

解説

レーザー核融合研究とトリチウム

井澤靖和

富山大学水素同位体科学研究センター

〒930-8555 富山市五福 3190

**Tritium Handling in Laser Fusion Research**

Yasukazu Izawa

Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama

3190, Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

(Received December 17, 2007; Accepted March 12, 2008)

**ABSTRACT**

Progresses and future prospect of laser fusion research and developments of tritium handling techniques for laser fusion are reviewed. Implosion physics of laser fusion targets toward central ignition has been intensively investigated for more than 30 years. Numerous milestones such as high density compression and heating of fusion fuel have been achieved. Recently a new scheme named fast ignition is opened by the development of highly intensive laser technology. Both by the central ignition and the fast ignition schemes, fusion ignition and burn will be demonstrated in the near future. Since the early stage of laser fusion research, DT fuel has been introduced in the implosion experiments. Numerous techniques, such as DT gas filling over 1000 atmospheric pressure into the glass and plastic shell targets, formation of uniform cryogenic DT layer on the inner wall of shell target, cleaning of target chamber wall and recovery system of DT fuel after the experiments, and safety system to preclude accidental release of DT gas and to minimize the potential for exposures to personnel, have been developed.

1. はじめに

1960年にレーザーが発明され[1]、その後間もなくレーザー核融合の研究が開始された。1964年ソ連のBasovらはガラスレーザーを重水素リチウムに照射し、核融合中性子の発生に成功した[2]。我が国でもレーザープラズマの研究が1964年頃より開始され、1971年には固体重水素ターゲットにより核融合中性子の発生を確認した[3]。

1972年、米国よりレーザー爆縮の概念が提案された[4]。断熱圧縮によりプラズマを高密度に爆縮し、その中心部に高温のスパーク部を形成するという中心点火方式である。DT核融合燃料を固体密度の1,000倍まで圧縮できれば、レーザー核融合は数10kJのレーザーエネルギーで実現できるとされた。これを契機に1970年代の後半から1980年代の前半にかけて、日本、米国、欧州各国において、激光XII号[5]、NOVA[6]、Phebus[7]など、出力10~100kJの核融合研究用大型レーザーが次々と建設され、1990年頃までに核融合点火に必要な高温度(5~10keV)と高密度(固体密度の数100~1,000倍)の爆縮が実現された[8, 9]。次の

段階はレーザー核融合点火・燃焼の実証であり、米、仏ではそれぞれ NIF [10] (National Ignition Facility、国立点火施設)、LMJ[11] (Laser Mega Joule) 計画により 2MJ 級レーザーの建設が進められている。両計画とも 2010 ~ 2013 年頃までに、レーザー核融合点火・燃焼の実証と 10 程度の核融合利得実現をめざしている。

一方、チャープパルス増幅 (Chirped Pulse Amplification, CPA) 技術[12]の開発によりピーク強度がペタワット (PW) に達する超高強度レーザーが可能となり、高速点火という新しい手法が提案された[13]。この方式は、爆縮により高密度圧縮された燃料プラズマに超高強度レーザーを照射して追加熱し、核融合点火をめざすものである。追加熱という概念は 1983 年頃既に提案されていた[14]が、CPA 技術の出現により現実のものとなった。新型コーンターゲットを用いて、爆縮プラズマに PW レーザーを照射して燃料を 1,000 万度まで加熱することに成功した[15]。この成果を受けて、我が国では高速点火実証実験 (Fast Ignition Realization Experiment, FIREX) 計画に着手した[16]。この計画が予定通り進めば、2015 年頃には高速点火方式による核融合点火が実現される見通しである。

レーザー核融合では、上に述べたように、研究開始当初から重水素を燃料に用いた実験が行われてきた。また、米国では 1970 年代前半に DT 燃料が爆縮実験に導入され、我が国でも 1980 年に DT 燃料による爆縮実験が開始された。このような状況は磁場核融合の場合と大きく異なっている。その理由は、レーザー核融合では対象となるプラズマの直径が 1mm 程度と極めて小さいため、微量のトリチウムを用いた実験が可能であることや、核融合反応で発生する中性子の量やエネルギースペクトルなどがプラズマの温度や密度などの診断手法として重視され、計測技術の開発が積極的に行われてきたことなどによる。燃料ターゲット 1 個に含まれるトリチウム量は 1980 年代初期の  $\sim 30$  kBq ( $\sim \mu\text{Ci}$ ) から同後期には  $\sim 30$  MBq ( $\sim \text{mCi}$ ) に増加し、現在では  $\sim 30$  GBq ( $\sim 1$  Ci) に近づいている。それにつれて実験施設における 1 日のトリチウム取扱量も初期の 30 GBq ( $\sim 1$  Ci) レベルから 300 TBq ( $\sim 10^4$  Ci) レベルまで増加した。

本稿では、レーザー核融合研究の進展と将来展望、ならびにそれに関連するトリチウム取り扱い技術の概要をまとめる。なお、レーザー核融合の物理の詳細については多くの文献[17]があるのでそれを参照されたい。

## 2. レーザー核融合の原理：直接照射と間接照射

### 2. 1 爆縮と核融合点火・燃焼

中心点火方式によるレーザー核融合の原理を図 1 に示す。球状の燃料ターゲットの周囲から強力なレーザー光を一様に照射する。燃料ターゲットは球殻状のプラスチック燃料容器 (プラスチックシェル) に高圧の DT ガスを封入したもので、これを 20 K 程度の極低温に冷却することにより容器内壁に DT の氷の層を形成する。中心の部分は飽和蒸気圧の DT ガスで満たされる。レーザー照射によりターゲット表面のプラスチックは瞬時に高温のプラズマとなり、外側へ向かって膨張する。そのロケット反作用により発生する 1 億気圧に達する高圧力で燃料ターゲットは中心に向かって急激に圧縮される。この過程が爆縮である。最大圧縮時には、氷の DT 燃料層は数千倍の密度に圧縮されて比較的低温高密度の「主燃料部」となり、中心の DT ガス部は衝撃波による加熱と主燃料層の圧力仕事により 1 億度の高温にまで加熱され「高温スパーク部」を形成する (図 5 参照)。



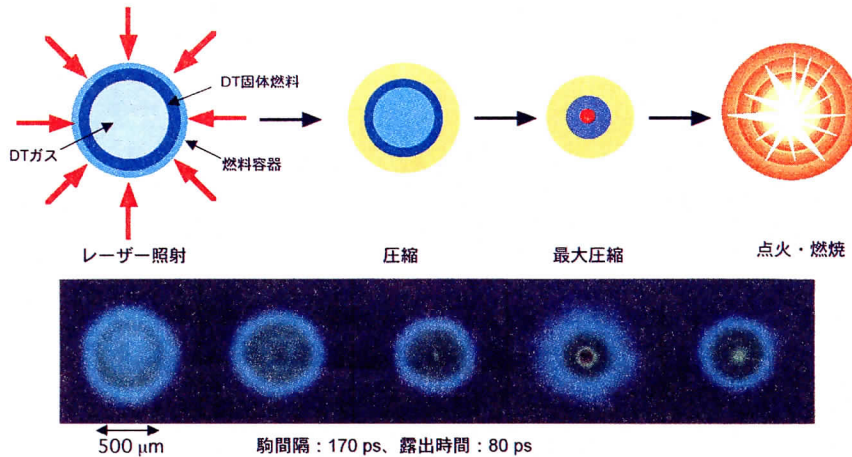


図1 レーザー核融合の原理 (中心点火方式、直接照射)  
 下図は超高速 X 線駒取りカメラで撮影した爆縮の様子

高温のスパーク部では核融合反応



が誘起され、中性子と $\alpha$ 粒子が生成される。スパーク部は $\alpha$ 粒子によって加熱され核融合反応が促進される。これが「核融合点火」である。スパーク部が核融合点火に達すると、その周囲の主燃料部も $\alpha$ 粒子で加熱され核融合反応が急激に開始される。これが「核融合燃焼」と呼ばれる状態で、投入したレーザーエネルギーの100倍ものエネルギーが発生する。

図1の下部は爆縮の様子を超高速のX線駒取りカメラで撮影したものである。レーザー照射から約1 ns程度で最大圧縮に達し、中心に高温のスパーク部が形成されている。この場合も中心で核融合反応は誘起されているが、点火・燃焼には至らず、最大圧縮後ターゲットは膨張・飛散している。

燃料ターゲットを爆縮する方法には2つの方式がある。図1のようにレーザー光を燃料ターゲットに直接照射する「直接照射方式」と、図2に示すようにレーザー光をまずキャビティの内側に照射してX線に変換し、発生したX線で燃料ターゲットを爆縮する「間接照射方式」である。キャビティの材料には、AuやUなど、レーザーからX線への変換効率の大きい高Z材料が用いられる。

直接照射では、球状ターゲット表面にレーザー光を均一に照射する必要がある。ターゲット表面で不均一があると、圧縮過程においてレーリーテラー不安定性などの流体不安定性[18]が成長し、低温の主燃料部と高温のスパーク部が混合してスパーク部の温度が低下し、十分な核融合反応が発生しないからである。

このため、燃料ターゲットの高度な球対称性、均一性、ならびにレーザー光の高い照射均一性が要求される。間接照射では、キャビティ内で発生するX線を爆縮に用いるため、必要なレーザー光の照射均一性は直接照射に比べて緩和されるが、X線への変換という過程を含んでいるのでエネルギー効率の点で直接照射より不利

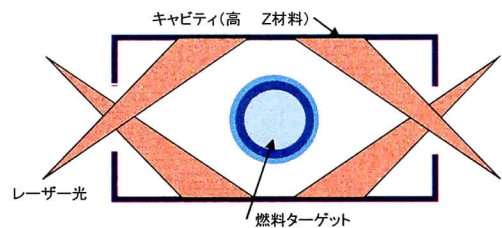


図2 間接照射型ターゲット

となる。我が国や米国ロチェスター大学では直接照射方式を、米国 NIF や仏国 LMJ では間接照射方式を採用している。

## 2. 2 高密度圧縮の重要性

ここで、高密度圧縮の重要性について簡単に触れておく。核融合点火が引き起こされるためにはスパーク部で発生した $\alpha$ 粒子による燃料の加熱が必要である。簡単のため、圧縮された燃料は一樣な温度 $T$ と質量密度 $\rho$ をもった半径 $R$ の球状と考える。燃料の質量 $M$ は

$$M = (4\pi/3) \rho R^3 = (4\pi/3) (\rho R)^3 / \rho^2$$

と書ける。高温スパーク部の $\rho R$ が $\alpha$ 粒子の飛程である $\rho R = 0.3 \sim 0.4 \text{ g/cm}^2$ であれば $\alpha$ 粒子は衝突によりエネルギーを失い、スパーク部の加熱が引き起こされる。これが核融合点火の条件である。一方、主燃料部が十分燃焼するには $\rho R = 3 \text{ g/cm}^2$ が必要とされている。このように、点火や燃焼には一定値以上の $\rho R$ を実現する必要がある。 $\rho R$ を一定とすれば、点火や燃焼に必要な質量は $\rho^2$ に反比例して小さくてよいことになる。すなわち圧縮密度が大きければ大きいほど少量の燃料で核融合点火や燃焼が実現できることがわかる。もし燃料の圧縮を行わず固体密度( $\rho = 0.21 \text{ g/cm}^3$ )のままであったとすると、 $\rho R = 3 \text{ g/cm}^2$ を得るために必要な燃料の質量は2.5 kgにもなってしまう。燃料を固体密度の1000倍( $\rho = 210 \text{ g/cm}^3$ )まで圧縮できれば $\rho R = 3 \text{ g/cm}^2$ を得るために必要な質量は6桁減少し、2.5 mgでよいことになる。

単位体積あたりのプラズマのエネルギー $E_p = (3/2) nkT$ とレーザーからプラズマへの結合効率 $\eta$ を用いて、このようなプラズマを生成するに必要なレーザーエネルギーは $E_L = E_p V / \eta = (3/2) kTM / m_{DT} \eta$ と書ける。ここに $n$ はプラズマの数密度、 $V$ は圧縮されたプラズマの体積( $V = (4\pi/3) R^3$ )、 $m_{DT}$ はDTの質量である。 $\eta = 0.05$ とすると、核融合点火に必要なレーザーエネルギーは $E_L \sim 10 \text{ kJ}$ となる。これが1972年に米国から提案された爆縮の概念である。この計算はあまりにも単純すぎるが、 $E_L \sim 100 \text{ kJ}$ で核融合点火が実現できると考えられている。詳細は文献 [19] を参照されたい。

最後にレーザー核融合におけるローソン条件を求める。よく知られているように、核融合によるエネルギー生成条件(ローソン条件)は、閉じ込め時間を $\tau$ として、 $n\tau = 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$ で与えられる。レーザー爆縮により圧縮・加熱された燃料は音速 $C_s$ (10 keVのプラズマに対し $C_s \sim 10^8 \text{ cm/s}$ )で膨張して密度が低下する。実効的な閉じ込め時間(核融合燃焼の持続時間)は $\tau = R/4C_s$ 程度 [19]と考えられるので、 $n\tau = \rho R / 4m_{DT} C_s$ と書ける。核融合燃焼条件( $\rho R = 3.0 \text{ g/cm}^2$ )に対し $n\tau \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$ となり、磁場核融合の場合より1桁大きい $n\tau$ が必要である。

## 3. レーザー核融合研究の進展

大阪大学で行われた研究を中心に、レーザー核融合研究の進展を見てみよう。図3は爆縮実験における中性子発生数と圧縮密度の年次経過を示したものである。図にはそれぞれの実験で使用された燃料ターゲットの概要も示した。大阪大学では、1975年2ビームレーザー激光II号による圧縮実験が開始され、爆縮による核融合反応中性子を確認した。78年には4ビーム、400Jの激光IV号、80年には2ビーム700Jの激光MII号を用いて同様の実験が行われ、中性子発生数の増加が検証された。これらの実験では比較的壁厚の薄いガラスシェルに $D_2$ やDTガスを充填したターゲットが用いられた。このようなターゲットはExploding



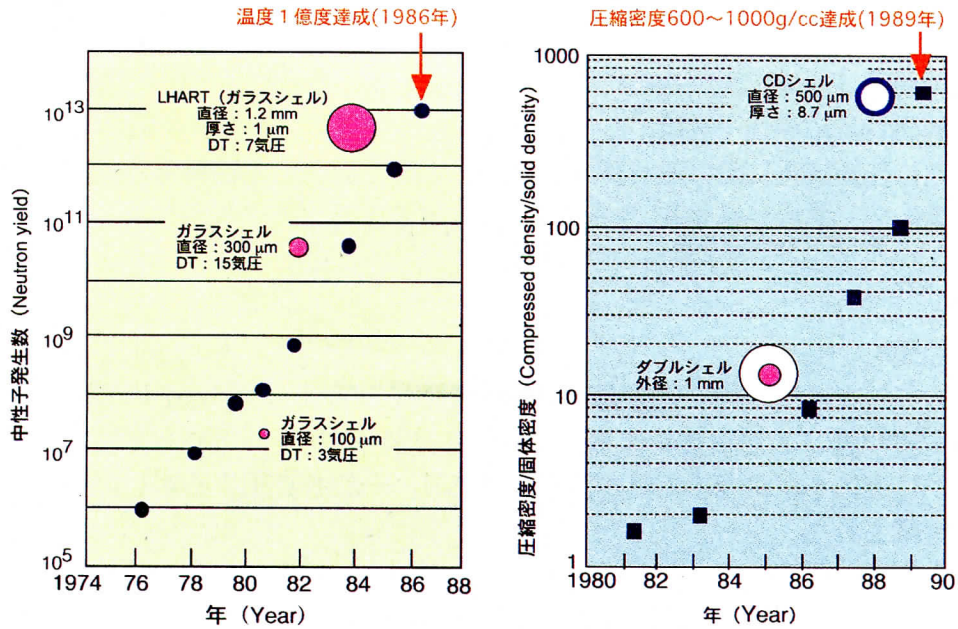


図3 レーザー核融合研究の進展 (爆縮プラズマによる中性子発生数と圧縮密度の年次経過)

pusher と呼ばれ、レーザー照射によりガラス壁を爆発的に膨張させ、内部の燃料ガスを衝撃波により圧縮する方式である。その後、核融合点火に必要な温度 (5 ~ 10 keV) まで加熱することを目的に、多重衝撃波を中心に集中させる LHART (Large High Aspect Ratio Target) が考案され、1985年には12ビーム、15 kJの激光 XII号を用いて中性子発生数  $10^{12}$  個/ショット [8]、86年には  $10^{13}$  個/ショット (核融合利得 = 0.2%) [20] を実現した。このようなターゲットでは、爆縮中に燃料が加熱されてしまうため高密度圧縮にはつながらないが、爆縮による高温加熱と核融合反応を実証したという点で意義がある。なお、米国ロチェスター大学においても OMEGA 増力レーザー (0.35 mm、60ビーム、30 kJ) を用いて、1995年、中性子発生数  $10^{14}$  個/ショット (核融合利得 1.0%) を達成している [21]。

高密度圧縮のためには、壁厚の厚い中空シェルターゲットを用い、ターゲット表面のアブレーションによるロケット作用を利用する爆縮が必要である。この場合には、アブレーション領域で発生する高速電子がターゲット内部に侵入して燃料を先行加熱することを防ぐため、波長 0.5 ~ 0.35  $\mu\text{m}$  の短波長レーザーを用い、 $10^{14} \text{ W/cm}^2$  という比較的低いレーザー照射強度でターゲットに照射しなければならない。しかも、圧縮過程での流体不安定性の成長を抑制し、球対称のよい爆縮を実現するため、ターゲット表面でのレーザー照射強度の均一性とターゲット自身の球対称性を確保しなければならない。ランダム位相板 [22] をはじめとするレーザー光の空間位相制御技術 [23] や、真球度、壁圧の均一性に優れ表面が極めて平滑なプラスチックシェル製作技術 [24] などが精力的に開発された。このような技術開発を経て圧縮密度は向上し、1988年激光 XII号 (0.53  $\mu\text{m}$ 、出力 8 kJ) と重水素化したプラスチック (CD) シェルターゲットを用いて固体密度の 600 倍までの圧縮が実証された [9, 25]。この密度は核融合点火に必要なとされる密度 (固体密度の数 100 ~ 1000 倍) 領域にあり、 $\rho = 600 \text{ g/cm}^3$ 、 $\rho R = 0.5 \text{ g/cm}^2$  が得られた。この成果はレーザーにより高密度爆縮が可能であることを初めて実験で実証できたという点で意義のある結果である。



この時得られた圧縮密度は1次元球対称シミュレーションによる結果とほぼ一致しており、予測通りの高密度圧縮が達成されたことになる。しかしながら、中心の高温スパーク部から発生した核融合反応中性子数は、シミュレーションで予測された発生数の1～3桁小さい値に留まった。圧縮過程における流体不安定性によって低温の主燃料部と高温のスパーク部の一部が混合してしまい、高温スパーク部の温度が予測ほど高くならなかったものと結論された。

#### 4. 高速点火

中心点火方式では、圧縮の最終過程で高温低密度のスパーク部とその周囲を取りまく低温高密度の主燃料層の2層構造を作る必要がある(図5参照)。これを実現するには爆縮の一様性をいかに高めるかが極めて重要な課題であり、それを克服する新しい手段として高速点火方式が提案された。

高速点火方式の原理を図4に示す。燃料ターゲットの周囲からレーザー光を照射しDT燃料を高密度に圧縮するまでの過程は中心点火方式と同じである。最大圧縮の時点で超短パルス高出力レーザーを照射して瞬時にエネルギーを注入し、高密度に圧縮されたプラズマを急速に加熱する。図5は中心点火と高速点火での圧縮コアの形状を模式的に示したものである。中心点火ではスパーク部と主燃料部の2層構造が必要であるのに対し、高速点火では高密度の主燃料部のみを形成すればよい。このため高速点火では爆縮の一様性を確保するための条件が大幅に緩和される。しかも、圧縮された主燃料部の $\rho$ 、および $\rho R$ を同じとすれば、高速点火の場合の圧縮コアの半径は中心点火の半分程度でよい。すなわち1桁近く少ない量の燃料を圧縮すればよいことになり、それに比例して圧縮に必要なレーザーのエネルギーも1桁近く小さくてよいことになる。

高速点火では、超高強度レーザーによって発生する高速電子などで圧縮コアを加熱する。圧縮コアはレーザー光に対する遮断密度よりも高い密度の周辺プラズマで囲まれており、加熱用レーザーをできるだけ圧縮コア近傍まで伝搬させることが重要である。レーザーとプラズマの非線形相互作用によるレーザー光の自己集束などを利用する方法[26]なども提案されているが、図6に示すようなプラスチックシェルターゲットに金属製のコーンを装着した新型コールドターゲット[15]が発明され、実験に導入された。激光XII号レーザー(9ビーム、0.53  $\mu\text{m}$ 、9 kJ)で爆縮した高密度プラズマにPWレーザー(波長1  $\mu\text{m}$ 、0.5 ps、500 W)を照射して圧縮プラズマを1 keVまで追加熱することに成功した。図6右はその結果で、追加熱レーザーのピーク出力増大とともに核融合中性子発生数が1000倍にも増加している。

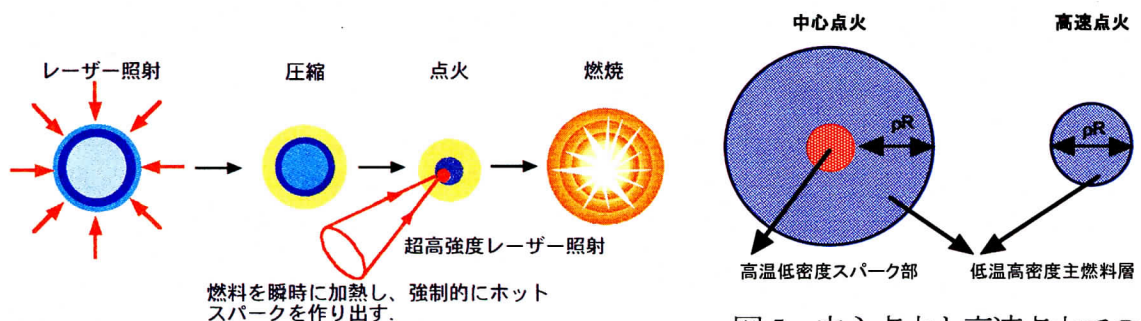


図4 高速点火方式の原理

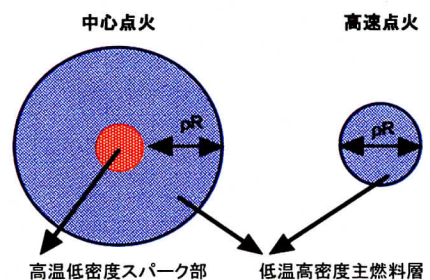


図5 中心点火と高速点火での圧縮コアの形状比較



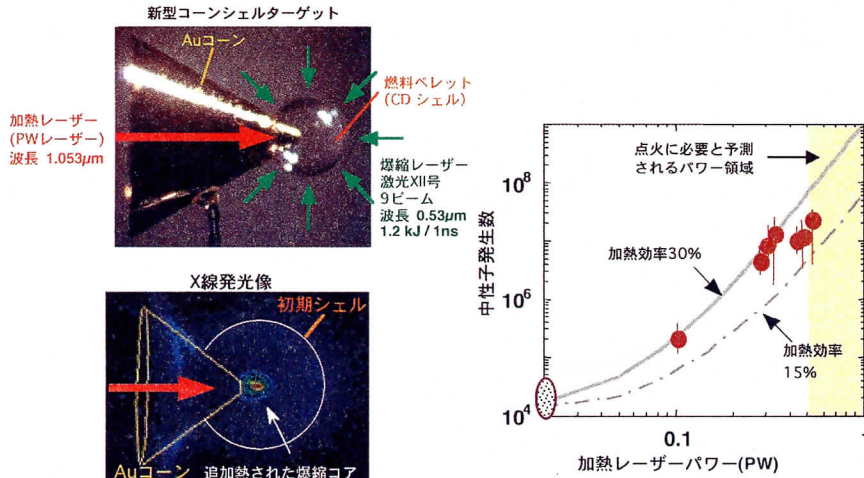


図6 コーンターゲット (左上) とその X 線発光像 (左下)、  
コーンターゲットによる追加熱実験結果 (右)

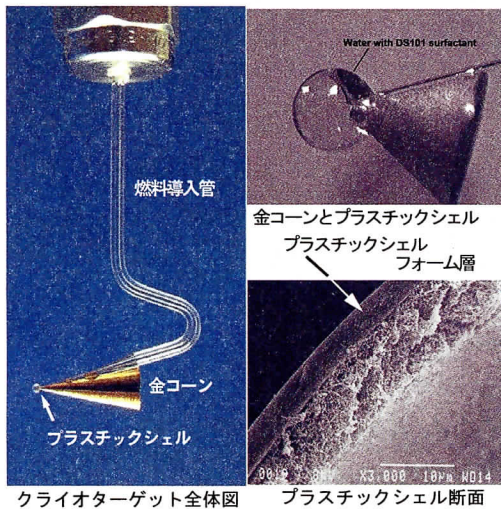


図7 FIREX 実験用クライオターゲット

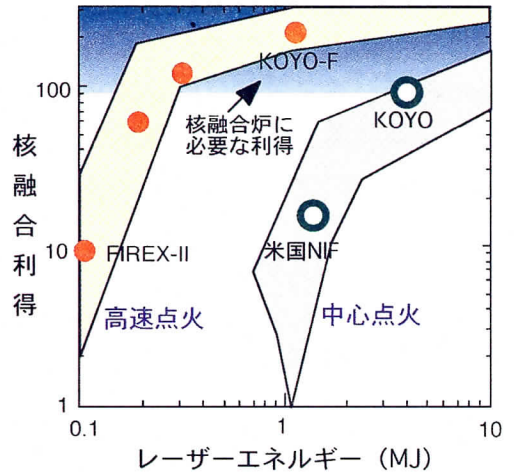


図8 核融合利得の予測結果

大阪大学ではこの成果を下にして、2003 年より高速点火実証実験 (Fast Ignition Realization Experiment: FIREX) 計画を推進している[16]。第 1 期 (FIREX-I) では追加熱レーザーの出力を増強し、10 keV までの加熱を実証する。このため 10 kJ / 1 ~ 10 ps の LFEX レーザーの建設が進められており、10 %程度の核融合利得をめざしている。第 2 期 (FIREX-II) では、50 kJ / 0.35 μm の爆縮用レーザーと 50 kJ / 10 ps の加熱用レーザーを建設し、高速点火方式による核融合点火・燃焼をめざす計画である。FIREX 計画では図 7 に示すような液体 DT 燃料層をもつクライオターゲットを用いる[27]。燃料容器は内側に低密度フォーム層をもつプラスチックシェルで、導入管を通して液体 DT をフォーム層内に注入する。

図 8 は入射レーザーエネルギーに対する核融合利得の予測結果である。高速点火方式では爆縮用レーザーと加熱用レーザーの和を入射レーザーエネルギーとしている。図には FIREX-II および米国 NIF の予測値も示した。高速点火では中心点火に比べてほぼ 1 桁小さいレーザーエネルギーで同程度の核融合利得が期待されている。レーザー核融合発電炉が成立するためには 100 程度の核融合利得が必要とされている。図には、中心点火方式と高速点

火方式によるレーザー核融合発電炉「KOYO」および「KOYO-Fast」の概念設計値（6 節参照）もあわせて示した。中心点火による発電炉では数 MJ のレーザーが必要であるのに対して、高速点火では数 100 kJ のレーザーで小型の発電炉が実現できると考えられている。

## 5. レーザー核融合におけるトリチウム技術

レーザー核融合研究においては、先にも述べたように、1970 年代初期のレーザー爆縮実験以来 DT ターゲットが用いられた。我が国では、大阪大学において 1979 年にトリチウム取り扱いを開始し、1980 年にはガラスレーザー装置激光 IV 号により DT ガスを燃料に用いたレーザー核融合実験が開始された。最初は、ターゲットへの DT ガス充填を外部に委託していたが、1983 年のガラスレーザー激光 XII 号完成にあわせてトリチウム取り扱い施設を拡充整備し、ターゲットへの DT 燃料の充填からレーザー爆縮実験まで、一連の作業を大学内で実施することが可能となった[28]。当初のトリチウム取扱量は年間 100 Ci (3.7 TBq) であったが、現在の最大取扱量は年間 1 PBq (～27,000 Ci, 2.7 g)、1 日 30 TBq (～1,000 Ci) となっている。

レーザー核融合研究におけるトリチウム取り扱い設備は、ターゲットに DT ガスを高圧充填するためのトリチウム充填装置、固体 DT 燃料層をもつクライオターゲットを製作するための極低温冷却装置、プラズマ実験用のターゲットチャンバーなどから構成される。トリチウム充填装置と極低温冷却装置はグローブボックス内に設置され、また、グローブボックスおよびターゲットチャンバーなどはトリチウム回収装置に接続している。

### 5. 1 DT ガス充填ターゲット実験のためのトリチウム取り扱い

米国ロチェスター大学の場合を例にして、DT ガス充填ターゲット実験のためのトリチウム取り扱い設備 [29] を見てみよう。ロチェスター大学では 60 ピーム、30kJ (351 nm) の OMEGA 増力レーザー (1995 年完成) を用いてレーザー核融合研究を行い、1996 年より DT ガス充填ターゲットを用いた爆縮実験を開始した。現在のトリチウム取扱量は 1 g (10<sup>4</sup> Ci, 370 TBq) であるが、DT クライオターゲットの導入に向けてトリチウム取り扱い設備の拡充を計画している。

図 9 はトリチウム充填装置 (TFS: Tritium Fill Station) で、SUS316 製のループで構成されている。DT ガスは 100g のウランベッド 2 個に吸蔵している。ウランから放出された DT ガ

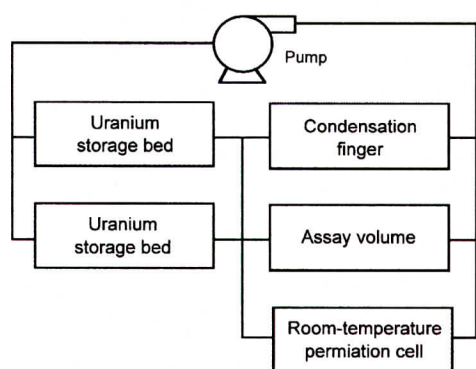


図 9 トリチウム充填装置 (TFS)

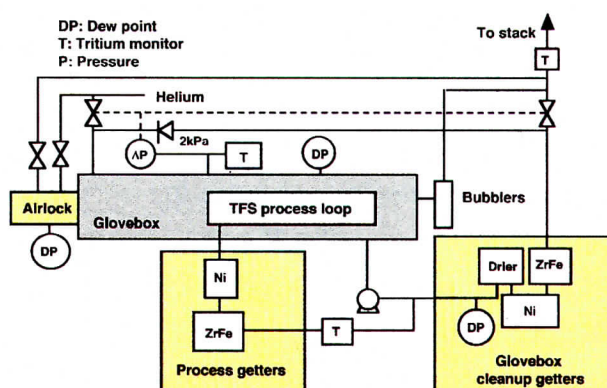


図 10 グローブボックスとトリチウム回収系



スはクライオ容器 (Condensation finger) で液化した後、秤量容器 (Assay volume) へ移送し、一定量を充填容器 (Permeation cell) へ送る。容器内には 10 個程度のシェルターゲットが置かれ、シェル壁中の拡散を利用して DT ガスを充填する。充填圧力は 20 ~ 30 気圧である。DT ガスはウランベッドと充填容器の間をループ内で循環する。ループはターボ分子ポンプとメタルベローズポンプで排気している。1980 年代の爆縮実験では燃料容器にガラスシェルを用いていたため、DT ガスの充填には充填容器を 500°C 程度まで加熱する必要があった。この場合には、SUS 充填容器壁を通して DT ガスの漏洩が問題であり、金メッキなどによる漏洩抑制の工夫がなされた [28]。最近の爆縮実験では燃料容器にプラスチックシェルを用いるのが主流となっており、室温での充填が可能となった。

TFS は図 10 に示すように、容量 2 m<sup>3</sup> のグローブボックス内に設置されている。グローブボックスの雰囲気ガスはヘリウムで、- 20 Pa の負圧に制御している。TFS およびグローブボックスはトリチウム回収系に接続されている。スクラバーシステムは、基本的に、乾燥剤 (5-A モレキュラーシーブ)、および Ni 触媒と ZrFe 合金水素捕集ゲッターで構成されている [30]。乾燥剤はグローブや窓のシールなどから漏洩してきた水蒸気やグローブボックス内で生成された HTO などを捕集する。Ni 触媒の動作温度は 350°C で、乾燥剤再生時の水蒸気や有機物を Ni 酸化物あるいは Ni 炭化物に変換する。ZrFe はガス中の水素、ならびに Ni 触媒還元時に生成されるトリチウム化した水素成分を捕集する。

ターゲットチャンバーは内径 3.12 m、容積 15.84 m<sup>3</sup> のアルミ製で、内表面積は 30.5 m<sup>2</sup> である。排気速度 12,000 l/s のクライオポンプ 3 台で排気している。レーザー爆縮実験で発生した気体状の廃棄物や燃え残った未反応 DT ガスなどはクライオポンプで捕集する。クライオポンプは定期的に再生し、その時捕集したガスなどはスクラバーシステムに送って回収する。

ロチェスター大学では、1996 年のトリチウム取り扱い開始から 2006 年までの間に、乾燥剤で 41.3 Ci の T を含む水 2.9 リットルを、Ni 触媒で 520 Ci の T を、また ZrFe ベッドで 15 Ci の T を、それぞれ捕集したとのことである。これらは 6 ヶ月ごとに外部で再生処理を行っている。この間 559 回の DT ターゲット実験を行い、150 GBq (4.05 Ci) のトリチウムがターゲットチャンバー内に放出された。

図 11 は、DT ターゲットを用いて 11 回の爆縮実験を行った後クライオポンプを室温に戻した際、スクラバーシステムで回収されたガス流中のトリチウム濃度時間変化である。11 回の実験でターゲットチャンバー内に放出されたトリチウム量は 6.44 GBq である。濃度はクライオポンプ出口、モレキュラーシーブ後、および Ni/ZrFe ベッド後の各場所で測定された。モレキュラーシーブによる吸着分は全体の 3% 程度にすぎないことから、クライオポンプから放出されたガスはほとんどが水素ガスか分子量の小さい有機物であろうと予測している。水素分子の平均自由行程はターゲットチャンバー直径の 3 倍以上大きく、爆縮実験で放出された DT などがクライオポンプに入るま

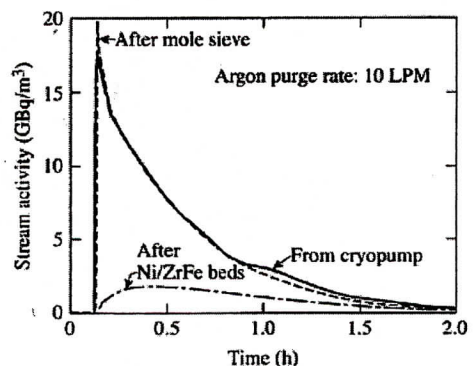


図 11 クライオポンプ吸着ガス回収時のトリチウム濃度時間変化

ではチャンバー壁と 50 回以上の衝突を繰り返すと予測されているが、この程度の表面相互作用ではガス形態の変化は見られないと結論している。なお、6.44 GBq のトリチウムの内、スクラバーシステムで回収されたものは 4.85 GBq、スタックからの放出が 1.44 GBq、最終的にターゲットチャンバー壁内部へ吸着されて残ったものが 0.07 GBq であった。

## 5.2 レーザー核融合点火・燃焼実験に向けて：DT クライオターゲットのためのトリチウム設備

前節までに述べたレーザー爆縮実験では、直径 0.5～1 mm のプラスチックシェルに最大 30 気圧程度までの DT ガスを充填した燃料ターゲットが用いられた。ターゲット 1 個に含まれるトリチウム量は最大 0.5 GBq 程度である。これに対し、今後の核融合点火・燃焼実験では内部の DT ガスを冷却固化したクライオターゲットが用いられる。例えば、米国 NIF 用に設計されているターゲットは直径 ~2 mm の Be/Cu 中空球内面に厚さ 80～100 μm の固体 DT 層を持つものである [31]。このようなターゲットは、まず室温で 1000 気圧を超える高圧の DT ガスを燃料容器内に充填した後、18 K 程度の極低温まで冷却するという過程を経て製作される。ターゲット 1 個あたりに含まれるトリチウム量は 15～30 GBq と、DT ガスタグレットの場合より 1 桁以上大きくなる。

ロチェスター大学では、NIF の準備研究として、直径約 1 mm のプラスチックシェル内に厚さ 100 μm 程度の固体 DT 燃料層を形成した DT クライオターゲットによる爆縮実験を開始しようとしている [32]。このためトリチウム取り扱い設備を拡充した。図 12 はその模式図である[33]。図中、TFS は図 10 に示したものであり、DT 高圧充填システム (DT High-Pressure Fill Station, DTHPS)、FTS、クライオスタット可動カート (Moving Cryostat Transfer Cart, MCTC) はクライオターゲット実験専用の設備である。DT ガスを TFS から DTHPS 内のクライオ容器 (Condensation cell) へ送って固化した後、TFS と DTHPS を切り離す。固化した DT を蒸発させて得られる最大圧力は 250 気圧程度であり、これを機械的に 1200 気圧まで昇圧して FTS 内の充填容器 (Permeation cell) へ送る。充填容器内には最大 4 個のプラスチックシェルターゲットを格納できる。プラスチック球は内外の圧力差に対する機械的強度が

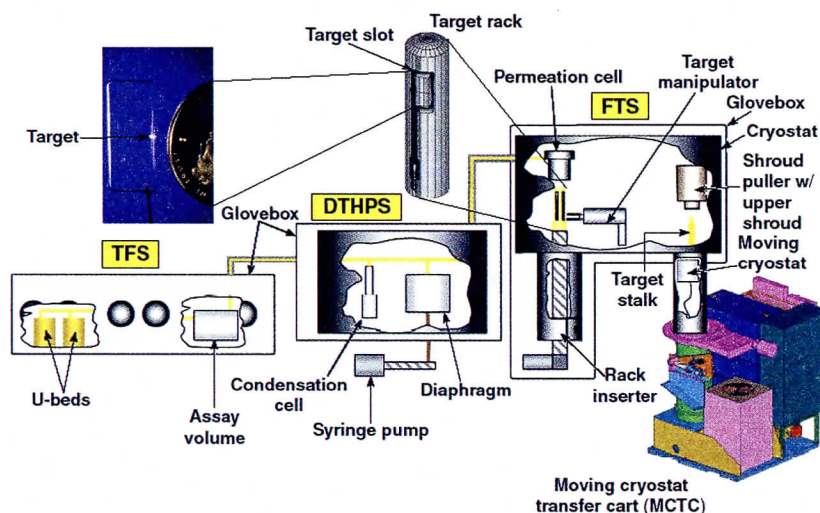


図 12 DT クライオターゲットへのトリチウム充填、固化装置



十分ではないため、昇圧速度を毎分 0.5 気圧程度に制御している。昇圧速度が毎分 1 気圧を超えるとターゲットは破壊される。このため DT 充填に要する時間は 32 時間程度である。充填終了後 FTS と DTHPS を切り離し、充填容器を室温から 20 K 程度まで冷却して DT ガスを固化する。冷却速度は毎分 0.1 K 程度である。固化に要する時間は 50 時間程度である。その後ループ内の全 DT ガスを FTS 内のウランベッドに回収する。

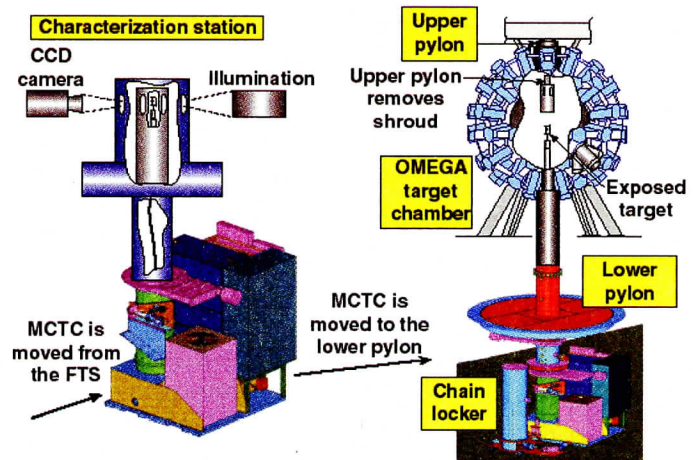


図 13 DT クライオターゲット爆縮実験手順の概念図

FTS 内の DT クライオターゲットは 1 個ずつ MCTC へ取り出し、図 13 に示すように、固体 DT 層の厚さ、その均一性、DT 固体内面の表面精度などを測定する。その後、MCTC をターゲットチャンバー下部に移動させ、パイロン (Lower pylon) と呼ばれる挿入機に取り付け、チャンバー中心へ挿入される。クライオターゲットが周囲からの熱放射に晒されるのを防いでいるシュラウドをレーザー照射 50 ms 前に高速で除去してレーザー爆縮実験を行う。

DTHPS と FTS は別々のグローブボックス内に設置されている。また、DTHPS 内のクライオ容器、圧力センサー、昇圧ポンプ、および FTS 内の充填容器などの超高压部分は、それぞれ、個別の 1 次格納容器内に、さらに 1 次格納容器と高压ガス配管を含めたループ全体を 2 次格納容器内に設置し、グローブボックスを 3 次の格納容器とする設計を採用して、事故時のトリチウム漏洩に備えている。

### 5. 3 トリチウム技術

ここまでは燃料容器への DT 燃料充填と極低温への冷却、ならびにレーザー爆縮実験の実施に必要な設備を中心にレーザー核融合におけるトリチウム取り扱い技術の概要を紹介した。このような技術開発以外にも、DT 燃料充填に際しての DT 分圧比や容器内充填圧力の非破壊測定技術、均一性にすぐれ高い表面精度を有する高精度クライオターゲット製作技術などの開発はレーザー核融合研究における重要な課題である。詳細は文献 [27] を参照していただきたい。

トリチウム分圧の測定用には無機粉末蛍光体を利用した小型センサー[34]が開発された。直径 5  $\mu\text{m}$  程度以下の微細な蛍光体粉末を用いることにより、高压下でも  $\beta$  線の自己吸収効果を小さくすることが可能となり、10 気圧を越える高压まで蛍光強度とトリチウム量の直線性が確認された。粒径を 1  $\mu\text{m}$  まで小さくすることにより 100 気圧にまで対応できると予測されている。センサー部の体積は 0.03  $\text{cm}^3$  程度である。

ガラスシェル内の DT 充填圧力非破壊測定用には  $\beta$  線で励起されたガラス中のシリコンからの特性 X 線を利用する手法[35]が開発されている。また、水素の一部を重水素化したプラ

スチックシェルを 20 ~ 30 気圧のトリチウムガス中におき、紫外線を照射して同位体交換反応を促進させ、短時間で高比放射能の H-D-T プラスチックシェルを製作する技術[36]が開発された。このターゲットは爆縮プラズマの  $\rho R$  計測に利用された。

クライオターゲットでは、燃料容器内面に形成される氷の DT 層に厚さの均一性や表面の平滑性が要求される。DT を高圧充填した燃料容器を極低温まで冷却すると、重力の影響やごくわずかの温度不均一により固体 DT 層の厚さは不均一になり、また 3 重点近傍で結晶化がおき表面の平滑性が失われる。このような氷の層を如何に均一化するかはターゲット技術における重要な課題であり、多くの手法が検討されてきた[27]。その一つに  $\beta$  線加熱法[37]がある。トリチウムからの  $\beta$  線はほとんどが固体 DT 層内で吸収される。このため氷の厚い部分では薄い部分より内面温度が高くなり、昇華した DT が薄い部分に凝縮して均一化が進むというものである。本来この方法は純粋の DT 層を均一化する手法として開発されてきたが、最近ではフォームクライオターゲットに適用しようとする研究[38]も行われている。

## 6. レーザー核融合の将来計画

### 6.1 研究開発ロードマップ

米国 NIF や仏国 LMJ 計画が予定通り進めば 2010 ~ 2013 年には中心点火方式によるレーザー核融合点火・燃焼が実現し、10 程度の核融合利得が達成される見込みである。また、我が国の FIREX 計画では 2015 年頃に高速点火方式による核融合点火・燃焼に達する予定である。このような研究を通してレーザー核融合点火・燃焼に関する炉心プラズマ物理の科学的実証が完了すれば、レーザー核融合研究開発はエネルギー開発計画としての長期的展望の下で、実験炉による工学的実証、実証炉による商用発電の実証を経て、商用発電炉の建設へと進められることが期待される。

レーザー核融合発電炉の概念設計は 1970 年代より行われ、数多くの提案がなされてきた [39]。我が国では「SENRI-I」(1975 年) [40]や「KOYO」(1995 年) [41]など中心点火方式による炉の概念設計が行われ、また 2003 年には発電プラントの開発に向けてのロードマップ [42]がまとめられた。2006 年には高速点火方式によるレーザー核融合炉「KOYO-Fast」の概念設計が実施された [43]。

「KOYO-Fast」の基本仕様は、1.1 MJ、32 ビームの爆縮用レーザーと 100 kJ、1 ビームの加熱用レーザーにより 200 MJ の核融合エネルギーを生成するというものである。炉チャンバーは 4 Hz の繰り返しで、1 基あたり 800 MW の核融合出力、300 MWe の電気出力を生み出す。レーザー自体は 16 Hz の繰り返しとし、一つのレーザーシステムで 4 基の炉を駆動するモジュラー方式を採用しており、プラント全体での電気出力は 1200 MWe になっている。高速点火方式では小型の炉を構成することも可能で、600 kJ のレーザーエネルギーで電気出力 150 MWe を生み出す炉の設計例も示されている。

IFE フォーラムにより提案されているレーザー核融合炉開発のロードマップ [42, 44]を図 14 に示す。NIF、LMJ、および FIREX による核融合点火・燃焼に引き続いて実験炉計画を進めるといのがポイントである。このため、繰り返しレーザー技術、ターゲット技術、炉チャンバー技術、ブランケット技術などの炉要素技術を並行して開発する。実験炉では開発した要素技術を集約して繰り返し炉心試験など種々の工学試験を実施するとともに、発電試験を行い正味電気出力を実証する。次の段階の実証炉は「KOYO-Fast」の 1 モジュール相当



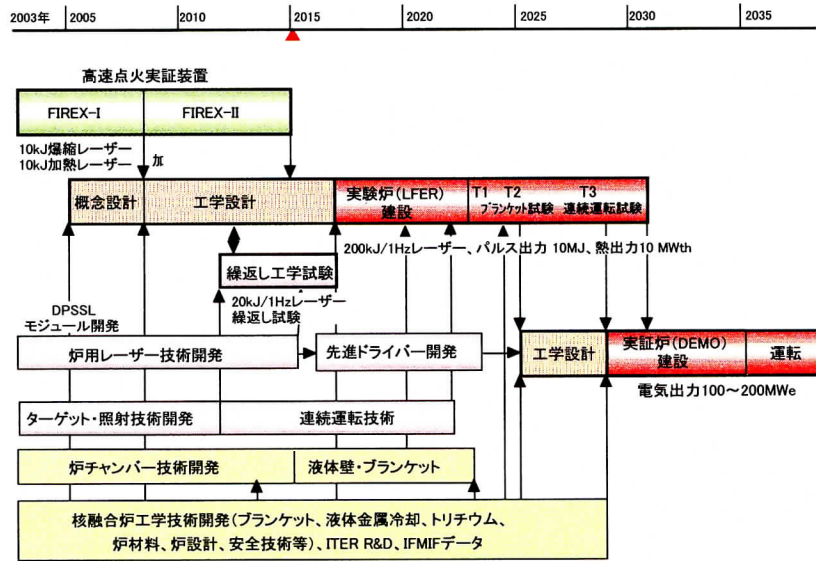


図 14 高速点火レーザー核融合炉開発ロードマップ

規模で、発電コストを含めた商用発電の可能性を実証する。

## 6. 2 将来計画とトリチウム技術

NIF や FIREX などレーザー核融合の科学的実証をめざす段階までは、1日に数回から10回程度の、いわゆる、シングルショット実験であるが、実験炉や実証炉では1秒間に1~10回程度の連続動作が必要となる。繰り返しレーザー技術については米[45]、日[46]、仏[47]などで10年ほど前から先行開発が行われているが、ターゲット技術をはじめその他の炉要素技術開発は遅れている。ターゲット技術では、燃料容器へのDT充填と極低温への冷却を同時に行う液中加熱法[48]を利用する高速連続供給法が提案されている[43]。このようなDT充填システム中のトリチウム装荷量は100g程度に達するものと予測されている。

レーザー核融合炉では、炉チャンバー内部はレーザー光の吸収が無視できる1Pa程度の低圧でよいいため、第1壁を液体炉壁とする概念設計が数多く見られる。「KOYO-Fast」でも液体LiPbの自由落下流を第1壁とする案を採用している。Liはトリチウム増殖の役目を担っているが、LiPb中の水素溶解度や拡散係数などに関するデータが少なく、報告されている数値も10~100倍程度のばらつきがある[43]。トリチウムの流れは、LiPbブランケットに溶解して熱回収系にむかう流れと、炉チャンバーの真空排気系で排出される流れわかれる。それぞれの流路でトリチウムの回収と閉じ込めが必要となるが、LiPb内でのトリチウムの移行特性や高温の金属材料中での水素透過挙動などに関する基礎データが不足しており、システムの検討がしにくい状況にある。これらの基礎データ取得を進めるとともに、併せて透過漏洩が少なく、効率のよいトリチウム回収、閉じ込め系を開発することが重要な課題である。

## 7. おわりに

レーザー核融合研究とそれに関連するトリチウム取り扱い技術の現状および将来展望の概要をまとめた。レーザー核融合は点火・燃焼の実証を間近に控え、将来の核融合炉を見据えたエネルギー開発段階の検討を開始すべき時期に移行しつつある。レーザー核融合炉は炉を

構成するレーザー、燃料ターゲット、炉チャンバーなどの独立性が高く、それぞれの要素技術開発に適した小規模の実験装置で並行した開発が可能である。特に、近年注目を浴びている高速点火方式では中心点火方式に比べて数分の1から1桁小さい炉を実現できるので、中小型炉による多様なエネルギー需要に対応できる。高速点火原理実証をめざす FIREX 計画による炉心物理研究とレーザー、ターゲットなどの炉工学技術開発をバランスよく進めることが重要である。

## 参考文献

- [1] T. H. Maiman, *Nature* **187**, 493 (1960).
- [2] N. G. Basov and O. N. Krokhin, *JETP* **46**, 171 (1964).
- [3] 姜衡富、脇素一郎、吉田国雄、阪上幸男、山中龍彦、山中千代衛、*核融合研究* **27**, 358 (1972).
- [4] J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen and G. Zimmerman, *Nature* **239**, 139 (1972).
- [5] 例えば、C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Mima, N. 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 and M. Takagi, *Nucl. Fusion* **27**, 19 (1987).
- [6] J. T. Huntand and D. R. Speck, *Opt. Eng.* **28**, 461 (1989).
- [7] G. Thiell, A. Adolf, M. Andre, N. Fleurot, D. Friart, D. Juraszek and D. Schiranamm, *Laser and Particle Beams* **6**, 93 (1988).
- [8] C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yabe, H. Nishimura, S. Uchida, Y. Izawa, T. Norimatsu, N. Miyanaga, T. Jitsuno, K. Mima, M. Nakatsuka, T. Sasaki, M. Yamanaka, Y. Kato, T. Mochizuki, Y. Kitagawa, T. Yamanaka and Y. Yoshida, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1575 (1986).
- [9] H. Azechi, T. Jitsuno, T. Kanabe, M. Katayama, K. Mima, N. Miyanaga, M. Nakai, S. Nakai, H. Nakaishi, M. Nakatsuka, A. Nishiguchi, P. A. Norreys, Y. Setsuhara, M. Takagi, M. Yamanaka and C. Yamanaka, *Laser and Particle Beams* **9**, 193 (1991).
- [10] W. J. Hogan, E. I. Moses, B. E. Warner, M. S. Sorem and J. M. Soures, *Nuclear Fusion* **41**, 567 (2001), C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach, M. W. Bowers, S. N. Dixit, G. V. Erbert, G. M. Heestand, M. A. Henesian, M. R. Hermann, K. S. Jancaitis, K. R. Manes, C. D. Marshall, N. C. Mehta, J. Menapace, J. R. Murray, M. C. Nostand, C. D. Orth, R. Patterson, R. A. Sacks, M. J. Shaw, M. Spaeth, S. B. Sutton, W. H. Williams, C. C. Widmayer, R. K. White, S. T. Yang, and B. M. Van Wousterghem, *Appl. Opt.* **46**, 3276 (2007).
- [11] <http://www-lmj.cea.fr/html/cea.html>
- [12] G. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- [13] M. Tabak, J. Hammer, M. E. Grinsky, W. L. Kruer, S. C. Wilks, J. Woodworth, E. M. Campbell, M. D. Perry, and R. J. Mason, *Phys. Plasmas* **1**, 1626 (1994).
- [14] 山中龍彦、大阪大学レーザー核融合研究センター内部資料 (1985).
- [15] R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnik, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S. J. Roses, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K. A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka and A. M. Zepf, *Nature* **412**, 798 (2001); R. Kodama, H. Shiraga, K. Shigemori, Y. Toyama, S. Fujioka, H. Azechi, H. Fujita, H.



- Habara, T. Hall, Y. Izawa, T. Jitsuno, Y. Kitagawa, K. M. Krushelnik, K. L. Lancaster, K. Mima, K. Nagai, M. Nakai, H. Nishimura, T. Norimatsu, P. A. Norreys, S. Sakabe, K. A. Tanaka, A. Youssef, M. Zepf and T. Yamanaka, *Nature* **418**, 933 (2002).
- [16] 疇地宏、城崎知至、FIREX プロジェクトグループ、*プラズマ・核融合学会誌別冊* **81**, 98 (2005).
- [17] 例えば、特集/レーザー核融合とレーザープラズマ応用の発展、*プラズマ・核融合学会誌別冊* **81**, (2005).
- [18] 重森啓介、*プラズマ・核融合学会誌別冊* **81**, 29 (2005).
- [19] 疇地宏、*プラズマ・核融合学会誌別冊* **81**, 2 (2005).
- [20] H. Takabe, M. Yamanaka, K. Mima, C. Yamanaka, H. Azechi, N. Miyanaga, M. Nakatsuka, T. Jitsuno, T. Norimatsu, M. Takagi, H. Nishimura, M. Nakai, T. Yabe, T. Sasaki, K. Yoshida, K. Nishihara, Y. Kato, Y. Izawa, T. Yamanaka and S. Nakai, *Phys. Fluids* **31**, 2884 (1988).
- [21] T. R. Boehly, D. L. Brown, R. S. Craxton, R. L. Keck, J. P. Knauer, J. H. Kelly, T. J. Kessler, S. A. Kumpan, S. J. Loucks, S. A. Letzring, F. J. Marshall, R. L. McCrory, S. F. B. Morse, W. Seka, J. M. Soures and C. P. Verdon, in *Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conf., Montreal*, (1996).
- [22] Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka and C. Yamanaka, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1057 (1984).
- [23] 例えば H. Nakano, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, M. Nakatsuka, T. Kanabe, H. Azechi, T. Jitsuno and S. Nakai, *J. Appl. Phys.* **73**, 2122 (1993).
- [24] M. Takagi, T. Norimatsu, T. Yamanaka and S. Nakai, *J. Vac. Sci. Technol.* **A4**, 2145 (1991).
- [25] 宮永憲明、*プラズマ・核融合学会誌別冊* **68**, 49 (1992).
- [26] K. A. Tanaka, R. Kodama, H. Fujita, M. Heya, N. Izumi, Y. Kato, Y. Kitagawa, K. Mima, N. Miyanaga, T. Norimatsu, A. Puhkov, A. Sunahara, K. Takahashi, M. Allen, H. Habara, T. Iwatani, T. Matsushita, T. Miyakoshi, M. Mori, H. Setoguchi, T. Sonomoto, M. Tanpo, S. Tohyama, H. Azuma, T. Kawasaki, T. Komeno, O. Maekawa, S. Matsuo, T. Shozaki, H. Yoshida, T. Yamanaka, Y. Sentoku, F. Weber, T. W. Barbee, Jr., and L. DaSilva, *Phys. Plasmas* **7**, 2014 (2000).
- [27] 乗松孝好、*プラズマ・核融合学会誌別冊* **81**, 76 (2005).
- [28] T. Norimatsu, M. Takagi, Y. Izawa and C. Yamanaka, *J. Nucl. Sci. Technol.* **23**, 650 (1986).
- [29] W. T. Shmayda, S. L. Loucks, R. Janezic, T. W. Duffy, D. R. Harding, and L. D. Lundet, *Fusion Sci. Technol.* **49**, 851 (2006).
- [30] W. T. Shmayda, N. P. Kherani, and A. G. Heics, *J. Vac. Sci. Technol.* **A6**, 1259 (1988).
- [31] S. W. Haan, P. A. Amendt, D. A. Callahan, T. R. Dittrich, M. J. Edwards, B. A. Hammel, D. D. Ho, O. S. Jones, J. D. Lindl, M. M. Marinak, D. H. Munro, S. M. Pollaine, J. D. Salmonson, B. K. Spears and L. J. Suter, *Fusion Sci. Technol.* **51**, 509 (2007).
- [32] P. W. McKenty, V. N. Goncharov, R. P. J. Town, S. Skupsky, R. Betti, and R. L. McCrory, *Phys. Plasmas* **8**, 2010 (2001).
- [33] W. T. Shmayda, D. R. Harding, L. D. Lund, R. Janezic and T. W. Duffy, 16th Target Fabrication Specialist's Meeting, Scottsdale, May (2005).
- [34] M. Takagi, T. Norimatsu, Y. Kato and C. Yamanaka, *Fusion Technology* **2A**, 845 (1988).
- [35] レーザーペレット部門成果報告書、大阪大学レーザー核融合研究センター (1988).

- [36] M. Takagi, T. Norimatsu, T. Yamanaka and S. Nakai, *J. Vac. Sci. Technol.* **A10**, 239 (1992).
- [37] A. J. Martin, R. J. Simms and R. B. Jacobs, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**, 1885 (1988), M. T. Murzek, S. Ankney and D. N. Decker, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**, 1889 (1988).
- [38] J. K. Hoffer, J. D. Sheliak, D.A. Geller, D. Schroen and P. S. Ebey, *Fusion Sci. Technol.* **50**, 15 (2006).
- [39] G. L. Kulcinski, W. J. Hogan, R. W. Moir, K. Mima and V. V. Kharitonov, in “Energy from Inertial Fusion”, edited by W. J. Hogan, IAEA, Vienna (1995), p. 186.
- [40] 慣性閉じ込め核融合炉設計検討報告書、大阪大学レーザー核融合研究センター慣性核融合炉研究委員会 (1979).
- [41] レーザー核融合炉「光陽」概念設計、大阪大学レーザー核融合研究センター (1995).
- [42] レーザー核融合エネルギー開発ロードマップワーキング委員会報告書「レーザー核融合エネルギー開発の進め方」、IFE フォーラム (2003).
- [43] レーザー核融合炉設計委員会報告書「高速点火レーザー核融合発電プラントの概念設計」、IFE フォーラム (2006).
- [44] 神前康次：プラズマ核融合学会誌別冊 **68**, 93 (2005).
- [45] C. Bibeau, R. J. Beach, A. Bayramian, J. C. Chantenloup, C. A. Ebberts, M. A. Emanuel, C. D. Orth, J. E. Rothenberg, K. I. Schffers, J. A. Skidmore, S. B. Satton, L. E. Zapata, S. A. Payne and H. T. Powell, in *Inertial Fusion Science and Applications 99*, p 635, edited by C. Labaune, W. J. Hogan and K. A. Tanaka, Elsevier (2000).
- [46] T. Kawashima, T. Kanabe, H. Matsui, T. Eguchi, M. Yamanaka, Y. Kato, M. Nakatsuka, Y. Izawa, S. Nakai, T. Kanzaki and H. Kan, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 6415 (2001), *ibid* **40**, 6852 (2001).
- [47] J.-C. Chantenloup, 4th Int. Workshop on High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers, Sept., Osaka (2007).
- [48] H. Katayama, T. Norimatsu, C. Chen, T. Yamanaka, S. Nakai and Y. Nishino, *J. Vac. Scie. Technol.* **A9**, 2140 (1991).