高速点火レーザー核融合実験用クライオジェニック ターゲットの開発

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2013-11-18
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 岩本, 晃史, 藤村, 猛, 中井, 光男, 乗松, 孝好,
	坂上, 仁志, 白神, 宏之, 疇地, 宏
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10655/10178

# 🔍 レビュー論文

# 高速点火レーザー核融合実験用クライオジェニックターゲットの開発

# **Development of Cryogenic Targets for Fast Ignition Laser Fusion Experiment**

岩本晃史,藤村 猛<sup>1,2)</sup>,中井光男<sup>1)</sup>,乗松孝好<sup>1)</sup>,坂上仁志,白神宏之<sup>1)</sup>,疇地 宏<sup>1)</sup> IWAMOTO Akifumi, FUJIMURA Takeshi<sup>1,2)</sup>, NAKAI Mitsuo<sup>1)</sup>, NORIMATSU Takayoshi<sup>1)</sup>,

SAKAGAMI Hitoshi, SHIRAGA Hiroyuki<sup>1)</sup> and AZECHI Hiroshi<sup>1)</sup>

核融合科学研究所,<sup>1)</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究センター,<sup>2)</sup>(㈱キーエンス

(原稿受付:2013年2月8日/原稿受理:2013年5月17日)

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターと核融合科学研究所では双方向型共同研究の枠組みの下, FIREX 用クライオジェニックターゲットの開発を進めている.ターゲットのシェル内に~20 µm 厚の均一な固体 燃料層を形成する手法の開発が課題となっている.現在二つの燃料層形成手法:フォーム法とコーンガイド加熱 法の開発を進めている.フォーム法では,液体と固体の密度差から生じる残留気泡の抑制が最大の課題であり, 本研究では(フォーム材の代わりに使用した)プリズム状のエアロゲル材中に充填率約99%の固体水素の形成に 成功している.開発した手法は実ターゲットへも応用可能であることがシミュレーションにより確認されてい る.一方,コーンガイド加熱法では直径2 mmのPSシェルターゲット中に155~192 µmの固体水素層の形成実証 に成功している.このように燃料層形成手法の原理実証は終了し,ターゲット開発は実ターゲットを用いた燃料 層形成の実証へと移行する最終段階に至っている.

#### Keywords:

fast ignition laser fusion, cryogenic targets, fuel layering, solid hydrogen refractive index

#### 1. はじめに

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(以後, レーザー研)では、ペタワットレーザーを使用した高速点 火レーザー核融合の加熱実証に成功した成果[1]をもとに, 次の段階として高速点火方式による点火の実証を目的とし た高速点火実証実験(FIREX)プロジェクトが進められて いる[2,3]. 爆縮用激光 XII 号と点火用 Laser for Fusion Experiment (LFEX) の二つのレーザーシステムを用い, こ れまでに約1 keVの加熱に成功している[4]. 典型的なター ゲットの構成を図1に示す. ターゲットはプラスチック シェル内に形成された固体燃料球殻、点火レーザーをガイ ドするコーンガイド、シェル内に直接燃料を供給するため のガラス製充填管から成っている.図ではこれまでの実験 において加熱実証に成功した金製シングルコーンが取り付 けられているが、点火レーザーによる加熱効率を向上させ るためにダイヤモンドライクカーボン (DLC) コーン[5], 金製ダブルコーン[6], TONGARI コーン[7] などシミュ レーション研究を基にした提案がなされ、各コーンの性能 評価が行われている. また,現状では高速点火の原理実証 に注力するため、数多くの完成品から性能の安定したもの を選択し使用することができるよう重水素化ポリスチレン (deuterated PS) シェルを燃料とした実験が行われている. しかし、将来の核融合炉開発を見据えると重水素(D<sub>2</sub>)ま たは重水素-三重水素 (DT) 燃料を充填したクライオジェ

ニックターゲットの開発が必要である.

これまでクライオジェニックターゲットの開発は中心点 火方式を対象に行われてきた.特にレーザー核融合による 点火燃焼を目的に実験が進められている米国の国立点火施 設(NIF)やレーザー核融合の基礎実験を行っているロ チェスター大学レーザーエネルギー研究所(LLE, Rochester Univ.)では実験に使用するターゲットの研究開発を長 年継続しており,必要な仕様とされる固体 DT 燃料層をも つターゲットをレーザー実験に供給する段階に至っている [8-11].均一な燃料層の形成が最大の課題であるが,その 燃料層の形成にはベータ線法[12,13]と呼ばれる方法が主



National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan

<sup>1)</sup>Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, OSAKA 565-0871, Japan

 $Coresponding\ author's\ email:\ iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp$ 

として用いられている. 三重水素のベータ崩壊により発生 するエネルギーを利用して燃料層を加熱,その結果,燃料 層の不均一性に起因して温度差が生じ、高温部では燃料の 昇華が起こると同時に蒸気圧も上昇し蒸気圧の低い低温部 で再固化する.このように燃料自身の体積加熱によりシェ ル内の固体燃料の再配分を促し、ある一定時間かけて均一 な燃料層を形成させる.一方,D2燃料を使用する実験には 別の方法を用いて燃料層が形成されている.D2はある波長 の赤外線を選択的に吸収する特性があり、その吸収ピーク を利用して燃料を加熱、ベータ線法と同様に燃料層の不均 一性に起因する温度差で燃料層を均一化する方法が開発さ れている[14,15]. このような燃料層形成手法の開発と同 時に、実験へのターゲットの供給には形成された固体燃料 層の評価方法の開発も重要な課題である. NIF や LLE では シャドウグラフ法やX線位相コントラスト技術による燃料 層の評価が行われており[16,17],仕様通りの燃料層が形 成されているターゲットを選択すると同時に燃料層の詳細 な調査を行い実験に供給している.

さて、レーザー研と核融合科学研究所(以後,核融合研) では2003年度から双方向型共同研究の枠組みの下、図1に 示した FIREX 用クライオジェニックターゲットの開発を 進めている.ターゲットの製造・組立,そのシェル内面に ~20 µm 厚の固体燃料層を均一に形成する手法や燃料層の 評価手法の開発が課題となっている.このターゲットは中 心点火方式用ターゲットとは異なり球対称性をもたない ターゲット構造のため既存の技術を応用できず,燃料層形 成には独自の研究開発が必要である.そこで現在,二つの 燃料層形成手法:フォーム法,コーンガイド加熱法を用い た開発を進めている.本報告では燃料層形成技術開発とそ の関連研究に関するこれまでの成果と今後の課題について述 べる.

#### 2. フォーム法の実証研究

フォーム法は中心点火方式によるレーザー核融合炉用 ターゲットに応用するために米国の研究者が1980年代に提 案した方法[18] であり、アブレーター層および燃料層の 形成を目的として現在も開発が続けられている. 我々は, その概念を FIREX 用ターゲットの仕様に合わせて最適化 する検討を行っている[19].フォーム法では燃料層として 必要な厚さや均一性などを有するフォーム球殻をあらかじ め形成し, そのスポンジ状フォーム材内に毛細管現象を利 用して液体燃料を均一にしみ込ませ、その後、固化する. その結果、必要な仕様を満たす固体燃料層を完成させこと ができる.この形成過程では毛細管現象により燃料が浸透 し, 微細な構造内で表面張力が燃料層を維持するため重力 などの影響を無視できる. このように液相ではフォーム材 自体が燃料層の均一性を保つ.しかしその後の固化が無秩 序に起これば,液体と固体間の密度差分の気泡が含まれた 固体燃料層が形成される可能性[20]が指摘されており、 その解決が本手法の重要課題となっている.軽水素 (H2), D<sub>2</sub>, DT の場合, その密度差から11~12%の気泡が固体内 に残留する可能性がある[21]. 我々はフォーム材に染み込 んだ液体燃料を固化させる際に気泡の形成を抑える手法を 発案した.これまでに専用の試料を作製し、その原理実証 実験を行った.また、発案した固化手法の実機フォーム シェルターゲットへの応用について ANSYS を使用したシ ミュレーションにより検討を行った.

先に述べたように形成された燃料層の評価も開発課題の 一つであり,我々もその開発に着手している.これまでに フォーム層内に充填されている固体燃料の量を試験的に評 価したので,それについても簡単に述べる.

#### 2.1 フォームシェルターゲットの製作・組み立て

レーザー研が中心となりフォームシェルターゲットの製 作・組み立てに関する研究を行っている。本報告では詳し く述べないが、関連技術:フォームシェルの製造[22,23]、 シェルのレーザー加工[24],コーンガイドの製造[25,26], ターゲットの組み立て[27]について現在開発が行われてい る. さて, そのフォームシェルについては大量生産可能な 製造法について検討を行っている.現在,実際にシェルの 形成に使用されている材料はエアロゲル材料の一つである レゾルシノール・ホルムアルデヒド重合体 (RF) であ り、100 nm程度のセルが集合した多孔質構造となっている [28] (フォーム法は手法の一般的名称として使用されてお り、実験では開発に成功しているエアロゲル材料の RF を 使用している.フォーム材とエアロゲル材は多孔質の構造 やセルサイズが異なる).図2にそのシェルの断面写真を 示す(図2は先に投稿した文献[29]に記載されており、そ こからの引用である.また図14までは同様である).これ までに直径約500 μm, エアロゲル層厚約20 μmのシェルの 試作に成功している.次にコーンと燃料充填管を取り付け るための RF のレーザー加工技術については安定に加工が 可能なレーザー加工技術の開発を終了している. 先に述べ たように効果的なコアプラズマの加熱のために数種類の コーンガイドが提案されており、これまでに金製シングル コーンによりコア加熱に成功している. そのシングルコー ンを取り付けた典型的な FIREX ターゲットを図3に示す. 図に示された RF シェルは直径 521 µm, 18 µm のエアロゲ ル層厚, 密度は 90 mg/cm<sup>3</sup> であった. 組み立てられたター ゲットは機械的な問題を解決し[30]、シミュレーションお よび予備実験により極低温実験に使用可能であることを確



図2 RF エアロゲルの SEM 写真(文献[29]からの引用).



図 3 組み立て後のFIREX用RFシェルターゲット (文献[29]から の引用).

認している.本報告ではその典型的なターゲットを基本に 燃料層形成技術について考察する.

#### 2.2 フォーム法のための燃料層均一化のアイデア

フォーム材中での固体燃料層形成時に気泡が残留する問 題については、その発生を抑制する手法の開発がフォーム 法の重要課題の一つである.もし対策を講じない場合,固 化転移が無秩序に起こり液体と固体の密度差からフォーム 材を形成する各セル内に気泡が発生することになる. その 気泡の発生を抑制する対策として、固体へと転移している 界面に対し密度差分の燃料を液相で供給しながら固化を進 める方法を提案する. この液体を供給し続ける能力として 多孔質材の毛細管現象を利用する.固化制御を実現する環 境作りがこの方法の成功の鍵となる.本報告では固化の進 展方向を固定するために対象とするフォーム材に単一温度 勾配を発生させる方法を採用し、その環境の実現を実験的 に実証する.図4にはそのアイデアの概念が示されてい る. また,実験ではエアロゲル材を用いるためその概念も エアロゲル材の構造を考慮している.図4(a)では毛細管 現象により液体燃料がエアロゲル材に均一に浸透した様子 を示している. 固化制御を行わなかった場合に密度差分の 残留気泡がセル内に発生している様子を図4(b)に示して いる. 直径100 nmのセルを仮定すると直径約50 nmの気泡 ができる計算である. 無気泡固化実現のための対策を講じ た理想的な固化過程を図4(c)に示している.エアロゲル 材の上下で温度差を発生させ,系全体の温度を燃料の固化 温度以下に徐々に低下させる. 固化は温度が最も低い下端 から始まり系全体の温度の低下と共に温度の高い上方へと 進展するはずである.その固化の先端では毛細管現象によ り自然に液体燃料が液-固界面に供給される. セルサイズ と浸透速度の関係には注意が必要であるが固化先端が通過 後,理想的には無気泡の固体層形成が期待できる.

#### 2.3 エアロゲル材への無気泡固化実証試験

#### 2.3.1 実験準備

前節で提案した方法の原理的実証を行うための試料として、シェル形状にこだわらず理想的な固化制御を実現できると同時に状態の観測が容易な三角柱のプリズム形状を採用した.核融合研では自主規制によりD<sub>2</sub>が使用できないため代替燃料として H<sub>2</sub>を使用した.また、新たな試みとして



図4 エアロゲル材内での無気泡固化のアイデア.(a)毛細管現象により各セルには液体燃料が均一に充填されている. (b)無制御固化の結果、気泡が固体燃料内に残留している. (c)温度勾配による固化制御.下方から固化が始まり、系の冷却温度の低下と共に固化の先端が上方へと移動する.毛細管現象により液体燃料が継続して固体と液体の界面に供給され気泡の形成を防止する(文献[29]からの引用).

屈折率から残留気泡を評価する方法を採用した.干渉計測 による屈折率の評価や試料の温度制御のため、試料は三角 柱に組まれたガラスプレート間に RF エアロゲル材が充填 され、その上下をセルノックス温度センサー付きの銅板で 挟まれた構造である. 組み立ては全てエポキシ樹脂による 接着である. 上部銅板には温度調整用のヒーターが取り付 けられている.評価の結果、このエアロゲル材の密度は約 95 mg/cc であった. その試料の概略図を図5 に示す. 固体 水素単体の屈折率を評価するために、全く同じ形状を持つ 別の試料:エアロゲル材なしプリズムも製作した.製作し た二つのプリズムに液体および固体水素を充填し屈折率を 評価するために、一つずつ専用の光学窓付き冷却装置[31] に入れ、低圧のヘリウムガスによる自然対流熱伝達の冷却 条件下で実験を行った. 試料を納めている容器には温度を 制御できるふく射シールドが取り付けられており、その温 度を制御することで冷却ヘリウムガスの温度を制御してい る. エアロゲル材中に形成された固体水素の気泡率はそれ ら二つのプリズムで評価した屈折率の差から評価ができる が詳細は後で述べる.

#### 2.3.2 屈折率評価のための干渉計測系

屈折率評価にはマイケルソン型干渉計を使用した. その システムを図6に示す. 二つの波長:632.8 nm (CVI Melles Griot Inc.), 594.1 nm (Thorlabs Inc.)の He-Ne レー



図5 制御された固化による無気泡固体燃料層形成実証に用いた 試料.ガラス板の間にエアロゲル材を充填している試料と 充填していない試料の2種類用意した.数10mKの誤差を 持つ Cernox<sup>™</sup> 温度センサーを銅ブロックに取り付けてい る.温度勾配は上部銅板に取り付けたヒーターにより発生 させる(文献[29]からの引用).



図6 屈折率評価のための干渉計測系(文献[29]からの引用).

ザーを使用し波長の依存性について評価する.各光線はエ キスパンダーにより拡大され,その半分はプリズムを透 過,残りの半分はプリズム外を進み,イメージングレンズ 系を経由し最終ミラー系で干渉像が形成される. 屈折率は次の式で評価ができる.

$$l_{\rm sol}/l_{\rm lig} = (n_{\rm lig} - 1)/(n_{\rm sol} - 1)$$
(1)

ここで $l_{liq} \ge l_{sol}$ はそれぞれ液相と固相で測定された干渉縞 間隔を表している.また $n_{liq}$ , $n_{sol}$ はそれぞれの屈折率であ る.今回使用した干渉計測系では $l_{sol} \ge l_{liq}$ の比の情報しか 得ることができないため、液相での測定によって得られた 情報を過去の研究[32]で既知の $n_{liq}$ に近似し、固体の屈折 率を評価した.また屈折率は波長に依存するため次の経験 式[33]を使って屈折率の波長依存性を考慮し必要な評価を 行った.

$$n_{\rm lig} - 1 = a \times \lambda^{-0.062} \rho_{\rm lig} \tag{2}$$

ここで *a*, *λ*, *ρ*<sub>liq</sub> はそれぞれ近似係数, 光源の波長, 液体 水素の密度である.

#### 2.3.3 固体水素の屈折率測定と残留気泡率の評価

初めにエアロゲル材を充填していないプリズムを使用し て固体水素の屈折率測定を行った.本実験の屈折率測定は すべて飽和蒸気圧下で行われている.固体水素内に気泡を 発生させないためにエアロゲルプリズムと同様の固化手順 を採用した.プリズムに液体水素を充填した後,ヒーター を使用して上下の銅ブロックに0.33Kの温度差を付けプリ ズム全体の温度を徐々に固化温度以下に冷却した.この実 験では冷却ヘリウムガスの温度が 13.60 K になったとき下 方から固化が始まり,温度の低下と共に固化が上方に広 がった.この時,液体と固体の境界ではその密度差による 干渉縞の変化を観測することができた.図7に成功した固 化制御の一例を示す.供給ガスはノーマル水素(オルソと パラの存在比は75:25)であり、今回の実験では触媒を通 さず常温から極低温へ急激に冷却するため、冷却後はその 温度での存在比になるようオルソ水素からパラ水素への変 換が徐々に起こる. 屈折率の測定温度領域ではオルソ:パ ラの存在比は 0.2:99.8 である. そのため, 安定した物性測 定を行うためにはその存在比になるのを待たねばならな い. そこで、冷却固化後の屈折率の時間変化を測定した. 図8に固化直後からの屈折率の時間的な変化を示す.測定 温度の存在比へと変換が終了し、屈折率が一定になるまで に約1日が必要であった.その後,上下の銅ブロックの温 度差を維持したまま、その平均温度で約11Kまで固体水素 の屈折率を測定した.次に,温度を上昇させ固体から液体 への転移の後,約16Kまで液体の屈折率測定を行った.全 測定の後、固体の屈折率を再度測定し屈折率の測定結果に オルソーパラ変換の影響がないことを確認した.

図9に二つの波長に対する固体パラ水素の屈折率を示 す.先に述べたように本実験では液相と固相の屈折率の比 のみが評価可能であるため,液相での測定結果が過去の測 定結果[32,33]と一致するように調整している.液相での 屈折率の温度依存性はその参照した過去の測定結果と一致 しており,それは我々の測定方法に問題がないことを示して いる.一方,固相では我々の測定結果と Perera らが測定し た屈折率:1.132(6.0 K,~630 nm),1.139(7.5 K,632 nm) [34]とは矛盾はないように思われる.それにも関わらず屈



図7 エアロゲル材が充填されていないプリズム内での制御され た固化の様子.液相と固相の界面で干渉縞のギャップが観 測された(文献[29]からの引用).

折率の温度の依存性に関しては,彼らの主張:屈折率には 温度依存性が見られる,とは異なり我々の測定範囲では屈 折率には温度の依存性がないように見える.ローレンツ-ローレンツの式によると

$$\frac{M(n^2-1)}{\rho(n^2+2)} = \frac{4}{3}\pi N_{\rm A}\alpha \tag{3}$$

屈折率 n は密度  $\rho$  と分極率 a の関数である.ここで M と  $N_A$  は分子量とアボガドロ数である.密度は温度の低下と 共に上昇し、分極率は密度の上昇と共に、すなわち温度の 低下と共に減少する[35].この両者の特性が打ち消し合 い、固体水素の屈折率に温度依存がみられなかった可能性



図8 オルソーパラ変換による屈折率の時間的変化.代表して波 長632.8 nmの測定結果が示されている.値が一定になった 後,屈折率測定を行った(文献[29]からの引用).

がある. 測定結果より11~13 Kの範囲で分極率を計算して みると,両光源について $0.81 \sim 0.82 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の範囲であっ た. これは van Straaten らによる評価[36]と矛盾していな い. このように我々の測定結果は妥当であることが確認で きた.

次にエアロゲルプリズムを使用した実験を行った. 同様 に室温におかれた水素を冷却し,エアロゲルプリズム内に 液体水素を満した後,上下の銅ブロックに 0.39 K の温度差 を発生させ,その温度差を維持したま冷却へリウムガスの 温度を固化温度以下に徐々に低下させた.固化の制御はエ アロゲルプリズムにおいても成功し,その冷却へリウムガ ス温度が 13.78 K の時に下方から固化が始まった.制御さ れた固化の先端が上方に進展している様子を図10に示す. その固化が進展する速度を観測すると~0.005 mm/sec で あった.Lucas-Washburn の式[37]によると実験に使用 しているエアロゲル材中での液体水素の浸透速度は



図10 エアロゲルプリズム内を制御された固化が進展する様子. 液相と固相の界面で密度差が観測できる(文献[29]からの 引用).



図 9 99.8% パラ水素の屈折率.(a)液相の屈折率,594.1 nm と632.8 nm の波長に対する測定結果を過去の研究と比較[32,33],(b)固相の屈折率,文献[34]の測定値を比較として示している(文献[29]からの引用).

~0.28 mm/sec であると予想されるが、これは実験で観測 された固化の進展速度を上回っている.この結果から残留 気泡発生の抑制に必要な液体量が固液界面に供給されてい たことが期待できる.また、干渉計でも液体と固体の界面 が観測されているが、これは密度差分の液体水素が固液界 面に供給され、その界面では固体の密度に変化しながら固 化が進展していることを示している. このように我々の手 法が残留気泡の抑制に有効であることが実験的にも確認で き, エアロゲル材内に無気泡の固体水素を形成できる可能 性を示すことができた.この後、オルソーパラの変換が完了 するのを確認し、パラ水素の屈折率測定を行った。図11に 固化完了後から1日間の屈折率の変化について観測した結 果を示す. 図中では 240 min の時点で屈折率の飛びが見ら れるが、これは干渉計を再調整したためであり、物性の変 化が反映されたものではない. この点を除くと屈折率はほ ぼ一定の値を示している.これは,安定な屈折率測定が可 能になるまでに冷却後約1日間必要であった固体水素のみ の場合とは異なる結果となっている.実験に使用している エアロゲル材はオルソーパラ変換の触媒として知られる活 性炭と類似した化学組成や構造を有しており、エアロゲル 材自身がオルソーパラ変換の触媒として機能した可能性が 考えられる[38]. その結果ノーマル水素がエアロゲル材に 満たされると速やかにオルソーパラ変換が完了したと推測 できる. エアロゲル材中に存在する固体パラ水素の屈折率 測定は先ほどと同様の手順で行った.

図12にエアロゲル材中に形成された固体パラ水素の見かけの屈折率測定結果を図9(b)の固体パラ水素の屈折率と比較して示す.全体的にパラ水素単体の屈折率より低い値となっている.これは密度が低い固体水素すなわち微量の気泡が含まれている固体水素が形成されている可能性があることを示している.その二つのプリズムで測定された屈折率の差からエアロゲル材中の固体の充填率kを評価することができる.

$$k = \frac{n_{\rm sol2} - 1}{n_{\rm sol1} - 1} \tag{4}$$

ここで *n*<sub>sol1</sub>, *n*<sub>sol2</sub> はそれぞれエアロゲル材が充填されて いないプリズムと充填されているプリズムで測定した屈折 率である.評価の結果,今回の実験では充填率として約 99%を達成していることがわかった.エアロゲル材を含浸 している固体水素中に約1%の気泡が残留している可能性 はあるが,温度制御を行わず固化を実行した場合に予測さ れる充填率89%と比較すると大幅に改善されていることが わかる.このように我々の提案している手法は気泡の発生 の抑制に有効であることがわかった.

先に評価した充填率は測定期間のうち前半に行われた測 定を基に評価を行った結果である.しかし後半の測定結果 による評価では若干高い充填率になる.ここではその点に ついて考察する.固相の屈折率は13.3 K から,11.2 K まで 温度を下げながらある温度間隔で測定され,その後,再度 13.5 K まで温度を上げながら数点測定された.固相の屈折 率測定終了後に液相の測定を行っている.全ての測定を終



図11 エアロゲルプリズム内に形成された固体水素の屈折率の時 間変化.代表して波長632.8 nmの測定結果が示されている (文献[29]からの引用).



図12 エアロゲル材中に形成された固体パラ水素の見かけの屈折率の測定結果.図9(b)の固体パラ水素の屈折率と比較している.代表して波長 632.8 nmの測定結果が示されている.(1)→(2)→(3)の順序で温度を変化させながら固相での屈折率測定を行った後,液相の測定(4)を温度を上げながら行った.◆は 13.3 K から温度を低下させながら測定した結果,◇は 11.2 K から温度を上げながら測定した結果(文献[29]からの引用).

了するまでに約8時間かかった.以上の点を考慮して固相 の測定結果を見ると,時間の経過または熱サイクルが固相 の屈折率を上昇させているようにみえる.屈折率が変化す る原因として二つの可能性が考えられる.一つ目はプリズ ムの状態に依存している.実験中はプリズムの温度勾配を 維持しており,時間の経過とともにその温度勾配に従って 残留気泡を埋めるように固体水素の再配分が起こっている 可能性が考えられる.二つ目は,固体水素で含浸されたエ アロゲル材が熱サイクルにより何らかの機械的な変化を起 こしている可能性である.いずれにしても,屈折率が変化 する原因は明らかではなく、今後さらなる研究を必要とす る

# 2.4 ターゲット形状への応用のためのシミュレーション

前章において実証に成功した固化手順を FIREX ター ゲットの形状へ応用する方法を検討する. これまでにいく つかのグループが中心点火用ターゲットを対象として, シェル内の固体燃料の温度を外部から制御する方法につい て検討してきた.NIFの間接照射ターゲットでは二つの容 器で構成されているホーラム部の、その二つの容器間で温 度差を発生させ容器内の冷却ガスに温度勾配を付けること で燃料部の温度制御に成功している[39].LLEでは フォームターゲットの温度制御について研究を行っている [40].液体と固体の密度差が原因で固体中に形成された気 泡とそれに伴うシェルの不透明化が問題となっている. 固 化時の冷却速度の最適化によりそれらの改善を試みている が、未だに無気泡固化の成功には至っていない. このよう に中心点火用のターゲットに関しては冷却ガスの温度制御 がターゲットの温度を制御する唯一の方法である.一方, 高速点火用ターゲットにはコーンガイドが取り付けられて おり、シェル内に温度勾配を発生させるには有利な構造で ある. これまでに PS シェルターゲットに対するコーンガ イド加熱法の開発を行ってきたが、その技術を応用しエア ロゲルプリズムと同様の温度勾配を実ターゲットのシェル 内に実現可能かどうか検討する.

今回のシミュレーションには解析ソフトウェアの AN-SYSを使用した.実験と同様に代替燃料のH<sub>2</sub>を仮定してい る.H2の潜熱を考慮することで相変化の計算が可能にな る. 温度変化や燃料の相変化に伴う機械的な特性の変化に ついては考慮しない.図13に FIREX ターゲットの軸対象 モデルを示す. モデルの簡素化のために燃料充填管は省略 されている. ターゲットは周囲のヘリウムガスによる自然 対流で冷却されていると仮定する.熱量の効果について評 価するためにコーンガイドへの入熱を 0.7×10<sup>-5</sup> W から 1.4×10<sup>-5</sup>Wまで変化させる。今回採用した固化制御の過 程は次の通りである.液体のパラ水素がフォーム層に浸透 している状態から計算を始める.冷却ヘリウムガスの温度 を14.0 Kから10.0 Kまで低下させるが、13.5 Kまで 1.4 mK/sec, その後11.8 Kまで13 mK/sec, 最終的に 0.19 mK / sec の冷却速度とした. 計算結果からコーンガイ ドへの入熱と固化の進展速度の関係について議論する.

コーンガイド加熱の結果,固化制御に成功した例を図14 に示す.これは1.4×10<sup>-5</sup>Wの入熱の場合で,固化がシェ ルの底部から始まりコーンガイドに向かって移動している 途中の状態である.今回の仮定では固化の開始から全体の 固化が完了するまでに2300 sec 以上の時間が必要であ る.固化の進展速度はコーンガイド直近では0.00024 mm/ sec,シェルの底部では0.00037 mm/sec であり,これは毛 細管現象による液体水素の浸透速度(~0.28 mm/sec)と比 較して十分遅い.よって残留気泡の発生を抑制するために 必要な液体水素量が供給可能である.一方,0.7×10<sup>-5</sup>W の加熱ではコーンガイド直近で0.00026 mm/sec,シェル底 部で0.00037 mm/secである.高熱入力はコーンガイド付近



図13 FIREX フォームターゲットの軸対称シミュレーションモデル.シェルの熱伝達率は対流による角度依存が考慮されている[19].最下部から30度間隔で次の熱伝達率を仮定している:83 W/m<sup>2</sup>K,75 W/m<sup>2</sup>K,67 W/m<sup>2</sup>K,58 W/m<sup>2</sup>K,42 W/m<sup>2</sup>K,17 W/m<sup>2</sup>K.コーンガイドの熱伝達率は0.44 W/m<sup>2</sup>Kとした(文献[29]からの引用).



図14 コーンガイド加熱法による固化制御の成功例.図は冷却開 始後 8800 sec の温度分布を示している.コーンガイドへの 熱入力は 1.4×10<sup>-5</sup> W である.点線は液相と固相の境界を 示しており温度の低下と共にコーンガイドに向かい移動す る(文献[29]からの引用).

での固化進展速度を遅くする効果があることがわかる.シ ミュレーションの結果から判断するとコーンガイド加熱法 は固化の進展速度を効果的に制御可能であり、プリズム形 状により実験的原理実証に成功した無気泡固化の手順を FIREX ターゲットの形状にも応用可能であることが示さ れた.

#### 2.5 フォームシェルの燃料充填量評価手法の開発

これまでに開発を行ってきた燃料充填量評価手法につい て簡単に述べる.実験では直径800 µm,フォーム層の厚さ 60 µm の試作フォームシェル(ゼネラルアトミクス社製) を取り付けたターゲットを使用した.また代替燃料のH2 を使用した実験である.まず初めにフォームシェルに液体 水素を充填している様子について図15に示す(図15は文献 [41]に記載されており、そこからの引用である.また 図16(a)-(c)も同様である).(a)は充填前のシェル,(b) はフォーム層にほぼ100%液体水素を充填したと思われる シェルである.(c)は液体水素を過剰に充填した状態で コーンの周りにメニスカスを観測できる. (d)は(b)の状 態から温度を下げフォーム層内の水素を固化した後,24時 間経過した状態である.(a)と(b)を見比べると液体水素 の充填によりフォーム層部の透過光が変化しているのがわ かる.しかし、このわずかな変化から燃料の充填量を評価 することは困難である. またフォーム材中に液体状燃料を 充填する過程では、毛細管現象によりほぼ均一に広がりな がら燃料の浸透が進むため、気層と液層の界面を確認する などの充填量を直接評価する方法を利用することはできな い. そこで、フォーム層内に充填された燃料の状態変化に 伴い屈折率が変化することを利用した燃料充填量の評価方 法を検討している.図15の各状態に対応して観測した干渉 パターンを図16に示す.評価方法の詳細は文献[42]に詳し く説明されているので省略し、簡単に結果だけを紹介す る. まず初めにこのフォームシェル自体の屈折率すなわち フォーム材(真空と基材の複合材)の屈折率を評価した結 果, 1.078 であった. 一方, ローレンツ―ローレンツの式か ら計算した屈折率は1.068であり,両者に矛盾はない.次に 固体水素がほぼ100%フォーム層に充填されている場合 (図16(d))について評価すると,その屈折率は1.197であっ た.この評価結果は約10%の誤差を含んでいる.一方,固 体水素の屈折率1.136と先ほどのフォーム材の屈折率1.078 から複合則により固体水素が100%充填されたフォーム材 の屈折率を計算すると1.196になる.このように固体水素 がフォーム層に100%充填されている状態を実験的に評価 することができた.いくつかの不確実性を含んでいるが, フォーム層を含浸している固体燃料の量を評価する手法と して本手法は有効であることが示された.今後はフォーム シェル寸法などの測定精度向上を含めて,レーザー核融合 実験に必要な精度である1%以内の評価誤差をめざして開 発を継続する.

#### 2.6 フォーム法のまとめ

FIREX フォームクライオジェニックターゲットの固体 燃料層形成手法および燃料層評価手法の研究開発の成果と 課題を以下にまとめる.

フォーム(エアロゲル)シェル内への無気泡固体燃料形 成手法の研究開発では次の成果を得た.

- 温度差を利用した固化制御による無気泡固化手法を提案し、エアロゲルプリズムと代替燃料のH2を使用した 原理実証実験に成功.気泡率を~1%まで低減できた.シェル材料の研究開発と連携しながらこの残留気 泡率1%の原因究明と無気泡固化の実現をめざした研究を継続して行う.
- 2) 原理実証に成功した環境を FIREX フォームシェル ターゲット内に実現可能であることが ANSYS を使用



(a)空のフォームシェル



(b)フォーム層へほぼ100% 液体水素充填



(c)メニスカス観測



(d) 固化後24時間

図15 800 µm 試作フォームシェルターゲットへの液体・固体水素充填の様子(文献[41]からの引用).



(a)空のフォームシェル



(b)フォーム層へほぼ100% 液体水素充填



(c)メニスカス観測



(d)固化後24時間

図16 800 µm 試作フォームシェルターゲットへの液体・固体水素充填時の干渉パターン. 波長 632.8 nm の光源((a)-(c)は文献[41]から, (d)は文献[19]からの引用).

したシミュレーションにより証明され, 無気泡固体燃料層形成に必要な冷却条件などが明らかになった. その条件に従い実機 FIREX フォームシェルターゲットへの無気泡固体燃料層形成の実験的実証を今後行う予定である.

3)気泡率評価に関連する計測により 99.8% 固体パラ水素 の屈折率の測定を行った.

次に燃料層評価手法の研究開発については、これまでに フォームシェル内に形成された固体水素の屈折率からその 充填量を評価する予備実験を行い、この手法が充填量の評 価に有効であることを示した.今後も研究を継続するとと もに、必要な基礎研究を発展させる.

#### 3. コーンガイド加熱法の実証研究

第2章ではフォーム法に関する成果について述べた.実 験およびシミュレーションによりフォームシェル内にほぼ 無気泡の固体燃料層を形成する技術が実証された.フォー ム法では,燃料層の均一性や燃料の充填量はフォームシェ ル自体の形成の正確さに依存する.現在,米国では直径数 mmのフォームシェルの大量生産技術が確立され製品とし て販売されているが,レーザー研で必要とする直径500 µm のフォームシェルについては米国では開発が行われていな い.シェルの小型化に伴い必要な技術はより高度になるた めレーザー研では独自の研究開発を行っている.しかし高 い正確さと同時に高精度のフォームシェルの大量生産技術 は開発半ばである.そこで,米国の中心点火用ターゲット と同様にプラスチックシェル内に必要な燃料層を直接形成 する技術開発を並行して行っている.

中心点火用ターゲットでは球対称性と燃料自身の発熱 (ベータ線や赤外線加熱)を利用して固体燃料層の均一 化を行っている.シェルの冷却状態が均一であることが求 められる方法であり,その不均一性はそのまま燃料層の不 均一性となることがわかっている.一方,高速点火用ター ゲットには燃料を納める球形シェルにコーンガイドが取り 付けられているため球対称性が崩れ軸対称となっている. よって,球対称性を持つターゲット用に開発された技術を 直接使用することができない.そこで,コーンガイド加熱 を利用した燃料層形成技術を提案し,その研究開発を行っ てきた.本章では,試作ターゲットを使用した実証実験の 成果について述べる.

### 3.1 コーンガイド加熱を利用した新しい燃料層形成手法 の提案

コーンガイド加熱を利用した新しい燃料層形成手法を提 案する.図17によりその手順を説明する(図17は文献[43] からの引用.図18,19も同様.).Step1:液体燃料をシェ ル内に導入する.表面張力の効果でコーンガイド周囲のみ に局在する状態になる.その後,固化.Step2:固体燃料の 移動に必要な温度差(飽和蒸気圧差)を発生させるために 外部からコーンガイドを加熱する.固体燃料は暖かいコー ンガイド周辺で昇華し、シェル内へと拡散、温度が低く飽 和蒸気圧も低い場所で再固化する.シェルがほぼ均一に冷 却されていればコーンガイド周辺を除きほぼ均一な燃料層 が形成される. Step 3: 固体燃料がなくなったコーンガイ ド周囲に燃料を供給する. 液化温度まで温度を上昇させ コーンガイド周辺から燃料充填管内までを液体状態とし必 要な量の液体燃料を追加,その後温度を下げ再固化させ る. この作業中 Step 2 で形成された固体燃料層はそれ自体 の熱容量によりその状態を維持している. 必要な燃料層に なるまで Step 2 ~ Step 3 を繰り返す.

#### 3.2 コーンガイド加熱法実証実験

#### 3.2.1 実験条件

本実験に使用した試作 PS シェルターゲットの写真を 図18に示す.ターゲットは直径2mmのPSシェル,金製 コーンガイド,ガラス製燃料充填管で構成されている.重 力に対する軸対称性を維持するためにコーンガイドはシェ ルに対して垂直上方に配置した構成となっている. ター ゲットは計測用ガラス窓付きの冷却装置[31]に取り付けら れヘリウムガスにより冷却される. ターゲットを納める容 器には温度可変型のふく射シールドが取り付けられてお り、その温度を制御することで冷却ヘリウムガスの温度を 制御している.外部に置かれた5mW He-Ne レーザー光線 がガラス窓を通してコーンガイドを加熱する. その加熱エ ネルギーを調整するため、減光フィルターのND20とND30 を直列に挿入した。さらに電気制御式シャッターの開閉時 間の調整によりレーザー光の照射を間欠的に行い加熱量の 調整を行った。今回の実験ではシャッターの開閉時間をそ れぞれ7秒と5秒とした。第2章と同様の理由で代替燃料 としてH2を使用して実験を行った. 今回の実験条件ではオ ルソーパラ変換による発熱は他の熱源と比較して小さく, 実験結果に影響しない程度である.

#### 3.2.2 燃料層形成実証実験

試作ターゲットを使用した原理実証実験について述べ る.図17で提案した各Stepを実験的に実証した結果が図19 に示されている.水素ガス供給・液化時に温度可変シール ドの温度は13.40 K に制御されていたが、この値はすでに 三重点以下であるため、シェル内の温度とは一致していな いと思われる. PS の熱伝導率が低く, その熱抵抗により温 度差が生じていることが理由として考えられる.よって, 本実験に関する温度情報は目安として参照していただきた い.水素ガスの供給圧を三重点における飽和蒸気圧を超え る程度に上昇させるとコーンガイドの周りに液体水素が充 填され始め、メニスカスを観測できる. その液体水素の塊 が重力の影響を受けシェル下部へと移動しない程度まで水 素を充填する.次に冷却ガス温度を13.20Kに下げ,その状 態を維持しながら水素全体の固化を完了させた(図19(a) 参照).透明な固体水素が形成されているのがわかる. コーンガイドのレーザー加熱中に固体が融解するのを避け るため冷却ガス温度を13.10 K に制御しながら、先に述べ た条件でレーザー光を間欠的に照射した. 図19(b)と(c)は 2回目のStep 2 (図17の(b)と(c))の状態を示してい る. コーンガイド加熱の結果, コーンガイド周辺の固体水 素が昇華し、シェル内へとほぼ均一に拡散・固化している 様子がわかる.その空いた周囲に固体水素を追加するため に、冷却ガス温度を13.40Kへと再度昇温し液体水素を供



図17 コーンガイド加熱を利用した新しい燃料層形成手法.ター ゲットは周囲のヘリウムガスにより冷却され、各 Step では 必要な温度に制御される(文献[43]からの引用).



図18 直径2mmPSシェル付き試作ターゲット (文献[43]からの 引用).

給後,13.20 K に再冷却し全体を再固化させた.図19(d)は その結果を示しているが,液化温度への昇温,再冷却後も 固体水素はほぼそのままの外見を維持していることがわか る.また図19(c)と(d)を比較すると,この昇温過程は水素 の氷の表面を平滑化する効果も期待できる.必要な水素層 厚さの形成はStep 2 ~ 3 を繰り返すことで可能になる.最 終的に形成された固体水素層が図19(e)に示されている. 今回の場合,液体水素再充填を4度繰り返し,全工程は8 時間であった.屈折率を考慮せず写真を基に直接測定した 結果,固体層の厚さは132~223 µm であった.コーンガイ ド直近では水素層厚の不均一性が目立っているが,これは 燃料充填管の挿入や組立時の接着剤により表面エネルギー が変化しているためであると思われる.その表面エネル ギーの不均一が液体水素の充填時に水素層厚の違いを生み、最終的な結果にも影響しているようである.仮にその 影響部分を無視すると固体水素層厚さは155~192µmの範 囲に収まる.内面の欠陥などについては同様に約30µm であると評価した.今回の実証実験では必要な仕様を満た す精度で固体水素層を形成することができなかったが、軸 対称性を持つターゲットに対して均一な燃料層を形成する 手段としてコーンガイド加熱法は有効であることが実証さ れた.

#### 3.3 燃料層の評価手法

PS シェル内に形成された燃料層の評価については米国 で研究開発が行われている方法を応用可能だと考えてい る. これまでLLEのOMEGAやNIFに供給されているター ゲットのうち可視光による光学計測が可能なシェルについ てはシャドウグラフ法[16], NIF 用ターゲットのようにベ リリウムがコーティングされた不透明なシェルについては X線位相コントラスト法[17]による評価が行われている. LLEではサブミクロン精度の解像度をもつシャドウグラフ 法を開発している.一つの光学系によりシェルの異なる角 度から撮影した複数のシャドウグラフ画像を再構成するこ とでシェル全体の不均一性を3次元的に確認できる評価手 法の開発に成功している. その成果, 燃料層全体の均一性 の評価は2次元的な計測のみでは不十分であることが明ら かになっている.またNIF用のターゲット評価ではX線位 相コントラスト法により 0.4 µm (二乗平均平方根 RMS) の 表面荒さの計測に成功しており、レーザー実験に必要な仕 様を満たしたターゲットの選択・供給が行われている.

一方,高速点火方式用ターゲットはコーンガイド自体が 最大の不均一性の要因となっており,中心点火方式と比較 して燃料層に必要とされる均一性が緩和される.高精度計 測が必要な中心点火方式用に開発された上記方法をそのま ま FIREX ターゲット用に転用可能なはずである.このよ うに中心点火方式用ターゲットのために開発された手法で はあるが,フォームシェルを使用しない FIREX ターゲッ トでは同様の計測技術を使用することができると考えてお り,現状ではその他新たな燃料層評価手法について検討を 行っていない.

#### 3.4 コーンガイド加熱法のまとめ

我々独自のアイデアにより研究開発を行っているコーン ガイド加熱法について直径2mmPSシェル試作ターゲット



図19 図17において提案した各 Step を実験的に実証した.(a)水素充填後固化した様子.コーンガイド周囲のみならず全体的に薄い固体水 素層が形成されているのがわかる.(b)2回目のコーンガイド加熱,(c)コーンガイド周囲からシェル内へ固体水素が移動した後の 様子,(d)コーンガイド周囲に液体水素を追加後,再固化した後の様子,(e)4回の液体水素充填後,最終的に形成された固体水素 層(文献[43]からの引用).

を用いた原理実証実験を行い、次の成果を得た.

コーンガイドの加熱にレーザー光を利用した実証実験を 行った.レーザー光による加熱は燃料層の再配分に必要な 温度差をシェル内に発生可能であることがわかった.

PS シェル内に均一な燃料層形成するために我々が提案 した手順の実証実験を行い,直径 2 mm のシェル内に厚さ 155~192 µm,表面荒さ約 30 µm 以下の均一性を持つ固体 水素層の形成に成功した.

このようにコーンガイド加熱による PS シェルターゲッ トへの均一燃料層形成の原理実証に成功した.今後は直径 500 µm PS シェルが取り付けられた実機 FIREX ターゲット への技術移転を検討し,その実証実験を行う予定である. また,米国などで開発された燃料層評価手法を FIREX ターゲットに応用するための検討を開始する.

## FIREX 用クライオジェニックターゲット開発 のまとめと今後の計画

レーザー研と核融合研は2003年度から開始した双方向型 共同研究により FIREX クライオジェニックターゲットへ 応用するための二つの燃料層形成手法:フォームシェル法 およびコーンガイド加熱法,について研究開発を行ってい る.これまでに,両手法の原理実証実験に成功し,その技 術をレーザー実験へ供給される実ターゲット用に調整する 最終段階に至っている.このように,双方向型共同研究の 枠組みより両研究機関の経験,知識,人材や装置を有効に 利用した結果,クライオジェニックターゲットの研究開発 は順調に進んでいる.今後も現状の協力体制の下,形成さ れた燃料層の評価方法の開発も同時に発展させながら,関 連する基礎研究と共に燃料層形成手法の研究開発を継続す る.数年後にはクライオジェニックターゲットをレーザー 実験に供給することをめざしている.

次に、レーザー実験へのターゲット供給を実現するため に専用装置の開発を開始する.これまでは核融合研に設置 したオフサイトのターゲット冷却専用装置においてター ゲット開発を行ってきたが、レーザー実験に使用するター ゲットはレーザー研に新たに建設される予定の専用装置で 冷却・燃料層形成が行われることになる.その装置では レーザー照射まで実行可能な機能が求められる.また、オ フサイトの冷却専用装置とは異なり使用できる空間が限ら れるため、温度や圧力の複雑な制御を実現する構造ではな く単純化された装置である必要がある.クライオジェニッ クターゲットの燃料層形成の原理実証が終了したことを受 け、これまでにオフサイトで研究開発を行ってきた技術を 簡略化し建設予定のレーザー実験専用装置に移転するため の検討を開始すると共にその装置の設計を開始する.

さらに必要な仕様を満たしたターゲットの安定供給を実 現するために次の課題についても検討を開始する.

 大量生産された数多くのシェルからよいものを選択で きる常温使用の重水素化シェルターゲットとは異なり、固体燃料層を形成したターゲットをそのまま実験 に使用しなければならないクライオジェニックター ゲットは必要な仕様を満たしていない場合があること が予想される. そこで,固体燃料層を形成した後に仕様を満たしていないことが判明したターゲットに対して,その燃料層を必要な仕様に合わせ再調整する技術の開発が必要である.

2)本研究の成果により FIREX クライオジェニックター ゲットのシェルとして必要な条件が明らかになってきた. シェル自体の完成度は燃料層の均一性にも影響するた め、これまでのシェル開発の視点[44]から一歩進み、 燃料層形成技術とシェル材料の研究開発を同期させ ターゲットの完成度を高める.

#### 5.謝辞

シェル材料の構造に関するコメントをいただきました東 京工業大学の長井圭治准教授, RF エアロゲルの SEM 写真 を提供していただきました大阪大学レーザーエネルギー学 研究センターの藤本靖博士に感謝いたします.

#### 参考文献

- [1] R. Kodama *et al.*, Nature **412**, 798 (2001).
- [2] H. Azechi et al., Nucl. Fusion 49, 104024 (2009).
- [3] K. Mima *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 52, 124047 (2010).
- [4] H. Shiraga *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 53, 124029 (2011).
- [5] S. Fujioka *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **54**, 124042 (2012).
- [6] T. Nakamura et al., Phys. Plasmas 14, 103105 (2007).
- T. Johzaki *et al.*, *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, Republic of Korea, 11-16 October 2010) IFE/P 6-01 (2010).
- [8] L.J. Atherton, J. Phys. Conf. Ser. 112, 032063 (2008).
- [9] T.C. Sangster et al., Phys. Plasmas 14, 058101, (2007).
- [10] J.D. Lindl, Nucl. Fusion 51, 094024 (2011).
- [11] T.C. Sangster et al., Nucl. Fusion 47, S686 (2007).
- [12] J.K. Hoffer and L.R. Foreman, Phys. Rev. Lett. 60, 1310 (1988).
- [13] A.J. Martin et al., J. Vac. Sci. Technol. A6, 1885 (1988).
- [14] D.N. Bittner et al., Fusion Technol. 35, 244 (1999).
- [15] G.W. Collins et al., J. Vac. Sci. Technol. A14 2897 (1996).
- [16] D.H. Edgell et al., Fusion Sci. Technol. 49, 616 (2006).
- [17] D.S. Montgomery et al., J. Phys IV France 133, 869 (2006).
- [18] R.A. Sacks and D.H. Darling, Nucl. Fusion 27, 447 (1987).
- [19] A. Iwamoto et al., J. Phys. Conf. Ser. 112, 032067 (2008).
- [20] J.K. Hoffer et al., Fusion Sci. Technol. 50, 15 (2006).
- [21] P.C. Souers, Hydrogen Properties for Fusion Energy (Berkeley: University of California Press, 1986) p.80.
- [22] F. Ito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45, L335 (2006).
- [23] K. Nagai et al., Nucl. Fusion 45, 1277 (2005).
- [24] T. Fujimura et al., J. Phys. Conf. Ser. 244, 032038 (2010).
- [25] K. Nagai et al., Nucl. Fusion 49, 095028 (2009).
- [26] H. Homma et al., Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Republic of Korea, 11-16 October 2010) IFE/P 6-27 (2010).
- [27] T. Fujimura et al., Plasma Fusion Res. 4, S1010 (2009).
- [28] 乗松孝好ら: プラズマ・核融合学会誌 85,755 (2009).
- [29] A. Iwamoto *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 083009 (2013).

- [30] A. Iwamoto et al., Plasma Fusion Res. 6, 240407 (2011).
- [31] A. Iwamoto et al., Fusion Eng. Des. 81, 1647 (2006).
- [32] D.E. Diller et al., J. Chem. Phys. 49, 3096 (1968).
- [33] P.C. Souers, *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (Berkeley: University of California Press, 1986) p.70.
- [34] M. Perera *et al.*, Optics Letters **36**, 840 (2011).
- [35] B.A. Younglove, J. Chem. Phys. 48, 4181 (1968).
- [36] J. van Straaten J and I.F. Silvera, Phys. Rev. B **37**, 1989 (1988).
- [37] E.W. Washburn, Phys. Rev. 17, 273 (1921).
- [38] C.A. Swenson, J. Chem. Phys. 18, 520 (1950).
- [39] J.D. Moody et al., J. Phys. IV France 133, 863 (2006).
- [40] H.R. Harding et al., LLE Review 114, 57 (2008).
- [41] A. Iwamoto *et al.*, *Proc. 21rd IAEA Fusion Energy Conference* (Chengdu, China, 16-21 October 2006), IF/P5-1 (2007).
- [42] T. Fujimura et al., J. Phys.: Conf. Ser. 112, 032066 (2008).
- [43] A. Iwamoto et al., J. Phys.: Conf. Ser. 244, 032039 (2010).
- [44] 長井圭治ら: プラズマ・核融合学会誌 80,626 (2004).