

Title	レーザー核融合のためのクライオターゲットシステム
Author(s)	中井, 光男; 乗松, 孝好
Citation	大阪大学低温センターだより. 2005, 131, p. 2-10
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/6141
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

レーザー核融合のための クライオターゲットシステム

レーザーエネルギー学研究中心 中井光男、乗松孝好 (内線 8773)

E-mail : mitsuo@ile.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

地球に降り注ぐ太陽のエネルギーは水素を燃料とする熱核融合反応¹⁾によるものである。原子核同士の電氣的斥力に逆らって核融合反応を行わせるためには、燃料を高温に保持し、原子核同士を激しく衝突させなければならない(熱核融合)。反応の効率は、個々の反応の反応断面積と反応粒子の密度に依存する。核融合反応を持続的に利用するためには、核融合反応によって得られるエネルギーが燃料加熱に要するエネルギーを上回らなければならない。この条件は、高温燃料(プラズマ)の保持時間を τ (エネルギー散逸の特徴的な時間)、密度を n とすると、積 $n\tau$ がある(温度の関数としての)閾値以上でないといけないうして整理することができる(ローソン条件²⁻⁴⁾)。

太陽においては、重力によって燃料が保持されており、反応断面積の低いp-p(水素-水素)反応¹⁾でも燃焼を持続させることができている。地上における制御核融合に於いては、反応断面積の大きな水素同位体(重水素D及び三重水素T)による反応(DT反応)が想定されている。必要な $n\tau$ を実現するために典型的な2つの方法が模索されている。一つは、磁場を用いた閉じ込めによって保持時間 τ を長くとうとする方法(磁場閉じ込め)、もう一つは、密度 n を高くする方法(慣性閉じ込め)である。後者の場合、積極的な閉じ込めはしないのであるが、半径 R 程度のスケールを持つ燃料プラズマが加熱されて飛散するとすると、反応に有効な時間は半径をプラズマ中での音速(c_s)で除した程度になる。従って、この場合、 $n\tau$ に対する制約は燃料密度 ρ と燃料半径 R の積(密度半径積)に対するものとして表現される($n\tau = (\rho/m) \cdot (R/c_s) \propto \rho R$ (1))。10 keV程度の温度の球状燃料の場合、中心部から起こったDT反応が自己加熱によって周辺部に効率よく伝播していく(自己点火)ためには $\rho R \approx 0.4 \text{ g/cm}^2$ が必要である⁵⁾。ここで、重要なことは、燃料密度 ρ を大きくすることができれば、必要な R が減少し、燃料の総量($(4\pi/3)R^3\rho$)も減少する。従って、反応を駆動するために必要なエネルギーも小さくすることができる。現在の慣性核融合のシナリオでは、 200 g/cm^3 程度のDT(重水素・三重水素混合)燃料プラズマを生成することが想定されている。

圧縮に必要なエネルギーを押さえ、高密度の重水素燃料プラズマを生成するためには、初期密度をできるだけ高く設定し、可能な限り断熱的に圧縮する必要がある。仮に完全な電子縮退状態にあったとしても、 200 g/cm^3 の重水素プラズマの持つ圧力は10 GPa以上になり、とても静的な圧力で実現できる値ではない。そこで、球状爆縮という概念が考えだされた。球殻状(中空)の固体燃料

の表面に高強度のレーザー（或いはX線、粒子ビーム等のエネルギー）ビームを照射し、表面をプラズマ化する。表面の高温プラズマが外向きに膨張飛散する反作用として、残された部分は内向きに圧縮、加速される。加速された燃料球殻は最終的には球中心で衝突し、停留するのであるが、それまでに蓄積された運動エネルギー（動圧）によって、高い圧縮が実現される。球殻状燃料は、球状に収縮する過程で、圧縮されるとともに、球中心部での減速過程で更に圧縮される。残念なことにこれらの圧縮過程は流体力学的には不安定な過程であり、初期にターゲット表面に凹凸があると、その不均一が増幅されて球対称な圧縮が行われなくなってしまう。米国ロチェスター大学の点火実証実験のためのターゲット設計⁸⁾では、固体燃料球殻の内面の不均一を $0.5\ \mu\text{m}$ 程度に留めることが要請されている。如何にして空間的に様な（球対称で、厚み不均一の小さい）燃料ターゲットを製作するかが重要な開発課題となっている。

初期のシナリオでは、初期密度の低い中心部のプラズマが、球状爆縮によって断熱圧縮されて高温度になり（ホット・スポットの生成）、核融合燃焼が自発的に点火されることが期待されていた（中心点火方式）。しかし、上記の様に、流体力学的な不安定性によって爆縮の球対称性が崩れる（ホット・スポットの消失）と自己点火が期待できなくなる。そこで考えられたのが高速点火スキームである。燃料の圧縮さえ巧く実現できれば、生成された高密度燃料コアを改めて加熱すれば核融合反応を点火することができる。高圧の燃料コアは急速に膨張するので、加熱時間は充分短くなければならない。高強度超短パルスレーザー光の出現によってこのアイデアの実現の可能性が出てきた。定量的にターゲットの製作精度をどの程度まで緩和できるかは、まだまだ研究の対象ではあるが、少なくともホット・スポットがなくなる程度の非一様圧縮でも許容されるのはありがたい。

さて、具体的な燃料ターゲットの形状であるが、極低温の燃料層のみでは、1. 球殻状の構造化が難しく、2. レーザー照射時までの輻射加熱による表面の昇華が問題になる。また、3. レーザーで直接照射される最外層としては、より原子番号の高い材料の方が吸収効率が高く、加速には効果的である。それ故、プラスチック素材の球状容器（直径数mm程度）にガス或いは液体状態の水素同位体を供給し、固体燃料球殻を形成することが想定されているのだが、球殻内の液体相は当然重力によって垂れ下がり、無邪気に冷却するだけでは、不均一な厚みの固化層ができあがる。また、冷却が非一様だと、固化時の体積収縮により、不均質な固体相ができあがる。意図的に温度勾配を作って固化分布を制御しようとする試みは、DT燃料の場合には同位体分離をおこし、良くない。球殻を一様に表面から冷却している場合には、内部の固化層を一様に加熱することができれば、厚み分布に応じた温度分布が生じ、自発的に厚みの均一化が進む。 β 崩壊加熱法⁹⁾や、プラズマ加熱法¹⁰⁾がこの方法の例であり、良好な結果を上げている。この手法の場合、ターゲットが完全な球形である場合には問題はないのだが、後述の高速点火用のターゲットの様に非球対称なターゲットの場合には適応できない。

我々の研究センターでは、任意形状の燃料層の形成に適用可能な方法として、フォーム法の開発を行っている。この方法は、純粹の燃料層を作るのではなく、低密度の多孔性プラスチック素材（「フォーム」と呼ばれている）に燃料を含浸させることによって燃料層とするものである。従って燃料層の形状は型となるフォーム層の形状によって決まり、フォーム層の製作精度を上げることに

よって燃料層の一様性を向上させることができると期待される。本報告では、レーザーエネルギー研究センターの激光XII号レーザーにおける球状爆縮実験用に開発された「高気圧充填クライオターゲット装置」を紹介するとともに、現在、高速点火実証実験に向けて開発が進められている爆縮実験用ターゲットと基礎実験用平板ターゲットの開発状況を報告する。

2. フォームクライオターゲット

フォーム法はSachsとDarling¹¹⁾によって提案された。極低密度の球形中空スポンジ状プラスチックに核融合燃料を含浸することによって、燃料層の厚さの均一性を保証しようとするものである。基本的な構造としては、フォーム層の表面は燃料の蒸発（或いは昇華）を防止するための極薄いプラスチック膜のみで覆われていれば良いのだが、レーザーを効率良く吸収し、燃料部を有効に爆縮するために比較的厚い外層（「アブレーター」）を有するものや、断熱層として、燃料を含まないフォーム層を最外層に持つものなどが提案されている。

ターゲットの持つ空間的な擾乱が流体力学的な不安定性によって成長し、圧縮の球対称性を阻害することは先に述べた。フォームは本質的に不均質な材料である。その内在的な微細構造がどの程度爆縮に影響するかは未だ明快にはされていない。最近の基礎研究の結果では、表面のプラズマの噴出効果によって、流体力学的不安定性が空間波長の小さな所では著しく緩和されることが分かっている。従って、一つの目安として、微細構造の特徴的なスケール（擾乱波長）が $1\ \mu\text{m}$ 程度であり、凹凸（擾乱振幅）が $100\ \text{nm}$ 程度に押さえられれば良いだろうと考えられている。只、実際のフォームターゲット内部には、ランダムな微細構造が形成されているので、長波長の空間擾乱がどの程度まで平滑化され得るのかは明らかではない。現在、レーザー照射によって加速されているフォームターゲット上での流体力学的不安定性の成長を観測する実験が行われている。また、本稿4章で紹介するように、重水素を充填したフォーム材料での基礎実験を行うための装置が開発されている。

フォーム材料は、核融合燃料にとっては不純物である。水素同位体である核融合燃料に比して原子番号の高い材料を使う以上放射によるエネルギー損失は避けられない。図1は高速点火のための計算機シミュレーション結果¹²⁾である。高密度の燃料プラズマを追加熱するエネルギーの増加によってターゲット利得（核融合反応により生成されるエネルギー / (投射レーザーエネルギー)）がどの様に増加するのかを予測している。純粋のDT燃料の場合には、 $50\ \text{kJ}$ 程度の加熱エネルギーで、核融合燃焼波が点火され、急激に利得が増加するのが分かる。一方、燃料中のフォーム材料の初期密度を上げて行く

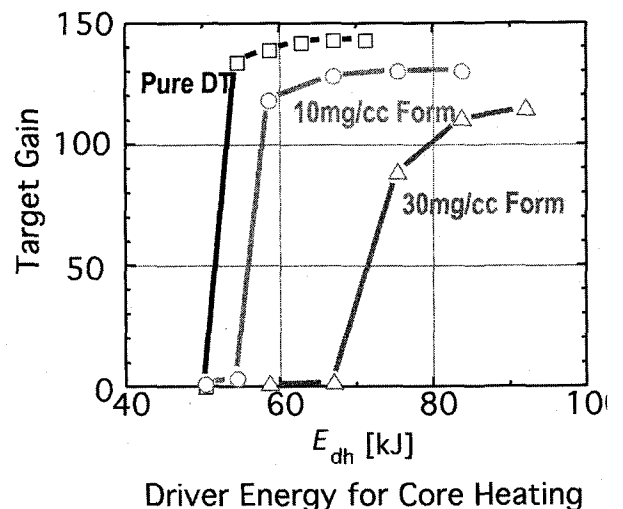


図1. フォームの初期密度をパラメータとした高速点火利得の計算機予測
密度 $300\ \text{g/cm}^3$ 、半径 $90\ \mu\text{m}$ の燃料プラズマに対する、追加熱エネルギーによるターゲット利得の変化。

ほど、点火開始に必要なエネルギーが増加し、利得の最大値も低下する。フォームの密度が 10 mg/cm^3 程度であれば、利得の低下も1割程度で納まることが期待される。現在、実験に使用されているフォーム材料の密度は 100 mg/cm^3 程度のものである。 10 mg/cm^3 を切る低密度の種々のフォーム素材¹²⁾が既に開発されているが、球殻状の構造化や冷却時の収縮対策など、まだまだフォームシェルターゲットの開発要素は多い。

3. 高気圧充填クライオターゲット装置

図2は激光XII号レーザー装置の照射実験用真空チェンバー（直径1.8m）内部の「高気圧充填クライオ装置」の写真である。本装置は、照射チャンバー内部で、「アブレーター付きフォームシェル」（図3）に重水素燃料を充填、固化し、レーザー照射するために開発された。中心部分の模式図を図4に示す。重水素ガスは、アブレーター層を通し拡散によってシェル内に充填される。冷却時に十分な液量とするために常温で100気圧以上のガスを充填する必要がある。そのため、装置中央部は、最終的にターゲットを重水素の固化温度で維持するためのクライオスタットの内部に高圧のガス充填室（側面は石英円筒）を持つ2重構造になっている。クライオスタットは液体ヘリウムで冷却されており、チャンバー壁からの熱侵入の大きな部分は液体窒素タンクを持った遮蔽層で覆われている。クライオスタット並びに充填室は上部ユニットに圧着することによってインジウムをシール材としてガス封止される。常温でのガス充填後、全体を冷却する。液化温度直前で充填室内の重水素を排気、充填室をさげ、ヘリウム雰囲気の中で、液化、固化させる（図4（b））。レーザー照射直前（8ms程度前）にクライオスタット外層を急速に引き下げ、ターゲットにレーザーを照射する（図4（c））。

アブレーター層の透過率は、実験で使ったヒドロキシエチレンセルローズ（HEC）の場合 $3 \times 10^{-16} \text{ mol/m/sec/Pa}$ 程度であるため、シェル内外の差圧によってシェルが潰れないように数時間かけて加圧しなければならなかった。また、冷却時には、冷却にともなうシェル内部の減圧に合わせ、充填室内を減圧していかなければならない。

実験に使ったフォームのセル（構造）サイズは $1 \mu\text{m}$ 程度であり、燃料充填前のターゲットは可視域モニター系では不透明であったが、重水素液体が浸透するとほぼ透明になり、干渉画像により、（画像系の空間分解能で）均一な燃料層が形成されていることが確認された。水素は固化に

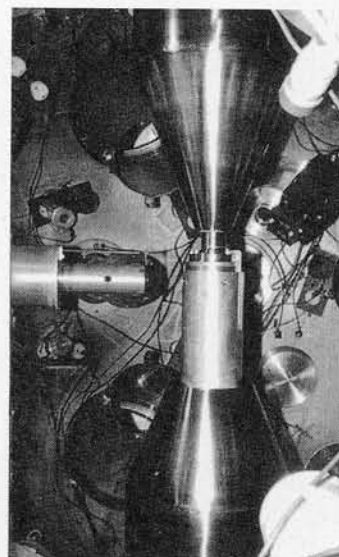


図2. 高圧充填クライオターゲット装置
直径1.8mの激光XII号レーザー照射用大型真空容器内部。

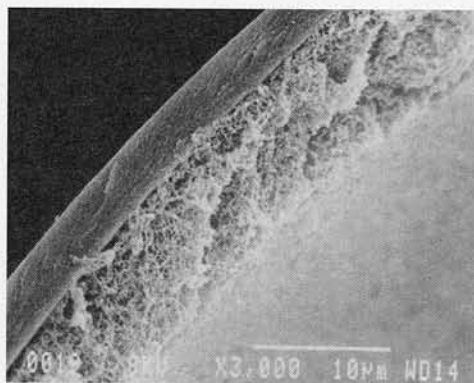


図3. アブレーター付きフォームシェルの電子顕微鏡写真

フォーム層はメチルメタクリレート（MMA）とトリメチルプロピレン・トリメタクリレート（TMPT）の共重合によって、アブレーター（外）層はヒドロキシエチルセルローズ（HEC）と塩化イソフタル酸の界面縮合で形成された¹³⁾。

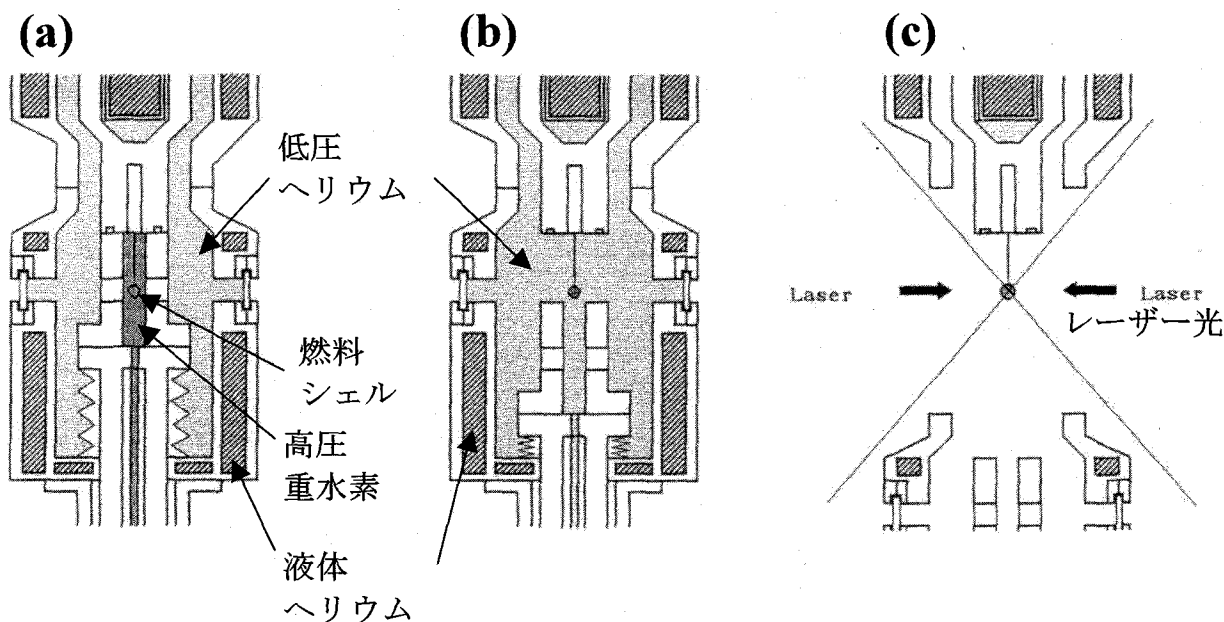


図4. 高圧充填クライオターゲット装置動作図

- (a) 高圧充填室並びにシュラウド（クライオスタット外層部）は上部に圧着され、燃料ガスが充填される。その後、液化温度直前まで冷却される。
- (b) ガス充填室が引き下げられ、ヘリウム雰囲気中でシェル内の燃料は冷却、固化される。
- (c) シュラウドが急速に引き下げられレーザー照射を行う。

よる体積収縮が大きく、固化により、亀裂や空隙が生じると考えられる。実験では、固化時にはターゲットは不透明になり、透過像の干渉計測はできなかった。高密度の圧縮を実現するためには、ターゲット内部に残るガス圧（蒸気圧）を十分に下げる必要があるため、固体状態まで冷却する必要があると考えられている。今後、固化時の均一性を確保し、透明度を維持する方法を開発する必要がある。単純には、フォームのセルサイズをより細かくすれば、固化時の結晶化のサイズも小さくなり、均一性が向上すると考えられ、極低密度の均質なフォームを開発するのが今後の最重要課題となっている。

4. 高速点火実証実験用クライオターゲット開発

高速点火のシナリオでは、爆縮によって中心に高温部（ホット・スパーク）を作る必要がなく、爆縮の対称性に対する要請が緩和されることは既に述べた。中心部に比較的低密度で高温のホット・スパークを持つ必要がないと言うことは、必要な ρR をより少ない質量で実現できるということである。と言うことは、実は、より小さなエネルギーで、高い利得を実現する可能性が出てくる。問題は、如何に効率良く圧縮コアを追加熱するかである。爆縮コアプラズマを単に短パルスレーザーで照射したのでは、電子密度 10^{21} cm^{-3} 程度の密度分布の裾野に位置する遮断密度面近傍で吸収されたレーザーのエネルギーが効率良く 10^{25} cm^{-3} もの高密度領域に輸送されるとは考えにくい。そこで考え出されたのが図5の様な燃料球殻にコーン状のレーザー光ガイドを突っ込んだターゲット¹⁴⁾である。爆縮用レーザー光はコーン内面を照らさないように燃料部に照射される。燃料が圧縮されたところで、追加熱用のレーザー光が、爆縮コアの近傍まで突っ込まれたコーンの内部に照射され

る。密度傾斜の急峻なコーン内面で効率良く吸収されたエネルギーは高速の電子流として、近傍に位置する高密度コアを加熱する。重水素化したプラスチックターゲットを用いた実験によって、この方法で、20-30%という高い効率の追加熱¹⁵⁾が実証された。

2次元の計算機シミュレーションによれば、このような「異形の」ターゲットを用いても1000倍以上の高密度圧縮が可能であることが示されている。現在、レーザーエネルギー学研究センターでは、高速点火の原理実証の第一段階として、1. 既存のレーザー装置を用いて核融合燃料を圧縮し、2. それを数keVの温度に追加加熱することを目的とした実験計画 (FIREX-I: Fast ignition realization experiment phase-I)

が進められており、そのためのターゲット開発と加熱用レーザーの増力化が実施されている。

開発目標となっているターゲットの燃料部分の基本寸法は前章の高気圧充填クライオ用のフォームシェルと同じである。開発項目となるのは、1. 低密度フォームシェル製造技術、2. ガイドコーン並びにフォームシェルの加工技術、3. 燃料の充填技術である。前章の拡散充填を用いる方法は、燃料充填に時間がかかり、厚いアブレーターやガス透過性の低いアブレーターに対しては用いられない、コーンとシェルの接合部の機密性を確保しなければならない、封入する燃料の量は充填時の圧力で決まってしまう、冷却後には変更(調整)できない、等の問題がある。一方、コーン周辺部のターゲットの非対称性が許容できるのであれば、図5に示した導入管を用いた方法が可能になる。この方法なら、制御すべき燃料ガス圧は飽和蒸気圧程度であり、高压配管を用意する必要がない。シェルを3重点よりやや高めの温度に設定、ガス導入管に沿って緩やかな温度勾配を維持しつつ徐々に蒸気圧程度までガスを導入することによって、フォーム内部に液体を浸透させることができると考えられる。実際には、ターゲット上の温度分布、特に導入管端周辺の構造、温度分布によって液化の分布が変化し、微妙な温度、ガス印加圧力の調整が必要になる。現在、核融合科学研究所の超伝導のチームが、FIREX計画におけるクライオ燃料充填装置の開発を目的として、GM冷凍機を取り付けた小型チャンバーで、1. 冷却時のターゲットの構造的な問題点を洗い出し、2. 外直径10 μm 程度の細管を通して燃料充填する方法(装置構成)を確立すべく、基礎実験を進めている。今年度後半には、その成果を受けて、レーザーエネルギー学研究センターの激光XII号用の装置の設計が開始される予定である。

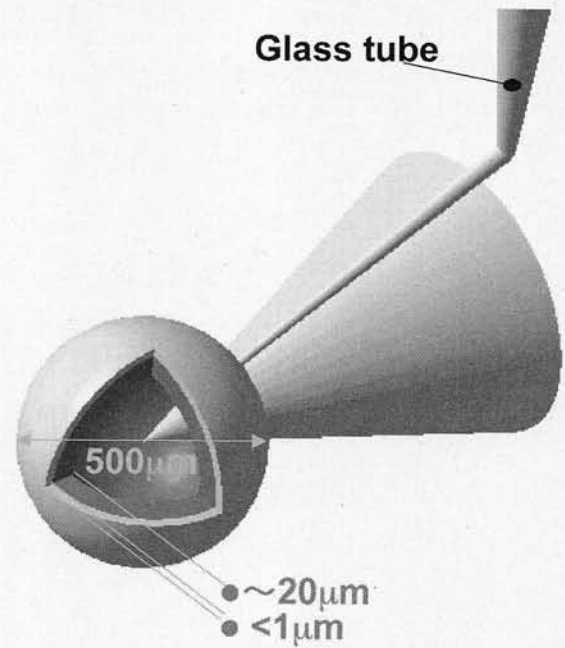


図5. 高速点火実証実験 (FIREX-I) 用ターゲット (ガス導入管、コーン型レーザーガイド付きフォームシェル)

5. 平板状フォームクライオターゲット

第3章で述べた「高気圧重点クライオターゲット装置」を用いた爆縮実験によって、「先行加熱」

の問題が明らかとなった。爆縮核融合の基礎概念では、可能な限り低エントロピーでターゲットを圧縮することが要請されている。その障害となるのが、高温のレーザー吸収領域からの高エネルギー電子や、X線による加熱（先行加熱）である。実験の結果、当時の一次元流体コードでは解決されていなかった電子熱輸送過程の問題やレーザー・プラズマ相互作用による先行加熱が予想以上に大きく、当初期待された爆縮性能を上げることができないことが分かった。現在、フォームクライオターゲットにおける先行加熱を定量的に評価し、その抑制手法を確立することを目的に平板状のフォームクライオターゲットを用いた実験が進められている。

平板状のターゲットを用いることによって、ターゲット背面（球状ターゲットでの内面に相当する）並びに断面を直接観察することができ、ターゲットの加熱の様子、圧縮（或いは膨張）の様子を直接観測することが可能となる。ターゲットの模式図を図6に示す。ターゲットは、内容量24 ccほどの銅製のガス・セルの開口部に張り付けられたポリイミド膜（厚み4 μm ）である。ガス・セルはインジウム・シールによってポリイミド膜によって封じられている。このポリイミド膜の内面にはフォーム膜（密度：100 mg/cm^3 、厚み：100 μm ）が接着されている。ガス・セルは実験用真空チェンバー上部に設置された10 K冷凍機（図7参照）により熱伝導冷却によって直接重水素の3重点近傍まで冷却される。冷却後に重水素ガスを導入することによって、液体重水素をセル内に溜める。液体重水素は表面張力によってスポンジ状のフォーム内を満たし、「液体重水素充填フォームターゲット」が完成する。

ガス・セルにはセルロックセンサーとヒーターが埋設されており、0.1 K以下の精度の温度制御性が実現されている。ガス・セル内を封じきった状態で、温度を変化させることによって、容易にセル内の液量を制御することができた。今回の装置では、鈴木商館のGM冷凍機RF50を用い、80 cmの長尺の伝導棒を介してガス・セルを14 Kまで冷却するのに9時間かかった。従って、前準備を入れると、一日に1ショットが精々である。これまでに数ショットのレーザーショットが実施され、レーザー照射によるターゲットの加速の様子やターゲット内部の衝撃波伝播の様子が観察された。

ターゲットの観測系としては、可視域のモニターカメラの他にHe-Neレーザーによるマッハツェンダー型干渉系を用意したが、冷却時には明瞭な干渉像が得られていない。光学窓に付着した不純物による散乱が原因であると考えられている。膜の厚み、一様性の評価方法に関してはまだまだ不十分であり、今後の開発が期待される。

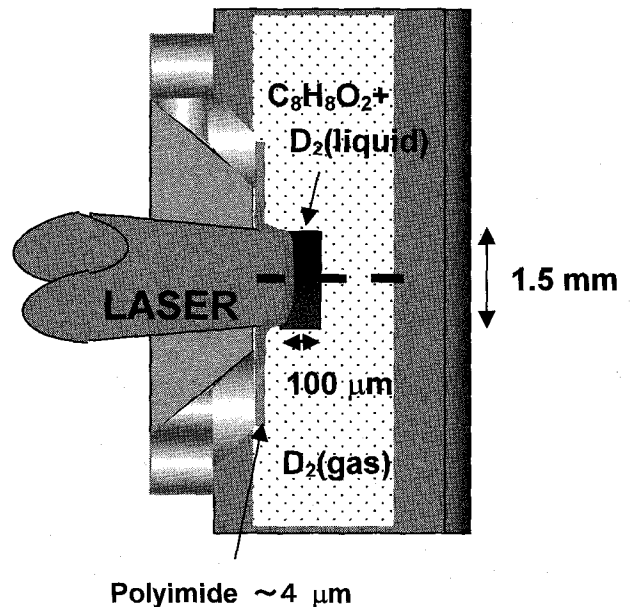


図6. 平板フォームクライオターゲット模式図
重水素ガス雰囲気中の平板フォーム（低密度多孔性プラスチック）に液体重水素を含浸させる。

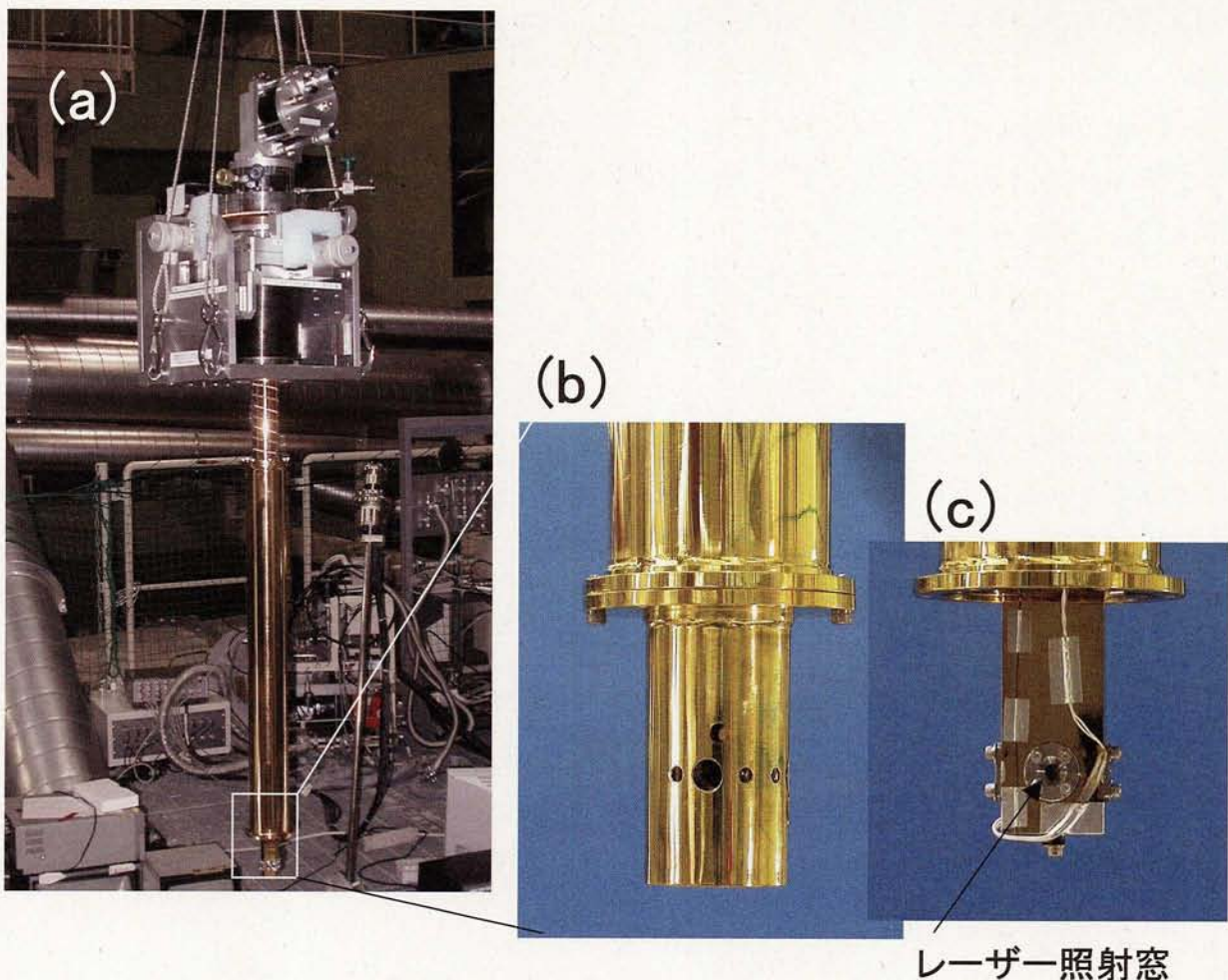


図7. 平板重水素クライオターゲット装置写真
 (a) 移動中の全景、(b) ガスセル 熱シールドカバー、(c) ガスセル 正面

また、固化時には、不透明に結晶化する。しかも、それがやがて昇華し、「固体重水素を含浸したフォームターゲット」は安定に維持することができなかつた。これは、ガス・セル内の温度分布によるものと考えられるが、現状では十分な温度分布制御は実現されておらず、当面は液体重水素燃料でのレーザー照射を中心に実験を進める予定である。

6. まとめ

これまでに開発されたクライオシステムによって、プラスチック膜を通しての拡散ガス充填法、表面張力によりフォーム内に液体重水素を浸透、保持する手法の有効性が示された。現在、核融合科学研究所で進められている極細管を通しての重水素液体制御技術の開発によって、液体燃料充填に関する基礎技術が確立されるといえる。

「フォームクライオ」の概念では、形状、寸法上の要請をフォーム構造に押し付けた形になっている。現在、サブミクロン程度の微細構造で、密度 100 mg/cm^3 程度の一様なフォームシェルが製造できるようになっており、高速点火実証実験の第一段階に向けてさらに低密度のフォームシェルの開発が進められている。燃料の固体化に関しては、故意に不純物を含有することによって微細多結晶化することによって透明な固体層が得られるという報告があり、 $0.1 \mu\text{m}$ 程度のセル構造フォ

ームを用いることによって透明な固体層が得られることが期待されている。10 mg/cm³以下の極低密度素材については既に何例かの報告があり、技術的な見通しが得られているが、冷却時の強度、変形、燃料充填時の変形などの問題は今後、実際のクライオ装置の中で確認されなければならない。一方、爆縮過程における安定性を向上させる試みも検討されており、ターゲットに対する要求精度に関しても、実際のレーザー照射実験によってより定量的に確認されていかなければならない。今後数年、ターゲット開発とレーザー照射実験とが平行して進められていくことになる。

最近では小型の冷凍機が普及しており、我々の平板クライオシステムにもそのようなものを用いたのであるが、前述の如く、冷却に時間が掛かる上に、振動を抑えるのが結構厄介である。実験の頻度を上げ、効率よく開発を進めていくためには、液体ヘリウムを寒剤としたシステムが有効であろうと考えられる。今後は、低温センターより供給いただく液体ヘリウムを利用し、開発の速度を加速できればと考えている。

参考文献

- 1) 佐藤文隆：岩波講座現代の物理学 宇宙物理、pp.62-70、岩波書店、第2版、1997年。
- 2) 宮本健郎：核融合のためのプラズマ物理、pp.4-6、岩波書店（1976）。
- 3) 中井貞雄：レーザー核融合、大阪大学新世紀セミナー、2001年。
- 4) レーザーハンドブック、pp.761-778、レーザー学会 1982年。
- 5) 高部、三間、核融合研究 第68巻別冊、13（1992）。
- 6) 中井光男、山中龍彦、*ibid.* 79（1992）。
- 7) 乗松孝好、*ibid.* 255（1992）。
- 8) R. L. MaCrory *et al.*, C. R. Acad. Sci. Paris, t.1, Série IV, 681（2000）。
- 9) J. K. Hoffer and L. R. Foreman, *Ohys. Rev. Lett.* 60, 1310（1988）。
- 10) T. Norimatsu *et al.*, Proc. of American Vacuum Sci. 38th National Symp. Seattle, WA, Nov. 1-15（1991）。
- 11) R. A. Sacks and D. H. Darling, *Nucl. Fusion* 27, 447（1987）。
- 12) K. Naai *et al.*, Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conf. Vilamoura, Portugal, 1-6 Nov. IAEA-CN-94/IF/P-7-14（2004）。
- 13) 高木 他、核融合研究 第68巻別冊、271（1992）。
- 14) P. Norreys *et al.*, *Phys. of Plasmas* 7, 3721（2000）。
- 15) R. Kodama *et al.*, *Nature* 412, 933（2002）。