The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高速点火レーザー核融合用フォームクライオターゲットの開発に関する研究
Author(s)	藤村, 猛
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27631
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

工甲 14940

高速点火レーザー核融合用
フォームクライオターゲットの開発に関する研究

2011年

藤村　猛

高速点火レーザー核融合用
フォームクライオターゲットの開発に関する研究

2011 年

大阪大学大学院
工学研究科
環境・エネルギー工学専攻
レーザーエネルギー学研究センター
TFT グループ所属
藤村猛

論文概要

この論文は、著者が過去６年間に亘り行った高速点火レーザー核融合用ターゲットの開発に関する研究内容をまとめたものである。

レーザー核融合研究が進むにつれ、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは高速点火方式という独自の方法に注力して研究するようになった。この方式においては燃料容器であるターゲットの形状が特徴的であり、追加熱レーザーのエネルギーを爆縮プラズマの中心部まで届けるために中空球に円錐形のコーンが接着されている構造をとる。このターゲットを完成させるためには中空球を高精度に加工する技術、組立ての技術、燃料を充填するための冷却技術やその計測技術など、従来とは異なる技術が必要となった。

本研究ではフォーム法に注目し、レーザー加工による低密度フォーム球の穴あけ加工技術、組立てた後の常温気密性試験の技術、フォーム内部の固体燃料の充填率についての評価技術、充填率構造のための冷却技術、フォーム内部の燃料の量を測定する技術について開発した。

本論文は７章よりなっている。

第１章（緒論）では、本研究の背景となるレーザー核融合の開発及び、それに関連するターゲットの開発の現状について述べ、レーザー核融合の実現が間近に迫っていることを知らしめた。次に本研究の目的を、日本が先行して行っている高速点火方式のレーザー核融合のためのターゲットに要求される条件（真球性、大きさ、膜厚、評価技術の精度等）についてまとめ、本研究で注目するFIREX-I用フォームクライオターゲットの仕様についてまとめた。最後に本研究の目的が、ターゲットの組み立て技術開発から始め、最終的にはフォーム層内に高密度(充填率99%以上)で固体燃料層を形成する方法の原理実証まで、フォームクライオターゲットに必要な一連の技術の実証研究であることを述べた。

第２章では、レーザー加工による低密度フォーム材料の穴あけ加工についてまとめた。本研究ではフォーム法の材料として有力な候補であるRFフォームの光学的特性及び熱的特性を評価し、その物性値に基づき比較的強度の低いレーザーによるフォームシェルの熱分解加工について述べる。

第３章では組立て方法についてまとめた。フォーム球にコーンと燃料導入管の接着の方法、蒸発防止膜の張り方についてまとめた。さらに組立てた後のターゲットの気密性検査手法の開発について述べる。

第４章では基礎実験として楔形サンプルを使用したフォームに充填される固体燃料の量の評価の研究をまとめた。固体燃料のフォーム材料への充填率を明らかにした。また充填率向上のための燃料層の冷却方法の研究についても述べる。

第５章では作製したフォームターゲットに対し、第４章より研究した充填率向上手法を適用しその実現性について述べる。

第６章では予備実験として第４章、第５章で研究された成果を採用せず、気泡を残した

状態の燃料を充填したフォームターゲットの燃料量の評価研究についてまとめた。レーザーを用いた干渉計測により、充填前と充填後のターゲットの干渉縞を比較、評価することによって燃料の充填率を測定した。

第７章は、これらの研究によって得られた成果をまとめた。

目次

論文概要

第１章　緒論

1－1　レーザー核融合の研究と高速点火方式　1

1－2　高速点火レーザー核融合用ターゲットの一般的仕様　2

1－3　FIREX-I 用フォームクライオターゲット　7

1－4　本研究の目的　8

参考文献　9

第２章　レーザーによる RF フォームの熱分解加工

2－1　はじめに　10

2－2　RF フォームの光学的特性および熱的特性　10

2－3　RF フォーム表面の温度上昇の計算　12

2－4　レーザー加工実験　14

2－4－1　実験方法　14

2－4－2　実験結果　15

2－4－3　考察　18

2－5　まとめ　18

参考文献　20

第３章　組み立て技術の開発

3－1　はじめに　21

3－2　組立て方法の確立　21

3－2－1　コーン、燃料導入管の作製　21

3－2－2　組立て用装置　22

3－2－3　接着剤のフォーム層への浸透　23

3－2－4　組立て　24

3－2－5　蒸発防止膜のコーティング　25

3－3　常温気密性試験方法の開発　26

3－3－1　六フッ化硫黄ガスのパリレン膜透過率測定　27

3－3－2　常温気密性試験測定方法　28

3－3－3　気密性試験時の透過による圧力変化の影響に関する考察　29

3－3－4　気密性試験測定のまとめ　30

3－4　まとめ　30

参考文献 31

第４章　フォーム層に対する高密度固体燃料充填の原理実証
4－1　はじめに 32
4－2　原理 32
4－2－1　屈折率測定と充填率評価 32
4－2－2　充填率向上のための固化方法の原理 35
4－3　実験 37
4－3－1　サンプルの作製 38
4－3－2　実験装置 39
4－3－3　実験手順 44
4－4　実験結果 46
4－4－1　固体水素の屈折率測定 46
4－4－2　フォーム内に充填された水素の屈折率測定 50
4－5　考察 53
4－6　まとめ 56
参考文献 57

第５章　フォームターゲットへの固体燃料の充填実験
5－1　はじめに 58
5－2　実験装置 58
5－3　原理実証用ターゲット 59
5－3－1　冷却時熱応力の検討 59
5－3－2　金コーン付き直径 800μm のフォームシェルターゲット 59
5－3－3　パリレンコーン付き直径 800μm の
フォームシェルターゲット 59
5－4　実験手順 61
5－4－1　金コーン付き直径 800μm のフォームシェルターゲット 62
5－4－2　パリレンコーン付き直径 500μm の
フォームシェルターゲット 63
5－5　実験結果 64
5－5－1　金コーン付き直径 800μm のフォームシェルターゲットによる
プロセス実証 65
5－5－2　パリレンコーン付き直径 500μm のフォームシェルターゲット、
高充填率の固体燃料層の実証 66
5－6　考察 69

5－7　まとめ　70
参考文献　71

第６章　燃料充填量評価方法の開発
6－1　はじめに　72
6－2　評価手法の原理　72
6－3　フォームターゲットにおける評価　74
6－4　考察　77
6－5　まとめ　78
参考文献　79

第７章　結論　80
謝辞　82

業績目録　84

第１章　緒論

1－1　レーザー核融合の研究と高速点火方式

近年世界中でエネルギー問題と環境問題が人類共通の問題であるとの認識の下、この問題解決に向け多くの試みがなされている[1)]。新たなエネルギー源の候補として核融合発電が考えられている。核融合発電は発電中に二酸化炭素を排出せず、原子炉と比較して高濃度放射性物質を排出しない。なによりも核融合発電における燃料は海水中に含まれる重水素、及びLiの核崩壊により生成される三重水素であるため、ほとんど無尽蔵であるといえる。（図１－１）このような理由から核融合発電は理想のエネルギー源であるとして期待されている。

核融合を起こさせる方法の一つとしてレーザーにより燃料を圧縮するレーザー核融合が研究されている[2)]。レーザー核融合では、プラスチック等の低密度低原子番号材料のカプセルに封入された固体 DT 層を持つターゲットに強力なレーザーを照射することによってレーザーアブレーションによる反作用を用いて 1 億気圧の高圧力を発生させる。その結果、燃料ターゲットは中心に向かって爆発的に圧縮し、固体密度の 1000 倍以上の高密度プラズマを生成する。この高密度プラズマの一部が、1 億度の高温に加熱する、または外部から加熱することにより核融合反応を点火させ、その領域から放出されるアルファ粒子と電子の熱伝導によって周りの燃料を順次加熱し、入力レーザーエネルギーの 100 倍以上の高いエネルギー利得を実現しようとするものである[3)]。核融合装置の例を挙げると 2010 年にはアメリカの National Ignition Facility (NIF)が完成し、初めての統合点火実験（点火実験と同じ条件だが 192 本のレーザーは約半分出力に押さえたクライオターゲットを使用した核燃料実験）に成功した[4)]。またヨーロッパでは Laser Mega Joule (LMJ)が建設中であり、NIF とほぼ同様の大型レーザー装置を建設し 2012 年には核融合実験を開始する計画である[5)]。NIF や LMJ は間接照射という方式での核融合における点火を目指している。（レーザーを直接ターゲットに照射する方式を直接照射と呼ぶのに対して、ターゲットをホーラムと呼ばれる高原子番号の容器に入れ、そのホーラムの内側にレーザーを照射し、ターゲットをホーラムからの X 線により圧縮する方式を間接照射と呼ぶ。）

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは、レーザー核融合の直接照射方式の中でも低いレーザーエネルギーで点火することが期待されている高速点火方式の研究が進められている[6,7)]。高速点火方式では加熱用と爆縮用の二種類のレーザー光が必要であり、爆縮用レーザーを用いて圧縮した高温高密度プラズマに加熱用レーザーを投入することで点火燃焼させる（図１－２）。高速点火方式は点火に必要な燃料中心部の圧縮加熱を行わないことから、はるかに小さなエネルギーで同程度のエネルギー利得が得られる可能性がある（図１－３）。当センターでは高速点火実証実験(Fast Ignition Realization Experiment (FIREX))計画[3)]が進められており、現在はこの計画の第一段階にあたる FIREX-I が実施されている（図１－４）。この FIREX-I では既存の爆縮用レーザーGekko XII 号と加熱用のレーザー(10kJ/10ps)[8)]を建設（図１－５）し、これにより燃料を 5 千万度から 1 億度の核融合点火温度へ加熱することを目指している。この段階では、圧縮された燃料の物理的大きさがアルファ粒子の飛程より小さいので核融合点火が起きることはないが点火・燃焼に必要な高い効率の加熱の可否が明らかになる。FIREX-II では爆縮用レーザーの増強を行い、核融合点火の実現を目標としている。

これらの FIREX 計画の成功の先に実験炉を経て将来の商用炉がある。大阪大学レーザーエネルギー学研究センターを中心にこの将来の商用炉のために高速点火レーザー核融合発電プラント(KOYO-Fast)の概念設計を行った[9)]（図１－６）。KOYO-Fast では送電端出力 1200MWe のベースロードプラントを、300 MWe の炉 4 基で構成することを想定している。

この様に日本独自の研究が進められ、比較的低レーザーエネルギーで核融合発電を実現できる高速点火手法に本論文は注目する。

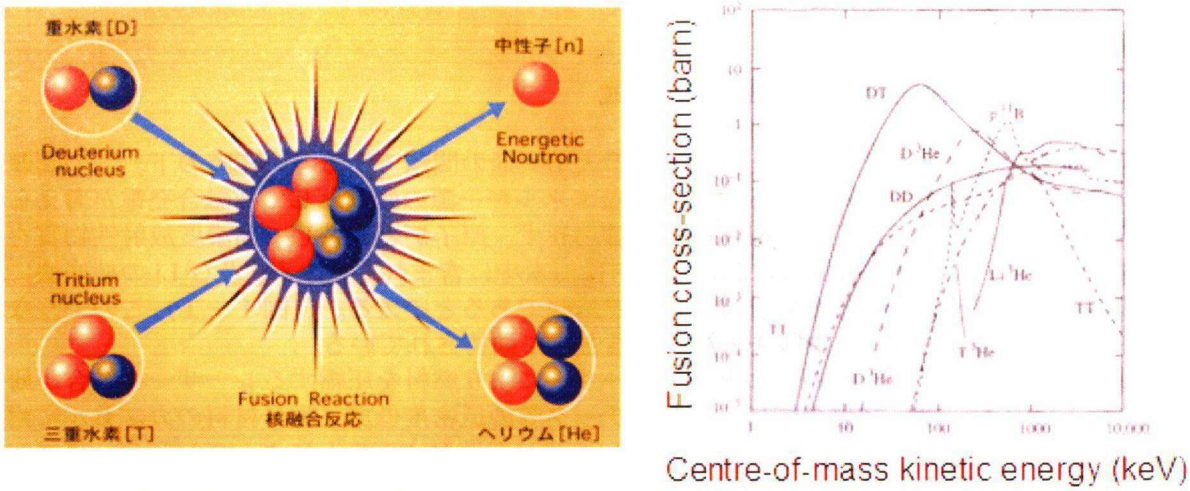


図１－１　核融合反応では、反応前の結合エネルギーと反応後の物質の結合エネルギーの差が核融合エネルギーとしてとりだされる。重水素と三重水素の DT 燃料が最も核融合反応断面積が大きいため（右）、燃料として用いられる。

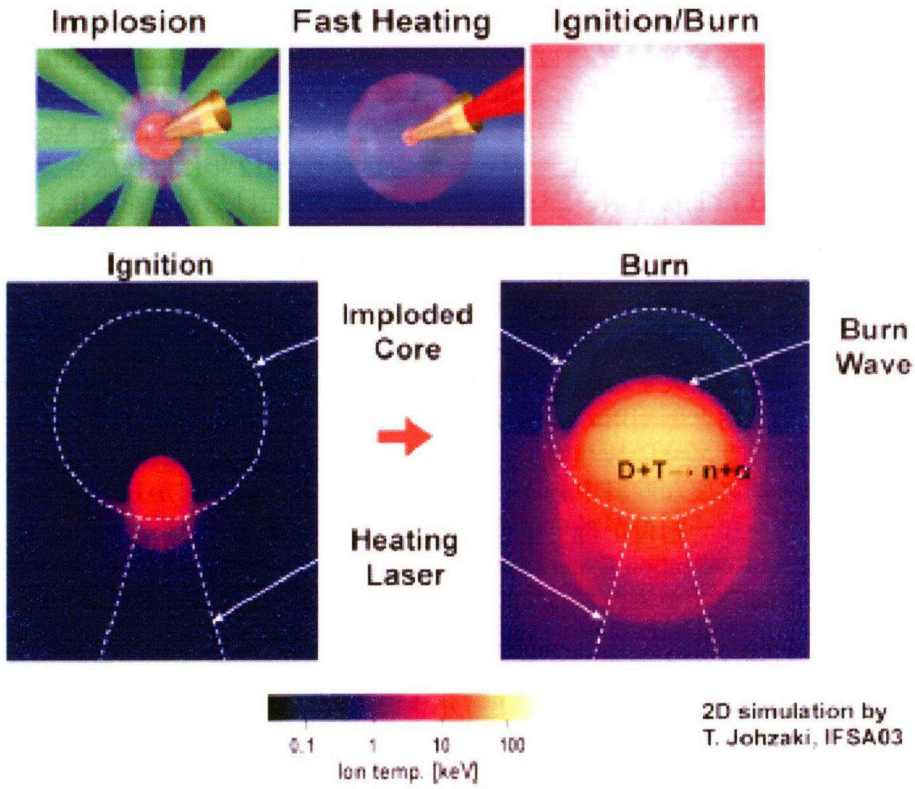


図１－２　高速点火方式の原理。第一のレーザー群で燃料ターゲットを爆縮し、最大圧縮のタイミングで第二のレーザーを照射し点火・燃焼を起こす。下段の図は点火し燃焼に至るプロセスを二次元シミュレーションした結果である。

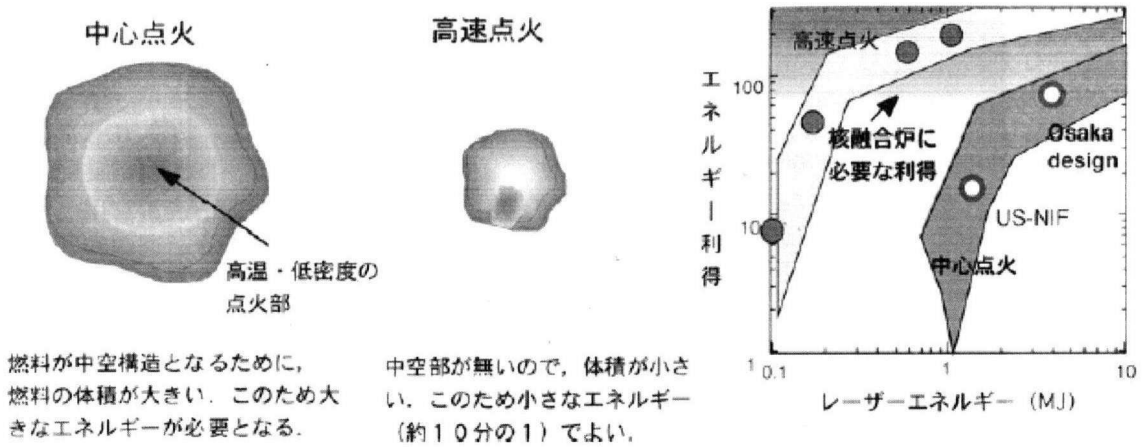


図１－３　中心点火と高速点火の燃料構造の違い。高速点火方式では同程度のエネルギー利得を得るために必要なレーザーのエネルギーが中心点火に比べて一桁小さい。ここで実際の商業炉を考えた場合にはエネルギー利得は 100 以上が必要とされる。

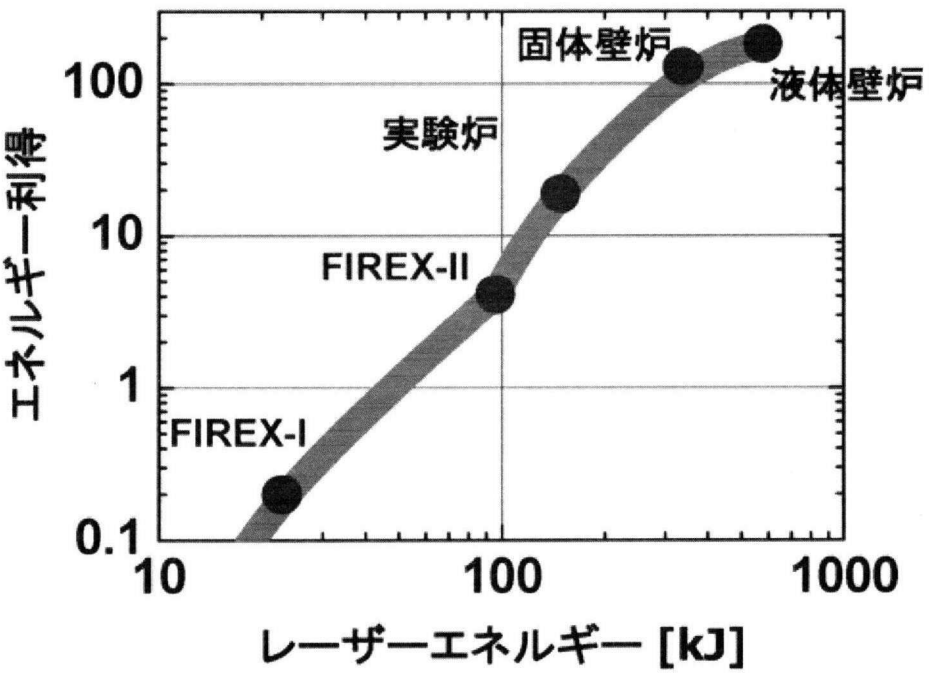


図１－４　高速点火発電に向けたロードマップ。現在は FIREX-I であり、FIREX-II にて自己燃焼のメカニズムを明らかにし、FIREX 計画の段階で炉心プラズマの基本的な物理を確立する。

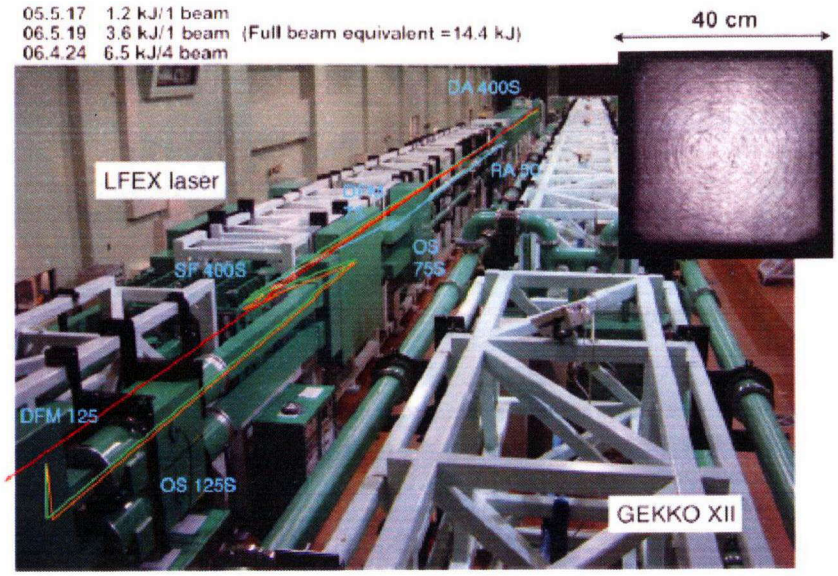


図１－５　極端パルス高強度レーザーの技術推進に伴い建設された LFEX レーザーと GEKKO XII 号。FIREX－I 計画では GEKKO　XII 号を用いて燃料ターゲットを爆縮し、LFEX によって加熱する。

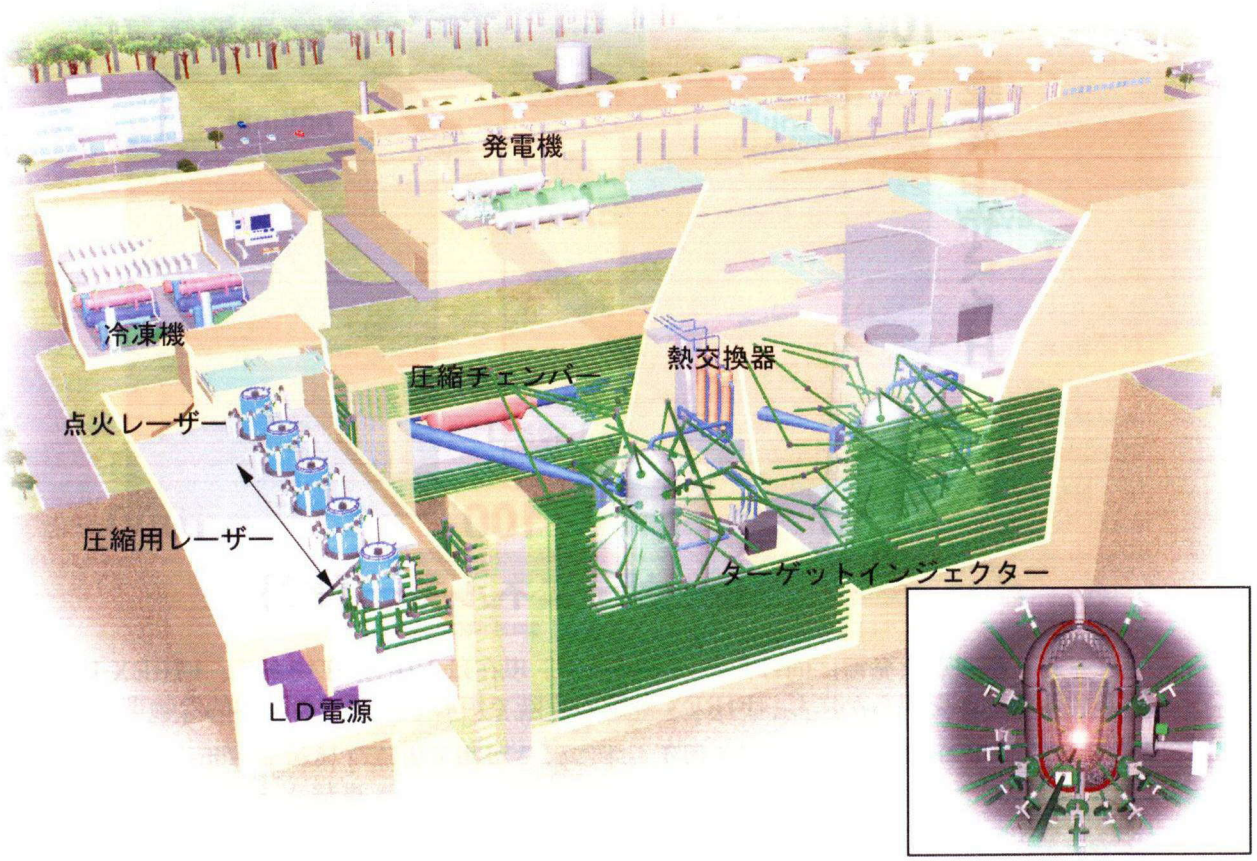


図１－６　高速点火レーザー核融合発電所（KOYO-Fast）の鳥瞰図

1－2　高速点火レーザー核融合用ターゲットの一般的仕様

高速点火レーザー核融合発電の実現や、FIREX 計画の実現に向けて、高速点火レーザー核融合用ターゲットを開発し供給する必要がある。従来まで進められてきた中心点火方式のターゲットとは異なり、レーザーのエネルギーを燃料プラズマ内部まで伝搬させるレーザーガイドコーンが燃料シェルにつけられている。このレーザーガイドコーンがあることによって、シェルの加工方法や、組立て方法、温度分布が非対称であっても出来る非球対称温度分布シェル内に均一な燃料層の形成の方法などの独自の技術開発が必要となる。以下に高速点火レーザー核融合用ターゲットの一般的な仕様を示す。

(a) 高速点火方式用ターゲットの一般的構造

高速点火レーザー核融合用ターゲットの基本的な構造は次のようなものである。高速点火レーザー核融合用ターゲットはシェル、アブレーター層、レーザーガイドコーン（以下コーン）の３つのパーツから成り立っている。図１－７に商用炉で用いられると想定されているはフォームクライオターゲットのモデル図を示す。最外殻であるアブレーター層は蒸発防止膜としての役割もあり、レーザー光をよく吸収し高い噴出圧力を発生できる炭化水素系有機化合物が主成分である。なお、このアブレーター層に臭素を 0.4wt%ほどドープすると、流体不安定性を抑えることができる可能性が報告されている [12]。その内側は燃料層であり、水素同位体燃料を中空状に形成する。その方法としては大きく分けて、低密度フォーム材料で出来た中空球に液体燃料を含浸させ固化させるというフォーム法と、燃料ガスを冷却し固化させ燃料層を成型する方法の二種類の方式がある。さらにその内部には固体燃料の温度に応じた蒸気圧の気体状の燃料が存在する。燃料はコーンとシェルの隙間から直接導入することが想定されている。またドコーンは高速点火用ターゲットの特徴として追加熱レーザーのエネルギーを伝播させる役割を担っている。

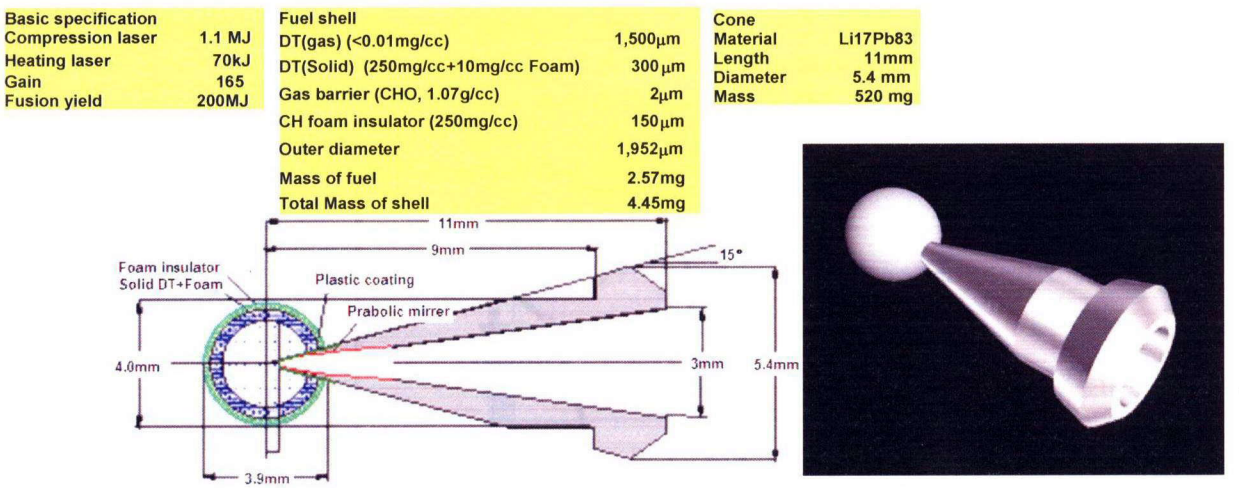


図１－７　出力 200MJ の液体壁炉用高速点火ターゲット（左）とそのイメージ（右）

(b) 一般的な高速点火方式用ターゲットに要求される性能

エネルギー利得やレーザー爆縮の観点、追加熱の観点などから、現時点では高速点火方式用ターゲットには以下の性能が必要だと考えられている。

(1) 燃料容器とアブレーター層を構成する物質は炭素や水素などの低原子番号元素を主成分とした有機化合物であること。
これは、エネルギー利得の観点からの要請であるが、燃料がプラズマになった際に光として放出される制動輻射のエネルギーはその原子番号の 2 乗に比例する。制動輻射のエネルギーが大きいほど高い利得が得られない。

(2) ターゲット表面の粗さは 0.1μm 以下の精度を有すること。

(3) 燃料層の燃料充填率の分布は1%以内のバラつきであること。
これらはレーザー爆縮の観点からの要請である。レーザーでターゲットを爆縮する際に生じる流体不安定性は初期擾乱が大きければ大きいほど爆縮の過程で大きくなることから、表面の粗さは0.1μm以下が求められている。また、燃料層の径方向の重量にバラつきが有ると流体不安定性による燃料プラズマの擾乱が発生する。この擾乱の大きさが燃料コアの半径を超えた場合には破断がおこり高密度爆縮ができない。そのため燃料充填率の分布は1%以内のバラつきが求められる。

(4) コーンを構成する物質は金や鉛といった高原子番号元素を主成分としたものであること。

(5) 燃料層の燃料充填量のバラつきは1%以下の精度で充填量を把握できること。
レーザーにより追加熱を行う際には電子を媒体とするため、高原子番号の物質が必要である。商用炉では放射化の影響などからブランケットと同じLiPbが想定されている。また追加熱レーザーは燃料プラズマが最大圧縮した前後50ps以内に照射することで高い利得が得られることがわかっている[7]。この最大圧縮のタイミングはターゲットの燃料層の重量によって変化する。そこで燃料充填量を1%以下で制御し、把握することで追加熱レーザーを照射するタイミングがわかる。

他にも要求される性能として正確な数値を定義するには更なる研究の余地を残すが、

(1) シェル内部の蒸気圧の低下により爆縮性能は向上する。商用炉においては0.01mg/cc以下が求められている[9]。

(2) フォーム法を用いた場合にはその低密度フォームの密度のさらなる低下は追加熱レーザーに必要なエネルギーを下げることができる（図１－８）。

(3) フォーム法を用いた場合にはそのフォーム材料に燃料を固化した際に生じると示唆されている気泡の量の低減がレーザー核融合の効率の向上につながる。

(4) ターゲットを構造上接着させる際に使用する接着剤は爆縮性能に影響する。接着剤が初期擾乱に該当するためである。ただしコーン付近の初期擾乱は爆縮に与える影響が小さいため、ターゲット表面粗さよりは緩和した条件である。

といったことも向上させるべき性能として存在する。

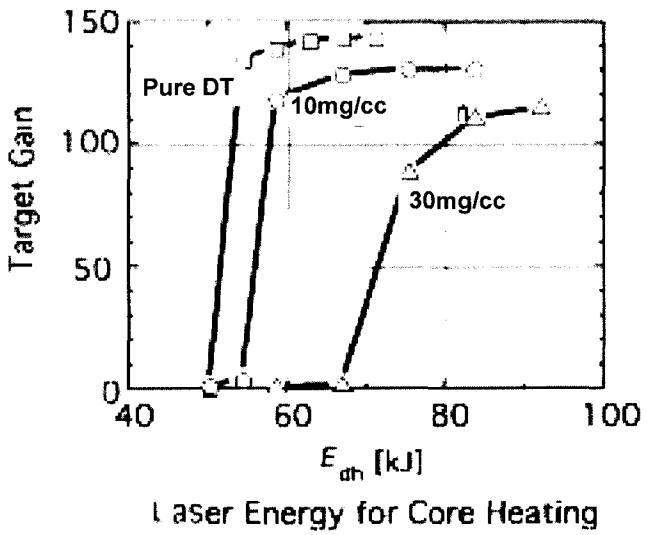


図１－８　フォームの密度を変化させて、追加熱レーザーの強度とエネルギー利得の関係を計算により求めたもの。横軸に追加熱レーザーの強度をとり、縦軸にエネルギー利得(核融合エネルギー/レーザーエネルギー)をとった。利得100を達成するためには10mg/ccの低密度フォームの開発が必要となる。Eulerian hydrodynamic codeを用いて計算したもの。

1−3　FIREX-I 用フォームクライオターゲット

前節では将来の炉用ターゲットに必要と考えられる仕様を述べたが、高速点火方式用の原理を実証する FIREX−I 計画においては基本的には炉用ターゲットと同様の思想の下、この計画に合わせた仕様を決定した、図１－９に示すターゲットを用いることが計画されている。燃料層固定の方法としてフォーム法を採用し研究を進めることにした。フォーム法ではフォームシェルの形状がそのまま燃料層の形状となるため、直接固体燃料層を形成する場合に比べて、『コーンによる温度非対称性』と、『コーンとシェル壁間の表面張力』の影響を受けにくいため、均一な燃料層を形成するに当たって優位性がある。また将来の炉を考えたときに均一な大きさ、厚みのフォームシェルの大量生産ができれば、それは均質な燃料層の大量生産を見通すことが出来る。FIREX-I では爆縮用レーザーとして激光 XII 号が用いられ、追加熱用レーザーとして LFEX が用いられる。この激光 XII 号を用いて高密度圧縮を実現させるためにシェルの直径や壁厚を以下のように決定した。燃料を充填するために、ガラス細管を燃料導入管としてシェル内部に差し込みそこから直接シェル内部に燃料を充填することとした。コーンはその成型性の観点から Au コーンを用いた。この FIREX-I 用フォームクライオターゲットの作成手順は、

１、フォームシェル、燃料導入管、コーンなど各部品の作製
２、フォームシェルに対する穴あけ加工
３、各部品の組立て
４、気密性の確認
５、燃料の液化温度まで冷却
６、燃料導入管より液体燃料をフォーム層に充填
７、燃料の固化
８、燃料の充填率均一性の計測

である。この FIREX-I 用フォームクライオターゲットでは一般的仕様とは異なる以下の性能が要求される。

(1) フォームクライオターゲットのフォームシェルは直径 500 μm、アブレーター層及び燃料層の壁厚と密度の積の和が 7g/cm^3×μm 以下である。フォーム材料の密度を低下させると得られるエネルギー利得は大きくなる（図１－８）。

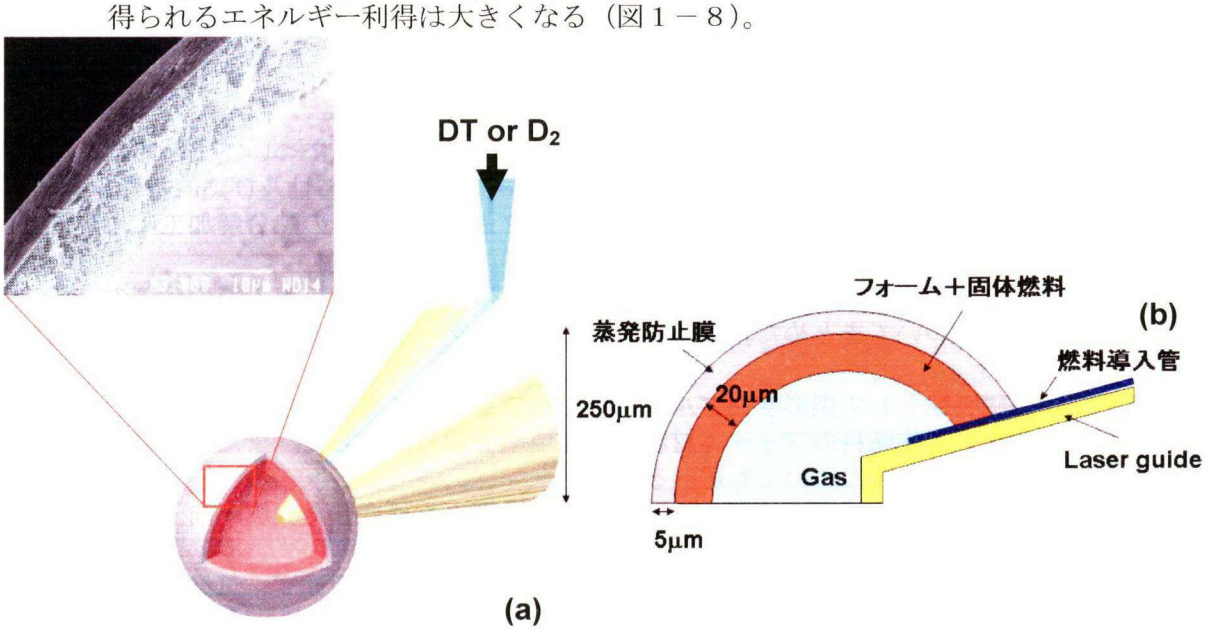


図１－９　FIREX-I 計画用ターゲットの模式図(a)。FIREX-I 計画用フォームクライオターゲットの寸法を表記した断面の模式図(b)

(2) シェルは光学計測により内部の燃料を測定するため、何らかの光源に対して可視であること。
(3) 燃料導入管に詰まりが無く、接続部分がしっかりと接着されており、気密性（内部に水素同位体燃料がとどまること）が確保されていること。
(4) コーンの先端がシェルの中央よりも 50μm 外側にあること。

この FIREX-I 用フォームクライオターゲットが完成することで、純度の高い重水素プラズマ実験が可能となる。また商用炉用ターゲットと概念は同じであり、大きさが FIREX-I 用のほうが小さいことから FIREX-I 用のほうが難易度が高く、FIREX-I 用が完成することで将来のターゲット製作に知見を与えることができる。

1－4　本研究の目的

本研究においては FIREX-I 用フォームクライオターゲットの開発に関する研究を行うこととする。従来までの高速点火の原理実証実験はすべて常温で行われており、水素同位体燃料もプラスチックを構成する炭化水素のその水素の一部を重水素に置換しただけである。すなわち極低温の環境下で燃料を燃料導入管から含浸させ作成する図１－９のようなターゲットは今まで作られてきていない。追加熱レーザーによる圧縮されたプラズマの加熱効率はプラズマの密度、平均原子番号などにより異なり、実際に近い純度の水素プラズマで検証することは、点火燃焼にむけてその学術的価値は大きい。

FIREX-I 用フォームクライオターゲットの開発に関する研究のなかでもフォームターゲットに燃料を充填する過程に注目する。これまでフォーム内に充填した液体燃料が固化する際に収縮し、気泡が発生する可能性があり、どの程度気泡が発生するのかということが長年の議論の対象であった。フォーム内に残る気泡は燃料量の誤差になるため、加熱レーザー照射のタイミングを決めるためには、あらかじめ調べることは重要である。そこでフォーム層内に高密度(充填率 99%以上)に固体燃料層を形成する方法の原理実証が本研究の主目的である。この主目的達成を念頭において、水素同位体燃料を充填できるターゲットの組み立て要素技術の開発、常温でターゲットの気密性を測定するための検査技術の開発をおこなった上で、そのターゲットを使用した極低温下での燃料充填、固化プロセスの研究、及び燃料を充填したターゲットの評価技術基礎研究を行う。加えて、フォーム層内部の固体燃料の充填率を評価する基礎実験を行い、フォーム層内部の固体燃料の充填率を上げる方法の研究を行った。

以上の研究にしたがって本論文は７章より成っている。

第２章では、レーザー加工による低密度フォーム材料の穴あけ加工についてまとめた。本研究ではフォーム法の材料として有力な候補である RF フォームの光学的特性及び熱的特性を評価し、その物性値に基づき比較的強度の低いレーザーによるフォームシェルの熱分解加工について述べる。

第３章では組立て方法についてまとめた。フォーム球にコーンと燃料導入管の接着の方法、蒸発防止膜の張り方についてまとめた。さらに組立てた後のターゲットの気密性検査手法の開発について述べる。

第４章では基礎実験として楔形サンプルを使用したフォームに充填される固体燃料の量の評価の研究をまとめた。固体燃料のフォーム材料への充填率を明らかにした。また充填率向上のための燃料層の冷却方法の研究についても述べる。

第５章では作製したフォームターゲットに対し、第４章より研究した充填率向上手法を適用しその実現性について述べる。

第６章では予備実験として第４章、第５章で研究された成果を採用せず、気泡を残した状態の燃料を充填したフォームターゲットの燃料量の評価研究についてまとめた。レーザーを用いた干渉計測により、充填前と充填後のターゲットの干渉縞を比較、評価することによって燃料の充填率を測定した。

第７章は、これらの研究によって得られた成果をまとめた。

第１章の参考文献

(1) 核融合科学研究所 “未来をつくるエネルギー“ p13-7 (2001)
(2) Stefano Atzeni and Jürgen Meyer-ter-Vehn “The Physics of Inertial Fusion” Oxford University Press p18-27 (2004)
(3) H. Azechi and the FIREX project “Present status of the FIREX programme for the demonstration of ignition and burn” Plasma Phys. Control. Fusion vol.48 B267-75 (2006)
(4) "First successful integrated experiment at National Ignition Facility announced". *General Physics*. PhysOrg.com. October 8, 2010. Retrieved 2010-10-09.
(5) B. Bigot “Inertial fusion science in Europe” Inertial Fusion Sciences and Applications p3-8 (2005)
(6) T. Yamanaka Institute of Laser Engineering Internal Report Osaka University p5–6 (1983)
(7) R. Kodama et.al. “Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition” Nature 412 p798-802 (2001)
(8) Miyanaga N et al. Inertial Fusion Science and Applications 2003 (Montereg, CA, USA) editer: B A Hammel et al. ,(Illinois: American Nuclear Society) p 507 (2003)
(9) レーザー核融合炉設計委員会 “高速点火レーザー核融合炉発電プラントの概念設計” 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、IFE フォーラム炉設計委員会、レーザー核融合技術振興会 pp48-50 (2006)
(10)T. Norimatsu et al. “Update for the drag force on an injected pellet and target fabrication for inertial fusion” Fusion Sci. Technol 43 p339-345 (2003)
(11) K. Nagai et al. “Foam materials for cryogenic targets of fast ignition realization experiment (FIREX)” Nucl.Fusion 45 p1277-83 (2005)
(12) S. Fujioka et al., “Suppression of the Rayleigh-Taylor Instability due to Self-Radiation in a Multiablation Target” Phy. Rev. Lett. Vol.92 No.19 195001 (2004)

第二章　レーザーによるRFフォームの熱分解加工

2－1　はじめに

FIREX-I用フォームターゲットを組み立てるにあたって、このターゲットの特徴であるコーンや、燃料導入管を接続するために、Resolcinol- Formaldehyde foam (RFフォーム)シェルに穴あけ加工を行う必要がある。空けるべき穴の形状は燃料導入管用の直径20μm程度の円と、コーン用の直径の130μm程度の円が二つ接した形状である。ここでRFフォームシェルは100mg/cc程度の低密度であり[1]、機械的強度が低く壊れやすい。従来穴あけ加工には先端が50μmほどのマイクロドリルを使用する方法[2]や、ベンゼンなどの溶液により溶かして穴あけ加工を行っていた。しかし、フォームシェルに、マイクロドリルを使用するとフォーム素材が絡み付きシェルが破壊されてしまう、溶液を用いた場合はその形状が安定して得られない、など再現性の高い加工ができない。そこで精密かつ無反力のレーザー加工に注目した。

レーザー加工の有機物に対する精密な穴あけ加工の例としてエキシマレーザー、炭酸ガスレーザー、そしてNd:YAGレーザーを用いたレーザー加工がある。エキシマレーザーと炭酸ガスレーザーを比較した場合、エキシマレーザーを用いた穴あけ加工のほうが加工精度は良いということがわかっている[3]。そこでRFフォームの加工にエキシマレーザーを使用したいところであるが、エキシマレーザーは紫外線吸収率の高い樹脂材料でなければ加工形状や加工精度に制限がある[4]。RFフォームはオレンジ色の素材であることから、その補色である緑の波長をもつNd:YAGレーザーの二倍高調波であればエネルギーを吸収し熱分解で加工が可能であると考え、Nd:YAGレーザーによる加工について研究することにする。一般的にレーザーによる加熱は集光によって熱影響領域を極めて小さく出来ることから、最適強度と照射時間を求めることにより、局所的な加熱となり、精度の高い加工が実現できると考えられる。

今回の研究では、クライオ燃料充填実験に供するターゲット製作のためのレーザー加工であり、目標を以下のように定めることにした。

① 局所的な加工であること、
加工部からクラックが生じない、シェルの加工している側の反対側の壁キズがつかない。

② ±2.5μm以下の加工精度であること
穴あけの精度が高いほど組立て時の接着剤の量が少なくて済み、爆縮プラズマへの影響を低減できる。しかし接着剤の量と爆縮過程について詳細な議論がなされていないため、今回はターゲットの直径の0.5%に設定した。

本章ではRFフォームの光学的、熱的特性を調べ、その物性値を用いた計算に基づき1回の照射で加工可能な最適強度と照射時間を求めた。その計算結果を元にNd:YAGレーザー照射による熱分解を利用した加工による高精度の穴あけ加工を実証する。また、その加工痕の評価についても報告する。

2－2　RFフォームの光学的特性および熱的特性

RFフォームのレーザーによる熱分解時の表面温度の上昇を評価するために、RFフォームの光吸収係数を調べる必要がある。そこでフォーム構造でない平板のRF重合物の吸収スペクトルをMCPD-7000 absorption spectrometer (Ootsuka Densi)を用いて計則した。図２－１にその結果を示す。計測に用いたサンプルは厚さ200μmのRF平板である。光吸収係数はランベルトの法則（式2-1）によって求められる。

$$\log_e\left(\frac{I_0}{I}\right)=\alpha\cdot d \tag{2-1}$$

ここで I_0 は入射光の強度であり、I は透過光の強度である。α がフォームの光吸収係数であり、

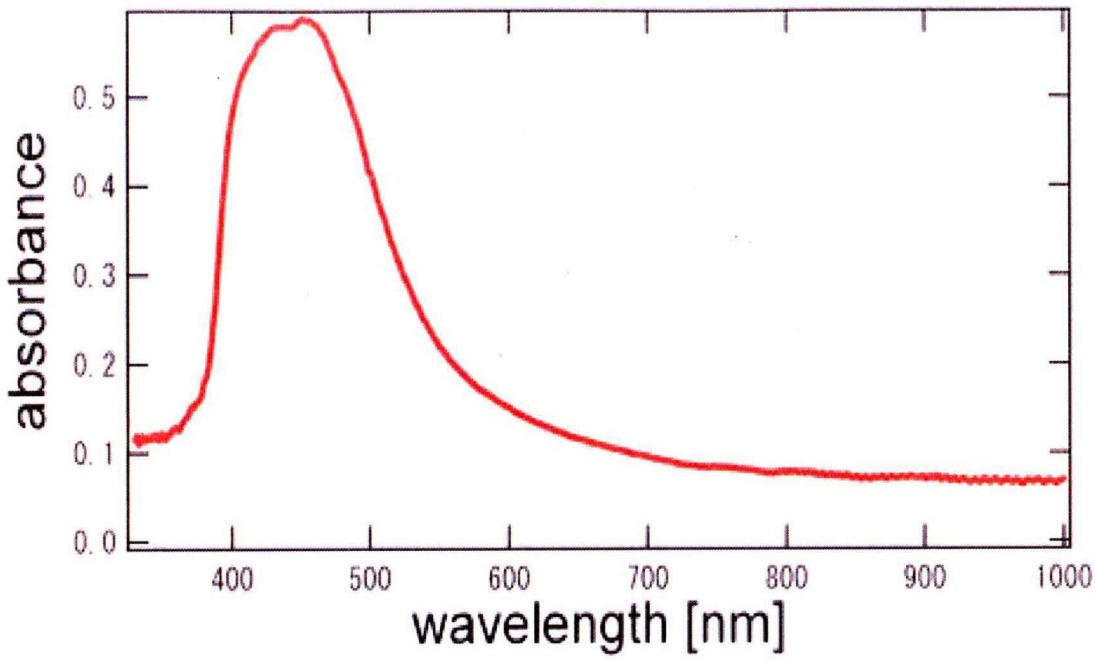


図２－１　RF 平板の吸光度。RF 平板は厚みが 200μm である。横軸は光の波長、縦軸は吸光度である。

d がサンプルの厚みである。今回使用する Nd;YAG レーザーの二倍高調波の波長は 532 nm であるため、そのときの光吸収係数は 1.4×10^{3} m^{-1} であると求めることができた。

次に RF フォームの温度上昇と熱分解の関係を調べるために DTG-60 (Shimadzu)を用いて RF フォームの熱重量測定を行った。 試料である RF フォームの質量変化と温度上昇の関係を計測するため、アルゴン雰囲気中で室温から 850K まで温度を上昇させる間の質量変化を測定した。わかりやすいようにこの結果を時間微分したものを図２－２に示す。図２－２には 3 つのピークがあり、RF フォームの室温から 850K までの間の質量変化は主に 3 段階に分かれていることがわかる。ここで図２－２における温度変化は 5K/min である。

１つ目のピークは保存に用いられているイソプロピルアルコール（IPA）の蒸発による変化だと考えられる。IPA の 1atm における沸点は 355K であるが、大気圧より低い圧力のアルゴン中での測定であったため、沸点より低い温度で蒸発したものと考えられる。この RF フォームの試料は IPA の中に保存されており、測定前に 60 時間大気中で乾燥させたが、いくらかの IPA がフォーム内にとどまっていたものと考えられる。３つ目のピークは燃焼によるものだと考えられるため、２つ目のピークが熱分解によるものだと考えられる。図２－２から、500K の前後 50K においてほぼ一定の減少率が見られる。これは IPA の蒸発が減少し質量減少率が下がることと、熱分解が始まり質量減少率が増えてきたことで相殺され一定の値をとっているものと考えることができる。正確な温度は不明であるが、これらのことから熱分解は 430K 付近からスタートしていると推測した。

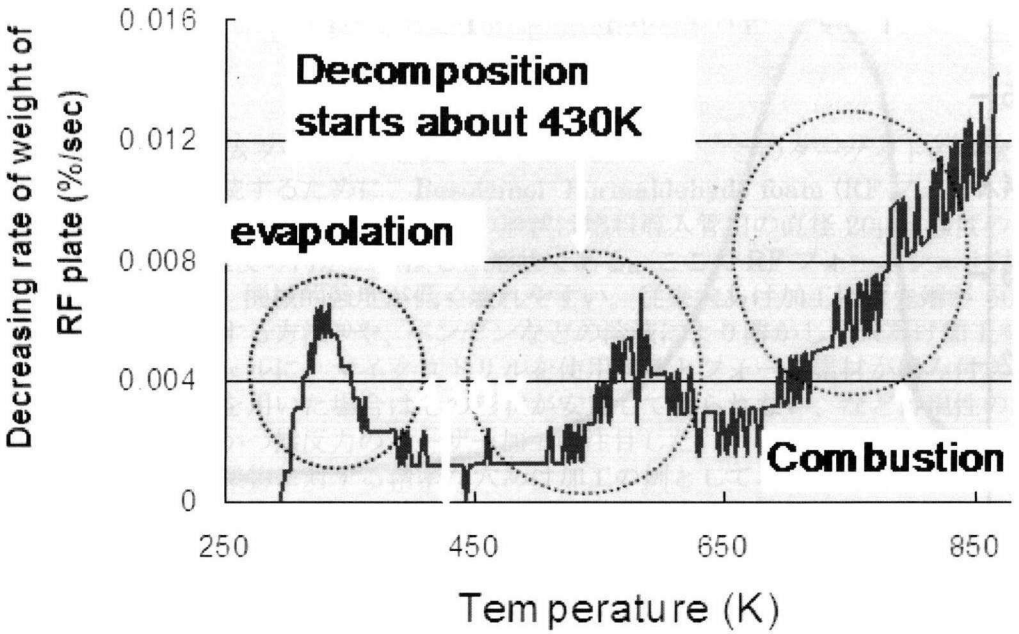


図２－２　RF フォームの熱重量分析の結果。横軸は温度、縦軸は質量減少率である。熱分解は430K ほどから始まっているものと考えられる。

2－3　RF フォーム表面の温度上昇の計算

レーザーの照射による RF フォームの温度上昇を計算する。簡単に理解するために固体の熱拡散方程式から求めることにする [5)]。固体中の熱フローを記述する方程式から温度上昇を求めていくと、次式で与えられる。ここで物性定数は温度によらず一定であること、レーザー光は z 方向から入射し、物質は一様であると仮定すると

$$T(z,t)=\left(\frac{2\cdot\alpha\cdot I_0}{\kappa}\right)(\kappa\cdot t)^{1/2}\cdot ierfc\left\{\frac{z}{2(\kappa\cdot t)^{1/2}}\right\} \tag{2-2}$$

ここで、温度の上昇はレーザーの進行方向の材質の深さ z と照射時間 t の関数で表される。α はフォームの光吸収係数であり、I_0 はレーザーの強度、κは物質の熱拡散率である。このとき、この物質によるレーザー光の吸収長（光吸収係数αの逆数）は熱拡散距離（ある時刻 t_p と物質の熱拡散率κの積の平方根）より十分小さいと仮定している（$\alpha^{-1}<<(\kappa t_p)^{1/2}$）。ここで erfc($x$) はエラー関数と呼ばれる関数であり [5)]、次のように定義される。

$$ierfc(X)=\int_X^{\infty} erfc(X')dX' \tag{2-3(a)}$$

$$erfc(X)=\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\int_X^{\infty} e^{-(X')^2}dX' \tag{2-3(b)}$$

式 2-2 において、物質の熱拡散率κは、

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \tag{2-4}$$

と与えられる。ここで ρ は物質の密度、c は比熱である。λ は熱伝導率であり、フォームの場合は以下の式で与えられる。

$$\lambda = \lambda_0 \times \beta \tag{2-5}$$

この式では λ_0 はフォーム構造でない場合の RF の熱伝導率であり、β はフォーム構造をとる場合の実効的な熱伝導率を求める係数であり以下の式で与えられる [6)]。フォームはフォームの基と成る物質と、気泡とからなりたっている。

$$\beta = \frac{1-(1-\lambda_a/\lambda_0)V_g^{2/3}}{1-(1-\lambda_a/\lambda_0)V_g^{2/3}(1-V_g^{1/3})} \tag{2-6}$$

ここで λ_a はフォーム内の気泡中の物質の熱伝導率である。V_g とはフォームの気泡比と呼ばれる係数であり、どれほどフォーム構造をとるのかを示す係数であり以下の式で表される。

$$V_g = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_0} \tag{2-7}$$

ここで ρ_f はフォームの密度であり、ρ_0 はフォーム構造でない RF の密度である。

最後にこれまでの結果と式(2-2)から(2-7)を使用して RF フォームの表面温度を計算することができる。(図２－３)。1 回の照射でシェルを穴あけ加工できる最適な照射時間を評価するために、表面上（z=0）と材質の深さが 50μm と 100μm の温度を計算した。計算にはフォームの密度 ρ_f は 95 mg/cm^3 であるとし、フォーム構造でない RF の密度 ρ_0 と比熱 c、熱伝達率 λ_0 はポリスチレンの値の代用で、ρ_0=1.07(g/cm^3)、c=1.34(J/g·K)、λ_0=0.12(W/m·K)を使用した。大気中にて加工を行う

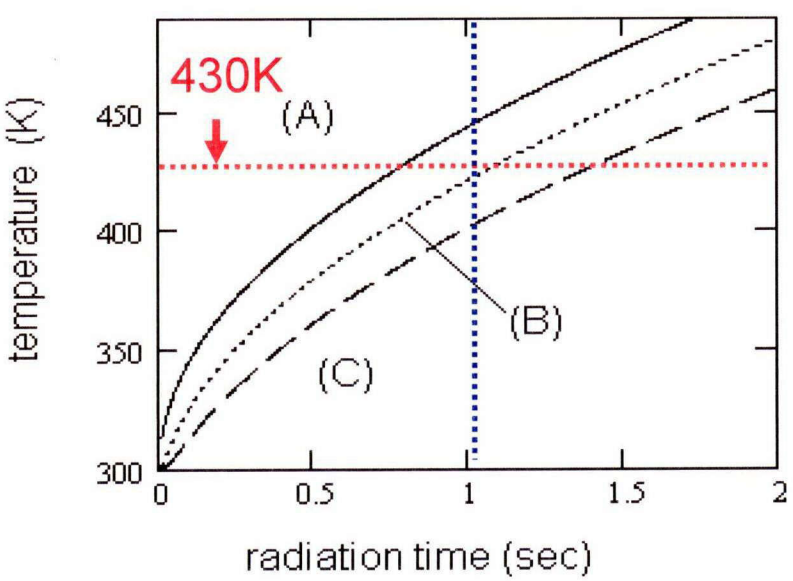


図２－３　レーザー強度を 6.4×10^3 W/cm^2 に固定し、照射時間と温度上昇の関係を計算した。(A)は表面上の温度、(B)は 50μm の深さの温度、(C)は 100μm の深さの温度を示している。

ため、気泡には空気が含まれる。ここで空気の熱伝達率 λ_a と RF の熱伝導率 λ_0 について、空気の熱伝導率はその対流により変化するが、RF の方が十分大きな値をとることから、$\lambda_a/\lambda_0 \approx 0$ として計算した。レーザーの強度 I_0 は 6.4×10^3 W/cm^2 に固定した。この強度は加工に使用したレーザー加工機（SL185CS NEC 製）の 5mW 出力の場合の強度と一致する。この強度のレーザーを用いて RF フォーム球の場合、加工面の対面は傷が着かないようにレーザー強度を決定する必要がある。6.4×10^3 W/cm^2 の強度のレーザーを用いた場合には、表面上が 430K を越えるが全厚さ方向で 430K を超えない 1.0 sec の照射が適しているということがわかった。0.8sec 以下では熱分解加工の領域まで表面の温度が到達せず、1.1sec 以上では表面より 50μm 以上深い位置まで加工されてしまい、厚みが 50μm 以下のシェルでは対壁が傷ついてしまうおそれがある。1.0sec の照射によって表面上では熱分解が生じる温度まで上昇するが、50μm より深いところでは熱分解が生じるほどの温度上昇は見られない。

2－4　レーザー加工実験

2－3 で求めた加工条件を参考にレーザーによる RF フォームの熱分解加工を実証する。実験的に調べる内容は、RF フォームの平板を用いて

① 430K の熱分解加工温度条件の確認
② 局所的な加工の確認
③ 熱分解加工の精度

である。

また RF フォームシェルの厚みが変化した場合に対応するためであっても強度や照射時間と熱分解加工により加工深さの関係も評価する。

RF フォーム平板で求めた加工に必要な条件を RF フォームシェルに適用し、必要な制度の加工を実証する。

2－4－1　実験方法

RF フォーム平板と RF フォームシェルに対する加工を行う実験装置の概要を図２－４に示す。実験で使用するレーザー発生装置は SL185CS（NEC）である。レーザーは Nd;YAG の二次高調波であり、繰り返し率は 10kHz、波長は 532nm、パルス幅は 40×10^{-9}sec のものを用いた。レーザーのスポット径は 10μm まで絞って使用した。図２－４中にサンプルと示した位置に RF フォーム平板および RF フォーム球を置く。RF フォーム平板及び RF フォーム球を固定するために真空チャックを使用した。真空チャックは表面に直径 3mm ほどの穴がある台があり、側面からこの穴に対してロータリーポンプが接続されている。この台の上に直径 40μm ほどの小さい穴が開いてある板を載せる。この小さい穴の上に RF フォーム平板及び RF フォーム球を乗せ、ポンプの吸引力を調整することで、壊れやすい RF フォーム平板及び RF フォーム球を破損させることなく固定した。真空チャックは微動ステージ MM4006(Newport)に固定されている。レーザーの焦点及び照射始点位置を調整するために、実体顕微鏡を用いた。

熱分解加工によって局所的な加工が出来ているか及び加工の精度について調べた。RF フォーム平板の密度は 95mg/cm^3 であり、レーザーの強度は 6.4×10^4W/cm^2 であり、レーザーのスポット径が 10μm である。このときフォーム上でレーザーの照射時間が合計で 1 秒となるようにレーザー照射点は 10μm/sec で動かした。この条件によりフォーム上ではレーザーが 1 秒間照射されることになる。RF フォーム平板上に円形に加工を行い、加工痕を電解放出形走査電子顕微鏡（SEM; JSM-7400-F, JEOL）を用いて撮影し、画像解析を行った。

次に RF フォーム平板を用いて、強度と加工深さの関係を調べた。この実験で用いた RF フォーム平板の密度は 168mg/cm^3 であり、レーザー照射点の速度は 10μm/sec に固定した。レーザーの強度を 2.4×10^4 W/cm^2 から 1.4×10^5 W/cm^2 まで変化させていき、そのときの加工深さを SEM を用いて調べた。

RF フォームシェルに対してレーザーによって円形に加工を行った。このとき用いた RF フォームシェルは密度 156mg/cm^3、直径 890mm、厚さ 63mm のものであり General Atomics 社より提供を受けたものである。加工は 7.4×10^4W/cm^2 の強度で 1.0sec の照射時間で行った。

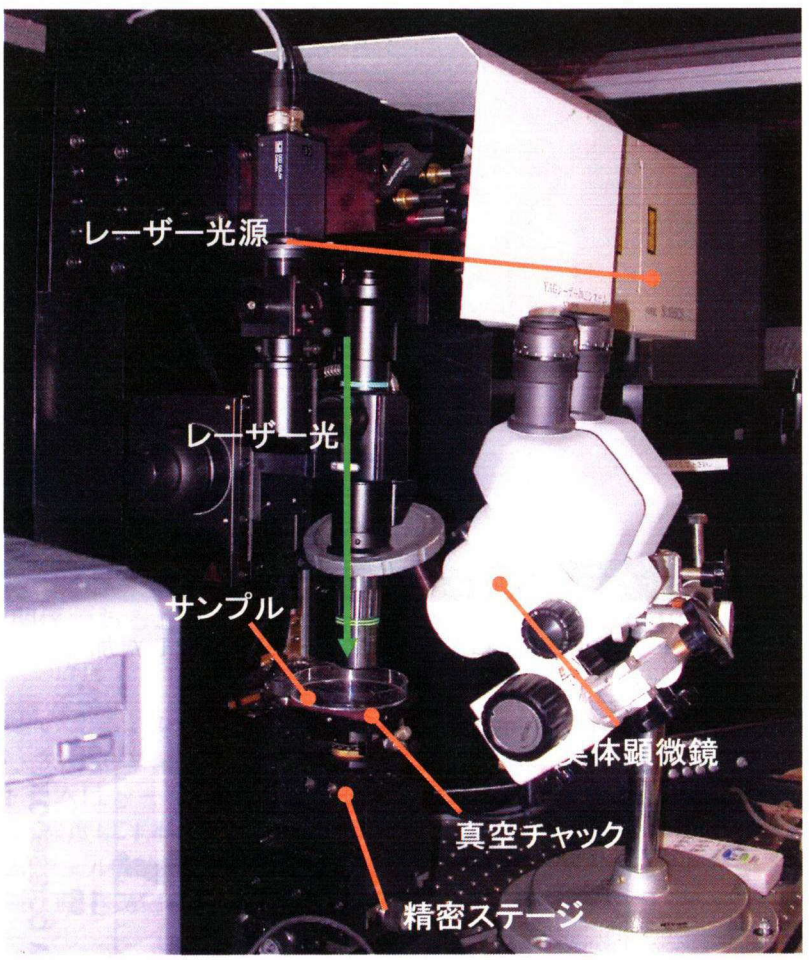


図２－４　レーザー加工用実験装置の写真。実体顕微鏡は斜めからターゲットとレーザー光を観察する。

2－4－2　実験結果

RF フォーム平板に対して円形にレーザー加工したときの SEM 画像を示す（図２－５）。この SEM 画像においては加工痕付近に変形は生じていない。また、加工痕の淵がシャープな形状をしている。この二点から熱分解加工によって表面状態には大きな影響がなかったといえる。この加工痕の形状を定量的に評価するため、画像解析により中心から加工痕の内側、及び外側までの距離を角度ごとに計測した（図２－６）。この結果によると、加工による溝の幅は 12.6μm±2μm であった。

次に RF フォーム平板を用いて、強度と加工深さの関係を調べた結果を図２－７に示す。図２－７において、多くの点は補助的に引いた直線上にほぼ乗ることがわかった。式 2-2 より、ある深さの温度はレーザーの強度に比例して高くなることから、熱分解が生じる位置も深くなる

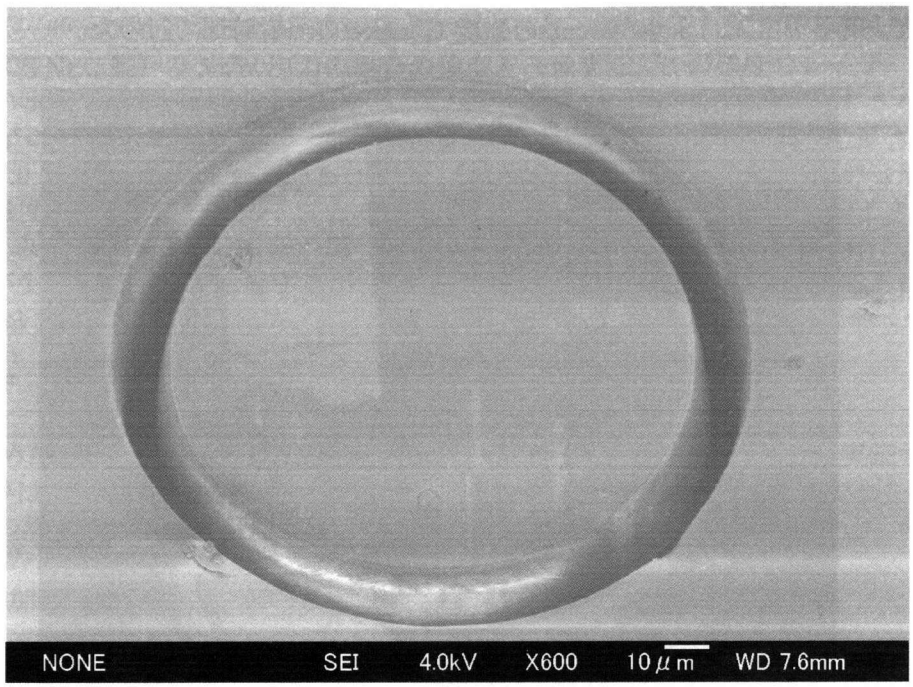


図２－５　RF フォーム平板に対して円形にレーザー加工した加工痕の SEM 画像

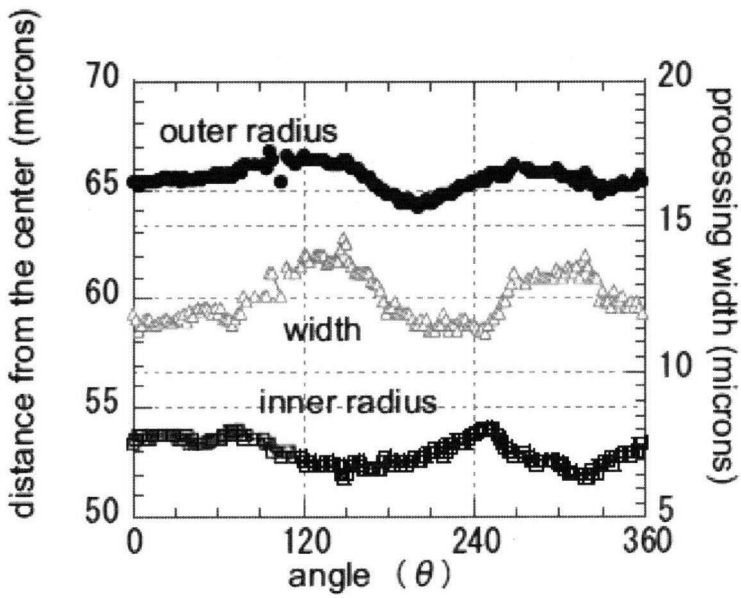


図２－６　レーザー加工の加工痕を画像解析したもの。レーザー加工痕の内側と外側について角度ごとに中心からの距離を測り、その差によって加工幅を求めた。

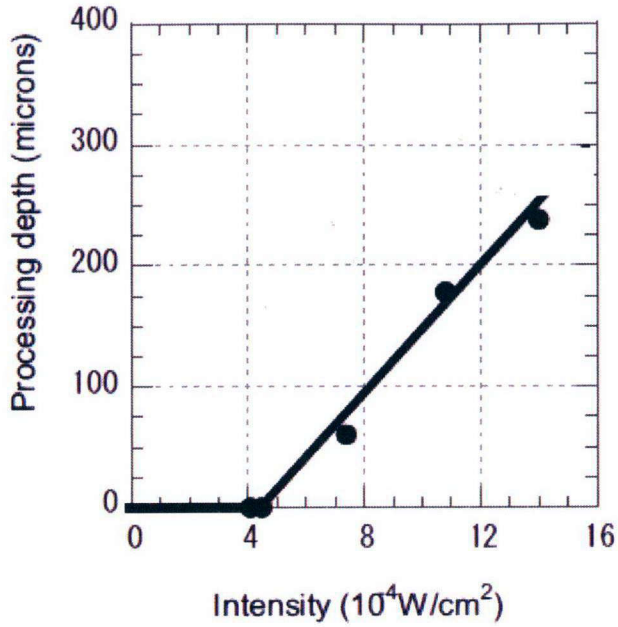


図２－７　RF フォーム平板(168mg/cm^3)のレーザー加工において、レーザー強度と加工深さの関係。直線は線形な関係であることを見やすくするための補助線。3.6×10^{4}W/cm^2 以上の強度であれば加工痕は観察できた。

ことは理論どおりといえる。レーザー強度が 3.6×10^{4}W/cm^2 以上においては加工深さは数μm の加工痕を観測したが、3.6×10^{4}W/cm^2 以下では観測できなかった。また、レーザーの強度を上げていくにつれ、RF フォームはレーザーを照射するとすぐに RF フォームが全て分解してしまった。このときのレーザーの強度は 1.4×10^{5}W/cm^2 であった。

次に RF フォームシェルに対してレーザーによって円形に加工を行った結果を図２－８に示す。フォームシェルの厚さが 63μm であることから図２－８より、レーザーの強度は

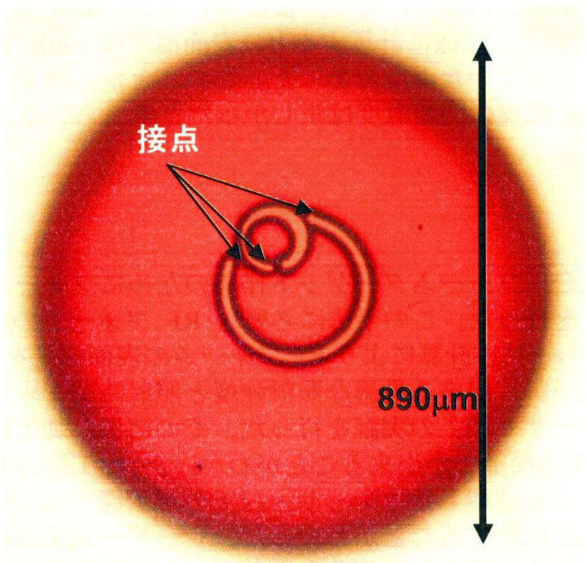


図２－８　RF フォーム球に対してレーザー加工したものを顕微鏡で拡大した図。

図２－９　レーザー加工後の RF フォームシェルから切り取り片を取り除いているところの写真。

7.4×10^4W/cm^2、1.0sec の照射時間で行った。このレーザー加工の際には、加工後の切り取り片がシェル内部へ侵入しないように、１～３点ほど加工を行わずにシェル本体と繋がっている部分を残した。この切り取り片は、カーボンファイバーの先端に紫外線硬化樹脂剤(Threebond.co.Ltd.)を塗り、引き剥がすことにより除去を行った。(図２－９)。RF フォームシェルは第３章で述べる組立て装置に装備されている真空チャックに固定した。

2－4－3　考察

加工痕の形状などの表面状態の観察から、加工痕以外の部分への熱的な影響は観察できなかった。これはレーザー光の吸収長が熱拡散距離に比べ十分短く、周辺部へは熱的な影響が少なかったものと考えられる。

熱分解開始の閾値をもとめる実験において、その表面温度を計算して求めてみる。熱分解加工が観察できなかった場合にはレーザーの強度が 3.6×10^4W/cm^2 であり、式(2-2)から(2-7)を用いて表面温度を計算すると、390K であった、これは、RF フォームが熱分解し始める温度と考えていた 430K よりも低い温度であるが、熱重量測定（図２－２）をみると IPA の蒸発と熱分解とが交差する領域であるため妥当であるといえる。また RF フォームが全て分解した場合のレーザーの強度は 1.4×10^5W/cm^2 であり、同様に計算すると、表面温度は 630K であり、これは、RF フォームが燃焼し始める温度と考えていた温度であった。このことから図２－２に示した熱重量分析の結果から推定した熱分解と燃焼の開始温度は正しかったと考えられる。

2－5　まとめ

高速点火レーザー核融合用フォームターゲット作製のためにフォームシェルのレーザーによる熱分解加工に関する研究を行った。この手法に必要な RF フォームの熱的特性及び光学的特性を測った。それらの物性をもとに、計算により RF フォームの表面温度を求め、1 回のレーザー照射でフォームへ必要な加工が実行出来る最適な照射強度と照射時間を求めた。その最適条件を使用したフォーム平板へのレーザー加工の実証を行った。その結果、加工後のフォーム平板にクラックなどは観察できず、局所的な加工が出来ることがわかった。加工痕の溝幅が±2μm 以下であり、目標値とする±2.5μm 以下を達成した。レーザー加工の加工深さはレーザーの照射時間が一定の場合レーザーの強度にほぼ比例することがわかった。レーザー加工の結果は測定した熱分解の温度と燃焼開始温度と計算により求めた温度分布によってよく説明されることがわかった。このフォーム平板の結果より求めた加工の条件を、RF フォームシェルの加工に適用した。シェル加工時

も加工の対壁に損傷は見られずシェルの穴あけに必要な精度の加工を実証した。

以上の成果により、RF フォームシェルに対する精度の高い穴あけ加工の手法が確立された。これにより、再現性の高い穴あけ加工が出来るようになった。

第 2 章の参考文献

(1) K. Nagai et al. "Foam materials for cryogenic targets of fast ignition realization experiment (FIREX)" Nucl.Fusion 45 p1277-83 (2005)

(2) T. Norimatsu et al. "Update for the drag force on an injected pellet and target fabrication for inertial fusion" Fusion Sci. Technol 43 p339-345 (2003)

(3) S. Lazare et al., "High-aspect-ratio microdrilling in Polymericmaterials with intense KrF laser radiation" Appl. Phys. A 69, S1–S6 (1999)

(4) http://www.tandk-inc.com/business/excimer1.html (2010/12/07)

(5) 小原寛ら "レーザー応用工学" コロナ社 pp59-91 (1998)

(6) I. Tokura, et al. "Heat transfer characteristics of foam flow at temperature up to 373K of heating surface" Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference 3 pp45-50 (2000)

第３章　組み立て技術の開発

3－1　はじめに

第２章ではフォームシェルに対する穴あけ加工の技術について述べた。しかし、依然としてターゲットの組立てには次のような課題が残っている。

１、組立て手順の確立

２、常温気密性試験方法の開発

組立て方法について、ポリスチレンの中空球にコーンを接続することはレーザーエネルギー学研究センター内の技術として確立している。しかし、クライオ燃料充填実験に供するターゲットを組み立てる場合には従来技術に加え、極低温環境下で燃料を導入することから、燃料導入管の接着が必要なこと、燃料導入管に詰まりがないなど、気密健全性を満たすように組み立てる必要がある。加えてフォームシェルに接着剤を塗布する際に接着剤がフォーム内部に浸透するのかを調べる必要がある。また FIREX-I 計画用のフォームシェルは 500μm と商用炉に比較して小さいために、コーンの挿入角度や位置決めの精度を高めることが困難であることや、各部品を接着する際の接着剤の量を低減することが難しい。本研究では、ターゲット組立てから、フォームシェルターゲットへの燃料充填までの一連を実証するため、組み上がったフォームシェルターゲットをクライオ燃料充填実験に供することを第一に考え、燃料導入管を通し、シェル内部に燃料を充填することが出来るターゲットの作製を目標にした。また事前に、接着剤がフォーム内部に浸透するのかを調べた。

ターゲットの作製においては、その気密健全性を確認する必要がある。ターゲットの組立てが完了した場合であっても、燃料導入管の先端の直径は 20μm と細く、組立工程で接着剤やシェルの破片が侵入し詰まりが生じ、燃料が入らないことがある。また、組立ての段階で接着不良があり、漏れが生じることがある。このターゲットを冷却し、燃料を充填する直前に気密健全性の欠如が発覚した場合、著しい時間と労力のロスになる。そこで常温の段階で燃料導入管の詰まりと接着不良による漏れがないことを確認するための試験方法の開発に取り組んだ。

3－2　組立て方法の確立

FIREX-I 用フォームクライオターゲットの組立てとして、前に述べたような理由からターゲットの気密性を重視したターゲットの作製を行った。作成したターゲットは二種類あり、直径 890μm のフォームシェルに金製コーン、ガラス製燃料導入管を接続したものと、直径 500μm のフォームシェルにパリレン製コーン、ガラス製燃料導入管を接続したものを作成した。双方とも共通して組立てに必要な課題は、

① 燃料導入管、コーンの作製、

② コーンとフォームシェルと燃料導入管の接着、

③ 蒸発防止膜のコーティング

である。

3－2－1　コーン、燃料導入管の作製

燃料導入管については、ガラス配管をプーラー(Model PC-10 (NARISHIGE))を用いて先端を細くし、ラジオペンチと小型ガスバーナーで曲げることで作製した（図３－１(a)）。この場合先端の直径は 10－20μm のばらつきがあった。もしくは市販の精子採取管(eppendorf) をそのまま使用した。

コーンはその成型性から、金もしくはパラキシリレン(パリレン)を用いて作製した。棒状の真鍮を小型旋盤で要求されたコーンと同じ角度(今回は 30°)に切り出し、その先端を先端から 50μm で切り落とす。この真鍮の型に 10μm の金メッキもしくはパリレンコーティングを行った後、真鍮を第二塩化鉄溶液で溶かし、コーンを取り出し使用した(図３－１(b),(c))。

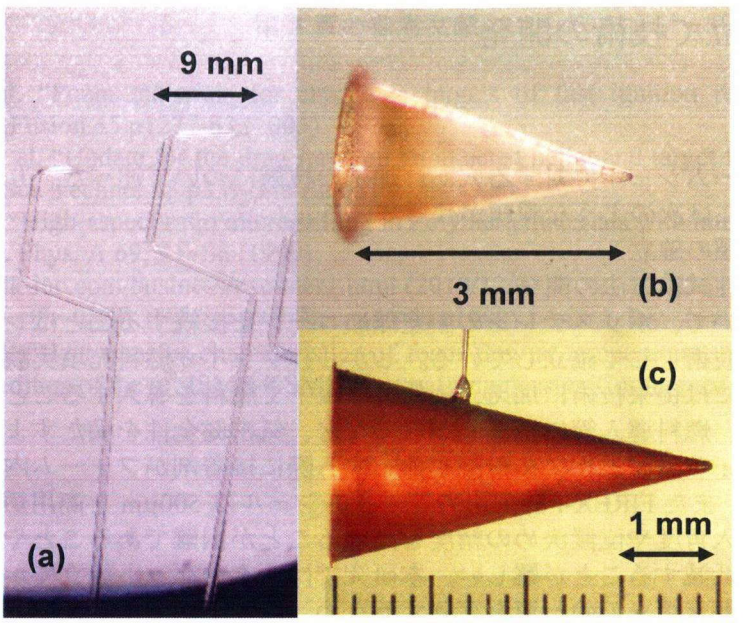


図３－１　ガラス製燃料導入管(a)とパリレン製コーン(b)の写真。(c)は金製コーンの写真。金製コーンには厚さ等の測定をするためにガラス管を接着している。

3－2－2　組立て用装置

FIREX-I 用フォームターゲットの組立てにはレーザーエネルギー学研究センターにある CCD カメラ付きマニュピュレーター（図３－２(a)）を使用した。この装置には XY 平面用と YZ 平面用

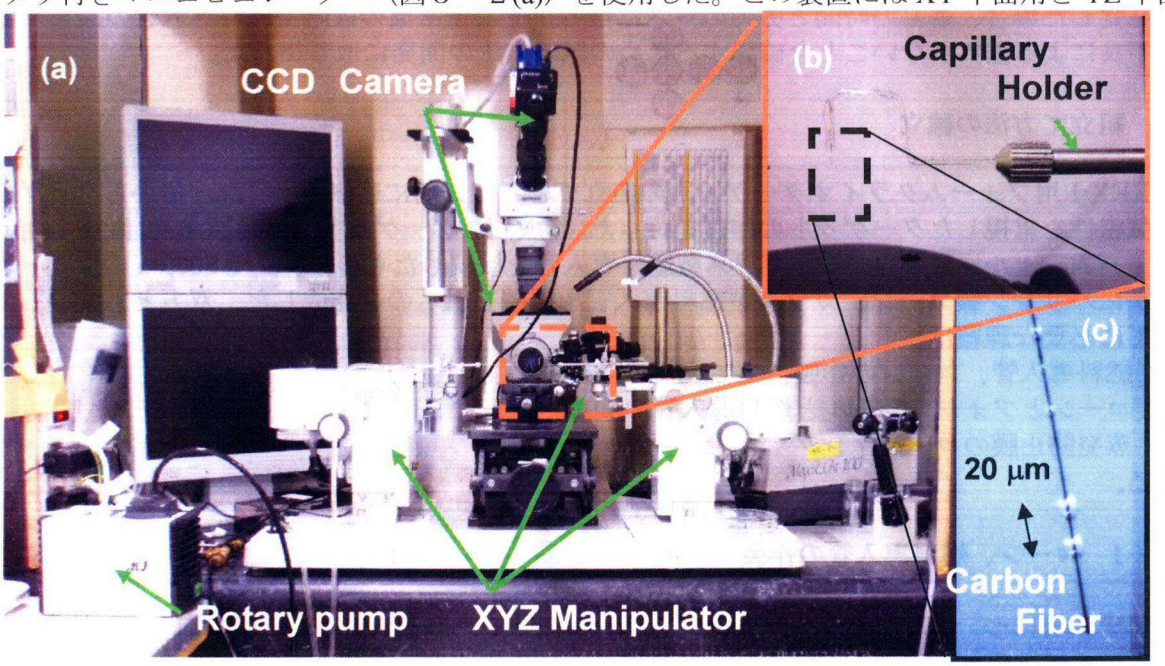


図３－２　ターゲット組み立て用装置。マニュピュレータは手前に２台と奥から手前に向けて動作するものが１台。手元を照らす照明などがある(a)。キャピラリーホルダーにカーボンファイバーつきのガラス管を接続した写真。接着剤を塗りたい角度にガラス管を曲げて使用する(b)。カーボンファイバーに接着剤の水滴が付着している写真(c)。

の二台のCCDカメラが備え付けられている。マニュピュレータは手前側に対向する向きに２台設置されており、奥側に１台手前に向かって動作するものが設置されている。マニュピュレータには（図３－２(b)）に示すキャピラリーホルダーが装着でき、このキャピラリーホルダーの先端に真空チャック用の先端や、カーボンファイバー付きガラスキャピラリーを装着できる。なお、真空チャックとして使用する場合、キャピラリーホルダーは真空ポンプに接続される。接着剤を塗布する場合には、ガラス管にカーボンファイバーをくっつけ、そのカーボンファイバーに紫外線硬化性樹脂(UV Curing Resin 3030, Threebond Co.,Ltd)を塗り、最適な量の水滴になるように調節して使用した（図３－２(c)）。

3－2－3　接着剤のフォーム層への浸透

フォームシェルに接着剤をそのまま塗布した場合に、表面張力の影響で接着剤がフォームの内部に浸透してしまう可能性がある。フォーム内部に接着剤が浸透した場合、重量不均一性の原因となり高密度圧縮の妨げになる。そこで接着剤がフォームの内部に浸透するのかを調べた。フォーム平板に接着剤を付着させ、10分の時間経過をみたところ接着剤が浸透していく様子は確認できなかった（図３－３）。接着剤の粘度が高く接触角も90度近くあることから、浸透深さは大きくなかったものと考えられる。

図３－３　紫外線硬化樹脂をRFフォーム平板に接触させ、浸透するかを試した。紫外線硬化樹脂のRFフォーム平板に接触前(a)、接触直後(b)、接触後10分後(c)の各写真。

3－2－4　組立て

各部品が出来上がった後に前述の装置を用いて組立てを行った。組立ての手順は
① コーンと燃料導入管の接続、
② コーンと燃料導入管が一体になったものとフォームシェルの接続、
の順に行うこととした。

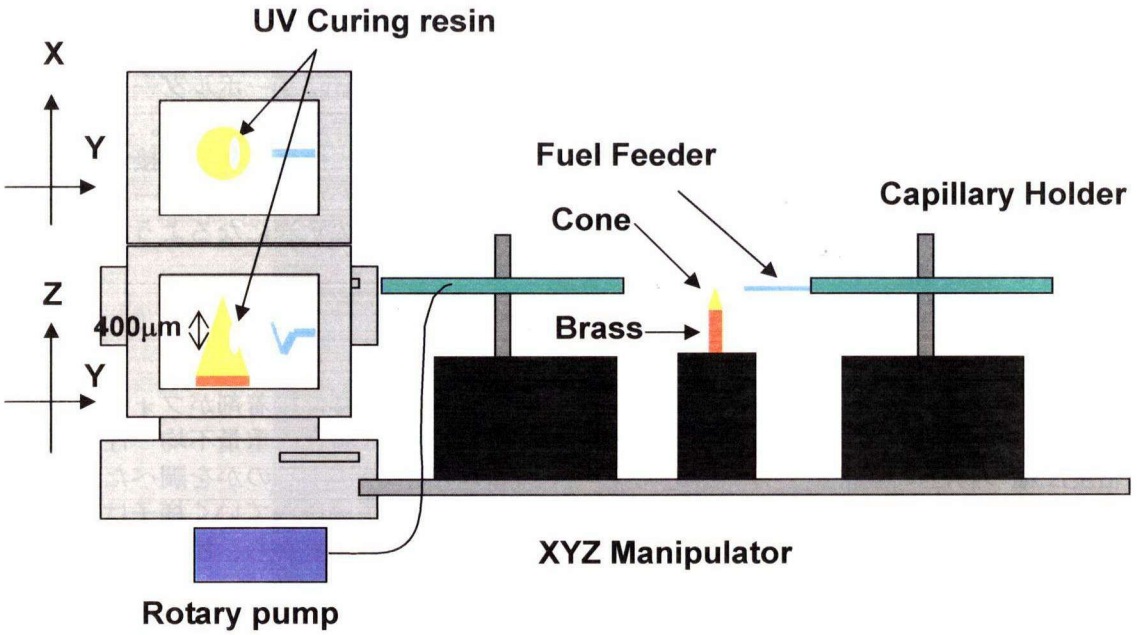


図３－４　コーンと燃料導入管を接続する様子の概念図。コーンと燃料導入管をつなげる接着剤はコーンの先端より 400μm よりも下側に塗布した。

① コーンと燃料導入管の接着（図３－４）

真鍮をコーンの先端角と同じ角度に切り出し、その上にコーンを乗せる。コーンの先端が CCD カメラの中央に来るように位置決めを行う。必要な角度に折り曲げた燃料導入管をキャピラリーホルダーに接続し、マニュピュレータによりコーンに近づける。コーンの先端よりも 100μm ほど下側に燃料導入管の先端が来るように調節し、接着剤により接着させた。

② コーンと燃料導入管が一体になったものとフォームシェルの接続（図３－５）

コーンと燃料導入管が一体になったものをキャピラリーホルダー①に接続し、フォームシェルは真空チャックにより固定した。この真空チャックはマニュピュレータ②に接続した。奥側にあるマニュピュレータ③は接着剤を塗布するハケとしてカーボンファイバーを接続した。コーンと燃料導入管が一体になったものとフォームシェルを近づけ、接点がコーンのどの高さになるのかを確認し、一旦フォームシェルを引き離した。さきほど確認したコーンの高さにカーボンファイバーで一周接着剤を塗布した。カーボンファイバーを遠ざけた後、フォームシェルを近づけ、紫外線を照射し接着させた。

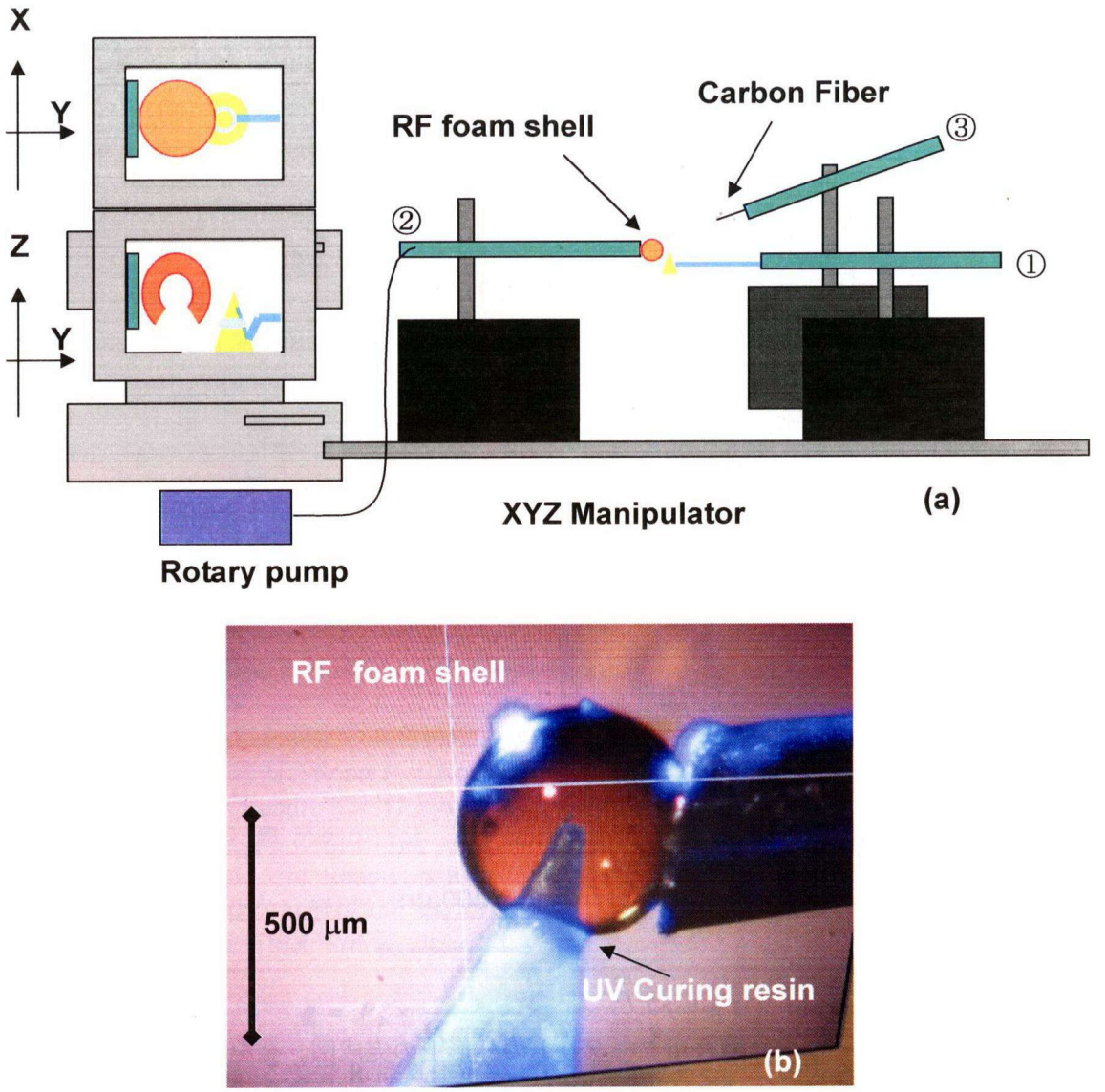


図３－５　フォームシェルと燃料導入管＋コーンを接続する概念図(a)。紫外線硬化樹脂に紫外線をあて硬化させている写真(b)。

3－2－5　蒸発防止膜のコーティング

蒸発防止膜のコーティングについては、可視光計測を念頭においているため、コーティング材としてプラスチック材料を採用した。プラスチック材料のコーティング法にはプラズマ重合法や、レーザーCVD などがあるが[1)]、単純な化学反応ゆえに安定してコーティングでき、レーザーエネルギー学研究センターとしてコーティング装置固有の経験値が最も高いパリレンコーティング[2)]を採用した。スライドガラスにも同じコーティングを施し、シェルにコーティングされているパリレンの厚さの推定を行った。この推定を基にシェルにパリレンが 5μm コーティングされるまでコーティングを行った。RF フォームにパリレンをコーティングした後の表面状態を SEM により調べた（図３－６(a)）。この図において観測できる凹凸は概ね直径 100nm 以下であり、第一章で述べた高速点火ターゲットの表面精度(凹凸は 0.1μm 以下)の条件は満たしている。また HeNe レー

ザーを用いた干渉計で画像撮影したところ、レーザー光は透過しており、燃料の充填量測定にHeNe レーザーの使用が出来ることがわかった（図３－６(b)）。

以上でクライオ燃料充填実験に供するターゲットの組立ては完了した（図３－７）。このターゲットの気密健全性の試験については次節で述べる。

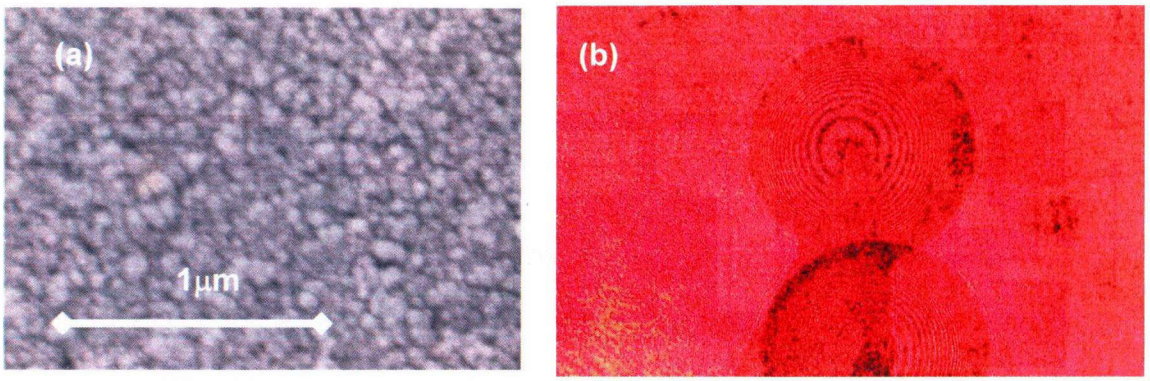


図３－６　RF フォームの平板にパリレンをコーティングした表面の電子顕微鏡写真(a)。パリレンコーティング後の干渉写真(b)。

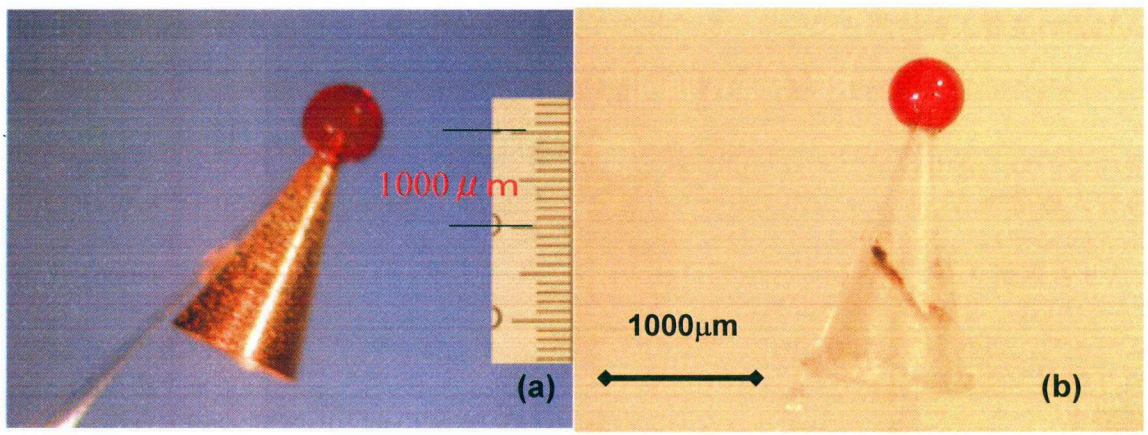


図３－７　高速点火レーザー核融合用ターゲットの外形上の完成図。金をコーンに用いた場合(a)と、パラキシリレンをコーンに用いた場合(b)の写真。

3－3　常温気密性試験方法の開発

ここまででは、気密健全性については未確認である。ここで漏れや詰まりがあっては燃料を充填できず、フォームクライオターゲットとして完成したことにはならない。そこで常温で気密性を確認できる装置の開発を行った。干渉計測を用い、干渉縞の変化からフォームシェル内部のガスの圧力を測定することで気密性を確認することにした（図３－８）。干渉計測において、漏れを発見するためには、内部に充填する気体は屈折率の高いガスの方が望ましく、また蒸発防止膜に対して透過量は小さい方が正確な測定が出来る。そこで六フッ化硫黄ガス(SF_6)を用いて試験を行うことにした。六フッ化硫黄ガスの 273K、0.1MPa における屈折率は 1.000783 で空気の屈折率(1.000292)や二酸化炭素の屈折率(1.000450)に比べて高い [4,5]。また分子量 146 と窒素(28)や二酸化炭素(44)と比較して大きいことから、パリレンに対する透過率が低いことが期待できる。そこで六フッ化硫黄ガスのパリレンに対する透過率を調べたうえで、干渉計測により内部の圧力の様子を見ることで、常温での気密健全性を調べた。

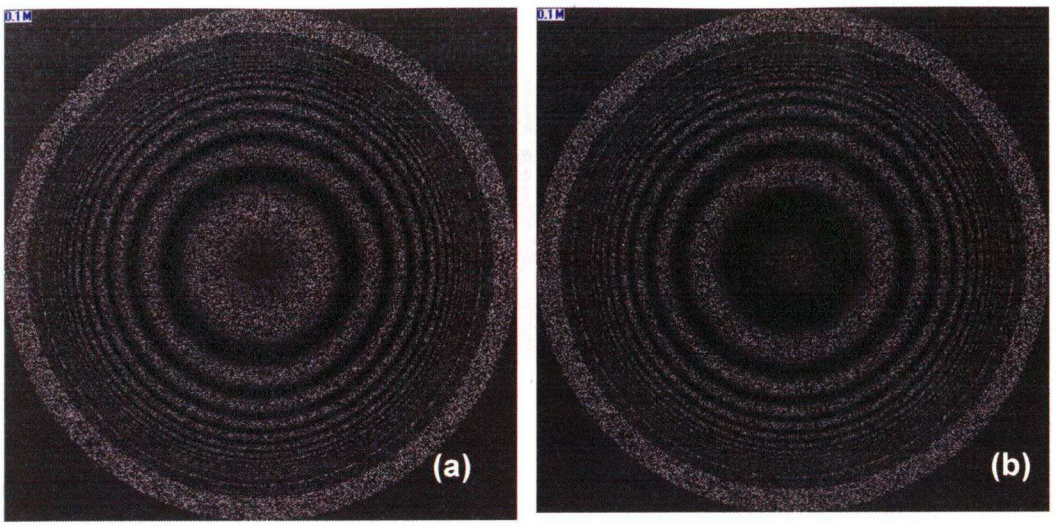


図３－８　直径500mm、RFフォーム100mg/ccが20mm、蒸発防止膜5mmのターゲットの干渉図。(a)は内部が真空、(b)は内部に六フッ化硫黄ガスが 0.1 MPa 充填されている。Shell optic model (Lebedev Phisical Institute,Moscow)[3)]を用いて計算した。

3－3－1　六フッ化硫黄ガスのパリレン膜透過率測定

六フッ化硫黄の透過率を測定するために図３－９に示すような装置を作った。透過率 q を求めるにあたって、二つの容器、Room1 と Room2 をサンプルで仕切り、Room2 は真空にしておく。そして六フッ化硫黄を Room1 にだけ充填する。原理的には Room1 内の圧力は透過によって低下していき、Room2 の圧力との差圧は減っていくため、透過率は指数関数的に下がっていくはずであるが、この実験においては Room1 と Room2 はそれぞれ透過する量に対して十分な広さがあるため、透過率の時間変化分は無視できる。ここで Room1 の圧力を P_1、Room2 の圧力と体積を P_2、V_2 とし、サンプルの表面積を $S(m^2)$、サンプルの厚みを t (μm)、測定時間をτとすると透過率 q は

$$q = P_2 \times \frac{P_1}{1(atm)} \times \frac{t}{S} \times \frac{1(day)}{\tau} \times V_2 \quad (\mathrm{cc\ \mu m/m^2 \cdot d \cdot atm}) \qquad (3\text{-}1)$$

と求めることができる。ここで R は気体定数、T は温度である。この方法でパラキシリレンの薄膜とポリスチレンの薄膜に対する六フッ化硫黄の膜透過率を測定した。測定は直径 6mm の円に厚さ 5μm の各サンプルを接着剤で貼り付け、Room1 の圧力を 0.1MPa まで加圧し 20 分間測定した。測定した結果を表 3-1 に示す。サンプルによってバラつきが大きかった。その理由は、サンプルの仕上げにバラつきがあり、平均すると厚さは 5μm であるが、サンプルによっては非常に薄く透過率の高い部分を有するものがあることためだと考える。

表 3-1 透過率 (10^3 cc μm/m^2·d·atm)

	平均	最小	最大
Poly(*p*-xylylene)	6.1	1.4	11.0
Polystelene	6.5	1.0	7.7

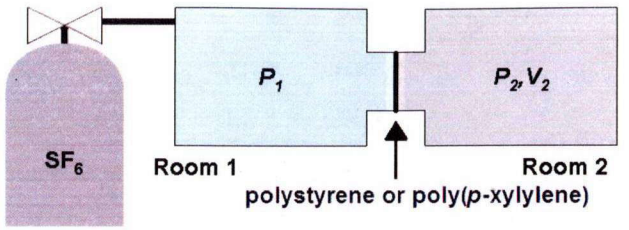


図３－９　透過率測定用装置の概略図。Room1 には六フッ化硫黄(SF_6)ガスのボンベが接続してあり、Room1 と Room2 には圧力計が備え付けられている。

3－3－2　常温気密性試験測定方法

気密性を試験するための装置を図３－１０に示す。六フッ化硫黄ガスのボンベは燃料導入管に接続してされて、また一方でポンプにも接続されている。このターゲットの燃料導入管と配管の接続部は swagelok 社の Urtra-torr1/16inch (SS-1-UT-6,swagelok)を用いた。燃料導入管にとって非破壊な真空用継手だからである。ガスの圧力はダイヤフラムゲージにて測定した。干渉計測にはマイケルソン型干渉計を採用した。ここではターゲットを透過した後のレーザー光をハーフミラーで分割し、ターゲットを透過した部分と、ターゲットの横の何も無い空間を抜けてきたレーザー光を干渉させるシェアリング方式を取った。波長が 632.8nm と 594.1nm の異なる２本のレーザーを用いた。ここで図３－１１に示すように、干渉縞の模様から、内部の圧力が変化したことは容易に判断できるが、内部の圧力を測定するには非常に高精度な画像取得の技術と画像処理能力が求められる。そこで、高精度１軸ステージの上にマイケルソン干渉計を構成するミラーの一つを乗せた。ただしこちらのミラーを経由するレーザー光は参照光のほうである。そしてミラーの向きをθだけ動作軸から傾けて動かす（図３－１０右上)。これによって参照光の距離を Xsinθずつ動かすことができる。

実験手順として、ターゲットをこの試験装置に取り付けた。ターゲットを取り付けた後に光学系のアライメントをおこない、赤色、黄色の両方で干渉像が撮影できるようにした。赤色のレーザーのみを照射し、ハーフミラーで分割したレーザー光は、撮影モニター内に５本程度暗線が観察できるようにミラーの傾きを調節した。次にターゲット及び全ての配管の真空排気を行い、内部圧力が10Pa 程度まで真空引きを行った。真空引きのあとに、１軸ステージを動かし、シェルの中央が暗線となるように調節した。このとき１軸ステージの角度も調節し、ステージの動作を1

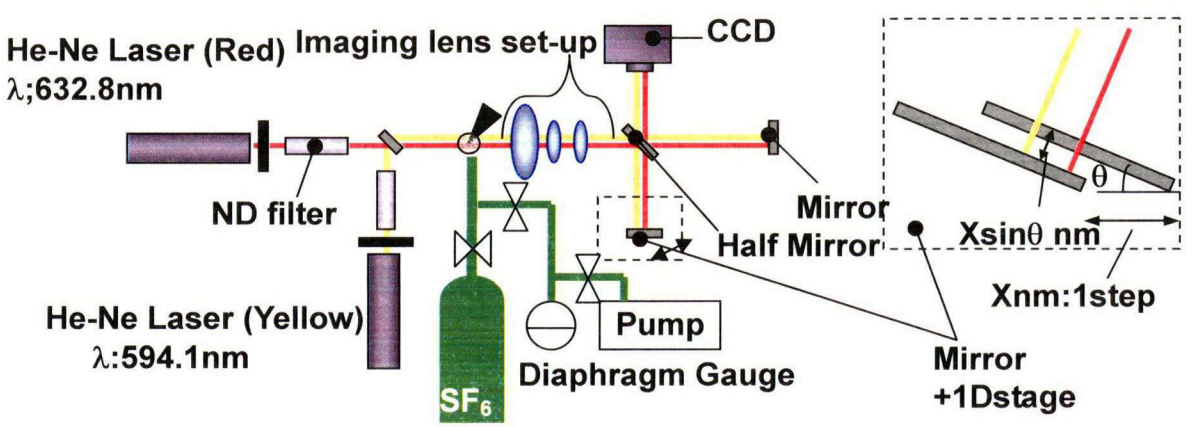


図３－１０　気密性を試験するための装置の概略図。１軸ステージの移動分解能を高める技術の概略を右上に示す。

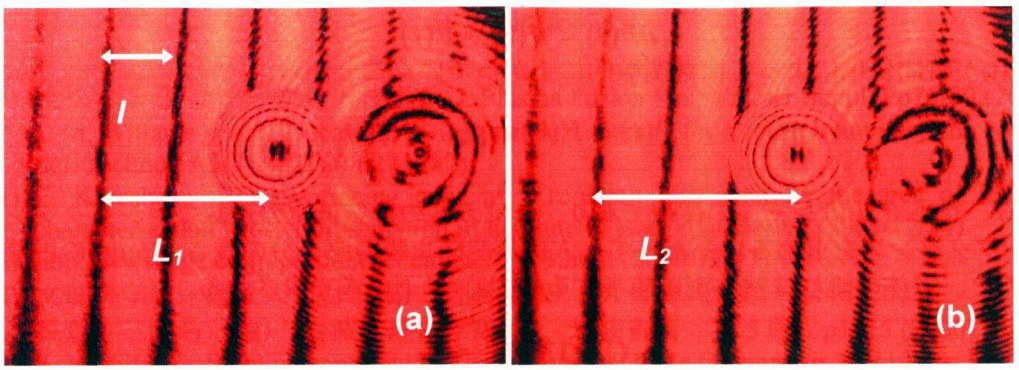


図３－１１　フォームシェル内部が真空状態の干渉縞(a)と、六フッ化硫黄ガスを 0.1MPa 充填した直後の干渉縞の写真(b)。このとき模擬サンプルとしてポリスチレンシェルを使用した。

ステップあたり1/21λ変化するように調整した。1色のレーザーによる干渉模様ではその繰り返し性よりどの暗線がどちらに動いたのか判断が難しい。そこで2色のレーザーを照射し、片方の暗線が SF_6 充填前後でどの暗線同士が対応しているのか見分けられるようにした。波長の異なるレーザーを使用した場合、干渉縞の周波数が異なることから、片方のレーザーにより生じた暗線の色味がもう一方の光線の影響を受け、判別できるようになる。次に六フッ化硫黄ガスを 0.1MPa 充填し、シェル上の干渉縞の変化を観察した。干渉縞が変化した場合には、燃料導入管に詰まりが無いといえる。シェル内部が真空のときに、シェルの中央に暗線が来るように調節したが、六フッ化硫黄充填後は屈折率の変化に伴い暗線が移動する。充填後もシェルの中心に来るように１軸ステージを調節した。ターゲットの気密健全性を確認するために封じ切のまま 12 分間（測定時間が長いほど検出感度があがるが、簡便であることを優先し 12 分の測定とした。）放置し、透過やリーク等のために移動した暗線を再びシェルの中央に来るように調節した（図３－１１）。この 12 分間の変化から六フッ化硫黄の透過やリークを評価する。内部の圧力を計算するため暗線同士の間隔 l を測定した。次にシェル中心と、任意の暗線（但し充填前後で同じもの）の距離(L_1 と L_2)を測定する。ここでシェルの直径を d とすると、六フッ化硫黄充填後のシェル内部の屈折率 n は以下の式(式 3-2)で計算できる。

$$(n-1)=\frac{(L_2-L_1)}{l\cdot d}\lambda \qquad (3\text{-}2)$$

この屈折率の値から Lorents-Lorenz の式[6)]を用いることによって内部の圧力は計算することが出来る。 この内部の圧力が六フッ化硫黄の充填直後から 12 分経過後までに透過を超える量の変化をしていない場合にはこのターゲットに、漏れはないといえる。図３－１１を画像解析すると、l=27.2(a.u.)、L_1=63.0(a.u.)、L_2=76.5(a.u.)である。これらの値と用いたレーザーの波長λ=632.8 nm、シェルの直径 500μm を式 3-2 に代入すると、シェル内部の屈折率は 1.00072 と求めることができた。0.1MPa の六フッ化硫黄ガスの屈折率は 1.000783 であるためこのターゲットには漏れがあることになる。

3－3－3　気密性試験時の透過による圧力変化の影響に関する考察

5μm のパリレン膜を六フッ化硫黄が透過することによるシェル内部の圧力低下を計算すると 12 分間で 12Pa であることが 3－3－1 に示した透過率測定の結果よりわかった。製作時の誤差に起因すると思われるシェル透過率測定のバラつきを考えるとこの透過による圧力低下よりも低い値の漏れがあった場合にはこの装置において発見することが難しい。漏れの原因となる穴が一つであったと仮定した上で、その穴の大きさを評価する。漏れ量は充填直後の圧力から 12 分後の圧力との差によって求められる。ある時刻 t におけるシェル内部の圧力を P(t)とすると漏れによる圧力低下 dP は、

$$dP(t) = P(0) - P(t) \tag{3-3}$$

そして、P(t)が時間変化によって指数関数的に下がっていくことから、

$$P(t) = P(0)\exp(-\frac{C}{V}t) \tag{3-4}$$

と表される。ここでVはシェルの体積であり、Cはガスの排気抵抗の逆数でコンダクタンスである[7]。コンダクタンスを求めるにあたって、穴は蒸発防止膜の厚さ分の長さL(5μm)の円管であると仮定すると、気体の流れは粘性流に該当するので、以下の式で表される。

$$C = 1349\frac{d^4}{L}P' \tag{3-5}$$

この式においてP'はシェル内部と外との平均圧力であり、dは穴の直径である。以上の式(3-3)から(3-5)までを用いて計算すると、透過による圧力低下(12Pa)と同様の圧力低下を生じさせる穴の直径は25.2nmであった。

3－3－4　気密性試験測定のまとめ

干渉計測を用いた常温での気密性試験方法について検討を行った結果、シェル内部を真空にした状態の後、六フッ化硫黄ガスの充填前後の干渉縞の変化を視認することで燃料導入管の詰まりの有無を確認できた。燃料導入管に詰まりがないと判断できたあと、封じ切のまま12分間測定を続け、干渉縞の変化から内部の圧力変化を評価することで漏れがあるか否かを判断できた。試験に用いたシェルの場合は直径25nm程度までの穴であれば透過による圧力低下とシェルの透過が同等になり、漏れによる圧力変化を検出することが容易になると考えられるため、本方法で穴の有無を確認することが出来るはずである。この方法では1ターゲットあたり作業時間と測定時間を足し合わせても30分程度で気密性の試験をすることが出来る。

3－4　まとめ

本章では、FIREX-I用フォームクライオターゲットの開発において、クライオ燃料充填実験に供するターゲット製作のための

1、組立て手順の確立

2、常温での気密性試験方法の開発

を行った。

本研究では、クライオ燃料充填実験に供することを第一に考え、組み立て精度を目的とせず、燃料導入管から燃料を導入し、内部に燃料を充填するまでの一連の実験ができるターゲットの製作を行った。金コーンターゲットとパリレンコーンターゲットの二種類の製作をした。製作においては①燃料導入管、コーンの作製、②コーンとフォームシェルと燃料導入管の接着、③蒸発防止膜のコーティングの順で行うと組み立てることが出来た。また組立て前の予備試験で、接着剤がフォーム内部に浸透しないことがわかった。

組立てが完了したあと、組立工程で生じた詰まりの有無、また、接着不良による漏れの有無について実験的に調べる方法を確立させた。六フッ化硫黄ガスをターゲットに導入し、ターゲット内部の干渉像の変化から気密健全性の確認を行うことが出来た、この方法では常温で1ターゲットあたり30分程度で調べることが出来、本研究の場合、直径程度のリーク穴であれば検出できるはずである。

第 3 章の参考文献

(1) 乗松　孝好　“ターゲット技術”　J. Plasma Fusion Res. Vol. 81 Suppl. Pp76-80 (2005)
(2) J. M. Willams and J. T. Rowen, “Diagnosis and therapy for a recalcitrant parylene coater” J. Vac. Sci. Technol. A5(4) pp2760-62 (1987)
(3) E. Koresheva “3D ray tracing code as a research instrument in the area of ICF/IFE target characterization” poster presentation in Institute of laser engineering (2003/12/24)
(4) http://www.agc.co.jp/products/chemical/sf6_3.html (2010/12/17)
(5) 文部科学省　国立天文台（編）”理科年表”　丸善株式会社　p446 (2003)
(6) 長倉　三郎ら（編）”岩波　理化学辞典”　岩波書店　第 5 版　p1515 (2000)
(7) S. Yoshikawa, Sinnkuu handobukku (in Japanese) (ULVAC, Japan) p.36. (1989)

第４章　フォーム層に対する高密度固体燃料充填の原理実証

4－1　はじめに

第２章、第３章において高速点火レーザー核融合用フォームクライオターゲットを作成するための要素技術の開発を行い、燃料充填実証にターゲットの供給が可能になった。このターゲットの低密度フォームの部分に液体状の水素同位体燃料を充填し固化させ、FIREX-I の実験に用いられることになる。このときフォーム層に液体状態で充填された燃料の固化に伴い密度変化が生じ、フォームのセル内に微小な気泡の生成が指摘されている [1)]。しかし、これまでにどのような気泡がフォーム層内に発生しているか、言い換えるとフォーム層における固体燃料の充填率を実験的に調べた例はない。固体燃料の充填率を評価する方法を考えてみると、気泡の大きさは数十 nm であることが予想されるため、一つ一つ気泡を見つけ直接評価するのは困難である。そこである程度の厚みを持たせたフォームを用意し、気泡の存在による光学的影響を厚さ分積分して求め、ある領域の平均値として気泡の存在を評価する手法を検討する。光学的な評価は干渉計測を用い、フォーム層内の固体燃料の充填率を評価することを目的とする。

実際の核融合実験では爆縮性能の観点から固体燃料の充填率は 99%以上であることが求められている。そこで、固体燃料の充填率を評価する方法の開発と同時に固体燃料の充填率を上げる方法の開発も行った。今回の研究では固体燃料の充填率を上げる方法の原理実証のみに焦点を当て、シェル状サンプルを使った実証ではなく、詳細にフォーム層の状況を観察でき、実験条件の決定も容易な楔形(ウェッヂ型)の模擬サンプルを用いた。

4－2　原理

実験において利用した原理は次の通りである。

① ウェッヂ構造を通過したときにできる光路差を利用してフォーム層内部の屈折率を測定する。液体状態や固体状態の各屈折率を測定することでフォーム層内の状況把握や燃料充填率の評価が可能になる。

② 充填率向上のためのフォーム層に温度差をつけ、固化面を一方向のみに成長させる固相の成長方向を制御し固体燃料充填率の向上を狙う。

4－2－1　屈折率測定と充填率評価

屈折率の測定は、ウェッヂの内部に測定対象を充填し、干渉計測を行う方法を用いた（図４－１)。レーザーの入射角はウェッヂの入射側面に対して垂直であると仮定する。図４－１において充填した水素によってできる干渉縞の間隔を l、サンプル内部の屈折率を n_1、容器の壁の屈折率を n_2 であるとし、レーザーの出射側の容器の窓における入射角はウェッヂの先端角θであり、その屈折角をαとおくと、これらの関係はスネルの法則より、

$$n_1 \sin\theta = n_2 \sin\alpha \tag{4-1}$$

と表すことができる。同様に入射角αと屈折角βの関係は、サンプルの外側の屈折率を n_0 とすると、

$$n_2 \sin\alpha = n_0 \sin\beta \tag{4-2}$$

となる。図４－１における光路 a と光路 b の光路差 dL は、図中の A と B の差が光路差 dL となる。dL を干渉縞の間隔 l を用いると

$$dL = n_1 l \tan\theta \cdot \frac{\cos(\theta)}{\cos(\beta)} \cdot \cos(\beta-\theta) - n_0 l \tan\theta \cdot \frac{\cos(\theta)}{\cos(\beta)} = \lambda \tag{4-3}$$

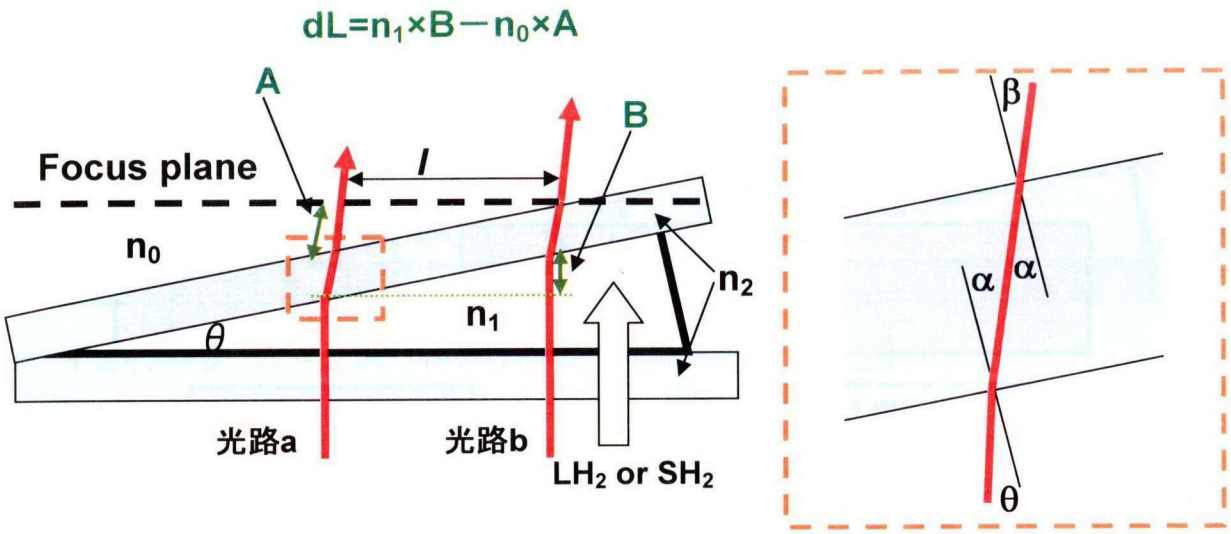


図４－１　ウェッジ型サンプルの断面の概略図。レーザーの光路と入射角と屈折角を示す。

と表すことが出来る。この式に基づいて内部に充填された測定対象の屈折率の絶対値測定をすることが出来る。

現実の実験では、常温でサンプルを作製し、低温の環境において測定を行うため、サンプルは収縮する。また、光学部品などの精度から縞間隔 l の正確な測定は難しい。ここでウェッヂ内部に含まれる物質の屈折率 n_1 と干渉縞の間隔には相関関係があり、そこで、液体水素の屈折率を基準に、固体水素の屈折率を求めることにした。液体水素の屈折率は既に調べられており [4]、液体水素を充填した場合の干渉縞の間隔と、固体水素を含んだ場合の干渉縞を測定し、比較することで相対的に固体水素の屈折率を求めることができる。この場合、実験中に変化する温度は 4K 程度であり、収縮による屈折率の影響は無視して良いと考える。また、屈折率を求める場合には、簡単のため、θ=βとして、図４－２のような光路を取るとした。(この近似の妥当性は 4−5 において述べる。)図４－２の光路において、光路差 dL'は、同様に C と D の部分で光路差が生じるので、

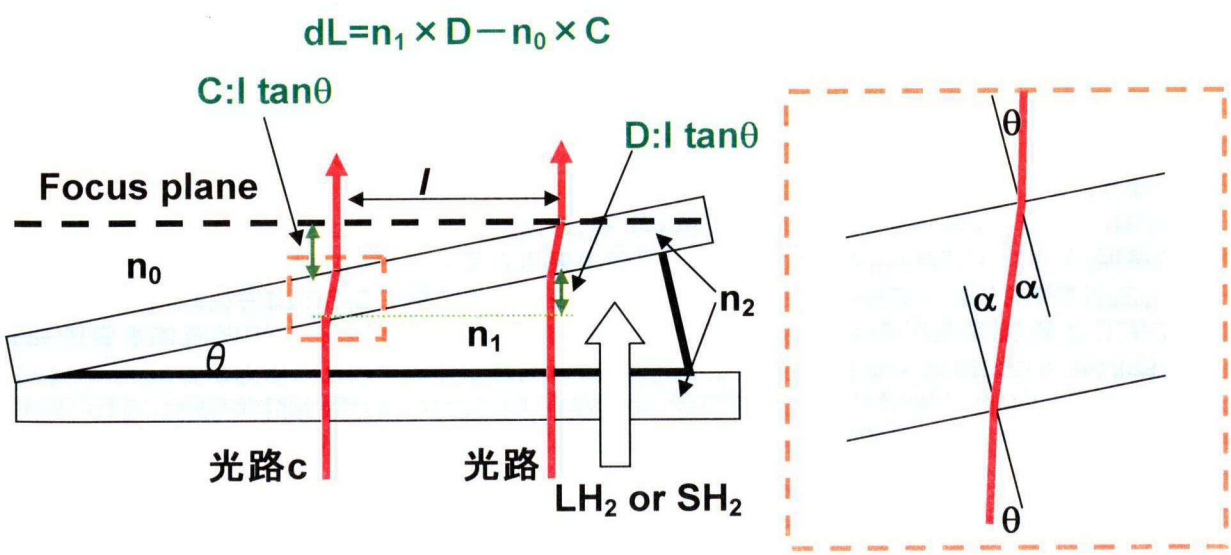


図４－２　ウェッジ型サンプルの断面の概略図。簡単のためθ=β と仮定する。

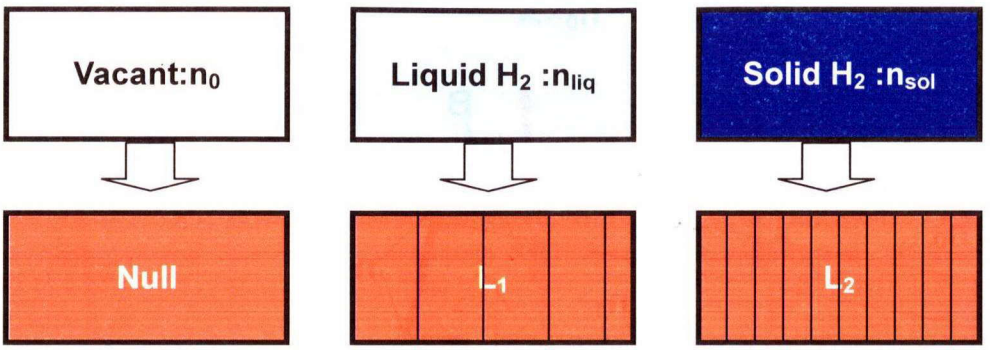


図４－３　充填した内容物と干渉縞の間隔の対応関係を模式的に示す。中に何も入っていない状態において参照光と物質光の光路をそろえることで干渉縞は null になる。シェアリング干渉計のため、参照光は光線のうちサンプルを透過していない部分を使用する。

干渉縞の間隔 l を用いて式 4－3 は、

$$dL' = n_1 l \tan\theta - n_0 l \tan\theta = \lambda \tag{4-4}$$

と書き直すことができ、この式において、液体水素の屈折率を n_{liq}、固体水素の屈折率を n_{sol} とし、液体水素がウェッヂ内部に充填した場合の干渉縞の間隔を l_1、固化させた後の干渉縞の間隔を l_2 として連立方程式を解くと、

$$n_{sol} - n_0 = (n_{liq} - n_0) \times \frac{l_2}{l_1} \tag{4-5}$$

このように表すことが出来る。液体水素の屈折率は既に調べられており [4)]、液体水素を充填した場合の干渉縞の間隔と、固体水素を含んだ場合の干渉縞を測定し、比較することで相対的に固体水素の屈折率を求めることができる。

フォームに含まれる固体水素のみかけの屈折率をもとめる場合において、それぞれの状態についての屈折率を表すと、フォームの屈折率を n_{foam}、フォームに液体水素が充填された場合を $n_{foam+liq}$、固体水素が充填された場合を $n_{foam+sol}$ とすると、

$$n_{foam+liq} = n_{foam} + V_g(n_{liq} - 1), \tag{4-6a}$$

$$n_{foam+sol} = n_{foam} + V_g(n_{sol} - 1) \cdot k \tag{4-6b}$$

となり、ここでフォームに何も入っていない状態の屈折率はフォームの屈折率 n_{foam} の値そのままであり、フォームの中に液体水素を充填した場合の屈折率 $n_{foam+liq}$ はフォームのボイド比 V_g(第二章参照)を用いて式(4-6a)のように表すことが出来る。そしてフォーム内部の固体水素の屈折率 $n_{foam+sol}$ は固体水素の充填率を k とすると、式(4-6b)のように表すことが出来る。ここで固体水素内に生じた飽和蒸気圧をもち水素ガスの屈折率は 1.00002(14K,632.8nm)と液体水素の屈折率 1.120(14K,632.8)に比べて十分小さく、真空(屈折率 1)として取り扱う。

フォーム内部の屈折率を測定する場合には、あらかじめウェッヂ内部にフォーム材が入った状態である。そこでフォームが入った状態で干渉縞が null になるように調整すると、図４－４に示すように、フォームがあることによって生じた位相差を打ち消すことになる、つまり、ウェッヂを抜けた光が再び同じ角度を持ったフォーム材を透過する状態を模擬することになる。この状態で、ウェッヂ内部に液体水素を充填した場合、隣り合う二つの暗線の位置を抜ける光線の光路差 $dL_{foam+liq}$ は、レーザー光の波長をλ、この暗線の間隔を l_3 とすると、

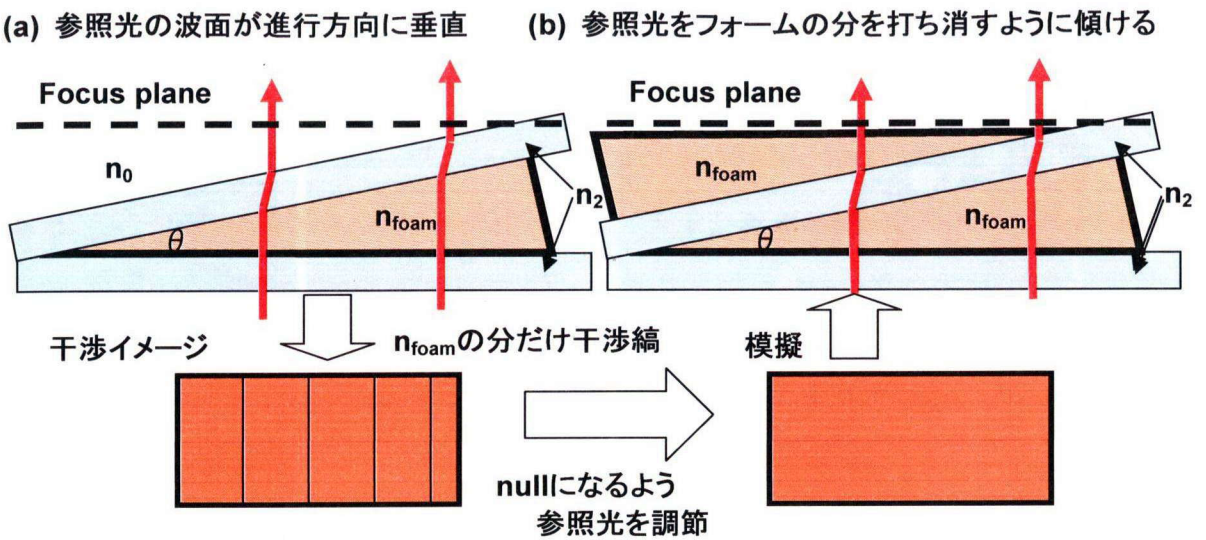


図４－４　フォーム入りウェッヂのフォーム内に充填した物質の屈折率の測定方法。(a)フォームが存在する分干渉縞が発生する。(b)null にすることでフォームによる位相差は打ち消され、ウェッヂの透過側に同じフォームが存在する状態と同じ効果がある。

$$dL_{foam+liq} = n_{foam+liq} l_3 \tan(\theta) - n_{foam} l_3 \tan(\theta) = \lambda \tag{4-7}$$

このように表すことが出来、同様に固体水素が充填した場合の暗線の間隔を l_4 とすると、光線の光路差 $dL_{foam+sol}$ は、

$$dL_{foam+sol} = n_{foam+sol} l_4 \tan(\theta) - n_{foam} l_4 \tan(\theta) = \lambda \tag{4-8}$$

このように表される。ここで、式 4-6 から 4-8 によると、フォーム内部の固体水素の充填率 k は

$$k = \frac{l_3(n_{liq} - 1)}{l_4(n_{sol} - 1)} \tag{4-9}$$

と求めることができる。以上から、固体水素の屈折率 n_{sol} をもとめ、液体水素をフォームに充填した場合の干渉縞の間隔 l_3 と、固体水素をフォームに充填した場合の間隔 l_4 を測定することでフォーム内部の固体水素の充填率 k を評価することが出来る

4－2－2　充填率向上のための固化方法の原理

フォーム内部に充填された液体燃料を固化させた際に、相変化に伴う密度変化が生じ、体積が減少する。この体積の減少によって、気泡が発生すると考えられている。そこでフォーム層に温度勾配を設け、固化を温度の低い側からゆっくり高温側へと進展させ全体を固化させる手法、すなわち温度差による固相の成長方向制御手法を採用し、固体の充填率向上実証を試みた。この方法では、固化による収縮のあと、近傍に液体水素があるため、その表面張力現象によって、固体と液体の界面に継続的に液体水素が供給され気泡の発生を抑えることが期待できる。すなわち燃料の固化→体積の減少→表面張力による液体水素の固化面への流入・固化を繰り返すことで充填率の高い燃料層を実現する（図４－５）。ここで界面の移動速度について考察する。界面の移動速度の計算に必要な各物性値を表４－１に示す。RF の臨界表面張力はまだ調べられていないのでポリスチレンの値で代用した。冷却が急速であり、セル同士の燃料のやり取りが無くフォームのセル及び気泡が真球であると仮定すると、一つのセルに含まれる気泡の体積 V_{void} はセルの体積 V_{cell} と、固体水素の体積 V_{sol} の差 $V_{void}=V_{cell}-V_{sol}$ であり、固体水素の体積 V_{sol} は液体水素の密度

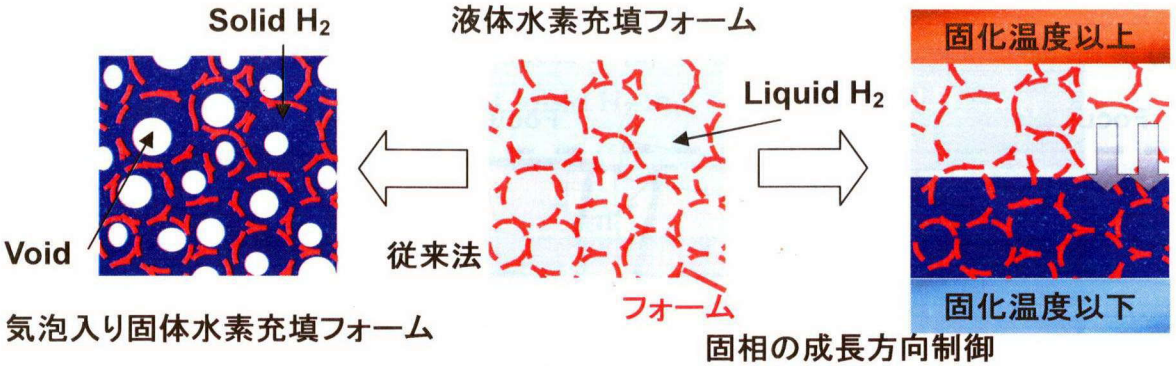


図４－５　全体を急速に固化させた場合では固化した際に各セル内で固相への転位が完結し、フォーム内に気泡が残ってしまう。温度勾配をつけ、一方向から固化を進行させることで常に固化面は液面と接しており、燃料の流入が生じる。

表　４－１　界面の速度を計算する際に用いる物性値

水素	
液体密度[5] d_L	76.6 mg/cm^3
固体密度[5] d_S	86.0 mg/cm^3
表面張力[6] γ_L	3.00 mN/m
粘度[7] η	2.54×10^{-5} Pa sec
ポリスチレンの臨界表面張力[8] γ_c	33mN/m
重水素	
表面張力[6]	3.56 mN/m
粘度[7]	3.91×10^{-5} Pa sec

d_{liq} と固体水素の密度 d_{sol} を用いて $V_{sol}=V_{cell}\cdot d_{liq}/d_{sol}$ と表すことができる。以上より気泡の半径 r_{void} は、フォームセルの半径を r_{cell} とすると、

$$r_{void} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}(1-\frac{d_{liq}}{d_{sol}})V_{void}} = 0.478 * r_{cell} \tag{4-10}$$

と計算することができ、フォームのセルサイズの半径 r_{cell} が 100nm で均一であるとすると、半径 47.8nm の気泡ができることになる。

表面張力による液体の流入と時間の関係について、Lucus-Washburn の式が解析の基本式として用いられる[9]。これは次の式 4-11 で表される。

$$h = \sqrt{\frac{r\gamma\cos\theta}{2\eta}t} \tag{4-11}$$

ここで h は浸透深さ、r は毛管半径、γは液体の表面張力、θは接触角、ηは粘度、t は時間である。添え字の c は臨界(critical)、L は液体(liquid)、s は固体(solid)のそれぞれ英語表記の頭文字である。接触角θは$\gamma_L > \gamma_c$のとき 0 である。毛管半径については気泡の半径 r_{void} を代入し、その他表４－１の値をいれて計算すると、直径 500μm のフォームシェルの場合、流入に必要な時間は 0.18sec、また、フォームセルの半径 r_{void} を毛管半径として代入した場合には 0.088sec となり、仮に 1cm のサンプルを仮定すると 35sec の時間をかけて片方から固化を進展させると固化と同時にセル内に液体水素が継続的に流入し、充填率の高い燃料層の形成が出来ることになる。大阪大学レーザーエルギー学研究センターで以前行った実験で、RF フォームの平板を液体重水素が浸透していく気

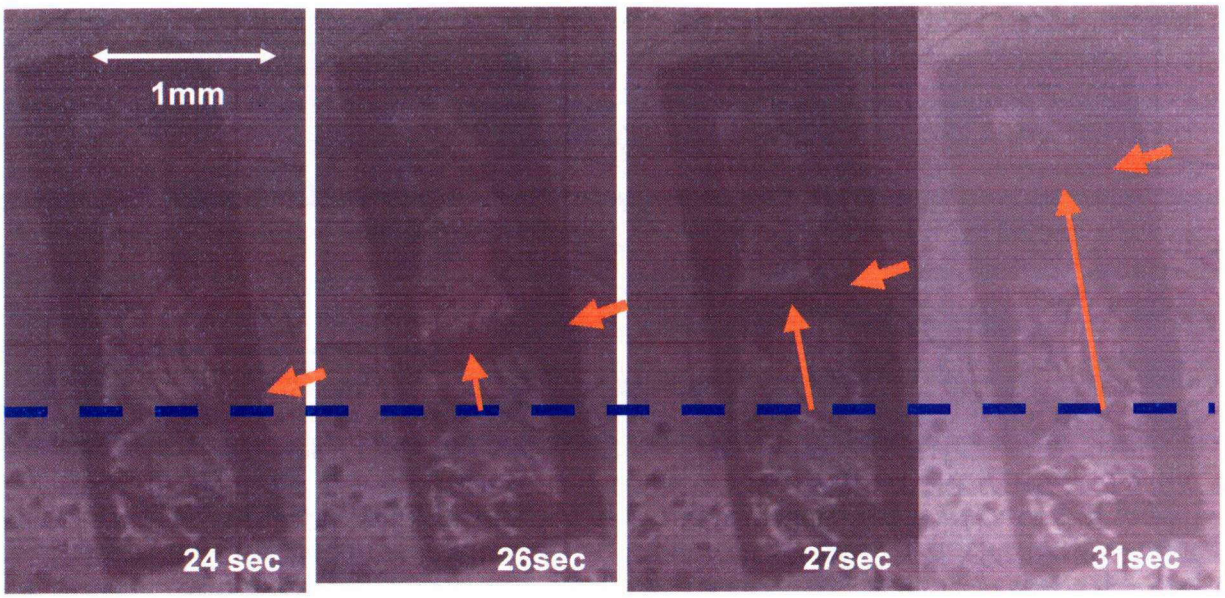


図４－６　フォーム平板に液体重水素が浸透していく様子を観察した写真。時間の経過と共に気液界面と思われる黒い領域が画面上方に動いていく。

液界面を観察した（図４－６）。この実験結果から、RF フォームに対する液体重水素の浸透速度を求めると、0.214(mm/sec)であった。式 4-11 によってフォームの浸透速度を計算すると、0.277(mm/sec)であり、式 4-11 による流入時間の評価は本研究で行う固化の進展速度の評価に対しても適用できる。

4－3　実験

前述の原理を使用して固体燃料の充填率の評価及び充填率向上を実証するために、図４－７に示すサンプルを作製した。このサンプルは二枚のガラス平板により、ウェッヂ型を構成し、上部の配管を通してウェッヂ内部に水素を充填できる構造である。本研究で用いた手法ではフォーム

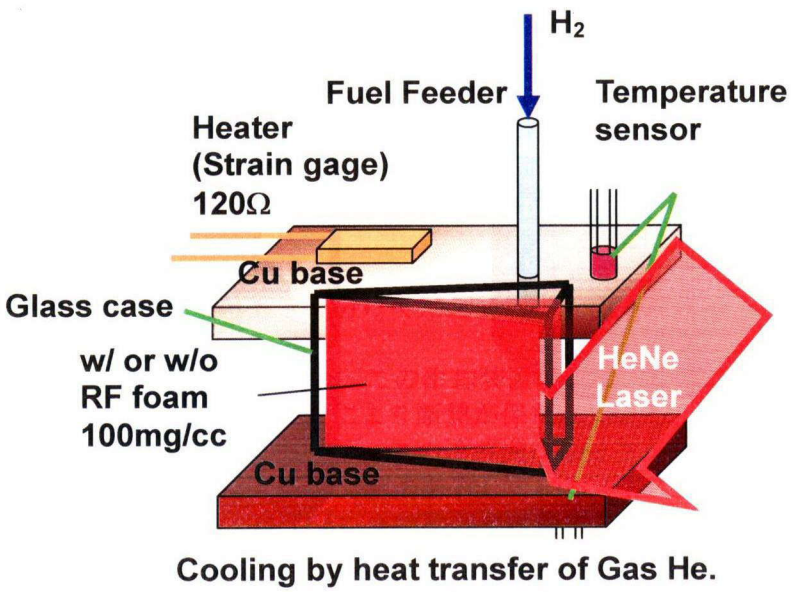


図４－７　燃料充填率測定実験に用いるサンプルの模式図。

層内の固体燃料の充填率評価のためには固体水素の屈折率、フォーム内に含まれた液体水素、固体水素の屈折率が必要になる。固体水素の屈折率を測定する場合にはウェッヂ内部には何も含まず、液体水素及び固体水素を含んだフォームのみかけの屈折率を測定する場合にはウェッヂ内にフォーム材を充填した。また、このサンプルの上下の銅基盤には温度センサーを取り付け、上部銅基盤には薄膜ヒーターを取り付け、上下の温度調節が出来るようにしてある。このサンプルは核融合科学研究所に備え付けられている冷凍機付きクライオチャンバー[10)]で冷却し、極低温実験を行った。

4－3－1　サンプルの作製

図４－６に示すサンプルを作る手順は、(1)ガラス板の張り合わせ、(2)銅板の加工、(2.5)フォーム材の充填、(3)各パーツの接着、(4)リーク試験（液体窒素温度）、(5)温度センサー、ヒーターの取り付け、である。(1)ガラス板の張り合わせについて、ガラス板は表面精度が高く、冷却時の真空引きによる圧力差による応力に耐える強度のもので無ければならないので、一辺 10mm 厚さ 1mm の BK7 の平行平面基盤(OPB-10S01-10-5、シグマ光機)を使用することにした。この平行平面基盤にかかる応力や最大たわみについて計算した。真空引きなどの応力については破壊が起こらないことを確認しているが、ここでは特に光学計測への影響について考えてみる。実験中に水素を加圧して生じる、平行平面基盤の前後の等分布荷重は 10kPa 程度である。ここで常温の物性値を用いて計算すると、このとき生じる最大曲げ応力は 0.27MPa であり、ガラスの平均破壊応力(55MPa)や、許容応力(25 MPa)を十分下回っている。またこのときの最大たわみは、中心部で 66nm であった。干渉計測に用いるエリアは中心から離れた位置で、大きさは全体の 1/10 程度の部分を使用する予定であるため、測定領域におけるたわみは 7nm 以下である。レーザーの波長の 1/100 程度であるため、このたわみは無視できる。張り合わせには、極低温用接着剤(NF-10 ニトフィックス SK-299、日東電工製)を使用した。平行平面基盤の片側に厚さ 100~150μm のスライドガラスを二枚はさみ、この接着剤で接着した。その結果スライドガラスと接着剤をあわせて 400μm のマチとなった。一方、その反対側のガラス板同士が直接合わさった部分の隙間に接着剤を流し込みウェッヂ形を完成させた。(2)ウェッヂに取り付けられる銅板は、厚さ 5mm、一辺 20mm の正方形の銅板で、その銅板の側面に温度センサー用の穴をドリルを使用して開けた。また、これと同じものをもう一つ用意し、温度センサー用の穴の他に 1/8inch の水素配管が接続できるように 3.2mm の穴をドリルで開けた。これらの表面を研磨しこの工程は終了である。(2.5)フォーム内部のみか

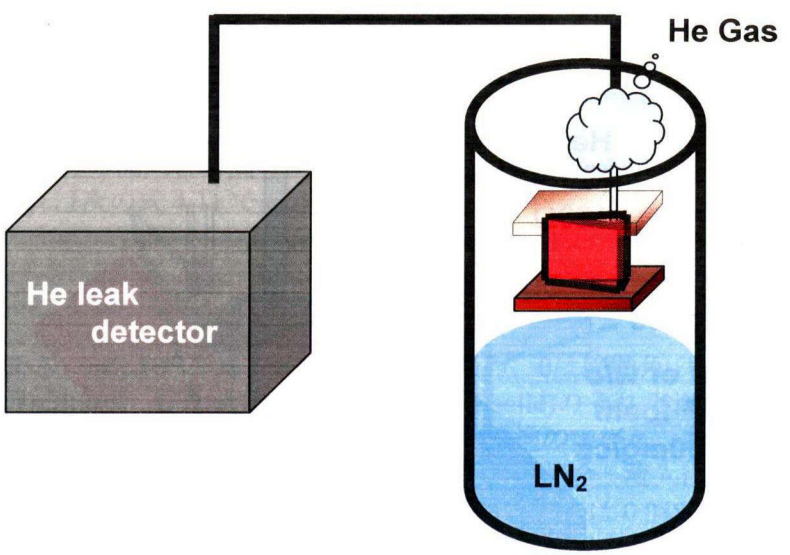


図４－８　液体窒素温度でのリーク試験方法の概略図。

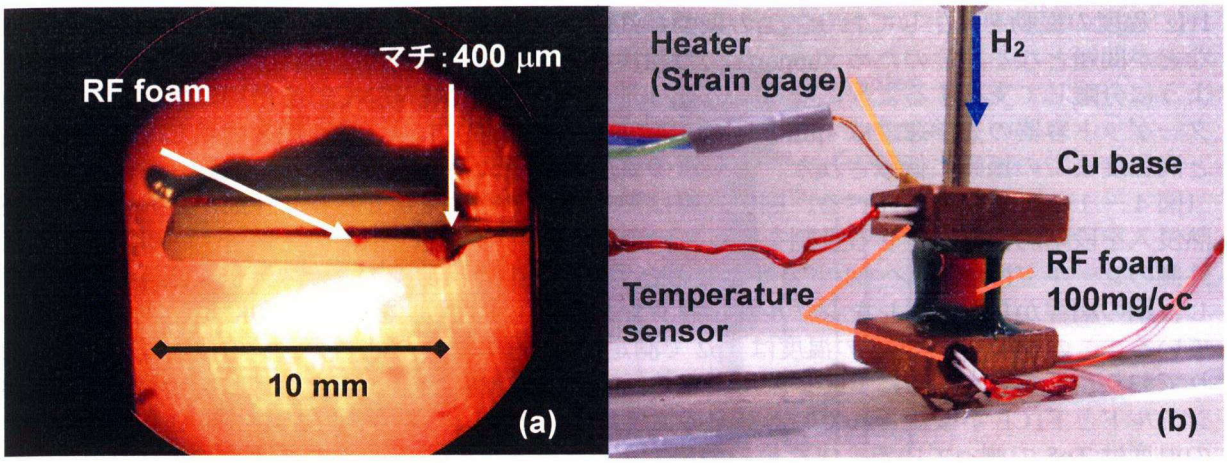


図４－９　燃料充填率測定実験に用いるサンプルの写真。フォームの入ったウェッヂの上部から観察したもの(a)、と完成図(b)。

けの屈折率を測定するにはウェッヂ内部を RF フォームで満たす必要がある。(1)においてできたウェッヂ型にレゾルシノールと水で薄めたホルマリンの重合液をいれ、それをウェッヂ型ごと二酸化炭素の超臨界流体を用いた乾燥プロセスにかけ、低密度フォームをウェッヂ型内に形成させた[11]。(3) 各パーツの接着は、配管用の穴を開けた銅板の片側に極低温用接着剤で 1/8inch ステンレス配管を銅板に垂直に接着し、ステンレス配管の口とウェッヂ型の開口部が一致するように注意しつつ、配管付き銅板ともう一枚の銅板でウェッヂをはさみ、極低温用接着剤で銅板とウェッヂを接着した。(4) 接着が完了したサンプルをヘリウムリークディテクター(Leibolt)に接続する。ヘリウムリークディテクターとサンプルの間の接続は取り外し可能なように Urtra-torr の 1/8inch 配管用(swagelok)を使用した。液体窒素をデュワー瓶の中に 1/3 ほど溜めておき、サンプルをその液面に接さない範囲で直上に固定する。1 時間ほど液体窒素の顕熱でサンプルを冷却した後、He ガスの吹きかけ法にてリークの有無を確認した（図４－８）。測定後急激に温度上昇しないように、サンプルを段階的に引き上げ、常温に戻した。(5)リークが無いと判断したサンプルに温度センサー(Cernox AA, Lake shore)を取り付ける。温度センサーと銅板の熱接触を大きくするため、熱伝導グリース(Cry-con Thermal conductive grease, Lake shore)を銅板の穴および温度センサーに塗り、温度センサーを銅板に空けた穴に差し込んだ。温度センサーのリード線からの熱侵入を防ぐためリード線の一部をヤ GE ワニス(Vinyl phenolic adhesive, General Electric 製)を用いて接着した。また銅板の上部にヒーターとして歪ゲージ(ZFLK-2-11, 東京測器研究所)を貼り付けた。以上でサンプルの組立ては完了した。出来上がったものの一つを図４－９(b)に示す。このサンプルのウェッヂの傾きは図４－９(a)に示すとおりである。

4－3－2　実験装置

今回の実験で使用した実験装置は大きく分けて冷却装置と計測装置に大別される。それぞれを以下に詳細に記述する。

冷却装置[10]の概略図を図４－１０に示す。この冷却装置は冷凍機付きチャンバーであり、極低温を実現するターゲット容器は真空断熱層により断熱が保たれている。冷凍機には 4.2K GM 型冷凍機（住友重機械工業製）が用いられている。この冷凍機は 2nd ステージでは 4.2K で 1.5W の冷却能力、1st ステージでは 50K で 45W の冷却能力を有している。この装置は室温の冷却開始から 26 時間でターゲット容器内部の温度が 11.6K まで冷却が可能であった。窓を通した外部からの輻射による熱進入を防ぐためにガラス窓には波長が 700nm 以上の赤外線及び 400nm 以下の紫外線をカットするためのコーティングが施されている。冷凍機はディスプレーサーの動きに同期した

1Hz 程度の振動を発生しており、この振動が直接サンプルに伝わると光学計測の際に画像のブレなどが問題となる。そのため Support1 では冷凍機を支持し、Support2 ではチャンバーを支持するように分離して支持するようになっている。レーザー変位計(KEYENCE)を用いて計測した結果、ターゲット容器の光学窓では 4μm 以下の振動まで抑えられており、冷凍機を起動していない場合と同程度までの振動に低減された。本装置の温度調整については、温度計の位置を示した概略図（図４－１１）を用いて述べる。図中点線は熱シールドを意味しており、外部からの輻射による熱侵入を段階的に低減させる役割をもっている。ターゲットに近い側のシールドは 10K シールド、外側のシールドは 50K シールドと呼ぶこととする。Tp1 は冷凍機の 1st ステージ直近の温度を示し、銅の網線からなるフレキシブル熱伝導リンク（以下 FTCL）を用いて 50K シールドを冷やしている。この 50K シールドの温度は Tp2 で測定される。また、2nd ステージの温度は Tc3 で測られており、こちらも同様に FTCL を用いて熱伝導により 10K シールドを冷却している。この 10K シールドと FTCL が接続されている部分の温度は Tc4 で測っており、容器の内部の 10K シールドの温度は Tp5 で測っている。また模擬燃料である水素を供給する配管の温度はターゲット容器内部で水素導入管に付いている Tc6 で測られる。ここで Tc とは cernox 温度センサーのことであり、Tp とはプラチナコバルト温度センサーのことである。以上の温度センサーを用いて装置の冷却曲

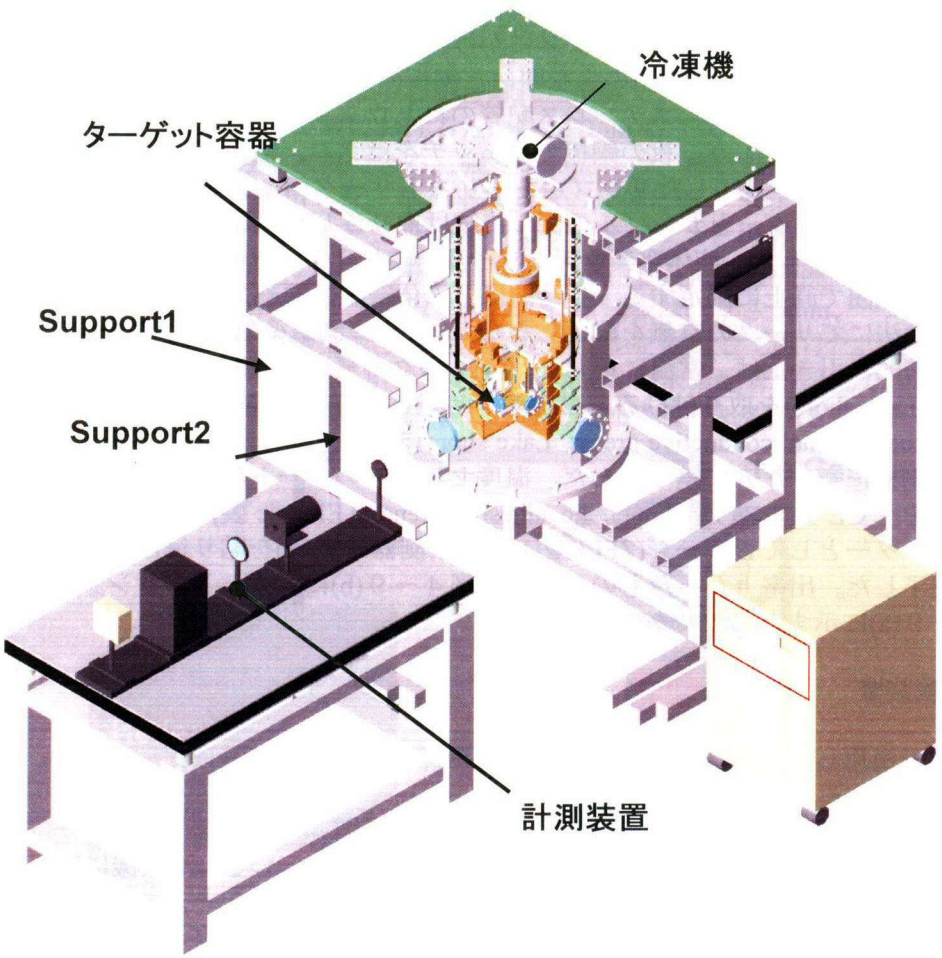


図４－１０　冷却装置の全体像の模式図。

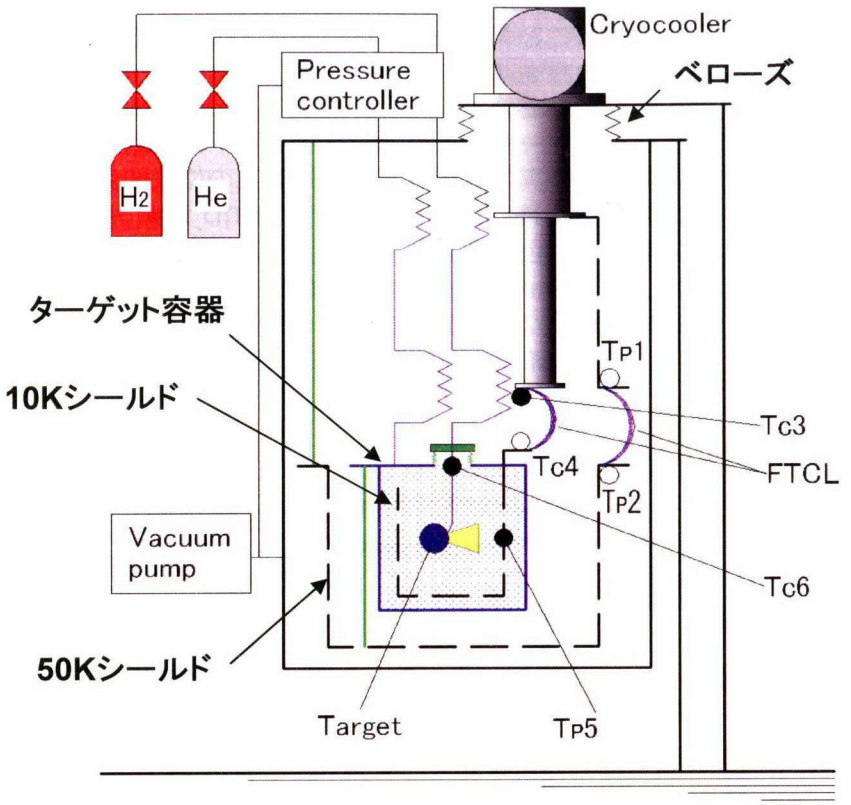


図４－１１　冷却装置の概略図。温度センサーの位置関係と、水素ガスとヘリウムガスの流路を示す。

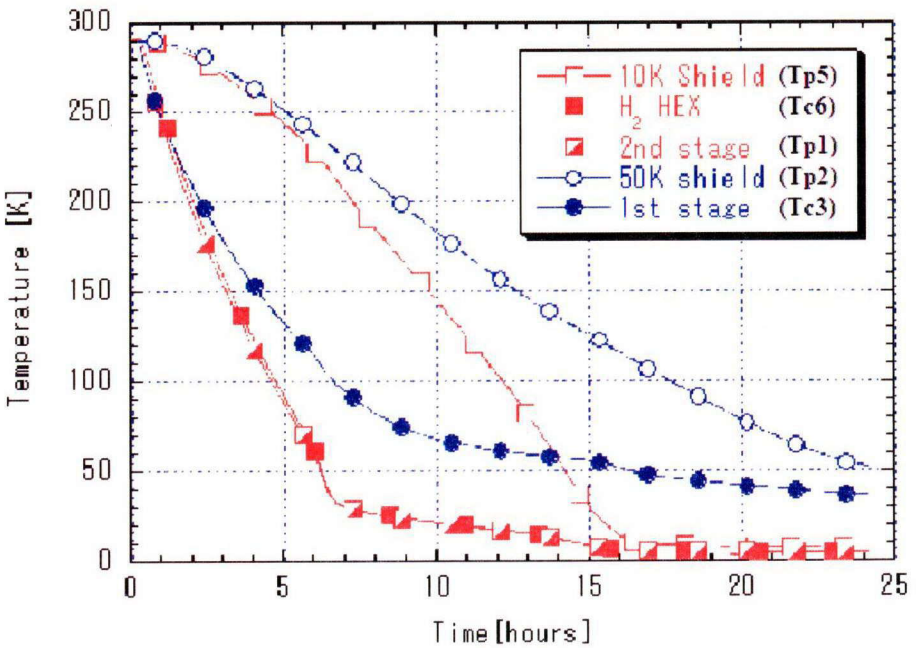


図４－１２　冷却装置におけるそれぞれの位置の冷却曲線。10K シールドと H_2HEX が 10K 前後になると実験が開始できる。

線をとると図４－１２のようになる。概ね 24~26 時間以上冷却すると、実験に必要な 10K 前後の環境をターゲット容器内に作り出すことが出来る。また、この装置には熱交換ガスとしてのヘリウムをターゲット容器内に供給することができ、また、サンプルには水素ガスを充填できるようになっている。ボンベからでたそれぞれのガスを微少流量用ニードルバルブ(SS-4BMRG-VCR、swagelok)によって圧力を調節しながら充填する。両ガス共に 1st&2nd ステージに取り付けられている熱交換器によって冷却されながらターゲット容器やターゲットに供給される。光学計測には実体顕微鏡及び干渉計測を用いている。実体顕微鏡と干渉計測系の位置関係を図４－１３に示す。実体顕微鏡としてマクロレンズ(Micro Nikkor、Nikon)つきの CCD カメラ(DS-5M-L1-H)を用いた。この計測用にサンプルの反対側から白色光源を照らした。干渉計測用の光源は二種類あり、一つは波長 632.8nm、偏光比 500:1、強度 5mW の HeNeLaser (05LHP-151、Melles Griot)であり、もう一つは波長 594.1nm、偏光比 500:1、強度 2mW の HeNeLaser (HYP020、THORLABS)である。屈折率は波長依存性があることから、実験の確度を高めるために二種類の波長でデータを採取すること

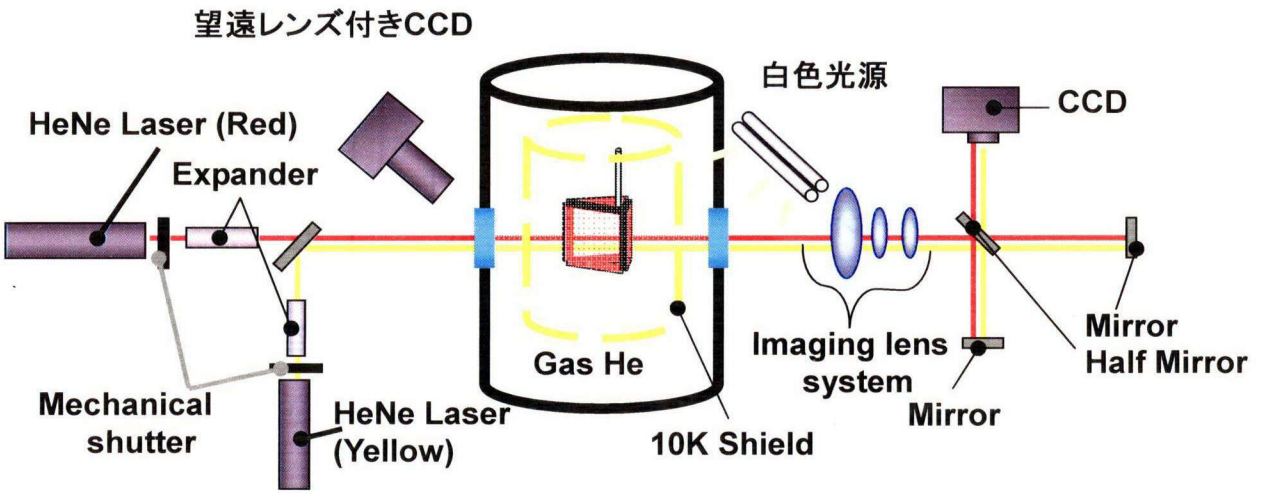


図４－１３　計測装置の概略図。二種類のレーザーによる干渉計と、実体顕微鏡による計測から成り立っている。

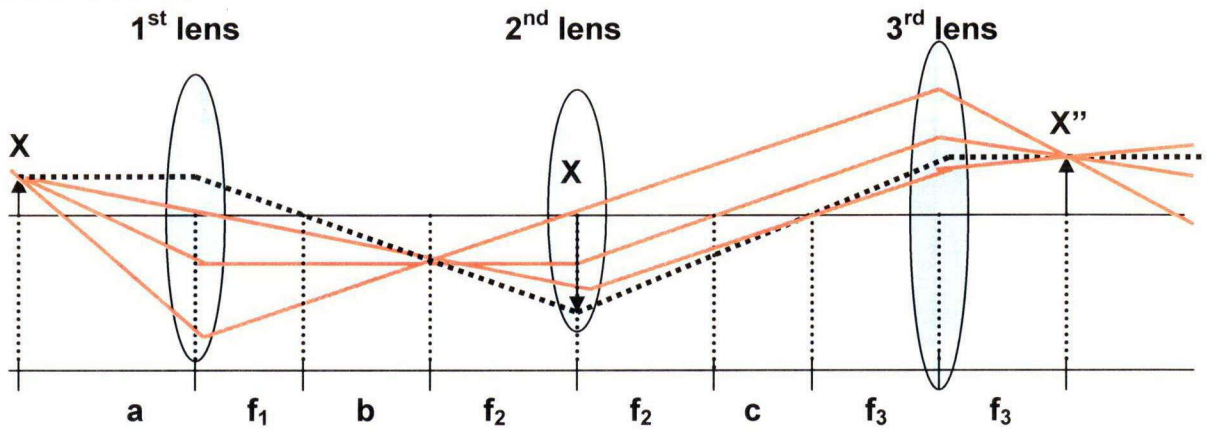


図４－１４　計測装置の干渉計測に用いられるイメージレンズシステムの光路図。下のアルファベットはそれぞれの間隔を表す。また f_1、f_2、f_3 はそれぞれ 1st、2nd、3rd レンズの焦点距離である。X、X'、X"はそれぞれその位置における大きさを示す。また物質像を直線で、参照光を点線にて表す。

にした。レーザー光の安定のため実験中は両レーザー光源ともレーザー光を出力状態で使用し、レーザー光によってサンプルが温度上昇するのを避けるためにメカニカルシャッター(F77-4、SURUGA SEIKI)を使い測定時のみレーザー光をサンプルに照射するようにした。そしてエキスパンダー(LBED-10、シグマ光機)を用いてレーザー光の断面積を拡大するとともに平行性を高めた。レーザー光はサンプルに照射され、後のイメージレンズシステムで拡大され、CCD に像が転送される（図４－１３）。このイメージレンズシステムのレンズをサンプルに近い順にそれぞれ 1st レンズ、2nd レンズ、3rd レンズとよぶ。このイメージレンズシステムを用いた場合には、図４－１４における b 及び c の距離を、1st レンズからサンプルまでの距離 a をもちいて幾何学におけるレンズの公式を用いてあらわすと、

$$b = \frac{f_1^2}{a - f_1} \tag{4-12}$$

$$c = \frac{f_2^2}{b} = \frac{f_2^2}{f_1^2}(a - f_1) \tag{4-13}$$

と表すことが出来る。またそれぞれのレンズ位置における物体像の大きさ X'及び X"の大きさは、

$$X' = \frac{f_2 + b}{f_1} \cdot X, \tag{4-14}$$

$$X'' = \left[\frac{f_1^2}{a - f_1} + f_2\right] \cdot \left[\frac{f_1 f_3}{f_1^2 f_2 + f_2^2 (a - f_1)}\right] \cdot X \tag{4-15}$$

と表すことが出来る。式 4-15 から、より拡大した像を得るためにはサンプルと 1st レンズの距離を焦点距離 f_1 に近づけなくてはならないということがわかる。図４－１４において、物質像は X" として結像される。一方参照光は平行に 1st レンズに入ったあと、3rd レンズ以降で再び平行光になるように調節される。以上からこのイメージレンズシステムを用いた場合に X"の点でサンプル焦点面の干渉像撮影が出来る。

実際の光学計測系では拡大されたレーザー光はサンプルのウェッヂが狭くなっている側の端をレーザーの光の中心になるように透過させる。つまりサンプルの境界で、レーザー光をサンプルを透過した側と透過していない側の二つに分割する。この分割した光線はまとまってイメージレンズシステムを通り、ハーフミラーでわけられる。その後、再度ハーフミラーで図４－１５のように重ね合わせ干渉させる。サンプルを透過した部分を物質光、透過していない部分を参照光とし

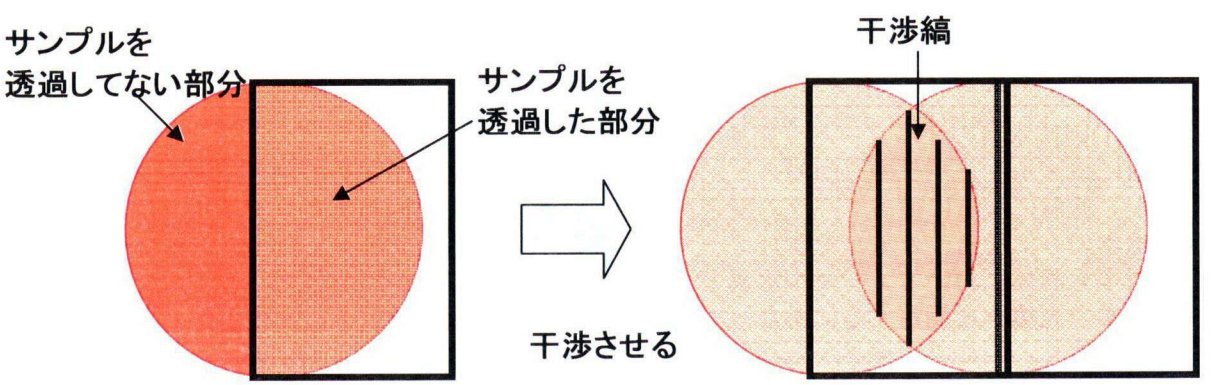


図４－１５　シェアリング干渉計のイメージ図。レーザー光をサンプルの端が中央になるように調節し、ハーフミラーで分けたのち、サンプルを透過した部分と透過していない部分を干渉させる。

て重ね合わせを行う。今回干渉計測で使用したCCDカメラはD300 (Nikon)であり、記録画素数が4288×2848 ピクセルのモードにて使用した。またシャッタースピードは全実験を通して 1/3200 (sec) で撮影した。

4－3－3 実験手順

サンプルを交換するたびに行う実験の準備として、(1)サンプルの接続及びリーク試験、(2)真空排気、(3)、冷却(4)、計測系のアライメントの順に行った。(1)先ずサンプルをターゲット容器内に取り付けた。サンプルのガラス管とターゲット容器の水素配管との接続はswagelokチューブ継ぎ手(swagelok)を使用した。ターゲット容器のシールには極低温領域まで性能保証がされているメタルOリング(HELICOFLEX, Garlock)を用いた。サンプル交換時にターゲット容器は試験装置から切り離されるが、その接続部分の水素配管とヘリウム配管の継ぎ手は極低温で実績のあるVCR継ぎ手(swagelok)を使用している。またこのサンプルと配管の接続部や水素とヘリウム配管の接続部、ターゲット容器の気密はヘリウムリークディテクターを用いて吹きかけ法で試験した。サンプルの接続部及び水素とヘリウム配管の接続部は概ね5×10^{-10} Pa·m^3·sec以下の漏れ量であった。ターゲット容器の場合は概ね4×10^{-9} Pa·m^3·sec以下の漏れ量であった。(2)次にサンプル交換時に装置全体が空気で満たされているため真空排気を行った。真空断熱層、ターゲット容器を含む水素配管やヘリウム配管の排気をまずはスクロールポンプで行い、30Pa程度まで排気できたらターボポンプも稼動させた。おおよそ4時間経過後には真空断熱層の圧力が0.5Pa程度まで下がった。(3)次に冷却であるが、冷却の前にターゲット容器内にヘリウムガスを充填させる。このヘリウムガスの熱伝達によってサンプルを冷却するためである。ヘリウムガスは600Pa充填させた。充填後、冷凍機を稼動させ、冷却を行った。(4)冷却中には熱収縮によりサンプルの位置が変化するため、冷却完了後に計測系のアライメントを行った。まずは赤色と黄色の光軸を揃えるために直近のハーフミラーへの両光の照射位置と、そこから反射した光の照射位置が可能な限り遠方で同じ位置であるように調節した。次にエキスパンダーをもちいてレーザー光を平行状態にするための光学調整（コリメート）を行った。この光学調整後のレーザー光の状態はコリメーションチェッカー(SPV25、シグマ光機)で確認した。レーザー光の中心がサンプルの端にあたるように調節し、同時に地面と水平になるように調節した。レーザーの光軸と各レンズの中心を揃え、図４－１４の位置関係になるように各レンズを並べ、物質光が結像し、参照光が平行になるように調節した。この参照光の平行度はコリメーションチェッカーを用いて測定しながら調節した。最後尾のマイケルソン干渉計のハーフミラーとミラーを調節し水素充填前にnullになるように調節した。結像位置にCCDカメラをおいた。以上がサンプル交換ごとの作業である。実験は、(1)固体水素のオルソーパラ変換の時定数の測定、(2)固体パラ水素及び液体パラ水素の屈折率の測定、(3)フォーム内の固体パラ水素及び液体パラ水素の屈折率の測定の順で行った。

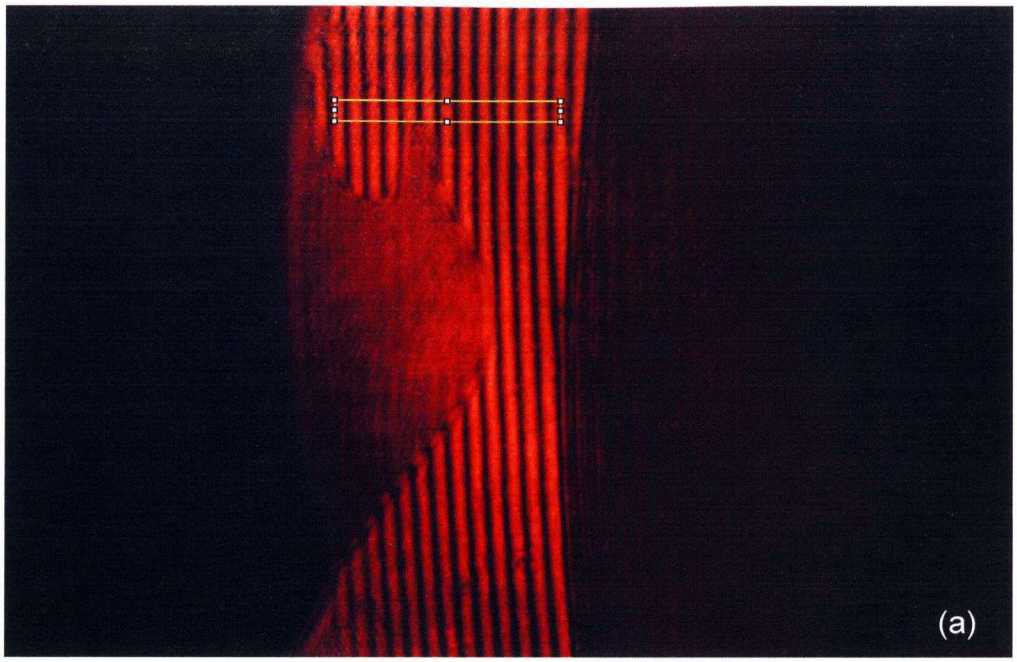
固体パラ水素の屈折率を測るための実験手順を示す。サンプルのウェッヂにはフォームが入っ

注：(1)固体水素のオルソ－パラ変換の時定数の測定について
水素にはオルソとパラの二つのスピンの状態があり、常温では3:1の割合でオルソの方が多い。しかし低温になるに従ってパラの割合が増えていき40Kを下回るあたりでオルソはなくなり、パラ水素のみになる。オルソを含むノーマル水素とパラ水素では様々な物性値が異なる[12)]。ここで屈折率も液体においてノーマル水素とパラ水素で異なることがわかっている[3)]。フォーム内の固体水素の充填率を測定するにあたって、充填率以外が原因で屈折率に変化が生じるのは実験の妥当性を欠く。ここでオルソからパラ水素への変換にかかる時定数は1%/hourと非常に長いことが計算で求められている[13)]。しかし、実験に使用したサンプルは上下に銅板があり、水素はその銅板と接触している。ここで銅板はオルソーパラ変換を加速させる触媒として作用する[14)]。そこでこのサンプルにおいての変換にかかる時定数を測定し、十分にパラ水素へ変換した後に固体水素の屈折率の測定を行った[15)]。

ていないものを使用した。十分に冷却が進み、10K シールドが 12K を下回った後に、H_2HEX（2nd ステージ部での水素配管用熱交換器）と 10K シールドの温度を備え付けられているヒーターによりそれぞれ 14.2K、14.6K に昇温し、その温度で制御した。その後水素ガスを供給・加圧していき、サンプル内部で液化させる。液化が始まった直後の水素の圧力とサンプル上部銅プレートの温度はそれぞれ 33kPa、16.55K であった。サンプル全てに液が入った後、徐々に 10K シールドの設定温度を下げていき、熱交換ガスの温度を下げ、サンプルの温度を下げた。10K シールドの温度を 13.6K まで下げたときウェッヂ内に固液界面が観察できた。このときサンプル上部銅プレートの温度は 14.13K、下部銅プレートの温度は 13.80K であった。さらに 10K シールドの温度をさげるに従い、その固液界面が上方へと移動し、13.16K のとき全面が固化した。その後、10K シールドの温度を 13.16K に固定し、その状態を 23 時間維持した。この間、適宜干渉計測により干渉像を撮影した。23 時間経過後、10K シールド及び H_2HEX の温度をさげながら、サンプル上部と下部の銅板の温度の平均値が 13.7K から 11K まで変化する間の干渉像を撮影した。この間サンプルの上部銅板の温度は下部に比べ 0.3K ほど高い。その後 10K シールド及び H_2HEX の温度をあげ、液化させた。液化後、さらに 10K シールドと H_2HEX の温度を上げながらサンプル上部と下部の銅板の温度の平均値が 13.8K から 16.2K までの干渉像を撮影した。

フォーム内の固体水素の屈折率を測るための実験手順を示す。サンプルのウェッヂにはフォームが入っているものを使用した。十分に冷却が進み、10K シールドが 12K を下回った後に、H_2HEX（2nd ステージ部での水素配管用熱交換器）と 10K シールドの温度をヒーターによりそれぞれ 14.3K、14.01K に昇温し、その温度で制御した。その後水素を供給・加圧していき、サンプル内部で液化させる。液化が始まった直後の水素の圧力とサンプル上部の温度はそれぞれ 11.4kPa、14.55K であった。サンプル全てに液面が入った後、徐々に 10K シールドの温度を下げていき、熱交換ガスの温度を下げ、サンプルの温度を下げた。10K シールドの温度が 13.78K にまで下げたときフォーム内に固液界面が観察できた。さらに 10K シールドの温度をさげるに従い、その固液界面が上方へと移動し、13.0K のとき全面が固化した。固液界面が生じてから完全に固化するまでに 30 分の時間を要したことから、この界面の速度は 0.33 (mm/min)程度であるといえる。全面が固化した後、更に 100mK 温度を下げ、10K シールドの温度を 13.0K に制御し、19 時間その状態を維持した。このときサンプル上部の銅板の温度は 13.45K、サンプル下部の銅板の温度は 13.30K であった。この間、適宜干渉計測により干渉像を撮影した。19 時間経過後、10K シールド及び H_2HEX の温度をさげながらサンプル上部と下部の銅板の温度の平均値が 13.4K から 10.8K までの干渉像を撮影した。この間サンプル上部の銅板の温度は下部に比べ 200mK ほど高かった。その後 10K シールド及び H_2HEX の温度をあげ、液化させた。液化後、温度を上げながらサンプル上部と下部の銅板の温度の平均値が 13.8K から 16.4K までの干渉像を撮影した。

撮影した干渉像を画像解析ソフト Image-J (National Institute of Health)を用いて干渉縞の間隔の測定を行った。図４－１６(a)に撮影した干渉縞の一例を示す。画像の中で縞が垂直に並んでいる領域を選び、その領域において両端一縞ずつを除いた干渉縞を解析に用いた。Image-J の plot profile というツールを用いて、横軸に位置を、縦軸に明るさをとったグラフを作成した（図４－１６(b)）。この領域における暗線若しくは明線の幅の平均値を求めた。暗線（若しくは明線）は、頂点を暗線とするとガラス基盤の反射光などのノイズの影響を直接的に受け、正確な測定が困難なため、頂点より離れた位置でサインカーブを描いている位置同強度の二点間の中央を暗線の位置として読み取った。固体水素の屈折率は液体水素の屈折率と縞間隔の変化から相対的に求めるため、同一のサンプル、同一の波長においては、同一の領域にある同一の干渉縞を画像解析し、暗線、若しくは明線の幅の平均値を求めた。



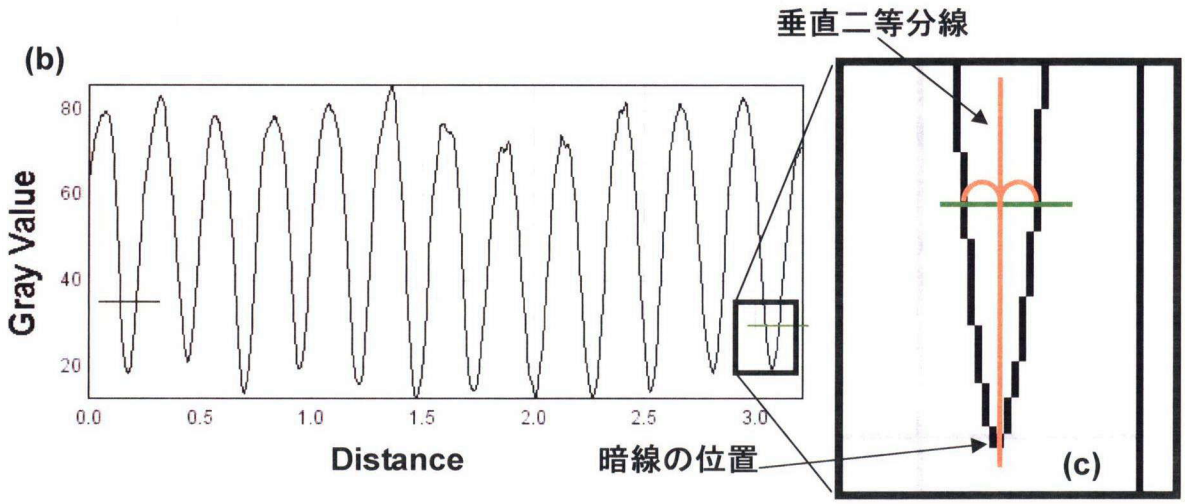


図４－１６　フォームの入っていないウェッヂに液体水素を充填したものも黄色(λ=594.1nm)のレーザーを用いた場合の干渉像(a)。図(a)中の四角に囲んだ部分の濃淡を数値化したもの(b)。谷（山）の中腹で値が同じ二点の中心を暗線（明線）の位置とした(c)。

4－4　実験結果

4－4－1　固体水素の屈折率測定

フォームの入っていないウェッヂ型サンプルに水素を供給・加圧し液化が始まると、図４－１７(a)に示すようにウェッヂの鋭角側から液が満たされ始めた。この場合の干渉像を撮影すると気液界面を境に気体側が null、液体側生じた干渉縞を観察できた。ウェッヂの鋭角側から液体水素が充填したのは表面張力による影響だと考えられる。ウェッヂ全体に液体水素が充填し、温度を下げ固化が下部から始まった写真を図４－１７(b)に示す。さらに温度を下げるにつれその下部から固液界面は上方に移動した。この状態の干渉縞を観察すると、固液の界面の移動にあわせて干

渉縞がシフトし、固化後は縞間隔が狭くなっていることが読み取れる。全体が固化した写真を図４－１７(c)に示す。液体を充填した場合と変わらない透明度を示しており、気泡などの発生はない。固体水素のオルソーパラ水素変換に伴う屈折率の時間変化を図４－１８に示す。ここで縦軸が屈折率として表記できるのは後述する液体水素の屈折率の評価を基準に求めているためである。

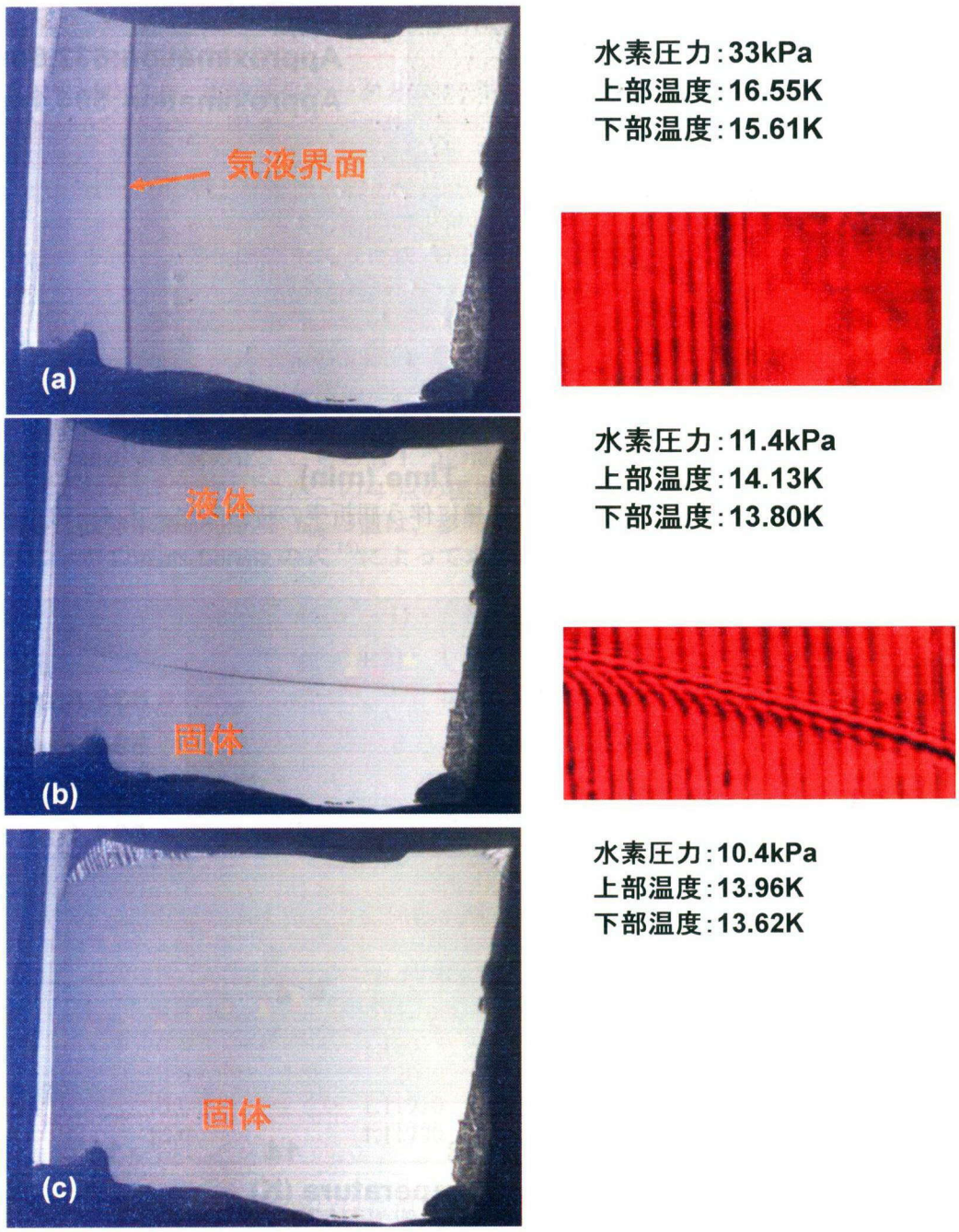


図４－１７　実体顕微鏡による各状態における写真。(a)水素を加圧していき気液界面がウェッヂの鋭角な側から生じた。界面を境に気体側が null、液体側に干渉縞が生じた。(b)温度を下げるにつれ下部から固液界面が発生し上に向かっていった。界面にあわせて干渉縞がシフトし、固化後は縞間隔が狭くなっている。(c)全体が固化した写真。

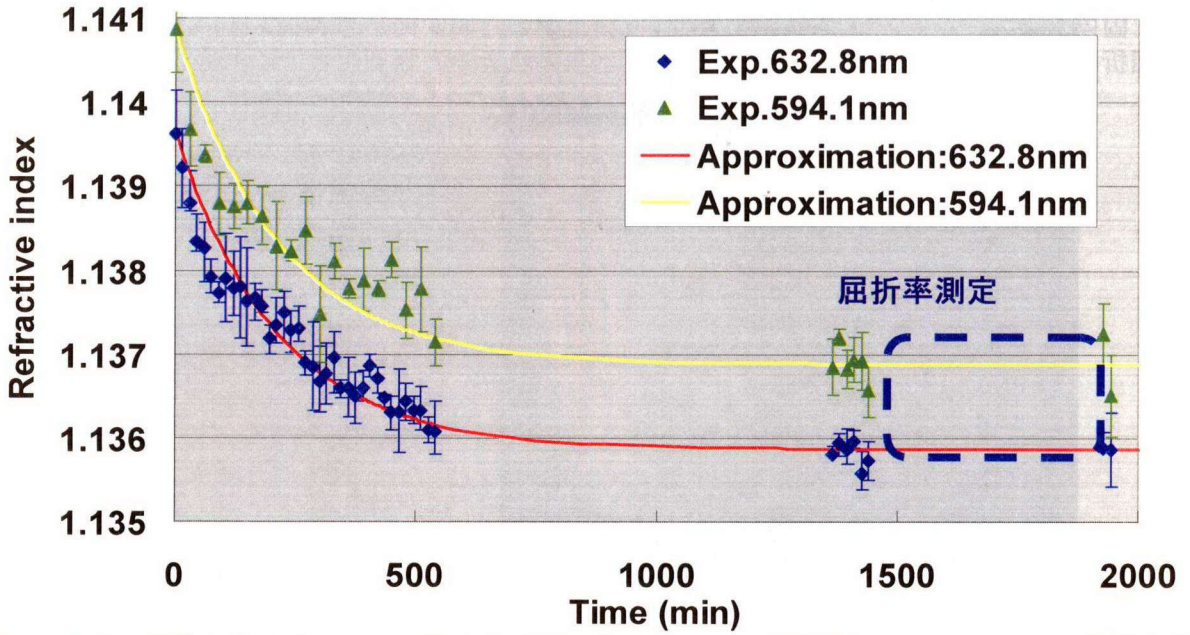


図４－１８　固体水素のオルソ－パラ水素変換に伴う屈折率の時間変化。式 4－12 による近似式を図中に示す。

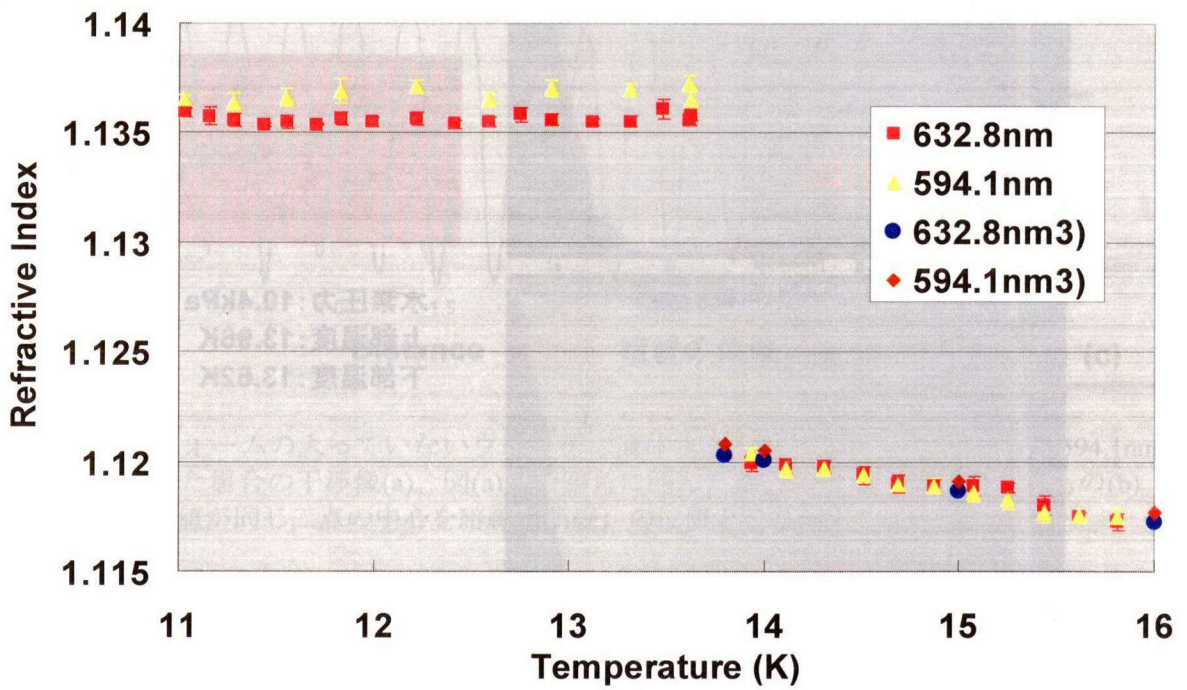


図４－１９　二つの波長 632.8nm と、594.1nm の液体及び固体水素の屈折率を示す。青丸及び茶菱形は参考文献 3)より求めた理論上の液体水素の屈折率である。

データ点は各測定時間において 4 点ずつ測定し、その平均をデータ点としてプロットしている。またこの 4 点の標準偏差より誤差棒を示している。測定開始時の屈折率を 4 点の平均値を n_n、1926 分、1941 分経過後の屈折率 8 点の平均値を n_p としてこの場合の時定数をτ、経過時間を t とし、その時刻における屈折率を n(t)とすると、変換の時定数τと屈折率 n(t)の関係は、

$$n(t) = (n_n - n_p)\exp(-\frac{t}{\tau}) + n_p \tag{4-16}$$

と記述することが出来る。実験結果データと式 4－16 の関数の差の二乗が最小となるようにτを決めるとτ=240(min)となった。図４－１８より、冷却開始後 1440 分以降はほぼ全体がパラ水素に変換されているものとして、固体パラ水素の屈折率の温度依存性を評価した（図４－１９）。ここで固体水素の屈折率は式 4-5 より液体水素の干渉縞の間隔と固体水素の干渉縞の間隔から計算により求めた。また基準となる液体水素の縞間隔と液体水素の屈折率の値の関係は、液体水素が充填された干渉縞のうち一つの縞間隔を任意に取り出し、適当な屈折率を与えてやり、その縞間隔と屈折率の比をもとに他の測定した縞間隔からその測定温度における屈折率を求める。この操作によって縞間隔のデータは横軸に温度、縦軸に屈折率のデータに変換した。この温度と屈折率のデータの最小二乗直線の値と液体水素の文献値（表４－２）を 13.8K、14K、15K、16K のそれぞれの温度で比較し、その差の二乗和を求めた。最初に任意に取り出した縞間隔に適当に与えた屈折率の値を、この二乗和が最小となるよう決定した。二乗和が最小となった縞間隔と屈折率の比を基に固体水素の屈折率を求めた。こちらも 1 つの温度につき 4 点データをとり、その平均をデータ点としてプロットしている。またこの 4 点の標準偏差より誤差棒を示している。ここで文献値として採用した液体水素の屈折率 n_{liq} の値は、参考文献 3)の分極率の値と、参考文献 5)の密度の値より以下に示す Lorents-Lorenz の式[15]によって求められる。

$$\frac{M(n^2-1)}{\rho(n^2+2)} = \left(\frac{4\pi N_A}{3}\right)\alpha = R_0 \tag{4-17}$$

ここで M は分子量であり、ρ は密度、N_A はアボガドロ定数、α は分極率、R_o は分子屈折率である。分子屈折率は原子屈折率の和で近似される。加えて文献 3)の測定値は 567nm の値であるため、波長依存性を考慮した近似式[16]、

$$n_{liq} - 1 = 4.73 * 10^{-6}(\lambda)^{-0.062}\rho_L \tag{4-18}$$

を用いて表４－２のように求められる。ここでρ_L は密度であり、単位は mol/m^3、λは波長であるが、式4–18は nm の単位で代入するように係数が設定されている。

表 ４－２ 液体水素の屈折率 n_{liq}

温度(K)	λ=594.1nm	λ=632.8nm
13.8	1.12075	1.12028
14.0	1.12049	1.12002
15.0	1.11910	1.11863
16.0	1.11770	1.11724

図４－１９より、固体水素の屈折率はほぼ温度依存性が無いことがわかる。温度とともに密度は高くなるはず（表４－３）であるため、温度とともに分極率が下がっていることが示唆される。

表 4－3 水素の密度(g/cm^3)

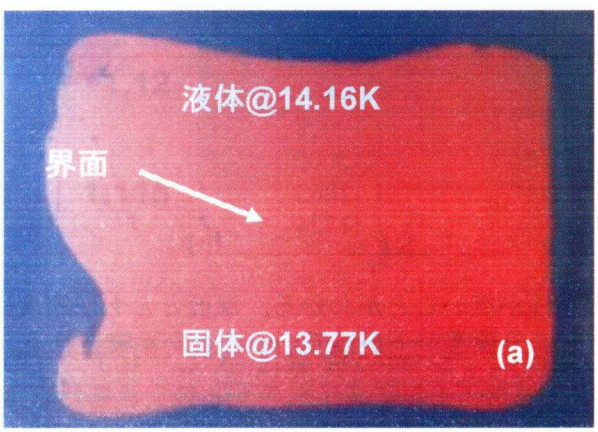
温度(K)	ノーマル水素	パラ水素
10.0	0.0875	0.0868
11.0	0.0873	0.0867
12.0	0.0872	0.0865
13.0	0.0870	0.0863
13.8(S)	--------	0.0861
13.8(L)	--------	0.0767
13.96 (S)	0.0867	--------
13.96 (L)	0.0769	--------
14.0	0.0768	0.0765
15.0	0.0760	0.0756
16.0	0.0751	0.0748

(S)は固体、(L)は液体を示す。

4－4－2 フォーム内に充填された水素の屈折率測定

フォームに水素を充填し、固液界面が生じたときの実体顕微鏡写真を図４－２０(a)に示す。フォームが入っていない場合に比べて境界面が不鮮明である。その理由として、フォームがあることにより界面での屈折率差が小さいためであると考えられる。界面の上下で透明度の違いは観察できなかった。この界面について干渉計測を行うと固体と液体の屈折率差から生じる縞間隔のギャップを視覚的に観察することができた（図４－２０(b)）。このことから温度差による固相の成長方向制御をフォームに含まれた水素でも実証することができた。

フォームの入っていないウェッヂの場合と同様に、固化した水素のオルソ－パラ変換の時定数を調べた結果を図４－２１に示す。データ点はそれぞれの時間において 4 点ずつ測定し、その平均をデータ点としてプロットしている。またこの 4 点の標準偏差より誤差棒を示している。冷却開始から 240 分経過後に固定されているミラーに接触してしまい、角度などの状態が変化してしまったため、屈折率にギャップが出来ている。固体の屈折率は接触後に測定した液体水素の屈折率を基準に相対評価しているため、実験結果の評価には 240 分経過後からの測定値を使用した。測定開始から 240 分間に干渉縞の間隔は変化せず、その後も干渉縞の間隔に大きな変化はないことが図４－２１より読み取れる。これは、フォーム層が触媒として働きオルソ－パラ変換を促進させ測定開始時にはすべてパラ水素になっていると考えている。



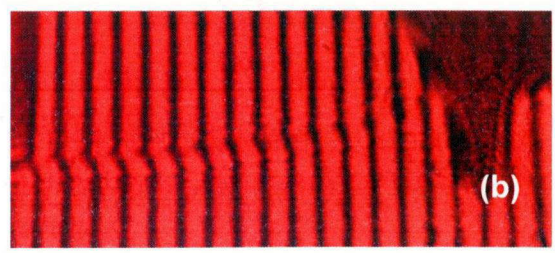


図４－２０　ウェッヂ型の中にフォームをいれ、液体水素を充填した後に温度差による固相の成長制御を実行し界面が下部から上部へと移動している時の実体顕微鏡写真(a)。そのときの干渉像(b)。

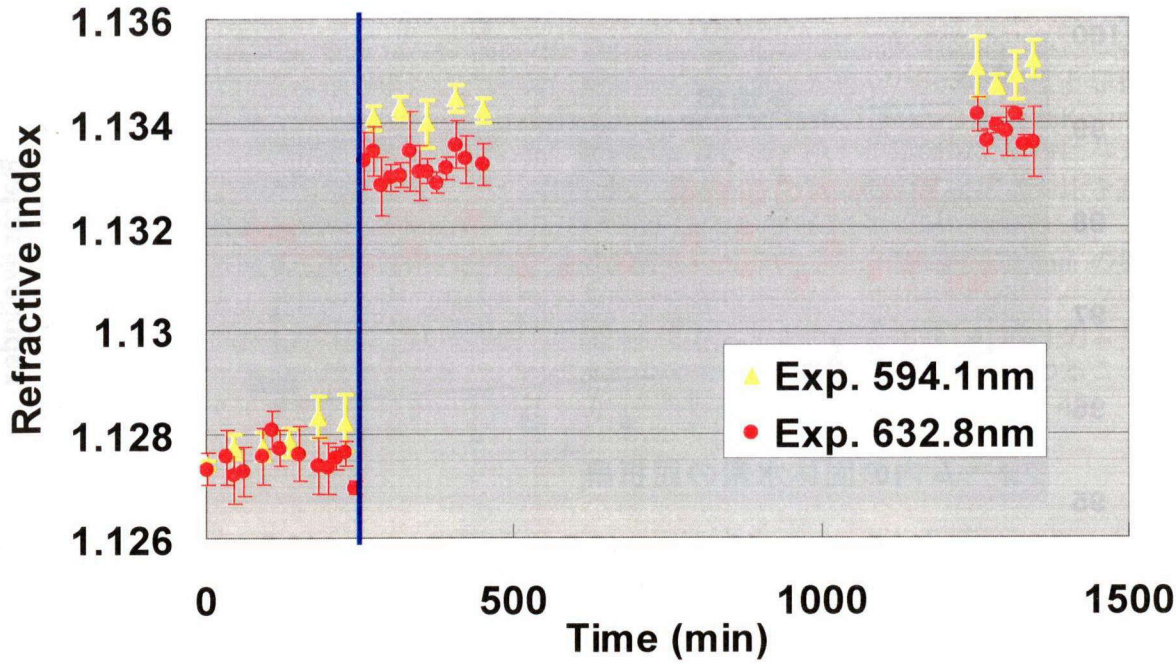


図４－２１　フォーム内に含まれる固体水素の屈折率の時間変化。

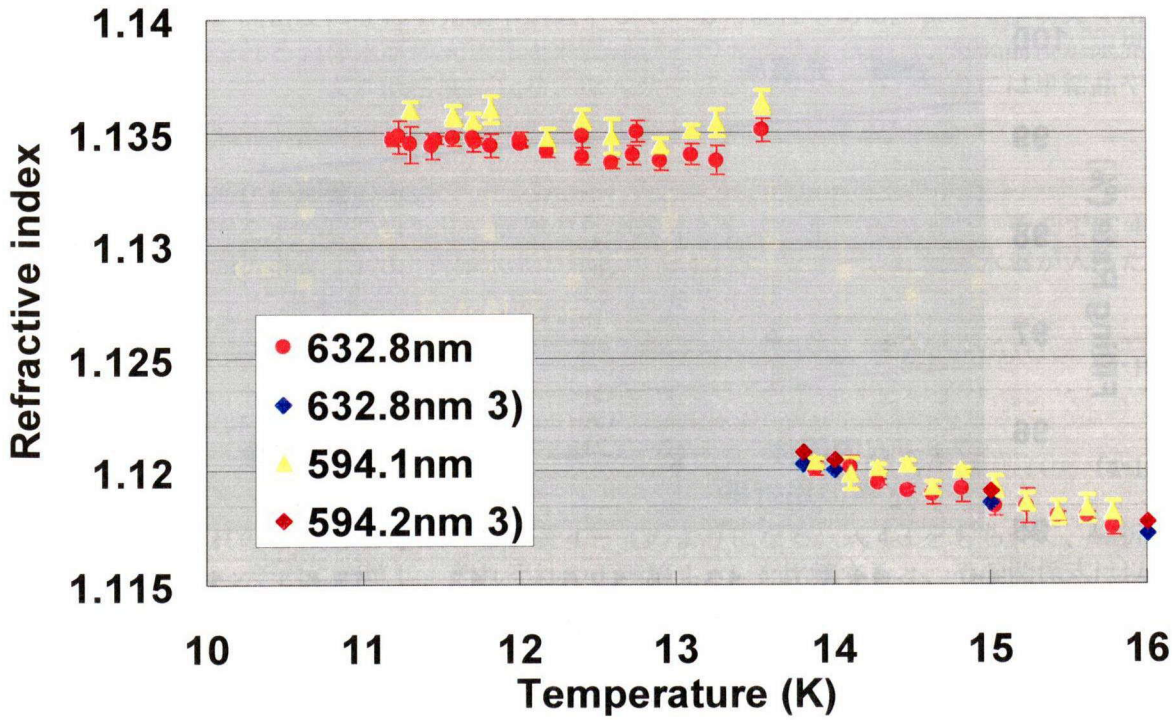


図４－２２　フォーム内に含まれる水素の屈折率の温度依存性。(測定原理からフォームの屈折率は相殺されている。) 青色の菱形、茶色の菱形は参考文献 3)よりもとめた理論上の液体水素の屈折率。

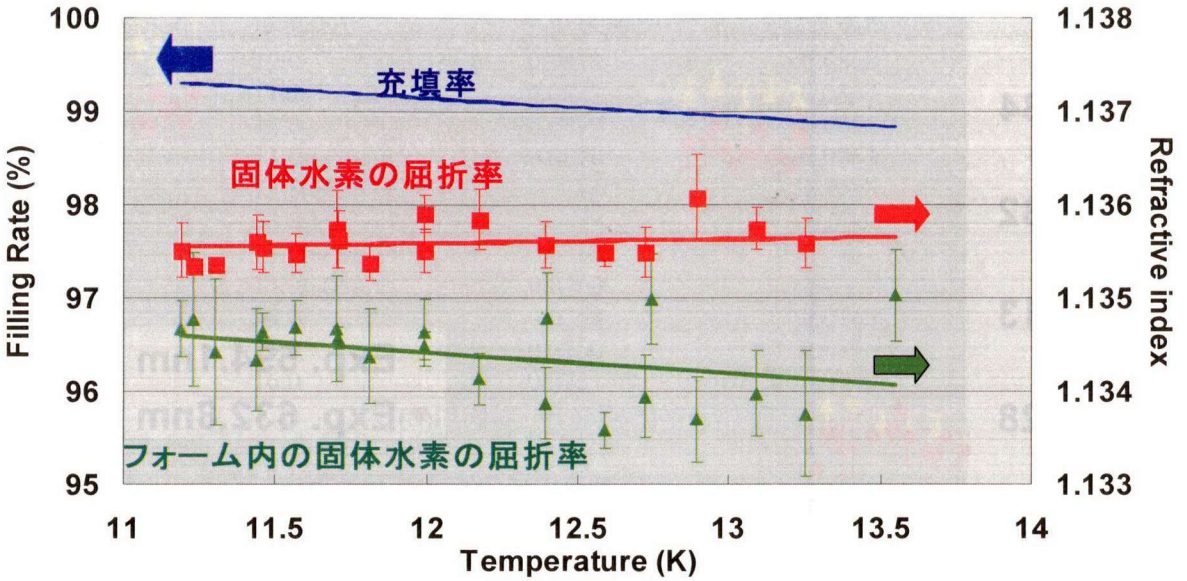


図４－２３　赤色レーザーの結果を用いて RF フォーム内の固体水素の充填率を評価した。青色直線が充填率のグラフであり、左側の軸の値を取る。赤色四角は固体水素の屈折率であり、その最小二乗法による直線が赤色の線である。フォーム内の固体水素の屈折率は緑三角で表現してあり、この最小二乗法による直線が緑色線である。固体水素の屈折率およびフォーム内の固体水素の屈折率は右側の軸の値をとる。

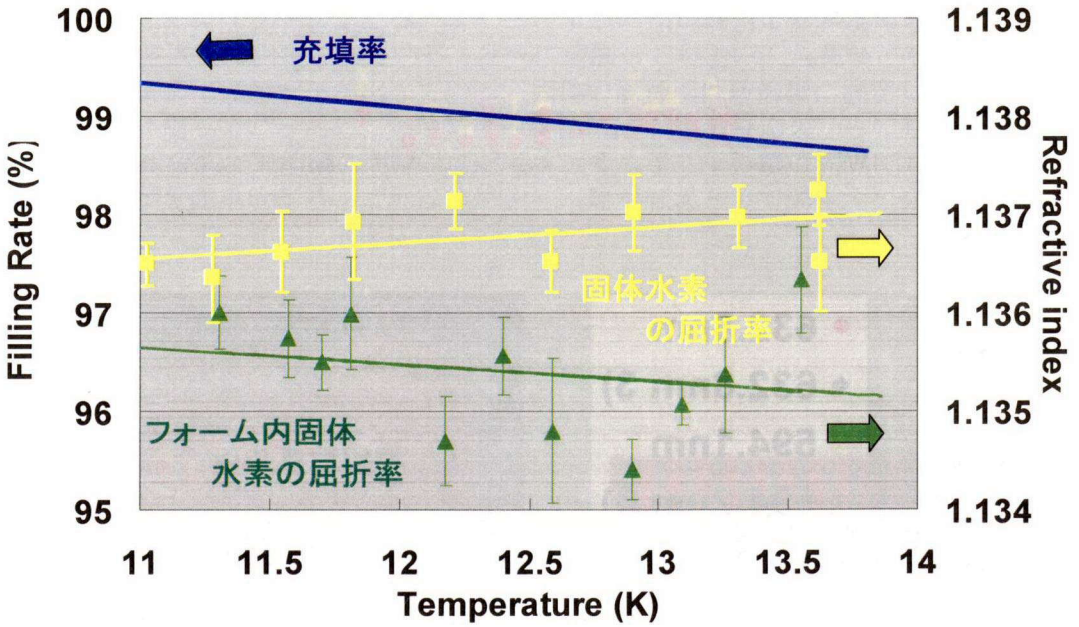


図４－２４　黄色レーザーの結果を用いて RF フォーム内の固体水素の充填率を評価した。青色直線が充填率のグラフであり、左側の軸の値を取る。黄色四角は固体水素の屈折率であり、その最小二乗法による直線が黄色の線である。フォーム内の固体水素の屈折率は緑三角で表現してあり、この最小二乗法による直線が緑色線である。固体水素の屈折率およびフォーム内の固体水素の屈折率は右側の軸の値をとる。

フォーム内に充填されている固体水素の屈折率の温度依存性を図４－２２に示す。液体水素が充填された干渉縞のうち一つの縞間隔を任意に取り出し、適当な屈折率を与えてやり、その縞間隔と屈折率の比をもとに他の測定した縞間隔からその測定温度における屈折率を求める。この操作によって縞間隔のデータは横軸に温度、縦軸に屈折率のデータに変換した。この温度と屈折率のデータの最小二乗直線の値と液体水素の文献値（表４－２）を 13.8K、14K、15K、16K のそれぞれの温度で比較し、その差の二乗和を求めた。最初に任意に取り出した縞間隔に適当に与えた屈折率の値を、この二乗和が最小となるよう決定した。最小となった縞間隔と屈折率の比を基に固体水素の屈折率を求めた。

図４－１９、及び図４－２２に示した値を基に、図４－２３に光源の波長が 632.8nm の場合の固体水素の屈折率と、フォーム内の固体水素のみかけの屈折率及び、これら両方のデータの最小二乗法による近似直線を示す。これら最小二乗法で得られた近似直線を比較し、式(4-9)よりフォーム層内への固体水素の充填率を求めた。固体水素の充填率は平均して 99.1%と求めることができた。また同様にして黄色の充填率の平均は 99.0%と求めることができた（図４－２４）。

4－5　考察

充填率の考察

本研究において提案した温度差による固相の成長方向制御手法により充填率の向上を実証した結果、充填率の平均値は 99%であった。この値は液体と固体の密度差から計算した充填率 89%を超える値であり、固液界面をゆっくり動かすことによる効果はあったと考えられる。フォームが無い場合の屈折率はその透明度から単結晶や多結晶体に近い密度の高い状態の屈折率だと考えられるが、フォームに充填された固体水素の場合にはフォームの微小セルにより単結晶や多結晶体を形成できず、アモルファス構造に近い状態であることが考えられる。すなわち、気泡が残存し充填率が低下しているのではなく、フォームのセルサイズに起因する結晶成長の阻害が原因で固体水素の構造自体が高密度になれず充填率が低下している可能性もある。よって本研究で用いたフォーム材内に含まれる固体水素の充填率としては、そのセルサイズから、99%前後が限界である可能性がある。ただし、より低密度になり、セルサイズが大きくなった場合には単結晶や多結晶体に近い構造が取りやすくなり、より高密度に充填できる可能性がある。

屈折率評価式の簡略化の影響の考察

固体水素の屈折率を求めるに当たり、簡単のため式 4-3 を式 4-4 と近似した。そこで式 4-3 において液体水素の屈折率を 1.120、固体水素の屈折率を 1.135、フォームに液体水素が入った屈折率を 1.178、フォームに固体水素が入った屈折率を 1.192 とし、

$$\frac{\cos\theta}{\cos\beta} = A, \tag{4-19(a)}$$

$$\frac{\cos\theta}{\cos\beta}\cdot\cos(\beta-\theta) = B \tag{4-19(b)}$$

と定義し、それぞれの A 及び B を求めると表４－４のようになる。式 4-3 をもちいて、屈折率 n_1 と n_2 の物質をウェッヂ内に充填し、それぞれの干渉縞 l_1、l_2 を比較すると、その関係式は以下の式で表される。

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{n_1A_1 - n_0B_1}{n_2A_2 - n_0B_2} \tag{4-20}$$

この関係式（簡略化前の式）の n_1 に液体水素を n_2 に固体水素の値を代入し、A_1 と B_1 に液体水素の A 及び B の値を、A_2、B_2 に固体水素の A 及び B の値を式 4-20 に代入し l_2/l_1 を求めた。簡略化

表 4－4 屈折率ごとの式4-3における係数

屈折率		A	B
LH_2	1.120	0.99981	0.99982
SH_2	1.135	0.99983	0.99984
Foam+LH_2	1.178	0.99974	0.99976
Foam+SH_2	1.192	0.99976	0.99978

された式4-5を用いて計算したI_2/I_1の比と簡略化前の式を用いて計算したI_2/I_1の比を比較するとフォーム無しの場合で式4-5の場合のほうが$1+3.0\times10^{-5}$倍だけ大きく、フォームが有る場合で式4-5の場合のほうが$1+2.3\times10^{-5}$倍だけ大きい。つまり、固体の屈折率を評価した結果は近似式による解と厳密解の間に10^{-5}の差があるといえる。この差は測定誤差や計測器の精度を考慮すると無視できると考えられ、本研究の範囲では近似式の使用は妥当であるといえる。

測定誤差の考察

CCDの測定限界による屈折率の誤差を評価すると1.4×10^{-4}であるのに対して、実験結果にはその値以上にバラつきが見られる。主な原因は干渉計測に用いたレーザー光の波面の歪みとサンプルの振動によるものだと考えられる。図４－１５に示すように今回の実験ではレーザー光線の端の部分同士の干渉であり、ビームの平行性が中心部に比べて低い部分同士の干渉であり、干渉縞の間隔が等間隔にならなかった。また見かけ上サンプルの同じ位置の測定をしていても、サンプルが振動することにより撮影のたびに始点の位相が異なっているため、暗線や明線の位置を決める際にばらつきが生じ、それが測定後との誤差になったと考えられる。このバラつきを補償するため、今回は4点のデータを採取したが、更に採取するデータ点を増やすことでより真値に近づくと考えられる。

実証した充填率向上方法の実ターゲットへの応用について

この温度差による固相の成長方向制御を実際の高速点火レーザー核融合用フォームクライオターゲットに応用するためには、外部からの温度調節が必要になる。そこでターゲット内に温度差を発生させるためにコーン部分の加熱を行い、フォームシェルのコーン対壁側からコーンに向けて固化が進むような状態を作る方法を提案する。そこでその温度調節の条件を熱流体解析ソフト(ANSYS ED,ANSYS)により計算した（図４－２５）。このときの条件は初期状態において、ターゲットは周囲のヘリウムガスへの熱伝達による冷却され、定常状態になっている。このときの冷却ガスの温度と熱伝達率は13.84 K、1.0 W/m^2Kとした。この熱伝達率はこの温度におけるガスヘリウム28Paの熱伝達率に相当する。その後、そのガスの温度を13Kに変化させ、6.5×10^{-9}Wの熱量をコーンに入れ、フォーム層内の固相の成長速度を評価した。計算結果によるとこの条件下では、固相はコーンの対岸側のフォーム層から固化が始まり、それがコーン側へと進展する。このときフォーム層中の液体水素が完全に固化するには23sec以上の時間がかかり、式4-11で求めた速度より遅く固化が進展するため、温度差による固相の成長方向制御により高充填率の固化が実現できると考えられる。

充填率の平均値は99%であった。この値は液体と固体の密度差から計算した充填率89%を超える値であり、固液界面をゆっくり動かすことによる効果はあったと考えられる。フォームが無い場合の屈折率はその透明度から単結晶や多結晶体に近い密度の高い屈折率だと考えられるが、フォームがあることにより単結晶や多結晶体を形成できず、アモルファス構造に近い状態であることが考えられる。そのためフォーム内に含まれる固体水素としては、このセルサイズのフォームを使用した場合には99%前後が限界である可能性がある。ただし、より低密度になり、セルサイズが大きくなった場合には単結晶や多結晶体に近い構造が取りやすくなり、より高密度に充填できる可能性があると考えられる。

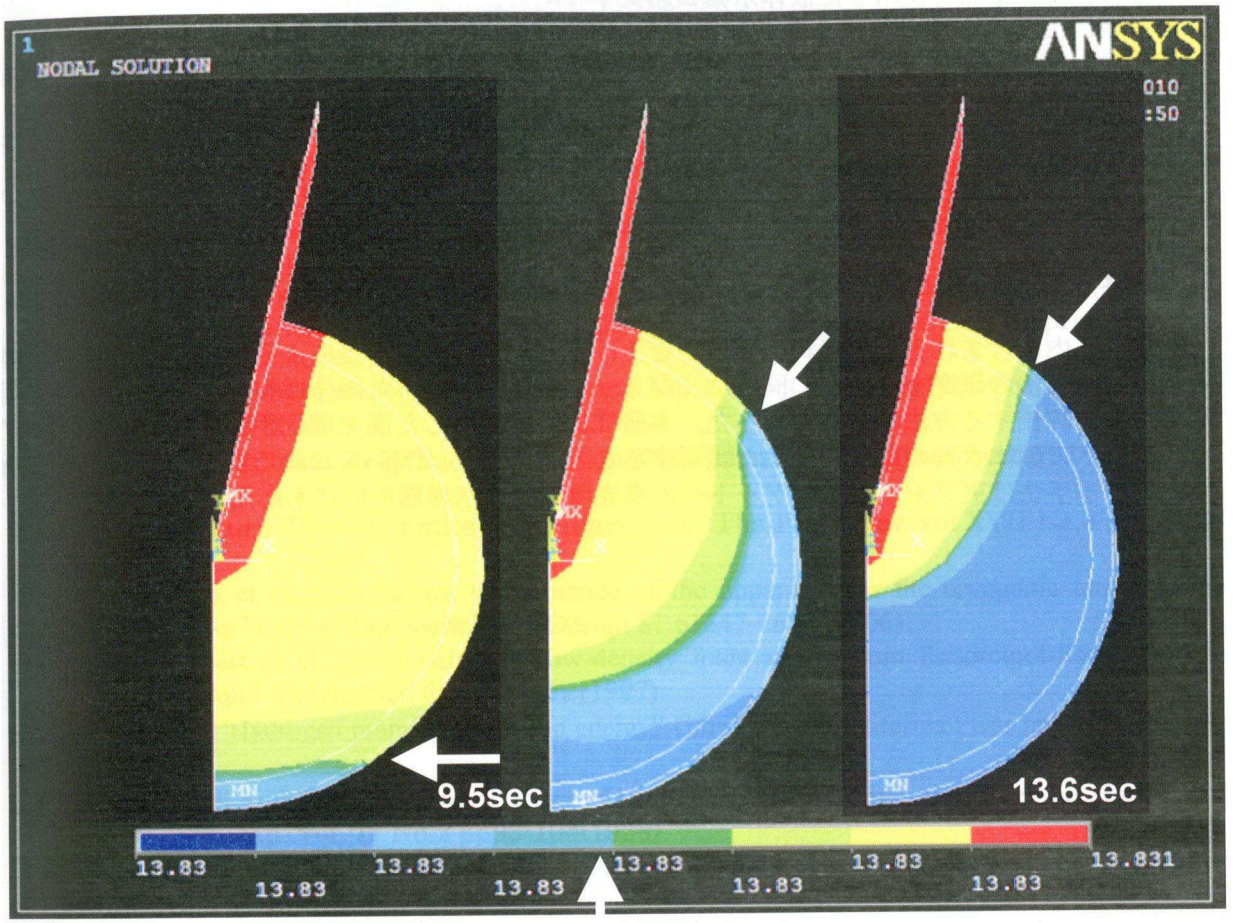


図４－２５　ANSYS による温度差は全体で 1mK 以下しかついていないが、矢印の部分で層変化が起こっている。

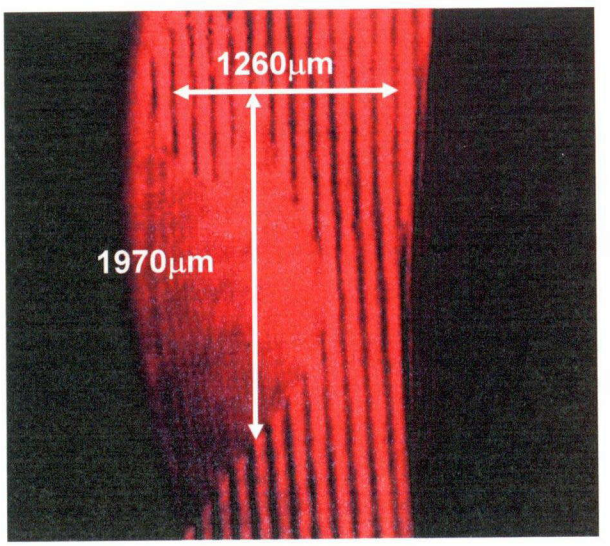


図４－２６　液体水素を充填したフォームなしウェッヂサンプルの赤色(λ=632.8nm)レーザーによる干渉像。

本実験による測定値を使用した液体水素の屈折率の絶対値評価の試み

本実験による測定値を使用した液体水素の屈折率の絶対値評価を試みる。図４－９(a)より、tanθ=4/100、図４－２６より、l=115μm、真空の屈折率を n_o=1.000、用いたレーザーの波長λ=632.8nmを式4-7に代入すると、液体水素の屈折率は1.135と求めることができる。理論上の屈折率(1.120)と比較すると、0.015程この計算値は高い値を示している。これはtanθやlの値には熱収縮の影響や、測定誤差が10%程度含まれているためであると考える。測定した絶対値と理論値の差は大きく、絶対値を用いた評価では充填率の議論は難しいと考える。

4－6　まとめ

フォーム内に含まれる固体燃料の充填率を上げる方法として温度差による固相の成長方向制御を利用した手法の研究を行った。同時に、フォーム内に充填された固体燃料の充填率を干渉計測を利用して評価する方法の開発も行った。本研究により提案した高充填化手法を用いることでフォーム内への固体水素の充填率99%を実現することができた。ANSYSによる計算の結果から判断すると、本手法は実フォームターゲットへの高充填率固体水素層形成にも応用できる。

第４章の参考文献

(1) J.K.Hoffer et al. "BETA-LAYERING IN FOAM-LINED SURROGATE IFE TARGETS" FUSION SCIENCE AND TECHNOL. VOL. pp15-32 (2006)
(2) P.C. Souers "Hydrogen property for fusion energy" University of California Press pp2-6 (1986)
(3) L.C.B. Tom et al., "The index of refraction of solid hydrogen" Abstracts of OSU International Symposium on Molecular Spectroscopy, Ohio State University (2007)
(4) D. E. Diller "Refractive Index of Gaseous and Liquid Hydrogen" J. Chem. Phys Vol.49 No.7 pp3096-3105 (1968)
(5) P.C. Souers "Hydrogen property for fusion energy" University of California Press p62,p78 (1986)
(6) H.M. Roder "Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperatures" U. S. Department of commerce P38(1973)
(7) P.C. Souers "Hydrogen property for fusion energy" University of California Press p63 (1986)
(8) 液体浸透の基礎理論
http://psl.fp.a.u-tokyo.ac.jp/hp/enomae/Paper%20Science%20seminar/Lecture1-1.htm(2010/12/19)
(9) E. W. Washburn "The dynamics of capillary flow" The Phys. Rev. vol.XVII No.3 pp273-83 (1921)
(10) A. Iwamoto et al. "Cool-down performance of the apparatus for the cryogenic target of the FIREX project" Fusion Engineering and Design 81 p1647-1652 (2006)
(11) S.M. Lambert et al. "Fablication of low-density foam shells from Resorcinol-Formaldehyde Aerogel" J. Appl. Polym. Sci. 65 p2111-21 (1997)
(12) P.C. Souers "Hydrogen property for fusion energy" University of California Press pp62-78 (1986)など
(13) K. Motizuki and T. Nagamiya "Theory of the Ortho-Para Conversion in Solid Hydrogen" J. Phys. Soc. Jap. Vol. 11 No.2 pp93-104(1956)
(14) K. svensson and S. Andersson "Fast Ortho-Para conversion of H2 adsorbed copper surface step atoms" Phy. Rev. Lett. 98 096105 (2007)
(15) ボルン・ウォルフ著、「光学の原理Ｉ」草川・横田訳　東海大学出版 p126 (1974)
(16) P.C. Souers "Hydrogen property for fusion energy" University of California Press p70 (1986)

第５章　フォームターゲットへの固体燃料の充填実験

5－1　はじめに

本章ではフォームターゲットに水素同位体燃料を液体状で充填し、その後固化させる実験について報告する。FIREX-I 用フォームクライオターゲットはシェル内のフォーム層がすでに核融合実験に必要な使用を満足する精度で作られているため、燃料導入管よりフォームシェル内に液体状燃料を導入し、その燃料をフォーム層に満たした後、固相への変化時の密度差に起因する気泡の発生を抑制しながら燃料を固化させることで完成となる。燃料を充填するためには水素同位体の液化温度以下の環境を作り出し、燃料を充填できるシステムの開発や手順の確立を行わなければ成らない。ここで、FIREX-I 用フォームクライオターゲットに求められる性能は第１章に述べた、壁圧の重量均一性が 99%以上、フォームシェル内部の燃料蒸気圧の低減など、燃料層などに関する最終的に必要とされる高度な要求であるが、残念ながら現状では、その要求を満たすことができる状況ではない。本研究ではそれら高度な要求を実現する以前に実証すべき固体燃料層形成に関わる基礎的な技術の研究を行う。注目した重要課題は次の通りである。

① 液体状燃料の充填手順の確立、
② その充填量の制御、
③ 温度差による固相の成長方向制御によりウエッジ型サンプルで実証した高充填率燃料層形成のフォームシェルターゲットへの応用

そこで、第２章のレーザー加工技術と第３章の組立て技術を用いて作製され、第３章の気密性測定試験により常温の気密性が確認されたターゲットに対し軽水素を模擬燃料として充填し、上記課題に対する実験を行った。

5－2　実験装置

実験装置は第４章で用いた冷凍機付きクライオチャンバーを使用した [1]（図４－１０、４－１１）。計測装置は同様に第４章で用いた干渉計測装置及び、実体顕微鏡を用いた（図４－１３）。但し、倍率を高める工夫として図５－１に示すように、1st レンズをターゲット容器に近づけられ

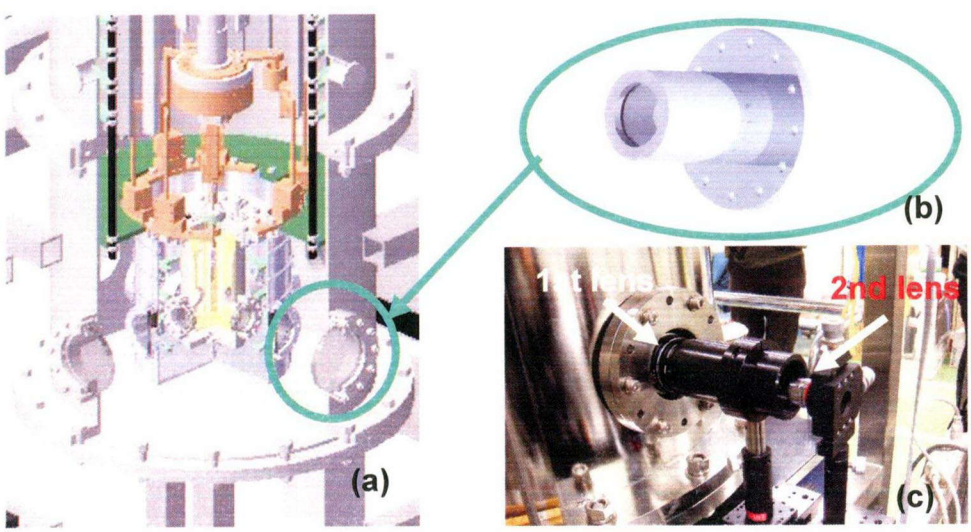


図５－１　干渉計測のための真空容器側改良を示す図。真空断熱層と大気の間にある外側チャンバーの計測用窓(a)に計測窓つき筒(b)を差込み(c)にしめすように1st レンズをターゲット容器により近づける。

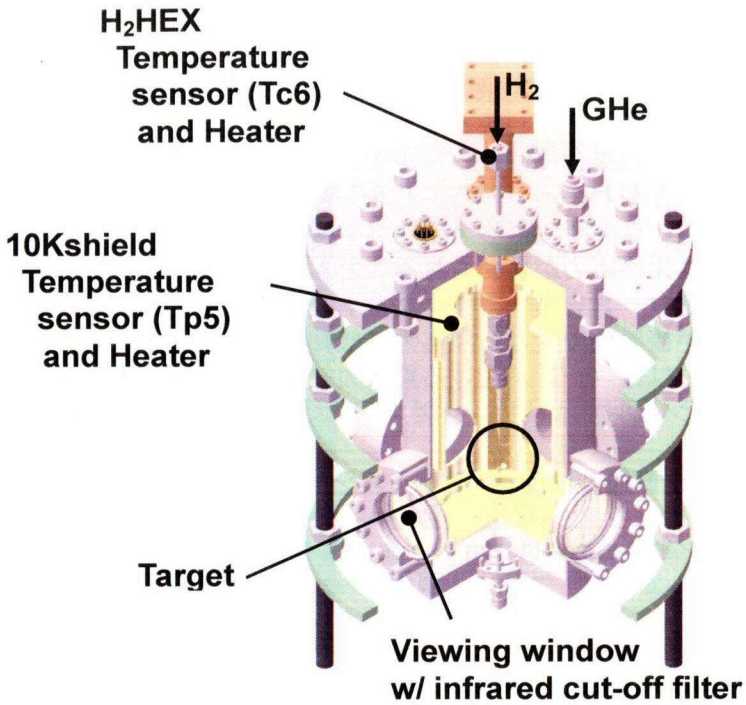


図５－２　ターゲット容器の詳細。ガスヘリウムはターゲット容器内部に、水素ガスはターゲットに充填できるようになっている。

るように外側容器にレンズ挿入用の筒を設けた。干渉計測の 1st レンズには焦点距離が 105mm のものを、2nd レンズには 10 倍の対物レンズを 3rd レンズには焦点距離が 500mm の非球面レンズを使用した。図５－２にターゲット容器の詳細を示す。今回の実験では模擬燃料として水素を使用した。水素配管に温度センサーとヒーターが取り付けられており、温度調節が可能になっている。また 10K シールドの温度を調節することにより、ターゲット容器に充填されたヘリウムガスの温度を調節し、最終的にそのヘリウムガスの熱伝達によりターゲットを冷却している。10K シールドは熱輻射を低減させるため金メッキが施されている。そのシールドは銅の網線を用いて振動の伝搬を抑えつつ冷凍機の 2nd ステージと熱的に接続され冷却される構造である。計測用窓には外部からの熱輻射を低減させるため赤外線カットフィルターがコーティングされている。

5－3　原理実証用ターゲット

使用したフォームターゲットは 2 種類あり、(1)直径 800 μm フォームシェル、金コーン付きフォームシェルターゲット、及び(2) 直径 500μm フォームシェル、パリレンコーン付きフォームシェルターゲット、である。(1) 金コーン付き直径 800 μm フォームシェルターゲットを用いた実験では、冷却方法、及び充填方法の確立、充填量の制御が目的であり、大型のシェルを使用してシェル内部の光学計測の容易性を重視した。(2) パリレンコーン付き 直径 500μm のフォームシェルターゲットは FIREX-I 計画において要求されている仕様とほぼ同様のフォームシェルである。こちらのターゲットを用いた実験では燃料の充填量の制御、及び温度差による固相の成長方向制御を応用した固化法の実サイズターゲットでの実証を目的とした。

5－3－1　冷却時熱応力の検討

本研究と並行して行われている金コーン付き直径 500μm のポリスチレン（PS）シェルターゲッ

トへの燃料充填実験において、冷却中の熱歪みが原因と考えられるターゲットの破壊が起こり、そこから模擬燃料の漏れが確認されている [2]。このポリスチレンシェルターゲットも第３章に示す気密性試験により常温における気密性が確認されたものであった。そこでこの冷却時のターゲット内に加わる熱応力について有限要素法構造解析ソフト(ANSYS ED, ANSYS)を用いて計算した。この計算結果からは 500μm の PS シェルを用いた場合であっても均質に接着剤が塗られ、コーンとシェルが接着された場合には、シェルでは破壊応力を超えるが接着剤では破断応力に至らず、気密が保たれることがわかっている。しかし接着剤の塗り斑がある場合には、接着の最も弱い部分に応力集中が起こり破断に至る可能性がある [2]。直径 800μm のシェルにおいては 500μm のシェルを用いた場合に比べ応力が緩和されることも解析からわかった。またこの解析ソフトを用いた計算において、金コーンを用いたターゲットよりも商用炉で予定されている鉛コーンを用いたターゲットのほうが接着部で受ける熱応力が緩和されることがわかっており、また、パリレン製コーンで受ける応力は鉛コーンが受ける熱応力と同程度である [3]。そこでこの熱応力と加工性の観点から 500μm のシェルではパリレン製コーンを使用することにした。

5－3－2　金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲット

図５－３に金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲットの写真を示す。RF フォームシェルの直径は 800μm であり、フォーム層の厚みは 63μm 、フォーム層の密度は 156mg/cm^3 である。蒸発防止膜として 5.3μm のパリレンがコーティングされている。この RF フォームシェルは General Atomics 社より提供を受けた。燃料導入管は先端の直径が 20μm であり、ガラス配管をプーラー(Model PC-10 (NARISHIGE))を用いて先端を細くし、ラジオペンチと小型ガスバーナーで曲げた。追加熱レーザーの照射方向を考慮して、コーンの開口の向きは水平方向にした。

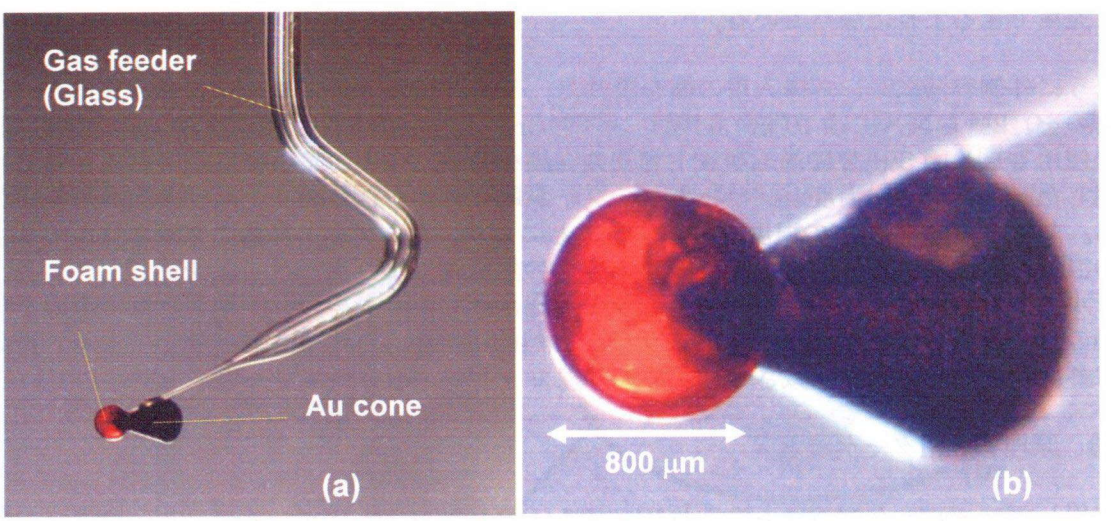


図５－３　金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲットの全体図(a) とフォームターゲット部分の拡大写真(b)。

5－3－3　パリレンコーン付き直径 500μm のフォームシェルターゲット

図５－４にパリレンコーン付き直径 500 ミクロンフォームシェルターゲットの写真を示す。RF フォームシェルの直径は 521μm であり、フォーム層の厚みは 18μm 、その密度は 90mg/cm^3 である。蒸発防止膜には 5.1μm のパリレンがコーティングされている。この RF フォームシェルはレーザーエネルギー学研究センターで作製したものを使用した。燃料導入管として先端の直径が

8μm の精子採取管(eppendolf)を使用した。コーンは真鍮の型にパリレンを 20μm コーティングし、パリレン層のみを型から取り外すことによって作成した。図５－４(a)に示すようにシェルの中心とコーンの先端の位置は組立て時の不備によりずれている。しかし、この実験の目的からすればこの位置あわせの不備は問題にならないと考え、そのまま使用した。

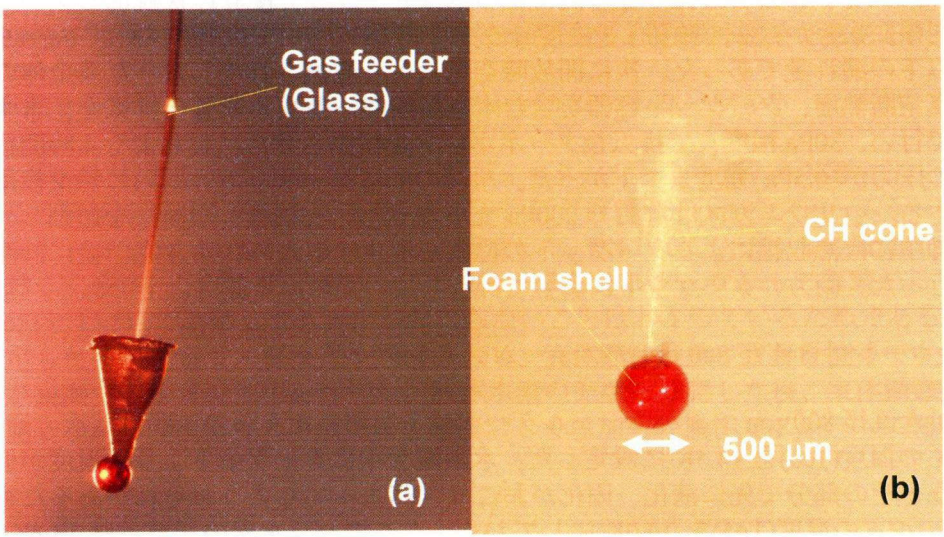


図５－４　パリレンコーン付き直径 500μm のフォームシェルターゲットの全体図(a) とフォームターゲット部分の拡大写真(b)。

5－4　実験手順

ターゲットの取り付け方法と冷却方法は両方のターゲットに共通している。ターゲットのガラス製燃料導入管と冷凍機付きクライオチャンバーのステンレス製水素配管との接続は Urtra-torr1/16inch (SS-1-UT-6,swagelok)を用いて接続した。通常 Urtra-torr はゴム製 O リングを押し変形させることで気密性を保つような構成であるが、10K 前後の極低温状態においてゴム製 O リングは硬化、収縮し気密性を保つことができない。そこで、ゴム製 O リングのかわりにインジウムを O リング状に加工し使用した（図５－５）。このターゲットの取り付け後、ヘリウムリークディテクター(HELEN M-22LD-D-H,ANELVA)を用いて接続部の気密性を調べた。このインジウム製 O リングを採用した接続部は 5×10^{-10} Pa･m^3/sec 以下の漏れ量であった。このときフォームシ

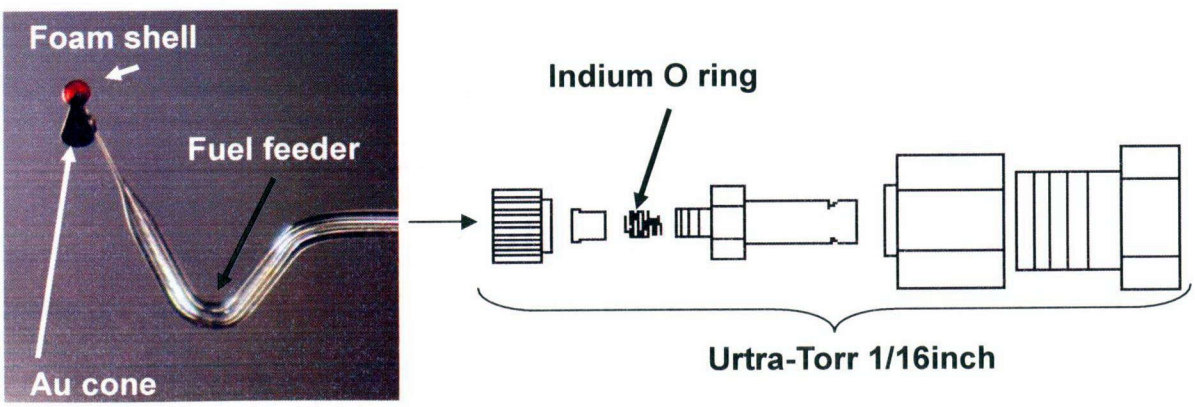


図５－５　ターゲットの燃料導入管と水素配管の接続の概略図。インジウムを O リングとして使用した。

ェルに直接ヘリウムガスがかかってしまうと蒸発防止膜をヘリウムが透過し、リークレートが増加するため、検査中はフォームシェルにヘリウムガスがかからないように注意した。第4章で述べたように、ターゲット交換のため、ターゲット容器は開放されており、ターゲット容器の極低温での気密性を確保するために、開放ごと新品のメタル O リング(HELICOFLEX, Garlock)を使用した。このターゲット容器と装置本体の間にある水素とヘリウム配管の接続部やターゲット容器の気密性を同様に吹きかけ法で確認した。ターゲット容器については概ね 4×10^{-9} Pa・m/sec のバックグランド以下の漏れ量であった。次に開放時空気により置換されてしまった系全体の真空排気を行った。真空断熱層、ターゲット容器を含む水素配管やヘリウム配管の排気を、まずはスクロールポンプで行い、30Pa 程度まで排気後ターボポンプを稼動させた。おおよそ 4 時間経過後には真空断熱層の圧力が 0.5Pa 程度まで下がった。冷却の前にターゲット容器内に熱交換用ヘリウムガスを充填する。ヘリウムガスは常温で 200Pa 充填させた。充填後、冷凍機を起動し、冷却を開始した。冷却中には熱収縮によりターゲットの位置が変化するため、冷却完了後に計測系のアライメントを行った。両方のターゲットにおいて行う共通の実験の準備は以上である。

5－4－1　金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲット

金コーン付き直径 800 μm フォームシェルターゲットを用いた実験の手順は、次の通りである。まず H_2 HEX の温度(Tc6)を 14.5K に設定した。水素配管中にターゲットよりも温度が低い部分が出来てしまうとその部分で先に液化、固化がおこり、詰まってしまうおそれがあるためである。次に 10K シールドの温度(Tp5)を 14.0K にしておく。ここでパラ水素の三重点は 13.8K であり [4]、14.0K でターゲット内部を液化温度に維持するためである。温度が安定した後、水素ガスをターゲットに導入し、加圧していく。ここで水素の圧力を 8.5kPa（液化温度は 14.1K(シールド温度よりもターゲットの温度の方が高い)）に固定し、実体顕微鏡及び干渉計測系でターゲット内に液体

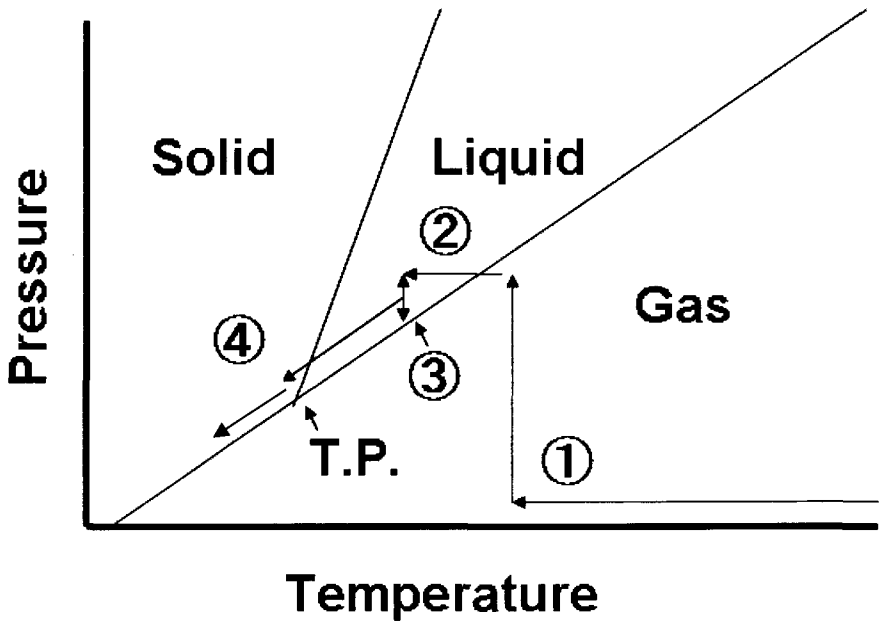


図５－６　金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲットを用いた燃料充填、固化実験におけるターゲット内部の温度と圧力の変化の模式図。①10K シールドの温度を 14.0K まで下げ、水素ガスを加圧する。②温度を下げ、気体から液体へ変化させる。③シェル内の蒸気圧を調節することでフォームに充填された液体水素量を調節する。④温度を下げていき、固化させる。温度とともに蒸気圧は下がる。温度を維持し、光学計測を行った。この図で T.P はパラ水素の三重点(13.8K,8kPa)を示す。

水素が観測できるまで 10K シールドの温度(Tp5)を段階的に下げていった。液体水素が充填されたのを確認した後、実体顕微鏡及び干渉計測系で計測しながら、水素ガスを減圧若しくは加圧の操作で液体水素の量を調節した。水素の圧力の調節により液体水素がフォーム層のみに充填されたあと、10K シールドの温度(Tp5)を固化温度に下げ、温度差による固相の成長方向制御を応用しない固化を実行した。その後さらに温度を下げて 12.0K で制御し、この状態で 24 時間フォーム層内の固体の挙動を観察した。それぞれの状態を実体顕微鏡及び干渉計測系で撮影した。

5－4－2　パリレンコーン付き直径 500μm のフォームシェルターゲット

パリレンコーン付き直径 500μm のフォームシェルターゲットを用いた実験において、水素を充填するための実験手順は次の通りである。金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲットと同様にまず H_2 HEX の温度(Tc6)を 14.2K に固定した。次に 10K シールドの温度(Tp5)を 13.5K に制御しておく。金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲットの実験から 10K シールドの温度(Tp5)を 13.5K で制御しても固化がおこらないことはわかっているためである。温度が設定温度に安定した後、水素ガスをシェル内に導入し、実体顕微鏡及び干渉計測系でターゲット内に液体水素が観測できるまで加圧を行った。液体水素の充填を確認した後、実体顕微鏡及び干渉計測系で計測しながら、水素ガスの蒸気圧を減圧若しくは加圧の操作でフォームに充填された液体

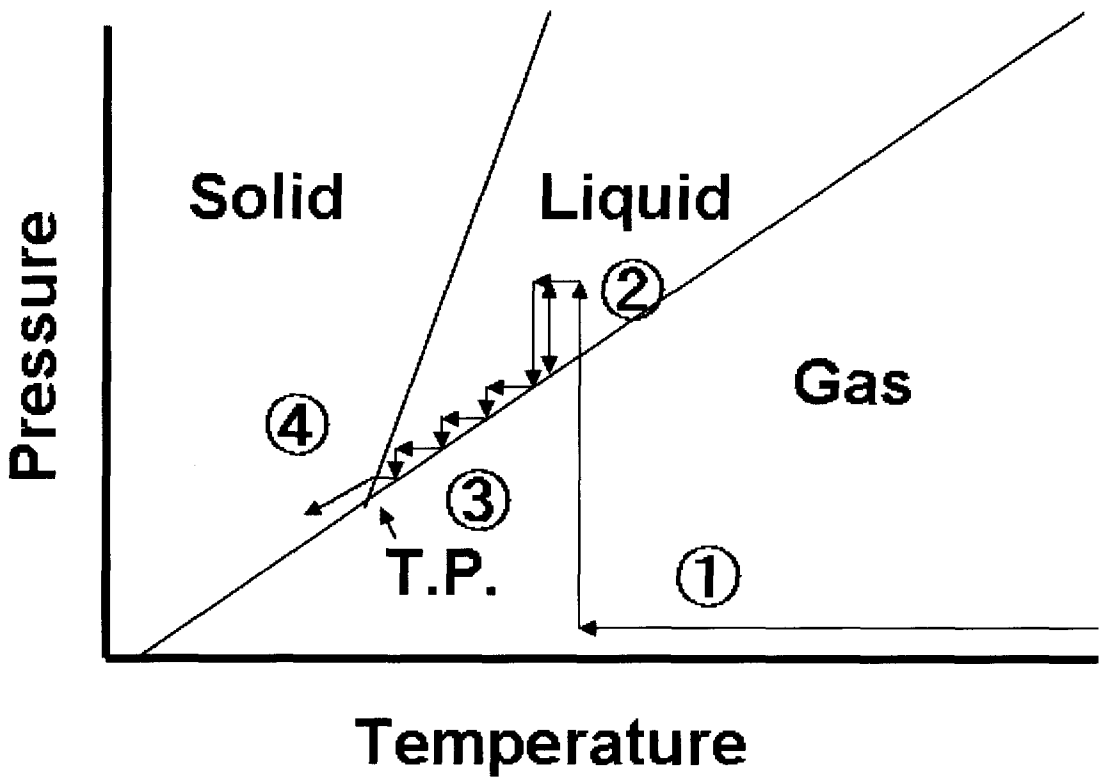


図５－７　パリレンコーン付き直径 500 μm のフォームシェルターゲットを用いた燃料充填、固化実験におけるターゲット内部の温度と圧力の制御の模式図。①10K シールドの温度を 13.5K で制御し、水素ガスをシェル内に供給、飽和蒸気圧以上まで加圧し液化させる。②液体がフォーム層に充填された状態でシェル内の蒸気圧を調節することで充填量を調節・維持する。③10K シールドの制御温度を下げていく、ここで 1step あたりの温度低下は 10mK である。温度の低下とともにシェル内の蒸気圧を飽和蒸気圧に保ち、内部の充填量を一定に保つ。④10K シールドの温度を下げ固化させる。パリレンコーンにレーザーを照射し、充填率向上を目指した実験と、比較としてレーザーを照射しない場合の実験を行った。この図の T.P はパラ水素の三重点(13.8K,8kPa)を示す。

水素の量を調節した。水素の圧力の調節によりフォーム内層のみに液体が充填された状態にしたあと、10K シールドの温度(Tp5)をさらに段階的に下げていき、同時にシェル内の蒸気圧を飽和蒸気圧に調整しながら、第 4 章において原理実証を行った温度差による固相の成長方向制御を応用した固化を実行した。実験では、シェル内に温度差をつけ固化成長方向を制御するために 2mW、594.1nm の HeNe レーザーをパリレンコーンに照射した。また比較としてレーザーを照射せず、固体成長方向を制御しない場合の固化実験も行った。

5－5　実験結果

(1) 金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲット、及び(2) パリレンコーン付き直径 500μm のフォームシェルターゲットの二つの場合においての実験結果を示す。干渉計測および実体顕微鏡の写真である。

5－5－1　金コーン付き直径 800 μm のフォームシェルターゲットによるプロセス実証

液体燃料を充填する過程のターゲットの拡大写真を図５－８に示す。ここで図の(a)は何も入っていない状態のシェルの写真、(b)はフォーム層内に模擬燃料である液体水素が充填されフォーム層に満たされたと考えられる時点での写真、(c)はフォーム層に液体水素が満たされた状態からさらに水素ガスを充填し続け、過分に液体を充填した状態の写真である。図５－８(a)及び(b)におい

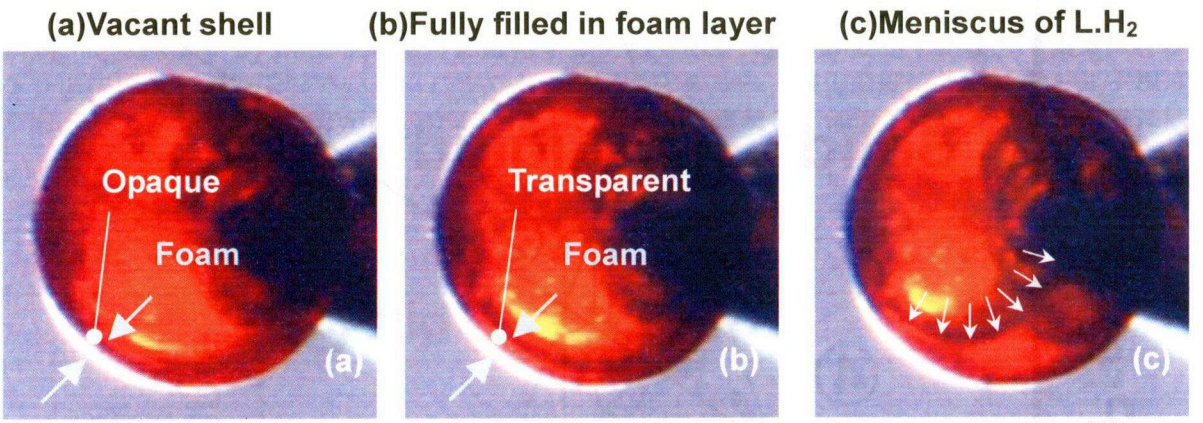


図５－８ RF シェルターゲットに模擬燃料を充填していく様子。(a)空の状態から、(b)液化が進みフォーム層に充填され、(c)コーン付近にメニスカスができた、各写真。

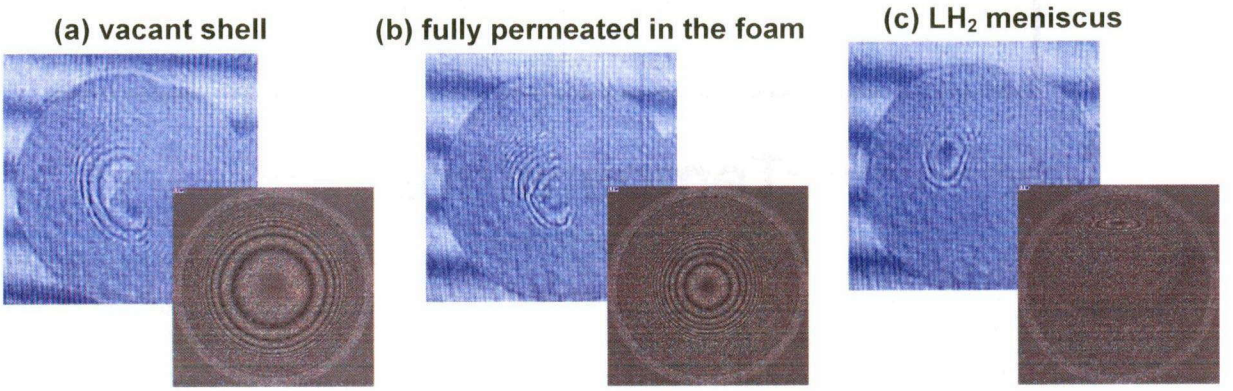


図５－９ RF フォームシェルターゲットに模擬燃料を充填していく様子。(a)空の状態から、(b)液化が進み、(c)コーン付近にメニスカスができていくそれぞれの干渉縞の写真（左上）。及び Shell's Optic Model により計算した干渉縞の計算結果（右下）。

て、充填前(a)は RF フォーム層が不透明であったものが、充填後(b)には透明になっているように見える。また、過分に液体水素を充填させると、コーン付近にメニスカスが形成される（図５－８(c)）。過剰な液体水素は、コーンと RF フォームシェルの内壁との間に表面張力の影響によってこの部分にフォームからあふれ出た液体水素がはじめに溜まる。しかし拡大レンズを用いて撮影した写真では燃料が充填されたかどうかの判別は難しい。そこで干渉計測を用いて (a)から(c)の状態に対応する干渉像を撮影したものを図５－９に示す。図５－９(a)と(b)を比較すると、確かに干渉縞が密になっていることが確認できた。次に図５－８のそれぞれの状態について Shell's Optic

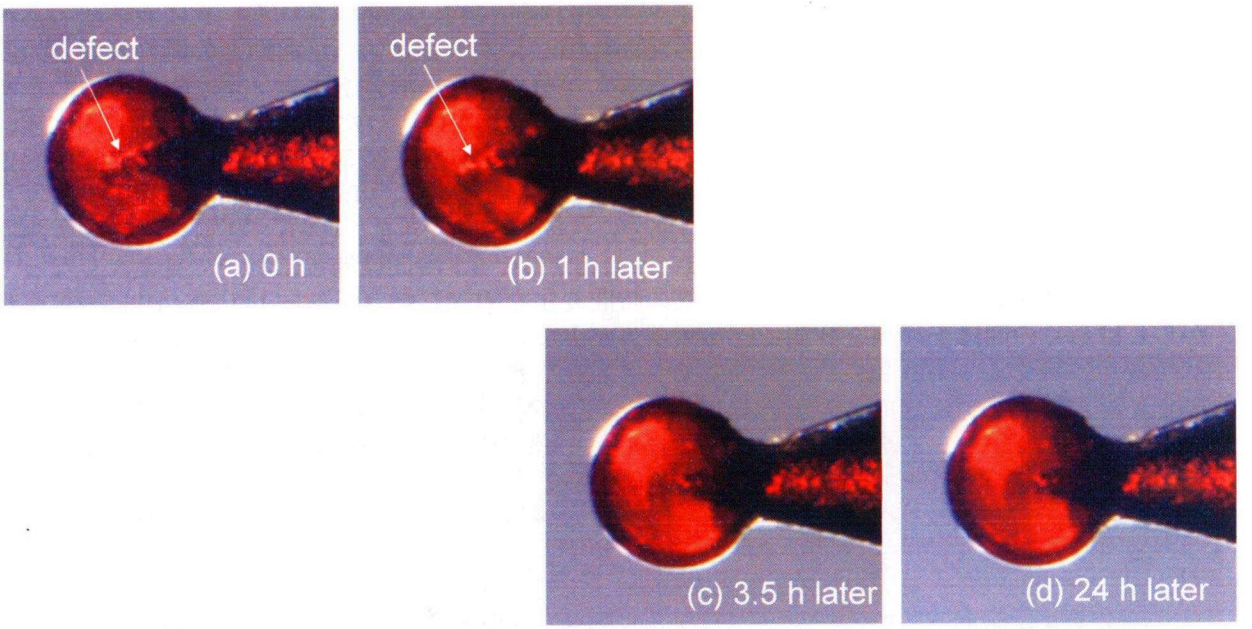


図５－１０　燃料を固化させた後の RF フォームターゲットの拡大写真。(a)固化直後、(b)1 時間経過後、(c)3.5 時間経過後、(d)24 時間経過後の各写真。

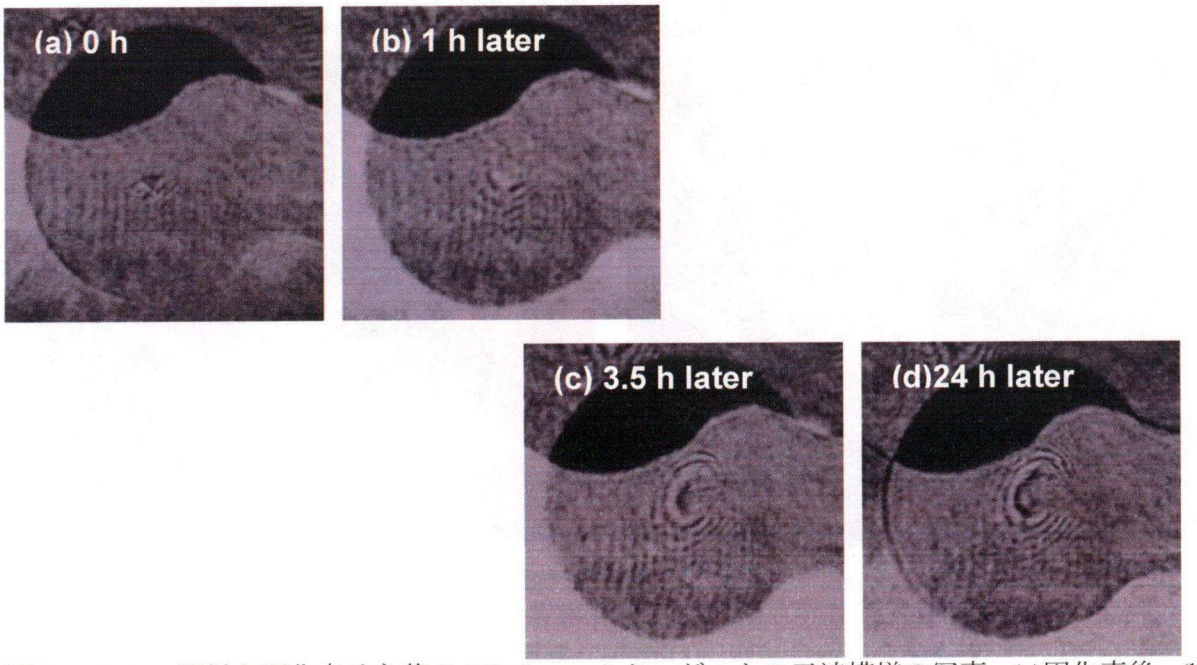


図５－１１　燃料を固化させた後の RF フォームターゲットの干渉模様の写真。(a)固化直後、(b)1 時間経過後、(c)3.5 時間経過後、(d)24 時間経過後。

Model (Lebedev Phisical Institute, Moscow)[5]を用いて計算した。計算結果については図５－９の右下にそれぞれの干渉計測結果に対応するように表示している。これらを実験結果と比較すると、液体燃料が充填されると干渉縞が密になること、フォーム層からあふれ出るまで過剰に液体水素が充填されると過剰な燃料が充填されコーン周辺に溜まった側と逆側に干渉模様の中心が移動していくこと、の二つの点で同様の傾向を示している。つまり中心が移動することなく干渉縞が密になった（図５－９(b)）ということは RF フォーム層に全体的に均一に液体水素が充填されたと考えられる。ここでフォームシェルにおける液体状燃料充填のプロセスをまとめると、まず、微小セルの表面張力が作用し、液体燃料はフォーム層全体的に均一に充填される。次に液体状の燃料をさらに継続するとそれはフォーム層からあふれ出し、コーンとシェル内壁との間の表面張力の影響をうけ、コーン近傍から溜まっていくとことが分かった。液体水素をフォームに充填したあと、10K シールドの温度(Tp5)を 12.4K に下げたときに固化が始まった（図５－１０(a)）。固化後、温度を 12K で維持したまま 24 時間固体水素の状態を観察した。図５－１０において、(a)は固化直後の拡大写真であり、(b)は 1 時間経過後、(c)は 3.5 時間経過後、(d)は 24 時間経過後の拡大写真である。固化直後では固体水素と思われる部分に欠陥が確認できた。（図５－１０(a)）この欠陥は 1 時間後の写真においても見られる（図５－１０(b)）が、3.5 時間経過後において見えなくなっている。干渉計測装置を用いてこの固化状態の時間変化を観測した（図５－１１(a)-(d)）。固化直後からしばらくの間は干渉縞を計測できるエリアが少ないことがわかる（図５－１１(a)-(b)）。これは光線が欠陥によって散乱されたためであると考えられる。時間の経過と共に中心の揃った干渉縞を確認することができた（図５－１１(c)-(d)）。RF フォームシェルターゲット内部では、温度が均一に近いことから[7]、昇華凝縮プロセスにより均一に固体水素が再分布したと考えられる。

5－5－2　パリレンコーン付き直径 500 μm のフォームシェルターゲット、高充填率の固体燃料層の実証

液体水素を充填中のターゲットの拡大写真を図５－１２に示す。ここで図中の(a)は何も入っていない状態のシェルの写真であり、(b)はフォーム層内に液体水素が充填された後、液体の供給が過剰になりフォーム層から溢れ出している状態の写真であり、(c)は(b)から(a)の状態からさらに水素を供給し続け、フォーム層から溢れ出した液体水素が増加している状態の写真である。(d)は液

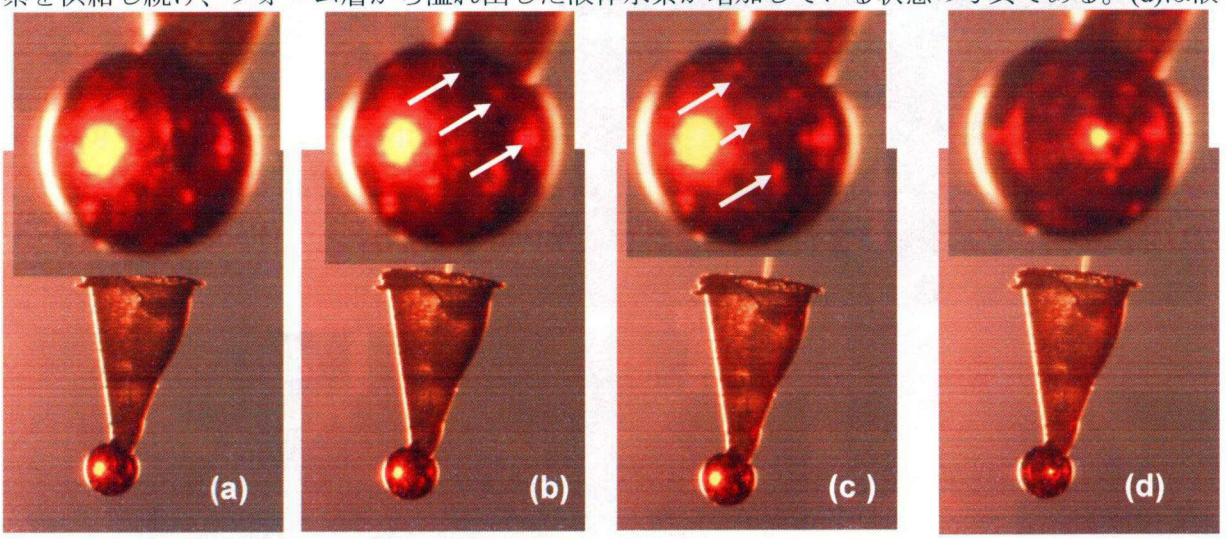


図５－１２　液体水素が入っていくときの様子を実体顕微鏡を用いて撮影した写真。(a)は何も入っていない状態、(b)はフォーム内にはすべて液体水素が充填され、さらに過量の液体水素によりコーン周辺にメニスカスが出来た状態、(c)はさらに液体の流入が進行しフォームシェルに半分程度入った状態、(d)はフォーム層から溢れ出した液体水素がフォームシェル全てに満たされた状態。図中の矢印は液体の界面が視認できる場所を示す。

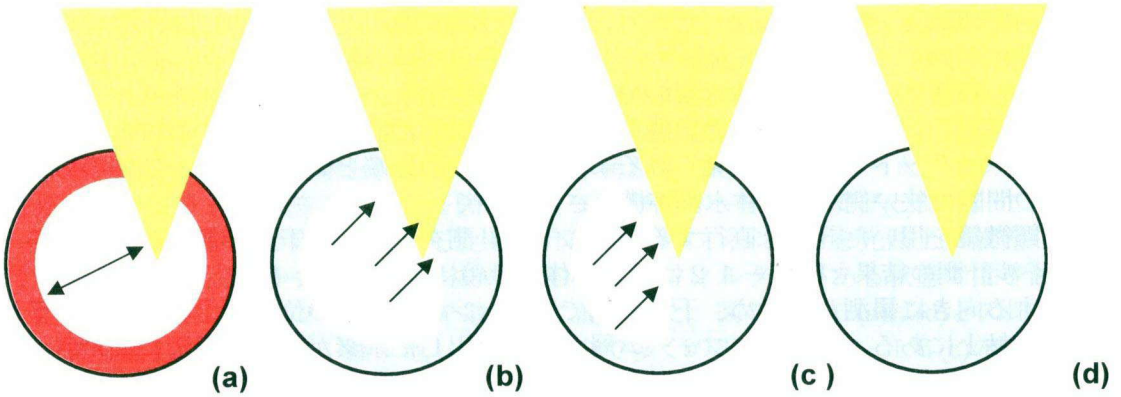


図５－１３　ターゲットに液体水素が入っていくときの水素の状況の模式図。(a)は何も入っていない状態。両矢印はコーンとシェル壁が最も遠いと考えられる位置。(b)はフォーム層内全てに液体水素が充填され、さらに過量の液体水素によりコーン周辺にメニスカスが出来た状態、(c)はさらに液体の流入が進行しフォームシェルに半分程度入った状態、(d)はフォームシェル全てに液体水素が満たされた状態。図中の片矢印は液体の界面が視認できる場所を示す。

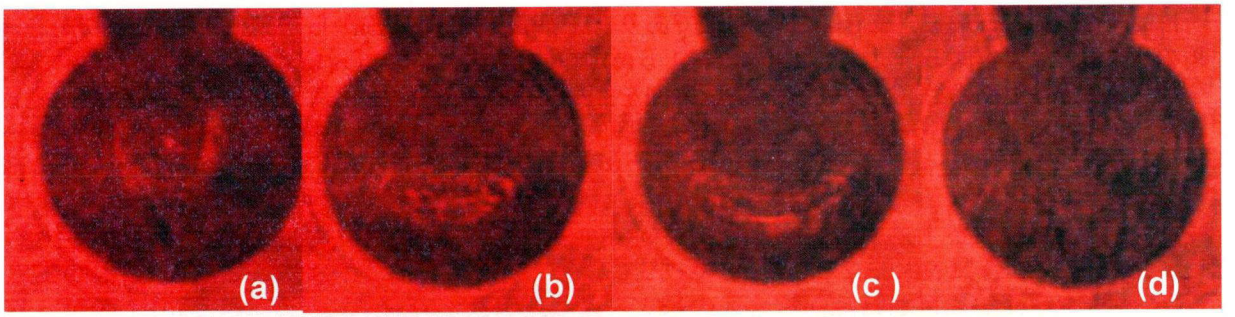


図５－１４　液体水素が入っていくときの様子を干渉計測によって撮影した。(a)は何も入っていない状態、(b)はフォーム層内全てに液体水素が充填され、さらに過量の液体水素によりコーン周辺にメニスカスが出来た状態、(c)はさらに液体の流入が進行しフォームシェルに半分程度入った状態、(d)はフォームシェル全てに液体水素が満たされた状態。

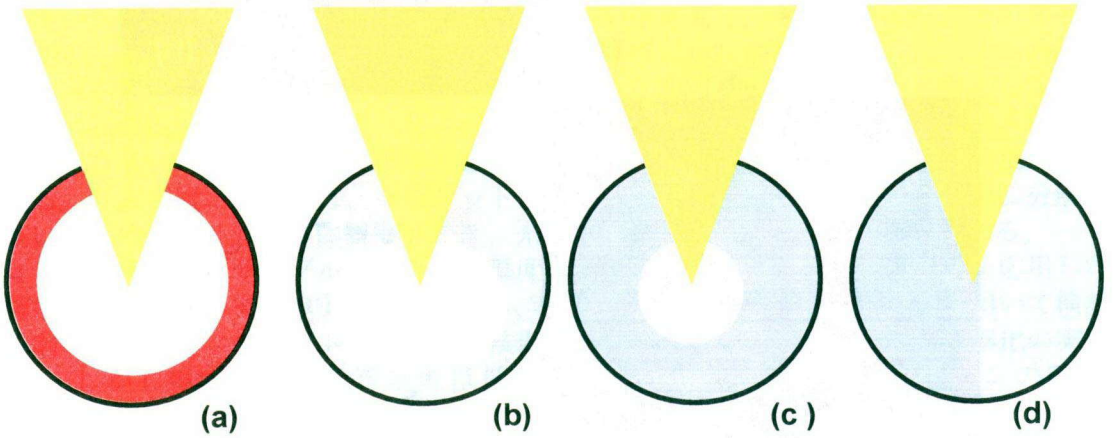


図５－１５　ターゲットに液体水素が入っていくときの水素の状況の干渉計測を行った方向の模式図。(a)は何も入っていない状態、(b)はフォーム層内全てに液体水素が充填され、さらに過量の液体水素によりコーン周辺にメニスカスが出来た状態、(c)はさらに液体の流入が進行しフォームシェルに半分程度入った状態、(d)はフォームシェル全てに液体水素が満たされた状態。

体でシェル内全体が完全に一杯になったと考えられる写真である。このターゲットを用いた実験では水素は液化が始まると勢いよく流入し、量を制御するのは非常に困難であった。図５－１３に図５－１２の各状態における液体水素の分布の模式図を示す。液体水素はまずフォームに入った後、過剰に供給されると表面張力の影響を受け、溢れ出した液体水素がコーン付近から満たされる。今回のターゲットでは写真に見られるようにコーンの先端とシェル右側の間隔の方が狭いため、右側の間隔の狭い側から液体水素が満たされていく。

この実体顕微鏡を用いた計測と直行する向きに干渉計測を行った。干渉計測の結果は図５－１４に示す。干渉計測の結果と図５－１２に示す実体顕微鏡による撮影との対応について説明する。両者は直交する向きに観測したため、干渉計測ではコーンのシェルの位置は中心にあり、干渉縞の中心も中心軸上にある。ただし、フォーム層から溢れ出した水素がコーン周辺に満たされるのに伴い、干渉縞の中心位置は下方へと移動し、干渉縞の円も楕円になる。理解しやすいように干渉計測側から実体顕微鏡で観察した場合の液体水素充填の様子がどのように予想されるか、その模式図を図５－１５に示す。干渉計測において、フォーム層から溢れ出た液体水素がコーン周辺に溜まり始めると干渉リングの中心は画面下方向に向かっていくが、さらに液体水素の供給を続けると、干渉リングの中心はフォームの中心側へと再度移動する。これはコーン先端とシェルの中心がずれた状態から考えると、コーンとシェル壁の間の表面張力によって初期には画面上方のほうからフォーム層から溢れ出た液体水素が充填されていくが、最後に液体水素が充填される場所はコーンとシェル壁が最も離れた位置であり、干渉計測と同じ軸から観察した場合それがシェルの中心部に近い(図５－１３(a)、図５－１５(c))ためであると考えられる。

次にシェル内に温度差をつけ固化成長方向を制御し、高充填率固化に取り組んだ実験結果を図５－１６に示す。何も入っていない状態の干渉像を図５－１６(a)に示す。次に液体水素がフォーム層に入り、溢れ出た液体水素でコーン周辺にメニスカスが観測できる状態を維持しながら、10K

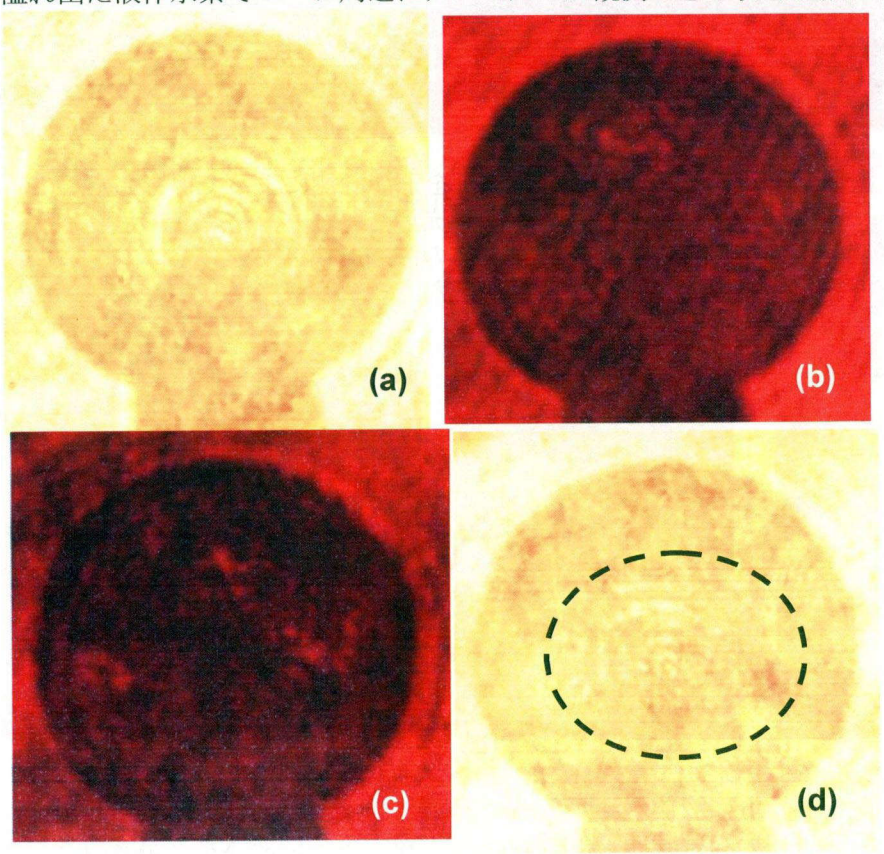


図５－１６　固体水素形成実験における干渉像。水素充填前の干渉像(a)、とレーザーを照射せずに固化させた場合の干渉像(b)、(c)及び(d)はレーザーを照射したまま固化させた場合の干渉像。

シールドの温度を 13.5K から数 mK 単位で段階的に下げていき、シェル内温度差制御を行わず最終的に固化させた状態の干渉像を図５－１５(b)に示す。最後に 2mW のレーザー光をコーンにあてながら、シェル内に温度差をつけ、ターゲット全体の冷却温度を下げていき高充填率固化の実証に挑戦した実験の干渉計測結果を図５－１５(c)及び(d)に示す。この場合コーンへの入熱量を計算すると、コーンの光吸収率と、レーザーの立体角から 2×10^{-5}W であった。この熱量は ANSYS の計算の条件よりも 10^4 倍であった。図５－１４及び図５－１６(b)及び(c)においては計測用レーザーによるターゲットの昇温を避けるために ND-400 のフィルターを光路上に設置し、光量を下げている。ただし、図５－１６(d)において ND-400 のフィルターがある状態では干渉リングが見難いため、一時的に ND フィルターを取り外し測定した。図５－１６(a)は(d)との比較のため ND フィルター無しで測定した。繰り返しの実験の中で多くの場合は図５－１６(c)のようにレーザーを照射しない場合と比べ大きな変化は見られなかった。このときの固化の速度は速く、全面から一様に固化が開始した。図５－１６(d)はレーザーを照射し高充填率実証に挑戦した実験で、干渉縞の中心がシェル中心にあり、縞間隔が狭い。これはフォーム層のみに固体水素が充填された状態を維持し、しかも固体水素内に発生する欠陥などが少ない状態が実現できた可能性を示す結果である。　すなわちウエッジ型サンプルで実証したように、実ターゲットを使用した実験でもフォーム層内に温度差をつけ固相の成長方向を制御することで、気泡のない均一な固体水素の生成が実現できた可能性を示している。

5-6 考察

直径 800μm のシェルにおける液体水素充填試験では液体水素の充填量の制御が出来たが、直径 500μm のシェルの場合にはある程度の液量制御ができたものの、フォーム層から溢れ出した液体水素がコーン周辺にメニスカスをつくり、そのメニスカスが無くなる状態を作り出すことができなかった。直径 800μm のシェルと、直径 500μm のシェルの場合と比較するとフォーム層に入る水素の体積は 500μm のシェルの場合 5.5×10^{-11}(m^3)であり 800μm のシェルの場合 4.6×10^{-10}(m^3)と比較して約 1/10 程度である。今回の実験ではメニスカスの大きさの制御は可能であったことからから 5×10^{-11}(m^3)程度の液量の制御が出来たと考えられる。今回の実験装置の構造上、水素配管はシェルや燃料導入管に対して長く、かつ室温からターゲットまでの全配管の温度分布を把握、制御できないために、配管内に存在する燃料の圧力などが細かく制御できず、飽和蒸気圧の低下とともにシェル内に液体水素が充填されるなど、装置に関わる課題が明らかになった。そこで更に細かく液体水素の充填量を制御するためには装置の改造や新たな技術開発が必要である。まず、室温からターゲットに向かって単調に減少する温度勾配を実現し、ターゲットの部分が最も冷える構造にする。それにより配管中に余分な液体状燃料が留まらないため、それがシェル内に流れ込む、シェル内の飽和蒸気圧の制御が定まらないといった問題点も解消できると考えられる。他にも燃料導入管に温度調節機能を持たせ、液体水素が適切量充填されたあと、燃料導入管の部分で水素を固化させ、バルブとして利用する方法などによっても理想的な実験環境が実現できると考えられる。計測装置においては、ターゲットと計測装置の距離を短くすることで更に分解能をあげ、高い精度の干渉計測や実体観察ができ、充填量の制御が容易になると考えられる。

第４章でウエッジ型サンプルで実証した温度差による固相の成長方向制御手法を応用したフォーム層内固体水素の高充填率実証の結果から、実ターゲットへの応用を ANSYS を用いて検討し、その検討をもとに実ターゲットでも同様な技術でフォーム層内固体水素の高充填率化の実証に成功した。しかし現状ではその再現性は低い。その主な原因はパリレンコーンの熱伝導率(0.026(W/m・K)(1K))が金の熱伝導率(2190(W/m・K)(4K))[6)]にくらべ低いため、熱がコーン付近のフォーム層に伝わらず、計算により求めた冷却とコーンの加熱のバランスを実現できなかったことだと考えられる。図５－１６(d)の状態が実現した際には液体水素がフォーム層から僅かに溢れ出しコーン周辺にその過剰分がメニスカスとして観察できる状態で 10K シールドの温度を 13.38K にした時、さらなる液体水素の流入が始まったため、不要なガスの排気を行った。この排気を行っている間にその蒸発潜熱によりフォーム層内液体水素の固化が進行した。それ以外の実験では

10K シールドの温度を 13.38K に制御した場合フォーム内の液体水素の固化は始まった例はない。よってこの実験の場合主に排気に伴う気化熱が液体から固体への相変化を助けたと考えられる。この排気による気化熱を数値的に見積もることは困難であるが、結果としてコーンの加熱とこのときの昇華熱のバランスによって温度差制御による高充填率固化が実現したと考えられる。今後コーンに加える熱量と、ターゲット冷却のバランスを調べることで再現性よく高充填率固化が実現できると考えられる。

5−7 まとめ

フォームシェルの直径とコーンの材質が異なる二種類のターゲットに液体水素を充填し、フォーム層内のみに液体水素を充填した状態を維持したまま、その液体水素を固化させることができた。このとき約 $5\times10^{-11}(m^3)$の精度で液量の制御が可能であった。このように液体燃料のフォーム層への充填およびその固化に関連する温度と圧力の制御プロセスを実証することができ、今後クライオターゲットを製作する際に利用できると考えられる。

また、ウエッジ型サンプルで原理実証した、フォーム層内固体水素の高充填率化の手法をフォームシェルターゲットに応用した結果、低い確率ではあるが気泡や欠陥の少ない均一な固体水素層形成の実証ができた。ターゲットの冷却とコーンに加える熱量について詳しく調べることによって再現性が高くフォーム層内固体水素の高充填率化を行うことができると考えられる。

第５章の参考文献

(1) A. Iwamoto et al. "Cool-down performance of the apparatus for the cryogenic target of the FIREX project" Fusion Engineering and Design 81 p1647-1652 (2006)
(2) 岩本晃史ほか 超電導・低温工学学会予稿集 (2010)
(3) 雑賀宏　修士論文　(2011)
(4) P.C. Souers "Hydrogen property for fusion energy" University of California Press pp62-78 (1986)
(5) E. Koresheva "3D ray tracing code as a research instrument in the area of ICF/IFE target characterization" poster presentation in Institute of laser engineering (2003/12/24)
(6) S. Yoshikawa, Sinnkuu handobukku (in Japanese) (ULVAC,Japan, 1989) p.36.
(7) A. Iwamoto et al., "Study on possible fuel layering sequence for FIREX target" Journal of Physics: Conference Series Institute of Physics **244** 032039 (2010)

第６章　燃料充填量評価方法の開発

6－1 はじめに

これまで、第２章、第３章において RF フォームターゲットの各部品の加工からその組み立て、組み立てられたターゲットの気密確認方法の開発を行い、組み立て精度は低いが極低温実験に供給するターゲットを完成させることができた。次に第４章においてフォーム層内の燃料の充填量の評価に必要な基礎データとして固体水素の屈折率を測定する手法を開発し、実際にその屈折率の測定をおこなった。同時に、フォーム層に温度勾配を設けることによって液相から固相への変化をサンプル内で一方向に進展させ、フォーム層への充填率の高い燃料層形成の原理を実証した。第５章においては実際に RF フォームシェルターゲットを使用して模擬燃料を充填し、固化までの手順の確立を行った。また、第４章で原理実証されたフォーム層内固体模擬燃料の高充填率化技術を実サイズターゲットに対して応用し、その実証にも成功した。この第６章ではこの RF フォームシェル内部のフォーム層に充填された燃料の量を評価する手法の開発研究について述べる。

レーザー核融合高速点火方式においては、燃料が最大に爆縮した時点より前後 50ps 以内に追加熱レーザーを照射する必要がある [1)]。フォーム層内に充填された固体燃料の量によりこの最大爆縮の瞬間は決まる。そのため燃料の量が正確に評価できていないと最大爆縮の瞬間を逃すことになる。この最大爆縮の瞬間を正確に求めるためにはフォーム層内の固体燃料の充填量を精度 1%以内で測定する必要がある。また、FIREX-I 計画 [2)]では高速点火の実証を目的としているため、燃料の充填量と核融合反応効率の関係を評価する要求がある。この燃料の量の評価についてはシェル内のある一点の情報から算出するのではなく全シェル内の分布についても調べ、算出する方がその精度を上げることができる。同時に燃料の不均一性評価は十分に燃料を爆縮できない原因となる流体不安定性と燃料の不均一性の関係を知る重要な情報になる。

フォーム法ではフォーム層の内部に燃料が充填されることから、フォーム内部の充填率を直接測定することが出来ない。そこで、ターゲットにレーザー光を照射し、その透過光を用いた干渉計測を行うことでその光路長の差から燃料層の屈折率を求め、固体燃料充填前後の屈折率の比較から燃料の量を評価する。本章では特に原理の実証を目的として次の点について研究を行う。

・撮影した干渉像とフォームシェルの情報から固体燃料を含むフォーム層の屈折率を求め、燃料の充填量を評価することができる解析手法の開発

6－2　評価手法の原理

フォーム層における燃料の充填量を評価するための屈折率測定方法として干渉計測を採用した。燃料層および蒸発防止膜、その中の飽和蒸気圧の燃料ガスの三層構造からなるシェルにおける燃料層の屈折率を測定することになる。燃料層の屈折率はフォーム層に充填された燃料の量を示す値であるため、燃料の充填量を求めることができる。燃料層の屈折率を測定するためには、フォーム層に燃料が充填された RF フォームターゲットの干渉像を撮影し、干渉縞の位置及び間隔を画像解析により求め、三層を通過した光の光路計算によりフォーム層に充填された燃料層の屈折率を求める。上記評価方法におけるこの三層構造のシェル内の光路計算の方法を説明する。

RF フォーム層と蒸発防止膜、その内部の飽和蒸気圧を持つ燃料ガスからなる三層構造からなるシェル内をどのように光線が通過するのかを図６－１に示す。この図で n_0, n_1, n_2, n_3 は各領域における屈折率である。結像レンズ系で像転送したため撮影した干渉縞は、焦点である座標 I の位置に現れる。つまり、ある高さから入射した光線（例えば $A(x_a,y_a)$を通る）が参照光と干渉した場合、明線は座標 $I(0,y_i)$にあるように撮影される。ここで燃料充填前後の変化について述べると、RF フォームに燃料が充填されると n_2 が変化する。n_2 が変化することにより D,E,F,G,H 及び I の座標が変化する。また光路長は物質の屈折率とその物質を光が通過する幾何学的な長さとの積である。つまり n_2 が異なれば屈折率と幾何学的な長さの両方が変化し、光路長が異なるため、燃料充填前

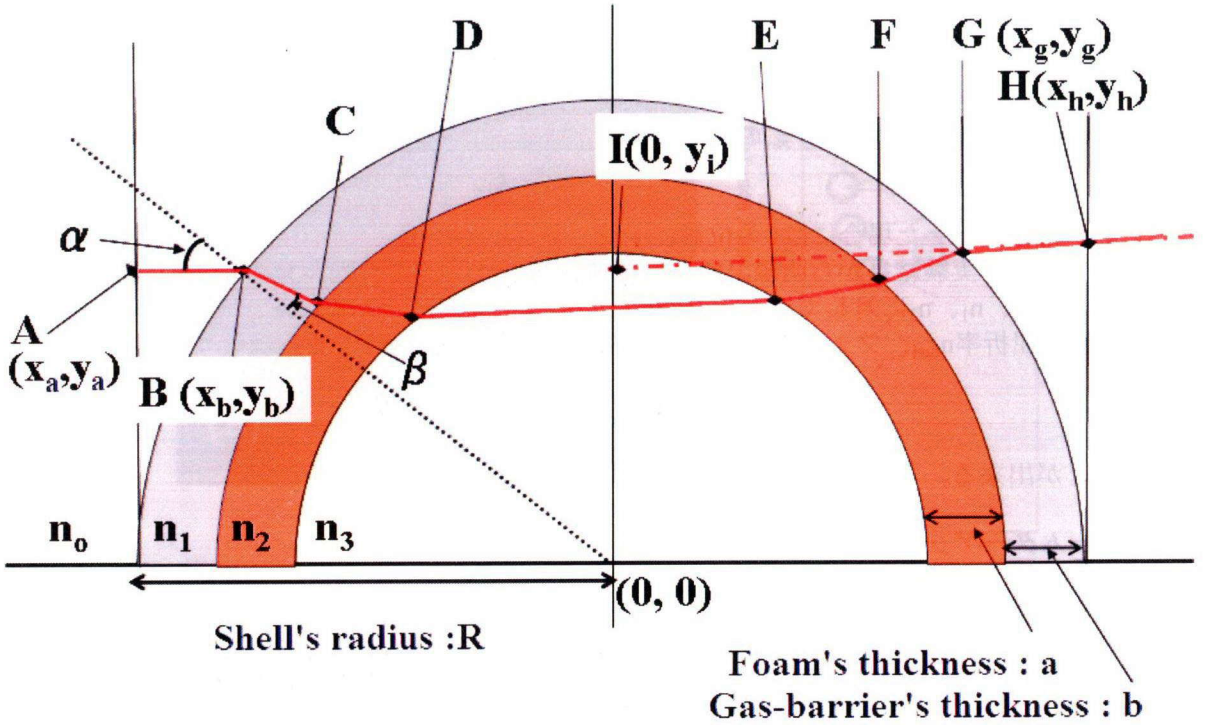


図６－１　二重シェル内部を透過する光線の光路を示すモデル図。

後で干渉縞の見える位置も異なる。
光線がどのような軌跡を辿るか考える。ここで入射光は水平面に対して平行に入ってくるものとして考える。ここで図６－１における角度 α は幾何学的に以下の式 6-1 で与えられる。ここで R はシェルの半径、A の座標を(x_a,y_a)、B の座標を(x_b,y_b)とする。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{y_b}{R}\right) \tag{6-1}$$

また、スネルの法則により図６－１における角度 α と β の関係は以下の式で与えられる。

$$n_0 \sin\alpha = n_1 \sin\beta \tag{6-2}$$

以上の角度 α と β、C の座標(x_c,y_c)は以下の式で与えられる。

$$[-\tan(\alpha-\beta)(x_c - x_b) + y_b]^2 + x_c^2 = (R-b)^2 \tag{6-3(a)}$$

$$y_c = -\tan(\alpha-\beta)(x_c - x_b) + y_b \tag{6-3(b)}$$

同様にスネルの法則と幾何学計算を用いて D, E, F, G, H の座標を求めることができる。そして焦点面の y 座標は G の座標(x_g,y_g)と H の座標(x_h,y_h)の座標をもちいて

$$y_i = \frac{x_h y_g - x_g y_h}{x_h - x_g} \tag{6-4}$$

と書くことが出来る。全ての座標が計算されたあとで、光路長 L は以下の式で表される。

$$L = n_0 AB + n_1(BC + FG) + n_2(CD + EF) + n_3 DE - n_o GI \tag{6-5}$$

ここで大文字アルファベットは各座標間の長さ(例えばABは座標Aと座標Bの間の長さ)を示す。ここでI に明線が観測できた場合に、平行な光がA と異なる点A'を通り透過してきたとき（このときの計測面の座標をI'とする）、この光路長をL'とすると、光路長の差ΔL は、

$$\Delta L = L' - L = k\lambda \tag{6-6}$$

ここでk が整数であった場合にはI'の位置に明線が見えk が整数＋0.5 であった場合にはI'の位置に暗線が見える。実験結果から明線と暗線の位置を数値化し、この光路長の差との関係を求めることで既知のn_0、n_1、n_3に対して屈折率n_2を求めることができる。屈折率n_2とフォーム層の屈折率n_{foam}、燃料の屈折率n_{fuel}、フォームのボイド比V_gおよび燃料充填率kの関係は

$$n_2 = n_{foam} + V_g(n_{fuel} - 1) \cdot k \tag{6-7}$$

と書くことが出来る。

6-3 フォームターゲットにおける評価

干渉縞を解析するにあたり、画像上のシェルの中心を定義する必要がある。理想的な中空球の場合、シェルの中心と干渉縞の中心が一致し、同心円状の干渉縞が観測できる。しかしフォームシェル製作の精度が干渉計の精度を下回る場合には、その中心同士が一致しなくなる。そこで本研究ではまずシェルの幾何学的に中心を定義した。図６－２にフォームシェルの干渉像を示す。干渉像において、直角三角形の頂点をフォームシェル球の外縁上にとり、このような直角三角形を3個干渉像の上に描き、直角の対辺同士の交点の平均を中心と定義した。この交点の分布は、フォームシェルの真球性に依存し、本実験で用いたフォームシェルにおいては直径3 μm の円に収

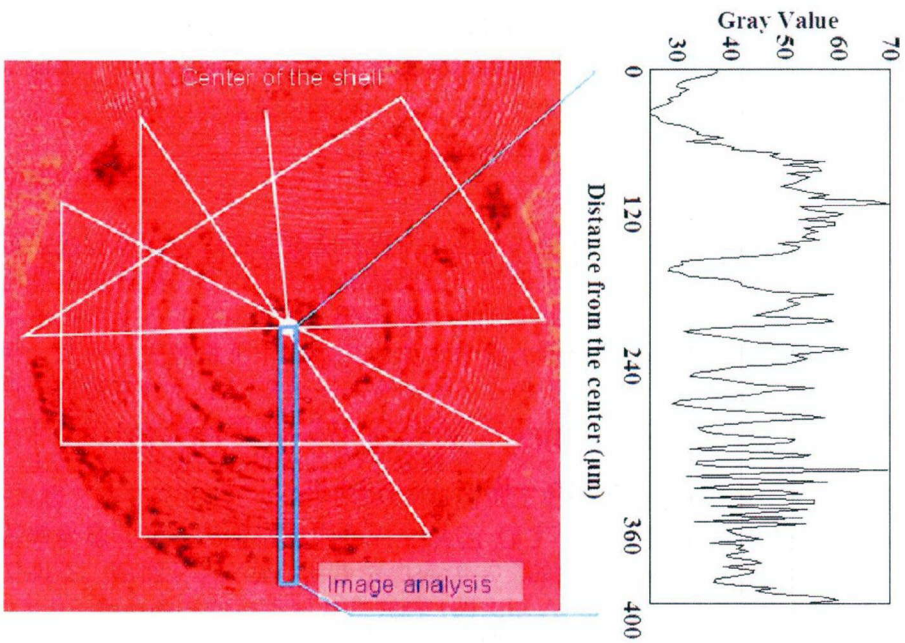


図６－２　幾何学的な方法によって、直角三角形を３つ用いたその交点を干渉像におけるシェルの中心とする。シェルの干渉像に四角で囲ったエリアの濃淡を画像解析すると右図のようになる。

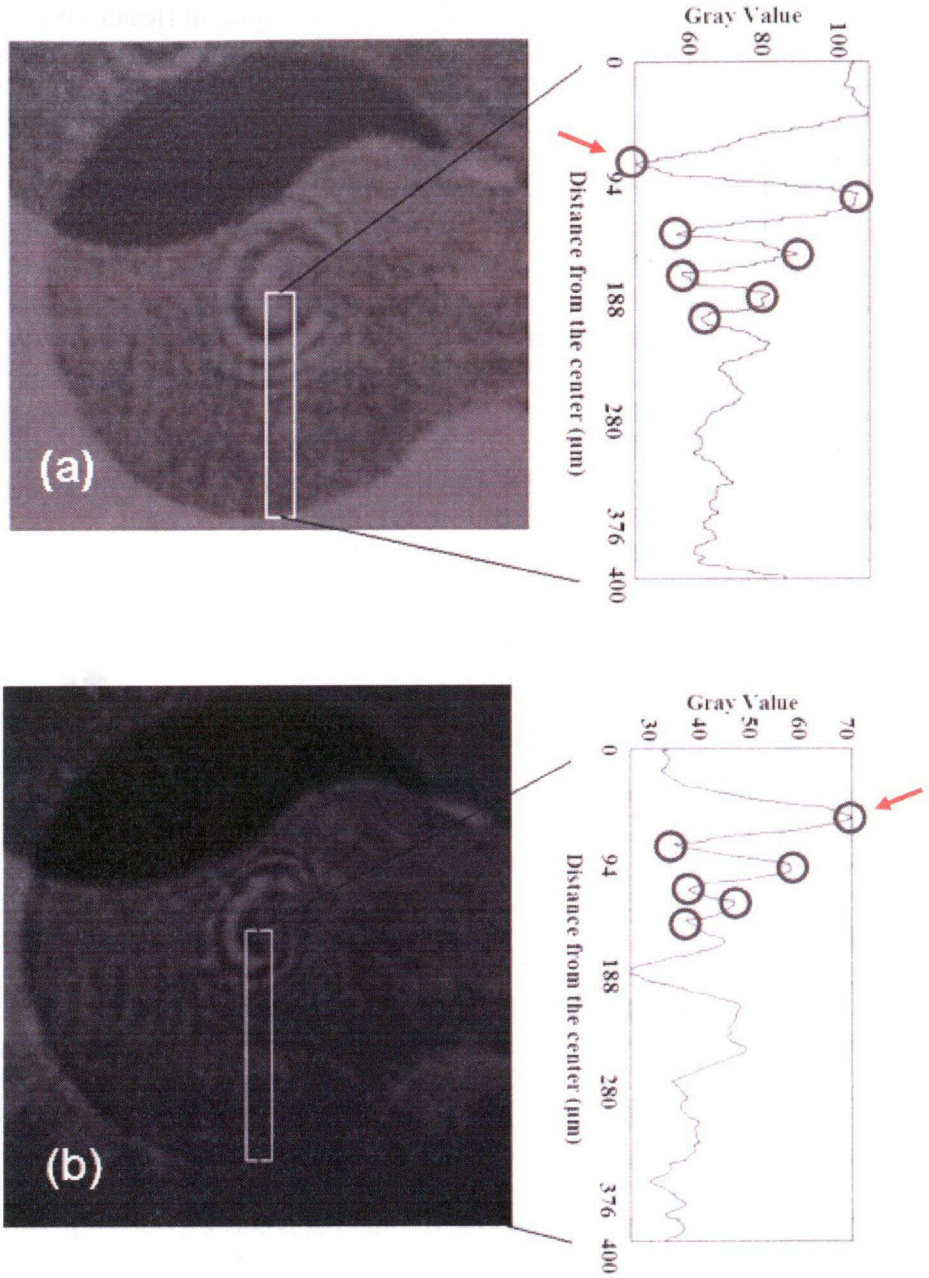


図６－３　干渉縞の写真と、その画像解析した強度プロファイルを示す。(a)水素を充填していない状態と(b)液体状水素を充填後、固化させた24時間経過後の状態。赤矢印は基準となる明線もしくは暗線。

まるものであった。また、このシェルの場合、干渉縞が多少変形しているが、幾何学的中心と干渉縞の中心がほぼ一致しており、今回の干渉計測の精度ではその両者のずれを検出することができない。よって、今後の解析ではシェルの幾何学的中心を干渉縞の中心として取り扱った。
第５章で撮影した干渉縞をもとにRFフォームシェルの屈折率解析を行う。このとき使用したターゲットは金コーン付き直径800μmのフォームシェルターゲットである。水素充填前の干渉像を図６－３(a)に、充填後固化させて24時間継続して冷却温度を維持した後の干渉縞の写真を図６－３(b)に示す。充填前より充填後の方が干渉縞の間隔が狭くなっていることが読み取れる。それぞれ

の干渉縞を解析するため、画像解析ソフトImage-J (National Institute of Health, USA) を用いて横幅7 μm のシェルの幾何学的中心から画面下方向にターゲットの外縁まで干渉縞の強度プロファイルを求めた。その結果を各干渉縞写真の右側に示す。この強度プロファイルからも明らかに干渉縞の周期は充填後のほうが充填前よりも短いことが分かる。周期的な明暗の中で最も明るい点と最も暗い点をそれぞれ明線、暗線の位置であるとした。

まずは基準となる空のRF フォーム層の屈折率を充填前の結果を用いて評価した（図６－４）。現状の計測装置ではターゲットの中心を通った光の位相を正確に測定するのが困難である。撮影した画像の強度プロファイルは相対値であり、中心部分を基点としてサインカーブへのフィッティングが出来ないためである。そこで図６－３(a)の右側に示す強度プロファイルにおいて、中心から82 μm にある最も内側の暗線を基準にした。式(6-6)におけるL を干渉縞の中心から82 μmの位置に見える暗線の光路長とし、この光線との光路差ΔL を図６－４の縦軸にとった。この縦軸の各点の間隔は光路差としてHeNe レーザーの波長の半分である316 nm を使用している。干渉縞の明線もしくは暗線の位置y_i を横軸にとった。次にこの実験結果のΔL から空のRF フォーム層の屈折率を評価するため、n_2 をある範囲で変化させてΔL を計算した。このときフォームシェルを真球かつそのフォーム層の密度及び厚みが均一である仮定した。

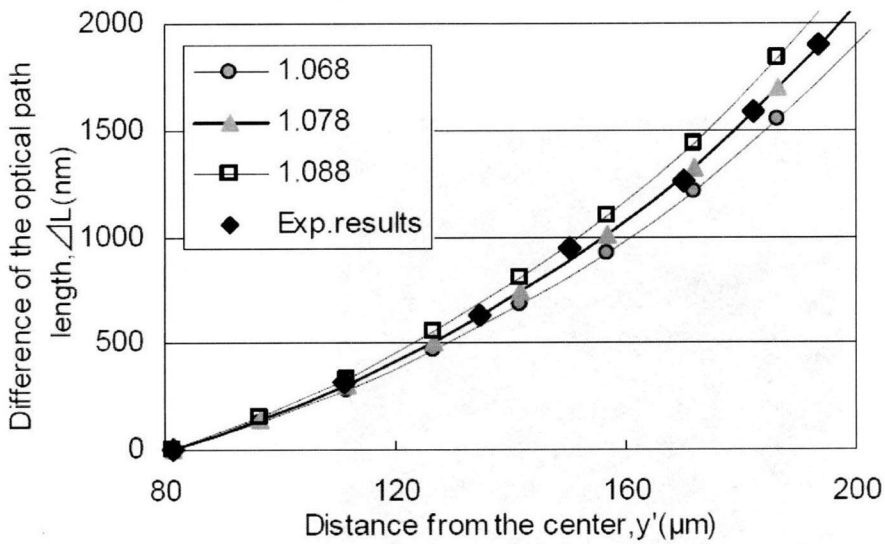


図６－４　RFフォームの屈折率の測定結果と計算により求めた屈折率の比較。

影した画像の強度プロファイルは絶対値であり、中心部分をサインカーブにフィッティングすることが出来ないためである。そこで図６－３(a)の右側に示す強度プロファイルにおいて、中心から82 μm にある最も内側の暗線を基準にした。式(6-6)におけるL をこの中心から82 μmの位置に見える暗線の光路長とし、この光線との光路差ΔL を図６－４の縦軸にとった。測定による明線もしくは暗線の位置y_i を横軸にとった。図６－４において、実験結果は、横軸に周期的に現れる明線と暗線の中心からの位置を、縦軸に光路差としてHeNe レーザーの波長の半分である316 nm を取り、プロットした。次にこの実験結果のΔL から空のRF フォーム層の屈折率を評価するため、n_2 を変化させてΔL を計算した。このときターゲットを真球かつ厚みが均一である仮定した。光路長の差は式(6-1)から(6-6)を用いて計算し、ターゲットの外側に満たされているHeガスの屈折率n_0 を1.000、蒸発防止膜の屈折率n_1 を1.661[1)]、ターゲット内部の屈折率n_3 を1.000として計算した。実験値との比較のため、その計算結果を図６－４上にプロットすると実験結果はn_2 が1.068 から1.088 までの計算結果の間に収まった。そこで実験的に求めたRF フォーム層の屈折率は1.068と1.088の中間値である1.078 を用いることにする。一方、参考として空のフォーム層の屈折率n_2 についてLorentz-Lorenz の式[2)]から理

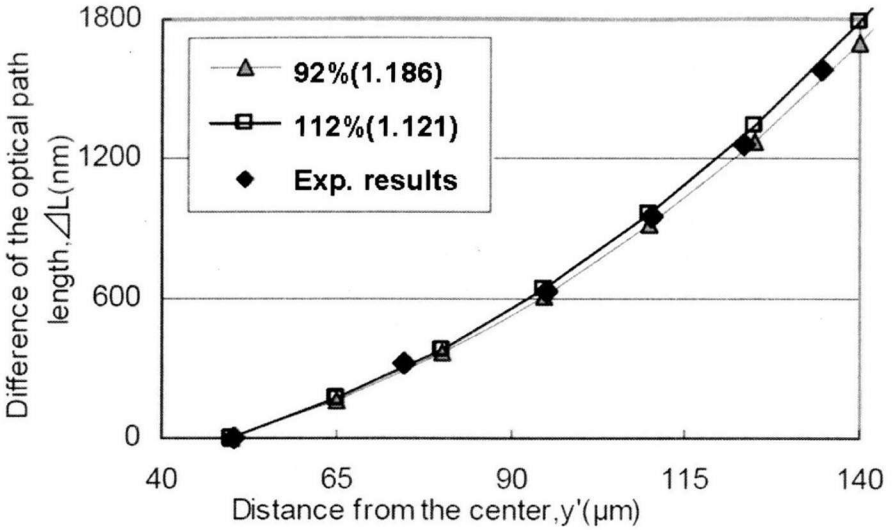


図６－５　RFフォーム内に充填された固体水素の充填率を屈折率の測定により求め

理論的に計算すると1.068 であった。実測値と近い値となっているが0.01の差があ
Lorentz-Lorenz の式による屈折率計算は原子屈折量の和をもって分子屈折量と近似して
の近似は単原子分子であれば実測値とよく一致するが有機物の場合、特に不飽和原子対
合には実測値との差が大きくなる傾向がある[3)]。RF フォームは有機物かつ不飽和原子対
ため、実験から求めた屈折率1.078が実際の屈折率に近いと考え、その値をRFフォーム層
として今後は採用する。

次に固体水素充填後24時間経過した干渉縞の強度プロファイル図６－２(b)を基に固体
量を求めた。またRF フォーム層の屈折率を調べた場合と同様に干渉縞を評価し、充填
には中心から50 μm にある最初の明線を基準にした。写真から縞として視認できるのは
つ目の暗線までであるため図６－２(b)中の丸印をつけた点までをデータとして採用した
の計算は上述のフォーム層の屈折率を求める場合と同様の計算式とターゲットのモデル
n2のみが変化すると考えた。12 K の固体水素の屈折率は第４章から1.136 であることか
複合則により計算すると、100%固体水素が充填されたRF フォーム層の屈折率は1.196
一方、実験結果と屈折率から評価した充填量を図６－５に示す。実験結果を最小二乗法
フィッティングした結果は屈折率1.197であり、これは102%の充填量にあたる。この結果
と評価時のフォームシェルにはほぼ100%の燃料が充填されていたと考えられる。次に実
各点について評価すると充填量が92%から112%まで変化していた。このように各点によ
の評価は平均値から±10%の範囲で変化しており、残念ながら必要とされる1%の評価精
することはできなかった。

6-4 考察

本評価手法によってフォームシェルへの燃料充填量を評価した結果、この評価時のタ
ではほぼ 100%のフォーム層へ燃料が充填されていたと評価できたが、各干渉縞の間隔は
価値が±10%の範囲で変化していた。この精度が低かった原因は以下の二つが挙げられる

① 干渉像の画像解析結果では、明線、暗線のピークが鋭く出ていない。

これは明線付近の光量が飽和してしまったこと及び画像からのデータが少ない、つま
が低いことが原因であると考えられる。

② 撮影した干渉像では干渉リングが偏心している。

これは理想的な中空球を仮定した計算モデルと実際のターゲットの条件が異なっていることによるもので、シェルの正確な三次元の情報をもとに計算モデルを修正することや、シェルの開発が進み、真球性が高くかつ膜厚が均一なシェルが製造されることで解決できると考えられる。
これらを踏まえて今後、分解能の高い干渉縞の撮影と、計算モデルと実際のターゲットの形状の差を小さくすることで、より充填量評価の精度を上げることができるものと考えられる。

二次元の干渉像の解析以外にも、充填量を測定する方法として、シェル中央を抜けてきたレーザー光の燃料充填前後の位相変化量の絶対値を読み取ることで中央部一点の充填量を評価する方法が考えられる。これには既存の技術である光位相変調干渉計を用いることで測定できる。厚さ20μm のフォームシェルに 100%固体水素が充填された場合、その位相変化量はλ=632.8nm の波長にして、7.7λである。既存の光位相変調干渉計では 1/100λの分解能があるため、固体水素の充填量を 0.13%の分解能で測定できる。この中心部の一点について精度の高い測定を行ったうえで、その周辺部は本章で測定した干渉縞をもちいて相対値を求めれば充填量の二次元の分布の測定が出来ると考えられる。さらにターゲットを回転させる、もしくはもう一軸測定方向を追加することにより三次元の分布が測定できる。これらの測定方法を実施し、三次元での燃料の充填率の分布を調べることが今後の課題である。

6-5 まとめ

干渉計測法による可視化技術を用いたRF フォームターゲットのフォーム層への固体燃料充填量の評価手法の開発を行った。撮影したフォームシェルの干渉縞から燃料を含むフォーム層の屈折率を算出し充填量を評価することに成功した。今回の評価に使用した干渉縞の平均値から充填量を評価するとフォーム層内の固体水素充填量は102%であった。しかし各干渉縞から評価した充填量は±10%の間で変化していた。今後、次の課題の研究を進めることで、要求される充填量評価精度を実現できると考えられる。

・干渉像を高分解能で撮影する装置や技術の開発
・実際に使用したターゲットの情報を計算モデルに反映すること

第６章の参考文献

(1) 日本パリレン株式会社ホームページ http://www.parylene.co.jp/about%20parylene-2.htm (2010/12/20)

(2) ボルン・ウォルフ:「光学の原理Ｉ」(草川・横田訳), 東海大学出版 p126 (1974)

(3) ボルン・ウォルフ:「光学の原理Ｉ」(草川・横田訳), 東海大学出版 p129 (1974)

(4) K. Nagai, et al.:"Foam materials for cryogenic targets of fast ignition realization experiment (FIREX)," Nucl. Fusion **45** pp1277-1283 (2005)

第７章　結論

本研究においてはレーザー核融合高速点火方式の原理実証を目的とした FIREX-I 計画用フォームクライオターゲットの開発に関する研究を行った。ターゲットの製造から検査、燃料充填、最終的な燃料層の検査まで、最終的にフォームクライオターゲットがレーザー実験に供給できるまでのすべての技術を網羅し、それらの基礎的技術の実証研究を行った。この章では以下に実証した成果と今後の課題を各章ごとにまとめ、本論文の結論とする。

第１章（緒論）では、本研究の背景となるレーザー核融合の開発及び、それに関連するターゲットの開発の現状について述べ、レーザー核融合の実現が間近に迫っていることを知らしめた。次に本研究の目的を、日本が先行して行っている高速点火方式のレーザー核融合のためのターゲットに要求される条件（真球性、大きさ、膜厚、評価技術の精度等）についてまとめ、本研究で注目する FIREX-I 用フォームクライオターゲットの仕様についてまとめた。最後に本研究の目的が、ターゲットの組み立て技術開発から始め、最終的にはフォーム層内に高密度(充填率 99%以上)で固体燃料層を形成する方法の原理実証まで、フォームクライオターゲットに必要な一連の技術の実証研究であることを述べた。

第２章では、レーザー加工による低密度フォーム材料の穴あけ加工に関する研究ついてまとめた。本研究ではフォームシェル材料として有力な候補である RF フォームの光学的特性及び熱的特性を評価し、その物性値に基づき比較的強度の低いレーザーによるフォームシェルの熱分解加工について述べた。RF フォームシェルに対する精度の高い穴あけ加工の手法を確立し、再現性の高い穴あけ加工を実現した。

第３章ではフォームシェルなどの各部品をクライオ燃料充填実験に供するターゲットとして組立て、その健全性を評価する方法について研究を行った。本研究では、クライオ燃料充填実験に供することを第一に考え、組み立てなどの精度向上を目的とせず、燃料導入管から燃料を導入し、内部に固体燃料を充填するまでの一連の実験ができるターゲットの製作手順を確立し、その手順で製作したターゲットの常温で気密健全性を確認した。その結果、クライオ燃料充填実験にフォームシェルターゲットの供給が可能になった。

第４章ではフォームに対する固体燃料充填の高充填率化の原理研究を行った。フォーム内に含まれる固体燃料の充填率を上げる方法として温度差による固相の成長方向制御を利用した手法を提案し、その実証を行った。同時に、フォーム内に充填された固体燃料の充填率を干渉計測を利用して評価する方法の開発も行った。本研究により提案した高充填率化手法を用いることでフォーム内への固体水素の充填率 99%を実現することができた。また ANSYS による計算の結果か、本手法は実サイズフォームターゲットへの高充填率固体水素層形成にも応用できることを明らかにした。

第５章では模擬フォームシェルターゲットに対する固体燃料層形成技術の実証研究を行った。フォームシェルの直径とコーンの材質が異なる二種類のターゲットに液体水素を充填し、フォーム層内のみに液体水素を充填した状態を維持したまま、その液体水素を固化させることができた。このとき約 $5\times10^{-11}(m^3)$の精度で液量の制御が可能であった。このように液体燃料のフォーム層への充填およびその固化に関連する温度と圧力の制御プロセスを確立することができた。このプロセスは今後クライオターゲットを製作する際に利用できると考えられる。また、ウエッジ型サンプルで原理実証したフォーム層内固体水素の高充填率化の手法を実サイズフォームシェルターゲットに応用した結果、低い確率ではあるが気泡や欠陥の少ない均一な固体水素層形成の実証ができた。

第６章では干渉計測法による可視化技術を用いたRF フォームターゲットのフォーム層への固体燃料充填量の評価手法の開発を行った。撮影したフォームシェルの干渉縞から燃

料を含むフォーム層の屈折率を算出し、その燃料の充填量を評価することに成功した。今回の評価に使用した干渉縞の平均値から充填量を評価するとフォーム層内の固体水素充填量は102%であった。しかし各干渉縞から評価した充填量は±10%の間で変化していた。今後、次の課題の研究を進めることで、要求される充填量評価精度を実現できると考えられる。

- 干渉像を高分解能で撮影する装置や技術の開発
- 実際に使用したターゲットの情報を計算モデルに反映する

以上のターゲットの組み立てから始まる一連の研究によって実サイズフォームクライオターゲットのフォーム層内に高密度(充填率 99%以上)の固体燃料層を形成する方法の原理実証を行うことができた。本研究の成果は今後のフォームクライオターゲット開発の基礎となり、一連の研究を発展させることでフォームクライオターゲットを使用した高速点火実証実験の第一期計画（FIREX-I）のレーザー核融合実験が実現できる。

謝辞

この素晴らしい研究テーマを与えていただいたこと、終始懇篤なる御指導、御鞭撻を承りましたこと、真摯に私の疑問に答え、研究の筋道を示して下さったこと、改めて大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　乗松孝好教授に深厚なる謝意を表します。

本研究を通じて直接細かなご指導をして頂き、また研究内容に対して常に深い思考で本質を捉え、私の研究が常に良い方向へ進むように導いてくださった大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　中井光男教授に心からの謝意申し上げます。

困難かつ手間と時間のかかる低温実験に直接の御指導くださったことだけでなく、研究の行い方や、研究者としての考え方など数多くのことに助言を下さった核融合科学研究所岩本晃史助教には深く感謝しております。

本研究は大阪大学レーザーエネルギー学研究センター及び核融合科学研究所にて行われたものであり、素晴らしい研究の場を提供してくださいました疇地宏センター長（レーザーエネルギー学研究センター　センター長)、小森彰夫所長（核融合科学研究所　所長）に心より感謝申し上げます。

研究の遂行にあたり熱心に御指導、御助言戴きました東京工業大学　長井圭治准教授、元大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(現　東京農工大学)　本間啓史助教に感謝申

本論文執筆に際し、御指導、御助言戴きました大阪大学　粟津邦男教授に深く感謝申し上げます。

本研究に際し、ターゲット製作、検査等様々な形でご協力戴いた大阪大学レーザーエネルギー学研究センターターゲットグループの兼安祐実氏、町真次氏、細川仁美氏、永田みず穂氏、門田速人氏、鈴木由美子氏に深く感謝いたします。

研究生活において、数多くの議論をしてくださり、助言していただいた大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　三間圀興名誉センター長、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　西村博明教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　白神宏之教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　猿倉信彦教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　村上匡且教授、核融合科学研究所　坂上仁志教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　長友英夫准教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　坂和洋一准教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　門野敏彦准教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　河中準二准教授、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　藤岡慎介助教、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　藤本靖助教、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　佐野孝好助教、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター　城崎知至氏、レーザー総研　古河裕之氏、レーザー総研　砂原淳氏、レーザー総研　染川智弘氏他スタッフの皆様に深く感謝いたします。

熱心に討論、激励を戴きました、保田ゆづり氏、中新信彦氏、有川安信氏、倉橋慎理氏、畑昌育氏、雑賀宏氏、田邉賢一氏他の方々に深く感謝いたします。

大阪大学大学院在学中に講義でお世話になりました、元大阪大学（現　福井大学附属国際原子力工学研究所 所長）竹田敏一教授、大阪大学　堀池寛教授、大阪大学　山口彰教授、

大阪大学　山中伸介教授、大阪大学　上田良夫教授、また修士論文の副査をしていただいた元大阪大学（現　東京大学）井通暁准教授、大阪大学　北田孝典助教に深く感謝申し上げます。

最後に、私の大学生活を支えて下さった家族及び友人に心からの感謝を申し上げます。

業績目録

主要発表論文

1) "Laser machining of RF foam by second harminics of Nd:YAG laser"
T. Fujimura, T. Norimatsu, M. Nakai, K. Nagai, A. Iwamoto and K. Mima
Fusion Sci. and Technol. American Nuclear Society Vol.51 pp677-681 (2007)

2) "Developments of characterization of the foam shell target for fast ignition realization experiment-I (FIREX-I)"
T. Fujimura, A. Iwamoto, M. Nakai, T. Norimatsu, K. Nagai, H. Yang, Y. Kimura, H. Sakagami, T. Mito and K. Mima
Journal of Physics: Conference Series Institute of Physics **112** 032066 (2008)

3) "Laser machining for fabrication of targets used in the FIREX-I project"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, N. Hayashi, M. Tanabe, Yu. Izawa, K. Nagai, H. Homma, H. Nishimura, T. Norimatsu and H.Azechi
Journal of Physics: Conference Series Institute of Physics **244** 032038 (2010)

4) "Manufacturing and Leak Check of Shell Targets for the FIREX-I Project"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, K. Nagai, H. Homma, K. Tanabe and T. Norimatsu
Plasma and Fusion Research: Rapid Communications Volume 4, S1010 (2009)

国際学会発表

1) "Laser machining of RF foam by second harminics of Nd:YAG laser"
T. Fujimura, T. Norimatsu, M. Nakai, K. Nagai, A. Iwamoto and K. Mima
17th Target Fabrication Meeting, San Diego, California, WP28, (2006)

2) "Development of characterization of the foam shell target for Fast Ignition Realization Experiment-I (FIREX-I)"
T. Fujimura, M. Nakai, T. Norimatsu, K. Nagai, Y. Hang, K. Mima, A. Iwamoto and T. Mito
Fifth International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, Kobe, Japan, (2007)

3) "Characterization of Cryogenic Fuel Loading in a foam capsule by using an Interferometer"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, T. Norimatsu, K. Nagai, H. Homma, Y. Kimura, and K. Mima
18th Target Fabrication Meeting, Lake Tahoe, California, P1-3 (2008)

4) "Leak check of targets for laser fusion at room temperature by an interferometer"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, K. Nagai, H. Homma, M. Tanabe, Y. Kimura and T. Norimatsu
Japan-China Bilateral Workshop on Target Materials & Laser Plasma, Osaka, Japan, 28 (2008)

5) "Laser machining for fabrication of targets used in the FIREX-I project"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, N. Hayashi, M. Tanabe, Yu. Izawa, K. Nagai, H. Homma, H. Nishimura and T. Norimatsu
6th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, San Francisco, California P3 10 099 (2009)

6) "Characterization of the state of solid hydrogen in the foam used for the Fast Ignition target of Inertial Confinement Fusion"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, T. Norimatsu, K. Nagai, H. Homma and H. Azechi
19th Target Fabrication Meeting, Orland, Florida, P2-3 (2010)

7) "Calculation results of the solidification process of the foam shell target for the Fast Ignition Realization Experiment-I"
T. Fujimura, M. Nakai, A. Iwamoto, T. Norimatsu, K. Nagai, H. Homma, H. Saika and H. Azechi
The 3rd Japan-China Bilateral Workshop on ICF Target Materials & Fabrication Technology, Hailaer, China, 42 (2010)

論文発表

1) "Preliminary Results of Fuel Layering on the Cryogenic Target for FIREX Project"
A. Iwamoto, R. Maekawa, T. Mito, H. Sakagami, O. Motozima, M. Nakai, K. Nagai, T. Fujimura, T. Norimatsu, H. Azechi and K. Mima
Fusion Sci. &Technol. American Nuclear Society Vol. 51 pp753-757 (2007)

2) "Low-Density-Plastic-Foam Capsule of Resorcinol/Formalin and (Phloroglucinolcarboxylic acid)/Formalin Resins for Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) in Laser Fusion Research "
F. Ito, K Nagai, M. Nakai, T. Norimatsu, A. I. Nikitenko, S. M. Tololonnikov, E. R. Koresheva, T. Fujimura, T. Norimatsu, H. Azechi and K. Mima
Japanese Journal of Applied Physics Part 2, 45 (11), L335-L338, (2006)

3) "Fabrication of aerogel capsule,bromine-doped capsule, and modified gold cone in modified target for the Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) Project"
K. Nagai, H. Yang, T. Norimatsu, H. Azechi, F. Belkada, Y. Fujimoto, T. Fujimura, K. Fujioka, S. Fujioka, H. Homma, F. Ito, A. Iwamoto, T. Jitsuno, Y. Kaneyasu, M. Nakai, N. Nemoto, H. Saika, T. Shimoyama2, Y. Suzuki, K. Yamanaka and K. Mima
Nucler Fusion **49** 095028 (2009)

4) " Study on a fuel layering sequence of the foam target for the FIREX project"
A Iwamoto, T Fujimura, M Nakai, K Nagai, T Norimatsu, R Maekawa, T Mito, H Sakagami, O Motojima, H Azechi and K Mima
Journal of Physics: Conference Series Institute of Physics **112** 032067 (2008)

5) "Study on possible fuel layering sequence for FIREX target"

A Iwamoto, T Fujimura, M Nakai, K Nagai, T Norimatsu, H Azechi, R. Maekawa1 and H Sakagami
Journal of Physics: Conference Series Institute of Physics **244** 032039 (2010)

6) "High-speed monochromatic x-ray imager for electron temperature mapping of fast igniter plasmas"
M. Tanabe, T. Fujiwara, S. Fujioka, N. Hayashi, H. Nishimura, T. Fujimura, M. Nakai, K. Nagai, H. Homma, H. Shiraga, T. Norimatsu, H. Azechi and K. Mima
Journal of Physics: Conference Series Institute of Physics **244** 032060 (2010)

その他刊行物

1) "レーザー核融合高速点火実証実験用クライオターゲットの開発－燃料充填状況の可視化技術－"
藤村 猛, 中井 光男, 岩本 晃史, 乗松 孝好, 長井 圭治, 本間 啓史, ヤン ハン, 坂上 仁志, 三間 圀興
低温工学 43巻 3号 pp109-113 (2008)

国内学会発表

1) 藤村 猛　中井 光男　乗松 孝好　長井 圭治　永田 みず穂　岩本 晃史　三戸 利行、「FIREX クライオ燃料技術開発」レーザー研シンポジウム 2006、40、大阪府吹田市　大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、2006 年 7 月、

2) 藤村 猛　中井 光男　乗松 孝好　長井 圭治　水田 華奈子　永田 みず穂　木村 泰子　白神 宏之　重森 啓介　嚊地 宏　三戸 利行　岩本 晃史　三間 圀興、「FIREX-1 に用いられるクライオターゲットの液体燃料充填方法の開発の現状」、プラズマ・核融合学会　第 23 回年会、30pA26、茨城県つくば市　筑波大学、2006 年 1 月

3) 藤村 猛　中井 光男　乗松 孝好　長井 圭治　ヤン ハン　三間 圀興　岩本 晃史　三戸 利行、「FIREX-1 に用いられるクライオターゲットの液体燃料充填方法の開発」、日本原子力学会 2007 年春の年会、N48、愛知県名古屋市　名古屋大学、2007 年 3 月

4) 藤村 猛　中井 光男　乗松 孝好　長井 圭治　ヤン ハン　三間 圀興　岩本 晃史　三戸 利行　坂上 仁志　本島 修「FIREX 計画用クライオターゲットの開発－固体燃料層の評価－」、2007 年度春季低温工学・超伝導学会、2C-a02、千葉県千葉市　千葉大学、2007 年 5 月

5) 藤村 猛　中井 光男 長井 圭治　本間　啓史 田邉　賢一　乗松 孝好　岩本 晃史　坂上 仁志　三戸　利行、「レーザー核融合高速点火方式に用いられるクライオターゲットの開発－ターゲット組立て後の常温気密性試験装置の開発－」、2008年度秋季低温工学・超伝導学会、3C-a04、高知県高知市、高知市文化プラザ、2008年11月

6) 藤村 猛　中井 光男　乗松 孝好　長井 圭治　本間 啓史　永田 みず穂　岩本 晃史　三

戸　利行、「高速点火実験用ターゲット製作のためのプラスチック・シェルのフェムト秒レーザー加工」、レーザー研シンポジウム 2009、60、大阪府吹田市　大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、2009 年 4 月

7) 藤村 猛　中井 光男 乗松　孝好　本間　啓史　ヤン　ハン 疇地　宏 岩本 晃史 坂上 仁志　三戸 利行、「レーザー核融合用低密度フォーム内における固体水素の充填状況の測定」2009 年度秋季低温工学・超伝導学会、2p-p02、岡山県岡山市、岡山大学、2009 年 11 月

8) 藤村　猛　中井 光男 乗松　孝好　本間　啓史　疇地　宏 岩本 晃史 坂上 仁志　三戸 利行、「高速点火用クライオターゲットの冷却方法に関する計算結果」 レーザー研シンポジウム 2010、66、大阪府吹田市　大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、2010 年 4 月

9) 藤村 猛　中井 光男 乗松　孝好　本間　啓史　町　真次 疇地　宏 岩本 晃史、「レーザー核融合高速点火方式用クライオターゲットの開発－フォーム内における固体燃料充填率の充評価研究－」2010 年度秋季低温工学・超伝導学会、1C-a11、鹿児島県鹿児島市、鹿児島県民交流センター、2010 年 12 月