

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	<a href="https://hdl.handle.net/11094/538">https://hdl.handle.net/11094/538</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

# 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プッシャーコーティングなどに成功した。加工技術関係ではダブルシェルタ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填炉を開発するとともに，充填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プッシャーコーティング，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填炉の開発，三重水素充填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	バキュームインシュレーション型	
	ダブルシュ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	三重水素充填	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	三重水素充填量の非破壊検査	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	気泡モデルによる計算	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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>と爆縮の概念<sup>3)</sup>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。100 kJ 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100 kJ 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<sub>2</sub> レーザーで出力10 kJ が達成され、100 kJ 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ミュ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. A 6 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填し、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撃波を作り、加熱する。後者の場合、比較の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。<sup>1) 2)</sup>

噴出型圧縮の場合、燃料は比較の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。<sup>3)</sup> 燃料の冷たい残りの部分は、核融合反応で生成した $\alpha$ 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<sup>4)</sup>

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 $\xi$  ( $\equiv R/\Delta R$ )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。

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

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

の運動方程式によって加速される。今、 $C_s^2 = dp/d\rho$  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、

$$\frac{d^2 R}{dt^2} \simeq \frac{R}{t_s^2} \quad (2-2)$$

であり、また

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

$$= \frac{C_s^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial R} \quad (2-4)$$

$$\simeq C_s^2 / \Delta R \quad (2-5)$$

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

$$t_s = \frac{\sqrt{\Delta R - R}}{C_s} \quad (2-6)$$

であるから,

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

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 $\sqrt{R/\Delta R}$ 程度であることが分かる。爆縮に要する仕事は,

$$W_m = 4 \pi R^2 P U \quad (2-8)$$

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、 $W_L \propto P C_s R^2$ 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 $\xi (R/\Delta R)$ を大きくする程効率が良くなる。しかしながら、 $\xi$ が大きくなると流体力学の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 $\lambda$ 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 $2\pi\Delta R/\lambda \gg 1$ 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、 $2\pi\Delta R/\lambda \ll 1$ 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 $2\pi\Delta R \sim \lambda$ 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 $\Delta R$ を越してはならない。圧縮率 $\eta_c$ と振幅 $\varepsilon$ との



関係は、

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

で与えられ、<sup>4)</sup> この関係を  $\eta_c$  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で直径500 $\mu\text{m}$ 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。

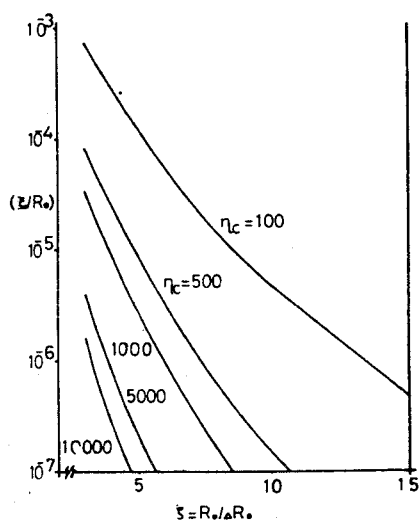


図2-1 流体力学的不安定性の面から見たターゲットの表面精度、各実線より下の領域でなければならない。

### 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）してしまふ。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  $\lambda_M$  は,

$$\lambda_M \approx 0.22 \frac{(T_h / 100 \text{ keV})^2}{\langle Z^2 \rangle (n / 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3})} \text{ (cm)} \quad (2-10)$$

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  $\lambda_E$  は,

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

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

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

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

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

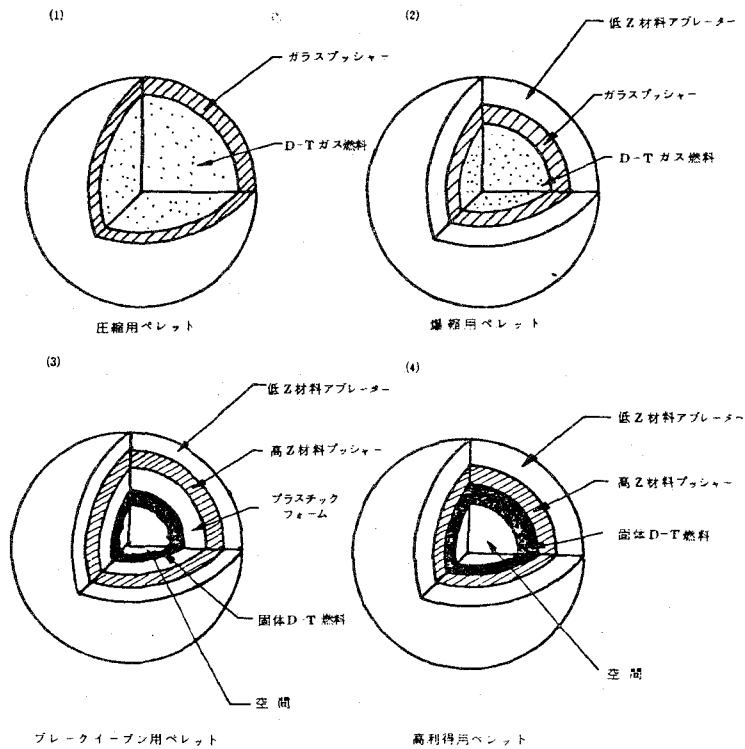
前節まででペレットターゲットに要求される一般的特性を述べた。実際に作られるターゲットはレーザーのエネルギーレベル, パルス波形, 実験の目的などによって構造, 寸法などが異なる。ここではその2, 3に例を示す。

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	ブレイクイーン用 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)	$10^{-7} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 1$	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	$> 1000 \text{ \AA}$	$\sim 1000 \text{ \AA}$	$100 \sim 1000 \text{ \AA}$	$100 \sim 1000 \text{ \AA}$
レーザーエネルギー	$\geq 10 \text{ J}$	$\geq 10 \text{ KJ}$	$\sim 100 \text{ KJ}$	$\sim 1 \text{ MJ}$
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、

$$\frac{2}{3} \pi \left( \frac{2/3 \rho_p \Delta R_p}{\epsilon_a} \frac{R^4}{P_L \zeta^3 \text{Las}} \right) \sim 1$$

で与えられる。ここで  $R$ ,  $\rho_p$ ,  $\Delta R$  はペレットの半径、プッシャーの質量密度と厚さであり、 $P_L$ ,  $\zeta_{\text{Las}}$ ,  $\epsilon_a$  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、

$$P_L \simeq 40 \text{ TW}, \quad \zeta_{\text{Las}} \simeq 100 \text{ psec}, \quad \epsilon_a \simeq 0.3$$

とすると、

$$\Delta R \sim 2 \mu\text{m} \quad R \simeq 200 \mu\text{m}$$

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100～500 $\mu\text{m}$ 、壁厚5～100 $\mu\text{m}$ が必要である。

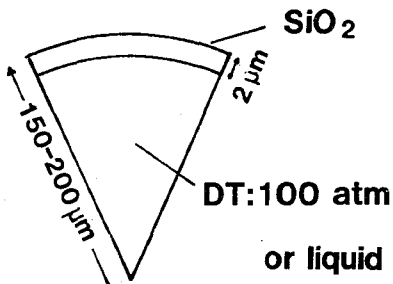
## §2-5 ま と め

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。

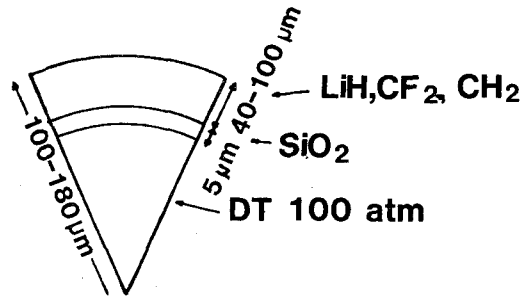
具体的に激光Ⅻ号クラスレーザーでは、爆発型圧縮ペレットとして直径200 $\mu\text{m}$

図 2 - 3 激光Ⅻ号用ターゲット

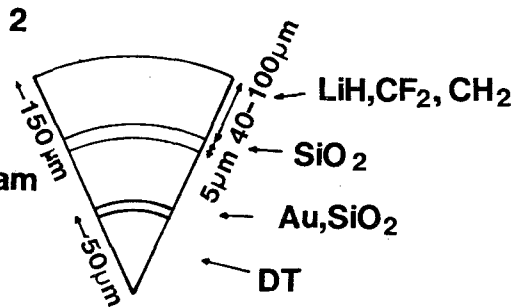
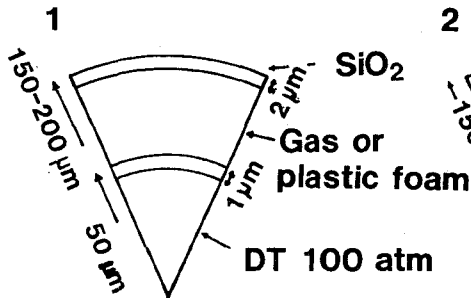
**Exploding pusher**



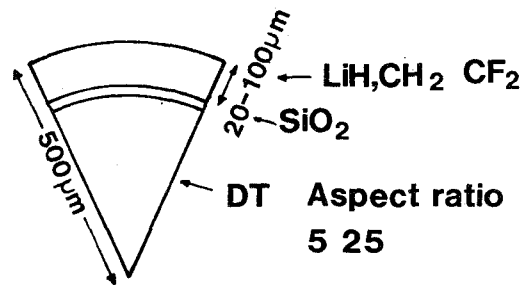
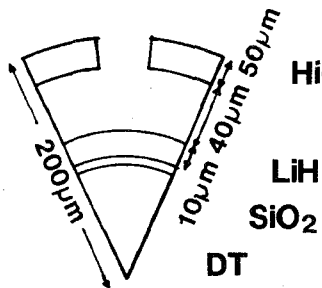
**Ablative compression**



**Double shell**



**Double shell with hole Stability study**



壁厚  $2\ \mu\text{m}$ , DT100気圧必要である。噴出型圧縮では直径  $200\ \mu\text{m}$ , アブレータ  
-  $40\ \mu\text{m}^{\dagger}$ , 表面仕上げに  $0.1\ \mu\text{m}$ , 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發現状報告書」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4 kJ級のガラスレーザーに用いられるターゲットは直径50～150 μm, 壁厚0.5～1 μm, 均一性 ( $\Delta R/R$ ) ± 3%程度が必要である。又, 出力10 kJ級のレーザーでは直径100～300 μm, 壁厚1～4 μm, 均一性± 1～3%, 表面仕上0.1 μm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<sup>1)</sup>プラスチック中空球,<sup>2)</sup>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, 真球形, 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填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40～170 μm, 壁厚0.6～1 μmである。B40Aシリーズでは直径30～120 μm, 壁厚0.7～1.2 μm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40～500 μm, 壁厚0.6～4 μm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

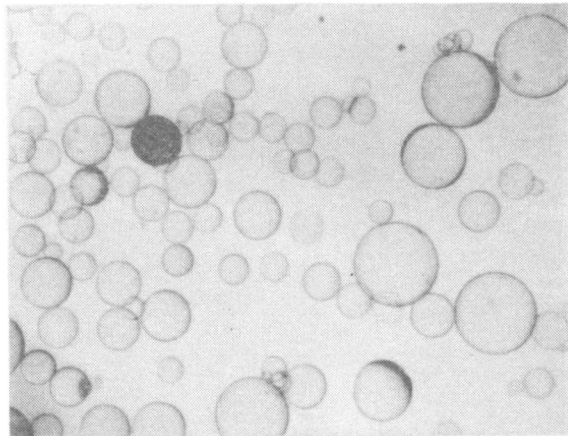


図3-1 Emerson & Comming社のガラスマイクロバルーン タイプSI(未選別)

表 3 - I GMBの種類と特徴

	直 径 壁 厚 ( $\mu\text{m}$ )	Fuel Retainment $D_2, 1/e$	組 成 (Wt%)
SI	50 ~ 150 0.8 ~ 1.2	3 日	SiO <sub>2</sub> 92% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5% Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5% ..... ..
IG101	50 ~ 100 0.8 ~ 1.2	6 日	SiO <sub>2</sub> 78% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3% Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 19%
3MB35D or B40A	50 ~ 110 0.8 ~ 1.2	7 日	SiO <sub>2</sub> 80% Na <sub>2</sub> O 11% CuO 6.5% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5%
大工試 169	50 ~ 500 1.2 ~ 5.0	>6ヶ月 (測定中)	SiO <sub>2</sub> 70% Na <sub>2</sub> O 20% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5% CaO 5%
大工試 171	50 ~ 100 1.2 ~ 1.4	>6ヶ月 (測定中)	SiO <sub>2</sub> 70% Na <sub>2</sub> O 20% CaO 10%
大工試 28	50 ~ 400 0.8 ~ 8	3 ~ 7日	SiO <sub>2</sub> 70% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10% Na <sub>2</sub> O 20%
大工試 177	測定中	測定中	SiO <sub>2</sub> 60% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10% Na <sub>2</sub> O 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 $10^4 \sim 10^5$ 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、GMB 1 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。燃料を充填した後、充填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。

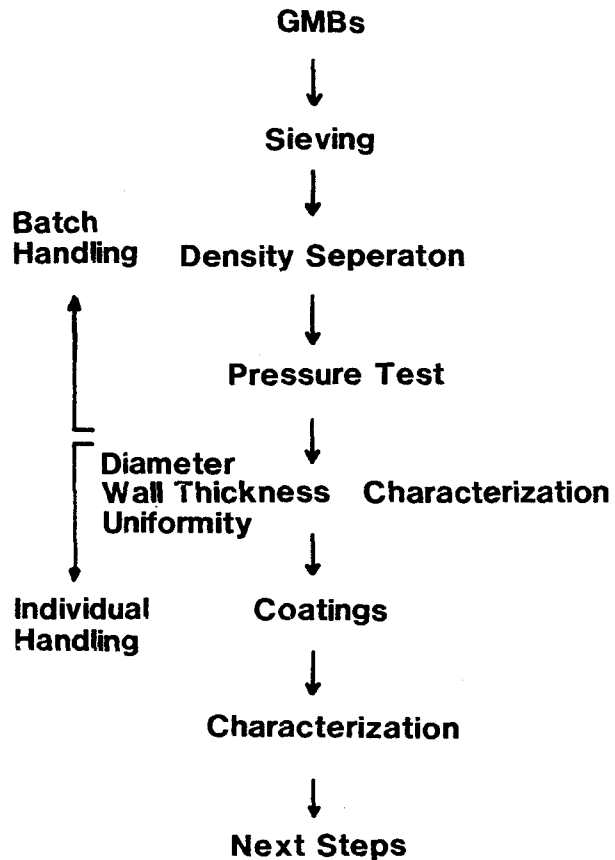


図3-2 ターゲットの製作過程と選別，検査

### § 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100  $\mu\text{m}$ 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1  $\mu\text{m}$ 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 $100\mu\text{m}$ 、壁厚 $1\mu\text{m}$ では $7.8 \times 10^{-5}\text{ dyn}$ であるのに対してGMB間に働く van der Waals 力は<sup>3)</sup>

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

$A$  : 定数,  $10^{-12} \sim 10^{-18}\text{ erg}$

$r_0$  : GMB半径

$h$  : GMB表面間距離

であるから、 $h$ として $0.01\mu\text{m}$ を採用すると $10^{-3}\text{ dyn}$ 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 $10^{-4}\text{ dyn}$ で上記の van der Waals 力に近づく。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

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

となる。 $3\text{ cm/sec}$ 程度の流速があると、 $10^{-3}\text{ dyn}$ 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 $53\mu\text{m}$ 、 $63\mu\text{m}$ 、 $74\mu\text{m}$ 、 $88\mu\text{m}$ のものを組み合わせて利用した。ふるい全体を出力 $125\text{W}$ 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3MB 40AのGMBを公称 $74\mu\text{m}$ と $88\mu\text{m}$ 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 $100\text{ cc/min}$ 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、 $74\mu\text{m}$ 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

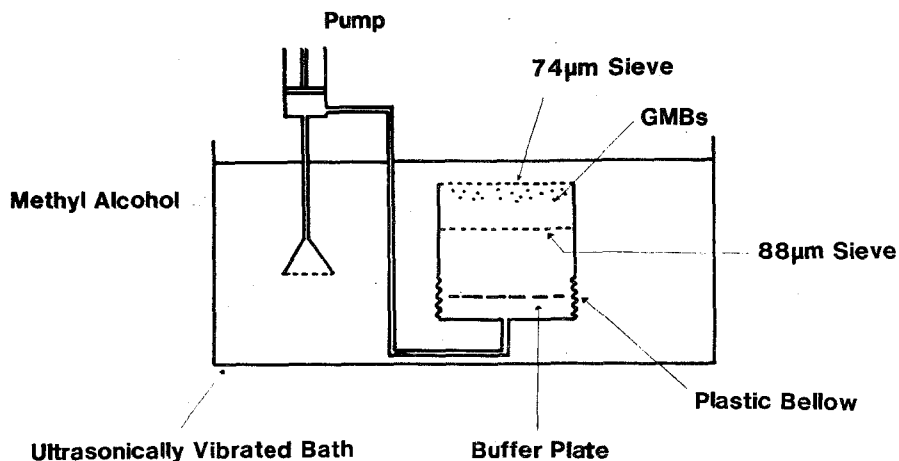


図 3 - 3 湿式超音波分粒装置

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  $74 \mu\text{m}^\phi$  以下のGMBが取り除かれる。

比較のために  $74 \mu\text{m}$ メッシュの上にGMBを置き流水で60分間洗い、 $74 \mu\text{m}$ 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  $74 \mu\text{m}$  のふるいの開口部の実測値を表 3 - II に示した。実測値は  $80 \mu\text{m}$  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  $80 \mu\text{m}$  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  $74 \mu\text{m}$ 標準ふるいの開口径実測値分布

$\mu$	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 50  $\mu\text{m}$  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、75  $\mu\text{m}$  では25%ものGMBが残った。

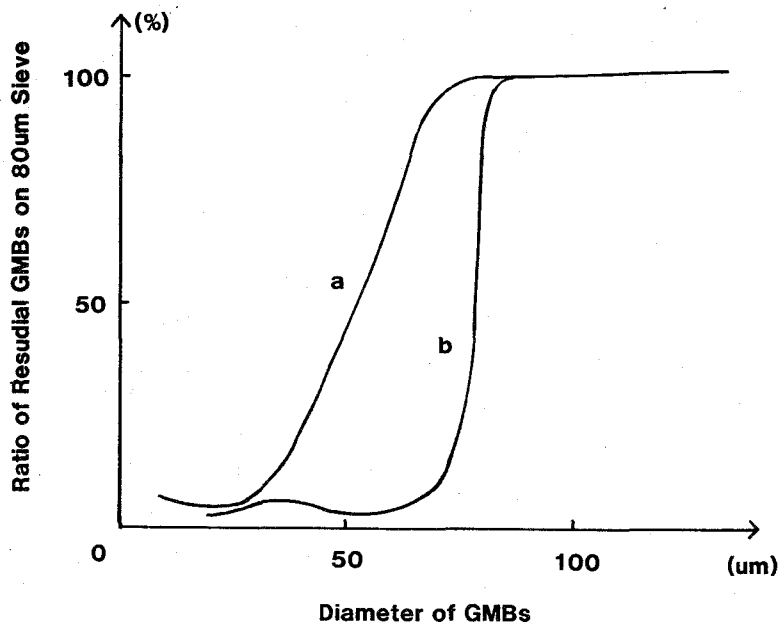


図3-4 ふるいによるGMBの選別結果

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10  $\mu\text{m}$  ずつふるい分けできなければ意味がない。実験結果では70~80  $\mu\text{m}$  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  $0.2\text{ g/cc}$  程度であるから、液体を用いた比重選別はできなかつた。著者等は密度を  $0.2\text{ g/cc}$  程度に高めることのできる  $\text{SF}_6$  ガスを用いて密度選別を行なつたので、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  $3\text{ cm}$ 、高さ  $10\text{ cm}$  の黄銅円筒をもとに作つた。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  $\text{SF}_6$  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  $200\text{ cm}^3$  のリザーバートankを取り付け、 $\text{SF}_6$  ガスの昇圧に利用した。ガスとして  $\text{SF}_6$  を用いたのは、臨界温度が低く ( $63^\circ\text{C}$ ) 高い密度を作り得ること、毒性が低いためである。

$0.5\text{ cc}$  のGMBを資料皿の上に置き真空排気後容器温度を  $63^\circ\text{C}$  以上に高めた。 $\text{SF}_6$  ガスを氷で冷却したリザーバートankに導入した。 $\text{SF}_6$  ガスはここで液体として溜つ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

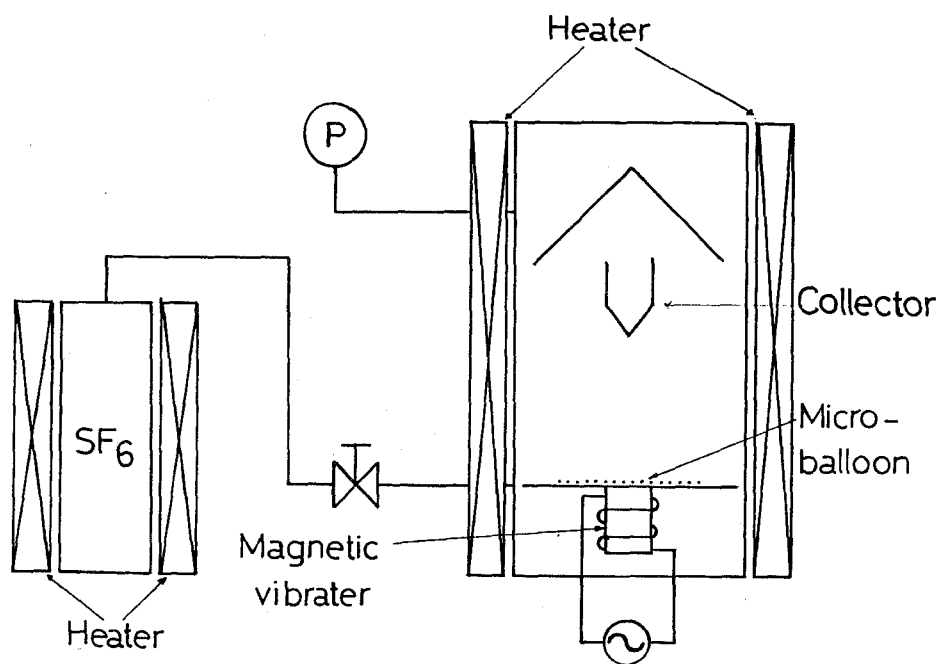


図3-5 密度選別装置

レーターに交流電流を流し、GMBを振動させながらSF<sub>6</sub>ガスを導入し圧力を32 kg/cm<sup>2</sup>まで高めた。このときのSF<sub>6</sub>ガスの密度は0.2 g/cm<sup>3</sup>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250 mgのGMBから平均密度0.19 g/cm<sup>3</sup>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3MB40Aで、より広い密度の広がりがあ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。

振動皿の効果を確認す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

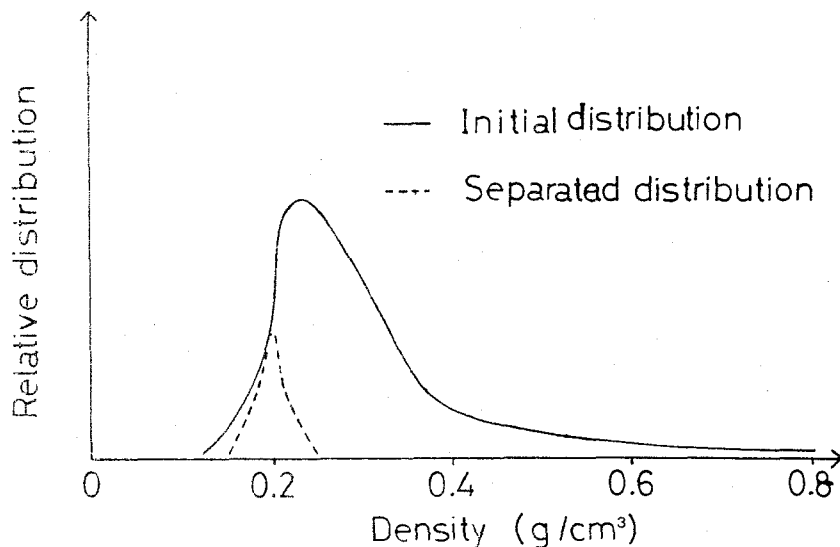


図3-6 密度選別前後のGMBの密度分布

の精度は密度一個数のグラフにおいて、SF<sub>6</sub>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  $\sigma^+$  は

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

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

と定義する。 $\rho$ は気体の密度で、 $\rho_i$ は個々のGMBの密度である。分散 $\sigma^+$ 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 $\alpha$ 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、 $v$ 、 $\alpha$ はそれぞれ

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

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

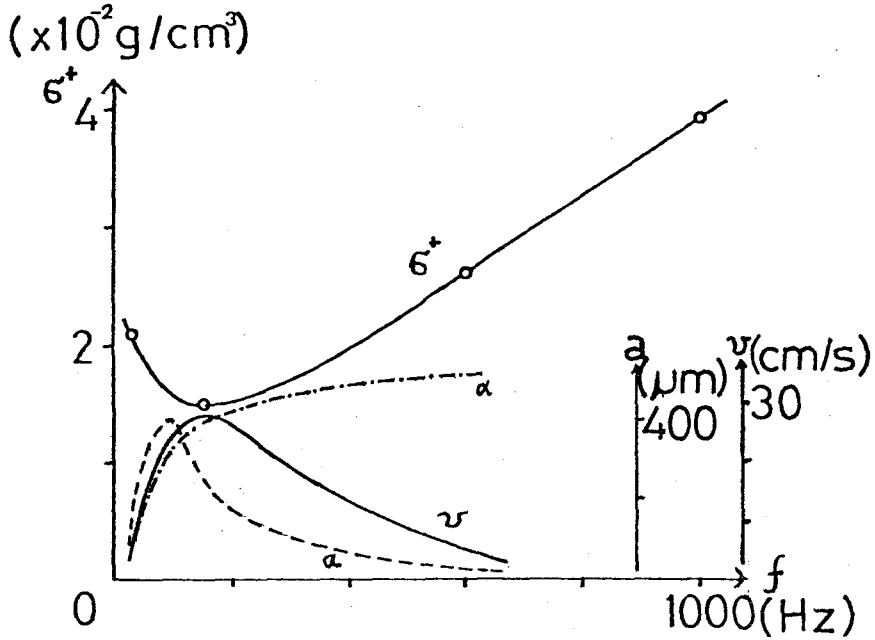
の関係で求めたものである。図を見ると分散 $\sigma^+$ と速度 $v$ の間にもっとも強い相関関係が見られる。このことから、精度良く分離するためには付着によるポテンシャルをぬけ出すに足るだけの運動エネルギーをGMBに与えてやる必要があることが推定できる。

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

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

で、 $h$ にGMBの表面荒さ  $0.01 \mu\text{m}$  を、 $A$ に  $10^{-12} \text{ erg}$  を用いると  $\varphi$ は  $4.2 \times 10^{-10} \text{ erg}$  となる。一方  $180 \text{ Hz}$  付近での振動皿速度  $28 \text{ cm/sec}$  を直径  $100 \mu\text{m}$ 、壁厚  $1 \mu\text{m}$  のGMBが直接受け取ったとするなら運動エネルギーは  $3 \times 10^{-5} \text{ erg}$  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SF<sub>6</sub>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  $0.04 \text{ g/cm}^3$  程度となる。これを直



a, Amplitude of the vibrator  
 v, velocity which was calculated from a  
 a, Acceleration  
 f, Frequency of the vibrator

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

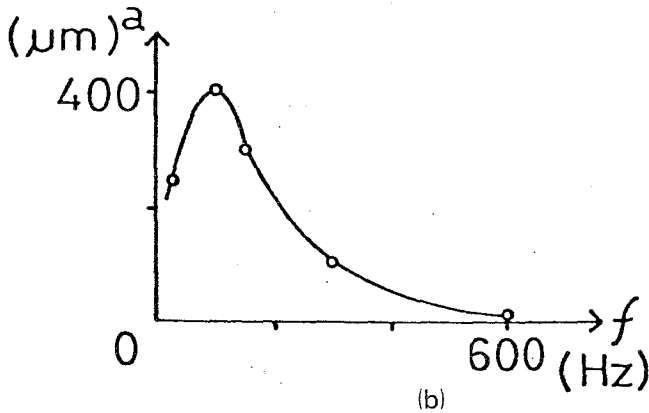


図3-7 比重選別後のGMBの密度分散と振動皿の動き

径  $100 \mu\text{m}$  の GMB にあてはめると厚さにして  $1 \pm 0.3 \mu\text{m}$  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 cmのステンレス製基板、厚さ2 mmのスペーサー兼バックアップリング、厚さ10 mmの亚克力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 mm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。

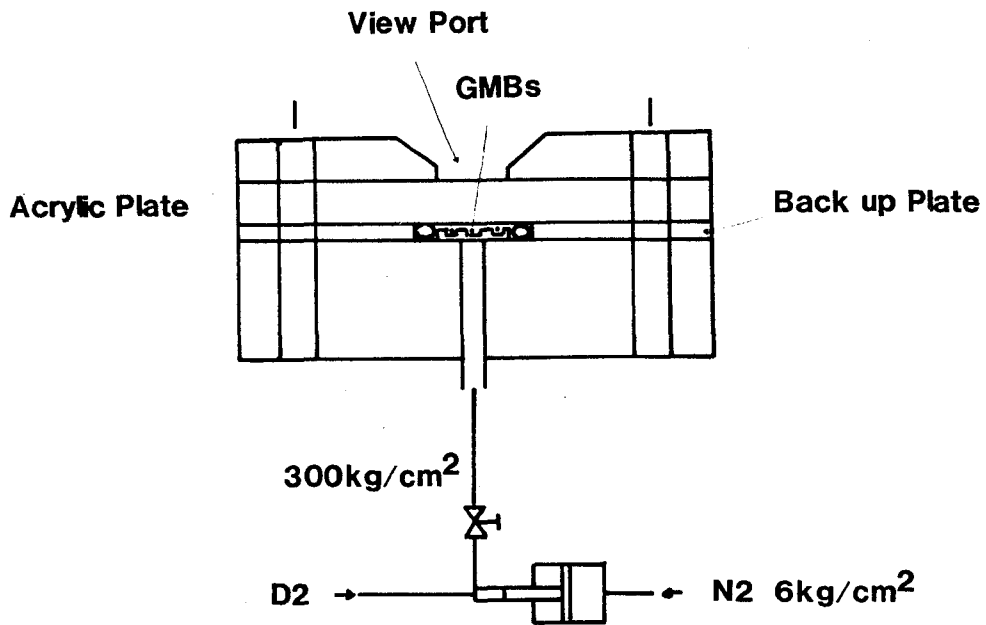


図3-8 GMB耐圧テスト装置

実験方法として直径 10 mm 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。

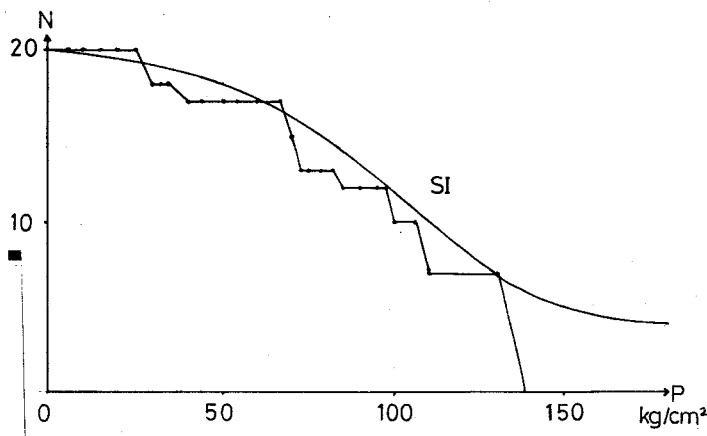


図 3 - 9 GMB SI の耐圧性能，実線は重量減少法で測定。折線は個々の GMB について調べた。

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（ $\Delta t/t$ ），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

図 3 - 9 は重量法で行なったものと，GMB を約 0.8 mm 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

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 $\nu$ とした場合、半径 $r$ 、壁厚 $t$ のGMBが破壊する圧力 $P_C$ は

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

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。燃料充填時に80%のGMBが破壊されずに残るため

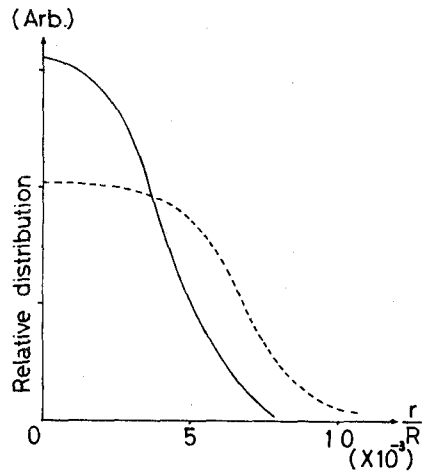


図3-10 加圧による不均一GMBの除去、加圧後(実線)不均一なGMBが少なくなっている。

表3-III GMBの座屈圧力

No.	$\phi$ ( $\mu\text{m}$ )	$t$ ( $\mu\text{m}$ )	$t-\Delta t$	$P_C$ $\text{kg}/\text{mm}^2$	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	均一性よい
7	237	1.87	1.87	212.9	124.0	0.58	
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	

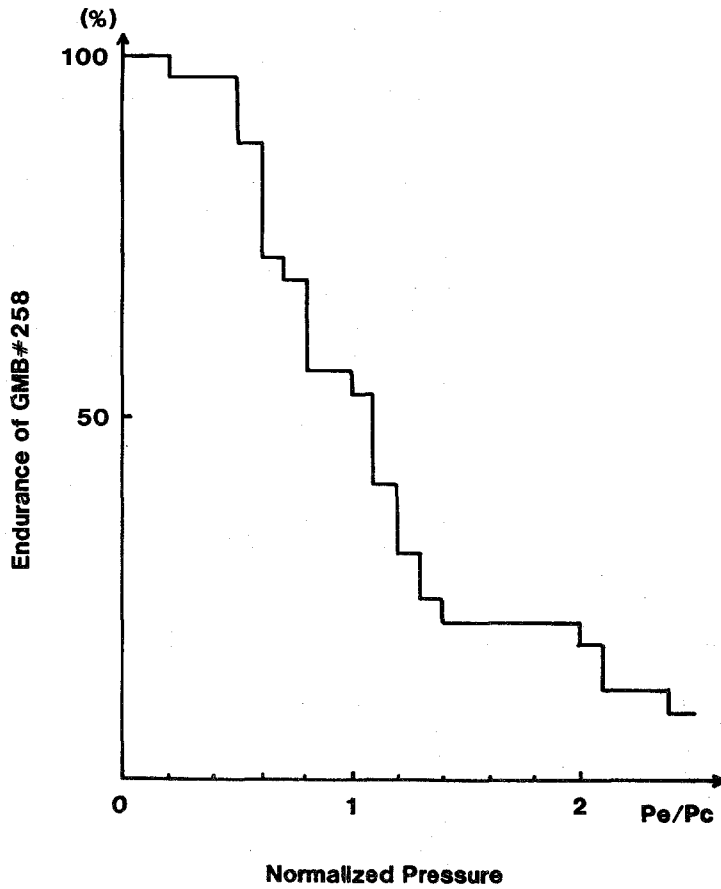


図 3-11 大工試#258GMBの耐圧特性。横軸は正規化した圧力

の直径，壁厚，充填時圧力の関係を図 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%，表面仕上げは200Å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づけられる。

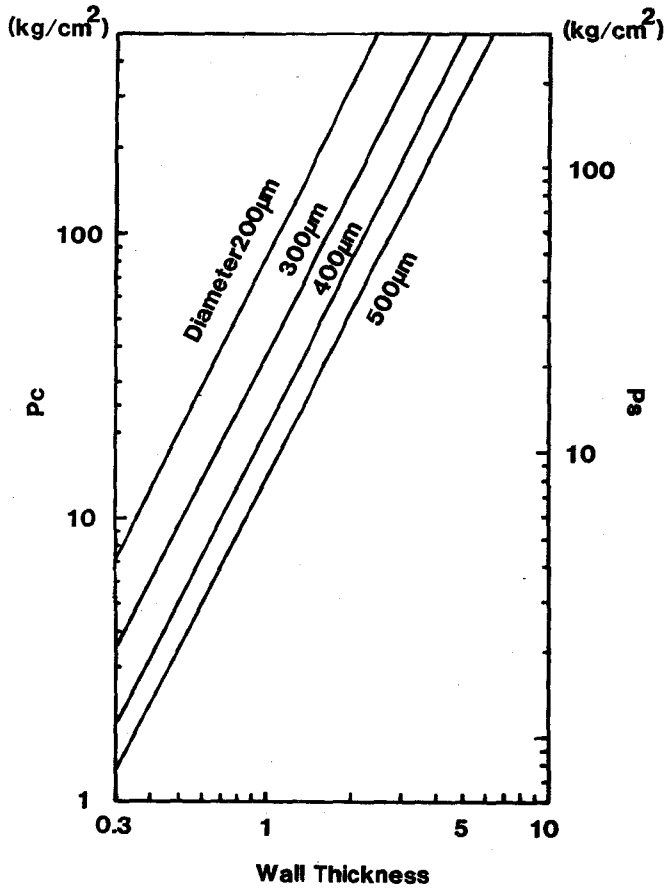


図3-12 燃料充填時に80%GMBが破壊  
されないで残るための条件

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

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

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

である。ここで $N$ はガラスの屈折率で $\lambda$ は光の波長である。 $N$ は実験で求めたものを用い $\lambda$ は光の波長で、白色光の場合 $0.55\ \mu\text{m}$ を用いた。白色光に用いる波長 $0.55\ \mu\text{m}$ の値は同じセッティングでHeNeレーザーを用いて校正したものである。

GMBに燃料が充填されているときや、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。

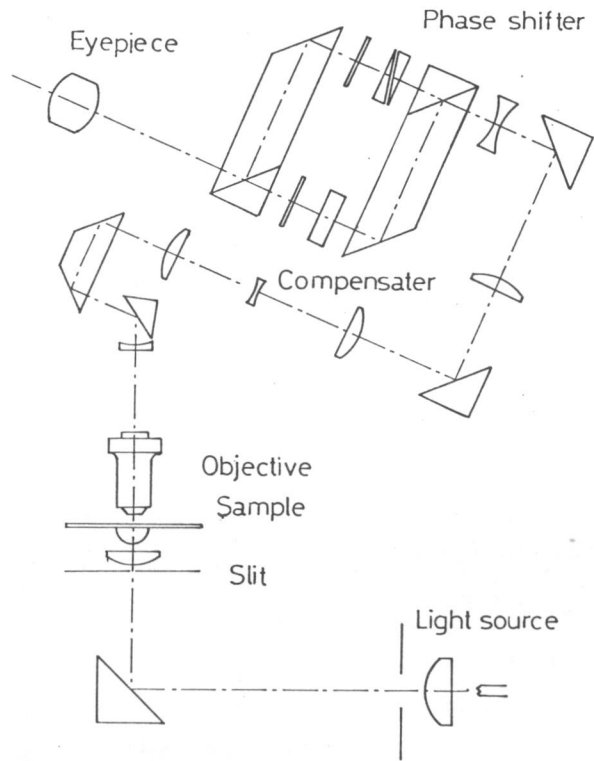


図3-13 インターファコ干渉顕微鏡

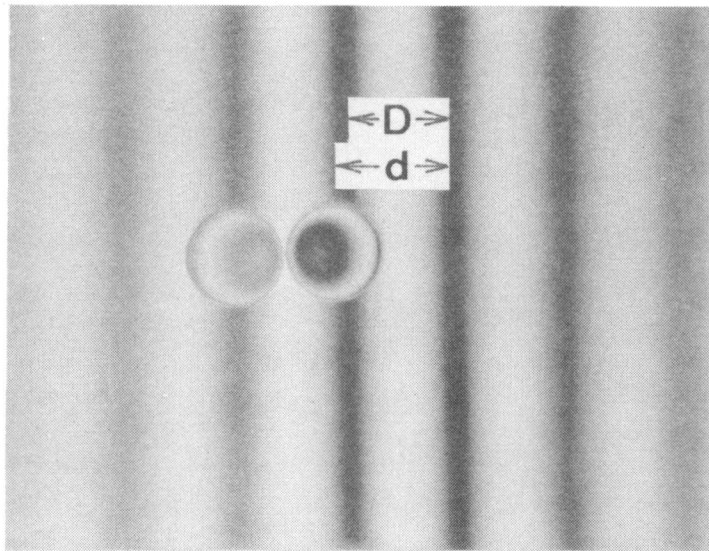


図3-14 インターファコ干渉顕微鏡による壁厚測定

$$2R(N_G - 1) + 2t_c(N_c - 1) + 2t(N - 1) = \frac{d}{D}\lambda \quad (3-9)$$

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

$P$  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、視野中の干渉フリッジは消滅し、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ッジは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

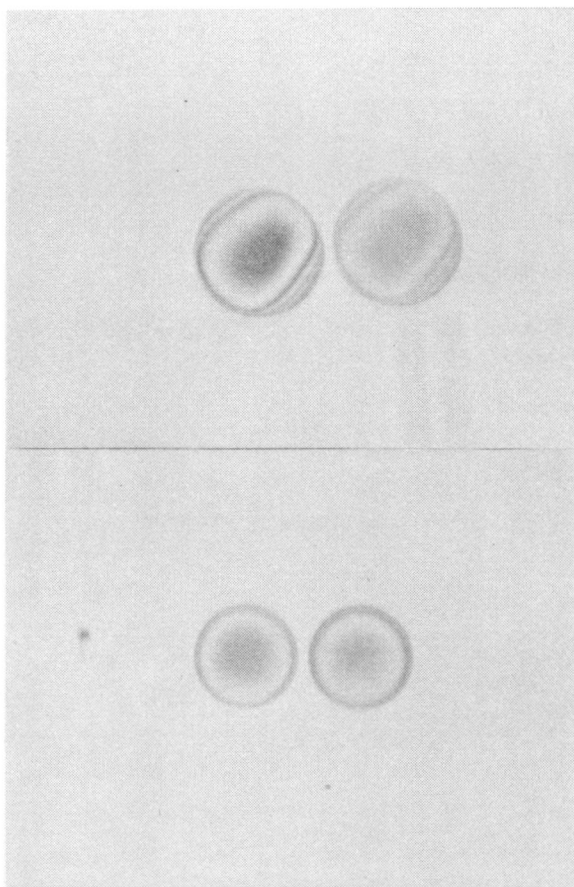


図3-15 干渉顕微鏡による均一性の検査

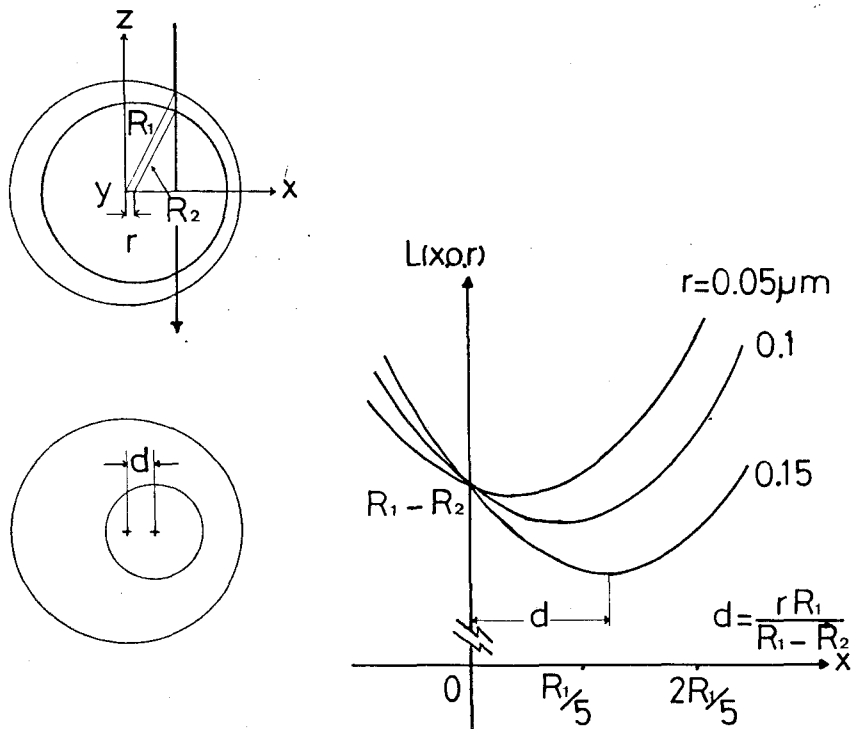


図 3-16 均一性評価のためのモデル

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

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

$$d = \frac{r R_1}{R_1 - R_2} \quad (3-12)$$

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



ットに対しては無効である。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。

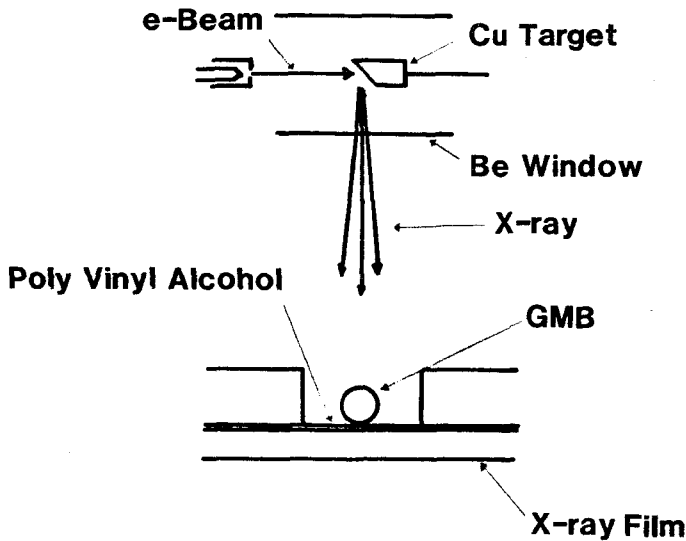


図3-17 X線コンタクトグラフ

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 $\sim 7$  keVまでのソフトX線を発生する。発生したX線は厚さ $50\mu\text{m}$ のベリリウム窓から取り出され、 $6\text{cm}$ 下方に置かれたフィルムを照射した。フィルムはコダック Type 649を用い

た。資料のGMBは厚さ $300\mu\text{m}$ の板に多数の穴を開け、厚さ数 $100\text{\AA}$ 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スイトレーサー又は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 $0.1\mu\text{m}$ 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 $10\text{cm}$ 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 $7\text{keV}$ 、電流 $3\text{mA}$ 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 $\sim 50\mu\text{m}$ 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 $150\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 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。

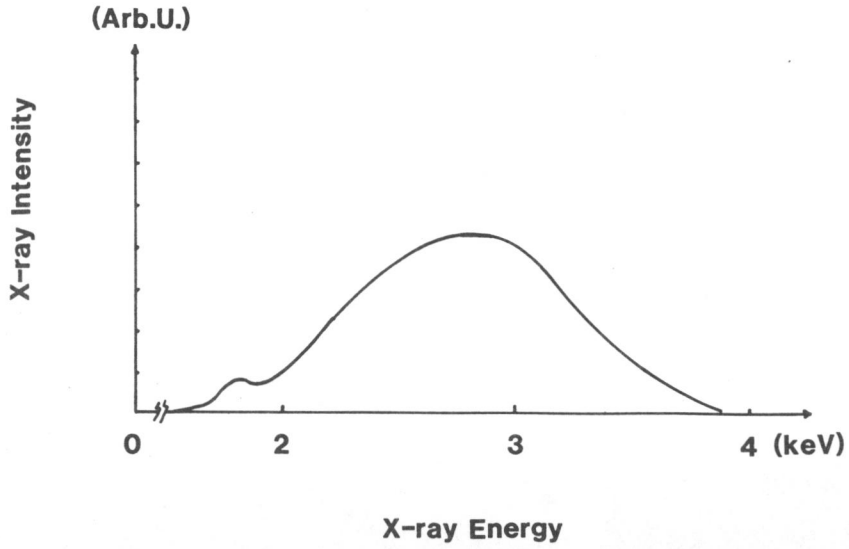


図3-18 X線コンタクトグラフのX線源スペクトル

X線フィルムの $\gamma$ 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

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{\log T_2}{\log T_1} \quad (3-13)$$

但し、

$$l_n = 2 \sqrt{R_0 t_n - t_n^2} \quad (3-14)$$

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

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

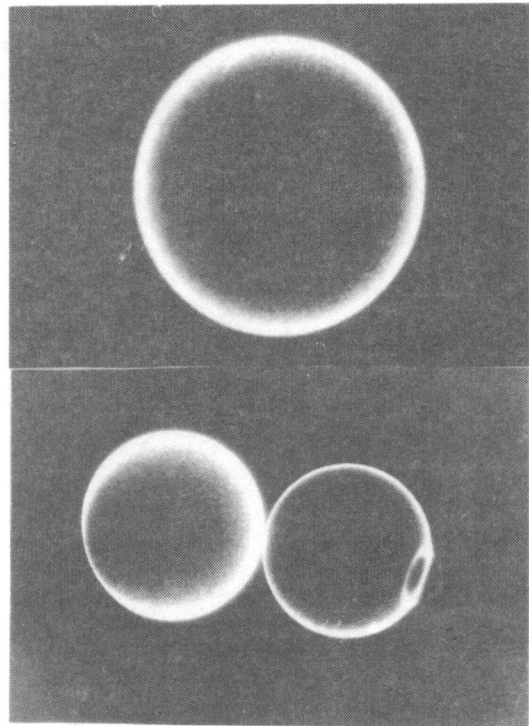


図3-19 ガラスマイクロバルーン上にNi $0.2 \mu\text{m}$ コーティングしたターゲットのX線写真

である。 $\log T_2 / \log T_1$  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  $\pm 2\%$  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  $\pm 2\%$  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  $100 \sim 1000 \text{ \AA}$  必要である。表面上の欠陥の高さを  $\Delta h$ 、底辺のひろがりをも  $w$  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<sup>4)</sup>。波長が壁厚と同じ程度のとき一番厳しく  $200 \text{ \AA}$  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

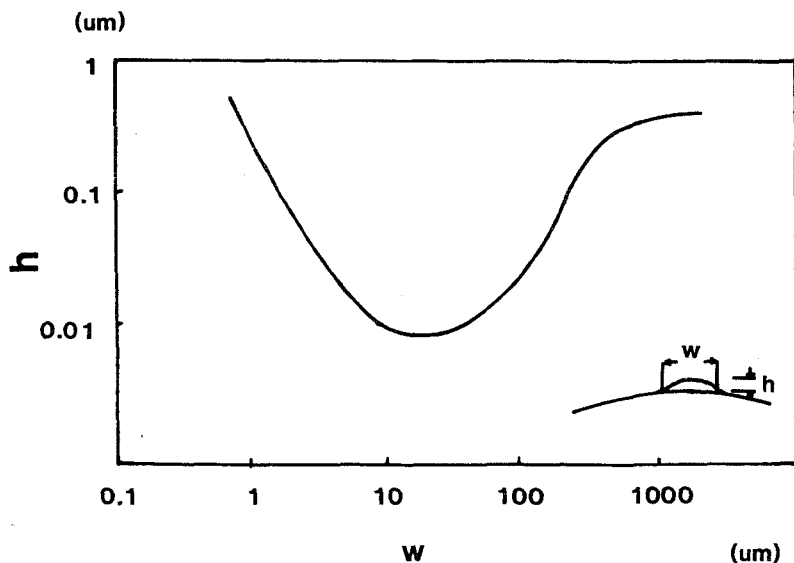


図 3-20 高密度圧縮ターゲットに許される表面荒さ

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  $30 \sim 100 \text{ A}^\circ$  の欠陥も検出できる。寸法の絶対値を測定する場合にはブラウン管の歪が有るため  $0.5 \sim 3\%$  の誤差を伴う。試料を動かして測定する場合は移動装置の精度で決り、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$  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  $0.1 \mu\text{m}$  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。高さとの比が  $\frac{1}{20}$  まで検出可能であるとした場合の  $\Delta h - w$  との関係を図 3 - 21 (a) に示した。

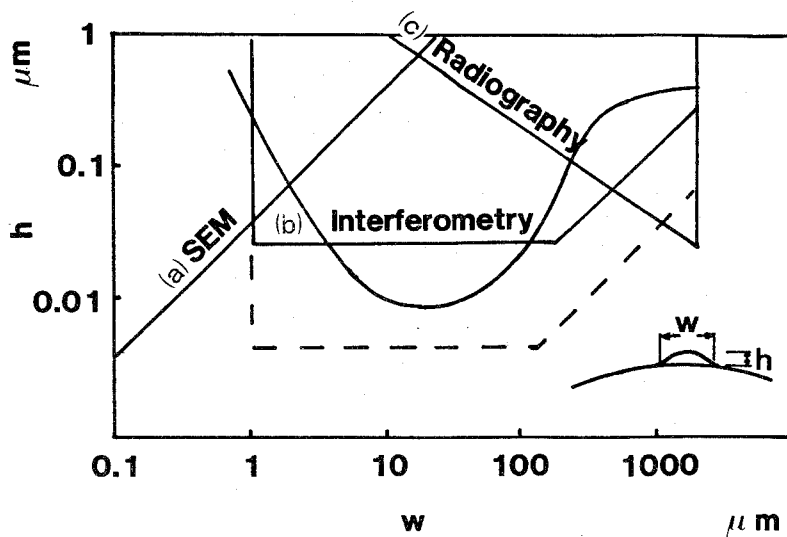


図 3 - 21 表面仕上げと検出限界

#### (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  $5 \mu\text{m}$  程度となる。光学顕微鏡自体では  $1 \mu\text{m}$  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  $\frac{1}{20}$  まで読み取れたとして、ガラスでは  $0.02 \mu\text{m}$  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、 $0.001 \mu\text{m}$  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

試料をフィ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ィルムの粒子で決る。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  $0.01\mu\text{m}$  の測定も可能である。この方法の不利な点は数  $\mu\text{m}$  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。

アブレターとしては厚さ1~20  $\mu\text{m}$ のプラスチックが用いられる。厚さの均一性 ( $\Delta t/t$ ) は $\pm 3\%$ 以下、表面仕上げは最高200  $\text{\AA}$ 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。<sup>1)</sup> アブレ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、<sup>2)</sup> 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。<sup>3)</sup> 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はほぼ必要な仕様（厚さ $\sim 1 \mu\text{m}$ 均一性 $\pm 3\%$ 、表面仕上げ200  $\text{\AA}$ ）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、チャ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

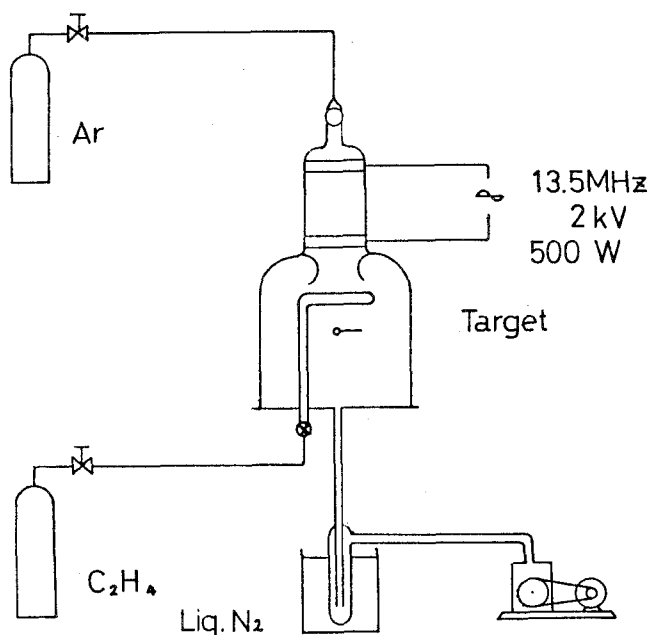


図4-1 外部放電型プラズマ重合装置

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ャ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。<sup>4)</sup> 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ン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 ( $\mu\text{m/hr}$ )
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ャ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 ( $\mu\text{m/hr}$ )	Electron Number Density $\times 10^9$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
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

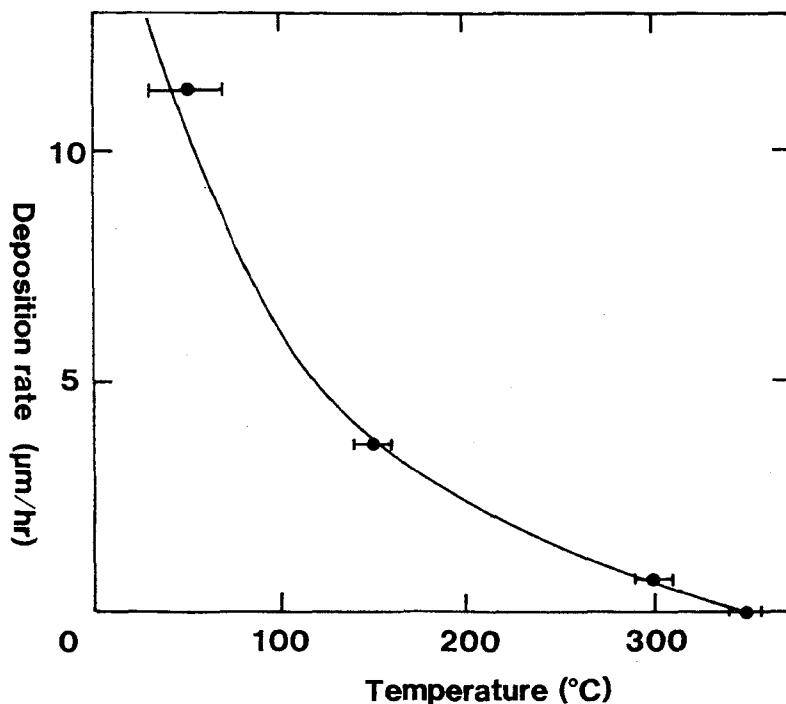


図 4 - 2 基盤温度とコーティング速度の関係。モノマーはジパラキシレン

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

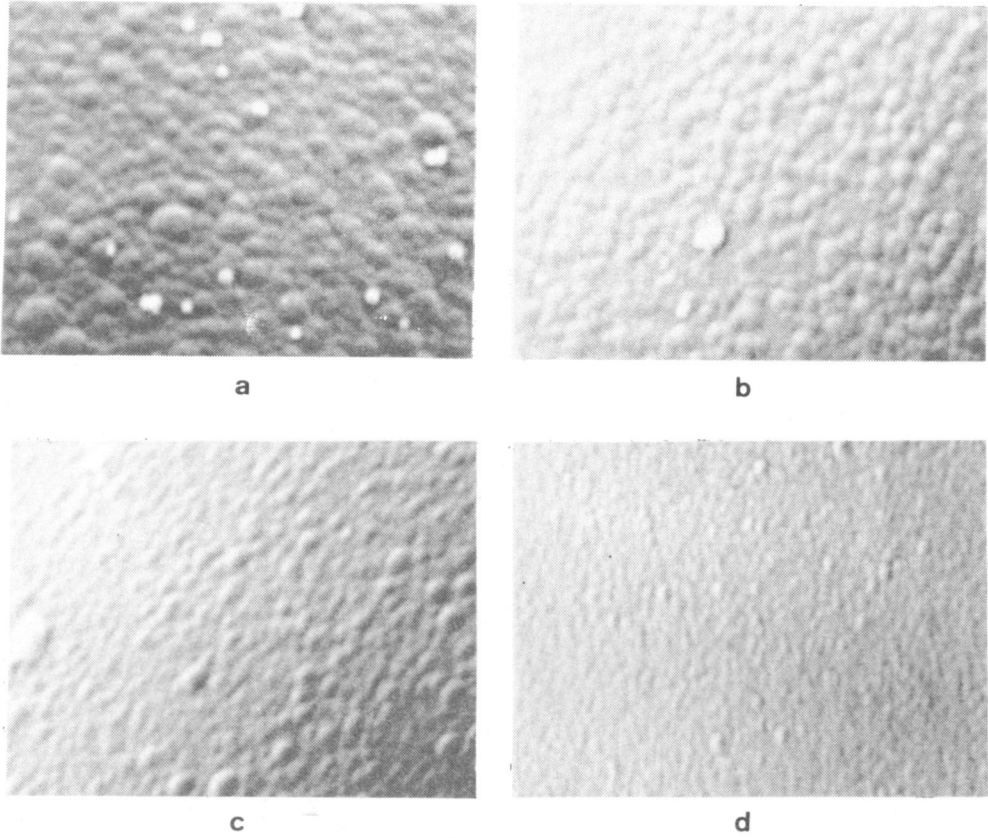
Increase of thermal conductivity	$C_n H_m$	—	$C_n H_m$
Pusher deposition	$SiH_4 + O_2$	—	$SiO_2$
	$C_n F_m$	—	$C_n F_m$
Stopper of hot electron	$C_2H_4 + Pb$	—	$C_n H_m Pb$
	$C_n H_m + (C_2H_4O)_4 Ta$	—	$TaC_n H_m O_1$
Doping of index	$C_2H_4 + C_2H_2Cl_2$	—	$C_n H_m Cl$

(b) 表面仕上げ

ターゲットの表面はレーザー不安定性を抑えるため平滑ではなければならない。最も有害なものはその凹凸の波長がシエ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 ( $\mu\text{m}$ )	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 $0.05\ \mu\text{m}$ のフィルターを用意し、以下の実験を行った。

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 $110\ \ell/\text{min}$ 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。

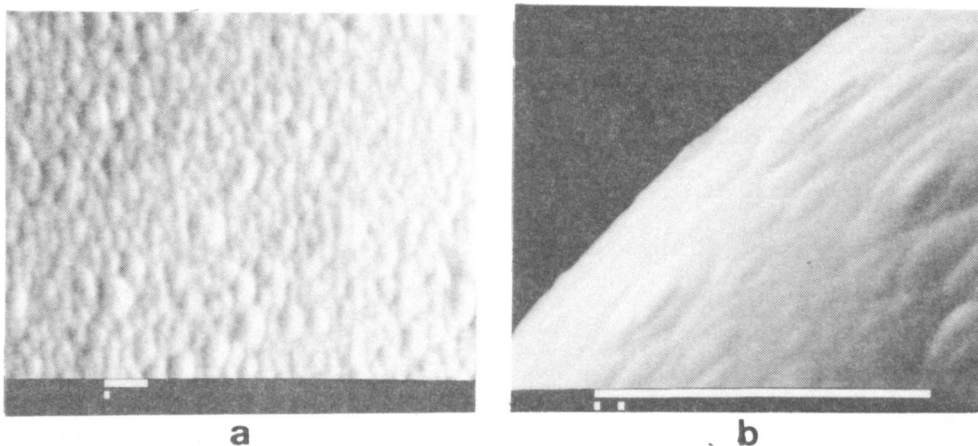


図4-5 気相中のゴミのコート層への影響

### (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

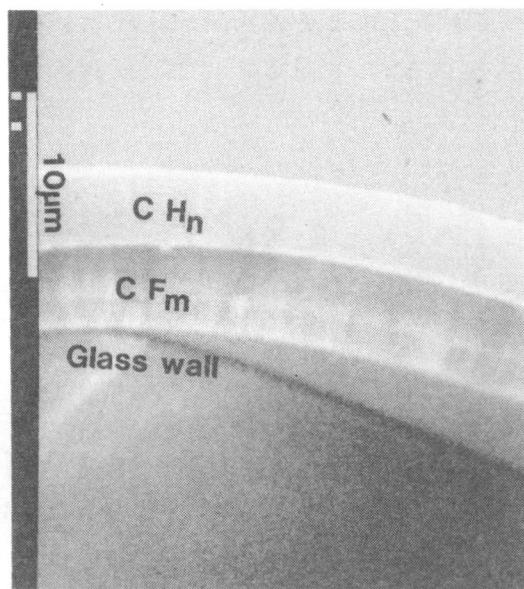


図 4 - 6 プラズマ重合でポリエチレンをコーティングされたターゲット

顕微鏡写真を示す。直径 $200\mu\text{m}$ の GMB 上にテフロンを $5\mu\text{m}$ 、ポリエチレンを $4\mu\text{m}$ 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 $\mu\text{m}$ 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 $1\sim 10\mu\text{m}/\text{h}$ であり、表面状態を良くするためには $3\mu\text{m}/\text{h}$ 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

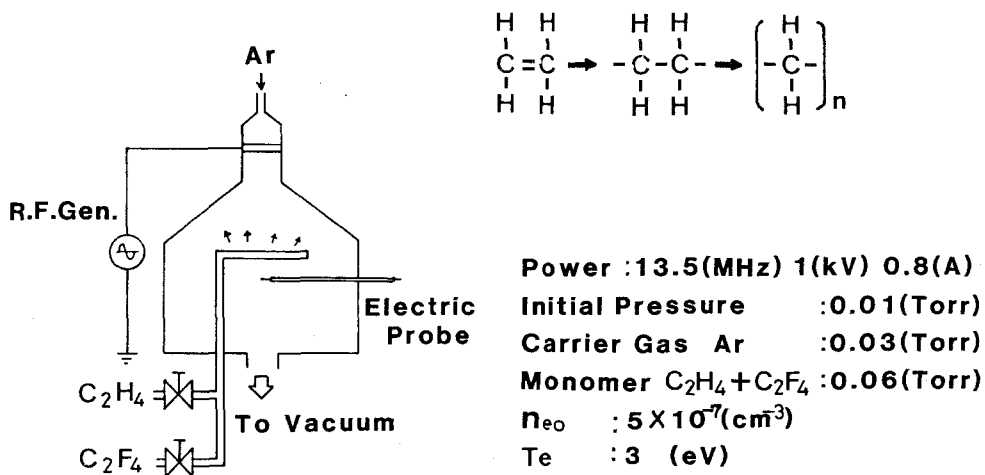
#### 4-3-1 特徴及び目的

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。<sup>5)6)7)</sup>

#### 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



### Plasma Polymerization System

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 0.6 keV 排気速度 130 l/min で行なった。

#### 4-3-3 実験結果

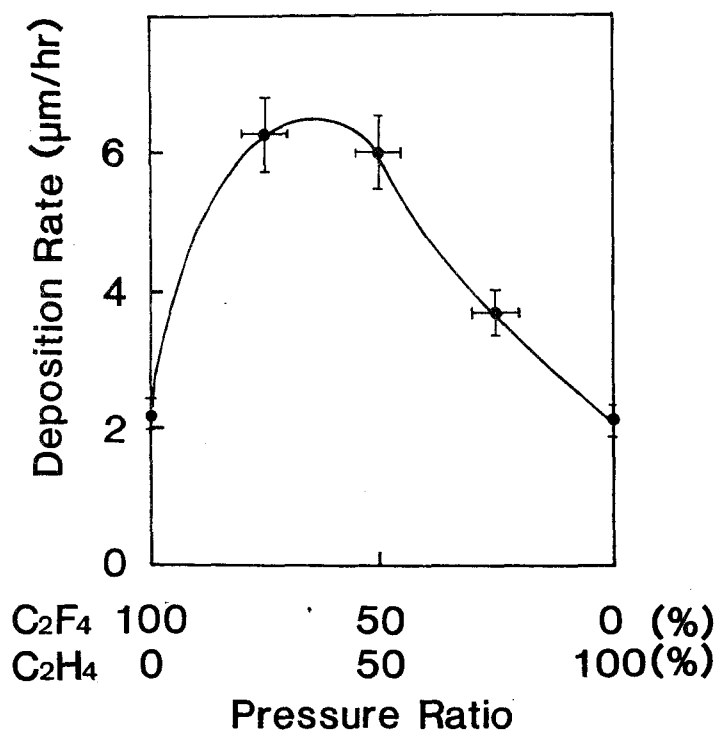


図 4-8 モノマー分圧と重合速度

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。

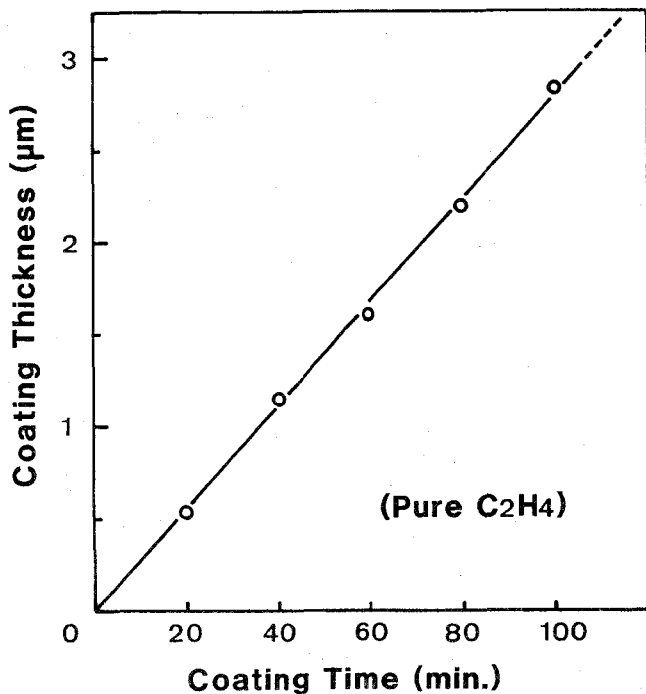


図4-9 プラズマ重合によるコーティング厚さの時間特性

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 $2.0 \text{ g/cm}^3$ であり、エチレンだけの場合は $0.9 \text{ g/cm}^3$ 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 $K\alpha$ 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、 $0.11 \text{ g/cm}^3/\mu\text{m}$ 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 $100 \mu\text{m}$ で重合層の膜厚は $12 \mu\text{m}$ である。膜厚の均一性 ( $\Delta R/R$ ) は $\pm 2\%$ であった。



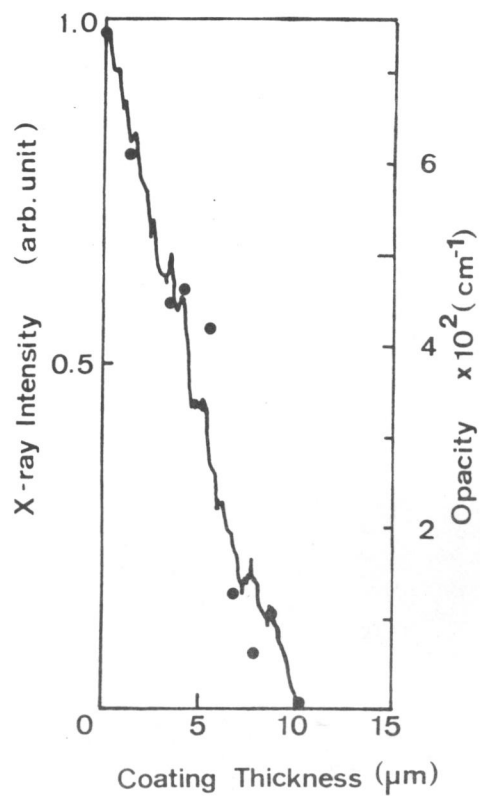


図4-10 X線マイクロアナライザ  
ーを利用した密度勾配の  
測定結果

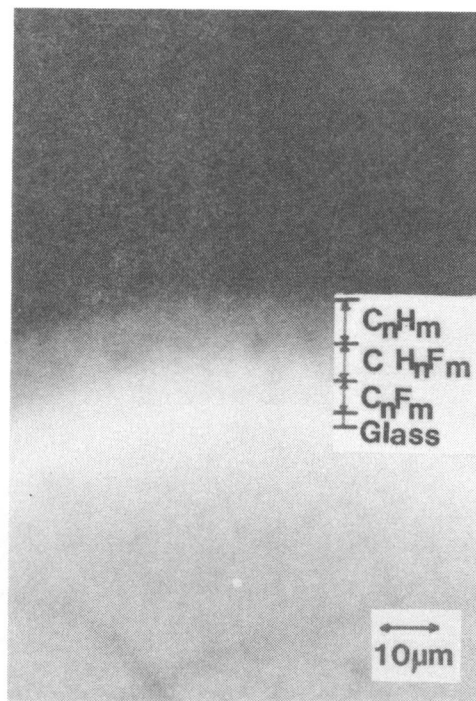


図4-11 密度勾配を付たコーティン  
グを施したターゲットのX  
線写真

#### 4-3-4 ま と め

2種モノマーの共重合を理用し、レーリ-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、 $0.9 \text{ g/cm}^3 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$  まで、 $0.05 \text{ g/cm}^3/\mu\text{m} \sim 0.5 \text{ g/cm}^3/\mu\text{m}$  の密度勾配をもたすことができた。

## § 4-4 TaCHO プッシュァーコーティング

### 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入れたとすると平均 $Z$ 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。<sup>8)</sup> 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。<sup>9)</sup>

### 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 ( $Ta(O C_4H_9)_5$ ) 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0.08 Torr に設定し、アルコールを150°Cまで加熱し放電を開始した。放電後は速やかに190°C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。

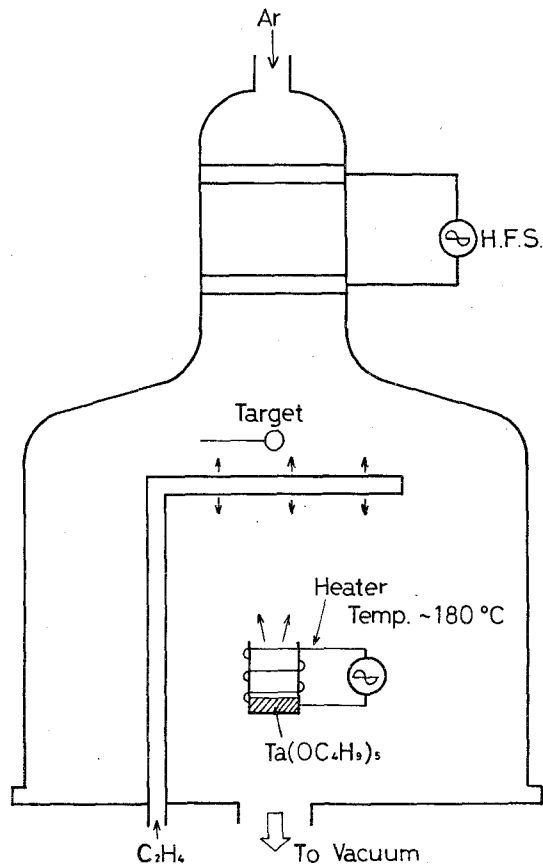


図4-12 TaCHO プッシュャーコーティング装置

#### 4-4-3 実験結果

高Z物質の混合量の測定はX線マイクロア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、Si K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。

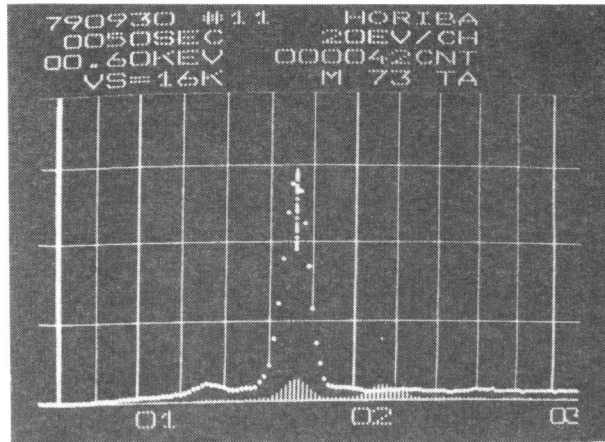


図4-13 TaCHO プッシャーのX線マイクロアナライザーによる分析結果

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

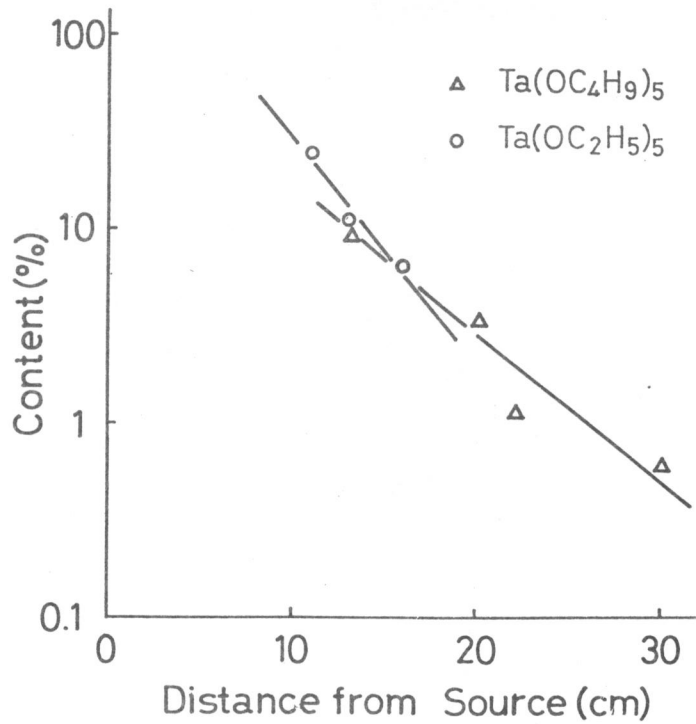


図4-14 Ta含有率の蒸発源からの距離依存性

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130  $\mu\text{m}$  のガラスマイクロバルーン上に TaCHO を6  $\mu\text{m}$  コーティングし、さらにポリエチレンを8  $\mu\text{m}$  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  $\Delta R/R$  は $\pm 3\%$ 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2~3  $\mu\text{m}$ 、底辺5~8  $\mu\text{m}$ 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。

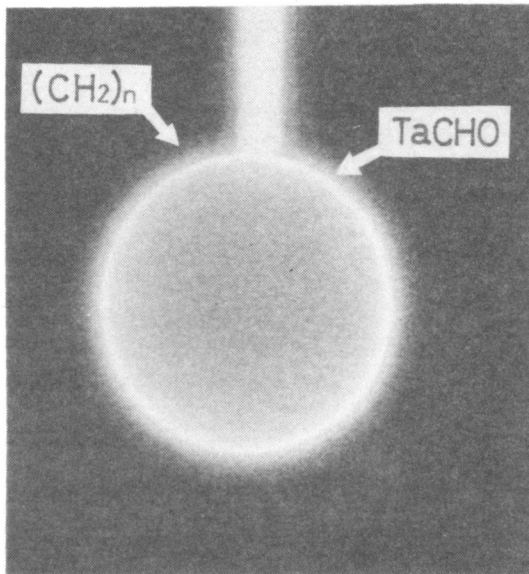


図4-15 TaCHO プッシュャーをコーティングしたターゲットのX線写真

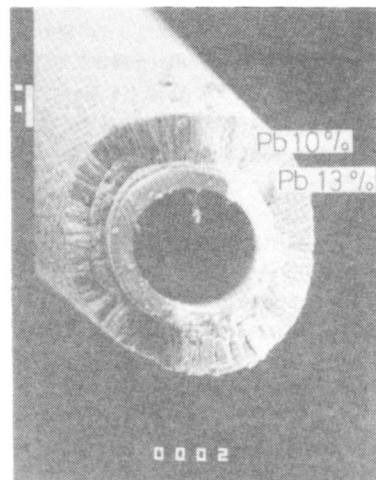


図4-16 ガラスパイプ上に鉛を含むポリエチレンをコーティングした電子顕微鏡写真

#### 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、ブレーキ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

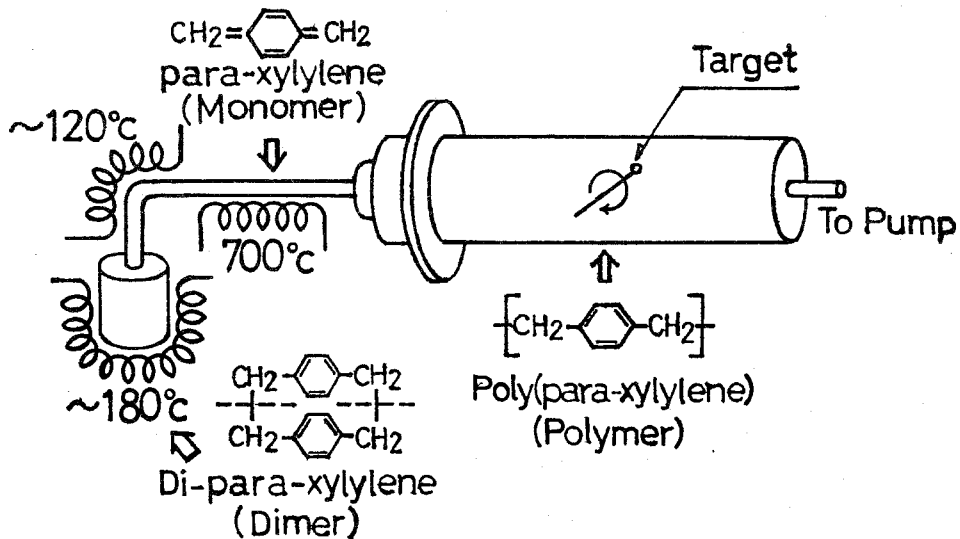


図4-17 パリレンコーティング装置

℃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25mmの石英ガラス管で作られ、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、

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

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 $0.5 \mu\text{m} / \text{min}$ 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 $0.1 \mu\text{m}$ 以下にする場合はコーティング速度は $1 \mu\text{m} / \text{h}$ 程度が最も適当であった。またこのとき、蒸発炉の温度は $83^\circ\text{C}$ 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GM B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

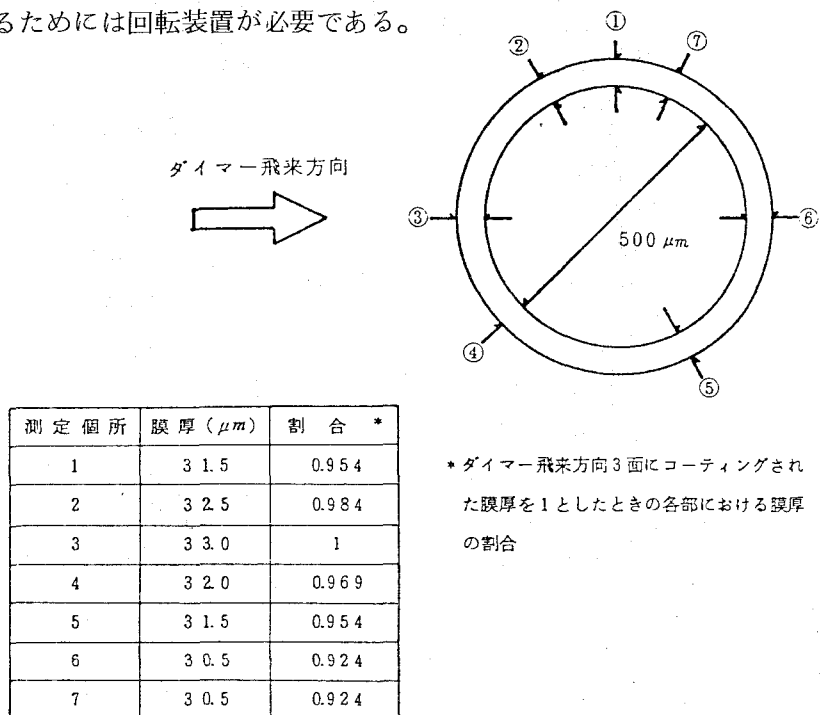
$$\frac{Q}{t} = 100 \pm 5 \quad (\text{mg} / \mu\text{m}) \quad (4-2)$$

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。



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		平滑性
				蒸発炉	蒸着室	
№ 18	20g	5.3 μ/hr	ガラス板	120℃	21℃	500~3000 Å
№ 19, 20	20g	0.9 μ/hr	ガラス板	95℃	21℃	<500 Å
№ 21	20g	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

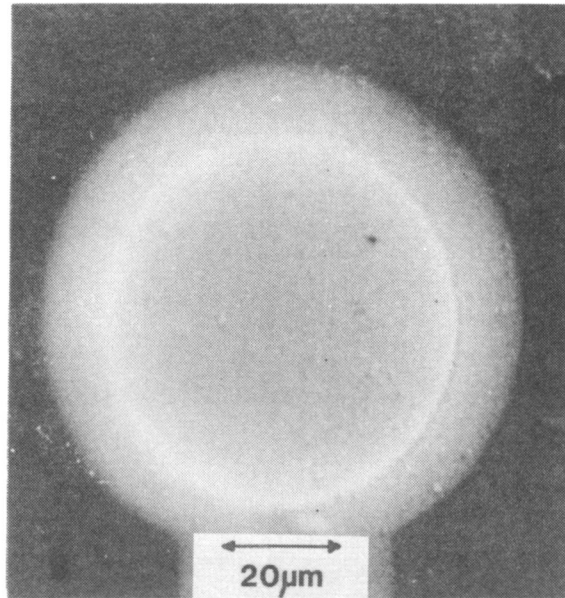


図4-19 パリレンをコートされたターゲットのX線写真

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( $\Delta R/R$ )±1%、表面仕上げ<500Å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

$\mu\text{m}^\phi$ ) をファイバー (10~20  $\mu\text{m}^\phi$ ) 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、グロー放電中に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。<sup>10)</sup>

## (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 $\phi$ , 10mm<sup>h</sup>, 1.5mm<sup>t</sup>) 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

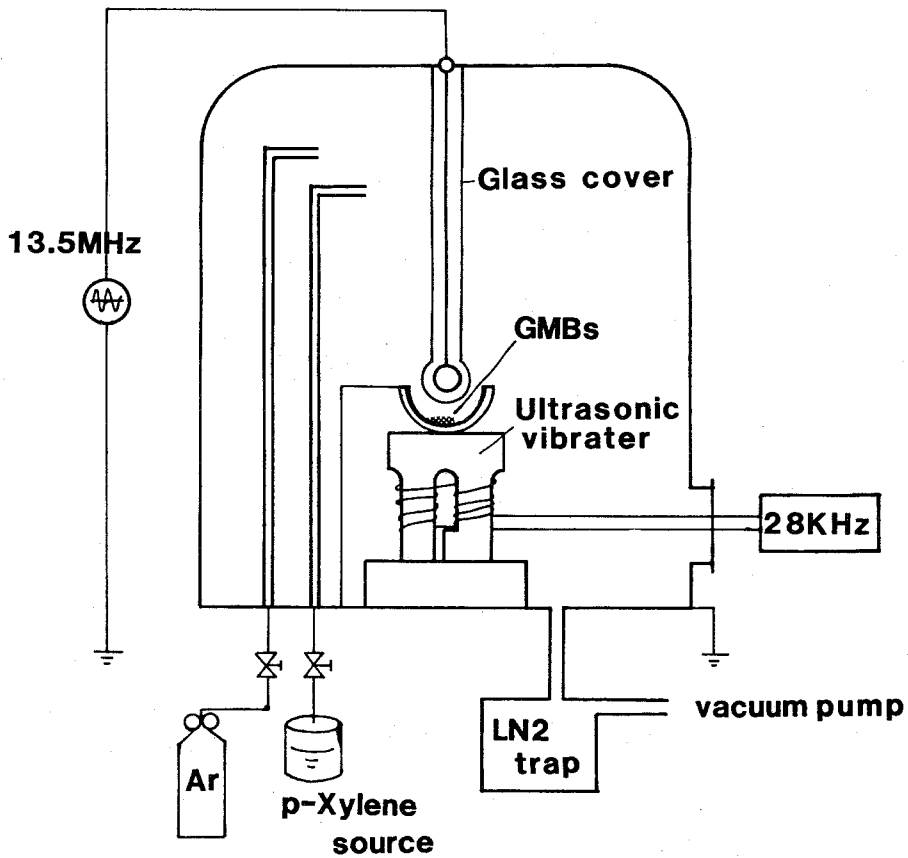
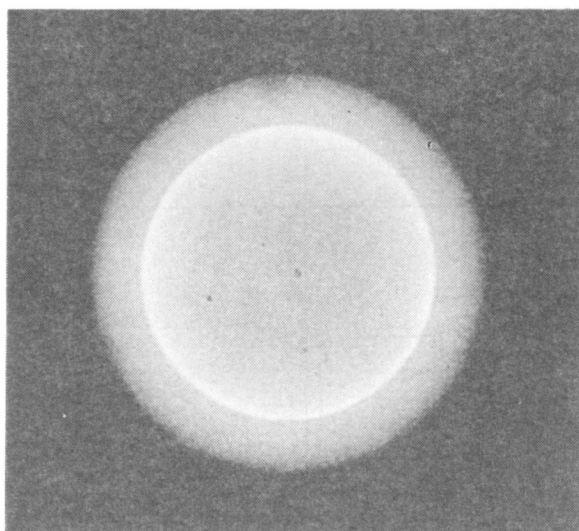


図4-20 振動型レビテーションとプラズマ重合

だけの硬さが必要であった。放電は直径10mm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<sup>3</sup>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2 $\mu\text{m}$ 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ヶタ悪かった。これは振動によりダメージが生じているためと考えられ、改良を要する。

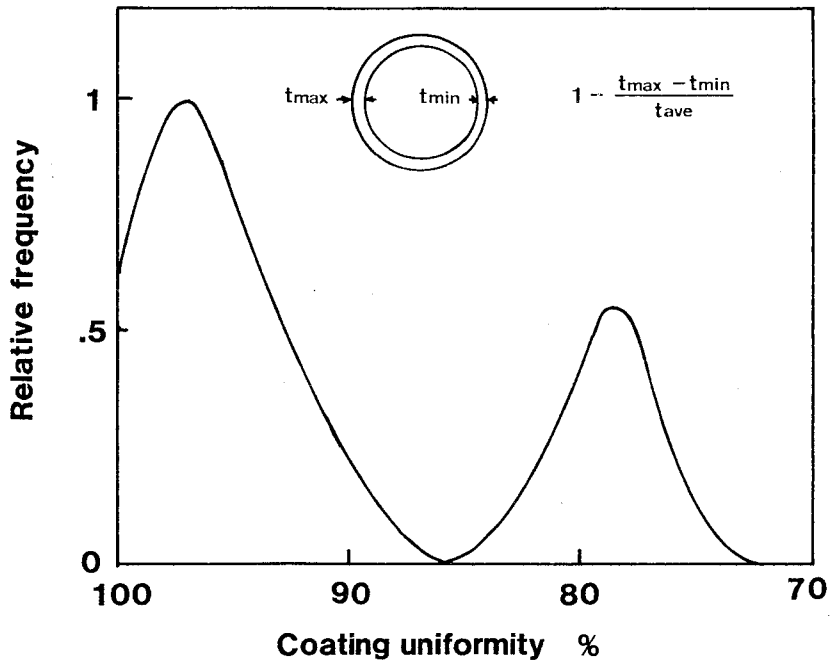


図4-22 振動型レビテーションで得られたプラズマ重合膜の均一性分布

#### (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。

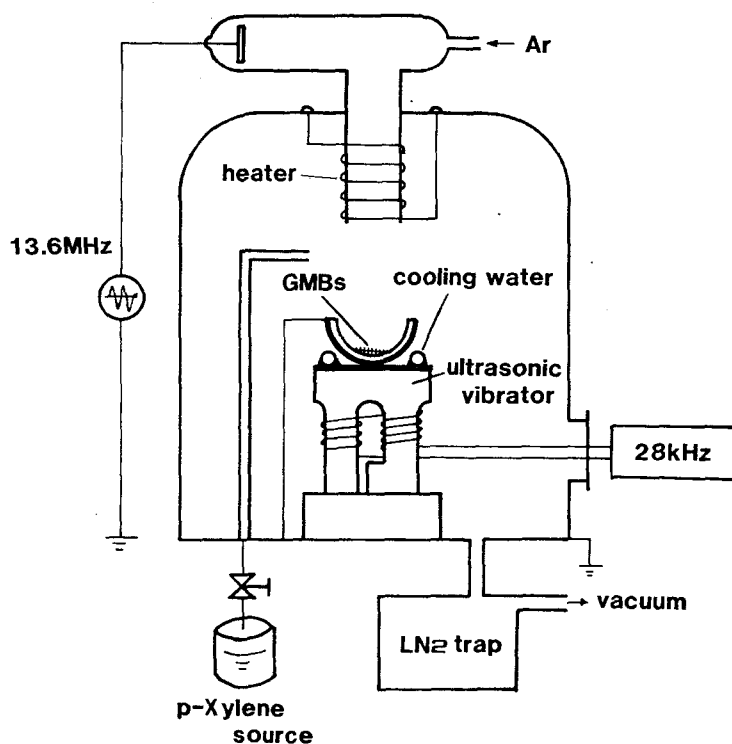


図4-23 ガス電極によるプラズマ重合と振動レビテーション装置

##### (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剝離を引き起こした。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。<sup>1)</sup> 本節ではスパッタリングに応用することを目的として、 $10^{-1}\text{Torr}\sim 10^{-4}\text{Torr}$ 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

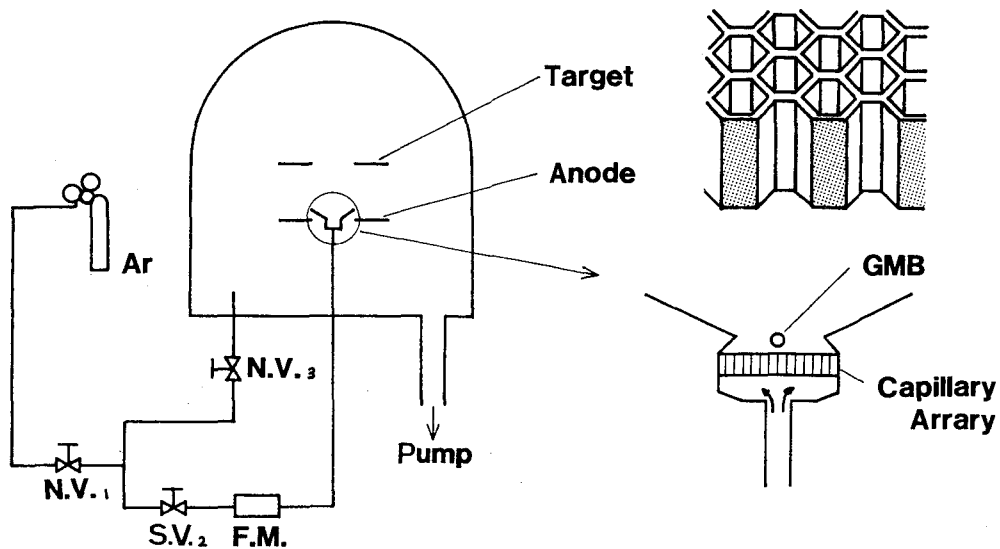


図4-24 中性ガスビームレビテーション実験装置

構成され、到達真空度  $5 \times 10^{-5}$  Torr,  $0.5 \text{ cc STP/min}$  のガス流入に対して  $3 \times 10^{-4}$  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  $1 \text{ kg/cm}^2$  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  $0.001 \text{ cc STP/min}$ ) 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  $100 \mu\text{m}$  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  $50 \mu\text{m}$  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。

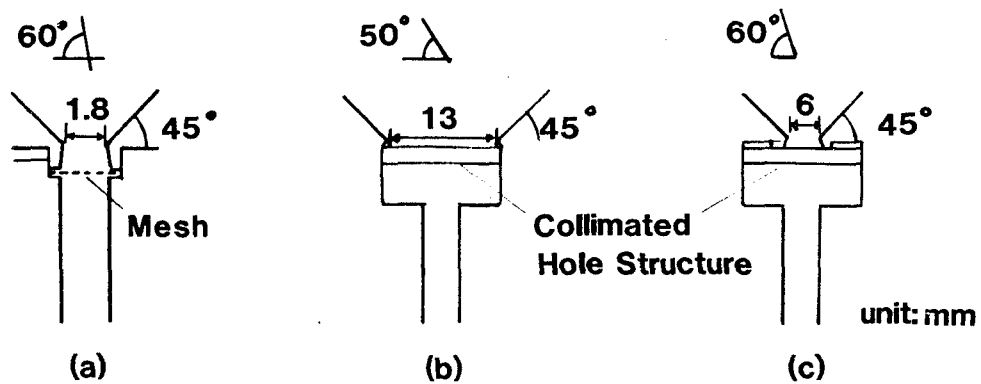


図4-25 種々のガスレビテーション用ノズル

スパッタリング電極は、中央に  $5 \text{ mm}$  の観測用窓を持つ直径  $4 \text{ cm}$  の金ターゲットと、その下部  $3 \text{ cm}$  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  $1 \times 10^{-4}$  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當であった。(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。

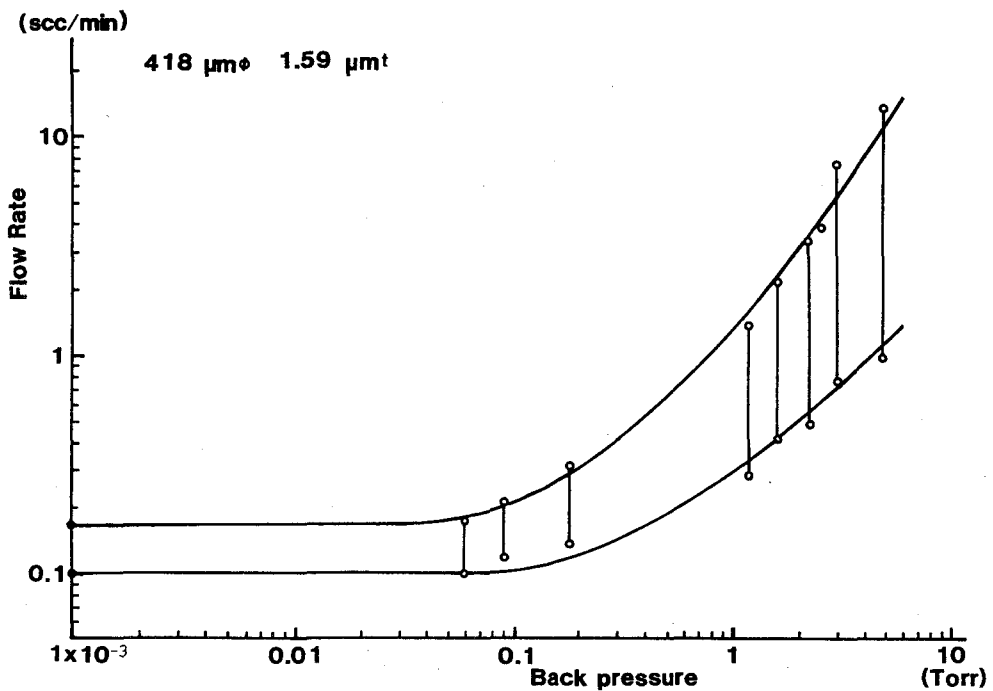


図4-26 ガラスマイクロバルーンの安定浮遊流量と背圧の関係

直径178 μm、膜厚0.95 μm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  $0.02\mu\text{m}$  コーティングしたときの X 線写真を、また図 4 - 28

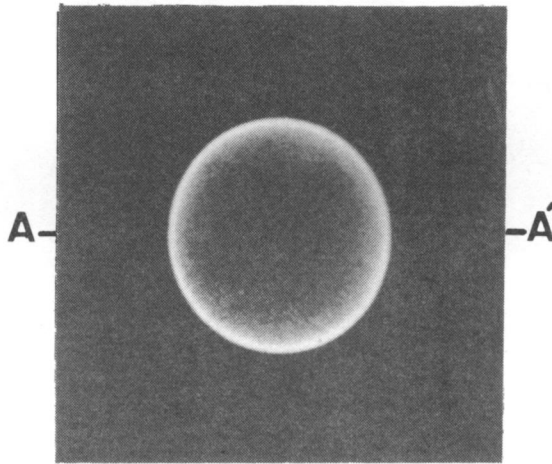


図 4 - 27 レビテーションとスパッタリングにより金を  $0.02\mu\text{m}$  コーティングされたターゲットの X 線写真

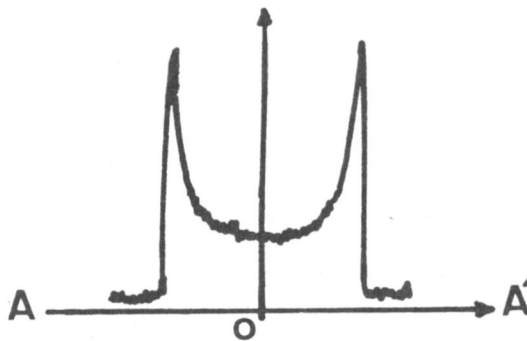


図 4 - 28 X 線による均一性の検査

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、 $210 \pm 30 \text{ \AA}$ 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が集まっている状態を考える。背圧を

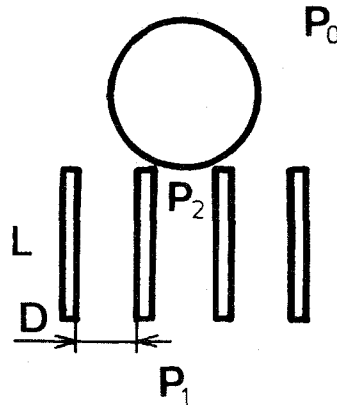


図4-29 ガスレビテーション解析用モデル

$P_0$ 、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、

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

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

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

ここでCはパイプのコンダクタンスで、  
粘性流領域では

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

分子流領域では

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

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

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

の関係となり、実験結果を説明可能である。実際直径400 $\mu$ m、壁厚1.6 $\mu$ mのGMBの質量は $2 \times 10^{-6}$ gであり、分子流領域での実験結果から求めた浮力は、 $4 \times 10^{-6}$ 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60 $^{\circ}$ /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

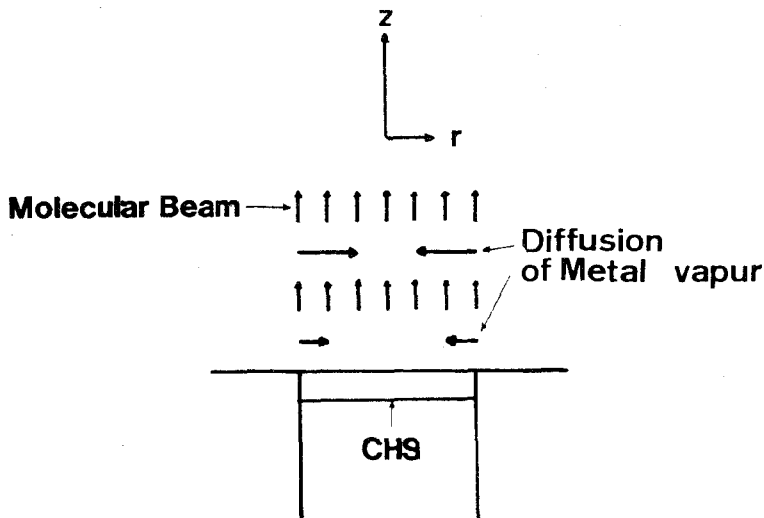


図4-30 コーティング速度を評価するためのモデル

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、

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

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

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

初期条件は  $t = 0$  のとき  $0 < r < a$  において、

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

である。この解は、

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

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

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

の関係で与えられる。即ち、

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

である。但しこの関係が成り立つのは仮定で示した通り

$$\frac{\partial n}{\partial r} \gg \frac{\partial n}{\partial z} \quad (4-14)$$

のときだけである。この仮定が成り立たないビーム中心付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事ができなかった。図 4-31 に  $D/U \cdot z$  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  $2.10 \text{ cm}^2/\text{sec}$  (0.4 Torr) を参考に、速度

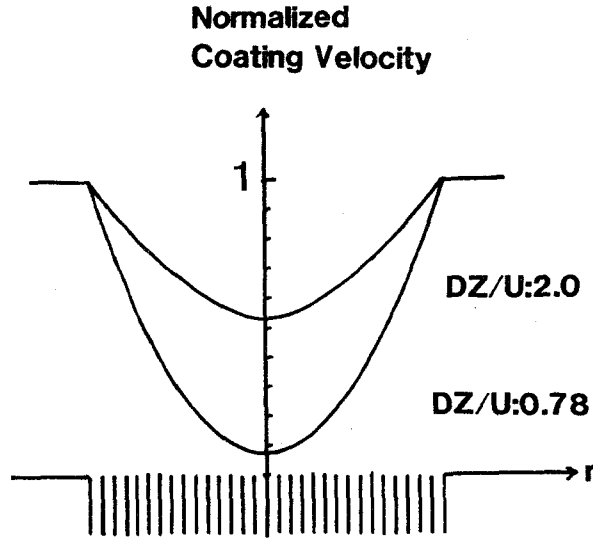


図 4-31 コーティング速度の空間依存性

Uとして70 cm/secを使用し300 μm 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60 A°/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、

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

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、 $(\Delta t/t) \pm 3\%$ 、コーティング速度  $1 \mu\text{m}/\text{h}$  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  $0.2 \mu\text{m}$  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  $(\Delta t/t) \pm 3\%$ 、コーティング速度  $\sim 1 \mu\text{m}/\text{h}$  は可能であり、表面仕上げも  $0.05 \mu\text{m}$  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  $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3 \sim 1.9 \text{ g}/\text{cm}^3$  まで連続に変えた。

プラズマ重合と蒸着を組み合わせる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  $10 \mu\text{m}$ 、均一性  $(\Delta t/t) \pm 2\%$  も可能であったが、コーティング速度が  $\sim 0.1 \mu\text{m}/\text{h}$  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  $0.02 \mu\text{m}$  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) Lawrence Livermore Lab., Laser Program Annual 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 Sym-  
posium 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

燃料を充填し、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  $\mu\text{m}$  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、ブレイクイブン、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、バキュー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 (Lawrence Livermore National Lab.) や LASL (Los Alamos National Lab.) ではレーザー加工機や精密旋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。<sup>1)</sup> 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。<sup>2)</sup> 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。<sup>3),4)</sup> 前者の方法は比較的大型の厚い球殻 (>30  $\mu\text{m}$ ) 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。<sup>5),6)</sup> 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10 kJ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、ブレイクイー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10～100 mg/ccセルサイズ3～10 μm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0.5 mmのタングステン線で内径2～3 mm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1 mmのバイレッ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。この方法で作る得る範囲

は $13\mu\text{m}\sim 65\mu\text{m}$ 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。

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。

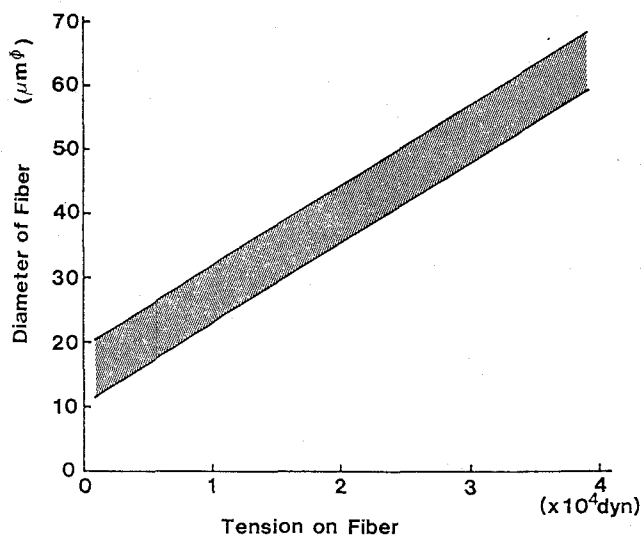


図5-1 張力とファイバー切断面直径の関係

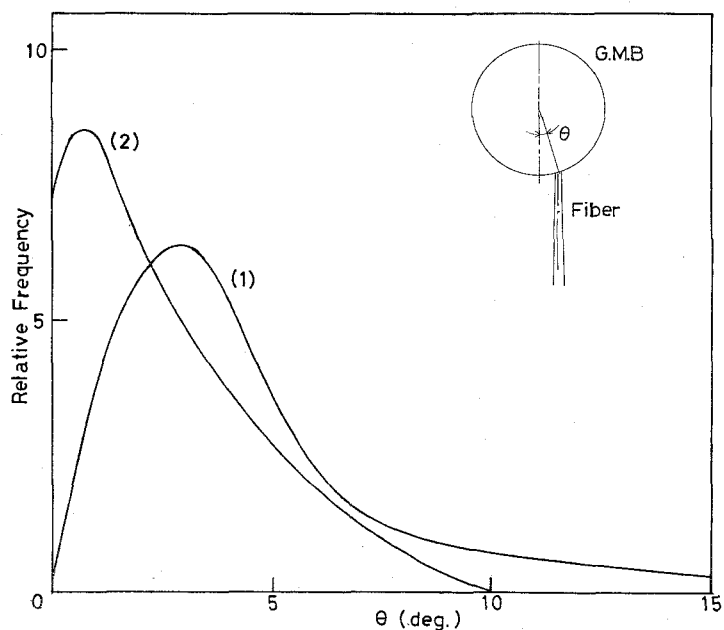


図5-2 ファイバー製法による切断面角度分布。  
(1)はダイヤモンドのキズを基に切断、  
(2)は張力で切断。

### § 5-3 バキュー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

バキュー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と問題点について述べる。

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 $\mu\text{m}$ 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2~3 $\mu\text{m}$ 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100~150 $\mu\text{m}$ 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。

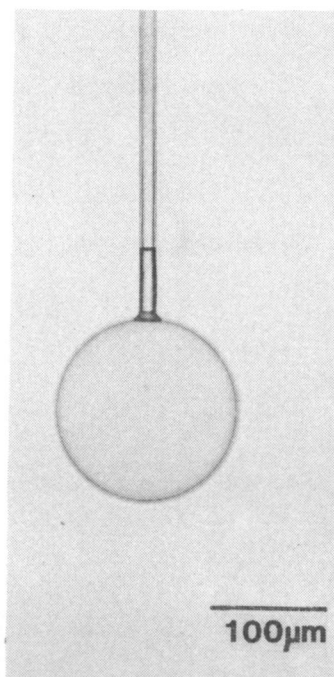
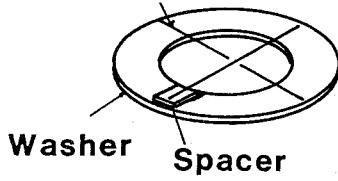


図5-3 爆発圧縮型  
ターゲット

**First Step**

(a) Glass fiber  $3\mu\text{m}^{\phi}$

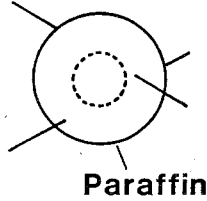


(b)

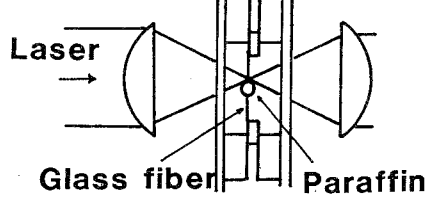


**Second Step**

(c)

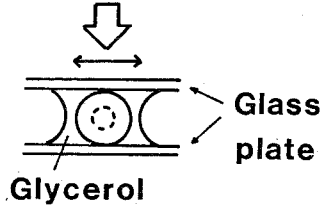


(d)



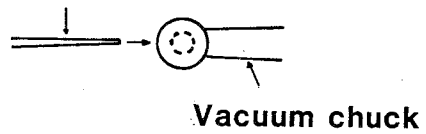
(e) Chemical etching

(f)



**Third Step**

(g) Glass capillary



(h) Parylene coating and Removing of mandrel

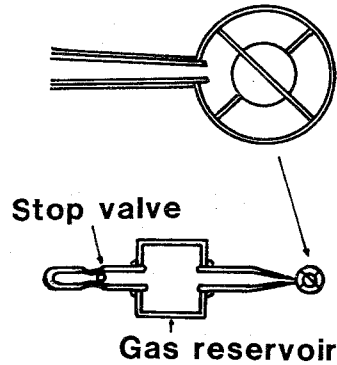


図5-4 ダブルシュルターゲットの製作過程

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。<sup>7)</sup> 半径  $R$  が

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

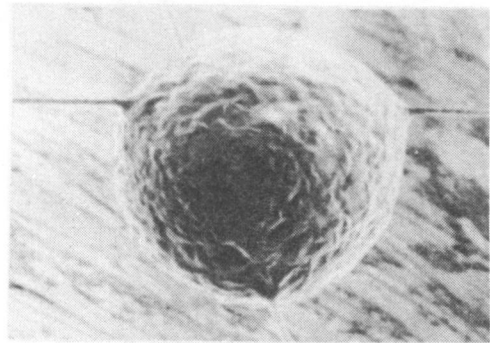
$r_0$  外側球半径,  $r_1$  内側球半径

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。

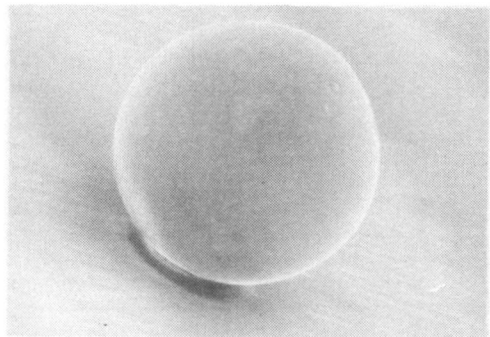
パラフィン球より突出したガラスファイバーをレーザー加工機、及びフッ酸によるエッチングで除去した後、表面処理を行なう。パラフィンは凝固するとき、表面に2~3  $\mu\text{m}$  のリップルを生じる。このリップルを除去するため、パラフィンボールを2枚の平行ガラス板にはさみ、圧力を加えながら回転させた。第5-5図に表面処理の効果を示す。圧力の強さは重りで調節し、500 mg から始め、次第に減じて100 mg で仕上げを行なう。このときの表面仕上げは0.2  $\mu\text{m}$  程度である。

第3段階で先端の直径が20  $\mu\text{m}$  程度のガラス毛细管を取り付ける。この毛细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  $\mu\text{m}$  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。パラフィンが融解し、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、

$$F(x) = -T \frac{dS(x)}{dx} \quad (5-2)$$

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取り、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。

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

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

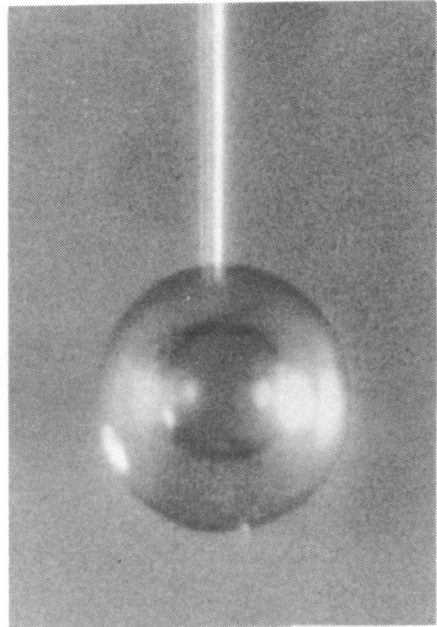


図5-6 ダブルシェルターゲット。外側シェルパリレン250 μmφ, 4 μm t, 内側ガラスバルーン160 μmφ。

表5-1 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 $\mu\text{m}$	180-250 $\mu\text{m}$
Wall thickness	2- 40 $\mu\text{m}$	4- 10 $\mu\text{m}$
Inner shell		
Diameter	80-120 $\mu\text{m}$	80-120 $\mu\text{m}$
Wall thickness	1- 2 $\mu\text{m}$	1- 2 $\mu\text{m}$
Sphericity	< 3%	< 3%
Concentricity	< 3%	< 7% ( $\Delta R/R$ )

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  $\mu\text{m}$  クラスのパラフィン球の場合3~5  $\mu\text{m}$  のずれになる。

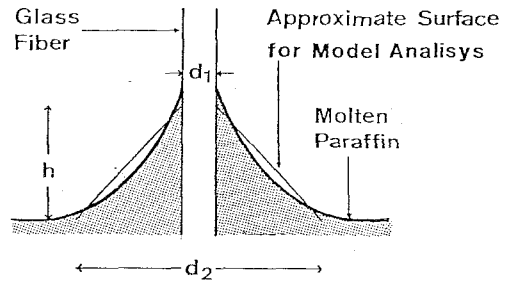


図5-7 パラフィン表面とガラスファイバーの接触モデル

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、

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

で表わすことができる。ここで $\alpha$ 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  $\mu\text{m}$  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、 $x/R \approx 5\%$ 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

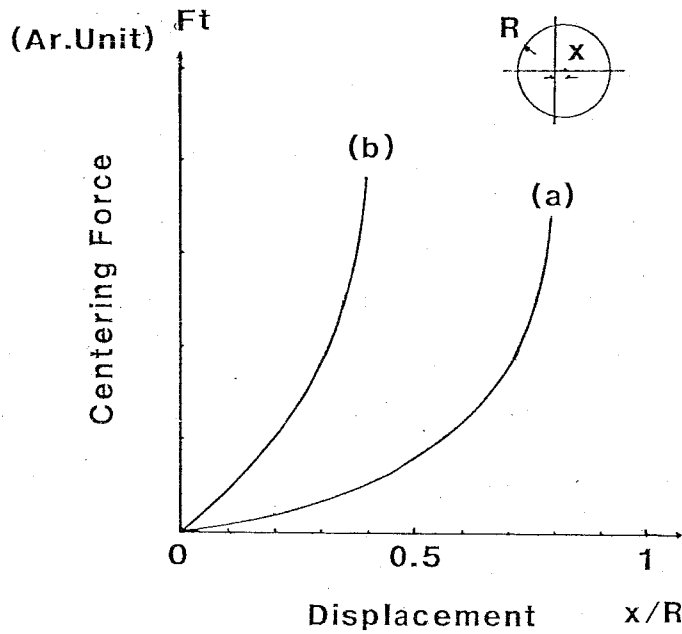


図5-8 表面張力によるパラフィン球ずれに対する復元力

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 $\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{2}$ 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。

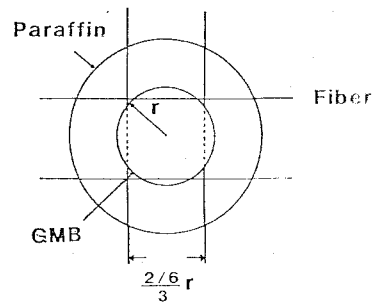


図5-9 4本ファイバーによるGMBの支持

### 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  $\mu\text{m}$ )、外側シェル、パリレン (直径160~260  $\mu\text{m}$ )、



壁厚 5  $\mu\text{m}$ 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, ガス導入口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, 各種のデータを得ている。

## § 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法では, 寸法的に大型のもの(直径 300  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$  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10 kJ クラスのレーザーでは密度10 mg/cc シェルサイズ 3~10  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  mg/cc のフォームを, またデキストランを用いて30  $\mu\text{m}$  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。<sup>8)</sup> TPXを200°C のジフェニールメタンに溶かし, 冷却した。180°C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°C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%以下の場合に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つた。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

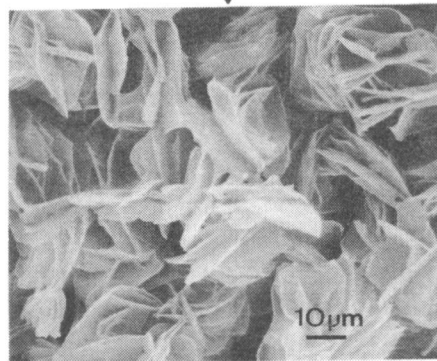
## Fabrication of Plastic Foam

**Poly(4-methyl-1-pentene) (TPX) 4%**  
**Diphenylmethane (DPM)**

↓  
**Heat to 230°C**

↓  
**Cool to 20°C**

↓  
**Extract Solvent out with Methanol**



**SEM Photomicrograph**

**( ρ:52mg/cm<sup>3</sup> )**

図5-10 TPXフォームの製作過程

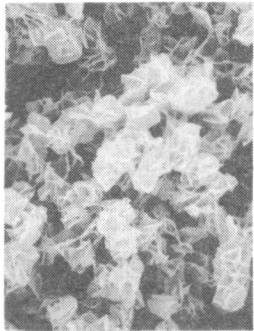
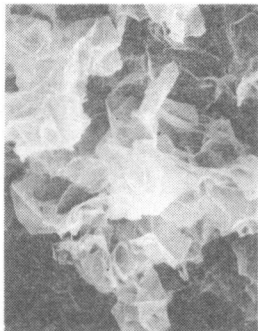
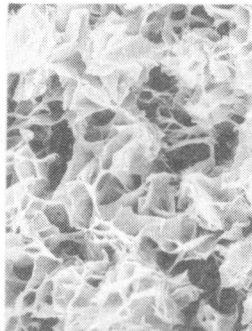
TPX 溶液の濃度 (%)	3.0	4.0	10.0
密度 (mg/cm <sup>3</sup> )	(32.7) (29.6)	45.1 (38.2)	129.3 (89.3)
抽出前後の長さの変化 (%)	-	-9.0	+1.6
電子顕微鏡写真 100μm			

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 融融液を2枚の直径3cm、厚さ5mmの銅板によって作られた0.5mm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 デキス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。<sup>9)</sup> デキストラン (Dextran (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>) を用いてターゲット用フォーム材料を作ることにはフランスリメール研究所などで提案された。デキストランは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ス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。デキス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

デキストラン濃度と作られたフォームとの関係を知るため、デキストラン1~8重量%の水溶液を作り、それぞれを直径2~3 mm φ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<sup>-3</sup>~10<sup>-5</sup> 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。 $\rho$ は実験的に得られた密度、 $\rho_0$ はデキストランの比重が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

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

デキストラン [%]	密度 [mg/cc]			体積収縮率 [%]
	$\rho$	$\rho_0$	$\rho_0^1$	
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ス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。デキストラン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50mg/cc程度が実用上の下限であった。

#### (b) 吸水性について

デキストランは親水性で、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 $\frac{1}{10}$ 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  $\mu\text{m}$  以内では1~10  $\mu\text{m}$ 、それ以上になると50~100  $\mu\text{m}$  ほどになる。またデキス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。

まとめとして、デキス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45mg/cc、セルサイズ3  $\mu\text{m}$ 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への取り付け程度の簡単なものであれば密度30mg/cc、セルサイズ1  $\mu\text{m}$ 程度も可能である。

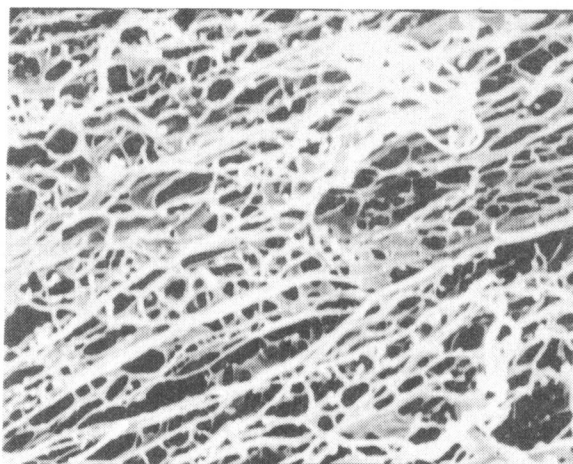


図5-12 デキストランフォームの電子顕微鏡写真

#### 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  $100\ \mu\text{m}$  の板や直径数  $100\ \mu\text{m}$  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  $100\ \mu\text{m}$  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 $26^\circ\text{C}$ 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、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  $100\ \mu\text{m}$  のGMBに厚さ  $100\ \mu\text{m}$  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  $100 \pm 2\ \mu\text{m}$ 、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

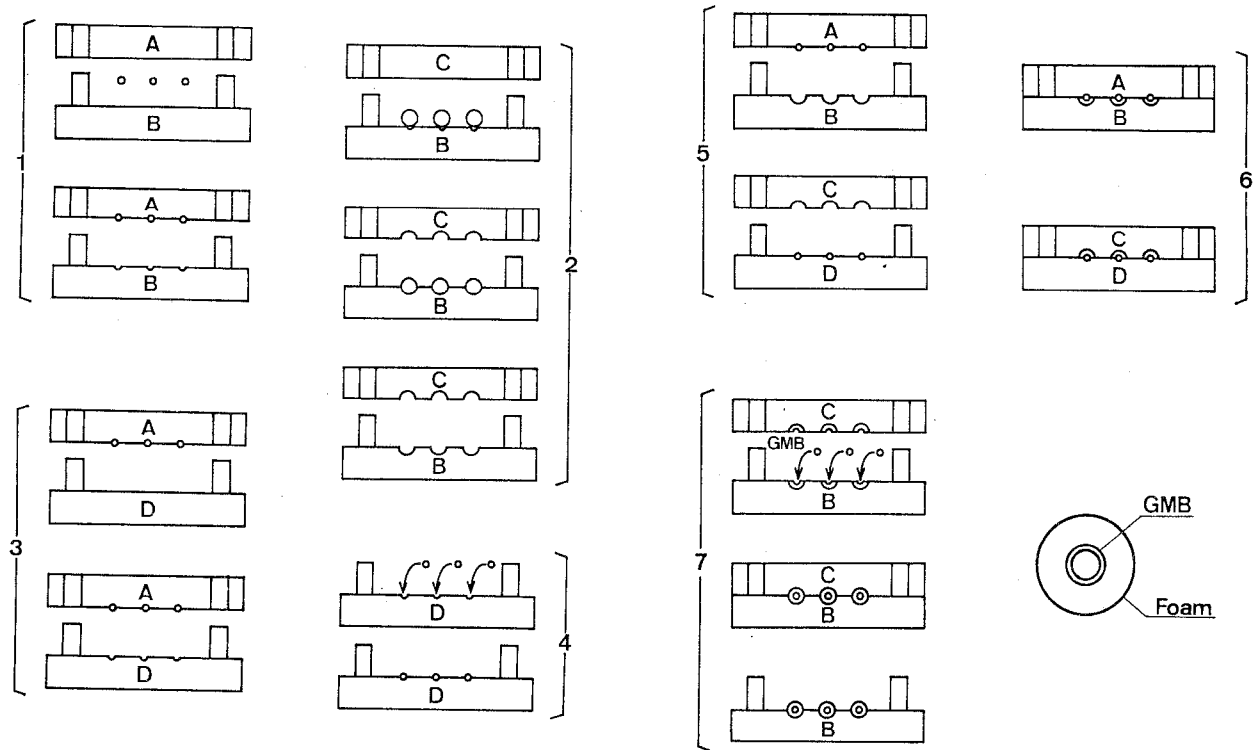


図5—13 フォーム鋳型の製作過程

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。

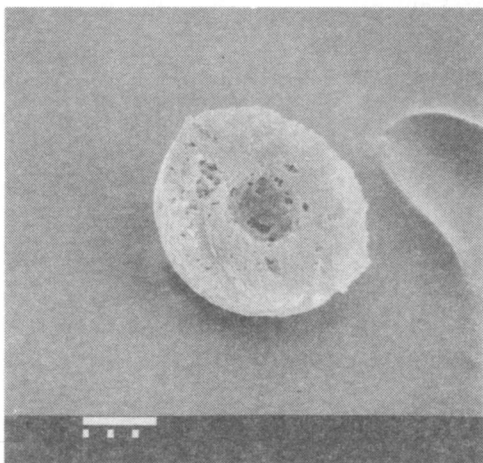


図5-14 フォームヘミシェルの電子顕微鏡写真

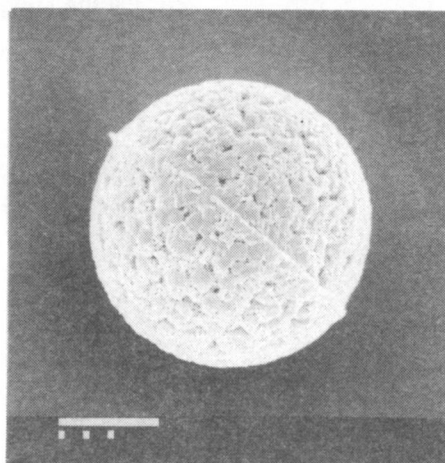


図5-15 フォームターゲットのX線写真

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鑄型による整形で行なった。凹型を付けた黄銅製鑄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

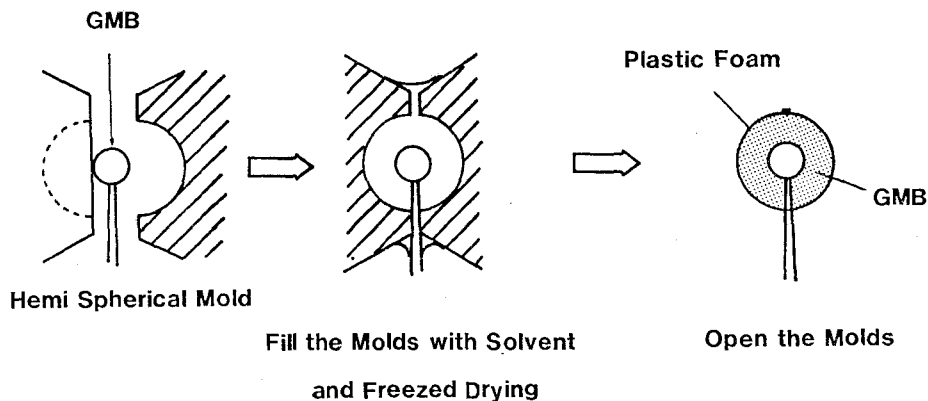


図 5-16 デキシトランフォームターゲットの製作

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脹して 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  $101^\circ C$ 、融点  $11.8^\circ C$  であり、温度に対して負の体積膨脹率を示す。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  $600 \mu m$  の黄銅製鑄型と直径  $140 \sim 160 \mu m$  の GMB の組み合わ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、またフォームが鑄型に強く付き、鑄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、フォームが鑄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、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 [ $\mu\text{m}$ ]	密度 [ $\text{mg}/\text{cc}$ ]
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、フォームの外表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わ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  $\mu\text{m}$ 程度で十分であり、容易に0.05  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ クラスの場合5  $\mu\text{m}$ 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1  $\mu\text{m}$ 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 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下である。コーティング後精密旋盤で切断し、 $120\ \text{C}$ に加熱することにより型から取りはずした。

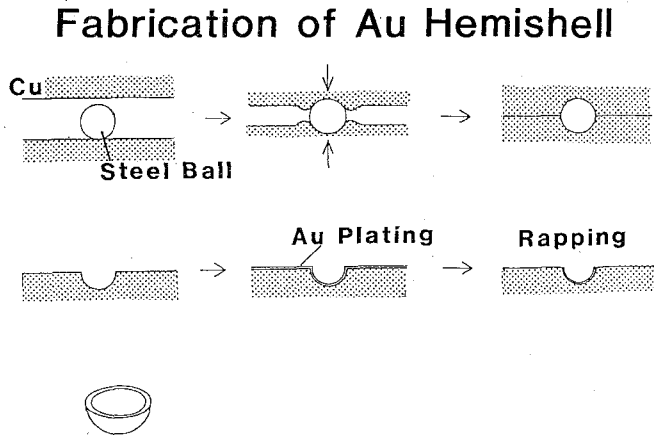


図5-17 金の半球シェル製作

Fabrication of Plastic Hemishell

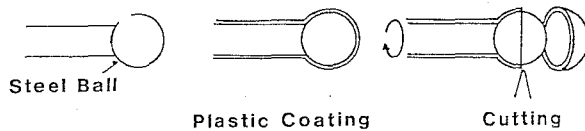


図5-18 プラスチック半球シェルの製作

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 $400\ \mu\text{m}$ のとき厚さ $4\ \mu\text{m}$ が必要であった。この方法の問題点は切断面の精度が $1\ \mu\text{m}$ 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 $0.1\ \mu\text{m}$ 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、又はキャピティターゲット）は、図5-19に示すような二重構造のターゲットである。燃料を充填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、直接当た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。

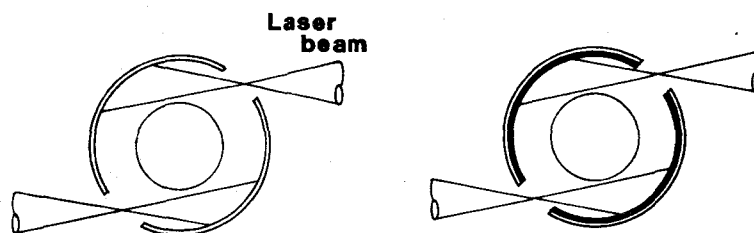


図5-19 キャノンボールターゲット

対向2ビーム照射でも

極めて一様な圧縮が可能である。

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10~20 $\mu\text{m}$ の溝を作った。次にC-パリレン( $\text{C}_8\text{H}_7\text{Cl}$ )<sub>n</sub>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400 $\mu\text{m}$ 、壁厚12 $\mu\text{m}$ 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半球の組み合わせでは5 $\mu\text{m}$ 、外側シェルと内球の位置合せでは10 $\mu\text{m}$ 程度に留まっている。また穴の位置決めは10 $\mu\text{m}$ 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。

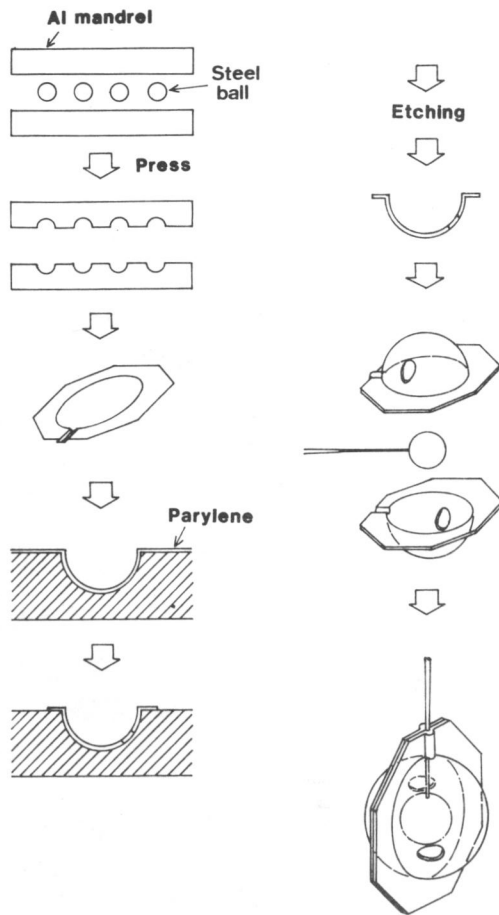


図 5-20 キャノンボールターゲットの製作過程

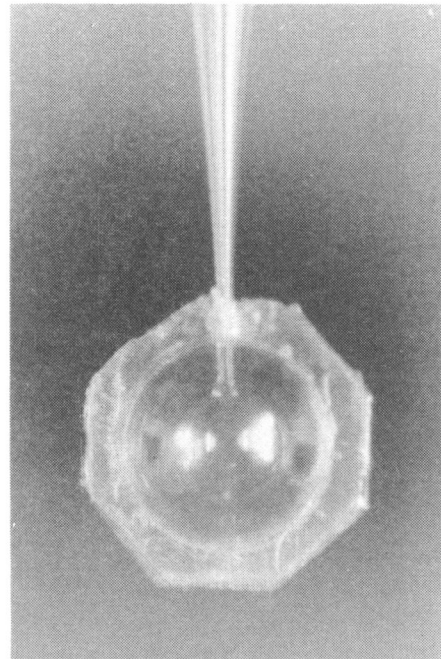


図 5-21 キャノンボールターゲット

### 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法について述べた。支持を付けたGMBにパラフィンコーティングし、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が可能となった。この方法で内側GMB 直径80~160  $\mu\text{m}$ 、外側パリレン殻160~250  $\mu\text{m}$  壁厚5  $\mu\text{m}$  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、燃料球にプラステ

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  $\mu\text{m}$ のGMB上に、密度50mg/ccのフォームを100  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ 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 Program  
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・三重水素を充填するためには GMB を 400°C, 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填炉の開発と、充填量非破壊検査についての研究をまとめた。

### § 6-2 三重水素充填

#### 6-2-1 目的

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

三重水素は半減期 12.26 年, 最大エネルギー 18 keV, 平均エネルギー 5.7 keV の  $\beta$  線を放出する放射性同位元素である。放出する  $\beta$  線の最大飛程は 0.6 mg/cm<sup>2</sup> 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。空气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、皮膚から吸収され、体内被曝をもたらす。米国などでは  $10^3 \sim 10^4$  Ci の三重水素を用いて、さかんに実験に供給されている。<sup>1)</sup> 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) 三重水素使用量の少ない充填システムの開発 2) 三重水素の昇圧 3) 炉からの拡散による漏れ 4) 三重水素充填量の非破壊測定 5) 三重水素充填ペレットの取扱い 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、拡散の少ない充填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填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

D T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、



の反応を利用する。三重水素充填装置の概略を図6-1に示す。M<sub>1</sub>はピエゾ素子による圧力計で、Mはウランベッド、RはGMBを入れる充填炉である。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。

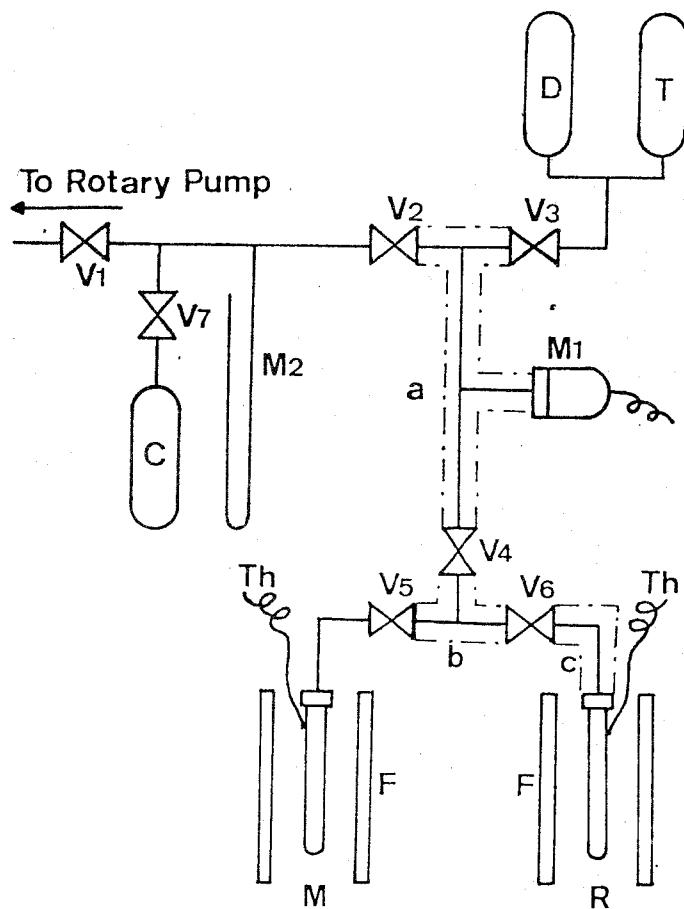


図6-1 三重水素充填システム



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、充填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。<sup>4)5)</sup> 図6-2にその概略を示す。

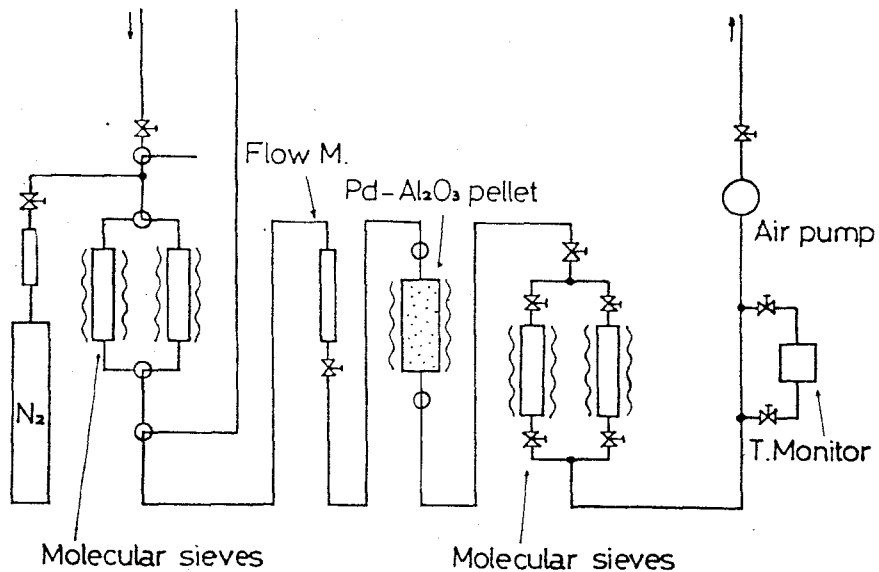


図6-2 三重水素回収系

グローブボックスは密閉型で充填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、充填室の三重水素を含んだガスは、エアープンプ (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/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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°C 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 (38.5 cc 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<sub>1</sub>、V<sub>6</sub>、V<sub>7</sub> 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°C 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 418 mm Hg) を 98% 吸着させた。

(c) ガラスマイクロバルーンへの充填

ガラスマイクロバルーンを図 6-1 R に入れ、装置内を排気する。バルブ V<sub>5</sub>、V<sub>6</sub> を開き、他のバルブは閉じたまま、容器 M を 650°C 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<sub>6</sub> 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°C で 10 時間加熱し、GMB に充填を行なう。充填後は V<sub>4</sub> 及び V<sub>6</sub> を開き、系内の圧力を測定する。

DT Fill Vessels

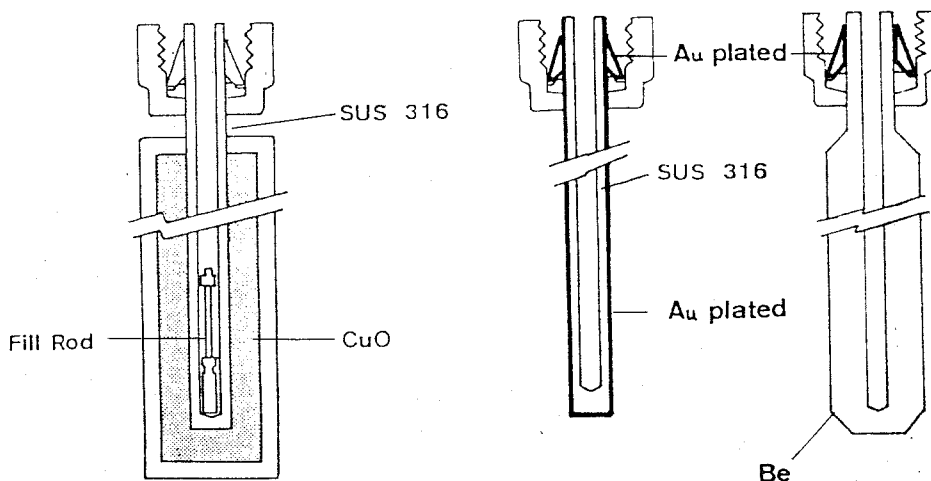


図 6-3 三重水素充填炉

$V_5$  を開き、容器を  $320^\circ\text{C}$  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  $10\ \mu\text{m}$  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

43 Ci の三重水素を用いた本実験で GMB に  $17 \pm 2$  気圧充填することができた。充填量は 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。

充填中の三重水素の圧力は直接測定できない。充填後に  $V_6, V_4$  を開き、R 内(体積  $0.7\ \text{cm}^3$ ) 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 a b c の和は  $6.1\ \text{cm}^3$ 、c は  $1.1\ \text{cm}^3$  で、実測値は  $6.1\ \text{kg}/\text{cm}^3$  であった。このことで、充填時に GMB の曝露されていた圧力を計算すると室温で  $3.4\ \text{kg}/\text{cm}^3$  である。

室温で  $3.4\ \text{kg}/\text{cm}^3$  の雰囲気ガス圧に対して GMB 内の圧力  $1.7\ \text{kg}/\text{cm}^3$  の充填結果を得た。この値の妥当性について検討してみる。実際の充填炉では温度分布が一樣でないため、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  $3.4\ \text{kg}/\text{cm}^3$  まで充填することはできない。

この充填システムでは炉最下部  $500^\circ\text{C}$  のとき炉上部  $200^\circ\text{C}$ 、配管バルブ温度は  $30^\circ\text{C}$  であった。炉体積  $0.7\ \text{cm}^3$ 、配管・バルブ体積  $0.37\ \text{cm}^3$  から計算した最高充填圧力  $P_\infty$  は  $P_0$  を室温における炉内圧力として

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

$$= 0.57 P_0 \quad (6-3)$$

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  $dV$  がしめる部分の温度である。この実験の場合  $P_\infty = 1.9\ \text{kg}/\text{cm}^3$  となる。

次に GMB が高温ガス中に置かれた場合の充填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。

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

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

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

従って

$$t = \frac{dD}{3\Phi} \{ \sqrt{P_\infty} \ln \frac{\sqrt{P_\infty}}{\sqrt{P_\infty} - \sqrt{P_t}} - \sqrt{P_t} \} \quad (6-6)$$

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 $400^\circ\text{C}$ において  $3.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{sec atm}^{1/2}$  であるので, この値で $500^\circ\text{C}$ の $\Phi$ の値を代用して計算してみると, 充填圧力として  $18.2 \text{ kg/cm}^2$  を得る。従って実験結果  $17 \pm 2 \text{ kg/cm}^2$  は妥当な結果と判断される。

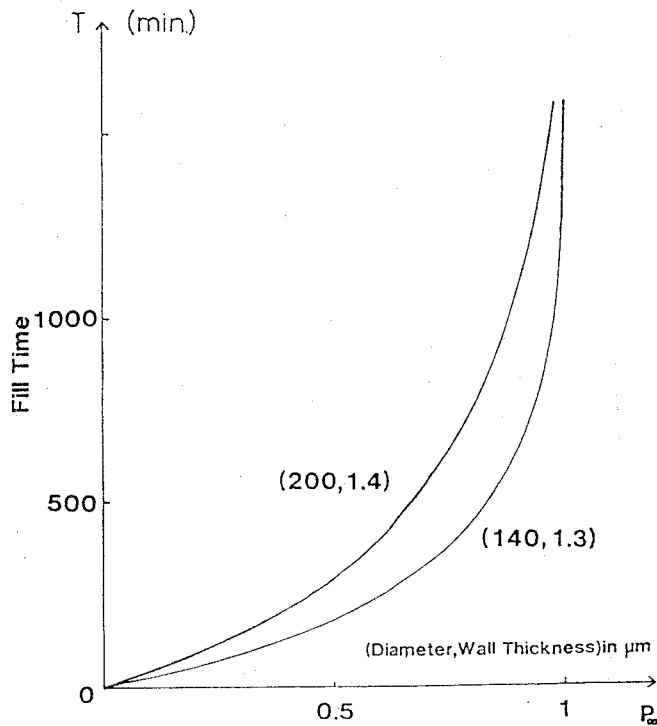


図6-4 三重水素充填に必要な時間。 $P_\infty$ は室温での平衡圧力。

## § 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、三重水素を含む充填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気圧充填される。充填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。

実験方法は燃料充填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、充填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、 $\gamma$ 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、<sup>2)</sup>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

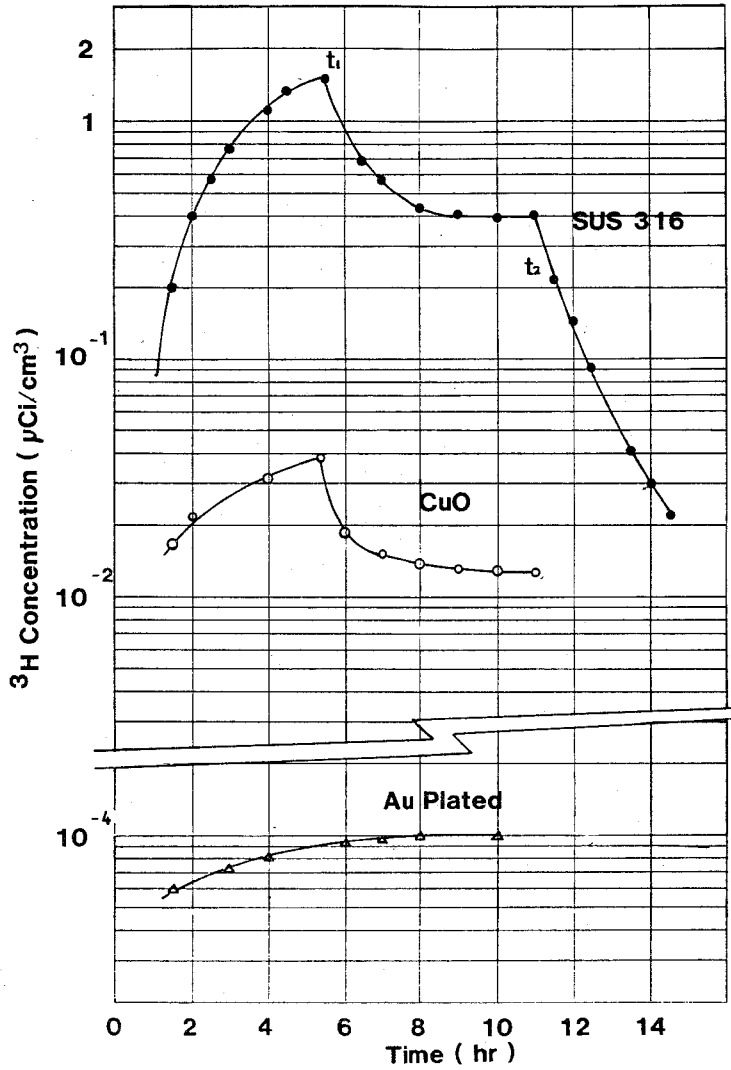


図 6 - 5 三重水素充填中のグローブボックス内三重水素濃度。  
 $t_1$  で回収装置運転開始した。

m³) 中の三重水素濃度である。図 6 - 5 で SUS 316, 酸化銅を用いた実験では  
 充填開始後 4.7 時間で三重水素回収装置が動作され, 1 0.5 時間後に炉の温度を下  
 げた。

グラフの傾きから SUS 316 単管からの三重水素の漏洩は 3.1mCi/min と  
 なる。充填中に漏れた全量は 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 SUS 316 単管を用いて充填作業を行なった時の作業室内の三重水素濃度

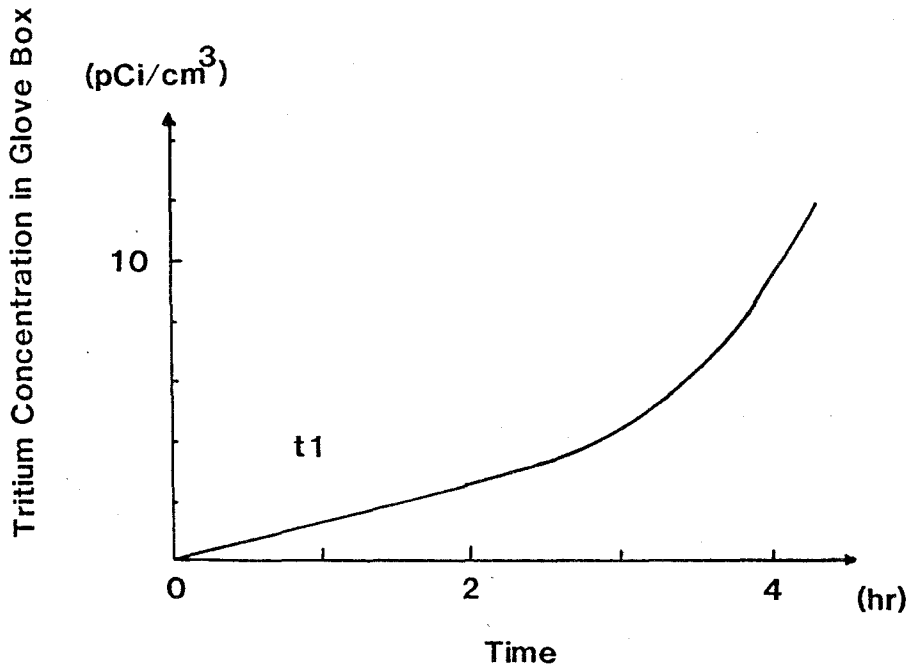


図6-6 ベリリウム炉を用いた場合のグローブボックス内三重水素濃度。前半はグローブボックスからの三重水素放出により徐々に増加した。

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  $0.3 \sim 1.5 \mu\text{m}/\text{cm}^3$  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  $120 \text{ m}^3$  の室内は  $20 \text{ 回}/\text{h}$  の割で換気されているが、室内での三重水素濃度は  $3 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  であった。法で定められている作業室内の三重水素濃度  $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  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 SUS 316 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。これは後で述べるようにするが、SUS と金メッキの付着力が弱いと思われる。図6-7, (2)は SUS と金メッキの付着強度を高めるために SUS 316 上にニッケルを  $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$  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  $3 \mu\text{m}$  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

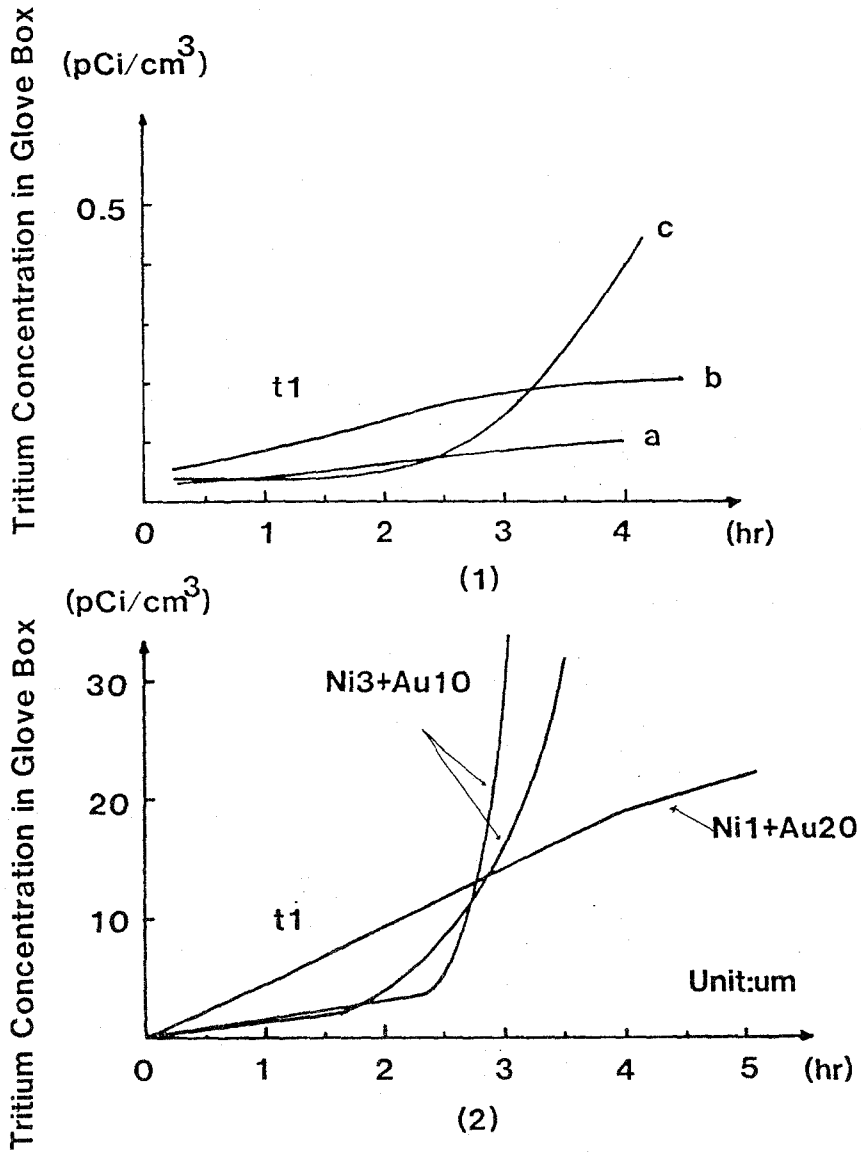


図6-7 金メッキ炉を使った場合の充填作業中のグローブボックス内三重水素濃度 (1)はステンレス上に直接金メッキした場合。(2)はニッケルをメッキしてから金メッキを行なった。

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,

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

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

$R$ : 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

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

境界条件は

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

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

$S$  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

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

である。この解は

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

で与えられる。

単位面積，時間当りの透過量  $\Phi(t)$  は，

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

で与えられるので，管からの透過量  $Q(t)$  は，

$$Q(t) = -\frac{DS P_1^{1/2}}{\ell} \left( 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos m\pi e^{-D \frac{m^2 \pi^2}{\ell^2} t} \right) \quad (6-15)$$

で与えられる。SUS 316，500°C における厚さ 1.5 mm 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。

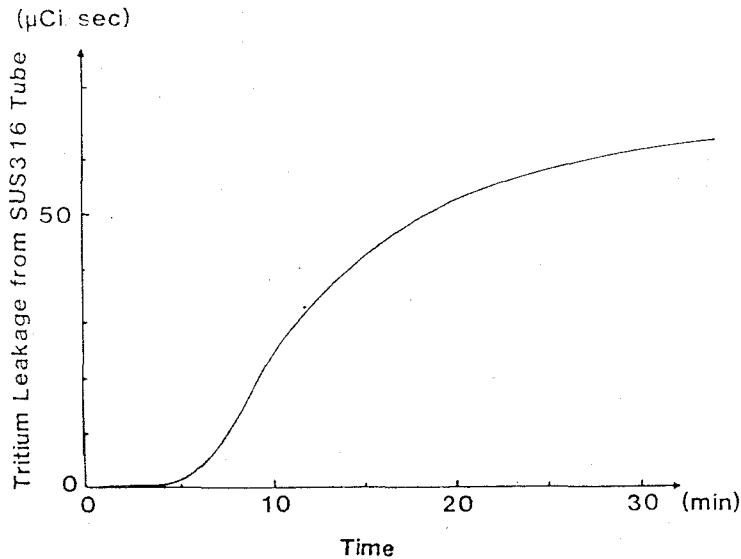


図 6-8 計算によるステンレス管からのトリチウム漏洩

定常状態におけるパイプからの透過  $Q'$  は単位長当り，

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

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°C， $P_1 = 50 \text{ kg/cm}^2$ ) での SUS 316 炉からの三重水素漏洩量は 3.4 Ci/時である。一方実験結果は 0.19 Ci/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つた。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 $D \text{ cm}^2/\text{sec}$	溶解度 $S \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ atm}^{1/2}$	透過率 $\Phi = SD \text{ cm}^3/\text{sec atm}^{1/2}$
Al	400°C	$7.1 \times 10^{-5}$	$7.6 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-9}$
Au	400°C	$8.1 \times 10^{-6}$	—	—
	500°C	$1.4 \times 10^{-5}$	—	—
Be	400°C	$1.1 \times 10^{-8}$	—	( $2.8 \times 10^{-10}$ )
	500°C	$1.7 \times 10^{-8}$	—	—
Cu	400°C	$1.1 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-7}$
	500°C	$2.7 \times 10^{-4}$	$9.7 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-6}$
SUS	400°C	$1.3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-1}$	$3.0 \times 10^{-7}$
316	500°C	$4.6 \times 10^{-6}$	$3.1 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-6}$ ( $3.6 \times 10^{-7}$ )

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

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

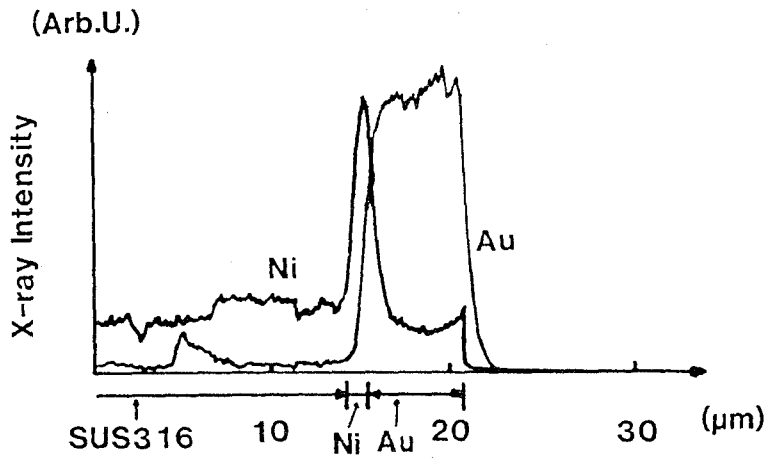
で与えられる。500℃における水素の金中での拡散係数は  $1.4 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/sec であることから  $t = 0.02$  sec となる。ステンレス中での水素の分布は1時間以内に定常になっていると考えられるので、観測された漏洩は単なる拡散ではないと考えられる。一般にステンレス地金上に直接施されたメッキは付着強度が弱いことから、ステンレス中を拡散した水素が金メッキ層をもち上げ、ミクロなクラックを金メッキ層に作り、そこを通過して漏洩したものと推定される。

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(Au92%, Ni8%)をコーティングした例では、充填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。

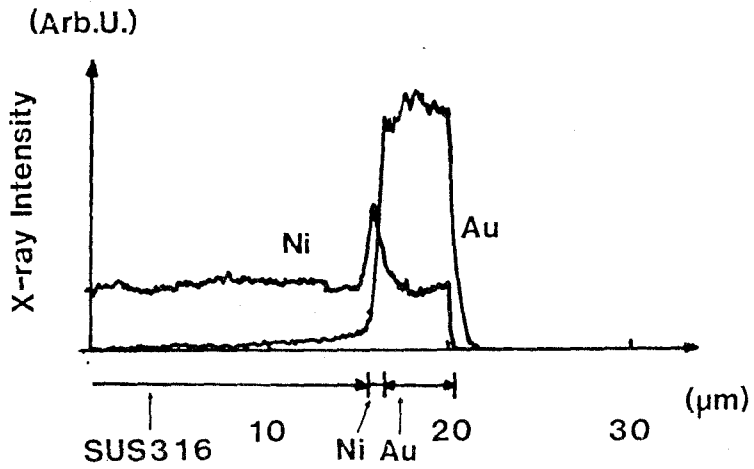
エネルギー分散型のX線マイクロアナライザーで調べた結果を図6-9に示す。試料はニッケル0.9μm上に金を6μmコーティングしたものを500℃で1時間及び20時間加熱したもので、断面上での元素分布を調べたものである。X線マイクロアナライザーの空間分解能は2μm程度なので正確な議論はできないが、1時間加熱でニッケル層からのKスペクトル強度は50%に落ち、20時間加熱した試料では35%に落ちている。金層へはニッケルの他に鉄、クロムの拡散も認められる。3時間加熱した例で金メッキ表面での元素比はAu78%, Ni16%, Fe, Co6%であった。(表6-II) 現段階ではどの元素が漏洩率の増加に影響し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。著者の実験では充填後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 %
3 0 時間加熱後	72 %	20 %	~ 8 %

が観測された。

ベリリウム<sup>4)</sup>の400°Cにおける水素拡散定数は、 $1.1 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/secである。  
(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、

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

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 SUS 316, Ni 1 μm, Au 20 μm 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

三重水素充填炉として SUS 316, 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 SUS 316 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 1 μm のニッケルをコーティングし、20 μm 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 5 μCi/h に抑えることができた。この値は将来の DT 100 気圧充填装置に必要な値に十分足りるものである。

### § 6-4 三重水素充填量の非破壊検査

#### 6-4-1 目 的

燃料の充填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。充填量は壁厚、直径、材料の影響を受けるだけでなく、充填炉中に置かれていた位置などにも影響される。また充填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、充填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。

充填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<sup>5)</sup> (2)プロトンビーム中に置き、その散乱を利用する方法<sup>6)</sup> (3) $\beta$ 線を測定する方法、(4) $\beta$ 線によって励起されたX線を利用する方法<sup>7)</sup>などが提案されている。(1)の方法は20気圧以上充填された燃料を $\pm 5$ 気圧程度の精度で測定する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 $\pm 3\%$ 、測定限度0.1 ng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 $\beta$ 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 $\beta$ 線の影響が大きく精度が悪い。

著者はSiLi検出器を用い $\beta$ 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  $\mu\text{Ci DT}$ )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填量、 $\beta$ 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、三重水素充填量、検出効率を実験的に求めた。 $\beta$ 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<sup>8)</sup>

#### 6-4-2 実験方法及び結果

##### (a) X線発生量測定

充填された三重水素から放出された $\beta$ 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

$$\begin{aligned} \text{X線発生量} = & (\text{検出効率}) \times (\text{X線透過率}) \times (\beta\text{線自己吸収補正}) \\ & \times (\text{変換定数}) \times (\text{三重水素充填量}) \end{aligned} \quad (6-19)$$

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-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10mm<sup>2</sup>であり、ベリリウム窓の厚さは13μmである。このシステムでの空間的な検出効率は大気質量比(GMB)とベリリウム窓の距離が500μmのとき、0.064である。

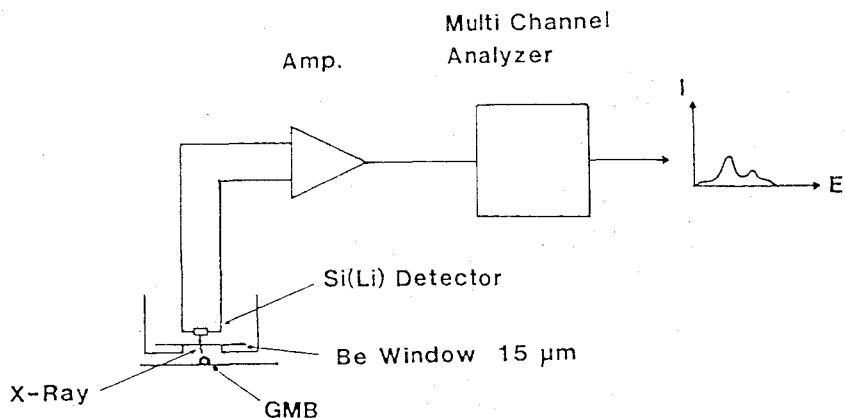


図6-10 X線マイクロアナライザーによる三重水素充填量非破壊検査

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500μm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、充填量を確認す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、充填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<sub>2</sub>70%、Na<sub>2</sub>O20%、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>5%、CaO5%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。

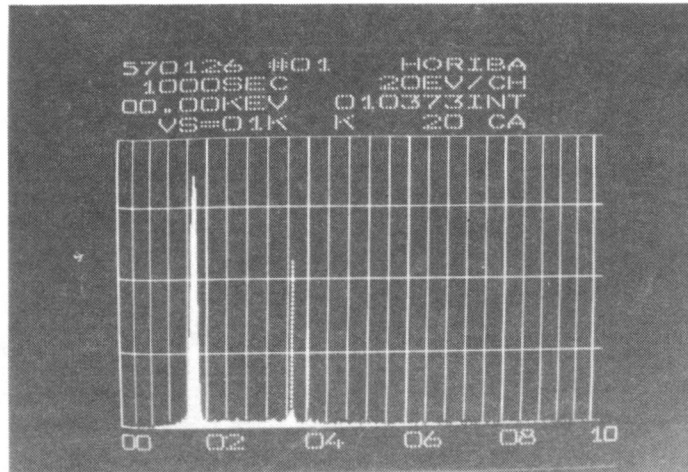


図6-11 三重水素を充填したGMBからのX線スペクトル

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 三重水素を充填したGMBからのX線測定結果

	直径×壁厚 (μm)	破壊法で求めた 充填圧力(atm) T <sub>2</sub> 量(ng)		X線計数量 (count/sec 4πstr)	補正のない変換定数 (C/sec ng T <sub>2</sub> )
# 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填量測定

三重水素を充填したGMBを二枚のガラス板で挟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、

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

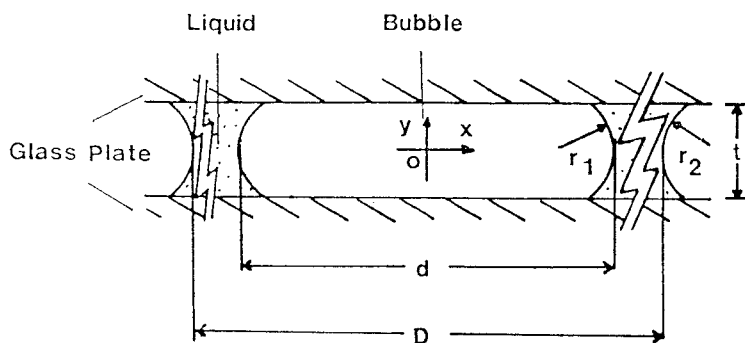


図6-12 燃料充填量破壊検査のための気泡モデル

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、

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

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  $\alpha$  とすると、

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

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

両式から

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

となる。

実際の場合  $r \simeq r_2$   $D \gg d$  であるから

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

となる。直径  $100 \mu\text{m}$  の GMB に 30 気圧充填された試料の測定を行なう場合、 $50 \mu\text{m}$  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  $\beta$  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  $\beta$  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。さらに壁に当たった  $\beta$  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  $\beta$  線の減衰を求める。

物質中での電子の減衰は stopping power を与える式

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

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

$\tau$  : 電子の運動エネルギー

$A$  : 質量数

$\beta$  : 電子の速度/光速

$Z$  : 原子番号

$I$  : 平均励起ポテンシャル

$$r_0 = 7.94 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$$

$$N_a = 6.02 \times 10^{23}$$

で与えられる。<sup>9)</sup> 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、

$$E(x, E_0) = \int_0^x \frac{dE}{dx} dx \quad (2-28)$$

であり、最初の  $\beta$  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  $N_x(E)$  との関係は、

$$N_x(E(x, E_0)) = N_0(E_0)$$

(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。

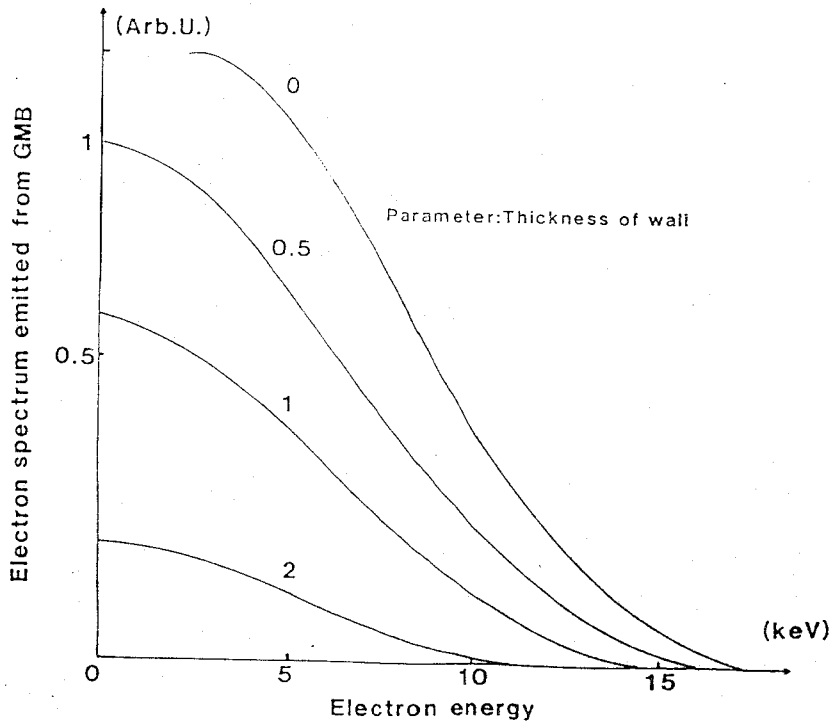


図 6-13 水素ガス中の三重水素  $\beta$  線の減衰

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。

$$X_G(x) = \frac{\int S(E) N_x(E) dE}{\int S(E) N_0(E) dE} \quad (6-30)$$

この関係を図 6-14 に示した。

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

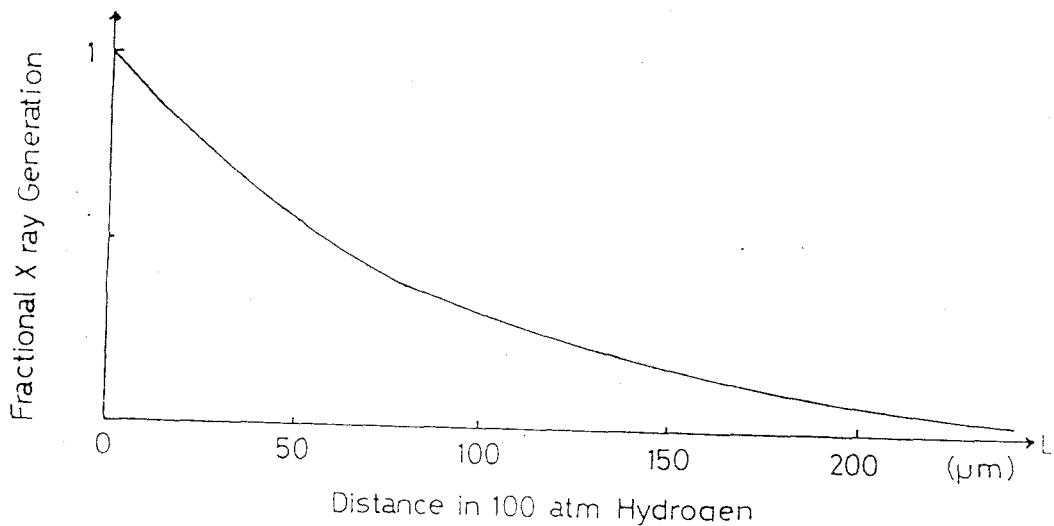


図 6 - 14 水素ガスで減衰を受けた三重水素β線によるX線発生

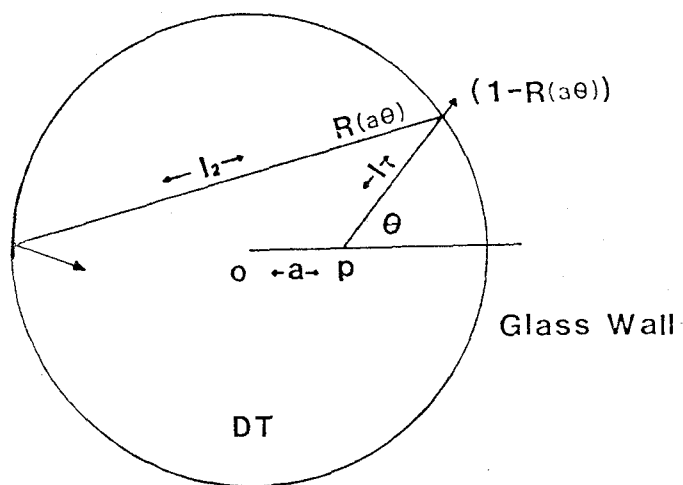


図 6 - 15 水素ガスによるβ線の減衰を計算するためのモデル

$$\Gamma_X(a\theta) = X_G(l_p) \{1 - R(a\theta)\} + X_G(l_1) X_G(l_2) R(a\theta) \{1 - R(a\theta)\} \\ \dots + X_G(l_1) \{1 - R(a\theta)\} \cdot \{X_G(l_2) R(a\theta)\}^{n-1} + \dots$$

(6-31)

$$\Gamma_x(a\theta) = \frac{X_G(\ell) \{1 - R(a\theta)\}}{1 - X_G R(a\theta)} \quad (6-32)$$

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  $C_\beta$  は

$$C_B = \int_0^\pi \int_0^{r_0} \Gamma_x(a\theta) \frac{\sin\theta}{2} da d\theta \quad (6-33)$$

で与えられる。 $C_\beta$  をGMBの内径と標準状態での充填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、 $E = 5 \text{ keV}$  のときの値を用い、ガラスの平均原子番号9.8 (SiO<sub>2</sub> 70%, Na<sub>3</sub>O<sub>2</sub> 20%, CaO 5%, B<sub>2</sub>O 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。<sup>9)</sup>

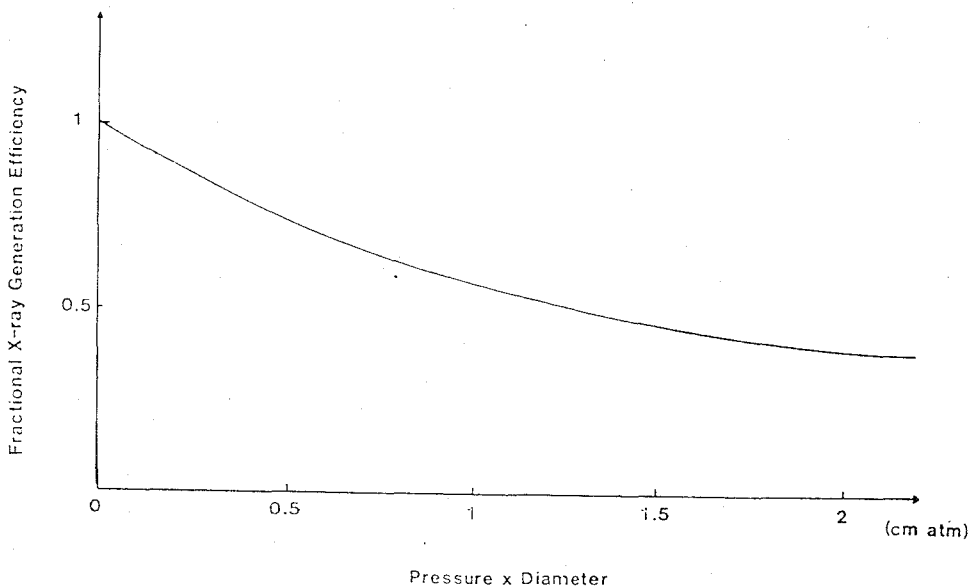


図6-16 水素ガスによるβ線自己吸収に対する補正

補正係数  $C_\beta$  は  $D$  をガラスマイクロバルーンの直径 ( $\mu\text{m}$ ) ,  $t$  を壁厚 ( $\mu\text{m}$ ) ,  $P$  を充填圧力 (a tm) として,

$$z = P \times (D - 2t) \times 1 \times 10^{-4} \quad (6-34)$$

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

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

表 6 - IV に  $\beta$  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。  $\beta$  線吸収補正を行なうことにより、  $\pm 50\%$  あったばらつきが  $\pm 14\%$  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 <sub>2</sub>	$\beta$ 線自己吸収 補正 (C $\beta$ )	Cwを入れた 変換定数 C/sec ng T <sub>2</sub>	壁厚補正 (CW)	C $\beta$ Cwを入れた 変換定数 C/sec ngT <sub>2</sub>
# 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 $\pm$ 25.7	—	57.7 $\pm$ 7.9	—	59.2 $\pm$ 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  $\beta$  線のエネルギーは最大で 18 keV であり、この  $\beta$  線のガラスマイクロバルーン (GMB) 壁中での最大飛程は約  $33 \mu\text{m}$  である。したがって壁厚が薄い場合  $\beta$  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、 $\beta$  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  $\beta$  線の減衰と同じ手順でGM B壁に侵入した  $\beta$  線のスペクトルを求めることができる。GM B壁内面上での  $\beta$  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  $\beta$  線のスペクトルを図6-17に示した。

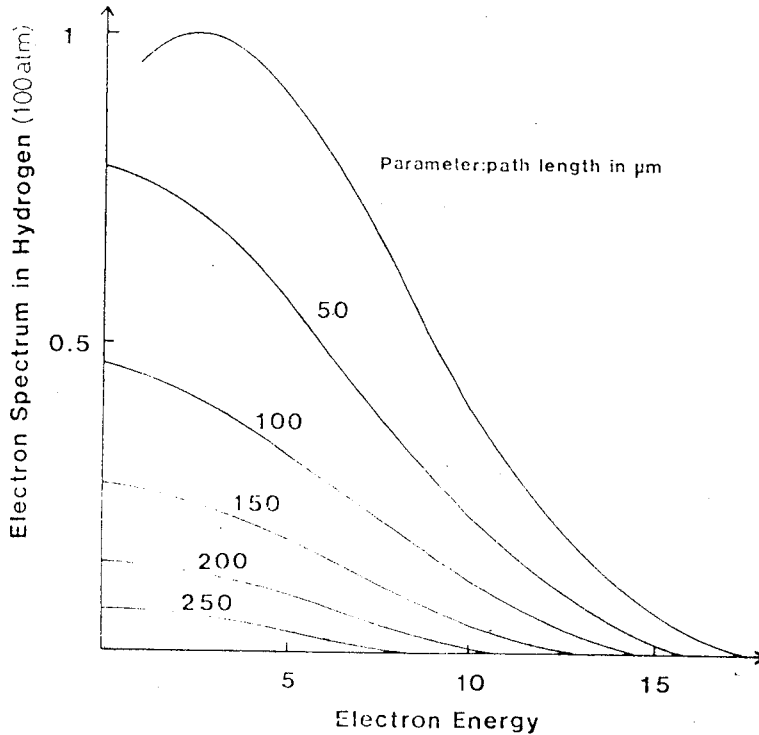


図6-17 GM B壁中での三重水素  $\beta$  線の減衰

対象とするガラス, 三重水素による  $\beta$  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。 $\omega_k$  を蛍光効率,  $Q_k(E)$  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,

$$n_d = \omega_k \int \frac{N_0 \rho}{A} Q_k(E) N_d(E) dE \quad (6-36)$$

で,  $N_0$  はアボガドロ数,  $\rho$  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



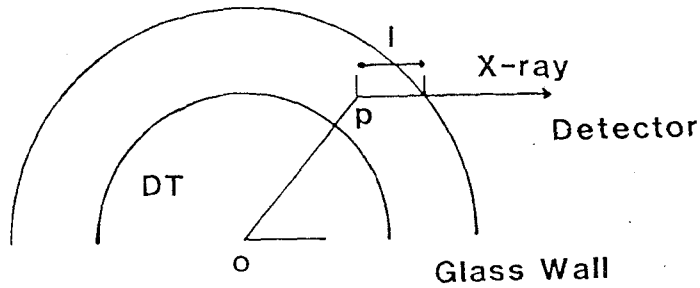


図6-18 X線発生と吸収を計算するモデル

で  $\exp(-\mu \ell_1)$  だけの減衰を受ける。したがって、検出器にかかる光子数は

$$n_{\text{detect}} = \frac{\omega_k N_0 \rho}{2A} \iiint Q_k(E) N(d) e^{-\mu \ell_1(a\theta)} da d\theta dE \quad (6-37)$$

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。

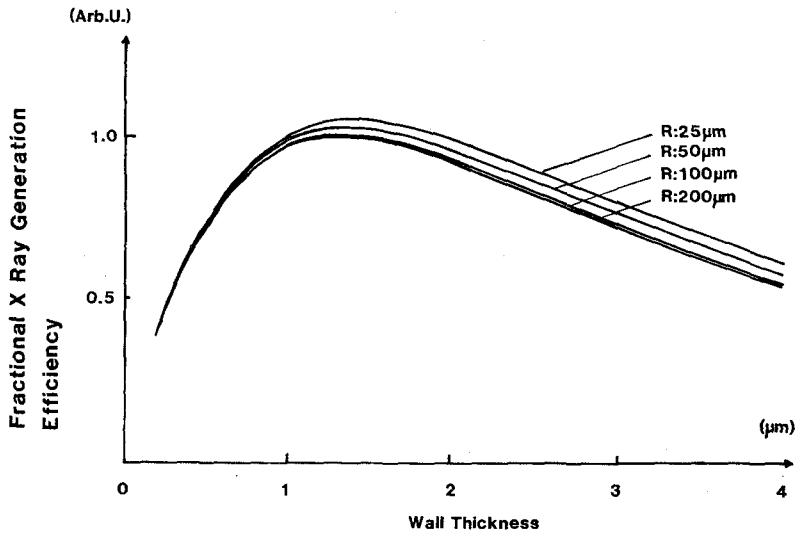


図6-19 X線の発生と吸収に対する補正係数

図ではX線検出効率が最大になる直径200 μm (≒無限大) 壁厚1.3 μm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  $1.4 \mu\text{m}$  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,  $0 \leq t \leq 5 \mu\text{m}$ ,  $50 \leq D \leq 500 \mu\text{m}$  の範囲で,

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

の関係で  $\pm 2\%$  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 - W に示した。補正を行なうことにより,  $\pm 14\%$  あったばらつきが  $\pm 1.2\%$  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, 補正值の範囲が  $0.83 \sim 1.1$  と変化が少なかったのと, 破壊法による充填量の測定に  $\pm 20\%$  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  $56.8 \pm 6.7 \text{ count/ng T}_2$  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  $10^{-6} \text{ sec}$  である。実際にデータに影響し始めるのは計数率が  $1000 \text{ c/sec}$  を越えるあたりからである。

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

バックグラウンドの影響：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  $\text{cm}^3$ , ガスチェンバー類が数百  $\text{cm}^3$  あるのに対して SiLi 検出器は  $0.1 \text{ cm}^3$  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  $30 \text{ c/min}$  程度であるから SiLi では  $6 \times 10^{-2} \text{ c/min}$ , 即ち  $1 \text{ c}/1000 \text{ 秒}$  である。実際試料をつけずに  $1000 \text{ 秒}$  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填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、

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

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

であり、平均値の確からしさは

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

である。本実験のデータの場合

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

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填量、横軸をX線測定結果から計算して求めた充填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、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、充填量が少ない場合、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価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。

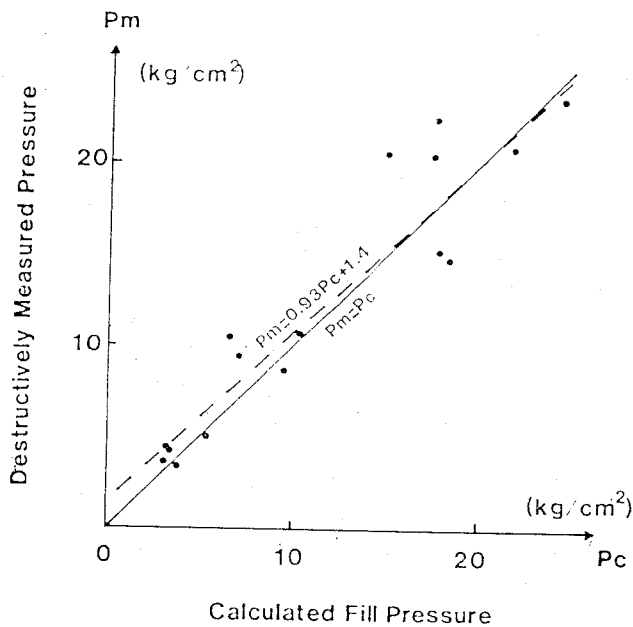


図 6-20 破壊法と非破壊法による三重水素測定結果

#### 6-4-4 結 論

三重水素充填量を非破壊で測定するために、三重水素充填量とX線発生量との関係を求めた。充填量を求める場合、充填ガスによる $\beta$ 線の自己吸収と、壁内部におけるX線の吸収及び $\beta$ 線の壁の通過を評価する必要がある。 $\beta$ 線の自己吸収はガラスマイクロバルーンの内径と充填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填圧が少なくても無視できなくなる。直径 $200\mu\text{m}$ 、充填圧 $10$ 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 $1\mu\text{m}$ 以下の場合には $\beta$ 線が透過することにより発生量が少なくなり、 $1\sim 2\mu\text{m}$ ではほぼ一定、 $2\mu\text{m}$ 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。

三重水素充填量とX線発生量を

$$(\text{三重水素充填量, } m, \text{ ng}) = (\text{X線測定値, } X_c, \text{ count/sec}) / (\text{検出器立体角, } A, \text{ ster.}) / (\beta \text{線吸収補正 } C_\beta) / (\text{壁厚補正, } C_w) / (\text{変換定数, } B, \text{ count/sec ng T}_2)$$

の関係とした場合それぞれ、

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

$L$  : 検出器前面とGMBを置いた板までの距離 (mm)

$D$  : GMBの外径 ( $\mu\text{m}$ ) ( $50 \leq D \leq 500$ )

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

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

但し  $0 \leq z \leq 2 \text{ cm atm}$

$P$  : 仮定したDT充填圧 (atm)

$t$  : GMBの壁厚 ( $\mu\text{m}$ ) ( $0 \leq t \leq 5 \mu\text{m}$ )

$$C_w = \{ 1 + \{ 0.067t + 0.06(1 - e^{-t}) e^{-1.4t} \} \} e^{-0.012D} \\ \times 2.01 (1 - e^{-1.1t}) e^{-0.33t} \quad (6-46)$$

$$B = 56.8 \pm 6.7 \text{ count/sec ng T}_2 \quad (6-47)$$

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填圧と仮定した圧力が異なる場合、仮定圧を修正し、計算結果と充填圧が一致したとき、それが真の充填圧となる。

### § 6-5 DTペレットハンドリング

三重水素充填後のガラスマイクロバルーン(GMB)には1個100  $\mu\text{ci}$ 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100  $\mu\text{m}$ 程度であり、重量はngのオーダーである。微小なGMBは充填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。

# DT FILLING

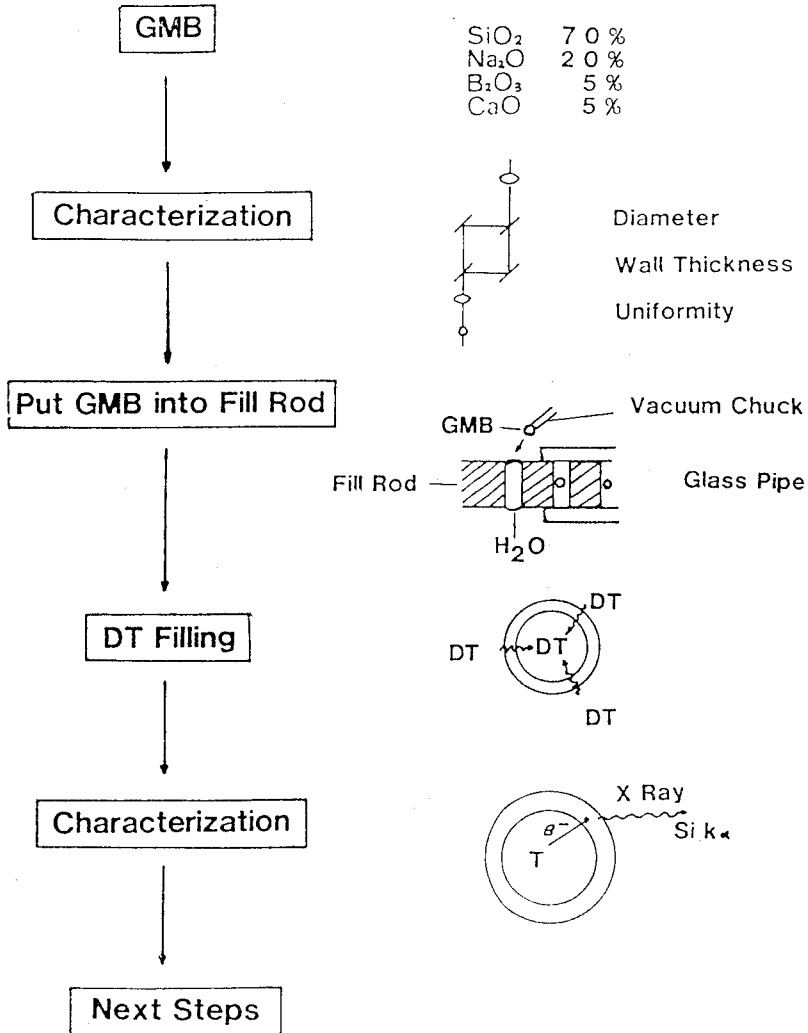


図6-21 DTペレットのハンドリング法

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1mmの黄銅棒に直径300 $\mu\text{m}$ 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填することにより、以後の管理が容易になるとともに、充填中に一個のGMBが圧力により破壊されても、隣接のGMB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填炉に入れられる。

充填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。

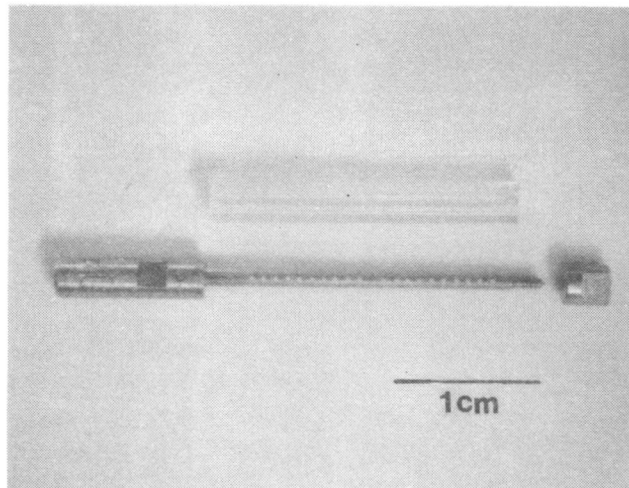


図6-22 フィルロッド

充填後のGMBはしばしば洗浄を必要とする。GMB上には細かい $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 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。

三重水素を充填した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1mm、外径3mm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5mm程度吸い込み、その中にDT・GMBを真空ピンセットで挿入する。マイクロポンプを動作させることにより液体は、直径1mm、長さ5mm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

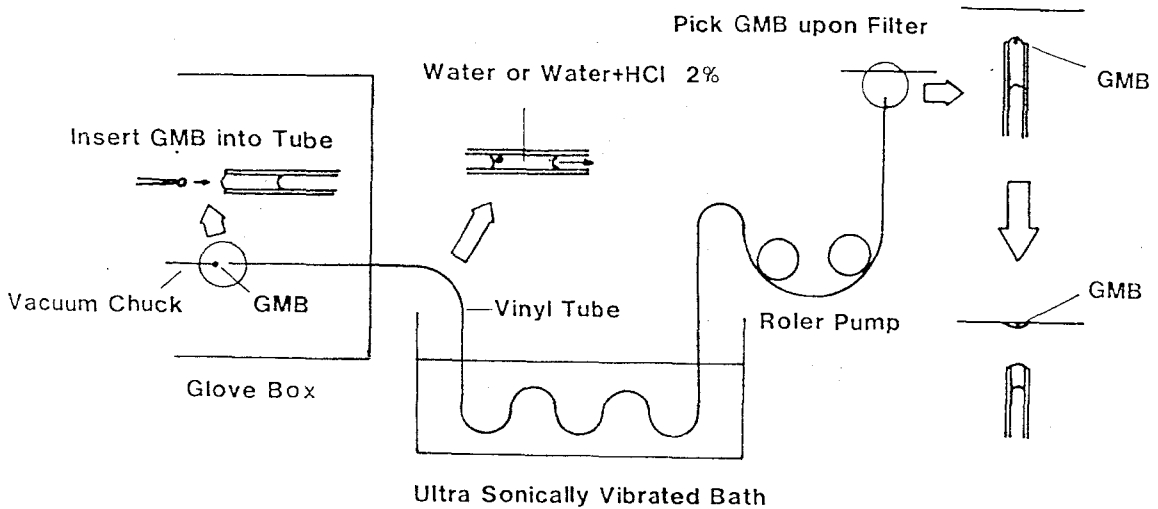


図6-23 三重水素ペレット洗浄装置

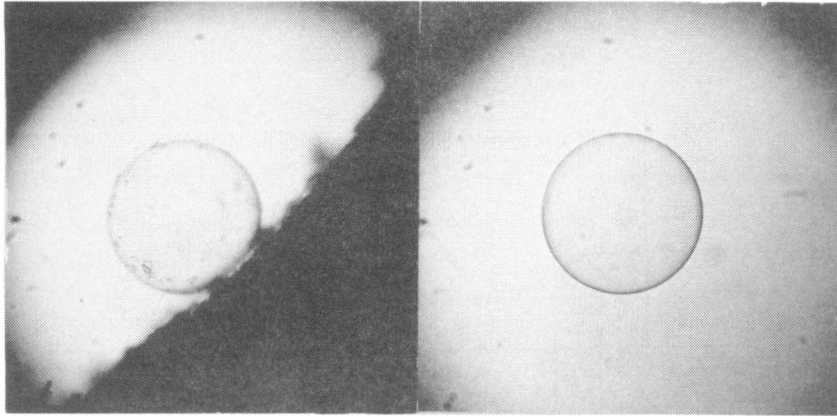
差がない限り、あるいはGMB上の汚染が特にひどいときを除き、液柱から出ることはない。逆転も可能である。超音波槽で洗浄された後、液柱は垂直に取り付けられたパイプ出口まで送られ、端面が凸になるまで押し出される。GMBは浮力で凸部最上段まで上がるので、これをミリポアフィルター上に移し取る。以後の取扱いは真空ピンセットで行なう。このシステムは直径150 $\mu$ m以上1mm以下のGMBに有効で、汚染発生の可能性も少ない。

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 $\frac{1}{2}$ 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、 $\text{SiO}_2$ 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





a

b

図6-24 塩酸による洗浄効果, (a)洗浄前 (b)洗浄後

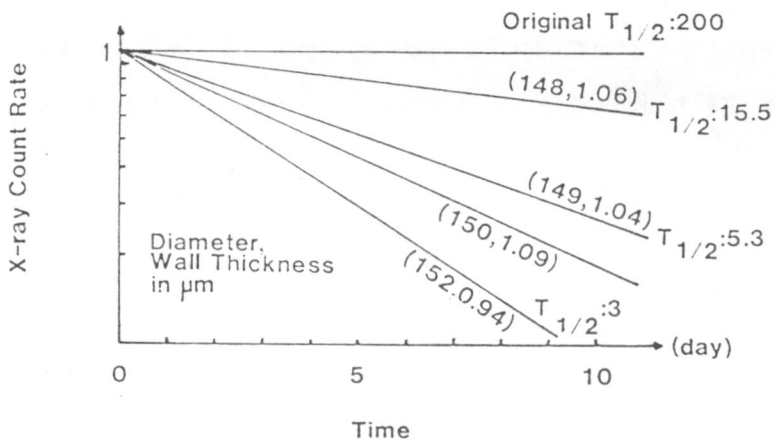


図6-25 塩酸洗浄による燃料保持能力の低下

マ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<sub>2</sub>70%, Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub>20%,  
CaO5%, B<sub>2</sub>O5%

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	$8.9 \times 10^{-2}$
3	10%	20分	$8.5 \times 10^{-2}$
4	10%	90分	$8.2 \times 10^{-2}$

### §6-6 ま と め

三重水素の使用量、洩れ量の少ない充填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88Ciの三重水素ガスを用いて20気圧まで充填することができた。充填中の炉からの三重水素の拡散漏洩はSUS316上にニッケルを0.6μm、金を20μmコーティングすることにより、5μCi/hにまで下げることができた。

三重水素充填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 $56.8 \pm 6.7$  count/sec ng T<sub>2</sub>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。

また充填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) Lawrence Livermore National Lab. Laser Program Annual 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

燃料容器に充填した  $D_2$  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。<sup>1)</sup>

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。<sup>2)</sup> これは燃料を充填した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。<sup>3)4)</sup> これは重水素ガスを充填した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填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±1 K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。

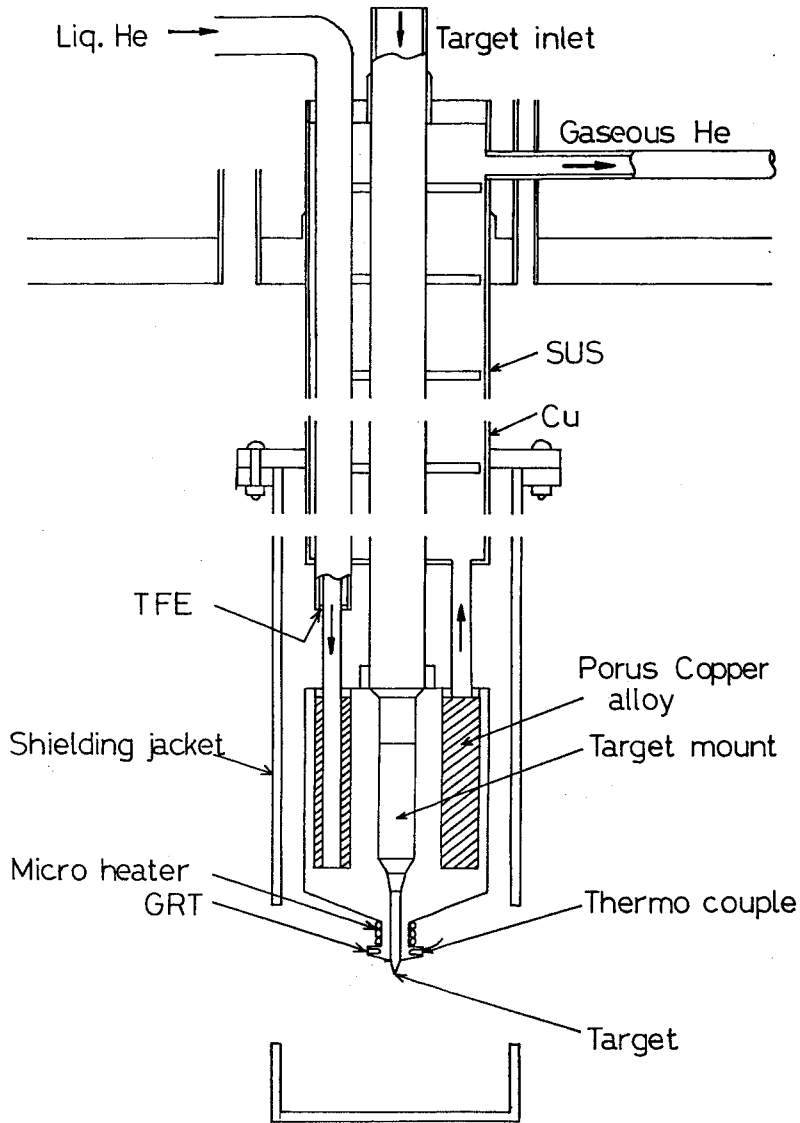


図7-1 クライオスタットの断面図

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 $100\mu\text{m}$ の無酸素銅を直径 $2\text{mm}$ 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 $20\mu\text{m}$ 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、液体窒素で冷却し、低温歪で取れないか確認をしてから実験に用いた。

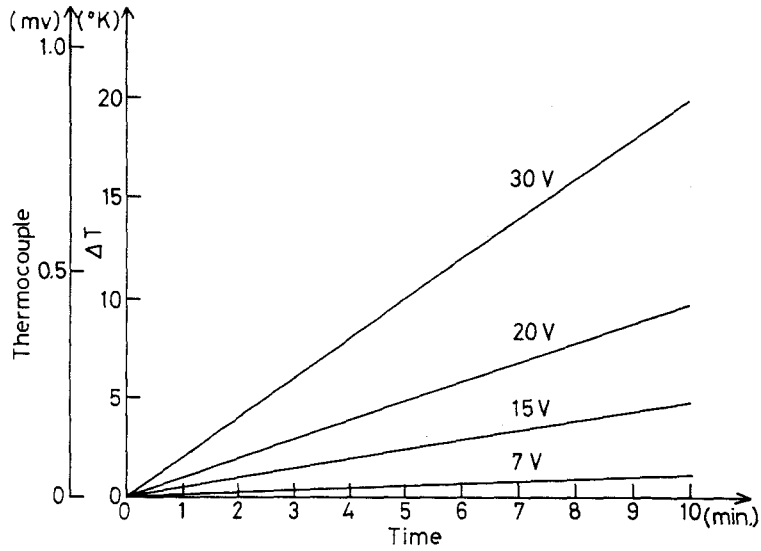


図7-2 マイクロヒーターによる加熱特性

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  $1\mu\text{m}$  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。

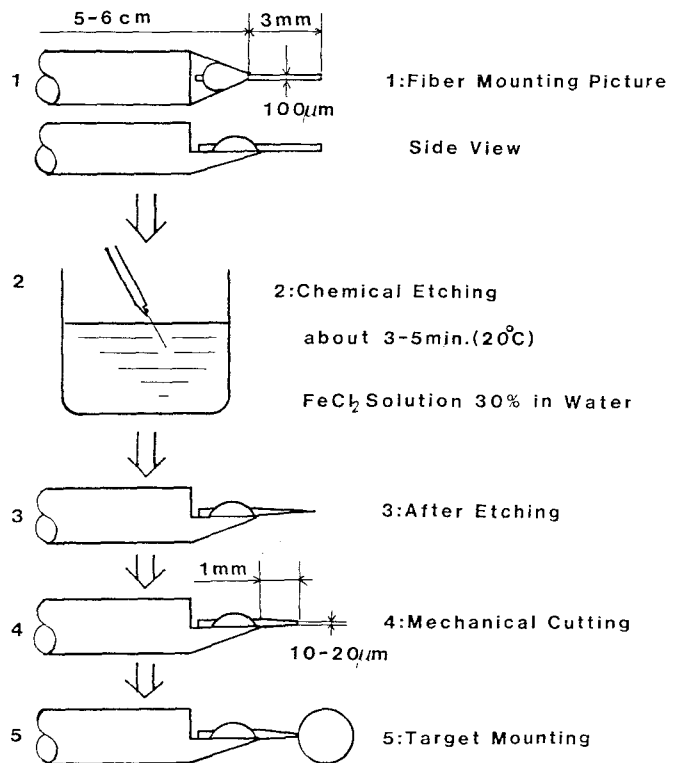
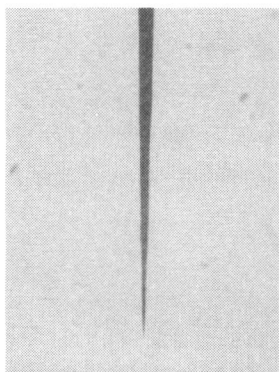
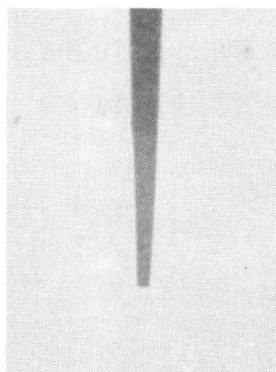


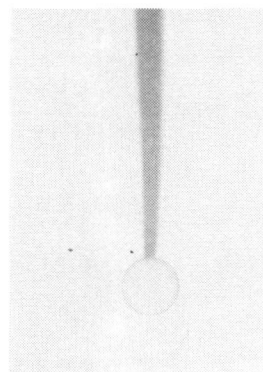
図7-3(a) クライオターゲット支持ファイバーの加工



**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

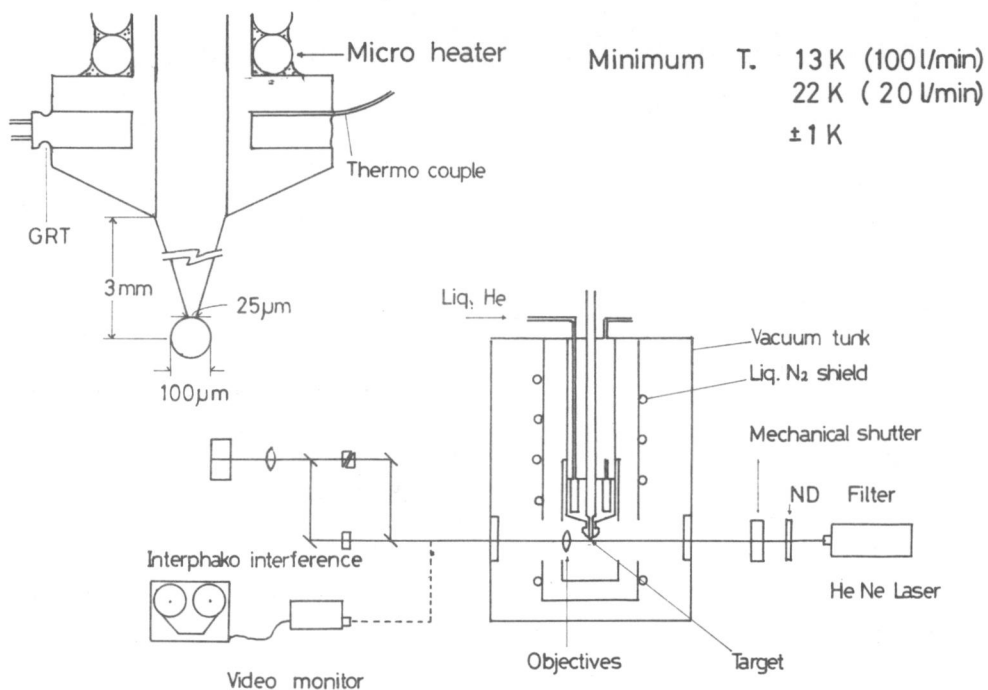


図7-4 液層分布測定観測系



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

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

$\theta$  : 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項は次節の關係を用い、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。

$N_{DL}$  は図7-5の關係を用い、 $N_{DV}$  は各温度における蒸気圧から密度を求め、室温で行なつて得た実験式

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

を用いて評価した。但し $\rho$ の単位は  $g/cm^3$  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

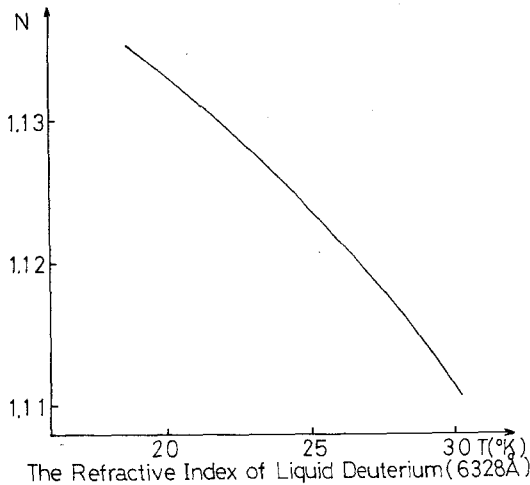


図7-5 液体重水素の屈折率

さは  $t_L$  は

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

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170 K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170 Kにおける水の蒸気圧にはほぼ等しい。

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

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

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

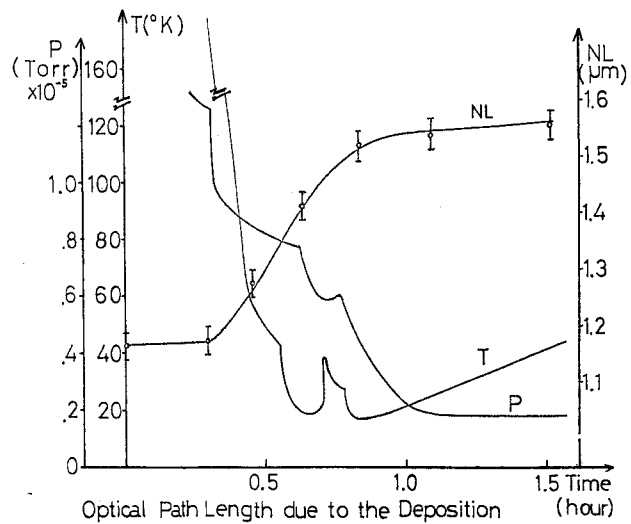
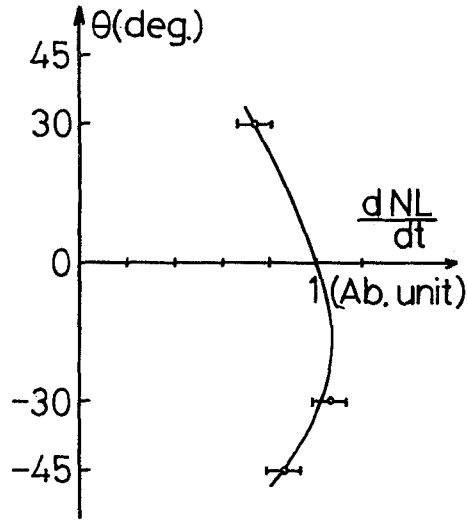


図7-6 実験中の光路長の変化。NLは(7-4)式から計算したものの。

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、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中に置いた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。



Uniformity of Deposited Layer

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、シールドの熱伝導率、充填圧

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30mmφ 2ヶ、即ち、立体角にして0.74π Ster.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/cm<sup>2</sup>の熱輻射を受けることになる。直径75μm、壁厚1.2μm、充填気圧25気圧のものを用いた場合の液体燃料層の分布を図7

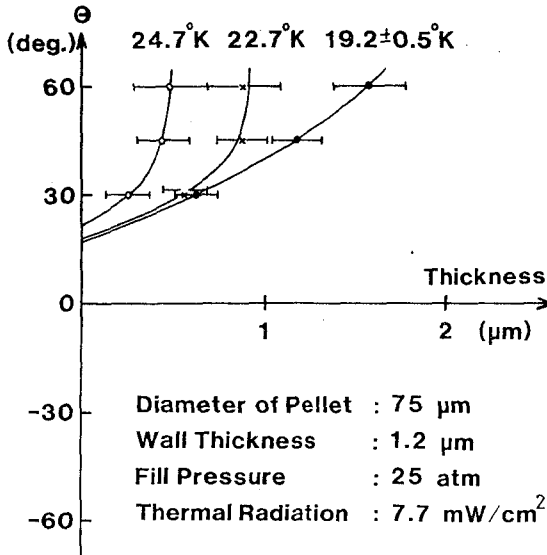


図7-8 液体燃料層の分布(1)

-8に示す。θ=0°はGMBの

冷却点を極として赤道面に当る。この場合液体は  $\theta = 20^\circ$  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気圧充填した結果である。25気圧に比較して  $\theta = 0^\circ$  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と思われる。

熱シールドの穴を小さくし、開口部が  $0.027\pi$  Ster.にした場合の実験結果を示す。直径  $70\mu\text{m}$ 、壁厚  $1.2\mu\text{m}$  のGMBに50気圧充填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  $0.5\mu\text{m}$  均一性 ( $\frac{1-4t}{t}$ , 面積加重平均) 90%の液体層を得た。

充填気圧を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、

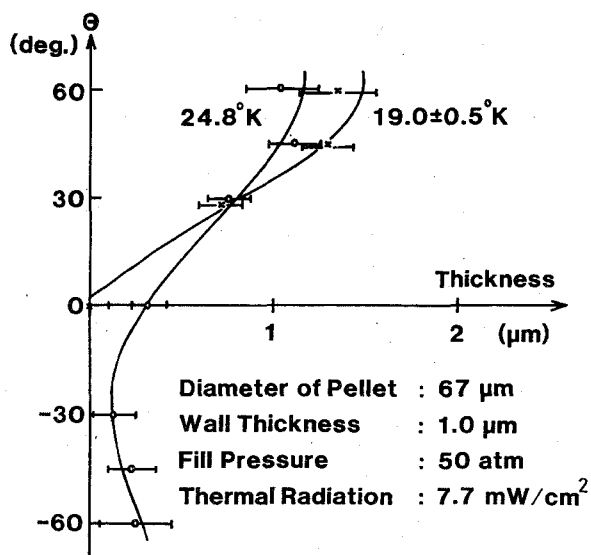


図7-9 液体燃料層の分布(2)

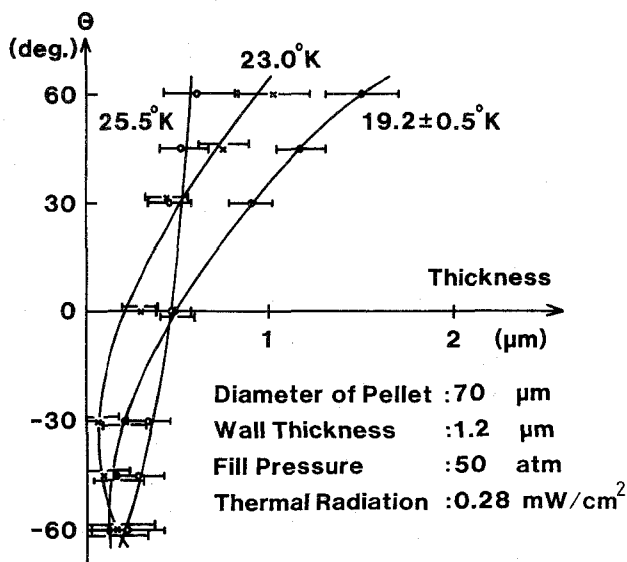


図7-10 液体燃料層の分布(3)

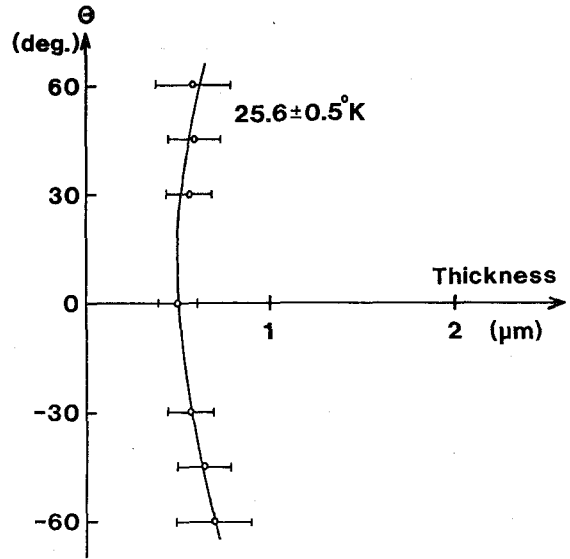
少なくとも  $2\text{ mW/cm}^2$  の熱輻射を受ける。このような条件下で均一な液体燃料層を得るための充填気圧を実験的に求めてみた。

熱シールドに  $0.19\pi\text{ Ster.}$  の穴を開け、直径  $100\ \mu\text{m}$  の GMB に  $100$  気圧充填した結果を図 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填量をふやすか熱シールドを可動式にし、輻射量を  $1.8\text{ mW}$  程度に落す必要がある。(次節参照)

### 7-2-3 考察

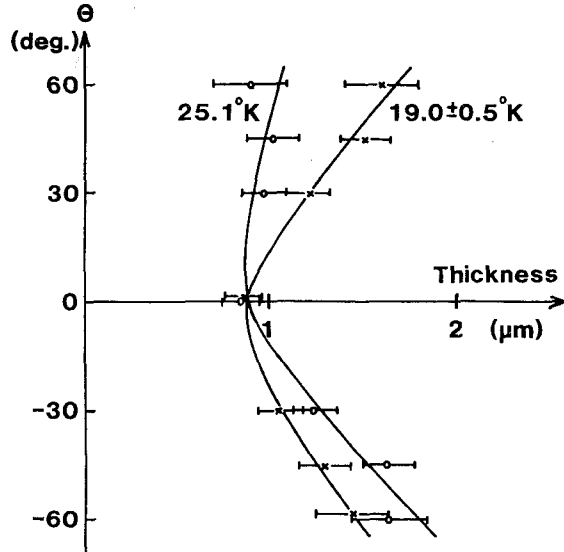
この項では、実験に基づいて均一な液体燃料層を得るため条件について考察する。

まず熱輻射  $7.7\text{ mW/cm}^2$  のとき、充填量  $25$  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  $0.37\text{ K}$  , b は  $0.35\text{ K}$  である。均一性は充填量の増



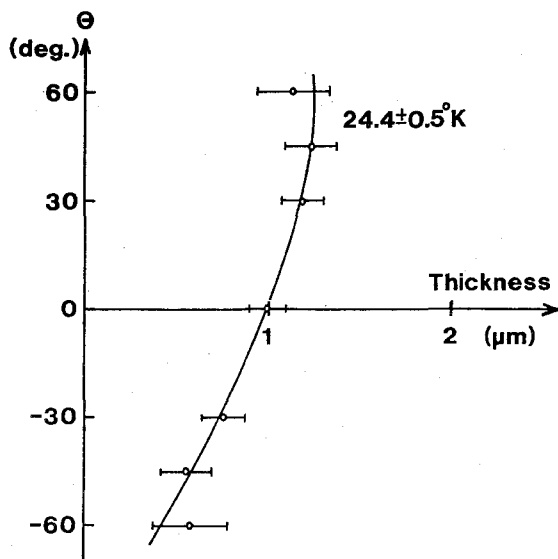
Diameter of Pellet :  $62\ \mu\text{m}$   
 Wall Thickness :  $1.0\ \mu\text{m}$   
 Fill Pressure :  $70\ \text{atm}$   
 Thermal Radiation :  $0.28\ \text{mW/cm}^2$

図 7-11 液体燃料層の分布(4)



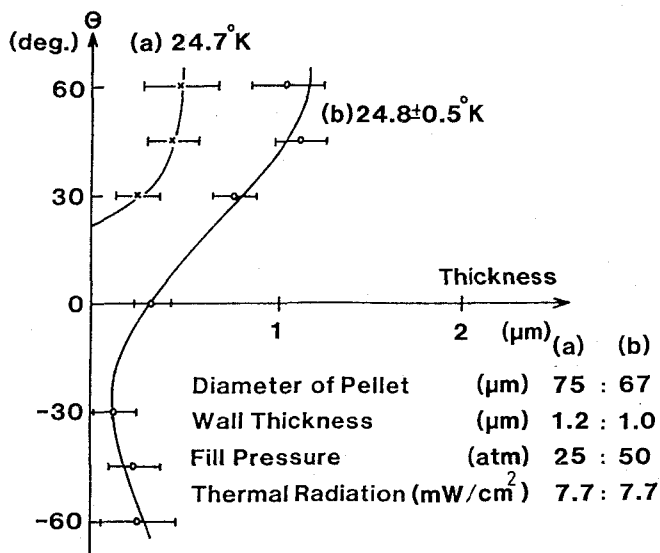
Diameter of Pellet :  $66\ \mu\text{m}$   
 Wall Thickness :  $1.0\ \mu\text{m}$   
 Fill Pressure :  $100\ \text{atm}$   
 Thermal Radiation :  $0.28\ \text{mW/cm}^2$

図 7-12 液体燃料層の分布(5)



Diameter of Pellet : 60  $\mu\text{m}$   
 Wall Thickness : 1.0  $\mu\text{m}$   
 Fill Pressure : 100 atm  
 Thermal Radiation : 2.0  $\text{mW}/\text{cm}^2$

図 7 - 13 液体燃料層の分布(6)



Diameter of Pellet	( $\mu\text{m}$ )	75 : 67
Wall Thickness	( $\mu\text{m}$ )	1.2 : 1.0
Fill Pressure	(atm)	25 : 50
Thermal Radiation ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )		7.7 : 7.7

図 7 - 14 充填量を変えたときの液体燃料層の分布(1)

加に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  $\text{mW}/\text{cm}^2$  のときの充填気圧に対する液層の分布の変化を図 7 - 15 に示す。直径  $66 \pm 4 \mu\text{m}$ 、温度 25 K のデータを集めたもので、約 60 気圧充填したとき最も均一度が良かった。充填量が増加するにしたがって下部の厚みが増加し、充填量 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を“くみ上げる”ことができなかったことを示している。

充填気圧一定で熱輻射がかか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 気圧充填、

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。この組み合わせでは熱輻射を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。充填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。

#### 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

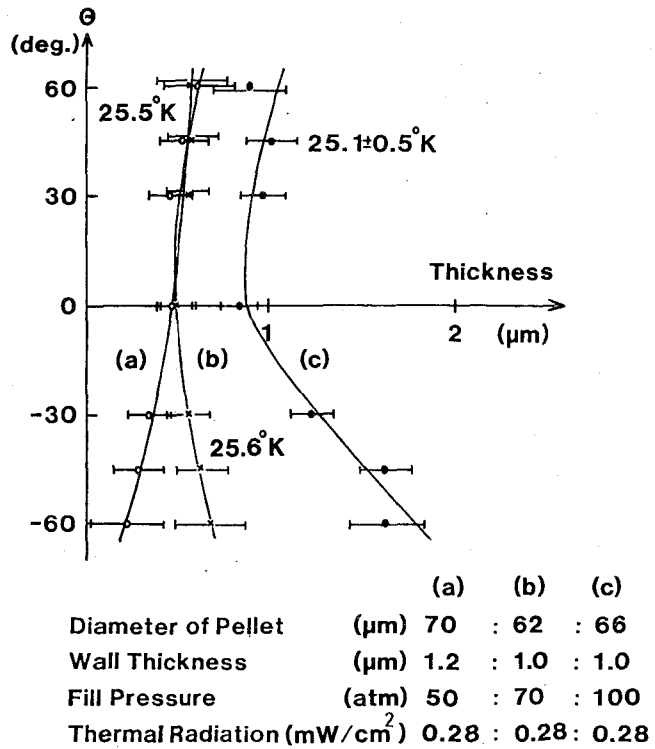


図7-15 充填量を変えたときの液体燃料層の分布(2)

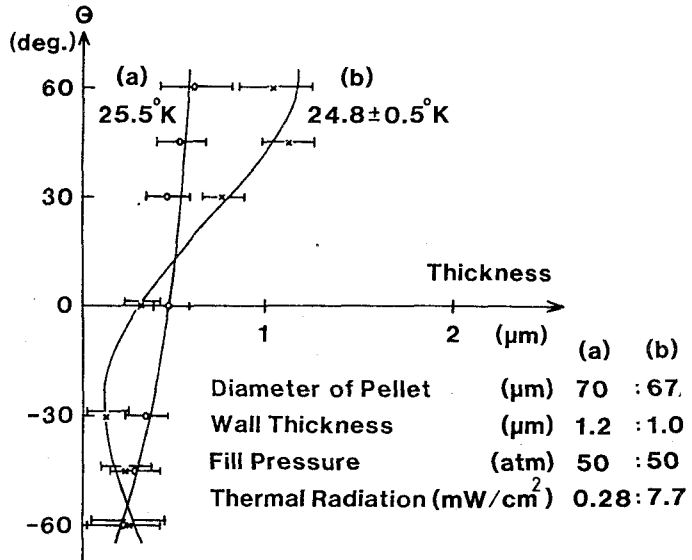


図7-16 熱輻射を変えたときの液層分布

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) 充填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62 $\mu\text{m}$ 、壁厚1 $\mu\text{m}$ のGMBに重水素を70気圧充填して、厚さ0.6 $\mu\text{m}$ 均一性、 $\pm 15\%$ の液層を得た。実験では直径62 $\mu\text{m}$ 、壁厚1 $\mu\text{m}$ のGMBに重水素を70気圧充填し、厚さ0.6 $\mu\text{m}$ 、均一性 $\pm 5\%$ 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

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

ここで  $r_0$  容器の内径                       $\eta$  液体の粘性  
 $\delta$  液体の厚さ                               $L$  液体の気化熱  
 $\rho$  液体の密度

であり、また容器の壁を伝わる熱量  $Q_{\text{Wall}}$  は

$$Q_{\text{Wall}} \approx 2\pi r_0 \Delta t \lambda_{\text{Wall}} \text{grad } T_W \quad (7-6)$$

となる。ここで

$\Delta t$  容器の壁厚  
 $\lambda_{\text{Wall}}$  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  $Q_{\text{Thm}}$  とすると



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

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  $\mu\text{m}$ の容器内に1  $\mu\text{m}$ の液層ができ4  $\text{mW}/\text{cm}^2$ の輻射場にGMBが置かれた場合  $Q_{Liq} \approx 3 \times 10^{-7} \text{W}$ であり、 $Q_{Thm} \approx 5 \times 10^{-7} \text{W}$ 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  $\mu\text{m}$ ) 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、その中に気泡を浮かべるといった概念で気泡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填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う熱伝導の理論を応用して液層分布を計算した<sup>5)</sup> 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 気泡モデルによる計算

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  $\Delta P$  は

$$\Delta P = \frac{T}{R} \quad (7-8)$$

で与えられる。半径50  $\mu\text{m}$ のGMB中の液体重水素の表面張力(2.8  $\text{dyn}/\text{cm}$ ) による圧力は560  $\text{dyn}/\text{cm}^2$  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

$$\Delta P = \rho g d \quad (7-9)$$

であり、 $2 \text{ dyn/cm}^2$  となる。ここで  $\rho$  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

$$\frac{T}{R} - \frac{T}{R + \Delta R} = \Delta P \quad (7-10)$$

$$\Delta R \approx \frac{\Delta P}{T} R^2 \quad (7-11)$$

で表わされる。 $\Delta P$  に式 (7-9) の関係を使って計算するならば、曲率半径の差は  $0.17 \mu\text{m}$  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  $0.1 \mu\text{m}$  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たされ、その中にこれまた真球の気泡が浮いているモデルである。気泡は液体の中を上下でき、上に押し上げるのは気泡に働く浮力であり、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泡の間を流れ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  $\theta = 0^\circ$  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、気泡は浮び上がり、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。

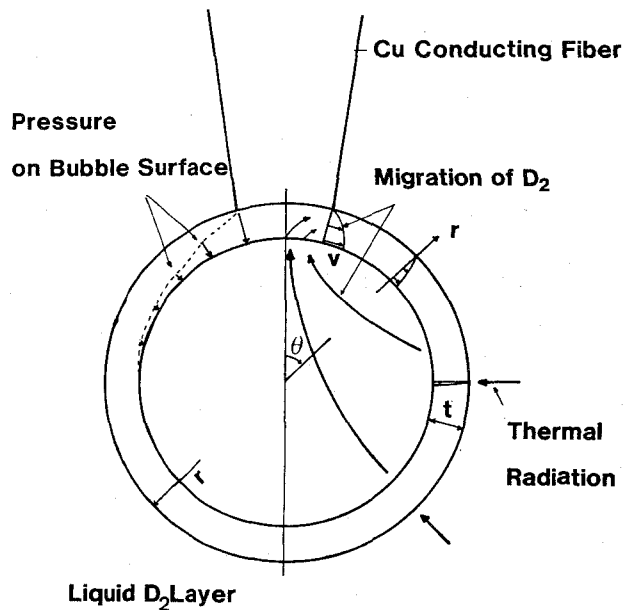


図 7-17 液層分布計算用気泡モデル

図7-18は直径70 $\mu\text{m}$ のGMBに50気圧の重水素を充填し、19Kにした場合の液体重水素の分布である。 $0 < \theta < 42.7^\circ$ のとき上に凹の形状となり、 $42.7^\circ < \theta$ のとき上に凸の形状となる。

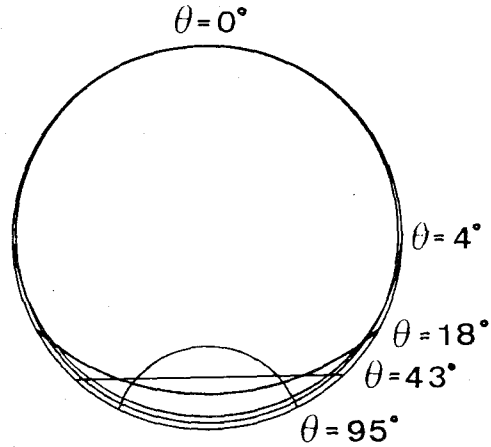


図7-18 熱輻射がない場合の液層分布

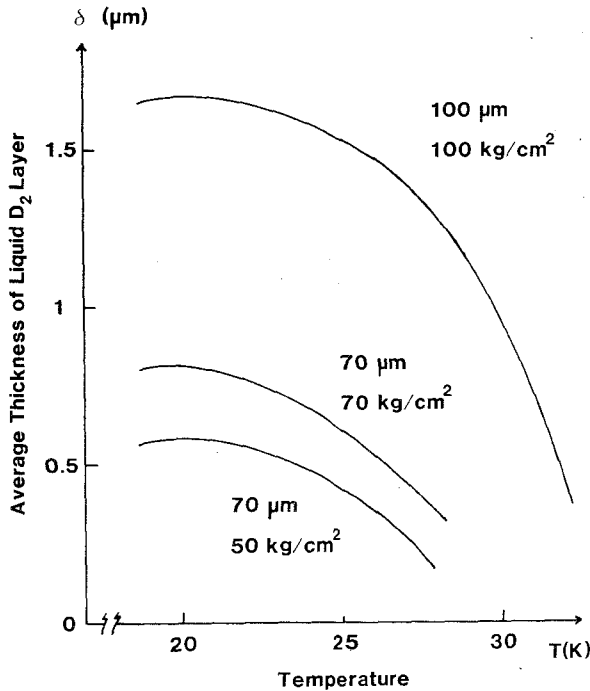


図7-19 各温度における液層の平均厚さ  
パラメーターは直径と充填圧

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、気泡も完全な球と仮定したから、燃料の厚さの角度依存性は

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

と近似できた。ここで $\delta$ は図7-19に示した各温度における平均燃料層の厚さで、 $a$ は気泡中心と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

泡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

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

で与えられる。ここで  $v$  は流速,  $\rho$  は密度,  $\eta$  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見捨て, 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  $\theta$  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

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

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。気泡液層間の摩擦を見捨てると

$$v = \frac{\text{grad } P}{2 \eta} z (2t(\theta) - z) \quad (7-15)$$

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

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

$$= \frac{\rho \text{grad } P}{3 \eta} t^3(\theta) \quad (7-17)$$

で与えられる。ここで  $t(\theta)$  は液層の厚さであり  $\nu$  は動粘性係数である。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  $\theta = 90^\circ$  から  $\theta = \varphi$  までの間に気化した量  $N_E$  の差に等しい。即ち

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

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

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

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

である。ここで  $R$  はGMB上に吸収された単位面積当りの熱放射量である。

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

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

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は充填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。充填量が増加した場合、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7-1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

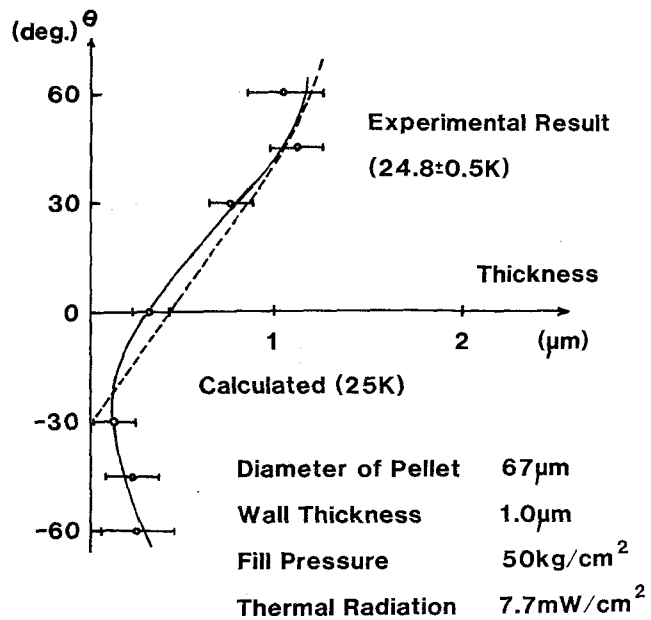


図7-20 気胞モデルによる液層分布計算結果と実験結果の比較(その1)

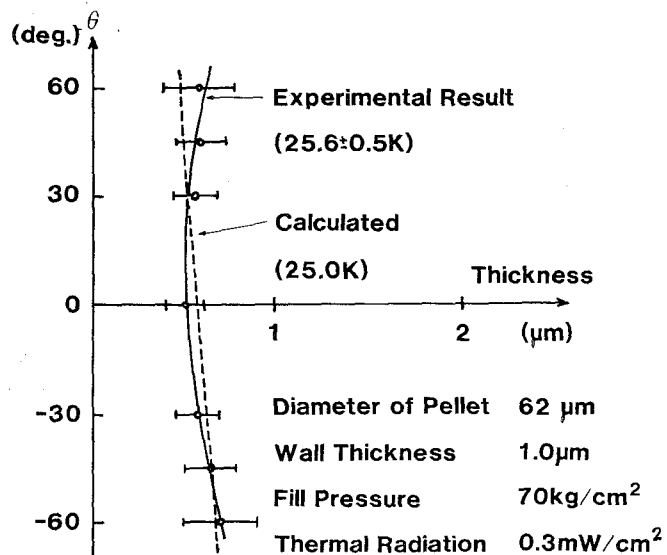
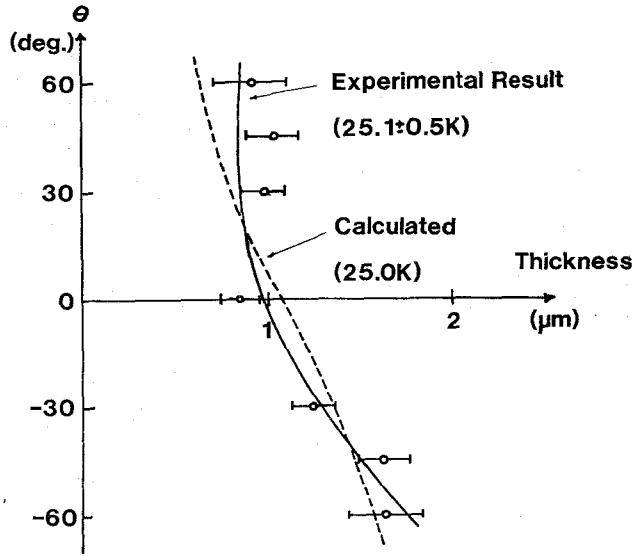
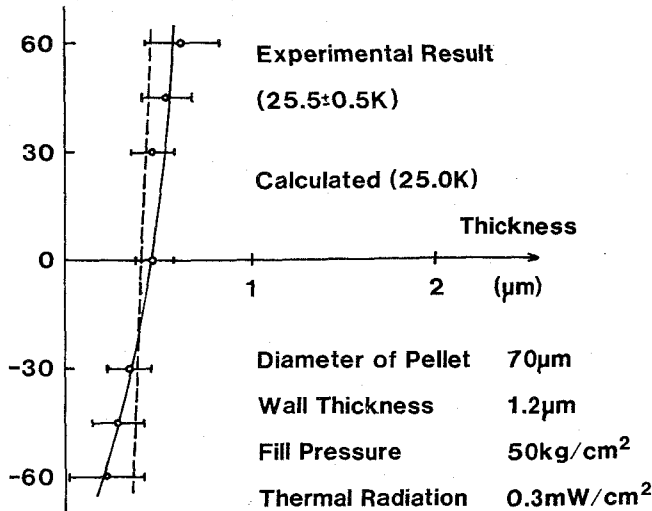


図7-21 気胞モデルによる液層分布計算結果と実験結果の比較(その2)



**Diameter of Pellet** 66 $\mu\text{m}$   
**Wall Thickness** 1.0 $\mu\text{m}$   
**Fill Pressure** 100 $\text{kg}/\text{cm}^2$   
**Thermal Radiation** 0.5 $\text{mW}/\text{cm}^2$

図7-22 気泡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)



**Diameter of Pellet** 70 $\mu\text{m}$   
**Wall Thickness** 1.2 $\mu\text{m}$   
**Fill Pressure** 50 $\text{kg}/\text{cm}^2$   
**Thermal Radiation** 0.3 $\text{mW}/\text{cm}^2$

図7-23 気泡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填気圧の関係を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100 $\mu\text{m}$ のGMB内部に厚さ1 $\mu\text{m}$ の均一な液層を作りたい場合、60気圧重水素ガスを充填し、冷却部の角度を15°にし、熱輻射が1.3 $\text{mW}/\text{cm}^2$ 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。液中に浮かぶ気泡をモデルに液層の厚さを計算で求め、よく実験結果を説明できる結果を

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 $\lambda_G$ (erg/cm·sec·K)	$1.29 \times 10^5$	$1.35 \times 10^5$	$1.45 \times 10^5$
D <sub>2</sub> 液体の熱伝導率 $\lambda_L$ (erg/cm·sec·K)	$0.96 \times 10^4$	$1.05 \times 10^4$	$1.11 \times 10^4$
D <sub>2</sub> 液体の密度 $\rho_L$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.172	0.166	0.158
D <sub>2</sub> 気体の密度 $\rho_V$ (g/cm <sup>3</sup> )	$0.50 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^{-3}$	$3.22 \times 10^{-3}$
D <sub>2</sub> 液体の粘性 $\mu_L$ (g/cm·sec)	$4.2 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-4}$
D <sub>2</sub> の潜熱 $L$ (erg/g)	$3.17 \times 10^9$ (19.65 K)		

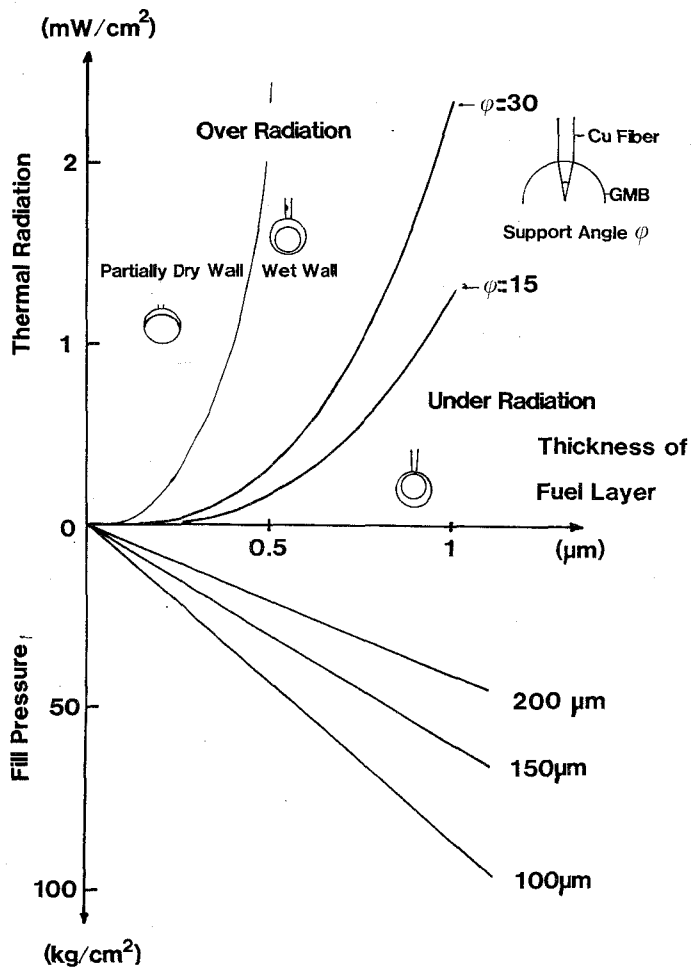


図 7 - 24 温度 25 K で均一な液層を得るためのチャート

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行下する。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

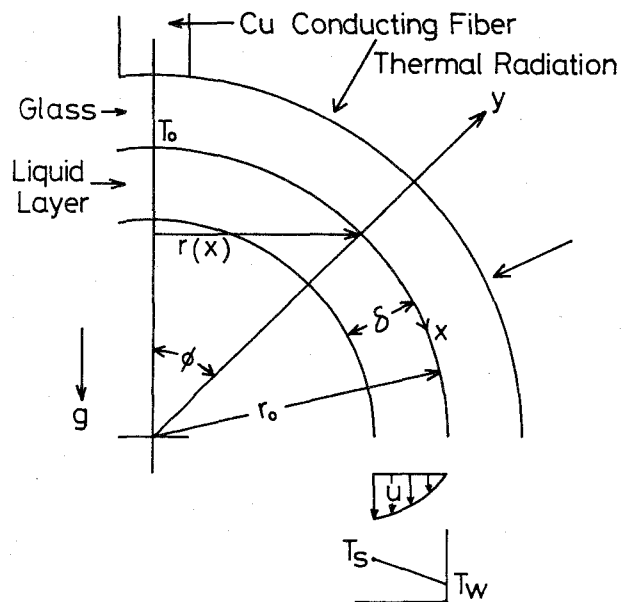


図7-25 液層分布を求めるためのモデル



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。 $\delta$  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

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

が得られる。ここで  $u$ ,  $\mu_L$ ,  $\rho_L$  は液体の速度、粘性、密度であり、 $\rho_V$  は気体の密度である。

境界条件は

$$\begin{aligned} y = 0 \text{ (冷却面) で} \quad u &= 0 \quad T = T_W \text{ (冷却面温度)} \\ y = \delta \text{ (液層内面) で} \quad \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \quad T = T_S \text{ (飽和蒸気温度)} \end{aligned} \quad (7-23)$$

式 (7-5) を積分し、境界条件から

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

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、

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

の関係を得る。 $r_0$  は GMB の内径、 $L$  は気化熱、 $\lambda_L$  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

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

とした。 $T_W$  は仮定より実効的な熱伝導  $\lambda'_G$  と熱放射量によって次の式から決めた。

$$\begin{aligned} 2 \pi r_0 \sin \phi \Delta t \lambda'_G \frac{d T_W}{d \phi} \\ = 2 \pi (1 + \cos \phi) r_0^2 \frac{\epsilon \sigma T_e^4 \Omega}{4 \pi} \end{aligned} \quad (7-27)$$

ここで $\Omega$ 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,  $\sigma$ はステファンボルツマン定数,  $\varepsilon$ は熱輻射に対する吸収率,  $\Delta t$ はGMBの壁厚,  $\lambda_G$ 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 $\delta$ 及び温度 $T_W$ に対して

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

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

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

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

の関係を得た。

式(7-29)により直径 $100 \mu\text{m}$ , 壁厚 $1 \mu\text{m}$ のガラスマイクロバルーンについて熱輻射 $2 \text{ mW/cm}^2$ と $4.4 \text{ mW/cm}^2$ 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 $\phi$ 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 $\lambda_G = 3.5 \times 10^{-8} \text{ W/cm K}^{-1}$ と推定した。

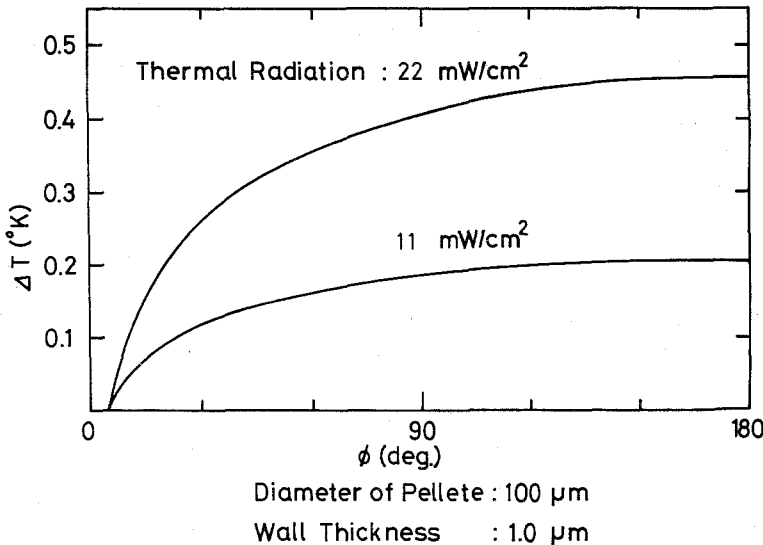


図7-26 GMB内部の温度分布

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 $\lambda_G = 3.5 \times 10^{-8} \text{ W/cm K}^{-1}$ と推定した。

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  $2 \text{ mW/cm}^2$  の条件下で充填気圧を変えて均一な液体燃料を得るための条件を求めた。GMBの直径は  $100 \mu\text{m}$ 、壁厚は  $5 \mu\text{m}$  である。充填気圧を 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

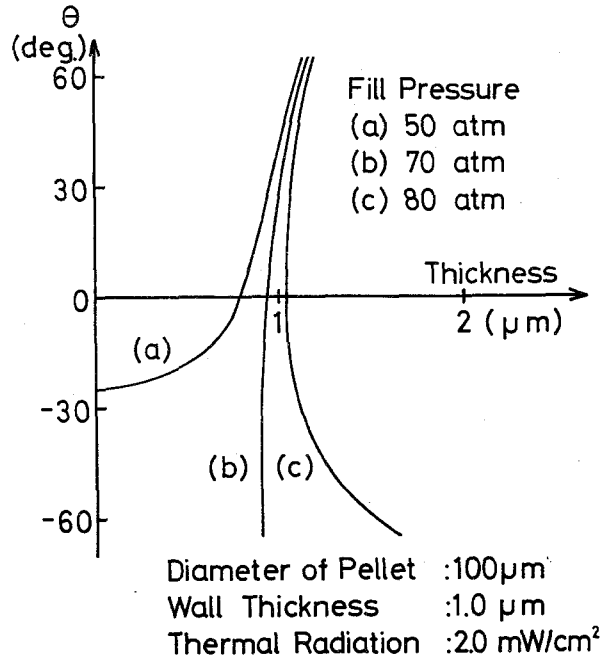


図 7-27 充填気圧を変えた場合の液層分布

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

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。充填気圧と均一性の関係を図 7-28 に示す。熱輻射  $2 \text{ mW/cm}^2$  のとき

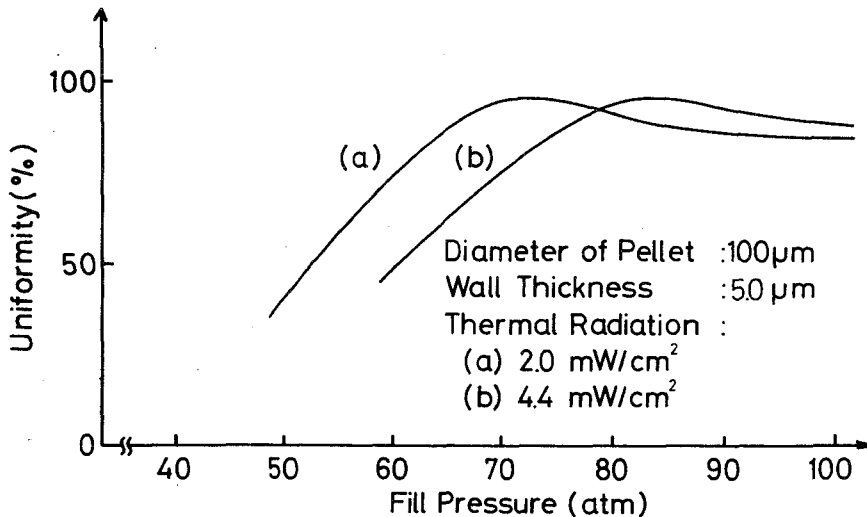


図 7-28 充填気圧と均一性の関係

には充填気圧約 7.2 気圧のときに、熱輻射 4.4 mW/cm<sup>2</sup> のときには充填気圧 8.3 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。

充填気圧 5.0 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のが推定できる。

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 気圧充填 GMB とそれぞれ 70 μm、1 μm、70 気圧の GMB について計算した。図

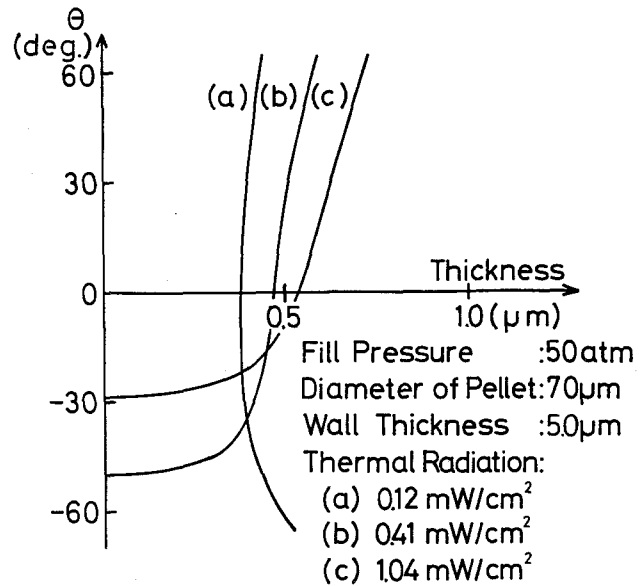


図 7-29 熱輻射を変えたときの液層分布計算結果

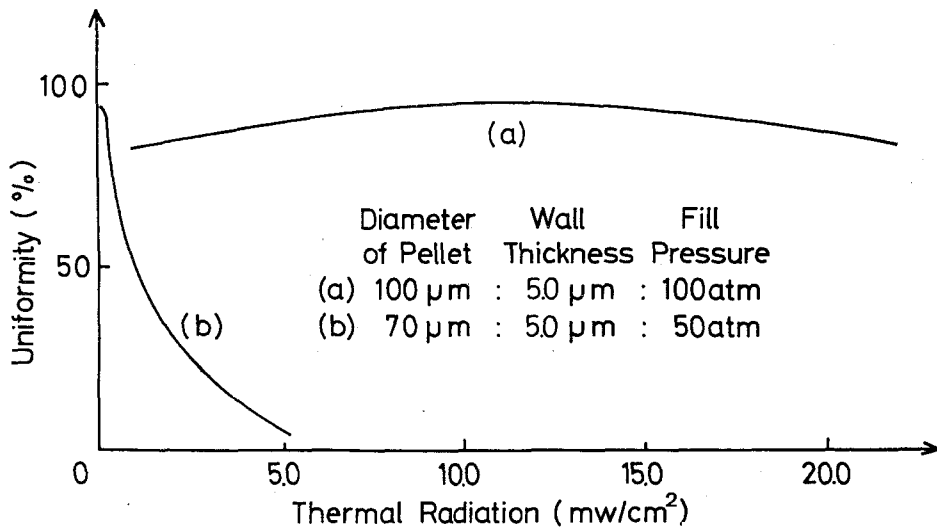


図 7-30 熱輻射と均一性の関係

から分るように充填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ことが分った。100気圧充填GMBは $5\text{ mW/cm}^2 \sim 18\text{ mW/cm}^2$ 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 $100\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ である。当然の事ながら前項と同じプロフィールを示し熱伝導が $5\text{ kcal/m hr K}$ のとき最高値を示した。熱輻射は $41.4\text{ mW/cm}^2$ 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いでも、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 $859\text{ kcal/m hr K}$ であるから、簡単な計算では $0.038\ \mu\text{m}$ 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) 重水素充填量、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め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

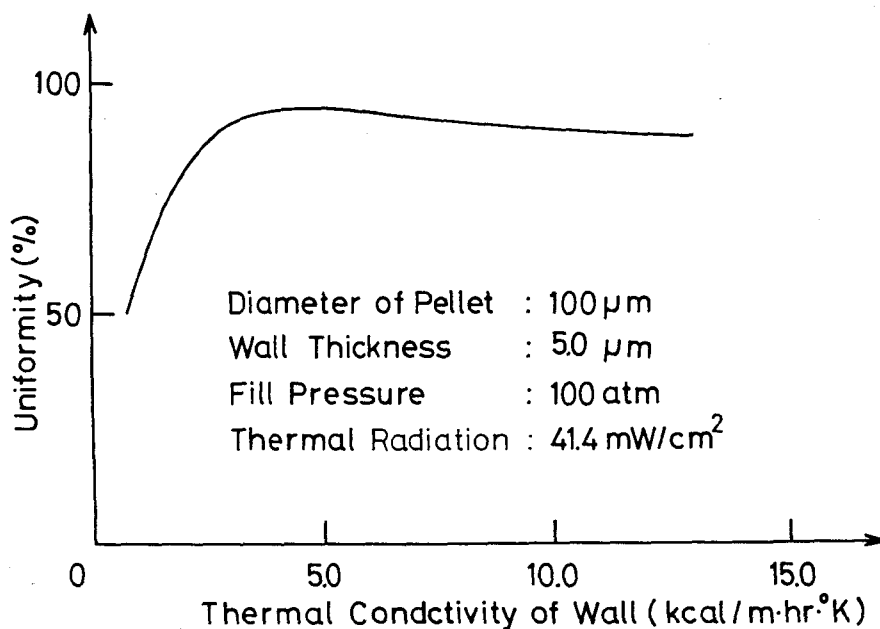


図7-31 容器の熱伝導を変えた場合の均一性の変化

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)  $100\ \mu\text{m}$ , 2)  $1\ \mu\text{m}$   
3)  $1.24\ \text{k cal} / \text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K}$ , 4) 100 気圧, 5) 25K, 6)  $12\ \text{mW} / \text{cm}^2$ である。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 蛍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<sup>8)</sup>。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、メインパルスが当た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  $300 \sim 400\ \mu\text{sec}$  の間、蛍光はターゲット上に集光される。波長は  $1.06\ \mu\text{m}$ で  
あり、全蛍光量は数百  $\mu\text{J}$  である。蛍光のターゲット上での強度は  $0.3\ \text{J} / \text{cm}^2$  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 気圧充填した直径  $80\ \mu\text{m}$  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  $0.2\ \mu\text{m}$  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

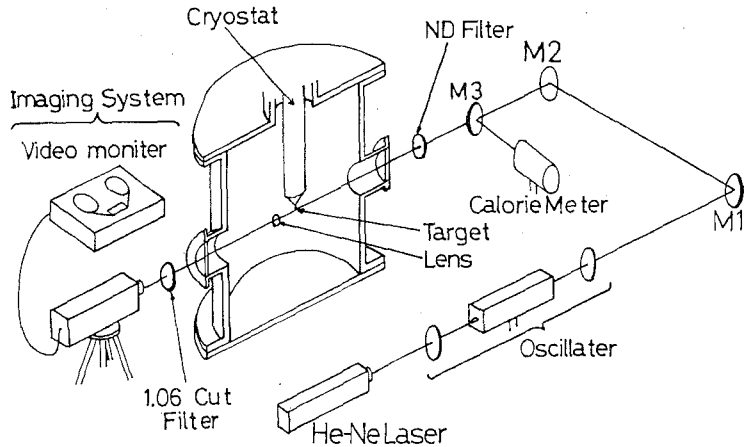


図7-32 蛍光のクライオ燃料への影響を調べる実験装置

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  $38\ \mu\text{m}$  及び  $7\ \mu\text{m}$  の銅のファイバーに取り付け実験を行なった。

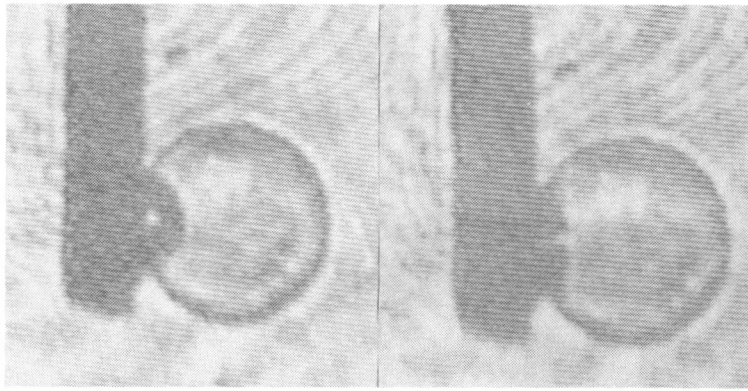
#### 7-4-3 実験結果及び検討

実験結果を表7-IIに示す。又、銅ファイバー  $38\ \mu\text{m}\phi$  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/cm<sup>2</sup>)

	No evidence of melting	Half of fuel melted	Completely melted
Cu Stalk	~ 2.1	2.1 ~ 2.9	2.9 ~
Cu Fiber $38\ \mu\text{m}\ \phi$	~ 0.18	0.18 ~ 0.25	0.25 ~
Cu Fiber $7\ \mu\text{m}\ \phi$	~ 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、温度が上がり、熱伝導でGMB内部の水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  $7 \mu\text{m}$  ファイバーの場合  $43\text{K}$  となる。これは銅ファイバーの吸収率  $1.5\%$  比熱  $0.015\text{ J/gK}$  ( $-250^\circ\text{C}$  に於て) レーザーエネルギー  $0.2\text{ J/cm}^2$  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  $6\text{ m sec}$  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  $3 \times 10^7\text{ J}$  であり、これによりGMB温度は  $10^\circ$  上昇し、中の水は溶ける。

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  $300 \sim 400\ \mu\text{ sec}$  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  $2 \times 10^8\text{ J}$  である。直径  $100\ \mu\text{m}$ 、 $100$  気圧充填のGMBの場合、気化する液体燃料は全体の  $\frac{1}{150}$  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  $7\ \mu\text{m}$  の銅ファイバーに直径  $100\ \mu\text{m}$ 、 $100$  気圧重水素を充填したGMBを取り付け、激光Ⅳ号で照射する場合、蛍光により ( $0.3\text{ J/cm}^2$  on GMB, 昭和52年3月)  $\frac{1}{150}$  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  $7\ \mu\text{m}$  の頂角  $15^\circ$  程度のコーンにすれば、さらに  $\frac{1}{10}$  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  $200\ \mu\text{m}$ 、アブレータ  $40\ \mu\text{m}^t$ 、均一性 ( $\Delta t/t$ ) 3%以下、表面仕上げ  $0.1\ \mu\text{m}$ 以下、DT 100 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  $8\ \mu\text{m}$  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  $\text{SF}_6$  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、 $\text{SF}_6$  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  $0.4\ \text{g}/\text{cm}^3$  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  $\pm 2\%$  ( $\Delta t/t$ ) 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  $\pm 2\%$ 、表面

仕上げ 0.02  $\mu\text{m}$ 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 $\pm 2\%$ を得た。表面仕上げは、コーティング層が10  $\mu\text{m}$ 程度では0.2  $\mu\text{m}$ 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20  $\mu\text{m}$ 、均一性 $\pm 2\%$ 、表面仕上げ $< 500\text{\AA}$ 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、0.2～20 wt%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法を開発した。外側球の直径300  $\mu\text{m}$ 以下、壁厚4  $\mu\text{m}$ 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50 mg/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) 三重水素充填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炉を用いて充填する。使用量、漏洩の少ない充填装置を開発した。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填量非破壊検査法を開発した。三重水素充填量とX線計数率の変換定数として $56.8 \pm 6.7 \text{ count/sec ng T}_2$ を得た。

この方法の特徴はSNが良いことで直径  $100\ \mu\text{m}$  のとき充填気圧に換算して  $0.2\ \text{kg}/\text{cm}^3$  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  $62\ \mu\text{m}$  のGMBに重水素を70気圧充填することにより、厚さ  $0.6\ \mu\text{m}$ 、均一性 ( $\Delta t/t$ )  $\pm 1.5\%$  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) 理論面では気泡モデル、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。

最後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 Laser 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填炉の開発

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

Fusion Research, IAEA-CN-37-M4, Innsbruck, (1978)

3) Laser Fusion Experiment in Osaka

H. Azechi, 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. Research, IAEA-CN-38/E-3,  
Brussel, (1980)
- 6) Laser Fusion Research 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. Research, IAEA-CN-38/B-3
- 7) Cryogenic Target for Laser Fusion Research  
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 Calculations 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 Research,  
Chicago, Illinois, 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) 1 kJ 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) 1 kJ 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）