

JAERI-Tech

JP9950497

99-054



## JT-60U負イオン源用熱伝導型セシウム導入管の開発

1999年7月

山崎晴幸・伊藤孝雄・薄井勝富・藻垣和彦・栗山正明  
佐藤藤雄・大島克己・大森憲一郎・渡辺和弘

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刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、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、お申し越しください。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おこなっ  
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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

## JT-60U 負イオン源用熱伝導型セシウム導入管の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

山崎 晴幸・伊藤 孝雄・薄井 勝富・藻垣 和彦・栗山 正明・佐藤 藤雄  
大島 克己・大森憲一郎・渡辺 和弘

(1999年6月17日受理)

JT-60U 用負イオン源では、負イオン生成効率を向上させるためにアークチャンバ内にセシウム（以下 Cs と略す）蒸気を導入する。従来の Cs 導入装置では、真空側に設置したヒータがイオン源電極の放電により発生する高電圧ノイズによりしばしば断線・故障した。そこで、Cs 導入装置を高電圧ノイズに強くするため、熱伝導型導入管の開発とヒータ回路の改良が求められた。

新たに開発した熱伝導型導入管は、ヒータ断線時の交換を容易にするため、真空側にはヒータを設置せず、大気側に位置する導入管の一部を加熱して、真空側の部分を熱伝導で昇温できる構造とした。開発にあたり、いくつかの構造について、Cs 導入管の伝熱特性を表す昇温時間、放熱量、温度分布等を計算機でシミュレーションし、熱伝導型導入管モデルを設計、製作した。このモデルを用いて性能確認試験を行い、試験結果と計算結果が良く一致することを確認し、これを JT-60U 用負イオン源に適用した。また、ヒータ断線を防止するために、ヒータ回路の改良を行い、高電圧ノイズが発生する加速電圧の印加中は、ヒータの電源を遮断できる制御方式とした。以上の 2 点の改良により、Cs 導入装置のヒータに関する故障はほとんどなくなり、現在、順調に運転中である。

Development of Heat Conduction Type Cesium Injection  
Device for Negative-Ion Source for JT-60U.

Haruyuki YAMAZAKI, Takao ITOH, Katsutomi USUI, Kazuhiko MOGAKI,  
Masaaki KURIYAMA, Fujio SATOH, Katsumi OHSHIMA, Kenichiro OHMORI  
and Kazuhiro WATANABE

Department of Fusion Facilities  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 17, 1999)

In the negative-ion source for JT-60U, cesium (Cs) vapor is introduced into an arc chamber to enhance negative-ion production rate. Conventional Cs injection devices were often broken by high voltage noises occurred during the ion beam acceleration. To make higher noise-resistant, the development of a newly heat conduction type Cs injection device and improvement of heater power supply to prevent heater break-down, were required.

To repair easily the Cs injection device after the heater was break-down, a new structure of an inlet tube was proposed to be settled no heater located in the vacuum area and to be heated up a given temperature through thermal conduction from the heated part of the tube located the atmospheric pressure area. Thermal characteristics, such as temperature rise time, heat losses and temperature distributions of the tube were calculated for some types of the tube. Based on these calculations, a new device of the heat conduction type inlet tube was designed and manufactured. The verification tests of the device showed that the experimental results were agreed well with the calculated ones. After the test, the new Cs inlet device was set onto the negative-ion source for JT-60U. The heater power supply was also modified to be cut off during beam acceleration which makes high voltage noises. As a result of these improvements, the heating system for the Cs injection devices is now working well without break-down of heaters.

Keywords: Cesium, Inlet Tube, Heat Conductance, Arc Chamber, N-NBI, JT-60U

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.熱伝導型 Cs 導入管の設計と性能確認試験.....	3
2.1 設計 .....	3
2.2 性能確認試験 .....	12
3.熱伝導型 Cs 導入管用ヒータ容量と制御方法.....	14
3.1 温度制御.....	14
3.2 ヒータ容量.....	14
3.3 ヒータ断線防止のための制御方法.....	15
4.実機 N-NBI 装置用 Cs 導入装置の試験結果 .....	16
5.まとめ.....	16
謝辞 .....	17
参考文献 .....	17

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Design and Verification Tests of Heat Conduction Type Cs Inlet Tube .....	3
2.1 Design .....	3
2.2 Verification Tests.....	12
3. Heater Power and Control System of Heat Conduction Type Cs Inlet Tube.....	14
3.1 Temperature Control.....	14
3.2 Heater Power .....	14
3.3 Heater Control System to Prevent Break-down .....	15
4. Test Results of The New Cs Inlet Devices Settled onto N-NBI Facility.....	16
5. Conclusion.....	16
Acknowledgements.....	17
References.....	17

This is a blank page.

## 1. はじめに

トカマク型プラズマ試験装置 JT-60U に使用されている負イオン源を用いた中性粒子加熱装置（N-NBI 装置<sup>(1), (2)</sup>）は高密度プラズマ中に中性粒子ビームを入射し、プラズマの加熱及び非誘導電流駆動の研究を推進するために用いられている。その N-NBI 装置の負イオン源は、体積生成方式と表面生成方式の 2 つの方により負イオンを生成している。Cs 導入装置は表面生成方式で負イオン生成効率を向上させ、中性粒子ビームの出力を増大させるために重要な装置である。

N-NBI 用イオン源<sup>(3)</sup>の概略構造と Cs 導入装置の設置位置を図 1 に示す。Cs 導入装置はイオン源鏡板の中央に設けられたフランジに設置される。Cs は融点が 28.5°C、沸点が 703.3°C の常温では粉末状のアルカリ金属<sup>(4)</sup>であり、酸化し易く、禁水性である。Cs 導入装置<sup>(5)</sup>は、 $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$ Pa の高真空下において Cs を約 180°C~200°C に加熱して蒸発させ、アーケーチェンバ内に Cs 蒸気を導入する装置である。

従来の Cs 導入装置を図 2 に示す。装置は、オーブン、手動弁、空気圧式駆動弁、導入管、加熱ヒータ及び断熱材から構成され、導入管のフランジから左側が大気圧側に、フランジから右側が真空側に配置され、その排気孔はアーケーチェンバ内に挿入されている。オーブンは Cs を貯蔵し、これを加熱、気化させる要素である。Cs 蒸気はオーブンから手動弁、空気圧式駆動弁、導入管を経て、高真空の負イオン生成部に導入される。また、導入管及び弁の周囲にヒータを巻いて Cs 蒸気を加熱し、系統内を流れる Cs 蒸気が途中で液化するのを防止している。

従来の導入管は図 3 に示す様に、直径 12.7mm、厚さ 2mm、長さ 404mm のステンレス (SUS304) 管であり、導入管の根元部がイオン源鏡板のイオン源フランジに固定され、導入管の先端部がアーケーチェンバ壁のポートに設けられた先端固定部に固定される。ここで、フランジから導入管先端までの寸法はイオン源の構造から決まる。また、導入管の周囲には、等間隔でらせん状の溝を掘り、そこにヒータを無誘導巻きにして埋込み、これに通電して導入管を加熱した。なお、このヒータへは加速電圧印加中も連続的に通電されていた。

この Cs 導入装置では、N-NBI 装置の放電破壊時に生じる高電圧ノイズにより、導入管のヒータがしばしば断線した。その断線位置は、フランジの右側の真空側に配置された部分であった。導入管のヒータが断線すると、Cs 導入装置全体を正常のものと交換しなければならない。Cs 導入装置の交換は、イオン源に蒸着している Cs の酸化を防ぐため、イオン源が設置されている真空容器全体に窒素を 1 気圧強封入した状態で行わなければならず、交換に約 2 日間を要する。もし、真空容器の窒素封入に失敗して Cs が酸化されれば、その酸化 Cs が以後の Cs 蒸着の妨害になるため、イオン源を取り外して洗浄しなければならない。この場合は Cs 導入装置の交換は 2 週間の作業となる。このように、導入管のヒータが断線すると実験日数と労力の大変な損失になる。

この真空側のヒータ断線対策として提案されたのが、導入管の開発とヒータ回路の改良である。導入管の開発に関しては、真空側のヒータをなくし、大気圧側にある導入管の根元だけを加熱し、真空側の部分を熱伝導で加熱する導入管（以下、熱伝導型導入管と称す）を開発することである。その利点はヒータが断線しても、大気側にある加熱部に別のヒータを巻き替えて使用すれば性能を維持できるため、Cs 導入装置全体を交換する必要が無くなることである。ヒータ回路の改良に関しては、高電圧ノイズが発生してもヒータが断線しないように加速電圧印加中はヒータ回路を遮断する制御をヒータ回路に組むことである。

この熱伝導型導入管の開発には以下の点に留意した。

- ①導入管の手前に空気圧式駆動弁が設置されており、加熱部の温度を 350°C 以下にすること。また、導入管内で Cs 蒸気が凝縮しないように、最小となる先端の温度を 200°C 以上にすること。
- ②導入管加熱用ヒータの既設の電源容量が 300W であるので、300W 以下とすること。
- ③N-NBI 装置の運転開始からビーム引出しまで 1 時間程度準備が必要なので、先端まで 1 時間以内に設定温度まで昇温できること。

等が最低限の仕様として求められた。さらに、可能な限り、ⅰ) 加熱部と先端の温度差（以下、加熱面の温度上昇と称す）を小さくする。ⅱ) 小さな電力量で加熱できる。ⅲ) 先端まで短時間で昇温する。ⅳ) 350°C 程度でも強度上、問題ない。ことが望まれた。

このような導入管を開発するため、図 4 に示す手順に従って研究を進めた。まず、1) 導入管を要素に分割し、各要素をモデル化して伝熱計算を行い、詳細構造を決定する。2) 各要素を組合せたモデルを設計し、そのモデルの伝熱特性を計算で予測する。判定基準を満足すれば、3) モデルを試作し、性能確認試験を行う。結果が良ければ、4) JT-60U 用 N-NBI 装置に取付けて、信頼性を確認してから実用化する。悪ければモデルを改良し、再度 2) に戻る。

本報告書では、2 章において、熱伝導型導入管の設計方法及び性能確認試験結果を述べ、3 章で熱伝導型導入管のヒータ電源容量と制御方法の検討、4 章で実機 N-NBI 装置に設置したときの試験結果を示す。

### 主な記号

$$A = \pi (D^2 - D_i^2) / 4 : \text{断面積} (m^2)$$

D : 管外径(m)

$D_i$  : 管内径(m)

$dQ_{rad}$  : dx 間の輻射による放熱量 (W)

$dT_x$  : dx 間の温度差(K)

dx : 微小区間の長さ(m)

$F = \pi D$  : 表面積( $m^2$ )

l : 円管の長さ (m)  
 $l_c$  : 放熱部の長さ (m)  
 $l_f$  : スリーブの長さ (m)  
 $l_x$  : 先端からの距離 (m)  
 Q : 放熱量 (W)  
 $Q_x$  :  $l_x$  における軸方向の伝熱量 (W)  
 $Q_{radx}$  : 0- $l_x$  間の輻射による放熱量 (W)  
 $q_x$  :  $l_x$  における熱流束 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $R_1$  : 円筒の内側の点 1 における半径 (m)  
 $R_2$  : 円筒の外側の点 2 における半径 (m)  
 $T_1$  : 円筒の内側の点 1 における温度 (K)  
 $T_2$  : 円筒の外側の点 2 における温度 (K)  
 $T_a$  : 周囲温度 (K)  
 $T_h$  : 加熱面温度 (K)  
 $T_x$  :  $l_x$  における表面温度 (K)  
 t : 管の厚さ (m)  
 $\epsilon$  : 輻射率  
 $\kappa$  : 形態係数  
 $\lambda$  : 热伝導率 ( $\text{W}/\text{mK}$ )  
 $\sigma = 5.6687 \times 10^{-8}$  : ステファン・ボルツマン定数 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ )

## 2. 热伝導型 Cs 導入管の設計と性能確認試験

### 2.1 設計

図 4 に示した開発手順において、導入管を要素分割するために、導入管に与えられた熱がどのように放熱（損失）するかを把握しておく必要がある。そこで、表 1 に放熱箇所、位置、伝熱形態、放熱先を模式的に示す。即ち、導入管の放熱箇所は、主構成要素である熱伝導部と固定部から成り、熱伝導部では輻射により負イオン生成部に放熱する。また、固定部は根元部と先端部の 2 力所にあり、根元部はイオン源フランジへ、先端部はポートよりアーケーチェンバ壁へ熱伝導で放熱する。したがって、ここでは導入管を熱伝導部、根元固定部及び先端固定部に分割し、それぞれの要素をモデル化した。

表 2 に計算モデルと決定すべき仕様を示す。熱伝導部モデルを用いて熱伝導部の基本的な伝熱特性を計算し、材質、寸法などの仕様を決めた。また、根元固定部モデルと先端固定部モデルを用いて固定部構造を決めた。

### 2.1.1 計算モデルと計算方法

#### (1) 热伝導部モデル

図 3 に示した従来の導入管を基本に設計した熱伝導部計算モデルを図 5 に示す。モデルは内径  $D_i=7\text{mm}$  の管であり、根元 70mm を加熱部とし、他を放熱部とした。この加熱部表面を 250°C で加熱し、放熱部表面から輻射で 20°C の雰囲気に放熱するものとした。本モデルでは、表 3 に示すように、管の材質、放熱部の長さ  $l_c$ 、管の厚さ  $t$ 、表面の輻射率  $\varepsilon$  をパラメータとする。管の材質としてはステンレス、炭素鋼、銅の 3 種類を選択した。 $t$  に関しては  $t=1\sim10\text{mm}$  の範囲で計算する。また、 $l_c$  については、従来の  $l_c$  が 334mm であるので、それより短い  $l_c=134\sim334\text{mm}$  の範囲で計算する。 $\varepsilon^{(6)}$  は材質、表面の状態により大きく変わるので、 $\varepsilon=0.1\sim1.0$  の範囲で計算した。

#### (2) 根元固定部モデル

根元固定部計算モデルを図 6、図 7 に示す。図 6 は、図 3 に示した従来の導入管で用いられた根元固定部(以下、従来型と称す)の計算モデル 1 である。モデル 1 は  $D_i=7\text{mm}$ 、 $D=17\text{mm}$  の管の根元 70mm を加熱部とし、そのさきに従来型のフランジが設置されている。 $l_c=334\text{mm}$  である。また、イオン源フランジに接触する部分を冷却面とし、フランジの右側半面及び、管の放熱面から輻射で 20°C の雰囲気に放熱するものとする。ここで、加熱面温度  $T_h=250\text{°C}$ 、冷却面温度を 20°C、雰囲気温度を 20°C のとする。加熱面に与えられた熱はフランジの冷却面および管の放熱面へと伝わる。フランジを従来と同様ステンレス製とし、 $t=5\text{mm}$  の銅管とした。

図 7 は改良型の計算モデル 2 であり、フランジからの放熱量低減を図ったモデルである。管の加熱部端の近傍に円板状のつばを設け、このつばの外周に円筒状のスリーブを設置し、フランジ内径と接続する構造である。ここではフランジ内径と接続するスリーブ先端を冷却面とした。輻射による放熱は管の放熱面、つばの右半面およびスリーブ外周面からなされるものとする。また、加熱面からの熱はつば、スリーブを経てフランジへ伝わる。この間の熱抵抗を大きくするため、つば及びスリーブ材には、比較的熱伝導率の小さなステンレスを選定し、 $t=2\text{mm}$  の薄肉構造とした。

スリーブ長さ  $l_f$  を大きくすると、さらに熱抵抗が増大し、フランジへの放熱量が減少することが予想される。ここで、イオン源フランジと管先端までの距離は図 3 に示したように既定寸法 308mm であり、 $l_c=310-l_f$ 、放熱面長さ = 284 -  $l_f$  である。したがって、 $l_f$  を大きくすると  $l_c$  が小さくなるため、管の輻射による放熱量が減少することが予想される。 $l_f$  をパラメータとして、フランジからの放熱量を計算する。管は  $t=5\text{mm}$  の銅管である。

#### (3) 先端固定部モデル

先端固定部計算モデルを図 8～図 10 に示す。計算モデルは  $D_i=7\text{mm}$ 、 $D=17\text{mm}$  の導入管の根元 70mm を加熱部とし、 $l_c=334\text{mm}$ 、その先端部 60mm を外径 12.5mm と細くし、サポートを介してポートに固定するモデルである。ポートは内径 18mm、外

径 30mm のステンレス管である。境界条件として、 $T_h=250^\circ\text{C}$ 、ポートの外周を冷却面とし  $20^\circ\text{C}$ とした。また、熱伝導部の放熱面から輻射による放熱があるとした。

図 8 に示す計算モデル 1 は内径 13mm、外径 17mm でステンレス製の円筒状サポートを、ポートと導入管先端部の間に挿入したモデルである。導入管先端部と円筒状サポート内側の間、及び、円筒状サポートの外周とポート内側の間に同一の接触熱抵抗を仮定して、これをパラメータとして、先端固定部からの放熱量を計算する。

図 9 に示す計算モデル 2 は、先端部表面の軸方向に沿って、厚さ 1mm、長さ 40mm、高さ 2.25mm のフィン状サポートを 4 枚設置し、フィンの外側をポート内孔に挿入したモデルである。フィン状サポートは銅製とする。

モデル 2 ではフィンの外側とポート内孔の接触であり、モデル 1 に比べて接触面積を小さくし、ポートからの放熱量の低下を図った。フィンの外側とポート内孔の接触部に熱抵抗を仮定して、これをパラメータとした。

図 10 に計算モデル 3 を示す。ポートの端面に内径 13mm、厚さ 1mm の円板状サポートを設置し、この内孔に導入管先端部を挿入したモデルである。モデル 2 に比べて接触面積を  $1/2.5$  とさらに小さくし、ポートからの放熱量をより一層抑制する構造とした。以下に計算条件、パラメータ、使用ソフトを示す。

(1) 計算条件：加熱面温度  $250^\circ\text{C}$ 、冷却面及び放熱面温度  $20^\circ\text{C}$ 、雰囲気温度  $20^\circ\text{C}$ 、

加熱面からの放熱は無い

(2) パラメータ：管の厚さ、長さ、表面の輻射率、根元固定部構造、

先端固定部構造、接触熱抵抗

(3) 使用ソフト：ADINA-T

### 2.1.2 計算結果

#### (1) 热伝導部の材質と寸法

##### 1) 材質の選定

これまで使用していたステンレス製の導入管と異なり、先端の温度が  $200^\circ\text{C}$ 以上になり、且つ、先端が 1 時間以下で昇温する材質を選定するために、炭素鋼、銅、及び比較のステンレスの材質について伝熱計算を行った。これらの材料の熱伝導に関わる主な物性値を表 4 に示す。

表 4 配管材の主な物性値

材質	熱伝導	密度	比熱	特徴
—	W/mK	kg/m <sup>3</sup>	J/kgK	—
ステンレス	19.0	7810	556	熱伝導率が小
炭素鋼	35.0	7760	559	
銅	383.0	8780	425	約 600K で軟化 <sup>(7),(8)</sup>

at 600K

図 5 に示した熱伝導部計算モデルにおいて、 $t=2\text{mm}$ 、 $l_c=334\text{mm}$ 、 $\varepsilon=0.3$  として、先端の温度が時間の経過と共にどのように変化するかを示したのが図 11 である。ステンレス及び炭素鋼は先端温度が  $200^\circ\text{C}$  よりかなり低く、また、先端温度が定常状態になる時間（以下、昇温時間と称す）が 1 時間よりかなり長いので、実用上使用できない。これに対し、銅は定常時の先端温度が  $190^\circ\text{C}$ 、昇温時間が 30 分程度と有望な材質である。しかし、本寸法では先端温度が  $190^\circ\text{C}$  であるので、 $200^\circ\text{C}$  以上になる寸法を見いだすことが次の課題である。また、銅は表 4 に示したように、約  $300^\circ\text{C}$  を超えると強度が低下するので、強度対策が必要である。さらに、表面が酸化、変色して輻射率が変わり易いので、変色防止対策も必要である。

### ② 厚さの影響

図 5 に示した熱伝導部計算モデルにおいて、銅製、 $l_c=334\text{mm}$ 、 $\varepsilon=0.3$ として、 $t$ が先端の温度変化に及ぼす影響を示したのが図 12 である。 $t$ が厚い方が先端の温度は高くなり、 $t \geq 3\text{mm}$ で先端温度が  $200^\circ\text{C}$ を超える。また、昇温時間は  $30\sim40$  分程度である。

先端が定常状態の管軸方向の温度分布を図 13 に示した。 $t$  が薄いほど、温度の下降あるいは温度勾配（単位長さ当たりの温度差）が大きい。他方、 $t$  に関わらず、軸方向の温度勾配は加熱部近くで大きく、先端で小さい。

なお、先端の温度特性をより明瞭に表示するのに、以下、先端と加熱面の温度差である温度上昇を用いる。 $t$  が昇温時間、温度上昇および放熱量に及ぼす影響を調べる。

図 14(上図)に  $t$  が昇温時間に及ぼす影響を示した。ここで、昇温時間を、先端が充分な定常状態であると考えられる温度の 98%に達する時間とする。 $t$  の増加と共に昇温時間も緩やかに増加する。

図 14(中図)に  $t$  が加熱面の温度上昇に及ぼす影響を示す。 $t$  の増加と共に温度上昇が小さくなる。その勾配は、 $t$  の小さな領域では大きいが、大きな領域では小さく、 $t > 5\text{mm}$  以上では緩やかである。したがって、 $t$  の小さな領域では、僅かに  $t$  を増やしても温度上昇は著しく減少するが、 $t$  の大きな領域では、さらに厚くしても温度上昇の低減効果は少ない。

その理由を考えるため、軸方向の温度勾配及びその原因となる管表面からの輻射熱について、図 15 を用いて以下に考察する。先端からの距離  $l_x$  における軸方向の伝熱量  $Q_x$  は、 $0 - l_x$  間の管表面からの輻射熱量  $Q_{\text{rad},x}$  と等しく、式(1) で表せる。

また、 $l_x$ における熱流束  $q_x$  は伝熱量  $Q_x$  を管の断面積  $A$  で除した値  $q_x = Q_x/A$  となる。

微小区間  $dx$  の輻射熱量  $dQ_{rad}$  は式(2) (9)で表せる。

$$dQ_{rad} = \sigma \varepsilon \kappa (T_x^4 - T_a^4) \pi D dx \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

また、 $0 \sim l_x$  間の放熱量  $Q_{\text{radx}}$  はそれらを積分した形で表せ、 $\sigma$  と  $D$  は一定であるので、式(3)で表せる。

$$Q_{\text{radx}} = \int dQ_{\text{rad}}$$

$$= \sigma \pi D \int_0^{lx} \varepsilon \kappa (T_x^4 - T_a^4) dx \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

故に、

$$q_x = \sigma \pi D/A \int_0^{lx} \varepsilon \kappa (T_x^4 - T_a^4) dx \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

一方、 $q_x$  は  $dx$  間の温度差を  $dT_x$  とすると、式(5)<sup>(7)</sup>で表せる。

式(4)、(5) より

$$\frac{dT_x}{dx} = (\sigma \pi D \int_0^x \varepsilon \kappa (T_x^4 - T_a^4) dx + dQ_{rad}) / A \lambda$$

ここで、 $dx$  間の放熱量  $dQ_{\text{rad}}$  は小さいので、

$$dT_x/dx \doteq \sigma \pi D/A \lambda \int_0^x \varepsilon \kappa (T_x^4 - T_a^4) dx \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

式(6)において  $\varepsilon$  と  $\kappa$  を一定とすると、温度勾配  $dT_x/dx$  は  $T_x$  の変化が小さい場合、表面積と断面積の比  $F/A$  で表せる。そこで、厚さと表面積  $F$ 、断面積  $A$  の関係を図 16 に示す。 $t$  が薄い領域では、 $t$  の増加と共に断面積  $A$  が急激に増加し、 $t$  が厚い領域では、 $t$  の増加と共に、 $A$  が緩やかに増加する。一方、表面積  $F$  は  $t$  によらず緩やかに増加する。

次に、 $t$  と  $F/A$  の関係を図 17 に示す。 $t$  が薄い領域では、 $t$  の増加と共に  $F/A$  が急激に減少するが、 $t$  が厚い領域では、緩やかに減少する。図 14（中図）に示した

曲線と良く似ている。このため、 $dT_x / dx$  は  $F / A$  に大きく依存していることがわかる。

加熱部のヒータ電源容量を設計するために重要な、管表面からの輻射による放熱量を図 14 (下図) に示す。式(3)に示したように表面積、即ち、直径に比例して放熱量が増加する。例えば  $t=5\text{mmn}$  の場合、輻射熱量は約 18W と予想される。

以上の結果から次のことがわかった。 $t$  が増加すると、①放熱量は直径に比例して大きくなるので、ヒータ容量も大きくなる。また、②温度上昇は小さくなる。 $t$  が温度上昇に及ぼす影響は  $t$  の小さな領域で大きめで大きいが、 $t$  の大きな領域では影響が小さい。 $t=5\text{mm}$  程度ではさらに厚くしても、温度上昇の低減効果は小さい。以上の結果から、銅製の  $t=5\text{mm}$  のモデルについて解析を進めることにする。

#### ④) 長さの影響

次に、 $l_c$  が昇温時間、温度上昇、放熱量に及ぼす影響を図 18 に示した。図 5 に示した放熱部計算モデルにおいて、銅製、 $t=5\text{mm}$ 、 $\varepsilon=0.3$  として計算した。図 18 (上図) に示したように、 $l_c$  が昇温時間に及ぼす影響は  $t$  の影響に比べて大きい。その勾配はほぼ一定であり、 $l_c$  に比例して昇温時間が増加する。したがって、昇温時間を短くするには、 $l_c$  を短くしなければならない。

温度上昇に及ぼす  $l_c$  の影響を図 18 (中図) に示す。 $l_c$  が温度上昇に及ぼす影響は、 $t$  の影響に比べて小さい。 $l_c$  の増加と共に温度上昇が直線的に増加する。これは式(3)に示した様に、 $l_c$  が長くなると、それに比例して表面積が大きくなり、放熱量が増大するためである。

その放熱量に及ぼす影響を示したのが図 18 (下図) である。放熱量は  $l_c$  の増加と共にほぼ直線的に増大するが、その勾配は小さいので、 $l_c$  が放熱量に及ぼす影響は、 $t$  の影響に比べて小さい。

図 19 に熱伝導部軸方向の温度上昇分布を示す。先端からの距離  $l_x$  を  $l_c$  で除した  $l_x/l_c$  を横軸にし、 $l_x$  における先端からの温度上昇  $\Delta T_x$  を加熱面の温度上昇  $\Delta T_h$  で除した  $\Delta T_x/\Delta T_h$  を縦軸にする。ここで、 $l_x/l_c=0$  が先端である。その結果、5 本の曲線が重なる。したがって、 $l_c=134\sim334\text{mm}$  では、 $\Delta T_x$  の軸方向の分布はほぼ等しい。また、 $\Delta T_x/\Delta T_h$  の  $l_x/l_c$  に対する勾配は  $l_x/l_c$  の増加と共に増大し、加熱面に近いほど大きい。

このときの管軸方向の熱流束の分布を示したのが図 20 である。 $l_x$  における熱流束  $q_x$  を加熱端の近傍の熱流束  $q_h$  で除した  $q_x/q_h$  を縦軸にすると、5 本の曲線はほぼ勾配が 1 で一致する。したがって、 $l_c=134\sim334\text{mm}$  では、 $q_x$  の軸方向の分布はほぼ等しい。

以上の結果から以下のことがわかった。①  $l_c$  が昇温時間に及ぼす影響は大きい。また、昇温時間は  $l_c$  に比例して長くなる。② 放熱量および温度上昇は、 $l_c$  にほぼ比例して増加する。したがって、 $l_c$  をできるだけ短くした方が良い。

## 2)輻射率の影響

次に、放熱部表面の  $\varepsilon$  の影響を検討する。図 5 に示したモデルにおいて、銅製、 $D_i=7\text{mm}$ 、 $t=5\text{mm}$ 、 $l_c=334\text{mm}$  として、 $\varepsilon$  が昇温時間、温度上昇、放熱量に及ぼす影響を示したのが図 21 である。 $\varepsilon$  の影響が大きいと思われる放熱量にまず着目する。図 21(下図)において、 $\varepsilon$  が増大すると、それにほぼ比例して放熱量が増大する。その勾配は  $t$  や  $l_c$  の影響に比べて大きく、 $\varepsilon$  が放熱量に及ぼす影響はかなり大きい。

他方、 $\varepsilon$  が温度上昇に及ぼす影響を図 21(中図)に示した。 $\varepsilon$  の増加にほぼ比例して温度上昇が増加する。これは  $\varepsilon$  の増加と共に、放熱量が増大するためである。その勾配は大きく、 $\varepsilon$  が温度上昇に及ぼす影響も大きい。

図 21(上図)に  $\varepsilon$  が昇温時間に及ぼす影響を示した。 $\varepsilon$  が増加すると、昇温時間が減少する。その勾配はほぼ一定である。その理由を以下に示す。 $\varepsilon$  が小さいと温度上昇が小さく、先端の温度は高くなる。先端の温度が高いと、放熱部に貯える熱量が大きい。逆に、 $\varepsilon$  が大きいと先端の温度が低くなり、放熱部に貯える熱量が小さくなる。したがって、放熱部に貯えられる熱量は  $\varepsilon$  にほぼ反比例するため、 $\varepsilon$  が増加すると、昇温時間が減少する。

以上の結果から次のことがわかった。①  $\varepsilon$  が温度上昇と放熱量に及ぼす影響は大きく、温度上昇と放熱量は  $\varepsilon$  の増加と共に、ほぼ直線的に増大する。②昇温時間は、 $\varepsilon$  の増加と共に、直線的に減少する。

$\varepsilon$  が温度上昇や放熱量に及ぼす影響は大きいので、加熱しても変色し辛いステンレスなどの材質で放熱部表面を覆う必要がある。ステンレスの  $\varepsilon$  は 0.2~0.3 と考えられるが、放熱部表面の変色や汚れによって  $\varepsilon$  が大きく異なるので、表面状態の監視が重要である。

### (2) 根元固定部の構造

図 6、図 7 に示した根元固定部計算モデルを用いて根元固定部の構造が放熱量に及ぼす影響を調べる。図 22 に従来型と改良型の放熱量を比較して示した。なお、改良型については、スリーブの長さ  $l_f$  をパラメータとして計算した。従来型に比べて、改良型の放熱量は明らかに小さい。例えば、改良型で  $l_f=30\text{mm}$  の放熱量は、従来型の約 1/3 である。なお、図 7 に示したように  $l_c = 310 - l_f$  で表せ、 $l_f$  が長くなると、 $l_c$  が短くなると、図 18 に示したように昇温時間が短くなり、また、放熱部からの放熱量が減少する。したがって、 $l_f$  はできるだけ長い方が良い。しかし、導入管は、加熱部にらせん状の溝を掘り、これにヒータを埋め込む構造があるので、加工上の制約がある。

### (3) 先端固定部の構造

図 8 に示した円筒状サポートを設けたモデル 1、図 9 に示したフィン状サポートのモデル 2、及び、図 10 に示した円板状サポートのモデル 3 の先端固定部計算モ

モデルを用いて、先端固定部構造及び接触熱抵抗が放熱量に及ぼす影響を図23に示す。接触熱抵抗は接触部の圧力、粗さ、材質により大きく異なることが予想されるので、接触熱抵抗が大きく異なっても、放熱量が余り変化しない先端固定部構造が望まれる。接触熱抵抗が大きい場合はモデル1～モデル3の差は小さいが、接触熱抵抗  $< 0.01 \text{m}^2\text{K/W}$  では、接触熱抵抗が減少するとモデル1、モデル2はサポートからの放熱量が急激に増大するのに対し、モデル3は放熱量が余り変わらない。したがって、円板状サポートのモデル3は、放熱量の小さい、優れた先端固定部構造である。

これは導入管とサポートの接触部の面積が小さいためである。そこで、各モデルの接触面積及び放熱量を表5に示す。

表5 各モデルの接触面積及び放熱量

モデル	サポート構造	接触面積 $\text{m}^2$	放熱量 W
1	円筒状	$1.709 \times 10^{-3}$	25
2	フィン状	$1.280 \times 10^{-4}$	18
3	円板状	$3.927 \times 10^{-5}$	4

$$\text{接触熱抵抗} = 0.02 \text{ m}^2\text{K/W}$$

ここで、円筒状サポートの場合はポートとサポート間の接触面積を表示した。接触面積の小さいモデルは、放熱量が小さくなる。

なお、接触熱抵抗を入力して伝熱特性を計算する具体的な方法について、以下に述べる。例えば、円板状サポートのモデル3において、導入管先端部と円板状サポート内孔の接触熱抵抗=0.02m<sup>2</sup>K/Wとする場合は、先端部の外径=12.5mmでサポート内径=13mmであるから、厚さ0.25mmの間隙に熱伝導率入=(0.25/1000)/0.02=0.125 W/mKの材料を挿入したと仮定して、接触熱抵抗=0.02m<sup>2</sup>K/Wになるようにした。

### 2.1.3 組合せモデルの設計と伝熱特性の予測

以下、上記要素モデルを組合せて熱伝導型導入管全体のモデルの設計し、その伝熱特性を予測する。

#### (1) 設計

熱伝導部の計算結果から、①昇温時間が短く、加熱面の温度上昇が小さい銅を導入管の材質に選定した。また、銅部の耐熱強度対策および表面の変色防止対策として、導入管をステンレス製の補強管に挿入した。また、②放熱量、加熱面の温度上昇から熱伝導部の管厚さを5mmにする。

根元固定部の計算結果から、③放熱量が小さい構造、即ち、導入管加熱端につばを設置し、つば外周とフランジ内周とを円筒のスリーブで接続する構造を採用した。この構造では、スリーブが長い方がフランジからの放熱量が小さいので、ヒータ巻付け作業が可能な最大長さとした。また、加工し易くするために、加熱部の外径を放熱部より太くした。

先端固定部の計算結果から、④放熱量が小さい構造、即ち、導入管先端部を円板状サポートに挿入した構造を採用した。

これらの結果を組合せて熱伝導型導入管を設計し、これを模擬した図 24 に示す組合せモデルで、伝熱特性を評価した。熱伝導部は銅管であり、内径 7mm、加熱部外径 24mm、放熱部外径 17mm、先端部外径 11.9mm の寸法である。この放熱部に、外径 19mm、厚さ 0.5mm のステンレス製の補強管 1 を挿入し、先端部に外径 12.5mm、厚さ 0.3mm のステンレス製の補強管 2 を挿入し銀口ウ付けする。根元固定部には図 7 に示したモデル 2 の改良型を採用し、スリーブの長さ  $l_f=32\text{mm}$  とした。また、先端固定部には図 10 に示したモデル 3 の円板状サポートを採用した。材質は耐熱材であるモリブデンである。

## (2) 伝熱特性の予測

導入管各部の温度変化を図 25 に示す。ここで、A～F,H は導入管の温度表示位置であり、それらを図 26 に示す。また、接触部は補強管 1 と熱伝導部との間、および、補強管 2 と円板状サポートとの間に 2カ所あるが、両者の接触熱抵抗を  $0.02\text{m}^2\text{K/W}$  と等しくした。

熱伝導部 A～C の昇温時間はいずれも約 30 分程度であり、加熱面からの距離が大きい程、温度が低い。また、つば部においても、中央 E、外周部 F、スリーブ端 K と加熱部 H から離れるにつれて温度が低い。つば部の昇温時間は約 10 分程度である。円板状サポートはほとんど昇温せず、冷却面温度とほぼ等しい。

図 27 に導入管の熱伝導部各位置の温度上昇を示す。先端部 B の勾配は小さいが、加熱部 H の勾配は大きい。また、この計算では、補強管 1 と導入管との接触熱抵抗も変化させているので、接触熱抵抗が大きいと、温度上昇も小さくなる。加熱面の温度上昇は 20～50°C 程度と予測される。

図 28 に各部の放熱量及びその合計を示す。つばからの放熱量は一定で、ここからの放熱量が最も大きいことが予測される。導入管表面及び円板状サポートからの放熱量は、接触熱抵抗の増大と共に緩やかに減少する。このうち、円板状サポートからの放熱量は非常に小さい。合計の放熱量は 30～50W 程度である。

したがって、定常時における温度上昇を 50°C 程度、加熱量を 50W 程度見積もっておけば良い。しかし、より高精度の予測を行うには、この接触熱抵抗をモデルで計測する必要がある。

以上の計算で、図 24 に示した計算モデルは昇温時間が 30 分程度、温度上昇は 50°C

程度、放熱量は 50W 程度等、伝熱特性が優れていることが予測される。したがって、本モデル及び計算結果に基づいて設計し、図 29、図 30 に示す製作図を作成した。

図 29 が熱伝導型導入管を備えた改良型 Cs 導入装置である。改良型 Cs 導入装置は Cs を貯蔵し蒸発させるオープン、2 個の手動弁、空気圧式駆動弁、導入管及びそれらを接続する配管から構成される。各要素の表面に熱電対を設置し、ヒータ及び断熱材が巻かれる。

図 30 に熱伝導型導入管を示す。図 24 の計算モデルとほぼ同じ構造である。加熱部にらせん状の溝を掘り、直径 1.6mm のシースヒータを埋め込む。ヒータの電源容量は 300W である。また、補強管 1 は熱伝導部にネジで固定し、補強管 2 は先端部に銀口ウ付けする。さらに、導入管先端には側面に 2 個の排気孔を設けた外径 12.5mm の銅製キャップをねじ込む。

次ぎに、これらの製作図にしたがって改良型 Cs 導入装置を試作した。

また、その伝熱特性を評価するために、以下に示す実験装置を製作した。

## 2.2 性能確認試験

### 2.2.1 実験装置と実験方法

実験装置系統図を図 31 に示す。実験装置は図 29 に示した Cs 導入装置、イオン源鏡板に設置された配管を模擬した真空容器、タンク、真空ポンプから構成される。真空容器に熱伝導型導入管を収納し、真空ポンプでこの容器をイオン源内圧力と同程度に減圧する。

真空容器を図 32 に示す。容器は直径 114.3mm で、そのフランジは直径 152 mm、厚さ 20mm である。また、容器内にはアークチャンバー壁を模擬したサポート、ポート、円板状サポートが設置されている。

図 34 に導入管及び真空容器の温度計測位置を示す。導入管加熱部の熱は放熱部、先端部へと伝わり、放熱部及び先端部を Cs 蒸気の飽和温度以上に昇温する（図 24 参照）。ここで、導入管の軸方向の温度分布を測定するため、管の先端から軸方向に 5 点(A~D,H)、根元固定部からの放熱量を測定するため、つばの半径方向に 2 点(E,F)、先端固定部からの放熱量を測定するため、サポートの半径方向に 2 点(I,J)、熱電対を設置した。他方、真空容器内の圧力を測定するために、電離真空計を取り付けた。

Cs 導入装置の温度制御方法は、各要素に設置した熱電対を温度コントローラに接続し、それぞれが一定温度になるようヒータの電気出力を制御した。その電気出力をスライドランスにより設定して、ワットメータで計測し、これを加熱量とした。

実験は、真空容器内の圧力及びヒータ加熱量を一定にして、導入管加熱部の温度をパラメータにして、昇温時及び定常時における各部の温度を計測した。

その具体的方法は、実機 Cs 導入装置の運転と同様に、まず、真空容器内を減圧し、所定の圧力になったら、スライドランスの目盛及び温度コントローラの上限温度を所

定の位置にセットした後に、電源を投入する。

以下に、実験条件を示す。

压力=1.7×10<sup>-4</sup>~6×10<sup>-4</sup>Pa

導入管加熱部の温度 = 250~350°C

導入管加熱量 = 100W

### 2.2.2 実験結果とその検討

熱伝導型導入管及び容器各部の温度変化を図33に示した。ここで、凡例中、英字A～Jは図34～図36に示した温度計測位置を表す。導入管加熱部-Hの温度をステップ状に昇温させ、先端-Aの温度が定常になるまで計測した。定常時における導入管と容器各部の温度分布を図34～図36に示した。

計算モデルと同じ加熱部温度 = 250°C の図 34 に着目する。導入管の軸方向の各計測点 A、B、C、D、H における温度は、それぞれ、217.4°C、223.8°C、231.2°C、236.5°C、249.9°C であり、温度上昇（先端との温度差）は  $\Delta T_B = 6.4^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_C = 13.8^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_D = 19.1^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_H = 32.5^\circ\text{C}$  である。

同様に、加熱面温度をパラメータとして、軸方向の温度上昇を求め、先端からの距離と温度上昇の関係をプロットしたのが図37である。先端からの距離の増加と共に、温度上昇は大きくなる。ここで、D-H（252mm-313mm）間の温度差が大きいのは、つばからの放熱のためと考えられる。

また、加熱面温度が各計測点の温度上昇に及ぼす影響を示したのが図38である。

加熱面温度の増加と共に、各計測点の温度上昇は直線的に増加し、その勾配は先端からの距離が大きな位置で大きく、距離の小さな位置で小さい。

次に、根元固定部からの放熱量について検討する。図 34において、つばの半径 17.5mm の計測位置と半径 34mm の計測位置との温度差が 53.4°C であるので、つばからフランジへの放熱量は 16.2W となる。この実験値は図 28 に示した計算値に比べて小さい。これは計算モデルでは図 26 に示したように冷却面温度を 20°C と仮定したのに対し、実験では図 34 のように 39.8°C であったためである。放熱量は式(7)に示す円管の熱伝導式<sup>(10)</sup>より求めた。

同様に、半径 20 mm と半径 50 mm におけるサポートの温度差は 1.4°C であるので、先端固定部からの放熱量は 2.4W となる。

加熱面温度をパラメータとして、根元固定部と先端固定部からの放熱量を算出し、これらをプロットしたのが図 39 である。加熱面温度の増加につれて、両者共、放熱量が緩やかに増加する。先端固定部からの放熱量は根元固定部からの約 1/10 であり、その

勾配は根元固定部より小さい。

Cs 導入管の伝熱特性を計算で予測する時には、補強管 1 と放熱部との接触熱抵抗、及び、先端固定部と先端部の接触熱抵抗をプログラムに入力するが、概略値を入力して、計算しているのが現状である。しかし、精度の高い予測をするには、実際のモデルで接触熱抵抗を実測しなければならない。

そこで、補強管 1 と放熱部の接触熱抵抗を求める方法を図 40 に示す。まず、加熱面温度 250°C について検討する。①接触熱抵抗をパラメータとして、B-D の間の温度差を計算し、接触熱抵抗と温度差の関係を把握し、近似曲線を引く。②B-D 間の温度差を実測する。図中、黒塗り四角の記号で表示。③近似曲線上に実測値と同じ温度差をプロットし、そのときの接触熱抵抗を求める。

その結果、接触熱抵抗=0.006m<sup>2</sup>K/W が得られた。同様にして、加熱面温度=300°C 及び 350°C についても接触熱抵抗を求め、接触熱抵抗=0.006m<sup>2</sup>K/W が得られた。したがって、補強管 1 と導入管の間の接触熱抵抗に 0.006m<sup>2</sup>K/W を入力すれば良いことがわかった。

同様にして、先端固定部と導入管先端部の接触熱抵抗を図 41 から求め、接触熱抵抗=0.0035m<sup>2</sup>K/W を得た。

次ぎに、これらの接触熱抵抗を伝熱計算に入力して得られた計算値と、実験値を比較して示したのが図 42 である。計算値は図 33 に示した加熱面-H 及び冷却面-F の昇温時における実験値の温度変化を入力した。導入管先端-A 及び中間点-C 共に、計算値と実験値は良く一致している。

以上の実験結果から、本熱伝導型導入管の実験モデルは昇温時間、導入管軸方向の温度上昇、固定部からの放熱量等において、伝熱特性が優れていることがわかったので、実機 N-NBI 装置用 Cs 導入装置に、本実験モデルをそのまま取り付けた。

### 3. 熱伝導型 Cs 導入管用ヒータ容量と制御方法

#### 3.1 溫度制御

熱伝導型導入管の温度制御は、加熱部に埋め込まれたヒータにスライドトランスを介して通電して、一定熱量を入力し、表面に設置した熱電対の測定値が設定温度に達したら、その温度を保持するように温度コントローラでヒータを ON-OFF 制御するものである。したがって、運転前にスライドトランスの電圧、及び温度コントローラの動作温度を設定する。図 29 に示した Cs 導入装置の他の要素も同様にして温度制御する。

#### 3.2 ヒータ容量

伝導型導入管のヒータは運転開始時に最大消費電力となり、この時に耐えうる電源容量が必要である。

2.1 節で述べた導入管の伝熱計算は、加熱面温度=250°Cとした計算値であり、その前段階として、加熱面温度が 250°C に達する時間、及び、ヒータに必要な容量についても検討する必要がある。

そこで、図 24 に示した熱伝導型導入管の計算モデルの加熱面に熱量を入力し、運転開始時における加熱面の温度を計算し、加熱面の温度が 250°C に達する時間を求めた。

運転開始時の加熱面の温度変化を図 43 に示す。加熱面の温度が 250°C に達する時間は加熱量 300W で 127 秒、500W で 66 秒程度である。

同様にして、ほかの加熱量についても、250°C に達する時間を求め、加熱量と加熱面を 250°C に昇温する時間の関係を図 44 に示す。加熱量の増加と共に 250°C に達する時間は減少する。これらの値は、図 25 中 A に示す導入管先端の昇温時間=約 30 分に比べ、非常に短時間であり、運転上、2 分程度は無視できる範囲である。

このため、必要なヒータの容量を 300W とし、既設の電源容量 300W で充分である見通しを得た。

### 3.3 ヒータ断線防止のための制御方法

Cs 導入装置の各ヒータはイオン源に直接取り付けられているため、最大 500kV の高電圧電位にあり、イオン源の電極間放電破壊に起因する高電圧ノイズに晒される。この電極間放電破壊は、ビームを加速するための加速電圧を、狭い電極間に印加するため発生し、静電加速型のイオン源では避けられない。導入管のヒータは、この高電圧ノイズにより再三断線した。この断線は、電極間放電破壊が発生し且つ、ヒータの通電中に起こるが、ヒータの通電を行わない加速電圧のみの印加においては、電極間放電破壊が発生しても起こらないことが経験上わかっていた。即ち、加速電圧印加中はヒータへの通電を停止すれば、ヒータの断線が避けられる。

そこで、ヒータの断線を避けるために、加速電源を印加する際に、導入管のヒータ回路ばかりでなく、Cs 導入装置の全てのヒータ回路において、ヒータへの通電を停止する制御の追加を行った。具体的には、ヒータ回路において加速電圧印加開始の信号を受信し、ヒータ回路の通電を停止するマグネットスイッチを設けることである。なお、ヒータ回路もヒータと同様に最大 500kV の高電圧電位になるので、絶縁のため大地側からの信号は光信号に変換する必要があった。

まず、ヒータの電力供給は図 45 に示す Upwon の SW の投入で行われる。この信号は、E/L 回路 B16U で光信号に変換され送信され、Cs 導入装置の制御盤の L/E 回路 P10 で受信され、リレー RypwonU を動作させる。これにより図 46 のマグネットスイッチ YY が動作しヒータへの電力供給がなされる。ここで、イオン源に加速電圧を印加すると、この開始指令を分岐した Upgon の信号が、図 45 に示したように E/L 回路 B16L で光信号に変換されて送信され、Cs 導入装置の制御盤の L/E 回路 P10 で受信され、リレー RypgonU を動作させる。この動作により図 47 に示すリレー CRXX が動作を停止し、リレー CR1 が

切状態になる。これにより図 46 の Cs 導入装置ヒータへの電力が遮断される。

ヒータの通電状態はランプ A 及び B の点灯をテレビカメラでモニターして確認し、加速電圧の印加によるヒータの通電停止はランプ B の消灯で確認した。

ランプの点灯状態モニターにより、加速電圧の印加中における Cs 導入装置のヒータの通電停止が正常に行われていることを確認できた。また、この制御方式を採用した後、ヒータの断線がほとんど起らなくなった。

#### 4. 実機 N-NBI 装置用 Cs 導入装置の試験結果

実機 N-NBI 装置に Cs 導入装置を設置した時の導入管加熱面の設定温度、加熱量、及び、温度変化を図 48 に示す。ここで、Cs 導入装置はイオン源の U と L 2 つのユニットに設置された。実機 N-NBI 装置では、運転開始時には通常 Cs を導入せずにコンディショニングすることが多い。このため、コンディショニング中に導入管が設定温度に達すればよいことから、2.2 節の性能確認試験に比べて緩やかな温度上昇率とし、約 1 時間をかけて昇温させた。

その結果、Cs 導入装置の各要素は設定温度どおりに制御されること、導入管のヒータ電源容量は 300W で充分であること、加速電圧の印加中に Cs 導入装置のヒータ回路を遮断させる制御方式が正常に作動することを確認した。

以上、本熱伝導型導入管及びヒータ電源の制御方式を採用した後、ヒータの断線がほとんど起らなくなり、現在もトラブル無く、順調に運転されている。

#### 5. まとめ

- (1) 負イオン源用に新型 Cs 導入装置を開発した。これは大気側に位置する導入管の一部を加熱して、真空側の部分を熱伝導で昇温するようにしたものである。開発にあたり、導入管を主要構成要素である熱伝導部、根元固定部、先端固定部に分割し、各要素の仕様を決め、次に、それらを組合せた熱伝導型導入管を設計し、熱伝導型導入管のモデルを設計、製作した。
  - (2) モデルを用いて性能確認試験を行い、昇温時間、加熱面の温度上昇、放熱量、接触部の熱抵抗等の伝熱特性を実測し、設計通りの性能が得られることことを確認した。これにより、高電圧ノイズによる導入管ヒータの断線発生時においても、Cs 導入装置全体を交換する必要が無くなることを実証した。
  - (3) 加速電圧の印加中に Cs 導入装置のヒータ回路を遮断させる制御方式を採用することにより、高電圧ノイズによるヒータの断線が無くなった。
- これらの開発、改良は、Cs 導入装置の昇温ヒータに関する故障の可能性を著しく低減させた。これにより、N-NBI 装置は負イオン源の出力を順調に上昇でき、これ

までにエネルギー 350keV で最大加熱入力 5.2MW の中性子ビーム入射を達成した。

### 謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有益な議論とご協力を頂きました NBI 装置試験室の皆様、奥村 NBI 加熱研究室長、及び、実験装置組立にご協力を頂きました NAT の皆様に感謝致します。また、本研究遂行に際し、終始ご指導とご鞭撻を頂いた核融合試験部清水部長及び同木村次長に感謝いたします。

### 参考文献

- (1) Kuriyama, M., Akino, N., et al. : "Operation of Negative-Ion Based NBI for JT-60U", Fusion Engineering and Design Vol.39, No.40, pp115-121, Nov., 1998
- (2) Itoh, T., Akino, N., et al. : "Beamline performance of 500keV Negative-Ion Based NBI System for JT-60U", Fusion Engineering and Design Vol.39, No.40, pp123-128, Nov., 1998
- (3) Kuriyama, M., Akino, N., et al. : "Development of Negative-Ion Based NBI System for JT-60", Journal of Nuclear Science and Technology AESJ, Vol.35, No.11, pp739-749, Nov., 1998
- (4) 東京天文台：「理科年表」、昭和 58 年版、1983 年 11 月 p486
- (5) NBI 装置試験室 他：「JT-60U 用負イオン NBI 装置の設計検討」、JAERI-M 94-072、1994 年 3 月、p89
- (6) 日本機械学会：「伝熱工学資料」、第 4 版、1986 年 10 月、pp184-185
- (7) 堀池 他：「0.2%銀入無酸素銅の高温特性」、私信
- (8) 赤坂 他：「銀入無酸素銅の高温特性」、古河電工時報 第 65 号、昭和 54 年 3 月
- (9) 日本機械学会：「伝熱工学資料」、第 4 版、1986 年 10 月、p157
- (10) 日本機械学会：「伝熱工学資料」、第 4 版、1986 年 10 月、p5

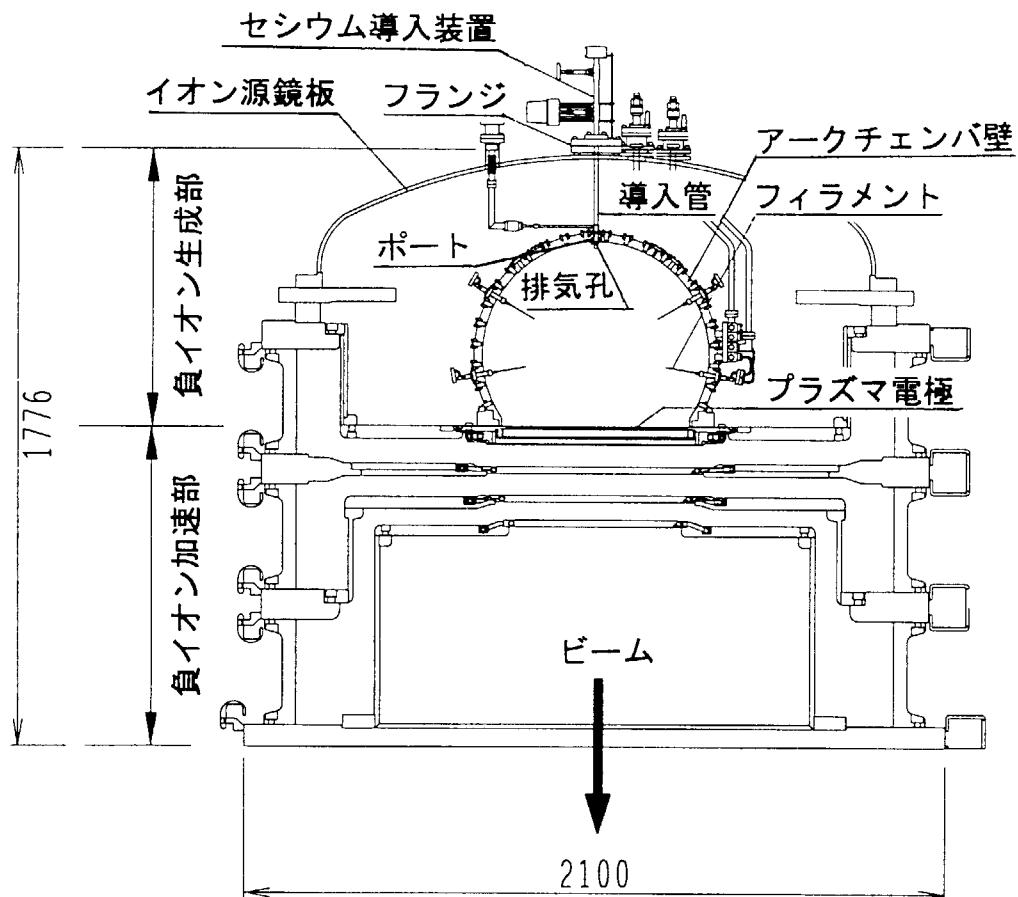


図 1 イオン源の概略構造とセシウム導入装置の設置位置

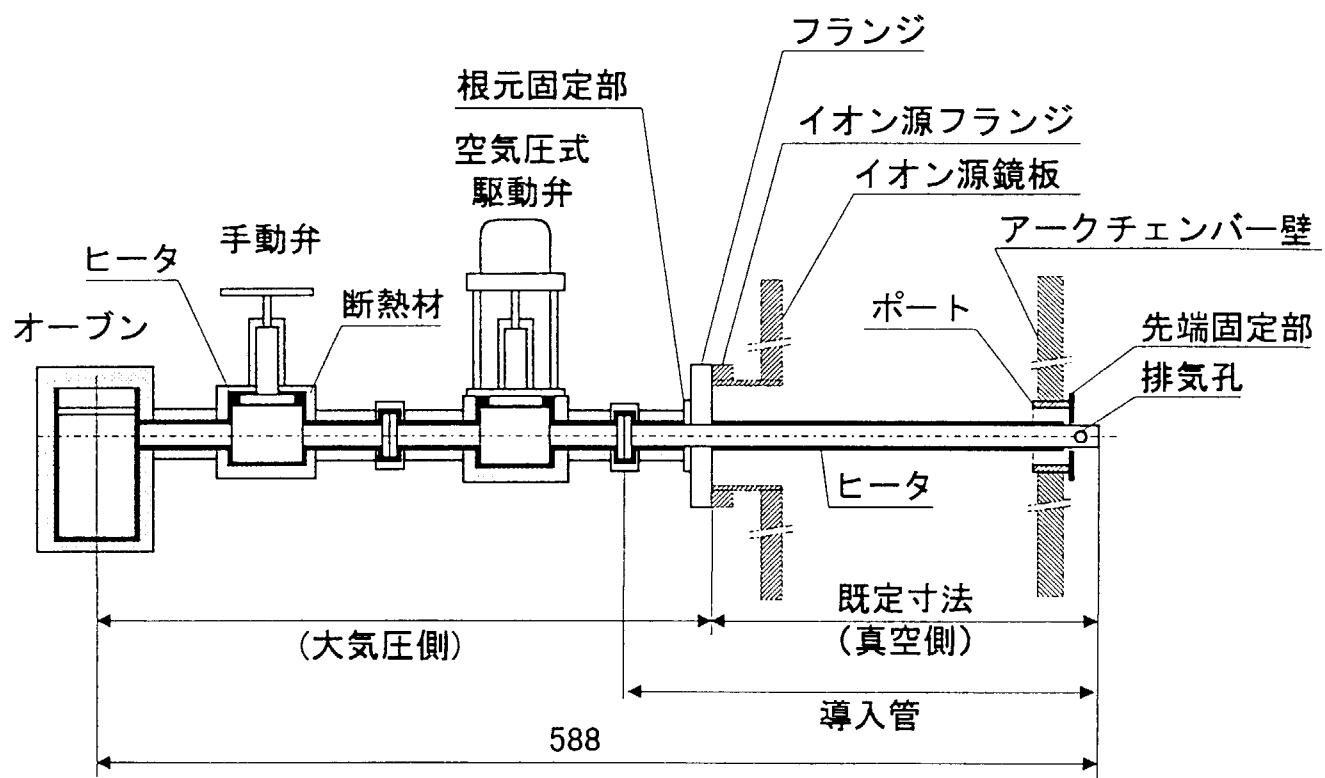


図 2 従来のセシウム導入装置

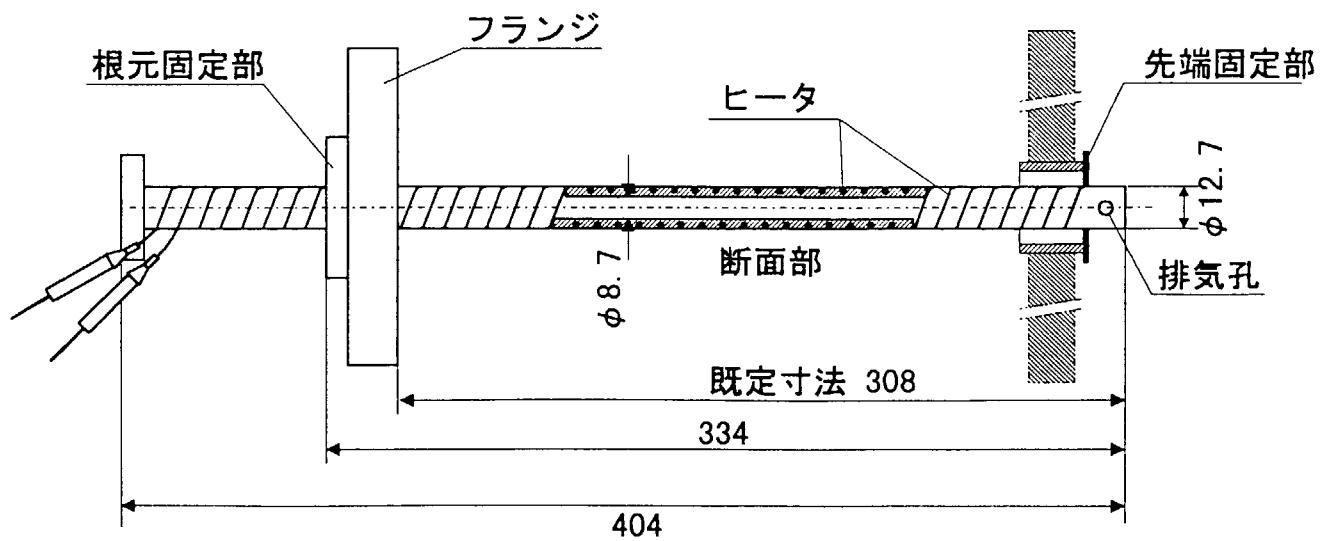


図 3 従来のセシウム導入管（ステンレス製）

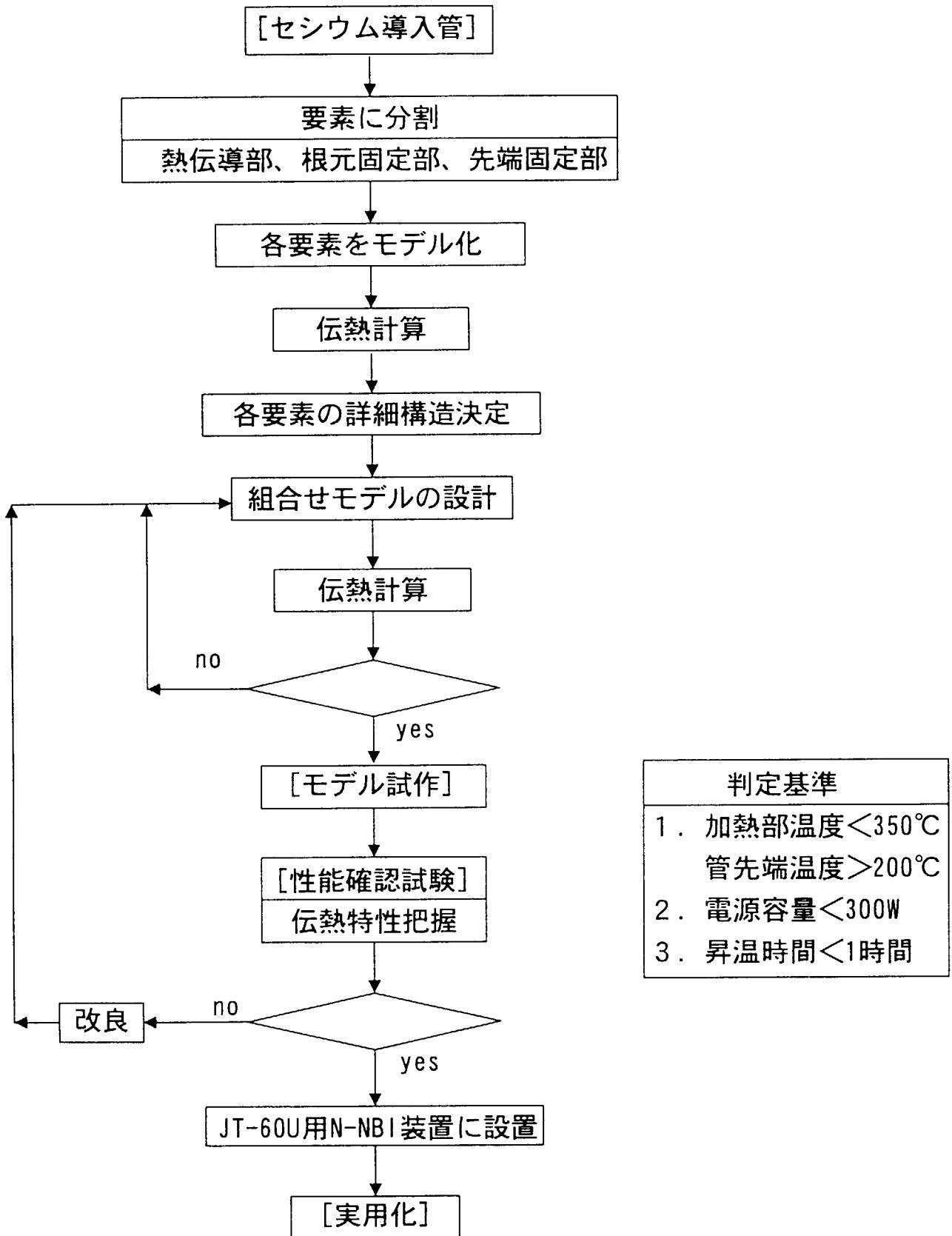


図 4 热伝導型導入管の開発フロー

表 1 放熱箇所と放熱先

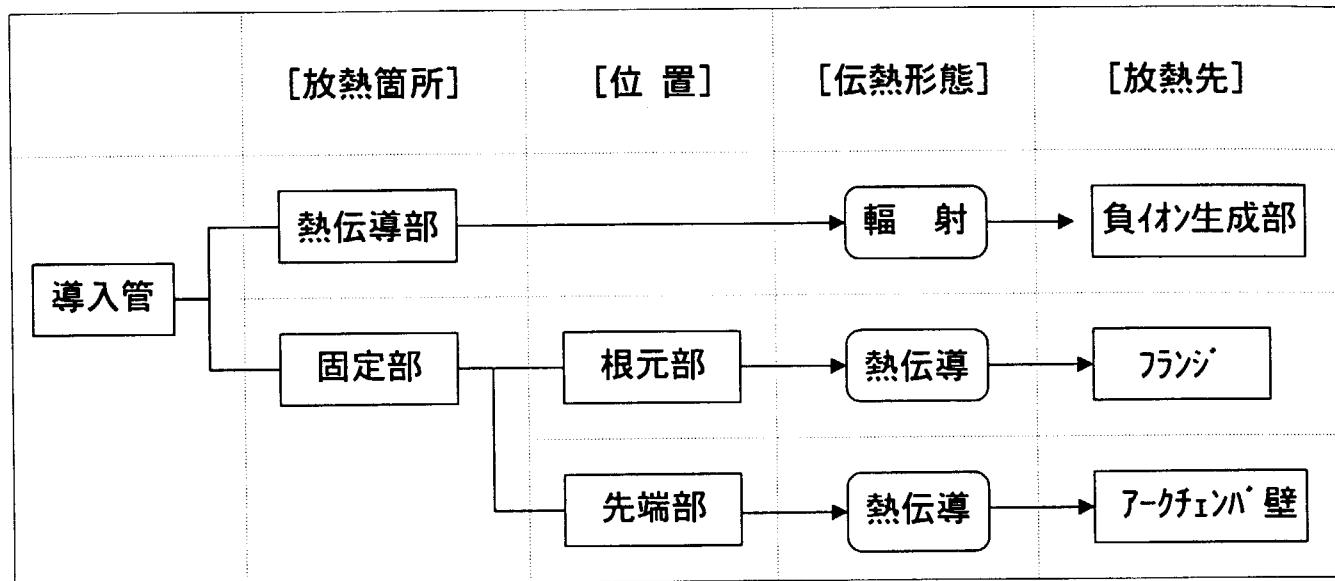


表 2 仕様決定のための計算モデルとパラメータベイ

仕様決定部		仕 様	計算モデル	パラメータ
導入管	熱伝導部	材質、寸法	図5	表3
	根元固定部	構造	図6	—
	先端固定部	構造	図8- 図10	—

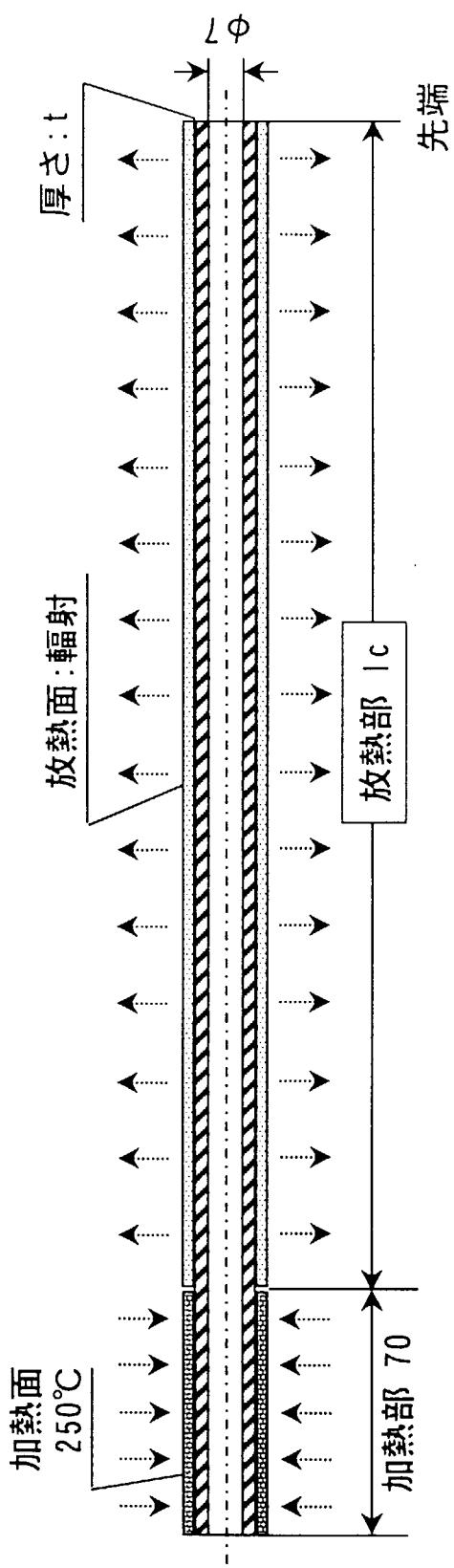


図 5 热伝導部計算モデル

表 3 热伝導部の計算に用いたパラメータ

No.	材質	$I_c$ mm	$t$ mm	輻射率 -
1	ステンレス鋼	334	2	0.1, 0.3
2	炭素鋼	334	2	0.1, 0.3
3	銅	134-334	1-10	0.1-0.9

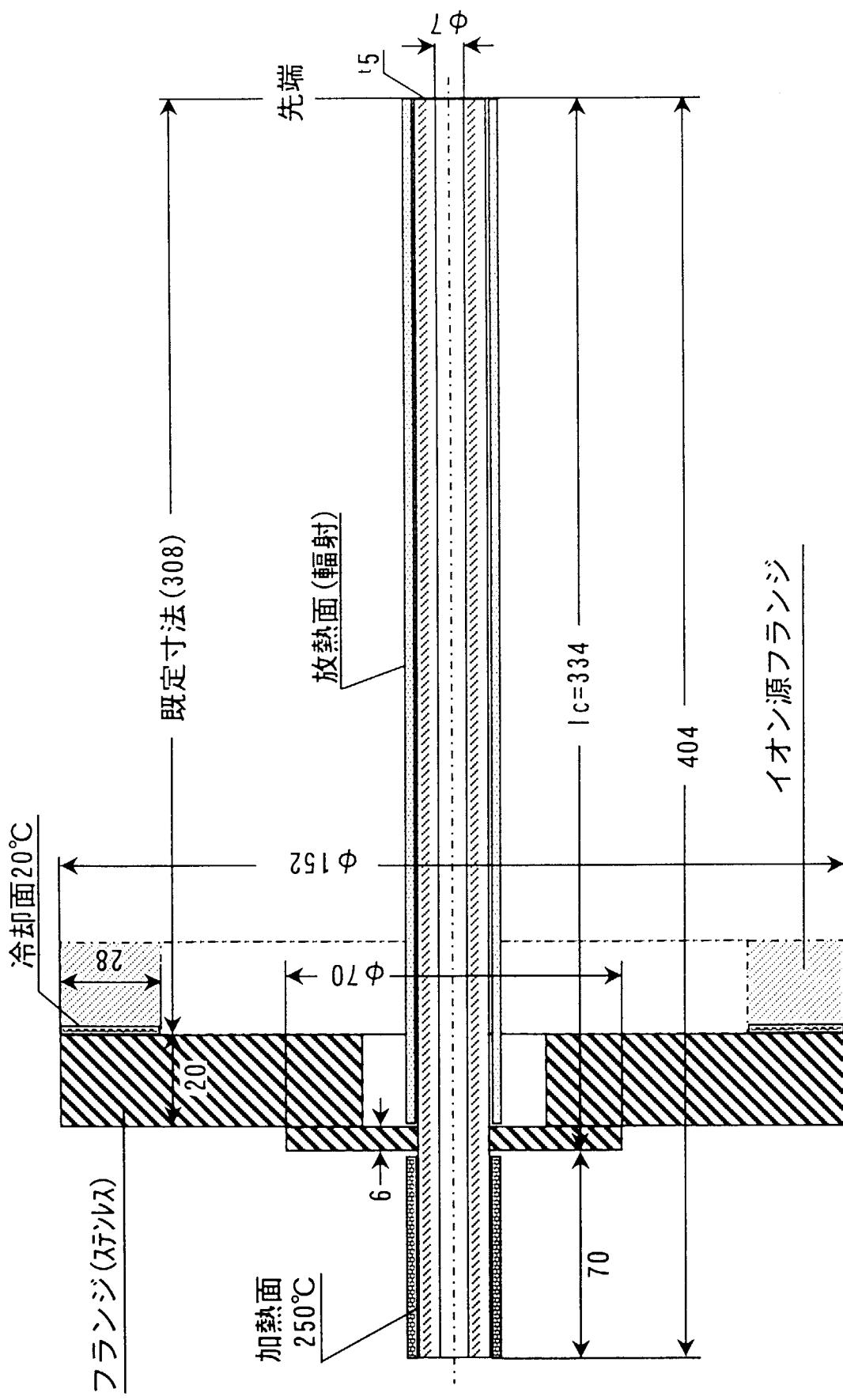


図 6 根元固定部計算モデル1（従来型）

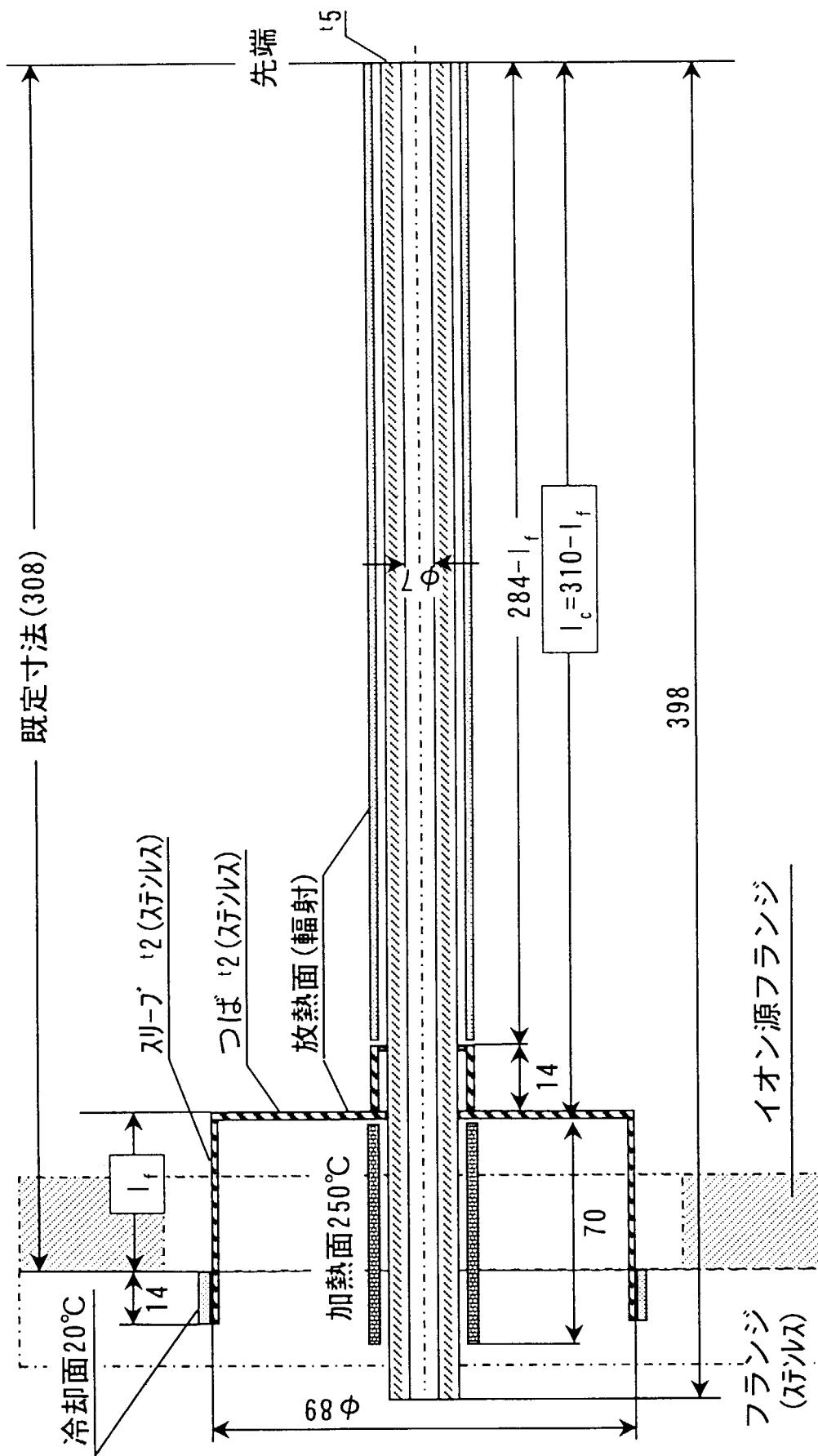


図 7 根元固定部計算モデル2（改良型）

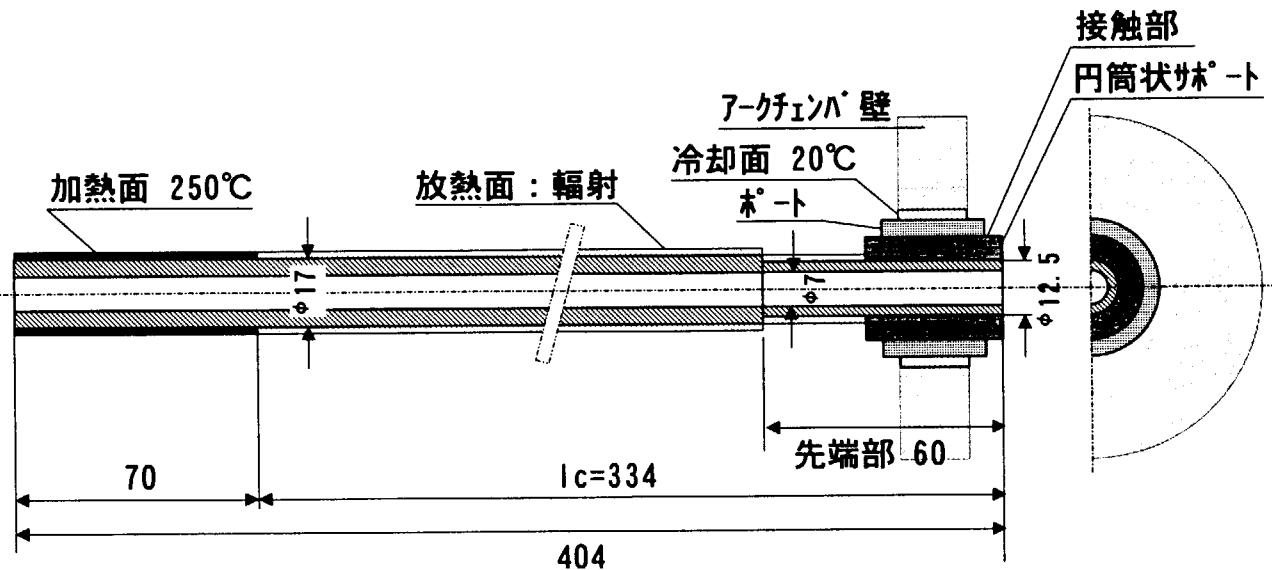


図 8 先端固定部計算モデル1（円筒状サポート）

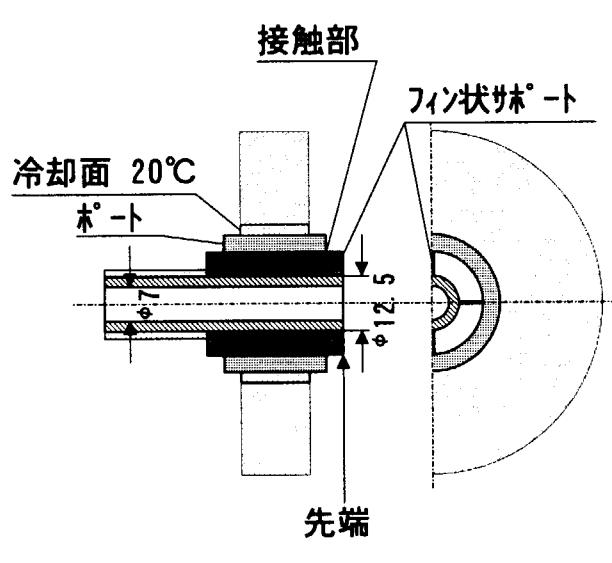


図 9 先端固定部計算モデル2  
(フィン状サポート)

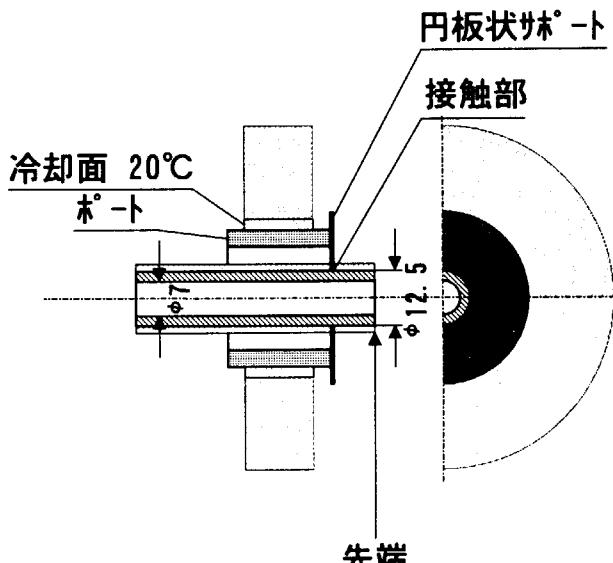


図 10 先端固定部計算モデル3  
(円板状サポート)

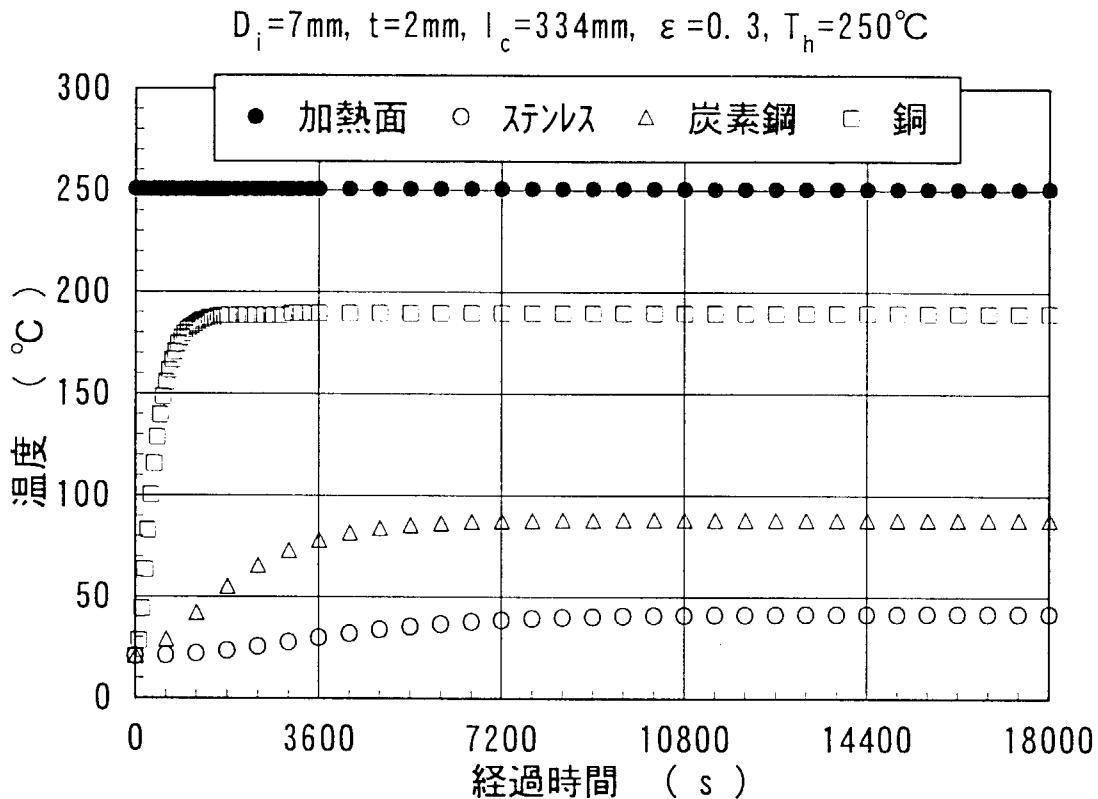


図 11 热伝導部先端の温度変化（材質の選定）

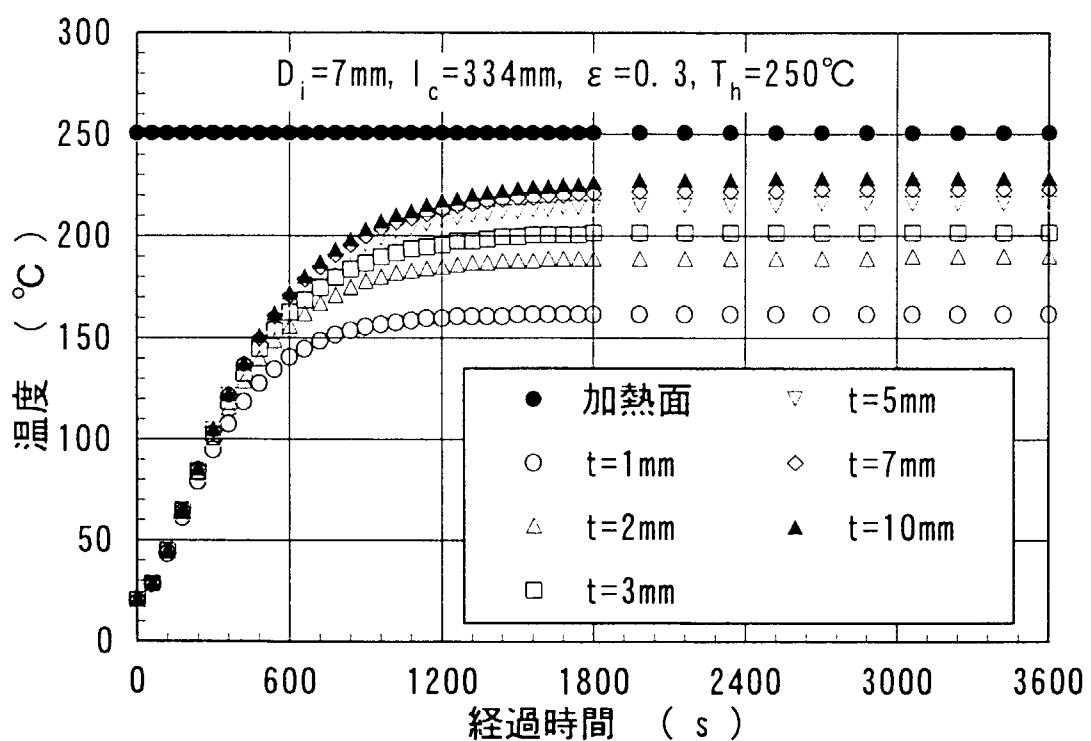


図 12 热伝導部先端の温度変化（厚さの影響）

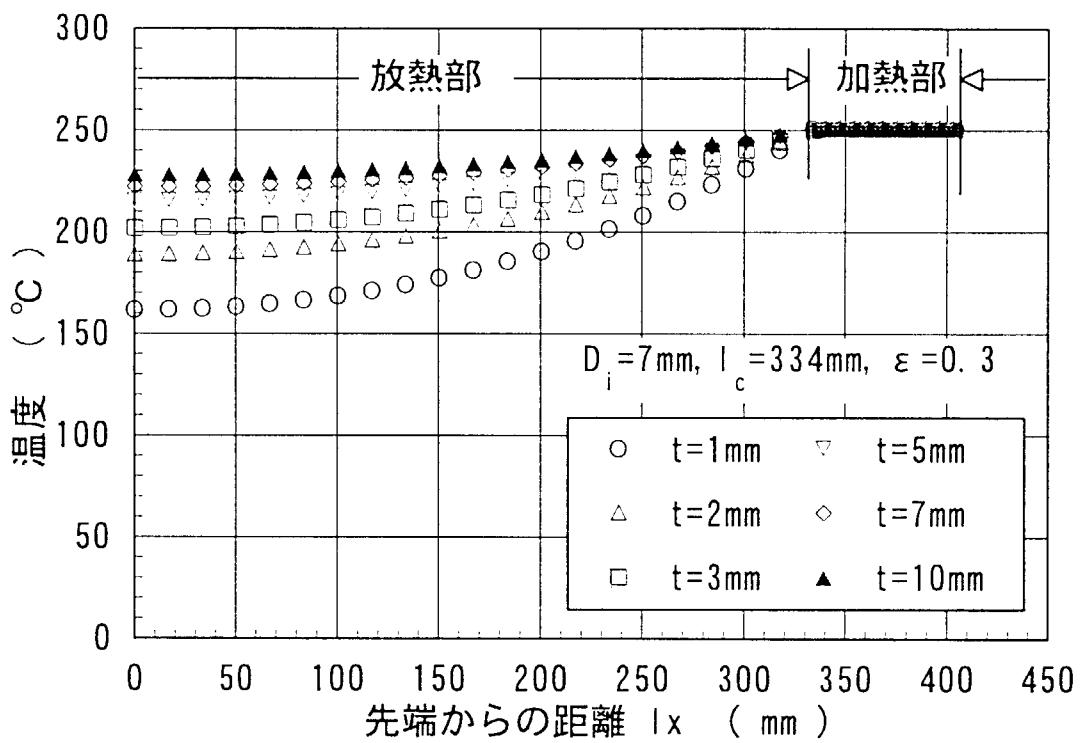


図 13 热伝導部軸方向の温度分布（定常時）

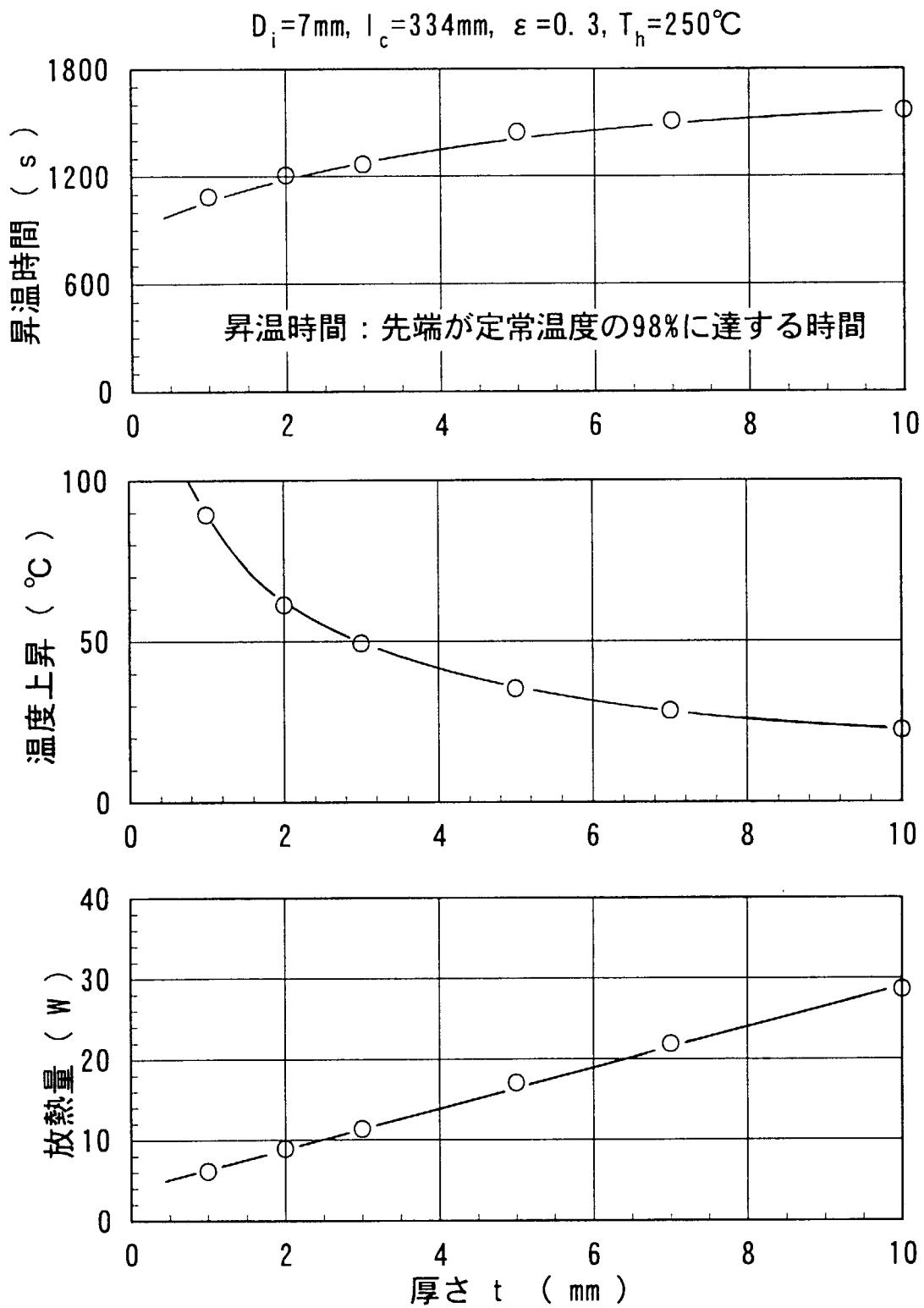


図 14 厚さが昇温時間、温度上昇、放熱量に及ぼす影響（定常時）

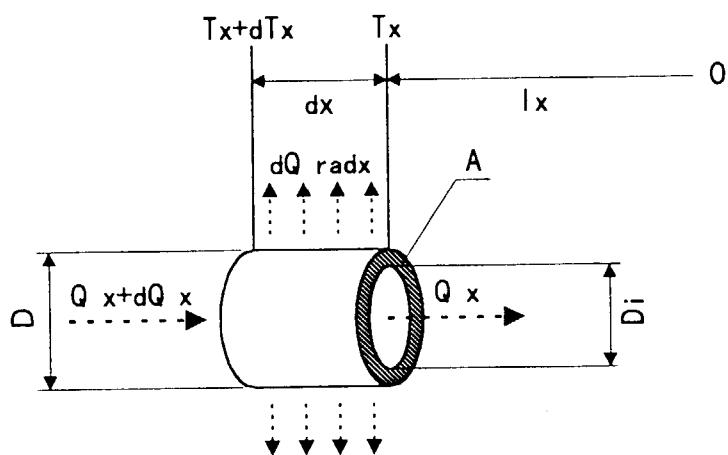
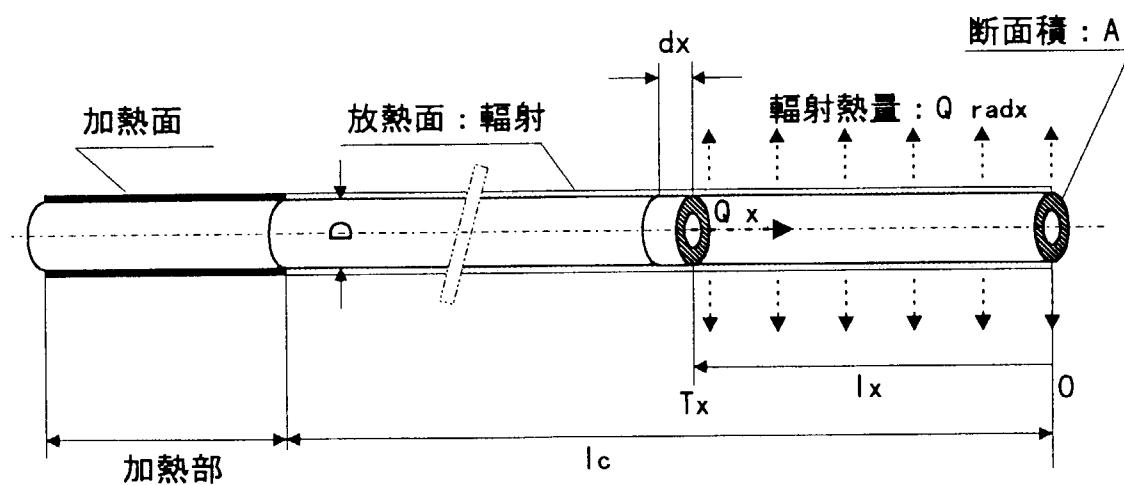
微少区間 $dx$ の伝熱モデル

図 15 热伝導部の伝熱モデル

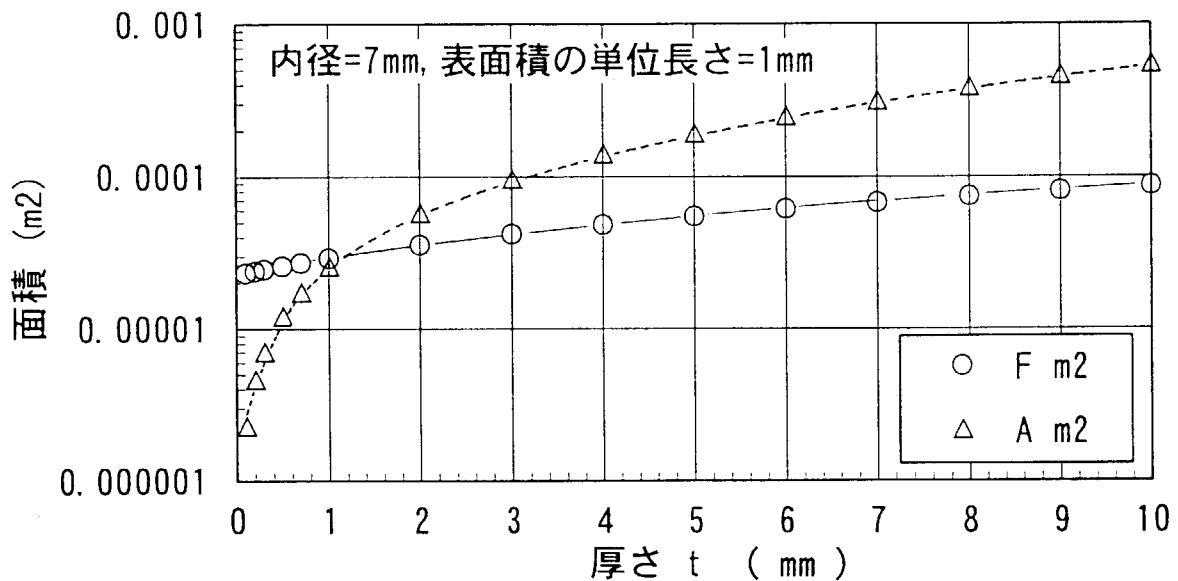


図 16 表面積と断面積

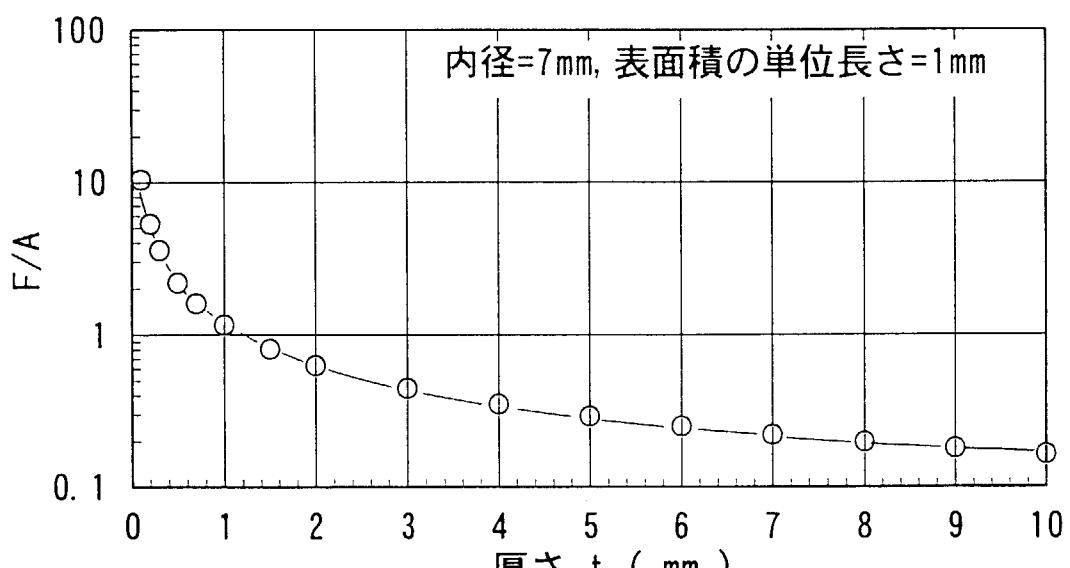


図 17 表面積と断面積の比

$D_i = 7\text{ mm}$ ,  $t = 5\text{ mm}$ ,  $\varepsilon = 0.3$ ,  $T_h = 250^\circ\text{C}$

昇温時間：先端が定常温度の98%に達する時間

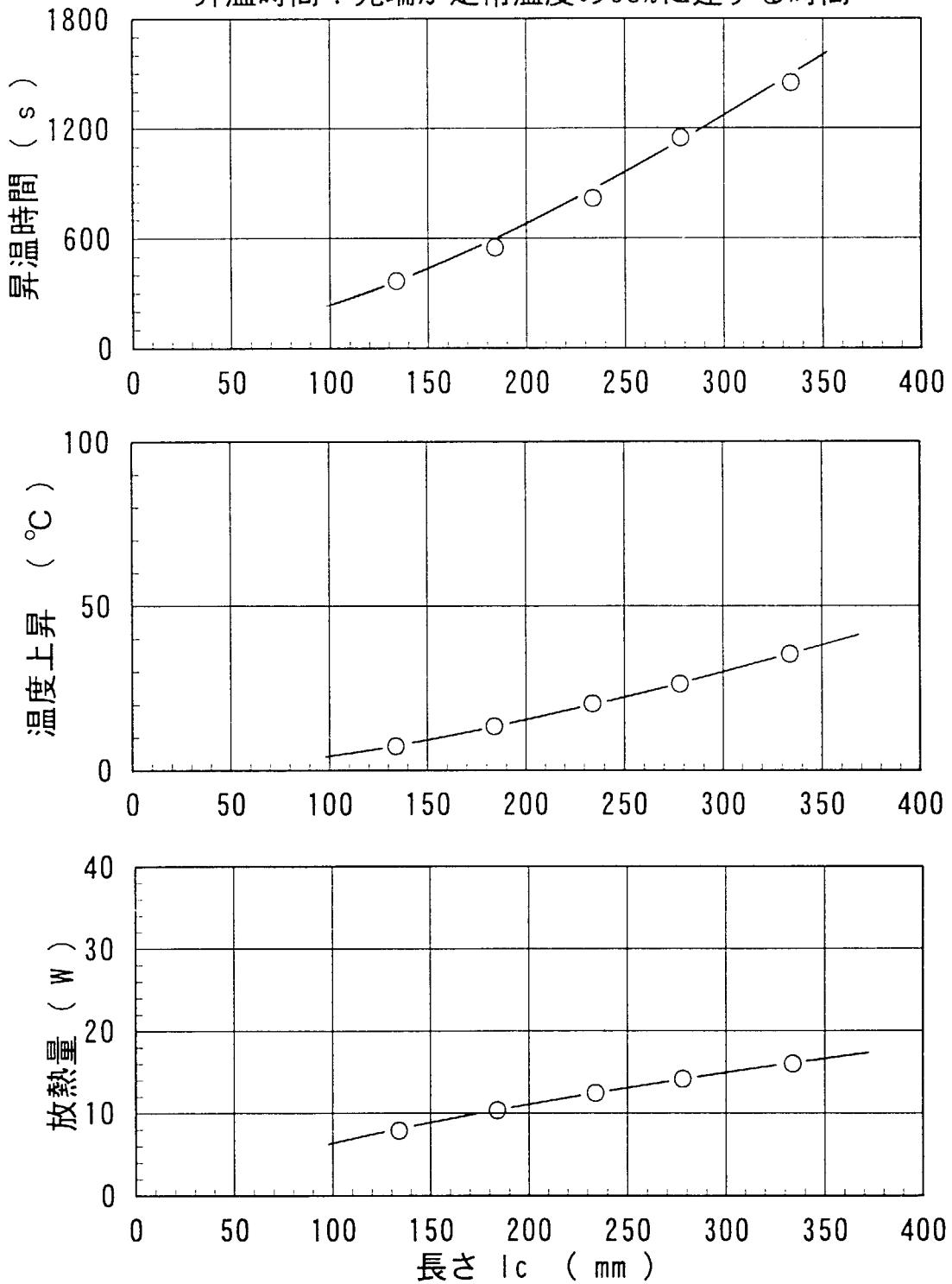


図 18 長さが昇温時間、温度上昇、放熱量に及ぼす影響（定常時）

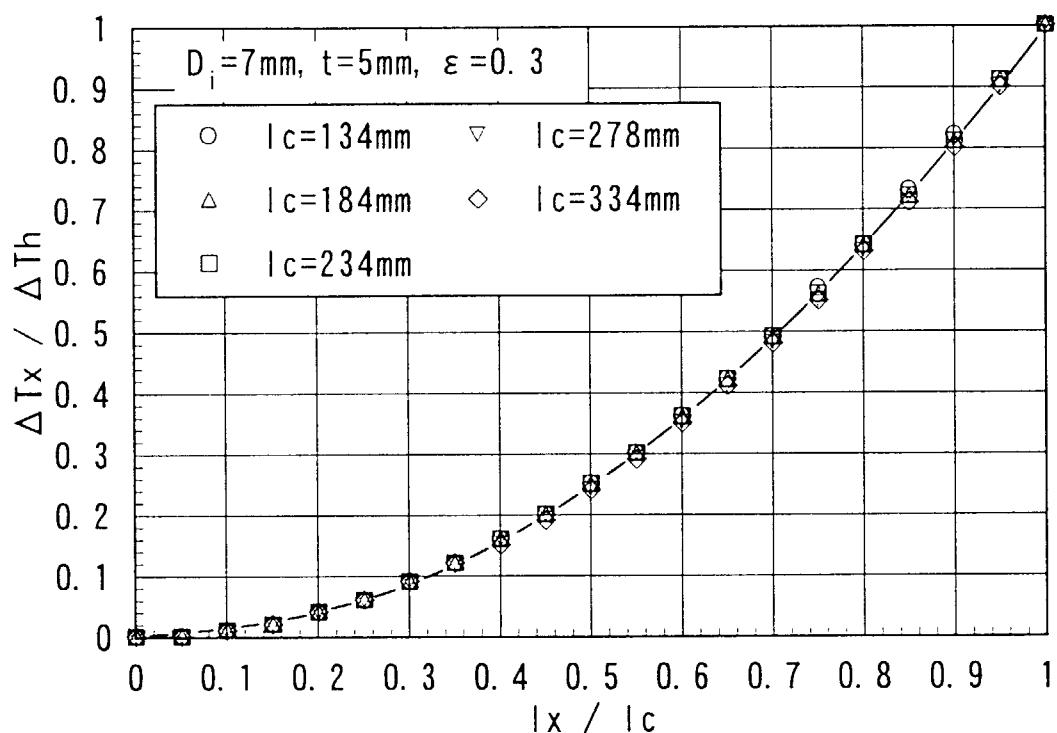


図 19 軸方向の温度上昇分布（定常時）

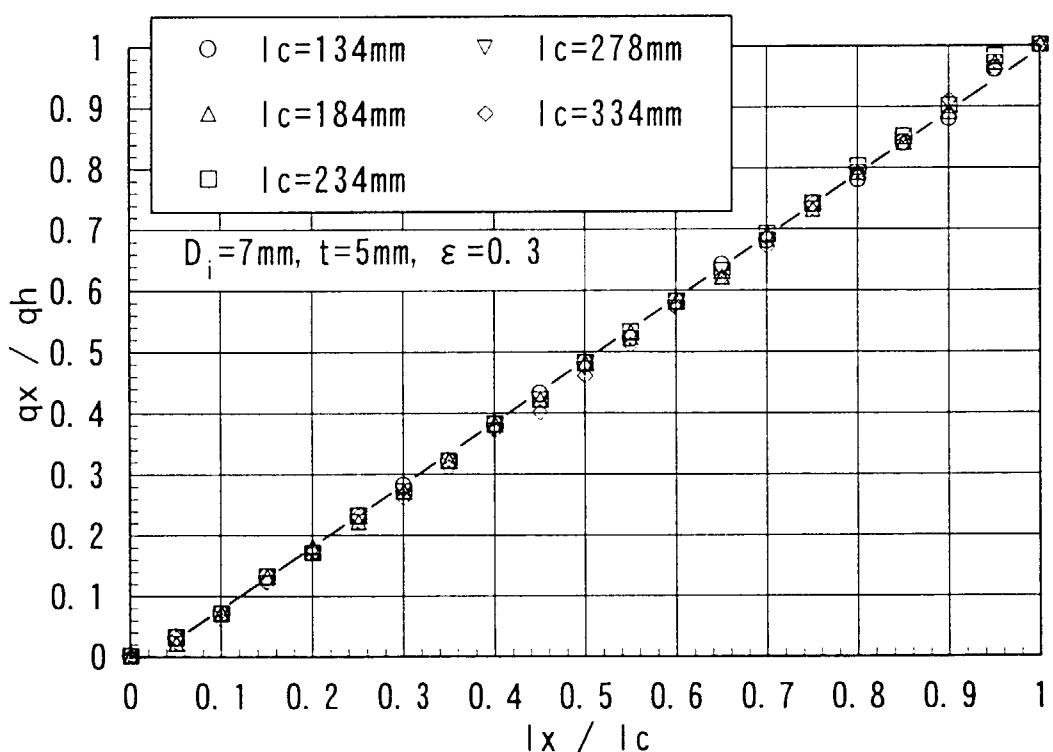


図 20 軸方向の熱流束分布（定常時）

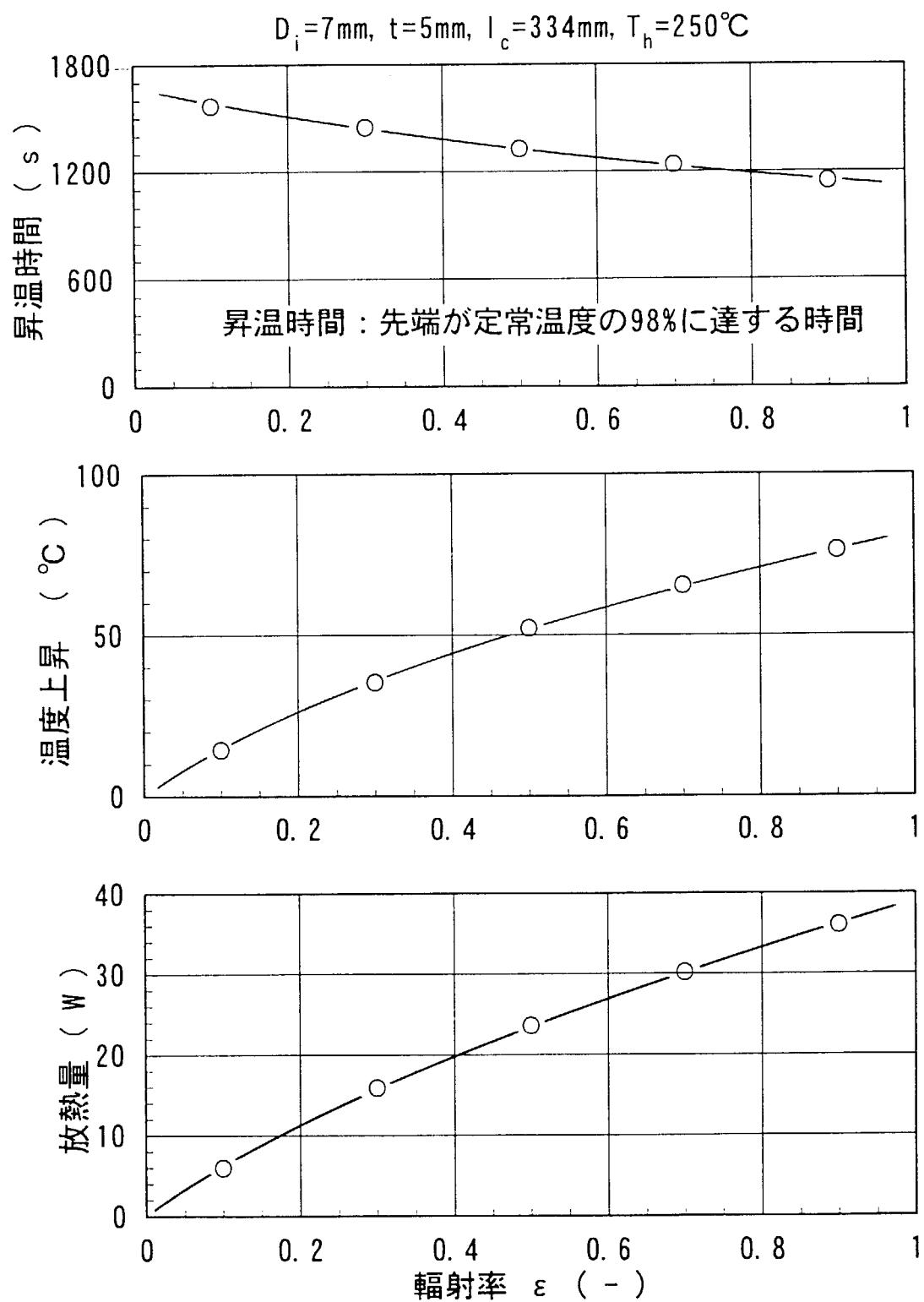


図 21 輻射率が昇温時間、温度上昇、放熱量に及ぼす影響（定常時）

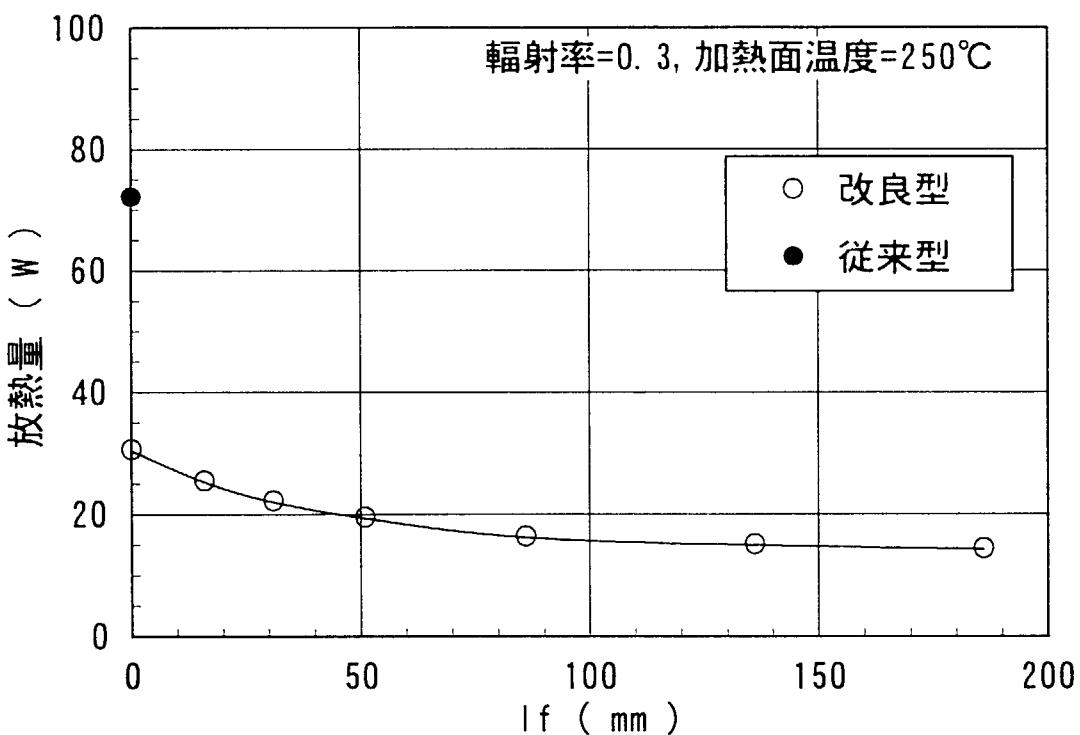


図 22 放熱量に及ぼす根元固定部構造の影響（定常時）

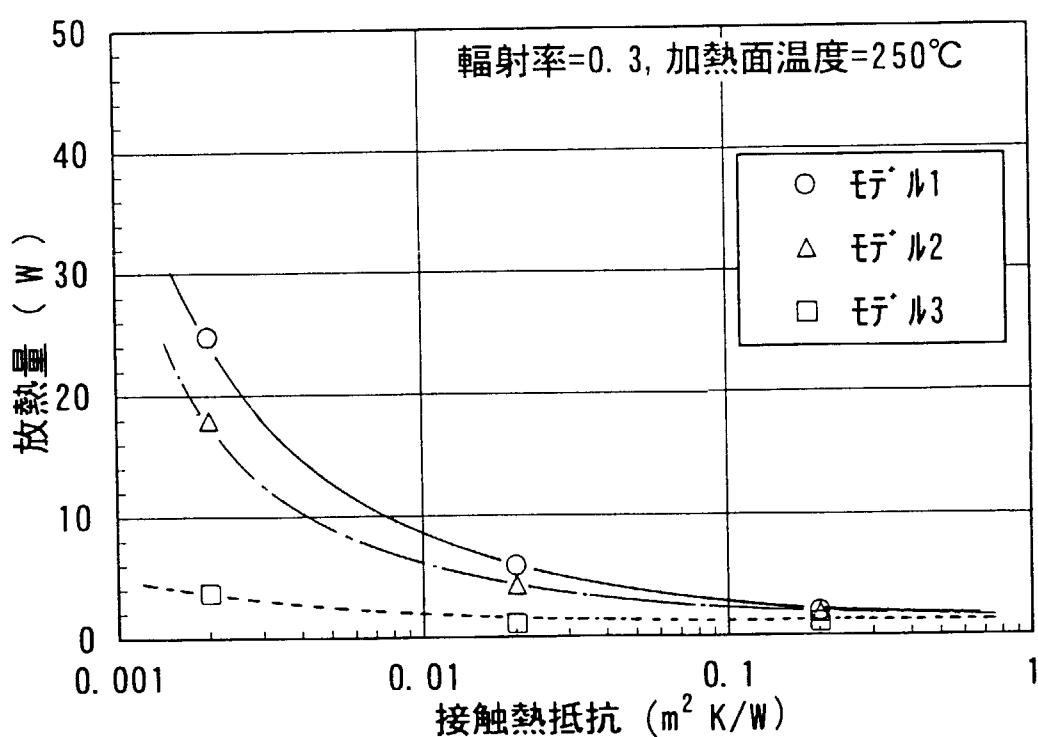


図 23 先端固定部構造と放熱量（定常時）

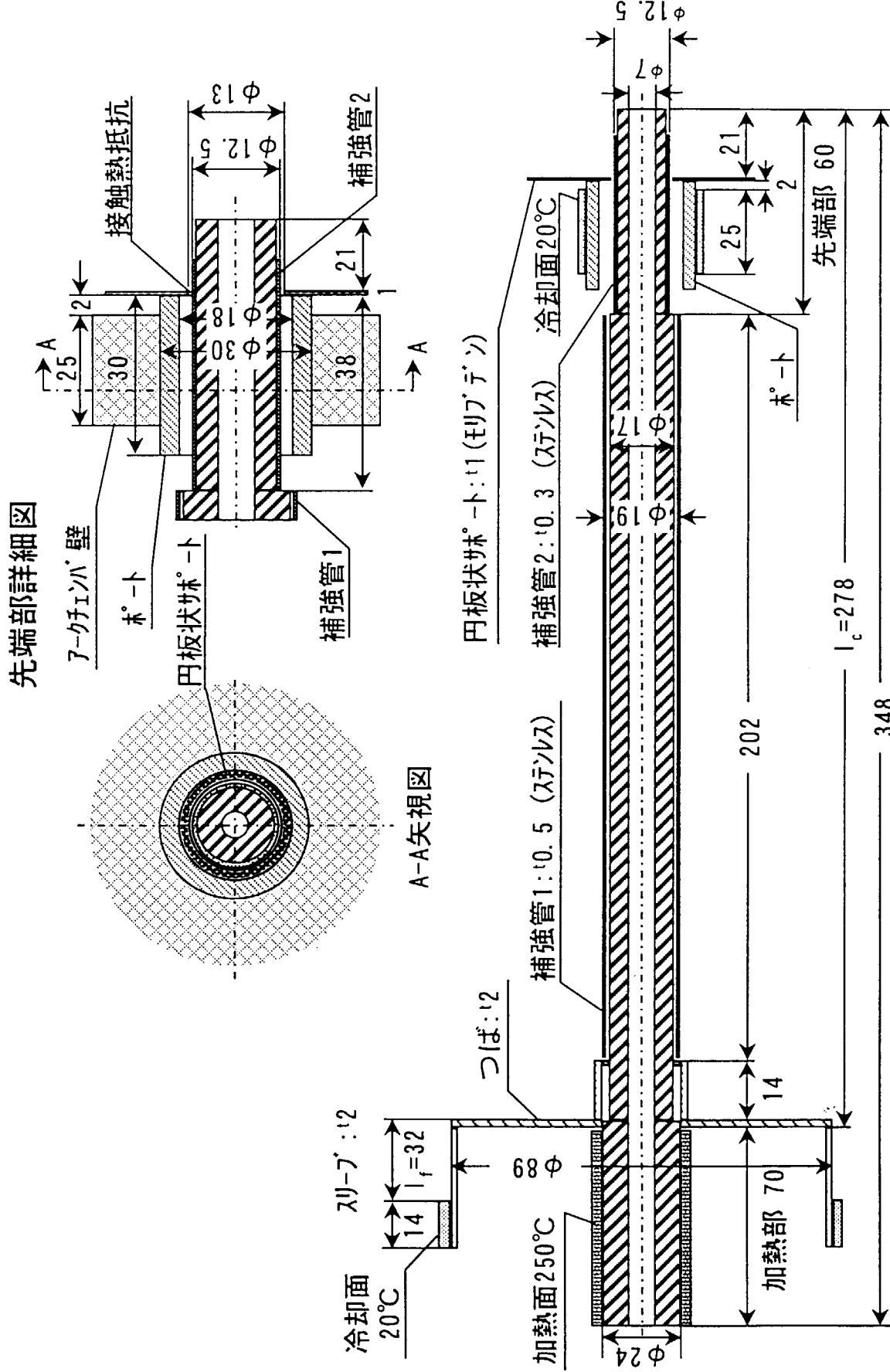


図 24 組合せモデル

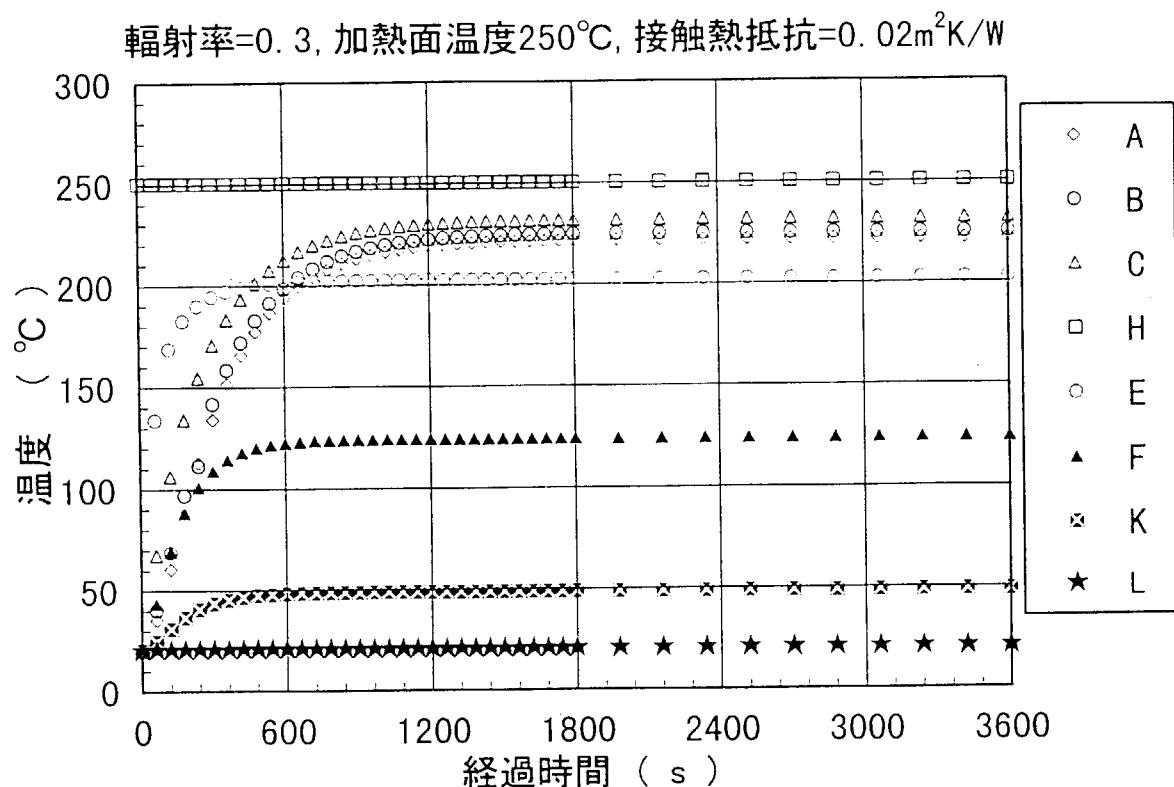


図 25 導入管各部の温度変化

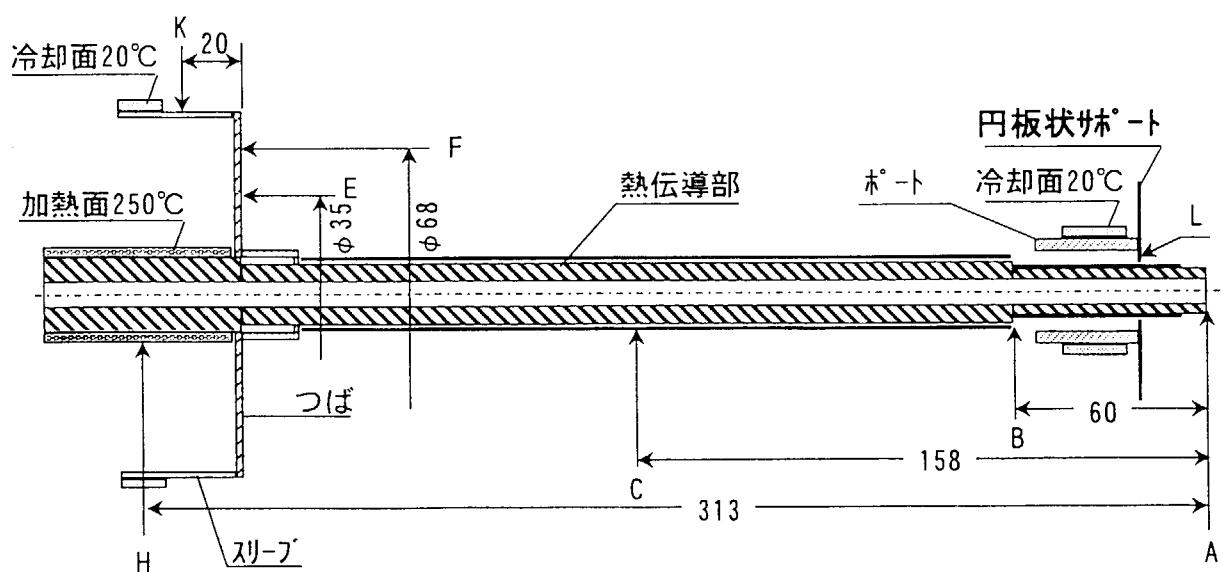


図 26 热伝導型導入管の温度表示位置

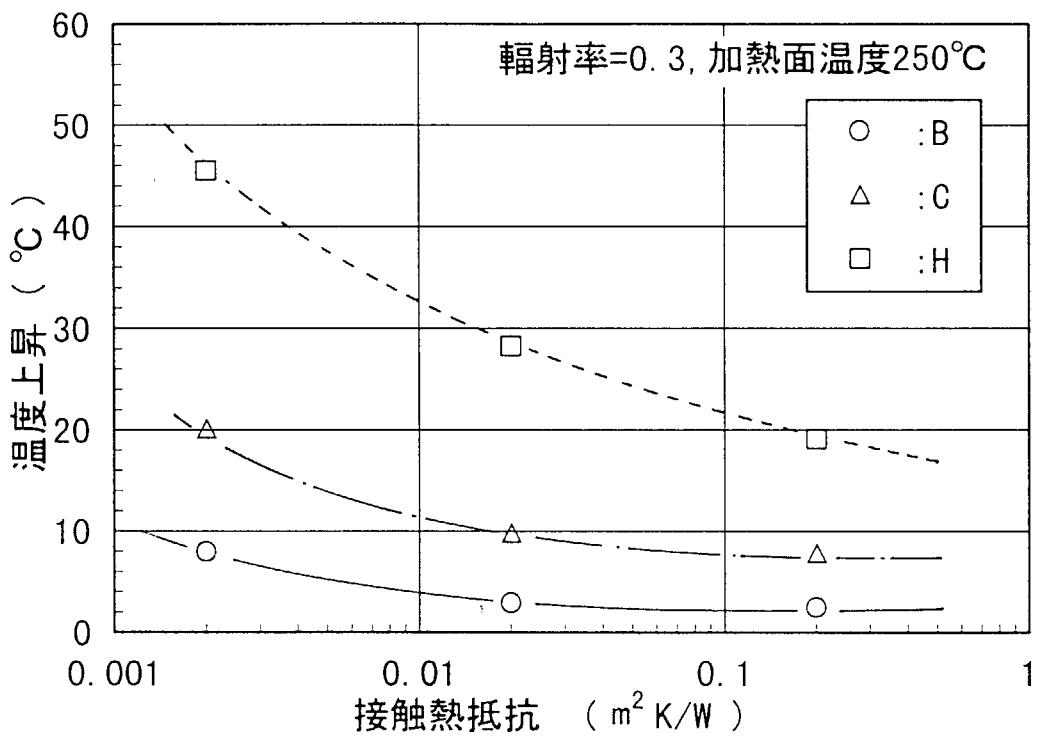


図 27 热伝導部各位置の温度上昇

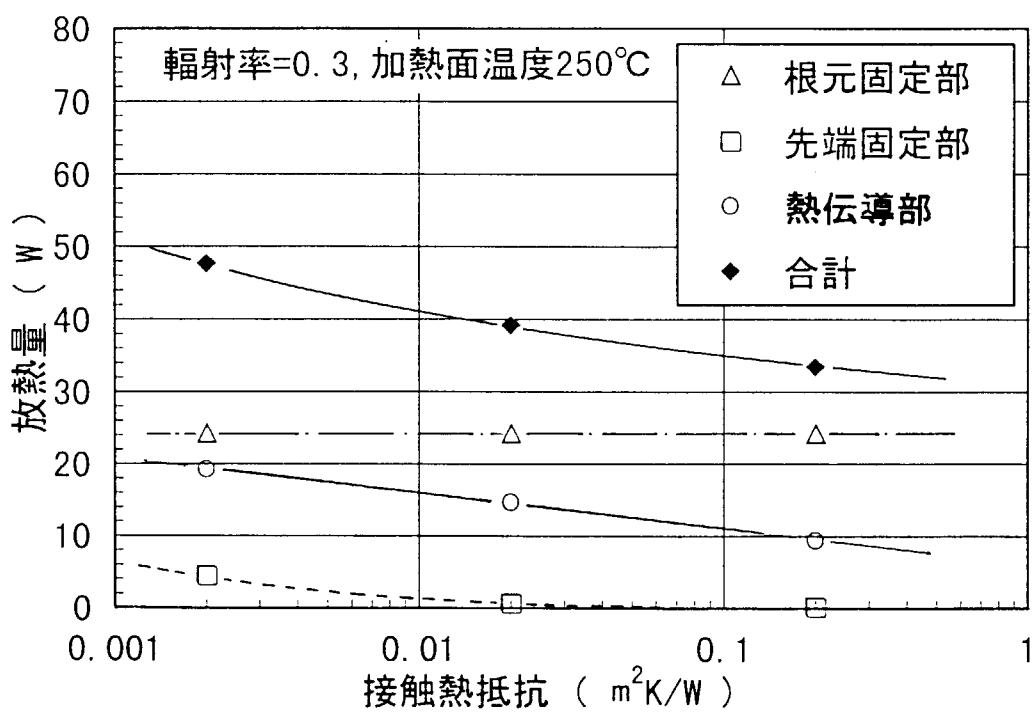


図 28 放熱量の分類

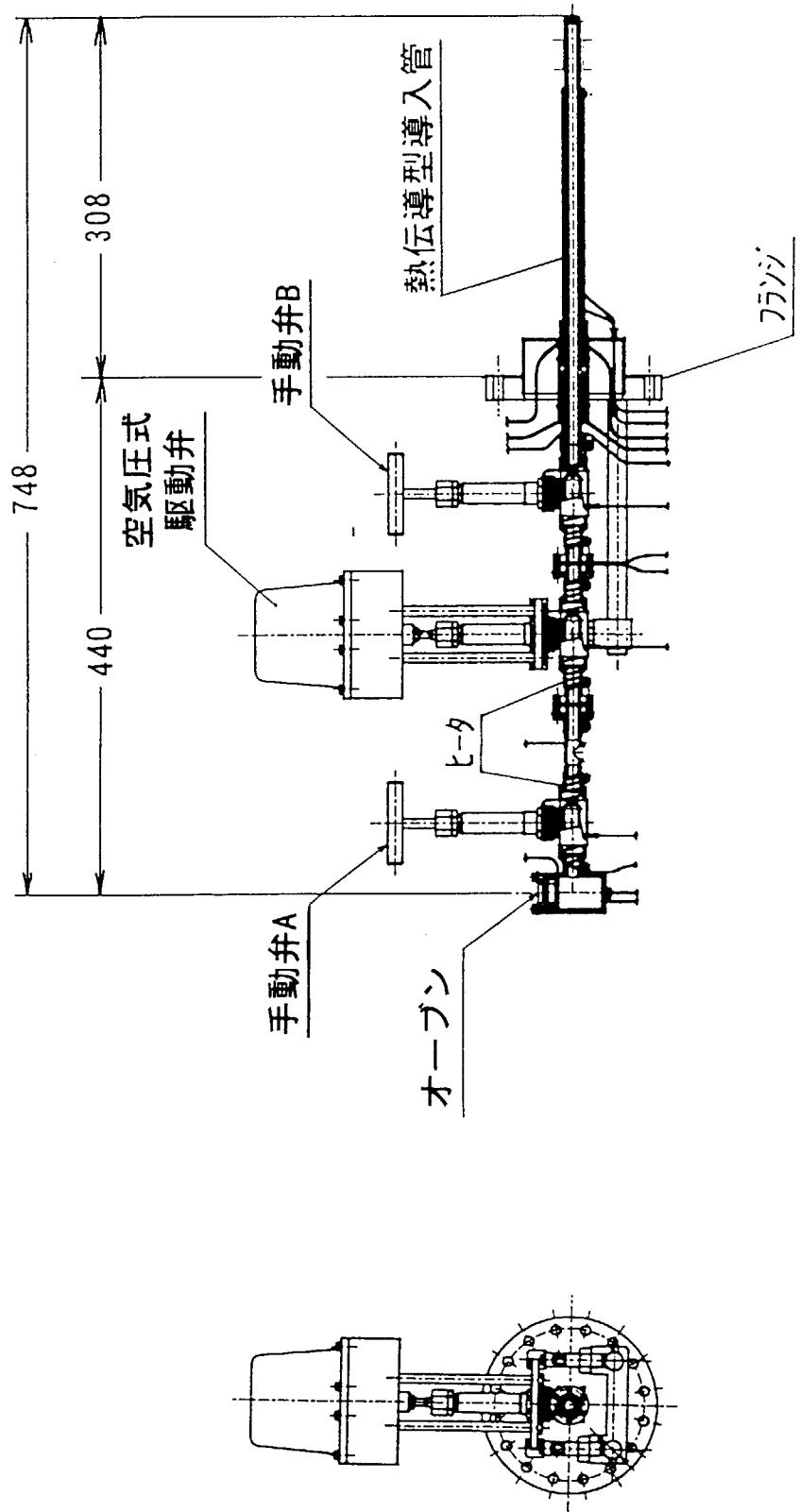


図 29 改良型セシウム導入装置

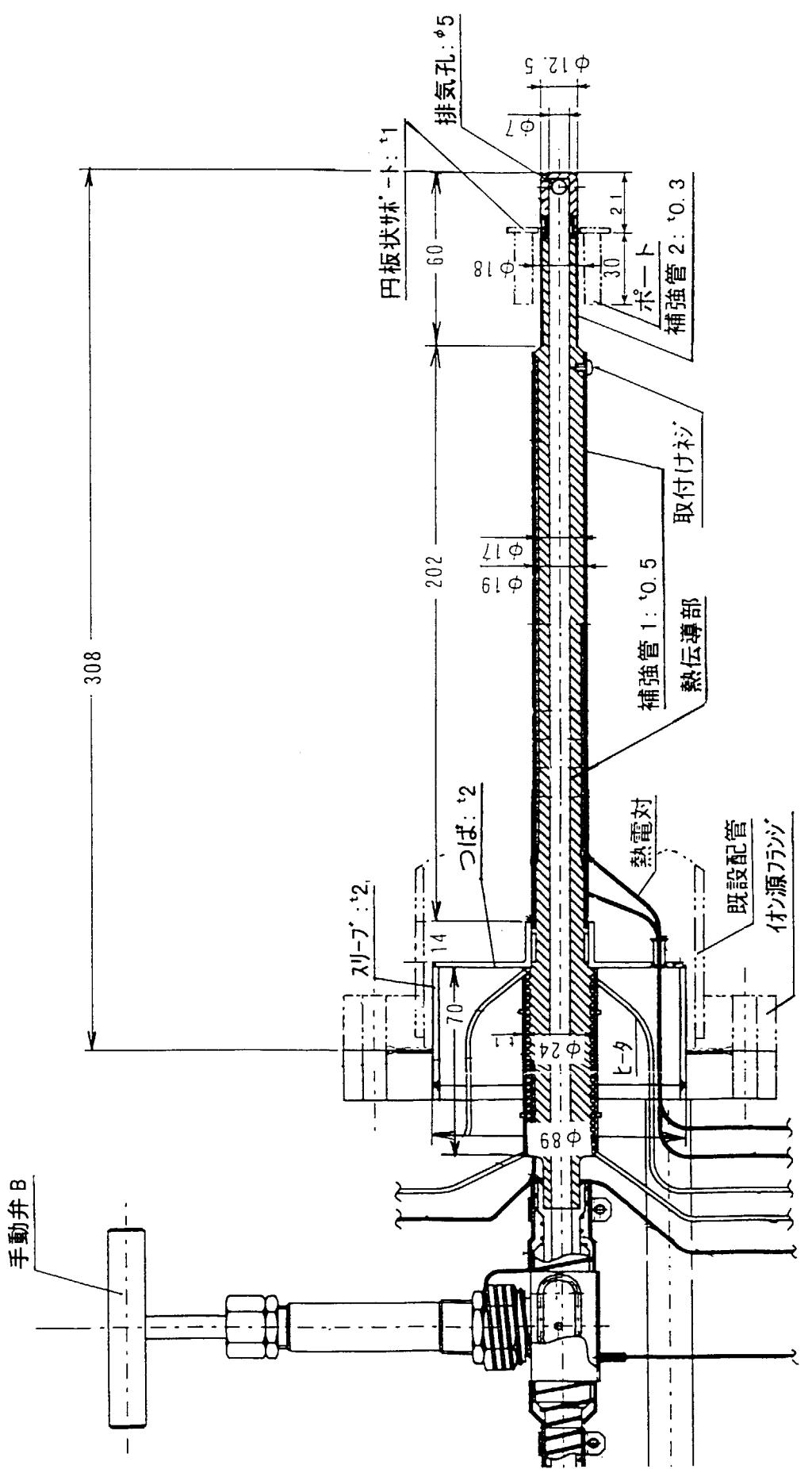


図 30 熱伝導型導入管

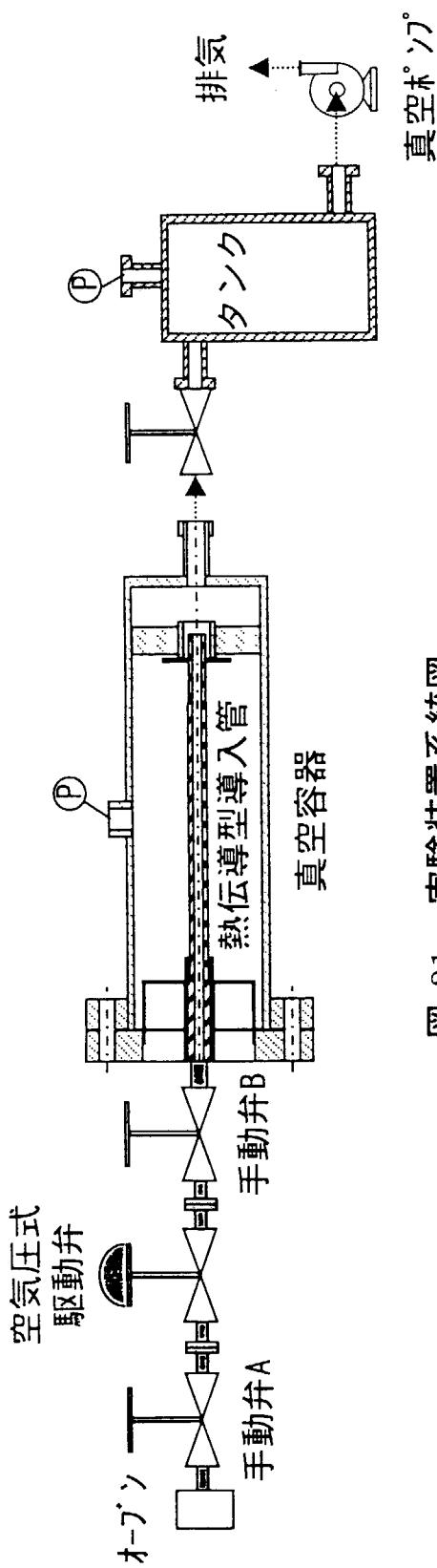


図 31 実験装置系統図

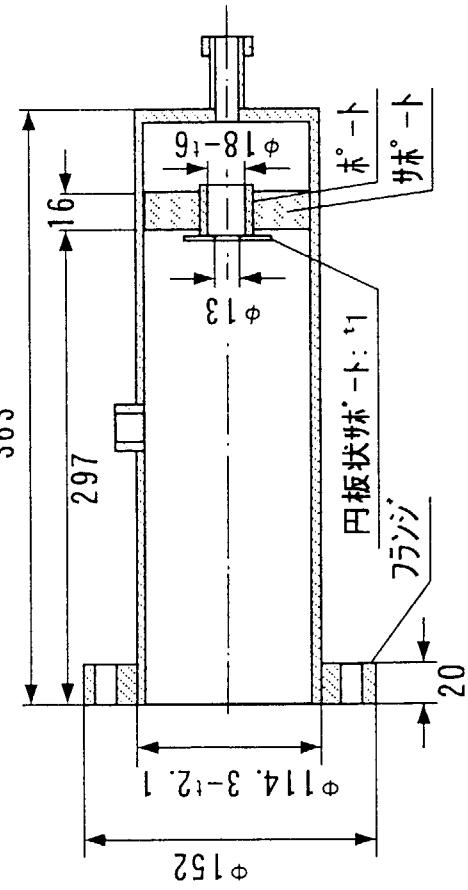


図 32 真空容器

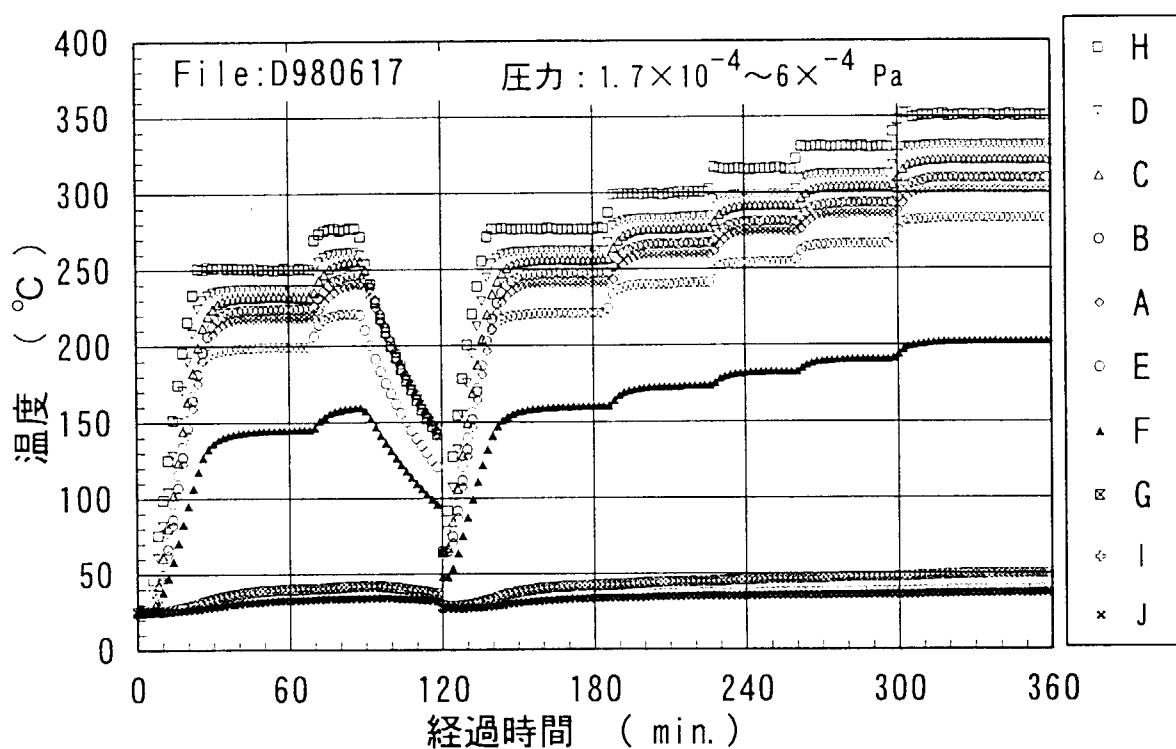


図 33 热伝導型導入管モデルの温度変化

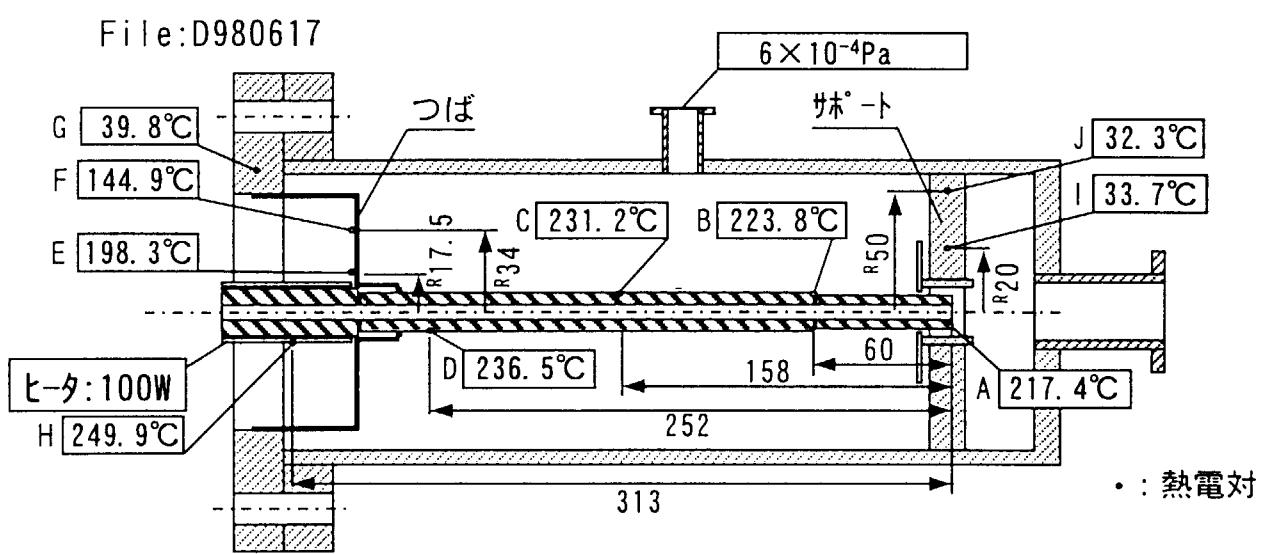


図 34 热伝導型導入管モデルの温度分布 (加熱面温度=250°C)

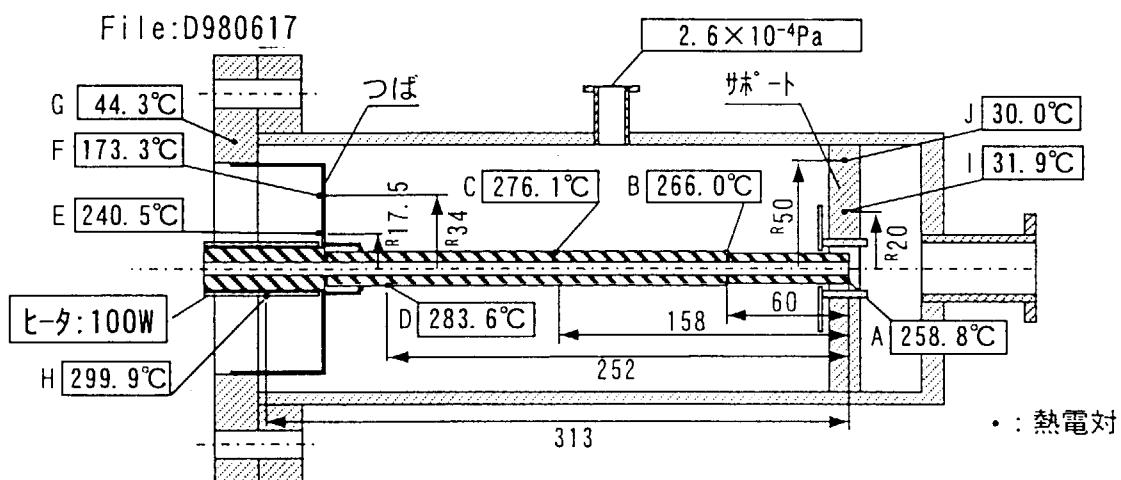


図 35 热伝導型導入管モデルの温度分布（加熱面温度=300°C）

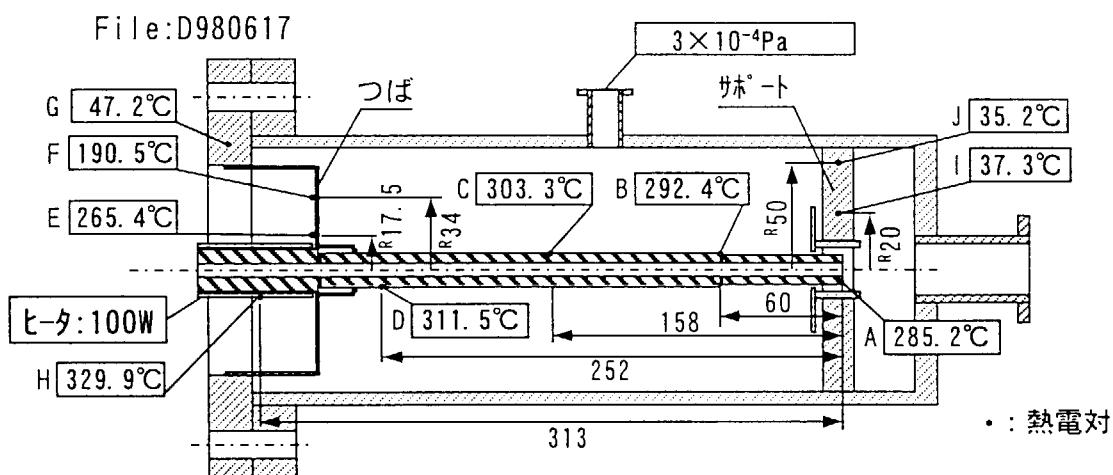


図 36 热伝導型導入管モデルの温度分布（加熱面温度=330°C）

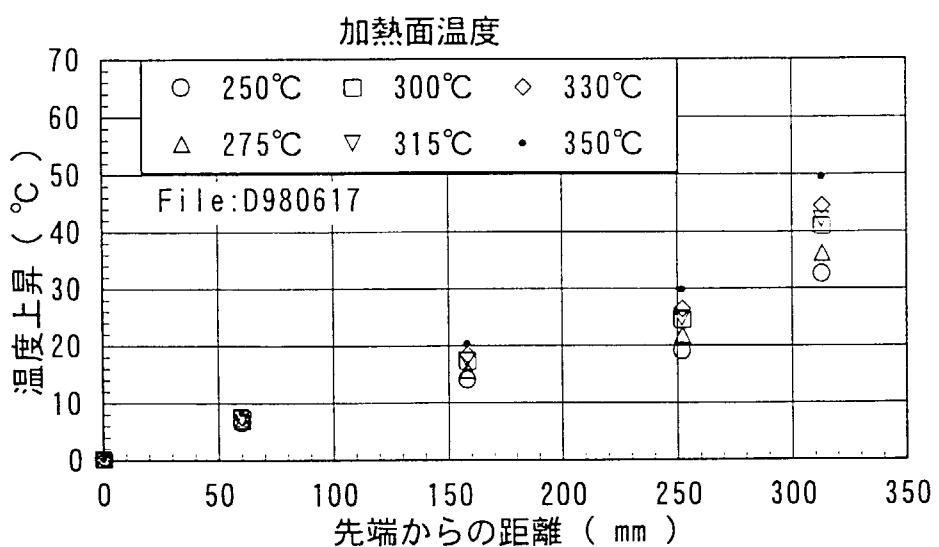


図 37 導入管の軸方向の温度上昇

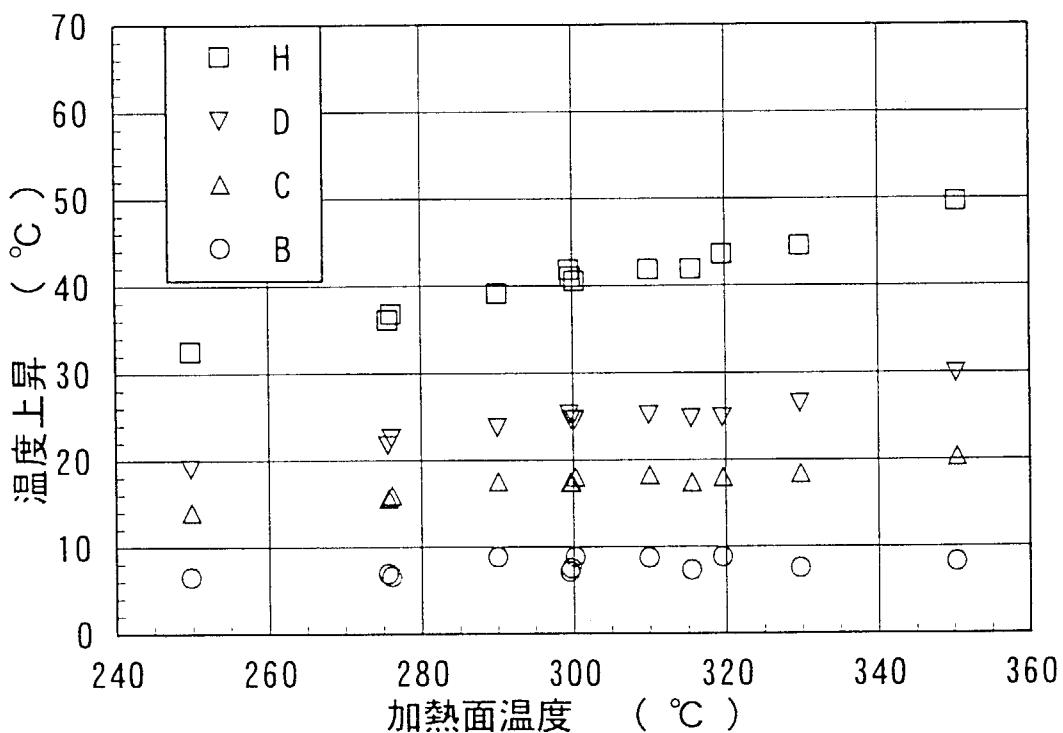


図 38 導入管の軸方向各位置の温度上昇

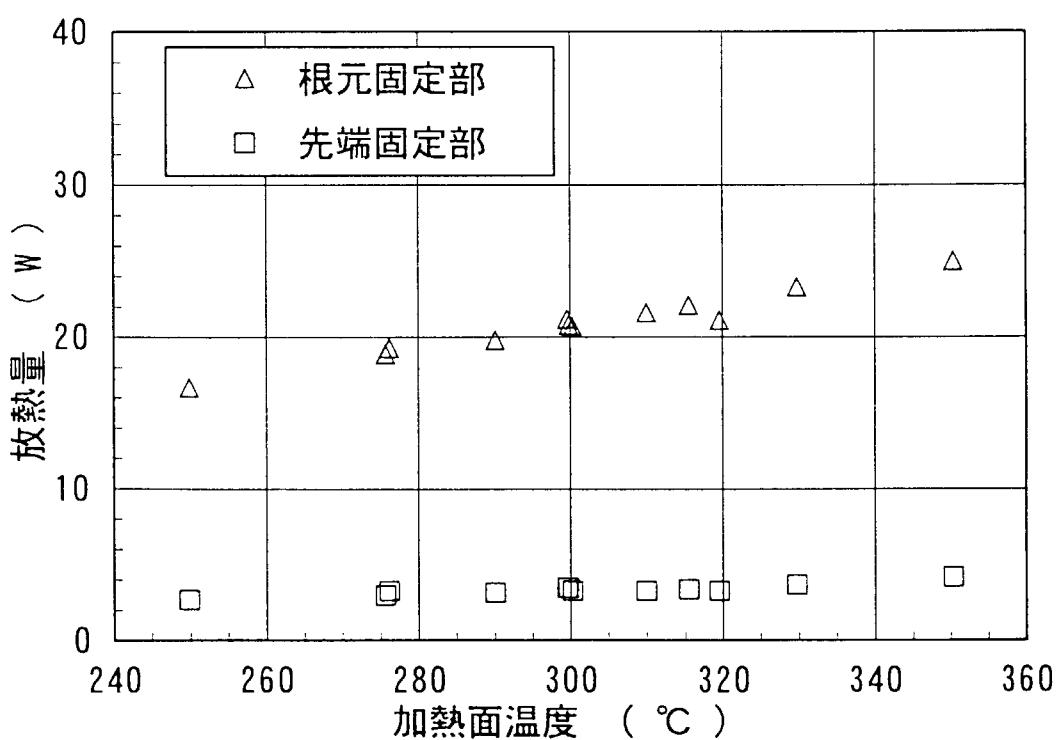


図 39 根元固定部と先端固定部からの放熱量

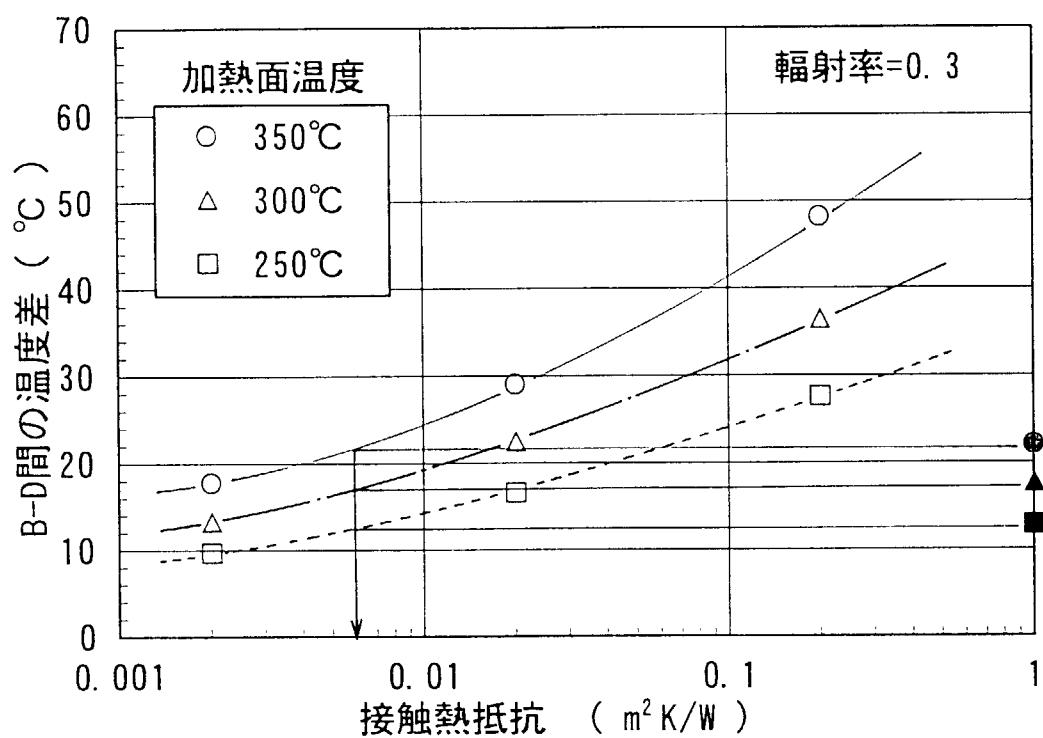


図 40 補強管 1 の接触熱抵抗

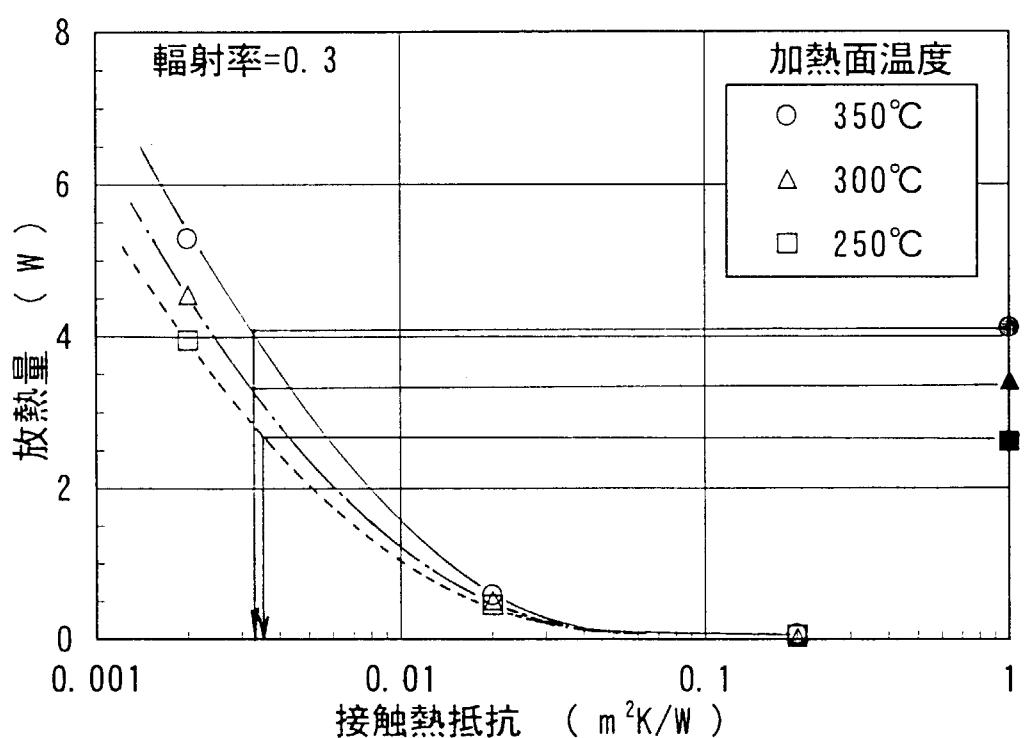


図 41 先端固定部の接触熱抵抗

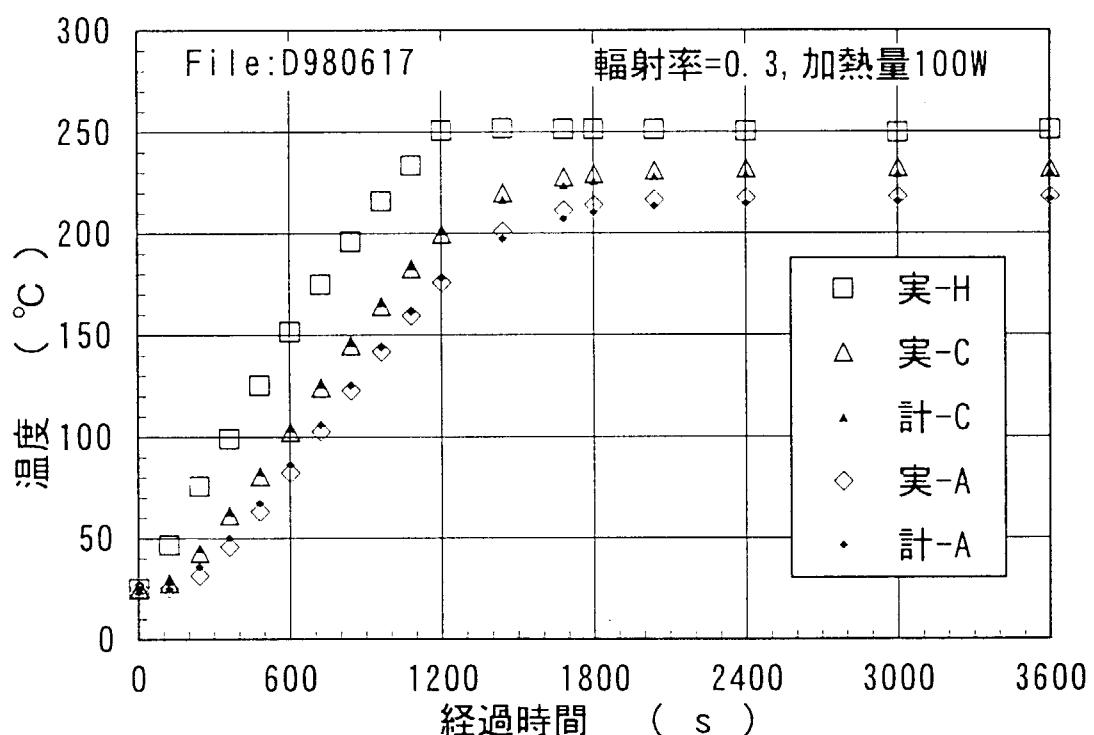


図 42 実験値と計算値の比較

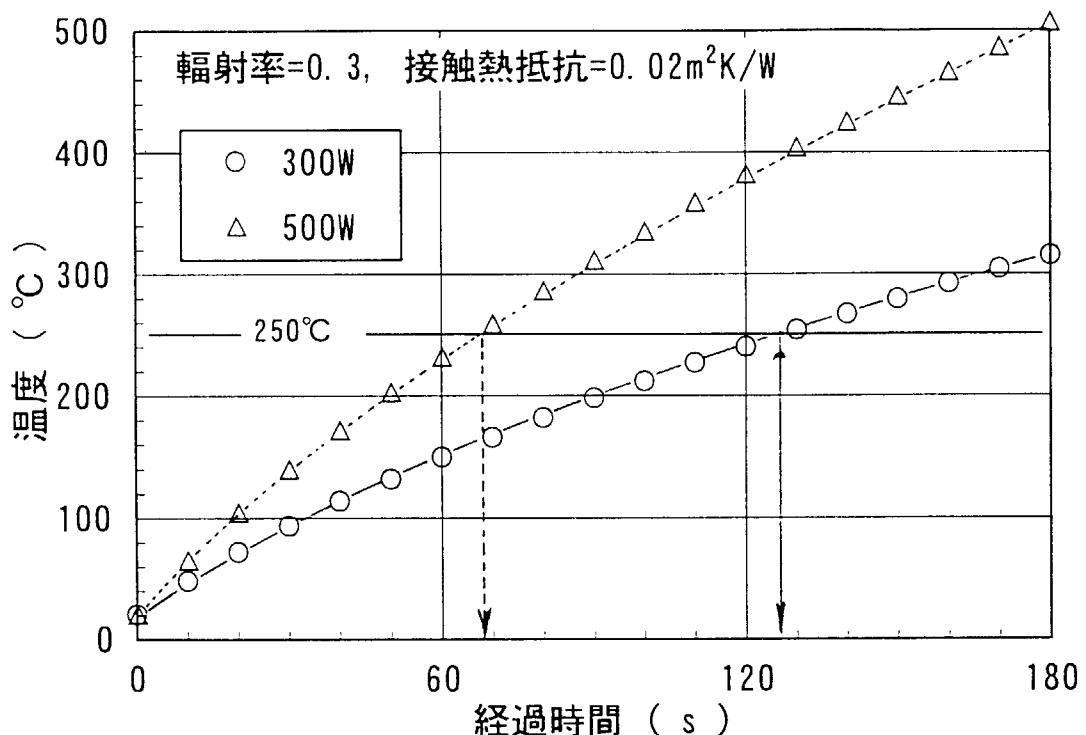


図 43 加熱面の温度変化

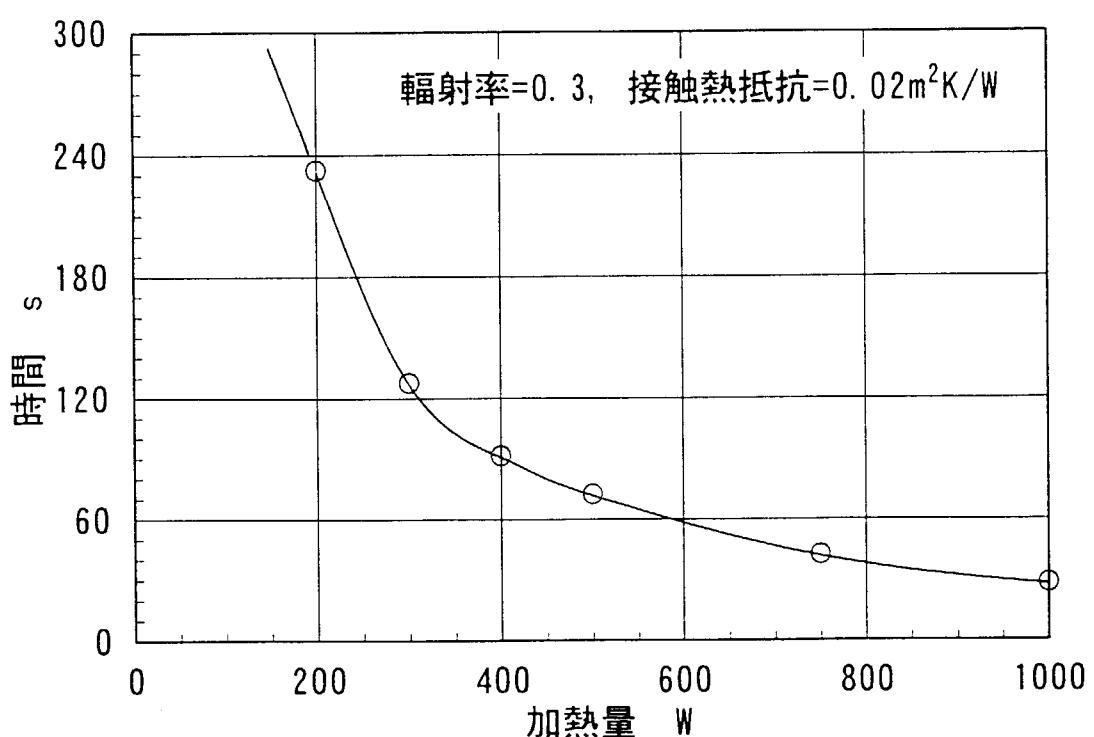


図 44 ヒータ加熱量と加熱面温度が 250°C に達する時間

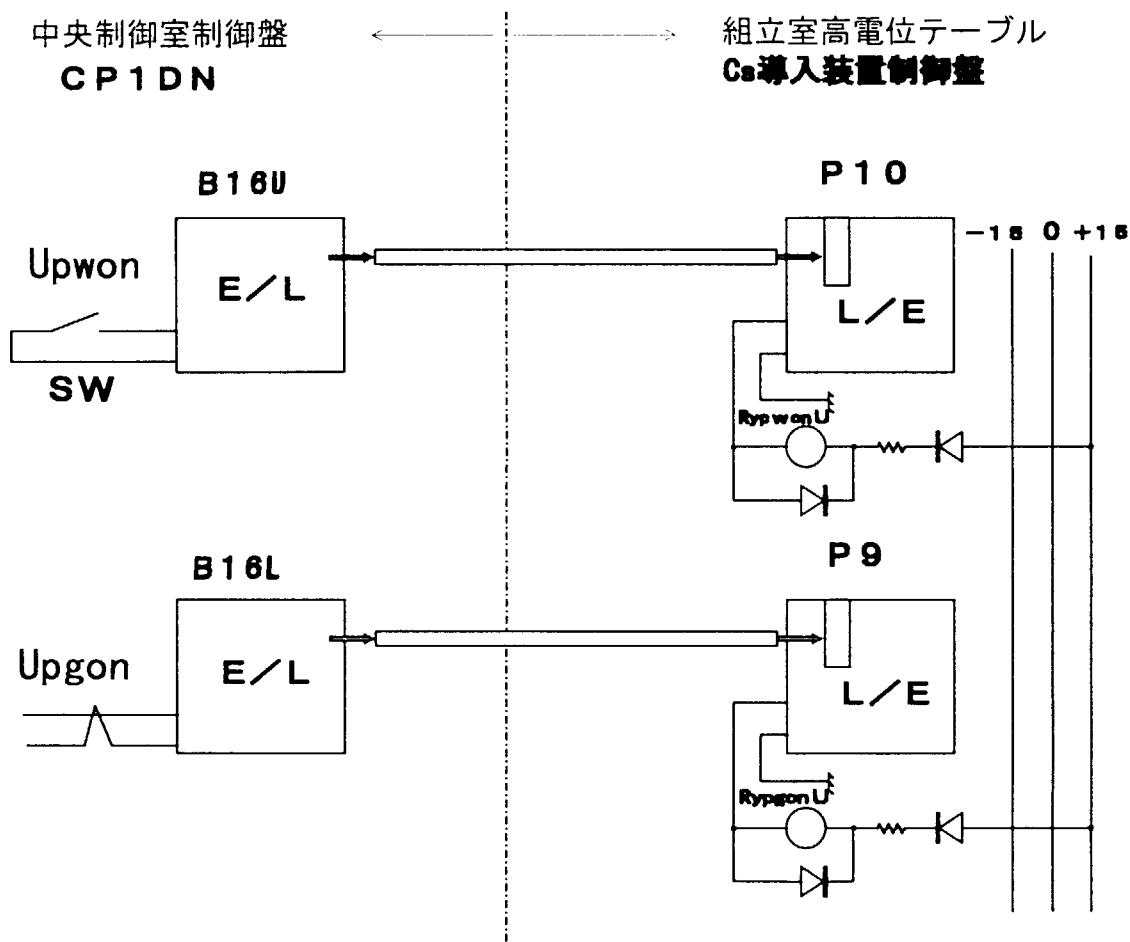


図 45 Cs導入装置ヒータ回路  
の光送受信

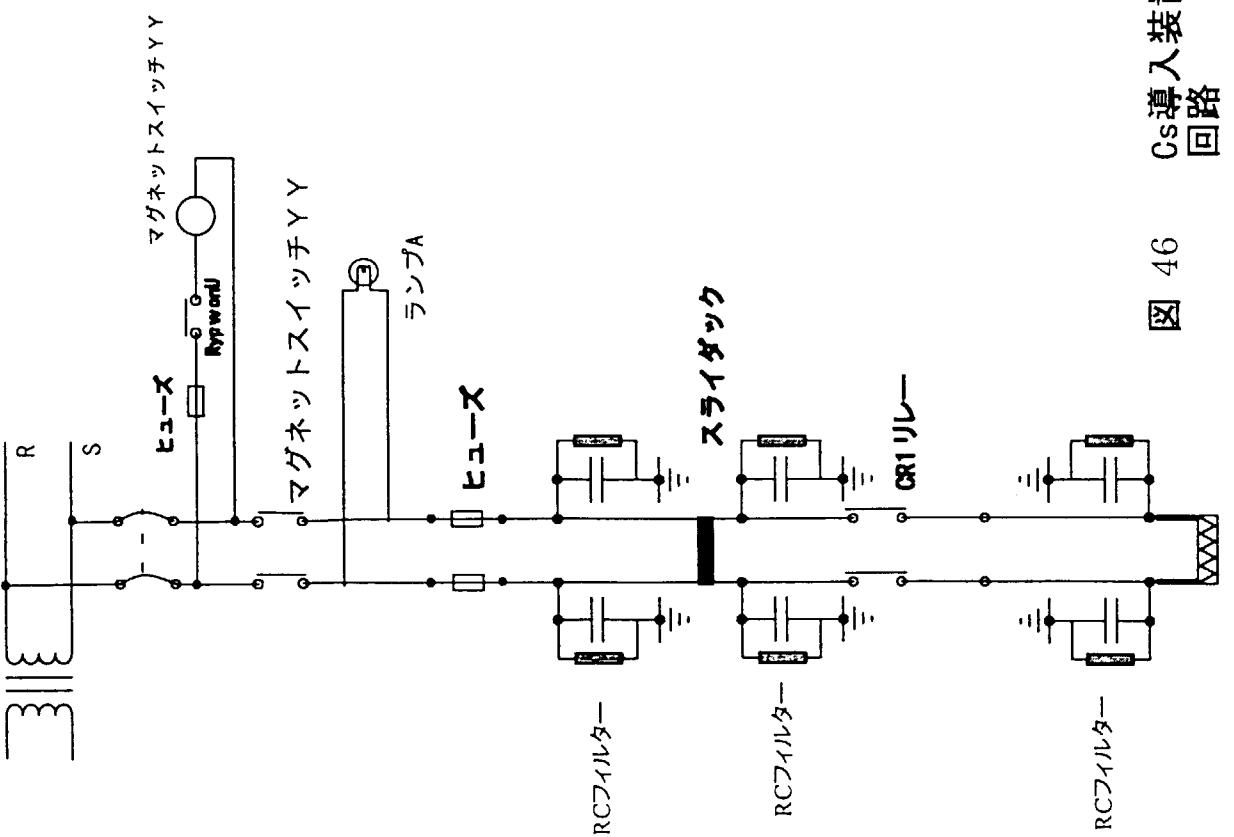


図 46 Cs導入装置ヒータ回路

図 46 Cs導入装置ヒータ回路

Cs導入装置ヒータ

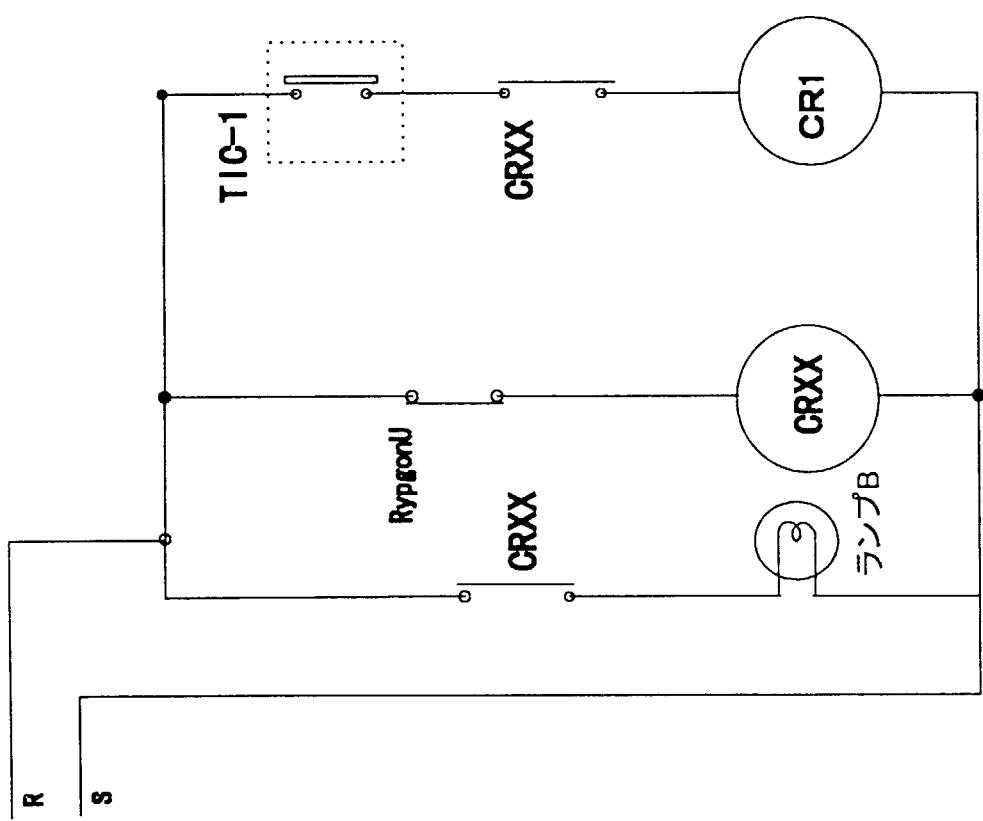


図 47 Cs導入装置ヒータ回路

図 47 Cs導入装置ヒータ回路

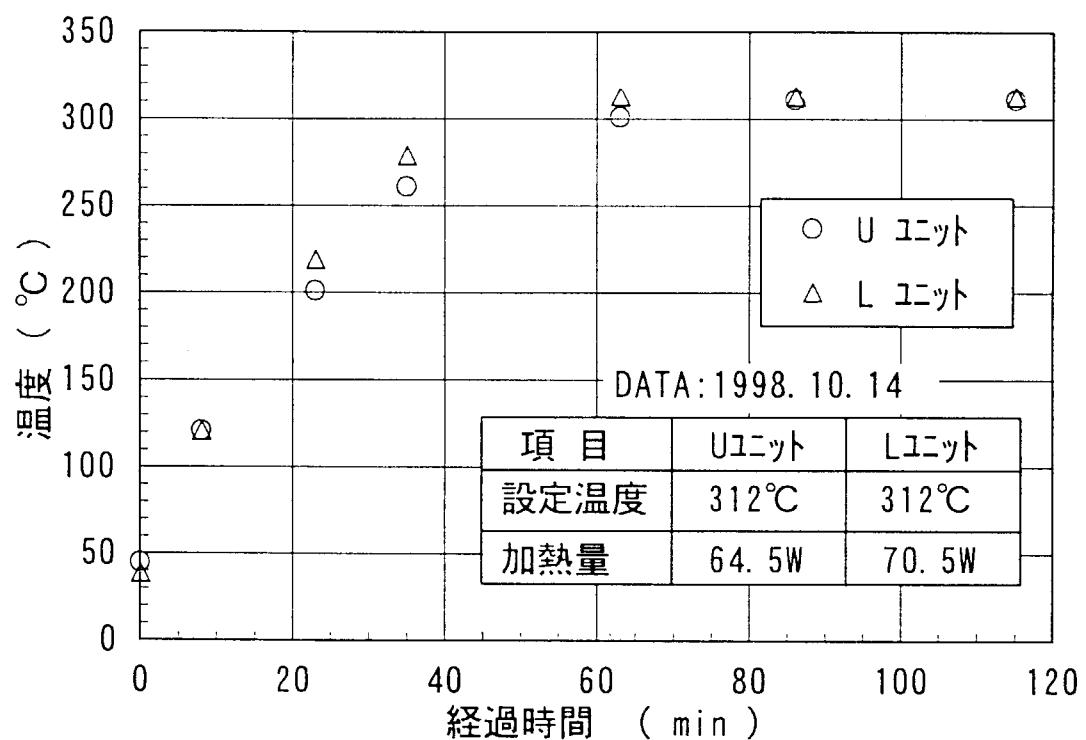


図 48 導入管加熱面の温度変化  
(実機N-NBI装置に取付け時)

This is a blank page.

# 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	kg·m/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
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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)

1. 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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. 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	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	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 cal = 4.18605 J(計量法)
	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>	= 4.184 J(熱化学)
	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>	= 4.1855 J(15 °C)
	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>	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	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>	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>16</sup>	= 735.499 W
	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	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100		1	3876		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1		2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

