

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

平成29年度 核融合科学研究所技術研究会

日時：平成30年3月1日～3月2日

Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories

主催：核融合科学研究所 技術部
Department of Engineering and Technical Services

(Received - Feb. 16, 2018)

NIFS-MEMO-82

May. 14, 2018

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. The views presented here are solely those of the authors. This document is intended for information only and may be published in a journal after some rearrangement of its contents in the future.

Inquiries about copyright should be addressed to the NIFS Library, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 Japan.

E-mail: gakujutsujoho@nifs.ac.jp

<Notice about photocopying>

In order to photocopy and work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)
6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
Phone: 81-3-3475-5618 FAX: 81-3-3475-5619 E-mail: jaacc@mtd.biglobe.ne.jp

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone: 1-978-750-8400 FAX: 1-978-646-8600

平成29年度 核融合科学研究所技術研究会

日時 : 平成30年3月1日(木)～3月2日(金)

開催場所 : 多治見市産業文化センター

核融合科学研究所 技術部

Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories
By
Department of Engineering and Technical Services,

Abstract

The Symposium on Technology in Laboratories was successfully held at Tajimi Industrial and Culture Center in GIFU, Japan from March 1st to 2nd in 2018 hosted by National Institute for Fusion Science (NIFS). 170 participants attended the symposium. Participants were from Universities, research institutes and technical colleges. Seventy-one papers were presented at the symposium. The participants discussed and reported the output of the new technology, techniques and technical experiences by five sessions of the technology of fabrication, the device technology, the diagnostic and control system, the cryogenics, and the information network technology.

Keywords: symposium, technology, fabrication, device, diagnostic, control system, cryogenics, information, network

はじめに

自然科学研究機構 核融合科学研究所
技術部長 飯間 理史

核融合科学研究所技術研究会を開催することとなりました。前回開催からの4年間さまざまな議論がされてきましたが、結論には至りませんでした。核融合科学研究所では、共同利用機関としても、少しでも多くの技術者が参加できる技術研究会にしたいと考えています。今回の技術研究会も従来と同様に、工作技術、装置技術、計測・制御技術、極低温技術、情報・ネットワーク技術の5分野としました。

今回トピックスとして、核融合科学研究所で行っている技術交流の1テーマ、熱シミュレーション技術についてプログラムを設けました。この手法は大型ヘリカル装置建設時に非常に有効であった有限要素法によるシミュレーションです。真空容器の大気圧による変形から、電磁力による変形、温度上昇による変形、さらには排気塔からのガスの拡散まで確認されました。ぜひのぞいてみてください。

核融合研では継続も力と考え、我々が開催できる規模ではありますが分科会を維持しつつも、より深い議論のできるテーマを見つけ今後も提供したいと考えています。

今回は多治見市産業文化センターでの開催となりました。

開催にあたり、遠方から来ていただいた参加者の方々、支援をいただいた核融合科学研究会、講師を引き受けていただいた先生方、所長、管理部をはじめ、研究所の皆様に感謝します。

目次

第1分野 (工作技術)

- (1) 3D-CAD・CAM を活用した機械工作による研究支援の効率化と高度化：
二足歩行ロボットの試作を例に・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
大阪大学 科学機器リノベーション・工作支援センター 大野 功司
- (2) 低エネルギー中重核子用イオンチェンバーの設計・製作・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
理化学研究所 仁科加速器研究センター 千賀 信幸
- (3) 非磁性高硬度 Ni-Cr-Al 合金の時効処理条件硬さと切削表面粗さ検証による
高圧小型圧力セルへの応用・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
名古屋大学 全学技術センター 山口 隆正
- (4) 液相焼結法を用いた Al-ZrO₂系マイクロ鈴構造体の開発・・・・・・・・・・・・・・・・ 16
山形大学工学部 技術部 佐竹 忠昭

第2分野 (装置技術)

- (1) 理学研究科等事業場における安全教育への貢献 ～安全意識の向上を目指して～・・・21
東北大学 物理学専攻 吹上 菜穂
- (2) 大型ヘリカル装置排気系の重水素実験対策・・・23
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 鈴木 直之
- (3) JT-60SA 本体制御設備の改修・・・28
量子科学技術研究開発機構 JT-60 本体開発グループ 三代 康彦
- (4) JT-60SA 大口径観測窓保護システムの設計と摺動部の耐久性評価・・・33
量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所 先進プラズマ実験 Gr 本間 寛人
- (5) COMET 実験用タングステンシールドの開発・・・37
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 牧 宗慶
- (6) 低被曝 RI 製造システムの構築とリアルタイム電子ビーム計測システムの開発・・・41
東北大学 電子光物理学研究センター 高橋 健
- (7) JT-60SA に向けた NBI 制御システムの開発・・・45
量子科学技術研究開発機構 NB 加熱開発グループ 佐々木 駿一
- (8) JT-60SA NBI 電源制御系更新に向けた通信機器性能確認試験・・・50
量子科学技術研究開発機構 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所
ITER プロジェクト部 坂本 響
- (9) JT-60SA 用 NBI 再組立て工期の実現化検討・・・54
量子科学技術研究開発機構 NB 加熱開発グループ 藻垣 和彦

第3分野 (計測・制御技術)

- (1) スラッグ流生成制御のための工夫・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
神戸大学 工学研究科 熊谷 宜久
- (2) TTL トリガ分周器開発における VHDL 回路構築の理想と現実・・・・・・・・63
自然科学研究機構 分子科学研究所 装置開発室 豊田 朋範
- (3) 放射線総合監視システムの整備と管理計画・・・・・・・・・・・・・・・・65
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 林 浩
- (4) ITV システムの更新及びインターロックシステムの構築・・・・・・・・69
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 横田 光弘
- (5) 中性子検出器の設置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・73
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 西村 輝樹
- (6) FPGA 評価ボードで作る簡易 DAQ・・・・・・・・・・・・・・・・77
名古屋大学 全学技術センター 岡田 宏太
- (7) J-PARC MR におけるキャパシタバンク制御試験用小型電源の開発・・・・・・・・79
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 三浦 一喜
- (8) シリコン受光素子 (MPPC) の電圧制御回路の開発・・・・・・・・83
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 佐藤 節夫
- (9) STARS を用いた真空一元管理システム・・・・・・・・87
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 石井 晴乃

第4分野 (極低温技術)

- (1) 小規模密閉空間を模擬した液化ガス漏洩時の拡散特性の研究 91
豊橋技術科学大学 工学部 技術支援推進室 日比 美彦
- (2) 液体ヘリウム運搬容器内の液量と重量の関係について 95
東京工業大学 極低温研究支援センター 金本 真知
- (3) ヘリウム液化システムのメンテナンス 98
東京大学 生産技術研究所 北原 直尚
- (4) J-PARC COMET 実験用冷却システムの構築状況 101
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 大中 政弥
- (5) 小さな故障が大きな代償となった例 ～計装空気発生装置ドレイン管理 106
千葉大学 理学部 吉本 佐紀
- (6) 液化窒素コールドエバポレータの傾倒と対応および修正作業 110
京都大学 大学院工学研究科 多田 康平
- (7) He ガス圧縮機 C5U217GEX ベースフレーム破損及び修理報告 113
高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター 飯田 真久
- (8) LHD 超伝導・低温システムの重水素実験対策 117
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 野口 博基
- (9) LHD 用ヘリウム液化冷凍機の復旧作業 122
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 森内 貞智

低温講演

- 多層断熱材の燃焼特性
自然科学研究機構 核融合科学研究所 装置工学・応用物理研究系 助教 高田 卓

第5分野 (情報・ネットワーク技術)

- (1) 高性能分子シミュレータの更新経緯と特長について・・・・・・・・・・127
自然科学研究機構 分子科学研究所 計算科学研究センター 水谷 文保
- (2) 岡崎3機関の共通ネットワークおよび仮想サーバ基盤の更新・・・・・・・・131
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課 澤 昌孝
- (3) 個別電線単位の計測／節電を目的とした消費電力測定システムの構築と運用・・・・・・・・135
国立大学法人電気通信大学 教育研究技師部 竹内 純人

技術交流会（熱シミュレーション技術）

- (1) 熱流体解析を用いた熱電変換効率評価装置水冷部の最適設計・・・・・・・・・・ 139
東北大学 工学部・工学研究科 生出 嘉
- (2) PF-BL15 液体窒素冷却分光器解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 143
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 内田 佳伯
- (3) ILC High power facility における熱シミュレーションについて・・・・・・・・・・ 147
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 森川 祐
- (4) 太陽電池用シリコン多結晶成長炉内温度分布、および不純物分布の数値解析・・・・・・・・ 153
九州大学 応用力学研究所 中野 智
- (5) LHD 真空容器内蔵型クライオポンプの熱構造設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 157
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 村瀬 尊則

ポスターセッション

工作技術

- (1) ハードターニングにより生成する加工変質層について・・・・・・・・・・・・・・・・・・165
三重大学 工学部工学研究科技術部 米倉 雄治
- (2) 機械工作における作業マニュアルの紹介・・・・・・・・・・・・・・・・・・166
一関工業高等専門学校 技術室 田口 恭輔
- (3) 視覚障害者のための立体触地図教材及びその量産装置の開発・・・・・・・・・・169
名古屋工業大学 技術部 萩 達也
- (4) 微細格子溝形状をした細胞培養基材成型用金型の超精密加工・・・・・・・・・・173
理化学研究所 RAP 先端光学素子開発チーム 竹田 真宏
- (5) ガンマ線検出器 CATANA 架台の設計・製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・177
理化学研究所 仁科加速器研究センター 千賀 信幸

装置技術

- (6) 貫通口処理と遮蔽対策・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・182
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 渋谷 真之
- (7) LHD 冷却水系の重水素実験対策・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 186
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 林 浩己
- (8) 排気ガス処理システムの設置と運転監視・・・・・・・・・・・・・・・・・・190
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 加藤 ひろみ
- (9) NBI 中性子検出器較正実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・195
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 佐藤 守
- (10) LHD ガス供給システムの整備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・201
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 安井 孝治
- (11) ラズパイを用いたオシロスコープトリガー停止信号発生回路の作成・・・・・・・・・・205
大阪大学 レーザー科学研究所 森尾 登
- (12) KEK 電子陽電子入射器における安全管理システムの改変および改良・・・・・・・・・・209
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 佐武 いつか

- (13) J-PARC 高周波加速装置の Machine Protection System (MPS) 高速化 213
高エネルギー加速器研究機構 J-PARC MR RF 古澤 将司
- (14) KEK-PF ハイブリット運転用の光パルスセクター2 218
高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 田中 宏和
- (15) 加速器安全管理システムの更新及び大規模システム更新にまつわる考察 223
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 白川 明広

計測・制御技術

- (16) 環境放射線及び放射能の監視 227
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 加藤 明己
- (17) 大型ヘリカル装置における中性子計測システム校正実験 230
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 小淵 隆
- (18) 混合ガス計測用イオンゲージ感度較正装置の構築と動作について 234
神戸大学 工学研究科電気系技術グループ 市村 和也
- (19) 圧力センサーFSR (Force Sensing Resistors) を用いた実験計測への適用の可能性 236
東京大学生産技術研究所 基礎系 片桐 俊彦
- (20) 3次元距離計測イメージセンサの高分解能化のための短パルス光源の開発 240
静岡大学 技術部 高澤 大志
- (21) Siemens 製 PLC を用いた TESPEL 入射装置の制御システム開発 243
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 小川 英樹
- (22) プログラミング言語 Python を用いた STARS の EPICS ゲートウェイプログラムの開発 246
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設 永谷 康子
- (23) BeagleBone を使用したシリアルデバイスサーバ 251
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 小菅 隆
- (24) J-PARC リニアック クライストロンデータ収集系の構築 255
日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 堀 利彦
- (25) ミューオン崩壊時間測定装置の更新作業 259
大阪市立大学 研究支援課 松山 利夫

極低温技術

- (26) 液体窒素の安全講習における IC カード認証履歴を利用した再学習プログラムの取組み・・・ 261
香川大学 工学部 西岡 彩美
- (27) IFMIF 原型加速器用冷凍設備の設置と許認可対応・・・ 265
量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所 IFMIF 加速器施設開発グループ 小又 将夫

情報・ネットワーク技術

- (28) 放射化試料管理システムの開発と構築・・・ 269
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 大砂 真樹
- (29) JT-60SA の運転に向けたデータ処理設備の設計と開発・・・ 273
量子科学技術研究開発機構 先進プラズマ研究部 山崎 莉穂
- (30) Apple Remote Desktop を使用した遠隔管理システムの構築・・・ 278
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 濁川 和幸
- (31) CentOS 系サーバー60 台と Web サイト 30 ヲ所にインストール済プログラムの一覧作成・・・ 281
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課 長屋 貴量
- (32) ティッカーシステムの開発・・・ 284
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課 岩橋 建輔

参加機関及び参加人数・・・ 288

あとがき・・・ 289

Web 版技術研究会報告集の閲覧方法について・・・ 290

第1分野 (工作技術)

3D-CAD・CAM を活用した機械工作による研究支援の効率化と高度化：

二足歩行ロボットの試作を例に

○大野功司、○竹中政人

大阪大学 科学機器リノベーション・工作支援センター

1 概要

科学機器リノベーション・工作支援センターは「ものづくり」と「機器共用」を通して、研究教育支援を行う学内共同利用施設である。本センターへの工作依頼は、単品・特注製作が殆どであり、加えて、簡単なものから複雑形状・システム設計が求められるものまで、非常にバラエティに富んでいる。設計専任担当者は配置しておらず、相談・設計から製作作業まで同一職員が一貫して担当するため、必ずしも設計図は必要ではなく、逆に、全ての工作依頼に3D-CAD/CAMを用いると、かえって時間がかかり非効率となってしまう。そこで、「どのように3D-CAD/CAMを活用すれば、機械工作による研究支援の効率化・高度化が図れるか」を、二足歩行ロボットの試作などを例に検討した。

3D-CADの利用によって、2D-CADでは難しい、パーツの3次元構造や配置、組み立てのシミュレーションが非常に容易となり、効率的な設計が可能となった。また3D-CAD/CAMの利用によって、手入力ではプログラムが困難だった、複雑なポケット加工が可能となった。しかし、比較的単純な部品加工においては、CADを使わずに、工作機械に直接加工プログラムを入力（対話型NC機能の利用を含む）する方が迅速であることも分かった。

今後は、①単純な加工には工作機械に直接加工プログラム入力、②単体で簡単な図面作成には2D-CAD、③複雑形状の図面や多部品構成でのシミュレーションには3D-CAD、④複雑なポケット加工や複合曲面の加工には3D-CAD/CAMと、工作の複雑さに応じて使い分けて、これらの支援ソフトウェアを活用し、支援の効果化と高度化を図っていく。

2 科学機器リノベーション・工作支援センターについて

当センターは、学内共同利用の教育研究施設であり、工作関連支援業務を行う工作支援室と、学内の機器共同利用を支援・促進する研究設備リノベーション支援室の2つからなる。工作支援室は、機械工作関連の依頼製作を行う機械工作メインショップ（5名）、ガラスやセラミック関連の依頼製作業務を行うガラス工作メインショップ（2名）、学生・教職員が自由に工作作業を行うことができる機械工作ステューデントショップの運営などを行う工作オープンショップ（2名）の3部門からなる（カッコ内は所属職員数）。

2.1 機械工作メインショップが受託する依頼作業業務

機械工作メインショップは5名の技術職員（内2名は嘱託技術職員）から成り、年間約250-300件の工作依頼に対応している。理工系部局だけでなく医歯系部局などからの利用もある。金属・樹脂材料の工作依頼が多く、切削加工・放電加工・溶接技術を使って、研究用の実験装置や実験に付随する器具・部品の依頼製作を行っており、規格外品や特殊品などの“一品もの”が多数を占める。また設計専任の担当者はおらず、多くの場合、一人の担当者が製作相談から設計・製作まで一貫して担当している。

研究支援が主な目的であるので、迅速な対応を心掛けているが、依頼が重なる繁忙期には、着工まで1ヶ月以上順番待ち-納期3ヶ月という状況も発生している。

3 CAD・CAM ソフトウェア導入の背景

3.1 動機

これまでは簡易 2D-CAD ソフトウェアや工作機械に内蔵された対話型 NC 機能 (CAM 機能) を駆使して、設計と加工プログラミングを行ってきた。しかし、内蔵された NC 加工パターンは、汎用的で単純な形状しかサポートされておらず、複雑な形状にはその都度、加工プログラムを作成しなければならない。特に除去量が多い加工や曲線を含む加工は非常に手間と時間のかかる作業となっていた。

いかにして「効率よく、短納期で製作依頼に対応し、限られたマンパワーで件数をこなすか」、加えて先端研究に必要な「複雑 3 次元形状の製作依頼などにどう対応するか (研究支援の高度化)」が大きな課題となっていた。

そこで、「CAD・CAM ソフトウェアを活用することで、これらの課題を解決できないか?」が、これらのソフトウェア導入の大きな動機であった。

まず 2017 年に 3D-CAD/CAM「Mastercam2017」を導入した。続いて 2D-CAD「AutoCAD Mechanical 2017」や 3D-CAD「Fusion360」の導入も行い、設計プロセスの電子化と支援の効率化・高度化を進めることにした (表 1)。

表 1. 導入ソフトウェア一覧

名称	メーカー	種別
Mastercam2017	CNC Software	3D-CAD/CAM
Fusion360	Autodesk	3D-CAD
AutoCAD Mechanical 2017	Autodesk	2D-CAD

3.2 3D-CAD の優位性

「Mastercam2017」は作図した立体図形から NC 加工プログラムを自動生成するため、NC 加工プログラム作成にかかる時間を、大幅に削減できると期待される。2D-CAD での立体表現には、正面図・平面図・側面図からなる第三角法が一般的であるが、三方向それぞれの作図が必要となる。3D-CAD「Fusion360」

では作図した立体から三面図へ展開する機能が備えられており、迅速な図面作成が可能である。修正があった場合でも、2D-CAD では該当箇所すべてで修正が必要となるのに対し、3D-CAD では修正箇所に関連する部分も連動して修正・反映されるため、修正の手間が少なく、人為的ミスも低減される。また視点変更も自在で、完成のイメージをつかみやすく、組み立てのシミュレーションも出来るため、部品同士の干渉等が事前に確認できる。ただし、「Mastercam2017」は CAM に特化され、組み立ての機能はない。

4 3D-CAD を使った二足歩行ロボットの設計と製作

4.1 3D-CAD 設計と動作シミュレーション

二足歩行ロボットは、連結された 2 つのクランクが交互に動作し、モーターの回転運動を二足歩行運動に変換する (チェビシェフリンク)。複数の部品が同時に動作するため、歩幅や部品同士の干渉チェックは、2D-CAD では非常に手間が掛かり困難であった。3D-CAD である「Fusion360」は、組み立て機能を備え、詳細なシミュレーションが可能である。そこで、まず各パーツを「Fusion360」で設計し、組み立て機能を活用して、“バーチャル”二足歩行ロボットを 3D-CAD 内に構築し、パーツの干渉問題のチェック、二足歩行シミュレーションを行った (図 1)。

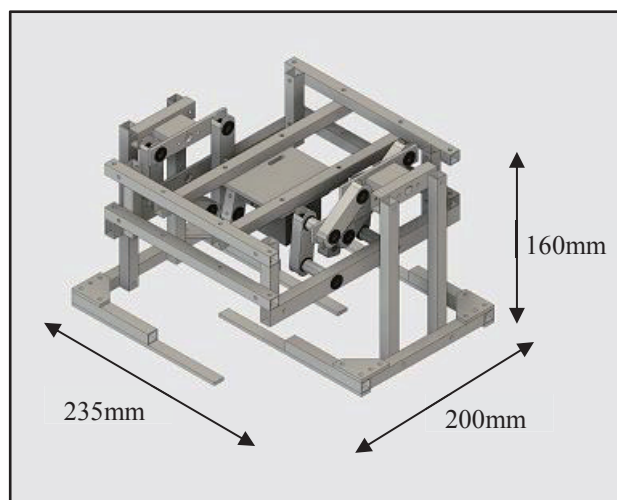


図 1. 設計した二足歩行ロボット 3D-CAD 図面

4.2 ロボット試作を通して分かったこと

設計・動作シミュレーションを経て、実際に二足歩行ロボットを製作した（図 2）。シミュレーション機能の問題から、製作後に多少の修正が必要であったが（後述）、二足歩行にも成功し、概ね満足できる製作結果となった。

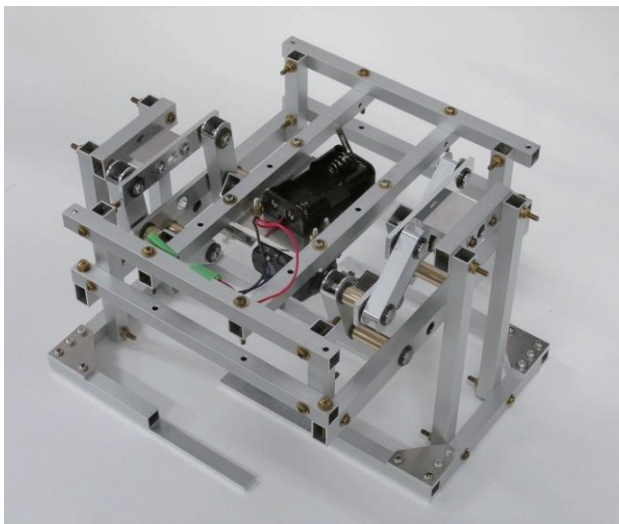


図 2. 製作した二足歩行ロボット

本二足歩行ロボットの構成部品数は、ネジや軸受けを除いても 70 以上にも及ぶ。可動部分は一箇所の修正が他の部品に影響するため、製作した後に修正すればロボット全体の修正が必要になる。3D-CAD による事前シミュレーションの威力を感じられた。

しかし、3D-CAD によるシミュレーションは完全ではないことも分かった。シミュレーションでは全てが理想状態であると仮定されているため、可動部分のクリアランス（遊び）や寸法誤差、組み立て誤差、摩擦、重力等が考慮されておらず、シミュレーションでは問題ないが、実機ではぎこちない動きで脚がもつれることもあった。重量と形状によってはたわみも影響することが予測されるため、シミュレーションのみに頼って試作することは現実的ではない—実際に物を作って試作する必要がある—と言える。

5 3D-CAD/CAM を使ったポケット加工への応用：スタンプの製作

5.1 3D-CAD/CAM による加工シミュレーション

スタンプは、金型に代表されるポケット加工技術を含むため、ものづくりにおいて応用の幅が広い。大

阪大学のマスコットキャラクターである、「ワニ博士」のスタンプ製作をテストケースとして、「Mastercam2017」を使った 3D 図面作成と加工シミュレーション、最適な工具軌跡の検討を行った。（図 3）

5.2 「ワニ博士スタンプ」の製作

図 4 が、アクリルをポケット加工して製作した「ワニ博士スタンプ」である。シミュレーション通りの加工が実施でき、スタンプとしても問題なく「ワニ博士」が紙に転写され、スタンプラリー等に十分使えるクオリティであった（広報関係者に大変好評だった）。

工具の制約で三角形等の閉じた空間の内側は工具半径分の丸みが残っている。より細かい工具を用いることで、より精細な再現が可能となるであろうが、回転工具を使って切削する限り、角の丸みは完全には解消されない。ある程度妥協せざるを得ない。以下に、加工条件を示す。

材質：アクリル（ $\phi 60$ mm、高さ 24 mm）

使用工作機器 牧野フライス製作所 KE-55

加工条件

- 荒加工

工具径	2.0mm
回転数	4000rpm（機械上限）
切削送り速度	80mm/min
加工時間	約 1 時間 30 分
プログラム行数	約 5600 行
- 仕上げ加工

工具径	0.5mm
回転数	4000rpm
切削送り速度	60mm/min
加工時間	約 7 時間 10 分
プログラム行数	約 37000 行

所要時間 3D-CAD/CAM 処理 約 4 時間

機械加工時間 約 9 時間

5.3 スタンプ製作を通して分かったこと

手入力では実質不可能な加工プログラムを、3D-CAM/CAM によって初めて作成・実行することができ、3D-CAD/CAM 導入の大きな効果を実感できた。



図3. CAM加工シミュレーション

今後、機械工作による研究支援の高度化に、大きく貢献できるのではないかと期待できた。

ただし、今回作成した加工プログラムは、サイズが非常に大きくなり、工作機械のメモリー容量を超えてしまった。そのため、外部記憶装置からコマンドを読み込み・メモリーの書き込みを繰り返し行うDNCモードを利用する必要があった。工作機械によってはDNCモードを備えていない機器もあり（特に旧型機器）、DNCモード機能の追加が必要となる。これからもメモリー容量が問題となった場合は、荒加工と仕上げ加工を分割するなど、加工計画を工夫して最適化することが重要であることが分かった。

応用的な使い方として、加工プログラムから X・Y・Z の移動値のみを抜き出し、工作機械独自のコマンドを埋め込めば、他の工作機器でも利用可能である。

6 最適な 3D-CAD/CAM ソフトウェアの活用方法

上で示したように、3D-CAD/CAM ソフトウェアを利用することで、設計の効率化と作業時間の短縮が期待でき、これまで不可能であった複雑な機械加工にも対応可能となる。

ただし、ソフトウェアごとに使用できる機能が異なり、それぞれに得手不得手がある。単一ソフトウェアだけで全ての 3D-CAD/CAM プロセス（3D 設計と CAM プログラミング）を行う事は、使い勝手が悪く、逆に時間が掛かった。各プロセスに一番適した支援ソフトウェアを用いて、複数のソフトウェアを併用



図4. 実際に製作したワニ博士スタンプ

して一連の設計・動作シミュレーション・CAM プログラムを行うことが必要であることも分かった。

複数の支援ソフトウェアの使い方を習熟するには、多少時間がかかるが、長期的にみると“支援の効率化や高度化”という観点から、最も効果を発揮すると思われる。

以下に、この試作を通して分かった、具体的な使い分け方について示す。

対話型 NC	<ul style="list-style-type: none"> 汎用的な形状加工（工作機器ごとの機能に依存）
2D-CAD	<ul style="list-style-type: none"> 簡単な図面が必要な単品製作
3D-CAD	<ul style="list-style-type: none"> 複雑形状の図面作成が必要な単品製作 複数構成品のシミュレーションが必要な単品製作 依頼者への説明ツールとして
3D-CAD/CAM	<ul style="list-style-type: none"> 複雑なポケット加工 複合曲面を含む外形加工

7 今後の活用について

ソフトウェア操作方法を習熟し、活用の幅を広げるためにも、積極的な利用を心がけたい。一方で、これらのソフトウェア利用は、ものづくりには直接関わらない作業（パソコン仕事）なだけに、多用しすぎることは禁物であると考えている。支援ソフトウェアの錬度を維持しつつ、適所に活用することが肝要である、「ものづくりは作ってなんぼ！」であるので（自戒も込めて）。

8 用語説明

文中で用いた略語の意味を以下に示す。

- NC Numerical Control :
数値制御
- CAD Computer Aided Design :
コンピューター支援設計
- CAM Computer Aided Manufacturing :
コンピューター支援製造
- DNC Direct Numerical Control :
直接数値制御

低エネルギー中重核子用イオンチェンバーの設計・製作

○千賀信幸^{A)}、大津秀暁^{A)}、H.Wang^{A)}、堂園昌伯^{B)}、川田 敬太^{B)}、武内聡^{C)}、平山晃大^{C)}、
中野敬太^{D)}、川瀬頌一郎^{D)}、親跡和弥^{E)}、炭竈聡之^{A)}

^{A)}理化学研究所 仁科加速器研究センター

^{B)}東京大学

^{C)}東京工業大学

^{D)}九州大学

^{E)}新潟大学

背景

原子力発電所から発生する使用済み核燃料には核分裂をしなかったウランや原子炉内で発生したプルトニウムが含まれている事から、再処理を行うことで新たに核燃料として使用することができる。しかし、再処理を行う過程において発生する高レベル放射性廃棄物の処分方法については、ガラス固化体をステンレス容器に格納して地層処分することとなっているが、半減期が数万年を超える核種が含まれるために長期保管に対する不安が払拭されていない。そこで、我々は長寿命核分裂生成物（LLFP）を短寿命核種や安定核に変換するための合理的な核変換方法に必要な核データの取得を目的に逆運動学法を用いて研究を行っている。[1]

本稿では反応生成物である様々な核種の同定やエネルギーを測定するためのキーデバイスであるイオンチェンバーについて、設計方法や創意工夫[2]及び実験結果等について報告する。

1 基本設計

1.1 実験方法と使用場所

核変換の実験は、理化学研究所仁科加速器研究センターに設置してある RI ビームファクトリーから供給される不安定核ビームを陽子や重陽子に照射し逆運動学を利用して測定を行う。具体的には、²³⁸U を加速して飛行中に核分裂した核種を超伝導 RI ビーム分離生成装置（BigRIPS）で分離し、目的の不安定ビーム及びビームエネルギーを得た後にターゲットへ照射して反応生成物を測定する。イオンチェンバーは、ビームや反応生成物の電荷量とレンジ（止まるまでの距離）を測定するために使用する。核変換の

実験においてイオンチェンバーは測定系の最下流に設置され、反応生成物の同定やエネルギー測定等を行うために使用する。また、その他原子核反応実験においては、ビームライン上に設置する事もある。

1.2 イオンチェンバーの構造と設計条件

イオンチェンバーは、放射線によってイオン化したガスの電流を測定する検出器である。一般的なイオンチェンバー（電離箱）は、容易に均電場が得られる円筒状のカソードにアノードワイヤーが設置してあり、電離した電子をアノードで読み出す構造である。イオンチェンバーはビームライン上に多数設置してあるが、RIBF にはビームレート耐性に優れている多層電極透過型（ビーム方向に電子をドリフトさせる構造）のみが設置してある。しかし、低エネルギービームを用いた実験では、

- ビームが電極膜を透過する際にビームの電荷が変わる場合がある
- 低エネルギーのビームは電極膜中で荷電粒子が止まる可能性がある

という問題がある。そこで、今回製作した低エネルギー中重核子用イオンチェンバーは、ビーム軸上をカウンターガスのみとして電子のドリフト方向を上方向とすることで上記の問題点を克服するよう設計した。以下に設計条件を示す。

- 50MeV/u 以下の低エネルギービームは容易に止まるため、筐体内部はカウンターガスのみとする。
- 電子のドリフト方向は上または下とする。
- 有効領域はイオンチェンバーの上流側に設置してあるビーム位置検出器 PPAC（Parallel Plate Avalanche Counter）と同様（X240 × Y150mm）またはそれ以上とする。

設計条件から、イオンチェンバーの構造は検出器

部とそれを囲うガス箱及びエネルギー調整用のデグレーダーで構成することとした。図 1 は電場勾配のシミュレーション図である。

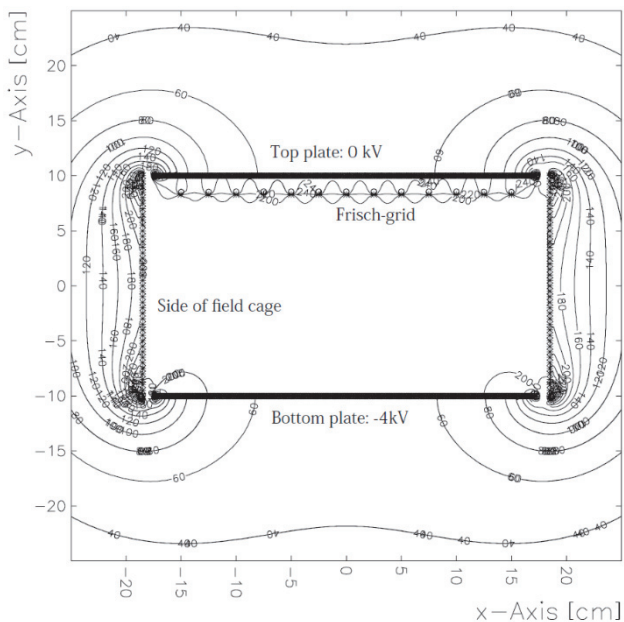


図 1. 電場勾配のシミュレーション

均電場を実現するフィールドケージは“勘”により設計し、シミュレーター (GARFIELD[3]) で確認を行った。図 1 に示す通り、電場勾配 $dE/dy=0$ となっており、一定の電場勾配が発生していることが確認できた。

1.3 イオンチェンバーの設計とアイデア

イオンチェンバーは、初めに筐体の設計から行った。電子をドリフトさせるための平行平板は、所内に多数保管されている Ge 検出器用高電圧印加モジュールの出力電圧に合わせて-4 [kV]とした。高電圧を扱うため、筐体の材質は高い絶縁性及び使用実績を考慮して FR-4 (G-10) 使用する事とした。有効領域はビームの広がりやを考慮して最大で X340 × Y160mm とした。筐体はガス箱内に設置する事から、箱の上からのアクセスを考慮して平行平板の上側をグランド側とした。均電場を実現する Field Cage はビームの出入口に 4 μm 厚の膜電極 (PET 膜に Au または Al 蒸着したもの) を使用することとした。またビームに対して横方向の Field Cage 用電極 (横電極) は銅被膜 FR-4 (G-10) にエッチング及び金のフラッシュメッキを施したものをを用いた。

本イオンチェンバーの最大の特徴は、Field Cage、Frisch Grid (静電シールド) 及び読出し PAD を全てスライドインで組み立てる構造である。具体的には、上下に設置した平行平板が付いている絶縁板に溝が切られており、横電極を溝に沿って挿入する。Frisch Grid と読出し PAD は、横電極に切られている溝に挿

入する。最後に設置する膜電極は、設置場所用の溝に置いた後にコネクタにより電氣的に接続される構造である。

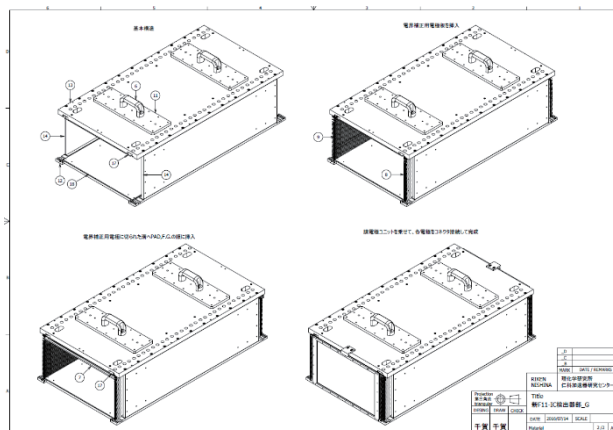


図 2. イオンチェンバー筐体

1.4 Frisch Grid と読出し PAD の設計

イオンチェンバーは、荷電粒子によって電離したカウンターガスから放出される電子を電流値 (電荷量) として測定する。電子は電場により上方向へドリフトされる一方でイオンは電子と反対方向へ移動する。イオンチェンバーの信号として欲しい情報は、電子の電荷量であるが、電離場所から読出し PAD までのドリフト中の電荷も信号として読み出されてしまう。また反対にイオン側からの誘導電荷も読み出されてしまう問題がある。これらの問題はカウントレートの低い (数百 Hz の) 場合は大きな問題とはならないが、kHz オーダーとなると誘導電荷による信号が欲しい信号と重なり合うことで正確な電荷情報を得る事が困難となる。そこで、誘導電荷の影響を少なくする目的で読出し PAD 付近に Frisch Grid (静電シールド) を挿入した。Frisch Grid の設置場所や構造は、

- 均電場を乱さない。
- PAD から見て影となる面積を全体の 5%程度とする。

の条件から、機械的にシールド構造・形状を決定した。製作した Frisch Grid は、FR-4 製の枠に $\phi 100 \mu\text{m}$ のワイヤーを 5mm 間隔で張り、読出し PAD から約 9.5mm 離れた場所へ設置する事とした。ワイヤーの張り方は、ワイヤーのテンション (11.5g) × ワイヤー数 152 本 $\approx 1.8\text{kg}$ の荷重を枠に加えた場合の撓みを予め計算し、プレテンションとして枠を撓ませた状態でワイヤーを張っていった。プレテンションは、枠の左右 60 本を張り終えた後に外して、最後に中央部を張った。

PAD の形状は、ビームのラフな位置を特定することが可能な Backgammon 形状を採用した。この形状

は2枚の三角形を1ユニットとして考え、2枚の電荷の比によってラフに位置を特定するものである。Backgammon 形状により、粒子の位置とレンジ（飛距離）が分かり、より正確なエネルギーを求める事が出来ると期待された。

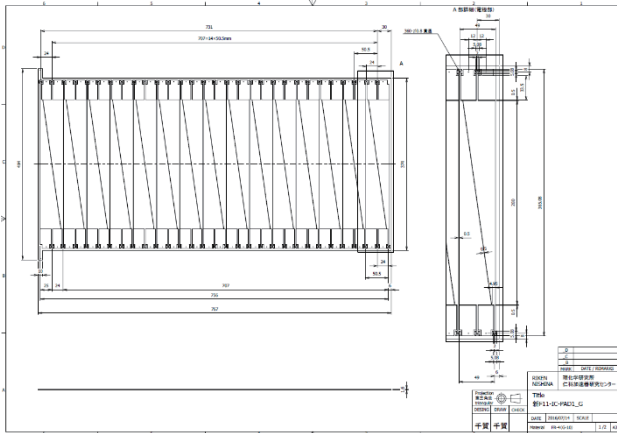


図 3. Backgammon 型の読出し PAD

1.5 ガス箱の設計

ガス箱は筐体を計数ガス雰囲気中で動作させるための箱である。ガス箱には、信号の読み出しやドリフト電圧の印加、ガス導入等の各種ポートを取り付けられる構造が必要で、また、低エネルギービームの入射時には減圧して使用するため、大気圧に耐える構造が必要不可欠である。そこで、ガス箱は架台の耐荷重や強度を考慮してアルミ（A5052）板厚 25mm 製の構造とした。ガス箱の天板にはアイボルトが取り付け構造となっており、底板には絶縁用のポリアセタール樹脂が取り付け構造となっている。ガス箱の上流側にはデグレーダーを挿入するための溝を設けており、大気中にてビームエネルギーの微調整が可能な構造とした。

2 ZeroDegree ビームラインでの実験結果

製作したイオンチェンバーは、既設の ZeroDegree ビームラインの最下流に設置し、LLFP である ^{107}Pd と ^{93}Zr の 50 MeV/u における反応断面積測定実験に使用した。ZeroDegree ビームラインはビームスポットが細い事から、十分なエネルギー分解能を持つデータが取得できた。イオンチェンバーのコンディションは、P10 ガスを 1 気圧、ドリフト電圧を約 100V/cm とした。図 4 左は ^{107}Pd のブラッグピークである。

表 1. 実験時におけるイオンチェンバーの状態

ドリフト電圧	-4 kV
ガス圧	1 気圧
ガス種	P10(Ar90%+CH4 10%)
デグレーダー設置場所	IC 入射窓前 (大気中)

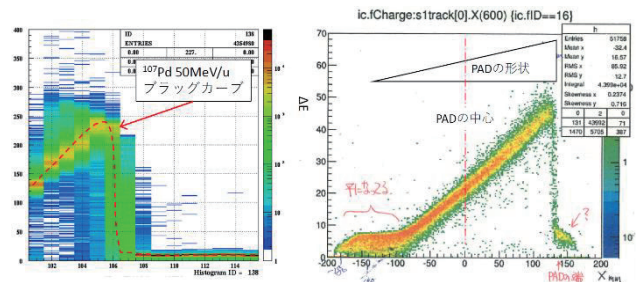


図 4. ^{107}Pd のブラッグカーブ (左) と PAD の場所による信号値 (右)

実験は成功したが、下記に示す問題点があった。

- 読出し PAD (Backgammon) の中央部の特性は良いが、両端の特性が悪かった。
- プリアンプのノイズ落としが大変だった。
- 今後の低エネルギー実験においては、デグレーダーを真空中に入れないと実験できない。

等の問題から次の実験ではイオンチェンバーの改良が必要不可欠となった。また、誘導電荷による影響を少なくする為の静電シールドの改良も必要となった。

3 OEDO ビームラインで実験のため改良

OEDO (an abbreviation of Optimized Energy Degrading Optics for RI beam) ビームラインとは、RF deflector (RF によりビームを収束させる装置) を備えた低速 RI ビーム専用のビームラインである。実験は、核変換データ取得のための ^{107}Pd と ^{93}Zr の 25 MeV/u における反応断面積測定を目的に行う。このエネルギー領域は物質厚が大きく影響するため、全てを真空中で動作させなければならない。

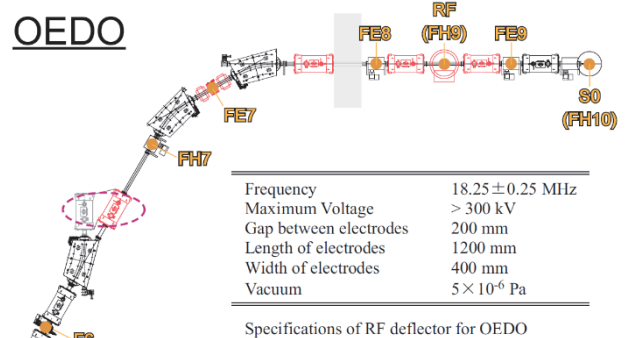


図 5. OEDO ビームライン

3.1 Frisch Grid の改良

図 6 は、実験中に取得したオシロスコープの画像である。誘導電荷のドリフトがあり、波形成形に影響を与える可能性があるため、より強力な静電シールドが求められる。そこで、過去の文献[4]を参考に新規に設計を見直し、ワイヤー構造を決定した。FR-4 製の枠の形状は前回と同様とし、静電シールド用の

ワイヤーピッチを 2.5mm 間隔とした。ワイヤーの張り方も前回と同様にプレテンション (11.5g×304 本 ≒ 3.5kg) を加えて撓ませたのちに半田付けした。

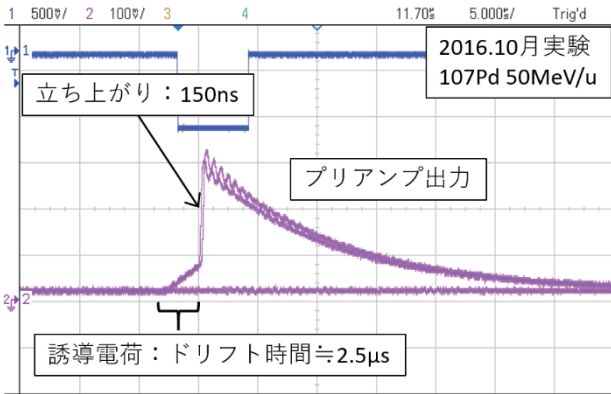


図 6. 実験時に取得したオシロの画像

3.2 読出し PAD の改良

ZeroDegree ビームラインでの実験では、予想外な PAD の特性からトラッキングが困難であった。また、想定以上にビームが広がっており、解析が難しいことから短冊形へ変更した。変更した PAD は、ビームの広がりに対する有効領域を X280mm から X340mm へ拡大した。PAD は 30ch (30 分割) で構成されており、2 台の 16ch 入力プリアンプで読み出しを行う。各プリアンプへは 15ch 入力し、残りの 1ch をコモンモードノイズモニター用とした。

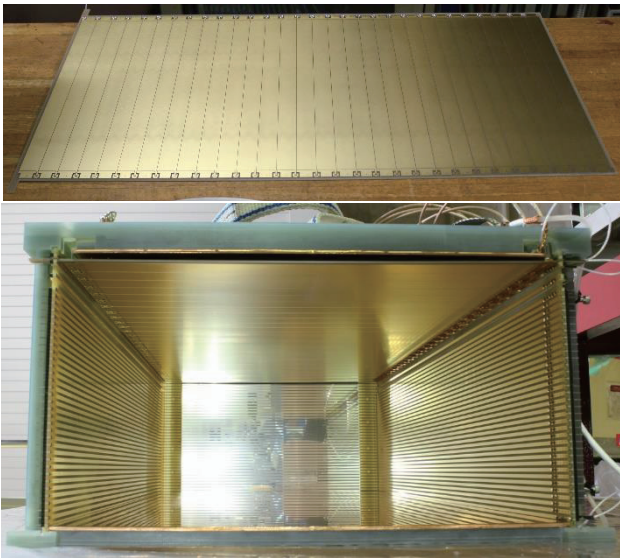


図 7. 改良した読出し PAD (上) とイオンチェンバー内部の写真

3.3 ノイズ対策

イオンチェンバーは、ガス増幅せずに電荷を収集して信号を読み出すため、ノイズに対して非常に敏感である。特にノイズに対して弱い所は、生信号が通る PAD-プリアンプ間及びプリアンプ筐体である。

一般的なノイズ対策の基本は、

- グランドを太くする。(表皮効果も含めて)
- ケーブルをなるべく短くする。
- 放射ノイズ対策を行う。

である。ZeroDegree ビームラインで使用した時のプリアンプは、ガス箱の外に設置し、信号ケーブルは自作のフィードスルーを通して取り出していた。しかし、OEDO ビームラインにおいては強大な RF ノイズが予想された事から、プリアンプをガス箱内部の筐体上面に設置する事にした。こうする事で、ケーブル長を最短にでき、放射ノイズ対策も併せて克服した。また、グランドは表皮効果を考慮して網紐を使用し、ガス箱へ接続する構造とした。

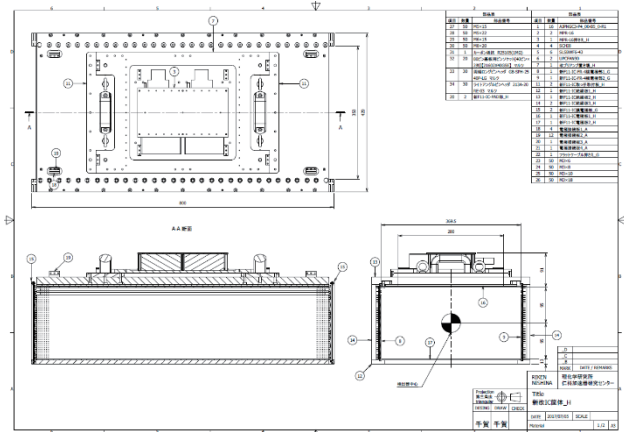


図 8. 改良したイオンチェンバー筐体

3.4 デグレーダーユニットの設計

デグレーダーとは、ビームエネルギー (グレード) を下げる (デグレード) ために使用する板で、使用したいビームエネルギーにより材質・物質を選定する。特に、イオンチェンバー上流に設置するデグレーダーは、荷電粒子の入射エネルギーを微調整する重要な役割を担う。

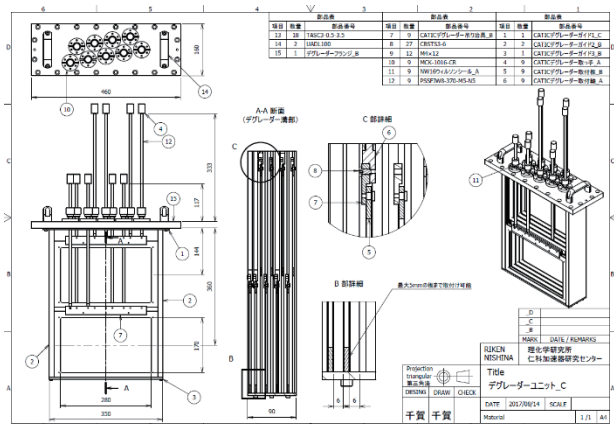


図 9. 設計した真空対応型デグレーダーユニット

設計したデグレーダーユニットは真空中に 9 枚のデグレーダー板を挿入することが可能な構造である。

デグレーダー板の厚さは、例えば $1\mu\text{m}$ ピッチで $511\mu\text{m}$ まで対応可能である。挿入方法は、デグレーダーとして使用する板もしくはフィルムをカプトンテープで枠に張り付ける単純な構造とした。

デグレーダーユニットの構造は、樹脂 (POM) 製のガイドにデグレーダー貼付け用の枠を入れ込み、棒で上げ下げする。棒は二重のウィルソンシールによって封止されている。棒を上げ下げする支点はウィルソンシールのみであり、棒が斜めに挿入された場合にはデグレーダー貼付け用の枠がガイドの途中でスタックする可能性がある。そこで、枠と棒の間に「ガタ」を作ることで斜め方向からの力を無くし、スムーズに上げ下げできる構造を考案した。様々な方向の力を加えつつ棒を上げ下げしたが枠がガイドにスタックしなかったため、この構造を採用して製作を行った。デグレーダーの有効領域は、上流に設置されている PPAC 検出器の有効領域を参考に、ビームの広がり considering $X280\times Y170\text{mm}$ とした。デグレーダーは頻りに厚さを変更するものではないので、製作したデグレーダーユニットは手動式としたが、後付けで圧空シリンダを取り付ける事が出来るよう製作した。

OEDO ビームラインでの実験結果

OEDO ビームラインを用いた実験は 2017 年秋に実施された。

表 2. 実験時のイオンチェンバーの状態

	30MeV/u	20MeV/u
ドリフト電圧	-1.8 kV	-1.0 kV
ガス圧	17.1 kPa	7.9 kPa
ガス種	CF ₄	
デグレーダー設置場所	IC 入射窓前 (真空中)	

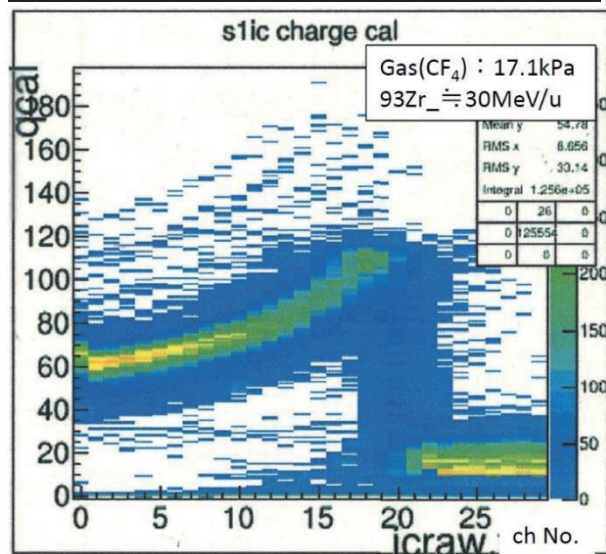


図 10. 改良した PAD でのブラッグピーク

OEDO ビームラインは前述した通り、低速 RI ビームの専用ラインである。ビームラインは平成 28 年度末に完成し、核変換時実験が最初の実験となる。OEDO ビームラインの基幹装置である RF Deflector は、低速 RI ビームを収束する目的で使用される。RF Deflector は、350kV の電圧を約 20MHz で励振するために、検出器に対して非常に大きなノイズが乗ると予測できる。実際に RF Deflector の励振テスト中にプリアンプ出力を確認したところ、プリアンプ出力に変化はなかったがシェーピングアンプ出力に RF ノイズが確認できた。この結果から、プリアンプへのノイズ対策は成功し、今後は実験前に行っているプリアンプのノイズ落とし作業は不要となった。一方、シェーピング出力に RF ノイズが乗る原因は、プリアンプ出力からシェーピングアンプ出力までのケーブルが長いと推察したため、ケーブルを短くまとめたところ、大幅に RF ノイズを低減させることができた。

図 8 は改良した読出し PAD でのブラッグピークである。Backgammon 型の読出し PAD に比べ、ストップレンジの分解能が約 2 倍に向上しており、より正確なエネルギー測定や粒子同定に使用できた。改良したイオンチェンバーは、OEDO ビームラインの最下流に設置され、安定して動作した。また、デグレーダーも真空を破ること無く出し入れでき、ビームタイムの有効利用に貢献できた。LLFP である ¹⁰⁷Pd と ⁹³Zr の約 25MeV における反応断面積測定のデータは無事に取得できた。

今後の展望

製作したイオンチェンバーは、3 度の実験で使用され、性能を確認することができた。現在は、更なる改良を加えた 2 号機を製作中で、今後は ZeroDegree ビームラインにおける標準検出器として開発を行う。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。

参考文献

- [1] <http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>
核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化
- [2] N. Chiga et al., RIKEN Acc. Prog. Rep. 50, 164 (2016).
- [3] R. Veenhof., GARFIELD, a drift-chamber simulation program, CERN (1994)
- [4] DESIGN OF GRID IONIZATION CHAMBERS Canadian Journal of Research, 1949, Vol. 27a, No. 5 : pp. 191-206

非磁性高硬度 Ni-Cr-Al 合金の時効処理条件硬さと切削表面粗さ検証による 高圧小型圧力セルへの応用

○山口隆正^{A)}、井村敬一郎^{B)}

^{A)}名古屋大学 全学技術センター

^{B)}名古屋大学 大学院理学研究科

概要

非磁性高硬度 Ni-Cr-Al 合金の時効処理条件による表面硬さと、切削加工条件による表面粗さへの影響を検証した。その結果、600℃付近の時効処理が高い硬度となることを確認した。引張強さも Be-Cu 合金の約 1.5 倍あることが分かった。また、磁化測定を行い、磁性物理学の研究に圧力セル材料として利用できる磁化であることを明らかにした。切削加工条件の表面粗さへの影響を調べたことによって硬度の高い Ni-Cr-Al 合金の切削に適した条件を明らかにした。得られた加工条件と処理結果を高圧に耐える小型圧力セル試作へ応用したことを報告する。

1 はじめに

磁性物理学の研究では、より低温・高磁場・高圧での多重環境下での測定が進められている。そのため、より強度が高い実験用部品が求められている。しかし、高磁場での試料の反応を測定することから、磁場で不都合が生じないよう磁場空間に配置する実験用部品は非磁性材料が求められる。圧力セルには非磁性材料でありながら圧縮強さと引張強さも求められることから、Be-Cu 合金が広く利用されている。より高圧に耐える Ni-Cr-Al 合金も圧力セルへの利用が報告されている。Ni-Cr-Al 合金は高価であることもあり技術情報が不足している。そのため、Ni-Cr-Al 合金の時効処理による表面硬さや切削加工条件による表面粗さを検証する必要がある。

2 Ni-Cr-Al 合金の時効処理条件硬さ検証

Ni-Cr-Al 合金の時効処理による表面硬さへの影響は広く知られていない。そのため、時効処理条件を変

えて、その条件毎の表面硬さを硬さ試験機により測定を行い、時効処理条件と硬さの関係を検証した。

2.1 実験装置

時効処理を行うための電気炉には、図 1(a)に示すデンケン製卓上マッフル炉 KDF-P90、KDF-S90、アドバンテック製電気マッフル炉 KM-160 により行った。時効処理後に材料表面の硬さを図 1(b)に示す Akashi 製ロックウェル硬さ試験機 ATK-600 により行った。



(a)電気炉

(b)硬さ試験機

図 1. 時効処理条件硬さ検証に用いた装置外観

2.2 実験方法

Ni-Cr-Al 合金の丸棒素材を旋盤により、丸棒端面及び円筒部などを切削加工して硬さ試験片を製作する。切削加工した試料を電気炉により時効処理する。Ni-Cr-Al 合金の処理温度は 575℃、685℃と 800℃で行う。冷却は空冷、又は炉冷を行う。比較のため、Be-Cu 合金とステンレスも硬さ試験を行う。Be-Cu 合金の処理温度は 315℃で炉冷により行う。ステンレスは時効処理を行わない。室温まで冷却されてから、硬さ試験機により丸棒端面の中心付近へダイヤモンド円錐圧子を用いたロックウェル硬さ試験を行う。

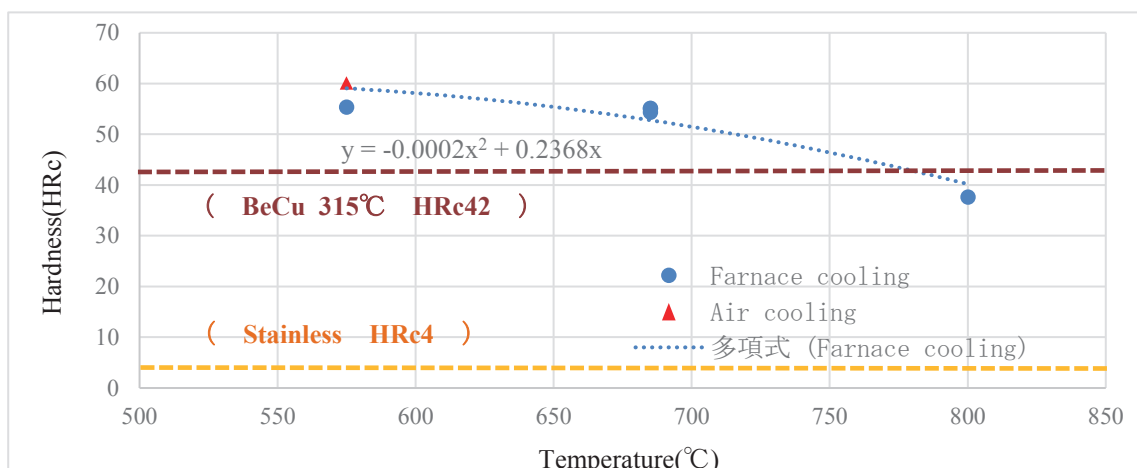


図 2. Ni-Cr-Al 合金の時効処理温度と硬さ試験結果線図

2.3 実験結果

Ni-Cr-Al 合金の時効処理温度と表面硬さの関係を図 2 に示す。時効処理条件によっては、Ni-Cr-Al 合金は Be-Cu 合金よりも硬くなっていることが分かる。Ni-Cr-Al 合金は 575°C と 685°C では硬さに大きな差はないが、800°C では硬さが低くなっていることが分かる。冷却は、炉冷よりも空冷により硬さが高くなっていることも分かる。これらより、Ni-Cr-Al 合金は 600°C 付近で高硬度であり、他の材質よりも硬いことが分かる。空冷が最大の硬さを示しているが、炉から熱い試料を取り出す工程があり安全作業ではないので注意が必要である。

3 Ni-Cr-Al 合金の引張強さの検証

圧力セルには引張強さも求められる。そのため、Ni-

Cr-Al 合金の引張試験を行った。比較のため Be-Cu 合金とステンレスも引張強さを試験して検証した。

3.1 実験装置

引張試験には図 3 に示す島津製作所製精密万能試験機 AG-X plus により測定した。



図 3. 引張強さの測定に用いた引張試験機外観

3.2 実験方法

Ni-Cr-Al 合金、Be-Cu 合金とステンレスの丸棒引張

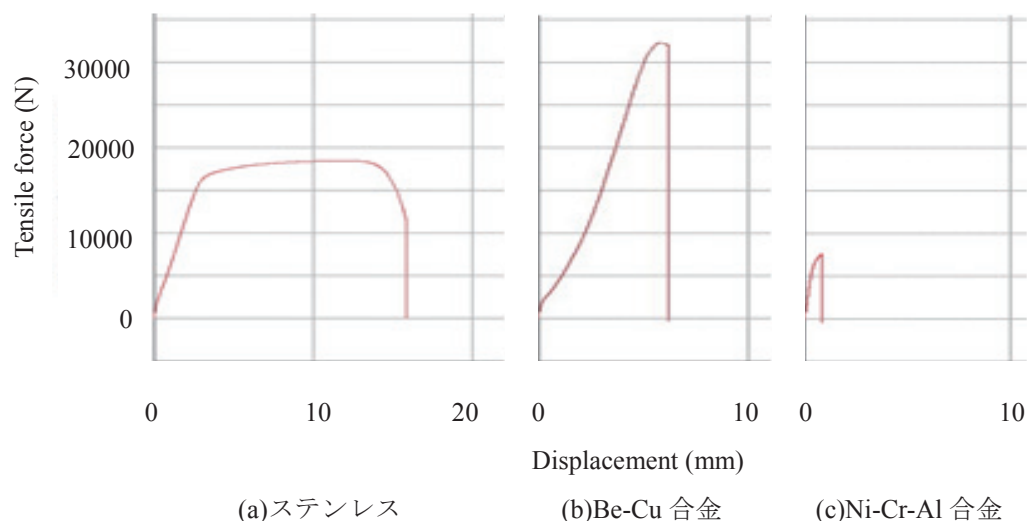


図 4. 各種材料の引張試験による引張力—変位線図

試験片を製作した。引張荷重を加えて破断するまで試験した。引張速度は 1mm/min で行った。引張試験に用いた試料の形状、時効処理条件や試験により得た表面硬さを示す。

- (a)ステンレス 直径 5.4mm×長さ 60mm
時効処理なし、表面硬さ H_{RC}4
- (b)Be-Cu 合金 直径 5.4mm×長さ 60mm
時効処理 315°C、表面硬さ H_{RC}42
- (c)Ni-Cr-Al 合金 直径 2.0mm×長さ 61mm
時効処理 575°C、表面硬さ H_{RC}55.3

3.3 実験結果

Ni-Cr-Al 合金の引張試験結果を図 4 に示す。引張応力へ変換した結果を図 5 に示す。Ni-Cr-Al 合金は Be-Cu 合金の 1.5 倍程度の引張強さがあることが分かる。

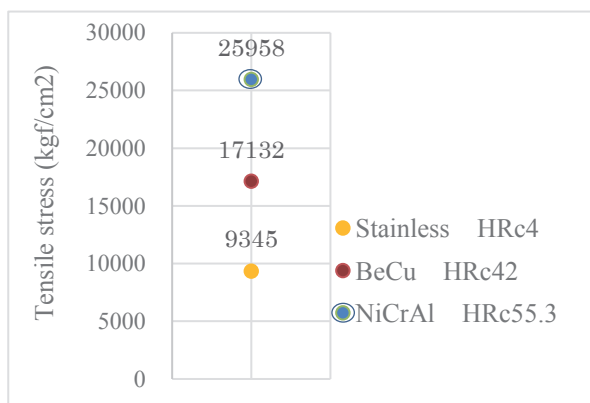


図 5. 各種材料の試験による引張応力プロット図

4 Ni-Cr-Al 合金の磁化の検証

圧力セルには非磁性が求められる。Ni-Cr-Al 合金の時効処理後の磁性を検証した。

4.1 実験装置

磁化測定には図 6 に示す日本カンタムデザイン製磁気特性測定装置 MPMS-XL により行った。



(a)測定装置外観 (b)測定試料

図 6. 磁化測定

4.2 実験方法

測定試料には Ni-Cr-Al 合金の切削加工した丸棒を準備した。試料を図 6(b)に示す。磁化の検証に用いた各試料の時効処理条件と形状などを示す。

- (a)時効処理なし
直径 4.0mm×長さ 4.1mm
- (b)時効処理 685°C、H_{RC}55
直径 5.1mm×長さ 7.9mm
- (c)時効処理 800°C、H_{RC}37.6
直径 4.0mm×長さ 6.0mm

4.3 実験結果

磁化測定の結果を図 7 に示す。磁化測定結果より、Ni-Cr-Al 合金は圧力セルとして利用可能な磁化であることを確認した。

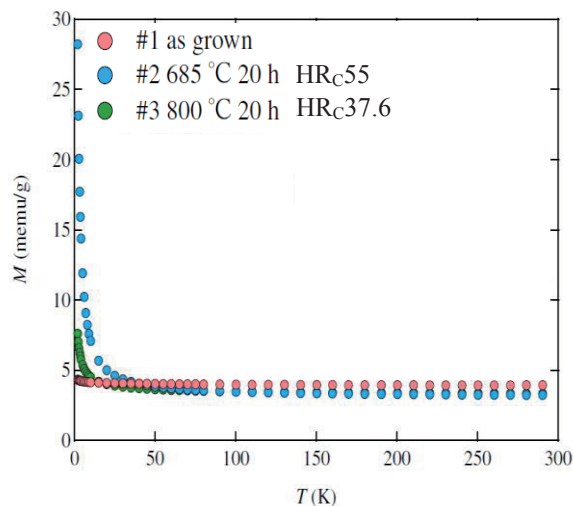


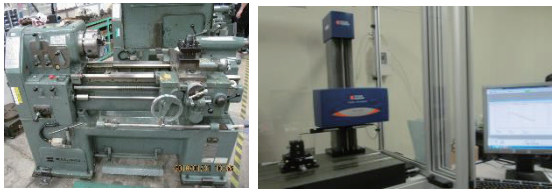
図 7. Ni-Cr-Al 合金の磁化測定結果線図

5 Ni-Cr-Al 合金の切削表面粗さの検証

Ni-Cr-Al 合金の切削による表面粗さへの影響も広く知られていない。そのため、切削加工条件を変えて、その条件毎の表面粗さを粗さ試験機により測定を行い、切削加工条件の表面粗さへの影響を検証した。

5.1 実験装置

切削加工を行うための加工機には、図 8(a)に示すワシノ機械製作用旋盤 LRS-55A により行った。加工後に材料表面の粗さを図 8(b)に示す粗さ試験機 Taylor Hobson 製 FormTalysurf i60 により行った。粗さ測定はデータ長さ 1.5mm、測定速度 0.5mm/s の測定条件により行った。



(a)汎用旋盤 (b)粗さ試験機

図 8. 切削加工と表面粗さ測定に用いた装置外観

5.2 実験方法

Ni-Cr-Al 合金、Be-Cu 合金とステンレスの丸棒試験片を製作した。各切削条件で丸棒端面を 0.1mm 切込みで切削加工した。周速度の変更は、旋盤の主軸回転数を変えて丸棒端面を切削加工した。加工した端面を粗さ試験機で粗さ測定を行った。切削表面粗さの検証のために行う切削加工条件を示す。各条件による表面粗さの変化を検証する。

(A)切削油種による表面粗さの変化

- ①フックス製切削油エコカット 210
- ②フックス製切削油エコカット 710

(B)チップ刃先 R 寸法による表面粗さの変化

- ①R0.4、②R0.8

(C)周速度による表面粗さの変化

(D)送り速度による表面粗さの変化

(E)チップ形状による表面粗さの変化

- ①ステンレス用チップ、②アルミ用チップ

切削表面粗さの検証に用いた各試料の硬さと形状を示す。

- (a)ステンレス HRc4 直径 30mm×長さ 20mm
 (b)アルミニウム 直径 30mm×長さ 20mm
 (c)Ni-Cr-Al 合金 HRc55.3 直径 8mm×長さ 10mm

5.3 実験結果

各種材料の切削表面粗さ結果を図 9～13 に示す。

(A)切削油種による表面粗さの変化を図 9 に示す。Ni-Cr-Al 合金はエコカット 710 でよい傾向である。ステンレスは切削油による表面粗さの変化は小さいことが分かる。(B)刃先 R 寸法による表面粗さの変化を図 10 に示す。アルミニウムと Ni-Cr-Al 合金は刃先 R により表面粗さが大きく変化していないことが分かる。延性があり硬いステンレスは R0.8 で表面粗さが改善している。(C)周速度による表面粗さの変化を図 11 に示す。アルミとステンレスは周速が速いと表面粗さ

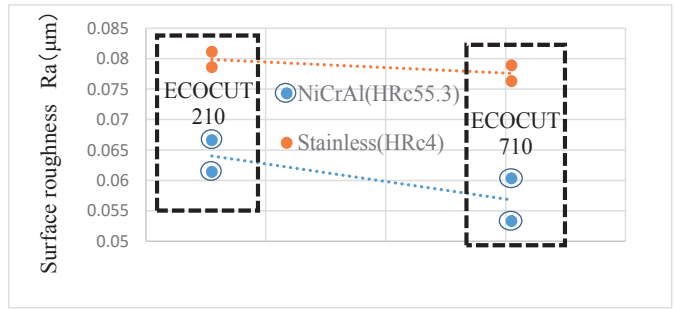


図 9. 旋盤加工における切削油種と表面粗さの関係線図

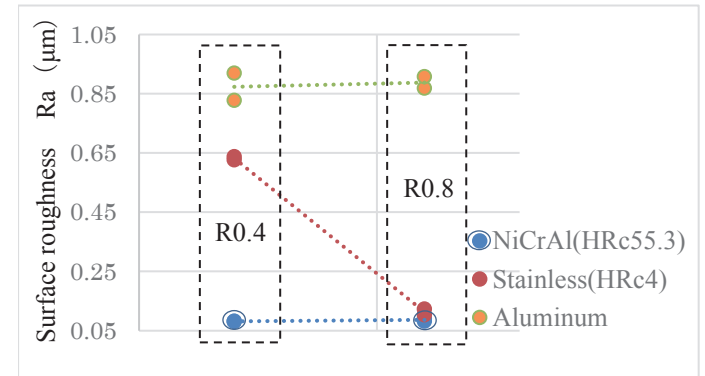


図 10. 旋盤加工における刃先 R 寸法と表面粗さの関係線図

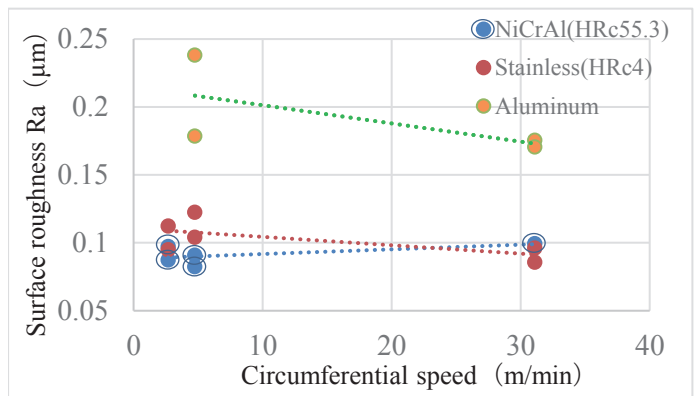


図 11. 旋盤加工における周速度と表面粗さの関係線図

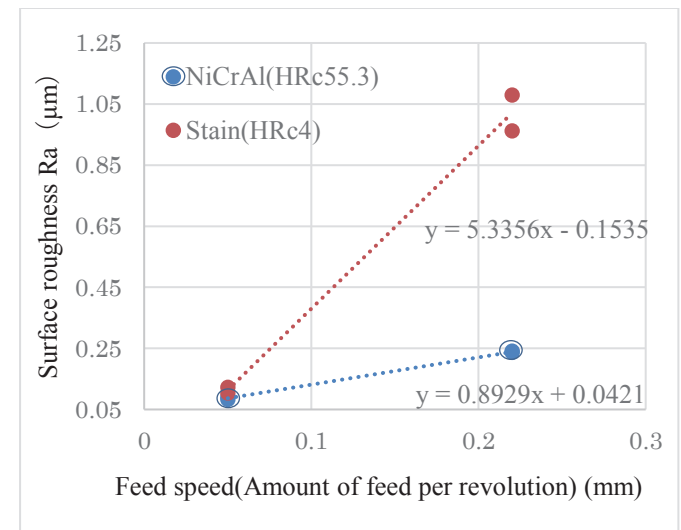


図 12. 旋盤加工における送り速度と表面粗さの関係線図

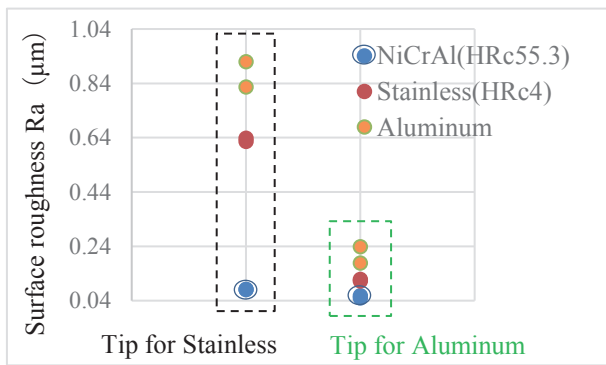


図 13. 旋盤加工におけるチップ形状と表面粗さ関係線図

がよくなる傾向であることが分かる。切削抵抗が下がっていること、構成刃先を抑制するためと考えられる。(D)送り速度による表面粗さの変化を図 12 に示す。送りを遅くすることでステンレスも Ni-Cr-Al 合金も表面粗さがよくなっていることが分かる。(E)チップ形状による表面粗さへの影響を図 13 に示す。アルミ用のシャープエッジにより表面粗さがよくなる傾向であることが分かる。

5.4 考察

時効処理した高い硬度の Ni-Cr-Al 合金の切削加工条件による表面粗さを検証した。切削には、(A) フックス製切削油エコカット 710、(B)チップ刃先 R0.4~0.8、(C)周速度 5m/min 程度、(D)送り速度 0.05mm、(E)アルミ用チップが適していることが分かった。Ni-Cr-Al 合金は硬くて強い材料であるが、表面粗さは算術平均粗さ Ra1.6 以下であり高い面粗度に仕上がっていることが分かる。

6 高圧小型圧力セルへの応用

Ni-Cr-Al 合金は、時効処理により Be-Cu 合金よりも硬く、引張にも強くなることが分かった。また、切削に適した加工条件を把握した。これらにより、Ni-Cr-Al 合金を用いた高圧小型圧力セルの製作を試みた。

6.1 圧力セルの小型化

圧力セルは磁気特性測定装置(図 6(a))で実験に使えるよう外径は 8.8mm にする。試作するピストンシリンダー型圧力セル構造を図 14 に示す。二層シリンダーの外層は Be-Cu 合金、内層は Ni-Cr-Al 合金の二層構造である。

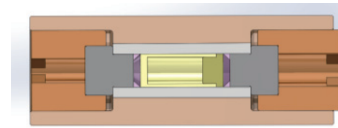
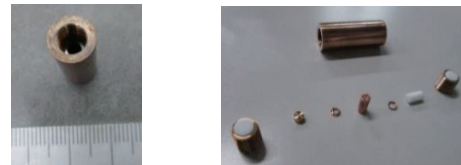


図 14. 圧力セル構造断面図(SolidWorks)

6.2 試作

二層構造の高圧小型圧力セルの試作した部品を図 15(a)に、圧力セルを構成する部品を図 15(b)に示す。



(a)試作した二層シリンダー (b)構成部品

図 15. 高圧小型圧力セル

7 おわりに

Ni-Cr-Al 合金の時効処理条件による表面硬さへの影響を検証した。引張試験も行い、他の材料よりも強いことを明らかにした。磁性を測定したことで時効処理により硬度を高くすると磁化も高くなるが、Ni-Cr-Al 合金は圧力セルに利用できることを明らかにした。切削加工条件による表面粗さへの影響も検証したことで、適した切削条件を明らかにした。これらの結果を応用して、Ni-Cr-Al 合金を用いた二層構造の高圧に耐える小型圧力セルの試作を行った。今後、試作した圧力セルの加圧テストや低温環境下でのテストを行う予定である。

8 謝辞

本加工技術開発は、名古屋大学理学部の技術開発費として助成を受けて行いました。圧力セル試作品の実験にあたり、名古屋大学 大学院理学研究科 磁性物理学研究室 博士前期課程 品川氏にはご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

9 参考文献

- [1] 上床美也、”ピストンシリンダー型圧力発生装置”、高圧力の科学と技術 Vol.12,No.4(2002),pp-306-311
- [2] 松本武彦、”高圧力発生装置と材料”、高圧力の科学と技術 Vol.12,No.4(2002),pp-280-287

液相焼結法を用いた Al-ZrO₂系マイクロ鈴構造体の開発

○佐竹忠昭^{A)}、遠藤信幸^{B)}、村澤 剛^{C)}

^{A)}山形大学工学部 技術部

^{B)} 山形大学工学部 学生

^{C)} 山形大学工学部 大学院工学研究科

概要

本研究では、液相焼結法を用いて Al 多孔質体中に ZrO₂ 微粒子を内包した新しい鈴構造体を開発した。振動吸収特性を測定した結果、鈴構造化により損失係数の値が上昇することと鈴構造の含有量の増加とともに損失係数が増すことが分かった。Al 原料粉末の形状に関しては、小径の球状粒子より大径の針状と紡錘状粒子が損失係数の上昇に有利である。また、吸音特性に関しては、鈴構造の含有量が増すにつれて吸音率が大きくなることから、吸音メカニズムとして鈴構造が有効であることが分かった。

1 はじめに

近年、制振材や吸音材の材料として鈴構造体が注目されている¹⁾²⁾。鈴構造体とは、空孔内に空孔よりも小さな核微粒子を内包した構造体を意味する。このような鈴構造体に振動や音が入射した場合、入射した運動エネルギーが空孔内での核微粒子の運動に変換、消費され、高い効率で振動や音を減衰することができる。このため、新しい制振、吸音材料としてその開発が期待されている。

本報では、ZrO₂ 微粒子を核とした多孔質 Al 鈴構造体を液相焼結法で作製した。その後、制振試験と吸音試験を実施し、振動吸収と吸音に対する鈴構造化の効果について調べた。

2 実験方法

2.1 原料粉末

母相となる Al 粉末には平均径 150 μ m の球形粉末（ヒカリ素材工業製）、平均径 300 μ m の針状と 600 μ m の紡錘状粉末（ミナルコ株式会社製）の 3 種類を用いた。液相焼結中の液相形成粒子には平均径 150 μ m

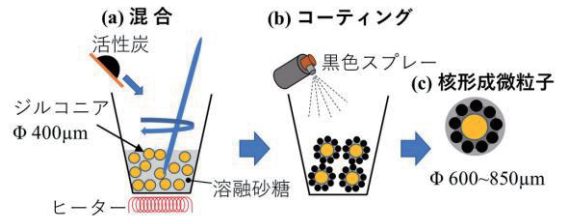


図 1. 核形成微粒子の製造過程

の Al-12Si 球形粉末（ヒカリ素材工業製）を採用した。核微粒子には平均径 400 μ m の ZrO₂ 球形粒子（株式会社ニッカトー製）を用いた。

2.2 核形成微粒子の製作

液相焼結中の熔融 Al と ZrO₂ 粒子の接合防止と空孔形成のため、あらかじめ ZrO₂ 粒子表面をカーボンで被覆した。図 1 に被覆処理過程を示す。まず、結合材となる砂糖と ZrO₂ 粒子を坩堝内に入れた後加熱する。砂糖が融けた段階で加熱を停止し、被覆材となる活性炭を投入、攪拌することで ZrO₂ 粒子表面に活性炭が被覆される（図 1(a)）。その後、表面を黒色スプレーで被覆することで崩れやすい活性炭表面を保護し被覆処理が完了する（図 1(b)）。最後に、ふるいにより径を 600~850 μ m に統一した。以後、被覆処理を施した ZrO₂ 粒子を核形成微粒子と呼ぶ。

2.3 多孔質 Al 鈴構造体の作製

図 2 に多孔質 Al 鈴構造体の作製過程を示す。原料粉末には核形成微粒子、Al 粉末、Al-12Si 粉末を用いた。Al-12Si 粉末を 20~25 wt.% に固定し、核形成微粒子の割合を 0、10、20、30 wt.% と変化させた。残を Al 粉末とすることで制振試験用試験片では計 8g、吸音試験用では 3g となるように計量した。エタノールを媒体として混合（図 2(b)）した後、成型用グラフィット治具に投入し、0.15kPa の圧力をかけた。100 $^{\circ}$ C、

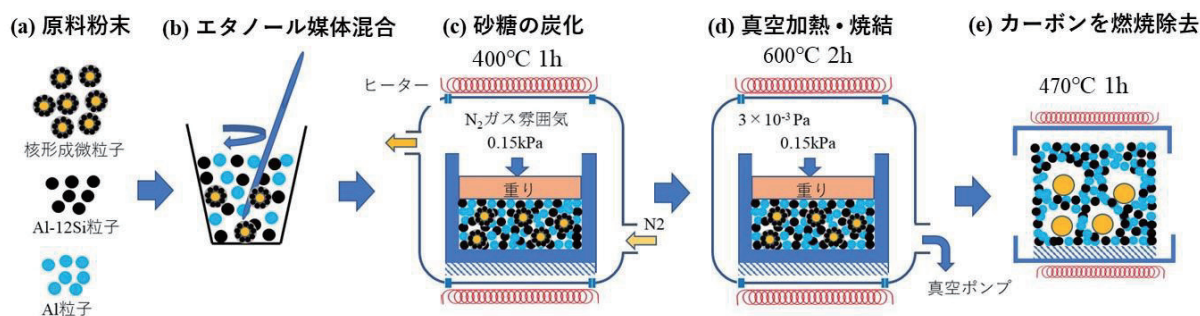


図 2. 多孔質 Al 鉛構造体の作製過程

30 分乾燥の後、窒素ガス中 400°C で 1 時間加熱することで、砂糖を炭化させた (図 2(c))。さらに、600°C の真空炉で 2 時間真空加熱し液相焼結した (図 2(d))。最後に、大気中 470°C、1 時間加熱することでカーボンを燃焼除去し鉛構造体を作製した (図 2(e))。図 3 に得られた試験片形状と寸法を示す。

なお、試験片の呼称として 150 μm の Al 粉末を使用し核形成微粒子を 20% 添加した場合 150-20% 材と呼ぶ。同様に 300 μm の Al 粉末を使用し核形成微粒子を 20% 添加した場合は 300-20% 材となる。

2.4 制振試験と吸音試験および組織観察

制振試験には自作の制振特性試験機を用いた。中央共振法により損失係数 η を反共振点について半値幅法で求めた。吸音試験には垂直入射吸音率測定装置を、組織観察には EDS 付属の SEM を用いた。また、試験中の ZrO_2 粒子の運動をビデオ観察した。

3 結果および考察

3.1 組織観察

焼結後、鉛構造の形成を確認するため樹脂を真空含浸後、表面を鏡面研磨し SEM 観察した。図 4 は 150 μm の Al 粒子に 20 wt.% の核形成微粒子を添加した例である (150-20% 材)。図中、黒い領域は含浸した樹脂の領域である。多孔質 Al 焼結体中の径 800 μm 程度の空孔内に ZrO_2 粒子が内包されており、鉛構造体の形成が確認できる。

3.2 振動吸収特性

振動吸収特性に対する ZrO_2 粒子含有量の影響を調べるため、150 μm 材について核微粒子含有量を 0、10、

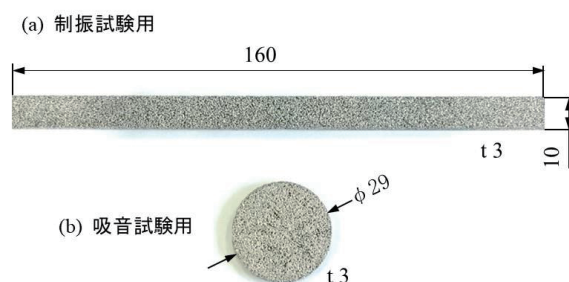


図 3. 試験片の形状と寸法

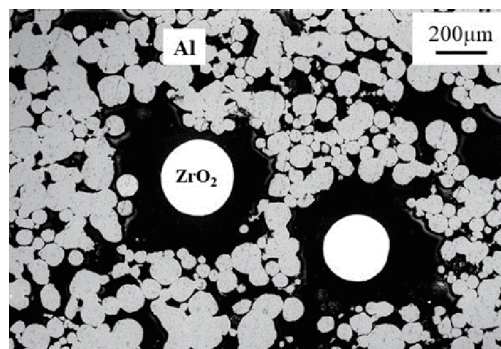


図 4. 多孔質 Al 鉛構造体の組織 (150-20% 材)

20、30 wt.% とした試料を作製した。表面の SEM 観察結果を図 5 に示す。150-0% 材は気孔率 21% となっている。これに対して 10、20、30% 材は鉛構造を有しており気孔率はそれぞれ 41、43、46% と得られた。図 5 は制振試験で得られた機械インピーダンスと周波数の関係である。図中矢印で示すように ZrO_2 粒子含有量が増すにつれて共振点が低周波数側に移行することとピーク高さが減少し幅が大きくなる傾向を示すことが分かる。同図の反共振ピーク (上向きのピーク) から半値幅法により損失係数 η を求めた。結果を図 6 に示す。図より ZrO_2 粒子含有量の増加とともに損失係数が増すことが分かる。特に 150-30% 材では一次共振点の損失係数が 0.039 まで増加する

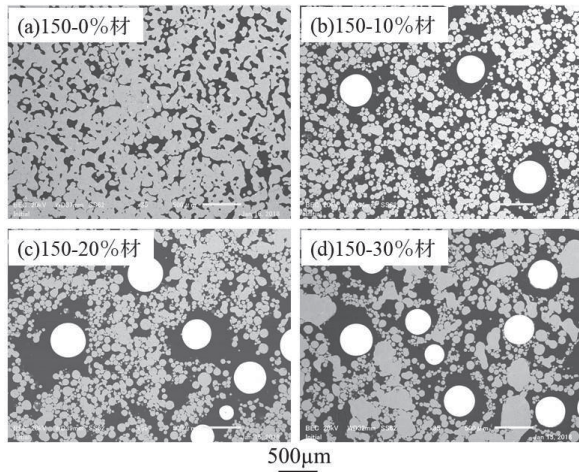


図 5. 150-0、10、20、30%材の鈴構造

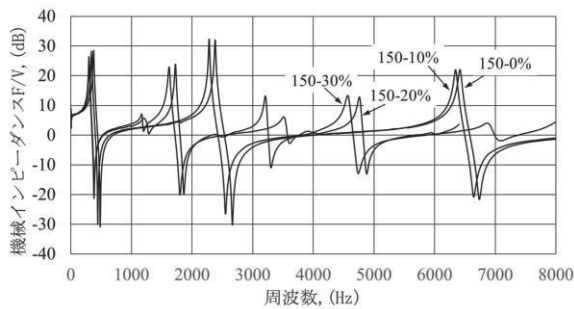


図 6. 機械インピーダンスと周波数の関係

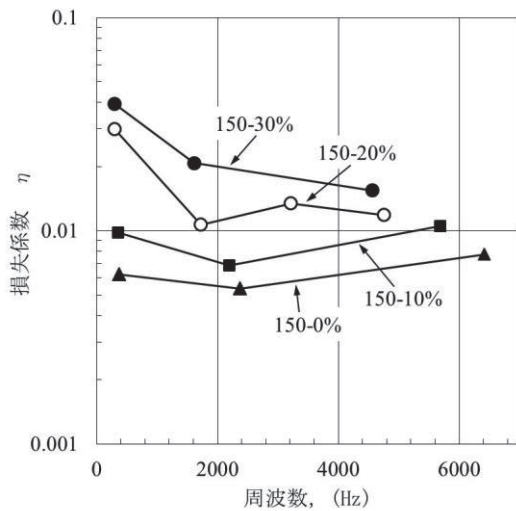


図 7. 損失係数に及ぼす ZrO_2 粒子含有量の影響

が、その後、周波数の増加とともに減少している。

この結果に関連して、ビデオ観察から一次共振点では ZrO_2 粒子が気孔壁面に高速で衝突しながら回転と往復運動していたのに対して二次、三次になるとその振幅が次第に減少するとともに回転運動が主となることが分かった。この現象が高周波数側で損失係数が減少した要因として考えられる。また、本鈴

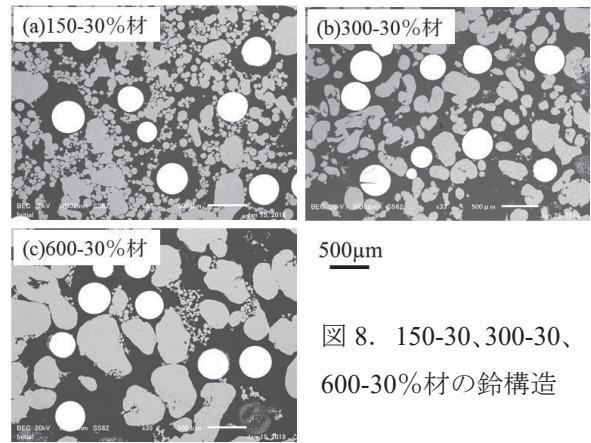


図 8. 150-30、300-30、600-30%材の鈴構造

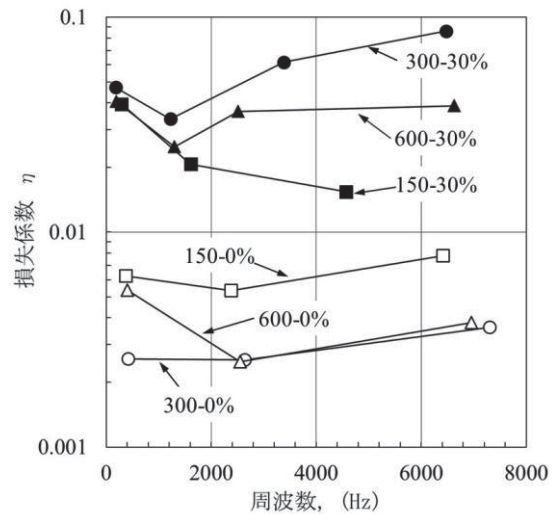


図 9. 損失係数に及ぼす Al 粉末形状の影響

構造体の制震メカニズムとしては低周波数域では ZrO_2 粒子の空孔壁面への非弾性衝突、高周波数域では粒子回転時の摩擦が考えられる。

振動吸収特性に対する Al 粒子形状の影響を調べるため、3種類の Al 粒子について核形成微粒子を 0 と 30wt.%含有した試験片を作製し、制振試験を実施した。得られた 30%材の組織を図 8 に示す。150-30%材では鈴構造が独立、分散している。これに対して、300-30%材では粗な構造となり、600-30%材では大きな空孔中に複数の ZrO_2 粒子が包含される。

図 9 に制振試験結果を損失係数と周波数の関係として示す。0%材については各材ともに損失係数が 0.001 のオーダーにあるが、一次ピークが高く、二次で減少した後、三次で上昇する傾向が認められる。150-30%の損失係数は前述のように 150-0%材に比較して一次で 0.039 まで上昇するが、二次、三次と減少する傾向を示す。これに対して 300-30%材の損失係

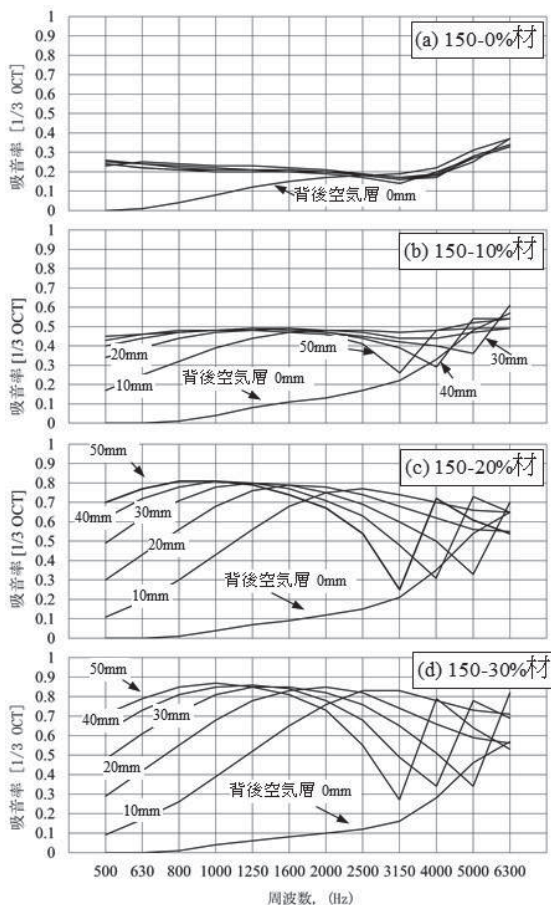


図 10. 吸音率と ZrO₂ 粒子含有量の関係

数は一次で 0.047 まで上昇し、二次で 0.034 まで減少するが、その後上昇に転じ四次で 0.086 まで上昇している。600-30%材の損失係数は 300-30%材と類似の傾向を示す。これらの結果は球状粒子の 150-30%材より粒径が大きく針状の 300-30%材と紡錘状の 600-30%材が優れた制振特性を示すことを示しているが、その機構については今後検討が必要である。

3.3 吸音特性

150-0%材、150-10%材、150-20%材、150-30%材の吸音試験結果を吸音率と周波数の関係として図 10 に示す。吸音率は各材について背後空気層を 0、10、20、30、40、50mm と変化させながら測定した。組織は図 5 に対応しており、気孔率は各材に対して 21、41、43、46%となっている。150-0%材では背後空気層 0mm の場合、吸音率が周波数の増加とともに緩やかに上昇している。これに対して背後空気層 10、20、30、40、50mm では約 0.2 と低い一定値を示した後、3150Hz 以降わずかに上昇する。これは気孔率が低く流れ抵抗が大きいと考えられる。150-10%では、0mm

を除く各曲線が上に凸のゆるいピークを示すようになり、吸音率は 150-0%材に比較し約 0.5 まで上昇している。150-20%材は明瞭な上に凸のピークを示すようになり、ピーク値で約 0.8 の吸音率となる。また、背後空気層が大きくなるとともにピークは低周波数側に移行している。150-30%材ではさらにピーク値が高くなり吸音率として約 0.85 が得られている。この結果は試料内の鈴構造の増加とともに吸音率が増すことを示している。類似の結果は 300 μ m 材でも得られており、吸音メカニズムとして鈴構造が有効であることを示している。

4 まとめ

本報では、ZrO₂ 粒子を核とした多孔質 Al 鈴構造体を液相焼結法で作製し、その振動吸収と吸音特性について調べた。結果として以下の知見が得られた。

- (1) ZrO₂ 粒子表面をカーボンで被覆した核形成微粒子を用い Al 粉末を液相焼結することで多孔質 Al 鈴構造体を作製できた。
- (2) 鈴構造化により損失係数の値が上昇することが分かった。また、鈴構造の含有量の増加とともに損失係数が増すことが分かった。
- (3) Al 粉末の形状により鈴構造が変化し、小径の球状粒子より大径の針状と紡錘状粒子が損失係数の上昇に有利であることが分かった。
- (4) 鈴構造化により吸音率が増すことから、吸音メカニズムとして鈴構造が有効であることが分かった。

本研究を行うにあたり、科学研究費補助金（奨励研究 17H00333）の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Murasawa G, Makuta T, Cho H : Fabrication of salami-type porous metal and its high attenuation characteristic, Scripta Materialia, Vol.65, Issue9, pp.827-829, Nov.2011.
- 2) 新保 實, 越田 伺 励, 三澤 章 博 : 鈴構造体の製造法と減衰特性に関する研究, 材料システム 第 29 巻, pp.31-37, 2011.1.

第2分野 (装置技術)

理学研究科等事業場における安全教育への貢献

～安全意識の向上を目指して～

○吹上 菜穂、佐藤 健、川崎 智之、澤田 修太、澤口 亜由美、中嶋 隆

東北大学 技術部安全管理室

1 はじめに

理学部・理学研究科技術部では、国立大学法人化前年の平成15年に技術職員が配置されていない職場や理学研究科内の共通的な業務に対して、技術的な支援業務を行う技術部「業務運用組織」を編成し、平成16年4月より技術支援業務の一つとして安全管理業務を行っている。安全業務は設立時より継続的に行われている支援業務であるが、ここ数年前から支援の幅を広げ、理学研究科等事業場の安全教育等の面でも独自の技術支援を行っている。

ここでは事業場で行われている安全教育、救命講習の様子を報告する。

2 研究室配属時安全教育

事業場における安全衛生管理は、大学の労働安全衛生法に定められた重要な責務である。「東北大学安全衛生管理指針」には、学生は教職員に準ずる立場にあると示されており、安全管理に留意するよう指導する必要がある。理学研究科等事業場では研究科

長（事業場長）からの指示の下、独自に学生・院生に対して「学生生活上の安全に関する教育」を行っている。この講習は理学研究科等キャンパスにおいて、各研究室に属して学生生活を送るにあたって必要な安全衛生等に関する知識を習得すること、並びに安全衛生意識を高めることを目的としている。対象者は学部4年生及び当事業場に進学する大学院生で安全教育を受けたことがない者である。内容は「一般編」と「専門編」に分かれており、各々を技術職員が交代で講師を担当している。講習会の資料は写真やイラスト、過去の事故例なども取り入れ、実験系以外の学生にも理解できるよう技術職員が理学部安全衛生管理室と協議して作成を行っている。このように対象者を集め一度に講習を行い統一的に最新の情報を伝えることにより、研究室側の負担軽減にも寄与している。平成24年度から安全教育をスタートし、今年で総受講者数は1,500人強となった。受講率も高い状態で推移してきており、今年度の学部生の総出席者は90%となっている。



図1. 研究室配属時安全教育の様子

3 救命講習会

理学研究科等事業場では、主要な建物に AED（自動体外式除細動器）を設置している。その適切な活用のため、平成 23 年度より応急手当普及員の資格を取得した技術職員が教職員・学生を対象に定期的に講習会を開催している。以前の救命講習会は仙台市消防局から講師を招き大規模に開催していたが、事業場の教職員のみを対象に年 1 回の開催であったため、門戸を広げるべく平成 24 年度から安全衛生管理室を支援する形で技術職員が講師として協力するようになった。現在では学生まで対象を広げて年 6 回程開催している。柔軟に日程調整を行い、また講習を小規模にすることで質疑応答もしやすくより身近な体験として参加しやすい講習会となった。（図 2）表 1 に示すように受講者数は延べ 220 名程となっている。

応急手当のガイドラインは、5 年毎に更新されるため受講者も講師も定期的な更新が必要となる。講師は常に最新の情報で講習会が開催できるよう努めて



図 2. 救命講習の様子

表 1. 救命講習の年度ごとの開催数と受講者数の推移

年度	23 年	24 年	25 年	26 年	27 年	28 年	29 年	合計
開催数	1 回	3 回	5 回	5 回	5 回	6 回	6 回 (予定)	31 回
受講者	7 名	18 名	46 名	41 名	41 名	48 名	21 名※	222 名

※平成 29 年度 10 月現在

おり、今年度の講習から、傷病者の様子など実例の写真や動画を多く取り入れて、よりわかりやすい内容に更新した結果、受講者からもとても理解しやすかったとの感想をいただいている。

4 終わりに

本事業場の安全教育への取り組みは、安全衛生業務の専任ではない技術職員も主体となって個々の専門の技術・知識を生かし、各職場の理解を得ながら主体的に取り組んできたものである。様々な研究分野で構成されている事業場であるが、今後とも安全に関する業務負担の軽減、更なる安全意識の向上を目指し、安全衛生管理室と協力して支援活動を行っていききたい。

謝辞

今回発表するにあたり、多くのご指導をして下さった安全管理室の方々、並びに日々の安全管理業務に協力して下さる方々にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 佐藤 健、他、平成 29 年度東北大学総合技術部職員研修ポスター発表要旨集、P8-10。
- [2] “平成 26 年度 国立大学法人東北大学 安全衛生管理指針”

大型ヘリカル装置排気系の重水素実験対策

○鈴木直之^{A)}、加藤ひろみ^{A)}、田中将裕^{B)}、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

概要

大型ヘリカル装置 LHD (Large Helical Device) で行っている重水素を用いた高温高密度プラズマ実験 (以下「重水素実験」) では、ごく一部の重水素が核融合反応を起こすことによって放射性同位体であるトリチウムが発生する。我々は LHD から排出されるトリチウムを含んだ排気ガスが、重水素実験の安全管理計画¹⁾に沿うように排気系の改造を行ってきた。ここではその設計方針と過程、結果等について報告

する。

1 重水素実験前の排気系

図 2 に重水素実験前の LHD 排気系統図を示す。LHD は 2 つの真空容器で構成されている。一つはプラズマを生成するための真空容器 (以下「真空容器」)、もう一つが超伝導コイルを冷却するために必要な断熱真空容器であり、それぞれに真空排気装置が設置されている。

容積が 250m³ ある真空容器内では水素ガスを用いた高温高密度プラズマを生成している。真空容器の主排気ポンプはクライオソープションポンプであり、その実効排気速度は約 200m³/s である。それ以外に 80K シールドに液体窒素を用いている大型のクライオパネルを装備したプラズマ加熱装置 NBI や、ターボ分子ポンプを装備した各種計測機器も真空容器に接続されており、真空容器から排出される水素ガスを排気している。また真空容器を粗引きする際の粗引きポンプも接続されている。

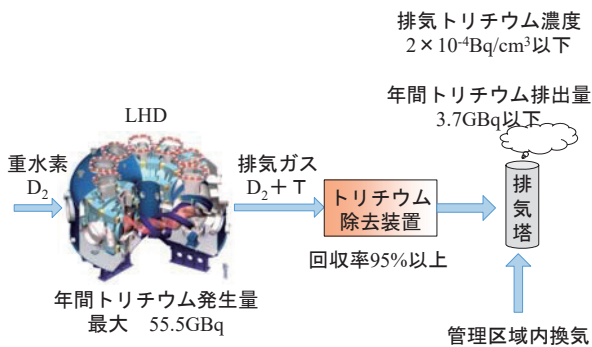


図 1. 排気系から見た重水素実験概要

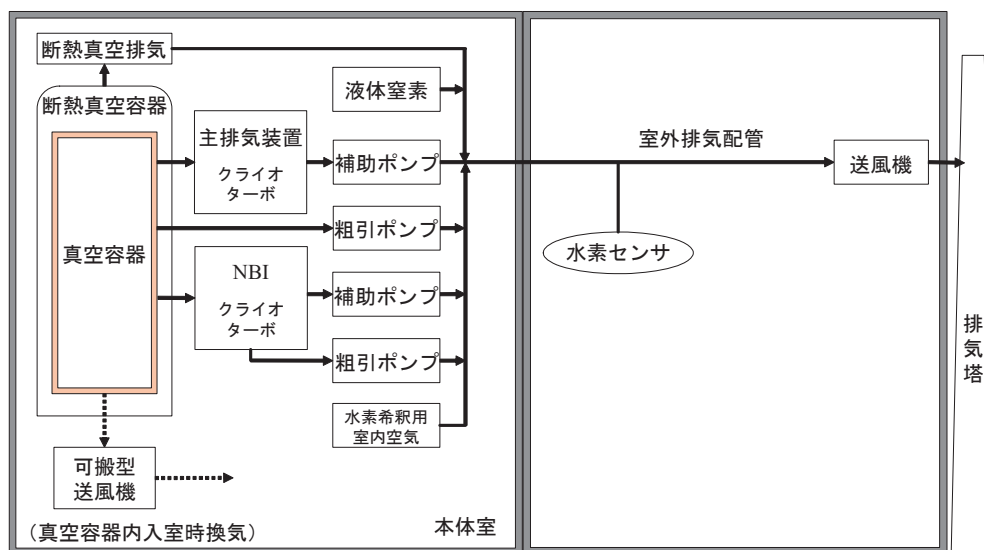


図 2. 重水素実験対策前の排気系統図

改造の対象となるのは以下に述べる室外排気部分である。クライオポンプやターボ分子ポンプは補助真空ポンプを介して室外排気配管に接続されていた。室外排気配管の最下流には送風機が設置されていた。室外排気配管内での水素対策として、水素センサと希釈弁が設置されていた。これは配管内の水素濃度がしきい値を超えた時に希釈弁を開けて室内空気を取り込むことによって、配管内の水素濃度を下げる装置であった。送風機の排気口は排気塔に接続されていた。

LHD がメンテナンス期間中に入ると、真空容器内に人が立ち入ることがある。その際は真空容器の換気を行う。これは LHD が設置されている本体室の空気を真空容器の一方のポートから可搬型送風機で取り込み、他方のポートから可搬型送風機で本体室に排出する形で行われていた。

2 排気系改造の基本方針

重水素実験の安全管理計画では、プラズマ実験中において真空容器の真空排気装置から排気されるガスは全てトリチウム除去装置を通し、トリチウムを水の形で除去・回収するよう示されている。また一度トリチウムに晒された真空容器からは大気開放後も壁からトリチウムが放出される可能性がある。そこでメンテナンス中の真空容器換気ガスについても排出されるトリチウム濃度や量が研究所管理値を超える恐れがある場合は、トリチウム除去装置を使用することとされている。プラズマ実験中に排気されるガスとメンテナンス中に排気されるガスではガス種や処理流量が大きく異なるため、それぞれの目的に対してトリチウム除去装置を設置することが求められた。

図 2 で示した排気系にトリチウム除去装置を設置するに当たって必要な改造、また放射線管理区域設定に当たって必要な改造を検討した。代表的な改造ポイントを以下に示す。

- トリチウム除去装置の設置
- トリチウム除去装置へ接続するための配管敷設
- 作業用排気配管の敷設

- 室外排気配管内の酸素濃度低減
- 排気用フィルタの設置、送風機の冗長化

3 実施した改造

3.1 トリチウム除去装置の設置

「2 排気系改造の基本方針」で述べたように、トリチウム除去装置は用途に合わせて 2 機設置された。一つは小流量（定格 10Nm³/h）だが水素濃度が高いガスを処理する装置、もう一つは大流量（定格 300Nm³/h）だが水素濃度がほぼゼロである空気を処理する装置である。どちらの装置も配管内に流れるトリチウムを酸素と化合させて水蒸気にした後に回収する方式をとっている。水蒸気回収方法の違いから前者をモレキュラーシーブ（MS）型処理装置、後者を高分子膜（PM）型処理装置と呼んでいる。図 3、4 に装置の概要を示す。プラズマ実験中に真空ポンプから排出されるトリチウムを処理するのが MS 型処理装置、メンテナンス期間中の真空容器換気ガスや真空容器粗引き排気ガスに含まれるトリチウムを処理するのが PM 型処理装置である。どちらの装置も目標トリチウム回収率は 95%以上である。MS 型処理装置ではクライオポンプ再生時に排気される高濃度の水素を処理することに対応するために一旦排気ガスを貯留する機能が、PM 型処理装置ではガス中のトリチウム濃度が研究所管理値を超えない場合は処理装置を通さずに排気できる機能が備わっている。

3.2 トリチウム除去装置へ接続するための配管敷設

2つのトリチウム除去装置へ接続するために、独立した室外排気配管を 2 系統設置した。MS 型処理装置へ接続される配管を「実験ガス系排気配管」とし、主排気や計測機器の補助ポンプが接続された。一方 PM 型処理装置へ接続される配管を「ページ空気系排気配管」とし、真空容器換気用ポートや粗引きポンプが接続された。気化した液体窒素や断熱真空排気装置排気ガス等トリチウムが混入しない排気ガスは「非トリチウム系排気配管」として既設の排気配管をそのまま使用した。

新設配管の設計条件として考慮したのは気密性、

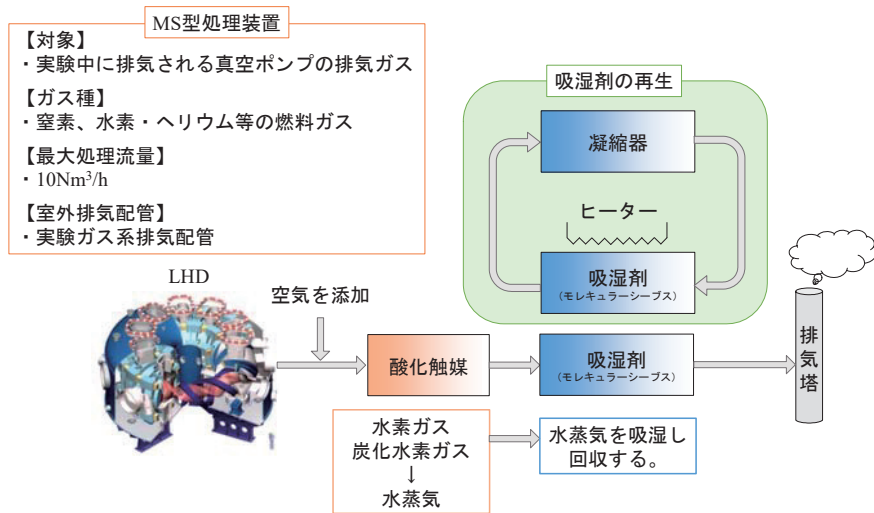


図 3. MS 型処理装置の概要

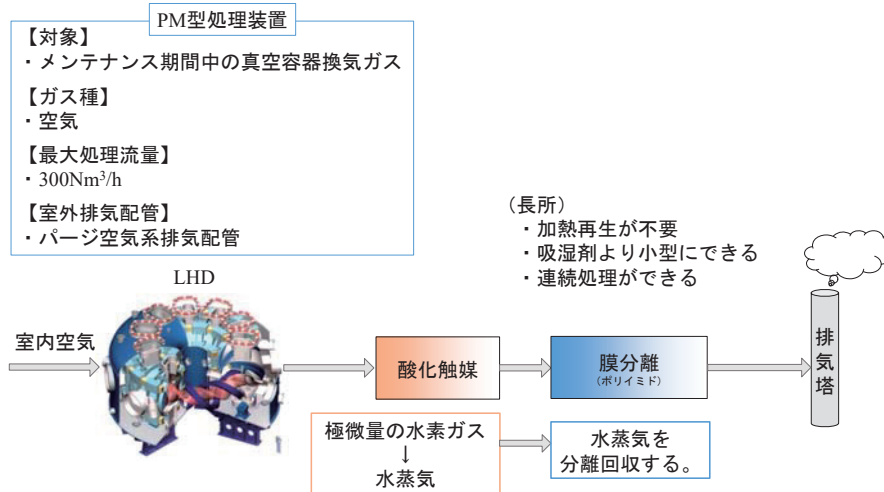


図 4. PM 型処理装置の概要

流量と負圧の確保、施工のしやすさである。

室外排気配管内は外部へのトリチウム漏洩を防ぐ観点から負圧管理とした。そして高濃度の水素が流れる雰囲気中に配管外の酸素を入れたくないということ、施工がある程度しやすいという観点から、配管は継ぎ手にバイトン O リング仕様のフランジを使った真空配管とした。許容リーク量は粗引き真空配管と同レベルの 10⁻⁷Pam³/s とした。

PM 型処理装置の処理流量は 300Nm³/h であるので、パージ空気系排気配管の流量も当初は 300Nm³/h で設計し施工した。しかし 3.1 節でも述べたようにガス中のトリチウム濃度が研究所管理値を超えない場合は処理装置を通さずに排気することがある。その際は真空容器の換気流量を重水素実験前の可搬型送風機

と同程度の 750Nm³/h としたいという要望があったため、計算と実測から圧力損失が高いと思われた流調弁と一部配管経路の改修を行った。母管の配管径はパージ空気系排気配管が 150A、実験ガス系排気配管は 100A とした。

3.3 作業用排気配管の敷設

LHD 周辺で測定機器や装置のメンテナンスを行う際に、トリチウムが本体室内に漏洩するのを防ぐ目的で局所排気をすることが想定される。また測定機器や装置のリークテストをすることも想定される。その作業に備えて、LHD を周回するようにパージ空気系排気配管を敷設した。この配管には図 5 に示すような取り合いバルブが各所に設置されており、配

管を接続すると LHD 周辺各所から PM 型処理装置へ排気することが出来る。



図 5. 作業用排気配管取り合いバルブ

3.4 室外排気配管内の酸素濃度低減

重水素実験前は水素対策として水素濃度がしきい値を超えると大量の室内空気を導入して水素を希釈する方法がとられていた。しかし、トリチウム除去装置が接続された配管では、希釈空気ごと処理を行うと処理流量が増大して装置の規模が大きくなってしまふ。その対策として、実験ガス系排気配管の酸素濃度低減策を行った。粗引きポンプや補助ポンプは全てドライポンプを採用しているが、ドライポンプにはシャフトシールガスやエアフラッシュといったポンプ内にガスを導入する機能が備わっている。そこで導入するガスを全て窒素とすることで水素対策を取ることにした。

3.5 排気用フィルタの設置、送風機の冗長化

排気系最終段には送風機が設置された。この送風機はトリチウム除去装置の排気を担っているため、送風機が停止するとトリチウム除去装置も停止するようなインターロックが組まれている。その為、送風機の故障によって停止してもトリチウム除去装置が長期運転停止とならないように、2 台の送風機が設置されている。送風機の仕様は真空容器換気流量の時に最大静圧となるように定めた。また送風機の吸気側にはフィルタユニット（プレ+HEPA）が設置された（図 6）。これは排気ガス中に含まれる固体の放射

性物質が外気へ放出してしまうのを防ぐためである。図 7 に重水素実験対策後の排気系統図を示す。



図 6. フィルタユニットと送風機

4 結果

図 8、図 9 はプラズマ実験中の実験ガス系排気配管内に流れるガス流量と光学式検出器による水素濃度、差動排気によって得られた質量分析計によるガス成分観測例である。図 8 から実験中の流量が $5\text{Nm}^3/\text{h}$ 程度で、プラズマ実験中には水素の排気がほとんど無いことが分かる。これは供給される水素のほとんどがクライオポンプに吸着されるからである。また図 9 において酸素分圧が窒素分圧の $1/100$ 程度であることから、空気の混入はほぼ無いということが分かり、窒素導入と配管真空封止の効果が表れている。19:00 頃からクライオポンプの再生が行われているが、前半は重水素ビームを入射する NBI、後半は軽水素ビームを入射する NBI のクライオポンプを再生しており、排気配管内の成分に表れている。

真空容器換気時にパージ空気系排気配管の流量を測定したところ、PM 型処理装置を通す排気で $300\text{Nm}^3/\text{h}$ 、通さない排気で $700\text{Nm}^3/\text{h}$ であった。設計目標は $750\text{Nm}^3/\text{h}$ であったので若干少ない流量となってしまった。これは元々 $300\text{Nm}^3/\text{h}$ で設計した排気配管の部分改修で流量を増やそうとしたことに起因していると思われる。この流量で真空容器担当者からは了承を得ている。真空容器内外の差圧は 350Pa であった。

トリチウム除去装置は重水素実験開始前に LHD を用いた試験運転で性能が確認された^[2]。この運転に

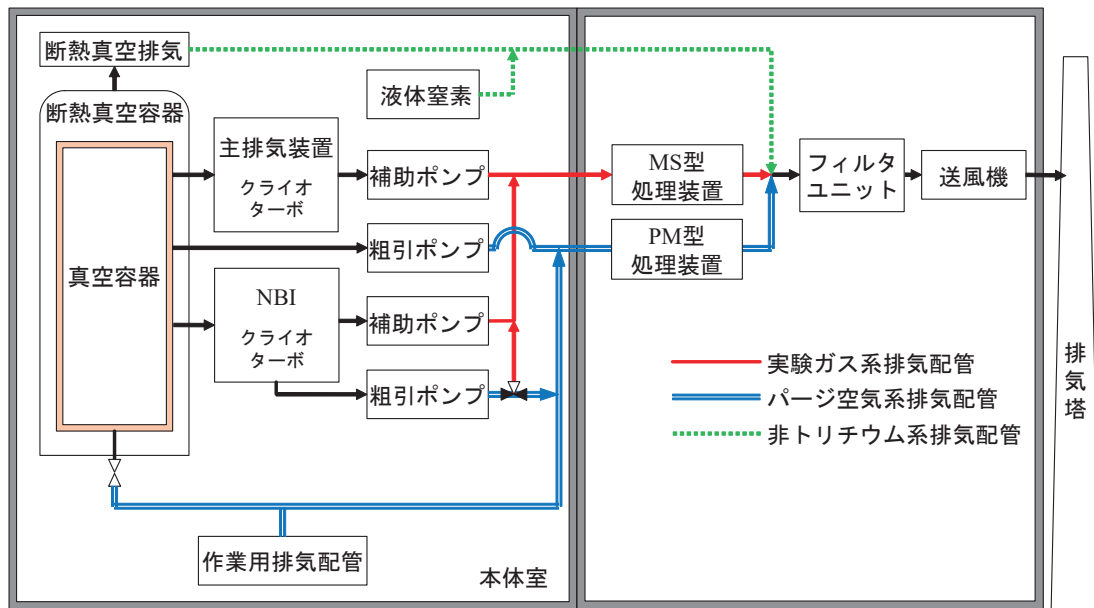


図 7. 重水素実験対策後の排気系統図

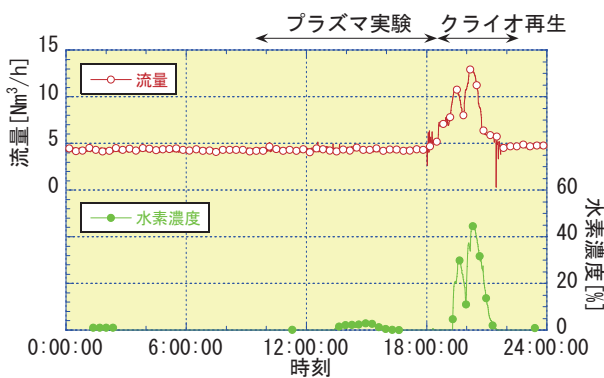


図 8. プラズマ実験時における実験ガス系排気配管内のガス流量と水素濃度観測例

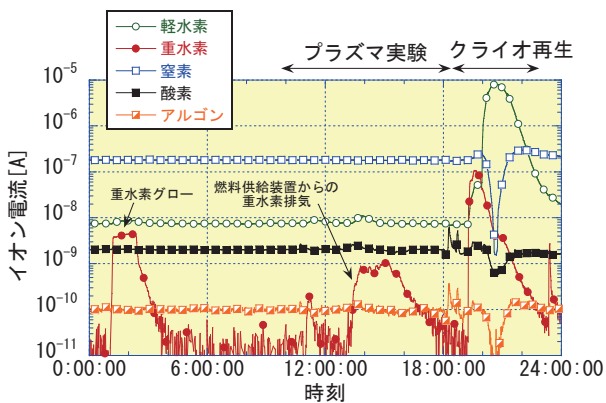


図 9. プラズマ実験時における実験ガス系排気配管内の質量分析計によるガス成分観測例

においていくつかの調整を行った^[3]。実運用では不具合による停止が発生することなく連続運転している。

5 まとめ

重水素実験で発生するトリチウムを含んだ排気ガスをトリチウム除去装置で処理してから排気できるように整備を行った。室外排気配管の整備では、排気配管に流せるガス種や流量を決め、トリチウム除去装置が円滑に運転できるようにした。これまでのところプラズマ実験期間中やメンテナンス期間中において排気が継続できないような不具合は発生しておらず、計画どおりの排気運転が出来ている。

参考文献

- [1] 核融合科学研究所ヘリカル研究部、「大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画<改訂版>」
- [2] M.Tanaka *et al.*, "Design and commissioning of the exhaust detritiation system for the Large Helical Device", *Fusion Engineering and Design* 127 (2018) 275-283
- [3] 加藤ひろみ 他、「排気ガス処理システムの設置と運転監視」、平成 29 年度核融合科学研究所技術研究会報告集、平成 30 年 3 月

JT-60SA 本体制御設備の改修

○三代康彦^{A)}、西山友和^{A)}、鈴木浩幸^{B)}、新出順士^{C)}、岡野文範^{A)}、正木圭^{A)}

^{A)}量研機構

^{B)}日本アドバンステクノロジー(株)

^{C)}(株)クリハラント

1 はじめに

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(以下「QST」という。)では、幅広いアプローチ活動におけるサテライトトカマク計画とトカマク国内重点化装置計画の下、日欧協力で核融合の早期実現を目指して超伝導核融合実験装置(JT-60SA)の建設を行っている。

JT-60SA 本体制御は、本体装置の温度情報の監視及び本体装置に関連する付帯設備の運転・監視を行うものである。JT-60SA の建設では、既存設備を最大限に生かして超伝導装置に改修するが、付帯設備がそれに対応するためには、大きな仕様変更が求められる。現在、仕様変更に対応した制御システムの開発を行っている。

JT-60SA 本体制御システムの開発では、装置本体が超伝導核融合実験装置になり、複数の付帯設備の運転に係る情報量が増大し、これらの情報量を制御室の運転員に瞬時に提供することが求められた。これらを実現するための制御システムの開発のコンセプトは、①ヒューマン・マシン・インターフェイス(HMI)の強化のため、付帯設備全体を集中監視できる統括監視システムの採用、②信頼性の高い汎用機器の採用、③自営開発による開発の自由度とコスト低減化である。

この中でも制御システムの開発では、監視用端末での各付帯設備を集中管理するための HMI の強化が最大のテーマであった。このテーマに対応するため、主幹制御監視システムには、多くの産業制御システムにおいて実績があり、HMI の機能が充実している SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)を採用した。各付帯設備の制御ユニットには、同様に産業制御システムにおいて実績のある

PLC(Programmable Logic Controller)を採用した。

システム構成は、複数ある付帯設備の制御システムと、それらの制御システムの運転状況を集中的に監視制御する主幹制御監視システム(本体プラント監視システム)から成る(図 1)。

本研究会では、制御システムの開発の基本方針、システム構成の検討過程及び制御システムの開発の現状を報告する。

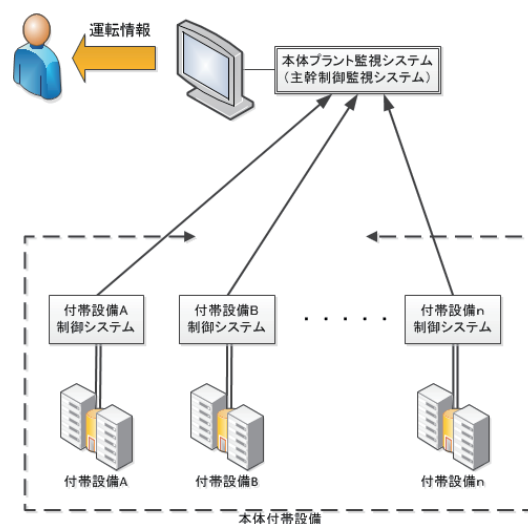


図 1. システム構成案

2 開発の方針

JT-60SA 本体制御は、本体装置及び関連する付帯設備の運転制御・監視を行うものである。本体装置においては、真空容器のベーキング時における真空容器内外表面の温度、真空容器内とクライオスタット内の真空度を監視する。付帯設備においては、「真空排気設備、ベーキング・ガス循環設備、一次冷却設備、ガス注入装置、グロー放電装置」の 5 設備の運転制御・監視を行う。

制御システムの開発は、開発コンセプトに沿った

システム構成の検討、機材の購入、プログラミング、デバッグ、実負荷試験の一連の作業を自営で対応している。自営による開発の利点は、検討段階における R&D への早期着手が可能であること、開発時の軌道変更・修正が容易であること、設備側の変更に対して臨機応変なプログラム変更が可能であること等が挙げられる。今回の最大の利点は、適宜プログラムの修正が可能なことである。これにより、一部の完成した付帯設備に対して、この設備を運転できる様にプログラムの修正を行い、実負荷を接続した動作確認試験が可能となる。このことにより、設備側のハード面の不具合を早期に発見でき、最終的な実負荷試験時の、未確認項目を極力減らし作業の戻りを防ぐことができる。

3 システム開発

JT-60SA 本体制御の開発は、JT-60SA 装置の全体組立工程に合わせて完了させることが重要である。組立工程に間に合わせるため、付帯設備の完成には合わせず、先行開発により計画を進めた。システム開発では、先ず、制御システムを構成する機器を手配するため、開発コンセプトに沿って必要とされる機能を実現するための制御システムの検討を行い、仕様を満足する機器の選択を行った。以下に検討内容と制御システムの構成を述べる。

3.1 本体プラント監視システム

JT-60SA 本体制御は、「HMI の強化」、「信頼性の高い汎用機器の採用」、「自営開発による開発の自由度とコスト低減化」を目的とし、主幹制御監視システムである本体プラント監視システムに当該機能を実装する。監視される側の付帯設備は、本体装置を中心に周辺設備室に分散したシステム群であり、これらを本体プラント監視システムにより集中的に監視制御する。SCADA システムは、分散したシステム群の集中管理に最適化されており、通常 HMI 機能も充実したものとなっている。さらに汎用ソフトウェアであることから、PLC 等との接続に関しては、手厚いサポートが得られることが期待できる。このため、自営作業によるシステム製作の計画に合致している。

さらに、現在において、様々な SCADA システムが購入可能になっている。今回は、『Schneider 社の Citect』という製品を選択した。選択理由を以下に示す。

- 1) PLC 等分散したシステムとの通信に必要なドライバが、制御対象毎に購入する必要が無く、標準で備わっている。
- 2) ヒストリー機能(過去に収集した運転データを表示する)等の HMI 機能が充実している。
- 3) システム構築に必要な SCADA システムの全ての機能が内包しているため、追加コストや追加手配による開発計画の遅延を防ぐことができる。また、運用後においても、システムの拡張性、冗長性(I/O サーバー、トレンドサーバーの分散処理)も可能となっている。
- 4) 開発ライセンスによるシステム開発が可能である。正規品は、購入時に入出力点数を指定しなければならないが、開発ライセンスを用いることで、開発を進めてから、実際の入出力点数に見合った正規ライセンスを購入することができる。
- 5) 標準装備されている Citect 固有のプログラム言語 : Cicode/CitectVBA やレポート処理を利用し、SCADA システム内の運転データを外部プログラムで運用可能である。

3.2 本体付帯設備制御システム

本体プラント監視システムの下運用される本体付帯設備制御システムは、優れた自律性により、本体装置の健全性を保持するため、付帯設備が通常運転の状態に保持されるように自動制御され、かつ、連続運転し続けなければならない。このため、汎用性が高く自動制御における信頼性が非常に高い PLC を用いて、付帯設備の制御を構築していく。また、今回の自営による改修作業においては、設備側の要求による制御ロジックの修正が予想され、PLC でのプログラム変更により、容易に制御ロジックが変更可能であることは重要である。

今回の改修範囲については、設備側の大幅な改修に伴い、既存のリレー回路によるシーケンス制御部や旧システムのプロセス I/O 部を含めた全ての設備

との取合い箇所に対して PLC を採用する。実装する PLC については、『横河電機製 FA-M3V シリーズ』とした。選択理由を以下に示す。

- 1) CPU が二つあり、独立した処理を行っている。
ノイズ等の環境の良くない場合でも、プログラムのクロスチェックを行い、エラー個所の書き戻しを行う。
- 2) CPU やネットワークモジュールを 2 枚実装できることや、光 FA バスのループ接続により、システムの冗長化が容易である。
- 3) FA リンクにより独立した PLC 間のデータ共有が容易である。

3.3 全体システム構成

JT-60SA 本体制御システムのシステム構成を図 2 に示す。本体プラント監視システムを中心に、本体付帯設備制御システムがローカルネットワーク (LAN) によって接続される。本体付帯設備制御システムは、真空排気設備、ベーキング・ガス循環設備、一次冷却設備、ガス注入装置、グロー放電装置で構成される。各設備の制御システムは、設備毎に CPU

を搭載した PLC の親機を持ち、設備に対して独立した運転制御を行う。このうち、真空排気設備、ベーキング・ガス循環設備及び一次冷却設備においては、親機と子機が離れているため、親機—子機間の接続に「光 FA バス」を通信方式に用いることとし、ループ接続することにより冗長化も図っている。真空排気設備 PLC においては、設備内に三つの系統が存在するため、系統毎に PLC 親機を持たせた。これらの系統では、運転中にバルブの開閉による配管の接続・切離しや保護動作を行うので、三つの PLC 親機間で相互の運転状況を把握する必要がある。このため、PLC 間を「FA リンク」により接続し、相互の情報交換を行える様にした。また、SCADA システムと各 PLC 間の LAN 内の通信量を低減するため、設備運転の補助や保守に使用する作業用 PC やタッチパネルの接続は、SCADA システムと別系統の LAN に接続することとした。

JT-60SA 全体の運転、特に実験運転での制御に関しては、統括制御システム主導で制御され、実験関連のデータ収集に関しては、実験 DB(データサーバー)にて管理されている。統括制御システムと実験 DB

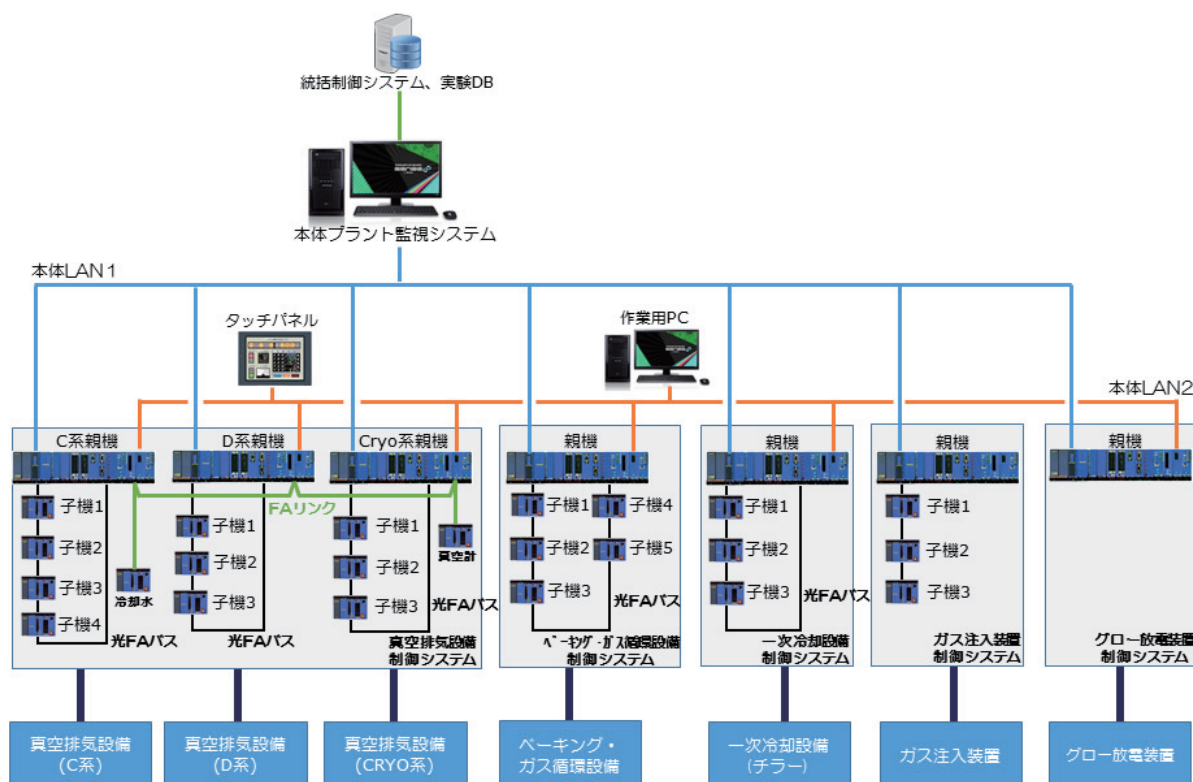


図 2. JT-60SA 本体制御システム構成

年度 四半期	H27			H28				H29				H30				H31			
	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	システム設計																		
2	機材調達																		
3	SCADAシステム開発																		
4	付帯設備プロトタイプ開発																		
5	通信プログラム開発(統括制御)																		
6	付帯設備システム開発																		
7	通信プログラム開発(実験DB)																		
8	デバッグ修正																		
9	実負荷試験																		

図3. 開発スケジュール

に対するデータ通信は、本体プラント監視システム内に通信プログラムを開発することで対応する。本通信プログラムの開発には、Citect に標準で搭載されている固有のプログラム言語(Cicode)とレポート処理機能を利用している。Cicode 或いはレポート処理機能を用いて、SCADA システム上の運転データを txt ファイル形式でハードディスク上に保存する。通信プログラムは、これを読み出し、運転データを加工し、指定された形式のデータを統括制御システム又は実験 DB へと送信する。統括制御システムと実験 DB に対する通信方法は、TCP/IP 接続によるメッセージ交信にて行う。その交信項目は、①設備側の運転状況が指定の運転状態を逸脱していないことの確認、②リアルタイムでの運転状況把握のためのプロセスデータの送信、③警報データの送信、④時系列データ構築のための運転データの送信である。

4 開発状況

開発スケジュールを図3に示す。H27年度からシステム開発を開始している。H28年度中には、開発に必要とされる機材を調達し、SCADAシステムとPLC間接続を行う付帯設備制御システムのプロトタイプの開発を行った。上位システムとの通信に関しては、通信プログラムによるSCADAシステムとのデータ共有方法の開発と通信プログラムの開発が完了し、統括制御システムと通信プログラム間でのリンク試験が完了した。

H29年度においては、H28年度に開発した付帯設備制御システムのプロトタイプを用いて、本体付帯設備制御用PLCの開発を行っている。

H29年度の目標は、各付帯設備制御PLCに対する入出力試験を実施することである。入出力試験の条

件は、SCADAシステムからの操作が行えること、タッチパネルから各機器に対する操作が行えること、これらの操作に対して、PLCが正しく動作すること、PLCへの模擬入力に対して、SCADAシステムとタッチパネルに対して、正しく情報が表示されることを確認する。通信試験の試験状況を図4に示す。端末からの入出力確認を本体プラント監視システムとタッチパネルで、PLC(設備側)の入出力確認をPLC開発画面で行っている。本試験においては、入力点数1,680点、出力点数777点について動作確認を実施する。

H30年度以降は、制御ユニットの組み付けと設備との接続を実施し、完成或いは部分完成をした付帯設備に対して、順次、実負荷試験を実施していく予定である。



図4 入出力試験状況

5 まとめ

核融合の早期実現を目指した超伝導核融合実験装置(JT-60SA)の建設において、JT-60SA本体制御は、複数の付帯設備の運転に係る情報量が増大し、これ

らの情報量を制御室の運転員に瞬時に提供するシステムとして開発を行っている。本システムの開発コンセプトである「ヒューマン・マシン・インターフェイス(HMI)の強化」のため、「信頼性の高い汎用機器(SCADA、PLC)を採用」し、本体プラント監視システムの監視機能の充実や付帯設備 PLC の構築を進めている。システム開発は順調に進み、プログラム開発が終了し、PLC の入出力試験やデバッグを実施している。

今後は、実負荷試験に向けた制御ユニットの制御盤への組み付けを実施し、デバックの一環として製作した制御ロジックを検証するためのシーケンス試験を繰り返し行っていく。

JT-60SA 大口径観測窓保護システムの設計と摺動部の耐久性評価

○本間寛人^{A)}、大山直幸^{A)}、東條寛^{A)}、根本修司^{A)}、濱野隆^{A)}

^{A)} 量子科学技術研究開発機構 (QST 那珂) 先進プラズマ実験グループ

概要

大口径観測窓を保護するため、垂直開閉式シャッターシステムの開発を行っている。大きくて重いシャッターを小空間で確実に上下させるため、ローター（樹脂製シーブ／セラミック製ベアリング）とステンレスワイヤーの適用を検討している。設計したローターに対して摺動試験を行い、JT-60SA の 20 年分の運転に相当する十分な耐久性があることが分かった。加えて、設計したローターからのガス放出量の測定を行い、JT-60SA の真空容器の到達圧力に影響を及ぼすことのない十分な清浄性があることが分かった。

1 背景

JT-60SA や ITER のような大型の超伝導トカマクではプラズマを詳細に測定するために、ポートプラグと呼ばれる長尺な筒をクライオスタットから真空容器へと挿入する（図 1）。多くの計測機器はポートプラグ先端に据え付けられた観測窓を通してプラズマ近傍から測定を行い、非計測時にはポートプラグ先端に据え付けられたシャッターを閉じて観測窓への不純物付着防止を図っている。JT-60SA におけるポ

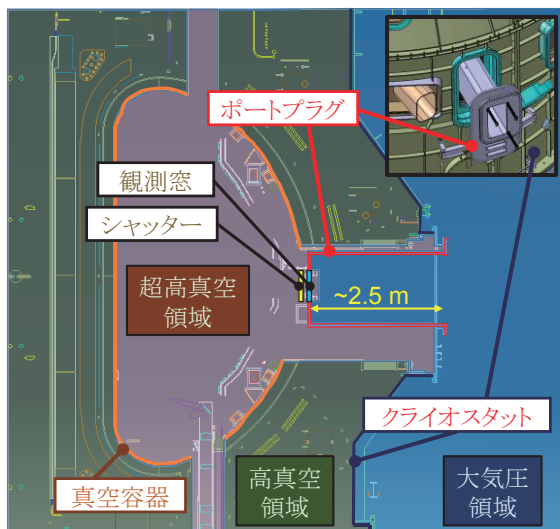


図 1. ポートプラグをクライオスタットから真空容器内へ挿入する

ートプラグの中でもトムソン散乱計測器が用いるものは最大で、有効径 $\phi 335$ mm の大口径観測窓に加え、幅 0.6 m × 高さ 0.3 m かつ 3 kg 程度のシャッターを備えている。このシャッターを小空間で垂直開閉させられるよう、ワイヤーガイドを用いて $\phi 1.05$ mm の SUS304 製ステンレスワイヤーを配線し、駆動を行う。これまでは、ワイヤーガイドとして SUS304 製のステンレス蒲鉾型ガイド（表 1 上段）を検討していた。し

表 1. 蒲鉾型ガイド（上段）、ローターA（中段）、及びローターB（下段）

外観	部品	材質
	蒲鉾型ガイド	SUS304
	シーブ	PEEK
	ベアリング	ZrO ₂ (内外輪) PEEK (保持器) Si ₃ N ₄ (玉)
	シーブ	PEEK

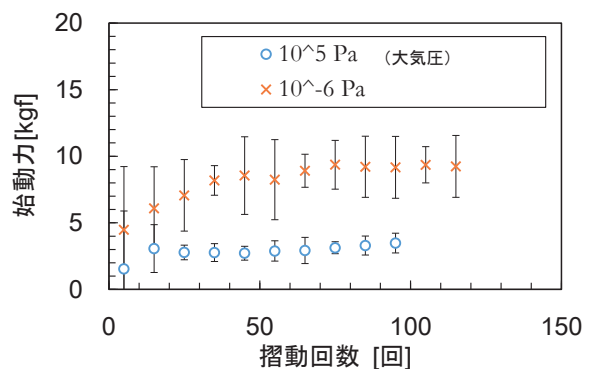


図 2. 蒲鉾型ガイドでの始動力測定

かし真空環境下での試験の結果、図 2 に示すように回数を追うごとに始動力（シャッターを始動するのに必要な力）が大きくなり、ワイヤー素線が破断した。これは同種金属同士の間大きな摩擦が発生したためと考えられる。そこで現在、蒲鉾型ではなくローターA（表 1 中段）を用いることを検討している。ローターA はシーブとベアリングからなる。真空環境を汚さずかつ強磁場環境下で使用するため、真空において清浄性が高いと言われる PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）樹脂並びに ZrO_2 （ジルコニア）及び Si_3N_4 （窒化ケイ素）のセラミックを選択した。本研究では、ローターA の摺動耐久試験と清浄性の指標となるガス放出の測定を行った結果を報告する。

2 実験装置

実験及び結果の比較に用いた蒲鉾型ガイド、ローターA 及びローターB の仕様は表 1 中段下段の通り。摺動耐久試験は図 3 に示すように、実際のシャッター機構を模擬した装置を用いて実験を行った。エアシリンダーに取り付けたワイヤーに、ローターを介してシャッター模擬錘を吊り下げ、エアシリンダーを周期的に駆動させた。シャッター模擬錘を上下させた後、フォースゲージを用いて始動力を測定した。始動力の荷重依存性と圧力依存性を確認するため、錘の重さ及び真空チャンバー内の圧力を変えて測定を行った。得られたデータについては、シャッター模擬錘の重量、ベローズのバネ力及び面圧を取り除いたものを始動力（シャッターを始動するのに必要な力）とする。始動力は 10 回の程度測定の平均を取った。摺動耐久試験を行うことで試験装置内部の摩擦

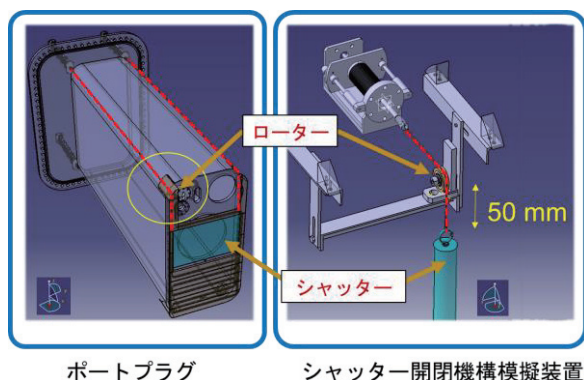


図 3. シャッター開閉機構の模擬装置

力の増加が懸念されるが、実験の前後でのバッググラウンド（錘を外した状態での始動力）測定を比較しても有意な変化がなかったため、無視できると考えられる。圧力が $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Pa となる範囲では試験装置の駆動に必要な力はほとんど変わらなかったことから、実験条件を 10^{-5} Pa 周辺として実験を行った。

JT-60SA の真空容器内は高真空～超高真空環境下にあり、ガス放出量が真空容器の到達真空度に影響を及ぼすことのない量であるかを評価する必要がある。JT-60SA では真空引きを開始してから 20 時間後の単位面積当たりのガス放出量が 1.3×10^{-6} Pa $m^3/s m^2$ 以下となることを真空管理基準としている。ローターA のガス放出量について、図 4 に示す小型チャンバーを用いて測定を行った。ガス放出量の測定には、ビルドアップ法よりも厳しく材料特性を評価できるスループット法を用いた[1]。まず小型チャンバー内が空の状態での小型チャンバーの実効排気速度の測定を行った。次に、小型チャンバー内が空の状態での 20 時間後のガス放出量をバッググラウンド（BG）として算出した。ローターA がある状態でのガス放出量を測定し、BG を差し引くことで実質的なガス放出量を算出した。

3 実験結果

3.1 摺動耐久試験

図 5 は摺動回数に対する始動力の測定結果である。錘の重量を 3.0 kg とし、摺動回数の最初の 4000 回は周期を 24 秒、4000～8000 回で 12 秒としたが結果に差が見られなかった。そこで 8000 回からは周期を 12 秒に固定して 16000 回まで摺動試験を行い、始動力

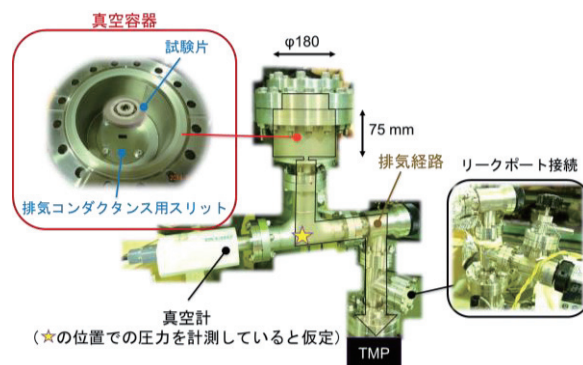


図 4. 小型チャンバー

がほぼ一定となることが分かった。シャッターの要求仕様は装置のメンテナンス周期を考慮して、4000回以上（1日4回×200日×5年分）としている。従って、ベアリング（ローターA）を使用することによって、JT-60SAの20年分の運転に相当する16000回でも始動力がほぼ一定となると分かった。次に錘の重さを3.0 kgから4.5 kgとして16000~32000回まで実験を行ったが始動力はほぼ一定であった。さらに、錘の重さによるベアリングへの荷重が耐荷重（約8 kg）にほぼ等しくなるよう、錘の重さを6.0 kgとして32000~36000回まで実験を行ったが、始動力はほぼ一定であった。従ってローターAは少なくとも5年間（4000回）は、6.0 kgまでの荷重であれば始動力はほぼ一定（約0.5 kgf）となることが分かった。

摺動試験の後、ワイヤー痕がシーブに確認されたが、痕の広がりはなく、摩耗粉の発生も確認できなかった。この結果は、ワイヤーがシーブの溝の上で滑らず、かみ合って動いていたことを示唆している。ワイヤーとシーブには他の異常は確認できなかった。

一方でベアリング無しのローターBについて測定を行ったところ、12000回周辺で始動力が約0.5~1 kgf

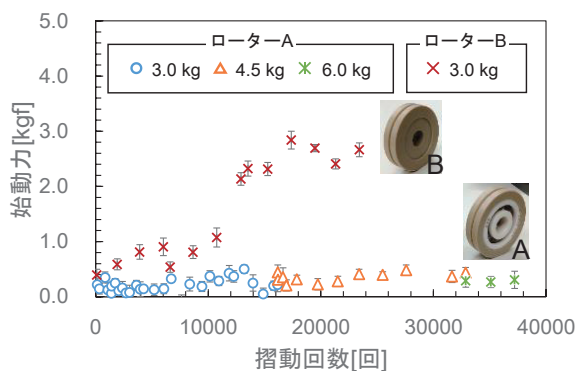


図5. ローターA及びローターBの始動力測定

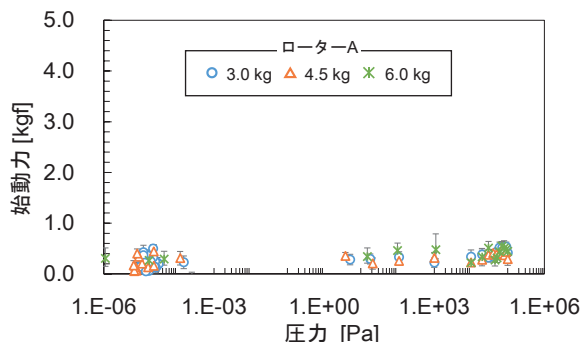


図6. 始動力の圧力依存性

から約2 kgfまでジャンプする現象が見られた。これは、ワイヤーがシーブの溝の上で滑っていたために、摩擦が増大したからだと考えられる。シーブの溝に摩耗痕や摩耗粉が発生しており、シーブはロックして動かない状態であった。したがって、ワイヤーとシーブの溝の間で摩耗が発生していたと考えることができ、始動力にジャンプが発生した時、ローターBがロックしたことを示唆している。

ローターの測定された始動力を、実験環境の圧力を横軸として表示したものを図6に示す。一般的に、大気圧環境下と比較して真空環境下では真実接触面積が増大し、摩擦力が大きくなる。これは、図2の結果からも確認ができる。しかし図6の結果から、ローターAでは周囲の圧力に関わらず、始動力がほぼ一定となると考えて使用できるという事が分かった。

3.2 ガス放出の測定

小型チャンバーは完全に気密であると仮定し、ターボ分子ポンプ(TMP)による主排気中に一定のガス放出量 Q [Pa m³/s]があると仮定すると、排気方程式から式1が導出できる。一般に、ガス放出の分圧は初期圧力よりも十分に小さく、 $p_0 \gg Q/S$ であるから式2が成立する。更に、容器内圧力よりもガス放出の分圧が十分小さい場合に、 $p \gg Q/S$ より式3が成立する。到達圧力 p_f を用いてガス放出量 Q は式4となる。従って、小型チャンバー内に試験片を入れた場合、求めたい試験片のガス放出量 Q_{test} は式5となる。

$$p = (p_0 - Q/S) \exp(-St/V) + Q/S \quad (1)$$

$$p = p_0 \exp(-St/V) + Q/S \quad (2)$$

$$p = p_0 \exp(-St/V) \quad (3)$$

$$Q = p_f S \quad (4)$$

$$Q_{\text{test}} = (p_{f,\text{test}} - p_{f,\text{BG}})S \quad (5)$$

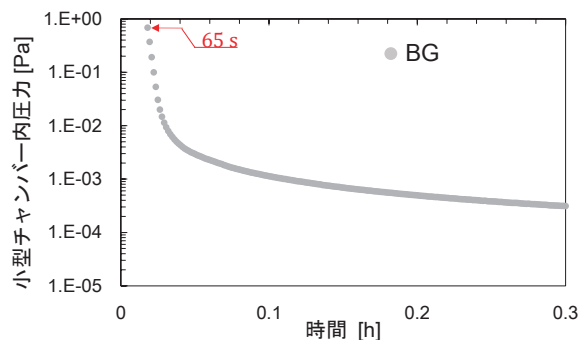


図7. BG圧力の時間変化

実験装置の実効排気速度は実測した図 7 のバックグラウンドデータ (BG) から算出した。圧力が直線的に下降するところでは壁からのガス放出量が無視できると仮定すると[2]、式 3 が成立する。65 s を初期圧力 p_{f_BG} ($=6.8 \times 10^{-1}$ Pa) とすると、90 s (3.1×10^{-2} Pa) までの実効排気速度は $8.7 \times 10^{-5} \sim 9.1 \times 10^{-5}$ m³/s の範囲にある。平均値 9.0×10^{-5} m³/s を実測した実効排気速度とする。

データの信頼性を確認するため、10 時間後の BG 測定結果をこれまでの測定結果[3]と比較した。図 8 に BG のグラフを示す。10 時間後の値は取得できなかったため、線形補完して算出した値を用いて計算を行った。式 4 より、10 時間後の到達圧力 (2.4×10^{-5} Pa) と実効排気速度の積で表される。小型チャンバの内表面積は 4.4×10^{-2} m² なので、BG の単位面積当たりのガス放出量は 4.9×10^{-8} Pa m³/s m² と算出した。小型チャンバの素材である SUS304 電解研磨の文献値は 3.8×10^{-8} Pa m³/s m² であることから、今回測定した値には信頼性があると考えられる。

BG 測定と同様のプロセスにより、BG を差し引いた 20 時間後のローターA のガス放出量を求める。図 8 から、ガス放出量は 1.4×10^{-8} Pa m³/s であることがわかった。ポートプラグの表面積を 20m²、SUS304 製であると仮定すると、ポートプラグからの放出ガス量は 2.6×10^{-7} Pa m³/s となる。よって、ベアリングを 6 個取り付けると仮定すると総ガス放出量は 3.4×10^{-7} Pa m³/s であると見積もることができる。したがって、単位面積当たりのガス放出量は、ポートプラグの表面積で除して 1.7×10^{-8} Pa m³/s m² となる。これは真空管理基準である 1.3×10^{-6} Pa m³/s m² よりも小さい。従

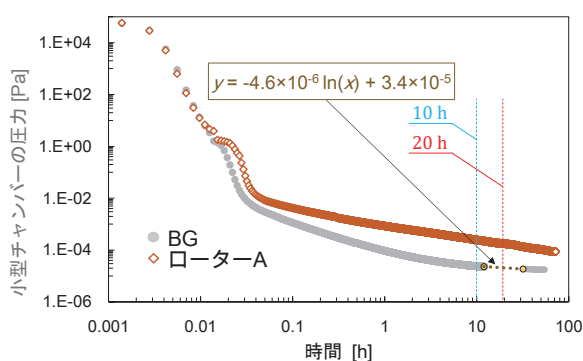


図 8. 小型チャンバ内の圧力の時間変化

ってローターA は JT-60SA の真空容器内で使用できることが分かった。

4 結論

ローターの耐久試験により、次のような有用な知見を得た。要求仕様である開閉動作 5 年分 (4000 回) だけでなく、JT-60SA の予定稼働年数である 20 年分 (計 16000 回) の往復摺動試験に置いても、ワイヤー、シーブ、ベアリングのいずれにも損傷が見られず、摩擦特性も変化がないことから、耐久性に関して十分な強度を有していることが分かった。

また、ローターA の始動力は、0.5 kgf 程度で一定となること。ローターが何らかの事情 (例えばダストの付着や破損) によって動かなくなった場合、始動力は 2kg 程度まで上昇し、これはローターの異常検知に使えること。つまり、真空容器の外からローターの状態を間接的に診断することができる。さらに、ワイヤーではなくローターのシーブが摩耗していくこと。ローターが摩耗した場合でも、ローターは壊れず、ワイヤー素線の破断もすぐには発生しないこと。従って、SUS304 製のワイヤーと PEEK シーブは適切な組み合わせであることが分かった。

さらに、今回設計したローターA からのガス放出量の測定の結果、JT-60SA 真空容器の超高真空環境下で使用可能な十分な清浄性があることが分かった。

5 今後の課題

ポートプラグ先端が冷却される実環境を想定し、本実験は温度環境を考慮せずに室温にて実験を行った。ローターA には PEEK を使用しているため、ガラス転移点である 140~150°C 以上での使用については試験により評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] K. Akashi, J. Plasma a fusion Res., Vol79, No.5(2003),pp520.
- [2] 第 51 回真空夏季大学 演習 I, II, III 問題解答 2011 年 日本真空協会 p16.
- [3] ULVAC, Inc. (2002). 真空ハンドブック、神奈川日本：オーム社.

COMET 実験用タングステンシールドの開発

○牧宗慶、亀井直矢、山野井豊、鈴木純一、深尾祥紀、江並和宏、飯尾雅実、

吉田誠、三原智

高エネルギー加速器研究機構

概要

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、大強度陽子加速器 J-PARC を用いて行われる、COMET 実験「Phase-I」の平成 30 年度の開始を目指し、ミュオンビームラインや実験装置の建設^[1]を進めている。実験では大強度の陽子ビームを用いた、二次粒子としてのパイ中間子生成に伴い、中性子や、その他の放射線が発生する。この放射線によって、超伝導電磁石内の超伝導コイルがクエンチ (超伝導状態の消失) しないように、タングステンシールド (タングステン合金製の放射線遮蔽体) を、パイ中間子生成標的の外周に設置し、放射線を遮蔽する。本発表では、このタングステンシールドの設計と、製造方法に関する検討結果について報告する。

1 COMET 実験

COMET 実験(Coherent Muon to Electron Transition) は、ミュオン稀過程の一つである「ミュオン - 電子転換過程」の探索を行う実験^[2,3]で、茨城県東海村 J-PARC のハドロン実験ホールにおいて実験用ビームラインを建設中である。COMET 実験装置概観を図 1 に示す。J-PARC の主リングから 8 GeV の陽子ビームをパイ中間子生成標的に照射し、発生したパイ中間子をパイ中間子捕獲磁石で捕獲する。パイ中間子は、180 度湾曲ソレノイドから構成されるミュオン輸送磁石内部でミュオンに崩壊する。このミュオンを効率良くミュオン静止標的に輸送して、実験に使用する。実験は「Phase-I」と「Phase-II」の 2 段階に分けて計画されており、放射線シールドは Phase-I 実験から必要とされるが、本検討では Phase-II 実験に必要なフルビームでの実験を想定して検討を行っている。フルビームを想定して設計を行う理由

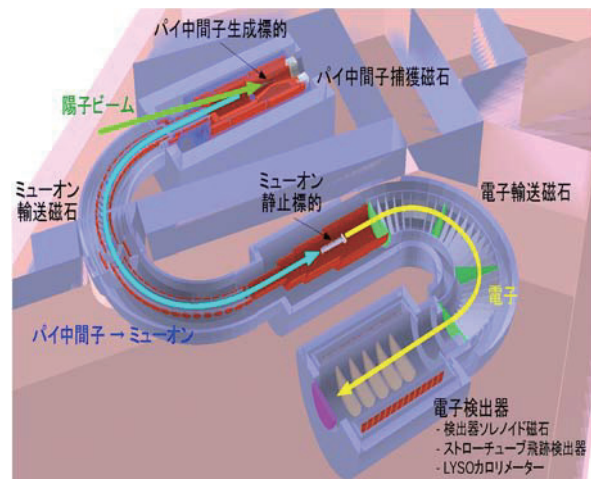


図 1 . COMET(Phase-II)実験装置概観

は、Phase-I 実験において、一度ビームを通してしまうと、放射線シールド及び周囲の実験装置は、僅かでも放射化物となる為である。この様な環境下で、Phase-II 実験に向けた改造作業を行うには、放射線作業に対する安全管理や、放射化物を扱う為の特殊重機と作業空間の確保が必要となり、その作業コストは同様の経験からして、非常に大きくなるといった問題がある。

2 タングステンシールド設計の要点

パイ中間子生成標的周り概観を図 2 に示す。Phase-II 実験において使用する一次ビームは 8 GeV 陽子ビーム (ビーム強度 56 kW) であり、パイ中間子生成標的 (グラフィイト標的) に当てて二次粒子を生成させる。その際、放射線シールドへの放射線による熱負荷は、おおよそ 22 kW になると見積もられている。この熱負荷が超伝導電磁石にかかると、内部にある超伝導コイル部 (図 2) のクエンチを引き起こす。これを防ぐ為に、タングステンシールド (Wシールド) を超伝導電磁石とパイ中間子生成標的の間に設置し、

この放射線を遮蔽する。遮蔽材としてタングステン合金を採用する大きな理由としては、タングステン合金が高密度の材料で、熱伝導率が高い事が挙げられる。この特性から、狭小空間での放射線遮蔽性と、熱負荷に対する冷却性に優れた材料と言える。以下にシールド設計の重要ポイントを挙げるが、タングステン合金は、これら条件にも合致する材料である。

1.使用する材料は非磁性であること（パイ中間子収束用の超伝導電磁石の磁場空間内（最大磁場 5 テスラ）に設置される為）、2.使用する材料は耐放射線性に優れていること（強度低下、熱伝導率低下）、3.構造物の外径寸法は超伝導電磁石内径φ1.2 m以下であること、4.構造物全体での平均比重が 16 以上を有すること（放射線遮蔽）、5.生産面や経済面において調達可能であること、6.遮蔽及び締結や構造用に用いる材料についても熱伝導率や引張強さ等の物性に優れていること、7.冷却条件が成立すること（水冷の場合は放射線によるトリチウム水の生成が問題となる為、冷却管は出来るだけ標的から離れた場所に配置し、少ない水量で効率的な冷却を行わなければならない）等が挙げられる。以上の条件から構造体寸法は、外径φ1.18 m、内径φ0.24 m、全長 1.82 mの中空円筒形で、重さは約 30 ton（使用するタングステン合金は約 25 ton）となる。また、コスト削減を考慮して、パイ中間子生成標的に近いエリア（電磁石超伝導コイルに放射線の影響が及ぶエリア）にはタングステン合金を用い、それ以外のエリアには銅またはステンレスを用いる事を検討している。

3 タングステン合金とシールド構造

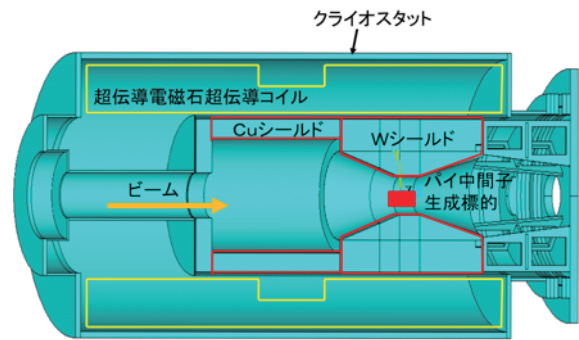


図 2. パイ中間子生成標的の周り概観

タングステン合金は一般的に、一塊で数 100 kg 以上のものを製造することが困難である。その為、タングステンシールドは分割構造となる。構造材及び締結材としては、タングステン合金の他に、ステンレス (SUS304)、銅 (C1020)、鉛の使用を検討している。調査を行ったタングステン合金の物性値として、一例を挙げると、比重：17~18、熱伝導率：104 w/m・K、引張り強さ：620 MPa、熱膨張率：5.6 x 10⁻⁶/°Cといった製品がある。表 1 には、これまでに調査を行ったタングステン合金製造に関する情報の一部を、図 3 には現在検討しているタングステンシールドの分割方法を示す。表 1 からわかるように、製造メーカーによって、製造可能寸法や完成時の寸法精度等の特徴が異なっており、これは製品の物性についても同様である。海外メーカーの場合は大径のタングステン合金の製作が可能で、大径円板や長尺板形状のタングステン合金を用いた分割構造が可能である。また、部

	大径円板	長尺板	集成ブロック
部品形状	大径、薄板円板	長尺、薄板	小径タングステン合金片を寄せ集めてブロック化
製造メーカー	△	△	◎
部品数	少	少	多
冷却効率	◎	◎	○
平均比重	◎	◎	○

図 3. タングステンシールドの分割方法

表 1. タングステン合金生産情報

	比重	生産情報
A 社	17~18	最大直径 300mm, 最大板厚 50mm, 最大重量 64kg, 月産 240 個
B 社	17.2	連続ホットプレス成型, 少変形量, 短期間製造可能, 最大面積 620mm ² , 最大板厚 25mm, 最大重量 25kg
C 社	18	最大寸法 30mmx30mm, 最大板厚 20mm, (過去実績 600mm×500mm)
D 社	18	最大直径 1.6m, 最大重量 4ton (中国), 20ton 製造/3ヶ月

品数が少なくなる為、冷却効率(熱伝導率)が良く、構造設計や機械加工の工数も削減でき、コスト面において有利になると予想している。ただし、品質や調達、輸送コストの面については、現状において不確定な部分がある。一方、国内メーカの場合は、海外メーカに比べると製造能力や品質面についての不安要素は少ない。しかし、製作可能寸法が小径である為、多数のタングステン合金片を用いる必要がある。この場合は集成ブロックを用いた分割構造を考えており、現在、その製作方法の開発に向けた試作検討を行っている。これについては次章で述べる。またタングステン合金の周囲には、冷却用に冷却水配管が設置される。その施工方法については、最適化を始めた段階ではあるが、長尺のタングステン合金を用いる場合は、冷却水配管を銅もしくはステンレスの板にろう付けまたは HIP(熱間等方圧加圧法)によって接合して冷却板を作り、これをタングステン合金の表面に密着させることで十分な冷却性能が得られることを確認している。

4 タングステン合金の集成ブロック化

集成ブロック概観を図4に示す。小径のタングステン合金片による製作の場合は、多数のタングステン合金片を組合せて集成ブロックを作った後、構造体として組立てる事を検討している。集成ブロック一個当たりの重量は 250 kg 程度を想定しており、その場合の製作総数は 250 個、使用するタングステン合金片は約 1000 個 (25 kg/個の場合) となる。現在

複数のメーカと協力して、集成ブロックの製作方法の開発を進めている。集成ブロックの製作方法としては、ステンレスの容器の中にタングステン合金片を積み重ね、HIP もしくは鑄ぐるみによって集成ブロック化した後、機械加工によって外形を整える方法を考えている。また、中性子の性質上、間隙または密度の薄い箇所に沿って外に飛び出す事から、集成ブロック内のタングステン合金片は、位相をずらすか、直交して積み重ねる必要がある。HIP は、圧力容器内に被処理体を設置し、数 100 °C~2000 °C の温度と 10 MPa~200 MPa の等方的な圧力を加える事で、拡散現象により接合する方法である。これにより集成ブロック全体が無垢に近い固体となり、間隙も無く、熱伝導や機械強度面で優れた製品が期待される。開発状況としては、50 mm 角程度の試験片の製作が終わり、これから強度試験を行う予定である。一方、鑄ぐるみによる製作の場合は、焼結後のタングステン合金片を機械加工することなくステンレス容器の中に積層し、そこに溶けた鉛を鑄込む。その為、タングステン合金片に対する工数を大幅に削減する事ができ、鉛が隙間に充填されることで、部品間の熱伝導にも期待できる。こちらの開発状況については、タングステンの特性上、金属表面の濡れ性が悪く、鑄ぐるみ材(鉛)が密着しない事が課題となっていたが、いくつかの化学的、機械的表面処理を試した結果、タングステン合金片への銅メッキの施工が可能となっ

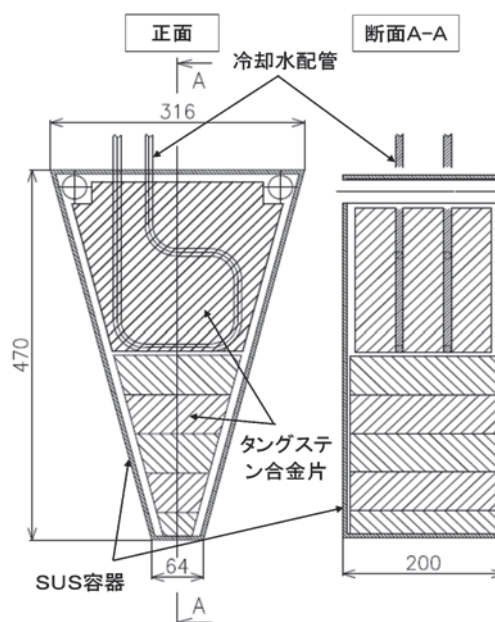


図 4. 集成ブロック概観

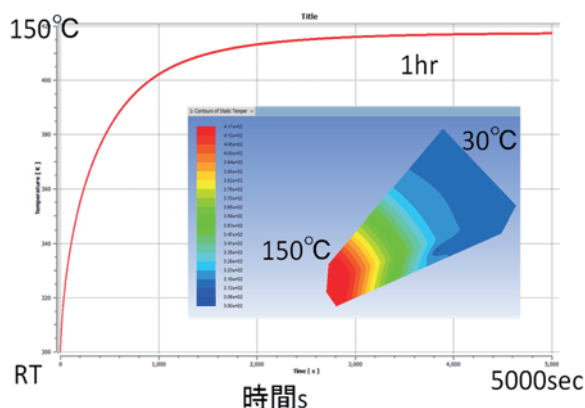


図5. タングステン合金片の標的周辺間接水冷時の温度分布

た。近日中にメッキ処理した試験片に対する、鑄ぐるみ材の濡れ試験を実施する予定である。それぞれにかかるコストについては、HIP の場合、専用炉（炉毎に処理能力やコストが異なる）を使う為、いかに効率良くブロックを処理出来るかがポイントとなる。また、HIP 処理時のタングステン合金片についても、焼結後のタングステン合金片をそのまま使うのか、または機械加工が必要なのか（寸法誤差や歪がどの程度許容されるのか）といった点が、工数の大幅増に直結する為、重要なポイントである。鑄ぐるみの場合、タングステン合金片のメッキ処理から鑄込み作業、機械加工といった工程の中で、どれだけの工程を簡略化できるのかが重要なポイントとなる。また、鑄込み作業工程の具体的な検討が今後必要である。集成ブロックの冷却方法としては、冷却板を、タングステン合金片の間に挟み、冷却水を循環させる事を検討している。この方法による冷却性能を、検証する為に行った簡易解析の結果として、タングステン合金片の標的周辺間接水冷時の温度分布を図5に示す。この図は、3/8 インチの冷却水配管入口から、27 °C、流速 3 m/s の水を流した時の、標的に一番近いタングステン合金片の温度分布を示している。結果は、タングステン合金片の最高温度が約 150 °C、出口側の冷却水温度が 27 °C、冷却水配管の壁面最高温度が 39 °Cであった。この結果から、簡易の解析ではあるが、現在検討している冷却方式をもって、フルサイズのビーム運転が始まっても、十分に安全な冷却効果を発揮し、熱負荷に対する安全性を保てる事が示されたと言える。

5 まとめと今後

タングステン合金製造メーカーについて、生産情報や製品特性等についての調査を行い、構造設計や熱設計、製作方法等への反映を様々なパターンで検討している。特に現在は鑄ぐるみと HIP を用いた小径のタングステン合金片での集成ブロックの製作方法について開発を進めている。HIP による検討については、50 mm 角程度のブロックが完成し、これから強度試験や切断面の観察を行う。一方、鑄ぐるみによる検討については、タングステン合金片と鑄ぐるみ材との密着性が課題となっていたが、タングステン合金片への銅メッキの施工が出来るようになった為、近日中に鑄ぐるみ材に対する濡れ性の試験を行った後、強度試験や切断面の観察を行う。また、各材料の熱収縮率の違いが、熱伝導や機械構造面においてどの程度影響するのかといった懸案事項が残ってはいるが、上記の試作検討の結果から、小径のタングステン合金片によるタングステンシールドの製作については、ある程度の目処がついたと言える。最終的なタングステンシールドの設計製作においては、コストと並んで、調達するタングステン合金片の大きさが重要なポイントになる。今後は、HIP 及び鑄ぐるみによる、集成ブロック製作工程の、具体的な検討を進め、タングステン合金の調達に関する調査も引続き行う。これと並行して、タングステンシールド構造体の具体的な構造設計（組立方法、構造解析等）を進め、冷却方法についても詳細な熱解析を行うと共に、モックアップを用いた、熱伝導率の測定や冷却試験等を行う予定である。

参考文献

- [1] 深尾祥紀、高エネルギーニュース **34-1**、pp.29-36(2015)
- [2] <http://comet.kek.jp/Introduction.html>
- [3] <http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/research/r001.html>

低被曝 RI 製造システムの構築と

リアルタイム電子ビーム計測システムの開発

高橋 健

電子光理学研究センター

概要

電子光理学研究センターでは電子加速器からの大強度電子ビームを用いた放射性同位体(RI)製造を行っており、製造した RI は核壊変特性の研究、放射化分析、化学トレーサーや核反応断面積・収率の研究開発に利用されている。従来の RI 製造システムは実験中の被曝が避けられない構造で、またビームモニターなどが不足していたため、照射する電子ビームの状態を確認することが難しく再現性や RI 製造効率に課題があった。そこでこれらの課題を解決するために低被曝 RI 製造システムとリアルタイム電子ビーム計測システムを開発した。

1 RI 製造システム

電子加速器を用いた RI 製造では、加速した電子ビームを標的の上流に設置した金属製のコンバータに照射して、生成した制動放射線と標的の光核反応を用いて製造する。照射点は放射線発生装置のビーム損失点であり、制動放射線や中性子に対する十分な遮蔽が求められる。構築した照射室は地階にあり、

天井土盛りの遮蔽厚と管理区域境界までの減衰距離が十分あることから、照射終了後の標的交換やメンテナンス時の安全確保を目的として構築した。本照射室がある実験室は加速器運転中に立ち入り禁止区域となり、また照射終了後は実験室内の放射線量が低下したことを確認した後にアクセス可能となる。

照射室の遮蔽は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ などの大きさでユニット化された既存の遮蔽コンクリートブロックを組み合わせて実現する。照射室周辺のどの場所でも最低 1m 厚のコンクリート遮蔽が確保でき、かつ照射終了後に周辺で作業する利用者が常に高線量の照射点から隠れる遮蔽ブロックの配置を、3D モデルを用いて検討した。また照射点やビームラインの保守管理、標的搬出入口のために照射室内へのアクセス経路を 4 つ設けた (図 1)。標的搬出入機構を用いることで、標的の交換場所を照射点から照射室外まで伸ばし搬出時に照射点に身体を晒さない構造とすることで、これまで被曝が多かった標的交換作業時の被曝の低減を図った (図 2)。

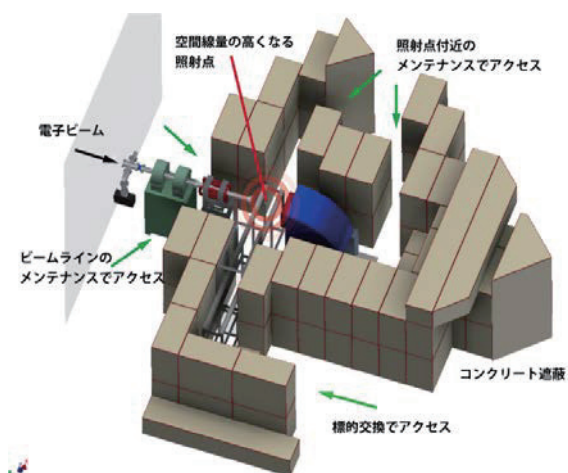


図 2. 照射室の 3 次元モデル



図 1. 照射点を取り囲むコンクリート遮蔽

2 開発中の照射装置

当センターのRI製造では照射条件に指定がない限り、標的の外径を試験管に封入できるΦ10 mm、コンバータと標的の間の距離を3 cmとしている。厚さ2 mmのタングステンや白金をコンバータに用いて、生成した制動放射線は角度広がりがおおよそ50 mrad、照射効率が57%程度であることが分かっている[1]。標的を近づければ製造効率が上がる一方、コンバータを透過した電子ビームによる標的への熱負荷が増加する。RI製造時のビーム強度は最大6 kWあり、コンバータの発熱は600W程度あり、純水で強制冷却している。コンバータと標的を同じ容器に収めて冷却している現在の照射装置では、コンバータは標的と一体となって移動する。構築した製造システムにより標的交換作業で照射点に身体を晒すリスクを解消したが、自身で発生した制動放射線によりコンバータも照射後は高線量となるため、照射した標的と共にコンバータを搬出する現在の照射システムでの主な被曝要因となっている。

そこで冷却の系統を標的とコンバータで分けて、コンバータはビームラインに固定し標的だけを搬出するシステムを考案して開発を進めている(図3)。コンバータは厚み1 mmのタングステン3枚を1.5 mm間隔で配置して、その間を冷却材である純水が循環するシステムとした。また、ビーム取り出し窓に用いたチタン箔大気側表面が電子ビームと空気との反応で発生するラジカルで変質する懸念があるため、コンバータとチタン箔の間に気密空間を設けて、ラ

ジカルの発生しないヘリウム冷却材の循環経路も同システムに設けている。

コンバータをビームラインに固定することにより被曝を軽減しつつ、同時にコンバータ入射前にビームが通過する物質が厚み30μmのチタンのみとなり、従来に比べて散乱などの影響が少ない電子ビーム照射が見込まれる。

3 電子ビーム計測システム

RI製造の照射開始前には必ずビームの軌道調整を行い、輸送途中の各所と照射装置に取り付けたスクリーンで電子ビームの位置やプロファイルを確認する。これまでアナログビデオカメラで撮影しスクリーン上で電子ビームのプロファイルから位置や大きさなどの確認を行っていたが、ビーム非同期の映像であったため定量的な軌道調整が行えなかった。

そこで、ビームと同期した画像を取得するために小型ゲート付きデジタルカメラを採用した。また発光のにじみを軽減するため、スクリーンの厚みを従来と比較して1/5である200 μmに変更した。従来はスクリーン上にあった罫線をホルダーの縁に設けて、ビーム計測に適したビームプロファイルモニターシステムを整備した(図4)。ビームライン架台の空きスペースを利用して構築した光学系により、画像の画素数とサイズの換算係数を事前に把握することができるので、高精度なビームサイズ測定が可能となった。またネットワークケーブルを介して電力供給をできるPower over Ethernet (PoE)を採用したことで、カメラの動作不良時にも加速器の運転を止めること

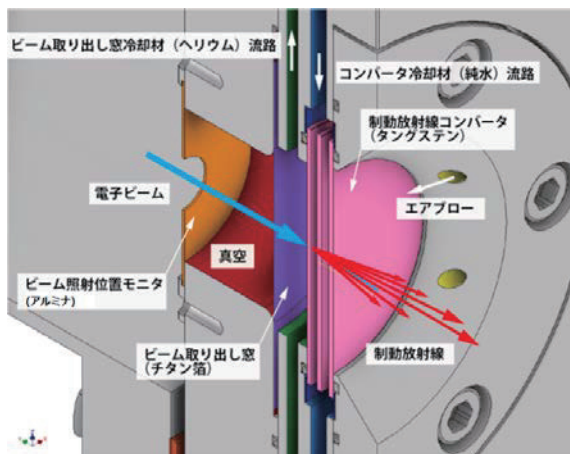


図4. コンバータ固定の新システム

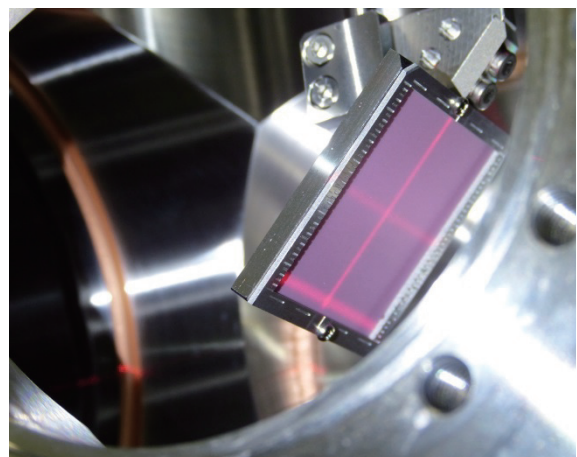


図3. 改良したビームスクリーン

なくカメラを再起動できるようになった。必要なケーブルがLANケーブルとトリガーケーブルのみとなり、ビームライン周辺の作業環境改善にも繋がった。

システムを構築したことでQ-Scan法によるビームエミッタンス測定が可能になり、加速後のビームパラメータは規格化エミッタンスがおよそ $80\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、ツイスパラメータは加速管出口でおよそ $\beta = 10 \text{ m}$ 、 $\alpha = -2.7$ であることが分かった[2]。

4 加速器と電子ビーム照射のリアルタイムな情報提供

照射点付近は放射線の影響で電子機器の長期運用が難しく、従来はビーム軸に張ったワイヤーを流れる電流を指標に照射の状況を確認していたため、ビームの空間情報を得ることが出来なかった。また、電子ビーム生成のためのカソードへ高圧印加やビームを加速するための高周波発生装置の立ち上げなど、さまざまな装置や機器の立ち上げと調整によりはじめて電子ビームの照射が可能になる加速器では、調整具合により操作が前後することも多く、これまでは立ち上げを担当するオペレーター以外が現在の運転シーケンスを把握することが難しかった。

そこで、加速器と電子ビーム照射の状況を視覚的に把握できるシステムを整備した(図5)。照射装置前面に設置した蛍光板は中心に標的と同じ大きさの $\Phi 10 \text{ mm}$ の貫通穴を設けてあり、標的搬入時にはビーム軸上に位置している。現在、ビーム調整後のビームサイズはガウス分布を仮定するとおよそ $\sigma = 2$ から 3 mm 程度で、ビームの空間分布で中心となる部分が

貫通穴を通過する際、ビーム全体の数%である裾部分により貫通穴の縁が発光する(図5①)。均等に縁を発光させるビームの位置調整を行うことで、以前のワイヤー電流値による調整と比較して視覚的なビーム調整ができるようになった。蛍光板と線量が比較的低い場所に設置したカメラを用いて観測するため、照射中でも連続してビーム位置のモニタが可能である。オペレーター以外の共同利用者でも照射位置が適切かどうか確認することができる。

運転シーケンスの視覚化には、現在立ち上げている機器と操作した順番により事前に定義した運転シーケンスの表示が遷移するプログラムを整備した(図5②)。これにより、オペレーター以外の共同利用者でも照射が開始されるまでに必要な運転シーケンスを簡単に把握できるようになった。また、RIの化学分離のため、制御室と化学実験室を行き来する共同利用者が一目で状況と進捗を把握できるように、照射の開始・終了時刻や照射時間(図5③)、照射量の指標となるビーム電流の履歴と運転パラメータの表示も整備した(図5④)。ネットワークを介して化学実験室で作業していても、照射状況を確認できるように整備を進めている。

5 まとめ

電子光理学研究センターのRI製造における作業者の被曝軽減を目的として、以前と比較して低被曝な製造システムの開発と加速器と電子ビーム照射の状況を視覚的に把握できるリアルタイム電子ビーム計測システムを整備した。数年の運用を通して表面化した標的搬出時の被曝を解消するため、現在ビームラインにコンバータを固定した照射装置の開発を現在行っている。当センター大強度電子加速器のビームパラメータを定量的に評価するために、空間プロファイル計測システムを構築して、現在は照射条件毎のパラメータ取りを進めている。

今後も当センターでの研究教育を発展させるための基盤の構築と安全な実験環境の整備を目指して業務を行っていききたい。



図5. 加速器・ビーム照射状況表示モニタ

参考文献

- [1] Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. August 1-3, 2017, Sapporo, Japan. PASJ2017 TUP008
- [2] Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan. PASJ2015 WEP004

JT-60SA に向けた NBI 制御システムの開発

○佐々木駿一、柏木美恵子、大楽正幸、坂本響、清水達夫、遠藤安栄、大関正弘、篠田明宏

(国) 量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

1 はじめに

(国) 量子科学技術研究開発機構では、JT-60U を超伝導コイル化する JT-60SA 計画を進めている。本計画において、JT-60SA の核融合プラズマを加熱する装置である中性粒子入射装置 (以下、NBI) では、計 34 MW のビームのパルス幅を定格の 10 秒から 100 秒の長パルスにすることが要求されている。合理的に本要求に対応するため、既存設備を最大限流用して、これらを改造・増力して目標を達成することが要求されている。制御システムについては、従来は専用ハードウェアと専用プログラムが用いられていたため、拡張性に乏しく、プログラムの変更等を行うのは容易ではなかった。また、JT-60 の運転開始から 30 年余りが経過しており、高経年化対策も課題であった。そこで、改造では、汎用品を用いた拡張性の高い制御システムに更新することとした[1]。

そこで、汎用の計算機、制御機器(National Instrument 社製機器と制御ソフト LabVIEW)、及び PLC(Programmable Logic Controller)から構成される制御システムを開発中であり、今回は、そのうちの JT-60SA の制御系最上位にある統括制御システムの一部との通信試験及び NBI の電源とのタイムシーケ

ンス試験を実施し、安定に通信することを確認した結果を報告する。

2 JT-60SA 用 NBI 概要

2.1 NBI 全体像

NBI は、図 1 に示すように、イオン源で高エネルギー・大電流のイオンビームを発生し、これを中性化セル内のガス中を通す際に中性粒子に変換し、強力な磁場で閉じ込められた核融合プラズマ内に入射してこれを加熱する装置である。主な構成機器は、イオン源、イオン源用電源、ビームライン、その補機設備 (冷却系、真空排気系、冷媒循環系)、受配電設備、及びこれらの制御系となる。JT-60SA に向けては既存の NBI を改造することで長パルス化を達成することとなっており、正イオン源 (85keV, 55A) を用いた NBI (P-NBI) と負イオン源(500 keV, 22 A)を用いた NBI (N-NBI) から成る。P-NBI は 1 ユニット (1 ユニットあたりイオン源 2 台) で 2 MW、計 12 台で 24 MW、N-NBI は 1 ユニット (1 ユニットあたりイオン源 2 台) で 10 MW、合わせて計 34MW の中性粒子ビームを発生する。

2.2 P-NBI 用制御システム

制御系の一例として、ここでは P-NBI の制御システムの概略を述べる。図 2 に示す構成図は、JT-60SA 用のものであるが、JT-60 時からシステム的设计思想は変わっていない。

まず、制御の最上位には、JT-60SA の統括制御システムが位置する。NBI の運転は、この指令に従って行われる。NBI の制御システムは、この統括制御システムに直接つながる計算機機能部、及び電源を直接動かし補機設備の信号を直接モニターする制御盤類機能部から構成される。今回は、この大きな構成は維持したまま、中の構成機器を改造している。各

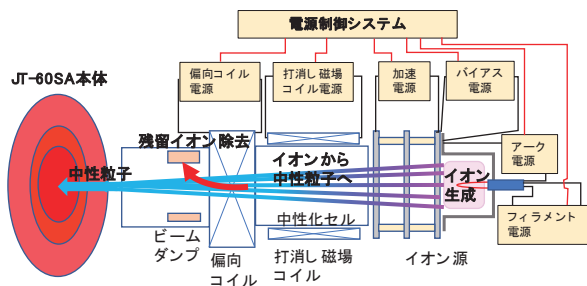


図 1. NBI 装置構成図

機能の詳細は以下のとおりである。

2.2.1 計算機機能部

既設では、イオン源運転、システム監視、データ収集・編集等を行うワークステーション(以下、WS) 2台(運転系WS、データ処理系WS)、主にデータ収集に使用されるVMEシステム3台、CAMACシステム3クレート、現場データ収集システム8台及び周辺機器である操作端末5台等で構成されていた。今回の改造対象となっている運転系WSの各機能の詳細は以下のとおりである。

① ヒューマンインターフェース機能

コマンド操作と運転操作端末にGUI(グラフィカルユーザーインターフェース)として表示する機能を有し、上記機能の画面操作、表示を行い、さらに操作端末のモード管理、使用ユニットの操作管理を行う。

② イオン源運転機能

イオン源用電源の電圧・電流等、運転するための条件を設定し、電源制御を行う。単独運転、または統括制御システムからの加熱入射命令に従って機能する。

③ システム監視機能

データサンプリング、システム監視、日報・月報出力機能を有し、常時動作している。P-NBIを構成する

電源・ビームライン系の状態監視及び異常発生を監視し、警報出力を行う。

④ データ収集機能

サンプリング、データ収集、データ編集、結果データ送信、データ提供を行う。収集するデータはイオン源用電源の電圧・電流やビームライン系のガス流量・冷却水水温・真空度等である。収集するデータの総数はアナログデータ約1900点、デジタルデータ約2900点あり、サンプリング速度は収集するデータの内容によって高速、低速に分類され、高速:10ms、低速:200~400msである。

2.2.2 制御盤類機能

制御盤類はP-NBI装置電源の通電/停止、遮断器の投入/開放などを管理し、計算機システムはイオン源運転、システム監視や機器のデータ収集/処理などの機能を有している。

制御盤類はNBI操作デスク(CP1)、電源系制御盤(CP2)、受配電設備盤(CP3)、ビームライン系関連制御盤(CP4,5)と計算機システムで構成されている。CP3,4,5は主にリレーで構成されており、インターロックの使用頻度も少ない。CP1,CP2は専用ハード基板、SC(シーケンスコントローラ)及びリレーから構成され、イオン源用電源の運転操作・監視やインターロックの設定値変更等を行う。各機器の詳細機

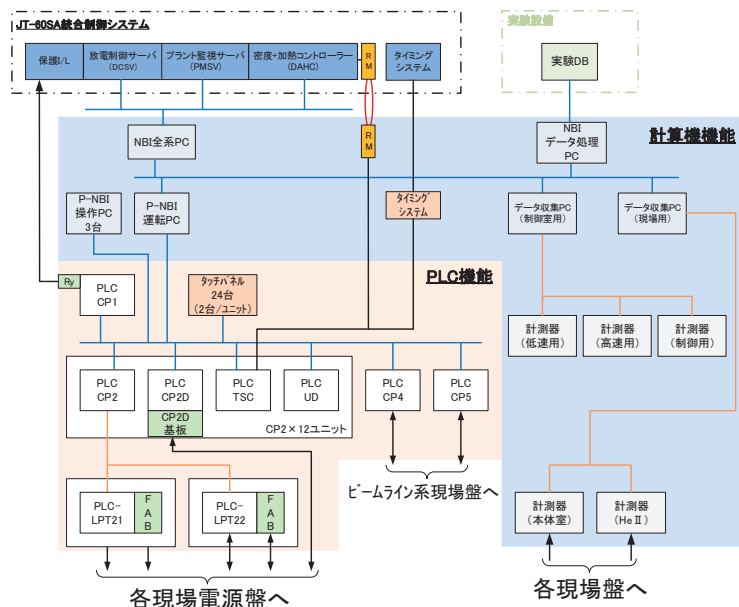


図2. JT-60SA用P-NBI制御システム構成図

能は以下のとおりである。

① NBI 操作デスク (CP1)

CP1 は SC やタイミング分配器(TDG)等で構成され、全系からの入射タイミング指令等を管理し、下位の電源系制御盤 (CP2) に信号を分配する。また、運転操作等の機能を有し、TDG ではビーム入射時の電源の通電タイミングなどの高速制御を行っている。

② 電源系制御盤 (CP2)

CP2 は現場電源の通電・遮断等のタイミング管理を TSC・SC 及び電源系制御リレーで行い、現場に設置されている電源の制御及び光通信等を低圧制御ユニット (CP2D) で行っている。その他にも磁場関係の電源の監視及び制御を行っている偏向打消コイル保護装置 (UD) がある。

3 JT-60SA に向けた改造

今回の改造では、図 2 に示すように、既設の計算機機能部は汎用の PC に更新し、NI 社の LabVIEW のプログラムで運転監視、データ収集、収集データの演算処理等を行う。制御盤類機能部は汎用品の横河電機(株)製 PLC を用いる。PLC 機器の構成は信号数、内部回路数等を踏まえて、統合・分散化し、効率化を図る。また、PLC 間の信号の送受信は主に FL-net (Ethernet を用いたオープンネットワーク) を用いる。

3.1 計算機機能部

計算機機能部は、図 2 に示すように全系 PC、運転 PC、操作 PC (3 台)、データ収集用 PC、データ処理 PC の計 7 台設置し、各 PC の負荷を分散させることとした。

全系 PC は統括制御システムの各サーバーと TCP/IP 通信回線で接続される。今回の通信試験対象は、JT-60SA のプラント監視に関する機能を持つプラント監視サーバ (以下、PMSV) とした。PMSV は、各設備の状態や警報データ等の大量の収集及び JT-60SA 運転状態ステートの移行等のメッセージ送信を行うものである。ここのメッセージ送信は JT-60SA で独自に規格化されたルールに従う必要がある。その基本フォーマットは、送信先/送信元の系統番号、デジタル/アナログデータ等のメッセージ種別、エラーの内容を示すエラー番号、添付データの

有無とデータサイズを示す情報が規定された固定長 (42 バイト) の文字列から成る。添付データがない場合 (回線監視要求/応答等) は、基本フォーマットのみでの送受信で 1 つの送受信シーケンスが完了する。添付データが有る場合は、基本フォーマットに添付データサイズを指定し、ショット番号、エラーメッセージの内容等のテキストデータを付加する。

これらのデータは定期的に送信されるものだけではなく不定期に送信されるものもあり、ほぼ同時に複数のデータが送信されてくるケースも考えられる。NBI 側では、どのタイミングで送信されるか分からないこれらの指令を漏れなく受取り、受取り後は、受信確認を返信すると共に、下位の制御盤類機能部に指示を出し、さらにその返信を受取り、また上位に返す、という多量の情報を管理することが求められる。

これを実現するために、以下のフローを考案した。図 3 にそのフローチャートも示す。

①全系 PC は PMSV とネットワーク回線を接続し、PMSV からのコマンドを待機する。②PMSV からメッセージ送信が行われた場合、基本フォーマットの固定長分のメッセージを読み出す。その後、③それぞれのメッセージに対して添付データの有無を判断し、添付データが有る場合にはそのデータを受信する。メッセージは複数送信されることもあるため、全てのメッセージを漏れなく受信するためにローカルバッファに格納する。

受信したメッセージは下位の計算機又は PLC に信号を送信され、下位機器で必要な処理を行う。NBI 設備から DCSV 及び PMSV に送信するメッセージに関しては、下位機器から全系 PC に送られてきたデータを DCSV・PMSV のどちらに送信するか振り分け、基本フォーマット+添付データ (添付データがある場合) を送信する。

このフローチャートに従い LabVIEW でシステムを作成した。ここで、通信試験の前に PMSV を模擬したプログラムを製作し、連続して全系 PC にデータを送信し、メッセージを漏れなく受信できるか確認した。実動作時に想定されるデータサイズよりも多い 1M バイトのデータの送信を 1 秒間に 2 回程度の

1. メッセージ送受信フロー

プラント監視サーバ(PMSV)からコマンドを受信する
 放電制御サーバ(DCSV)に対しても同様の処理を行う
 各サーバに対して通信を行うプログラムをそれぞれ独立に設ける

VI名称 : Process_Communication_to_PMSV_1stConnect.vi

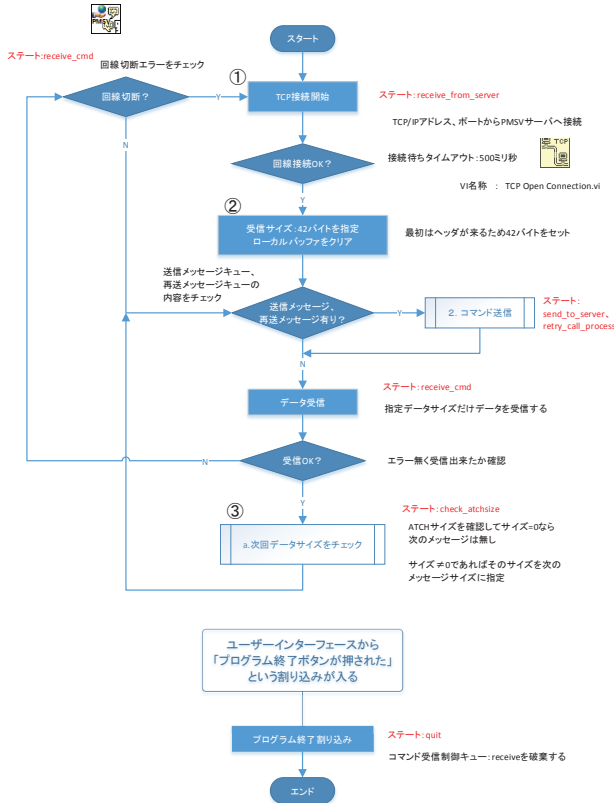


図3. フローチャート

速度で 10 回繰り返したが、全系 PC はすべてのデータを漏れなく受信することができた。

3.2 制御盤類機能部の改造

新制御システムにおいて、制御盤類機能は既設と同等の機能を持たせることを前提とするが、NBI 装置の研究開発を進める上で運転方法の変更や保護インターロックの追加等も考えられるため、容易にプログラムの変更・追加等を行える拡張性の高いシステムとして、汎用品の PLC に移行することとした。

NBI 操作デスク (CPI) の改造にあたっては、今後使用する見込みのない信号の削除等、信号・機能の見直し・合理化を図った。

電源系制御盤 (CP2) では、各電源の制御及び通信を行う TSC、SC、CP2D 及び UD の機能を PLC 化した。その際、各々に PLC を設け、負荷を分散させる

方針とした。

PLC 化の手順としては、まず機器毎に既設機器のインターロックブロック線図 (IBD) から入出力信号数、信号種別、インターロック、警報項目、信号の要/不要等の調査を実施した後、PLC プログラム開発のため、ブロック線図や PLC プログラム内のアドレス割付、入出力信号の取合箇所及び取合方法を明記した配線図を作成した。これらの準備作業完了後、PLC プログラムの書込みと PLC モジュールの据付及び周辺機器との配線作業を行った。図 4 に PLC 据付後の CP2 盤内写真を示す。

4 制御システム確認試験

4.1 計算機機能確認試験

今回、第一段階である統括制御システムの PMSV と全系 PC、運転 PC 間でデータ通信試験を実施した。試験内容は PMSV と全系 PC 間でネットワーク接続されていることを双方で確認した後、JT-60SA で実際に交信するメッセージ (回線監視要求/応答、設備プロセスデータ要求/応答、警報データ出力など、総 42 点) について正常に送受信できるかを確認した。



図4. CP2 盤内機器 (改造後)

試験の結果、PMSV とのネットワーク中の状態について誤認識があり、通信が持続されない現象が発生した。NBI 側は、当初、一度 PMSV に接続した後、データが来ない際は 25 秒のタイムアウトを設けて一旦ネットワーク接続を切断し、再度 PMSV に接続するようにしていた。しかし、PMSV は各設備のネットワーク接続を確認した後、その設備を使用するか手でフラグを立ててからコマンドを送信するプログラムであるため、NBI 全系 PC のタイムアウトで一旦ネットワーク接続を切断すると、PMSV 側は NBI とのネットワークがクローズしたと認識してしまったことが原因であった。そのため、NBI 側のプログラムについて、ネットワークを閉じずにコマンド待ちを続行するように修正して再試験を実施した結果、通信が持続されることを確認した。

その他の試験においても NBI 側でメッセージ送信のフォーマットの誤記載等のプログラム上のバグが生じたが、その都度修正を行い、今回計画したすべての試験項目について、正常に通信できることを PMSV、NBI 双方で確認できた (図 5)。

4.2 PLC 化後のタイムシーケンス試験

PLC 機能確認試験は、CP2 内の PLC4 台、現場の LP-T21 及び 22 を対象として P-NBI 装置用電源について実施した。PLC プログラムの製作及び機器の据付作業終了後、入出力信号確認のため、現場又は PLC プログラム内から模擬信号を発信し、然るべき箇所に信号が出力されることを確認した。その後、各電源の過電圧・過電流や運転時間超過等の保護インターロックについて、動作設定値以上でインターロックが動作することを確認し、タイムシーケンス試験を行った。タイムシーケンス試験は 1 電源ずつ行い、各電源の正常動作を確認した後に全電源の確認試験を実施した。

確認試験の結果、入出力信号の配線ミスや PLC プログラムのバグ等が発見されたが、その都度修正を行い、設計検討の仕様を満足する結果が得られた。

また、従来の専用ハードウェア及び専用プログラムでは容易ではなかった内部処理の追加・変更やインターロック値の変更等を容易に追加できるようになったことで NBI 装置の効率的でより安全な運転に

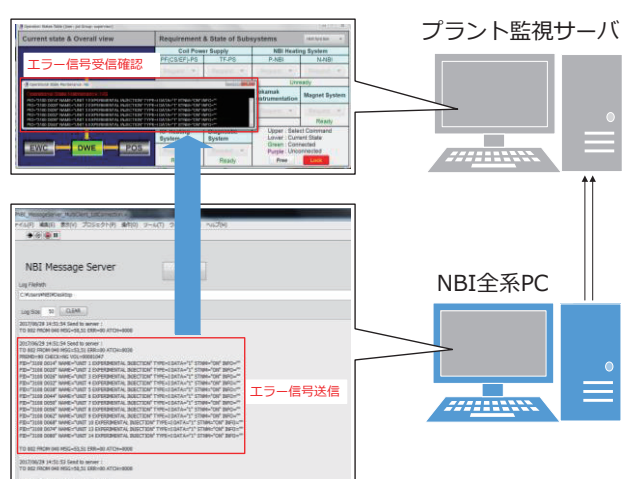


図 5. 通信確認試験結果

寄与する。

5 まとめ

NBI 装置は JT-60SA 化計画に伴い、ビームパルス幅を定格の 10 秒から 100 秒に伸長することが要求されている。本要求に対応するためには NBI 装置用制御システムの大幅な改造が必要となるため、JT-60SA 用制御システムを開発中である。P-NBI 装置の計算機機能については汎用 PC 内の複数の LabVIEW プログラムに変更し、拡張性の高いシステムとする。電源制御システムについては、既設機器を撤去し、PLC に置き換える。今回、開発した計算機及び PLC の一部機能の確認試験を実施した。

試験の結果、計算機機能は、JT-60SA 用に更新される統括制御システムの PMSV との通信が正常に持続されることを確認した。PLC 機能は既設と同等の性能を実証することができた。

今後も JT-60SA に向け PLC 機能及び計算機機能について並行して開発を進める。

参考文献

- [1] 本田 敦他、“JT-60SA における P-NBI 加熱装置の制御システム (100 秒化) の予備設計検討” JAEA-Technology 2007-026、P1-7.

JT-60SA NBI 電源制御系更新に向けた通信機器性能確認試験

○坂本響、柏木美恵子、大楽正幸、佐々木駿一、清水達夫

(国) 量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

1 概要

(国) 量子科学技術研究開発機構では、核融合実験装置 JT-60 を超伝導トカマク装置に改造する、JT-60SA 計画を進めている。この核融合プラズマの加熱装置である中性粒子入射加熱装置（以下「NBI」という。）では、10 秒間連続運転から 100 秒間連続運転への長パルス化を求められており、電源設備の長パルス化に伴い、制御システムの長パルス化改造も必要不可欠となっている。

従来の制御システムは、電源メーカーの専用基板を軸に、シーケンスコントローラ及びリレーを使ったものであったが、不具合発生時の修理に時間がかかり、運転に支障をきたすなどの問題があった。そこで本改造に伴い、信頼性の高い汎用品を用い、かつ自分たちで保守・改造可能で拡張できる制御システムに更新することとし、制御システムとして、Programmable Logic Controller（以下「PLC」とする。）に更新していくこととした。しかし、その中で既存の光通信用基板と PLC の間に電圧変換器が必要となった。

ここでは、その電圧変換器について、まずはフォトカプラを用いた電圧変換器を自作して動作を確認し、次に安定動作確保に向けて実装可能な市販機器を選定し、実システムを模擬して機器性能試験を行った結果について報告する。

2 NBI 制御システム

2.1 JT-60SA NBI システム

ここでは、NBI とその制御系の概要について説明する。図 1 に示すように、NBI ではイオン源でイオンビームを発生し、これをガスが充填された中性化セルを通して中性粒子に変換し、残ったイオンを磁場で曲げて除去し、強力な磁場で閉じ込

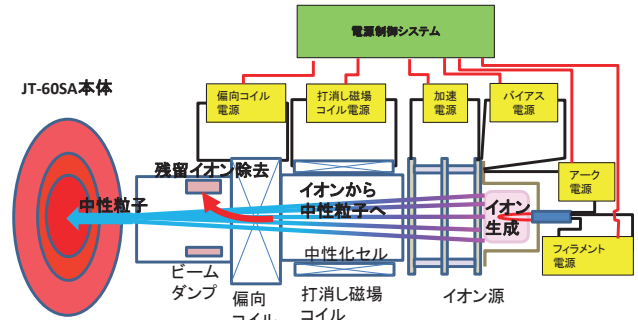


図 1. NBI 概略図

められた核融合プラズマに入射してこれを加熱する。JT-60SA では従来の NBI を増力・改造することとし、正イオンを用いた NBI（以下「P-NBI」という。）を 12 基（1 基あたりイオン源 2 台）と、負イオンを用いた NBI（以下「N-NBI」という。）を 1 基（1 基あたりイオン源 2 台）という多数の NBI を用い、最大 34MW の中性粒子ビームを 100 秒間連続で入射する。この大規模な装置を動かすための制御系システムは、図 2 に示すように、上位の計算機システムとその下位の各制御盤類で構成される。イオンや磁場を発生させるための電源（アーク、フィラメント、バイアス、加速電源、コイル用電源等）を制御する電源制御システムでは、電源を動作させると共に、電源やビームラインで異常が起きた際には、そのインター

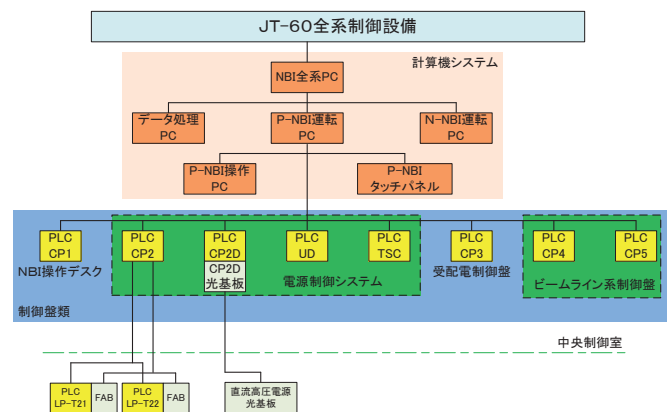


図 2. P-NBI 制御系構成図

ロック信号を拾って各電源を停止させ、さらに上流のシステムに伝えることが求められている。

2.2 PLC化と電圧変換器

今回のPLC化の概略を図3に示す。従来、現場の電源と制御系は光基板で接続され、制御側ではその後にシーケンサー(SC)を通して制御を実施していた。電源異常時、電源の緊急停止が必要なマイクロ秒オーダーの高速処理のインターロックについては、最初に信号を受けた光基板において、電源遮断の信号を電源に戻すこととし、一方、そのインターロックを受けて、他の設備にNBIの異常を知らせる場合には、数ミリ秒のオーダーで信号を伝達すればよい。今回は、このSCをPLC化することとしたが、既存の光基板(DC15V)とPLC(DC24V)間では使用している電圧が違うため、電圧変換器が必要となった。PLC単体での通信速度は、仕様上は1ミリ秒以下であるが、今回、これら新規機器全体を組み合わせ、遅滞なく、かつ安定に動作することを確認する必要がある。

スペースが限られた既存の制御盤内でも多数の変換器を設置することができたことである。

しかし、自作の電圧変換器だったため、プリントボードの接触不良による動作不良が幾度となく確認され、実機に搭載するためには問題であった。CP2Dでは、現場高圧電源の異常の有無に関する信号のやり取りが含まれるため、動作不良によって信号の電圧が途絶えることは絶対にあってはならない。そのため、安定した動作が期待される信頼性の高い変換器に変更することとした。その際、既存の制御盤内に設置するため、限られたスペースの中で多数設置で

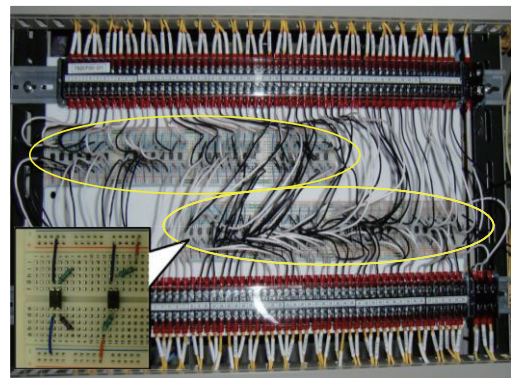


図4. 自作の電圧変換器

3 電圧変換器の製作

このように既存の光基板(DC15V)と新規PLC(DC24V)を繋ぐ機器としてフォトカプラを用いた電圧変換器を製作し(図4)、図3のCP2Dの系統に装着した。これを電源設備の通電試験時に本機器を使用し、現場の高圧電源と通信が可能なことを確認した。この変換器の利点は、プリントボードにフォトカプラと抵抗を組み合わせで作成していたため、

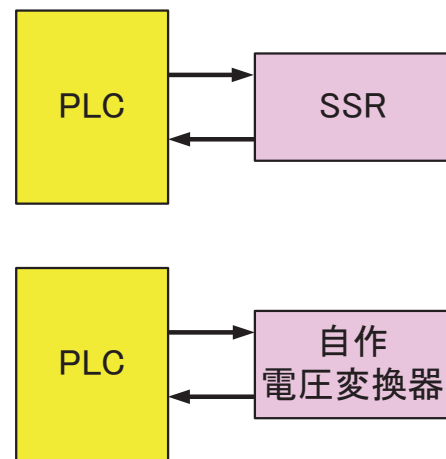


図5. 単体動作確認試験

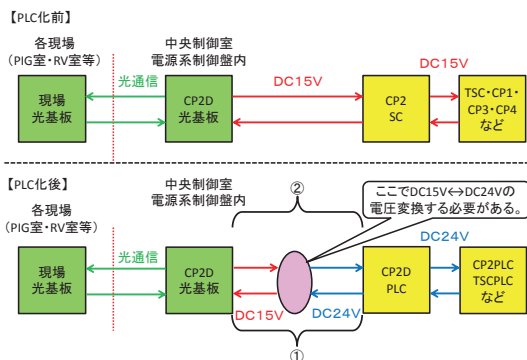


図3. CP2DPLC化

表1. 単体動作時間測定

電圧変換器	SSR
11.50 μ s ~	11.55 μ s ~
18.38 μ s	17.02 μ s

きるものを選定する必要がある。

4. 汎用電圧変換器の実装

そこで、接点摩耗がなく、動作表示灯の確認により、正常な動作をしているのかを確認することが容易なソリッドステート・リレー（以下「SSR」という。）で、なおかつ既存制御盤内に装着可能な小型のSSRの使用を検討することとした。CP2Dの使用電圧にあったSSRを選択し、CP2D実システムの模擬回路を作成し、PLCと光基板との通信の際に電圧変換器として使用可能か確認する。

4.1 単体動作確認試験

光基板を含めたCP2D模擬回路で試験をする前に、SSR単体での正常な動作を確認すると共に、自作電圧変換器と動作時間を比較した。

単体試験では、PLCとSSRもしくは電圧変換器のみの回路を作成した（図5）。PLCから信号を送信しSSRを介してPLCに戻ってくるまでの波形を、オシロスコープを用いて読み取り、正常な動作の確認と単体動作時間の比較を行った。

表1の示す通り、自作の電圧変換器もSSRの動作時間に個体差があり幅があるものの、大きな差はないことを確認した。また、SSRの表示灯を確認し、SSR単体での正常な動作を確認した。

4.2 CP2D 模擬回路通信試験

SSRを電圧変換器として用いて、PLCと光基板が通信できるのかを確認するため、実システム模擬回

路を作成した（図6）。

手動スイッチを動作させ（図6内①）、PLCから光基板に向けて信号が出力され、SSRを介して光基板に入力される（図6内②）。ここでは図4内①のPLCから出力されて光基板に入力されるまでを模擬する。その後の光基板間の通信については、実システムの光基板による送受信を一つの回路模擬することとした。その後、基板から出力された信号がSSRを介してPLCに入力される（図6内③）。ここでは図3内②の光基板から出力されてPLCに入力されるまでを模擬した。PLCに入力後は、正常に入力されたことを確認する目的で、PLCに接続した小型ランプの点灯で確認する（図6内④）。本試験では手動スイッチを作動させた際に、PLCから出力された信号が光基板に入力されるのかを光受信モジュールの基板回路内小型ランプで確認し、光基板から出力された信号がPLCに入力されるのかをPLCに配線した小型ランプで確認する。また、各SSRの動作表示灯を確認し、SSRそのものの動作が、正常に行われていることも確認する。

今回の試験では、「デジタル光送信モジュール」と「デジタル光受信モジュール」、「デジタルアイソレータ」の3種類の基板を使用した。この3種類の基板は、CP2D実システムにおいて中央制御室と現場間で高圧電源の故障や異常に関するデジタル信号の送受信を担っていた基板である。使用したPLCについては、CP2Dで使用されている横河電機株式会社製の電源モジュールとCPUモジュール、信号の送受信を担う送信用モジュールと受信用モジュールの4種類のモジュールを使用した。横河電機株式会社製PLC

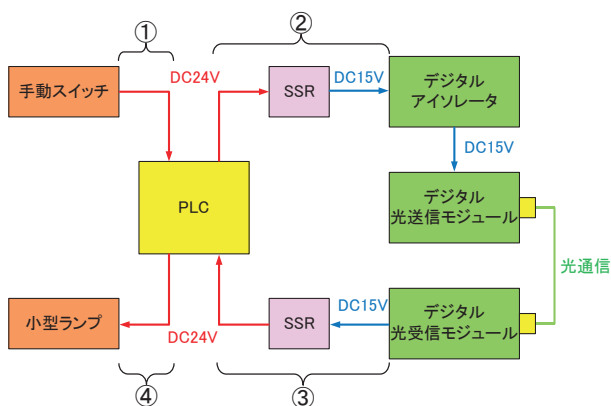


図6. 模擬回路の信号の流れ

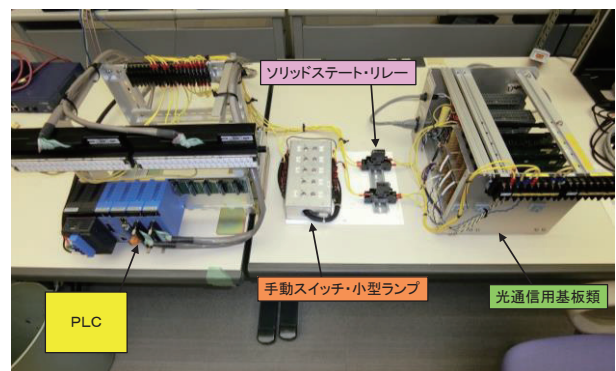


図7. 実システム模擬回路

の FA-M3 用プログラム開発ツールの「WideField3」を用いてラダープログラムを作成し、PLC の出力を手動スイッチで制御し、PLC への入力を小型ランプで確認できるようにした。

光基板回路内小型ランプで、光基板への信号の受信を確認し、PLC に接続された小型ランプで PLC が信号を受信したことを確認した。また、通信中に SSR の表示灯の点灯を確認し、正常な動作が行われていることを確認した。以上のことから、電圧変換器として SSR を用いたことで、PLC と光基板間の通信が正常に行われていることを確認した。確認後ラダープログラムを変更し、PLC から信号を出力する際、手動スイッチを動作させている間は 0.5 秒毎に出力するラダープログラムに切り替え、連続で信号を出力した時にも通信が正常に行われることも確認した。

正常な動作の確認後、本試験における動作時間について、単体動作時間測定と同様にオシロスコープを用いて測定した。測定の際には、図 6②と図 6③の波形を読み取り、SSR と電圧変換器をそれぞれ 3 台ずつ用意して測定した。また、PLC から出力して戻ってくるまでの時間を測定することで、本回路全体の動作時間も測定した。

表 2 に示すように、測定の結果、回路内 SSR の動作時間は単体での動作時間とほとんど変わらず、回

路全体としてみると単体での動作時間測定結果(表 1)よりも 2 倍強遅れているが、要求値のミリ秒オーダーに比べて十分小さく、実装には問題ないことが分かった。

5 まとめ

P-NBI 制御システムにおいて、現場直流高圧電源の制御を担っている低圧制御ユニット CP2D では、光基板と PLC 間との通信に、自作の電圧変換器を用いてきた。しかし、接触不良が原因で不安定な動作が確認されたため、既存設備の使用に見合うソリッドステート・リレーの変更を検討し、実システムを模擬した回路で動作確認試験を実施した。

動作確認試験の結果、PLC と光基板間の信号の送受信が可能で、動作時間においても要求値に対して十分小さく、問題ないことを確認し、実機には試験で使用したソリッドステート・リレーを用いて通信を行う方針となった。

また、本システムを、量研機構が所有している MeV 級イオン源試験装置の制御システムに搭載したところ、1 年以上に渡り、特に異常なく安定に動作することを確認した。よって今後は、NBI 制御システムの改造計画において、今回の機器を搭載する計画である。

表 2. 模擬回路動作時間測定

測定箇所	電圧変換器	電圧変換器
図 6②	7.87 μ s ~ 10.30 μ s	7.98 μ s ~ 8.12 μ s
図 6③	8.90 μ s ~ 11.89 μ s	13.70 μ s ~ 16.74 μ s
回路全体	21.89 μ s ~ 25.90 μ s	27.20 μ s ~ 28.60 μ s

JT-60SA 用 NBI 再組立て工期の実現化検討

○藻垣和彦^{A)}、花田磨砂也^{A)}、柏木恵美子^{A)}、根本修司^{A)}、大槻信一^{B)}、

^{A)} (国)量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

^{B)} 日本アドバンステクノロジー株式会社

1、はじめに

(国)量子科学技術研究開発機構(以下、量研機構)では、核融合発電の早期実証を目指して、臨界プラズマ試験装置 JT-60U の磁場コイルを超伝導化し、より高い圧力の核融合プラズマをより長い時間生成する JT-60SA プロジェクトを日欧共同で進めている。JT-60SA (図 1) では、プラズマの主加熱装置として、中性粒子入射装置(以下 NBI)を採用している。この NBI は入射角度の違いによって、垂直正イオン中性粒子入射装置(以下 P-NBI) 8 基と、接線正イオン中性粒子入射装置(以下 T-NBI) 4 基、さらに、負イオン源を用いた負イオン中性粒子入射装置(以下 N-NBI) 1 基を採用し、全 13 基の NBI で合計 34MW の高エネルギー中性粒子を 100 秒間プラズマに入射する計画である。JT-60SA プロジェクトは 2010 年にキックオフされ、JT-60U の解体作業が開始された。原則、NBI は再使用する計画であり、JT-60U 真空容器本体の解体作業に影響する P-NBI については解体撤去し、所内の保管場所に仮置き保管している。

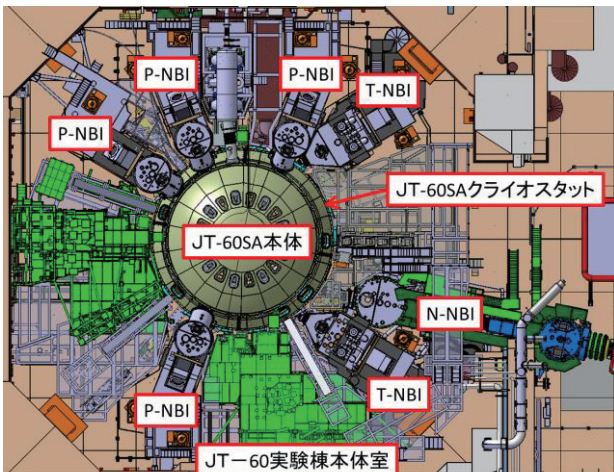


図 1 JT-60SA

N-NBI については既に所定の位置に据え付けている。

JT-60SA 本体は 2020 年のファーストプラズマ達成を目標に組立据付作業を進めており、NBI はその後約 2 年以内に 9 基を復旧させ、さらに、短期のプラズマ実験を実施した後の 8 ヶ月間で残りの 4 基を復旧させる予定である。しかしながら、この期間には他の装置の復旧作業も並走しているため、NBI の復旧作業に充てられる期間は正味 26 か月程度である。NBI の解体は実績で 20 か月に及んでいるため、改造部品の準備、組立時に設置精度の高い作業が必要なことを考慮すると、単純に 30 か月以上の作業期間が必要と考えられた。そこで本件では、この限られた期間に NBI 復旧作業を遅滞なく完遂するための方策について検討した結果を述べる。

2、NBI 再組立時の課題

解体作業時より作業期間が増加する要因は、以下のようなものが挙げられる。

- ① 並列作業数が限られる高精度作業:NBI は重量が数十トンもある重量物であるが、設置には ±2 mm と非常に高い精度が求められる。このような高精度設置作業の作業業者の確保が難しい場合。
- ② 大半に渡る膨大な再用品の点検保守・改造作業。
- ③ 大型化した JT-60SA と NBI の間の狭隘部における据付作業。作業難易度が高く、機器破損の恐れがあるだけでなく、作業後に真空リーク等の戻り作業が発覚した場合は大きな工程遅れとなる。
- ④ NBI 新規製作機器の影響:大型化した JT-60SA

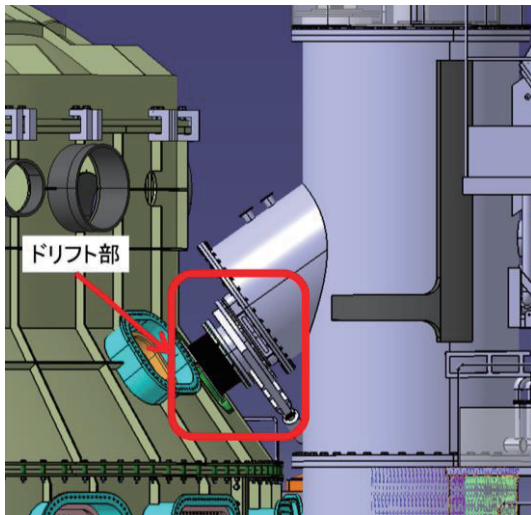


図2 NBIドリフト部

とNBIとを繋ぐ接続部(図2、以下ドリフト部)の新規製作期間、及びJT-60SA本体からの漏洩磁場を打ち消す新漏洩磁場打消シコイルの設計/製作/据付。

このような状況のなかでNBI再据え付け作業を確実に計画期間内に遅滞なく完遂する必要があることから各問題に対して方策を検討した。

3、再据え付け方策の検討

前述の①②で示すように、NBIの再据え付け作業は本来の装置の復旧作業だけでなく、前述した再使用品の点検保守・改造作業など多岐に渡る。これを工程内に収めるためには、受注業者の指導員・作業員を増員し、4チームを作って4並列作業が必要であった。しかし、これまでの実績から精度の高い作業を4並列で実施することは非現実的であると考えられた。そこで、ただ作業員を増やし並列に作業を行うのではなく、作業の難易度を整理し、それに応じた作業員を選出し、実行的に4チームを実現することを検討した。具体的には難易度の高い作業として、重量が約50tにも及ぶP-NBIを建屋の基準点から求めた基準ビーム軸に対してビームラインのビーム通過点が±2mmの範囲以内(図3)に収まるように精度良く据え付ける作業があげられる。この作業では重量物のP-NBIのアライメント調整において高い技術と経験が重要である。また、隣接する他のP-NBIとの距離が近い狭隘部作業も含まれるため作

業の難易度が非常に高い。この他にも重量が約120tに及ぶN-NBI用高電圧機器が載っている筐体を別棟建屋からJT-60SA本体室に隣接する組立室に運搬・搬入し、21本のFRP支柱の上に偏荷重をかけずに据え付ける高度な作業がある。複雑な形状の重量物についてバランスを取りながら吊り上げるため、大型の吊り天秤等の専用治具が必要であり作業にノウハウを要する。しかしながら、これら重量機器の据付作業後は、周辺の付属品の保守・改造作業、真空排気設備・圧縮空気設備・冷却水配管・電源/制御/計測のケーブルの復旧といった軽作業であり、細かくみると、機器製作・電気・配管関係などに仕分けられる。1メーカーではなく、各業者に発注することは発注側の負担は高くなるが、このような考えに基づき、それぞれの作業は実施可能な受注業者に割り振ることで、4並列作業が可能な工程を組むことが可能となった。

次に重要なのは前述の③の後戻り作業をなくすことである。組立作業手順等を検討した結果、P-NBIのドリフト部の組立作業とT-NBIのドリフト復旧作業が後戻り作業となった場合、工程への影響が大きいことが判明した。P-NBIの復旧作業手順は、先ずJT-60SA本体室以外の別棟建屋に保管しているNBIをJT-60SA本体室へ移動することから始まり、JT-60SAに対応した新規ドリフト部を設置した後、JT-60SA本体周辺の既定位置へ据え付ける作業を行う。その後に隣接するNBI専用ヤグラ設備から主排気タンクへ真空・冷媒・圧縮空気・冷却水配管、制

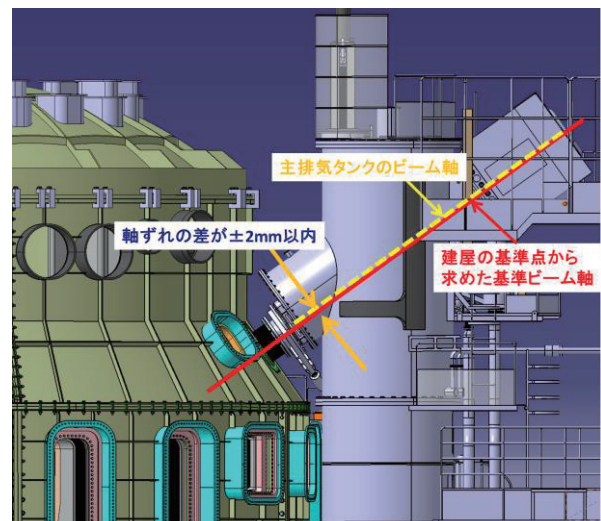


図3 P-NBI主排気タンク設置基準

御・計測・電源ケーブルを接続していく手順となっている。本作業のなかにドリフト部を主排気タンクへ据え付ける作業に後戻り作業のリスクがあった。新規ドリフト部は、変位を吸収する目的の新規接続ベローズ、他設備と電位を切る絶縁フランジ、既存の大口径ゲート弁を主排気タンクへ設置するための変換フランジで構成される（図 4）。これらを組み合わせて、ドリフト部単体での真空リーク試験は小型の真空排気装置で実施可能であるが、ドリフト部を主排気タンクへ設置し真空リーク試験を実施するためには、主排気タンクの真空引きが必要となり、大型の真空排気設備と長時間を要することが判明した。また、使用した真空排気設備はトリチウム汚染の可能性があることから JT-60 実験棟本体室から搬出が不可となり現実的ではない。そこで、既存の真空排気設備を使用することを検討したが、P-NBI を復旧した後でなければ可動することが出来ず、その時点でリークが発見された場合は、P-NBI を撤去した後、ドリフト部を外しての対応となるため後戻り作業となり、この損失は計り知れない。これを防ぐため、新規調達品である変換フランジは主排気タンクとの接続面に径の違う 2 本の O リングを使用して接続する構造とし、2 重 O リングでシールされた間を真空引き出来る小さなポートを設ける設計とした。これにより新規ドリフト部を単品で真空リーク試験を実施した後、主排気タンクへ設置して O リング間の真空引きを行い、フランジの外周と内面からヘリウムガ

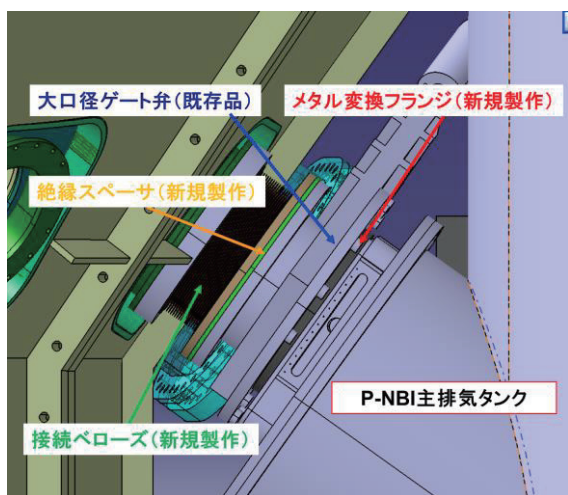


図 4 P-NBI ドリフト部構成機器

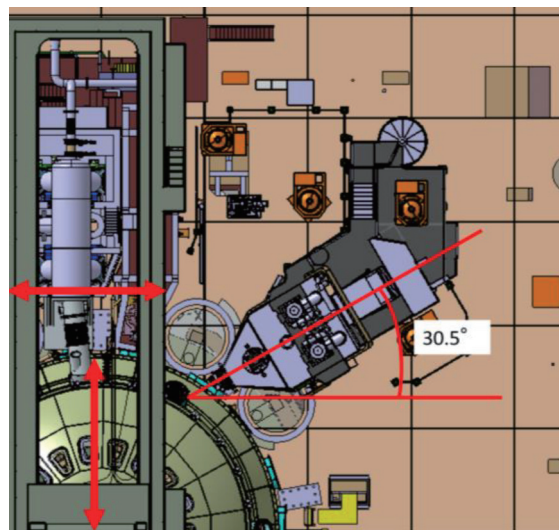


図 5 T-NBI とクレーン動線

スを吹き付けることによって真空リーク試験が可能となった。真空引する容積が小さいことから小型の真空排気装置またはヘリウムリークディテクター単体でも十分に真空引きが可能な設計となった。

T-NBI ドリフト部の復旧作業も後戻り作業となった場合に作業工程への影響が大きいことが判明した。T-NBI は解体作業時に、旧ドリフト部のみを解体撤去しただけで主排気タンクは JT-60SA 本体室に残したため、大型化した JT-60SA 本体との間に新規ドリフト部を据え付ける狭隘作業となった。T-NBI ドリフト部の据付手順はドリフト部の接続ベローズを縮めることで全長を 565mm とし、T-NBI と JT-60SA 本体の間の 85mm の隙間の中で据え付け作業を行うことになる。また、T-NBI 主排気タンクは建屋の天井走行クレーンの走行方向に対して 30.5° の角度を持って設置されており（図 5）、天井走行クレーンを使用してドリフト部を適切な取合い位置に据え付けるためには、小刻みな走行・横行を繰り返して近づける必要があり、機器の損傷や作業工期の遅延が発生するリスクがあった。そこで、新規ドリフト部を据え付けるための専用治具を検討することにした。この専用治具は、図 6 に示すように大口径ゲート弁の本体の四隅に設置するガイドローラーと、主排気タンク側に設置する図 7 に示すガイドレールから構成される。ガイドローラーによりドリフト部を 9 度の角度に保ったまま、天井走行クレーンを使用せず T-NBI 主排気タンク側へ横スライドさせることが出来るため、

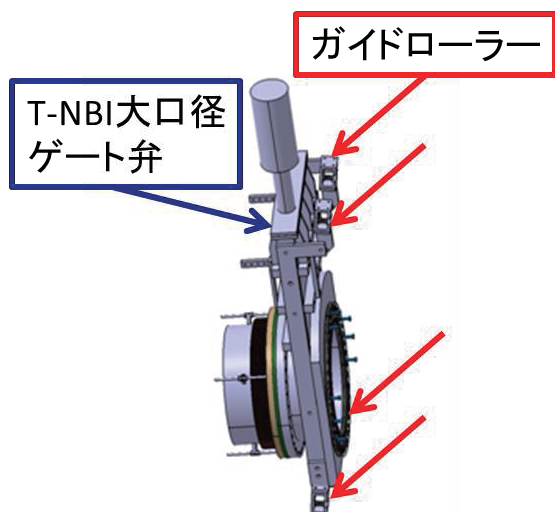


図6 ドリフト部取付治具（ガイドローラー）

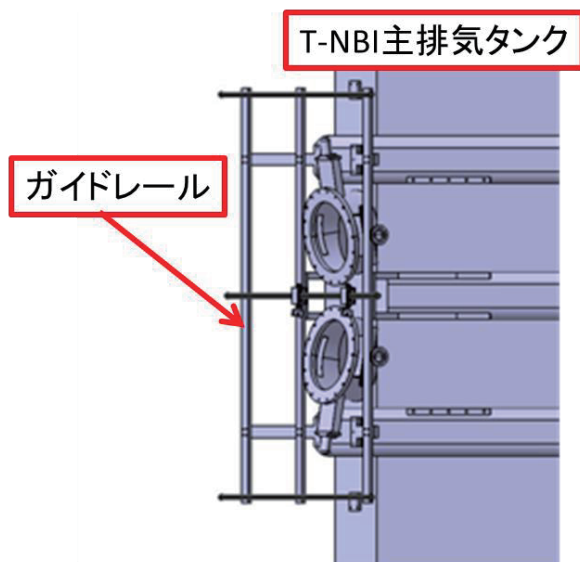


図7 ドリフト部取付治具（ガイドレール）

JT-60SA 本体側に接触することなく据え付け位置まで移動が可能である。ガイドレールは主排気タンク側からの距離を調整できる機構を持たせてあり、スライドしてきたドリフト部を、ガイドレールとの距離を短くすることで主排気タンク側に寄せてドリフト部を据え付けることが可能である。また、この専用治具は、上下の大口径ゲート弁取り付に使用することが出来るため、4基の T-NBI ドリフト部の復旧に使用可能である。この専用治具を使用することによって機器破損等による後戻り作業のリスクが回避できると考えている。

最後に前述④については、できるだけ機器製作等を作業開始前までに準備する必要がある。

これらの検討結果を元に再据え付け工程を組み上げ、計画期間内に全機器再据付の実現性を高めることができた。

4、まとめ

量研機構では JT-60SA ファーストプラズマ後に実施される NBI について再組立工程を実現するための工程を検討した。

NBI 機器再据付作業について作業項目毎に作業内容と作業スキルの有/無を検討し、複数の受注者による並列作業の可/否を判断しながら再据え付け工程の見直しを実施することで、作業工程の短縮を図り並列作業の実現性を高めた。

また、NBI 復旧作業手順の内、後戻り作業に発展する可能性が高いリスクを抽出し、真空リーク試験の戻り作業を防止するシール構造、狭隘作業を確実に実施するための据付専用治具を考案し、機器の破損防止と作業期間の短縮を図った。

これらの作業改善を計画したことで、計画通り、最初の約2年で9基の、その後4基、計13基すべてのNBI再据付作業完遂の実現に目途を得られた。

今後は、作業開始に向けて、他の機器の進捗状況を聴取しながら NBI 復旧作業工程を都度見直し、再組立て作業準備を行う。

第3分野

(計測・制御技術)

スラグ流生成制御のための工夫

熊谷宜久

神戸大学大学院 工学研究科 技術室

概要

内径数ミリ程度までの円管内に、気体／液体、水性液体／油性液体などの親和性のない流体が交互に流れるものをスラグ流という。その生成法として現在、一般的には丁字型合流装置を用いて複数種の流体を合流させている。操作パラメータがそれぞれの流体の流速のみであり、実験装置の幾何学的構造あるいは流体と装置の濡れ性などの物理的性質によって、円管上に生成する各スラグ長が一意的に決定する。つまり、一定の総流量および流量比条件下でのスラグ長の制御は、構造上できない。この度、任意のスラグ長を生成する合流装置を発明し、本学知財部門の審査を経て本学から特許申請を行った（特願2017-004523）。本発表では、装置の構造及び基礎実験結果、応用の可能性例を中心に紹介する。

1 始めに

気液二相スラグ流は、液相スラグ内の循環流と大きい比界面積を持つことからガス吸収等の物質移動特性に優れている^[1]。スラグフロー触媒反応器に応用して気相の拡散速度を促進させるなど、応用も試みられている^[2]。

医薬分野では、スラグ流で連続晶析を行うと、凝集が起らず大きな結晶が得られることが注目されている^[3]。特に液相のスラグ長は混合状態に大きな影響を及ぼす。

その他産業での応用例として、配水管等^[4]、あるいは酪農業におけるミルクライン^{[5][6][7]}では、スラグ流によって高効率な洗浄を行うことができる。

以上の背景よりスラグ長を任意に調整可能な手法が求められているが、装置の調整が複雑であったり^[8]、装置自身を交換する必要があったり^[9]、流体物性によって大きな制約を受けたりした^[9]。

2 実験

2.1 合流装置及び周りの構造

図1に、気液スラグの合流装置周りの構造を示す。気液それぞれの流量を制御し、合流装置に導入できる。そこで生成させたスラグ流を高速度カメラにより観察し、スラグ長が測定できる。

図2に、気液二相流を例に、今回開発した合流装置の構造例を示す。一般的に用いる丁字流路とは異なり、気体を満たす小空間を設けている。そこに液体が細管状の流路を伝って液滴状に流入できる。

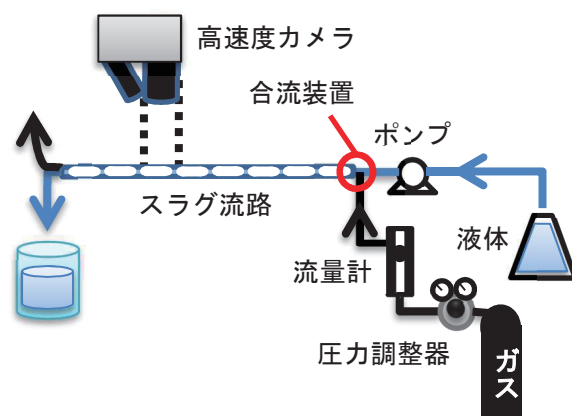


図1. 合流装置周りの構造

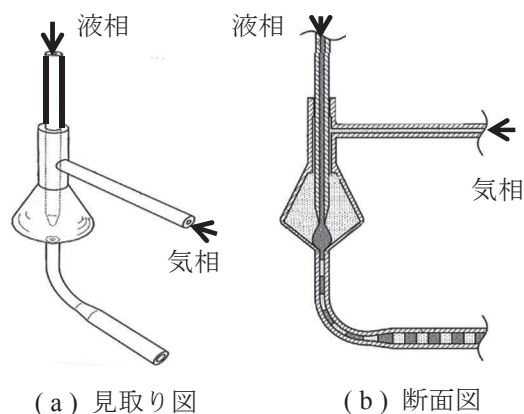


図2. 合流装置周りの構造例

液滴の直下に、断面積の小さな流出部を設けている。液滴が接して流出部を塞ぐと、上流からの気体が液滴を押し流して気液二相スラグ流を生成し、下流の流路に導く。液相の流入路である細管が可動式となっており、その上下によって流出部に接する液滴の大きさ（体積）が変化する。以上の構造によって総流量および各相の流量比を保ちつつスラグ長を任意に変化させることを狙いとした。

2.2 実験条件

以上の装置を用いて実験を行った。気相には酸素、液相には粘度の異なるアセトン、蒸留水、グリセリンの3通りを用いた。合流装置はガラス製、反応管の内径は3.5 mm、長さは約300 mmのガラス製とした。気相、液相の流量はそれぞれ20 ml・min⁻¹、3 ml・min⁻¹とした。比較のため、従来の丁字型合流装置に置き換えた同様の実験も行った。

3 結果

それぞれの液相条件においてスラグ長を変化させ、各条件のデータを100点ずつ集めて平均及び標準偏差を求めた（表1）。スラグ流路の撮影画像を図3に示す。

表1. 液相スラグ長および標準偏差

液相名	No.	液スラグ長 [mm]	標準偏差 [mm]
アセトン	a-1	2.06	1.84
	a-2	0.82	0.13
	丁字	2.58	0.88
蒸留水	w-1	3.29	0.24
	w-2	1.76	0.41
	丁字	6.09	0.32
グリセリン	g-1	2.97	0.24
	g-2	1.96	0.13
	g-3	1.35	0.13
	g-4	1.05	0.13
	g-5	1.26	0.22
	丁字	7.47	0.55

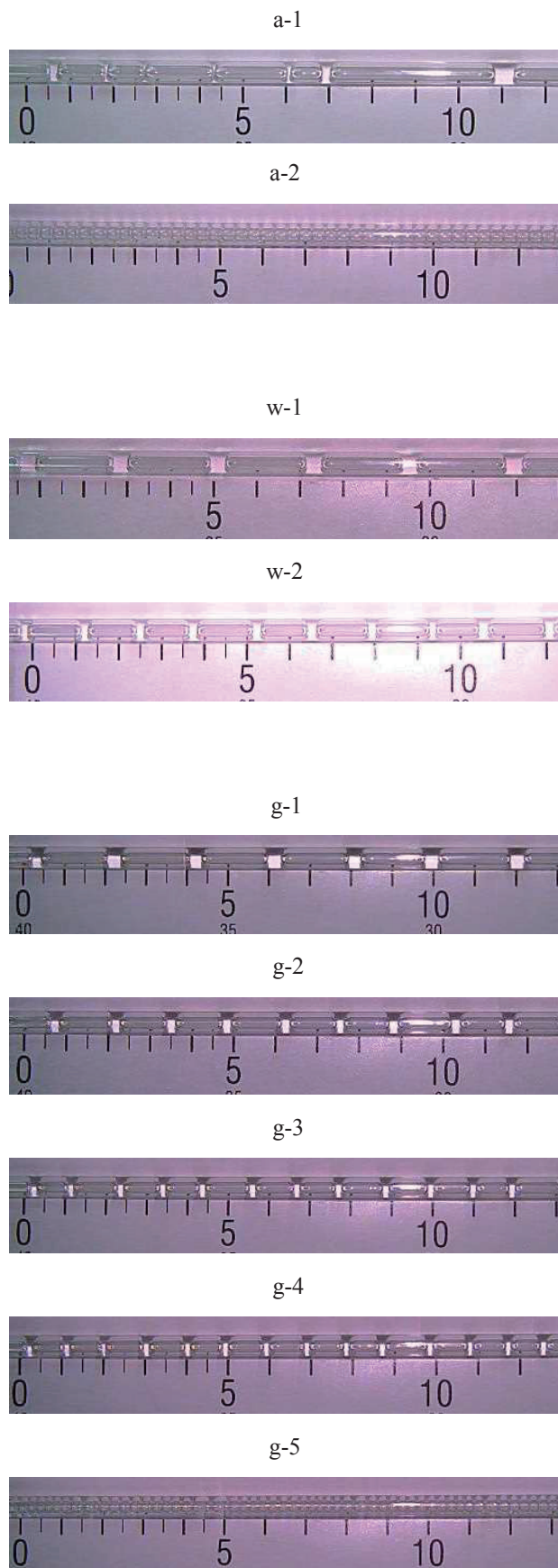


図3. 流路上のスラグ流画像

4 考察

4.1 丁字型合流装置との比較

表 1 の通り、従来用いられている丁字型合流装置と比較して、概ねではあるがばらつきの少ないスラグ長が得られた。スラグ長そのものに関しては、総じて短くなった。これは構造上、液滴を形成しうる最大体積以上の液相はスラグ流中にできないためである（水の場合、1 滴は約 40 μ l のためおよその上限も同様になる）。

4.2 スラグ長の制御

表 1 および図 3 の通り、総流量および流量比一定の条件下でも、概ね液相の種類にかかわらずスラグ長の制御が可能であることを示せた。

4.3 液相の種類による違い

アセトンに関しては、表 1 および図 3 の通り、長スラグ長側の制御が難しいことがわかった (a-1)。これは粘度が低いため、スラグ生成後、不安定で容易に気相が合一していたため^[10]である。一方で、非常に短い液膜状のスラグの生成が可能であった (a-2)。このような短いスラグは自然には発生せず、実際観察してみると、いずれかの箇所が合一すると、急激に全体の合一が促進されて図 3 の a-1 のようなばらつきのある大きなスラグへと変化する。このように、短いスラグを準安定的に生成できることがわかった。

蒸留水に関しては、気相が容易に合一するため、安定したスラグ長の領域が限定的であった。

グリセリンに関しては、高い粘度のために安定したスラグ形成が可能となり、スラグ長、ばらつき精度共に 3 種の液相中では最も制御が容易であった。またアセトンと同様、非常に短い液膜状のスラグの生成も可能であったと共に、こちらは気相の合一も起こらなかった (g-5)。

4.4 応用への可能性

1 章で触れた内容を例に挙げると、ガス吸収等の相間物質移動を制御するために、総流量および気液流量比を保ちつつ流路壁による界面更新などの調整を行う際に応用が期待できる。副反応などの兼ね合いで反応速度等を過不足無く制御する際には特に有効

となりそうである。

医薬分野においても同様に、結晶粒径などの物性が薬効に影響するため、所望の結晶が得られるよう、流動状態を制御する際に応用が期待できる。

配水管、酪農におけるミルクライン洗浄においては、短いスラグ長（短周期のスラグ）が有効であり、特にアセトンで示したような、自然には発生しない程短いスラグの生成に応用が期待できる。

5 今後の展望

今回の合流装置は特許申請のための試作器を用いたため制御に難があった（液相供給管の操作方法が粗かった、撥水処理を考慮していなかった）。大いに改善の余地がある。

また今回は流路の内径が 3.5 ミリと、安定したスラグ流を生成しうる上限付近であったため^[11]に不安定であったが、マイクロリアクター等、より細い流路においては気相の合一などもほぼなく、安定化するので応用が期待できる。

参考文献

- [1] M. N. Kashid, A. Renken and L. Kiwi-Minsker, Gas-liquid and liquid-liquid mass transfer in microstructured reactors, *Chemical Engineering Science*, 66, 3876-3897(2011)
- [2] 平井 健太、他、“スラグフローを用いた気液固三相反応プロセスの強化”、化学工学会 第47回秋季大会講演要旨集
- [3] Mo Jiang et al, Continuous-Flow Tubular Crystallization in Slugs Spontaneously Induced by Hydrodynamics, *Cryst. Growth Des.* 2014, 14, 851-860
- [4] <http://www.kowa-lining.co.jp/>
- [5] <http://e-doto.com/hdms/pdf/sai02.pdf>
- [6] <http://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/ss/nkc/kankoubutsu/no28/no28085.pdf>
- [7] <http://www.orionkikai.co.jp/rakuno/support/tenken/tenken07-1.html>
- [8] 門脇 信傑、他、“スライド式三方弁を用いたマイクロビーカー化学合成プロセス”、*化学工学論文集*、40(1)、38-42(2014)
- [9] 国立大学法人 岡山大学、他出願、発明の名称“マイクロリアクター”、特開 2009-220041 号公報
- [10] 小山内州一、“泡の化学”、*オレオサイエンス*第1巻第8号、863-870(2001)
- [11] Michinobu Sato et al, Continuous synthesis of silica particle synthesis using Taylor flow in milli-channel, WCCE, 2013

TTL トリガ分周器開発における VHDL 回路構築の理想と現実

豊田朋範

分子科学研究所 装置開発室

はじめに

パルスレーザを用いた実験において、レーザパルスに同期した一定の周期で測定器のゲートを開帳するために分周器を必要とする。

今回、ARM マイコンと CPLD で TTL トリガ分周器を開発したが、カウンタと論理素子の単純な組み合わせなので容易に構築できると思いきや、出力に予想外のハザードが存在することが発覚した。

本稿では、装置の全容と VHDL による分周回路の構築、ハザードの発生原因と対策について述べる。

1 装置の全容

開発した TTL トリガ分周器のブロック図を図 1 に示す。

TTL トリガは、74VHCT245 で 5V→3.3V レベル変換を行い、CPLD(Intel 社 EPM570T100C5N)に入力する。CPLD は TTL トリガもしくは後述の 1kHz パルス

をシステムクロックとして動作し、ARM マイコン(NXP 社 LPC1114FBD48/302)から転送された値(2~65000)を初期値として 16bit ダウンカウントを行う。カウンタが 1 になった時キャリー信号を生成し、TTL トリガと合成して、TTL トリガのパルス幅に合わせた分周出力とする。最後に 74VHCT245 で 3.3V→5V レベル変換を行い、BNC コネクタから出力する。

ARM マイコンは、PWM を用いた 1kHz パルス出力とインターフェースを担当する。ロータリーエンコーダとスイッチの操作により、メニューから設定パラメータを選択し、分周値の設定であれば桁の選択と値の増減を行う。設定パラメータは、他に出力の極性切替、出力の ON/OFF 切替、CPLD 動作クロック切替がある。

分周値を更新すると、SPI(Serial Peripheral Interface)に類似した形式に Load 信号を付加した 4 線シリアル通信で CPLD に転送する。また、EEPROM に記録することで、電源投入時に前回の状態を復元する。

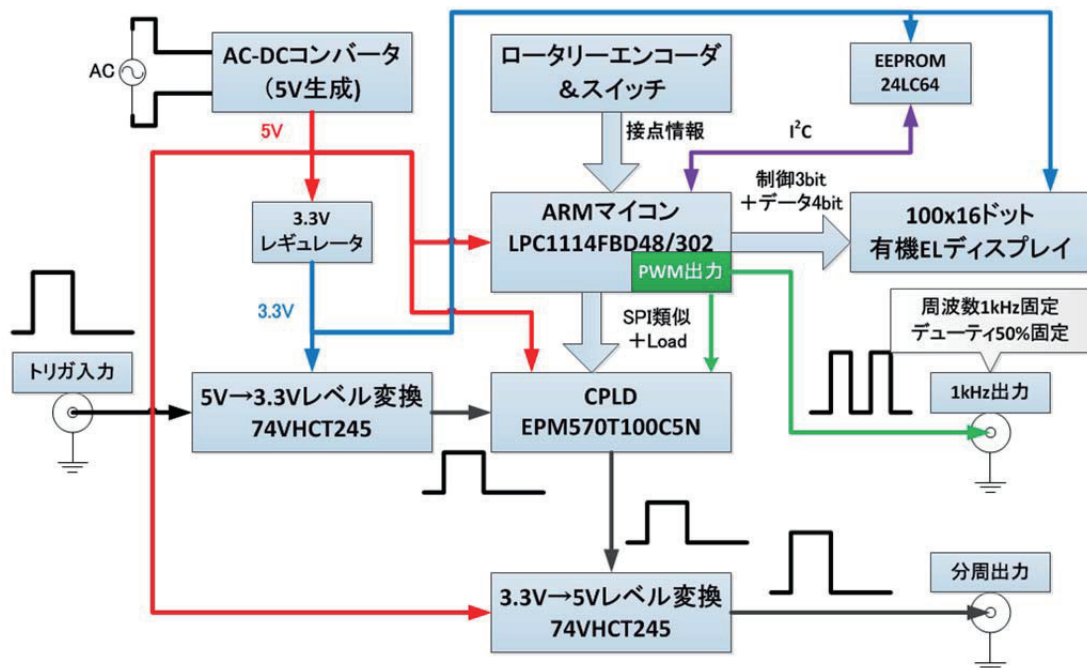


図 1. TTL トリガ分周器のブロック図

2 ハザードの発覚と VHDL による対策

当初、CPLD における分周出力の生成には、内部ダウンカウンタのキャリー信号と TTL トリガの論理積を用いていた。しかし、動作試験において、次の TTL トリガの立ち上がりと同時に同期するハザードの存在が発覚した。

ハザード発生の原因は、CPLD の内部素子間にも伝搬遅延があり、TTL トリガ 1 周期分のキャリー信号と TTL トリガの論理積を取ると、伝搬遅延の分が次の TTL トリガと僅かに重なるためである。(図 2)

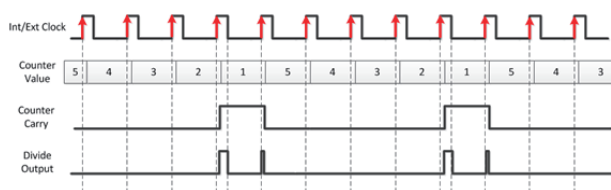


図 2. TTL トリガ分周器におけるハザードの発生原理

ハザードの対策としては、RC 回路で信号をなまらせることも挙げられるが、TTL トリガが高周波になると本来の分周出力もなまってしまい、測定器のトリガにする際にタイミングがずれる恐れがある。このため、VHDL による対策を検討した。

情報の検索と試行錯誤の結果、フリップフロップが NAND で構成されるため、立ち下がりが立ち上がりより遅くなり、論理積の 2 入力が共に 1 になる際にハザードが発生すること^[1]が判明した。同時に、対策としてド・モルガンの法則により、論理積を、入力を反転した論理和に変換すること^[1]も判明した。

そこで、VHDL ソースにおけるキャリー信号の生成部分と、TTL トリガとの論理演算部分を図 3、図 4 のように改良した。結果、分周出力のハザードは解消し、最大動作周波数が 5% 向上する良い副作用も得られた。

3 おわりに

パルスレーザーを用いた実験において、レーザーパルスに同期した一定の周期で測定器のゲートを開帳するために、TTL トリガ分周器を開発した。

CPLD に構築した分周出力回路は 16bit ダウンカウンタと論理演算であり、構築自体は容易であったが、

CPLD 内部素子の伝搬遅延を考慮しなかったため、予想外のハザードが発生した。VHDL による対策を検討した結果、ド・モルガンの法則により信号合成回路を改良することで、NAND で構成されるフリップフロップの伝搬遅延を回避し、ハザードを解消できた。

VHDL や Verilog HDL の登場から約 30 年が経過したが、未だに伝搬遅延や動作クロックのタイミングなどを考慮した設計や対策が必要である。より抽象的な記述が可能な HLS(High Level Synthesis)が登場したが、内部素子を意識した設計手法に依存するのでは、他分野、特にソフトウェア分野からの参入を妨げ、FPGA 分野の先細りは避けられない。FPGA ベンダーは事実上 Xilinx 社と Intel 社に絞られたが、両社には HDL を用いた回路合成機能の抜本的な改善を強く求めたい。

```
-- Generate Dividing (Counter) logic
process (clk_sys, in_reset) begin
-- process (clk_sys) begin -- for testing
    if (clk_sys'event and clk_sys = '1') then
        if (in_reset = '1') then
            counter_divide <= storage_divide;
            preout_divide <= '1';
        elsif (counter_divide = 1) then
--
            if (counter_divide = 1) then -- for testing
                counter_divide <= storage_divide;
                preout_divide <= '0';
            else
                counter_divide <= counter_divide - 1;
                preout_divide <= '1';
            end if;
        end if;
    end process;
```

図 3. ハザードを解消した VHDL ソース (キャリー信号生成部分)

```
-- Generate 'out_divide' from 'preout_divide' logic
-- out_divide <= preout_divide and clk_sys; -- for testing
out_thru <= not(clk_sys);

process (preout_divide, in_logic, clk_sys) begin
    if (in_logic = '1') then
        out_divide <= not(not(preout_divide or clk_sys));
    else
        out_divide <= not(preout_divide or clk_sys);
    end if;
end process;
```

図 4. ハザードを解消した VHDL ソース (信号合成部分)

参考・引用文献

- [1] 碓井有三、"インテグリティな技術コラム(2)ーパルス幅によって変化するノイズの影響"、CQ 出版、2010 年 5 月 19 日

ITV システムの更新及びインターロックシステムの構築

○横田光弘^{A)}、土伏悌之^{A)}、林 浩^{A)}、三宅 均^{A)}、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

概要

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、昨年から重水素実験が始まっている。この重水素実験に必要な放射線総合監視システム^[1]の重要な機能の一つに、異常が発生した場合に実験を停止させるインターロック機能がある。また、放射線機器の監視に必要な ITV システムの更新を行っている。本稿では、この機能を実装したインターロック盤の内容と ITV システム更新等について報告する。

1 ITV システムの更新

大型ヘリカル実験棟には数多くの ITV(Industrial television)が設置されている。それらの多くは、LHD 実験に合わせて設置されたアナログカメラで、既に十年以上稼働している。

重水素実験を始めるに当たり建物の改修が行われ、LHD が設置されている本体室、及びその周辺の部屋は、法令（放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律）に係わる管理区域となる。管理区域に設定されると、ITV 機器の持出しに制限がでることと機器監視の重要性が増すこと、カメラ増設の必要性から ITV システム全体の更新を行った。

更新を行うに当たり、使用するカメラは設置や増設のし易さから PoE(Power over Ethernet)対応のネットワークカメラとし、専用のネットワークを構築することにした。

既設 ITV の一部については、配線が建物建設時に壁面等に埋め込まれているものがあり、特に本体室上部は新たにケーブル敷設することが難しいことから PoE 機能を内蔵した同軸-LAN コンバータを使用する構成にした（図 1）。

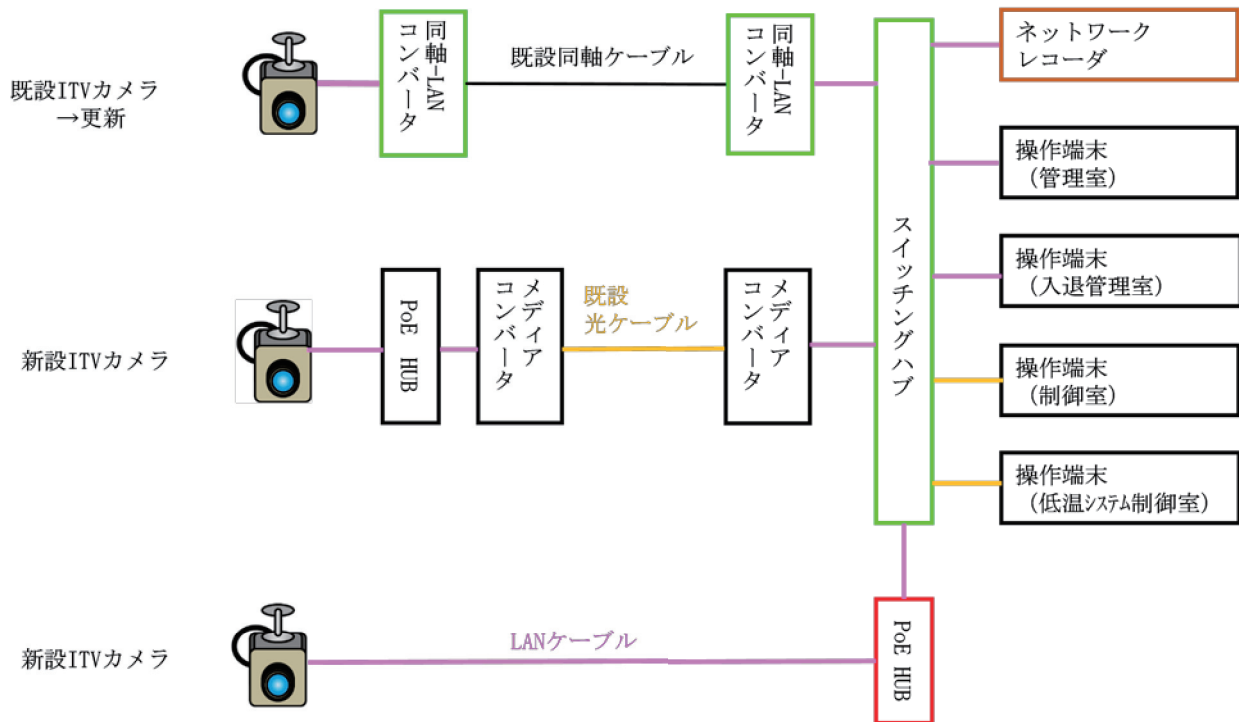


図 1. ITV システムの構成



図2. 大型ヘリカル実験棟の ITV 機器

カメラ映像は、このネットワークに接続したレコーダで録画すると共に操作端末で見ることができる。

2 インターロックシステムの構築

今までの LHD 実験では、中央制御装置が入退管理装置を含む実験機器の管理と実験同期タイミング機能を担ってきた。そして、実験や機器の増減・仕様変更に合わせて毎年のように停止を伴う改造作業を行ってきた。

重水素実験では、LHD が設置されている本体室及びその周辺の部屋は管理区域に設定される。基本的に管理区域が解除されないことがないため、放射線管理機器の状況を実験機器に影響受けることなく一元的に監視できるシステムを中央制御装置とは別に構築し、入退管理装置はこちらに接続変更した。

インターロックシステムに必要な機能は次の 3 点である。

- ① 放射線管理機器の状況を監視する
 - ② 異常が発生した場合に実験を停止させる
 - ③ 異常が発生した場合に汚染の拡大を防ぐ
- ①は制御室に運転表示盤等を設置することにし、②

は実験を統括している中央制御装置に、③は本体室内を負圧に保つ空調設備に対して停止要請信号を出すことにより、必要な機能を実現する。

インターロック盤の接続対象は各種放射線管理機器であり、これらは LHD が設置されている大型ヘリカル実験棟と重水素実験を統括・管理している制御棟に分散している。大型ヘリカル実験棟は東西 130m、南北 97m、高さ 49m の大きな建物であり、制御棟とは 100m 程離れている。このため、大型ヘリカル実験棟に 5 か所、制御棟に 1 か所制御盤を設置し、制御棟内の制御室に運転表示盤、大型ディスプレイと監視用 PC、操作卓を置いて各機器の運転状況の監視が行えるような構成にした (図 3、4)。



図3. 大型ディスプレイと運転表示盤

各機器とのやり取りは ON/OFF 信号であり、これらの情報を元に機器の監視やインターロック動作を行うことから、制御装置には PLC(Programmable Logic Controller)を使うことにした。各盤内に PLC を設置し (図 5)、盤間の情報伝達には光ケーブルを使ったローカルネットワークを構築した。

各盤の電源は、長時間の停電に対応するためのデ

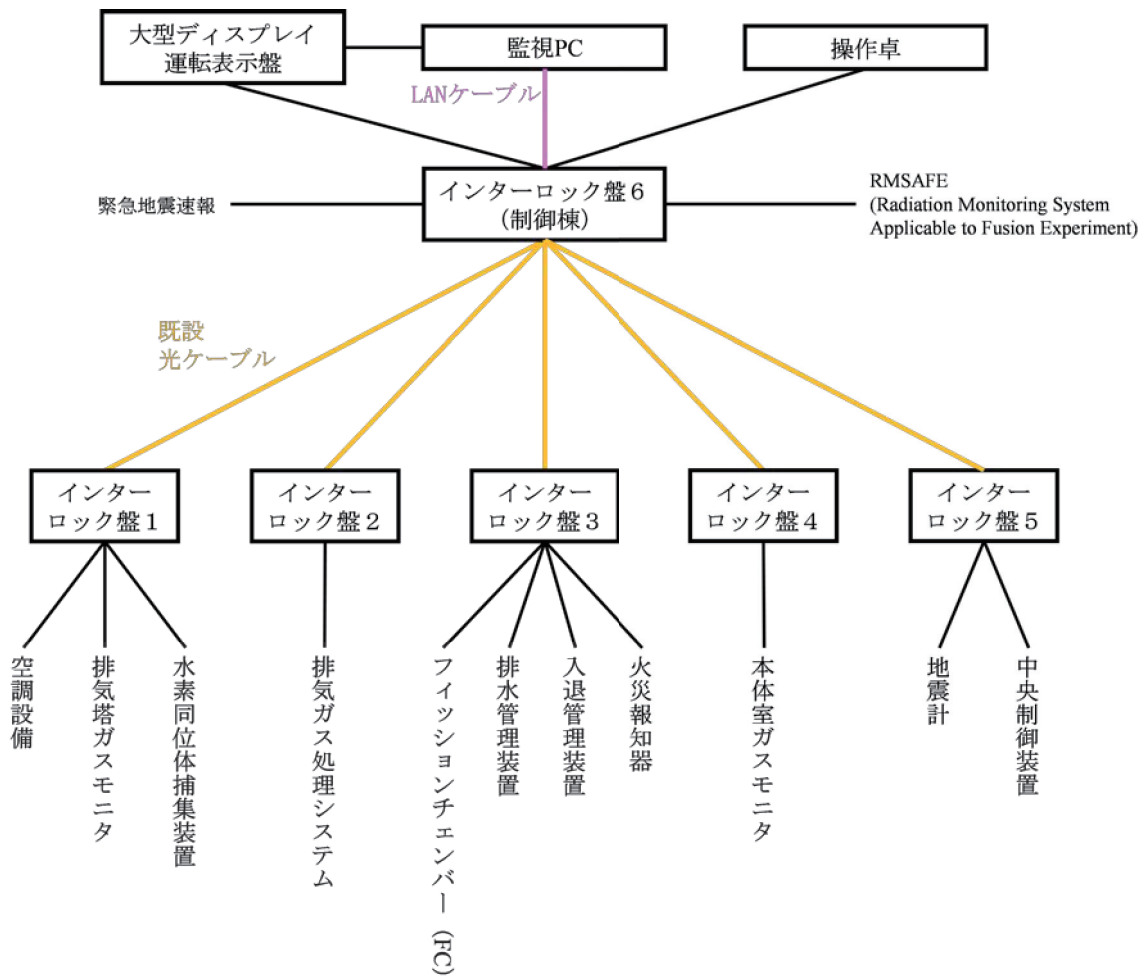


図4. インターロックシステムの構成



図5. インターロック盤の内部

イーゼル発電機に切替え可能な系統からの給電とし、短時間停電にはUPS (Uninterruptible Power Supply)を内蔵して対応している。

主なインターロックとしては、本体室の遮蔽扉が開いたり入室者があった場合は実験停止、放射線管理機器の規定値超過や火災報知器が発報した場合は実験停止と共に汚染拡大を防ぐため空調設備が停止する。

3 インターロックシステムの運用

制御室に設置された操作卓は、放射線担当者と実験責任者が操作する部分に分かれており、それぞれのキースイッチを使って操作する (図6)。

実験を開始するときは、放射線担当者が本体室の無人と施錠を確認して入室禁止にする。その他の放射線管理機器に異常がないことを確認し実験停止要請信号を解除するためにリセットボタンを押す。

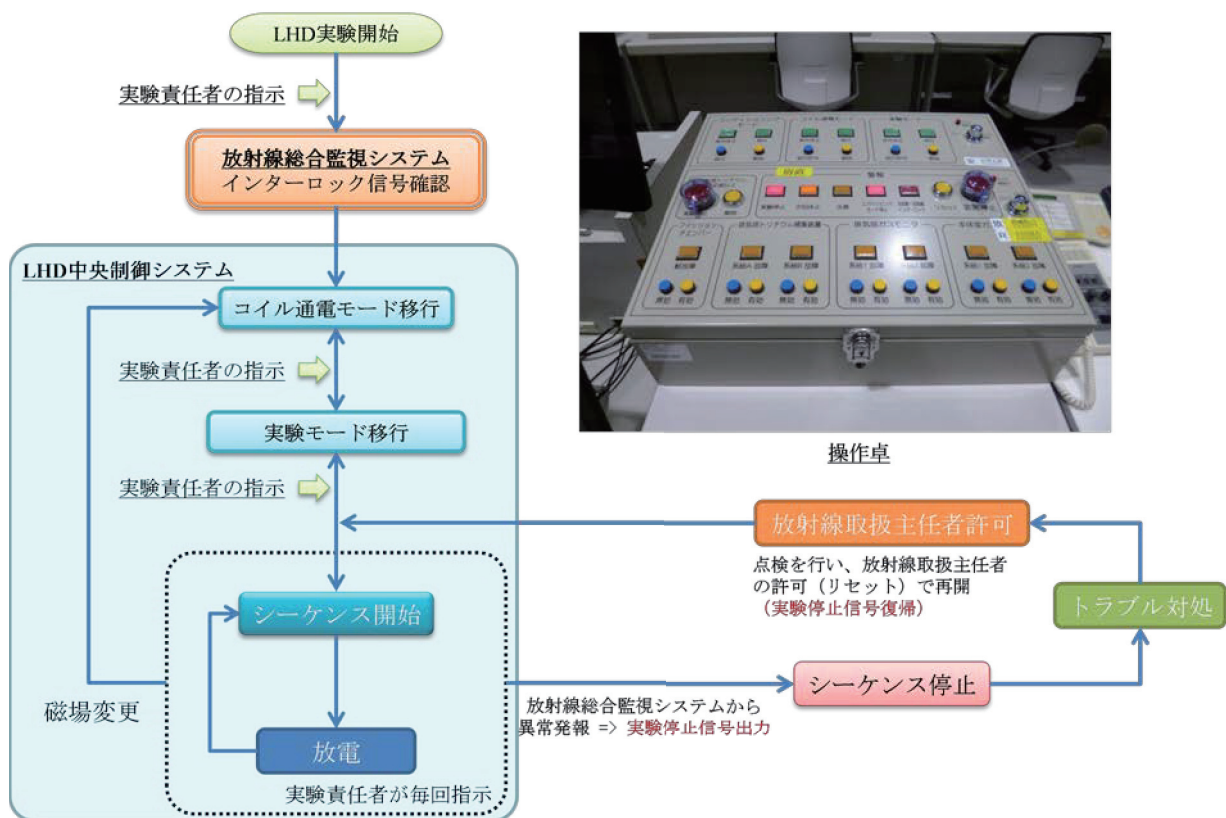


図 6. 操作卓と実験の流れ

この後、実験責任者は LHD 実験を行うため超電導コイルの通電モード移行許可ボタンを押してコイル通電モードに移行する。実験磁場に整定すると、実験モード移行許可ボタンを押して実験モードに移行し、実験シーケンスを開始する。

放射線管理機器に異常が発生すると、中央制御装置に実験停止要請信号を出力し、実験が停止する。また、大型ヘリカル実験棟外部へ汚染物質が拡散する恐れがあるときは、空調設備へ停止信号を出力し、汚染の拡大を防ぐようになっている。インターロック盤は、実験停止要請信号を保持し、監視 PC の履歴画面で何が起こったか把握することができる (図 7)。

トラブル対応が終わり実験を再開するときは、放射線取扱主任者が異常ないことを確認して許可 (リセット) すると、実験停止要請信号が解除される。

4 まとめ

今回更新した ITV システムとインターロックシステムは、昨年の実験前に運用を開始した。稼働してから実験終了までの間に実験が停止するような大きな不具合はなく、安全に重水素実験が行われている。



図 7. 制御室の監視 PC

参考文献

[1] 林 浩、他、“放射線総合監視システムの整備と管理計画”、平成 29 年度核融合科学研究所技術研究会報告集、平成 30 年 3 月。

FPGA 評価ボードで作る簡易 DAQ

○岡田宏太 ^{A)}

^{A)}名古屋大学 全学技術センター

概要

Xilinx 社製 SoC の ZYNQ は CPU を搭載しており、ソフトウェアを動かすことができます。

評価ボードは各社から発売されており、オンボードメモリ、イーサネット、USB といった豊富な機能が使えます。今回、研究者から 200MSPS の AD ボードが欲しいとの依頼があったので、市販の FPGA 評価ボードと内作した AD ボードを組み合わせ DAQ を製作しました。

1 背景

ユーザーからの依頼は、8bit、200MSPS の AD を 2ch 搭載し、外部トリガ (TTL,10kHz) に同期して、トリガ毎に 1us 分 (200 ポイント) のデータ取得を 10 分間連続で行うというものでした。200MSPS の AD を実現するには PC ベースのデジタイザや、専用の AD ボードを使う方法もありますが、いずれも数十万円以上と高価なため、市販の FPGA 評価ボードに内作した AD ボードを組み合わせ、簡易ですが安価な DAQ を構成することにしました。

2 デザイン

2.1 FPGA ボードの選定

FPGA ボードの選定は、機能的な仕様はもちろんのこと、開発をスムーズに行うためにもドキュメントの充実度を考慮する必要があります。Digilent 社の ZYBO や AVNET 社の ZedBoard などはユーザー数も多く、お勧めです。今回はユーザー IO の数や、ドキュメントの充実度から AVNET 社の MicroZed を使います。表 1 に MicroZed の概略仕様を示します。SD カードから Linux を起動できるので、イーサネットや USB 機器との連携も容易です。

表 1 MicroZed の概略仕様

SoC	XC7Z010-1CLG400C
メモリ	1 GB DDR3 SDRAM
インタフェース	マイクロ SD カード イーサネット、USB ユーザー I/O (100)

2.2 システム概要

図 1 に本システムのブロック図を示します。8bit、100MSPS の ADC を 2 個組み合わせてインターリーブ動作させ 200MSPS を実現します。AD データは FIFO メモリに蓄えられ、順次 DRAM に転送します。なお 1 回の測定で数 GB のデータ量となるので、全てのデータを DRAM に蓄える事はできません。SD

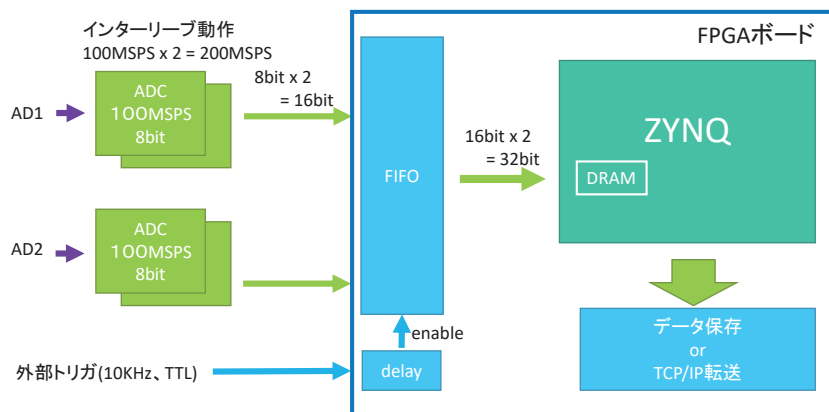


図 1 DAQ システムのブロック図

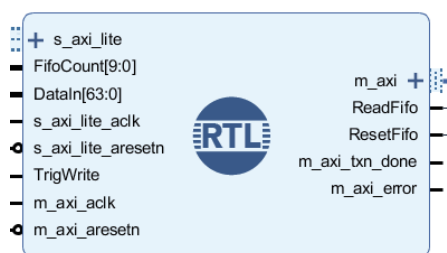


図 2 DRAM 転送用 IP

カード（USB メモリでも可）に保存するかイーサネット経由で順次転送します。

2.3 DRAM 転送用 IP

DRAM にデータを転送するには ZYNQ の PS (Processing System) 部に対して AXI バスを介して通信する必要があります。Xilinx の開発環境 VIVADO には AXI ペリフェラルを自動生成する機能があるので、これを使って AXI ペリフェラルを生成し、カスタマイズすることで DRAM 転送用の IP を作成しました。図 2 に作成した IP を示します。AXI バスと AXI-Lite バスを備え、AXI-Lite は IP のパラメータ設定などの低速通信に使い、AXI バスは DRAM 転送用の高速通信に使います。

3 動作試験

3.1 AD クロック調整

図 3 に製作した AD ボードを示します。図 4 は AD に矩形波を入力したときの測定データです。調整前のデータ（図 4 上）では、信号のエッジ部分でノイズの様なものが見えます。これは ADC に入力するクロックと ADC からのデータ信号（パラレル出力）を取得するクロックに同一のものを使用したために、パラレル信号のバタつきを捉えてしまったためです。対策として2つのクロックの位相を 180° ずらしたところ、信号のバタつきは収まりました（図 4 下）。クロックの位相を手軽に変更できるのも FPGA を使う利点です。

3.2 読み出しプログラム

メモリ（DRAM）に転送されたデータの参照は CPU のプログラムから行います。Linux が動いているので、転送先のメモリアドレスを直接読み出すことでデー

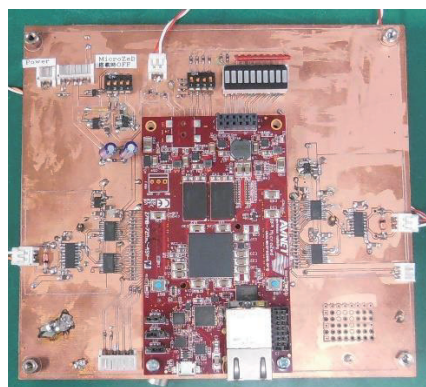


図 3 AD ボード

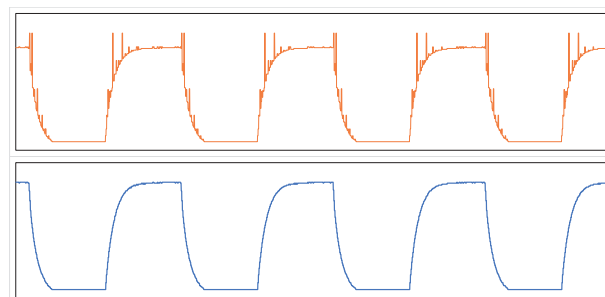


図 4 AD 動作確認結果

上：クロック調整前

下：クロック調整後

タを参照できます。本来はデバイスドライバ経由で読み出すべきですが、簡便さを優先して、メモリマッピング（`mmap()`）を使って読み出すことにしました。読み出したデータは TCP/IP で別 PC に転送します。Linux が動いているので、ソケット通信の実装も容易です。データレートは 4MB/s 程度ですが、問題なく動作しました。

4 まとめ

FPGA と CPU を組み合わせることで、高性能かつ拡張性の高いシステムを構築出来るようになりました。特に Linux を動かす事が出来るメリットは大きく、USB やイーサネットなどのインターフェースを使って、様々なシステムに応用することが出来ます。製作した DAQ は別に AD ボードを必要としますが、ZYNQ 自体にも AD が組み込まれているため、ZYBO や ZedBoard であれば、それだけで簡易 DAQ やロジアナを製作することが出来ます。

J-PARC MR におけるキャパシタバンク制御試験用小型電源の開発

○三浦一喜^{A)}、下川哲司^{A)}、森田裕一^{A)}、栗本佳典^{A)}、内藤大地^{A)}、佐川隆^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

^{B)}ユニバーサルエンジニアリング

概要

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) では将来計画であるビーム大強度化のために、主リング(MR)の運転周期を 2.5 秒から 1.3 秒へと速める高繰り返し化を実現することが求められており、その計画の一部として高繰り返し対応の主電磁石用新電源の開発が進められている[1]。新電源への要求の一つとして、電磁石の励磁エネルギーを1次側へ回生することにより発生するシステムの電力変動を抑えることが挙げられる。この要求に対して新電源ではキャパシタバンクを用いて回生エネルギーを貯蔵することで対応する[2]。特に我々はフローティングキャパシタ方式を採用するため、系統に接続しないキャパシタバンクの電圧制御が課題となる。我々はその電圧制御試験を目的として、キャパシタバンクの静電容量を新電源の十分の一程度とした試験用小型電源を IPM(Intelligent Power Module)によるコンパクトなフルブリッジチョッパとして開発した。本報告では制御試験用小型電源の開発およびフローティングキャパシタの初充電シーケンス制御の確立に向けて行ったキャパシタバンク間の充放電試験の結果について報告する。

1 開発目的

現在開発中の偏向電磁石 (BM) 新電源の主回路構成を図 1. に示す。BM 新電源では 6 台のチョッパを直列にし、それぞれのチョッパにキャパシタバンクが接続されている。そのうち中央の 2 台のみを系統に接続し、上下の 2 台ずつは系統に接続しないフローティングキャパシタとしている。このフローティングキャパシタの初充電はフローティング部のチョッパを回生動作させることにより、系統接続キャパシタバンクから負荷を介して充電する方式を採用し

ている。その初充電シーケンス制御の確立が現状の課題である。そこでチョッパを 2 直列とした制御試験用小型電源の開発を行った。

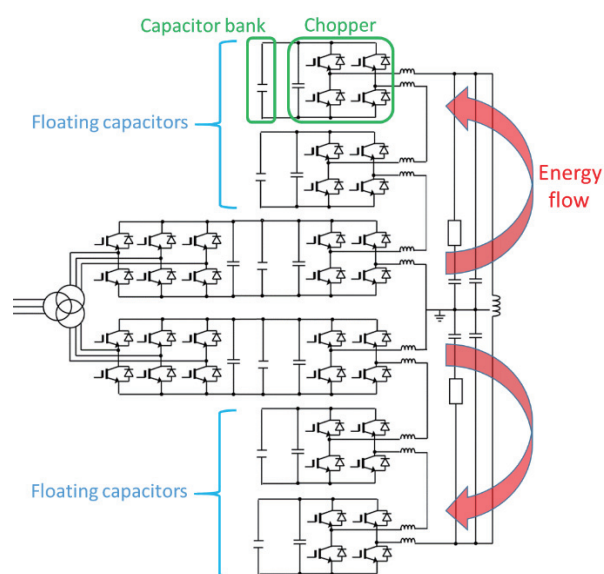


図 1. 主回路概要

2 小型電源主回路概要

本小型電源は、トランス、三相コンバータ、フルブリッジチョッパ 2 台、キャパシタバンク (50mF) 2 台、出力フィルタ、負荷(12.9mH, 8.7mΩ 6 直列)により構成されている。主回路の概要を図 2. に示す。2 台のフルブリッジチョッパ Chopper1, Chopper2 が直列に接続してあり、キャパシタバンク C1, C2 がそれぞれに接続されている。本来は C1 を系統接続してコンバータによる初充電を行うが、その前段階となる今回のチョッパ動作試験においては、コンバータと C1 間を分離し、各キャパシタバンクを共にフローティングさせた状態で動作させ、それぞれのキャパシタバンク初充電は別途初充電回路を用いて行った。

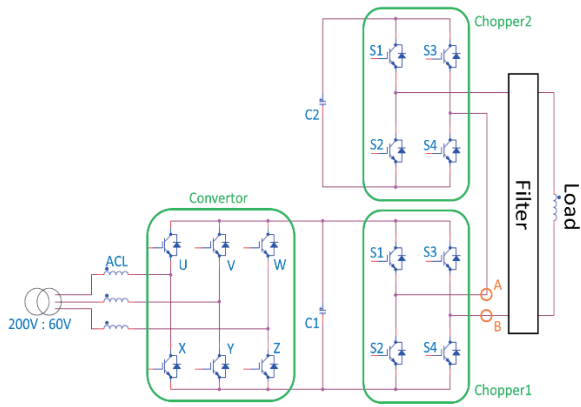


図 2. 小型電源主回路概要

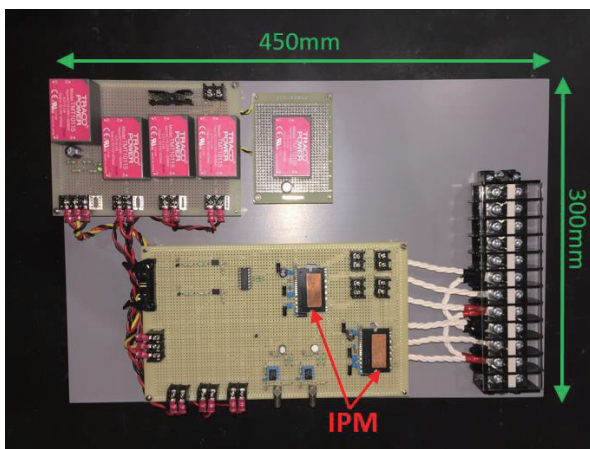


図 3. チョップユニット外観

このフルブリッジチョップは、テーブルトップサイズの可搬型ユニットを目標として開発を行った結果、スイッチング素子に IPM を用いることで、図 3. に示すように A3 サイズ程度のコンパクトなチョップユニットを実現した。今回使用した IPM は STM 社製の STGIB15CH60TS-L で、素子内部に定格 600V, 20A の IGBT を 2 直列、3 並列に内蔵しており、本小型電源では IPM 2 台で一つのフルブリッジチョップを構成することで電流定格 60A を得ている。本小型電源におけるフルブリッジチョップの基本的な動作を表 1. に示す。S2, S3 を常時 OFF、S1, S4 を表 1. のようにスイッチングさせることにより、力行、還流、回生の制御を行い、負荷への出力およびキャパシタバンク間でのエネルギーの交換を行う。

表 1. チョップ動作一覧

	S1	S2	S3	S4	
力行	ON	OFF	OFF	ON	
還流	ON			OFF	OFF
	OFF			ON	
回生	OFF			OFF	

3 IPM 周辺回路

IPM によるチョップユニットを開発するうえで、動作上必要となる周辺回路について述べる。

3.1 ブートストラップ回路

IPM 内の High-Side(HS) IGBT をドライブするためには、HS-IGBT のゲート信号電圧を Low-Side(LS) IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧分浮かせる必要があるため、ブートストラップ回路が必要となる。ブートストラップ回路の構成について図 4. に示す。IPM におけるブートストラップ回路はモーター駆動回路のように LS-IGBT もスイッチを行う回路であれば、ブートストラップキャパシタ(BSC)は LS-IGBT が ON した際に自動的に電源電圧へ充電されるが、今回の構成では S1, S2 において LS-IGBT は常時 OFF に対して HS-IGBT をスイッチング動作させる必要があったため、別途 BSC の充電を行う必要があった。そのため電源電圧 Vcc と同電圧の外部電源 Vdd を用意し、常時 BSC が充電されている状態を作ることによって、HS-IGBT のみのスイッチング動作を可能とした。

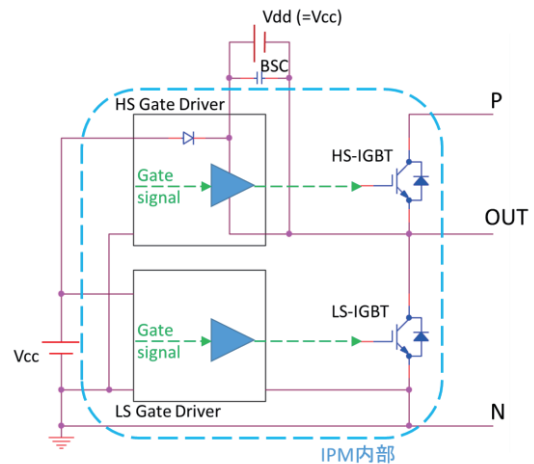
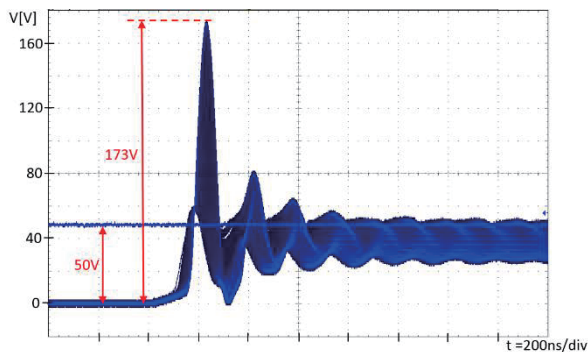


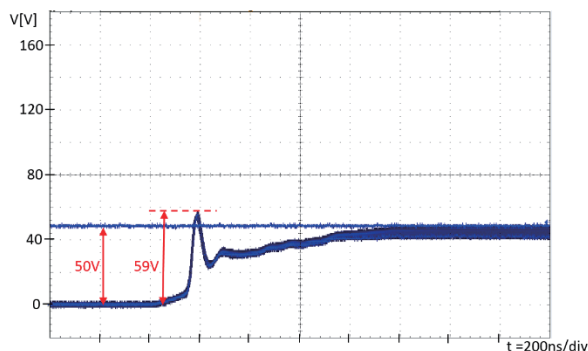
図 4. ブートストラップ回路

3.2 サージ対策

IGBT はスイッチングが速いため、ターンオフ時に大きな di/dt を発生し、IGBT 周辺の配線インダクタンスによるターンオフサージ電圧が発生する。そこで素子破壊を予防するための保護回路として、スナバ回路を導入してサージ電圧の吸収を図った。スナバ回路はスイッチング電源に対して一般的に用いられる RC スナバ回路を採用した。本サージ測定においては図 2 の A-B 間をショートして Chopper1 を分離、Chopper2 のみで動作とし、キャパシタバンク C2 を 50V 充電した状態から、S4 は常時 ON、S1 をスイッチングさせることにより力行・還流モード（放電）動作させた時の S1 両端サージ電圧を重ね書きした試験結果を図 5 に示す。スナバ回路の導入により、スナバ回路無しの状態の図 5-(a) で充電電圧の約 3.5 倍出ているサージ電圧がスナバ回路有りの状態の図 5-(b) で 1.18 倍となり、サージ電圧を大幅に低減することに成功した。



(a) スナバ回路無し

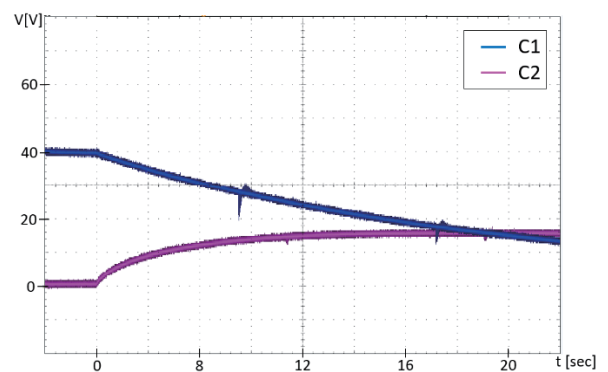


(b) スナバ回路有り

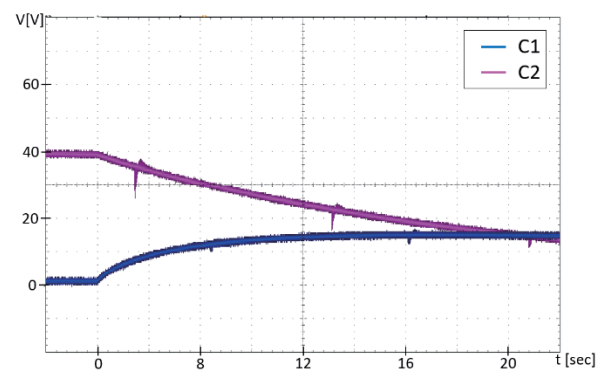
図 5. サージ測定結果

4 チョッパ動作試験

Chopper1 と Chopper2 をそれぞれ力行・還流モード（放電）と回生・還流モード（充電）にすることにより、キャパシタバンクを充放電させ、それぞれのキャパシタバンク間でエネルギー交換が行えるか試験を行った結果を図 6 に示す。それぞれにおいて放電動作をさせるキャパシタバンクを 40V に初充電、充電側キャパシタバンクが 0V の状態で充電・放電動作を行った結果、放電動作にあわせて充電側キャパシタバンクが充電されており、キャパシタバンク間でのエネルギーの交換に成功していることが読み取れる。この結果により今回開発した制御試験用小型電源の構成において、BM 新電源に向けたフローティングキャパシタの初充電シーケンス制御試験が可能であることが実証された。



(a) C1 放電、C2 充電



(b) C1 充電、C2 放電

図 6. キャパシタバンク間充放電試験

5 まとめと今後

J-PARCでは将来計画であるビーム大強度化のために、MRの運転周期を2.5秒から1.3秒へと速める高繰り返し化対応の主電磁石用新電源の開発が進められている。新電源への要求の一つとして、電磁石の励磁エネルギーを1次側へ回生することにより発生する系統の電力変動を抑えることが挙げられる。この要求に対して新電源ではキャパシタバンクを用いて回生エネルギーを貯蔵することで対応するが、我々はフローティングキャパシタ方式を採用するため、系統に接続しないキャパシタバンクの電圧制御が課題となる。今回その電圧制御試験を目的としたテストベンチとして、キャパシタバンクの静電容量を新電源の十分の一程度とした試験用小型電源を開発した。小型電源のチョッパユニットはスイッチング素子としてIPMを用いて開発し、フローティングキャパシタ間での充放電動作によるエネルギーの交換が可能であることを確認した。今後は初充電シーケンス制御の確立に向けて、Chopper1へのコンバータおよび系統接続を行い、BM新電源に向けた制御試験を進めていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Morita et al., “Development of J-PARC MR Main Magnets Power Supplies for High Repetition Rate Operation,” JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012006.
- [2] T. Shimogawa et al., “Test Demonstration of Magnet Power Supply with Floating Capacitor Method,” JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012021.

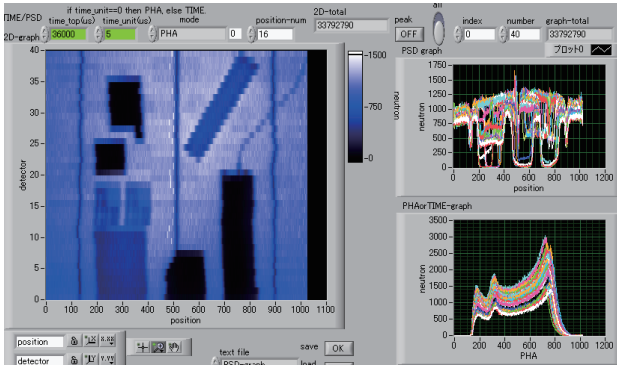


図 2. 図 1 の測定データ

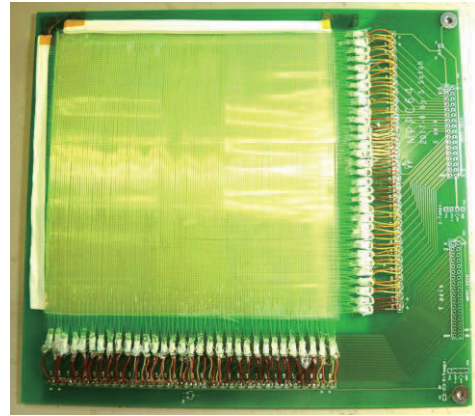


図 5. 2次元検出器の検出面外観

2.2 MPPC を使用した検出器システム

MPPC はアバランシェダイオードを 2 次元に数百～数万個配置したシリコン受光素子である。PMT と同程度に光を電流に変換できる。しかし、シリコン素子なので放射線に弱く、直接中性子に当たらない波長シフトファイバーを使用する方式等が向いている。図 3 に波長シフトファイバーの計測原理を示す。中性子で光ったシンチレータ光がファイバーの横から入ると吸収し、波長を変換して再発光する。これらの光がファイバーに沿って通り、端面の MPPC で読み出される。MPPC の狭い受光面で広い領域のシンチレータ光を集めることができる。

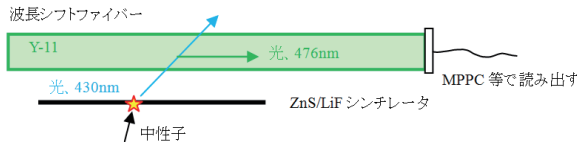


図 3. 波長シフトファイバーの計測原理

図 4 に波長シフトファイバーを使用した 2 次元検出器の構成図を、図 5 に実際の外観を、図 6 にデータ例を示す。64 個の MPPC を X 軸と Y 軸に 32 個ずつ配置している。位置分解能 2mm が得られた。

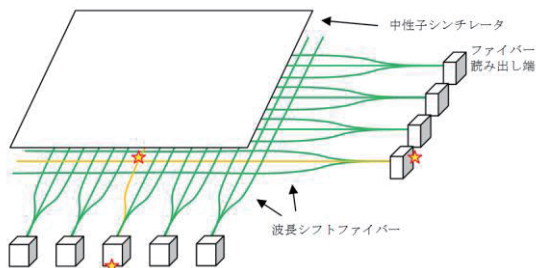


図 4. 2次元検出器の構成図

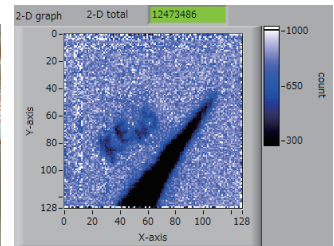


図 6. 検出器前の遮蔽物とそのデータ

3 MPPC 電圧制御回路

3.1 MPPC の電圧調整と温度補正回路

MPPC 電圧制御回路には、個別の MPPC への電圧調整回路と、自動動作する温度補正回路が必要である。図 7 に MPPC 電圧制御回路を示す。右上に CPU を搭載した FPGA 付きの高電圧発生及び温度補正回路を、左下に電圧調整回路が写っている。



図 7. MPPC 電圧制御回路

図 8 は MPPC 電圧制御回路のブロック図で、およその構成を示している。CPU はネットワークを通じて制御 PC とデータ授受できる。制御 PC からの指令で多数の MPPC の個別電圧を指定できる。その値を

不揮発メモリ（EPROM）に書き込むことができる。電源投入時は自動的に EPROM の値を読み出し、DAC に設定する。また、5 秒に 1 回程度で MPPC 近辺に設置した温度計を読み出し、温度補正値を共通電圧の DAC に書き込む。

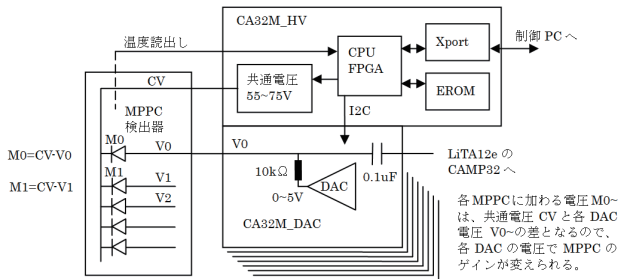


図 8. MPPC 電圧制御回路のブロック図

3.2 各部分の動作

MPPC の動作電圧は 2017 年現在で 53V 程度である。制御範囲を考えると 60V 以上の高圧電源が必要である。小型で低価格、高性能にするためには、汎用品の組み合わせにしたい。図 9 に高電圧発生回路のブロック図を示す。入出力絶縁タイプで 24V 系を組み合わせ、72V:24mA とした。1 個の MPPC は 0.1mA 以下で、64 個分だと 6.4mA であるので、十分である。

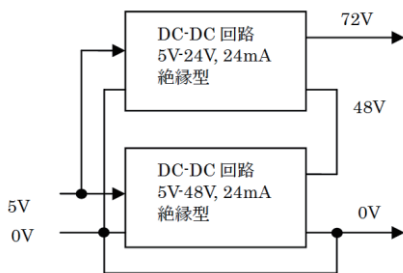


図 9. 高電圧発生回路のブロック図

高電圧発生回路は固定電圧の 72V 程度の精度の悪い電圧を発生するので、可変で精度の良い制御をしたい。しかし汎用品で 72V から 53V に電圧制御できるレギュレータはあまりない。唯一、グランドに設置しないで電圧制御できる LM317 系のレギュレータが可能である。出力電圧とグランドまでの抵抗比だけで電圧が決めるため、応用範囲が広い。図 10 に MPPC 電圧調整回路のブロック図を示す。R2 の一部を半固定抵抗にすることで、Vout のおよその電圧

を決め、DAC で CPU からの電圧制御を可能にしている。ただし、多くの LM317 の耐電圧は 37V 程度なので、保護用に入力と出力間にツェナーダイオード等を付けるべきである。

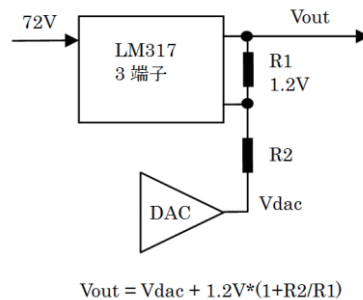


図 10. MPPC 電圧調整回路のブロック図

図 11 に個別 MPPC の電圧制御の概略図を示す。それぞれの MPPC には MPPC 電圧調整回路の出力と個別 DAC の出力差が加わることになる。

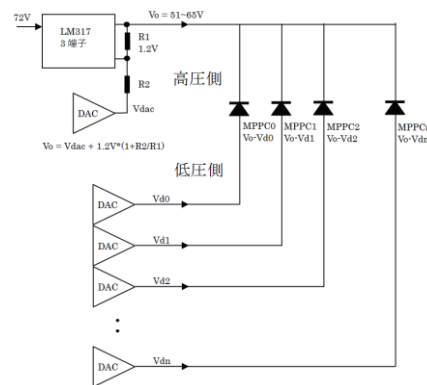


図 11. 個別 MPPC の電圧制御回路の概略図

3.3 多数 MPPC の調整例

図 5 の検出器を多数 MPPC の調整例として紹介する。図 12 に検出器を暗箱に入れた様子を、図 13 に暗箱内の検出面とテスト用 LED を示す。LED の波長と発光時間と強度をシンチレータに合わせている。



図 12. 検出器を暗箱内に入れた様子



図 13. 暗箱内の検出面とテスト用 LED

図 14 に個別 MPPC の電圧制御プログラムを示す。制御 PC から 64 個の MPPC の電圧設定と、EROM への書き込み等ができる。

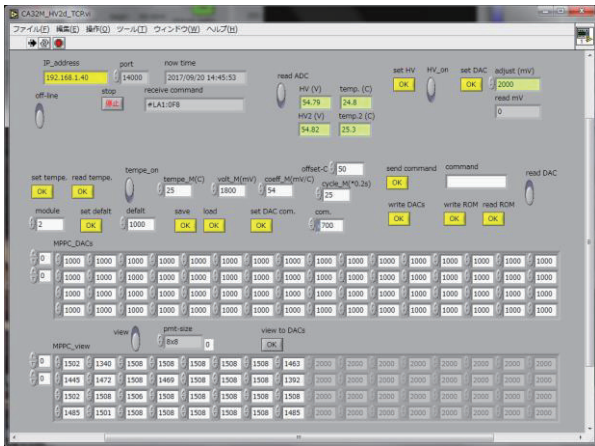


図 14. 個別 MPPC の電圧制御プログラム

図 15 に 2 次元検出器の測定プログラムを示す。個別の MPPC 出力の波高分布を出力できる。

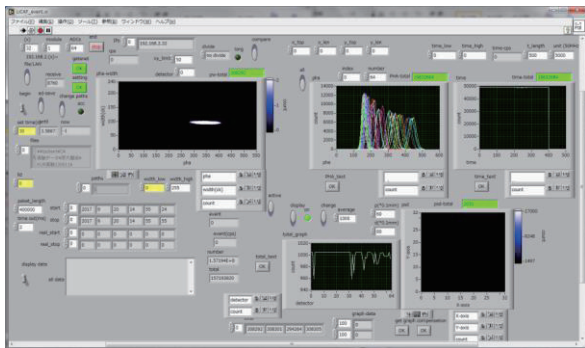


図 15. 2 次元検出器の測定プログラム

図 16 に MPPC 電圧フィードバックプログラムを示す。図 15 の結果から、図 14 の設定値にフィードバ

ックを施した設定ファイルを作成できる。図 17 は MPPC 電圧調整前とフィードバックを 3 回程度かけた後の波高分布図を示す。制御 PC から多数の MPPC 電圧を制御できるようにできたので、少し手間はかかるが自動で調整できるようになった。

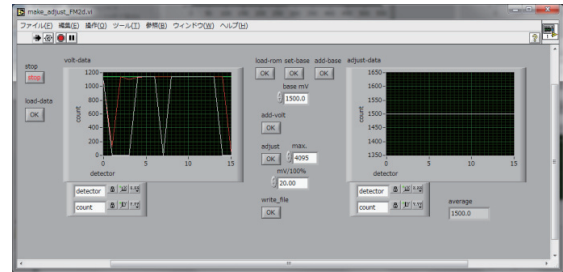


図 16. MPPC 電圧フィードバックプログラム

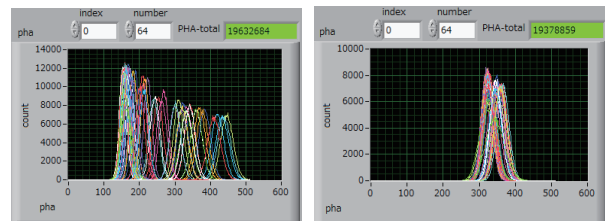


図 17. MPPC 電圧調整前と後の波高分布図

4 おわりに

本研究開発の MPPC 制御回路システムの成功は、今後の中性子検出器回路システムの開発に大きな進展をもたらす。さらに簡便で正確な自動調整システムを目指し、中性子実験で簡単に使用できる検出器システムに仕上げていきたい。

参考文献

- [1] Satoh S, et al. DOI:10.1016/j.nima.2008.11.054.
- [2] Satoh S, et al. nima.2013.04.067, <http://authors.elsevier.com/sd/article/S0168900213040932>.

STARS を用いた真空一元管理システム

○石井晴乃、仁谷浩明、小菅隆

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

概要

高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設(以下 KEK PF)では STARS と呼ばれる制御用ソフトウェアを用いビームラインの制御を行っている。これにより真空ゲージコントローラの制御が可能となり、データのロギングや設定値の変更などを PC から行うことができる。一方で使用する真空ゲージコントローラによって通信規格が異なる場合やコマンドのプロトコルが異なることが数多くある。

今回我々は、真空ゲージコントローラの違いによる設定や構成の変化を最小限にし、規模が大きくなった場合でも容易に真空を管理することのできるシステムを開発した。

1 はじめに

KEK-PF では PFEIFFER VACUUM 社製の真空ゲージコントローラ TPG261 や TPG300,TPG361,また Leybold 社製の真空ゲージコントローラ Center シリーズや Graphix シリーズなど各社様々な真空ゲージコントローラが数百台の単位で放射光利用実験を行うためのビームラインで使用されている。

KEK-PF で使用している真空ゲージコントローラには真空値があらかじめ設定した値になると ON/OFF する接点出力があり、出力は放射線安全やビームライン真空の保持を目的としたビームラインインターロックシステムに接続される。ビームラインインターロックシステムは真空が悪化した場合、ゲートバルブを制御することでストレージリングやビームラインの真空を確保している。

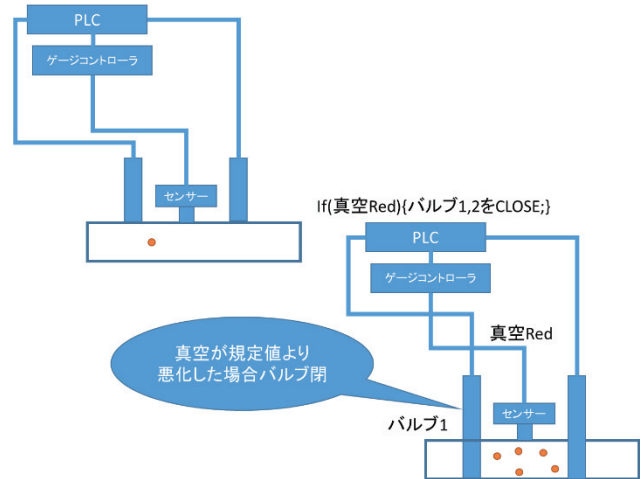


図 1. 真空ゲージコントローラの役割

これとは別に真空値の変動から光学素子の出ガスなど様々な情報を得るためには真空値をロギングし蓄積されたデータを可視化することが必要である。なお、KEK-PF では使用する真空ゲージコントローラは統一されておらずビームラインごとに真空ゲージコントローラの台数なども違うため真空データを蓄積するためのシステムはすべて同様の構成というわけにはいかない。システムの構築はそのような事情を加味し規模に合わせ、かつ導入やメンテナンスが容易である必要がある。

そのような背景から真空ゲージコントローラを制御し真空値をロギング及び可視化するシステムを KEK-PF に於いて開発されたビームライン制御用のソフトウェア ”STARS(Simple Transmission and Retrieval System)”^[1]を用いて構築した。

STARS は TCP/IP ソケットを使用してテキストメッセージを送受信するメッセージ配信システムでシンプルかつ様々なシステムに応用可能である。

2. システム構成

2.1 概要

KEK-PF で構築したシステムは大きく分けて主に 2

つの構成がある。1つは真空ゲージコントローラの数が多く設置場所も広い範囲にわたるような規模の大きな場合の構成である。制御するソフトウェアを1台のPCにまとめることでハードウェアとソフトウェアを切り分け管理を容易にする(図2)。これには制御するPCと真空ゲージコントローラがネットワークでつながっている必要がある。また、もう1つは一時的に真空ゲージコントローラから情報を得たい場合や接続するデバイスが小規模な範囲でまとまっている場合の構成である。大きなメリットとしてコストを削減できることや事前に必要なソフトウェアをインストールしておくことでPCとデバイスをケーブルでつなぎソフトウェアを起動するだけで構築することが可能なシステムになる(図3)。

2.2 大規模システム

大規模システムの構成例を図2に示す。なお、今回構築した真空一元管理システムはこのタイプである。この例では真空一元管理用のサーバに真空ゲージコントローラを制御するソフトウェアやロギングソフトウェア、真空ゲージコントローラと通信する環境を構築するためのSTARSサーバがインストールされている。各真空ゲージコントローラと通信にはシリアルデバイスサーバが使用されている。なお、各シリアルデバイスサーバはTCPサーバモードで動作している。

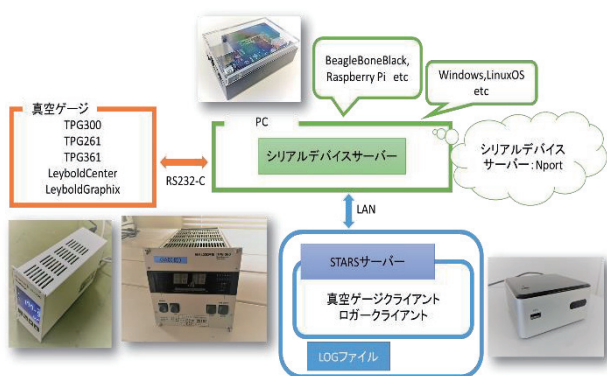


図2. 大規模システム

KEK-PFのビームラインにおいて大規模なシステムの構成では約100台以上のゲージコントローラが接続されているが、各ビームラインで使用されているゲージコントローラの機種や台数は異なる。シリアルデバイスサーバを利用することで制御端末から

はそれらの違いを意識することなく一つのネットワーク機器として認識することができるようになる。

1つ制御クライアントが立ち上がる際はシリアルデバイスサーバのIPアドレスと真空ゲージコントローラが利用するポート番号の情報で接続する。

2.3 小規模システム

小規模システムの例を図3に示す。小規模システムの場合、真空ゲージコントローラは直接RS232-CでPCに接続されている。このPCにはシリアルデバイスサーバソフトやSTARSサーバなどすべてのSTARS関連のソフトウェアをインストールする。小規模システムの場合には、大規模システムでいう真空一元管理用サーバの役割とシリアルデバイスサーバの役割を一つのPC端末が行う事となる。

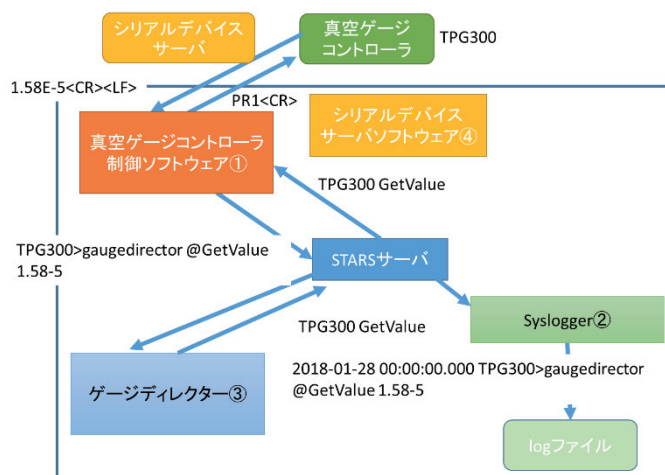


図3. 小規模システムの構成

3. 真空一元管理システムにおけるSTARS関連のソフトウェア

真空一元管理システムで使われるSTARS関連のソフトウェアを図4に示す。

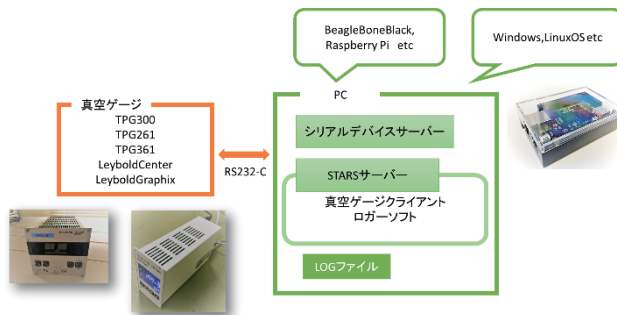


図4. ソフトウェアの構成

真空一元管理システムでは、それぞれ真空ゲージコントローラと直接コマンドをやり取りする真空ゲージコントローラ制御ソフトウェア①、STARS サーバのやり取りをすべてテキストに記録するロガーソフトウェア②、指定した時間間隔で指定した真空ゲージコントローラにコマンドを送るソフトウェア③、PC のシリアルポートを TCP/IP ソケットとして認識させるシリアルデバイスのソフトウェア④が動作している。ソフトウェアを複数作成し、それぞれに役割を分担させることで、個々のソフトウェアの単純化と柔軟な構成の変更が可能となっている。

3.1 真空ゲージコントローラ制御ソフト

現在 STARS 対応の真空ゲージコントローラは以下に挙げる 6 つである。

- PFEIFFER TPG300
- PFEIFFER TPG261
- PFEIFFER TPG361
- Leybold Center シリーズ
- Leybold Graphix シリーズ
- Leybold TM22

これらのゲージコントローラは、機種やメーカーによってそれぞれ独自のコマンドを持っている。制御クライアントでは共通のコマンドを決め、それぞれ機種に合わせたコマンドに変換し送ることで、真空ゲージコントローラの機種による操作の違いを減らすことができる。

なお、クライアントの立ち上げ手順等に関しては STARS の Web サイト²⁾にあるチュートリアルに詳しく記載されている。

本システムのコマンドのやり取りは以下のような書式で行われている。

TPG300(ノード名) GetValue(コマンド)

TPG300(ノード名)>term1(自ノード名) @GetValue

2.2E-9

コマンドは GetValue、SetSwFuncX、SPS などがある。それぞれ指定したセンサーの検出した真空値を得たり、セットポイントを設定したり、現在のセットポイントの ON/OFF を確認したりする機能がある。

アナログ出力信号のみの真空ゲージコントローラに関しては Arduino を用い ADC 変換し、変換した出

力値を STARS クライアントで真空値に直し、変換した真空値はクライアントから STARS サーバを通してサーバのクライアントに送るようにした。これによりほかのアナログ出力のデバイスも ADC 変換、計算用クライアント、STARS サーバがあればデータのやり取りができログを取ることが可能になる。

3.2 ゲージディレクターとロガー

ゲージディレクターは指定したノードに指定したコマンド、例えば TPG300 に対して GetValue というようにコマンドを送り続けるソフトウェアである。送るコマンドや時間間隔は自由にセットできる。ロガーソフトは STARS の Web サイトよりダウンロードした、標準 STARS Client である syslogger を使用している。記録されるデータは次のような書式となる。

```
2018-02-01 00:08:00.115 gaugedirector>testgauge1.1  
GetValue
```

```
2018-02-01 00:08:30.140 testgauge1.1>gaugedirector  
@GetValue +1.0900E-07
```

3.3 シリアルデバイスサーバ

シリアルデバイスサーバは RS232-C 機器をイーサネット経由でリモートに監視、管理することができる。KEK-PF では MOXA のシリアルデバイスサーバである Nport(図 5)か PC の USB 等をシリアルデバイスのポートとして認識させるシリアルデバイスサーバソフト(図 6)を使用している。例えば前述の小規模なシステム構成の場合には Nport ではなくシリアルデバイスサーバのソフトウェアを起動することで、イーサネット経由のシリアル通信を低コストで実現する事が可能となる。



図 5. シリアルデバイスサーバ(Nport)



図 6. シリアルデバイスサーバ(シリアルデバイスサーバソフトの入った PC※オレンジ枠)

4. グラフィック

真空一元管理システムにおいて STARS 関連のソフトウェアは、真空ゲージコントローラと制御クライアントが STARS サーバ経由で通信しコマンドのやり取りをしたりテキストベースでデータを蓄積したりする役割を担っている。テキストベースのデータは STARS の通信時間ごとに追加されて保存されていく。ここで、STARS 関連のソフトウェアはデータを記録するところまでを担っているが、データを検索することや真空値の変化を表示するために別途 CGI プログラムを作成している。この CGI プログラムを利用すると、必要な真空ゲージコントローラのデータのみをテキストデータから読み込み、グラフで表示する事や CSV ファイルとしてダウンロードする事が可能となる(図 7)。

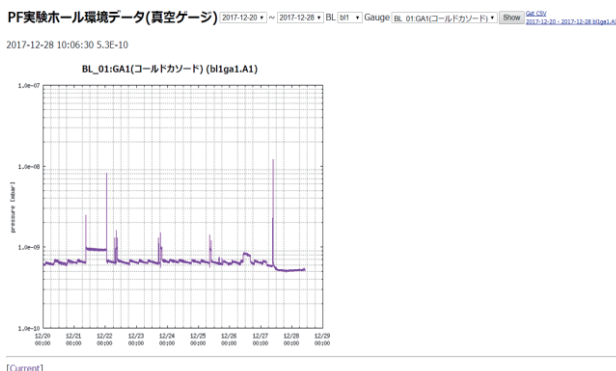


図 7. CGI でのグラフ表示

5. まとめ

本開発では KEK-PF で広く利用されている STARS を使い、真空値の測定からデータの蓄積、表示までの

システムを構築した。また各ソフトウェアや ADC 回路のプログラムなどは、できるだけ単純な機能のみで作成している。そのため、今後真空ゲージコントローラ以外のデバイスから出力されるデータ収集の際には、デバイスと通信するためのクライアントのみを開発すれば同様のシステムが容易に構築することができる。

参考文献

- [1] T. Kosuge and Y. Nagatani, “STARS Current Development Status,” in Proc.PCaPAC’ 14, Karlsruhe, Germany, Oct.2014,paper WPO019
- [2] STARS, <http://stars.kek.jp>
連絡先
Email:haruno.ishii@kek.jp

第4分野 (極低温技術)

小規模密閉空間を模擬した液化ガス漏洩時の拡散特性の研究

日比美彦

豊橋技術科学大学 工学部 技術支援推進室

1. はじめに

豊橋技術科学大学では、高圧ガスボンベの利用者ならびに液化ガス(液体窒素(LN₂)、液体ヘリウム(LHe))の新規使用者を対象に、教育訓練(利用者講習)を毎年行っている。

講習の指導事項の1つに、エレベータを利用する際には、「液化ガスの入った容器と一緒に乗らないこと」がある。これは、万一昇降中のエレベータが長時間停止した際に、液化ガスの気化により、エレベータ内にガスが充満し、酸欠に至る可能性があるため、酸欠事故を防ぐための指導である。しかし、講習後に学生にこの事柄の認識について確認をすると、危険性を十分理解していない者が少なからずいる事が判明した。

これら受講者の多くは、窒息と酸欠を混同しているか、密閉空間(実験空間)で液化ガスが蒸発・拡散することの危険性をイメージできていないことが判った。そこで、受講者が事故の危険性を理解するよう、密閉空間においてLN₂がこぼれた際の状況を記録・撮影し、数値化・可視化することで、より効果的な安全指導方法を模索していた。

今回は、エレベータのような小規模密閉空間を実物大で作成し、生じる危険性の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 模擬空間

学内でLN₂運搬に使用する、頻度の高いエレベータ3機の寸を測定し容積を算出した。3機ともほぼ同じ容積であったため、最も利用頻度が高いエレベータの寸を模擬空間の基準寸法(縦1.4m、横1.4m、高さ2.4m、容積4.7m³)とした。

また、一般的なエレベータの天井部には、通風孔が設置されており、基準とするエレベータにも直径25cmの通風孔があったので、模擬空間にも同径の通

風孔を作成した。内壁の側面部分2面をビニールハウス用のビニールで覆い、残り2面を食品用ラップフィルムで覆い囲った。また、拡散するガスを見やすくするためビニール2面の内側に黒の模造紙を張り付けた。

天井面と床面も梱包用ラップ材で封止したが、床面はアングル枠の上に板を敷きラップで封止して、その上に段ボールと黒の模造紙を敷き、最後にアルミ板を敷き詰めて床面を作った。

2.2 LN₂運搬容器と実験容器

LN₂利用者が運搬に用いる一般的な容器を調査した。本学では、シーベル(ジェック東理社_CEBLL)と、クリック(エーテック社_CRIC)、その他、Taylor-Wharton社、チャート社、エア・リキード社などのバイアル収納用や小型の液体窒素保存容器、LICONシリーズ、LABシリーズ、TRシリーズなどの大口徑容器や、大容量容器などが利用されている。(図1)



図1. 利用されているLN₂運搬・保存容器類

本研究の目的は、運搬容器が転倒した際、漏洩・流出するLN₂量を想定するとともに、流出が少量であっても小規模密閉空間で生じる危険性を検証することである。そのため多くの利用者が使用し、小口径で比較的安全と思われる容器(CEBELL, CRIC)を用いて、転倒実験を計画した。実験では、CEBELL-5・10ℓと、CRIC-5・10ℓ容器を使用した。容器の開口径(内径)は、CEBELL-5・10ℓが19mm、CRIC-5・10ℓが24mmである。これ以上口径が大きい容器はLN₂流出量が多くなり、実験での取回しが難しくなるため今回の実験対象から除外した。

2.3 容器の転倒と LN2 漏洩実験 (横転・流出実験)

容器転倒を想定した LN2 拡散実験であるため、廃棄品の CRIC、CEBELL 容器を入手し実験に使用した。

転倒時の衝撃から容器を守るため、容器開口部と容器の胴周りにクッション材を巻き実験を行った。

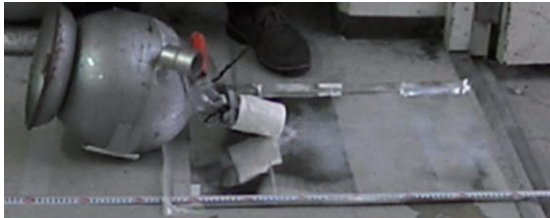


図 2. LN2 流出実験

容器の転倒時間(LN2 流出時間)をおよそ 3 秒間~5 秒間と仮定し、CEBELL-5・10ℓ、CRIC-5・10ℓの各容器から流れ出る LN2 量(流出量)を測定した。(図 2)

CEBELL-5ℓ, CRIC-5ℓ容器を、5 秒間横転した際の LN2 流出量を図 3 に示す。

測定の手順は以下の通りに行った。

- ①容器に LN2 を充填し重量を測定する。
 - ②容器を素早く倒し LN2 を流出させる。
 - ③5 秒後に素早く容器を戻し重量を計る。※1
 - ④①と③の重量差を流出量として記録する。※2
 - ⑤①~④を繰り返す、容器が空になるまで測定する。
- ※1 重量は、体重計(TANITA_BC-519)を使用。
 ※1・2 10ℓ容器や 3 秒の場合も測定を行った。

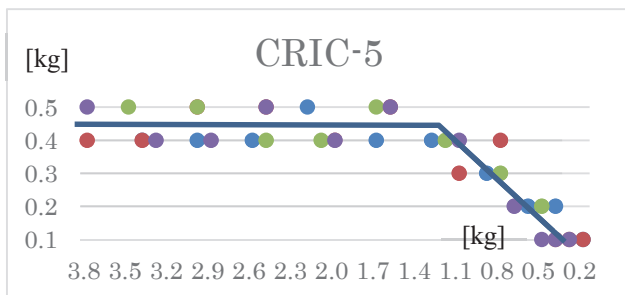
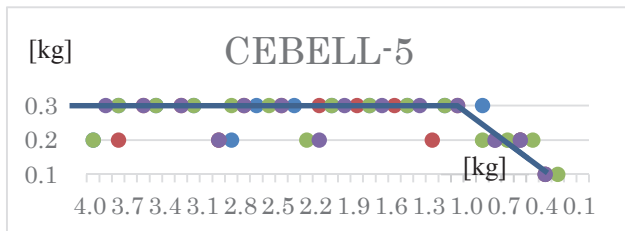


図 3. 容器転倒時の LN2 流出実験

図 3 のグラフで示す縦軸は、容器から流れ出る LN2 量(kg)、横軸は容器内の LN2 残量(kg)である。CRIC

と CEBELL では流出量に差があり、主な要因は容器開口径が異なるため、CRIC は CEBELL に対し 1.6 倍の開口面積があり、流出量も 1.6 倍程度異なる。

図 3 から、CEBELL、CRIC ともに LN2 流出量は途中まではほぼ一定の値を示し、CEBELL-5ℓ が 250~300cc、CRIC-5ℓが 400~500cc であった。容器内の LN2 残量が 1/3 程になると流出量は、徐々に減少する。これは容器内部の LN2 量が減り空間が広がったこと、内部の圧力を高めていた LN2 ガスが抵抗なく流出する開口部のレベルまで近づいた為と思われる。(図 4)

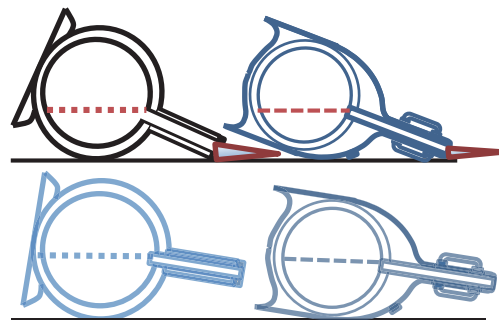


図 4. LN2 の減少と容器内の液面

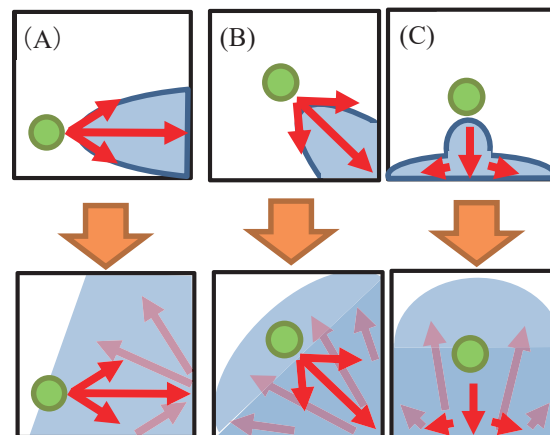


図 5. CRIC-5ℓ 容器の転倒と LN2 流出方向

2.4 LN2 流出と拡散方向

密閉空間の床面で LN2 の拡散方向を知るため、模擬空間の床面と同面積の枠を作り、図 5 のような、LN2 流出・拡散実験を行った。

LN2 は容器転倒方向に倣い拡散すると想定したが横転の反動で手元方向にもこぼれることが判明した。また、2 m²程の面積では壁面で反転し勢いよく戻ってくるので、図 5 のように、どの方向でもほぼ全面に拡散することが確認できた。方向だけでなく床の凹みも LN2 が溜まるので影響があることも確認した。

2.5 模擬空間の分割とセンサ位置

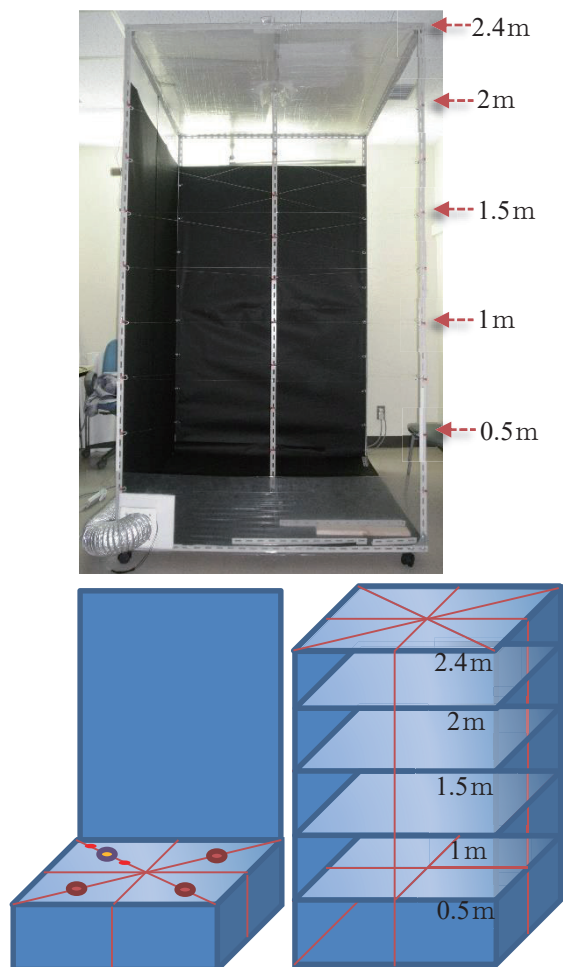


図 6. 模擬空間とセンサ位置

模擬空間内の温度変化を測定し酸素濃度との相関を調べるため、空間を床上 50cm 毎に 5 区画に分けて、1 区画をさらに 4 分割して、最小単位(縦 0.7m 横 0.7m 高さ 0.5m)に分割する。(図 6)

各空間に温度センサ配置し、任意の 2ヶ所(0.5m と 1m)に酸素モニタを設置して酸素濃度を測定する。温度変化に連動して変化する、酸素濃度との関係性が得られると思いこの分割にした。

3. 測定

3.1 実験用 LN2 容器と測定装置

密閉空間内では、CEBELL や CRIC 容器の代わりに、ペットボトル容器で流出実験を行う。(図 7(B)) ペットボトル容器で模擬空間に LN2 を持込み、任意の位置にセットする。容器をセットし空間を閉じたら、LN2 容器を倒し酸素濃度と周囲温度を測定する。

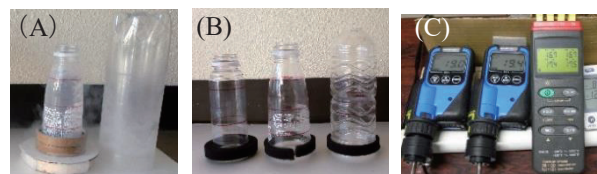


図 7. 液体窒素容器と測定機器

酸素濃度計は[理研計器 OX-07]、温度測定は HIOKI 10ch メモリーロガーと、CENTER 社の 4ch デジタル温度計 [CENTER-309] で K 型熱電対を使用した。

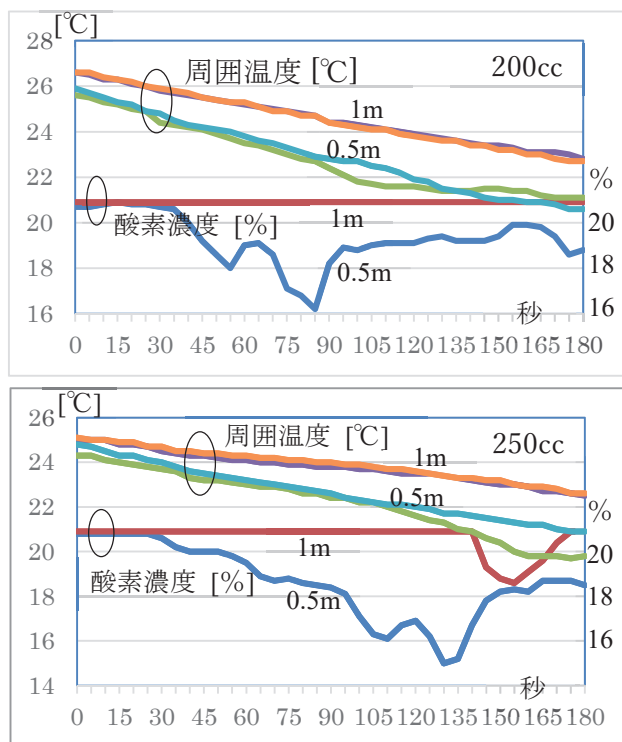


図 8. 酸素濃度と周囲温度

LN2 を 100cc～500cc まで変化させ、流出実験を行い 10 分間測定した。状況の差が顕著に表れた境界として、200cc、250cc の 0～180 秒間を図 8 に示す。

周囲温度はどの場合もほぼ一定の割合で減少し続けるが、酸素濃度は、周囲温度の変化に関係なく変化することが分かった。特に床上 0.5m の位置では 30 秒を過ぎた頃から酸素濃度に顕著な変化が始まる。また、流出量の増加によって濃度 18%未満の出現時間も長くなり、より低い濃度の値も現れた。また、LN2 流出量が 150cc ほどでも、床上 0.5m の位置ではごく短時間であるが、濃度 18%未満が検出されることも確認した。

しかし、LN2 流出量 250cc で床上 1m の場合では、

120 秒後に酸素濃度が 30 秒程変動し、18.6%まで低下したが、200cc 以下の場合には全く変化が起きなかった。

映像により床面付近に滞留していると思われる低温ガスの情報を比較するため、サーモグラフで測定した画像情報を図 9 に示す。

測定には NEC 製 サーモギア G120EX を用いた。



図 9. 周囲の温度変化 LN2 流出直後と

LN2 容器転倒 30 秒後の画像を (A)、40 秒後の画像が (B) である。(A) は、勢いよく流出した LN2 が壁面で戻り容器前の床面で溜まり、一部はアルミ材の隙間に浸み込んで行くときの映像である。(B) は、

(A) から 10 秒経過しており、溜っている LN2 や隙間に浸み込んだ LN2 が蒸発・ガス化している画像で

ある。(B) は (A) よりも低温の部分が多く、ガス化した LN2 が多く滞留していると思われるのだが、画像からは、床面と滞留していると思われるガス層の判別は難しい。LN2 流出後 2 分の画像 (C) でも、床面と、壁面の空間に滞留するガス層を見つけることは困難であった。

4. まとめ

当初、酸素濃度の変化は、濃度の濃淡を繰り返しながら、LN2 ガスから伝わる冷温と同時期に周囲空気に混ざり込むと予想していたが (周囲温度の低下=酸素濃度の低下)、冷温の伝搬と酸素濃度の関係は、必ず酸素濃度が遅れて変化することを確認した。

空間内の温度変化は、10 分間ゆっくり一定の速度で低下し続けるのに対し、酸素濃度の変化は、LN2 流出後 30 秒程遅れて始まり、急激に変化し 60 秒~150 秒の間で大きく変化する。床上 50cm 以下の空間では酸素濃度 18~16%に達する程危険な状態が発生するため、部分的ではあるが特に注意が必要なことも分かった。しかし 1m 付近になると LN2 の流出量 250cc 程度では 18%未満の数値には至らずほとんど変化しないことも判明した。

サーモグラフを用いて画像として危険個所の判定を試みたが、有効な画像データを得ることができなかった。

これらの結果から、条件は限定的であるが、小規模空間において、酸欠事故の危険性があることを確認し、今後も安全指導が必要なことを認識した。

今後は、温度センサの測定点を増やし、また、サーモグラフ、動画など画像情報を収集・整理し、検討することで、危険個所の特定や、危険認知・回避のための安全教育用資料として、映像化を検討したい。

5. 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導を賜りました豊橋技術科学大学 環境・生命工学系 松本明彦教授に心より感謝申し上げます。

本研究は、JSPS 科研費 JP17H00366 の助成を受けたものです。

液体ヘリウム運搬容器内の液量と重量の関係について

○ 金本真知、藤澤真士

東京工業大学 極低温研究支援センター

1 動機

東工大では貯槽から液体ヘリウム(He)運搬容器に詰め替えて各研究室への供給を行う。供給時と返却時の容器内の He 液量(液体が占める体積)を測定し、供給量をその差として得る。液体 He の液量は、振動膜を上部に取り付けたステンレス細管からなる液面計を容器内に突っ込み、膜の振動数の変化によって液面の高さを測り、それをメーカーが公表している容器ごとの表と照らし合わせることで求めらる。

この方法では、室温のステンレス細管を容器内に突っ込むため、熱により液体 He がいくらか蒸発し、その一部は回収できずに空気中へ排出されてしまう。He 運搬容器の重量から液量を得ることが出来れば、作業の効率化や He の節約につながる。

しかし、重量の差を液体 He の密度で割る、という方法では液面計による計測とは無視できないずれが生じる。その理由は以下のように説明できる。液体 He を容器から取り出すと、容器内に空間ができ、低温の気体 He によって自動的に埋められる。He の沸点 4.2 K においては液体 He と気体 He の密度の比は 10:1 程度であり、気体 10 L の重量が液体 1 L の重量に相当する。室温の水と大気では密度の比は 1000:1 程度で、大気の重さなどは全く無視でき、これは極低温の液体 He に特有の問題である。

気体の密度は絶対温度に依存するが、内部の温度分布は分からないため、単純な計算によって重量から液量へと換算することは出来ない。そこで、われわれは重量と液面計で測った液量を比較することで、この 2 つの量の実験的に求めた。また、この関係を元に、容器内の温度分布についての考察を行った。

2 計測方法

東工大には液体 He 自動供給装置として、上下にリフトが可能なロードセルがある。ロードセルは上部からの力を測定しているが、その目的から、重量を液体 He の量に換算して表示するようになっている。液体 He の密度は 0.125 kg/L であり、0.5 L 刻みで測定が可能なため、分解能は 62.5 g である。つまり、液体 He を 1 L 程度の精度を持って重量で管理するためには、100 kg 以上の重量を 100 g 程度の精度で計測可能な重量計が必要となる。重量を L で表記すると体積との混同を招くため、以下では重量を kg に戻して議論を行う。

全体の重量から液体 He および気体 He の重量を求めるためには、容器の重量を知る必要がある。内部を真空にして重量を測るのは面倒なので、満タンに充填した際の重量から液面計を用いて測定した液体 He の量に対応する重量を引いたものを容器の重量とする。容器上部のネック部分等の体積は小さいので、この部分の気体 He の温度変化による重量への影響はないものとして考える。

3 計測結果

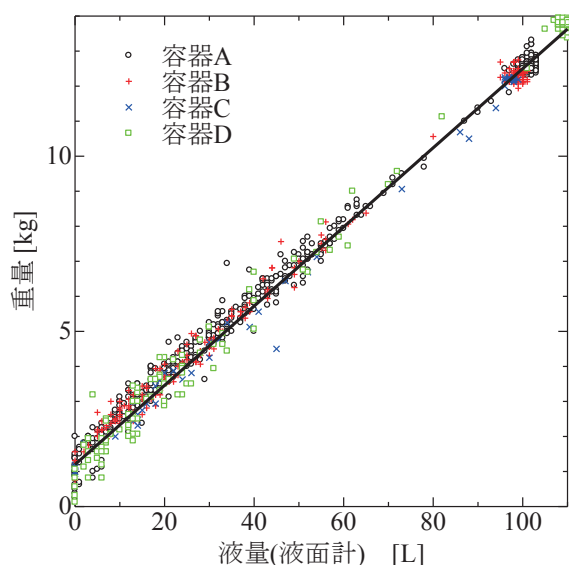


図 1. 液量と容器内 He の合計重量

計測結果は図 1 のようになった。横軸が液面計で計測した液量であり、縦軸がそのときの重量から容器の重量を引いた値で、つまり容器内部の液体 He と気体 He の合計の重量である。東工大では主に 4 種類の容器で供給しており、種類によって色とシンボルを変えている。

ばらつきはあるものの容器の種類に関わらず全ての点が 1 つの直線上に並んだ。直線上に並ぶということは、容器内部の気体 He の密度が液量に関わらずほぼ一定であるということを示唆する。

直線の傾きから気体の密度および温度を求めよう。ネック等の部分の体積は胴と比較して無視できるとすると、容器内の気体の占める体積 V_g は液体が減った量に相当し、容器の最大容量を V_{max} 、液体の残量を V_l とすると

$$V_g = V_{max} - V_l$$

となる。

液体の密度を ρ_l 、気体の密度を ρ_g とすると、容器内の He の合計質量は

$$M = \rho_l V_l + \rho_g V_g = \rho_g V_{max} + (\rho_l - \rho_g) V_l$$

となる。

図 1 について全データから最小二乗法により 1 次の直線でフィッティングを行うと、

$$M = 1.20 + 0.113V_l$$

となった。

液体の密度 $\rho_l = 0.125 \text{ kg/L}$ から、気体の密度 $\rho_g = 0.012 \text{ kg/L}$ となり、気体の密度は液体の密度の約 1/10 に相当することが分かった。

気体の密度から、理想気体の状態方程式を仮定して気体の温度を求めると 4.0 K となった。これは液体 He の沸点 4.2 K よりもわずかに低い。気体の温度が沸点を下回ることは起こり得ないので、これは測定の誤差あるいは理想気体であるという仮定からのずれであろう。いずれにせよ、容器の大部分が 4.2 K に近い低温まで冷却されていると考えるのが妥当である。

もちろん容器上端は室温であるから、温度差は容器のネックの非常に限定された部分のみで付いていることになる。以下では、残量に関わらず容器内部はほぼ 4.2 K に保たれていることの説明を試みる。

4 容器内部の構造と温度分布

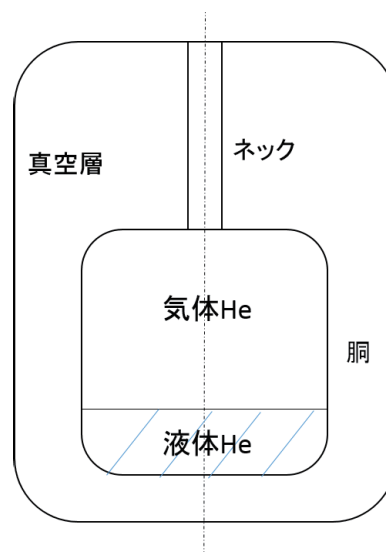


図 2. 容器内部の構造の模式図

容器内部の構造と温度分布を考える。図 2 は容器内部の模式図である。

まず明らかなこととして、容器の上端は室温であり、液面は 4.2 K である。内部の気体の温度分布は下部から上部へ単調に温度が上昇しているはずである。平衡状態において熱流は下部から上部まで一定であり、温度分布は熱伝導によって決まる。液体 He 運搬容器は上部からの熱伝達を防ぐために長いネック部

を持つ。

メッサー社のストラトスと呼ばれる容器ではネックの長さや液体 He が溜まる胴の部分の長さがほぼ等しく、それぞれ 500 mm 程度である。胴の内径は 570 mm である一方ネックの内径は 55 mm であり、径の太さは約 10 倍異なる。よって断面積は約 100 倍異なり、気体の熱伝導も、温度による熱伝導率の変化を考慮しないと仮定すると、約 100 倍胴の方がネックよりも大きい。

胴はアルミ合金から出来ているのに対し、ネックは FRP と呼ばれる強化プラスチックから出来ている。厚みは分からないため正確な比較は出来ないが、おそらく壁面の熱伝導も胴のほうが大きい。

蒸発によって気体は下部から上部へと流れているが、胴の上部では、気体 He と壁面の熱伝導率の差により壁面が気体よりも低温になっている可能性がある。すると壁面近傍の He が壁面によって冷却され、下方へ向かうことによって対流が起こり、胴内部の気体の熱伝達が極端に大きくなる、ということも考えられる。

これらのことから、胴の部分では温度差が付かず、容器内部の気体の大半が 4.2 K で、ネックの部分のみで温度差が生じているとしてもおかしいことではない。

5 重量による管理の利点と注意点

以上の結果から、単純な計算によって重量から液面計で計測した液量へと変換できることが示された。

重量による管理の利点は

- ・作業の効率化
- ・省 He
- ・測定精度の向上

が挙げられる。

液面計による測定では、液面計が曲がっていたり、容器によっては底面中心にある構造物に当たってしまったたりして、正しく測定できないことがある。重量計では安定した計測が可能である。

一方で、返却時の容器に、供給時に無かった付属品や付着物などがある場合には、供給量を著しく少な

く見積もってしまう可能性があることに注意が必要である。また、容器ヘッド部分やキャスターなどの交換による容器重量の変更にも気をつけなくてはならない。

6 まとめ

・一般的な液体 He 運搬容器について、一次の変換式を用いるだけで、重量から液面計により計測した液量へと換算することが可能である。

・運搬容器内部の胴の部分は液体 He がわずかしが入っていない状態においてもほぼ 4.2 K に保たれている。

ヘリウム液化システムのメンテナンス

北原直尚

東京大学 生産技術研究所

概要

東京大学生産技術研究所で運用しているヘリウム液化システムは稼働から17年経過している。ヘリウム液化システムをトラブルなく運用させるには、日頃からの点検作業に加えて、長時間使用している機器に対してのメンテナンスが必要である。

今回は、液化用圧縮機 DS141 用の油分離器(ORS)の吸着剤およびフィルターエレメントの交換と長尺カードルの内視鏡検査を行った。油分離器の吸着剤等は前回交換より10,000時間が経過しており、液化用圧縮機自体の運転時間は22,000時間を超えている。長尺カードルは、設室当初に学内の他の施設から譲り受けた1974年製のものを一部使用している。移設時にフラッシングをしているが、それから17年間一度も内部を確認していない状態にあった。それぞれ異常やトラブルは起きていないが、予防保全としてメンテナンスを実施した。それらの報告とそれに付随するデータを紹介する。

1 油分離器(ORS)吸着剤等の交換

ヘリウム液化用圧縮機には必ず吐出口に油分離器が接続される。油分離器は、圧縮機では取り除けなかったオイル成分を吸着剤やフィルターエレメントで完全に除去するシステムである。もし液化機側(コールドボックス)にオイルが侵入してしまうと、タービンの破損など深刻なトラブルが発生してしまう恐れがある。そのため、吸着剤やフィルターなどはメーカーが推奨する期間(当機器は12,000時間毎)で交換を行うことが非常に望ましい。当施設では今回の交換が2回目となる。(筆者は初体験。)交換にあたっては特殊な作業となるため基本的には業者に依頼を行うが、その交換費用が高額であるため技術職員にとっては予算の確保が最初の仕事となる。実際の作業内容を以下に記す。



図1. 油分離器の内部(4次セパレータ)

- (1) 吸着剤の抜き取り、再充填
- (2) 各フィルターの交換
- (3) 気密検査
- (4) 窒素ガスによる加温再生
- (5) 露点測定
- (6) 真空置換 (N₂→He)
- (7) クールダウン
- (8) 真空置換
- (9) 循環精製運転

全行程を終えるまで丸1週間かかり、その期間は液化運転ができない。そのため作業前までに供給に必要な液体ヘリウムと回収ガス用に長尺カードルを調整しなければならない。作業内容は上記の名の通りのものだが、当初のイメージがわからなかったりイメージとは違っていた作業を紹介する。

各セパレータを開放し、(1)~(3)の作業を行った後、吸着剤に残留している水分を取り除く工程が(4)である。リボンヒーターで吸着剤の入った容器を加温し、ブロウヒーターを通した窒素ガスを流して水分を除去する。再生作業時間は2日にまたいで約10h。その後露点測定を行い、(5)露点が-60℃以下になれば合格となる。予想してなかったのが窒素ガスの使用流量である。設備が地下にあるため、排気は1/4インチパイプを通して地上へ送る予定だったが、実

際は窒素ガスを 1/2 インチの銅管を用いて 40 m³/h で流すことを当日知った。急遽、排気を地下のドライエアラへ流す方針になり、酸欠防止への対応などを迫られることになった。露点が合格した後、吸着剤などから窒素成分をなるべく多く排出するために暖かい状態でバッファタンクのヘリウムを用いて 2 回 (6)真空置換し、一晩(7)クールダウンを行った。翌朝、(8)真空置換を 2 回(20 分ずつ)行ったあと分析計で測定したところ窒素成分はレンジオーバーとなったため、追加の真空置換を 2 回(40 分ずつ)行った。これを行ったことで分析値は、問題のない値まで回復した (表 1)。真空置換を行ったうえでさらにガス分析をすることは、作業後のトラブルをなくすための非常に重要な手段だと再認識した。最終日に(9)循環精製運転を行った。全く聞いたことがなかったこの作業は、液体窒素を使用した簡易精製器を使用して行うものである。簡易精製器を圧縮機の吐出側 (油分離器の出口) にあるポートとバッファタンクの間接続し、液化機とは縁を切った状態で圧縮機を運転することで油分離器の不純物を取り除く構成となる (図 2)。もし不純物が多く残っていた場合、これを短時間行うことで却ってバッファタンクが汚染されるのでは?と考えたが、約 3 時間実施したところ特に問題なく純度は良化の傾向にあった。これで 1 週間の作業は終了し、後日の液化運転においても、窒素、水分、オイルの分析値に異常は見られなかった。

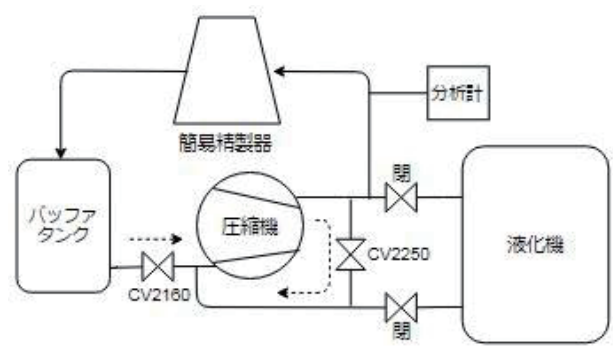


図 2. 循環精製運転フロー図

2 長尺カードルの内視鏡検査

本施設には冒頭に述べた製造日の古い長尺カードルを使用している。毎年、肉厚検査に合格しており、内部検査は本来不要な項目であるが長期間使用することで主に水分による内部の腐食が懸念されるため、ある程度の周期で内視鏡検査をした方がよいと言える。回収系の構成としては、ガスバックで回収したヘリウムガスを圧縮機で 14.7MPa まで圧縮し、油水分離器 (ウルトラフィルター)、高圧ガスドライヤーを通り、長尺カードルにガスは収まる。近年、高圧ガスドライヤーを通過したガスの露点は-80~95℃で推移しており、数値的には全く問題のないガスが長尺カードルを出入りしているはずである。

作業は、検査する容器を大気圧まで落とし、容器の末端側(仕切栓)を開放し内視鏡カメラを挿入する方法で行った。使用したカメラのケーブルの長さが 2m 程だったので容器弁まで (6m70cm ある) は観測できていない。観測後は真空置換 (1 時間) と気密検査を行い、作業を終了した。

表 1. ガス分析値

	H ₂ O	N ₂
バッファタンク	2.3 ppm	2.0 ppm
真空置換 1 回目	17.8 ppm	レンジオーバー
真空置換 2 回目	4.6 ppm	3.5 ppm
循環精製 運転前	4.2 ppm	2.6 ppm
循環精製 運転後	3.6 ppm	0.3 ppm



図 3. 内視鏡検査

現状の容器状態と移設時の状態及び移設前の状態を図に示す。移設前の図 4 に観測できる異物は主に錆とスケールだと思われ、以前の施設で水分が混入していたことがうかがえる。これを基準にフラッシングを行った移設時の状態(図 5)と今回の状態(図 6)を見比べると錆やスケールは酷く発生していないと見ることが出来る。しかし、薄茶色の斑点や筋がところどころ見えるため、判定に困ったのが実情である。肉厚測定に合格しているため、使用には問題ないと判断している。

3 まとめ

油分離器の吸着剤等の交換作業は、日数を要することもあり、交換作業費が高額になりやすいメンテナンスである。(4)以降は依頼側でも出来る作業が多々あったため、そこで費用を抑える必要があると感じた。現在の液化運用を続けた場合、次回は 8 年後となる。もしその間に圧縮機の更新が入るとしても覚えておきたい作業の一つである。

長尺カードルは移設以来 17 年間良好な状態を保っており、フラッシング等の対応がまだ不要であることが分かった。これは、高圧ガスドライヤーが回収ガスに含まれる水分を十分に除去出来ていると言える。しかし、製造から 44 年経過しており容器自体の経年劣化が気になる場所である。今後も内視鏡検査は実施すべきであると考えますが頻繁に空気にさらしたくないという側面もある。これに関して、トラブル等がない場合は、特に根拠はないが 3 年を周期に同様の検査を行っていきたいと考えている。



図 4. 移設前



図 5. 移設時 (フラッシング後)

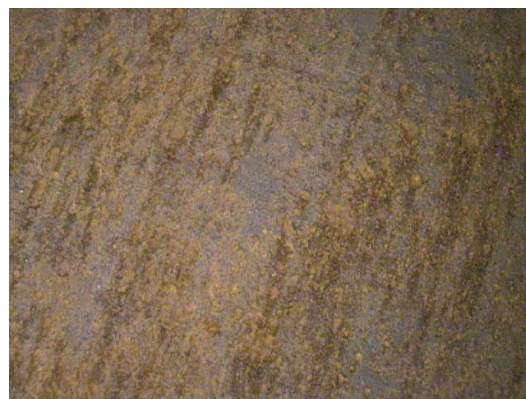


図 6. 内視鏡検査結果

J-PARC COMET 実験用冷却システムの構築状況

°大中 政弥^{A)}、岡村 崇弘^{A)}、大島 洋克^{A)}、榎田 康博^{A)}、飯田 真久^{A)}、黒澤 宣之^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 J-PARC センター 低温セクション

概要

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、大強度陽子ビームを用いて 10^{-16} の分岐比でミュオンが電子に転換する事象を探索する COMET(COherent Muon to Electron Transition) 実験の建設が進行中である。このプロジェクトではミュオンを生成する標的を内包し 5 T を発生する捕獲ソレノイド、生成されたミュオンを 3 T の磁場で輸送する輸送ソレノイドならびに検出器ソレノイド、で構成される超伝導磁石システムを整備する。このうち検出器ソレノイドは、単独で GM 冷凍機により単独で冷却されるが、熱負荷の比較的大きな捕獲ソレノイドと輸送ソレノイドは、ヘリウム液化冷凍機により冷却される。2015 年から 2017 年にかけてこのヘリウム液化冷凍機を主とする冷却システムの整備を行った。本報では、冷却システムの概要、具体的な構築方法、冷凍機単体試運転の結果を報告する。

1 冷却システムの概要及び構築方法

このヘリウム液化冷凍機を主とする冷却システム(「冷却システム」と略す)の概要図を図 1 に、熱負荷など主要冷却パラメータを表 1 に示す。冷却システムは地上部の中圧タンク、圧縮機、ヘリウム冷凍機、電流リードボックス(CLB)と、地下ビームライン室の捕獲・輸送ソレノイド、及び両者を接続する断熱 4 重配管(TRT)で構成される。

捕獲・輸送ソレノイドと TRT や CLB で想定される熱負荷は核発熱分も含めて 74.5 W 程度、シールド負荷は 520 W 程度と見積もられており、GM 冷凍機冷却の規模を大きく上回る。そのためクロードサイクルによるヘリウム液化冷凍機(「液化冷凍機」と略す)の整備が必要となるが、コスト削減の観点から、KEK に既存の、トロイダル超伝導電磁石システムで使用されてきた液化冷凍機を再利用することにした [1][2][3]。

この液化冷凍機は 1989 年製で、2004 年まで KEK

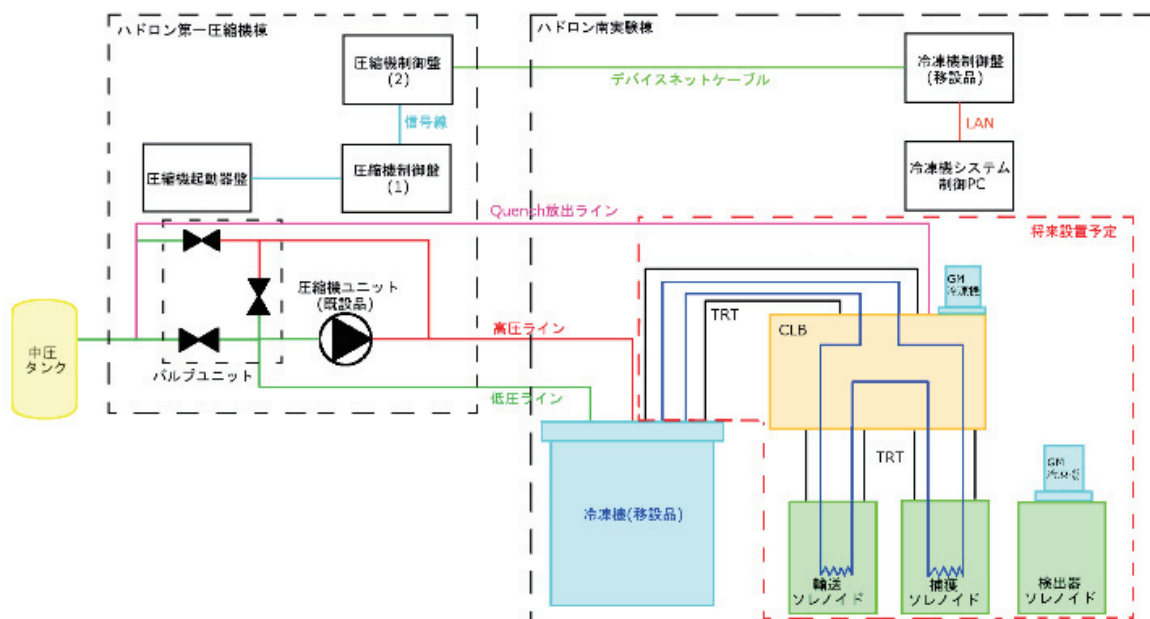


図 1. COMET Phase I における冷却系概要図

つくばキャンパスで使用された後、保管されていたが、2015年に約半年の短期ながらトロイダル磁石利用の実験が J-PARC ハドロンホールで実施されたため、移設の上再整備された。2012年度から2014年度にかけて再整備をしてトロイダル磁石の冷却運転にのぞんだが、冷凍機内部の温度センサ(CLTS)の指示値をはじめ、多く運転上の問題が見つかった。

初期の運転記録や他の冷凍機の運転経験に基づいた操作で、トロイダル磁石の冷却励磁試験は乗り切り、2016年度より COMET 実験用冷却システムとして整備を進めている。圧縮機・中圧タンクはそのまま継続して使用し、冷凍機は COMET 実験エリア(ハドロン南実験棟)に移設し、両者間の配管は新規に敷設した。

今回は超伝導磁石、CLB や TRT など負荷のない状態で、1)移設後の高圧・低圧ラインなどの配管設計を含むシステム健全性の検証、2)低温時の交換した温度センサの指示値の確認、3)冷凍能力の実測値を得ることを目的に冷凍機単体における冷却試運転を行った。

表 1. COMET Phase I における冷却系仕様

熱負荷 (4.5 K/80 K)	74.5 W / 520 W
冷却配管径/配管総長	20 mm ϕ / ~130 m
二相流必要質量流量	10 g/sec
二相流出口クオリティ	0.409
冷凍機	TCF-50
冷凍能力仕様値	90 W @ (450 W shield load)
冷却方式	二相流強制循環

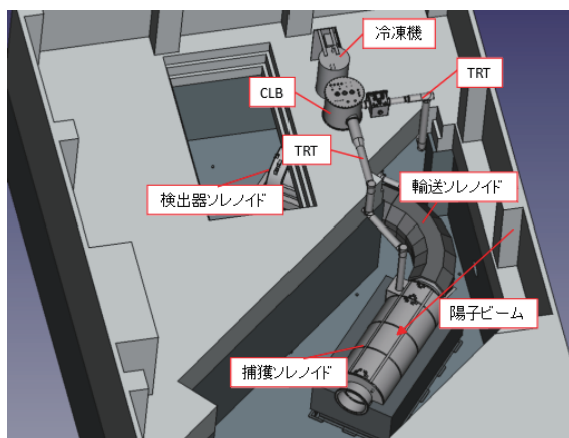


図 2. COMET Phase I における冷却系完成図

2 移設整備

2015年から始まった移設を含む整備は冷凍機サイドの工事を終え、2017年7月に県庁からの完成検査に合格した。主要な整備項目であった温度信号システムの改善について紹介する。

2.1 温度センサ交換及び温度伝送器の校正

冷凍機内部には全 10 台の温度センサが取り付けられており、図 3 に温度センサ及びその取付状況と温度伝送器の写真を、図 4 に温度センサから制御 PC までの信号の概略フロー及び校正確認時のフローを示す。

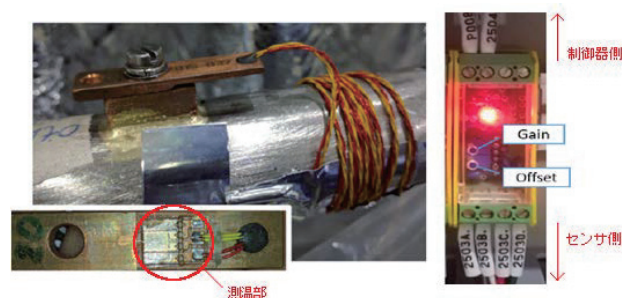


図 3. 温度センサと温度変換器

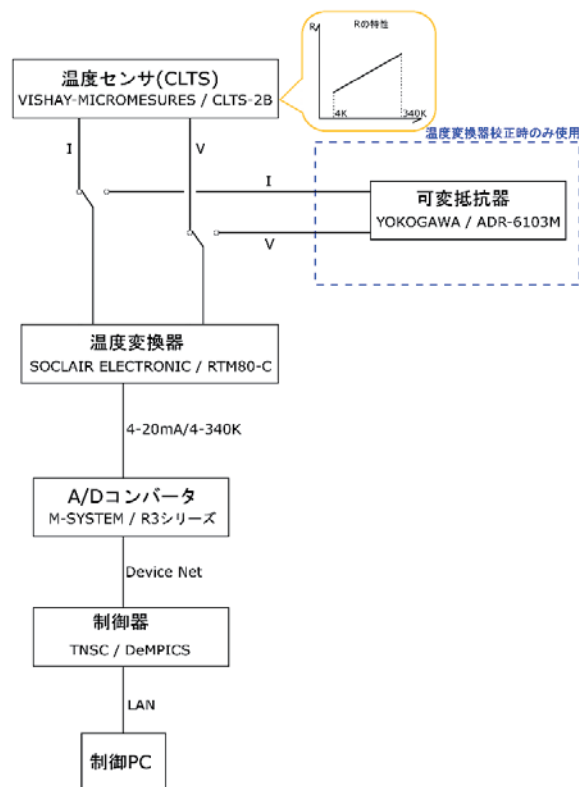


図 4. 温度センサ信号概略フロー

温度センサは VISHAY-MICROMESURES 社の CLTS(Cryogenic Linear Temp Sensor)で、図 4 中に示すように 4 K - 300 K で抵抗値の変化が直線的なセンサ

である。本センサは図に示すようにそれぞれ銅ブロックについており、配管に取り付けられた銅ブロックにアピエゾン N グリースを塗布してボルト止めされている。

全 10 台の CLTS を交換した後に行った第 1 回冷却試験にて温度表示の不具合が改善されていないことが確認され、メーカーに詳細を問い合わせたところ、精度の高い温度変換はセンサ毎に伝送器の調整も必要であることがわかった。

校正は下記の手順にて行われた。

1. センサ毎の校正カーブを参照しながら可変抵抗器で抵抗値を入力する
2. 入力された抵抗値に対する温度変換器の出力を制御 PC にて確認し、これをプロットする
3. 校正カーブと 2 で作成されたカーブを見比べながら図にある温度変換器の Gain, Offset の調整ツマミを少しずつ回して調整する

校正する前の温度伝送器の中では最大で 7 K もずれていた変換器があり、CLTS の交換時にはあわせて温度変換器の校正を行う必要があることがわかった。

温度変換器の校正後、第 2 回冷却試験を行い、温度表示の不具合は修正されたことが確認された。

2.2 温度センサ用フィードスルーの不具合

温度センサ交換後、コールドボックスのトップフランジを閉止して断熱真空槽の真空引きをしていたところ、真空度がある一定の値から上がっていかない不具合が発見された。ヘリウムリークテストを実施すると、冷凍機真空容器の温度計フィードスルーコネクタ部からリークが発見された。図 5 にリークが発見されたフィードコネクタ (Fischer connectors 社 DEE 103A 053-40) 部の写真を示す。[4]

原因としては、このフィードスルーコネクタ部に配線をはんだ付けする際に高温にしすぎて、充填してあるガラスエポキシ混合剤が溶けたことと考えられる。

対策として、リークの起きたフィードスルー部のコネクタをすべて新しいコネクタに交換し、配線を

はんだ付けする際に融点 90 °C 以下の低温はんだ及びはんだごても温度調節機能付きのものを使用することによってコネクタ部が高温になりすぎることを防いだ。

この処置を行った後は、断熱真空槽からのリークはなくなった。

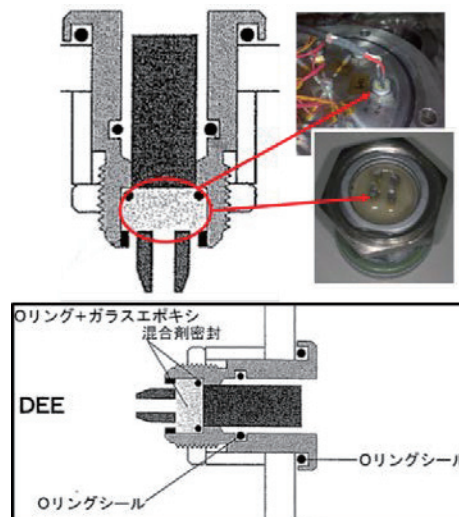


図 5. リークが起きた DEE 103A 053-40 (Fischer connectors 社製)

3 試運転の結果

図 6 に冷凍機のフロー図を示す。2 台の膨張タービンを用いて寒冷を発生する本システムは、気液分離槽の液位が 60 % になることによって定常状態となる。

冷凍機単体での冷却試運転は

1. 移設後の高圧・低圧ラインなどの配管設計を含むシステム健全性の検証
2. 低温時の温度センサの応答性の確認(温度表示に関しては前述のとおり)
3. 冷凍能力の実測値を得ることを目的とした。計 2 回の冷却試験を通して上記すべての目的を達成することができた。

3.1 移設後のシステム健全性の確認

図 7 に気液分離槽の液面と液面制御ヒータの出力のグラフを示す。冷却開始から約 7 時間で気液分離層の液面が 60 % を示して定常状態となり、システムの健全性が確認された。

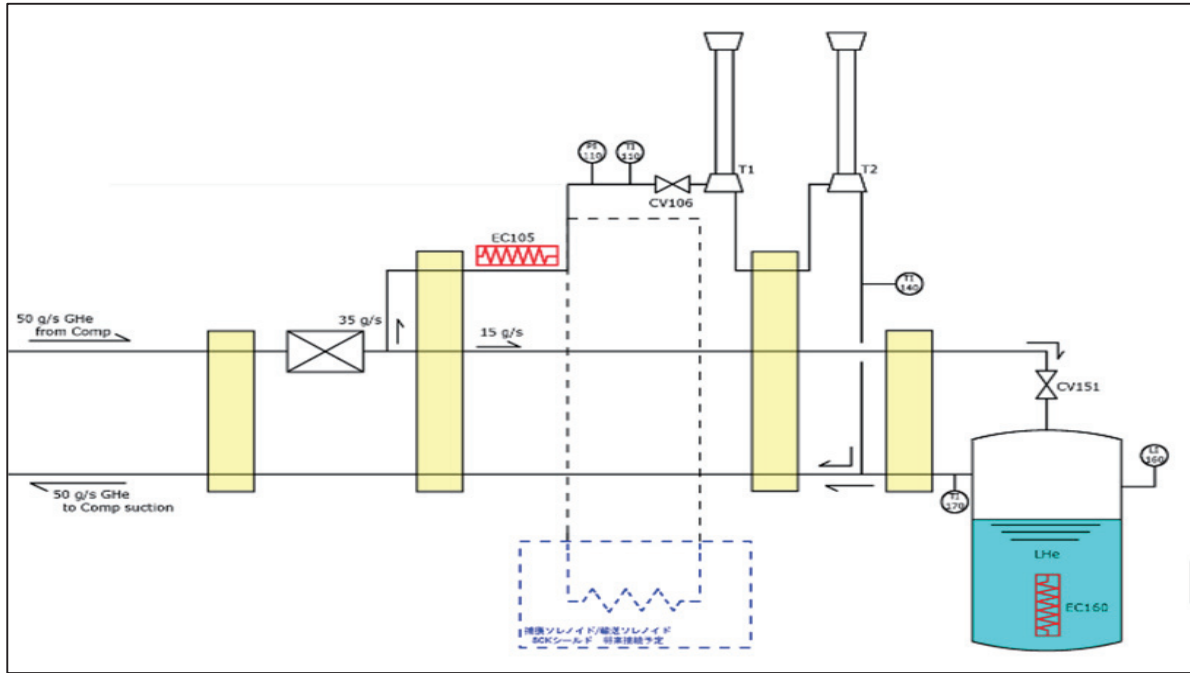


図 6. 冷凍機概略フロー

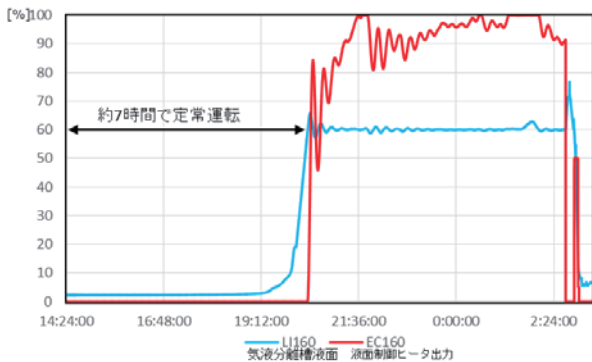


図 7. 気液分離槽液位と液面制御ヒータ

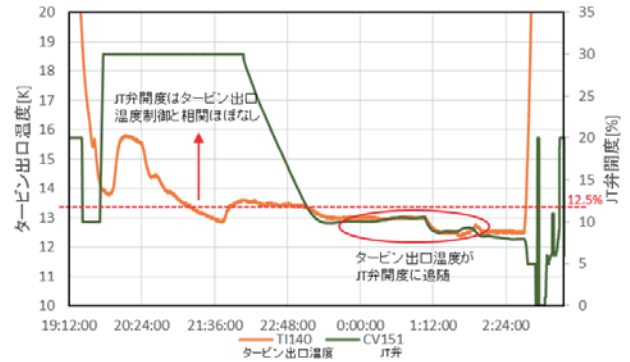


図 8. タービン出口温度と JT 弁開度

また、図 8 にタービン出口温度(TI140)と JT 弁 (CV151)開度のグラフを示す。今回の冷却試運転で精度の高い温度表示ができるようになったことにより、後述のようにタービン出口温度を 13.0 K~12.5 K とするように JT 弁開度で制御できるようになった。この調整を行っている際に JT 弁の開度が大きすぎるとタービン出口温度が制御できないことがわかり、実効的な開度を調べたところ、入力できる値 0 % - 100 %に対して実効的にバルブが流量を調整できる開度は約 6 % ~ 12.5 %程度であることがわかり、運転上のパラメータの調整の指標の一つとすることができた。

3.2 冷凍能力の実測値測定

図 9 に冷凍能力測定時の主な調整パラメータとの比較を示す。また、表 2 にパラメータごとの冷凍能力の実測値のまとめを示す。

今回行った冷却試験での冷凍能力測定は冷凍機のパラメータ調整を兼ねており、主にタービン出口温度及びタービン入口圧力を $T-S$ 線図に合わせるように調整することによって冷凍能力の向上を行った。

図 9 のように、タービン出口温度を 12.5 K、タービン入口圧を 0.71 MPa にした時に冷凍能力が最大となっていることが分かり、この時の冷凍能力は表 2 に示すとおり、測定最大値である 132 W(Shield = 490 W)以上であった。また、タービン入口圧を 0.63 MPa

まで落とすと冷凍能力は 117 W(Shield = 490 W)まで下がったが、この値も仕様値以上であり、COMET Phase I で求められている冷凍能力を十分に満たすと考えられる。

また、温度センサ指示値についても飽和状態においては適切な飽和温度を示し、それ以外の超臨界状態においても *T-S* 線図に合致した温度に制御することで冷凍能力が最大となることを確認できたことから、温度センサの低温応答性は改善されたものと判断する。

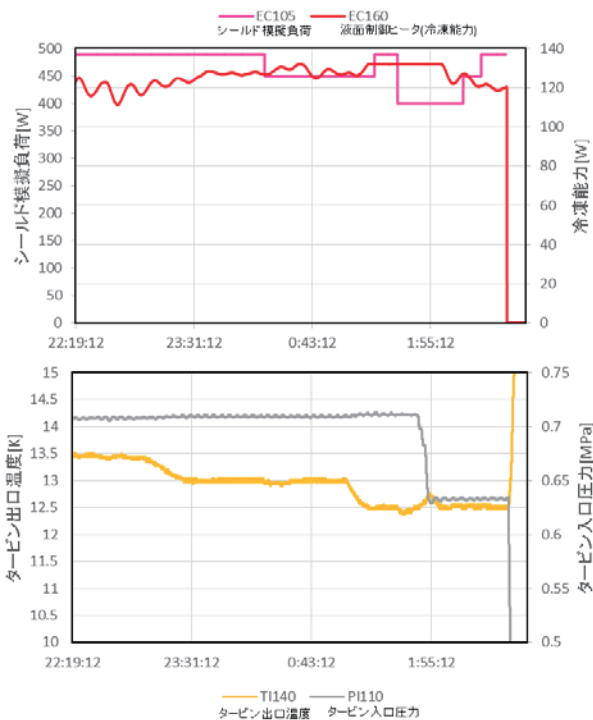


図 9. 冷凍能力と調整パラメータ

表 2. 冷凍能力実測値まとめ

	タービン入口圧 0.63 MPa タービン入口弁 開度：80 %	タービン入口圧 0.71 MPa タービン入口弁 開度：90 %
Shield = 400 W	122 W	> 132 W
Shield = 450 W	119 W	> 132 W
Shield = 490 W	117 W	> 132 W
COMET Phase I での要求：74.5 W (Shield = 520 W)		

4 まとめ

COMET Phase I に向けて冷却システムを設置、建設中であり、E36 実験に使用していた冷凍機の移設工事及び配管、配線工事を終了し、冷凍機単体試運転を行った。

温度センサ交換、温度変換器の校正を行ったこと

により温度表示の精度が増し、冷凍機内部の状態を正しく把握することで、冷凍能力も向上することができた。

現在、TRT 及び CLB の設計製作に取りかかっており、超伝導電磁石と接続され次第、冷却試験・励磁試験を実施する予定である。

参考文献

- [1] J. Imazato et al., “A superconducting toroidal magnet for charged particle spectroscopy,” Proceedings of 11th International Conference on Magnet Technology (MT-11), Tsukuba (1989), pp.366-369
- [2] H. Ohhata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.154
- [3] H. Ohhata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.84
- [4] フィッシャーコネクタカタログ Vol.6 より図を抜粋

小さな故障が大きな代償となった例 ～計装空気発生装置ドレイン管理

吉本佐紀

千葉大学 理学部

概要

ヘリウム液化装置にまつわる空圧弁を制御している計装空気発生装置のドレイン弁が故障し、ドレインの排出不良により計装空気系内に水が侵入した。その結果、圧力制御弁のポジショナーが浸入した水によって故障してしまった。故障したドレイン弁自体は安価なものであったが、圧力制御弁のポジショナーは高価なものであり大きな代償となった。故障によるトラブルの顛末と、初期段階で見逃したドレイン弁の故障の発見しにくさについて改善したので報告する。

1 故障の発生

1.1 トラブル発生と原因

ヘリウム液化装置が精製運転中に突如停止した。疑わしき機器を調べていくと、追跡調査のように次々と関連機器をさかのぼる事となった。

表 1. 原因の追跡

疑った機器	状況
1.液化用圧縮機 (ケーザー圧縮機)	圧力異常によって安全装置が働いて停止していた
2.圧力制御弁 (CV2150, CV2160)	動作確認をしたところ制御通りに動かなかった
3.圧力制御弁の ポジショナー	カバーを外すと水で湿っており基盤が損傷していた
4.圧縮空気系統	圧縮空気で満たされているはずが水が出て来た
5.計装空気発生装置	ドレインは定期的に排水確認をしていたのに、なぜか圧縮空気出口から大量の水が出て来た

その結果、原因は計装空気発生装置のドレイン不良により圧縮空気に水が混入し、この水が圧力制御弁のポジショナーを故障させていた事がわかった。



図 1. 故障した圧力制御弁ポジショナー

1.2 計装空気発生装置とは

ヘリウム液化機を始めとした関連機器には空気圧を動力源として開閉操作される空圧弁が多数用いられている。これを運用するために圧縮空気を供給するのが計装空気発生装置である。簡単に言えば空気圧縮機のこと、当施設にあるものは圧縮機、圧縮空気タンク、エアドライヤーの一式が一つの筐体に収まったものである。

原料となる周囲の空気は圧縮機で圧縮された後、圧縮空気タンクへ貯められ、最後にエアドライヤーで乾燥させてから関連機器へ供される。原料である空気には水分が水蒸気として含有されているので圧縮すると飽和水蒸気圧を越えて液体の水としてしみだしてくる（ドレイン）。圧縮空気タンク底にはこの水を排出するバルブが設置されている（ドレイン弁）。また、エアドライヤーは圧縮空気を冷やす事で、な

おも残留している水蒸気を結露させて水分除去するもので、やはりここにも水を排出するドレイン弁が設置されている。圧縮空気タンク、エアドライヤーともに各ドレイン弁は設定された時間間隔に従って自動開閉され溜まったドレインを排出している。

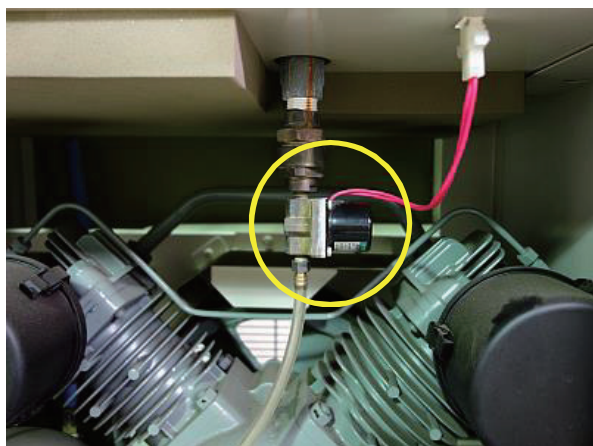


図 2. 故障したドレイン弁

当施設では自動排出されたドレインを一旦ポリタンクに溜め、週に一回溜まった水を捨てている。季節によりドレイン量は変わるものの今回の故障直前に排出量が極端に減るような事は確認されず、ドレイン排出については全く問題の無いものと思っていた。しかし、その後調べると二系統あるドレインの内、一方のドレイン弁が壊れていたことが分かった。

2 復旧作業と利用停止

復旧作業は圧縮空気系統の乾燥と圧力制御弁ポジショナーの修理およびドレイン弁の交換を行った。

①圧縮空気系統の乾燥：計装空気発生装置本体については加圧と放出を何度も繰り返し内部に溜まっていた水を外部へ放出させた。関連機器の空圧弁へと配管されている圧縮空気系統のチューブ内は液体窒素貯槽より窒素ガスを導入して3~4日流し続けることで乾燥させた。幸いにして計装空気発生装置はオイルフリータイプであったため、水に混じって油分が圧縮空気系内を汚染する事は無かった。

②圧力制御弁ポジショナーの修理：ポジショナーの基盤は水に浸った事により損傷がひどく修理では復旧が望めず交換する事となった。これには莫大な

費用と長い時間がかかり、極低温室の運用上大きな打撃となった。

③ドレイン弁の交換：型番より代替品を探して交換した。取り外した弁を分解しようとしたがネジが固着して開かず故障原因は探れなかった。

表 2. 被害状況

原因と被害	費用	状況
原因 ドレイン弁交換	約 2 千円	通販でも 4 日で 手に入る汎用品
被害 1 ポジショナー交換	約 100 万円 ※1	修理依頼から設置/調整完了まで10日を要した
被害 2 ヘリウム損失	約 6 万円 ※2	故障後 9 日目に 回収限界量を越え 放出に至った
被害 3 利用停止・実験スケジュールの遅延	Priceless	学内での利用停止は 8 日間におよんだ

※1 ポジショナーは 3 台交換、作業一式を含む

※2 漏洩量を 20m³ 程度と推定した

知っての通り液体ヘリウムは常に蒸発し続けるため長期間ヘリウム液化運転が滞った今回、ヘリウムガスを回収できる限界量を超えてしまった。このため貴重なヘリウムガスを大気へ放出させてしまう事態に陥った。当初すぐに復旧できるレベルのトラブルなのか長引いてしまうのか判断に迷い、学内利用者への利用停止要請はトラブル発生から 2 日半後であった。その後完全な復旧までに 10 日間かかった内、9 日目にヘリウムガスを回収しきれず放出した事を振り返ると利用停止要請の判断の遅さが悔やまれる。

今回のように液化運転が滞るようなトラブルの場合、高価なヘリウムガスの損失を最小限に抑えるためには一刻も早く復旧しなくてはならず、迅速に的確な判断をしないといけない。しかし、無闇に利用停止要請を発して研究室の実験スケジュールに悪影響を与えるのも避けたい。トラブルを経験する度にその時の対応について反省する事が多いが、結果論になってしまうので非常に難しい。

3 対策と予防

今回、計装空気発生装置のドレイン不良について発見が遅れたのはどういう事なのだろうか。前述の通りドレインは一旦ポリタンクに溜め、週に一度ポリタンクを排水するので排水量は日頃から目視確認できていたはずである。それなのに見逃したのは何故なのか・・・。

3.1 二系統あるドレインが誤解を招く

計装空気発生装置のドレインは圧縮空気タンクとエアドライヤーからの二系統あり、ともに筐体の外に排水用チューブが出てきている。この構造を踏まえた上で失敗だったのは、従前より二系統の排水用チューブを一つに束ねて同一のポリタンクに溜めていた事だった。つまり、どちらか一系統がドレイン不良に陥っても他方からの排水があるので不具合を見逃す可能性が出て来てしまう。

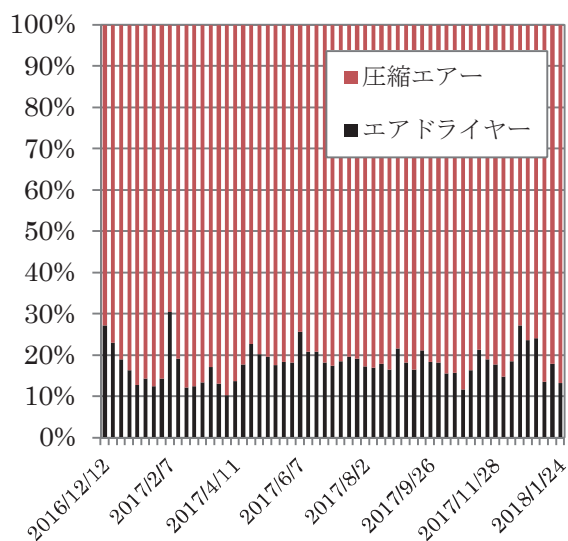


図3. 排水量の割合

その後調べてみたところ、当施設の運転環境下(千葉市)では圧縮空気タンクとエアドライヤーからの排水量の比は概ね8:2という事がわかった。そして今回故障していたのは悲運にも排水割合の小さいエアドライヤー側のドレイン弁だった。つまり日頃から排水量を目視で確認していても、これがいつもの8割程度に減っても気が付くことが出来なかったという事であった。

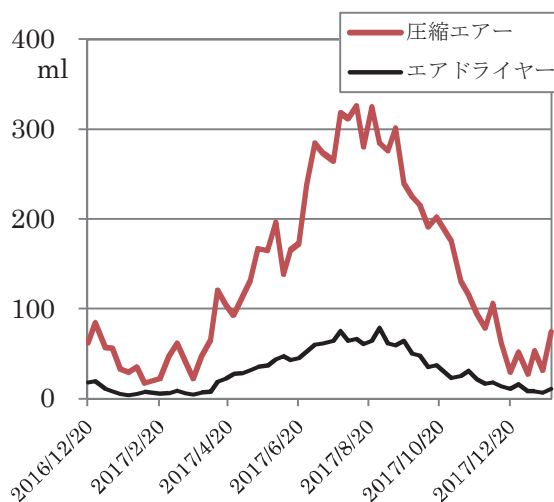


図4. 一日当たりの排水量

また、季節によって排水量は大きく変化し、湿度の高い夏季に一日当たりの合計排水量が400mlに達する日があるのに対し、乾燥した冬季は40mlにも満たない日もある。年間を通して10倍ものスケール幅で変化がある中で、今回のケースのように2割程度の変化が生じていても、不具合に気が付くのはなかなか難しかったのではないと思われる。



図5. 系統毎にポリタンクを用意

そこで今回の故障を機にドレインの排水ポリタンクを二系統それぞれ別々に設置して管理する事にした。こうしておけばどちらか一方でドレイン不良が起きたとしてもすぐに気が付くことが出来る。ただし、前述のように排水量は湿度に依存するため季節毎に大きく変化するので、絶対量には頼らず排水量の割合を概ね8:2であると把握しておくことで不具

合の兆候を見逃さないようにする。

図5では18Lサイズのポリタンクを利用しているが、今回の用途のために用意したわけではなく、たまたま空き容器として持っていたので利用した。排水量が最大で400ml程度に対して、これでは少し大き過ぎると思っていたが、ドレイン放出の際には若干の圧力を伴い容器サイズが小さいと吹き飛ばされてしまうので、実は都合よく利用している。

3.2 バッファタンクの設置

当施設の計装空気発生装置には外付けのバッファタンクが併設されておらず内臓の圧縮空気タンク（容量5L）だけであった。調べてみるとオプションとして設置する事が推奨されていた。また他大学へ施設見学に行った際に計装空気発生装置を確認すると、バッファタンクが併設されているケースが多く見られた。そこで当施設でも60Lのバッファタンクを新たに設置した。



図6. 新設したバッファタンク

これにより万が一、今回のように圧縮空気に液体の水が混入したとしても、まずはバッファタンクの底部へ溜まる事になるので、すぐに圧縮空気系統へ水が回る事は避けられる。加えてバッファタンクにもドレイン弁（手動のボールバルブ）があるので水が入ったとしてもここで排出できる。

また、圧縮空気を貯めこむ容量が飛躍的に大きくなったため、計装空気発生装置の一回当たりの運転時間が長くなり、次の起動までの運転間隔も長くなった。それにより装置の発停回数が大幅に低減でき

た。一般に高頻度の短時間運転より低頻度の長時間運転の方が産業機器には優しい。その面においてもバッファタンクを設置した事は大きな意義があった。

表3. バッファタンク設置前後の発停状況

実測 平均値	稼働時間 (分：秒)	稼働間隔 (分：秒)	稼働回数 (回/h)
設置前	00:18	04:00	15
設置後	00:51	16:35	4

余談だが、冬季の特に気温の低い日にバッファタンクのドレイン弁を開いてみたら水が出て来たことがあった。当初、また水が採り切れずに圧縮空気に混入しているのかと焦ったが、気温の低い時に限った現象だったため、バッファタンク内壁表面に冷やされて結露した水だと思われる。つまり、バッファタンクが冷えたことでエアドライヤーと同じ役目をして、計装空気発生装置で採り切れなかった水蒸気をさらに除去してくれたようだ。なかなか面白い。

4 まとめ

今回のトラブルの大元であるドレイン弁の故障原因は結局のところわかっていないため、根本的な対策は取れていない。しかし、今回の件で計装空気発生装置の構造を学ぶことが出来き、不具合が起きた場合にその兆候をいち早く察知できる予防策も整える事が出来た。同様の機器は全国の大学に数多く設置されており、ドレイン弁からの排水用チューブを排水溝や野外へ直接つなげているケースも見たことがある。排水量のカウントは手間だが万が一に備えて管理する事をお勧めする。

参考文献

- [1] エアードライヤーの豆知識 オリオン機械 (株)
<http://www.orionkikai.co.jp/kuatsu/mame07.html>
- [2] 冷凍式エアードライヤー 株式会社三栄商会
<http://www.sanei-air.jp/SHOP/RAX6F.html>
- [3] サイクロンセパレーター 株式会社フクハラ
http://www.fukuhara-net.co.jp/product_af_cyclone.html

液化窒素コールドエバポレータの傾倒と対応および修正作業

○多田 康平、西崎 修司

京都大学 大学院工学研究科 附属桂インテックセンター

京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

概要

京都大学桂キャンパスに設置している液化窒素コールドエバポレータ (CE) のひとつが不同沈下さらに最大 0.6%傾倒していることが、平成 27 年度の定期自主検査によって判明した。約 1 年間の沈下推移観察後、沈下は進行していないとの判断に基づき、傾倒修正作業を行った。ここでは、沈下および傾倒の様子と沈下推移観察後の対応、修正作業について報告する。

1 液化窒素 CE の不同沈下・傾倒の判明

京都大学桂キャンパス A クラスターには、主として大学院工学研究科の電気系・化学系の専攻が利用するために、液化窒素 CE (日本酸素製 CE-13 型、内容積 12,270 L、3 本の脚間距離 1,576 mm) が設置されている。

この CE は、平成 15 年 3 月の設置から平成 27 年 2 月までの年 1 回の定期自主検査では、ベンチマークからの沈下量 (以下、絶対沈下量と呼ぶ。) および脚間の沈下量の差 (以下、相対沈下量と呼ぶ。) はいずれもゼロであった。しかしながら、平成 28 年 2 月の定期自主検査では、3 本の脚の絶対沈下量が -19 mm から -26 mm の範囲 (負号はベンチマークより沈下

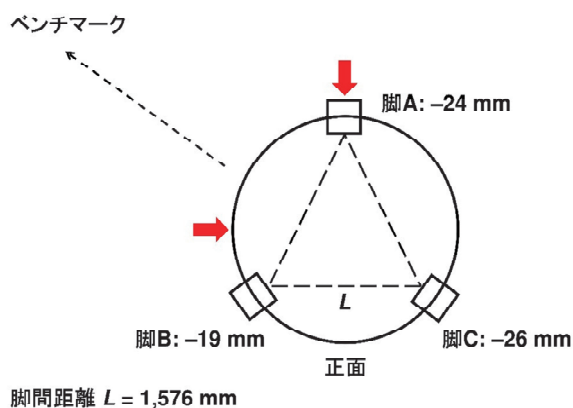


図 1. 平成 28 年 2 月の不同沈下の状況。2 個の矢印は工事の際の下げ振り設置場所を表す。

していることを示す。) にあり、相対沈下量が 2 mm から 7 mm の範囲にあることが判った (図 1)。普段我々は CE の定期自主検査を外部業者に委託しているが、検査結果の報告を受けた直後に我々自身でも沈下の程度を計測したところ、同様の結果を得た。

不同沈下状況の計測は年 1 回で行われていたため、今回問題となった不同沈下が、平成 27 年 2 月 (前回検査時) から平成 28 年 2 月までの期間に、いつ、どのようなタイムスケールで生じたかは不明である。

2 不同沈下状況の経過観察

液化窒素 CE の定期自主検査における不同沈下の判定基準は「沈下の程度が 0.5%以下のこと」と定められている。平成 28 年 2 月の定期自主検査の結果は、この判定基準には合格しないものの、直ちに CE を使用停止しなければならないものではなかった。そこで、傾倒修正工事の方針を立てるため、平成 28 年 2 月以降、月 1 回の不同沈下計測を行い、さらに沈下が進行するかどうかを経過観察することにした。

不同沈下計測には、当初、水を入れたホースを用いて、両端の水面の高さを比較する方法を用いていた。この方法は簡便な一方で、ホースが揺れると水面も揺れるため精確な計測が困難であった。そこで平成 28 年 4 月以降はトータルステーション (レーザ測量器) を計測に利用した。これら 2 種類の計測方法での計測誤差は、いずれも 1-2 mm 程度と考えられる。

平成 28 年 2 月以降の、絶対沈下量および相対沈下量の推移を図 2 に示す。毎月 1 回の計測による経過観察は平成 29 年 1 月まで継続した。この期間では、多少の計測値の揺れは見られたものの、上記の計測誤差を考慮すれば、沈下は進行してはいないと考えられることができる。図 2 に示す推移から、我々は、この CE の不同沈下の進行は平成 28 年 2 月の時点で既に止まっていたものと判断した。

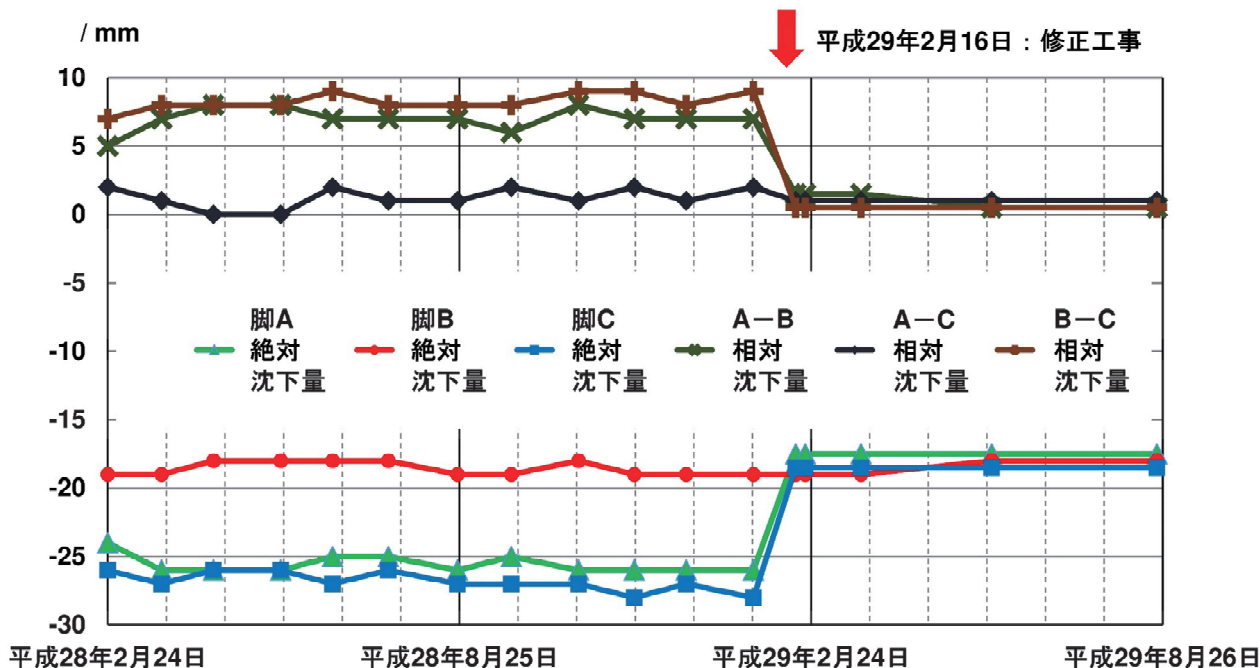


図2. 平成28年2月から平成29年8月にかけてのCEの不同沈下の推移。

3 CE 傾倒修正工事

平成28年11月に京都府庁にて、液化窒素CEの不同沈下・傾倒が生じているものの沈下の程度が平成28年2月以来変化していないこと、及び、修正工事を行いたい旨等を報告し、京都府の了解を得た。

液化窒素利用者への影響の大きさ及び工事予算の都合などを踏まえ、今回の修正工事は、絶対沈下量まで修正するのではなく、あくまで傾倒の程度を改善することを目的として、平成29年2月に行われた。

修正工事は以下に述べる要領で1日間で行われた。CEに接続されたガスラインは取り外さない状態で作業が行われたが、工事当日は念のため、CEからの液取り・ガス取りを停止した。また、作業範囲周辺に誘導員を複数人配置し、関係者以外の立入りを禁止した。あらかじめCEの転倒防止措置として16tクレーン車でCEを保持した(図3)。また、傾斜の程度を確認するために、CE側面2方向に下げ振りを設置した(図1)。その後、3本の脚部と基礎とを固定するアンカーボルトを緩め、脚部をジャッキアップした。脚部と基礎との間にできた隙間へのライナー材挿入およびアンカーボルトの締付けの作業を、2個の下げ振りの両方で垂直が確認できるまで繰り返した。平成28年2月には最大0.44%(脚間距離1,576mmに対



図3. 転倒防止措置として、液化窒素CEをクレーンで保持した様子。

して最大7mmの相対沈下量)であった傾倒が、上述の工事によって、0.05%以下(長さ1,000mmの下げ振りに対して0.5mm以下の傾斜)まで改善された。

後日、ライナー挿入によって生じた脚部と基礎との隙間にシリコンコーキング材を充填して雨などが浸入するのを防ぐとともに、不同沈下状況を計測するためのマーカーを貼り直した(図4)。工事終了後、京都府庁をはじめ関係各所へ結果を報告した。

4 修正工事後の経過観察

CEの傾倒修正工事後も引き続き、トータルステーションを用いた沈下状況の経過観察を続けている。図2に示すように、工事後も沈下・傾倒は進行しておらず、安定した状況が続いている。平成30年2月の定期自主検査まで変化がなければ、定期的な経過観察は終了し、年1回の定期自主検査に戻る予定である。

謝辞

京都大学大学院工学研究科の栗木周技術職員には、トータルステーションを用いた液化窒素CEの不同沈下計測において御協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。



図4. 液化窒素CEの脚部の隙間にシリコンコーキング材を充填した様子。

He ガス圧縮機 C5U217GEX ベースフレーム破損及び修理報告

飯田 真久

高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター

概要

高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センターにて設置されている He ガス回収・精製用高圧圧縮機 C5U217GEX のベースフレームに亀裂が発生している事を昨年発見した。その後、迅速に修理を行い、修理後 1 年経過しており特に支障などが無いことから、修理の方法などを報告したい。

1 超伝導低温工学センターの回収システム概要

高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センターは液化ヘリウムを使用した極低温実験および超伝導マグネットの開発、素材開発を行っている。

又、他の実験施設にて行われる極低温実験、超伝導マグネット開発において必要とされる液化ヘリウムを供給する目的で、ヘリウム液化装置、ヘリウム冷凍機、実験にて使用されガス化されたヘリウムを回収し、精製させる装置、ガス貯蔵施設を設置している。特にヘリウムガス回収系に関しては、広範囲にある実験施設からガスを回収するために実験施設周辺に回収ステーションを設け、そこから超伝導低温工学センター第 2 低温棟へ集約される形でガス回収をされ、高圧圧縮機にてポンベに充填する形をとっている。

低温工学セ) (-Heガス回収系(KEK全体図)



図 1. 回収系全体図

2 ヘリウム圧縮機 C5U217GEX とは

2.1 ブルックハルト社製 CU シリーズ

液化ヘリウムを使用する大学・研究機関にて多く設置される高圧圧縮機の一つである型式 CU のラインナップの内、5 段圧縮機であり、初段 (1 段) の吸吐弁サイズが直径 17 cm を使用しており、処理能力が概ね 200Nm³/h である。他の機関にてブルックハルト社製の圧縮機が設置されているのは C5U214 又は C5U210 が多いと思われる。

C5U214 は初段吸吐弁サイズが直径 14 cm で処理能力は標準で 100Nm³/h、C5U210 は直径が 10 cm で処理能力は標準で 45Nm³/h となっている。

C5U217 と C5U214 は共通する部品が多く、ドレンポッド、セパレータ、熱交換器、バルブ類、配管の一部は同一品である。

超伝導低温工学センターが C5U217 を採用するのは、回収ガス量は年 10 万 L 以上の液化ヘリウムを供給していると共に各回収ステーションからの同時回収に対応する為にサイズが程々で処理能力が大きいからである。

2.2 末尾 GEX について

CU シリーズ圧縮機の末尾には GX、GEX が記載されている。これは熱交換器が GX は銅製のフィンチューブ、GEX はステンレス製のフィンチューブを使用しているため区別されている。ちなみに外観は GEX の方は熱交換器が大きく貼りだしており、GX ではベースフレームよりはみ出す事は無いが、GEX は大きくはみ出しており、設置時にクレーンにてつり上げるのに大変苦労した。

3 ベースフレーム破損の発見の経緯から修理まで

3.1 破損発見

昨年、夏の保安検査に向けての事前検査において定期開放検査の対象になった圧縮機を検査作業業者にて開放点検を行った。

その際にベースフレームの破損が発見された旨の報告を業者から受けた。確認をするとベースフレーム下部から上部に向けて亀裂が発生しており、急遽製造メーカー（ブルックハルトジャパン）へ連絡を取った。



図2. 亀裂発生発見時の写真

3.2 作業工程の調整

開放点検時に発見したために、まずは開放点検報告書に必要な測定を優先に行い、その間に必要な補修部品の加工、人員の手配および日程を調整して貰い、ブルックハルトジャパンからフレーム修理作業として見積書を作成して貰った。作業に必要な人員及び作業期間は4人（作業員3人、溶接作業員1人）で3日間ということだった。

3.3 補修作業-分解

まずはフレームのみにするため、フレーム上にある機器をすべて外す作業から始まる。

まずは周辺配管および電動機用電力線を外し、その後に各段の吸入・吐出配管、ドレンポットへ接続する配管などを取り外し、各機器（クランク及びシリンダー、熱交換器、ドレンポット）を単体にしておく。

その後、熱交換器を外す作業に入るが、継ぎ手が奥にある為に大変作業が困難のようであった。

熱交換器の取り外しが完了すると次は冷却ファンの取り外し、電動機の取り外しを行い、クランクケースおよびシリンダーを取り外した。

最後にドレンポット、セパレータを取り外す作業になるが、セパレータからドレンポットに繋がる配管がフレームに近く、低いところにある為に作業時間は他の取り外しよりは長い作業であった。無事配管が外れ、ドレンポットを外し、セパレータはファンガードおよび圧力計固定板と溶接にて固定しているため、そのまま取り外しを行った。

3.4 溶接作業準備

ベースフレームをクレーンにてつり上げ、横にした後にヒビの発生箇所及び進行状況を確認した。

亀裂の発生場所はベースフレーム下部にあるカラー（と呼ばれていた）を溶接した箇所から発生し、そこから上に伸びている事を確認した。

但し、フレーム両側に亀裂が伸びている事は無く、内側（シリンダー側）が多くなっている。

その後、金属ブラシにて塗装をはがし、亀裂発生箇所が塗装にて隠れていなかったかを確認すると共に、金属表面出しの作業を行った。



図3. 亀裂発生箇所写真

3.5 溶接作業

まずは底部をサンダーにて亀裂部分をV字に削り、その部分に溶接棒を溶け込ませながら溶接していった。溶接盛りは多めに感じた。

次に側面内部側にある亀裂をサンダーにて削った。その際にわずかながら2又に分かれた亀裂を発見し、

その箇所も追加で削る作業を行った。溶接後に表面を平らにし、脱脂作業を行った。これは補強板を溶接するため表面を均一させる作業である。

3.6 補強板取付

補強板はフレーム両側に取り付け、フレームの両面の強度を確保する。補強板は図の通りである。

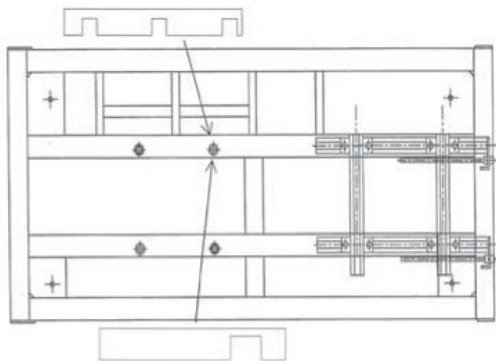


図 4. 補強板とフレーム形状

3.7 補強板（内側）溶接

内側の補強板は、縦 95 mm、横 900 mm 肉厚 9 mm の板である。図 5 にて判るように、横に繋がる角材をよけるように加工をしている。

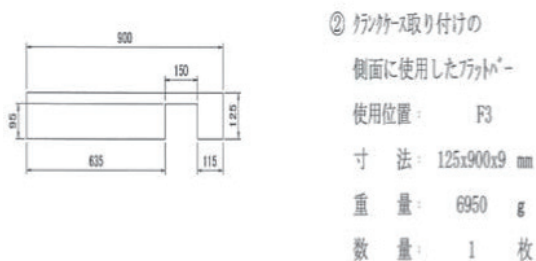


図 5. 補強板（内側）図面

溶接前に仮止めの為、クランプで止め、角材側が溶接可能になる程度に隙間を空け、その後、仮溶接を行った。

本溶接を行う前に、サンダーおよび金属ブラシにて周辺の表面処理を行った。その後に本溶接に入った。

3.8 補強板（外側）溶接

外側補強板を図 6 に示す。縦 125 mm、横 1500 mm 肉厚 9 mm を使用している。内側とサイズなどが異なる理由を聞いてみたが特に理由は無いとのことだった

が、運転時の振動などによる問題の対処では無いかと考えている。

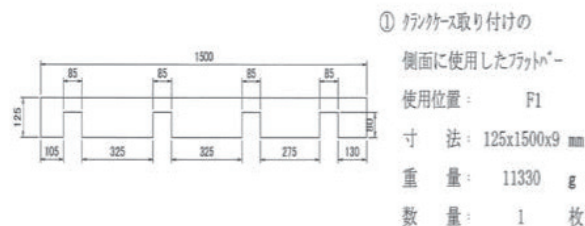


図 6. 補強板（内側）図面

溶接作業は、3.7 に記載したとおりであるが溶接作業は時間が内側補強板溶接より多くの時間を要している。

3.9 フレーム塗装

溶接完了後に防錆材にて溶接箇所及び周辺部分を塗装し、その後本塗装を行った。

3.10 再組み立て

溶接作業完了後、フランクケース等各機器をフレームに戻し、配管などを接続し圧縮機を組み立てた。

その後に、静圧にて気密試験を行い、発泡試験にて漏洩が無いことを確認の後に、電動機とプーリーに V ベルトを掛け、実運転を行った。吐出圧力を常用圧力である 14.7MPa まで上昇させ、ガスリーク箇所が無い事を確かめた。

3.11 亀裂が入った原因を考察

修理完了後、1 年が経過しフレームには新たな亀裂などは見られなかった。

作業業者と現場にて亀裂の原因は何であったのかを聞いたところ、カラーの溶接不良では無いかとのことであったが、塗装などをはがした際に他の溶接箇所と見比べをしたが大きな差は無いと思われた。又、超伝導低温工学センターは C5U217GX を保有しており、運転時間は倍以上経過しているが亀裂は発生していない。各機器の違いは熱交換器だけなのでそれ以外の違いが無いかを見比べた所、クランクケースの固定方法が異なっていた。

その違いを図 7 に示す。

C5U217GEX はカラーにネジ溝加工されているが

C5U217GX はクランクケース側にネジ溝加工されていて、カラーは貫通穴となっている。この違いは修理作業の行いやすさに繋がる。C5U217GX はクランクケースを外す場合、フレーム下へスペナを入れてボルトを緩めるためフレームと床の隙間が大きくなると作業が出来ない為、ジャッキなどでフレームを上げ作業スペースを確保していた。

C5U217GEX はそれが無くなり、作業性が良くなっている。

しかし、固定させるのに応力が係る場所が今までと異なることから、運転時の振動などがカラー溶接部に影響し、カラー溶接部に金属疲労が早く進んでしまったのではと推測している。

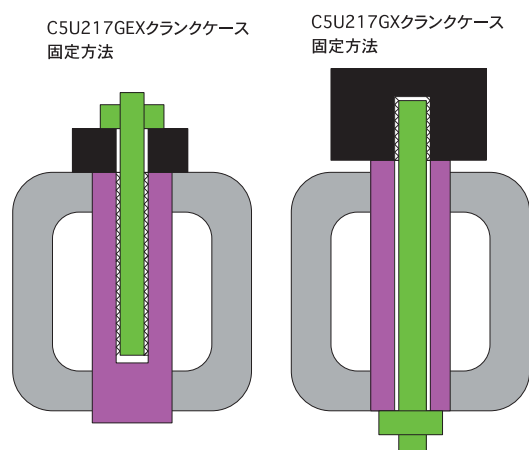


図7. 固定方法の違い

4 最後に

超伝導低温工学センターはブルックハルト社製の圧縮機を数台設置しており、30年以上経過した機器もあるが、フレームが破損したことは一度も無かったのでここまで圧縮機が分解された作業を立ち会い出来たので良い経験になった。

その後もフレームに亀裂が入っていないかを他の機器も含めて、注意するよう気を付けている。

LHD 超伝導・低温システムの重水素実験対策

○野口博基^{A)}、森内貞智^{A)}、鷹見重幸^{A)}、大場恒揮^{A)}、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

概要

2017年2月～8月に行われた第19サイクルプラズマ実験では重水素を用いた実験(重水素実験)が行われた。よってLHDが設置してある本体室及び本体室地下は、「放射線発生装置及び密封されていない放射性同位元素に関わる管理区域」に設定されることとなり、関係する各システムは放射線の影響を考慮した対策や、管理区域設定に伴う整備が求められた。

LHDの基幹設備である、超伝導・低温システムは大まかに下記3つの構成となっており、設置範囲は管理区域と非管理区域両方に及び、あるいは管理区域と非管理区域をまたいで設置されているシステムである。

- ・ プラズマ閉じ込め磁場発生用超伝導コイル
- ・ 超伝導コイル冷却用低温システム
- ・ 励磁電流送電用超伝導バスライン

重水素実験を開始するにあたり、このシステムにどのような対策、整備を行ったかを報告する。

1 LHD 超伝導・低温システムの構成

1.1 超伝導コイル

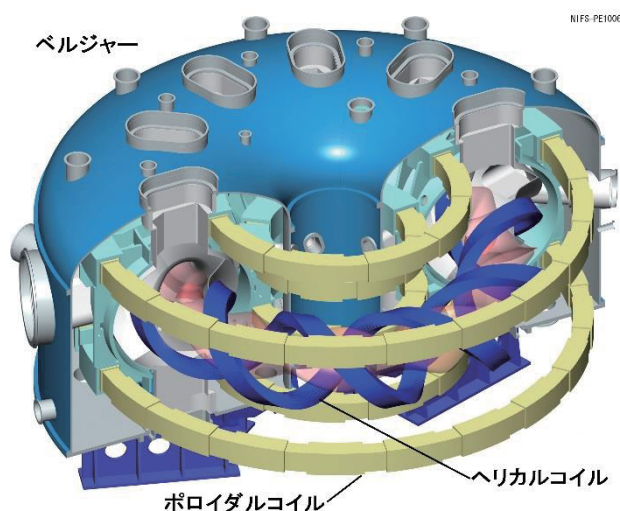


図1. 超伝導コイルとベルジャー

LHDの超伝導コイルは2種類あり(ヘリカルコイル、ポロイダルコイル)、直径13.5mのベルジャー(真空断熱容器)の中に図1のように設置されている。

この2種類の超伝導コイルを冷却し、通電することによって強力な磁場を発生させ、プラズマを閉じ込め、様々な実験を行っている。

1.2 低温システム

LHDでは超伝導コイルおよび超伝導バスラインを冷却する冷媒にヘリウムを用いている。ヘリウム圧縮機により、1.8MPaまで圧縮した高圧のヘリウムガスを、真空断熱された2棟のクールドボックス(図2)に送り、合計7台の膨張タービンと、合計15台の熱交換器によって液化温度まで冷却している。



図2. コールドボックス

クールドボックスは冷却したヘリウムガスを液化、または超臨界圧ヘリウムとし、それぞれのコイルに対応したバルブボックスへ送り出す。(図3、図4)

バルブボックスは真空断熱されており、低温バルブやヒーターなどによって冷媒の流量や流路、温度、圧力を制御している。

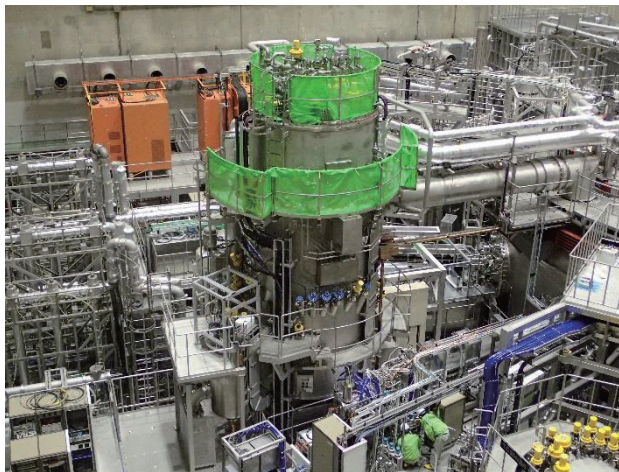


図 3. ヘリカルコイルバルブボックス

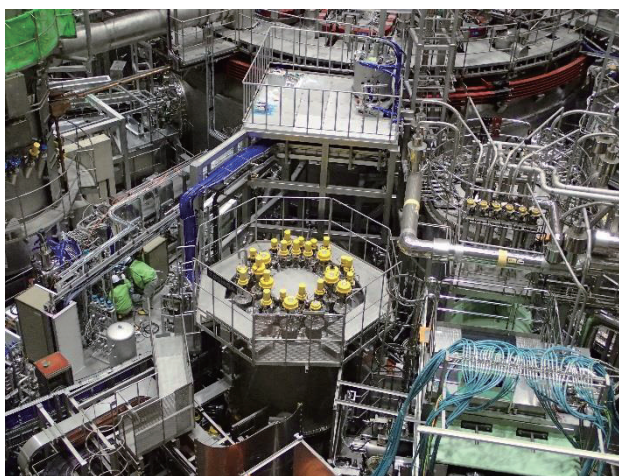


図 4. ポロイダルコイルバルブボックス

さらに、ヘリカルバルブボックスに隣接設置されているサブクールシステム（図 5）では、コールドコンプレッサによって減圧し、3K 以下まで温度を下げた液体ヘリウムと熱交換した、サブクール液体ヘリウムをヘリカルコイルへ送り出している。



図 5. サブクールシステム

1.3 超伝導バスライン

LHD では超伝導コイル励磁用の直流電源システム



からの電流を効率良く送電するために、超伝導バスラインを用いている。この超伝導バスラインは、液体ヘリウムで冷却した超伝導導体をコルゲート管で真空断熱した構造となっている。（図 6 模型）

図 6. 超伝導バスラインの模型

1.4 各システムの配置

次にこれらの位置関係だが、各システムは管理区域である本体室と、非管理区域である液化機室にそれぞれ設置してあり、それぞれの配置を図 7 に示す。

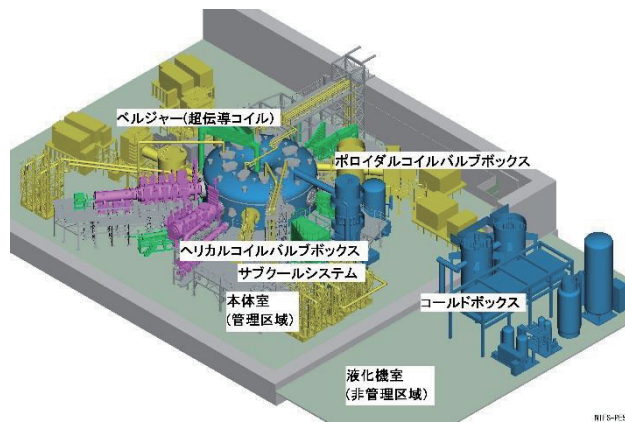


図 7. 各システムの配置

超伝導コイルを内包したベルジャーが本体室中央に設置してあり、その東側に各バルブボックスとサブクールシステムがある。さらにその東側に、厚さ 2m のコンクリート壁をはさみ、液化機室があり、コールドボックスが設置してある。

また、地下の様子は図 8 の通りとなっている。液化機室の地下にコイル電源室があり、直流電源システムがある。超伝導バスラインはここから厚さ 2m のコンクリート壁の開口部を通り、本体室地下へ伸び、さらに上へ向かって床開口部を通して、本体室ベル

ジャー内の超伝導コイルに接続されている。(図9)

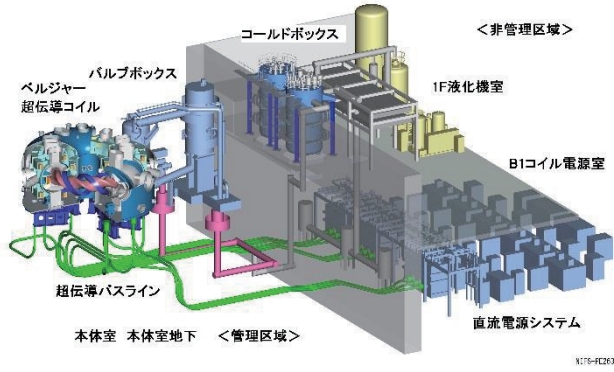


図8. 地下も含めた各システムの配置



図9. 超伝導バスラインが本体室へ向かう様子

コールドボックスからの冷却用配管（冷媒送り用、回収ガス用など）も、液化機室から地下コイル電源室へ下り、同じく厚さ2mのコンクリート壁の開口部を通して、本体室地下へ抜け、そこから上部本体室へ伸びて各バルブボックスまでつながっている。

2 重水素実験に向けた対策、整備

2.1 考慮すべきポイント

まず、重水素実験を開始し、管理区域が設定されるにあたり、超伝導・低温システムが考慮すべきポイントは下記であると考えた。

- 管理区域境界壁にある開口部の存在
- 実験で放出される中性子の機器への影響
- 放射化した可能性があるものは持出せない

上記を考慮に入れ、行った対策、整備を順に報告する。

2.2 開口部の穴じまい

図7、8の通り、管理区域である本体室と、非管理区域である液化機室は厚さ2mのコンクリート壁で仕切られている。地下も同様である。この2mの壁は管理区域境界であるし、また実験中に放出される中性子の遮蔽壁としての役割も担う。しかしながら、本体室地下とコイル電源室の間には図10のように超伝導バスラインが通る開口部と、図11のように冷却用配管が通る開口部が存在していた。



図10. 超伝導バスライン貫通用開口部



図11. 冷却用配管貫通用開口部

また、微細な放射化物の飛散防止のため、管理区域内は負圧で管理されるが、そのためにも開口部を埋めて密閉性を高める必要があった。

穴じまいは、バスラインや配管に大きな力が加わり破損しないよう、直接当たる範囲はアングル等で囲い、仕切り板を取り付け、その外側をコンクリートで埋めた。仕切り板の内側にできる隙間にはポリエ

チレンのビーズやブロックを詰めた。(図 12)



図 12. 開口部穴じまい

2.3 管理区域内機器の中性子による誤動作対策

超伝導・低温システムでは、クエンチ保護や温度、圧力、流量の制御に加え、バルブ制御やヒーター制御、などのために、多くの機器（センサー、アンプ、変換機、電源、計測器など）が管理区域内に設置してある。また、バルブボックス真空断熱用の真空排気装置やサブクールシステムも管理区域内に設置してある。

重水素実験では、中性子が放出されるため、これらの機器の誤動作が懸念された。特に誤動作による影響の大きい、インターロックに関係する機器は優先的に対策を行うことにした。

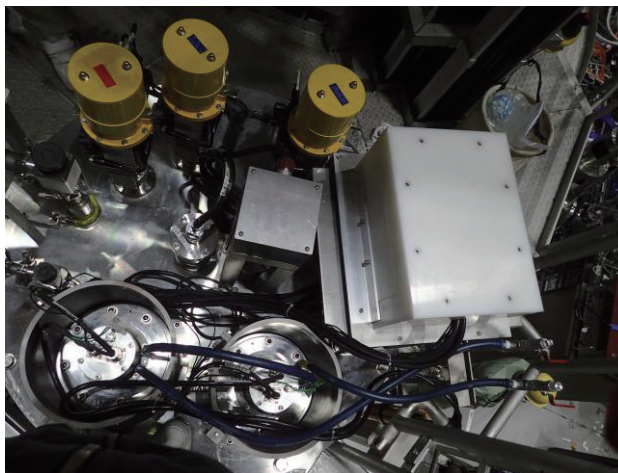


図 13. ポリエチレン板による遮蔽材取付けの例

そこで、管理区域外へ移設する、比較的中性子の影響が少ないと考えられる本体室地下へ移設する、移設は無理だが接続配線をコネクタに改造するなどして実験中のみ退避させる、または移設が無理なので

ポリエチレン板による遮蔽材を取付ける（図 13）など優先順位を考え対策を行った。

移設に関して問題となったのは、機器の仕様による配線長の制限だった。真空排気装置のターボ分子ポンプやサブクールシステムのコールドコンプレッサは配線長に制限があり移設不可、あるいは移設先が限定された。また、上記図 13 の例だが、コールドコンプレッサの回転数と振動数を測定する機器も配線長に制限があり、移設不可であったためポリエチレン板で囲い遮蔽した。

ポリエチレン板で囲った場合、熱伝導が悪く、内部の温度上昇が気になるところだが、内部温度の上昇測定を行い、問題がない事を確認した。図 14 の例では+6°Cの温度上昇で平衡状態となった。

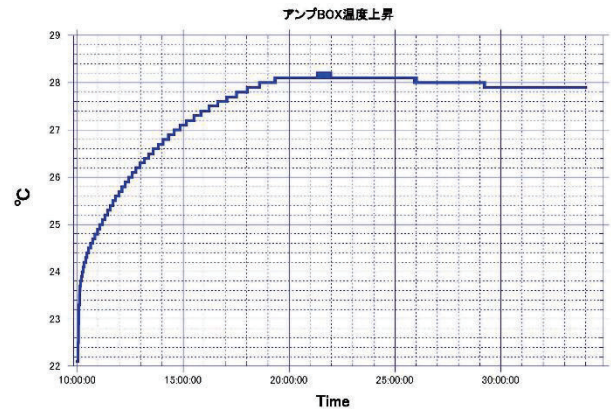


図 14. 温度上昇測定

さらに、バルブボックスの真空断熱に関してだが、真空度が悪化し、熱侵入が大きくなるとコイル冷却が不可能になるため、実験中は誤動作でメインバルブが開かないように処置をした。封じ切り後のビルドアップが心配されたが、19 サイクル中監視したところ、問題はなかった。

2.4 機器の放射化に関する対応

次に、機器の放射化に関する対応について報告する。重水素実験を行い、中性子によって放射化した可能性がある機器については管理区域外へ持出すことができなくなるため、主にメンテナンスにおいて対応が必要となった。

サブクールシステムのコールドコンプレッサはこ

れまで、取外して所外へ持出し、メーカー工場にてメンテナンスを行ってきたが、それができないため、管理区域内でメンテナンスができるよう、機材などメーカー工場と同じ状況となるよう整備した。(図 15)

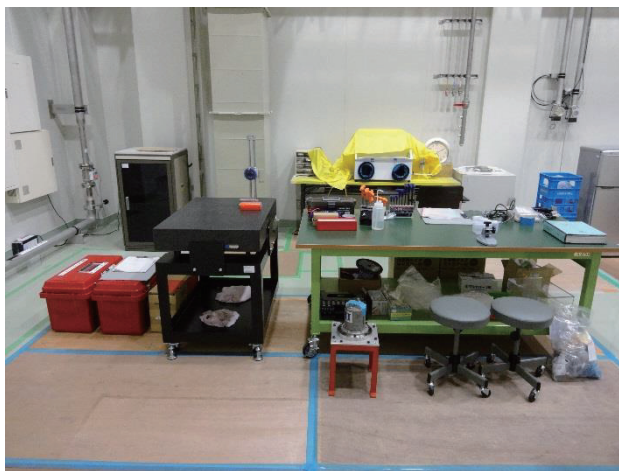


図 15. コールドコンプレッサメンテナンス機材

高圧ガス保安検査に関わるものとして、バルブボックスに設置してある、安全弁と圧力計の点検があるが、こちらの点検も、管理区域内で行うことにした。

また、メンテナンスで交換した機器(廃油なども)や故障して交換した機器に関しても、交換後持出せないため管理区域内の保管場所で保管することになる。保管場所のスペースは限られているので、保管物を減らすことを考えなくてはならない。そこで、ロータリーポンプはスクロールポンプに交換し、設置から 10 年以上経過している機器をめどに、可能な限り重水素実験開始前までに交換しておくなど、今後出る保管物が少なくなるよう努めた。

さらに、真空排気装置のターボ分子ポンプに関しては真空断熱層を封じ切った後に停止して、稼働時間を節約し、機器寿命を延ばすことにした。

2.5 その他の対策

その他の対策について、下記の通り報告する。

- 実験期間中における管理区域入室時間を削減する目的で、安全弁に熱電対を取付けて温度を遠隔監視し、動作の確認を行う試みや、真空計の遠隔監視化を行った。遠隔化にともないリモート IO の追加、信号や通信の整備、操作端末の変更、追加なども随時行った。
- 安全弁の放出側(二次側)配管はこれまで大

気側で開放となっていたので、配管内部にちり、ほこりなどが存在する可能性がある。安全弁動作時にそれらが大気へ出て行かないよう、HEPA フィルタを設置した。(図 16)



図 16. HEPA フィルタ

- 冷媒として循環しているヘリウムに関しては、実験中に放射化して生成されるトリチウムはごく僅かで、問題とならない量だと考えられるが、自主的な管理として、定期的に循環系統内のヘリウムを一部抜き取り、ルームガスモニタによる測定を行い、経過観察することにした。

3 今後の対策、整備について

今後も引き続き、本体室地下へ移設可能な機器は移設することを予定している。

さらに、これまでは機器が設置してある現場で行ってきた操作を、可能な限り遠隔操作できるよう整備し、管理区域入室時間を削減していく予定である。

また、重水素実験は始まったばかりであり、どの程度の中性子が放出されるのか、機器の設置位置によって受ける影響の差はどの程度なのか、機器の種類によって中性子に対する耐量に違いがあるのか、などまだ定量的にわからない点が多い。今後実験を重ね、明らかになってくるとともに、更なる対策が必要になり、都度対応していく必要があるだろうと考えている。

LHD 用ヘリウム液化冷凍機の復旧作業

○森内貞智^{A)}、三戸利行^{B)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

概要

2015年8月に発生したLHD（大型ヘリカル装置）用ヘリウム液化冷凍機のコールドボックス火災事故後の復旧作業とその後の運転成果について報告する。

1 LHDの超伝導・低温システム

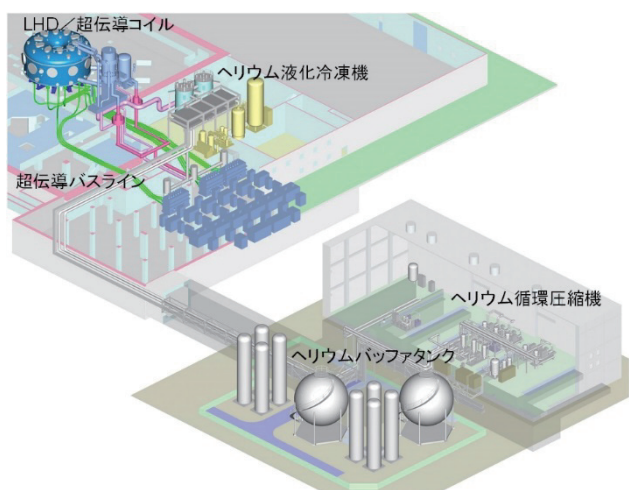


図1. 低温システム全体配置図

LHDは全ての磁場閉じ込めコイルを超伝導化したヘリカル型核融合プラズマ実験装置である。LHD低温システムの全体配置を図1に、フロー図を図2に示す。大型ヘリカル実験棟には超伝導コイルが内装するLHD本体が設置される本体室と厚さ2mの壁を隔てた隣室にヘリウム液化冷凍機が配置される。LHD低温システムは、超伝導ヘリカルコイル、超伝導ポロイダルコイル、電磁力支持構造物、超伝導バスライン、80K 輻射シールド等で構成される超伝導システムを、冷凍能力として 5.76kW at 4.4K 及び 20.6kW at 80K と液化能力として 650L/h を同時に発生する1台のヘリウム液化冷凍機で冷却する国内最大級の極低温冷凍システムである。

1998年のLHD低温システムの運転開始から過去17年で18回の長期連続運転を達成し、99%を超える高い稼働率で安定な核融合プラズマの実験環境を提供してきた。

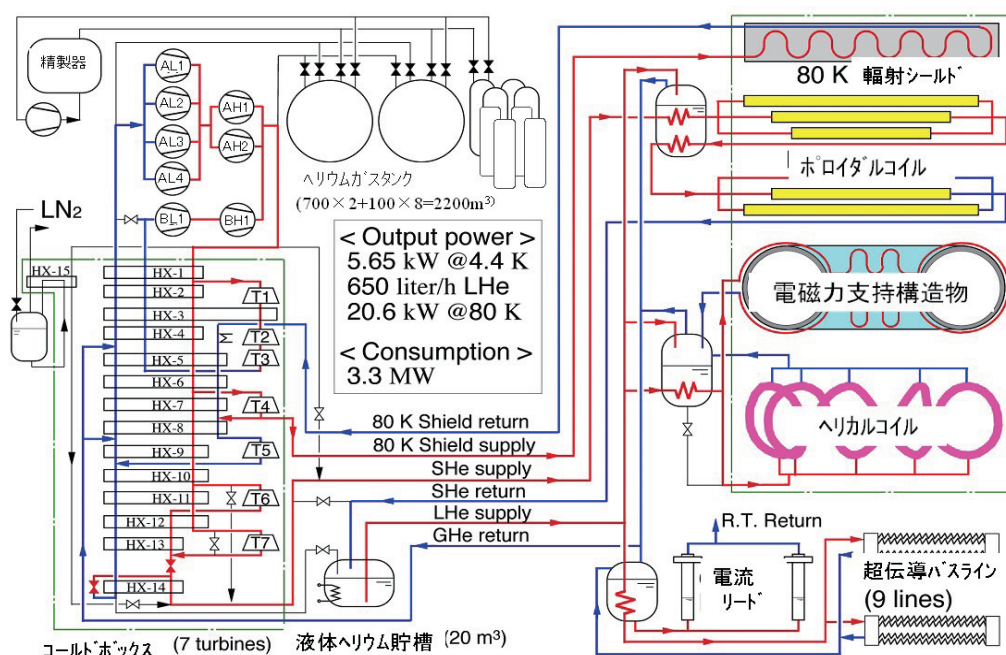


図2. 低温システムフロー図

2 ヘリウム液化冷凍機

図3にヘリウム液化冷凍機室の概略配置を示す。幅22m、奥行き60m、高さ20mの室内に、コールドボックス、50,000L液体窒素貯槽、20,000L液体ヘリウム貯槽、ヘリウム精製器等が配置される。ヘリウム液化冷凍機のコールドボックスは荷重分散のため2筒で構成され、低温側をコールドボックスA、高温側をコールドボックスBとしてそれぞれが連結配管で接続された1台の冷凍機である。コールドボックスは床から4本の支柱で支えられ、トップフランジに自動弁(WEKA社製)やダイナミックガスベアリング式膨張タービン(Linde社製)等が配置される。コールドボックス内部の熱交換器や配管類及び温度センサー等のメンテナンスを行う場合は、コールドボックス真空外槽を床の開口部から地下部に下ろすことで内部を露出させる構造となっている。

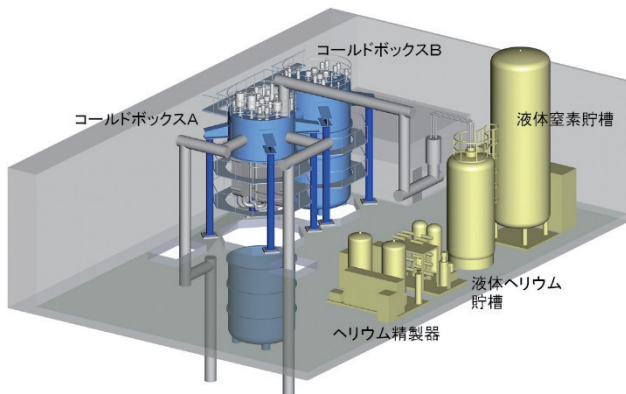


図3. ヘリウム液化冷凍機室配置図

ヘリウム液化冷凍機は約20年に及ぶ長期間の運転により電気計装機器や回転機器等の各部の経年劣化と考えられる不具合が発生している。そのうち、図4に示すコールドボックス内の各タービン入口フィルターや内部吸着器1(ADS1)が、数年にわたり冷却運転中に閉塞傾向となり冷凍能力や運転状態に変化が認められてきたため、交換作業を行うこととした。

2015年のメンテナンス期間に行っていたフィルター交換作業中にヘリウム液化冷凍機のコールドボックスAで火災事故が発生し、コールドボックス内の多層断熱材や温度センサー等の計測機器部材が焼失した。

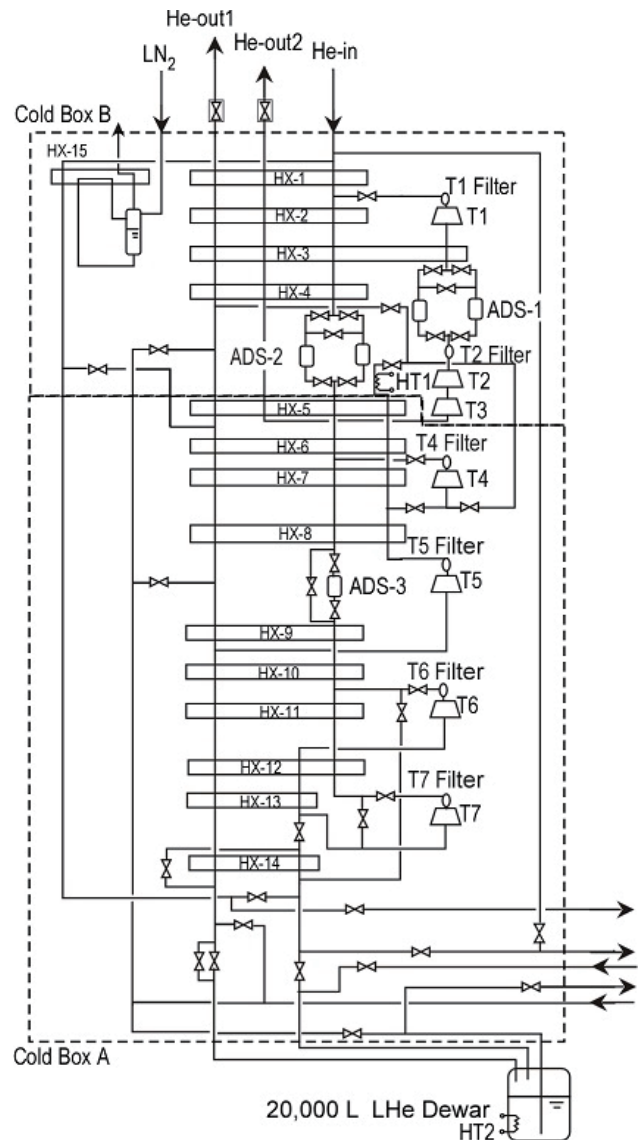


図4. コールドボックスフロー図

3 復旧作業

3.1 作業内容

2015年11月より復旧作業を行い、2016年7月末に完了した。以下に行った主な復旧作業内容を示す。

- ヘリウム液化冷凍機室内建屋・設置機器清掃
- コールドボックス(CB)内清掃作業
- コールドボックス(CB)機能復旧作業
 - CB内配管の配管内部点検及び清掃
 - タービン入口フィルター/ADS1配管接続
 - 自動弁/手動弁点検
 - リーク試験(配管/熱交換器健全性確認)
 - 配管施工部の試験・検査

- ・温度センサー交換
- ・外部配線修理
- ・多層断熱材（SI）取付け
- ・配管系ヘリウムガス真空置換
- ・CB 精製運転
- ・ADS1 出口弁開放点検
- ・タービン復旧
- ・ヘリウム液化冷凍機単独冷凍確認運転

コールドボックス機能復旧作業に先立ち、コールドボックス内の配管や熱交換器及びコールドボックス内面等に施工されていた多層断熱材の多くが焼失又は蒸し焼きとなりその機能をほぼ失ったため、焼損した多層断熱材の煤を拡散防止するための養生を行った状態で、手作業及びバキュームにて除去し、配管や熱交換器の表面の汚れをドライアイスブラストや手作業により傷つけないよう清掃した。

タービン入口フィルター及び ADS1 交換作業のために切断していた配管開口部からファイバースコープで目視点検し、エアパージやフロン洗浄を行った後、タービン入口フィルター及び ADS1 の取付けと切断した配管を溶接で復旧した。

コールドボックス内部配管の接続完了後、真空法によるヘリウムリークテストを行うため、コールドボックス外槽を一時復旧し外槽の真空引きを行い配管内部にヘリウムガスを加圧することで配管各部の健全性確認を実施した。また、再度外槽の取り外し後、配管溶接箇所の高圧ガス保安法冷凍則対応の検査とともに、自主検査として熱交換器と容器の健全性確認のため耐圧試験を行い、異常は認められなかった。可燃物が多層断熱材のみのため長時間高温の環境にさらされることはなかったと考えられる。

コールドボックス A 側 54 本、B 側 32 本の全ての温度センサーを交換した。Pt-Co、Pt100Ω、シリコンダイオードの 3 種の温度センサーを配管台座に取付け、冷却スプレーでセンサー部を冷やし反応の確認でループ試験とした。温度センサー取付け後に各部の多層断熱材の復旧を行った。多層断熱材の取付けにおいては温度センサー配線や導圧管があるコールドボックス内で多種多様な形状の配管や熱交換器に

施工するため、また事故前の施工状態と異なると冷凍機の性能に影響する可能性があるため慎重な作業が要求され長時間を要した。

コールドボックスのトップフランジに配置される自動弁類は、直接熱的な影響はないものと判断したが多層断熱材の細かい煤等が多量に拡散したため、ポジショナーや接点類の弁軸への噛み込みによる動作不良を防ぐ目的で掃除機による吸引及びエアブローを行った後に自動弁類の単体動作確認を行った。

配管系内においては、ヘリウムガス真空置換を 3 回行い、ヘリウム循環圧縮機及び外部精製器を使用した循環精製運転をヘリウム分析計で検出感度限界程度になるまで行った。

タービン本体は、フィルター交換作業を行う前に予め 7 台全てコールドボックスから取り外していたため、影響はなく通常復旧した。

3.2 性能再確認試験

復旧後の冷凍液化能力及びセンサー類、自動弁等の動作特性を確認するため、2016 年 8 月にヘリウム液化冷凍機の単独冷凍運転を行い、各機器に異常な動作を認めることなく試験運転を完了した。

20 年前に行った性能試験結果の比較を表 1 に示す。4.4K の等価冷凍能力は、9.19 kW であり、20 年前に測定した性能 9.38 kW に対して約 2% の僅かな冷凍能力の低下が測定された。この冷凍能力の低下は、火災事故の影響ではなく、18 年間の経年劣化による性能低下と考えられる。

表 1. 性能試験結果

冷凍能力	2016 年 8 月 5 日 測定	1995 年 6 月 17 日 測定
4.4 K 冷凍能力 (液体ヘリウム貯槽内 ヒーター入力値)	5.67 kW	5.67 kW
4.4 K 液化能力 (液体ヘリウム貯槽液 位)	606 L/h	704 L/h
80 K 冷凍能力 (80 K 輻射シールド ヒーター入力値)	23.35 kW	20.7 kW
4.4 K 等価冷凍能力	9.19 kW	9.38 kW

4 運転成果

2017年1月からLHD低温システムとしての運転を再開し、2月8日からプラズマ実験が開始され、3月7日からは新たに重水素プラズマ実験が開始された。LHD低温システムの第19サイクル運転成果を図5に、第1サイクルからこれまでの運転履歴を図6に示す。

第19サイクルでは精製運転、予冷運転、定常運転、加温運転の各運転モードにおいても特に異常な挙動もなく、計画通りの工程で運転を行い、これまでの積算運転時間が最長となる5,761時間の安定な連続運転を達成することができた。

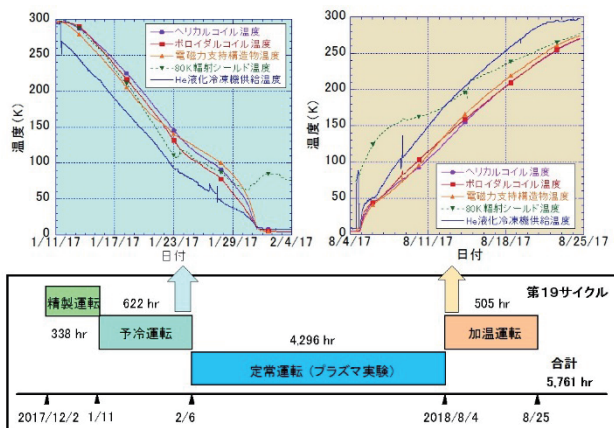


図5. 第19サイクル運転成果

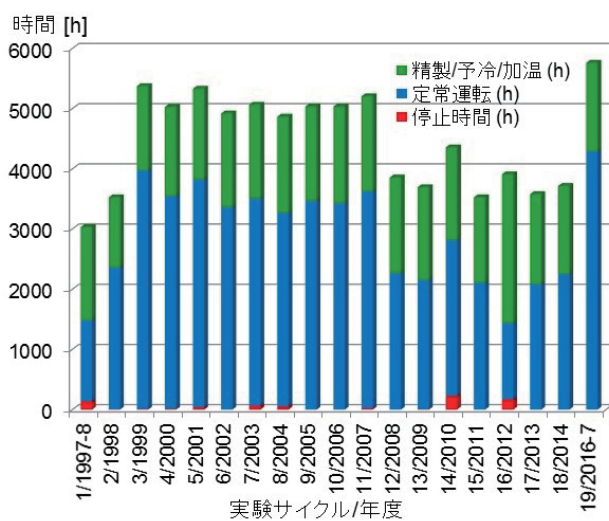


図6. 低温システム運転履歴

第5分野

(情報・ネットワーク技術)

高性能分子シミュレータの更新経緯と特長について

○水谷文保、岩橋建輔、松尾純一

自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課

概要

自然科学研究機構 岡崎共通研究施設 計算科学研究センターでは、分子科学研究所の共同利用サービスとして、全国の分子科学研究者に無料の計算環境を提供するため、その計算資源となるスーパーコンピュータ（以下、スパコンと略す）の運営を行っている。2017年10月から稼働を開始した高性能分子シミュレータ（以下、S2017と略す）の更新経緯と特長について報告する。

1 はじめに

1977年5月に設立された分子科学研究所 電子計算機センターは、翌年1月には汎用コンピュータ（以下、汎用コンと略す）を導入して共同利用サービスを開始した。1986年1月には、かねてから分子科学研究者の夢であったスパコンを別途導入し、その後は2システムによるサービス体制になった。

組織的には、2000年4月から岡崎国立共同研究機構 共通研究施設 計算科学研究センターに転換しサービス範囲をバイオサイエンス分野にも広げた。2004年4月には法人化に伴い、自然科学研究機構 岡崎共通研究施設 計算科学研究センターに転換して現在に至っている。

法人化以降、汎用コンを高性能分子シミュレータ、スパコンを超高速分子シミュレータと呼称することになった。これは自然科学研究機構が、岡崎3機関（分子科学研究所、基礎生物学研究所、生理学研究所）と国立天文台および核融合科学研究所から設立されたことにより、機構内にスパコンが複数台存在する状況になったことを踏まえ、明確な性格付けをするためである。

当初のスパコンは、ベクトルプロセッサを搭載した演算性能が高い計算機であったが、その後汎用コンにおいてもベクトルプロセッサ搭載機を選考する

様になったため、汎用コンも実質スパコンと同等であった。相違点は、汎用コンは演算サーバに加え、ファイルサーバや会話処理サーバなど、1システムで運用が完結するのに対し、スパコンは主として演算サーバのみであって、演算性能強化システムという位置づけが異なっていた。運用的には両者を1システムとして一体運用を行っていた。

2 更新の経緯

2.1 2システム運用の問題点

1980年代後半に起こった日米スパコン貿易摩擦[1]を受けて、1987年8月よりスパコンの導入手続きが、アクション・プログラム実行推進委員会で決定された手順により国際調達しなければならなくなり、その手続きには1年半以上の期間が必要となった。このため最新のCPU動向を2年前から情報収集する必要に迫られることになった。また通常スパコンが5年前後のレンタル契約で導入するため、2システムを運用することは、市場調査や導入手続き、システム立ち上げなどの一連の業務サイクルがずっと継続している状況に陥ることになった。

法人化翌年度より2004年度予算から1%ずつ効率化係数が課せられ、2016年度から6年間は1.6%に増加し、これにより法人化後13年経った2017年度は単純に14.2%予算が削減された状況になっている。さらにスパコンの性能向上がコア数だけでなくノード数増加傾向を伴うことで、電力消費量が増加傾向にあり、これに加えて電気代が一時200%、現在でも150%程度高止まりしている状況にあり、電気代の不足分を借料から補填するため、スパコンにかけられる金額の目減りが著しい状況になっている。S2017では、借料予算の約20%を電気代補填に確保しなければならない状況となっているため、法人化前と比べて実質的な計算機予算は、消費税3%上昇分も含め

ると、66%程度に目減りしている状況である。ここに至って計算機にかかる費用をわずかでも増量させるため、1システム化の判断は必然的であった。

以上から、運用効率や調達効率を上げるために、2013年3月から稼働した高性能分子シミュレータ(以下、S2012と略す)は、その前年度2月から稼働した超高速分子シミュレータ(以下、S2011と略す)とレンタル終了時期を合わせ、その次は1システム化して調達することを2012年5月21日開催の第3回仕様策定委員会で決定した。5年以上前の話である。

2.2 CPUの選択

S2011以降の導入機器は、CPUにInte Xeonを選択している。S2011は第2世代と呼ばれる開発コード名SandyBridgeを、S2012は当初同じSandyBridgeを導入し、1年後に第4世代と呼ばれる開発コード名Haswellを導入した。その次のS2017は、第6世代と呼ばれる開発コード名SkyLakeをターゲットにすることは早々に決まっていたが、この出荷時期情報がなかなか得られなかった。

S2017は、当初2017年2月運用開始予定であったが、2015年10月6日官報公示によって行った資料招請の結果を受け、2015年12月11日に開催した第2回仕様策定委員会で、現有機のレンタルを8カ月延長することを決定した。この当時SkyLakeは2017年第2四半期末に出荷されるという情報と、第3四半期末に出荷されるという情報があり、リスクを回避するために後者を採用することになった。

2.3 CPUコア数およびクロック数の選択

導入時期を2017年10月に設定したが、仕様書を仕上げるリミットである2016年12月ぎりぎりまでSkyLakeのコア数とクロック数のラインナップ情報が得られなかった。ようやく得られた情報の中で妥当と思われたCPUが2.3GHz 20コアであったが、HaswellでSIMD命令を使うとクロックダウンする現象、例えばS2012で採用した2.6GHz 14コアはAVX2命令を使うと2.2GHzまで下がったが、SkyLakeのAVX512命令を使うと2段階下がることもあり、2.3GHzから1.9GHzを経て1.5GHzまで下がることある、との情報を入手し、このままこのCPUを採用

することがためらわれた。

分子科学分野では様々な種類にプログラムが使われており、ジョブの流し方も、数千コアジョブを1本投入するタイプNに対し、1コアジョブを数千本投入するタイプCと両極端な利用形態が存在している。S2011のSandyBridgeは2.9GHz 8コア(AVX命令で8演算を同時実行)のCPUを採用したが、SkyLakeで最悪1.5GHz 20コア(AVX512命令で32演算を同時実行)を採用した場合、タイプNの様にCPU全コアを1度に使い尽くしさらにSIMD命令に対応したジョブであれば、CPUの総合性能が要求されるため、特に問題にはならないが、タイプCの様に1コアしか使わないジョブでSIMD命令に対応しない場合はクロックダウンの影響を受け、スパコン更新による性能向上の恩恵にあずかれない。そこで利用形態を、ノード単位で利用するタイプN用のシステムと、コア単位で利用するタイプC用のシステムの2つに分け、後者には高クロックで低コア数のCPUを採用することにした。本方針は、仕様書確定直前の2016年12月12日開催の第4回仕様策定委員会で承認された。

3 本システムの特長

3.1 2タイプのシステム

分子科学研究で使用されるさまざまな特徴を有したプログラムに対応するため、過去には高速メモリを有したベクトルプロセッサマシン対超並列向けスカラプロセッサマシンや、巨大共有メモリマシン対分散メモリマシンなど、その時代の特性に応じたシステムを導入してきた。本システムの演算サーバは2.3で示した経緯からバランス良いメニーコアマシン対高クロック低コアマシンという2利用形態対応構成になったが、これに加え、タイプNには一部高容量メモリノード(Fat node)と、タイプCには一部GPGPU搭載ノード(Accelerated node)の4種類が存在している。総数1,069ノード、40,588コアに192GPGPUカードを搭載して総演算性能が4PFlopsで消費電力量が745kW/hである。これらをOmni-Pathインターコネクで接続している。GPGPUノードを除外してlinpackベンチマークを実施したところ1.785PFlops

高性能分子シミュレータ 4.096PFlops

2017年10月更新

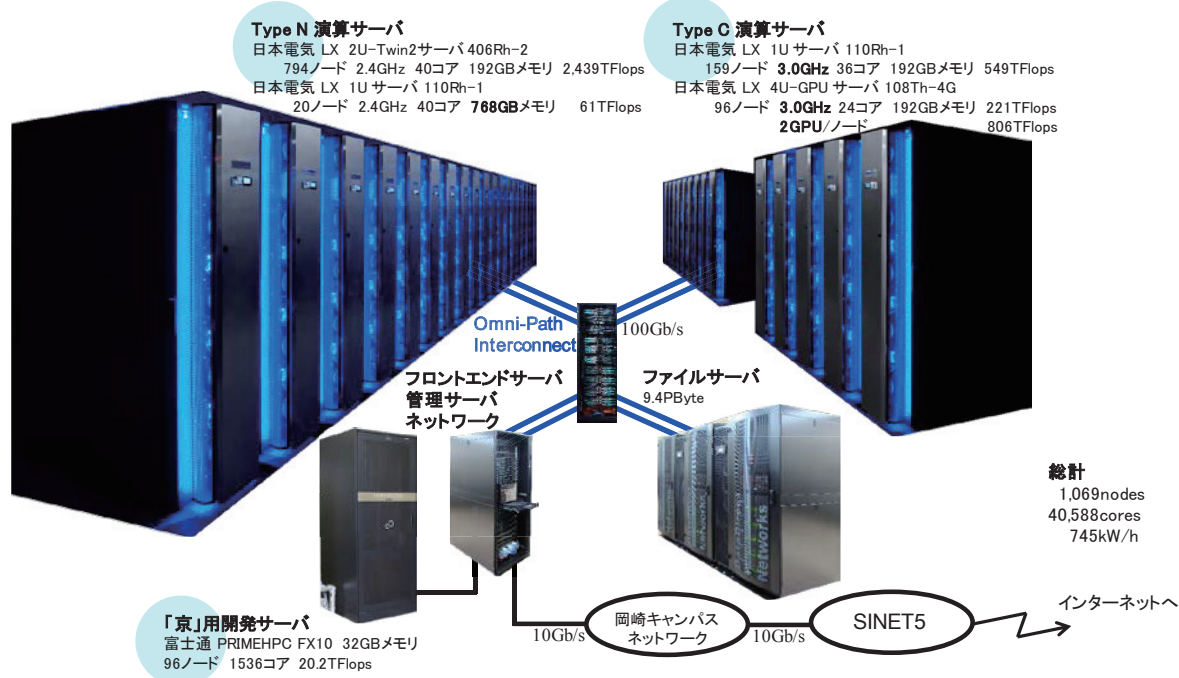


図 1. 高性能分子シミュレータ

の実効性能を記録し、2017年11月付 Top500において世界70位、国内11位で登録された。演算性能ではCPUが3.2PFlops、GPGPUが0.8PFlopsという4:1の配分も特長の1つである。

その他に、9.4PBのファイルサーバ、フロントエンドサーバ、管理クラウドが導入されている。さらにS2011で導入した「京」用開発サーバもレンタル延長している。本システムの概要を図1に示す。本システムは、日本電気株式会社（以下、NECと略す）が落札した。

3.2 省エネルギー対策

省エネルギー対策については、資料招請段階でも各ベンダ独自の様々な方式が存在していたため、仕様書ではクーリングシステム一式も本システム構成に含めることにし、具体的な方式は特に規定せず、消費電力量が少なければ加点を増やす程度に記述にとどまった。NECが提供したクーリングシステムの概要を図2に示す。

本システムは、水冷システムであるが、特長はwarm waterを循環させる方式である点である。旧来はcold waterを循環させるのが普通であったが、常時

水を冷やすことから消費電力が増えるため、いかに水を冷やさないかが最近のトレンドである。省電力という点では、hot waterを循環させる方式が、一番省エネとされている。水温のhotとwarmの境は明確に示されていないが、夏季の気温が一つの目安のようである。hot waterを循環させるシステムでは、夏季もそのまま循環させて問題がないとされている。これに対してwarm waterを循環させるシステムでは、夏季は循環水を冷やすためのチラーが必要とされ、この分だけ省エネおよびコスト的に不利とされる。ただしhot waterの場合は廃熱がCPUとメモリに限られる場合が多く、それ以外の発熱には空冷が必要となるためコスト的に有利とも限らない。

今回のクーリングシステムでは、warm waterを使うもののチラーは導入せず、冷却塔だけで循環水を冷やすシステムである。夏季は冷却側が34℃で廃熱側が37℃という設計である。この差の3℃は2基の冷却塔で冷やされる。冬季は冷却側の最低温度は12℃で設定しており、これ以下になると冷却塔内の冷却水の散布を停止させる。停止すると循環水温が上昇し17℃を超えると冷却塔内の冷却水の散布を開

始する。この機構に必要な電力は循環水を循環させるモーターと、冷却塔内の冷却水を散布させるモーターの分だけなので消費電力が低く抑えられる。

特に発熱量が多い演算サーバにおいては、ラックの背面に Rear Door と称する廃熱機能を有した扉を設置し、そこで演算サーバの発熱のほとんどを循環水へ廃熱する。ファイルサーバには InRow と称する機器が設置してあり、ラック背面からの廃熱された空気を吸気して循環水へ廃熱し、冷やした空気をラック前面に排出する。これらの廃熱装置で取り除けなかった分の熱は、エアコンで冷却を行う。今回導入されたエアコンは、通常の冷媒による冷却以外に、循環水による冷却も可能な機器であり、特に空調機の設定温度の 20℃を循環水温が下回る冬季には、冷媒を冷却するための室外機は運転停止する。

4 システムの有効性について

4.1 2タイプ構成

利用形態と CPU 開発傾向に注目して、システムを 2タイプに設定して導入を行ったが、過去 3カ月の利用状況等を可視化グラフで参照すると、タイプ N の平均稼働率が 89%程度、タイプ C の平均稼働率は 75%程度で徐々に上昇傾向にある。若干タイプ C の利用にムラがあるものの、どちらか一方に偏ることなく両タイプがほぼ均等に使用されている状況である。

4.2 省エネルギー対策

まだシステム導入から 4 か月であり一番の問題である夏季を経験していないため、クーリングシステムが有効に機能しているか検証するにはもう少し時間がかかるが、冬季の省エネルギー状況は想定以上の効果が得られている。

今回導入された冷房能力 56kW の空調機を使用し全部空冷で行うのであれば、過去 3 か月分のサーバ全体の消費電力の最大値が 530kW 程度であったことから、ざっくり 10 台の空調機が必要となるところ、2 台構成である点から、水冷による廃熱率は 80%以上であるが、冬季は 100%水冷だけで運用できている。

サーバ以外の消費電力量の最大値は 50kW 程度であるため、PUE は 1.09 とかなり低い状況であり、こ

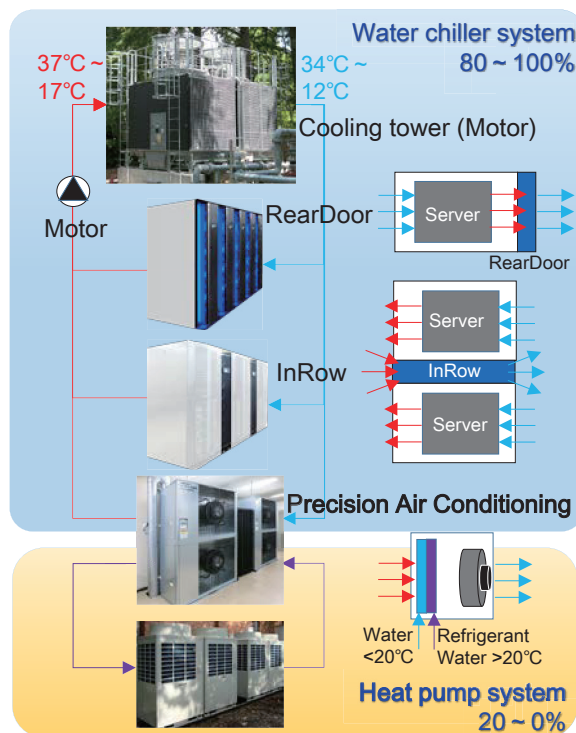


図 2. クーリングシステム

の状況には満足できている。

4.3 トラブル

初期不良と思われる障害以外に、Omni-Path インターコネクト由来と思われる障害がいくつか発生している。後者に関しては、十分なモニタができていないため、早急にモニタ整備を行う必要がある。

4.4 可視化

本システムの運用にあたり、様々な情報を収集しながら常時可視化してモニタ出来る体制を構築している。これにより障害発生をいち早く認識可能である。

5 まとめ

2タイプのシステム構成への問題は特に見られない。省エネルギー対策は、夏季の運用が試金石となるため、今後の経過観察が重要である。

参考文献

- [1] 小柳義夫、“HPC の歩み 50 年 (第 30 回) ”、HPCwire JAPAN、2015 年 3 月 9 日
<http://www.hpcwire.jp/archives/7126>

岡崎 3 機関の共通ネットワークおよび仮想サーバ基盤の更新

○澤 昌孝、内藤茂樹

自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課

概要

2017 年 3 月末に岡崎 3 機関の共通ネットワークおよび仮想サーバ基盤の更新を実施した。

今回の更新で導入した技術（イーサネット・ファブリックなど）や変更した構成（冗長性の強化など）を紹介し、その効果などを検証する。

また、落札後や導入後に発覚した問題なども併せて紹介する。

1 新旧システムの概要図

自然科学研究機構・岡崎キャンパスには部局として生理学研究所、基礎生理学研究所、分子科学研究所、および研究所の事務を担当する岡崎統合事務センターがあり（まとめて「岡崎 3 機関」という）、キャンパスエリアとしては研究設備や研究室が存在する明大寺地区と山手地区、および講演施設（OCC）やロッジなどがある三島地区がある。

キャンパス内のネットワークを統括的に運用・導入する組織として岡崎情報ネットワーク管理室が存在しており、基幹サーバなども含めたキャンパスネットワークシステムの総称を ORION と呼称している。2011 年度末に構築した旧システム（ORION2011）、昨年 3 月に構築した新システム（ORION2017）と定義する。新旧システム共通な基本構成としては、多くの通信がある明大寺～山手地区間を基幹スイッチ（レイヤ 3 スイッチ）で 40Gbps 以上の高帯域接続し、主に建屋内のフロア毎に支線スイッチ（レイヤ 2 スイッチ）を設置し、基幹スイッチや他の支線スイッチ間は主に 10～20Gbps の帯域で接続している。なおゲストネットワークについては、岡崎 3 機関の教職員ネットワークと明確に分けるため、外部との接続は学術研究ネットワーク（SINET）ではなく一般 ISP を使って外部接続する構成になっている。

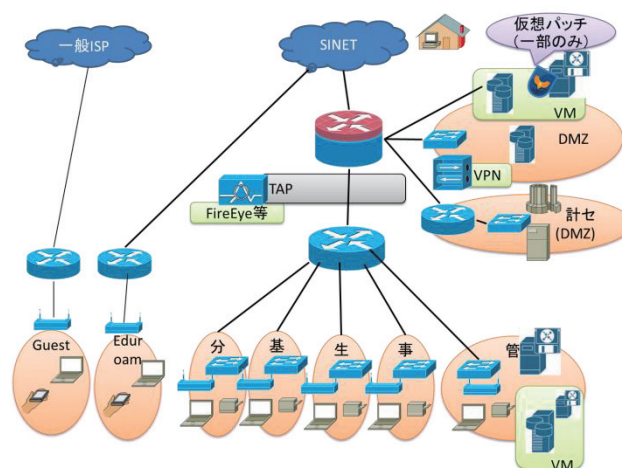


図 1. 旧システム（ORION2011）概要（論理図）

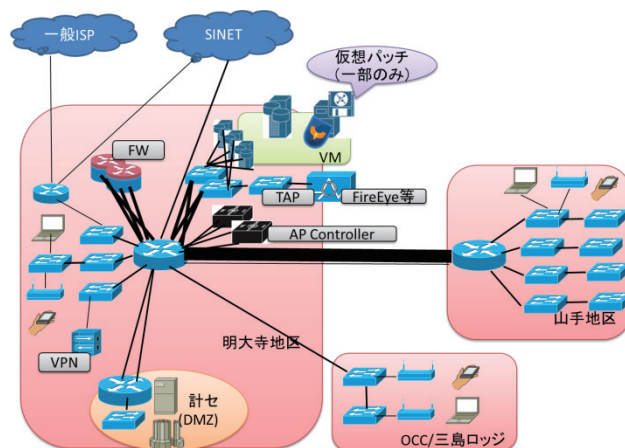


図 2. 旧システム（ORION2011）概要（物理図）

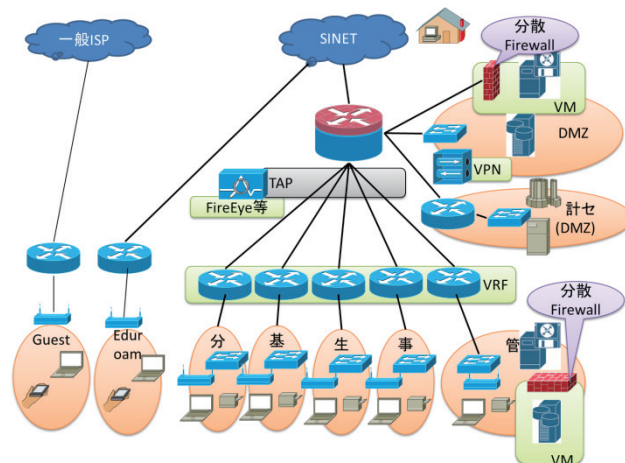


図 3. 新システム（ORION2017）概要（論理図）

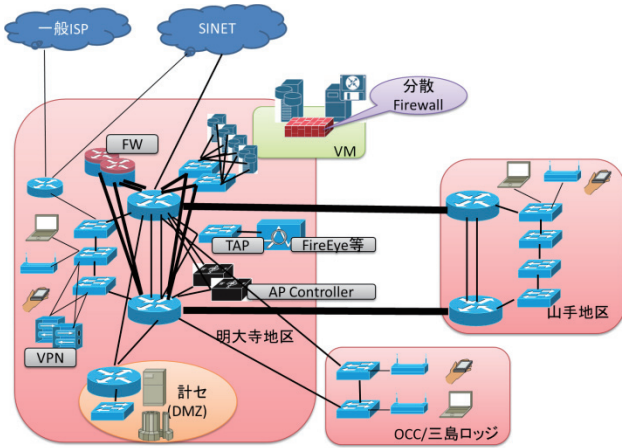


図 4. 新システム (ORION2017) 概要 (物理図)

2 導入した技術

2.1 イーサネット・ファブリック

冗長回線構成にする場合、単純にリングやメッシュなどのトポロジーにするとブロードキャスト・ストームが生じるため、Spanning Tree Protocol (STP) を使って副回線ポートをブロッキング状態にし、実質的にシングルパスにしなければならなかった。旧システムでは明大寺～山手地区間基幹スイッチは 100Gbps と 10Gbps の 2 本で接続していたが (図 5)、副の 10Gbps 側のポートはブロッキング状態になるため、1 回線分しか有効活用できない状態になっていた。

新システムの基幹スイッチ間ではイーサネット・ファブリックを採用することにより (図 6)、ファブリック接続したスイッチの最短経路が自動判断されるためループを回避できるようになった。その結果、基幹スイッチ間のパスは全てアクティブにでき、接続した回線の全帯域を利用できる構成になった。

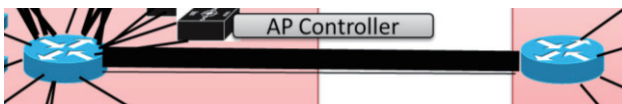


図 5. 旧システムの明大寺～山手地区間基幹スイッチ接続 (100Gbps と 10Gbps の各 1 本で接続)

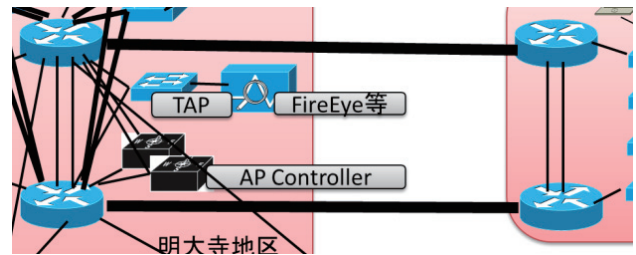


図 6. 新システムの明大寺～山手地区間基幹スイッチ接続 (40Gbps2 本で接続)

2.2 分散 Firewall

岡崎情報ネットワーク管理室では研究所メールサーバなどの基幹サーバを運用するプライベートクラウド (仮想環境) を運用しており、旧システムの仮想環境ではごく一部の重要なサーバの仮想マシン (VM) に対してのみ仮想パッチシステムを適用していた (図 7)。

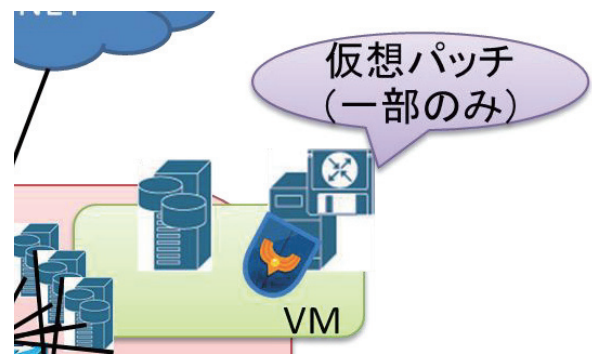


図 7. 旧システムの仮想環境と VM 運用

しかし、重要なサーバを VM 化する機会が増えており、その度に VM 単位でライセンスが必要な仮想パッチシステムを適用していくと、費用が膨大化することが見込まれていた。そこで新システムでは全 VM 個別に分散 Firewall を適用することによって Micro Segmentation 化できるシステム (vArmour) に更新した (図 8)。

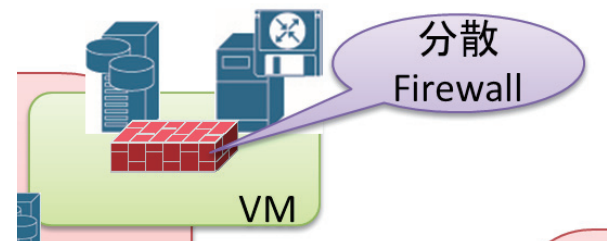


図 8. 新システムの仮想環境と VM 運用

最近ハードを含むアプライアンスとして供給されていた機能を VM で提供されるようになり、岡崎 3

機関でも AntiSpam システムなどで VM アプライアンスを使用している。しかし、VM アプライアンスの場合、仮想パッチを適用することができず、また通信制御できる機能が限定的であることがある。新システムの分散 Firewall システムでは VM が直接接続している仮想スイッチ上で動作するため、VM アプライアンスでも通信制御ができるようになった。

3 新システムで強化された主なこと

3.1 冗長性

基幹スイッチ同士間については 2.1 で示したイーサネット・ファブリックで冗長性を強化した。基幹～支線スイッチ間については STP を用いたリングトポロジーに更新した (図 9、10)。また VPN 装置についても 2 台で High Availability(HA)構成に更新している。

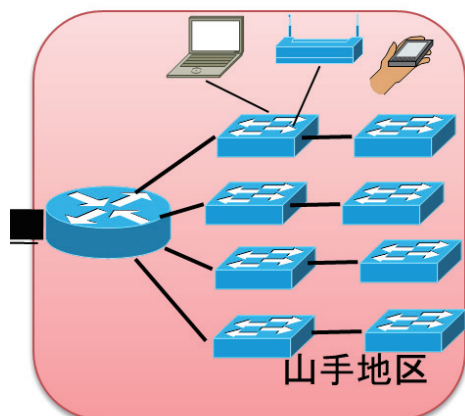


図 9. 旧システムの基幹～支線スイッチ間接続 (スタートポロジー)

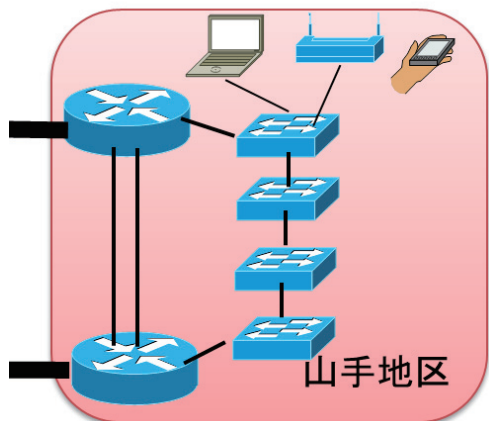


図 10. 新システムの基幹～支線スイッチ間接続 (リングトポロジー)

3.2 セキュリティ

VM 環境については 2.2 で紹介した分散 Firewall にて経路制御および可視化が実現された。

また部局間通信について、旧システムでは部局間通信は同じ Router で行っていたが (図 11)、新システムでは Virtual Routing and Forwarding (VRF) を使って部局ごとに別々のルーティングテーブルを分け、さらに中央 Firewall を経由するように構成した (図 12)。これにより部局間通信においても経路制御および可視化が実現された。

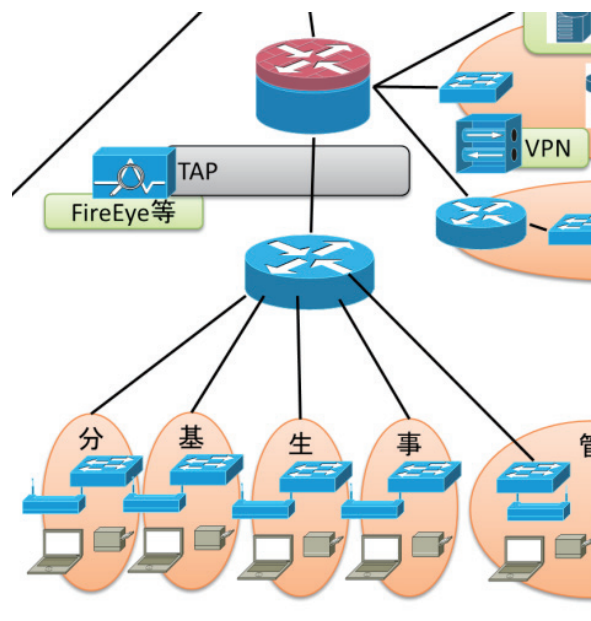


図 11. 旧システムの部局間経路

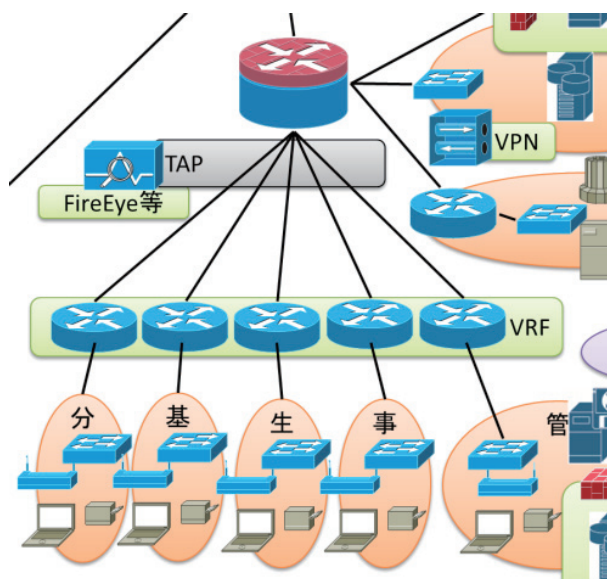


図 12. 新システムの部局間経路

4 更新で実現できなかった主なこと

4.1 基幹スイッチ～SINET 間接続の冗長化

図4で分かるように基幹スイッチ～SINET 間接続は明大寺地区の基幹スイッチ 1 台のみ接続となっているため、内外接続通信の単一障害点となっていた。

この問題については、図4で SINET 間接続されている基幹スイッチポートに障害があった際に、別の明大寺地区の基幹スイッチ 1 台に光回線を切り替える機器を 2017 年 10 月に導入し対応した。

4.2 支線スイッチを含めた全体的なイーサネット・ファブリック構成

3.1で紹介したように基幹～支線スイッチ間については STP によるリングトポロジーとなっている。新システム調達の仕様書策定した時点では、支線スイッチでイーサネット・ファブリックが構成できる機器に限られており競争性が低下するため、今回の更新では支線スイッチのイーサネット・ファブリックの導入を見送ることになった。

5 新システム導入後に発生した問題

5.1 支線スイッチの ColdStart

10 日に 1 台程度の頻度で不特定な支線スイッチにて ColdStart が発生する現象が新システム導入後から発生していた。当初はスイッチ電源の供給元や温度等が原因ではないかと疑われた。しかし、同一ラックに収められている同型支線スイッチで同時に ColdStart は発生しておらず、また、ColdStart が起きていた春から秋までの発生頻度を調べた結果、夏場のみ突出して発生している傾向はないことから疑われた原因ではないことは確認できていた。最終的にはメーカーから、支線スイッチの特定機能のバグにより ColdStart が発生していたと報告があった。該当する特定機能については無効化させても運用に支障がないことを確認できたので、無効化によることで問題を回避した。

5.2 基幹および支線スイッチベンダの M&A

新システム調達期間中の落札後に導入する基幹および支線スイッチベンダが M&A されることが判明

した。つまり、スイッチ類は落札時のベンダとは異なる M&A 先から供給されることになった。落札業者からはスイッチ導入後できる限りの対応をすると確約いただいているが、M&A 先に競合する製品が既にある場合、M&A されたベンダ製品の開発を終了することがあるため、M&A 先ベンダの情報収集を継続的に行うことが必要になった。

6 今後の課題

新システム調達確定後に、自然科学研究機構本部作成の情報セキュリティ関連規則が制定され、より厳密な規則となった。新システムは、岡崎 3 機関内で作成した情報セキュリティ規則および情報セキュリティ強化計画を前提としていた。

新規定を実施するために新システムでは不足しているもの調達や開発などを進めていく予定である。

個別電線単位の計測／節電を目的とした消費電力測定システムの構築と運用

○竹内純人^{A)}

^{A)}電気通信大学 教育研究技師部

1 はじめに

電気通信大学 教育研究技師部では2013年度より、学内における節電推進への貢献を目的とした「ECOプロジェクト」を立ち上げ、2018年現在も鋭意活動中である。本プロジェクトでは主に、ICTを活用した消費電力のリアルタイム計測および消費状況の見える化システムの構築に注力しており、活動の成果として、図1に示すようなグラフ表現によるWebページを学内専用サイトにて2017年度より公開中である。

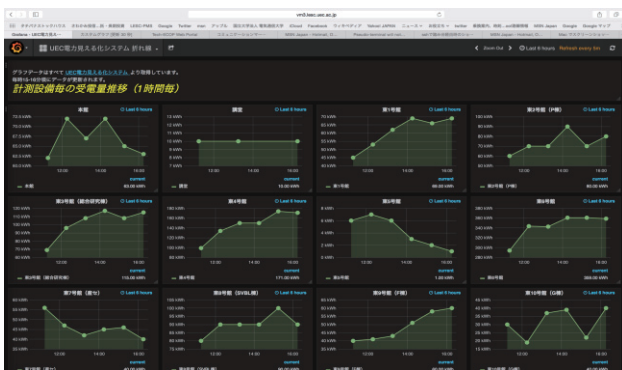


図1. 電力計測システムにおける消費電力のグラフ表示

上記Webページは、教育研究技師部にて独自構築した消費電力計測システムの一部として稼働している。本システムでは、建て屋内の分電盤にある個別の電線に電力計測センサを取付け、皮相電力値を定期的に取得することで、各電線単位の消費電力を推計している。したがって、計測対象の各電線が建て屋内のフロア全体に伸びているものであれば、その建て屋のフロア単位の消費電力が計測でき、同様に個別の部屋に伸びている電線であれば、部屋単位の電力計測が可能となる。これにより、必要に応じて次のような電力消費の単位で消費電力量を計測することが可能となっている。

- 建て屋内のフロアごと

- 研究室ごと
- 個別のコンセントごと

本システムは、電力計測用センサ／PCなどのハードウェア設備は購入した市販品から成るが、ソフトウェアに関してはLinuxを中心とした無償のオープンソースソフトウェア（以下、OSS）のみを連携させて構築しており、ツール間のデータ関係のために必要となる機能のみ、教育研究技師部で新たに開発した。センサ計測に関わるシステムは一般に、その計測データ総量が数百万～数千万件単位になることも珍しくはなく、このような規模のデータを処理するには、市販のOLAPツールやデータ分析ツールを利用することも有力な解決策の一つとされている。本システムも、同様の規模のデータを処理対象とするものであるが、ソフトウェアに関わる部分は前述の理由により、ライセンス費用の支払いや再配布の制限などは一切発生しない。そのため、様々な規模の組織に対して、比較的安価かつ容易に導入可能なセンサ計測システムとなっていることも、大きな特徴となっている。

本報告では、2017年度までに構築した消費電力計測システムの概要および、複数のOSSを連携させた学内への電力使用状況の周知機能について紹介する。併せて今後の展望を述べる。

2 消費電力計測システムの概要

2.1 全体概要

2017年度までに構築した消費電力計測システムの全体概要を図2に示す。

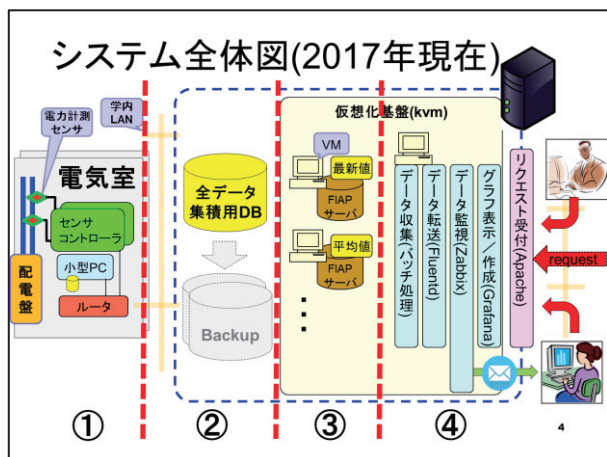


図 2. 電力計測システム全体図

図 2 に記載の①～④はシステムの構成要素であり、それぞれ次の名称を付けて管理している。

- ① 電力計測センサ設備
- ② 全データ集積用データベース
- ③ FIAP サーバ群
- ④ データの見える化と監視環境

各構成要素について、以下に述べる。

2.2 電力計測センサ設備

建て屋内の電線に取り付けている設備である。実際の取付けの状況を図 3 に示す。

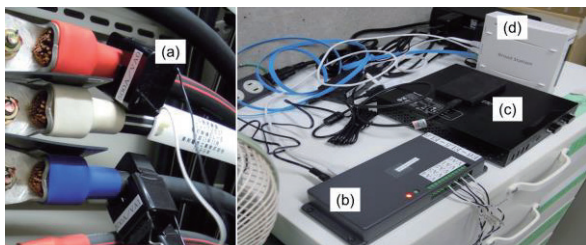


図 3. 電力計測センサ設備

本設備は (a)クランプ型交流電流センサ／(b)センサコントローラ／(c)小型 PC／(d)ルータを設備一式としている。(a)を取り付けた個別の電線の電力計測値を(b)が定期的に取得し、(c)に一次蓄積された後、(d)を経由して学内ネットワークに接続され、データ集積サーバシステムに送信される仕組みとなっている。

2.3 全データ集積用データベース

全データ集積用データベースは、電力計測センサ

設備から送信されるすべての計測値を多重化されたデータベースに蓄積する役割を果たす。全レコードのバックアップ／リストア機能の他に、各センサの正常稼働などを集中監視する役割も果たしている。

2.4 FIAP サーバ群

FIAP サーバとは、計測されたセンサデータについて受信／格納／問い合わせ応答の機能を持つサーバである。本サーバは「東大グリーン ICT プロジェクト」(<https://www.gutp.jp/>)にてプロトタイプ実装が開発／公開されており、同プロジェクトで提唱され標準規格化された IEEE1888 プロトコルに基づき、センサデータに関する処理を行う仕様となっている。ECO プロジェクトでも、同プロジェクトの成果を取り入れており、上記で述べた全データ集積用データベースに対するビューの役割を担っている。全データ集積用データベースに蓄積された計測レコードは、単純に

- センサ ID
- 計測時間
- 計測値

の 3 種類のデータを 1 レコードとして蓄積していくのみとなっている。これを種々の分析の切り口、具体的には最新値／平均値（10 分毎、1 時間毎）／積算値（1 日単位、1 時間単位）などの分析単位で加工された形でデータが整備される仕組みとなるよう、複数の FIAP サーバを用いて実現している。

2.5 データの見える化と監視環境

複数の OSS を組み合わせ、プログラミングレス／リアルタイム更新／マルチデバイス対応を特徴とした Web 上でのデータ可視化環境である。グラフ表示したいデータを FIAP サーバから定期取得し、ネットワーク統合監視システムを経由して、Web 上のダッシュボードツールに表示する方式としている。また、計測データをリアルタイムで監視し、異常値検出の際に自動で関係者にメールを通知する機能も併せて実現している。詳細は後述する。

3 電力使用状況の周知環境

上述したデータの見える化と監視環境について詳

説する。

3.1 センサシステムにおける Web ページ作成の問題点

定期的にデータを取得し続けるセンサシステムにおいて、データの計測状況を確認するための手段として、今日では、専用の Web サイトを構築しその中の各 Web ページにて見やすいグラフなどを動的に生成し、ユーザに提示するのが一般的である。しかしながら、Web ページ上にグラフ表示機能を実装するには、HTML/JavaScript/サーバサイドプログラミングなどの深い知識が必要となる。仮にグラフ表示専用の補助ツールを利用したとしても、HTML/JavaScript などのコーディング工程を省くことは困難であり、必然的に、多数のセンサデータの状況確認ページを作成するにあたっては、多くの工数が見積もられることとなる。また、昨今では Web ページを参照するユーザデバイスも、PC/スマートフォン/タブレットなど多数の機種が存在する状態であり、これら多機種からの閲覧にすべて対応すること、すなわちマルチデバイスに対応した Web ページを作成することもまた、サイト構築にあたっての工数増に繋がっている。

電気通信大学教育研究技師部で推進している ECO プロジェクトも、長らく同様の困難に直面していた。しかしながら技術調査を重ねた結果、下記 3 つの OSS を連携させることにより、プログラミングレス/リアルタイム更新/マルチデバイス対応の Web ページの作成が可能であることが判明したため、2016 年度より消費電力計測システムへの実装を行った。

- **Grafana** (<https://grafana.com/>) : Web ページ上におけるグラフデータ作成/表示ツール
- **Zabbix** (<https://www.zabbix.com/>) : ネットワークシステムにおける統合監視ツール
- **Fluentd** (<https://www.fluentd.org/>) : ログデータ転送ツール

3.2 グラフ表示/作成

ECO プロジェクトにて構築した消費電力計測システムには現在、Web におけるデータ視覚化ツールとして、Grafana を全面採用している。Grafana とは Web

ページ上にてグラフを作成/表示するためのデータ視覚化ツールである。特徴として、

- Web ページ上で完結するプログラミングレスでのグラフ画面作成
- マルチデバイス対応
- 複数の外部データベースからのデータ取得
- ユーザの作成/権限管理

などが挙げられる。また、表示しているグラフは最新値が自動更新される。本ツールを駆使することにより、定期的に取得されるセンサデータのリアルタイムなグラフページの作成が、マウス操作のみで可能となり、Web サイト構築における種々の工程を大幅に削減することに成功した。また、作成される Web ページは、自動的にマルチデバイス対応となるため、PC/スマートフォンなど、それぞれの閲覧環境に最適化された形での画面表示が実現されている。

ただし Grafana 単体では、データベース機能を保持しておらず、後述する外部のデータベースからデータを取得するよう、設定する必要がある。

3.3 データ監視

Grafana に対しデータ提供を行うデータベースツールとして、ネットワークシステムにおける統合監視ツールで有名な Zabbix を採用した。Zabbix はもともと、ネットワークシステム上の異常検知や負荷監視などを行う目的のツールであるが、Zabbix のデータベースからデータを抜き出し Grafana と連携するプラグイン機能が Grafana に備わっており、本機能を利用して、Grafana にデータ提供を行っている。

3.4 データ転送

最後に、上述の Zabbix に対してセンサの計測データを転送するツールとして、Fluentd を採用した。これは、システムやアプリケーションから出力される種々のログデータについて、取得/加工/転送を容易かつ柔軟に行うことを目的に開発されたツールであり、必要最小限の設定ファイルを作成するだけで、複数のネットワーク上に分散した複数のシステムから、ログデータを転送することが可能となる。

消費電力計測システムでは、FIAP サーバ群からデータをテキストファイルに自動追記するバッチ処理

と Fluentd を連携させ、上述の Zabbix に対してデータ入力を行う方式を採用している。

4 まとめ

4.1 本システムの特徴と貢献

学内における節電推進を目的としてはじまった ECO プロジェクトであったが、プロジェクト開始当初から 2 年ほどは、電力計測センサ設備のみを長時間安定稼働させるだけでも精一杯の状況であった。しかしながら年を重ねる毎に、センサネットワークの構築／運用ノウハウを獲得してゆき、現在は大学内で最も電力消費が大きい建て屋（9 階建て）全体について、フロア単位の電力消費量を計測するまでにシステムを拡張するに到った。また、上述したグラフィカルなデータ表示環境の構築により、計測対象の拡張時に、少ない工数で迅速に Web ページにセンサの計測状況を学内に周知することが可能となっている。また、本システムのソフトウェア部分はすべて、ライセンス費の支払いが不要なフリーのソフトウェアツールを中心に構築されている。そのため、様々な規模の組織に対して、比較的安価かつ容易に導入可能なセンサ計測システムとなっている。

年を追ってこれらの要素を拡張して来たことにより、より広い視点からのセンサ計測システムとして、電気通信大学の独自性を有するものへと発展したと考える。

4.2 今後の展望

今後の展望として、システム全体の稼働状況観察と洗練を繰り返し、学内外に提供可能な信頼性の高い Web サービスとしての電力計測システムの実現を目指したいと考えている。実現にあたって必要な作業として、下記の内容についてさらなる検討を行い、システムの発展と大学内での節電活動に貢献に繋げる予定である。

- 一覧表示、グラフ表示（Web ページ）の強化
- センサ種類の増加、計測値の信頼性検査
- システム全体の性能改善、さらなる運用性の向上
- 正しい節電行動を促すような使用方法

参考文献

- [1] 落合秀也 著、江崎浩 監修、“スマートグリッド対応 IEEE 1888 プロトコル教科書”、インプレスジャパン、2012.
- [2] 竹内純人、“コンセント単位での計測を可能としたフリーソフトウェアツールによる消費電力値自動収集システムの実装と改善”、電気通信大学紀要 28(1)、pp.61-69、2015
- [3] 落合 隆夫、和田 紀子、竹内 純人、“フロア単位の電力計測を実現するための大型電流計測センサの動作テストおよび導入”、電気通信大学紀要 29(1)、pp.1-9、2016

熱流体解析を用いた熱電変換効率評価装置水冷部の最適設計

生出 嘉

東北大学総合技術部 分析・評価・観測群

概要

Solidworks Simulation を用いた熱流体解析は、熱マネジメントが必要な部材の設計に有用である。講演者は熱電発電モジュールを評価する為の熱電変換効率評価装置を開発している。この装置は、熱電発電モジュール上部に加熱部を、下部に冷却部を接触させ、上下部の温度差を一定に保つことにより電気を発生させる。その発電量と加熱部流入熱量を測定し熱電変換効率を得ることで、熱電発電モジュールの性能を評価する。現状では、測定中に加熱部からの熱で下部温度が上昇し、温度差を一定に保つことができない。本講演では、熱伝導率の異なる SUS と Cu を使用した冷却部のモデルを作成し、熱流体解析を用いた構造最適化の事例を紹介する。

1 はじめに

熱電発電は、図 1 に示す熱電発電モジュールを用いる。熱電発電モジュールの上端を高温排熱で加熱し、下端を冷却することで電気を得ることから、クリーンな電力源として注目されている。講演者は、熱電発電モジュールのための熱電変換効率評価装置

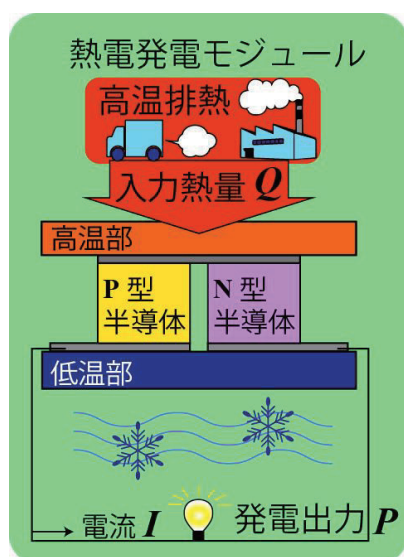


図 1. 熱電発電モジュール模式図

を開発している(図 2)。この装置は、加熱部にヒータを、冷却部に水冷冷却部(水冷部)をもち、SUS 製真空チャンバーで全体を覆っている。真空中で熱電発電モジュールの上部と下部に一定の温度差を与えて得た起電力を測定し、熱電変換効率を得て熱電発電モジュールを評価する。現状では、水冷部に SUS 製水槽型水冷部を用いているが、SUS は熱伝導率が低い

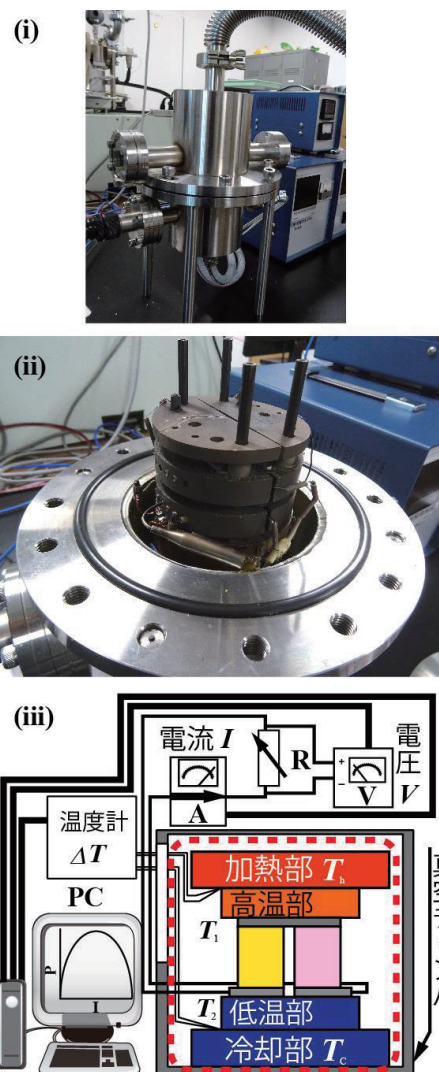


図 2. (i) 開発中の熱電発電評価装置 SUS 製真空チャンバー外観
(ii) 熱電発電評価装置加熱部外観
(iii) 熱電変換効率測定装置模式図

ため測定中に低温部の温度が上昇し、高温部と低温部の温度差を一定に保つことができない。そこで、Solidworks Simulation を用いて材質と形状の異なるモデルを作成して熱流体解析を行い、真空中で温度差を一定に保つことができる水冷部の設計検討を行った。

2 解析準備

2.1 解析条件の最適化

はじめに、加熱部・熱電モジュール・試料台(低温部)・SUS 製水槽型水冷部のモデルを作成し、真空中での熱流体解析を実施した(図 3(i)). すると、加熱部の熱は熱電発電モジュールまでしか伝わらず、低温部温度は初期値から変化しなかった。真空中で加熱する場合、理想的に断熱状態となるが、実際の測定装置においては加熱部からの輻射熱により低温部が加熱される。そこで、図 3(ii)のように熱電発電モジュールを空隙に置き換え、加熱部と低温部の間に接触する面を設けて熱伝導を考慮できるモデルとした。熱電発電モジュールからの熱伝導は、加熱部からの熱に比べて十分小さいことから、今回は考慮しないこととした。水冷部に流す水は、講演者が作製した熱電変換効率評価装置で用いているチラーの設定値を用いて、流量を 0.45 kg/s とした。水は図 3(ii)に示す矢印のとおりに入出入するものとした。

次に、短い計算時間でより精度の高い結果を得るためにメッシュサイズの設定を行った。SUS 製水槽型水冷部のモデルを用いて、図 4 のように 3 種類のメ

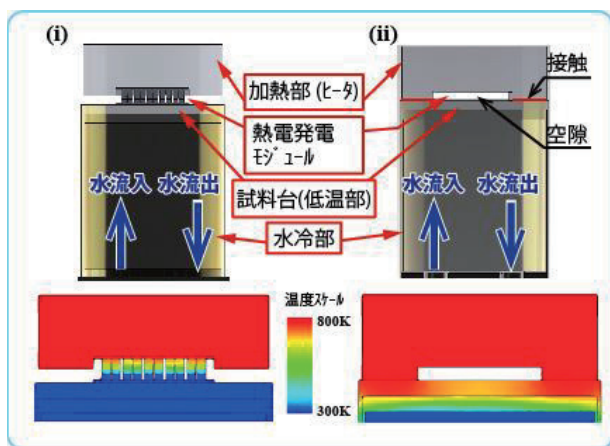


図 3. (i) 熱電発電モジュールを用いた解析モデル
(ii) 熱電発電モジュールの代わりに空隙を用いた解析モデル模式図

ッシュサイズを設定した。加熱部温度 $T_h=800$ K、水冷部温度 $T_c=300$ K として熱流体解析を行い、

温度差 $\Delta T=T_1$ (高温部温度)- T_2 (低温部温度)

(ただし、 $T_1=T_h$)

として ΔT , 計算時間を比較した。その結果を表 1 に示す。一般的に、メッシュサイズが小さいほど計算精度は高くなることが知られている[1]。得られた ΔT は、メッシュサイズに依らずほぼ同じ値となり計算精度の差はみられなかった。また、計算時間は、メッシュサイズが小さいほど長くなった。そこで、計算時間が短い $2 \times 2 \times 2$ (mm) のメッシュサイズを採用することとした。

講演者が作製した熱電変換効率測定装置を用いて内藤[2]は、 $T_1=832$ K のとき $\Delta T=319$ K を得た。この値と比較すると、熱流体解析によって得られた ΔT は約 1/4 の値となった。これは、加熱部を測定部分に接触させた解析モデルを使用しているため、実際より T_2 が高く得られることによる。以後本報告では ΔT の絶対値を評価するのではなく、解析モデルを熱流体解析することで得られた ΔT を比較して、相対的に最適形状を決定することとした。

2.2 Cu 製水冷部の形状決定

Cu 製水冷部について、形状検討を行った。SUS 製水槽型水冷部と同形状の Cu 製水槽型水冷部のほかに、市販されている Cu 製配管をもちいた配管型水冷

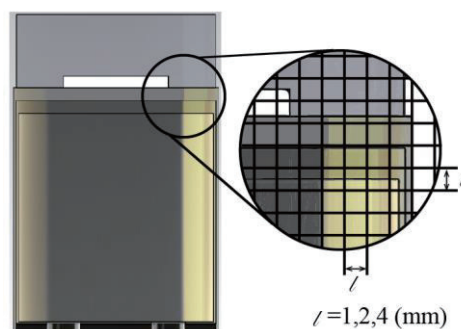


図 4. 解析モデルとメッシュサイズ

表 1. メッシュサイズごとの解析結果と計算時間

メッシュサイズ(mm)	温度差 ΔT (K)	計算時間(分:秒)
4×4×4	92.4	1:37
2×2×2	91.4	6:11
1×1×1	90.9	55:44

部のモデルを作成した。SUS 製水槽型水冷部のモデルを含めた一覧を、図5(a)から(e)に示す。配管型水冷部は、試料台との接触面積を大きくするために、配管の曲げる回数を2, 3, 6回とする3種類のモデルを作成した。曲げ R の小さいものは配管径を細くし、水冷部(b), (c)はφ8, 水冷部(d)はφ4とした。

$T_h=400, 500, 600, 700, 800$ K とし、 $T_c=300$ K に固定して熱流体解析を行った。図5のモデルについて、低温部の温度分布を算出した。低温部の最低温度を T_2 として ΔT を比較し、より大きい ΔT を得られたモデルは冷却能力が高いものとした。冷却能力の高い水冷部を実際に作製し、水冷部(a)と冷却能力を比較した。

3 結果と考察

3.1 水冷部の熱流体解析結果

$T_h=800$ K としたときのモデルごとの低温部の温度分布を、図6に示す。水冷部(a)よりも水冷部(b), (c), (d), (e)の方が、低温部をより低温に保つことがわかった。特に水冷部(e)において $T_2=350.1$ K と最も低い値を示した。水冷部(b), (c), (d)において、配管径によらず曲げ回数が多く接触面積が大きくなるほど、より低い T_2 を得られることがわかった。

低温部の温度分布の結果をもとに、水冷部のモデルのうち、低い T_2 が得られた水冷部(d), (e)と、水冷部(a)について、 T_2 の時間変化を熱流体解析から求めた。 $T_h=800$ K としたときの結果を図7に示す。どの水冷

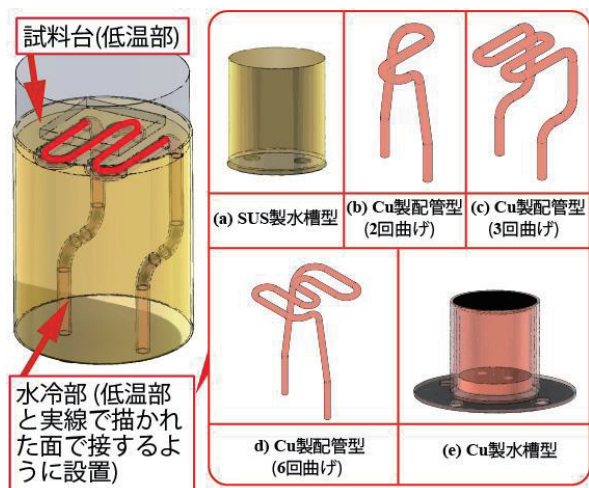


図5. 水冷部モデル一覧

部も、ある時間を経過すると T_2 が一定温度に到達することがわかった。水冷部(e)は、最も早く一定温度に達した。

図8には、 ΔT の T_h 依存性を示す。太線は $T_h - T_c$ を示している。水冷部(e)において、 $T_h=800$ K のとき最大値 $\Delta T=450$ K を得たことから、水冷部(e)は最も冷却能力が高いことがわかった。

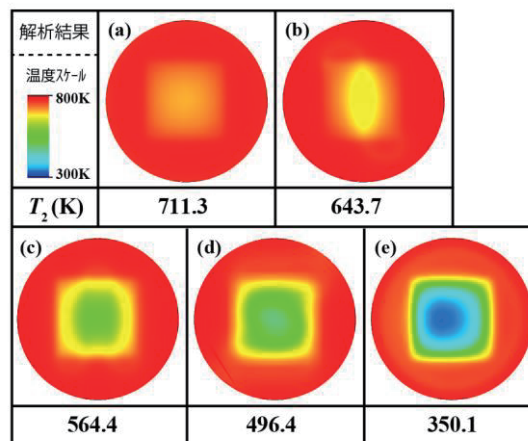


図6. 熱流体解析結果(低温部の温度分布)

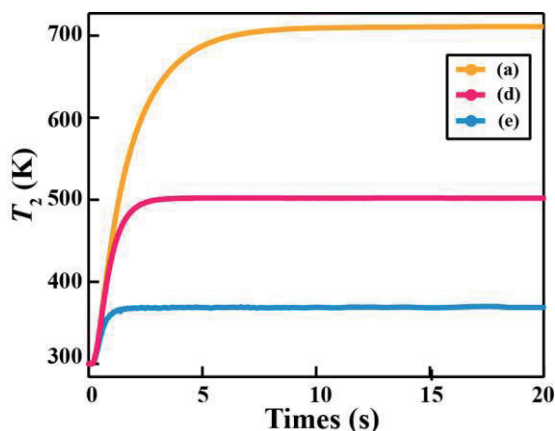


図7. (a), (d), (e)モデルにおける T_2 の時間変化

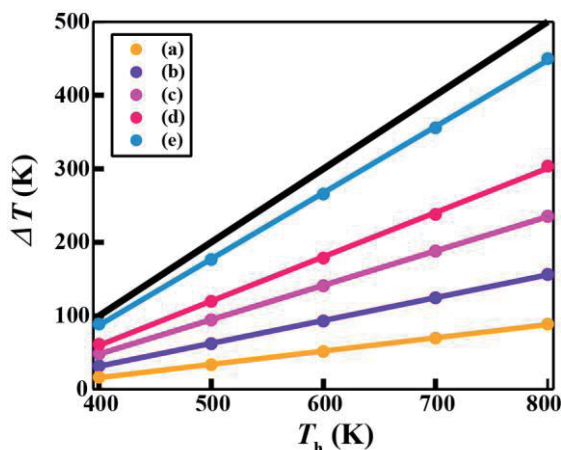


図8. 解析モデルごとの ΔT の T_h 依存性 (黒太線は $T_h - T_c$)

3.2 水冷部の作製、冷却能力の評価

最も冷却能力が高い水冷部(e)を実際に作製した。その水冷部(e)を図9に示す。真空性を保つために、水冷部をCu製試料台で覆い、SUS製真空チャンバーとボルトで締結して密閉した。

冷却部(a)と(e)の冷却能力を比較するために、冷却部上部にヒータを設置し、 $T_c=300\text{K}$ 、 T_h を473Kから100K刻みに上昇させ、 ΔT の温度変化を測定した。その結果を図10に示す。 T_h の増加に伴い ΔT は増加するが、その傾きは冷却部(e)の方が大きくなった。また、 $T_h=973\text{K}$ において、冷却部(a)のとき $\Delta T=510\text{K}$ 、冷却部(e)のとき $\Delta T=626\text{K}$ を得た。このことから、冷却部(e)は冷却部(a)よりも冷却能力が高く、低温部を T_c により近い値に保つことが確認できた。

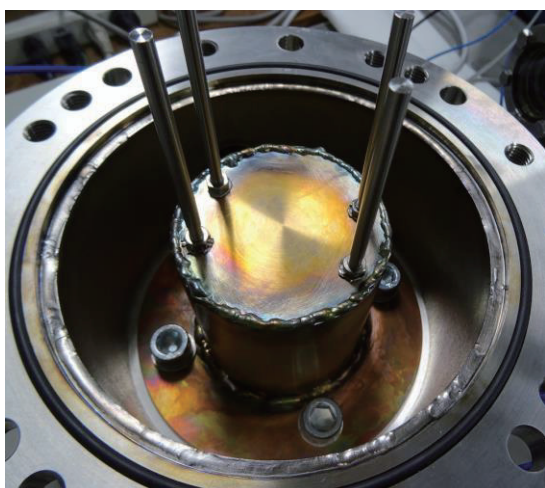


図9. 作製したCu製水槽型水冷部(e)

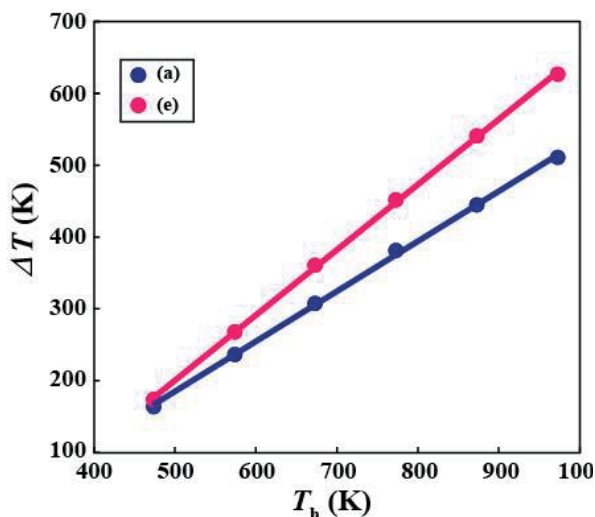


図10. 水冷部(a), (c)の ΔT の T_h 依存性

4 まとめ

熱電変換効率測定装置の開発にあたり、真空中で温度差 ΔT を一定に保つことができる水冷部の材質・形状について設計検討を行った。SUS製水槽型、Cu製配管型(曲げ回数3種類)とCu製水槽型的水冷部モデルについて熱流体解析を実施し、その冷却能力を比較したところ、Cu製水槽型水冷部の冷却能力が最も高いことがわかった。Cu製水槽型冷却部を作製し、 ΔT を測定したところ、SUS製水槽型冷却部より高い冷却能力が得られることを確認した。これにより、一定温度差のもとで熱電発電モジュールの発電効率を測定することを可能にし、クリーンな電力源の開発の一助となった。

5 謝辞

本報告を作成するにあたり、ご助言を賜りました東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 宮崎教授、林准教授に心より御礼申し上げます。また、温度測定データを提供くださいました東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士2年小平直人さん、修士1年川崎優太郎さんに、心より感謝申し上げます。熱流体解析実施に際し、東北大学大学院工学研究科創造工学センターの共通施設をご提供いただきましたこと、心より感謝申し上げます。

本報告は平成27年度東北大学工学研究科・工学部技術職員技術開発助成を受けて行った成果であり、ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 構造計画研究所, 設計者のための熱流体解析入門トレーニング 流体解析編テキスト, P92 (2014).
- [2] 内藤秀磨, 修士論文 (2016).
- [3] 国立天文台編, 理科年表, 78 (2005).

PF-BL15 液体窒素冷却分光器解析

○内田 佳伯

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

概要

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設ビームラインBL15の分光器は高熱負荷下にさらされるため、従来の水冷方式では対応できず液体窒素冷却方式を採用している。今回有限要素法 Ansys を用いて分光器の熱構造解析を行ったが液体窒素温度であるため常温(水冷)と異なった色々問題があった。分光器の原理、液体窒素冷却を用いている理由、解析上で起こった問題点、解析結果等について報告する。

1 液体窒素冷却分光器

放射光は可視光から X 線の領域までの幅の広いエネルギーの範囲を含む連続光であるがユーザーは任意のエネルギーを用いて実験する。ほしいエネルギーの X 線を取り出す装置として分光結晶(分光素子として主にシリコン結晶)が用いられるが高熱負荷により結晶に熱変形が生じる。ビームラインで通常用いられている 2 結晶分光器において熱変形が生ずると、第 1 結晶で回折した X 線は一部しか第 2 結晶で回折されないこととなるため熱変形を生じないような冷却が重要となる。通常利便性等のため冷却に水を用いるが近年の光源の高輝度化に伴い水を用いた冷却方式では熱変形を充分に取りきれない問題が生じてきた。熱変形は線膨張率が小さく熱伝導率が大いほど小さくなることが知られているがシリコンは 125K 付近で線膨張が 0(図 1)、熱伝導率は室温の約 3 倍となる。液体窒素(77K)を用いると線膨張率が 0 とならないものの熱変形を小さくできることが期待される。そこで液体窒素を用いて冷却した場合結晶表面温度や熱変形がどれくらいとなるのかを有限

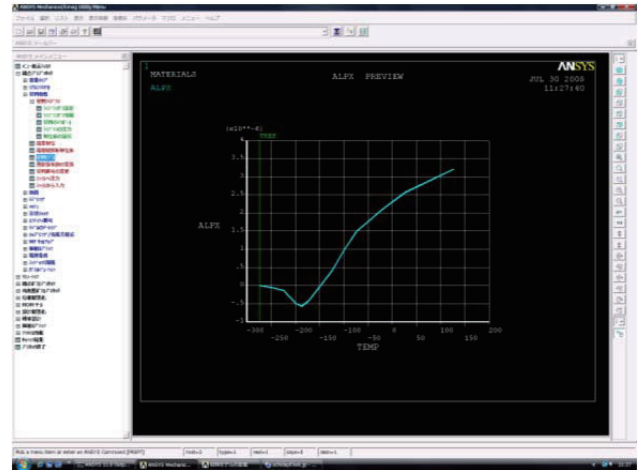


図 1 シリコンの線膨張率

要素法 Ansys を用いて解析することとした

2 解析の流れ等

2.1 解析の流れ

Ansys で熱構造解析を行う際 物質の特定値(熱伝導率、ヤング率等)入力→モデリング→メッシング(モデルを小さい要素に分割する)→伝熱解析に必要なパラメーター入力(入熱等)→伝熱解析の流れとなりモデルの温度分布を計算する。その後構造解析に必要なパラメーターや条件等(拘束エリア等)入力→伝熱解析ファイルの読み込み→構造解析の流れとなり結晶表面の変位等を計算する

2.2 モデル形状

40×50×40 のシリコン分光結晶の両側を中心に液体窒素が流れている 20×68×36 の銅ブロックで挟み込んでいる。また銅ブロックと結晶は In シートを介して接触しており銅ブロックの外側に取り付けられた板ばねで銅ブロックを結晶に押し付けている構造となっている。

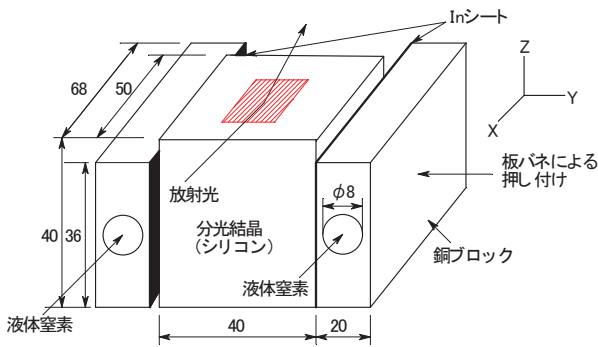


図2 モデル形状(単位 mm)

2.3 入力パラメーター

Ansys で熱構造解析を行う場合必要な入力パラメータは熱伝導率(W/mm°C)、熱伝達係数(W/mm²°C)、入熱(W/mm²)、ヤング率(N/mm²)、線膨張率(°C)である。熱伝導率、ヤング率、線膨張率は物質固有のパラメーターであるが、入熱と熱伝達係数は計算する必要がある。入熱に関しては放射光計算プログラム SPECTRA を用いて分光器前のミラーのカットオフ、取り込み角等を考慮し分光結晶への入射角9°で1.88W/mm²となった。なお分光結晶等は真空槽の中に入っているが輻射の影響は小さいと考えるため輻射は考慮していない。またビームラインで使用されている分光器では液体窒素が流量 2.5ℓ/minで流れているのでその値でその他の定数を考慮し熱伝達率は 2.23×10^{-3} W/mm²°Cとなった。最後に構造解析では分光結晶、銅ブロックとも分光器内のステージに乗っているため底面の上下左右方向拘束の条件とした。

3 解析結果

3.1 一体モデルでの構造解析結果

最初モデリングの際結晶と銅ブロックは In シートを介して接触しており熱接触がよいため理想的であると考え一体モデル(接触面のエリアや節点を共有)で作成した。しかし構造解析を行うと銅ブロックの変形を受けた結果となった(図3)。これは液体窒素温度付近で結晶(シリコン)と銅の線膨張率が大きく異なり接触面が共有のためである。実際は剛性の高いシリコンではなく剛性の弱い板バネに銅の変形が逃げるため、結晶には銅の変形はかからないと考えられる。そこで結晶と銅ブロックの接触面を別々と

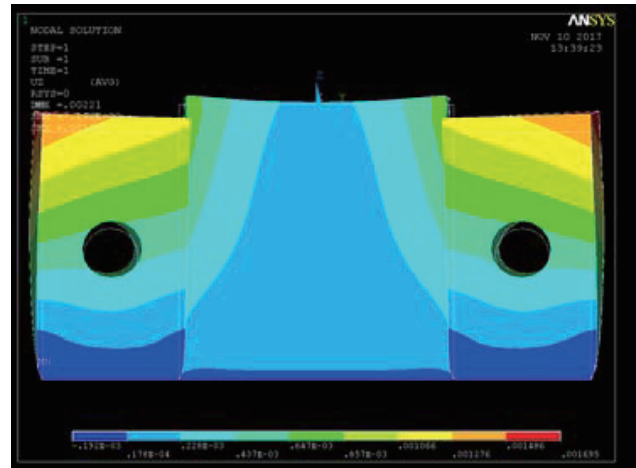


図3 構造解析結果(ビーム軸(X軸)より見た物)

した独立のモデルで解析を行うこととした

3.2 独立モデルでの構造解析結果

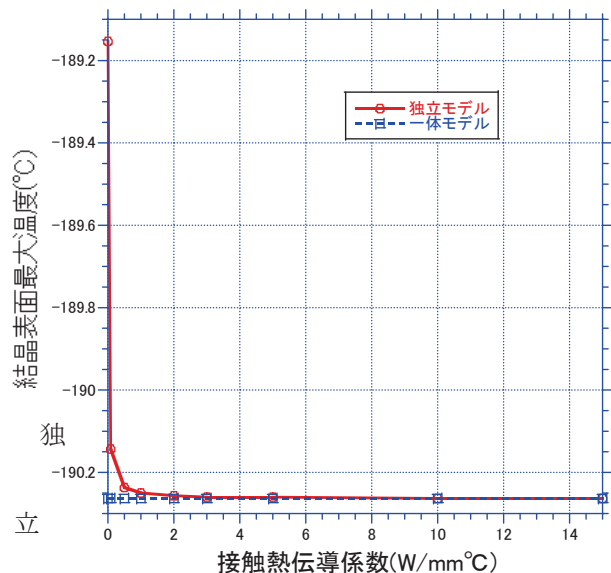


図3 表面温度の変化

モデルで構造解析した場合入力に必要な定数は一体モデル同様の熱伝導率等の他に接触面の摩擦係数と熱伝達係数が必要である。まず独立モデルや定数入力が正しく行われるか確認するためこれらの定数を大きくしていくこととした。それにより摩擦大となることで接触面の節点の移動が少なくなり、また熱伝導大となることで結晶と銅ブロック間で熱が伝わりやすくなるため一体モデルの解析結果に近づくと考えられるためである。

接触熱伝達係数を変化させた時の結晶表面の最大温度の変化のグラフを図4に示す。15 W/mm²°Cで最大温度が一定(-190.263°C)となり一体モデルと同じ値と

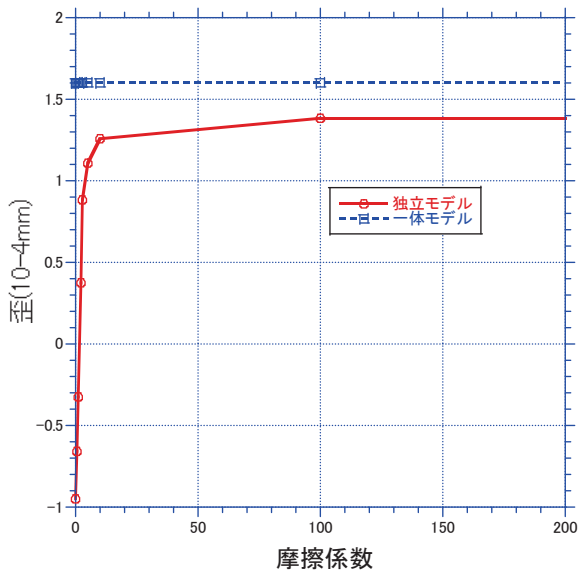


図4 結晶表面の熱歪

なった。次に接触面の接触熱伝導係数を $15 \text{ W/mm}^2\text{C}$ とし摩擦係数を変化させた時の結晶の最大歪のグラフを図4に示す。摩擦係数10で最大歪はほぼ一定であり熱解析と同様に一体モデルと同じ値とならなかったが約90%だった。以上よりモデリングや定数入力为正しく行われていることが確認できた

3.3 実際のモデルでの検討

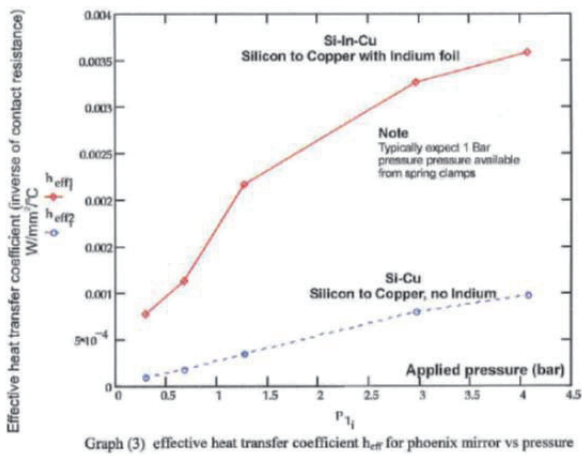


図5 面圧と接触熱伝導係数

真空層内の水冷銅ブロックとシリコンの接触面にInシートの有無の接触熱伝導係数の実測値を図5に示す。実測データは分光器と異なる光学素子(ミラー)であるが材質は同じで側面を銅ブロックで冷却している構造は同じである。しかし常温で水冷であることや板バネが無いなど今回の解析モデルとは異なるため接触熱伝導係数が違った値をとると考えられ

るが解析では同じと仮定し板バネがない状態で片側4本のM4ボルトでトルク $7\text{N}\cdot\text{m}$ 締め付けで面圧を計算し、またグラフの右端がリニアに上昇すると仮定し接触熱伝導係数は 0.01 とした。次に接触面の摩擦は弱いと考えられるため摩擦係数を 0 とし解析を行った。

3.4 解析結果

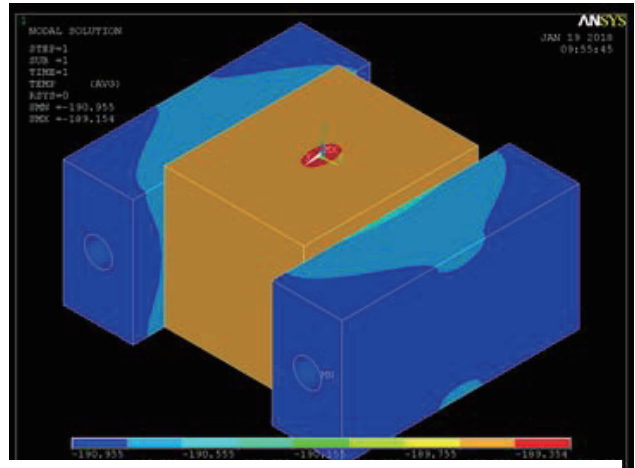


図6 伝熱解析結果

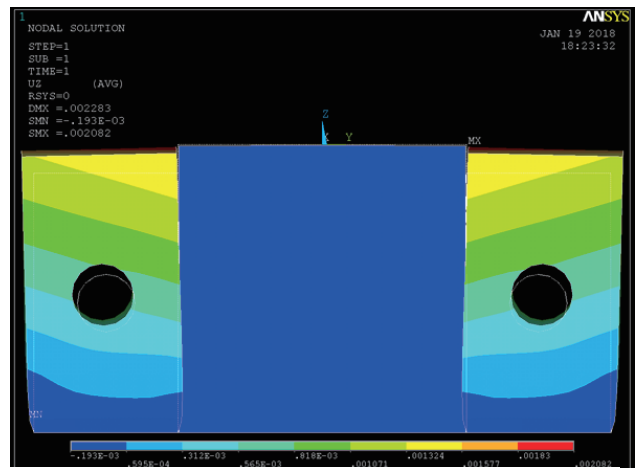


図7 構造解析結果(ビーム軸(X軸)より見た物)

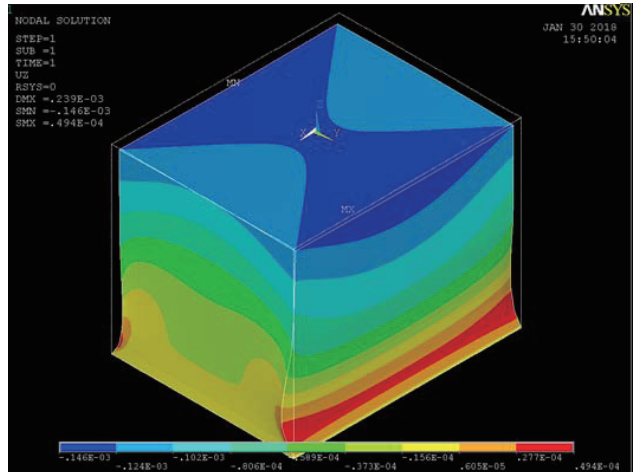


図8 構造解析結果(結晶のみ表示)

主な入力パラメーターは入熱:1.8W/mm²、熱伝達係数:2.23 × 10⁻³W/mm²°C、接触熱伝導係数:0.01 W/mm²°C、摩擦係数0である。図6に伝熱解析結果(温度分布)、図7に全体、図8に全体の中から結晶のみを取り出し表示した構造解析結果(熱歪)を示す。液体窒素温度付近では銅の線膨張率はプラスで底面固定のため温度上昇により銅ブロックは上に伸びる。また、摩擦係数0のため銅ブロックが逆ハの字に広がり結晶との接触面上方に隙間を生じている。解析前は摩擦係数0のため結晶に銅ブロックの影響小さいと考えていたが底面付近は影響を受けている(Y軸方向)。一方摩擦係数を大きくすると接触面が固定に近づくため一体モデルと同様に銅ブロックがハの字型になり接触面上方も結晶に密着し結晶表面を押し上げる形となった。最後に摩擦係数を10まで変化させた場合の放射光が当たっている結晶表面の高さ方向

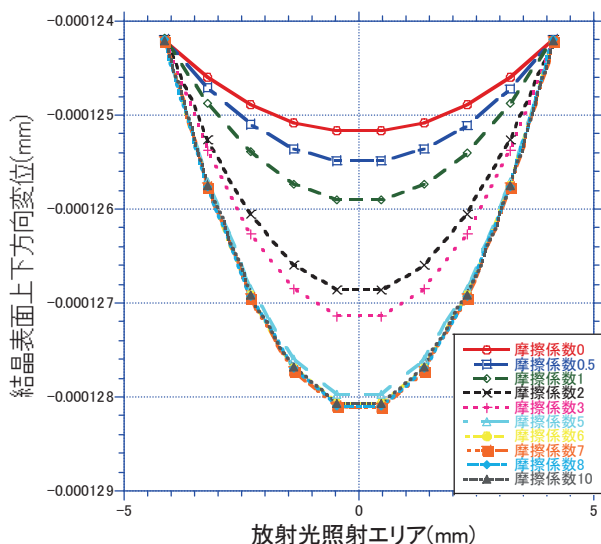


図9 結晶表面の熱歪

(Z軸)の変位(熱歪)を図9に示す。図9から明らかのように摩擦係数が大きくなるほど銅ブロックに押される影響が大きくなるため窪みが大きくなる。なお液体窒素温度付近では結晶(シリコン)の線膨張率はマイナスなので温度上昇により下に凸の表面形状となる。銅ブロックと結晶との間の熱接触をよくするためには銅ブロックの締め付けトルクを大きくする必要があるのでそうすると結晶表面の変形が大きくなるため適度な締め付けが必要である。

4 まとめと今後の展開

今回液体窒素冷却分光結晶の熱構造解析を行うにあたりまず一体モデルで解析したが銅ブロックの変形が結晶表面の歪に与える影響が大きいため独立モデルで解析した。その結果、摩擦係数が小さい時は銅ブロックの影響が小さい結果が得られた。今回、接触熱伝導係数は推測値で底面を固定して解析を行ったがこれらの条件が実機と異なる可能性がある。従って今後は放射光を用いた実測結果との比較を通じて入力パラメーター等の見直し、実機同様押しバネを考慮した解析や等を行う予定である。

参考文献

- [1] 平成20年度京都大学総合技術研究会 有限要素法 ansys を用いた液体窒素冷却分光結晶の解析.
- [2] Thermal Contact Resistance Measurements for Indirectly Cooled SR Optics, Barry Fell and Khalid Fayz

ILC メインビームダンプにおける熱シミュレーションについて

森川 祐

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

はじめに

ILC（国際リニアコライダー; International Linear Collider）計画は、全長約 31km の直線状の加速器をつくり、最高重心系エネルギー1TeV の電子・陽電子衝突実験を行う計画である。ILC のビームパワーは最大 14MW まで到達する。このビームを安全に吸収・冷却する装置であるビームダンプには、高密度、高容量の熱負荷がかかる。

ILC ビームダンプ の中でも最大のビームパワー (14MW) を受けるのはメインビームダンプである。メインビームダンプの基本設計はスタンフォード線形加速器センター(SLAC)にてビームパワー2.2MW 用に開発された水ダンプ[1]を基にして作成された[2]。現在は高エネルギー加速器研究機構(KEK)で周辺施設も含めた詳細設計を進めている。この詳細設計に向けて高エネルギー放射線と物質の相互作用を評価するモンテカルロ計算(FLUKA)や熱・構造解析(ANSYS)を行っている。

今回は ILC メインビームダンプの熱シミュレーション事例としてメインビームダンプの水温評価とビーム入射部であるビーム窓の耐久性評価を報告する。

1 ILC メインビームダンプの概要

1.1 ILC のビームダンプ

ILC 全体ではビームダンプは 15 基あるが、今回紹介するメインビームダンプはビームラインの最下流に設置され、衝突実験後のビームを受ける。ILC 全体でこのメインビームダンプは電子用と陽電子用の 2 つが設置される。

1.2 メインビームダンプの構造

ビームダンプの材質には銅やアルミニウム、グラファイトなどの固体を使ったものが多くみられるが、

固体ビームダンプでは熱輸送能力が材質の熱伝導率に制限される。そこでメインビームダンプでは 14MW ものビーム熱を輸送し続けるために固体ではなく強制対流させた水によってビームを吸収する。

図 1 にメインビームダンプの構造を示す。現在のメインビームダンプの設計では、内径 1.8m×奥行 11m の円筒容器に 1MPa に圧縮された水を満たし、ビーム窓をとおして水にビームを入射させる。水を 1 MPa に加圧することで、沸点を上昇させて水の沸騰を防ぐとともに、ビーム熱により発生する圧力波でキャビテーション(水中での負圧状態)が起こらないようにしている。この円筒容器内には 2 本の冷却水供給用のパイプがあり、渦状の対流を生成するようにそれぞれ反対方向に水を放出する。冷却水回収用のパイプは 1 本あり、円筒容器の中心軸に位置する。また、ビーム入射部であるビーム窓は円筒容器前面に中心軸から 35 cm 上に設置されている。

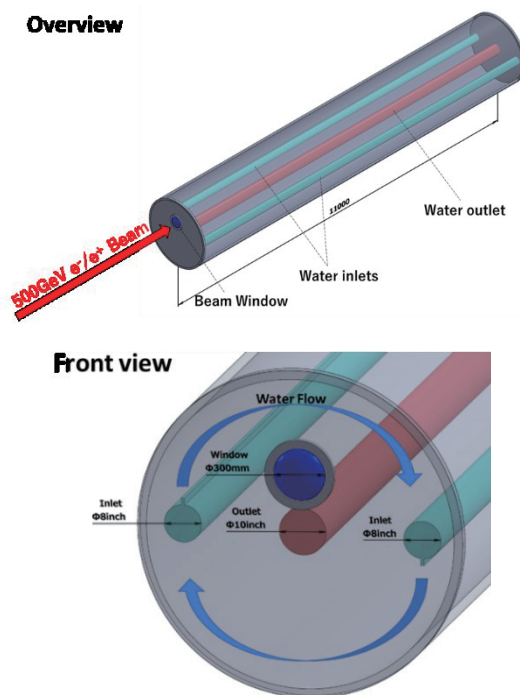


図 1：メインビームダンプの構造-

2 メインビームダンプ中のビーム発熱

FLUKA は欧州原子核研究機構(CERN)で開発されている高エネルギー放射線と物質の相互作用を評価する計算コードである。今回の報告では FLUKA により電磁シャワーの発熱分布を評価しているが、それ以外にも物質の放射化やその崩壊放射線も評価することができる強力な計算コードである。

2.1 ビームパラメーター

ビームはパルス構造を持ち、パルスは一定の周波数で繰り返される。またパルスはバンチと呼ばれる粒子の塊で構成されており、このバンチが一定間隔で進行方向に並び、1つのパルスを構成する。

メインビームダンプに入射される最大強度のビームパラメーターは下記のとおりである。

電子/陽電子エネルギー	500GeV
バンチ当たりの電子/陽電子数	1.74×10^{10}
パルス当たりのバンチ数	2450
パルス幅 (バンチ間隔)	0.897msec (366nsec)
パルスの繰り返し周波数	4 Hz
ビームサイズ	$\sigma_x=2.42\text{mm}$ $\sigma_y=0.27\text{mm}$
パルス当たりのエネルギー	3.41MJ
平均ビームパワー	13.7MW

またビーム熱を集中させないために、1パルスのビームが入射する間に、ビームは半径 6 センチの円周上に走査させる。

2.2 水中のビーム発熱

図 2 は鉛直(Y)軸断面でみた 1パルス分のビーム熱分布である。ビーム(Z)軸に沿ってビームは進み、電磁シャワーの発展にともないビーム熱が広がっていく。図 3 は Z 軸に沿った最大発熱密度と深さ当たりの発熱量を示している。最大の発熱密度は水にビームが入射してから 180cm のところ生じ、その値は 1パルス当たり $179\text{J}/\text{cm}^3$ に達する。一方で深さ当たりの発熱量が最も多いのはビーム入射後 290cm の地点であり、 $41\text{kW}/\text{cm}$ もの発熱がある。

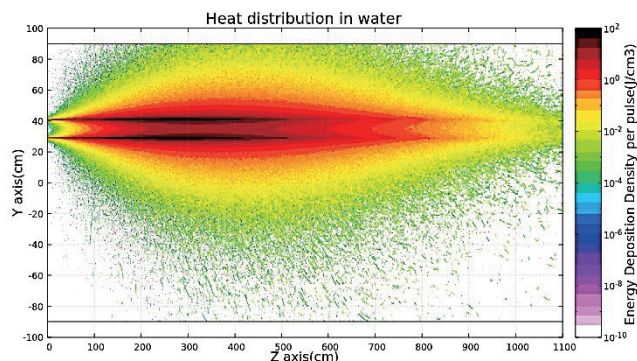


図 2：水中のビーム熱分布(Y 軸断面)

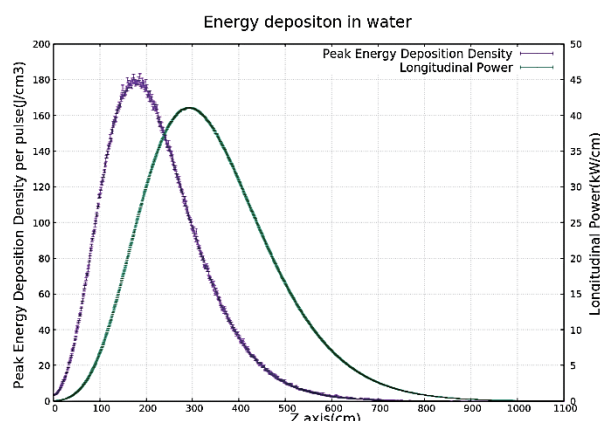


図 3：水中におけるビーム軸に沿った発熱

Peak Energy Deposition Density：最大発熱密度

Longitudinal Power：深さ当たりの発熱量

2.3 ビーム窓の発熱

図 4 にビーム窓の構造を示す。ビーム入射部は楕円球殻になっており、基本設計[2]ではこの球殻の厚さを 1 mm としている。材質はチタン合金(Ti6Al4V)である。図 5 に 1パルス当たりのビーム窓上のビーム発熱分布を示す。ビームは半径 6cm の円周上に走査されている(図 5)。最大発熱密度は $21\text{J}/\text{cm}^3$ である。窓全体では 25W の発熱になる。

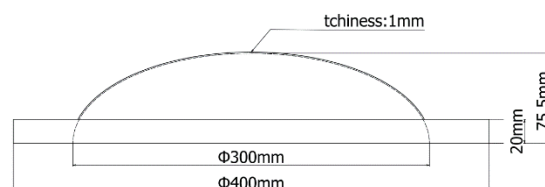


図 4：ビーム窓の構造

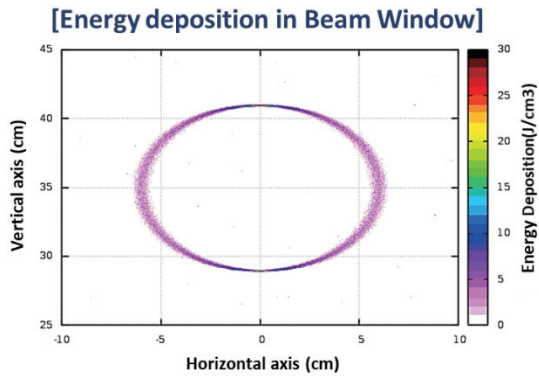


図 5：ビーム窓上のビーム発熱分布

3 メインビームダンプの水溫評価

水が沸騰せず安定的に運転できるか確認するために水溫を評価した。有限体積法に基づく流体解析コード ANSYS-FLUENT を使用している。FLUENT では 2 次元、3 次元での評価が可能である。最高水溫の評価にはメインビームダンプ全体の水を計算する必要はなく、熱負荷の高い場所を選んで 2 次元解析をした。

3.1 水溫評価のための 2 次元構造

図 6 に水溫評価で使用したメインビームダンプの 2 次元構造を示す。中心には内径 10 インチの冷却水回収用パイプがある。この回収用パイプから 70cm 離れたところに、対称となるように 2 本の内径 8 インチの冷却水供給用パイプがある。この供給用パイプは 4.4mm 幅のノズルを有し、ここから冷却水が放出される。基本設計[2]では、供給用パイプ 1 本あたり 104.5kg/sec の流量、平均流速 2.17m/sec で水溫 50°C の水が放出される。

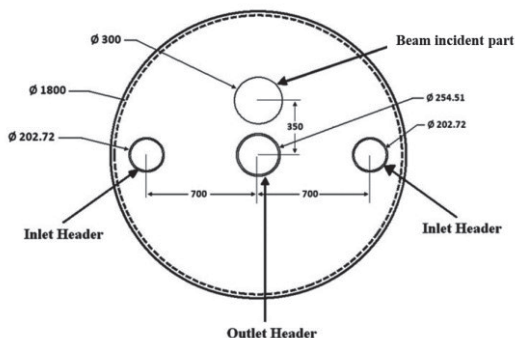


図 6：水溫評価用の 2 次元構造(単位:mm)

3.2 FLUENT による水溫評価の手順

解析対象が水であることから、流体方程式の解法は非圧縮性流体に適した圧力ベースソルバーを適用した。また、乱流のモデルとしては RNG $k-\epsilon$ モデルを適用した。ビーム熱の導入には、FLUENT の User Defined Function(UDF)機能を利用し、FLUKA で評価したビーム熱分布をエネルギー輸送方程式に組み込んでいる。またビーム照射部分のメッシュサイズは Y 軸ビームサイズ 270 μm 以下になるように 100 μm とした。ビーム熱を導入した過渡計算では、ビーム照射中の時間ステップを 0.05msec とし、ビーム未照射時の時間ステップは 1msec とした。

水溫評価は下記の計算手順で進めた。

- (1)ビーム熱は導入せずに流速分布を評価する。
- (2)時間平均化したビーム熱を導入し、定常状態での温度分布を評価する。
- (3)ビーム熱に時間構造を入れて水溫の経時変化を評価する。

3.3 流速分布及び有効熱伝導率

図 7 に流速分布、図 8 に有効熱伝導率を示す。50°C の水の熱伝導率は 0.64W/(m・K)であるが、乱流による熱交換の効果を含めた有効熱伝導率でみると 50kW/(m・k)に増大している。

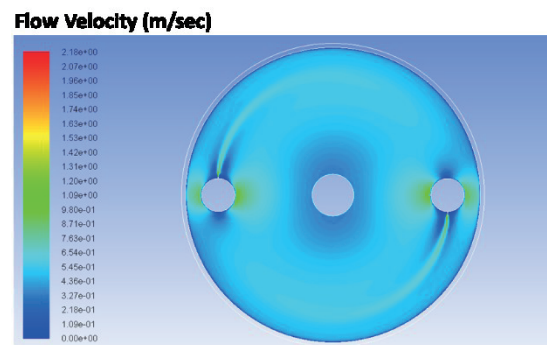


図 7：流速分布

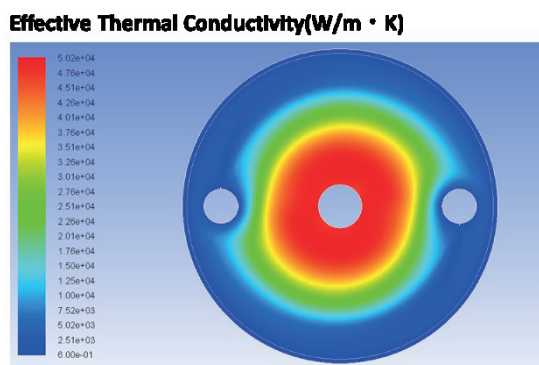


図 8：有効熱伝導率

3.4 温度分布の評価結果

最高水温となるのは、発熱量の最も多いビーム入射点から Z 方向 290cm の地点であった。図 9 はこの地点における 1 パルス分のビームが入射した直後の温度分布である。最高温度は 122°C であり、1MPa に圧縮された水の沸点は 180°C であることから通常運転が維持されている限り沸騰のリスクはない。図 10 は同じビーム入射後 290cm の地点での最高温度の経時変化を示している。

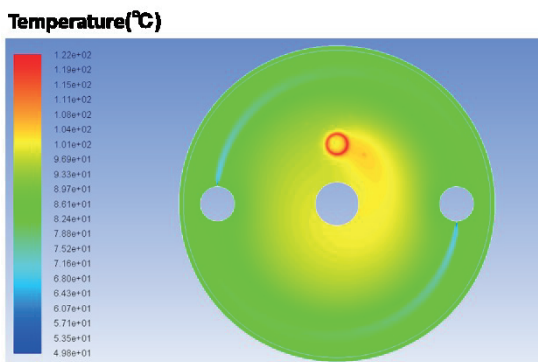


図 9：ビーム入射直後の温度分布

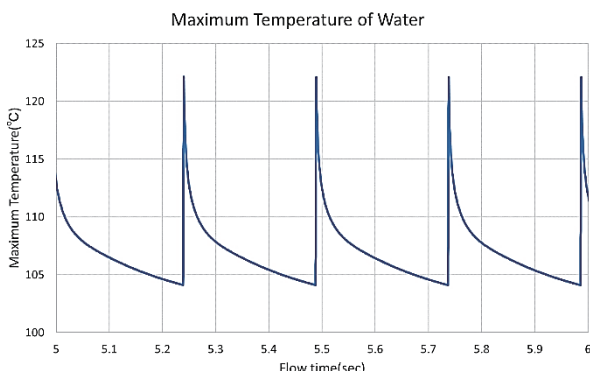


図 10：最高温度の経時変化

4 ビーム窓の耐久性評価

ビーム窓はビームダンプの円筒容器に蓋をしている形になっており、常に 1MPa の水圧がかかっている。したがってこの水圧に耐えられるだけのビーム窓の厚さが必要になる。一方で、ビーム窓にもビームによる発熱があるために、ビーム窓を不要に厚くしてしまうと「ビーム窓の温度が上がりすぎて水が沸騰する」、「ビーム窓が熱応力に耐えられない」などの危険性がある。そこでビーム窓における温度・応力の厚さ依存性を評価して、最適な厚さを評価した。

4.1 温度・応力の評価手順

下記の評価をビーム窓の厚さを変えて行った。

- (1) FLUENT による 3 次元解析でビーム窓と水の熱伝達係数を評価する。
- (2) FLUENT により先の熱伝達係数を用いたビーム窓の温度分布を評価する。
- (3) 構造解析コードである MECHANICAL により先の温度分布を入力して熱応力を評価する。

なお、ビーム窓におけるビーム発熱は厚さ 1mm 当たり 25W と小さく、温度変化も 7°C と小さい。このため温度と応力の経時変化は評価せず、定常状態のみ評価した。

4.2 ビーム窓/水間の熱伝達率の評価

ビーム窓と水の熱伝達係数はビーム窓付近の流体解析を行うことで求めた。図 11 は熱伝達率評価に用いたメインビームダンプの 3 次元構造である。メインビームダンプ前方から 50cm 分を切り出して解析した。FLUENT の設定は水温評価の場合と同様である。図 12 にビーム窓付近の流速分布、図 13 にビーム窓/水間の熱伝達率を示す。熱伝達率は平均で 5kW/(m² · K)程度が見込まれる。ただし、図 11 の構造は仮評価用であり、ビーム窓の交換を考慮したフランジ構造が含まれていない。フランジ構造を加えた場合、ビーム窓付近の流速は低下し、熱伝達率は 5kW/(m² · K)よりは小さくなると考えられる。今後、ビーム窓の交換方法が決まれば、フランジ構造を追加した解析を行う予定である。基本設計[2]のビーム窓/水間の熱伝達率は 500W/(m² · K)であるので、以下の温度・応力評価ではこちらの値を使用している。

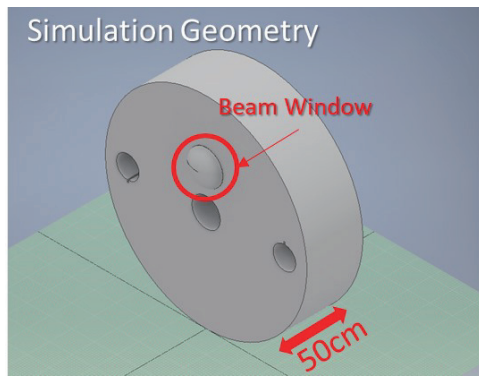


図 11：熱伝達率評価に使用した 3次元構造

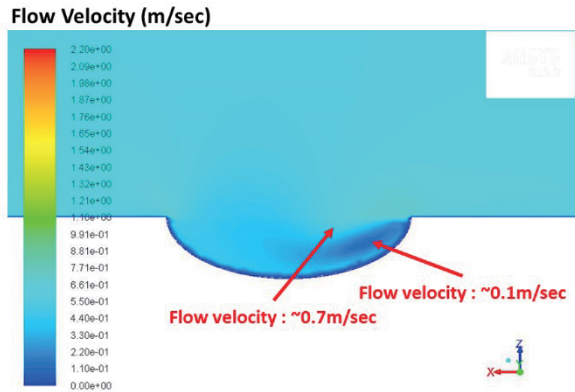


図 12：ビーム窓付近の流速分布

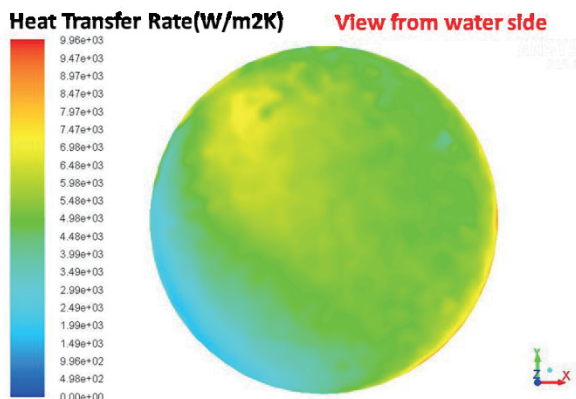


図 13：ビーム窓の熱伝達係数

4.3 ビーム窓の温度・応力評価

ビーム窓の温度分布は先に求めた熱伝達率を使用して計算し、次にこの温度分布による熱応力を評価した。図 14 は MECHANICAL で応力評価をした際の構造条件である。フランジの面部分は固定され、ビームが入射する球殻部分には 1MPa の水圧負荷と先に計算した温度分布が入力される。図 15 ではビーム窓厚さが 1mm と 5mm の場合におけるビーム窓の相当応力分布を示している。ビーム窓の球殻天頂部分に水圧に起因する応力がかかっている。5mm 厚では 1mm 厚より天頂部分の応力は緩和されているが、一方

でビーム照射部に発生している熱応力は 5mm 厚の方が強くなる。

図 16 はビーム窓球殻部分の最高温度と最大相当応力の窓厚依存性を示している。ビーム窓を厚くすると温度が上がるものの、水の圧力に起因する応力は窓厚 5mm までは緩和されていく。5mm より厚くすると熱応力による負荷がかかっていくことが分かる。基本設計[2]では窓厚は 1mm であったが、本評価により通常運転に関しては窓厚 5mm が最も応力負荷が少ないことが分かる。なお、ビーム窓の材質である Ti6Al4V は疲労限度の引張強度で 440MPa 程度であり[3]、5mm 厚のビーム窓にかかる相当応力は 48MPa であるので耐久性としては問題ないと言える。

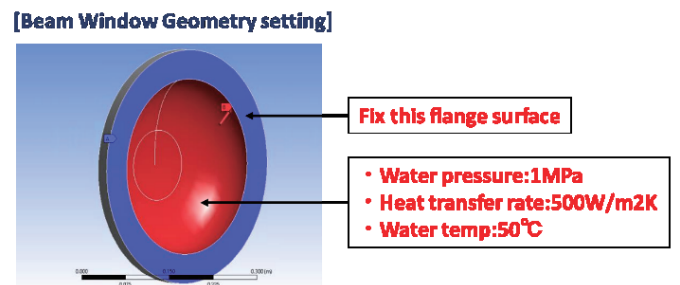
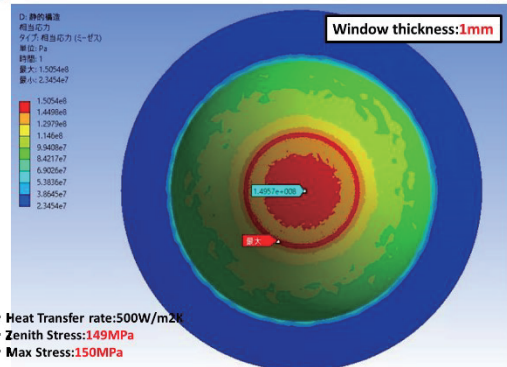


図 14：ビーム窓の温度・応力評価に使用した構造

[Simulation Results : Von Mises Stress of Beam Window]



[Simulation Results : Von Mises Stress of Beam Window]

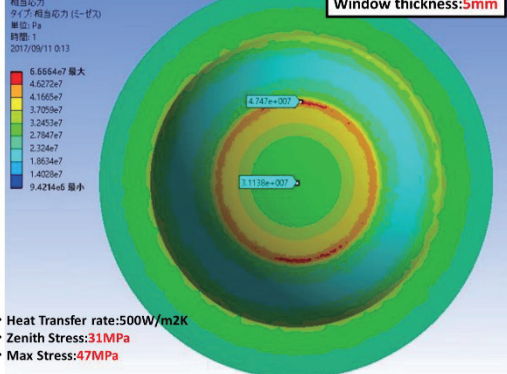


図 15：相当応力分布(ビーム窓厚：1、5mm)

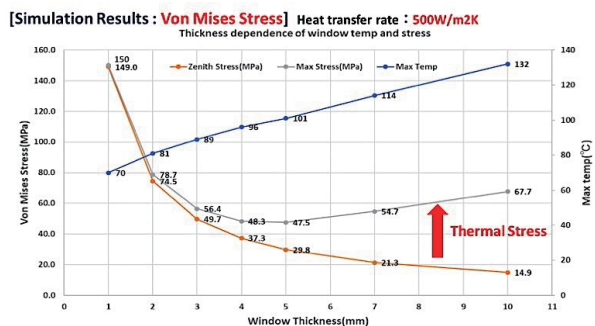


図 16：最高温度と最大相当応力の窓厚依存性

5 今後の展望

FLUKA と ANSYS (FLUENT、MECHANICAL) を用いた解析により ILC メインビームダンプの構造評価を行なった。今後の構造評価の課題としては「ビーム走査に異常があった場合」や「放射線によるビーム窓材質の劣化」、「水中で放射線分解により発生する水素の影響」を検討する必要がある。ビーム窓交換などのメンテナンスを見据えた装置設計も進める必要がある。現在は、FLUKA を使用してダンプ周辺の放射化を評価し、必要な放射線シールド構造を検討している。

高エネルギー物理実験における加速器は大強度化が進んでおり、この大強度ビームを受ける粒子生成標的やビームダンプは厳しい熱負荷や放射線ダメージにさらされる。堅牢な装置設計をするためにも構造解析は欠かすことができず、本報告のような熱シミュレーション技術はますます重要になるものと考えている。

参考文献

- [1] R.B. Neal Ed, SLAC 2.2MW Water Dump, The Stanford Two-Mile Accelerator, 1968.
- [2] P. Satyamurthy et al, Design of an 18MW vortex flow water beam dump for 500GeV electrons /positrons of an international linear collider, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 679 (2012).
- [3] M. Janeček et al, The Very High Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Alloy, ACTA PHYSICA POLONICA A Vol. 128 (2015).

太陽電池用シリコン多結晶成長炉内温度分布、 および不純物分布の数値解析

○中野 智^{A)}、高 冰^{B)}、原田博文^{B)}、宮村佳児^{B)}、柿本浩一^{B)}

^{A)}九州大学 応用力学研研究所 技術室

^{B)}九州大学 応用力学研究所

概要

太陽電池用多結晶シリコンの結晶成長において、今までは、各種パラメータ等を経験則で調整し、試行錯誤で最適だと思われる結晶成長条件を模索してきた。しかし、現在は数値計算によって、最適な結晶成長条件を得ることが可能となっている。今回我々は、融液流れや炉内構造物全ての熱伝達、熱輻射を考慮した総合伝熱解析法を用いて、炉内温度分布、および太陽電池の品質にとって大きな問題である不純物分布を解析し、結晶の品質向上を図った。

1 はじめに

地球温暖化などの環境破壊問題、エネルギー問題が世界的に注目されている中、燃料を必要とせず、二酸化炭素を排出しない太陽光発電への期待が益々高まっている。太陽光発電に使用される太陽電池は、使用する材料の種類によって異なる。現在最も使用されているものは、発電効率が比較的高く、原料も安価で量産が容易な多結晶シリコン太陽電池である。しかし、太陽電池市場の急激な需要拡大に伴って、シリコン原料の供給不足が問題となっている。このため、更なる高効率化と低コスト化が求められている。多結晶シリコン太陽電池の代表的な結晶成長方法として、一方向性凝固法が用いられている。この方法は、坩堝にシリコン原料を装填し、ヒーターを用いて原料を加熱・融解した後に冷却し、融液を凝固させることで、多結晶シリコン太陽電池を製造する方法である。多結晶シリコン太陽電池にとって、太陽電池の変換効率を低下させる不純物の低減は大きな課題の一つである。特に、酸素は代表的な不純物^[1-3]であり、結晶中の酸素濃度を制御することは大変重要である。酸素は、結晶成長時に坩堝壁から溶出し、融液対流によって輸送され、結晶中に混入す

ると考えられている。今回我々は、数値計算を用いて結晶内酸素濃度を解析し、多結晶シリコン太陽電池の品質向上を試みた。

2 計算方法

2.1 一方向性凝固炉の2次元モデル

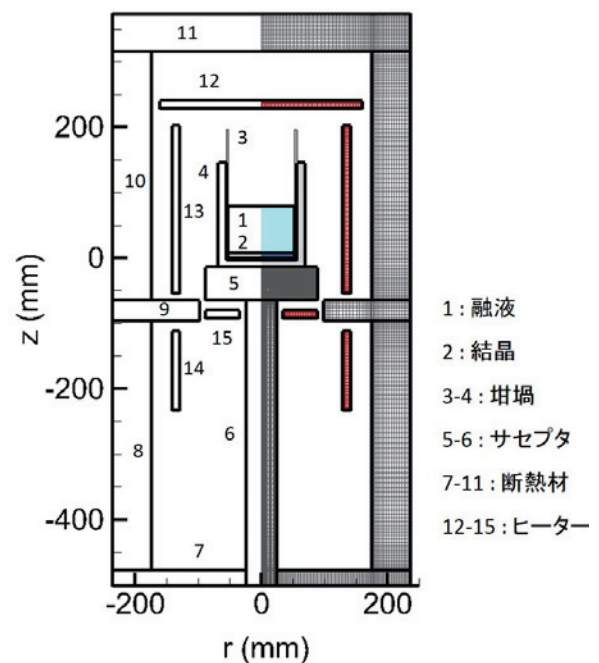


図1 一方向性凝固炉の炉内構成図

一方向性凝固法に使用する小型炉の構成を図1に示す。炉内は図に示すように、融液、結晶、および13の部材で構成されている。形状は軸対称を仮定している。今回使用するヒーターは12、13の2箇所のみで、12を上部ヒーター、13を横ヒーターと呼ぶ。

2.2 支配方程式

炉内の熱伝達のグローバルモデルは、坩堝内の融液対流による熱伝達、全ての炉内構成部材の熱伝達、輻射による熱伝達を含めて考慮してある^[4]。また、炉

内ガス流れの効果は考慮していない。

上記条件下における、坩堝内の融液の熱の流れに対する連続式、運動方程式、エネルギー方程式を、それぞれ式(1)、(2)、(3)に示す。

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{V} + \vec{V}^T)] - \rho \vec{g} \beta_r (T - T_m), \quad (2)$$

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (3)$$

\vec{V} : 速度 (m/s)

ρ : 密度 (kg/m^3)

μ : 粘性係数 ($kg/m \cdot s$)

\vec{g} : 重力加速度 (m/s^2)

β : 膨張係数 ($1/K$)

T : 融液温度 (K)

T_0 : 基準温度 (融点) (K)

c : 熱容量 ($J/kg \cdot K$)

λ : 熱伝導率 ($W/m \cdot K$)

炉内構造物での輻射による熱伝達のモデル化がグローバルシミュレーションで最も重要なものの1つである。炉内構造物の表面温度 $T(x)$ と熱流束 $q(\vec{x})$ の関係式を式(4)に示す^[5]。

$$\frac{q(\vec{x})}{\varepsilon(\vec{x})} \int_{\vec{x}' \in \partial V} K(\vec{x}, \vec{x}') \frac{1 - \varepsilon(\vec{x}')}{\varepsilon(\vec{x}')} q(\vec{x}') dS' = \sigma T^4(\vec{x}) - \int_{\vec{x} \in \partial V} K(\vec{x}, \vec{x}') \sigma T^4(\vec{x}') dS', \quad (4)$$

$q(\vec{x})$: 熱流束 (W/m^2)

$\varepsilon(\vec{x})$: 放射率

$K(\vec{x}, \vec{x}')$: 形態係数

σ : ボルツマン定数 ($W/m^2 \cdot K^4$)

$T(\vec{x})$: 表面温度 (K)

式(5)に示す $K(\vec{x}, \vec{x}')$ は、 \vec{x} と \vec{x}' 間の形態係数である。 \vec{x} と \vec{x}' は、炉内構造物の表面上の極小要素である。 dS と dS' は、 \vec{x} と \vec{x}' の極小の面積を表す。 ∂V は炉内輻射構造物の表面積を表している。 dS と dS' がお互い見えている場合、 $K(\vec{x}, \vec{x}')$ は、下記方程式を満たす。 \vec{h} と \vec{h}' は、それぞれ dS と dS' からの単位法線ベクトルである。

$$K(\vec{x}, \vec{x}') = - \frac{[(\vec{x}, \vec{x}') \cdot \vec{n}][(\vec{x}, \vec{x}') \cdot \vec{n}']}{\pi [(\vec{x} - \vec{x}') \cdot (\vec{x} - \vec{x}')]^2}, \quad (5)$$

dS と dS' がお互い見えていない場合、式(6)のようになる。

$$K(\vec{x}, \vec{x}') = 0. \quad (6)$$

2.3 加熱方法について

今回我々は、図1に示す上部ヒーターと横ヒーターを用いて数値解析を行った。具体的には

(a) 上部ヒーターのみを用いた上部加熱方法

(b) 上部ヒーターと横ヒーターを用いた横加熱方法

の2つの場合において、炉内温度分布、融液対流、および酸素濃度がどのような影響を受けるかについて比較・検討を行った。ただし、(b)は上部ヒーターと横ヒーターのヒーターパワーの割合を25%:75%としている。

3 酸素濃度計算

シリコン融液内における、酸素輸送の支配方程式を以下に示す。

$$V \cdot \nabla C = D_{m,O} \nabla \cdot (\nabla C). \quad (7)$$

$D_{m,O}$ は融液中の酸素の拡散係数 ($D_{m,O} = 5 \times 10^{-8} m^2/s$)^[4]、 C は融液内酸素濃度である。また、以下に数値計算で用いた酸素濃度の境界条件を示す。酸素濃度の計算には、シリコン融液表面からの蒸発、坩堝からの酸素の溶出、固液界面からの酸素の混入を考慮した。

3.1 坩堝 - 融液界面

酸素は坩堝から溶出して融液中に溶け込むため、坩堝と融液の境界条件に、離型剤として用いられている窒化珪素 (Si_3N_4) と石英坩堝 (SiO_2) との化学反応を考慮した以下の酸素平衡濃度を用いた^[6]。 C_O は酸素濃度を示す

$$C_O = 0.5 \times 10^{23} \times \frac{a_O}{1 - a_O} [\text{atoms/cm}^3]. \quad (8)$$

$$a_O = 1.32 \times \exp(-7150/T - 6.99). \quad (9)$$

3.2 融液表面

酸素は融液表面において、 SiO ガスとして蒸発するため、以下の式を用いた^[7]。

$$-D_{m,O} \frac{\partial C_{m,O}}{\partial z} = \varepsilon(T) C_{m,O}. \quad (10)$$

$C_{m,O}$ は融液表面の酸素濃度である。 $\varepsilon(T)$ は酸素の蒸発速度であり、以下の式を用いた。

$$\varepsilon(T) = 5.9152 \times 10^7 \exp\left(\frac{-4.1559 \times 10^4}{T}\right) \text{ (m/s)}. \quad (11)$$

3.3 固液界面

結晶凝固時に、酸素は融液から結晶に混入する。この時におこる偏析現象を考慮した固液界面での式を以下に示す。

$$D_{m,O} \frac{\partial C_{m,O}}{\partial z} + V_g C_{m,O} (1 - k_{0,O}) = D_{s,O} \frac{\partial C_{s,O}}{\partial z}. \quad (12)$$

ここで $D_{s,O}$ は固相中の酸素の拡散係数、 $C_{s,O}$ は固相中の酸素濃度である。 $k_{0,O}$ は酸素の平衡偏析係数であり、0.85 を用いている^[8]。

4 結果・考察

図 2 は、既述の計算方法を用いて得られた炉内温度分布の数値計算結果の例である。図はシリコン原料融解完了時の炉内温度分布を表している。図 3 は、横加熱方法を用いた場合における、融液、および結晶部の温度分布（右側部）と融液内対流の流速分布（左側部）の時間変化を示している。ヒーターパワーを降下させ、坩堝底部から抜熱していくことによって、図のように、坩堝底部から鉛直上方向に結晶が成長していく。この時のシリコン融液、結晶、炉内全部材の温度、および融液対流の時間変化を数値計算により求め、その後、結晶中酸素濃度を求めている。上部加熱方法と横加熱方法では、入熱や抜熱といった熱の流れ（熱流束）の方向や量が異なってくる。このため、融液、および結晶の温度分布も異なり、融液対流の方向や流速も変化するため、異なる酸素濃度分布が得られる。図 4 は結晶凝固終了後の上部加熱方法と横加熱方法を用いた場合における結晶中酸素濃度分布図である。図より、横加熱方法を用いた場合の方が上部加熱方法を用いた場合より、結晶中の酸素濃度が低くなることがわかった。これは、坩堝壁近傍の対流の向きの違いが原因だと考えられる。図 5 は坩堝壁近傍における融液対流の平均速度と方向を示した図である。対流の流れの向きが

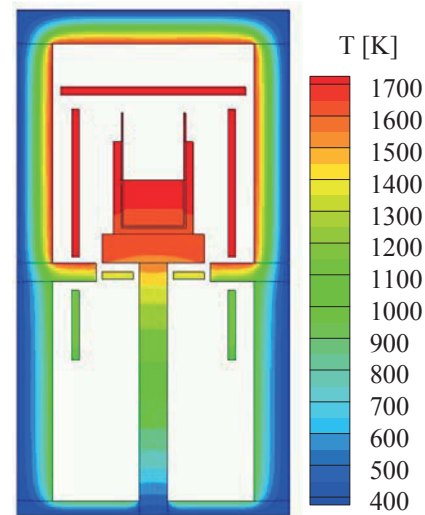


図 2 炉内温度分布の数値計算結果例

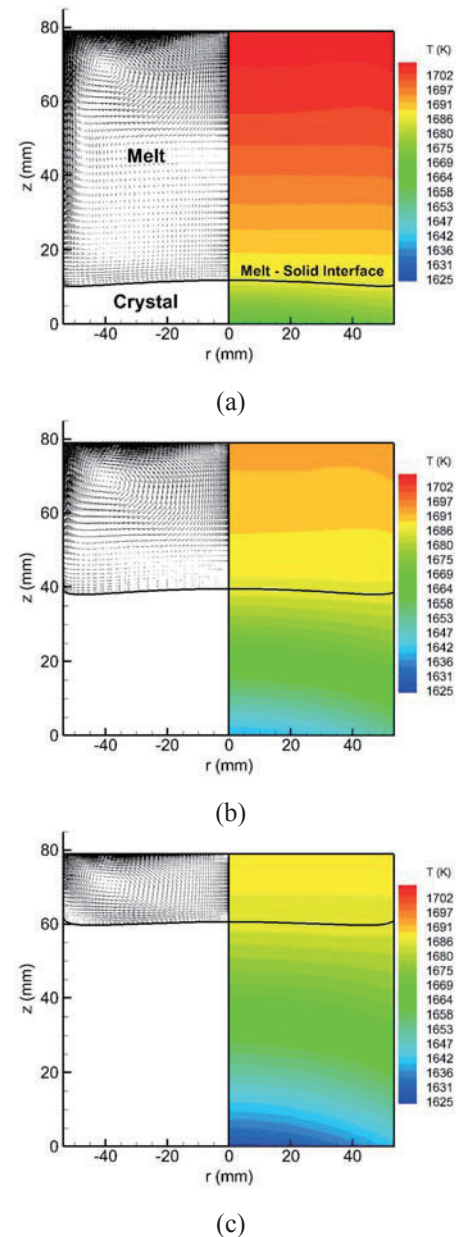


図 3 横加熱方法を用いた場合の固化率(a)15%、(b)50%、(c)75%時における融液、結晶部の温度分布図（右側）と融液内対流の流速分布図（左側）

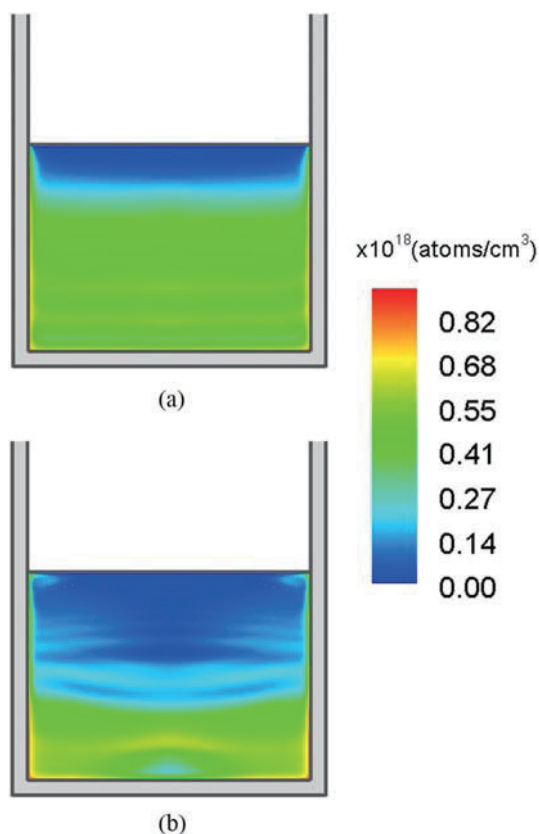


図 4 (a) 上部加熱方法、(b) 横加熱方法を用いた場合における結晶中酸素濃度分布

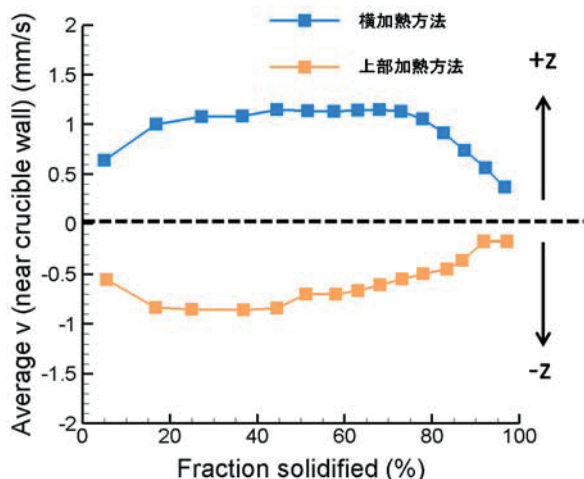


図 5 坩堝壁近傍における融液対流の平均速度と方向

垂直上方向の場合を正、垂直下方向の場合を負として定義している。図より、上部加熱方法を用いた場合、坩堝壁近傍の対流の向きは垂直下方向である。このため、坩堝壁面から溶出した酸素は、対流によって固液界面付近へ輸送されるため、結晶中への混入が容易になる。これに対して、横加熱方法を用いた場合、坩堝壁近傍の対流の向きは垂直上方向であ

る。このため、坩堝から溶出した酸素は、対流によって融液表面に輸送されるので、酸素の蒸発が促進されることとなり、結晶中の酸素濃度が低濃度になると考えられる。以上の結果より、結晶中の酸素濃度を減少させるためには、横加熱方法を用いる方が有効だということがわかった。

参考文献

- [1] H. J. Möller, C. Funke, A. Lawerenz, S. Riedel and M. Werner, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 72 (2002) 403.
- [2] W. Bergholz, *Semiconduct. Semimet.* 42 (1994) 513.
- [3] H. J. Möller, L. Long, M. Werner and D. Yang, *Phys. Stat. Sol., (a)*171 (1999) 175.
- [4] L. J. Liu, S. Nakano and K. Kakimoto, *J. Crystal Growth*, 299 (2007) 48.
- [5] F. Dupret, P. Nicodème, Y. Ryckmans, P. Wouters and M. J. Crochet *Int. J. Heat mass Transfer*, Vol.33, No. 9, (1990) 1849-1871.
- [6] H. Matsuo, R. Bairava Ganesh, S. Nakano, L. J. Liu, K. Arafune, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, K. Kakimoto, *J. Crystal Growth*, 311 (2009) 463-465.
- [7] S. Togawa, X. Huang, K. Izunome, K. Terashima and S. Kimura, *J. Crystal Growth*, 148 (1995) 70.
- [8] K. Hoshikawa and X. Huang, *Mater. Sci. Eng.*, B72 (2000) 73.

謝辞

日頃から御指導いただいている九州大学 応用力学研究所 柿本 浩一教授、寒川 義裕教授、武漢大学 高 冰教授、西安交通大学 劉 立軍教授、陳 雪江淮教授に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

LHD 真空容器内蔵型クライオポンプの熱構造設計

○村瀬尊則^{A)}、本島巖^{B)}、田中宏彦^{C)}、森崎友宏^{B)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

^{C)}名古屋大学大学院 工学研究科

概要

LHD 真空容器に内蔵するクライオポンプの開発には、1000°Cを超える受熱板からの強い輻射熱環境と、吸着パネルの極低温環境（～20 K）を狭小空間内で両立しつつ、更に排気性能を最大化することが要求されるため、高度な熱構造設計が必須である。そこで、精緻な 3D-CAD モデルを作成し、有限要素法による熱輸送解析とクライオポンプの構造設計を組み合わせることで、多角的な要求を満足するクライオポンプを実現した。

1 はじめに

定常核融合炉に向けて能動的粒子制御手法の確立が課題となっている。大型ヘリカル装置（以下、LHD）では、外部コイルのみで磁気面を形成するその特長から、高性能プラズマの定常保持に関する研究が先行して進められている。しかし、放電時間が長くなると、壁からのリサイクリング粒子の増加に伴う密度上昇が生じ、放電が阻害されることが観測されている。長時間放電における粒子バランスを考えた場合、密度の制御性を向上させるためには、壁からのリサイクリングに影響されない粒子バランスが担保可能な真空ポンプの整備が必要である。特に、真空容器内で相対的に中性粒子密度が高くなるダイバータ板近傍に設置できれば、より効果的な排気効果が期待できる[1-3]。そのため、これまで LHD では、極低温（～20 K）に冷却した活性炭にガスを吸着させることにより高真空を作り出す、クライオ吸着ポンプの開発を進めてきた。

LHD のダイバータ部にクライオ吸着ポンプを直接設置するためには、LHD のダイバータ部は真空容器とプラズマに挟まれた“ねじれたバナナ”のように湾

曲した細長い空間であるため、ポンプの設置可能領域が著しく制限される[4-6]。さらにプラズマやダイバータ受熱板からの強い輻射熱に曝されるため、コンパクト、かつ高い熱遮蔽性能を有し、熱シールドや吸着パネルを許容温度以下に抑える熱構造設計が求められる。

本稿では、LHD の閉構造ダイバータ内に設置することを目的としたクライオ吸着ポンプについて、その熱構造設計ならびに実機における排気能力試験の結果を述べる。

2 LHD に実装するクライオ吸着ポンプの熱設計

LHD 閉構造ダイバータ用に設計したクライオ吸着ポンプの模式図を図 1 に示す。クライオ吸着ポンプは炭素繊維複合材で保護されたステンレス鋼製の水冷シールドと無酸素銅製のルーバー型の液体窒素（LN₂）シールド、および 10 K のガスヘリウム（GHe）により冷却された吸着パネルで構成されている。排気ポンプとしての役割から、熱シールドは、気体の通り道を十分確保した上で光や熱の侵入を効果的に防

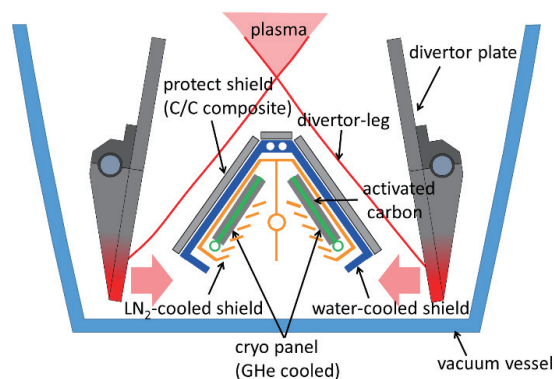


図 1. クライオ吸着ポンプの断面模式図。

ぎ、吸着パネルへの入熱を許容値以下まで低減させる必要がある。そのため水冷シールドは、LN₂シールドがダイバータ受熱板の高温部を見込まない構造とした。またルーバー型 LN₂シールドでは、吸着パネルが常温部を直接見込まないように、ルーバーの傾斜角と個々の間隔を調整した。また水冷シールドの材質であるステンレス鋼 (SUS316) は 500 °C を超えると機械的強度が低下する。そのため多少裕度を持たせて許容温度を 450 °C とした。LN₂シールドの温度は、吸着パネルへの輻射熱量に関わるため、可能な限り低く抑えることが理想であるが、本設計では LN₂シールドの許容温度を 100 K とした。

また LHD におけるクライオ吸着ポンプは、ダイバータ受熱板やプラズマからの高い輻射熱にさらされる。万が一、吸着パネルに除熱能力以上の熱負荷が加わり、パネル温度が 20 K を超えると、活性炭に溜め込まれたガスが一気に放出し始め、排気ポンプとしての機能を喪失する。よって、吸着パネルの温度を 20 K 以内に抑えることが、最も重要な設計ポイントで

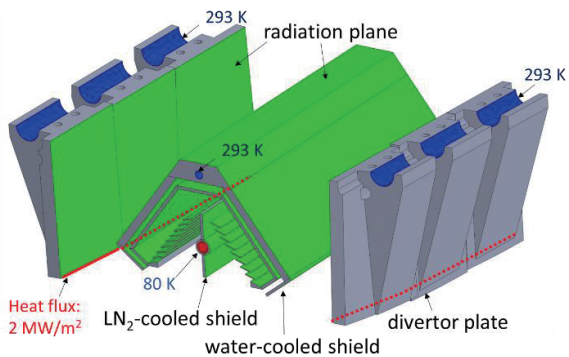


図 2. 有限要素解析モデル.

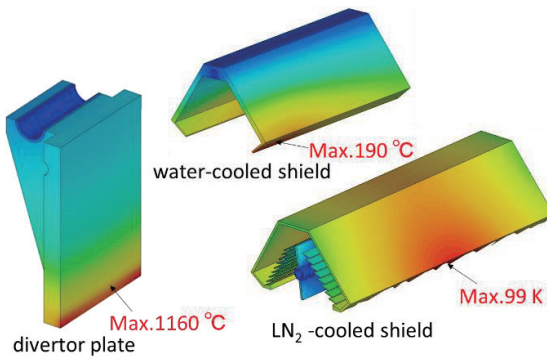


図 3. 各熱シールドの温度分布.

あり、そのためには、熱シールドの耐熱性・熱遮蔽性を高め許容温度を超えない構造とすること、さらに吸着パネルへの入熱 (放射熱・気体伝熱・固体伝熱) を抑制することが重要である。吸着パネルへの熱負荷が冷凍機の冷却性能を超えている場合には、ポンプ構造や冷凍機の増設等の見直し等を検討する必要がある。この設計条件をクリアする範囲内において、排気性能を高める構造設計が可能となる。構造設計におけるポイントは、ダイバータ部の狭小領域にも収まるコンパクトな設計で、さらにその領域の中で吸着 (排気) 面積を最大に、かつ排気コンダクタンスを大きくすること (ポンプの排気口や真空容器とのギャップを大きくする等) である。本章では熱シールドおよび吸着パネル温度を許容温度以下に抑えるための熱構造設計について述べる。

2.1 ダイバータ受熱板から熱シールドへの熱負荷

水冷シールドおよび LN₂シールドの耐熱性能・熱遮蔽性能は、プラズマおよびダイバータ受熱板との位置関係や熱シールドの材料および板厚、そして各熱シールド間のギャップで評価が大きく変わる。そのため実際の設計活動では、3D-CAD を用いた構造設計を進めつつ、ダイバータ受熱板-クライオ吸着ポンプ間の輻射熱を含めたシミュレーションを並行して行い、その結果を受け、さらに設計の改良をするという試行錯誤を繰り返して設計を進めた。以下に解析の一例について示す。

トロイダル非対称な LHD において、標準磁場配位で熱負荷の最も厳しくなる位置 (赤道面近傍) のクライオユニットおよびダイバータ受熱板を対象とした。図 2 に有限要素法による輻射伝熱解析モデルを示す。ダイバータ受熱板端部に、LHD の定常プラズマ実験に相当する定常熱流束 (2 MW/m²) を加えた。ダイバータ受熱板の冷却水配管部およびクライオポンプ上部の冷却水流路を 25 °C、液体窒素配管内壁を 80 K とした。ダイバータ受熱板の表面、水冷シールド、および LN₂シールド表面上の輻射面間に対して、ラジオシティ法 [7] を用いた面-面間の輻射設定を適用した。ダイバータ受熱板は等方性黒鉛、水冷シールドはステンレス鋼 (SUS316)、LN₂シールドは無酸素銅製であり、各材質の物性値 (熱伝導率、比熱、放射率)

に応じて設定した。ただし、LN₂シールドの輻射率は、外部の光を吸着パネルへ導かないよう黒化処理が施されているため、0.9とした。図3に計算結果を示す。熱解析の結果を設計にフィードバックし設計を重ねた結果、ダイバータ受熱板表面における最大温度は1000℃を超えるものの、水冷シールドの最大温度は190℃程度に抑制することができ、またLN₂シールドの温度は最大でも100K以下に抑えることができた。

2.2 輻射による吸着パネルへの熱負荷

前項の設計検討では水シールドおよびLN₂シールドへの熱負荷を抑制する検討を行った。実際の設計ではLN₂シールドから吸着パネルならびにGHe配管への輻射熱を評価し、熱仕様を満たさなければ、さらにシールド温度を下げるための設計変更を行う。本項では吸着パネルへの輻射熱の評価方法について述べる。LN₂シールドから活性炭への輻射熱 q_c (W)は、ステファンボルツマン定数 σ 、輻射率 ε 、および吸着パネルの受熱面積 A (0.568 m²)を用いて以下の式で試算できる。

$$q_c = \sigma \times \varepsilon \times (T_{LN_2}^4 - T_p^4) \times A \quad (1)$$

T_{LN_2} 、 T_p はそれぞれLN₂シールドと吸着パネルの温度である。そして2.1項の結果を基に、LN₂シールドの温度 T_{LN_2} を100Kとし、また吸着パネルの温度 T_p を10Kとすると、(1)式を用いて2.63Wを得る。輻射率 ε は並行平面の輻射率の式

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{LN_2}}{\varepsilon_{LN_2} + (1 - \varepsilon_{LN_2}) \varepsilon_p} \quad (2)$$

より求める。吸着パネルの輻射率 ε_p は、吸着パネル上に活性炭が隙間なく敷き詰められていると仮定し、1とした。またLN₂シールドの輻射率 ε_{LN_2} は0.9とした。

ここでクライオ吸着ポンプは1基6ユニットで構成され、各ユニット間では、GHe配管はLN₂シールドからの輻射熱を受ける(図4)。この輻射熱の評価には(1)式と同様に下記の式を用いる。

$$q_c = \sigma \times \varepsilon \times (T_{LN_2}^4 - T_{GHe}^4) \times A_{GHe} \quad (3)$$

ここで輻射率 ε は同軸円筒の輻射率の式

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{GHe} \varepsilon_{LN_2}}{\varepsilon_{LN_2} + \frac{A_{LN_2}}{A_{GHe}} (1 - \varepsilon_{LN_2}) \varepsilon_{GHe}} \quad (4)$$

を用いる。また A_{LN_2} 、 A_{GHe} はそれぞれLN₂シールド

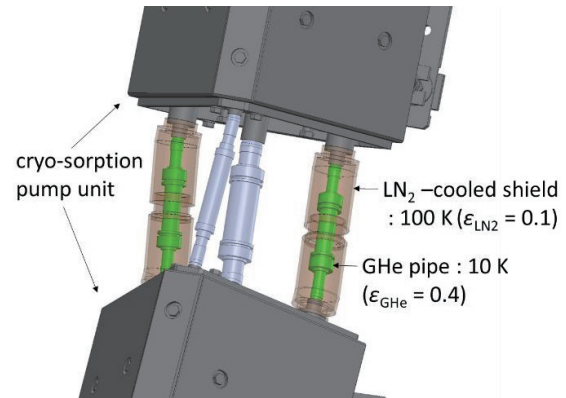


図4. クライオ吸着ポンプユニット間を繋ぐGHe配管 ($T_{GHe}=100$ K, $\varepsilon_{GHe} = 0.4$) およびGHe配管を覆う円筒形のLN₂シールド ($T_{LN_2}=100$ K, $\varepsilon_{LN_2} = 0.1$)。

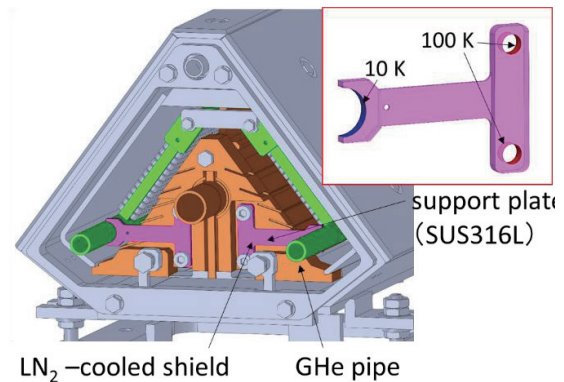


図5. GHe配管支持体構造および有限要素解析における境界温度設定。

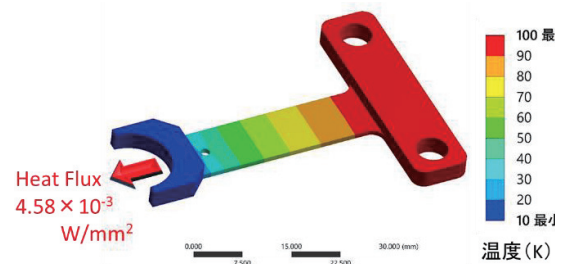


図6. GHe配管支持体の温度分布。

およびGHe配管の表面積 (0.235 m², 0.0772 m²) である。ユニット間のGHe配管はSUS316製、LN₂シールドは銅製であるため、それぞれ $\varepsilon_{GHe}=0.4$ 、 $\varepsilon_{LN_2}=0.1$ として計算すると、(1)式より輻射熱 q_c は、 6.82×10^{-3} Wと求まる。これは、(1)式から求めたユニット本体における輻射熱と比べて無視できるほど小さい。

2.3 支持体からの伝導による吸着パネルへの熱負荷

吸着パネルは、LN₂シールドに設置した断熱支持体により固定される。そのため吸着パネルは断熱支持体から熱伝導による熱負荷を受ける。通常、断熱支持体の設計では熱パスを出来るだけ細く、長くする設計が採用されるが、本クライオ吸着ポンプでは、もともと設置できるポンプ断面が小さく、断熱に効果的な長さの熱パスを確保できない。さらに熱パスを無理に長くすると、自重で歪み、周りの熱シールドと干渉する恐れもあることから、伝熱解析を通して、シンプルな T 型構造の支持体を採用した (図 5)。支持体はステンレス鋼 (SUS316) 製で LN₂シールドにボルトで固定される。クライオ吸着ポンプ 1 基あたり 24 個の支持体を用いる。最終的な支持体の設計については、吸着パネル全体の熱負荷および製作性を勘案して決定する。

ここでは支持体 1 個あたりの伝導熱を、有限要素法により計算した例について述べる。LN₂シールドとの接触部 (ボルト固定部) を 100 K とし、GHe 配管との接触部を 10 K に設定した。実際には完全接触ではないため、接触熱抵抗を考慮する必要があるが、多少過大な境界条件とした。伝熱解析による温度分布の結果を図 6 に示す。GHe 配管との接触部を通る熱流束は、 $4.58 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ となる。GHe 配管との接触面積は 57.5 mm^2 であることから支持体 1 個あたりの伝熱量は 0.26 W となり、よって 1 基あたりの支持体から入る熱負荷は、 6.24 W となる。

2.4 ガス吸着による吸着パネルへの熱負荷

ガス吸着による熱負荷は、排気するガスの仕様によって決定するため、構造設計による大きな制御は出来ないものの、吸着パネル全体の熱負荷を議論する上で欠かせない評価項目である。活性炭が水素を吸着する際に発生する吸着熱 q_{g1} (W) は、比熱 C_p (W/(Pa·L/s)/K)、吸着熱 λ (W/(Pa·L/s))、クライオポンプの排気速度 S (L/s)、および圧力 P (Pa) を用いて、

$$q_{g1} = C_p(T_g - T_p)SP + \lambda SP \quad (5)$$

と表される。ここで、吸着パネルに到達する水素分子は、LN₂シールドを通過する過程でルーバースライン

ド型の冷却面 (100 K) と衝突・反射を繰り返すため、速度が十分に低下している。パネル周辺の水素ガスの温度は LN₂シールド温度と同一であると仮定し、 $T_g = 100 \text{ K}$ とした。なお、排気速度 S と圧力 P の積、つまりクライオポンプが排気する水素の流量 SP (Pa L/s) は吸着パネルの冷却が完了した定常状態と、プラズマ実験時とで計算条件が異なるため、ここでは場合分けして考える。

(i) 定常状態

クライオポンプの冷却が完了すると、吸着パネルへ出入りする熱の収支が釣り合い、吸着パネル温度が一定となる。この時、吸着パネルは真空容器内に残るごく僅かなガスを吸着するのみで流量 SP は無視できるほど小さい。よって $q_{g1} = 0$ と考えることができる。

(ii) プラズマ実験時

閉構造ダイバータ用クライオ吸着ポンプの設計において、LHD 真空容器内に入射される固体水素ペレット (直径 2.5 mm, 長さ 2.5 mm) を 10Hz で入射したときのガス流量 ($10 \text{ Pa m}^3/\text{s}$) を連続排気できることが目標として設定されている[4]。本稿では、現状のパイプガンペレットで用いられているより大きな固体水素ペレット (直径 3 mm, 長さ 3 mm) [8] を反映して吸着熱の見積もりを行った。固体水素ペレット 1 個あたりの水素は 2 Pa m^3 であるので、10 Hz (1 秒間に 10 個) で入射された水素ペレットの水素ガス流量 SP は $2 \times 10^4 \text{ Pa L/s}$ と考えられる。よって、このときの吸着パネルへの吸着熱は (5) 式より 70 W と求まる。

2.5 気体の熱伝導による吸着パネルへの熱負荷

LN₂シールドと吸着パネルの間にある水素ガスを介して、LN₂シールドから吸着パネルへの気体の伝導熱が存在する。この場合の熱負荷の計算は圧力が低い時の真空壁間の残留ガスによる熱伝導の式が適用できる。この伝導熱量を q_{g2} (W) とすると、

$$q_{g2} = 0.243 \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot a_0 \cdot (T_g - T_p) \cdot \frac{P}{\sqrt{MT}} \cdot A \quad (6)$$

と表すことができる[9]。ここで γ は気体の比熱比、 M は分子量、 P は水素ガスの圧力 (Pa) そして A は受熱面積 (m^2) である。また熱適応係数 a_0 は以下の

式で与えられる。

$$a_0 = \frac{a_1 a_2}{a_2 + \frac{A_2}{A_1} (1 - a_2) a_1} \quad (7)$$

なお a_1, a_2 はそれぞれ吸着パネル, LN₂ シールドの熱適応係数であり, $a_1 = 1, a_2 = 0.5, A_2/A_1 \approx 3$ とすると, $a_0 = 0.25$ を得る. T は平均温度であり, 以下の式で与えられる。

$$\sqrt{T} = \frac{\sqrt{T_g} + \sqrt{T_p}}{2} \quad (8)$$

$T_g = 100 \text{ K}, T_p = 10 \text{ K}$ のとき, $T = 43 \text{ K}$ を得る. ここで, この熱負荷は水素ガスの圧力によって値が異なるため, 定常状態とプラズマ実験時とで場合分けを行う。

(i) 定常状態

LHD における高密度プラズマ実験において, ベース圧力は最大 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度である. このとき (6) 式より, 熱負荷 q_{g2} は $1.35 \times 10^4 \text{ W}$ となる. よって定常状態における残留水素ガスによる熱伝導は無視できるほど小さい。

(ii) プラズマ実験時

LHD ダイバータ部を閉構造化すると, 中性粒子が凝集され圧力が最大 1 Pa 程度に上昇することが実験により観測されている[4]. よって (6) 式より熱負荷 q_{g2} は, 1.35 W となる。

2.6 吸着パネルの熱的健全性評価

2.1 項から 2.5 項までの設計検討により吸着パネルへの最大熱負荷は 80.2 W まで抑制することができた. このときの吸着パネルへの熱負荷を表 1 にまとめる. 吸着パネルへの熱負荷は, 定常状態では支持体からの伝導熱が支配的となる. 一方, プラズマ実験時には, 水素ガスの吸着熱が支配的となる。

熱設計の最終目標は, 熱負荷が最も厳しくなる条件において吸着パネルの表面温度が局所的でも 20 K を超えないことである. そのため設計変更の都度, 有限要素法による熱計算を行い, 最大熱負荷時における吸着パネルの表面温度分布を求め, 許容範囲内であるか確かめた. 満足していない場合は, 構造を改良して満足できる結果が得られるまで繰り返した. 以下に吸着パネルの熱解析について述べる. GHe 配管内壁の温度を 10 K とし, 吸着パネルに入る熱負荷

(80.2 W) をパネル面積 (0.568 m^2) で除算した熱流束 (141 W/m^2) を吸着パネル表面 (両面) に与えた. 図 7 に吸着パネルの温度分布を示す. 吸着パネルの表面温度は, GHe 配管から最も離れた活性炭位置で最大 17.8 K であることがわかる. このように熱解析を利用しながら, ポンプ機能を維持する目安温度である 20 K 以下を維持可能な熱構造設計を行った。

3 クライオ吸着ポンプの排気能力試験

本稿で概説したクライオ吸着ポンプは, 平成 28 年度までの真空容器内改造作業において, LHD トーラ

表 1. 吸着パネルへの熱負荷

	Steady State	Plasma Operation
Thermal radiation (W)	2.6	2.6
solid heat conduction (W)	6.2	6.2
Adsorption enthalpy (W)	0	70
Gaseous heat conduction (W)	0.00135	1.35
Heat load to cryo panels (W)	8.8	80.2

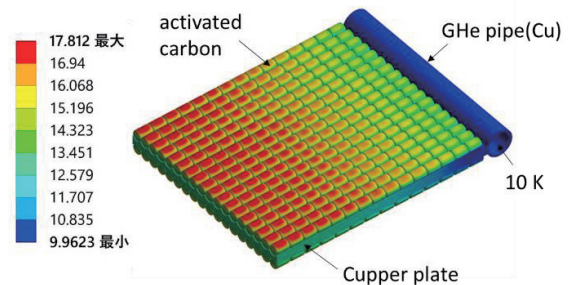


図 7. 吸着パネルの温度分布.

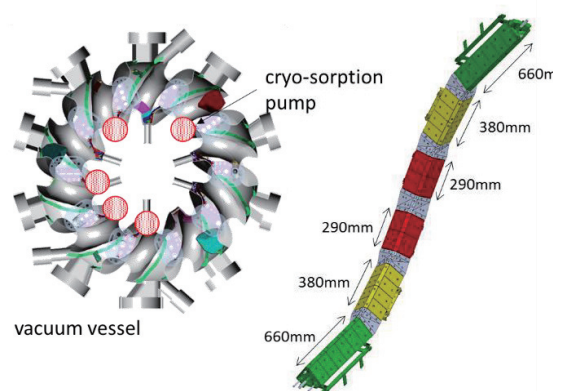


図 8. クライオ吸着ポンプの配置と形状.

ス内側，トロイダル 10 セクションの内，5 セクションに配置された（図 8）．より大きなポンプ体積を確保するため，ダイバータレグと真空容器壁に囲まれた狭小領域を塞ぐように，サイズの異なる 3 種類，1 セクションあたり計 6 台のクライオ吸着ポンプユニットを“ねじれたバナナ”のように繋げて構成している．また，吸着パネルの冷媒である GHe は循環方式を採用しており，3 台の GM 冷凍機（住友重機械工業製 RDK-415D）で冷却された GHe は，トランスファ

表 2. クライオ吸着ポンプの性能諸元

Pumping area	0.568 m ²
Ultimate pressure	1 × 10 ⁻⁵ Pa
Pumping speed	15-20 m ³ /s for hydrogen
Pumping capacity	13,640 Pa m ³

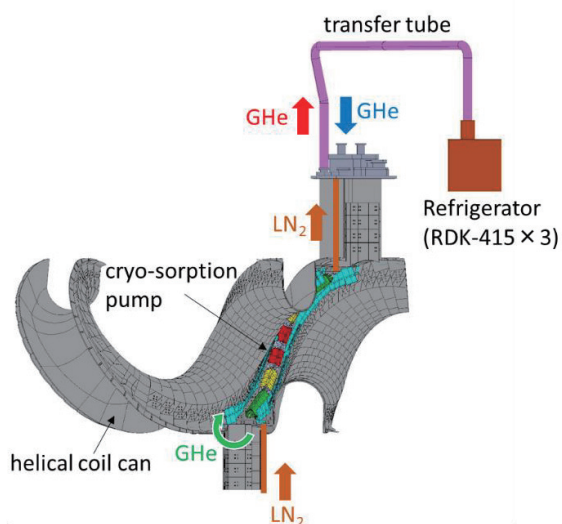


図 9. クライオ吸着ポンプの冷却システム.

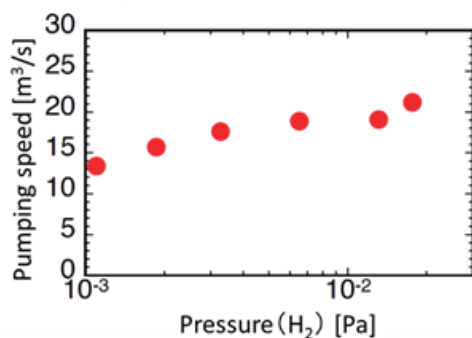


図 10. クライオ吸着ポンプの排気速度.

ーチューブにより，真空容器上部ポートを經由してクライオ吸着ポンプに供給される．そしてポンプ内を通過した GHe は，再び真空容器上部ポートよりトランスファチューブを通過して冷凍機に戻る．LN₂ は圧送方式を採用しており，真空容器下部ポートからクライオ吸着ポンプに供給され，上部ポートから排出される（図 9）．

表 2 に，LHD 真空容器内に設置したクライオ吸着ポンプ 1 基あたりの主な性能諸元を示す．LHD 真空容器（体積：250 m³）を主排気装置で排気した後，開発した真空容器内蔵型クライオ吸着ポンプ単独で排気した結果，およそ 1 × 10⁻⁵ Pa（水素換算）の真空度に達した．また LHD ガスパフ用マスフローコントローラで水素ガスの流量を調整し，クライオ吸着ポンプの排気とつり合う平衡圧力から排気速度を求めた．ここで，現状のペレットを 10 Hz で入射した際のガス流量（20 Pa m³/s）を想定した場合には，クライオ吸着ポンプ 1 基あたりのガス流量（2 Pa m³/s）で排気試験を行う必要がある．しかしながら本試験ではマスフローコントローラの制約上，1.5 × 10⁻² ~ 0.37 Pa m³/s の流量範囲で試験を行った．排気速度は約 15~20 m³/s（水素換算）を示し（図 10），ガス圧の増加に対して減少の傾向は見られなかった．また排気容量は，13,640 Pa m³ となった．実際のプラズマに対する効果は，2016 年 - 2017 年度の LHD 実験において，本クライオポンプの作動によるリサイクリングの低減を確認した．これにより，リサイクリングの影響を受けやすい低密度放電時の密度制御が可能となった．

4 まとめ

本開発では，LHD の閉構造ダイバータ内に設置することを目的として，核融合実験装置の真空容器内に設置可能な吸着型のクライオポンプを開発した．特に，ダイバータ部の熱的・空間的に厳しい制約の中で，クライオ吸着ポンプを実装するため，3D-CAD による構造設計と輻射熱解析を相互に補完しながら設計検討を行った．その結果，ダイバータ受熱板やプラズマからの高い熱負荷を受けても十分な耐熱性・熱遮蔽性能を有する構造とすることができた．また同

時に、熱解析を活用しながら、吸着パネルへの輻射・気体／固体伝熱による熱負荷を、許容温度以下に抑制した構造とすることができた。この熱構造設計を通して、LHD ダイバータ部の高熱負荷環境下においても、真空ポンプとして成立するクライオ吸着ポンプの見通しを得た。

本稿で開発したクライオポンプをLHD トーラス内側、トロイダル10セクション中、5セクションに配置し、その排気能力試験を行った。その結果、1基あたりの排気速度は、設計目標の約1.5～2倍の排気性能[4]となり、さらに排気容量は、LHDの高密度実験において使用する約1週間分の粒子数に相当し、十分な排気容量を有することが示された。

5 謝辞

クライオポンプの開発・運用に携わっている核融合科学研究所内・所外関係者の皆様、特にクライオ吸着パネルの製造に必須な無機接着法[5]に対する三田正弘氏(㈱協同インターナショナル)の多大な貢献に感謝いたします。なお、本開発は、核融合科学研究所予算NIFS10ULPP801の支援を受けて実施したものであり、ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] K. M. Schaubel *et al.*, *Advances in Cryogenic Engineering* **39**, 1583 (1994).
- [2] Q.S. Hu *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 1508 (2010).
- [3] R. J. Pearce *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **88**, 809–813(2013).
- [4] S. Masuzaki *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 940–945 (2010).
- [5] 村瀬尊則 他 :クライオ吸着パネル及びその製造方法、並びにそれを用いた真空装置。特許第6021276号, 2016.
- [6] T. Murase *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **11**, 1205030 (2016).
- [7] E.M. Sparrow *et al.*, *Radiation Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, (1978).
- [8] R. Sakamoto *et al.*, *Review of Scientific Instruments*

84, 083504 (2013).

- [9] 熊谷寛夫, 富永五郎編, 真空の物理と応用. 裳華房, (1970).

ポスターセッション

ハードターニングにより生成する加工変質層について

○米倉雄治^{A)}

^{A)}三重大学 工学部 工学研究科 技術部

概要

近年、cBN(立方晶窒化ホウ素)工具の開発が進んだ事により、焼入鋼の仕上げ切削、所謂ハードターニング加工が可能となり、加工工数削減が可能となった。しかし、ハードターニング加工は被削材に与える熱や歪が大きいため、加工変質層を生成することがある。焼入鋼を切削・研削加工した際に生成する加工変質層は白層と呼ばれている。白層は主に、①強ひずみにより生成したナノ・サブミクロン結晶組織(超微細結晶粒(UFG 組織))、②加工発熱によるオーステナイト化とその後の急冷によるマルテンサイト組織がある。UFG 組織は、従来の加工方法では得られない微細組織であるため、近年、高強度精密部品などへの実用化に向けた研究が盛んに行われている。白層を生成させる要因としては、切削条件や工具の逃げ面摩擦幅 Vb の影響など、いくつかの報告がある。白層を有する鋼材の力学特性はいくつかの報告があり、疲労強度には、表面や内部の圧縮残留応力に比例することが報告されている。今回、被削材として機械構造用炭素鋼 S55C 高周波焼入鋼を使用し、ハードターニング加工により加工変質層が生成する切削条件の検討を行ったので、結果を報告する。

1 試験条件

CNC 旋盤にて S55C 高周波焼入鋼(φ25×500mm)の乾式外周切削を行った。切削条件を表 1 に示す。被削材の金属組織、cBN 工具の観察には走査型電子顕微鏡(SEM)を使用した。金属組織観察用腐食液には 3%ナイトール(3vol% HNO₃ + 97vol% C₂H₅OH)を用いた。断面観察試料は旋削方向と直角な面で切断した。

表 1. 切削条件

サンプルNo	切削速度(m/min)	送り(mm/rev)	切込み量(mm)	擦過距離(km)
①	200	0.1	0.30	2.04
②	50	0.1	0.03	2.00

2 試験結果

図 1 に被削材表面の SEM 観察結果を示す。サンプル①は 2~10μm 程度の厚さで白層が確認でき、表面層の組織が微細化していた。表面層の下は基材組織である焼き戻しマルテンサイトの針状組織が観察された。サンプル②は白層が観察されなかった。

図 2 にサンプル①にて使用した cBN 工具の SEM 観察結果を示す。Vb 幅は 30μm 程度発生していた。

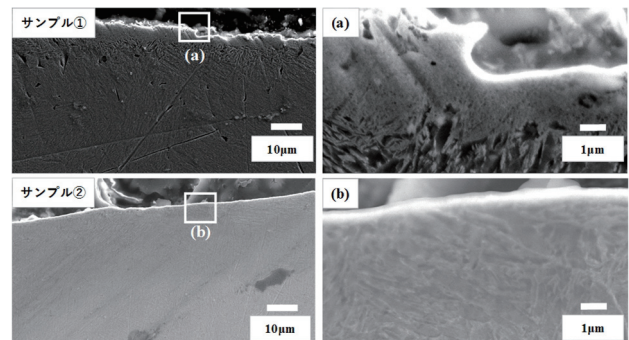


図 1. サンプル①②SEM観察結果

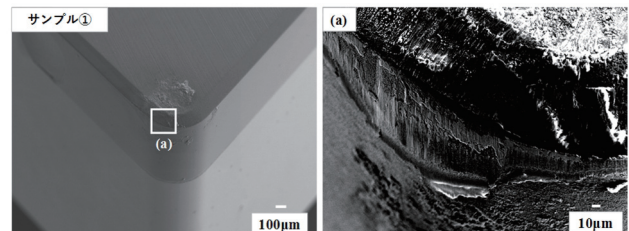


図 2. サンプル①cBN工具SEM観察結果

3 まとめ

cBN 工具を使用した S55C 高周波焼入鋼のハードターニング加工を行った結果、サンプル①で白層が観察された。これは切削時の発熱により表面温度が上昇、動的変態が生じ、結晶粒を微細化させたと考えられる。

参考文献

- [1] 戸高義一・他 マルテンサイト鋼の高速ドリル加工によるドリル穴表層における超微細結晶粒組織形成とその力学特性 鉄と鋼 No. 1 Vol. 96, 2010

機械工作における作業マニュアルの紹介

田口恭輔^{A)}

^{A)}一関工業高等専門学校 技術室

1. 緒言

現在、工業高等専門学校における教育・研究活動では様々な項目に関しての取り組みが行われている。

著者においても、摩擦時に発生するAEに関する研究や超音波振動加工時のバリメカニズムの研究を初め、様々な学生・教員との連携をとっている。

研究活動を行ううえで、大変重要となるのが実験装置の製作である。一般に実験装置を製作する際、研究者が研究の背景を元に実験内容を検討し、その内容を満たすための実験装置を設計し製作する必要がある。そのため自ら設計した実験装置の詳細内容を理解することは大変重要となる。

今日、3次元CAD（以下3DCAD）ソフトの普及により、設計した部品をその場で3Dモデルにすることが出来るようになり、3Dモデルを組み合わせることで、即座に自分の設計した実験装置の完成イメージを確認することが出来る。3DCADソフトにより、設計過程における利便性が向上している一方、問題となる事案もあがってきている^[1]。その代表が、データコピーの容易性である。例えば、学生に実験装置に関して質問した際に、「前任者が決めたのでよくわかりません」という言葉をよく聞きはしないだろうか？その他の例として、構造上組み付けることの出来ない設計をする、既存設備では加工不可能な設計図を持ってくる学生も多々いるのが現状である。これらは3DCADという架空空間でモデリングが可能だった故に出てきた問題点だといえる。

これらを解消するためには、設計者が実験装置の製作・組立過程を理解することが必要で、実験装置の特性を最大限に引き出すためには必要不可欠であると考え。そのため、学生の加工技術の向上においても研究活動を行うにあたって、必要なスキルの1つであると考え。

本校では、1,2学年時に機械実習を取り入れているが、1回90分と大変短くなっている。その結果、機械の操作方法を説明し、少し加工を行った頃には片付けをしないといけない時間になってしまう。そのため、研究活動を行う高学年時にはほとんどの学生が加工方法を理解できていない状況になっており、前述のような問題がおきている。そのため、低学年時に少しでも長く加工を行うため、高学年時に少しでも多く加工した時の記憶を思い出すために短時間で理解できるような授業資料や各工作機械の作業マニュアルが必要になると考える。これにより、実習の際に複数の情報を得て理解することで理解を深めるだけでなく、高学年になり工作機械を使用する際に思い出すきっかけになるものと考え。

また、加工技術の向上とともに現在必要とされているのが、高専生の『英語能力』である。本校でも、毎年多くの学生が海外に留学したり、また海外の学生が本校へ留学に訪れたり、外国の学生とふれあう機会が多くある。そこで問題となるのが日本と海外の学生が意思疎通するための英語である、特に高専生における英語力は問題視されており、図1に示すようにTOEICのスコアで比較すると、高専の平均点が451点であるのに対して、高校：512点、大学：561点と大きく離れている事が確認できる^[2]

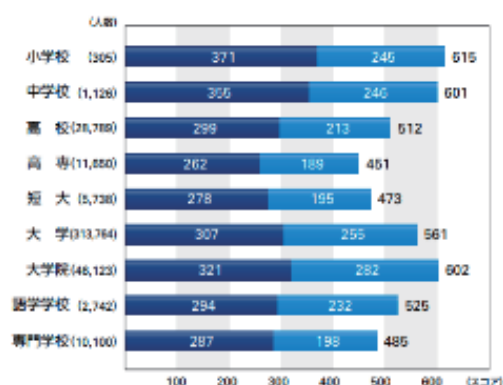


図1 各学校別受験者数と平均スコア^[2]

そこで、機械加工マニュアルを作成するとともに、授業の中で使用する資料には英語を併記する事で、英語学習の入口となり、機械実習の説明資料として使用することの出来る教材の作成を目的とする。

2. 内容

本稿では機械実習の授業資料において、学生が理解しやすい教材の作成と機械加工を行いやすくなるようなマニュアル作りを行う。

また、学生にアンケートによる意識調査を行い、その結果から学生の学習意欲に沿うような形で英語を用いた教材資料の検討し作成を行う。

3. 結果

3.1 工作機械作業マニュアルの作成

高学年および課外活動の学生向けに作成した工作機械作業マニュアルの一例を図 2,3 に示す。図 2 は NC フライス盤における加工機の操作マニュアルで、図 3 は汎用フライス盤における基本加工手順マニュアルである。

これらのマニュアルを初めとして、複数の工作機械のマニュアルの作成を行った。マニュアル作成時の注意点として「フルカラー」「1枚に収める」という点に気をつけながら作成した。1枚に収めることで説明書のようにページをまたいで検索をする必要がなくなるため、必要な情報を短時間で得られ、学生の理解力向上の足掛かりになると考えた。また、マニュアルはラミネート加工をし、マニュアルの裏面にマグネットシートを貼り工作機械側面に貼っておくことで、誰もが常時確認できるようにした。

学生に説明する際は、そのマニュアルを用いながら説明を行う事で、講習会終了後に学生が単独で使用する場合においても、各々がマニュアルを手に取りながら加工を行っているため、講習会後すぐであっても、1人での加工が可能になった。また、加工に関して少し間を空けた学生に関しても、マニュアルの存在を覚えており、自ら確認しながらの復習が可能となった。



図 2 NC フライス盤用作業マニュアル

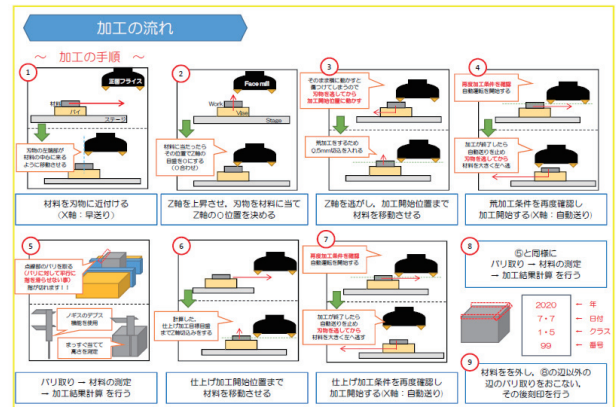


図 3 汎用フライス平面加工マニュアル

3.2 英語に関する意識調査

次に、学生の英語に対する意識調査をするために、英語に関するアンケートを行った。その集計結果を図 4,5 に示す。

英語の必要性についてアンケートを取った結果、図 4 の結果より、多くの学生が英語に関して、必要性を感じていることが分かった。

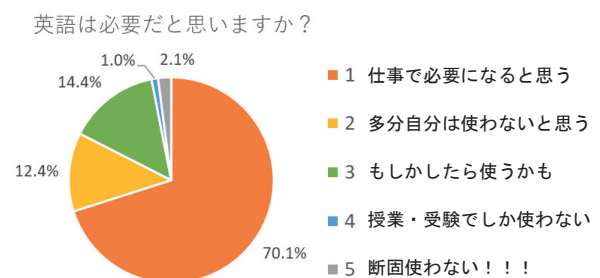


図 4 英語意識調査アンケート①

そこで次に問題となるのは英語に関する勉強方法である。図 5 に勉強方法に関するアンケートの結果を示す。この結果より、いきなり英文を訳したり、話したりすることはハードルが高いとの認識がされており、英語と日本語の併記を行い、それを見比べながら勉強をしたいという声が多くあがった。そこで、機械加工用の資料を作るに当たり、日本語と英語の併記の資料を作成することで、英語に対する苦手意識の少ない資料作りを行うこととする。

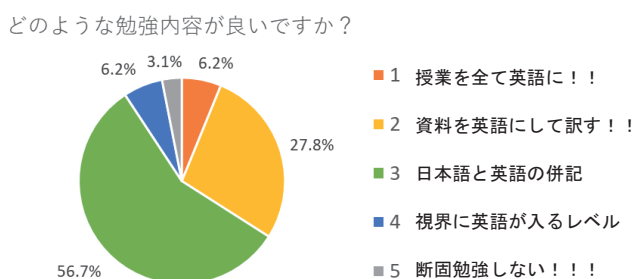


図 5 英語意識調査アンケート②

3.3 英語を併記した授業資料の作成

3.2 で確認した内容を参考に作成した授業資料の一例を図 6 に示す。このように授業の際に説明する資料に英語を盛り込み、説明時においても英語での名称を口に出す事で、英語を取り入れた授業資料を作成した。これにより、少しでも英語に触れる機会が増えればと考える。

次に授業時における資料の使用例を図 7 に示す。授業で説明を行う際は、ラミネート加工してホワイトボードに貼り付ける他に、タブレット端末を利用することで、スライドとしても活用している。その結果、スライドで集中的に説明を行い、授業中や授業後に各自が学習する際はラミネート資料を使い聞き逃した点などを再かくにんできるようにした。

4. 結言

今回、機械加工における操作マニュアルおよび加工手順マニュアルの作成を行った。その結果、授業・講習会での説明だけでなく、学生自ら復習を行うことが出来るようになり、学生の自己学習・復習が出来る環境を構築した。

また、授業資料を作成する際は、資料内に英語を併記することによって、英語が苦手な学生も英語に触れる機会を少しでも増やしてあげられるような資料作りに務めた。

本校ではこのような取り組みを行っているが、他の機関でもどのような対策を取っているのか情報共有をすることが出来ればと考える。

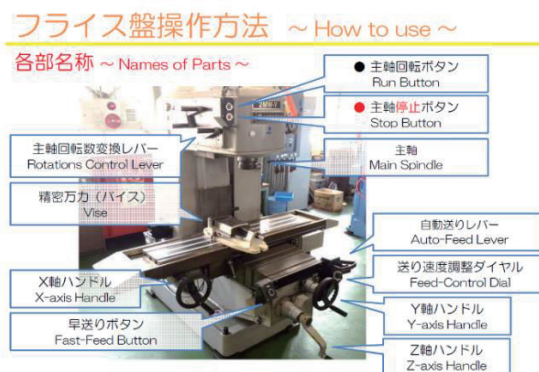


図 6 英語を併記した授業資料



図 7 作成資料の授業活用の様子

参考文献

- [1] 北條 恵司, “機械製図教育における評価精度および採点効率に優れた 3 次元 CAD 実習課題の開発”, 工学教育 61 巻 2 号, 2013 年, P7-11
- [2] TOEIC Program DATA & ANALYSIS 2017, 国際ビジネスコミュニケーション協会, 2017 年 6 月, P5-11

視覚障害者のための立体触地図教材及びその量産装置の開発

○萩 達也

名古屋工業大学 技術部

概要

視覚障害者の地理の学習では点字地図が広く用いられているが、教育現場では煩雑で分かりにくいなどの意見がある。教師らによる手作り地図が用いられたり、晴眼者用の地図を代用するなど、地図教材は十分普及していない。中には始めから使用しないケースもあるという。一方、最近では点字地図に代わる新しい立体触地図を開発する動きがある。特に3Dプリンターを利用し製作したものが脚光を浴びている。しかし、製作時間・コスト、精度、サイズなどの問題が多く教育現場の教材として提供するには課題がある。これを踏まえ、筆者は3Dプリンターに代わる工作機械で立体触地図を製作することを思い立った。また、本学内の視覚障害者向け音声認識触地図の研究室から触地図模型の製作依頼もあり、科研費(奨励研究)を使い本年度4月から研究を開始した。

1 研究経緯と目的

視覚障害者のための触地図はこれまで点字や簡単な記号を使って表したものが一般的である。地図には膨大な情報が記載されているため、視覚障害者が指先を頼りに知り得る情報量には限界がある。学習テーマを絞り、余分な情報を切り捨てた教材が望まれる。筆者は晴眼者でも判読が難しく、空間認識力が問われる等高線の学習に役立つ立体触地図に着目した。地図データは国土地理院ホームページ^[1]から無償で入手できる。この地図データは3Dプリンター向けのSTLファイル形式であるが、機械加工用3DCAD/CAMでも読み込める。本研究ではマシニングセンター(MC)で触地図を製作した。MCは、3Dプリンターと比べ、加工精度が優れ、加工が速く、大型加工や、量産化も容易である。MCの3D加工は通常ボールエンドミルを使用するが、スクウェアエン

ドミルに置き換えて等高線加工法で階段状に起伏を表して立体触地図が完成する。さらに一人一教材を念頭にこれを量産する装置を完成させる。本研究では、立体触地図として全都道府県の立体模型および山岳模型(筑波山)を製作することとした。全都道府県の模型は互いに比較することで遊び感覚で楽しく地理学習ができる。筑波山^[2]は独立峰なので等高線が分かり易く、3Dプリンター作品が既に公開されており、出来栄を比較するためである。

2 立体触地図製作方法

2.1 データの入手と編集

国土地理院ホームページから各都道府県(縮尺108万分の1)のSTLデータをダウンロードした。専用ソフトウェア^[3](ポリゴナルマイスター 日本ユニシス製)を用いて高さ方向倍率を5倍に強調した。平面方向の倍率はそのままとし、県境と海岸線で閉じた形状を切り出した。(図1)これを3DCAD/CAMで読み込み、所定の操作後NCプログラムを作成し機械加工した。筑波山触地図(縮尺2万5千分の1)のサイズは縦横夫々、150mmで高さは50mmとした。

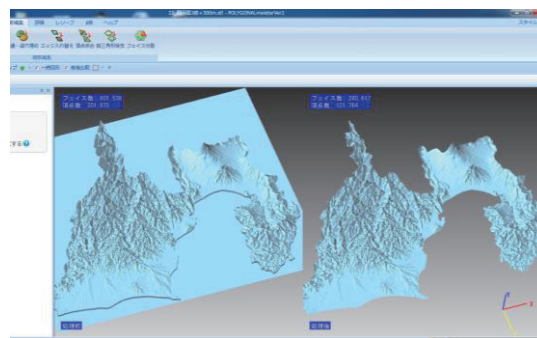


図1 ダウンロードした地形図(神奈川県)

2.2 立体触地図の機械加工

全都道府県の立体触地図の材料は厚さ10~20mmのABSプラスチックを用い、アルミ板に両面テープで固着して機械加工を行った。また、筑波山の材料は

ケミウッド（質感が木質のプラスチック素材）を使用した。切削工具は荒加工ではラジラスエンドミル、仕上げ加工ではスクウェアエンドミルを使用して等高線を階段状に表現した。この「等高線バージョン」の他に比較対照のため、ボールエンドミルで切削した「リアルバージョン」も製作した。

等高線バージョン 富士山周辺県の触地図を製作した。最高標高地点から低地まで一定の標高間隔で階段状に等高線を表現した。標高間隔は日本地図は200m、筑波山は50mとした。(図2、図3) 立体触地図上ではそれぞれの標高間隔は1mm~2mmである。高さ方向の倍率を5倍にし、さらに等高線の高さピッチ(zピッチ)を細かくすることもできる。(図4)

表1 切削加工条件 (等高線バージョン)

	回転数	送り	Zピッチ	平面ピッチ
	rpm	mm/min	mm	mm
荒加工 Φ12	3000	1000	1.0~ 2.0	5
仕上 Φ10	3500	1400	1.0	3



図2 富士山周辺県 (加工時間各40分)

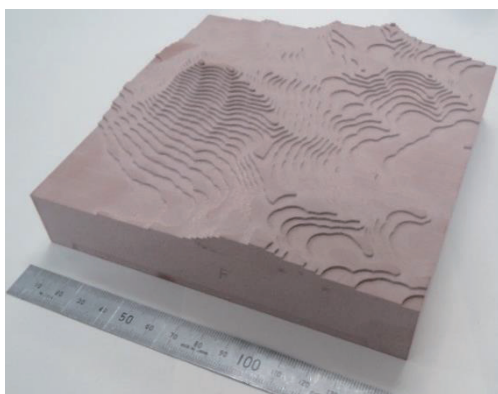


図3 筑波山 (加工時間90分)

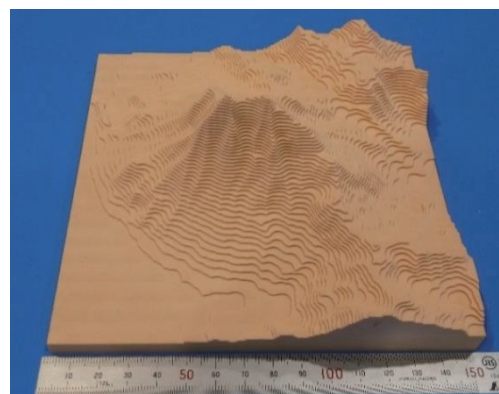


図4 筑波山 (高さ方向5倍加工時間2時間)

リアルバージョン 切削方法は等高線バージョンと同様である。仕上げ加工では等高線バージョンと比べてzピッチが0.3mmと細かい。(図5,6)

表2 切削加工条件 (リアルバージョン)

	回転数	送り	Zピッチ	平面ピッチ
	rpm	mm/min	mm	mm
荒加工 Φ20R4	2000	1200	1	10
仕上 Φ6R3	3500	1500	0.3	0.5



図5 富士山周辺県 (加工時間各80分)



図6 筑波山 (加工時間6時間)

機械加工による触地図は 3D プリンター製^[4] と比べ、精緻でリアルな出来栄である。(図 7)

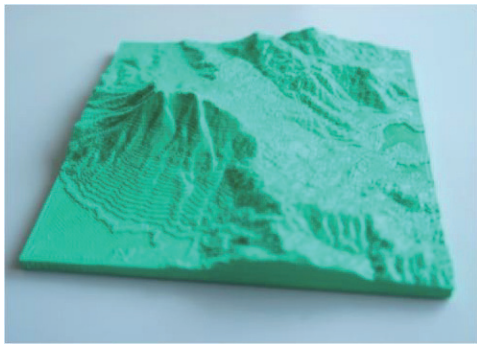


図 7 筑波山 3D プリンター製

日本列島全 47 都道府県分を製作するにあたり、北海道地区は 6 つのブロックに分割、北方領土や佐渡島、沖縄のような島々を含め、60 点の立体触地図を製作した。これらの加工はアルミ板に ABS 材を両面テープで貼り付け夜間自動運転を行い一度で最大 16 県を機械加工した。(図 8,9) 両面テープは瞬間接着剤より、せん断力^[5]に優れ剥がれにくい。また、専用剥がし溶剤を使うと簡単に剥がれる。最長連続加工は 12 時間に及ぶため、切削クズ対策が問題であった。



図 8 外周輪郭加工後 16 県 縦 400mm 横 500mm



図 9 外周輪郭加工後 12 県 縦 400mm 横 500mm

各立体触地図は各地域毎にアクリル板にマグネットで固定し、これらアクリル板を縦横 1.8m のストレッチボードに貼って日本地図を完成させた。(図 10) 現在は愛知県立名古屋盲学校で常設展示されている。各県はマグネットで固定してあり自由に取り外しでき、大きさや形状が分かる。晴眼者でも楽しくジグソーパズルの遊び感覚で地図の学習ができる。



図 10 日本列島立体触地図 108 万分の 1
縦横 1.8m

2.3 量産装置

量産装置は、視覚障害者一人一教材を念頭に製作に取り組んだ。上型を凹形、下型を凸形とした。上型は下型を凹形に反転し、板厚 2mm オフセットした後に等高線バージョンで加工した。本型は絞り加工用のプレス金型からヒントを得た。上下両型に力は作用しないため、単純な構造である。上型はガイドポストで上下に案内するため、合わせ面では完全に一致する。下型にシリコーンを流し込み、上型をかぶせて固化させた。(図 11,12) 上型下型を作り替えれば、別の立体触地図も製作できる。型を開けば厚さ 2mm の筑波山の立体触地図が完成している。(図 13)

シリコーン以外では安価な石膏を試みた。離型剤を両型に塗布したが固まって剥がす際に割れて失敗した。(図 14)

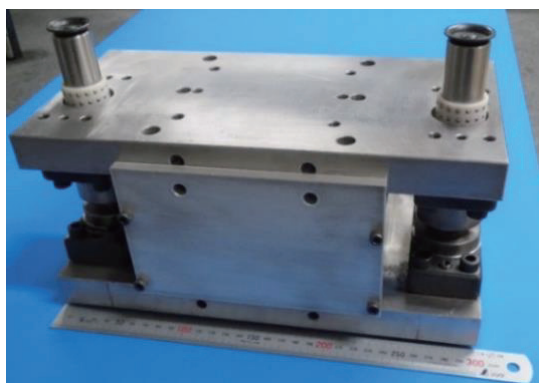


図 11 立体触地図量産装置

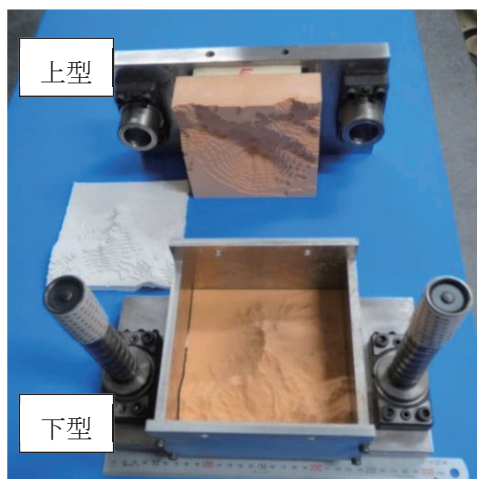


図 12 触地図量産装置 上型と下型

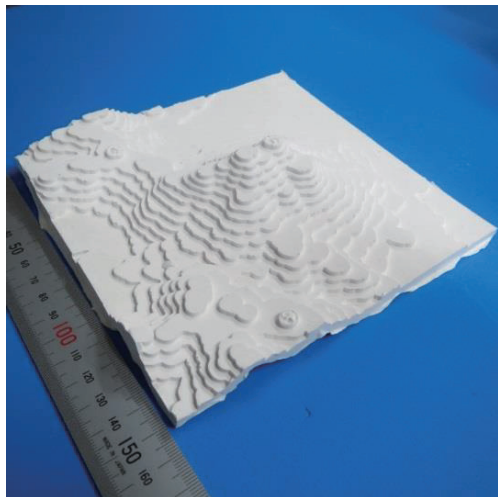


図 13 量産したシリコン触地図



図 14 割れた石膏

3 研究結果

等高線バージョンの立体触地図は 3D プリンターでは製作が不可能である。工作機械を用い、等高線バージョンとリアルバージョンの筑波山と日本列島の立体触地図が完成した。盲学校の全盲の視覚障害者からは「等高線を階段状に立体化したことで地形の高低差が分かり易くなった。」との意見が得られた。

一方、弱視の視覚障害者からは「階段状の等高線で表さなくても、通常のボールエンドミルで製作したリアルバージョンのほうが分かり易い。」との指摘もあった。立体触地図教材は視覚障害者から高い評価が得られ、一定の成果を出せた。

量産装置は筑波山以外を作るには上下型を新たに製作する必要があるが、国土地理院が収蔵する地形図データなら、どこでも製作できる。

4 謝辞

本研究を行う上でご助言、データ編集ソフトウェアをご提供頂いた本学社会工学科橋本芳宏教授、製作時に貴重なご意見を頂いた社会工学科博士後期課程細川洋一氏に感謝申し上げます。また機械工作でご協力くださった祖父江孝之氏に感謝申し上げます。

本研究は、平成 29 年度 JSPS 科研費奨励研究 課題番号 17H00222 の助成を受けて実施している。

連絡先

E-mail: hagi.tatsuya@nitech.ac.jp

参考文献

- [1] 国土地理院ホームページ
<http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3d/index.html>
- [2] 筑波山 3D データ
<https://maps.gsi.go.jp/#15/36.225278/140.106667/&vs=c1j0l0u0t0z0r0f0>
- [3] STL データ変換ソフトウェア
<http://www.excel.co.jp/polygon/case/interview01.shtml>
- [4] <http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3d/images/ABS.jpg>
- [5] 両面テープの特性
http://www.nichiban.co.jp/stationery/category/tape/adhesive_d.html

微細格子溝形状をした細胞培養基材成型用金型の超精密加工

竹田 真宏

理化学研究所 RAP 先端光学素子開発チーム

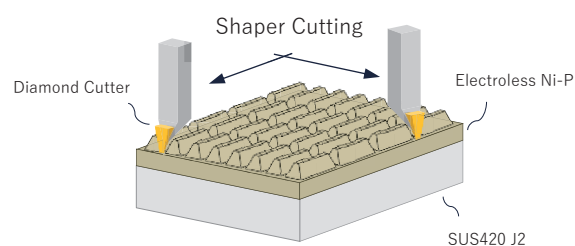
概要

細胞の培養基板に微細構造を付与することで細胞の運動特性が変化することが報告されている^[1]。しかし、従来のリソグラフィ技術による手法では、形状パターンの選択肢に制限があり、特に滑らかな斜面を含む微細構造は製造が困難とされている。ここでは、上皮細胞（野生型 α カテニン発現細胞）が丸くなれる仕組みを解明するため、細胞が運動する培養地に規則的に配置された微小な凹凸構造をポリジメチルシロキサン（PDMS）に転写・成型するための金型を超精密加工技術によって製造する手法を検証した（図 1）。PDMS はマイクロ流路などに用いられる微細構造への流動性と転写性に優れた無色透明なシリコーン樹脂であり、細胞の運動を阻害する生体反応性が無害である。また、金型表面には PDMS の剥離促進効果を目的としたフルオロカーボン成膜処理を施した。

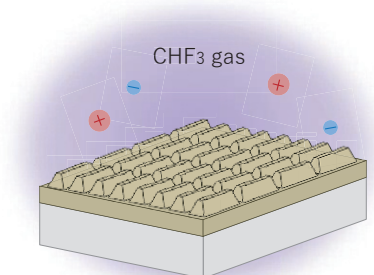
超精密加工とは、サブミクロン分解能による高い位置決め精度を繰り返し再現することが可能であり、主にレンズやミラーといった光学素子の開発分野において用いられている加工技術である。金型の加工方法には、単結晶ダイヤモンド工具によるシェーパ加工（工具で被削材を“ひっかく”ように切削する加工方法）を採用した。切削とは、被削面に工具を切込ませて切りくずを生成することで仕上げ面を得る加工方法であり、仕上げ面の品質は生成された切りくずの形によって左右される。つまり、超精密加工における切削とは、サブミクロン精度で案内された工具の刃先形状を被削材へ転写する行為であり、高い加工精度を実現するためには振動や温度変化といった周辺環境を整備する必要がある。

今回の金型は PDMS が流れ込む溝が格子状に配列されており、溝が深い（ $160\mu\text{m}$ ）ことから切削抵抗を低減させてビビリ振動などの加工不良を回避する

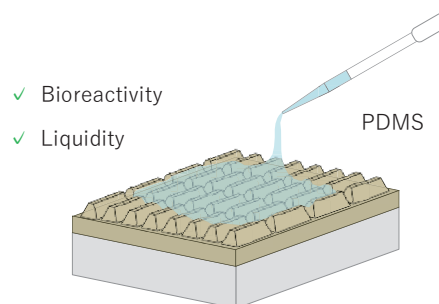
必要がある。本報では、深溝のシェーパ加工における加工パスの設計と加工精度の測定結果について述べる。



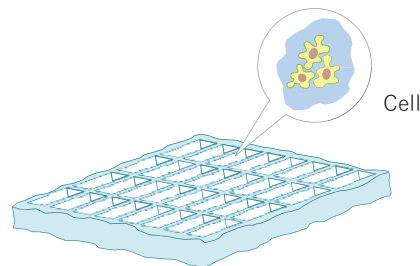
(i) Ultra-precision Machining



(ii) Fluorocarbon Coating



(iii) Molding

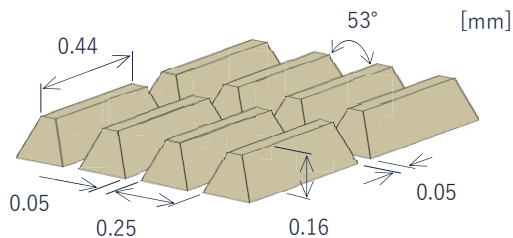


(iv) Separating

図 1. 金型加工から細胞培養基材成型の流れ

1 微細格子溝形状の加工方法

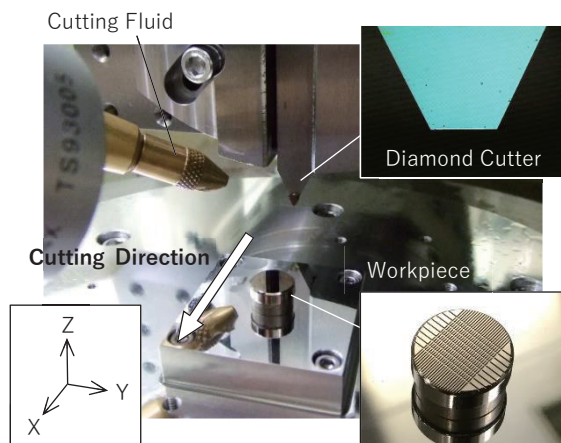
図 2 に微細格子溝形状の寸法を示す。



Material	Electroless Ni-P
Microstructure Area	5.1964×6 mm
Number of Groove	9×25

図 2. 微細格子溝形状の寸法

加工方法は超²精密微細形状加工機 NPIC-M200 (NAGASE-i) を用いたシェーパ加工を採用した。加工機の軸構成は、基本となる X,Y,Z の直交 3 軸に加えて、被削材と工具の角度を調整する回転テーブル B,C が備わった合計 5 軸制御である。ここでは、シェーパ加工方向に X 軸、溝のピッチ方向に Y 軸、溝の深さ方向に Z 軸を担当させた。なお、加工時は回転テーブル B,C 軸を機械的に固定させ、被削材と工具の姿勢変化の発生を抑制した (図 3)。



Model	NPIC-M200 (NAGASE-i)
NC	FANUC 15i MA (FANUC)
Resolution	Straight Axis XYZ : 10 nm Rotation Axis BC : 0.0001 °
Drive / Guide	XY : Linear Motor / Hydrostatic Pressure Z : Hydrostatic Lead Screw / Hydrostatic Pressure BC : AC Servomotor / Hydrostatic Pressure

図 3. 加工機のセットアップ

工具は溝形状と同じ刃先形状をした単結晶ダイヤモンド (平刃幅 50 μm, 刃先角 53°, すくい角 0°, 逃げ角 7°, 横逃げ角 3~5°) を使用し、仕上加工では溝の全方向 (3 方向) から切りくずが生成される。

被削材は直径 10mm×高さ 6mm の焼入れ焼戻し (HRC50~55) したステンレス鋼 (SUS420J2) を母材とし、加工する溝の深さ (160 μm) が十分に収まるよう無電解 Ni-P めっきを厚さ 300 μm 成膜した。

2 加工パスの設計

深溝をシェーパ加工するにあたり、加工工程を先加工、中加工、仕上加工の 3 工程に分けた。その結果、1 本の溝を仕上げるために合計 400 回のシェーパ加工 (所要時間約 1 時間) を要した。仕上代は、溝底面が 0.4 μm、両斜面が 0.18 μm とした。なお、使用した単結晶ダイヤモンド工具の刃先はシャープエッジであるが、厳密には R0.2 μm 程度の丸みを帯びているとされている。従って、切込量が 0.2 μm 以下の場合、すくい角はネガティブの働きをする。

各加工工程の詳細は次の通りである (図 4)。

a. 先加工

溝中心 (Y0.0) で 2 μm 切込んだ後、溝中心から左右に 38 μm 移動した座標 (Y±0.038) で 1 μm 切込みを 2 回ずつ行う。これを 1 セットとして深さ 80 μm まで切込む。(シェーパ加工回数 : 200 回)

b. 中加工

溝中心 (Y0.0) で 2 μm 切込んだ後、Y 軸を左右に 38 μm-1 μm×切込み回数 N だけ移動した座標 (Y±(0.038±0.001N)) で 1 μm の切込みを 2 回ずつ行う。これを 1 セットとして深さ 156 μm まで切込む。(シェーパ加工回数 : 190 回)

c. 仕上加工

溝中心 (Y0.0) で 0.4 μm ずつ 10 回切込む。このとき、溝の 3 方向から切りくずが生成されるため、切りくずの排出が難しくなるが、加工中の様子を CCD カメラで拡大観察したところ円筒状にカールした流れ形の切りくずが排出される様子が確認できた。なお、工具の送り速度は全工程 F 1000 mm/min (const) とした。

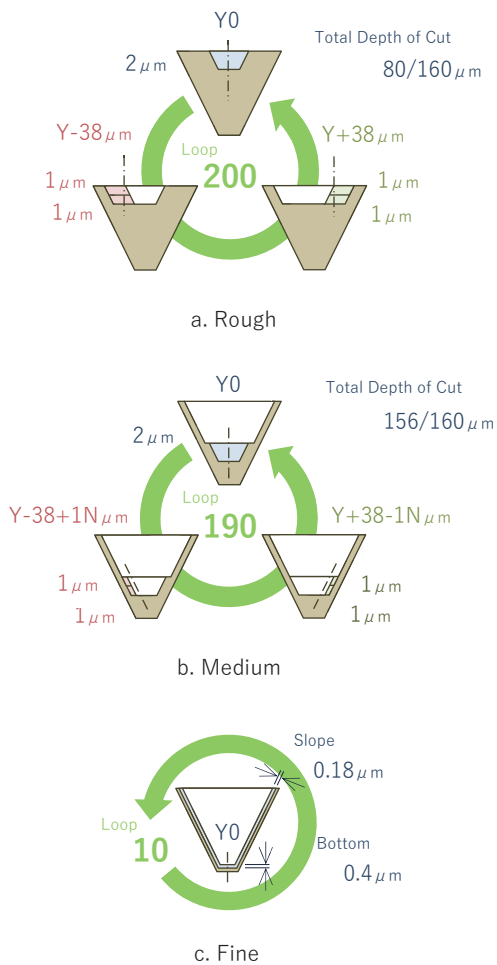


図 4. 各加工工程の加工パス

3 加工精度の測定

非接触光学式走査型白色干渉計 NewView7200 (ZYGO) により溝の表面粗さを測定した結果、算術平均粗さは約 Ra 1 nm であった。また、溝底面の両隅にはむしろのような破壊が認められた。これは平刃の両コーナー部分において、溝底面と斜面の 2 方向から生成された切りくずが凝集することで、局所的に切りくずの排出不良が生じたためだと考えられる。一方、溝底面にはビビリ振動のような周期的なカッターマークは認められず、安定した滑らかな仕上げ面が得られた。

溝が交差する部分において、約 $0.24 \mu m$ の段差が生じた (図 5)。これは工具刃先の摩耗と溝を直交させるために B 軸で被削材を 90° 回転させた際に生じた傾き誤差が原因だと考えられる。また、溝底面に

生じた約 0.26° の傾きについては、あらかじめ試験加工することで工具の取付け角度を調整すれば誤差を小さくすることが可能だが、ここでは省略した。

被削材の固定方法に起因する特徴的な測定結果が得られた (図 6)。加工した全領域において、溝底面の高さ分布を測定したところ、金型の中央 2 カ所に凹みのようなうねり分布が確認できた。うねりの高さは約 $0.75 \mu m$ であり、加工機の X 軸の直行度 ($0.2 \mu m/390mm$) よりも大きい値である。このうねりが発生した原因は、被削材の固定方法として、裏側から 2 本の M2.6 によるねじ止めを採用したためだと推察する。従って、被削材を固定する方法として、裏側からのねじ止めを避けること。ねじ止めの位置を加工領域からなるべく離すこと。ねじ止め部の肉厚を薄くしてねじ止めによる変形が加工領域に及ばないようにするなどの対策が効果的である。

なお、加工精度の測定は金型をイソプロピルアルコール (IPA) で超音波洗浄した後、フルオロカーボン成膜処理をする前に実施した (図 7)。

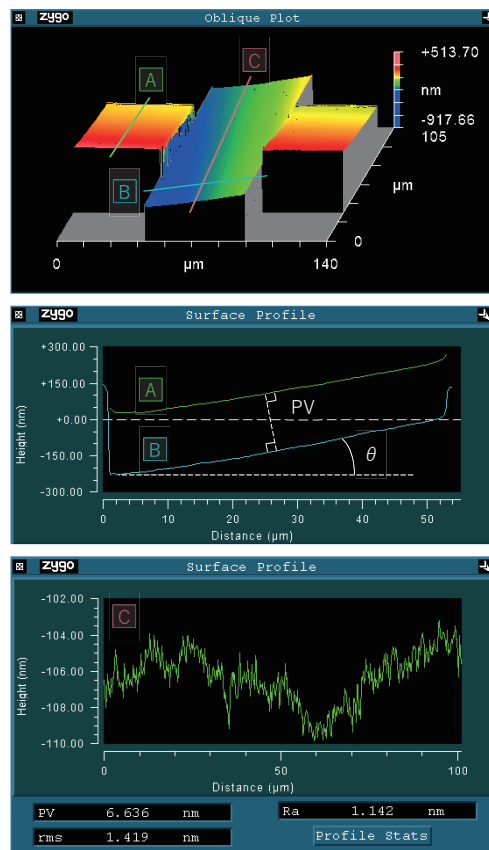


図 5. 溝底面に生じた段差と傾きの誤差 ($PV \cong 0.24 \mu m$, $\theta \cong 0.26^\circ$)

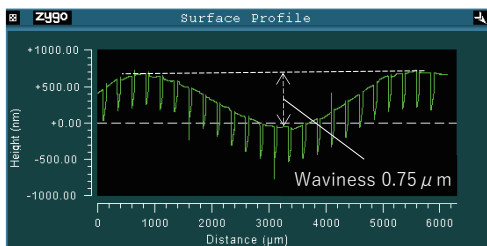
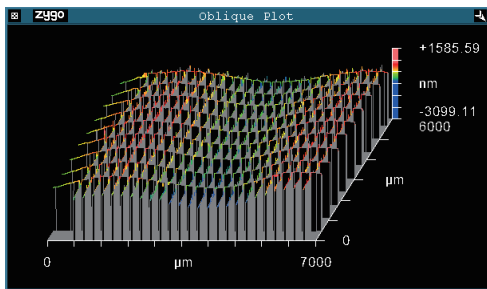


図 6. ねじ止めに起因する加工面のうねり
(Waviness $\approx 0.75 \mu\text{m}$)

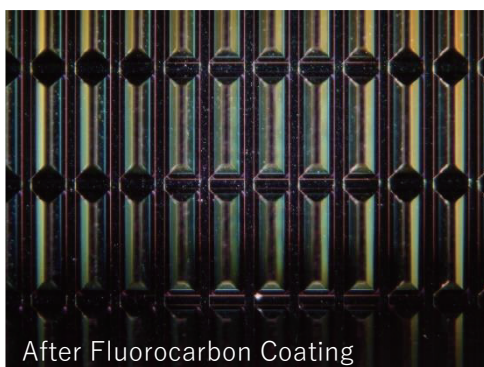
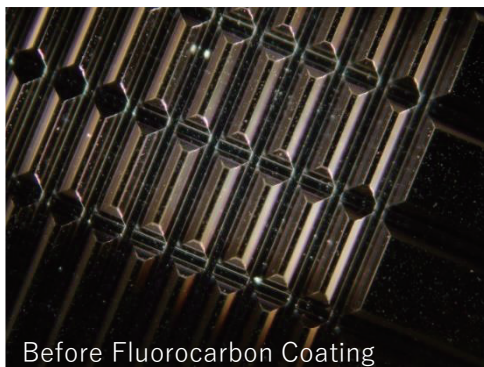


図 7. フルオロカーボン成膜前後の金型表面

4 結論

深溝をシェーパー加工するにあたり、1本あたりの溝を仕上げるために加工工程を3つに分けて合計400回のシェーパー加工を実施した結果、総加工時間は約34時間を要した。1回のZ軸方向の切込量を $2 \mu\text{m}$ 以下に抑えることで工具欠損のリスクを軽減できた。また、被削材を加工面の裏側からねじ止めすると引張応力により加工面にうねりが生じることが確認できた。

今回、検証した超精密加工技術を応用した金型による細胞培養基材へ微細構造を付与する手法は実際に細胞の培養実験を経て、その実用性が証明された^[2]。

参考文献

- [1] H. Miyoshi, J. Ju, SM. Lee, DJ. Cho, Y. Yamagata, T. Adachi “Control of highly migratory cells by microstructured surface based on transient change in cell behavior” *Biomaterials* 31(33) 8539-8545 (2010).
- [2] 米村重信 “上皮細胞が丸くなれる仕組み-細胞間接着装置におけるメカノトランスダクション-” 日本顕微鏡学会北海道支部講演会, (2016).

ガンマ線検出器 CATANA 架台の設計・製作

○千賀信幸^{A)}、大津秀暁^{A)}、四方瑞紀^{B)}、尾崎友志^{B)}、齋藤敦美^{B)}、斗米貴人^{B)}、

山田啓貴^{B)}、安田昌弘^{B)}、中村隆^{B)}、近藤洋介^{B)}、梶野泰宏^{B)C)}

^{A)}理化学研究所 仁科加速器研究センター

^{B)}東京工業大学 大学院理工学研究科

^{C)}立教大学 理学部物理学科

背景

不安定原子核とは、放射性同位体の事で約 3000 種類が確認されている。例えば、陽子数に対して中性子数が大幅に過剰な中性子過剰核や、中性子数に対して陽子数が過剰な陽子過剰核がある。これらの核種は α 壊変、 β 壊変、 γ 壊変、EC 壊変等によって、最終的には安定核種へととなる。したがって、安定核種の元となる不安定原子核を用いた研究は、原子核を結び付けている核力の解明や超新星爆発に伴う元素合成過程を知るうえで重要な情報を与えてくれると考えられている。中性子過剰核の測定では、安定核をターゲットとして不安定核ビームを使用した実験が一般的である。原子核の構造は、逆運動学から不変質量を求めることで研究を進めている。不変質量の導出には、反応により放出される荷電粒子や中性子に加え、ガンマ線エネルギーの測定も必要である。ガンマ線の測定方法は中性子過剰核を電氣的に励起させることで電気双極子振動を発生させ、そこから放出されるガンマ線を測定することで $E(\rho)$ を決定する。[1]また、中性子が崩壊して娘核が生成された場合は、娘核の終状態の捕捉が必要となる。そのためには、高い検出効率とエネルギー分解能を有する検出器の開発[2]が必要不可欠である。

1 架台の設計

CATANA (Cesium iodide Array for γ -ray Transitions in Atomic Nuclei at high isospin Asymmetry) とは、CsI(Na) 結晶を多数用いた高効率なガンマ線検出器である。同所には NaI(Ta) 結晶を用いたガンマ線検出器 DALI2[3]があるが、検出効率が低く大型であるため使いにくかった。また、DALI2 は読み出し回路用のラックを別途用意しなければならず、セットアップの変更が難しいという問題があった。そこで、新規に製作する CATANA はこれらの問題を解決するような構造が望まれた。

1.1 結晶の配置

CATANA は 200 個の CsI(Tl)結晶から構成される。結晶はターゲットから発せられたガンマ線を高効率で検出するために、大立体角を覆う構造となっている。表 1 に DALI2 と CATANA の概略を示す。

表 1. DALI2 と CATANA の比較

	DALI2	CATANA
結晶	NaI(Tl)	CsI(Na)
個数	160 個	200 個
検出効率@1MeV	~25%	~65%

CATANA は、CsI(Na)結晶がターゲットに対して大立体角 (4π) で覆う構造である。結晶の配置は、ビーム方向に対して 10 個並べた結晶を 1 結晶ユニットとして組立て、その結晶ユニットをビーム軸に対して 20 個回転複写した構造とした。結晶の形状は、完全な球体ではターゲットから見ると結晶間に隙間が発生する事から、原子核の反応過程を考慮して最適な形状になるよう設計されている。特に、ビーム上流側に設置される結晶は、ローレンツブーストやコンプトン散乱によるレンジを考慮して設計されている。

1結晶ユニットをビーム軸に対して 20個回転複写した結晶群

10個の結晶をビーム軸上に並べて 1結晶ユニットとする

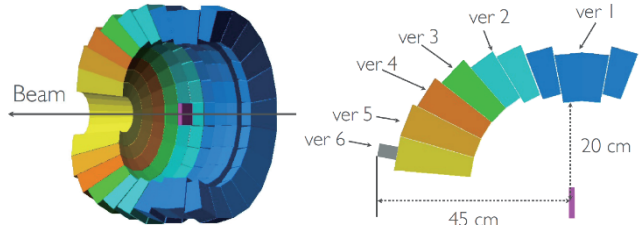


図 1. CATAN 結晶の配置

1.2 架台構造の決定

CATANA は仁科加速器研究センターの SAMURAI

スペクトロメーター上流側で使用することを想定して設計した。SAMURAI スペクトロメーターでは、逆運動学を用いた原子核反応実験が行われており、ビームタイムの効率的な運用から実験中にセットアップを変更することがある。また、セットアップ変更に限らず、検出器には光電子増倍管 (PMT) の故障や結晶の交換等の問題も多々ある。そこで、設計する CATANA 架台構造は、以下の条件により決定した。

- メンテナンス性を重視する。
- 読出し回路を内包し、セットアップ変更時に容易に対応できる構造とする。
- 薄く作ることで DALI2 では不可能だったセットアップにも対応する。

架台は上記条件を基に組立性やアライメント性を考慮して設計した。検討の結果、架台は下部と上部に分割し、上部は左右に開口する構造に決定した。

1.3 結晶ユニットの設計

設計はボトムアップ式で行った。まず初めに、シミュレーションにより求められた結晶の大きさに対する結晶ケースの設計を行った。CATANA に使用する結晶は、発光量、減衰時間、最大発光波長等によって CsI(Na)を選定した。CsI(Na)結晶は、潮解性があるため水分のない乾燥したケース内に格納する必要がある。設計した結晶ケースは、ガンマ線を効率的に通すアルミ 0.5mm 厚の板に石英製の窓を取付け、光電子増倍管の固定及び遮光を可能にする構造とした。なお、ケースは板金及び接着製とした。

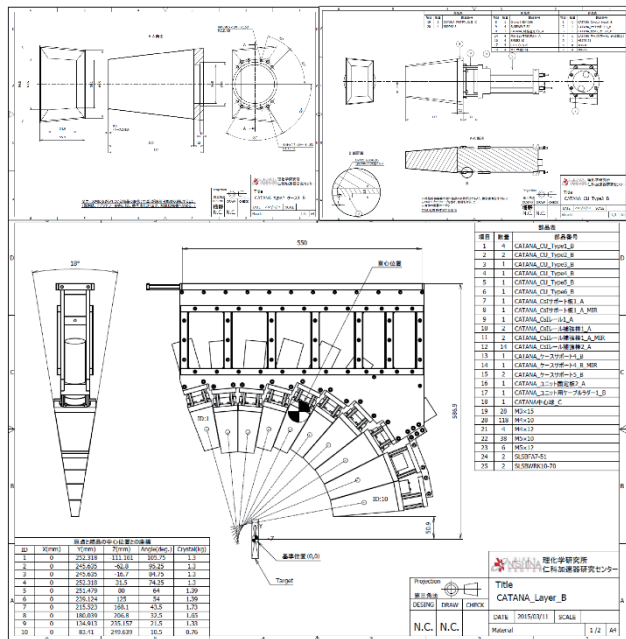


図2. 結晶ユニット

結晶と PMT との遮光方法は、PMT の支持具と結晶ケースの間にゴム板を挟むことで遮光した。PMT の

支持具と PMT 側面は黒色テープで巻くことで遮光した。PMT は読出し側をバネで押すことで常に光電面と結晶ケースの石英面が密着するように設計した。PMT を押すための治具は樹脂製にすることで PMT の絶縁も兼ねた。結晶ユニットは、PMT を取付けた状態の結晶をねじ止めして完成させる。なお、結晶ユニットは平らな面を下側にすることで自立し、メンテナンス性が向上するように設計した。結晶ユニットには多数の穴が開いており、PMT へのケーブル接続が容易に行える構造である。

1.4 上部架台の設計

上部架台とは、結晶ユニットを挿入するための構造体である。上部架台はメンテナンス性とコストを考慮して、結晶ユニットを抜き差しできる構造とした。一般的な抜き差しにはスライドレールやコロ等を使用するが、コストの観点から樹脂の摩擦によるスライド構造を採用することにした。具体的には、結晶ユニット上部の板をガイドと荷重を支える構造物として使用し、側面の板でトルクの発生を抑える構造とした。結晶ユニットのガイド部を受ける板は POM 製とした。こうする事で、適度な摩擦が生まれて結晶ユニット引き抜き時に思わぬ衝撃を無くす効果が期待できる。

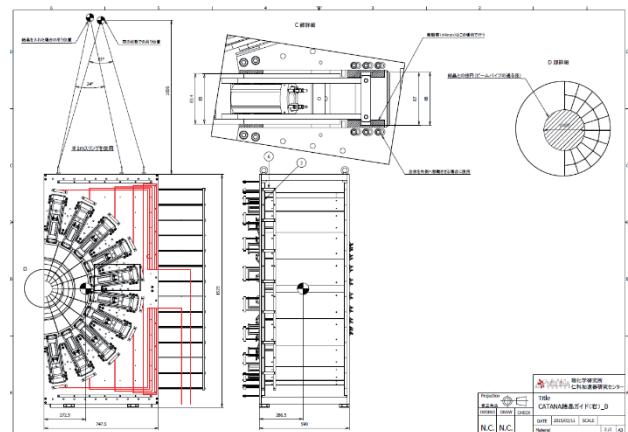


図3. 上部架台 (片側) の図面

上部架台は 1 つ約 27kg の結晶ユニットが 10 個取り付く構造なので、それなりの強度が必要である。上部架台の強度は、シミュレーションによる構造計算によって決定した。設計条件は、

- 安全係数は 3 以上。
- 各結晶ユニットのクリアランスは 1.5mm としていることから、全体の変形量は 1.5mm 以下。

とした。条件を基に設計を進めた結果、上部架台は A2017 の t15mm 板を使用し、補強用の角材を入れる事で強度の条件を十分に達成することができた。架台表面は磁気シールドの取付や将来の拡張に備え

て多数のネジ穴持つ構造とした。

1.5 下部架台の設計

下部架台は、結晶ユニットが搭載される上部架台の下に設置され、下記の機能を有するように設計した。

- 上部架台を乗せて可動できる構造とする。
- 読出し回路が取り付けられる構造とする。
- 高さの違うビームラインに対応できる構造とする。
- クレーンで全体を吊れるようにする。

設計は、使用する材料の選定から行った。材料は電磁石の近くで使用するため SUS304 とした。形状は想定荷重と加工性を考慮して等辺アングル 50×t6mm を使用することにした。下部架台の大きさは、様々な実験に対応するために可能な限りビーム方向に対して薄く、かつ上部架台のメンテナンス性を考慮して決定した。図 4 (上) は設計した下部架台の図面である。

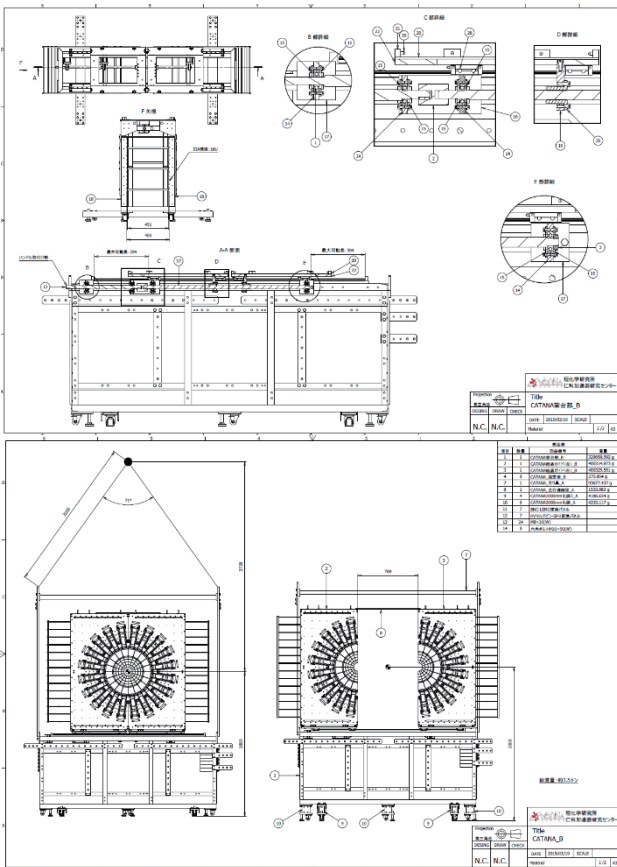


図 4. 下部架台 (上) と全体図 (下)

上部架台は、LM ガイドと左右ねじを使用して左右対称に可動し約 750mm の隙間を作り出すことが可能である。架台の中に人が入れる隙間を作り出した事で、メンテナンス性の向上が期待できる。高さの違うビームラインに対しては、転倒防止用の脚及びフ

ットジャッキ部にスペーサーを挿入することで対応した。また、CATANA 全体をクレーンで吊る場合に使用するアームは、下部架台に取り付ける事で結晶ユニットへの変形等の影響を無くす構造とした。読出し回路は、下部架台に開けた EIA 規格のネジ穴を使用して架台内に取り付ける。読出しチャンネルが多数あるために取り付けられる回路数は限られているが、一度付けたら外さない信号用 Delay 及び高電圧電源等の回路を優先して取付けることとした。

1.6 上部架台と下部架台を連結して完成

CATANA の架台は別々に組立を行い最後に上部架台と下部架台を連結させて完成させた。連結時は水平や開閉機構の調整も行った。結晶ユニットは、架台が完成した後に挿入した。今回は予算の都合により CsI(Na)結晶が当初設計数量の半分 (100 個) しか購入できなかったため、若干寂しい風景となってしまったが、無事に結晶ユニットを挿入し完成に至った。

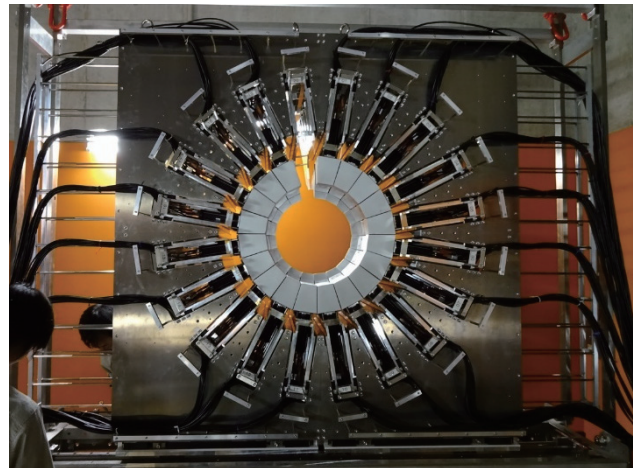


図 5. 完成した CATANA 架台

2 磁気シールドの設計

2.1 磁気シールド設計とゲイン確認

当初、研究者から CATANA には磁気シールドが不要と伝えられていたが実際に測定したところ、特定の方向でゲインが下がる現象が確認された。ゲインが変化した場合は PMT 印加電圧の調整やアンプで増幅すればよいが、今回の変化は調整範囲を超えており、磁気シールドが必要となった。磁気シールドの設計は、今後想定される実験での CATANA の位置及び最大磁場を基にシミュレーションによって行った。シミュレーターには Cobham 社の TOSCA を使用した。シミュレーション条件は、SAMURAI の中心磁場を 2.9 [T] として、SAMURAI-CATANA 中心間距離を

3644mm とした。シミュレーション結果から、CATANA には上から下に抜ける磁束があることが分かった。これは、return ヨーク（電磁鉄鋼 (SUY-2)）から漏れ出た磁束であることも分かった。使用している PMT には円筒状の磁気シールドが付いているが、筒の中に入り込む磁束に対してはシールド出来ない。そのため、磁場の影響を大きく受ける光電面が磁場に対して垂直にある場所のゲインが極端に下がる。

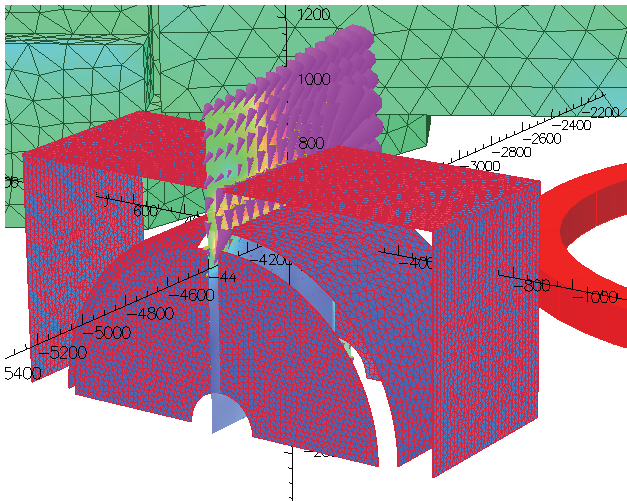


図 6. TOSCA による磁場シミュレーション

この結果から、磁気シールドは CATANA 結晶ユニット内に入り込まないように結晶ユニット全体を包み込むような円筒形状のシールドが良い。一般的な磁気シールドの材質は鉄 (SS400) であるが初期透磁率が小さいため数ガウス程度の磁場に対してはあまり効果が期待できない。そこで、初期透磁率の非常に大きいパーマロイ (PC) を円筒形状の内側に取り付けることにした。

磁気回路の性質上、流入する磁束の絶対量を減らすことも重要である。この考えを基にして磁気シールドを設計して、シミュレーションにて確認した。その結果、シミュレーション上では光電面付近が 1 [Gauss] 程度となり、ゲインの変化がほぼ無くなると推察できた。そこで、実際に磁気シールドを製作して組立て及び励磁中でのテストを行った。その結果、ゲインの変動及び分解能は 40% 程度改善できたが、依然として大きい事から、磁気シールドを改良する事とした。

2.2 磁気シールドの改良設計

磁気シールドを改良するにあたり、なぜシールド効果が薄かったのかを検証した。検証は、

- 想定した磁気回路は正しいか。
- 材料物性値は正しいか。
- 漏れ磁場の見積もり。

- 見落としはないか。

について行った。磁気回路については、閉回路となっているため電磁気学的には漏れ磁場は鉄の透磁率のみで決定される。従って、磁気回路としては正しい構造である。一方で材料物性についてだが、シミュレーション上の物性値は Default (純鉄) としているが、実際に使用した材質は SS400 であった。また、鉄板の厚さはシミュレーション上では 3mm だったが、取扱性 (特に重量) の観点から 1.6mm に変更してしまった。更に、シミュレーション結果から上部架台の左右に設置した鉄板内の磁束密度がほぼ飽和 (SS400 で 0.3 [T]) していることも分かった。鉄板内の磁束密度が飽和すると、鉄板では吸収できなくなるため漏れ磁場の原因になる。そこで、上部架台の左右に設置した鉄板を二重化することで問題の解決を図った。

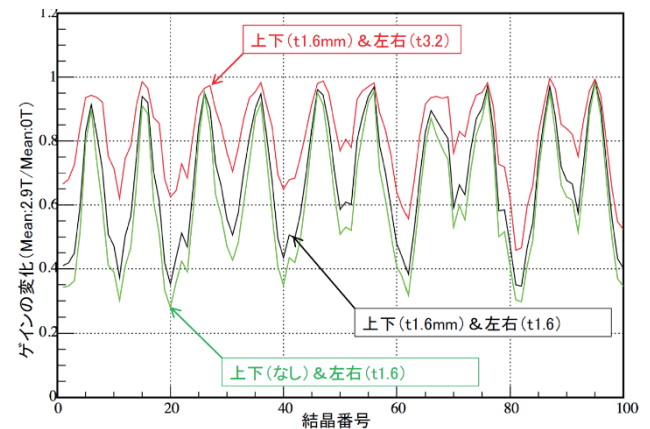


図 7. 磁気シールドの配置によるゲインの変化

図 7 の縦軸はサムライ中心磁場を 2.9 [T] とした時のゲインの変化率 (実測値) である。横軸は上流側上部の結晶を時計回りに番号付けしたものである。実測したゲインの変化から、漏れ磁場はシミュレーション同様に上から下に通る磁束が存在することが分かった。磁気シールドの改良設計は、磁束による PMT ゲインの変化を半分以上に収める事を目標に行った。設計の結果、容易に取り付ける事が可能でかつシールドの効果が高い構造を考案し、現在組立中である。

2.3 吊り具の改良

CATANA は限られた時間内にセットアップ変更ができるよう、全体をクレーンで吊る構造を採用した。吊り治具は、下部架台の四隅に SUS304 製の長い平板を設けてその先端を吊る構造である (図 4 を参照)。吊り具を取り付けて実際に吊ったところ、製作した吊り具はシャックル用の穴が小さいためにアイ部が通らず、平板に負荷がかかる事が判明した。また、CATANA の設置予定場所付近では揚程が低く、使用

するワイヤーロープの角度を急にする必要があった。そこで、理想的に吊れるよう、吊り具を改良する事にした。

新規に考案した吊り具の構造は、上部架台の上に設置した水平の梁に穴を開けてその穴にシャックルのボルトを通して吊ることにした。穴の位置は構造計算により最も安全率の高い所とした。改良した吊り治具を使用した結果、梁や平板の撓みは確認されず、揚程の問題もクリアした。

3 拡張性

CATANA は、CsI(Na)結晶が合計 200 個取り付く構造であるが、現在は予算の関係で 100 個となっている。そこで、設計したエネルギー分解能に近づけるためには所内にある既存の検出器を流用して検出効率を補う必要がある。そこで、LaBr3 結晶を取り付ける穴を予め用意した。下部架台についても、予め EIA 規格の回路が追加で取付け出来るよう設計していたことから、限られた時間の中でスムーズに LaBr3 結晶を取り付ける事が出来た。その他として、上部架台の開閉機構の変更も出来るようあらかじめ取付穴を用意した。

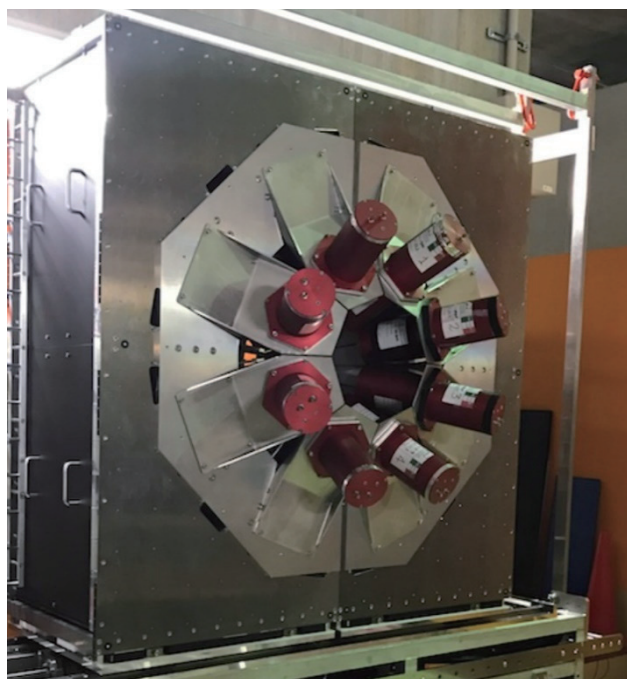


図 8. LaBr3 結晶を取付けた様子

4 今後の展望

CATANA は 2017 年春にサムライスペクトロメータを用いた実験に使用され、問題なく動作することが確認できた。

CATANA はガンマ線専用の検出器として開発を行ったが、今後は結晶数を増やして設計値の性能を発揮できるようにしたい。また、その形状や検出効率を活かして所内の様々な焦点面で使用してもらいたい。

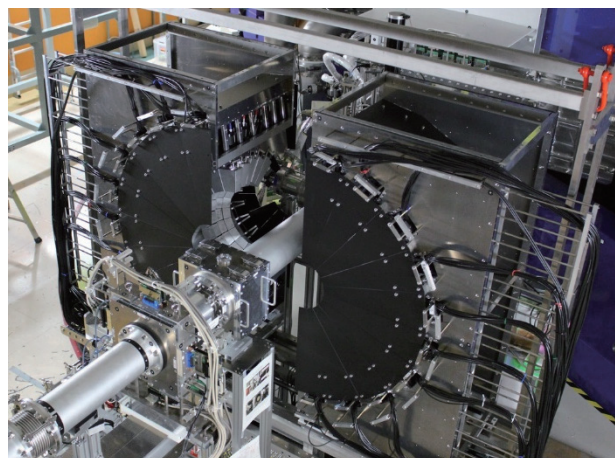


図 9. 実験に使用されている CATANA の写真

5 参考文献

- [1] Y. Togano et al. RIKEN APR 48, 207(2015)
- [2] N. Chiga et al. RIKEN APR 49, 166(2016)

貫通口処理と遮蔽対策

○渋谷真之^{A)}、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

1 重水素実験と中性子遮蔽

将来の核融合発電所を実現するためには、温度が高く、高性能のプラズマの性質を詳しく調べ、理解する必要がある。水素に代わって重水素を用いるとプラズマの性能は向上することがトカマク型装置の実験結果として知られており、同位体効果と呼ばれている。同位体効果は理論的な予測ではプラズマの性能が悪くなると予想されており、世界最大級のヘリカル型装置である大型ヘリカル装置(LHD)で、その効果を検証することは非常に意味がある。LHDでは、同位体効果を含めた核融合発電の実現に向けた学術的な研究をさらに進め、核融合発電所の設計を可能にする基礎的なデータを取得するために、2017年3月から重水素を用いたプラズマ実験を開始した。

重水素実験では重水素ガスのごく一部が核融合反応を起こして、放射線である中性子が発生するが、これらは大型ヘリカル実験棟本体室を囲む2m厚のコンクリート壁で遮蔽できる。しかしながら、本体室地下には配管等のための貫通口が開けてあり、中性子が漏洩する懸念があるため、重水素実験を実施するための整備として、貫通口の閉止処理を重水素実験開始前に実施した。

2 大型ヘリカル実験棟の概要

大型ヘリカル実験棟は、地下2階、地上2階の鉄筋コンクリート造りである。大型ヘリカル実験棟の主要区画は、本体室とその地下に位置する本体室地下であり、それらの周囲には、計測機器室、加熱装置室、ヘリウム液化冷凍機室、コイル電源室、排気ガス処理装置室等が配置されている。LHDは本体室に設置されていて、プラズマ実験中には、本体室、本体室地下および加熱トレンチには入室できない。LHDの制御室は、大型ヘリカル実験棟の南に位置する制御棟に設置されている。LHDの運転に必要な電力や冷却水

等は、大型ヘリカル実験棟周辺の建屋から地下トレンチを経由して、ケーブルや配管類によって供給される。



図1. 大型ヘリカル実験棟

3 大型ヘリカル実験棟の構造

大型ヘリカル実験棟本体室は、コンクリート（壁2m厚、床2m厚、天井1.3m厚）で囲まれている。本体室地下は、LHDの真下に位置し、隣接する部屋との間には、2m厚のコンクリート壁がある。中性子線のストリーミングがないように、本体室の側壁には貫通口がなく、LHDにつながる配管は本体室地下の貫通口を経由して隣室に至る。搬入用と人の出入り用の遮蔽扉があるが、それらは、メンテナンスの為に必要な場合を除き、常時閉めている。



図2. 大型ヘリカル実験棟本体室

4 管理区域の概要

4.1 管理区域

重水素実験に伴い中性子線および γ 線が発生するため、大型ヘリカル実験棟内に放射線障害防止法及びその関連法令（以下、「法令」とよぶ）に基づき管理区域が設定された。図3、図4、図5に大型ヘリカル実験棟平面図を示す。管理区域境界を赤線で示す。管理区域境界に対しては、安全管理計画[1]に従い、法令に基づき $1.3 \text{ mSv}/3$ ヶ月の管理値を設定している。中性子は一回の実験あたり、最大で 5.7×10^{16} 個の発生を予定しており、年間最大発生量 2.1×10^{19} 個を管理値としている。

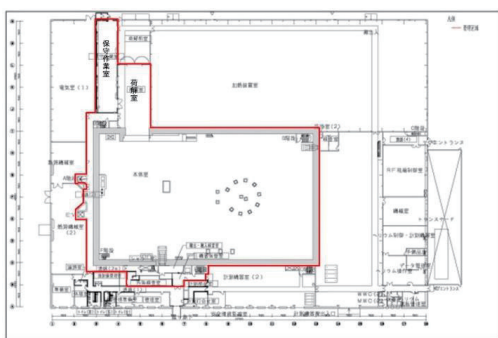


図3. 大型ヘリカル実験棟1階平面図

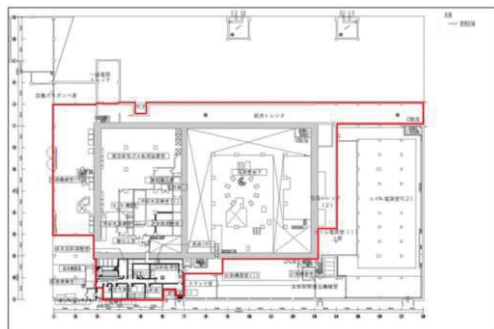


図4. 大型ヘリカル実験棟地下1階平面図

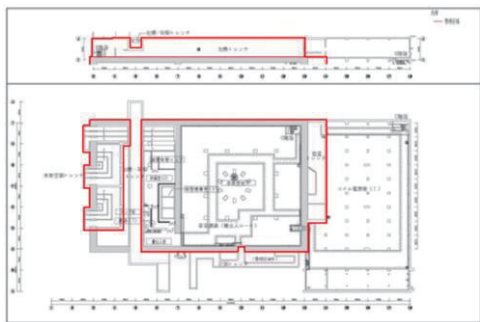


図5. 大型ヘリカル実験棟地下2階平面図

4.2 壁による遮蔽

本体室の壁コンクリートは2 m厚であり、天井の厚みは1.3 mである。さらに、地上部分の壁に貫通口を持たない構造となっているため、重水素実験による敷地境界での線量は年間で約 $2 \mu\text{Sv}$ 程度以下と計算されている。壁により、中性子は1千万分の1程度に、ガンマ線は3万分の1程度に減衰している。

5 貫通口の閉止

5.1 貫通口と遮蔽計算

本体室地下にはケーブルや冷却水配管等のための多数の貫通口が設けられていた。図6、図7に本体室地下壁面の貫通口立面図を示す。本体室地下に隣接する部屋では、貫通口からの中性子ストリーミングによる線量増加があるので、そこでの作業に支障のない線量になるように対策する必要があった。東西南北それぞれの方向に対して、まず2次元Sn法輸送計算コードDORTで本体室地下壁面の実効線量を計算し、その値を基に貫通口の閉止したときの形状に応じて管理区域境界の線量を計算した。

管理区域に関する線量限度に問題がないことを確認した後、以下のように貫通口の閉止処理を行った。

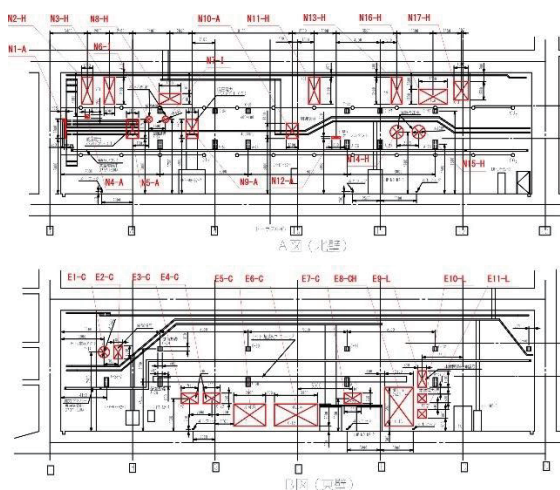


図6. 本体室地下壁面（北、東）の貫通口立面図

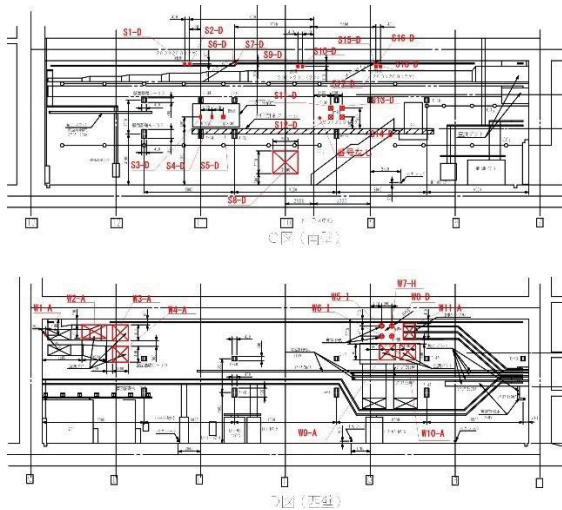


図 7. 本体室地下壁面（南、西）の貫通口立面図

5.2 北面_加熱トレンチ

加熱トレンチとの間には、NBI 高圧ケーブルダクトやECH 導波管が貫通している大きな貫通口が複数あり、隙間をポリエチレン板で充填した。また、NBI 高圧ケーブルダクトが貫通している加熱トレンチと加熱装置室の間の 0.5m 厚の床貫通口も、ポリエチレンペレットで充填した。

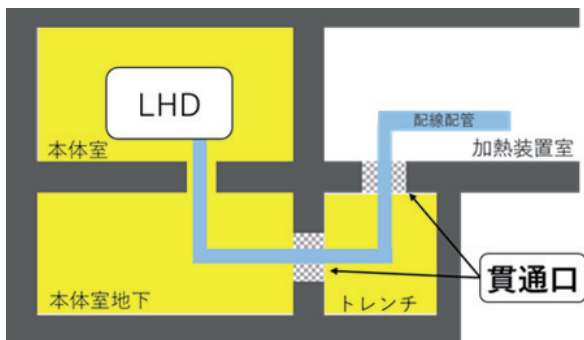


図 8. 貫通口の概念図

5.3 東面_低温トレンチ

低温トレンチとの間には、超電導バスライン、ヘリウム液化冷凍機配管やケーブルダクト等が貫通している大きな貫通口が複数あった。配管等の周囲をポリエチレンで囲い、大きく開いた空間はコンクリートを充填した。低温トレンチとコイル電源室間の 0.5 m 厚の壁も同様に閉止し、一部はさらに 0.5m 厚のコンクリート遮蔽壁を追加した。図 9 に閉止前の貫通口と閉止の概念図を示す。

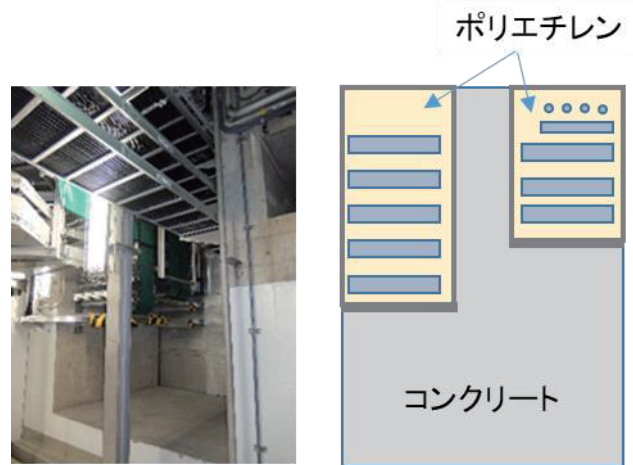


図 9. 閉止前の貫通口と閉止の概念図

5.4 南面_計測機器室

計測機器室との間に、計測用光ファイバやレーザー光路が複数の貫通口に貫通していた。隙間をポリエチレンで埋め、本体地下室でクランクになるようにポリエチレン板を設置した。

5.5 西面_排気ガス処理装置室

空調配管が多数通っているが、排気ガス処理装置室等を重水素実験中は入室禁止とし、入退管理を行うことで、追加の遮蔽を行う必要がなかった。

6 貫通口閉止作業の一例

本体室地下北面と加熱トレンチ間の壁貫通口および加熱装置室と加熱トレンチ間の床貫通口の閉止処理の一例を記す。

加熱トレンチとの貫通口には高電圧のケーブルダクトが貫通していて、加熱トレンチを経由して加熱装置室へ至る。直径 0.85m の高電圧ケーブルダクト 1 本が、大きさ 2.5m×1m の貫通口 1 つを通過していて、これが 3 本ある。高電圧ケーブルダクト表面は、グラウンドと絶縁する必要があり、遮蔽材として絶縁体の高密度ポリエチレンを用いた。

本体室地下壁と加熱トレンチ壁間の横穴の貫通口は、高密度ポリエチレン板を敷き詰めた。隙間なく充填できるように、現場でポリエチレン板の加工を行った。高密度ポリエチレン板が入らないようなわずかな隙間には、高密度ポリエチレンペレットを充填した。その後、ステンレス板材で蓋をし、蓋とケーブル

ルダクト等との隙間は耐火性シーラントで気密処理を行った。



図 10. ポリエチレン板での閉止作業

加熱装置室床と加熱トレンチ天井間の縦穴の貫通口は、まずステンレス板を加熱トレンチ天井にアンカー固定して貫通口の底板とし、溝形鋼で補強を施した。ケーブルダクト等との隙間を耐火性シーラントで気密処理した後、上からポリエチレンペレットを充填して最後にステンレス板で蓋をした。



図 11. ポリエチレンペレット充填と板の加工

7 重水素実験での遮蔽結果

平成 29 年 3 月より開始された重水素実験では、最初の 2 週間で 2m コンクリート遮蔽壁の性能検査が行われた。2 週間の実験で発生した中性子の積算量は 8.5×10^{16} 個であったが、遮蔽壁の外に複数設置したルミネスバッジによる放射線量の測定結果はすべて検出下限値 (0.01mSv) 以下であり、また放射線モニタリングシステム (RMSAFE) による測定でも実験に起因する放射線量は検出されなかった。これらに

より、2m コンクリート壁の放射線遮蔽性能に問題ないことが確認され、放射線障害防止法に基づく LHD の「放射線発生装置 (プラズマ発生装置) に係る施設検査」に合格した。

重水素プラズマ実験は平成 29 年 3 月から 7 月の約 4 ヶ月間行われたが、その期間中に測定された放射線量はすべて自然放射線の変動範囲内であった。図 12 に RMSAFE による環境放射線量の監視結果を示す。上段はガンマ線、下段は中性子線の監視結果を示す。ガンマ線の監視結果では、降水に伴う天然に存在する放射性同位元素であるラドンに起因するバックグラウンドレベルの変動が見られるが、重水素実験に起因する中性子及びガンマ線の観測結果の変動は観測されていない。よって、大型ヘリカル実験棟本体室・本体室地下の遮蔽性能に問題が無いことが確認できた。

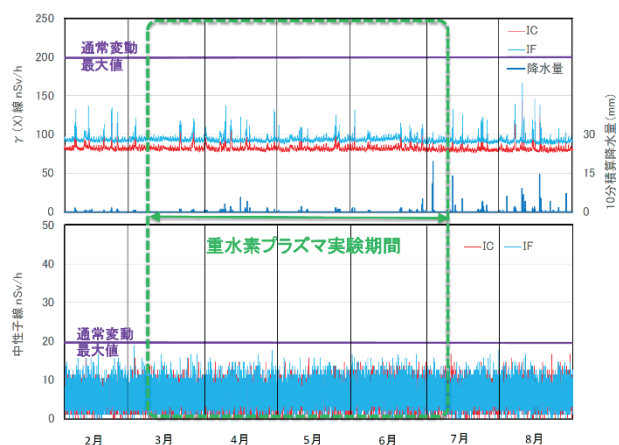


図 12. RMSAFE による環境放射線量の監視結果

参考文献

- [1] “大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画<改訂版>”、平成 24 年 2 月
- [2] “大型ヘリカル装置 (LHD) における重水素実験の実施結果等について”、平成 29 年 12 月

LHD 冷却水系の重水素実験対策

○林 浩己、小林策治、重水素実験推進支援グループ

核融合科学研究所 技術部

概要

平成 29 年 2 月から行われてきた、大型ヘリカル装置 (LHD) の第 19 サイクル実験は、軽水素ガスを用いた実験からスタートし、3 月 7 日に重水素ガスを用いた実験 (重水素実験) に移行、7 月 11 日にはガスを再び軽水素に戻し、8 月 3 日に予定通り終了した。技術部では、重水素実験を開始するまでの準備を、最重要課題の一つとして LHD 重水素実験期に使用する冷却水系の最適化を行った。

重水素実験の開始に伴い大型ヘリカル実験棟は、管理区域と非管理区域に分けられ、中性子場と定義された本体室及び本体室地下は、放射化区域となり、その他の部屋は、非放射化区域に区分された。重水素放電時に放射化区域に設置されていた機器は、放射化物として扱われることになる。このことを背景に、既存の LHD 冷却水装置を、管理区域での使用において最適化されたシステムへと移行しておく必要があった。さらに放射線によるテフロンシールの劣化が懸案事項として浮上し、その対策を立てることとなった。本報告では、具体的にどのような対策を行ったかを報告する。

1 LHD 冷却水系の概要

LHD の冷却水系は、大きく四つの系統に分けられる。表 1 に重水素実験に最適化した後の系統を示す。冷却水装置棟 I と II (冷却水装置棟側: 一次冷却水とする) は、クーリングタワーを備え、LHD 実験で生じた熱を放出する設備 (建屋) である。冷却水装置棟 I では、主に LHD 本体系 (1 系、4 系) の熱を処理し、1 系の冷却水装置は、冷却能力約 4.4MW・送水量約 350 m³/h、4 系の冷却水装置は、冷却能力約 10.8 MW・送水量約 1300 m³/h の性能がある。冷却水装置棟 II は、主にプラズマ加熱装置の熱を処理し、2 系・3 系合わせての冷却能力は、7.5 MW の能力で、2 系の冷却水装置は、送水量約 700 m³/h、3 系の冷却水装置は、送水量約 900 m³/h の性能がある。LHD の実験期間中は、これら全ての冷却水装置を運転することで実験を遂行・維持する。

2 具体的な重水素実験対策

2.1 冷却水装置の系統の最適化

LHD 冷却水系の重水素実験開始前の系統を図 1 に示す。本体室・本体室地下は、重水素実験開始から、

表 1. LHD における冷却水系

建屋	系統	主な使用用途	冷却水使用区域	被冷却機器
冷却水装置棟 I	1 系	実験設備の運転・維持	管理区域	真空排気装置 排気ガス処理システム 計測機器 プラズマ真空容器 常伝導コイル装置
冷却水装置棟 II	2 系	プラズマ加熱機器	管理区域	中性粒子ビーム入射加熱装置 (NBI) 電子サイクロトロン共鳴加熱装置 (ECH) イオンサイクロトロン共鳴加熱装置 (ICRF)
	3 系	プラズマ加熱機器	管理区域外	ECH 用発振器 ICRF 用発振器
冷却水装置棟 I	4 系	超伝導コイルの運転・維持	管理区域外	ヘリウム液化冷凍機システム 超伝導コイル電源

図2に示す管理区域（赤線内枠）となり、かつ放射化区域として設定された。そこに設置されている実験機器に供給している冷却水は、冷却水装置棟Ⅰと冷却水装置棟Ⅱの冷却水装置（一次冷却水）から直接冷却水が供給されていた。図1の赤の点線の1-b系と2系である。

重水素実験を行うにあたり、管理区域と非管理区域の明確化に伴い、一次冷却水は、冷却水装置棟から本体室地下に設置された熱交換器に送られ、冷却水装置棟に戻る系統に統一した。最適化後の系統図を図2に示す。最適化により新たに設置した冷却水装置（システム）を図2の青線に示す。一次冷却水である1-a系は、1-b系と冷却水装置を統合し、本体室地下に熱交換器を追加で設置した。LHD本体系の実験機器は、その熱交換器を介して整備され、中間ステー

ジ系冷却水システム（本体室専用）、地下室機器系冷却水システム（本体室地下専用）を設置した。本体室で使用されるICRF系は、3系の冷却水装置から分離し、既設のNBI・ECH系の冷却水装置に熱交換器を挿入（配置）してICRF系冷却水システムを設置した。これで管理区域内の冷却水装置は、管理区域内で閉じた系統になった。これにより一次側冷却水の配管内と熱交換器一次側は、管理区域外として定義することができた。

これらの冷却水装置を設計するにおいては、以下の点を考えて設計する必要（改良）もあった。圧力・流量の要求が各実験機器において異なること、各実験機器の設置高低差が本体室地下とLHD上部まで約24 mあること、電気導電率が十分に低い値を要求する機器とそうでない機器があること、各実験機器の

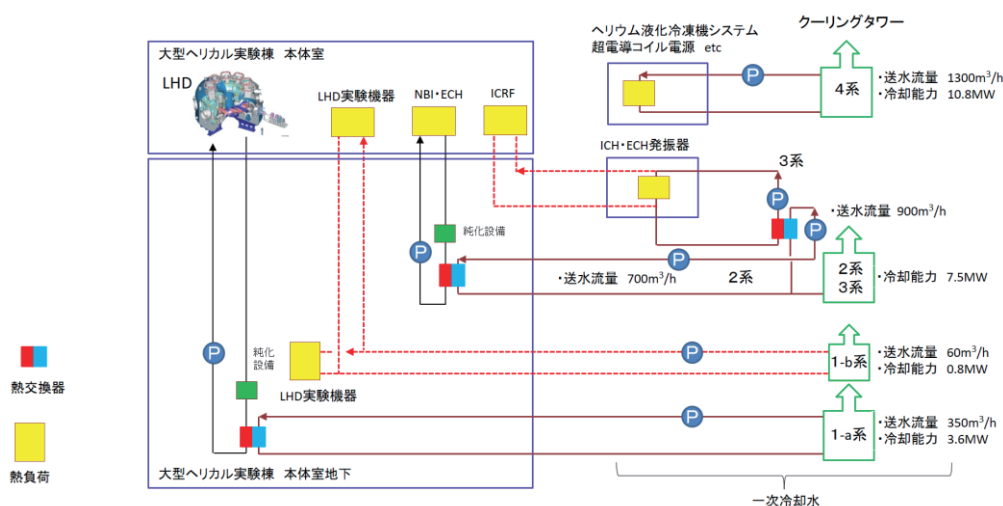


図1 冷却水系の重水素実験開始前の系統図

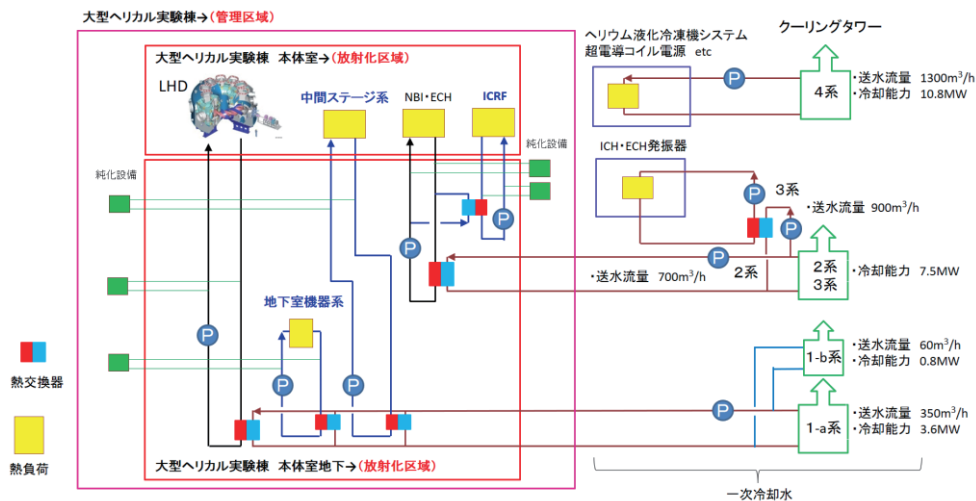


図2 冷却水系の重水素実験後の系統図

運転時間の違いに対応できること、などである。これらのことを満足するため、あえて三基の冷却水装置を整備し、高低差も考慮した（加圧式）冷却水システムも採用した。

これらの最適化により、重水素実験開始からは、管理区域内外の冷却水装置の点検が系統ごとに行うことが可能になった。冷却水の分析及び排水処理も系統ごとに分けてできるようになった。さらに実験機器の運転時間の違いにも対応することが容易できるようになった。

2.2 純化設備の移設

管理区域内で使用する（循環する）冷却水装置は、純化処理しないと品質が下がる。品質の劣化は、水の汚れに伴う電気導電率の上昇（絶縁劣化）などが起きるので、冷却水装置ごとに純化設備を備えている。純化設備には、イオン交換樹脂とフィルターが必ず備わっており、系統の使用用途により殺菌灯や脱酸素装置も備わった冷却水装置もある。

イオン交換樹脂は、劣化したら1年～2年、フィルターは、点検も兼ねて毎年交換する。図1に示すように重水素実験開始前、純化設備（緑の四角）は、放射化区域となる本体室地下に設置されていた。重水素実験時に放射化区域である本体室及び本体室地下に設置されていた機器は非管理区域に持ち出せないことから、劣化による交換が必要なイオン交換樹脂やフィルター類については、非放射化区域に移設する必要があった。新たに設置された三基の冷却水シ



図3 移設後の純化設備

ステムについても非放射化区域に純化設備を設置する必要があった。よって図3に示すように純化設備を非放射化区域の冷却水設備室などに移設または、新規で設置した（図2の緑線に示す）。非放射化区域でないことから、純化装置の点検（イオン交換樹脂の交換、フィルター交換）が容易になった。点検時、放射化物として扱わなくていいことから、部分的に汚染検査後一般廃棄できることで、廃棄物の減少につながり経費を削減することができた。

2.3 テフロン材のシール交換

重水素実験の開始で、冷却水対策は、非常に重要な事項となる。それは、LHD周辺の冷却水配管系（真空容器・ダイバータ加熱冷却装置）は、テフロン材（PTFE）のシールを使用していたことによる。テフロンは、通常使用では、漏れ難く、扱いが容易であることから多く使用されているが、他のシール材（フッ素、EPDM、黒鉛）と比較すると耐放射線に弱いことから将来劣化が予想された。

具体的にテフロン材が使用されている箇所（LHD

表2 テフロンシール交換リスト

バルブ口径及びバルブの種類	個数
8A～25A ニードルバルブ	94
20A グローブバルブ	55
40A ボールバルブ	20
80A～200A グローブバルブ	6
150A ゲートバルブ	1

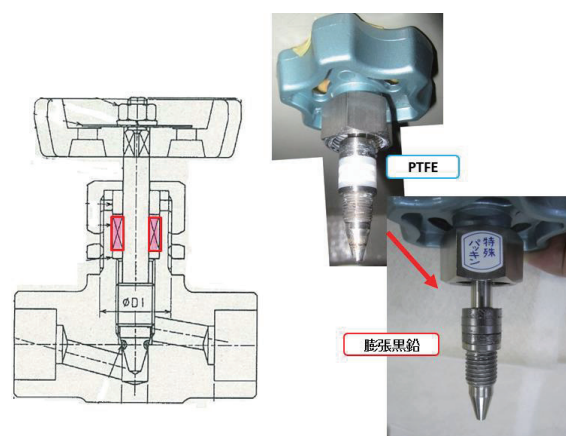


図4 冷却水バルブ交換の一例
(ニードルバルブのグランドパッキン)

周辺のみ)は、フランジガスケット、バルブのシール部及びグランドパッキン部である。フランジ部のガスケットは、ノンアスベスト系のジョイントシートに交換した。ボールバルブは、内部構造のシール部にテフロンが使用されているので、バルブの種類をゲート弁に変更した。全てのバルブのグランドパッキンについても耐放射線に強い膨張黒鉛系の材質へ交換した。表2に交換したバルブの数を示す。図4は、バルブのグランドパッキンの一例写真である。左上が交換前のテフロンシール、左下は交換後の膨張黒鉛の材料を使用したものである。テフロンシールを交換した効果については、即結果をみることはできないが、テフロンの劣化に伴う漏水のおそれに対して最善の対策を行うことができた。

3 最後に

第19サイクルの重水素実験を行った後、第20サイクルに向けて点検を行っている。純化設備の移設等を含む冷却水システムの最適化を行ったことにより、先に記述した通り冷却水区分が明確化され、点検などの作業がし易くなった。

LHD周辺のテフロンシールの交換を重水素実験開始前までに行ったが、他にも漏水対策を行っている。具体的には、冷却水システムを点検する、旧品を新品に交換する、接手部等に漏水センサーを設置するなどの対策を行っている。

冷却水装置は、停止した場合、実験ができなくなることから、LHD実験にとって絶対必要な装置である。技術部として、長期にわたりLHD実験が継続できるよう、冷却水装置の改良の提案、確実な点検を行うことで貢献している。

排気ガス処理システムの設置と運転監視

○加藤ひろみ^{A)}、鈴木直之^{A)}、田中将裕^{B)}、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

はじめに

大型ヘリカル装置 (Large Helical Device :LHD) では平成 29 年 3 月より重水素実験を開始した。重水素実験では僅かではあるが水素の放射性同位体であるトリチウムが発生する。我々はそれを回収除去するために排気ガス処理システムの設計、建設および運用を行ってきた。

発生したトリチウムを漏洩することなく、排気ガス処理システムに接続されるよう室外排気配管 (実験ガス系排気配管・パージ空気系排気配管) も同時に整備された^[1]。

1 装置の概要^[2]

排気ガス処理システムは重水素実験で発生したトリチウムを回収する装置である。排気ガス処理シ

テムは大きく分けて、モレキュラーシーブ (Molecular Sieve:MS) 型処理装置と高分子膜 (Polymer Membrane :PM) 型処理装置で構成されている。どちらもトリチウムを軽水素や重水素といった他の水素同位体を含めて水の形で回収するが違いは対象とする排気ガスである。

1.1 モレキュラーシーブ (MS) 型処理装置

MS 型処理装置は、LHD と周辺機器からの排気ガスに含まれる水素・重水素およびトリチウムを酸化し、水の化学形態で吸着回収する。

MS 型処理装置は連続で運転される主系統と排気ガスを圧縮・貯留する貯留系統、モレキュラーシーブに吸着した水を回収する再生系統などから構成される。MS 型処理装置の系統図を図 1 に示す。

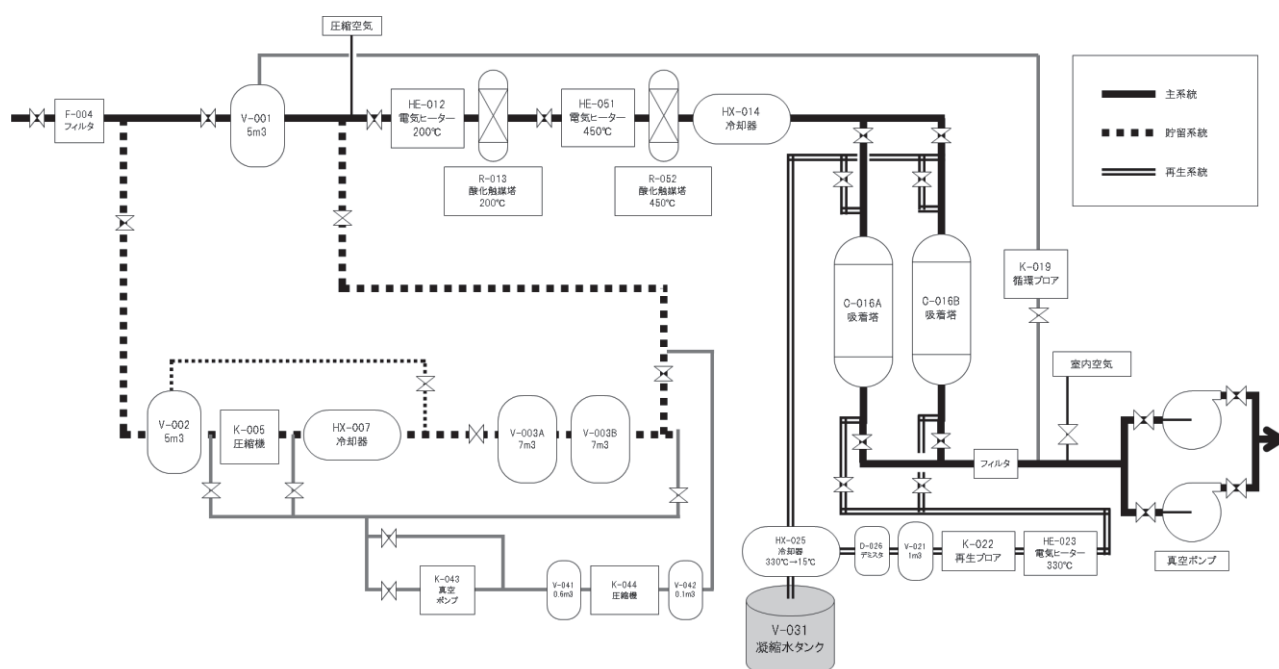


図 1. MS 型処理装置系統図

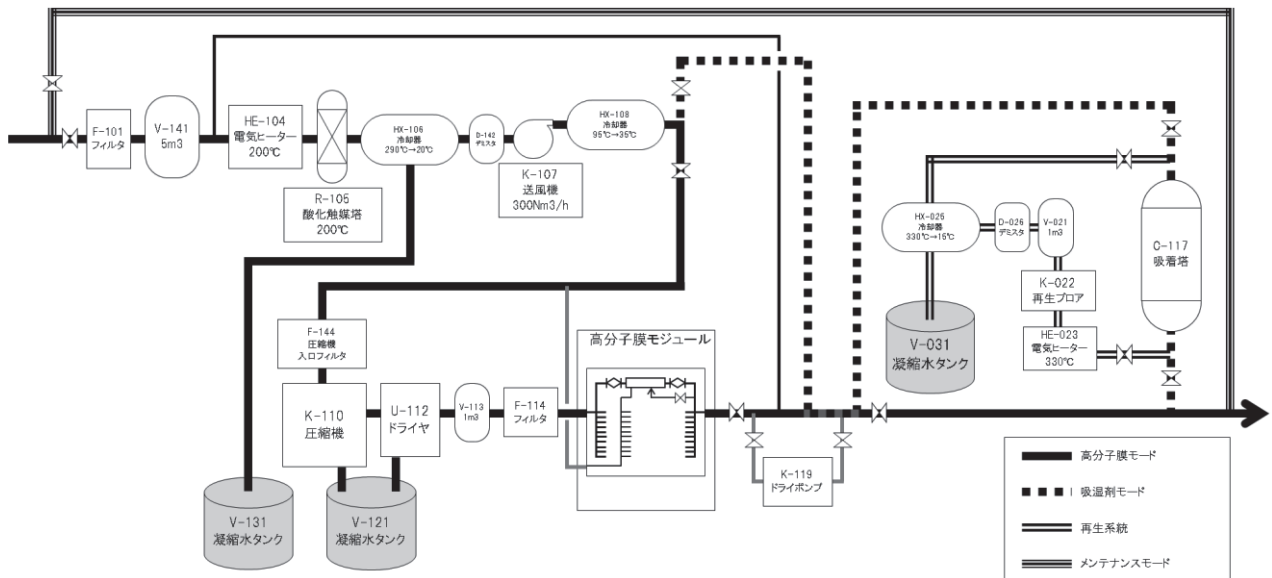


図 2. PM 型処理装置系統図

MS 型処理装置に受け入れた排気ガスは触媒酸化をするのに必要な酸素を供給し処理されていく。処理方法は、200℃に加熱されている酸化触媒塔（白金触媒を充填）を通り水素ガスを水に転換する。続いて 450℃に加熱されている酸化触媒塔（パラジウム触媒を充填）を通り炭化水素を水に転換して水分を吸着塔（モレキュラーシーブを充填）に吸着させる。

吸着塔に一定量の水分を吸着した後、加熱してトリチウム水を回収する。

通常は主システムを用いて処理運転を行うが、中性粒子入射装置（Neutral Beam Injection :NBI）や真空排気装置などに設置されているクライオポンプ再生時には大量の水素が排気されるため貯留システムに切り替えてバッファタンクに排気ガスを受け入れる。貯留した排気ガスは、水素濃度が 1%を超えないように制御しながら主システムへ導入して処理を行う。

再生システムでは水分を含んだ吸着塔を 360℃まで加熱してトリチウム水を脱着する。脱着した水蒸気は、ブローアで空気の流れを作り下流側で冷却することにより凝縮水として回収することができる。回収された水は凝縮水タンクに溜められる。

1.2 高分子膜（PM）型処理装置

PM 型処理装置は、LHD や NBI のメンテナンス期間の真空容器内パージガス、真空容器粗引き排気ガスに含まれるトリチウムを酸化し、水の化学形態で

回収する。

PM 型処理装置は高分子膜モードと吸湿剤モード、メンテナンスモードから構成される。PM 型処理装置の系統図を図 2 に示す。

PM 型処理装置に受け入れた排気ガスは、200℃で加熱されている酸化触媒塔（白金触媒を充填）を通り水素ガスを水に転換する。その後、受け入れる排気ガスによって高分子膜除湿装置（高分子膜モード）または吸着塔（吸湿剤モード）に送られ水蒸気を回収する。

通常は高分子膜モードを用いて処理運転を行うが、流量が大きく、かつ流量変動も大きい LHD の真空容器や NBI の粗引き排気運転時には吸湿剤モードで処理を行う。吸湿剤モードは、高分子膜除湿装置の上流側で切替えてモレキュラーシーブの入った吸着塔で水分を吸着させる。この吸着塔も MS 型処理装置の再生システムで再生処理を行うことができる。

高分子膜モードでは、圧縮機、ドライヤで水分を圧縮することにより凝縮水として回収する。しかしそれでは安全管理計画^[3]に示している回収率を満たせないため高分子膜除湿装置で残りの水蒸気を回収する。回収された水は凝縮水タンクに溜められる。

PM 型処理装置入口にサンプリングポートを設け比例計数管でトリチウム濃度を監視している。メンテナンスモードでは、研究所管理値よりもトリチウム濃度が低い場合には PM 型処理装置を通さずに排

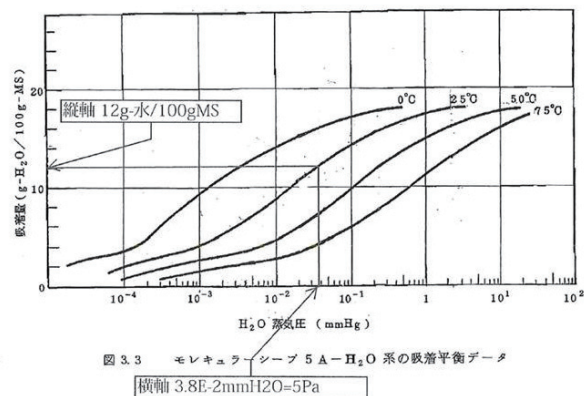
気できる。

2 設計

2.1 MS 型処理装置

MS 型処理装置はプラズマ実験中に排気されるガスを処理するため流量は少ないが水素濃度の高い排気ガスが流れてくる。1%の水素は酸化すると 90℃前後の熱が発生するため設計では、水素ガスを安全に処理する方法が課題となった。通常の排気運転で使用する主系統では、流量 $20\text{Nm}^3/\text{h}$ となるように乾燥空気を導入し、水素ガスを希釈した。水素処理に必要な触媒量は、触媒の基礎データを用いて設計した。またモレキュラーシーブの量は、図 3 に示したデータから吸着水分量を最大 30kg として設計した。30kg を超えると水分は吸着されず水蒸気として外へ出てしまうため吸着塔を二つ用意し、ラインを切り替えて連続で処理できるようにした。吸着塔の再生運転は、加熱・冷却工程を含めて 4 日程度を要する。

LHD や NBI などのクライオポンプ再生では、数十%の水素濃度となるため、貯留システムを用いた。貯留系統では水素を安全に圧縮できる金属ダイアフラム式圧縮機を採用し、バッファタンクに一時的に水素ガスを貯留することとした。重水素実験前の排気ガス観測結果から、排気総量が 40Nm^3 以上となることが見積もられたのでバッファタンクの容量を 14m^3 、最大使用圧力を 0.67MPa で設計した。貯留系統で溜めたガスは水素濃度が 1%を超えないように制御しながら主系統に合流させて処理を行うが、これは酸化触媒塔などの温度が上がり過ぎてしまうのを避けるためである。



(「トリチウム除去システムにおけるトリチウム水吸着塔の設計法に関する検討」 木下正弘 (日本原子力研究所) 1980年1月)

MSから放出される水蒸気圧が5Pa(濃度50ppm)になるまでMSは水を吸着できる。

図 3. モレキュラーシーブの吸着量と水分濃度との関係^[4]

2.2 PM 型処理装置

PM 型処理装置は、LHD や NBI の粗引き排気やメンテナンスなどに排気されるガスを処理するため流量が大きいことを想定して設計した。粗引き排気には真空度に伴い流量が変化すること、メンテナンスには換気が必要であり換気流量を増やすことが課題となった。

高分子膜モードは $300\text{Nm}^3/\text{h}$ の排気ガスを処理することが可能なように設計されている。受入流量が無い場合には、内部循環を行って処理プロセス条件(温度や圧力)が安定するようにしている。受入流量の変化がある場合には一度バッファタンクに受け入れ、バッファタンクの圧力で送風機の回転数を制御し内部循環分と合わせて $300\text{Nm}^3/\text{h}$ で処理される。MS 型処理装置で $300\text{Nm}^3/\text{h}$ の排気ガスを処理しようとすると吸着塔が 20 基程度必要となるので今回は膜分離法による水蒸気分離の方法(高分子膜モジュール)を採用した(図 4)。高分子膜モジュールの長所として、水を連続的に回収するための再生処理が不要、吸着塔と比較して小型・省スペースとなる。一方で、処理流量の大きな変動には追従することが難しい。

吸湿剤モードでは、LHD や NBI の粗引き排気ガスを処理する。吸湿剤の再生系統を MS 型処理装置と共用とするため、同じ形状、容量とした。粗引き排気で回収される水分量が、10kg 以下と見積もられるため、吸着容量を超えることはない。

メンテナンスモードでは、研究所基準値を超えると高分子膜モードに自動で切替り、排気ガスを処理することができるようにした。

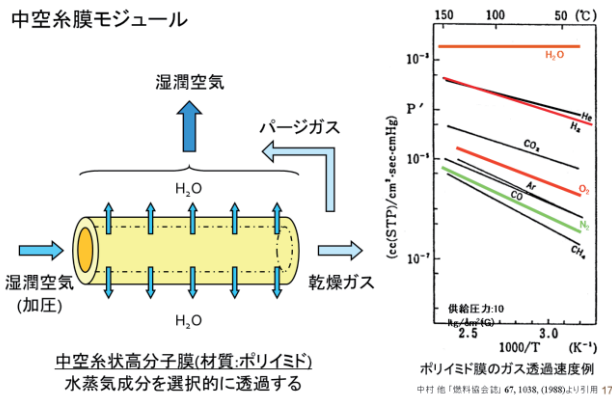


図 4. 膜分離法による水蒸気分離の原理^[5]

2.3 運転制御システム

排気ガス処理システムは制御室からの遠隔運転を基本とし、操作および監視は運転制御システムにより現場制御盤と遠隔制御端末の両方より操作できるよう設計した。操作はオートメーション化し出来るかぎり簡単に操作できるよう心がけた。この装置は放射線総合監視システムを介して、LHD、NBI などと運転状態信号のやり取りをできるようにした。排気ガス処理システムに異常が発生した場合には、排気を停止するインターロックなども組み込んだ。

3 試験運転

設計、建設を経て試験運転を開始した。動作確認を行い、次の事象が見つかったので報告する。

3.1 高温ゲート弁の開閉操作

MS 型処理装置で吸着塔から水分を回収するため再生処理を開始するとヒーターが加熱し吸着塔は 360°C 程度で制御される。再生処理が終了し主系統へ切り替えようとしたところ切替バルブが開かなくなってしまう。このバルブの耐熱温度は 450°C とな

っておりメーカーの見解ではバルブが溶けることは無いとのことであった。応急処置として圧空の供給圧力を上げて切替バルブを開けた。点検整備作業時にバルブを分解したところ、ボンネットガスケットが焼きついているのが確認されたがメーカーの見解ではこちらも溶けることは無いとのことであった。ボンネットガスケットにはグリスが塗布してありこれが高温のため変色したものと結論に至ったためグリスの塗布はしないこととした。

3.2 冷凍機の運転

排気ガス処理システムでは流体を冷やすために熱交換器を多く設置している。熱交換に必要な冷水は 2 段構成となっており 1 段目に本体冷却水装置より冷却水を供給してもらい 2 段目に冷凍機を用いて冷水を各熱交換器に送っている。

連続運転を開始して約 2 ヶ月を経過した頃、冷凍機内部のインターロックが働き停止した。調査したところ原因は本体冷却水装置から供給される冷却水の温度が冷凍機の運転仕様条件以下であったために、冷水出口温度が設定温度以下に下がってしまい冷凍機内を流れる冷媒の圧力が低くなりインターロックで冷凍機が停止していた (図 5)。対策として冷水出口設定温度を少し上げて対応することとした。

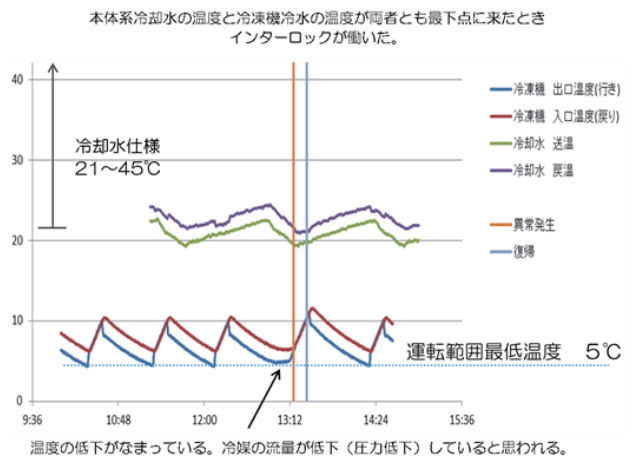


図 5. 冷凍機停止時の冷却水温度

3.3 冷水の循環系統

3.2 で報告したようにこの装置は熱交換器を多く設置している。長期連続運転を開始していると、熱交換器の性能が落ちていることに気が付いた。調査を

開始して分かったことは熱交換器にエアが混入しているということであった。配管にリークは考えにくいことから冷水ポンプの故障によりエアの混入があるのではないかと疑い、配管部の断熱材を取り回転音を確認すると異音を確認された。更に冷水ポンプの上流側が負圧であることも確認された。その旨メーカーに問い合わせたところ冷水ポンプからエアが混入することはないとの返答が返ってきた。メーカーの見解では冷水ポンプの入口側が負圧になるということは配管のどこかで詰まっている可能性が高くストレーナーが汚れているのではないかとのことだった。点検整備作業時に分解点検してみるとストレーナーに汚れを確認することができた(図6)。清掃後は冷水ポンプの異音もなくなり、エアの混入も無くなった。エアの混入は吸入側が負圧になったため、回転軸から空気を吸い込んでいたとの結論に至った。現在は冷水ポンプの上流に連成計を取り付け、監視を行うとともに定期的な保守点検を計画している。



図6. ストレーナー内部の汚れ

4 まとめ

排気ガス処理システムは安全管理計画のもと設計、建設を行ってきた。この排気ガス処理システムによって排気されたトリチウムの回収率は、安全管理計画に示している95%以上を確認することができた。

排気ガス処理システム以外にも分析装置を使用し、監視しているがそれらでも回収できていることを確認しているので排気ガス処理システムの回収率は評価できる。

核融合実験装置の排気ガス処理は、国内での運転経験・実績がないため手探りなところも多く、慎重に一つ一つの問題に取り組んできた。設計から単体試験、試験運転、水素ガスを用いた性能確認、保守点検などを経て重水素実験の初年度を向かえたが安全に運用することができている。これらの成果は各職員の重水素実験に対する高い意識があったからである。今後もこの高い意識を持ち続けながら運用にあたりたい。

参考文献

- [1] 鈴木直之、「大型ヘリカル装置排気系の重水素実験対策」、平成29年度核融合科学研究所技術研究会報告集、平成30年3月
- [2] M. Tanaka, N. Suzuki, H. Kato, T. Kondo, “Observations of the gas stream from the Large Helical Device for the design of an exhaust detritiation system”, Plasma Fusion and Research, 11, (2016), 2405055.
- [3] 核融合科学研究所ヘリカル研究部、「大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画<改訂版>」
- [4] 木下、松田、成瀬、「トリチウム除去システムにおけるトリチウム水吸着塔の設計法に関する検討」、JAERI-M 8648、(1980).
- [5] 中村、二宮、堀田、「ガス分離用ポリイミド膜の開発とその応用」、燃料協会誌、第67巻、第12号、(1988)、1038.

NBI 中性子検出器校正実験

○佐藤守^{A)}、渋谷真之^{A)}、NBI グループ、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

概要

大型ヘリカル装置 (LHD) では 2016 年度第 19 サイクルより重水素を用いた実験を開始した。プラズマ加熱装置の一つである中性粒子ビーム入射加熱装置 (NBI) では、重水素ビームを入射するようになり、その際に NBI 内のイオンビームダンプから中性子が発生する。実験中は NBI 周辺に設置した中性子検出器 (NBI 中性子検出器) を用いて中性子の発生量を測定している。

2016 年 11 月 7 日から 19 日にかけて、検出器運用に先立ち、LHD と NBI の検出器に対するその場校正実験を行った。また、中性子プロファイルモニタに対しての校正実験も同時に行った。中性子線源として ²⁵²Cf (以下線源) を使用した。NBI 中性子検出器に対する校正実験は、期間中の 11 月 11 日と 16 日に実施した。本報告では NBI 中性子検出器の校正実験とその事前準備として行った模擬線源 (中性子線源を含め同線源ケース) を用いたコールドテストについて報告する。

1 校正実験の概要

1.1 NBI 中性子検出器

LHD は 5 台の NBI (1 号機から 5 号機) を有して

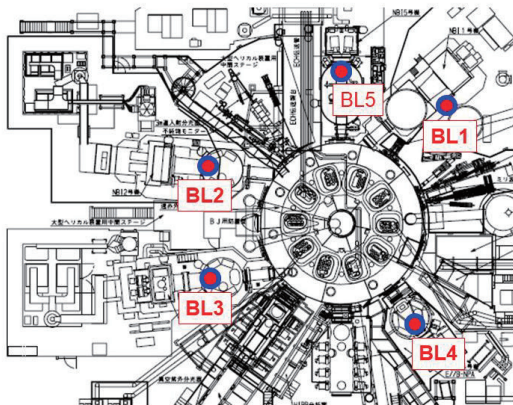


図 1. 検出器設置位置

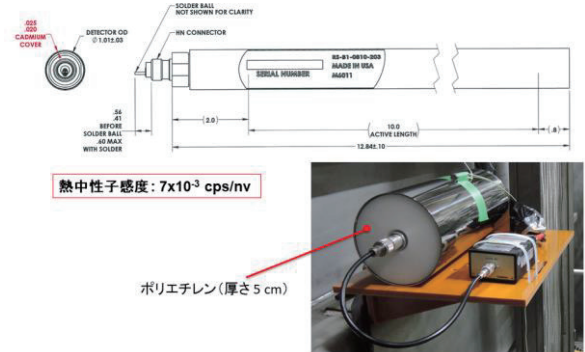


図 2. B10 中性子検出器

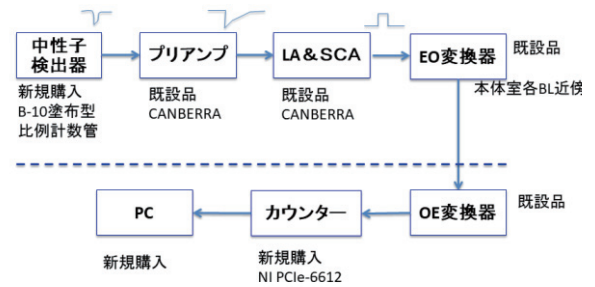


図 3. 計測回路

おり、それぞれに対して検出器を設置した。設置場所は、主な発生源となるイオンビームダンプから約 3m 離れた場所である (図 1)。B10 中性子検出器を使用しており、計測回路を経て PC にてリアルタイムでモニタ出来るようになっている (図 2、3)。

1.2 校正の方法

校正には中性子線源として ²⁵²Cf を使用する。線源をイオンビームダンプ中心付近 (ここを測定点とする) に移動させ、一定時間 (30 分程度) 設置し、検出器で中性子の計測を行う。これを 5 か所で行うことで、各中性子検出器の校正を行う。

1.3 実験のスケジュール

11 月 11 日: 前日から連続で LHD の検出器の校正

をしているため、線源は LHD から受け取り、後述する移動方法を用いて下記の要領で 2 日に分けて較正実験を実施した。

- LHD から線源を受け取る
- 線源を 1 番目の測定点へ移動させる
- 作業者は管理区域外へ退室、中性子測定開始
- 測定終了後入室、線源を 2 番目の測定点へ移動させる
- 2 番目以降も同様に測定する
- 最後の測定が終わった後、線源を保管用ポリエチレン(PE)容器へ移す
- 保管用 PE 容器を、保管室にある貯蔵箱へ入れる

11 月 16 日：11 日同様、LHD の検出器の較正中。

- LHD から線源を受け取る
- 11 日同様、中性子測定を行う
- 測定終了後、線源を保管用 PE 容器に移す
- 保管用 PE 容器を貯蔵箱へ入れる

2 線源の移動方法

2.1 線源の扱いに関して

線源は SUS 製の線源ケース内に収納されており、較正実験にて使用するときも、その状態で使用する。

較正実験では、放射線防護の原則に従って、線源との距離を可能な限りとることとした。また、線源を取り扱うための時間を極力短くするために、模擬線源を使用したコールドテストを事前に入念に行うことで、取り扱い手順の最適化を行った。



図 4. 線源移し替え専用治具

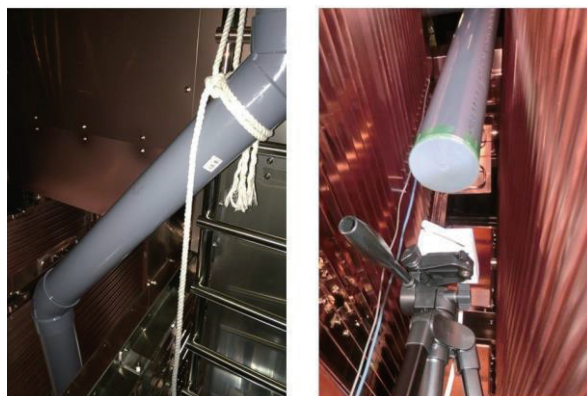


図 5. ガイドパイプ (真空容器内)



図 6. ガイドパイプ (上部)

2.2 線源の移動方法

線源に最も近づくのは、保管用 PE 容器への出し入れ時、LHD から NBI への受渡し時である。線源移し替え用に製作した専用治具 (図 4) を使用し、2m 離れた場所から行った。

NBI 中性子検出器の較正時は、線源を線源ホルダーに入れた状態で行う。測定点は NBI 真空容器内にあるため、NBI 真空容器上部のポートから測定点まで塩ビ管を用いたガイドパイプを設置 (図 5、6) し、線源ホルダーをスリング (ナイロン糸 0.8mm) で吊ってガイドパイプ内に上から垂らすという方法をとることにした。スリングはそのままではなくウインチで巻取りできるようにし、クレーンを使用しガイドパイプが設置された場所まで移動させることで、線源から十分に離れて作業することができる。塩ビ管ガイドパイプは、内部で線源が引っかかることがないよう、すべてストレートにしたかったが、真空容器

内の構造物とポートの位置の関係から4号機と5号機においては45°エルボを使用し曲げる必要があった。ポートより上側は、クレーンが近づく際に構造物が邪魔にならない程度までガイドパイプを伸ばし、先端には線源を入れやすいよう異径継手を漏斗の代わりとして取り付けた。ガイドパイプの入り口から測定点までの長さは最大5m程でガイドパイプの径が10cm程である。

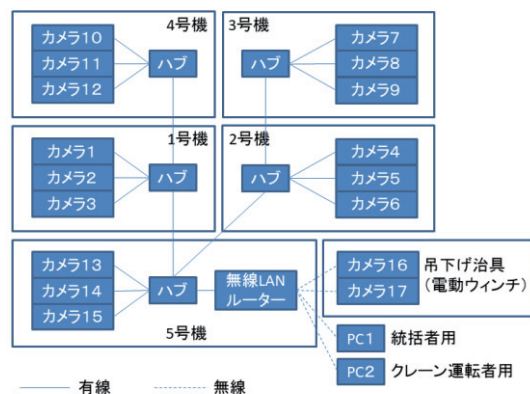


図9. ネットワーク構成図

コンスイッチを搭載しており、離れた場所からウィンチの操作が可能である。

2.4 位置合わせ

電動ウィンチユニットをガイドパイプの真上に移動させるためにワイヤレスカメラを用いたローカルネットワークを構築した(図9)。カメラは各ガイドパイプの入り口北側もしくは南側、西側もしくは東側に設置し、クレーンの走行、横行で位置調節しやすいようにした(図7カメラ(a)、カメラ(b))。また、電動ウィンチユニット上のカメラで上からガイドパイプの入り口を確認することができる。真空容器内にもガイドパイプの下端を見るためのカメラを設置し(図7カメラ(c))、線源が測定点に到着したことを確認できるようにした。(図10)

機器使用イメージ図

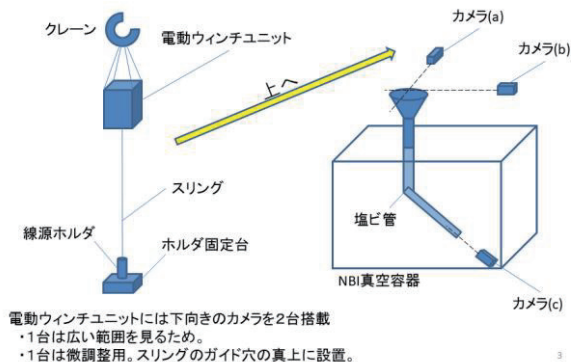


図7. 線源の移動方法

2.3 電動ウィンチユニット

クレーンで5mのスリングがついた線源ホルダーを吊り上げると、線源ホルダーが軽いためひどい荷振れが起きる。人は十分に離れているとはいえ、できるだけ短い時間で作業したほうが良い。そこで、図8のような電動ウィンチユニットを製作し、クレーンでの移動時にはスリングを巻き上げて、ガイドパイプ上部で位置が決まったらスリングを巻き下げるといった方法をとった。電動ウィンチユニットには、電動ウィンチ、バッテリー、ワイヤレスカメラ×2、リモ

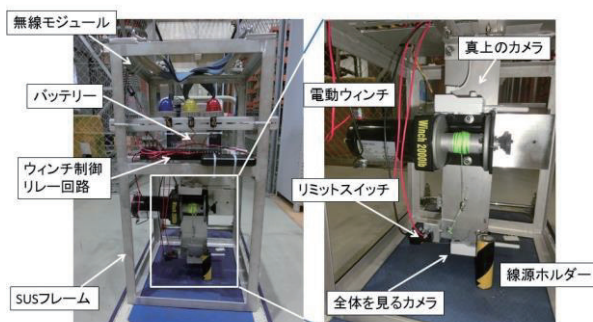


図8. 電動ウィンチユニット

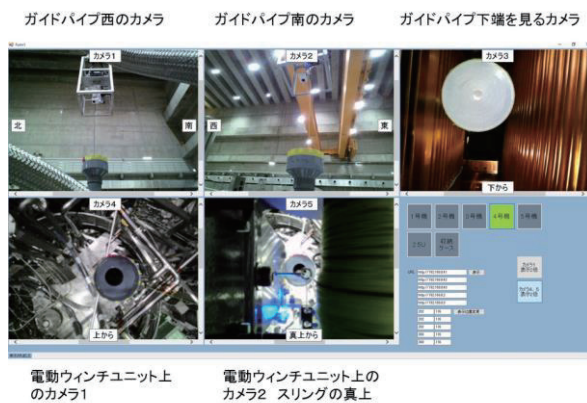


図10. カメラの映像

3 模擬線源を用いた線源移動試験

較正実験を行う前に、空の線源ケースを用いたコールドテストを行った。

3.1 第1回コールドテスト(2014年9月9日実施)

5台のNBIの内の1台にガイドパイプを設置し、線源を測定点まで移動させることが可能か調査した。また、リモコンや無線LANの届く範囲を確認した。カメラはNBI1台分のみ設置。通話はPHS(ハンズフリー)を使用した。

改善点等：

- リモコンの届く距離がリモコンスイッチ単体で動作確認した時より短い。→近づけば問題なし。構造物によるものと判断。
- PHSの電池切れ。→トランシーバーを用いた通信に変更した。

3.2 第2回コールドテスト(2015年4月3日)

NBI5台すべてにガイドパイプを設置しての試験を行った。最初にLHDからの線源の受渡し、最後に線源ホルダーから保管用PE容器への線源の受け渡しも行った。カメラはNBI全台分設置。

改善点等：

- カメラの台数が多く映像に遅延が生じた。位置合わせは可能。
- リモコンの反応が悪く、リモコン装置の電池切れを疑う。

3.3 第3回コールドテスト(2015年7月30日)

LHDとNBIを合わせた総合コールドテストを行った。手順ごとにかかる時間を計測した。

3.4 第4回コールドテスト(2016年8月31日)

NBI単独で改善点の確認のための試験を行った。

改善点等：

- 巻上げ過ぎを防止するための安全装置が必要。→過巻上げ防止リミットスイッチを巻上げウィンチに設置。
- 新品の電池を使用したにも関わらず、リモコンの反応が悪い。→後に無線LAN使用の有無によるリモコンの動作試験を実施し、無線LANとリモコンが電波干渉していること

が判明した。周波数帯の違うリモコンに変更した。

3.5 第5回コールドテスト(2016年10月5日)

変更したリモコンの動作確認を行った。追加された中性子プロファイルモニタに関して、測定点まで線源を移動することが可能か調査した。カメラを3台追加した。

改善点等：

- 周波数変更したリモコンが、トランシーバーと電波干渉を起こした。→PHS(ハンズフリー)を用いた通話に戻すこととした。PHSの電池の問題に関しては、中性子の計測中は退室するため、その都度充電することで解決した。

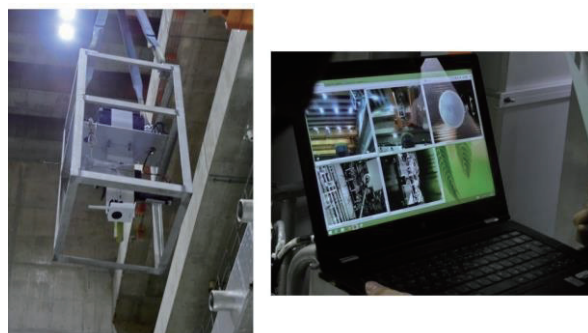


図 11. 移動試験の様子

4 較正実験

4.1 線源の移動ルート(予定)

- 11月11日：LHD→4号機→1号機→5号機→2号機→3号機→保管用PE容器→貯蔵庫
- 11月16日：LHD→中性子プロファイルモニタ1→中性子プロファイルモニタ2→保管用PE容器→貯蔵庫

4.2 第1回較正実験(11月11日)

LHDから線源を受け取った後、予定通り4号機内部に線源を設置し計測を開始した。計測終了まで室外で待機し、計測終了後、中に入りウィンチを巻き上げ開始直後に巻上げが停止した。線源がガイドパイプの途中にある状態で、過巻上げ防止のリミットス

スイッチが反応して、それ以上巻上げられなくなった。ウィンチユニットのスリングに張力が加わり、リミットスイッチが反応したと思われる。線源ホルダーの上下試験の結果、線源ホルダー自体が引っ掛かっているのではないと判断し、クレーンでウィンチユニットごと引き上げることにした。ガイドパイプの曲がり部分を超えてからは電動ウィンチで巻き上げることができた。

この後、予定では1号機、5号機、2号機、3号機と回るはずだったが、4号機と同じ屈曲構造を持つ5号機は16日に行うこととし、1号機、2号機、3号機を行い、この日を終えた。線源ホルダーから保管用PE容器への移し替えは問題なく行うことができた。

この日の実験で、4号機検出器の設置位置での検出感度が高かったため、検出器の設置場所を移動させた。4号機については16日に再度計測することとした。

4.3 リミットスイッチ周りの改良

1日目の実験を終えた後、リミットスイッチ周辺を確認したところ、スリングがリミット用リングに触れている状態であることが判明した。以下の事象がその原因であることが確認された。

- 電動ウィンチユニットの水平が出ていない。
(今まで水平を出していたわけではないが、吊り方で状態が変わる)
- リミットスイッチの上部に設置したウィンチユニットのスリング位置固定リングの穴径が大きいため、ウィンチドラム上のスリング位置の変化に応じてスリングがリミットスイッチリングに接触し、リミットスイッチの過反応が発生した。(図12)

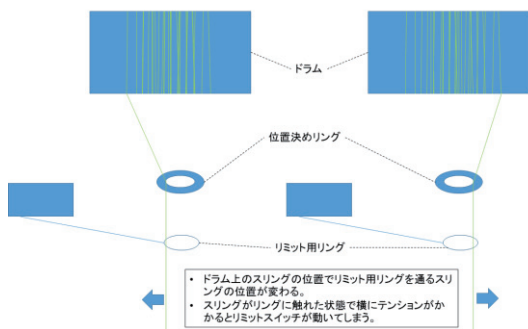


図12. リミットスイッチ過反応の原因の一つ

応が発生した。(図12)

また、スリングがガイドパイプの角でこすれるため、今までのコールドテストで所々撚りが不均一になっていたことで、スリングがリミットスイッチに引っ掛かりやすくなっていた。

対策としてリミットスイッチ周りを図13のように改良し、コールドテストで問題ないことを確認した。

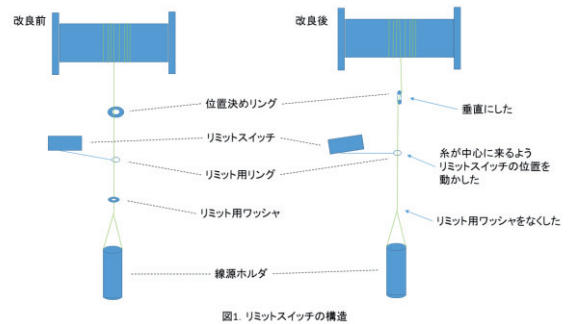


図13. リミットスイッチ周りの改良箇所

4.4 2回目の実験 (11月16日 (17日))

1回目の実験の結果から、この日の予定は次のように変更になった。

- LHD→4号機→5号機→中性子プロファイルモニタ1→中性子プロファイルモニタ2→保管用PE容器→貯蔵庫

線源の移動に関しては問題なく行うことができた。5号機の計測で1回目の4号機同様、5号機の検出器の検出感度が高かったため、検出器の設置位置を変更した後、再計測した。設置位置変更作業が入ったため、最後の計測である中性子プロファイルモニタ2は日をまたいで行うこととなり、この日は線源が中性子プロファイルモニタ2の測定点にある状態で実験を終了し、残りの作業を翌日(17日)に持ち越した。

17日に、中性子プロファイルモニタ2→保管用PE容器→貯蔵庫と線源を移動させ、実験が完了した。

5 まとめ

NBI中性子検出器は現在も順調に稼働している。5回に及ぶコールドテストを実施することで、多くの問題点を抽出し、手順の確認及び設備の動作確認を

行うことで、それらの改善を進めることが出来た。実際の較正実験では、初日にウィンチ巻上げ装置のリミットスイッチの過反応事象が発生した。初日は、ガイドパイプに屈曲部がない NBI を対象として較正実験を実施した。スイッチの過反応事象に対しては、リミットスイッチ周辺の構造を改善することで問題を解決した。その後、NB15 号機の検出器の感度調整を行いながら、較正実験は無事終了した。今回の実験を通じて、コールドテストの重要性を再認識した。

LHDガス供給システムの整備

○安井孝治^{A)}、長原一樹^{A)}、宮澤順一^{B)}、重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

概要

大型ヘリカル装置（LHD）におけるガスパフ装置は、1998年の第1サイクル実験以来、最小限の配管本数と入射バルブとでガス交換により多数のガス種の切替ができる拡張性の高い燃料ガス入射装置であった¹⁾。2017年から開始する重水素実験では、放射化物を極力減らすことが重要であり、他の装置を含め実験室内に拡張したポンペを撤去し、実験期間中のガス交換による排気ガスを減らす必要が生じた。

ガス供給システムは、これまでの燃料ガスを入射する機能は勿論、他のLHD関連装置に必要なガスを一括して供給するシステムであり、2014年より再構成し、整備を行ったので現状を報告する。

1 はじめに

重水素実験を開始するにあたり、必要不可欠である以下の点を考慮し、再構成を行った。

- ・ガスポンベは実験室外へ移設
- ・ガスパフ装置のガス交換は不要とする
- ・供給ガスは従来通り超高純度とする
- ・高圧ガス（最大8MPa）の供給
- ・他のLHD関連装置へのガス供給
- ・放射線対策の実施

2 システムの構成

システムの構成を図1に示す。

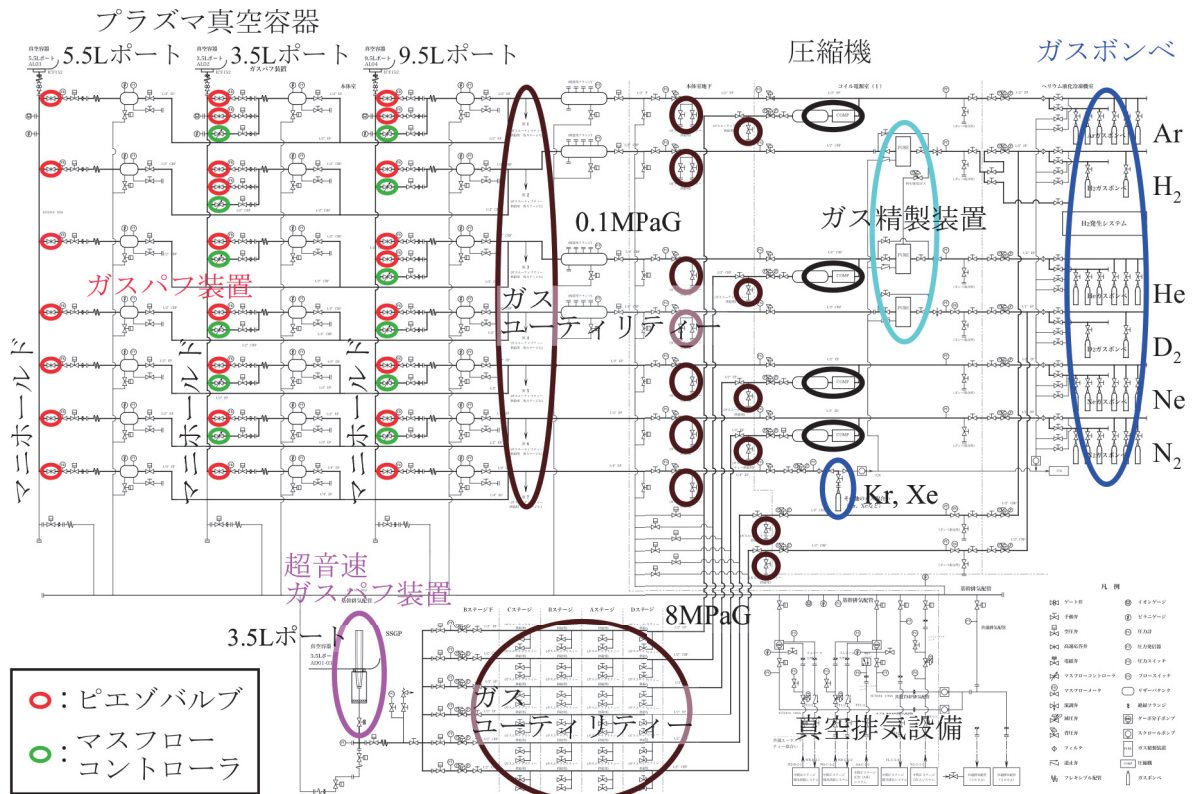


図1. ガス供給システム構成図

2.1 供給ガス

供給するガスは市販の超高純度ガスボンベを使用し、ボンベ交換しやすい部屋に設置する。特に、使用頻度の高い水素、重水素、ヘリウムガスは、ガス精製装置を使用し不純物を極力減らし(0.05ppm以下)供給する。高圧ガスはボンベの残圧が低くても消費できるよう、圧縮機で昇圧する構成とした。ただし、水素と重水素ガスは危険性を考慮し、ボンベ出口か

ら高圧系統と低圧系統とに分け供給し、残圧の少ないボンベは低圧系統に移動し運用する。

2.2 ガスパフ装置

ガスパフ装置はLHDのプラズマ真空容器に燃料ガスを0.1MPaGで入射する装置である。入射バルブはピエゾバルブとマスフローコントローラを使用し、プラズマ真空容器の3箇所のポートに接続したマニ

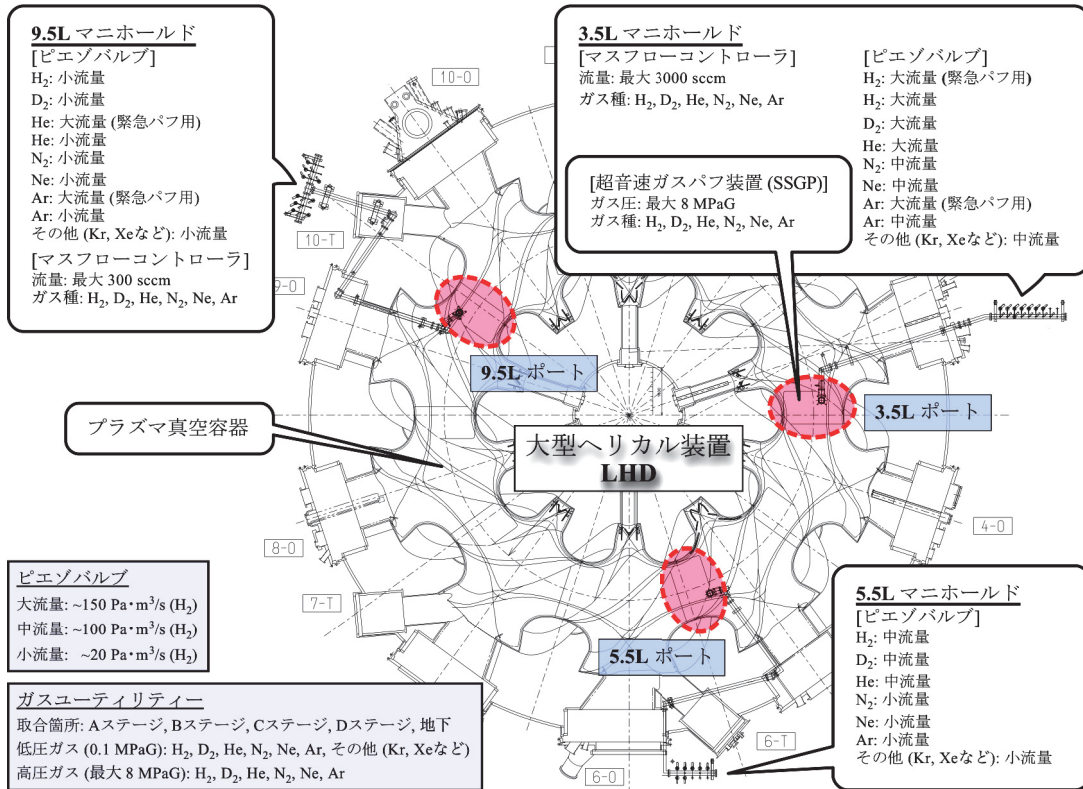


図2. ガスパフ装置の配置図

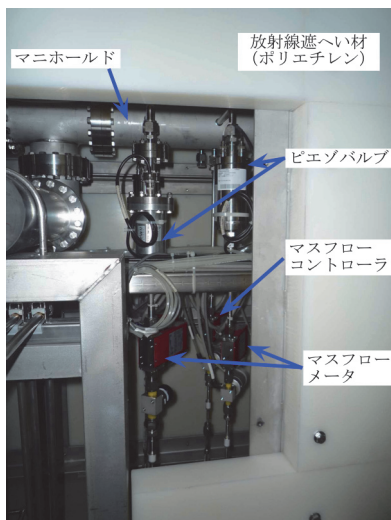


図3. 9.5L マニホールドの放射線遮へい

ホールドに設置する。ただし、放射線の影響を避けるため、マニホールドはLHD中心より約8.5mの位置まで延長し入射バルブ等の機器を設置した(図2)。更に放射線遮へいを行った(図3)。

ガス種は水素、重水素、ヘリウム、窒素、ネオン、アルゴン、その他(クリプトン、キセノンなど交換可)と限定した。ガス交換を不要にするため、配管敷設と各マニホールドへの入射バルブ類の設置はガス種毎に独立した構成とした。そのため、各機器を大幅に増設する必要があるが、既存ピエゾバルブの製造メーカーは製造販売を終了していた。

そこで、不足分のピエゾバルブ15台は新しく設計・開発を行った(図4、図5)。

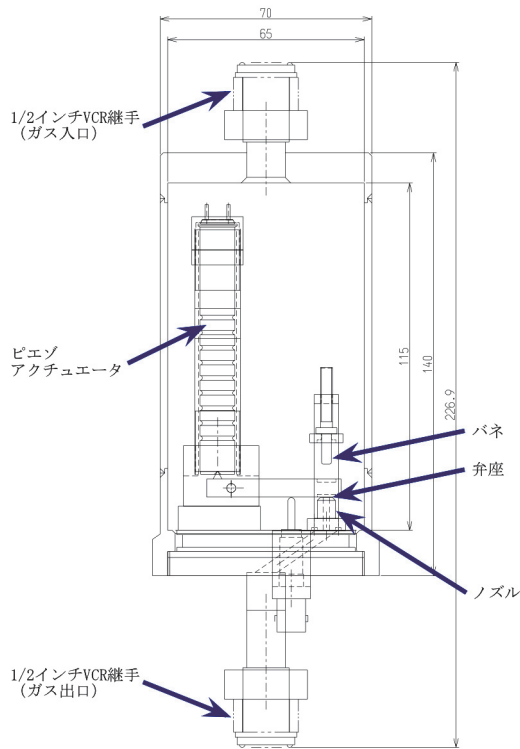


図4. ピエゾバルブの構造図

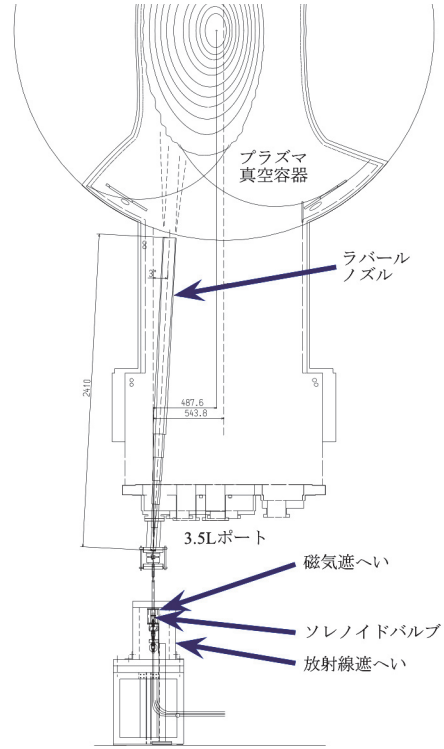


図6. 超音速ガスパフ装置の配置図

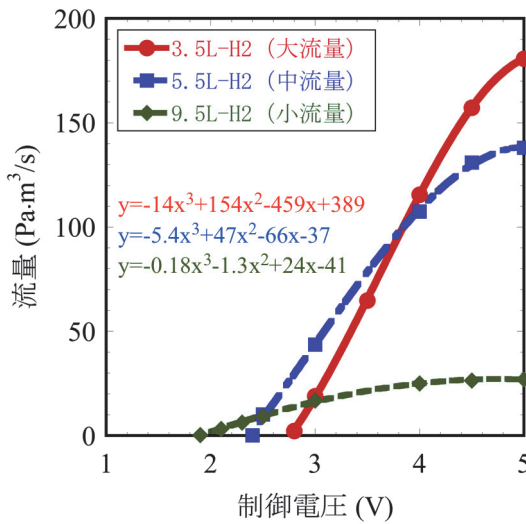


図5. ピエゾバルブの流量特性

ピエゾバルブは制御電圧によりピエゾアクチュエータを駆動し、ノズル開度を制御することで流量を制御するバルブであり応答性は5ミリ秒程度である。

それに対し、マスフローコントローラは内部にピエゾアクチュエータと制御回路が内蔵されており、流量が一定になるようフィードバック制御する製品であり、応答性は1秒程度である。

2.3 超音速ガスパフ装置 (SSGP)

超音速ガスパフ装置 (SuperSonic Gas Puff) は、ソレノイドバルブと2.4mのラバーノズルとを組合せ、最大8MPaGの燃料ガスを供給することで、プラズマ真空容器に超音速で燃料ガスを入射する装置であり応答性は0.2ミリ秒程度 (図6)。これまでプラズマ真空容器内にあった高速ソレノイドバルブを外に移設し、磁気遮へいと放射線遮へいを行った (図7)。

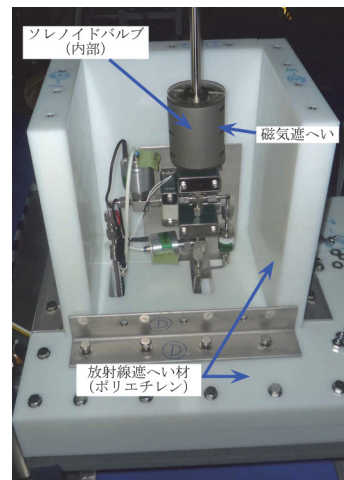


図7. ソレノイドバルブの放射線遮へい

3 ガス供給システムの運用

3.1 プラズマ真空容器への燃料ガスの入射

ガス供給システムにおいて、ガスパフ装置のピエゾバルブと SSGP の高速ソレノイドバルブは主にプラズマ実験に使用し、制御は専用のフィードバック制御システム²⁾で行う。マスフローコントローラはプラズマ真空容器の壁に付着した不純物除去のための放電洗浄を数時間連続で行う際に使用する。

3.2 ガスユーティリティの運用

LHD 関連装置へガスを供給するユーティリティとして高圧ガス系統と低圧ガス系統の各ガス種の取合いを各所に配備し、中性粒子ビーム入射装置 (NBI)、各種ペレット入射装置、重イオンビームプローブ (HIBP)、E/B 中性粒子アナライザー (E/B-NPA)、ジボラン設備へ必要なガスを供給している。

3.3 ガス供給システムの制御

ガス供給システムの制御は、現場のシーケンサにより全て制御されており、各種インターロックにより安全に操作できる。通常、ネットワークを介した遠隔制御で行う。超伝導コイルがクエンチした際に

はプラズマの異常放電を防ぐため専用ピエゾバルブにより緊急ガスパフを行うが、停電時でも信号が途切れないようハードワイヤード化されている。

3.4 高圧ガス設備

ガス供給システムには高圧ガス設備が含まれており、所轄の官庁へ申請をしている。年に一度定期自主検査を行う必要がある。

4 今後の課題

第 1 回目の重水素実験を終え、ガスパフ装置を LHD から遠ざけたことにより、燃料ガス入射制御の遅れが見られる場合があった (図 8)。

参考文献

- [1] 安井 孝治、他、“大型ヘリカル装置 (LHD) 用ガスパフ装置”、第 15 回技術研究会報告集、KEK Proc. 99-16 Nov.1999、P229-232.
- [2] 安井 孝治、他、“ガスパフ装置のフィードバック制御システムの設計・開発”、平成 20 年度京都大学総合技術研究会報告集、平成 21 年 3 月、P82-83.

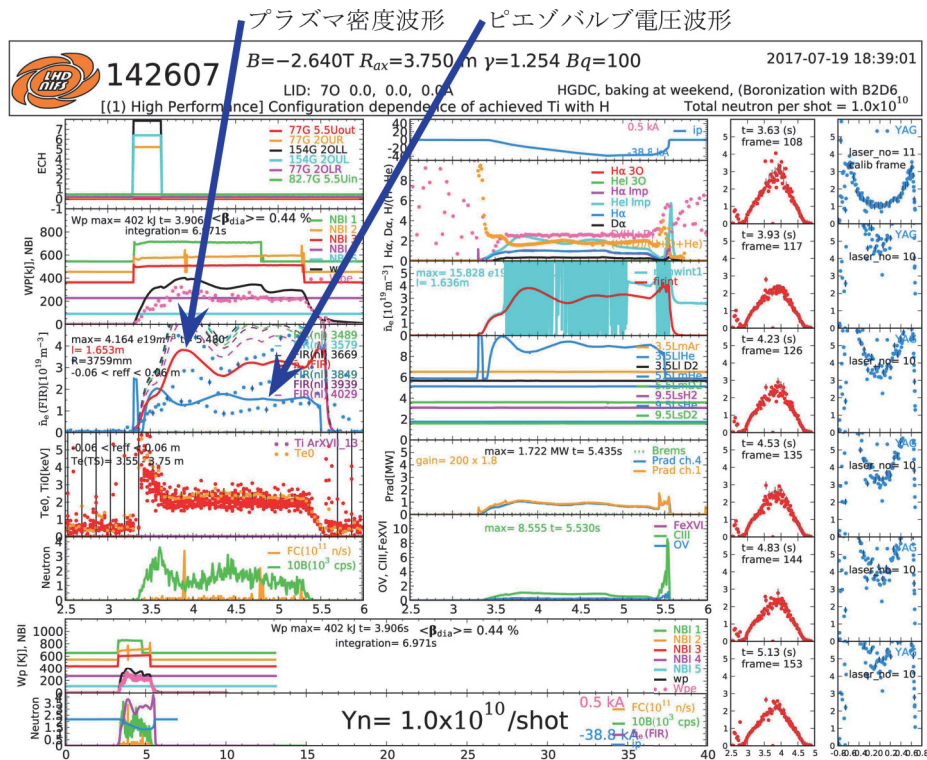


図 8. 第 19 サイクルにおける実験番号 142607 のショットサマリー

ゲートの TC74HC132 で信号を反転させ、それを CMOS タイマ LMC555 に信号を入れることによって、パルス幅を 100ms に広げて、ラズパイの GPIO に入力した。これにより、ラズパイで、ファイヤー信号を確実に受けることが出来た。

また、トリガー停止回路装置上で入出力信号の ON/OFF が分かる様に LED を付け、また単体でもトリガー停止信号を出力出来る様に、またその信号をリセットするためのボタンも取り付けている。

ラズパイの GPIO を 4 個使用している。

1.2 回路装置外観

図 3 にトリガー停止回路装置の製作後の外観、図 4 に装置内部を示す。ラズパイボードの上にブレッドボードを載せて、そこに IC や配線用コネクタを取り付け、外部とのやりとりを行なわせている。

フロントパネルには、手動ボタンと LED を配置し、リアパネルには、ラズパイの出力コネクタに直接配線出来る様にパネル加工した。また、ファンを取り付けて、内部に熱がこもらない様にしている。

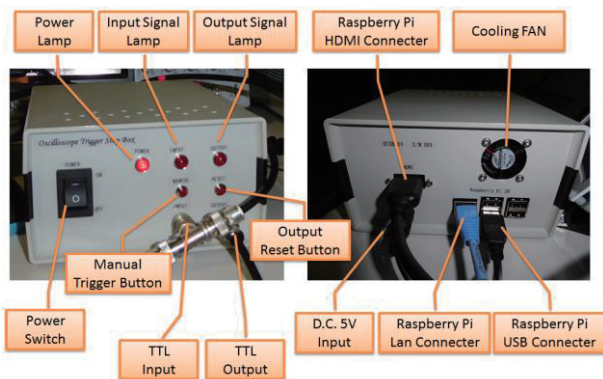


図 3 信号発生装置外観

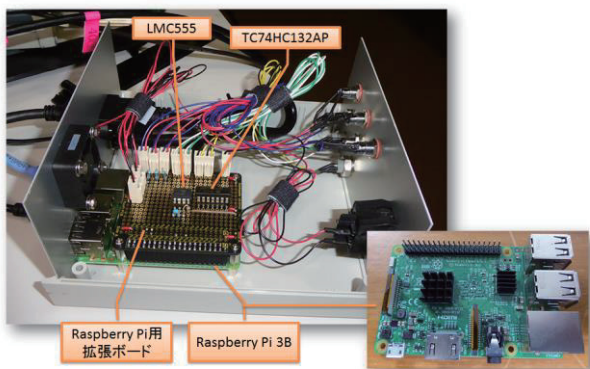


図 4 信号発生装置内部

1.3 プログラムの作成

ラズパイはシングルボードコンピューターであるため、プログラムする事が可能である。このプログラム作成するに当たって、オペレーションシステム (OS) には、Windows IoT Core を使い、プログラム言語には日頃から使用している Microsoft 社の Visual Studio 上で動作する C#言語を用いた。この組み合わせだとラズパイをネットワークで通信出来る様にしておけば、デバッグも Visual Studio 上で行えるため、プログラム開発が容易であった。

Windows IoT Core を使う上で、ドライバの種類が Inbox ドライバと DMAP (Direct Memory Mapped) ドライバを選択することができる。今回、両方のドライバで入力信号に対して、出力信号のレスポンスやジッターを調べた所、DMAP の方がレスポンスは良いと思っていたが、実際は、逆であった。プログラムは、全く同じで、ドライバモードを変更した時、DMAP モードでの入力信号後、出力信号が出力されるまでの遅延時間は、最速で約 1.3ms、最遅で 2.0ms であったのに対し、Inbox モードでは、最速で 0.216ms、最遅で 0.326ms であった。この事より、今回は、Inbox モードを使用した。図 5 に DMAP モードでの入力信号のパルス幅約 100us 入れた時の GPIO から出力信号までの遅延時間グラフ、図 6 に Inbox モードでの遅延グラフを示す。

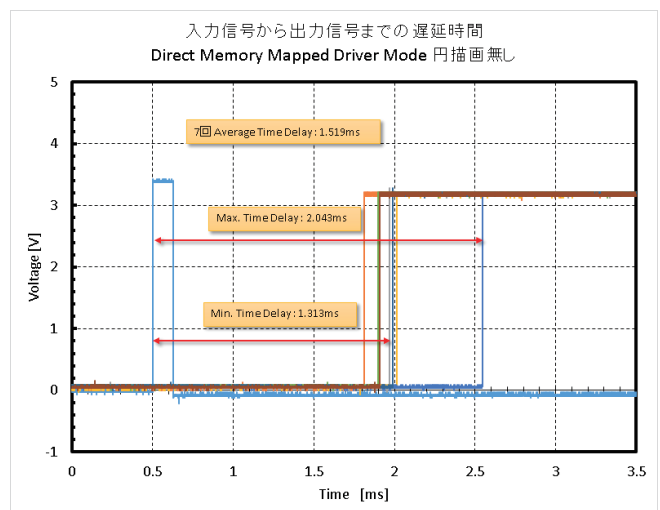


図 5 DMAP ドライブモード時の入力信号に対する出力信号のレスポンス

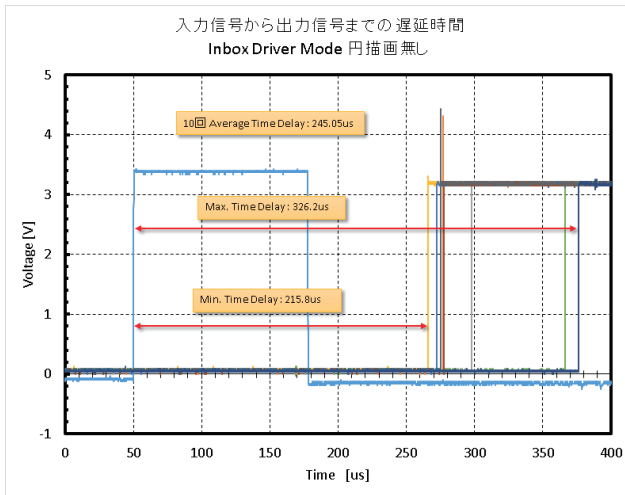


図6 Inbox ドライバモード時の入力信号に対する出力信号のレスポンス

図7にプログラム作成後のタッチパネル式ディスプレイに表示されているトリガー停止回路操作画面を示す。通常、6pps 信号が各計測装置にトリガー信号として入力されているが、ファイヤー信号が入力されると、指定した時間だけ高速トリガー信号発生装置のインヒビット端子に TTL 出力信号が出力され、その時間だけ、6pps 信号が停止し、その間にデータ取得が出来るようになる。

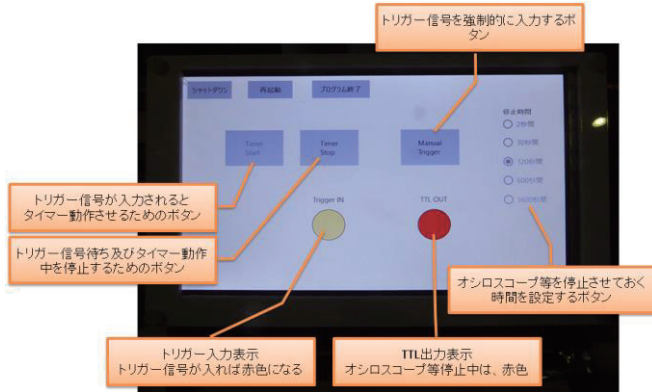


図7 タッチパネル式ディスプレイ上でのプログラム操作画面

2 LFEX 装置への設置

このトリガー停止回路は、2台製作し、実際の装置に組み込んで動作している。

2.1 1台目製作

1台目は、LFEX 装置の発振器のある発振器室に設置した。図8に設置状態を示す。図9に高速トリガー信号発生装置 (DG645) のトリガー信号により、データ更新している計測器類を示す。オシロスコープの他に画像処理ボードのデータ更新も停止させている。一定時間後、6pps 信号によるデータ更新が再開される。

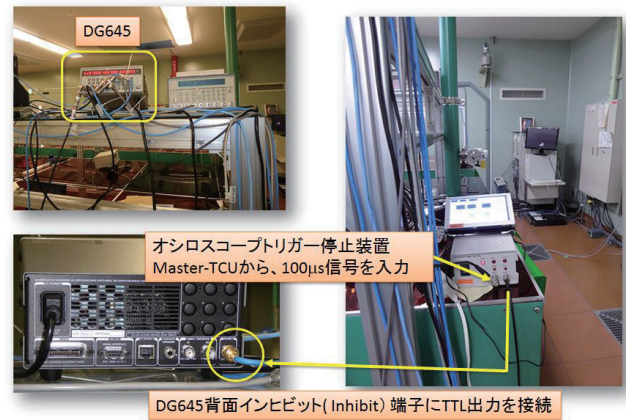


図8 発振器室に設置した1台目のトリガー停止回路

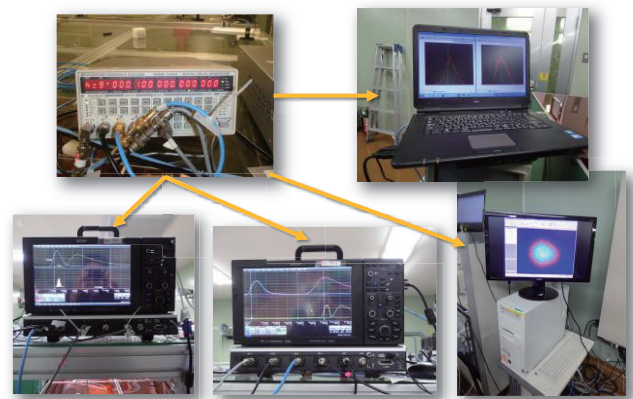


図9 データ取得装置一覧

2.2 2台目製作

2台目を製作し、LFEX 装置の前置増幅器段にあるオシロスコープの波形モニターに使用している。

図10に設置状態を示す。前置増幅器段の途中のレーザー発振器の出力波形等を確認しているオシロスコープに取り付ける事により、通常は、6pps で発振しているレーザー波形をモニターしているが、レー

ザーショット時には、ファイヤー信号を受け取った時に 6pps 信号を停止し、オシロスコープ波形の表示を維持している。そして、一定時間経過後、6pps 信号をオシロスコープにトリガー信号として入力され、定常的にレーザー出力波形が更新される。



図 10 前置増幅器列に設置したトリガー停止装置

3 おわりに

Raspberry Pi 3B を使用したプログラム作成は初めてであったが、いつも使い慣れている Visual Studio 上の C# 言語でデバッグをしながら、プログラム開発が出来たため、プログラム開発自体は、楽であった。しかし、Windows IoT Core 上でのプログラム開発についての情報は、Web 上において、日本語では少なく、英語サイトがほとんどであったため、理解するのに時間がかかった。ただ、一旦理解すると、単純な GPIO 操作程度なら、手軽に開発できた。

機器制御を行なうに当たって、今までは、高価なパソコンや入出力ボードが必要であったが、このシングルボードコンピュータにより、安価になる。

今後、色々な機器制御に使用していきたいと思う。

参考文献

- [1] N.Miyanaga, et al., EDP Sciences, J.de Physique IV 133, 81 (2006).

KEK 電子陽電子入射器における安全管理システムの改変および改良

○佐武いつか^{A)}、白川明広^{A)}、峠暢一^{A)}、久積啓一^{B)}、熊野宏樹^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

^{B)}三菱電機システムサービス株式会社

概要

KEK 電子陽電子入射器（以下「入射器」）は 2010 年秋以降、PF 及び PF-AR へのビーム供給と SuperKEKB 計画のための高性能ビーム源の研究開発を並行して実施するため、上流・下流を分割管理していた。SuperKEKB 計画の Phase-II では、低エミッタンスの陽電子ビームの実現のため、陽電子ダンピングリングが稼働する。これを入射器と合流させるため、入射器では 2017 年夏に上下流を再統合し、これに伴い安全管理システムの改変および改良を行った。本発表では、システム統合の詳細についてハードウェアを中心に報告する。

1 入射器の管理区域統合

入射器は、SuperKEKB (High Energy Ring 及び Low Energy Ring)、放射光施設である PF、PF-AR の下流リングに電子・陽電子ビームを供給する全長約 600m の線形加速器である。セクターと呼ばれる約 80m ほどの区画で分けられており、上流端の電子銃から下流に向かって順番に A および B セクター（約 100 m）、J-ARC と呼ばれる 180 度偏向部、C セクター、それに続く 1~5 セクター（約 500 m）で構成されている（図 1）。

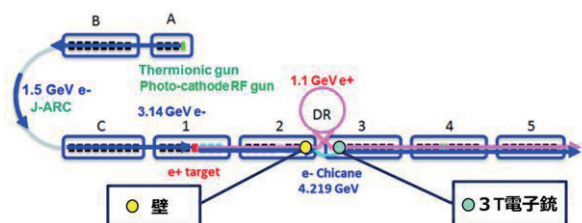


図 1. 電子陽電子入射器

2010 年の 9 月から 2017 年 5 月までの期間は、3 セクターの上流端に 3T 熱電子銃が設置されており、そのビームは続く 3~5 セクター（「入射器下流部」と

呼ばれていた）で加速ののち PF、PF-AR に入射されていた。3T 電子銃の直前（2 セクター最下流部）には放射線遮蔽能力とインターロック付通用扉を持つコンクリート壁を構築し、加速器室を上流部と下流部の二つの空間に分割していた。この間、A~2 セクター（「入射器上流部」と呼ばれていた）では震災で損傷した架台の修復や強度の増強を行い、SuperKEKB へのアップグレードのための電子銃やライメントシステムの開発、試験を行うとともに、上流側で独立のビームスタディを行いながら、下流側でのビーム運転も可能としていた。

入射器運転時には、トンネル内の加速器室では人体被ばく許容量を上回る放射線が発生する。そのため、運転を許可するには「加速器室を無人とする」ことを安全系インターロックシステムにおいて保証しなければならない。3T 電子銃と付近の遮蔽扉が設置されていた期間は、入射器の入域管理は上流下流で別々に行うこととしていた。

SuperKEKB 計画の Phase-II では、低エミッタンスの陽電子ビームを実現するため、2017 年度より新しく陽電子ダンピングリング（Damping Ring : DR）が稼働する。入射器では、SuperKEKB、PF、PF-AR、DR の計 5 種類の円形加速器に、エネルギーやビーム特性の大きく異なるビームを高速で切り替えながら入射運転を行う予定である（表 1）。

表 1. 入射器運転形態

ビーム入射先	ビーム種類	変更前		変更後	
		電子銃	入域管理	電子銃	入域管理
KEKB High Energy Ring	7 GeV 電子	(休止)	—	先頭(A1)	全域
KEKB Low Energy Ring	4 GeV 陽電子	(休止)	—	先頭(A1)	全域
PF-Ring	2.5 GeV 電子	中間(3T)	下流側	先頭(A1)	全域
PF-AR	6.5 GeV 電子	中間(3T)	下流側	先頭(A1)	全域
DR-Ring	1.1 GeV 陽電子	—	—	先頭(A1)	全域
Linac調整 (Ringに入射無し)	各種ビーム	先頭(A1)及び中間(3T)	全域	先頭(A1)	全域

新しく稼働する DR を入射器と合流させるビームライン構築のためには、3T 電子銃の撤去とこれまで上流下流を隔てていたコンクリート壁の撤去が必要となる。この工事は 2017 年夏に実施された (図 2)。



図 2. 入射器上下流の壁撤去前と撤去後

上流下流を隔てていた壁の撤去は、入射器トンネルの上流下流の管理を統合することを意味する。そのため、下流側への扉や下流側パーソナルキーシステム (後述)、その関連機器を撤去し、上下流のパーソナルキーシステムを統合した。DR の導入に伴って、インターロック信号線の増設および既存インターロック信号線を整理した。安全管理システムの改変に伴って、制御卓の運転操作パネルを改造し (後述)、インターロック表示 PC 画面を更新した。

2 パーソナルキーシステムの統合

2.1 入射器の運転許可条件

入射器運転許可の必要条件の一つである加速器室が無人状態であることを担保するため、表 2 に示す項目を必要条件としている。

具体的には、加速器に通じる通用扉及び物品搬入扉の開閉状態を監視し、全ての扉が「閉」状態であることを確認する。また、パーソナルキーボックスに全てのパーソナルキーと扉開閉鍵が返却されていることを確認する。ギャラリー (地上階) には高周

波源があり、これらも放射線発生源であるが、空間放射線量が少ないこと及び放射性物質生成による汚染が発生しないことから、加速器室のような入域管理は行わず、境界扉の開閉状態のみを監視する。

表 2. 入射器加速器室の無人状態必要条件

入射器加速器室無人状態の保障条件項目	入射器運転許可の条件
加速器に通じる通用扉・物品搬入扉の開閉状態	全ての扉が「閉」状態
個人キー-BOXの全パーソナルキー	全ての鍵の返却
ギャラリーの境界扉開閉状態と個人キー-BOXの扉開閉鍵	全ての鍵の返却

「加速器室が無人状態である」を含めた複数の必要条件が合わさったものを入射器運転許可条件とし、「Linac Ready」信号と呼ぶ。これは、入射器において人員保護を目的とするインターロックシステム (Personnel Protection System, PPS) のことである。入射器上下流の統合前後の運転形態については、表 1 に示す。上流下流統合前の入射器の入域管理範囲については、下流側のみでビーム運転を行う際には下流側のみ、入射器終端までビームを通す際には、全域を対象としていた。2017 年夏の入射器の上流下流統合後は、ビーム運転時の入域管理範囲は常に全域が対象となる。

2.2 上流用・下流用パーソナルキーシステム

パーソナルキーボックスは、統合前は上流用と下流用で 2 台使用していた。それぞれ入射器入口付近に設置されており、パーソナルキーと通用扉及び物品搬入扉の開閉のための鍵があった (図 3)。

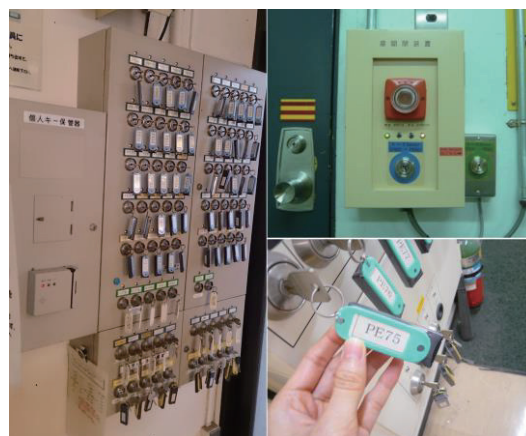


図 3. 統合パーソナルキーシステム

機器の保守や改造のため加速器室に入域する際は、

加速器が停止している状態でパーソナルキーボックスからパーソナルキーを、作業員 1 名につき 1 個ずつ携帯する。このパーソナルキーは加速器室への入口扉鍵でもあり、下流用パーソナルキーは下流側入口扉の鍵にもなっていた (図 4)。



図 4. 下流側パーソナルキーシステムと下流側入口扉

パーソナルキーと扉開閉鍵の貸出管理には各人の ID カードを使用する。カードリーダ読み込みによって鍵が抜ける。上流用は 50 人、下流用は 32 人まで同時入域が可能となっている。パーソナルキーの全数が返却されないと加速器運転不可となるため、持出防止対策として、各キータグに RF タグ (自鳴式) が接着されている。入射器玄関ゲートに近づくと、両側の各ゲート中心約 2m 範囲内でブザーが鳴る。

2.3 上流用パーソナルキーボックスへの統合

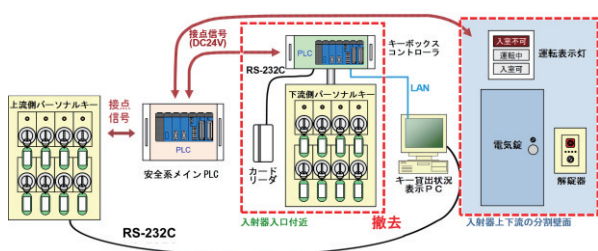


図 5. パーソナルキーシステム機器群

上流用パーソナルキーボックスは、内部にボードコンピュータを備え、安全系メイン PLC と接点信号

を受受し、キーを管理している (図 5)。

キー貸出状況表示 PC と入射器ネットワーク PC がある。キー貸出状況表示 PC とキーボックスは、RS-232C 経由で入退域情報や入域管理情報を授受している。カードリーダにより読み出したカード情報を内部回路で処理し、キー抜取の可否を判断する。

入射器の上下流統合に伴って、下流側用パーソナルキーボックスを撤去し、上流側用パーソナルキーボックスを入射器全域用とした。下流側用パーソナルキーボックスにあった加速器室下流側の扉鍵を、全域用パーソナルキーボックスの扉鍵に合わせた。

2.4 運転表示灯

撤去した壁面に取り付けられていた機器類は運転表示灯、電気錠、解錠器である (図 4)。いずれも安全系 PLC との間で DC24V 接点信号を授受する。入射器の運転状況に応じて、電気錠制御 (解錠許可/不許可) を行い、運転表示灯は入室禁止/加速器運転中/入室許可の表示をする。運転表示灯は入射器加速器室の 2 箇所の入り口にある。DR が稼働することにより、入射器運転を行うためにはビームの入射先である DR 側の情報も必要である。そのため、新たに入射器入室許可条件に、「DR にビームがない状態」の信号を受け取るよう変更した。『入室許可』表示には、ビームキーが OFF であることに加えて、「DR にビームがない状態」条件が追加された。また、『加速器運転中』を表示する LINAC READY 条件下に、「DR READY」条件を追加した。

3 入射器運転操作パネルの更新

3.1 入射器運転操作パネルと PLC

入射器安全管理システムでは PLC を使用しており、インターロック信号は、入射器主制御室及び ABC 副制御室にある計 2 台の PLC に収集されている。ABC 副制御室の PLC は、A セクター入射部から C セクターまでの信号入出力を担っている。入射器主制御室の PLC (安全系メイン PLC) が、1 セクターから入射器終端までの信号入出力と、入射器安全系システム全体の統括を担っている。入射器運転操作パネルと安全系メイン PLC は、デジタル I/O で情報を授受

している。操作パネルの裏側には多数の信号線が接続されている（図 6）。入射器運転操作パネルは、入射器運転を行うための操作盤であり、入射器及びビームの入射先である KEKB に設置されている。



図 6. 入射器運転操作パネルの更新前後

3.2 入射器運転操作パネルの改造

入射器運転操作パネルは、DR 導入に伴い改造した（図 6）。右上が以前のパネルで、右下が新規のパネルである。パネル上には、各種 READY 信号や、ビームキー、Remote/Local キー、非常停止ボタン、リセットボタンがある（図 7）。

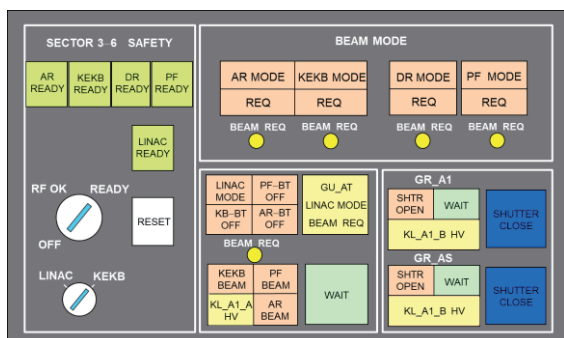


図 7. 入射器運転操作パネル

READY 信号は、下流リング側の安全状態を確認する信号であり、DR READY が加わったことで、AR/KEKB/DR/PF の状態が表示されている。ビームキーは、OFF /RF OK/READY の 3 段階の状態を選択するキーである。入射器運転の場合は、READY 状態にする必要があり、RF コンディショニングを行うときには RF OK 状態を選択する。新規のパネルでは、下流用ビームキーがなくなり、上下流を色分けしていたものが統一された。図 7 右上の Beam Mode は運転モードを示しており、DR モードが追加されたことで、AR/KEKB/DR/PF/LINAC モードが選択可能にな

った。図 7 右下は、電子銃に関する部分である。入射器のビームをどちらの電子銃（熱電子銃又は RF 電子銃）から出すかを選択する。ここでは、RF 電子銃によるビーム入射に関わるスイッチを追加した。これは、RF 電子銃シャッターの Open/Close ボタンで、RF 電子銃の状態がわかりやすく判断できるよう改造した。

4 まとめ

入射器安全系インターロックシステムは、入射器の電子・陽電子ビームを下流リングに入射する、又は入射器単独運転を行うための安全に関するシステムで、このシステムが異常を検知するとビームを入射できず、入射器は運転できない。上下流を隔てた壁撤去と DR 稼働に伴い、DR との様々な信号の授受を入射器安全管理システムに取り入れた。パーソナルキーシステムは統合し、入域管理範囲を入射器全域とした。さらに、制御卓の運転操作パネルを改造し、新たに DR との信号の授受情報を取り入れた。2018 年 2 月に DR が稼働するが、現在も本システムは入射器運転に使用されており、入射器から下流リングへの安全な入射・運転に貢献している。今後もオペレーターや職員の意見を取り入れながら、より使いやすく効率的なシステムを目指して改良を続けていきたい。

参考文献

- [1] 白川 明広、他、“加速器入域管理システムの増設”、平成 22 年度熊本大学総合技術研究会報告集、平成 23 年 3 月。
- [2] A. Shirakawa *et al.*, “Upgrade of Safety Interlock System of e+/e- LINAC for SuperKEKB Project”, in Proceedings of IPAC2013, the 4th International Particle Accelerator Conference, Shanghai, China, May 12-17, 2013.
- [3] 白川明広, “RF タグ監視システム導入による放射線立入制限区域無人管理の円滑化”, 平成 18 年度名古屋大学総合 技術研究会, 2007 年 3 月

J-PARC 高周波加速装置の Machine Protection System (MPS) 高速化

○古澤将司^{A)}、大森千広^{A)}、杉山泰之^{A)}、長谷川豪志^{A)}、原圭吾^{A)}、吉井正人^{A)}

島田太平^{B)}、田村文彦^{B)}、山本昌亘^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

^{B)} 日本原子力研究開発機構

1 序論

大強度陽子加速施設 J-PARC の Rapid Cycling Synchrotron (RCS) 及び Main Ring (MR) は大強度陽子シンクロトロンであり、ニュートリノ施設へ 470kW、ハドロン施設へ 42kW の陽子ビームを供給する。本研究会では J-PARC、RCS、MR 高周波加速装置の MPS の概要と、本年度の MPS 高速化に向けた機器改修、調査に関して報告する。

2 概要

2.1 高周波加速装置 (Radio Frequency : RF システム) [1]

加速器とは荷電粒子を加速するための装置である。加速空洞とは、加速器を構成する装置システムの一つであり、高周波電圧により荷電粒子にエネルギーを供給し、粒子を取り出しエネルギーまで加速させる装置である。

円形加速器 (シンクロトロン) では、その形状から荷電粒子を直流電場で加速できない。また陽子は電子の 2000 倍程度重いため、電子と異なり即座に光速付近まで加速されず、固定周波数の高周波電圧は使用できない。このため J-PARC の RCS、MR は、ビームの周回時間に同期した高周波電圧が使用される。

MR を例とすれば、加速空洞は 4 つのギャップを有し、1 ギャップあたり約 15kV の高周波電圧を発生させることで、1 台で 60kV の高周波加速電圧を印加できる。ビーム加速に必要な周波数と振幅及び位相は Low Level RF (LLRF) で制御され、その出力信号 (~1V) は、駆動段増幅器 (半導体増幅器) とトンネル内終段増幅器 (二本の電子管増幅器で構成) で増幅される。

MR では、加速空洞が 9 台存在し、内 7 台が加速システム、2 台が二次高調波システムとして使用され、大強度陽子ビームの安定加速を実現している。

2.2 高周波システムの MPS、構成

J-PARC リングの高周波システムは、主に加速空洞、終段増幅器、駆動段増幅器、陽極電源で構成される。終段増幅器には四極電子管が 2 本使用され、電子管それぞれのフィラメント電源、CG 電源、SG 電源及び陽極電源は Programmable Logic Controller (PLC) により制御され、異常検出による自動停止が MPS として機能している。その他の機器でも PLC による制御及び MPS が機能し、各機器で異常を検出した場合、集約情報を上位の制御グループが監視する MPS システムに送信し、ビーム停止、ビームアポート等の割り込み動作のための信号として利用する。Fig.1、Table1 に高周波システム及び MPS の構成を記載した。

このように、加速器の MPS は加速器を構成する装置毎の MPS 信号を使用して構成され、不要な放射化防止のために、異常検出後、利用できないビームを任意の運動量で速やかにアポートラインへ取り出し、廃棄する。

将来のビーム強度増加計画に伴い、各装置の異常検出システムの高速化が求められている。高周波システムにおいては、後述する PLC 内に記載されるラダープログラムのスキャンタイムを短縮することで、MPS システムの高速化を期待できる。

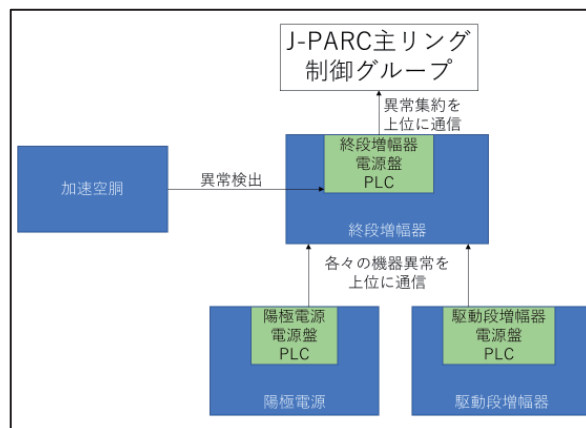


Fig.1 RF の MPS 構成

Table1 各設備に設置の PLC の監視部分

PLC 配置箇所	監視部分
終段増幅器 電源盤	加速空胴ステータス 下位 PLC 信号 終段増幅器
駆動段増幅器 電源盤	駆動段増幅器
陽極電源 電源盤	インバータ(DC-DC コンバータ) 真空管増幅器内陽極

2.3 Programmable Logic Controller (PLC)

PLC とは、プログラムによりリレー回路を再現し、シーケンス制御を実行する装置である。運転や操作の省力化、自動化、無人化の役割を果たす。PLC は、各モジュールを接続するベースモジュール、各モジュールへ電力を供給する電源モジュール、監視機器からの信号を受け取る入力モジュール、機器へ指示送信を行う出力モジュール、PLC の動作のためのプログラムを書き込み、他のモジュールに指示を送る CPU モジュールで構成される。

CPU モジュール内部にリレー回路を記載する際、多くの機種でラダープログラムが用いられる。ラダープログラムとは、入力命令と出力命令を対応させた縦書きシーケンス図を梯子 (Ladder) 図として記載するプログラムである。実装されたプログラムは、梯子の上から下へ順に処理され、最下段へ到達の後再び最上段へ戻り、下方に向かって同様の処理がされる。最上段から再度最上段まで戻る速度をスキャンタイムと呼び、この時間は使用される命令の数等の内部のプログラム構成により決定される。Fig.2 にラダー図の解説、Fig.3 に駆動段増幅器にて使用されるラダープログラムの一部を記載した。

現在、陽極、終段増幅器、駆動段増幅器電源にそれぞれ別種の、計 3 種の CPU モジュールが使用されている。現在使用されている機種は装置の老朽化、メーカー側のサービス停止等の理由より継続使用することが困難であり、また新機種はスキャンタイムに関する各種パラメータが一新され、スキャンタイムの短縮による MPS の高速化を期待できる。このため現使用 CPU の新機種への換装が求められている。

J-PARC の高周波システムにて、PLC は横河電機の FA-M3 シリーズが使用されている。現使用中の PLC を Fig.4 に図示した。FA-M3 の CPU のラダープログラムは、編集ソフトである Widefield3 にて記載できる。

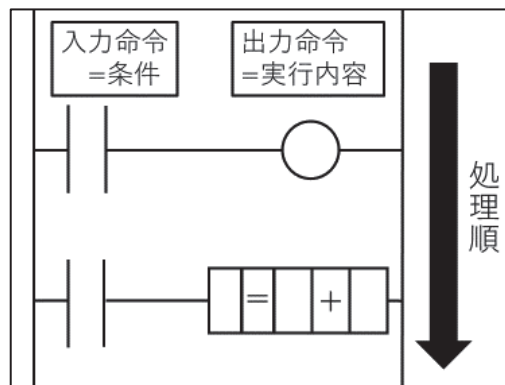


Fig.2 ラダーに使用されるシーケンス図の解説

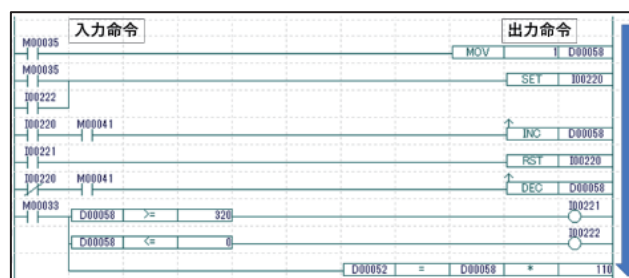


Fig.3 駆動段増幅器 PLC 内ラダープログラム

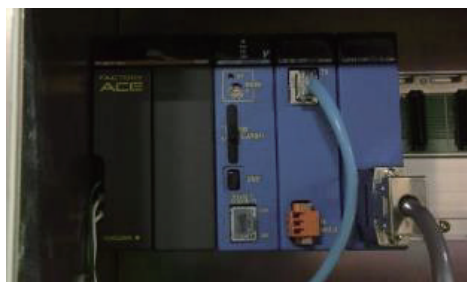


Fig.4 YOKOGAWA FA-M3

2.4 作業概要

先の点を踏まえて、本研究会では MPS 高速化のためのスキャンタイム短縮を目的とした、旧機種から新機種へ CPU モジュールの換装作業を行い、新旧機種のスキャンタイムを測定調査、比較した。

まず、CPU 後継機種への換装作業を MR 高周波加速空胴 7 号機にて実施した。後継機種は横河電機が正規で定めた資料 [2] の規格を元に選定したが、各機種のラダープログラムの容量を解析し、後継機種の最適化、再選定も実施した。Table2 に現使用及び正

規資料の記載事項による後継の CPU モジュールを記載した。CPU 換装作業に関して、これまで使用されていたラダープログラムが正常動作するか、また新機種と旧機種の混在で問題が発生するかが懸念事項となり、それらの動作確認も並行した。

現使用機種及び後継機種スキャンタイムの測定は先に記載した換装作業の過程で実施した。スキャンタイムは、CPU 内部の特殊レジスタを 2.3 に記載の Widefield3 にて監視することで確認できる。本作業にて測定した値を実測値として、横河電機の定める命令処理に関する値と数式を用いて得られた理論値と比較し、評価を行った。各々の PLC のスキャンタイム理論値は、下記の (1) 式を用いて計算した [3][4][5]。パラメータの詳細な説明は 3.3 に記載した。

$$T_s = T_c + T_a + \sum_i T_i \cdot C_i \quad (1)$$

T_s : スキャンタイム

T_c : PLC の種類毎の共通処理時間

T_a : 外部機器との接続による周辺処理時間

T_i : 命令 i の 1 つ当たりの処理時間

C_i : 命令 i の数

$\sum T_i \cdot C_i$: ラダープログラムの処理時間

Table2 現使用及び正規後継の CPU

CPU	現使用	正規後継機種
終段増幅器	F3SP53-4S	F3SP71-4S
駆動段増幅器	F3SP21-0N	F3SP22-0S
陽極電源	F3SP58-6S	F3SP76-7S

3 結果

3.1 陽極電源機種の再選定、最適化

現在使用中の各 CPU ラダープログラムの容量を解析した結果、陽極電源にて終段増幅器と同様の F3SP71-4S を適用しても、ラダープログラムの容量に足りることが判明した。陽極電源にて使用されるラダープログラムの容量 (ステップ数)、F3SP71-4S、F3SP76-7S の最大容量を Table3 に記載した。備品管理の明瞭化等のため、使用する CPU は可能な限り種類を減らすことが望ましい。このため、予定されていた正規後継機の換装作業に加えて、F3SP71-4S を陽極電源に換装、動作確認した。

Table3 陽極電源プログラムステップ数

	容量(ステップ数)
陽極電源 PLC ラダープログラム	1813
	最大容量(ステップ数)
F3SP71-4S	61440
F3SP76-7S	266240

3.2 CPU 換装、動作確認

Table2、Table3 に記載された対応を元に、後継機種の動作を確認した。結果としては、ラダープログラム内の使用機器設定を変更することで後継機種でも問題なく動作し、陽極電源においては、F3SP71-4S でも正常に動作することを確認できた。先に記載した通り、使用する CPU は種類を減らすことが望ましい。このため陽極電源では後継機種を F3SP76-7S から F3SP71-4S に変更する。本作業により新たに見直された後継機種を、Table4 に記載した。上記事項に加えて、現使用機種と後継機種が混在でも正常動作することが確認できた。

Table4 現使用及び後継の CPU

CPU	現使用	後継機種
終段増幅器	F3SP53-4S	F3SP71-4S
駆動段増幅器	F3SP21-0N	F3SP22-0S
陽極電源	F3SP58-6S	F3SP76-7S ⇒F3SP71-4S

3.3 スキャンタイム理論値の計算

(1) 式を用いて得られた各々の CPU モジュールのスキャンタイム理論値に関するパラメータを Table5 に記載する。

T_c : PLC の CPU モジュール毎に固有の共通処理時間である。いずれも換装による CPU 機能の向上により現使用機種と後継機種の比較で 1/3 程度に短縮されることが判明した。

T_a : PLC の CPU モジュールとその他のモジュールとの接続によって発生する周辺処理時間である。厳密に記載すると、周辺処理はラダープログラムと並行して処理される部分と、他の部分はプログラムの処理とは別で独立した処理がなされる部分の 2 種に分

類できる。Table5 では、独立して試行される周辺処理としてスキャンタイムの計算に用いた時間を記載した。

$\Sigma Ti \cdot Ci$: ラダープログラムの処理時間である。Table5 では PLC 起動より十分に時間経過し、定常状態となった際に予想されるスキャンタイムを記載する。現使用機種と比較して、後継機種は命令処理時間 Ti が多数種類において短縮されているため、Table5 に記載のようにプログラム全体の処理時間が短縮されると考えられる。

以上のパラメータにより得られたスキャンタイム理論値 T_s により、どの程度高速化されるか考察できた。 T_s を用いて、実測値を評価した。

Table5 スキャンタイム計算に関するパラメータ

単位 μs	T_c	T_a	$\Sigma Ti \cdot Ci$	T_s
終段 増幅器	F3SP53-4S			
	200	72	1213	1485
	F3SP71-4S			
	65	25	735	825
駆動段 増幅器	F3SP21-0N			
	500	56	1152	1708
	F3SP22-0S			
	200	24	536	760
陽極 電源	F3SP58-6S			
	200	36	145	381
	F3SP71-4S			
	65	25	91	181

3.4 スキャンタイム実測

(1) 式による各ラダープログラムのスキャンタイム計算結果と換装作業の過程で測定した定常状態でのスキャンタイムを Table6 に示す。実測値の欄は、測定中に変動した値の範囲を記載した。

測定の結果、後継機ではスキャンタイムが高速化されていること、及び理論値と実測値は概ね同程度の値を示していると確認できた。F3SP21-0N で実測値が理論値より高くなったのは、装置の老朽化のためと考えられる。

Table6 より、駆動段増幅器、陽極電源の新機種ではスキャンタイムは理論値と同等か、さらに低い値と

なったが、終段増幅器内 F3SP71-4S では理論値より高い値が測定された。

Table6 各 PLC のスキャンタイム理論値と実測値

単位 μs 最小~最大	現使用機種		後継機種	
	計算	実測	計算	実測
終段 増幅器	F3SP53-4S		F3SP71-4S	
	1485	1500	825	900~1000
駆動段 増幅器	F3SP21-0N		F3SP22-0S	
	1708	2000~2200	760	500
陽極 電源	F3SP58-6S		F3SP71-4S	
	381	400~500	181	100~200

4 まとめ

本誌では、J-PARC 高周波システムの MPS の概要と構成、将来的に継続使用が不可能な PLC、CPU モジュールの後継機種への換装作業について記載した。同時に J-PARC の陽子ビーム大強度化の際に必要な MPS の高速化を目的として、PLC の処理速度となるスキャンタイムの測定を行い、前後機種それぞれの理論値、実測値の比較を行った。その結果、CPU 機能の向上によるスキャンタイムの短縮、すなわち MPS の高速化が実現できることを確認できた。

しかしながら、課題として終段増幅器にて使用される F3SP71-4S のスキャンタイム速度が予想より短縮されなかったことがあげられる。そのため今後は、全機種 of PLC 換装作業と並行して、ラダープログラムの書き換え等による更なるスキャンタイムの高速化のための調査も継続する。

参考文献

- [1] 山崎良成、“高周波加速装置”、高エネルギー加速器研究セミナーOHO、1984年、P1-2.
- [2] 横河電機株式会社、“FA-M3/e-RT3 販売終了品一覧”、2017年11月、p2
- [3] 横河電機株式会社、“シーケンス CPU 説明書機能編 (F3SP71,76,-□N/-□S 対応) ”、A7-4、スキャンタイム計算例
- [4] 横河電機株式会社、“シーケンス CPU 説明書機能編 (F3SP22,28,38,53,58,59,-□N/-□H/-□S 対応) ”、7-4、スキャンタイム計算例
- [5] 横河電機株式会社、“シーケンス CPU 説明書命令編 ”、付録3、ラダーシーケンス命令一覧

KEK-PF ハイブリッド運転用の光パルスセクター2

○田中宏和^{A)}、足立純一^{A)}、小菅隆^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 放射光研究施設

概要

KEK-PF ハイブリッド運転用の光パルスセクターは約 100ps のパルス軟 X 線を取り出す開口時間 360ns の加速器同期の超高速シャッターである。

現在、空気軸受型の 1 号機と 2 号機を製作し運用している。さらに磁気軸受型の 3 号機を開発中である。

1 号機は、設置難易度の高さから設置時間が多く必要で、限られた実験時間で測定ができることが求められる放射光実験としては望ましくなく、現在、実効的な開口が狭いが繰り返しを高めることにより光量を維持し、設置難易度を下げた 2 号機を主に TOF 実験にパルス光を供給している。

3 号機は周速の高速化により、スリット幅が 80 マイクロメートル程度に拡大できた。これにより、性能向上とともに、ワイヤー放電加工が使えるように設計されているが、現実には、要求精度通りの加工が難しいという状況であり、高繰り返しのパルスセクターとしては完成していないが、現状を報告する。

1 経緯

PF ハイブリッド運転モードは 400mA のバンチトレイン部と 362ns のダークギャップの中にある 50mA の孤立バンチ部からなる運転モードである。

この運転により時分割実験などに必要なパルス幅 100ps の放射光と、時間平均的な測定結果を得るための平均輝度の両方を実現できている。

しかし、そのために、孤立バンチ部の事象を弁別することが求められるため、従前のシングルバンチ運転モードに比較して、パルス光のみを取り出す加速器同期超高速シャッターであるパルスセクターか、高速な信号処理により 362ns の間だけの測定デ

ータを収集する必要がある。

高速な信号処理による選別には、高速なプリアンプにゲートをかけることや検出器の電源を高速に ON-OFF する方法などを KEK-PF では開発しているが、S/N が悪くノイズが目立つケースもあり、パルス光のみを取り出すことが求められることもある。

また、多電子同時計測実験による原子分子の多重電離の研究[1]に代表されるような短パルス性を生かして高精度な飛行時間測定(TOF)を行う場合には、原理的にそのようなゲートをかけることができず、パルスセクターの開発が必要であった。

そこで、我々は、SPring-8 で開発中であったパルスセクター[2]を基に、より開口時間の短いパルスセクターの開発を開始した。

2 1 号機の現状

前回の報告[3]では、空気軸受型で軸直交型(図 1)の 1 号機を製作し、実用試験中に圧空喪失による故障を報告したが、その後、軸受交換などの修理を行い、圧空喪失時の窒素ボンベによるバックアップシステムを構築し、再度、実用試験を行った。

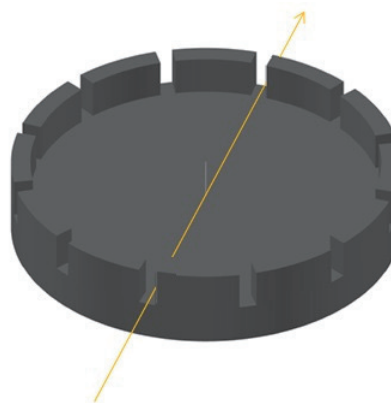


図 1. 軸直交型光パルスセクター概念図

その結果、パルスの切り出しを確認でき、S/Bの検証を行い、バックグラウンドはシグナルの2.9%程度であることを確認した[4]。

しかし、210m/sの周速であり、そこからジッタを加えて362ns以下の開口を実現するために、スリット幅が $50\mu\text{m}\pm 10\mu\text{m}$ と細く、マイクロエンドミル加工しか選択できなかった。そのため、加工のアスペクト比の問題で $700\mu\text{m}$ の横幅のスリットとなり、直径の200mm離れた、上流側と下流側のスリットを正確に光軸に一致させて設置するために1日以上時間を必要としたため、実験時間を消費してしまう問題があった。

なお、スリット数は100本で当初は33kHzで、後述する2号機とともに高回転化を行ったので、40kHzの繰り返しになったが、スリットの遠心力による変形や回転体の振動およびそれに起因すると思われるジッタの増大が起こったので、開口時間の短縮には至らなかった。

3 2号機の現状

1号機の問題を解決するため、回転軸を光軸と平行にした空気軸受軸平行型(図2)の2号機を製作し、実用に供している。

2号機は、光路制限を行うことにより、光路中をスリットが通過している時間だけシャッターが開くことになる。

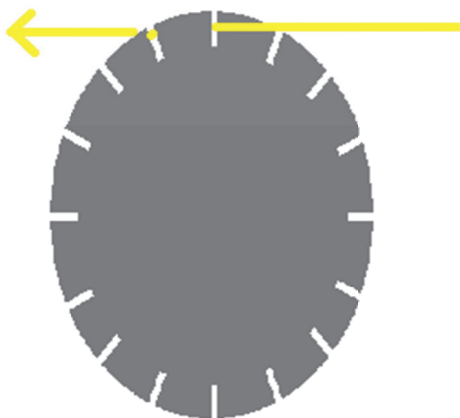


図2. 軸平行型パルスセレクター概念図

このため、210m/sの周速で $50\mu\text{m}\pm 10\mu\text{m}$ だと、光路制限スリットの開口をほとんど開けることができない。また、さらなるスリットの微細加工は難しい。そこで、安全余裕を削って430Hz(25800rpm)の共振点の手前まで高回転化することにした。これにより、406.7Hz(24400rpm)まで高速化し、255.5m/sまで高速化し、光路制限スリットの開口 $10\mu\text{m}$ 程度を許容できるようになった。

その後、実用試験を行い、1号機よりも格段に設置が早く、最短で4時間程度で位置合わせができることが分かった。

また、実効的な開口幅は $10\mu\text{m}$ だが、スリット長さが1.5mmに、スリット本数が360本で繰り返しが144kHzになったことにより実効的な光量は1号機と同等になった。

現在2号機を主にTOF実験用として運用しており、査読付き論文[5][6]が出るなど成果が出てきている。

4 3号機の開発

1号機、2号機の周速とジッタから計算されるスリット開口は $70\mu\text{m}$ であり、加工公差を考えると $60\mu\text{m}\pm 10\mu\text{m}$ にせざるを得ない。これを、さらに高速化することにより、 $70\mu\text{m}\pm 10\mu\text{m}$ より大きくすることができれば、 $50\mu\text{m}$ ワイヤーによる放電加工が採用でき、アスペクト比の問題がなくなるため、設置難易度を下げることができると考えた。高速化の障壁はモーターおよびドライバが35000rpm、PLL制御用のエンコーダーが30000rpmと共振点によるものが一番低い。共振点を決めているのはスリット回転体の材質と形状であるが、この形状を採用している理由は、高精度空気軸受の許容荷重であった。使用していた高精度空気軸受は剛性を高く保つため、クリアランスが非常に狭くトレランスが少ないため高い剛性にもかかわらず許容荷重が小さかった。

また、空気軸受は空気の流入があり、軟X線を用いるため高真空になっている光路を含む装置群に望ましくない。そのため、高真空で使用できる高速軸受の検討も行った結果、新しく1号機、2号機で使用したモーターと磁気軸受を組み合わせ、国産初の磁気軸受パルスセレクターを開発することとなった。

磁気軸受は、ターボ分子ポンプで使われていることからわかるように真空中での使用に問題がなく、真空に対しては樹脂からの脱ガスがあるのみで、外部からの流入やオイルなどの蒸気圧の高いものはない。また、軸受としては、剛性は高精度空気軸受ほどは高くないものの、非接触軸受としては比較的剛性はあり、クリアランスも大きいため許容荷重が大きい。

これを利用して、回転体の厚みを増やすことにより共振点を高めることができ、エンコーダーの限界である 500Hz(30000rpm)での運転ができるようになった。

スリット回転体はφ215mmで周速337.7m/sのスリット数は4本で製造し、レーザー同期実験に適した2kHzの繰り返しのパルスセレクターとして試験を行った。

しかし、共振点を回避する程度には厚みを増やすことができたが、さらに厚みが増すとスリット回転体の慣性がモーターの起動トルクを超えてしまうため、回し始められないことが問題となった。そのため、比較的薄く設計したことで、安全率が不足し、モーター回転子および軸受からの入熱による温度上昇によりクリーブ破壊を起こしてしまった(図3)。

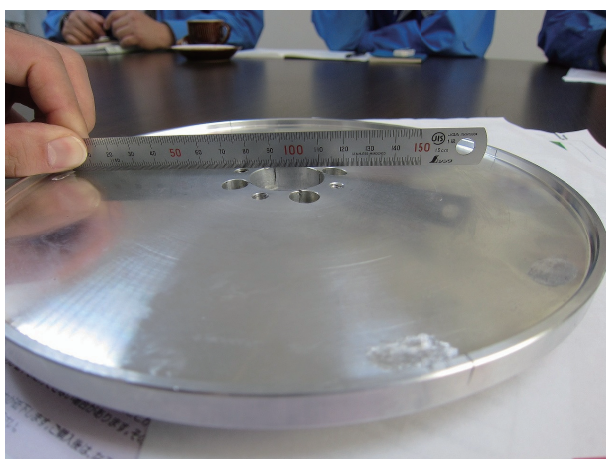


図3. クリーブ破壊したスリット回転体

その後、磁気軸受の回転体が理想的な真空断熱状態にあることから真空断熱状態での放熱経路として輻射を十分にとることを考え黒く塗ることで温度上昇を抑え、壊れなくすることに成功した[7]。

また、軸受の剛性が落ちたことにより、ジッタが

大きく観測された。しかし、これはエンコーダーの読み取り機と軸との距離が変動することによるものであり、PLL 制御されているとは言え回転体の慣性が大きいため、実態は観測されるほどジッタがないと推測された。これは、図4に示すように試験で得られた放射光で実証した開口時間が設計値の範囲に収まっているからである。

これについては、レーザー光などを用いたスリット自体のジッタ観測システムを構築して検証したいと考えている。

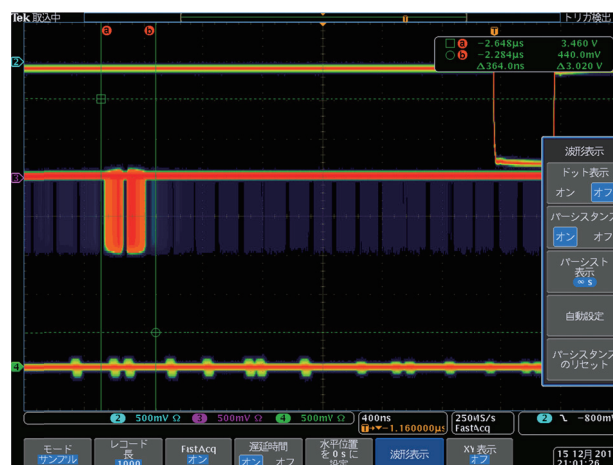


図4. PFのマルチバンチ運転モードの放射光を実際に切った試験を行った時のオシロスコープのハードコピー。(360nsの開口時間が見えている)。

5 3号機の高度化

ワイヤー放電加工機に高精度な回転ステージを組み合わせれば高繰り返し用のスリット回転体を製作することができると考え、ワイヤー放電加工機の高さ制約であるφ180mmのスリット回転体で高回転化をさらに進めることを考えた。

現在の回転数を決めているのはエンコーダーであり、エンコーダーの電気仕様から推測するともう少し高回転にも耐えうると推測された。35000rpmがモーターとドライバの限界であることから35000rpmで動作することを目標とすることにし、エンコーダーの回転体の強度についてもパルスセレクターメーカーに簡単に検討してもらい問題ないであろうと推測された。

そこで、パルスセレクターメーカー所有の別のモ

ーターシステムを使用して、パルスセクターメーカーの工場にてエンコーダーの高回転作動試験を行った。その結果、35000rpmの1.1倍以上の39000rpmでも正常に動作し、信号も取り出すことができたため、35000rpmでφ180mmスリット回転体にする技術的めどがたった。

しかし、50μmワイヤー放電加工用の高精度な回転テーブルが全周で高精度であるという仕様を満たしていないことが、製作にかかったところで分かったため、別の方法で加工できるよう設計を変更した。そのため、高繰り返しと低繰り返しをスリット長さを変更することによって、同じスリット回転体で行う計画は実現できなくなった。

そこで、高繰り返しのスリット回転体と低繰り返しのスリット回転体は交換可能なように設計しそれぞれ製造する方針である。高繰り返しのスリット回転体を用いて、現在2号機で供給しているTOF実験などにパルス光を供給する計画である。また、低繰り返しのスリット回転体によりレーザー同期実験にパルス光を供給する予定である。

現在、高繰り返しスリット回転体を製作しており、近々高繰り返しスリット回転体高度化3号機の実証試験を行い、2018年中には実用実験に供することを計画している。

表1に、開発したパルスセクターの性能をまとめる。

表1. PFハイブリッドモード用パルスセクターの性能表

	1号機	2号機	3号機 高度化前	3号機高度化 高繰り返し回転体	3号機高度化 低繰り返し回転体(予定)
開口時間	360ns	360ns	360ns	360ns	360ns
実効開口高	50±10μm	10μm	70±10μm	70±10μm	70±10μm
開口幅	0.7mm	1.5mm	3mm	3mm	3mm
繰り返し	40kHz	146kHz	2kHz	231kHz	1.2 or 2.3kHz
回転数	24400rpm	24400rpm	30000rpm	35000rpm	35000rpm
回転体直径	200mm	200mm	215mm	180mm	180mm
回転スリット 開口高	50±10μm	50±10μm	70±10μm	70±10μm	70±10μm
スリット数	100	360	4	396	2 or 4
周速	256m/s	256m/s	338m/s	330m/s	330m/s
回転ジッタ	±20ns	±20ns	±50ns	±50ns	±50ns
モーター	新明和工業 (株)製 Build-in DD	新明和工業 (株)製 Build-in DD	新明和工業 (株)製 Build-in DD	新明和工業(株)製 Build-in DD	新明和工業(株)製 Build-in DD
軸受	新明和工業 (株)製 空気軸受	新明和工業 (株)製 空気軸受	丸和電機 (株)製 磁気軸受	丸和電機(株)製 磁気軸受	丸和電機(株)製 磁気軸受
	設置難易度 が高い	10μm程度 の光路規制 スリットが 必要	ジッタの実 態はおそ らく±30ns程 度	ジッタの実態はおそ らく±30ns程度	ジッタの実態はおそ らく±30ns程度

参考文献

- [1] 彦坂泰正、伊藤健二、“原子分子の光多重電離ダイナミクス研究の新展開”、放射光 March 2008 Vol.21 No.2
- [2] 大沢仁志、他、「超高繰り返しシングルバンチ切り出しチョッパーの開発」、第24回日本放射光学学会年会放射光科学合同シンポジウム、茨城県つくば市、2011年1月7日～10日
- [3] 田中宏和、他、“KEK-PF ハイブリッド運転用の光パルスセレクター”、愛媛大学技術研究会、2013年3月7日、愛媛県松山市
- [4] 田中宏和、他、“VUV/SX パルスセレクターの開発”、第27回日本放射光学学会年会、2014年1月13日、広島県広島市
- [5] Y.Hikosaka *et al.*, "Photoelectron recapture and reemission process associated with double Auger decay in Ar", *Phys. Rev. A* **93**, 063412 (2016).
- [6] T. Kaneyasu *et al.*, "Single, double, and triple Auger decays from 1s shake-up states of the oxygen molecule", *J. Chem. Phys.* **147**, 104304 (2017).
- [7] 今井学、他、“磁気軸受パルスセレクターの温度上昇測定とその低減” 第29回日本放射光学学会年会、2016年1月9日、千葉県柏市

加速器安全管理システムの更新及び大規模システム更新にまつわる考察

○白川明広、佐武いつか、本間博幸、峠 暢一

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子入射器では、SuperKEKB 計画に向けた増強改造の一環で、2017年にそれまで2つに分かれていた放射線管理区域を1つに統合した。これに伴い、安全管理システムを大幅に更新した。当該施設は全長約600mであり、同システムの信号数は数百点に及ぶ。本稿では更新内容について主にソフトウェアの観点から報告すると共に、大規模な安全管理システムの更新時における難しさや留意点等について考察を加える。

1 電子陽電子入射器のアップグレード

電子陽電子入射器（以下「リニアック」と称する）は全長約600メートルの線形加速器である。電子及び陽電子ビームを加速し、隣接する4方面の円形加速器に供給する。供給先の加速器名称と供給するビームの種類を表1に示す。このうちSuperKEKB加速器へのビームは現在増強途上であり、陽電子の加速到達エネルギーを上げると共に(3.5GeV→4GeV)、ビームエミッタンスの高輝度化を図っている。このエミッタンス向上のため、リニアックの中間付近に隣接して新たに陽電子ダンピングリング(Damping Ring、以下「DR」と称する)を建設し、運用を開始しつつある^[1]。

リニアックの加速器本体は建屋の地下にある。地下の加速器室は、2010年秋季より2017年夏季まで、中間地点付近で厚さ1mのコンクリートブロックで空間的に分断されていた^[2]。加速器自体は連続していたが、リニアックの先頭側(上流側)でSuperKEKBに向けた研究開発を行いつつ、同時に後半側(下流側)で放射光加速器のユーザー実験向けのビーム供給が可能となっていた。電子銃(電子の発生源)はリニアックの先頭と分断地点のすぐ後ろの2箇所に設置されていた。今般、上記DRを導入するにあたり、DRとの合流部が分割地点となるため、分割壁面及びその直後の電子銃を撤去した(図1)。これにより、リニアックの運転は常に先頭の電子源から出射する形態となった。

表 1. 電子陽電子入射器からのビーム供給先加速器

供給先加速器	供給ビーム種別
KEKB High Energy Ring	7 GeV 電子
KEKB Low Energy Ring	4 GeV 陽電子
PF-Ring	2.5 GeV 電子
PF-AR	6.5 GeV 電子
DR (リニアックに還流)	1.1 GeV 陽電子

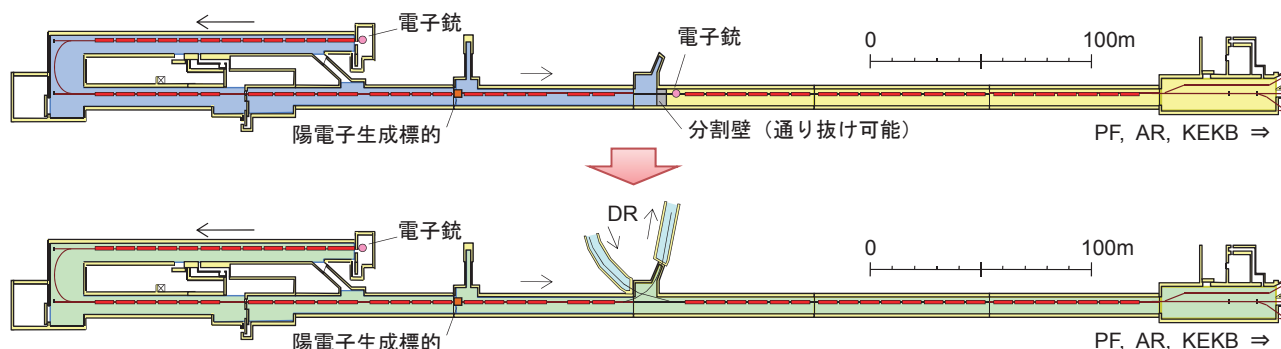


図 1. リニアック放射線管理区域統合及びダンピングリング合流

2 放射線安全管理システムの更新

2.1 リニアックの放射線安全管理

リニアックの運転（電子及び陽電子ビームの加速）では人体被ばく許容量を超える放射線が発生するため、放射線安全対策を要する。また対人保護を保障した上で、更に機器に対する放射線の影響の低減も図る。これらに関する必要条件を図 2 及び図 3 に簡略的に示す。図 2 にある「ビーム供給先」とは、具体的には表 1 に示す各加速器である。人的安全が保障されて運転可能となった状態を“LINAC READY”と称している。

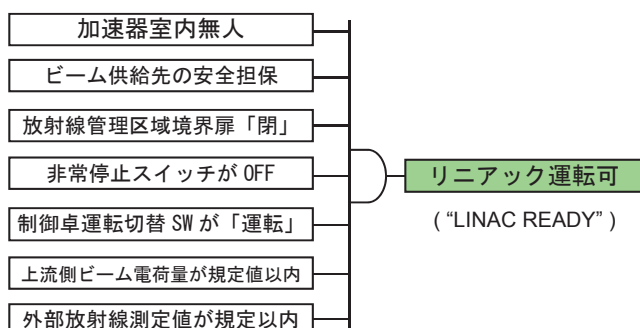


図 2. 人的放射線保護のためのリニアック運転条件

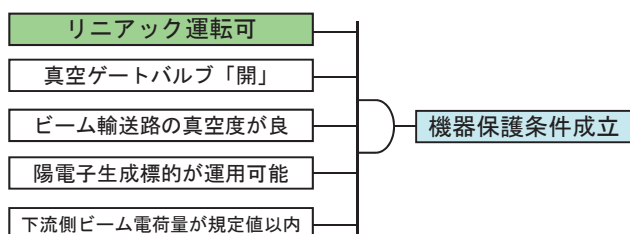


図 3. 機器保護のためのリニアック運転条件

上述の諸条件に関係する各種信号は PLC（プログラマブルコントローラ）に集約しており、PLC 上で安全管理のための論理構成を行っている。但し、リニアック緊急停止用の非常停止信号系統のみ、PLC を介さずに機械リレーのみの使用で構築している。

2.2 放射線管理区域統合に伴うシステム更新

放射線管理区域の統合前は、上流／下流で独立した運転を可能としていたため、図 2、図 3 に示した論理構成も原則として個別に構築していた。但し、分割地点において上流側のビームを物理的に止めるためのストッパーが無かったため、上流側運転の必要

条件として「下流側が運転許可状態である」が含まれていた。統合後は、全ての信号を一括で管理するよう変更した。これに際してはハードウェア上も多数の改造が発生している^[3]。

また下流側の電子銃に加え、分割部通用扉の電気錠や運転状況表示灯の撤去も行った。これらにまつわるソフトウェア改訂も実施した。

2.3 ダンピングリング運用開始に伴う更新

ダンピングリング（DR）はリニアックから入射した陽電子ビームを周回させ、高輝度化してリニアックに戻す。リニアックと密接な関係があるが、施設としてはリニアックとは独立した加速器となっている。従って、放射線安全管理も独自のシステムとした上で、リニアックとの間で必要な情報のやり取りを行う。

DR の運用開始に際し、図 2 に示した必要条件の「ビーム供給先の安全担保（READY）」の中に、DR からの READY を新たに加えた。一方 DR 側の視点に立つと、ビームを戻す相手、すなわちリニアックの READY 状態が DR 運転の必要条件の一つとなる。リニアックと DR が、互いに相手の READY が必要ということになり、これでは両方とも永遠に READY が成立しない。そこで、リニアック運転の必要条件から「DR READY」を除いた「LINAC OPERATION」と称する信号を定義し、これを DR 安全系に送る。DR 安全系ではこの LINAC OPERATION 受信を以てリニアックの受け入れ準備が整ったものとし、DR READY を成立させる。これで、リニアックの READY も成立する。これらの関係を図 4 に簡単に示す。

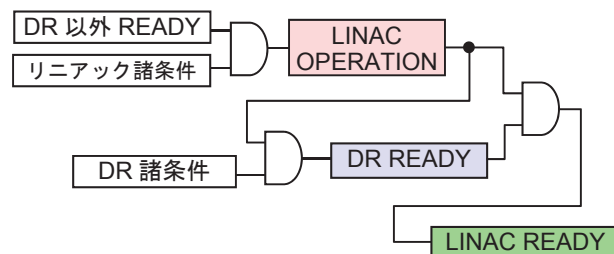


図 4. DR READY と LINAC READY の関係（概略）

上記 READY 信号の他、DR との間では

- 非常停止用信号
- 「DR 入射モード」確立用信号
- 境界領域の加速管への高周波印加許可信号

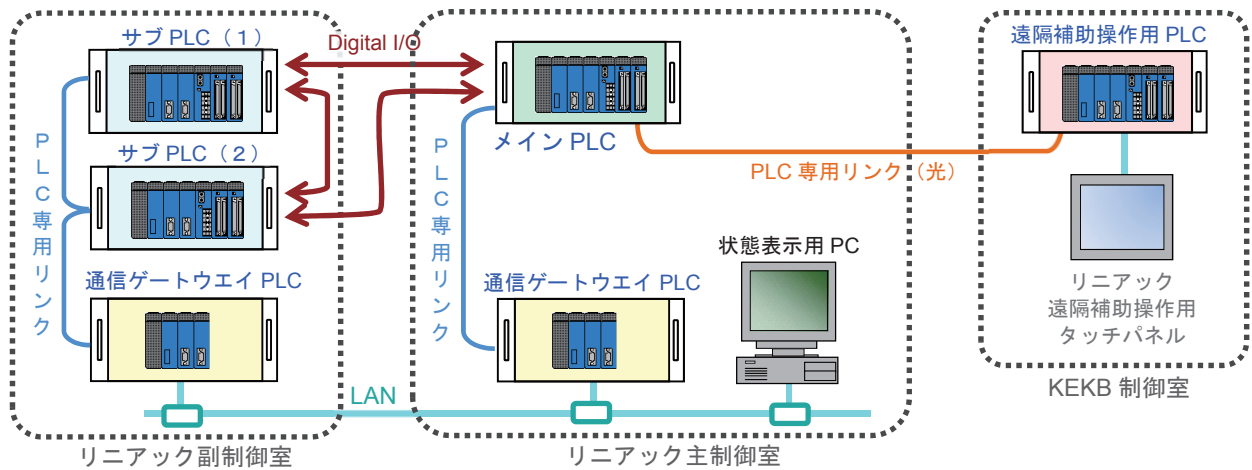


図 5. リニアック安全管理システムの PLC 構成

- ビーム輸送路の偏向電磁石の出力状態信号
- ビーム出力要求信号

といった信号の授受を行う。これらは既存のビーム供給先加速器群と同様の構成内容である。

2.4 ソフトウェア更新実施箇所

安全管理システムの根幹を構成する PLC は 2 箇所の制御室に計 3 台ある。リニアック建設の歴史的経緯により複数台となっており、機能を分担している。PLC の能力としては 1 台だけでも問題は無いが、取ってコストと手間をかけて集約するだけの利点は薄い。簡略なシステム構成図を図 5 に示す。上記 3 台の PLC の他に、システムの状態を外部コンピュータに送信するためのゲートウェイとして、通信専用 PLC を 2 台置いている。情報の流れは一方通行としており、LAN 上に障害が発生しても、安全管理システムには影響が及ばないようにしている。

ビーム供給先の 1 つである SuperKEKB 加速器はビーム入射頻度も高く（ほぼ連続入射）、リニアックと緊密に連携を取る必要がある。このため、KEKB 加速器制御室内にリニアック制御用端末を設け、遠隔制御を行っている。ビーム操作を遠隔で行うため、そのための PLC とタッチパネルのセットを 1 組設けている。

システム内には結局合計 6 台の PLC が存在する。今回の更新は広範囲に及ぶものであり、それら全ての PLC と、システム状態表示用の PC について、ソフトウェアを改訂することとなった。更新前後の制御卓 PC 上の表示画面をそれぞれ図 6 と図 7 に示す。

更新前は、上流と下流の諸条件を青色と黄色で区分けしていた（図 6）。

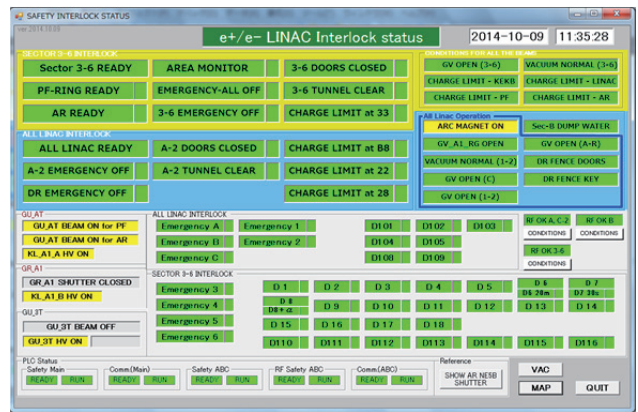


図 6. システム更新前のインターロック状態表示

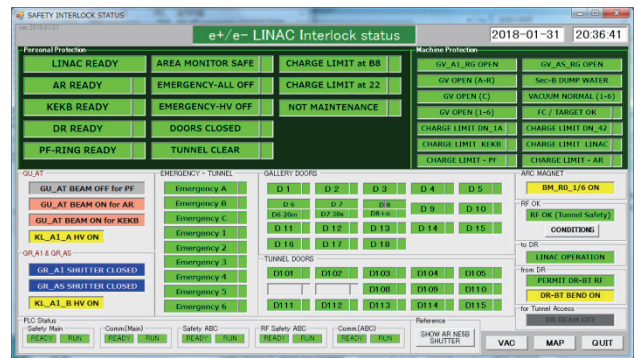


図 7. システム更新後のインターロック状態表示

3 安全管理システム更新時の留意点

3.1 更新作業のタイミング

リニアックは一度運転を開始すると昼夜連続で稼働する。年間の運転時間は数千時間（8～9 か月間）に及ぶ。停止するのは主に夏季の約 3 か月間で、装置の保守や実験の進捗に伴う改造等はその期間に集

中する。放射線安全管理システムは、加速器の運転中は当然のこと、停止期間中も連続稼働する。すなわち、停止時には加速器室に人が入室した際に加速器が起動するのを防ぎ、放射線安全を保障しなければならない。

安全管理システムの更新作業を行う場合、特に作業が広範囲に及ぶケースでは、作業時間確保のため、結局夏季の停止期間中に実施することになる。ハードウェア、ソフトウェア共に、放射線安全を損なわないよう細心の注意を払いながら作業を進行させる。

3.2 更新後の検証

安全管理システムの更新を行った後、加速器の運転開始前に、更新対象箇所が設計通りに改訂されたかの検証が必要である。その際、理想的には全ての機器を「試運転」させて「本運転」と同等の環境を用意できれば良いが、実際には大電力高周波源等の機器を保守期間中に動かすのは困難である。それらの台数も多い。また、加速器の運転状態を作るとは、加速器室内の「人払い」をすることであり、各方面の保守作業と干渉する。

ソフトウェアの検証に限っては、試運転に代わりシミュレーションという手段も考えられる。今般、PLC メーカー各社よりシミュレーションツールが提供されている。但し、多くの場合は PLC 1 台に対してツール（を搭載した PC）1 台が対応する。当方では安全管理の基幹に PLC が 3 台あり、それらに同時に PC を対応させる必要がある。複数のツール同士の連携も必要で、コスト的負担とも相まって、実施のハードルはやや高い。

更にソフトウェアシミュレーションの代わりとして、次のような方法も考えられる。

- 本運転と同型の PLC を同数用意
- PLC I/F の入力に擬似接点スイッチを接続
- 本運転用シーケンスに準じ擬似接点を開閉
- PLC からの出力を PLC モジュールのインジケーターで確認

PLC 同士の連携が必要なのはソフトウェアの場合と事情は同じであるが、こちらでは物理的に電線を接続すれば良い。一方で、裏を返せば配線作業に手数を要することになる。

参考までに、表 2 に PLC 1 台当たりの信号入出力点数を示す。なお、全ての信号において直流 24V が使用されている。

表 2. 安全系 PLC の信号入出力点数（概数）

PLC 種別	入力	出力
主制御室 メイン PLC	200 点	140 点
副制御室 サブ PLC (1)	50 点	30 点
副制御室 サブ PLC (2)	40 点	10 点

4 考察

システム更新後の運転前の検証方法には、完璧なものはない。究極には運転開始後にデバッグを行えば目的は達成されるが、リニアックの運転スケジュールは恒常的に余裕が少ないため、可能な限り運転前に完成度を上げておきたい。現状では、保守期間の終了近くに、各方面と日程調整の上、加速器室を無人化して検証を実施している。

5 まとめ

電子陽電子入射器において、SuperKEKB 計画に向けた増強改造の一環で、2 つに分かれていた放射線管理区域を 1 つに統合し、安全管理システムを大幅に更新した。ハードウェア、ソフトウェア共に大規模な改訂があった。

安全管理システムの更新に際しては、加速器の停止期間中でも可能な限り無停止とし、放射線安全を保障しなければならない。更新後の効果的、効率的な検証を模索している。

参考文献

- [1] 佐藤 政則、“SuperKEKB 入射器コミッションングの現状 (IV)”、第 14 回日本加速器学会年会、平成 29 年 8 月
- [2] 白川 明広 他、“加速器入域管理システムの増設”、平成 22 年度熊本大学総合技術研究会、平成 23 年 3 月
- [3] 佐武 いつか 他、“KEK 電子陽電子入射器における安全管理システムの改変および改良”、平成 29 年度核融合科学研究所技術研究会、平成 30 年 3 月

環境放射線及び放射能の監視

○ 加藤明己^{A)}、三宅 均^{A)}、林 浩^{A)}、岩田智恵^{A)}、赤田尚史^{B)}、
重水素実験推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

1. はじめに

核融合科学研究所では、核融合発電を見通せる高性能プラズマの実現に向けて平成 29 年 3 月 7 日より重水素を用いたプラズマ実験を開始した。この重水素実験に伴い微量ではあるが中性子とトリチウムが発生するが、関連法令、協定書・覚書、安全管理計画を遵守し実施されている。研究所では、施設内管理区域の作業環境や周辺環境に重水素実験の影響が無いことを確認するため、重水素実験開始前から環境放射能モニタリングおよび管理区域内作業環境汚染検査を実施しデータを蓄積している。ここでは、環境放射線及び放射能監視業務の一部として、環境試料分析と管理区域内汚染検査及び清掃で回収される埃の検査手法と結果について報告する。

2. 対象とする試料

当研究所でモニタリングとして測定している敷地内及び管理区域内での対象試料とその頻度、対象とする放射線の種類を表 1 に示す。定期モニタリング試料と、作業や事象に伴い発生・測定する試料があり、対象とする放射線の種類も異なる。測定結果は、所定のフォーマットに従いとりまとめ、報告している。

表 1. 核融合科学研究所放射能測定

	対象	測定周期	対象放射線
敷地内	松葉	3ヶ月毎	γ線
	土壌	3ヶ月毎	γ線
	大気中浮遊粒子	1ヶ月毎	γ線
	大気降下物	1ヶ月毎	γ線
管理区域内	スミア	1ヶ月毎	γ線、β線
		作業開始前後	γ線、β線
	排水	排水前	γ線、β線
	冷却水	実験前後	γ線、β線
	イオン交換樹脂	実験前後	γ線、β線
	排気	毎週	β線
	呼気	作業後	β線
	空間線量	1ヶ月毎	γ線
	作業環境	1ヶ月毎	γ線
	埃	1ヶ月毎	γ線

2. 1 松葉

大型ヘリカル実験棟西側松林より、その年に成長した一年葉を約 150g 採取した (図 1)。採取した松葉は 80°C の乾燥機で 1 日乾燥させた後、ミキサーで粉碎し、容器に詰めて測定用試料とした。松葉中 γ 線放出核種濃度は、高純度ゲルマニウム半導体検出器 (HPGe, GX-3018, Canberra, USA) を用いて 8 万秒測定をおこなう。測定に用いる HPGe は大型ヘリカル実験棟管理区域内に設置している。この装置は検出部を 10cm の鉛遮蔽体の中に設置することでバックグラウンド γ 線を低減している (図 2)。2MeV のエネルギーまでの γ 線に対して 0.5eV の分解能で測定することが可能であり、エネルギーに毎に核種を同定することができる。



図 1. 採取した松葉



図 2. 高純度ゲルマニウム半導体検出器

2. 2 スミア

管理区域内の各実験室について、室内汚染とその拡散状況を確認するため、スミアろ紙を用いた入口床汚染検査を月に一度実施している。任意の面積の床面をふき取ったスミアろ紙は、持ち手部分を取り除き専用試料皿にセットする（図3）。試料皿にのせたスミアろ紙は窓なし 2πガスフロー型比例計数管（LBC-4211B, Hitachi : 図4）を用いてβ線測定を行う。この装置は、1インチφの検出器により試料に含まれるβ線をカウントするものであり、最大50個の試料を自動測定できる。



図3. スミアろ紙



図4. LBC-4211Bの外観

2.3 管理区域内清掃埃

研究所では、汚染の可能性が極めて低い管理区域内廊下等共用部分の清掃のため、自動お掃除ロボット Roomba（Roomba876, iRobot, USA : 図5）を使用しており、現在管理区域内で10台のお掃除ロボット

を使用している。使用の際は適宜スミアろ紙を用いて周辺の汚染が無いことを確認している。管理区域内作業終了後の1時から50分間自動で採取された埃は、月毎にとりまとめ、20mlのポリエチレンバイアルに回収した後、井戸型 NaI(Tl)シンチレーション・カウンタのオートウェルガンマシステム（AccuFLEX γ7001, Hiotech : 図6）により、1サンプルにつき、20分測定を3回繰り返し測定結果としている。



図5. お掃除ロボット Roomba が集めた埃

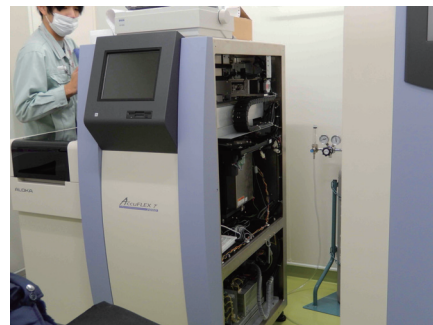


図6. オートウェルガンマシステム点検時

この装置は固体もしくは液体の試料から放出されるγ線を測定するものであり、γ線のスペクトルも取得可能であるが、HPGeと比較すると分解能は低く、汚染状況の把握に適した装置である。対象核種により測定効率が異なるため、測定結果は、安全側に見積もることで評価をしている。サンプルを置いた状況を図7に示す。

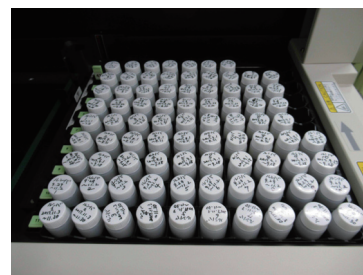


図7. サンプルセット状況

3. 結果

例として、HPGeで測定した2017年11月に採取した松葉試料の γ 線スペクトルを図8に示す。この時の松葉の含水率60.2%であった。当研究所の監視対象 γ 線放出核種であるMn-54、Fe-9、Co-58、Co-60については、測定を開始した2013年から一度も検出されたことはない。ウラン系列核種であるPb-212、宇宙線により生成される天然放射性核種であるBe-7、天然に幅広く存在するK-40が検出されている。

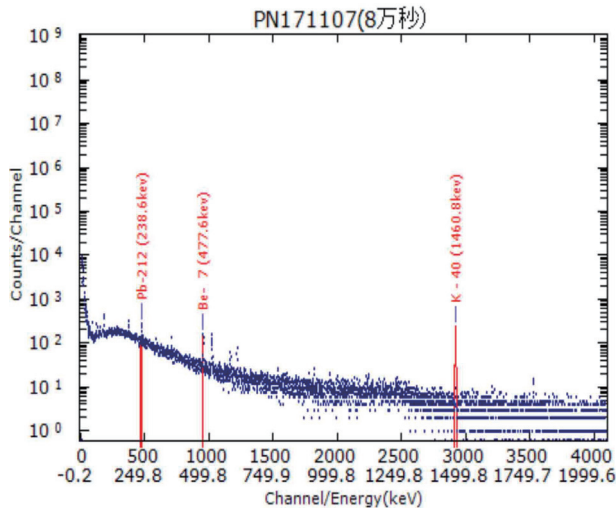
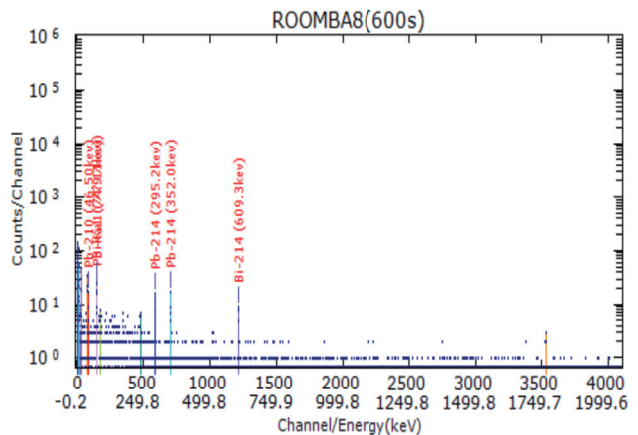


図8. 松葉の測定スペクトル

自動お掃除ロボットで採取された埃のオートウェルガンマシステムを用いて測定した結果の一部を表2に示す。ここで、2017年1月17日の測定結果については、3回の測定結果について各回の計数率を示す。測定を3回繰り返す間に、計数率が減少していることが分かる。2017年3月28日から3月31日にかけて採取した試料のように採取後数日経過後に測定した結果は、バックグラウンド計数率と同程度である。2017年4月24日午後4時から1時間かけて採取した埃について、回収後直ちにHPGeを用いて測定した γ 線スペクトルを図9に示す。このスペクトルから、検出有れている γ 線放出核種はウラン系列核種であるPb-210、Pb-214、Bi-214であることが分かる。これらの半減期はそれぞれ22.3年、26.8分、19.9分であることから、オートウェルガンマシステムを用いた測定結果に影響を及ぼしている γ 線放出核種は、ウラン系列の天然放射性核種であると推定される。

表2. Roomba回収埃のオートウェルガンマシステムによる測定

採取日	測定日	試料 (g)	結果		バックグラウンド	
			counts/sec		counts/sec	
2017年1月17日	2017年1月17日	0.93	12.6	± 0.3	2.1	± 0.1
			9.6	± 0.3	2.1	± 0.1
			7.1	± 0.2	2.1	± 0.1
2017年2月18日から2017年2月27日	2017年2月28日	1.54	2.3	± 0.1	2.1	± 0.1
2017年2月28日から2017年3月6日	2017年3月7日	0.92	2.1	± 0.1	2.1	± 0.1
2017年3月7日から2017年3月13日	2017年3月15日	0.11	2.1	± 0.1	2.1	± 0.1
2017年3月14日から2017年3月27日	2017年3月28日	0.06	2.0	± 0.1	2.1	± 0.1
2017年3月28日から2017年3月31日	2017年4月3日	1.30	2.2	± 0.1	2.0	± 0.1



2017年4月24日17時 10分間測定 2.57cps

図9. 埃のHPGeによる測定

4. まとめ

研究所では、施設内管理区域の作業環境や周辺環境に重水素実験の影響が無いことを確認するため、重水素実験開始前から環境放射能モニタリングおよび管理区域内作業環境汚染検査を実施しデータを蓄積してきた。最初の重水素実験以降の結果と実験前の結果に変化はなく、これまでのところ本実験が環境放射能に影響を与えていないこと及び管理区域内に汚染がないことが確認できた。

混合ガス計測用イオンゲージ感度校正装置の構築と動作について

○市村和也 A)

A)神戸大学工学研究科 技術部

概要

核融合炉においては重水素などの燃料ガスに加え、核融合反応によって生成されるヘリウムガスや、ダイバータ部保護のために入射されるアルゴンなどの冷却ガスが混在することが想定される。そのような混合ガス環境でのガス圧計測手法を確立、改善するため、任意の混合ガス環境を再現し、混合ガス中におけるイオンゲージの感度を調べるための実験装置を構築したので報告する。

1 研究背景

近年の核融合研究においては、ダイバータ部を高温のプラズマから保護するためにアルゴンなどの冷却ガスを入射し、非接触プラズマを形成することが試みられている。そのような実験ではダイバータ部におけるガス圧力の挙動を正確に計測することが重

要である。しかしながらダイバータ部近傍は、数 Pa 前後の比較的高いガス圧、プラズマからの熱負荷による高温化、プラズマ閉じ込めのための強磁場などガス圧力計測において天敵とも言える要件が揃っており、適用可能な計測手法は限られている。そのような環境に適応させた計測手段の一つに、イオンゲージの計測原理を応用した ASDEX ゲージとも呼ばれる高速イオンゲージ (図 1) があり、実際に大型装置におけるガス圧力計測で成果を挙げている。

ITER のような大型核融合実験装置においてもこの方式の高速イオンゲージは有力な計測機器になると考えられるが、さらに将来を見据える場合、実際の核融合炉においては核融合燃料ガスである重水素、反応生成物であるヘリウム、さらにダイバータ部冷却のために入射されるアルゴンなどの不純物ガスが混在することが想定され、このような環境において高速イオンゲージの感度や動作について調べておくことは、核融合研究にとって有益に成ると考えられる。そこで本研究では、混合ガス環境を模擬するために感度校正用の装置を構築し、実験を行った。

2 高速イオンゲージ (ASDEX ゲージ)

高速イオンゲージ (ASDEX ゲージ) はイオンゲージの一種であり、ゲージ周辺の中性ガスをイオン化させることで電流として検知し、ガス圧力を評価する。ゲージ本体は図 2 に示すようにフィラメントと 3 枚の電極から構成されている。電流によって加熱されたフィラメントから発生する熱電子をグリッド感の電位によって加速し、ガスに衝突させることでイオン化を行っている。通常の (BA ゲージなどの) イオンゲージと異なる点は、各電極が直線状に並べられていることと、0.6mm 程度の太い径をもつフィラメントを採用していることである。電極が直線状に配置されていることにより、磁場による感度への影

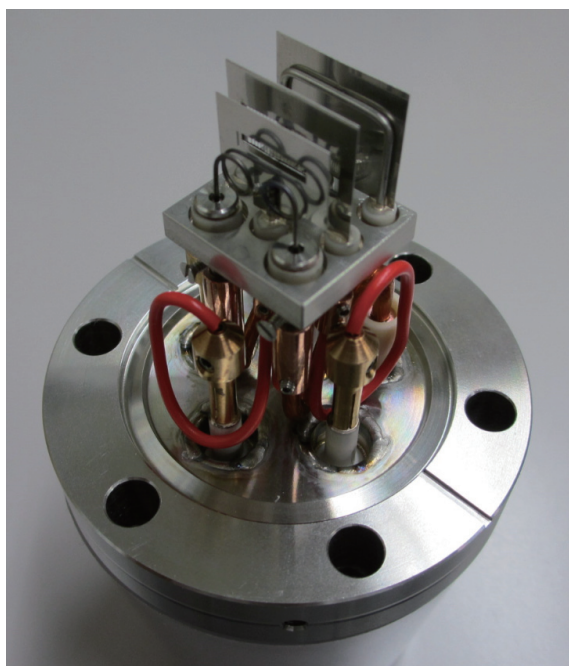


図 1. 高速イオンゲージの写真

響を一定の値に抑えることができる。また、太いフィラメントは剛性が高いため、磁場中でローレンツ力を受けても断線するリスクを最小限にすることができる。加速電極には200Vの定常電圧が印加され、熱電子の加速を行っているが、加速電極とフィラメントの間に設置されたコントロール電極には300Vで掃引される交流電圧(200V100V)を印加することが可能である。電圧変動の間隔で熱電子を遮断することにより、熱電子による電離とプラズマから流入し

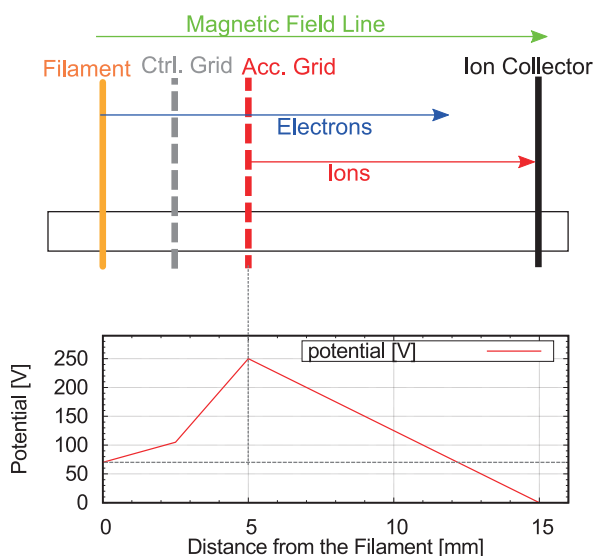


図3. 高速イオンゲージにおける各電極の役割と電位分布図

た電子による電離を分離して計測を行うことが可能になっている。

3 感度較正用装置の構築

混合ガスを用いた感度構成を行うため、図3のような較正装置を構築した。最大流量 100m のマスフローコントローラ(MFC)を備えた2本のガスラインからガスが導入され、キャパシタンスマノメータ(CM)型バトロングージ2基にて圧力のモニタリングを行っている。広範囲のガス圧力に適用するため、それぞれのバトロングージはそれぞれ異なる測定範囲を持つものを使用している。一方のバトロングージは低分解能で最大 133Pa までの測定範囲をもち、他方のゲージは高分解能で 2.66Pa までの計測が可能である。さらに真空排気ポンプの手前側には開度可変のバタフライバルブを備え、ガスの排気速度を制御している。流量と廃棄物の制御により、0.01Pa~10Pa程度の範囲までのガス圧力を、水素・ヘリウムや水素・アルゴンといった混合ガスにて実現した。このようにして得られた圧力を高速イオンゲージ(AIG)からの出力電流を比較することで、感度の評価が行われている。将来的には3系統目のガスラインを導入し3ガス混合状況の模擬を実現することや、磁石を使用して磁場による感度の変化を調査することなどが行われる予定である。

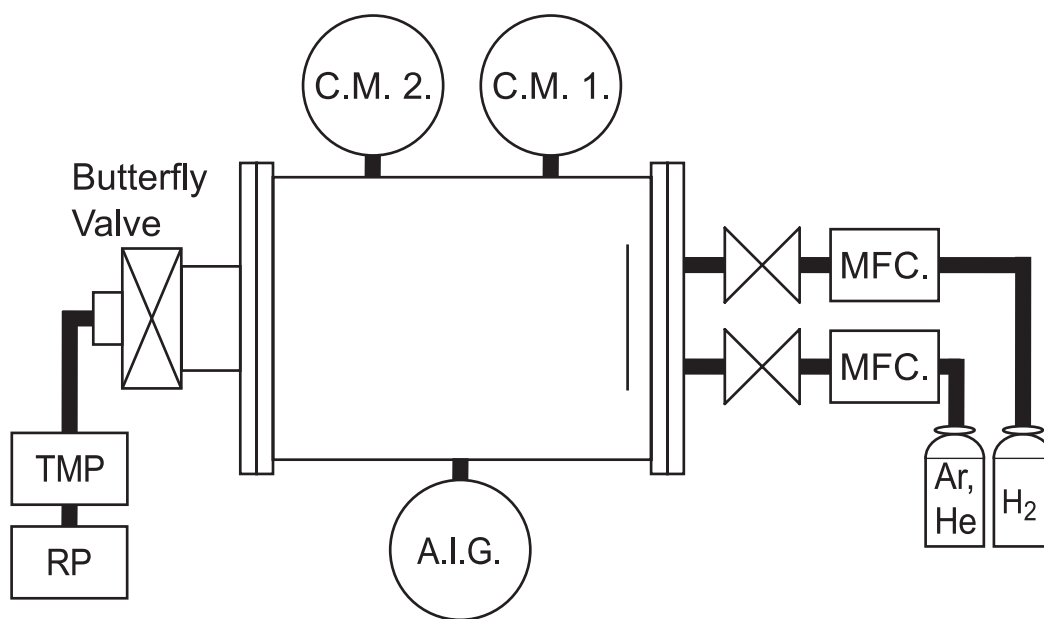


図2. 混合ガス用感度較正装置の模式図

圧力センサーFSR(Force Sensing Resistors)を用いた

実験計測への適用の可能性

○片桐俊彦

東京大学生産技術研究所 基礎系

概要

補強土擁壁の引っ張り補強材として用いられるジオセルと呼ばれる独特の立体構造を有する材料の形状や補強材料（以降、gravel）の組み合わせなどを変えながら経済的で合理的な検討を研究室で行っている。その際に部材の引っ張り強度や挙動に関して評価するために計測を行う必要がある。そこで、経済的な観点からコストパフォーマンスが高く、かつ扱いやすいセンサーを検討した結果、FSR(Force Sensing Resistors)^[1]と呼ばれる圧力センサーを用いて計測用回路設計などを行いジオセル等に設置し、それらの引っ張り時の挙動や圧力計測を行い、実験適用の可能性について検討してみたのでここに報告する。

1 センサー・回路を用いた実験その目的・方法

1.1 回路およびセンサーの概要

FSR からの信号を計測するため、センサーの出力信号を増幅し、出力する回路が必要である。そこで2台の汎用型のクワッドオペアンプ2台を組み込み、計8ch対応仕様の回路設計を行い構築することとした。併せてFSRの機構についても以下に詳述する。

1.2 回路構成について

FSRの信号を計測するに辺り、そのままでは出力信号が小さいため、信号を増幅する必要がある。今回は汎用型のクワッドタイプのオペアンプを使用し、可変抵抗(100kΩ)を備え付けることで加圧力の計測範囲を調整でき、目的の仕様に合うものとした。信号増幅出力の最大電圧幅を担うものでもある供給電源は+12Vとした。回路構成としては図1、2に示す様になっている。

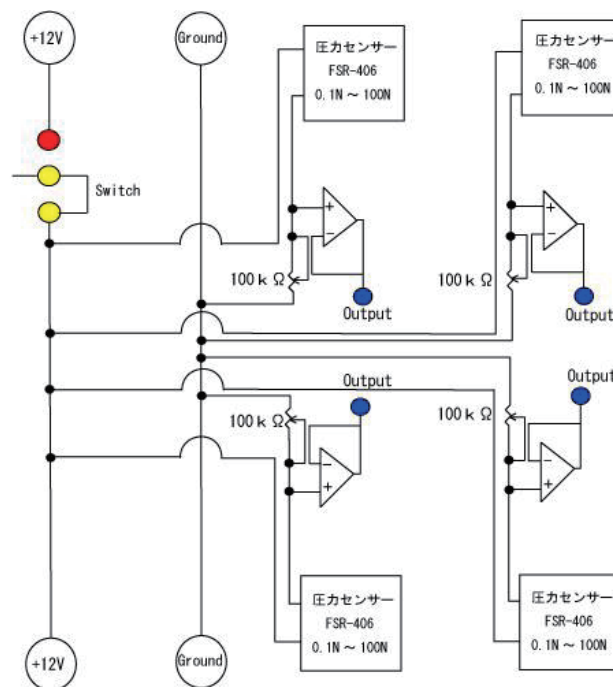


図1. 圧力センサー(FSR)計測回路構成図
(4ch仕様の回路図であるが8ch仕様で製作)

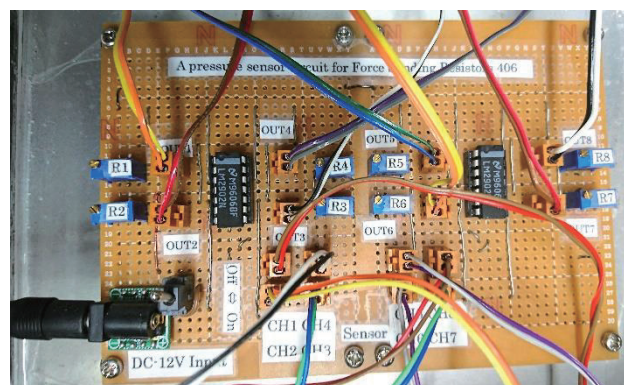


図2. 実際に組上げた圧力センサー用計測回路
(4chオペアンプ×2と可変抵抗×8を使用)

1.3 FSR について

FSR(Force Sensing Resistors)は PTF (Polymer thick film : 高分子圧膜フィルム) デバイスの一つであり、アクティブエリアに加えられた力(圧力)の増加に伴い、電気抵抗値が減少する特性を持っている。

ちなみに力や圧力に対する精度は使用する測定方法等にも因るが大凡±5%から±25%、また圧力分解能はフルスケールの±5%程度である。



図 3. 使用した圧力センサー(FSR406)

以下、FSR の一般的仕様について記述する。

表 1. FSR の一般仕様

項目	データ	備考
力の感知範囲	1N to 100N	システム構造に依存
圧力の感知範囲	0.1kg/cm ³ to 10kg/cm ³	システム構造に依存
最小感度	20g to 100g	システム & FSR の構造に依存
スタンドオフ抵抗値	1MΩ以下	負荷と歪なし
デバイス立ち上がり	抵抗値変化は加える圧力に即応	
寿命	1000 万回以上の繰返し加圧に耐える	
使用温度範囲	-30℃ to 70℃	フィルム素材に依存
最大電流	1mA/cm ²	
ノイズ/振動に対する影響	影響なし	

仕様のようにシステム構造の依存度が大きい点に留意すれば取扱い易さやコストパフォーマンスの点から使い勝手は良いと考えられる。

2 実験概要

2.1 FSR の設置方法

実際に当研究室にある Pull-out 試験装置を利用し引っ張り試験を行った。概要としては gravel No.1 (D₅₀=3.2mm) を用い、ジオセル(格子状)の合間(縦 40 mm×横 50 mm)に図 4 の様に引っ張り方向に面を向けて圧力が計測できる様に FSR を組み込み gravel で格子間を埋める。記録計の仕様上 3 秒毎に計測記録した。

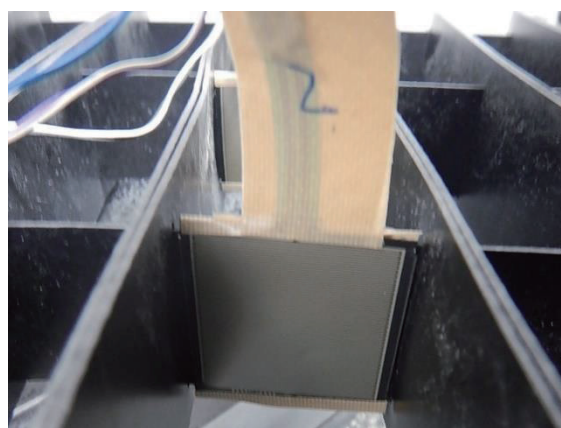


図 4. 補強材(ジオセル)に FSR を取り付けた状況

取付け方法について以下の 2 つの方法で行った。

1. ジオセルの表面に直接 FSR を設置する方法
2. ジオセルの表面に FSR の受動面と同じ面積をもつ鉄板を固定し、その上に FSR を設置する方法

取付け方法について 2 つの設置方法を採用する理由としては FSR の設置条件によりデータにどのような差異が生じるのかについて検証をするためである。

1.の方法では引っ張り試験時に格子間の gravel が動く際に FSR の設置されている前後のジオセルの動きや捩じれなどそれ自体の変形に与える影響性が考えられ、その複雑な動きを FSR により力の変動値として直接計測できる。

2.の方法ではジオセルの上に鉄板を設置することで計測されるジオセル面は鉄板の面積と同一かつ剛なものとなり、試験時に引っ張り側の面からの力が捉えられる反面、ジオセルの局所的な捩じり方向の動きが抑制され、FSR にかかる力が主に引っ張り側の力方向の影響を受けることになる。

2.2 設置の目的

前述の様にジオセルへの FSR の設置方法により得られるデータの意味合いが変わってくるため、今回は前述の 2 通りの方法について行い、併せて相違についても着目し検討することを主たる目的とする。

詳細にはジオセル全体の中心付近に位置する格子列に 4 つの FSR を引っ張り方向側に受信面を揃えて引っ張り方向に沿って配列し、ジオセルが引っ張られる際に FSR に gravel の力がかかり始める時間の割り出しと各 CH の FSR の力の相対的な比較について検証を行う事を主眼とした (図 5)。

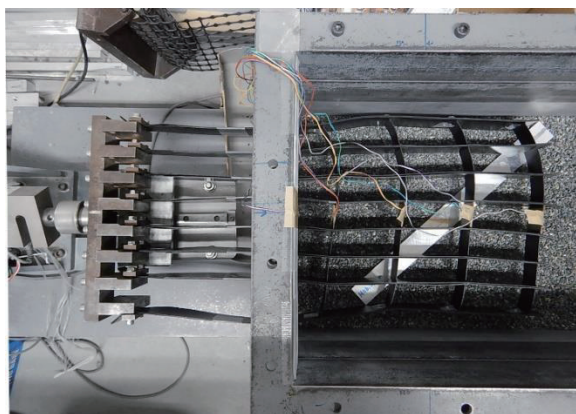


図 5. Pull-out 試験装置とジオセル中央楯列に FSR ×4 を設置してある状況

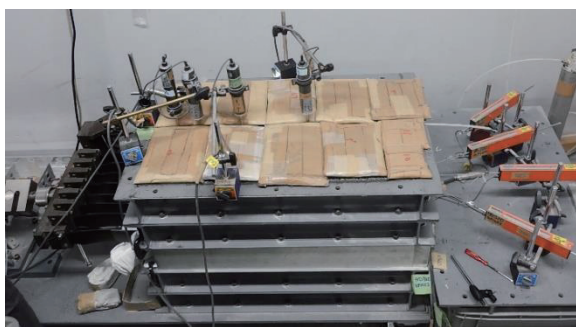


図 6. 実験前の装置全景

図 6 の様に実際の実験では鉄箱の中に FSR を取り付けた格子状のジオセルがあり、そのまま外側に延長して治具を通じてロードセルに固定、引っ張り試験装置で 2.5 mm/min. の速度で左方向に引っ張られる。

外部設置のロードセルはジオセルの全体にかかる荷重を計測し、FSR はジオセルの中心線上の局所の力を設置箇所毎に計測し把握するため、ジオセルの局所の有用な情報が得られる事となる。

3 実験結果

実験結果についてはジオセルへの FSR の取り付け方の相違による各データ整理と相互のデータ比較より得られた結果を検討を交え以下記述する。

3.1 ジオセルの動き始めのトリガーとしての FSR データの結果 (直接設置の場合)

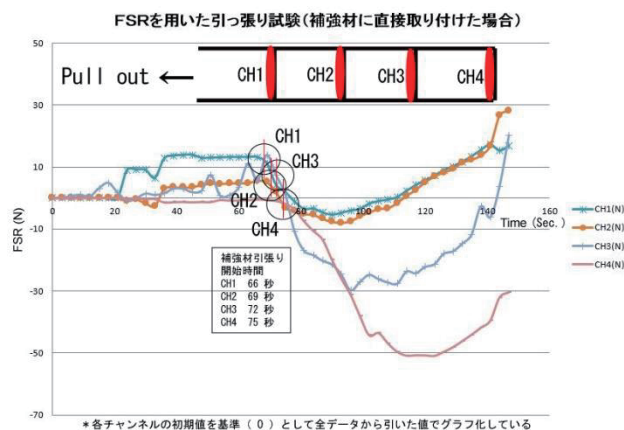


図 7. FSR を用いた引っ張り試験 (ジオセルに直接取り付けられた場合)

FSR を直接ジオセルに取り付けた場合の計測結果を図 7 に示す。図中に格子の設置位置とそれに対応するデータを示してある。スタート時の初期値を基準に 0 N と定義し、比較のため各 CH 毎に値を初期化して図示してある。

図 7 によれば各 FSR センサーの初期の力から引っ張り時間の経過に伴って、力の変化がみてとれる。

各格子で受ける力はジオセルが動き始める際に初期の力がかかり始め、各 gravel 間で元々生じていた空隙が徐々に埋まる中でジオセル周辺の gravel の収縮に伴って FSR にかかる力が抜け始めて、空隙が最終的になくなった段階で gravel の荷重が再度 FSR にかかり始め力が上昇に転じていく流れを示している。

全体が動き始める行程において徐々に力がかかり始めると共に gravel により空隙が埋まり始めると FSR 上の力が抜け始まる。その時点を動き始めと定義し、開始ポイントとして示してあるのが○印であり開始線を縦線で示している。これに因れば引っ張り装置に一番近い図 5 左側の FSR である CH1 から CH4 の順に時間差 (図中四角枠にて表記: 計測 66 秒地点から 3 秒置き) で動き出している事、また CH1

から CH4 に行くに従いジオセルにかかる力が大きくなっている。CH3 は挙動の揺らぎが大きく設置上での原因の可能性もあり検証の余地を残した。

3.2 ジオセルの動き始めのトリガーとしての FSR データの結果（鉄板と共に設置の場合）

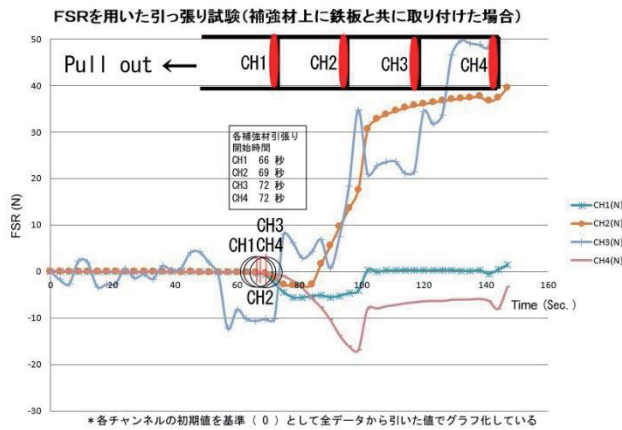


図 8. FSR を用いた引っ張り試験
(ジオセルに鉄板と共に取り付けた場合)

FSR を直接ジオセルに取り付けた場合の計測結果を図 8 に示す。図中に格子の設置位置とそれに対応するデータを示してある。

このケースでは FSR の裏に鉄板を挟み込んだ上でジオセルに設置してある。図 8 によれば引っ張り方向に近い CH2、3 が大きな力を受けている。また、図 7 には見られない空隙が埋まる行程の力の乱れが見られない。FSR が引っ張り方向の反対側から受けるジオセルの変形や gravel の空隙を埋めていく際に生じる力の影響を受けていない事を意味する。

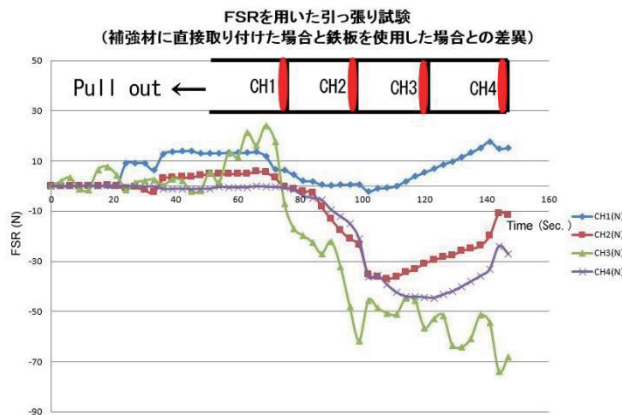


図 9. ジオセルに直接設置した場合と鉄板を挟んだ場合との各 CH 毎の力の差異

図 9 にジオセルに直接設置した場合と鉄板を挟んだ場合との各 CH 毎の力の差異を図示してある。これに因れば FSR に働く引っ張り方向の力以外にも生じている力が働いておりその影響がデータの差異として示されている。

□ まとめ

今回 FSR を用いた 2 つの計測方法について得られた知見を以下記述する。

1. ジオセルに gravel が与える力の軽微な動きは直接 FSR を貼り付ける事により、ジオセルの変形情報として引っ張り力の情報と共に、場所（各 CH）毎の情報として時刻歴で計測できる。また、ジオセルの変形性は柔軟で引っ張り方向の力以上に捩じり等の影響、全体系の影響を受けやすい。

2. ジオセルにかかる引っ張り方向の実際の力を計測するには鉄板の様な剛なものを FSR と対象物（今回はジオセル）の間に設置し、計測する事で他の影響を極力取り除く事ができ、引っ張り方向の力を効率よく取り出すことが可能である。

3. 引っ張る際に生じる FSR にかかる力について各 CH の計測値を比してみると FSR に gravel がどのような接触の仕方でも力がかかるかによって力の計測値が変動するため、実験ケース毎に注意が必要である。

4. FSR に力がかかり始め動き出すタイミングにおいては各計測データより CH1~4 の順番に 66 秒付近から 3 秒毎に概ね動き出している事が分かった。

5. FSR を使用する事でジオセルの動きが計測でき、計測目的によって得られる情報に差異があることが分かった。

今後の検討

今後は更に細かな設置を行うなどして局所の挙動などから全体的な系に至る詳細な情報を得るべく、その応用方法を探りたい。

参考文献

□□ <https://www.generationrobots.com/media/FSR400-Series-Integration-Guide.pdf#search=%27FSR+Model406%27>

3次元距離計測イメージセンサの高分解能化のための短パルス光源の開発

○高澤 大志

○静岡大学 技術部

はじめに

近年,CMOS イメージセンサの需要が高まっている.中でも Time-of-Flight 法 (以下,TOF 法) による距離撮像は,他の三角測量に基づく方式に比べて装置の小型化や計算コストの面で優位性があり,ジェスチャー認識などを始めとして広まりつつある.その一つとして,安全性向上のための自動車内でのジェスチャーによる機器制御の開発が進められているが,屋外使用下では太陽光などの外乱光の影響により分解能が劣化し,実用化を阻む大きな障害となっている.この障害を打破するために,短パルス型の TOF 撮像素子の開発を進めている.短パルス型 TOF 法は一般的な位相検出 TOF 法(Kinect などに用いられる)に比べて,短時間にエネルギーを集中させるため,外乱光の影響を受けにくい撮像が実現できる.パルス幅を狭くすることで,外乱光耐性の向上と更なる高分解能化が見込まれるが,現状のパルス幅は,LED の応答で律速されている.そのため,レーザダイオード (以下,LD) による新たな短パルス光源の開発が必要であった.

1 Time of Flight 法

TOF 法では,センサと同期された光源から光が照射され,その光が対象物から反射して返ってくるまでの光の飛行時間を計測することで対象物までの距離を

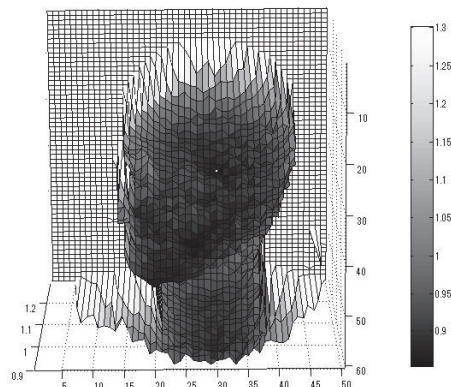


図 1-2. TOF 法での撮影画像

求めることができる.図 1-1 に TOF 法の概略図を示した.ここで L は対象物までの距離, c は光の速さ, T_d は光の飛行時間である.TO F 法により撮像した画像を図 1-2 に示す.この図のように,光が対象物から跳ね返ってくるまでの時間を計測することで,対象物までの距離画像を取得することができる.

2 LD 光源の開発

現状のパルス幅は,LED の応答で律速されている.そのため,LD による新たな短パルス光源の開発が必要であった.これまでの LED ではパルス幅 13ns 程度

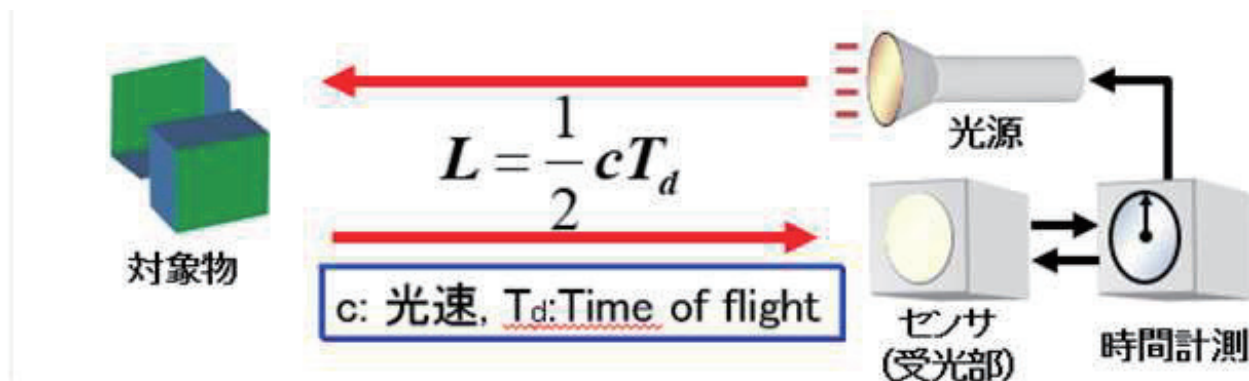


図 1-1.Time of Flight 法の原理

の応答が限界であったため、LED ではなく LD において 5ns 程度のパルス幅が実現できる光源を開発した。開発した光源を図 2 に示す。黒い筒の中の先端 1w の LD がついていて、外部のパルスによってパルス幅を制御できるコントローラがついている。黒い筒をつけた理由は、レーザーによる危険防止のため、黒い筒を出る部分での光源パワーをレーザークラス 1 になるように設計している。



図 2. 開発した LD 光源とコントローラ

3 分解能の測定

実際に、13ns の LED 光源と 5ns までのパルスが発生できる LD 光源を使い、TOF イメージセンサで分解能の比較測定を行った。図 3-1 が 13nsLED 光源での結果である。対象物まで 80cm の場所での分解能が 2.6mm 程度である。それに比べ、開発した LD 光源での結果を図 3-2 に示す。5ns の LD 光源では、60cm の距離での分解能が 0.9mm、80cm の距離でも 0.11mm と LED 光源に比べて大幅に分解能が向上できたことがわかる。

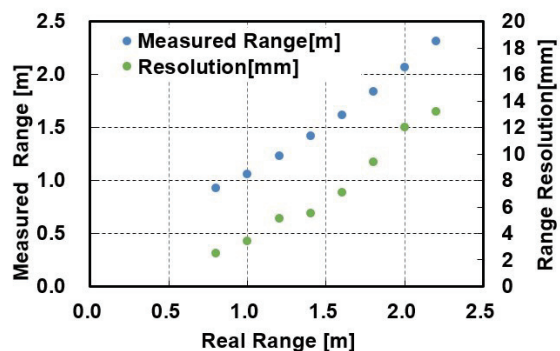


図 3-1. 13nsLED での距離分解能

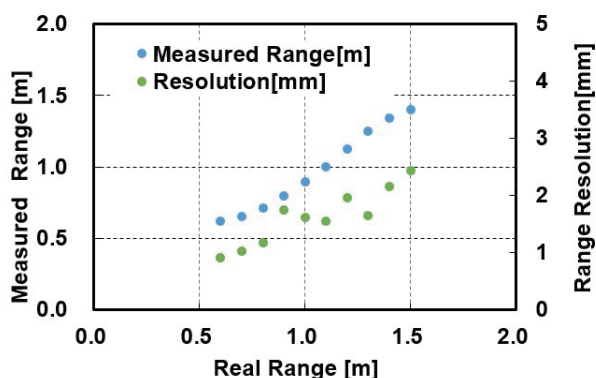


図 3-2. 5nsLD での距離分解能

4 まとめ

5ns 程度でパルス駆動ができる LD 光源を開発し、13nsLED パルスよりも TOF イメージセンサで分解能の向上を確認することができた。しかし、一方で距離線形性が劣化している部分もあり、原因の調査が必要である。今後は、TOF イメージセンサの太陽光下での使用を考え、定量的に背景光量を変えながら測定する人工太陽光発生光源等を開発し、太陽光下での分解能の劣化計測を行い、屋外での実用化へ向けて、計測が必要である。

謝辞

本研究は、JSPS 科学研究費、奨励研究、No. 17H00361 の助成によりなされたものであり、感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Spring,et al.,”The Lock-In CCD-Two-Dimensional Synchronous Detection of Light” IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS,VOL.31,NO.9,PP.1705-1708,SEPTEMBER 1995.
- [2] Robert Lange,et al.,”Solid-State Time-of-Flight Range Camera”IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS,VOL.37,NO.3,PP.390-397,MARCH 2001.
- [3] Bernhard Buttgen,et al,”High-Speed and High-Sensitive Demodulation Pixel for 3D-Imaging”SPIEDigital Library on 18 Mar 2012 to 133.70.158.104.
- [4] Cyrus S.Bamji,et al.,”A 0.13um CMOS System-on-Chip for a 512×424 Time-of-Flight Image Sensor With Multi-Frequency Photo-Demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC”IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS,VOL.50,NO.1,pp.303-319,JANUARY 2015.
- [5] S.-M. Han, et al., “A Time-of-Flight Range Image Sensor with Background Cancelling Lock-in Pixels Based on Lateral Electric Field Charge Modulation”IEEE J.Electron Devices Society, vol.3, no.3,pp. 267-275, May.2015.
- [6] Hanh Trang,et al.,”Design, implementation and evaluation of a TOF range image sensor using multi-tap lock-in pixels with cascaded charge draining and modulation gates ” Electronic Imaging,Image Sensors and Imaging Systems 2016,pp.1-6(6),2016/02/14.
- [7] Shoji Kawahito,et al.,”CMOS Lock-in Pixel Image Sensors with Lateral Electric Field Control for Time-Resolved Imaging”INTERNATIONALIMAGE SENSOR WORKSHOP,June.2013

Siemens 製 PLC を用いた TESPEL 入射装置の制御システム開発

○小川英樹^{A)}、横田光弘^{A)}、林浩己^{A)}、田村直樹^{B)}、前野博也^{A)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

はじめに

核融合研で開発された TESPEL(Tracer-Encapsulated Solid Pellet)^[1]をプラズマ中に入射すると、プラズマ中に局所的に不純物粒子を供給することができる。そのように入射された不純物粒子は、プラズマ中でトレーサーとして振る舞うので、不純物がプラズマ中でどのように輸送されるのかといった計測に利用されている。

来年度、核融合研とドイツのマックス・プランクプラズマ物理研究所(IPP)との国際共同研究の一環とし

て、TESPEL を入射するための装置を IPP のプラズマ実験装置(W7-X)^[2]に供与することになり、核融合研の技術職員が、研究者からの依頼を受けて、装置の設計・組み立て、制御システムの構築を進めてきた。

本報告では、TESPEL 入射装置の概要と制御システムの詳細について説明する。

1 装置概要

TESPEL 入射装置は、大きく分けて射出部と差動排気部から構成される。(図 1)

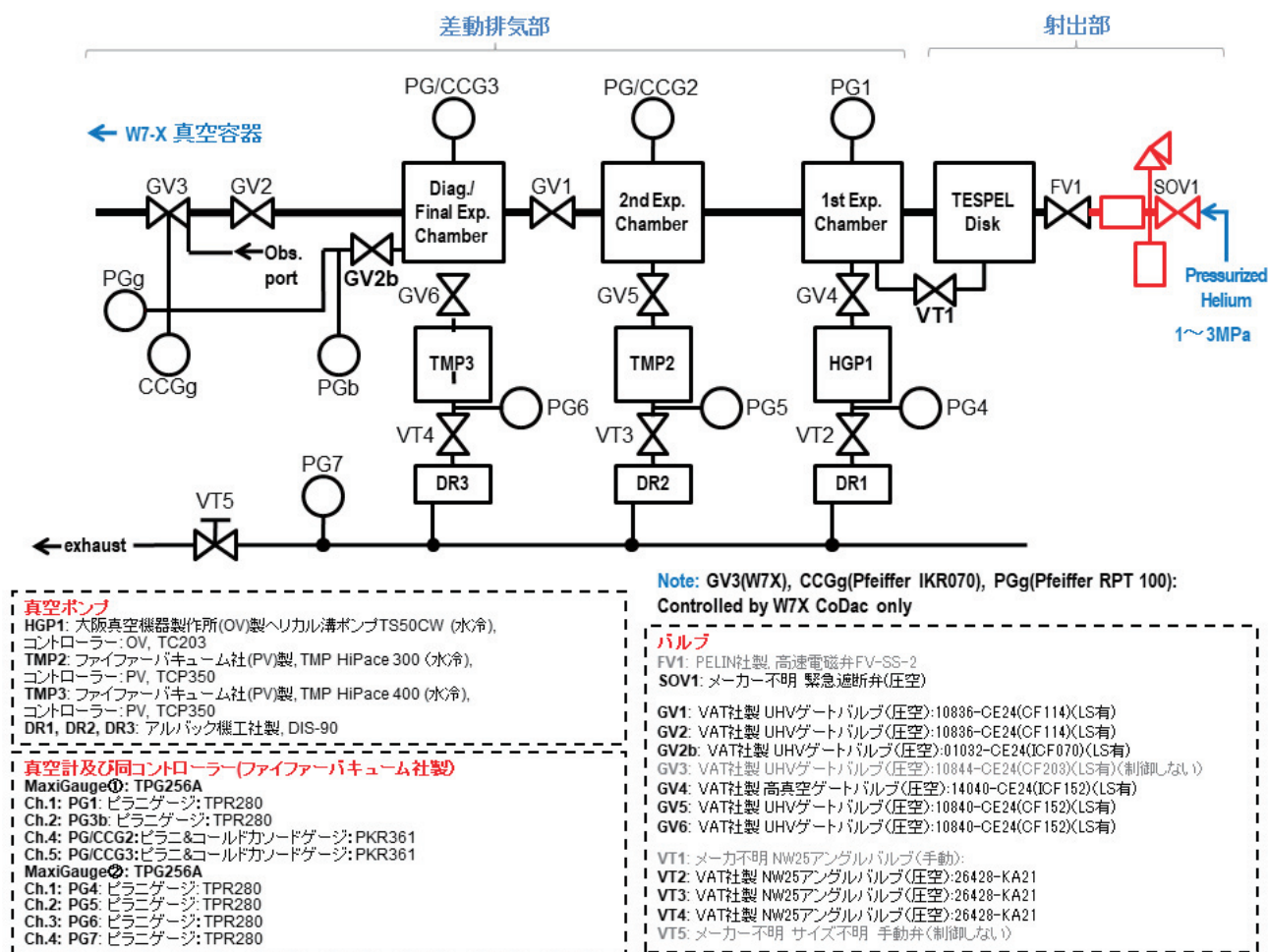


図 1. TESPEL 入射装置の系統図と制御対象

射出部には、リボルバー式の TESPEL 保持機構 (TESPEL 保持ディスクと呼ぶ)があり、直径 400~900 マイクロメートルの TESPEL を最大 59 発までセットすることができる。射出部は、中央制御装置から入射タイミング信号を受信すると、高速電磁弁(FV1)を開き、高圧(1~3 MPa)のヘリウムによって、吹き矢の原理により TESPEL が発射される。発射された TESPEL は差動排気部を通り、W7-X の真空容器内に生成されたプラズマ中に入射される。

2 制御システム

制御システムの構築にあたり、シーメンス製の PLC(Programmable Logic Controller)を使用すること、という条件が課せられていた。しかし核融合研では、これまで同製品を用いた開発経験がなかったため、製品情報の収集やツールの使用方法の調査からはじめる必要があった。

系統図からもわかるように、制御対象としては、ポンプ 6 台、バルブが 10 個、真空計のデータ取り込みが 8 点と比較的小規模であるため、PLC は S7-300 シリーズで十分と考えた。装置との信号取り合いに使用するリレーや端子台を全て合わせると、最終的に相当な部品点数となったが、輸送コスト節約と、ドイツ現地での配線作業の最小化のため、全ての部品を、あらかじめ専用の制御ボックス内に組んでおくこととした。(図 2)

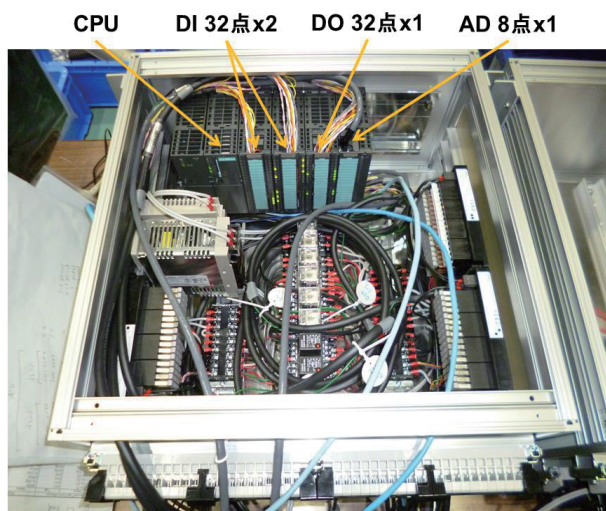


図 2. 制御ボックスの内部

なお、TESPEL 保持ディスクの制御部は別システムとして既に完成しており、今回の開発対象から外れている。

ラダー図編集ツールとして「STEP7 Ver.5.5」を、パソコンと PLC 間のデータ通信に「SOFTNET-IE S7 Lean」(以降 S7 Lean と呼ぶ)を利用した。S7 Lean には、OPC(OLE for Process Control)サーバ及び VB.Net 等で利用できるライブラリが含まれている。

OPC とは、マルチベンダ製品間や異なる OS にまたがってデータ交換を可能にする、安全で高信頼の産業通信用の標準規格である。今回のシステム構成ではそのメリットを生かし切れなかったが、複数ベンダの PLC や SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)が混在するようなシステムでは非常に有用な仕組みである。

HMI(Human Machine Interface)の開発には SHMIT(Standard HMI Template)^[3]を利用し、プログラミング作業の効率化を図った。OPC サーバとの通信部分について、参考となる情報が限られており、試行錯誤の繰り返しとなったが、S7 Lean 付属のサンプルプログラムと、シーメンスの Web ページなどから得た情報を基に、なんとか予定通りに完成させることができた。

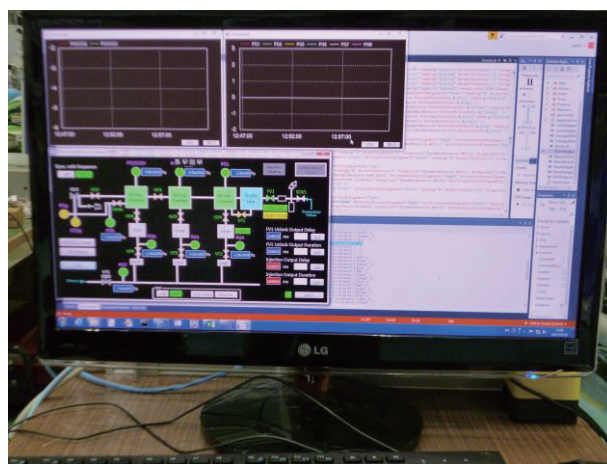


図 3. HMI 開発の様子

3 輸出規制

日本国内で開発した装置をドイツで使用するためには、国際輸出管理レジームに従い、外為法や政省令などで規制対象となっている貨物や技術を特定し、

表 1. リスト規制

種別	省令 (貨物)	政令 (技術)	主な規制品目
武器			
汎用品	1条	15条 の1	原子力専用品、または原子力に使用できる汎用品
	2条	15条 の2,3	化学兵器の原料 生物兵器の原料
	3条	16条	ミサイル・ロケット及び製造装置
	4条	17条	先端材料

全 15 項目

輸出許可を得る必要がある。

規制の種類としては、リスト規制とキャッチオール規制があり、これら両方をクリアする必要がある。

リスト規制では、輸出許可が必要な貨物や技術のスペックがあらかじめ決められている。今回は、PLCのスペックが輸出規制に該当しないことを証明するため、代理店を通してシーメンス社に、該否判定証明書の発行を依頼した。

一方キャッチオール規制は、輸出する貨物や技術の利用用途、および需要者の要件に対して行われる規制である。規制されていない国(ドイツを含む全27か国)に向けた輸出の場合、キャッチオール規制は対象外となるため、今回は手続きを省略することができた。

4 まとめ

ドイツの IPP との共同研究で使用する TESPEL 入射装置の設計・組み立て、および制御系の構築を、核融合研の技術職員が中心となって行った。

2018年1月下旬にドイツに向けて発送され、同年7月から開始される W7-X のプラズマ実験より、今回開発した装置が稼動する予定である。

実際に運転が始まると、組合せ試験で見つからなかった運用上のトラブルや、機能の追加依頼が発生

することが考えられる。そうした場合にもすぐに対応できるように、核融合研側にも実機の制御システムと同じ環境を用意している。

今回は、シーメンス製 PLC を用いた開発ノウハウだけでなく、産業通信用の標準規格である OPC や、輸出規制に関する知識も得ることができた。

核融合研では、各種協定に基づく国際共同研究が活発に行われている。今後も同様の依頼を受けることが考えられるため、今回得たノウハウを再整理し、迅速に対応できるよう、体制を整えておきたい。



図 4. 発送前の TESPEL 入射装置の様子

参考文献

- [1] 須藤滋: プラズマ・核融合学会誌 第 91 巻第 4 号(2015) P.251
- [2] <https://www.ipp.mpg.de/w7x>
- [3] 前野博也、他、“遠隔操作・監視用 HMI テンプレートの開発”、平成 28 年度東京大学総合技術研究会報告集、平成 15 年 3 月、P-3-1

プログラミング言語 Python を用いた STARS の EPICS ゲートウェイプログラムの開発

○永谷 康子、小菅 隆

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所放射光科学研究施設

概要

STARS は、TCP/IP ソケットを使用してテキストのメッセージの送受を行うクライアント・サーバ型の基本ソフトウェアで、サーバはプログラミング言語 Perl で書かれているため様々な OS で動作する。

また Perl、C、Java、.Net、Python 等様々なプログラミング言語に対応したインターフェイスライブラリや開発支援ツールを使ってクライアントプログラムを書くことができる。STARS はオープンソースとして Web で公開しており、誰でも利用可能である。

本研究会では、加速器の制御等で使用されている基本ソフトウェア EPICS を対象とした STARS のゲートウェイプログラムの開発の現状について報告する。

1 STARS

STARS^{[1][2]} (Simple Transmission and Retrieval System) は、高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 (KEK-PF) で開発された基本ソフトウェアで、KEK 放射光のビームライン制御やビームライン・インターロックシステム等で使用されている。

STARS は、1 つの STARS サーバと複数の STARS クライアントから構成され、各 STARS クライアントは、TCP/IP ソケットを使用して STARS サーバに接続する。STARS クライアントはユニークな名前 (ノー

ド名) を持ち、STARS のテキストフォーマットに沿ったテキストを送受することで、STARS サーバに接続する他の STARS クライアントとのアプリケーション間通信を行う。

2 EPICS

EPICS^[3] (Experimental Physics and Industrial Control System) は、加速器をはじめとする大規模な実験用機器の制御等で使用されている分散型ソフトウェアフレームワークで、KEK においても多くの加速器の制御で利用されている。

EPICS はサーバ・クライアント型システムで、TCP/UDP を使用したチャンネルアクセス (Channel Access, CA) と呼ばれるプロトコルを使用して、ユニークな名前を持つ状態変数 (Process Variables, PV) の値の参照及び値の更新によって制御を行う。この PV を有するのがサーバプログラムとなる。

3 STARS EPICS ゲートウェイプログラムについて

STARS の EPICS ゲートウェイプログラムは STARS のクライアントプログラムとしてそして EPICS クライアントプログラムとして動作する。(図 1)

STARS EPICS ゲートウェイプログラムは、STARS

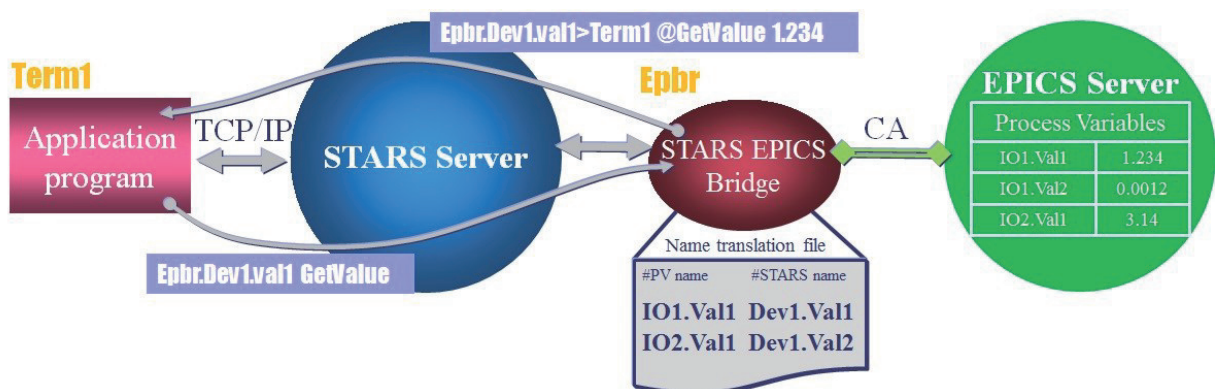


図 1. STARS EPICS ゲートウェイプログラム概念図

側からの PV の値に対する操作要求を受け付けて PV の値への問い合わせや書き換えを行う。また EPICS 側の PV の値の変更を監視し最新の PV の値を STARS 側に送信する機能を有している。

3.1 STARS EPICS ゲートウェイプログラムで扱う STARS メッセージ

STARS のテキストフォーマットは、「送信元ノード名」+「>」+「宛先ノード名」+「空白」+「メッセージ文字列」となっており、STARS の PV の値に対する操作要求と、STARS 側への PV の最新の値の送信に対応する STARS メッセージ文字列は表 1 の通りである。

表 1. STARS における PV の値への処理に対応するメッセージ文字列

PV の値	STARS メッセージ文字列
問い合わせ	“GetValue”
更新	“SetValue”+「空白」+「値」
最新の値の送信	“_ChangedValue”+「空白」+「値」

STARS EPICS ゲートウェイプログラムを利用した KEK-PF の PF リングカレント値のモニタリングを、実際にターミナル上から STARS メッセージの送受で行っている様子を紹介する。(図 2)

```
$ telnet localhost 6057
Trying 127.0.0.1...
Connected to localhost.
Escape character is '^]'.
4501
term] (password)
System>term] Ok:
System>term] @
e2spf.PFRing.DCCT @GetValue 最新のKEK-PF リングカレントの問い合わせ
e2spf.PFRing.DCCT @GetValue 435.8089291 最新のKEK-PFリングカレント値の応答結果
e2spf.PFRing.DCCT @GetValue
e2spf.PFRing.DCCT @term] @GetValue 435.7723287

System>term] @
System | |son e2spf.PFRing.DCCT STARSにおけるKEK-PFのリングカレント値のモニタリング開始指示
System>term] @ | |son Node e2spf.PFRing.DCCT has been registered.
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.5000335
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4951083
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4911801 最新のKEK-PF リングカレント値の自動受信
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4871094
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4830031
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4788375
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4757756
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4699367
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4672545
System | |soff e2spf.PFRing.DCCT STARSにおけるKEK-PFのリングカレント値のモニタリング終了指示
e2spf.PFRing.DCCT @term] _ChangedValue 435.4587572

System>term] @ | |soff Node e2spf.PFRing.DCCT has been removed.
```

図 2. KEK-PF の PF リングカレント値に関する STARS のメッセージ送受の様子

3.2 EPICS の PV 名と STARS ノード名の変換

STARS EPICS 間相互で PV の値のデータ転送を行うためには、EPICS の PV 名を知っておく必要がある。

STARS EPICS ゲートウェイプログラムでは、テキストベースのファイルにあらかじめ PV 名と STARS のノード名の対応を記述しておき、プログラム起動時にこのファイルを読み込みその内容に従ってプログラムの中で STARS ノード名と PV 名の相互変換を行う。

4 Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラム開発の動機

4.1 Perl 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムの課題

2013 年にプログラミング言語 Perl を用いた最初の STARS EPICS ゲートウェイプログラムが開発された。このプログラムは、EPICS の Perl 言語インターフェイスを用いて、Linux OS で動作することを前提に、EPICS 側の PV の値の変更を監視するプロセスと STARS サーバとコミュニケーションを行うプロセスに分かれてプロセス間通信の仕組みを利用して STARS EPICS 間のデータ転送を実現している。

Perl 版の STARS EPICS ゲートウェイプログラムの STARS EPICS 間のデータ転送は安定して動作するが、一旦 EPICS 側との通信接続が切れてしまうと EPICS の PV の値の変更を監視するプロセスが終了する一方で STARS サーバとのコミュニケーションを行うプロセスが残り、EPICS の PV にアクセスできない状況であるのにも関わらず STARS 側からは正常に動作しているかのように見える状態が継続する。

KEK-PF では、STARS EPICS ゲートウェイプログラムを用いて、光源グループが管理する EPICS サーバを介して、運転期間中光源側とビームラインステーション側双方向で情報をやりとりしており、EPICS 側の通信障害に対する、実際は EPICS サーバの再起動によるものがほとんどであるが、早急な復旧が急務となってきた。

STARS には、STARS プログラムのプロセス監視を行う”manager”と呼ばれるプログラムがあり、STARS のプロセスが停止した場合に自動で再起動させる仕組みがあるので、EPICS 側との通信切断時に STARS EPICS ゲートウェイプログラムが完全に終了させることが当課題に対する解決策となる。

4.2 Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムの開発に至る経緯

このような状況の中 2017 年春に、2 次元検出器“timepix”の STARS 制御プログラムの開発依頼が寄せられた。

2 次元検出器“timepix”に対しては EPICS の 2 次元検出器制御用ソフトウェアが提供されており、STARS EPICS ゲートウェイプログラムを使用すれば、STARS を使用するビームライン制御システム側から EPICS ベースの 2 次元検出器ソフトウェアを制御し 2 次元検出器“timepix”を操作することが可能である。

当初は、既存の Perl ベースの STARS EPICS ゲートウェイプログラムの利用を検討したが、以下の理由から Python 版の STARS EPICS ゲートウェイプログラム開発の決定に至った。

- 2 次元検出器“timepix”の制御要件
- EPICS の Python インターフェイスの PV 接続時切断時のコールバック関数のサポート
- Python 版 STARS インターフェイス^[4]

2 次元検出器“timepix”の制御要件として、EPICS ベースの 2 次元検出器ソフトウェアの制御の他に、測定ファイル(TIFF 形式)を入力源とした計算処理があり、計算ライブラリが充実しているプログラミング言語 Python の利用がたいへん効果的である。さらに EPICS の Python インターフェイスを調査した結果、Perl 版では実装されていなかった PV 接続時切断時のコールバック関数が提供されており、これを利用して EPICS 側との通信障害時のプログラム終了を容易に実現することが可能となった。そして 2017 年度末には STARS の Python 言語インターフェイスの初回版が完成し、Python を用いて STARS プログラムが簡単に開発できるようになっていた。以上の理由が Python 版の STARS EPICS ゲートウェイプログラム開発を進める動機となった。

5 Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムの動作環境

STARS の Python インターフェイスは Python2、3 両方をサポートしている。そして EPICS の Python インターフェイスの動作条件は 2018 年 1 月時点最新パ

ージョン 3.27 で EPICS の Channel Access Library (3.14.8 以上)、Python 2.7、3.5、3.6 (推奨) となっている。STARS と EPICS それぞれの Python インターフェイスは Linux、Windows OS 両方で動作するが、Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムは、Linux OS で動作することを最初の目標とする。

KEK-PF で Perl 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムが動作している環境を調査したところ全ての環境で EPICS Python インターフェイス動作条件を満たしていた。そしてインストール用ドキュメントを参照して EPICS Python インターフェイス“pyepics”のインストールを行い問題なくインストールできることを確認した。

EPICS Python インターフェイスのインストールが成功した動作環境のプロファイルは以下の通りである。

- OS: Ubuntu 16.04.3 LTS 64 bit
Channel Access Library: 315.1、Python 2.7.12
- OS: Scientific Linux release 6.9 2.7.3 64bit
Channel Access Library: 314.12.3、Python 2.7.3
- OS: Ubuntu 12.04.3 LTS 64 bit
Channel Access Library: 314.12.3、Python 2.7.3

6 Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムの開発

6.1 STARS EPICS ゲートウェイ機能のパッケージライブラリ化

EPICS の PV 名と STARS ノード名の変換用テキストファイルの読み込みを含めて STARS・EPICS 間のデータ転送に必要な機能をまとめた Python のパッケージライブラリの開発を行い、STARS EPICS ゲートウェイプログラムだけでなく、他の Python プログラムから利用できるようにした。

2 次元検出器“timepix”の制御プログラムについても、STARS EPICS ゲートウェイパッケージライブラリを使用して開発を行った。

6.2 EPICS の PV 名と STARS ノード名の変換用ファイル形式の見直し

STARS EPICS 間のデータ転送を行うにあたって 2

次元検出器“timepix”制御で使用する STARS メッセージは、STARS EPICS ゲートウェイプログラムで使用する表 1 の STARS メッセージでは足りないため、STARS メッセージを任意に定義できるよう、ファイル形式の見直しを行った。STARS ノード名と STARS メッセージの組み合わせに対して、EPICS の PV 名と値の操作を対応付けられるようにした。(図 3)

#PVNAME	StarsNode	ACCESS	STARSCommand
13TIM1:cam1:Acquire		R	IsBusy
13TIM1:cam1:Acquire		W:1	Start
13TIM1:cam1:Acquire		W:0	Stop
13TIM1:cam1:Acquire		E	_ChangedIsBusy

図 3. EPICS の PV 名と STARS ノード名の変換用ファイルイメージ (見直し後)

6.3 EPICS 側の接続切断時の対応

EPICS Python インターフェイスが提供する PV 接続時切断時コールバック関数機能を利用して、STARS EPICS ゲートウェイプログラムにて、PV 切断時に STARS EPICS ゲートウェイプログラムを終了させるようコーディングを行った。下記にてプログラムのコーディングの内容を紹介する。(図 4)

```
#PV接続時切断時CallBack関数
def onEPICSConnectionChanged(pvname=None, conn=None, **kws):
    global st
    global epicsstars
    self = epicsstars

    #設定ファイルでPV名に関連づけられているSTARSノード名とイベント名を取得する
    (starsnode, eventcommand)=self.getstarscommandandpvname(pvname, event)
    if(starsnode is not None and eventcommand is not None):
        #定義があった場合
        pv = self.getpvinstance(pvname)
        if(pv is not None):
            if(conn is None):
                st.terminateMainloop()
            elif(conn == True):
                st.send(starsnode+'System '+ "_Connected")
            elif(conn == False):
                #切断時、プログラムを終了させるための命令を呼ぶ。
                st.send(starsnode+'System '+ "_Disconnected")
                st.terminateMainloop()
```

図 4. プログラムにおける EPICS 側接続切断時の処理の記述

7 開発ソフトウェアの評価および課題

7.1 EPICS サーバとの通信切断時の動作確認

Python 版の STARS EPICS ゲートウェイプログラムを起動させてリモートの EPICS サーバに接続させてからネットワークケーブルを引き抜いてみた結果、PV 接続時切断時コールバック関数が呼び出され、プログラムが終了することを確認した。

7.2 EPICS 側からの PV の変更値の受信頻度の確認

EPICS 側からの PF のリングカレントの変更値の STARS における受信頻度について確認を行った。ネットワークのトラフィックは刻々と変化するため全く同じ条件下での計測は難しいが、Perl 版と Python 版の STARS EPICS ゲートウェイプログラムを単独で動作させたところ、両プログラムとも受信回数が 10 秒間で約 23 回となり、Perl 版と Python 版で受信頻度に差がないことが確認できた。

次に Perl 版と Python 版両方の STARS EPICS ゲートウェイプログラムを並行して動作させたところ、同じタイミングで同じ値を受信できていることが確認できた。また Perl 版、Python 版単独で動かした場合と比較して受信回数の低下は見られなかった。

さらに Perl 版と Python 版両方の STARS EPICS ゲートウェイプログラムを並行して動作させ、Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムに対してのみ STARS 側から”hello”コマンド(”nice to meet you.”とテキストを返信するだけのコマンド)を連続送信したところ、Perl 版と Python 版は同じタイミングで同じ値を受信できているが受信回数に低下が見られた。STARS から STARS EPICS ゲートウェイプログラムへの問い合わせ間隔が 0 秒の場合、受信回数は 10 秒間で約 16 回となり STARS の連続問い合わせがない状態と比較して受信回数に明らかな低下が見られた。STARS からの問い合わせ間隔を 0.1 秒に変更すると受信回数は 10 秒間に約 22 回と回復した。

STARS からの問い合わせ間隔を 0 秒とした場合に受信回数の低下が顕著となった理由として、単純に STARS サーバが時間あたり大量の STARS メッセージを順番に処理しているために起きている可能性が考えられるが明確な確認はとれていない。今回の場合でいうと STARS から STARS EPICS ゲートウェイプログラムへの問い合わせ間隔を 0.1 秒とすることで受信回数の低下を回避できていることや、STARS の PV の値の問い合わせコマンドの送受以外にも STARS の PV の最新の値の送信結果を受信することで PV の値を取得することが可能なので、実用上の問題は起こりにくいと考えられることから、現段階では STARS EPICS ゲートウェイプログラム使用の考慮

すべき点として利用されてから状況をみていきたい。

7.3 2次元検出器“timepix”制御プログラムの本番運用状況

2017年11月に、2次元検出器“timepix”制御プログラムの KEK-PF ビームラインでの本番利用を開始し、STARS からの EPICS の PV の値の更新や参照および EPICS 側の PV 値のモニタリングを組み合わせた検出器の操作と測定が行えており、これまでのところ大きなトラブルもなく利用が続けられている。

7.3.1 課題

2次元検出器“timepix”制御に対応させる目的で EPICS の PV 名と STARS ノード名の変換用ファイルの記述形式の見直しを行ったが、STARS EPICS ゲートウェイプログラムで PF のリングプロファイル情報参照のための記述を行って見たところ、表 1 の STARS メッセージに対応させるためひとつの PV に対し見直し前と比較して 3 倍の行の記述が必要となり定義が煩雑となった。については再度ファイル形式の見直しあるいは簡易的な記述の方法を検討する。

また KEK-PF では現在 STARS における Python プログラム開発の標準化が別途進行しているが、Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムと 2次元検出器“timepix”制御プログラムの開発は標準化が検討される前から着手していたため、プログラムのリリースに際しては STARS Python プログラムの標準化にあわせてプログラムの書き直しを実施する。

8 まとめと今後の予定

Python 版 STARS の EPICS ゲートウェイライブラリの動作は非常に安定しており Perl 版が抱えていた課題を解決することができた。

Python 版 STARS EPICS ゲートウェイプログラムについては、2018年2月から PF および PF-AR のリング情報配信にて試行運用から本番運用に切り替え最終評価を行う。

今後は、まず EPICS の PV 名と STARS ノード名の変換用ファイル形式を確定させ Python 版 STARS EPICS ゲートウェイパッケージライブラリを確定させる。

そして STARS Python プログラムの標準化を反映させて STARS の EPICS ゲートウェイプログラムや 2次元検出器“timepix”制御プログラムの確定を目指していく。

最終的には、使用中の Perl 版 STARS の EPICS ゲートウェイプログラムの Python 版への置き換えを進めていく。

参考文献

- [1] T. Kosuge and Y.Saito, “RECENT PROGRESS OF STARS”, in Proc. PCaPAC’05, Hayama Japan, 2005.
- [2] STARS, <http://stars.kek.jp>
- [3] EPICS, <https://epics.anl.gov/>
- [4] 永谷康子、小菅隆、“STARS Python インターフェイスの開発”、平成 28 年度東京大学総合技術研究会、平成 29 年 3 月

BeagleBone を使用したシリアルデバイスサーバ

○小菅隆、石井晴乃、仁谷浩明

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

概要

高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory のビームラインでは、RS-232C インターフェースを持つ機器用に、Ethernet からアクセス可能なシリアルデバイスサーバを利用している。しかし、これは USB インターフェースを持ち、PC 等に接続の際は仮想 COM port として機能する器機には利用できない。我々は、安価で Linux が動作可能な Beaglebone を利用したシリアルデバイスサーバを作成した。

1 シリアルデバイスサーバ

高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory（以下 KEK-PF）には PF-2.5GeV 及び PF-AR の放射光リングがあり、シンクロトロン放射光を利用した様々な実験が行われている。現在、PF-2.5GeV リングには 22 本、PF-AR には 8 本のメインビームラインが設置されており、それぞれのメインビームラインは 1~3 のブランチビームラインに分岐され、シンクロトロン放射光はビームライン光学系を経てそれぞれの実験ステーションに導かれる。

KEK-PF では、ビームライン光学系を制御するためのステップモータコントローラや、実験データを取得する測定器など、様々な機器が使用されており、これらはパーソナルコンピュータから制御されるのが一般的である。最近では Ethernet インターフェースを持つ機器が多くなってきているが、RS-232C インターフェースを持つ機器も少なくはない。これらの機器に対応するため、我々は MOXA 社の NPort などのシリアルデバイスサーバを使用している。これらのシリアルデバイスサーバを使用すると、RS-232C 機器を Ethernet 経由で操作することが可能（図 1）となる。

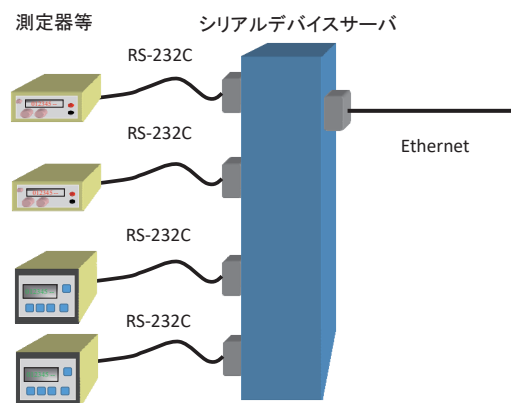


図 1. シリアルデバイスサーバ

2 STARS からの利用

KEK-PF ではビームライン制御及び測定用のソフトウェアとして STARS (Simple Transmission and Retrieval System) [1,2]と呼ばれるシンプルかつ拡張性の高いシステムを使用している。STARS では 1 つの STARS Server に複数の STARS Client が TCP/IP Socket を利用して接続し、テキストベースのメッセージを送受することで制御システムを実現している。STARS Client はそれぞれユニークな「ノード名」と呼ばれる名前を持つ。また、STARS Client の種類としてはグラフィカルユーザインターフェースのような User Client、実際のハードウェアの制御を行うデバイスドライバのような役目をする IO Client がある。図 2 は STARS に於いてのコマンド送受を示したものである。例えば「Term1」というノード名を持った User Client が「Dev1」というノード名を持った IO Client からデータを取得したい場合は、「Term1」は STARS Server に対して「Dev1 GetValue」のような「Dev1」をあて先にしたテキストのメッセージを送る。STARS Server により、このメッセージは IO Client である「Dev1」に届けられるので、「Dev1」は実際に

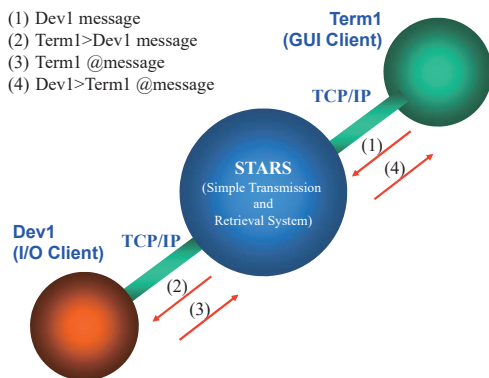


図 2. STARS でのコマンド送受 (STARS Web site <http://stars.kek.jp/> より)

ハードウェアからデータを取り込むなどの処理を行う。そして、その結果を STARS Server へ送り主である「Term1」を宛先としたテキストのメッセージを送る。STARS Server はこのメッセージを「Term1」に配信するので、結果的に「Term1」は「Dev1」の扱うハードウェアからデータを取得することができる。

以上のような事から STARS を使用したシステムでは、実際のハードウェアを制御する部分は IO Client が受け持つこととなる。

KEK-PF において、ハードウェアに付属するデバイスドライバーが必要になるような機器は、出来るだけ使用しないようにしている。このことにより、OS やバージョンの依存性を極力除外することが可能となる。例えば RS-232C を有した機器についてはシリアルデバイスサーバを TCP Server Mode で利用するのが一般的であり、IO Client は Ethernet を経由して RS-232C にアクセスする。TCP Server Mode ではシリアルデバイスサーバが TCP/IP Socket のサーバとなっているのでシリアルデバイスサーバには TCP/IP Client として接続する。接続が完了すると TCP/IP Socket を通して送ったデータがそのまま RS-232C ポートに送出されるとともに RS-232C ポートからのデータを TCP/IP Socket を通して受信することが可能となる。なお、シリアルデバイスサーバによっては、RS-232C のビットレートなどの設定を HTTP や Telnet 経由で行う事が可能なものがある。

3 BeagleBone Black

BeagleBone^[3]はクレジットカードサイズの Linux コンピューターで、Ubuntu や Android4.0 など動作させることができる。BeagleBone にはいくつかのラインナップがあるが、今回我々は BeagleBone Black を利用してシリアルデバイスサーバを作成することとした。同様のマイクロコンピュータについては Raspberry Pi などの選択肢もあったが、モニターやキーボードなどを用意しなくても、USB ケーブルを通じてセットアップ作業が可能である BeagleBone Black を採用する事とした。

3.1 セットアップ

BeagleBone Black には内蔵の 4GB 8-bit eMMC オンボードフラッシュストレージに Linux がインストールされており、特別な設定をすることなく付属の USB ケーブルとパーソナルコンピュータを接続するだけで起動可能であるが、今回は後の拡張性も考慮し、32GB の microSDHC に Ubuntu をインストールして使用することとした。なお、今回のインストール作業で行った主な手順は以下の通りである。

1. BeagleBone Black 用 Ubuntu のソフトウェアイメージをダウンロード
2. microSDHC へのイメージの書き込み (VMware+Ubuntu)
3. イメージを書き込んだ microSDHC を BeagleBone Black へ差し込み、microSDHC から Ubuntu を起動
4. 初期状態ではディスク全体を使うようにはなっていないので、拡張用スクリプト (grow_partition.sh) を使用してディスク拡張。
5. タイムゾーンを設定。
6. ネットワークの設定。
7. Ubuntu のアップデート (apt-get update その後 apt-get upgrade)

microSDHC へのイメージの書き込みについては Windows のみで行う方法などもあるが、今回は VMware 上で動作する Ubuntu 16.04 LTS を使用して行った。なお、microSDHC はパーソナルコンピュータ内蔵のドライブではなく USB のライターを使用した。

3.2 シリアル機器の接続

今回の開発では BeagleBone Black に USB ハブを接続して USB ポートを拡張したうえで、シリアル機器としては USB シリアルケーブル iBUFFALO BSUSRC06 及び Arduino Uno を使用した (図 3)。

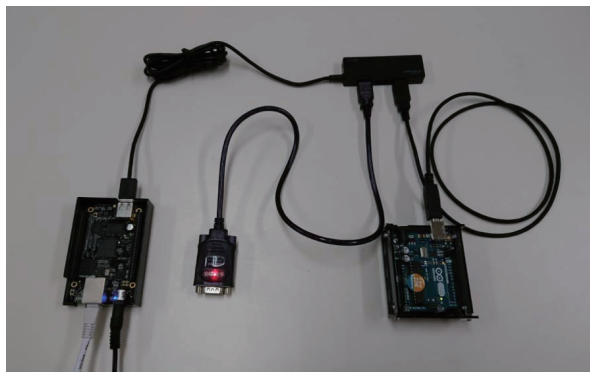


図 3. シリアル機器の接続

以下は起動時ログの抜粋(コマンド `dmesg` を使用)であるが、Arduino Uno は `ttyACM0`、BSUSRC06 が `ttyUSB0` として認識されているのが確認できる。

```
[ 19.671412] cdc_acm 1-1.4:1.0: ttyACM0: USB  
ACM device  
[ 19.686905] usbcore: registered new interface  
driver cdc_acm  
[ 19.686930] cdc_acm: USB Abstract Control  
Model driver for USB modems and ISDN adapters  
[ 21.208711] usb 1-1.2: Detected FT232BM  
[ 21.259237] usb 1-1.2: FTDI USB Serial Device  
converter now attached to ttyUSB0
```

4 シリアルデバイスサーバプログラム

今回開発したシリアルデバイスサーバプログラム名は `sdevPort.py` とし、開発のためのプログラミング言語としては Python3 を使用した。なお、シリアルポートへのアクセスのためには `PySerial` モジュールを使用している。

4.1 Ethernet/シリアル変換

`sdevPort.py` を実行すると、TCP/IP Socket の Server プロセスが起動し Client からの接続を受け付けるようになる。そして TCP/IP Socket の接続が確立すると、Client からデータが送られてきた場合は、そのままシリアルポートに出力 (Ethernet => シリア

ル変換機能)、シリアルポートから入力があった場合はそのまま Client に出力する (シリアル=>Ethernet 変換機能)。なお、これら 2 つの機能は別々のスレッドで実行されるので、非同期の通信にも対応可能である。

4.2 設定ファイル

TCP/IP Socket の Server プロセスが使用するポート番号、シリアルポートのポート名、シリアルポートのビットレートやビット長、パリティなどのパラメータは設定ファイルにより設定を行う。以下は設定ファイル (`ttyACM1.cfg`) の例である。

```
[serial]  
Device = /dev/ttyACM1  
Speed = 9600  
Data = 8  
Parity = No  
Stop = 1  
XonXoff = No  
RtsCts = No  
DsrDtr = No
```

```
[tcp]  
PortNumber = 4003
```

なお、設定読み込みのために `sdevPort.py` は `configparser` モジュールを利用している。`Configparser` モジュールは設定ファイルのパースであり Microsoft Windows の INI ファイルに似た構造の設定ファイルを扱うことが可能である。

5 実際の利用

図 4 は USB インターフェースを持つ真空ゲージコントローラ PFEIFFER 製 TPG361 を実際に使用してい

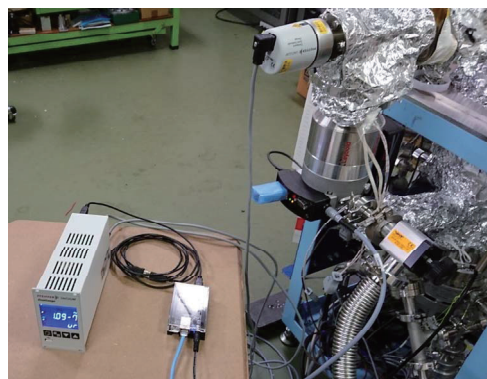


図 4. 真空ゲージコントローラの接続例

る例である。

この例ではターボ分子ポンプの排気能力の確認を行っており、TPG361によりテスト用チェンバーの真空値をモニターしている。そしてTPG361のUSBインターフェースは、今回開発したシリアルデバイスサーバに接続されている。別の場所に設置されたパーソナルコンピュータ上ではSTARSを用いた真空一元管理システム^[4]が動作しており、TPG361用のSTARS Clientはネットワークを通してこのシリアルデバイスサーバにアクセス、定期的に真空値を読み

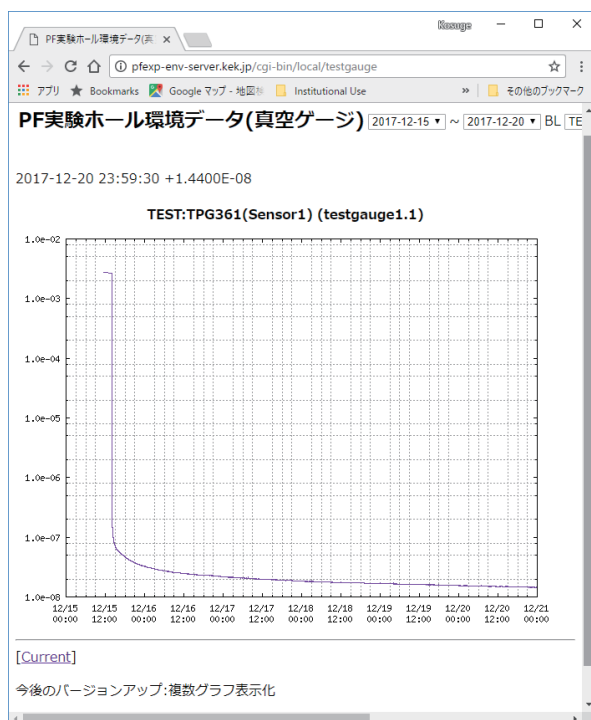


図 5. 真空一元管理システムでの表示

込む。図 5 はこの TPG361 の真空値の推移を真空一元管理システムの Web 表示画面で、真空値の推移を確認する事が出来る。

6 まとめと今後の課題

今回我々は、BeagleBone Black を使用したシリアルデバイスサーバを開発することに成功した。また、この事でシリアルポートを持つ機器だけでなく、USB インターフェースを持ち、PC 等に接続の際は仮想 COM port として機能する器機にも対応することが可能となった。なお、BeagleBone Black 上では STARS Server や数多くの STARS Client が動作することを確認しており、一つの BeagleBone Black だけで STARS システムを構築するような、非常にコンパクトなシステムも構築可能である。

本シリアルデバイスサーバの今後の課題としては、シリアルポートのパラメータ設定などを Web インターフェースから行える機能の追加などが挙げられる。

参考文献

- [1] <http://stars.kek.jp/>
- [2] T. Kosuge and Y. Nagatani, "STARS: Current Development Status", in Proc. PCaPAC'14, Karlsruhe, Germany, Oct. 2014, paper WPO019.
- [3] <http://beagleboard.org/>
- [4] 石井晴乃、仁谷浩明、小菅隆、「STARS を用いた真空一元管理システム」、本技術研究会

J-PARC リニアック クライストロンデータ収集系の構築

○堀利彦^{A)}、篠崎信一^{B)}、佐藤克福^{A)}、二ツ川健太^{C)}、福井祐治^{C)}

^{A)}日本アドバンステクノロジー

^{B)}日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

^{C)}高エネルギー加速器機構 J-PARC センター

概要

J-PARC リニアックで稼働中の3極型クライストロンの変調アノード放電事象を調査する目的で、25Hz インターバルタイムの波形変化を取得可能なデータ収集系を構築した。これらのデータから得た知見を基に各種の対策を講じたところ、放電に起因する高圧電源停止頻度は大幅に改善された。この成果に加えて、クライストロンの寿命に伴う交換時期を判断する際に有効なデータも得られており、本データ収集システムは、高周波源の安定で継続的な運転を行うための有効なツールである。

1 はじめに

J-PARC (Japan Proton Research Complex) は、3つの加速器、3つの実験施設から構成された研究施設である[1]。リニアックは3つの加速器の最上流に位置し、設計時のビーム電流は50 mA、負水素イオンビームを400 MeVまで加速する。パルス繰り返しは25 Hz、マクロパルス幅:500 usである[2]。3-MeVのRFQ(Radio Frequency Quadrupole)の下流に順次、DTL(Drift Tube Linac)、SDTL(Separated-type DTL)、ACS(Annular-ring Coupled Structure)の加速空洞で構成され

ている。これらに大電力の高周波電力を供給する最終増幅器がクライストロンであり、熱陰極型の変調アノード(M-アノード)付3極管構造である。324 MHz(3740A型:TETD製)/972 MHz(3766A型:TETD製)の中心周波数を持つもの[3]が各々20本/25本、稼働中である。

本格的な利用運転が開始した約20,000時間経過後から、クライストロン用直流高圧電源の高圧停止が多発し、加速器の利用運転時間を低減させた[4]。又、利用運転中に突然定格電圧まで高圧を印加できなくなり、計画外のクライストロン交換も行った。このような経験から、クライストロンの安定で継続的な運転に必要なモニタ系を整備し、これらの情報を一括管理可能なデータ収集系を構築する作業を2014年から本格的にスタートした。

2 M-アノード放電用データ収集系

2.1 M-アノード放電状況と高圧電源停止

高圧電源停止頻度多発の1次要因は、324MHzクライストロンのM-アノードとボディ(アース電位)間の部分放電であった。放電から高圧停止に至る流れは、放電発生→RF機器を制御・モニタする電子機器が誤動作→誤動作による異常を検出しインターロッ

表1. 現在運用中のクライストロンデータ収集系(概要)

項目	モニタ	測定器	サンプリング時刻	台数	接続先&表示
324MHz用 クライストロン	M-アノード放電 時刻、回数、波形	放電カウンター	放電発生時	5	加速器制御LAN 時刻、波形
		モジュール & オシロスコープ		5	
972MHz用 クライストロン	M-アノード放電 時刻、回数 25Hzパルス平坦部	放電カウンター	放電発生時	7	現場のみ
		モジュール & オシロスコープ	25Hzパルス全数	25	
クライストロン 全数の高圧4波形	直流高圧電源 停止時刻、波形	オシロスコープ	カソード電圧が 定格の70%時	45	加速器制御LAN 時刻、波形

ク (ILK) を発報→電源は機器保護動作が働き高圧を停止、である[5]。放電が発生するタイミングは、25 Hz-700 μ s 変調パルス (以下 25Hz パルス) のインターバルタイム:39.3ms の任意の時刻であった。しかし、RF 源の運転当初より運用している RF 系データ収集システム (PLC LAN, InTouch) [6]の 4 つの高圧系モニタ:カソード電圧・電流(V_k, I_k)及び M-アノード電圧・電流(V_a, I_a) は、25Hz インターバルタイムの波形変化を測定出来ていなかった。図 1 に M-アノードで放電が発生し、高圧電源が HV-OFF した時の高圧系 3 モニタ波形の代表例を示す。図中、25Hz パルス最終ショットの 4 発前と 3 発前のショット間に放電が発生している様子がモニタされており、この放電が電源を停止させた、と読み取れる。表 1 に現在運用しているクライストロンデータ収集系の概要をまとめた。放電検出用のカウンターモジュール; 12 台とオシロスコープ: 75 台からなり、いずれも 25Hz インターバルタイムの波形変化がモニタ可能である。

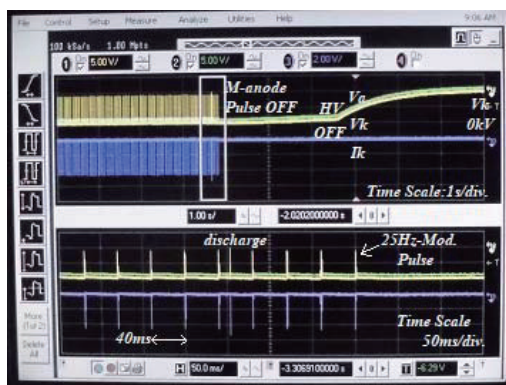


図 1. M-アノード放電で高圧電源の HV-OFF が発生した時の代表的な高圧系 3 モニタ波形

2.2 放電検出モジュールとデータ収集系

M-アノードの放電検出用に NIM 2 幅、ディスクリミネーター機能を有する放電カウンターモジュールが開発された。4 台分のクライストロン (高圧電源と対応) の入力信号を 1 台のモジュールに集約し、コストダウンした。図 2(左)にモジュール外観図を又、図 2(右)には 1 入力分のモジュール回路図 (概略)を示す。図 2 の Differential Comparator (LM311D Texas Inst.)の入力: A 点にはカソード電流モニタ信号 (アナログ、パルス) を採用した。カソード電流は、クロ

ーバ動作時も含めて、M-アノード電圧変化と“正”の関係があり、信号の立ち上がりエッジで放電を検出する。B 点の閾値電圧はモジュール内部で生成しており、25Hz パルスのカソード電流モニタ値の約 10% (アナログ、DC) に設定している。この値が放電検出レベルを決定しており、S/N 比を向上させることで“より微小な放電事象”までモニタ出来る。Comparator 出力が High の時、ビジュアルスケーラー (セグメント表示、C 点) をカウントアップすると共に、2 μ s-TTL レベル信号を外部に出力する (D 点)。

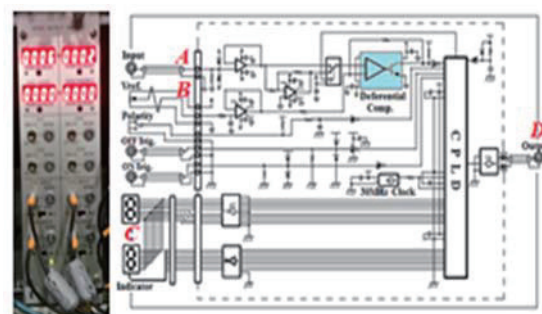


図 2. (左) 放電検出モジュール外観図、
(右) モジュール内部の概略回路図

次にデータの収集系であるが、“オシロスコープビューワー”と呼ぶアプリケーションが加速器制御 LAN に接続したオシロスコープからの情報を一括管理している。加速器制御 LAN 上の PC 環境下で、放電発生時の高圧系 4 モニタ波形、放電発生時刻とその時系列データ (電子ログ) がモニタ出来る。オシロスコープのトリガーを One-Shot に設定し、このトリガーに放電カウンターモジュールの外部出力信号を入力することで、放電発生時刻を特定できる。オシロスコープビューアーシステムでモニタされた M-アノ

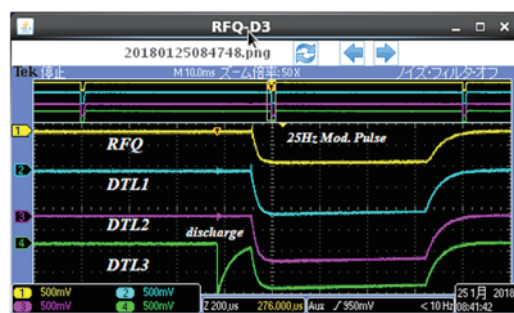


図 3. DTL3 クライストロンの M-アノード放電発生時の RFQ~DL3 カソード電流波形

ード放電発生時の代表的なカソード電流モニタ波形を図3に示す。DTL3 クライストロンの25Hzパルス直前のタイミングで放電が発生し、約0.4ms後には放電前の電圧値に回復した、と解釈できる。M-アノード放電が主原因の高圧電源停止頻度は、25Hzトリガ分配器の誤動作対策やVeto回路導入などの対策[5]が効果を上げ、2016年秋以降大幅に低減された。

3 クライストロン交換時期の予知

本データ収集系で得られた波形データから、クライストロンの交換を判断する際に有効なデータが得られている。その代表例として、図4(上)に324MHz用、(下)に972MHz用、各々のクライストロンのM-アノード耐圧劣化の兆候が見られるモニタ波形を示す。一般的にクライストロンの寿命はカソードライフ、いわゆるエミッション減で定格のカソード電流値が得られない時である。その他、RF窓の破損等が報告されているが、現状の実績ではJ-PARCリニアックのクライストロン寿命は全て、M-アノードの耐圧不良が原因であった。

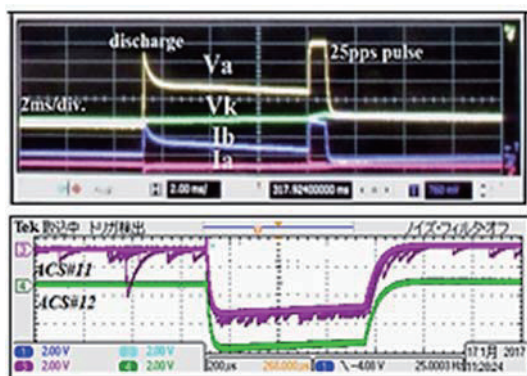


図4. (上)324MHz、(下)972MHz、各クライストロンの高圧系モニタ波形

3.1 324 MHz 用クライストロン

図4(上)からは、25Hzパルスの約7ms前のタイミングにM-アノードで放電が発生した後、M-アノード電圧がカソード電圧よりも低い状態が25Hzパルスまで持続している。これと並行して、カソード電流は、減少傾向を有しながら、約7ms流れ続けたと読み取れる。通常の放電波形は図3に示したように、約0.4ms後には放電前の電圧値に回復する。この波形変化の相違から、図4(上)のケースは放電後のM-

アノードに電流が流れ続けるすなわち、放電は持続していると解釈できる。一般的に、耐圧劣化が進んでくると1)放電確率が上がる、2)放電持続時間が長くなる、の2点が考えられることから、図4(上)のようなモニタ波形は耐圧劣化の予兆を示している、と我々は考えている。実績として、M-アノード放電持続波形が観測されてから約3~数か月後には突然、定格の電圧が印加できなくなったケースが3本のクライストロンで生じた。この経験から、M-アノードで放電持続波形がモニタされたクライストロンについては、夏の長期メンテナンス時間中に交換する、いわゆる“寿命を迎える前に予め複数台のクライストロンを同時に交換する”方式を採用している。寿命を迎えてクライストロンを交換する方式のほうが経済的なメリットがある一方、加速器利用運転中に交換する場合、最大半日程度、加速器運転を停止させる。我々は経済的なデメリットを超えて、加速器利用運転を最優先させる方針に基づき2016、2017年の2年間で5本の324MHz用クライストロンを寿命を迎える前に交換し、良好な結果を得ている。

3.2 972MHz 用クライストロン

972MHz用クライストロンの場合、324MHz用の放電状況とは異なり、1)放電発生時の放電レベルは地絡まで至らない微小放電(M-アノード電極近傍のコロナ放電と考えられる)が支配的、2)25Hzパルス内、インターバルタイムの別なく放電が多発、の特徴を有する。この時の代表的な波形例を図4(下)に示す。2017年の1月下旬に、ACS11クライストロンで放電が多発した時期の8時間におけるカソード電流モニタ波形の積算データであり、比較の為1台下流側のACS12クライストロン波形も同時に表示した。25Hzパルス内の放電は1)加速ビームロスが増大、2)空洞へのRFパワー入力過大、等が生じるため緊急性の高い対応事項である。我々は、クライストロンのカソード電圧値を下げ、MPS(Machine Protection System)発報頻度を低減させる、一時的な運転パラメータでクライストロンを動作させることで利用運転時間の確保に努めている。この時の代表的な例として、図5にACS11クライストロンのカソード設定電圧を通常値から4kV下げた時の25Hzパルス内の微小放電回

数と MPS 発報回数との比較を示す。最大でも 1 回/時間の MPS 発報頻度に低減されており、2 週間に 1 回の 1 日メンテナンス日までこの運転を継続した後、クライストロンの交換作業を行っている。従って、972MHz 用クライストロンの場合、M-アノード放電監視用オシロスコープは、「Acquire Mode ∞」に設定し、25Hz-700 μ s パルス全数のショットをモニタする方式を採用している(表 1 の 2 段目参照)。この方式では、放電をイベント処理しデータ収集する方法は使えないため、現状では現場での波形監視で対応しており、加速器制御 LAN への接続が今後の課題である。

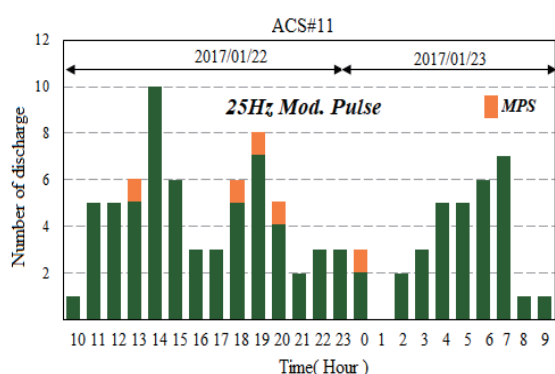


図 5. 25Hz パルス内の微小放電回数(緑)と MPS 発報回数(橙)回数との比較

謝辞

オシロスコープを加速器LAN制御系に接続する並びに、オシロスコープビューアーシステムの構築に際し、J-PARC加速器制御の加藤氏にご尽力いただきました。放電カウンターモジュールの製作についてツジ電子(株)の植松氏、張替氏にご協力いただきました。

参考文献

- [1] K. Hasegawa et al., “J-PARC 加速器の現状”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, FSP002
- [2] K. Hasegawa, “Progress and Operation Experiences of the J-PARC Linac”, Proceedings of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, MOPLR054.
- [3] A.Yano et., al., “DEVELOPMENT OF THE KLYSTRONS FOR THE HIGH INTENSITY PROTON

ACCELERATOR FACILITY”, Proceedings of the second Asian particle accelerator Conference, Beijing, China, 2001, p783-785

- [4] T.Hori et., al., “J-PARC リニアッククライストロン高圧電源停止頻度の改善”, Proceedings of the 10 th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, p1001 – 1003
- [5] T.Hori et., al., “ J-PARC リニアック 324MHz クライストロンのアノード短絡状況とその対策“, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, p1099 - 1102
- [6] Y.Fukui et., al., “ J-PARC リニアック 324MHz クライストロンのデータ収集システム“, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, p504 - 506

ミューオン崩壊寿命測定装置の更新作業

松山利夫

大阪市立大学 研究支援課

概要

3回生実験のミューオン崩壊寿命測定装置(図1.)の更新作業をしました。OSが、Windows95でしかも動作するパソコンの寿命の為に入手の困難さから、やっと更新に至り、装置の制御と測定は、パソコンで行なっておりOSを、Windows7にシインタフェースをUSBのI/Oに置き換えました。

作業は、プログラムを全面的に書き換え、使い易いUSB接続でしたが、OSに隔世の感があり、その失敗と困難さを加えて報告します。

1 OSのバージョンアップ

OSが、Windows95から使用しているWindows7までの期間にハードの変化は、処理スピードと容量が、大幅に増大する、CPUクロックが60MHz程度から2GHz程度になりメモリーも640KBから4GB程度になったが、外部入出力は、対応コマンドが、外されて手軽には使えなくなっています。マイクロソフト社のC言語コンパイラMS C、Ver.2で作成したため、その更新にI/Oが、継続していない事からそのままでは来ません。

1.1 パソコンの更新

OSに対応して従来の古い型のパソコンからノート型のパソコンにして入出力を取り扱い易いUSB接続に置き換えそして、USB_I/Oが、市販されている事から入出力を使い制御しデータの取り込みをさせる方法にしました。これで、パソコンの入手が、困難になっていた環境を変えるようになりました。

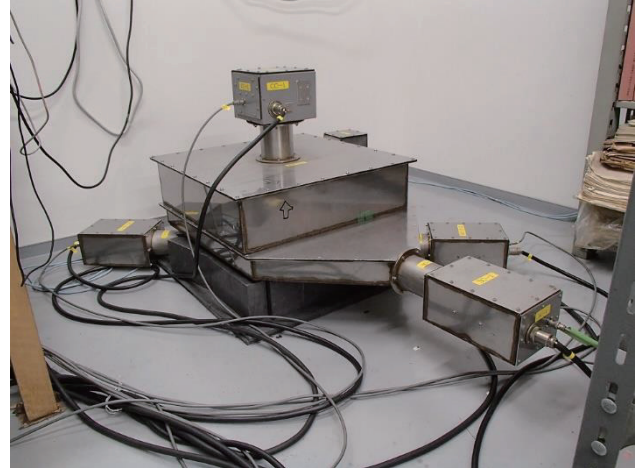


図1. 測定装置

1.2 ソフト環境

OSの次に使用言語は、MS C Ver.2から使い易Basicへと変えました。内容的には、Visual Studio上では、コンパイラによってCとBasicの差が変わらなくなっています。USBは、メーカーのドライバーを使うとライブラリの呼び出しで入出力を扱えます。

しかし、Windows7を用いたのは、メモリー上のセキュリティが、厳しくなりバージョンアップ後にWindows10では、エラーを起こすようになりWindows7での作成となりました。

2 測定と制御

この測定装置では、Windows7でのUSB_I/Oの応答速度が、

- ・ 実測値(入力) 2120.100 μ S、
- ・ 実測値(出力) 2124.700 μ S

と約2mSでした。

測定する事象の時間は、25.6 μ Sの範囲内ですが、この部分は、CPLDで組んだ論理回路を用いてミューオン粒子が、通過した信号、カウント終了の信号にて判断し取り込むため常時モニタリング出来れば、データ取込みの制御で可能になります。

当初、信号が、プログラム上のループで回して取り込めなかった。原因は先に述べた応答に約 2mS の時間がかかるためモニター出来ない事がわかり 10mS の間隔でタイマー割り込みを用いてその 10mS 間隔で通過信号を捉え次に装置の測定時間カウントからの終了信号を捉えて測定時間カウントを取り込むようにしました。(図 2.フローチャート参照)

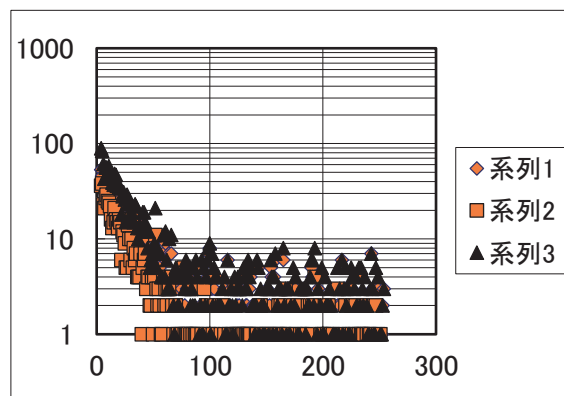


図 3.従来の測定グラフ

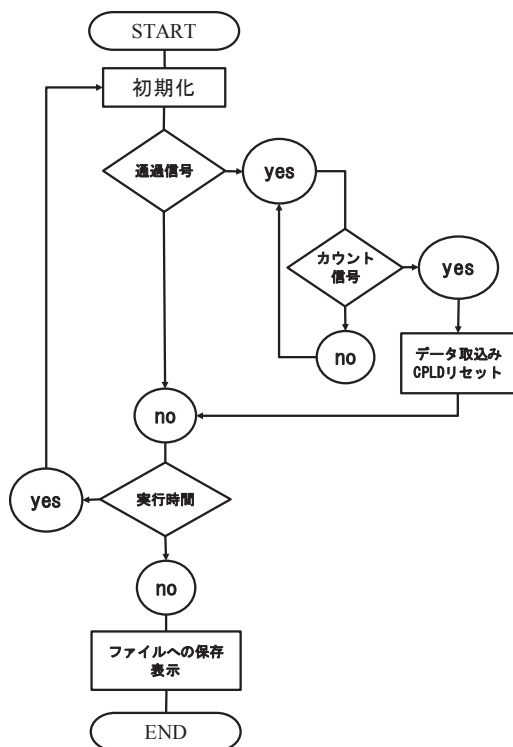


図 2.測定フローチャート

3 測定時間の問題

実行出来たのですが、実測定時間が、短くて従来の実行時間には、1 週間かけているためデータが、不足しており散布グラフでは、読み取る精度に満たない結果となりました。(図 3.参照 従来の測定グラフ)

改善方法として USB 接続をシリアル通信のみにし、制御と測定をワンチップマイコンにしてシリアル通信で応答し、データを送るシステムにする方法があります。これは、Basic が、意外とシリアル通信のツールを取り入れていたことがわかりその方法に変えて行くことになりました。

液体窒素の安全講習における IC カード認証履歴を利用した 再学習プログラムの取組み

○西岡彩美^{A)}、岡崎敏和^{A)}、松居俊典^{A)}

^{A)}香川大学工学部 実験実習係

概要

香川大学工学部では、2016 年度より体験型教材と分散学習を併用した新たな液体窒素利用に関する安全教育を実践している。2017 年度は、上記安全教育の課題や効果を、作業受付時の IC カード認証履歴に作業環境と様々な作業要素を紐付けして検証した。そして、学習効果の低い学生の分類群を抽出し、それらに補填的な再学習教材を考案して適用した。本発表は、これらの教育システムについて報告する。

1 はじめに

香川大学工学部は、2001 年 2 月に高圧ガス第二種製造所として液体窒素の定置超低温貯槽（処理量：60.7Nm³/D、貯蔵量：3572.1kg）を設置した。年間の消費量は 3 万 L 程度であり、利用者は増加傾向にある。2007 年度より筆者を含めた数名の技術職員が業務の一環として全利用者を対象とした安全講習を 2 期（4 月期 M1 対象・12 月期 B3 対象）実施している。

2 寒剤利用に関する安全教育の取組み

工学系の大学生を対象とした寒剤に関する安全教育はスライドと紙媒体資料を用いた講義形式が一般的である。本学部でも以前はこの形式であった。しかしながら、2015 年度に学生の汲み出し作業において液封によるインシデントが発生した。その際に「現象がなぜ起こったのか理解できない」、「パニックで対処が出来ない」、「問題のある操作に気が付かない」などの課題が挙げられた。このことは、視覚的要素から理解に繋げる講義形式の安全教育では、学生は実際の危機に対処するには不十分であることを示唆するものであった。そこで本学部では、2016 年度の奨励研究「液体窒素に関する体験型教材と分散学習を併用

した安全教育」JSPS 科研費（JP16H00428）を実践している。加えて、実際の汲出し作業における注意点や危険性をわかりやすくまとめた模擬動画を用いて実地講習の前に視聴させて理解度向上を図り、緊急時の対処方法、エレベータを使用する際の液体窒素の運搬方法、理解度把握のための確認テストを合わせた新規的な安全教育システムを構築している。

2.1 体験型教材

体験型教材は液体窒素の危険性（液封による破裂・酸素濃度低下・凍傷）を模擬実験によって身近に体験させて、思考を巡らせながら視覚以外の感覚から液体窒素の物理現象を認識させることを意図した教材である（図 1）。

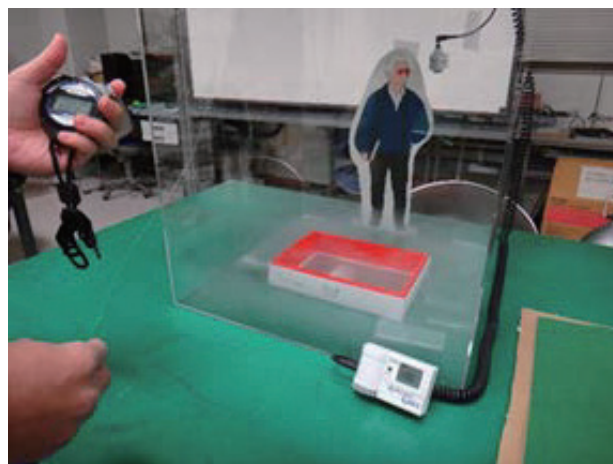


図 1. 体験型教材（酸素濃度低下）

2.2 分散学習

分散学習は体験型教材を用いた講習後に、一定の間隔を空けて液体窒素の危険性や作業手順に関する択一式の Web テストを 2 回実施している（図 2）。これは、危険性や作業手順の記憶を一時的なものでは無く、定着させる効果が期待され、作業時の誤操作を予防して安全な作業管理が見込まれている。

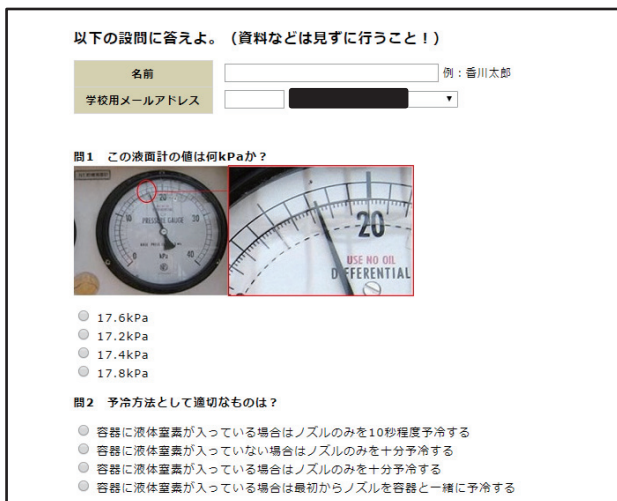


図2. 分散学習教材

2.3 安全教育の実施状況

2016年度の安全教育は42名、2017年度は58名に対して実施した。体験型教材に関する受講者からの意見としては、「模擬実験によって理解が深まった」が多数得られた。分散学習に関しては、すべての受講者の解答時間は概ね5分以内であり、全員が合格となった。受講者に行ったアンケートでは、「分散学習についてどう思ったか？」に対して、約62%が「危険を思い出すきっかけになった」と好意的に捉えている。「分散学習を通じて液体窒素の危険性や作業内容の記憶を思い出せたか？」という問いに対しては、約76%が「分散学習によって思い出せた」と回答しており、記憶の呼び起こしの効果が出ている(図3)。

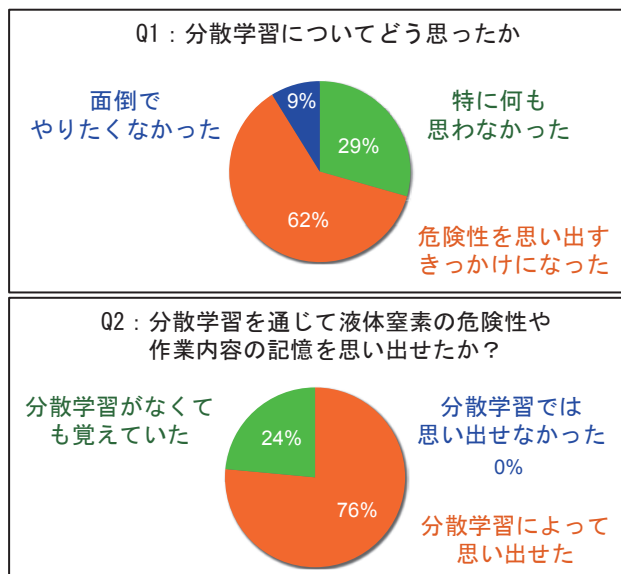


図3. 分散学習に関するアンケート結果

また、安全教育の副次的な効果として、潜在的な危機認知の低い受講生(分散学習実施忘れ)の把握も可能となった。

3 研究目的と方法

上記安全教育の課題としては、以下の2点が想定された。1点目は安全講習実施後の学習効果の低下が生じる点である。具体的な事例として、研究の引継ぎとして講習直後に汲出し作業を行った後、次回作業が自身の研究が本格的になる時期まで半年程度の長期間経過するケースである。2点目は、学習意識の低い受講者の教育効果の持続である。これは、教員からの指示により講習時点で作業予定が不明で「とりあえず受講」をしている者にみられる傾向である。

本研究は、様々な観点から作業状況を監視し、学習効果の低い学生が該当する分類群を検証した。そして、抽出した分類ごとに補填的な再学習教材を考案して適用させた。この再教育プログラムは、ある特定の個人ではなく、学習効果が低いと判断した分類に該当する利用者全てに適用することで、潜在的な危機を予防し、作業管理の向上を図ることを目的としている。具体的な手順は下記に沿って試行した。

1. ICカード認証システム構築と利用者データ収集
2. 監視による作業環境と作業要素毎の過誤の調査
3. 学習効果の低い分類群の把握
4. 再学習教材の作成とプログラムの適用

4 ICカード認証システム

本学の学生はICチップ内蔵の顔写真付き学生証が配布されている。これを作業受付時に利用認証として用いてICリーダーで読み込み、学籍番号と氏名を紐付けにPC上で利用者データ(作業日時、回数、頻度、分散学習から初回作業までの日数など)を収集するプログラムを作成した。なお、認証システムに用いるPCはstand-aloneの状態にしており、データの漏出が無いように管理している。

認証システムは作業受付時に利用者データから前回からの経過日数や作業回数を計算して表示することによって、再学習プログラム適用者を含むフォローが必要な利用者の把握が容易に可能となり、再教

育プログラムを適用し易い環境が整備された(図4)。

なお、2017年度(10月末まで)の利用者数と頻度は、利用者数64名(登録者数110名)、3回未満の利用者が過半数で55%、3回以上10回未満の利用者は31%、10回以上の利用者は14%である。



図4. ICカード認証システム操作画面

5 作業監視データの収集と安全教育効果の検証

ICカード認証システムによるデータ収集と同時進行で以下の作業要素に関するデータを収集した。

- 作業環境に関する要素
(作業日時・天候・作業時間・使用容器)
- 事故に繋がる可能性のある要素「危険性」
(保護具の使用・意思疎通・バルブ操作)
- 作業手順に関する要素「正確性・効率性」
(予冷方法・予冷時間・圧力計器の読取り)

これらの監視項目は、図5に示すチェックシートを用いて記録した。

2017年度(10月末まで)の作業監視データは88サンプル得られた。このデータを様々な要素から検証し、安全教育効果に課題がみられた分類を以下のとおり抽出した。

- 初回作業が講習から長期間経過した利用者
- 作業頻度が極端に少ない利用者
- 「慣れ」による危機認識の低下した利用者

上記の分類A)とB)は、作業内容をうる覚えまたは誤解している者が散見された。これは、作業時間を初心者(3回未満)の有無で比較したところ、初心者は

作業時間が長いことや目盛りの読み取り方法を間違えていることから裏付けられる。しかし、分類A)とB)に該当するサンプル数が少ないことと、個人差がみられることから、作業間隔と過誤の関連性を明確に検証することは困難であった。分類C)は、危険行為や保護具の着用が疎かになる傾向がみられた。危険行為の一例としては、汲出し中に放出されるガスを浴びる行為や、急なバルブの開閉操作をする行為などが挙げられる。特に保護具の着用に関しては作業監視の結果より、8回目以降に保護具の着用がおろそかになる傾向がみられた。

液体窒素作業チェックシート		開始時刻	終了時刻	天気: 晴 曇 雨 雪
		年 月 日	: :	
学籍番号	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
講習受講日	<input type="checkbox"/> 16年春以前 <input type="checkbox"/> 16年冬 <input type="checkbox"/> 17年春			
容器種類	<input type="checkbox"/> デューワービン <input type="checkbox"/> 自加圧容器			
目盛の読取	前後 <input type="checkbox"/> 2人共 <input type="checkbox"/> 1人のみ			
読み取り方法	<input type="checkbox"/> 正面から <input type="checkbox"/> 正面以外			
	<input type="checkbox"/> 目線の高さを合わせている <input type="checkbox"/> 目線の高さバラバラ			
保護具(手袋)	<input type="checkbox"/> 専用皮手袋 <input type="checkbox"/> 軍手 <input type="checkbox"/> 素手 <input type="checkbox"/> その他			
装着タイミング	<input type="checkbox"/> 予冷前 <input type="checkbox"/> 予冷後 <input type="checkbox"/> 汲出し途中 <input type="checkbox"/> 汲出し後			
保護具(メガネ)	<input type="checkbox"/> 専用メガネ <input type="checkbox"/> 普通メガネ <input type="checkbox"/> なし			
装着タイミング	<input type="checkbox"/> 予冷前 <input type="checkbox"/> 予冷後 <input type="checkbox"/> 汲出し途中			
その他	<input type="checkbox"/> ノズルの緩みチェックしていない			
予冷方法	<input type="checkbox"/> 冷凍 <input type="checkbox"/> 常温			

図5. 作業監視チェックシートの様式

6 再学習プログラム

再学習プログラムの適用は、ICカード認証の際に該当者を確認し、作業直前にタブレット端末で教材を視聴させることとした。分類A)とB)は、試験的に3か月以上の作業履歴の無い利用者に対して適用し、分類C)は、作業回数8回目となった利用者を条件とした。

分類A)とB)の再学習教材は現状の作業動画からさらに重要な部分を抜き出し、要点をまとめた2~3分程度の動画を作成した。主に作業内容を思い出させることに重点を置き、忘れやすいポイントと事故につながる保護具の着脱タイミングやバルブ操作時の注意点に特化させた。分類C)は、作業における危険性の再認識を促すように、危険行為や保護具の不備と事故を関連付けた以下の4事例を考案した。

- ① ガス放出部周囲の酸素濃度の可視化
- ② 急なバルブ操作による突沸現象
- ③ 保護メガネ未着用による事故想定
- ④ 専用革手袋未着用による事故想定

①は、デュワー瓶や自加圧容器周囲の酸素濃度を実測し、窒素ガスによる酸素濃度低下を可視化した。②は、急なバルブ操作によって液体窒素が突沸して飛散する現象を撮影し教材に加工した。③は、保護メガネを未着用の際に突沸が起こった場合の危険性を示した。④は、冷却したフレキシブルホースを素手で触った場合を想定し、素手に見立てた鶏肉を用いて教材化した。これらの内容を集約させて 2 分半程度の教材を作成した (図 6)。



図 6. 再教育教材 (酸素濃度低下の可視化)

今後の課題として、作業監視を継続してデータ数を増やして効果検証を行い、再学習プログラム適用の最適化を実現していきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP17H00414) の助成を受け実施した。ここに謝意を表す。

7 まとめ

IC カード認証システムの構築によって PC 上で利用者データ (作業日時、回数、頻度、分散学習から初回作業までの日数など) を容易に把握することが可能となった。上記を利用した本研究の再教育プログラムは、従来の全体で行う一度きりの安全教育とは異なり、個別かつ容易に教育効果を補填することが可能な新たな安全教育システムである。

この再教育プログラムを含めた安全教育システムの特徴は、利用者と実施者共に負担の少ない持続可能な運用体系であることが挙げられる。このことは、より安全な作業管理を保持することに繋がると考えられる。加えて、このシステムは、液体窒素以外の安全教育に容易に転用が可能であることが有用である。

IFMIF 原型加速器用冷凍設備の設置と許認可対応

○小又将夫^{A)}、吉田清^{B)}、前原直^{A)}、春日井敦^{A)}

^{A)}量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所 IFMIF 加速器施設開発グループ

^{B)}量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

概要

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下、「量研」という）六ヶ所核融合研究所は、「核融合分野における幅広いアプローチ活動」という名称の国際協力の下、欧州と共同で国際核融合材料照射施設／工学実証工学設計活動（以下、「IFMIF/EVEDA」という）事業を実施し、IFMIF/EVEDA 原型加速器を用いて 125mA の重陽子ビームを 9MeV まで加速する実証試験を行う[1-2]。

ビームの加速に超伝導加速器[3]を用いるため、それらを極低温に維持するために必要な液体ヘリウム冷凍設備を高圧ガス保安法に基づき設置した。本報告書では、IFMIF/EVEDA 原型加速器の紹介とともに冷凍設備の許認可申請から設備の据付、試験について報告する。

1 IFMIF/EVEDA 原型加速器の概要

IFMIF/EVEDA 原型加速器は、LIPAc(Linear IFMIF Prototype Accelerator)と呼ばれ、重水素イオン源(Injector)-高周波四重極加速器(RFQ)-中エネルギービーム輸送系(MEBT)-超伝導加速器(SRF Linac)-診断系

(D-Plate)-高エネルギービーム輸送系(HEBT)-ビームダンプ(BD)から構成された大電流重陽子線形加速器である。図 1 に IFMIF/EVEDA 原型加速器の構成図を示す。原型加速器は 1 本のビームライン、超伝導加速器 1 台では 125mA の重陽子ビームを 5MeV から 9MeV まで連続運転で加速する仕様である。LIPAc の大きな特徴は、加速器を構成する各機器の製作を欧州および日本の研究機関がそれぞれ担当し、六ヶ所核融合研究所において原型加速器として 1 つに組み上げるという調達取決めに基づいた国際協力である。これまでに欧州の各研究機関において、加速器機器の設計・製作が行われてきており、現在六ヶ所核融合研究所において組立・調整・ビーム試験を段階的に実施しているところである。

Injector は、フランス原子力・代替エネルギー庁サクレー研究所(CEA Saclay)が担当しており、すでに 2012 年に試運転で 100keV/140mA の陽子および重陽子イオンの連続ビームを実証済である。この入射器は青森県六ヶ所村のサイトに 2014 年に移設され、原型加速器の Injector として性能実証を完了した。また、RFQ は 2016 年にイタリア国立核物理学研究所(INFN)レニャーロ研究所から既に輸送され、整備

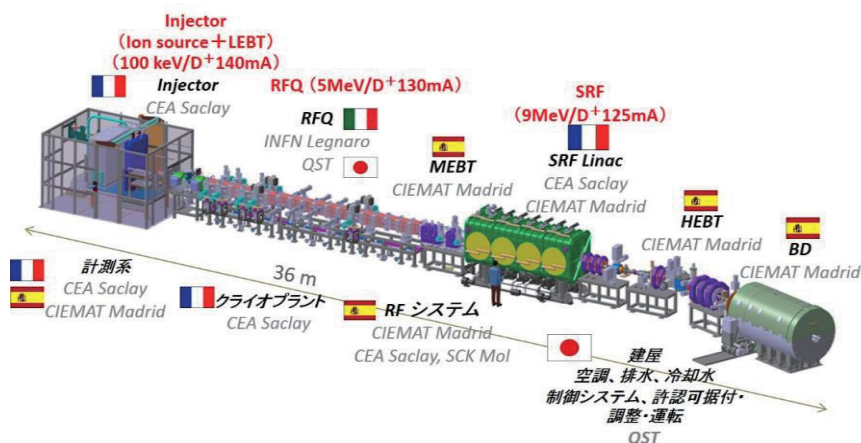


図 1. IFMIF/EVEDA 原型加速器の構成

が完了し、現在は高周波コンディショニングおよびビーム加速試験中である。超伝導リアックは2018年にフランス CEA-Saclay から輸送され、六ヶ所サイトで組立を開始する予定である。スペインエネルギー環境技術センター(CIEMAT)が担当する高周波システム、MEBT は既に設置済みであり、HEBT、BDは2018年に量研六ヶ所サイトに搬入され据付が実施される予定である。

日本は主に建屋、電気設備、周辺設備、高周波結合系、制御、全体組立・試験を担当している。

2 超伝導加速器

2.1 超伝導加速器の概要

超伝導加速器は、入力エネルギー5MeVのビームを9MeVの出力エネルギーに加速する装置であり、図2に示すように横置きステンレス製真空断熱容器(クライオスタット)には、8台の超伝導半波長空洞、空洞に高周波を供給する8台の高周波入力パワーカプラおよびビーム収束用の8台のステアリングコイルを含むソレノイドパッケージが内蔵されている。超伝導半波長空洞とソレノイドパッケージはそれぞれ飽和蒸気圧の液体ヘリウム槽を有し熱シールドおよび計測系が備えられる。超伝導加速器の大きさは、おおそ長さ6m、高さ3m、幅2m、重量は12.5トンとなり、欧州で設計および部品の製作を行い、量研の六ヶ所サイトにおいて組立て及び試験を行う。

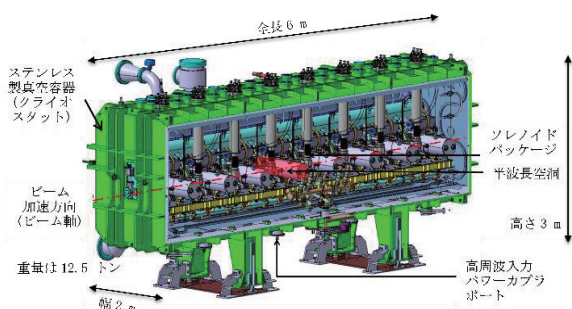


図2. IFMIF/EVEDA 超伝導加速器の構成

2.2 半波長空洞の概要

半波長空洞は、全長約1000mm、直径230mmで、図2に示すように超伝導加速器の中に8基が水平に設

置される。その形状は高周波設計仕様に基づいて決められている。また、半波長空洞は、液体ヘリウムを貯めるチタン製の槽(図3 緑色部、以下、「チタン槽」という)、液体ヘリウム中に設置されるニオブ製空洞(図3 灰色部、以下、「ニオブ空洞」という)及び、ニオブ空洞とチタン槽を接続するための、ニオブチタンで作られたフランジ(図3 青色部、以下、「ニオブチタンフランジ」という)から構成され、これらが溶接で一体化されることにより液体ヘリウムを貯蔵する高圧ガス冷凍保安規則の容器となる。

半波長空洞は加速器としての性能を発揮する観点から設計・製作され、複雑な構造を有することから、設計・製作において冷凍保安規則の例示基準に従えない部分がある(材料、使用温度、強度計算等)。これに加え、国際協力の観点から、プロジェクトとして、国際的に認知度が高く、かつ、信頼性のあるASME Sec.VIII Div.1(2010)に準拠して設計・製作することを基本的な合意としているため、欧州で設計・製作され、日本に輸入される半波長空洞では、試験検査の方法、基準において冷凍保安規則の例示基準に従えない部分がある。このため、高圧ガス保安協会に「冷凍保安規則の機能性基準の運用について」に基づく詳細基準事前評価を申請して許可され、評価書に基づき製作・試験を実施している。

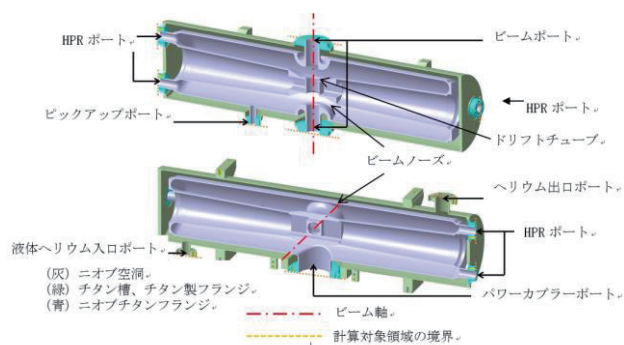


図3. 半波長空洞とヘリウム槽の断面図

3 超伝導加速器用冷凍設備

3.1 超伝導加速器用冷凍設備の概要

IFMIF 超伝導半波長空洞を極低温 4.5K に維持するために、ヘリウム冷凍機を用いる。

冷凍機は多段クロードサイクルの冷凍機を採用した。図4にIFMIF加速器用冷凍設備（以下、「冷凍設備」という）の概略系統図及び表1に冷凍設備の主要諸元を示す。コールドボックス内に設置される膨張タービンの数は2台で構成され、JT弁で4.5Kの液体ヘリウムを生成している。80Kまでは液体窒素で冷却するため、別途コールドエバポレータ（一般則第2種製造者）から液体窒素を供給する。液体ヘリウム貯槽に貯められた液体ヘリウムは、バルブボックスを経由して超伝導半波空洞に送られ、低温戻りガスを再液化することによって4.5Kで103Wの冷凍運転をする。一部のガスは室温で戻ってくるため、52L/hの液体ヘリウムを超伝導半波空洞に供給する。

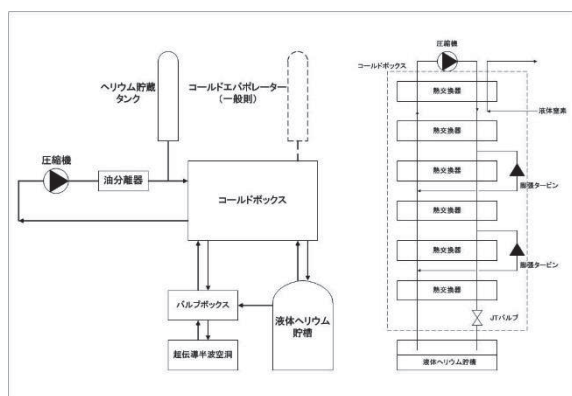


図4. IFMIF 冷凍設備概略系統図

4 高圧ガス製造許可申請

IFMIF 原型加速器用冷凍設備は1日の冷凍能力が110トンの第一種製造者であり、高圧ガス保安法により都道府県知事の製造許可が必要である。冷凍保安

規則第三条の第一種製造者に係る製造の許可の申請に基づき青森県に申請し、審査を経て製造の許可を得た。申請書には、冷凍保安規則に記載されている事項について記載した。本冷凍設備の申請において、主なものを述べる。

・高圧ガスの申請範囲

2の超伝導加速器は、2018年度に六ヶ所核融合研究所にて組立を実施する。そのため、それ以外の機器について高圧ガス製造許可の申請を行い、超伝導加速器の組立が完了後に高圧ガス製造変更許可申請をする計画である。液化ヘリウム付近の部品（コールドボックス、液体ヘリウム貯槽、液相配管等）が高圧ガスに該当し、常温で使用する圧縮機や油分離器、ヘリウム貯蔵タンクは設計圧力が0.98MPaであるため高圧ガスには該当しない。

・機器の製造に係る技術上の基準

冷凍保安規則で容器として扱うのは内径160mm以上であるコールドボックス内の圧力容器2個と、15リットル以上の熱交換器、液体ヘリウム貯槽およびヘリウム貯蔵タンクである。申請書には強度計算書も含まれている。いずれも強度計算の結果、使用した材料の厚さは計算した最少厚さ以上を満たしている。

・基礎の耐震設計

ヘリウム貯蔵タンクは、高さ9.4mのタンクである。冷凍保安規則では、凝縮器（縦置円筒形で胴部の長さが五メートル以上のものに限る。）の支持構造物及び基礎は、耐震設計構造物の設計のための地震動、設計地震動による耐震設計構造物の耐震上重要な部分に生じる応力等の計算方法、耐震設計構造物の部

表1. 冷凍設備の主要諸元

機器	主要諸元
圧縮機	定格出力：132kW、圧縮機の種類：スクリー式、番号：DSD238、型式：Sigma26 Helium、製造所名：KASER KOMPRESSOREN
油分離器	コアレッサー：2台、活性炭容器：1台
コールドボックス	型式：多段式クロードサイクル冷凍機、膨張タービン数：2台、基準凝縮温度：4.5K、許容圧力：高圧部0.98MPa
ヘリウム貯蔵タンク	最高使用圧力：0.98MPa、容積：50 m ³ 、寸法：Φ2500×11241mm
液体ヘリウム貯槽	運転圧力：0.05MPa、容量：2000ℓ、製造所名：Wessington Cryogenics

材の耐震設計用許容応力その他の経済産業大臣が定める耐震設計の基準により、地震の影響に対して安全な構造とするとなっている。ヘリウム貯蔵タンクは、凝縮器に該当しないが縦置円筒形で胴部の長さが五メートル以上のため、基礎の耐震設計を実施した。アンカーボルトは、M24×16 本、埋込深さは520mm 以上を採用することにより耐震設計値(222mm)を満足した。

5 冷凍設備の据付・試験

5.1 機器の据付

2016年9月に高圧ガス製造許可の申請を行い、10月に許可が下りたため同月より冷凍設備の据付作業を開始した。図5に冷凍設備機器の外観図を示す。

各機器は申請した位置へアンカーボルト施工により設置した。また機器の炭素鋼部分には防錆塗装を実施し防食措置を実施している。圧縮機は振動を伴うため、床との設置部分は防振支持脚の設置と吸込配管および吐出配管接続部には可撓管を設置し防振処置を施した。屋外設置のヘリウム貯蔵タンクの基礎は、高圧ガス設備等耐震設計基準及び耐震設計指針を含む法令及び基準に準拠して設計を実施し製作した。各機器を据付後、機器間の配管の接続作業、気密試験を実施した。気密試験は許容圧力を加圧して石鹼水による漏えいの有無を確認した。その他、電気関係・ガス以外(水・圧空)の接続も実施した。

さらにヘリウム貯蔵タンクについては、高さ8mを越えるため、建築基準法の適用を受け、建築確認申請も実施した。

5.2 機器の試験

機器の据付完了後、予備調整試験として。電源盤の通電チェック及び起動、油分離器の予備運転(活性炭の乾燥化)、機器の予備運転(ヘリウム置換)、圧縮機の本起動を4週間の日程で実施した。その後、調整試験として、配管ラインの洗浄、コールドボックスのシーケンサー制御試験、機器のクーリングダウン、冷凍モードの試験を5週間の日程で実施した。その他の試験としては、冷凍設備のヘリウムガス中の窒素純度の測定分析作業、圧縮機の自動制御装置のインタ

ロック試験、圧縮機の騒音測定(結果:67dB)等の試験も実施した。



図5. IFMIF 冷凍設備機器の外観図

6 まとめ

六ヶ所核融合研究所では欧州との国際協力の下、IFMIF/EVEDA 原型加速器用冷凍設備を高圧ガス保安法に基づき設置した。青森県による高圧ガス製造施設の完成検査に合格し、2017年12月に合格証が交付された。また、研究所内の冷凍高圧ガス製造施設危害予防規程及び保安教育計画も制定し運用が開始されている。今後、欧州主導の冷凍設備運転トレーニングが2018年5月から計画されて本格的に運転を開始する予定である。さらに2018年10月頃から超伝導加速器の六ヶ所サイトでの組立を開始し、2019年には本冷凍設備へ接続して装置の完成を目指している。

参考文献

- [1] 杉本 昌義、他、“IFMIF 加速器のプロトタイプ建設の意義と目標課題”、「加速器」Vol.7,No.2、2010(110-118)
- [2] 木村 晴行、他、“国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動”、J.Plasma Fusion Res.Vol.86,No.4(2010)223-230
- [3] N.Grouas、他、“MECHANICAL AND CRYOGENIC SYSTEM DESIGN OF THE FIRST CRYOMODULE FOR THE IFMIF PROJECT”、MOPEC054 Proceedings of THE IPAC'10,Kyoto,Japan

放射化試料管理システムの開発と構築

○大砂真樹^{A)}、横田光弘^{A)}、野々村美貴^{A)}、青柳美和^{A)}、林浩^{A)}、三宅均^{A)}、
時谷政行^{B)}、増崎貴^{B)}、矢嶋美幸^{B)}、重水素実験準備推進支援グループ

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

概要

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) では 2017 年 3 月から重水素実験を開始した。重水素実験時に LHD 周辺で発生する放射化した試料の取り扱いについては各種法令に従ってその数量・所在地・使用状況等を管理する必要がある。このため、放射化試料を管理するためのデータベースを中心とし、バーコード等を用いて簡便に利用できる一元的管理システムの開発と構築を行った。

1 LHD 重水素実験

LHD では 1998 年 4 月の実験開始以来、軽水素を用いたプラズマ実験を行い、年々プラズマの温度と密度を向上させてきた。そして、2017 年 3 月からは重水素を用いたプラズマ実験を開始した。重水素は陽子 1 個と中性子 1 個から成る原子核を持ち、陽子 1 個から成る軽水素に比べてほぼ 2 倍の質量を持つ同位体である。重水素を用いることにより、LHD での磁場によるプラズマ閉じ込めがより効率的になり、より高い温度・高い密度のプラズマを実現できるようになる。これにより、軽水素実験時と比べて、核融合条件に近い条件下でのプラズマのふるまいについて研究することを目的としている。

重水素実験はプラズマの高性能化を目指すものであり、核融合反応そのものを目的としているわけではない。しかし、特に中性粒子ビーム入射による加熱を行う実験時には、重水素ビームと重水素プラズマが衝突し、ある程度の核融合反応が起こる。重水素同士による核融合反応 (D-D 反応) では、その生成物は、三重水素 (トリチウム) + 陽子、またはヘリウム 3 + 中性子の 2 パターンがあり、ほぼ 50:50 の生成率となる。

2 放射化試料

LHD 内部にある物体には、プラズマのガス原料や加熱のために使用する物質、及び前述のような生成物などのさまざまな物質が、表層に附着し堆積したり、ある程度浸食して内部まで入り込んだりする。さらに中性子の場合には、他の原子核に捕獲され核種変換が起こることもある。

この堆積物に含有される原子の割合、浸食の様子、中性子の影響などを、たとえば透過型電子顕微鏡などで観察・分析することにより、LHD 実験下でのプラズマのふるまい、実験磁場条件との関係、D-D 反応での生成物による影響などを推測する手がかりとなる。また同時に、このような分析によって、将来の核融合発電炉の実現に向けて、どのような材質を利用するのが安全で丈夫で適切か、という理解を深めることもできる。

このようにして、一定期間のプラズマ実験を行った後の、LHD 内壁や内部構造物、加えてこの目的のために内部に挿入されていた特定の材質は、貴重な分析対象としての試料となる。ただし、ここで重要な点として、重水素実験が開始されたことがある。重水素実験時の D-D 反応の結果として生成される物質のうち、陽子とヘリウム 3 は安定した原子核であるが、トリチウムと中性子は放射性物質である。また、前述の通り、中性子は他の原子核を核変換することで放射性物質に変えることがある。従って、この分析試料は放射性物質を含む放射化試料でもあり、その取り扱いについては各種の関連した法令に従って管理する必要が生まれる。

3 放射化試料管理システム

このような必要性から、研究所内より要請を受け、複数の研究者・作業者が行う放射化試料の取り扱いを記録し管理する手助けとなる放射化試料管理システムを開発し、2017年10月から運用を開始した。

3.1 機器構成概要

放射化試料管理システムは管理用データベースサーバを中心としており、それにアクセスする2台のクライアントが作業現場に設置されている(図1)。サーバークライアント間はプライベートLANで接続され、核融合研キャンパスLANからは独立している。

試料の管理番号、及びシステム利用者のログインIDには、QRコードにセキュリティ機能を追加したSRQC¹⁾を利用するため、クライアントにはSQRC用のプリンタとリーダーが接続されている。

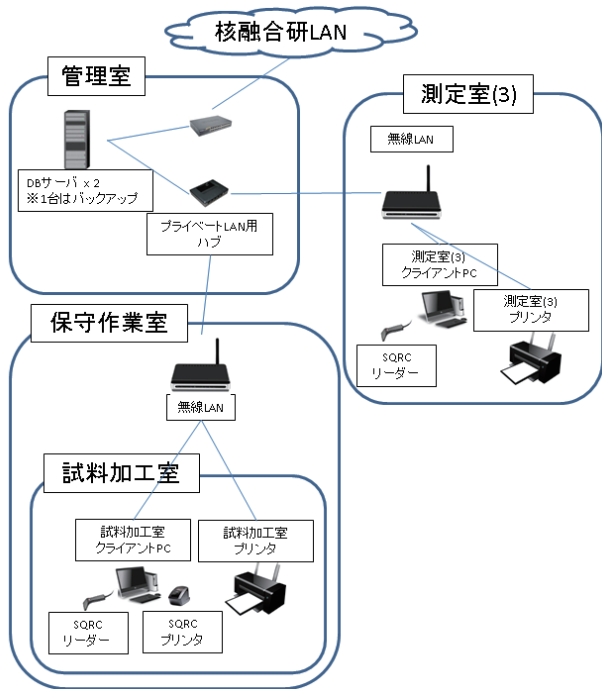


図1. 放射化試料管理システム機器構成

3.2 ログインIDと試料管理番号のSQRC化

クライアントからのアクセスはWWWブラウザを利用しており、利用者は自分のIDのSQRCをリーダーに読み込ませることで放射化試料管理システムにログインすることができる。核融合科学研究所では重水素実験の準備段階から放射線管理区域を設定し、管理区域入退の一元管理のためにSQRCを導入済で、

業務に関わる者は各自のIDのSQRCをすでに持っている。放射化試料管理システムのログインIDはこれと共通化することで導入コストを削減している。

また、各放射化試料に割り振られた管理番号についても、SQRC化することで簡便化を図っている。SQRCプリンタでラベルを印刷し試料ケースに貼り、再度その試料を使用する際にはSQRCリーダーで読み込み、入力と管理の手間を省くことができる。

3.3 管理画面

ログインするとトップメニュー画面として図2のように登録されている試料がリスト表示され、新しい試料の登録や各種印刷なども行える。リスト上の管理番号をクリックする、または試料に貼付されているSQRCをリーダーに読み込ませると、図3のような放射化試料登録情報画面が表示され、詳細情報を閲覧したり、状態を変更することができる。



図2. 放射化試料管理システムトップメニュー



図3. 放射化試料登録情報画面

トップメニュー画面のリスト表示には、検索やソートの機能もあり、デフォルトの条件では廃棄済や移管済などの試料は表示されないが、条件を変えて表示することもできる。

3.4 管理項目

各放射化試料には管理番号が振られ、この管理番号をデータベースの主キーとして、試料番号、登録日、登録者、枚数相当、重量、寸法、所在・状態などを管理する。

このうち、放射化試料管理システムにおける独自の性格を持つ項目について、以下に示す。

- 試料番号…試料の種別を表すもので、LHD 内部での元所在地、材質、含まれると想定される核種などと関係づけられる。
- 枚数相当…試料は切断によって分割されることがあるので、元の試料を1枚とした場合の割合を表す。これについては別項目で詳細を後述する。
- 所在・状態…現在の所在地、及び、使用中/保管中/分割済/廃棄済/移管済、等の状態を示す。これについては別項目で詳細を後述する。

3.5 放射化試料の新規登録

トップメニュー画面から新規登録をクリックすると図4のように放射化試料新規登録画面が表示される。LHD 内部から回収された放射化試料は最初に試料加工室に持ち込まれ、そこで重量や寸法などを測定し、新規登録画面でその数値を入力して登録を行う。

このため、新規登録された放射化試料の所在・状態の初期値は「所在地：試料加工室」で使用中ということになる。

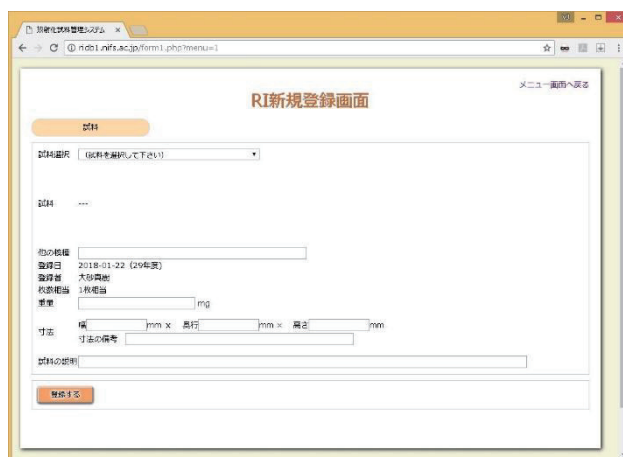


図4. 放射化試料新規登録画面

単年度で新規登録可能な試料枚数は試料番号ごとに定められているため、可能枚数を超えて登録しないための判定も新規登録時に行われる。

3.6 放射化試料の状態変更

図3の放射化試料登録情報画面では、該当の放射化試料について、実態に合うようにデータベース上の登録情報を変更することができる。

たとえば、実態が分析室で分析に使用している状態であれば「所在地：分析室」に、貯蔵室(1)に保管中であれば「所在地：貯蔵室(1)」に変更する。状態変更の際には、データベース上の履歴テーブルにもレコードが追記され、状態変更した日時や作業者などを後日閲覧することができる。

3.7 管理番号と分割

管理番号は、西暦年度下2桁(2017年度なら17) + 年度内通し番号3桁 + 分割通し番号3桁の計8桁で構成される。

年度内通し番号は001から始まり、新規登録毎に発行された後インクリメントされる。分割通し番号は000から始まり、分割によって子試料ができるときにインクリメントされる。従って、2017年度最初に登録された放射化試料の管理番号は17001000となり、以降登録するごとに17002000、17003000と続く。

試料は切断などによって分割することがあり、その実態に合わせて、図3の放射化試料登録情報画面で分割の操作を行う。分割は図5の試料加工室に設置されている機器内で行われ、親試料は2つ以上の

複数個の子試料に分割される。その際、子試料のそれぞれについて重量と寸法を測り、数値を入力する。



図 5. 試料加工室内のクライアント端末

分割操作によって、データベース上では、親試料の所在・状態は「分割済」、子試料の所在・状態は「所在地：試料加工室」となる。また、子試料には新たな管理番号として、年度と年度内の通し番号は親試料と共通にし、分割通し番号をインクリメントさせた番号が割り当てられる。たとえば、17001000 の試料を 2 つに分割した場合は、170010000 の所在・状態は「分割済」にされ、17001001 と 17001002 が子試料にそれぞれ割り当てられる。この状況から、さらに 17001001 を 2 つに分割すると、17001001 の所在・状態は「分割済」にされ、17001003 と 17001004 が子試料に割り当てられることになる。

またそれぞれの子試料のデータベースレコードには自身の一世代前の親試料の管理番号を持たせるため、一世代ずつ親をたどることもできる。

分割通し番号が 000 の試料は初代にあたるため、親試料の管理番号は持たない。また、分割によって子試料ができるときには、この初代試料の重量を 1 枚相当として、入力された子試料の重量を元に枚数相当を自動的に計算して保持する。これは、試料の種類ごとに年度内で使用できる限度量が枚数単位で管理されるために、必要な情報となる。

4 まとめ

LHD での重水素実験開始に伴い発生する放射化試料管理システムを開発し、2017 年 10 月から運用を開

始した。SQR コードプリンターの納入の遅れなどもあり、機能のフル運用の状態には至っていないが、利用者からの要望をフィードバックとして、機能の追加、改修などを行いつつ運用を続ける予定である。

参考文献

- [1] 株式会社デンソーウェーブ
SQRC (セキュリティ機能搭載 QR コード)
<https://www.denso-wave.com/ja/adcd/product/software/SQRC/sqrc.html>

JT-60SA の運転に向けたデータ処理設備の設計と開発

○山崎莉穂、坂田信也、大島貴幸、末岡通治、戸塚俊之、川俣陽一、鈴木隆博

量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

概要

臨界プラズマ試験装置 JT-60 の改修による超伝導トカマク装置 JT-60SA の建設が現在進められている。2020 年の JT-60SA の運転開始に向け、データ処理設備の設計および開発を進めている。データ処理設備は、プラズマ放電のための設備間同期システムと、運転で得られた実験データの一元管理システムの 2 種類に大別される (図 1)。

プラズマ放電のためには、JT-60SA 各設備の準備状況を確認して同期を図る必要があり、この一連の流れの制御を「放電シーケンス」と呼ぶ。設備間同期システムは、放電シーケンスの進行に関するイベント情報 (以下「放電シーケンス情報」と呼ぶ。) を送信する統括制御設備から、メッセージを受信して各計測装置へ通知することで設備間の同期を図る。また、

放電シーケンスを開始するための条件となる計測装置の準備状態を統括制御設備へ通知する。

実験データの一元管理システムは、運転によって得られた実験データを格納し、データ利用者の要求に応じてデータ提供するシステムである。実験データには、放電に同期して本体設備及び計測装置から得られる「放電データ」と、運転している設備から常時得られる「運転データ」がある。JT-60 では、放電データと運転データは別々に管理されていたが、JT-60SA では両データを一元管理し、データの管理および提供を容易にする設計とした。また、データの更新を履歴管理により行い、利用者が更新前後のデータを比較して確認することが可能となるよう設計した。

本報告書では、これら 2 システムから構成されるデータ処理設備について、全体設計と現在までの開発状況を報告する。特に、設備間同期システムの一部

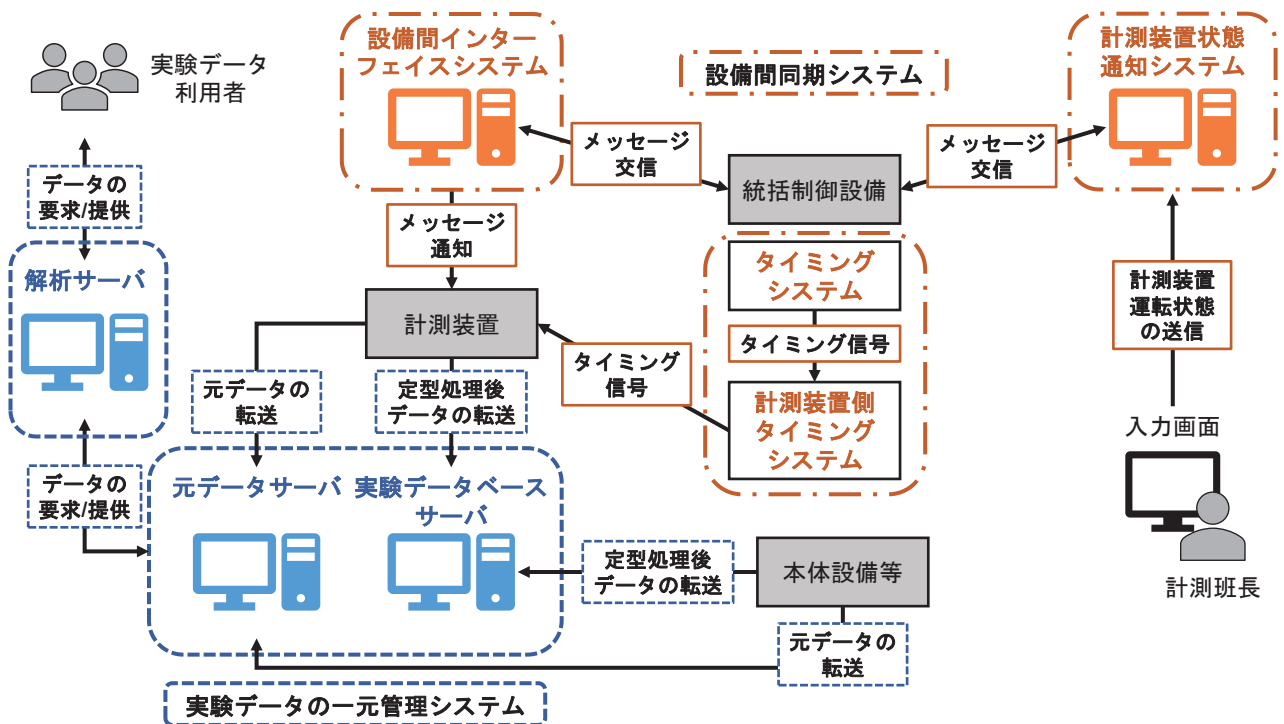


図 1. データ処理設備の概要

一点鎖線 (橙色) : 設備間同期システム 点線 (青色) : 実験データの一元管理システム

として新規に開発した計測装置状態通知システムと、実験データの一元管理システムの一部である元データ管理システムの設計について、詳細に報告する。

1 設備間同期システム

1.1 設備間同期システムの概要

設備間同期システムは、放電シーケンスを実行する統括制御設備と計測装置間で放電シーケンス情報のやり取りを行うシステムである。設備間同期システムは、設備間インターフェイスシステム、タイミングシステム、計測装置状態通知システムの3種類に大別される。

1.2 設備間インターフェイスシステム

運転時、統括制御設備から受信した放電シーケンス情報を計測装置に通知することで、多数の計測装置が放電シーケンスに同期することができる。この統括制御設備と計測装置間のデータ処理を行うシステムが、設備間インターフェイスシステムである。このシステムは放電シーケンス情報をネットワーク経由で各計測装置に通知する。この通知は高速の通信処理に適したプロトコルであるUDPを用いて行うため、メッセージに対する応答を必要とせず、多数の計測装置へ同時にメッセージ送信が可能である。また、メッセージの送信が失敗した場合を考慮し、UDPパケットを複数回送信することでパケット到達の信頼性を向上させている。

1.3 タイミングシステム

放電シーケンスでは、放電開始などイベント発生時の時刻を同期させるためのトリガー信号と、各計測装置のサンプリングの時間間隔を同期させるためのクロック信号(40 MHz)をタイミングの情報として同期する必要がある。設備間インターフェイスシステムはネットワーク経由で通信するため、転送時間のずれを考慮しなければならず、正確なタイミングを知ることはできない。そこで、ハードワイヤード信号によるタイミングの同期を行うのがタイミングシステムである。統括制御設備側のタイミングシステム親機から送信されたタイミング信号は、光ケーブルによって接続されたタイミングシステム子機へ

と送られ、多数の計測装置に分配するために、計測装置側のタイミングシステム親機へと送られる。さらに各計測装置のタイミングシステム子機へと信号が送られることで、すべての計測装置のタイミングの同期を図ることができる。このシステムを用いることにより、タイミング信号の遅延時間を数マイクロ秒以下に抑えることができる。

JT-60SAでは、設備間インターフェイスシステムとタイミングシステムによって計測装置を放電シーケンスに同期させる。これらのシステムの開発はすでに完了させており、2018年から統括制御設備との個別リンケージ試験を行う。

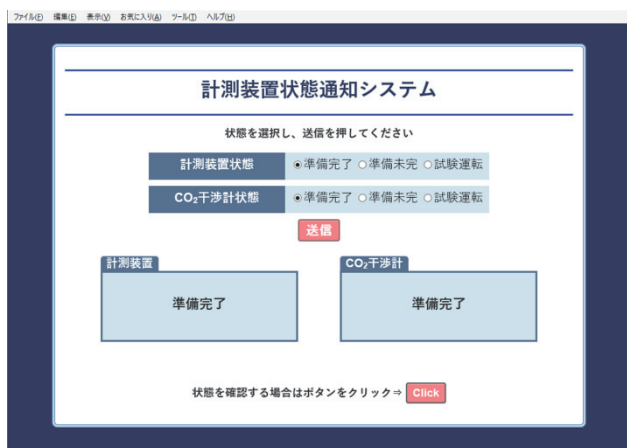
1.4 計測装置状態通知システム

JT-60SAの運転では、実験目的に応じてプラズマの実時間制御に使用する計測装置が決定される。運転に必要な計測装置の準備状態が未完の状態で放電シーケンスが開始されると、計測装置が実験データを取得できず、プラズマの実時間制御を行うことができないといった問題が生じる。したがって、JT-60SAの運転に必要な計測装置の運転状態を確認し、統括制御設備に正確かつ円滑に通知する機能は放電シーケンスの開始のために不可欠な機能である。JT-60の運転では、計測班長が各計測装置の準備状態から実験放電シーケンスを開始する準備が完了したか否かを判断し、統括制御設備に口頭で伝えるという形で運転が進められてきた。JT-60SAではこの通知機能を自動化するために、新規機能として計測装置状態通知システムを設計し、開発を行った。

① システムの設計

このシステムに必要なとされる機能は、統括制御設備から10秒ごとの定周期で送られてくる設備運転状態の通知要求に応じ、プラズマの実時間制御に必要なCO₂レーザー干渉計(プラズマ電子密度を計測)およびそれ以外の計測装置の運転状態を通知することである。そこでこのシステムは、Webブラウザの画面を用いて計測班長がCO₂レーザー干渉計およびそれ以外の計測装置の運転状態を「準備未完」「準備完了」「試験運転」の中から選択し設定することで、その選択値が統括制御設備への応答メッセージに自動で反映されるように設計した。また、システ

(A)



(B)



図 2. 計測装置の状態確認画面 (A)運転状態設定用画面 (B)運転状態参照用画面

ムの安全性を確保するため、計測班長のみが計測装置の運転状態を設定できる必要がある。さらに、計測班長以外でも現在の計測装置の運転状態を確認できるよう、計測装置の状態参照用画面を用意する必要がある。これらの機能を満たすようシステムを設計した。

② システムの開発

Web ブラウザの画面はフリーアプリケーションの XAMPP^[1]を導入して開発した。XAMPP は Web サーバの開発に必要な多数のアプリケーションを利用でき、各アプリケーション間の連携を意識せずに開発を行うことができる。画面の選択内容を応答メッセージに自動的に反映させ、統括制御設備に通知するプログラムを開発し、Web ブラウザから動作できるよう設定した。開発した画面を図 2 に示す。CO₂ レーザ干渉計およびその他の計測装置について、「準備未完」「準備完了」「試験運転」の 3 つの選択肢を設けて現在の運転状態を選択し、送信ボタンを押すことで選択内容が設定されるよう開発した (図 2-A)。また、計測班長がアクセスする際にユーザ名およびパスワードの入力を要求するようにアクセス制限を行った。

また、計測班長以外の利用者がユーザ名およびパスワードの入力なしに現在の計測装置の運転状態を確認できるよう、運転状態のみを表示する画面を開発した (図 2-B)。この画面から計測装置の運転状態

の入力を行うことができない。また、運転状態の変更を反映させるため、画面は定期的に自動で更新されるよう開発した。

③ 開発のまとめ

XAMPP を利用して Web サーバを構築し、画面の設定内容を統括制御設備に通知するプログラムを開発し、計測装置の運転状態の入力および現在の運転状態の確認を Web ブラウザから行うことができた。開発したシステムは 2018 年より、統括制御設備との個別リンク試験を予定している。また、今後の開発計画として、実時間制御に使用される計測装置の増設に合わせ、設定および参照可能な計測装置の数を増やすことに加え、長期的には現在手動で入力される計測装置の運転状態を計測装置ごとに判断し、自動で入力できるよう開発を検討している。

2 実験データの一元管理システム

2.1 実験データの一元管理システムの概要

運転で得られた放電データ、運転データを消失することなく適切に管理するために、実験データの一元管理システムの開発を進めている。運転によって各設備が取得したデータは、変換や補正等の定型処理を行ったデータ (以下「定型処理後データ」と呼ぶ。)、定型処理後データ算出の元となったデータ (以下「元データ」と呼ぶ。)として管理される。JT-60SA では、放電データ、運転データ、およびそれらの元デ

ータを一元管理することにより、データの管理および提供を容易にする。また、更新前のデータを保管してデータの更新履歴管理を行うことで、データの消失を防ぐ。実験データの一元管理システムは、元データサーバ、実験データベースサーバ、解析サーバの3種類のサーバで構成される（図3）。

元データサーバは、運転によって取得した元データを格納する役割を担うサーバである。元データは、放電時に付加されるショット番号及び各計測量に割り当てられた識別番号（以下「PID番号」と呼ぶ。）をインデックスとして各フォルダに格納される。また元データだけでなく、関連する定型処理を行うプログラムや機器の校正データも転送され、元データ同様に保管する。これらのデータを元データサーバですべて管理することにより、放電にて収集したデータの消失を防止する。

実験データベースサーバには、定型処理後データが転送され、放電時に付加されるショット番号及びPID番号をインデックスとして格納される。また、定型処理後データには、そのデータの元データ、定型処理を行ったプログラム、使用した機器の校正データ

に関する情報が明記され、そのデータの生成過程がデータの一部として格納される。これにより、格納後においても生成過程を参照し、データの再計算を行うことが可能である。

解析サーバはデータ利用者と両データサーバとのインターフェースの役割を担うサーバであり、定型処理後データ及び元データへのアクセス機能は、解析サーバ上で稼動する。また、利用者がデータを取得するためには、必ず解析サーバを経由し、専用のアクセスツールを用いてのアクセスのみを許可するため、両データサーバのセキュリティを保持することができる。

実験データを管理するための機能として、データの転送、格納、読み出し機能の開発を現在進めている。実験データベースサーバに格納される定型処理後データについては、放電データとなる計測装置と本体設備からのデータを1つのアクセスツールを用いて読み出せるよう、データのフォーマットを統一にする設計とした。また、データを更新する際は一度格納したデータを削除せずに、履歴管理により行う設計とした。定型処理後データの管理システムについて、

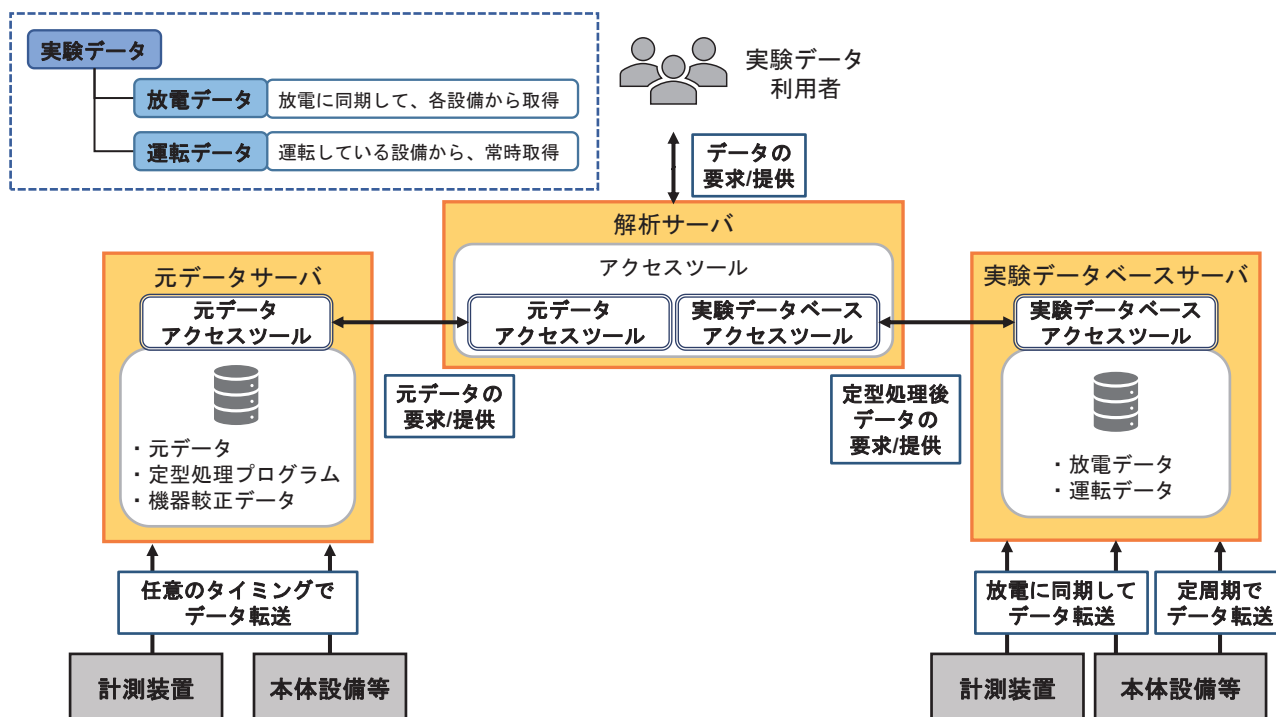


図3. 実験データの分類とその一元管理システム

2017 年度内には開発を完了する予定である。また、元データサーバについては現在詳細設計を行っており、2018 年度末までに開発を完了させる予定である。次節では、現在進めている元データ管理システムの設計について報告する。

2.2 元データ管理システムの設計

元データサーバは定型処理後データの作成に使用された元データを格納し、管理するためのサーバである。JT-60SA の運転開始時では、1 放電シーケンスの放電時間を最大 70 秒と想定し、1 放電シーケンスで 84 GB の元データをサーバに収集することが見込まれている。また、収集されるデータは元データだけでなく、元データに定型処理を行ったプログラム、設備の機器校正データも対象とする。

元データは、処理されていない本来のデータを保存するためにデータフォーマットを統一せず、各設備から収集した状態のまま格納管理を行う。また、送られてくるデータにはヘッダ部と実データ部があり、ヘッダ部には実データ部のデータ情報を記述する。ヘッダ部に記述される情報はデータを読み出す際に必要不可欠な情報であり、あらかじめ定められたフォーマットに従ってヘッダ部を作成することが必須である。

元データの格納に際しては、定型処理後データと同様に、一度格納されたデータは上書き、削除することなく、更新履歴管理を行う。また、更新処理はヘッダ部の記述内容の訂正、実データ部の訂正を考慮し、ヘッダ部のみの更新、実データ部を伴う更新の両方に対応する予定である。なお、データ利用に際しては、最新版のデータ提供のみでなく、任意の版数を指定してデータを利用できるよう設計した。

2.3 元データと定型処理後データの紐づけ

定型処理後データの生成過程を追跡できるようにするためには、元データ、定型処理後データ、定型処理プログラムを適切に紐づける必要がある。各データを紐づけるために、定型処理後データとその元データの対応テーブル（以下「実験データ対応テーブル」と呼ぶ。）を使用してデータの管理を行う。

実験データ対応テーブルは、実験データベースサ

ーバに格納される定型処理後データのデータ略称名と PID 番号の対応、およびその元となるデータの略称名と PID 番号の対応が明記されているテーブルである。データの略称名と PID 番号は、データの格納場所となるフォルダの階層構造を構築するためのインデックスであり、実験データ対応テーブルを参照することで各データの格納フォルダを決定できる。また、新規に計測装置が追加された場合、実験データ対応テーブルに新規データの情報を追記することにより、自動的に格納フォルダを生成し、データの格納場所を決定できるよう設計した。今後、この設計に基づき、プログラムの開発を進めていく。

3 総括

現在開発を進めているデータ処理設備について、全体の概要と設計について述べた。現在の開発状況として、設備間同期システムについては開発を完了している。また、実験データの一元管理システムについては、定型処理後データの管理システムの開発はほぼ完了しており、元データ管理システムの設計を進めた。

今後の予定として、2020 年の JT-60SA の運転開始に向けた元データ管理システムの開発を進める。また、その後の運転では使用する計測装置の増設に伴い、さらに大量のデータの収集が見込まれているため、今後は大量のデータ処理に適したデータベース管理システム (DBMS) の利用について検討する。計測装置の状態通知システムについては、設定および参照可能な計測装置の数を増やすことに加え、計測装置ごとに運転状態を判断し、自動で状態を入力できるよう開発を検討している。

本報告書をまとめるにあたり、多大なるご助力、ご協力をいただきました那珂核融合研究所 先進プラズマ統合解析グループの方々、JT-60SA チームの方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] <https://www.apachefriends.org/jp/index.html>

Apple Remote Desktop を使用した遠隔管理システムの構築

○濁川和幸

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

高エネルギー加速器研究機構（以下、KEK）で稼働している主な加速器ではそれぞれの運転状況を表示するための Web ページを持っている。実験などで訪れる来訪者が簡単にこれらのページを見る事が出来るシステムが作れないかと研究支援戦略推進部から相談があり、大型 TV に小型 PC を取り付けたものを KEK 内の主な建屋に設置する事とした。

その後、これらを遠隔操作で管理する事が出来ないかとの要望もあり、「Apple Remote Desktop」を使用した管理システムの構築を行った。

1 加速器運転情報表示システム

KEK はつくばに LINAC、Super KEKB、PF、PF-AR など、東海に J-Parc などと多くの加速器が運転されており、その中の主な加速器は運転状況を見れる Web ページを持っている。

平成 25 年末に、これらをドミトリーや食堂など、実験にきた来訪者等が見られるようなシステム作成を考えて欲しいとの依頼があった。年度内に完成させる必要もあったので、簡単に実現可能なように、下記のような構成のシステムを考案した。

システムと呼ぶような大掛かりなものではないが、写真 1 のように Mac mini と 46 インチの大型モニターを組み合わせて主な建屋ロビーの壁に設置し、壁掛け出来ない場所は写真 2 のようにスタンドで設置した。モニターの画面には図 1 のような、全画面表示にしたブラウザで、スクリプトで作成した専用ページにアクセスすることで、左右のフレームにそれぞれ別の加速器の運転状況を表示させている。

スタンド設置の場合は Mac mini を収める場所が最初から用意されているが、壁掛け時には Mac mini の設置場所が問題となる。そこで、写真 3 のようにモニターの壁掛け金具に特注の箱を用意して溶接し、

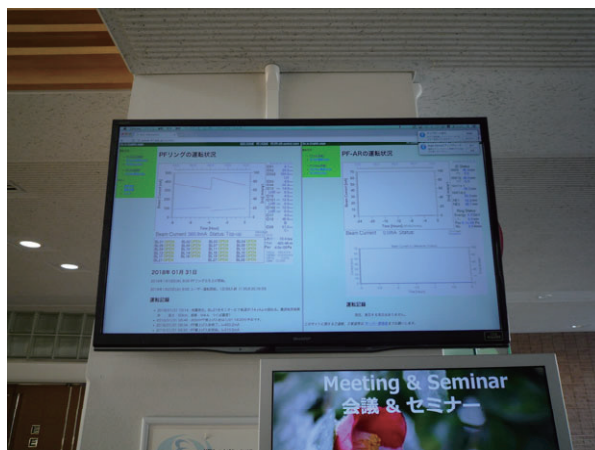


写真 1. 壁への設置例 (4号館1階エントランス)

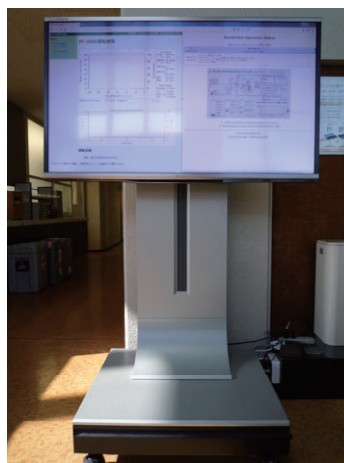


写真 2. スタンドでの設置例 (PF研究棟2階)

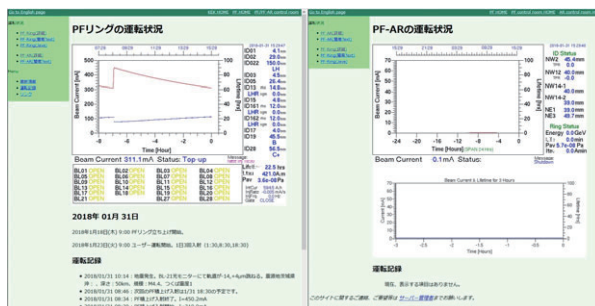


図 1. 画面表示例



写真 3. Mac mini の設置（赤丸部分が Mac mini）

Mac mini がモニターに隠れるように収めている。

ネットワークへの接続は有線で行うこととし、設置場所には所内 LAN 用の情報コンセント（RJ45 モジュラージャック）と電源コンセントの設置を施設部にお願いした。

キーボードとマウスは Bluetooth 接続の物を使用する事にして常時接続はしていなかったが、この状態では再起動後などに画面に大きくキーボードやマウスが接続されていない旨のアラートが出てしまい、管理上面倒であるとの意見が寄せられていた。

翌年には 3 セットの増設を行う事になったが、新たに設置するセットは上記のアラート表示の事もあるので Mac mini の代わりに小型の Windows PC を採用して、大型モニターと組み合わせて設置する事とした。

各機器の設置に使用した壁掛け金具やスタンドはメーカーが用意している専用品ではなく、汎用品を使用して将来のモニター故障の際に同じものでなくても代替え可能なようにしてある。

2 遠隔管理システム

2.1 初期の遠隔管理方法

1 章で説明したセットをまとめて、加速器運転情報表示システム（以下、表示システム）と呼んでいるが、これらの管理はシステム構築依頼のあった研究支援戦略推進部が行っている。

先にも述べたが、キーボード・マウスは Bluetooth 接続の物にしたので、現場に行けば Mac mini などの PC の操作は可能である。しかしこれでは現場まで出

向かないと操作が行えないなど、不便な場合が多い。そこで VNC を使用して遠隔管理を行うこととし、管理者が日常的に使用する PC（Windows PC）から遠隔管理を行ってきた。

2.2 問題点

VNC を使用する事で Mac mini と Windows PC の各クライアント PC を遠隔管理する事は一応できていたが、停電後などの電源 ON は現場で行う必要があった。また管理者の PC が Windows と Real VNC の組み合わせであったためか、Mac mini へ VNC で接続するためには「オプション設定」からカラーレベルを「フル」に設定する必要があるが、この設定を忘れると接続出来ないなど、問題点も多くあった。

2.3 新遠隔管理システムの構築

平成 27 年に遠隔管理について再検討して欲しいとの依頼があり、サーバーを設置して管理用ソフトを導入することを検討した。

先の述べた通り、表示システムには Mac mini を使用したものと Windows PC を使用したものがあり、これらを一元管理できる遠隔管理用ソフトウェアを探していたところ、Apple の Remote Desktop であれば VNC ベースで遠隔操作が行ええるなど、Mac OS でも Windows でもどちらでも管理可能な事が分かった。Apple Remote Desktop（以下、管理ソフト）は金額も 1 万以下であり、さほど高いものでもないのに、Mac mini を 1 台増設してサーバーとし、この上で管理ソフトを動作させて遠隔管理システムとすることに決定した。

この遠隔管理システムを構築するのもさほど難しくはない。新規にインストールした管理ソフトに新たにグループを作成し、そのグループの下に管理したいクライアント PC に適当な名称を付けて、IP アドレスを指定して追加していただくだけである。グループと管理対象のクライアント PC 追加後の画面が図 2 である。

これにより Mac OS のクライアント PC であれば、図 3 のように電源の ON/OFF や再起動、クライアント PC のソフトウェアのアップグレードなどを一元管理できるようになった。

ただし、このままでは Windows を使用している PC の電源 ON/OFF が出来ない。そこで、Windows PC の電源管理には WoL (Wakeup on Lan) を使用する事にして、サーバーとして使用する Mac mini に図 4 のフリーの WoL ツールを導入した。

この管理システム導入にあたって、Mac OS に関して調べていたところ、図 5 の省エネルギー設定画面で、起動時間の設定や停電時の自動復旧が行えることがわかり、現在は毎日の起動時間の設定と停電後の自動復旧を有効にしている。この設定を行った事により、Mac mini の停電後の電源関係の復旧はほぼ自動で行えるようになった。ただし、再起動後のキーボード・マウスが接続されていない事によるアラート表示はいぜんとしてあるので、瞬間停電が起こった場合などは、管理ソフトから「監視」もしくは「制御」のボタンを押してアラート表示を消してやる必要は残っている。

3 今後とまとめ

遠隔管理システムとしては完成し、日々の運用で使用されている。

各機器に関しては、表示システムの導入から約 4 年間で過ぎ、一部の PC に故障が発生している。まだ HDD 交換などで対処できる範囲だが、今後機器の入れ替えが必要な場合は Apple の Remote Desktop を導入したこともあり、Windows PC を Mac mini と交換する事にして、Mac OS のみで構成させよりスッキリとした形で管理が行えるようにしていきたいと思っている。

今回の構築にあたって、様々な経験が出来、Mac OS と Windows の設定の違いなど勉強になった部分が多かった。

4 謝辞

本システムの構築に当たっては、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所の小菅隆氏に情報表示用の専用ページの作成を快く引き受けて頂き、さらには専用ページを置いておく Web サーバーも使用させて頂きました、心より感謝致します。ありがとうございました。

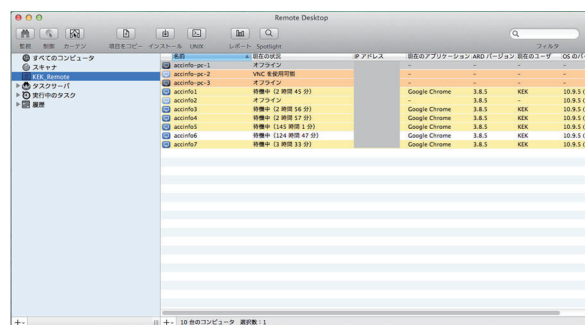


図 2. クライアント PC の管理

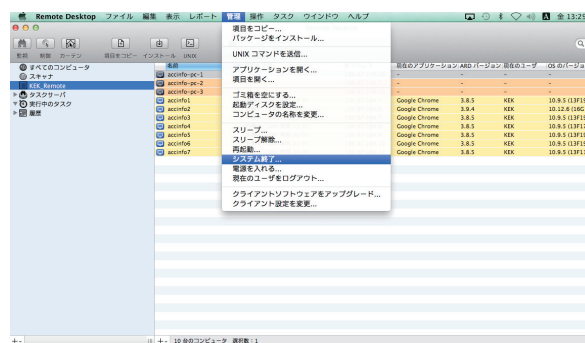


図 3. クライアント PC への各種指示

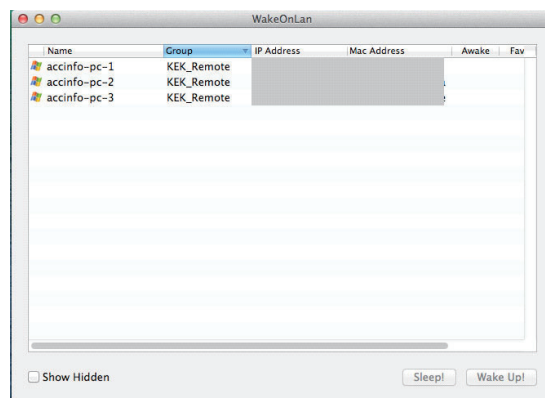


図 4. WoL ツール



図 5. Mac OS の省エネルギー設定画面

CentOS 系サーバー60 台と Web サイト 30 ヲ所にインストール済

プログラムの一覧作成

長屋 貴量

分子科学研究所 技術課

概要

現在私が管理している Linux サーバーは、CentOS を中心に約 60 台存在し、この中には Web サーバーも数多く含まれる。この台数のマシンをまとめて管理する方策を探るべく、サーバーにインストールされたプログラムの一覧表を作成した所、必要・不要プログラムの有無が容易に把握できるようになった事等報告する。

1 現状ときっかけ

私が管理可能な Linux サーバーとして、OS 別では CentOS7 が数十台、CentOS6 が十数台、その他 RaspberryPi (OS は Ubuntu 系統の一種である Rasbian Stretch (Debian 9)) が 20 台程度存在する。

これらのマシン上で、Web サービスも行っているものも多数存在する。また Web で公開しているコンテンツの管理は CMS の一種である Drupal を用いている箇所が、約 30 箇所存在している。

このようにいくつか種類のあるマシン構成の中で、何らかのソフトウェアに脆弱性が見つかった場合、問題のソフトウェアを利用しているマシンを速やかに見つけ出し更新を行う必要がある。しかし一台一台確認していると、全体を把握するまでに時間がかかったり、対応途中でどのマシンが対策済みなのか、把握できなくなったりすることがあった。

そのため、問題が起こってから現状を把握するのではなく、予めインストール済みプログラムの一覧を作成しておき、問題発生時にはその表を見るようにすれば、時間削減及び対処が必要なマシンを容易に識別できると考えた。

2 情報の収集方法

今回対象のマシンはいずれも Linux マシンであるため SSH コマンドを使いログインする事が可能である。ただ各マシンの管理者 ID やパスワードは個々に違っている。また SSH でログイン可能とは言え、一台ずつ順にログインしては時間がかかった。

そのため並列実行する方法がないか対応を検索した所、Parallel SSH ^[1] というソフトウェアを利用すると、パスワードが共通である複数マシンに対しコマンドを同時に実行でき、実行結果を個々のファイルに出力できることが判明した。また CentOS 及び Debian 系統では、パッケージ管理ソフトウェア (rpm / dpkg) が標準で装備されているため、インストール済ソフトウェアの一覧はこのコマンドの実行で入手できたため、この結果を利用することにした。

なお、手動でインストールするためパッケージ管理ソフトウェアの対象にならない、CMS の Drupal については、当初は対象ソフトウェアがインストールされているフォルダに含まれるファイルの一覧から情報を得ていた。しかし Drupal 用管理コマンドラインツールである Drush ^[2] の存在を知ったため、こちらを用い Drupal に含まれるモジュール (拡張プラグインソフト) の一覧を得られるようにした。

調査対象マシンについては、予め対象とするマシン名を記載したテキストファイルを作成しておき、調査時にこのファイルを読み込むようにした。

最後に、ソフトウェアの情報を恒常的に収集するため、Linux で標準的に利用される Cron を用いることで、毎日定時に情報を収集するようにした。

3 表の作成及び結果

上記で得られたデータを一覧表示するため、Perl を用い、HTML の表を作成した。元のデータは 1 行 1 プログラムとなっているが、不要な情報を含んでいたり区切りが不明瞭な場合があったりしたため、データ抽出にやや手間取った。

3.1 インストール済ソフトウェアの表

横の項目が対象サーバー名(CentOS 系 約 60 台)、縦の項目名がインストール済ソフトウェア名となる HTML の表を作成した。(図 1. (一部))

図 1. インストール済みプログラムの一覧表

最初はセル内に該当ソフトウェアのバージョンを表示させていたが、表がやや見づらかったため、セル内は空欄にして代わりに色を付けた。バージョンはマウスカーソルを載せると表示させるようにした。

また、この表は非常に巨大で一画面に収まらない。そのため、表をスクロールすると項目名が画面外に移動してしまい項目を確認しにくいという不都合があった。そこで、表をスクロールしても項目名は画面端に残して表示させるスクリプト(FixedMidashi [3]) を利用させていただき、視認性を改善させた。

3.2 アップデート有無の一覧表

rpm 等でインストール済ソフトウェアの一覧を得る際に用いるコマンドを差し替えることで、公開済アップデートの有無について情報が得られることに

気付いたため、表 1 にあげるコマンドを用い図 2. (一部) の表を作成した。

表 1. 一覧を得るために利用したコマンド

OS	インストール済	アップデート
CentOS	rpm -qa	yum check-update
Rasbian	dpkg -l	apt-get -s upgrade

図 2. アップデート有無の一覧表

この表を見れば、未適用のアップデートがどのマシンにいくつ残っているのか容易に確認でき、アップデート対象の数を減らす原動力となった。

また、図 1 と図 2 をまとめると図 3 となる。重要なシステム上でアップデートを実行する前に、似たプログラム構成のマシンでアップデートの試行を行って事前チェック可能となった点が大きい。

図 3. インストール済とアップデートの有無をまとめた一覧表

3.3 Rasbian

Rasbian Stretch (Debian 9)) でも表 1 のコマンドを用いインストール済ソフトウェア及びアップデート

有無の表を作成できた。(図 4. (一部))

図 4. 各 Raspbian マシンにインストール済みプログラム及びアップデートの一覧表

3.4 Drupal モジュール一覧

Drupal のモジュールについては、上記で作成したスクリプト集を援用する事で表を作成した。(図 5. (一部))

図 5. Drupal のモジュール一覧

Drush を利用した場合、存在しているモジュールが有効になっているのか単にファイルが設置されているだけなのかを判別できるため、モジュール利用の統一化に役立った。また、図 5 ではわかりやすいが左から 2 つ目のサイトでは縦に列が大きく抜けている部分があり、これは意図した結果なのか不慮によるものか、調査するきっかけになった。

4 考察

・マシンにインストールされたプログラムの一覧を作成する事で、各マシンに存在するソフトウェアを容易に把握する事ができる様になり、また通常存在を期待しているソフトウェアが存在していないマシンも判別する事ができた。

まだ、実際にセキュリティ上の観点からこの表

が役に立つ機会は起こっていないが、ソフトウェアの更新で対応可能な脆弱性の場合、容易に対象を見分けることができることを確認した。

・インストールされていることが標準的なソフトウェアがインストールされていなかった場合、意図してインストールしていないのか単にインストールしていないだけなのか、調査するきっかけとなった。

・今回の方法ではインストール済・未インストールプログラムの存在は検知できる。しかし各マシンをセキュアに保つにはプログラムの存在のみならず、どのように設定が行われているのかを知る必要がある。設定ファイルに含まれる設定内容を漏れなく一覧表にすることは上記方法の援用では限界があり、各マシンに共通して存在する項目ならば上記方法の援用は可能と思うが、そのマシン固有のソフトウェアの設定を含めて表にするのはかなり労力がかかると考え、打開策を模索している。

・自分以外の方が手動でインストールしたソフトウェアについては、その存在を認識する事は難しいため、今回の調査からは抜け落ちている可能性が高いと考える。

・各マシンの構成を横断的に設定・管理するソフトウェアとして Chef^[4] / Puppet^[5] / Ansible^[6] が知られているが、エージェントをあらかじめインストールしておく等事前準備が要る様であり、ノウハウを集めている状況である。

参考文献

- [1] <https://code.google.com/archive/p/parallel-ssh/>
- [2] <http://www.drush.org/>
- [3] 2017 K.Koiso http://hp.vector.co.jp/authors/VA056612/fixd_midashi/manual/
- [4] <https://www.chef.io/chef/>
- [5] <https://puppet.com/ja>
- [6] <https://www.ansible.com/>

ティッカーシステムの開発

岩橋 建輔

自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課

1 はじめに

「ティッカー」という言葉は広く知られている用語でないので簡単に説明する。今回ここで使うティッカーという言葉は、もともとはニュースや株価などの情報を狭い表示領域で伝えるため、文字を次々と流して表示するものである。これが広義に使われるようになり、ツイートを1行ずつ表示するようなことも含まれるようになっていく。発表タイトルの「ティッカー」は広義の意味のものである。

次に「ティッカーシステム」を開発するに至った経緯について説明する。2017年7月に自然科学研究機構技術研究会の一つのセッションとしてパネルディスカッションが行なわれることになった。パネルディスカッションを盛り上げていくにはどうしたらよいか、ということを実行委員と有志で議論している過程で、「最近テレビでよく用いられている手法として、視聴者からの書き込みを画面の下の方に出すものがないだろうか」というアイデアが出された。実現すれば、限られた時間の中で会場の方々の活発な意見を述べてもらうための仕掛けとして有効なツールとなることが期待されたため、即座に試作に取り掛かり最終的にティッカーシステムを独自開発し、パネルディスカッション時に活用することができた。

2 パソコン画面出力のキャプチャー

ティッカーシステムを作成するにあたり最も難しいのは、いかにパソコン画面出力を別のパソコンで取り込んでリアルタイムに画像合成処理ができるかである。これを実現するためには、UVCデバイスとして扱えるUSB接続のHDMIビデオキャプチャーの一択であった。UVCはUniversal Video Classの略語で、標準化された規格で現在のOSでは標準ドライバーで動作する。最近ではUSBカメラの大半がこの規格

に準じている。UVC非対応のビデオキャプチャーの場合、リアルタイムで画像にアクセスできる方法が一般的には提供されていないため、今回の目的には不適であるため検討から外した。

2017年4月時点で入手できるビデオキャプチャーを検討した。すでに同僚がライブ配信で使用していた「MonsterX Live」(SKNET社製)(図1)もUSB2.0接続ながら仕様上はUVC対応のものであった。しかし、実際に試してみるとすぐにフリーズして実用には程遠いものであった。そこで「FEBON238H」(ノーブランド)(図2)を入手して試したところ、ほぼ安定してキャプチャーできることが分かったので、こちらを使用してシステムを構築することにした。カタログスペックのレイテンシは0.04-0.16秒であり、今回の用途にはほとんど影響を感じさせない程度になっている。



図1. MonsterX Live



図2. FEBON238H

3 ティッカーシステムの全体像

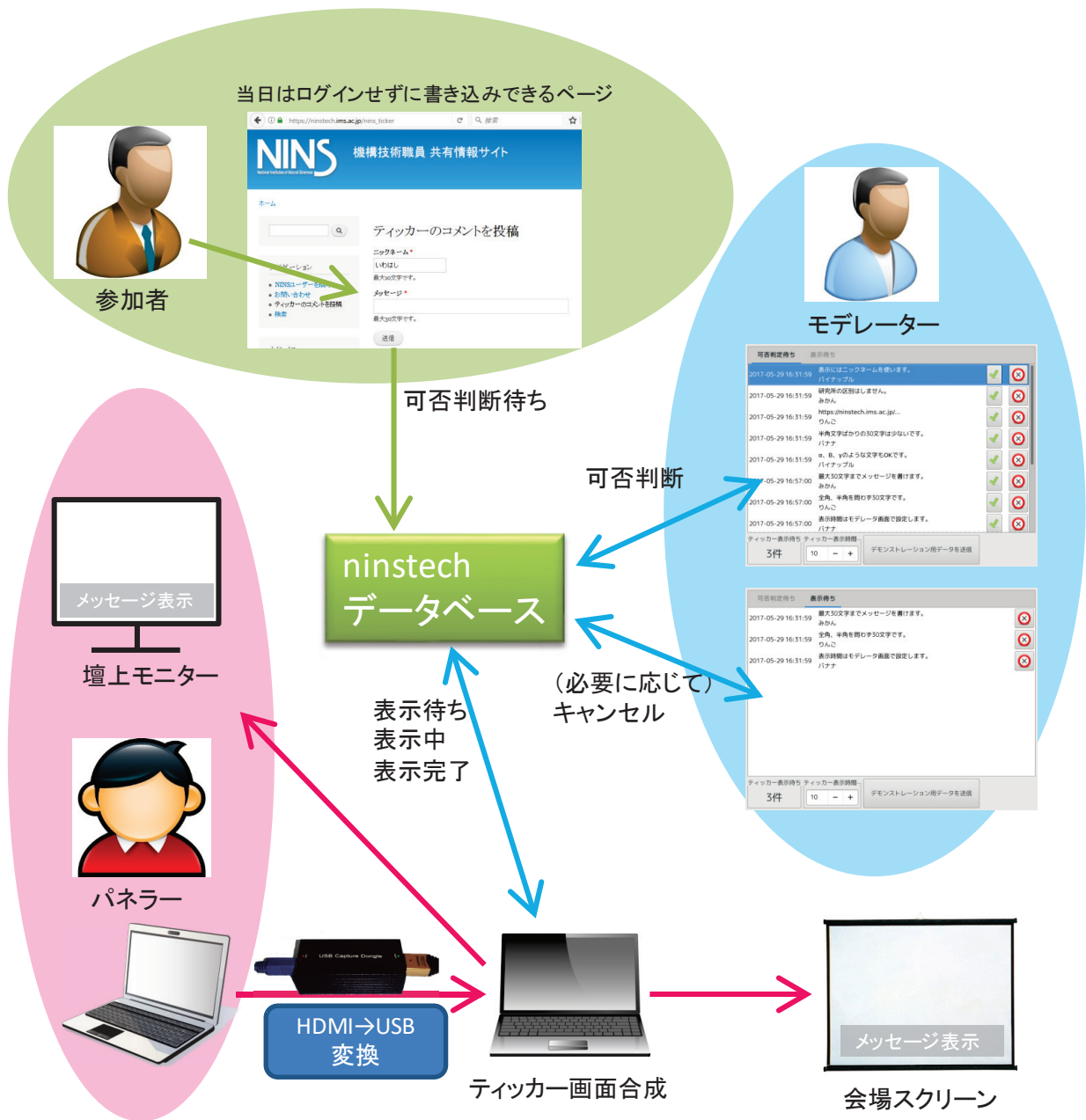


図3. ティッカーシステムの全体像

今回作成したティッカーシステムの全体像を図3に示す。参加者は何かコメントしたいことがあれば専用ウェブサイトのフォームにニックネームを入力後、コメントを書き込み、送信ボタンを押す。送信ボタンが押されるとニックネームとメッセージはninstechサーバーのデータベースに可否判断待ちとして保存される。モデレータは今回新たに作成したGTK+で作成された管理ソフトウェアで可否判断待ちのコメントから公開すべきと判断したものを選択

する。ティッカーとして他に表示されていなければ速やかにティッカー画面に10秒間表示される。そうでない場合は表示待ちとなる。また、モデレータが不適切と判断したものはキャンセルする機能も有している。データベースへの問い合わせは管理ソフトウェアが能動的に1秒ごとに行っているため、パネルディスカッションとのタイムラグが最小限になるようにしている。パネラーから見た場合は、通常のHDMI出力でスクリーンに出力するのと同じである。

今回のパネルディスカッションでは、ティッカー画面合成用のノートパソコンの段階で、会場スクリーンとパネラー用のモニターの出力を行い、実際にはモニター側の出力はさらに HDMI を 4 分岐させて 4 台のモニターに出力させた。

4 ティッカー合成アプリケーション

先のウェブフォームや管理ソフトウェアに関する部分は特に目新しい技術がないので本報告では割愛する。ここでは、ティッカー合成アプリケーションに焦点を当てて説明する。

今回このアプリケーションで利用している主なドライバやフレームワーク等について簡単に述べておく。まず、OS は Linux を採用した。これは UVC を扱える `uvcvideo` ドライバがあるだけでなく、映像を画像として簡単に取り込める `v4l2 (video4linux version 2)` というドライバが利用できるためである。フレームワークには、文字をグラフィックとして扱うために `Cairo`、グラフィカルユーザーインターフェースを扱うために `GTK+` と `glib`、そして、`GTK+` と `video4linux` を結びつけるものとして `GStreamer` を使用した。

`Gstreamer` はエレメントを組み合わせるパイプライン

を作成するもので、今回のシステムで最も重要で根幹を成すものである。今回は下記のエレメントを上から順番に組み合わせた。

- `v4l2src`
- `capsfilter`
- `videoconvert`
- `videoscale`
- `capsfilter`
- `gtsink`

`v4l2src` は `video4linux` からデータを読み取って出力するもの、最初の `capsfilter` はキャプチャーデバイスの解像度を固定するためのもの、`videoconvert` は画像フォーマットを変換するもの、`videoscale` は画像をリサイズさせるもの、2 番目の `capsfilter` はウィンドウサイズに合わせて画像を得られるようにするためのもの、`gtsink` は得られた画像を `GTK+` のウィジェットとして扱えるようにするためのものである。

5 ティッカーシステムの機材

このティッカーシステムを実際に設営するには様々な機材が必要である。今回のパネルディスカッションでは下記のものを用意した。

- 30m のイーサネットケーブル × 1

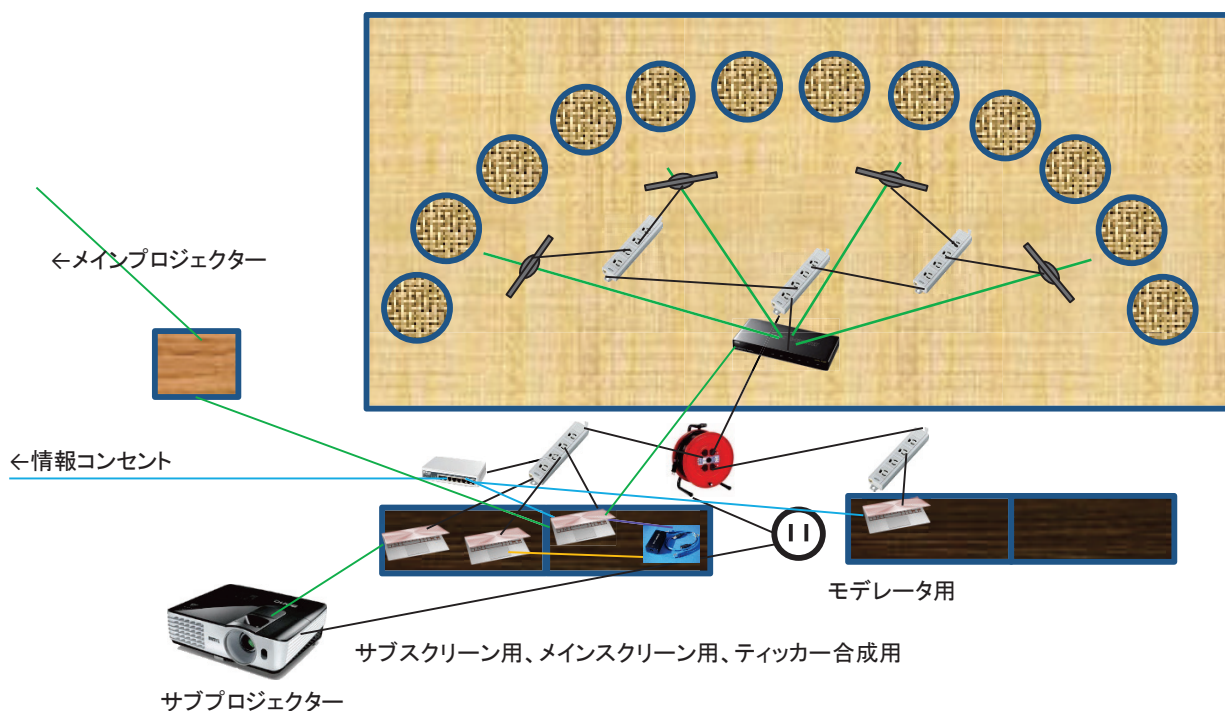


図 4. ステージ周辺の配置・配線図

- 5m のイーサネットケーブル× 2
- 8 ポートスイッチングハブ× 1
- 電源ドラムリール× 1
- 3m 電源タップ× 5
- 30 インチモニター× 4
- モデレータ用ノート PC× 1
- ティッカー合成用 PC× 1
- プレゼン用ノート PC× 2
- 5mHDMI ケーブル× 2
- 3mHDMI ケーブル× 4
- 2mHDMI ケーブル× 1
- HDMI 4 分配機× 1
- HDMI キャプチャー× 1
- USB3.0 ケーブル× 1

これらを具体的に配置・配線したものが図4である。また、本番開始前にティッカーシステムを試験



図 5. スクリーンに表示されたティッカー



図 6. モニターに表示されたティッカー

稼働させたものが図5、図6である。

6 問題点

事後アンケートで大きく2つの問題点が指摘された。1つ目は、ティッカーの領域を半透明にして元のプレゼンテーションにかぶせてしまっているのを見づらいという点。2つ目は、1回のメッセージの文字数制限を30文字としたため、書きたいことを書くのに苦労させられたという点。

またこのティッカーシステムをどこかで活用されることがあれば、上記の問題点を解消して稼働させたいと思う。

7 まとめ

若干の問題点はあったもののパネルディスカッションにおいてティッカーシステムを活用することによって、観客側もディスカッションに随時参加できるということを実証した。

参加機関名(50音順)及び参加人数

参加機関	参加者数
一関工業高等専門学校	1
宇宙科学研究所	3
大阪市立大学	1
大阪大学	8
香川大学	1
学習院大学	1
核融合科学研究所	47
金沢大学	1
九州工業大学	1
九州大学	3
京都大学	4
高エネルギー加速器研究機構	24
神戸大学	2
国立天文台	2
佐賀大学	1
静岡大学	2
千葉大学	2
電気通信大学	3
東京工業大学	1
東京大学	7
東北大学	7
徳島大学	2
豊橋技術科学大学	1
名古屋工業大学	4
名古屋大学	8
日本原子力研究開発機構	1
福井工業高等専門学校	1
分子科学研究所	9
北海道大学	3
三重大学	2
山形大学	1
山梨大学	2
横浜国立大学	3
理化学研究所	3
琉球大学	1
量子科学技術研究開発機構	7

総参加者数	170
口頭発表者数	39
ポスター一件数	32

2018/03/2集計

あとがき

技術研究会実行委員長 小林策治

核融合科学研究所で開催される平成29年度核融合科学研究所技術研究会にご参加いただきましたこと、厚く御礼申し上げます。

今回の技術研究会の特色は、初めて多治見市産業文化センターで開催することとしました。これは研究所近隣で複数の会議室を保有し交通の利便性にたけた会場を選定した結果です。また、5つの分野を平行開催することを必須とせず3～4つの会議室で行うこととしました。特別講演と代表講演では今年度開始したLHD重水素実験に関する内容とし、本研究所発表者も同様のテーマとすることにより関連付けを深めた企画にしました。今回はもう一つ新たな試みとして技術交流のセッションを設け「熱シミュレーション技術」を題材に口頭とポスターを交えた発表会を行います。活発な意見交換が行われることを期待します。

この技術研究会は職域を超えて真剣に議論頂ける技術職員の情報交換の場であります。仕事上の専門分野が異なっても各自が持つ要素技術や英知を有効活用することで新たな優位技術の誕生のきっかけとなり、各自の問題解決のヒントが得られるのではないかと思います。技術研究会への参加を契機に、さらに継続的な技術交流へと発展させるというアクションを参加者一人一人意識的に行い、技術の研鑽を図られることを期待します。

最後に、今回の技術研究会の企画開催にご協力とご支援を頂きました、核融合科学研究所、核融合科学研究所の管理部、研究部をはじめとする関係者の皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。

技術研究会実行委員会 実行委員長 小林策治
実行委員 林 浩己 谷口能之
加藤明己 岡田光司
古田紘己 近藤友紀
渋谷真之 森内貞智
井上知幸 前野博也
林 浩 小淵 隆

Web 版技術研究会報告集の閲覧方法について

概要

1975 年度より開催されている技術研究会、並びに機器・分析技術研究会や実験・実習技術研究会の過去全ての報告集は電子化作業が完了し、Web 公開拒否の意思表示頂いているものを除いた全ての論文を Web で参照可能です。各論文は、研究会毎の発表リストから選択するだけでなく、全文検索を含む様々な検索を利用して探し出すことが可能です。以下の案内を参照頂き、ぜひご活用ください。

1 公開環境について

誰もが閲覧できる Web 環境で、技術研究会報告集の論文を公開することは多くの問題点があり、これまで何度も議論を繰り返してきました。そこで誰もが参照可能な Web 環境では、基本的に題名等の公開にとどめています。これとは別途利用者を限定できる環境を整備して、その環境下では論文閲覧ができる様に整備しています。この利用者限定環境には、SNS (Social Network Service) を利用しており、招待された方のみが参加できる SNS へ登録することで、全論文の閲覧が可能になります。参加は技術研究会参加範囲に限定しています。論文の公開は、要望により論文単位で「一般公開可」や「Web 参照不可」なども設定しています。

2 アクセス方法

利用形態に応じて、以下の URL までアクセスしてください。

一般公開版（論文参照不可） <http://techsv.ims.ac.jp/GEN>

利用者限定版（論文参照可） <http://techsv.ims.ac.jp/SNS>

一般公開版ページは、利用者限定版ページへリンクしています。もし一般向けに公開しているホームページ等へリンクしたい場合には、一般公開版ページをリンクするようにして下さい。

SNS へ登録するには、既に SNS に登録済みの方から招待メールを送付頂く必要があります。もし身近に登録済みの方がいない場合は、下記問い合わせ先までご一報下さい。担当者より招待メールを差し上げます。

3 利用者限定版の登録方法と使い方

招待メールを受信したら、メール上の URL へアクセスして登録手続きを行って下さい。登録時には、利用規約を一読願います。登録方法など、SNS の使い方は、「利用の手引き <http://techsv.ims.ac.jp/WIKI>」を参照してください。利用者限定版ページ下部には、常に「利用の手引き」へのリンクが掲載されています。

登録すると 1 日 1 回ニュースメールが届きますが、これを止めたい場合は、「設定変更」メニューから設定可能です。技術研究会報告集データベースを利用したい場合は、SNS 画面左上にある黄色の「データベース検索」ボタンをクリックして下さい。登録が済んだら、利用規約の範囲の身近な方に、ぜひご紹介ください。

4 問い合わせ先

今後の開催分についても、下記の運用責任組織でデータ登録を行い、データベースを維持していく所存です。本件以外にも、本データベースや SNS の運用についてなど問い合わせは、下記までお願いいたします。

運用責任組織	自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課
担当者	水谷 文保
メールアドレス	mizutani@ims.ac.jp