

JAERI-Tech  
2001-024



JP0150377



アルミニウム被覆カドミウム薄肉円筒  
中性子吸収体の製作

2001年3月

武山 友憲・千葉 雅昭・磯崎 太\*・雨澤 博男  
板橋 行夫・菊池 泰二・小田部 芳清\*  
平田 雄二\*・高 勇・大場 敏弘

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

## アルミニウム被覆カドミウム薄肉円筒中性子吸収体の製作

日本原子力研究所東海研究所技術部

武山 友憲・千葉 雅昭・磯崎 太\*・雨澤 博男<sup>+</sup>・板橋 行夫<sup>+</sup>  
菊地 泰二・小田部 芳清\*・平田 雄二\*・高 勇 ・大場 敏弘

(2001年2月9日受理)

中性子スペクトル調整型キャプセルの製作にあたり、試料に高速中性子のみを照射する目的で、熱中性子吸収材であるカドミウムのアルミニウム被覆密封薄肉円筒を製作した。核設計、熱設計上からの要求は、カドミウムの肉厚 5.5 mm、内径 23 mm、全長 745mm、アルミニウム被覆肉厚 0.7 mmであり、カドミウムの表面に酸化膜があってはならない、アルミニウム被覆は全面に於いてカドミウムに密着していることであった。

この仕様を満足するため鋳造によって製作した。  
酸化を防止するためとカドミウムは特定化学物質であるため、真空溶解鋳造装置を製作して鋳造を行った。

---

東海研究所：〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ 大洗研究所材料試験炉部

\* 原子力エンジニアリング (株)

## Fabrication of Thin Cadmium Cylinder Coated with Aluminum For Neutron Irradiation Capsules

Tomonori TAKEYAMA, Masaaki CHIBA, Futoshi ISOZAKI\*, Hiroo AMEZAWA+  
Yukio ITABASHI+, Taiji KIKUCHI, Yoshikiyo OTABE\*, Yuji HIRATA\*  
Isamu TAKA and Toshihiro OHBA

Department of Engineering Services  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai -mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 9, 2001)

In order to fabricate the irradiation capsule screened thermal neutron, a thin cadmium cylinder coated with aluminum was developed. The capsule is used for the fast neutron irradiation test .

Requested specification of the cylinder are the thickness of 5.5mm, the inner diameter of 23mm, the length of 750mm and the coated thickness of aluminum of 0.75mm. Moreover, cadmium and aluminum adhere to each other .

The cylinder was developed and fabricated by means of casting. The a new vacuum chamber in which solving and casting work is possible was fabricated to prevent cadmium oxidation and work safely from poison of cadmium.

Keywords : Irradiation Capsule, Thermal Neutron , Thin Cadmium Cylinder Coated  
with Aluminum, Cadmium Oxidation, Vacuum Chamber, Solution  
Casting

---

+ Department of JMTR, Oarai Research Establishment

\* Nuclear Engineering Co.Ltd.

## 目 次

1. はじめに	1
2. 中性子スペクトル調整型キャプセル	1
3. 94M-23A用カドミウムシールドの製作	2
3.1 カドミウムシールド製作にあたっての検討	2
3.2 溶解とその結果	4
4. 新型真空溶解鑄造装置の設計製作	5
4.1 装置が具備すべき機能	5
4.2 熱設計	6
4.3 構造設計	8
5. 予備溶解と新しい事実	10
6. カドミウムシールドの鑄造	12
7. カドミウムシールドの製作	13
8. あとがき	14
参考文献	15

## Contents

1. Introduction	1
2. Irradiation Capsule Screened Thermal Neutron	1
3. Fabrication of Thin Cadmium Cylinder Coated with Aluminum for 94M-23A Capsule	2
3.1 Examination of Fabrication of Cadmium Cylinder	2
3.2 Some Result Obtained Above-mentioned Examinations	4
4. Fabrication of New Vacuum Solving and Casting Apparatus	5
4.1 Functions	5
4.2 Thermal Design	6
4.3 Constructive Design	8
5. Examinations and Results of Pre-solution of Cadmium	10
6. Casting of Cadmium Cylinder	12
7. Production of Thin Cadmium Cylinder Coated with Aluminum	13
8. Summery	14
References	15

## 1. はじめに

1994年、工作課ではJ M T Rより熱中性子吸収材の性能確認キャプセル1体及び中性子スペクトル調整型キャプセル3体の工作依頼を受け製作を開始した。中性子スペクトル調整型キャプセル3体の内訳は、1体はカドミウムで周囲を覆うことにより熱中性子を吸収し、高速中性子のみを試料に照射する材料照射キャプセル94M-1A、他の1体は黒鉛で周囲を覆うことにより熱中性子をトラップし、照射量を増加した材料のインパイルクリーブ試験キャプセル94M-2A、更に他の1体は、前述のごとくカドミウムにより熱中性子を吸収し、高速中性子のみを照射する材料のインパイルクリーブ試験キャプセル94M-3Aである。

これらのキャプセルの製作にあたっての最大の問題は、熱中性子吸収用のアルミニウム被覆カドミウム円筒の製作であった。アルミニウム被覆カドミウム円筒の製作の可否がこの研究計画遂行の鍵となるものであった。

カドミウムの加工は、法律による規制の関係で、これまでの調査では国内外で実施するところが無く、限定された寸法の素材が入手できるのみであった。また、熱設計によってカドミウムと被覆は全面において密着していること、およびカドミウムの表面に酸化膜が存在しないことが要求されたため、鋳造によってアルミニウム被覆の薄肉長尺円筒を製作することとした。

最大の難関は、94M-1A用のアルミニウム被覆カドミウム円筒の製作であったが、この製作に先立ち熱中性子吸収材の性能確認試験キャプセル94M-23A用のアルミニウム被覆カドミウム円筒の鋳造を行った。しかしこれは技術上の問題から照射予定に間に合わず、鋳造を断念せざるを得なかったが鋳造についての多くの情報を得ることができた。この経験から専用の鋳造装置が必要との判断にたち、溶解槽と鋳造装置を備えた真空溶解鋳造装置を製作し、これによってアルミニウム被覆カドミウム薄肉円筒の製作を行った。

これらの部品によって製作された各々のキャプセルは既に照射を終了し、データの取得も終了したことから、当課において実施したスペクトル調整型キャプセル94M-1A及び94M-3A用アルミニウム被覆カドミウム薄肉円筒の製作について報告する。

## 2. 中性子スペクトル調整型キャプセル

製作するキャプセルは、熱中性子吸収材の性能確認キャプセル94M-23A、中性子スペクトル調整型キャプセル94M-1A、94M-2A及び94M-3Aの4体である。

各々の概略の特徴は以下に示すとおりである。

### 1. 94M-23A

カドミウムを用いた熱中性子吸収材（以下「カドミウムシールド」という）を円筒に成形した場合、上下の開口部からの熱中性子の回り込み効果を測定する目的で製作するキャプセルで、構造は密閉バスケット型である。94M-1Aと3Aに使用するカドミウムシールドの形状が核設計上妥当であるかの確認を行い結果をキャプセル設計に反映する。照射試料はフルエンスモニタである。

## 2. 94M-1A

引張り試験片照射キャプセル。カドミウムシールドにて引張試験片を覆い、熱中性子を吸収して高速中性子のみを試験片に照射するスペクトル調整型キャプセル。長尺のカドミウムシールドが特徴。図1に組立図、図2にカドミウムシールド部品図、写真1及び写真2にキャプセル部品を示す。

## 3. 94M-2A

黒鉛製の筒でクリープ試験片を覆い、熱中性子をトラップした状態で材料のクリープ試験を行うインパイルクリープ試験キャプセル。構造材の熱膨張による変位補償機構、自動調芯型ベアリングの開発と応用。データ自動収録、解析のプログラム開発と応用を特徴とする。

## 4. 94M-3A

カドミウムシールドにてクリープ試験片を覆い、熱中性子を吸収して高速中性子のみを試験片に照射した状態でクリープ試験を行うインパイルクリープ試験キャプセル。

構造の特徴は94M-2Aと同じ。図3に組立図、図4にカドミウムシールド部品図、写真3にキャプセル部品を示す。

### 3. 94M-23A用カドミウムシールドの製作

#### 3.1 カドミウムシールド製作にあたっての検討

94M-23Aキャプセルの製作にあたっての最大の問題はカドミウムシールドの製作である。技術的に全く経験の無い問題であったこと及び要求仕様が厳しいため各種の検討を行った。

カドミウムの融点は321℃であるため、キャプセルに装荷時の安全上の問題からカドミウムにはアルミニウムの被覆を行い、溶融することがあっても形状が変化しないこと。また、熱設計上の要求として被覆とカドミウムの母材の間には間隙があってはならないことおよびカドミウムの表面に酸化膜が存在しないことが仕様として要求された。これは間隙の測定ができないことおよび酸化膜の熱伝導のデータが無いことによるものである。

カドミウムとアルミニウムの共存性については、先に試験を行い良好であることを確認してあるので問題は無い。

試料の試験片に対する必要中性子照射量の核計算の結果からカドミウムの厚さは5.5mm、加工技術の問題からアルミニウム被覆の厚さは0.7mmとの値が決定された。

かかる要求を満足するカドミウムシールドの製作方法は、スウェーピングによる成型加工か鑄造による方法である。

これらの方法は専用のスウェーピングマシンや加工上の特殊な技術的経験が必要であるため、専門メーカーが製造を行っている。

このため下記のような検討を行った。

1. カドミウムは、特定化学物質である。加工などの取り扱いで制約がある。
2. カドミウムの棒の入手は可能か。素材はどのような形で入手できるか。また、加工を行うところはあるか。
3. スウェーピングを行うとすれば業者は限られるがカドミウムの加工はできるか。



4. 鋳造を行うとすれば素材メーカーで行うことができないか。
5. 我々には鋳造についての知識と技術は無い。

技術調査の結果、カドミウムを加工できるメーカーは国内、国外ともに無く、素材メーカーもカドミウムの取り扱いに関する一切の技術情報について提供を拒否する状態であった。

このため、入手できる素材の大きさが1 mm × 500 mm × 1000 mm に限定されることもあり、特殊な機械を設備する必要の無い鋳造によってカドミウムシールドを製作することとした。溶解鋳造の方法は、カドミウムが溶解中に空気と反応するのを避けるためと取扱の問題から真空溶解鋳造とし、カドミウムシールド容器に海苔巻き状に5層に巻いたカドミウムを充填しヒータによる加熱で溶解する方法を採った。カドミウムは全長は410 mmである。

カドミウムシールド容器はアルミニウム製の底付2重円筒容器とし、内外筒間にカドミニウムを溶解鋳造する構造とした。

主な寸法は下記のとおりである。

カドミウム筒の肉厚	: 5.5 mm
カドミウム筒の全長	: 400 mm
アルミニウム被覆の肉厚	: 1.0 mm (内筒)、0.5 mm (外筒)

購入できるカドミウムの仕様は下記のとおりである。

規格	: JISH 2113 カドミウム地金1種
純度	: 99.99% 以上
寸法	: 1 mm × 500 mm × 1000 mm

鋳造で筒を作る場合、カドミウムシールド容器を加熱するため曲がりの発生が問題となる。

これは、長さ/直径の比が大きくなるほど深刻な問題となる。

従ってカドミウムを鋳造するアルミニウム製のカドミウムシールド容器は、肉厚を厚くして曲がりに対する抵抗力を大きくし、鋳造後に切削加工を行って所用の寸法に仕上げることにした。

溶解用のヒータはシースヒータ3本を上中下に分けてヒータホルダに巻き付けて構成し、各段独立して制御可能とし、スライダックによって出力を調整した。

使用したヒータの性能は次のとおりである。

#### シースヒータ

外径	: $\phi 2$
発熱部長さ	: 2400 mm
発熱部の抵抗値	: 3.1 $\Omega$ /m
最大熱密度	: 800 W/m
投入可能電圧	: 100 V

#### ヒータホルダ

外径	: $\phi 60$
内径	: $\phi 40$ + 0.6 + 0.3
全長	: 450 mm

各段の温度は、ヒータホルダ外壁に取り付けた上中下3本の熱電対で計測を行った。

ヒータには断熱材を巻き、真空槽からの取り出し端子はJRR-3照射キャプセルの中間シールボックス用セラミックス端子を用いた。

真空維持のための排気系にはカドミウムトラップを設け、排気ポンプは負圧を維持しているフードの中に置き、フードの排気はフィルタを通して大気中に放出した。

### 3.2 溶解とその結果

溶解は360℃の温度に達してから1時間保持することで行った。温度の観察からは、溶解の吸熱反応による明確な変化は確認できなかった。これは、カドミウムの溶解量が少量であることとカドミウムシールド容器その他の構造材の熱容量が大きいことによるものと考えられた。

溶解後カドミウムシールドの上端面を観察したところ黒色のスラグ状の堅い固形物が確認された。これは酸化物であると考えられたが、カドミウムシールド容器端面からカドミウムシールド上端面までの距離は溶解の前後で変わらなかった。

このため、カドミウム中に気泡およびスラグを巻き込んでいると考え、再度溶解を行って脱気とスラグの浮遊を図った。溶解は繰り返し3度行ったが状態は変わらなかった。

なお、内部確認のためのX線撮影は、撮影条件の決定が難航して3度目の溶解が終わった後に撮影することができた。

カドミウム溶解時の熔融状態保持時間および温度は下記のとおりである。

	1回目	2回目	3回目
時間	1時間	45分	3時間35分
温度	360℃	430℃	410℃～430℃ (上段) (下段)

溶解の結果は下記のとおりである。

1. X線写真で観察したところカドミウムインゴットの容器壁部分に沿って気泡が認められ、下端より190mmの位置から気泡が連続して存在している。
2. これより上部については円周方向の1方向に沿って、上部に位置するに従って気泡が大きくなる傾向を示している。
3. 気泡の形状は円周方向に長く縦方向に短い、厚さの薄い断面形状である。各々の気泡の大きさは一定ではない。
4. 気泡は、内筒にまつわり付くようにジグザグにピッチ20mm～30mmで生成している。気泡は互いに連結しているようである。
5. カドミウムシールド容器を解体してインゴットを観察したところ、巢の部分は比較的きれいであるが若干の着色があり(薄い黄色)酸化皮膜と考えられた。カドミウムシールド容器内筒壁のカドミウムとのギャップの部分は茶色に変色していた。

一方外筒壁側にも同様の着色があり、この着色はカドミウムインゴットの下端では痕跡程度であるが上部に向かって色が濃くなり、上端の黒色のスラグに続いている。

上端には厚さ5mmのスラグが生成した。

6. 容器とカドミウムとの密着状態は良い。また、カドミウムの肉厚中には巣は認められない。
7. 溶解および凝固時の吸熱、発熱反応による温度変化は明確には確認できなかった。これは、カドミウムの質量が比較的小さく、反応による吸熱量および発熱量が容器の熱容量に比して十分に大きくなかったことによると考えられる。
8. 巣の原因はカドミウム溶解時に溶湯中に巻き込んだ気泡である可能性も考え、最終溶解の終了時にHe加圧 ( $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ ) を行い気泡の圧縮を試みたがこれによる効果は確認できなかった。

以上の知見を得たが、「巣」の原因が冷却不良による「ひけ巣」なのか、脱泡不良なのか明確にできなかった。

しかし、清浄な溶湯を得ることが最低限必要なことは明白であるので、必要な真空度を確保でき、また必要な機能を具備した新しい溶解鑄造装置を製作して鑄造を行うことにした。

#### 4. 新型真空溶解鑄造装置の設計製作

##### 4.1 装置が具備すべき機能

94M-23A用カドウムミシールドの鑄込みの不良から、現状の鑄造容器を用いてカドミウムの溶解を行うことは不可能であった。このため次のことを考慮した新しい装置を製作し、これによってカドミウムの鑄造を行うことにした。

94M-1Aキャプセルに必要なカドミシールドの大きさは

カドミウム筒の肉厚	: 5.5 mm
カドミウム筒の全長	: 745 mm
アルミニウム被覆の肉厚	: 0.7 mm
カドミウムシールド内径	: $\phi 23$
"          外径	: $\phi 35.4$

である。

従ってこの装置に要求される性能は次のとおりである。

- 4.1.1 真空度の高い装置とする。このため、装置内に断熱材等のガスを発生させるものは置かない。断熱は多重熱反射板による。カドミウムヒュームトラップはステンレスウールを用いフィルターの機能と冷却器の機能を持たせ、ここでカドミウムヒュームを完全にトラップする。
- 4.1.2 これまで行ってきた据置き溶解方法に変えて、溶解と鑄造を分離し、溶解したカドミウムの清浄な部分のみを鑄造する方法とする。

このため、真空溶解鑄造装置の中に溶解槽を独立して設け、ここで溶解したカドミウムをアルミニウム製のカドミウムシールド容器に鑄造する。溶解槽と容器は装置内に上下に位置する構造とし、高所から熔融カドミウムを落下させて鑄造することにより、溶湯中に存在する気泡を除去し「巣」の発生を防止する。

- 4.1.3 溶解槽はカドミウムの素材を溶かすこと。溶けたカドミウムを真空溶解鑄造装置の外から攪拌して脱泡およびスラグの浮遊を促進できること。溶けたカドミウムを下のカドミウムシールド容器に鑄造できること等の機能を持つ構造とする。また、溶湯注入孔の前にはスラグ除去用のフィルタを設ける。
- 4.1.4 カドミウムシールド容器は、容器加熱ヒータによって予熱できること。また、上中下3本のヒータによって独立して熔融温度の維持、凝固速度および凝固伝播モード（冷却モード）の制御できる構造とする。
- 4.1.5 カドミウムシールド容器は中心孔を持つ型と持たない型の2種類を計画する。中心孔は内径の仕上げ機械加工のために必要な孔である。この孔にスペーサを挿入するなどして容器に鑄造したカドミウムを中心部からも冷却できる冷却モードとすることができる。巢の発生が、カドミウムシールドの外側と内側の冷却速度の違いによる可能性もあるので、この問題に対応できるようにするためである。
- 一方、カドミウムシールド容器の曲がりに対する抵抗の大きい型として中心孔の無い中実の型も製作する。
- 4.1.6 カドミウムシールド容器への熔融カドミウムの注入は、1方向からであると熱バランスが崩れ曲がりを生ずる危険があるので、溶湯が円周方向に均等に流れるような構造とする。しかし、構造上無理があるので曲がりの発生への対策は予熱によって行う。
- 4.1.7 カドミウムが溶解槽から確実に注入されているか確認するためのモニターが必要である。これは熱電対によって温度差を確認することで行う。
- 4.1.8 カドミウムシールド容器は縦長2重円筒構造であり、この円筒の間にカドミウムを充填するので、内外筒が同心となるように上部には着脱可能なスペーサを取り付ける構造とする。
- 4.1.9 この鑄造装置は既存の装置を改良することとする。コンパクトにする一方、ヒータの容量に余裕をとることおよび水ジャケットを装備することで応用の範囲の広い装置とする。
- これらの性能を備えた装置として図5に示す装置の設計を行った。性能は以下のとおりである。また、本装置による真空溶解鑄造法の全体の構成を図6に示す。

## 4.2 熱設計

熱計算による設計と94M-23A用カドミウムシールドの溶解での実績から使用するヒータの出力が十分であることを確認し、スライダックによって出力を調整することとした。

カドミウムシールド容器加熱用ヒータに巻き込むシースヒータは上中下3本とし、容器の予熱と冷却速度の制御に使用する。

一方、分割鑄造によると、鑄造の途中で真空容器を開放し、溶解槽の中にカドミウムインゴットを装荷すること等操作が複雑であることと、鑄造、冷却を繰り返すことによってカドミウムシールドが曲がる可能性があるため、溶解槽は1度の鑄造に必要な量のカドミウムを溶解できる容量が必要であり、これを溶解できるヒータの容量が必要である。

溶解槽に巻き込むヒータは、寸法の関係から2本とした。

カドミウムシールド容器及び溶解槽は真空中に位置するので、放射熱は熱反射板によって反射し断熱する構造とする。溶解槽は上部にも熱反射板を置く構造とする。

93M-23A用カドミウムシールドを鋳造しようとしたときの経験からカドミウム溶解に必要な投入電流は3~4Aであったので、同様のヒータの使用で溶解は充分可能である。

真空容器のリングの部分は水ジャケットを設けて過熱を避ける構造とする。

#### 4.2.1 真空容器各部の熱設計

真空容器外壁最高温度	:	80 °C
熔融カドミウム最高温度	:	460 °C
カドミウムシールド容器最高温度	:	350 °C

4.2.2 溶解するカドミウムの重量 : 約4000g (462cc)

#### 4.2.3 熱反射板 (上2段、下1段分離型4重同心円筒)

材 質	:	SUS 304片面研磨板
上 段 外 径	:	φ 120 4重同心円筒、板厚 1mm
内 径	:	φ 84
数 量	:	2 台
全 長	:	470 mm
下 段 外 径	:	φ 122 4重同心円筒、板厚 1mm
内 径	:	φ 98
数 量	:	1 台
全 長	:	400 mm

#### 4.2.4 ヒータの熱設計

##### 4.2.4.1 溶解槽用ヒータ (2本)

型 式	:	シースヒータ (フィリップス社製、Z E Z型)
外 径	:	φ 2
発熱部長さ	:	2910 mm及び2800 mm
発熱部の抵抗値	:	3.1 Ω/m
最大出力	:	2.3 kW
投入可能電圧	:	100 V

##### 4.2.4.2 漏斗保温用ヒータ (1本)

型 式	:	シースヒータ (フィリップス社製、Z E Z型)
外 径	:	φ 2
発熱部長さ	:	850 mm
発熱部の抵抗値	:	3.1 Ω/m
最大出力	:	0.5 kW
投入可能電圧	:	40 V

##### 4.2.4.3 カドミシールド容器余熱用ヒータ (3本)

型 式	:	シースヒータ (フィリップス社製、Z E Z型)
外 径	:	φ 2

発熱部長さ	: (上) 2800 mm (中) 3140 mm (下) 4120 mm
発熱部の抵抗値	: 3.1 $\Omega$ /m
最大出力	: 3.1 kW
投入可能電圧	: 100 V

### 4.3 構造設計

#### 4.3.1 真空容器

容器は、内部構造物の設置が容易なように、溶解槽収納部分とカドミウムシールド容器収納部分の上下2段分割構造とする。底部および上部は各々開閉できる構造とする。

上下の真空容器の胴には、各々の部分に収納した部品に取り付けたヒータ及び熱電対の端子取り出し用のポートを設け、各部が独立して分解できる構造とする。ポートは先に製作した溶解装置と同様のものとする。

容器の下部と下部には排気用のポート及び弁を設ける。

最上部には、装置外部から溶解槽底部に取り付けた弁を操作するためのハンドル及び溶解槽中の熔融カドミウムを攪拌して脱泡及びスラグを浮遊させる攪拌器用のハンドルを設ける。これらの容器を貫通する部分は真空をシールする構造とする。

最下部には下段真空容器と熱反射板及びヒータ並びにカドミウムシールド容器を支持する台を置く。この台は水冷ジャケット構造とする。

容器のOリング設置部分の外周には水冷ジャケットを巻き付ける。

外径	: $\phi$ 140
内径	: $\phi$ 133
全長	: 1950 mm

#### 4.3.2 溶解槽

溶解槽は、カドミウム溶解用ヒータを外壁に巻き付け、底部に弁を持つ構造とする。カドミウムを溶解した後弁を開けて落下させ鑄造する構造とする。弁体と弁座の密着を最適にするため、弁棒と弁体は自在嵌合の構造とする。

底部にはスラグ巻き込み防止用のストレーナを設ける。

材質	: SUS 304
外径	: $\phi$ 86
内径	: $\phi$ 70
全長	: 225 mm
内容積	: 790 cc

#### 4.3.3 カドミウムシールド容器加熱ヒータ (シースヒータを巻き付けて構成)

材質	: A 1050
外径	: $\phi$ 64
内径	: $\phi$ 50 + 0.6 + 0.3
全長	: 900 mm

加工を容易にするため、全長 450 mm のヒータを 2 本製作し溶接によって接続する構造とする。

#### 4.3.4 カドミウムシールド容器

材質 : A 1050  
 外径 :  $\phi 50$  ( 仕上げ寸法  $\phi 36.8$  )  
 内径 :  $\phi 18$  ( 仕上げ寸法  $\phi 23.0$  )  
 全長 : 900 mm ( 仕上げ寸法  $\phi 798$  )  
 カドミウム層厚さ : 5.5 mm  
 充填可能カドミウム重量 : 3980 g ( 460 cc )

全長を 900 mm とした理由は、カドミウムインゴット上部に発生が予想される「巢」の長さを見込んだためである。カドミウムシールドの設計長さは 745 mm である。

本容器は、中心孔を持つ型と持たない型の 2 種類を製作する。

#### 4.3.5 上部ポートの弁操作機構及び攪拌機構

弁は回転せずに上下に移動できる構造とする。攪拌器の位置は、カドミウムインゴット装荷時の容積を考慮して決定する。攪拌器は回転すると同時に上下にも移動できる構造とする。

これらの機構の取り付けを容易にするために真空容器上部には作業用のポートを設ける。

#### 4.3.6 下部架台

下部架台は、熱反射板、カドミシールド容器加熱ヒータ、カドミウムシールド容器を支持し、真空容器をも支持するものである。

熱反射板と水ジャケットが組み込まれ、カドミウムシールド容器を支持するための軸を持つ構造とする。

#### 4.3.7 電流導入端子および信号取り出し端子

ヒータへの電流の供給と熱電対からの信号の取り出しは、JRR-3 用照射キャプセルに使用するセラミック気密端子と同型の気密端子を使用する。

セラミック絶縁板外径 :  $\phi 26$   
 " 厚さ : 9 mm  
 ヒータ用電力導入端子直径 :  $\phi 2.4$  mm  
 " 数量 : 6  
 熱電対用接続端子直径 :  $\phi 1$   
 " 数量 : 20 ( K 型熱電対用は 16 本 )

#### 4.3.8 熱電対

熱電対は  $\phi 1.6$  K 型 SUS 316 シース熱電対とする。

各部への取り付け要領は、熱電対先端を 5 mm 差し込んでカシメて止める構造とする。

取り付け位置は

- (1) カドミウムシールド容器加熱ヒータ下端より 100 mm
- (2) " 300 mm

(3)	"	500 mm
(4)	"	700 mm
(5)	"	850 mm
(6)	漏斗管首部分 (この部分の熱電対の取り付けはワイヤで固定)	
(7)	溶解槽下端より	20 mm
(8)	溶解槽上端より	50 mm

とする。

#### 4.3.9 カドミウムヒュームトラップ

内部にステンレスウールを充填しカドミウムヒュームを冷却すると同時にトラップする構造とする。

材質	: SUS 304
外径	: $\phi 39$
内径	: $\phi 36$
全長	: 200 mm ( Oリングシールキャップ付き )

ステンレスウール (シートから切り出して容器に充填)

商品名	: サスマックファイバ
材質	: SUS 304
繊維直径	: 4~20 $\mu$
厚さ	: 5 mm

## 5. 予備溶解と新しい事実

以上の性能の装置の設計を終了し装置を製作する間に、新型鑄造装置の溶解槽において溶解が可能な形状のインゴットを製作するためとスラグ等の不純物を予め除去することを目的として、旧型の真空容器を用いてカドミウムの溶解を行った。これを予備溶解といい、板状のカドミウムを密に海苔巻き状に巻き、これをアルミニウム製の容器に挿入して真空容器中の筒状ヒータ内に挿入し、加熱溶解して棒状のカドミウムインゴットを製作する真空据置溶解鑄造工法である。

本溶解鑄造にあたっては、各部の温度記録を収録し、鑄造後のX線透過撮影によってインゴット内部の「巣」の状態を確認し、1回の溶解鑄造ごとに方法についての検討を加えた。

この溶解では、新たに熱反射板を製作し、またステンレスウールのカドミウムヒュームトラップを用いて排気性能の向上を図ったがその結果は良好であった。カドミウム鑄造容器の寸法は外径40 mm×内径34 mm×全長430 mmである。鑄造作業は途中中断を含め6回実施し、インゴットは5本製作した。

この予備溶解ではいくつかの興味深い現象が確認された。以下にそれらを述べる。

5.1 5本製作した予備溶解インゴットのうち、2本には上部凝固面に酸化物が観察されなかった。(他のインゴットには約10 mmの黒色の堅い酸化物が観測された)

この2本については、アルミニウム製溶解鑄造容器の製作者が異なっており、洗浄方法について確認したところアルカリ洗浄であった。カドミウムシールド容器は直接原子炉冷却水に



接触することは無いので洗浄についてはこの方法を採用することとした。

結局、これまでのアセトン洗浄では、アルミニウム表面の酸化物をはじめ不純物の除去が充分ではなく、これらの不純物がカドミウムと反応して酸化物を生成したと考えられた。

- 5.2 溶解鑄造後上部端面を観察すると中心部に縦方向に空洞が確認されたので、X線撮影にてインゴット内部の状態を確認した。この結果写真4に示すように、インゴットの中心部に縦方向全長の約 $1/2 \sim 1/3$ くらいのところから煙状（竜巻状）に連なって「巣」が発生していることが判明した。この巣は上部になるに従って大きくなる特徴があり開口している。93M-23A用のカドミウム溶解時とはその形態が著しく異なっているが、中心付近に位置することは同じであった。

- 5.3 予備溶解したインゴットの内部のその他に「巣」は認められない。溶解途中に誤って加熱を中止したインゴットのX線写真を観察すると溶解部分と非溶解部分の状態が鮮明であった。

非溶解部分のカドミウムは、海苔巻き状にして装荷した状態が残存していてスリット状の断面が現れており、溶解部分には微細な気泡が全体に存在している状態が確認できた。溶解は下部より開始されていることが判明した。十分に溶解したインゴットの内部には気泡及び巣らしきものは全く認められない。これは環境が真空であるため、脱泡が完全に行われていることである。

- 5.4 温度計測は $\phi 1.6$ のK型シーース熱電対をヒータホルダに差し込む状態で行った。

平衡状態ではカドミウムの温度を現していると考えて問題はない。過渡状態においても溶融、凝固時のプラトー領域がよく現れているので、温度計測における問題はないと考えられる。

2個のインゴットの鑄造を終了した段階で以上の知見を得た。ここで問題になるのは「巣」の長さの問題である。このままの状態で鑄造した場合、巣の長さを見込んで製品全長の1.5倍の長さのカドミウムシールドを鑄造する必要がある。しかし、これは曲がりの発生の問題と鑄造後のカドミウムシールド容器の内外径加工の問題から不可能に近いことである。

一方、カドミウムの熱膨張率は個体と液体で約5倍の差があり、密度も $330^{\circ}\text{C}$ の液体で8.01、 $20^{\circ}\text{C}$ の固体で8.65である。収縮率は0.926である。

このデータからも判断すると、「巣」はスラグの巻き込みでも気泡の存在でもなく、冷却時の収縮によって「引け巣」が極端に発現すると考えられた。

鑄造に使用している容器の寸法は、外形 $\phi 40$ 、全長 $430\text{mm}$ である。底面積と側面積の比は約 $1/43$ である。底部が真空容器底部に接触しているとはいえ図7に示すように冷却時は側面からの放熱が支配的である。この温度記録は「引け巣」の大きい場合の記録である。

この結論を得て4、5回目の予備溶解には、上中下のヒータを用いて、溶解は同温度で、冷却は上中下部分に温度差をつけ、凝固が下部から開始されて徐々に上部に伝播する冷却モードとし、カドミウムの中心部と側壁部の温度差を極少とする溶解を実施した。

つまり、カドミウムの容器壁における凝固が中心部における凝固と同時に進行する冷却モードを採用した。図8はこの冷却モードによる鑄造の温度記録である。

この結果、写真5のX線写真に示すようにカドミウムに発生する「巣」の高さを上端から約 $50\text{mm}$ にまで改善することができ、全長約 $370\text{mm}$ の緻密で清浄なカドミウムインゴットを得ることができた（カドミウム溶解容器長は $430\text{mm}$ である）。写真6はこのカドミウムインゴッ

トで、溶解槽に装荷するために短く切断したものである。

以上の事実から煙状の巣は「引け巣」であることが判明した。鑄造後のカドミウムインゴットの冷却に際し、周辺部から凝固が開始されると中心部に対して溶湯の供給ができなくなり、「引け巣」が発生するので、中心部と周辺部との間に温度差を生じさせないことが必要である。

この状態で下部より平面状の凝固面を確保しながら上部に向かって全体を冷却していく方法で「引け巣」を小さくすることができる。

## 6. カドミウムシールドの鑄造

鑄造するカドミウムシールドは94M-3A用と94M-1A用の2体であり、鑄造は全長が450mmと比較的短い94M-3A用から実施し、状態を確認することとした。

新型溶解鑄造装置による鑄造の実施状況を写真7に示す。

鑄造に先だってカドミウムシールド鑄造容器のアルカリ洗浄を実施し、清浄な容器を得た。

アルカリ洗浄液の銘柄は「DKピークリヤCW-5520」第一工業製薬製である。

鑄造しようとするカドミウムの厚さは5.5mm、必要長400mm及び745mmである。

カドミウムシールド容器は各々外径50mm×内径18mm×全長450mm及び外径50mm×内径18mm×全長900mmの円筒の肉厚部分に、中心径30mm×厚さ5.5mmのカドミウムの鑄造用溝が円周上に縦方向に設けられている構造である。図9に94M-1A用のカドミウムシールド鑄造容器の詳細を示す。図9では、カドミウムシールド容器と記載している。また、図2および図4は各キャプセル用カドミウムシールドの詳細である。

先に述べたように94M-1A用のカドミウムシールド容器は2種類制作したが、今回の鑄造には中心孔を持つ中空型を採用した。これは内径加工が容易であることを重視したためである。鑄造作業は下記の要領で実施した。

1. カドミウムの鑄造にあたっては、溶解開始と同時に鑄造時の熱衝撃によってカドミウムシールド鑄造容器が変形するのを避けるための予熱を開始した。
2. 予熱温度は約350℃、カドミウム溶解温度は約400℃である。保持時間は約1時間。
3. カドミウムの溶解完了は、温度の監視と同時に攪拌器を回転して確認した。
4. 溶解後は十分に溶解槽内の攪拌を行ってスラグの浮遊を促進した。
5. 鑄造は、溶解槽底の弁を引き上げることによって1度に行った。弁の締め切りは良好であった。
6. カドミウムが溶解槽から落下している状態は漏斗部の首に取り付けた熱電対No6の温度変化で確認することができる。図10にカドミウム落下時の温度跳躍記録を示す。
7. しかし、94M-1A用のカドミウムシールド鑄造に際しては明確な変化は確認できなかった。これは、漏斗の取り付けを180°間違えてしまったためにカドミウムの落下を熱電対が感知できなかったことによる。結局、カドミウムの落下確認はカドミウムシールド容器に取り付けた熱電対の急激な温度上昇によって確認した。
8. 94M-1Aのカドミウムシールドは、平均径φ29.9の円筒形の5.5mmの間隙に860mmの長さにかドミウムを鑄造する。(設計上充填可能なカドミウムの長さは880mm)

であるが、溶解槽の容量の制約からこの値とした。設計上必要な長さは737mmである。)

この间隙に溶湯を均一に鑄造するのが課題であるが、94M-3A用カドミウムシールド鑄造では全く問題は無かったが94M-1A用は全長が長いいため落下鑄造のみでこれが達成できるか明確な判断ができなかった。このため、カドミウムを鑄造後カドミウムシールド容器の温度を上げて、カドミウムが容器内に均一に行き渡るように温度管理を行った。

9. 冷却は、下部から下中上のヒータの出力を下げていく方法で行った。カドミウムシールド容器の構造上、カドミウムの凝固は下部及び円周部より開始される。カドミウムの外円周部から凝固が開始されると引け巣のできる原因となるため、円周方向の温度勾配を極力小さくし、上下方向の温度勾配が支配的である冷却モードとした。

台座に設けた水ジャケットに水を流して下部の冷却を速やかに行うとともに、ヒータの出力調整を行って垂直方向の温度勾配を大きくし、熱の鉛直方向の流れを促進した。

また、上部の液面の温度を維持するために漏斗部のヒータの出力を上げて輻射熱による加熱を行った。

10. 冷却操作の最終段階では、装置下部より装置内にヘリウムガスを充填し、冷却速度を速めた。
11. カドミウムシールド容器の取り出しは、94M-3A用は上、下部の真空容器を分離して下部の真空容器上部より取り出したが、94M-1A用は全長が長いことと熱影響で台座の支柱が内径にかんでしまったため、真空容器を倒し台座をはずして下部から取り出した。

## 7. カドミウムシールドの製作

94M-3A用カドミウムシールドは、全長が450mmであるため鑄造は問題なく成功し、成形加工も問題なく実施できた。両カドミウムシールドとも鑄造以降の製作工程については同じであるので、ここでは94M-1A用のカドミウムシールドの製作について述べる。

鑄造後のカドミウムシールドはX線透過撮影を行い内部の巣の状態を確認した。写真8は94M-1A用カドミウムシールドの鑄造後のX線写真である。上部に内筒壁に付着した形の「薄い引け巣」が確認されたが、引け巣が存在する範囲は容器上端から155mmの範囲までである。健全な鑄造部分は容器下部より745mmであった。

これは成功であるので、カドミウムシールド容器の内外径の機械加工を行い設計の寸法に仕上げることにした。

この加工を実施する前の寸法検査において、カドミウムシールド容器全体に緩やかな曲がり確認された。これは、外径を基準として確認した縦方向の曲がりである。この値は長さ方向の中心付近で最大となり中心軸からの偏心は0.8mmであった。

これを矯正して内筒の加工を行うために寸法検査を行った結果、内筒にも曲がりがあることが判明した。これは内筒が外筒に対して偏心していることを意味し、カドミウムの肉厚が一定でないことを示すものであった。

このため、X線透過撮影によってカドミウムの偏肉の状態を確認した。

この結果曲がりの値は最大値で中心軸から1.05mmであり、カドミウムの下端から約400

mm付近で最大となっていた。

カドミウムシールド容器上端には、鑄造時にスペーサを嵌合していたので上端部における内外筒間の偏心は0.4mmであった。このため、両端部において加工品のチャッキングと振れ止めをすることができ、ここを基準として内筒の曲がりの矯正作業を行い、内径の「中ぐり」加工を行った。カドミウムは柔らかいのでカドミウムシールド容器に鑄造したままで矯正作業を実施できた。

内径加工終了後、外径加工を行うために、外径を中心とする矯正作業を行った。この後超音波厚み計によって測定しながらカドミウムシールド容器の外筒部分の肉厚を0.7mmとする加工を行った。

内、外径を設計寸法に仕上げる加工は旋盤によって行ったが、工作物の全長が900mmであることと全長/直径の比が24.5と細長く、また材質がアルミニウムであるために切り込み深さを少なくし、切削速度を大きくして行った。最終工程では、工作物が細長いためバイトの刃先が当たったときに逃げてしまい、さらに刃先がくい込んだときにアルミニウムを引っかけて破いてしまう危険があるためである。

核設計上の要求からは、アルミニウム部分の肉厚は薄いことが要求されるが、実際に加工可能な最も薄い値として設計した値が0.7mmである。

94M-1Aキャプセルは、カドミウムシールドの外径が設計寸法であれば、内径に緩やかな曲りがあっても試料、ヒータホルダ兼熱媒体が内部に収納できる構造となっている。

このため組立上の問題を回避することができた。

問題となるのは、熱中性子のシールド材であるカドミウムの肉厚である。

試料に必要な高速中性子照射量を計算した結果からは、試料を覆う部分のカドミウムの厚さは最少4.8mmが必要であるとされ、余裕度をもって5.5mmと決定された。

一方、94M-23Aキャプセルを用いて行った熱中性子の回り込み効果の試験結果からは、試料部を覆っているカドミウムシールドの上下方向のスカート部の長さが10mmで充分であることが判明した。

最終的にはこれらの検討結果をともに、偏肉の最大部分をピーク部からはずしてフラックスの低い部分に配置することで問題を解決し、カドミウム長さ665mm、全長725mmのカドミウムシールドとした。この寸法に加工した後、上端に端栓を嵌合して電子ビーム溶接で密封し、上部プレナムにヘリウムガスを充填し、これを密封して製品として完成した。写真9は94M-1A用カドミウムシールドの単体写真である。

## 8. あとがき

当初企画されたキャプセルは、技術的な問題を克服して各々計画どおりの照射を開始することができた。これらのキャプセルの製作にあたって我々が遭遇した技術的な困難とこれらの解決にあたって得た知見について、資料および正確な事実関係を整理しておくことが必要である。

溶解鑄造時の溶湯のガス吸収を避けるには、再溶解または真空溶解がこれまで行われている方法である。特に真空溶解は、溶解場の環境を整えることによって、溶湯の周囲のガスとの反応を

防ぎ溶湯中のガス放出を促進する有効な方法である。

本鑄造作業では、この真空溶解に溶湯の攪拌と真空中落下鑄造を組み合わせることによって脱泡を完全に行うことができた。

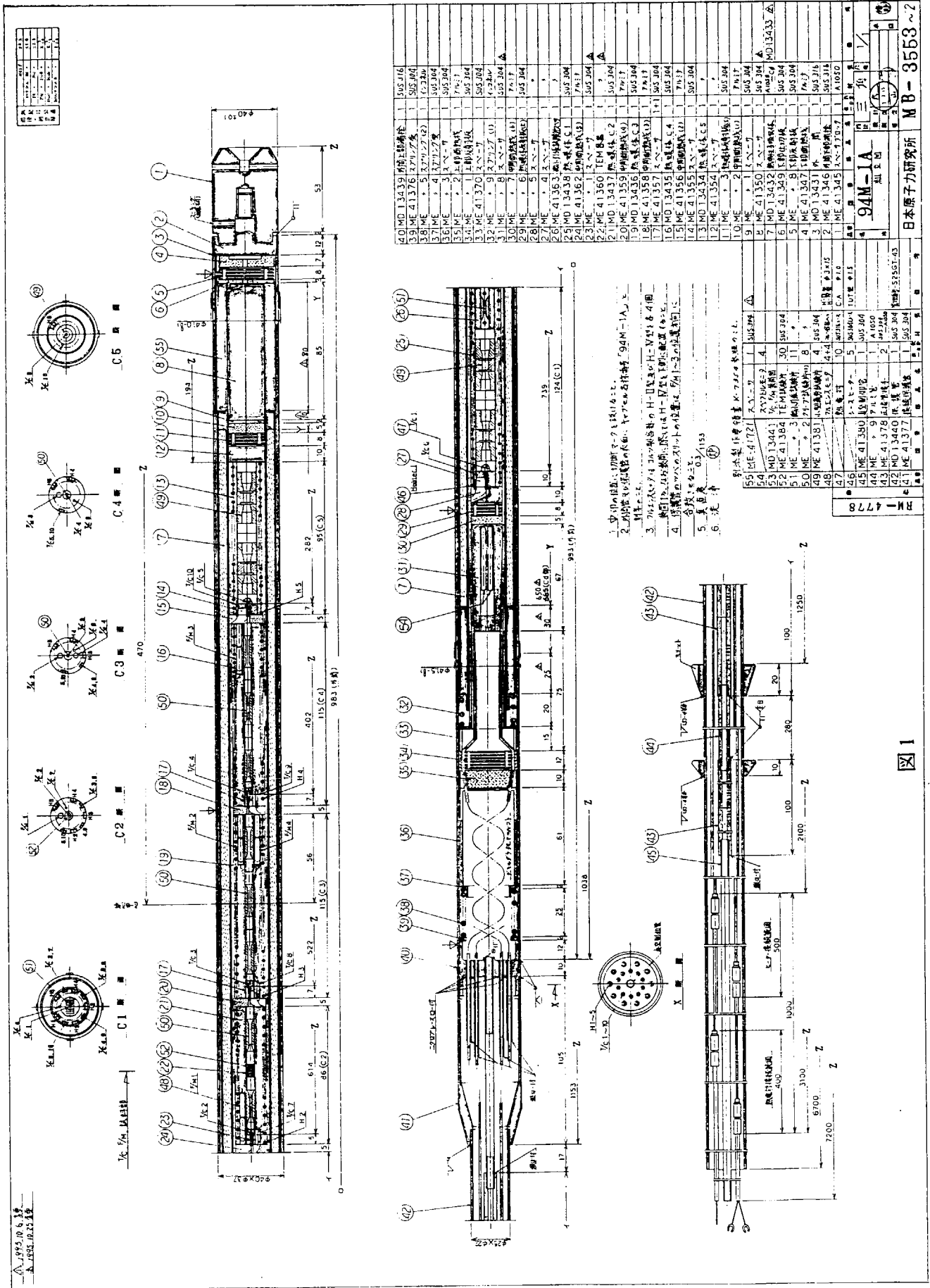
本文中でも明らかにしたが、この鑄造において我々が遭遇した空洞は凝固収縮による「引け巣」である。これほど大きな「引け巣」ができたのは、カドミウムシールドが全長／直径の比が極めて大きい特殊な形状であるためと、カドミウムの収縮率が比較的大きいためである。これはその後の技術調査によっても確認された。

今回の鑄造による製作にあたっては発生した曲がりの対応に苦慮したが、曲がり対策としては予備溶解で製作したインゴットを機械加工してカドミウムシールド容器内に充填し、下部から順次溶解凝固させインゴットと容器の間隙を埋める工法が有効である。

カドミウムは労働安全衛生法で特定化学物質として規制される物質で、取り扱いには細心の注意が必要である。このため、切削加工時には防塵マスクを着用して粉塵の吸引を防止し、切り粉は全て回収した。溶解は真空槽で行い、溶解時のヒュームはトラップ及びフィルタによって回収した。カドミウムが付着した機器は除染してカドミウムを分離するとともに、不可能のものは保管とする等の措置を講じた。

### 参考文献

- |                         |                  |        |          |
|-------------------------|------------------|--------|----------|
| 1) 日本原子力研究所 大洗研究所材料試験炉部 | J M T R 照射ハンドブック | 改訂第5版  | 1994年 4月 |
| 2) 日本機械学会               | 伝熱工学資料           | 第5刷    | 1994年 9月 |
| 3) ”                    | ”                | 改訂第3版  | 1975年 2月 |
| 4) 長谷川 正義、三島 良績         | 原子炉材料ハンドブック      | 初版     | 1997年10月 |
| 5) 日本金属学会               | 金属便覧             | 改訂第3版  | 1971年 6月 |
| 6) 日本機械学会               | 機械工学便覧           | 新版 4刷  | 1990年 5月 |
| 7) 労務行政研究所              | 労働安全衛生関係法令集      | 平成3年度版 |          |
| 8) 大西 清                 | 機械設計製図便覧         | 第6版    | 1989年 2月 |
| 9) 省エネルギーセンター           | エネルギー管理技術        | 第1版    | 1984年 8月 |



40	MD 13439	閉鎖用調整ねじ	505.016
39	ME 41376	1770-7/8	505.004
38	ME 41377	27 (2)	505.004
37	ME 41378	27	505.004
36	ME 41379	27	505.004
35	ME 41380	27	505.004
34	ME 41381	11	505.004
33	ME 41382	27	505.004
32	ME 41383	27	505.004
31	ME 41384	27	505.004
30	ME 41385	27	505.004
29	ME 41386	27	505.004
28	ME 41387	27	505.004
27	ME 41388	27	505.004
26	ME 41389	27	505.004
25	ME 41390	27	505.004
24	ME 41391	27	505.004
23	ME 41392	27	505.004
22	ME 41393	27	505.004
21	ME 41394	27	505.004
20	ME 41395	27	505.004
19	ME 41396	27	505.004
18	ME 41397	27	505.004
17	ME 41398	27	505.004
16	ME 41399	27	505.004
15	ME 41400	27	505.004
14	ME 41401	27	505.004
13	ME 41402	27	505.004
12	ME 41403	27	505.004
11	ME 41404	27	505.004
10	ME 41405	27	505.004
9	ME 41406	27	505.004
8	ME 41407	27	505.004
7	ME 41408	27	505.004
6	ME 41409	27	505.004
5	ME 41410	27	505.004
4	ME 41411	27	505.004
3	ME 41412	27	505.004
2	ME 41413	27	505.004
1	ME 41414	27	505.004

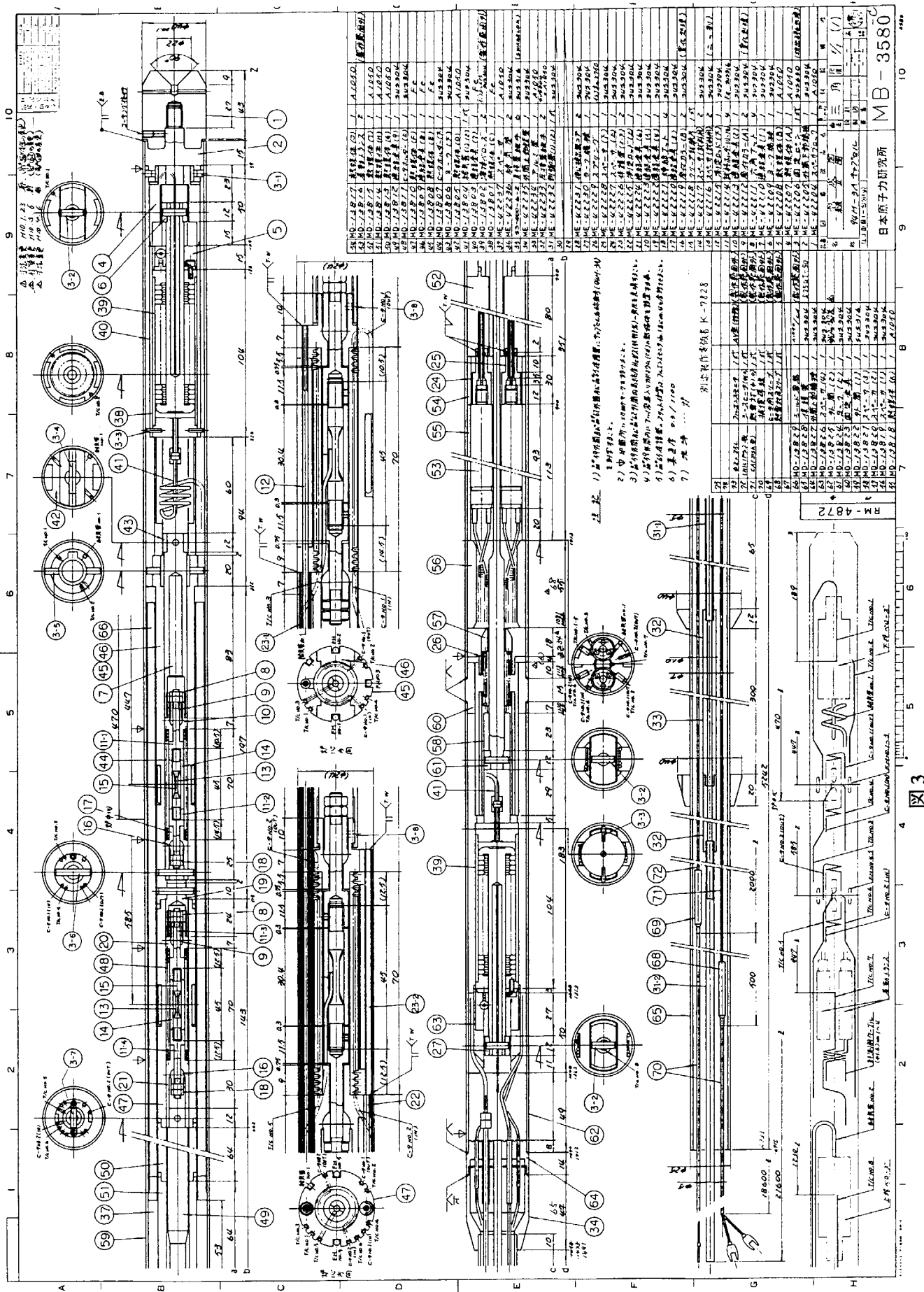
1. 中央部は、閉鎖用調整ねじの位置に注意して、94M-1Aを  
 2. 閉鎖用調整ねじの位置に注意して、94M-1Aを  
 3. 閉鎖用調整ねじの位置に注意して、94M-1Aを  
 4. 閉鎖用調整ねじの位置に注意して、94M-1Aを  
 5. 閉鎖用調整ねじの位置に注意して、94M-1Aを  
 6. 閉鎖用調整ねじの位置に注意して、94M-1Aを

55	ME 41372	27	505.004
54	ME 41373	27	505.004
53	MD 13441	30	505.004
52	ME 41384	11	505.004
51	ME 41385	11	505.004
50	ME 41386	11	505.004
49	ME 41387	11	505.004
48	ME 41388	11	505.004
47	ME 41389	11	505.004
46	ME 41390	11	505.004
45	ME 41391	11	505.004
44	ME 41392	11	505.004
43	ME 41393	11	505.004
42	MD 13440	11	505.004
41	ME 41377	11	505.004

図 1

94M-1A  
 日本原子力研究所 MB-3553 ~2





図番	品名	数量	材料	備考
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
4	...	...	...	...
5	...	...	...	...
6	...	...	...	...
7	...	...	...	...
8	...	...	...	...
9	...	...	...	...
10	...	...	...	...
11	...	...	...	...
12	...	...	...	...
13	...	...	...	...
14	...	...	...	...
15	...	...	...	...
16	...	...	...	...
17	...	...	...	...
18	...	...	...	...
19	...	...	...	...
20	...	...	...	...
21	...	...	...	...
22	...	...	...	...
23	...	...	...	...
24	...	...	...	...
25	...	...	...	...
26	...	...	...	...
27	...	...	...	...
28	...	...	...	...
29	...	...	...	...
30	...	...	...	...
31	...	...	...	...
32	...	...	...	...
33	...	...	...	...
34	...	...	...	...
35	...	...	...	...
36	...	...	...	...
37	...	...	...	...
38	...	...	...	...
39	...	...	...	...
40	...	...	...	...
41	...	...	...	...
42	...	...	...	...
43	...	...	...	...
44	...	...	...	...
45	...	...	...	...
46	...	...	...	...
47	...	...	...	...
48	...	...	...	...
49	...	...	...	...
50	...	...	...	...
51	...	...	...	...
52	...	...	...	...
53	...	...	...	...
54	...	...	...	...
55	...	...	...	...
56	...	...	...	...
57	...	...	...	...
58	...	...	...	...
59	...	...	...	...
60	...	...	...	...
61	...	...	...	...
62	...	...	...	...
63	...	...	...	...
64	...	...	...	...
65	...	...	...	...
66	...	...	...	...
67	...	...	...	...
68	...	...	...	...
69	...	...	...	...
70	...	...	...	...
71	...	...	...	...
72	...	...	...	...

注記 1) 本図は、本機組立図に用いられる部品を、その寸法と材質を記載したものである。  
 2) 本図中の寸法は、すべてmm単位である。  
 3) 本図中の寸法は、すべてmm単位である。  
 4) 本図中の寸法は、すべてmm単位である。  
 5) 本図中の寸法は、すべてmm単位である。  
 6) 本図中の寸法は、すべてmm単位である。  
 7) 本図中の寸法は、すべてmm単位である。

日本原子力研究所  
 MB-3580





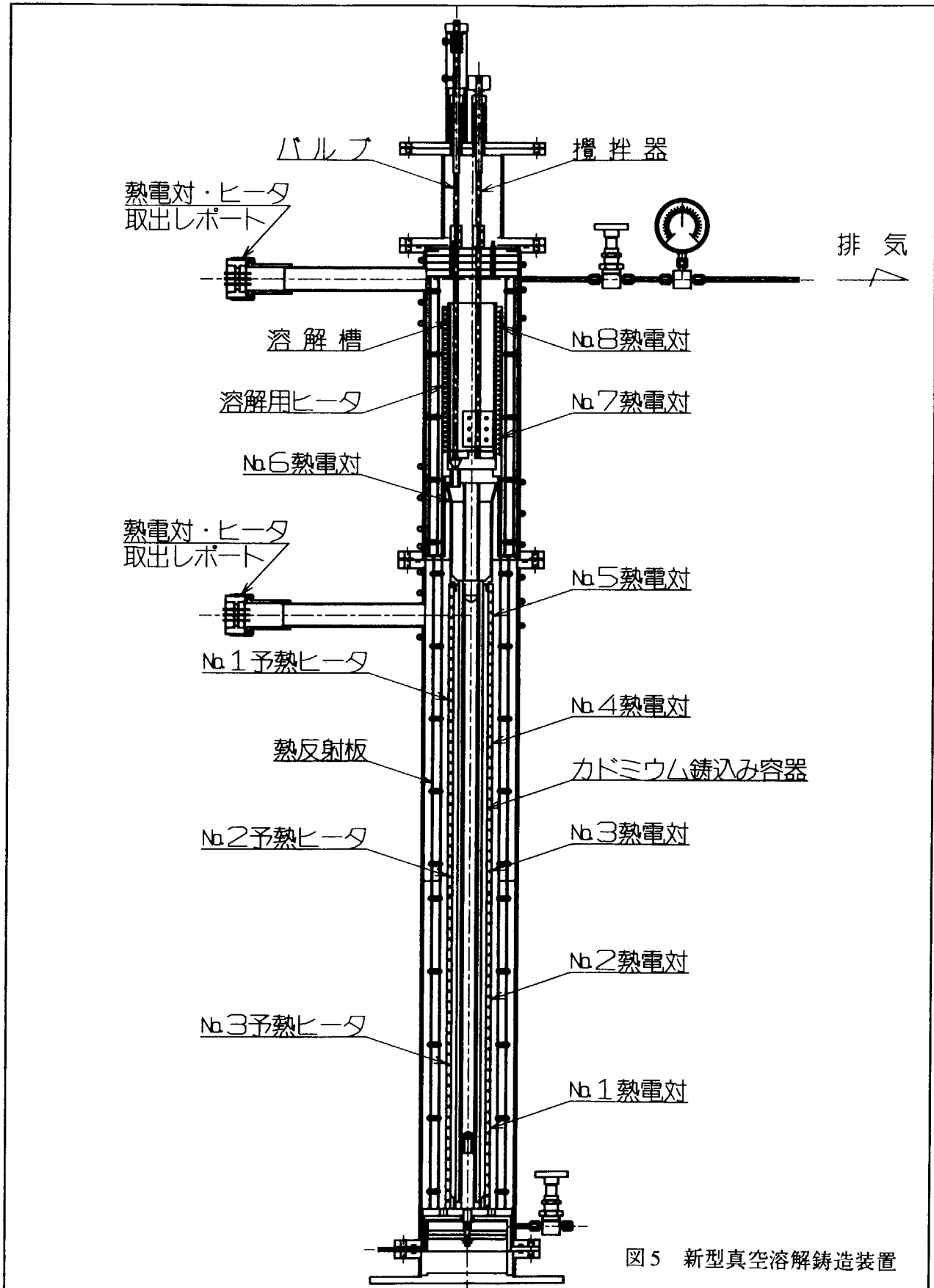


図5 新型真空溶解鑄造装置

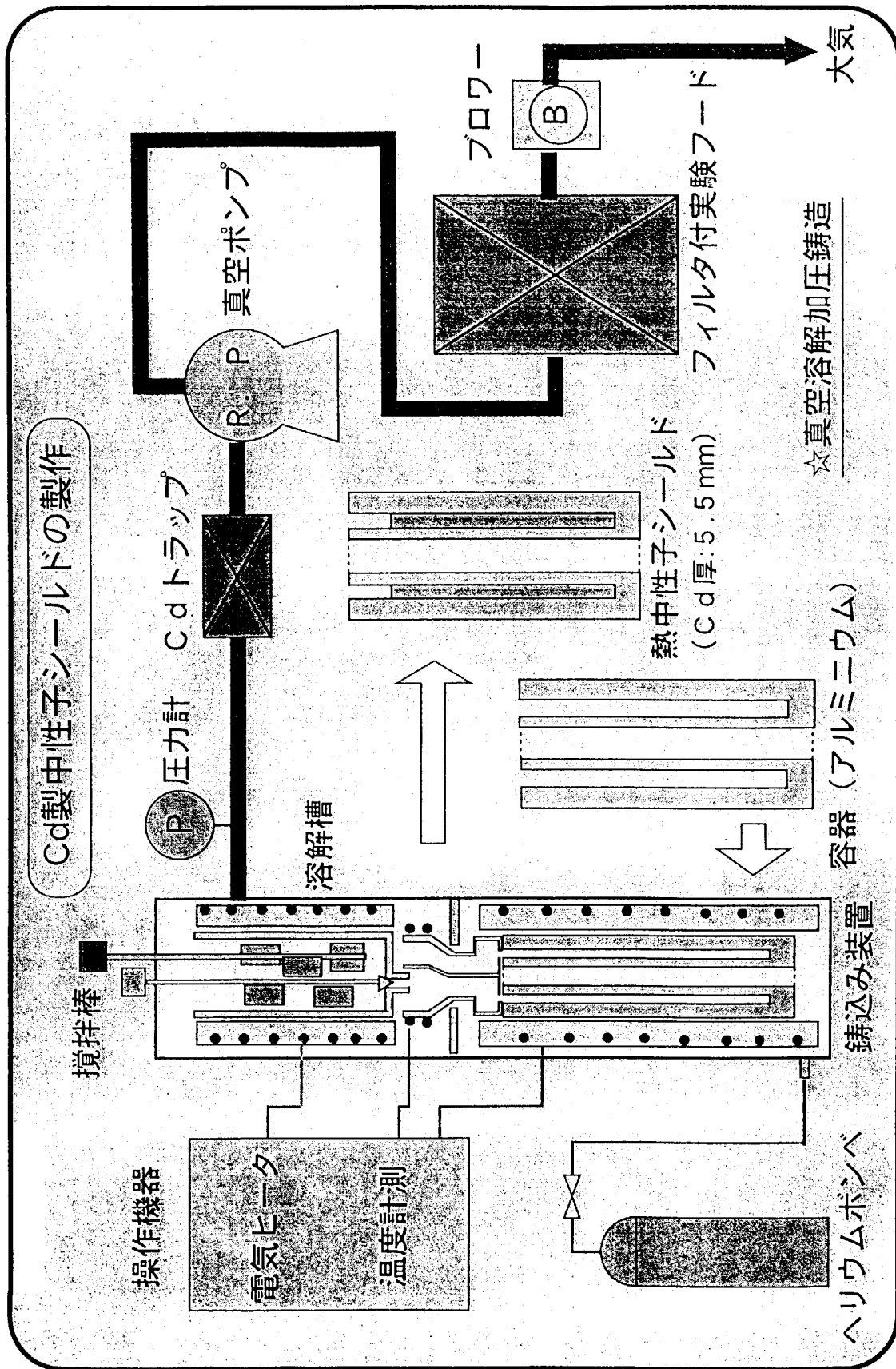


図6 真空溶解鑄造法全体構成図

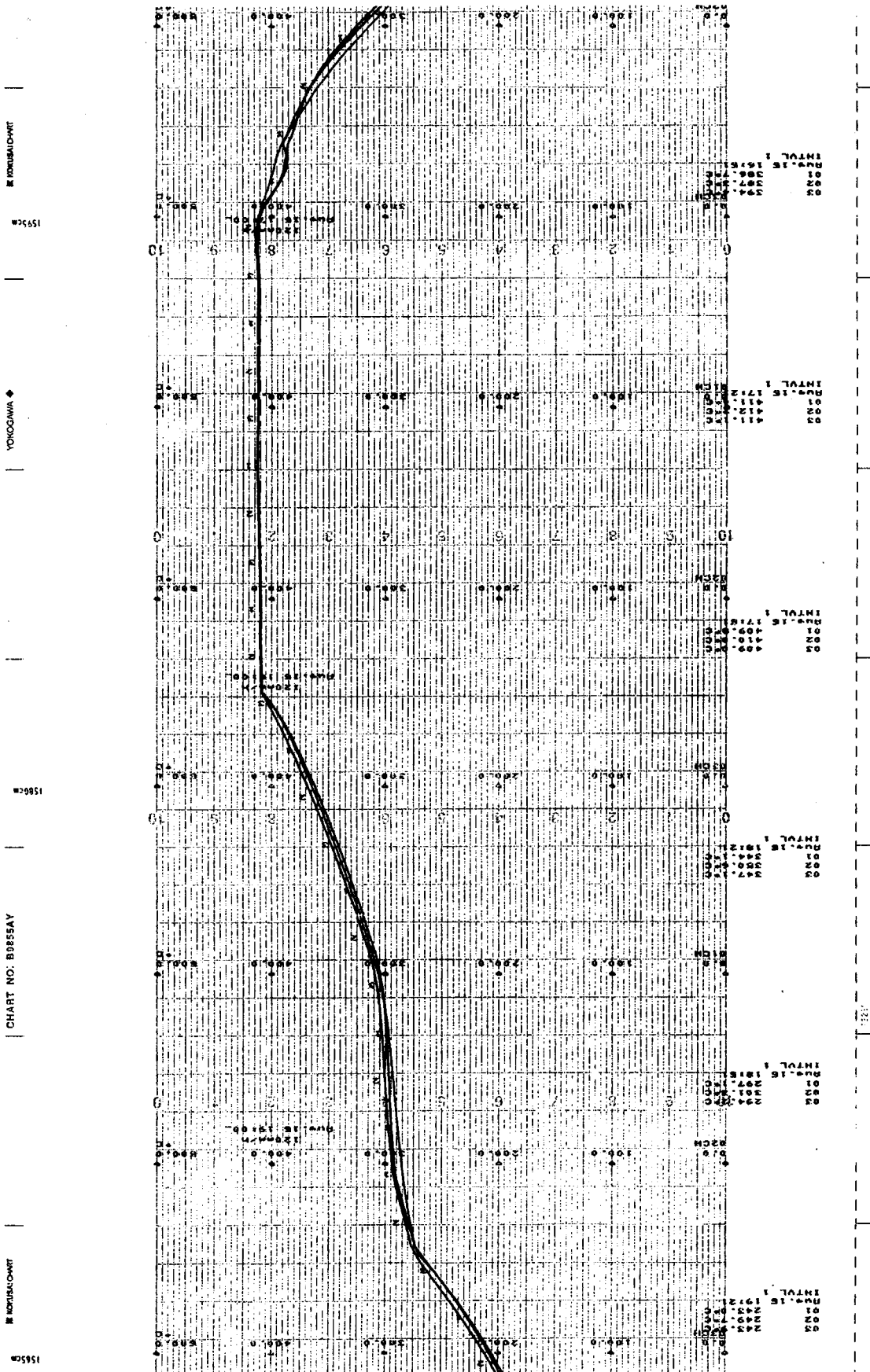


図7 予備溶解温度記録 (引け巢の大きいもの)

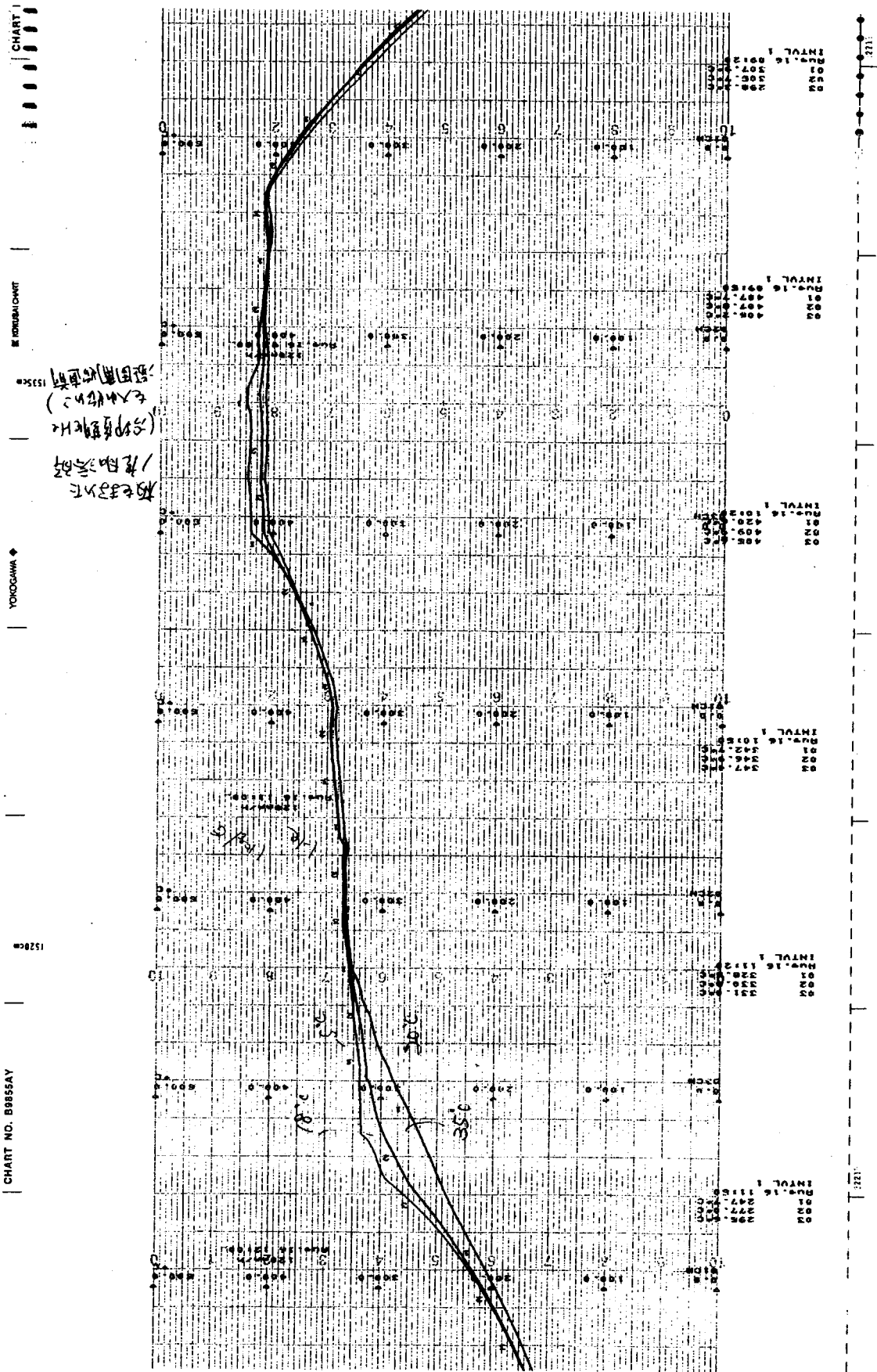
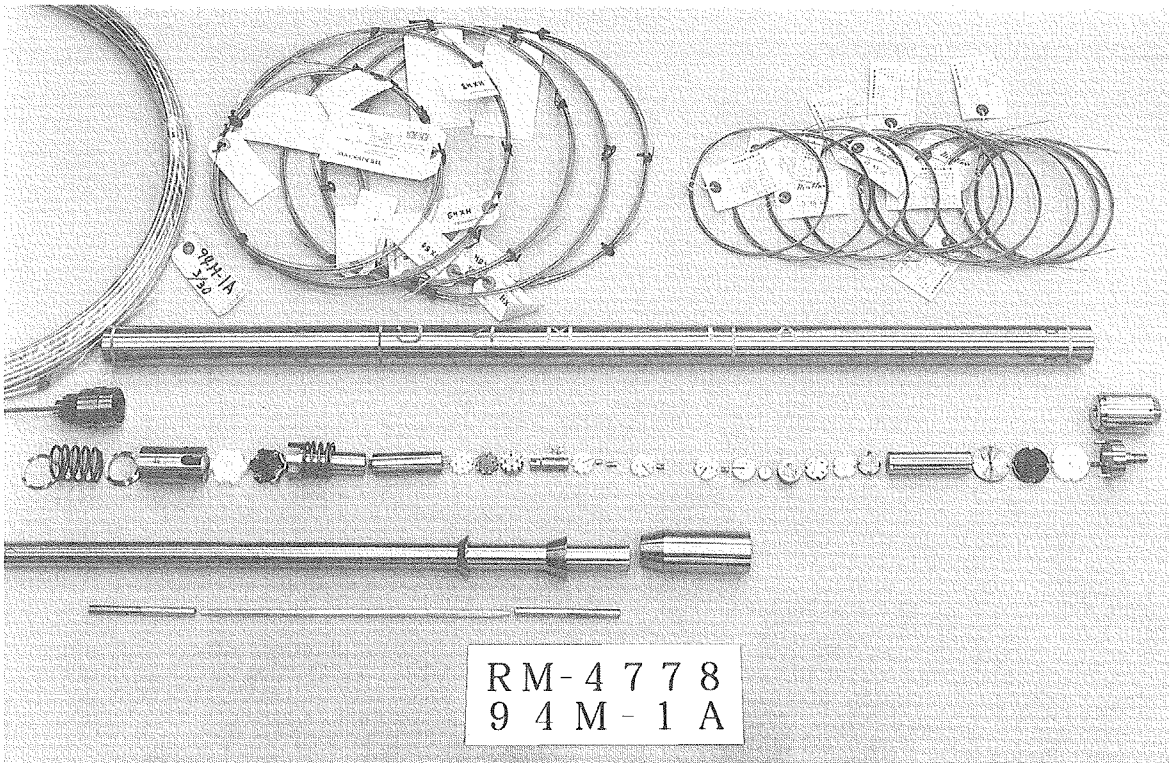


図8 予備溶解温度記録 (引け巢の小さいもの)

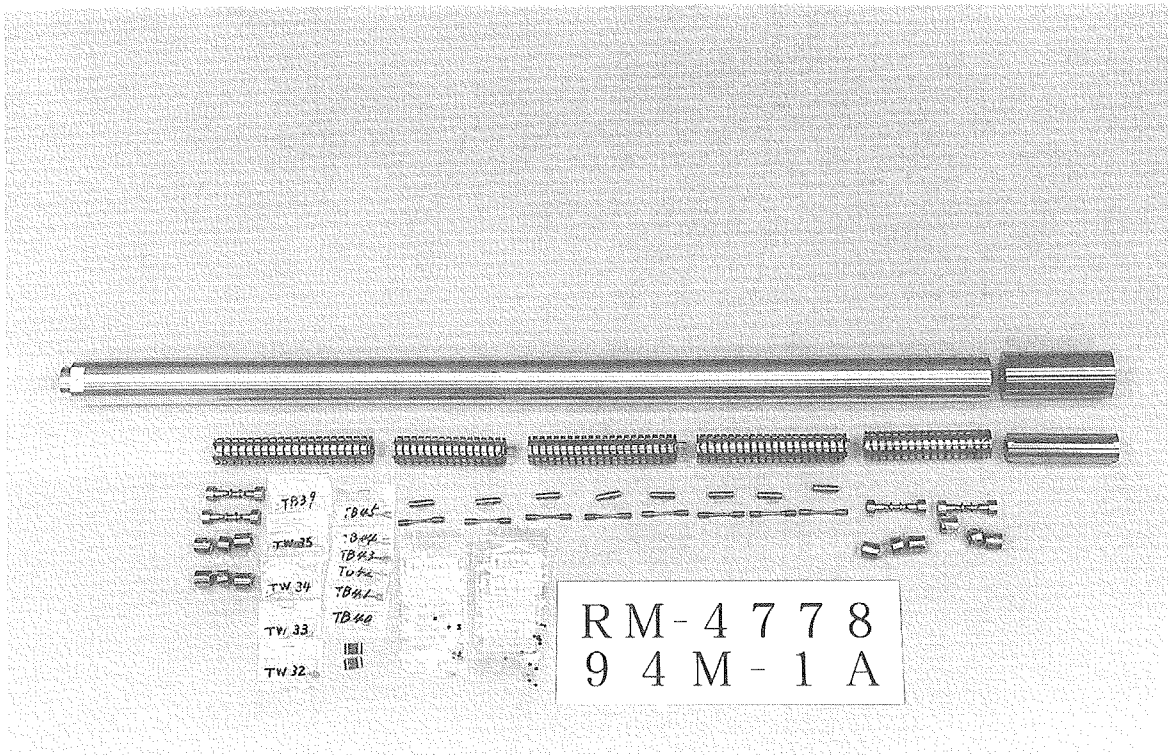






RM-4778  
94M-1A

写真1 94M-1A キャプセル部品・I



RM-4778  
94M-1A

写真2 94M-1A キャプセル部品・II



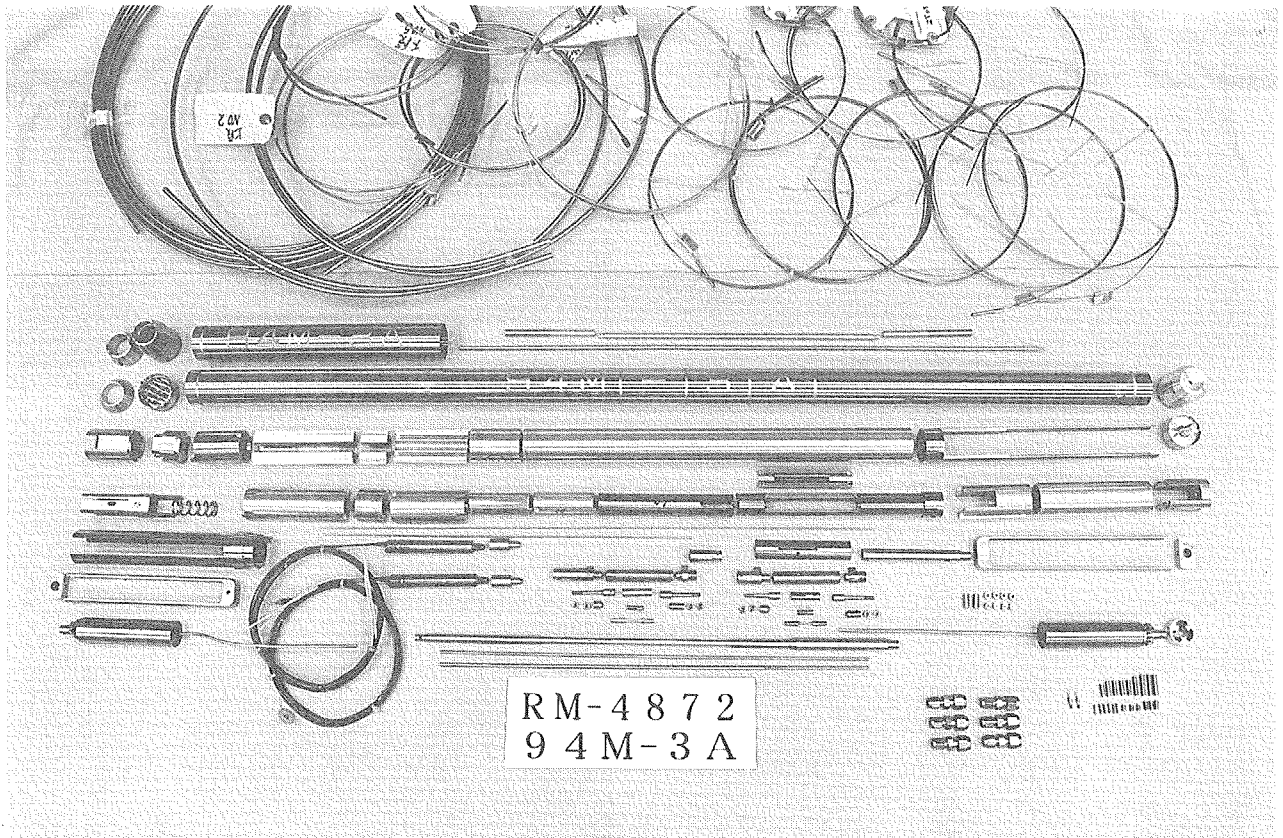


写真3 94M-3A キャプセル部品

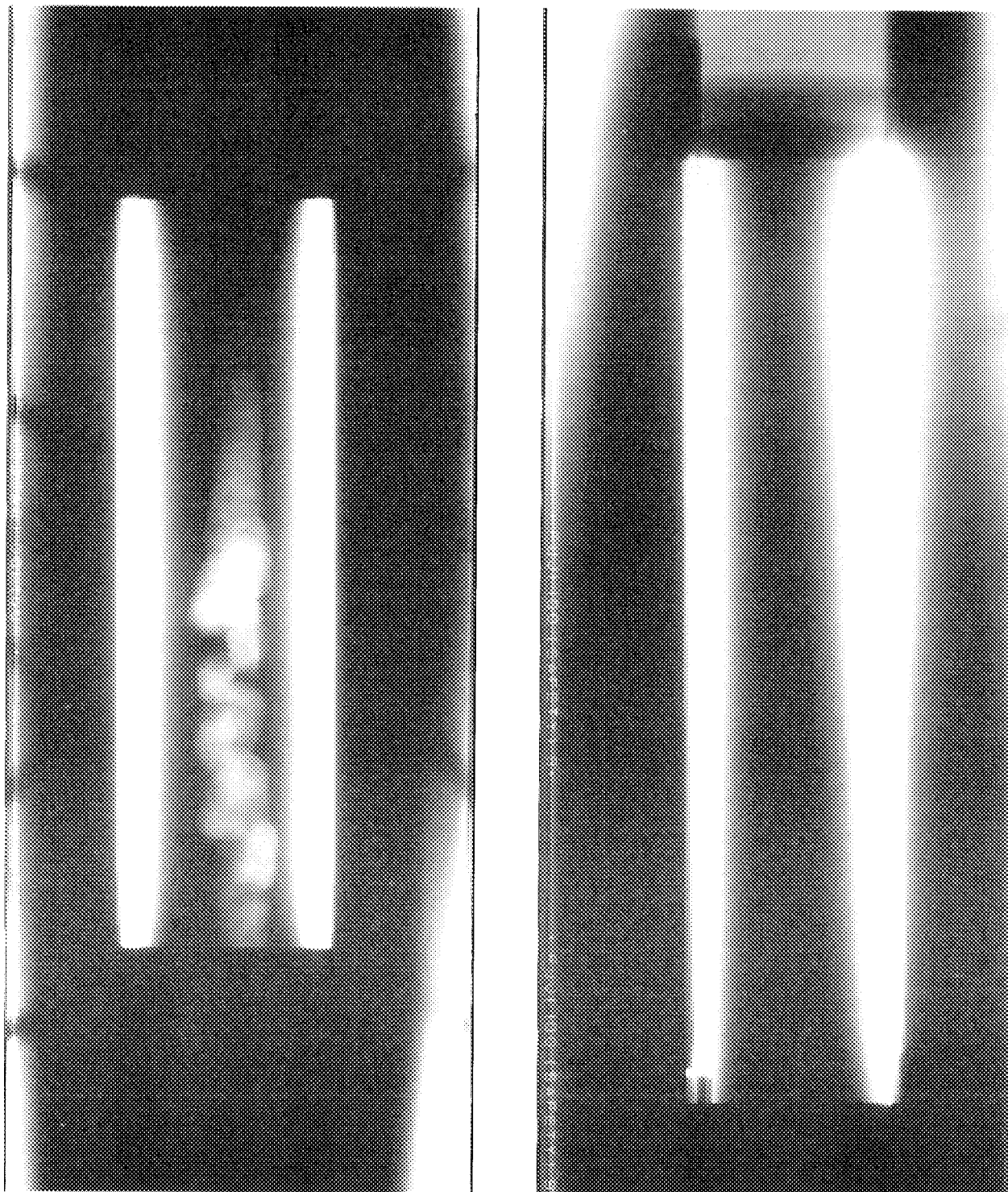


写真4 予備溶解インゴットの内部状態 (引巢の大きいもの)

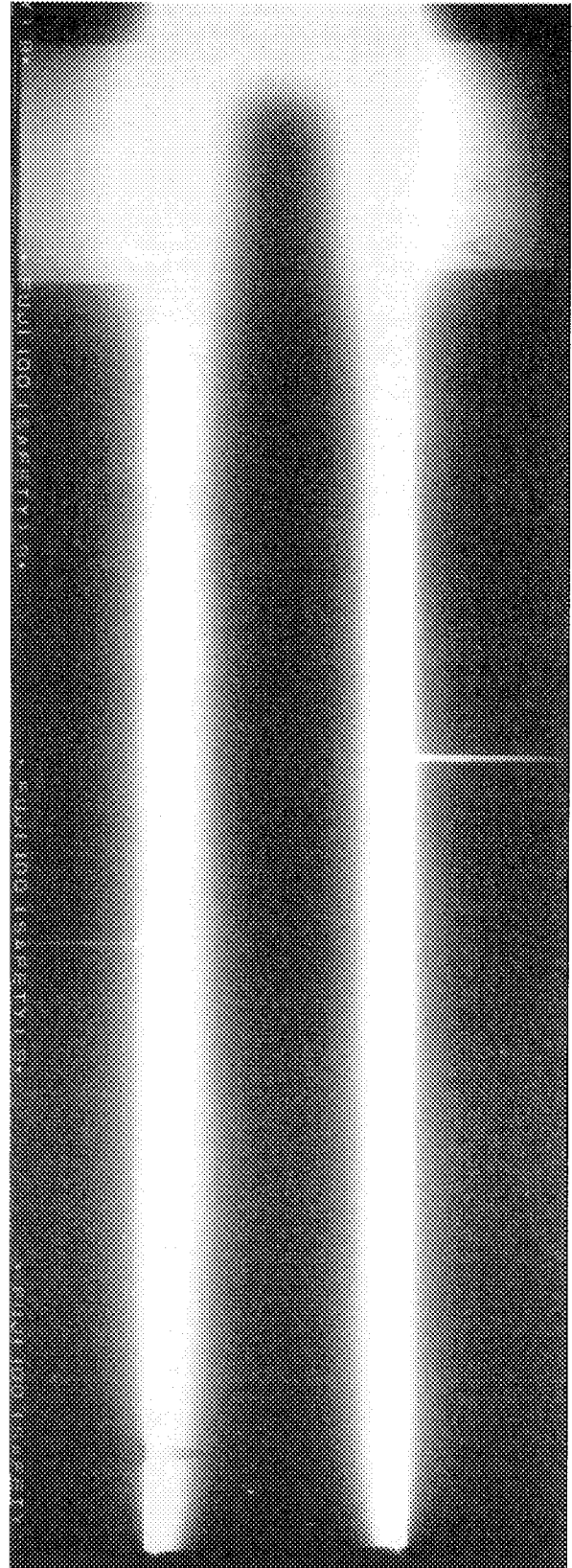
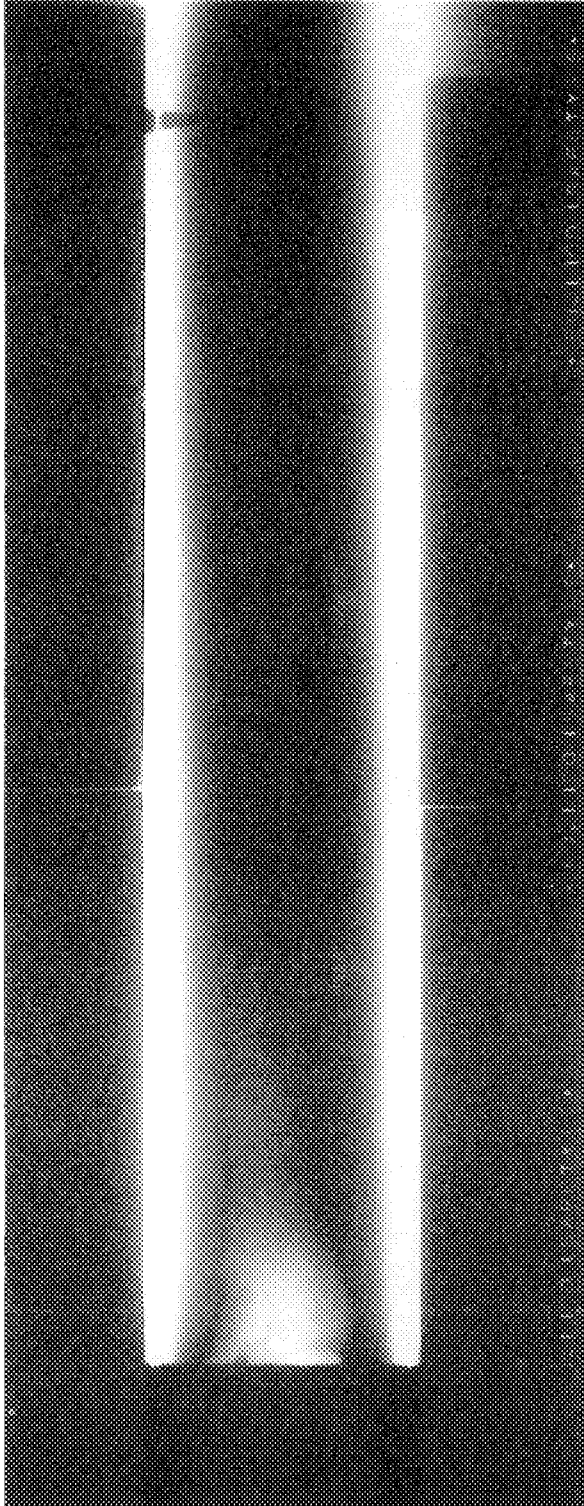


写真5 予備溶解インゴットの内部状態（引巢の小さいもの）

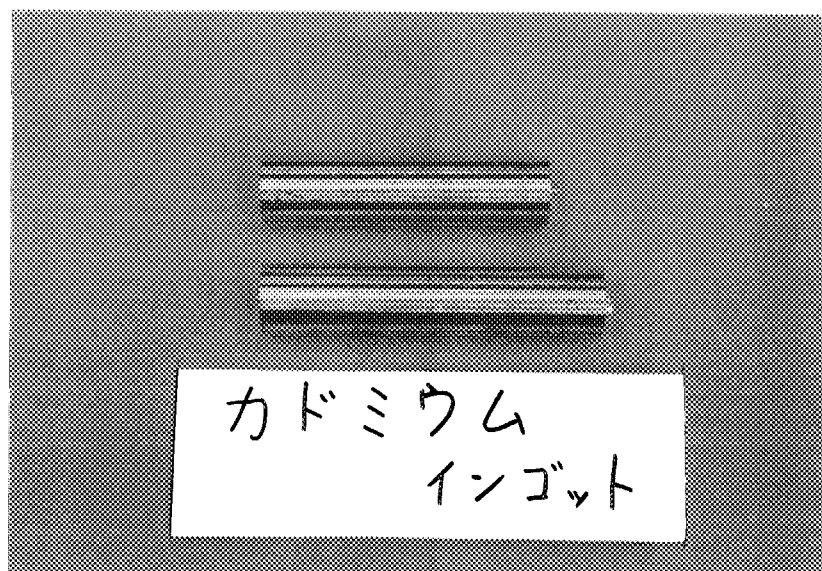


写真6 予備溶解にて製作したカドミウムインゴット

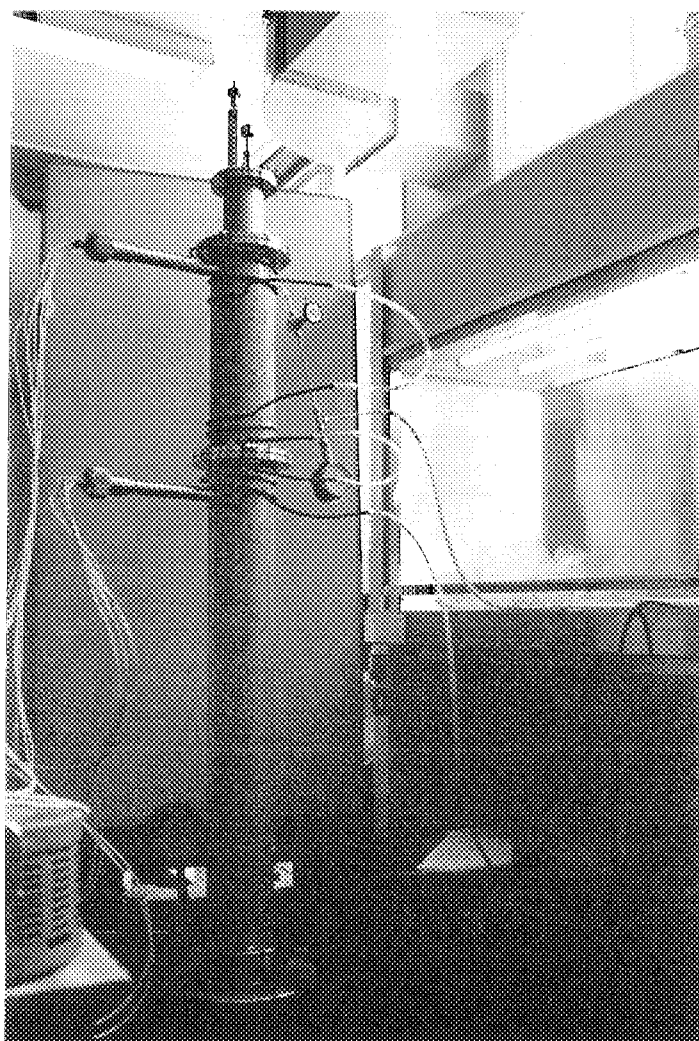


写真7 新型真空溶解鑄造装置による鑄造

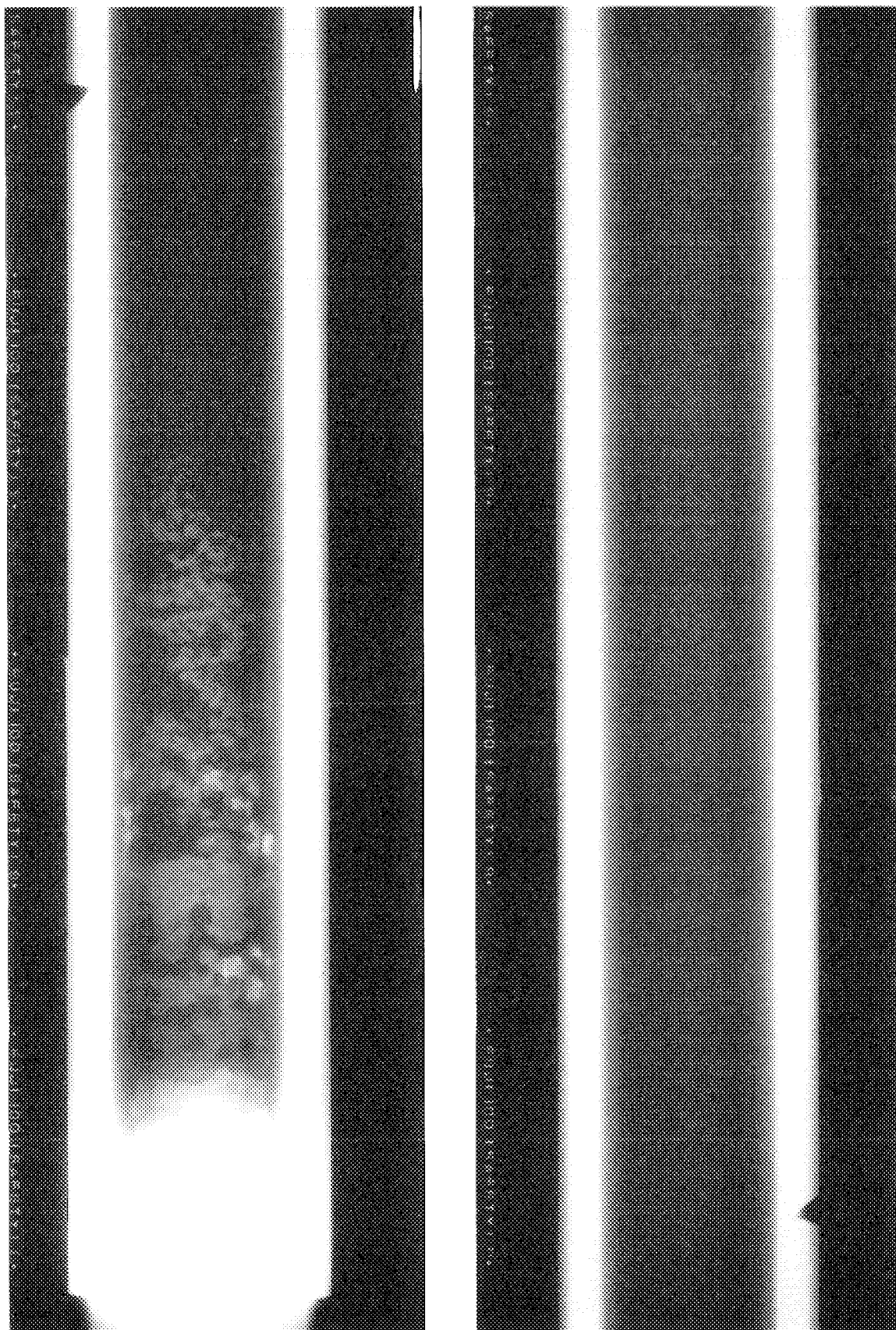
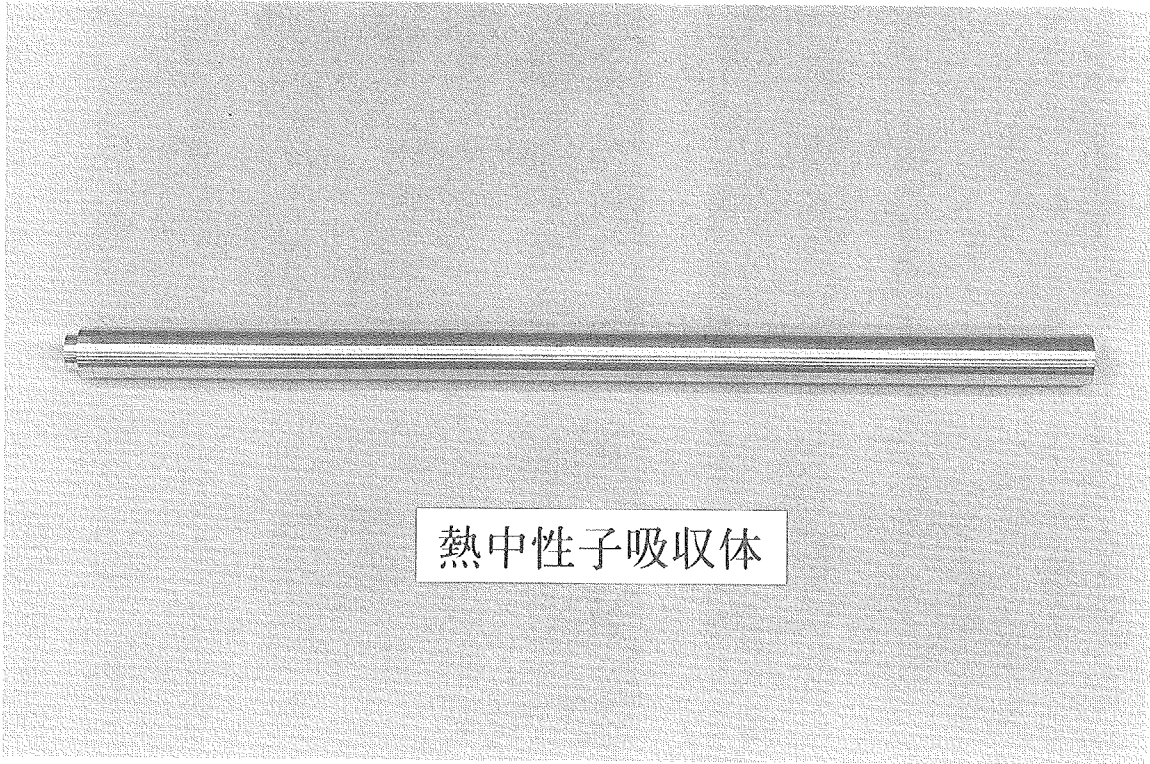


写真8 94M-1A用カドミウムシールド棒製造時内部状態



91M-1A用

写真9 カドミウムシールド

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクターも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

アルミニウム被覆カドミウム薄肉円筒中性子吸収体の製作