

J A E R I - M
90-214

多段独立制御ヒータ付きキャップセルの設計手法

1990年11月

染谷 博之・遠藤 泰一・星屋 泰二
新見 素二・原山 泰雄

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

JAERI-M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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

多段独立制御ヒータ付きキャップセルの設計手法

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

染谷 博之・遠藤 泰一・星屋 泰二

新見 素二・原山 泰雄

(1990年11月6日受理)

多段独立制御ヒータ付きキャップセル（MUSTAC）は、 JMTRでの照射試験に使用しているキャップセルの一型式である。このキャップセルは内部に複数個の電気ヒータが組み込まれている。電気ヒーターへの供給電流を調整することで、照射試料の温度を一定に維持することが可能である。

本タイプキャップセルの照射試料は、試料ホルダーに挿入される。試料ホルダー外表面と外筒内面の間のガスギャップ寸法は、軸方向試料全長にわたり試料温度が平坦化するよう設計される。原子炉の出力変動等による温度変化は、試料ホルダー表面の溝に巻き付けたヒータによって、照射目標温度になるよう矯正される。

この報告書は、本タイプのキャップセルについて、設計・製作の経験、ならびに現在までにキャップセルの照射により得られてきた使用実績データを整理し、将来有用となる設計用データの整備をすることにより、考え得る合理的設計手法にまとめることを試みている。

この型式のキャップセル設計の最大の重点は、熱設計にある。現在、試料ホルダー内の温度分布が中心軸対称でないマルチホールの場合、設計熱計算はかなり煩雑な作業となっている。この種の問題を解決するため、今後の展開は、熱設計の手法の合理化にあると考えられ、そのためには、例えば、熱設計計算を扱う設計用計算プログラムを整備すること等が必要となろう。

Design Procedure of Capsule with Multistage Heater Control
(named MUSTAC)

Hiroyuki SOMEYA, Yasuichi ENDHO, Taiji HOSHIYA
Motoji NIIMI and Yasuo HARAYAMA

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 6, 1990)

A capsule with electric heaters at multistage (named MUSTAC) is a type of capsule used in JMTR. The heaters are assembled in the capsule. Supply electric current to the heaters can be independently adjusted with a control systems that keeps irradiation specimens to constant temperature.

The capsule being used, the irradiation specimen are inserted into specimen holders. Gas-gap size, between outer surface of specimen holders and inner surface of capsule casing, is calculated and determined to be flatten temperature of loaded specimens over the rigion. The rise or drop of specimen temperature in accordance with reactor power fluctuations is corrected within the target temperature of specimen by using the heaters filled into groove at specimen holder surface.

The present report attempts to propose a reasonable design procedure of the capsules by means of compiling experience for designs, works and irradiation data of the capsules and to prepare for useful informations against onward capsule design.

The key point of the capsule lies on thermal design. Now design thermal calculations are complicated in case of specimen holder with multihole. Resolving these issues, it is considered from new on that an emphasis have to placed on settling a thermal calculation device, for an example, a computer program on calculation specimen temperature.

Keywords: Steel Irradiation Capsule, JMTR, Multistage Heater Control,
Constant Temperature, Thermal Design

目 次

1. はじめに	1
2. 基本設計手順	7
2.1 使用材料の選定	7
2.2 基本構造の設計	7
2.3 热設計における試料等の温度評価式	10
2.4 热設計計算手段とモデル化	14
2.5 热設計手順	16
3. 詳細設計	24
3.1 主要構造部	24
3.2 試料配置計画	24
3.3 各段におけるヒータ出力および線長の決定	25
3.4 試料ホルダー	26
3.5 热電対	28
3.6 部品および細部設計	28
3.7 試験・検査	28
4. キャプセル温度制御装置	33
4.1 制御盤への接続とヒータ制御装置	33
4.2 試料温度の確認と昇温方法	33
5. キャプセル設計例および設計・製作実績	37
5.1 キャプセル設計例	37
5.2 設計・製作実績	38
5.3 トラブル例	39
謝 辞	51
参考文献	51
付 錄 多段独立ヒータ制御型キャプセル要目一覧表	53

Contents

1. Introduction	1
2. Procedure of Basic Design	7
2.1 Selection of Material	7
2.2 Design of Basic Structure	7
2.3 Calculating Temperature of Specimen in Thermal Design	10
2.4 Modification of Specimen Geometry for Computer Program	14
2.5 Procedure for Thermal Design	16
3. Detail Design	24
3.1 Strength for Pressure Boundary Elements	24
3.2 Planning of Specimen Arrangement	24
3.3 Determinating Electric Heater Wiring Length on Each Holder Stage	25
3.4 Specimen Holder	26
3.5 Thermocouples	28
3.6 Detail Design for Miscellaneous Parts	28
3.7 Inspections	28
4. Capsule Temperature Control Apparatus	33
4.1 Jointing to Control Panel and Heater Controller	33
4.2 Recognition of Specimen Temperature and Controlling of Heater	33
5. Design Example and Experiments of Capsule Design	37
5.1 An Example of Capsule Design	37
5.2 Experiments of Designs and Works	38
5.3 Troubles	39
Acknowledgments	51
References	51
Appendix Summary of "MUSTAC" Specification	53

1. はじめに

(1) 材料試験炉（J M T R）を利用した照射試験の照射試料は、材料と燃料とに大きく分類される。これ等の照射試料は、照射用キャップセル内に格納され試験に供せられる。キャップセルは、原子炉炉心に装荷されることから、核的、熱的、寸法的に制限される。

この報告書で取上げるキャップセルは、材料の照射試験を主たる目的にしているため、核的な制約は割に少ない。材料特に鉄鋼等の材料照射における最近の傾向は、試料についての照射温度の変動範囲が小さくなるよう要求されることである。例えば、従来、目標照射温度が $290 \pm 25^{\circ}\text{C}$ であった範囲を $290 \pm 10^{\circ}\text{C}$ とする等である。

上記のような要求の照射試料の目標照射温度に対し、多段独立制御電気ヒータ付きキャップセル（この報告書では“多段独立ヒータ制御型キャップセル”と言う）が開発されてきた。この型式のキャップセルは、すでに初期の開発段階を終了し、かなりの成功を納めたことから実用に供しつつ、その使用中のデータを蓄積している。

(2) キャップセル構造

多段独立ヒータ制御型キャップセルの例を、Fig. 1.1, Fig. 1.2 に示す。Fig. 1.1 は、引張試験片と衝撃試験片を混載した例、Fig. 1.2 は、円形の破壊非性試験片を装荷した例である。この型式のキャップセルについて、設計、製作されたキャップセル主要要目を付録の Table A.1, A.2 に示す。

照射試料は温度調整を兼ねた試料ホルダー内に格納している。キャップセルの外径寸法は、主に 40 mm, 60 mm のものが使用されている。試料を格納した主要部の長さは、約 600 ~ 700 mm である。これに、真空温度制御装置への接続導管、温度の計測と制御に使用する熱電対を取付ける必要から、これらの計測線等の取出しのための保護管が付き全長約 7 m になる。

試料はアルミニウム製等の試料ホルダー内に装荷される。ヒータ発熱部長さの制約等から試料ホルダーは軸方向に 5 段あるいは 6 段配置している。また、試料ホルダーと外筒間のガスギャップ寸法が段階的に変えられている。試料ホルダーの外面には電気ヒータが取り付けられる。キャップセル内のガスギャップ層は、真空温度制御用導管に接続されており、ヘリウムガスを満たすこと、あるいは排気することが可能である。各段の試料ホルダーの外側に設けた電気ヒータは、各段独立に制御可能となっている。

材料の照射試験では照射中の試料の温度を可能な限り一定温度範囲に保持することが要請される。照射温度に関する要求条件を満足するため、この型式のキャップセルは軸方向ガンマ線束分布の変動によって引き起こされる温度変化を修正するように設計される。

キャップセル照射中、内部に装荷した試料は軸方向ガンマ線束分布により軸方向に温度差が発生する。この温度差を避けるため、試料ホルダーとキャップセル外筒間のギャップ寸法を軸方向に変化させている。これはガスギャップ層における伝熱抵抗の増減による温度差を利用し、試料温度の平坦化を図るためである。しかし、工学上ギャップ寸法を連続的に変化させ

ることは現実的でないので、試料ホルダーの任意の長さについてギャップ寸法を変更する。この結果、試料ホルダーと外筒内面間のギャップ寸法は軸方向に、原子炉の軸方向出力分布と逆向きの寸法分布となる。

J M T Rでは、ヒーター温度制御装置のほかキャプセル内部を真空にする真空温度制御装置を設置している。この装置の機能は、キャプセル内部の気体を排気することにより、キャプセル外筒内部の空間ギャップにおける熱抵抗を増加させ、試料等の温度上昇を図ることである。

照射試料の温度は、まず、軸方向ガンマ線束分布に対応した試料ホルダーのギャップ調整によるヘリウムガス層の伝熱抵抗により平坦化され、さらに真空温度制御により昇温される。運転中の発熱分布による微小な温度変化は、配置した各段で独立に制御可能な電気ヒータを使用して微調整される。

なお、この型式のキャプセルは、少なくとも各段に装荷する照射試料の形状等が揃った発熱量に大きな相違がない試料の照射に限られる。照射目標温度の異なる試料の照射試験は、このキャプセルの適用範囲外である。

(3) キャプセルの開発の経緯

照射中試料はガンマ発熱により自己発熱することから、試料はその炉心内の位置によるガンマ線強度に従う。ガンマ線強度は、おおむね炉心の出力分布に従っているので、この強度は一定ではなく、分布する。キャプセル内の構造、寸法が上、下に渡り同一ならば、ガンマ発熱によって引起される試料の温度は炉心の出力分布にしたがい、軸方向の中央で高く、上、下端程低くなる。

外筒内面と試料ホルダー間のギャップ寸法の調整と真空温度制御を組合せた温度制御でもかなりの目標温度範囲に維持することが経験された。しかし、キャプセル内の上・下端に位置する試料では、目標温度を下回ることがあった。そこで、照射試料装荷部の上・下端にのみヒータを組込んだキャプセルが製作された。この型式のキャプセルの前身は、この種のキャプセルであったと考えられる。

J M T R炉心内の照射位置すなわち、照射孔を固定して設計しても、 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 程度の相違が生じることもある。この温度範囲は、最近の照射温度目標範囲 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ を逸脱する。温度の相違を発生させる変動の原因是、

- 照射サイクルの前、後期によるドライバー燃料の燃焼度の進み具合による軸方向出力分布の変化（軸方向）と
- その照射サイクルにおいて、他の照射キャプセル等の炉心構成（径方向）の影響を受けるためである。

この型式のキャプセルは、照射中の試料の温度を可能な限り一定温度範囲に保持することを目的に開発された。キャプセルの基本構想は、発生する目標温度との温度差を上記のギャップ調整のほかに外部から制御可能な熱源を投入し、修正することである。投入熱源の手段として、試料ホルダー外側に独立に制御可能な電気ヒータをキャプセルに組むことが計画された。しかし、開発当初のキャプセルは、必ずしも照射目標温度を充分に満足するには至らなかった。その設計上の問題は、

- ・熱設計上のデータの不足
- ・軸対称でない断面形状試料の温度計算上の取扱い方法

であった。さらに、

- ・キャップセル温度制御装置の未整備

が考えられた。これらのが重なり、試料温度は、原子炉の出力変動を完全に吸収できず、必ずしも照射目標温度の範囲を充分に満足するに至らなかった。その後、この型式のキャップセルを改良し、圧力容器鋼材のPTS調査の照射試験に際して大幅に採用された。PTS(Pressurized Thermal Shock)とは、中性子による照射脆化が進行した加圧状況下の原子炉圧力容器に、何らかの原因で冷却水の温度低下が起こるとき、発生する熱衝撃である。この種の材料特性には、照射脆化に対する照射中の温度の影響が顕著であることから、試料の照射試験中の温度変動幅は290°Cに対し±10°C以内との条件が示された。JMT-R炉心の軸方向ガンマ線束は、高速中性子束分布に比例しておりコサイン状分布である。しかし、PTS照射試験に要求された照射量と照射期間から選定される炉心内照射孔は、ガンマ線束が大きく、また、原子炉運転中の制御棒引抜きによるガンマ線束の変動も大きい。さらに照射サイクルの前半、後半でも分布が変動する。これ等のため、従来の技術を使用した場合の温度制御の限界は要求温度に対して±25°Cになると推定された。そのため、この型式のキャップセルを改良し使用することになった。結果として、照射目標温度290°C±10°Cを達成した。

(4) キャップセルの設計・製作実績

この型式のキャップセルは1986年から1989年までに35体設計・製作された。この間、これらのキャップセルを用いて、引張り試験片178本、衝撃試験片688本、破壊非性試験片535個、3点曲げ試験片42本が照射された。

圧力容器鋼材のPTS調査の照射試験用キャップセルとして昭和58年から4年間にわたり13体が設計・製作された。この関係の試験片照射実績は、引張り試験片54本、衝撃試験片228本、破壊非性試験片180個に達した。

現在、この型式のキャップセルは、主として原子炉圧力容器材の照射試験に多用されている。

(5) この報告書編集の目的は、多段独立ヒータ出力制御型キャップセルについて、その設計経験、今までに得られてきた実測データの整理等を行うことにより、現時点で考え得る最善な合理的設計手法を提案することであった。しかし、キャップセルの照射により得られた実測データの中から将来有用になると考えられる設計用データを抽出することは困難であった。理由は、主として設計計算と実測データとの比較等についての資料が未整理状態であるためであった。

キャップセルは、種々の制限の中で照射要求を満足するよう最適な条件で照射試料が照射されるように設計されねばならないことから、提案の設計手法も今後の設計、照射経験の蓄積により改良さるべきことであることは論を待たない。

この型式のキャップセルの設計上の最大の重点は、熱設計にある。現在、多孔型試料ホルダー内の温度分布評価式が得られているが、計算手段が未整備なため、ホルダー内の試料配置が中心軸対称でない場合、設計熱計算にはかなり困難を伴っている。今後の展開は、熱設計計算の合理化にあると考えられる。そのためには、例えば、熱設計計算を扱う設計用計算機

プログラム等を整備すること等が必要となろう。

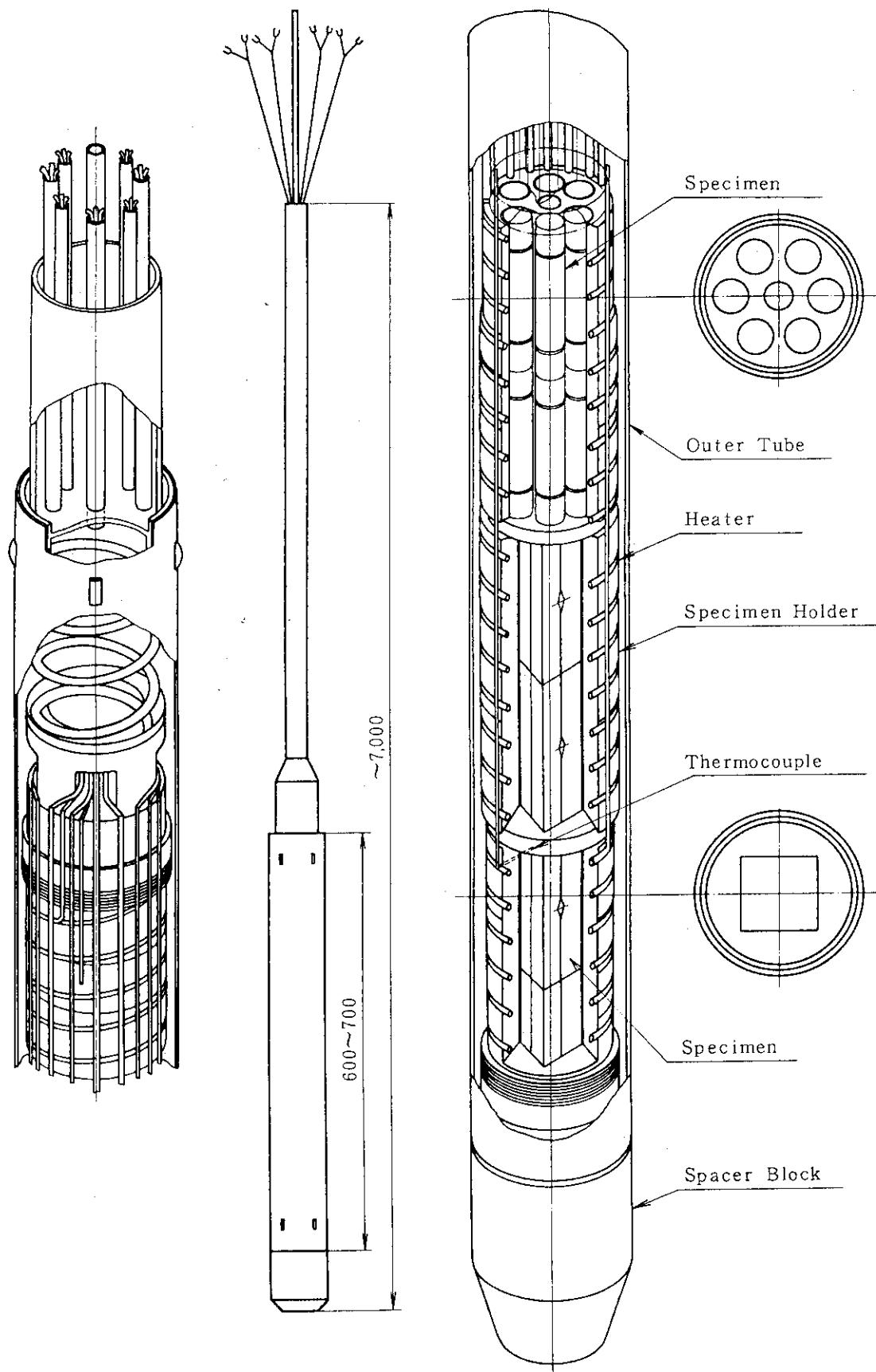


Fig. 1.1 Perspective View of Capsule
(Tensile Specimen and Charpy Specimen)

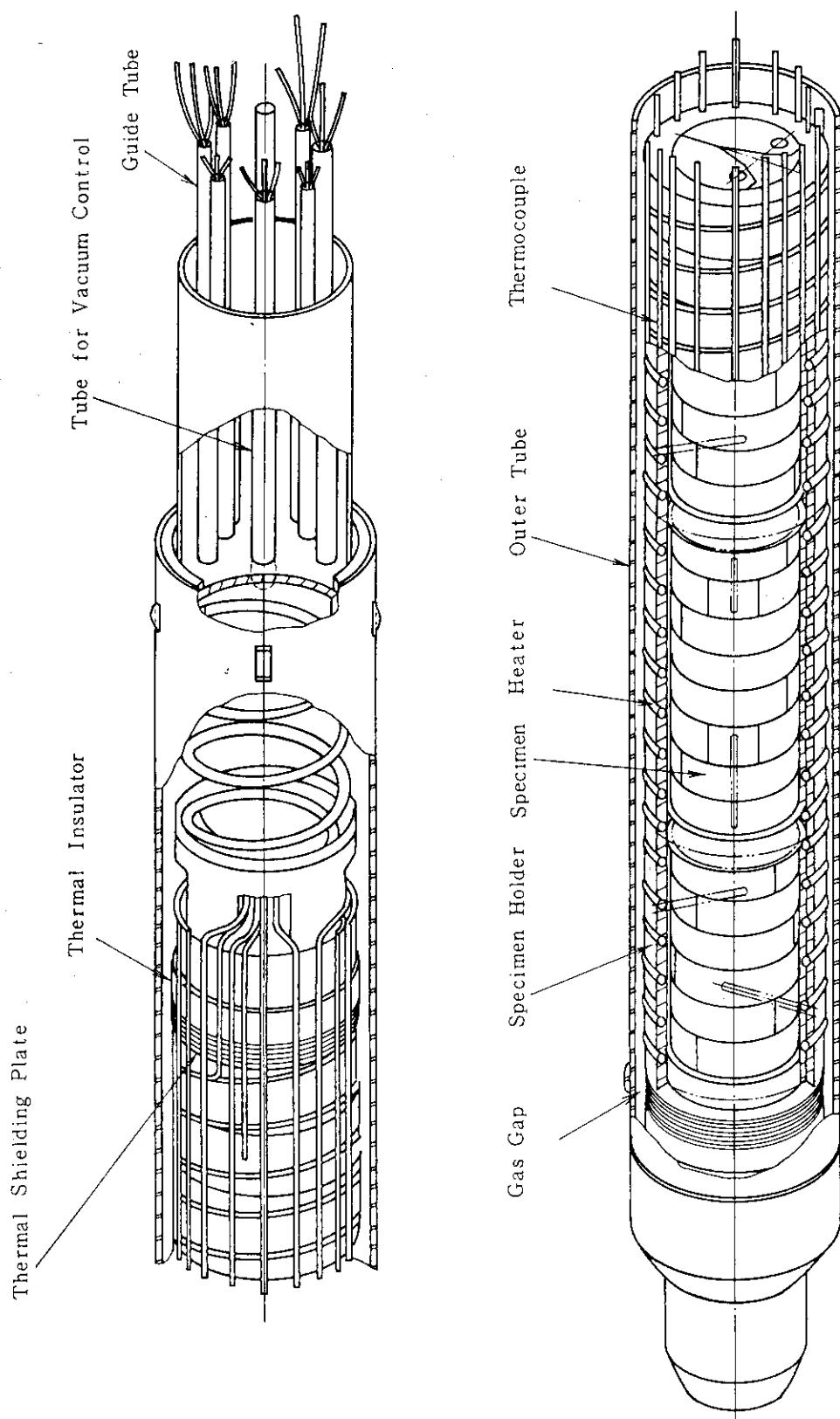


Fig. 1.2 Perspective View of Capsule
(Disk-Shaped Compact Specimen)

2. 基本設計手順

2.1 使用材料の選定

この型式のキャプセルの主要構成材および部品は、試料、試料ホルダー、ヒーター、外筒および保護管である。試料は、照射計画により材質は決まっている。外筒は、強度および原子炉冷却水との両立性の観点からステンレス鋼が用いられる。また、保護管も外筒に溶接により接合されることおよび原子炉圧力容器を貫通することから、ステンレス鋼が用いられる。この結果、この型式のキャプセルの設計上、試料ホルダーの材質を何にするかだけが、主要な材料選択となる。

ホルダー材質の選定は、構造より熱設計に関係した側面が大きい。ホルダーの機能の一つは、照射試料をキャプセル内の特定位置に拘束し、試料に発生した熱を外筒側へ流出させることにある。しかし、ガンマ加熱によりホルダー内に発生する温度差をも、照射試料の温度を目標温度に到達させるため積極的に利用する。ホルダー外側に取り付けるヒーターの主目的は、試料の照射目標温度への微調整である。

ホルダー材質は、試料の照射条件（照射目標温度、キャプセルの炉心装荷位置）およびその材料のガンマ発熱率と熱伝導率を考慮した熱設計の観点から選定される。今まで、設計実績のある大部分の材質は、アルミニウム系（A 1050）になっている。これは、試料が原子炉圧力容器用鋼材の鉄鋼系で、ガンマ加熱率が2 W/g 前後で、目標照射温度が 290 ± 10 °Cと低いことから選ばれている。アルミニウム系ホルダーの場合、その融点から制約され、経験的には試料の照射目標温度500 °Cが限界となる。通常、アルミニウム系ホルダーは試料の照射目標温度400 °C以下の照射を利用している。

試料の目標照射温度がこれより高い場合には、アルミニウムより密度が高くガンマ加熱率が大きい鉄鋼系の材質とすることになる。さらに、試料の目標照射温度が高い場合には、ホルダー材としてガンマ加熱率が大きいモリブデンの利用も考えられる。ただし、試料の重量が大きい場合は、試料自体の発熱が大きくなるため、一概には断定できないが、この型式のキャプセルを利用してこれまでの照射試料はステンレス鋼を含む原子炉圧力容器用鋼材の鉄鋼系が大部分であることと照射目標温度が400 °C以下であるため、使用経験の多いホルダー材はアルミニウムとなっている。

いずれにしても、ホルダー材質の選定は、後に述べる熱計算の結果に今までの設計経験を加味して判断することになる。

2.2 基本構造の設計

多段独立ヒータ制御キャプセルの基本構造設計において、決定すべき事項は、次の項目である。

- ① キャプセル外筒外径 と 試料格納の主要部長さ
- ② 試料格納の分割段数 と 热電対取付け個数

この型式のキャプセル設計において、計画要求試料個数は、必ずしも満足できない場合が発生

する。機器の設計一般として、顧客の要求を可能な限り満足するようにすることであるが、使用できるキャップセルの容積が限られるため制限せざるをえない場合が発生する。

試料格納の分割段数（ヒータ段数）決定上には制約がある。それら制約の制限値を満足するようには基本構造の設計を進める。この手順の流れの概略をFig. 2.1に示す。基本構造設計における主要な制限条件は、キャップセル外径寸法、ホルダー段数、ペネトレーション個数等である。

2.2.1 キャップセル外径寸法

この型式のキャップセルとして、外径寸法上に特に制約はない。外筒外径は、32 mmから65 mmまで段階的に選択可能である。試料形状と寸法からキャップセルへの装荷方法を計画すれば、必要なキャップセル外筒寸法が決定できる。計画要求試料個数については、必ずしも満足できない場合が発生する。すなわち、大きい外筒を選定しても、要求試料個数の装荷が不可能ならば、収容可能な試料個数に試料個数の変更を行う必要がある。

(1) キャップセル外筒外径

多段独立ヒータ制御型キャップセルとして、使用経験のあるキャップセル外筒寸法は、 $\phi 40$, $\phi 60$ mmである。すなわち、小型の試料、個数が少ない等の場合は、 $\phi 40$ mmを使用する。J M T Rにおいては、一般的に $\phi 40$ mmの外径のキャップセルの方が、照射試験の自由度、柔軟性が高い。

(2) キャップセル長さ

試料の照射試験に利用できるキャップセル主要部の長さは、原子炉炉心有効長までに制約される。J M T Rの場合、この長さは、約750 mmである。

2.2.2 試料格納の分割段数とヒータ段数

第1章で述べたように、このキャップセルは同一試料について、許される温度範囲内で同一温度で試料を照射することが望ましい。一方、炉心の出力は、有効長さ間で軸方向に分布を持つ。軸方向出力分布は、一般に上、下端で出力が低く、中央部で高い。キャップセル内部構造が軸方向に同一形状、寸法とすれば、その中に含まれる試料の温度はガンマ加熱により中央部程高くなる。

軸方向の全範囲に渡った試料の同一照射温度の達成を図る手段の一つとして、外筒内面と試料ホルダー間のギャップ寸法の違いに基づく熱伝達率の変化によって発生する温度差を利用する。ギャップ寸法を軸方向出力分布に逆比例するように連続的に変化させうるならばよいが、これを実現するように製作することは技術上困難である。許される範囲内で、軸方向にいくつかに分割し、先の軸方向出力分布と逆の分布となるように区分的に近似する。

キャップセル内の試料格納の分割段数およびヒータ段数の決定に影響する主要な制限事項あるいは要因は、次の通りである。

(1) ヒータの長さからの各段の分割高さ制限

使用可能なヒータの長さには技術上の制限があり、あまり長くは取れない。このことから、取り得る各段の最大高さが制限される。現在までの実績のある高さは、約160 mmまでである。各段にはヒータを取付けるが、分割した各段のヒータの区切りには、断熱材を使用し遮蔽する。したがって、その厚さも含んで考慮しておくことが必要である。断熱材の目的は各

段の間の軸方向の熱の移動を防止することである。

(2) 炉心有効長よりの制約

当然のことながら、各段の高さの合計は、炉心有効長（約750mm）以内でなければならぬ。

(3) Penetrationの個数上の制約

この型式のキャップセルは、真空制御装置への接続のための管（ $\phi 5\text{ mm}$ 、ステンレス鋼製）、各段のヒーターシース（各段に2本）と試料温度測定用熱電対シースを必要とする。熱電対取付け個数の原則は、少なくとも各段に一対とすることである。

試料を含むキャップセル主要部と保護管部は、気密遮断する。この理由は、試料を含むキャップセル主要部内の気体を排氣し、昇温するためである。このため、ヒーターシース、熱電対シース等は、遮断部（通常、キャップセル上部端栓）を通さなければならない。遮断部（Penetration板）には、貫通孔（Penetration）を設けることになる。Penetrationには、上記の理由のため、気密性を保持するシールを必要とする。このPenetrationを設計するため、実際のケーブル等の断面積より大きな面積を必要とする。この結果、キャップセル外径は決まっていることから、Penetration個数には制限が生じる。

(4) 保護管からの制約

ヒータ、熱電対を含む計測用ケーブル、管は、外筒上部に溶接された保護管を通して炉心外の制御装置に接続される。使用可能な保護管の内径寸法は、22mmあるいは31mmである。上記のケーブル等はすべて保護管内を通せる数に制限される。

2.2.3 基本構造決定手順

(1) キャップセル基本構造決定の各段階は、次のようになる。

第1段階は、照射試料の形状・外径寸法から一体のキャップセルに装荷できる試料個数の決定である。

第2段階は、軸方向に分割する段数を仮定し、各段への割付け試料個数を計画する。この際、制限となる事項は、分割した各段の高さが、実現可能かと言うことである。また、各段の合計高さは原子炉炉心有効長以内でなければならない。

第3段階は、熱電対個数の決定である。この決定には、ヒータ、熱電対に必要なPenetration個数が設計可能かが関係する。また、これ等ヒータ、熱電対の引出しケーブルが保護管内に収容できるか検討しなければならない。

これ等の選定や決定には、この型式のキャップセルの現在までの設計・製作実例が参考になる。設計、製作されたキャップセルの外筒外径、分割段数、熱電対個数等は、付録の要目表に示す通りである。

(2) 上記の設計の流れは、概括的なことであり、次に述べる熱設計や詳細設計の結果によっては、修正を加えることが必要になることも発生する。熱設計や詳細設計から、この基本設計にフィード・バックして来る主要な事項は次のようなことである。

(a) 第2段階で、各段内の試料個数を決定したが、熱設計において試料を格納する試料ホールダーの径方向内試料配置計画から、試料個数の加不足が出てくるならば、修正を必要

とする。

(b) 分割した各段の高さの実現可能性として、一個のヒータで取り得るヒータ容量からホルダー高さの調整を必要とする。

逆に、この基本構造設計において、最初から、これ等のこととに多少の考慮を払えば手間取らずに済ますことができる。

2.3 热設計における試料等の温度評価式

試料温度に関し、その最高温度等が設計上必要となる。この型式のキャップセルは試料を円柱形のホルダーに納める。ホルダーへの試料の挿入に関する代表的な例をFig. 2.2に示す。図に示すように挿入方法として、(a)キャップセル中心に試料を装荷する場合と、(b)キャップセル中心に試料を装荷できない場合に分かれる。

2.3.1 キャップセル中心に試料を装荷する場合

(1) キャップセル中心に試料を装荷でき、かつ試料の挿入断面が円形の場合は、キャップセル中心軸対称が成立するので、最高温度等を求めるることは困難ではない。この場合、最高温度は試料中心であり、試料内最高（中心）温度は次式により計算可能である。

$$\begin{aligned} T_s(0) &= T_{hs} + \frac{R_o}{2k_h} \cdot (q''_o - q''_i) \\ &- \frac{R_s}{2k_h} \cdot q''_a \cdot \ln(R_a/R_o)^2 + \alpha_s \cdot q''_s + \frac{R_s}{2k_s} \cdot q''_s \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$$q''_o = \frac{H}{2\pi R_o}, \quad q''_i = \frac{\pi R_a^2 \cdot q''_h}{2\pi R_o},$$

$$q''_a = \frac{P - \pi R_a^2 \cdot q''_h}{2\pi R_o}, \quad q''_s = \frac{P}{2\pi R_s},$$

$$\alpha_s = 1/h_s$$

とする。なお、ホルダー内部の熱量から発生するホルダー表面における熱流束は

$$q''_{av} = q''_o + q''_a$$

である。各記号は、

T_{hs} : ホルダー外表面（平均）温度

R_o : ホルダー外半径,

R_a : 試料挿入孔（ホルダーの中心孔）半径,

R_s : 試料半径,

k_h : ホルダー熱伝導率, k_s : 試料の熱伝導率,
 q''_h : ホルダーの出力密度, q''_s : 試料の出力密度,
 H : 中心孔が無い場合のホルダーの線出力密度
 (単位軸方向当たりの出力 = $\pi R_o^2 q''_h$),
 P : 試料の線出力密度
 (単位軸方向当たりの出力 = $\pi R_s^2 q''_s$),
 h_s : 試料表面における(ホルダーとの間隙)熱伝達率

である。

上式の右辺第2項は、ホルダー内の自己発熱により発生する温度差である。第4項は試料表面でのギャップによる温度差、第5項は試料領域における温度差を表している。

(2) 試料の断面形状が四角形 ($2c_s \times 2c_s$, $2c_s$: 四角形試料の差し渡し径とする) 等の場合、試料およびホルダー内の温度分布は軸対称にならない。しかし、試料中心温度(最高温度)のみを評価するのであれば、先の式(1)で近似可能である。すなわち、設計上の温度を評価するのであれば、式(1)において

$$R_s = c_s, \quad R_a = c$$

として計算すればよい。ここに c はホルダー内の試料挿入孔の寸法(四角形: $2c \times 2c$)。これは Fig. 2.2 (a)-2 に示すような微小角(θ)部分を考えそこに中心軸対称温度分布を適用した時の分布に等しい。ただし、

$$q''_a = \frac{P - c^2 \cdot q''_h}{2\pi R_o}, \quad q''_s = \frac{P}{2c_s},$$

$$P : \text{試料の線出力密度} \quad (\text{単位軸方向当たりの出力の } 1/4 = c_s^2 q''_s)$$

に置き換える。

挿入試料の断面形状が長方形 ($2a_s \times 2b_s$) 等の場合は、それぞれ長軸方向、短軸方向に上記と同様な計算を行い、conservative になる温度を採用すれば良かろう。通常の場合は、

$$c_s = (a_s + b_s)/2$$

として評価可能と考えられる。

(3) ホルダー表面(平均) 温度 T_{hs} は次のように表される。

$$T_{hs} = T_w + \alpha q''_{av,p} + \frac{R_o}{2k_{cc}} \cdot q''_c - \frac{R_o}{2k_{cc}} \cdot q''_d \cdot \ln(R_{ci}/R_{co})^2 \quad (2)$$

ここに、

$$\alpha = 1/h_g + (R_o/k_{cc}) \ln(R_{co}/R_{ci}) + (R_o/R_{co})(1/h_f)$$

$$q''_{av,p} = q''_{av} + (\Delta E / 2\pi R_o),$$

$$q''_c = \frac{\pi (R_{co}^2 - R_{ci}^2) q''_{cc}}{2\pi R_o}, \quad q''_d = \frac{\pi R_{ci}^2 \cdot q''_{cc}}{2\pi R_o},$$

である。各記号は

- | | | | |
|------------|---|----------|----------|
| R_{ci} | : 外筒内半径, | R_{co} | : 外筒外半径, |
| k_{cc} | : 外筒熱伝導率 | | |
| q''_{cc} | : キャップセル外筒の出力密度, | | |
| ΔE | : ホルダー外表面に装着したヒーターにより投入する線出力密度, (厚さを無視した膜出力として取り扱う) | | |
| h_g | : ホルダー外表面(外筒内面との間隙)における熱伝達率 | | |
| h_f | : 外筒外表面における熱伝達率 | | |

とする。

上記の、式(2)は外筒の自己発熱(τ 加熱)による温度上昇を考慮した。外筒の内側に内筒(反射筒)等を設けた場合にはその自己発熱による温度上昇、キャップ層が増えることによる温度上昇をも追加しなければならない。この型式のキャップセルの如く主として材料照射試験用いるものでは τ 加熱による試料の出力密度と外筒材の出力密度がほぼ等しいので、発生する温度上昇を考慮している。ホルダー外面から外筒外表面(原子炉一次冷却水)への熱流($q_{av,p}$)に比較し、外筒等の発熱量が無視し得る程度なら、式(2)右辺の第3項、第4項は無視し得る。

2.3.2 キャップセル中心に試料を装荷できない場合

- (1) 引張り試験片等が複数個の場合、キャップセル中心に試料を装荷せず、試料ホルダー内の試料はFig. 2.2(b)に示すような配置を採用する。すなわち、ホルダー内の半径 a の同心円上に m 個の試料挿入孔を設け試料を挿入する。この場合、温度分布は中心軸対称とならない。多孔型ホルダー内の温度分布は、次式で表される^{1) 2)}。

$$\begin{aligned}
 T(r, \theta) = & T_{hs} \\
 & + 2\alpha m q''_a \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(a/R_o)}{1+m j (\alpha k/R_o)} (r/R_o)^{mj} \cos(mj\theta) \\
 & - \frac{R_o}{2k_h} q''_a \times \\
 & \ln \frac{(r/R_o)^{2m} + (a/R_o)^{2m} - 2(r/R_o)^m (a/R_o)^m \cos(m\theta)}{1 + (r/R_o)^{2m} (a/R_o)^{2m} - 2(r/R_o)^m (a/R_o)^m \cos(m\theta)} \\
 & - \frac{R_o}{2k_h} q''_i \ln(r/R_o)^2 + \frac{R_o}{2k_h} q''_o \{ 1 - (r/R_o)^2 \} \quad (3)
 \end{aligned}$$

ここに、ホルダー表面平均温度 T_{hs} は式(2)に従う。また、

$$q''_o = \frac{H}{2\pi R_o},$$

$$q_a'' = \frac{P - \pi R_a^2 \cdot q_h''}{2\pi R_o} , \quad q_i'' = \frac{Q - \pi R_i^2 \cdot q_h''}{2\pi R_o}$$

とする。ホルダー内部の熱発生によるホルダー表面平均熱流束は

$$q_{av}'' = q_o'' + q_i'' + mq_a''$$

である。また、記号は、

Q : 中心孔内の発熱体の線出力密度,

R_i : ホルダーの中心孔半径,

a : 同心円上に配置された試料挿入孔中心とホルダー中心との距離

とする。その他の記号は先に第2.3.1項で記述したところに従う。

上式の右辺の第2項は多孔によるホルダー外表面に発生する温度変化に基づいている、第3項と第4項は中心孔と多孔の領域がホルダー内で特異点であることから出てきた表示である、第5項はホルダーが発熱体によることを表している。

(2) ホルダー内の半径 (r) 方向熱流束は

$$\begin{aligned} q''(r, \theta) &= (r/R_o) + (R_o/r) q''_i + mq_a'' \times \\ &\frac{(r/R_o)^{2m-1} + (a/R_o)^m (r/R_o)^{m-1} \cos(m\theta)}{(r/R_o)^{2m} + (a/R_o)^{2m} - 2(r/R_o)^m (a/R_o)^m \cos(m\theta)} \\ &- \frac{(a/R_o)^{2m} (r/R_o)^{2m-1} - (a/R_o)^m (r/R_o)^{m-1} \cos(m\theta)}{1 + (a/R_o)^{2m} (r/R_o)^{2m} - 2(a/R_o)^m (r/R_o)^m \cos(m\theta)} \\ &+ 2m(\alpha k/R_o) q_a'' \sum_{j=1}^{\infty} \frac{mj(a/R_o)}{1 + mj(\alpha k/R_o)} (r/R_o)^{mj-1} \cos(mj\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

(3) 多孔内に挿入の試料が中実円柱形(半径: R_s)とすれば、文献(2)等より試料内の温度分布は次式で近似できる。

$$\begin{aligned} T_s(\rho, \phi) &= \frac{R_s}{2k_s} q''_s \left\{ 1 - \left(\frac{\rho}{R_s} \right)^2 \right\} - \frac{R_a \Delta q''}{k_s} \left(\frac{\rho}{R_s} \right) \cos(\phi) \\ &+ \alpha_s q''_s + T_{av} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、

$$\Delta q'' = \{ q''(a+R_a, 0) q''(a-R_a, 0) \} / 2$$

$$T_{av} = \{ T(a+R_a, 0) + T(a-R_a, 0) \} / 2$$

とする。 (ρ, ϕ) は試料孔中心を原点とした極座標である。 $q''(a-R_a, 0), T(a+R_a, 0)$ 等はそれぞれ上の式(4), 式(3)から求める。

$\Delta q''$ は試料側からの角度 $\phi=0$ と π における熱流束差である。 $\phi=\pi$ の熱流束はホルダー側からは符号が逆になる。

(4) ホルダー内温度分布の特性

Fig. 2.2 (b)に示す如き多孔ホルダーに試料を装荷したときのホルダー内部の温度分布の解析的表示は式(3)の通りである。式(3)の温度分布表示式から導かれる特性は、この型式のキャップセルの熱設計に関し多くの示唆を与える。

(a) 中心孔の温度への影響等

中心孔と中心孔内の発熱率 Q (W/cm)は、次のような効果を持っている。いま、ホルダー内の試料挿入孔内の試料の発熱率 P (W/cm)が $\pi R_a^2 q''' (=P_0)$ に等しいと仮定すると(ただし、 R_a : 試料挿入孔半径, q''' : ホルダー発熱密度), ホルダー内の温度分布は、中心孔内に発熱体(発熱率 Q)をもつ発熱円筒体の温度分布に等しくなる。

さらに、 Q が $\pi R_i^2 q''' (=Q_0)$ の場合、ホルダー内の温度分布は中実円柱体の温度分布に等しくなり、中心孔の存在の有無は関係しない。

$Q=0$ の場合、右辺第4項が負となることから、温度は中心孔付近において低下する。

試料温度を高くするため中心孔に発熱体を挿入するような場合、 $Q>Q_0$ となるような発熱体を中心孔に挿入しなければ意味がない。 $Q<Q_0$ となるようならばむしろ中心孔を設けない方が良い。

試料温度を全体として低くしたいならば、中空ホルダーとし中心孔を設けた方がよい。中心孔を設けた方が中心孔に近い側の温度が低下し試料孔周りのホルダー温度差が小さくなり、温度の平坦化が図れる。

(b) 試料挿入孔の温度への影響

試料の発熱率 P (W/cm)が P_0 に等しいと、試料周りのホルダーの温度分布は中心孔をもつ発熱円筒体(あるいは発熱中実円柱体)の温度分布に等しい。

したがって、試料とホルダー材がほぼ同一材ならガンマ加熱率が等しくなるため、ホルダー内の温度分布は通常の中心軸対称の発熱円筒体(あるいは発熱中実円柱体)の分布に近くなる。

2.4 热設計計算手段とモデル化

2.4.1 热設計計算手段

この型式のキャップセルは、先にその構造でも述べたように試料ホルダーとキャップセル外筒内面間のギャップに発生する温度差を積極的に利用する。そのため、設計時かなり正確な試料等の温度評価を必要とする。基礎となる温度評価式は前節に記載の通りである。しかし、先の評価式にも表れるように温度評価には、ホルダー外面と外筒内面の間隙、ホルダーと試料表面の間隙におけるギャップ熱伝達率が必要である。ギャップをはさむ両構造物は、温度上昇により熱膨張する。ギャップ寸法の小さいものでは、熱膨張はそのギャップ寸法に大きな影響を持つ。そして、ギャ

ップ熱伝達率はギャップ寸法に大きく依存している。このような場合、温度推定計算を正確に行うには、熱膨脹によるギャップ熱伝達率への効果を考慮した“くりかえし計算”による収束計算を必要とする。そのため、キャップセルの熱設計には、計算機プログラムを利用した方が便利である。しかし、この型式のキャップセルの熱計算を目的に作成された単独のプログラムが未整備なことから、この型式のキャップセルの設計に際してもしばしば一般のキャップセルの熱設計を目的に編集された計算機プログラムGENGTC³⁾を利用する場合が多い。GENGTCは、二次元軸対称の複合円筒体を計算対象とし、その内部の温度分布を計算する。

2.4.2 热計算のためにGENGTCを利用する場合のモデル化

(1) 試料の装荷法に関し、半径方向、軸方向に形状の変わる試料は可能な限り、二次元軸対称となるようにスペーサ等用いvoidとなる空間を埋める手段をとる。すなわち、第3.2節に述べるように、試料ホルダー内に装荷する試料とホルダー試料装荷孔間に生じるボイドは可能な限り同一試料材で埋められ、長手方向に同一形状となるようとする。この理由は、装荷時voidとなる空間が生じることに起因し、引越される温度分布の乱れを防止し、試料温度の一様性を保持することと、設計時の温度推定計算の予測性を向上させることにある。

前節で述べたように照射試料がキャップセルの中心に装荷できるか、中心より外れるかでの温度評価式が異なるために熱計算の手法も異なる。

(a) キャップセル中心に試料を装荷する場合

キャップセル中心に試料を装荷できる試料ホルダーへの装荷断面が円形の破壊非性試験片等は、温度分布に関し中心軸対称性がほぼ成立する。しかし、試料の断面形状が四角形のシャルピー試験片等の場合は、GENGTCにおける中心軸対称の計算仮定は完全に成立せず、試料形状、寸法等を計算上の寸法等に置き換える（モデル化と言う）中心軸対称とする。

このモデル化に採用した例の一つをFig. 2.3に示す。形状が四角形等のモデル化として、

- ① 試料等の周長を変えずに変換する。
- ② 試料等の断面積は変えず、等価な円環に置換する

の二つの方法が考えられる。しかし、前節の温度評価式は試料表面での熱流束がモデル化前後で変化しないようにする方法がより良い温度近似になることを示唆する。四角形試料等をキャップセル中心に装荷した温度計算にGENGTCを適用する場合、上記①の「試料等の周長を変えずに変換する」の方法を採用する。ただし、この適用に際しては、試料断面積が変わることにより発熱量の相違が発生するので、変換によっても熱流束が一定になるよう発熱密度を補正することを必要とする。ただ、このような変換を行えば中心と表面の温度差は、②の等断面積変換と等しくなる。しかし、表面におけるギャップの温度差はより平均的な熱流束を使用するため実際に近づく。このことから①の方法による変換を通常採用している。

(b) キャップセル中心に試料を装荷できない場合

複数個の試料をホルダーに装荷する等の場合、キャップセル中心に試料を装荷できることが起こる。この種の試料配置を必要とする試料は、棒状の引張り試験片である。簡単な熱計算が可能な軸対称性が成立するように、試料を試料ホルダー中心に配置すれば計算上の困難性はないが、その場合は照射試料個数は1個に限られる。そこで、ホルダー内の同一半径上

に試料挿入孔を複数個設け、これに試料を挿入する方法を通常採用している。この例はFig. 2.2(b)の通りである。

キャップセルの中心に試料を装荷できない場合、試料ホルダー内の試料配置は温度分布に関し中心軸対称とならない。中心軸対称の温度分布を計算することを基本にしているGENGTCは原理的には適用できない。しかし、プログラムGENGTCを上手く利用すれば、ホルダー外面と外筒内面の間隙は中心軸対称であり、この部分での平均のギャップ熱伝達率を推定することは可能である。そこで、試料をキャップセル中心に装荷しない場合でもプログラムGENGTCをこのキャップセルの熱計算に利用することがある。その場合には、試料などを中心軸対称で計算可能にモデル化することが必要となる。中心軸対称にモデル化した結果は、いずれにしても試料等が円環状になる。試料の温度は試料表面でのギャップにおける温度差によって最も大きく影響されるが、多孔型ホルダー内の温度分布は本来中心軸対称ではないので、試料表面熱流束をモデル化前後で一定に変換することは困難である。そのため、設計者によって様々な手法を採っているが、通常「試料等を含めキャップセル全体の発熱率をえずくに変換する」ことをモデル化の基本としている。このモデル化の例の一つは第5.1節に記述する。

(2) 試料をキャップセル中心に装荷しても、試料のvoidを完全にスペーサで埋めることができない場合などがある。また、試料を多孔型ホルダーに装荷したとき、仮に試料断面積を等しくなるよう円環状にモデル化しても、試料周りのギャップ断面積まで等しく置き直すことは、ギャップ熱伝達率を考えると困難である。

モデル化前後で、モデル化された試料および試料ホルダー部分の断面積が実際の断面積より変化した場合等は、実際の断面積における発熱率とモデル化された断面積における発熱率が等しくなるように出力密度を修正^{*1}し、キャップセル全体の線出力密度が実際の試料配置の場合と変化しないようにして、熱計算を行っている。

2.5 热設計手順

この型式のキャップセルの热設計の主要な主题は、試料ホルダー外径と外筒内面間のギャップ寸法とヒータ出力の决定である。

(1) 热設計の目的は、試料照射温度が目標照射温度に達するようにすることである。この目的のため、热設計は、キャップセル内の分割の各段について、次の3段階に分けて行う。第一段階の计算の目的是ギャップ寸法の决定、第二段階の目的是必要ヒータ出力の决定である。第三段階の目的是热设计全体のバランスの確認である。さらに、热设计の目標の一つとして、可能な限り必要ヒータ負荷を小さくすることもあり、第三段階の计算はこれの達成度の確認となる。

(i) 第一段階の计算は、计算条件として、

- ・原子炉が定格出力に達したとし、
- ・キャップセル内部がヘリウム・ダンプ状態^{*2}
- ・ヒータ出力 0

を仮定する。この条件で、試料温度を計算する。

計算された試料温度が、照射目標温度を一定温度だけ下回ることを確認する。この場合の一定温度として、一般には約100°C程度を使用している。この条件（試料照射目標温度-100°C）が満足されなければ、ギャップ寸法の調整を行う。

(ii) 第二段階の計算は、計算条件として、

- ・原子炉の出力は定格出力で、
- ・キャップセル内部がヘリウム・ダンプ状態

を仮定する。試料温度を目標温度に達するに必要なヒータの線出力を算出する。計算は、ヘリウム・ダンプ状態を仮定した条件なのでギャップにおける熱伝達率が大きく、算出されたヒータ線出力は最低必要線出力密度である。

(iii) 第三段階の計算は、計算条件として、

- ・原子炉の出力は定格出力で、
- ・キャップセル内部のヘリウムガスがキャップセルから排気され（真空制御状態）、
- ・ヒータ出力0の状態

を仮定する。この条件で、試料温度を計算する。

この形式のキャップセルでは、目標温度までの昇温はヒータだけで行えることを原則として設計する。従って、真空温度制御装置による昇温は、ヒータによる昇温の補助的役目である。そこで、第三段階の計算は、達成度の確認程度であり設計においてはあまり重点を置いていない。

以上の各段階における設計上の温度の選定と決定、その段階で決定すべきパラメータをTable 2.1にまとめて示す。計算上の判定温度は、これまで実施してきた多くの設計と実測の経験事例から選定された温度であるが、キャップセルを装荷する照射孔での予想発热量によってはその選定温度を考慮する必要がある。

(2) 第一段階の重点は、試料の発熱のみで試料温度がどの程度昇温するかを予測することである。この計算によりキャップセル外筒と試料ホルダー間のギャップ寸法を推定する。この場合の試料温度は、目標温度より少し下回るように設定し、ギャップ寸法を決定する。この結果同一形状の試料においては、一般的にガンマ線強度の低い軸方向の上、下端部分ではギャップ寸法が大きくなることから、ギャップ寸法は軸方向に、炉心出力分布と逆向きの寸法分布となる。

設計上注意すべき点は、ギャップ寸法が、例えば、1mm（片側ギャップ）以上となるような計算結果が得られた場合である。かなり大き目なギャップ寸法は、現実のキャップセルで計算通りの温度とならない。片側で1mmを越えるギャップ寸法は、計算予測のようなギャップ熱伝達率を与えない。すなわち、寸法の増大はギャップ熱伝達率の低下とならないことである。このような場合、外筒内にもう一層反射筒（内筒）を設ける等の手段が考えられる。

* 1 GENGTCの場合、出力密度 $q^{\#}$ (W/cm³) は、 $q^{\#} = r^{\#} \rho$ ($r^{\#}$: 単位重量当たりの発熱率 (W/g), ρ : 密度 (g/cm³)) で与えるので、修正手段としては密度を修正することで行っている。

* 2 ヘリウム・ダンプ状態： JMTRのキャップセルでは、キャップセル内には大気圧のヘリウムが満たされた状態をヘリウム・ダンプ状態と称している。

- (3) 第2段階の設計計算において、計算条件としてヘリウム・ダンプ状態を仮定する。この理由は、真空制御状態に出来ない状態を想定し試料を目標温度にするに必要な設計上のヒータ最大出力を算出することと、真空制御状態とすることは試料温度上昇の補助手段と設計上考えることによる。
- (4) 第1、第3段階の設計計算において試料温度を目標温度より低く設定する理由は次による。
- ヒータは加熱側としてのみ作用し（出力は0以上）、吸熱作用があるものではないことから、試料温度が高くなり過ぎた時の試料温度の制御手段の喪失を防止すること。
 - 設計時には、JMTR運転中における出力変動を考慮せず平均的軸方向出力分布を使用する。しかし、JMTRの軸方向出力分布は、制御棒の位置変化に伴い変動を余儀無くされる。
- (5) ギャップ熱伝達率をギャップ内のガスの熱伝導のみによると考えれば、その表示は
- $$h_g = k_g / (\text{gap size}) \quad (6)$$
- となる。gap sizeは、半径（片側）ギャップ寸法で、例えばホルダー表面ならば外筒内半径とホルダー外半径の差 ($R_{ci} - R_o$) で与えられる。 k_g はギャップ空間の雰囲気ガスの熱伝導率である。この型式のキャップセルの場合ヘリウムガスである。
- キャップセル内のヘリウム・ダンプから排気状態におけるギャップ熱伝達率の評価を行うには、ヘリウムの低压排気状態時の熱伝導率を計算上必要とする。この計算においては、次の値を通常使用している。
- $$k = f \cdot \{ 1.43 \times 10^{-3} + 3.25 \times 10^{-6} T - 7.68 \times 10^{-10} T^2 \} \quad (7)$$
- ここで、 k_g ：熱伝導率 (W/cm²·°C)，T in °Cである。
- 上式において、右辺{}内の値は、ヘリウムの熱伝導率である。ファクターfは、通常f = 2/5としている。これは諸キャップセルの温度計算や排気状態における実測の比較等から経験的に得られた値である。
- ヘリウムの熱伝導率は、プログラムGENGTC組込みの値で、Fig. 2.4の如くになる。⁴⁾図中に森島らの編集による値も記入している。使用のヘリウム値は報告された一般のヘリウムの熱伝導率の値に等しい。
- 試料外表面等に必要なギャップ熱伝達も通常、式(6)で評価している。上記のヘリウムの熱伝導率を使用し、ギャップ寸法（片側）が、0.1 mm (100 μm) とすれば、ギャップ熱伝達率は、約 0.234 (W/cm²·°C) (= 410 Btu/ft²·h·°F) (at 300 °C評価) 程度となる。
- (6) 一体の同一ホルダーでも、ギャップ寸法を変えることができる。変更した箇所については熱計算を行う必要がある。このようなホルダーは、軸方向の出力分布の変動が急峻な上部あるいは下部である。

Table 2.1 Temperature Calculation and Determination of Design Parameter

Capsule Condition		Specimen Temp. (°C)	Determination of Design Parameter	Design Temp. / Objective Temp.
Atmosphere -in Capsule	Heater Output			Gap Size between Holder and Outer Tube
Helium Gas	OFF	(Objective Temp.) - 100		Specimen Region
	ON	Above Objective Temp.	Minimum Out Put of Heater	Rised in Temperature by Heater

The figure consists of two side-by-side graphs. Both graphs have a vertical axis labeled 'Temp.' and a horizontal axis labeled 'Temp.'. The left graph shows a flat line at a certain temperature level, with a shaded rectangular region below it labeled 'Specimen Region'. A dashed line extends from the top of this region to a horizontal line above, which is labeled 'Design Temp.' and 'Objective Temp.'. A gap between the specimen region and the outer tube is indicated by a double-headed arrow labeled '100'. The right graph shows a similar setup but with a shaded rectangular region in the middle labeled 'Rised in Temperature by Heater'. This region is bounded by a dashed line on top and a solid line on the bottom. The gap between the specimen region and the outer tube is also indicated by a double-headed arrow labeled '100'.

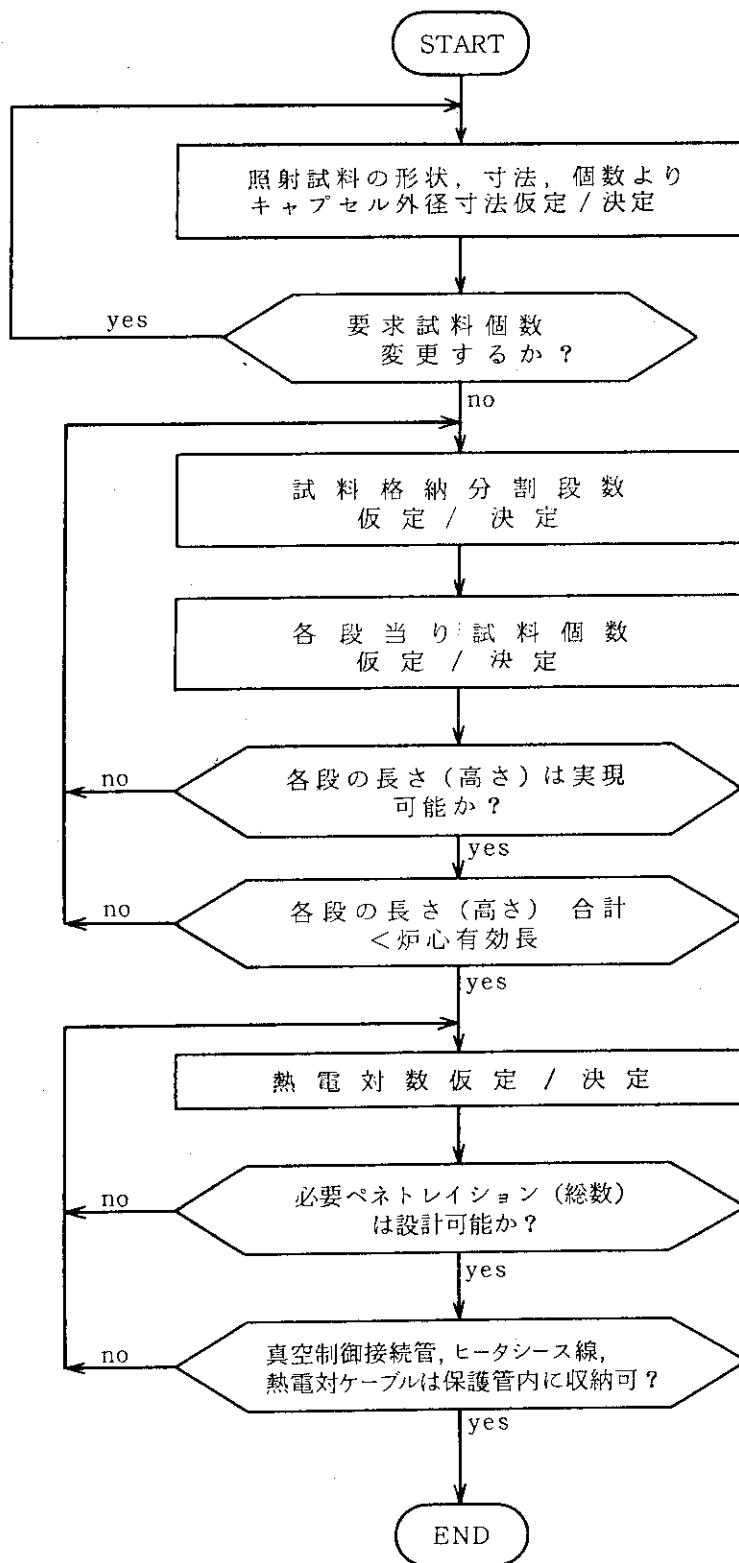


Fig. 2.1 Flow Chart of Basic Design for
Multi-stage Control Capsule

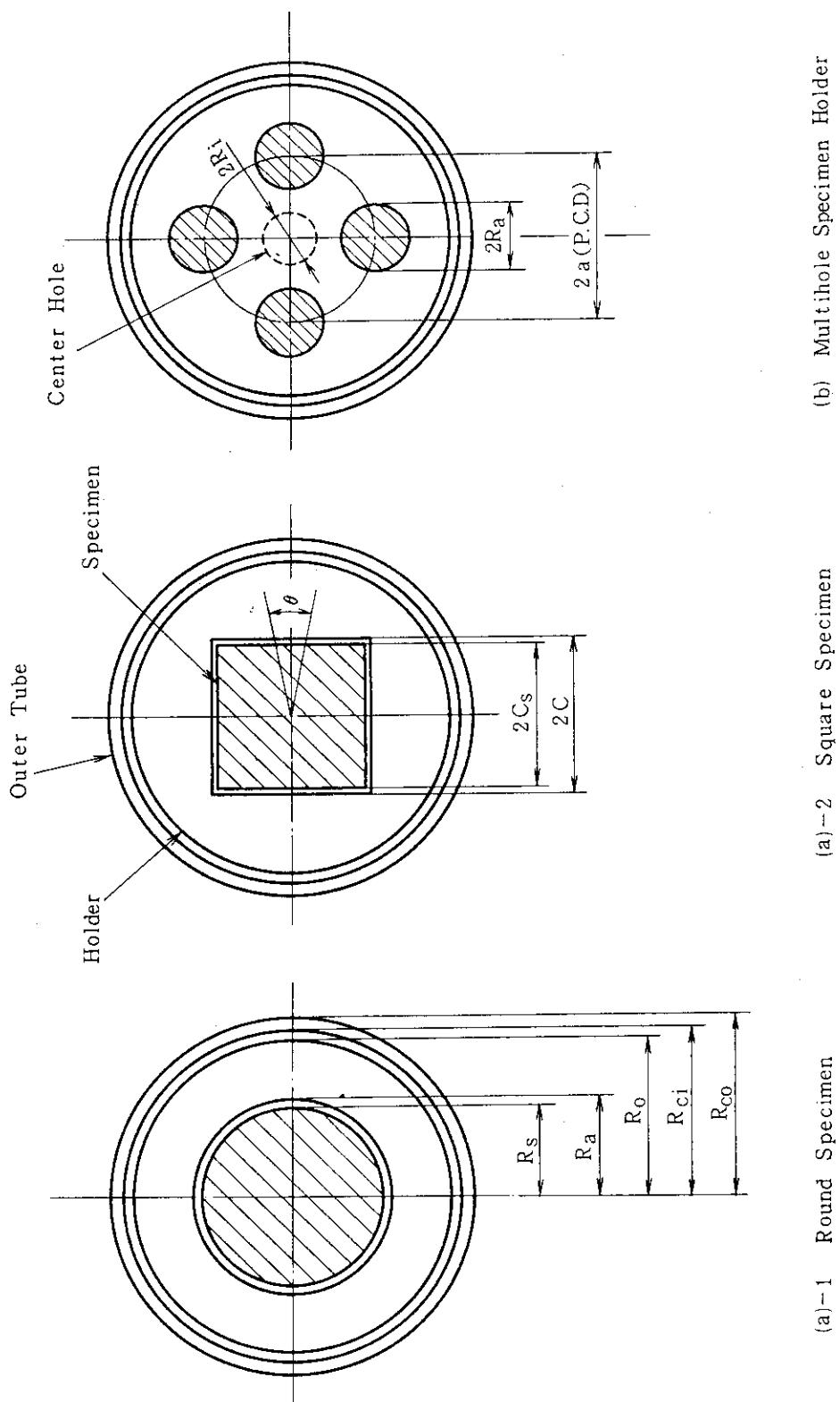


Fig. 2.2 Specimen Insertion Method

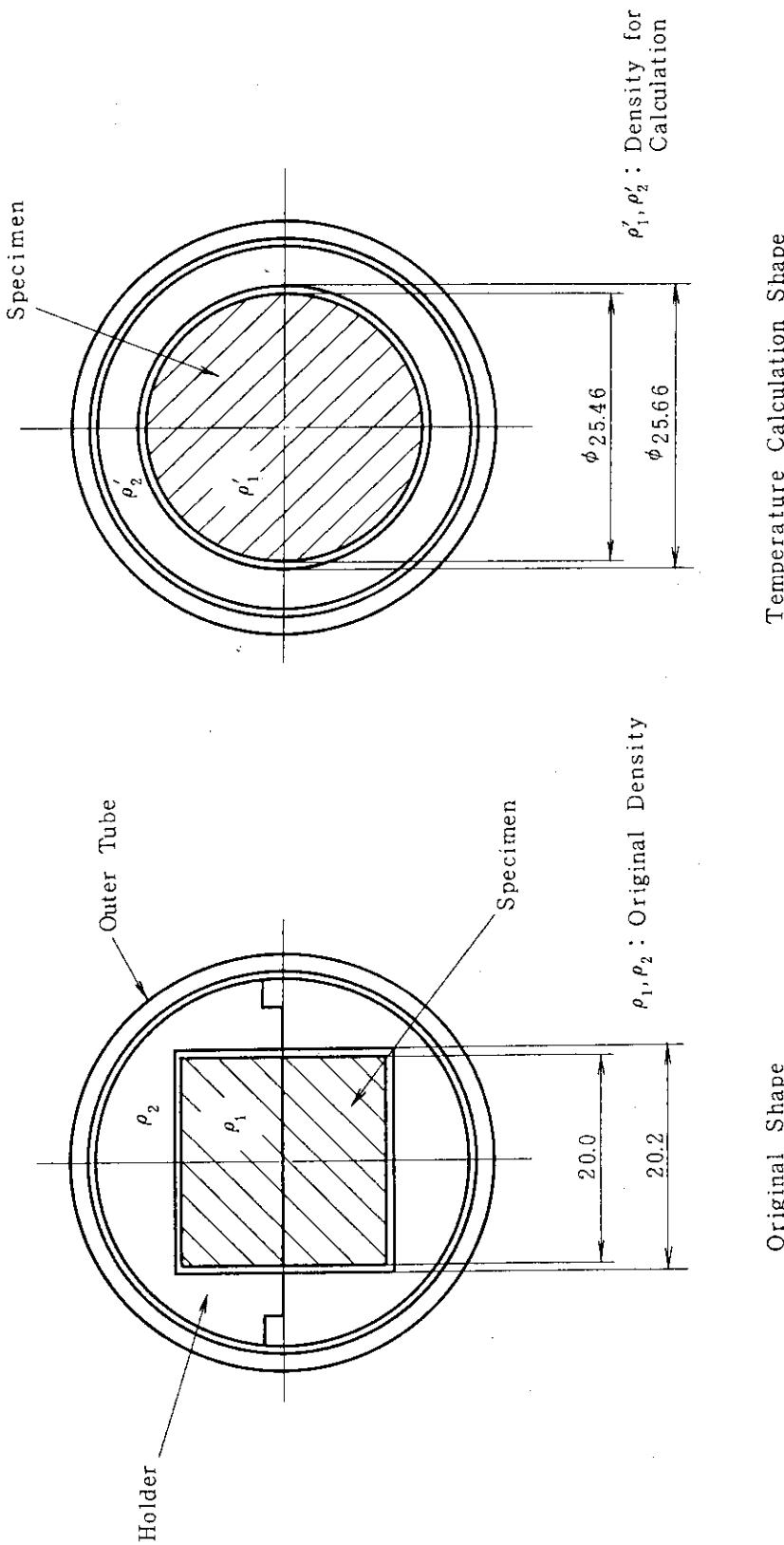


Fig. 2.3 Example of Deformation Method for Calculation

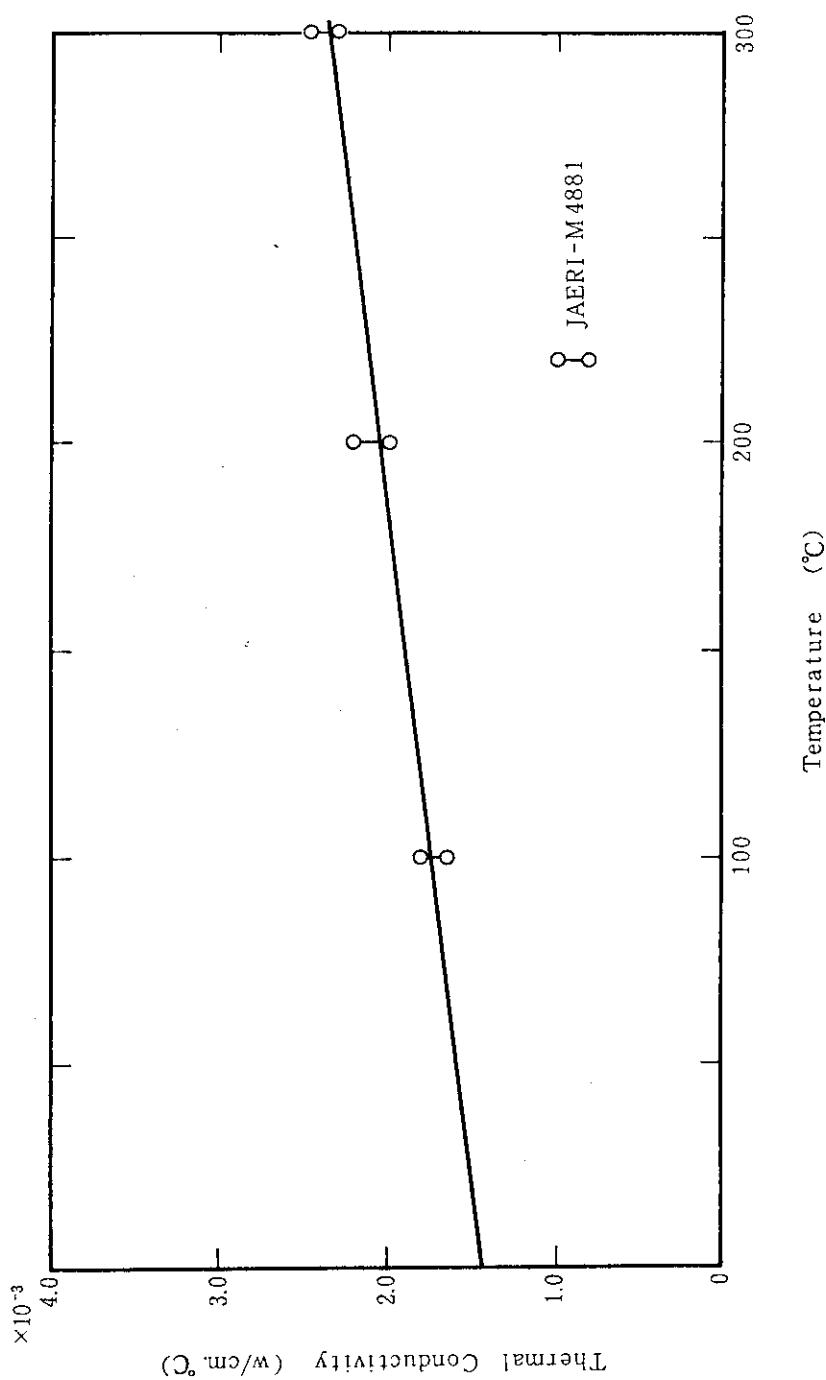


Fig. 2.4 Thermal Conductivity of Helium Gas

3. 詳細設計

3.1 主要構造部

この型式のキャップセルに使用してきたキャップセル外筒の径とその肉厚は、40mmで1.5mm, 60mmで2mmである。外圧として作用する原子炉一次冷却水圧に対して、この肉厚で十分であることは強度計算でも確認されている。また、JMTRのキャップセル標準仕様管を使用した実績は、特にトラブルを発生していない。しかし、この型式のキャップセルの外筒には、原子炉一次冷却水による外圧が作用する。外筒強度として、主として次の2点に関し注意した検討を必要とする。

(a) 外圧による限界挫屈圧力と応力

外圧が作用する管は、挫屈の限界圧力をもつ。また、微少な非円形性が発生応力に影響する。

(b) 端栓部局部応力

キャップセル外筒の如く内・外圧が作用し、その端が端栓等で固定された管の固定端には、固定されたことによる局部応力が発生する。

外圧作用時の管の挫屈、固定端の局部応力を含めた強度評価手法は、キャップセル外筒強度計算プログラム CAP STAR⁵⁾の解説書に記述されているので、そちらを参照されたい。

なお、JMTRキャップセルの限界圧力に関する実験を行った小森芳広らによれば、⁶⁾ JMTRキャップセル外筒標準仕様の寸法公差の管では、外圧が限界圧力の1/3以下ならば、応力に関する強度の不足は発生しない。簡単な強度評価としては、外圧が限界圧力の1/3以下で判定しても、挫屈に関し安全率3以上の強度を有している。

3.2 試料配置計画

この型式のキャップセルで照射を実施する照射用試料に関する照射温度の変動幅は、一般的に約20°C以内（鉄鋼の場合）が要求される。このような要求温度変動幅が小さい場合、照射試料は、後述するように形状、材質が同一になるようにし、一体の試料ホルダーに収まるように計画しなければならない。形状、材質が同一でない試料を計画のキャップセルに装荷すると、試料の発熱量が異なることから、要求温度変動幅を逸脱する可能性が大きくなる。また、経験的に一本のヒータで温度制御が、可能なホルダーの高さは約150mm程度であることから、試験片の長さは150mm以内に制限される。

試料の装荷方法に関し、半径方向、軸方向に形状の変わる試料は可能な限り、二次元軸対称となるようにスペーサ等を用い void となる空間を埋める手段をとる。この目的は、装荷時 void となる空間が生じることに起因し、引起される温度分布の乱れを防止し、試料温度の一様性を保持することにある。さらに、設計時の温度推定計算の予測性を良くすることになる。この実例を引張試験片について Fig. 3.1, 破壊靱性試験片について Fig. 3.2 に示す。棒状引張

試験片は、試験用平行部は試験片込み部の径と等しくなるように Fig. 3.1 に示すような“割型”を使用することが必要である。また、破壊靱性試験片の場合には、ノッチ部およびチャック部にスペーサーを使用する。スペーサー等は、試験片との密着性を良くするため、現物合せ加工が望ましい。

照射試験中の温度測定位置は、照射試料の試験部（棒状引張試験片の場合は、平行部）とすることが最良である。しかし、全ての照射試料が照射後試験に供されることから、照射後試験に影響がない部分に溝を設け熱電対を取り付ける。その場合には、例えば、引張試験片ならばその拘み部である。

3.3 各段におけるヒータ出力および線長の決定

(1) ヒータ発熱部は各ホルダー外表面に取り付けられる。取り付けはホルダーボス外表面に溝をコイル状に切りこれに巻き付ける方法による。各段のヒータがそれぞれ独立に制御可能なよう各段から引き出し線（非発熱部）が引き出される。ヒータの引き出し部はキャップセル主要部から引き出され保護管内で温度制御盤からのケーブルと接続される。接続は接続端子によっている。使用するヒータは引き出し部と発熱部が同径のシース・ヒータを用いている。ヒータに使用する供給電源は 220V の交流である。

ヒータの設計は使用するヒータ出力、その出力から必要な発熱部の長さ、線径を指定することである。ヒータ仕様の決定手順一つの例は、Fig. 3.3 のごとくになる。特に、線径の選択の要因として、a) キャップセルの内部構造やホルダー高さ、b) ヒータの発熱量の実現性等が影響する。

(2) 热設計計算によって算出された出力はヒータに要求される線出力密度 q'_c である。プログラム GENGT C を使用する場合は、この出力は線出力（単位 kW/cm）で得られる。したがって、試料ホルダーの軸方向分割計画で決めたホルダー実長（or 高さ）を H (cm) とすれば、このホルダー外面において必要なヒータ出力 E は

$$E = q'_c \cdot H \text{ (kW)}$$

となる。

(3) ヒータ発熱部必要長さの選定

必要ヒータ出力が定められたら、ヒータ発熱部長さの概略が求められる。一つの手法は、ヒータに要求される発熱量 Q (W) と許容実効電流 I (A) から、ヒータの必要全抵抗 R (Ω) は、 $E = I^2 R$ より、 $R = E/I^2$ (Ω) と推定される。ヒータの単位長さ当たりの電気抵抗値 r (Ω/cm) から、必要ヒータ長さ L は $L = R/r$ (cm) が決定できる。ここで、ヒータの単位長さ当たりの電気抵抗値 r (Ω/cm) は、ヒータ製造メーカの製品カタログ等によって知ることができる。ヒータ線の単位長さ当たりの取り得る出力を q'_w (W/cm) が与えられている時、必要なヒータ全長 L は、上記の必要出力 E に等しくなければならないことより、

$$E \text{ (W)} = q'_w \cdot L \quad \text{から,}$$

$$L \text{ (cm)} = Q/q'_w$$

と求まる。

(4) ヒータ線径の選定

この型式のキャップセルに使用実績のあるヒータ線径は、 $\phi 1.6\text{ mm}$ と $\phi 2\text{ mm}$ である。電源からのケーブルとヒータ・引き出し部は、キャップセル延長管の保護管内で接続端子を用いて結線する。電源は 220 V の交流であり、供給可能な電流は接続端子の許容値で決定される。ヒータの設計に際しては、ヒータ線径 $\phi 1.6\text{ mm}$ の場合 15 A 、 $\phi 2\text{ mm}$ の場合 20 A を制限値とし、使用電流はこの制限値以下に設定している。したがって、最大発熱量は、ヒータ線径 $\phi 1.6\text{ mm}$ の場合 3 kW 、 $\phi 2\text{ mm}$ の場合 4 kW となっている。

そのホルダー段に要求されるヒータ必要発熱量が、 3 kW 以下ならばヒータ線径 $\phi 1.6\text{ mm}$ を選定する。 3 kW を越えるならばヒータ線径 $\phi 2\text{ mm}$ を選定する。ヒータ線径 $\phi 2\text{ mm}$ を選定しても発熱量は 4 kW 以下でなければならない。

(5) ヒータの巻数 n、ピッチ p の概算

ヒータは試料ホルダー外表面にコイル状に装着する。いま、巻くべきヒータのコイル中心直径 D (cm) およびピッチ p (cm) を仮定すると、コイル一回転当たりのヒータ長さは、

$$\ell = \{ (\pi D)^2 + p^2 \} \quad (\text{cm/turn})$$

である。ヒータ全長は、 $L = n \cdot \ell$ (n : コイル巻き数、 $n = H/p \sim L/\pi D$) となる。ここに求めたヒータ全長さ L はさきに、発熱量から求めた長さ L にはほぼ等しくなければならない。

(6) ヒータ線径 d は求められたヒータ・ピッチ p に比較し、 $d < p$ を満足しなければならない。もし、満足されなければ、最初の仮定を修正し満足するまで繰返し計算し、決定することになる。

諸条件を満足しなければ、ホルダー高さの調整、ホルダー材質の変更やキャップセル内部構造の修正（例えば第 6 章に示す設計例のような反射筒を外筒内に設ける等）の対策を考える。

(7) この型式のキャップセルを利用するシース・ヒータとして、大部分 Philips 社（仏国）製の型式 Z-E-Z サーモコアックス・ヒータを使用してきた。一例としてその仕様を示すと、次のごとくである。

材 質：シース SUS 304

芯線 Ni-Cr (発熱部), Zr-Cu (引出部)

絶縁 MgO

線 径：シース外径 $\phi 2\text{ mm}$, 芯線 $\phi 0.68\text{ mm}$

電気抵抗： $3.1 \pm 0.25 \Omega/m$ (発熱部), $0.15 \Omega/m$ (引出部)

さらに、このヒータは、キャップセル組み立てにおける容易さを考慮し発熱部と引き出し部の径が同径に製作されたものを使用している。

3.4 試料ホルダー

通常、一個の試料ホルダーの高さ (or 長さ) は、約 150 mm 程度に制限される。この長さ以上に

なる場合には、試料を分けて装荷することになる。この制約は、一個のヒータで温度制御が可能な高さが、通常、約150 mm程度であることによる。この長さはヒータへ供給する電気容量からの制約である。

(1) ヒータの取付け位置

使用するシース・ヒータの最小曲げ半径があまり小さく取れないと言う設計上の制約から、通常ヒータは試料ホルダーの外表面に配置され、試料ホルダーの外表面に巻き付けられる。一方、温度制御と試料温度の測定のための熱電対は、通常、試料の端に孔を穿け孔の中に納める。ヒータ取り付け位置と温度検出位置に相違がある。このため、温度を検出し、ヒータ出力を制御しても制御の応答性があまり良くない。これを回避するには、ヒータの取付け位置を可能な限り試料に近い箇所とすることが有利と考えられる。ヒータを試料に近い箇所に設計することは、今後のこの型式キャプセルの課題である。過渡的にヒータへの供給電流が限界電流値になっても、熱電対による計測温度はある時間の間、目標温度に達しなかった事例もある。

(2) ヒータの取り付け用溝と巻方

(a) 取り付け用溝

ホルダー外表面に設けるヒータ取り付け用溝は、シース・ヒータが完全にかくれる深さとする。すなわち、シース・ヒータの直径よりも大きくなければならない。これは、キャプセル組み立て時、ヒータを傷付けないためと、下段に位置するヒータ引き出し部を引き出す必要があるからである。

(b) ヒータの巻方

シース・ヒータの試料ホルダーへの取り付けは、通常、上部より巻き始めて下部で終わる方法を取る。巻き初めと終り部の急激な曲げにならないようにする。例えば、 $\phi 2\text{ mm}$ のシース・ヒータの場合、曲げ部は 3 mmR 以上としている。さらに、密着性を考え強く巻き付ける外、ホルダーの数箇所でカシメて固定する。引き出し部についても同様な処置をとる。

(3) 外筒内面とのギャップ寸法

設計上の試料ホルダーの外径は、熱設計計算から得られた外筒内径とのギャップ寸法より決定されるが、これを確実に製作上実現するため、実際に使用するキャプセル外筒管の測定寸法をもとに加工寸法を決定する。照射試料の温度は、ほぼこのギャップ寸法で決定される。この型式のキャプセル製作においては最も重要な事項である。

(4) 断熱材の装荷

多段に重ねるヒータ段とヒータ段の間には、断熱材を装荷する。断熱材の目的は、ヒータ間の軸方向の熱の移動を遮断し、各段の温度の制御性を良くすることである。

この型式のキャプセルの断熱材材質は、従来ムライト($3\text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{ SiO}_2$)を使用してきた。厚さとしては、 5 mm か、 10 mm が使用されている。

この断熱材のキャプセルへの組み立てに際しては、 600°C 以上に加熱し十分な脱ガス処理を行い、組み込む。キャプセル照射試験中に断熱材よりガスが放出されると、キャプセル内に充填されたヘリウムガスとの混合ガスを形成し、ガスの熱伝導率が低下する。

3.5 热電対

(1) 装荷個数

試料の照射温度検出の熱電対は照射試料の中心か試料に接して配置されねばならない。熱電対は、試料各段に少なくとも二本装荷する。この目的は、熱電対の断線によるヒータ制御ができなくなることを防止することである。なお、ヒーター一本に対し二本を越える熱電対を装荷する場合もある。これとは逆に、penetration個数の制約上、二本の装荷が困難でやむなく一本にする事例もある。

(2) 热電対の測定検出端

設計上注意すべき点は、熱電対の試料への取付け位置を、照射後のPIEの支障とならない箇所に選定することである。試料の照射温度を検出することを目的にした現在まで経験のある熱電対の測定検出端は、

シャルピー試験片では、Vノッチから離れた部分

引張り試験片では、チャック部分

破壊非性試験片では、ノッチ部分

のような箇所を選定している。

3.6 部品および細部設計

(1) ヒータおよび熱電対等の引き出し部分の気密性保持

この型式のキャップセルは試料装荷のキャップセル主要部内の雰囲気を制御する。そのため、主要部のバウンダリーは気密設計としなければならない。気密設計を必要とする部分は上部端栓部である。外筒上部端栓部はシースヒータ、熱電対および真空温度制御のための管等が貫通する。

シースヒータおよび熱電対の外筒上部端栓の貫通部は、貫通させるに適した寸法の引出管を必要個数上部端栓に通した上、端栓にニクロ・ブレーズあるいは溶接する。シースヒータおよび熱電対は、引出管を通し引出管の上でその周囲を銀ロー付する。真空温度制御のための管も同様な処置を行う。

(2) 試料ホルダーのギャップの保持

試料ホルダーの外表面には、突起を取り付ける。これは、試料ホルダーと外筒内面との間の一定ギャップの保持が目的である。一般に、ギャップ寸法の小さなものでは、仮に試料ホルダーが外筒内部で偏心しても、平均ギャップ熱伝達率は変動しない⁷⁾。このことは試料中心における温度は、変わらないことを意味している。しかし、照射試料の形状によっては熱電対の取り付け位置がキャップセルの中央でなく、この偏心による影響が考えられることから突起を設ける。

3.7 試験・検査

設計したキャップセルの製品は、試験・検査によって確認される。このキャップセルに関する主要

な検査項目の概要を Table 3.1 に示す。

照射試料は照射依頼側によって準備される。しかし、原子炉炉心に装荷することから、核的、熱的、寸法的な制限があり、キャップセルと同様な検査が実施される。

試験・検査の時期は、原則として次の 3 段階に分かれる。

- 1) 部品（部品完成時）
- 2) キャップセル組立中（外筒完成時）
- 3) キャップセル組立後（完成時）

Table 3.1 Inspection of Capsule with Multistage Heater Control

検査時期	部品時	組立中	完成時
検査項目	外観検査	外観検査	外観検査
	寸法検査	寸法検査	寸法検査
	素材組成及び材料試験	真直度検査	真直度検査
	重量検査	欠陥検査	欠陥検査
	真直度検査	熱電対検査	熱電対検査
	欠陥検査	ヒータ検査	ヒータ検査
	熱電対検査	溶接部検査	溶接部検査
	ヒータ検査	ヘリウムリーク試験	ヘリウムリーク試験 全体放射線透過写真撮影

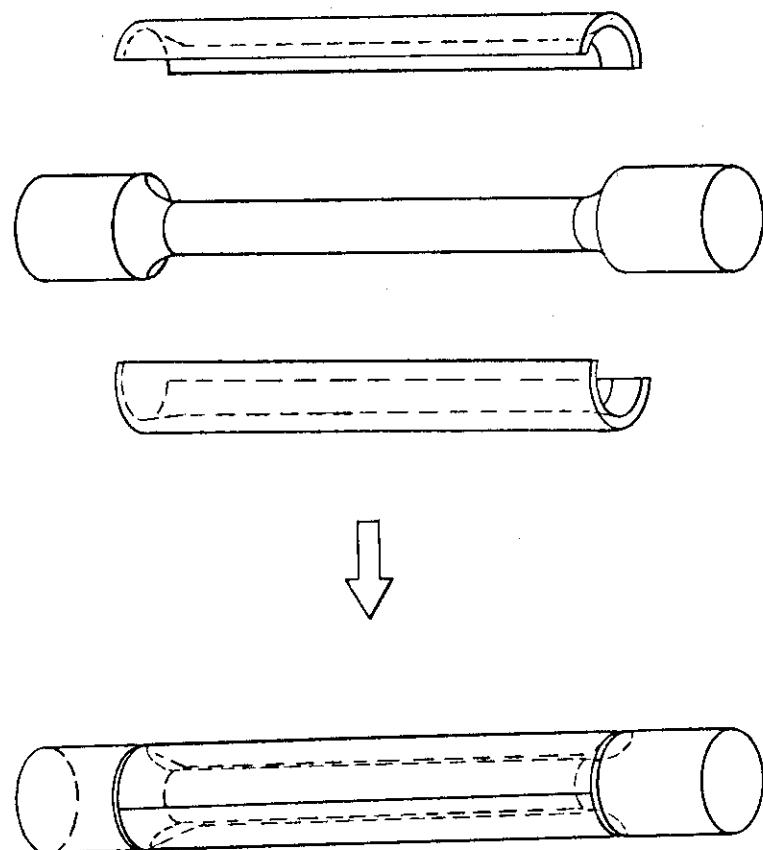


Fig. 3.1 Tensile Test Specimen

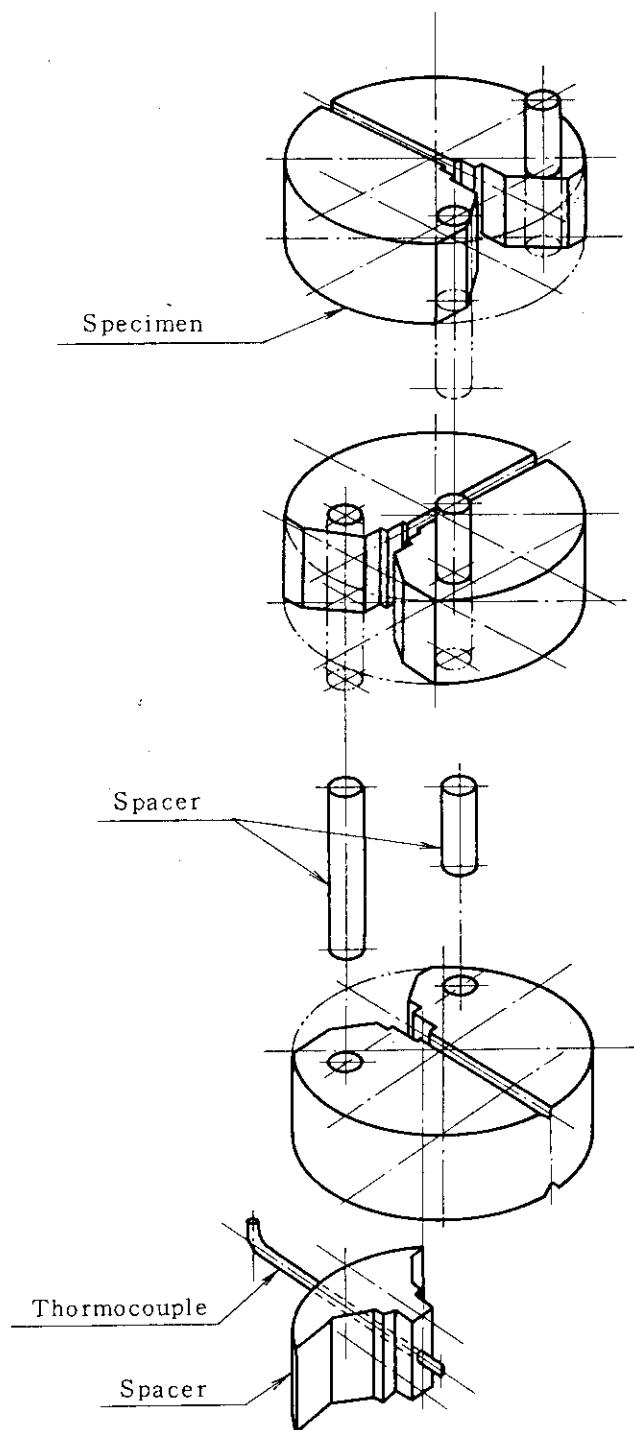


Fig. 3.2 Disk-Shaped Compact Specimen

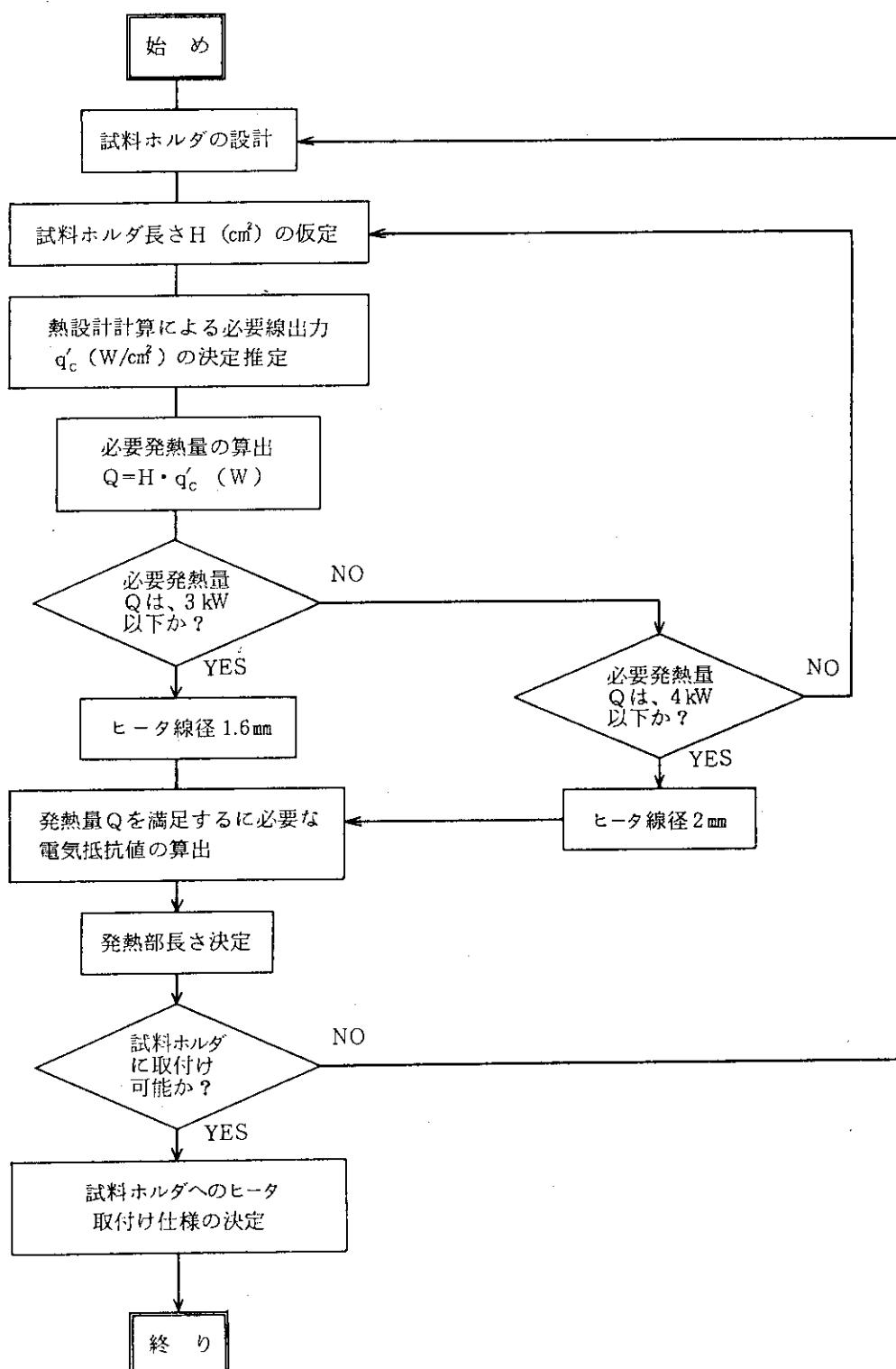


Fig. 3.3 Flow Chart of Heater Specification

4. キャプセル温度制御装置

4.1 制御盤への接続とヒータ制御装置

(1) 制御盤への接続

この多段独立ヒータ制御型キャプセルの制御装置への接続の概略をFig. 4.1に示す。制御装置は炉心外に設置される。保護管を通り抜けた真空温度制御用導管は、接続箱を介して照射施設として設置されている真空温度制御盤に接続される。ヒータおよび熱電対用のケーブルは、いったん接続箱内で端子と接続し、その後この型式のキャプセルのために特設されたヒータ温度制御装置に接続される。接続箱の役割は、キャプセル上部に溶接されている保護管部の健全性が、損なわれた場合の原子炉一次冷却水漏洩防止である。

(2) ヒータ制御装置

Fig. 4.2にヒータ温度制御装置の概略を示す。ヒータへの供給電源は、原子炉建屋一階の220V商用交流電源である。キャプセル内のヒータによる温度制御は、まず、試料部に装荷された熱電対からの信号をヒータ制御盤内の温度調節器および温度記録計に入力する。温度調節器では入力された信号、すなわち温度が目標温度より高いかあるいは低いかを判別する。その信号はヒータ制御用SCR (Silicon Controlled Rectifier) ユニットに送られる。ヒータ制御用SCRユニットは、温度調節器からの温度差信号に従い、キャプセル内取り付けのヒータへの電流供給量を調節する。温度調節器には、アラーム回路、温度記録計には、インターロック回路が設けられている。規定温度より温度が高くなったとき、まず温度調節器からの信号でアラームを発し、さらに温度が高くなったときには、温度記録計からの信号でマグネット・ブレーカが作動し、ヒータへの供給電源を遮断する。

4.2 試料温度の確認と昇温方法

原子炉が定格出力（熱出力50MW）に到達し、照射試料温度の変動がなくなったところで、照射目標温度までの昇温操作を開始する。この昇温操作は、通常原子炉が定格出力到達後速やかに実施している。

第1段階は、原子炉定格出力到達時にキャプセル内がヘリウムガスで満たされたときの試料温度を確認する。

第2段階は、キャプセル内のヘリウムガスを排気状態とし、試料温度を確認する。この時の温度は、照射目標温度より約30~40°C程度下回る温度まで昇温する。

第3段階は、ヒータを使用し、試料温度を照射目標温度にする。ヒータへの供給電流の増減を行い、目標温度範囲にする。その後、自動制御装置に投入する。ヒータ各段に取付けた熱電対が複数個の場合、それらの算術平均値が照射目標温度になるようにヒータの制御温度を決める。ここでの照射目標温度とは、例えば照射目標温度範囲が $290 \pm 10^\circ\text{C}$ の場合、 290°C とすることで

ある。

なお、ヒータによる温度制御を行うときは、温度の共振をさけるため、真空温度制御は、手動制御を行う。

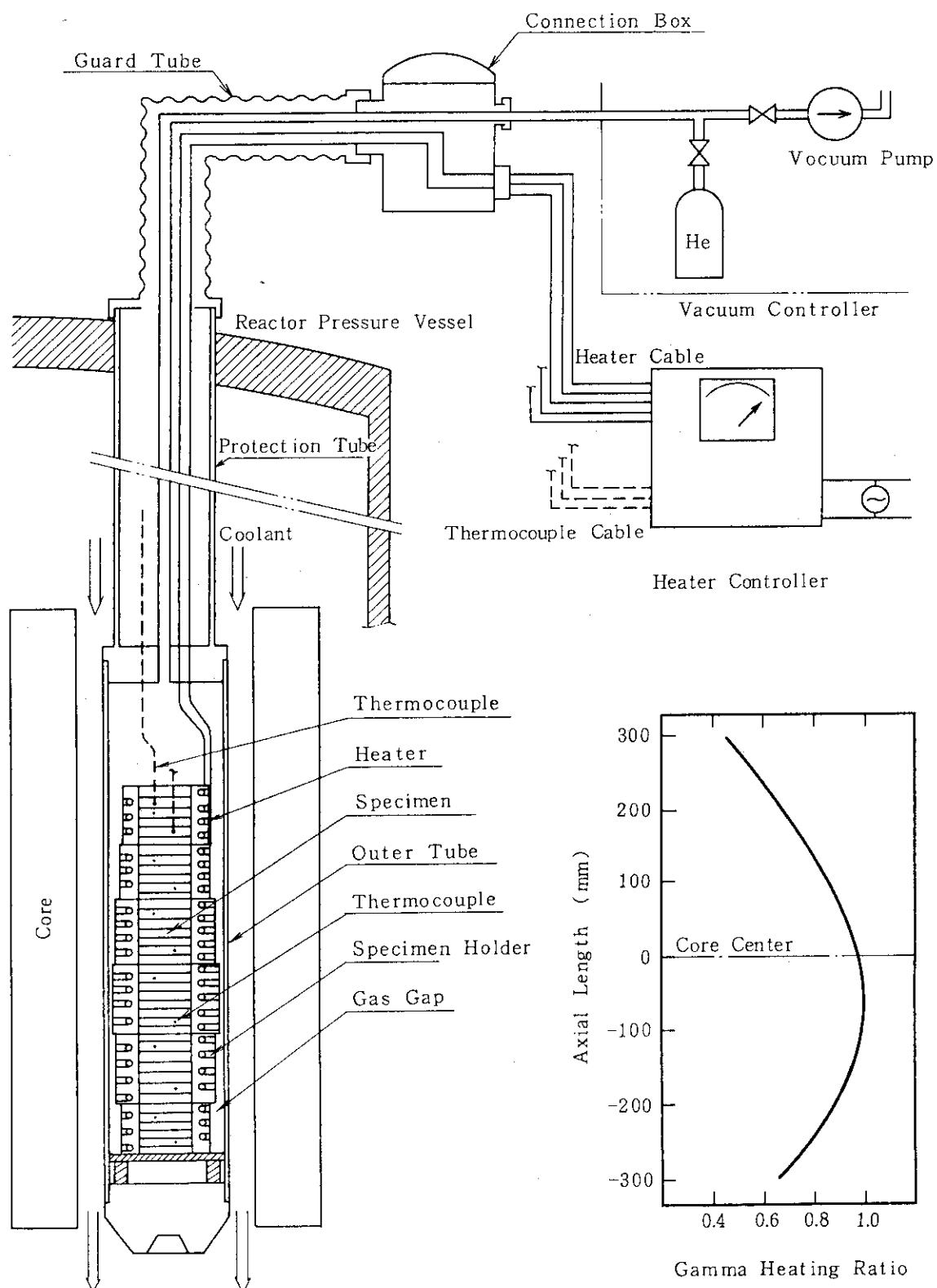


Fig. 4.1 Gamma Heating and Schematic of the Multi-Stage Heater Control Capsule

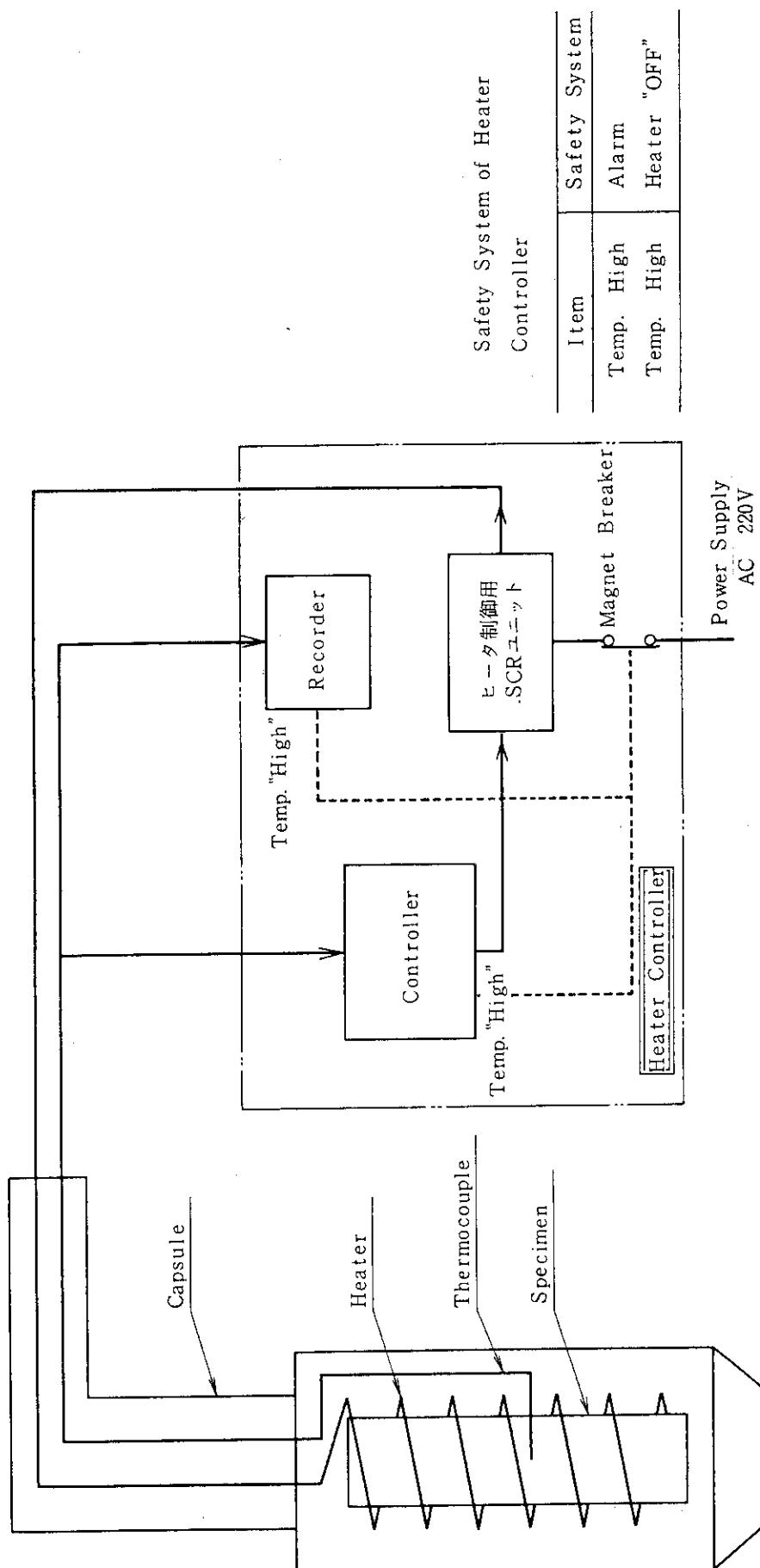


Fig. 4.2 Flow Diagram of Heater Controller

5. キャプセル設計例および設計・製作実績

5.1 キャプセル設計例

(1) キャプセルの概要

この型式のキャプセル設計例の一つとして、その組立図を Fig. 5.1 に示す。このキャプセルは、鉄鋼材料の引張試験片およびシャルピー試験片を照射するために設計された。炉心内照射位置は F-12 であり、この位置における最大ガンマ加熱は 2.4W/g である。

このキャプセルは、次の条件の下に設計された。

試料照射目標温度： $290 \pm 10^\circ\text{C}$

試料形状・数量：引張試験片 12本 (Fig. 5.2(a)参照)

シャルピー試験片 28本 (Fig. 5.2(b)参照)

このキャプセルの設計では、試料ホルダーと外筒とのガスギャップ寸法をガンマ線束の分布とは逆に変化させ試料全長に渡って同一温度となることを目標とした。

(2) 試料配置計画

引張試験片およびシャルピー試験片の試料ホルダー内試料配置を Fig. 5.3(a) および(b) に示す。引張試験片は、各ホルダー当たり 6 個とし、ホルダー (6 孔) に挿入した。また、ホルダー中心孔には発熱量を調整するための発熱体を挿入してある。

シャルピー試験片は、各ホルダー当たり 4 個とし、試料が角型であることから試料ホルダーを二つ割り構造とし挿入した。軸方向のホルダーの配置を Fig. 5.4 の如く計画した。すなわち、試料ホルダーを 5 段とし 9 つのブロックに試料を配置した。ヒータは、5 段の試料ホルダー各々に 1 本ずつ取り付けた。なお、ガンマ加熱は図左のような分布をしている。

試料ホルダーの外径寸法は Fig. 5.5 に示すとおりであり、19か所その寸法を変化させてある。また、試料とホルダーとのガスギャップは片側で 0.1mm としてある。

(3) 熱計算

熱設計計算にプログラム GENGT C を用いた。試料などを中心軸対称で計算可能にモデル化して計算した。

(a) モデル化

この熱計算モデル化は以下のとおりとした。Fig. 5.3 に示す試料配置状態をモデル化した結果を、Fig. 5.6(a) および(b) に示す。引張試験片を中心軸対称にモデル化すると、ホルダー内は中心の円柱 (ホルダー材) と二つの円環 (試料材とホルダー材) となる。ここで、多孔ホルダー内の試料挿入孔の PCD (Pitch Circle Diamenter) 19mm を中心に 6 個の試料断面積が試料としての円環の断面積に等しくなるよう円環の内径 11mm 、外径 27mm とした。シャルピー試験片については、第 2 章で述べた方法によった。

モデル化した試料円環の内外のギャップ寸法も計画の試料周りのギャップ寸法の幅は実際

の試料周りのギャップ幅と等しくとった。モデル化前後において、ホルダー内の試料、ホルダーの断面積の変化は小さいが、試料およびホルダーの出力密度の修正を行った。

(b) 計算結果の一例

計算結果の一例をFig. 5.7に示す。この計算条件は原子炉定格出力時ヘリウムダンプ状態である。図の温度分布のキャップセル内の計算位置は、出力分布が大きいほぼ中心についてのものである。

計算が軸対称なので試料の予想最高温度はキャップセル中心部である。照射目標温度を十分達成すると判断した。なお、この計算結果は、Fig. 5.6(b)の計算モデルで実施したものである。

(4) ホルダーと外筒内面間直径ギャップ寸法

熱計算結果に従い、Fig. 5.5に示すようなギャップ寸法を決定した。

図のギャップ寸法において、軸方向の出力分布の変化が大きい位置（上下段部）では複数のギャップ寸法の変化を設けた。この理由は、第1および第5段部では軸方向の出力分布の変化が大きいので、同一試料ホルダー部でもいくつものギャップ寸法を設け試料温度の均一化を図ったためである。

(5) 照射中の試験片温度

以上の設計をもとに製作したキャップセルの温度履歴をFig. 5.8に示す。試料温度は、原子炉出力とともに上昇する。照射試験は、途中ヒータ制御盤および真空温度制御盤用供給電源のブレーカが何等かの原因で自動的にOFFとなり、一時温度制御が不能となった。この期間を除けば順調に照射試験を終了した。なお、途中2日間温度が低くなっているのは、J M T Rの場合、1サイクルを前半と後半サイクルの2つに分け、原子炉運転を一時停止し、燃料交換を実施するからである。

原子炉定格出力(50 MW)到達後、真空温度制御装置による昇温およびヒータによる目標温度までの軸方向温度分布をFig. 5.9に示す。原子炉定格出力到達時の温度は、約200°Cであった。その後、真空温度制御装置で約250°Cまで昇温し、最後に目標温度範囲になるようヒータで昇温した。

5.2 設計・製作実績

この型式の照射試験用キャップセルは、1986年から1989年までに35体製作された。この間、これらのキャップセルを用いて、引張り試験片178本、衝撃試験片688本、破壊非性試験片535個、3点曲げ試験片42本が照射された。

特に、この型式のキャップセルは圧力容器鋼材のPTS(Pressurized Thermal Shock)調査の照射試験に際して大幅に採用され、合計13体のキャップセルが設計・製作された。一連の照射試験は、昭和58年から4年間にわたり実施された。この目的に照射された試料は、引張り試験片54本、衝撃試験片228本、破壊非性試験片180個に達した。

この試験を通じ、この型式のキャップセルの鉄鋼材料の照射への有効性が立証され、現在、この型式のキャップセルは主として原子炉圧力容器材の照射試験に多用されている。これ等のキャップセ

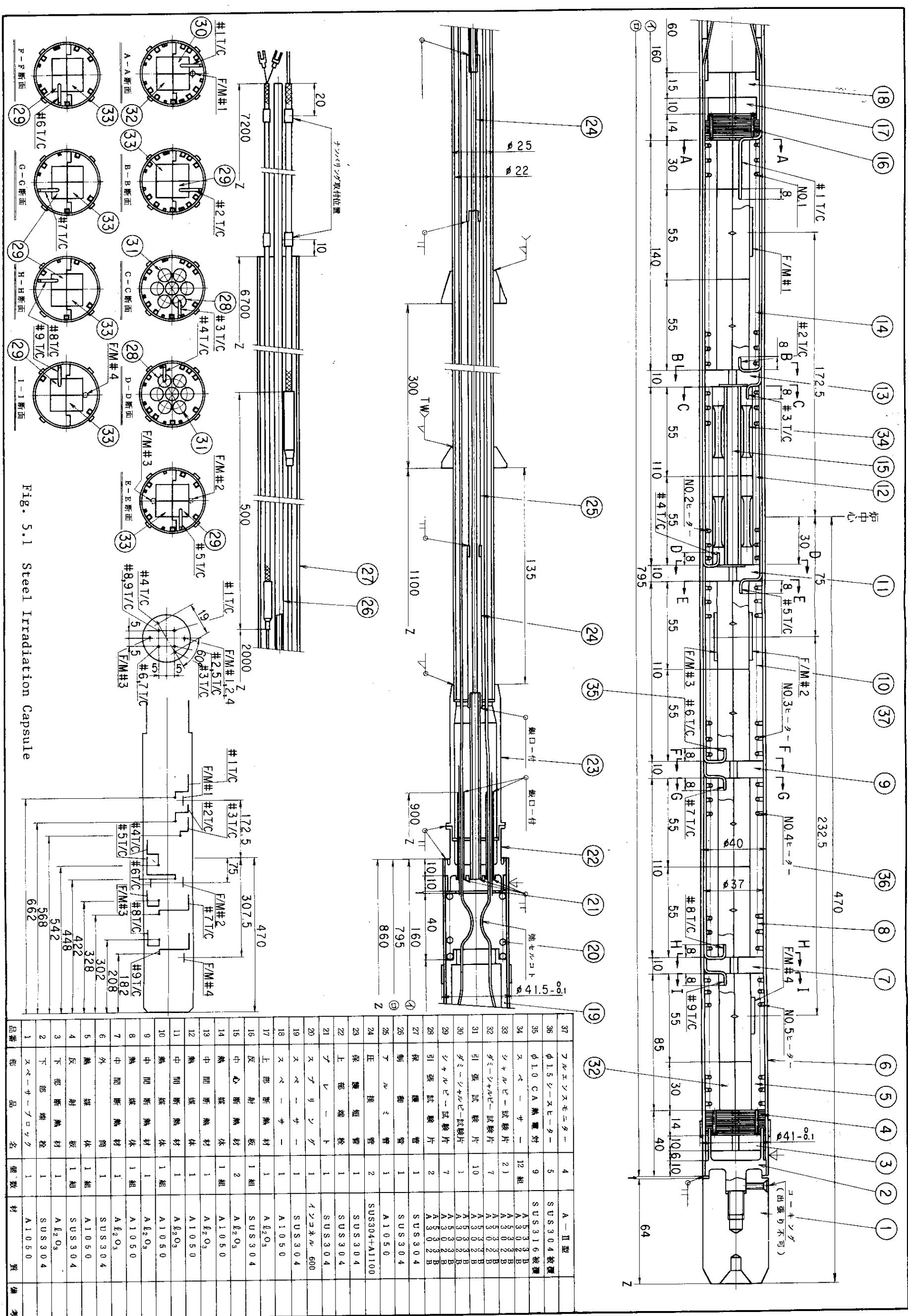
ルによる照射試験結果の温度測定値は、おおむね設計目標を達成している。また、このキャプセルに採用したヒータ設計の手法を応用し、他の照射目的のキャプセル設計にも利用している。例えば、原子炉の出力上昇、下降の段階をも含めて試料を照射中の温度に等しくする照射計画に利用した。⁸⁾

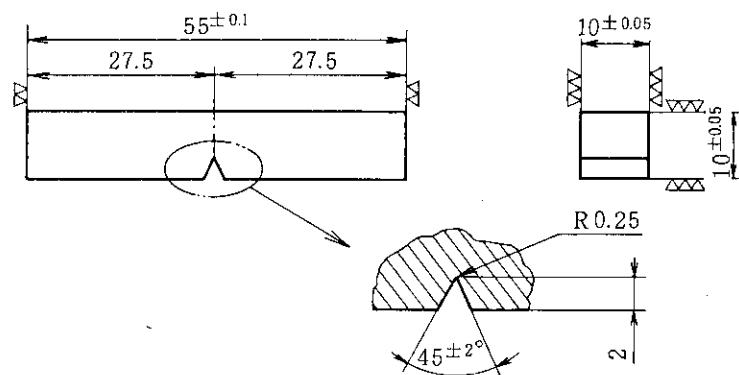
5.3 トラブル例

この型式のキャプセルで経験されたトラブルの主要なものは、熱電対の断線であった。断線の原因は種々調査されたが、明確ではない。しかし、試料ホルダーからの立ち上げ部の曲げ加工部が断線の原因ではないかと推測されている。

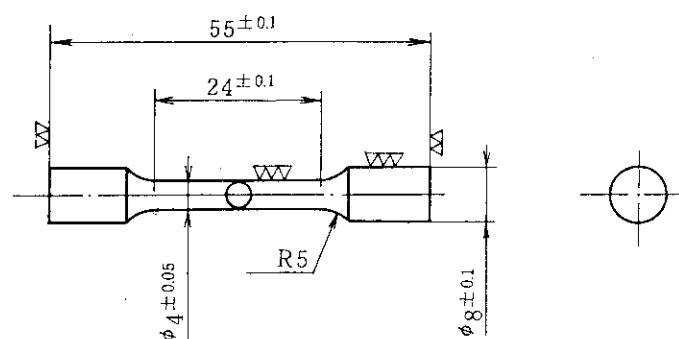
この型式のキャプセルの初期に設計・製作されたものでは、照射試料として形状の異なる試験片をしばしば混載していた。そのような場合、試料温度が目標照射温度範囲からのずれが経験された。

この型式のキャプセルは、試料周り等ギャップにおけるガス雰囲気を変化させる。制御用のガスにはヘリウムを使用している。そのため、上部端栓におけるペネットレーションの気密シールや真空制御用導管の接続部にリークがあると、内部雰囲気ガスが混合ガスとなり、試料温度の制御が不可能になる事態を引き起こすことが予想される。この型式のキャプセルではないが、そのようなトラブルを経験したことがある。

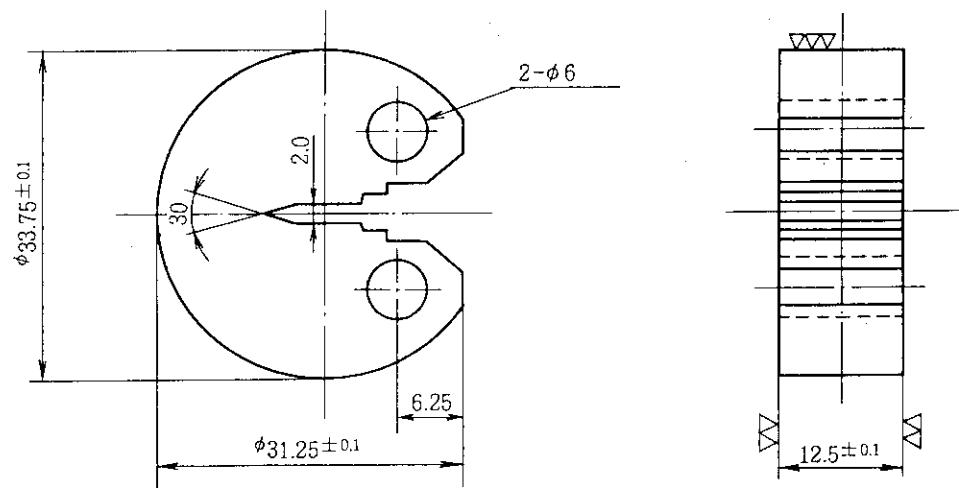




(a) Charpy Specimen



(b) Tensile Test Specimen



(c) Disk-Shaped Compact Specimen

Fig. 5.2 Geometry and Dimension of Specimen

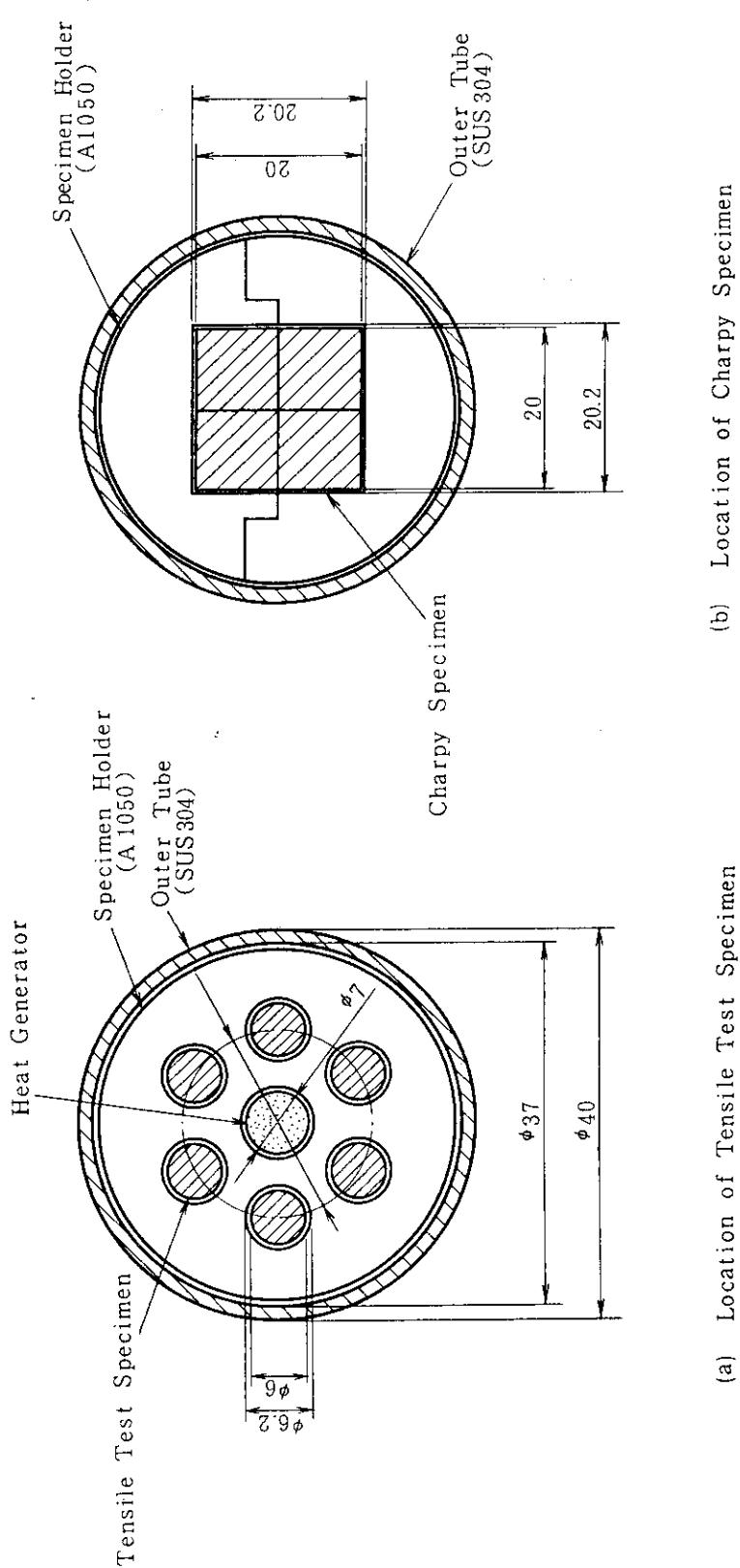


Fig. 5.3 Location of Specimen in Capsule

(a) Location of Tensile Test Specimen

(b) Location of Charpy Specimen

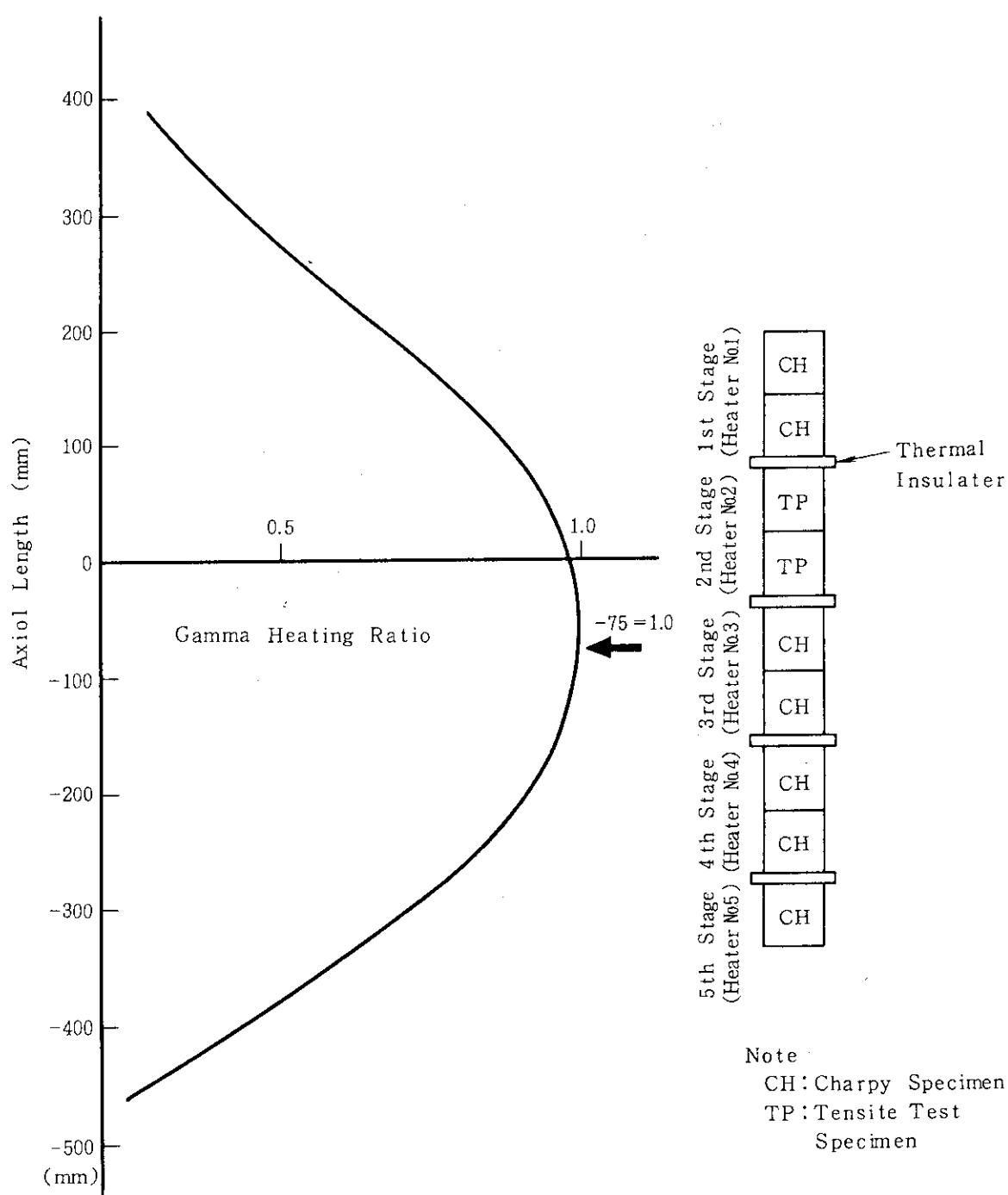


Fig. 5.4 Location of Specimen and Specimen Holder

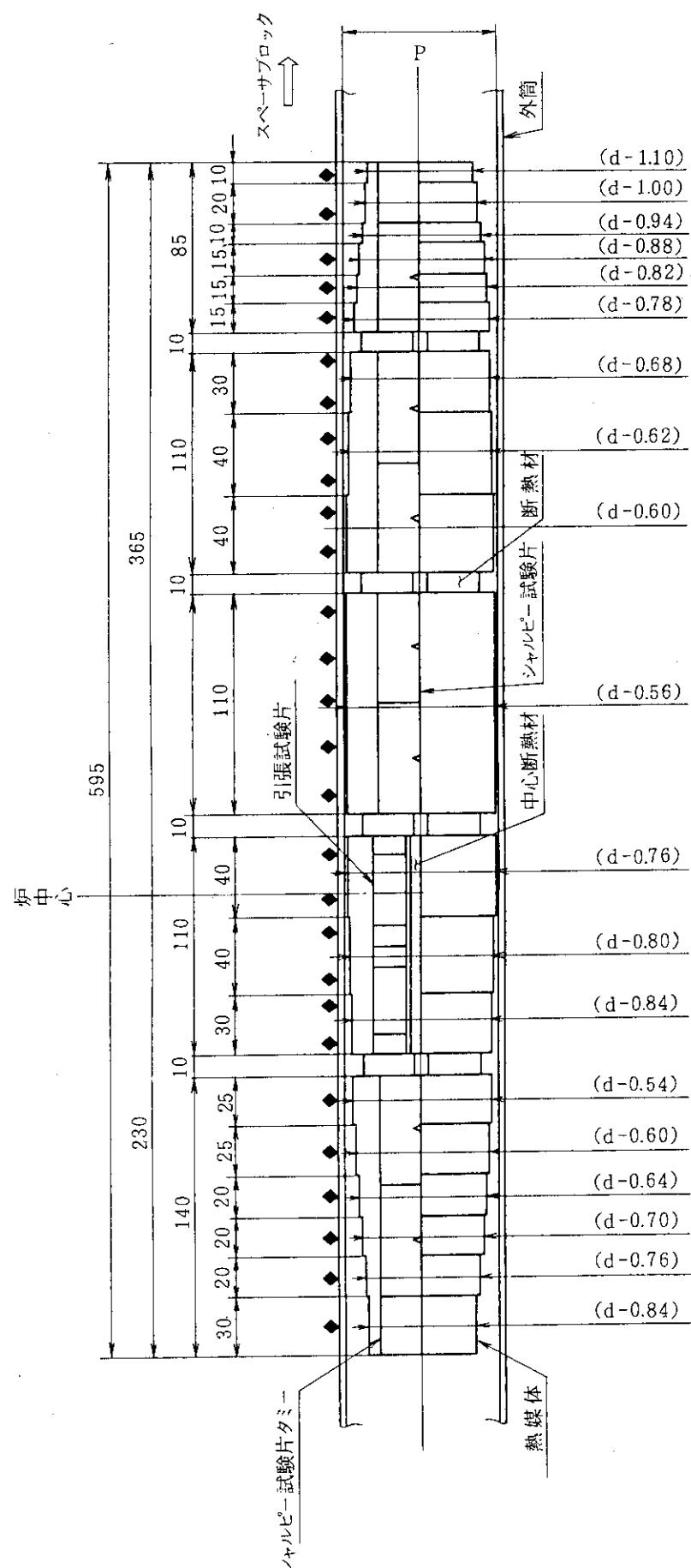
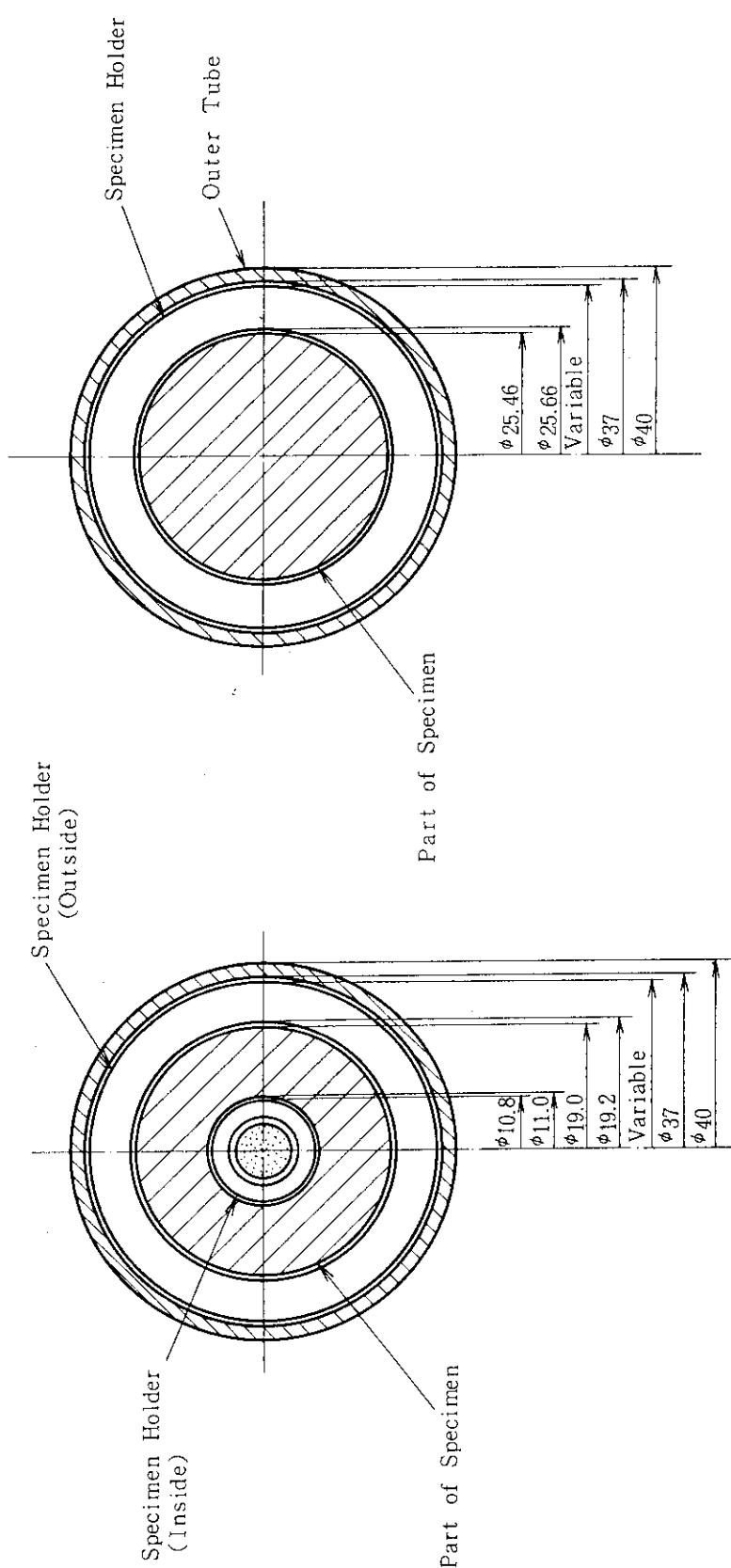


Fig. 5.5 Outside Diameter of Specimen Holder

印位置を実測の上その平均寸法は、外筒内径の平均寸法とする。



(a) Calculation Model for Tensile Test Specimen
(b) Calculation Model for Charpy Specimen

Fig. 5.6 Calculation Model

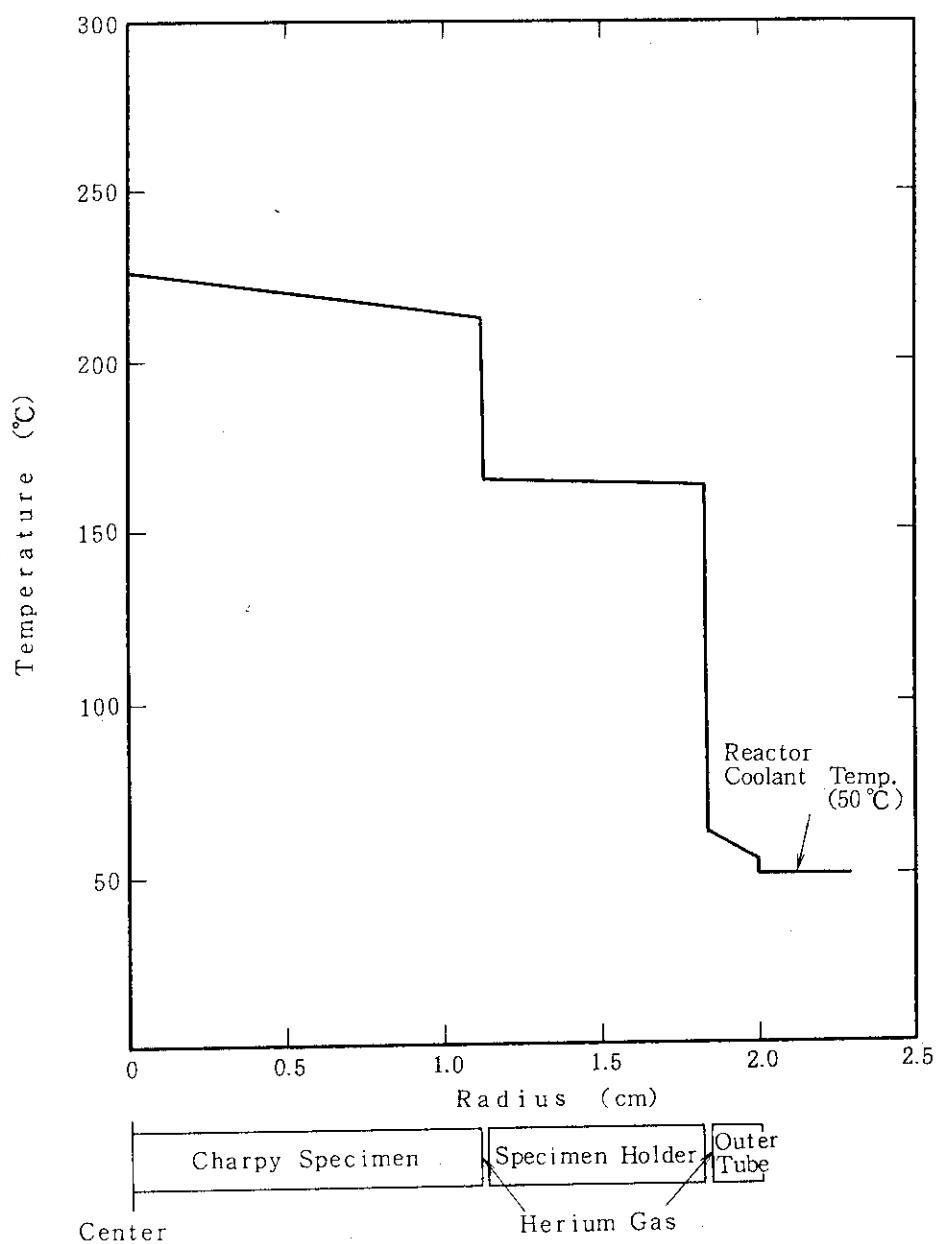


Fig. 5.7 Calculation Result

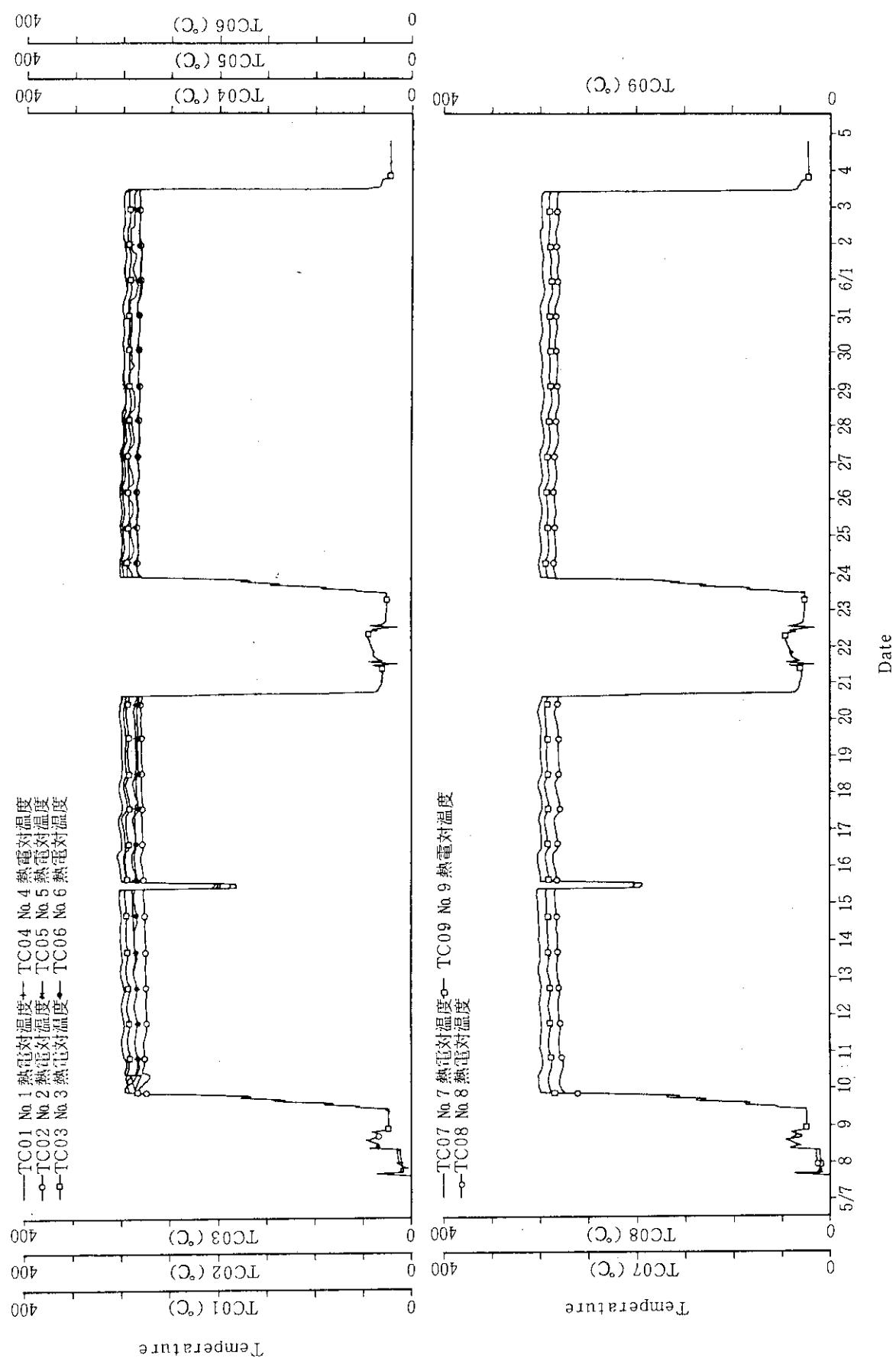


Fig. 5.8 Irradiation Temperature in Capsule

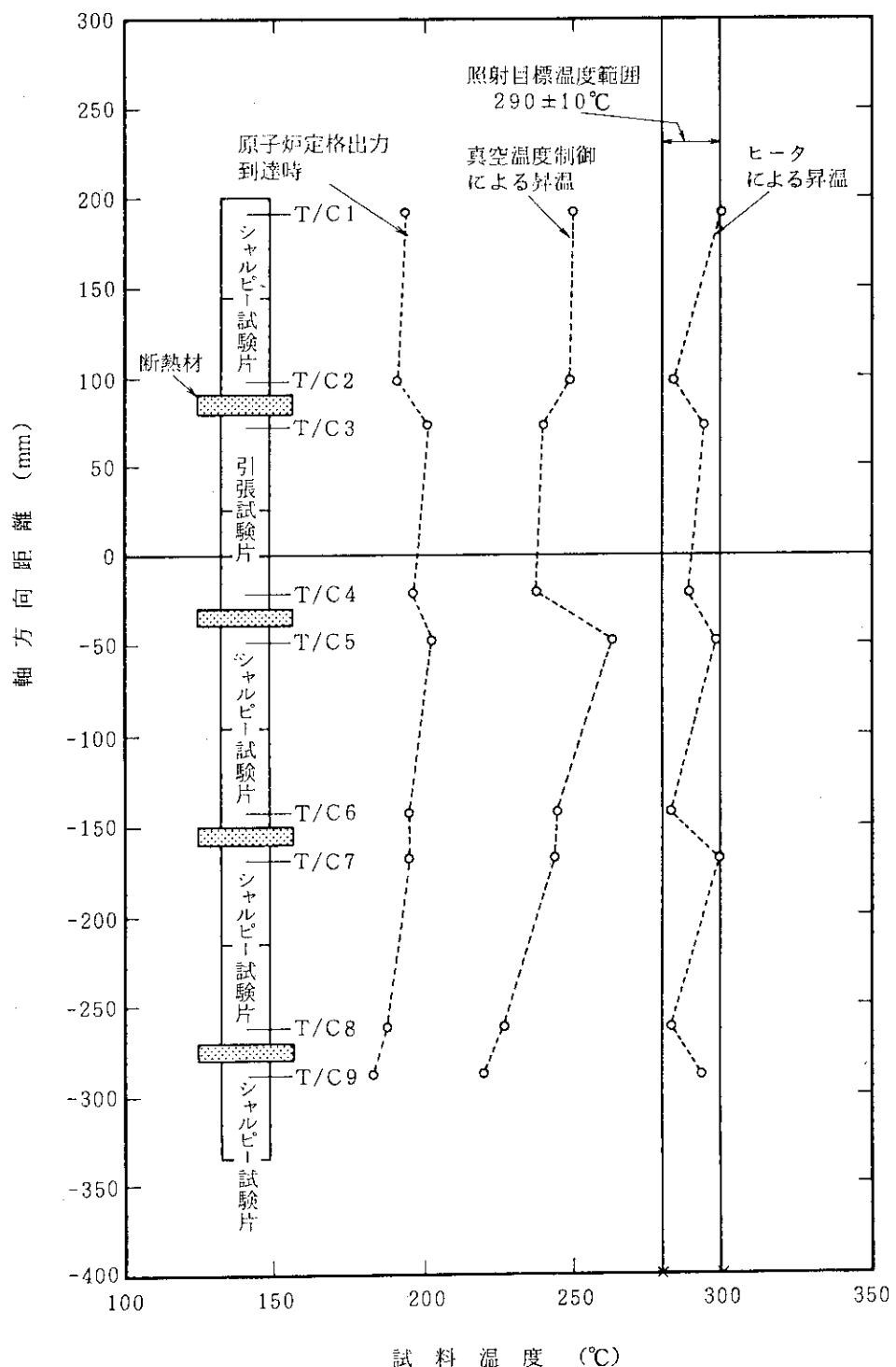


Fig. 5.9 Axial Distribution of Temperature in Capsule

謝 詞

多段独立ヒータ制御型キャップセルは、材料試験炉部においてかなり古くから使用してきた。その間、小森芳広氏、伊藤治彦氏等多くの人々がこの型式のキャップセルの開発、改良に努力された。しかし、この報告書に述べた設計手法の確立には、「原子炉圧力容器材のPTS「Pressurized Thermal Shock」調査」に関する研究の照射試験に使用したキャップセルの設計、製作が大きな寄与をしている。故・下井 周二氏（クールス科学技術㈱・元技術部長）は「原子炉圧力容器材のPTS調査」に関する研究において、この型式のキャップセル設計・製作に努力された。この報告に使用した図のかなりの数は同氏の手による。横山 憲夫氏（クールス科学技術㈱）は、このキャップセルの熱設計手法に関し多くの寄与をされた。

市橋芳徳氏（材料試験炉部）には、業務遂行に関し種々のご配慮を戴いた。

以上にその氏名を記し、深遠な謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 原山、新見、染谷、小林、「多孔型発熱熱媒体の温度分布」、日本原子力学会「昭和62秋の大会」F18, (1987年10月)
- 2) Y. HARAYAMA, et. al., 「Temperature Distribution in Heat Generating Cylinder with Multihole」, to be published in JAERI-M report.
- 3) 染谷、小林、新見、星屋、原山「GENGTC-JB: 照射用キャップセル内温度評価プログラム」, JAERI-M 87-148 (Nov. 1987)
- 4) 森島ほか, 「第1集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表(改訂2版)」JAERI-M 4881 (1972)
- 5) 小林、星屋、新見、染谷、原山, 「CAPSTAR: 照射用キャップセルの外筒・内筒の安全性強度評価プログラム」, JAERI-M 88-121 (Jul. 1988)
- 6) 小森芳広、下井周二ほか, 照射用キャップセルの外筒挫屈実験・その2(挫屈実験結果)
private communication, (1984年7月)
- 7) 星屋、染谷、山口、原山, 「挫屈した被覆等ギャップ寸法の変化が燃料棒内の温度、熱流束分布に与える効果の解析」, JAERI-M 89-199 (Dec. 1989)
- 8) 材料試験炉部, 「JMTTR時報・第82サイクル」No.75 p.p. 2~7 (1988年7月)
- 9) 下井 周二 ほか, 「83M-35Gの設計と照射温度について」, private communication, (1987年3月)
- 10) 下井 周二 ほか, 「83M-36Gの設計と照射温度について」, private communication, (1987年3月)
- 11) 小林 敏樹 ほか, 「83M-44Gの設計と照射温度について」, private communication

謝 辞

多段独立ヒータ制御型キャップセルは、材料試験炉部においてかなり古くから使用してきた。その間、小森芳広氏、伊藤治彦氏等多くの人々がこの型式のキャップセルの開発、改良に努力された。しかし、この報告書に述べた設計手法の確立には、「原子炉圧力容器材の PTS 「Pressurized Thermal Shock」調査」に関する研究の照射試験に使用したキャップセルの設計、製作が大きな寄与をしている。故・下井 周二氏（クールス科学技術㈱・元技術部長）は「原子炉圧力容器材の PTS 調査」に関する研究において、この型式のキャップセル設計・製作に努力された。この報告に使用した図のかなりの数は同氏の手による。横山 憲夫氏（クールス科学技術㈱）は、このキャップセルの熱設計手法に関し多くの寄与をされた。

市橋芳徳氏（材料試験炉部）には、業務遂行に関し種々のご配慮を戴いた。

以上にその氏名を記し、深遠な謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 原山、新見、染谷、小林、「多孔型発熱熱媒体の温度分布」、日本原子力学会「昭和62秋の大会」F18, (1987年10月)
- 2) Y. HARAYAMA, et. al., 「Temperature Distribution in Heat Generating Cylinder with Multihole」, to be published in JAERI-M report.
- 3) 染谷、小林、新見、星屋、原山「GENGTC-JB: 照射用キャップセル内温度評価プログラム」, JAERI-M 87-148 (Nov. 1987)
- 4) 森島ほか, 「第1集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表(改訂2版)」JAERI-M 4881 (1972)
- 5) 小林、星屋、新見、染谷、原山, 「CAPSTAR: 照射用キャップセルの外筒・内筒の安全性強度評価プログラム」, JAERI-M 88-121 (Jul. 1988)
- 6) 小森芳広、下井周二ほか, 照射用キャップセルの外筒挫屈実験・その2(挫屈実験結果)
private communication, (1984年7月)
- 7) 星屋、染谷、山口、原山, 「挫屈した被覆等ギャップ寸法の変化が燃料棒内の温度、熱流束分布に与える効果の解析」, JAERI-M 89-199 (Dec. 1989)
- 8) 材料試験炉部, 「JMTTR時報・第82サイクル」No.75 p.p. 2~7 (1988年7月)
- 9) 下井 周二 ほか, 「83M-35Gの設計と照射温度について」, private communication, (1987年3月)
- 10) 下井 周二 ほか, 「83M-36Gの設計と照射温度について」, private communication, (1987年3月)
- 11) 小林 敏樹 ほか, 「83M-44Gの設計と照射温度について」, private communication

on, (1987年3月)

12) 染谷 博之 ほか, 「83M-38Gの設計と照射温度について」, private communication, (1987年4月)

付 錄

多段独立ヒータ出力制御型キャップセル要目一覧表

多段独立ヒータ出力制御型キャップセルとして設計・製作したキャップセルの要目を表として収録した。Table A.1 はキャップセル全体としての要目である。Table A.2 は試料ホルダーに重点を置いて編集した 2 体のキャップセルの例を示す。

Table A.1(a) Capsule List (1)

Table A.1(b) Capsule List (2)

Table A.1(c) Capsule List (3)

Table A.2 Specification of Capsule

以 上

Table A.1 Capsule List (1)

キャプセル名	外筒の外径寸法 (mm)	照射孔	照射条件	公称 T 加熱 (W/g)	照射目標温度 (°C)	目標照射量 (n/cm ²)	試料名	数量	照射試験片	熱媒体段数	熱電対の本数	試料部全長 (mm)	熱媒体の材質	備考
81M-1C	Φ4.0	1-12	5.8	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	衝撃試験片	3.6	ASTM A533B #1	5	9	5.5	A1050	
81M-2C	Φ4.0	1-12	5.9	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	衝撲試験片	3.6	ASTM A533B #1	5	9	5.5	A1050	
81M-3C	Φ4.0	1-12	6.0	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	衝撲試験片	3.6	ASTM A533B #1	5	9	5.5	A1050	
81M-4C	Φ4.0	H-12	6.3	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	衝撲試験片	3.6	ASTM A533B #1	5	9	5.5	A1050	
81M-5C	Φ4.0	H-12	6.4	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	衝撲試験片	3.6	ASTM A533B #1	5	9	5.5	A1050	
81M-6C	Φ6.0	L-12	5.9	2.0	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 引張試験片 衝撲試験片	2.4 8 4.5	ASTM A533B #1	6	10	6.8	5	A1050
81M-7C	Φ6.0	H-12	6.0	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 衝撲試験片	3.8 9	ASTM A533B #1	6	10	5.9	6	A1050
81M-8C	Φ6.0	D-11	64~65	1.5	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 衝撲試験片	3.8 9	ASTM A533B #1	6	10	5.9	6	A1050
81M-9C	Φ6.0	D-11	61.63	1.5	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 衝撲試験片	3.8 9	ASTM A533B #1	6	10	5.9	6	A1050
81M-10C	Φ6.0	F-12	64~65前半	2.0	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 引張試験片	3.5 1.6	ASTM A533B #1	6	10	614.5		A1050
81M-11C	Φ6.0	F-12	61.63	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 引張試験片 衝撲試験片	2.4 8 4.5	ASTM A533B #1	6	10	6.8	5	A1050
82M-33C	Φ6.0	L-12	6.0	2.4	290±10	6.0 × 10 ¹⁹	破壊非性試験片 衝撲試験片	3.8 9	ASTM A533B #1	6	10	5.9	6	A1050

照射試験の合計
 破壊非性試験片 235個
 引張試験片 32本
 衝撲試験片 306本

Table A.1 Capsule List (2)

キャビセル名	外筒の外径 寸法(㎜)	照射孔 寸法(㎜)	照射物 公称T加熱 (W/g)	照射目標 温度(℃)	目標照射量 (n/cm ²)	試料名	数量	照射試料の材質	熱媒体 段数	熱電対 の本数	試料部全長 (㎜)	熱媒体 の材質	備考
83M-35G	φ6.0	D-6	67~69	2.0	290±10	6.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片	4.0	ASTM A533B ϕ .1	6	12	5.85	A1050	
83M-36G	φ6.0	D-6	70~72	2.0	290±10	6.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片	4.0	ASTM A533B ϕ .1	6	12	5.85	A1050	
83M-37G	φ4.0	F-12	67~69	2.0	290±10	6.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撃試験片	3.0 1.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.10	A1050	
83M-38G	φ4.0	L-12	67~71	2.0	290±10	1.0×10 ²⁰ 衝撃試験片	3.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	
83M-39G	φ4.0	J-4	68~71	0.7	290±10	6.0×10 ¹⁹ 衝撃試験片	3.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	
83M-40G	φ4.0	F-12	70~72	2.0	290±10	6.0×10 ¹⁹ 衝撃試験片 引張試験片	1.2 2.4	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	
83M-41G	φ4.0	H-12	71~74	2.4	290±10	1.0×10 ¹⁹ 衝撃試験片	3.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	
83M-42G	φ4.0	I-12	74~75	2.4	290±10	6.0×10 ¹⁹ 衝撃試験片	3.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	
83M-43G	φ4.0	D-11	72~75	1.5	290±10	6.0×10 ¹⁹ 衝撃試験片	3.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	
83M-44G	φ6.0	D-6	73~75	2.0	290±10	6.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片	4.0	ASTM A533B ϕ .1	6	12	5.85	A1050	
83M-45G	φ6.0	I-4	67~70	0.7	290±10	6.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片 引張試験片	3.0 6	ASTM A533B ϕ .1	6	12	5.35	A1050	
83M-46G	φ6.0	J-4	72~75	0.7	290±10	6.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片 引張試験片	3.0 6	ASTM A533B ϕ .1	6	11	5.35	A1050	
83M-47G	φ4.0	L-12	72~75	2.0	290±10	6.0×10 ¹⁹ 衝撃試験片	3.2	ASTM A533B ϕ .1	5	8	5.20	A1050	

照射試料の合計
破壊韧性試験片 180個
引張試験片 54本
衝撃試験片 228本

Table A.1 Capsule List (3)

キャプセル名	外管の外径 寸法 (mm)	照射孔	照射ケル 公称アーチクル (W/g)	照射目標 温度 (°C)	目標照射量 (n/cm ²)	試料名	数量	照射試料の材質	熱媒体 段数	熱電対 の本数	試料部全長 (mm)	熱媒体 の材質	備考
85M-7A	Φ4.0	F-12	7.5	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撃試験片	1.2 2.8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	9	595	A1050	
85M-8A	Φ4.0	F-12	7.6	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撲試験片	1.2 2.8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	9	595	A1050	
86M-4A	Φ4.0	F-12	7.8	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撲試験片	1.2 2.8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	9	595	A1050	
86M-5A	Φ4.0	F-12	7.9	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 3点曲げ試験片	1.2 2.8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	9	595	A1050	
87M-3A	Φ4.0	F-12	8.1	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撲試験片	1.2 1.4 1.4	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	9	595	A1050	
87M-4A	Φ6.0	F-12	8.2	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片	4.0	ASTM A533B d1	6	12	617.5	A1050	
88M-4A	Φ6.0	F-12	8.5	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片	4.0	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	6	12	617.5	A1050	
88M-5A	Φ6.0	F-12	86~87	2.0	290±10	4.0×10 ¹⁹ 破壊韧性試験片 引張試験片	4.0 8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	6	12	617.5	A1050	
89M-4A	Φ4.0	F-12	9.0	2.0	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撲試験片	1.2 2.8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	9	595	A1050	
89M-5A	Φ6.0	B-5	90~99	0.3	290±10	2.0×10 ¹⁹ 引張試験片 衝撲試験片	1.2 2.8	ASTM A533B d1 ASTM A508 d3	5	10	580	A1050	内筒有り

照射試料の合計
 破壊韧性試験片 120個
 引張試験片 92本
 衝撲試験片 154本
 3点曲げ試験片 42本

Table A.2 Specification of Capsule

キヤブセル名称 (外筒外径 : mm)	照射目標温度 (℃) (ホルダ材質)	項目	段		第1段	第2段	第3段	第4段	第5段	第6段	備考
			試料	試料							
83M-35G ¹⁾ 83M-36G ^{1,6)} (6.0)	290 ± 10 ℃ (アルミニウム)	ホルダ 試験片 半径ギャップ寸法 ヒータ最大出力 ヒータ発熱部全長	6 中心 9.5	6 中心 8.5	6 中心 8.5	7 中心 1.00	8 中心 1.10	7 中心 1.00	6 中心 9.5	6 中心 9.5	ホルダ全長 は、断熱材 を含んだ長 さである。
83M-38G ^{1,2)} (4.0)	290 ± 10 ℃	ホルダ 試験片 半径ギャップ寸法 ヒータ最大出力 ヒータ発熱部全長	4 中心 8.5	4 中心 8.5	4 中心 8.5	8 中心 1.10	8 中心 1.10	8 中心 1.10	4 中心 8.5	4 中心 8.5	シルビ-試験片 シルビ-試験片 シルビ-試験片 シルビ-試験片 シルビ-試験片 シルビ-試験片