

JAERI-M

8 3 1 1

単一燃料棒昇温装置の製作と試験

1979年7月

金子 義彦・竹内 素允・榊山 年夫\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

単一燃料棒昇温装置の製作と試験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

金子義彦・竹内素允・榊山年夫\*

(1979年6月9日受理)

SHEにおいて一本の燃料棒を昇温して反応度温度係数を測定し、高温ガス炉の炉心設計に関する研究開発に寄与することを目的として、単一燃料棒昇温装置を製作し試験を行った。単一燃料棒昇温装置はニクロム線ヒータを巻いた石英管中に一本の被覆粒子燃料棒を収め電気加熱して約700℃まで昇温することができる。この石英管は真空断熱のためジルカロイ管に収納されておりジルカロイ管の外側は放射熱を除去するため空気により冷却される。また、冷却空気の昇温により、SHE炉心へ伝熱することを防止するために、ジルカロイ管はさらに、真空断熱層を有する二重アルミニウム管に収納された。単一燃料棒昇温装置は、以上の昇温管のほか、真空排気系、冷却系、計測制御系及び安全保護系より構成される。昇温管部はSHE炉心の中央の黒鉛マトリックス管1本を引抜きそのあとへ挿入した。昇温管部の基部はSHE 1/2 集合体移動側架台上に固定された真空排気系に直結された。

主な性能：1. 単一燃料棒，直径24 mm

全長2400 mm

2. 昇温能力，電力約3 kWにより約40分で700℃に昇温しうる。

3. 冷却能力，吐出圧，0.4 kg/cm<sup>2</sup>

送風量，1.4 m<sup>3</sup>/min

4. 断熱性，SHE炉心への漏洩熱量が，約20 W以下

黒鉛棒を昇温体とした特性試験により、以上の性能が達成されたことを確認した。さらにこの装置は中性子吸収の少ない部材により構成し、中性子場の擾乱が少ないという特長もあるので、被覆粒子燃料棒の高温における反応度係数を精度良く測定できる見通しを得た。

---

\*日本カーボン株式会社

Heating apparatus for single-fuel-rod experiments

Yoshihiko KANEKO, Motoyoshi TAKEUCHI and Toshio MASUYAMA\*

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 9, 1979)

A single-fuel-rod heating apparatus was constructed for installation to Semi-Homogeneous Experimental Assembly (SHE); which is used to measure the reactivity temperature coefficient of a single fuel rod in verification of the precision of nuclear design of the VHTR (very high temperature reactor). The apparatus raises the temperature of a single fuel rod up to 700°C. A fuel rod is enclosed in a silica tube coiled with nichrome heater. The silica tube is confined in a zircalloy tube of which outer surfaces are cooled with air to remove the radiation heat. The zircalloy tube is then confined in a double-walled evacuated aluminum tube to prevent heat transfer to SHE core. The heating apparatus consists of evacuation, cooling, instrumentation, control and safety system, beside the heating tube. The heating tube is inserted in a space made by withdrawing a graphite matrix tube along the central axis of SHE core. The base of the heating tube is connected to an evacuation system, which is set on the table of the movable half of SHE. Performance of the heating apparatus shown by test operation with a single graphite rod are:

1. Single fuel rod: 24 mm in diameter, 2400 mm long
2. Heating ability: The heating up of a single fuel rod to 700°C in 40 min with electric power 3 kW
3. Cooling capacity: Blower in flow 1.4 m<sup>3</sup>/min at pressure 0.4 kg/cm<sup>2</sup>
4. Heat leakage: lower than 20 W

Keywords: Coated Particle Fuel, Critical Experiment, Graphite, Fuel-Rod Heating Apparatus, High Temperature, Doppler Effect, Reactivity Temperature Coefficient

---

\* Nippon Carbon Inc.

## 目 次

1. 序 言	1
2. 設計の方法	2
2.1 装置の概要	2
2.2 設計方針	2
2.3 設計条件	2
2.4 設計仕様	3
3. 工事の方法	6
3.1 工事の方法の概要	6
3.2 工事上の注意事項	6
3.3 工事の内容と工程	6
4. 試験検査	7
4.1 試験検査の項目及び内容	7
4.2 試験検査結果	8
5. 黒鉛棒の反応度温度係数の測定	11
5.1 実験体系	11
5.2 測定方法と結果	11
6. 結 論	13
付 録	37
1. 安全性の検討	37
2. 昇温管部の等価反応度の計算	39
3. 昇温管内の伝熱流動の計算	43
4. 耐震性の計算	52

## Contents

I. Introduction .....	1
2. Design .....	2
2.1 Out line of heating apparatus .....	2
2.2 Design lines .....	2
2.3 Design conditions .....	2
2.4 Design specifications .....	3
3. Construction .....	6
3.1 Out line of constructions .....	6
3.2 Remarks in constructions .....	6
3.3 Procedure of constructions .....	6
4. Test .....	7
4.1 Subject matters of tests .....	7
4.2 Results of tests .....	8
5: Measurement of reactivity temperature coefficient of single graphite rod .....	11
5.1 Experimental system .....	11
5.2 Experimental methods and results .....	11
6. Conclusion .....	13
 Appendices .....	 37
I. Safety consideration .....	37
2. Calculation of reactivity worth of heating tube .....	39
3. Calculation of heat transfer and air dynamics .....	43
4. Calculation of proof against earth-quake .....	52

## 1. 序 言

半均質臨界実験装置（以後「SHE」という。）において単一燃料棒ないし黒鉛棒を電気加熱により昇温して反応度温度係数を測定し、高温ガス炉の炉心設計に関する研究開発に寄与することを目的として、単一燃料棒昇温装置を製作した。

臨界実験装置による炉物理実験は通常、室温で行われることが多く、昇温した実験は例が少い。この主な理由は、炉心温度が核的特性に及ぼす影響はもともとあまり大きくないこと、及び反応度温度係数が負になるように炉心設計に余裕をもたせていることによるが、一方、昇温装置設計にともなう技術的な負担の大きさも一つの理由となっている。しかしながら高温ガス炉の炉心温度は平均して900℃程度であり、従来の原子炉より温度が高くなっている。そのため炉心温度の影響が強調されてくる。したがって、 $^{238}\text{U}$ のドップラー効果や黒鉛減速材の温度係数について実験的な裏付けを必要としている。以上が動機となって、単一燃料棒昇温装置を製作した。

設計にあたっては、なるべく純粹に燃料棒ないし黒鉛棒だけが昇温されることが実験上要求されることに最大の注意をはらった。同時に、中性子吸収の強い材料は炉心の中性子場をみだしてしまうので、中性子吸収の弱いジルカロイとアルミニウムを主材料として選択した。

単一燃料棒昇温装置の昇温管部は単一燃料棒ないし黒鉛棒を収納するヒータ付き石英管とこれを取りまくジルカロイ管及び二重アルミニウム管よりなる真空断熱多重管構造をしていて、SHE炉心の黒鉛マトリックス管1本を引抜きそのあとへ挿入した。この昇温装置は単一燃料棒ないし黒鉛棒を700℃まで昇温しうるが、SHE炉心部への熱漏洩はほとんどないように設計した。

## 2. 設計の方法

### 2.1 装置の概要

単一燃料棒をニクロム線ヒータを巻いた石英管中に収め電気加熱して約700℃まで昇温する装置であって、昇温管部のほか、真空排気系、冷却系、計測制御系及び安全保護系より構成される。昇温管部はSHE炉心部の黒鉛マトリックス管1本を引抜きそのあとへ挿入する。昇温管部の基部は、真空排気系と直結され、SHE 1/2 集合体移動側架台上に固定される。冷却系はSHE炉室床に固定されるが、配管により昇温管基部と連結する。制御盤は、SHE制御室に置き遠隔操作により装置本体を運転制御できるようになっている。装置本体の系統図を第1に、配置図を第2図に示した。また、組立図、SHEへの据付図及び制御系統図をそれぞれ第3、4及び5図に示した。

単一燃料棒の反応度の温度係数を測定する場合には十分な点検後単一燃料棒昇温装置の運転を開始する。SHEの移動側1/2集合体が固定側1/2集合体に密着して臨界に達してから昇温を開始する。所定の温度に達したら反応度変化を測定した後、加熱ヒータの電源を切りSHEを通常停止する。昇温管部は、実験期間のみSHEに据付けるが、実験が終了したらとりはずして燃料作業室に保管する。

### 2.2 設計方針

- (1) いかなる場合においても装置の破損ないし変形が起きないこと。
- (2) 単一燃料棒昇温装置を設置することによりSHEのスクラムその他の運転動作が妨げられるおそれがないこと。
- (3) 装置の一部が故障しても、SHEに影響を与えることなく安全に装置を停止させる連動装置を設けること。
- (4) SHE炉心に挿入される昇温管部の設計にあっては、中性子吸収の少ない材料を使用するとともに、できるだけSHE炉心への熱漏洩を少なくし、かつ熱応力がほとんど発生しない構造とすること。

### 2.3 設計条件

- (1) 耐震性  
水平加速度 0.3 g , 垂直加速度 0.3 g の地震に対して装置の破損が起きないこと。
- (2) 温度条件  
昇温管部の各部分の最高温度は以下のとおりであること。
  - (イ) 単一燃料棒ないし黒鉛棒 : 700℃
  - (ロ) ジルカロイ管の外側 : 160℃ (通常運転時)



300 °C (主送風機停止時)

(2) 内側アルミニウム管及び：110 °C (通常運転時)

冷却空気 150 °C (主送風機停止時)

(3) 断熱性

昇温管部からSHE炉心部への漏洩熱量は20ワット以下であること。

2.4 設計仕様

(1) 昇温管部

昇温管部はその断面を第6図に示したが、多重管構造をしている。燃料棒ないし黒鉛棒を収納した石英管はジルカロイ管中に保持し真空断熱して伝導伝熱を防止する。放射伝熱による漏洩熱は、ジルカロイ管の外側を空気冷却して除熱する。さらに、断熱効果を高めるため内部を真空にした二重アルミニウム管で、ジルカロイ管をおおって炉心への熱漏洩を避ける。SHE集合体が密着したとき、昇温管の先端部は固定側1/2集合体の背部に押出されるが固定1/2集合体の背部にとりつけた水平案内樋を滑らせるようになっている。昇温管部を構成する多重管の主要部分の材料と寸法は以下のとおりである。

被覆粒子ウランペレット：外 径 240 ± 0.1 mm  
 内 径 8.0 ± 0.05 mm  
 高 さ 36 ± 1 mm  
 スタック長 2,412 ± 5 mm 167個

黒鉛ペレット：高純度黒鉛 (JIS R 7221)  
 外 径 24 ± 0.2 mm  
 内 径 6.5 ± 0.2 mm  
 高 さ 50 ± 0.2 mm  
 スタック長 2,400 ± 1 mm

SUS細管：S U S 304  
 外 径 6 mm  
 内 径 5 mm  
 全 長約 2,600 mm

石英管：石 英  
 外 径  $28.5 \pm \begin{smallmatrix} 0.8 \\ 0 \end{smallmatrix}$  mm  
 内 径  $24.5 \pm \begin{smallmatrix} 1.0 \\ 0 \end{smallmatrix}$  mm  
 全 長 2,500 ± 1 mm

{ 全体は8こに分割されていて、  
 300 $\pm$  $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.5 \end{smallmatrix}$ mm 6本と350 $\pm$  $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.5 \end{smallmatrix}$ mm  
 2本より構成される。

ジルカロイ管：ジルカロイ-2 (ASTM B 353-64 T)  
 外 径 45.8 ± 0.2 mm  
 内 径 41.8  $\pm \begin{smallmatrix} 0.5 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$  mm  
 全 長 3,835 ± 1 mm

内側アルミニウム管	: アルミニウム合金 (JIS H 4080 - A 5056)
外 径	55 ± 0.2 mm
内 径	51 ± 0.2 mm
全 長	4,565 ± 2 mm
外側アルミニウム管	: アルミニウム合金 (JIS H 4080 - A 5056)
外 径	63 ± 0.2 mm
内 径	59 ± 0.2 mm
全 長	3,715 ± 2 mm

## (2) 真空排気系

真空排気系は油拡散真空ポンプ (排気速度 320 ℓ/sec) 1台及び油回転真空ポンプ (排気速度 300 ℓ/minと 200 ℓ/min) 2台のほか, 真空弁及び配管より構成されていて, 昇温管部の基部に接続し以下の排気能力を有する。

- (イ) ジルカロイ管内を油拡散ポンプ及び油回転ポンプにより排気して  $5 \times 10^{-4}$  mmHg 以上の真空に保持しうる。
- (ロ) 二重アルミニウム管内を油回転ポンプにより排気して  $1 \times 10^{-1}$  mmHg 以上の真空に保持しうる。

## (3) 冷却系

冷却系は主送風機 (吐出圧 0.4kg/cm<sup>2</sup>, 送風量 1.4m<sup>3</sup>/min) と, バッテリー (12V 150AH) 2ケにより駆動される非常用送風機 (吐出圧 0.2kg/cm<sup>2</sup>, 送風量 1 m<sup>3</sup>/min) より構成され, 鉄製配管 (内径 4.9cm) をへた後, 耐圧塩ビ管 (内径 4.9cm) によって昇温管基部に連結される。

冷却系は, ジルカロイ管の外側を空気冷却する。通常は主送風機により送風するが, 停電などにより吐出圧が低下した場合は自動的にバッテリー駆動の非常用送風機が動作する。

## (4) 計測制御系

計測制御系は温度, 真空度及び冷却空気の検出器とそれらの記録計 3台及びメーター, 加熱ヒータ電流制御用SCR 回路等から構成される。燃料棒ないし黒鉛棒の温度は設定値からのずれを検出して, 加熱ヒータ電流を制御することによりほぼ一定に保持される。SHE 制御室に置かれた制御盤を操作することにより炉室に据付けた本体を運転することができる。

## (イ) 温度計測

昇温管各部の温度は熱電対により測定して, 制御盤にとりつけた記録計により連続記録する。

単一燃料棒ないし黒鉛棒	3 点
ジルカロイ管の外側	1 点
冷却空気 (入口と出口)	2 点
外側アルミニウム管の表面	1 点
SHE 周辺黒鉛	2 点

## (ロ) 真空度計測

昇温管基部にとりつけた電離真空計によりジルカロイ管の真空度を測定し, 制御盤上のメーターで表示する。二重アルミニウム管の真空度は, 油回転真空ポンプの引口にガイスラー管

をとりつけ測定する。

(4) 冷却空気圧力計測

昇温管部の基部の冷却空気入口附近にダイヤフラム型圧力計をとりつけて測定し制御盤上の記録計により連続記録する。

(5) 安全保護系

単一燃料棒の昇温装置に故障が発生した場合、加熱電流ヒータを切るあるいは非常用送風機を動作させる等の措置をとるとともに、制御盤上の表示灯及び警報により表示するために連動装置をもうける。また、単一燃料棒温度が700℃を超えた場合SHEがスクラムするように、そのほかの故障に対してSHE制御盤の警報ブザーが鳴るように連動装置をもうける。

SHE制御盤上におけるスクラム表示灯及び警報ブザーの位置を第7図に示した。

(1) 次のすべての条件が満たされていないと、ヒータ電源が投入できない連動装置を設ける。

- 冷却空気圧力が設定値より高いこと
- 真空度が設定値より高いこと
- 二重アルミニウム管排気ロータリーポンプの電源が投入されていること
- 1/2集合体が密着していること

(2) 次のいずれかの場合、ヒータ電源は自動的に切れる連動装置を設ける。

- 燃料棒ないし黒鉛棒の温度が設定値より高くなったとき
- ジルカロイ管温度が設定値より高くなったとき
- 冷却空気出口温度が設定値より高くなったとき
- 冷却空気圧力が設定値より低くなったとき
- 真空度が設定値より低くなったとき

(3) 次のいずれかの場合、バッテリー駆動非常用送風機が自動的に動作する連動装置を設ける。

- 冷却空気及びジルカロイ管の温度が設定値より高くなったとき
- 停電が起きたとき

(4) 次の場合SHEは自動的にスクラムする連動装置を設ける。

- 単一燃料棒温度が設定値より高くなったとき

(5) (2)に述べた単一燃料棒昇温装置の連動装置が動作した場合、制御盤において表示灯及び警報により表示されるとともに、SHE制御盤の警報によっても表示される。

### 3. 工事の方法

#### 3.1 工事の方法の概要

当所の仕様書にもとづき、メーカーが単一燃料棒昇温装置の設計を行い製作してSHEに据付ける。昇温管部については素材メーカーより素材を購入し加工して部品を製造し組立てる。排気系、冷却系については真空排気ポンプ及び送風機を機器メーカーより、計測制御系については、部品を部品メーカーより購入して必要な配線・配管を行い、昇温管部と連結して全系統を組立てる。工場において調整を行い、総合機能検査を行った後、SHEに据付ける。また、各工程毎に所内専門職員が検査、監督を行いつつ完成させる。

#### 3.2 工事上の注意事項

単一燃料棒昇温装置は十分な技術と経験を有するメーカーにおいて設計を行い、かつ十分な品質管理のもとで製作する。また、SHEへの据付調整時には東海研究所放射線管理規程にしたがって十分な放射線管理を行う。

#### 3.3 工事の内容と工程

単一燃料棒昇温装置の工事の方法及び順序を第8図に示した。

また、SHEへの据付工事は次の順序にしたがって行う。

- 1) 移動側1/2集合体架台上に、昇温装置の基部をボルトで固定する。
- 2) 固定側1/2集合体架台上に昇温管の案内樋をボルトで固定する。
- 3) SHE炉心部のマトリックス管1本をとりはずし、そのあとへ昇温管部を挿入する。
- 4) 昇温装置の基部に、昇温管部の基部を接合させるとともに、昇温管部の端部を案内樋上に定着させる。
- 5) 制御盤はSHE制御室にボルトで固定する。送風機等は炉室床にボルトで固定し、空気・水・電気等の配線・配管は主としてピットを使い、床上にあってはおおいをつけ、フレキシブルにして、移動側1/2集合体上の昇温装置基部に連結する。

## 4. 試験検査

### 4.1 試験検査の項目及び内容

#### (1) 材料検査

- (イ) 黒鉛ペレット：分析表によりJIS R 7221に適合していることを確認する。
- (ロ) 石英管：分析表・特性表により耐力が約 $4 \text{ kg/mm}^2$  (700℃)以上であることを確認する。
- (ハ) ジルカロイ管：ミルシートによりASTM B 353-64Tに適合していることを確認する。
- (ニ) 内側及び外側  
アルミニウム管：ミルシートによりJIS H 4080に適合していることを確認する。
- (ホ) ニクロム線：分析表によりJIS C 2520に適合していることを確認する。

#### (2) 外観検査

目視により有害な欠陥がないことを確認する。

#### (3) 寸法検査

第5図に示す昇温管部の部品の寸法の主要部分を測定器により実測して定められた誤差以内であることを確認する。

#### (4) 溶接検査

第5図に示す昇温管部の部品の溶接箇所的主要部分について以下の検査を行い異常がないことを確認する。

- (イ) 液体浸透探傷試験
- (ロ) ヘリウムリーク試験
- (ハ) 放射線透過試験

昇温管の断面を撮影して異常のないことを確認する。

#### (5) 総合機能検査

現地納入前に、工場において全部品を組立て調整後昇温試験を行い2.4にのべた設計条件と2.5にのべた設計仕様の各項に定められた総合機能が実現されていることを確認する。

##### (イ) 温度条件

- 黒鉛サンプルの温度を熱電対温度計により測定して、700℃以下であることを確認する。
- ジルカロイ管の外側の温度を熱電対温度計により測定し、計算により補正して最高温度が通常運転時160℃以下、主送風機停止時300℃以下であることを確認する。
- 内側アルミニウム管と冷却空気の温度は、熱電対温度計により冷却空気出口温度を測定し、計算により補正して、最高温度が通常運転時110℃以下、主送風機停止時150℃以下であることを確認する。

##### (ロ) 断熱性

昇温管部の周囲を黒鉛棒でおおって、漏洩熱により黒鉛棒の温度が上昇する度合を温度計

により測定し黒鉛棒への伝熱量が20ワット以下であることを確認する。

(4) 真空度

○ ジルカロイ管

電離真空計により真空度を測定して  $5 \times 10^{-4}$  mmHg 以上の真空度が保持されることを確認する。

但し、黒鉛ペレットの温度は約700℃とする。

○ 二重アルミニウム管

ガイスラー管の蛍光の発生により、 $10^{-1}$  mmHg 以上の真空度が保持されることを確認する。

(5) 連動装置

2.5設計仕様の(5)安全保護系にのべた連動装置が正常に働くことを確認する。

(6) 据付調整検査

(1) 単一燃料棒昇温装置をSHEに据付後、総合機能検査の各項目をくりかえし行う。

(2) 単一燃料棒昇温装置の異常に対するSHEの連動装置が2.5設計仕様の(5)安全保護系にのべるように正常に動作することを確認する。

(3) 配管・配線等に関して、単一燃料棒昇温装置を据付けたことにより、SHEのスクラムやその他の運転動作が妨げられるおそれのないことを確認する。

## 4.2 試験検査結果

4.2において定められた項目及び内容について、試験検査を行い、いずれの項目についても合格した。ここでは、主要な検査結果についての記載することとし、寸法検査等は一切省略した。また、工場立合検査の状況を写真1(黒鉛ペレットを収納し、ニクロム線を巻いた石英管)、写真2(ジルカロイ管)、写真3(内側アルミニウム管)、写真4(内側アルミニウム管基部)、写真5(昇温管基部)、および写真6(右、外側アルミニウム管、左、ジルカロイ管)に示した。一方、SHEに据付終了後の状況を写真7(SHE移動側背部にとりつけた昇温管基部)および写真8(SHEにとりつけた昇温管)に示した。

### 1. 温度試験

#### (1) 検査方法

熱電対により各部の温度を測定して、記録計に指示させる。

#### (2) 判定基準

1) 黒鉛サンプル温度 700℃以下

2) Zr管外側温度

イ 通常運転時 160℃以下

ロ 主送風機停止時 300℃以下

3) 内側A管および冷却空気温度

イ 通常運転時 110℃以下

ロ 主送風機停止時 150℃以下

(3) 検査対象

昇温装置

(4) 検査結果

- 1) 黒鉛サンプル温度
- 2) Zr 管外側温度 (冷却空気温度からの推定)
  - イ 通常運転時
  - ロ 主送風機停止時
- 3) 内側 A 管および冷却空気温度
  - イ 通常運転時
  - ロ 主送風機停止時

測定値
659 °C
102 °C
115 °C
70 °C
83 °C

2. 断熱性試験

(1) 検査方法

6本の黒鉛棒を昇温管のまわりに配置して、温度上昇を熱電対により測定する。

(2) 判定基準

昇温管からの漏洩熱量が 20 W 以下

(3) 検査対象

昇温装置

(4) 検査結果

判定基準

昇温管からの漏洩熱量が 20 W 以下

測定値

昇温管出口附近の二層の黒鉛棒 18本が昇温開始より 2時間 で約 1°C であった。以上の温度上昇から漏洩熱量は 6.5 W と推定される。

3. 真空度試験

(1) 検査方法

- 1) 電離真空計
- 2) ガイスラー管

(2) 判定基準

黒鉛サンプルの温度 700°C のもとで、

- 1) Zr 管真空度  $5 \times 10^{-4} \text{ mmHg}$  以上 (1-(1)による)
- 2) 二重 A 管真空度  $1 \times 10^{-1} \text{ mmHg}$  以上 (1-(2)による)

(3) 検査対象

昇温装置

(4) 検査結果

- 1) Zr 管真空度
- 2) 二重 A 管真空度

測定値
$0.8 \times 10^{-4} \text{ mmHg}$
$0.5 \times 10^{-1} \text{ mmHg}$

4. 連動装置作動試験

(1) 検査方法

連動条件を1項目ずつ発生させ安全保護系の動作を確認する。

(2) 判定基準

安全保護系が動作する連動条件が正常であること。また安全保護系が動作した場合、サンプル昇温装置の制御盤において、表示灯および警報によって表示されること。

(3) 検査対象

昇温装置

(4) 検査結果

連 動 項 目	作 動 条 件	表示灯	警 報	結 果
1. ヒータ電源投入連動装置				
(1) 冷却空気圧力	0.36kg/cm <sup>2</sup> 以下	良	良	良
(2) 真 空 度	5×10 <sup>-4</sup> mmHg 以上	良	良	良
(3) 二重A管排気ポンプ	電 源 投 入	良	良	良
(4) 1/2 集合体	密 着	良	良	良
2. ヒータ電源開放連動装置				
(1) サンプル温度高	700℃ 以上	良	良	良
(2) Zr 管温度 (外側)	50℃ 以上	良	良	良
(3) 冷却空気出口温度	110℃ 以上	良	良	良
(4) 冷却空気圧力低下	0.36 kg/cm <sup>2</sup>	良	良	良
(5) 真空度低下	5×10 <sup>-4</sup> mmHg 以下	良	良	良
3. 非常用送風機連動装置				
(1) 空気温度高-Zr管温度高	空気110℃, Zr 50℃以上	良	良	良
(2) 停 電	停 電	良	良	良



## 5. 黒鉛棒の反応度温度係数の測定

### 5.1 実験体系

昇温装置による初回実験は黒鉛棒について行った。黒鉛棒は、外径 24 mm, 内径 6.5 mm, 高さ 50 mm のペレット 50 ケをならべ中心に外径 6 mm, 肉厚 0.5 mm の細い薄肉厚の不銹鋼管 (SUS 304) を通し石英管をかぶせて石英テープを巻いたもので全長 2500 mm ある。この黒鉛棒を収納した昇温管は SHE - 14 炉心の中心に位置した黒鉛マトリックス管を引抜き, そのあとへ挿入されている。第 9 図に SHE - 14 炉心の断面を示したが, 6 本の燃料棒を同心円環上に配置したカラム 7 こより全炉心が構成されている。燃料棒は 20% 濃縮の  $UO_2$  の微粉と黒鉛粉を混合し冷間圧縮成型して製作した燃料ペレット 115 枚を黒鉛さやに挿入したものである。SHE - 14 炉心の  $^{235}U$  の全装荷量は 4.96 kg であり, 炉心領域の平均  $C / ^{235}U$  原子比は 7.158 である。

昇温実験の解析・評価にあたっては, 昇温管部の単位長さあたりの物質構成を知っておくことが必要である。そこで, 構成する物質の名称, 寸法, 密度, 成分, 原子数密度を第 1 表にまとめた。また, 実験結果の解釈を見通しよくするためには, 理想的なことをいうと, サンプルである黒鉛ないし被覆粒子ウランペレットのみが昇温されることが望ましいし, ジルカロイ管やアルミニウム管は夾雑物である。そこで, もともと, 設計にあたっては, 中性子吸収の少ない材料を選定し, できるだけ, 厚みを薄くするという方針をとった。第 2 表において, 昇温管の各部の熱及び共鳴中性子反応率の尺度としてマクロ吸収断面積ないし, 共鳴吸収積分を示した。被覆粒子ウランペレットの場合には, 熱中性子吸収のおよそ 60% が, また共鳴吸収積分については, 昇温される部分つまり, 石英管及びニクロム線をふくむ構造材まで考慮したとき約 90% がウラン中において起ることになる。したがって, かなり純粋に  $^{235}U$  の共鳴吸収のドプラー効果を探究しうる装置であるといえよう。

### 5.2 測定方法と結果

冷却空気の送風を開始した後, SHE を起動し, 臨界に達して, 出力が約 1 W で十分一定に落ち着いたことを確認してからニクロム線ヒーターの電源を投入して黒鉛棒の加熱を行なった。黒鉛棒の温度が所定の温度に達した後は, 温度が一定になるように, 約 3 時間運転した後, ヒーターの電源を切り, 約 2 時間を経て黒鉛棒の温度が 250°C まで下がってから SHE の運転を停止させた。

原子炉の反応度は, 黒鉛棒の温度上昇につれて低下した。例として, 第 10 図に示すように 680°C まで昇温するのに約 50 分要したが, その間, 反応度は約 2% 減少した。つづいて黒鉛サンプル温度を一定に保っている約 3 時間の間も, 反応度はゆっくりであるが, なお減少をつづけて, 結局, 約 0.6% の減少を示した。ヒーター電源を切り, 黒鉛サンプル温度が 250°C まで下降するにしたがい, 反応度は増加しつづけ, 結局, 約 1.2% 増加したが, 昇温時 250°C におい

て示した反応度より 0.7 % だけ低い値にとどまった。以上の黒鉛棒温度に対する原子炉反応度変化の様子は、上記の 680°C 運転のほか、260°C 及び 410°C 運転の場合についても同様であった。黒鉛サンプル温度上昇時に起る反応度の減少は、黒鉛サンプルの温度上昇に直接原因する炉物理現象に起因すると理解してよいであろう。つぎに、黒鉛棒温度を高温で一定に保持している間のゆっくりとした反応度の減少は SHE 炉心が昇温管からのわずかな熱漏洩のために、温度上昇することに原因していると推定した。そこで、ヒーター電力の投入はしないまま、臨界状態において、冷却空気を送風を開始し、反応度の変化を観測したところ、第 11 図に示すように、約 3 時間で約 0.6 % の反応度減少があった。このとき、昇温管入口における空気温度は約 30°C であり、炉室空気温度、及び SHE 炉心温度が約 10°C より約 20°C 高いため、内側アルミニウム管が温度上昇し放射により外側アルミニウム管へ伝熱し、これと接触している SHE の黒鉛マトリックス管をあたためているとも判断された。また、実際、昇温管に接している黒鉛マトリックス管の 1~2°C にわたる微少な温度上昇が熱電対によって記録された。

黒鉛サンプルの温度上昇時における反応度の減少量のうちにも、SHE 炉心への熱漏洩による減少分が若干混入していることになるので、それをさし引く方法をつぎのように定めた。すなわち、第 12 図のように、黒鉛サンプル温度の上昇と反応度の減少を、昇温期と温度保持期について、勾配のことなる直線で近似することにした。

すると、黒鉛サンプルの温度上昇による純粋な反応度減少  $\rho_{true}$  は、昇温期間  $t$  と温度保持期間  $t'$  における反応度の減少量  $\rho$  及び  $\rho'$  から、次の式によって決定される。

$$\rho_{true} = \rho - \rho' \frac{t}{t'} \quad \dots\dots (1)$$

各黒鉛サンプル温度における  $\rho_{true}$  の値をそのほかの諸量と共に第 3 表と第 13 図にまとめた。黒鉛サンプル温度が 260°C、410°C および 680°C のとき対応する  $\rho_{true}$  はそれぞれ、0.64、1.08 および 1.78 % である。温度係数として表示すると、0.257 %/°C あるいは  $1.75 \times 10^{-7} \Delta k/k/^\circ C$  ( $\beta_{eff} = 0.0068$ ) になる。

この温度係数は黒鉛サンプルつまり黒鉛棒の温度上昇により、熱中性子が変化して、核反応に影響を与えているのか、加熱用のニクロム線ヒータの昇温により中性子の共鳴吸収がドップラー効果により、増加しているのか検討を進めている。

## 6. 結 論

SHEにおいて単一燃料棒を昇温して反応度温度係数を測定し、高温ガス炉の炉心設計に関する研究開発に寄与することを目的として、単一燃料棒昇温装置を製作し試験を行った。この試験にあたっては、単一燃料棒の代りに、同寸法の黒鉛棒を昇温し、昇温能力、冷却ブローの性能、昇温管の各部の温度、ならびに、SHE炉心への漏洩熱量等を測定したが、いずれも、設計値に近い結果が得られた。また、この単一燃料棒昇温装置は、なるべく試験体である単一燃料棒のみが昇温されるように配慮すると共に、支持構造物には、中性子吸収の少ない、ジルカロイ及びアルミニウムを主として使用し、炉心の中性子場への摂動効果を小さくした。以上の理由により、今後に予定されている被覆粒子ウラン燃料棒の昇温実験に関して、十分純粋にウラン-238のドブラー効果による反応度減少が測定し得ることが判明し、所期の目的が実現された。

---

単一燃料棒昇温装置は、原研において概念設計を行った後、日本カーボン株式会社及び東京真空株式会社において詳細設計を行い、製造された。この一連の過程を通して、有益な指導のかづかづかをいただいた科学技術庁水戸事務所の中根康夫技官に深謝いたしたい。また、本装置は、多重の長管構造をしている昇温管が製造上最も困難な部分であったが、東京真空株式会社の益子常務の努力によって可能になった。製作期間は約2ヶ年にわたったが、この間、激励を惜しまれなかった鳥飼欣一原子炉工学部長及び後藤頼男炉物理実験研究室長に謝意を表す。

第1表 昇温管の単位長さあたりの物質構成

名 称	外 径 (mm)	内 径 (mm)	厚さ(mm) / 体積(cm <sup>3</sup> )	密 度* (g/cm <sup>3</sup> )	重 量 (g/cm)	成 分		備 考
						核 種	W %	
SUS 細管 (SUS 304)	6	5	0.5/ 0.0864	7.78	0.672	Fe Cr Ni	72.2 18.3 9.5	核 子 一 々 ** 熱中性子吸 収断面積 (バールン)
黒 鉛 棒	24	6.5	8.75/ 4.192	1.71	7.168	C	100	中性子吸収 共鳴積分 (バールン)
石 英 管 (石英ガラス, SiO <sub>2</sub> )	28.5	24.5	2/ 1.67	2.2	3.674	Si O	46.7 53.3	2.53 2.9 4.6 0.18 0.13 0.6 0.0002
ニク ロ ム 線 (被覆率 65/30)	28.9	28.5	0.4/ 0.0776	8.357	0.638	Ni Cr	78.2 20.2	0.6 0.0002
ジルカロイ管 (ジルカロイ-II)	45.8	41.8	2/ 2.75	6.45	1.777	Zr Sn	98.4 1.6	0.23 0.003
内銅アルミニウム管	55	51	2/ 3.33	2.70	8.99	Al	100	694 2.73 (実効 3.2.5)
外銅アルミニウム管	63	59	2/ 3.84	2.70	1.04	Al	100	274 281 (実効 3.2.5)
被覆粒子ウラン ペレット (UO <sub>2</sub> , 核直径 600 μ)	24	8	8/ 4.021		U: 3.246			

\*\* Nuclear Engineering Handbook による。

\* 密度 =  $\sum_{i=1}^n$  (物質の百分重量率) × (i 物質の密度)

第2表 被覆粒子ウランペレット等の中性子反応

名称	核種	原子数 N/cm ( $\times 10^{24}$ )	熱中性子吸収* ( $N\sigma/cm$ )	共鳴中性子吸収** ( $NIa/cm$ )
SUS 細管	Fe	0.0523	0.132	0.121
	Cr	0.0142	0.041	0.037
	Ni	0.0074	0.034	0.024
黒鉛サンプル	C	3.595	0.0107	—
石英管	Si	0.368	0.0478	0.184
	O	0.737	0.0001	—
ニクロム線	Ni	0.0512	0.236	0.164
	Cr	0.0132	0.038	0.034
ジルカロイ管	Zr	1.154	0.208	1.085
内側 アルミニウム管	Al	2.008	0.462	0.321
外側 アルミニウム管	Al	2.323	0.534	0.372
被覆粒子 ウランペレット	$^{235}\text{U}$	0.003328	2.309	0.9119
	$^{238}\text{U}$	0.07886	0.215 全体の59.1%	22.16 (実効2.56**) 全体の90.4% (実効8.19%, ニクロム 線までの昇温部のみ考慮)
夾雑物の合計 (ニクロム線 までの合計)			1.744	2.342 (0.564)

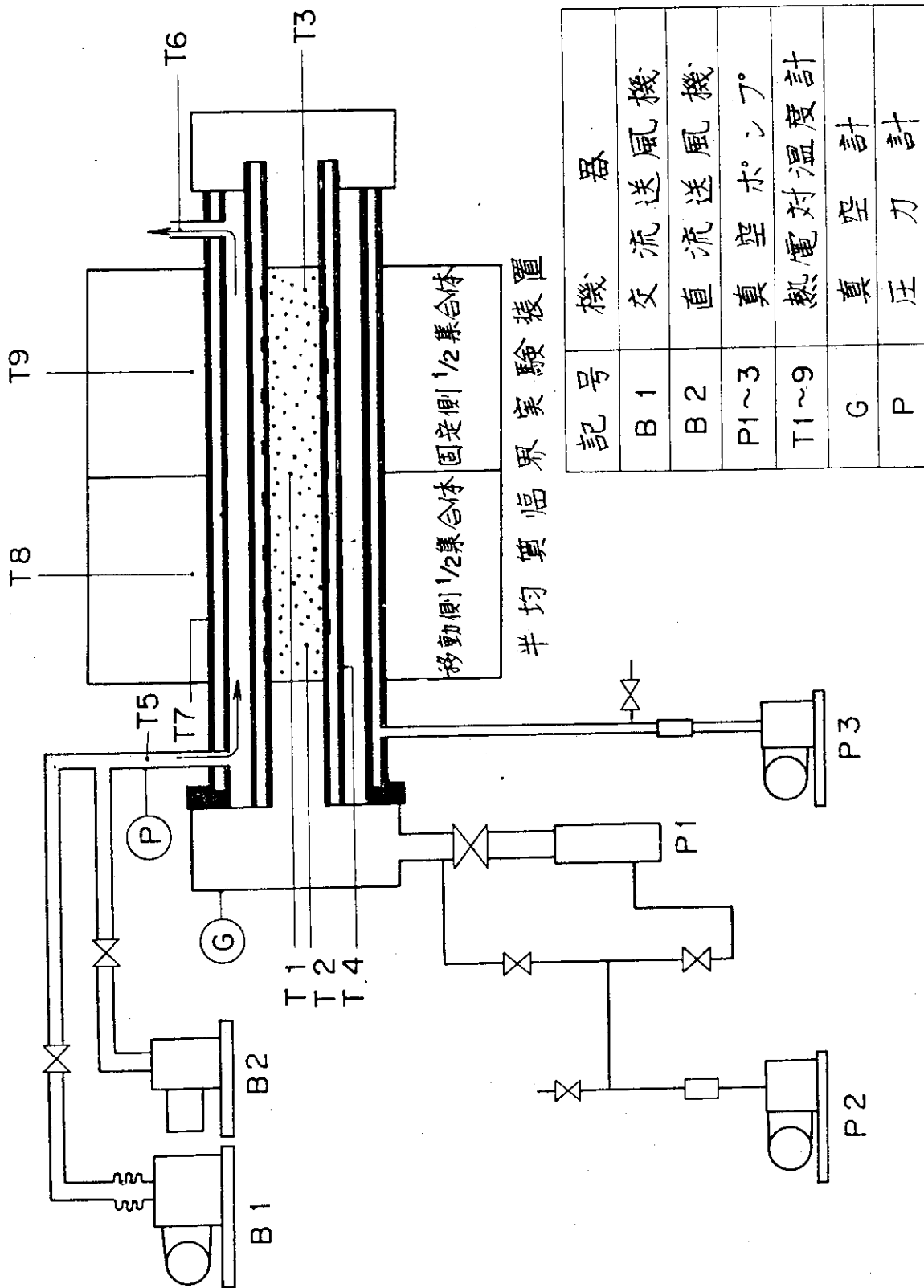
\*  $\sigma$  ミクロ吸収断面積

NIa ミクロ中性子吸収共鳴積分

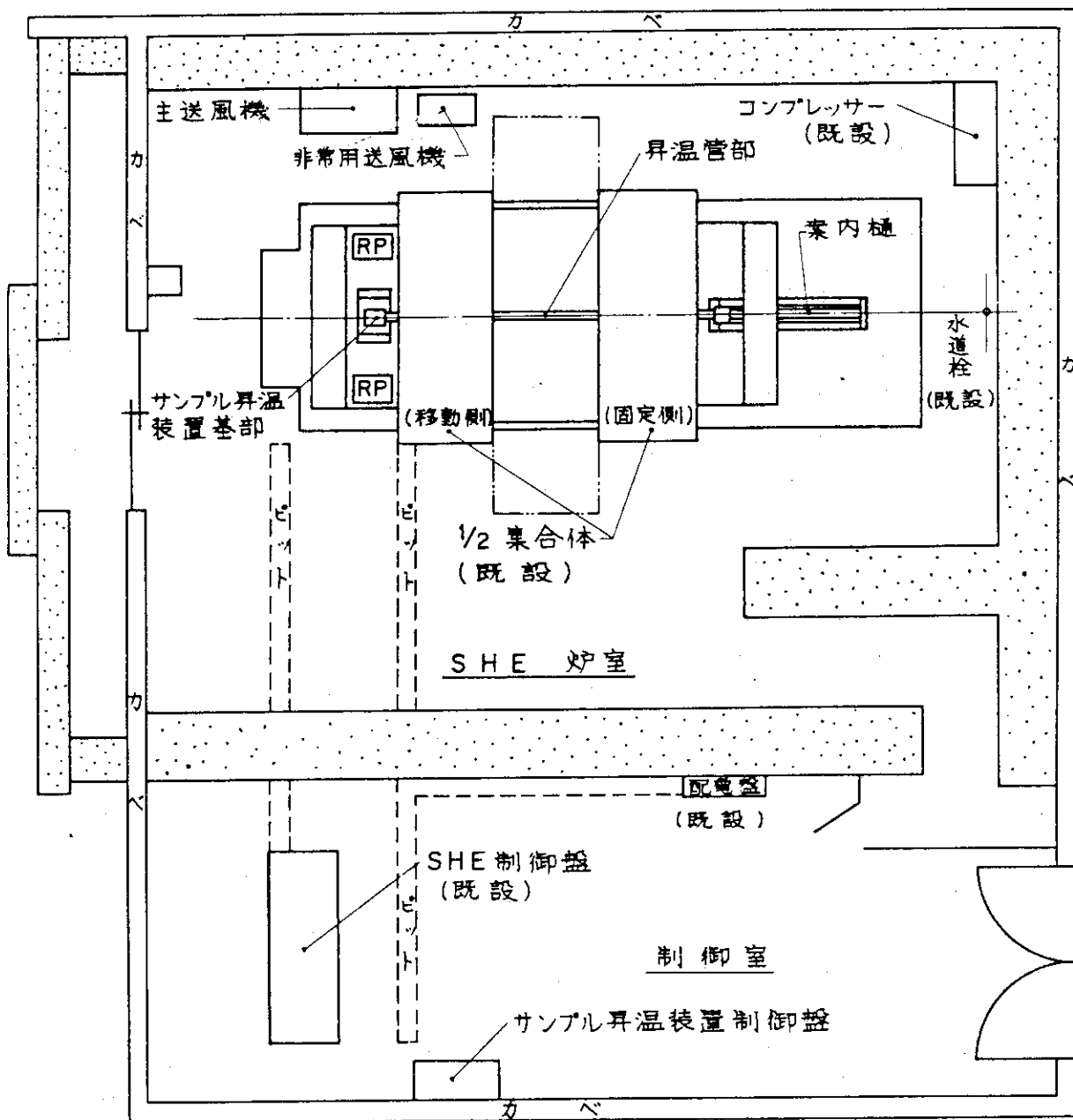
\*\*  $^{238}\text{U}$  の実効共鳴積分3.25バーンを使用, ニクロム線等は共鳴積分をそのまま使用

第3表 黒鉛棒の昇温による反応度減少について、原因別の分類

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	t (sec)	t' (sec)	$\rho$ (%)	$\rho'$ (%)	$\rho_{\text{true}}$ (%)
260	$1.4 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	0.74	0.5	0.64
410	$1.2 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	1.16	0.48	1.08
680	$3.04 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	2.03	0.58	1.78

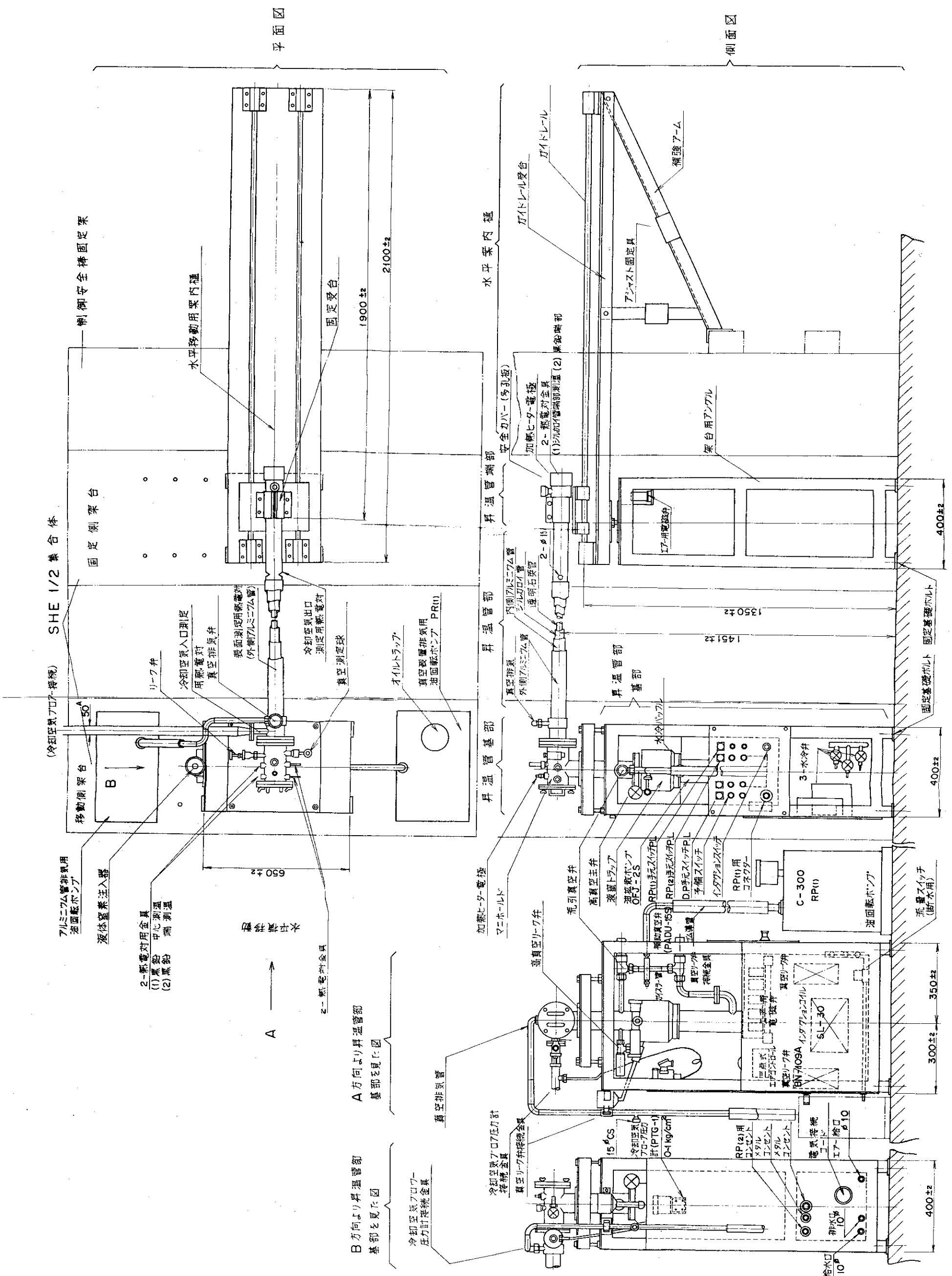


第1図 単一燃料棒昇温装置の系統図



第 2 図 単一燃料棒昇温装置の配置図





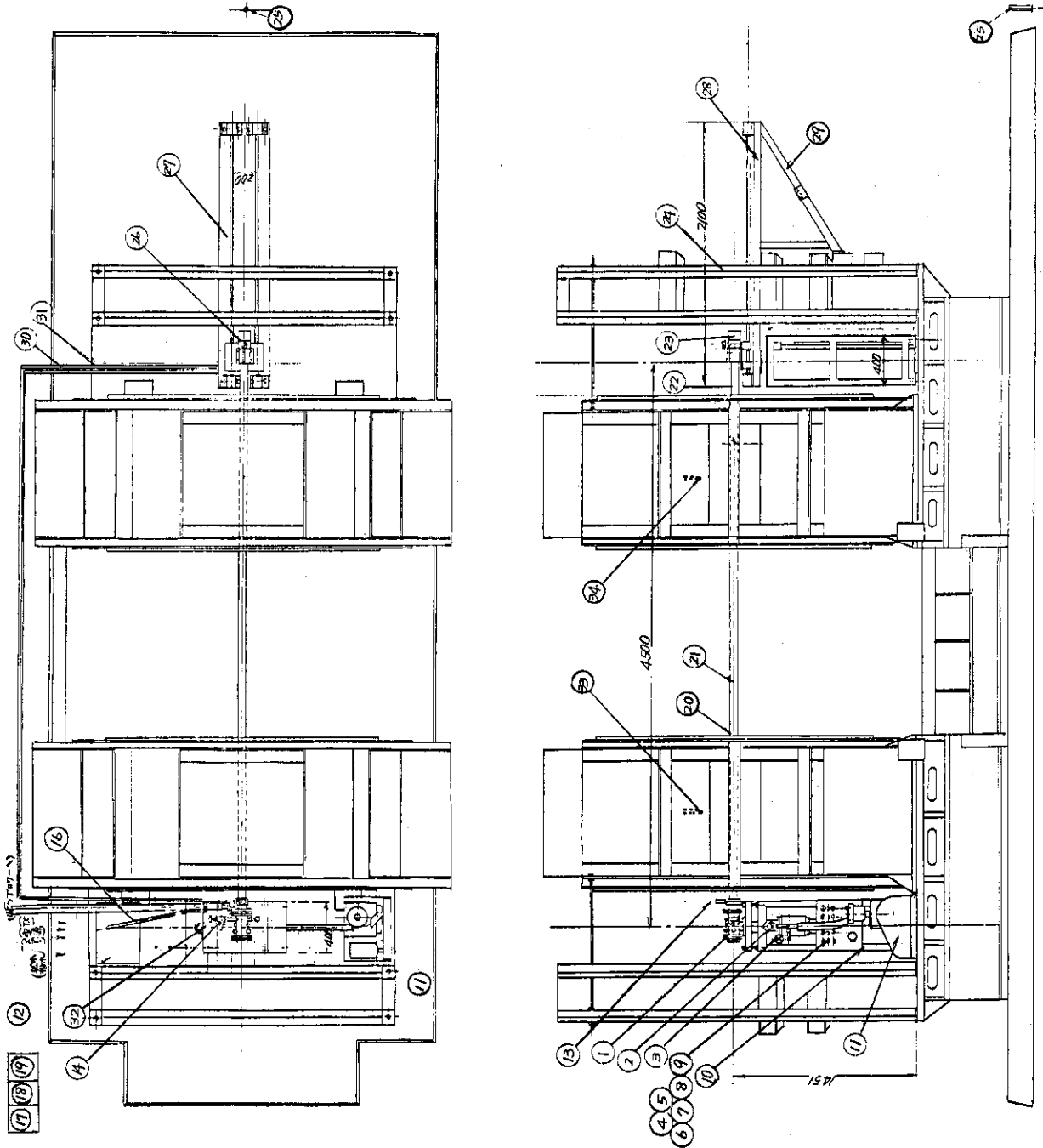
SHE 1/2 集合体

平面図

側面図

第3図 単一燃料棒昇温装置の組立図

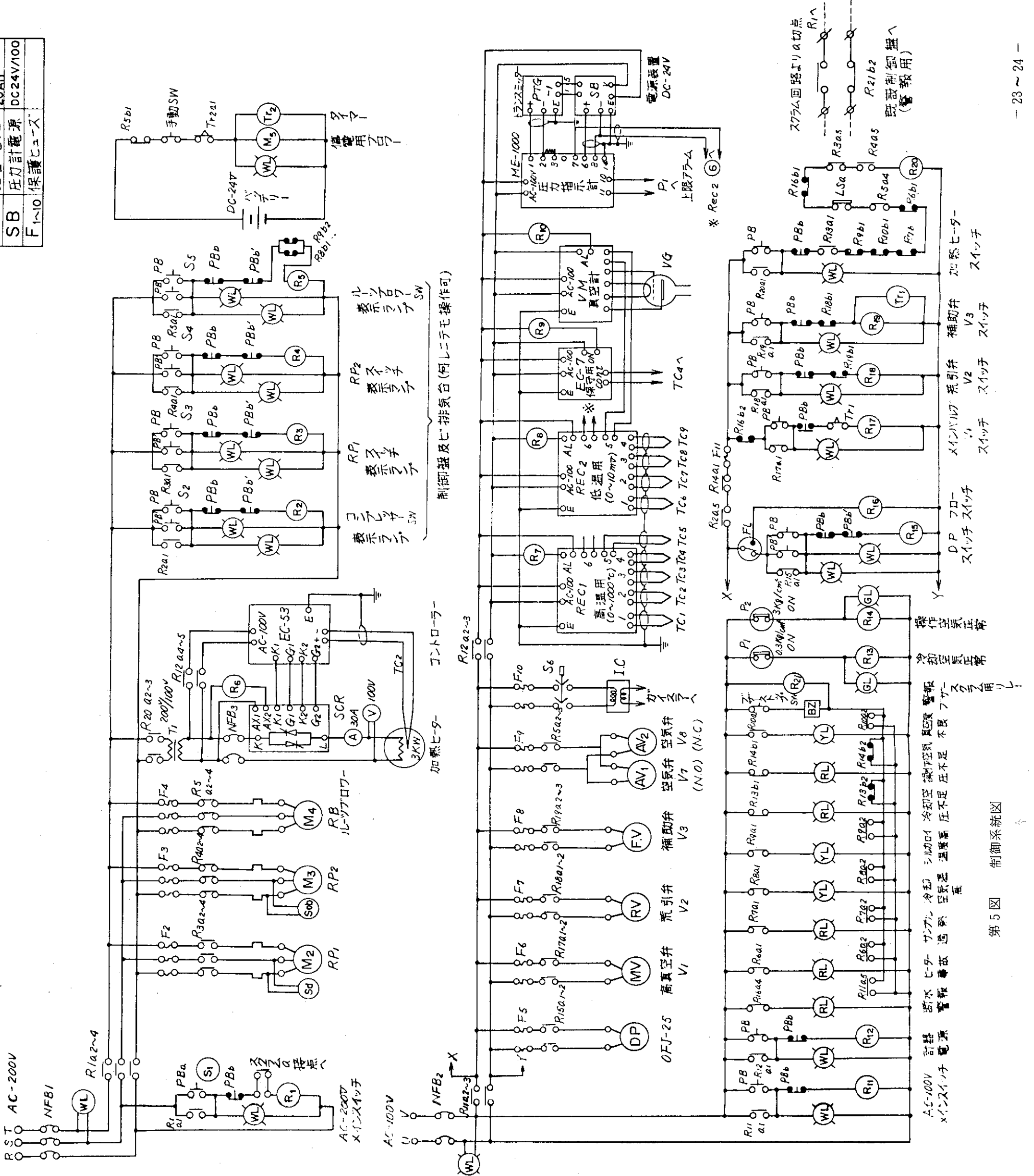
番号	機	畧
1	マニホールド	
2	真空配管	
3	排気装置	PL
4,5	R.P.手元スイッチ	PL
6	D.P.手元スイッチ	PL
7	予備スイッチ	
8	R.P.用コネクタ	
9	インダクションスイッチ	
10	排気装置用架台	R.P.
11,12	回転ポンプ	
13,14,15	予備弁	
16	冷却空気配管	
17	バッチャー駆動送風機	
18	バッチャー	
19	主送風機	
20	熱電対(外周部配管)	
21	黒鉛サドル収納部	
22	冷却空気出口及び熱電対	
23	マニホールド	
24	架台	
25	給水口元栓	
26	予備弁	
27	ガードレール	
28	レール台	
29	補強アーム	
30	電源配線	
31	真空配管	
32	冷却空気入口熱電対	
33,34	熱電対(周辺黒鉛)	



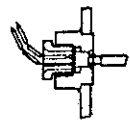
第4図 単一燃料棒昇温装置の据付図

VT	鉛蓄電池	DC-12V	20AH
SB	圧力計電源	DC24V/100	
F1~10	保護ヒューズ		

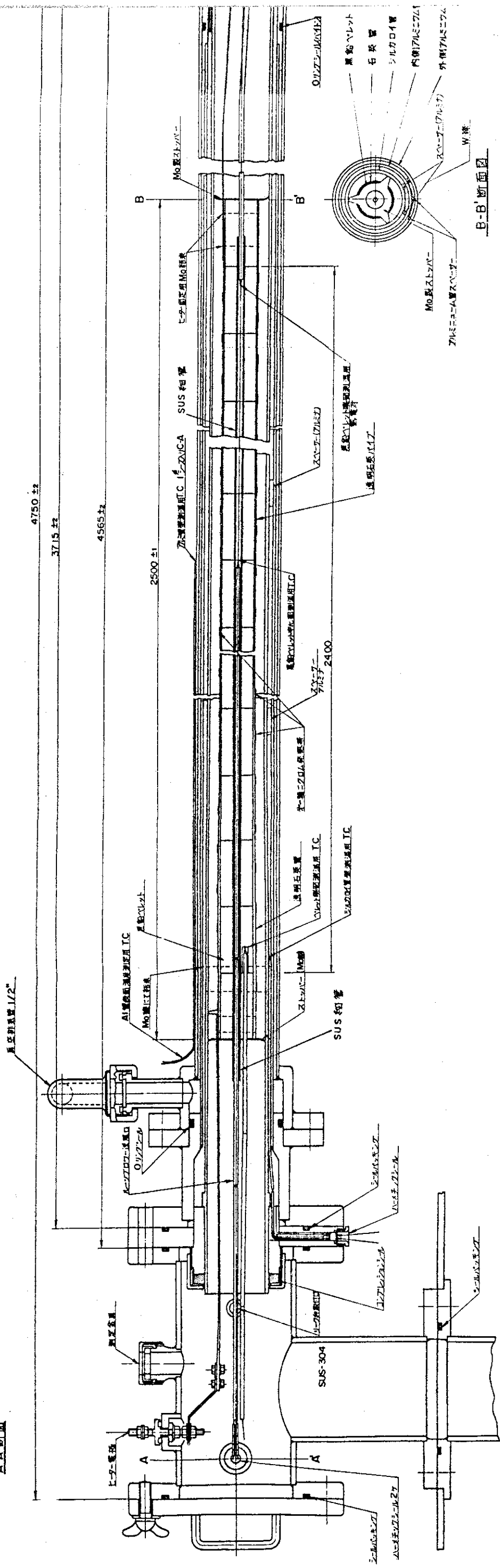
ME	圧力指示計
LS	集塵機用リレー
Tr2	タイマー 30分
Tr1	タイマー 10sec
R21	リレー (5a5b)
R20	電磁リレー
R17~19	リレー
R13~14	リレー
R12~15	リレー
R11	電磁リレー
R6~10	リレー
R5	電磁開閉器
R34	電磁開閉器
R2	電磁リレー
R1	電磁リレー
TC1~9	熱電対
S6	ハネカエリスイッチ
Si-S13	押切スイッチ
P2	ABN-2F10.2F101
P1	エヤ圧力 SW
FL	圧力伝送器
F.L	フロースイッチ
BZ	警報ブザー
VM	警報真空計
EC-7	温度真空計
REC2	6層記録計
REC1	ISRF6ABA00-0
EC-53	ER-4036.2156-A20
A	温度調節計
V	電圧計
SCR	サイリスタ
IC	インダクションリリ
AV2	空冷用電磁四方弁
AV1	空冷用電磁四方弁
FV	補助用電磁四方弁
RV	荒引用電磁四方弁
MV	高真空弁
DP	油圧数ポンプ
Sol1	油圧リリ
Sol2	油圧リリ
M5	DCモーター
M4	フロワー
M3	RP2用モーター
M2	RP1用モーター
M1	コンプレッサモーター
NFB3	オートブレーカー
NFB2	オートブレーカー
NFB1	オートブレーカー



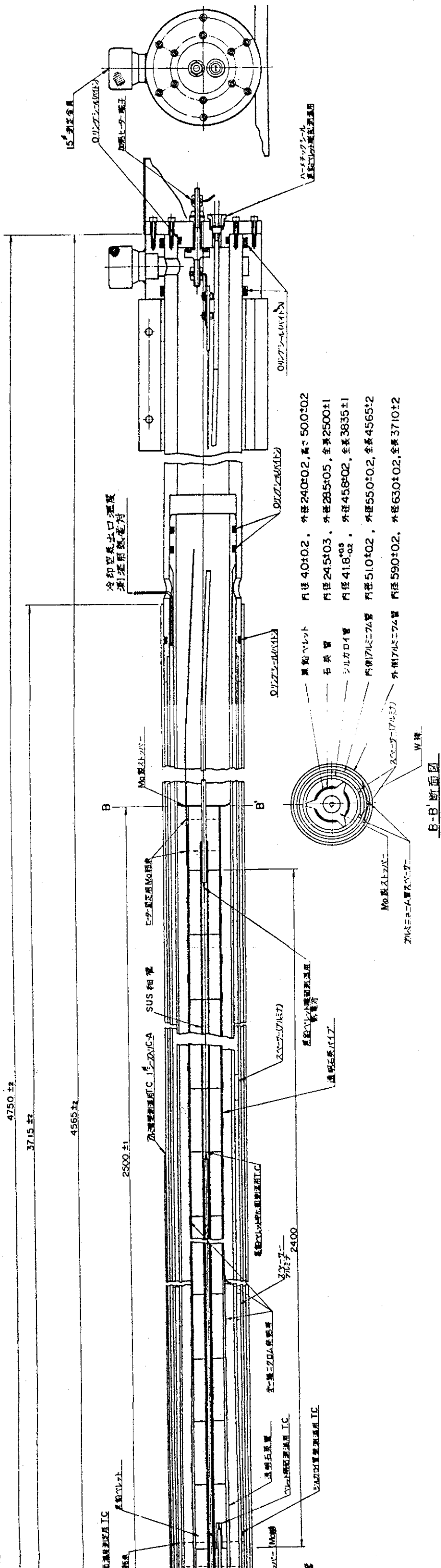
第5図 制御系統図



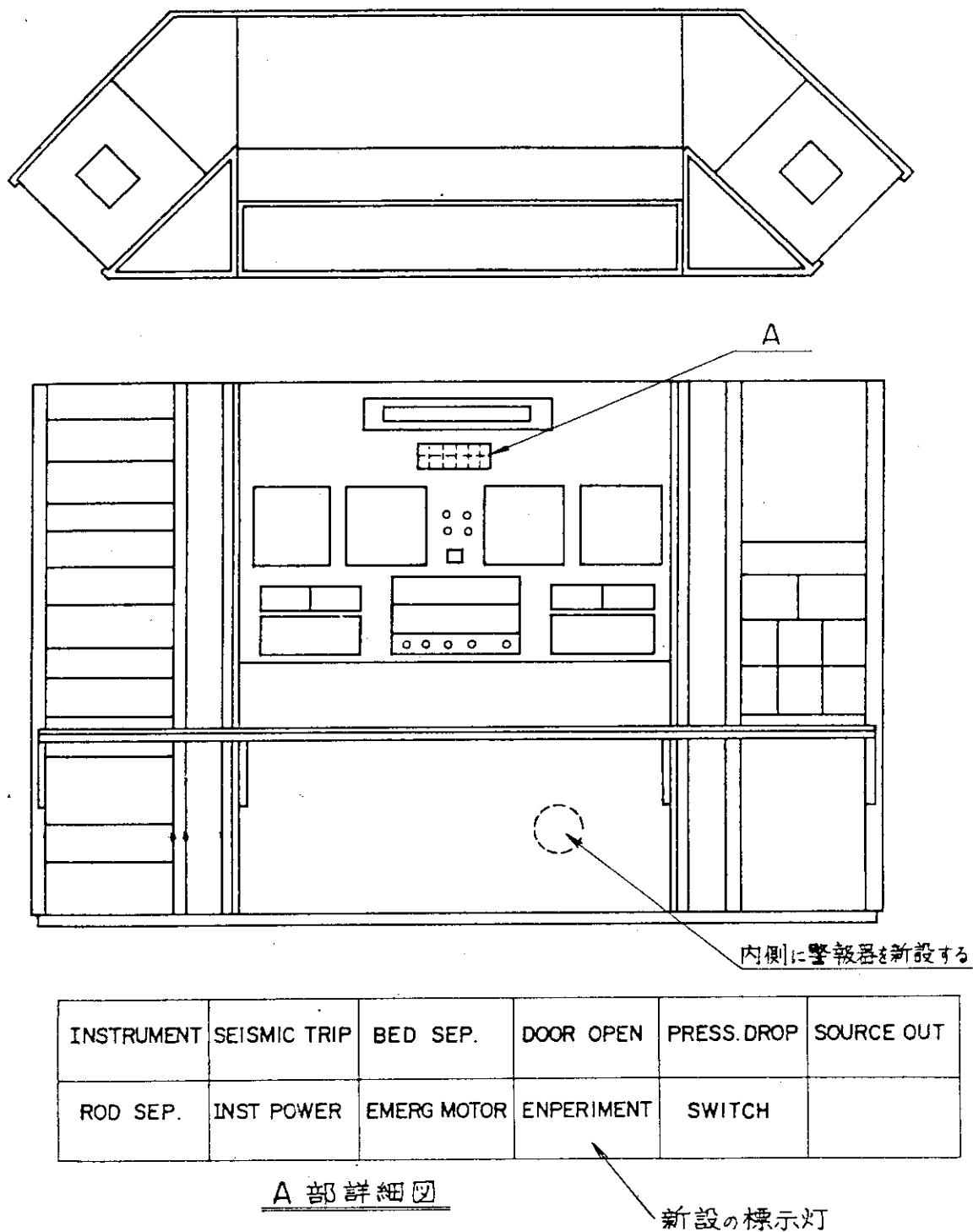
A-A'断面



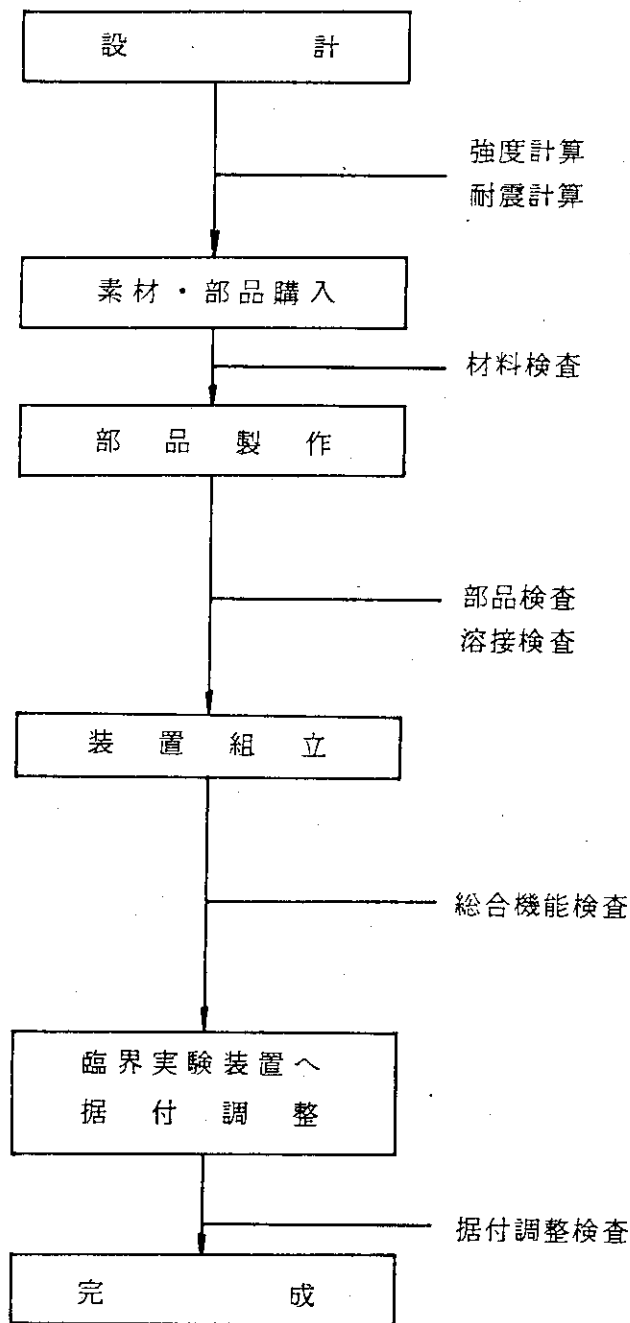
第6図 昇温管断面図



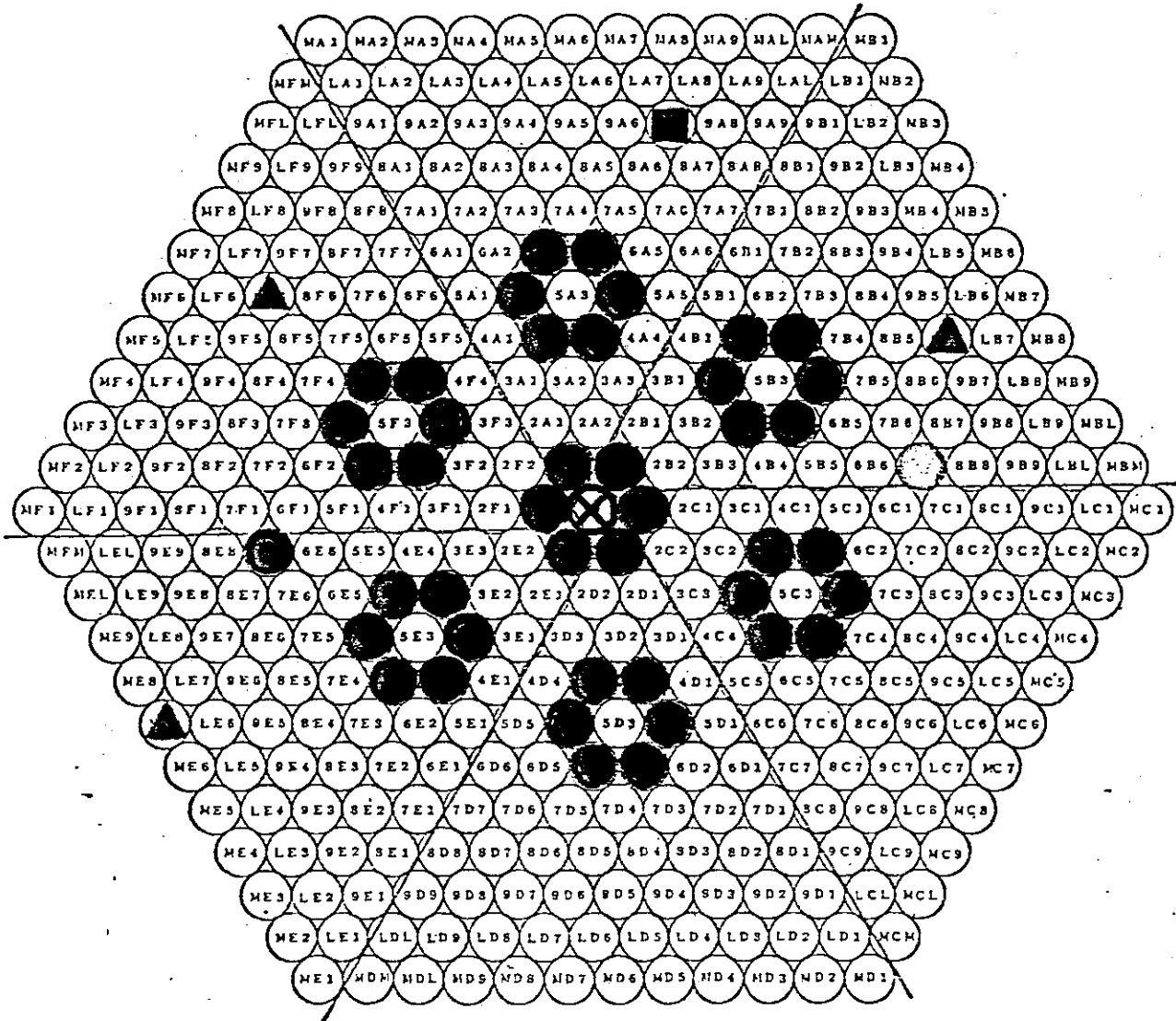
第6図 昇温管断面図



第7図 SHE 制御盤における単一燃料棒昇温装置の故障に対するスクラム標示灯および警報器位置



第8図 単一燃料棒昇温装置の製作及び検査の工程

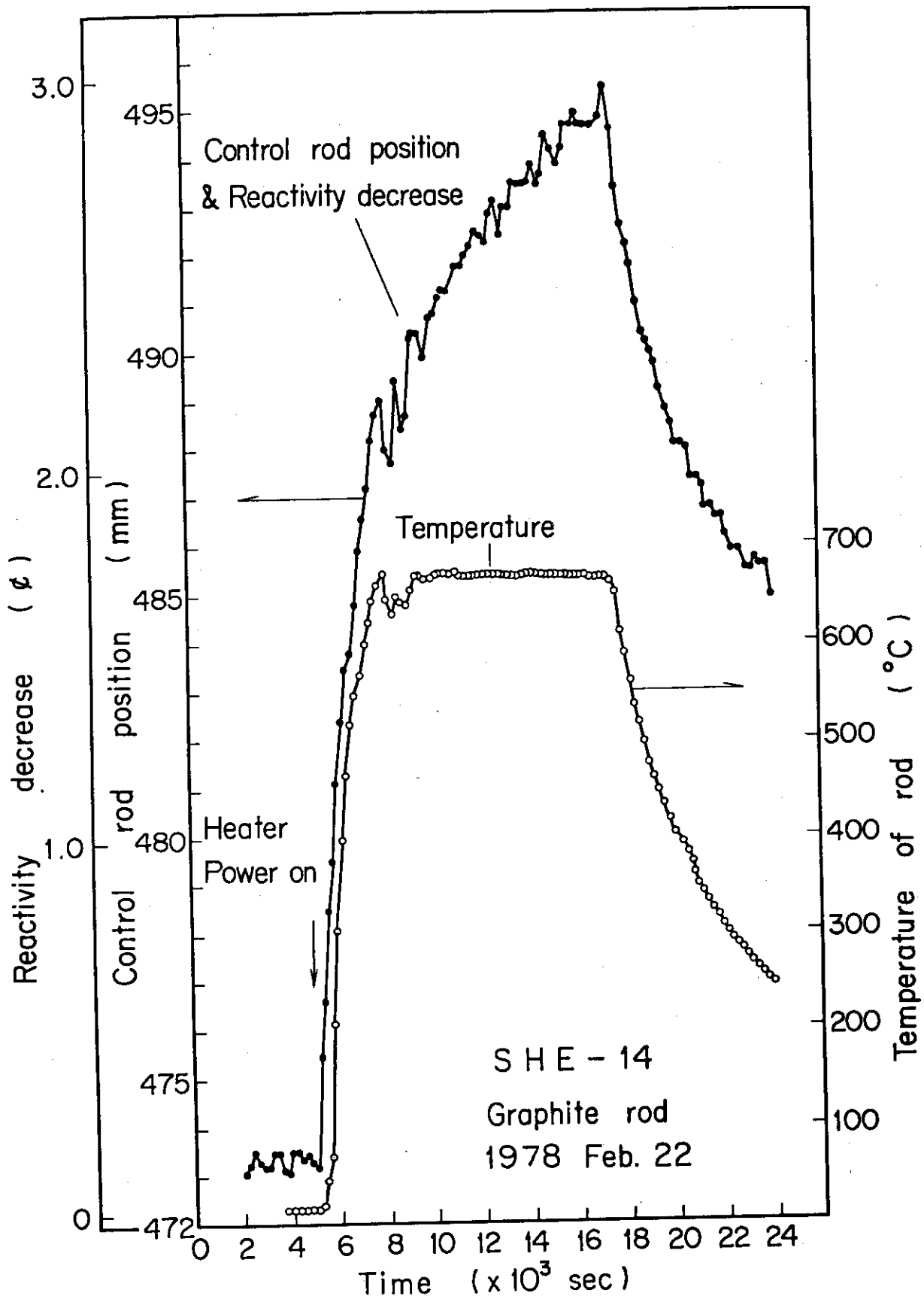


S H E - 14

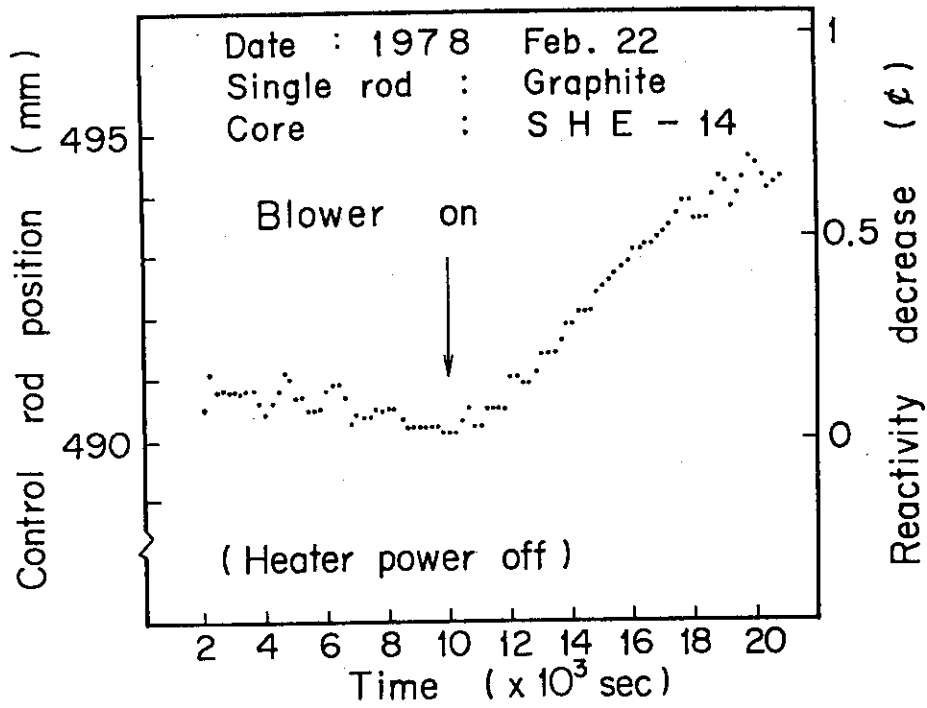
- FUEL ROD
- ⊗ HEATING TUBE

第 9 图 Cross section of SHE-14 core

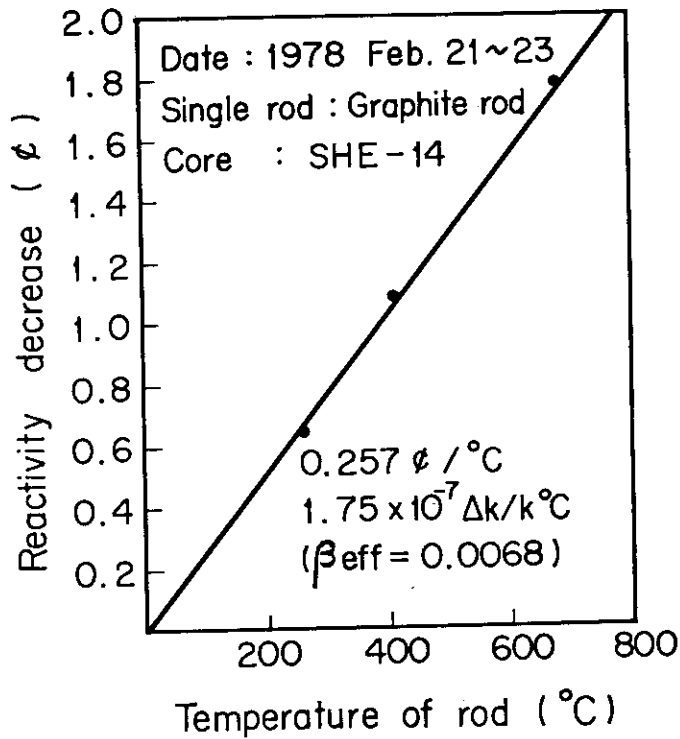




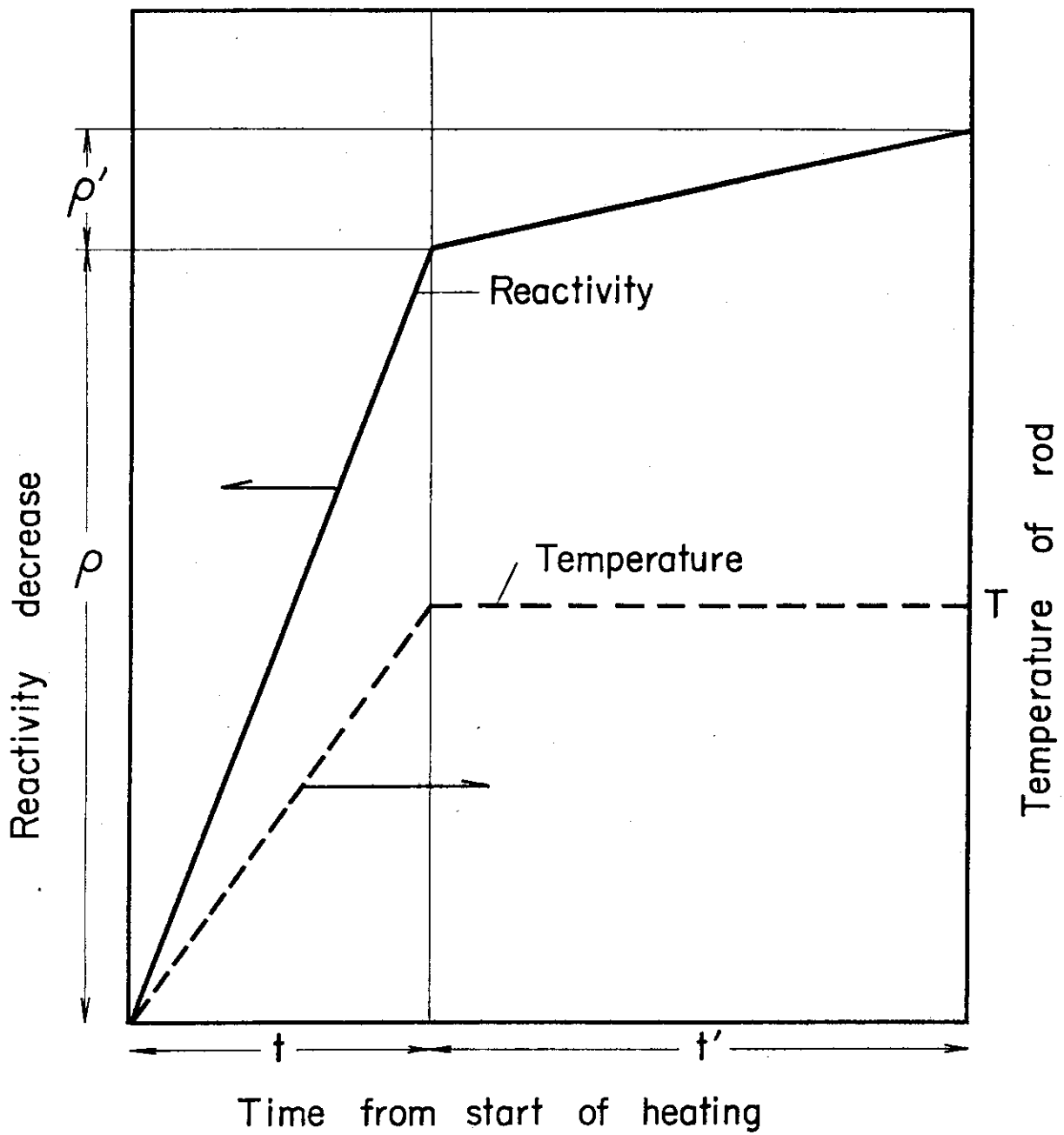
第 10 图 Reactivity decrease due to temperature change of graphite rod



第11图 Reactivity decrease due to temperature change of cooling air

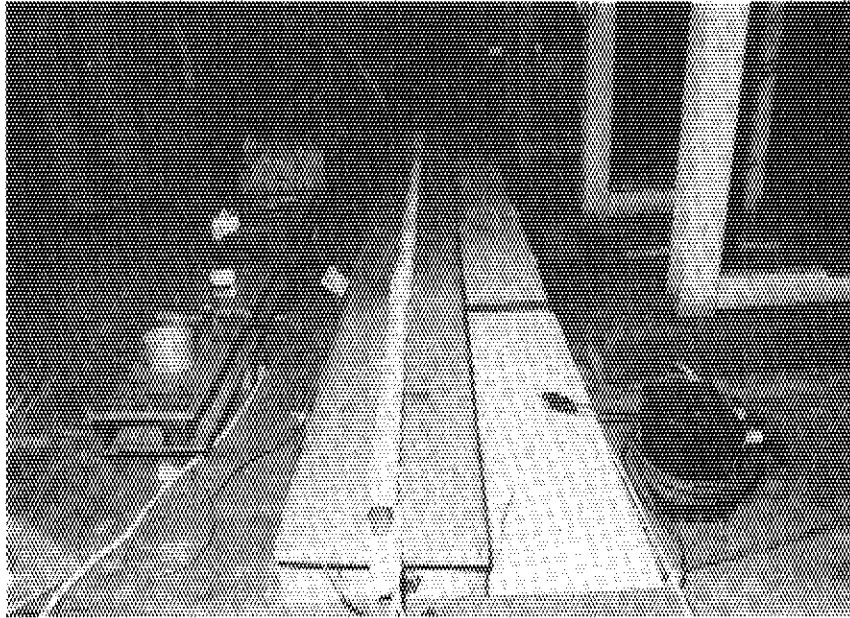


第13图 Relation between reactivity decrease and temperature of graphite rod

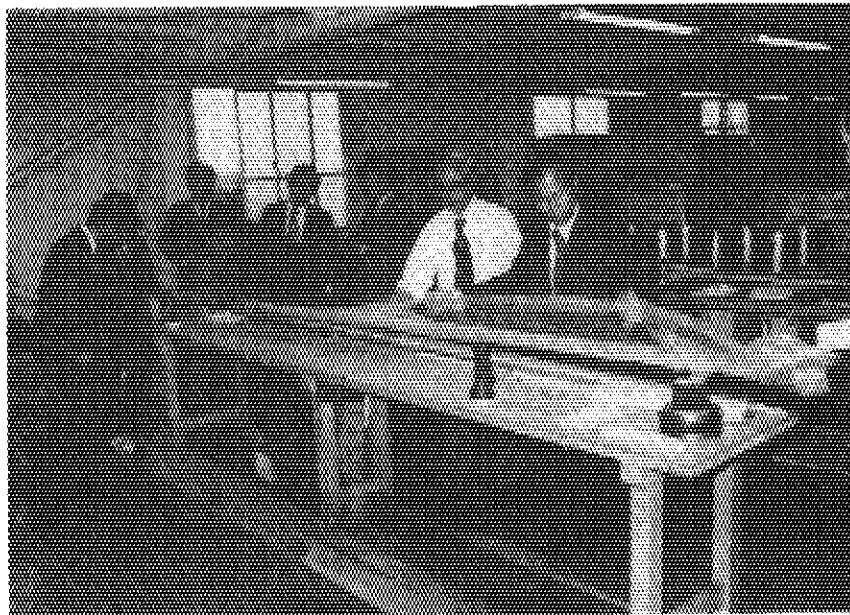


$$\rho_{\text{true}} = \rho - \rho' \frac{t}{t'}$$

第12 ☒ Relation between reactivity decrease and time from start of heating



写 真 1. 黒鉛ペレットを収納し、ニクロム線ヒーターを巻いた  
石英管  
通電試験の状態を示す。



写 真 2. ジルカロイ管

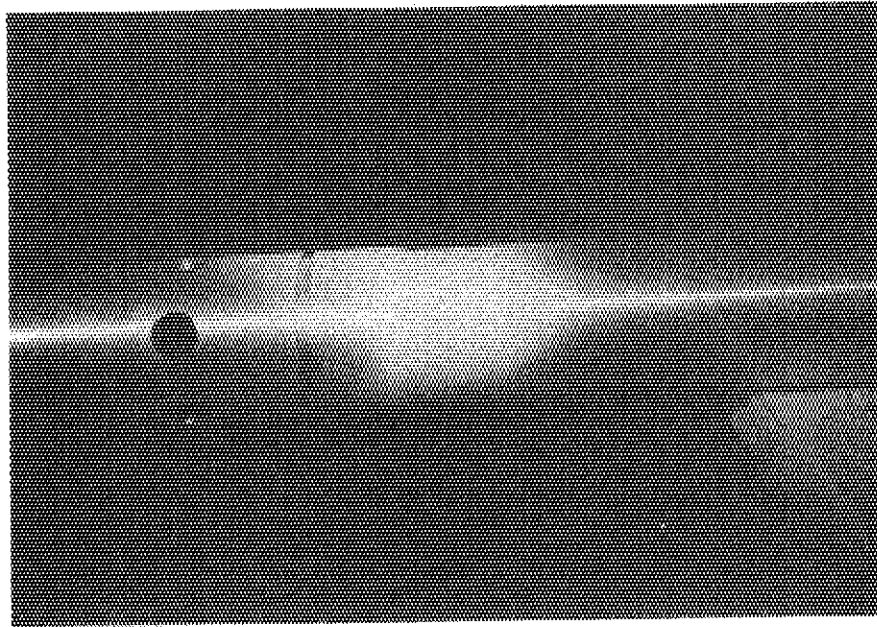


写真 3. 内側アルミニウム管  
液体浸透探傷試験, 有害な傷は認められなかった。

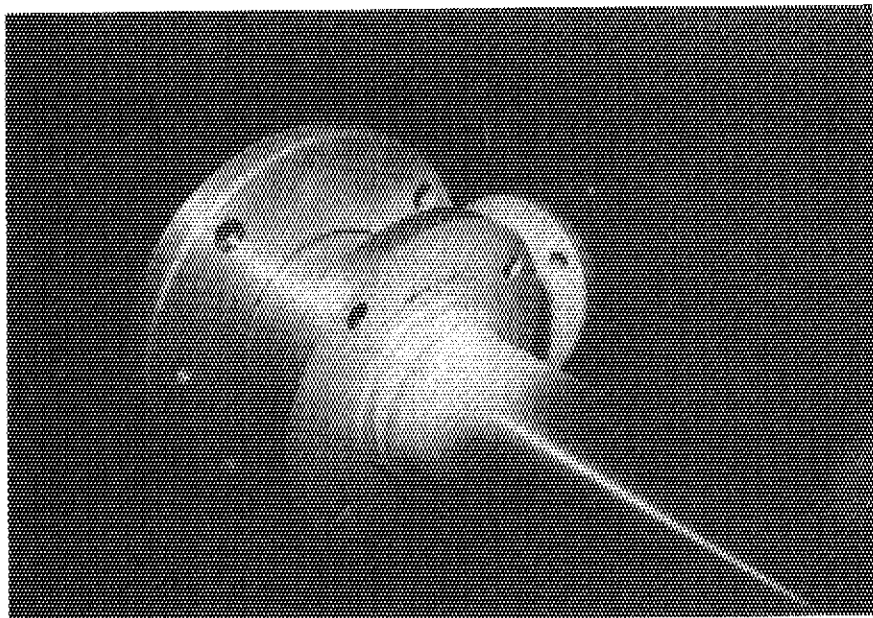


写真 4. 内側アルミニウム管基部  
液体浸透探傷試験, 有害な傷は認められなかった。



写真 5. 昇温管基部

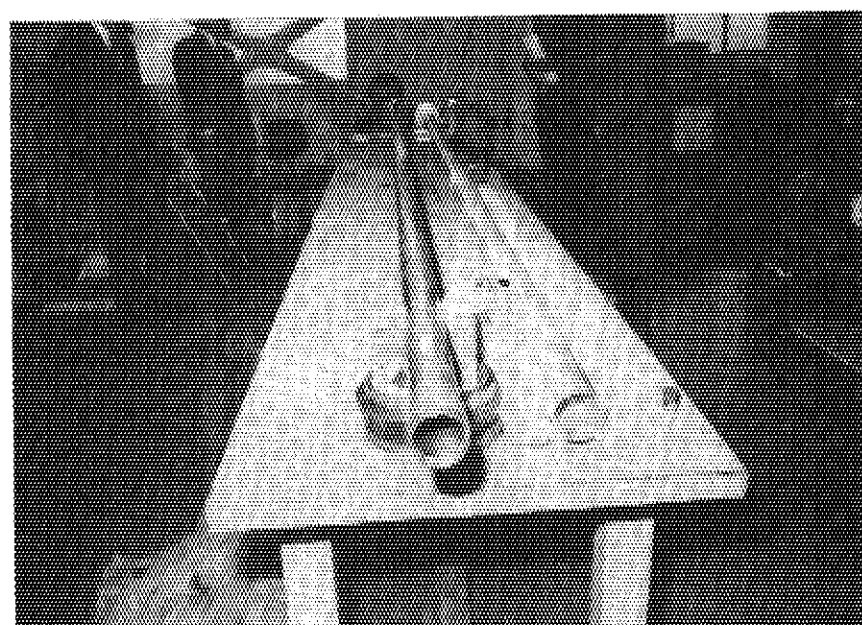


写真 6. 右, 外側アルミニウム管  
左, ジルカロイ管

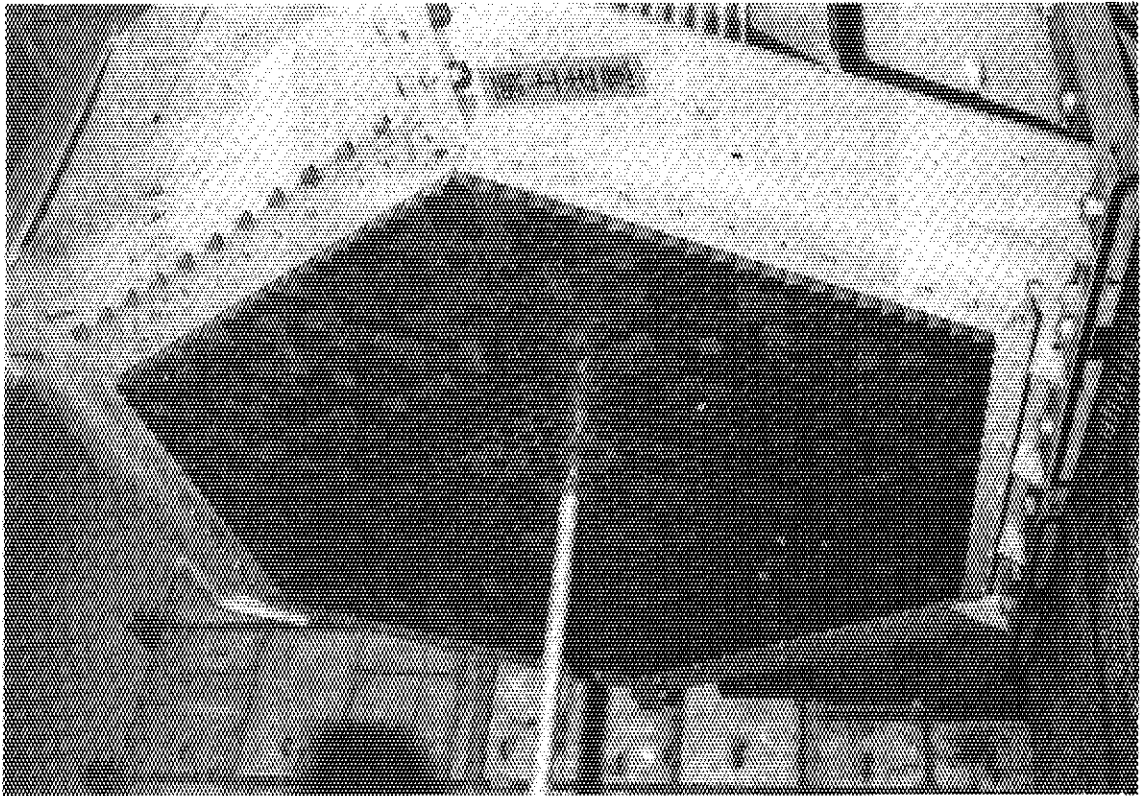


写真 8. SHE にとりつけた昇温管

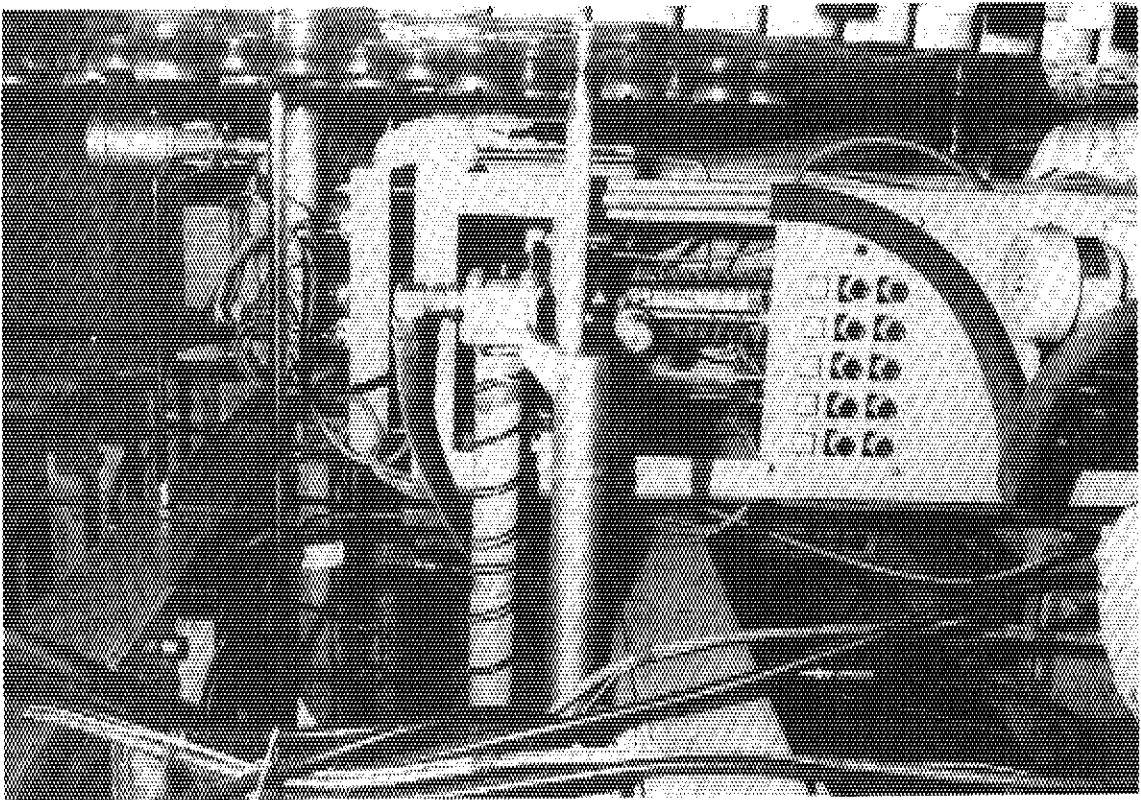


写真 7. SHE 移動側背部にとりつけた昇温管基部

## 付 録

## 1. 安全性の検討

## (1) 核的影響

黒鉛炉の減速材温度係数は大きく見積っても $-10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$ 程度である。従って黒鉛サンプルの温度上昇に伴い、原子炉反応度が僅かばかりであるが緩慢に減少する。しかしその大きさは $700^\circ C$ の昇温について約 $0.01 \Delta k/k$ と推定されるので十分制御棒で追随しうから、安全上問題ない。この昇温管部の炉心への挿入による反応度低下は附録2に示す計算及び模擬実験から $0.3\% \Delta k/k$ 程度と推定される。また装置自体の変形、脱落はないよう十分構造及び固定方法を検討し、かつ材料の耐力の限界内で設計されているので、臨界実験装置の運転中、反応度変化が生ずる恐れはない。

## (2) 構造強度

装置自体が小型で重量も小さく、かつ高圧のかかる部分もないので基本的に安全である。黒鉛サンプルは約 $700^\circ C$ まで昇温されるが、その際ジルカロイ管及びアルミニウム管の温度は附録3に示すように、それぞれ最高 $160^\circ C$ 及び $110^\circ C$ と推定されるので強度上問題になる温度にいたらない。またこれらの管温度上昇に伴うのびについては一端は固定するが、他端は耐熱Oリングを使って真空を保持しつつ滑らせる構造をとっているので、熱応力はほとんど発生しない。装置全体は附録4に示すように $0.3 g$ 程度の加速度の地震に対しても破壊しないよう設計されるので、地震により変形して臨界実験装置の緊急停止動作を妨げることはない。

## (3) 安全保護体策

単一燃料棒昇温装置の制御盤はSHE制御室におかれていて、常時、温度、圧力、真空度等を監視するようになっている。また異常が発生すれば2.4(5)に述べた連動装置が動作するとともに表示ランプ及び警報により表示される。さらに単一燃料棒昇温装置に異常が発生した場合にはSHE制御盤の警報が鳴る。また特にサンプル温度が $700^\circ C$ を超えた場合にはSHEは緊急停止するように連動装置が設けられている。連動装置には十分な多重性がとり入れられているので、以下に述べるような異常が起きた場合でも確実にヒーター電源が切れてサンプル温度を下げる事が可能であるとともに、ジルカロイ管等の温度が異常に上昇することなく単一燃料棒昇温装置は停止される。

## (イ) ヒーター電源の自動制御装置の故障

自動制御装置が故障した場合、黒鉛サンプル温度は設定値を超えて上昇するが、三箇所の測定値のいずれかが $700^\circ C$ を超えると自動的にヒーター電源が切れる連動装置が設けられている。

この連動装置が動作しなかった場合でも、ジルカロイ管及び冷却空気の出口温度が上昇し制限値を超えると、やはりヒーター電源が切れる連動装置が設けられているので黒鉛サンプル温度は下降する。

## (ロ) ジルカロイ管中の真空度低下



ジルカロイ管中の真空度が低下した場合、真空計の指示値が制御値を超えるとヒーター電源が自動的に切れる連動装置が設けられている。この連動装置が動作しなかった場合でも、ジルカロイ管及び冷却空気の出口温度が上昇し制御値を超えると、やはりヒーター電源が切れる連動装置が設けられているので、黒鉛サンプル温度は下降する。

#### (3) 冷却空気の停止

送風機が故障して冷却空気量が低下した場合、冷却空気及びジルカロイ管の温度が設定値より高くなったとき、停電時、後備のバッテリー駆動送風機が動作する連動装置が設けられている。

以上の連動装置が動作しなかった場合でも、ジルカロイ管及び冷却空気出口温度が上昇して制限値を超えるとヒーター電源が切れ、後備のバッテリー駆動送風機が動作する連動装置が設けられているので、ジルカロイ管と内側アルミニウム管の温度はそれぞれ300℃と150℃以内に止まり、やがて常温に達するようになっている。また、Oリング部分は200℃以内の温度に止まるので真空も保持される。

単一燃料棒昇温装置の使用予定は約5年間であり、炉心の主要な構成が変わるたびに使用されるので、一年間あたり2ヶ月程度である。使用しない場合は、昇温管部は炉心からはずされる。

以上のような使用予定期間においては、金属より構成される部品の耐久性は十分であるが、石英管、Oリング等の交換も不要と考えられる。石英管が万一保管中に破損した場合は予備品と交換する。

#### (4) 放射線管理

単一燃料棒昇温装置の臨界実験装置への据付調整作業は十分な運転休止期間を設け、放射線線量率を下げた後、放射線管理課員による十分な放射線管理の下に行われる。

臨界実験装置の運転による単一燃料棒昇温装置昇温管部の放射化は、炉出力が10ワット以下に制限されているため微小であり、連続4時間の運転に対しても直後の生成放射能は10ミリキュリー以下と推定されるが、1時間後にはほとんど消失するので、放射線管理に関して特に問題になることはない。

## 2. 昇温管部の等価反応度の計算

単一燃料棒昇温装置の等価反応度は、摂動論によれば、

$$\Delta k / k = \frac{\int \Sigma a \phi \phi^* dV}{\int \Sigma a \phi \phi^* dV} \dots\dots\dots (A. 2. 1)$$

サンプル昇温管領域  
炉心領域

ここに

$\Sigma a$  : 中性子吸収断面積

$\phi \phi^*$  : 中性子束×共役関数であるが、近似的に炉心領域で  $\phi \phi^* = 1$  とおいてよい。

(A. 1. 1) 式の分子は、表 (A. 2. 1) の中性子吸収断面積を使って計算する。

次に分母については、SHE の標準的な炉心である SHE-T 1 炉心の  $\Sigma a = 0.00569 \text{cm}^{-1}$  及び炉心半径 40cm を代入して計算する。

結局

$$\Delta k / k = 0.0030$$

表 (A.2.1) 昇温管各部分の物理的性質と熱的・機械的安全性検討結果

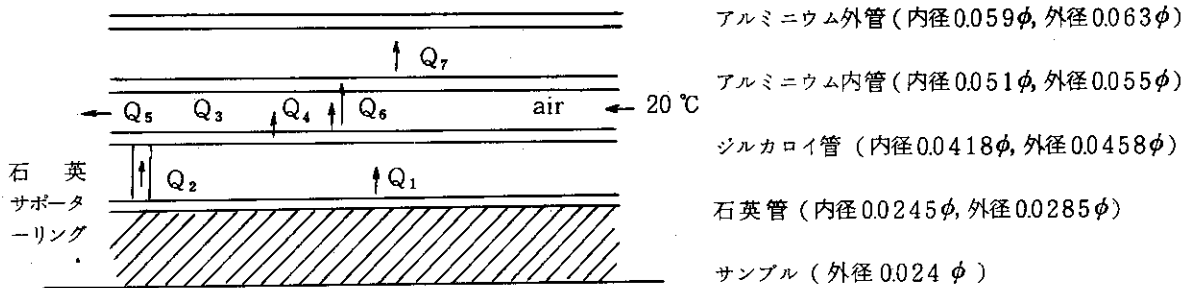
材料	内径 (mm)	外径 (mm)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	元素	原子価数密度 N ( $\times 10^{-24}$ )	熱中性子吸収断面積 $\sigma_a$ (バースン)	材料の耐力 S (kg/mm <sup>2</sup> )	比熱 Cp (cal/°C)	平均温度°C (入口温度) (出口温度)	線重量 W (g/cm)	ヤング率 E (g/cm <sup>2</sup> )	断面二次モーメント I (cm <sup>4</sup> )	長さ支持方法	固有周期 (sec)	地震時の最大曲げ応力 $\sigma_{max}$ (kg/mm <sup>2</sup> )
黒鉛	5	24.0	1.60	C	$8.03 \times 10^{-22}$	0.0032	—	0.35 (室温からの平均 700°C)	700 (697) (702)	7.23	—	—	全長 240 cm ペレット長 5 cm	—	—
石英管	24.5	28.5	2.65	Si O	$2.657 \times 10^{-22}$ $5.315 \times 10^{-22}$	0.13 0.00019	4 (700°C)	—	700 (697) (702)	4.41	$0.68 \times 10^9$	1.47	全長 250 cm 5点単純支持 最長間隔 60 cm	0.041	0.38
ジルカロイ管	41.8	45.8	6.55	Zr Fe Ni Cr Sn	$4.2513 \times 10^{-22}$ $0.9185 \times 10^{-4}$ $3.3618 \times 10^{-5}$ $7.5875 \times 10^{-5}$ $4.8206 \times 10^{-4}$	0.180 253 46 29 0.60	30 (110°C) (ジルカロイ-2)	0.075	745 (465) (1045)	17.87	$0.95 \times 10^9$ (ジルカロイ-2)	6.57	全長 383 cm 1端固定他3 点単純支持 最長間隔 180 cm		0.71
内側アルミニウム管	51.0	55.0	2.699	Al Cu Mg	$6.03 \times 10^{-22}$ $2.62 \times 10^{-3}$ $9.05 \times 10^{-4}$	0.23 362 0.063	927 (室温) 677 (100°C) 384 (200°C)	0.214	48 (20) (78)	8.96	$0.719 \times 10^9$	1.17	全長 368.5 cm 1端固定他2 点単純支持 最長間隔 129 cm	0.022	0.28
外側アルミニウム管	59.0	63.0	2.699	—	—	—	—	20 (20) (20)	10.2	—		—	1.87	全長 456.5 cm 1端固定 SHE分離時 間隔 150 cm 単純支持	0.013

### 3. 昇温管内の伝熱流動の計算

#### 3.1 仕様

1. サンプル温度 700℃
2. サンプル温度の均一度：温度分布が軸方向で20℃以内半径方向で10℃以内
3. サンプル昇温（700℃まで）時間は40分以内
4. サンプル長さ 2.4 m
5. SHE周辺の黒鉛への伝熱は20 WHr 以下
6. ジルカロイ管の冷却空気出口側の最高温度は160℃以下
7. 冷却空気の出口温度は110℃以下
8. 冷却用空気流速 50 m/sec

#### 3.2 計算



#### (1) 記号

Q	伝熱量	[kcal/Hr]
T	温度	[°K, °C]
A	面積	[m <sup>2</sup> ]
de, d'e	相当直径	[m]
d	直径	[m]
L, l	長さ	[m]
ρ	密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
Cp	比熱	[kcal/kg・°C]
μ	粘度	[kg/m・Hr]
λ	熱伝導度	[kcal/m・Hr・°C]
h	対流伝熱係数	[kcal/m <sup>2</sup> ・Hr・°C]
e	熱放射率	[—]
G	質量速度	[kg/m <sup>2</sup> ・Hr]

f	流体摩擦係数	[ - ]
$\theta$	時間	[Hr, min]
gc	重力換算係数	[kg·m/kg·sec <sup>2</sup> ]
U	流速	[m/sec]
$\Delta P$	圧力損失	[kg/m <sup>2</sup> ]
Pr	プラントル数	[Cp $\mu$ / $\lambda$ , -]
Re	レイノルズ数	[d $\rho u$ / $\mu$ , -]

Suffix

A <sub>1</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	アルミニウム, アルミニウム内管, 外管
Zr	ジルカロイ
q	石英
A	空気
g	黒鉛
O	外径側
i	内径側

(2) 計算の進め方

この計算は、単一燃料棒昇温装置の昇温管部についての熱計算で、次のような方針で計算を行う。

- 1) 石英管からジルカロイ管へ伝わる放射伝熱量と石英サポータリングを通してジルカロイ管に伝わる伝導伝熱量との和がジルカロイ管から空気に伝えられる対流伝熱量とジルカロイ管からアルミニウム内管へ伝えられる放射伝熱量との和に等しい。
- 2) 空気からアルミニウム内管へ伝わる対流伝熱量とジルカロイ管からアルミニウム内管へ伝わる放射伝熱量との和がアルミニウム内管から外管へ伝えられる放射伝熱量に等しい。
- 3) ジルカロイ管から空気に伝わる対流伝熱量は空気が昇温によって取り除く熱量と空気からアルミニウム内管に伝えられる対流伝熱量との和に等しい。

(3) 計算

定常状態において単一燃料棒温度と石英管温度が等しく、その平均温度を 700°C (= 973°K) とすると、

- i) 石英管 → ジルカロイ管の放射伝熱量  $Q_1$

1面が他面を完全に囲む場合を考えて

$$Q_1 = \frac{\sigma A_q}{1/\epsilon_q + (A_q/A_{zri})(1/\epsilon_{zr} - 1)} \left\{ \left(\frac{T_q}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{zr}}{100}\right)^4 \right\} \quad (A.31)$$

ここでは  $\sigma$  は Stefan - Boltzmann 定数で 4.88kcal/m<sup>2</sup> Hr °K。

$$A_{q0} = \pi \times 0.0285 \times 24 = 0.215 \text{ m}^2$$

$$A_{q0}/A_{zri} = 0.0285/0.0418 = 0.682$$

$$\epsilon_q = 0.9$$

$$\epsilon_{zr} = 0.1$$

$$T_q = 973^\circ\text{K}$$

したがって

$$Q_1 = \frac{(488)(0.215)}{1/0.9 + (0.682)(1/0.1 - 1)} \left\{ \left(\frac{973}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{zr}}{100}\right)^4 \right\}$$

$$= (0.1447) \{ 8963 - (T_{zr}/100)^4 \} \text{ kcal/Hr} \quad (\text{A. 3.2})$$

ii) 石英管サポータリングによる伝導伝熱量  $Q_2$

円筒の熱伝導の式より

$$Q_2 = 2\pi\ell\lambda \frac{T_q - T_{zr}}{\ln(d_{zr}/d_{qo})} \quad (\text{A. 3.3})$$

ここで  $\lambda = 1 \text{ kcal/mHr }^\circ\text{C}$ ,  $\ell = 0.003 \text{ m}$  のリングが 5 個, 形状から実効的には 2 個

$$Q_2 = 2 \times \pi \times 0.006 \times 1 \times \frac{973 - T_{zr}}{\ln(0.0418/0.0285)}$$

$$= (0.0984)(973 - T_{zr}) \text{ kcal/Hr} \quad (\text{A. 3.4})$$

iii) ジルカロイ管より空気への対流伝熱量  $Q_3$

対流による伝熱において伝熱量は次のように表わされる。

$$Q_3 = h_1 A_{zri} (T_{zr} - T_A) \quad (\text{A. 3.5})$$

ところで冷却用空気は二重管によって囲まれる円環の中を流れる。このとき二重管の内管での対流伝熱係数は  $0.7 < Pr < 5$  の範囲では

$$h_1 = 0.0142 (\lambda/de) (d_o/d_i)^{0.53} (de \rho_A U_A / \mu_A)^{0.8} (C_{pA} \mu_A / \lambda)^{0.53} \quad (\text{A. 3.6})$$

$$de = d_o - d_i$$

と表わされる。

ここで試算により空気の平均温度は約  $55^\circ\text{C}$ 。したがって物性値は

$$C_{pA} = 0.25 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$$

$$\mu_A = 0.0702 \text{ kg/mHr}$$

$$\lambda_A = 0.025 \text{ kcal/mHr }^\circ\text{C}$$

空気の質量速度  $GA (= \rho_A U_A)$  は

$$G = 50 \times 3600 \times (29/22.4) = 233,000 \text{ kg/m}^2 \text{ Hr}$$

したがって,

$$Re = de \rho_A U_A / \mu_A = (0.051 - 0.0458) \times 233,000 / 0.0702 = 17,259$$

$$Re^{0.8} = 2,453$$

$$Rr = C_{pA} \mu_A / \lambda_A = 0.25 \times 0.0702 / 0.025 = 0.702$$

$$Rr^{0.53} = 0.829$$

そしてまた

$$d_o/d_i = 0.051/0.0458 = 1.11, (d_o/d_i)^{0.53} = 1.06$$

これらの数値を (A. 3.6) に代入して

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.0142 \times (0.025/0.0052) \times 1.06 \times 2.453 \times 0.829 \\ &= 147.2 \text{ kcal/m}^2 \text{ Hr } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ジルカロイ管外側の表面積  $A_{zro}$  は,

$$A_{zro} = 3.14 \times 0.0458 \times 2.4 = 0.345 \text{ m}^2$$

したがって (A. 3.6) 式より

$$\begin{aligned} Q_3 &= 147.2 \times 0.345 \times (T_{zr} - T_A) \\ &= 50.8 \times (T_{zr} - T_A) \end{aligned} \quad (\text{A. 3.7})$$

iv) ジルカロイ管 → アルミニウム内管への放射伝熱量  $Q_4$

接近している曲面の場合と考えて

$$Q_4 = \frac{\sigma A_{zro}}{1/\epsilon_{zr} + 1/\epsilon_{Al1} - 1} \left\{ \left( \frac{T_{zr}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Al1}}{100} \right)^4 \right\} \quad (\text{A. 3.8})$$

$\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数で  $4.88 \text{ kcal/m}^2 \text{ Hr } ^\circ\text{K}$ 。

ここで  $A_{zro} = \pi \times 0.0458 \times 2.4 = 0.345 \text{ m}^2$

$$\epsilon_{zr} = 0.1$$

$$\epsilon_{Al1} = 0.1$$

したがって,

$$\begin{aligned} Q_4 &= \frac{(4.88)(0.345)}{1/0.1 + 1/0.1 - 1} \left\{ \left( \frac{T_{zr}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Al1}}{100} \right)^4 \right\} \\ &= (0.0886) \left\{ \left( \frac{T_{zr}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Al1}}{100} \right)^4 \right\} \end{aligned} \quad (\text{A. 3.9})$$

v) 冷却用空気が昇温することによって取り去る熱量  $Q_5$

$$Q_5 = C_{pA} W (T_{A2} - T_{A1}) \quad (\text{A. 3.10})$$

ここで  $W$  は空気量 [ kg/Hr ],  $T_{A2}, T_{A1}$  はそれぞれ空気の出口及び入口での温度。

$$W = 233.000 (\text{kg/m}^2 \text{ Hr}) \times \frac{\pi}{4} (0.051^2 - 0.0458^2) (\text{m}^2) = 92.05 (\text{kg/Hr})$$

したがって,

$$\begin{aligned} Q_5 &= 0.25 \times 92.05 \times (T_{A2} - 293) \\ &= 23.01 \times (T_{A2} - 293) \end{aligned}$$

vi) 空気よりアルミニウム内管への対流伝熱量  $Q_6$

iii) において示したように対流による伝熱では, 伝熱量は

$$Q_6 = h_2 A_{Al1i} (T_A - T_{Al1}) \quad (\text{A. 3.12})$$

$T_A$  は空気の平均温度

ここで対流伝熱係数  $h_2$  は円管内の対流伝熱係数の式より

$$h_2 = 0.023 (\lambda / de') (de' \rho_A U_A / \rho_A)^{0.8} (C_{pA} / \lambda)^{0.4} \quad (\text{A. 3.13})$$

de' は伝熱的相当直径で、二重管の場合次式で示される。

$$\begin{aligned} de' &= (do^2 - di^2) / do \\ &= (0.051^2 - 0.0458^2) / 0.051 = 0.00986 \text{ m} \end{aligned}$$

空気の物性値は iii) の場合と同じ値を用いて、

$$de' \rho U / \mu = 0.00986 \times 233000 / 0.0702 = 32726, (de' \rho U / \mu)^{0.8} = 4091$$

$$C_{pA} \mu_A / \lambda = 0.702, (C_{pA} \mu_A / \lambda)^{0.4} = 0.868$$

したがって、これらの値を (A. 3.13) に代入して

$$\begin{aligned} h_2 &= 0.023 \times (0.025 / 0.00986) \times 4091 \times 0.868 \\ &= 207.1 \text{ kcal} / \text{m}^2 \text{ Hr } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

アルミニウム内管の内表面積  $A_{A\ell 1}$  は

$$A_{A\ell 1} = \pi \times 0.051 \times 2.4 = 0.385 \text{ m}^2$$

(A. 3.12) より

$$\begin{aligned} Q_6 &= 207.1 \times 0.385 \times (T_A - T_{A\ell}) \\ &= 79.73 \times (T_A - T_{A\ell}) \text{ kcal} / \text{Hr} \end{aligned} \quad (\text{A. 3.14})$$

vii) アルミニウム内管からアルミニウム外管への放射伝熱量  $Q_7$

この放射伝熱量が最大となるのはアルミニウム外管が外管雰囲気 (20°C) と同一温度の場合と考えられる。

接近している曲面の場合と考えて、放射伝熱量  $Q_7$  は

$$Q_7 = \frac{\sigma A_{A\ell 10}}{1/\epsilon_{A\ell 1} + 1/\epsilon_{A\ell 2} - 1} \left\{ \left( \frac{T_{A\ell 1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{A\ell 2}}{100} \right)^4 \right\} \quad (\text{A. 3.15})$$

ここで  $A_{A\ell 10} = \pi \times 0.055 \times 2.4 = 0.415 \text{ m}^2$

$$\epsilon_{A\ell 1} = 0.1$$

$$\epsilon_{A\ell 2} = 0.1$$

$$T_{A\ell 2} = 293 \text{ } ^\circ\text{K.} (= 20^\circ\text{C})$$

したがって

$$\begin{aligned} Q_7 &= \frac{(488)(0.415)}{1/0.1 + 1/0.1 - 1} \left\{ \left( \frac{T_{A\ell 1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right\} \\ &= 0.1065 \{ (T_{A\ell 1} / 100)^4 - 73.7 \} \end{aligned} \quad (\text{A. 3.16})$$

以上のように求めた各熱量間で収支をとると

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (\text{A. 3.17})$$

$$Q_3 = Q_5 + Q_6 \quad (\text{A. 3.18})$$

$$Q_4 + Q_6 = Q_7 \quad (\text{A. 3.19})$$



したがって

$$\begin{aligned} & (0.1447)\{8963-(T_{Zr}/100)^4\}+(0.0984)(973-T_{Zr}) \\ & = (50.8)(T_{Zr}-T_A)+(0.0886)\{(T_{Zr}/100)^4-(T_{A\ell 1}/100)^4\} \end{aligned} \quad (A. 3. 20)$$

$$(50.8)(T_{Zr}-T_A)=(23.01)(T_{A2}-293)+(79.73)(T_A-T_{A\ell 1}) \quad (A. 3. 21)$$

$$\begin{aligned} & (0.0886)\{(T_{Zr}/100)^4-(T_{A\ell 1}/100)^4\}+(79.73)(T_A-T_{A\ell 1}) \\ & = (0.1065)\{(T_{A\ell 1}/100)^4-73.7\} \end{aligned} \quad (A. 3. 22)$$

Try and error によって上式より

$$T_{Zr} = 3475 \text{ }^\circ\text{K} (= 745 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$T_{A\ell 1} = 321 \text{ }^\circ\text{K} (= 48 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$T_{A2} = 351 \text{ }^\circ\text{K} (= 78 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$T_A = 321 \text{ }^\circ\text{K} (= 48 \text{ }^\circ\text{C})$$

(4) 検討事項

◦温度分布

先の熱計算結果、及び空気入口条件より(空気入口温度 20℃)ジルカロイ管、アルミニウム管の温度分布は(A. 3. 20)～(A. 3. 22)を用いると次のようになる。

	空気入口	平均値	空気出口
ジルカロイ管	465℃	74.5℃	104.5℃
アルミニウム管	20℃	48℃	78℃
空 気	20℃	48℃	78℃

したがって、計算誤差を考慮しても、ジルカロイ管とアルミニウム管の最高温度はそれぞれ160℃及び110℃以下である。

石英管及びサンプルからの放熱量は一樣であると考えると

	空気入口	平均値	空気出口
石英 サンプル	697℃	700℃	702℃

◦アルミニウム外管及び周囲SHEの温度上昇について

アルミニウム外管及び周囲SHEの温度上昇については安全側をみて、全長において空気出口温度条件を用いて計算する。このときアルミニウム外管温度が293°K(20℃)のとき伝熱量は最大となる。

したがって

$$Q_{7\max} = (0.1065)\{(T_{A\ell 1}/100)^4-73.7\}$$

ここで  $T_{A\ell 1} = 322.5 \text{ }^\circ\text{K} (= 50 \text{ }^\circ\text{C})$  を代入して

$$\begin{aligned} Q_{7\max} & = 3.67 \text{ kcal/Hr} \\ & = 0.0043 \text{ kW} \end{aligned}$$

そして、周辺黒鉛への伝熱量は 43 wH となるが 2.4 設計条件で定めた 20 wH より少ない。

$Q_{7 \text{ max}}$  が周囲 6 本の SHE 燃料棒の昇温に寄与することになる。そこで黒鉛の密度を  $1,600 \text{ kg/m}^3$ 、比熱を  $0.17 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$  とすると、SHE の昇温は

$$\begin{aligned}\Delta t &= Q_{7 \text{ max}} / C_{pg} W_g \\ &= 43 / 0.17 \times (\pi/4) \times 0.065^2 \times 24 \times 6 \times 1,600 \\ &= 0.33^\circ\text{C}\end{aligned}$$

○ 空気の圧力損失

円管内の圧力損失は次式で与えられる。

$$\Delta p = 4f (\rho_A \bar{U}_A^2 / 2g_c) (L/d)$$

ここで  $d$  に流体力学的相当直径  $d_e = d_o - d_i$ 、ジルカロイ管及びアルミニウム管を平滑管として考えると、 $f = 0.007$ 、

そして  $\rho_A = 1.078 \text{ kg/m}^3$ 、 $\bar{U}_A = 180,000 \text{ m/Hr} = 50.0 \text{ m/sec}$ 、 $L = 3.7 \text{ m}$ 、したがって

$$\begin{aligned}\Delta P &= 4 \times 0.007 \times (1.078 \times 60.0^2 / 2 \times 9.8) \times \{3.7 / (0.051 - 0.0458)\} \\ &= 3.945 \text{ kg/m}^2\end{aligned}$$

○ 所要電力及びサンプル昇温時間

i) サンプル昇温時間

サンプルを  $20^\circ\text{C}$  から  $700^\circ\text{C}$  まで昇温するのに必要な熱量は、

$$Q = \bar{C}_p w \Delta t = \bar{C}_p \rho V \Delta t$$

ここで  $\bar{C} = 0.35 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ 、 $\rho = 1,600 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned}Q &= 0.35 \times (\pi/4) \times 0.026^2 \times 24 \times 1,600 \times (700 - 20) \\ &= 484 \text{ kcal}\end{aligned}$$

サンプル加熱用に  $1.5 \text{ kW}$  を用いると昇温時間  $\theta$  は

$$\begin{aligned}\theta &= 484 / 860 \times 1.5 = 0.38 \text{ Hr} \\ &= 23 \text{ min} (< 40 \text{ min})\end{aligned}$$

ii) 所要電力

熱損失を補う為に必要な電力は

$$\begin{aligned}Q_1 + Q_2 &= 1.275 + 61 = 1,336 \text{ kcal/Hr} \\ &= 1.3 \text{ kW}\end{aligned}$$

所要電力はサンプル昇温用と熱損失を補う為の電力との和であるから

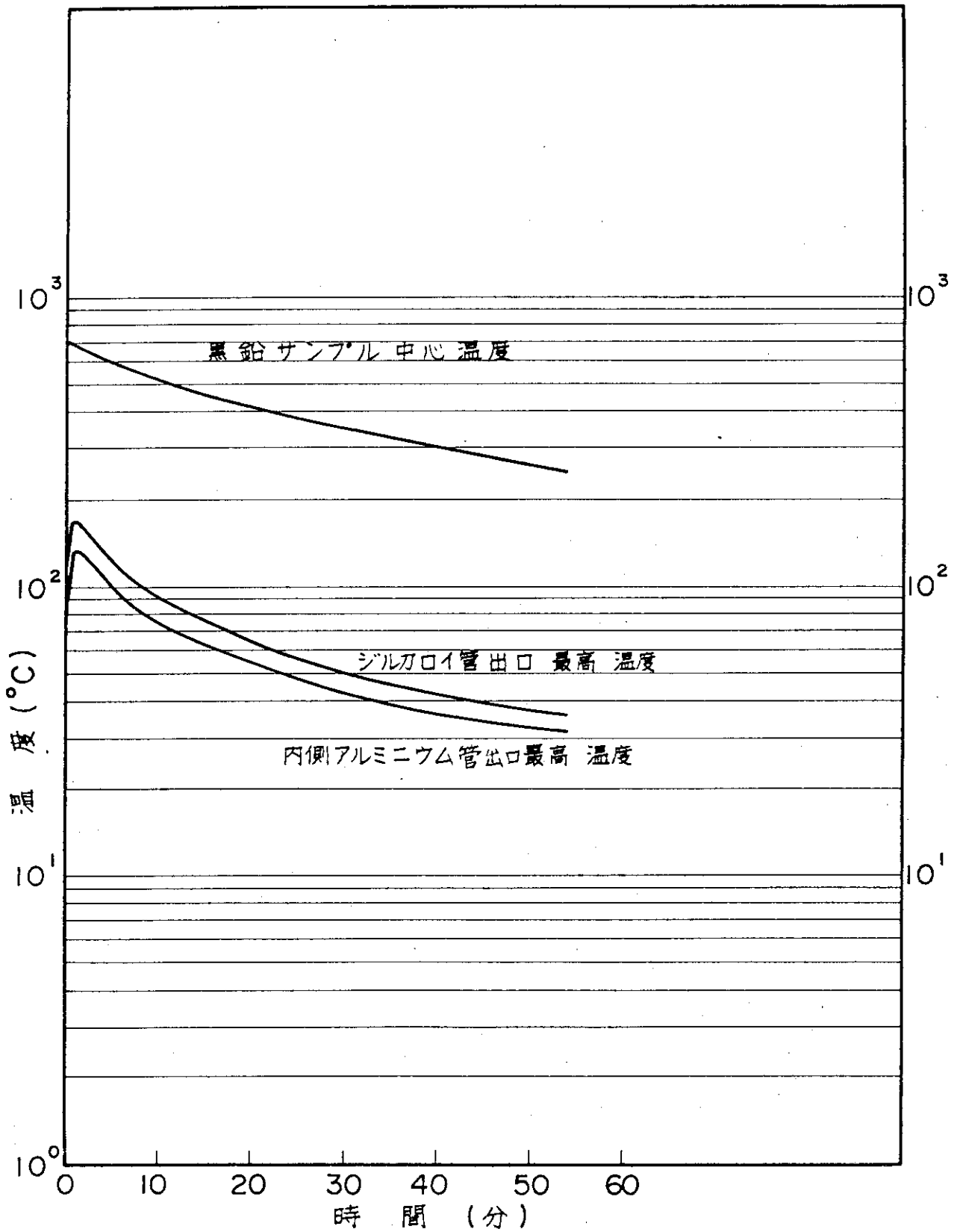
$$1.3 + 1.5 = 2.8 \text{ kW}$$

○ 停電の場合の送風

停電もしくは、ブロワーの故障により冷却空気が停止した場合には、インターロックに

より黒鉛サンプル加熱ヒーター電源が切れるが、黒鉛サンプル中に蓄えられた熱が漏洩してくるので、ジルカロイ管や内側アルミニウム管の温度が上昇する。これを防止するため、後備として、バッテリー駆動ブLOWERを用意し、除熱に必要な時間送風する。この場合、すでに、ヒーター電源が切れているので、風速は30 m/sec程度で十分である。

バッテリー駆動ブLOWERで送風した場合について、各部分の温度変化を計算により推定すると第A. 2.1図のようになる。したがって、ジルカロイ管と内側アルミニウム管の温度は出口で最高になるが、各々168℃と133℃であり制限値の300℃と150℃以内にとどまる。



第A. 3.1図 主送風機停止後の各部の温度

## 4. 耐震性の計算

### 4.1 計算の方法

地震の周期は岩盤及び洪積層において、それぞれ約 0.15 及び 0.3 sec にピークをもっている。装置の固有周期  $\tau$  がこの地震の周期に近いほど、共振して応管加速度が大きくなる。この様子を昇温管部のような小口径配管について第 A. 4.1 図に示した。

第 1 段階として  $\tau$  を計算して適切な応管加速度を推定する。昇温管部は多重管構造をしているとともに、第 A. 4.2 図に示すように、スパーサーが管間ギャップに入っている。このため、構造が複雑になり、直接的な方法の適用が困難になるので、ここでは近似的な方法を採用した。すなわち、管の内蔵物の重量は均等に管の内壁にかかっているという単純化を行った上で  $\tau$  を求めた。

計算式はレーリーリッツの式によった。

3 領域 4 点単純支持の場合、管の固有周期

$$\tau = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{W_1^3 \ell_1^3 + W_2^3 \ell_2^3 + W_3^3 \ell_3^3}{(E_1 I_1 W_1^2 \ell_1^5 + E_2 I_2 W_2^2 \ell_2^5 + E_3 I_3 W_3^2 \ell_3^5) g}} \quad \text{..... (A. 4.1)}$$

ここに、領域  $i$  について ( $i = 1, 2, 3,$ )

$W_i$  : 単位長さ当りの重量

$\ell_i$  : 長さ

$E_i$  : ヤング率

$I_i$  : 断面二次モーメント

あるいは、1 領域両端単純支持の場合の固有周期を求める式

$$\tau = \frac{2 \ell^2}{\pi} \sqrt{\frac{W}{E I g}} \quad \text{..... (A. 4.2)}$$

を用いた。昇温管各部の諸元は表 (A. 2.1) のとおりである。

第 2 段階として管の各部には、応管加速度に重力加速度を加えた加速度が各部分に作用することにより曲げモーメントが発生する。この曲げモーメントに起因する曲げ応力を求めた。そしてこの曲げ応力が材料の強度の範囲内にあるので、管の破損は発生しないことを結論した。

曲げ応力  $\sigma_{\max}$  及びたわみ  $\delta_{\max}$  に関しては、一番きびしい条件にあるスパンについて両端単純支持の場合のつぎの計算式を用いた。

$$\sigma_{\max} = \frac{2 M_{\max} D_1}{1} \quad \text{..... (A. 4.3)}$$

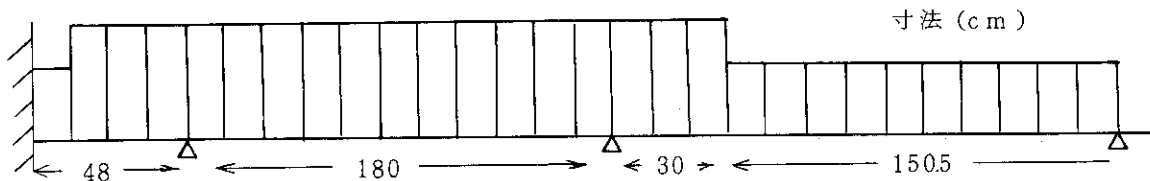
$$\delta_{\max} = \frac{5 W \ell^2}{384 EI} \dots\dots\dots (A. 4.4)$$

ここに

- $M_{\max}$  : 最大曲げモーメント
- $I$  : 断面二次モーメント
- $D_1$  : 管の外径

4.2 石英管・ジルカロイ管の耐震性

- 石英管を収納したジルカロイ管の固有周期  
黒鉛サンプル・石英管を収納したジルカロイ管の重量分布は、



(A. 3.1) 式に入れて計算すれば

$$\tau = 0.041 \text{ sec}$$

これは地震の周期よりはるかに短いので共振しない。

応管加速度は第A. 3.1 図によって 0.3 g の地震に対して 0.9 g となる。従って、自重 1.0 g との和 1.9 g が瞬間的に石英管にかかる加速度となる。

- 石英管に発生する曲げ応力

石英管は全長 2500 mm であり、20 mm - 630 mm - 600 mm - 600 mm - 630 mm - 20 mm の間隔の 5 点で支持されている。これを等間隔、5 点支持、スパン長さ  $\ell = 600$  mm と近似すると、各スパン間の最大曲げモーメント  $M_{\max}$  は、

領域	1	2	3	4
$M_{\max}$	$0.0772W\ell^2, 0.0364W\ell^2, 0.0364W\ell^2, 0.0772W\ell^2$			

と機械工学便覧により与えられる。

一方、曲げ応力は (A. 4.3) 式に

$$M_{\max} = 0.0772 W \ell^2$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D_1^4 - D_2^4), \text{ } D_2 \text{ は管の内径を示す。}$$

$$\ell = 60 \text{ cm}$$

$$W = (7.23 + 4.41) \text{ g/cm}$$

$$D_1 = 2.85 \text{ cm}$$

$$D_2 = 2.45 \text{ cm}$$

を代入して

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{2 \times 0.0772 \times (7.23 + 4.41) \times 60^2 \times 2.85}{1.47} \\ &= 0.125 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

故に、重力のみによる曲げ応力の最大は  $0.125 \text{ kg/mm}^2$  になる。地震時に石英管にかかる最大加速度は、 $1.9g$  だから、そのさいの最大曲げ応力は

$$1.9 \sigma_{\max} = 1.9 \times 0.125 = 0.238 \text{ kg/mm}^2$$

この値は、 $700^\circ\text{C}$  の石英管の強度約  $4 \text{ kg/mm}^2$  に比較してはるかに小さいので石英管は破損しない。

また、安全係数  $= 4/0.238 = 17$  である。

○ ジルカロイ管に発生する曲げ応力

中央の  $180 \text{ cm}$  スパン長の部分に最大曲げ応力が表われると考えられる。(A. 4.3) 式に、機械工学便覧による最大曲げモーメント、

$$M_{\max} = \frac{W \ell^2}{8}$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D_1^4 - D_2^4)$$

$$\ell = 180 \text{ cm}$$

$$D_1 = 4.55 \text{ cm}$$

$$D_2 = 4.15 \text{ cm}$$

$$W = (7.23 + 4.41 + 17.87) \text{ g/cm}$$

を代入すると、地震時の最大曲げ応力

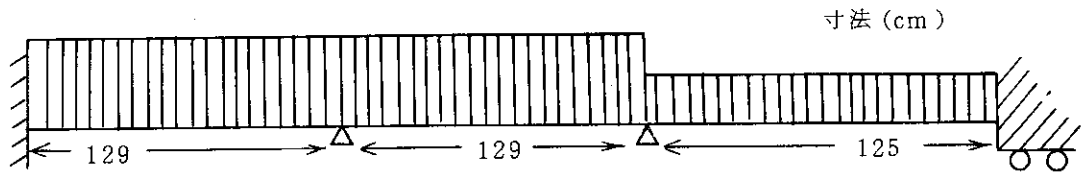
$$\begin{aligned} &= 1.9 \sigma_{\max} = \frac{1.9 \times (7.23 + 4.41 + 17.87) \times 180^2 \times 4.55}{16 \times 6.57} \\ &= 0.78 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

ジルカロイの強度は  $50 \text{ kg/mm}^2$  以上なので、ジルカロイ管は破損しない。

$$\text{安全係数} = 30/0.78 = 38.5$$

#### 4.3 内側アルミニウム管の耐震性

ジルカロイ管を収納している内側アルミニウム管の重量分布を以下のように近似する。



全体の固有周期は中央の129 cmのスパンの領域だけが単純支持されている場合の固有周期で十分よく近似的に求めることができる。(A. 4.2)式に

$$\begin{aligned} \ell &= 129 \text{ cm} \\ W &= (7.23 + 4.41 + 17.87 + 8.96) \text{ g/cm} \\ E &= 0.719 \times 10^9 \text{ g/cm}^2 \\ I &= 11.7 \text{ cm}^4 \\ g &= 980 \text{ cm/sec}^2 \end{aligned}$$

を代入して

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{(7.23 + 4.41 + 17.87 + 8.96) \times 1.29^4 \times 10^8}{8.41 \times 10^9 \times 0.98 \times 10^3}} \\ &= 0.023 \text{ sec} \end{aligned}$$

第A. 4.1図より、0.3gの加速度の地震に対して応管加速度は約0.6gと推定される。これに重力を加えた1.6gが地震の場合の最大加速度となる。このさいの中央129 cmのスパンに発生する曲げ応力の最大値は(A. 4.3)式に

$$M_{\max} = \frac{W \ell^2}{8}$$

$$\begin{aligned} \ell &= 129 \text{ cm} \\ D_1 &= 5.5 \text{ cm} \\ I &= 11.7 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

を代入して

$$\begin{aligned} 1.6 \sigma_{\max} &= \frac{1.6 \times 38.4 \times 129^2 \times 5.5}{16 \times 11.7} \\ &= 0.3 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

となるが、この曲げ応力の最大値はアルミニウムの強度  $6.77 \text{ kg/mm}^2$  に比較して十分小さいので、地震により内側アルミニウム管が破損することはない。

$$\text{安全係数} = 6.77 / 0.3 = 23$$

また、内側アルミニウム管のたわみは(A. 4.4)式に上記の定数を代入して

$$1.6 \delta_{\max} = \frac{1.6 \times 5 \times 38.4 \times 1.29^4 \times 10^8}{384 \times 8.41 \times 10^9}$$



$$= 0.26 \text{ mm}$$

外側アルミ管との間隔は 2.0 mm あって接触しない。

一方、アルミニウム外管は、六方から SHE のマトリックス管により支持されているので振動しない。

#### 4.4 SHE 集合体分離時の耐震性

アルミニウム外管がスパン長 150 cm で両 1/2 集合体によって単純支持される。重量分布は内・外管が接触しないという前提のもとに以下のようなになる。



固有周期は (A. 4.2) 式に

$$\begin{aligned} \ell &= 150 \text{ cm} \\ W &= 10.2 \text{ g/cm} \\ E &= 0.719 \times 10^9 \text{ g/cm}^2 \\ I &= 18.7 \text{ cm}^4 \\ g &= 980 \text{ cm/sec}^2 \end{aligned}$$

を代入して

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{10.2 \times 15^4 \times 10^8}{13.48 \times 10^9 \times 0.98 \times 10^3}} \\ &= 0.013 \text{ sec} \end{aligned}$$

応管加速度の最大は第 A. 4.1 図より 0.6 g と推定される。重力を加えて地震時には 1.6 g の加速度が発生するとして、曲げ応力の最大は (A. 4.3) 式に上記の定数を代入して

$$\begin{aligned} 1.6 \tau_{b\max} &= \frac{1.6 \times 10.2 \times 150^2 \times 6.3}{16 \times 18.7} \\ &= 0.07 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

となるが、アルミニウムの強度  $6.77 \text{ kg/mm}^2$  に比較して十分小さいので地震により外側アルミニウム管が破壊することはない。

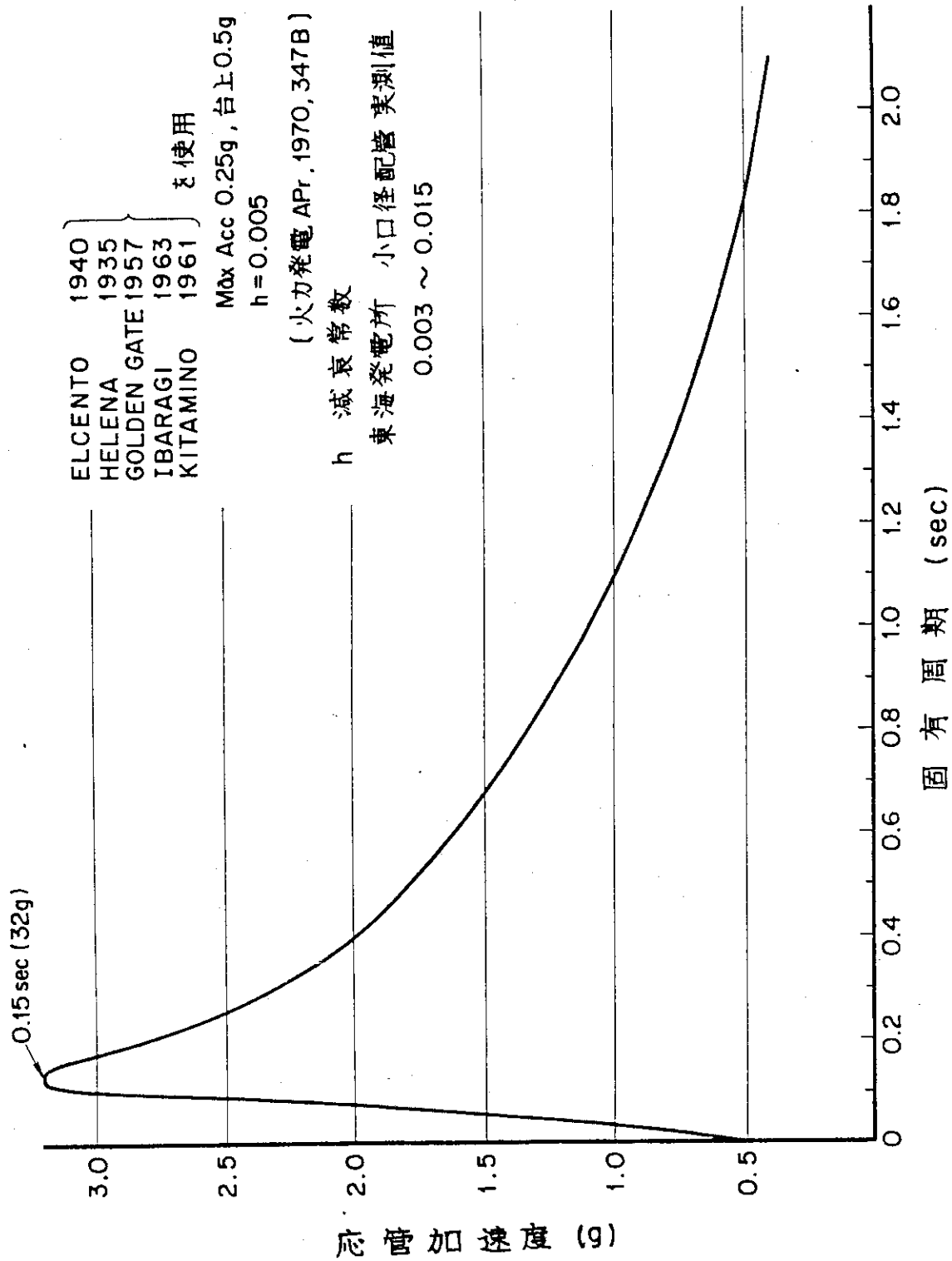
$$\text{安全係数} = S / \sigma_{b\max} = 6.77 / 0.07 = 96$$

たわみの最大は、(A. 4.4) 式に上記定数を代入して

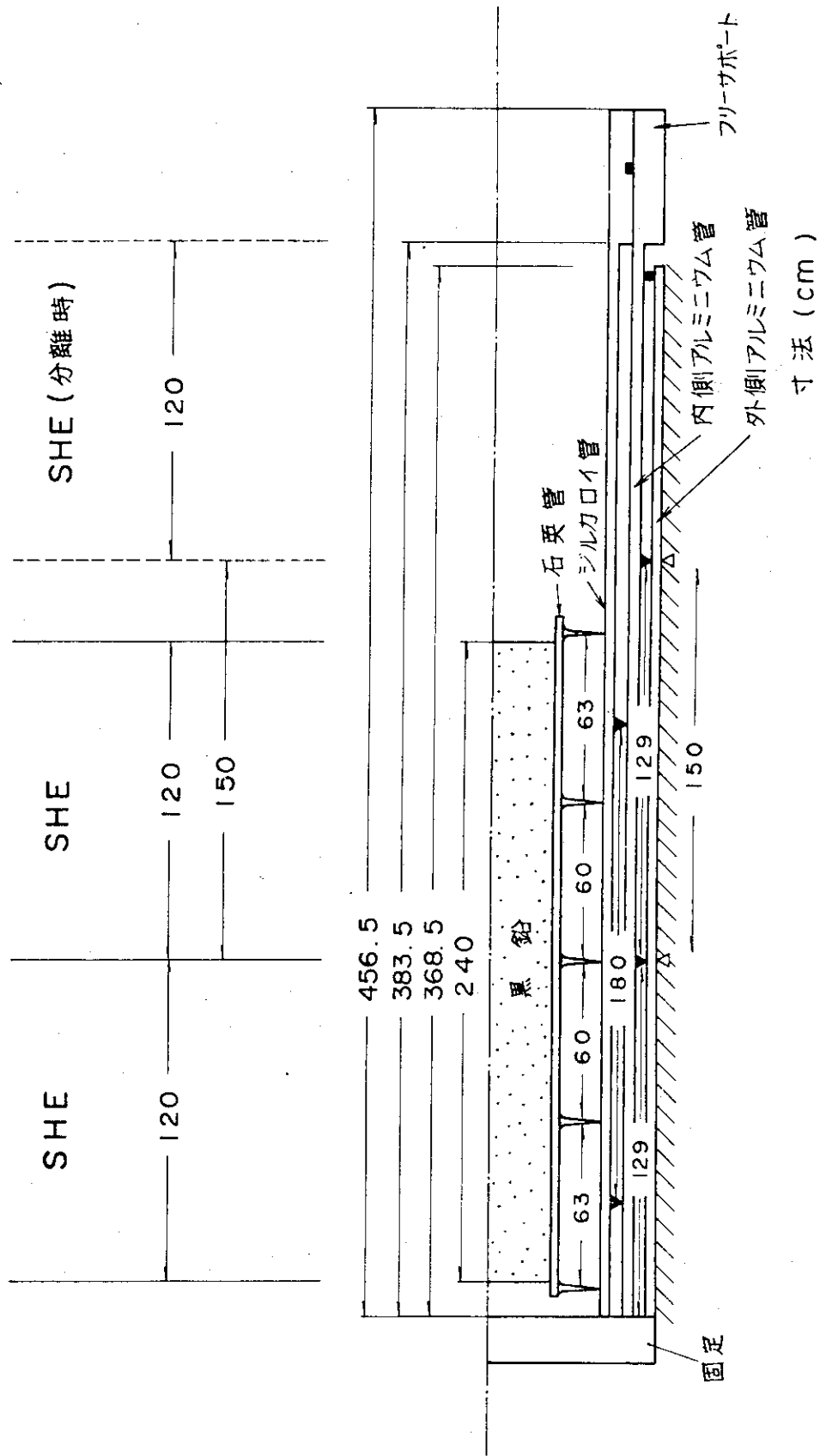
$$1.6 \delta_{\max} = \frac{5 \times 10.2 \times 150^4}{384 \times 13.48 \times 10^9} = 0.08 \text{ mm}$$

内管とのギャップは 2 mm あるので接触しない。

内側アルミニウム管から内部については、支点がなお SHE 集合体上にあるので、密着時の解析が成立し、地震により破壊することはない。



第A. 4.1図 固有周期と配管加速度



第A. 4.2図 昇温管部の支持状態