



JAEA-Technology

2006-004



JP0650348

# 照射済燃料ピンを対象とした過渡時燃料破損限界 試験装置の検討

Study on the Fuel Damage Limit Examination Device at Transition for  
Irradiated Fuel Pin

勝山 幸三 豊田 裕昌\* 永峯 剛

Kozo KATSUYAMA, Hiromasa TOYODA\* and Tsuyoshi NAGAMINE

大洗研究開発センター燃料材料試験部

Fuels and Materials Department  
Oarai Research and Development Center

February 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.

Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

## 照射済燃料ピンを対象とした過渡時燃料破損限界試験装置の検討

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター燃料材料試験部

勝山 幸三・豊田 裕昌\*・永峯 剛

(2006年1月13日受理)

高速炉においては、定常時に加え、反応度挿入型事象 (TOP)、冷却能力低下型事象 (LOF)、除熱源喪失事象 (LOHS) 等の異常な過渡変化時における燃料ピンの健全性を評価することが重要となる。その評価には、実際に破損燃料ピンのデータが有効である。しかし、その破損データは数量的に限られており、それも海外炉で得られたものだけで、わが国の高速炉においてその実例はない。

そのため、照射した燃料ピンから切り出した被覆管に対し、急速加熱バースト試験等を実施してデータを拡充し、その破損等の予測に用いてきた。しかし、そのような炉外での試験では、試料作製の際に物理・化学的な外乱が想定され、実際の挙動を模擬していない可能性も考えられる。

そこで本研究では、その外乱を可能な限り排除して、炉外での異常時の燃料ピンの性能評価の実現性を検討した。すなわち、実際に高速炉で照射された燃料ピンをそのまま切断することなく用いて、ホットセルに設置する試験装置 (過渡時燃料破損限界試験装置) で破損限界を確認するというものである。検討にあたっては、実際に装置のモックアップ試験を行い、その性能限界等を見極めた。

検討の結果、本装置の加熱系には、高周波誘導加熱方式が最も有望であり、これにより加熱系を水冷却することなく、炉内を想定した燃料ピンの軸方向温度分布の再現等、様々な温度パターンを実現できる見通しが得られた。

さらにモックアップ試験結果から、加熱系に冷却機構を付加しない状況においても、急速加熱試験により  $\phi 9\text{mm}$  の被覆管表面の温度が最高で  $1100^{\circ}\text{C}$  まで到達することを確認した。また、被覆管表面温度を  $850^{\circ}\text{C}$  一定にして 1 時間保持する高温保持試験も可能であることが確認できた。

---

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

\* 検査開発株式会社

## Study on the Fuel Damage Limit Examination Device at Transition for Irradiated Fuel Pin

Kozo KATSUYAMA, Hiromasa TOYODA\* and Tsuyoshi NAGAMINE

Fuels and Materials Department  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higasiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 13,2006)

In the case of FBR, it is important to evaluate the soundness of fuel pins in the situation of transient such as Transient Over Power(TOP), Loss Of Coolant Flow(LOF) and Loss of Heat Sink(LOHS). In order to evaluate these behaviors, the failed fuel pins are available. But the data of failed fuel pins were very limited in the world.

Therefore, the data obtained by the temperature transient burst tests for cladding tubes cut down from irradiated fuel pins were provided for the evaluation. But it should be noted that such out-pile tests could not simulate the actual behavior due to change in the physical and chemical properties during the preparation of the specimens.

To solve this problem, the feasibility of the transient test that was able to exclude such turbulence as much as possible was investigated in this study. This is to examine where the limit of the fuel pin failure can be measured using the irradiated fuel pin without fuel pin sectioning. For this examination, Fuel Damage Limit Examination Device installed in the hot sell was used. And then, mock-up test was conducted to confirm its performance.

As a result, the high frequency induction heating method is the most promising for the heating system of this device. This heating system makes it possible to simulate the axially distribution of the fuel pin temperature without the water-cooling system around the furnace. And then, the mock-up test showed that the temperature of cladding( $\phi$  9.0mm) surface reached 1100°C highest without the cooling system, and could be kept at a certain value (850°C) for an hour.

Keywords: FBR, Loss of Coolant Flow, Irradiated Fuel Pin, Temperature Transient Burst Test

---

\* Inspection Development Company

目次

1. はじめに	1
2. 日米共同研究で実施した照射済み燃料ピンの炉外加熱試験	2
2.1 試験装置の概要	2
2.2 試験結果	3
3. 過渡時燃料破損限界試験装置の概念検討	4
3.1 要求性能	4
3.2 加熱系の検討	5
3.2.1 加熱方式の検討	5
3.2.2 加熱方式の選定	6
3.3 測定系の検討	8
3.3.1 要求される性能要件	8
3.3.2 温度測定手法の検討	8
3.3.3 破損検知手法の検討	8
3.3.4 F P ガス分析系	9
4. コールドモックアップ試験	10
4.1 コールドモックアップ試験の目的	10
4.2 モックアップ試験装置の概要	10
4.2.1 モックアップ試験装置の構成	10
4.2.2 モックアップ試験装置	10
4.3 モックアップ試験	11
4.3.1 モックアップ試験 I	11
4.3.2 モックアップ試験 II	14
5. まとめ	15
参考文献	16

## Contents

1. Introduction	1
2. Transient overheating test carried out in ORT program	2
2.1 Outline of equipment	2
2.2 Results	3
3. Conceptual study of fuel damage limit examination device	4
3.1 Performance requirement	4
3.2 Study of heating method	5
3.2.1 Study of heating method	5
3.2.2 Selection of heating method	6
3.3 Study of measurement techniques	8
3.3.1 Required performance	8
3.3.2 Study of temperature measurement method	8
3.3.3 Study of detection method	8
3.3.4 Study of FP gas analysis	9
4. Mock up test	10
4.1 Purpose of mock up test	10
4.2 Outline of mock up test apparatus	10
4.2.1 Structure of mock up test apparatus	10
4.2.2 Mock up test apparatus	10
4.3 Mock up test	11
4.3.1 Mock up test I	11
4.3.2 Mock up test II	14
5. Conclusion	15
Reference	16

## 図リスト

図 1.1	LOF 型事象時の被覆管温度変化評価例	17
図 1.2	急速加熱バースト試験結果と破裂温度評価線の比較	18
図 2.1	ANL で実用化された過渡時燃料破損限界試験装置	19
図 2.2	TOH 試験時の被覆管温度履歴	20
図 3.1	高周波誘導加熱方式による加熱系概念図	21
図 4.1	モックアップ試験装置	22
図 4.2	試験装置断面概略図	23
図 4.3	熱電対の取り付け位置及び熱電対番号	24
図 4.4	被覆管表面温度と時間の関係(急速加熱試験)	25
図 4.5	被覆管表面温度と時間の関係(高温保持試験)	26
図 4.6	被覆管外径と被覆管表面温度の関係	27
図 4.7	被覆管表面温度と時間の関係(模擬ペレットの影響確認)	28
図 4.8	被加熱試料(模擬燃料ピン)を加熱容器内で偏心させるための部品	29
図 4.9	被覆管表面温度と時間の関係(炉内装荷位置による影響)	30

This is a blank page.

## 1. はじめに

高速炉においては、定常時に加え、反応度挿入型事象 (TOP)、冷却能力低下型事象 (LOF)、除熱源喪失事象 (LOHS) の異常な過渡変化時における燃料ピンの健全性を評価することが重要となる。

その LOF 時の被覆管温度変化の一例を図 1.1 に示す。これは、高速原型炉「もんじゅ」における外部電源喪失時の評価結果である。この結果に示された 1 次ピークの値をもとに、「もんじゅ」における異常な過渡変化時の被覆管最高温度は、830°C に設定された<sup>1)</sup>。そのため、「もんじゅ」の異常な過渡変化時の燃料ピンの健全性評価は 830°C、最大内圧 69MPa (約 7kgf/mm<sup>2</sup>) で行われた。この評価は、海外等における被覆管の急速加熱バースト試験結果<sup>2)~5)</sup>に基づき、これらに工学的な安全裕度を考慮して行われた。

その「もんじゅ」の評価点と急速バースト試験結果<sup>6)</sup>を図 1.2 に示す。同試験に供された被覆管試料は、照射した燃料ピンから切り出した試験片から燃料部分を取り出したものである。

図 1.2 からわかるように、大部分のデータは「もんじゅ」評価点における燃料ピンの健全性を保証するものとなっている。しかし、HEDL で取得されたデータの一部にかなり強度の低いものが見られた<sup>7)</sup>。

この強度低下現象を HEDL 側は、燃料隣接効果 (FAE) と名づけた。この問題について柴原ら<sup>8)</sup>は、照射材料試験施設 (MMF) で実施した実験をもとに、FAE の生じるのは空気中に曝した試料だけで、窒素中で扱ったものではそのような効果が現れないことを示した。

以上のことから、照射後試験において、燃料ピンを切断し試料に加工する際に、その取り扱い雰囲気によって物理的・化学的性質が変わることが懸念された。その懸念を払拭するためには、照射後、燃料ピンを切断せずにそのままの形状で急速加熱バースト試験等を行うことが望まれた。

そのような背景を踏まえ、照射後の試料の取り扱いに伴う外乱を可能な限り排除するために、高速炉で照射された燃料ピンをそのまま加熱して破損させる実験が、日米共同研究 (EBR-II における酸化物燃料の運転時信頼性試験) の下、アルゴンヌ国立研究所 (ANL) において実施された。

本研究は、その海外での経験等を参考に、燃料ピン全体を加熱して破損限界として見極める試験 (過渡時燃料破損限界試験) をわが国で実施すべく、その実現性を検討したものである。本稿には、そのホットセルへの設置という観点から装置の最適化とともに、実際にモックアップ試験を実施して得られた結果についても合わせて報告する。

## 2. 日米共同研究で実施した照射済み燃料ピンの炉外加熱試験

高速実験炉 EBR-II (米国) における酸化燃料の運転時信頼性試験<sup>9)</sup>は、高速炉燃料の運転信頼性を確立するため、米国エネルギー省 (DOE) との日米共同研究として実施された。この共同研究の一環として、照射した燃料ピンを対象とした炉外加熱試験 (TOH 試験) が、米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) で行われた<sup>10)</sup>。本章では、この試験に適用された試験装置の概要と得られた結果について述べる。

### 2.1 試験装置の概要

ANL において TOH 試験に適用された試験装置の概念図を図 2.1 に示す。本装置には、試験用照射燃料ピンを金属キャプセルに密閉し、その外側を石英管で覆い、さらに、その外側から赤外線反射加熱炉で燃料ピンを加熱する方式が採用された。

金属キャプセルはタンタルまたはインコネル製で、内外に熱電対を溶接し、被覆管温度及び加熱炉を制御するための温度測定を実施している。金属キャプセル内は真空中で、その外側の石英管の間は He 雰囲気になっており、キャプセルの酸化及び外面の窒化を防止している。また、金属キャプセルの気密性はスエジロックで担保され、燃料破損後の核分裂生成 (以下 FP) ガス捕集を行うため閉じた系となっている。系内の内圧は感度の異なる 2 個の圧力計で常時測定されており、燃料ピンの破損検知はこの圧力計の変動を読み取り実施している。

加熱炉は反射型で、アルミ製ジャケットを水冷している。この冷却水は、セル壁を經由して操作室から閉ループで供給されており、セル外には熱交換器、ポンプが組み込まれている。冷却水の全量は約 1～2 リットルで、エチレングリコールが添加されている。また、電気炉の延命を目的としてフィラメント部は N<sub>2</sub> ガスで冷却している。N<sub>2</sub> ガスはフィラメントに直接吹きかけるため、石英円筒と金属キャプセル管に移行する。そのため、キャプセル外表面を窒化する恐れがあり、この部分に He ガスを流し窒化を防止している。加熱性能は最高温度が 1200°C であり、加熱速度は室温から 800°C までの昇温に 1～2 分程度 (最大昇温速度は約 13°C/sec) である。また、高温保持時間は 1～2 時間となっている。

被覆管温度は、金属キャプセルに取付けた 6 個の熱電対の測定値で代替しており、被覆管の直接測定は実施していない。なお、金属キャプセルは再利用されず試験ごとに交換される。

## 2.2 試験結果

TOH 試験で実施した昇温パターンを図 2.2 に示す。TOH 試験では、所定の温度まで急速加熱し破損が検出されるまでその温度を保持する定常温度型試験（図 2.2 中 (1)）、800°Cまで急速加熱しその後破損が検出されるまで 20°C/hr で温度を上げる試験（図 2.2 中 (2)）、880°Cまで急速加熱しその後 750°Cで 24 時間保持する試験（図 2.2 中 (3)）がそれぞれ実施された。いずれの試験ともに最初に 250°Cで 1 時間、装置内の脱ガスを行った後、急速加熱により所定の温度まで加熱した。

ここでは、一例として EBR-II で照射した PNC316 鋼被覆管を用いた定常温度型試験の結果について紹介する。試験燃料は、被覆管外径  $\phi 7.0\text{mm}$ 、肉厚 0.37mm、燃焼度 12at.%である。本試験では、急速加熱により被覆管最高温度を 923°Cまで加熱し、その後 49 分保持した時点で被覆管最高温度部に破損が生じた。

これらの TOH 試験データを未照射材のクリープ破断強度データと比較すると、PNC316 鋼では破断時間にして 1/2 程度の低下が認められた。しかし、設計で用いている保守側の値 (1/500) ほどの低下ではなく、かなりの裕度のあることが確認された。

### 3. 過渡時燃料破損限界試験装置の概念検討

#### 3.1 要求性能

照射済み燃料ピンを対象とした過渡時燃料破損限界試験装置については、照射燃料集合体試験施設（以下、FMF と称す）の試験セルに設置することを前提に検討した。FMF は、高速実験炉「常陽」等で照射した燃料集合体や燃料ピンの照射後試験（以下、PIE と称す）を実施する施設である。内部には照射した燃料集合体等、高い放射線、高い表面汚染密度を有する試料を扱うため試験セル、除染セル、クリーンセル等が設置されている。

試験セルを選択した理由は、ガス分析系を既存のパンクチャ試験装置のセル外ガス分析装置と共有することができることや、過渡試験により燃料ピンが破損した際の FP 等による  $\alpha$  汚染対策からである。FMF 試験セルに設置する条件としては以下のことが要求された。

- ・ 試験セル内において加熱コイル等の冷却に水を使用しないこと（試験セルは臨界管理上、乾燥系で評価しており、水の使用はできないため）
- ・ 燃料ピンの破損試験により隣接試験装置への影響がないこと。
- ・ 破損後の FP 放出、燃料ペレット片等の回収が容易であること。

一方、過渡時燃料破損限界試験装置の本来の目的である過渡事象を模擬するための要求性能について検討した。基本的には、前項で述べた ANL の炉外加熱装置の性能に準拠して設定することとした。

ANL の実績では、前述したように PNC316 鋼の場合、被覆管最高温度が 923℃、保持時間 49 分で破損が確認された。今回検討している装置は、「常陽」で照射した燃料ピンを対象とするため、EBR-II で照射した燃料ピンと比較すると、仕様や照射条件も異なり、破損に至る可能性はかなり低くなると予測される。そのため、最高温度は 1200℃まで昇温可能なように設定した。

- |          |                |
|----------|----------------|
| ・ 昇温速度   | 1℃/sec～10℃/sec |
| ・ 昇温最高温度 | 1200℃          |
| ・ 常用最高温度 | 800℃           |
| ・ 高温保持時間 | 1～2 時間         |

過渡時燃料破損限界試験装置を構築する基本的機器構成は、試験体である燃料ピンを昇温加熱するための加熱系、試験装置内の雰囲気制御して破損時に燃料ピンから放出される FP ガスを捕集するための真空系、破損検知及び温度・圧力データを取得するための測定系からなるものとした。それぞれ概念検討結果を以降に示す。

## 3.2 加熱系の検討

### 3.2.1 加熱方式の検討

一般的に用いられる加熱方式としては、赤外線輻射加熱方式、通電加熱方式、高周波誘導加熱方式があげられる。ここでは、これら加熱方式の特徴等について検討した結果を述べる。

#### (1) 赤外線輻射加熱方式

赤外線輻射加熱方式は、赤外線を炉内の反射鏡で集光させ、対象物を加熱する方法である。本方式は、ANLの装置にも適用された実績がある。

- ・メリット
  - ・反射鏡に放物面あるいは楕円面反射鏡を用いることで、広範囲な領域を均一に加熱することが可能である。
  - ・高速で超高温までの加熱が可能である。
- ・デメリット
  - ・反射炉等の水冷却設備が必須である。このため装置が比較的大掛かりとなる。

#### (2) 通電加熱方式

通電加熱方式は試験体に電流を直接流し、試験体自身の電気抵抗により発生するジュール熱を利用して温度を上げる方法である。この方法には以下の特徴がある。

- ・メリット
  - ・試験体に電極を接続するだけの簡単な構造で昇温ができる。
  - ・試験体周囲を覆う必要がなく、試験体全体の可視化が可能である。
  - ・試験体が直接熱を発生することから加熱効率が低い。
- ・デメリット
  - ・実機の照射済み被覆管は、内外面腐食や照射損傷、偏肉等によって電気抵抗が管の周方向及び軸方向で不均一になっていると考えられることから、試験体全体で均一な発熱とならない可能性がある。
  - ・被覆管の軸方向に任意の温度分布を施すことが困難である。

#### (3) 高周波誘導加熱方式

高周波誘導加熱方式は、コイルから試験体の表面付近に高密度の渦電流を生じさせて加熱する方法である。電気炉の実用化例から考えると500Hz以上の周波数を必要とする。

- ・メリット
  - ・急速に高温まで昇温することが可能である。
  - ・コイルの出力を軸方向で変えることにより、被覆管の軸方向に温度分布を施すことが可能である。
- ・デメリット
  - ・誘導電流を発生させるコイルを真空容器の周辺に設置する必要がある。

以上の検討結果から、赤外線輻射加熱方式では、反射炉を水冷するための冷却設備が必要である。試験セルでは、臨界管理上セル内で水を使用することができないことを考慮すると、この加熱方式の採用は現実的ではない。このため加熱方式の選定にあたっては、通電加熱方式と高周波誘導加熱方式について詳細に検討することとした。

### 3.2.2 加熱方式の選定

通電加熱方式と高周波誘導加熱方式について、要求される性能要件等を含めた観点からの具体的な検討を行った。

#### (1) 昇温最高温度

一般産業界におけるこれまでの使用実績等から、昇温最高温度については、双方の加熱方式とも目標とする 1200℃は問題なく到達が可能と判断できる。ただし、通電加熱方式の場合、被覆管の内外面腐食や照射損傷、偏肉等によって、電気抵抗が管の周方向及び軸方向で不均一になると考えられ、試験体全体で均一な発熱とされない可能性がある。これに対し、高周波誘導加熱の場合は、周波数を最適化することによりほぼ均一に加熱できると考えられる。

#### (2) 昇温速度

昇温速度については、両方法とも電気的設備容量を大きくすることで目標とする 10℃/sec は確保できるものと考えられる。その電気出力は、高周波誘導加熱の場合では 15kW 程度であり、通電加熱ではさらに小規模になると考えられる。

#### (3) 高温保持時間

高温保持時間については、各加熱方式とも問題なく目標の 1 時間保持は可能と判断できる。

#### (4) 加熱温度の軸方向勾配化

過渡時燃料破損限界試験では、LOF 事象をはじめとしてさまざまな過渡時の状態を想定した被覆管の軸方向温度分布状態で試験を実施することが望まれる。このためには、軸方向で任意に温度を変えられることが必要である。

通電加熱方式では上下端に設置する電極により加熱を行うため燃料ピンの軸方向で温度を変えることは難しい。一方、高周波誘導加熱方式では加熱機構をモジュール化したうえで、各モジュールに対する温度制御を実施すれば燃料ピンの軸方向の温度を任意に変えることが可能である。

#### (5) 試験セルへの適用性

試験セルへの適用性については、コイル等の冷却に水を使用しないことが前提条件となる。この点に関しては、両加熱方式ともに水による冷却を必須とはしていないため問題はない。

セル内に設置するにあたっての加熱炉の大きさについては、通電加熱方式のほうが、高周波誘導加熱方式よりもコンパクトになる可能性を有する。これは、後者の場合、真空容器の外にコイルを設置することから、多少大きくなる可能性がある。ただし、セル内に設置することに関しては、高周波誘導加熱の場合でもコイル径は直径 30cm 程度以内であり、現状において FMF 試験セルの設置スペースとして問題はないと考えられる。

#### (6) 真空容器との取合い

燃料ピンは、全体を真空容器に入れて試験する必要がある。このため真空容器自体の大きさは、燃料ピンの長さや外径に依存するため、加熱方式による大きな違いはない。

以上のように 2 種類の加熱方法に対して、それぞれの観点から詳細な検討を行った。その結果、腐食等の被覆管表面状況の影響を受けずに均一に被覆管を 1200°C 前後まで昇温可能であることや、任意に変えられる被覆管の軸方向温度分布の機能付加が可能になること等から、過渡時燃料破損限界試験装置の加熱方式には高周波誘導加熱方式を採用することが最良と判断した。高周波誘導加熱方式を採用した場合の加熱系の概念図を図 3.1 に示す。

### 3.3 測定系の検討

#### 3.3.1 要求される性能要件

本装置の測定系としては、被覆管の温度測定、破損検知、FP ガス分析が挙げられる。要求される主な性能要件は、以下のとおりである。

- ・ 温度測定：
  - 1200°C程度までの被覆管の表面温度が高い精度で測定可能なこと。
- ・ 破損検知：
  - ピンホール等微小破損についても明確に検知可能なこと。
- ・ FP ガス分析：
  - 放出された FP ガスの組成分析等が可能なこと。

#### 3.3.2 温度測定手法の検討

過渡時燃料破損限界試験装置の温度測定手法には、光学式温度測定方式（非接触方式）と熱電対式温度測定方式（接触方式）が考えられる。以下にその検討結果を示す。

光学式温度測定方式は、熱電対式と比較して測定温度範囲が広く、その上限は約 2000°Cである。さらに、測定応答速度が 1/60 秒まで可能である。しかし、測定誤差が比較的大きいことやレンズ、検出素子の耐放射線性に課題がある。さらに、照射済み燃料ピンの一様でない表面性状に光学式温度測定方式を適用した場合、測定誤差が大きくなると予測される。

熱電対式温度測定方式は、照射材料試験施設（MMF）で実施されている急速加熱バースト試験において、照射済み燃料被覆管の温度測定として使用実績がある。MMF では、 $\phi 0.2\text{mm}$  のタングステンレニウム熱電対をスポット溶接で被覆管に直接取付けており、遠隔操作による熱電対の装着が可能である。さらに、温度測定誤差が光学式と比較して少ない利点がある。

以上のことから、これまでの使用実績や測定誤差を考慮して、過渡時燃料破損限界試験装置の温度測定手法には、熱電対式温度測定方式の適用が妥当であると判断した。

#### 3.3.3 破損検知手法の検討

破損検知は、被覆管破損時の内圧や温度を評価するうえで重要であり、燃料被覆管が加熱により破損する瞬間を正しく捕捉することが求められる。被覆管の破損検知手法には以下に示す 3 種類が考えられ、これらに関する検討結果を以下に示す。

- ・ FP ガス核種検知
- ・ 弾性波検知

- ・ 圧力変動検知

### (1) FPガス核種検知

FPガス核種検知は、燃料被覆管の破損により放出されるXeやKr等のFPガス核種を検出して破損検知する方式である。この方式では、燃料ピンが破損して、そこからFPガスが放出され、そのガスを検知するという段階を経る。FPガスの検知は、ゲルマニウム検出器等による $\gamma$ 線の測定が有力である。この方式の場合、被覆管の破損から検出器による確認までに多少の時差の発生することが考えられ、特に急速加熱時等では正確な破損時間を特定できない可能性がある。

### (2) 弾性波検知

破損時の弾性波検知とは、被覆管破損時の急激な歪エネルギーの開放にともなって発生する弾性波をAcoustic Emission (AE)により捉える方法である。具体的には、被覆管の上端もしくは下端に取付けた導波棒のAEセンサーから弾性波を検知する方法である。この方法は信号を直接的に測定する方法であり、破損時点を正確に把握する点では優れている。しかし、歪エネルギーの開放が常に大きいとは限らないことやAEセンサーが比較的ノイズや騒音に弱いことなどから、その微小な弾性波を十分に捕捉できない可能性が考えられる。

### (3) 圧力変動検知

圧力変動検知とは、被覆管が破損したときの真空容器内の圧力変動を圧力計により検知するものである。昇温試験中、真空容器内は高真空になっており、被覆管が破損した場合には、FPガスが真空容器内に拡散するためその圧力変動により破損を感知する。ANLの装置においてもこの手法により、被覆管の小規模破損を検知した実績がある。

以上の検討結果から、過渡時燃料破損限界試験装置の破損検知手法は圧力変動検知手法が最適であると判断した。

## 3.3.4 FPガス分析系

FPガスの分析は、主にKrとXeの定性分析である。この分析に関しては、燃料ピンを収納した真空容器とパンクチャ試験装置セル外ガス捕集系を配管で接続することにより可能となる。パンクチャ試験装置のセル外ガス捕集系には、ガスクロマトグラフィが設置されている。また、FPガスの同位体組成比分析もガス質量分析装置により可能である。

## 4. コールドモックアップ試験

### 4.1 コールドモックアップ試験の目的

上述したように過渡時燃料破損限界試験装置の概念検討結果から、本装置の加熱方式は高周波誘導加熱方式が有力とした。高周波誘導加熱方式の場合、一般的な使用方法では高温まで昇温する際、コイルを水等により冷却する。本検討では、無冷却かあるいは空気冷却により、所定の性能が達成できるかを確認する必要があるがあった。そこで、無冷却条件下において加熱コイル、試験体温度等の相関関係を把握して実機設計に資する基礎データを取得するために、モックアップ試験を実施した。

### 4.2 モックアップ試験装置の概要

モックアップ試験装置の概要及び仕様は以下のとおりである。

- ・加熱方式 : 高周波誘導加熱方式
- ・コイル冷却方式 : 自然冷却方式
- ・加熱ピン仕様 : 外径  $\phi 5.5 \sim \phi 9.0$  mm
- ・加熱対象 : 模擬燃料ピン
- ・加熱ピン長さ : 約 300 mm
- ・昇温速度 :  $5 \sim 10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$
- ・到達最高温度 : 約  $1200^{\circ}\text{C}$
- ・高温保持時間 : 模擬燃料ピン表面温度  $700^{\circ}\text{C} \times 0.5$  時間
- ・温度計測方法と計測点 : 熱電対、5 点

#### 4.2.1 モックアップ試験装置の構成

装置の全体写真を図 4. 1 に示す。試験装置には、加熱用コイル、冷却用クーラー等から構成される昇温部と、整合器や操作盤等から構成される電源系がある。加熱される燃料ピンは加熱用コイルの中心に設置され、コイルの表面は、冷却用クーラーから送られる空気により冷却される。

各部の詳細を次項以降に示す。

#### 4.2.2 モックアップ試験装置

##### (1) 加熱コイル

本装置では、高周波誘導加熱コイルとしてりつ線式を使用した。りつ線式の加熱コイルは、絶縁被覆した銅の細線を束ねたもので、細線を数多く束ねることで通電量を大きくとることができ、効率よく加熱することが可能となる。さらに、コイルの巻き数を調整することで容易に入熱量が変えられ、単一電源で高さ方向に温度分布をつけることが可能であ

る。

本試験で使用した加熱コイルは $\phi 0.4$  mmの細線を $6 \times 7 \times 7 = 294$ 本束ね、絶縁体の円筒に長さ約 300 mmの範囲で2重巻きにして成形したものである。加熱コイルの径に関しては、試験体である燃料ピン径 ( $\phi 5.5 \sim 9.0$  mm) 及び熱電対の装荷スペースを考慮し、炉心管には $\phi 13.5$  mmの石英ガラス管を選定した。さらに、試験試料からの放熱及び伝熱によるコイル温度の上昇を抑制する目的で、セラミックファイバーの断熱層を炉心管周辺に配置した。また、コイルへの伝熱を遮断し、コイル内面を冷却する目的で空気冷却することができる隙間を設けた。

## (2) 試験部構造

試料を設置して加熱を行う試験部分は、炉心管、断熱層、容器上蓋、架台と前述の加熱コイルから構成される。図 4.2 に加熱試験部断面図を示す。

### ・石英ガラス炉心管

外径 $\phi 13.5$  mm、肉厚 1.2 mm、長さ 770 mmの石英管で約 1200°Cの耐熱性がある。加熱用試料は炉心管内で中央部に取り付けられる構造になっている。炉心管は金属製 (SUS) の容器上蓋とOリング構造でシールされ、真空排気が可能な構造である。

### ・ファイバー断熱材

内部温度保持、コイルの過熱防止のために炉心管外周部に厚さ 60 mmのセラミックスファイバー断熱層を設置した。断熱層には気体冷却用の配管 4本を設置し、必要に応じて通気により冷却を実施できる構造とした。断熱層外周部には温度測定用の熱電対を設置した。

## (3) 温度測定

加熱用試料、断熱材、加熱コイル等については、熱電対を装着し、加熱中オンラインで温度測定を可能とした。熱電対の設置位置を図 4.3 に示す。

## 4.3 モックアップ試験

### 4.3.1 モックアップ試験 I

#### (1) 概要

モックアップ試験 I では、最初に本装置の性能を確認するための単純な昇温試験や、被覆管の外径、模擬ペレットの有無等を試験パラメータとした急速加熱試験と高温保持試験を実施した。

急速加熱試験、高温保持試験ともに装置の安全性の観点から加熱コイル中心部の温度に制約を設け（絶縁材の耐熱温度）、加熱コイル温度を 170℃ として試験を実施した。

## (2) モックアップ試験結果

### 1) 急速加熱試験結果

急速加熱試験結果の一例を図 4.4 に示す。これは、被覆管外径  $\phi 9.0\text{mm}$ 、模擬ペレットなしの条件で急速加熱試験を実施したときの温度プロファイルである。昇温開始後、500℃程度までは、約 10℃/sec 以上で被覆管表面温度は上昇した。その後、試験体の電気抵抗が低下する 600℃付近からジュール発熱が減少するため昇温速度も遅くなっている。最終的な被覆管表面の最高温度は、約 1100℃であった。

本モックアップ試験装置では、基本的な基礎データの取得を目的としていたため、一定の割合で高周波の出力を上昇させるシステムとなっている。このため、昇温速度が低下した場合に、高周波出力の上昇幅を大きくするといった機能がなく、図 4.4 に示したように高温側で昇温速度が低下した。これについては、被覆管温度等をリアルタイムで測定し、その結果をフィードバックさせた出力制御を導入すれば直線的な昇温が可能となる。

また、被覆管最高温度についても、高周波誘導加熱コイルを 170℃以下の温度で制限しているために 1100℃までとなったものであり、今後の確認試験によりさらに高温まで昇温できる可能性もある。

### 2) 高温保持試験結果

高温保持試験結果の一例を図 4.5 に示す。なお、本試験では被覆管外径  $\phi 9.0\text{mm}$ 、模擬ペレットなしの条件で実施した。

最初に、急速加熱により 1100℃まで昇温し、その後被覆管表面温度が約 850℃になるように調整し、その時点から約 1 時間その温度を保持した。これらの試験結果から、急速加熱と継続して高温保持試験を実施し、目標である 800℃で 1 時間以上の高温保持が可能であることを確認した。

### 3) 被覆管外径の影響

本試験では被覆管外径  $\phi 5.5\text{mm}$ 、 $8.0\text{mm}$ 、 $9.0\text{mm}$  の 3 種類を対象とした試験を実施し、それぞれの昇温特性を比較した。高周波誘導コイル温度が 100℃を示した時点でのそれぞれの被覆管表面温度を図 4.6 に示す。被覆管の外径が  $\phi 9.0\text{mm}$  の場合では、コイル温度 100℃の時点で、被覆管表面温度は 833℃を示しているのに対し、外径  $\phi 5.5\text{mm}$  の被覆管では

367°Cであった。この結果から、被覆管外径が小さくなると、被覆管表面温度の低下することが確認された。

本モックアップ試験装置は、対象とする被覆管の外径を約φ10mm程度まで昇温できるようにしたため、高周波誘導加熱コイルはφ10mm程度の径に対して最も効率が良くなっている。そのため、外径φ5.5mmといった細い径の対象物では熱変換の効率が低下していると予測される。

今回の試験で用いた外径φ5.5mm被覆管の熱容量は、肉厚や密度等から0.0015kcal/°Cと見積もられる。一方、φ8mm及びφ9mmの場合はそれぞれ0.0058kcal/°C、0.0066kcal/°Cである。このことから1°C温度を上昇させるためにはφ5.5mmの場合よりもφ9mmの方が約4倍の熱量を必要とすることになる。しかし、実際の加熱試験結果からは、外径φ5.5mmでは約23kcal/h、φ8mmでは約156kcal/h、φ9mmでは約220kcal/hの入熱があったと推定された。前述したようにφ5.5mmの場合は、φ9mmの熱量の1/4でほぼ同様の温度まで加熱できると予測されることから、約55kcal/hが必要であるが、これが約23kcal/h程度であったため最高温度が低くなっていると考えられる。このことからφ5.5mmでは現状の約2.4倍の入熱量が得られれば目標までの加熱が可能になると予測される。

これに関しては、φ9mmの被覆管に対しては約220kcal/hの入熱が与えられることから、φ5.5mmの場合でもよりコイルを被覆管に近づけることによって約55kcal/h程度の入熱を得ることは容易であると考えられる。

また、誘導加熱では、周波数の選定は極めて大切であり、エネルギーを効率良く物体に吸収させるためには、被加熱物が小さいほど高い周波数が、また、被加熱物が大きい場合には比較的低い周波数が必要となる。今回の試験装置の周波数は30kHzであるが、本試験で用いた試料のように被加熱体が小さい場合は、これを高周波にすることによって効率よく入熱させることが可能となる。ただし、周波数を高くして電流浸透を浅くすることによって、表面に発熱部が集中することも予測されることから、周波数を高くしすぎないことや加熱時間を長く取ること等が重要となる。

#### 4) ペレット装荷の影響

被覆管の中にペレットが装荷された場合を想定した急速加熱試験結果を図4.7に示す。装荷した模擬ペレットは、ZrO<sub>2</sub>製のφ0.8mm粒子であり、これを外径φ9.0mmの被覆管に詰めて試験した。図から、模擬ペ

レット入りの被覆管表面温度は最大で約 843℃であり、ペレットなしの場合の温度 1100℃と比較すると約 260℃低い結果となった。これは、加熱されている被覆管から熱が  $ZrO_2$  ペレットに伝達し、被覆管温度が低下したと考えられる。

$ZrO_2$  ペレットを装荷した  $\phi 9\text{mm}$  の被覆管の熱量は  $0.0116\text{kcal}/^\circ\text{C}$  ( $0.0066\text{kcal}/^\circ\text{C} + 0.0050\text{kcal}/^\circ\text{C}$ ) と見積もられ、ペレットなしの  $0.0066\text{kcal}/^\circ\text{C}$  と比較すると約 1.8 倍の熱量が必要である。ペレットなしの  $\phi 9\text{mm}$  被覆管の入熱量は約  $220\text{kcal}/\text{h}$  であることから、1.8 倍した約  $400\text{kcal}/\text{h}$  の入熱が与えられれば目標の温度までの加熱が可能である。

これに関しては、コイル温度の制限値を緩和することや、さらに前述したように対象とする被覆管径とコイル径との間に顕著な依存性があることを考慮すると、最適な高周波誘導加熱コイルを設計・製作することで、目標温度までの昇温は達成できると考える。

#### 4.3.2 モックアップ試験Ⅱ

##### (1) 概要

モックアップ試験Ⅰでは、被覆管外径の違いによる最高温度への顕著な影響が確認された。外径が  $\phi 9.0\text{mm}$  の場合は被覆管最高温度  $1100^\circ\text{C}$  が得られたが、外径  $\phi 5.5\text{mm}$  の被覆管では約  $450^\circ\text{C}$  程度までしか昇温できなかった。このように燃料ピン外径の違いで最高温度に差が生じたことから、燃料ピン湾曲等によりコイル中心から偏芯した場合、昇温特性に影響を与えることが懸念された。そこで燃料ピンの湾曲を模擬したモックアップ試験を実施した。

試験体は外径  $\phi 9.0\text{mm}$ 、肉厚  $1.0\text{mm}$ 、材質は SUS304 である。図 4.8 に示すように炉心管の中心位置、外側、両者の中心位置で試験した。

##### (2) 試験結果

試験体を加熱容器の中で変位させることにより、ピン湾曲の影響を確認した。試験結果を図 4.9 に示す。図から試験体の位置を加熱容器内での変化させた場合でも、温度推移に大きな差は確認されなかった。

この結果から、加熱容器内で燃料ピンが湾曲し、偏芯した場合でも、昇温に影響のないことが確認された。

## 5. まとめ

過渡時燃料破損限界試験装置を整備することにより、実際に照射したままの状態の燃料ピンを用いて急速加熱試験を実施し、破損限界温度を求めることが可能となる。本研究では、この装置の照射燃料集合体試験施設での実現性等について検討した結果、高周波誘導加熱方式を採用することによって実現できる可能性のあることがわかった。

さらに、本装置の実現性を見極めるためにモックアップ試験を実施した。その結果、加熱系に冷却機構を付加しない状況においても、急速加熱試験により被覆管径 $\phi 9.0\text{mm}$ の表面温度が最高で $1100^{\circ}\text{C}$ まで到達することを確認した。また、被覆管表面温度を $850^{\circ}\text{C}$ の一定にして、1時間保持する高温保持試験も可能であることをモックアップ試験により確認した。なお、被覆管外径 $\phi 5.5\text{mm}$ の場合及び模擬ペレットを装荷した場合には、所定の温度まで到達することができなかったが、高周波誘導加熱コイルを最適な条件で設計製作することにより、水等による冷却なしで可能になると考える。

### 参考文献

- 1) 高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書 添付書類 (十)、1980
- 2) Hunter, C.W.et al., "Deformation and Failure of Fast Reactor Cladding During Simulated Loss-of-Flow Type Transients" p.566 CONF-740401(1974)
- 3) Johnson, G.D.et al., "Fuel Cladding Mechanical Properties for Transient Analysis" p.998 CONF-761001(1976)
- 4) Duncan, D.R.et al., "Effect of Multiple Transients on Fast Reactor Fuel Pin Cladding Mechanical Properties" ANS Trans. Winter Meeting Vol.III(1978)
- 5) Hunter, C.W.et al., "Mechanical Properties of Fast Reactor Fuel Cladding Transient Analysis" ASTM. STP611(1976)
- 6) 吉武 他 PNC TN9400 96-281 「高照射 PNC316 被覆管の急速加熱破裂挙動評価」、1996 年 9 月
- 7) Vaidyanathan, S et al., "Mechanisms of the fuel adjacency effect in LMFBR oxide fuel pins" ANS Trans Vol.41 page 274-175 (1982)
- 8) Shibahara et al. "Mechanical property degradation of fast reactor fuel cladding during thermal transients", Effect of radiation on materials, 16<sup>th</sup> international symposium, ASTM STP 1175, 1994, p.664.
- 9) 浅賀 他 「EBR-II 炉における高速炉燃料の運転信頼性試験」、動燃技報 No.77、1991 年 3 月
- 10) 皆藤 他 JNC TN9400 99-001 「燃料ピン加熱試験による熱過渡時燃料ピンの挙動評価」、1998 年 10 月

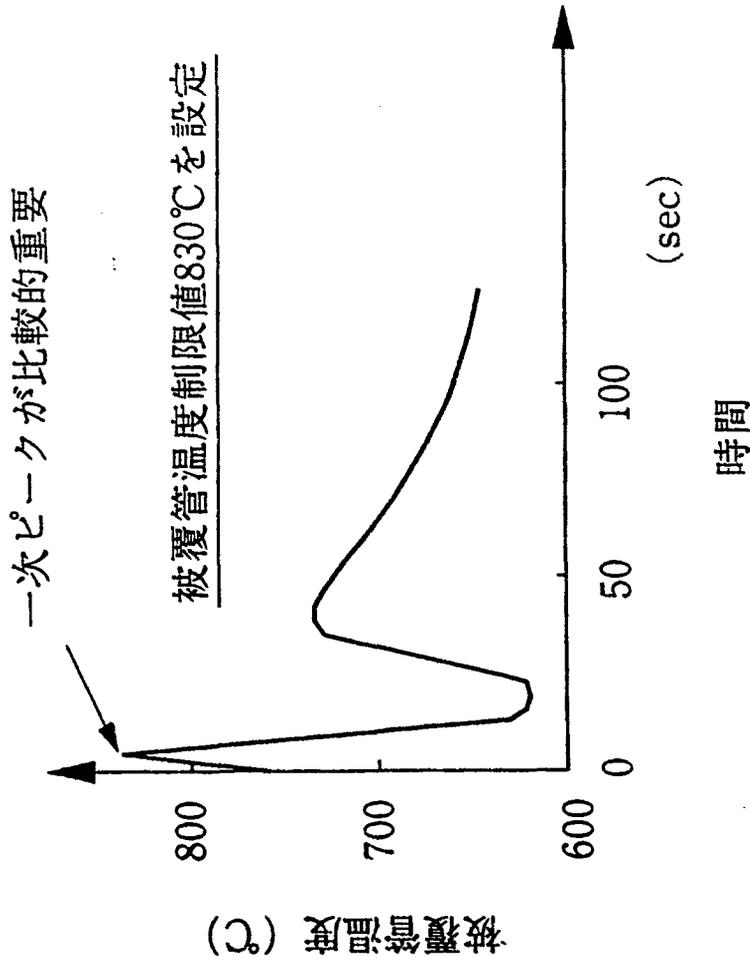


図 1.1 LOF 型事象時の被覆管温度変化評価例

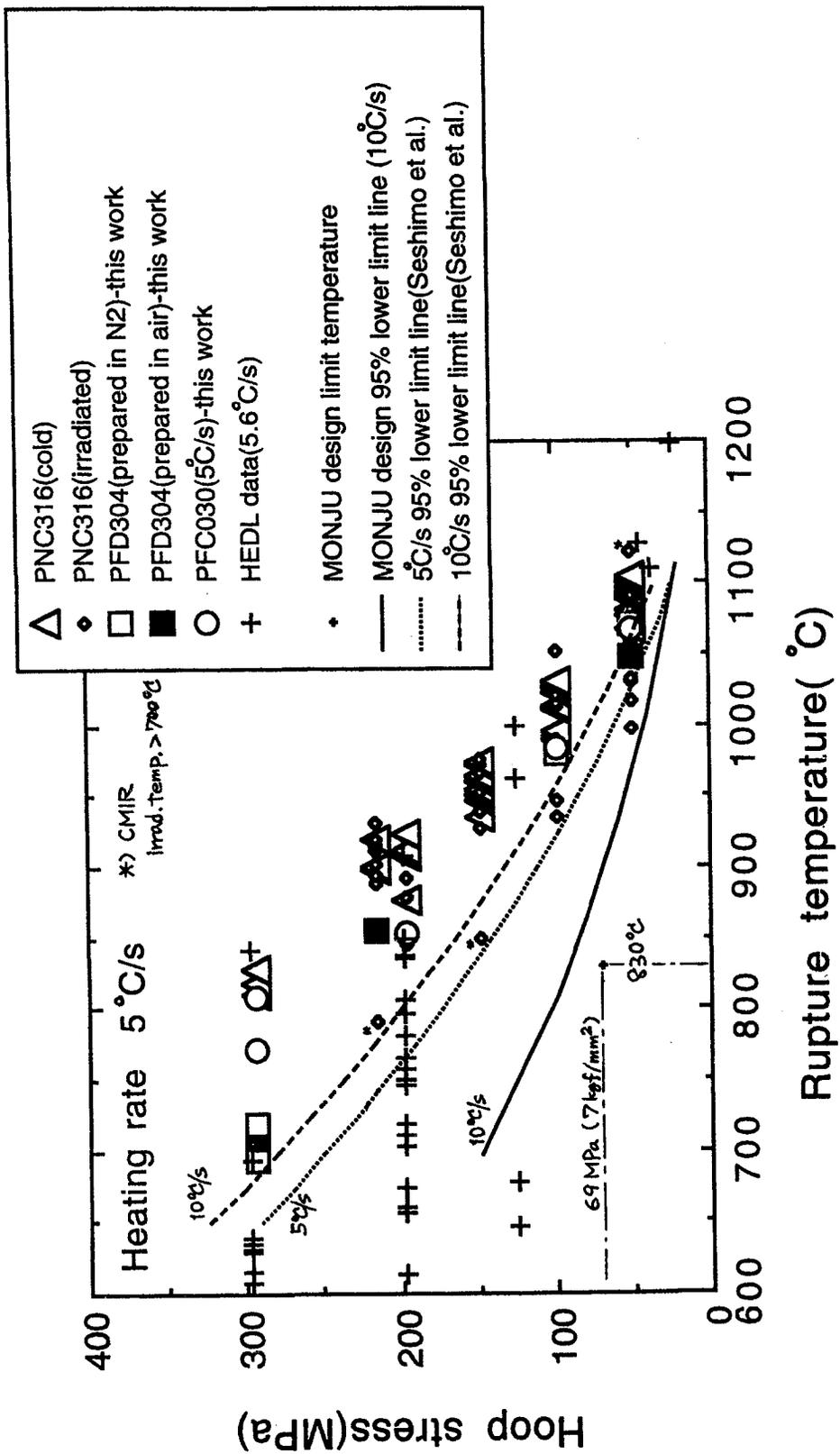


図 1.2 急速加熱バースト試験結果と破裂温度評価線の比較

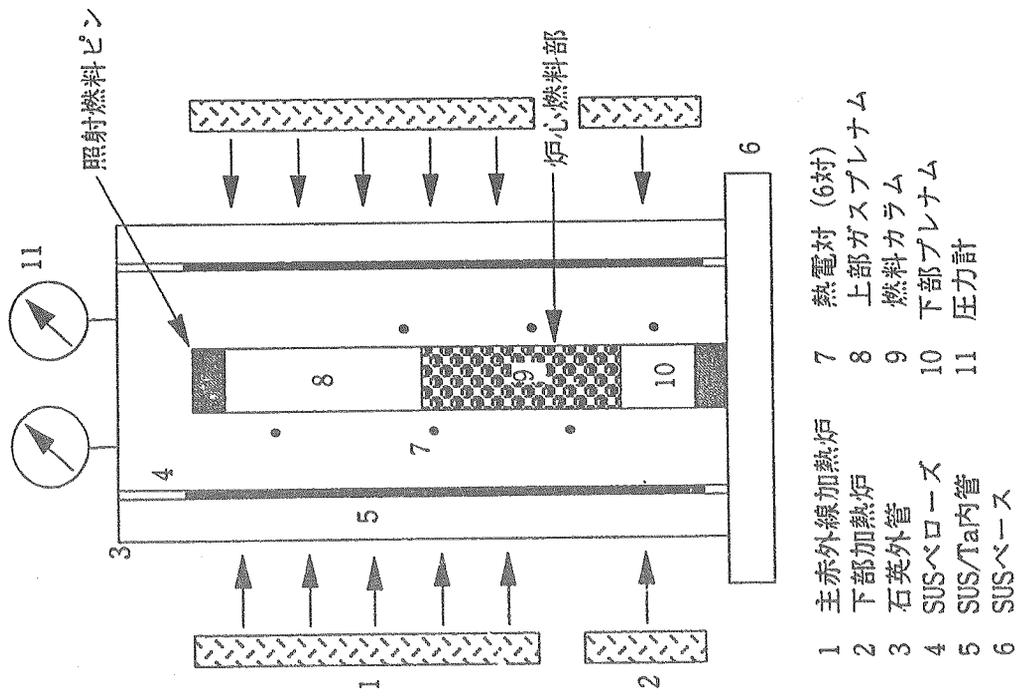


図 2.1 ANL で実用化された過渡時燃料破損限界試験装置

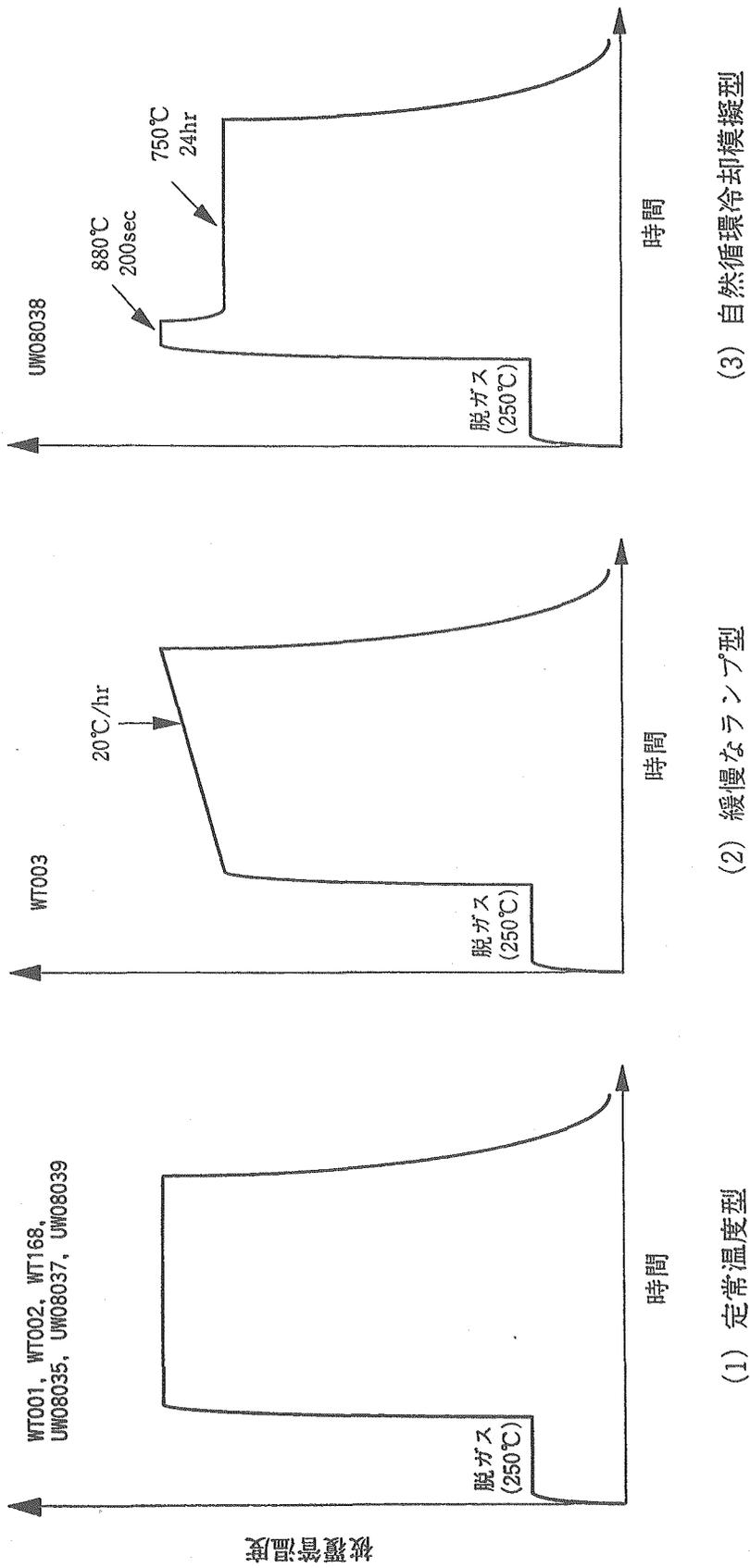


図 2.2 TOH 試験時の被覆管温度履歴

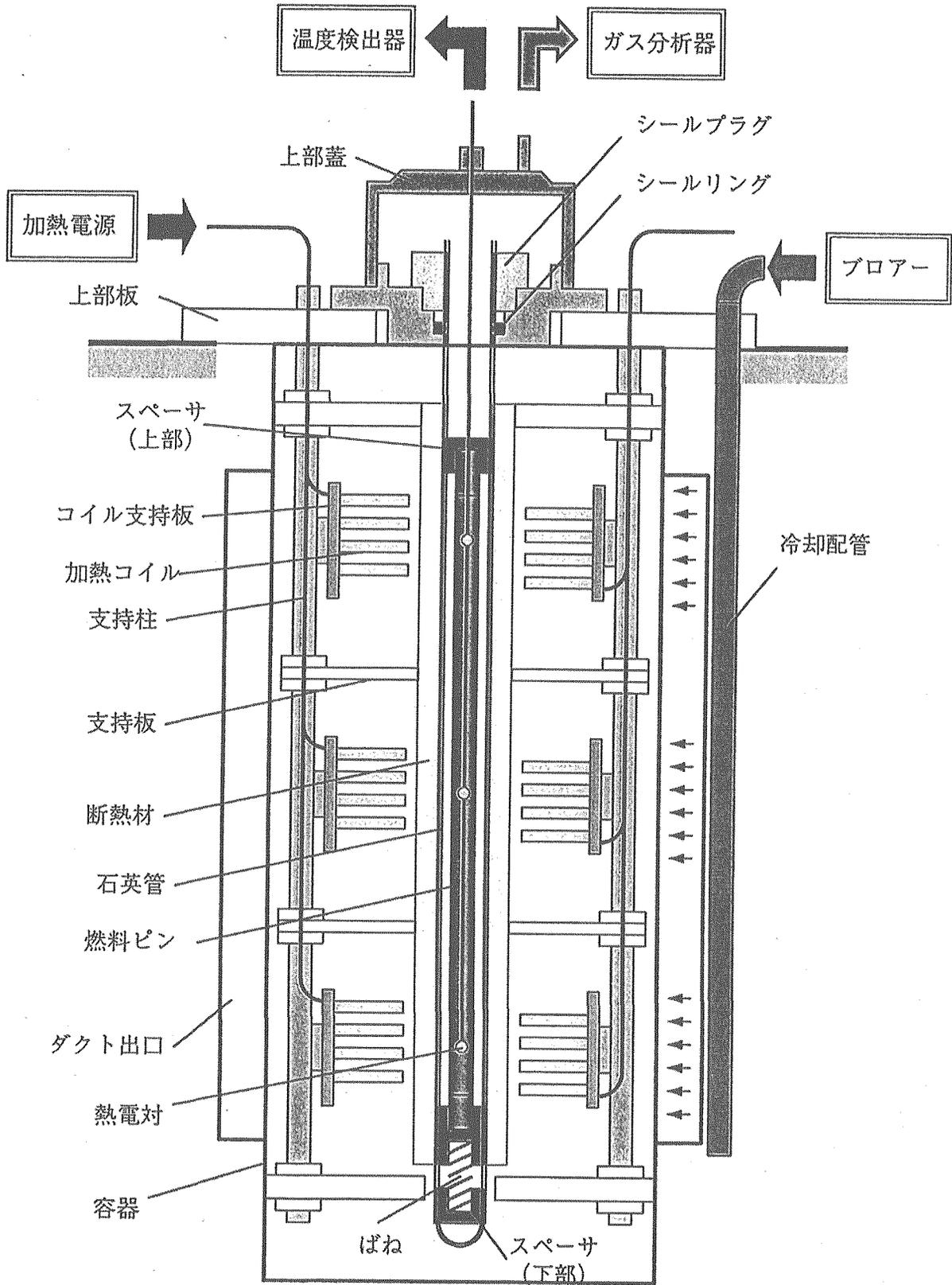


図 3.1 高周波誘導加熱方式による加熱系概念図

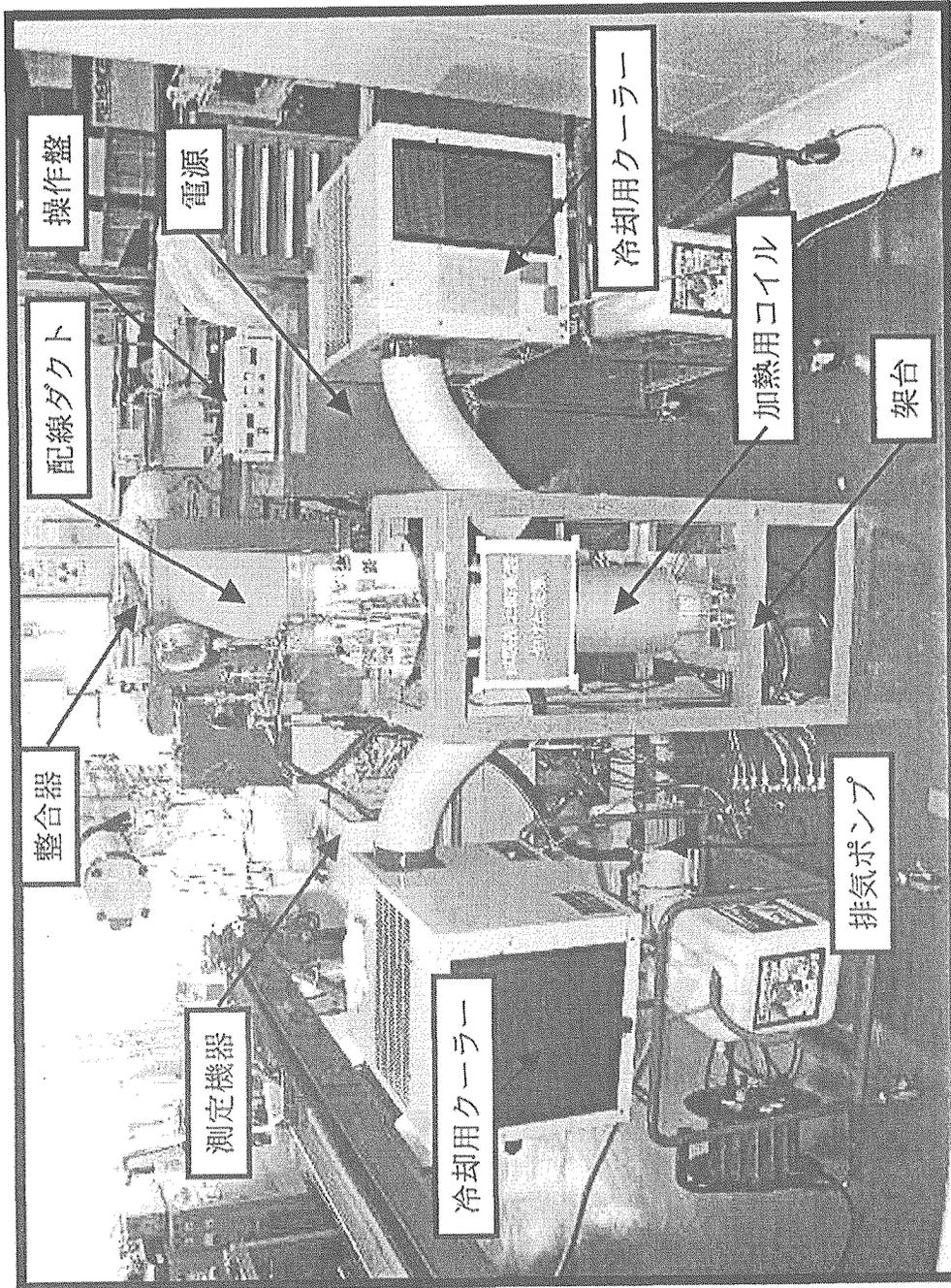


図 4.1 モックアップ試験装置

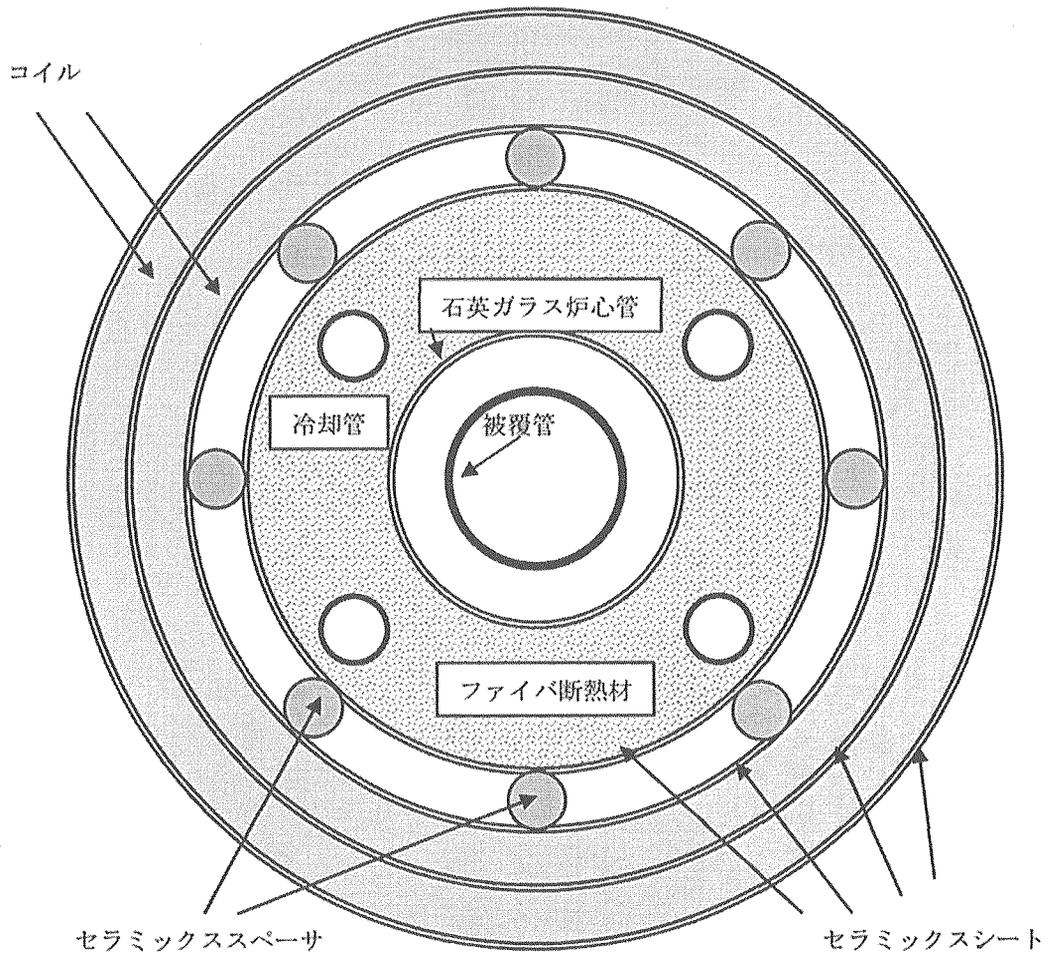


図 4.2 試験装置断面概略図

**熱電対位置及び番号**

- T1 : 試料加熱中央位置
- T2 : 試料加熱中央位置  
(温度制御用)
- T3 : 試料上部
- T4 : 試料下部
- T5 : 加熱コイル中央位置
- T6 : 加熱コイル上部
- T7 : 加熱コイル下部
- T8 : 断熱材外周
- T9 : 冷却管内温度
- T10 : 容器金属部分
- T11 : 室温

●  
T11

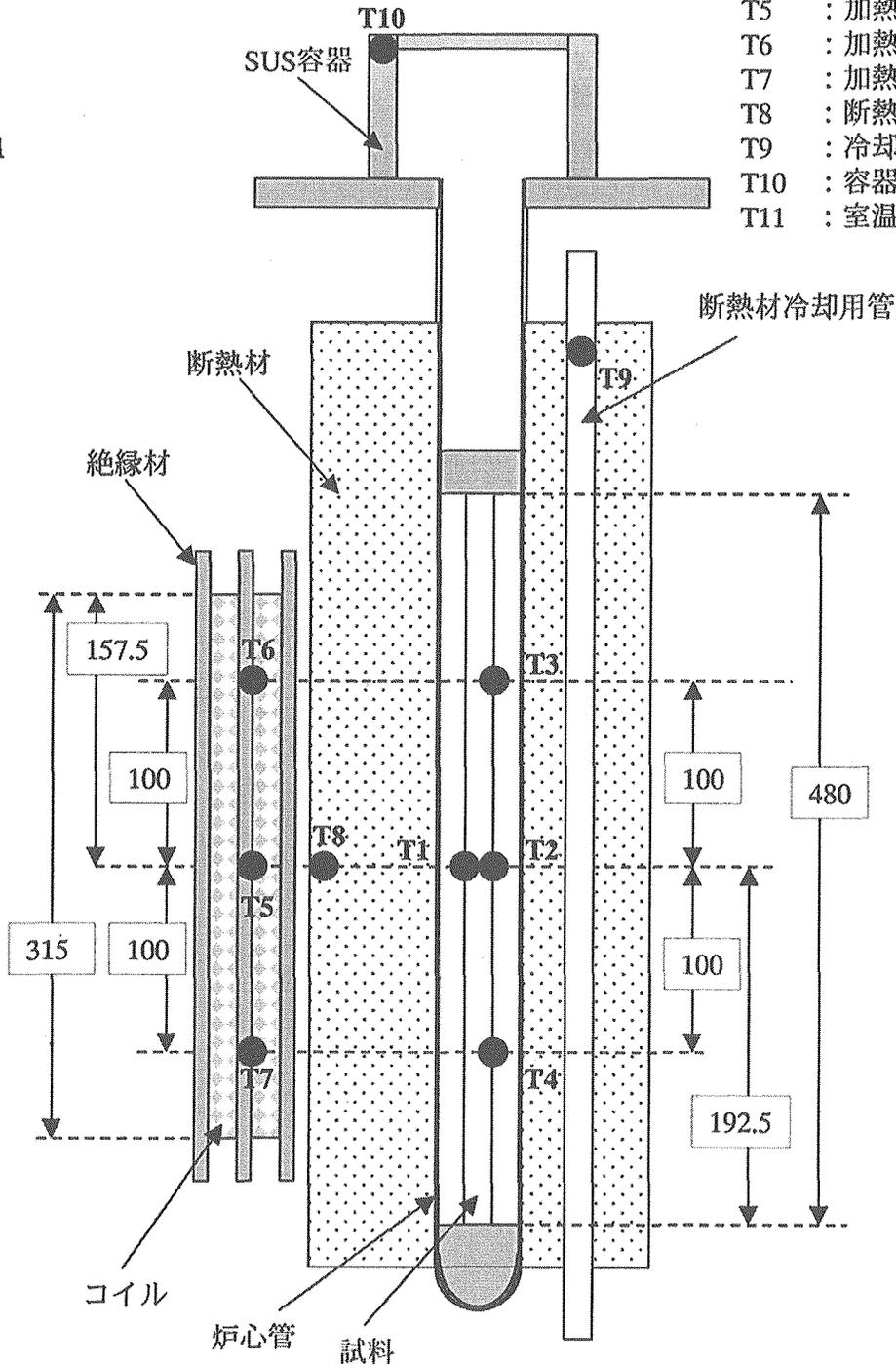


図 4.3 熱電対の取り付け位置 及び熱電対番号

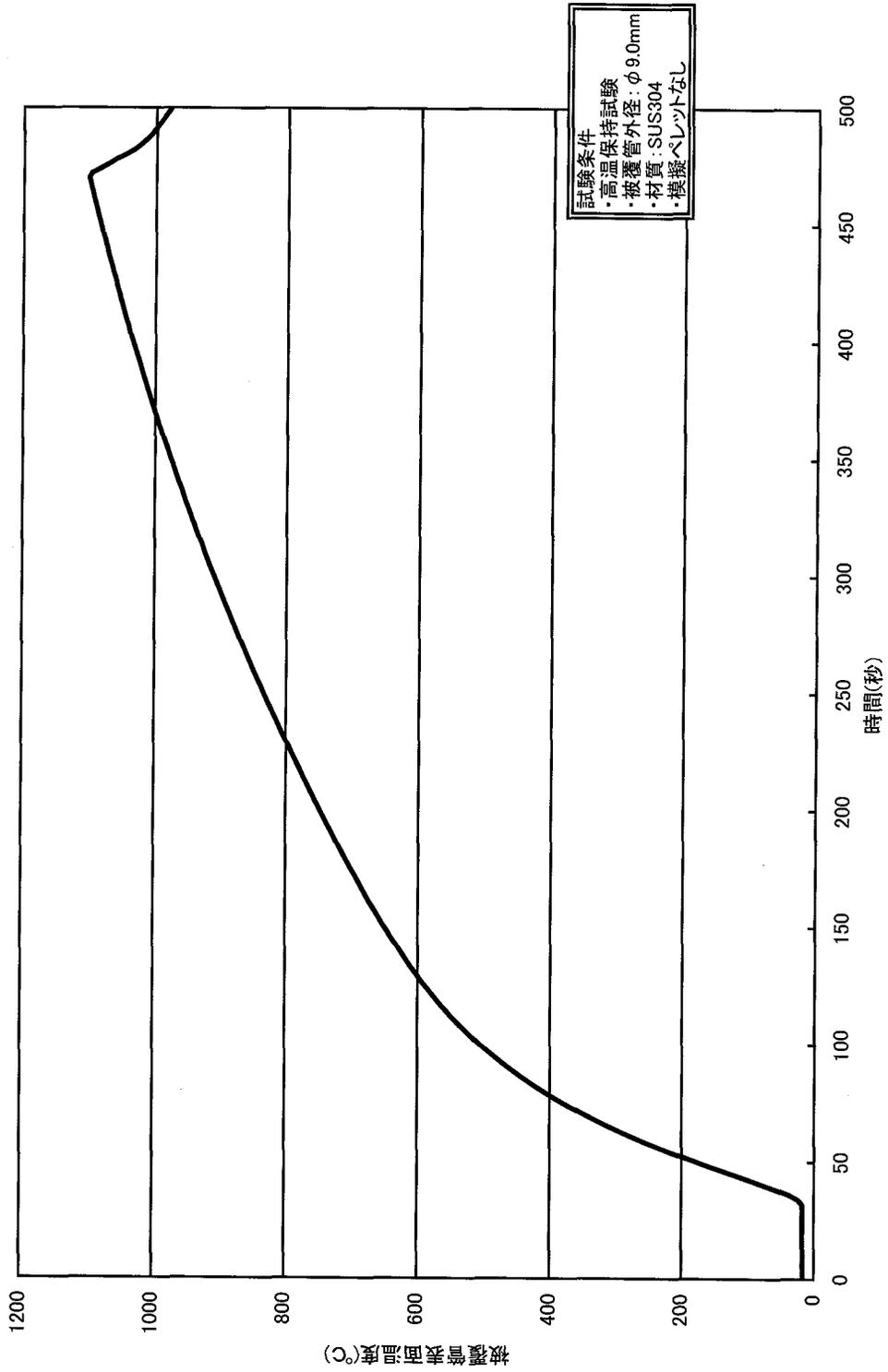


図 4.4 被覆管表面温度と時間の関係(急速加熱試験)

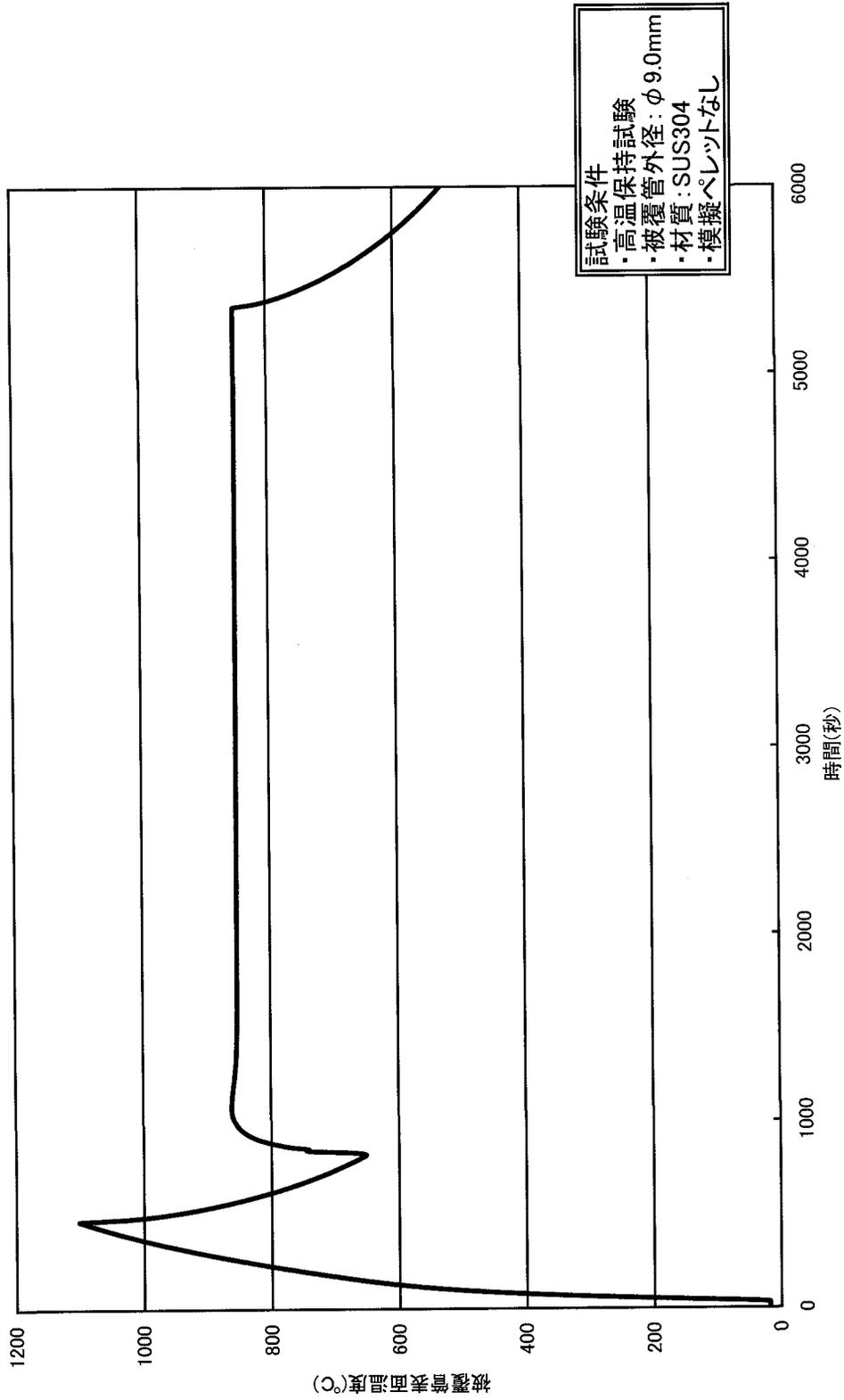


図 4.5 被覆管表面温度と時間の関係(高温保持試験)

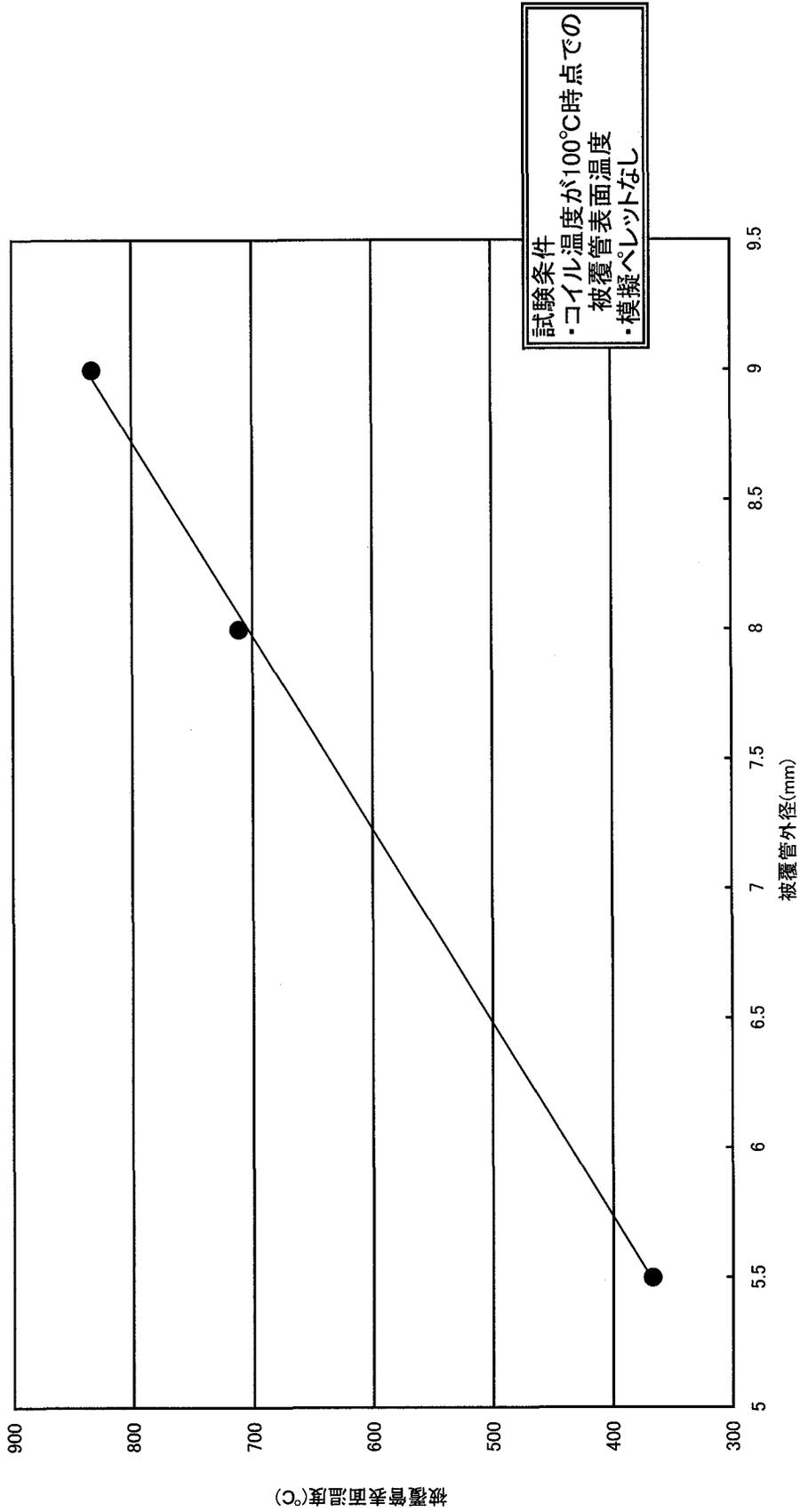


図4.6 被覆管外径と被覆管表面温度の関係

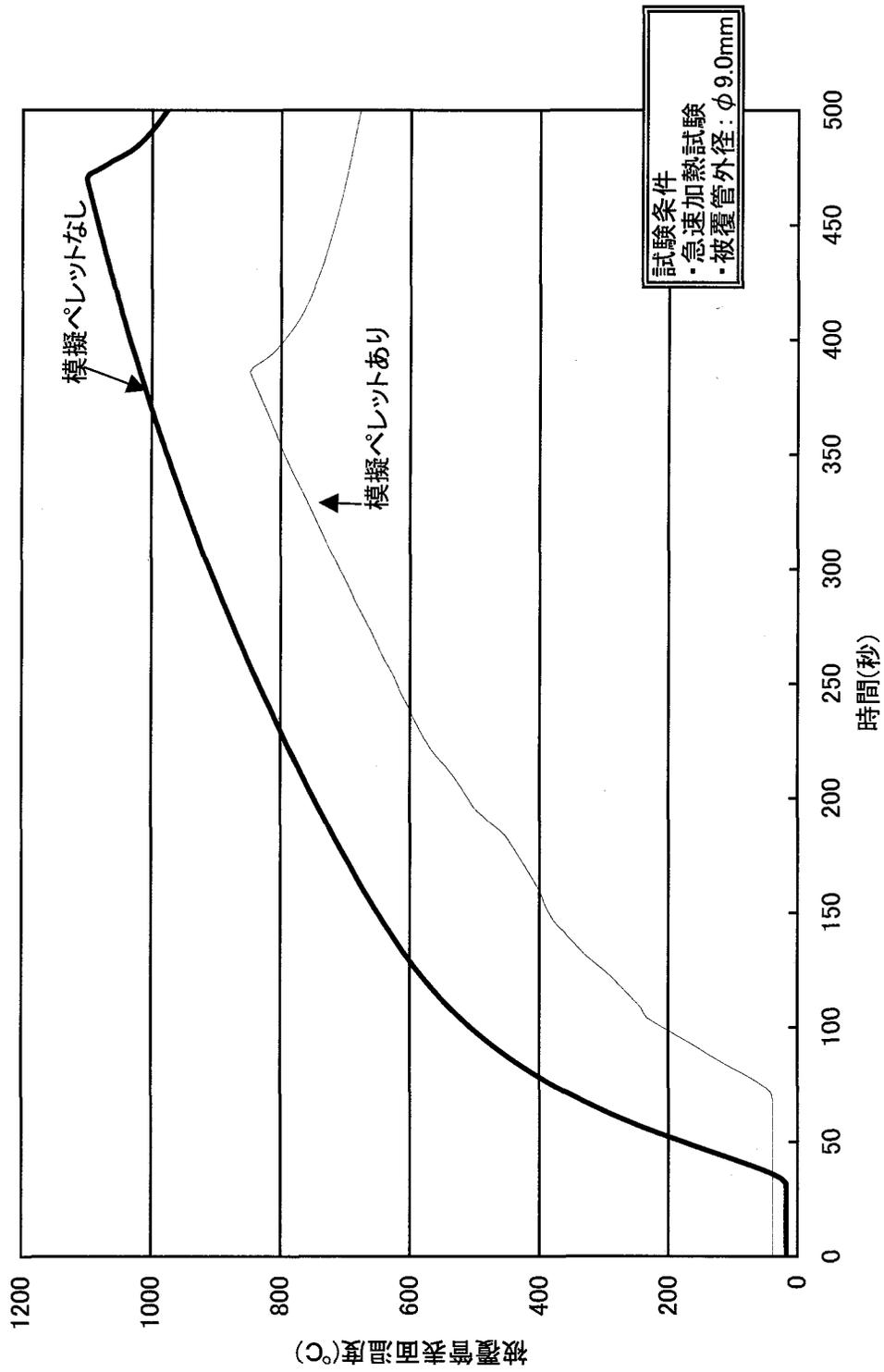
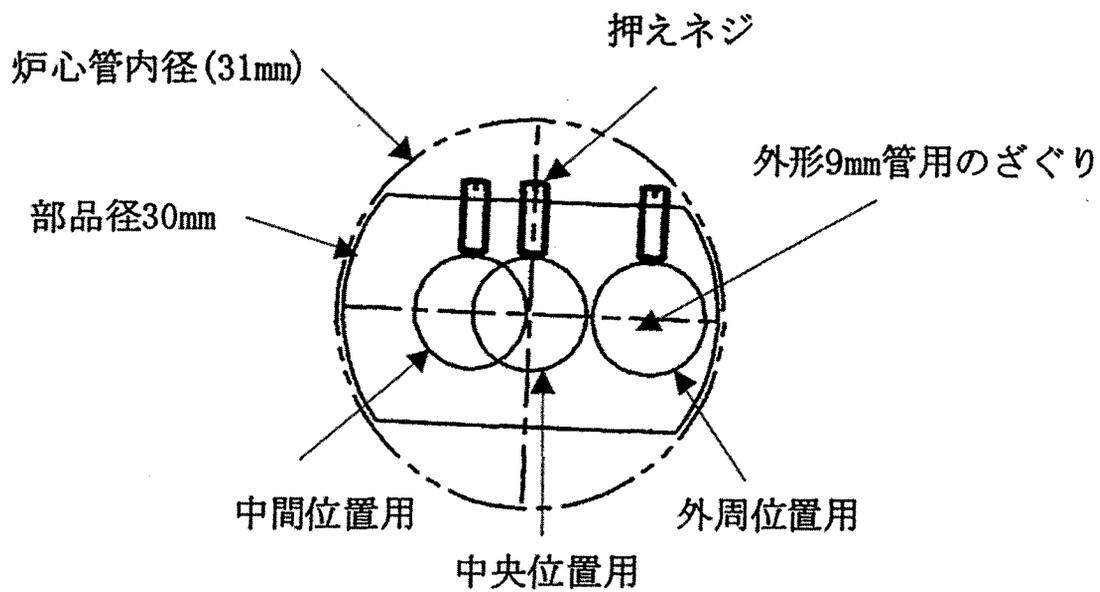


図 4.7 被覆管表面温度と時間の関係(模擬ペレットの影響確認)



試料の押え構造図 (平面)

図4.8 被加熱試料 (模擬燃料ピン) を加熱容器内で偏心させるための部品

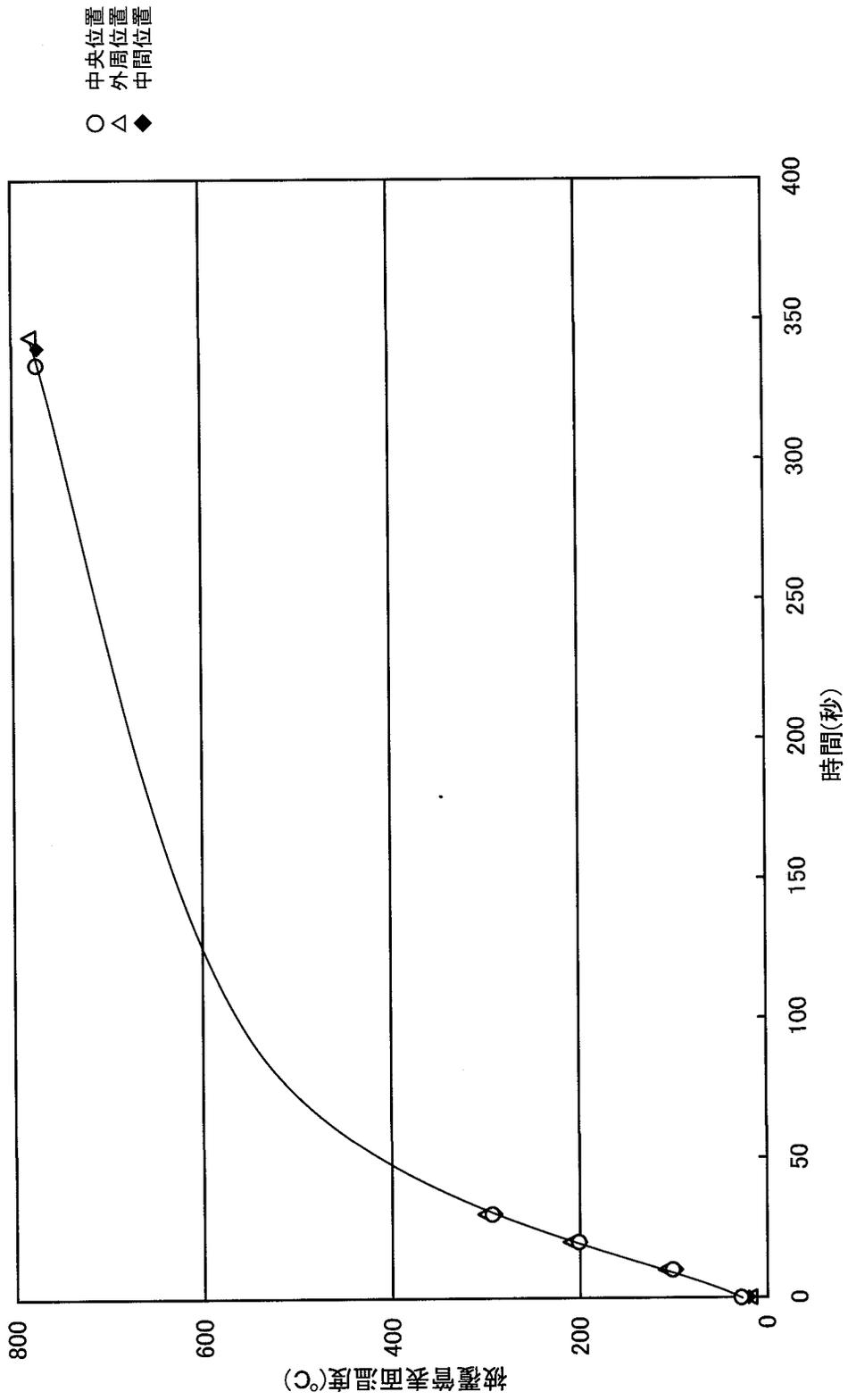


図4.9 被覆管表面温度と時間の関係(炉内装荷位置による影響)