

Target Fabrication Technology and New Functional Materials for Laser Fusion and Laser-Plasma Experiment

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-09-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00067097

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.





レーザー核融合，レーザープラズマ実験用ターゲットの製作技術と新材料の利用

長井 圭治，乗松 孝好，井澤 靖和
(大阪大学レーザーエネルギー学研究中心)

Target Fabrication Technology and New Functional Materials
for Laser Fusion and Laser-Plasma Experiment

NAGAI Keiji, NORIMATSU Takayoshi and IZAWA Yasukazu

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

(Received 23 October 2003 / Accepted 12 May 2004)

Target fabrication technique is a key issue of laser fusion. We present a comprehensive, up-to-date compilation of laser fusion target fabrication and relating new materials. To achieve highly efficient laser implosion, organic and inorganic highly spherical millimeter-sized capsules and cryogenic hydrogen layers inside should be uniform in diameter and thickness within sub-micrometer ~ nanometer error. Porous structured targets and molecular cluster targets are required for laser-plasma experiments and applications. Various technologies and new materials concerning above purposes are summarized including fast-ignition targets, equation-of-state measurement targets, high energy ion generation targets, etc.

Keywords:

laser fusion, fuel target, microcapsule, cryogenic target, low density foam, cluster, functional materials

1. はじめに

直径2ミリメートルの球殻状固体重水素，三重水素ターゲットにメガジュール(米国立点火施設 NIF 級)レーザーが照射されると半径50~100 μm 程度の微小の超高密度プラズマが生成し，核融合点火が起こる[1,2]。レーザー照射またはターゲット形状の摂動により，最大圧縮時の超高密度プラズマの温度，密度は変わるため，点火しない場合もある。つまり，点火ターゲットはナノメートルオーダーの半径一様性と厚み一様性を有する必要がある。Fig.1は，点火実験用ターゲットにおいて許容される逸脱を，フーリエ展開のモードに対して示したものである[3]。このような精密ターゲット製作技術は，レーザー核融合の中でも重要な技術の一つである。米国では，Target Fabrication Meetingが1年半ごとに開催され，その内容はプロシーディングにまとめられている[4,7]。ほかにもいくつかの国際会議が行われている[8]。我が国，特に大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(阪大レーザー研)からはレーザー核融合研究のマイルストーンとなるいくつかのターゲット技術が生み出されており，それらは本誌にも掲載されてきた[9,10]。一方で，高密度プラズマからは様々な量子線が放出されるので，この応用に関わる研究も広がっている。例えば，2003年度より極端紫外光源(EUVL)の開発に関して文部科学省のリーディングプロジェクトが開始され，ナノテクノロジーへ展開している。場合によっては，レー

author's e-mail: knagai@ile-osaka-u.ac.jp

ザープラズマ応用に用いられるターゲットにも高精度が求められる。いわば，高密度プラズマを介して，その入口と出口にナノテクノロジーが存在している形になる(Fig.2)。本稿ではその後の進展も含めて，まずレーザー核融合燃料ターゲットの関わる微細加工技術を総括的に述べる。中でも2章では高い真球性と壁厚の均一性を持つプラスチックカプセルの製造法である密度整合エマルジョン法について述べる。3章ではコーティング法について，4章では高効率中性子発生に用いられる高アスペクト比ターゲットについて，5章では極低温重水素カプセルについて，6章では高速点火ターゲットの製造法について，7章では衝撃波計測ターゲットについて述べる。また，微細加工技術だけでなく新材料もレーザー核融合燃料ターゲットに欠かせない。一般にブレークスルーは新しい材料の利用によってなされるという視点から，8章では多孔質フォームについて，9章ではクラスター，10章ではベリリウムを中心にした軽元素材料，11章では光電機能材料，12章では磁気材料のレーザー核融合およびレーザープラズマ生成ターゲット材料への利用に関して，この分野への必要性もあわせて述べる。

2. エマルジョン法によるプラスチックカプセル

2.1 密度整合エマルジョン法の概略

プラスチックカプセルは，レーザー核融合研究のマイル

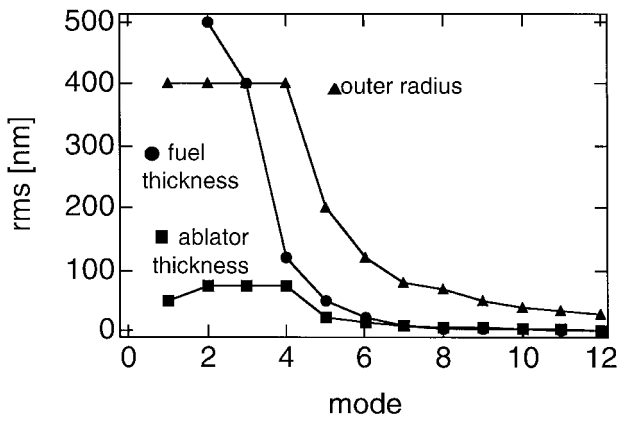


Fig. 1 Low mode specifications for capsule out-of-round, in rms per mode. The data is shown in reference 3.

ストーンの一つである核融合点火, 燃焼に必要な超高密度 (固体密度の数百~一千倍) を実証したターゲットであり, 中空構造を持っている[9,11]. 同質量の気体燃料に比べて, 中空球の固体燃料は高密度低エントロピー的に効率良く爆縮される. つまり, このターゲットは高温高密度に至るエネルギーを低減できる. このターゲットは密度整合エマルジョン法によって製作された. エマルジョンとは, (例えば水と油の)二相分散系であり, 身近には牛乳やマヨネーズの例がある. これらの例では分散液滴のサイズはサブミクロン程度である. この環境を利用して, 油相に重合性物質を用いて重合させると, マイクロカプセルやナノカプセルが得られることが, 高分子や界面科学の分野でよく知られている. しかし, 気泡などの欠陥がしばしば生じる. レーザー核融合ではこの欠陥は高密度圧縮の妨げとなる. 高い真球性や高い壁厚の一様性を有するカプセル, 特にそ

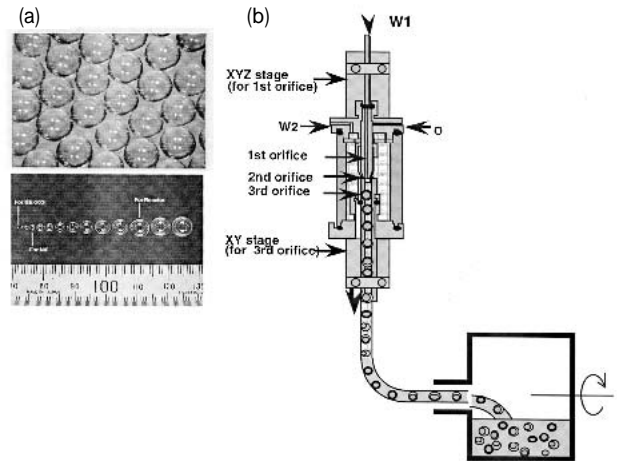


Fig. 3 Mono-dispersed sized emulsion generator (left), polystyrene capsules from the emulsion (right above), and various capsule size range (right below).

のミリメートルカプセルはレーザー核融合の分野で初めて製作されたものである[12,13]. このカプセルはエマルジョンの安定化のために, 油相と水相の密度を一致させ, 重力の影響を補償する方法で得られた (密度整合エマルジョン法). エマルジョンの油相には, 重合性の単量体ではなく, 高分子の有機溶媒溶液が用いられ, 溶媒の散逸の後に残留した高分子がカプセル化する. 密度整合エマルジョン法では, 通常のコロイドによるマイクロカプセル法に比べて, 重合反応中の密度増加の影響や単量体の水和の影響が回避され, 歪みや気泡などの欠陥を生じにくい. この方法は, ポリスチレンや, ポリメチルメタクリレート誘導体と行った材料に用いることができる. Fig. 3(a)はその一例である. 直径は 500 μm ~ 7 mm, 壁厚は 7 μm (直径 500 μm

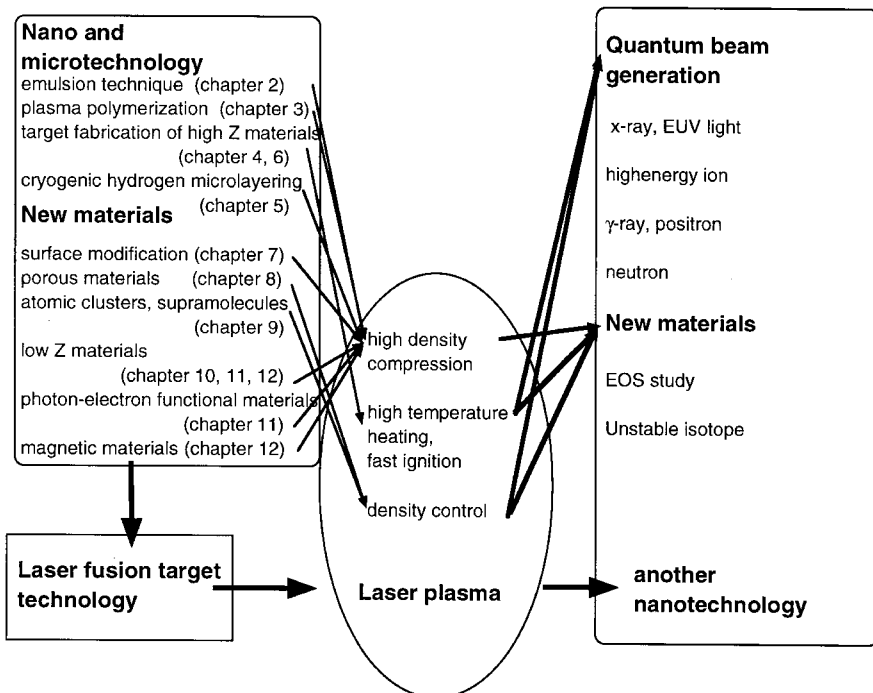


Fig. 2 Relation between laser fusion target and nanotechnology.

の場合)である。半径一様性が99.9%,厚み一様性が99.3%のカプセルが得られている[13,14]。将来,商業用発電プラントが成立した場合,レーザー核融合炉では高繰り返し(~4 Hz)爆縮が必要であり,そのためには高均一のカプセルの大量生産が必要である。密度整合エマルジョン法は液滴製造装置(Fig.3(b))と組み合わせることにより実用炉クラスのカプセルを単分散サイズに得ることが可能である[14,15]。

2.2 密度整合エマルジョンからカプセル形成過程における諸因子の影響

2.2.1 エマルジョンの変形の影響

以上のような水準にあるカプセル製造技術だが,その製造条件は複雑であり,原理的にも完全に解明されているわけではない。最近明らかになった例として,エマルジョンの溶媒散逸過程における攪拌が油相厚みを一様にする効果があげられる。乗松らは,エマルジョンの油相厚が,一様となる様子を数値シミュレーションし,それを検証する実験を行った。エマルジョンはプロペラなどで攪拌されて安定に存在するが,この際にプロペラに衝突すると変形力が油相を介して内部水相に働く(Fig.4(a))。働く力は油相によって分散され,油相の厚みに反比例する力が発生する。その結果,内部水相に対して中心力が働き,内部水相はエマルジョンの中心に向かって移動する。機械的な方法でエマルジョンに振動を与え,実験的検証が行われた(Fig.4(b))。この実験において,内部水相の密度は 0.998 g/cm^3 ,油相は 1.024 g/cm^3 である。油相の粘性率は, $1 \times 10^{-2} \text{ Pa s}$

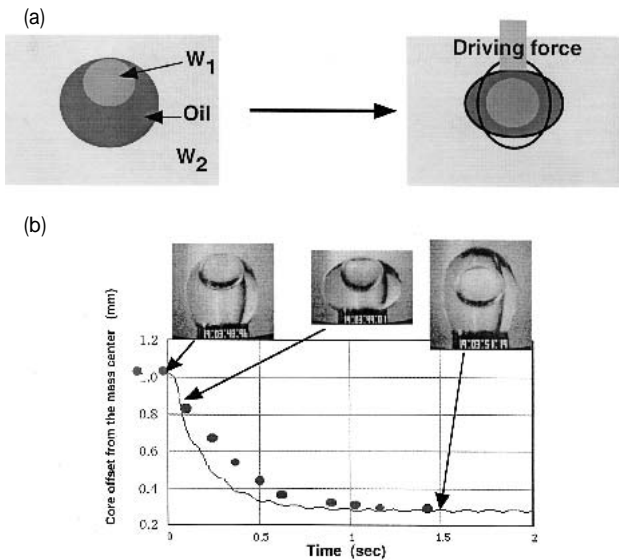


Fig. 4 (a) A schematic view of an emulsion and the core W_1 phase of the emulsion centered by the deformation of emulsion due to the sloshing. (b) Comparison of the centering process of a compound emulsion with the Norimatsu model. The oscillation mode is sloshing mode. The vertical axis is the offset of the core in mm and the horizontal axis is the time in second. In the set of photographs, the left and middle photographs show the first vertically lengthened phase and the first compressed phase, respectively. The right photograph shows the final equilibrium position in the lengthened phase. Time origins for experiment and simulation are arbitrary.

である。モデル計算は実線のようにあり,実験的に求めた位置と合う。これは sloshing モードと呼ばれる振動に相当する。しかし中心方向への移動速度は小さい核の場合において,計算値より速くなった。内側の半径と外側の半径の比である λ 値は $0.5 < \lambda < 0.8$ のときによく中心力が働いた[15,17]。

2.2.2 溶媒乾燥過程

密度整合エマルジョン法では,溶媒の散逸によりエマルジョンがカプセル化するが,その際の溶媒の移動が,油相,水相,蒸発相について定量的に求められた(Fig.5)[18]。この実験により油相から水相への移動は溶媒の水に対する溶解性に支配されていることが明らかとなった。水と密度整合を取るために油相には通常ベンゼン/1,2-ジクロロエタンのような高密度/低密度混合溶媒が用いられる。ここでは,二種類の溶媒の選択において沸点を一致させることが,成分比を一定に保つ(つまり密度を保つ)ために必要だと信じられていた。実験事実は溶媒の水相への移動は比較的低温で溶解により起こることを示し,沸点を一致させても密度が変化してしまうことを明らかとした。さらに,この実験は溶解による油相の溶媒の減少を定量的に明らかとしたので,ゲル化,つまり油相が変形運動を起こせなくなる時刻を観測したという意味も持つ。このゲル化時にカプセルの真球性と壁厚の一様性が決まってしまうので,2.2.1節に述べたような中心力による壁厚の均一化をこの時刻までに行う必要がある。

2.2.3 溶媒の対流の影響

第3章で述べるように米国ではポリスチレンカプセルは爆縮に用いられず,GDP(Glow Discharge Polymer)カプセルが用いられる。GDPカプセルはエマルジョン法で作ら

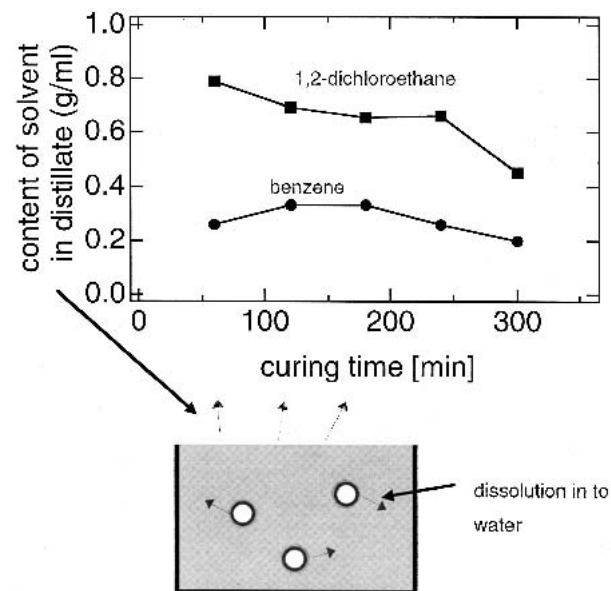


Fig. 5 At the early time of the emulsion curing process (~30 min), the distillate ratio of 1,2-dichloroethane/benzene was higher than that at the late time (above). This means the curing was not governed by the boiling point (benzene ~80, 1,2-dichloroethane ~83), but the solubility in water (benzene 0.2 g/100 g, 1,2-dichloroethane 1.0 g/100 g at 50).

れたポリスチレン誘導体（ポリ α -メチルスチレン，PAMS）カプセルを鋳型としてコーティング法で製作される。GDPの表面状態はその鋳型であるPAMSのそれに依存することがわかっている。つまり，GDP被覆過程において表面平滑性はごくわずかだが劣化が起こるので，極めて平滑なPAMSカプセルが必要となる[19]。カプセル赤道円（もしくは子午線円）表面の凹凸のフーリエ変換に対してモード10となる成分はNIF（米国立点火施設）の点火実験に重大な悪影響を与える。PAMSカプセルにはモード7～20にあたる周期に～30 nmの高さの表面粗さがしばしば見られた。このモードはFig. 6のようなMarangoni対流によって形成されると解釈されている。実際に乾燥速度を遅くして，油相の壁を横切る方向の濃度勾配を押えることによりMarangoni対流の発生要因を抑え，粗さが改善された[20]。

2.2.4 表面張力の影響

エマルジョンの真球性は水と油の重力差のほか，表面張力にも依存する。高木らは高分子量ポリアクリル酸の低濃度溶液（～0.1 wt%）を外水相に用いる方法によりPAMSカプセルを作製した。この系では表面張力がポリビニルアルコールよりも大きいため真球性の向上が見られた。しかし，ポリアクリル酸に由来する表面付着物の問題が生じ，GDPコートした場合におけるGDPの平滑性は，ポリビニルアルコール外水相のエマルジョンで製作した場合のGDPよりも低下した。この付着物を避けるため，エマルジョンの油相のPAMS濃度が高まりゲル化して，カプセルの真球性，壁厚の一様性の整った段階で，ポリアクリル酸溶液からポリビニルアルコール溶液への外水相の交換が行われた。この方法で得られたPAMSにコートしたGDPはNIFの要求する条件（Fig. 1）に合致する平滑性となった[21, 22]。

2.2.5 分子量の影響

カプセルの特性は主としてポリスチレンの平均分子量と

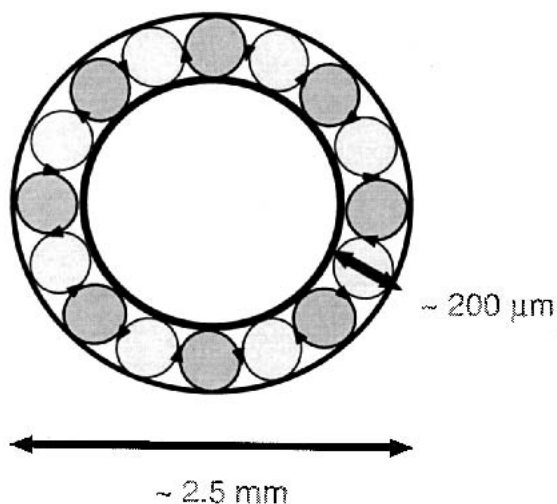


Fig. 6 The PAMS capsule showed a surface roughness ~ 30 nm within the mode 7 ~ 20. The roughness mode number corresponds with theoretical modes of Marangoni convection cells formed during the curing of emulsion.

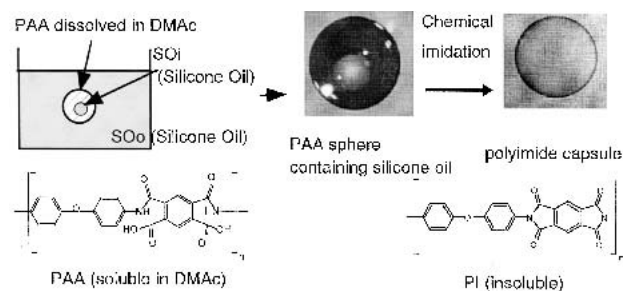


Fig. 7 Polyimide capsule was obtained using emulsion technique via soluble precursor of poly(amic acid) capsule and chemical imidation process.

分子量分布によることがわかっている。表面の特性は分子量分布に依存している。分子量分布は，重量平均分子量と数平均分子量の比 (M_w/M_n) で表現され，分布の大きいほど M_w/M_n は大きくなる。最も表面の平滑性が高いカプセルは $M_w/M_n = 1.20$ のときに得られている[23]。

2.3 ポリイミドカプセルの製造法

以前は，ポリスチレン誘導体（PAMSを含む）やポリメチルメタクリル酸のような有機溶媒可溶性汎用高分子しか高品質カプセルを得ることができなかったが，最近欠陥のないポリイミドカプセルをエマルジョン法でも得られるようになった（Fig. 7）。ポリイミドは加工性に劣るが，幅広い温度範囲で力学強度に優れ，そのカプセルはNIF点火ターゲットの有力なデザインの一つに選ばれており[24]，CVD（Chemical Vapor Deposition）法による製法が研究されている[25, 26]（3.2節）。エマルジョン法はCVD法に比べて，安価で大量生産も容易である。エマルジョンはポリイミドの前駆体であるポリアミド酸のジメチルアセトアミド溶液とポリジメチルシロキサン（シリコンオイルの主成分）から作られた。ジメチルアセトアミドをゆっくりと外側のポリジメチルシロキサン中に溶解させることで5～0.5 mmの直径のポリアミド酸カプセルが製作された[27]。ポリアミド酸カプセルはピリジン/無水酢酸により化学的にイミド化され，ポリイミドカプセルとなる[28]。

2.4 諸元素ドーパカプセルの方法

ロシアのグループにより，金属ナノ微粒子をドーパしたポリスチレンカプセルが製作され，流体不安定性の抑制に有効であると言われている[29]。金属酸化物ナノ微粒子をカプセル内面に分散させたターゲットは辻らにより製作された。これはカプセル内部の酸化アルミニウム微粒子（～300 nm）が爆縮時にX線を発光し，温度計測ができる仕掛けになっている。ポリスチレンカプセル製作時と同様のエマルジョン法で，内水相にナノ微粒子を加えることで製作される[30]。

3. コーティング法によるプラスチックカプセル

3.1 GDPカプセル

GDP（Glow Discharge Polymer）カプセルは，米国で開発され，仏国にも技術移転されている爆縮用カプセルである[31]。原料である低分子量炭化水素を真空チャンバーに流し込み，低分子量炭化水素をグロー放電させると，有機

Table 1 Specification of GDP capsule for high power laser implosion experiments.

Laser system	laser energy	capsule diameter	capsule thickness
NIF (US)	1.8 MJ	2 mm	200 μm
Omega(CRYO)(US)	40 kJ	900 μm	as thin as possible
LIL* (France)	60 kJ	1mm	
LMJ** (France)	1.8 MJ	2.4mm	175 μm
Gekko XII (Japan)	25 kJ	500 μm ***	7 μm ***

* Ligne d'Integation Laser

** Laser Mega Joule

*** Polystyrene capsule has been used and GDP capsule is not used.

ラジカルが形成する．これはチャンバー内で重合を起こし，基板に付着して膜化する．一種のCVDにあたる[32]．カプセル化にあたっては，熱分解性のPAMSカプセルを鋳型とし，その外側にGDPカプセルをコートする(Fig. 8)．均一に球表面に被覆させるためにプラズマ重合反応容器内に皿を設け，反応中に皿を振動させる．PAMSはその置換基の立体障害のために，解重合を熱的に起こすことができ，GDPコート後に単体を拡散して透過させて除去することが可能である．残ったGDPカプセルがターゲットとして用いられる．厚い(～200 μm)カプセルは厚み制御が困難となるが，それ以下の厚みについてはルーチ的に製作されている．カプセルサイズは，レーザーエネルギーによって異なり，照射エネルギーの大きいほど大きいカプセルを爆縮できる．Table 1にその関係をまとめた[33]．

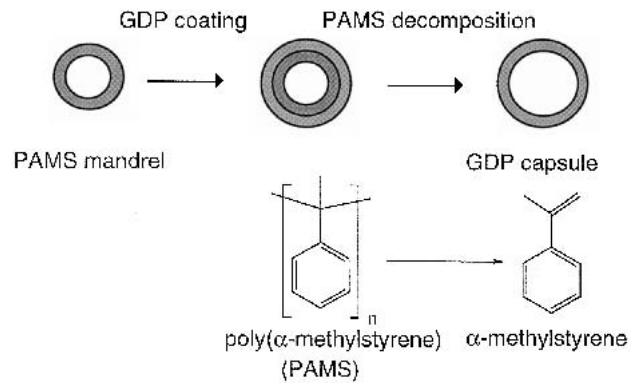
ロチェスター大学のOMEGAレーザーでは900 μm 直径のカプセルが固体重水素/三重水素ターゲット用に用いられている[34]．厚みは可能なかぎり薄いものが求められるが，1,000気圧充填のために必要な力学強度を考慮して1～2 μm のものが用いられている．力学強度を問わなければ，0.5 μm 厚のものも製作されている．

力学強度を高めるためにGDP組成に対する検討もされている．密度を20%高めることで，ヤング率は3倍になった．このときの水素/炭素比が0.9とフーリエ変換赤外分光(FT-IR)により見積もられた．一方標準的なGDPでは水素/炭素比が1.3であった．この差は末端のメチル基の量の少ないこと，二重結合の多いことによることがFT-IRにより示唆されている．ただし，この強いGDPは空気中の酸素や水分と反応し重量変化する．これは二重結合や，フリーラジカルに酸素が付加するためと考えられている．

我が国ではエマルジョン法で作製されたペレットが，LHD(Large Helical Device)においてトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)[35]として磁場核融合の分野でも利用されているが，米国ではGDPカプセルが，トカマク装置(DIHD)のプラズマ診断用ペレットとして検討されている．

3.2 ポリイミドカプセル

CVD法によるポリイミドカプセルの製作法の開発がNIF向けに進められている[25, 26]．表面平滑性の向上が主な課題である．平滑性を悪くする要因として，鋳型の質，原料の混合，コーティング時の影，剥離が考えられた．10 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の高速蒸着が平滑性向上に効果的である．これ

Fig. 8 Fabrication of Glow Discharge Polymer (GDP) capsule using poly(α -methylstyrene) mandrel.

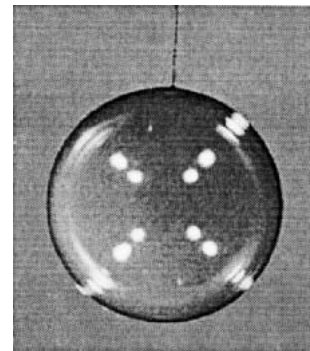
は鋳型を乗せる皿の影響が少なくなるためと考えられている．最適化の結果，160 μm 厚で，300 nm RMS粗さが得られている．この粗さはジメチルスルホキシドの蒸気を用いて平滑化され，30 nm RMSまで平滑性が向上する．

蒸着ポリイミドは，溶媒キャスト法によるポリイミドとは異なる性質を示す．これは，物理架橋，化学架橋の違いによると考えられている．X線回折の結果はPAMS上に蒸着したポリイミドは結晶性で，分子鎖がカプセル面に平行であることを示している．イミド化の際の，加熱雰囲気，加熱温度，加熱時間といった条件によっても気体透過性やヤング率が変わる．これらは結晶化度，架橋度，分子量の違いであることがFT-IRにより示されている[25]．

粗さは，低次(2～20)モード(カプセル全体にわたる歪み)については，多少の加熱によって減少する．しかし，高次モード(微小突起物のような)については90～140 $^\circ\text{C}$ の加熱によって増加する[26]．

4. 無機材料カプセル

ガラス中空球は最も単純な構造のレーザー核融合ターゲットである[36]．特にLHART(Large High-Aspect-Ratio Targets)は阪大激光XII号で熱中性子 10^{13} を発生したターゲットである(Fig. 9)．この中空ガラス球の作製法は液滴法とゾルゲル法の二種類がある．液滴法は水ガラスの均一液滴を毛細管から射出させ，それを乾燥させるものであ

Fig. 9 Large High-Aspect-Ratio Targets (LHART) produced thermonuclear neutron yields exceeding 10^{13} with the twelve-beam green GEKKO XII laser.

る。ゾルゲル法ではガラス材料の酸化溶液を乾燥しゲル化させ、適当な大きさに粉碎した後、ゲル粒子を高温電気炉塔内に落下させて、ガラス球を得るものである[37]。

最近別の方法も開発されている。この方法は所定の直径のPAMSカプセルにGDPをケイ素やチタンをドーピングさせながら、所定の膜厚に被覆させてカプセルを得た後に、アルゴン中で焼結させて酸化物もしくはガラスカプセルを得るものである[38]。

5. 極低温重水素カプセル

5.1 極低温重水素カプセルの概略

極低温固体重水素/三重水素層状ターゲットはレーザー核融合技術として極めて重要である。極低温中空ターゲットは低密度プラスチックフォーム法により、10年前に開発され[39-41]、基礎実験に用いられた[41]。プラスチックは炭素原子が核融合燃焼の効率の妨げとなるのでフォームを用いない、つまり不純物原子を含まない極低温中空ターゲットの製作がなされ、それをを用いた爆縮実験が最近、ロチェスター大学にて行われた[42]。

燃料DTを球殻に凝固させる際には重力と多結晶化が影響し、これを取り去るのは容易でない。いくつかの方法が考案され、研究されている。

5.2 β 加熱法

β 加熱法はトリチウムの β 壊変に伴う熱を利用して、DTの充填されたカプセルを凝固点以下に保持し、再分配させる方法である。不均一に分布するカプセル内の固体DTは厚く分布する壁の方が薄く分布する壁よりも β 壊変による発熱が多いため蒸発量が多くなる。蒸発したDTは凝固点以下に保たれている壁で再固化する。この蒸発-凝固過程により均一に再分配される。再分配速度は $d\delta/dt = -\delta/\theta_{TC}$ 、(ただし δ = DT固体厚み)に従い、その時定数 θ_{TC} は $\sim 1,500$ sとなる[43]。 β 加熱法の欠点は、軽水素や二重水素では適用できないこと、時間経過とともに ${}^3\text{He}$ が増加し、 θ_{TC} の長くなることである。層状化に要する時間を短縮させるためには、外部からの加熱が必要となり、以下のような方法が研究されている。

5.3 プラズマ加熱法

乗松らはプラズマ加熱法を考案した。ここでは外部グロー放電により、マイクロ波加熱させる。実用炉サイズ(~ 5 mm 直径)の凝固固体重水素を ~ 80 秒で均一層状化できた[44, 45]。Mapolesらは同様の加熱を重水素/三重水素に対して行い、 β 壊変により生ずるイオンの存在のために容易に加熱されることを明らかにした[46]。

5.4 赤外線加熱法

赤外線加熱法はさらに有力な手段である。 D_2 は $3.15 \mu\text{m}$ 、HDは $2.57 \mu\text{m}$ の赤外線を吸収する。これは水素分子の伸縮振動に帰属される[47]。150 - 250 μm 厚のHD層は三重点付近で形成され、表面粗さrmsは1 - 3 μm の範囲であり、温度を下げるほどに粗くなった。固体成長の過程の制御が、層状固体の均一性の因子となる。固体層をゆっくり(~ 0.1 K/min)溶融状態から成長させるほど表面は平滑になった[48] (Fig. 10)。 D_2 の場合において、赤外線照射量は

三重点 18.72 K の 0.5 K 下では ~ 50 mW/cm²、0.1 K 下では ~ 25 mW/cm² となった。

5.5 フォームクライオ法

クライオターゲットはカプセルの均一性、固体重水素層の均一性ととも、クライオ装置自身の振動が爆縮性能に影響を与える。現状では、これまでに述べたクライオ装置では振動の問題を完全に回避することが困難なため、クライオ装置を小型化できるフォームクライオ法が再び実験の対象に上がっている。また、フォームクライオ法の方が、現状では重水素層の平滑性の上でも優れている。フォームクライオターゲットは液体燃料をしみ込ませる低密度プラスチックフォームカプセルとその外側の蒸発防止膜からなるものである(Fig. 11)。固体重水素層の均一性はフォームの均一性によって支配される。フォーム材料中の炭素は核融合燃焼に対して不純物となるが、レーザー吸収過程に有利となる。最近 Bordner らはこれがレーザー光の吸収率の増大を起こし、爆縮性能が向上することを指摘している[49]。

5.6 無支持ターゲット

今までに述べた方法は、カプセルを支持棒などで固定させて、極低温重水素固体を製作する方法である。支持棒の不要な、無支持ターゲット(free standing targets, FST)は

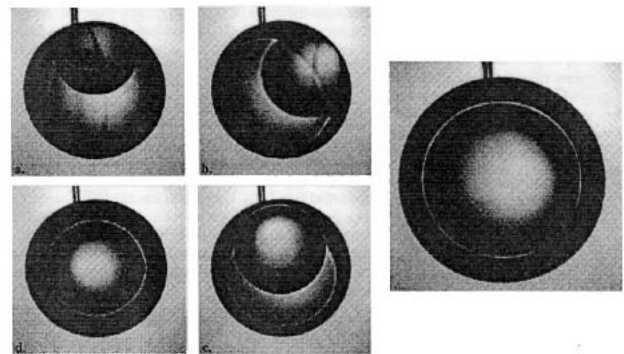


Fig. 10 Layer formation by direct injection of the IR laser beam. The capsule is then warmed to the liquid phase and slowly cooled until solid starts forming. The temperature is then held constant during the solidification. (Ref [48])

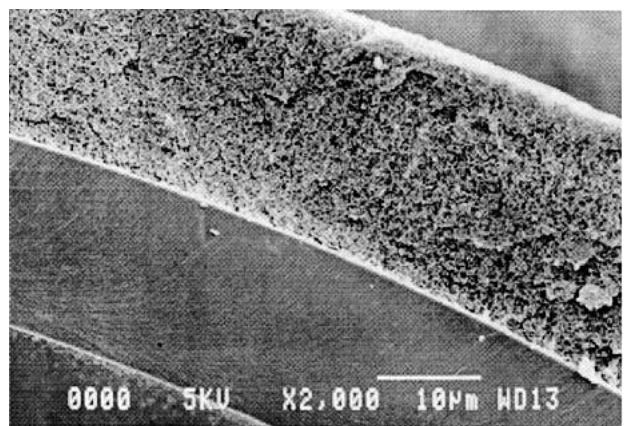


Fig. 11 Cross section of foam shell obtained from macromonomeric acrylate with multi functional groups.

次の課題であり、実用炉では特に重要である。ロシアの Lebedev 研では、3 ミリサイズ直径ポリスチレン内部に、30 ~ 100 μm 厚の H_2 や D_2 固体が製作されている。製作時間は 30 秒以内である (Fig. 12 [50])。平滑な固体水素を得るために、ドーピングを行い、凝固速度を遅くする工夫がされている。例えば、 H_2 に HD を 1% 以下ドーピングすることにより、500 μm 直径のガラスシェル内に透明な固体水素層が形成される。しかもこの固体層は 5 K から 16 ~ 20 K の昇温降温を繰り返しても透明を維持しているという。

5.7 磁場による重力の補償

仏国から、水素原子の反磁性を利用した層状化が報告された。20 K において、質量あたり磁化率 / 質量は $-2.51 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ だが、10 T の不均一強磁場をうまく与えると液体水素 / 気体水素が均一層状に浮遊する形をとるといふ。直径 3 mm のプラスチック中空球の中に液体水素を充填した系を用いて、上記のことが実験的に示された [51]。

5.8 その他の課題

間接爆縮ではカプセルをホーラムが取り囲む。このクライオ重水素ターゲット製作においては、ホーラム内にカプセルを組み込ませた後に固体重水素層の形成を行なうほうが容易である。Kozioziemski らは間接照射用のホーラムターゲット内の HD を赤外加熱し、そのモデル化を行なった [52]。直径 2 mm、厚さ 40 μm のカプセルに、100 - 400 μm 厚の HD 固体を内層にいたれた NIF スケールの金ホーラムは HD 伸縮振動バンドで加熱された。モデルはホーラム

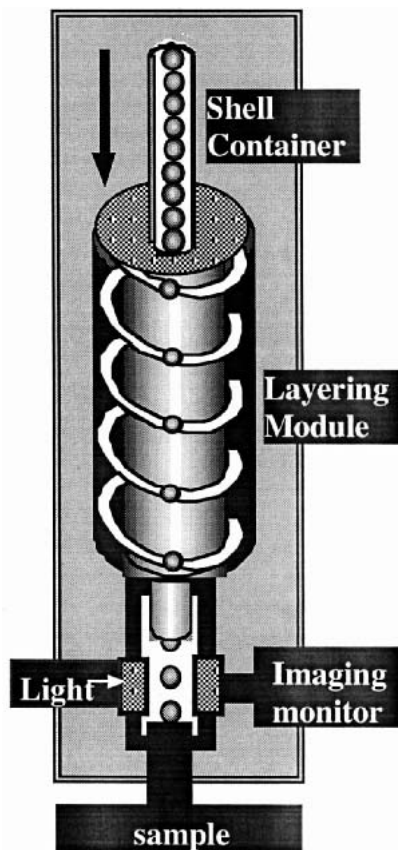


Fig. 12 Cryogenic solid hydrogen layering module with a spiral channel to fabricate self standing target. (Ref [50])

軸に沿った赤外加熱によって低モードの制御ができることを示した。実験的にはホーラム軸と垂直方向に対称な層状となった。ホーラム内のカプセルの外側では、対流が起こり、クライオカプセルの均一性が低下する。これを避けるためにポリイミドの薄膜窓で対流が遮断されている [53]。

極低温ターゲットに関して、カプセルの変形の問題が指摘されている。例えば、ポリスチレンカプセルを液体窒素で冷却したところ、薄いカプセルの方が厚いカプセルよりも変形しやすいことが光学顕微鏡により観察された [54, 55]。

6. 高速点火ターゲット

高速点火においては、超高強度レーザーが圧縮用レーザーによる最大圧縮時に照射される。超高強度レーザーをガイドするコーン型ターゲットを用いた実験において、固体密度の 60 倍に圧縮されたプラズマに対して、1 keV までの追加加熱が実証されている [56 - 58]。この実験に用いられたターゲットは Fig. 13 のようにプラスチックカプセルに金円すいが挿入された構造である。ターゲットの懸架は、カプセルではなく金円すい側となる。金円すいはダイヤモンド研磨された真鍮の鋳型に電気化学的にメッキすることにより製作された [59]。金円すいの先端の厚みを薄くする場合には、二回に分けて金メッキが行われる。この際一回目のメッキ後に先端のみが有機単分子膜で被覆され、二回目のメッキの際に先端に被覆されないようにしている。カプセル部分はエマルジョン法で製作された真珠の重水素化ポリスチレンを有機溶媒でエッチングして金中空円すいを挿入した。ポリスチレンとの接着性を高めるために、金表面は有機単分子膜で被覆される。

このターゲットのクライオ重水素ターゲット化については、フォーム法が有力視されている。対称な球ターゲットに用いられる β 加熱法や、赤外加熱法の適用が困難と考えられるためである。コーンガイド型ターゲットでは、燃料カプセルに穴を開けることが許されるので、カプセル内まで重水素導入用の管を用いて流し込むことが可能である (Fig. 14)。この導入管の採用によって、トリチウム使用量を大幅に減らすことが可能となる [60]。

最近高速点火核融合の炉設計がなされ [61]、そこではガイド用コーンに、ブランケット材料と同じ LiPb 合金を用い

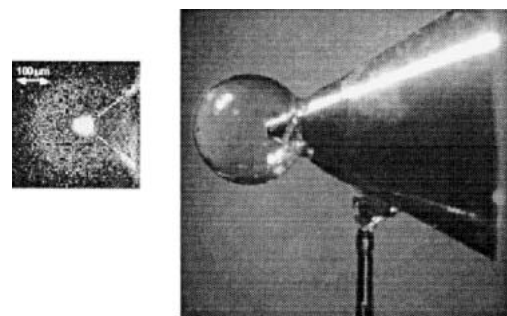


Fig. 13 (Right) The implosion target for efficient heating of the highly compressed plasma. A gold cone is attached poly(d 8-styrene) capsule. (Left) An x-ray image of the implosion.

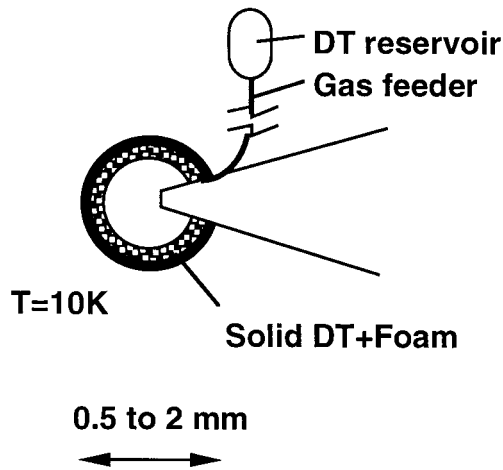


Fig. 14 Structure of cryogenic foam target with gold cone guide. Gaseous DT is filled in to the target using gas feeder shown in the figure.

ることが提案されている．この合金は比較的融点の低いために射出成形による大量生産が可能と考えられている [60] .

7 . 衝撃波計測ターゲット (ナノ接着剤)

レーザー衝撃波計測は，レーザー核融合爆縮過程を定量的に解釈する為に必要な状態方程式データ取得のために不可欠である [62] . その正確な計測 (1 % 誤差) にはターゲットの厚み精度を高める必要がある . 例えば，20 μm 厚のターゲットでは 200 nm 以下の誤差に抑える必要がある . 階段状ターゲットにおいては，接着法による作製が精度向上，製作コスト面で有利だが，接着剤の厚みをナノメートルレベルにすることは通常困難である . しかし，単分子膜接着法はナノレベルの接着剤厚みを可能とする [63] . 具体的にはアルミニウム箔などの衝撃波標準物質の表面 (酸化アルミニウム) に，イソブチルトリクロロシランなどによって有機単分子膜を被覆させた後，箔どうしを溶媒中で接触させる . 箔は有機鎖どうしの分子間力および箔の凹部に基づく空隙による陰圧により接合する (Fig. 15) . この接着力は強く，通常の実験室操作，例えばカッターによる切断，液体窒素への浸漬，アルコール中への浸漬などによって剥がれない . これにより容易に精密な厚みの階段状ターゲットが得られるようになり，状態式の正確なデータが得られつつある [63 , 64] .

8 . 多孔質フォーム

8.1 多孔質フォーム概略

多孔質フォームは前節で述べた極低温ターゲットのみならず，レーザー衝撃波，レーザープラズマ相互作用，Z - ピンチなどの研究に用いられる . 様々な組成，密度，マイクロ構造のものが求められて，製作されている . 一般には，光学材料，チェレンコフ光検出，断熱材，撥水材，軽量材，触媒等の広い応用範囲がある [65] .

プラスチックフォームについて言えば，三つの製作方法が知られている (Table 2) . 一つめは，揮発性溶媒との混合

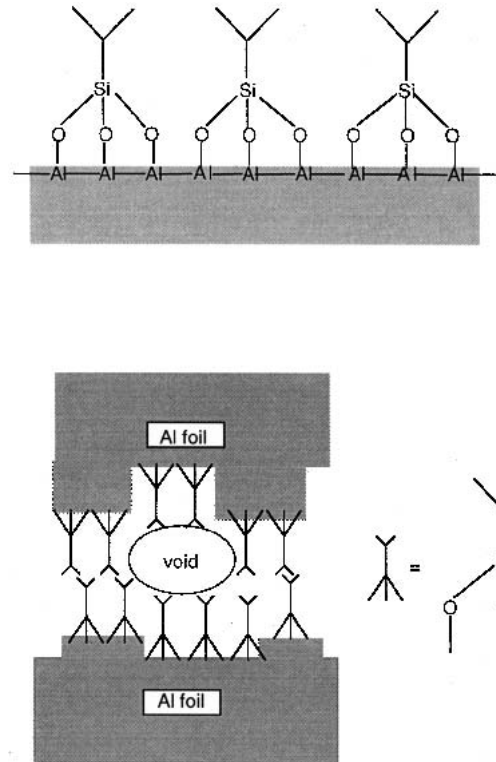


Fig. 15 Schematic structure of single molecular membrane glue, (left) ideal modified surface with isobutylsiloxy groups on the aluminum surface and (right) possible mechanism of the adhesion.

による発泡，縮重合における脱離分子の発泡といった発泡法であり，二つめは，凍結溶媒の昇華による凍結脱気法であり，三つめは化学ゲル，物理ゲルから，超臨界流体二酸化炭素で溶媒を除くアエロゲル法である . 前二者は比較的セルサイズが大きく (~ 10 μm) ，レーザー波長，レーザースポットサイズより大きくなることもあり，そのスケールをレーザーターゲットとして考えると多孔質と呼べない場合がある . 三番目のアエロゲル法は微細構造を与えるが，材料に制限がある . Table 3 に，この方法の適用が可能な有機材料を集めた . 実用炉においては，高温蒸気 of の残る炉内

Table 2 Fabrication of low-density foam.

method	applicable materials	structure size
Evaporation of volatile solvent	polyurethane polystyrene	~ 10 μm
Freeze-Dry	PMP	~ 10 μm
Aerogel	see Table 3	~ μm

Table 3 Starting materials to prepare foam via aerogel technique.

Starting material	foam density (mg/cm ³)	structure size (μm)	foam shell fabrication	ref
Poly(4-methyl-1-pentene)	2.5 ~ 200	0.1 ~ 10	No	76, 77
Multifunctional acrylate	50 ~ 200	~ 5	Yes	67, 69
Divinyl benzene	50 ~ 200	~ 1	Yes	70
Resolcinol/Formaldehyde	10 ~ 100	~ 0.1	Yes	71

に低温固体ターゲットを投入する際に、重水素の溶融が懸念される。中程度の密度のフォームを外側に被覆させることで、直接爆縮のターゲットを溶融から保護することが提案されている[66]。無機材料のフォームもレーザープラズマ生成のために用いられる。

8.2 アクリル系フォーム

多官能性のアクリルモノマー、アクリルマクロモノマーによるフォームは、80年代に液体重水素担持用のフォームクライオ用の材料として開発された[67,68]。重合によってゲル化するようなモノマーと溶媒の組み合わせを選んで重合させる。ゲル化の後は凍結脱気法又は超臨界流体抽出法により、溶媒を除去する。超臨界流体抽出法では、凍結脱気法よりも多孔質構造が細くなる。アクリル系フォームは、エマルジョン法が適用可能で、その場合溶媒をフタル酸ジエチルなどの水に密度の近い溶媒が選ばれる。ただし、重合反応の際に体積の減少が起こったり、急激にゲル化するためにカプセルの真球性は98%程度と、ポリスチレンほどには高くない。カプセル化させたこのフォームの外側に固体重水素蒸発防止膜を被覆させて、クライオ用フォームターゲット化された(Fig. 11)。さらにプラズマ診断用に、チタンや鉛をドーブしたアクリル系フォームも製作された[69]。

8.3 レゾルシノール/ホルマリン(RF)フォーム

固体重水素層形成過程の監視のために、多孔質構造が十分に小さく透明な材料が求められている。アクリル系モノマー、ジビニルベンゼン、レゾルシノール/ホルマリン(RF)(Table 3)の三者は最近クライオフォームターゲット用に米国でスクリーニングされ、多孔質構造の最も小さい(~100 nm)RFフォームが採用されている[70]。RFフォームはレゾルシノールとホルマリンを塩基性で重合させ、直鎖高分子とした後に、酸を加えて架橋させることによって

ゲル化させるフェノール樹脂の一種である。溶液状態では水溶性なので、エマルジョンを逆相の油/水/油系として、カプセル化する[71]。

8.4 ポリ(4-メチル-1-ペンテン)(PMP)フォーム

ポリ(4-メチル-1-ペンテン)(PMP)は、シクロヘキサンなどの溶液を凍結させた後に真空下で昇華させる凍結脱気法により容易にフォーム化が可能である[72]。また、PMPは炭化水素であり、酸素などの比較的高い原子番号(Z)元素を含まないので、X線発生が少ない。また、高Z物質をドーブすることにより、X線のエネルギーを変えることができるので、レーザープラズマX線源としても研究された[73]。

低密度フォームの密度を下げてゆくと、電子密度が低下するので完全にプラズマ化してもレーザー光の進入を許すようになる。化学組成 CH_2 の炭化水素高分子について、ガラスレーザーの波長 $1.06\ \mu\text{m}$ のカットオフ密度は、 $\sim 3\ \text{mg}/\text{cm}^3$ 、二倍波の $0.53\ \mu\text{m}$ については $\sim 15\ \text{mg}/\text{cm}^3$ である。最近、凍結脱気法により、極めて低い密度のフォームが得られている[74,75]。凍結脱気法で得られる極低密度PMPフォームの多孔質構造サイズは $20\ \mu\text{m}$ と大きいので、アエロゲル法によるフォーム作製が研究された。アルコールはPMPを溶解しないが、PMPの溶媒となるシクロヘキサンとは混合するので、シクロヘキサンのPMP溶液を高温の(沸騰した)アルコールにわずかに加えた場合には最初は均一溶液となり、その後にPMPがゲル化する。そのアルコールを含むゲルを超臨界二酸化炭素で抽出した。この方法では、ラメラ(鱗片)構造をした微小PMPの集合体を得られる(Fig. 16)。ゲル化の際のアルコールの種類を変えて、ラメラ構造体のサイズと密度を変化させることができ、密度 $2\ \text{mg}/\text{cm}^3$ (空気の2倍程度)、ラメラ構造体のサイズ $1\ \mu\text{m}$ 、厚み数十nmのフォームも得ることができる

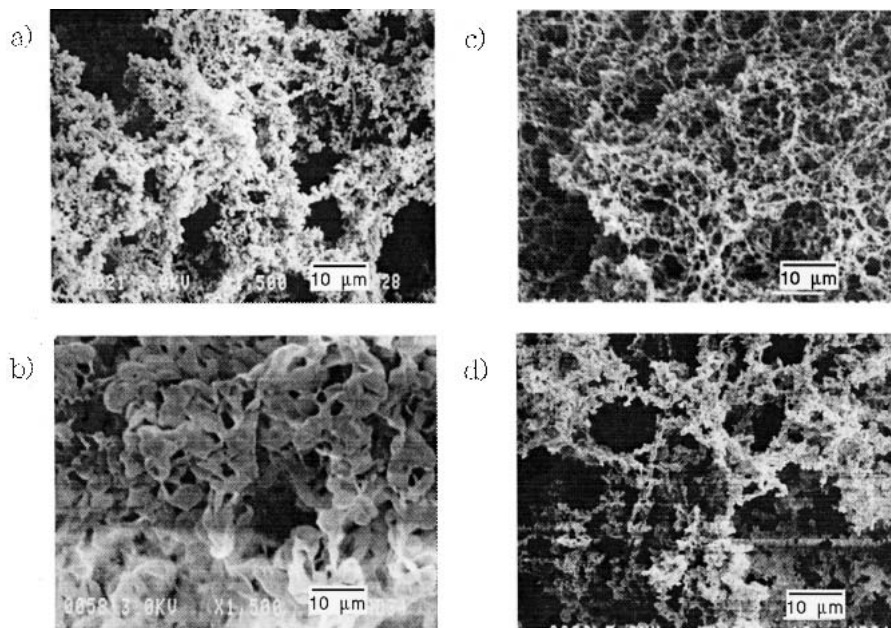


Fig. 16 Scanning electron microscope image of poly(4-methyl-1-pentene) foam prepared from a) 1-butanol, b) 2-methyl-1-propanol, c) 2-butanol, and d) 2-methyl-2-propanol.

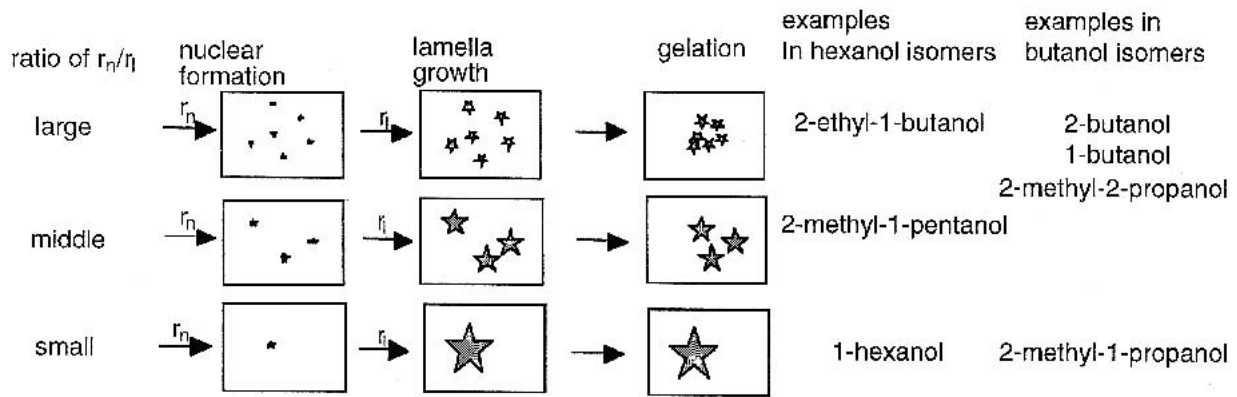


Fig. 17 Schematic view of coagulation process in terms of nuclear formation and lamellar growth. The lamella size would be determined by the ratio of nuclear formation rate per lamella growth ratio, and be correlated with affinity between alkyl chain of alcohol and the side chain of poly(4-methyl-1-pentene).

[76, 77]. このことは, Fig. 17に示した機構論で説明することができる. つまり, ゲル核形成速度(r_n)が大きく, ゲル成長速度(r_l)が小さいほど, ラメラ構造が小さくなる. r_n は沸点の低いほど大きく, r_l はアルコールのアルキル鎖とPMPの側鎖の相互作用の弱いほど大きくなる. ヘキサノールよりもブタノールの方が沸点が低いのでゲル核形成(r_n)は速く, ブタノールの中では, 2-ブタノール, 1-ブタノールが最もPMPと相互作用が強いために, r_l が小さくなる. その結果, 2-ブタノール, 1-ブタノールを用いると最も細かい構造が得られたと考えられる. この極微構造, 極低密度フォームを極短パルスレーザーのターゲットとして用いると, クーロン爆発を起こし, 第9章で述べるクラスターターゲットよりも高収率で高エネルギーイオンを与えることが最近沖原らによって明らかとなっている[78].

8.5 無機材料フォーム

無機材料のフォームはSiO₂について, しばしばターゲットファブリケーションミーティングで報告されており, 米国のレーザープラズマ実験に用いられていると考えられる. 最近SnO₂をフォーム化してレーザープラズマ化すると, スペクトルの狭い極端紫外光(EUV)発光が起こることがわかってきた. このフォームは, ポリスチレンナノ粒子薄膜の隙間に液体の塩化スズを浸漬させてから, 固体のSnO₂に加水分解させ, ポリスチレンを熱分解させることによって得られた[79].

9. クラスターターゲット

原子クラスター蒸気や巨大分子は極短パルスレーザーに対するターゲットとして興味を持たれている. Ditmireらは, D-D反応が高压低温ガスジェットにより形成される10² - 10⁶分子のD₂クラスター中に極短パルスレーザーを照射して起こることを示した[80, 81]. こうしたクラスターターゲットは, 局所原子密度としては固体に近いものの, 平均密度は小さい. レーザー吸収効率は90%を超える. ここでは, 極短パルスレーザー光の強力な電場により電子がはぎ取られ, その後クーロン爆発によるイオン加速が起こる. イオンのエネルギーは1 MeVであり, D-D中性子が

10⁴個得られている.

クラスターターゲットは中性子源だけでなく, 高輝度X線源[82, 85], 高エネルギーイオン源[86]としての応用も研究されている.

10. 軽元素材料

NIFの間接照射爆縮についてシミュレーションされた結果, ベリリウムカプセルは流体力学的不安定性において炭化水素カプセルよりも固体重水素層内面の粗さに対する許容度が大きいと見積もられている[24]. ベリリウムおよびその銅合金のカプセル製法はロスアラモス研究所にて研究されている. 機械的研磨により半球が二つ作られ, アルミニウムによるハンダ付けが行われる[87]. ベリリウムのCVDはジアルキルベリリウムや, ビス(シクロペンタジエニル)ベリリウムを出発原料とする[88]. 最近リバモア研究所ではスパッタ法によってカプセルが製作された[89].

ベリリウムを含む軽元素のフォーム化も研究されている. ロシアでは0.1 g/cm³以下の低密度フォームが多孔質構造サイズ~10 μmで報告されている. 水素化ベリリウム, 重水素化ベリリウム, 水素化リチウムのフォームも得られている. 厚みの制御についても報告されている[90, 91].

11. レーザー光進入遮断材料

レーザー爆縮で最もカギとなるのが, 流体不安定性により高密度圧縮が妨げられることである. 直接照射方式では, レーザー光がターゲットに直接照射されるために, ターゲットのプラズマ化前の極初期過程ではレーザービームパターンの刻印や, ターゲット壁内部へのダメージが発生する(laser-shine-through). 前者は流体不安定性の成長核となるものである. 後者は高精度に製造されたターゲットに不規則な内部構造を与える(Fig. 18). こうした問題が生じないようなターゲット材料が研究された. 特に, カプセル材料の元素組成に近い有機材料で行なえば, 高Z元素でおこる先行加熱などの問題は起こらない. 例えば, 有機p-n半導体接合系であるベリレン誘導体(C₃₂H₁₆N₈)/フタロシアニン(C₃₆H₁₆O₄N₂)積層薄膜をポリスチレンに被覆するとそうした効果が得られる. この積層系は, ~

Irradiation of High Power Laser

-Amplification of initial perturbation-

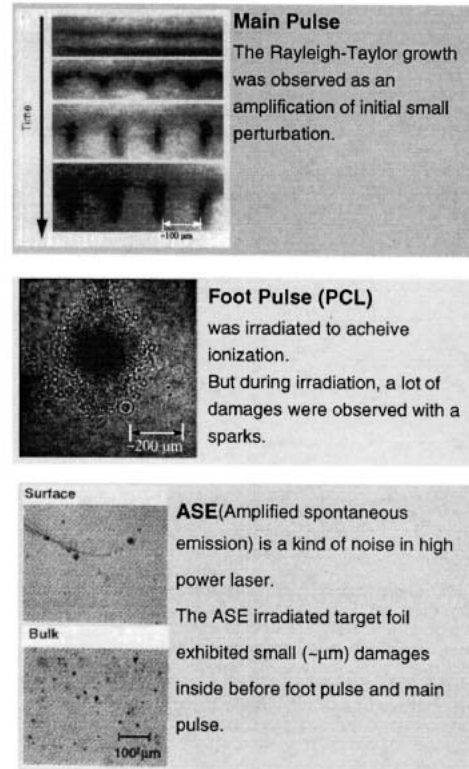
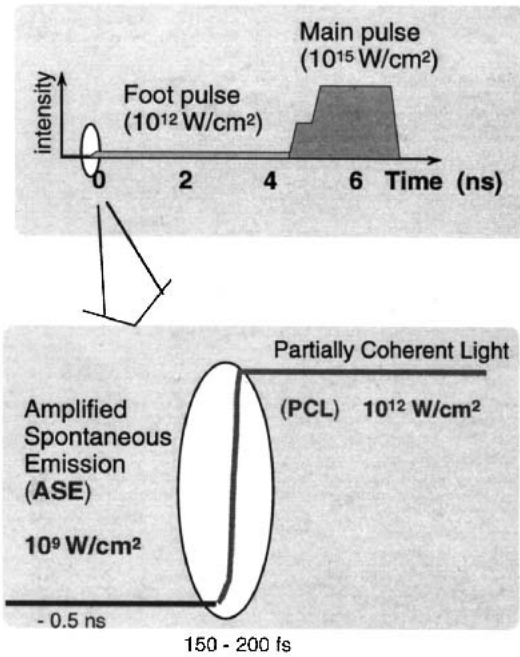


Fig. 18 Pulse shape of high power laser (left) and the perturbation growth of the capsule surface and damage generation in the capsule during laser irradiation.

mW/cm³の可視光照射で0.55 Vの起電力を与えることが知られている[92]. また, 自由電子が 150 ps 以内にペリレン層に生成する[93].

Fig. 19(a)は, 何も被覆しないポリスチレン膜に $10^9 \sim 10^{10}$ W/cm² の Nd - YAG レーザ基本波を照射した後の痕跡である. 無色透明なポリスチレン膜内部にダメージが発生している. このレーザ強度は, レーザ材料に見られるダメージ発生しきい値に近い値である. 一方ペリレン誘導体/フタロシアニン積層薄膜をポリスチレンに被覆した場合は, 有色の被覆薄膜のみが脱離し, ポリスチレン内部にはダメージはみられない(Fig. 19(b)). さらにレーザ強度を上げた場合は未被覆時にはダメージ面積が増すのに対して, 被覆時にはアブレーション深さが増していく. この機構を模式的に示したのが Fig. 20 である. 光起電力を発生するペリレン誘導体/フタロシアニン積層薄膜は暗時には絶縁体なので, 例えば実用炉のような高温に投入しても, 固体重水素の溶融を招く熱伝導性は高くない.

この二層系では光照射によって *n* 型半導体であるペリレン誘導体に自由電子が蓄積し, 近赤外光に対する反射を示すようになる. レーザ光に対しては吸収し, アブレーションが起こる. さらにアブレーションルームも不透明でポリスチレンを保護する働きがあると考えられる. このように時々刻々と性質を変えながらダメージ抑制に有利に働く性質を有しているインテリジェント材料と呼ぶことができる[94 96].

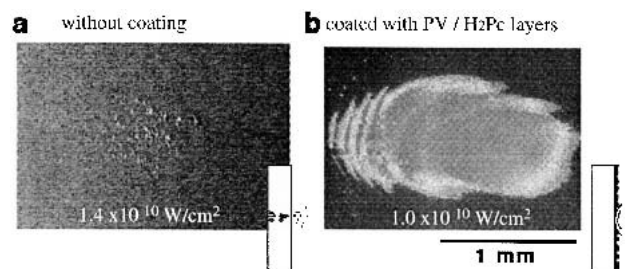


Fig. 19 Laser ablation trace of polystyrene film (4 μm thickness). 1,060 nm input beam in a 1.1 ns (full-width half-maximum) pulse with a 1/e² beam diameter of 750 μm.

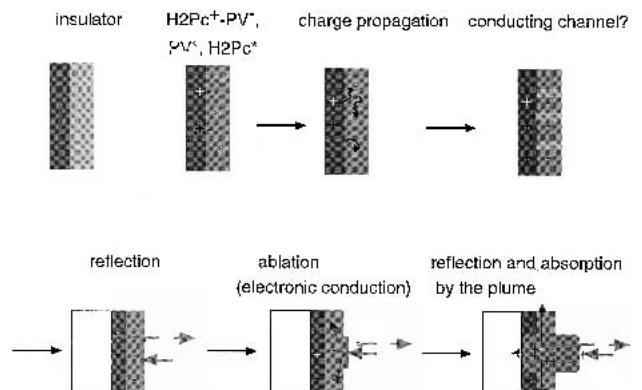


Fig. 20 Mechanism of uniform laser ablation utilizing organic photo-voltaic materials.

12. 磁気材料の利用

高密度圧縮のためにはレーザー光を球対称に照射することが必要であり、レーザー強度のバランスの対称化の努力がなされている。ターゲットを支持棒等で懸架することは対称性を落とす原因となる。カプセルに強磁性体（ニッケル）を被覆し、静磁力で懸架させる研究が岐阜大で行われてきた[97]。改良された装置“MINO-2”ではガスパフにより、ニッケル被覆カプセルが静磁場で補足される領域に浮上され、その後5 μm の精度で位置制御された[98]。間接照射用のホーラムターゲットに関しても、磁気懸架されている（Fig. 21）。

実用炉では、 $\sim 4\text{ Hz}$ の頻度でレーザー照射が必要となり、これに対応するレーザー照射位置へのターゲット射出が必要となる[99]。射出方法は空気銃方式と、コイル銃方式が研究されている。射出速度は200 m/sec程度である。実用炉内では、核融合プラズマや炉壁に由来する蒸気が、極低温のターゲットに吸着され、カプセル表面の不均一化が起こると懸念されている。それを均一化させるために、ターゲットにスピンを与える必要も指摘されている[100]。

磁気懸架、射出、スピン射出にはターゲットへ強磁性体を被覆し、静磁力を利用するのが一つの方法である。その

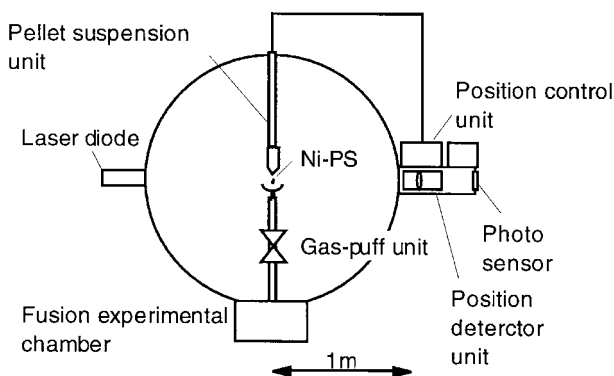


Fig. 21 Schematic diagram of magnetic suspension system for laser fusion target "MINO-2", where a nickel coated polystyrene capsule was magnetically centered within 5 μm accuracy. (Reference 97)

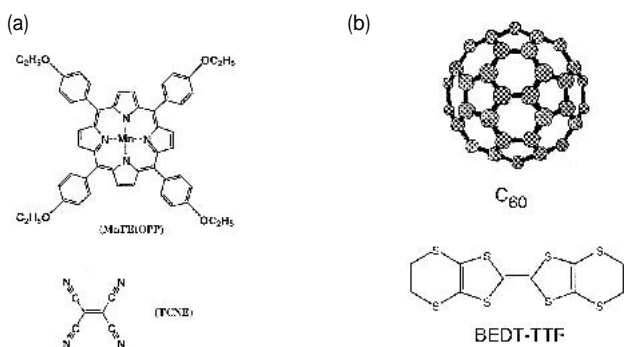


Fig. 22 Chemical structures of the hardest molecular based magnet of MnEtOPP/TCNE and organic superconductors of K_3C_{60} and BEDT-TTF derivatives.

後の爆縮では高Z原子材料が影響するので、低Z元素材料の強磁性体が好ましい。有機強磁性体材料は T_c が著しく低く、実用上の応用範囲を広くとれないが、レーザー核融合ターゲットは極低温燃料のために T_c 以下に置くことが可能になる。特に金属イオンを含む分子強磁性体には多くの新しい機能が知られている[101]。例えば、マンガンポルフィリン誘導体（Fig. 22(a)）のように、極めて磁気異方性の強い系では[102]、2テスラの保磁力を示すものも開発されている[104-105]。アルカリ金属ドープ C_{60} や、イオウを含むBEDT-TTF（Fig. 22(b)）などの有機超電導体も、有用な材料となる[106]。

13. まとめ

ここにレーザー核融合ターゲット製造に用いられる様々な微細加工技術について述べた。特に極低温環境を含む高真球カプセル製法、コーティング法、多孔質材料について総括的に述べた。また、様々な新材料の応用の可能性についても述べた。これらの技術の進歩とともに核融合点火、燃焼への厳しいレーザー技術条件や、炉設計条件が緩和されることが期待される。そのためには、ここで述べなかった新しい視点から生まれる微細加工法や新材料がこの分野に移転される必要があると予想される。それとともに、ここで生まれた材料加工技術や新材料がレーザー核融合以外の様々な分野に広がっていくことを願っている。

参考文献

- [1] 疇地 宏, 三間園興: 日本物理学会誌 58, 588 (2003).
- [2] J. Lindl, Phys. Plasma 2, 3933 (1995).
- [3] S.W. Haan, T. Dittrich, G. Strobel, S. Hatchett, D. Hinkel, M. Marinak, D. Munro, O. Jones, S. Pollaine and L. Suter, Fusion Sci. Technol 41, 164 (2002).
- [4] Proceedings of 15th target fabrication specialists' meeting, Gleneden Beach, June 1-5 2003, Fusion Sci. Technol. 45, (2004).
- [5] Proceedings of 14th target fabrication specialists' meeting, West Point, July 15-19 2001, Fusion Sci. Technol. 41, (2002).
- [6] Proceedings of 13th target fabrication specialists' meeting, Catalina Island, November 8-12 1999, Fusion Technol. 38, (2000).
- [7] Proceedings of 12th target fabrication specialists' meeting, Jackson Hole, April 19-23 1998, Fusion Technol. 35, (1999).
- [8] Proceedings of the second international atom energy agency technical meeting on physics and technology of inertial fusion energy targets and chambers, San Diego, June 17-19 2002, Fusion Sci. Technol. 43, (2003).
- [9] 激光 XII 号によるレーザー核融合研究の現状と展望, J. Plasma Fusion Res. 68, (1992).
- [10] "Research on High Energy Density Plasma and Their Applications", J. Plasma Fusion Res. 75, Sup. II (1999).
- [11] H. Azechi, T. Jitsuno, T. Kanabe, M. Katayama, K. Mima, N. Miyanaga, M. Nakai, S. Nakai, H. Nakaishi, M. Nakatsuka, A. Nishiguchi, P.A. Norrays, M. Takagi, M. Yamanaka and C. Yamanaka, Laser Part. Beams 9, 193 (1991).
- [12] U. Kubo and H. Tsubakihara, J. Vac. Sci. Technol. A4, 1134

- (1989).
- [13] M. Takagi, T. Norimatsu, T. Yamanaka and S. Nakai, J. Vac. Sci. Technol. A9, 2145 (1991).
- [14] T. Norimatsu, C.M. Chen, K. Nakajima, M. Takagi, Y. Izawa, T. Yamanaka and S. Nakai, J. Vac. Sci. Technol. A12, 1293 (1994).
- [15] T. Norimatsu, Y. Izawa, K. Mima and P.M. Gresho, Fusion Technol. 35, 147 (1999).
- [16] T. Norimatsu, T. Takaki, M. Nakajima, K. Nagai, Y. Izawa, K. Mima, Kobunshi Ronbunshu (Jpn J Polym Sci Technol) 56, 415 (1999).
- [17] P.M. Gresho, Fusion Technol. 35, 157 (1999).
- [18] K. Nagai, M. Nakajima, T. Norimatsu, Y. Izawa and T. Yamanaka, J. Polym. Sci. A Polym. Chem. 38, 3412 (2000).
- [19] A. Nikroo, J.M. Pontelandolfo and E.R. Castillo, Fusion Sci. Technol. 41, 220 (2002).
- [20] B.W. McQuillan and M. Takagi, Fusion Sci. Technol. 41, 209 (2002).
- [21] M. Takagi, R. Cook, R. Stephens, J. Gibson and S. Paguio, Fusion Technol. 38, 46 (2000).
- [22] M. Takagi, R. Cook, B. McQuillan, F. Elsner, R. Stephens, A. Nikroo, J. Gibson and S. Paguio, Fusion Sci. Technol. 41, 278 (2002).
- [23] 高木 勝, 乗松孝好, 山中龍彦, 中井真雄: 高分子論文集 48, 41 (1991).
- [24] M.M. Marinak, S.W. Haan, T.R. Dittrich, R.E. Tipton and G.B. Zimmerman, Phys. Plasmas 5, 1125 (1998).
- [25] F.-Y. Tsai, D.R. Harding, S.-H. Chen, T. N Blanton and E. L. Alfonso, Fusion Sci. Technol. 41, 178 (2002).
- [26] S.A. Letts, A.E. H. Nissen, P.J. Orthion, S.R. Buckley, E. Fearon, C. Chancellor, C.C. Roberts, B.K. Parrish and R. C. Cook, Fusion Sci. Technol. 41, 268 (2002).
- [27] K. Nagai, T. Takaki, T. Norimatsu and T. Yamanaka, Macromol. Rapid Commun. 22, 1344 (2001).
- [28] K. Nagai, T. Norimatsu, Y. Izawa and T. Yamanaka, Proc. SPIE 5228, 712 (2003).
- [29] K.K. Mishra, R.K. Khardekar, R. Singh, H.C. Pant, N.G. Borisenko, A.I. Gromov and Ju. A. Merkul'ev, Plasma Phys. Control. Fusion 43, 1723 (2001).
- [30] R. Tsuji and Y. Ogushi, Fusion Eng. Design. 34, 811 (1997).
- [31] S.A. Letts, E.M. Feason, S.R. Buckley, M.D. Saculla, L.M. Allison and R. Cook, Fusion Technol. 28, 1797 (1995).
- [32] 長田義仁編著: プラズマ重合 (東京化学同人, 1986) .
- [33] A. Nikroo, J.M. Pontelandolfo and E.R. Castillo, Fusion Sci. Technol. 41, 220 (2002).
- [34] A. Nikroo, D.G. Czechowics, E.R. Castillo and J.M. Pontelandolfo, Fusion Sci. Technol. 41, 214 (2002).
- [35] S. Sudo, N. Tamura, K. Khlopenkov, S. Mutoh, H. Funaba, I. Viniar, V. Sergeev, K. Sato, K. Ida, K. Kawahata, A. Komori, K. Matsuoka, K. Narihara, S. Okamura, N. Ohyabu, K. Tanaka and O. Motojima, Plasma Phys. Control. Fusion 44, 129 (2002).
- [36] C. Yamanaka and S. Nakai, Nature 319, 757 (1986).
- [37] T. Norimatsu, H. Tajima, M. Takagi, S. Nakai and C. Yamanaka, J. Vac. Sci. Technol. A6, 2552 (1988).
- [38] M.L. Hoppe, Fusion Sci. Technol. 41, 234 (2002).
- [39] H. Katayama, T. Norimatsu, Y. Kato, T. Yamanaka and S. Nakai, Appl. Phys. Lett. 55, 2660 (1989).
- [40] H. Katayama, T. Norimatsu, C. Chen, T. Yamanaka, S. Nakai and Y. Nishino, J. Vac. Sci. Technol. A9, 2140 (1991).
- [41] A. Richard, K.A. Tanaka, K. Nishihara, M. Nakai, M. Katayama, Y.O. Fukuda, T. Kanabe, Y. Kitagawa, T. Norimatsu, M. Nakatsuka, M. Kado, T. Kawashima, C. Chen, M. Tsukamoto and S. Nakai, Phys. Rev. E 49, 1520 (1994).
- [42] C. Stepecki, C. Chiritescu, J.A. Delettrez, R. Epstein, V. Yu. Glebov, D.R. Harding, R.L. Keck, S.J. Loucks, L.D. Lund, R.L. McCrory, P.W. McKenty, F.J. Marshall, D.D. Meyerhofer, S.F.B. Morse, S.P. Regam, P.B. Radha, S. Roberts, T.C. Sangster, W. Seka, S. Skupsky, V.A. Smalyuk, C. Sorce, J.M. Soures, R.P. J. Town, J.A. Frenje, C.K. Li, R.D. Petraso, F.H. Seguin, K. Fletcher, S. Paladino, C. Freeman N. Izumi, R. Lerche and T.W. Phillips, Phys. Plasma 9, 2195 (2002).
- [43] M.T. Mruzek, J.S. Ankney and D.N. Decker, J. Vac. Sci. Technol. A6, 1889 (1988).
- [44] C.M. Chen, T. Norimatsu, Y. Izawa, T. Yamanaka and S. Nakai, J. Vac. Sci. Technol. A13, 2908 (1995).
- [45] T. Norimatsu, M. Takagi, Y. Izawa, T. Yamanaka and K. Mima, in *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Fusion Energy Organized by the International Atomic Energy Agency, Montreal, Canada, October, 1996, pp171*.
- [46] E.R. Mapoles, J. Sater, J. Pipes and E. Monsler, Phys. Rev. E 55, 3473 (1997).
- [47] G.M. Collins, D.N. Bittner, E. Monsler, S. Letts, E.R. Mapoles and T.P. Bernat, J. Vac. Sci. Technol. A14, 2897 (1996).
- [48] D.N. Bittner, G.W. Collins, E. Monsler and S. Letts, Fusion Technol. 35, 244 (1999).
- [49] L. Phillips, J.H. Gardner, S.E. Bodner, D. Colombant, S.P. Obenschain, A.J. Schmitt AJ, Dahlburg JP, Lehecka T, Klapisch M and A. Bar-Shalom, Laser Particle beams 17, 225 (1999).
- [50] I.V. Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov, E.R. Koresheva, I.E. Osipov, in *proceeding of Inertial Fusion Science and Applications 2001*, pp. 762, Elsevier 2002.
- [51] D. Chatain, V.S. Nikolayev, Cryogenics 42, 253 (2002).
- [52] B.J. Kozioziemski, R.L. McEachern, R.A. London and D. N. Bittner, Fusion Sci. Technol. 41, 296 (2002).
- [53] F.R. Powell, Fusion Sci. Technol. 45, 197 (2004).
- [54] T. Endo, K. Shibata, K. Kobayashi, M. Yasuda, Y. Fujima and T. Norimatsu, Fusion Sci. Technol. 41, 248 (2002).
- [55] T. Endo, K. Kobayashi, K. Goto, M. Yasuda and Y. Fujima, Fusion Sci. Technol. 43, 270 (2003).
- [56] R. Kodama, P.A. Norris, K. Mima, A.E. Dangor, R.G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S.J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K.A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka and M. Zepf, Nature 412, 798 (2001).
- [57] R. Kodama and the Fast-Ignitor Consortium, Nature 418, 933 (2002).
- [58] R. Kodama, K. Mima, Y. Izawa, K.-A. Tanaka, Y. Kitakawa, N. Miyanaga, T. Fujita, T. Norimatsu, H. Nishimura, K. Shigemori, Y. Sentoku and T. Yamanaka, J. Plasma Fusion Res. 78, 792 (2002).
- [59] K. Nagai, T. Norimatsu, Y. Izawa and T. Yamanaka, Proc. SPIE 5228, 712 (2003).
- [60] T. Norimatsu, K. Nagai and T. Yamanaka, T. Endo, H.

- Yoshida and Y. Sakagami, *Fusion Eng. Design* 63, 587 (2002).
- [61] 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 (苫米地顕委員長), 「レーザー核融合エネルギー開発の進め方」IFE フォーラム, レーザー核融合技術振興会 2003.
- [62] 田中和夫, 近藤建一, 吉田正典: 日本物理学会誌 56, 338 (2001).
- [63] K. Nagai, T. Norimatsu, T. Yamanaka, T. Nishibe, N. Ozaki, K. Takamatsu, T. Ono, M. Nakano and K.A. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* 41 L1186, (2002).
- [64] K. Takamatsu, N. Ozaki, K.A. Tanaka, T. Ono, K. Nagai, M. Nakai, T. Watari, A. Sunahara, M. Nakano, T. Kataoka, H. Takenaka, M. Yoshida, K. Kondo and T. Yamanaka, *Phys. Rev. E*, 67, 056406, (2003).
- [65] N. Husing and U. Schubert, *Angew. Chem. Int. Ed.* 37, 22 (1998).
- [66] T. Norimatsu, K. Nagai, T. Takaki and T. Yamanaka, *Fusion Eng. Design* 55, 387 (2001).
- [67] M. Takagi, M. Ishihara, T. Norimatsu, Y. Izawa and S. Nakai, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11, 2837 (1993).
- [68] M. Takagi, T. Norimatsu, T. Yamanaka and S. Nakai, *J. Vac. Sci. Technol. A* 9, 820 (1991).
- [69] N. Miele-Pajot, L.G. Hubert-Pfalzgraf, R. Papiernik, J. Vaissermann and R. Collier, *J. Mater. Chem.* 46, 37 (1999).
- [70] J. Streit and D. Schroen, *Fusion Sci. Technol* 43, 321 (2003).
- [71] S.M. Lambert, G.E. Overturf, G. Wilemski, S.A. Letts, D. Schroen-Carey and R.C. Cook, *J. Appl. Polym. Sci.* 65, 2111 (1997).
- [72] K. Okada, S. Sakabe, H. Shiraga, T. Mochizuki and C. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* 21, L257 (1982).
- [73] W.L. Perry, R.C. Dye, P.G. Apen, L. Foreman and E. Peterson, *Appl. Phys. Lett.* 66, 314 (1995).
- [74] I.G. Schneir and B. McQuillan, *Fusion Technol.* 28, 1849 (1995).
- [75] M.A. Mitchell, P. Gobby and N. Elliott, *Fusion Technol.* 28, 1844 (1995).
- [76] K. Nagai, B.-R. Cho, Y. Hashishin, T. Norimatsu and T. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, L431 (2002).
- [77] K. Nagai, T. Norimatsu and Y. Izawa, *Fusion Sci. Technol.*, 45, 79 (2004).
- [78] S. Okihara, T. Zh. Esirkepov, K. Nagai, S. Shimizu, F. Sato, T. Iida, K. Nishihara, T. Norimatsu, Y. Izawa, S. Sakabe, *Phys. Rev. E* 69, 026401 (2004).
- [79] K. Nagai, H. Nishimura, T. Okuno, T. Hibino, R. Matsui, Y.-Z. Tao, M. Nakai, T. Norimatsu, N. Miyanaga, K. Nishihara and Y. Izawa, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* 29, in press (2004).
- [80] J. Zweiback, R.A. Smith, T.E. Cowan, G. Hays, K.B. Wharton, V.P. Yanovsky and T. Ditmire, *Phys. Rev. Lett.* 84, 2634 (2000).
- [81] T. Ditmire, J. Zweiback, V.P. Yanovsky, T.E. Cowan, G. Hays and K.B. Wharton, *Nature* 398, 489 (1999).
- [82] A. McPherson, B.D. Thompson, A.B. Borisov, K. Boyer, C.K. Rhodes, *Nature* 370, 631 (1994).
- [83] T. Ditmire, T. Donnelly, R.W. Falcone and M.D. Perry, *Phys. Rev. Lett.* 75, 3122 (1995).
- [84] T. Ditmire, J.W. G. Tisch, E. Sprigate, M.B. Mason, N. Hay and R.A. Smith, *Nature* 386, 54 (1997).
- [85] K. Kondo, M. Mori and T. Shiraishi, *Appl. Surf. Sci.* 197, 138 (2002).
- [86] M. Lezius, S. Dobosz, D. Normand and M. Schmidt, *Phys. Rev. Lett.* 80, 261 (1998).
- [87] R. McEachen, C. Alford, J.P. Armstrong and R. Gallix, *Proceedings of 15th target fabrication specialists' meeting*, Gleneden Beach, June 1-5 2003.
- [88] K.V. Salazar, S.G. Pattillo, M. Trkula, *Fusion Technol.* 38, 69 (2000).
- [89] R.W. Margevicius, *Fusion Sci. Technol.* 41, 286 (2002).
- [90] N.G. Borisenko, V.M. Dorogotovsev, A.I. Gromov, S. Yu. Guskov, Yu. A. Markushkin, N.A. Chirin, A.K. Shikov and V.F. Petrunin, *Fusion Technol.* 38, 161 (2000).
- [91] Yu. A. Markushkin, V.V. Gorlevsky and V.F. Petrunin, *J. Moscow Phys. Soc.* 8, 373 (1998).
- [92] T. Morikawa, C. Adachi, T. Tsutsui and S. Saito, *日本化学会誌* 1990, 962 (1990).
- [93] K. Nagai, Y. Fujimoto, H. Shiroishi, M. Kaneko T. Norimatsu and T. Yamanaka, *Chem. Lett.*, 2001, 354 (2001).
- [94] K. Nagai, T. Norimatsu, N. Miyanaga and T. Yamanaka, *Fusion Sci. Technol.* 41, 257 (2002).
- [95] K. Nagai, K-i. Morishita, H. Yoshida, T. Norimatsu, N. Miyanaga, Y. Izawa and T. Yamanaka, *Synth. Met.* 121, 1445 (2001).
- [96] K. Nagai, H. Yoshida, T. Norimatsu, N. Miyanaga, Y. Izawa and T. Yamanaka, *Appl. Surf. Sci.* 197, 808 (2002).
- [97] Y. Sakagami, H. Yoshida, R. Itou, T. Terasawa and T. Fuseya, in *Proceedings of Inertial Fusion Science and Applications 2001 pp.819*, Elsevier 2002.
- [98] H. Yoshida, Y. Sakagami, Y. Hasegawa and T. Fuseya, in *Proceedings of Inertial Fusion Science and Applications 2001 pp.819*, Elsevier 2002.
- [99] D. Goodin, N.B. Alexander, C.R. Gibson, A. Nobile, R.W. Petzoldt, N.P. Siegel and L. Thompson, *Nucl. Fusion* 41, 527 (2001).
- [100] M. Murakami, K. Nishihara and T. Norimatsu, *IFSA 2003 proceedings*, in press.
- [101] 佐藤 治: 固体物理 38, 72 (2003).
- [102] K. Nagai, T. Iyoda, A. Fujishima and K. Hashimoto, *Chem. Lett.* 1996, 591 (1996).
- [103] K. Nagai, T. Iyoda, A. Fujishima and K. Hashimoto, *Solid State Commun.* 102 (1997) 809.
- [104] K. Nagai, L. Jiang, T. Iyoda, A. Fujishima and K. Hashimoto, *Thin Solid Films* 331, 165 (1998).
- [105] 長井圭治, 彌田智一, 藤嶋 昭, 橋本和仁: 固体物理 32, 897 (1997).
- [106] 齊藤軍治: 有機導電体の化学 - 半導体, 金属, 超伝導体 (丸善, 2003).