

## 解 説

# レーザー核融合ターゲット開発の現状

## — 極低温技術と三重水素技術 —

乗松 孝好

〒565 吹田市山田丘2-6  
大阪大学レーザー核融合研究センター

## Recent Topics in Laser Fusion Targets and Related Tritium Technologies

T. NORIMATSU

Institute of Laser Engineering  
Osaka University  
2-6, Yamada oka, Suita, Osaka 565  
Japan

(Received September 4, 1995 ; accepted January 22, 1996)

### Abstract

After achieving high temperature and high density compression, laser fusion research proceeded to a new stage to demonstrate ignition and burning of the compressed fuel. In these experiments, high spherical symmetry is required for implosion and target technologies including shell fabrication, cryogenic technologies and tritium handling are again going to play an important role with irradiation uniformity of the main laser. The present status and requirements for the target are discussed with cryogenic technologies and tritium technologies being centered on.

### 1. はじめに

大阪大学レーザー核融合研究センターでは、1986年に高アスペクト比ターゲット<sup>1)</sup>を用いて核融合に必要な高温度を実証する実験を行い、 $10^{13}$ 個の核融合中性子を観測<sup>2)</sup>した後、もう一つの重要な要素である高密度爆縮を実証する実験に移行した。実験には一部を三重水素に置換した重水素化プラスチックシェルが用いられ<sup>3)</sup>、1989年に固体密度の600倍の高密度爆縮の実験に成功<sup>4)</sup>した。この高密度達成を受け、その後、世界各地で大型のレーザー

装置の建設及び計画がスタートし、点火燃焼実験へとコマが進められている。

大阪大学レーザー核融合研究センターでは流体力学的に高利得ターゲットと等価な爆縮を行う（HEP, Hydrodynamically Equivalent Plasma）計画が進められている。さらに爆縮されたプラズマコアに超高度強度レーザーを照射し、追加熱を行い点火させる高速点火（Fast Ignition）の実験計画もある。ここでは次期装置用ターゲットの中心となるクライオターゲットの開発と三重水素技術について述べる。

## 2. 次期計画とターゲット技術

アメリカのロチェスター大学では総出力30kJで60ビームから成るオメガアップグレードレーザーが完成し、95年4月から本格的な爆縮実験を開始している。ロチェスター大学の計画では直径600～1000 $\mu$ mのプラスチック容器に重水素、三重水素混合ガスを1000気圧近く充填し、均一な厚さに固化し、将来の高利得ターゲットに必要な点火コアを形成することを目的にしている。

同じく米国ローレンスリバモア研究所ではNIF（National Ignition Facility）の建設計画がスタートし、フランスではメガジュールレーザーの建設計画が進められている。NIF計画では間接照射爆縮で、最終的に数倍のエネルギー利得の達成を見込んでいる。

実用炉を運転するためにはエネルギー利得100以上が必要である。このような高利得を達成するためには爆縮は球対称性を確保したまま進行し、中心部に高温高密度に圧縮されたプラズマ（イグナイター）があり、その周辺に比較的低温で高密度のプラズマ（主燃料）が存在する二重構造の爆縮を実現する必要がある。主燃料はイグナイターでの核融合反応で発生した $\alpha$ 粒子で加熱されて燃焼し、高利得を実現する<sup>5)</sup>。高利得を実現する上での最大の課題はレーザーの照射不均一性、ターゲットの不均一性などが存在する中で、いかに流体力学的不安定性を抑え、球対称性を保ったまま爆縮を完結するかにかかっている。

これらの計画で高精度のクライオターゲットを使用することが計画されている。クライオターゲットは燃料を冷却し、均一な厚さになるように固化または液化した物で、同じ重量のガス状の燃料を持つターゲットより10倍以上爆縮効率が高いとされている<sup>6)</sup>。このようなクライオターゲットを作る上で問題になるのは重力が存在する中で均一な厚さを持つ燃料層をいかに製作するかという問題と、水素が固化したときの結晶化により内面に凹凸が発生する問題、体積が収縮することによりクラックが発生する問題などがある。これらの問題を克服するために多くの方法が提案され研究されてきた。それらの中で将来の実用炉クラスのターゲットにまで応用可能な技術はフォームクライオ法<sup>7)</sup>、 $\beta$ 線加熱法<sup>8)</sup>、プラズマ加熱均一化法<sup>9)</sup>である。

フォームクライオ法は極低密度のプラスチックフォームに液化した燃料を浸透させた物で、均一な厚さを持つフォーム中空球の開発が鍵となる。阪大レーザー研では二重ノズルを用いた密度整合エマルジョン法<sup>10)</sup>と界面重合法<sup>11)</sup>でほぼ仕様を満足する蒸発防止膜付き

のフォーム中空球の開発に成功し、重水素を用いて実際の爆縮実験にも供給されているが、ここでは三重水素が直接関係する物に焦点を絞るために省略する。β線加熱法は現在米国を中心に研究が進められ、三重水素が崩壊するときに発生する熱を利用して固体燃料層を均一化する技術である。この方法では最終的にどこまで均一がなされるかが今後の研究課題である。実用炉にまで応用する場合は、均一化に要する時間を短縮することが望ましい。プラズマ加熱均一化法は我々独自の技術で、外部より加えられたマイクロ波電界で、中心部の残留蒸気内にグロー放電をつけ、均一化する技術である。

### 3. ターゲットの条件

次期大型レーザー装置による爆縮実験ではいずれも高い精度を持った燃料容器を用いて製作されたクライオターゲットを必要としている。直径、厚さに対する要求精度をTable 1にまとめた。燃料容器の真球性や、壁厚の一様性は99%以上必要なのが特徴である。これらは表面荒さと関係し、爆縮初期の流体力学的不安定性の発生を招き、甚だしいときには爆縮途中でシェルの破壊を招き、圧縮された燃料がそこから漏れだし、高密度の爆縮を行うことができない。燃料層の均一性や内面の精度は容器より若干緩和される。主な理由

Table 1 Specifications of laser fusion targets for the upgrade laser systems in major laboratories in the world.

Characteristics	NOVA*1	OMEGA*2 Upgrade	GEKKO*3 Upgrade	NIF*4
Shell diameter	200 - 600 μm	700 - 1400 μm	1000-2000 μm	1000-3000 μm
-required accuracy	< 1%	<0.05 %		<0.5 %
Shell thickness	3 - 5 μm	5 - 25 μm	20 - 40 μm	5 - 25 μm
Fuel layer thickness	---	50 - 100 μm	50 - 150 μm	50 - 100 μm
-required accuracy	---	< 0.5 μm		1 μm
nonconcentricity		< 0.5 μm		1 μm
<b>Capsule accuracy</b>				
<b>External</b>				
-nonsphericity	< 1 %	< 1 %	< 0.5 %	< 1 %
-surface finish	< 1000 A	< 200 A	< 200 A	< 1500 A
<b>Internal</b>				
-nonsphericity	---	< 1 %	< 0.5 %	< 1 %
-surface finish	---	< 1000 A		< 5000 A

\*1 Previous laser system of Lawrence Livermore National Laboratory

\*2 Current laser system (60 kJ output power) of Rochester University

\*3 Proposed laser system (400 kJ output power) of Osaka University

\*4 National Ignition Facility (under construction, >1 MJ) of Lawrence Livermore National Laboratory

は固体水素の密度が容器の1/5しかなく、また内面は爆縮初期は流体力学的に安定であるからである。

次期実験装置のHEP実験で用いられるターゲットの精度は将来の高利得ターゲットに要求される製作精度よりも厳しくなる可能性がある。その主な理由は、少ないエネルギーで先に述べた爆縮構造を実現する必要がある、中心に形成されるコアの大きさも小さい。従って不均一性の影響を受けやすく、コアの大きい実用炉クラスのターゲットよりもターゲット精度を高める必要があるためである。

クライオ技術の中で最終的にどの方法が採用されるかは未だ未定である。一般的に1次元シミュレーションでは内部の気体状態の燃料が少ないほど高い性能を示すが、現実にはターゲット及びビレーザの不均一性の存在する中でイグナイターを形成するためにはある程度の気体状態の燃料も必要であるとの説もあり、今後の研究を待たなければならない状態にある。Fig. 1 に各技術が最も得意とするクライオターゲットの温度領域を示した。この温度は直ちに蒸気の密度に関係し、ターゲット特性を決める。最も得意とする温度領域で均一な燃料層を形成後、必要な温度にまで、冷却または加熱する方法も考えられるが、以下に述べるように、結晶化や熱膨張によるクラックの発生などを考える必要がある。

#### 4. $\beta$ 線加熱法

$\beta$ 線加熱法の原理をFig. 2 (a)に示した。重水素を等モル比で混ぜたガスでは、 $\beta$ 線のエネルギーが全て混合ガス中に吸収されると、三重水素の崩壊熱が0.1942W/gの率で発生する。次第にターゲットの温度を下げた場合、氷は不均一な厚さに凍り、結晶化により内面は凹凸の多い構造となる。このときターゲットが均一な温度場で様に冷却されているとすると、氷の厚い部分の内面温度は薄い部分の内面温度より高くなり、厚い部分の氷は昇華し、蒸発した氷は厚さの薄い内面温度の低い部分に固化する。結果として氷の厚さは時間と共に均一になる。

実験ではロスアラモス研究所やリバモア研究所で、銅の中に直径6mmの円筒状の穴を開け、窓を付けた物で再配分が行われることが確認されている。この6mmという大きさは将来の核融合炉で使用するターゲットと同じ大きさで、このサイズのターゲットでも内面が融けることなく機能することが確認されている。またDTガスを充填したガラス中空球で実験を行い、干渉測定で均一化が行われることも確認されてい

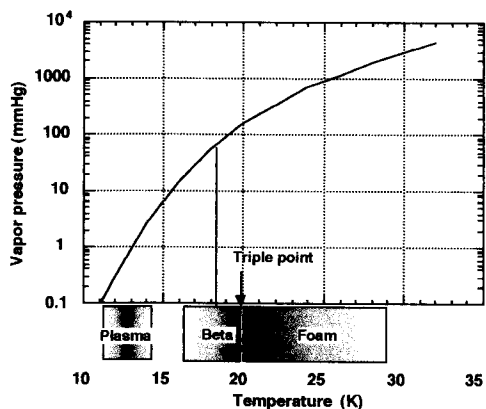


Fig. 1 Applicable temperature ranges of cryogenic technologies and the vapor pressure in the central void.

る<sup>12)</sup>。

均一化に要する時間は基本的には昇華するのに必要な潜熱と発熱量の比で決まり、ターゲットの温度が三重点に近いほど早くなる。実際には三重水素の崩壊で発生したヘリウムがこの温度差を平均化してしまうために、充填後時間が経つと時定数は長くなる。充填後の日数を  $a$  として最も短い均一化の時定数  $\tau$  は、

$$\tau = 28 + 25 a \quad (1)$$

と表すことができる<sup>13)</sup>。時定数は充填後では28分であり、これはターゲットを均一な温度場に入れておきさえすれば1時間に均一性が1桁ずつ良くなることを意味している。従ってヘリウム3のビルドアップを考えた場合、将来この方法及び次のプラズマ加熱均一化法で均一化を行うとき、充填は使用直前に行ない、ヘリウムが蓄積しない前に使用しなければならない。

この方法はターゲットを一様な温度においておけば自然に均一化される点で大変都合がよいが、最終的に内面をどの程度まで均一化できるかが重要な課題である。ロスアラモス研究所の L. R. Foreman の金属シリンダーを用いた実験では内面の凹凸の大きさは自乗平均で  $0.2 \mu\text{m}$  であると報告している<sup>14)</sup>。

固体状態で長時間（1日以上）放置しておく、内部に発生したヘリウム3が次第に蓄積し、内面周辺部で光散乱が多い状態になることが可視光の観察で分かっている<sup>15)</sup>。この原因の一つにはFig. 2に示したように、 $\beta$ 線加熱法では氷の厚さがほぼ一様になると氷の内面での温度勾配がゼロになることに起因していると考えられている。従って内表面での均一化のメカニズムは働かなくなり、ヘリウム3の気泡が内表面に接近しても最終的に追い出すことができなくなる。また $\beta$ 線加熱法に有効に働く三重点近傍の温度では氷の再結晶化が盛んになると言われていて<sup>16)</sup>、これが新たな凹凸の成長を促すかもしれない。したがって、将来核融合炉を運転する場合でも予備ターゲットを固化した状態で長時間蓄えておくことは困難である。

またこの $\beta$ 線加熱法、及び、次のプラズマ加熱法に共通する課題である

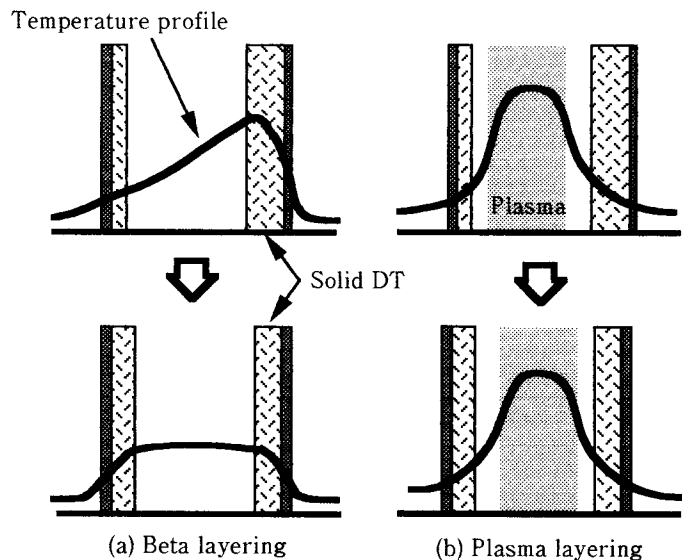


Fig. 2 Temperature profiles inside cryogenic targets fabricated by beta layering (a) and plasma layering (b).

が、同位体分離の影響を実験的に確かめておく必要がある。閉鎖された系で温度勾配で利用して移動させることは、同位体分離の原理そのものであり、ターゲットの中での影響はまだ正確に測定・議論された例は無く、M.T.Mruzekの実験にその糸口が見られるのみである<sup>17)</sup>。

## 5. プラズマ加熱法均一化

プラズマ加熱均一化法は不均一に固化したターゲット内部の残留ガス中に外部から強いマイクロ波電界をかけ、グロー放電を点灯させ、固体燃料層を均一化するものである。ターゲットが一樣な温度場にあるとき、氷の厚さの厚い部分の内面温度が薄い部分の内面温度より高くなり、厚い部分で氷の昇華が起こり、蒸発した蒸気は薄い部分に凝結する。結果として氷の厚さが時間とともに一樣になる現象を利用したものである。

この方法の特徴は短時間に均一化できるばかりでなく、結晶化などで凹凸になった固体燃料層の内側を平滑にできる可能性がある点である。プラズマ加熱均一化法では、放電開始のパッシェンガーブとターゲットの大きさから、外部の電界をかけっぱなしにした場合、放電を開始する温度は11K程度と見積もられている。さらに一度放電が始まると内面は加熱され、圧力は上昇し、1から2K温度が上昇すると放電は自然に停止する。従ってターゲット温度が異常に上がることはなく、この温度領域では固体水素の結晶化の進行具合は少ない。また気化した水素は急速に冷却されるので、再び固化した水素結晶が小さいことが予想され、結晶化に伴う凹凸は少なくなると思われる。また、この方法では発熱源は内部に存在するので、氷の厚さが一樣になった場合でもFig. 2(b)に見られるようにある程度の温度勾配が表面に存在し、小さな凹凸まで平滑化できると期待されている（Fire polishing 効果）。

この方法は現在実験的にはクリプトンガスを液体窒素で冷却したモデルターゲットで均一化されることが示されている<sup>18)</sup>。重水素を使った実験で放電時間の測定と、均一化の特定数の測定が行われた。Fig. 3はその実験装置で、発信器を出たマイクロ波はパワーメーター、チューナーをへて同軸ケーブルの先端に取り付けられたアンテナで共振器の中に供給される。ターゲットは直径6mmの石英中空球にガス導入間を取り付けた物で代用した。実験では適当な量の重水素を石英シェルの中に固化させ、放電をつける。導入管の細い部分に昇華したガスが凝結することにより、出入口をふさいだ後、本格的に実験を行う。

パルス幅5msの2.45GHzのマイクロ波を毎秒5パルスの割合でかけた場合、放電はマイクロ波をかけて30 $\mu$ s後に点灯し、0.5ms後に自然に消滅する。この場合放電は正規グロー放電領域まで入り、コラム状の放電となるので、氷の均一化は期待できない。直径6mmの石英シェルの底に凍った厚さ2.5mmの氷の部分を観測すると、放電開始後厚さ自体が薄くなるとともに、30秒程度経過すると底の部分から透明な部分が成長し初め、次第に厚くなっていくのが観測される。これは氷の中に発生したクラックなどが埋め戻されているため

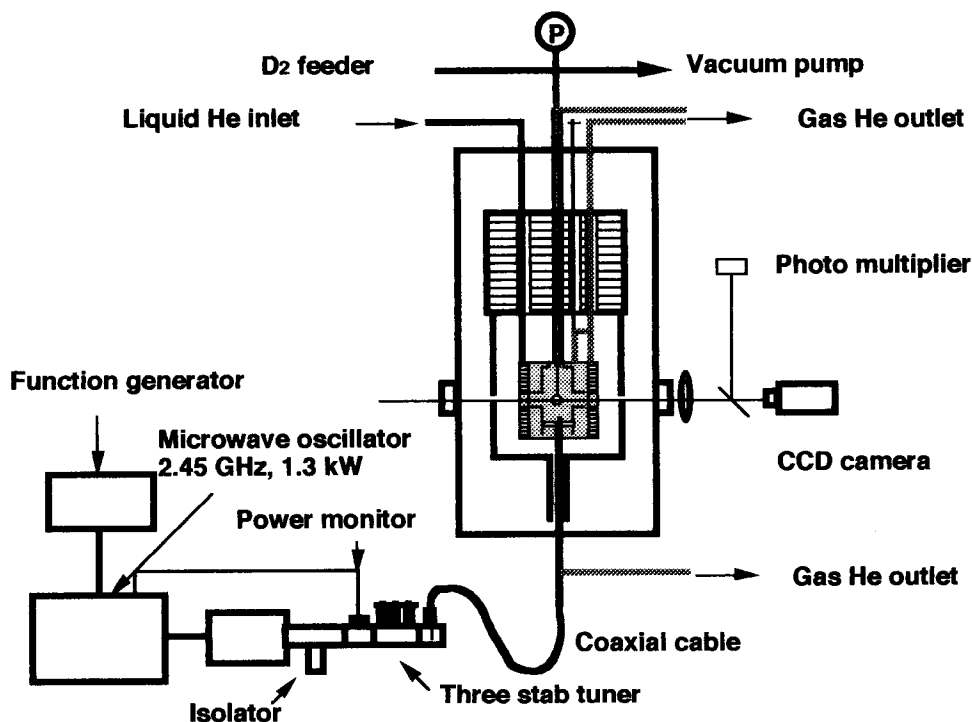


Fig. 3 Experimental equipment to demonstrate plasma layering method.

あり、重要な結果である。氷の厚さと、この透明な部分の厚さの変化をFig. 4 に示した。これによれば、均一化の時定数は80秒程度で、 $\beta$ 線加熱法の28分に比べて著しく短くなっている。均一化に要する時間が短いことは将来のレーザー核融合炉を考えた場合炉を運転するために必要な三重水素の量が少なくてすむことを意味し、有益な結果である。

逆にこの方法ではプラズマの内面加熱の一様性、外部の冷却の一様性がきわめて重要である。Fig. 5 は室温で直径20mmの石英球に2.45GHzのマイクロ波でグロー放電をつけ、表面の温度から対流と輻射の影響を考慮してプラズマの加熱の均一性を計算したものである。直径が20mmで、ガスの密度が $0.7 \text{ g/cm}^3$ 以下の時、放電による発光領域は完全に球内部を満たし、いわゆる異常グロー領域で、98%の一様性が得られている。これより密度が高いときは放電は電界方向に円柱状になり、いわゆる正規グロー領域に相当し、電界方向が余分に加熱され、

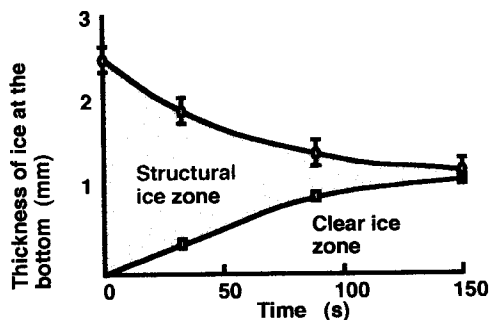


Fig. 4 A thick, nonuniform ice layer was redistributed into uniform one by plasma layering technique. Clear ice zone appeared from the bottom which showed the plasma layering can remove cracks in the ice layer.

均一性は低下する。

このような領域下では電界を回転電界にするか、ターゲットを回転させる必要がある。或いは温度が十分下がり、内部の蒸気圧が下がった状態で放電を点灯し、放電が正規グロー放電領域にはいる前に放電を止める方法も有効である。この場合でも放電の繰り返しを高めることにより、実質的に均一化の特性時間を長くすることなく均一化が可能と考えられる。

また外部は放電が起こらないようにある程度の圧力を保つ必要があるため、ターゲットの冷却は対流による冷却が主な過程となる。そのため、冷却に一様性はあまり期待できず、ターゲットを重力の方向に対してランダムに動かすか、補助的な温度勾配をもうけ

たり、強制的にガスの流れを与える必要がある。この操作は現在の小さなシステムには難しいが、将来の大量生産システムでは大きい問題にはならない。

## 6. 三重水素技術

レーザー核融合ではターゲットを製作する際には、高圧充填を行うことから多量の三重水素を必要とし、ターゲット完成後は1個に含まれている三重水素の量が少ないという特徴がある。ターゲットチェンバー周りでの三重水素の管理が楽であることから、比較的当初から爆縮実験に三重水素が用いられてきた。ターゲット1個に含まれる三重水素の量は、概ねレーザーの出力で決まり、現在の激光X11号の出力10kJクラスの実験で $3.7 \times 10^8$  Bq、点火、ブレークイーブンを目指した400kJクラスで $3.7 \times 10^9$  Bq程度となる。これに対してターゲットを製作する際には高圧充填をすることから多量の三重水素を必要とし、現状で $3.7 \times 10^{10}$  Bqの三重水素が用いられて、次期計画では $3.7 \times 10^{13}$  Bq以上の三重水素が必要と思われる。

Fig. 6に次期大型実験装置で計画されている三重水素充填クライオターゲットの供給システムの概念図を示す。全体は充填ユニット、移動カートリッジ、クライオスタット、三重水素回収系、精製系で構成され、ターゲットは直径2mm以下のプラスチックシェルが想定されている。三重水素はターゲットチェンバー以外の場所で数100気圧の重水素・三重

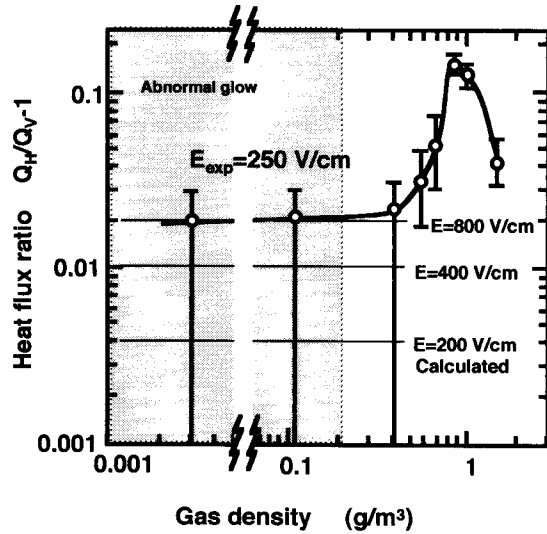


Fig. 5 Heating uniformity of plasma to the inner surface of a cryogenic target was calculated using one dimensional model for the plasma layering technique. When the gas density in the void is sufficiently low, the glow discharge plasma heats the ice surface uniformly to produce a uniformly thick ice layer.



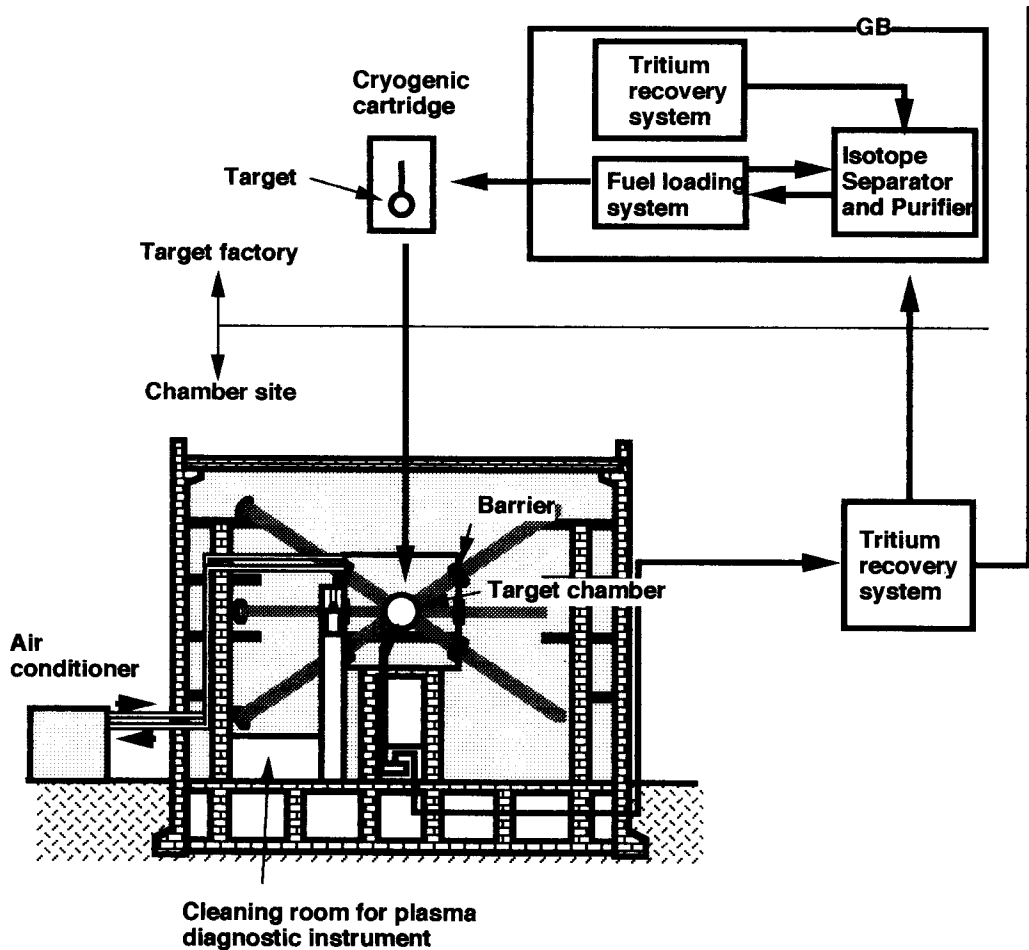


Fig. 6 Tritium facility for a future Gekko laser system. Development of a cryogenic cartridge, which will be used to carry a plastic shell target filled with high pressure tritium from a tritium fill site to the target chamber, is the key subject in the next laser system.

水素混合ガスに曝され、室温で拡散で充填される。プラスチックシェルにはこれだけの圧力の燃料の保持能力は無いので、充填装置に接続されたままの移動カートリッジの中で内部のガスが液化、又は固化する19K程度まで冷却される。不要な三重水素が回収された後、移動カートリッジは充填装置から分離され、ターゲットチャンバーの、予め十分冷却されたクライオスタットに装着される。ターゲットは移動カートリッジからターゲットチャンバー中心部に極低温を保ったまま押し出され、レーザー照射直前に冷却カバーを取り除き、爆縮される。次期装置でも核融合で燃焼する三重水素の量は無視できる量であり、ほとんどの三重水素はチャンバー内に飛散する。チャンバー内に広がった三重水素は真空排気系を通して三重水素回収装置に送られ、処理される。

これらの内、回収、精製、放出後の環境への影響などはすでに磁場核融合関係者などにより貴重な多くの研究がなされている。上記システムに於けるレーザー核融合固有の技術課題としては、高圧の発生技術、室温から極低温まで使用可能なシール技術、ターゲットチャンバー周りの三重水素の挙動の把握、ターゲット内部での同位体分離の問題等であろう。レーザー核融合実験で用いられているチャンバーは磁場核融合で用いられるほど高真空は必要ないことから、今まで実験に用いられたターゲットのデブリスで内面は薄く覆われたままとっている。高エネルギーの放射線が存在する中で、これらの残留物と三重水素がどのように反応するか、まだ十分に解明されていない。

レーザー核融合研究センターでは今までに漏洩の少ない充填装置の開発、充填システム内の三重水素分圧の測定<sup>19)</sup>などの研究開発を行ってきた。今後激光X11号を改良していく過程でさらに三重水素の使用量が増大することから、上記課題の解決に早急に着手する必要がある。

## 7. おわりに

次期レーザー核融合システムに必要なクライオ技術を将来の実用炉クラスまで発展可能なものに絞って現状をまとめた。β線加熱法では最終的な内面の平滑性が課題である。プラズマ加熱均一化法では加熱及び冷却の一様性を確保する技術が課題である。さらにこれらのクライオ技術の共通の課題として、固体状態の燃料の均一性、内面の平滑性などの検査技術を開発する必要がある。三重水素関係ではターゲットチャンバー周辺部での三重水素の挙動を明らかにし、全体構想を固めるとともに、ターゲット内部で固体燃料が移動するときの同位体分離の発生を研究する必要がある。

## 参考文献

1. T.Norimatsu, H.Tajima, M.Takagi, S.Nakai, and C.Yamanaka, J.Vac. Sci. Technol., A 6 (4) (1988) 2552.
2. C.Yamanaka, S.Nakai, T.Yamanaka, Y.Izawa, Y.Kato, K.Mima, K.Nishihara, T.Mochizuki, M.Yamanaka, M.Nakatsuka, T.Sasaki, T.Yabe, K.Yoshida, H.Azechi, H.Nishimura, T.Norimatsu, S.Ido, N.Miyanaga, S.Sakabe, T.Jitsuno, M.Takagi, Nuclear Fusion, **27** (1987) 19.
3. M.Takagi, T.Norimatsu, T.Yamanaka, and S.Nakai, J.Vac. Sci. Technol., A10(1) (1992) 239.
4. H.Azechi, T.Kanabe, M.Katayama, K.Mima, N.Miyanaga, M.Nakai, S.Nakai, H.Nakaishi, M.Nakatsuka, A.Nishiguchi, M.Takagi, and M.Yamanaka, Laser and Particle Beams, **9** (1993) 193.
5. J.Lindl, R.McCroy, and E.Campbell, Physics Today, **45**, (1992) 32.

6. J.T.Larsen, J.Vac. Sci. Technol., **A 7** (3) (1988) 1150.
7. R.A.Sacks and D.H.Darling, Nucl. Fusion, **27** (1987) 447.
8. A.J.Martin, R.J.Simms/R.B.Jacobs, J.Vac. Sci. Technol., **A 6** (3) (1988) 1885.
9. T.Norimatsu, C.M.Chen, K.Nakajima, M.Takagi, Y.Izawa, T.Yamanaka, and S.Nakai, J.Vac. Sci. Technol., **A12**(4) (1994) 1293.
10. M.Takagi, T.Norimatsu, T.Yamanaka, and S.Nakai, J.Vac. Sci. Technol., **A 9** (3), (1991) 820.
11. M.Takagi, M.Ishihara, T.Norimatsu, T.Yamanaka, Y.Izawa, and S.Nakai, J. Vac. Sci. Technol.,**A11**(5) (1993) 2837.
12. M.T.Mruzek, D.L.Musinski,and J.S.Ankney, J.Appl. Phys., **63** (1988) 2217.
13. J.K.Hoffer and L.R.Foreman, Phys. Rev. Lett., **60** (1988) 1310.
14. L.R.Foreman, Presented at 12th Laser Interaciton and Related Plasma Phenomena, April 24-28, 1995, Osaka, Japan.
15. J.K.Hoffer, and L.R.Foreman, J.Vac. Sci. Technol., **A 7** (3), (1989) 1161.
16. I.V.Aleksandrova (1992) , private communication.
17. M.Norimatsu, C.M.Chen, K.Nakajima, M.Takagi, Y.Izawa, T.Yamanaka and S.Nakai, J.Vac. Sci. Technol., **A12**(4) (1994) 1293.
19. M.Takagi, T.Norimatsu, Y.Kato., and S.Nakai, Fusion Technology, **14** (1988) 845.