The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	レーザー核融合ターゲットの開発に関する研究
Author(s)	乗松，孝好
Citation	大阪大学，1983，博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/538
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

レーザー核融合用ターゲットの開発に関する研究

昭和58年1月

乗　松　孝　好

内　容　梗　概

本論文は著者が大阪大学大学院工学研究科前期，後期課程，レーザー核融合研究センターにおいて行なったレーザー核融合用ターゲットの開発，特にコーティング技術，加工技術，燃料技術についてまとめたものである。

コーティング技術ではプラズマ重合法，気相熱重合法をアブレーターコーティングに適用し，密度勾配を付けたコーティング，TaCHOプッシャーコーテイングなどに成功した。加工技術関係ではダブルシェルダーゲットの独特な製作方法を開発した。燃料技術では三重水素の漏洩の少ない充塡炉を開発するとともに，充塡量の非破壊測定技術を開発した。クライオ技術では点冷却法で均一な液層を得る条件を明らかにした。

本論文は8章から構成されている。

第1章は緒論であって，レーザー核融合実験におけるターゲット開発の位置づけについて述べた。第2章では燃料ターゲットに要求される一般的特性について触れ，開発すべきターゲットを明らかにした。第3章では燃料容器の選別，検査などペレットターゲットの研究を行なう上で基礎となる技術を集めた。

第4章はコーティング技術についてまとめたもので，プラズマ重合，気相熱重合法をターゲットのアブレーターコーティングに適用するうえでの問題点を明らかにするとともに，TaCHOプッシヤーコーティング，密度勾配を付けたコーティングへの応用について述べる。またコーティング中のペレットレビテーションについても触れる。

第5章はターゲット加工技術に関するもので，著者が独自に開発したバキュームインシュレーション型ダブルシェルターゲット，プラスチックフォームターゲット，キャノンボールターゲットについて製作法の詳細及び改良すべき点を明らかにした。

第6，7章は燃料に関する章で，第6章は三重水素に関する研究をまとめた。三重水素の漏洩の少ない充塡炉の開発，三重水素充塡量の非破壊検査について述べる。第7章では点冷却法で燃料球内部に液化した燃料を均一に付ける技術について述べる。燃料層の挙動を実験的に明らかにするとともに，理論計算で液層の分布を計算し均一な液層を得る条件を明らかにした。

第8章は結論であってこれらの研究によって得られた知見をまとめた。

目　　次

第1章　緒　　論 …… 1

第2章　レーザー核融合用ペレットターゲットに要求される一般的特性 …… 3
§2－1　はじめに …… 3
§2－2　爆縮の概念 …… 3
§2－3　ペレットターゲットへの要請 …… 4
2－3－1　流体力学的効率からの要請 …… 4
2－3－2　流体力学的不安定性の抑制 …… 5
§2－4　ペレットターゲットの構造 …… 7
§2－5　まとめ …… 9

第3章　ペレットターゲットの選別と検査 …… 12
§3－1　はじめに …… 12
§3－2　燃料容器の選別 …… 14
3－2－1　直径による選別 …… 14
3－2－2　比重による選別 …… 17
3－2－3　ガラスマイクロバルーンの耐圧テスト …… 22
§3－3　ターゲットの検査 …… 25
3－3－1　干渉顕微鏡による均一性の検査 …… 25
3－3－2　X線コンタクトグラフによる検査 …… 29
§3－4　表面検査 …… 32
§3－5　まとめ …… 34

第4章　ペレットコーティング技術 …… 35
§4－1　はじめに …… 35
§4－2　プラズマ重合 …… 36
4－2－1　目　　的 …… 36

4－2－2　プラズマ重合装置 …… 36
4－2－3　実験結果と検討 …… 37
4－2－4　結　　論 …… 42
§4－3　密度勾配をつけたコーティング …… 43
4－3－1　特徴及び目的 …… 43
4－3－2　実験装置と方法 …… 43
4－3－3　実験結果 …… 44
4－3－4　まとめ …… 46
§4－4　TaCHO プッシャーコーティング …… 47
4－4－1　特徴及び目的 …… 47
4－4－2　実験装置と方法 …… 47
4－4－3　実験結果 …… 48
4－4－4　まとめ …… 51
§4－5　パリレンコーティング …… 51
4－5－1　特徴及び目的 …… 51
4－5－2　実験装置 …… 51
4－5－3　結果及び検討 …… 52
§4－6　レビテーション …… 54
4－6－1　振動型レビテーション …… 54
4－6－2　中性分子ビームレビテーション …… 59
§4－7　まとめ …… 67

第5章　ターゲットの加工組立 …… 69
§5－1　はじめに …… 69
§5－2　ターゲット支持棒の加工 …… 70
§5－3　バキュウムインシュレーション型
ダブルシェルターゲットの開発 …… 72
5－3－1　製作方法 …… 72
5－3－2　検　　討 …… 75

5－3－3　ま　と　め …… 77
§5－4　プラスチックフォームダブルシェルターゲットの開発 …… 78
5－4－1　特徴と目的 …… 78
5－4－2　ＴＰＸによる低密度フォームの製作 …… 78
5－4－3　デキシトランフォームの開発 …… 81
5－4－4　フォームの加工 …… 83
5－4－5　半球殻の製作 …… 87
§5－5　キャノンボールターゲットの製作 …… 88
5－5－1　キャノンボールターゲットの特徴 …… 88
5－5－2　製作過程 …… 89
§5－6　ま　と　め …… 90

第6章　三重水素技術 …… 92
§6－1　はじめに …… 92
§6－2　三重水素充塡 …… 92
6－2－1　目　　的 …… 92
6－2－2　実験原理及び装置 …… 93
6－2－3　実験方法 …… 94
6－2－4　実験結果及び検討 …… 96
§6－3　三重水素漏洩の抑制 …… 98
6－3－1　目的及び方法 …… 98
6－3－2　実験結果 …… 98
6－3－3　検　　討 …… 102
6－3－4　結　　論 …… 107
§6－4　三重水素充塡量の非破壊検査 …… 107
6－4－1　目　　的 …… 107
6－4－2　実験方法及び結果 …… 108
6－4－3　検　　討 …… 119
6－4－4　結　　論 …… 121

§6－5　DTペレットハンドリング …… 122
§6－6　ま　と　め …… 127

第7章　クライオ技術 …… 129
§7－1　はじめに …… 129
§7－2　点冷却法によるクライオターゲットの製作 …… 130
7－2－1　実験原理及び方法 …… 130
7－2－2　実験結果 …… 135
7－2－3　考　　察 …… 138
7－2－4　結　　び …… 140
§7－3　液層分布の理論計算 …… 141
7－3－1　気胞モデルによる計算 …… 142
7－3－2　ニューサルトの方法による計算 …… 149
§7－4　蛍光のクライオ層への影響 …… 155
7－4－1　目　　的 …… 155
7－4－2　実験装置，方法 …… 155
7－4－3　実験結果及び検討 …… 156
7－4－4　ま　と　め …… 157

第8章　結　　論 …… 159

謝　　辞 …… 162

業　績　目　録 …… 163

1章　緒　　論

大出力レーザー技術の進歩に伴い高エネルギー密度が容易に得られるようになり、高温高密度プラズマ発生への応用が研究され、1968年には固体重水素にレーザー光を照射して核融合中性子の発生が報告[1)]された。その後プラズマによるレーザー光の異常吸収現象の発見[2)]と爆縮の概念[3)]の導入により、レーザー核融合によるエネルギー生成の可能性が注目され、研究は飛躍的進展を見せた。100kJ 級のレーザーにより、照射エネルギーに等しい核融合反応出力エネルギーが得られる、いわゆるブレークイーブンが可能で、MJ 級レーザーにより核融合炉が実現されるものと考えられている。現在の目標は100kJ級レーザーによるブレークイーブンの達成である。

レーザー核融合では重水素、三重水素を含んだ球状ターゲットにレーザー光を照射してプラズマ化し、プラズマの膨張による反作用により燃料を圧縮して高密度を得、それが飛散してしまう前に核融合反応を完了する。発生したエネルギーは直接発電又はリチウム等を介してタービンを廻し、発電に用いられ、一部はレーザー運転用に用いられる。レーザー核融合を実現するには強力なエネルギードライバーの開発と高利得燃料ターゲットの設計製作が重要な開発項目である。

エネルギードライバーとしての大出力レーザーの開発は勢力的に進められ、すでにガラスレーザー及び CO_2 レーザーで出力10kJ が達成され、100kJシステムが建設中で、ほぼブレークイーブンを射程内にとらえている。

燃料ターゲットはレーザー光の吸収が良く、燃料を効率良く高密度に圧縮できるものでなければならない。　ターゲット設計には計算機シュミレーションの手法が用いられ、レーザーの出力レベルに応じて大きさ構造の最適化が行なわれている。数MJ級のレーザー出力によりエネルギー利得100～1000が得られる見通しがついている。

代表的な燃料ペレットは、最外殻にレーザー光を吸収してプラズマ化し外側に噴出して圧縮力を得るアブレーター層を持ち、その内側にアブレーター層の噴出により燃料を内側へ安定に圧縮するためのプッシャー層、および、固体燃料層を持つものである。さらに中心には燃料に点火するためのイグナイターを置いた多重多層構造になっている。　またレーザー吸収領域で発生する高速電子が内部に進入し燃料を予備加熱

して圧縮効率を低下させることのないよう高速電子遮断層をアブレーター層とプッシャー層の間に置くものもある。アブレーター層としては低Z番号のプラスチックが、プッシャー層としては高速電子の遮断もかねて、高Z材料が良いとされている。またこれらの層の密度や、Z数の制御も必要である。

爆縮時に誘起される不安定性を抑制し、十分な圧縮を得るため、各層は極めて高い真球度、厚さ、密度、Zの一様性、および各層の境界面の面精度が高くなければならない。

このようにターゲット製作には低Zから高Zまでの多様な材料を駆使して高精度に加工製作する技術が必要であり、そのため、

1）多重・多層ターゲット製作技術

2）高精度ターゲット検査技術

3）燃料固体化のためのクライオ技術

4）三重水素安全取扱技術

等を開発しなければならない。

著者はこれらについて1）3）4）に重点を置きレーザー核融合ターゲットの製作に必要な技術開発を実施してきた。　本論文はその成果をまとめたものである。　まずレーザー核融合ターゲットとして要求される特徴を定量化し、開発項目を明確化した。ついで燃料容器の選別、検査、組立等ターゲット製作の基礎技術、アブレーター、プッシャー層の生成に用いるコーティング技術、多重ターゲット製作について述べ、最後に燃料技術について述べる。

参　考　文　献

1) N.G. Basov et al ; IEEE J. Quant. Elect. QE－**4** 864 (1968)

2) C. Yamanaka, T. Yamanaka, T. Sasaki, K. Yoshida, M. Waki and H. B. Kang ; Phys. Rev. **A6** 2335 (1972)

3) J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen and G. Zimmerman ; Nature **239** 139 (1972)

第2章　レーザー核融合用ペレットターゲットに要求される一般的特性

§2－1　はじめに

レーザー核融合では微小な燃料容器に燃料を充塡し，四方からレーザーを照射し、表面をプラズマ化する。高温のプラズマは四方に吹き出し、その反作用として燃料を高温高密度に圧縮する。この章では爆縮の概念を明らかにしてターゲットに必要な一般的特性を導出する。

§2－2　爆縮の概念

レーザーで照射されたターゲットは高温のプラズマとなり膨張し，燃料を圧縮する。

この過程は大きく2つに分けることができる。即ち，プラズマの熱に関するスケール長が容器の厚さより長い場合の爆発型圧縮と，その逆の噴出型圧縮である。前者の場合，容器は瞬間的にプラズマ化し，内側と外側に対称に膨張する。これにより燃料内部に強い衝激波を作り、加熱する。後者の場合，比較的おだやかな断熱曲線に乗って加熱し，中心部で点火に導くものである。

爆発型圧縮の場合，燃料の加熱はほとんど衝撃波加熱で行なわれ，ターゲットに対する精度の要請は比較的少なく，比較的容易に高い中性子発生を見ることができる。しかしながら，燃料全体を加熱する為，エネルギー利得は低く，核融合炉用ターゲットとしては不向きである。[1) 2)]

噴出型圧縮の場合，燃料は比較的おだやかな断熱曲線に乗って圧縮され，衝撃波が中心で衝突し，燃料の一部を高温に加熱し，核融合反応に導く。[3)] 燃料の冷たい残りの部分は，核融合反応で生成したα粒子の加熱によって燃焼する。従って噴出型圧縮の場合，爆縮は完全に球対称に進行しなければならない。さらに燃料が圧縮される前に加熱されるプリヒートがあってはならない。

§2－3　ペレットターゲットへの要請[4)]

以上のことからターゲットに要求される一般的条件は,

1）エネルギードライバーに要求されるパワーとエネルギーが低いこと。

2）高利得であること。

3）流体力学的不安定性に対して鈍感であること。

4）高速電子X線輻射による燃料のプリヒートが少ないこと。

などが揚げられる。さらに実用炉クラスのターゲットを考えた場合,

5）安価であること。

6）製作容易であること。

7）残留放射能が少ないこと。

8）炉材料との相互作用が少ないこと。

などが加えられる。以下の項で2，3の点について触れる。

2－3－1　流体力学的効率からの要請

レーザー光に要求されるパワーを小さくするにはアスペクト比ξ（$\equiv R/\triangle R$）を大きした方が有利である。この点について検討を行なう。

今内側に向って加速されつつある半径R，密度ρの球殻を考えた場合，球殻に働く力は grad P であるから，その加速度$\frac{du}{dt}$は,

$$\frac{du}{dt}=\frac{d^2R}{dt^2}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial R} \qquad (2-1)$$

の運動方程式によって加速される。今，$C^2_s=dp/d\rho$によって音速が伝えられることを考慮し，爆縮に要する時間をt_sとすると,

$$\frac{d^2R}{d^2t}\simeq\frac{R}{t^2_s} \qquad (2-2)$$

であり，また

$$(1/\rho)\frac{\partial P}{\partial R}=(1/\rho)\frac{\partial P}{\partial \rho}\frac{\partial \rho}{\partial R} \qquad (2-3)$$

$$=\frac{C^2_s}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial R} \qquad (2-4)$$

$$\simeq C^2_s/\triangle R \qquad (2-5)$$

のオーダーとなる。ここで$\triangle R$は殻の厚さである。(2－2)，(2－4) を (2－1) に代入すると，

$$t_s = \frac{\sqrt{\triangle R - R}}{C_s} \qquad (2-6)$$

であるから，

$$U \approx \frac{R}{t_s} \approx \sqrt{R/\triangle R}\ C_s \qquad (2-7)$$

を得る。このことから，球殻ターゲットのマッハ数$M(=U/C_s)$，は$\sqrt{R/\triangle R}$ 程度であることが分かる。爆縮に要する仕事は，

$$W_m = 4\pi R^2 PU \qquad (2-8)$$

で与えられる。この仕事は内部に蓄えられるエネルギーであり，マッハ数に比例する。

レーザー光の吸収エネルギーフラックスW_Lは圧縮に要する圧力を発生するために使われ，$W_L \propto PC_s R^2$ の関係から$W_M/W_L \propto M$となる。即ち，球殻ターゲットはアスペクト比ξ ($R/\triangle R$) を大きくする程効率が良くなる。しかしながら，ξが大きくなると流体力学的問題が生じてくるため，双方の均衡によってターゲットデザインが決定される。

2－3－2　流体力学的不安定性の抑制

一般に重い液体が軽い液体の上に乗っているとき境界面に発生した凸凹は生長し，ついには上下の関係が反転する。これは流体力学的不安定性と呼ばれ，ペレット爆縮の場合，爆縮初期のアブレーター，プッシャー境界などに発生する。

流体力学的不安定性は表面波の一種であり，その為波長λの不安定波は球殻内部に伝わるにつれて exp ($-2\pi x/\lambda$) で減衰する。それ故 $2\pi\triangle R/\lambda \gg 1$ の波は表面近傍のみに局在し、圧縮中の球殻を壊すまでには至らない。また逆に，$2\pi\triangle R/\lambda \ll 1$ の波は不安定性の生長率が $\lambda^{-1/2}$ に比例することからあまり問題にならない。結局 $2\pi\triangle R \simeq \lambda$ のときが一番問題であり，圧縮された状態で，生長した波の振幅が，球殻の厚さ$\triangle R$を越してはならない。圧縮率 η_c と振幅ϵとの

関係は,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \eta_c \sqrt{\frac{2\pi R}{3\lambda}} \qquad (2-9)$$

で与えられ,[4] この関係を η_c をパラメーターとして表示すると図２－１のようになる。横軸はアスペクト比，縦軸は半径と許し得る表面精度の比である。ターゲット表面は各実線より下の状態でなければならない。アスペクト比が10で直経５００μmのターゲットを１００倍にまで圧縮する場合，表面精度は２５Å以下でなければならない。

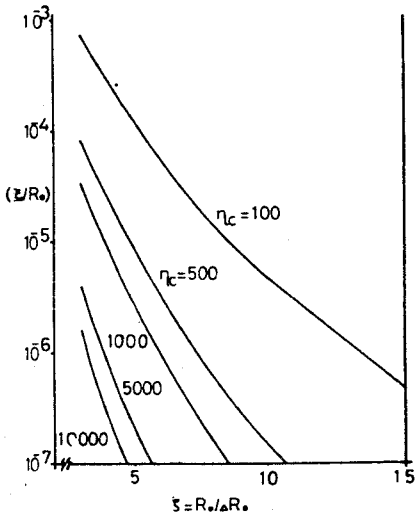


図２－１　流体力学的不安定性の面から見たターゲットの表面精度，各実線より下の領域でなければならない。

２－３－３　プリヒートの抑制

エネルギードライバーからターゲット表面に吸収されたエネルギーの一部は，X線輻射あるいは高速電子となって燃料を圧縮する前に加熱（プリヒート）してしまう。これにより圧縮に必要なエネルギーが増大し，エネルギー利得を低下させる。この解決法としては原子番号の大きい物質で燃料を包む方法と，低密度の大気層を燃料の外側に付ける方法がある。

T_h の温度をもつ高速電子がターゲットのイオンと衝突して散乱するときの平均

自由行程 λ_M は,

$$\lambda_M \approx 0.22 \frac{(T_h/100\,\mathrm{keV})^2}{\langle Z^2 \rangle (n/5\times10^{22}\,\mathrm{cm}^{-3})}\ (\mathrm{cm}) \qquad (2-10)$$

で与えられる。ここで $\langle Z^2 \rangle$ は原子番号の二乗平均, n はターゲット中のイオン粒子密度である。この衝突では高速電子はエネルギーを失うことなく, エネルギーはターゲット中の低速電子との衝突で失われ, その平均自由行程 λ_E は,

$$\lambda_E = \frac{\langle Z^2 \rangle}{\langle Z \rangle} \lambda_M \qquad (2-11)$$

で与えられる。このような散乱過程での高速電子の浸入の深さ λ_T は $\lambda_E \lambda_M$ で与えられ,

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{\langle Z^2 \rangle}{\langle Z \rangle}} \lambda_M \qquad (2-12)$$

$$\lambda_T \propto \frac{1}{\sqrt{\langle Z \rangle \langle Z^2 \rangle}} \qquad (2-13)$$

となる。流体力学的不安定性を防ぐためにはこの層の密度は燃料の密度に近い方が望ましく, 結局平均$\langle Z \rangle$が小さく平均$\langle Z^2 \rangle$が大きい物質をコーティングすることが望まれる。

もう一つの解決法はダブルシェル構造とし、最外殻の吸収層と, 内側の燃料層の間に真空層を設ける方法で, 静電シースによって高速電子の侵入を防ぐものである。

§2－4　ペレットターゲットの構造

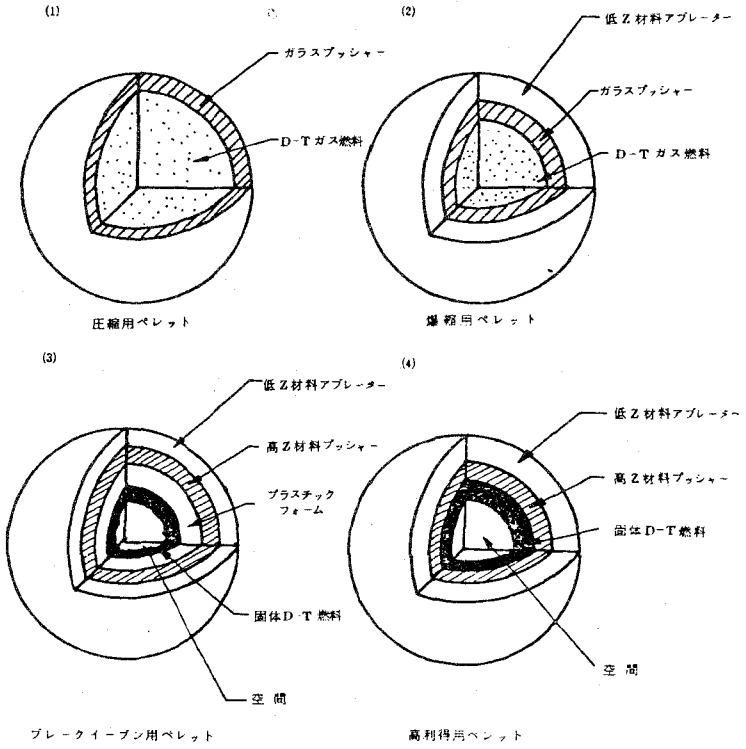
前節まででペレットターゲットに要求される一般的特性を述べた。実際に作られるターゲットはレーザーのエネルギーレベル, パルス波形, 実験の目的などによって構造, 寸法などが異なる。ここではその2, 3に例を示す。

ターゲットの効率を高める為には, 断熱圧縮に近い高密度圧縮と, 核融合燃焼の点火と自己燃焼が行なわれなければならない。この実現には圧縮の一様性が要求され, プリヒートの抑制が重要になる。そのために高度の表面仕上げと真球度の確保が必要である。

図2－2　各種ペレットターゲットの比較

	圧縮用ペレット	爆縮用ペレット	ブレークイーブン用ペレット	高利得用ペレット
燃料圧縮率 (× Liquid Density)	0.1 ～ 10	～100		～ 10,000
利得 (核融合出力/レーザー入力)	10^{-7}～10^{-2}	10^{-2} ～ 1	1	～ 1,000
初期燃料状態	低圧ガス状	高圧ガス状	固体水素	固体水素
要求される表面状態のあらさ	〉1000 Å	～1000 Å	100～1000 Å	100～1000 Å
レーザーエネルギー	≧ 10 J	≧ 10 KJ	～100 KJ	～ 1 MJ
図番	(1)	(2)	(3)	(4)

核融合用ペレットターゲット



また，原子番号の大きな物質を含む熱遮断層や，ダブルシェルターゲットが必要である。

現在，レーザーのエネルギーレベルに応じて図２－２の様な構造のターゲットが考えられている。(1)は爆発型圧縮に用いられたもので，初めて熱核融合による中性子が検出された。(2)は噴出型圧縮用のもので，このレベルのターゲット開発はほぼ終了した。(3)，(4)はそれぞれブレークイーブン用，実用炉用ペレットの例である。

ここで現在建設中の激光XII号レーザーシステム（ピーク出力20TW／100ｐｓ，エネルギー20ｋJ／1ns)に用いるターゲットの寸法について検討してみる。爆縮型ペレットの場合，計算機シュミレーションの結果では中性子発生数を最大にするためのペレット半径とレーザー最大出力，パルス長の関係は，

$$\frac{2}{3}\pi\left(\frac{2/3\,\rho_p\,\triangle R_p}{\varepsilon_a}\;\frac{R^4}{P_L\,\zeta^3{}_{Las}}\right)\sim 1$$

で与えられる。ここで R，ρ_p，$\triangle R$ はペレットの半径，プッシャーの質量密度と厚さであり，P_L，ζ_{Las}，ε_a はレーザーの算大出力，パルス長，吸収率である。激光XII号の場合，

$$P_L \simeq 40\ \mathrm{TW},\quad \zeta_{Las} \simeq 100\ \mathrm{psec},\quad \varepsilon_a \simeq 0.3$$

とすると、

$$\triangle R \sim 2\ \mu\mathrm{m} \qquad R \simeq 200\ \mu\mathrm{m}$$

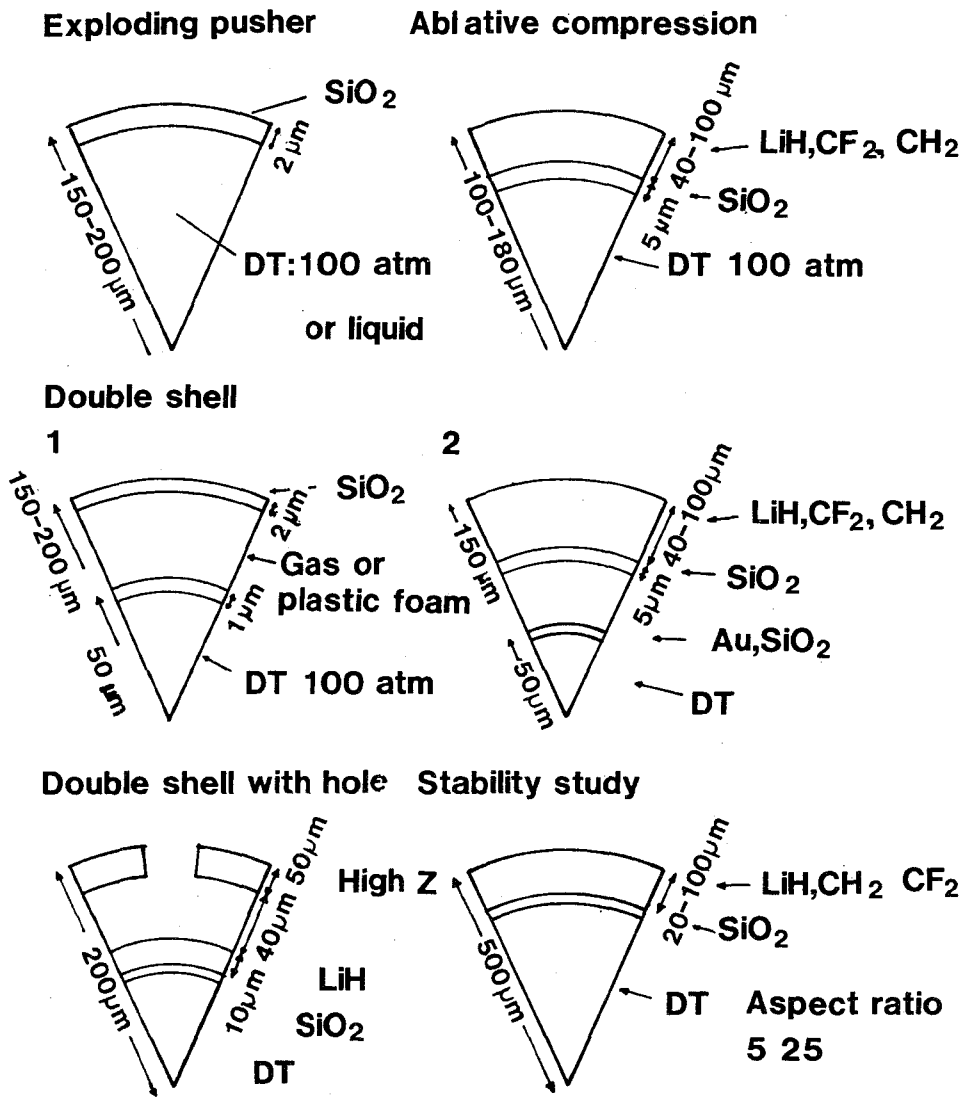
となる。同様に噴出型圧縮ペレットの場合も計算機シュミレーションで設計可能で，それらの結果を図２－３に示す。図から分るように直径100～500μm，壁厚5～100μmが必要である。

§２－５　ま　と　め

本章ではターゲットに要求される一般的な特性を明らかにするとともに，20ｋJ級レーザーによる爆縮実験用ターゲットに必要な仕様を示した。即ち，高密度圧縮には１）球対称な圧縮と２）断熱圧縮が必要であり，流体力学的不安定性，プリヒートの抑制が必要である。そのため，ターゲット製作には高い精度が必要であり，ダブルシェルなどの構造にする必要がある。

具体的に激光XII号クラスレーザーでは，爆発型圧縮ペレットとして直径200μm

図２－３　激光Ⅻ号用ターゲット



壁厚2 μm，DT100気圧必要である。噴出型圧縮では直径200μm，アブレーター40μm^{t}，表面仕上げに0.1μm，DT100気圧が必要である。

参　考　文　献

1) Lawrance Livermore National Lab., Laser Program Repts. UCRL−79788 (1977)

2) M. D. Rosen J.H. Nuckalls: Phys. Fluids, 22., 1393(1979)

3) J. Nuckalls, L. Wood, A Thiessen and G. Zimmerman, Nature 239, 139, (1972)

4) ペレットターゲット開発委員会編「ペレットターゲット開発現状報告書」大阪大学レーザー核融合研究センター (1980)

第３章　ペレットターゲットの選別と検査

§３－１　は　じ　め　に

レーザー核融合実験に用いられる燃料容器はいずれも微小でかつ高い精度を必要とする。前章で触れたように出力４ｋＪ級のガラスレーザーに用いられるターゲットは直径５０～１５０μm，壁厚0.5～１μm，均一性（$\triangle R/R$）±３％程度が必要である。又，出力１０ｋＪ級のレーザーでは直径１００～３００μm，壁厚１～４μm，均一性±１～３％，表面仕上0.1μm以下が必要である。

燃料容器としてガラスマイクロバルーンや[1]プラスチック中空球，[2]金属球などが研究されているが，最も研究が進み，かつ実験に用いられているものはガラスマイクロバルーン（ＧＭＢ）である。ＧＭＢは現在の時点では，真球性，均一性，燃料の保持能力のいずれの点でもすぐれている。

ＧＭＢは本来プラスチック充塡剤として開発されたもので Emerson & Comming 社や３Ｍ社から買入可能である。レーザー核融合ターゲットとして使用可能なものはＥ＆Ｃ社のタイプＳＩと３Ｍ社のＢ４０Ａシリーズである。図３－１にＥ＆Ｃ社のＳＩ　GMBを示す。直径４０～１７０μm，壁厚0.6～１μmである。Ｂ４０Ａシリーズでは直径３０～１２０μm，壁厚0.7～1.2μmである。いずれも現在必要な寸法，性能を十分満足できるものではない。

最近，大阪工業技術試験場の野上氏らのグループにより直径４０～５００μm，壁厚0.6～４μm のＧＭＢが開発された。これは金属アルコレートを加水分解して得られる粉末を熱処理して作られたもので燃料保持

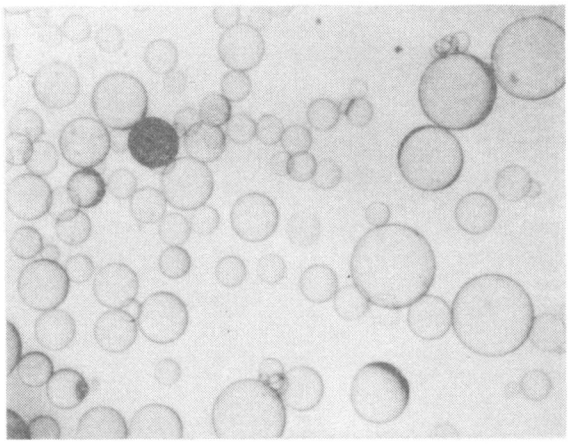


図３－１　Emerson & Comming 社のガラスマイクロバルーン　タイプＳＩ（未選別）

表3－Ⅰ　GMBの種類と特徴

	直径 壁厚 (μm)	Fuel Retainment D_2, 1/e	組成 (Wt%)
SI	50～150 0.8～1.2	3日	SiO_2 92% B_2O_3 2.5% Na_2O_3 2.5% …… ……
IG101	50～100 0.8～1.2	6日	SiO_2 78% B_2O_3 3% Na_2O_3 19%
3MB35D or B40A	50～110 0.8～1.2	7日	SiO_2 80% Na_2O 11% CuO 6.5% B_2O_3 2.5%
大工試 169	50～500 1.2～5.0	＞6ケ月（測定中）	SiO_2 70% Na_2O 20% B_2O_3 5% CaO 5%
大工試 171	50～100 1.2～1.4	＞6ケ月（測定中）	SiO_2 70% Na_2O 20% CaO 10%
大工試 28	50～400 0.8～8	3～7日	SiO_2 70% B_2O_3 10% Na_2O 20%
大工試 177	測定中	測定中	SiO_2 60% B_2O_3 10% Na_2O 20% PbO 10%

能力，寸法などの点ですぐれている。表3－Ⅰに現在使用できるGMBの特徴を示す。

しかしながらGMBはその製作上の理由でいずれも直径，壁厚，均一性などが不ぞろいで実験に用いることができるのは 10^4～10^5 個に一つ程度である。したがってGMBを多量に選別する方法を開発することは実験用ターゲットの製作能率を高める意味で重要である。

図3－2に代表的なターゲット製作過程とそれに係る選別，検査過程を示した。GMBは直径で選別された後，比重選別を行ない壁厚一定のものを選び出した。耐圧テストを行ない不均一なものを破壊してとり除いた。ここまでは多量に処理が行

なわれるが，ここからは，ＧＭＢ１個ずつを対象にして検査を行なった。干渉顕微鏡で直径，壁厚，均一性を測定した。燃料を充塡した後，充塡量の測定を行なった。ＧＭＢのクリーニングを行なった後，必要なコーティングを行ない，検査をした後ささえを取り付け実験に供給された。

実際にはこれらの過程をすべて一率に行なったのではなく，ＧＭＢの性能，量，ターゲットの構造などにより，省略したり，順番を変えたりして行なった。

この章ではこれらＧＭＢの選別に関する著者の行なった研究及び現状の問題点などについてまとめる。

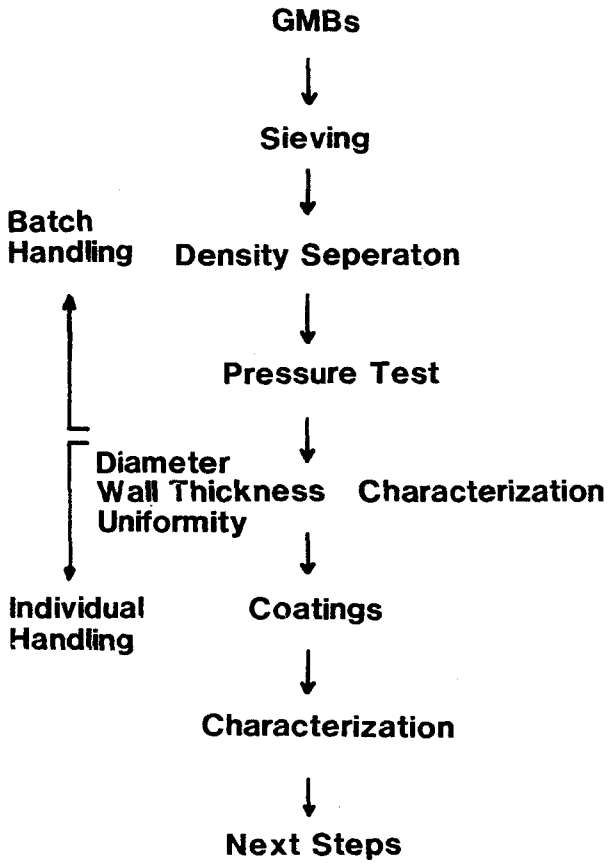


図３－２　ターゲットの製作過程と選別，検査

§３－２　燃料容器の選別

３－２－１　直径による選別

(1)　直径選別の問題点

ＧＭＢの選別の中で最も基本となるものであるが最も難しいものといえる。その原因はＧＭＢのみかけ比重が小さいことに起因している。ＧＭＢの直径は１００μm 程度であり，もしこれが中実球であれば全く問題なく種々のふるいによる方法が実用化されている。しかしながらＧＭＢの壁厚は１μm 程度であり，重量は 10^{-8}

グラムのオーダーになる。この程度になるとGMBに働く重力よりも静電気力，あるいは van der Waals 力の方が大きくなり，昔からあるふるいによる乾式選別は困難になる。GMBに働く重力は直径100μm，壁厚1μmでは7.8×10^{-5} dynであるのに対してGMB間に働く van der Waals 力は[3)]

$$F = \frac{A\ r_0}{12\ h^2} \qquad (3-1)$$

A：定数，$10^{-12}\sim10^{-13}$ erg

r_0：GMB半径

h：GMB表面間距離

であるから，hとして0.01μmを採用すると10^{-3} dynとなる。したがって空気中でのふるい分けはほとんど不可能である。

ふるい分けを液体中で行なう場合GMBに働く浮力は10^{-4} dynで上記の van der Waals 力に近ずく。また流れが存在する場合GMBに働く力はストークスの法則により

$$f = 6\pi r\eta v \qquad (3-2)$$

となる。3 cm/sec程度の流速があると，10^{-3}dyn の力が働くことになり，さらに振動を加えれば分離可能と思われる。

著者等は方法としては昔からある湿式超音波分粒を試みたので，その結果について示す。

(2) 実験装置と方法

実験装置の概略を図3－3に示す。ふるいは JIS 75MMふるいを利用したもので，メッシュ開口部53μm，63μm，74μm，88μm のものを組み合せて利用した。ふるい全体を出力125Wの超音波槽に入れ，手動ポンプで流れを作った。

実験した方法は3MB40AのGMBを公称74μmと88μmのふるいの間に入れ，メタノールを入れた超音波槽の中に沈めた。超音波をかけながら，手動ポンプで約100 cc/min の割で10分間アルコールをGMBが浮び上がる方向に流した。次の10分はこれを止め，超音波を止めてから，74μm メッシュの上から下向きにアルコールを吹きつけ，目づまりしていたGMBを取り除いた。このサイクルを60

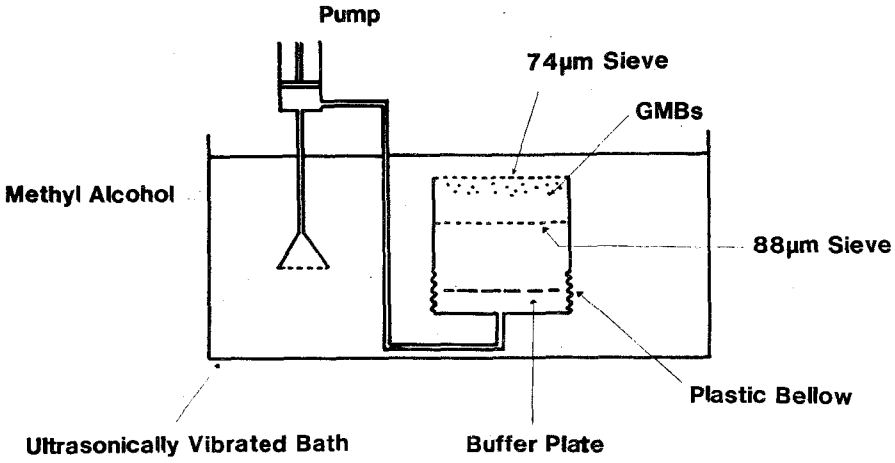


図３－３　湿式超音波分粒装置

分続けた。この他にさらに機械的振動を与えたものについても行なった。これにより７４ μm^{ϕ} 以下のＧＭＢが取り除かれる。

比較のために７４μmメッシュの上にＧＭＢを置き流水で６０分間洗い，７４μm以下のＧＭＢを取り除いた資料も作った。

実験後ＧＭＢを取り出し，任意にサンプリングし，顕微鏡写真を撮り直径の分布を測定した。

(3)　実験結果

実験に用いた公称７４μm のふるいの開口部の実測値を表３－Ⅱに示した。実測値は８０μm が一番多く，実験結果はこちらで示した。

図３－４は湿式超音波ふるい選別の結果である。比較のため流水による結果も同時に示した。これは５００コのサンプルの直径分布グラフを作成し，直径８０μm以上では分布が選別する前と同じはずであるから，各グラフが重なり合うように系

表３－Ⅱ　実験に用いた７４μm標準ふるいの開口径実測値分布

μ	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
個数	2	2	1	7	0	2	2	0	16	1	1	0	0	2

数をかけ，直径ごとの除却率を求めたものである。水で洗った例では直径５０μmのものはすべて洗い流されているはずであるが，４０％のＧＭＢが残っていた。超音波を用いた例でも４～６％のＧＭＢが残り，７５μmでは２５％ものＧＭＢが残った。

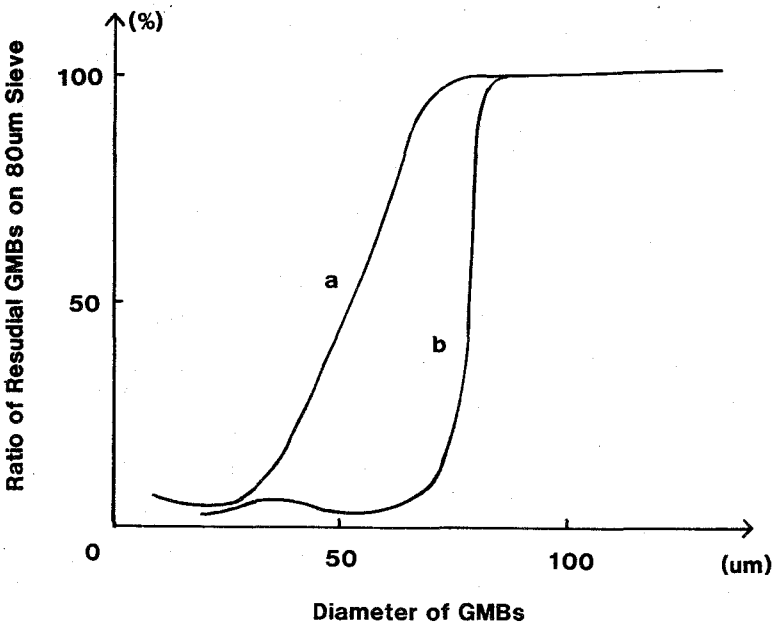


図３－４　ふるいによるＧＭＢの選別結果

実際にＧＭＢをふるい分ける場合，このように単一のふるいで行なうのではなく，少なくとも直径で１０μm ずつふるい分けできなければ意味がない。実験結果では７０～８０μmの間に多数のＧＭＢが含まれていてまだ満足できる結果ではない。今後問題点として検討すべきことは，超音波をかけることによりＧＭＢ同志の付着をはずし易くなるが，超音波によりできる定在波にＧＭＢが捕えられ，浮き上がれなくなる。メッシュの開口部よりわずかに大きなＧＭＢが開口部にはいったとき，超音波があるとくい込んで目詰まりを助長するなどの問題点がある。さらに回収率が悪いので，ＧＭＢが少量しかないときは使えない欠点がある。小型で目詰り対策を施した自動選別装置が必要である。

３－２－２　比重による選別

(1)　実験装置と方法

あらかじめ直径で分類しておいたＧＭＢを比重で選別することにより同じ壁厚の

GMBを選別することができる。GMBのみかけの密度は 0.2 g／cc 程度であるから，液体を用いた比重選別はできなかった。著者等は密度を 0.2 g／cc 程度に高めることのできるSF_6 ガスを用いて密度選別を行なったので，その結果について示す。

実験装置の略図を図３－５に示す。装置は内径３㎝，高さ１０㎝の黄銅円筒をもとに作った。外側にはヒーターを上部になるほど密になるように巻いた。これはSF_6 ガスの対流が発生しないようにするためである。装置の底には電動バイブレーターを置き，その上に資料皿を取り付けた。容器上部にはカサ状のコレクターと回収容器を取り付けた。本体には内容積 200㎤ のリザーバータンクを取り付け，SF_6 ガスの昇圧に利用した。ガスとして SF_6を用いたのは，臨界温度が低く（６３℃）高い密度を作り得ること，毒性が低いためである。

0.5 cc のGMBを資料皿の上に置き真空排気後容器温度を６３℃以上に高めた。SF_6 ガスを氷で冷却したリザーバータンクに導入した。SF_6 ガスはここで液体として溜ったのでこの部分の温度を調節することで本体の圧力を調整した。バイブ

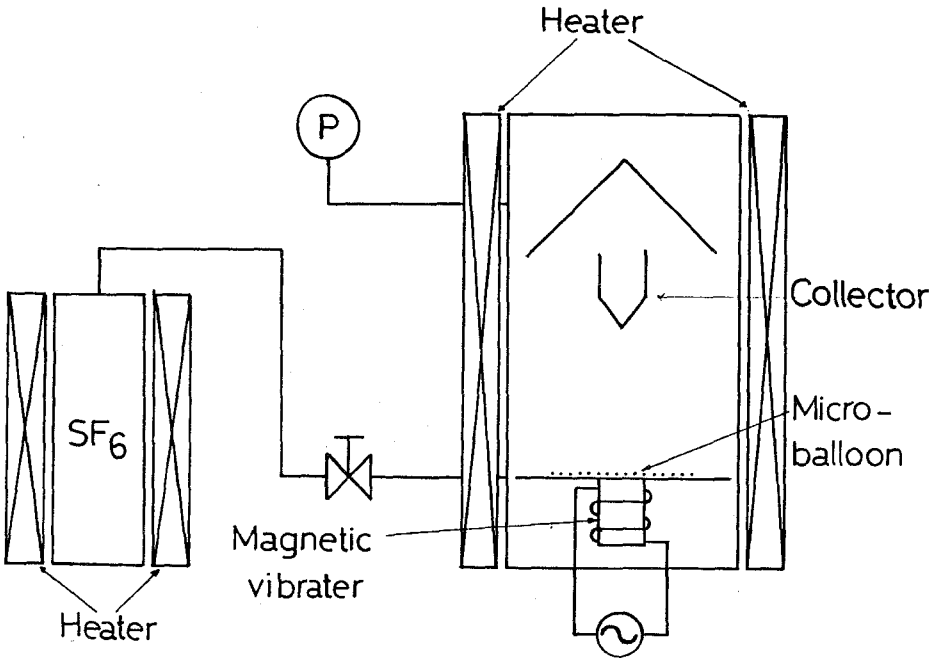


図３－５　密度選別装置

レーターに交流電流を流し，ＧＭＢを振動させながらＳＦ$_6$ガスを導入し圧力を３２kg/cm^{2}まで高めた。このときのＳＦ$_6$ガスの密度は 0.2g/cm^{3}である。軽いＧＭＢは浮き上がり，上のコレクター上部に集まった。ここで圧力を下げるとＧＭＢは下の回収容器の中に落ち，軽いＧＭＢだけを取り出した。取り出したＧＭＢを無作為に選び出し，干渉顕微鏡で直径壁厚を測定し，密度を計算した。

(2) 実験結果

この実験では２５０mg のＧＭＢから平均密度 0.19g/cm^{3}のＧＭＢが１５mg回収できた。この方法の問題点はＧＭＢが固まりになって浮き上がることであった。重いものも軽ＧＭＢと一体となって浮き上がるため精度の良い分離ができなかった。振動皿を用いなかったときの密度の分布はもとの資料のそれと同じであった。振動皿を用いたときの分離前と分離後の密度の分布を図３－６に示した。ここで用いたＧＭＢは３Ｍ Ｂ４０Ａで，より広い密度の広がりが有った方が実験し易かったため直径選別を省略したものを用いた。

振動皿の効果を確かめるために分離の精度と振動皿の動きの関係を調べた。分離

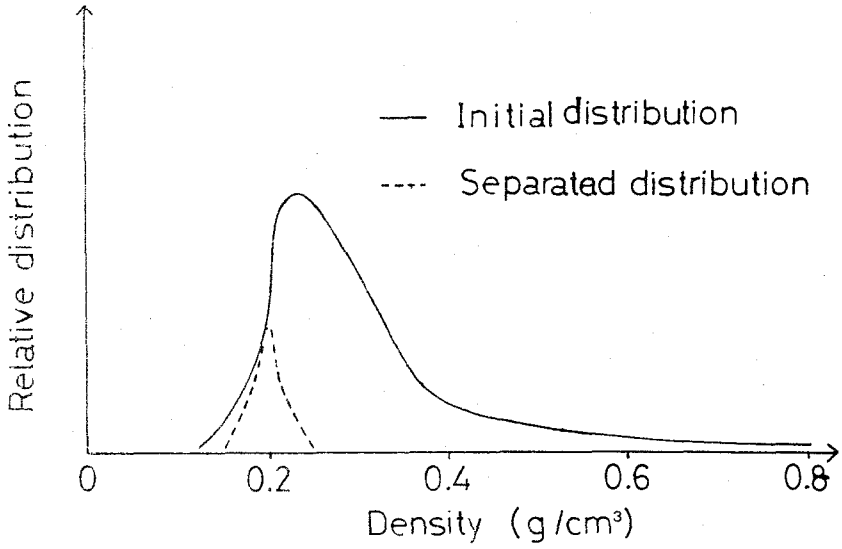


図３－６　密度選別前後のＧＭＢの密度分布

の精度は密度一個数のグラフにおいて，ＳＦ6ガスより重いＧＭＢの分散を求めて評価した。きれいに重いものが取り除かれているほど分散は小さくなる。
分散 σ^+ は

$$\sigma^+ = \frac{\sqrt{\Sigma[\rho_i - \rho]^2}}{n} \qquad (3-3)$$

$$[\rho_i - \rho] = \begin{cases} 0 & \rho_i < \rho \\ \rho_i & \rho_i \geq \rho \end{cases}$$

と定義する。ρ は気体の密度で，ρ_i は個々のＧＭＢの密度である。分散 σ^+ と振動皿の振動周波数との関係を図３－7(a)に示した。同時に振動皿の振幅 a，速度 v，加速度 α を示したものを図３－7(b)に示した。振幅 a は顕微鏡で実測したもの，v，α はそれぞれ

$$v = a\omega \qquad (3-4)$$

$$\alpha = a\omega^2 \qquad (3-5)$$

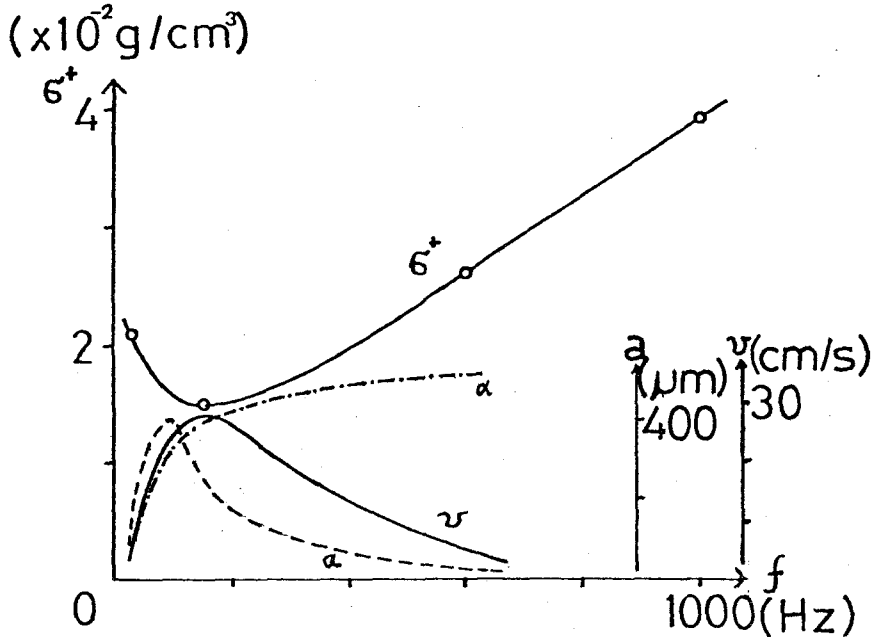
の関係で求めたものである。図を見ると分散 σ^+ と速度 v の間にもっとも強い相関関係が見られる。このことから，精度良く分離するためには付着によるポテンシャルをぬけ出すに足るだけの運動エネルギーをＧＭＢに与えてやる必要があることが推定できる。

ＧＭＢの粒子間の付着力が van der Waals かだとすると，そのポテンシャルは（３－１）式の積分値であるから

$$\varphi = \frac{A\,r_0}{12\,h} \qquad (3-6)$$

で，h にＧＭＢの表面荒さ 0.01 μm を，A に 10^{-12} erg を用いると φ は 4.2×10^{-10} erg となる。一方 180 Hz 付近での振動皿速度 28 cm/sec を直径 100 μm，壁厚 1 μm のＧＭＢが直接受け取ったとするなら運動エネルギーは 3×10^{-5} erg となり，van der Waals 力のポテンシャルよりはるかに大きい。実際のＧＭＢには静電気力も働くので正確にしきい値を推定することはできない。

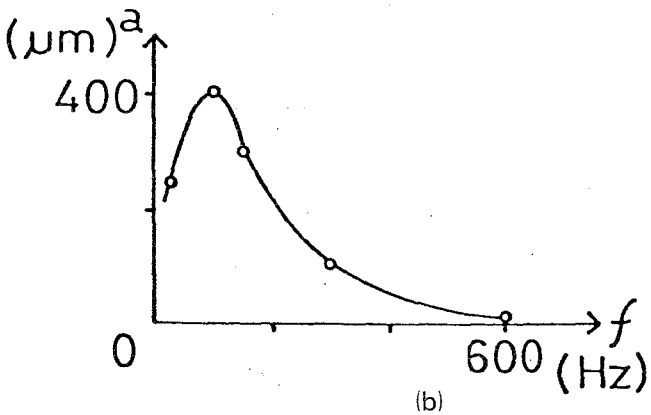
まとめとしてＳＦ6ガスを用いて比重選別を行なった。ピークから 1/10 に密度分布がなるまでを分離能力とするなら，その幅は 0.04 g/cm³ 程度となる。これを直



a, Amplitude of the vibrator
υ, velosity which was caluculated from a
α, Acceleration
f, Frequency of the vibrator

$$\sigma^{+}=\sqrt{\frac{\Sigma[\rho_n-\bar{\rho}]^2}{n}} \qquad [\rho_n-\bar{\rho}]=\begin{cases}\rho_n-\bar{\rho} & (\rho_n\geq\bar{\rho})\\ 0 & (\rho_n<\bar{\rho})\end{cases}$$

(a)



(b)

図３－７　比重選別後のＧＭＢの密度分散と振動皿の動き

径 100μmのＧＭＢにあてはめると厚さにして 1 ± 0.3 μm 程度のばらつきを許すことになる。この分離能力は十分とは言えず，今後の研究が必要である。

改良すべき点としては，振動皿を用いてもすべてのＧＭＢをばらばらにすること

はできなかった。この対策として，容器にスパークプラグをつけ，放電させることが考えられる。このようにすることにより，ＧＭＢは帯電し，静電気力でばらばらにすることができる。また対流を完全に無くすのも重要な問題で，容器全体を恒温水槽に入れることも必要であろう。容器の内壁にＧＭＢが付着して回収率が低下することも改良する必要がある。

３－２－３　ガラスマイクロバルーンの耐圧テスト

ＧＭＢに圧力をかけることによって壁圧が不均一なＧＭＢを選択的に破壊し取り除くことができた。

実験装置を図３－８に示した。高圧部は重水素圧入装置を流用したもので，厚さ３㎝のステンレス製基板，厚さ２㎜のスペーサー兼バックアップリング，厚さ１０㎜のアクリル板で構成されている。ガスの昇圧は専用に設計されたポンプで行なう。高圧ピストンに直径１０㎜のステンレス棒を焼き入れしたもので，テフロン製Ｖパッキングを５枚使用して気密を保っている。ポンプは８気圧の窒素ガスで駆動した。

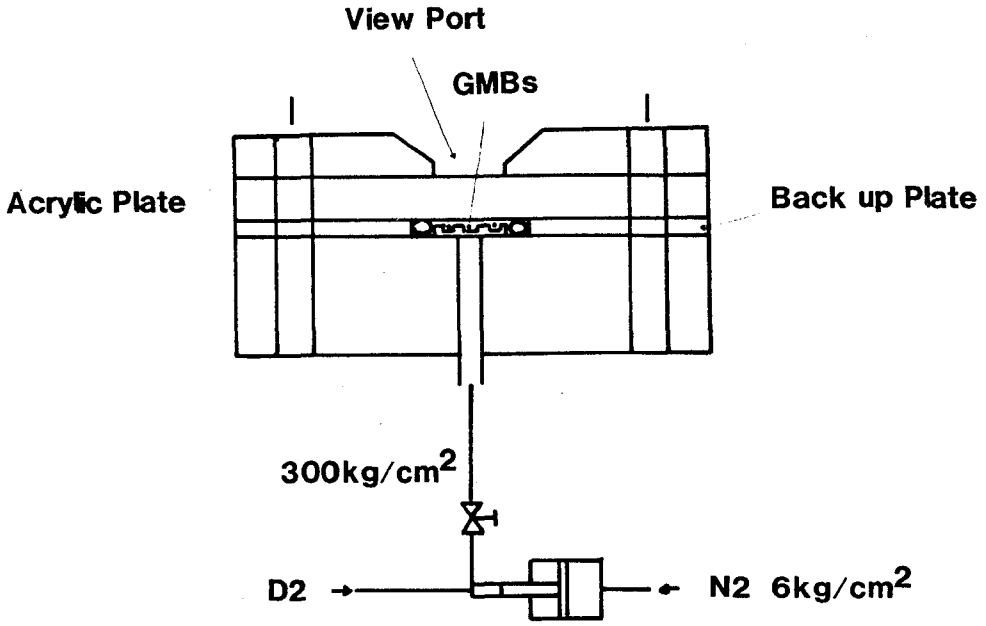


図３－８　ＧＭＢ耐圧テスト装置

実験方法として直径１０㎜の板に凹を多数作り，その中に直径，壁厚，均一性を測定したＧＭＢを１個ずつ入れ，圧力を少しずつ高め観測窓から破壊したことを確認してから圧力を読む方法と，容器に多数ＧＭＢを入れ，圧力をかけた後水に浮かせ，割れたＧＭＢを分離し重量変化を測定したり，残ったＧＭＢの均一性を測定する２通りの方法を試験した。これは多数のＧＭＢを入れて実験すると，一個が割れた場合に隣接するＧＭＢも割れる恐れがあったからである。

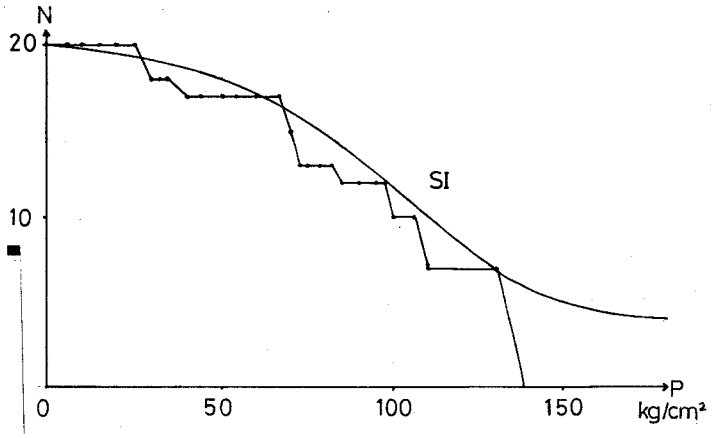


図３－９　ＧＭＢ ＳＩの耐圧性能，実線は重量減少法で測定。折線は個々のＧＭＢについて調べた。

図３－９は重量法で行なったものと，ＧＭＢを約0.8㎜はなして置いて圧力をかけた場合の残存率を示している。ＧＭＢはＳＩを用いた。この結果を見る限り，一個ずつ分離して置いた方が割れにくいとは言えなかった。但し，割れるときは数個ずつ割れたことから，割れたときに発生した音波で限界に近かったＧＭＢが割れたとも判断できる。

また図３－１０は窒素ガス１００気圧をかける前（点線）とかけた後（実線）のＧＭＢの均一性の分布を示している。一方向からのみ３００個のＧＭＢについて均一性を測定したもので，横軸は壁厚の均一性（$\triangle t/t$），縦軸は個数である。圧力をかけたことにより，不均一なＧＭＢが破壊されたことが示されている。

次に個々のＧＭＢの直径，壁厚，均一性を測定し，破壊した圧力を求めた結果の一部を表３－Ⅲに示した。用いたＧＭＢは大工試＃２５８である。これだけの結果を見る限り不均一だったり，薄いＧＭＢが必ず先に破壊するとは言えないが，実験

で70個のGMBを用いて行なった結果では，厚さ，直径と破壊圧力とに相関関係を認めることができた。

ヤング率をE，ポアソン比をυとした場合，半径r，壁厚tのGMBが破壊する圧力P_Cは

$$P_C = \frac{2\ E\ t^2}{a^2\sqrt{3(1-\upsilon^2)}} \qquad (3-7)$$

で与えられる。実験結果をこの値で正規化し，度数分布を求めた結果を図3－11に示す。この結果から80％のGMBが破壊されずに残るための最高圧力は$P_E/P_C = 0.6$のときであることが分った。燃料充塡時に80％のGMBが破壊されずに残るため

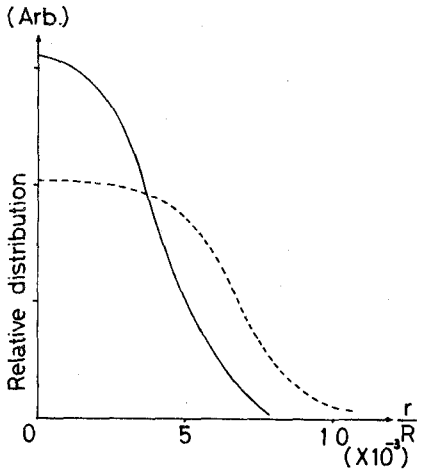


図3－10　加圧による不均一GMBの除去，加圧後（実線）不均一なGMBが少なくなっている。

表3－Ⅲ　GMBの座屈圧力

No.	ϕ (μm)	t (μm)	$t-\triangle t$	P_C kg/mm²	測定値	測定値/理論値	備　考
1	250	1.22	1.22	80.4	102.5	1.27	均一性よい
2	270	1.74	1.74	141.2	113.0	0.80	
3	253	1.46	0.94	46.4	80.0	1.72	
4	252	1.77	1.49	118.6	124.0	1.05	
5	193	1.31	1.24	140.3	185.0	1.32	
6	270	1.53	0.70	22.4	60.0	2.68	
7	237	1.87	1.87	212.9	124.0	0.58	均一性よい
8	260	1.26	1.15	65.9	185.0	2.81	
9	306	1.07	1.04	38.8	50.0	1.29	
10	320	1.17	0.73	17.4	40.0	2.30	

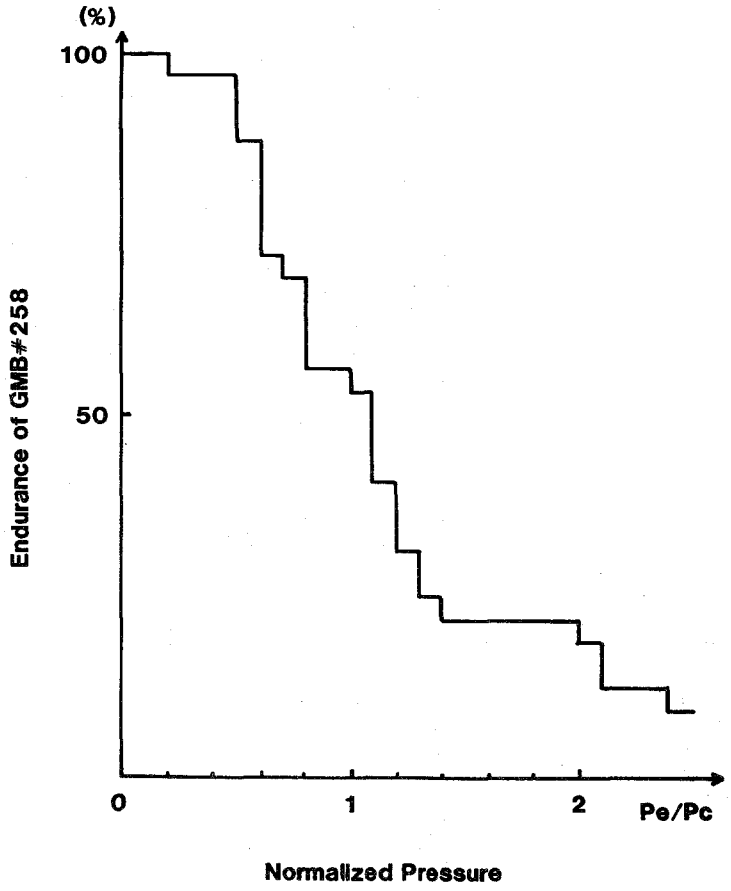


図３－11　大工試#258GMBの耐圧特性。横軸は正規化した圧力

の直径，壁厚，充塡時圧力の関係を図３－12に示した。

§３－３　ターゲットの検査

３－３－１　干渉顕微鏡による均一性の検査

ＧＭＢは前節までのプロセスで選別されるが実験に用いるまでには直径，壁厚，均一性，表面状態などを正確に把握されなければならない。特に壁厚の均一性，表面仕上げは流体力学的不安定性の関係で，均一性±１％，表面仕上は ２００A°単位で知る必要がある。ここで、壁厚で言うなら均一性も表面仕上げも同じことで，いかなる平均値からのずれもフーリエ－変換すれば同じ周波数と振幅で特徴ずけられる。

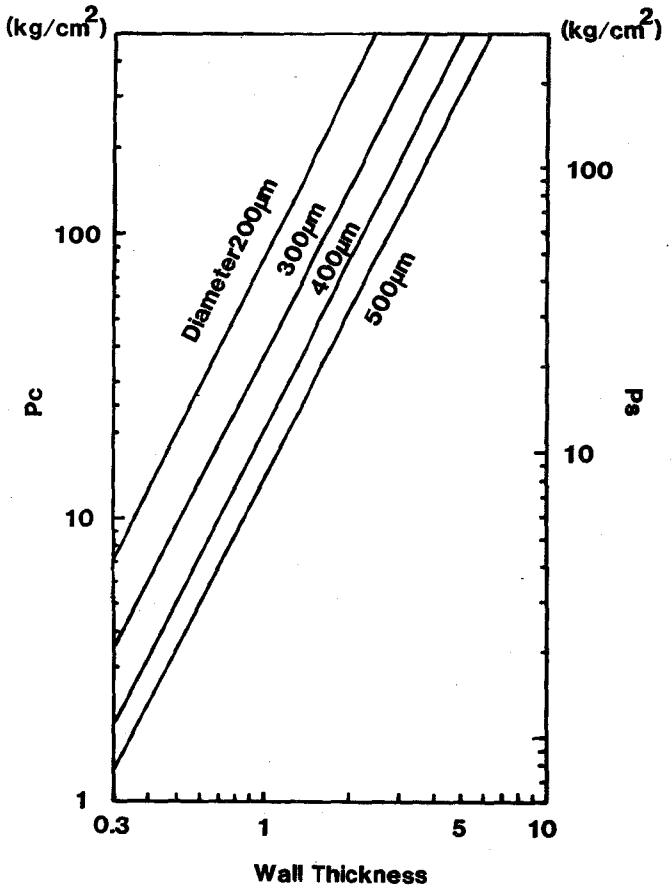


図３－12　燃料充塡時に８０％ＧＭＢが破壊されないで残るための条件

便宜的に零次のものを均一性，高次のものを表面仕上げと呼ぶ。

均一性の測定としては４章のコーティング膜についても必要であるが，ここではＧＭＢを中心として述べる。干渉顕微鏡にはトワイマングリーンやダブルビーム干渉顕微鏡が実用化されているが，著者はインターファコ型干渉顕微鏡を用いて行なった。インターファコは他の２つの方法のように光路長の等しい対物レンズやスライドガラスを必要とせず取扱が容易である。インターファコ干渉顕微鏡の原理を図３－１３に示す。照明には白色光を用いフリンジの対応を容易にする。資料を出た光は２分され，一方はロータリーウエッジで空間的にずらされた後，参照光と合成される。図３－１４に壁厚測定用にセットされた干渉パターンを示す。干渉フリンジ間隔をD，試料によるシフト量をdとするとすれば，ＧＭＢの壁厚tとの関係はよく知られている通り

$$2t(N-1)=\frac{d}{D}\lambda \qquad (3-8)$$

である。ここでNはガラスの屈折率でλは光の波長である。Nは実験で求めたものを用いλは光の波長で，白色光の場合 0.5 5 μmを用いた。白色光に用いる波長 0.5 5 μmの値は同じセッティングでHe Ne レーザーを用いて校正したものである。

ＧＭＢに燃料が充塡されているときや，コーティングがされている場合補正項が付け加えられる。

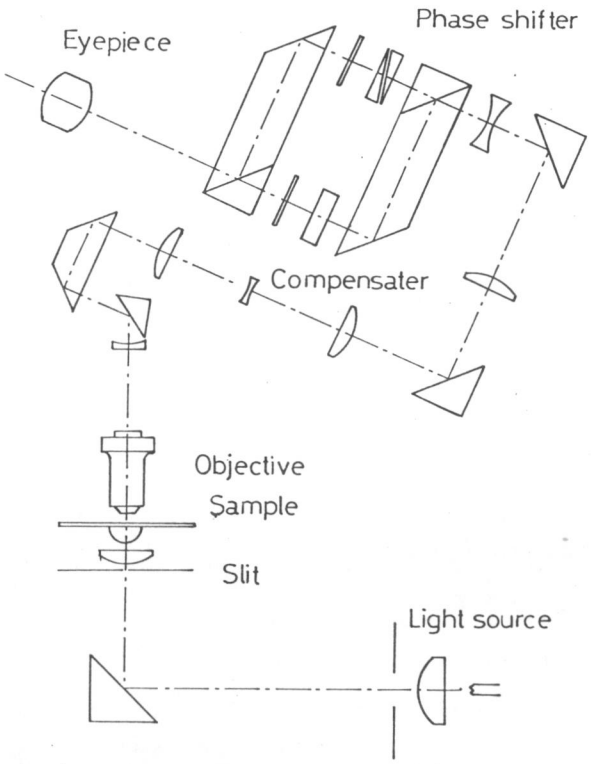


図３－13　インターファコ干渉顕微鏡

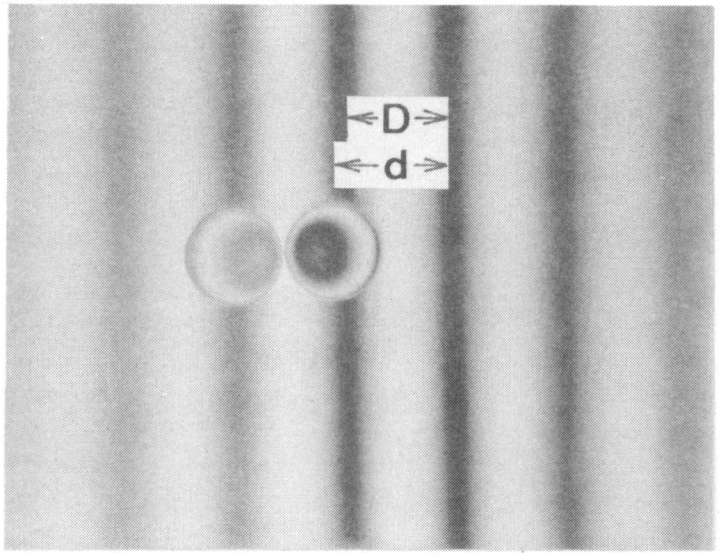


図３－14　インターファコ干渉顕微鏡による壁厚測定

$$2R(N_G-1)+2t_C(N_C-1)+2t(N-1)=\frac{d}{D}\lambda \qquad (3-9)$$

$$N_G=1+1.21\times10^{-4}P \qquad (3-10)$$

P　重水素ガスの室温での圧力(atm)

R　GMBの内径

t_C　コーティング層の厚さ

N_C　コーティング層の屈折率

均一性の測定は，式(3－9)に相当する測定を必要な個所だけ行なうこともできるが，干渉顕微鏡を操作することにより簡単に行なえた。2つのビームを完全に平行に干渉させると，視野中の干渉フリンジは消滅し，背影は単一色となり，GMB中に現れている同心円状の干渉フリンジはGMBの壁厚の均一性と対応するようになる。図3－15にこのときの干渉パターンを示す。又，図3－16に解析のためのモデルを示す。GMB中心部の光路長Lは

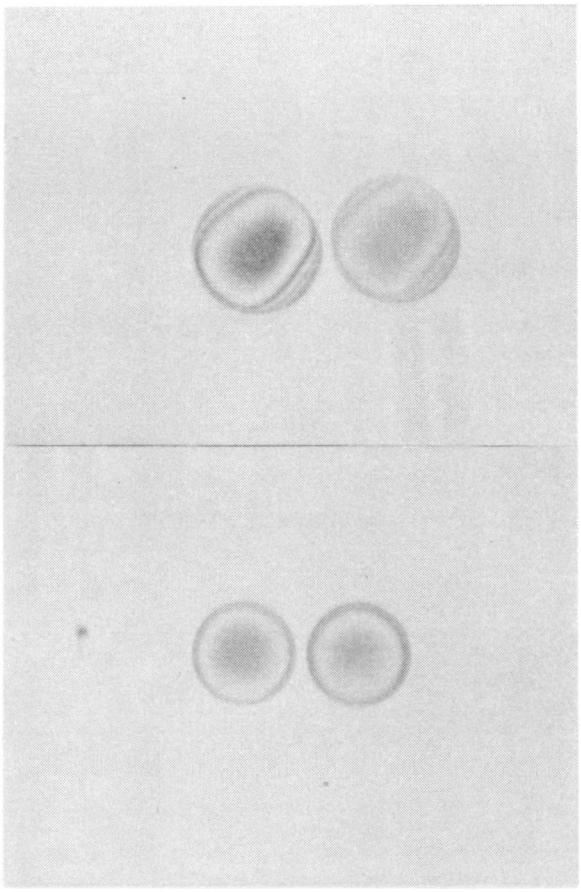


図3－15　干渉顕微鏡による均一性の検査

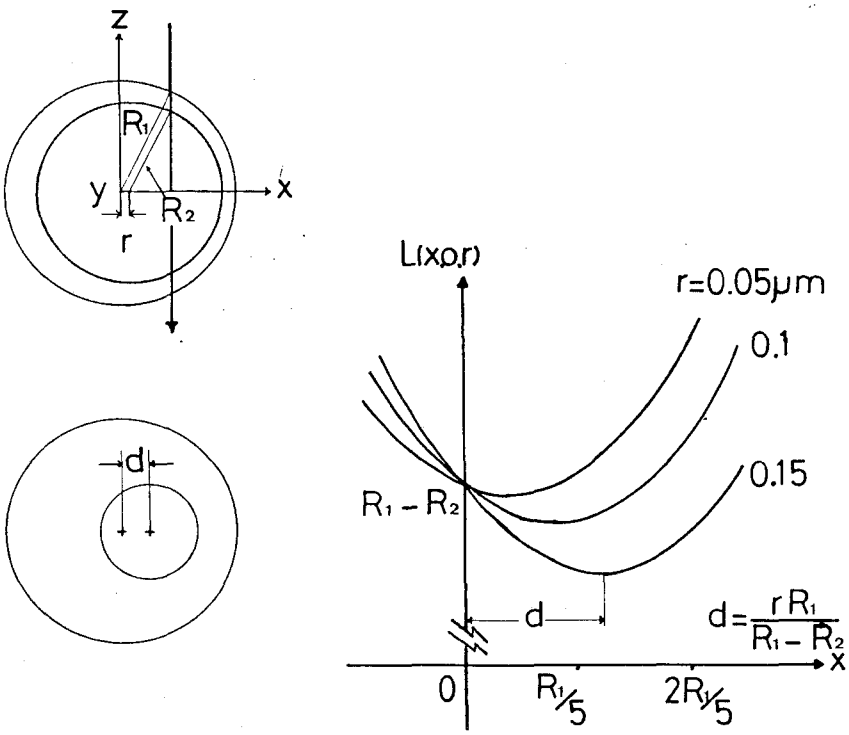


図３－16　均一性評価のためのモデル

$$L = 2n[(R_1^2 - x^2)^{1/2} - \{R_2^2 - (x-r)^2\}^{1/2}] \qquad (3-11)$$

で表わされる。干渉フリンジの中心は，この場合光路長の一番短い所である。これを微分することにより，干渉フリンジの中心とＧＭＢの中心とのずれdは

$$d = \frac{rR_1}{R_1 - R_2} \qquad (3-12)$$

で表わすことができる。$R_1 - R_2$は壁の厚さに対応し，特にアスペクトレシオ$R_1/R_1 - R_2$が大きい球に対しては精度良く測定できる。

３－３－２　Ｘ線コンタクトグラフによる検査

干渉顕微鏡は透明なターゲットに対しては有力な手段であるが，不透明なターゲ

ットに対しては無力である。金属バルーンや金属コーティングの検査に使えるのはX線コンタクトグラフである。ここではX線コンタクトグラフによる均一性及び欠陥の検査能力について議論する。

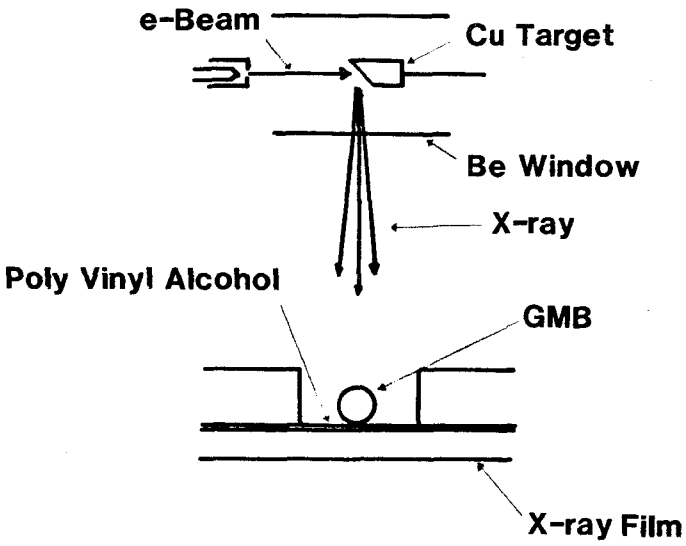


図3－17　X線コンタクトグラフ

実験に用いたX線撮影装置は微生物研究用に開発されたもので，その概略を図3－17に示す。X線管は銅をターゲットとし～7 keVまでのソフトX線を発生する。発生したX線は厚さ50μm のベリリウム窓から取り出され，6㎝下方に置かれたフイルムを照射した。フイルムはコダックType 649を用いた。資料のGMBは厚さ 300μmの板に多数の穴を開け，厚さ数 100A° のポリビニールアルコールの底を張ったものに一個ずつ入れて撮影した。結果はマイクロデンシトトレーサー又はTVラインセレクター，オシロスコープでオパシティを測定した。絶対量はポリビニールアルコールの薄膜上に水晶膜厚計でモニターしながら金を0.1μmコーティングした標準資料とパシティを比較して決めた。

実験に用いたX線コンタクトグラフのX線源のスペクトルを図3－18に示す。これはX線管より 10㎝の所に Si Li 半導体検出器によるX線アナライザーで調べたものである。X線管には電圧 7 keV ，電流 3mA の加速電圧がかけられていた。又，X線管と検出器の間には ～50μm$^{\phi}$ のピンホールを置いた。X線ピンホールカメラで撮影した光源の形状は 150μm× 500μm の長円形であった。

図3－19 はGMBのX線像で，上段は均一な壁を持っている場合，下段は不均一及び欠陥を持っている場合である。オパシティを測定し，均一性の評価ができる。

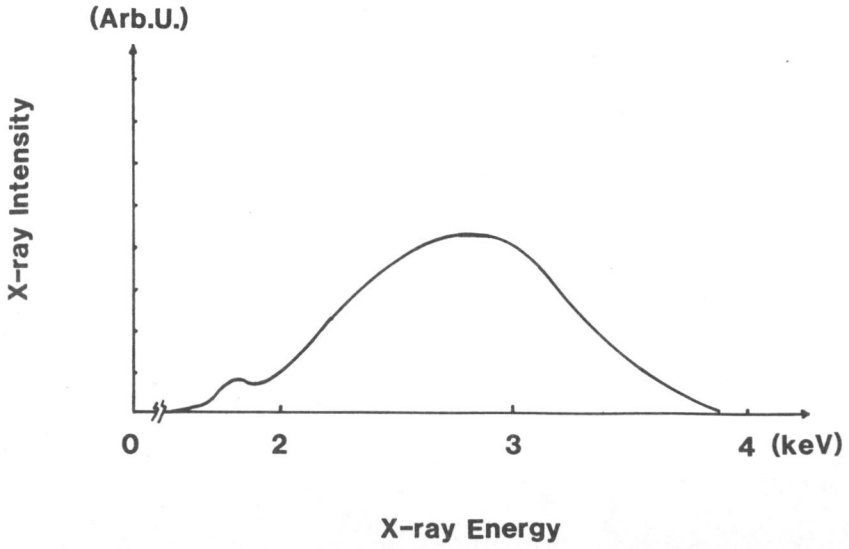


図3－18　X線コンタクトグラフのX線源スペクトル

X線フイルムのγカーブを線形と仮定するならば，コーティング膜の厚さの比は近似的に

$$\frac{\ell_2}{\ell_1}=\frac{\log T_2}{\log T_1} \qquad (3-13)$$

但し、

$$\ell_n=2\sqrt{R_0 t_n-t^2_n} \qquad (3-14)$$

で与えられる。ここでℓはX線吸収長，R_0は金コーティング膜内径，tは膜厚である。通常金のコーティングの場合$t \ll R_0$であるから

$$\sqrt{\frac{t_2}{t_1}}=\frac{\log T_2}{\log T_1} \qquad (3-15)$$

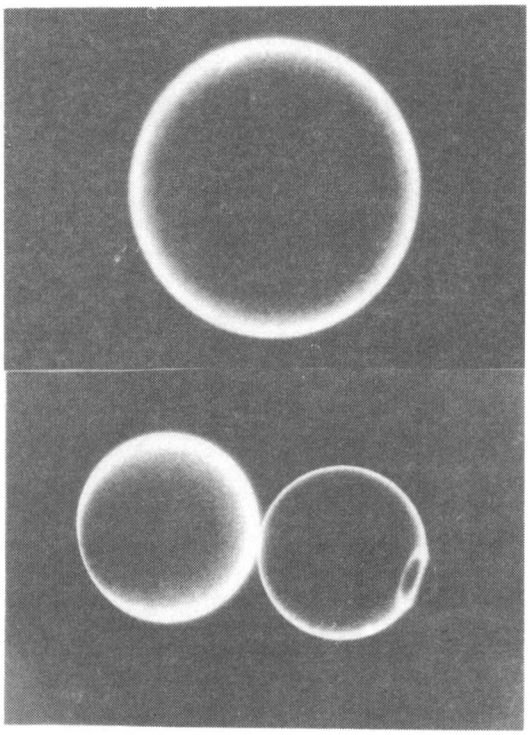


図3－19　ガラスマイクロバルーン上にNi0.2 μmコーティングしたターゲットのX線写真

である。$\ell og\ T_2 / \ell og\ T_1$ に対して $1/100$ のオーダーまで測定できるとするならば t_2/t_1 は±2%の精度で検査可能であることが分る。写真のコーティング膜では厚さのばらつきは±2%であった。

§3－4　表　面　検　査

前節では均一性を中心に議論した。ここでは表面仕上げ，即ち局所的な不均一性について現在利用し得る技術と核融合用ターゲットに必要な精度について述べる。

流体力学的不安定性を考えたときのターゲットに要求される表面仕上げは，2章で述べた通りブレークイーブン用ターゲットでは100～1000 A° 必要である。表面上の欠陥の高さを $\triangle h$，底辺のひろがりを w とするとき，ブレークイーブン用ターゲットに要求されるこれらの関係を図3－20に示した。[4] 波長が壁厚と同じ程度のとき一番厳しく200A° 程度とされ，波長が短い側ではスムージングのため，また波長の長い側では不安定性の生長率が遅いことなどで緩和される。以下各装置での能力を議論する。

(a)　走査型電子顕微鏡

走査型電子顕微鏡は2次電子の発生量が入射ビームと資料のなる角度によって異

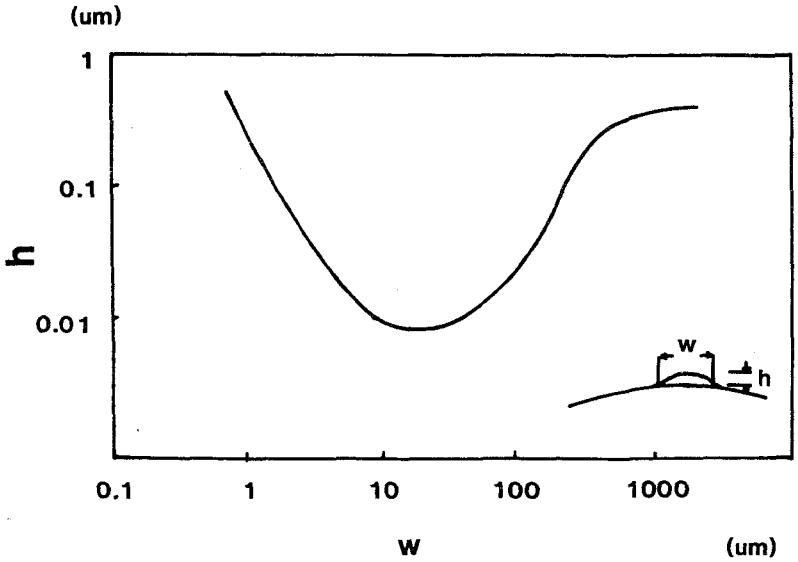


図3－20　高密度圧縮ターゲットに許される表面荒さ

なることを利用したもので，手軽に高分解能を得ることができる。十分立体感の試料に対して30～100A°の欠陥も検出できる。寸法の絶対値を測定する場合ではブラウン管の歪が有るため0.5～3％の誤差を伴う。試料を動かせて測定する場合は移動装置の精度で決り，1～2 μmが限度である。近年のＩＣ製作などで使われる高精度のものを用いれば0.1 μmの測定も可能である。

電子顕微鏡の欠点は大きく広がった欠陥に対しては高さの測定が困難であるということである。高さと広がりの比が $1/20$ まで検出可能であるとした場合の $\triangle h - w$ との関係を図３－21(a) に示した。

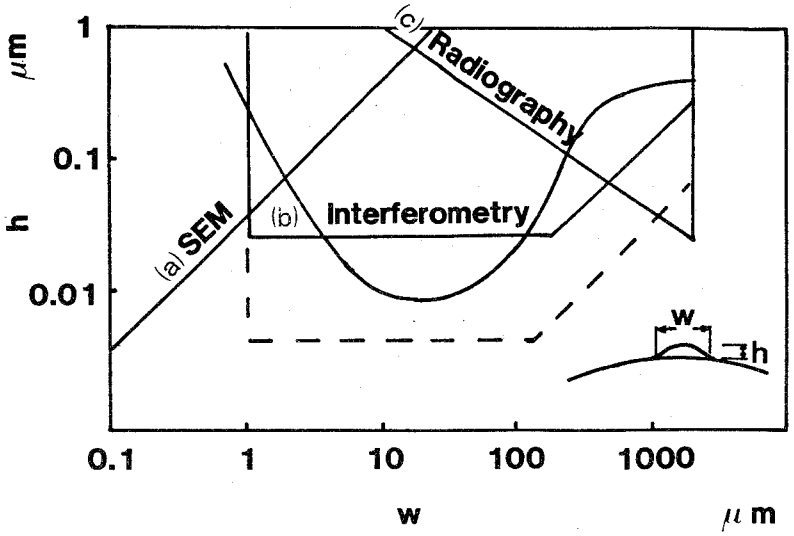


図３－21　表面仕上げと検出限界

(b)　光干渉顕微鏡

光干渉顕微鏡で欠陥の大きさを測定する場合，透過型で用いると空間的な広がりに対して 5 μm程度となる。光学顕微鏡自体では1 μm の分解能も可能であるが，位相差を測定する場合，色を識別する必要があり実用的な分解能が低下する。厚さ方向の測定ではフリンジシフトを $1/20$ まで読み取れたとして，ガラスでは0.02 μmが測定限界となる。これは位相差測定を自動化することにより，0.001 μm まで測定可能である。干渉顕微鏡による測定限界を図３－21(b)に示した。

(c) X線コンタクトマイクログラフ

試料をフイルム上に置き点光源から出たX線で露光する。この方法では空間的な分解能は光源の大きさとフイルムの粒子で決る。先に述べたように球全体に広がるような欠陥に対しては 0.01μmの測定も可能である。この方法の不利な点は数 μmの同じ材料の欠陥が球全体に広がる場合である。このときは積分されるため分解能は落ち，図3－21(c)の関係になる。

以上で現在の測定器での検出限界を示した。噴出型圧縮で液体密度の100倍程度の圧縮を目標とするなら，現在の技術で可能であり，問題は生産ラインに入れるための能率になる。高利得ターゲットを目標とする場合，位相差測定の自動化等の研究が必要である。

§3－5 まとめ

本章ではペレットターゲット製作の基礎となる燃料容器の選別と検査について述べた。

代表的な燃料容器であるガラスマイクロバルーンの直径，比重，圧力による選別を行ない，その問題点を明らかにした。

検査技術ではインターファコ顕微鏡による簡単な均一性の検査法を示した。

参考文献

1) 野上正行，守野喜郎；レーザー研究，**8**，793，(1980)

2) 椿原 啓，中塚正夫，久保宇市；レーザー研究，**7**，172，(1979)

3) 田丸謙二，界面の化学，岩波書店

4) Lawrence Livermore Lab, Laser Program Annual Rept. (1976)

第4章　ペレットコーティング技術

§4－1　はじめに

第2章で示した通りペレットに種々の物質をコーティングすることによりペレットターゲットの特性を変えることができる。低原子番号の材料からなるアブレーターをコーティングすることにより，燃料を断熱圧縮することができるし，また熱伝導が良いことから有限ビームによる照射の不均一性から発生する爆縮の非対称性を改善できる。また原子番号の大きい物質（プッシャー）をコーティングしたり，低原子番号の材料の中に数重量％の高原子番号の材料を混ぜたものをコーティングすることにより燃料のプリヒートを防止することができる。またアブレーターとプッシャーの間の密度変化を連続的にすることにより流体力学的不安定性を抑えることができる。

アブレーターとしては厚さ1～20 μmのプラスチックが用いられる。厚さの均一性（$\triangle t/t$）は±3％以下，表面仕上げは最高200A°以下が必要である。

産業界ではプラスチックをコーティングする場合，パンコーティング法などが用いられるが核融合ペレットなどの小さなものには適さない。[1] アブレーターコーティング法として米国のローレンスリバモア研究所では誘導放電型プラズマ重合とパリレンコーティングが，[2] 同じくロスアラモス研究所では容量放電型プラズマ重合とパリレンコーティングが研究されている。[3] しかしながらこれらのコーティング法は装置固有のパラメーターによる特徴も多く単なるコピーでは良い結果が得られない。著者はプラズマ重合，パリレンコーティングのコーティング速度，均一性，表面仕上げなどの基本的な特性を調べるとともに密度勾配を付けたコーティングや，TaCHO プッシャーコーティングを試みたのでその結果についてまとめる。高原子番号材料によるプッシャーコーティングは蒸着法，スパッタリング法を用いたことにより，レビテーションの問題を除いてほぼ必要な仕様（厚さ～1 μm均一性±3％，表面仕上げ200A°）を満足できるので省略した。

§4－2　プラズマ重合

4－2－1　目　　的

プラズマ重合は低圧モノマーガス中で放電を行なうことにより高分子を形成するもので，著者はアブレーターコーティング法としてプラズマ重合を試みた。

本節では重合速度，均一性，表面精度などの基本的特徴を明らかにし，ターゲットコーティング法としての適合性を調べた結果を示す。またコーティング膜の特性の改良についても示す。

4－2－2　プラズマ重合装置

有機化合物の蒸気の中で放電を行なうと化合物はエネルギーを得て活性化し高分子を形成する。放電は一方では高分子の破壊を伴うので，いわゆる低温プラズマ，主としてグロー放電が用いられる。グロー放電を起こす方法としてコイルに高周波電流を流し誘導で放電を行なう場合と，平行平板電極を用いた容量放電型がある。前者はコンパクトでプラズマに高いエネルギーを与えることができ，後者は電極，チェンバーの設計の自由度が高い特徴がある。

著者は外部電極式の容量放電型プラズマ重合装置を試作し，諸特性のチェック

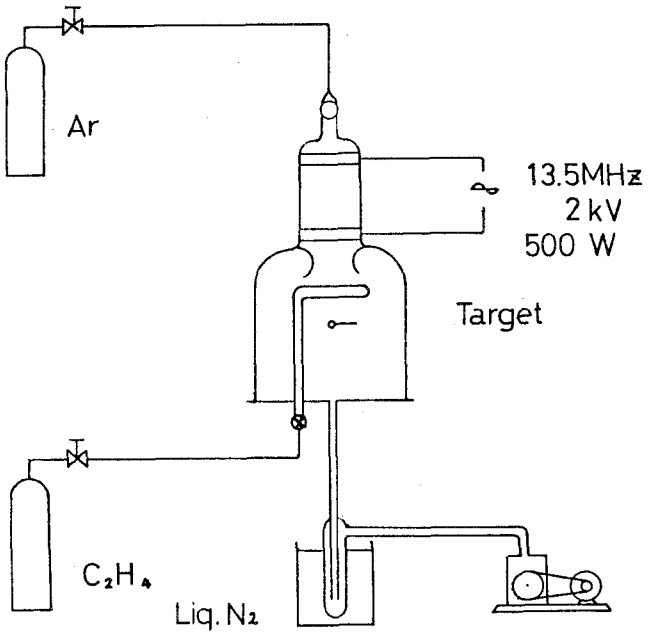


図4－1　外部放電型プラズマ重合装置

を行なった。装置の略図を図４－１に示す。電源は１3.5 MHz，最高出力１５０Wでマッチングボックスを介して電極に接続される。モノマーはリング状に配置されたノズルからチェンバー内に均一に供給される。キャリアガスのアルゴンは上部から導入され，電極付近に多量の重合物が付着するのを防止する。排気系は１０ℓの液体窒素トラップ，メカニカルブースターポンプで構成され，最高８００ℓ/minの排気速度を持ち，長時間種々の実験条件を安定に作り得る。ターゲットは枝に固定されノズル下１０cmの所に固定された。また電子密度の測定にはマイクロ波干渉計を用いた。

４－２－３　実験結果と検討

(a)　コーティング速度

プラズマ重合におけるポリマーの生成速度はモノマー分圧，放電電流，基板温度などによって変化する。[4] 重合の過程として，空間中で重合が行なわれる場合と基板上に吸着されたモノマーを中心に重合される過程があり，条件によりこれらの割合が変化するためである。常に再現性の良い結果を得るために重合速度と他のパラメーターとの関係を正確に抑えておく必要がある。

表４－１は，キャリアガスのアルゴル３０m Torr 放電電流 0.5 A一定とした場

表４－１　エチレンモノマー分圧とコーティング速度

Monomer Pressure (mTorr)	Deposition Rate (μm/hr)
20	0.5
40	1.4
60	1.9

合のエチレンモノマー分圧とガラスマイクロバルーン（GMB）上でのコート層の厚さを示したものである。モノマー分圧とコーティング速度はほぼ比例関係にある。さらに分圧を高めると放電状況が不安定になると共にチェンバー内部に粉末状の重合物が生成する。表４－２はアルゴン，エチレンの分圧をそれぞれ３０m Torr一定としたときの放電電流の増加とコーティング速度との関係を示す。この範囲内

表４－Ⅱ　エチレンをモノマーにした場合の放電電流とコーティング装置

Discharge Current (A)	Deposition Rate (μm/hr)	Electron Number Density $x10^9$ (cm^{-3})
0.4	0.5	2.6
0.6	1.0	3.7
0.8	1.3	---
1.0	1.7	6.0

で両者は比例関係にあり，コート層の表面状態も良い。さらに放電電流をふやすと電子密度の増加とコーティング速度の増加も少なくなる。これは主として，一個の電子の持っているエネルギーが増加することと，それによる高分子破壊が起こってくるためと思われる。

一般に常温常圧で気体であるものに対してパラキシレンのように液体である物質の方がコーティング速度が速い。図４－２はモノマーにパラキシレンを用い，基盤温度を変えた場合のコーティング速度の変化を示したものである。基盤温度が高く

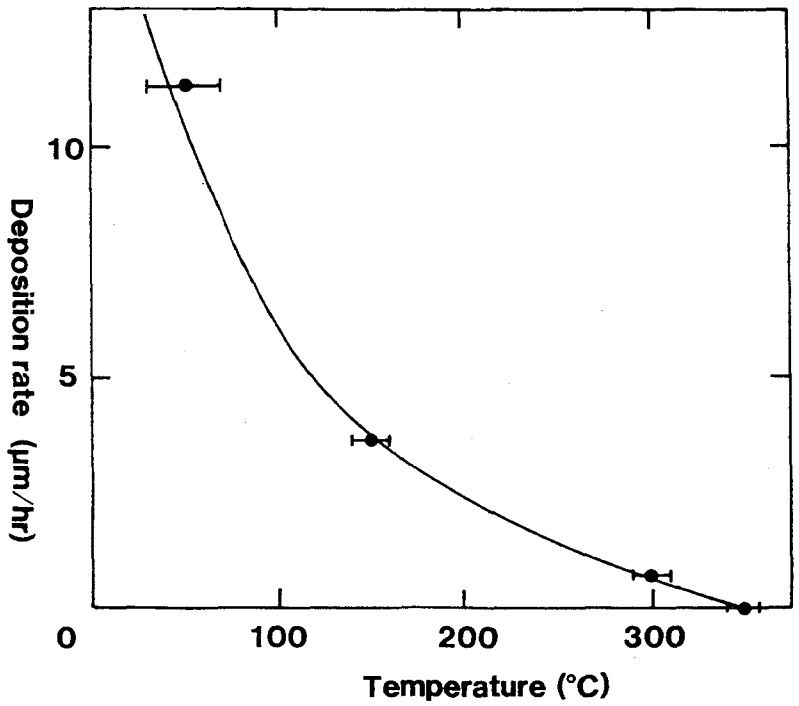


図４－２　基盤温度とコーティング速度の関係。モノマーはジパラキシレン

なるにつれ，コーティング速度は低下する。これは基盤上にモノマーが吸着されていて，そこに活性種が飛来し，重合を起こすと考えることによって説明がつく。最後に本装置でコーティング可能なものを表4－Ⅲに示す。

表4－Ⅲ　プラズマ重合でコーティング可能なプラスチック

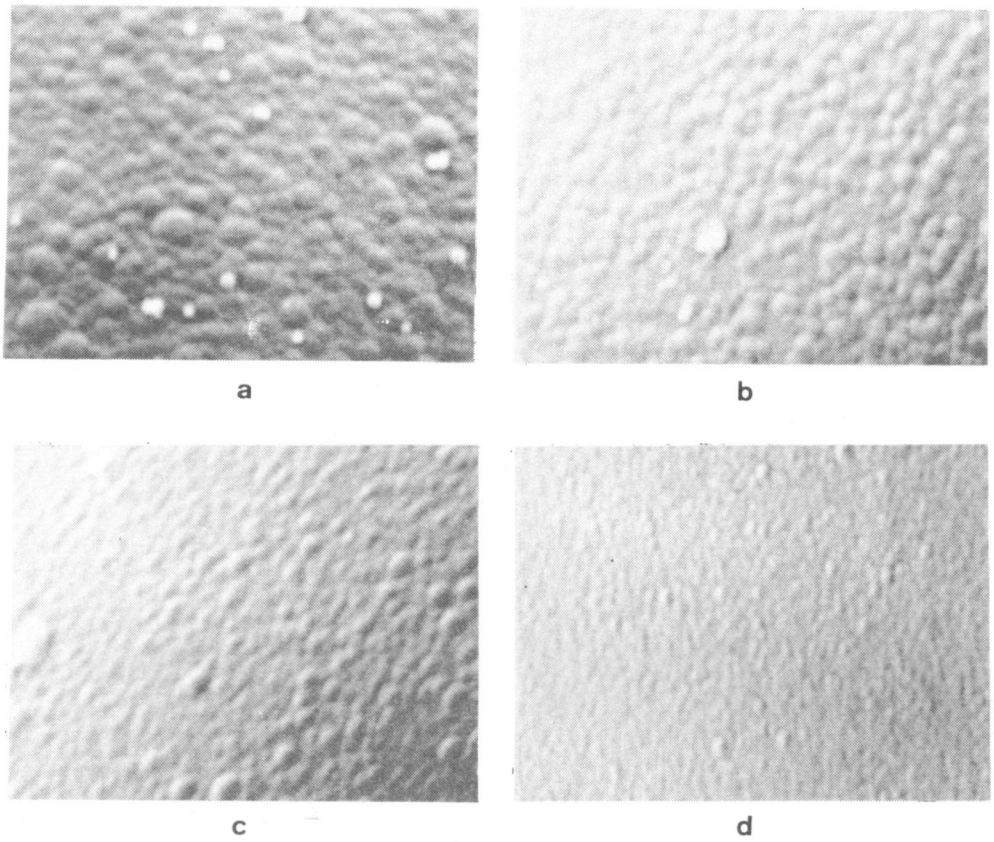
Increase of thermal conductivity	C_nH_m —— C_nH_m
Pusher deposition	$SiH_4 + O_2$ —— SiO_2
	C_nF_m —— C_nF_m
Stopper of hot electron	$C_2H_4 + Pb$ —— C_nH_mPb
	$C_nH_m + (C_2H_4O)_4Ta$ —— $TaC_nH_mO_1$
Doping of index	$C_2H_4 + C_2H_2Cl_2$ —— C_nH_mCl

(b)　表面仕上げ

ターゲットの表面はレーリーテーラー不安定性を抑えるため平滑ではければならない。最も有害なものはその凹凸の波長がシェルの厚さに近いもので，激光Ⅻ号クラスのターゲットでは0.1 μm程度である。プラズマ重合膜に発生する微小な凹凸の原因を調べるために2つの実験を行なった。

放電電流 0.5 A，反応チェンバー内圧力を90m Torr 一定とし，モノマー分圧と排気速度をパラメーターとしてコーティングを行ない，表面状態を走査型電子顕微鏡で観察した。結果を図4－3に示す。図中の排気速度はガス流入量とチェンバー内圧力から算出したものである。

図から分かるようにモノマー分圧が低下するにつれ，凹凸の波長が0.9 μmから0.5 μmまで減少した。また排気速度を増加すると，さらに0.2 μmまで減少した。この結果から判断すると表面の凹凸の主な原因は気相重合反応で生成されたポリマーが，ある程度の大きさの粒子になってGMB表面上に付着したと考えられる。モノマー分圧が高いことで反応が活発となり気相重合が進む。また排気速度を速くすることにより，粒子の気相滞在時間が少なくなり，粒子の生長が少なく，従ってコート層上での凹凸も少なくなると考えられる。従ってこの種の凹凸は気相重合が中



	Monomer Pressure (Torr)	Typical Defect size (μm)	Pumping Speed (l/min)
(a)	0.06	0.9	130
(b)	0.04	0.7	
(c)	0.02	0.5	
(d)	0.02	0.2	800

Total Pressure 0.09 (Torr)

図4－3　種々の条件下におけるプラズマ重合膜の表面状態

心と考えられる条件によるコート層に多いと考えられる。実際，表4－Ⅲ中のシランガス，エチレンガスによるコーティングなどに多く見られる。

コート層の表面状態を低下させるもう一つの原因は，大気中あるいはGMB上に付着している微細なゴミが関与している。キャリアガスのアルゴン中にもダストがあるのでラインにミリポアの0.05μm のフィルターを用意し，以下の実験を行なった。

A) GMB を洗浄しないで用いる。コーティング中に2回リークした。フィルター無し。

B) 洗浄したGMBを用いた。リークなし。フィルター使用。

重合条件はA) B) 共にP－キシレン200m Torr，アルゴン分圧40m Torr 放電電流0.15A，排気速度110ℓ/min で一定である。

結果を図4－5に示す。aでは波長が短く振幅の大きいコブが全体をおおっている。bでは波長が長く振幅の小さいコブが点在している。このことよりaはコーティング中に連続的に微細なコブがついたものと思われ，bは主にGMB上に付着していたゴミの上に均一に表面重合が進んでいったものと考えられる。

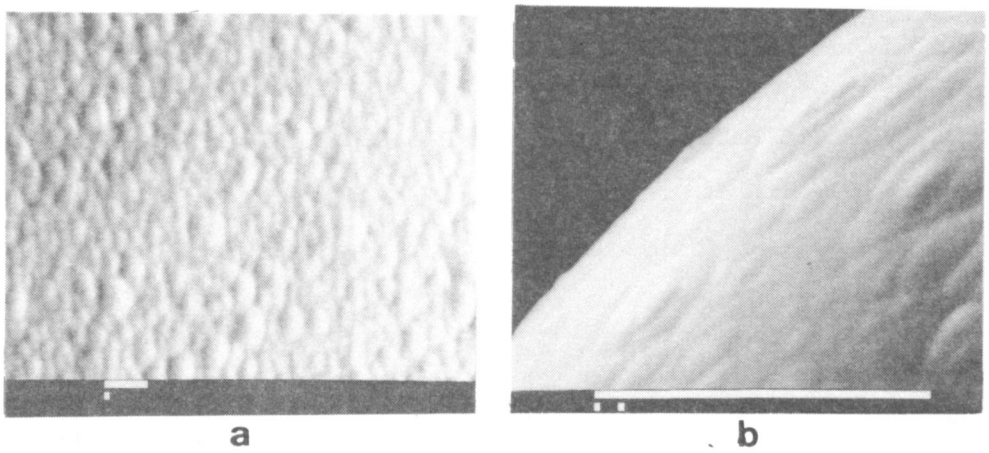


図4－5　気相中のゴミのコート層への影響

(c) 均　一　性

均一性の測定はささえをつけたGMB上にコーティングを行ない，X線コンタクトマイクログラフで撮影しコーティング層の厚さを測定する方法と，ガラスファイバーにコーティングし，断面を作り走査型電子顕微鏡で観測した。図4－6に電子

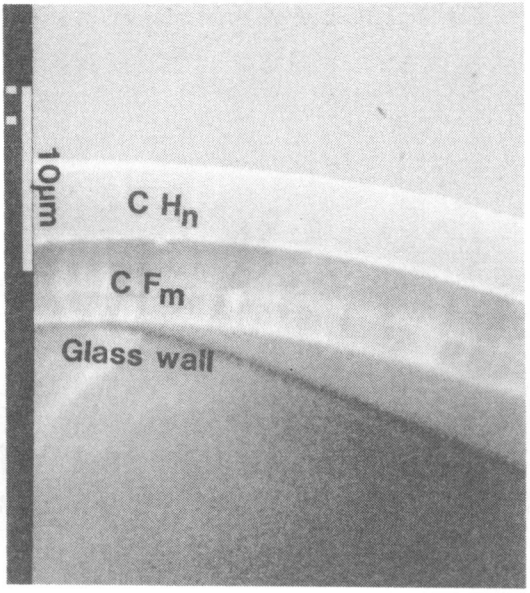


図4－6　プラズマ重合でポリエチレンをコーティングされたターゲット

顕微鏡写真を示す。直径200μm のGMB上にテフロンを5μm，ポリエチレンを4μmコーティングしたものの断面である。X線検査の結果では，チェンバー内にはわずかな下向きの流れがあるが，支えの附近を除いてコーティング層の厚さに有意な差は認められなかった。これはコーティング条件下では分子のドリフト速度は熱速度に比較して十分小さいこと，分子の平均自由行程は数十μmとペレットの直径と同じオーダーであることから理解できる。逆に支柱の近くが薄くなっているのは支柱によって活性種が“食われる”ためと思われる。

4－2－4　結　　論

プラズマ重合のペレットコーティング法に対する適合成について調べた。その結果コーティング速度は1～10μm／h であり，表面状態を良くするためには3μm／h 程度以下が適当である。この速度は実験室レベルでは十分である。均一性につ

いても支えの問題を除き容易に±２％は達成できる。表面仕上げ0.2 μm程度であり今後の改良が必要である。表面仕上げを良くするためには気相重合の抑制，クリーンネスの管理が必要である。

§４－３　密度勾配をつけたコーティング

４－３－１　特徴及び目的

燃料容器として用いられるガラスマイクロバルーン上に熱伝導の良い物質をコーティングし，ターゲットの圧縮の均一性を高めることを行なってきた。しかし，二種物質の密度差が大きいため，爆縮過程においてその境界面にレーリーテーラ不安定性（流体が学的不安定性）が発生する恐れがある。

レーリーテーラ不安定性の生長率は二層間の密度差を緩和することにより減少する。このため著者は，低Ｚコーティングの特性を損わず不安定性の抑制に有効な密度勾配を持つコーティングを，プラズマ重合による二種モノマーの共重合を利用して行なった。[5)6)7)]

４－３－２　実験装置と方法

実験に用いた外部電極型プラズマ重合装置の略図を図４－７に示す。二種のモノ

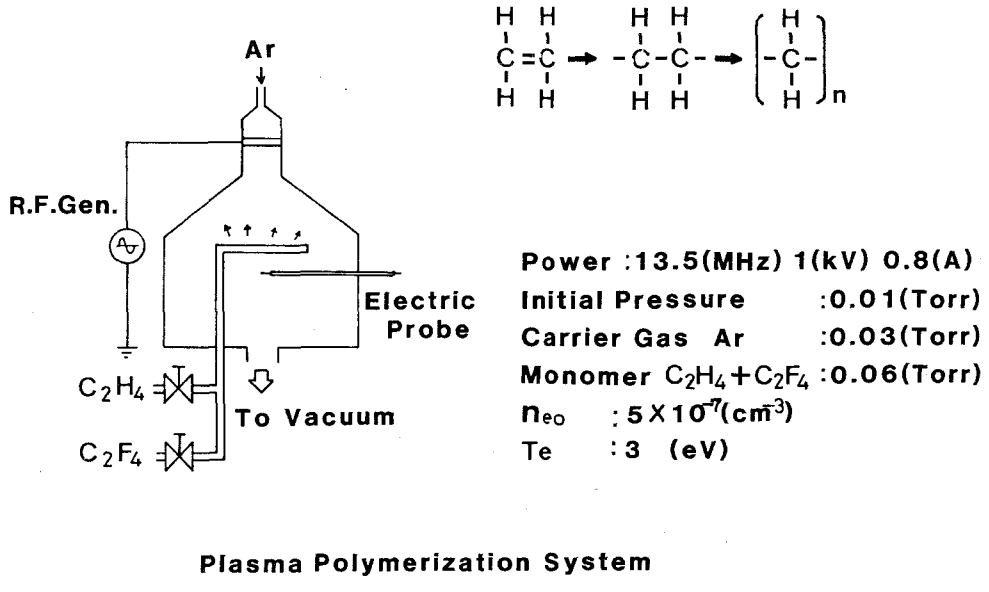


図４－７　密度勾配を付るためのプラズマ重合装置

マー及びキャリアガスの制御はニードルバルブで行ない，実験条件を一定にするため電子密度測定用針電極が取り付けられている。

共重合モノマーは，ポリマー密度ガラスの密度にほぼ等しいテトラフルオロエチレンと低Z層を得るためのエチレンを選んだ。重合により得られたポリマーの密度は，水晶振動子膜厚計により求めた面密度と，走査型電子顕微鏡で測定した膜厚により求めた。

重合層の密度制御を行なうため，各モノマー分圧比に対する重合速度，及び重合時間に対する重合膜厚の関係を調べた。実際のコーティングでは求めた関係から境界の密度が線形に変化するようにモノマーの分圧比を C_2F_4 100%，C_2H_4 0%より C_2F_4 0%，C_2H_4 100%まで10段階に分け，各ステップでのコーティング時間を調整して行なった。実験はキャリアガス25m Torr，混合モノマー分圧 40m Torr 一定とし，放電電圧 0.6keV 排気速度130ℓ/min で行なった。

4－3－3　実験結果

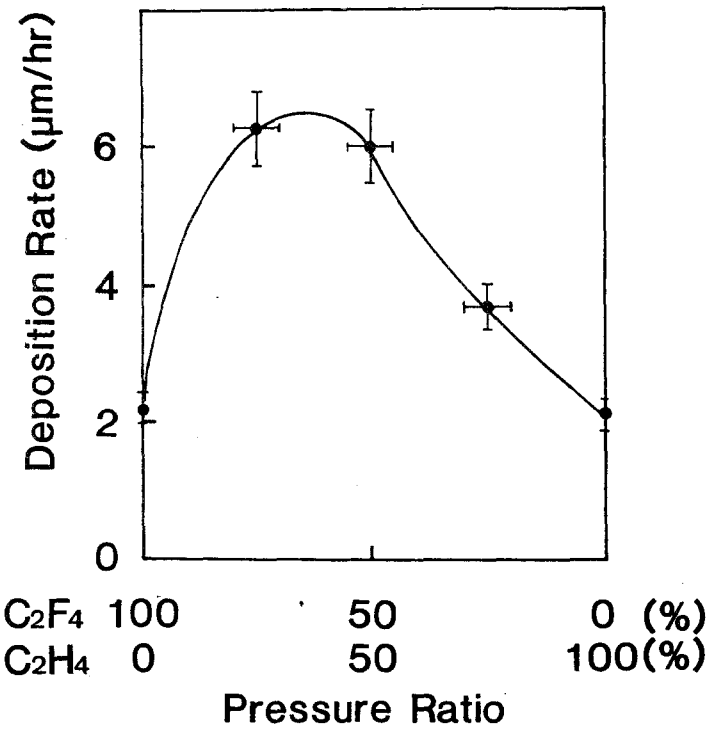


図4－8　モノマー分圧と重合速度

各モノマー分圧比に対する重合速度の変化を図４－８に示す。重合速度はC_2F_4 ４０％，C_2H_4 ６０％付近で最大となった。図４－９は，モノマーをエチレンだけにした場合のコーティング時間とコーティング層厚の関係で，この線形性は混合ガスとなっても同様と考えられる。

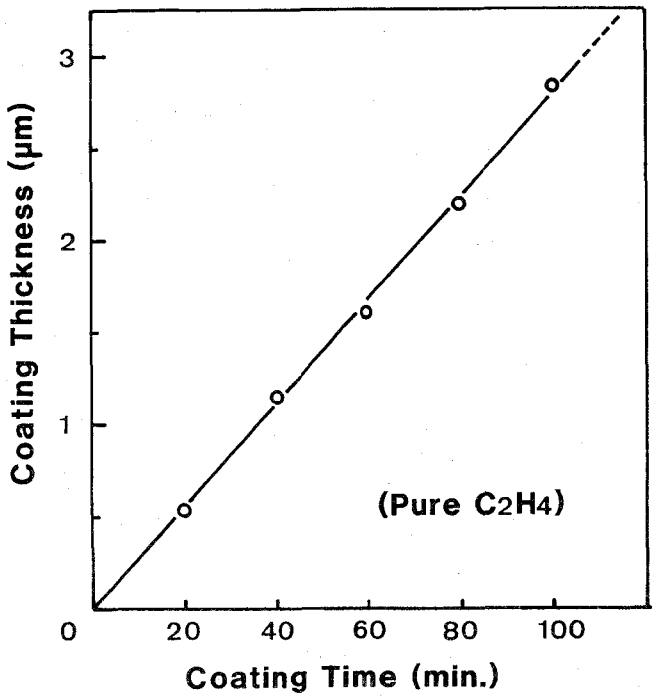


図４－９　プラズマ重合によるコーティング厚さの時間特性

重合層の密度はモノマーをテトラフルオロエチレンのみにした場合は2.0 g／cm³であり，エチレンだけの場合は 0.9 g／cm³であった。重合層の密度は層中の弗素含有率に依存すると考えられるので，密度の空間分布を弗素含有量分布を測定することで計算した。図４－１０はその結果で実線はＸ線マイクロアナライザーで弗素のK_α線の強度を求めたもので，点はＸ線コンタクトグラフからＸ線吸収率を求め，アーベル変換を行なったものである。両者は一致し，これから求めた密度勾配は，0.１１g／cm³／μm であった。

密度勾配を付けたコーティングを行なったターゲットのＸ線写真を図４－１１に示す。ガラスマイクロバルーンの直径は１００μmで重合層の膜厚は１２μm である。膜厚の均一性（$\triangle R/R$）は±２％であった。

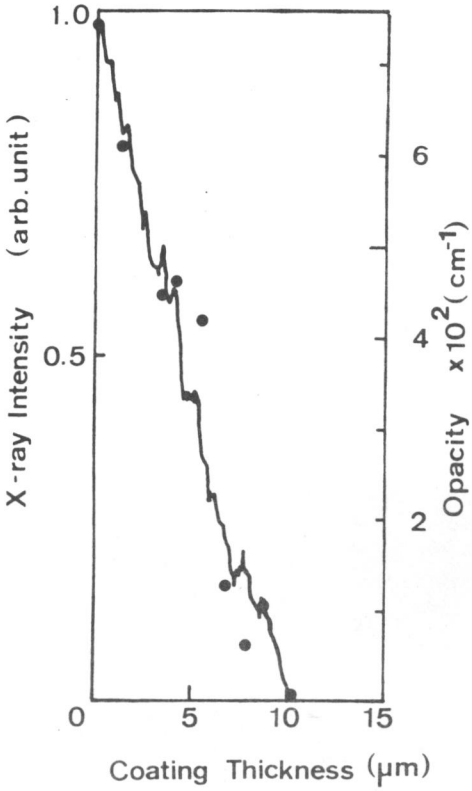


図4－10　X線マイクロアナライザーを利用した密度勾配の測定結果

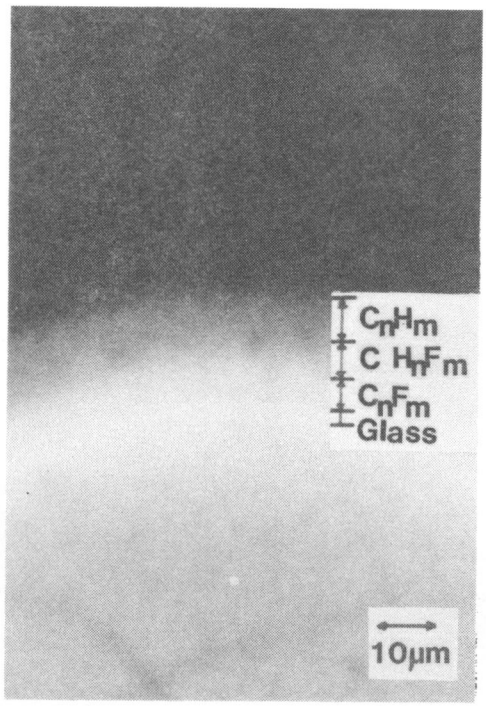


図4－11　密度勾配を付けたコーティングを施したターゲットのX線写真

4－3－4　ま　と　め

2種モノマーの共重合を理用し，レーリーテーラー不安定性の抑制に必要な密度勾配を持つコーティングを行なった。混合モノマーの分圧比を抑制することにより，密度を直線的に変化させ，0.9 g／cm³～2.0 g／cm³ まで，0.05 g／cm³／μm ～0.5 g／cm³／μm の密度勾配をもたすことができた。

§4－4　TaCHO プッシャーコーティング

4－4－1　特徴及び目的

高速電子のプリヒートを防ぐために平均Zが低く，平均 Z^2 が大きい物質をコーティングすることが望まれる。TaCHOはプラスチックの中に数重量%のタンタルを含ませたもので，例えばタンタルを1%ポリエチレンの中に含ませたとすると平均Zはポリエチレンとほとんど同じであるが，平均 Z^2 はポリエチレンの2.5倍になる。

プラズマ重合で金属を含むコーティングを行なうこと自体は，J.Goodman などによって，低沸点有機金属を用いて初めて行なわれた。[8] 著者はこの方法を改良してペレットターゲットにコーティングを行なうとともに，プラズマ重合に蒸着法を組み合わせることにより，抵抗加熱で蒸着可能な低融点の任意の金属を含むプラスチックがコーティング可能なことを示した。[9]

4－4－2　実験装置と方法

プラズマ重合は低圧のモノマーガス中で放電を行ない，モノマーを活性化し，資料表面で重合させるものである。高分子を形成する過程で雰囲気中のモノマー以外の分子を炭素チェーン，又はその間隙に取り込むので，本来高分子を形成しないものでも，化合物又は混合物としてコーティング可能である。実験装置の概略を図4－12に示す。外部放電型の電極を持つベルジャー，メカニカルブースターポンプ，ロータリーポンプで構成した。主モノマーはエチレンとし，放電安定用にアルゴンガスを導入した。高Z物質としてはタンタル，鉛，金を用い，鉛，金は直接加熱し，また，融点の高いタンタルはアルコレート（$Ta(OC_4H_9)_5$）として用いた。

タンタリウムペンタブトキシドを用いた場合のコーティング手順を一例として示す。ターゲットは支えを付けた状態で高Z源上方に固定した。アルコレートの容器の中にはガラスキャピラリーを入れ，突沸による資料の汚染を防いだ。エチレンとアルゴンの分圧をそれぞれ0.08Torr に設定し，アルコールを150℃まで加熱し放電を開始した。放電後は速やかに190℃まで加熱し，定常運転を行なった。コーティング終了後はエチレンを止め，アルコレートの温度が十分下がってから放電を停止した。これはアルコレートの蒸気が多い間に放電を停止すると，停止と同

時にアルコレートの霧が発生し，ターゲットを汚染するためである。

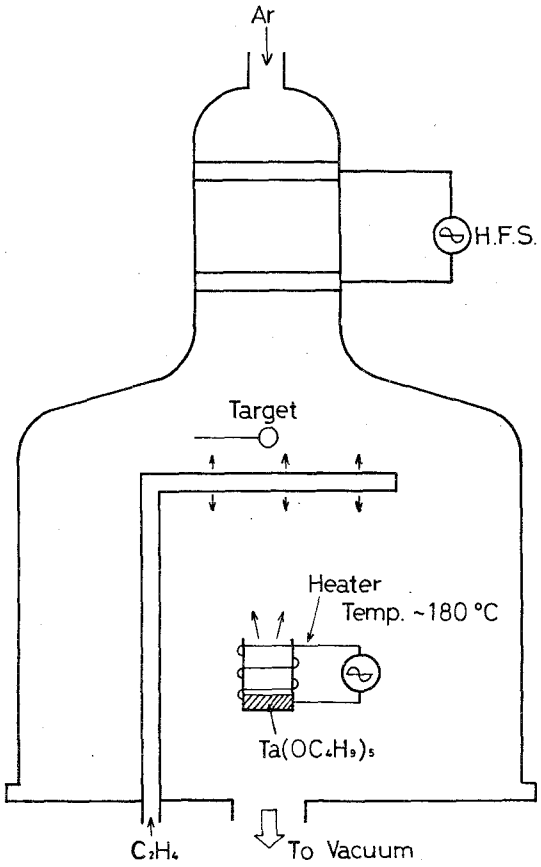


図４－12　TaCHO プッシャーコーティング装置

４－４－３　実　験　結　果

高Ｚ物質の混合量の測定はＸ線マイクロマナライザーを用いてカーボンファイバー上にコーティングした試料を用いて行なった。これはガラスを用いた場合，ＳｉＫ線とＴａＭ線が重複するのを防ぐためである。図４－１３はＸ線アナライザーの出力で横軸はＸ線エネルギー，縦軸はフォトンの数である。点線は金属Ｔａからのスペクトル，棒線はコーティング膜からのスペクトルである。この例では重量で２０％のタンタルが含まれていることが分かる。

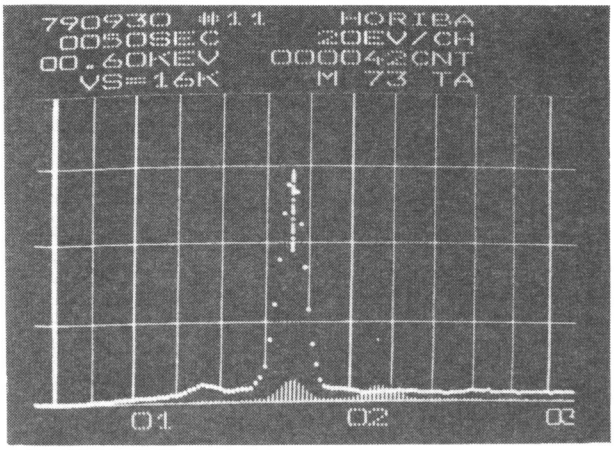


図4－13　TaCHO プッシャーのX線マイクロアナライザーによる分析結果

図4－14は蒸発源と試料までの距離とタンタルの混合比の関係を示したものである。タンタルの混合比は指数関数的に減少し，キャリアガス中を拡散で飛来して

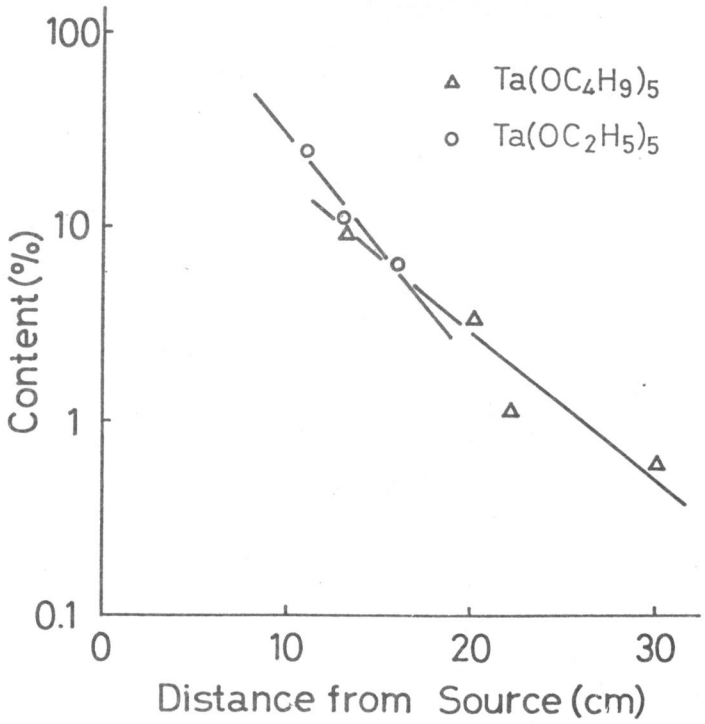


図4－14　Ta 含有率の蒸発源からの距離依存性

いることを示している。

厚さの均一性はガラスマイクロバルーンにコーティング後，X線コンタクトグラフで撮影して調べた。混合比はX線の吸収量で評価した。図4－15は直径130μmのガラスマイクロバルーン上にTaCHOを6μmコーティングし，さらにポリエチレンを8μmコーティングした多層ターゲットのX線写真で，図では蒸発源は右側にある。厚さの均一性$\triangle R/R$は±3％で高Z源に向かった側と反対側での混合量の差は3％以下であった。

表面状態は走査型電子顕微鏡で観察した。一例としてガラスパイプ上に鉛を含むポリエチレンをコーティングした例を図4－16に示す。一番内側の層は鉛を13％，2番目は10％，外側の層はポリエチレンだけである。最外層の表面は高さ2～3μm，底辺5～8μmの円丘が集合したようになっている。これはプラズマ重合法だけでも表われる現象で，高Z物質を入れたことの直接的な結果ではない。

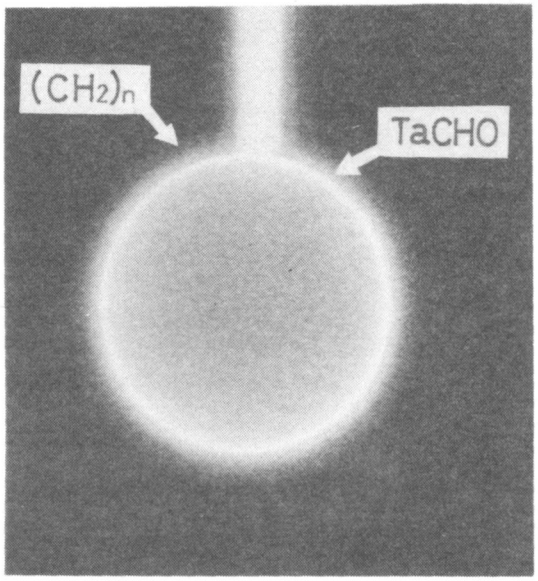


図4－15　TaCHOプッシャーをコーティングしたターゲットのX線写真

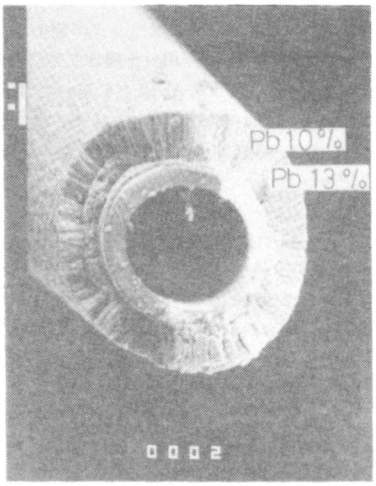


図4－16　ガラスパイプ上に鉛を含むポリエチレンをコーティングした電子顕微鏡写真

4－4－4　ま と め

プラズマ重合法と蒸着法を組み合わせることにより，ブレークイーブンターゲットに必要な TaCHO プッシャーコーティングを行なった。高Z物質の混合量は25重量%まで可能であり，この範囲内でプラズマ重合本来の特徴を損うことなくコーティングできた。表面状態は改善の余地があり，コーティング条件の検討が必要である。

§4－5　パリレンコーティング

4－5－1　特徴及び目的

パリレンコーティング法は米国ユニオンカーバイド社で開発されたもので，ジパラキシレンの熱重合作用を利用したものである。この方法は簡単に安定で強い重合膜をコーティングできることに最大の特徴がある。本来はプリント基板用に開発されたものであるが，著者はターゲットのアブレーターコーティング法に用い，その適用性を検討した。検討した項目はコーティング速度，均一性，表面仕上，再現性である。

4－5－2　実 験 装 置

図4－17に実験装置の概要を示した。ジパラキシレンは蒸発炉で90～150

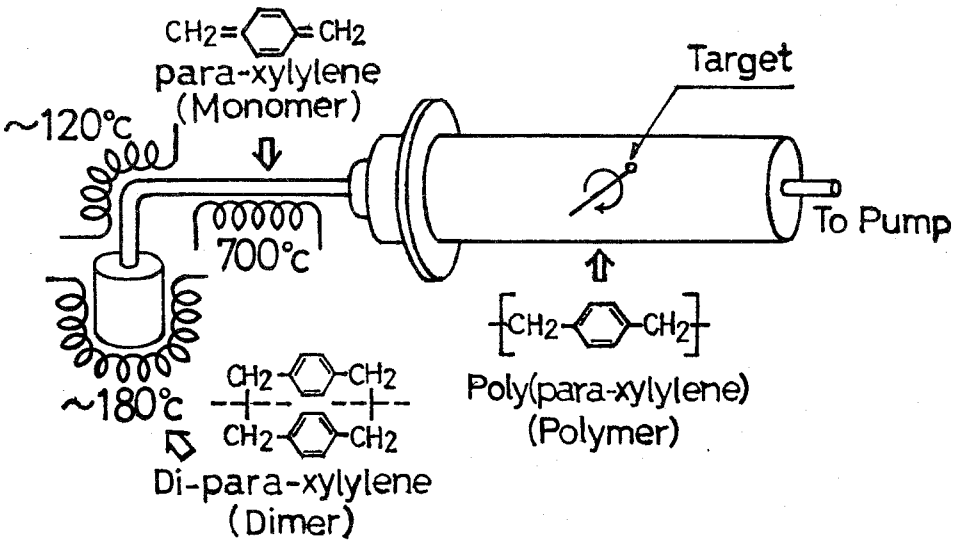


図4－17　パリレンコーティング装置

℃に加熱されることにより昇華し，分解炉に送られる。蒸発炉は内径２５㎜の石英ガガラス管で作り，蒸気が再凝結しないようヒーターで全体を均一に加熱できるように設計した。分解炉にはいった蒸気はここで７００℃に加熱される。二重に重なっていたベンゼン管は分離され，モノマーとなりコーティングチェンバーに送られる。モノマーは室温の固体表面上で重合し，ポリマー（パリレン）を形成する。コーティングチェンバーにはモノマーの一方向からの飛来による不均一コーティングを防ぐため資料の回転装置を取り付けた。

４－５－３　結果及び検討

(a)　コーティング速度

通常コーティング量を測定する場合，水晶振動子が用いられるが，パリレンは重合直後は非常にやわらかく，振動に追従できなかったため，コーティング中のチェンバー内の圧力と全コーティングの厚さを測定することによりコーティング速度の実験式を求めた。コーティング速度をvとすると，

$$v = 4.4\ (p_t - p_0) \quad (\mu m / min) \qquad (4-1)$$

の関係を得た。ここで$P_{(t)}$はチェンバー内部のコーティング中の圧力で単位はTorr。P_0 はコーティングを始める前の圧力である。コーティング速度は最高0.5μm/min程度まで高めることが可能であったが，コーティング速度を高めると表面仕上げが悪くなる傾向が見られた。表面仕上げを0.1 μm 以下にする場合はコーティング速度は１μm／h 程度が最も適当であった。またこのとき，蒸発炉の温度は８３℃に設定することにより自動運転が可能で，蒸発炉に入れられるモノマーの量ＱとＧＭＢ上にコーティングされたパリレンの厚さｔとの関係として

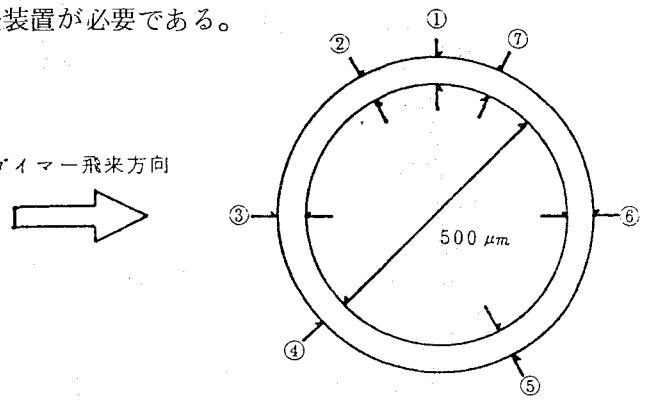
$$\frac{Q}{t} = 100 \pm 5\ (mg / \mu m) \qquad (4-2)$$

の実験式を得た。

(b)　均　一　性

均一性を試べるため，チェンバー内にガラスロッドをモノマー飛来方向に垂直に置き，コーティングを行ない，コーティングされた膜の断面を走査型電子顕微鏡で

観測することにより厚さを測定した。結果を図4－18に示す。モノマーの飛来方向が一番厚くコーティングされ±4％のばらつきがあった。均一なコーティング膜を得るためには回転装置が必要である。



測定個所	膜厚（μm）	割合 *
1	31.5	0.954
2	32.5	0.984
3	33.0	1
4	32.0	0.969
5	31.5	0.954
6	30.5	0.924
7	30.5	0.924

＊ダイマー飛来方向3面にコーティングされた膜厚を1としたときの各部における膜厚の割合

ロッド面上でのコーティング膜の均一性

図4－18　パリレンコーティングの均一性

(c) 表面仕上げ

表面状態はGMB上に種々の条件でコーティングを行ない，走査型電子顕微鏡で評価した。その結果を表4－Ⅳにまとめた。またパリレンを10 μmコーティング

表 4 － Ⅳ

写真番号	ダイマー供給量	蒸着速度	被コーティング材	温度条件 蒸発炉	温度条件 蒸着室	平滑性
No. 18	20 g	5.3 μ/hr	ガラス板	120℃	21℃	500～3000Å
No. 19, 20	20 g	0.9 μ/hr	ガラス板	95℃	21℃	＜500 Å
No. 21	20 g	5.3 μ/hr	ガラス板	120℃	70℃	～6 μm

したGMBターゲットのX線写真を図4－19に示す。プラズマ重合に比較してパ

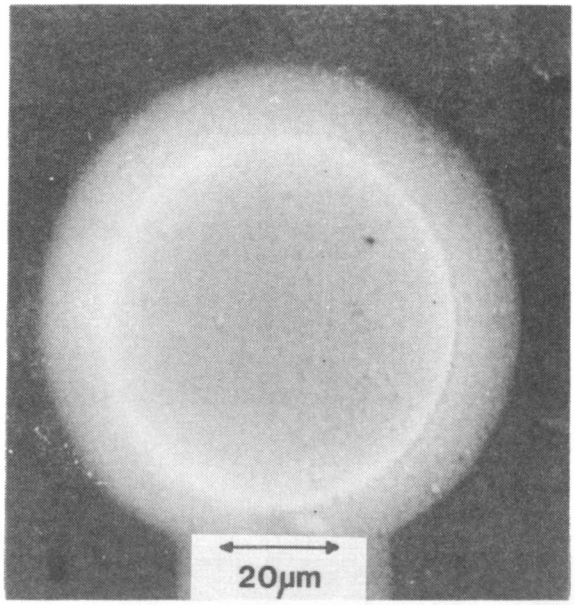


図4－19　パリレンをコートされたターゲットのX線写真

リレンコーティングは表面状態の良いコーティング層を得やすかった。これはプラズマ重合では気相重合も多く起こり，粉末状のものが付着する場合があるのに対して，パリレンコーティングでは温度が下がって初めてコーティングされることから，主にコーティング前のGMBの表面クリーニングや，チェンバー内のダストに留意しておけばよいためと考えられる。

以上の結果をまとめると直径50～500μmのGMBターゲットに対してコーティング速度を1μm／hに抑え，ターゲットをモノマー飛来方向に垂直に回転させることにより，均一性（△R／R）±1％，表面仕上げ＜500A° を得ることができた。

§4－6　レビテーション

4－6－1　振動型レビテーション

(1) 特　　徴

ペレットターゲットにアブレーターをコーティングする場合，ペレット（～100

μm$^{\varnothing}$）をファイバー（10～20μm$^{\varnothing}$） 上に固定して行なう。しかしながらペレットだけでなくファイバー上にもコーティングされ，ペレットターゲットの球対称性を著しく低下させる。コーティング中にペレットを空間に浮遊させておく技術が必要である。

ペレットを空間で浮遊させる方法として光，音波，ガス流，磁場，静電場，振動などが考えられるが，低ガス圧中，グロー放電中で行なえる振動法でレビテーションを試みた。ここではプラズマ重合法下での振動レビテーションについて著者の研究結果をまとめる。[10]

(2) 実験装置及び方法

実験装置の概略を図4－20に示す。磁歪型超音波振動子上に振動皿（30mm$^{\varnothing}$, 10mm^{h}, 1.5mm^{t} ）を固定する。振動皿は高周波の振動を十分伝えることができる

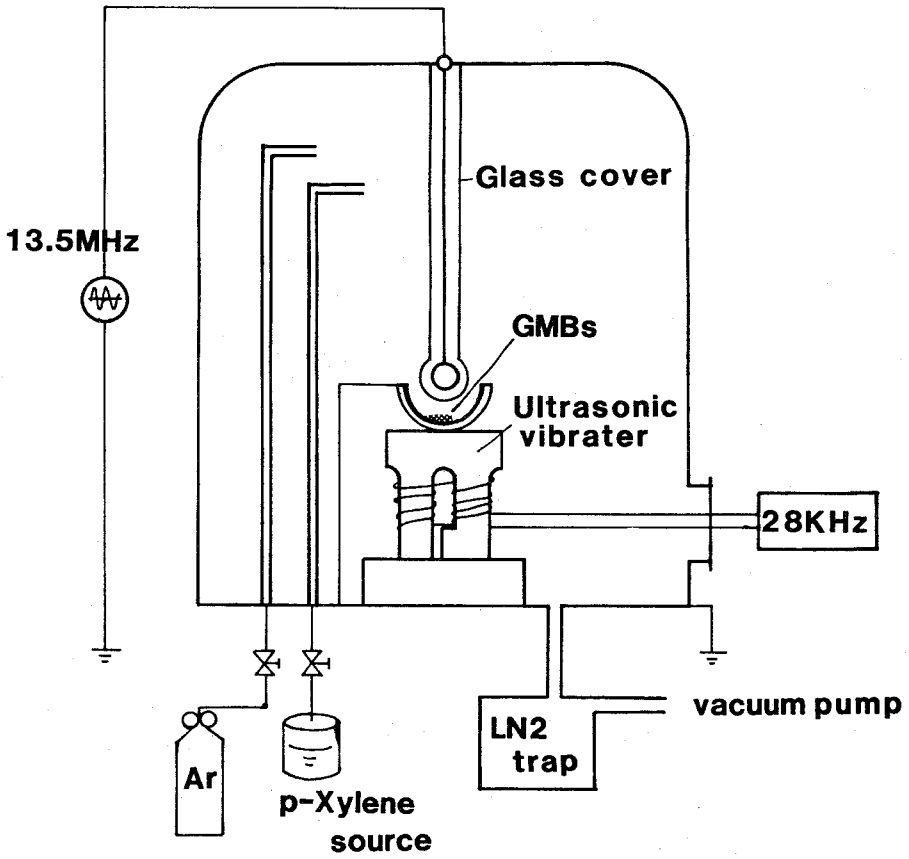
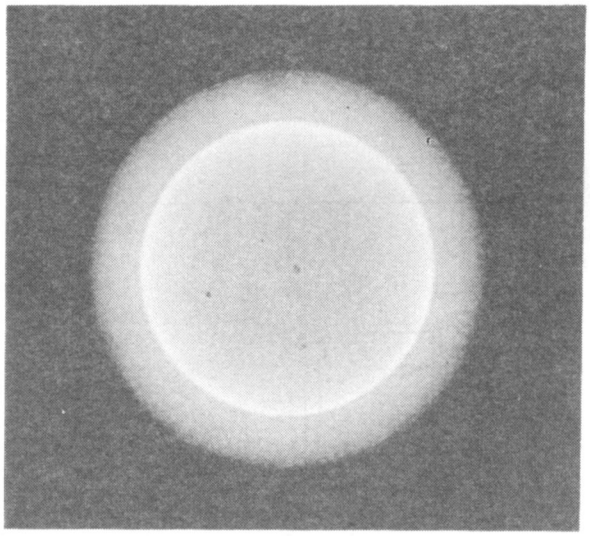


図4－20 振動型レビテーションとプラズマ重合

だけの硬さが必要であった。放電は直径１０㎜のアルミ製電極と振動皿の上面又は下面に金メッキした電極の間で行なった。モノマーとしてパラキシレン，キャリアガスとしてアルゴンを用い，それぞれ200m Torr，40m Torr の分圧で行なった。10^3個のGMB を振動皿に入れ超音波振動（28kHz）によるランダムな動きでコーティング中の固着を防止する。

(3) 実 験 結 果

パラキシレン200m Torr，アルゴン40m Torr，放電200V，100mAで13時間コーティングしたGMBのX線写真を図4－21に示す。平均コーティング厚さは7μmであり，コーティング速度は0.54μm／h である。



X-Ray Radiograph of
Poly(p-xylene)-coated GMB
with Vibratory Levitation

Coating thickness : 23 μm
GMB diameter 125 μm

図4－21 振動型レビテーションとプラズマ重合でキシレンをコーティングされたGMBのX線写真

コーティング層の均一性を図4－22に示す。（一方向からのみ撮影）度数分布にピークが2つ見られるのは固着してコーティングされているものがあることを示している。均一性95％以上のコーティング層をもつペレットの収率は20％程度である。

表面状態は高さ2μm程度の凹凸があり，振動させずにコーティングしたものに比較して一ケタ悪かった。これは振動によりダメッジが生じているためと考えられ，改良を要する。

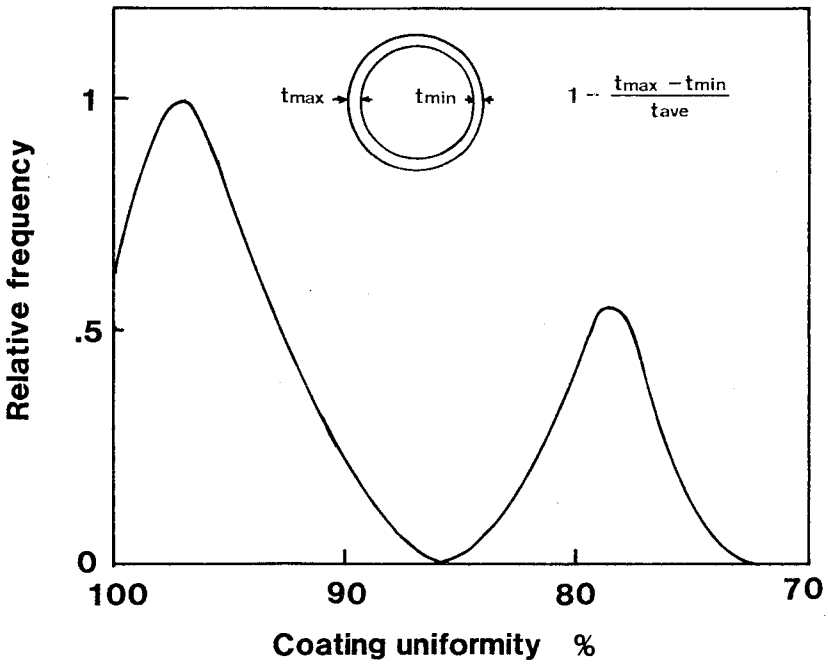


図4－22　振動型レビテーションで得られたプラズマ重合膜の均一性分布

(4) 検　　討

この方法での問題点は，

1）GMB同志，及びGMBと振動皿の固着

2）電極からのポリマー剥離

である。1）について固着の原因を調べるために簡単な実験を行なった。i）パラキシレン200m Torr 中にGMBを入れ，30分後超音波をかけたが固着して振

動しなかった。ii）GMBが振動している所にパラキシレンガスを流し込むと固着した。iii）いずれの場合でも放電を開始すると，固着していたのがランダムな運動を始めた。

以上の結果から固着はモノマーがGMB表面に吸着され発生すると考えられる。放電を行なうとランダムな運動を始めるのはペレットが帯電し，クーロン斥力が働くためと思われる。

2）についてはガス電極を用いることで解決する見通しがついている。（図4－23）ガラス管へのポリマーの付着はガラス管を300℃に加熱することにより防ぐことができる。

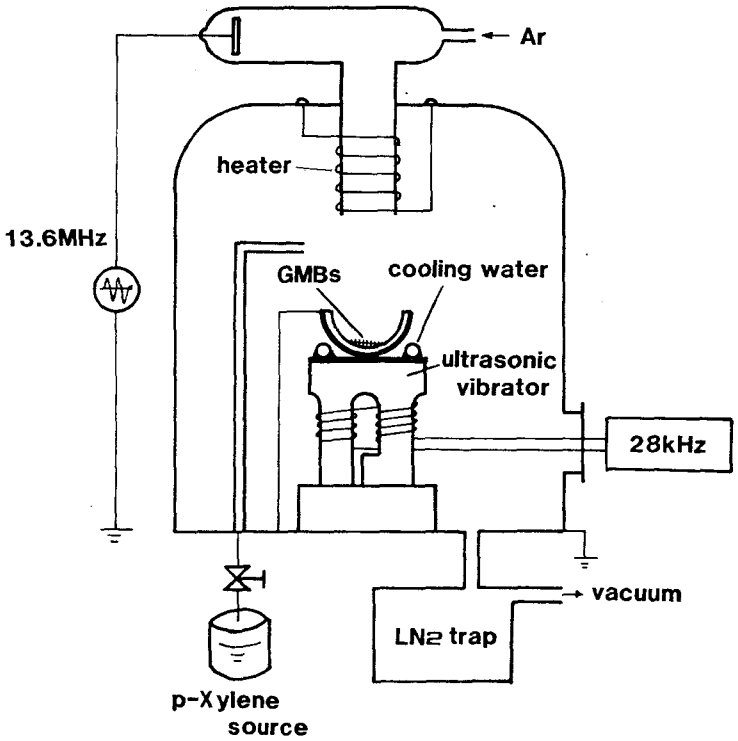


図4－23　ガス電極によるプラズマ重合と振動レビテーション装置

(5) ま と め

プラズマ重合と超音波レビテーションにより，GMBへパラキシレンを7μmコーティングすることができた。均一性95％以上のペレットの収率は20％程度で

ある。収率，表面状態については改良の必要がある。

4－6－2　中性分子ビームレビテーション

(1) 特徴と研究目的

前節で取り上げた振動形レビテーションは比較的簡単であるが，コーティング時に粘着性のあるもの，例えばパリレンコーティングや，金，銀，鉛などの金属コーティングに応用すると固着したり膜の剥離を引き起こした。また表面仕上げも十分ではなかった。

分子ビームレビテーションは垂直に吹き上がるガス流中にターゲットを置き，浮かせてコーティングするもので，完全に非接触で行なわれるため，固着の問題は除外される。この方法は高真空を必要としないスパッタリング，イオンプレーティング，パリレンコーティング，プラズマ重合などに応用可能である。[11] 本節ではスパッタリングに応用することを目的として，10^{-1}Torr～10^{-4}Torrの真空下におけるレビテーション装置及び技術の開発，均一性，コーティング速度の評価を試みたのでその結果について示す。

(2) 実験装置と方法

実験装置の概略を図4－24に示す。排気系は油拡散ポンプとロータリポンプで

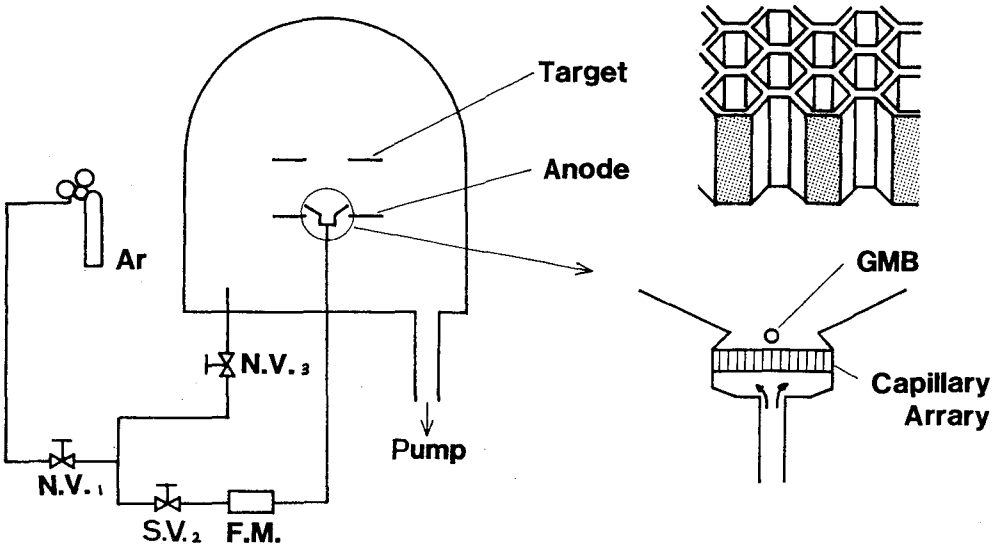


図4－24　中性ガスビームレビテーイション実験装置

構成され，到達真空度 5×10^{-5} Torr，0.5cc STP／min のガス流入に対して 3×10^{-4} Torr に保つ能力を持つように製作した。レビテーション用ガスとしてアルゴンガスを用い 1kg／cm² に減圧後，微流量バルブ V_1，ストップバルブ V_2，熱流量計（Vacuum General 社 Model 80－5，最小感度 0.001cc STP／min ）を通して流入される。流量の微調は V_1 と，微流量調整バルブ V_3 で行なわれる。

実験でテストされた種々のノズル形状を図4－25に示す。(a)は電子顕微鏡に用いられる100μm ピッチのメッシュを用い，(b)(c)は CHS（Collimated Hole Structure）を用いた。CHS はチャンネルプレートなどに用いられるもので，直径50μm の六角状穴が多数あいたものである。ノズル部分には振動を与えるため，ソレノイドによるハンマーを取り付けた。

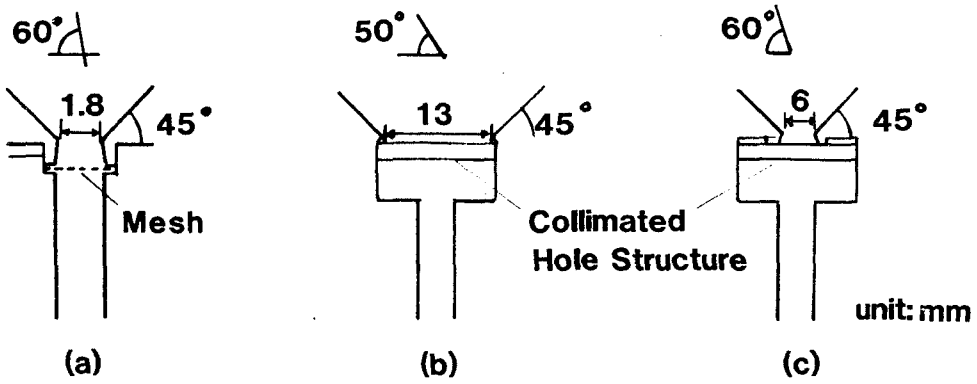


図4－25　種々のガスレビテーション用ノズル

スパッタリング電極は，中央に5mmφの観測用窓を持つ直径4cmの金ターゲットと，その下部3cmに置かれたリング状アノードにより構成した。ノズルはリング状アノードの中心部に置いた。

CHS 上に GMB を1個乗せ，容器内圧が 1×10^{-4} Torr になるまで排気した。V_1 V_2 を閉じ，V_3 を開けアルゴンガスを導入した。V_1 を若干開け定常状態になってから V_2 を開け，電磁ハンマーで振動を与えながら，主に V_3 を閉じることにより微調整を行ない浮き上がらせた。

放電を行なったあとは10分毎に流量調整が必要であった。コーティングされた

膜の検査はX線コンタクトグラフで行なった。

(3) 実 験 結 果

ノズルの形状について(a)では大気中から数十Torr の圧力まででは安定に浮遊させることができたが，数Torr 以下では安定範囲が狭く，実用的でなかった。(b)は安定であったが流量が多く本装置には不適当であった。(c)が最も操作しやすく，安定に浮遊できたので，Cの結果について示す。

図4－26はチェンバー内の背圧と流量の関係を示したもので，データバーの下限は浮き上がり始めた流量，上限は吹き飛ばされたときの流量である。0.1 Torr 以下では流量は背圧に無関係で，1 Torr 以上では比例することが分かった。

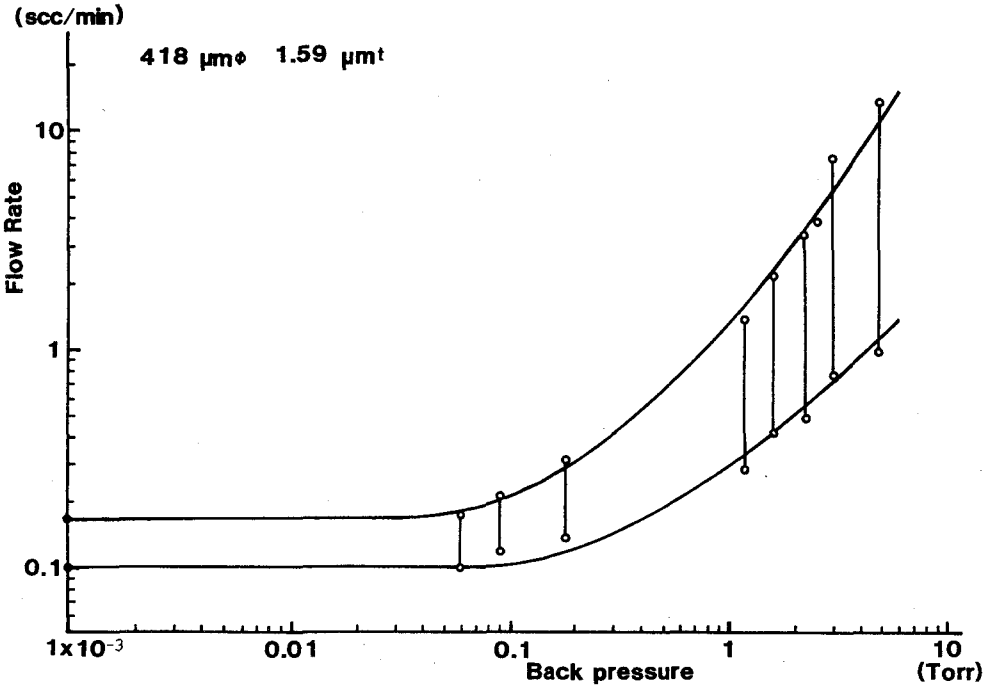


図4－26 ガラスマイクロバルーンの安定浮遊流量と背圧の関係

直径178μm，膜厚0.95μm の GMB を用いて60分間DCスパッターで金をコーティングしたときの実験結果について示す。コーティングの間GMBの重量が多くなるので，流量を調節しなければならなかった。その様子を表4－Ⅴに示す。流量，電極間電圧とも最初の30分以後は変化しなかった。これはスパッタリング

表4－Ⅴ　ガスレビテーション中の流量変化

時　間 (min)	浮　揚	0	10	20	30	40	50	60
流　　量(cc/min)	0.41	0.41	0.42	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44
電極間電圧　(V)	－	470	520	550	540	540	550	550

によりチェンバー内面に金が付着し，導電性を持ち，ターゲットからの金のスパッタリング量が減少したためと考えられる。

図4－27に金を0.02μm コーティングしたときのX線写真を，また図4－28

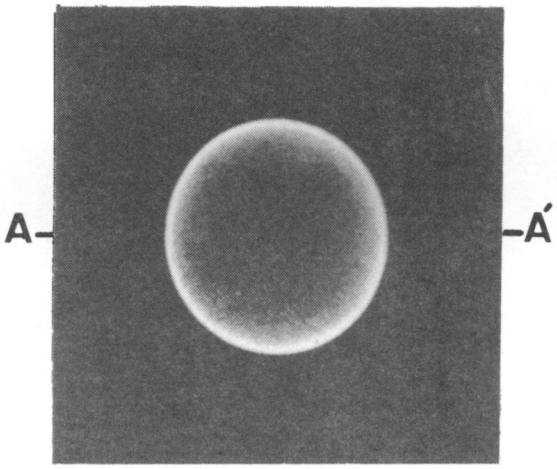


図4－27　レビテーションとスパッタリングにより金を0.02μm コーティングされたターゲットのX線写真

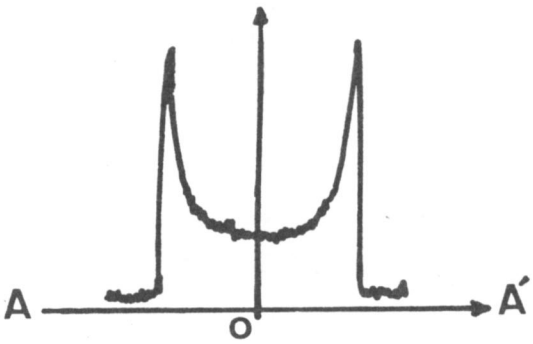


図4－28　X線による均一性の検査

に断面A－A′ におけるX線の透過分布を示す。金の厚さは同じ寸法のGMB上に金を膜厚計でモニターしながら0.1 μmコーティングし，この資料とX線吸収量を比較して測定した。その結果平均厚さと均一性に対して，210±30A°を得た。

(4) 検　　討

分子ビームレビテーションを理解するため，レビテーションに必要な流量，コーティング速度，均一性などについて理論的な検討を行なう。

(a) レビテーションに必要な流量

図4－26の実験結果から，浮き上がる流量は0.1 Torr 以下では背圧に無関係，1 Torr 以上では背圧に比例することが分かった。この結果は次のモデルで説明可能である。図4－29のようにCHS上にGMBが集っている状態を考える。背圧を

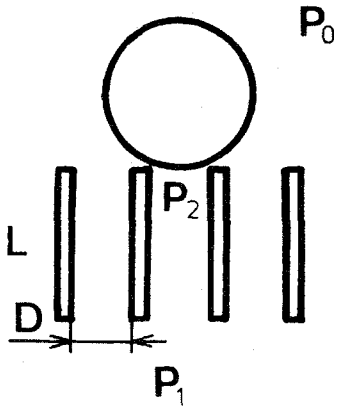


図4－29　ガスレビテーション解析用モデル

P_0，GMB直下の圧力をP_2，CHS下部の圧力をP_1，CHSの直径とDとするとGMBに働く浮力Fは，

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 P_2 \qquad (4-3)$$

で表わすことができる。浮き上る直前ではGMBでふたをされたCHSの穴では流量がゼロであるから $P_2 = P_1$ である。一方CHSの穴の数をnとすると，CHSを通る全ガス量Qは

$$Q = nC\ (P_1 - P_0) \qquad (4-4)$$

ここでCはパイプのコンダクタンスで，

粘性流領域では

$$C_V = 0.18 \times 10^3 \frac{D^4}{L} \frac{(P_0 + P_1)}{2} \qquad (4-5)$$

分子流領域では

$$C_M = 12.1 \frac{D^3}{L} \qquad (4-6)$$

で表わすことができる。浮き上がるとき，$F = mg$（m　GMB の重さ)であるから

$$Q = C \left(\frac{4\pi mg}{\pi D^2} - P_0 \right) \qquad (4-7)$$

の関係となり，実験結果を説明可能である。実際直径４００μm，壁厚1.6 μm のＧＭＢの質量は2×10^{-6}g であり，分子流領域での実験結果から求めた浮力は，4×10^{-6} gであった。２倍の差があるが，これは誤差の内と考えられる。

(b)　コーティング装置

実験に用いた平行平板ＤＣスパッタリング装置のコーティング速度は，レビテーターの位置で６０A°／minである。ガスを流した場合コーティング速度がどのように影響を受けるかを評価してみる。

簡単のためにコーティング速度は雰囲気中の金蒸気濃度に比例すると仮定した。計算モデルは図４－３０に示すように，ＣＨＳから柱状にガスが吹き出しているも

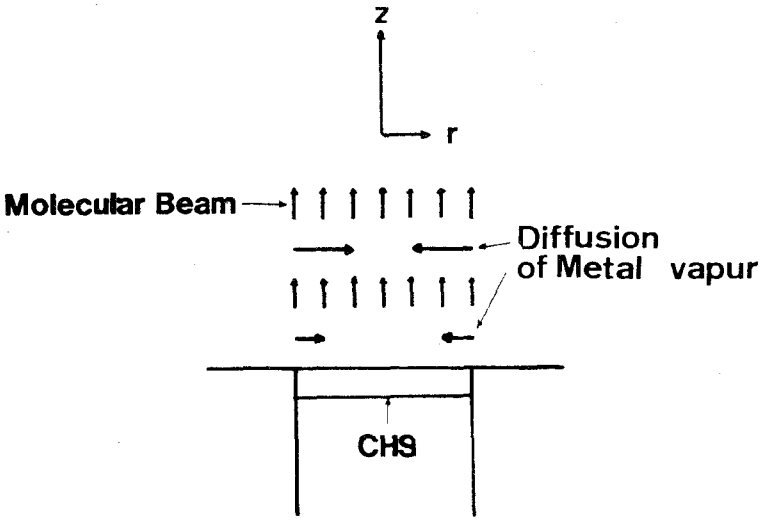


図４－30　コーティング速度を評価するためのモデル

のとした。この柱以外では金蒸気濃度は n_0 で一定とした。雰囲気から金蒸気は拡散で流入する。流速が十分速いとき柱内部でのZ方向の拡散は無視できる。このとき流れに乗った座標の柱に垂直な平面内の微分方程式は,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial n}{\partial r}\right) \qquad (4-8)$$

で与えられる。境界条件は $t>0$ のとき $r=a$ (ノズル半径) において

$$n = n_0 \qquad (4-9)$$

初期条件は $t=0$ のとき $0<r<a$ において,

$$n = 0 \qquad (4-10)$$

である。この解は,

$$n = n_0\left(1+\frac{2}{a}\sum_{s=1}^{\infty} e^{-D\alpha_s^2 t}\frac{J_0(\alpha_s r)}{J_0'(\alpha_s a)}\right) \qquad (4-11)$$

で与えられた。但し, $J_0(x)$ は0次のベッセル関数であり, $\alpha_1\ \alpha_2\ \alpha_3\cdots\cdots$ は, $J_0(\alpha a)=0$ の根である。[12] これを位置の関数とする場合

$$t = \frac{z}{U} \qquad (4-12)$$

の関係で与えられる。即ち,

$$n(r\,z) = n_0\left(1+\frac{2}{a}\sum_{s=1}^{\infty} e^{-D\alpha_s^2\frac{z}{U}}\frac{J_0(\alpha_s r)}{J_0'(\alpha_s a)}\right) \qquad (4-13)$$

である。但しこの関係が成り立つのは仮定で示した通り

$$\frac{\partial n}{\partial r} \gtrsim \frac{\partial n}{\partial z} \qquad (4-14)$$

のときだけである。この仮定が成り立たないビーム中心附近では実際のコーティング速度はこれより速くなる。

アルゴンガス中でのスパッターされた金原子の拡散定数は知ることができなかった。図4－31に D/U zをパラメーターとしたコーティング速度分布を示す。参考までに窒素中への水銀蒸気の拡散定数210cm²/sec (0.4 Torr) を参考に, 速度

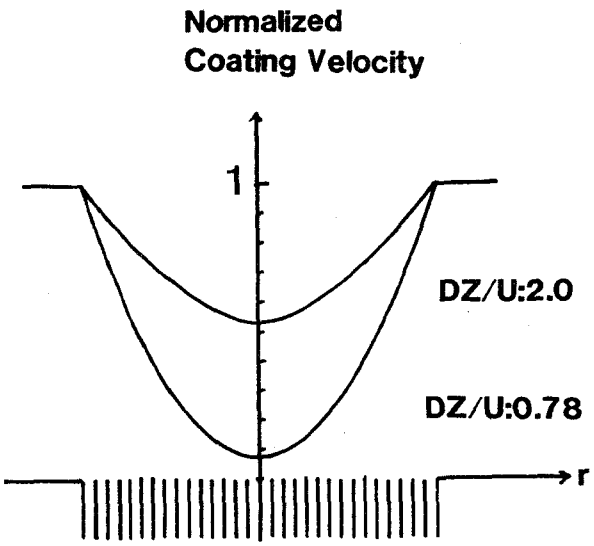


図４－31　コーティング速度の空間依存性

Uとして７０cm／secを使用し３００μm 吹き上げられたときの n/n_0 は0.1である。レビテーションしない場合のコーティング速度が６０A°／min，レビテーションの実験で得られた開始から３０分間の平均コーティング速度が６ A°／min であった。多くの仮定を行なってコーティング速度を評価したが大筋に於いて正しいものと判断できる。

(c)　均一性の評価

前節の検討でコーティング速度が雰囲気中の金蒸気濃度に比例すると仮定してコーティング速度を求めた。ビーム中にＧＭＢを浮かせてコーティングを行なう場合，中心部で浮かせるとｒ方向での不均一はなくなる（$\frac{\partial n}{\partial r}=0$）が，上下方向に不均一性がでる。（４－１３）式はｚ方向の拡散を無視しているが，これは逆にｚ方向の不均一の最大値を与えることになる。コーティング厚さを $t \pm \Delta t$ とすれば，

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{d}{2} \left. \frac{\partial n(zr)}{\partial z} \right|_{z=h}$$

となる。ここでｈは吹き上げられた高さである。しかし実際のコーティングではコーティングされるにしたがい上部が重くなり，上下が逆になるため，このような不均一性は発生しないものと思われる。

§4－7 まとめ

本章ではアブレーターコーティング法としてプラズマ重合，パリレンコーティングを取り上げ問題点を調べた。その結果プラズマ重合法はコーティング膜の種類が多く，均一性，（$\Delta t/t$）±3％，コーティング速度1 μm／hが得られることが分かった。しかしながら，再現性，コーティング膜の安定性ではパリレンコーティングより劣り，表面仕上げは条件にもよるが0.2 μm程度であった。

パリレンコーティングでは手軽に安定な膜をコーティングすることができた。均一性（$\Delta t/t$）±3％，コーティング速度～1 μm／hは可能であり，表面仕上げも0.05μm 程度まで可能であった。

二種モノマーによる共重合を利用して密度勾配を連続的に変えるコーティングを行なった。エチレンとテトラフルオロエチレンを用い0.9 g／cm³～1.9 g／cm³まで連続に変えた。

プラズマ重合と蒸着を組み合すことにより種々の金属をプラスチックの中にドーピングできることを示した。混合量は最大20重量％まで可能であった。

振動型レビテーションとプラズマ重合でキシレンを均一にGMBにコーティングした。厚さは10 μm，均一性（$\Delta t/t$）±2％も可能であったが，コーティング速度が～0.1 μm／h と遅く，表面状態も悪く改良を要する。

中性ガスビームレビテーションとスパッタリングで金を0.02 μm GMB上にコーティングした。ガス流のコーティング速度，均一性に与える影響を理論的に評価した。

参　考　文　献

1) 日本粉体工業協会編：造粒便覧　オーム社

2) Lawrance Livermore Lab., Laser Program Anual Rept.(1976)(1977), (1978), (1979)

3) R. Liepin, M. Campbell, J.S.Clements, J. Hammond and R. J.Fries,. J.Vac.Sci.Technol., **18**,1218 (1981)

4) Westwood A.R.; Europ. Polym. J. **7**, 363, (1971)

5) T.Williams and M.W.Hays ; Nature , **209** , 769 , (1969)

6) Kobayashi , H. Bell and M. Sher ; J.Appl. Polym . Sci., **17** , 885 , (1973)

7) A, Tsujimoto , T. Norimatsu , Y. Izawa and C. Yamanaka , Japan J .A.P.21 , 343 , (1982)

8) J .Goodman ; USA Patent No 3239368

9) 乗松孝好, 辻本 明, 山中千代衛：レーザー研究 , **8** , 69 , (1980)

10) R. Liepins, M.J.Campbell and R.J.Fries ; reported at Symposium on New Concepts in Coatings and Plastics , Honolulu Hawaii April 1～6 (1979) J.April.Polym. Sci..

11) A.T.Lowe and C.D. Hosford; J.Vac.Sci.Technol.**16** , 197 , (1979)

12) 川下研介；熱伝導論, オーム社

第５章　ターゲットの組立加工

§５－１　はじめに

燃料を充塡し，必要なコーティングと検査を行なわれたターゲットに，さらに外側シェルを取り付け，より複雑なターゲットへと発展させる。ここではターゲット及びそれに付属するパーツの加工組立法を中心に述べた。

第２節ではターゲット加工の基本とも言える支持棒の加工について示した。支持棒はプラズマ実験の面から，１）ターゲット周辺（<1 mm）での質量が小さい，２）ターゲット表面材料に近いものであること，３）位置合わせが容易であることなどが必要である。米国ロスアラモス研究所などでは直径10～20 μm のガラスファイバー先端をラッピング加工して垂直な切断面に加工しているが、著者は張力で切断することにより簡単に垂直な切断面を得たのでこの事について述べた。

第３節では著者が開発したパラフィンを用いたダブルシェルターゲットの製作技術について述べた。ダブルシェルターゲットは燃料を入れた容器の外側にレーザー吸収用のもう一つの独立した殻を置いたもので，ブレークイーブン，高利得ターゲットには不可欠な技術である。即ち，外側殻と内側の燃料容器の間を真空にし，バキュウムインシュレーション効果で高速電子によるプリヒートを防止する。また逆にキセノンガスなど原子番号の大きいガスを入れてプリヒートを防止する。外側シェルからの熱輻射で内側シェルを均一に圧縮する。重い外側殻が軽い内側シェルに衝突したときに生じる倍速効果など，数々の利点を掲げることができる。

このようなダブルシェルターゲットをLLNL（Lowrance Livemore National Lab.）やLASL（Los Alamos National Lab.）ではレーザー加工機や精密施盤による機械加工により製作した一対の半球シェルで２枚の薄膜で押えられた内球をはさみ込み組み立てる方法で行なっている。[1] またはミシガン大学，ロチェスター大学などでは IC 技術を応用して半球をはさみ込み組み立てる方法で作っている。[2] 日本では近畿大学でマイクロカプセリング法で水と油の複合エマルジョンを作り，プラスチックダブルシェルを作ることに成功している。[3),4)] 前者の方法は比較的大型の厚い球殻（>30 μm）を持つものには適するが，小型のもの

では組立が困難である。著者はこれらの問題を解決するため，内球にパラフィンをまき，これに外側シェルとなるパリレンをコーティングし，ペレットの支持棒となる細管よりパラフィンを除去し，接合面のないダブルシェルターゲットを作る方法を開発した。[5),6)] この方法は他の研究所で進められている方法と比べて，半球を組み立てる手間がなく，かつ，ガス導入管を持ち，任意のガスを内側と外側シェルの間に導入することができる等，他に例を見ない特色を持っている。

第4節では出力10kJ以上のレーザーに適したフォームダブルシェルターゲットについて書いた。フォームダブルシェルターゲットは燃料球を極低密度で均質なプラスチックフォームでささえたもので，ブレークイーブン用ターゲットなどでも用いられるものである。プラスチックフォームは密度10～100mg／ccセルサイズ3～10μmのものが必要で，TPX，デキストランを用いて製作した。また同時に加工法も開発したのでその点にもふれた。

§5－2　ターゲット支持棒の加工

ターゲットの支持棒の加工は表には出ないがプラズマ実験を精度良く行なうためには重要な点である。そして支持棒の加工で最も重要な点は先端を垂直に切断することである。米国ではファイバーを金属板にはさみ込み，ダイヤモンド粉でラッピングする方法で垂直な切断面を得ている。この方法は確実にできるが，時間がかかる欠点がある。著者は極めて簡単な方法で行なっている。

直径0.5mmのタングステン線で内径2～3mmの4ターンコイルヒーターを作った。ヒーターの軸を垂直に取り付け，その中心部に支持棒となる直径1mmのパイレクスガラス棒を取り付け，下部に重りを取り付けた。ヒーターを約800℃に加熱し，ガラス棒を延ばし，延び切る前にヒーターを切り，硬くなった所を引張力で切断した。

この方法で重要な点は張力で切断するところにある。曲げの力などが加わると切断面が欠けたり，突起が残ったりした。張力による切断は真に統計的現象であるが，切断面の形状は満足すべきものであった。図5－1にファイバー切断面の直径と張力の関係を示した。張力が大きいほど，ガラスの温度が低くて粘性が大きくとも延ばすことができるので，太いファイバーを作ることができた。この方法で作り得る範囲

は13 μm～65 μm 程度までである。図５－９に完成したターゲットの傾き，即ち，切断面の角度の相対分布を示す。分布(1)はダイヤモンドでキズを付け切断したもの，(2)はこの張力による方法で作られたものである。

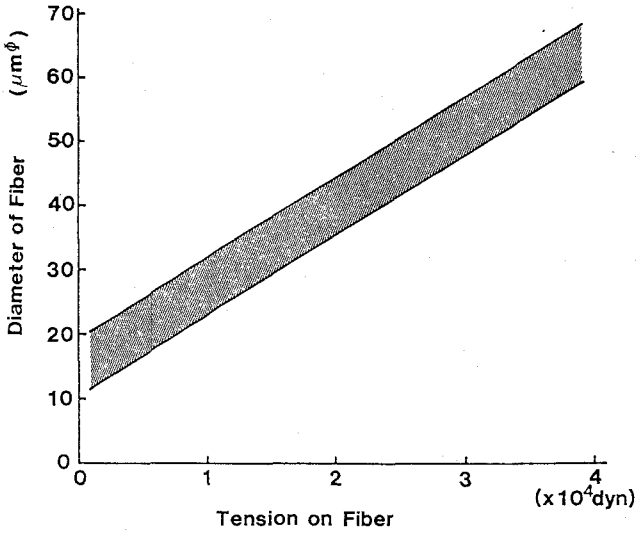


図５－１　張力とファイバー切断面直径の関係

このようにして作られた支持棒はマニピュレーターを用いながら顕微鏡下で少量のエポキシ接着剤を用いて組立てられる。完成した爆発圧縮型ターゲットを図５－３に示す。

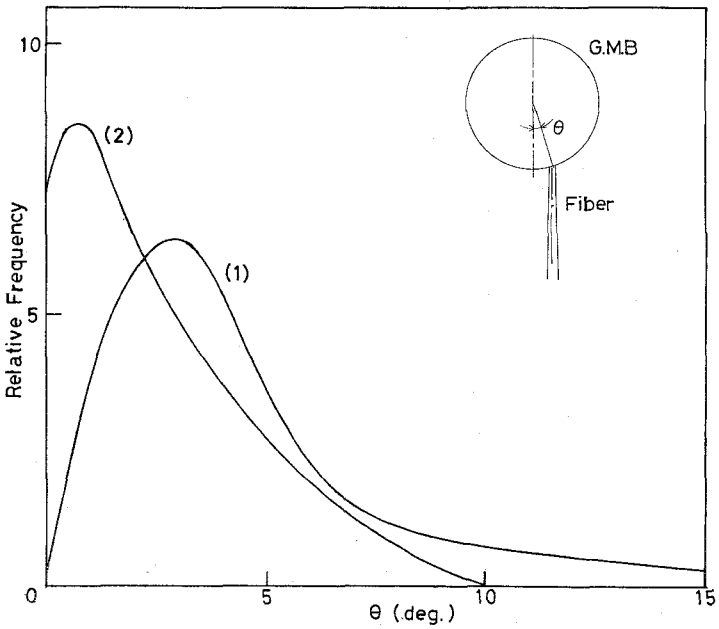


図５－２　ファイバー製作法による切断面角度分布。
(1)はダイヤモンドのキズを基に切断，
(2)は張力で切断。

§5－3　バキュウムインシュレーション型ダブルシェルターゲットの開発

5－3－1　製作方法

バキュウムインシュレーション型ダブルシェルターゲットは，レーザー吸収領域で発生した高速電子による燃料のプリヒートを，プラズマが中性を保とうとする性質を利用して防ぐもので，短パルスレーザーによる爆発型の圧縮に適する。

本節では著者が独自に開発した，出力数kJレーザー用の外側パリレン，内側ガラスマイクロバルーン（GMB）のバキュウムインシュレーション型ダブルシェルターゲットの製作法と問題点について述べる。

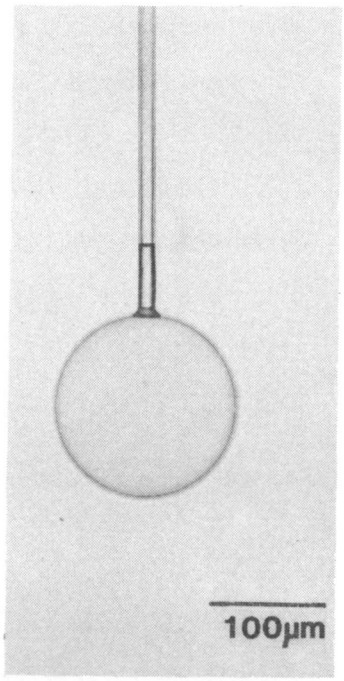


図5－3　爆発圧縮型ターゲット

著者が開発したダブルシェルペレットターゲットは図5－4に示す3つの過程を経て製作される。第1段階では内側シェルの支柱となる直径数μmのファイバーを内側シェルに固定する。第2段階では外側シェルを形成するのに必要なパラフィンをまき，形を整える。第3段階ではこれにパラフィン除去用の細管を取り付け，外側シェルとなる物質をコートし，真空中で加熱してパラフィンを除去し，ダブルシェルペレットターゲットを完成させる。以下に各行程でのキーポイント及び問題点を記述する。

第1段階で最も重要となる点は，直交ファイバーの中心に精度良く内球を固定することである。このため内球の支持柱となる直交ファイバーを作業治具となるワッシャーに固定する。ファイバーは直径2～3μmのガラスを用いた。両ファイバーの上下の間隔は内球の取付精度，作業性より決まる。内球径が100～150μmのGMBに対しては内球径の80%が適している。次に燃料を充填したGMBを2本のファイバーの中心に少量のエポキシ樹脂で固定する。この工程が最も精度を必要とする所で，完成時の内球と外球の偏心の原因のほとんどはこの工程におけるGMB中心とファイバーの対称の中心とのずれである。

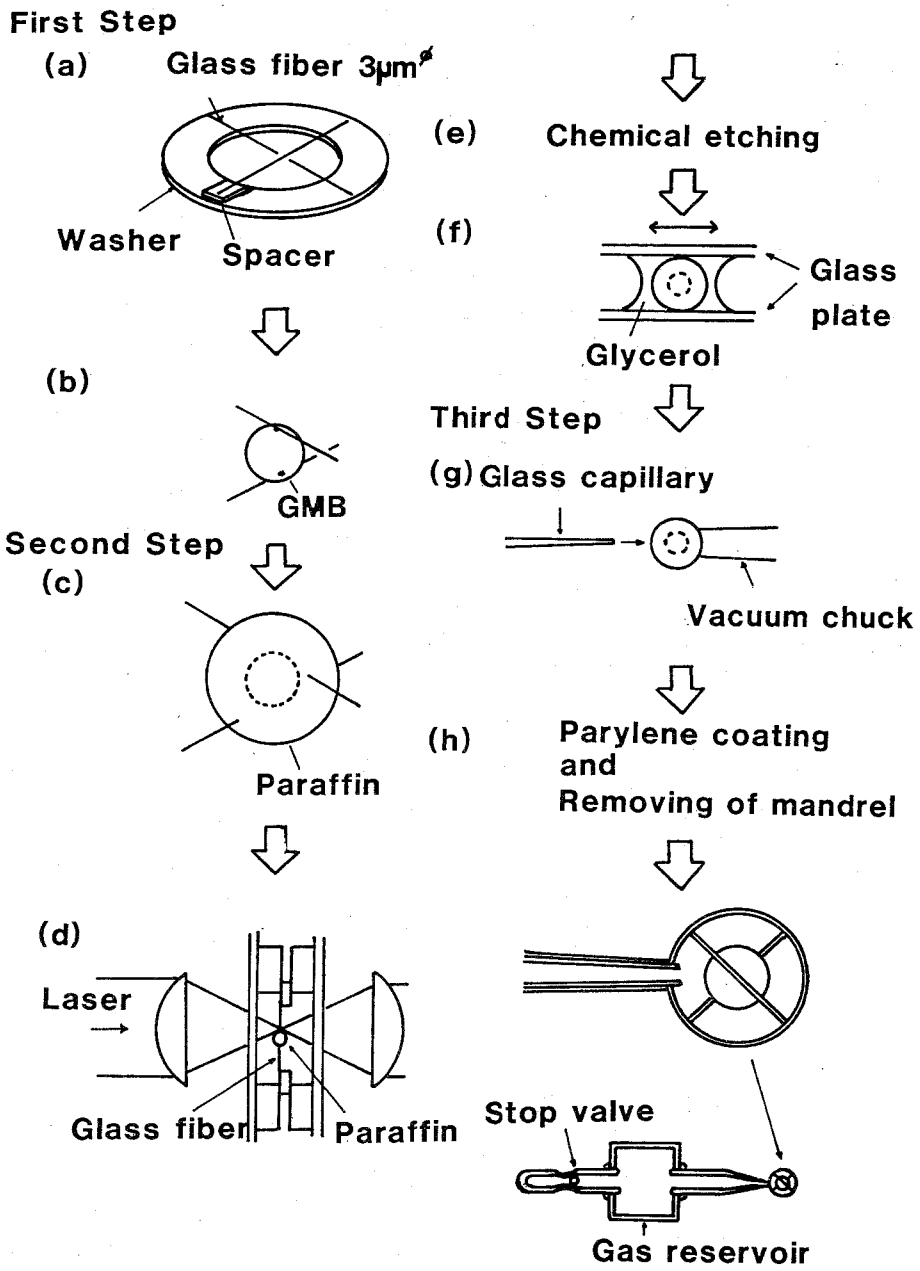


図５－４　ダブルシェルターゲットの製作過程

第２段階について述べる。少量のパラフィンを GMB の上に乗せ加熱するとパラフィンは溶け，ファイバーの中心に取り付けた GMB をつつむように球状に集まる。この状態で自由落下させてパラフィンを凝固させることにより重力の影響を少なく

し，偏心の原因を取り除くことができる。外側シェルの外径は，このときのパラフィンの径で決定される。必要な外径を正確に得るために，メルトスプレイ法で製作したパラフィン球を用いて行なった。[7] 半径Rが

$$R=\frac{3}{4\pi}\sqrt[3]{\frac{4\pi}{3}\left(r_0{}^3-r_1{}^3\right)} \qquad (5-1)$$

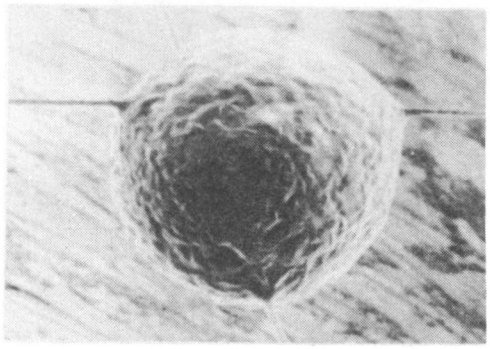
r_0 外側球半径，r_1 内側球半径

で決まるパラフィン球を用いることによって容易に寸法のそろったダブルシェルターゲットを作ることができる。

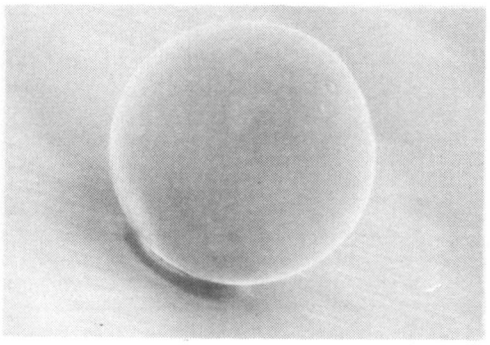
パラフィン球より突出したガラスファイバーをレーザー加工機，及びフッ酸によるエッチングで除去した後，表面処理を行なう。パラフィンは凝固するとき，表面に2～3 μmのリップルを生じる。このリップルを除去するため，パラフィンボールを2枚の平行ガラス板にはさみ，圧力を加えながら回転させた。第5－5図に表面処理の効果を示す。圧力の強さは重りで調節し，500mg から始め，次第に減じて100mg で仕上げを行なう。このときの表面仕上げは0.2 μm 程度である。

第3段階で先端の直径が20 μm 程度のガラス毛細管を取り付ける。この毛細管はレーザー照射時の支持の他に，パラフィンの除去，ガスの導入管として用いる。パラフィン球を傷付けないようプラスチックをコーティングした真空ピンセットで球を支持し，キャピラリーを数 μm 挿入することにより，キャピラリーにパラフィンの粘着力を利用して取り付ける。

キャピラリーを取り付けたパラフィンボールは，外側シェルとなるパリレ



(a)



(b)

図5－5　加圧によるパラフィン球表面処理

ンをコーティングされ，さらに真空中で200℃で1時間加熱される。パラフィンは融解し，ガラスキャピラリーを通して蒸発し，パリレンが外側シェルとして残る。この方法で作られたダブルシェルターゲットを図5－6に示す。

5－3－2　検　　討

現在までにこの方法で作られたダブルシェルターゲットの諸量を表5－1にまとめる。

この方法の問題点は2つのシェルの同心度が良いのを作るのが難しい所にある。その原因については先に述べたGMBとファイバーのずれの他に，a）パラフィン球とファイバーの対称中心のずれ，b）ガラスファイバーの除去の不均一がある。まずパラフィン球とファイバーのずれについて検討を行なう。パラフィン球とファイバーの位置関係は，パラフィンの表面張力とファイバーとパラフィンの親和力で決まる。今，パラフィン球がXだけファイバー中心からずれたときの復元力Fは，

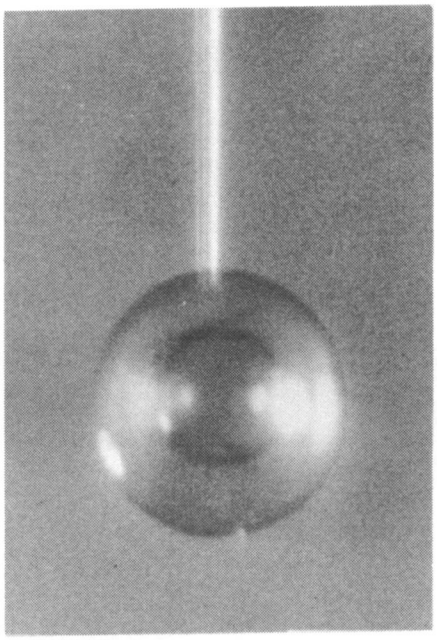


図5－6　ダブルシェルターゲット。外側シェルパリレン250 μmφ，4 μm t，内側ガラスバルーン160 μmφ。

$$F(x) = -T\frac{\mathrm{d}S(x)}{\mathrm{d}x} \qquad (5-2)$$

で与えられる。ここでTは表面張力でSは関与する部分の表面積である。表面積の変化はファイバーと溶けたパラフィンの表面との交点を中心に起こり，第1近似として図5－7のモデルを使うと，hを一定と仮定して，次の関係を得る。

$$F(x) = -T\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left\{\frac{\pi R}{2\sqrt{R^2-x^2}}\sqrt{4h^2+(d_2-d_1)^2(d_2+d_1)}\right\} \qquad (5-3)$$

$$F(x) \propto -\frac{x}{(R^2-x^2)^{3/2}} \qquad (5-4)$$

表5－I　ダブルシェルターゲットに必要な寸法と現状

	Required	Present status
Outer shell		
Diameter	150-300 μm	180-250 μm
Wall thickness	2- 40 μm	4- 10 μm
Inner shell		
Diameter	80-120 μm	80-120 μm
Wall thickness	1- 2 μm	1- 2 μm
Sphericity	＜3%	＜3%
Concentricity	＜3%	＜7% (ΔR/R)

この力は図5－8(a)で示す通り，変位が小さいときは復元力も小さく，中心からずれやすいことを示している。この式を利用して重力がかかった場合のずれを計算してみると半径100 μmクラスのパラフィン球の場合3～5 μmのずれになる。

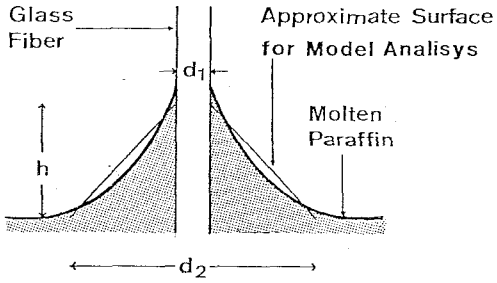


図5－7　パラフィン表面とガラスファイバーの接触モデル

この“ずれ”を起こす原因となるものは重力等の外力の他にファイバーの直径の相異，汚れ等があり，ファイバーとパラフィンの親和力によって発生する。親和力によるずれの力Fは，

$$F = \alpha N \cdot L \qquad (5-5)$$

で表わすことができる。ここでαは表面状態等によって異なる係数であり，Nは親和力，Lはパラフィン表面とファイバー表面の接している長さである。式（5－2）との関係で，ファイバーの直径が10%異なる場合の影響を調べると，パラフィン球の直径が100 μmクラスの場合，パラフィン球はファイバーの太い方にずれ，$x/R \simeq 5\%$となる。

このようにパラフィンの位置のずれは，外力に対して敏感である。これを改良す

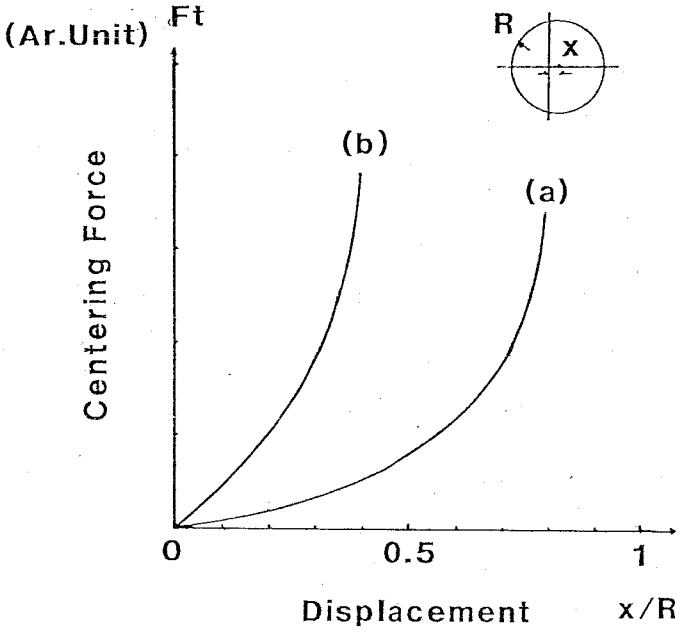


図５－８　表面張力によるパラフィン球ずれに対する復元力

るために，ファイバー直径を同一にすることの他に，図５－９に示すような４本のファイバーで支持する方法がある。このように改良することにより，復元力のカーブは図５－8(b)になり，同じ外力に対して変位は¼～½以下にすることができる。

次にガラスファイバー除去時に生じる不均一であるが，これはエッチングがパラフィン表面より内部に回り込むためである。これを改良するためには，フッ素化合物低ガス圧下でのグロー放電によるドライエッチングが有効であると考えられる。この方法はパラフィンの溶解を防ぐために冷却が必要であり，現在検討中である。

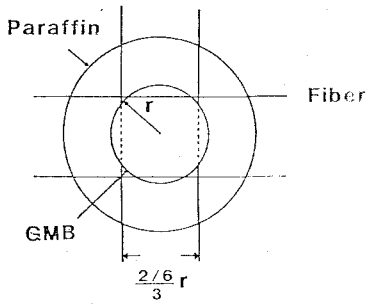


図５－９　４本ファイバーによるGMBの支持

５－３－３　ま　と　め

パラフィン除去法によるダブルシェルターゲットの製作法を開発した。内側シェル，GMB（直径80～160 μm），外側シェル，パリレン（直径160～260 μm,

壁厚5 μm以上），真球性97%以上，2つのシェルのずれ5%以下のものが製作可能である。さらに精度を良くするためには4点支持，ドライエッチング等の導入が必要であるが，現在世界で作られているものの中では最も小型のもので，ガス導入管を持つ唯一のものである。このターゲットは実験に供給され，各種のダーテを得ている。

§5－4　プラスチックフォームダブルシェルターゲットの開発

5－4－1　特徴と目的

前節のダブルシェルターゲットの製作法では，寸法的に大型のもの（直径300 μm以上）は心材となるパラフィンが固化するときの体積変化などで作るのが困難になる。また，支持に用いている直径2 μm のガラスファイバーが燃料球の対称な爆縮の妨げとなる恐れがある。これに対して燃料球を低密度のプラスチックフォームで支えたダブルシェルターゲットは完全対称であり，実用炉用ターゲットにつながるものとして注目されている。

この節ではフォームダブルシェルの基礎となるフォームの製作技術，加工技術について示す。フォームに要求される仕様はレーザーパワーによるが10kJ クラスのレーザーでは密度10mg／cc シェルサイズ3～10 μm のものが必要とされている。現在のフォーム製作技術では密度とシェルサイズの積に下限があり，300 μm mg／cc が下限となっている。著者はポリ（4―メチル―1―ペンテン）（TPX）を用いて150 μm mg／cc のフォームを，またデキシトランを用いて30 μm mg／cc のプラスチックフォームを試作するとともに，プラズマ実験に供給した。

5－4－2　TPXによる低密度フォームの製作

TPX（ポリ（4―メチル―1―ペンテン））を用いたフォームの製作過程を 図5－10に示す。[8] TPXを200℃ のジフェニールメタンに溶かし，冷却した。180℃程度にまで下がってくるとTPXが析出し，溶液は白濁した。さらに26℃以下に冷却するとジフェニールメタンも固化し，白いワックス状になった。実験中ジフェニ

ールメタンの酸化を防ぐため，窒素ガスで置換したグローブボックスの中で加熱した。またジフェニールメタンが蒸発し，濃度が変わることを防ぐため，冷却器を付けた蓋をして実験を行なった。26℃以下に冷却したあとアルコールでジフェニールメタンを抽出することにより，低密度のプラスチックフォームを得た。

(a) 濃度とフォーム構造

TPXの濃度を1～10wt%と変えてフォーム構造を調べた。100 ccのビーカーで溶かしたものを自然冷却（約2時間）し，一部を削り出し，ソックスレー抽出器を用いてジフェニールメタンを除去し，走査型電子顕微鏡で観測した。図5－11に典型的な結果を示す。TPX の濃度が3%以下の場合はフォーム構造を作らず，ターゲットを作るに必要な機械的強度はおろか，自分自身も支えることができなかった。TPX の濃度が4%を越えるとフォーム構造を作り始めるが，空隙が多く，ジフェニールメタン抽出時に体積で25%収縮した。TPX の密度が10%になると，ほとんど収縮することはなく，むしろ大きくなる傾向を示した。図中( )の値は収縮量から計算した密度で，上段が実験

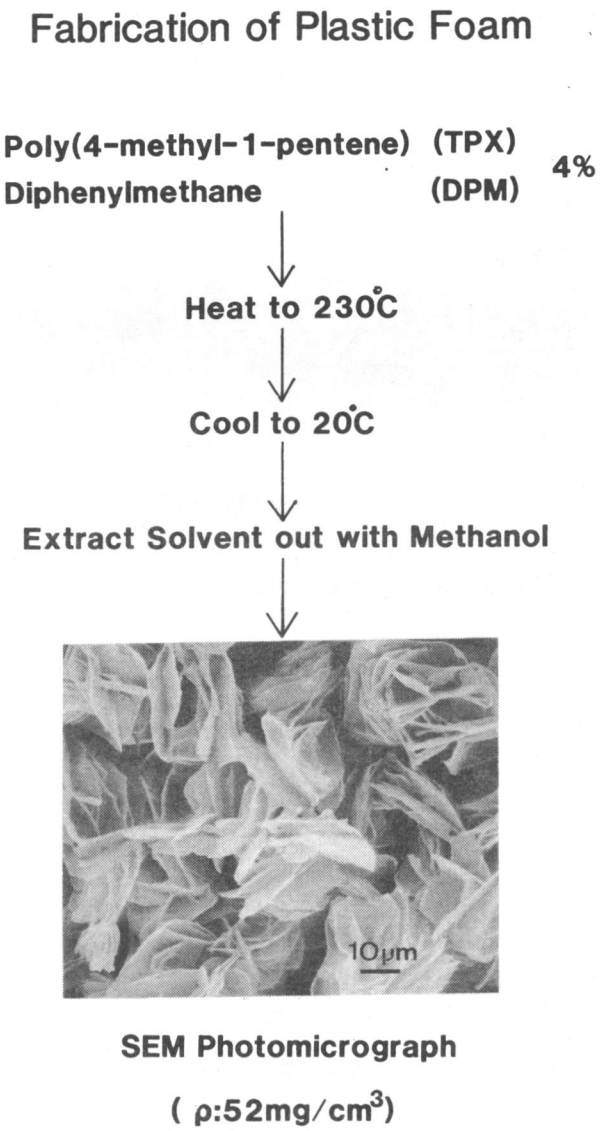


図5－10　TPXフォームの製作過程

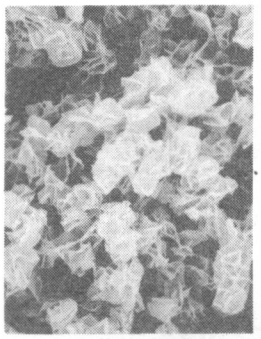
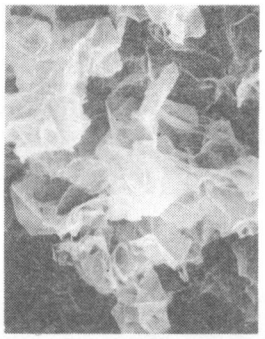
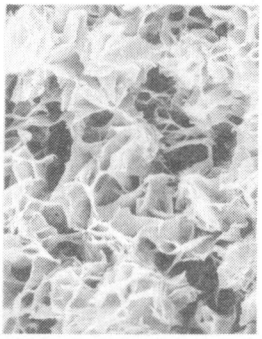
TPX 溶液の濃度（%）	3.0	4.0	10.0
密　度（mg／cm³）	（32.7） （29.6）	45.1 （38.2）	129.3 （89.3）
抽出前後の長さの変化(%)	−	−9.0	+1.6
電子顕微鏡写真 100μm			

図5−11　TPX フォームの電子顕微鏡写真

値である。実験値が多いのはジフェニールメタンが完全に抽出されないで，フォームの“シェル”の中に閉じ込められているためと考えられる。フォームターゲットとして安定に供給できるのは密度50mg／cc程度であった。

(b)　濃度降下速度の影響

フォーム構造と温度降下速度との関係を調べるため，TPX 溶融液を2枚の直径3㎝，厚さ5㎜の銅板によって作られた0.5㎜のスキ間に流し込み，冷却速度を変え，その断面を観測した。その結果，冷却速度が速い場合（>10℃／分），金属面に近い所にTPX フォームが集まり，3〜10μm のシェルを作るが中央部は空洞になることが多かった。自然冷却ではほぼ均一な10μm のシェルができた。しかしながらここに示した結果は傾向を示すもので，我々の実験の範囲では冷却速度とシェルサイズの正確な関係を見い出すことはできなかった。

まとめとして，TPX でフォームを作る場合，TPX 濃度を4%にし，自然冷却で固めることにより，密度50mg／cc，セルサイズ3〜10μm のプラスチックフォームを再現性良く作ることができた。

5－4－3　デキシトランフォームの開発

有機物の水溶液を凍結乾燥させることによりフォームが形成されることが古くから知られている。[9] デキシトラン（Dextran （$C_6H_{10}O_5$）n）を用いてターゲット用フォーム材料を作ることはフランスリメール研究所などで提案された。デキシトランはD－グルコースから成る細菌性多糖類で，ショ糖を含む培地から種々の細菌またはそれから 得られる酵素デキシトランスクラーゼの作用により合成される。比重は1.0 g／ccである。デキシトランフォームの特徴を知るために次の実験を行なった。

(a) 密 度 測 定

デキシトラン濃度と作られたフォームとの関係を知るため，デキシトラン1～8重量％の水溶液を作り，それぞれを直径2～3 mmφの液滴にし，液体窒素中に落下した。凍った状態で寸法を測定しこれを真空乾燥した。10^{-3} ～10^{-5} Torrの圧力下で3～6時間を必要とした。乾燥後，顕微鏡を用い非接触で寸法を測定し，重量を測定した。

実験結果を表5－Ⅱに示した。ρは実験的に得られた密度，ρ_0 はデキシトランの比重が1であることから得られる理論値，$\rho_0{}^1$は体積収縮率を考慮して得られた

表5－Ⅱ　デキストランを用いたフォームの密度と収縮率

（ρ：測定値，ρ_0 ：理論値，$\rho_0{}^1$：ρ_0 に収縮を考慮した値）

デキストラン〔％〕	密度〔mg／cc〕			体積収縮率〔％〕
	ρ	ρ_0	$\rho_0{}^1$	
1	15.5	10	16.0	37.5
3	43.2	30	46.9	36.0
5	67.2	50	61.4	18.6
8	101.0	80	97.2	17.7

理論値である。実験結果と理論値は一致しており，TPX フォームのように溶媒がフォーム中に残っていないことを示している。これはTPX フォームが壁で閉じられたセルを作るのに対してデキシトランフォームは柱を中心とした構造になっているためである。デキシトラン1％によって作られたフォームは非常に脆く，取り扱

いが困難であった。フォームターゲットとしての取り扱いを考えると，4％，密度50㎎／cc 程度が実用上の下限であった。

(b) 吸水性について

デキシトランは親水性で，大気中の水分を吸収する。フォームの保管に必要な知識を得るため，3種の状況下に置いて変化を観測した。その結果，温度20℃，湿度25％の乾燥器内に6時間放置した場合，重量，外寸法の変化いずれも認められなかった。温度20～22℃湿度40～50％の室内に6時間放置した場合も大きな変化は認められなかった。気温20℃，湿度96％以上の所に置くと，10分で密度は0.9 g／cc に，体積は1/10に縮小した。

(c) フォーム構造

フォーム構造を調べるため，溶液が凍っている間に割り，真空乾燥後断面を電子顕微鏡で観測した。フォームは冷却面に対して平行な面と垂直な面で断面の様子が大きく異なっていた。(図 5－12) セルサイズは冷却面から内部へ行くほど大きくなる傾向が見られた。表面から100～150 μm 以内では1～10 μm，それ以上になると50～100 μm ほどになる。またデキシトラン濃度が高くなるにつれ，この変化は小さくなる。セルの壁は濃度が下るほど細かくなり，1％では繊維状，3％では繊維と板状，5％以上では板状の壁をしていた。

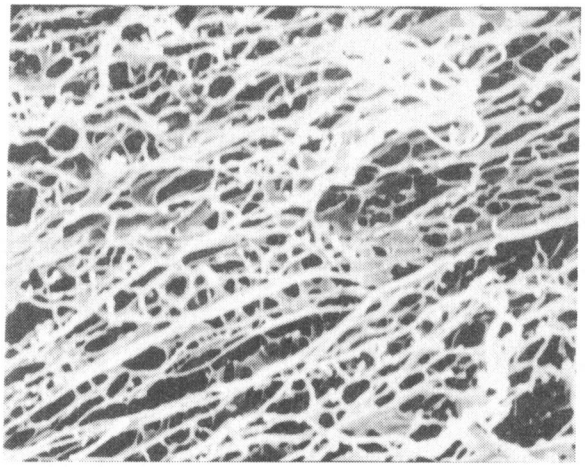


図5－12 デキストランフォームの電子顕微鏡写真

まとめとして，デキシトランでターゲット材料としてのフォームを作る場合，密度45㎎／cc，セルサイズ3 μm 程度が限界である。フォームを作った後の取り扱いがささえの取り付け程度の簡単なものであれば密度30㎎／cc，セルサイズ1 μm程度も可能である。

5－4－4　フォームの加工

低密度プラスチックフォームはレーザー光の吸収を測定するために厚さ数100μmの板や直径数100μm の球に加工されなければならない。また，流体力学的効率を高めるためにガラスマイクロバルーンの外側に厚さ数100μm コーティングされる。ここでは鋳型を使った加工法について簡単に示す。

(a)　TPXフォームのGMBへのコーティング

TPX のジフェニールメタン溶液は26℃以下ではワックス状に固化する。したがってマクロな加工はこれを切断，穿孔することで基本的に可能である。しかしながら，TPX 濃度が10％以下の場合は，アルコールによるジフェニールメタン抽出後に収縮が著しく，精度は期待できない。また，ワックス状に固化しているときでも軟らかいため精度の高い加工は困難であった。

著者は直径100 μmのGMBに厚さ100μmのフォームをコーティング するために鋳型を利用して行なった。鋳型を用いると鋳型がフォームのささえとなるため，ジフェニールメタン抽出後の収縮が少なく，良い結果を生むことができた。この方法では精度の良い鋳型を作ることが鍵となった。

図5－13に鋳型の製作過程を示す。著者が開発を行なった方法の特徴は，4組のはめ合せのできる銅製の鏡板を作るのに精度を要するが，それ以後の工程には特に精度を保つ努力をしなくとも容易に精密な鋳型対を作ることができることにある。銅板は，はめ合わせのためステンレスのピンとスリーブを2対取り付け，締め付のための2対のネジ穴を用意した。まずAB 2枚の銅板の間に，完成後の GMB と同じ直径のガラス中実球を必要なだけはさみ込みプレスした。この実験では直径100±2 μm，真球度99％以上のものを用いた。ガラス球95％以上割れることなく用いることができた。板の硬さが同一であるときガラス球は上下の板に均等にめり込み，半球状のへこみを作ることができた。実際に用いた銅材では上下のくい込み量に最大5％の差がでることがあった。第2段階ではBの穴の上に，完成したフォーム球の外径と同じ直径の鋼球を入れ，新しい銅板Cを用いてプレスした。これにより鋳形の凹型2組が完成した。第3段階では第1段階のAを利用して新しい銅板DにAの鋼球の位置を刻み込む。A，Dの銅材の硬さが同一であればAのガラス球が新たにめり込むことはなかった。第4段階でDに凸型となるガラス球をシリコン系接着

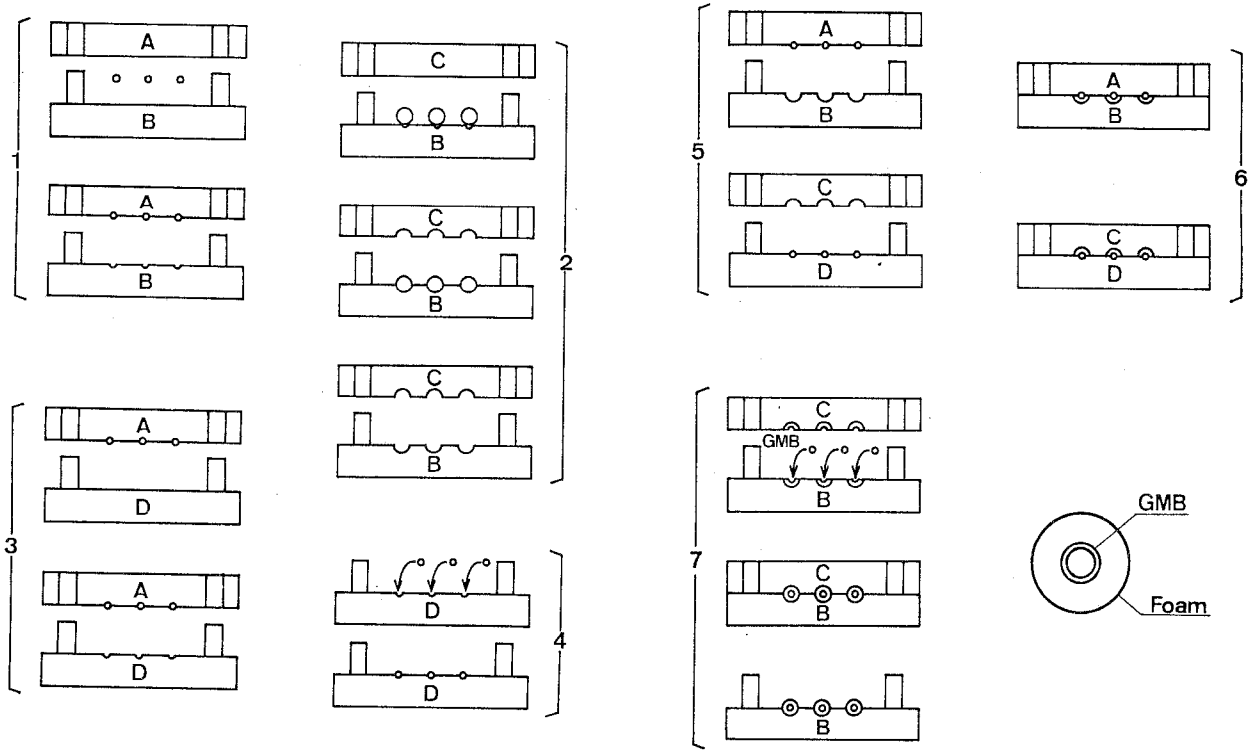


図5—13　フォーム鋳型の製作過程

剤で固定し，A，B，C，Dの一セットの鋳型が完成した。

この2対の鋳型を200℃の8wt％TPXのジフェニールメタン溶液中で組み立て，鋳型の中に液を流し込んだ。2時間かけて25℃以下に冷却後，メチルアルコール中に1時間入れ，ジフェニールメタンを抽出した。最後にGMBを入れ，少量のエポキシ接着剤をフォーム部につけ，CBを重ね合わせることにより完成した。

この方法で作ったフォームの半球の走査型電子顕微鏡写真を図5－14に示す。鋳型に接する部分は閉じた部分が多いが，内部はフォーム構造をしている。この資料の場合，密度は89mg／ccであった。図5－15はそれぞれ2個の半球フォームを組み合わせ，支えを付けた電子顕微鏡，X線写真である。

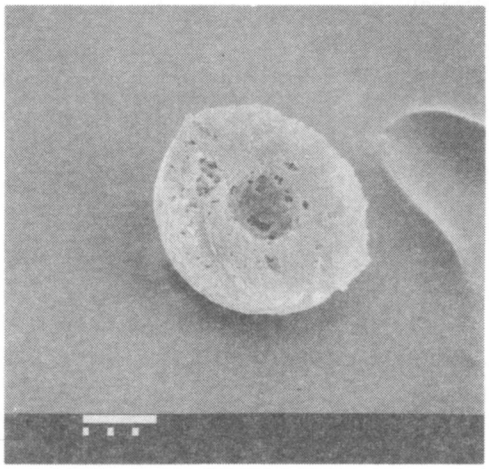


図5－14　フォームヘミシェルの電子顕微鏡写真

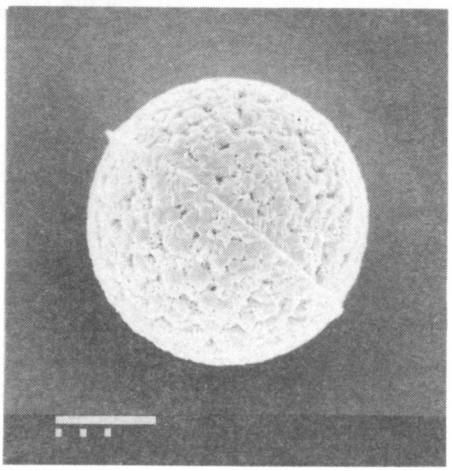


図5－15　フォームターゲットのX線写真

この方法の特徴は容易に精度の良いフォームターゲットを一度に多量に作り得ることである。この実験では一対の鋳型で5個ずつしか作らなかったが直径3cmの銅板で一度に100個作ることも可能である。完成したときの2つのフォームのずれは3μm以下でGMB中心とフォーム中心とのずれは10μm以下であった。この方法は鋳型製作時に球のめり込み量が均等になるように修正することでさらに精度を高めることができる。

(b) デキシトランフォームの加工

デキシトランフォームも加工は鋳型による整形で行なった。凹型を付けた黄銅製鋳型の中央部に支えを付けたGMBを置き，デキシトラン水溶液を流し込み，そのまま凍結，乾燥させる方法を採用した。（図5－16）実験は水溶液の他に，水－ジ

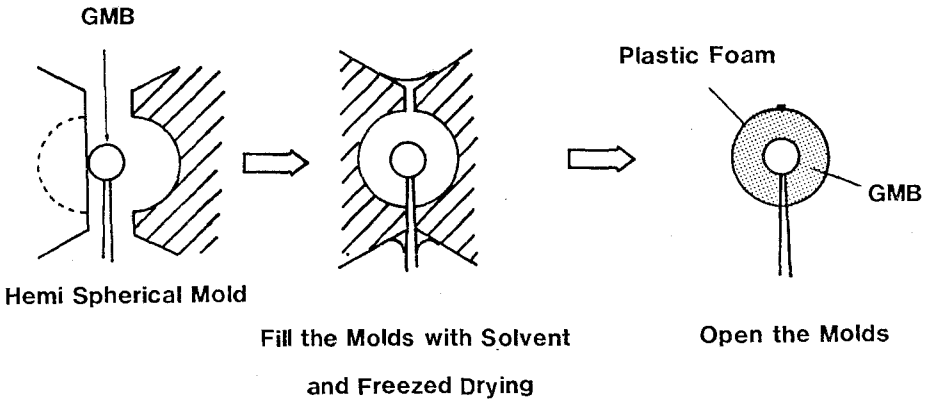


図5－16　デキシトランフォームターゲットの製作

オキサン混合液を溶媒として行なった。これは水が氷るとき膨張してGMBを割る恐れがあるためである。ジオキサン（Dioxan $C_4H_8O_2$）は環状エーテルの一つで水および多くの有機溶媒と混ざる。沸点101℃，融点11.8℃であり，温度に対して負の体積膨張率を示す。このため，水とジオキサンを6対4に混ぜると，水が氷るときの体積変化を抑えることができる。

溶媒に水だけを用い，内径600μmの黄銅製鋳型と直径140～160μmのGMBの組み合せで製作した結果について示す。デキシトランが1重量%のときフォームは非常にもろく，ターゲットとして取り扱うことができなかった。3%及び5%の場合は取り扱うだけの強度があったが，約60%の割合で内部のGMBが割れ，またフォームが鋳型に強く付き，鋳型を開けるとき割れることがあった。

溶媒として水対ジオキサンを6対4で混合した場合の結果を表5－Ⅲに示す。デキシトラン3%及び5%いずれの場合もGMBの破損は見られなかった。

実験で得られた収縮率は水だけを溶媒にしたときより5～8%大きかった。これは水だけを溶媒にしたとき，フォームが鋳型に付着するために収縮が押えられたと

考えられる。実際，鋳型を開けるとき，鋳型に付着して割れることがあったのに対して，水とジオキサン混合液ではこのようなことが見られなかった。フォームの鋳型への付着は再現性が低く，加工の信頼性を悪くするので，この意味でも水－ジオキサン混合液の使用が望ましい。

表５－Ⅲ　フォームの収縮率，密度，フォーム層厚の測定結果

デキストラン〔%〕	収縮率　〔%〕	フォーム層厚〔μm〕	密度〔mg／cc〕
3	32.4	190	44.6
5	22.6	200	64.6

（溶媒　水：ジオキサン＝６：４）

５－４－５　半球殻の製作

プラスチックフォームダブルシェルターゲットを製作する場合，フォームの外面は鋳型に接した側でも数ミクロンの凹凸が有るため直接コーティングを行なって外側シェルを形成することはできなかった。そこで，外側シェルは２分割した半球殻を組み合せる方法を採用した。以下に金及びプラスチックの半球殻の製作法を示す。

(1)　金半球殻の製作法

図５－17に金半球殻の製作法を示す。２枚の銅板に必要とする外径に等しい鋼球をはさみ込み押しつぶした。銅板は鋼球に押さえられ弾性限界を越えて変形するため，凹部の表面仕上げは鋼球の表面仕上げに近い値が得られる。銅板の表面仕上げは0.5 μm程度で十分であり，容易に0.05 μm 以下の平滑な面が得られた。次に凹型に金メッキ，又はイオンプレーティングで必要な厚さのコーティングを行ない，表面を研磨して不要な部分を塩化第二鉄によるエッチングで除去した。

この方法で，ターゲットとして取り扱うだけの機械的強度を得るためには直径400 μm クラスの場合５μm以上の厚さが必要であった。金メッキの場合，表面状態は悪く，直径１μm程度の粒子が付着したような状態であった。また，厚さの均一性も問題がある。この方法については今後研究が必要である。

(2) プラスチック半球殻の製作

図5－18にプラスチック半球殻の製作過程を示す。プラスチック半球殻の内径に等しい鋼球を心材として必要な厚さのパリレンコーティングを施す。心材となる鋼球はマイクロベアリング用として開発されたもので，表面仕上げは0.1 μm以下である。コーティング後精密旋盤で切断し，120℃に加熱することにより型から取りはずした。

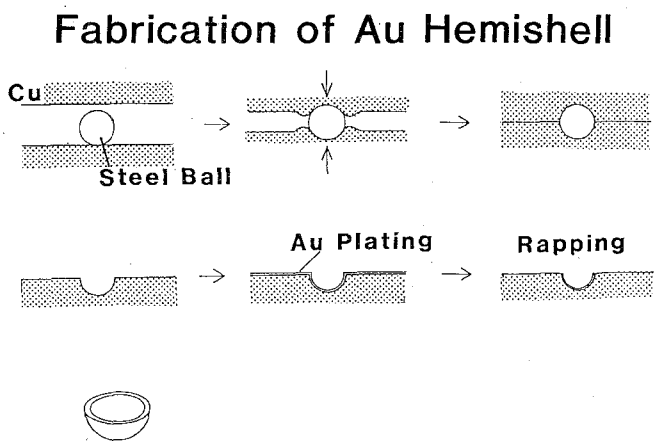


図5－17 金の半球シェルの製作

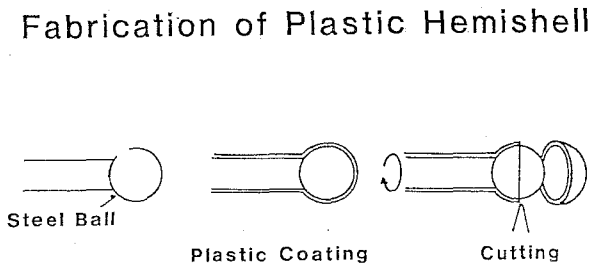


図5－18 プラスチック半球シェルの製作

この方法でターゲットとして実用的な強度を得るためには直径400 μm のとき厚さ4 μmが必要であった。この方法の問題点は切断面の精度が1 μm程度しかないのと，旋盤にとり付けたときセンターがでないことにある。いずれも0.1 μm以下の精度が必要であり，今後の開発が必要である。

§5－5 キャノンボールターゲットの製作

5－5－1 キャノンボールターゲットの特徴

キャノンボールターゲット（密閉型，又はキャビティターゲット）は，図5－19に示すような二重構造のターゲットである。燃料を充塡した内球と穴の開いた外殻とにより作られている。レーザー光は穴から外殻の内側を照射する。レーザー光は

一部反射され，直接当らない部分も加熱する。内側の燃料球は外側からのX線又は粒子により加熱圧縮される。このターゲットの特徴は単一シェルターゲットに比較してレーザーの吸収率が高く，また圧縮の流体力学的効率も高い。対向2ビーム照射でも極めて一様な圧縮が可能である。

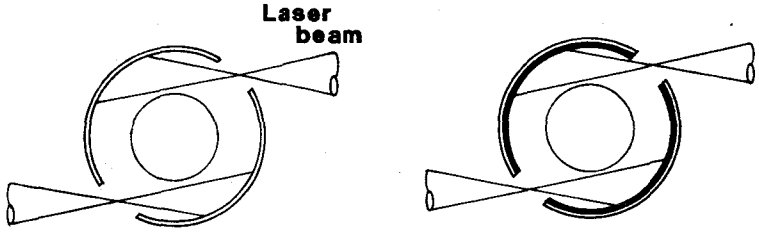


図5－19　キャノンボールターゲット

著者はこのキャノンボールターゲットの製作法を開発し，実際にプラズマ実験に供給し，成果を上げた。ここに製作法を示す。

5－5－2　製作過程

図5－20にキャノンボールターゲットの製作過程を示す。外殻直径に等しい鋼球を2枚のアルミ板の間にはさみ圧縮し，半球の鋳型を作った。さらに後に内側のGMBをささえる棒を逃るため，深さ10～20μmの溝を作った。次にC－パリレン（C_8H_7Cl）$_n$を全体にコーティングし，パリレン層を必要な大きさに切断した。マイクロドリルでレーザー光を導入するための穴を開けた。この段階で内面に金のコーティングが必要な場合，スパッタリングで行なう。フッ酸でエッチングを行ない，アルミ鋳型から取り出した。

この方法で外側殻直径400μm，壁厚12μmのキャノンボールターゲットが作られた。図5－21に顕微鏡写真を示す。現在の所，組立時の精度は2半球の組み合せでは5μm，外側シェルと内球の位置合せでは10μm程度に留まっている。また穴の位置決めは10μm程度であり，開け得る場所についても限界があり，今後の研究を必要とする。

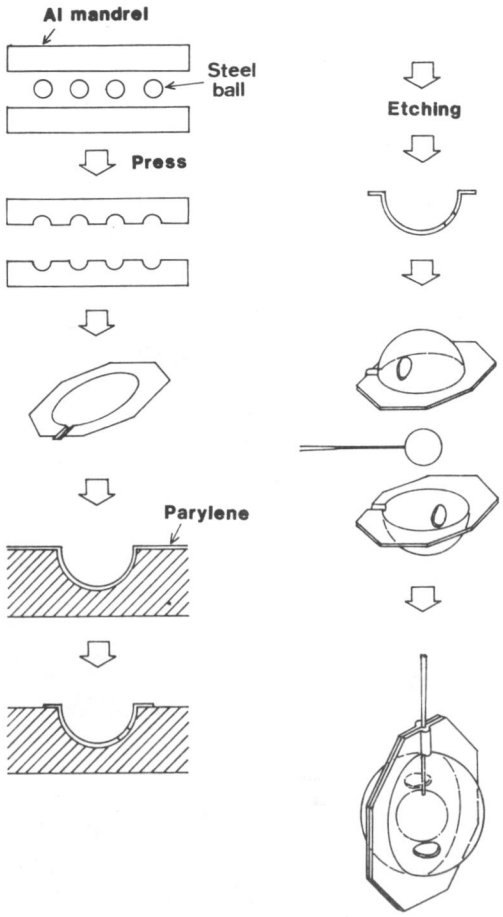


図5－20　キャノンボールターゲットの製作過程

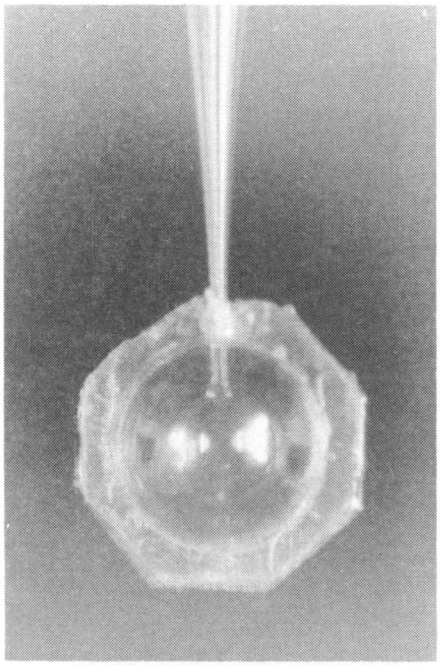


図5－21　キャノンボールターゲット

5－6　まとめ

本章では2通りのダブルシェルターゲット，及びキャノンボールターゲットの製作法について述べた。支持を付けたGMBにパラフィンをコーティングし，さらにパリレンをコーティングした後，パラフィンを除去することにより，外側パリレン殻，内側ガラスマイクロバルーンのバキュウムインシュレーション型ダブルシェルターゲットの製作が可能となった。この方法で内側GMB直径80～160 μm，外側パリレン殻160～250 μm　壁厚5 μm以上，内球と外球のずれ5％以下のものが製作可能である。内球と外球のずれは内球の支持法，ガラスファイバーのエッチング法などの改良により，さらに少なくすることが可能である。

プラスチックフォーム型ダブルシェルターゲットの開発では，燃料球にプラスチ

ックフォームをコーティングし，２分割した殻をかぶせることにより基本的に可能であることを示した。フォームコーティングは鋳型を用いることにより，直径100 μmの GMB 上に，密度50mg／cc のフォームを100 μm コーティングした。外側殻は２つの半球をはり合せる方法を採用したが組立法はさらに検討が必要である。またこの方法では厚さ４ μm 以下のものは製作困難で，現在のレーザーパワーに合ったターゲットを作る方法も開発する必要がある。

参　考　文　献

1) Lowrance Livermore National Lab., Laser Progran Anual Repts. UCRL−50021−79

2) K.D.Wise et al ; J. Vac. Sci;Technol., 16, 936 (1979)

3) 椿原啓，中塚正夫，久保宇市，レーザー研究・7,172,(1979)

4) 椿原啓，久保宇市；大阪大学レーザー核融合研究センター，ペレットターゲット開発委員会編，ペレットターゲット開発成果報告書　第２巻

5) T.Norimatsu, A.Furusawa, M.Yoshida, Y.Izawa and C. Yamanaka ; J. Vac. Sci. Technol. 18, 1288,(1981)

6) 乗松孝好，古沢文子，山中龍彦，山中千代衛；レーザー研究，9,541 (1981)

7) 板橋徹；造粒便覧，P199,オーム社，(1975)

8) R.J. Fries ;私信 (1981)

9) A. Coudeville, P. Eyharts, J. P. Perrine, L. Roy and R. Rouillard ; J. Vac. Sci. Technol. 18, 1227, (1981)

第６章　三重水素技術

§6－1　はじめに

ターゲット研究の中で燃料に関係する技術，放射性物質である三重水素の取扱い技術は必要不可欠なものである。重水素 ―三重水素による核融合反応は最も反応に必要な温度が低く，三重水素無しでは核融合の実用化はあり得ない。ガラスマイクロバルーン（ＧＭＢ）の中に１００気圧の重水素・三重水素を充塡するためにはＧＭＢを４００℃，３００気圧の混合ガス中に２４時間入れる必要がある。高温高圧の三重水素ガスを長時間安全に保持する技術が必要である。本章では三重水素漏洩の少ない充塡炉の開発と，充塡量非破壊検査についての研究をまとめた。

§6－2　三重水素充塡

6－2－1　目　　的

核融合燃料として用いられる重水素（D，^{2}H）と三重水素（トリチウム，T，^{3}H）は燃料容器の中へ熱拡散を利用して充塡させる。

三重水素は半減期１2.２６年，最大エネルギー１８keV，平均エネルギー 5.7 keV のβ線を放出する放射性同位元素である。放出するβ線の最大飛程は0.6㎎／㎠で，しゃへいは容易である。しかし，ガス状の三重水素は拡散が速く，一カ所に閉じ込めておくのは極めて困難である。空気中に拡散した三重水素はそのまま，あるいは空気中の水分と同位体交換しＴＨＯの形で，肺，粘膜，皮層から吸収され，体内被曝をもたらす。米国などでは10^3～10^4Ｃｉの三重水素を用いて，さかんに実験に供給されている。[1] 日本ではこのような性質をもつ三重水素をレーザー核融合用ターゲット実験に用いる場合問題となるのは，１）三重水素使用最の少ない充塡システムの開発　２）三重水素の昇圧　３）炉からの拡散による漏れ　４）三重水素充塡量の非破壊測定　５）三重水素充塡ペレットの取扱い　６）三重水素の回収，などである。この節では三重水素の使用量が少なく，拡散の少ない充塡装置の開発について述べ，次節以後でそれぞれ三重水素充塡量の非破壊測定についてと，ＤＴペレットのハンドリングシステム開発を目的とした研究について述べる。

6－2－2　実験原理及び装置

ＤＴガスは放射性物質であり使用量は少ない方が望ましい。また拡散，置換が多いため，方法，材料の選定にはこれらの点も考慮されなければならない。著者は水素化ウランの熱解離反応を利用し，水素を小容器の中に閉じ込め，昇圧する方法を取った。即ち，

$$2UH_3 \rightleftarrows 2U + 3H_2 \qquad (6-1)$$

の反応を利用する。三重水素充塡装置の概略を図６－１に示す。M_1 はピエゾ素子による圧力計で，Ｍはウランベッド，ＲはＧＭＢを入れる充塡炉である。Ｃは三重水素吸着用の活性炭である。配管はＳＵＳ３１６とスエジロックで構成されている。

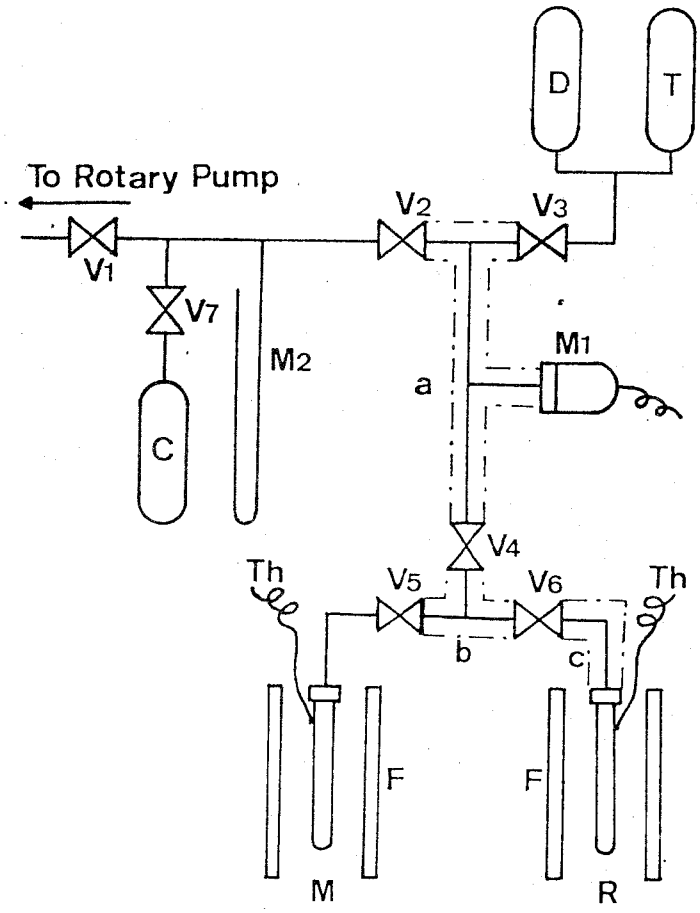


図６－１　三重水素充塡システム

炉の加熱は赤外線コールドイメージ炉を用い，グローブボックス内の温度上昇を少なくした。

実験中の三重水素の拡散漏洩による内部被曝を防ぐために，充塡装置はグローブボックス内に納められ，三重水素回収装置が取り付けられている。[4)5)] 図6－2にその概略を示す。

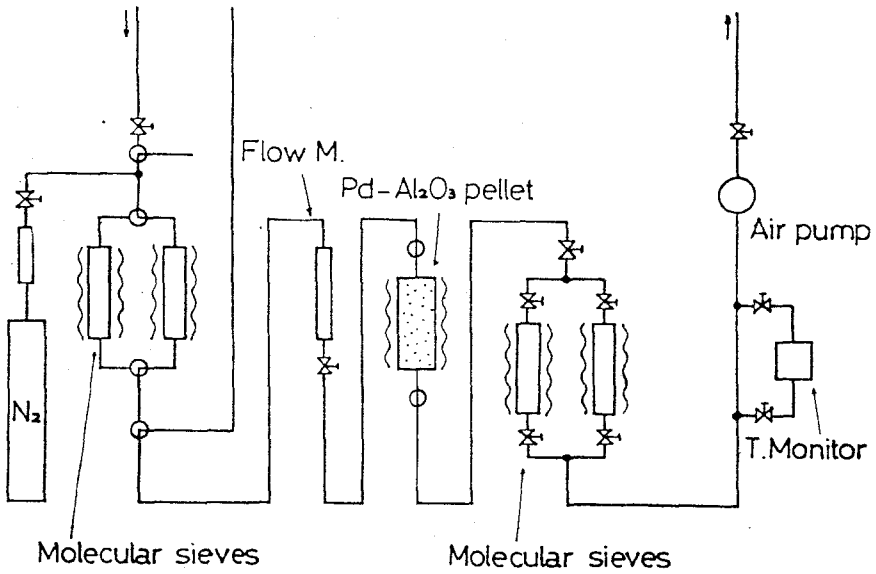


図6－2　三重水素回収系

グローブボックスは密閉型で充塡室と回収室に分けられている。グローブボックス内は窒素ガスで満たされ，充塡室の三重水素を含んだガスは，エアーポンプ (I)，フローメーター (M) を通った後，酸化触媒に送られる。酸化触媒は Pd/AI_2O_3 を用いた。三重水素はここで酸化されDTOとなり，Lのモレキュラーシーブ（4A $^1/_{16}$）で吸着される。

6－2－3　実験方法

(a)　ウランの活性化

金属ウランはペレット状のものを硝酸に浸漬して酸化被膜を除去した後，水洗いし，アセトンで脱水した。図6－1のMに処理をしたウラン1.5gを入れ，水素ガス60cc at STP を導入する。温度サイクル60↔500℃を繰り返すことによ

りウランは活性化され，吸脱着を始める。活性化後は 650℃に加熱し，水素を放出し，三重水素の吸着を行なう。

(b) ウランによるDTガス吸着

三重水素ガス 100 Ci（38.5cc at STP）入りパイレックスガラス製アンプルT，及び二重水素ガス 38.5 cc at STP を入れたアンプルDを連結した。系内を排気後，V_1，V_6，V_7 を閉じ，アンプルD及びTをブレイクシールで破壊し，系内に導入した後，260℃ と室温との熱サイクルを2回繰り返すことにより，DTガス（初期圧 418mm Hg）を98%吸着させた。

(c) ガラスマイクロバルーンへの充塡

ガラスマイクロバルーンを図6－1Rに入れ，装置内を排気する。バルブ V_5，V_6 を開き，他のバルブは閉じたまま，容器Mを 650℃で30分加熱し，DTを系内に放出する。次に容器Rを液体窒素で冷却し，バルブ V_6 を閉じ，容器Mは徐々に温度を下げ，系内に残った三重水素を回収する。容器Rを 500℃で10時間加熱し，GMBに充塡を行なう。充塡後は V_4 及び V_6 を開き，系内の圧力を測定する。

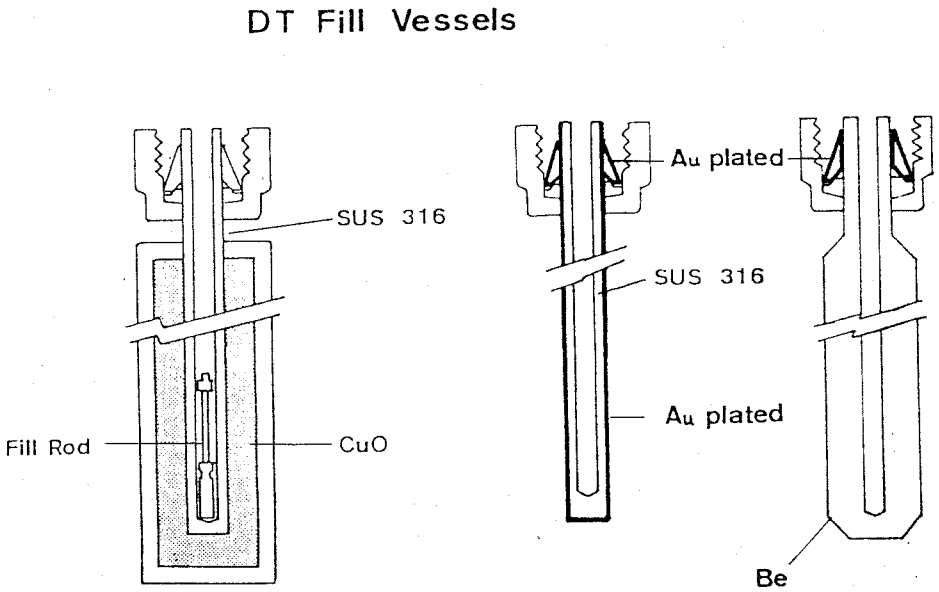


図6－3　三重水素充塡炉

V_5 を開き，容器を３２０℃まで加熱，徐々に冷却することにより，ウランに回収する。

容器RはSUS－３１６によるもの，酸化銅ジャケットを付けたもの，金を１０μmメッキしたもので試みた。（図６－３）

６－２－４　実験結果及び検討

４３Ｃｉの三重水素を用いた本実験でＧＭＢに１７±２気圧充塡することができた。充塡量はＧＭＢをグリセリン中で破壊し，できた気胞の大きさから求めた。

充塡中の三重水素の圧力は直接測定できない。充塡後に V_6，V_4 を開き，R内(体積0.7㎤）の三重水素をａ，ｂ部分に拡散後 M_1 で測定する。本装置ではａｂｃの和は6.1㎤，ｃは1.1㎤で，実測値は6.1 kg／㎠ であった。このことで，充塡時にＧＭＢの曝露されていた圧力を計算すると室温で３４ kg／㎠ である。

室温で３４kg／㎠の雰囲気ガス圧に対してＧＭＢ内の圧力１７kg／㎠ の充塡結果を得た。この値の妥当性について検討してみる。実際の充塡炉では温度分布が一様でないため，低温部にガスが偏在し，高温部が低密度となるため，常温で示された圧力３４kg／㎠まで充塡することはできない。

この充塡システムでは炉最下部５００℃のとき炉上部２００℃，配管バルブ温度は３０℃であった。炉体積0.7㎤，配管・バルブ体積 0.37㎤ から計算した最高充塡圧力 P_∞ は P_0 を室温における炉内圧力として

$$P_\infty = \frac{\int dV}{\int \frac{T}{Th}\, dV} P_0 \qquad (6-2)$$

$$= 0.57\, P_0 \qquad (6-3)$$

で与えられる。ここで Th はＧＭＢが置かれている部分の温度，T は体積素 dV ががしめる部分の温度である。この実験の場合 P_∞ ＝１９kg／㎠ となる。

次にＧＭＢが高温ガス中に置かれた場合の充塡ガス圧の時間変化を求めてみる。拡散の法則，シーベルトの法則により，面積 S，厚さ d の壁を隔てて圧力 P_1，P_2 のガスが存在するとき，壁と単位時間に透過する量は次式で与えられる。

$$Q = S\Phi\,(P_1^{1/2} - P_2^{1/2})\,/\,d \qquad (6-4)$$

ここでΦはガスの透過率である。高温炉中でのガス圧をP_∞（atm），GMB中での圧力をPt，GMBの直径，壁厚をそれぞれD，dとすると充塡圧の時間依存性は，

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{6\Phi}{dD}\,(P_\infty^{1/2} - P_t^{1/2}) \qquad (6-5)$$

従って

$$t = \frac{dD}{3\Phi}\left\{\sqrt{P_\infty}\,\ln\frac{\sqrt{P_\infty}}{\sqrt{P_\infty}-\sqrt{P_t}} - \sqrt{P_t}\right\} \qquad (6-6)$$

で与えられる。この関係を図6－4に示す。

実験に用いたGMBの透過率は400℃において 3.8×10^{-10} cm²/sec atm$^{1/2}$ であるので，この値で500℃のΦの値を代用して計算してみると，充塡圧力として18.2 kg/cm² を得る。従って実験結果17±2 kg/cm² は妥当な結果と判断される。

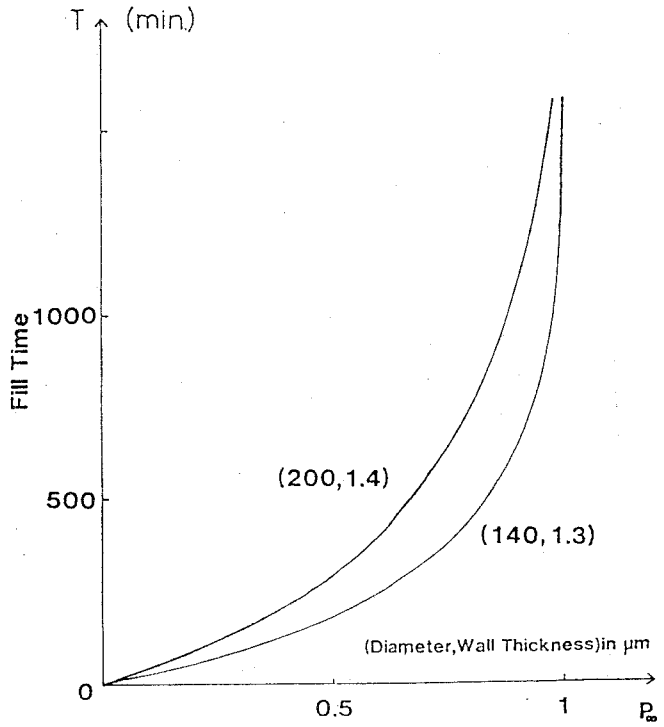


図6－4　三重水素充塡に必要な時間。P_∞は室温での平衡圧力。

§6－3　三重水素漏洩の抑制

6－3－1　目的及び方法

燃料である三重水素は放射性物質である一方，その原子直径が小さいため容易に拡散する。高温高圧の重水素，三重水素を含む充塡炉からの三重水素の漏洩はグローブボックス内部，ひいては作業室，環境の汚染を招くため低く抑えられなければならない。激光Ⅻ号レーザーシステムに必要なターゲットでは燃料は室温で１００気圧充塡される。充塡作業中の炉内条件は４００℃，３００気圧であり，この条件下でも三重水素の漏洩は十分に低く抑えられる必要がある。

実験方法は燃料充塡に用いたのと同じシステムを用いて行なった。即ち試験用炉を図６－１，Ｒに取り付け重水素，三重水素ガスを満たし，充塡条件と同じ状態にする。炉からの三重水素の漏洩量は密閉されたグローブボックス内の三重水素濃度の時間変化から求めた。測定にはトライトン三重水素モニター（イオン，γ線補償付）を用いた。

テストされた炉を図６－３に示す。炉体はＳＵＳ３１６棒を機械加工で穴をあけたものである。ＳＵＳ３１６の水素透過はＦｅ又はＦｅＮｉ合金系の水素透過度の1／10～1／100の値を持っており，工業的に十分信頼できるものとして原型に選んだ。他にSUS３１６管の外側に酸化銅のジャケットを取り付けたもの，SUS３１６に純金を，又はニッケルと純金を電界メッキしたもの，カロライズで処理を行なったもの，[2] ベリリウム棒を放電加工で穴をあけたものなどを用いた。メッキ又はカロライズ処理を行なった炉では，温度が上がるジョイント，接続パイプ部分にも同じ処理を行なった。ベリリウム炉の接続は最も漏洩の少なかったSUS３１６に金メッキを施したジョイント・パイプを用いた。

6－3－2　実験結果

SUS３１６単管，酸化銅ジャケット付SUS３１６管，及びSUS３１６上に金メッキを施したものの一例を図６－５に示す。カロライズ処理は表面仕上げが荒く，ジョイント部の漏洩が多く，実験を続けることができなかった。また種々の方法で金メッキを行なった炉とベリリウムを用いた場合の結果を図６－６に示す。図において横軸は炉の温度を上げ始めてからの時間，縦軸はグローブボックス（容積0.5

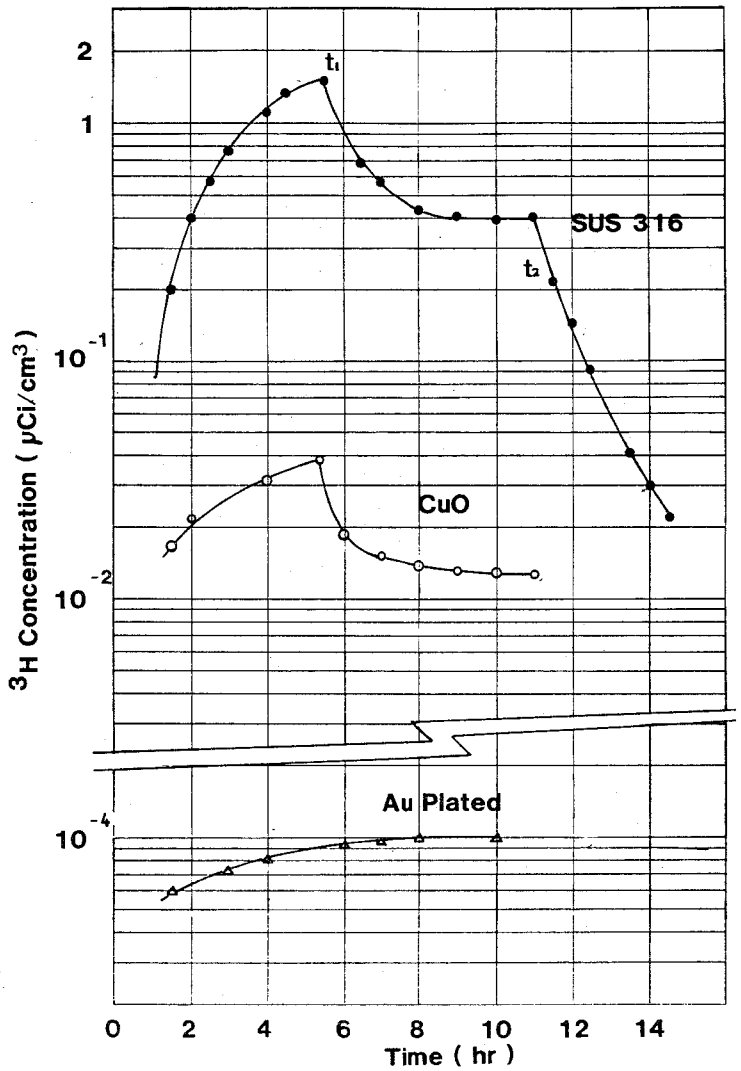


図６－５　三重水素充塡中のグローブボックス内三重水素濃度。
t_1 で回収装置運転開始した。

m³）中の三重水素濃度である。図６－５でＳＵＳ３１６，酸化銅を用いた実験では充塡開始後 4.7 時間で三重水素回収装置が動作され，１0.5 時間後に炉の温度を下げた。

グラフの傾きからＳＵＳ３１６単管からの三重水素の漏洩は 3.1ｍＣｉ／ｍｉｎ となる。充塡中に漏れた全量は 1.9 Ｃｉ であり，実際に炉の中に入った三重水素の５％が漏洩したことになる。酸化銅ジャケット付炉の場合４１μＣｉ／ｍｉｎであった。

またＳＵＳ３１６単管を用いて充塡作業を行なった時の作業室内の三重水素濃度

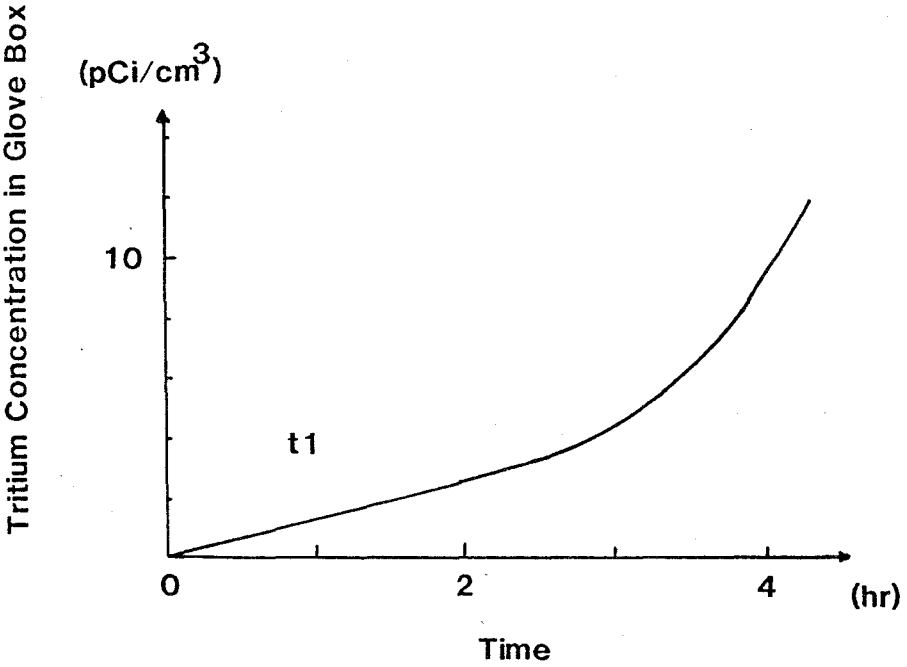


図６－６　ベリリウム炉を用いた場合のグローブボックス内三重水素濃度。前半はグローブボックスからの三重水素放出により徐々に増加した。

も同時に測定された。作業中のグローブボックス内の三重水素濃度は 0.3～1.5μm／㎤であり，グローブボックスのグローブなどから三重水素が拡散して室内を汚染する。約１２０ ㎥の室内は２０回／ｈの割で換気されているが，室内での三重水素濃度は３×１０$^{-6}$μＣｉ／㎤ であった。法で定められている作業室内の三重水素濃度５×１０$^{-6}$μCi／㎤ を若干下まわるが改善が望まれる。

比較的結果の良かったベリリウム炉と金メッキ炉の結果を図６－６と図６－７に示した。図６－７，(1)はＳＵＳ３１６ 上に金を直接メッキした例で，ほとんど漏洩しないものと，途中から急激に漏洩し始めるものとに分れた。これは後で述るようにするが，ＳＵＳと金メッキの付着力が弱いためと思われる。図６－７，(2)はＳＵＳと金メッキの付着強度を高めるためにＳＵＳ３１６ 上にニッケルを 0.5～3 μｍコーティングした後，金をコーティングしたものである。ニッケルを３μｍコーティングして金をコーティングした炉の中には加熱開始後１時間程度で漏洩が増加する

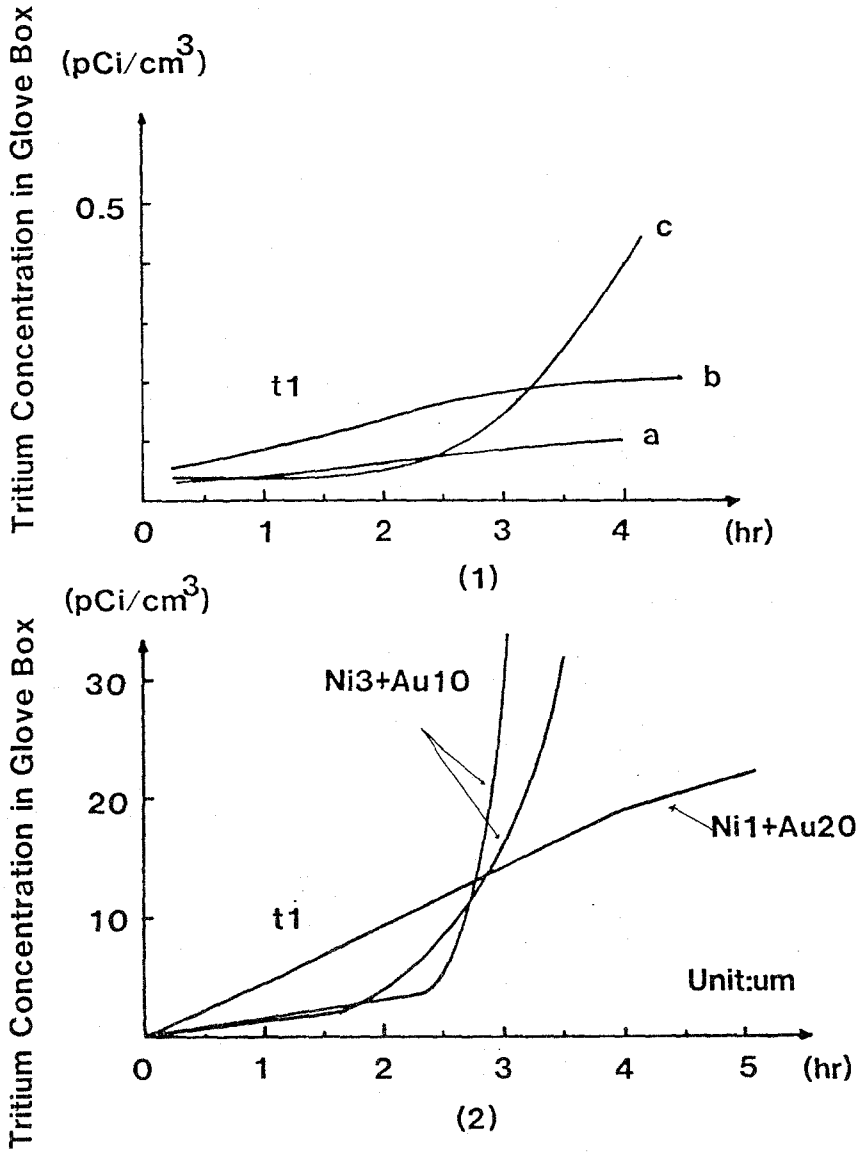


図6－7　金メッキ炉を使った場合の充塡作業中のグローブボックス内三重水素濃度　(1)はステンレス上に直接金メッキした場合。(2)はニッケルをメッキしてから金メッキを行なった。

傾向が見られた。これはニッケルが金の中に拡散し，漏洩を多くしていると考えられる。

6－3－3　検　　討

(a)　SUS 316 炉

SUS 316 中の水素ガスの透過についてはすでにいくらかの研究結果が報告されているので著者の実験結果と比較してみる。井本氏等の研究によれば,SUS 316 中の水素ガスの拡散及び透過係数は,

$$D = 17.4 \times 10^{-3} \exp(-12.6\ (\mathrm{kcal/mole})/RT)\ \mathrm{cm^2/sec} \qquad (6-7)$$

$$\Phi = 34.4 \times 10^{-3} \exp(-15.5\ (\mathrm{kcal/mole})/RT)\ \mathrm{cm^3\ STP/cm^2\ sec\ atm^{1/2}} \qquad (6-8)$$

R：気体定数，T：絶対温度

が与えられる。これを基に漏洩量を計算してみる。

実際の炉は内径 3 mm，外径 6.15 mm の円筒であるが簡単にするために，厚さ $2\ell = 3.15$ mm の半無限壁を考えてみる。拡散の基礎方程式として

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}\quad (0 < x < \ell) \qquad (6-9)$$

境界条件は

$$x = 0 \qquad n = n_1 = SP_1^{1/2} \qquad (6-10)$$

$$x = \ell \qquad n = n_2 = 0 \qquad (6-11)$$

Sは水素溶解度，P_1 は炉内水素圧力である。

初期条件は $t = 0$ のとき

$$n = 0 \qquad (6-12)$$

である。この解は

$$n(x,\ t) = n_1\left(1-\frac{x}{\ell}\right)+\frac{2}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{-\frac{n_1}{m}\sin\left(\frac{m\pi}{\ell}x\right)\exp\left(-D\frac{m^2\pi^2}{\ell^2}t\right)\right\} \qquad (6-13)$$

で与えられる。

単位面積，時間当りの透過量Φ(t)は，

$$\Phi(t)=D\frac{dn}{dx}(x,\ t)\quad x=\ell \tag{6-14}$$

で与えられるので，管からの透過量Q(t)は，

$$Q(t)=-\frac{DSP_1^{1/2}}{\ell}\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\cos m\pi\, e^{-D\frac{m^2\pi^2}{\ell^2}t}\right) \tag{6-15}$$

で与えられる。SUS316，500℃ における厚さ1.5㎜の壁を単位面積，時間当りに透過する水素量の時間変化を図6－8に示す。測定可能な三重水素の漏洩は5分後には発生し，20分もたてば定常状態になっていることがわかる。

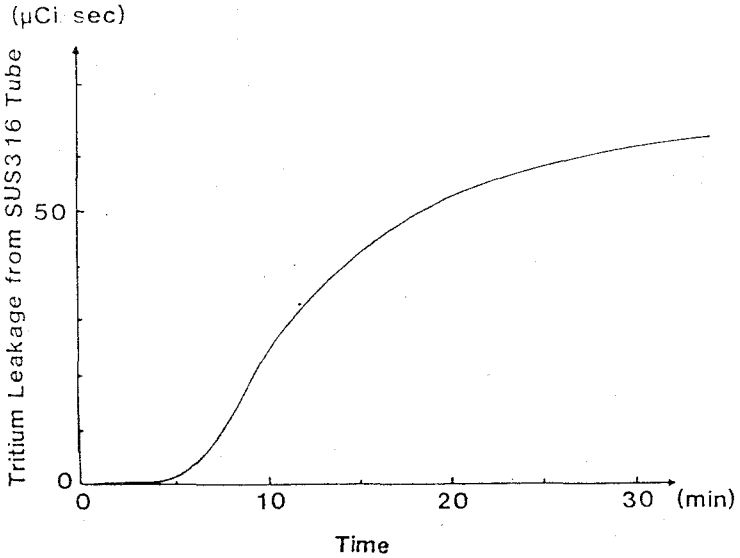


図6－8　計算によるステンレス管からのトリチウム漏洩

定常状態におけるパイプからの透過 Q' は単位長当り，

$$Q'=\frac{2\pi\cdot\Phi P_1^{1/2}}{\ln\frac{r_0}{r_1}} \tag{6-16}$$

で与えられる。ここで r_0 はパイプの外径，r_1 はパイプの内径である。これにより計算した実験条件下（500℃，P_1＝50㎏／㎠）でのSUS316炉からの三重水素漏洩量は3.4Ci／時である。一方実験結果は0.19Ci／時であった。この差

は主として壁の中を拡散してきた三重水素が，表面付近で酸化され拡散が少なくなったためと考えられる。

(b) 金メッキ炉

直接金又は金合金（92％Au，8％Ni）をSUS上にメッキしたものと，0.5～3 μmのニッケルを下地にメッキしてから金又は金合金をメッキした2種類についてを試験した。

金をSUS 316上に直接メッキした場合では加熱1時間後急激に漏洩が目立つものがあった。水素の金中での透過率，及び金への溶解度に関するデータがないため計算で漏洩量を評価することはできない。（表6－I） しかし，金中での水素の拡散係数は知られているので，金中での拡散が定常状態になるまでの時間を推定することができる。

表6－I 金属中の水素の拡散定数，溶解度，透過率
（ ）内は実験結果

		拡散定数 D cm²/sec	溶解度 S cm³/cm³ atm$^{1/2}$	透過率 Φ＝SD cm³/sec atm$^{1/2}$
Al	400℃	7.1×10^{-5}	7.6×10^{-5}	5.4×10^{-9}
Au	400℃	8.1×10^{-6}	—	—
	500℃	1.4×10^{-5}	—	—
Be	400℃	1.1×10^{-8}	—	(2.8×10^{-10})
	500℃	1.7×10^{-8}	—	—
Cu	400℃	1.1×10^{-4}	4.5×10^{-3}	4.9×10^{-7}
	500℃	2.7×10^{-4}	9.7×10^{-3}	2.6×10^{-6}
SUS 316	400℃	1.3×10^{-6}	2.7×10^{-1}	3.0×10^{-7}
	500℃	4.6×10^{-6}	3.1×10^{-1}	1.4×10^{-6} (3.6×10^{-7})

式（6－15）から厚さ10 μmの金層中での現象がほぼ定常値の80％になるまでの時間は

$$D\frac{\pi^2}{\ell^2}t \simeq 3 \qquad (6-17)$$

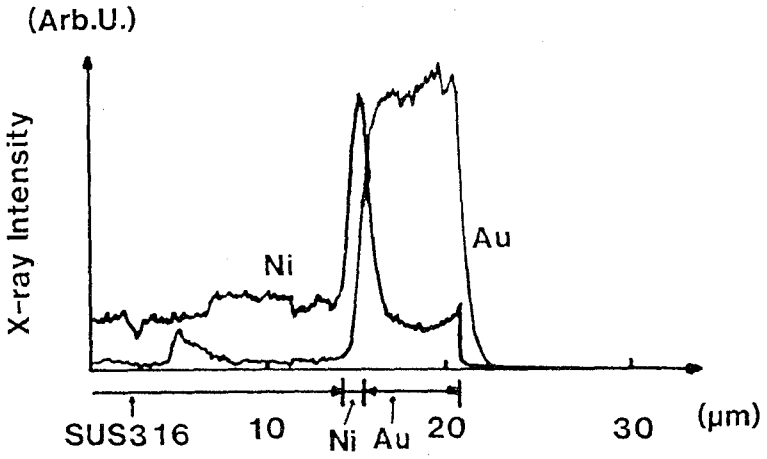
で与えられる。500℃における水素の金中での拡散係数は 1.4×10^{-5} cm²/sec であることから $t=0.02$ sec となる。ステンレス中での水素の分布は1時間以内に定常になっていると考えられるので，観測された漏洩は単なる拡散ではないと考えられる。一般にステンレス地金上に直接施されたメッキは付着強度が弱いことから，ステンレス中を拡散した水素が金メッキ層をもち上げ，ミクロなクラックを金メッキ層に作り，そこを通って漏洩したものと推定される。

ニッケルを下地に金メッキを行なったものの結果では，1μmのニッケルの上に純金20μmをコーティングしたものが最も漏洩が少なかった。ニッケル3μmの上に金（Au 92%，Ni 8%）をコーティングした例では，充塡途中から漏洩が多くなる傾向が見られた。これは主としてNiが金層に拡散して金の純度を下げ，拡散を助長したものと考えられる。

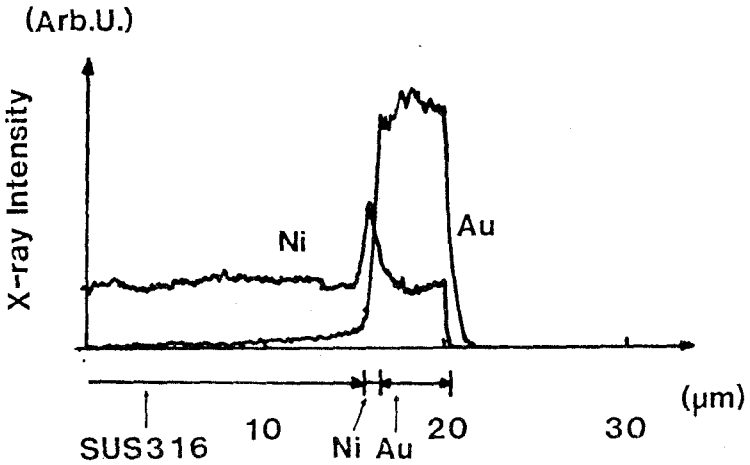
エネルギー分散型のX線マイクロアナライザーで調べた結果を図6－9に示す。試料はニッケル0.9μm上に金を6μmコーティングしたものを500℃で1時間及び20時間加熱したもので，断面上での元素分布を調べたものである。X線マイクロアナライザーの空間分解能は2μm程度なので正確な議論はできないが，1時間加熱でニッケル層からのKスペクトル強度は50%に落ち，20時間加熱した試料では35%に落ちている。金層へはニッケルの他に鉄，クロムの拡散も認められる。3時間加熱した例で金メッキ表面での元素比は Au 78%，Ni 16%，Fe，Co 6%であった。（表6－Ⅱ） 現段階ではどの元素が漏洩率の増加に影響しているか断言できない。しかしながら，ニッケル層が薄いものが漏洩が少なく，またニッケルの拡散は最初の1時間程度で決まり，以後金中のニッケル成分は増加していない。この1時間は三重水素の漏洩が始まる時間と対応することなどから，ニッケルが重要な働きをしていることが推定される。また，漏洩率測定の実験は4時間しか行なっていないが，ニッケルの拡散は比較的短い時間で行なわれているので，今後加熱時間は増えても急激な漏洩は起こらないものと思われる。

(c) ベリリウム炉

ベリリウムは金と同様に水素の溶解度が小さく，また拡散定数も小さいため透過が小さいものとして知られている。著者の実験では充塡後3時間目から大きい漏洩



(1)



(2)

図6－9　X線マイクロアナライザーで調べた三重水素漏洩防止メッキの安定性 (1) は加熱前 (2) は加熱後1時間

表6－Ⅱ　金メッキ層中の不純物の濃度（重量%）

	金	ニッケル	鉄
未加熱	92 %	8 %	－
1時間加熱後	84 %	11 %	～5 %
30時間加熱後	72 %	20 %	～8 %

が観測された。

ベリリウムの400℃における水素拡散定数は，1.1×10^{-8} cm²/secである。[4)]（溶解度，透過率について正確な値は不明）　式（6－15）から水素透過が目立ち始める時間（平衡値の10％）は，

$$D\frac{\pi^2}{\ell^2}t \simeq 0.65 \qquad (6-18)$$

であるから，壁の薄い部分でも37時間を要する。ジョイント，配管部については最も漏洩の少ないSUS316，Ni 1μm，Au 20μmを用いているので，ジョイント本体からの漏洩は否定できる。したがって，本実験に用いたベリリウム（日本ガイシ製）が，ポーラスであったのではないかと推定される。

6－3－4　結　　論

三重水素充塡炉としてSUS316，酸化銅ジャケット付二重管，金メッキ炉，ベリリウム炉を試作し性能を調べた。酸化銅ジャケット付二重管は三重水素の漏洩をSUS316単管の1／76に落とすことができたが，グローブボックス内部の汚染は著しく，以後の管理の上で十分とは言えない。ベリリウム炉は原材料のばらつきがあるらしく今後のテストが必要である。金メッキ炉はメッキ方法によって漏洩率が異なる。下地として1μmのニッケルをコーティングし，20μmの金をコーティングしたものが漏洩が少なく，SUS単管の1／40,000の5μCi/h に抑えることができた。この値は将来のDT100気圧充塡装置に必要な値に十分足りるものである。

§6－4　三重水素充塡量の非破壊検査

6－4－1　目　　的

燃料の充塡はガラスマイクロバルーン（GMB）の壁を通して水素ガスの拡散を利用して行なわれる。充塡量は壁厚，直径，材料の影響を受けるだけでなく，充塡炉中に置かれていた位置などにも影響される。また充塡後の漏洩も取扱いの状況や，個々のGMBの壁に存在するミクロな欠陥などにより異なってくる。このため，充塡された燃料の量を非破壊で測定する技術がぜひとも必要になる。

充塡量を非破壊で測定する方法としては，(1)屈折率の変化を利用する方法,[5] (2)プロトンビーム中に置き，その散乱を利用する方法,[6] (3)β線を測定する方法，(4)β線によって励起されたX線を利用する方法,[7]などが提案されている。(1)の方法は20気圧以上充塡された燃料を±5気圧程度の精度で測定するのには簡単な方法であるが，コーティングを施した不透明なターゲットには利用できない。(2)の方法で±3％，測定限度0.1ngとされているが，ルーチンワークとして手軽に用いることができない。(3)のβ線による方法は壁による吸収が大きく，さらに壁内部，及びGMB表面に吸着されている三重水素から放出されるβ線の影響が大きく精度が悪い。

著者はSiLi検出器を用いβ線で励起されたX線を計測することにより，燃料を非破壊で測定するために，いわゆる変換定数（X ray photon count rate／ng or μCi DT）を求めることを試みた。即ち，X線カウント数は三重水素充塡量，β線自己吸収効果，変換定数，X線吸収効果，検出効率の積で表わされるとし，X線カウント数，三重水素充塡量，検出効率を実験的に求めた。β線，X線の自己吸収効果は理論的に計算した。

同様の研究がR.J.Fries等によりガスフローX線カウンターを用いて，またS.M.Alexanderなどにより，NaIシンチレーターを用いて行なわれている。[8]

6－4－2　実験方法及び結果

(a)　X線発生量測定

充塡された三重水素から放出されたβ線はガス中で衝突によりエネルギーを失いながら壁に到達する。ガラス中で発生したX線は吸収を受けながら外部に出て検出される。したがって

$$\text{X線発生量}=(\text{検出効率})\times(\text{X線透過率})\times(\beta\text{線自己吸収補正})\times(\text{変換定数})\times(\text{三重水素充塡量}) \qquad (6-19)$$

と表わすことができる。

X線の測定には堀場製作所のEMAX－1800E X線マイクロアナライザーを用いた。検出器はリチウムをドーピングしたPIP型シリコンである。空乏層に進

入したX線はそのエネルギーに比例した電子ー正孔対を作るので流れた電荷量をマルチチャンネルアナライザーで分析することにより，X線フォトン数のみならずX線のエネルギーも測定可能である。システムの概略を図6－10に示す。検出器の有効面積は10㎟であり，ベリリウム窓の厚さは13 μm である。このシステムでの空間的な検出効率はGMBとベリリウム窓の距離が500 μm のとき，0.064である。

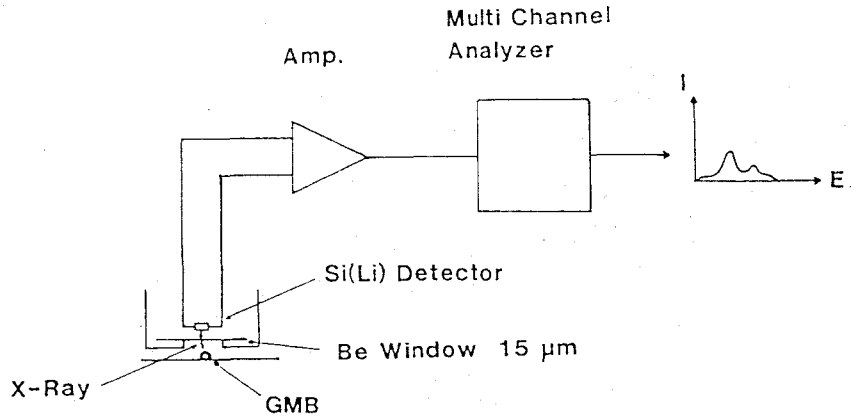


図6－10　X線マイクロアナライザーによる三重水素充塡量非破壊検査

この方法では検出器とGMBの位置関係が正確でなければならない。X線の測定はGMBをアクリル板上に少量のグリセリンを用いて固定し，アクリル板を厚さ500 μm のワッシャーを介してベリリウム窓に密着させて1000 秒間計数した。GMBは表面に吸着されている三重水素の影響をなくすために事前に水又は3％塩酸で1個ずつ洗浄したものを用いた。GMBの近辺には壁を透過して出て来たβ線により測定に影響を及ぼすようなX線が励起されないように材料を選択した。またグリセリンを固定材に用いたのは，水洗により容易に除去でき，プラズマ実験に利用できるからである。

X線を測定した後，充塡量を確かめるためにグリセリン中で破壊してガスの量を測定した。ペレットを2枚のガラス平板の間に挟んで液中でつぶして，ペレット中のガスを気泡としてガラス平板間に保持する。ガラス平板間にシムを設け，その間を一定に保つと気泡は表面張力により円板状になる。顕微鏡により寸法を測定したあと表面張力の影響を補正し，圧力に換算した。

実験に用いられた三重水素は１９８１年６月精製され１９８１年１２月に体積で重水素と５０％－５０％になるように調合され，充塡装置のウランに吸着された。測定時における三重水素，ヘリウム３，重水素の比は，拡散定数が同一と仮定すると，４７％，３％，５０％である。

実験に用いたＧＭＢのガラスの成分は，SiO_2 ７０％，Na_2O ２０％，B_2O_3 ５％，ＣａＯ ５％である。

Ｘ線アナライザーで示されたＧＭＢからのＸ線スペクトルを図６－１１に示す。

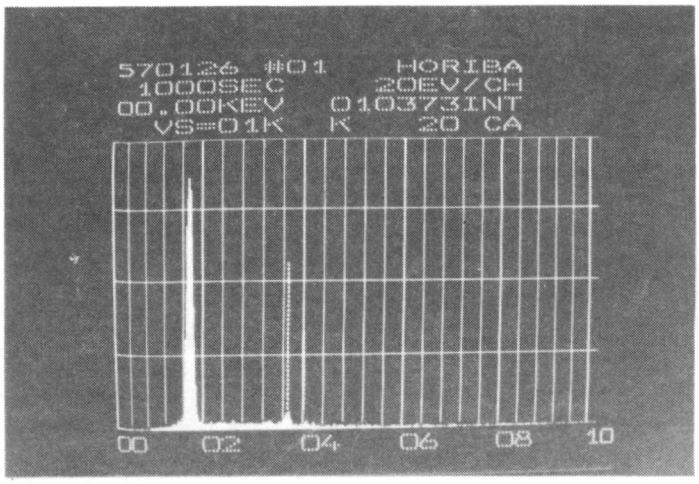


図６－11　三重水素を充塡したＧＭＢからのＸ線スペクトル

SiK（1.74keV）のピークとCaK（3.7 keV）のピークがはっきり観測できる。また結果を表６－Ⅲにまとめる。

表６－Ⅲ　三重水素を充塡したＧＭＢからのＸ線測定結果

	直径×壁厚（μｍ）	破壊法で求めた充塡圧力(atm)	T_2量(ng)	Ｘ線計数量 (count/sec 4πstr)	補正のない変換定数 (C/sec ngT_2)
＃１	195 × 0.96	10.5	5.06	246	48.6
＃２	223 × 1.39	4.1	2.94	138	46.9
＃３	123 × 1.37	3.3	0.385	25.7	66.8
＃４	117 × 0.92	5.0	0.513	60.0	11.7
＃５	343 × 2.52	15.3	38.6	1,503	38.9
＃６	300 × 2.33	20.9	35.1	1,260	35.9
＃７	309 × 2.62	19.0	34.8	1,225	35.2
＃８	285 × 2.64	14.8	21.2	894	42.2
＃９	317 × 2.34	22.3	38.2	1,274	33.4
＃10	356 × 2.47	20.3	45.2	1,496	33.1

(b) 破壊法による三重水素充塡量測定

三重水素を充塡したＧＭＢを二枚のガラス板で挾まれたグリセリン中で破壊すると円板状の気泡が発生する。図６－１２のようなモデルを考えると体積は,

$$V=\pi\int_{-t/2}^{t/2}\{d/2-r_1)+\sqrt{r_2^2-y^2}\}^2\mathrm{d}y \qquad (6-20)$$

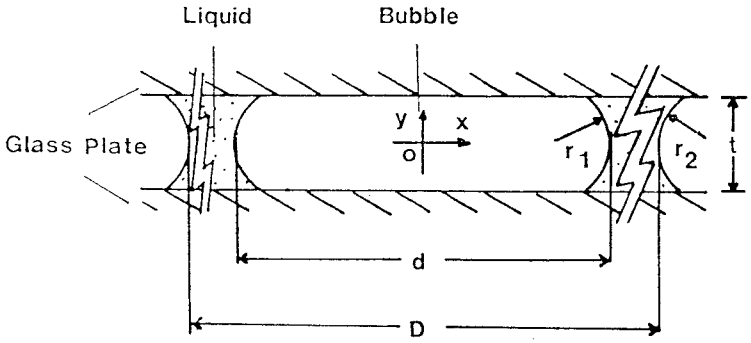


図６－12　燃料充塡量破壊検査のための気泡モデル

で得られる。ここで r_2 は液環の内側のメニスカスの半径, y は気泡中心からその高さ方向にとった変数である。$r_2=t/2$ とすると,

$$\frac{v}{(\pi/4)d^2t}=1-0.429(t/d)+0.0959(t/d)^2 \qquad (6-21)$$

となる。

内部の圧力は表面張力の影響を受ける雰囲気の圧力 P_1, 液体の圧力を P_2 , 気泡内の圧力を P, 液体の表面張力を α とすると,

$$P_2-P_1=\alpha(2/D-1/r_1) \qquad (6-22)$$

$$P-P_2=\alpha(2/d-1/r_2) \qquad (6-23)$$

両式から

$$P=P_2+\alpha(2/D+2/d-1/r_1+1/r_2) \qquad (6-24)$$

となる。

実際の場合 $r \simeq r_2$　$D \gg d$ であるから

$$P = P_1 + 2\alpha/d \qquad (6-25)$$

となる。直径100 μm のGMBに30気圧充填された試料の測定を行なう場合，50 μm の厚さのシムを用いると P は P_1 より3％高くなる。

(c)　DTガスによるβ線自己吸収の評価

充填ガス圧又はGMBの直径が大きくなった場合，内部で発生したβ線はGMB内壁に至るまでに主として衝突によりエネルギーを失い，この自己吸収の効果が無視できなくなる。さらに壁に当ったβ線の一部は後方散乱電子として反射され，X線を発生することなくエネルギーを失なっていく。これらの効果を理論的に評価してみる。

まず水素ガス中でのβ線の減衰を求める。

物質中での電子の減衰はストッピングパワーを与える式

$$-\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi Na\, r_0^2\, mc^2}{\beta^2}\cdot\frac{Z}{A}\left\{\ln\frac{\tau^2(\tau+2)}{Z(I/mc^2)^2} + F(\tau) - 8\right\} \qquad (2-26)$$

$$F(\tau) = 1-\beta^2 + [\tau^2/8 - (2\tau+1)\ln 2]/(\tau+1)^2 \qquad (2-27)$$

τ ：電子の運動エネルギー　　A ：質量数

β ：電子の速度／光速　　Z ：原子番号

I ：平均励起ポテンシャル

$r_0 = 7.94\times10^{-26}$ cm²

$Na = 6.02\times10^{23}$

で与えられる。[9] 最初にエネルギーが E_0 の電子が x 進んだときのエネルギーは，

$$E(xE_0) = \int_0^x \frac{dE}{dx}\,dx \qquad (2-28)$$

であり，最初のβ線のスペクトルを $N_0(E)$ とした場合，x はなれた点でのスペクトル $Nx(E)$ との関係は，

$$Nx\,(E_{(x\,E_0)}) = N_0\,(E_0) \qquad (6-29)$$

で与えられる。この関係から求めた水素ガス中をx伝搬したときのスペクトルを図6－13に示す。

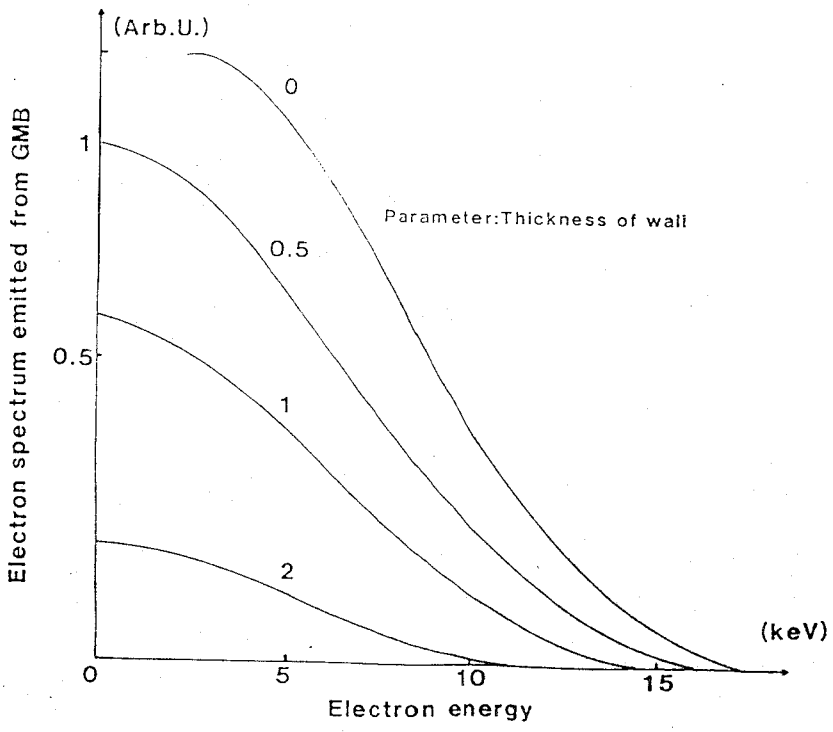


図6－13　水素ガス中の三重水素β線の減衰

次に簡単化のために，最も強度の大きいSiK線だけを考え，その励起断面積を$S(E)$とすると，距離xにおけるX線発生率$X_G(x)$は次のように表わすことができる。

$$X_G(x) = \frac{\int S(E)\,N_X(E)\,dE}{\int S(E)\,N_0(E)\,dE} \qquad (6-30)$$

この関係を図6－14に示した。

GMB中の点Pから放出されたβ線のモデルを図6－15のようにすると，β線が止まるまでに発生する全X線量$\Gamma(a,\theta)$

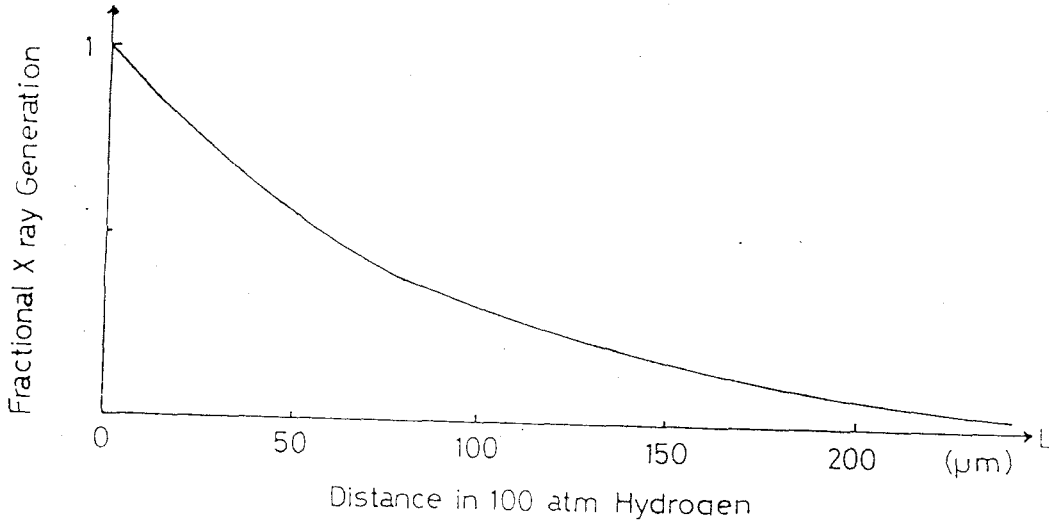


図6－14　水素ガスで減衰を受けた三重水素β線によるX線発生

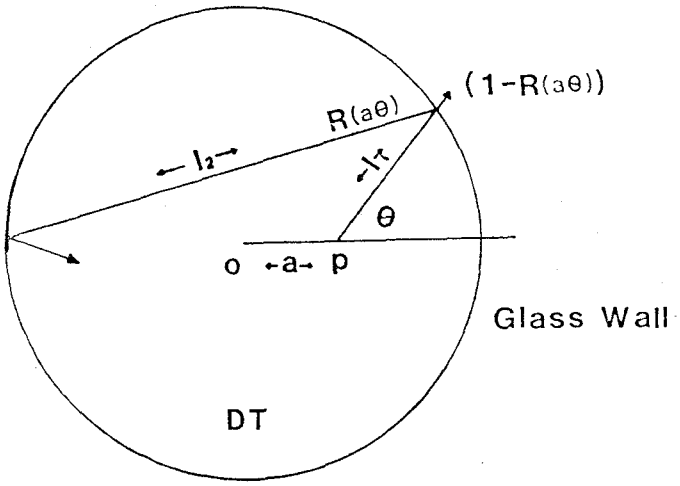


図6－15　水素ガスによるβ線の減衰を計算するためのモデル

$$\Gamma_X(a\theta) = X_G(\ell_1)\{1-R(a\theta)\} + X_G(\ell_1)X_G(\ell_2)R(a\theta)\{1-R(a\theta)\}$$
$$\cdots\cdots + X_G(\ell_1)\{1-R(a\theta)\}\cdot\{X_G(\ell_2)R(a\theta)\}^{n-1} + \cdots\cdots \qquad (6-31)$$

$$\Gamma_{X}(a\theta)=\frac{X_{G}(\ell_1)\{1-R(a\theta)\}}{1-X_{G}R(a\theta)} \qquad (6-32)$$

で与えられる。ここでRは反射率である。点Pでのβ線の発生は等方的であるので結局β線の自己吸収によるX線の発生量に対する補正係数 C_β は

$$C_{B}=\int_{0}^{\pi}\int_{0}^{r_0}\Gamma_{X}(a\theta)\frac{\sin\theta}{2}\,da\,d\theta \qquad (6-33)$$

で与えられる。C_β をGMBの内径と標準状態での充塡圧力との積で表わしたものを図6－16に示した。この計算では反射率Rは電子のエネルギーにあまり依存しないので，$E=5$keV のときの値を用い，ガラスの平均原子番号9.8（SiO_2 70%, Na_3O_2 20%，CaO 5%，B_2O 5%）とし，反射率の角度依存性はD．B．Holtの研究を参考にした。[9]

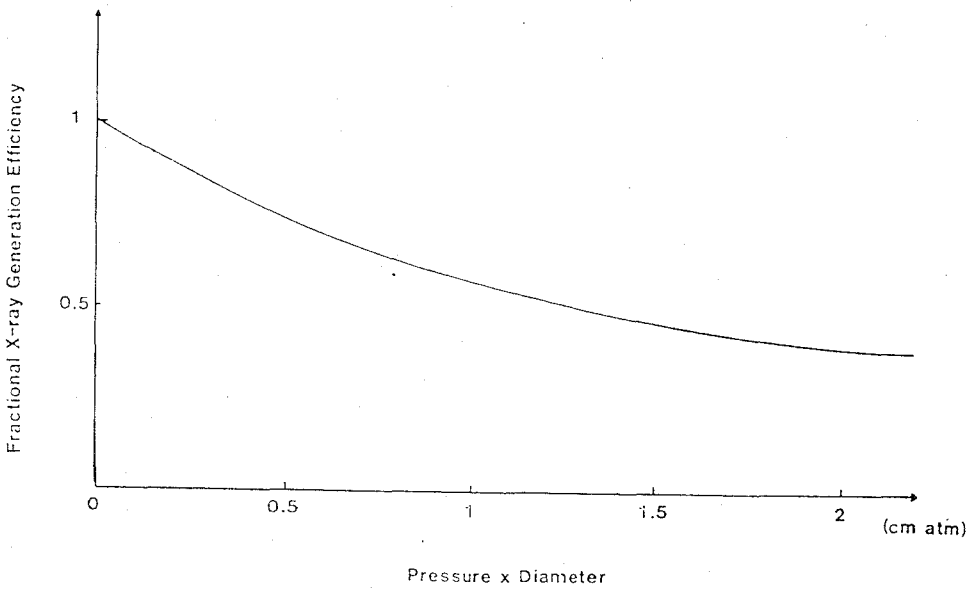


図6－16　水素ガスによるβ線自己吸収に対する補正

補正係数 $C\beta$ はDをガラスマイクロバルーンの直径（μm），t を壁厚（μm），Pを充塡圧力（atm）として，

$$z=P\times(D-2t)\times1\times10^{-4} \qquad (6-34)$$

$$C\beta = 0.953 \exp(-0.495\ z) - 0.22\{1-\exp(-1.2z)\}\exp(-0.7z) + 0.047 \qquad (6-35)$$

の関係で近似できる。精度は $0 \leqq z \leqq 2$ の範囲で±２％である。

表６－Ⅳにβ線吸収補正をした場合としなかった場合の変換定数を示す。β線吸収補正を行なうことにより，±５０％あったばらつきが±１４％に低くなっている。

表６－Ⅳ　変換定数の決定。補正を行なうことにより，ばらつきが小さくなっている。

	表６－Ⅲの値 Count/sec ngT$_2$	β線自己吸収補正 (Cβ)	Cwを入れた変換定数 C/sec ng T$_2$	壁厚補正 (CW)	CβCW を入れた変換定数 C/sec ngT$_2$
#1	48.6	0.89	54.7	0.96	57.0
#2	46.9	0.95	49.5	1.0	49.5
#3	66.8	0.98	68.1	1.0	68.1
#4	117	0.97	60.3	0.94	64.1
#5	38.9	0.72	54.0	0.84	64.3
#6	35.9	0.68	52.8	0.86	61.4
#7	35.2	0.70	50.3	0.80	62.9
#8	42.2	0.78	54.1	0.80	67.6
#9	33.4	0.66	43.5	0.88	49.4
#10	33.1	0.65	40.1	0.84	47.6
平均	49.8 ± 25.7	—	57.7 ± 7.9	—	59.2 ± 7.8

(d)　ガラスマイクロバルーン壁厚の補正

三重水素から放出されるβ線のエネルギーは最大で１８keV であり，このβ線のガラスマイクロバルーン（ＧＭＢ）壁中での最大飛程は約３３μm である。したがって壁厚が薄い場合β線は透過してＸ線発生量は少なくなる。逆に最大飛程より厚くなるとＸ線はガラス中で吸収され，外部に出る量が少なくなる。壁厚のＸ線計数率への影響を計算で求めてみる。

対象としている物質及び電子エネルギーの範囲内では，β線の減衰は主として原

子の電離又は励起による。したがって電子の阻止能 $f(E)$ は 式(6－26),式(6－27)で与えられ，前節で行なった水素ガス中でのβ線の減衰と同じ手順でGMB壁に侵入したβ線のスペクトルを求めることができる。GMB壁内面上でのβ線のスペクトルを減衰を受けてないもので代用したときの，侵入深さ d におけるβ線のスペクトルを図6－17に示した。

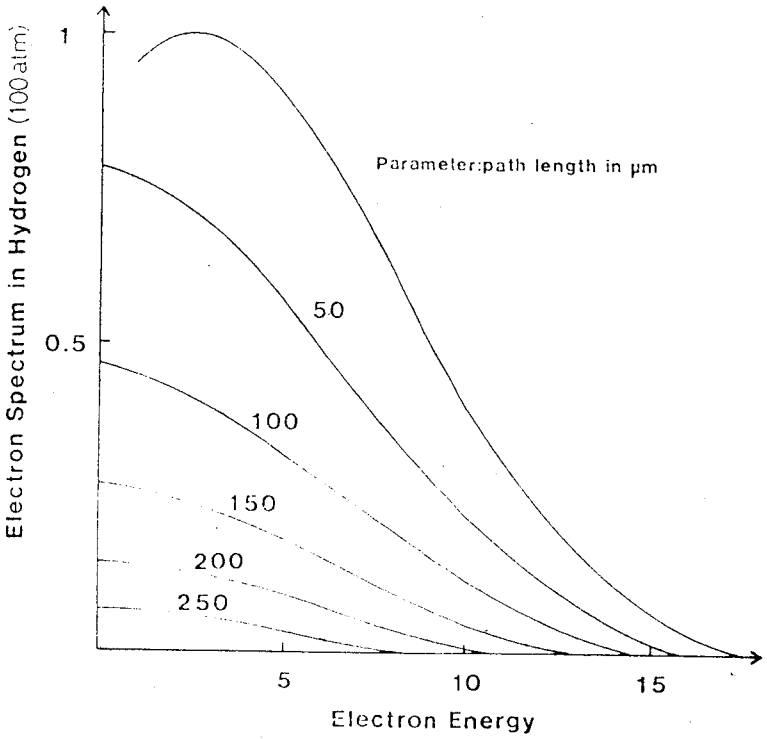


図6－17　GMB壁中での三重水素β線の減衰

対象とするガラス，三重水素によるβ線の組合せでは，発生するX線はほとんどが特性X線なので制動輻射は無視する。ωk を蛍光効率，Qk (E)をイオン化断面積とすると，深さ d の所で発生するX線は，

$$n_{\mathrm{d}} = \omega_{\mathrm{k}} \int \frac{N_0 \rho}{A} \mathrm{Q_k(E)}\, N_{\mathrm{d}}(\mathrm{E})\, \mathrm{d}E \qquad (6-36)$$

で，N_0 はアボガドロ数，ρはガラス中のシリコンの密度，A原子量である。

図6－18で示したモデルで分るように点Pで発生したX線は検出器にかかるま

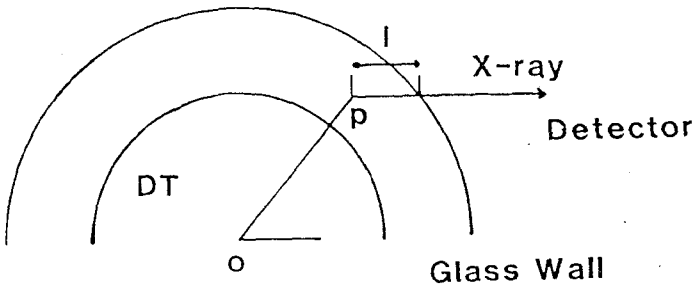


図6－18　X線発生と吸収を計算するモデル

でに exp（$-\mu\ell_1$）だけの減衰を受ける。したがって，検出器にかかるフォトン数は

$$n_{\mathrm{detect}} = \frac{\omega_{\mathrm{k}} N_0 \rho}{2\mathrm{A}} \iiint Q_{\mathrm{k(E)}} N_{(d)}\, \mathrm{e}^{-\mu\ell_1(a\theta)}\, \mathrm{d}a\, \mathrm{d}\theta\, \mathrm{d}E \qquad (6-37)$$

で与えられる。これにより壁厚の影響を評価した校正定数を図6－19に示す。

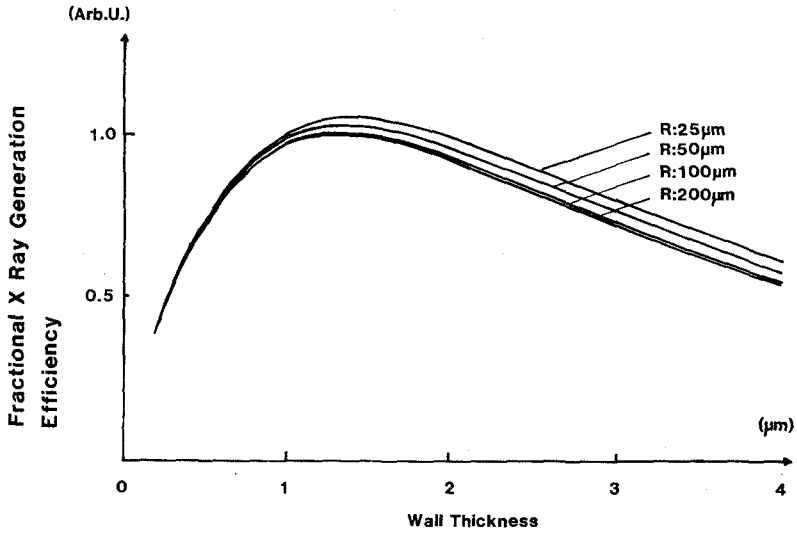


図6－19　X線の発生と吸収に対する補正係数

図ではX線検出効率が最大になる直径200μm（≃無限大）壁厚1.3μmのときの値で規格化した。直径が変わることにより，GMBの壁内の各点から検出器までの距離は変わるが，この点は含まれてない。

壁厚 1.4 μm の値で規格化した値を壁厚に対する補正係数 C_Wとすると，$0 \leqq t \leqq 5\,\mu m$，$50 \leqq D \leqq 500\,\mu m$の範囲で，

$$C_W = [1 + \{0.067t + 0.06(1 - e^{-t})e^{-1.4t}\}]e^{-0.012D} \times 2.01(1 - e^{-1.1t})e^{-0.33t} \quad (6\text{--}38)$$

の関係で±２％の精度で近似できる。

Ｘ線の吸収の補正を行なった変換定数を表６－Ⅳに示した。補正を行なうことにより，±14%あったばらつきが±１２％に減少している。補正を行なってもそれほどばらつきが少なくならなかったのは，補正値の範囲が0.８３～1.1 と変化が少なかったのと，破壊法による充塡量の測定に±２０％程度の誤差があるためと考えられる。表には１０個の測定結果を示したが，さらに多くのＧＭＢの測定を行なった結果，変換定数として５6.8±6.7 count/ng T_2 の値を得た。

６－４－３　検　　討

(a) 測 定 誤 差

数え落し：測定に用いたＸ線アナライザーの１フォトンに対するデータ処理時間は１$0^{-6}$ sec である。実際にデータに影響し始めるのは計数率が１０００c／sec を越えるあたりからである。

本実験では計数率は～１０c/sec であるから数え落し影響はないものと判断できる。

バックグランドの影響：ＳｉＬｉ 検出器は検出部の有効体積が極めて小さい。NaI シンチレーターが数十cm³，ガスチェンバー類が数百cm³あるのに対してＳｉＬｉ検出器は 0.1 cm³程度である。自然放射能のように方向性の少ないものによるノイズは，ほぼ検出器の体積に比例すると考えられる。NaI シンチレーターで３０c／min 程度であるから SiLi では6×10^{-2} c/min，即ち１c／１０００秒である。実際試料をつけずに１０００秒測定しても１カウントかかるかかからないかであったから，バックグラウンドの影響は全く無視できる。

統計的誤差：寿命の長い放射性同位元素から出る放射性を測定する場合，必らず統計的誤差が伴う。１個の測定値 x に対する確からしさは $\sqrt{x}$ で与えられる。この

実験では，xは１０００～１００００ であるからそれによる誤差は３％～１％である。従がって本実験ではこの統計的誤差もほぼ無視できる。

偶然誤差：上記の議論から本実験における変換定数のばらつきは破壊法による充塡量定時に発生したものと考えられる。破壊法による誤差が，全くの偶然によって発生したとするなら，$\bar{x}$を測定値の平均値，S^2を分散，Nを測定回数とすれば，

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (6-39)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \qquad (6-40)$$

であり，平均値の確からしさは

$$\bar{x} \pm \frac{S}{\sqrt{N}} \qquad (6-41)$$

である。本実験のデータの場合

$$\bar{x} = 56.8 \pm 1.5 \ (\mathrm{count/sec\ ng\ T_2}) \qquad (6-42)$$

で与えられる。

(b) 破壊法とＸ線法の比較

縦軸を破壊法で求めた三重水素充塡量，横軸をＸ線測定結果から計算して求めた充塡量とした場合の関係を図６－２０に示した。図中の実線は両者が等しい場合，破線は最小２乗法で求めた両者の関係である。上下にばらつきが大きいのは破壊法による測定誤差が±２０％と大きいためで，これを入れればすべてこの直線上に乗る。破壊法の誤差が大きいので正確な議論はできないが，充塡量が少ない場合，破壊法の方が多目に出ていないことからβ線の自己吸収に対する評値が少ない可能性がある。

さらに変換定数の精度を高めるためには精度の高い破壊測定法を考えなければならない。そのとき最も注意しなければならないのは，測定系内壁へのガスの吸着である。

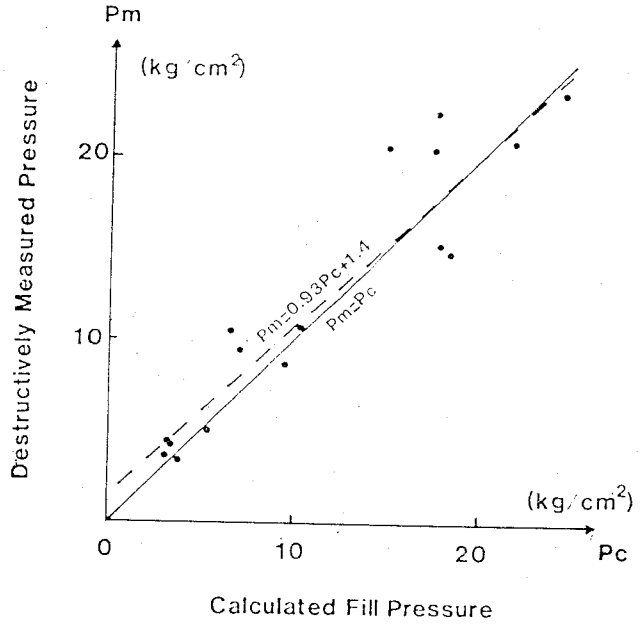


図6－20　破壊法と非破壊法による三重水素測定結果

6－4－4　結　　論

三重水素充塡量を非破壊で測定するために，三重水素充塡量とX線発生量との関係を求めた。充塡量を求める場合，充塡ガスによるβ線の自己吸収と，壁内部におけるX線の吸収及びβ線の壁の通過を評価する必要がある。β線の自己吸収はガラスマイクロバルーンの内径と充塡圧の積をパラメーターとして評価でき，直径が大きくなると充塡圧が少なくても無視できなくなる。直径200μm，充塡圧10気圧の場合，X線の発生量は67％になる。壁厚によるX線の発生量は，壁厚が1μm以下の場合はβ線が透過することにより発生量が少なくなり，1～2μmではほぼ一定，2μm以上ではX線の吸収により検出可能なX線量は低下する。

三重水素充塡量とX線発生量を

（三重水素充塡量，m，ng）＝（X線測定値，X_c, count／sec）／（検出器立体角，A, ster.）／（β線吸収補正C_β）／（壁厚補正，C_W）／（変換定数，B, count／sec ng T_2）

の関係とした場合それぞれ,

$$A=\frac{1-\cos\{\tan^{-1}(2/3.67+L-D/2000)\}}{2} \qquad (6-43)$$

L：検出器前面とGMBを置いた板までの距離（mm）

D：GMBの外径（μm）（$50\leqq D\leqq 500$）

$$C_{\beta}=0.953\exp(-0.495z)-0.22\{1-\exp(-1.2z)\}\exp(-0.7z)+0.047 \qquad (6-44)$$

$$z=P\times(D-2t)\times 1\times 10^{-4} \qquad (6-45)$$

但し $0\leqq z\leqq 2$ cm atm

P：仮定したDT充塡圧（atm）

t：GMBの壁厚（μm）　（$0\leqq t\leqq 5$ μm）

$$C_{W}=[1+\{0.067t+0.06(1-e^{-t})e^{-1.4t}\}]e^{-0.012D}\times 2.01(1-e^{-1.1t})e^{-0.33t} \qquad (6-46)$$

$$B=56.8\pm 6.7\ \mathrm{count}/\mathrm{sec\ ng\ T_2} \qquad (6-47)$$

である。なお，Bに対する誤差は，安全の為，大きめの値を用いた。この関係で求めた充塡圧と仮定した圧力が異なる場合，仮定圧を修正し，計算結果と充塡圧が一致したとき，それが真の充塡圧となる。

§6－5　DTペレットハンドリング

三重水素充塡後のガラスマイクロバルーン（GMB）には1個100μci 程度の三重水素が含まれていて，放射線管理上，一個たりとも紛失しない技術が必要である。GMBの直径は100μm 程度であり，重量は ng のオーダーである。微小なGMBは充塡時のガスの流れはもちろん，人の動きによる風でも動かされる。

このようなDTペレットをターゲットとして実験に供給するために，図6－21に示すシステムを採用した。

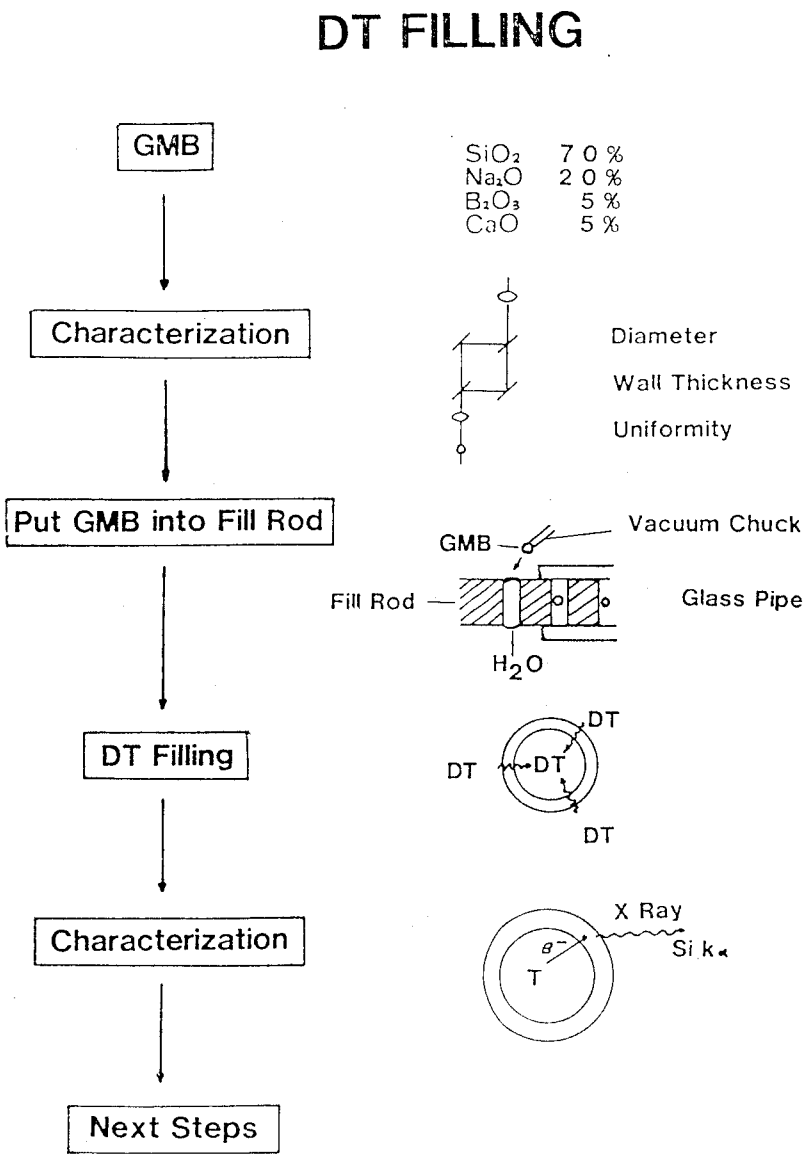


図6 −21　DT ペレットのハンドリング法

直径，壁厚，及び均一性を干渉顕微鏡で測定されたGMBは，一個ずつフィルロッドの穴の中に納められる。フィルロッドは直径1㎜の黄銅棒に直径 300 μm の穴を多数あけたもので，図6 − 22 の構造をしている。このように一個ずつ区別した状態で充塡することにより，以後の管理が容易になるとともに，充塡中に一個のGMBが圧力により破壊されても，隣接のG MBは破損を免れる。穴に入れるとき，

穴を蒸留水で満たしておくことにより作業性が大幅に良くなる。穴に入れるごとにガラスカバーをずらし，最後にネジ止めした後真空乾燥を行ない充塡炉に入れられる。

充塡後は液体窒素中に保管され，三重水素の拡散による漏洩を少なくする。

ターゲットの組立はグローブボックス内の顕微鏡下で行なわれる。ＧＭＢは真空ピンセットで穴から一個ずつ引き出され，支柱が取り付けられる。

このシステムでの収率は８０％以上で，ＲＩ管理の信頼性を高めている。

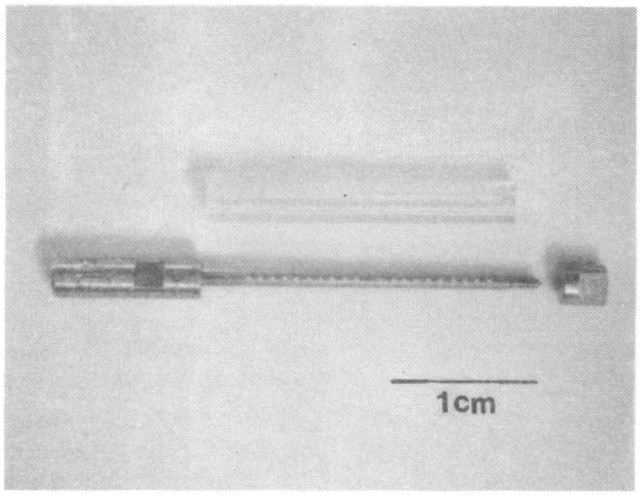


図６－22　　フィルロッド

充塡後のＧＭＢはしばしば洗浄を必要とする。ＧＭＢ上には細かい 0.1～0.3 μm のダストの他に，粘性の高い液状のものが付着している。これはガラスを構成している物質のウェザリングによるもので，プラズマ実験の精度を落とすばかりでなく，以後の取扱いをも困難にする。

三重水素を充塡したＧＭＢを洗浄するために図６－２３に示す装置を開発した。装置は内径１㎜，外径３㎜のビニールチューブ，超音波洗浄槽，マイクロチューブポンプから構成されている。洗浄液を５㎜程度吸い込み，その中にＤＴ・ＧＭＢを真空ピンセットで搊入する。マイクロポンプを動作させることにより液体は，直径１㎜，長さ５㎜の液柱状になり，ＧＭＢを内部に含んだまま超音波槽へと移動する。ＧＭＢは表面張力により液体の中にトラップされたまま移動し，パイプの内部に段

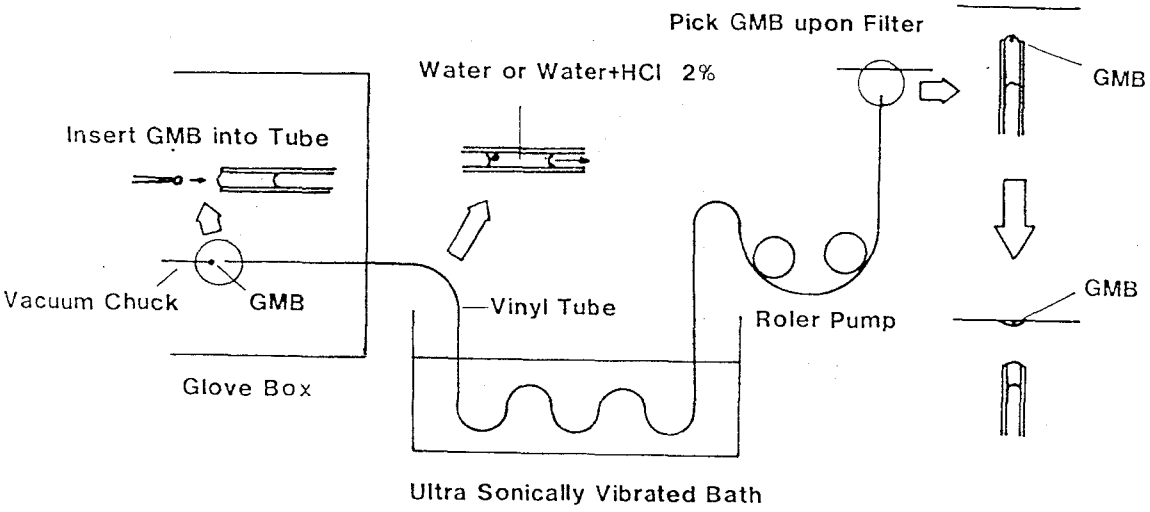


図6－23　三重水素ペレット洗浄装置

差がない限り，あるいはＧＭＢ上の汚染が特にひどいときを除き，液柱から出ることはない。逆転も可能である。超音波槽で洗浄された後，液柱は垂直に取り付けられたパイプ出口まで送られ，端面が凸になるまで押し出される。ＧＭＢは浮力で凸部最上段まで上がるので，これをミリポアフィルター上に移し取る。以後の取扱いは真空ピンセットで行なう。このシステムは直径１５０μm 以上１㎜以下のＧＭＢに有効で，汚染発生の可能性も少ない。

洗浄液としてアルコール，アセトン，中性洗剤，水酸化ナトリウム水，希塩酸を試みたが，ダスト及び粘性の高い液状物質いずれの除去に対しても希塩酸が最も有効であった。

図６－２４に３％塩酸で洗浄前後のＧＭＢの顕微鏡写真を示す。しかしながら，塩酸による洗浄はＧＭＢの燃料保持能力を低下させるため，現状ではターゲットの使用計画を考慮して行なわなければならない。実験に用いたＧＭＢの燃料保持能力は $1/2$ になるのに室温で３～６カ月かかるが，塩酸で洗うことにより３～１５日に低下する。この例を図６－２５に示す。これは主としてＧＭＢを構成する成分の一つであるカルシウムが溶出するためと思われる。

一般にガラスではアルカリ金属が多くなるほど水素の拡散定数が少なくなり，SiO_2 が多くなるほど大きくなる傾向がある。カルシウムが失われているのはＸ線マ

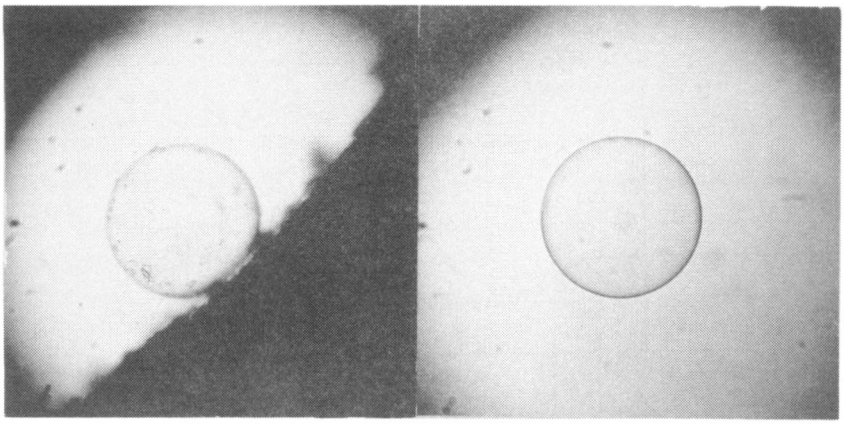


図6－24　塩酸による洗浄効果，(a)洗浄前　(b)洗浄後

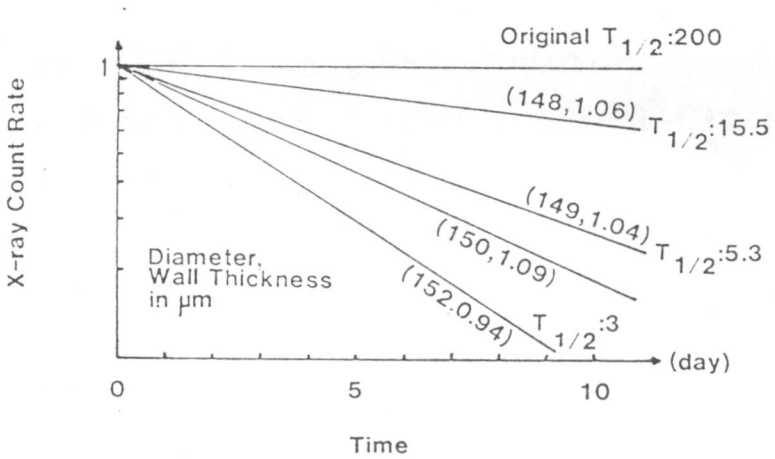


図6－25　塩酸洗浄による燃料保持能力の低下

イクロアナライザーでも確認することができる。表6－Ⅴ表に示すように塩酸に長時間浸したものほどカルシウムが少なくなる傾向が知れる。

このＧＭＢの洗浄については，ウェザリングが少なく，しかも均一性，真球度，燃料の漏洩の少ないＧＭＢを開発する一方，適当な洗浄液の開発，ウェザリングが起こりにくいシステムの開発などを必要とする。

表6－Ⅴ　X線マイクロアナライザーで試べた塩酸洗浄による
Caの溶出。GMB，SiO_2 70％，Na_2O_3 20％，
CaO 5％，B_2O 5％

資料番号	塩酸濃度	洗浄時間	X線スペクトル比　Ca／Si
1	—	—	0.107
2	5 ％	5 分	8.9×10^{-2}
3	10 ％	20 分	8.5×10^{-2}
4	10 ％	90 分	8.2×10^{-2}

§6－6　ま　と　め

三重水素の使用量，洩れ量の少ない充塡システムの開発を行なった。水素化ウランの熱解離反応を利用し88 Ciの三重水素ガスを用いて20気圧まで充塡することができた。充塡中の炉からの三重水素の拡散漏洩はSUS 316上にニッケルを0.6 μm，金を20 μmコーティングすることにより，5 μci／hにまで下げることができた。

三重水素充塡量を三重水素崩壊によって出るβ線により励起されたX線を測定することで，非破壊で測定する研究を行なった。その結果，変換定数として56.8±6.7 count／sec ng T_2 を得た。今後さらに精度を高めるために，破壊法の測定技術を高める必要がある。

また充塡からターゲットショットまでに必要なDTペレット取扱い法を開発した。今後はペレットのクリーンネスを中心に置いた研究が必要である。

参　考　文　献

1) Lawrance Livermore National Lab. Laser Program Anual Rept., P 4−63, (1982)

2) 菱田誠, 佐野川好母, 大内光男, 滝塚貴和, 根小屋真一, 小川益郎, 江森恒一, 日本原子力学会誌, 22, 49, (1980)

3) 井本正介, 田辺哲郎, 私信 (1979)

4) J. Colin, *Metal Reference Book*: Butter worth Co.Ltd., London

5) U. V. Veselov, A.V. Dudin, G.K. Komleva and Yu. D. Pukhov。Sov. J. Quantum Electron 11, 662, (1981)

6) Nelson Jarmie, P.E. Lovoi, E.H. Farnum, R.J. Fries and F. Young: Nucle. Instru and Methods 126. 299 (1975)

7) R. J. Fries, Eugene H. Farnum., Nucle. Instru. and Methods: 126, 285, (1975)

8) S.M. Alexander and T.M. Henderson, J. Vac. Sci. Technol. 18, 1262, (1981)

9) National Academy of Science, Publication 1133 Washington, D.C. (1964)

第7章　クライオ技術

§7－1　はじめに

燃料容器に充塡したD_2又はＤＴ燃料の温度を下げ，液化又は固化し，容器の内面に均一な燃料層を付けたターゲットはクライオジェニックターゲットと呼ばれている。クライオジェニックターゲットは燃料の初期密度が高く中空であるため爆縮に必要なエネルギーが少なく，同じガス状の燃料を持つ常温のターゲットに比較して効率良く圧縮できると言われている。[1)]

クライオジェニックターゲットの重要な問題は均一な燃料層の製作とレーザーで照射されるまでの間クライオ燃料層を安定に維持することである。

均一なクライオ燃料層を作る方法として２通りの方法が研究されてきた。一つはロスアラモスやリバモア研究所で行なわれている均一急冷法（First isothermal freezing　ＦＩＦ）で固体燃料層を作るものである。[2)] これは燃料を充塡したＧＭＢを液体ヘリウム温度に近い低温低圧のヘリウムガス中に置き，ヘリウムガスを通して熱伝導で冷却し，固化する。この段階では固体燃料は偏在しているので，レーザー等によりターゲットをパルス状に加熱し，氷を気化させ，周囲の冷たいヘリウムガスで急冷し，再びＧＭＢ内部に均一な燃料層を作る技術である。今一つはKMSＦ社，大阪大学などで研究されている点冷却法である。[3)4)] これは重水素ガスを充塡したＧＭＢを熱伝導の良いファイバーを介してクライオスタットに取り付け，真空中でファイバーを通して冷却し，熱輻射，温度を制御することにより，均一な液体燃料層を作る技術である。両者ともクライオターゲットとしての性能には大差が無い。前者はD_2，ＤＴガスに利用できるが，照射実験に用いる場合，照射系，観測系に与える制限が多くなる。後者は熱シールドを適当に設計することにより長期間安定に均一な燃料層を維持できるが，重力場中で照射する場合，同位体分離が起るのでＤＴ混合ガスには使えないという欠点がある。燃料が重水素である限り，後者の方がメリットが多い。

クライオターゲットをレーザー照射時まで安定に保つ上での問題点は室温からの熱輻射と，レーザーの蛍光による加熱である。均一急冷法では構造上室温から完全に遮断された形になっているため，熱シールドの除去及び除去後の熱輻射の影響が

重要な問題となってくる。点冷却法では熱輻射も含めた定常状態を制御の対象としているため熱シールドの除去の問題はそれほど重要ではない。

著者は，点冷却法による均一な燃料層を得る実験，及び理論による解析，レーザーの蛍光の影響を実験的に調べたので，その結果についてまとめる。

§7－2　点冷却法によるクライオターゲットの製作

7－2－1　実験原理及び方法

点冷却法では燃料を充塡したガラスマイクロバルーン（GMB）を熱伝導の良いファイバーを介してクライオスタットに取付け，真空中につるす。GMBは周囲からの熱輻射を受け，吸収された熱はペレット上部に取付けられたファイバーから運び去られる。したがってGMB内部では上部の温度は下部の温度より常に低く，液化した燃料は下部で蒸発し，上部で凝結し，内部に沿って流下する。熱輻射と温度をコントロールすることにより均一性と厚さをコントロールすることができる。

著者が用いたクライオスタットの断面図を図7－1に示す。先端の熱交換部分は多孔質の銅の合金で作られ、能率を高めている。熱シールドはヘリウムの排気で冷却するようにし，液体窒素のジャケットを省略し，小型化した。温度は鉄をドーピングした金とクロメルによる熱電対とGRTにより計測した。温度のコントロールは液体ヘリウムの流量を調節するのとマイクロヒーターにより行なわれた。He 流量 100 ℓ/min で 13 K，20 ℓ/min で 22 K の性能である。ヘリウム流量 100 ℓ/min におけるマイクロヒーターの効果を図7－2に基本性能として示す。温度コントロールの精度は±1Kである。

熱シールドにはターゲットに与える輻射量を調整するために穴があけられている。実際にはこの穴を利用して観測を行なった。将来プラズマ実験をする場合，輻射量が許される場合，熱シールドに開けた穴から照射，計測を行ない，十分でないときは熱シールドの除去を行なう。

ターゲットはクライオスタット中央にあるパイプを通して，クライオスタットの温度を上げることなく交換可能である。ターゲットは銅ファイバーを介してクライオスタットに取り付けられる。熱ファイバーの加工の成否は，実験に大きく影響する。

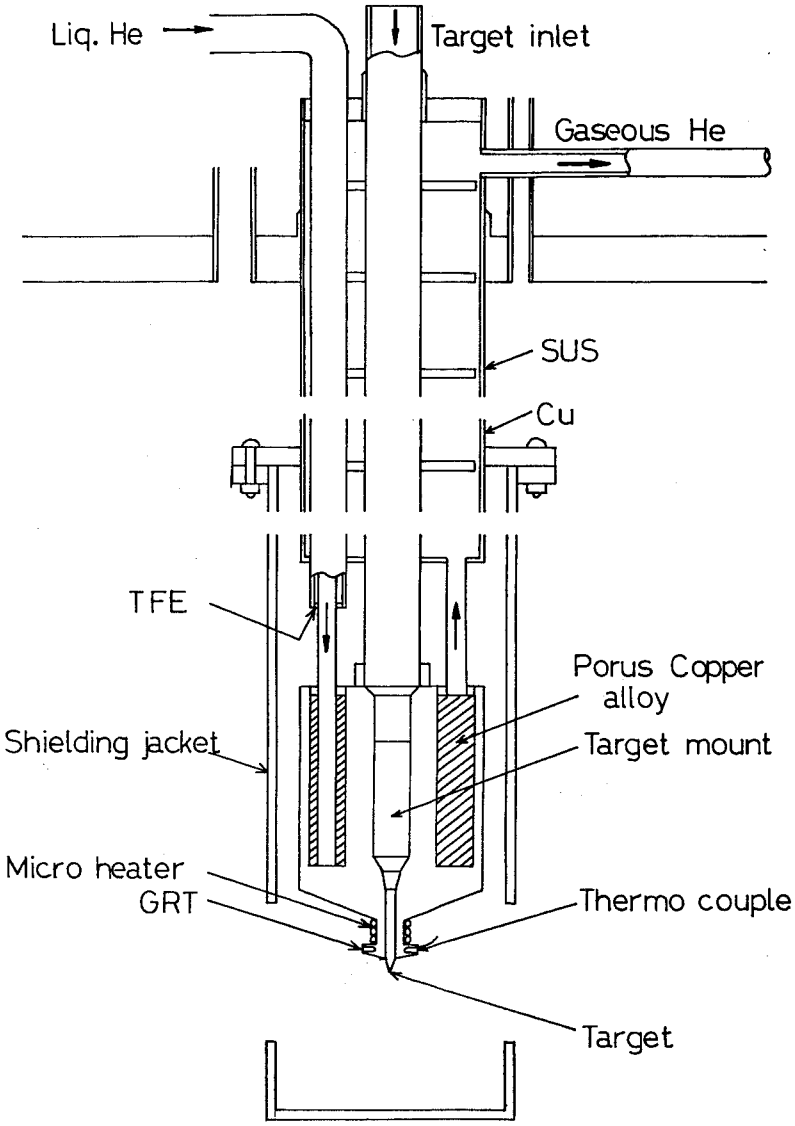


図７－１　クライオスタットの断面図

検討の結果，図７－３に示した方法が最もすぐれていた。まず直径１００μmの無酸素銅を直径２㎜の銅ステムに取り付けた。先端を３０％塩化第２鉄でエッチングし針状に仕上げた。次に先端を垂直に切断し直径２０μm 程度に仕上げる。ＧＭＢはシリコングリス又はエポキシ接着剤で固定し，液体室表で冷却し，低温歪で取れないか確認をしてから実験に用いた。

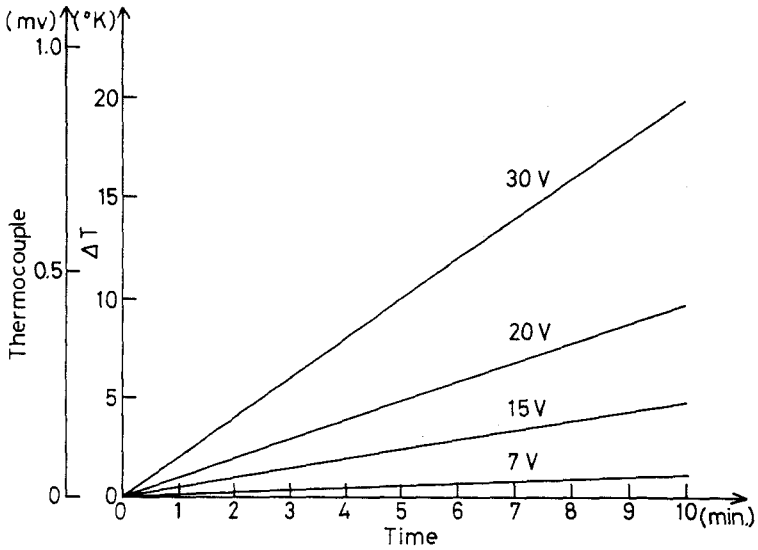


図７－２　マイクロヒーターによる加熱特性

行なった実験はクライオターゲット上へのガスの吸着の評価，液層分布の温度依存性，同じく分布の熱輻射強度依存性である。

観測は作られる液体層がすべて１μm程度であるので干渉望遠顕微鏡を用いて行なった。観測系の略図を７－４に示す。データ整理には次式の関係を用いた。

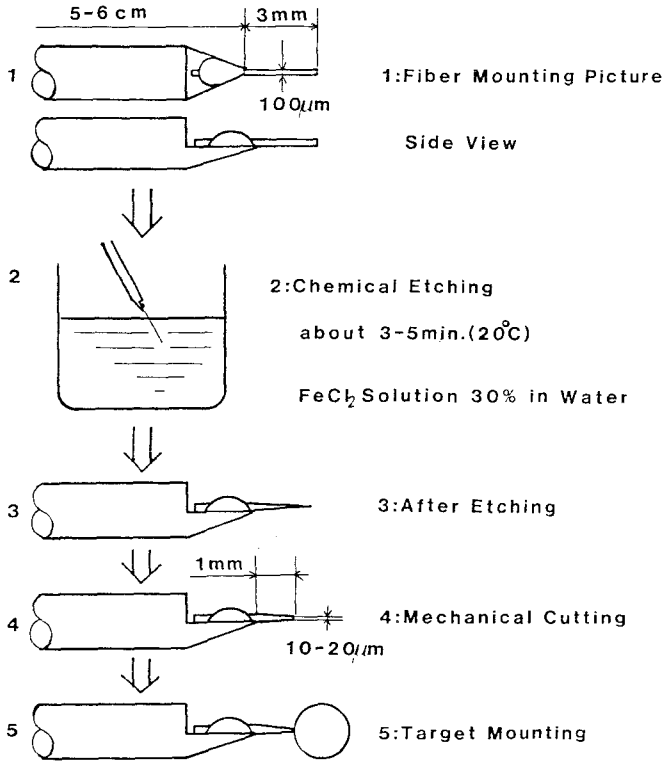
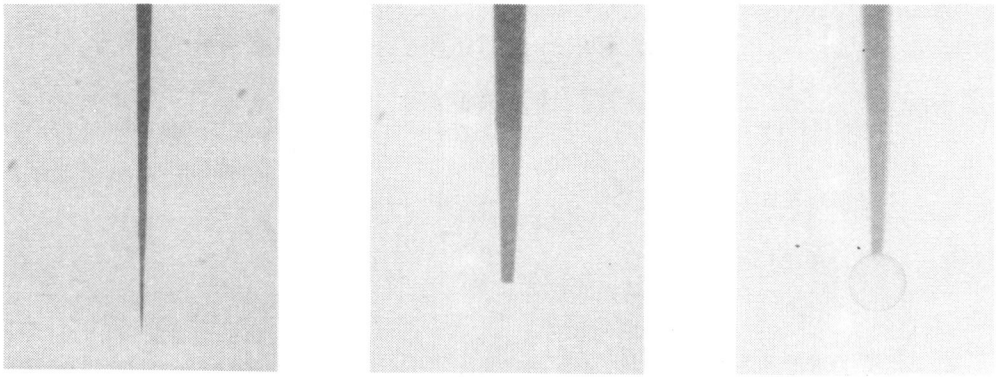


図７－3(a)　クライオターゲット支持ファイバーの加工



Chemical Etching　　Mechanical Cutting　　Target Mounting

図７－3(b)　クライオターゲット支持ファイバーの加工

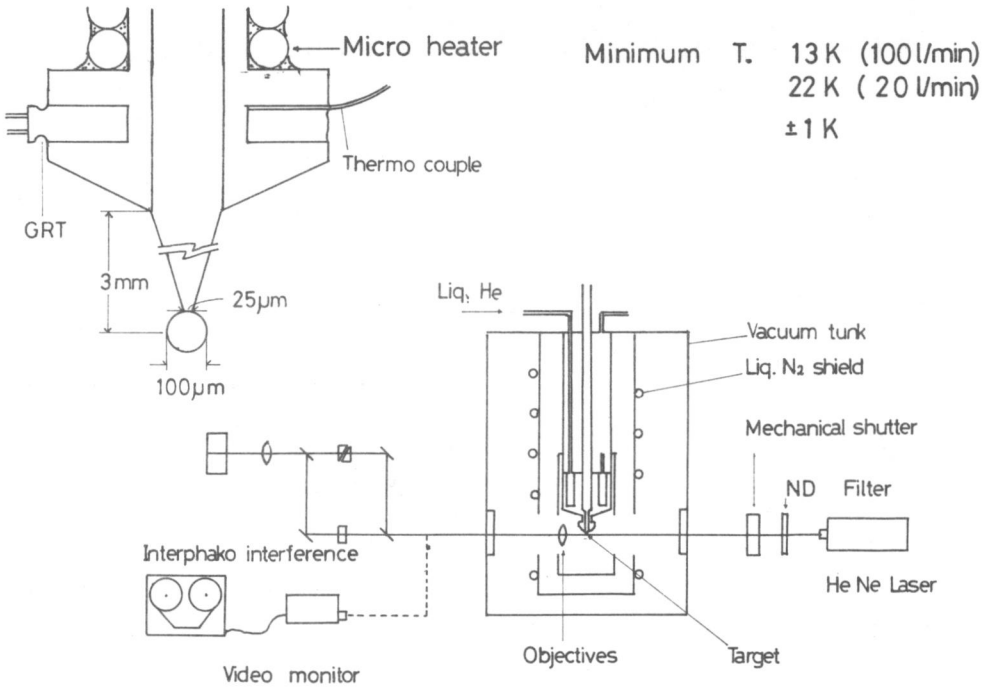


図７－４　液層分布測定の観測系

$$\Sigma NL(t,\theta) = N_W L_W \{ t, \theta \} + N_G L_G + N_{DL} \{ T(t) \} L_{DL} \{ T(t)\ \theta \} + N_{DV} \{ T(t) \} L_{DV} \{ \theta \} \qquad (7-1)$$

ここで

N：屈折率

L：光路にそった厚さ

$T(t)$：温度

で，そえ字はそれぞれ

W：水　　G：ガラスマイクロバルーン

D：重水素　　L：液体

V：気体　　t：時間

θ：赤道面からの角度

を意味する。

（7－1）式の第1項は水の分子がGMBの外側に付着したことによる光路長の変化であり，第2項はGMBのガラス層での光路差である。第1項は次節の関係を用い，第2項はGMBを固相温度にまで下げ，重水素を冷却点に氷らせておき，GMBの中を空にして第1項と一緒に測定した。第3項は液体燃料層を，第5項は気体燃料層を表わしている。

図7－5　液体重水素の屈折率

N_{DL} は図7－5の関係を用い，N_{DV} は各温度における蒸気圧から密度を求め，室温で行なって得た実験式

$$N_{DV} = 1 + 0.77\rho \qquad (7-2)$$

を用いて評価した。但し ρ の単位は g／cm³ である。

以上より6－34式の L_{DL} を求めた。L_{DL} は光路にそった値であるので実際の液層の厚

さは t_L は

$$t_L = \frac{L_{DL} \cos \alpha}{2} \qquad (7-3)$$

となる。

7−2−2 実験結果

(a) ガスの吸着

クライオターゲットの実験を行なう場合，ターゲットは低温のまま真空中に放置される。ターゲット上には雰囲気ガスが氷りつき，内部の液層を干渉測定する場合，正確な測定を妨げる。吸着を評価するために空のＧＭＢを用い光路差の時間変化を測定した。

結果を図７－６に示す。縦軸はクライオスタット周辺の圧力，クライオスタットの温度，光路差であり，横軸は時間である。測定結果はΦで示されている。光路差はクライオスタットの温度が170Ｋ以下で増加し始める。このときの圧力は 10^{-4} Torr であり，これは１７０Ｋにおける水の蒸気圧にほぼ等しい。

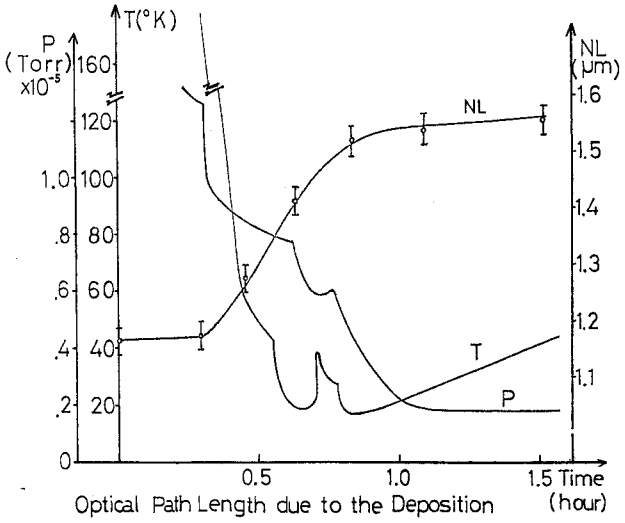


図７－６　実験中の光路長の変化。NL は（７－４）式から計算したもの。

光路長の増加 dNL/dt とチェンバー内圧力の関係として次の実験式を得た。

$$\frac{dNL}{dt} = 1.2 \times 10^5 \, (P_{(t)} - P_u) \ (\mu m/hoar) \qquad (7-4)$$

ここで P_u は最終的に到達する圧力〔Torr〕である。この結果はＧＭＢに当る分

子の６６％が吸着されたことを示している。

また付着速度のペレット表面上での様子を図７－７に示す。分布が非等方的なのは上部は１９Ｋの熱交換部分に面しているので，ここから反射して飛んでくる分子が少なく，又下部は７０Ｋの熱シールドに面しているため，ここからは吸着が少なく，より多くの分子が飛んでくることを示している。

この実験結果によれば，クライオターゲットを長時間真空に置くなら高真空にしておき，しかも平均自由行程より近い部分の温度は一定でなければならない。

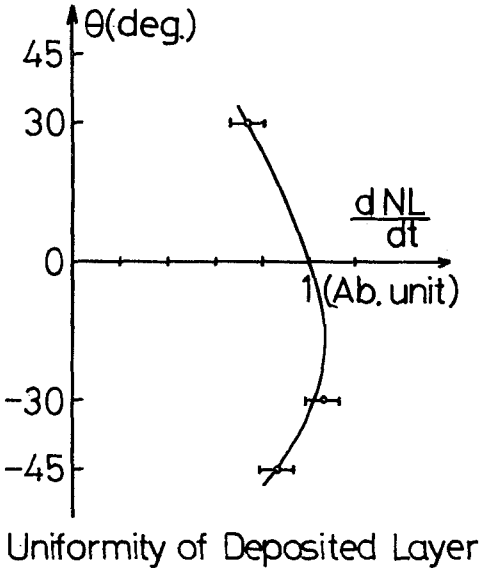


図７－７　クライオターゲット上へのガスの吸着分布

(b)　各種条件下での液層分布

液体燃料層の形状は設定温度，まわりからの熱輻射，シェルの熱伝導率，充塡圧などによる。これらの関係を明らかにするため各種の条件下での液層の分布を測定した。

まず熱シールドの穴を30㎜$^{\phi}$２ケ、即ち、立体角にして0.74πSter. にした場合の結果を示す。計算上，熱シールド内で等方的に分布しているとして7.7mW/㎠の熱輻射を受けることになる。直径75μm，壁厚1.2μm，充塡気圧２５気圧のものを用いた場合の液体燃料層の分布を図７－８に示す。θ＝0°はＧＭＢの

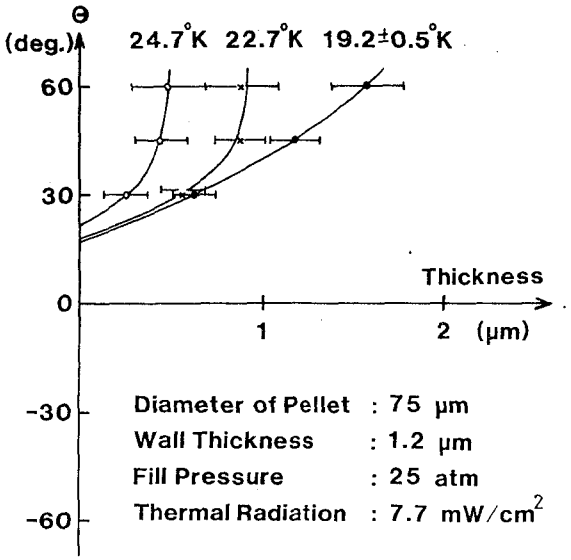


図７－８　液体燃料層の分布(1)

冷却点を極として赤道面に当る。この場合液体は$\theta=20°$より下には存在せず温度の上昇とともに液層は薄くなった。図7－9は同じ条件下で50気圧充塡した結果である。25気圧に比較して$\theta=0°$の付近まで液層がひろがったが，以前として上部に集中していた。24.8Kのとき下部にもひろがっているが，これは誤差の範囲と見るべきであろう。これらの実験では熱輻射が多く，下部にまで流れ落ちる前に蒸発したものと思われる。

熱シールドの穴を小さくし，開口部が0.027πSter.にした場合の実験結果を示す。直径70μm，壁厚1.2μmのGMBに50気圧充塡した場合の結果を図7－10に示す。この場合，温度が上るにつれ上部に集まっていた液体が全体に広がり，25.5Kで厚さ0.5μm均一性（$\frac{1-\Delta t}{t}$，面積加重平均）90％の液体層を得た。

充塡気圧を70気圧，100気圧にした結果を図7－11，7－12に示す。

ところで激光MⅡレーザーでクライオターゲットを，熱シールドを固定し、そこに開けた穴から照射観測する場合，

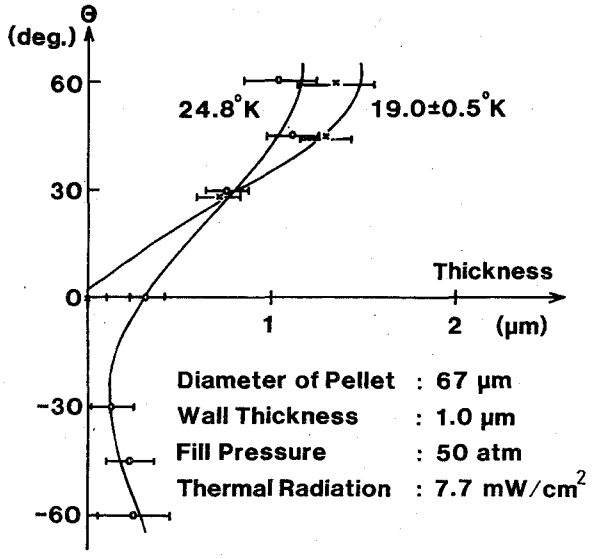


図7－9　液体燃料層の分布(2)

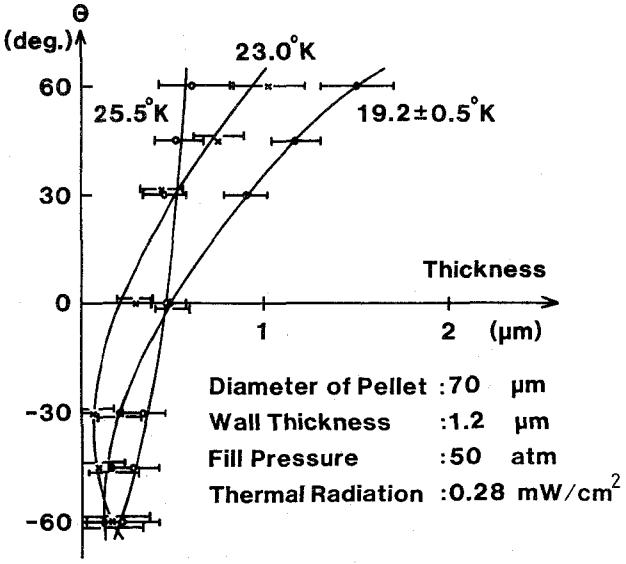


図7－10　液体燃料層の分布(3)

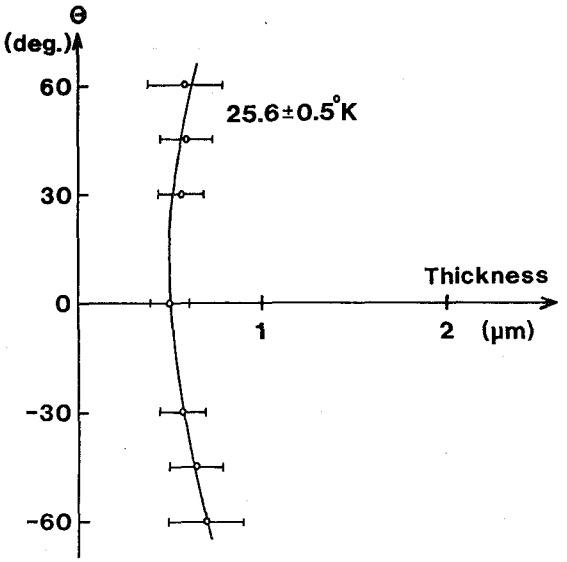
少なくとも2mW/㎠の熱輻射を受ける。このような条件下で均一な液体燃料層を得るための充塡気圧を実験的に求めてみた。

熱シールドに0.19πSter.の穴を開け，直径100μmのGMBに100気圧充塡した結果を図7－13に示す。面積加重平均による均一性は70％であった。これを均一性90％以上にするにはさらに充塡量をふやすか熱シールドを可動式にし，輻射量を1.8mW程度に落す必要がある。(次節参照)

7－2－3　考　察

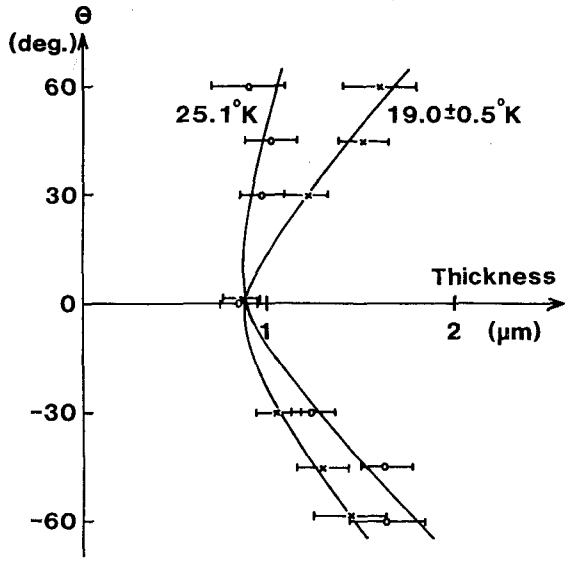
この項では，実験に基づいて均一な液体燃料層を得るため条件について考察する。

まず熱輻射7.7mW/㎠のとき，充塡量25気圧と50気圧の場合の比較を図7－14に示す。GMBの上下の温度差は計算上aは0.37K，bは0.35Kである。均一性は充塡量の増



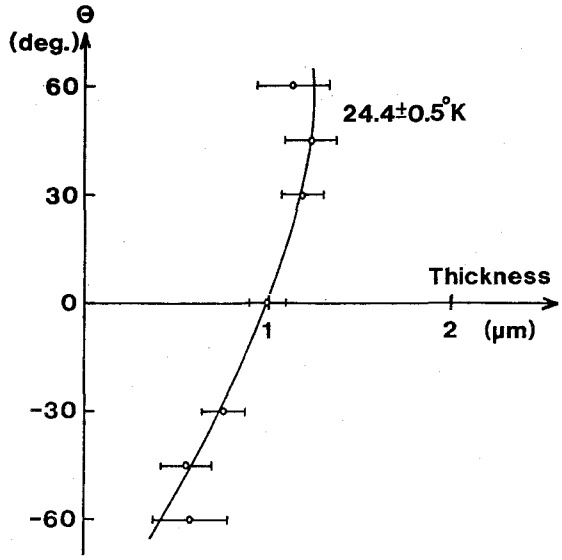
Diameter of Pellet : 62 μm
Wall Thickness : 1.0 μm
Fill Pressure : 70 atm
Thermal Radiation : 0.28 mW/cm^2

図7－11　液体燃料層の分布(4)



Diameter of Pellet : 66 μm
Wall Thickness : 1.0 μm
Fill Pressure : 100 atm
Thermal Radiation : 0.28 mW/cm^2

図7－12　液体燃料層の分布(5)



Diameter of Pellet : 60 μm
Wall Thickness : 1.0 μm
Fill Pressure : 100 atm
Thermal Radiation : 2.0 mW/cm^2

図７－13　液体燃料層の分布(6)

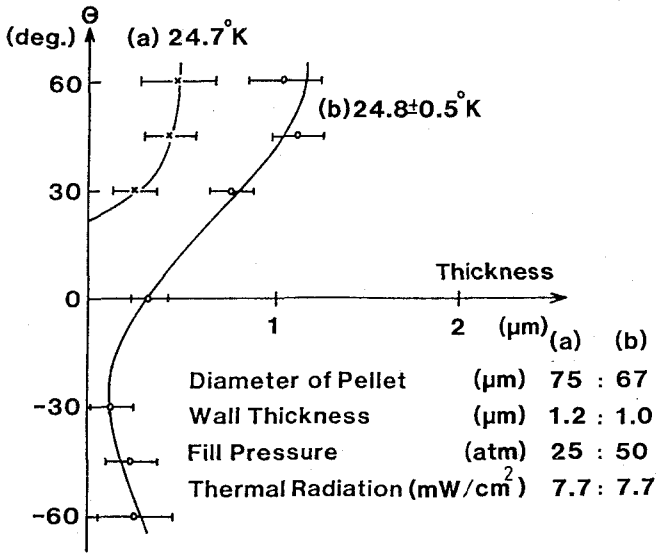


図７－14　充塡量を変えたときの液体燃料層の分布(1)

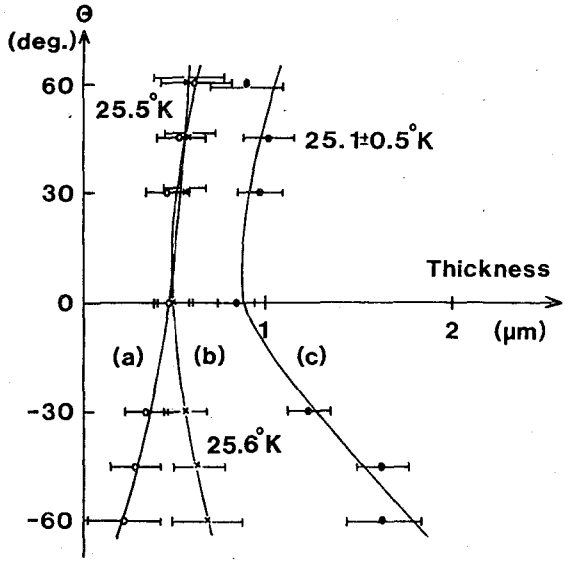
加にともなって向上するが，50 気圧以上入れないとＧＭＢ内面全体に広がらなかった。

次に熱輻射が 0.28 mW／cm^2 のときの充塡気圧に対する液層の分布の変化を図７－15 に示す。直径 66±4 μm，温度 25K のデータを集めたもので，約 60 気圧充塡したとき最も均一度が良かった。充塡量が増加するにしたがって下部の厚みが増加し，充塡量 70 気圧以上では下部の方が上部より厚くなった。このことは熱輻射量が少なく，液体重水素を気化させ冷却点に〝くみ上げる〟ことができなかったことを示している。

充塡気圧一定で熱輻射がかかわった場合の液層の分布の様子は図７－16 に示す。図７－16 は 50 気圧充塡

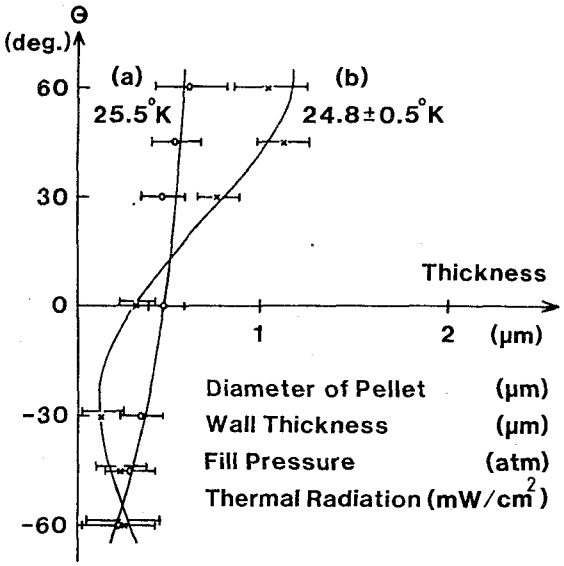
した場合で，熱輻射が多くなれば上部が厚くなった。熱輻射が多くなり，流れ落ちる液体燃料は途中で蒸発し，下まで届かないためと考えられる。この組み合せでは熱輻射を0.28 mW からさらに小さくする必要がある。

以上の考察より熱輻射が多くなるとGMB上下の温度差が大きくなり，下部では蒸発量が増し薄くなる。充塡量が増せば重力の効果により下部での液層の厚さは増大する。この２つの要因は相補関係にあり，二つの量を適当に決める事により均一な液体燃料層を得る事ができる。



		(a)	(b)	(c)
Diameter of Pellet	(μm)	70	: 62	: 66
Wall Thickness	(μm)	1.2	: 1.0	: 1.0
Fill Pressure	(atm)	50	: 70	: 100
Thermal Radiation	(mW/cm^2)	0.28	: 0.28	: 0.28

図７－15　充塡量を変えたときの液体燃料層の分布(2)



		(a)	(b)
Diameter of Pellet	(μm)	70	:67
Wall Thickness	(μm)	1.2	:1.0
Fill Pressure	(atm)	50	:50
Thermal Radiation	(mW/cm^2)	0.28	:7.7

図７－16　熱輻射を変えたときの液層分布

7－2－4　むすび

この節では点冷却法による液体重水素燃料層を作る実験について述べた。干渉計測法

により，均一な燃料層が形成されるメカニズムを実験的に明らかにした。その結果

1）温度が凝固点に近くなるにつれ，液体重水素はＧＭＢ上部の冷却点に集まった。

2）熱輻射量が多くなるにつれ，冷却点周辺の液体重水素の厚さが下部により多くなった。

3）充塡量が多くなると下部の液体重水素の厚さが多くなった。

4）直径62μm，壁厚1μmのGMBに重水素を70気圧充塡して、厚さ0.6μm均一性，±15％の液層を得た。実験では直径62μm，壁厚1μmのGMBに重水素を70気圧充塡し，厚さ0.6μm，均一性±5％の液層を得た。

§7－3　液層分布の理論計算

点冷却法によるクライオターゲットの実験的研究の報告は多くみられる。しかし理論的な検討の報告はない。すべての条件を実験的に調べることは不可能であり，計算によって液層の分布を求める必要がある。ここでは熱の伝わり方に注目し，ガラスが吸収した輻射による熱量を内部の液体重水素が運ぶ場合と，容器の熱伝導が良く，輻射による熱量のほとんどが，壁を伝わって冷却点に運ばれる場合に分けて検討した。ＧＭＢ内部を流下す液体重水素が気化することによって運ばれる熱量 Q_L は

$$Q_{Liq} \simeq L \frac{2\pi r_0 \rho^2 g \delta^3}{3\eta} \qquad (7-5)$$

ここで　r_0　容器の内径　　η　液体の粘性

δ　液体の厚さ　　L　液体の気化熱

ρ　液体の密度

であり，また容器の壁を伝わる熱量 Q_{Wall} は

$$Q_{Wall} \simeq 2\pi r_0 \triangle t \ \lambda_{Wall} \ \mathrm{grad}\ T_W \qquad (7-6)$$

となる。ここで

$\triangle t$　容器の壁厚

λ_{Wall}　容器の熱伝導率

T_W　容器の壁温度

である。熱輻射による吸収熱量を Q_{Thm} とすると

$$Q_{Thm} = Q_{Liq} + Q_{Wall} \qquad (7-7)$$

であり，これらの大小関係を比較してどちらの場合か判断した。参考までに直径100 μmの容器内に1 μmの液層ができ4 mW／cm²の輻射場にGMBが置かれた場合 $Q_{Liq} \simeq 3 \times 10^{-7}$Wであり，$Q_{Thm} \simeq 5 \times 10^{-7}$Wである。

まず液体が下部で気化し冷却点で液化することによってほとんどの熱量が運ばれている場合について述べる。ガラスマイクロバルーン（GMB）程度の寸法（～100 μm）では表面張力が重要な働きがあることに着目して，GMB内部に液体重水素を満し，その中に気胞を浮かべるといった概念で気胞の浮沈から液層分布を求めたものである。この結果は液層分布の充塡圧依存性と熱輻射依存性について実験結果と誤差の範囲で一致し，均一な液層を得るためのチャートを作った。

いま一つの状態は容器の熱伝導が良く，ほとんどの熱が容器の壁を伝わって冷却点に運ばれる状態である。この場合容器の壁温度を液層分布と関係なく決めることができたのでニューサルトの相変化を伴なう熱伝導の理論を応用して液層分布を計算した。[5] この理論は飽和蒸気中にその温度より低い物体を置いた場合の液層形成過程を議論したもので、著者はこれを閉ざされた球体であるGMB内部の液体重水素のふるまいに応用した。この方法では表面張力の影響を無視した。この結果を利用することにより，金などの熱伝導の良いものをコーティングした場合の均一性を議論した。

7－3－1　気胞モデルによる計算

重水素の分子間力の結果として表面張力とガラスとの親和力が上げられ，微小なGMB内部では重要な影響がある。

実際半径Rの曲面と表面張力Tによって生じる圧力変化$\triangle P$は

$$\triangle P = \frac{T}{R} \qquad (7-8)$$

で与えられる。半径50 μmのGMB中の液体重水素の表面張力（2.8 dyn／cm）による圧力は 560 dyn／cm² となる。これに対してGMB内部の液体重水素中での上下の圧力差は

$$\triangle P = \rho g d \qquad (7-9)$$

であり，2 dyn／㎠ となる。ここでρは液体重水素の密度，gは重力加速度，dはＧＭＢの直径である。ＧＭＢ内部で重力により，液体燃料層内面の曲率半径が上半分と下半分で異なるとすると，その関係は

$$\frac{T}{R} - \frac{T}{R+\triangle R} = \triangle P \qquad (7-10)$$

$$\triangle R \simeq \frac{\triangle P}{T} R^2 \qquad (7-11)$$

で表わされる。$\triangle P$に式（７－９)の関係を使って計算するなら，曲率半径の差は0.17 μmである。したがって液体燃料層内面の真球からの重力によるずれはせいぜい0.1 μm 程度であり，真球と考えても事実上さしつかえない。

ここで液体燃料の厚さを計算するモデルは真球のＧＭＢ内部に液体重水素が満され，その中にこれまた真球の気胞が浮いているモデルである。気胞は液体の中を上下でき，上に押し上げるのは気胞に働く浮力であり、押し下げる力は輻射熱で気化した重水素が冷却点で液化しガラス内面と気胞の間を通って四方に流れ出るとき粘性抵抗によって生じる圧力である。これらの概念を図７－１７に示す。

まず熱輻射が無い場合を考えてみる。この場合の状況はＧＭＢの内部が濡れているか乾燥しているかによって異なる。言い換えればガラスと液体重水素面との接触角によって決まる。接触角$\theta = 0°$のときＧＭＢ内部の壁は濡れた状態にあり，先の概念で言うと，気胞は浮び上がり，天囲に接した状態にある。$\theta > 0$のときＧＭＢ内壁は一部乾燥した状態にある。

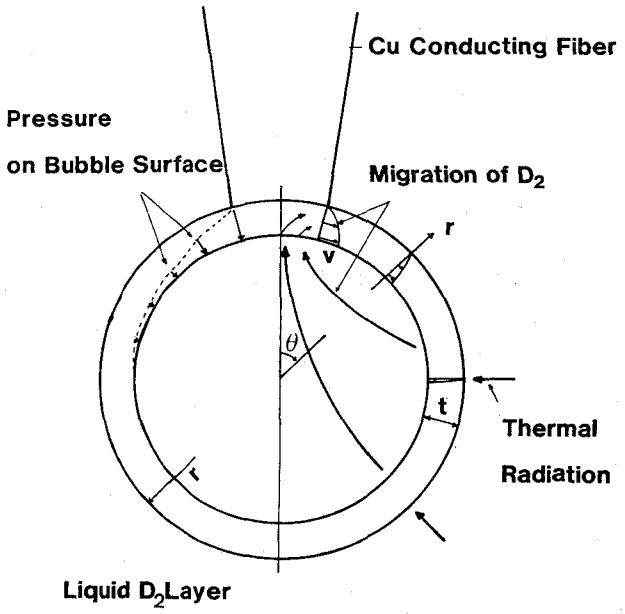


図７－１７　液層分布計算用気胞モデル

図7－18は直径70μmのGMBに50気圧の重水素を充塡し，19Kにした場合の液体重水素の分布である。$0<\theta<42.7°$のとき上に凹の形状となり，$42.7°<\theta$のとき上に凸の形状となる。

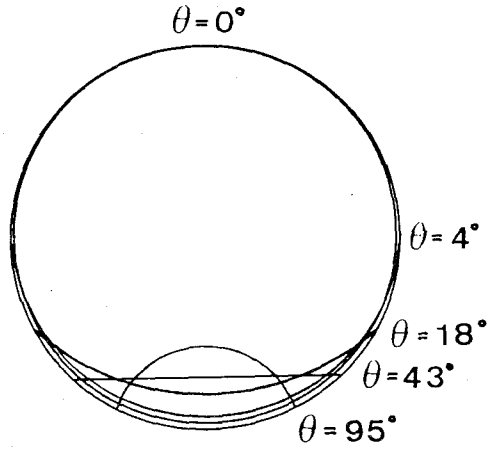


図7－18　熱輻射がない場合の液層分布

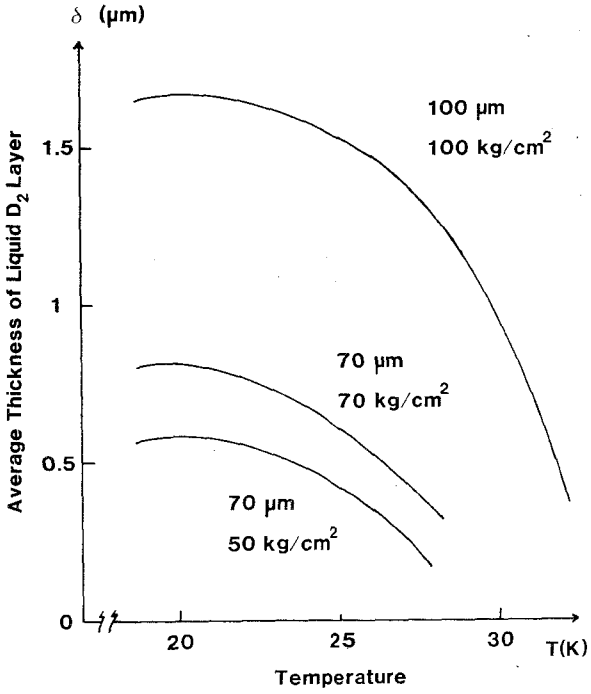


図7－19　各温度における液層の平均厚さ
パラメーターは直径と充塡圧

次に熱輻射が存在する場合を考える。このときの液層分布を求めるため簡単化を行った。先に述べた理由でGMB内面も，気胞も完全な球と仮定したから，燃料の厚さの角度依存性は

$$t(\theta)=\delta-a\sin\theta \qquad (7-12)$$

と近似できた。ここでδは図7－19に示した各温度における平均燃料層の厚さで，aは気胞中心とGMB中心のずれである。これにより液体分布を求める問題がaを求める問題に置き換えられた。aを求めるためには気胞を押し下る力を求めなければならない。非圧縮性粘性流体の運動方程式は

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\ \mathrm{grad})\,v=-\frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,P+\frac{\eta}{\rho}\Delta v \qquad (7-13)$$

で与えられる。ここでvは流速，ρは密度，ηは粘性，Pは流体中の圧力である。定常状態を考えているから第1項はゼロ，また，流体の動きは十分遅いので慣性の効果を無視し，流体は圧力勾配と粘性のみがつり合った状態であるとする。このとき冷却点からはなれたθの変化がそれほど重要でない場所での液体の運動方程式は，液層は十分薄いので

$$\eta \frac{d^2 v}{dz^2} + \mathrm{grad}\ P = 0 \qquad (7-14)$$

となる。vは接線方向の流体速度，zはGMB内面で$-r$方向にとった座標である。気胞液層間の摩擦を無視すると

$$v = \frac{\mathrm{grad}\ P}{2\eta} z\,(2t(\theta) - z) \qquad (7-15)$$

で与えられる。したがって同一緯度線上での単位長当りの流量Qは

$$Q = \rho \int v\, dz \qquad (7-16)$$

$$= \frac{\rho\, \mathrm{grad}\ P}{3\nu} t^3(\theta) \qquad (7-17)$$

で与えられる。ここで$t(\theta)$は液層の厚さでありνは動粘性系数である。今$\theta = \varphi$を流れ落ちる流量は$2\pi r_0 \cos\varphi\, Q(\varphi)$であり，これは冷却点で液化した量$N_C$と$\theta = 90°$から$\theta = \varphi$までの間に気化した量$N_E$の差に等しい。即ち

$$2\pi r_0 \sin\varphi\ Q(\varphi) = N_C - N_E \qquad (7-18)$$

$$N_C = \frac{4\pi r_0^2 R}{L} \qquad (7-19)$$

であり，気化は冷却点（$90° > \varphi > 75°$）を除き一様に行なわれるとする場合

$$N_E = \frac{2\pi r_0 (1 - \sin\varphi) R}{L} \qquad (7-20)$$

である。ここでRはGMB上に吸収された単位面積当りの熱輻射量である。

一方粘性抵抗によって生じた圧力により気胞を押し下る力が浮力とつりあうことから

$$\int P(\varphi) \sin\varphi\ ds = \rho g V \qquad (7-21)$$

が成り立つ。ここでVは気胞の体積である。 式(6－59)，式(6－60)，式(6－61)，式(6－62)，式(6－63) で気胞とガラスマイクロバルーン中心のずれaを求めることができる。

実験結果と計算結果の比較を図7－20～7－23に示す。 図7－20，7－21，7－22は充塡ガス圧が異なる場合で両者は測定誤差の範囲で一致する。充塡量が増加した場合，最上部の厚さは変化せず下部のみが増加する。図7－23は図7－20との対比で熱輻射が異なる場合に対応する。熱輻射が増加すると上部が厚くなり，図7－20では下部が乾燥している。計算に用いたパラメーターを表7－Ｉにまとめる。

均一な液体燃料層を得るのに必要なパラメーターをすべて含んだチャートを図7－24に示した。図7－24は温度25Kで均一な液層を得るためのもの

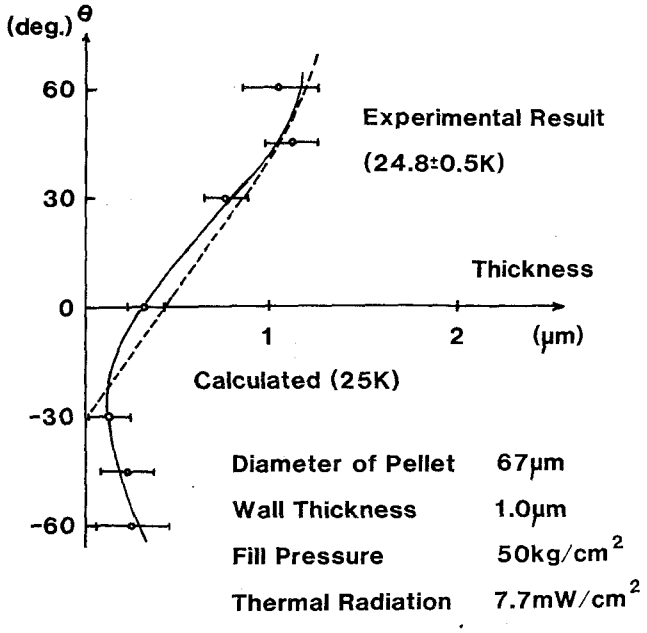


図7－20　気胞モデルによる液層分布計算結果と実験結果の比較(その1)

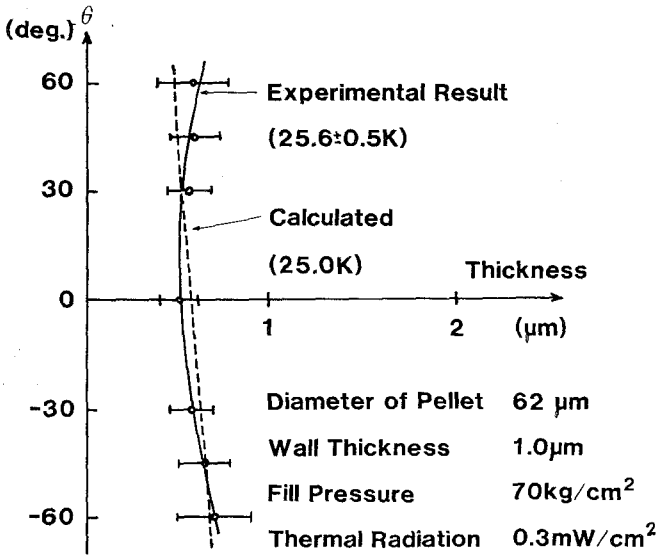


図7－21　気胞モデルによる液層分布計算結果と実験結果の比較(その2)

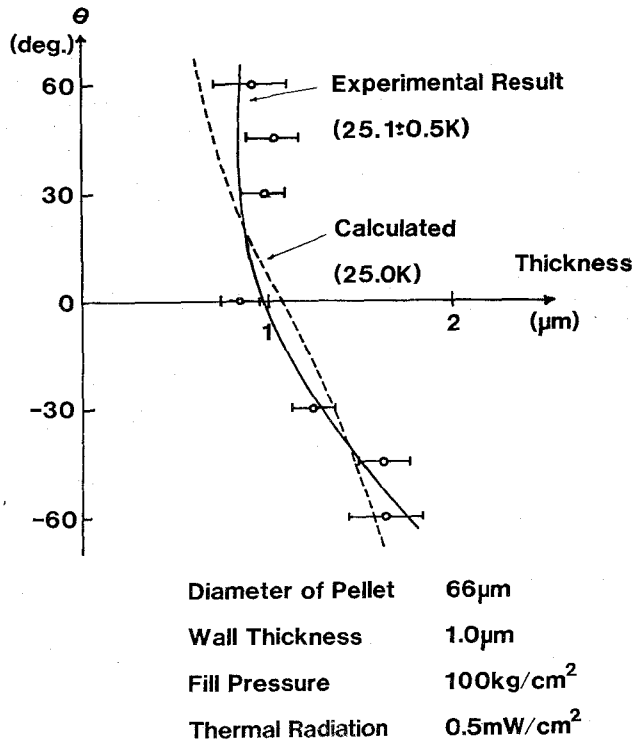


図７－22　気胞モデルによる液層分布計算結果と実験結果の比較（その３）

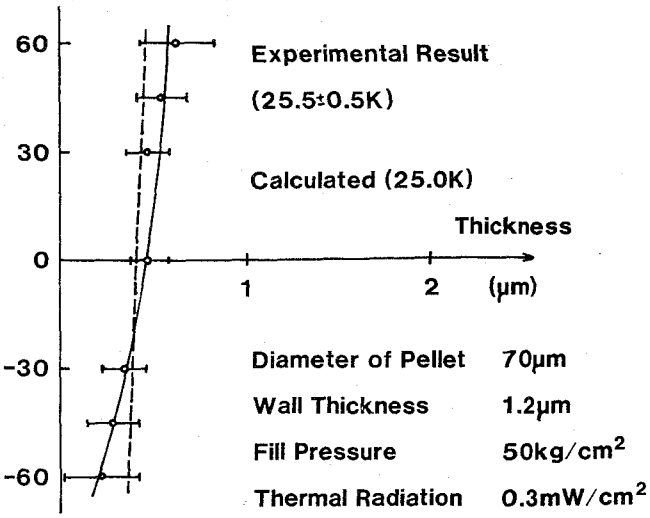


図７－23　気胞モデルによる液層分布計算結果と実験結果の比較（その４）

で，上部はＧＭＢ中心から見た冷却部の角度をパラメーターとして均一な液層を得るために必要な熱輻射の量を示している。下部は１９Ｋにおける液層の平均厚さと充塡気圧の関係をＧＭＢの直径をパラメーターとして表わしたものである。例えば直径１００μmのＧＭＢ内部に厚さ1μmの均一な液層を作りたい場合，６０気圧重水素ガスを充塡し，冷却部の角度を１５°にし，熱輻射が1.3mW／cm²になるようにシールドを設計すれば良いことを示している。

まとめとして点冷却法でＧＭＢ内部に均一な液体燃料層を作る条件を明らかにした。液中に浮かぶ気胞をモデルに液層の厚さを計算で求め，よく実験結果を設明できる結果を

表７－Ⅰ　計算に用いた低温での諸物性値

先端温度 T_0〔 °K 〕	19.0	22.0	25.0
ガラスの熱伝導率 λ_G〔erg／cm・sec・K〕	1.29×10^{5}	1.35×10^{5}	1.45×10^{5}
D_2 液体の熱伝導率 λ_L〔erg／cm・sec・K〕	0.96×10^{4}	1.05×10^{4}	1.11×10^{4}
D_2 液体の密度 ρ_L〔 g ／ cm³ 〕	0.172	0.166	0.158
D_2 気体の密度 ρ_V〔 g ／ cm³ 〕	0.50×10^{-3}	1.41×10^{-3}	3.22×10^{-3}
D_2 液体の粘性 μ_L〔 g ／ cm・sec〕	4.2×10^{-4}	3.2×10^{-4}	2.6×10^{-4}
D_2 の潜熱 L〔erg／ g 〕	3.17×10^{9} (19.65K)		

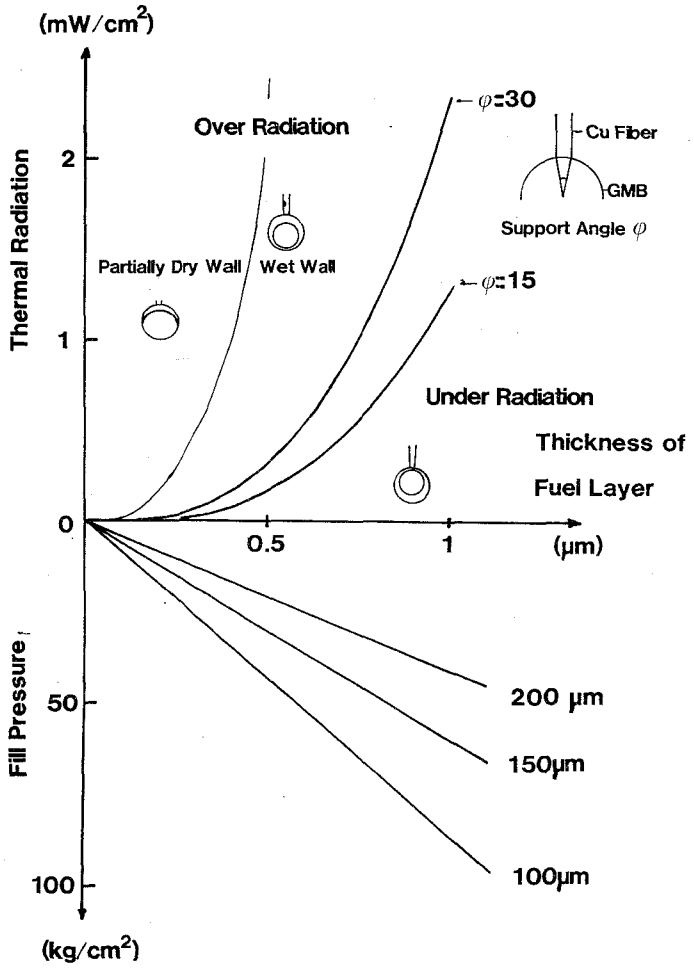


図７－24　温度25Kで均一な液層を得るためのチャート

得た。また均一な液層を得るための諸パラメーターをまとめたチャートを完成した。

7－3－2　ニューサルトの方法による計算

燃料の飽和蒸気温度 T_S より低い温度 T_W の冷たい壁が蒸気に接すると表面に液体の凝縮が起こる。面が凝縮液にぬれやすい場合には冷却面上を凝縮液が連続した膜状になって流下する。蒸気は液層を通して熱が運ばれる結果，さらに界面で液体に凝縮する。純粋な飽和蒸気であるなら，流体と蒸気の界面の温度は等しく，本質的に飽和蒸気温度に等しい。このような状態での液層の形成過程は古くはニューサルトなどによって解析された。

ＧＭＢ内部の場合，飽和蒸気に触れる球殻冷却面があり，凝縮液が層流の状態で流下する。簡単にするため以下のことを仮定した。

(1)　表面張力の影響は無視する。（したがって７－３－１の考察から，分るように，特に直径が小さいとき，これから示す結果より，さらに均一性は良くなる。）

(2)　ＧＭＢの壁温度 T_W はガラスの熱伝導だけで決まる。液体内面の温度は T_S であり，そして $T_S - T_W$ に比例する液体が気化又は凝縮して移動する。

(3)　液層内での厚さ方向の温度分布は直線である。

(4)　飽和蒸気の温度は T_S で一定である。

図７－２５に解析に用いたモデル及び座標を示す。我々が対象としているモデルでは液層の厚さは直径に比較

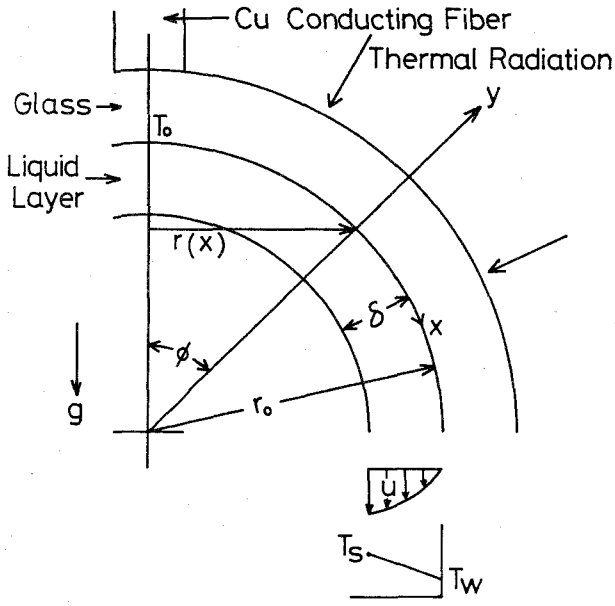


図７－２５　液層分布を求めるためのモデル

してかなり薄いからr方向の変化は無視し，球の頂点（冷却点）から円周に沿ってx軸，壁面にy軸を取った。δは液層の厚さである。軸対称の層流問題であるので二次元境界層の流れ及び熱伝達の問題に変換して考えた。

液層の厚さは薄く，流れも遅いので，慣性力の影響を無視し，粘性による抵抗と重力がつり合っていると考えると液の運動方程式として

$$\mu_L \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -g(\rho_L - \rho_V)\sin\phi \qquad (7-22)$$

が得られる。ここでu，μ_L，ρ_Lは液体の速度，粘性，密度であり，ρ_Vは気体の密度である。

境界条件は

$y=0$（冷却面）で　$u=0$　$T=T_W$（冷却面温度）

$y=\delta$（液層内面）で　$\frac{\partial u}{\partial y}=0$　$T=T_S$（飽和蒸気温度）　(7−23)

式（7−5）を積分し，境界条件から

$$u = \frac{g(\rho_L - \rho_V)\sin\phi}{2\mu_L}(2\delta y - y^2) \qquad (7-24)$$

となった。

次にGMB内面にそって$x(=r_0\phi)$の位置を流れ落ちる液体の総量は，$x=0$からxまでに凝縮した液体に等しいので，

$$2\pi r_0 \sin\phi \cdot L\int_0^{\delta}\rho_L u\,dy = \int_0^x 2\pi\sin\phi\,\lambda_L\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}dx \qquad (7-25)$$

の関係を得る。r_0はGMBの内径，Lは気化熱，λ_Lは液体の熱伝導率である。左辺の積分は$x=r_0\phi$における単位長当りの流量を意味し，左辺全体で$x=r_0\phi$を流れ落ちる流量を表わしている。右辺は気化又は凝縮した量を示している。

液層内部のr方向の温度分布は仮定より

$$T = T_W + (T_S - T_W)\frac{y}{\delta} \qquad (7-26)$$

とした。T_Wは仮定より実効的な熱伝導λ'_Gと熱輻射量によって次の式から決めた。

$$2\pi r_0 \sin\phi\,\triangle t\,\lambda'_G\frac{dT_W}{d\phi} = 2\pi(1+\cos\phi)\,r_0^2\,\frac{\varepsilon\sigma T_e^4\,\Omega}{4\pi} \qquad (7-27)$$

ここでΩはターゲットから見た室温熱輻射体の立体角，T_Rは室温，σはステファンボルツマン定数，εは熱輻射に対する吸収率，$\triangle t$はGMBの壁厚，λ_Gはガラスの熱伝導である。

式（7－7），（7－8），（7－9）により液層の厚さδ及び温度T_Wに対して

$$\delta = \frac{1}{\sin^{2/3}\phi}\left[\frac{4\mu\lambda_L r_0}{L\rho_L(\rho_L-\rho_V)g}\int_0^{\phi}\sin^{5/3}\phi\,(T_S-T_W)\,d\phi\right]^{1/4} \quad (7-28)$$

$$T_W = \frac{r_0^2 N}{\lambda'_G}\left(\log\left|\tan\frac{\phi}{2}\right| + \log|\sin\phi|\right) + C \quad (7-29)$$

$$C \equiv T_0 - \frac{r_0^2 N}{\lambda'_G}\left(\log\left|\tan\frac{\phi}{2}\right| + \log|\sin\phi|\right) \quad (7-30)$$

$$N = \frac{\varepsilon\sigma T_C^4\Omega}{4\pi} \quad (7-31)$$

の関係を得た。

式（7－29）により直径100μm，壁厚1μmのガラスマイクロバルーンについて熱輻射 2 mW/cm² と 4.4 mW/cm² の場合の温度分布を計算した結果を図7－26に示す。横軸は角度ϕを，たて軸は冷却点からの温度上昇を示す。この計算では壁材の熱輻射に対する吸収率0.9，として計算した。計算に用いたガラスの熱伝導は文献6）7）から$\lambda_G = 3.5\times10^{-3}$ W/cmK^{-1}と推定した。

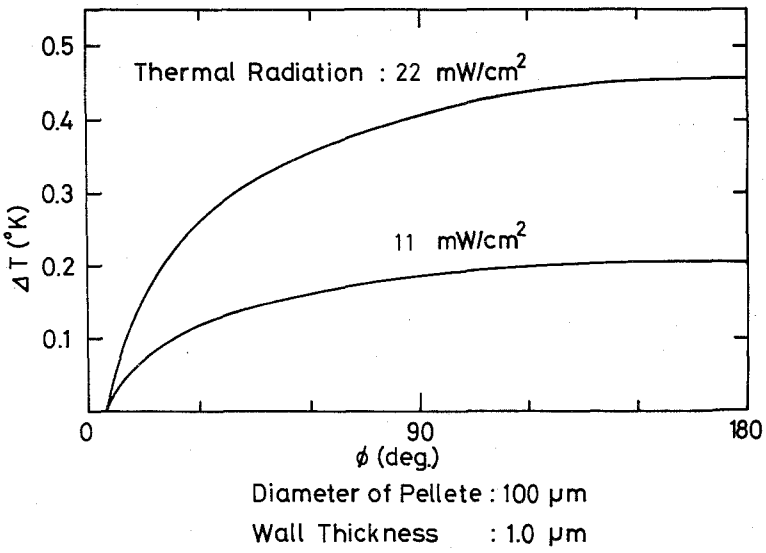


図7－26　GMB内部の温度分布

この式をもとに壁の熱伝導が主である場合の液層分布，均一

性について試べてみる。

まず熱輻射 2 mW/cm² の条件下で充塡気圧を変えて均一な液体燃料を得るための条件を求めてみた。GMBの直径は 100 μm，壁厚は 5 μm である。充塡気圧を 50，70，80 気圧と変えた結果を図 7 −27に示す。上部の厚さはあまり変化せず，下部が増加する。これは熱輻射が一定の場合の特徴で〃くみ上げる〃能力が一定であるため上部の厚さが変わらないためである。均一性 U を

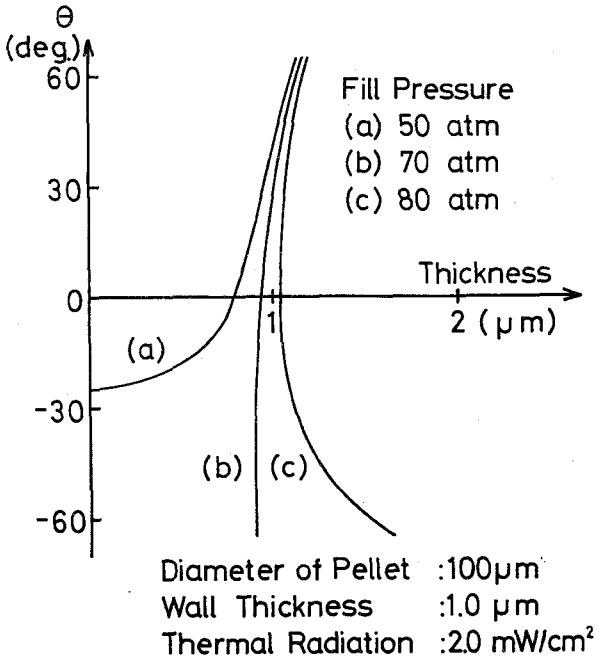


図7 − 27　充塡気圧を変えた場合の液層分布

$$U = 1 - \int \frac{(t_{av} - t)\,ds}{t_{av}\,ds} \qquad (7-32)$$

で評価するなら(a) 40 %，(b) 94 %，(c) 91 %である。ここで t_{av}は平均の液層の厚さである。充塡気圧と均一性の関係を図 7 − 28 に示す。熱輻射 2 mW/cm² のとき

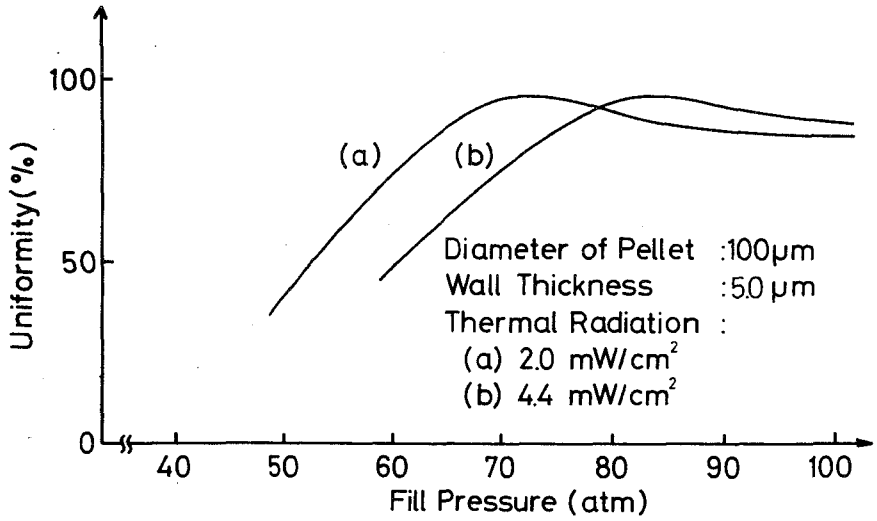


図 7 − 28　充塡気圧と均一性の関係

には充塡気圧約 72 気圧のときに，熱輻射 4.4 mW/cm² のときには充塡気圧 83 気圧で最も均一になり 97 % の値を得た。実際の液層分布は表面張力により，さらになめらかで均一なものになる。

充塡気圧 50 気圧にして熱輻射を変えて液層の分布を計算した結果を図7—29に示す。熱輻射が強くなるにつれ上部の液層が厚くなる。これは何度もふれたが，熱輻射が多くなることにより〝くみ上げ〟能力が多くなったに他ならない。上部の厚さは熱輻射の 1/3 乗に比例することが分かる。熱輻射がさらに少なくなると下部の方が上部より厚くなることが推定できる。

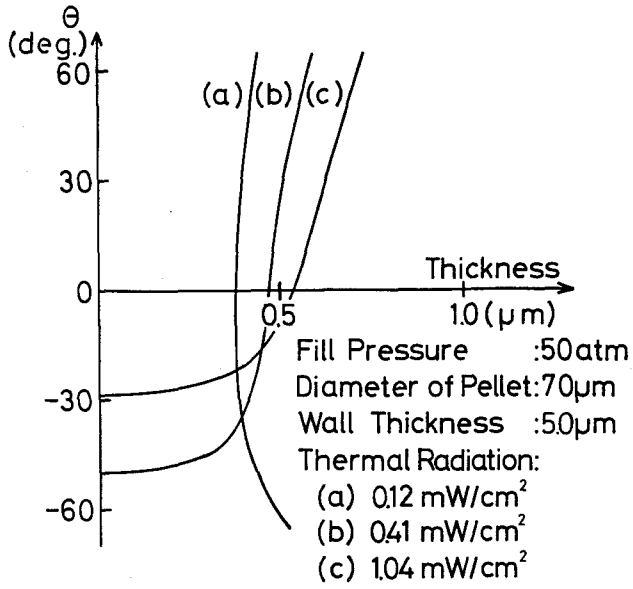


図7－29　熱輻射を変えたときの液層分布計算結果

熱輻射と均一性の関係を図7－30 に示す。直径 100 μm，壁厚 1 μm，100 気圧充塡GMBとそれぞれ 70 μm，1 μm，70 気圧のGMBについて計算した。図

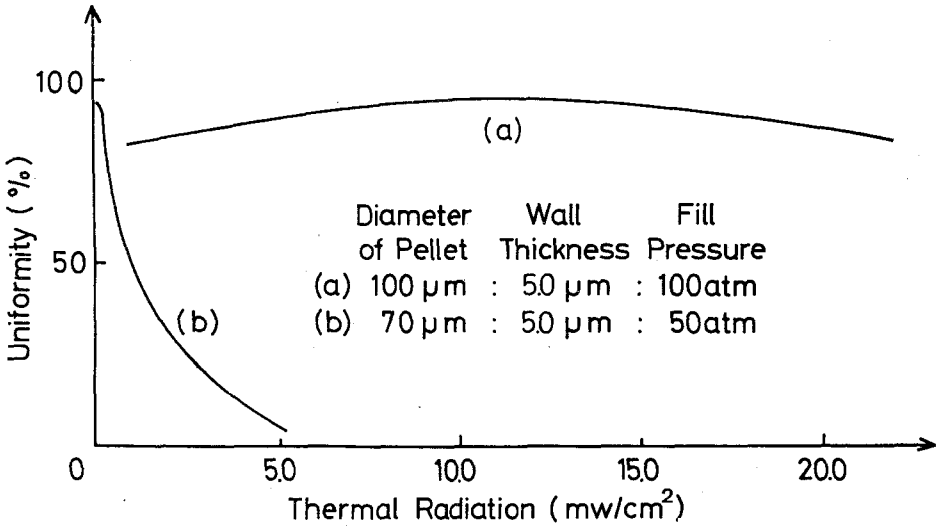


図7－30　熱輻射と均一性の関係

から分るように充塡量が多いほど熱輻射に対する依存性が小さく，均一な液層を作り安いことが分った。100気圧充塡GMBは5mW/cm²～18mW/cm² の範囲で90%以上の均一性を得ている。

図7－31は容器の壁の熱伝導率を変えて均一性を計算した例である。容器の直径，壁厚はそれぞれ100μm，1μmである。当然の事ながら前項と同じプロフィルを示し熱伝導が5kcal/m hr Kのとき最高値を示した。熱輻射は41.4mW/cm²で，これは熱シールドを全く付けない場合に相当する。したがって熱シールドを付けなくても，GMBの外側に金や銅などの熱伝導の良い物質をコーティングすることが許されるなら均一な液層を作り得ることを示している。例えば銅の極低温での熱伝導は859kcal/m hr Kであるから，簡単な計算では0.038μmコーティングすれば良いことになる。

まとめとして点冷却法で液体燃料層を作る場合，液層の分布はGMBの1）直径，2）壁厚，3）熱伝導率，4）重水素充塡量，5）温度，6）熱輻射の影響を受けることが分った。これらの内で1）から4）までは実験の目的で決るターゲット固有のパラメーターである。したがって均一な液層を得るためには，温度，熱輻

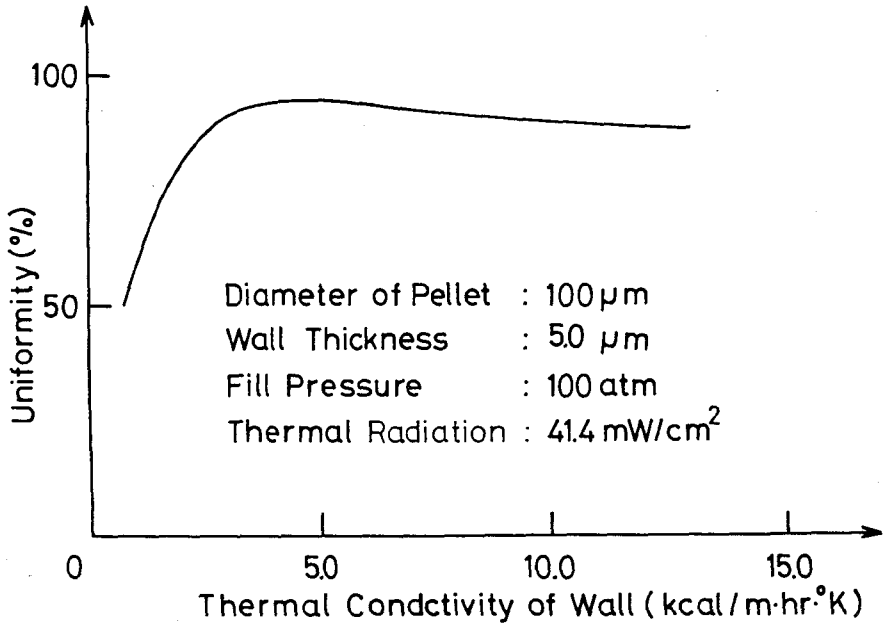


図7－31　容器の熱伝導を変えた場合の均一性の変化

射量のコントロールが必要となる。代表的数字を上げれば，1）100μm，2）1 μm 3）1.24 k cal／m·hr·K，4）100気圧，5）25K，6）12mW／cm²である。ここでの計算では表面張力の影響を入れなかったが、実際には表面張力の影響が大きく均一性99％程度のものも作り得ると思われる。熱輻射に対する条件がレーザー照射，プラズマ計測などによって決る熱シールドの形状によって決る値を満足できない場合，熱シールドをレーザー照射直前に取り除くなどの対策が必要である。

§7－4　螢光のクライオ層への影響

7－4－1　目　的

大出力レーザーでメインパルスがターゲットに到達する前にターゲットを加熱する蛍光はクライオターゲットの燃料状態を変える恐れがある。[8] 著者は蛍光がターゲットにどのような影響を与えるか実験で調べた。

大出力レーザーシステムではフラッシュランプが点燈している間に自然放出された光が増幅され，メインパルスが当る前にターゲットを加熱する。たとえば激光Ⅳ号レーザーシステムではフラッシュランプが点燈してメインパルスが到着するまでの300～400μsec の間，蛍光はターゲット上に集光される。波長は1.06μmであり，全蛍光量は数百μJである。蛍光のターゲット上での強度は 0.3 J／cm²である。（昭和52年3月測定）

GMBと燃料はそれぞれ熱容量が小さく，50 気圧充塡した直径 80μm のターゲットの場合，液体重水素が気化するまでに必要なエネルギーは 0.2 μm である。これは激光Ⅳ号の蛍光のターゲット上に集光されるエネルギーの数％に相当し，影響を実験的に調べてみる必要がある。

7－4－2　実験装置，方法

実験装置を図7－32のように配置した。激光Ⅳ号と同じ量の蛍光を発生するには某大な装置が必要であるので，Nd ガラスレーザーをノーマル発振させ，クライオターゲットに照射した。液層の変化を直接観測する方法もあるが，融解熱の方が気化熱より小さいので，より感度の良い固体→液体の変化を観測し，吸収量を評価した。ターゲットは重力の影響が最も出やすい横付けとし，照明はHeNeレーザー

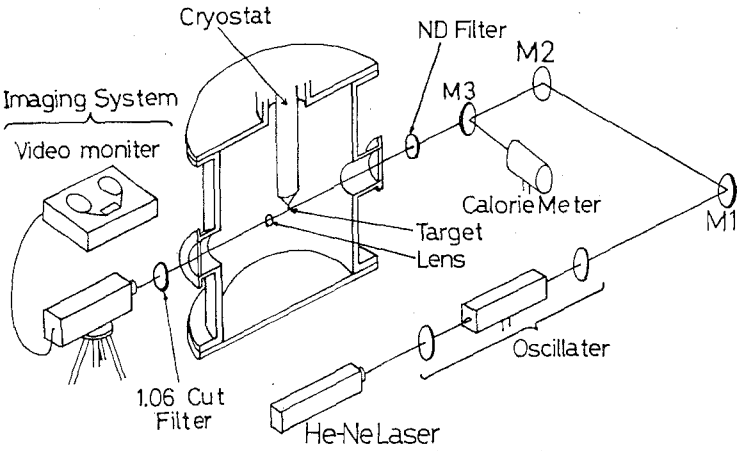


図7－32　蛍光のクライオ燃料への影響を調べる実験装置

を用いシリコンビジョンでターゲットの変化をビデオに集録した。レーザーのパワーはフラッシュランプの充電電圧を変えることにより調整し，ビームスプリッターを通してパワーメーターで測定した。

GMBはコーン状の銅棒，直径38μm及び7μmの銅のファイバーに取り付け実験を行なった。

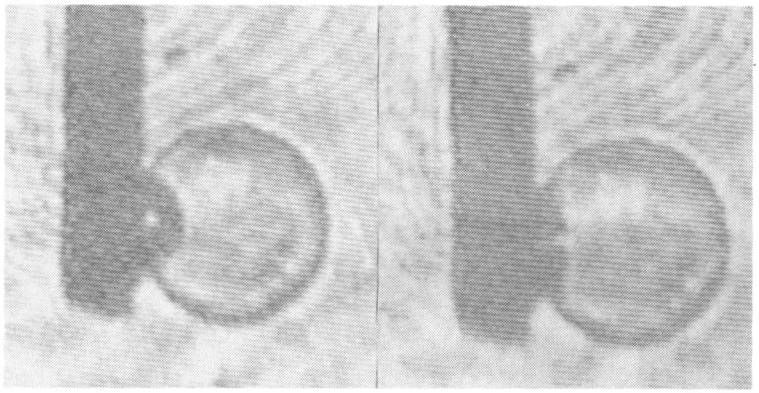
7－4－3　実験結果及び検討

実験結果を表7－Ⅱに示す。又，銅ファイバー38μm$^{\phi}$を使ったときの氷の変化の様子を図7－33に示した。実験結果ではささえの銅の熱容量が大きくなるほど溶けにくくなっている。

表7－Ⅱ　蛍光のクライオ燃料への影響

（J/cm²）

	No evidence of melting	Half of fuel melted	Completely melted
Cu Stalk	～2.1	2.1 ～2.9	2.9 ～
Cu Fiber 38 μm φ	～0.18	0.18 ～0.25	0.25 ～
Cu Fiber 7 μm φ	～0.13	0.13 ～0.20	0.20 ～



a　　b

図７－33　蛍光のクライオ燃料への影響

実験結果から分るようにＧＭＢが直接蛍光を吸収しているのではなく，銅ファイバーが吸収し，温度が上り，熱伝導でＧＭＢ内部の氷を融かしていることが分る。

銅ファイバーがエネルギーを吸収することによる温度上昇は７μmファイバーの場合４３Ｋとなる。これは銅ファイバーの吸収率1.5％比熱0.015Ｊ／ｇＫ（−250℃に於て）レーザーエネルギー0.2Ｊ／㎠ として計算した。そして熱容量の大きいクライオスタットに取り付けられているため６ｍ sec 後にはほぼもとの温度まで低下する。この間，銅ファイバーからＧＭＢに伝えられる熱量は3×10^{-7}Ｊであり，これによりＧＭＢ温度は１０°上昇し，中の氷は溶ける。

Ⅳ号の場合，蛍光が出はじめてメインパルスが来るまでは３００～４００μsec であるから，この間に流入するエネルギーはさらに少なく2×10^{-8}Ｊである。直径１００μm，１００ 気圧充塡のＧＭＢの場合，気化する液体燃料は全体の$1/150$であり，蛍光の影響は無視できる。

７－４－４　ま と め

点冷却法によって作られた液体燃料層に対する蛍光の影響を評価した。クライオ層の蛍光に対する耐久性はサポートの方法により異なり，直径７μm の銅ファイバーに直径１００μm，１００ 気圧重水素を充塡したＧＭＢを取り付け，激光Ⅳ号で照射する場合，蛍光により（0.3Ｊ／㎠ on GMB，昭和５２年３月）$1/150$の燃料が

気化する。この値は事実上無視できるが，ささえを先端 7 μmの頂角 15°程度のコーンにすれば，さらに$^{1}/_{10}$に少なくすることができる。

参　考　文　献

1) R. J. Mason, Nuclear Fusion **15**, 1031, (1975)

2) J.R. Miller, Advance in Cryo. Eng. **23**, 669, (1978)

3) T.M. Henderson, R. B. Jacoks, D.L, Musinsky, R. J. Simms and G.H. Wuttle; Advance in Cryo. Eng. **23**, 690, (1978)

4) Koji Nomura, T. Norimatsu, Y. Izawa and C. Yamanaka; Technol. Repts. of Osaka Univ. **31**, 109, (1981)

5) 甲藤好郎；伝熱概論，養賢堂版 P259.

6) E. H. Ratcliffe; Phys. and Chem. of Glasses, **1**, 103, (1960)

7) Berman R. Foster, E. L., and Rosenberg, H. M. J. Appl. Phys **6**, 181, (1955)

8) D. L. Misinski, R. J. Simms and T.M. Henderson J. Appl. Phys. **48**, 1176, (1977)

第８章　結　　論

レーザー核融合研究において非常に重要なターゲットの開発を行なった。爆発圧縮型ターゲット，噴出圧縮型ターゲットを開発し，実験に供給するとともに，ブレークイーブン用ターゲットの開発に必要な基礎を築いた。以下に各章で得た知識をまとめる。

第２章ではターゲット開発の目標とするために，高密度圧縮に必要な項目を示した。その結果

１）高密度圧縮には球対称な圧縮と断熱圧縮が必要であり，流体力学的不安定性，プリヒートの抑制が必要である。

２）ペレットターゲットは高い精度で作られ，密度勾配のあるコーティング，高速電子遮断層，ダブルシェルターゲットなどを開発する必要がある。具体的に激光Ⅻ号レーザー用の噴出圧縮ターゲットでは直径２００μm，アブレーター４０μm^t，均一性（$\triangle t/t$）３％以下，表面仕上げ0.1μm以下，DT１００気圧充填の仕様が必要である。

第３章では燃料容器であるガラスマイクロバルーン（GMB）の選別，検査技術についてまとめた。

１）直径選別では従来からある湿式超音波ふるいを利用して試みた。小さいGMBを分離する場合，GMB間に働く力，目詰り，開口径のばらつきなどで分離精度が下がる。直径で分離前後の比を求めると，分離比が９０％～１０％変化するのに対し直径において８μm の幅を許した。目詰り対策を中心として長時間自動運転を行う必要がある。

２）GMBの比重選別を高圧のSF_6ガスを用いて行った。一度に多量のGMBを分離することができるが，SF_6ガスの対流，GMB同志の付着などで分離精度は高くなかった。密度で分離前後の比をとった場合，分離比が９０％～１０％変化するのに密度において0.4 g／cm³の幅が必要であった。

３）検査技術ではインターファコ干渉顕微鏡を利用した簡単な壁厚の均一性評価法を開発した。この方法で±２％（$\triangle t/t$）まで測定可能である。

４）電子顕微鏡，X線ラジオグラフ，干渉顕微鏡により，壁厚の精度±２％，表面

仕上げ0.02μmまで検査可能であった。

第4章ではプラズマ重合と気相熱重合によるパリレンコーティングをアブレーターコーティングに適用し，その特性を調べるとともに，プラズマ重合を応用し，TaCHOプッシャー，密度整合コーティングを行った。

1）プラズマ重合ではポリエチレン，テフロン，パラキシレンのコーティングを行い，厚さの均一性±2％を得た。表面仕上げは，コーティング層が10μm 程度では0.2μmで，工程のクリーンネスの管理，気相重合の抑制が必要であった。

2）パリレンコーティング法で厚さ20μm，均一性±2％，表面仕上げ＜500Å を得た。コーティング層の厚さの制御，コーティング層の安定性の点でもプラズマ重合よりすぐれていた。

3）プラズマ重合と蒸着法を組み合わせ，高速電子遮蔽層であるTaCHOプッシャーのコーティングを行い，0.2～20wt％の高Z含有率を得た。

4）プラズマ重合による2つのモノマーを用いた共重合で，密度を0.8～1.9g/cc まで連続的に変えるコーティング法を開発した。

5）振動型レビテーション法を開発し，均一性の高いアブレーターコーティングが可能になった。

第5章ではターゲットの加工技術についてまとめた。

1）外側殻パリレン，内側殻ガラスマイクロバルーンの，バキュームインシュレーション型ダブルシェルターゲットの製作法を開発した。外側球の直径300μm以下，壁厚4μm以上，中心のずれ5％以下のものが製作可能である。

2）プラスチックフォーム型ダブルシェルターゲットの開発を行った。フォーム密度50mg/cc 以上のものを，銅製マイクロ鋳型で量産することができた。外側殻の組立はさらに研究する必要がある。

第6章では三重水素関係の技術についてまとめた。

1）三重水素充塡では水素化ウランの熱分解反応を利用して昇圧し，金メッキSUS炉を用いて充塡する。使用量，漏洩の少ない充塡装置を開発した。また安全なDTペレットハンドリングシステムを開発した。

2）SiLi半導体検出器を用いた三重水素充塡量非破壊検査法を開発した。三重水素充塡量とX線計数率の変換定数として56.8±6.7 count/sec ng T_2 を得た。

この方法の特徴はＳＮが良いことで直径１００μmのとき充塡気圧に換算して0.2 kg／cm²まで検出可能である。

第７章では点冷却法によるクライオターゲット製作技術についてまとめた。

１）実験面では各種条件下での液体燃料層の分布を測定し、直径６２μmのGMBに重水素を７０気圧充塡することにより、厚さ0.6 μm、均一性（$\triangle t/t$）±１５％を得た。また蛍光のクライオ層への影響は無視できることを示した。

２）理論面では気胞モデル，ニューサルトの方法を利用して各種条件下での液層分布を計算できるようになった。

謝　　辞

本研究の遂行に際し，終始懇篤なる御指導，御鞭撻を賜わった山中千代衛教授，山中龍彦教授，井沢靖和教授に深厚なる謝意を表します。大学院在学中において，御教示，御指導を戴いた故川辺和夫教授，西村正太郎教授，犬石喜雄教授，木下仁志教授，藤井克彦教授，横山昌弘教授，鈴木眸教授，中井貞雄教授に謝意を表します。

また終始変わらぬ御指導，激励を戴いた加藤義章助教授，西原功修助教授，三間圀興助教授，佐々木孝友助教授，山中正宣助教授，望月孝晏助教授，中塚正大助教授，故的場幹史助教授，吉田国雄講師，今崎一夫講師，矢部孝講師，北川米喜講師，井門俊治助手，畦地宏助手，藤田尚徳助手に謝意を表わします。

また燃料容器の研究や，ペレットハンドリング，コーティングの研究に御援助，アドバイスをして戴いた大阪工業技術試験場の守屋喜郎氏，野上正行氏らのグループ，近畿大学の久保宇市教授，椿原啓講師，東京大学の増田閃一教授，岐阜大学の阪上幸夫助教授，名城大学の森田慎三助教授に厚く感謝いたします。

終りに研究生活上の苦楽を共にし，手足となって研究に協力してくれた吉田実君，古沢文子さん，矢田慶子さん，野村幸治君，辻本明君に感謝の意を表します。

業　績　目　録

§1　主要発表論文

1) Selection of Glass Microballoons and Measurement of Pellet Properties for Laser Fusion Experiment
T. Norimatsu, K. Hashizume, A. Tsujimoto, T. Sasaki, T. Yamanaka and C. Yamanaka
Jap. J. Appl. Phys., **17**, 1657, (1978)

2) レーザー核融合ターゲット用TaCHOプッシャーコーティング
乗松孝好，辻本明，山中千代衛
レーザー研究，**8**，69，(1980)

3) Fabrication of Double Shell Target for Lasor Fusion
T. Norimatsu, A. Furusawa, M. Yoshida, Y. Izawa and C. Yamanaka
J. Vac. Sci. Technol., Vol. **18**, 1288, (1981)

4) レーザー核融合用ダブルシェルターゲットの開発
乗松孝好，古沢文子，山中龍彦，山中千代衛
レーザー研究，**9**，65，(1981)

5) Density Matched Coating for Laser Fusion Targets
A. Tsujimoto, T. Norimatsu, Y. Izawa and C. Yamanaka
Jap. J. Appl. Phys., **21**, 343, (1982)

6) レーザー核融合ターゲット用三重水素充塡炉の開発
執　筆　中
日本原子力学会　投稿予定

§2　主要国際学会発表

1) Application of Plasma Polymerization to Pellet coating for laser fusion
T. Norimatsu, H. Azechi, M. Yoshida, R. Ohashi and

C. Yamanaka

ICF Topical Meeting, San Diego, California, WC-1, (1980)

2) Fabrication of Double Shell Target for Laser Fusion

T. Norimatsu, A. Furusawa, M. Yoshida, Y. Izawa and C. Yamanaka

27th National Symposium of American Vacuum Society, Detroit, ICFTh-10, (1980)

§3 発表論文

1) Target Fabrication for Laser Fusion

T. Norimatsu, K. Hashizume, T. Sasaki, T. Yamanaka and C. Yamanaka

Technol. Rep. Osaka Univ. **27**, 185, (1978)

2) Inertial Confinement Fusion Research in Osaka

H. Azechi, H. Fujita, K. Imasaki, Y. Kato, Y. Kawamura, M. Matoba, K. Mima, S. Miyamoto, Y. Mizumoto, T. Mochizuki, S. Nakai, K. Nishihara, H. Nishimura, T. Norimatsu, T. Sasaki H. Takabe, K. Yoshida, T. Yamanaka and C. Yamanaka

7th International Conf. on Plasma Physics and controlled Fution Resarch, IAEA-CN-37-M4, Innsbruck, (1978)

3) Laser Fusion Experiment in Osaka

H. Azech, H. Fujita, K. Imasaki, K. Kato, Y. Kawamura, M. Matoba K. Mima, S. Miyamoto, Y. Mizumoto, T. Mochizuki, S. Nakai, K. Nishihara, H. Nishimura, T. Norimatsu, T. Sasaki, M. Matoba, K. Yoshida, T. Yamanaka and C. Yamanaka

IEEE Topical Meeting on Inertial Confinement Fusion, San Diego, California, (1978)

4) Anomalous Interaction of High Intensity Laser Beams with Plasma

C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yamanaka, K. Mima, T. Sasaki, M. Matoba, H. Azechi, T. Norimatsu, H. Nishimura, N. Miyanaga, S. Ido, K. Aono, Y. Yanase, J. Mizui, and N. Yamaguchi
Technol. Rep. Osaka Univ., **29**, 127, (1979)

5) Laser Fusion Reactor Concept of High Pellet Gain Using Magnetically Guided Li Flow
S. Ido, K. Imasaki, Y. Izawa, Y. Kato, Y. Kitagawa, M. Matoba, K. Mima, T. Mochizuki, S. Nakai, K. Nishihara, H. Nishimura, T. Norimatsu, T. Sasaki, T. Yabe, T. Yamanaka, and C. Yamanaka
8th ICPP and Con. Nuc. Fus. Resarch, IAEA-CN-38/E-3, Brussel, (1980)

6) Laser Fusion Resarch at ILE
H. Azechi, H. Fujita, S. Ido, Y. Izawa, Y. Kato, Y. Kawamura, M. Matoba, K. Mima, T. Mochizuki, M. Monma, S. Nakai K. Nishihara, H. Nishimura, T. Norimatsu, T. Sasaki, T. Yabe, K. Yoshida, T. Yamanaka and C. Yamanaka
8th ICPP and Nuc. Fus. Resarch, IAEA-CN-38/B-3

7) Cryogenic Target for Laser Fusion Resarch
K. Nomura, T. Norimatsu, Y. Izawa and C. Yamanaka
Technol. Rep. Osaka Univ., **31**, 109, (1981)

8) Laser Fusion Reactor Concept with Magnetically Guided L Flow (SENRI-I)
S. Ido, K. Imasaki, Y. Izawa, Y. Kato, Y. Kitagawa, M. Matoba, K. Mima, S. Nakai, K. Nishihara, H. Nishimura, T. Norimatsu, T. Yabe and C. Yamanaka
Technol. Rep. Osaka Univ. **31**, 65, (1981)

9) Plasma Polymerized Thin Coating on Pellet Target
S. Morita, S. Ikeda, M. Ieda, and T. Norimatsu

5th International Symposium on Plasma Chemistry, Edinburgh, Schotland (1981)

10) レーザー核融合用ペレットターゲットにおける重合膜コーティング
森田慎三, 池田晋, 石橋新太郎, 家田正之, 乗松孝好, 山中千代衛
高分子論文集, **38**, 641, (1981)

11) Conceptual Design of Laser Fusion Reactor "SENRI-I" Model Caluculations and Design of Tritium Recovery System for Liquid Lithium Cycle
T. Norimatsu, K. Tsukumo, S. Ido, S. Nakai, T. Yamanaka and C. Yamanaka
9th Symposium on Engineering Problem of Fusion Resarch, Chicago, Illinoi, 4W-08, (1981)

12) レーザー核融合概念炉「千里1号」のトリチウムサイクルに対するモデル解析
乗松孝好, 井門俊治, 中井貞雄, 山中千代衛
原子力学会誌, **24**, 883, (1982)

§4 学 会 発 表

1) 1kJ 4ビームガラスレーザー (激光4号)
電気学会関西大会, 関西大学, (1975, 3)

2) 1kJ 4ビームガラスレーザー激光Ⅳ号(3), 集光系及びターゲット
電気学会全国大会, 北海道大学, (1976, 7)

3) ガラスレーザーによる核融合の研究Ⅳ (ガラスペレット)
物理学会全国大会, 山口大学, (1977, 3)

4) ガラスレーザー激光による核融合の研究Ⅲ, ターゲットファブリケーション
物理学会秋の分科会, 東京理科大, (1977, 10)

5) ガラスレーザー激光による核融合Ⅱ (ターゲット)
物理学会全国大会, 東北大学, (1978, 3)

6) レーザー核融合用重水素シェルターゲット

物理学会秋の分科会，静岡大学，（1978，10）

7）ガラスレーザー激光による核融合研究Ⅱ（ペレットターゲット）

物理学会全国大会，大阪大学，（1979，4）

8）ガラスレーザー激光による爆縮核融合研究Ⅱ（ターゲット）

物理学会秋の分科会，愛媛大学，（1979，10）

9）ガラスレーザー激光によるプラズマ実験Ⅰ，高利得ターゲットの開発Ⅰ

物理学会全国大会，早稲田大学，（1980，3）

10）ガラスレーザー激光による高密度圧縮の研究Ⅴ，二重構造ターゲットの開発

物理学会秋の分科会，福井大学，（1980，10）

11）慣性核融合用ペレットターゲットの開発

物理学会全国大会，広島大学，（1981，3）

12）慣性核融合用ターゲットの開発（フォームターゲット）

物理学会秋の分科会，新潟大学，（1981，10）

13）慣性核融合用ターゲットの開発（キャノンボールターゲット）

物理学会全国大会，横浜大学，（1982，3）

14）レーザー核融合用ターゲットの開発Ⅴ(高Zコートと低密度プラスチックフォーム)

応用物理学会　　九州大学，（1982，10）