

レーザー核融合(ミニ太陽)ターゲットの表面技術

長井 圭治*, 乗松 孝好*

*大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6)

Laser Fusion Target and Surface Technology

Keiji NAGAI* and Takayoshi NORIMATSU*

*Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6, Yamada-oka, Suita-shi, Osaka 565-0871)

Key Words : Laser Fusion, Fuel Target, Microcapsule, Low Density Foam, Photovoltaic Materials

1. はじめに

核融合反応(D+T → n+⁴He)により17メガ電子ボルト(MeV)のエネルギーが発生する。この核融合反応の燃料となる重水素(D)および三重水素(T)を固定化した球殻状のターゲットが用いられ、エネルギー密度の高いレーザー光をターゲットに照射して、超高密度、超高温のプラズマを生成して核融合反応を起こさせる。レーザー核融合では、直径2ミリメートルの球殻状固体重水素、三重水素(DT)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直径~100マイクロメートル程度の微小の超高密度プラズマが生成し、核融合点火を実現できると期待されている¹⁾。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。阪大で考案された高速点火方式²⁾によれば、50kJレーザーに50kJの極短パルスレーザーを付加させることにより、核融合点火が起こる³⁾。核融合燃焼プラズマからは荷電粒子などの量子線が放出され、これを炉壁で回収して発電するのがレーザー核融合発電であり、概念設計もされている⁴⁾。最近の水素エネルギー社会⁵⁾の構築が提案されているが、その水素源に米国ではレーザー核融合も候補に挙げられている⁶⁾。レーザー照射またはターゲット形状の摂動により、超高密度プラズマの最大圧縮密度が低下し、点火しない。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り、米国では、Target Fabrication Meetingが1年半毎に開催され、その内容はプロシーディングにまとめられている^{7)~10)}。レーザー核融合ターゲット技術には材料技術、極低温技術、三重水素取扱技術などが含まれるが、表面技術には前二者が関連すると考えられるのでそれらを中心に述べる。

2. レーザー核融合ターゲットの表面平滑性

2.1 エマルジョン法によるプラスチックカプセル

プラスチックカプセルは、レーザー核融合研究のマイル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、(たとえば水と油の)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、レーザー核融合では高密度圧縮に致命的となる気泡などの欠陥のないカプセルを得ることはこの重合法では容易でない。高い真球性や高い壁厚の一様性を有するカプセル、特に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開発されたものである^{11),12)}。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。エマルジョンの油相は、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、溶媒の散逸によって残留した高分子がカプセル化する。この方法では、通常のコロイドによるマイクロカプセル法に比べて、重合反応中の密度変化の影響や単量体の水和の影響が回避される。この方法により、ポリスチレンカプセルや、ポリメチルメタクリレート誘導体について、このエマルジョン法で高真球カプセルが製造される。図1(a)はその一例である。直径が500μm~7mm、壁厚は直径500μmの場合で7μm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^{12),13)}。表面の平滑性は~10nm程度である。

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(~4Hz)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。ここで紹介したエマルジョン法は液滴製造装置図1(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数百個以上の個数で分散サイズに得ることが可能である^{14),15)}。

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かく拌が、油相厚みを一様と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かく拌されて、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

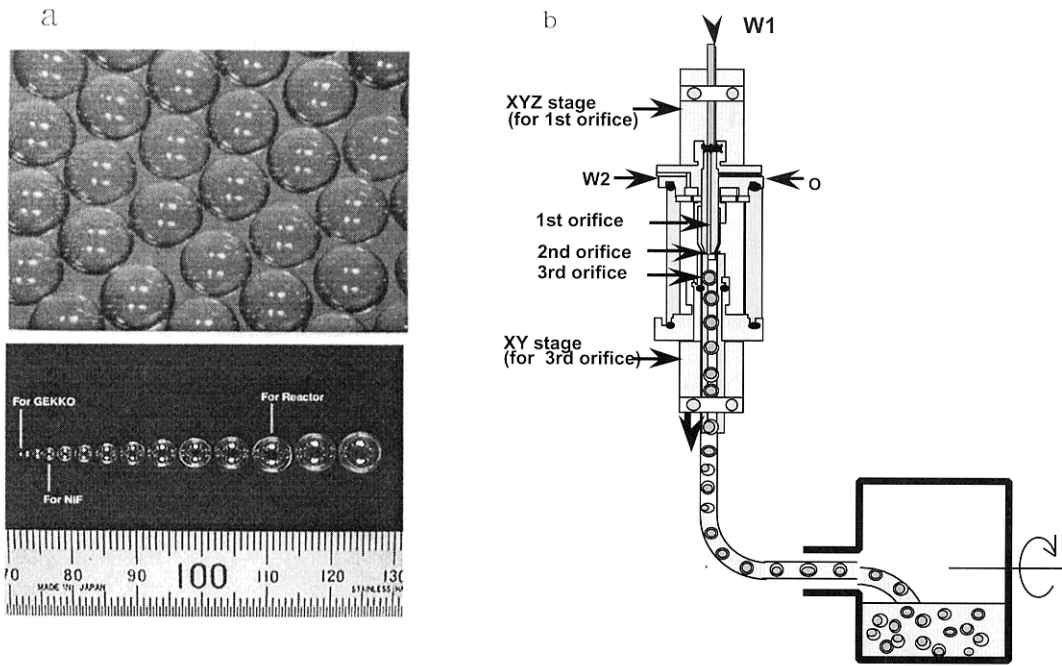


図1 密度整合エマルジョン法により製作されたカプセル(a)と単分散サイズエマルジョン製作器(b)

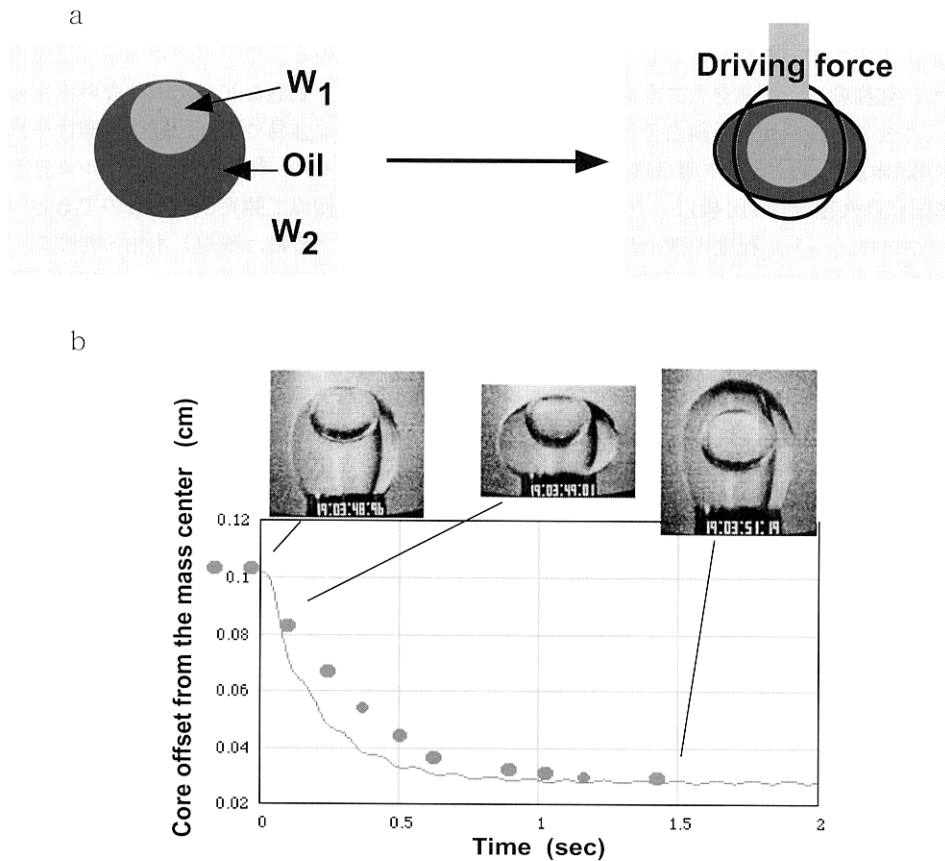


図2 エマルジョンに対する変形力の模式図(a)と、内水相の中心への移動に関するモデル実験とシミュレーション結果(b)。図の縦軸は内水相の中心とエマルジョン全体の中心との距離であり、横軸は変形を与えた時間である。

介して内部水相に働く図2(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、水相核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(図2(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、 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa s}$ である。モデル計算は実線のようにであり、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

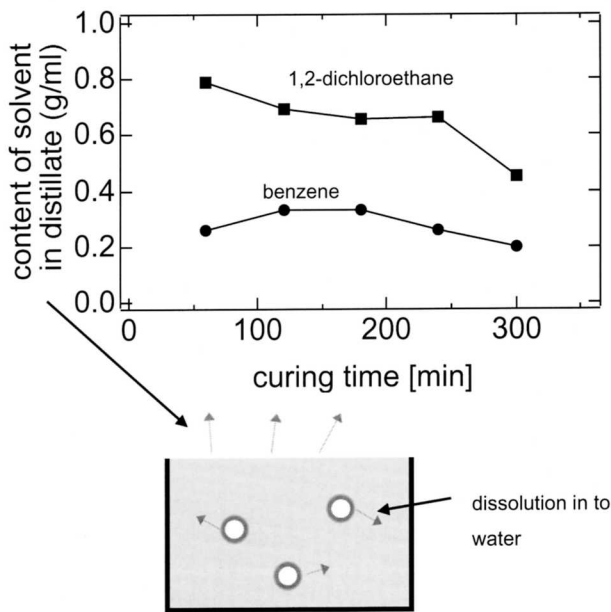


図3 エマルジョン乾燥過程における、留出した溶媒(ベンゼンと1,2-ジクロロエタン混合)の回収量の時間経過。沸点のやや高い1,2-ジクロロエタン($\sim 83^{\circ}\text{C}$)が低いベンゼン($\sim 80^{\circ}\text{C}$)よりも先に留出始めることから、水への溶解性が乾燥過程に重要なことを示している。

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^{14)~16)}。

レーザー核融合用プラスチックカプセルでは、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(図3¹⁷⁾)。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/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て成分比の変わらない(つまり密度の変わらない)ようにしていた。実験事実は溶媒の水相への移動は比較的低温で起こることを示した。溶解による油相の溶媒の減少によりゲル化が起こり、油相は運動を止める。上に述べたように中心力によって壁厚の均一性が高められるので、この時刻までに中心に寄せる必要がある。

次節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、Glow Discharge Polymer(GDP)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れたポリスチレン誘導體(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作製される。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分かっている。つまり、GDP被覆過程において表面平滑性はごくわずかだけ劣化が起こるので、極めて平滑なPAMSカプセルが必要となる¹⁸⁾。

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)における点火に重大な悪影響を与える。PAMSカプセルにはモード7~20にあたる周期の表面粗さが $\sim 30\text{nm}$ 程度の

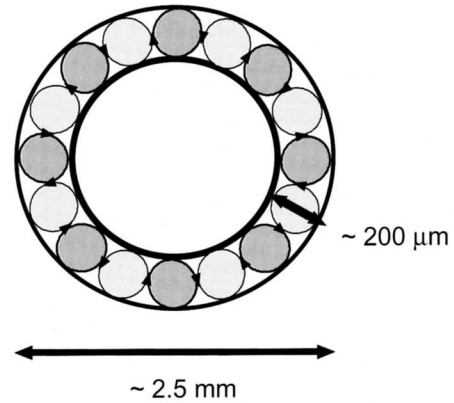


図4 直径2.5mmのPAMSカプセルはモード7~20の真球からの逸脱を示した。これは、図のようなMarangoni対流によって説明できる。

高さで見られた。このモードは図4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¹⁹⁾。

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。高木らは高分子量アクリル酸の低濃度溶液($\sim 0.1\text{wt}\%$)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(数 μm 径、数十nm高さ)の問題が生じ、GDPコートした場合にも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作製した場合よりも低下した。そのため、エマルジョンの油相のPAMS濃度が高まり、ゲル化して、カプセルの形作られた段階で、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の要求する条件に合致する平滑性となった^{20),21)}。

以前は、ポリスチレン誘導體(PAMSを含む)と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(図5)。ポリイミドカプセルは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²²⁾、CVD(Chemical Vapor Deposition)法による製作法が研究されている^{23),24)}。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乾燥させることで5~0.5mmの直径のポリアミド酸カプセルが製作された^{25),26)}。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。

2.2 コーティング法によるプラスチックカプセル

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²⁷⁾。

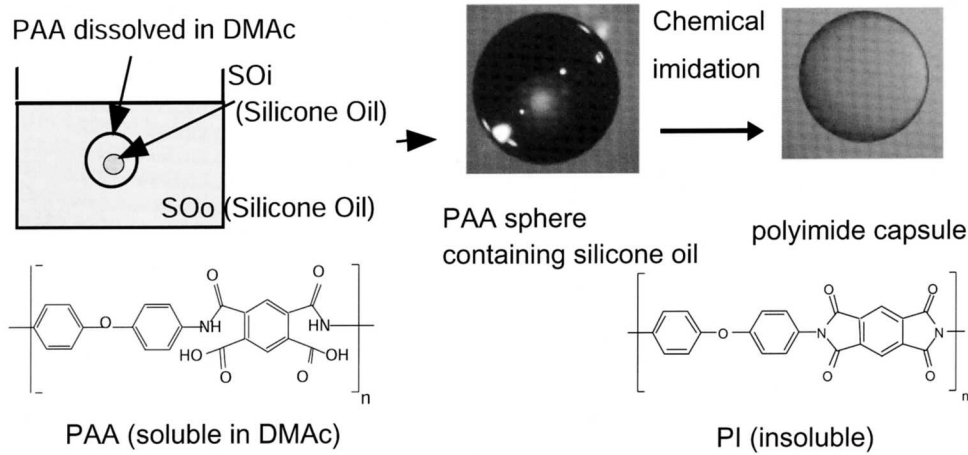


図5 ポリイミドカプセルは、エマルジョン法によっても得られた。まず溶媒(DMAc)に可溶なポリアミド酸をエマルジョン法によりカプセル化し、化学イミド化によってポリイミドカプセルとした。ポリイミドカプセルはポリジメチルシロキサンを内包する。

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、有機ラジカルを形成させる。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(Chemical Vapor Deposition)にあたる。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(図5)。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(pan)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で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、それ以下についてはルーチン的に製作されている。

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²⁹⁾。厚みは可能なかぎり薄いものが求められるが、1000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吸収分光法(FT-IR)により見積もられた。一方標準的な方は水素/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。但し、強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、フリーラジカルが酸素と結合するためと考えられている。

CVD法によるポリイミドカプセルの製作がNIF向けに進められている^{23),24)}。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、はく離が考えられた。10 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の高速蒸着が抑制に効果的であり、これ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粗さのカプセルが得られている。

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、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²³⁾。

粗さは、低次(2～20)モードについては、多少の加熱によって減少する。しかし、高次モード(突起物のような)については90～140度への加熱によって増加する²⁴⁾。

2.3 極低温重水素カプセル

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。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。極低温中空ターゲットは低密度フォーム法により、10年前に開発され、基礎実験に用いられた^{29),30)}。フォームを用いない極低温ターゲットの爆縮実験は最近、ロチェスター大学にて行われた³¹⁾。

重水素、三重水素(DT)燃料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。

まず、 β -加熱法はトリチウムのベータ壊変にともなう熱を利用して、DTを充填し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。ここで、トリチウムは水素の放射性同位体(半減期、12.3)であり、ベータ崩壊($T \rightarrow 3\text{He} + e^-$)により、最大エネルギー(19 keV)のベータ線(電子線)を放出する。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に蒸発量が多くなる。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

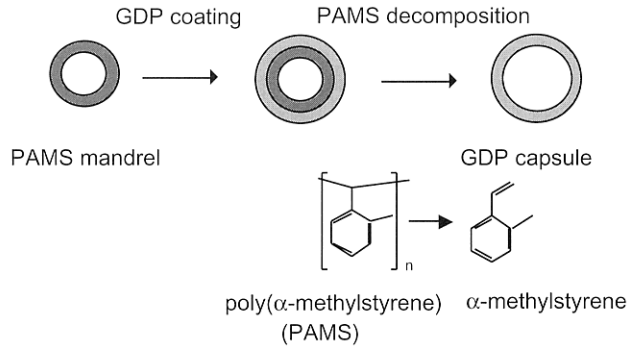


図6 PAMS(poly(α -methylstyrene)) 鑄型カプセルを利用する GDP(glow discharge polymer)の製造

り均一に再分配される。再分配速度は $d\delta/dt = -\delta/\theta_{TC}$ (但し $\delta = DT$ 固体厚み) に従い、その時定数 θ_{TC} は ~ 1500 s となる³²⁾。 β -加熱法の欠点は、時間経過とともに ^3He 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、外部からの加熱が必要となる。

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(図6)^{33),34)}。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より容易に加熱されることを明らかにした³⁶⁾。

赤外線加熱法はさらに有力な手段である。 D_2 に対しては $3.15\mu\text{m}$ 、HD に対しては $2.57\mu\text{m}$ が照射される。これは水素分子の伸縮振動に帰属される³⁶⁾。 $150-250\mu\text{m}$ 厚の HD 層は三重点付近で形成され、表面粗さ rms は $1-3\mu\text{m}$ の範囲であり、温度を下げるほどに粗くなった。等温冷却された DT 固体を加熱すると、 β -加熱法同様に固体 DT 層が均一となった。固体成長の過程は得られる層状固体の均一性の因子となる。固体層をゆっくり($\sim 0.1\text{K}/\text{min}$)溶融状態から成長させるほど表面は平滑になった³⁷⁾。 D_2 の場合において、赤外線照射量は三重点 18.72K の 0.5K 以下では、 $\sim 50\text{mW}/\text{cm}^2$ 、 0.1K 以下では $\sim 25\text{mW}/\text{cm}^2$ となった。

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

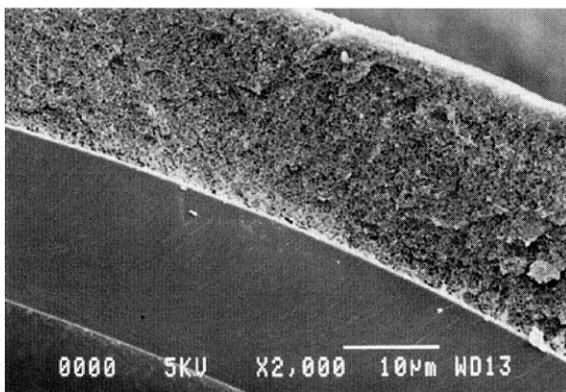


図7 アクリル酸マクロモノマーを原料として作製された、クライオ重水素ターゲット用フォームカプセルの断面図。

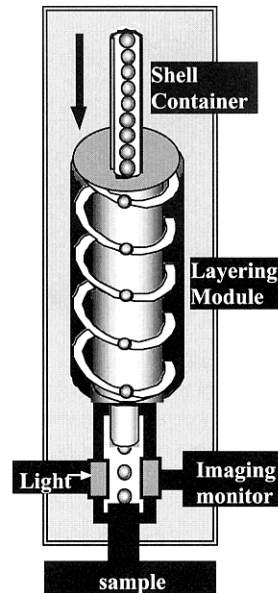


図8 ロシアの Lebedev 研により開発された、自立型クライオ重水素球殻の製造装置、重水素は極低温装置の中で回転を受けて、球殻化する。これまでの方法と異なり、ターゲットの固定なしに、ミリサイズの球殻重水素を製造する。(文献 39)

動の問題を完全に回避できないといわれており、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。クライオフォーム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(図7)。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、最近 Bordner らはこれがレーザー光の吸収率の増大を起し、高密度に爆縮されることを指摘している³⁸⁾。

今まで述べた方法は、カプセルが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。無支持ターゲット (free standing targets, FST) は次の課題であり、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、 $0-100\mu\text{m}$ 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(図8)³⁹⁾。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。たとえば、 H_2 に HD を 1% 以下ドーピングすることにより、 $500\mu\text{m}$ 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 $16-20\text{K}$ の昇温降温を繰り返しても透明を維持しているという。

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。たとえば、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^{40),41)}。

3. 表面機能のレーザー核融合への応用

3.1 コーンガイド型レーザー核融合ターゲット

高速点火方式では、核融合点火に必要な密度(固体密度の

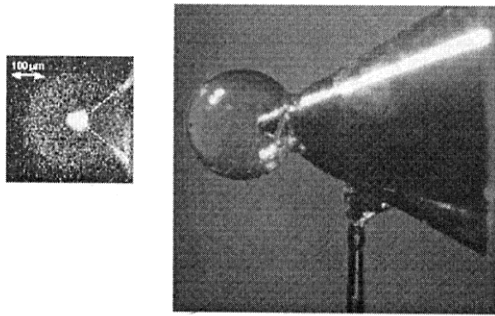


図9 金円すいガイド型高速点火ターゲットの爆縮時の X 線イメージ(a)。カプセル部分は poly(d 8-styrene) からなり、直径 $500\mu\text{m}$ 、厚み $7\mu\text{m}$ (b)。このターゲットを用いて、爆縮プラズマへの追加加熱が実証された。

2000 倍)、温度(1 億度)を二つの異なる種類のレーザーで実現させるため、NIF の $1/10$ のレーザーエネルギーで点火が可能となる⁴²⁾。大阪大学においてはコーンガイド型ターゲットを用いた実験において、固体密度の 60 倍のプラズマに 1 千万度までの追加加熱が実証されている^{43),44)}。この実験に用いられたターゲットの構造を図 9 に示す。金の円すいはレーザー光を高エネルギー電子や高エネルギーイオンに変換する機能を有する。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めっきすることにより製作された⁴⁵⁾。金円すいの先端の厚みを薄くする場合には、二回に分けてめっきが行われる。この際一回目のめっき後に先端のみが有機単分子膜で被覆され、二回目のめっき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球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。

3. 2 レーザー核融合ターゲット表面修飾による機能化

レーザー爆縮で高密度プラズマを得るための最大の障壁は流体不安定性により、ターゲットの球対称圧縮が妨げられることである。レーザー光がターゲットに直接照射される場合、

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。後者は高精度に製作されたターゲットに不規則な内部構造を与える。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、高原子番号元素でおこる X 線発生や先行加熱などの問題が起こらない。

たとえば、有機 p-n 半導体接合系であるペリレン誘導体($\text{C}_{32}\text{H}_{18}\text{N}_8$)/フタロシアニン($\text{C}_{36}\text{H}_{16}\text{O}_4\text{N}_2$)積層薄膜⁴⁶⁾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 $\sim\text{mW}$ の可視光照射で、 0.55V の起電力を発生することが知られている。また、蛍光を示すペリレン誘導体が、フタロシアニンを積層するだけで消光作用を示すことから、極めて速い(ペリレン誘導体の蛍光寿命、 150ps 以内)光誘起電荷分離が起こることが分かっている⁴⁷⁾。

図 10(a)は、何も被覆しないポリスチレン膜に $10^9\sim 10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$ の Nd-YAG レーザー基本波を照射した後の痕跡である。膜内部にダメージが発生している。このレーザー強度は、レーザー材料に見られるダメージ発生閾値に近い値である。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には、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発生しない。さらにレーザー強度を上げた場合に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ゆく。この機構を模式的に示したのが図 11 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、たと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。

光照射によってはじめて、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。レーザー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

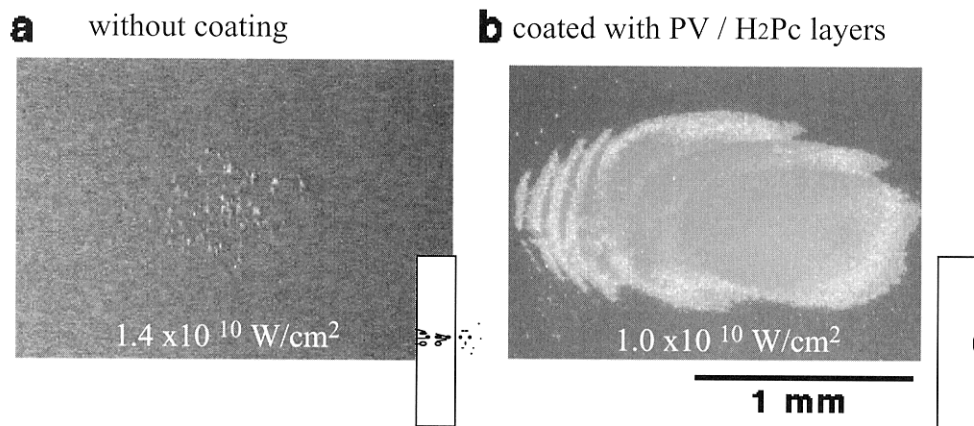


図 10 ポリスチレン膜のアブレーション跡(a)とペリレン/フタロシアニン積層膜をコートしたポリスチレン膜のアブレーション跡(b)。ともに Nd-YAG 基本波 1064nm 、 1.1ns (full-width half-maximum)が照射された。(a)膜内部にダメージが生じているが、(b)ではポリスチレンにダメージがない。強度を上げた場合にはコートした場合には上流側からのアブレーションが観察された。

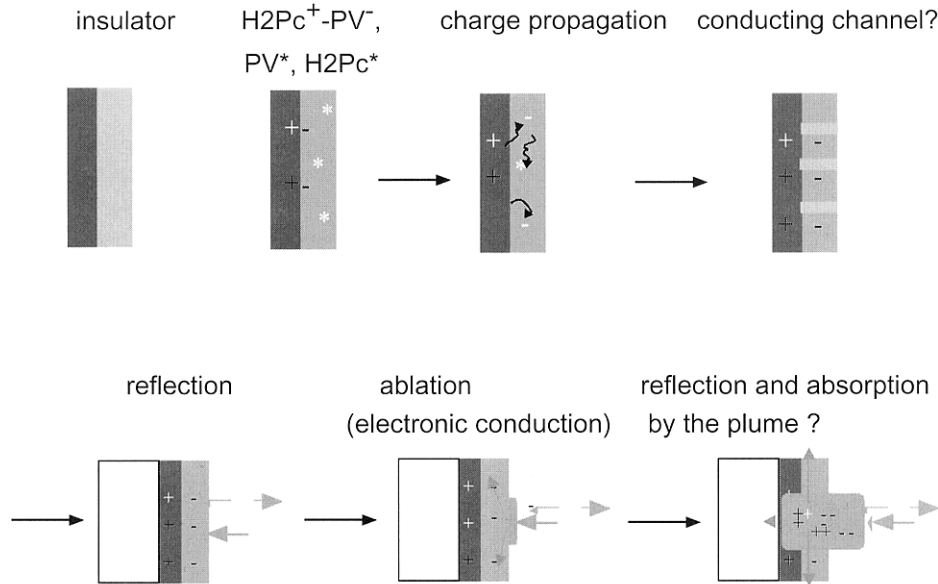


図 11 光起電力発生材料を被覆した場合の模式図。暗時には絶縁体であり、固体重水素を高温の炉による溶融から守る。弱い光で電荷分離が起こり、ペリレン誘導体相に自由電子が蓄積される。自由電子は近赤外光を反射する。アブレーションが起こると、その自由電子のために面内に電子伝導を起こし、外表面からのアブレーションとなる。ポリスチレン内部にダメージの起こらないことから、アブレーションルームは十分に電離してレーザー光を反射し、ポリスチレン(および固体重水素)へのダメージ抑制機能があると考えられる。

るインテリジェント材料と呼ぶことができる^{48)~50)}。

3. 3 レーザーターゲット用極低密度多孔質プラスチック

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、さまざまな組成、密度、マイクロ構造のものが求められ、製作されている。

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。一つは、揮発性溶媒との混合による発泡、縮重合における脱離分子の発泡といった発泡法であり、二番目は、凍結溶媒の昇華による凍結脱気法であり、三番目は化学ゲル、物理ゲルから、超臨界流体二酸化炭素で溶媒を除くエアロゲル法である。前二者は比較的セルサイズが大きく、(〜10 μ m)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。三番目のエアロゲル法は微細構造を与えるが、材料に制限がある。表1にこの方法の適用が可能な有機材料を集めた。PMPは広い範囲の密度を与えるが、カプセル形成は容易でない。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年代にクライオフォーム材料として開発された^{51),52)}。この方法は、凍結脱気法よりも多孔質構造が細かくなる。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、クライオフォームターゲット化された。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⁵³⁾。

アクリル系を含む表1の後三者は最近フォームクライオ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⁵⁴⁾。RFフォームはレゾルシノールとホルマリンから重合されるフェノール樹脂の一種である。

プラズマの電子は、その振動のために光を反射するが、低密度フォームの密度を落としてゆくと、完全にプラズマ化しても電子密度が低いためにレーザー光を進入させるようになる。

$$\omega_L = [(e^2 n_{cr}) / (\epsilon_0 m_e)]^{1/2}, \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ω_L , e, ϵ_0 , m_e はカットオフ角振動数(電子プランク角振動数), 電荷素量, 真空の誘電率, 電子質量である。化学組成 CH_2 の炭化水素高分子について質量密度を計算すると、ガラスレーザーの波長 1.06 μ m について〜3 mg/cm³, 二倍波の 0.53 μ m については〜15 mg/cm³ となる。

凍結脱気法により、この密度以下(極低密度と呼ぶことにする)のポリ 4-メチル 1-ペンテン(PMP)フォームが製作された^{55)~60)}。PMPは炭化水素であり、酸素などの比較的高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⁵⁸⁾。しかし、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 μ mであったので、エアロゲル法によるフォーム作製が研究された。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(図12)。

表1 エアロゲル法によるフォーム作製

原料物質	フォーム密度 (mg/cm ³)	構造サイズ (μ m)	球殻フォーム製作	文献
ポリ(4-メチル-1-ペンテン)	2.5~200	0.1~10	No	59, 60
多官能性アクリレート	50~200	~5	Yes	51-53
ジビニルベンゼン	50~200	~1	Yes	55
レゾルシノール/ホルムアルデヒド	10~100	~0.1	Yes	54

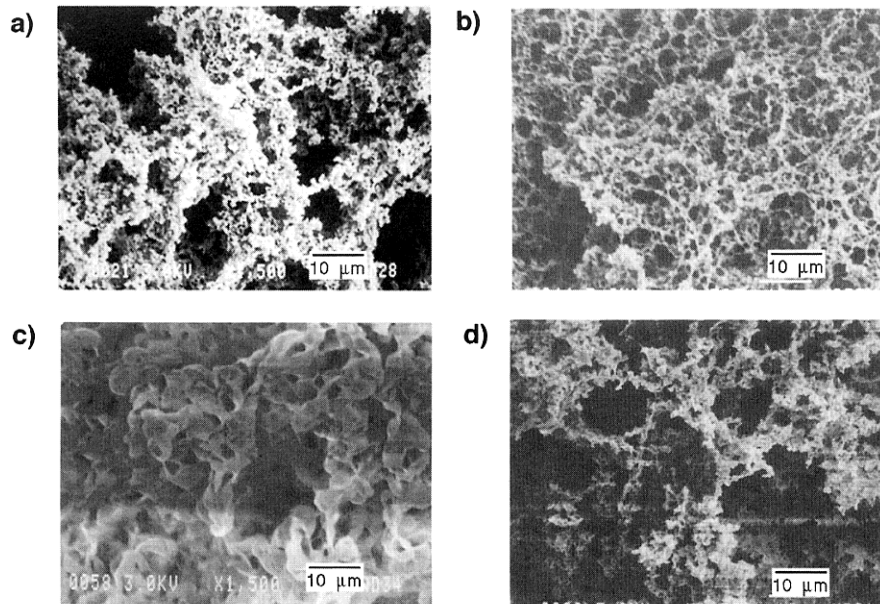


図 12 ポリメチルペンテンアエロゲルの走査電子顕微鏡図。ゲル化に用いるアルコールの種類 a) 1-ブタノール, b) 2-ブタノール, c) 2-メチル-1-プロパノール, d) 2-メチル-2-プロパノールを変えることにより, その構造を変えることができる。これらの平均密度は $2 \sim 3 \text{ mg/cm}^3$ であり, レーザーによりプラズマ化しても反射を起こさない。そのため, 照射ターゲット全体に渡って均一なプラズマを形成すると考えられる。これらは鱗片状の構造体の集合であるが, その厚みは数十 nm である。極短パルスレーザー照射実験の結果は, クーロン爆発機構に基づくと解釈される高エネルギープロトンを与えた。

ゲル化の際のアルコールの種類を変えて, PMP 側鎖とアルコールのアルキル基の相互作用を制御することにより, 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 mg/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^{59),60)}。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, クラスタータラ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⁶¹⁾。

3. 4 ターゲット材料の単分子膜被覆による精密ターゲット製作(単分子膜接着法)

レーザー衝撃波計測はレーザー核融合爆縮過程をシミュレーションするために必要な状態方程式データ取得に不可欠である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。たとえば, $20 \mu\text{m}$ 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。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),64)}。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)を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, 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。この接着力は強く, 通常の実験室操作, たと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

ラ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),65)}。

4. おわりに

ここにレーザー核融合ターゲットに用いられる平滑, 高真球カプセル製法, アブレーション制御機能表面材料, 極低密度多孔質材料について述べた。これらの技術の進歩とともに核融合点火, 燃焼へのレーザー技術や, 炉設計の厳しい条件が緩和され, ミニ太陽のエネルギー源への利用が現実となることが期待される。それとともに, これらの表面技術がレーザー核融合以外のさまざまな分野に役立つことを願っている。

(2003-9-29 受理)

文 献

- 1) 疇地 宏, 三間園興; 日本物理学会誌, 58, 588 (2003)
- 2) 慣性核融合研究計画; 実験プロポーザル(昭和 58 年大阪大学レーザー核融合研究センター内部資料)
- 3) 児玉了祐, 三間園興, 井澤靖和, 田中和夫, 北川米喜, 宮永憲明, 藤田尚徳, 乗松孝好, 西村博明, 重森啓介, 千徳靖彦, 山中龍彦; プラズマ・核融合学会誌, 78, 792 (2002)
- 4) S. Nakai, K. Mima, Y. Kitagawa, S. Sakabe, Y. Izawa, M. Nakatsuka, M. Yamanaka, H. Fujita, T. Jitsuno, T. Kanabe, N. Miyanaga, H. Takabe, T. Norimatsu, Y. Kosaki, T. Yamanaka, C. Yamanaka, T. Sasaki, Y. Mori, K. Miyazaki, M. Nishikawa, T. Iida, H. Horiike, H. Kan, T. Hiruma, Y. Soman and H. Ito; Sixteenth IAEA Fusion Energy Conference, Montreal, Canada, 7-11 October, 1996, IAEA-CN-64/

- G 1-3/GP-17
- 5) 金子正夫; 化学と工業, 43, 1482 (1990)
 - 6) 2003.2.6 プッシュ米大統領声明
 - 7) Proceedings of fifteenth target fabrication specialists' meeting, Gleneden Beach, June 1-5 2003, *Fusion Sci. Technol.*, in press
 - 8) Proceedings of fourteenth target fabrication specialists' meeting, West Point, July 15-19 2001, *Fusion Sci. Technol.*, 41 (2002)
 - 9) Proceedings of thirteenth target fabrication specialists' meeting, Catalina Island, November 8-12 1999, *Fusion Technol.*, 38 (2000)
 - 10) Proceedings of twelfth target fabrication specialists' meeting, Jackson Hole, April 19-23 1998, *Fusion Technol.*, 35 (1999)
 - 11) U. Kubo and H. Tsubakihara; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 4, 1134 (1989)
 - 12) M. Takagi, T. Norimatsu, T. Yamanaka and S. Nakai; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 9, 2145 (1991)
 - 13) T. Norimatsu, C. M. Chen, K. Nakajima, M. Takagi, Y. Izawa, T. Yamanaka and S. Nakai; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 12, 1293 (1994)
 - 14) T. Norimatsu, Y. Izawa, K. Mima and P. M. Gresho; *Fusion Technol.*, 35, 147 (1999)
 - 15) T. Norimatsu, T. Takaki, M. Nakajima, K. Nagai, Y. Izawa, K. Mima; *Kobunshi Ronbunshu (Jpn. J. Polym. Sci. Technol.)* 56, 415 (1999)
 - 16) P. M. Gresho; *Fusion Technol.*, 35, 157 (1999)
 - 17) K. Nagai, M. Nakajima, T. Norimatsu, Y. Izawa and T. Yamanaka; *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.*, 38, 3412 (2000)
 - 18) A. Nikroo, J. M. Pontelandolfo and E. R. Castillo; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 220 (2002)
 - 19) B. W. McQuillan and M. Takagi; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 209 (2002)
 - 20) M. Takagi, R. Cook, R. Stephens, J. Gibson and S. Paguio; *Fusion Technol.*, 38, 46 (2000)
 - 21) M. Takagi, R. Cook, B. McQuillan, F. Elsner, R. Stephens, A. Nikroo, J. Gibson and S. Paguio; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 278 (2002)
 - 22) M. M. Marinak, S. W. Haan, T. R. Dittrich, R. E. Tipton and G. B. Zimmerman; *Phys. Plasmas*, 5, 1125 (1998)
 - 23) F.-Y. Tsai, D. R. Harding, S.-H. Chen, T. N. Blanton and E. L. Alfonso; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 178 (2002)
 - 24) 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)
 - 25) K. Nagai, T. Takaki, T. Norimatsu and T. Yamanaka; *Macromol. Rapid Commun.*, 22, 1344 (2001)
 - 26) 長井圭治, 乗松孝好, 山中龍彦, 高木智宏; 特開 2002-265625
 - 27) S. A. Letts, E. M. Feason, S. R. Buckley, M. D. Saculla, L. M. Allison and R. Cook; *Fusion Technol.*, 28, 1797 (1995)
 - 28) A. Nikroo, J. M. Pontelandolfo and E. R. Castillo; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 220 (2002)
 - 29) T. Norimatsu, H. Tajima, M. Takagi, S. Nakai and C. Yamanaka; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 6, 2552 (1988)
 - 30) 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)
 - 31) C. Stpecki, 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. Petrasso, F. H. Seguin, K. Fletcher, S. Paladino, C. Freeman N. Izumi, R. Leriche and T. W. Phillips; *Phys. Plasma.*, 9, 2195 (2002)
 - 32) M. T. Mruzek, J. S. Ankney and D. N. Decker; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 6, 1889 (1988)
 - 33) C. M. Chen, T. Norimatsu, Y. Izawa, T. Yamanaka and S. Nakai; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 13, 2908 (1995)
 - 34) 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, pp. 171.
 - 35) E. R. Mapoles, J. Sater, J. Pipes and E. Monsler; *Phys. Rev.*, E 55, 3473 (1997)
 - 36) G. M. Collins, D. N. Bittner, E. Monsler, S. Letts, E. R. Mapoles and T. P. Bernat; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 14, 2897 (1996)
 - 37) D. N. Bittner, G. W. Collins, E. Monsler and S. Letts; *Fusion Technol.*, 35, 244 (1999)
 - 38) B. J. Koziolowski, R. L. McEachern, R. A. London and D. N. Bittner; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 296 (2002)
 - 39) E. R. Korsheva, I. V. Aleksandrova, I. E. Osipov, V. I. Chtcherbakov, E. L. Koshelev, A. I. Nikitenko, S. M. Tolokonnikov, L. S. Yaguzinskiy, G. D. Baranov, A. I. Satronov, I. D. Timofeev, B. V. Kuteev and V. G. Kapralov; *Fusion Sci. Technol.*, 43, 290 (2003)
 - 40) T. Endo, K. Shibata, K. Kobayashi, M. Yasuda, Y. Fujima and T. Norimatsu; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 248 (2002)
 - 41) T. Endo, K. Kobayashi, K. Goto, M. Yasuda and Y. Fujima; *Fusion Sci. Technol.*, 43, 270 (2003)
 - 42) N. Miyanaga et al.; International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, Monterey, September 1-5 2003.
 - 43) 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. Tambo, K. A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka and M. Zepf; *Nature*, 412, 798 (2001)
 - 44) R. Kodama and the Fast-Ignitor Consortium, *Nature*, 418, 933 (2002)
 - 45) K. Nagai, T. Norimatsu, Y. Izawa and T. Yamanaka; Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng, in press.
 - 46) T. Morikawa, C. Adachi, T. Tsutsui and S. Saito; *Nippon Kagaku Kaishi*, 962 (1990)
 - 47) K. Nagai, Y. Fujimoto, H. Shiroishi, M. Kaneko T. Norimatsu and T. Yamanaka; *Chem. Lett.*, 2001, 354 (2001)
 - 48) K. Nagai, T. Norimatsu, N. Miyanaga and T. Yamanaka; *Fusion Sci. Technol.*, 41, 257 (2002)
 - 49) K. Nagai, K-i. Morishita, H. Yoshida, T. Norimatsu, N. Miyanaga, Y. Izawa and T. Yamanaka; *Synth. Met.*, 121, 1445 (2001)
 - 50) K. Nagai, H. Yoshida, T. Norimatsu, N. Miyanaga, Y. Izawa and T. Yamanaka; *Appl. Surf. Sci.*, 197, 808 (2002)

- 51) M. Takagi, M. Ishihara, T. Norimatsu, Y. Izawa and S. Nakai ; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 11, 2837 (1993)
- 52) M. Takagi, T. Norimatsu, T. Yamanaka and S. Nakai ; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 9, 820 (1991)
- 53) N. Miele-Pajot, L. G. Hubert-Pfalzgraf, R. Papiernik, J. Vaissermann and R. Collier ; *J. Mater. Chem.*, 46, 37 (1999)
- 54) 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)
- 55) J. Streit and D. Schroen ; *Fusion Sci. Technol.*, 43, 321 (2003)
- 56) I. G. Schneir and B. McQuillan ; *Fusion Technol.*, 28, 1849 (1995)
- 57) M. A. Mitchell, P. Gobby and N. Elliott ; *Fusion Technol.*, 28, 1844 (1995)
- 58) W. L. Perry, R. C. Dye, P. G. Apen, L. Foreman and E. Peterson ; *Appl. Phys. Lett.*, 66, 314 (1995)
- 59) K. Nagai, B.-R. Cho, Y. Hashishin, T. Norimatsu and T. Yamanaka ; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, L 431 (2002)
- 60) K. Nagai, T. Norimatsu and Y. Izawa ; *Fusion Sci. Technol.*, In press.
- 61) S. Okihara, T. Zh. Esirkepov, K. Nagai, S. Shimizu, F. Sato, T. Iida, K. Nishihara, T. Norimatsu, Y. Izawa, S. Sakabe ; *Phys. Rev. E*, in press.
- 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, L 1186, (2002)
- 64) 長井 圭治, 乗松 孝好, 山中 龍彦, 田中 和夫 ; 特開 2003-246971
- 65) 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)