

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

準軸対称ヘリカル型トーラス閉じ込め装置
CHS-qa 実験提案書
Proposal of the CHS-qa experiment

CHS-qa design team

(Received - 2020/07/6)

NIFS-MEMO-87

July 22, 2020

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: tosho@nifs.ac.jp

<Notice about copyright>

NIFS authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights and reuse rights of copyrighted works. If you wish to obtain permissions of these rights, please refer to the homepage of JAC (<http://jaacc.org/eng/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

Proposal of the CHS-qa experiment

CHS-qa design team

Abstract :

The CHS experiment program started in 1988, ten years before the LHD experiment began. The purpose of this experimental program was to conduct pioneering research to learn the device operation and to develop a good perspective of the research in stellarator experiments before starting a large scale LHD experiment. When the LHD experiment was started, experimental research activities in NIFS were focused on the LHD experiment and the main target of the CHS program was shifted to the discussions for the next research target of the stellarator experiment in NIFS.

NIFS organized a taskforce group to evaluate several research programs as candidates for the post-CHS project. Records of the discussions of the taskforce were included in this booklet. After making scientific comparisons between candidate plans, the experimental program of the advanced stellarator with quasi-axisymmetry was selected. The program name was decided as the CHS-qa program. This report is a copy of the official proposal of the CHS-qa which was submitted to NIFS in April, 2000.

The discussions at NIFS finally reached the decision that this proposal would not be accepted as the post-CHS experiment. The main reason was that the schedule of the CHS-qa program would occur in the same period of the initial phase of the LHD experiment and it was not possible to manage the two programs in parallel.

After 20 years, a new international joint project NSJP (NIFS - SWJTU Joint Project) started in 2017 for the construction of an advanced stellarator in China and to conduct experiments under the international collaboration scheme. The name of the new stellarator is CFQS (Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator). Because the concept of the device (quasi-axisymmetric stellarator) is the same as CHS-qa, many experiences and design data developed in the physics and the engineering design of CHS-qa are incorporated into the design work for the CFQS. The publication of the 'Proposal of the CHS-qa program' is planned now to make the information open for all researchers who will work for the new experimental program CFQS.

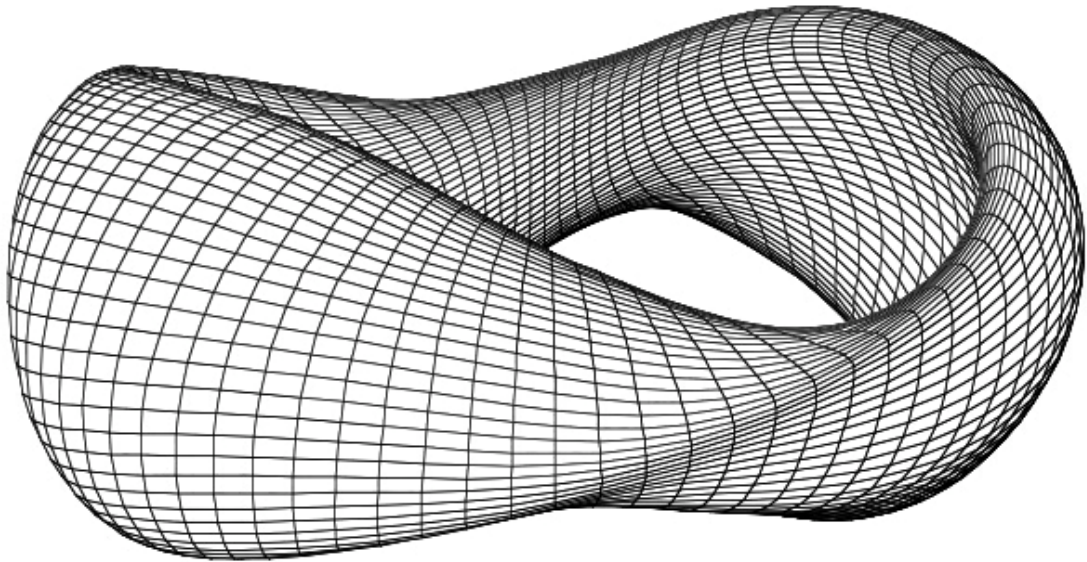
Shoichi Okamura
Research Enhancement Strategy Office
National Institute for Fusion Science

Keywords : Quasi-axisymmetric stellarator, Advanced stellarator, modular coil, Compact stellarator

All figures are in color only CD-ROM(PDF).

準軸対称ヘリカル型トーラス閉じ込め装置

CHS-qa 実験提案書



2000年 4月

核融合科学研究所

目次

1. 研究の目的
2. 磁場配位の最適化設計
 - 2.1 ヘリカル磁場配位設計の方法論
 - 2.2 最外殻形状の記述形式と磁場構造のスペクトル表現
 - 2.3 CHS-qa のための磁場配位の検討
3. MHD 安定性
4. 高エネルギー粒子閉じ込め
 - 4.1 高エネルギー粒子閉じ込めと磁場リップル
 - 4.2 粒子最適化配位
5. プラズマ回転
 - 5.1 ヘリカル系閉じ込め装置におけるプラズマ回転
 - 5.2 新古典平行粘性の定量的評価
6. 実験計画
 - 6.1 CHSの主な成果
 - 6.2 CHS-qa における実験計画
 - 6.3 計測
 - 6.4 年次計画
 - 6.5 実験計画を達成するための装置サイズ
7. 装置設計
 - 7.1 主眼点
 - 7.2 コイル設計
 - 7.2.1 モジュラーコイル
 - 7.2.2 ポロイダルコイル
 - 7.2.3 トロイダルコイル
 - 7.3 コイル支持構造
 - 7.4 真空容器
 - 7.5 全体図
 - 7.6 モジュラーコイル1/5モデル

付録 CHS 後継装置に関するこれまでの検討

1. 研究の目的

磁場閉じ込め核融合研究は、この30年程の期間はトカマク方式による研究が、全体の流れをリードしてきたといつてよいだろう。トカマク方式に替わるものとして最も期待されてきたと言って良い、ヘリカル型閉じ込め方式の研究も、装置の規模と達成されたプラズマ・パラメータとしては、残念ながら数年規模の遅れを伴って発展してきたと言わざるを得ない。将来の核融合炉にとって極めて重要な安定した定常運転の観点からは、トカマク方式に対して大きな利点をもつヘリカル方式にとって、このような研究の進展における遅れは残念なことである。その最大の原因は、磁場配位の三次元構造に基づくもので、ヘリカル配位に特有なヘリカル捕捉粒子の損失の問題と、またその解決のための磁場配位最適化の研究において、理論的方法論と解析手法の精密化がこれまでは困難であったためである。

しかしながら、ヘリカル方式による閉じ込め研究は、ここ十年の間に飛躍的な発展を遂げている。実験面においては、核融合科学研究所において実験研究が開始された、大型ヘリカル装置LHDは、世界で初めての、大型トカマクに匹敵するサイズと規模を持つヘリカル型実験装置であり、トカマクに対してこれまで抱えていた実験研究面での時間的遅れを、大幅に縮めることが期待されるに十分な成果をあげつつある。一方、理論面においては、近年のコンピュータ科学の発展に支えられた三次元磁場構造解析手法は、それまでは近似的な解析法が主であった磁場配位の最適化研究に、より精度の良い具体的な構造を生み出すことが可能な手段を提供することができるようになった。その結果として磁場配位の三次元構造については、これまで行われていたコイルの形を工夫するだけの次元から、はるかに広い領域の構造を研究することが可能になり、またプラズマの安定性などの解析についても、三次元構造に基づく評価の精度が高められている。このような新しい概念の代表的な例として、三次元の磁場配位の形状を持ちながら、粒子閉じ込めの観点からは磁場構造が二次元と同等になるという、対称性を持った磁場配位の発見があげられる。

磁場構造を二次元化するという事は、これまでヘリカル方式にとって不可避と考えられていた、三次元構造から派生する粒子閉じ込めの問題点を本質的に解決するという事を意味する。当然のことながら、磁場配位自体の形状は三次元のままであり、これはトラス閉じ込めにとって必須な磁気面の回転変換を、プラズマ電流を用いないで形成するために必要である。二次元磁場構造を達成する配位としては二通りの構造が発見されていて、一つは準ヘリカル対称配位、もう一つは準軸対称配位と呼ばれるものである。前者は磁場構造が直線状ヘリカル配位に同等となるもの、後者は軸対称トラスと同等になるものである。後者の場合はプラズマ電流を必要としないトカマクと言い換えることもできる。

このような、全く新しい概念に基づくヘリカル方式が与えてくれる閉じ込め改善の物理を、実験的に実証することが本実験計画の主目的である。ヘリカル方式の研究が本質

的に必要とする三次元磁場構造解析手法については、過去においては十分なものが用意されていたとは言えない。その意味で本当の意味のヘリカル方式の発展はこれからのものと言っても良い。大型ヘリカル装置 LHD によって核融合炉に向かって大きな一歩を踏み出した今、最近のヘリカル方式研究のもうひとつの大きな成果である新概念の研究を開始することが、今後のヘリカル方式の発展にとって重要な一歩になることは明らかである。

コイルの形に捕らわれないで、自由なプラズマ形状に基づく磁場配位の最適化から設計されたヘリカル方式の閉じ込め装置の中で、実験が開始されるフェイズに入りつつあるものが、世界的にはいくつか存在する。ドイツで現在建設中の Wendelstein 7-X 装置は、本研究所の LHD に匹敵する規模を持った実験計画であるが、対称性に基づく磁場配位最適化を採用してはいない。ここでの最適化は捕捉粒子の動く範囲をトーラスの一部に限定させることであり、磁場の二次元構造による単純化とは逆の方向を目指したものである。また準ヘリカル対称性に基づいた最適化による装置として、アメリカの HSX 装置が建設をほぼ終了する段階に入っている。ただしこの装置は大学の研究室レベルの規模であり、研究目的としては、低密度、低ベータ値の ECH プラズマの研究に限定されていて、本格的なプラズマ閉じ込め研究を行うためには加熱入力不足が否めない。

本実験計画においては、二つの二次元磁場構造をもつ配位の中から、準軸対称性配位を採用する。その理由は、この配位が持つ特徴のうち、低アスペクト比の性質とトロイダル回転に対する粘性が少ない性質を重要視するためである。CHS 実験の主目的は、それまで比較的高アスペクト比の装置が主流であった、ヘリカル方式の実験研究の流れの中で、低アスペクト比のヘリカル装置が与えることのできる閉じ込め性能を調べることであった。この目的に対しては、後に述べるように CHS は十分満足できる成果を与えることができた。核融合科学研究所のサテライト実験装置として計画される本実験計画においては、この路線を継承しさらに発展させる方向を旨とする。そのためにアスペクト比は CHS においては 5 であったものを、3 から 3.5 程度まで下げた設計を採用する。この値はほとんど通常のトカマク型核融合炉において採用される値に近く、将来の核融合炉における装置のコンパクト性の問題に対して、ヘリカル方式からの解答を与えることができる。

トロイダル回転の問題は、サテライト実験装置として十分なプラズマ性能を確保するために必要な課題である。本実験計画の主目的は、二次元磁場構造を持つヘリカル方式の新概念の実験的検証であるが、一方で、サテライト装置として要求される重要な特徴の一つは、高レベルのプラズマを安定して供給することができる、優れた閉じ込め性能である。広い運転領域において、閉じ込め性能を大きく支配する輸送過程は、いわゆる異常拡散であって、このような異常拡散に対する閉じ込め改善の方策を持つことは、これからの実験装置としての必要条件と言っても過言ではない。準軸対称磁場配位においてトロイダル方向の粘性が低いという特徴は、プラズマの高速トロイダル回転が容易となる条件を提供し、そこから派生する電場の勾配による異常輸送の抑制が、閉じ込め改

善のための重要な方策として考えられている．プラズマは改善閉じ込めモードに入ったときは、自発的に回転を始めるが、一方外部のトルクによって高速トロイダル回転を発生させるための実験的手法として、NBI を全て co-injection の接線入射角度に設置してプラズマを駆動する計画も用意する．二次元構造の磁場配位において、トカマクの場合と同等の回転がもたらされることが期待でき、電場による異常輸送抑制の実験研究にとっての広範なプラズマ運転領域を用意することが可能である．

サテライト装置は、研究テーマの新規性とは別に、以下に述べるような観点からもその必要性を論ずることが出来る．サテライト装置は小回りが効くため、大型装置のミッション(プロジェクトとして約束したパラメータの実現)を達成する上で将来必要になるかもしれない各種 R&D を安く且つ速くサテライト装置において行うことが出来る．それらの中から、うまくいった試みを大型装置に適用すればよい．小回りが効き実験テーマの回転が速いことは、一方で、大学院学生の教育に適している．核融合研究は長期にわたることが予想されるため人材の養成は重要事項である．また、システム全体を見ることの出来る若手研究者の養成はサテライト装置でなければ出来ない．若手研究者にとって、大型装置においては各分野の専門家にはなりえても、その規模が大きいため全体を見渡す役割を担うことは難しい．次代の計画を構想する研究者たりうるには、若い時に全体を見る経験を積むことが必須であろう．

2. 磁場配位の最適化設計

2.1 ヘリカル磁場配位設計の方法論

実験計画の目的を達成するためには、装置の閉じ込め磁場配位の正しい選択が最も基本的な要素である。これまでに設計・建設されてきたヘリカル型装置のほとんどは、ヘリカル・コイルの巻線則とポロイダル・コイル等の付加的コイルの形状を調節することによって、磁場配位の最適化を達成していた。必要な磁場コイルの数があまり多くなく、かつコイル形状もあまり複雑でないということは、装置の設計の上からは好ましい点ではあるが、磁場配位の物理的性質のシンプルさとコイルの構造的シンプルさとは、必ずしも正の相関があるとは限らない。ヘリカル型磁場構造の実際の例においては、却って逆の相関関係にあるケースも多いと言える。

トカマクの新しい装置を設計する時に、まずトロイダル・コイルとポロイダル・コイルの数と位置を決めた上で、その電流値の配分を調整することによって目標とする磁場配位を決めるといったプロセスは普通は取らない。磁場配位はモデル的に自由に設定し、実験目標に適合する配位を決めた後に、その配位を実現するためのコイルの設計にかかるのが通常の見方であろう。もちろん、コイルの設計において技術上の問題点が出てきた時は、その点を解決するために元の磁場配位に修正を加えるといった、フィードバックを行うことはいくらでもあり得る。このようなトカマクでの常識に反して、ヘリカル方式の装置設計においては、長い間どちらかと言うとコイルの形状に強く依存した設計方法が広く用いられてきた。コイルによって生成される磁場に基づいて設計するということは、真空磁場の特性に引きずられた発想になり易いということをも意味する。このような状況をもたらした原因としては、第一章にも述べたように、三次元構造の数学上、あるいは数値計算上での取り扱いの困難さが大きかったと思われる。

三次元磁場構造は、磁気面関数としてプラズマ圧力と電流に関する一次元分布を与えれば、最外殻形状から一意的に決定される。コイルが作る磁場に基づいて磁場配位を設計する方法に対して、プラズマの最外殻形状を入力データとして、プラズマの圧力平衡の式を解くことから磁場配位を決定し、その性質を目的のものに近付ける方向に最外殻形状データを調整するという方法は、理論的には1980年代に始まっている [Garabedian, 1980]。圧力平衡の式から磁場配位を求めるということは、コイルの磁場による設計においては難しかった、有限ベータの平衡配位を直接ターゲットにした最適化のプロセスを可能にするという大きなメリットもある。この方法が実際のヘリカル型閉じ込め装置の設計の上に実用化されたのは、NESCOIL コードによるモジュラー・コイルの設計が可能になってからである [Merkel, 1988]。このような流れを受けて、Wendelstein 7-X の設計が行われた [Grieger, 1990]。ちなみに Wendelstein 7-AS の設計においては、磁場配位の最適化のプロセスにおいてコイル形状から独立した設計を行い、その後でモジュラー・コイルを設計するといった手順は取っているが、上に述べたような設計技術はまだ本格的には使われていない。

今回の実験計画で採用した磁場配位の設計方法は、本質的には Wendelstein 7-X の設計で採用されたものと同様である。ただし、結果として得られた解は以下に述べるように本質的に異なるものとなった。最適化とは最も優れた結果を得ようとするプロセスであるが、その過程においてどのような物理量に最適化の重点を置くかによって、結果が異なることは当然のことである。我々が次期サテライト装置に求めた二つの基本特性は、低アスペクト比と極小化されたトロイダル粘性であり、両者とも Wendelstein 7-X の設計において求めた特性とは全く異なるものである。

2.2 最外殻形状の記述形式と磁場構造のスペクトル表現

我々の設計に使用した磁場配位の最適化コードは、ドイツの Nuehrenberg グループによって開発されたものである。このコードでは平衡計算の部分は VMEC [Hirshman, 1986] を用いているので、入力する最外殻形状を表現するデータとしては、VMEC で通常用いられている、最外殻形状のフーリエ成分 R_{mn} , Z_{mn} を用いる。これらの成分により最外殻形状は次の式によって表現される。

$$\begin{aligned} R(\theta, \phi) &= \sum R_{mn} \cos(m\theta - n\phi) \\ Z(\theta, \phi) &= \sum Z_{mn} \sin(m\theta - n\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 θ はポロイダル角、 ϕ はトロイダル角を示す。また m はポロイダル、 n はトロイダル・モード数を示す。トロイダル方向の周期性を仮定しているため、トロイダル・モード数はトーラス全周に対する値ではなく、一周分に対する値である。最適化のプロセスにおいて、これらの R_{mn} , Z_{mn} を自由変数として扱うので、この数をむやみに増やすことは計算の能率を落とすことになり、自由変数の選び方にこの最適化法のノウハウの鍵がある。目標とするレベルの準軸対称性と、満足できるベータ値の平衡に対する MHD 安定性を得るために、最終的には 43 の成分を必要とした。実験装置としての技術設計の基準とした 2w39 配位に用いた各成分の値を表 2-1 に示す。フーリエ成分としては全部で 46 個示されているが、そのうちの R_{00} , Z_{00} はトーラスの大半径として固定値であり、また R_{10} と Z_{10} はアスペクト比を一定にするために二つの値の和を固定しているため、自由度としては 43 となる。

磁場配位最適化計算を最外殻形状を基にして行うコードとしては、New York 大学クーラン数理物理研究所の Garabedian の開発した NSTAB コードも知られている。このコードでは最外殻形状の表現として、前記のコードと同様にフーリエ成分を用いているが、以下の式に示すような異なった表式を用いている。

$$r + iz = \exp(iu) * \sum \Delta_{mn} \exp(-imu + inv) \quad (2)$$

ここでは、 Δ_{mn} がフーリエ成分の値を示す．この表式は数学的には当然のことながら表現式 (1) と同等であり、表 2-1 の値を Δ_{mn} で表すと表 2-2 のようになる．

このような最外殻形状から、圧力平衡の式を解いて求められた平衡配位の物理的評価のための一つの手段として、Boozer によって考案された、いわゆる Boozer スペクトル [Boozer, 1980] を用いる．Boozer スペクトルは磁場強度の三次元的変動を、ポロイダル・トロイダル角に対するフーリエ成分で表現したものである．磁気座標の一つであるが、無衝突の粒子軌道がこのスペクトルを使って評価できることが大きな特徴である．磁場強度の空間変動構造は次のようにスペクトルの和として表現される．

$$B(\theta, \phi) = \sum B_{mn} \cos(m\theta - n\phi) \quad (3)$$

$n = 0$ の場合は軸対称成分を示し、 $m = 0$ の成分はトーラス上の連結ミラー的磁場変動を表す．その他の成分は全て一種のヘリカル成分である．基本的には磁場強度の Boozer スペクトルとコイルの形状とは対応していて、例えば CHS の場合は $l = 2, N = 8$ のヘリカル・コイルによって主に磁場が生成されているため、Boozer スペクトルとしては $B_{mn} = B(2, 1)$ の成分が一番大きい ($n = N/8$) ．

最外殻の形状を表すフーリエ成分と磁場構造の Boozer スペクトルとの関係を考える時は、(2) 式による表現の方が直接的である．(2) 式に用いられている Δ_{mn} と Boozer スペクトルの B_{mn} とは一対一の対応関係がある．(1) 式の R_{mn}, Z_{mn} の場合はポロイダル・モード数を一つずらさないと対応しない．内部電流を含まない軸対称な磁場構造において、回転変換を作り得ないことは簡単に証明できる．内部電流無しで回転変換を生み出すためには、少なくとも最外殻形状が非軸対称でなければならない．これまでのヘリカル磁場の理解は、 Δ_{mn} と B_{mn} との強い相関を意識することに引きづられて、幾何学的にはヘリカル配位でありながら、磁場構造としては軸対称である配位を考え付くことには至らなかった．この可能性を指摘したのは Garabedian である [Garabedian, 1996] ． Δ_{mn} と B_{mn} とが仮に厳密に一対一に対応しているとすれば、 B_{mn} に軸対称性をもたせるためには Δ_{mn} が軸対称構造でなければならないわけで、内部電流をもったトカマク型しかあり得ない．実際には Δ_{mn} と B_{mn} との関係は単純な一対一に対応しているわけではなく、 Δ_{mn} の微妙な調整によって、 B_{mn} に軸対称性を持たせることが可能になったのである．無電流のヘリカル配位ではないが、非軸対称な最外殻形状により、磁場構造の軸対称性を損なわずに内部回転変換を生み出すことの可能性は、Garabedian に先立って Nuehrenberg が準軸対称トカマクという見地から発表している [Nuehrenberg, 1994] ．

2.3 CHS-qa のための磁場配位の検討

磁場配位を決定するプロセスにおいては、要請される物理的特性に対してある程度の選択を行う必要がある．最終的に総ての物理特性を満たす解を見つけることが目標であったとしても、始めから要求項目を欲張りすぎでは最適化プロセスが収束しない．CHS-qa

のための磁場配位設計作業の第一フェーズにおいては、磁場構造の軸対称性と磁気井戸の確保の二つの物理特性を基本要件項目として配位の最適化を行った。MHD 安定性は最適化作業の途中のステップにおいて、逐次検定する方法を採用した。

このようなプロセスから得られた磁場配位を第 2-1 図に示す。トロイダル周期数は 2、アスペクト比は 3.9 である。磁気井戸 (Magnetic Well) を示す w を加えて、 $2w39$ 配位と呼ぶ。第 2-1 図の配位はプラズマ・ベータ値ゼロの真空磁場配位である。アスペクト比については、低い値を選択した方がより良い準軸対称性を実現することが容易になるが、一方磁場配位を実現するためのモジュラー・コイルの設計は、より難しくなる。この意味において、磁場配位の物理的特性のみの考慮からはアスペクト比の最適値は決められない。アスペクト比 3.9 の値は、コイル設計の実現性の考慮に少し傾いた選択である。第 6 章に示されるように、この配位に対しては強度解析まで含めた総合的技術検討を満足するコイル設計がすでに完了している。第 2-1 図 (b) は、磁場強度の等高線を示す。三ヶ所のトロイダル断面の全てにおいて、トーラス内側で強く外側で弱いという、準軸対称な磁場構造が見てとれる。

第 3 章に述べるように、 $2w39$ 配位は高ベータ・プラズマに対しては、十分な MHD 安定性を持ってはいない。この点を改善する目的で、磁場配位最適化のプロセスの中に、MHD 安定性の評価としては間接的な磁気井戸の評価に換えて、局所的バルーニング安定性の評価を取り入れた新しいコードが開発された。このコードから得られた配位として、第 2-2 図に $2b32$ 配位を示す。アスペクト比はさらに下がった値の 3.2 である。モジュラー・コイルの設計はかなり厳しくなっているが、技術的検討を進めることにより実現可能な範囲である。

$2b32$ 配位の真空磁場に対する Boozer spectrum を第 2-3 図に示す。回転変換を持つ磁力線に沿った、トロイダル効果に起因する磁場変動分はトカマクと共通であり、 $m=1, n=0$ のモードの成分である。この成分に対して、残りのスペクトル成分は数パーセント以内のレベルであり、準軸対称性が保たれていることがわかる。しかしながらこの配位においては、プラズマ周辺部において $m=1, n=-1$ のヘリカル・リップルが 1-2% レベルで残っていて、無衝突領域での輸送においては、新古典輸送に少なからず影響を与えていることがわかっている。

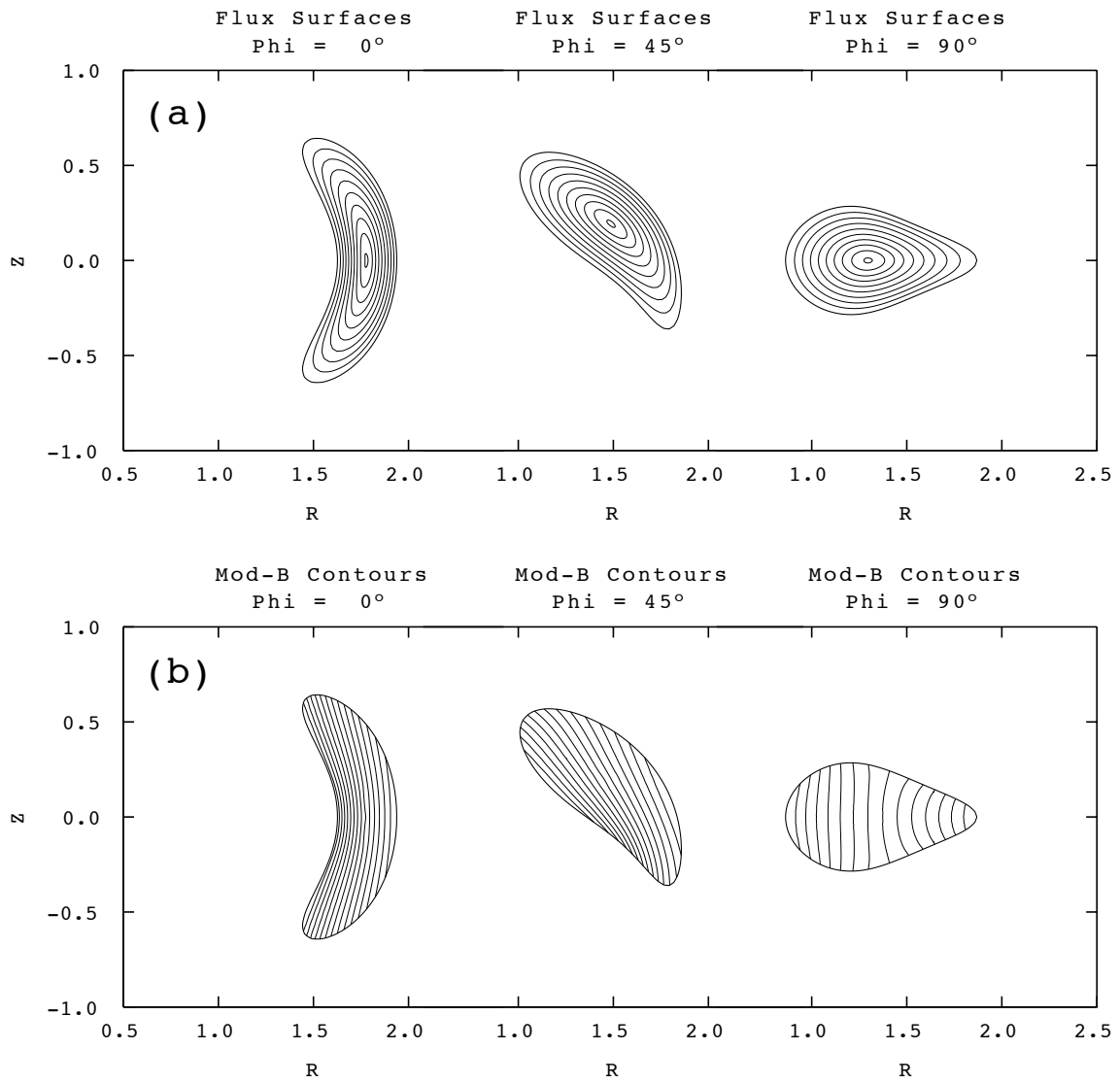
この問題を解決するために、さらに高エネルギー粒子の閉じ込めの評価を最適化のプロセスに取り込んで設計した配位として、 $2a36$ 配位の磁気面を第 2-4 図に示す。また、この配位の平均ベータ値 2.5% における Boozer spectrum を第 2-5 図に示す。この配位では軸対称成分 $m=2, n=0$ の振幅と、ミラー成分 $m=0, n=1$ は $2b32$ に比較してかなり増加しているのに対して、それ以外の非軸対称成分は十分小さなレベルに押さえ込むことに成功している。第 4 章に述べるように、この配位での高エネルギー粒子閉じ込めは極めて高度のレベルまで最適化が行われている。

m	n	Rmn	Zmn
0	0	1.500000E+00	0.000000E+00
0	1	1.315590E-01	-9.596100E-02
0	2	5.553000E-03	-5.646000E-03
0	3	5.907600E-05	1.592790E-03
1	-1	3.034200E-02	3.996000E-02
1	0	3.376500E-01	4.389600E-01
1	1	-1.857480E-01	1.538790E-01
1	2	-6.066300E-03	6.611700E-03
1	3	2.290950E-03	-4.937400E-03
2	-2	3.932400E-03	1.718250E-03
2	-1	7.813500E-03	3.488400E-03
2	0	3.773700E-02	3.045300E-03
2	1	7.447800E-02	3.924300E-02
2	2	2.856570E-02	-1.998810E-02
2	3	-4.364700E-03	7.235400E-03
3	-1	1.634670E-03	3.090600E-03
3	0	-5.172000E-03	5.225400E-03
3	1	-1.551480E-02	-1.250340E-02
3	2	2.224110E-04	-2.487390E-03
3	3	-6.648900E-03	5.238600E-03
3	4	2.836980E-03	-2.567730E-03
4	2	-1.966890E-03	6.632100E-04
4	3	-1.275660E-03	-2.667000E-03

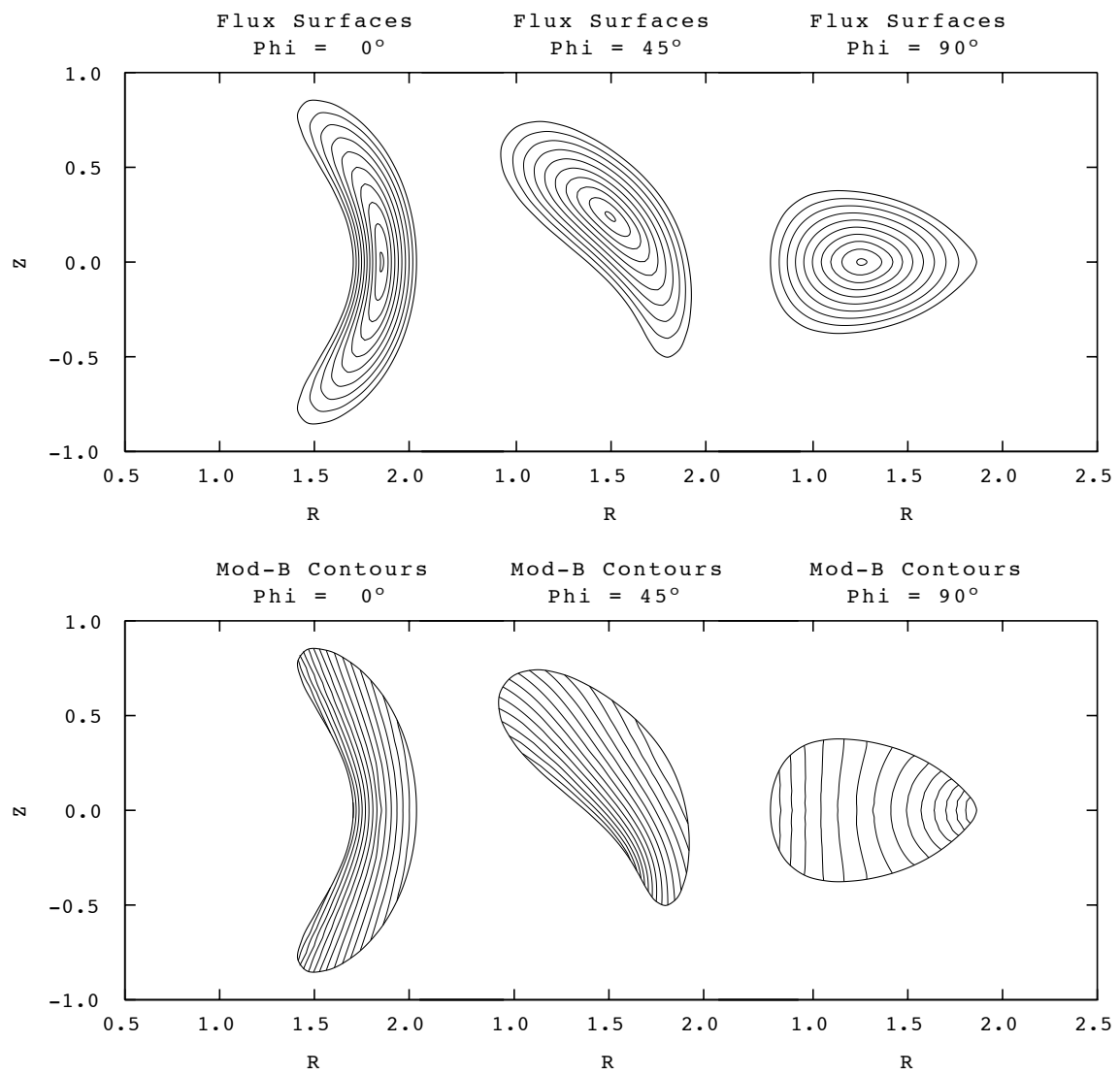
表 2-1 2w39 配位に用いた Rmn, Zmn フーリエ成分の値 . m はポロイダル・モード数、n はトロイダル・モード数

m:n	-1	0	1	2	3
-2	-0.01401	0.00003	0.00236	0.00000	0.00000
-1	0.05686	0.02039	0.00565	0.00283	0.00000
0	-0.01593	0.38831	0.03515	0.00000	0.00000
1	0.01780	1.50000	0.11376	0.00560	-0.00077
2	-0.00481	-0.05065	-0.16981	-0.00634	0.00361
3	0.00216	0.01735	0.01762	0.02428	-0.00580
4	-0.00073	-0.00520	-0.00151	0.00135	-0.00594

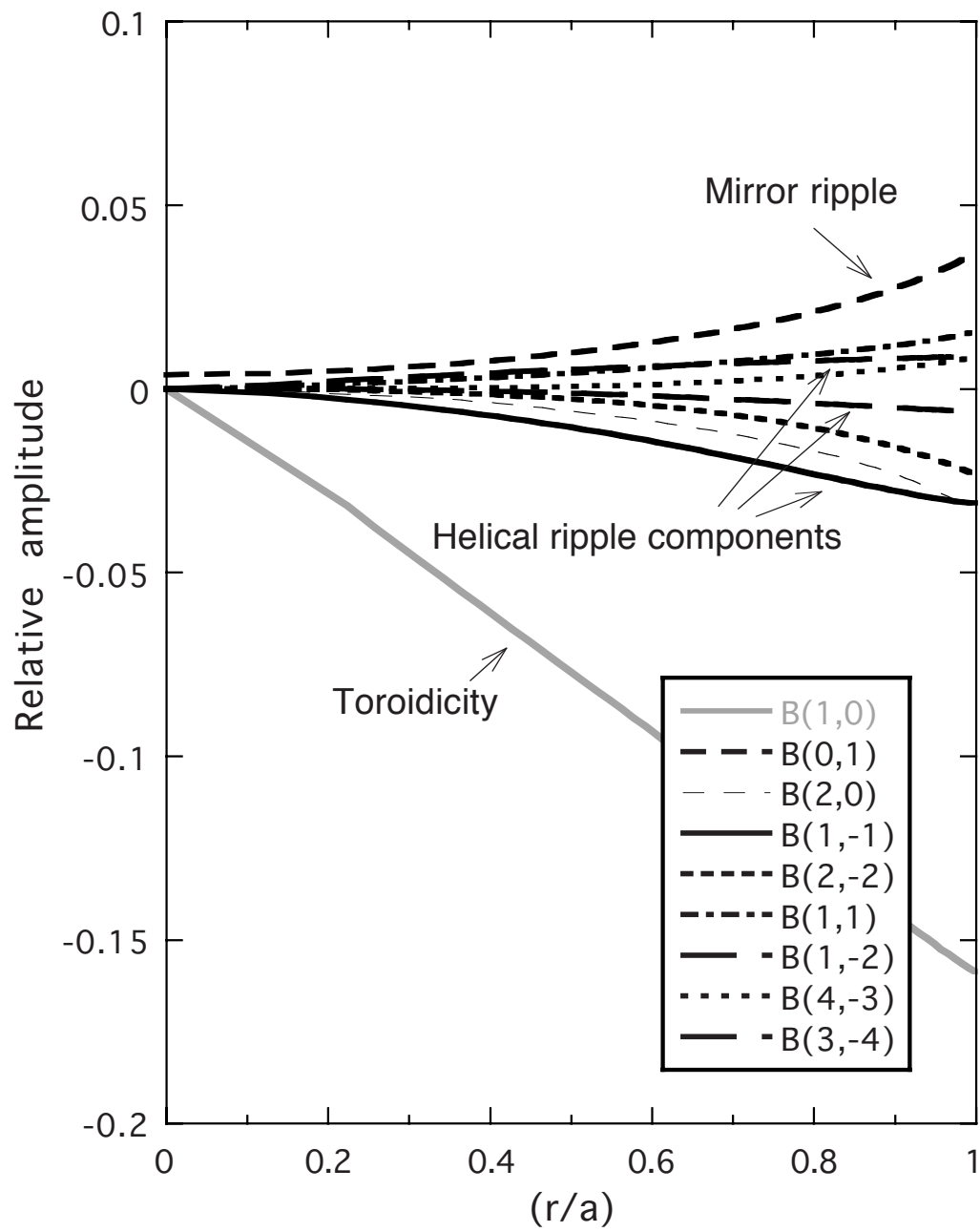
表 2-2 2w39 配位に対する Δ_{mn} の値



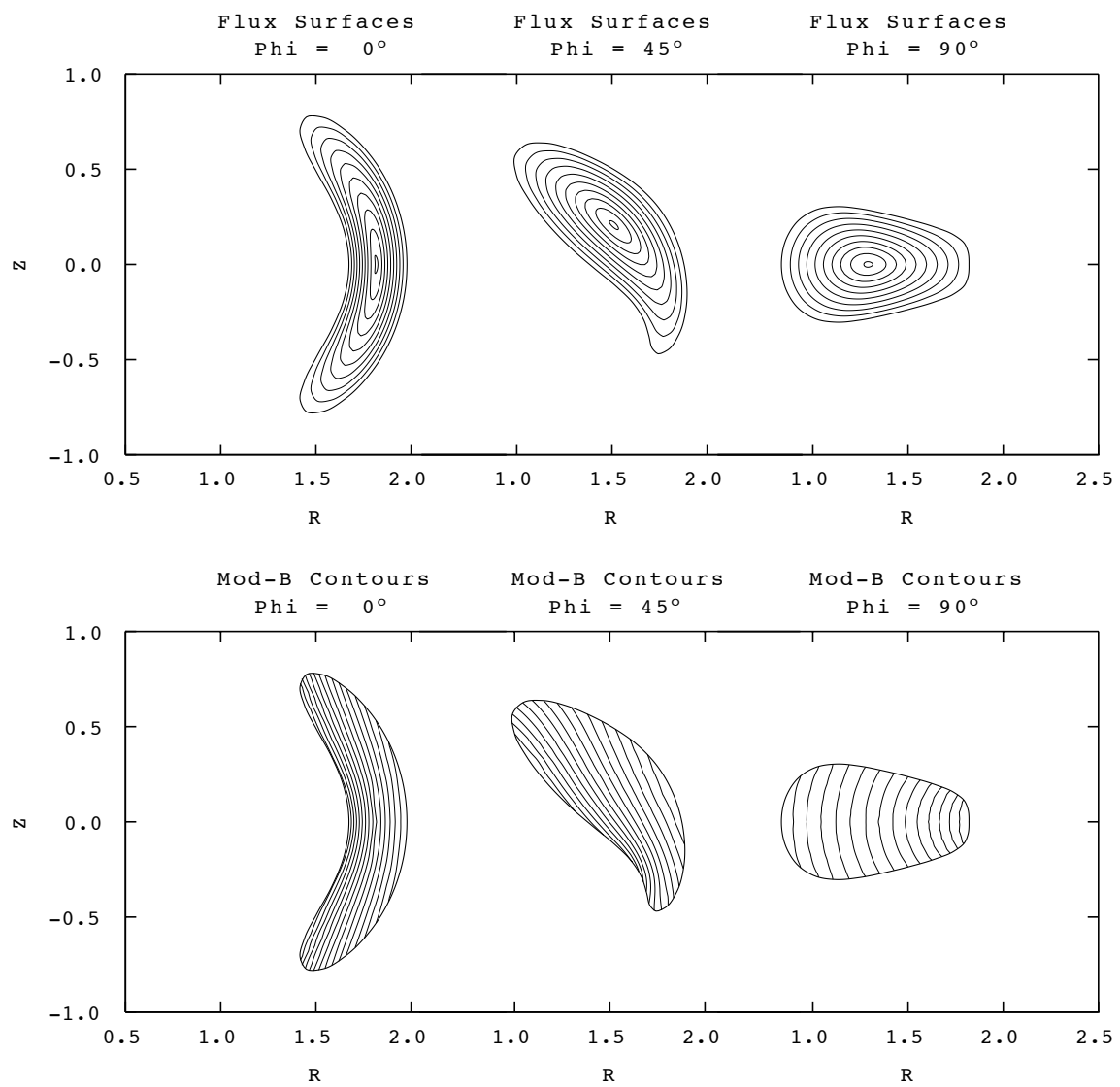
第 2-1 図 2w39 配位の (a) 磁気面と (b) 磁場強度等高線



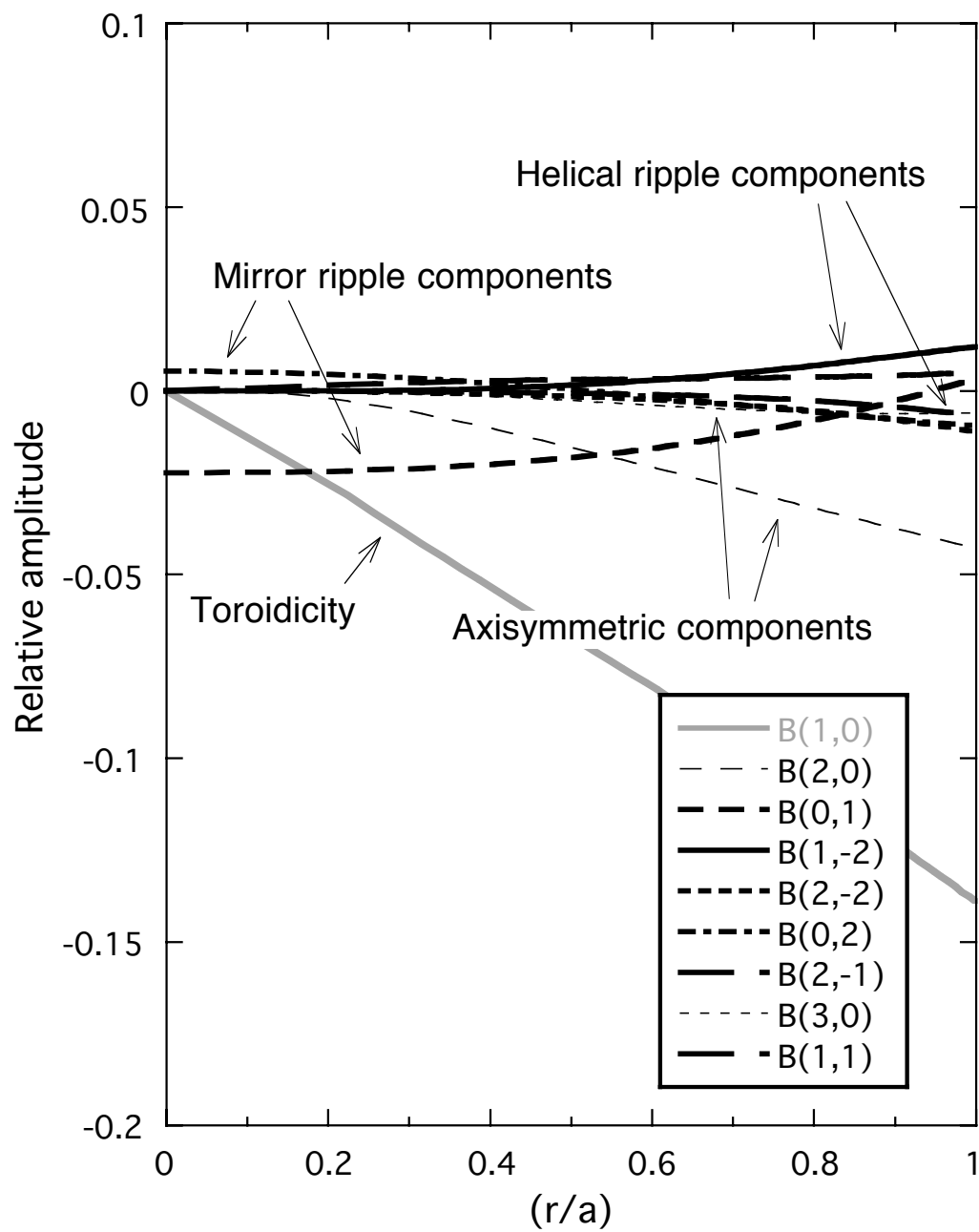
第 2-2 図 2b32 配位の (a) 磁気面と (b) 磁場強度等高線



第 2-3 図 2b32 配位の Boozer スペクトラム



第 2-4 図 2a36 配位の (a) 磁気面と (b) 磁場強度等高線



第2-5 図 2a36 配位の Boozer スペクトラム

3. MHD 安定性

MHD 安定性の検討は、主に Mercier 条件に基づいて行っている。バルーニング・モードに対する安定性については、磁力線に沿った local ballooning 近似の評価は行っているが、global mode の系統的な評価は今後の検討課題である。Mercier 条件の評価は、まず基本的には無電流の平衡に対して計算し、一部の特殊なケースに対してはトロイダル電流が加わった平衡について評価している。MHD 安定性評価のための平衡配位は、与えられた境界形状と圧力分布に対して VMEC の固定境界モードで計算した。モジュラー・コイルによって生成された真空磁場を使い、VMEC を自由境界モードで使用した平衡配位も得られているが、今回の提案ではこれらの結果は議論しない。

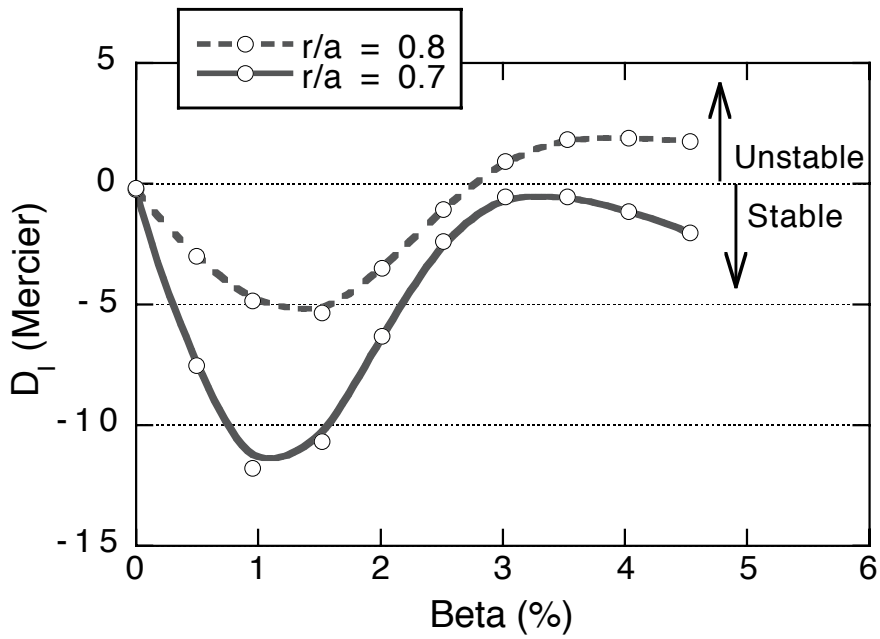
準軸対称配位においては、トカマクと同じレベルのブートストラップ電流が流れることが予想され、高ベータプラズマでは平衡配位及び MHD 安定性に対してかなりの影響があると考えられる。安定性の評価としては、外部キンク・モードをはじめとした、低モードの global mode 安定性解析が重要である。TERPSICHORE コードを用いた初期的解析結果からは、大半径 $R = 1.5$ m、磁場強度 $B = 1.5$ T の CHS-qa 装置に、100 kA の bootstrap 電流が流れたとして計算した平均ベータ値 3% の平衡配位は、外部キンク・モードに対して安定であることがわかっている。詳細な検討は現在進行中である。

2w39 配位の Mercier 安定性計算の結果を第 3-1 図に示す。圧力分布の形状は $p(r) \propto (1-r^2)^{1.5}$ を用いている。Mercier 安定性の指標である D_1 [Glasser, 1976] を、圧力勾配が最大になる $(r/a) = 0.7$ と 0.8 の位置で、平均ベータ値の関数として評価している。 D_1 は負の値を取るときに Mercier 安定である。平均ベータ値を次第に上げて平衡を計算したとき、ベータ値約 3% を越えるあたりから $(r/a) = 0.8$ の位置で Mercier 不安定になる。この時、プラズマ中心での回転変換は急激に減少し、それと同時に磁気軸の Shafranov シフトも増大していることが、第 3-2 図に示されている。ベータ値の増大に対して、平衡が失われるのに附随して MHD 安定性が失われていると見ることもできる。

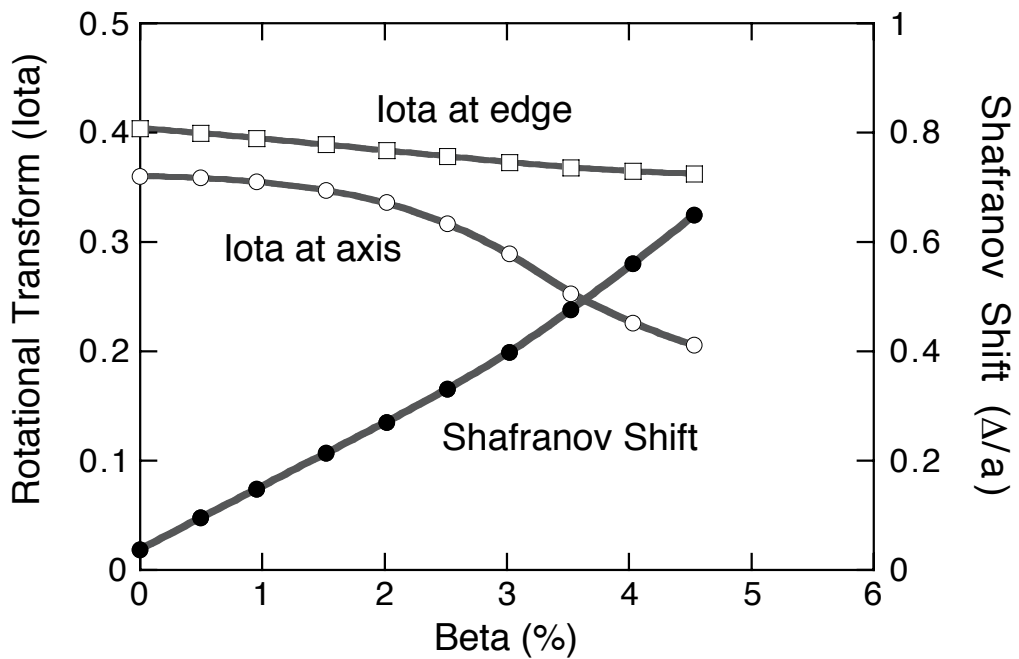
プラズマ中心での回転変換の減少を抑える目的で、プラズマ電流を加えた平衡解の MHD 安定性を調べた結果が第 3-3 図に示されている。ここで電流密度の分布は $I(r) \propto 1-r^2$ と仮定し、全電流値は 100 kA、トロイダル磁場強度 1.5 T、トラス大半径 1.5 m としている。比較のためにプラズマ電流の無い場合のデータも、細い線で示してある。Mercier 安定性の指標 D_1 は、四角い点 ($r/a=0.7$) とクロス点 ($r/a=0.8$) によって示され、ベータ値 5% まで Mercier 安定であることを示している。 D_1 の値が小さいため、10 倍にした値のプロットも同時に示されている。ただし、 D_1 の値の大小は直接 MHD 安定性の程度を示すものではない。もう一つの効果として、プラズマ電流によって Shafranov シフトが抑えられていることが、第 3-4 図に示されている。第 3-3 図と同様に、プラズマ電流の無い場合のデータが細い線で加えてある。第 3-4 図には、プラズマの周辺での回転変換の値も同時に示されている。ここでの安定性の議論は圧力駆動型のモードに対する評価であって、電流駆動型のモードに対しては別に議論する必要がある。プラズマ電流

を加えることによって、単純に MHD 安定性が改善されるという結論にはならないことに注意する必要がある。

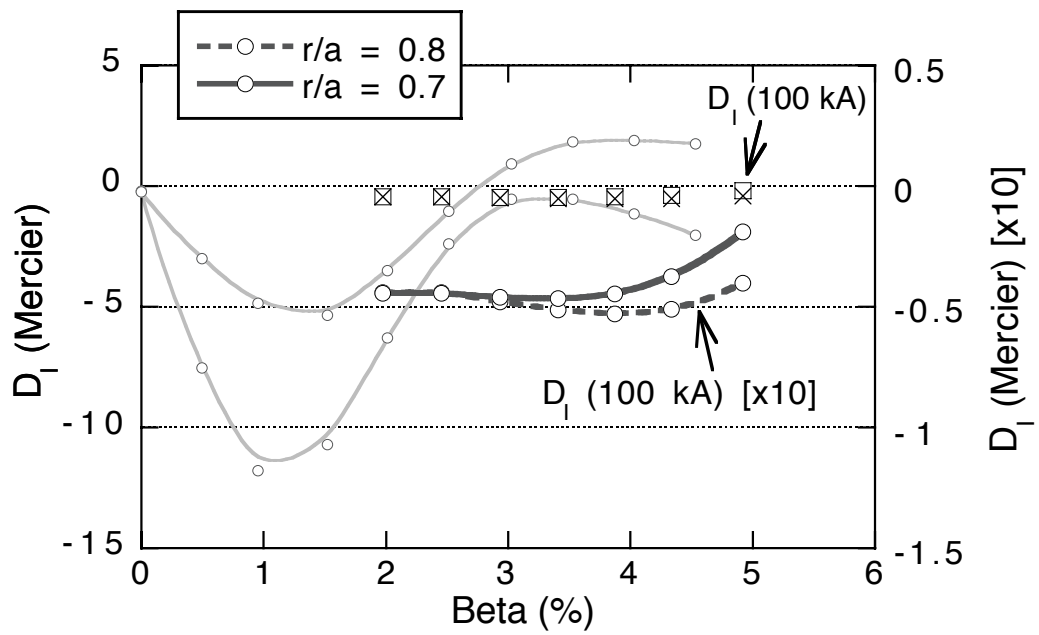
第 2 章に述べたように、新しく local ballooning 安定性の評価を取り込んだ計算コードが開発された。このコードによって最適化された、2b32 配位の Mercier 安定性を第 3-5 図に示す。Mercier 安定性の評価として用いられる D_l は、規格化のための分母として回転変換の勾配を含んでいる。2b32 配位は回転変換の勾配がゼロになる点を含むために、 D_l の代わりに D_M を安定性の評価として用いている。 D_M は D_l とは反対に正の値の場合、Mercier 安定である。第 3-5 図に示されるように 2b32 配位は平均ベータ値 5% まで、Mercier 安定である。この計算ではプラズマ電流値は(磁気面平均で)ゼロとしてある。Local ballooning 安定性の評価を基にして最適化した配位ではあるが、附随した結果として 2b32 配位では Shafranov シフトが抑制されている。第 3-6 図は 2b32 配位の Shafranov シフトと中心での回転変換の値を、比較のために 2w39 配位のデータと一緒に示している。双方ともに無電流の平衡である。ベータ値 5% の平衡配位に対して、Shafranov シフトが約 30% 減少していることがわかる。同時に中心での回転変換の減少も抑えられている。



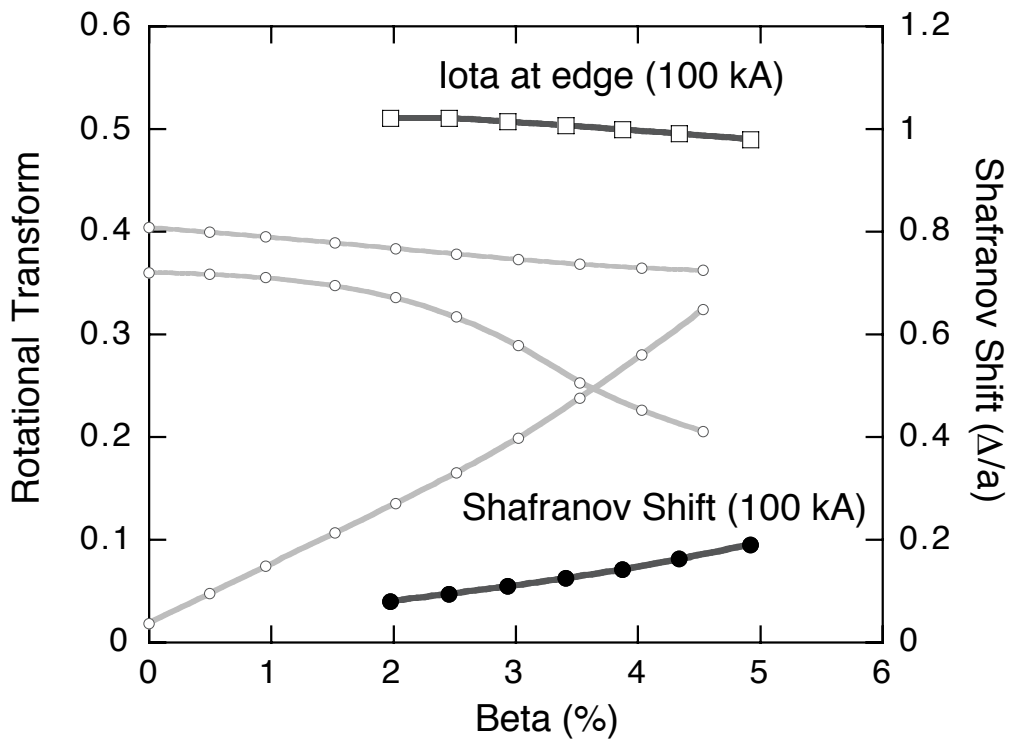
第 3-1 図 2w39 配位の無電流平衡の Mercier 安定性



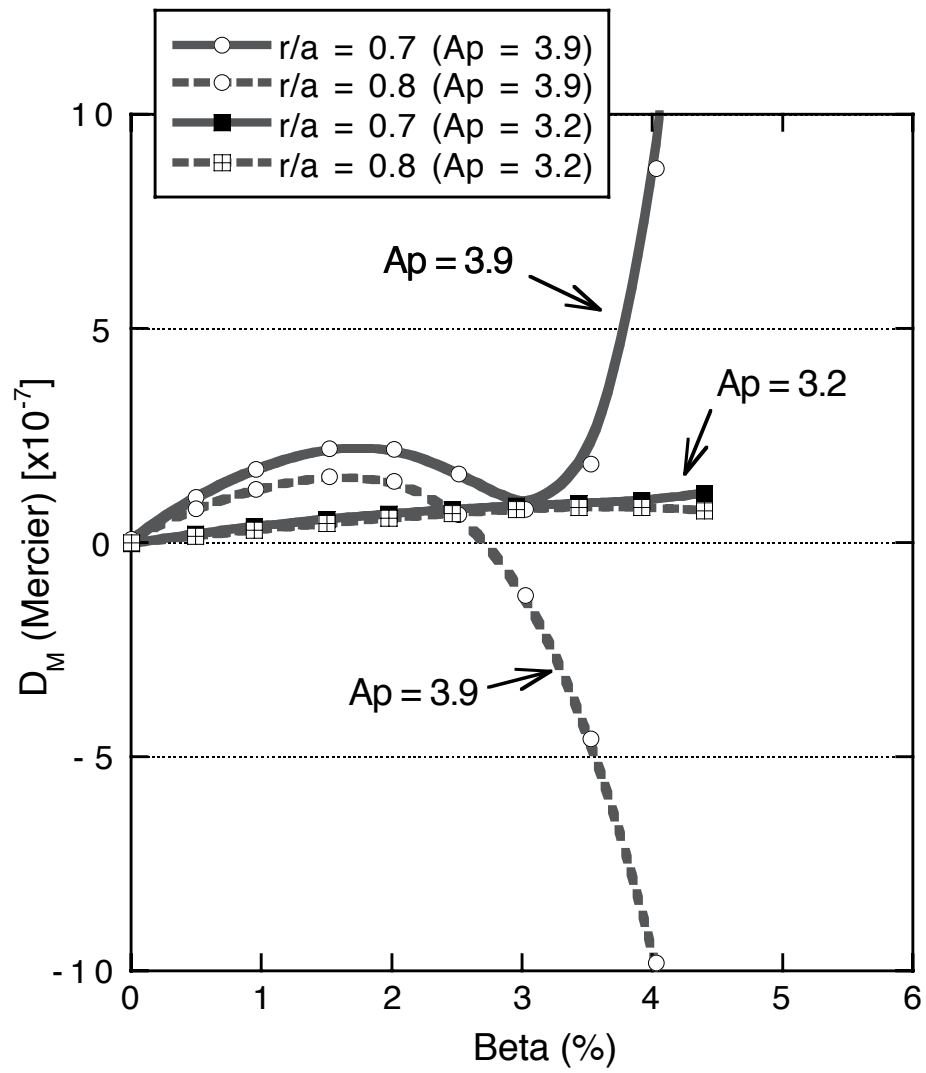
第 3-2 図 2w39 配位の回轉變換のベータ値依存性と Shafranov shift



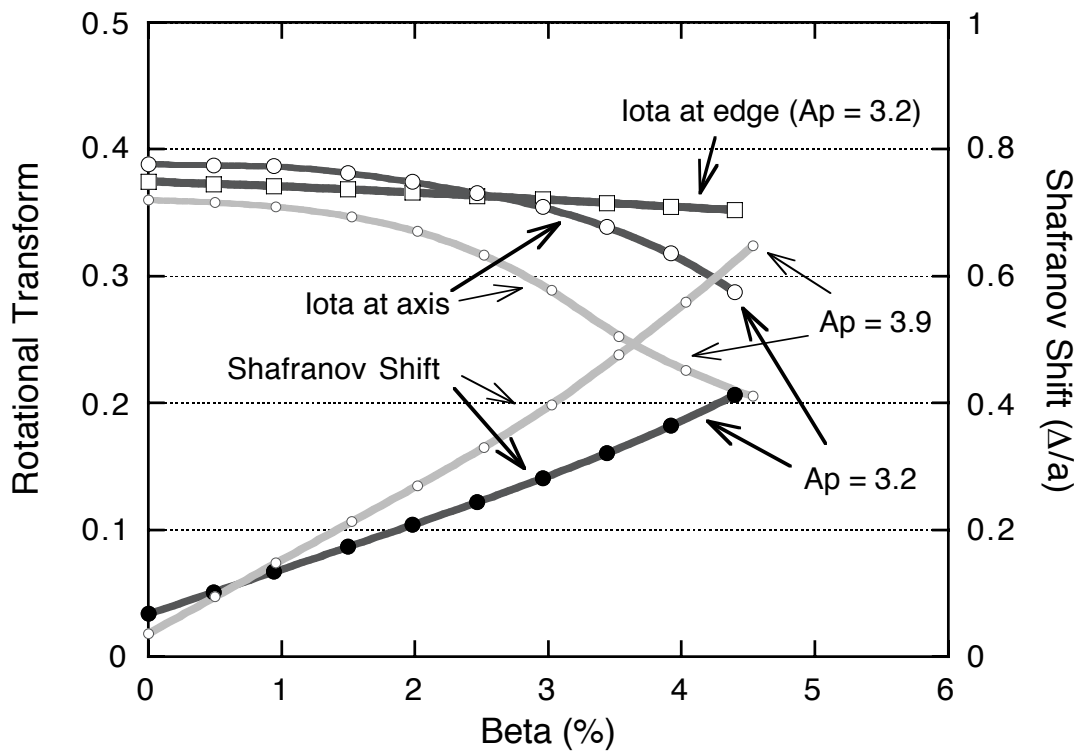
第 3-3 図 プラズマ電流を持った 2w39 配位の Mercier 安定性



第 3-4 図 プラズマ電流を持った 2w39 配位の回転変換と Shafranov shift



第 3-5 図 2b32 配位の Mercier 安定性



第 3-6 図 2b32 配位の回転変換及び Shafranov shift

4. 高エネルギー粒子閉じ込め

4.1 高エネルギー粒子閉じ込めと磁場リップル

CHSのような従来型ヘリカル系トーラス磁場配位においては、磁力線に沿った磁場強度は、トーラス形状からくるトロイディシティによるゆっくりとした変化に、ヘリカルコイルとの遠近に起因する速い変化（ヘリカルリップルと呼ばれる）が重畳される形となる。この両者の重ね合いが、結果としてヘリカルリップルに捕捉された粒子の軌道損失を引き起こす要因となる。特に、高いエネルギーを持つ粒子はプラズマとの衝突頻度が低いことから、その輸送は磁場のリップル構造に強く依存することとなり、ヘリカル系トーラスにおいて高エネルギー粒子の軌道損失をいかに押さえるかという問題は、非常に重要な課題である。高エネルギー粒子の閉じ込めの問題は、単に現状のトーラス実験装置における中性粒子ビーム入射（NBI）の加熱効率という話で終わらない。将来のD-T核燃焼プラズマにおける主加熱は、そこで生成される3.5MeVアルファ粒子自身が担う。自己点火条件を維持する為には、アルファ粒子は自身の運動エネルギーをプラズマに十分与えるまで損失することなく閉じ込め領域内にとどまる必要がある。良好なアルファ粒子閉じ込め特性は核融合炉の成立に必要な絶対条件の一つであり、次世代のヘリカル系閉じ込め配位の探求は、常にこの事を意識して行われるべきである。

トーラス系閉じ込め配位において、磁場の非軸対称成分が結果として粒子の速度空間上に軌道損失領域（ロス・コーン）を存在させることは良く知られている。準軸対称配位（CHS-qa）設計の基本思想は、ヘリカル系トーラスにおいてその磁場構造に軸対称性を持たせることにより、粒子軌道の改善を実現することである。CHS-qaの磁場強度フーリエ・スペクトルは第2-3図及び第2-5図に示すとおりである。トロイディシティによる軸対称磁場成分 B_{10} が全域にわたって支配的である事が分かる。その次に強い磁場成分は、楕円形状に由来する磁場成分の B_{20} で、やはり軸対称成分である。本配位ではリップル輸送の増大に寄与するヘリカル成分 B_{11} やバンピー成分 B_{01} は極力小さくなるように設計されている。CHS磁場配位では、ポロイダルモード数 $l=2$ である事に起因するヘリカル成分 B_{21} が B_{10} と並んで支配的であったが、ここでは B_{21} 成分はほとんど見られない。CHS-qaはトカマク的な磁場配位を持つステラレータ、または電流駆動を必要としないトカマクと呼ぶことが出来る。

CHS-qa配位における粒子軌道は次の2つに大きく類別できる。磁力線に沿った方向に大きな速度ベクトルを持ち、軸対称ミラーに捕捉される事なくトーラスを周回する通過粒子と、磁力線に対する垂直方向に大きな速度を持ち、トーラス外側の弱磁場領域に捕捉されるバナナ粒子である。CHS配位の粒子軌道を議論する上で重要であったヘリカル捕捉粒子や、結果として損失することになるヘリカルリップル捕捉・脱捕捉を繰り返す遷移粒子はここではほとんど存在しない。

CHS-qaでは準軸対称性が実現されており、CHSと比べると粒子の軌道損失において著しく改善が期待できるが、捕捉粒子軌道を考えた際に全く問題が無いわけではない。

トロイダル捕捉粒子は、磁場リップルの無い完全軸対称磁場中では、その軌道をポロイダル断面に投影すると閉ループとなる。CHS-qaにおいては、第 2-3 図からも分かるように、周辺部には僅かながらも消しきれない残留磁場リップルが存在する。この残留リップルの存在により、バナナ軌道の上下先端において受けるドリフトに差が生じ、捕捉粒子は衝突を経験しなくても径方向へのステップを始め、イオンの輸送現象が引き起こされる。CHS-qa 配位における高エネルギー捕捉粒子のリップル励起拡散を表す軌道例を第 4-1 図に示す。

軸対称系であるが故に高速イオンの閉じ込めに関しては楽観的に見られがちであるトカマクにおいても、実はトロイダルコイルが有限個数であることに起因するトロイダル磁場リップル (TF リップル) が存在するために、同様の現象が引き起こされる。CHS-qa 配位、トカマクの何れにも言えることは、軸対称磁場成分以外の成分、すなわち残留磁場リップルを完全に無くすることは極めて困難であり、逆にどのモードの残留リップルが粒子軌道に強い影響を及ぼすのか、どの程度の残留リップル強度であれば閉じ込めの観点において許容されるのかを調べるのが、この問題に対する現実的なアプローチである。残留磁場リップルが低衝突度粒子の軌道に与える影響は、準軸対称配位研究における重要な研究課題の一つであり、実験、計算を通して詳細に調べていく必要がある。

CHS-qa の磁気軸は常に赤道面上にあるわけではなく、わずかではあるが立体磁気軸的な動きをもつ。加えて磁気面のポロイダル断面形状がトロイダル角によって、空豆形状から比較的丸型に近い形状まで大きく変化する。CHS-qa のプラズマの主加熱には NBI を予定しているが、上記の理由からより高い加熱効率を得る為に、NBI の入射角度について通常の赤道面上における入射角度のみではなく、赤道面から斜め上・下方向も考慮に入れて慎重に選ぶ必要がある。CHS-qa の磁場において NBI 粒子のデポジションを評価する為の計算コード (HFREYA) の準備は既に済んでおり、現在 HFREYA コードを使って最適な NBI 配置の検討を行っている。実際の実験において懸念されることの一つに、先に述べた軌道損失の他に、空豆型断面の赤道面付近における高速イオンの荷電交換損失がある。高速イオンは、ドリフトにより最外殻磁気面に比較的近い場所を通過することに加えて、空豆型断面の赤道面付近においてはプラズマの幅が狭い為に、周辺からの中性粒子が閉じ込め領域の奥深くまで浸透してくることが考えられるからである。CHS-qa 実験では、高エネルギー粒子閉じ込めの様子について実験的に調べる目的で、荷電交換中性粒子分析器 (NPA)、中性子計測機器、シンチレータに基づく高速イオン検出器等が用意される予定である。

4.2 粒子最適化配位

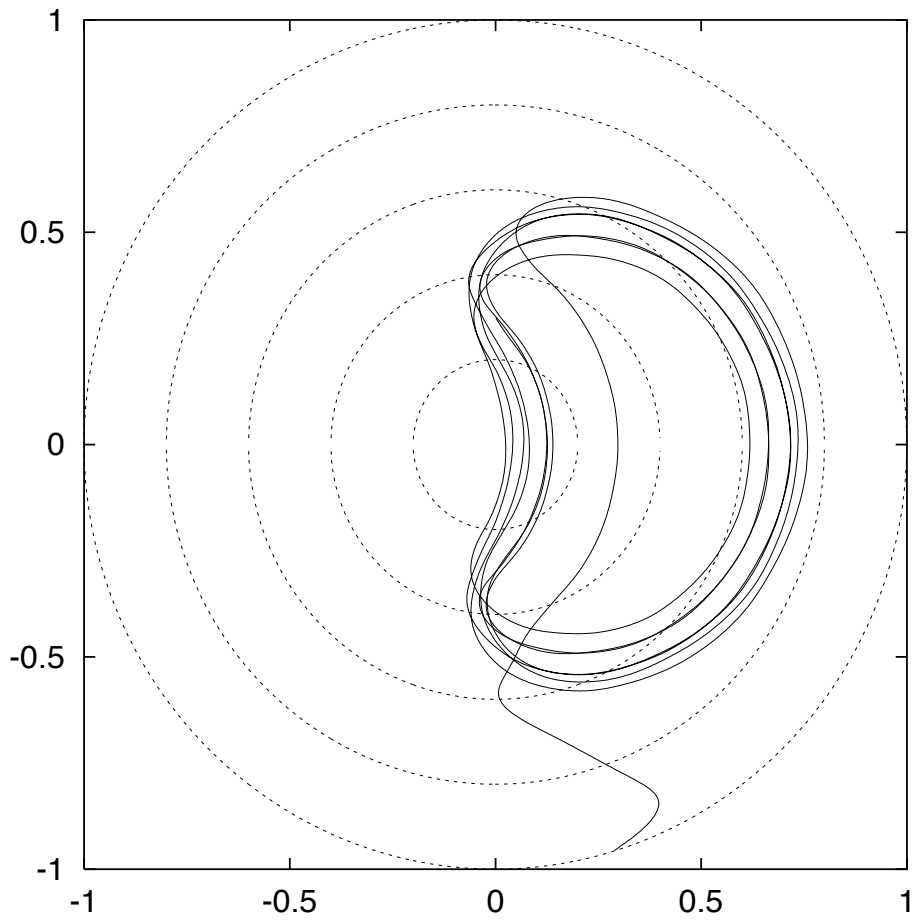
前節で述べたように、準軸対称配位における高エネルギー粒子閉じ込めでは、非軸対称磁場成分によるリップル輸送が重要な要因となっている。このリップルによる粒子輸送および損失を低減するため、第 2 章で述べられている最適化プロセスにおいて、

MHD 安定性などの評価関数に、新たに 粒子損失率による評価関数を導入し、最適化を行った配位が 粒子最適化配位である。

実際の計算においては、粒子損失率は、モンテカルロシミュレーションにより評価される。粒子 ($E = 3.4 \text{ MeV}$) のテスト粒子を、ピッチ角を乱数により与え、初期位置 $r/a = 0.25$ の磁気面内に一様に乱数により配置し、それぞれの粒子に対する軌道の時間発展を解き、損失粒子数の時間発展を評価する。また、粒子閉じ込めは、装置サイズ等に大きく依存するため、アスペクト比などの異なる配位に対する評価を公平に行うため、比較する磁場配位を、プラズマ体積 1000 m^3 、磁場強度 5 T に規格化し、粒子損失率を評価した。

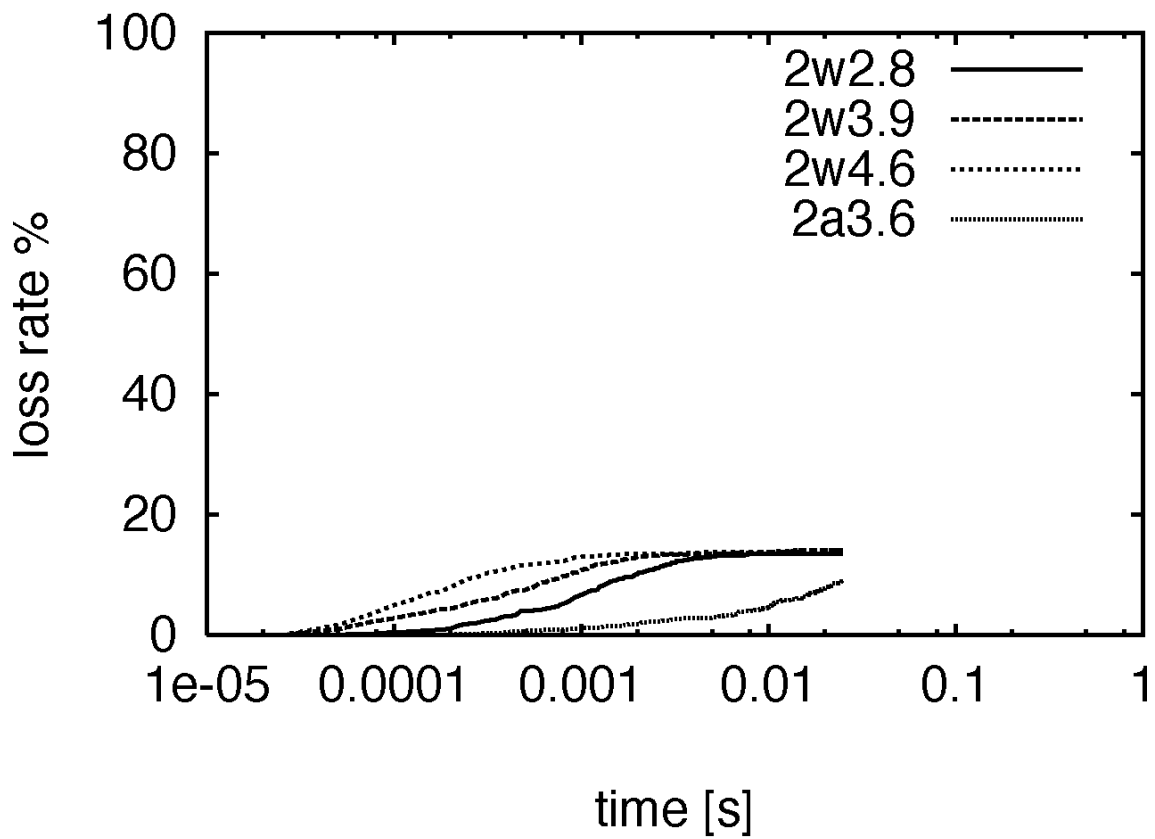
第 4-2 図は、粒子最適化のプロセスを導入した $2a36$ 配位と導入していない他の配位との比較を示したものである。数 ms の段階で、明らかな差が見られ、粒子最適化された配位における大幅な粒子閉じ込め改善を見ることができる。第 4-3 図は、 $r/a = 0.6$ の磁気面における磁場強度の等高線を示した。粒子最適化配位の特徴は、捕捉粒子の軌道を改善するため、非捕捉粒子が多い強磁場側の軸対称性を犠牲にして、捕捉粒子の存在する磁場の弱い領域において、軸対称性を良くし、捕捉粒子の閉じ込めの改善を行っていることが分かる。

今回の粒子最適化配位の計算には、磁場フーリエ成分に対して $B_{mn} > 0.005 B_{00}$ の条件を満たすもののみを用いて行われた。そのため、最適化に用いたフーリエ成分のみを使用した粒子損失率はほぼゼロとなり、ほぼ完璧な粒子閉じ込めを得ることが出来た。しかしながら、実際には、 $B_{mn} < 0.005 B_{00}$ となるフーリエ成分の影響も無視することが出来ず、すべてを考慮すると第 4-2 図で得られたような有限の損失が見られる。しかしながら、この結果は最適化の際に用いるフーリエ成分の条件をさらに緩和することにより、さらに粒子閉じ込めの良い配位が期待できることを示しており、将来の核融合炉やその前ステップで予定される大型装置においては、これらをさらに詳細に考慮した、より高いレベルでの高エネルギー粒子閉じ込め性能を持つ装置を完成できる可能性を示すものである。



第 4-1 図 CHS-qa におけるバナナ粒子のリップル拡散損失の例

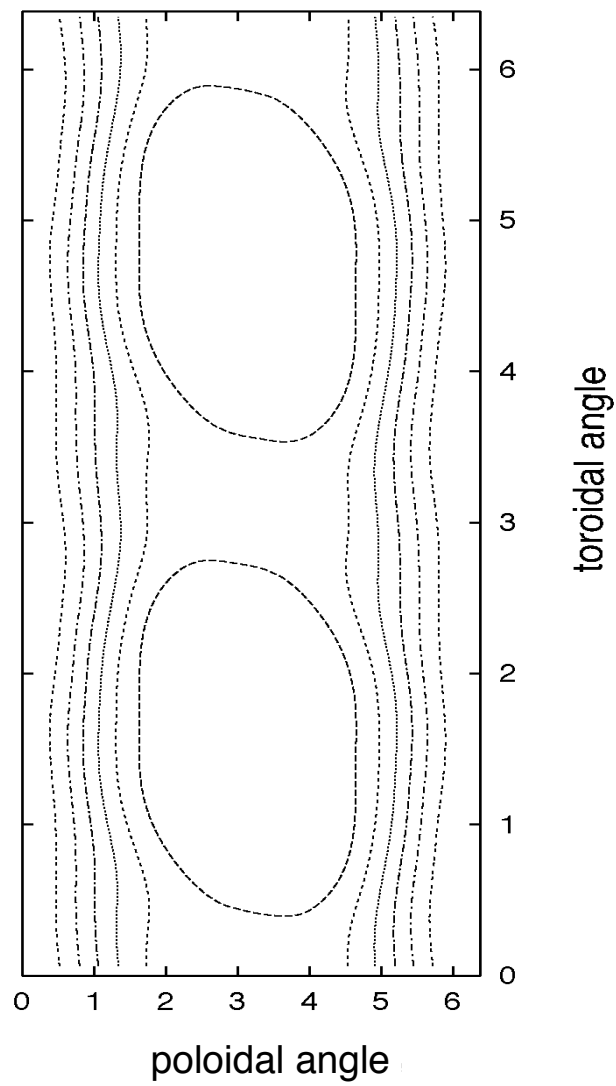
Alpha Particle Confinement in CHS-qa



第 4-2 図 粒子損失率の時間発展

modB in the LHD(Boozer coordinates)

1.95 -----
1.9 -----
1.85 -----
1.8 -----
1.75 -----
1.7 -----



第 4-3 図 α 最適化配位の磁場強度等高線 ($r/a=0.6$)

5. プラズマ回転

5.1 ヘリカル系閉じ込め装置におけるプラズマ回転

これまでのヘリカル型装置においても径電場の閉じ込めに及ぼす効果は調べられてきたが、より強い径電場を持ちうるようなプラズマ回転の自由度を持った磁場配位において、プラズマ回転制御による異常輸送低減の可能性を探ることは準軸対称磁場配位の重要な実験目的の一つに挙げられる。トカマクのHモードを契機として径電場シアアの役割は広く認識されるに至り、最近ではヘリカル系でも高イオン温度モード [Ida, 1996]、高電子温度モード [Fujisawa, 1997] など径電場シアアによる閉じ込め改善が発見されている。径電場シアアによる異常輸送抑制は広くトロイダルプラズマ全般に共通する問題となっている。

ヘリカル系の径電場やプラズマ回転の特徴として新古典両極性条件による拘束があり、電場は任意の値をとることができない。また、トロイダル回転はリップルに起因するトロイダル粘性 (新古典的にはプラズマフローの方向に磁場強度変化がある時に平行粘性が働く) のために減衰している [Ida, 1991, 1996]。CHS で発見された内部輸送障壁やポテンシャルの自励振動はこの両極性条件が多重根を持つことに起因すると解釈できるが、トカマクの輸送障壁の遷移現象はこれとは異なるものである。新古典粘性に基づくものやイオン軌道損失に基づくものなど様々なモデルがトカマク理論では提案されているが、共通して言えることは、輸送障壁形成のためには局所的圧力勾配の上昇が輸送係数低減をもたらす、更に圧力勾配を上昇させるメカニズムが必要であり、この局所的圧力勾配とともに大きくなりうる径電場がその機構として注目されるに至ったことである。このような自発的な電場シアア、圧力勾配の成長を考えると、電場や圧力勾配に伴って発生するプラズマフローに対する制約が存在することは好ましくない。

プラズマフローを制約する要因としては、新古典的に考えられる要因に限っても平行粘性の他にフローの非圧縮性条件があり、トロイダル効果のもとではポロイダルに回転するプラズマには磁力線に沿った Pfirsch-Schlueter 的リターンフローが必要である。CHS のようなヘリオトロン/トルサトロン磁場中のプラズマ回転は、トロイダル粘性のために主にポロイダル方向に回転するが、この時の非圧縮性フロー保存のためのリターンフローもまたヘリカルリップルの影響を受ける [Nishimura, 2000]。このように磁場強度の三次元的不均一性に起因する平行粘性はトロイダル、ポロイダル回転ともに制約を与えており、特に低アスペクト比配位における高速回転は期待できない。これまでに Heliotron-E や CHS で観測されている径電場は、第二高調波 ECH 重畳時の電子ルートに現れるような大きい場合で 100 V/cm、通常 (NBIプラズマなど) では 10 V/cm 程度であり、かつプラズマ内に両極性電場の界面ができるような場合 (内部輸送障壁) を除き、この電場は広がった空間分布を持ち強いシアアを持つことは少ない (トカマク輸送障壁や CHS 内部輸送障壁によれば、閉じ込め改善が起こるに必要な電場シアアは 100V/cm^2 程度と見られている)。トカマクの境界輸送障壁に関するモデルでは、磁力線に沿ったプラズ

マフロー速度が音速程度に達するまで圧力勾配や電場は成長すると考えられている．このような速度領域で現われる速度と粘性の間の非線形性で境界輸送障壁の遷移現象を説明するモデルが考えられているが、平行粘性の強いヘリカル系ではこのような現象は観測されていない．

電場シアーに基づく輸送障壁の形成のためには径電場の両極性条件による拘束、プラズマフローの平行粘性による減衰の無い磁場配位が必要である．ヘリカル系の異常輸送、並びにその抑制法の研究のための、このような径電場、プラズマ回転に関するパラメタ領域の拡大が準軸対称配位を CHS 後継機として選択する動機の一つである．近年各種提唱されている準ヘリカル対称、準軸対称などの準二次元対称磁場は、その対称性の方向に対する平行粘性を下げる方法となるが、低アスペクト指向の観点からは前述の非圧縮性条件との両立のためにトロイダル粘性を低減する準軸対称配位が望ましいからである．

準軸対称配位においては、磁力線に沿って磁場強度を見た時に、残留リップルによる極値が存在しない条件

$$B_{\text{ripple}}/B_0 < \iota / A_p / (N - \iota)$$

を満たすまでに残留リップルを下げることであれば、リップル捕捉粒子が存在せず、バナナ粒子と通過粒子のみが存在する状態となる．粒子軌道をドリフト近似で考える新古典理論の枠組みの中では、このような状態では三次元構造でありながら軸対称系と同じ性質が期待される．すなわち、電場は両極性条件に拘束されず任意の値を取りえるようになる．これは他の最適化ヘリカル装置には無い特徴である．低アスペクト比 ($A_p \sim 4$)、低トロイダルモード数 ($N \sim 2$) の配位のコア領域に対してはこの条件は達成される．またこれら残留リップルの新古典トロイダル粘性に与える影響については次節に詳しく述べるが、CHSに比して格段のトロイダル粘性低減が達成されている．

これまでの、トカマク実験、ヘリカル実験に共通して見られることの一つに、粒子拡散、熱伝導では異常輸送が支配的であるにも拘わらず、プラズマ電流、プラズマ回転、径電場に関してはかなりの部分が新古典理論で説明できるということがある．異常輸送の原因となっている揺動では磁力線垂直方向と平行方向で波長が異なる (磁力線方向波長が長い) こと [Okamoto, 1995]、異常拡散粒子束が両極性であること、などの理由が考えられているが、このようにプラズマ回転、径電場の新古典的解釈は異常輸送研究の一つの手段となっており、近年の閉じ込め改善モードにおけるプラズマ回転、径電場に関する理論モデルにも新古典理論の応用が多く見られる [Shaing, 1990]．また、非軸対称系においては新古典理論それ自体まだ体系的に完成されたものではなく、それ自体が重要な研究課題でもある．高エネルギー粒子閉じ込めとも共通する課題であるが、準軸対称磁場配位位置において、摂動磁場を加えて準軸対称性を劣化させた時のブートストラップ電流、トロイダル粘性、電場の分岐現象などが新古典的であるか否かを調べる事も、今後

のヘリカル系物理のための重要な課題である。

5.2 新古典平行粘性の定量的評価

新古典的平行粘性係数は、磁場リップル強度の二乗 $\eta_{\parallel}^2 = \langle (\delta B / \delta s)^2 / B^2 \rangle$ にほぼ比例する。ここで $\delta / \delta s$ は流れの方向に沿った微分であり、 $\langle \rangle$ は磁気面平均を表わす。このリップル強度には、振幅の大きい磁場スペクトル成分が主に寄与するとは限らず、振幅は小さいがトロイダルまたはポロイダルモード数が大きい磁場スペクトル成分が寄与することが考えられるので、粘性低減度は磁場スペクトル成分だけではなく、リップル強度を実際に計算して評価する必要がある。そこで3次元平衡コード VMEC の計算結果を用いて CHS-qa 配位における磁場リップル強度を定量的に評価した。

まず、磁気面上の磁場強度等高線図を描画するため、VMEC コードの計算結果から、磁場強度 B 、円柱座標における位置 R, Z, ϕ のグリッドデータを作成した。第 5-1 図はアスペクト比 3.9 の CHS-qa 配位 (2w39) における最外殻磁気面上の磁場強度等高線図である。トロイダルおよびポロイダル角は実角変数で表されている。実空間におけるポロイダル角 θ の定義は $\theta = \tan^{-1} [(R - R_{ax}) / (Z - Z_{ax})]$ とし、ここで R_{ax}, Z_{ax} は各トロイダル断面 (等 ϕ 面) における磁気軸の座標とした。従って、以下の計算結果では立体磁気軸効果は無視されている。まずこの実角変数空間 $\phi - \theta$ 平面上で直線となる流れの方向を仮定し、磁気面平均を取る際には微分方向がトロイダル方向となす角度 ($= \tan^{-1} (r_{\theta} / R_{\phi})$) を固定した。この流れに沿った磁場強度微分 $\delta B / \delta s$ をスプライン補間によって求めた。

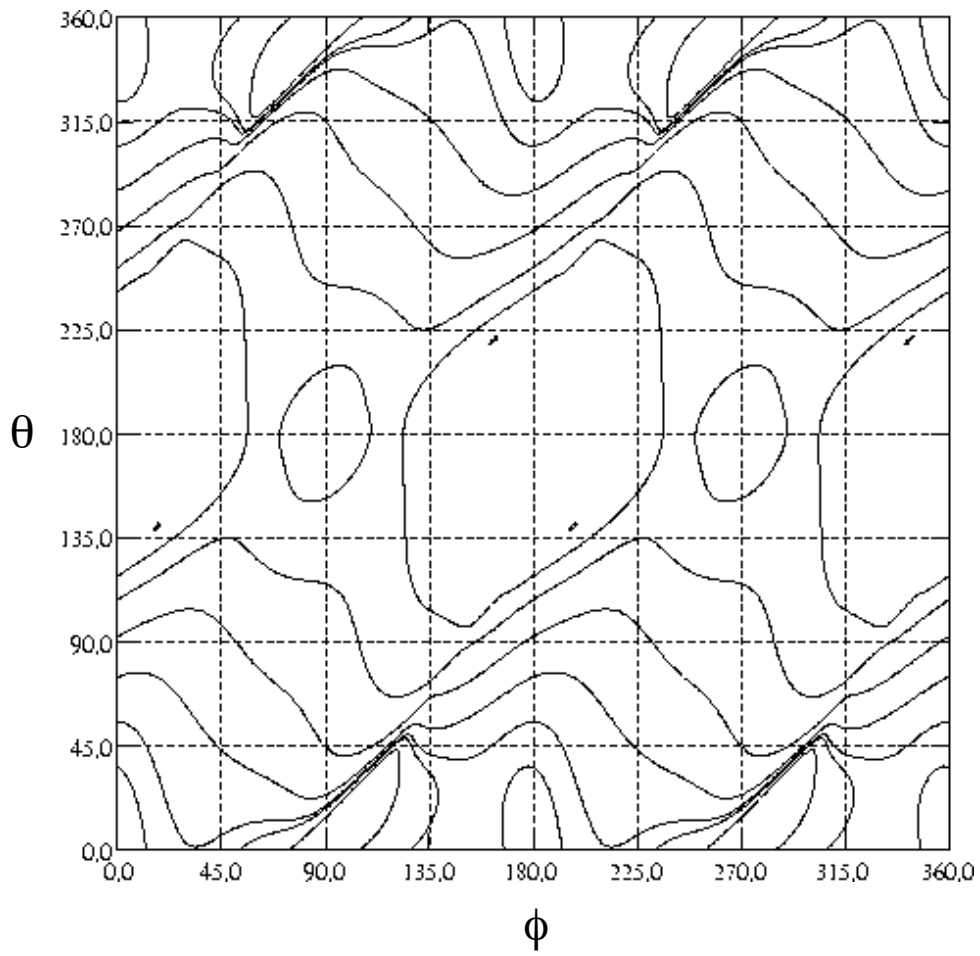
第 5-2 図は計算された η_{\parallel} の流れの方向に対する依存性である。磁気面は規格化小半径をラベルとして表わされている。CHS-qa ではどの磁気面においても流れの方向が 90° 付近で η_{\parallel} が最大になっており、ポロイダル方向の平行粘性が大きいことがわかる。トロイダル方向の η_{\parallel} は最外殻においても 0.1 以下であり、このような低リップル強度領域では、外部運動量入力に対して回転速度を決定する主な要因は、トカマク同様に平行粘性以外の垂直粘性、異常粘性等になると予想される。本計算は磁場配位最適化コードの出力に基づくもので、コイルリップルの影響を考慮していない。しかし η_{\parallel} が最小になる角度は 0° ではなく、 $1.1^\circ \sim 6.8^\circ$ の間になっており、かつその最小値は有限値である。これはおもに残留リップルの影響であると考えられ、準軸対称配位の3次元磁場構造の反映である。

比較のために同様の計算を CHS の代表的配位 ($R_{ax} = 92.1\text{cm}$) についても行っている。第 5-3 図に最外殻磁気面上の磁場強度等高線図を、第 5-4 図にリップル率 η_{\parallel} の計算結果を示す。リップル率極小値を与える方向は最外殻付近で 40° 程度になっている。これは自発的プラズマ回転としては磁場スペクトル成分として $m=2, n=1$ 成分が支配的な Heliotron/Torsatron 磁場配位のヘリカル構造に沿った流れが発生しやすいことを示し、このことは後述するように最近実験的にも確認されている。しかし、ヘリシティとトロイディシティの混在のために、この極小値の方向においても周辺部では CHS-qa のポロイダル方向相当のリップル率があって回転は減衰しており、またトロイダル運動量外部入

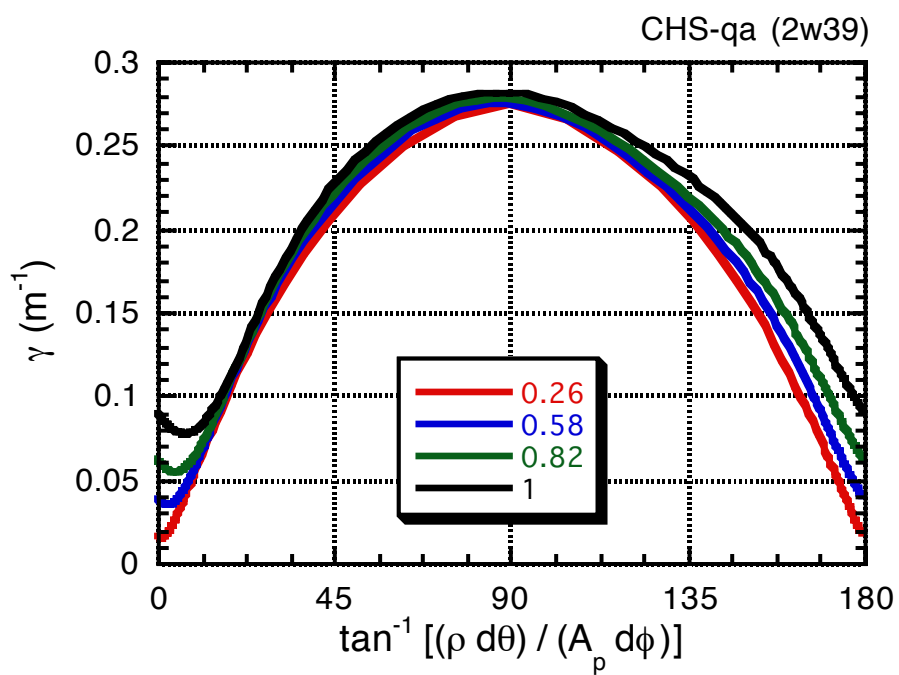
力に対しては強いトロイダル粘性が働いて大きな回転は期待できない．これもこれまでの CHS 実験で確認されているとおりである．

実際のプラズマの流れの方向が、実座標 $\phi - \theta$ 空間上で直線になりえないことは、イオン運動方程式 (radial force balance) $E_r = -V_i * B + \text{grad } P_i / (e n_i Z_i)$ において、電場極性および圧力勾配極性を全トロイダル角度で同一方向にし、静電ポテンシャルおよびイオン圧力を磁気面量にしなければならない条件から明らかである．プラズマの流れの方向は、外部運動量入力により駆動される場合と、圧力勾配や電場で駆動される自発的プラズマ回転では異なることが考えられ、特に自発的回転の方向は平行粘性が小さくなる方向を辿ろうとする．このために、トカマクのプラズマ回転はトロイダル回転が主となりポロイダル回転が減衰すると考えられている．ヘリカル系も同様の原理に従っていることが最近の CHS 実験でわかってきた．NBI を co 入射されたプラズマに第二高調波 ECH を重畳し電子ルートに遷移させると正の径電場に対応した強いイオン反磁性方向ポロイダル回転を生ずるとともに、トロイダル方向においては co 入射 NBI に拘わらず counter 方向の自発的回転が起こる．これは平行粘性を最小化するヘリカル方向へプラズマが回転しているためと解釈できる．このようなことから、準軸対称配位 (CHS-qa) においても、プラズマの流れは定性的には Boozer 座標のトロイダル軸方向に向くことが予想される．特に輸送障壁ができる時の径電場、圧力勾配による自発的流れはこのような方向をたどると考えられるが、このような 3 次元ヘリカル構造を持つ磁場中の流れのパターンは、後述のように今後の CHS 及び CHS-qa における研究課題の一つである．

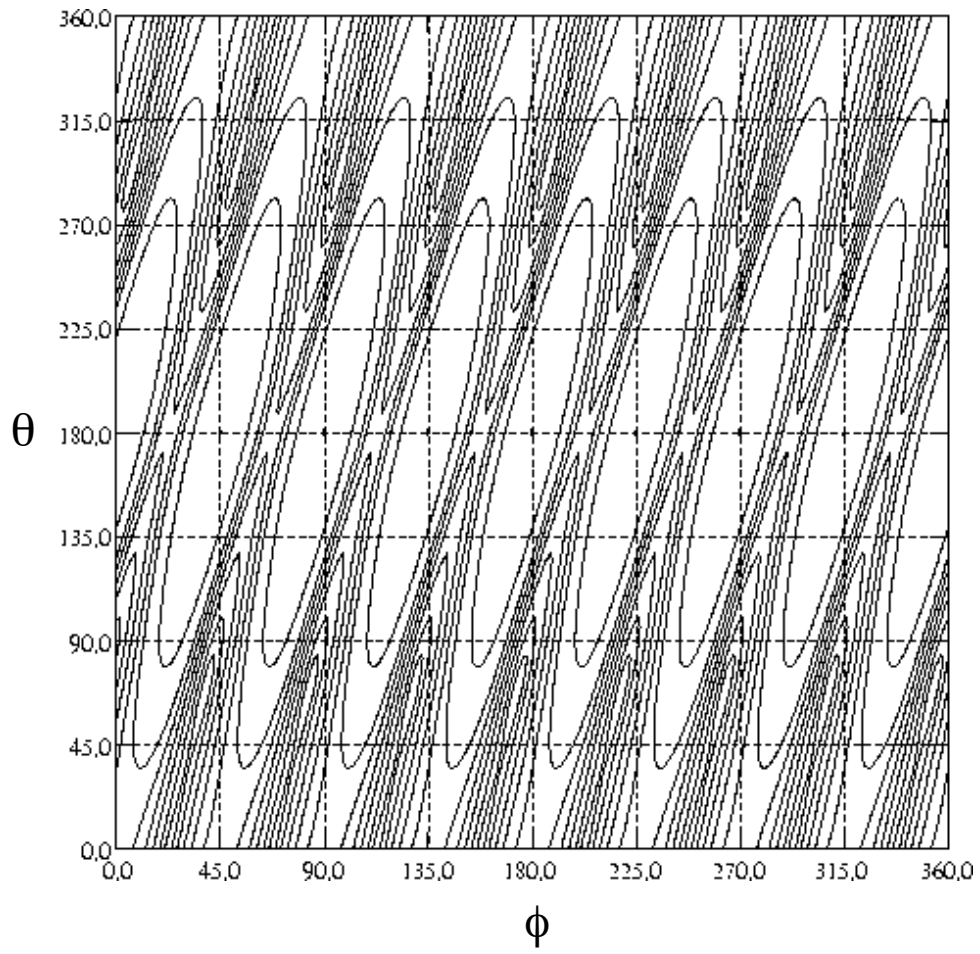
以上をふまえて、実角変数ではなく、 Boozer 角変数空間において微分方向 (=流れの方向) がトロイダル方向となす角度 ($= \tan^{-1} (r \theta / R \phi) = \tan^{-1} (A_p \rho \theta / \phi)$) を固定した計算も行った． Boozer 座標のトロイダル軸方向リップル率の計算結果を小半径方向依存性として第 5-5 図に示す． CHS-qa のリップル率は CHS に比べて 15 から 20 分の 1 に低下している．今回の計算では立体磁気軸効果および CHS-qa においてはコイルリップルを無視したが、このような両者の比較から、準軸対称配位はプラズマ回転に対してもトロイダル粘性を低減したトカマクの性質を持つことがわかる．



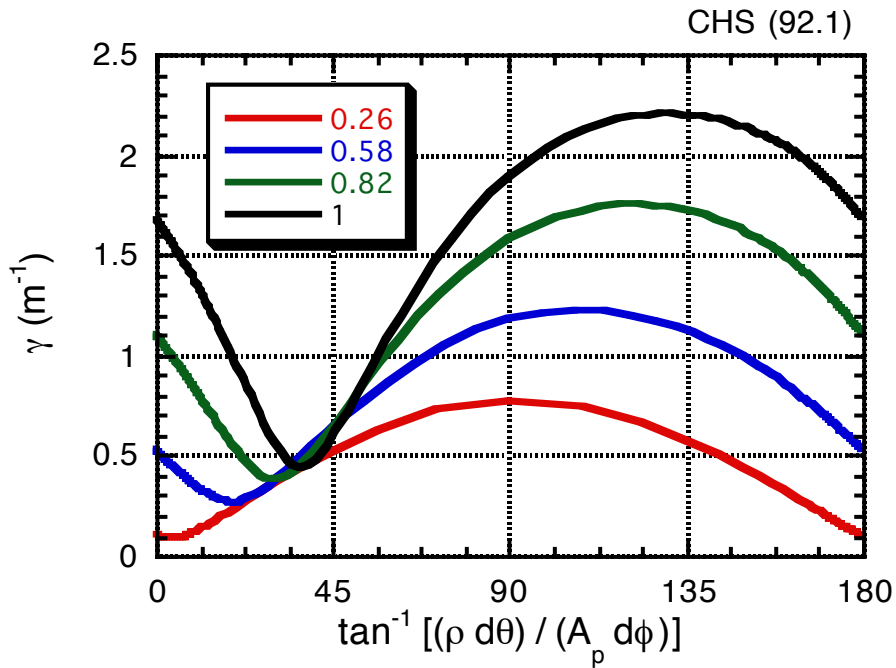
第 5-1 図 CHS-qa 配位 (2w39) における最外殻磁気面上の磁場等高線図



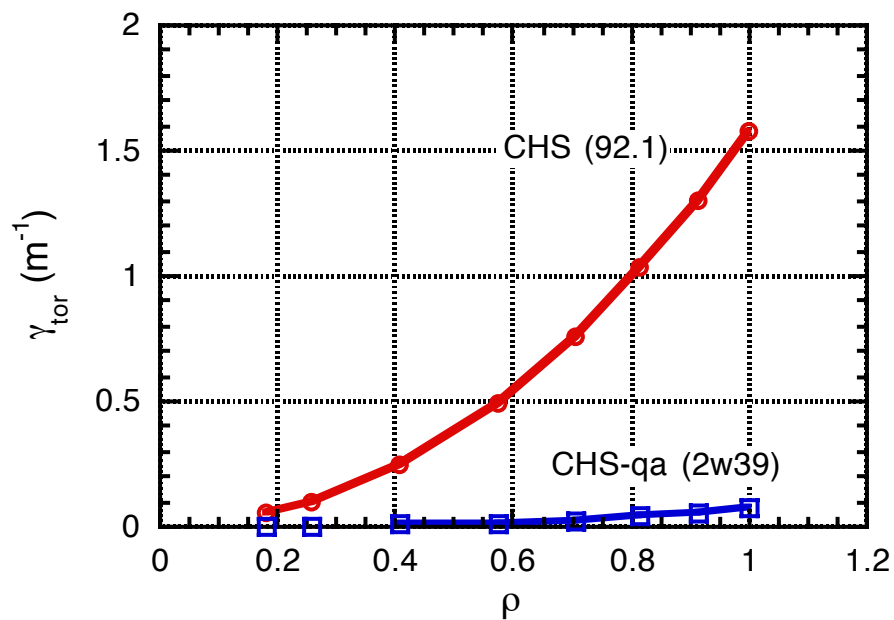
第 5-2 図 CHS-qa 配位 (2w39) における磁場リップル強度の方向依存性



第 5-3 図 CHS 配位 ($R_{ax} = 92.1 \text{ cm}$) における最外殻磁気面上の磁場等高線図



第 5-4 図 CHS 配位 ($R_{ax} = 92.1$ cm) における磁場リップル強度の方向依存性



第 5-5 図 CHS-qa および CHS におけるトロイダル磁場リップル強度の小半径方向依存性

6. 実験計画

CHS における実験結果を概観し、それを踏まえ CHS-qa の実験計画を述べる。

6.1 CHS の主な成果

CHS は、CHS とほぼ同時期に運転を開始した ATF (オークリッジ国立研究所)とともに、先ず LHD のトロイダル周期数 (m) の決定に寄与した。CHS は $m = 8$ 、ATF は $m = 12$ であり、両装置ともにエネルギー閉じ込め時間の経験則に乗っていたため、LHD では安心して $m = 10$ と決定することが出来た。その後も 2000 年の現在に至るまで、LHD の実験に反映できる下記のような成果を出している。これらには、CHS-qa を考え始める動機になったテーマもあるが、CHS-qa においても引き続き実施されるテーマもある。

NBIによって駆動されるトロイダル回転に対する新古典粘性の効果を実験的に解明した。この結果、回転を減衰させないためにはヘリカルリップルを小さくすることが必要であることが分かった。

ヘリカル装置における当時の世界最高 値 (2.1%) を達成した。従来のヘリカル装置に比べて、アスペクト比が小さいことが大きな役割を果たしており、MHD 不安定性が 値を制限していないことが実験的に示された。これによって、LHD での高 実験に見通しがついた。

世界で初めてヘリカルプラズマの ICRF による加熱 (電子加熱) に成功した。イオン加熱については、イオン温度の顕著な上昇は観測されたものの、磁場に垂直方向の高エネルギーイオンの閉じ込めが悪いため高エネルギーイオンが壁を叩き、不純物の混入により放射崩壊に至った。しかしながら、プラズマ体積の大きい LHD では ICRF 加熱実験が成功するであろうという見通しが得られた。

閉じ込め時間に関する国際ステラレータ・データベースへの寄与を行った。ATF、W7-AS、ヘリオトロン-E とともにデータベースの構築に貢献した。

ローカル・アイランド・ダイバータによる密度制御と閉じ込め改善に成功した。これは国際的に高く評価され、LHD においても実施の運びとなっている。

壁相互作用の少ない低電子密度プラズマへの NBI 入射によって、プラズマ中心への粒子補給を行い高イオン温度モードを実現した。この手法は LHD においても実施されている。

低密度の NBI プラズマに ECH を重畳することによって電場が正に変わり、トロイダル回転の方向が NBI 入射方向から逆転した。これは自発的なプラズマ回転の方向が磁場リップルの少ない方向となることを示した。

世界で初めて重イオン・ビームプローブによるプラズマポテンシャルの本格的な測定を行い、ポテンシャルの脈動という新しい現象を発見した。ヘリカルプラズマの平衡

状態の分岐現象を実験的に解明しつつあり、国際的に高く評価されている。ポテンシャルが分岐し電場のシアが大きくなった時、電子密度の揺動が抑えられ、高電子温度モードと呼ばれている高い電子温度のプラズマが達成された。

6.2 CHS-qa における実験計画

サテライト装置としては、世界の情勢を踏まえつつ LHD と相補的な実験を行うことがその使命であろう。LHD はヘリオトロン型の利点を生かして、本格的なダイバータを備えた定常運転を最大の特長としている。現在までの CHS 実験及びヘリオトロン/トルサトロン系の実験から判断して、将来のヘリカル系にとってエネルギー閉じ込めの改善が最も重要であろうと考えられるため、サテライト装置では定常運転と言うよりはむしろ、CHS 実験において得られた知見を基に、ヘリカル型プラズマの閉じ込め改善を最大の実験目標とすることが適当と考えられる。プラズマパラメータとしては、数 keV、 10^{13} cm^{-3} 台は予想され、POP 実験としての活躍が期待される。ISS95 スケーリングから計算されるエネルギー閉じ込め時間は、密度 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、加熱入力 2 MW の場合、約 30 msec である。

準軸対称配位における新古典輸送では、磁場配位が軸対称に近い場合、P-S 領域、プラトー領域、バナナ領域など、ほぼトカマク型配位と同様な衝突周波数領域を示す。しかしながら、バナナ領域の低衝突周波数側では、非軸対称成分によるバナナ軌道の拡散による効果が見られ、バナナ領域から衝突頻度の減少にともなって、衝突頻度に反比例し拡散係数が増加する領域が存在すると考えられる。実際のトカマクにおいても、有限個のトロイダルコイルによるリップル磁場が原因となり、同様な拡散係数の増加する領域が存在することが知られているが、ヘリカル成分を含む準軸対称配位においては、その影響が大きいと考えられる。

これら低衝突周波数領域における拡散係数の振る舞いを明らかにするためには、新古典拡散係数を正しく評価する必要がある。一方、非軸対称成分が重要となる衝突周波数領域で拡散係数を求めるためには、多くのフーリエ成分を用いた高精度な計算が必要であり、ここではモンテカルロ法による粒子拡散係数 D を求める DCOM コードを用いた計算を行っている。DCOM コードでは、拡散係数を求める磁気面に対し、ピッチ角を乱数で与えたテスト粒子を磁気面内に一様に乱数で分布させ、粒子軌道の時間発展を追跡する。この時、粒子は仮定した衝突頻度でピッチ角散乱を受ける。拡散係数は、ある一定の時間後に、粒子の径方向分布を求め、その広がりをガウス分布であると仮定して求めている。現在、CHS-qa の様々な配位に対する計算を行っており、その結果を用いた磁場配位の検討は今後の課題である。

プラズマ回転、径電場は準軸対称配位を選択した動機の一つであり、径電場シアを伴う改善モードを見出し、ヘリカル系異常輸送抑制策の理解を進めることは重要な実験課題である。新古典的にはプラズマ回転、径電場についてトカマクの性質が期待される準軸対称配位では、改善モードについてもこれまでにトカマクで見い出されてきた現象

と類似の現象 (Hモード・VHモード放電で見られるような境界輸送障壁形成、負磁気シア放電で見られるような内部輸送障壁形成など) が期待される。一方で MHD 平衡やその安定性については、磁場の 3 次元ヘリカル構造の影響が反映され、また平衡のためにトロイダル電流を必要としないため、実現可能な圧力分布、回転変換分布がトカマクとは異なる。この観点からは、従来のトカマクとは異なる現象を見出す可能性も大きく、CHS 実験で蓄積してきた知見を基に様々なプラズマパラメータ制御を試みるべきであろう。

加熱装置には当面 CHS のものを流用し、実験結果を見ながら必要に応じて接線入射 NBI の増設を検討するが、当面の 2 機の NBI 同方向入射によって駆動されるトロイダル回転速度は同等規模のトカマクから推定して 100 km/s 以上、それに基づく径電場は 100V/cm 以上得られることになり、新たな径電場制御手段を与える。電場シアを作る手段としては密度分布制御、加熱パワーデポジション分布制御による圧力分布制御が重要であることが CHS 高イオン温度モード実験などで判ってきており、後継装置においても CHS 実験で確立整備してきた制御手法を適用する。

閉じ込め改善度に関しては、具体的には ISS95 に対して H-factor 2 を目指すことが出発点として妥当であろう。更なる改善は、その次の研究目標とする。

この他の主な実験テーマとして以下のものが考えられる。

付属のトロイダルコイルやポロイダルコイルを用いて多種多様な磁場配位を実現し、輸送現象を調べる。特に摂動磁場印加により準軸対称性を劣化させた時の、高エネルギー粒子閉じ込め、ブートストラップ電流、トロイダル粘性、電場の分岐現象などのその劣化への依存性を調べる。

高ベータ化については、5% 程度の安定性が確保できる設計である。当面は手持ちの加熱パワーを用いた実験を行い、MHD 不安定性の無い状態で 2% 程度の β の実現を目指す。将来は、加熱パワーの増力のため NBI #3 号機の設置を考えたい。

CHS-qa の設計からは、良好な高エネルギーイオンの閉じ込めが期待される。NBI の垂直入射を行い加熱効率の評価を行うと共に、損失粒子プローブを用いて損失粒子を測定する。将来は ICRF 加熱も考える。

新古典拡散の改善を実証するために、低密度・高電子温度プラズマを ECH によって生成し拡散係数を理論値と比較する。

CHS-qa はブートストラップ電流が存在するヘリカル装置である。外部回転変換にある程度の値が存在する場合、位置不安定性に対する復元力は大きく、トカマクの電流崩壊は発生しない。見方を変えれば、ディスラプションの起きないであろうブートストラップ・トカマクであるので、トカマクのコミュニティに大きなインパクトを与えることが出来る。電流駆動 MHD 不安定性について、ビーム駆動電流や OH 電流を利用し、その安定性を調べる。

ダイバータ配位に真剣に取り組まなければならない。ダイバータのない核融合炉は絵

に書いた餅に等しい．W7-X で考えているアイランド・ダイバータのために、真空容器と最外殻磁気面との距離を確保しており、この実験から始める．その傍ら、将来のダイバータ付き最適化配位を考案するための、理論的実験的実力を貯える．

CHS-qaは、あくまでプラズマ実験のための実験計画であるとの認識に立ち、加熱・計測のためのアクセシビリティの確保に重点を置いてきた．CHS と同様に、電子密度、電子温度、イオン温度、プラズマ回転速度、ポテンシャルなど重要な物理量のプロファイルについて、従来よりも踏み込んだ形で計測を行う装置とする．詳細な計測は新しい物理を生み出す可能性を秘めている．計測については、次節を参照．

6.3 計測

核融合研究は、詳細な計測を通した高温プラズマの構造の探究が必須な時代となっている．Hモード遷移に代表される改善閉じ込め状態への遷移、輸送障壁の形成、それに伴う乱流状態の変化など、興味深い研究課題も数多く見い出されている．核融合への応用のみならず、物理的な意味でも (たとえば非線形非平衡系として)、高温プラズマ物性の探究は極めて活発な局面を迎え、計測の果たす役割はますます重要となっている．

CHS-qa は、トカマクの閉じ込め性能、およびヘリカルの定常性を兼ね備えるべく設計された独創的な装置である．そのプラズマは、安価な定常燃焼プラズマの実現には欠かすことのできない希少な研究対象となるであろう．他のトロイダルプラズマとの相補的な理解を目的としたデータベースを構築する上で、精密な計測に基づいた詳細なデータを取得することを心掛ける．

上記のように、トロイダルプラズマ全体に関わる重要な課題である異常輸送と改善閉じ込め状態成立の機構に関係の深い下記の項目、

- 1) 揺動の空間的時間的な構造、
- 2) 電場や流れの構造、

を詳細に調べるために、CHS-qa では CHS において成功をおさめた荷電交換分光、重イオンビームプローブなどの先進的計測システムを活用する．さらに、レーザー散乱計測 (揺動)、加熱ビームを利用したモーショナルシュタルク計測など先進的な計測の導入も将来計画として考慮に入れている．

また、CHS-qa の設計思想であるヘリカルリップルの低減による磁気粘性の低下や軌道の最適化と関連して

- 3) トロイダル回転と入射運動量の関係
- 4) 高エネルギー粒子損失と加熱効率の評価

に必要な計測の準備を精力的に行う．さらに、密度限界の物理も、ヘリカル型の装置ではトカマクにも増して重要である．ヘリカル型装置の閉じ込め性能は密度の増加に伴って改善されることが、スケーリング則より示されているからである．それゆえ、周辺、

MHD 揺動および輻射計測にも重点を置く。

基幹的計測については、現在、輸送計算用コンピューターシステムの発展により大量データを扱う画像処理が可能となっていることを配慮し、トモグラフィーなどの解析法を用いて基本プラズマパラメータの内部構造を詳細に測定できることを基本的な思想とする。そのために、磁気プローブ、軟X線、分光、などの基本的な計測については、すべて2次元あるいは3次元的な観測を行う。また、電子サイクロトロン輻射やトムソン散乱計測のような局所的なプラズマパラメータが観測可能なものについて2次元化の検討を行う。これによって、プラズマの非線形発展や構造の詳細な観測が可能となる。

表 6-1 に、計測装置のリストを示す。

現在の設計におけるポートの利用計画を第 6-1 図に示す。20 箇所の横ポート、12 箇所の上下ポートが現在設定されている。その内、横ポート 2 箇所は NBI 加熱に利用される予定である。プラズマが立体的であるので、水平面においてプラズマが上下対称な横ポートには、電子温度測定用のトムソン散乱など、基幹計測を配置する予定である。計測用の接線ポートおよび重イオンビームプローブに利用するポートは特殊形状を有することが予想され、これらについては今後詳細に検討する。

6.4 年次計画

上に述べた研究テーマを、装置建設期間も含めて、表 6-2 に年次別に示す。初年度と次の年度は、装置詳細設計・装置建設・据え付け・調整、通電テストになる。この期間に、CHS から加熱・計測機器の切り離しを行う。また、本体支持用 SUS 梁は装置サイズが異なってくるため、CHS-qa 用に改造する。モジュラーコイルの電流値が CHS の HF/OVF コイルの電流値よりも大きいこと、及び、現在の 4 電源から 6 電源に増えることから、サイリスタ電源設備 (開発実験棟電源ヤード) からの動力ケーブルを増設する。3 年度から、真空排気を始め磁気面計測を先ず行う (2ヶ月)。その後、加熱・計測の据え付け・調整を行う (4ヶ月)。真空排気・壁コンデিশョニング (2ヶ月) の後、ECH, NBI を用いて初期実験 (2ヶ月) に入る。この時点では、2 mm 干渉計, 反磁性測定を行う傍ら、各種計測機器の調整を行う。引き続き、閉じ込め性能を調べる実験 (スケーリング則との比較、磁場配位依存性、新古典論との比較)、高 実験 (+ 電流駆動 MHD 不安定性)、ポテンシャル・電場計測、プラズマ回転計測、高エネルギーイオン計測、などを行う。その後、NBI #3 の増設による高 実験、ダイバータ実験への本格的な取り組みを行いたい。

6.5 実験計画を達成するための装置サイズ

装置サイズの決定に際して、いくつかの境界条件がある。その一つは MG 電源であるが、ここで考える主半径 1.5 m、磁場強度 1.5 Tesla は、MG の容量から言って問題ない。また、開発実験棟の冷却水設備もコイルの冷却に支障のない容量を持っている。次に、CHS-qa では CHS よりもアスペクト比が低いいため、同じ主半径でもプラズマのサイズは

大きくなり、達成されるであろうプラズマパラメータを考慮すると物理実験の遂行には支障はないであろう．準軸対称ヘリカル配位の POP 実験のために必須のモジュラーコイルを採用しているため、CHS のヘリカルコイルに比べてポートのサイズを制限している．既存の加熱 NBI #1, #2 のドリフト管径を考えると主半径 1.5m が限界になる．また、モジュラーコイルのインボード側のコイル間の干渉は装置サイズが小さくなればなるほど厳しくなり、主半径 1.5m 以下では装置の成立が危ぶまれる．このため、装置の主半径を CHS の 1.5 倍の 1.5 m とし、その代わりに磁場強度を 0.75 倍の 1.5 Tesla に落としている．装置の詳細設計は次の第 7 章を参照．

基幹的計測

対象	方法	備考
電子密度	ミリ波干渉計	多チャンネル化を行う
	HCN レーザー干渉計	多チャンネル
電子温度	トムソン散乱システム	
	トムソン散乱システム	
	ECE 検出器	ポロイダルおよびトロイダル
イオン温度		
MHD		ポロイダルおよびトロイダル
周辺	水素アルファ線アレイ	ポロイダルおよびトロイダル
輻射	ボロメータアレイ	
蓄積エネルギー	反磁性計測	
電流	ログスキーコイル	
不純物	各種分光器	

先進的計測

対象	方法	備考
電場あるいは電位	重イオンビームプローブ	二台：トロイダル
プラズマ回転	荷電交換分光	ポロイダルおよびトロイダル
損失粒子	高速中性粒子エネルギー分析器	
揺動	重イオンビームプローブ	二台：トロイダル
	反射計、散乱計測	
	リチウムビーム計測	

表 6.1. 基幹的計測と先進的計測。基幹的計測は常にモニターすることを原則としている計測器、先進的計測は実験の条件あるいは目的に即し稼働させる計測装置である。

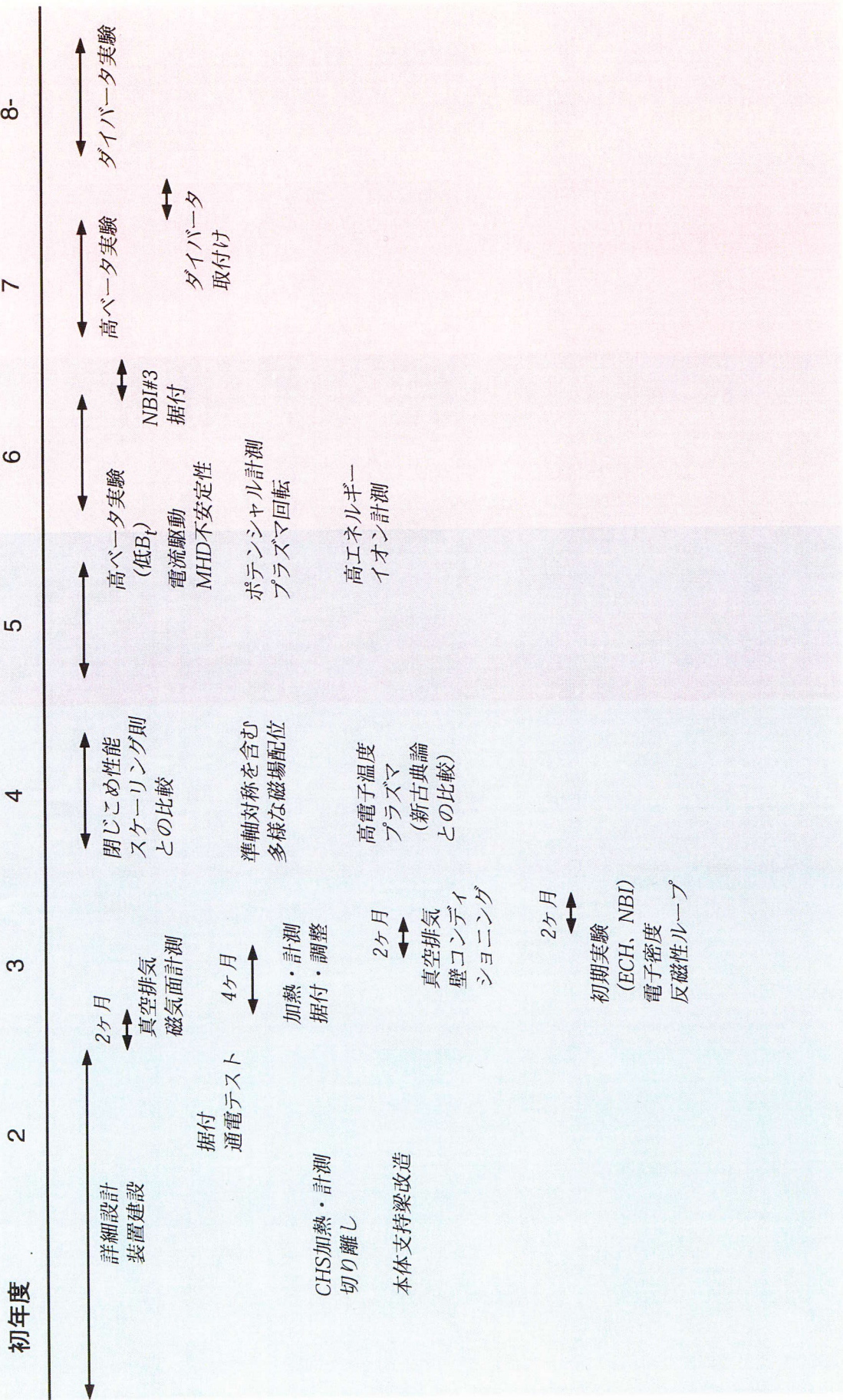


表6-2 CHS-qa実験計画

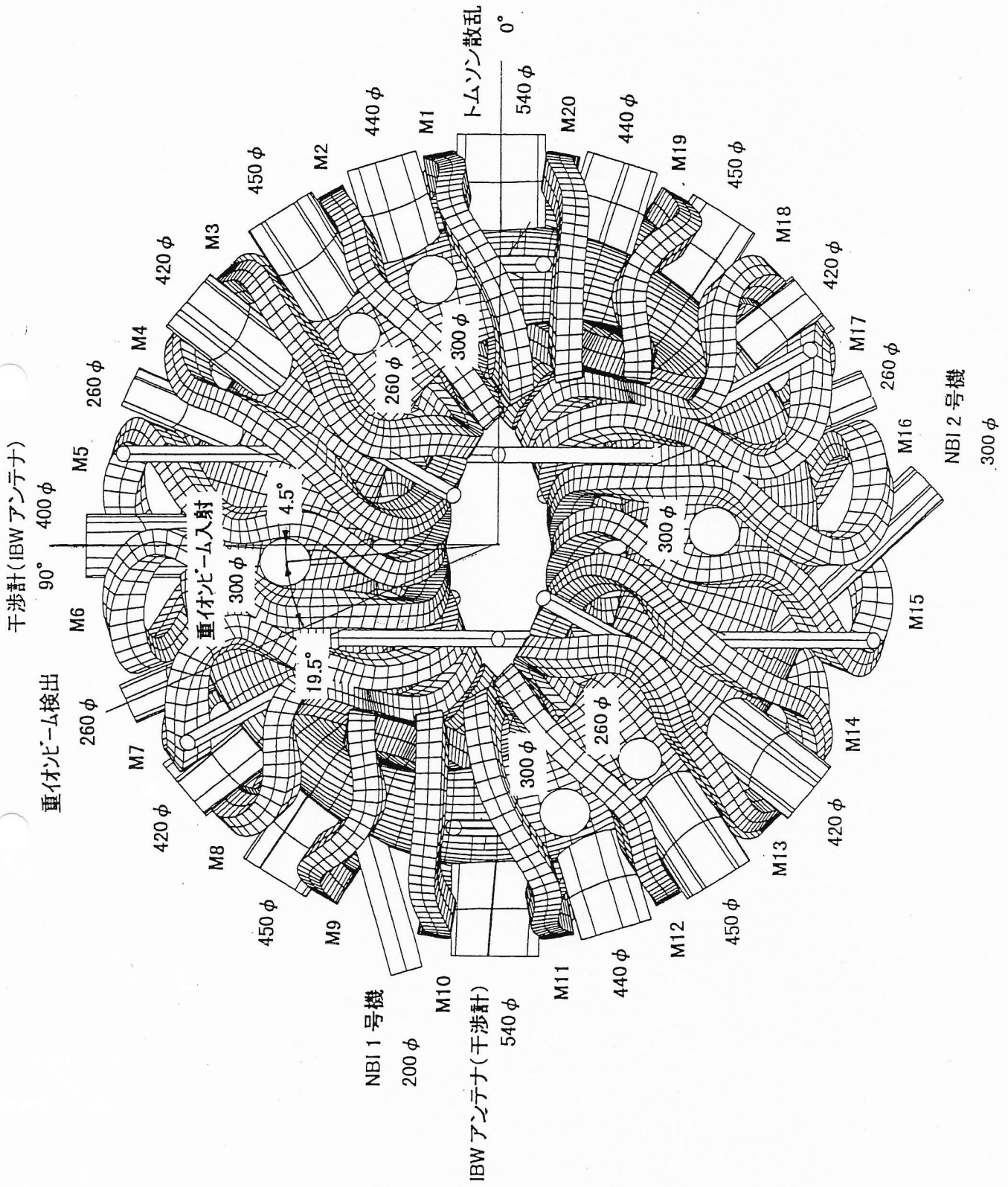


図 6-1. CHS-qa のポートと利用計画

7. 装置設計

7.1 主眼点

近年の大型装置では計測や実験においてその大きさ故に計測や運転に莫大なコストを必要とし、このため野心的な実験や計測には不向きである．また大型装置における計測器の立ち上げは費用だけでなく時間も小型装置の何倍も要し、小回りの効く実験を行うことは困難である．サテライト装置 CHS-qa においては、そのような実験や計測を補完できることが大きな利点でありこれを活かせるように、計測におけるプラズマへの近接性を特に重視してその主な工学的な構造が決定されている．また、この装置は閉じ込め実験装置であり、準軸対称磁場配位のプラズマ閉じ込め特性の研究を幅広く行うことも目的としている．このため、回転変換や磁気軸位置、プラズマ電流の制御を可能にするための補助コイルが付加されている．

7.2 コイル設計

7.2.1 モジュラーコイル

Heliotron-E や ATF、CHS などの装置世代において、三次元磁場配位を最適化する方法やツールは現在のように確立されていなかった．このため、これらの装置では、まず連続巻線のヘリカルコイルによって直観的に回転変換を作り出し、それからこのコイルの性質を表すピッチモジュレーションパラメータ等を変えることによって磁場配位の最適化をおこなうという方法がとられた．つまり、コイルありきとして磁場配位はコイルによって作られるものとした．このような設計方法はコイルの形状を簡単にでき、磁場配位の最適化もパラメータをそれほどたくさん用いないですますことができるという利点がある．

しかしながら、現在 Nuehrenberg らによって確立された磁場配位の最適化手法は、このような磁場の最適化と根本的に異なる．彼らの方法は、磁場配位の最外殻形状をフーリエ係数を用いて数値化して表し、様々な配位の性質をにらみながらこの数値の最適値を探するという方法である．この方法は、従来の方法と比べて、コイルよりも磁気面のほうに立脚しており、最適な磁場配位を作り出す点では優れている．しかしながら、CHS におけるような比較的単純な形状のコイルでは、このように最適化された磁場配位を構築することは非常に困難となる．このため CHS-qa においては、目的とする準軸対称磁場配位を構築するため、コイル形状の最適化プロセスを必要とする．

主コイルとして、モジュラータイプと連続巻線のどちらを取ることも可能である．これは、ある磁場配位を外から面電流で構築する際に、トロイダル方向への面電流の総和 It をどう取るかに自由度が存在することに由来する．しかしながらこの It を有限とした場合、この電流はコイルの内部の磁場配位部分だけでなく外側にも磁場を作る．これは漏れ磁場となり、また所定の磁場の強さを得るために必要な磁気エネルギーを増やすこ

ともなり不利である．コイルをモジュラー化した方が連続巻線に比べて製作やメンテナンスがしやすいという利点も生じる．このためモジュラータイプのコイルを選択することにした．モジュラーコイルの採用により、コイルの電流比を変えて配位のバンピー成分を変化させる実験も可能になる．これは閉じ込め性能における準軸対称性の効果を知る上で重要な実験となる．

コイルは常伝導とする．定常かつ高磁場運転をするためにコイルの超伝導化は有効な手段であるが、このサテライト装置にあっては LHD を補完するような柔軟な研究をすることが主要な目的である．常伝導を選択することによりコイル構造をより簡単にでき、プラズマへの近接性を確保できる．特に、CHS-qa はコンパクトサイズの低アスペクト比を指向しており、小さな装置サイズにおいてはコイルの超伝導化は困難である．

モジュラーコイルの数は、有限個のコイルによって作られるバンピーリップルの大きさが、最適化された磁場配位の非軸対称成分に比べて充分小さくなるように決定されなければならない．しかしながら、コストを下げ、様々な計測機器を配置しやすくするためにはコイル数は少ない方が望ましい．これらの観点からなるべく少ないコイルで最適磁場を得ることが必要になる．16 個以下のモジュラーコイル数では、理論的に予想されるバンピーリップルが配位の最適化における非軸対称成分よりも大きくなる．18 個にすると CHS-qa はトロイダル周期に 2 を選択しているため、プラズマの主要パラメータ計測に最適である上下対称断面 (縦長または横長断面) の所にモジュラーコイルが位置することになり望ましくない．20 個より多くするとコスト面の問題ばかりでなく、コイル構造が混み合いコイル自体の配置スペースさえ危ぶまれる．このためモジュラーコイルの数は 20 個にした．

モジュラーコイルの形状は Wendelstein7-X で実績のある NESCOIL コードを用いて決定される．これはコイル形状を、カレント面の形状を表すフーリエ係数とその面上での閉曲線 (コイルに相当する) を表すフーリエ係数で数値化して表し、磁場配位最適化プロセスより得られた所定の磁気面を得るようにこれらの数値を最適化する．具体的には、生成すべき最外殻磁気面での磁場のノーマル成分を評価しこれを最小化する．あわせて磁気軸位置や回転変換、磁気軸などの主要なパラメータも所定の値が得られているかどうかの評価を行う．これ以外に、コイル間の距離、コイルの曲率などもコイル形状の最適化プロセスに含めることができる．

モジュラーコイルの曲率と、コイル間の距離は工学的な面において極めて重要なパラメータである．コイルの形状を簡単にすることは、工学的に製作可能であるために必須条件となる．コイルの最小曲率半径は充分製作可能になるように決められた．また柔軟な計測に対応するためコイルの間は充分な空間を持たせてある．

NESCOIL コードによる最適化プロセスによって得られたコイル形状を図 7-1 に示す．コイルの曲率半径の最小値は 12.7 mm であり現在想定している導体断面の 10 倍以上あることからコイルの巻線は十分可能である．

7.2.2 ポロイダルコイル

ポロイダルコイルは CHS や LHD 装置と同様の 3 対からなる方式を採用する。この方式は、充分実績があり信頼性に優れている。CHS-qa においてこのポロイダルコイルは主に 2 つの目的がある。第一の目的は磁場配位の制御である。真空磁場配位に垂直磁場を加えることにより、磁気軸を動かすことが可能となる。高ベータ時、シャフラノフシフトに加えてプラズマ全体の位置もトーラスの外側へシフトしようとする。このシフトはポロイダルコイルによる垂直磁場を加えることによって抑えることが可能であり、これによってベータ限界の向上が期待できる。

第二の目的はプラズマ電流の制御である。電流は回轉變換を生成し MHD の振る舞いに大きな影響を及ぼす。高ベータ時における磁気軸付近の回轉變換の減少を、プラズマ電流によって補えばベータ限界の改善が期待されることが理論的に予想されている。NBI はプラズマの回転を誘起するためすべて Co-入射とするので、数十キロアンペアのプラズマ電流が常に存在する。それに加えブートストラップ電流も、準軸対称配位では回轉變換を増やす方向に流れることになる。これらの電流値を補って更なるベータ限界の向上を目指すために、ポロイダルコイルによる Ohmic Heating が可能なように設計される。また、Ohmic Heating による電流によってビーム駆動電流を打ち消すことも可能となり、準軸対称配位におけるプラズマ電流の影響を詳しく調べることができる。

7.2.3 トロイダルコイル

モジュラーコイルの外側に、配位の回轉變換を変えるための補助トロイダルコイルを配置する。回轉變換を変えられる程度の磁場を作り出せば良いので、大きな電流を必要とせずコイルやその支持構造は簡単になる。回轉變換は MHD 的な振る舞いや閉じ込め特性に重要な役割を果たすパラメータである。これを可変にすることは実験装置としての自由度を持たせるために特に重要な点である。また、CHS の磁場配位において、MHD 理論による安定性の議論では実験での結果が説明できない例もある。理論計算の不確かさを考慮に入れると、磁場配位の回轉變換を固定することは望ましいことではない。

さらに、この補助トロイダルコイルの形状を最適化することによって、真空配位だけでなく高ベータ値においても最適配位を保てるような磁場の補完が可能となる。図 7-2 に補助トロイダルコイルの形状を図示する。

7.3 コイル支持構造

コイル通電時はコイルに強力な電磁力が働く。装置はコンパクトサイズの低アスペクトを指向しているため、支持構造物の配置に限られたスペースしか許されていない。さらに計測におけるプラズマへの近接性を失わないように配慮がなされた上で、支持構造物の配置が決定されなければならない。この様な観点から、モジュラーコイルは主に三つの構造物(内側支持プレート、コイル間支持ロッド、そしてコイルケース)によって支える。内側支持プレートはトーラスの中心部の柱に固定され、すべてのモジュラーコイル

に接するように設置される．主にモジュラーコイルに働く中心向きの力を支える．また隣り合うモジュラーコイルには、通電時強い引力が働く．これをコイル間に挿入される支持ロッドによって支える．コイル導体は銅を用いるが、コイルに働く強い電磁力を導体自身で支えることは不可能である．このため SUS のコイルケースによってコイル自身を補強する．1.5 T の通電時における NASTRAN CODE による構造解析の結果を図 7-3 に示す．コイルの曲率の強いところに、力が集中している．引っ張り応力、圧縮応力のどちらも、SUS を用いたときの設計許容値 140 Mpa を越えず 1.5 T オペレーションが充分可能である．

このような構造を選択することで、モジュラーコイルに働く強い電磁力を比較的簡単な構造で支えることを可能にしている．特に、計測ポートの配置可能空間を多く確保することが可能になっている．

7.4 真空容器

真空容器はプラズマへの近接性を重視して、モジュラーコイルの内側におかれる．外置きにした場合に比べて容積を減らすことができ、ガスパフ効率や真空排気効率の点で有利となる．また計測器をプラズマへできるだけ近づけて配置することが可能である．コイルに働く電磁力は真空容器にかからないよう支持構造が設計されているため、真空容器自体は大気圧を支えられればよい．このため、CHS と比べて容器の肉厚は充分薄くなっており、プラズマへの近接性を高めている．また、ベローズを挿入することにより Ohmic Heating 時に真空容器自身に流れるトロイダル方向の電流を抑えている．真空容器は 4 つのパーツからなり、モジュラーコイルの取り替え時に分解可能なよう設計されている．

プラズマの最外殻磁気面から、20 cm 離れたところに内壁を設定する．この距離は、磁気軸を動かしたときの磁場配位に対応でき、また、ダイバータの実験のためのスペースを確保できるように決定されている．計測用のポートは大きいものをできるだけ多く確保してある．プラズマの主要パラメータは上下対称断面の所で計測され、プロファイル計測まで充分可能なようポート設計がなされている．

モジュラーコイルは真空容器とは別に製作され、後で真空容器に組み込まれる．この組み込みの作業は真空容器の 1/4 セクタごとに行われ、最後に全てのセクタを溶接する．このときのモジュラーコイルの真空容器への組み込みを検討したのが図 7-4 である．ここには、一つのコイルについての組み込み手順しか示さないが、残りのコイルについても全て組み込みが可能であることが充分検討されている．

7.5 全体図

図 7-5 に全体図を示す．図には中心支柱、中心支持板、コイル間支持梁、ポロイダルコイルなども示されている．

7.6 モジュラーコイル1/5モデル

図 7-6 に、モジュラーコイル製作及び固定法の予備テストとして試験的に製造した、トーラスの1/4部分に対する1/5サイズ装置モデルを示す．ステンレスのブロックからモジュラーコイルの溝形状を削り出し、コイル導体を巻き付けてある．

装置緒元	大半径 プラズマアスペクト比 プラズマ平均小半径 トロイダル磁場 トロイダル周期数 ポート数	$R = 1.5 \text{ m}$ 3.9 $a_p = 0.38 \text{ m}$ 1.5 T 2 40
モジュラーコイル	総数 異なる形状の数 各コイルのターン数 各コイルのアンペアターン数	20 5 40 turn 562.5 kAT
ポロイダルコイル	総数 (OV、MV、IVの三対) アンペアターン数	6 170 kAT (OV) 120 kAT (MV) 160 kAT (IV)
モジュラー トロイダルコイル	総数 各コイルのアンペアターン数	8 70.4 kAT

第 7-1 表 装置及びコイルのパラメター

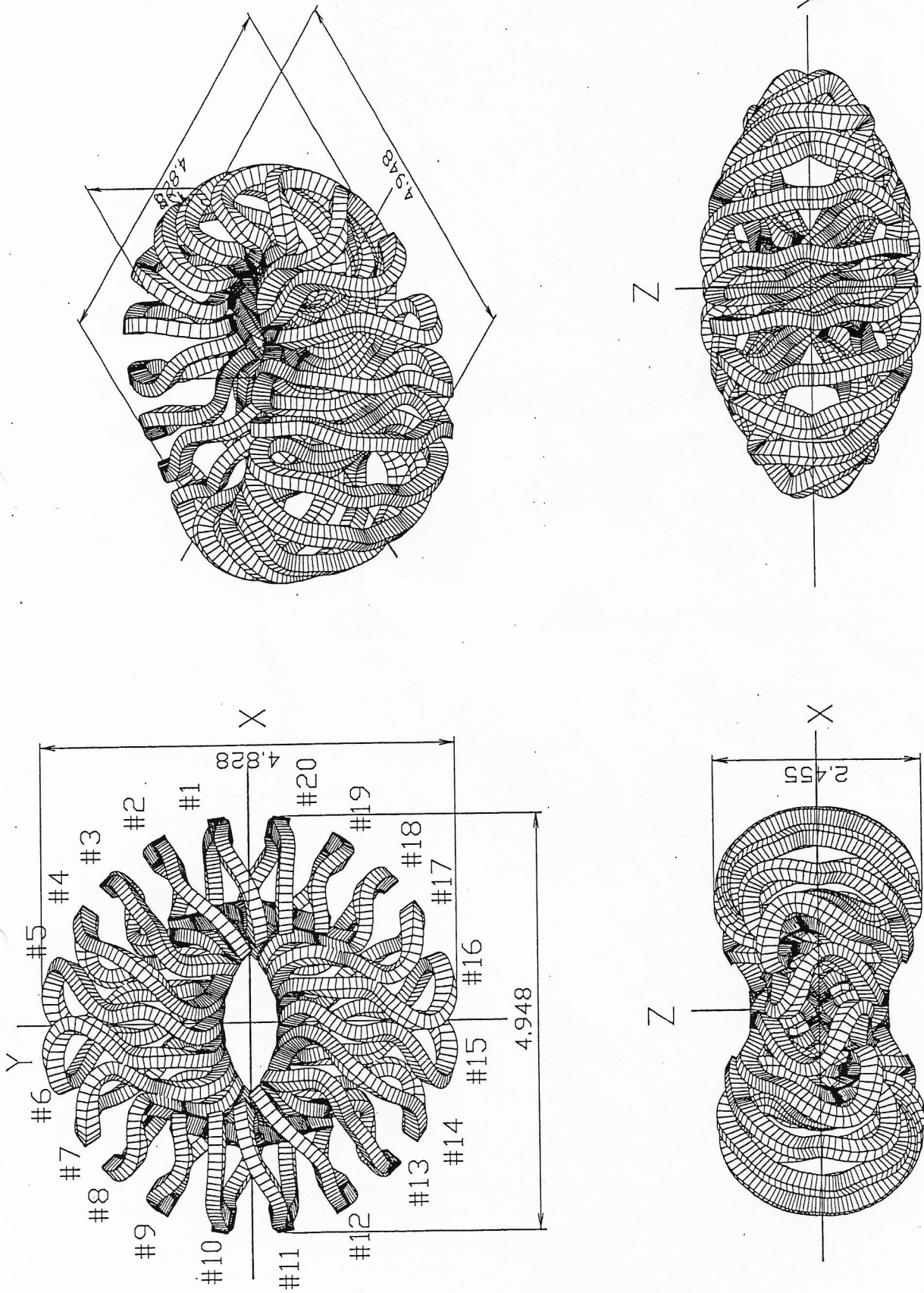


図7-1 モジュラーコイル全体図

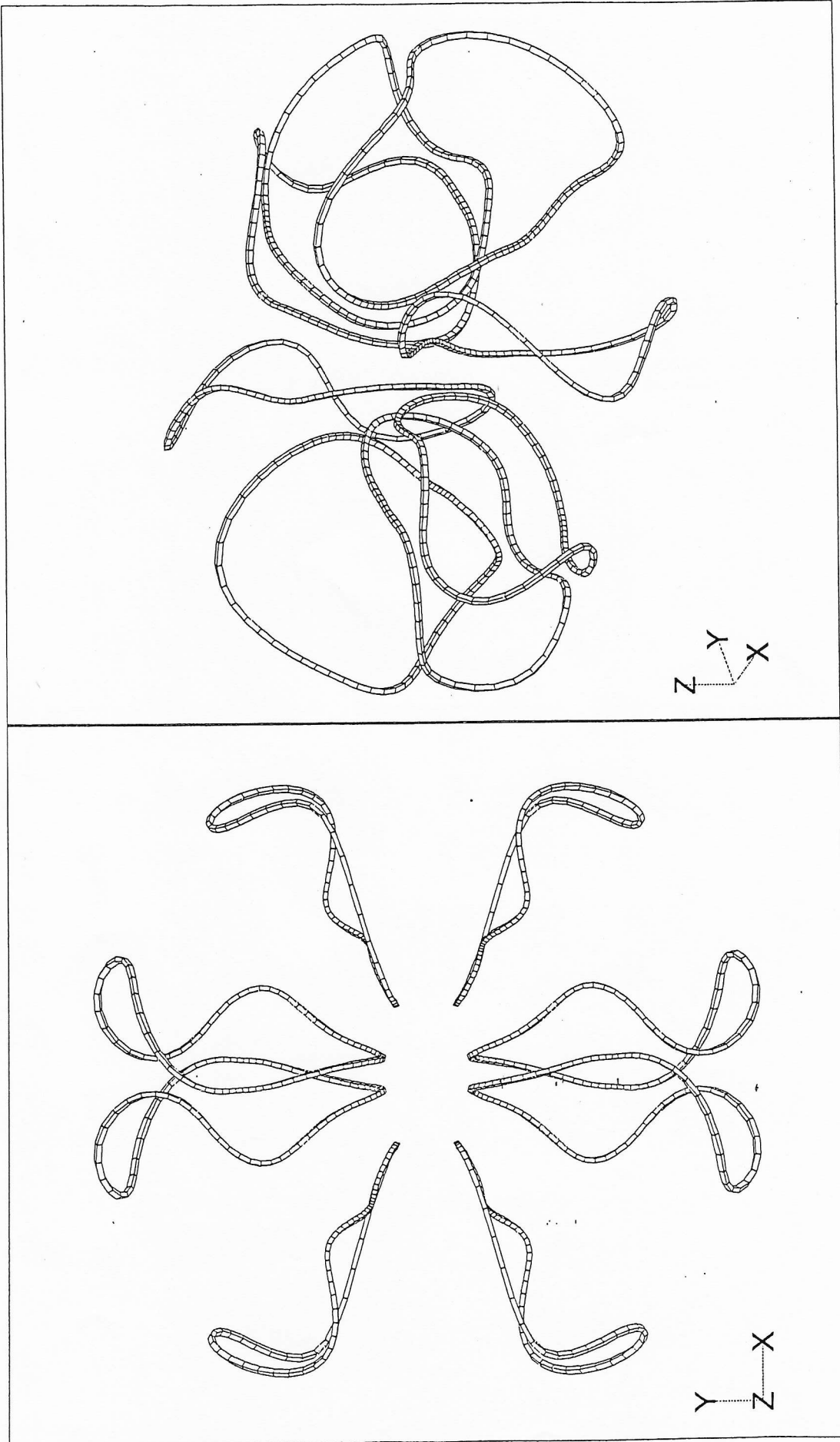
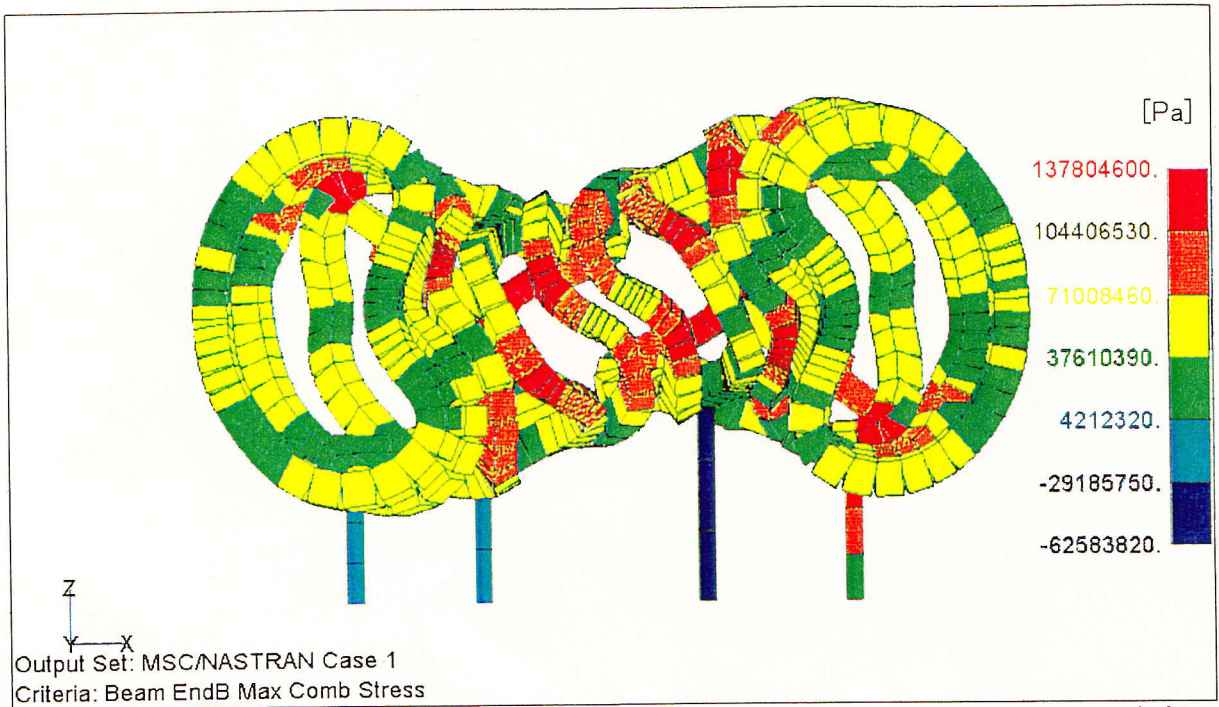
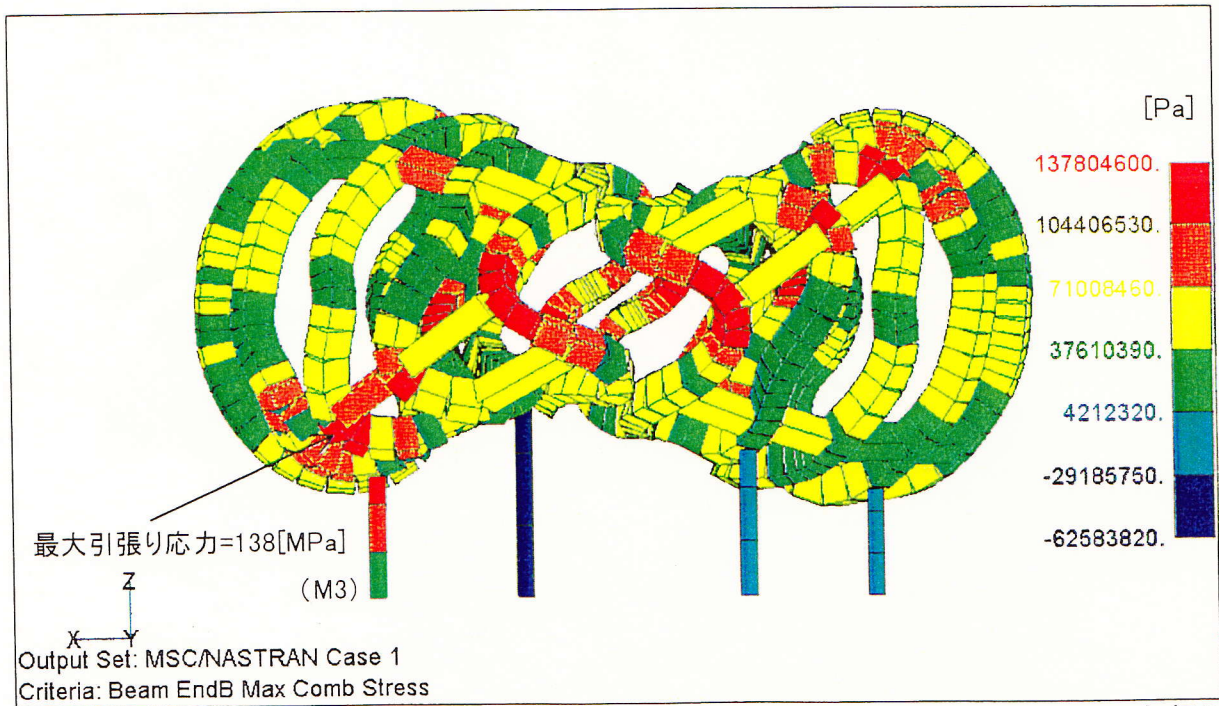


図 7-2 モジュラートロイダルコイル



矢視A



矢視B

図 7-3 コイルケース及びコイル間支持梁における最大応力分布

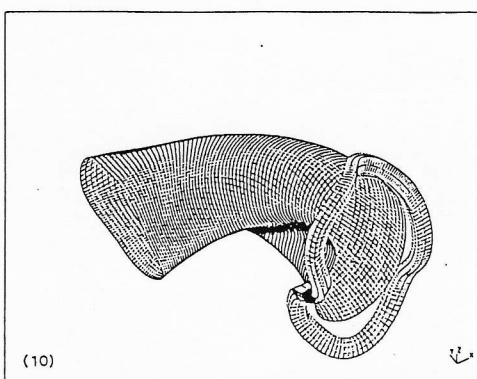
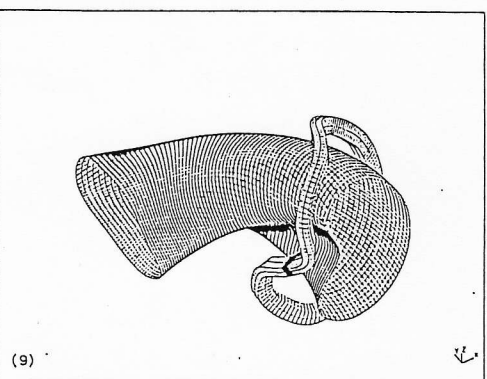
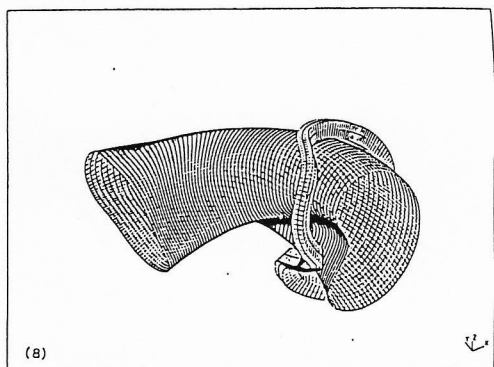
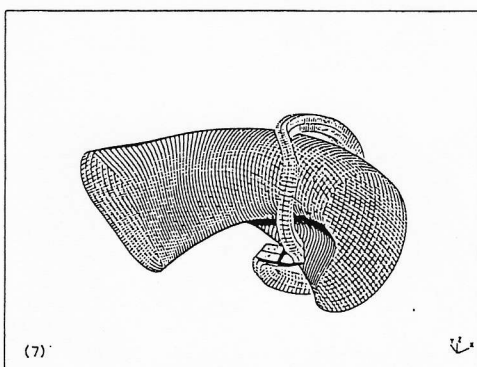
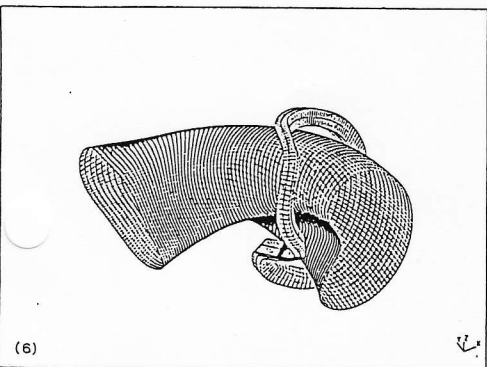
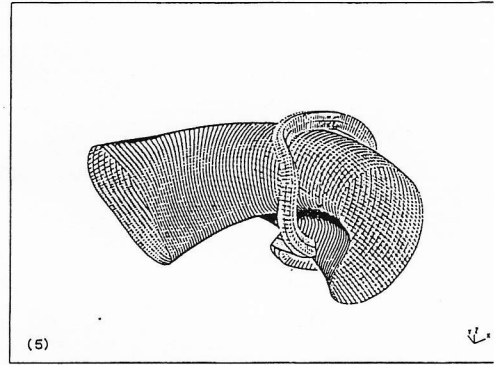
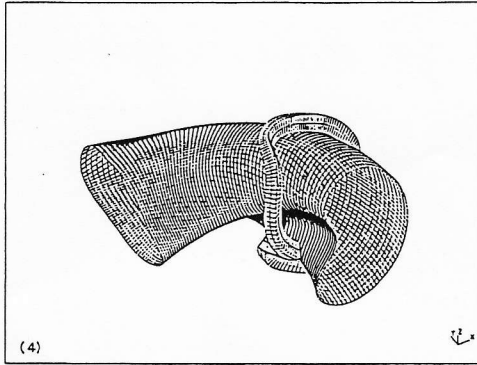
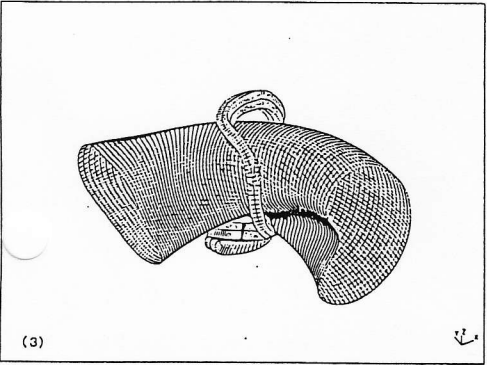
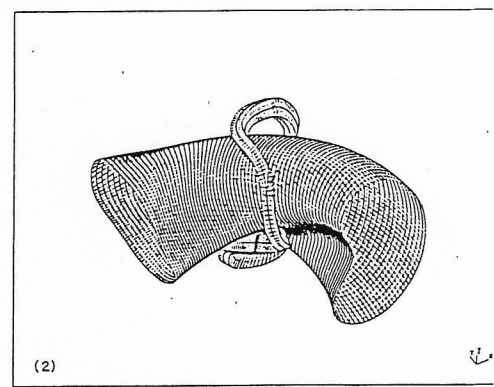
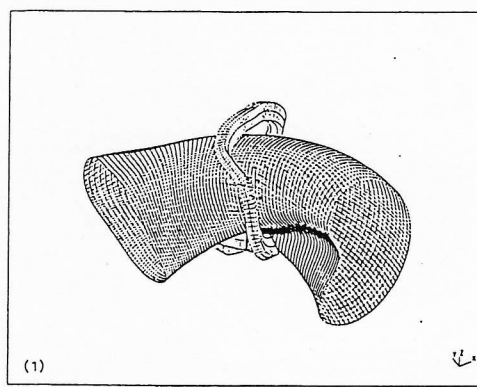
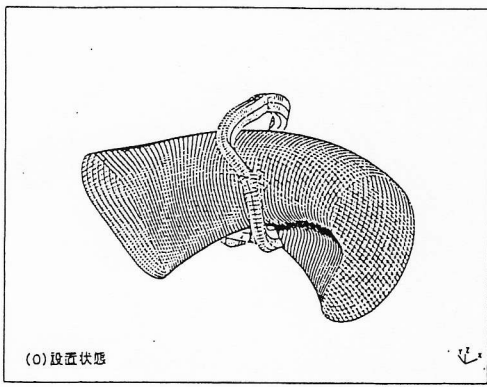


図 7-4 モジュラー型イルの組み込み操作手順

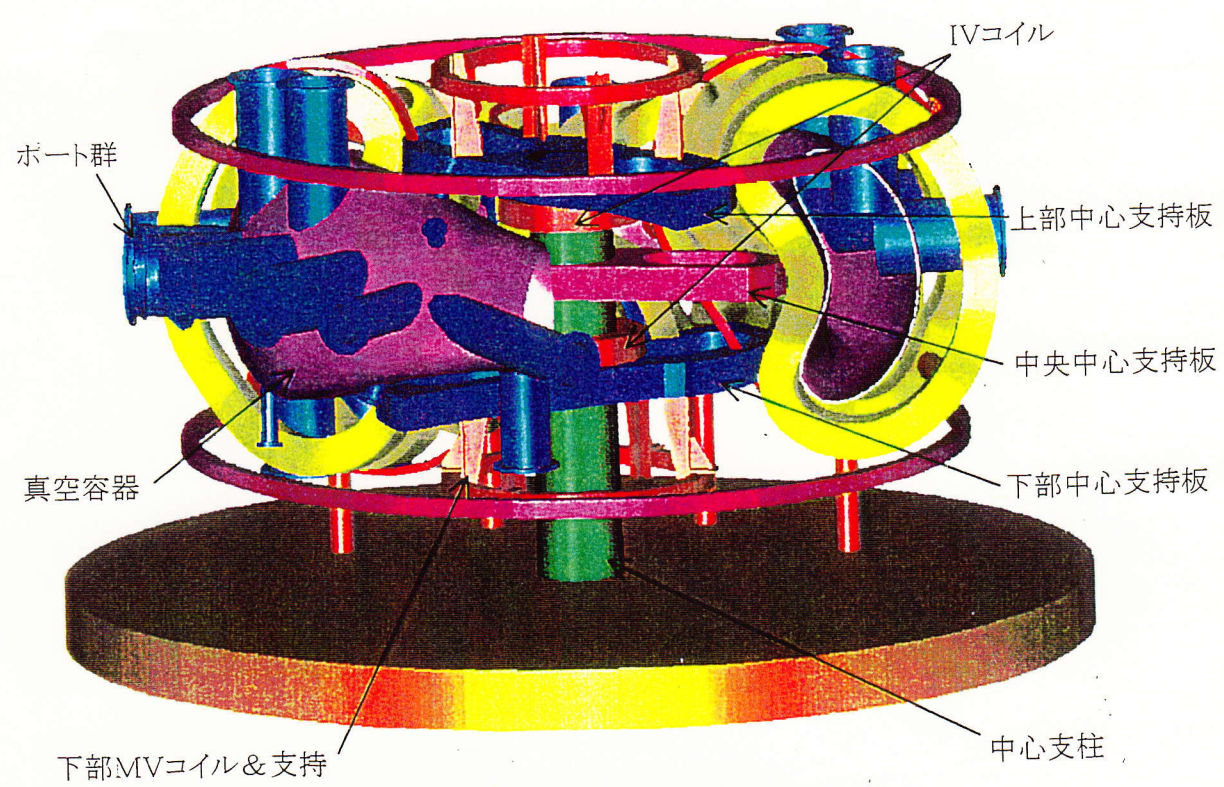
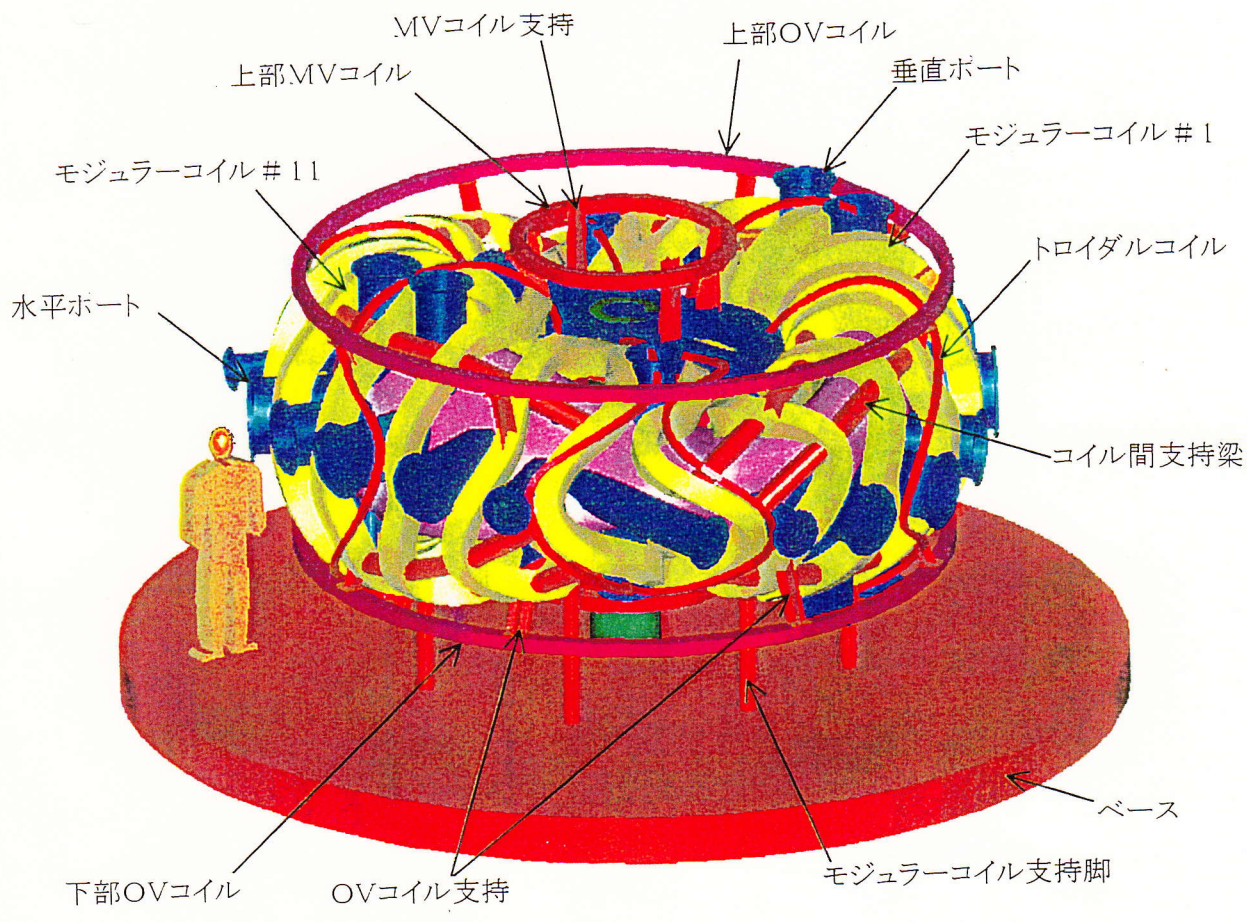


図 7-5 CHS-qa 装置全体図

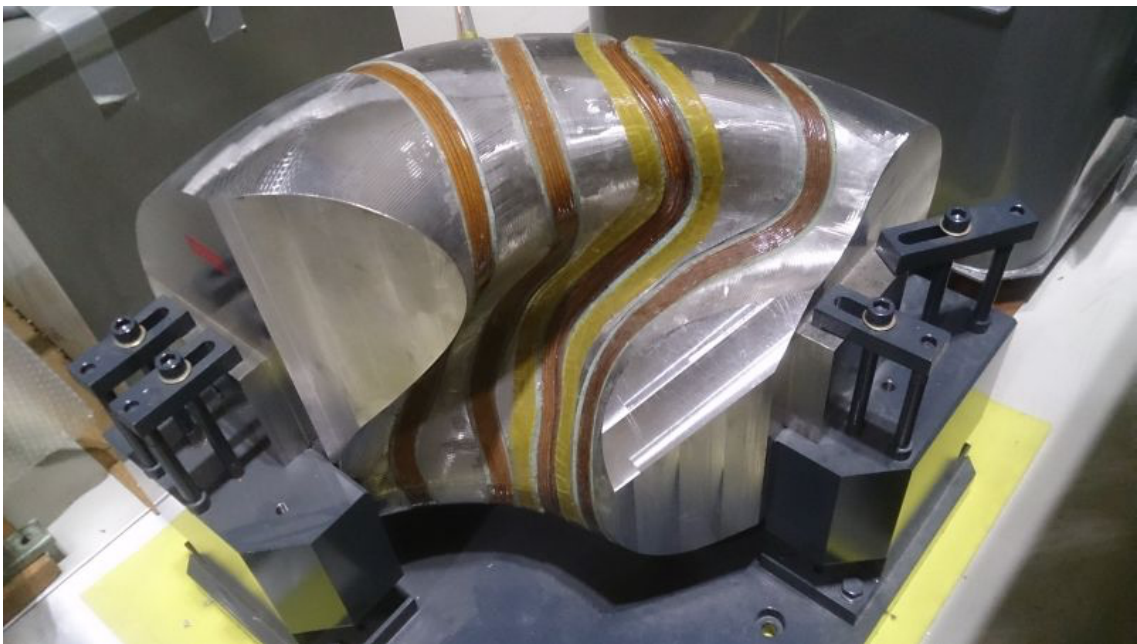


図 7-6 モジュラーコイル 1/5 モデル

REFERENCE

- Boozer, A. H. : Phys. Fluids 23 (1980) 904.
- Fujisawa, A. : Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 1054.
- Garabedian, P. : Phys. Plasma 3 (1996) 2483.
- Glasser, A. H. : Phys. Fluids 19 (1976) 567.
- Grieger, G. : Proc. 13th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Washington, 1990, Vol. 3, 525.
- Hirshman, S. P. : Comput. Phys. Commun. 43 (1986) 143.
- Ida, K. : Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 58.
Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 1268.
- Merkel, P. : "Theory of Fusion Plasmas", (1988) 25.
- Nishimura, S. : Phys. Plasmas 7 (2000) 437.
- Nuehrenberg, J. : "Theory of Fusion Plasmas", (1994) 3.
- Okamoto, M. : NIFS-PROC-25 (1995)
- Shaing, K. C. : Phys. Fluids B2 (1990) 149.

付録

CHS後継装置に関するこれまでの検討

1. 初めに

CHSの後継装置の検討は、総合計画検討委員会の専門部会として、Advanced Toroidal System 検討部会 #) が1995年3月2日に発足し、その第一回会合が1995年3月15日に開催されたことに始まる。

#) 藤沢、江尻、久保、須藤、山崎、富田、松岡、藤原、中島、伊藤公、林、若谷（京大）、小野（東大）、小川（東大）

2. ATS検討部会での主な議事内容

第0回会合（1995年3月15日）

東山サイトでのCHS実験がH8年度で完了するという前提に立った上で、藤原総合計画検討委員会委員長（兼、部会長）から検討部会発足の趣旨説明が行われた。続いて、サテライト計画としてどのようなことを考えるかなどについて意見が交換された。

第1回会合（1995年4月5日）

飯吉所長からCHSの後をどのようにするかを考えてもらいたいとの趣旨説明があった。前回に引き続き意見を交換した。

第2回会合（1995年4月19日）

CHS実験結果のレビューが行われた。

第3回会合（1995年4月28日）

引き続きCHSのレビューに関して議論され、レビューとしてまとめることになった。また、ヘリカル、トカマク、RFP、FRC、球状トーラスについてのレビューが行われた。

第4回会合（1995年5月11日）

CHSレビューの原案が示された。コメントを考慮し、レビューとすることになった。サテライト装置として、バンドルダイバータ付きヘリカル、 $l=2/m=4\sim 6$ モジュラーヘリオトロン、トカスター/三日月トカマク、低リップルモジュラーステラレータ、球状トーラス、プラズマ診断と加熱目的のトカマクの提案があった。

第5回会合（1995年6月2日）

部会長が藤原から松岡に交替した。また、幹事に伊藤公が指名された。モジュラーコイルを用いたヘリカル装置が新たに提案された。前回提案について補足説明を行った。

第6回会合（1995年6月16日）

サテライト装置として次の結論になった。CHSの単純移転は行わない、新提案はモジュ

ラーコイルによるヘリカル磁場配位と球状トーラスの2つに絞る。

第7回会合（1995年6月30日）

所長に経過（CHSは年半で終了、2本に絞る）を報告した結果、概ね了承されたとの報告があった。強磁場ヘリカル装置の提案があった。検討部会報告書の原案を部会長と幹事でとりまとめることになった。

Advanced Toroidal System 検討報告書（ここでは添付略）が、ATS 検討部会から1995年8月24日付けで出された。A案として低リップル化ヘリカル計画、B案として先進的球状トーラス（低アスペクト比トーラス）計画が並記され、いずれも価値ある研究計画である旨の報告となっていある。

3. 第2期 ATS 検討部会

ATS検討報告書をもとに、1995年9月14日の総合計画検討委員会*)において議論が始まった。計4回の委員会における議論の結果、i) A案、B案に優先順位を付けてよりまとまった案とする、ii) ヘリカル、トカマクだけでなく他の提案も広く募るべきである、とのコメントが示された。これを受けて、第2期ATS検討部会が発足した。別途、FRCについても検討部会が発足した。

*) 伊藤公（幹事）、市口、江尻、岡村、久保、須藤、関、長山、藤沢、松岡（部会長）、山崎、若谷（京大）

第1回会合（1996年2月15日）

A、B両案のその後の展開が紹介された。A案については、準トロイダル対称性を持つヘリカル装置が紹介され、B案については、期待される閉じ込め改善が紹介された。A案では、京都大学の次期装置との兼ね合いがあることが、若谷氏より指摘された。

第2回会合（1996年3月5日）

報告書にまとめるべく議論を行った。

第3回会合（1995年3月6日）

実験関係者（実行部隊として）のみで引き続き議論を行った。

第4回会合（1996年3月15日）

報告書（案）が配布された。3月19日付けで藤原総合計画検討委員会委員長あてに提出する。どちらの案を採用するかについては、総合計画検討委員会に一任することになった。A、B両案とも引き続き検討を深める。

1996年3月19日付け ATS 検討部会報告書を以下に添付する．その後の総合計画検討委員会において、A案（低リップル化ヘリカル計画）を第1優先とすることが決まった．

これを受けて1996年以降、準軸対称ヘリカル装置の検討を、CHS 実験関係者、理論データ解析研究系の有志により鋭意続けてきた．開発実験棟の建設がもともと CHS の単純移転を前提としたものであったことや、実験棟の着工の遅れなどにより、CHS 後継装置の提案が今日になった．1996年3月19日 ATS 検討部会報告書

CHSの移転に際し、増力 / 改造を視野にいれ、可能なトーラス実験装置を検討した．以下に検討結果を報告する．

部会メンバー：

松岡 (部会長)、伊藤公 (幹事)、市口、江尻、岡村、久保、須藤、関、長山、藤沢、山崎、若谷 (京大ヘリオトロン)

検討期間：1996年2月 - 3月

1. 検討結果の要点

昨年8月末に提出した報告書において、様々なトロイダル配位を検討した結果、

(A)低リップル化ヘリカル配位

(B)球状トーラス配位

の二つの配位を魅力あるオプションとして提案した．

今回、総合計画検討委員会の委嘱を受け検討部会を再度発足させた．今回は検討部会メンバーを充実させ、改めて計画案を検討した．前回に比較し、

(1) 物理的研究課題の詳細な検討

(2) 装置建設上の概念検討

(3) 実験家の熱意

といった、詳細な点や立ち入った課題をも検討した．（なお、この検討では、国内の他所の研究計画等との整合性は議論していない事を申し添える．）

結果は次節に説明するが、要点は以下の通りである．

(i) 前回検討した様々な配位について展望し、今回の検討においても上記(A)(B) 両案が優れている事を改めて確認した．

(ii) (A)(B)両案について、hardwareの妥当性、研究課題の現実性についても、検討を進めた．

(iii) 各々の長所を確認するために緊急に検討すべき課題を抽出した．

(iv) 実験家により両案の実験遂行上のプライオリティを討論した．いずれの案についても、意義深いことは確かであるが、長所 / 短所とも種類が異なったもので、直接の優劣の比較については結論が出なかった．

(v) 実験家の実行の熱意を討論した．いずれの案についても、熱心に遂行する実験家がいるだろう事を確認した．

総合計画検討委員会において両者のうちから選択するに当たっては、研究意義の差異（と諸計画との整合性）を評価することになると考えられるが、上記（iii）に挙げる検討を迅速に行った後にすることが望ましい．

2. 両計画の概要

(A)低リップル化ヘリカル配位

研究目的

リップル率の極めて低いヘリカル配位を実現し、新古典粘性の低い配位での閉じ込め実験を行う．回転の減衰を減らすことでプラズマ回転速度を増し、H-modeの様な改善閉じ込めを開拓する事を目指す．ロスコーンの低減による加熱効率の向上、低アスペクト比の採用による容易な計測などが特徴である．低アスペクト比の結果、トロイダルピッチ数の低い配位になる．

モジュラーコイルを採用し、ヘリカル軸を導入することで配位の自由度を増やし、そのなかでリップル最小化についての最適化を目指す．モジュラーコイルを用いるものとしては、

(1) 二次電流やBootstrap 電流を極力減らし、粒子捕獲の効率、新古典拡散、ベータ値等の総合的最適化を目指すW7-X

(2) 磁場のヘリカル対称性を高め、新古典拡散を減らす事を目指すHSXが知られているが、ここでは第三の最適化

(3) ヘリカルリップルを減らし、トロイダル対称性の高い磁場配位

を提案している．advanced helical systemのなかで、新しい指導原理を追及する研究である．

閉じ込め配位

具体的な例として、Nuehrenberg (N案), Garabedian(G案)などの検討例が知られている．

N案では、磁気軸excursionの比較的小さなヘリカル配位を採用し、 $N=2$, $R/a=4-5$, $i=0.1-0.15$ (真空磁気面)、ヘリカルリップル率2% (プラズマ表面) の配位の存在を確認している．その場合、ベータ値が3% になると、 $i=1-0.5$ 、ヘリカルリップル率0.5% (プラズ

マ表面)という性質を示している。G案では、磁気軸excursionのより大きなヘリカル配位を採用し、 $N=2$, $R/a=4-5$, $i=0.5$ (真空磁気面)、ヘリカルリップル率1-2% (プラズマ表面)の配位の存在を示唆している。

設計の例：概略を図1 (ここでは略)に示す。より詳細は添付の検討資料を参照願いたい。

予想されるプラズマパラメタ：

電子温度：2-3 keV

イオン温度：1 keV

エネルギー閉じ込め時間：20-30 ms (LHD scaling; $B_t=2T$, $n_e=6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $P=1 \text{MW}$)

長所：

ヘリカルリップルを十分小さくできれば、トカマクの有する優れた閉じ込め性能 (新古典拡散、回転をともなう改善閉じ込め) を定常なヘリカル配位のなかで実現する可能性がある。前例のないチャレンジになる。

対称性が良いので、粒子閉じ込めに優れ、加熱効率が高い。

短所：

リップル率を下げると、回転変換が小さくなり、Bootstrap 電流が流れやすい。N案の例では、ベータ値3%では普通のトカマクと同程度のBootstrap 電流が流れる。トロイダル対称性を保持するためには、最外殻磁気面を調整して真空磁気面に一致させる必要性が生まれる。

LHDとの関係：

改善閉じ込めの開発という的を絞った計画であり、LHDと同時に行う事で回転誘起のためのプラズマ制御法など、先駆的試みを行い、その成果をLHD実験に生かす事が可能になる。

世界全体では異なる指導原理で選択される各種のヘリカル配位があるが、LHDとの比較を通じて、ヘリカル系の総合的理解を深める事ができる。

ターンアラウンドの速い実験計画が取り入れられる。年間の実験計画が長くきちんと決まるであろうLHDには取り入れにくい実験課題 (たとえば極めて先駆的 / 萌芽的課題、大学院学生の課題など) を研究する事が出来、成功したものをLHDに本格的に適用する道が開かれる。その意味で、LHDとの役割分担が成り立つ。

現在の問題点と課題

collisional plasma におけるmagnetic pumping の計算は、conventional stellarator, W7-AS, W7-X, toroidal ripple tokamak に対して行われている。W7-Xはtokamakと同程度の値を示している。この結果から類推すると、ここで提案した配位は、研究目的に足る程度に粘性を下げ、目的とする回転を生み出すことが期待されるが、明瞭ではない。早急に詳細な

検討を進めるべきである。

(B)球状トーラス配位

研究目的

第二安定領域に代表される高ベータ値と改善閉じ込めを同時に達成し、advanced fuel fusionへの展望を開くプラズマ閉じ込めを研究する。極端低アスペクト比トーラス (Spherical Torus; ST)を用い、異常輸送やデイスラプションの発生や抑制の機構を研究する事を目指す。

現在の核融合研究は、DT燃焼核融合を第一の開発課題として研究が進められ、三大トカマクによる臨界(相当)プラズマの実現、LHDによる定常化研究、ITERによる核融合実験炉の設計、という研究の潮流が出来ている。しかし、核融合の当初からの研究課題である「無尽蔵且つクリーンなエネルギー源の実現」という目的は、DD燃焼核融合など advanced fuel fusionによって初めて満たされるものであり、学問的展望から研究を推進する核融合科学研究所では、環境整合性の高い核融合開発を他に率先して進める必要があろう。もとよりDT核融合に比べ格段にプラズマ性能に対する要請が厳しく(ベータ値20%程度、 n_T 値ではDTの場合に比べ桁の改善が求められる)、実現の可能性は高くなかった。しかし、極端低アスペクト比トーラスSTによって初めて、具体的に実験できる可能性が出てきた。このチャンスをつかえ、高ベータ・改善閉じ込め研究を行う事を目的とする。さらに、その実現の上に、Tokastar 的ヘリカル配位をも活用し、その定常化実験も構想する研究計画である。

閉じ込め配位

研究計画を二段階に区分する。

第一段階では、アスペクト比1.4 を目標とするST配位を選ぶ。軸対称とし、トカマクオペレーションを行う。磁場の性質を検討すると、アスペクト比が約1.5以下になると、絶対極小磁場の性質をもった領域が中心付近に現われる。また捕捉粒子について平均した磁気ドリフトも良い曲率の向きになる。これらの性質を反映し、第二安定領域への近接性、微視的不安定性(i mode, 捕捉粒子モード)などの線形安定性の急激な改良がアスペクト比約1.5以下において予言される。FM-1 Spheratorの実験を顧みると、磁気ドリフトの改良は、異常輸送の低減をもたらす可能性が高い。乱流理論による異常輸送の理論からも、輸送係数の低下が予言されている。デイスラプションの問題は、トカマクの大きな課題である。STARTの実験結果によると、アスペクト比が小さくなると、内部リコネクション現象は見られるが、デイスラプションは現われなくなる。こうした性質を鑑み、アスペクト比1.4 を目標とするST配位を選択した。この配位で、高ベータ値・高閉じ込めプラズマが実現された後に、第二段階では、Tokastar 型のヘリカル磁場を重畳する。設計の例に見られる様に、トロイダル磁場コイルは上下/外では一本の導体であ

る．外部のリターンを隣り合う（または二つ隣の）リターンと順次つないで行くことで Tokastar 型のヘリカル磁場を作ることができる．このヘリカル磁場の作る回転変換は 0.1-0.2と小さい．しかし、高ベータ状態では、トロイダル電流の大半がBootstrap 電流で維持されており、少量のseed currentによって、電流駆動なしに平衡磁場を維持出来るだろう．

設計の例

アスペクト比1.4を目指した設計例を図2（ここでは略）に示す．軸上トロイダル磁場1テスラ、電流2MAである．土岐サイトの活用可能な設備や、CHS / JIPP T-IIUの既存の加熱系 / 計測系の活用を考えている．

プラズマパラメタとしての例は以下の通りである．

L-mode scaling: $t_E=150$ ms ($B_t=1$ T, $I_p=1$ MA, $n_e=5 \times 10^{13}$ cm⁻³, $P=1$ MW), $T_e(0)=500$ eV

H-mode scaling(H-factor=2): $t_E=300$ ms

福山コード: $t_E=150$ ms ($B_t=1$ T, $I_p=2$ MA, $n_e=5 \times 10^{13}$ cm⁻³, $P=3$ MW), $T_e(0)=1.5$ keV

長所：

高ベータ値（第二安定領域で40% 程度のMHD安定性）高閉じ込め改善度（H-モードの threshold power 約1MW、また、電流分布制御による2倍以上の改善度）が実現出来る可能性がある点で、極めてユニークである．軸対称系での高加熱効率、優れた計測の近接性、ダイバーター機能、など実験も容易である．他の実験と比較し、トロイダルプラズマの輸送や安定性の全体像を構成する事ができる．

短所：

中心軸部分の設計が困難．OH fluxを大きくとることが易しくない．（この計画では、その困難を克服するためにTokastarヘリカル配位を活用している．）

LHDとの関係：

第二安定領域等の高ベータプラズマ・高閉じ込め実験に目標を絞った研究でありLHDと同時に実験を行うことによって、MHDモードの性質の解明（特に非線形発展）等を通じ、LHDの高ベータ化の方策に寄与する．高ベータでの磁場構造変化がもたらす輸送への影響を解せし、LHDの高ベータでの異常輸送研究に寄与する．ターンアラウンドの速い実験計画が取り入れられ、LHDとの役割分担が成り立つのは(A)案と同様である．（たとえば極めて先駆的 / 萌芽的な課題、大学院学生の実験課題など）

現在の問題点と課題

図示した例では、中心軸部分について、OH Flux、発熱、応力等の観点から一通りの検討は済ませている（添付の検討資料参照）．しかし、製作可能性は詰めていないので、早急に検討を完了する必要がある．

両計画の比較

(A)、(B)両案とも、先駆的試行研究、共同研究の推進、大学院学生の教育などの面で大きな役割を果たしうるだろう。サテライト装置としての要件を共に備えている。しかしながら、(A)、(B)両案についてプライオリティを議論しようと思みると、計画の意義や長所が種類の異なったものであることが際立つ。

(i) 研究目的は、(A)案がヘリカル系装置の可能性を拡張する点に集中しているのに対し、(B)案では、トロイダルプラズマ全体として高ベータ・高閉じ込めの開拓をはかるところに重点がある。

(ii) LHDとの関連を比較すると、いずれもLHDと相補的研究を展開するところに価値がある。結果をLHD計画に反映するには、(A)案の方が同じヘリカル装置であるので(B)案より成果の類似性が高い。けれども、ヘリカルリップルの大きさ等が異なるので、(A)案で発見されるだろうシナリオが直接LHDに生きる訳ではなく、一般的知識として昇華した成果を通じてLHDに生かされることになるだろう。

(iii) 現在の時点での検討のレベルに違いがある。(A)案では、ヘリカルリップルの最小化という原則が提案され、具体的配位の物理的検討が始まった段階である。はたして目的を満たす配位が見い出されるか否か、今後の集中的検討に待つ。一方、(B)案については、平衡配位、MHD安定性、輸送と閉じ込めなど、一通りの物理検討が済んでいる。重要な未検討課題は、中心部分の製作性とヘリカル成分の詳細についてである。

(iv) (B)案(ST配位)については、物理検討が進展しており、高いプラズマパラメタが期待されるので、英国のMAST、PPPLのNSTXなど、やや小型の装置が平行して提案されている。ここでは、より強い個性を発揮する事が求められる。国際的な比較からいうと、(B)案では、中心導体の設計の工夫およびヘリカル配位(第二期)を活用して、STにつきもののOH fluxの不足を克服しようとしている点に特徴がある。(A)案では、直接似通った配位が外国では計画されていないのは、準トロイダル対称ステラレータという配位が最近のものであるためと考えられるが、有限時の磁気面補正について慎重に検討する必要がある。

(v) 研究所の理念からすると、一見するところ、

(A)案では「LHDを用いたヘリカル核融合炉の開発」との関連が深く

(B)案では「トロイダルプラズマの総合的理解」との関連がより強い。

核融合炉開発の視点からすると、(A)案では、現在のDT核融合炉開発の路線上にある。他方、(B)案は、DD核融合などadvanced fuel fusion研究の展開に於いてイニシアティブを取ることを目指す。(しかし、(A)案とLHDでは、配位選択の原理が異なり、(A)案の成果からLHDへは、必ずしも直接の応用が可能な訳ではない事を注意すべきである。そ

の意味では、いずれも「総合的理解」を目指すことになる。）

両者のうちから選択するに当たっては、この差異に注意し、(iii)に挙げる検討を迅速に行った後にすることが望ましい。

3. 両計画の詳細検討資料

以下に添付する。（ここでは略）

Recent Issues of NIFS-MEMO Series

- NIFS-MEMO-76 M. Sato and M. Yokoyama for TASK3D-UD (Users and Developers)
Documentation on DKES/PENTA with loose coupling with TASK3D-a
Aug. 31, 2016
- NIFS-MEMO-77 J. Beckers, K. Ida, M. Yoshinuma, M. Emoto, R. Seki, M. Yokoyama, R. Jaspers
Implementation of neoclassical effects in momentum transport analysis at LHD
Oct. 07. 2016
- NIFS-MEMO-78 核融合科学研究所 安全衛生推進部・放射線管理室
Radiation Control Office/Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science
放射線安全管理年報 (2015年4月1日～2016年3月31日)
Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2015 to March 2016
Mar. 02, 2017 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-79 A. Sagara, T. Goto, J. Miyazawa, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tanaka, R. Sakamoto, S. Imagawa, T. Mito, T. Muroga, A. Iwamoto, H. Chikaraishi,
M. Tanaka, O. Mitarai, K. Tsumori, M. Isobe, G. Kawamura, S. Okamura, X. Ji, S. Hamaguchi, K. Takahata, S. Ito, S. Yamada, S. Masuzaki, N.
Ashikawa, S. Kubo, H. Kasahara, K. Ogawa, T. Nishitani, M. Goto, I. Yamada, R. Yasuhara, T. Akiyama, T. Tokuzawa, S. Ishiyama,
T. Obana, Y. Hishinuma, S. Takada, T. Nagasaka, H. Fu, Y. Hirooka, J. Yagi, S.
Full Report on the NIFS Fusion Engineering Research Project for the Mid-Term of FY2010-2015
Nov. 30, 2017 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-80 原形炉の運転制御に関する研究会
Program Committee of Technical Study on the Operation and Control of the Fusion DEMO Reactors
核融合原形炉の運転制御
Report on the Operation and Control of the Fusion DEMO Reactors (in Japanese)
- NIFS-MEMO-81 自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室
Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science
放射線安全管理年報 (2016年4月1日～2017年3月31日)
Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2016 to March 2017
Jan. 22. 2018 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-82 主催：核融合科学研究所 技術部
Department of Engineering and Technical Services
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
May. 14, 2018 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-83 Kazuyoshi Yoshimura
Nonlinear Wave Propagations in Binary-Gas Mixture
May. 14, 2018
- NIFS-MEMO-84 山本孝志、情報ネットワークタスクグループ 核融合科学研究所 情報通信システム部
T. Yamamoto and members of information Network Task Group
The Division of Information and Communication Systems, National Institute for Fusion Science
セキュリティを考慮した核融合科学研究所キャンパス情報ネットワークの構築
Construction of the campus information network with information security measures on NIFS
Oct. 05, 2018 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-85 自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室
Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science
放射線安全管理年報 (2017年4月1日～2018年3月31日)
Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2017 to March 2018
Jan. 28. 2019 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-86 自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室
Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science
放射線安全管理年報 (2018年4月1日～2019年3月31日)
Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2018 to March 2019
Jan. 14. 2020 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-87 準軸対称ヘリカル型トーラス閉じ込め装置 CHS-qa 実験提案書
Proposal of the CHS-qa experiment
CHS-qa design team
July 22, 2020 (in Japanese)