

JAERI-M

5834

JMTR インパイルクリーブ試験装置の開発

1974年9月

宮尾次郎, 清水正重, 石井忠彦, 露崎典平

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

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.

JMTRインパイルクリープ試験装置の開発

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

宮尾次郎・清水正重・石井忠彦・霧崎典平

(1974年8月15日受理)

1969年以来、JMTRではインパイル・クリープ試験装置の開発につとめてきた。装置は1971年の春に完成し、最初の照射試験はJMTR第10サイクル(1971年7月)から開始された。本報告ではインパイル・クリープキャプセルの設計および製作技術、ヘリウム・マイクロメータによるクリープ歪測定法およびインパイル・クリープ試験装置の概要が示されている。インパイル・クリープ試験装置はここ1ないし2年の間によく改良され、試験技術は確立されたものといえる。

The Development of an In-Pile Creep Facility in JMTR

Jiro MIYAO, Masatsugu SHIMIZU, Tadahiko ISHII  
and Noriyoshi TSUYUZAKI

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

( Received August 15, 1974 )

Since 1969, efforts had been made on the development of an in-pile creep facility in JMTR. It was completed in the spring of 1971, and irradiation tests were started with No. 10 cycle of the JMTR operation (July, 1971 ). The design and construction details of the in-pile creep capsule, the method of creep strain measurement with a helium-micrometer, and the facility itself are described. During the past two years, the facility had been improved; and the technique of in-pile creep test has proved to be satisfactory.

## 目 次

まえがき	1
1. インパイル・クリープキャプセルの設計	1
1.1 キャプセルの構造設計	1
1.2 キャプセルの熱設計	9
2. キャプセルに関する実験的検討	20
2.1 摺動部ベアリングについて	20
2.2 試料部ヒータについて	24
2.3 荷重用ペローズの有効断面積および抗力	28
2.4 ヘリウムマイクロメータの特性	32
3. 荷重装置	48
4. 歪測定装置	57
5. 温度制御装置	67
6. 照射試験	72
7. ま と め	83
図 目 次	
図1 インパイル・クリープキャプセル構造図	2
図2 ヘリウムマイクロメータによる歪測定範囲	5
図3 67M-28Jの熱計算箇所	18
図4 摺動部試験装置	22
図5 摺動部実験データ	23
図6 摺動部間隙とベアリング温度の関係	23
図7 インパイル・クリープキャプセル加熱部模擬実験フローシート	26
図8 ヒータ部炉外試験結果	27
図9 試料部温度分布詳細測定結果	27
図10 ペローズ較正試験装置	30
図11 ペローズ有効断面積較正データ	31
図12 ペローズ圧縮時の抗力	31
図13 ヘリウムマイクロ(パツフル型)較正曲線の例	34
図14 ヘリウムマイクロメータ測定系略図	34
図15 低圧型成立条件に関するデータ	41
図16 ヘリウムマイクロメータノズル部流量係数	41
図17 ヘリウムマイクロメータ検出端構造図(67M-28J用)	42
図18 歪検出端較正装置 構成図(1)	43
図19 歪検出端較正装置 構成図(2)	44
図20 歪検出端較正装置 構成図(3)	45
図21 歪検出端較正装置 流量計較正曲線	46

図22	バッフル型歪検出端校正曲線 (67M-28J)	47
図23	ニードル型歪検出端校正曲線 (67M-28J)	47
図24	荷重装置構成図	54
図25	荷重装置計装結線図	55
図26	荷重装置機内配線図	56
図27	歪測定装置構成図 (1)	63
図28	歪測定装置構成図 (2)	64
図29	歪測定装置構成図 (3)	65
図30	歪測定装置、オリフィス流量計校正曲線	66
図31	石けん膜流量計	66
図32	温度制御装置構成図 (1)	70
図33	温度制御装置構成図 (2)	71
図34	67M-28J インパイルクリーブ試験データ (第10サイクル)	74
図35	67M-28J インパイルクリーブ試験データ (第11サイクル)	74
図36	67M-28J インパイルクリーブ試験データ (第12サイクル)	75
図37	67M-28J インパイルクリーブ試験データ (第13サイクル)	75
図38	67M-28J インパイルクリーブ試験データ (第14サイクル)	76
図39	67M-28J 照射中のクリーブ歪測定データ	77
図40	67M-28J バッフル型特性 (1)	78
図41	67M-28J バッフル型特性 (2)	78
図42	原子炉起動時の試料部温度	79
図43	試料部温度変動-温度制御の無い場合	79
図44	原子炉出力と熱膨張の関係	80
図45	試験片温度と熱膨張の関係	80
図46	ガンマ発熱による試料部温度分布 (70M-7A)	81
図47	上下のヒータのみを使ったときの温度分布 (70M-7A)	81
図48	ヒータが均一出力の場合の試料温度分布 (1)	82
図49	ヒータが均一出力の場合の試料温度分布 (2)	82
図50	インパイル・クリーブ試験装置全体構成図	86
図51	インパイル・クリーブキャプセル構造立体図	87
図52	インパイル・クリーブ試験装置外観写真	88
図53	吐出部圧力 (Pa) の変動に伴う歪測定誤差	88

## まえがき

日本原子力研究所・材料試験部では照射試験中に原子炉材料のクリープ試験を行うためにインパイル・クリープ試験装置を開発し、現在までに2本のクリープ・キャプセルの照射を完了した。

本報告はインパイル・クリープキャプセル、荷重装置、歪測定装置および温度制御装置など一連の装置についてその概要と性能を述べるほか、照射試験の結果についても装置の性能、運転実績という面からまとめたものである。

歪測定技術のように現在も継続して改良をすすめている部分もあるが、全体としては技術的に確立された段階に達しているので、今後J M T Rにおいてクリープ試験を計画される場合の参考として載せたい。

## 1. インパイル・クリープキャプセルの設計

## 1.1 キャプセルの基本構造

J M T Rにおけるインパイル・クリープキャプセルの構造は金属材料の引張クリープ試験を対象として設計された。図1にキャプセルの構造を示す。本項では図1に示す構造を採用するに到った経緯を歪測定部、荷重部、温度制御部、駆動部などに分けて述べ、さらに、キャプセル全体構造について説明する。

## 歪測定部

金属材料の引張クリープ試験には破断強度あるいはクリープ変形に関する2種の試験方法があり、J I Sでは個別に規格が定められている。クリープにおける破断強度は定温・定荷重における破断までの時間として求められるから、試験中におけるクリープ歪の測定はそれほど必要とはされないがクリープ変形に関する試験では試験中での歪測定を欠くことはできない。

J M T R用インパイル・クリープキャプセルでは研究側の要望もあり、クリープ変形に主眼をおいた試験法が選ばれた。従って照射中での歪測定が必須の要件となっている。

歪測定法の選定に先立って既に海外において実施されている実例について調査を行った。調査結果の要点を表1に示す。照射下での使用実績をもつ歪測定法としては下記の3つの方法をあげることができる。

- a. 電気抵抗型歪測定法………電気抵抗体の表面を試料に固定した接触子を摺動させ、電気抵抗体の一端と摺動子間の抵抗変化をクリープ歪として検出する方法。
- b. 差動トランス型歪測定法………差動トランスを用いて試料の伸びを鉄心に伝達し、クリープ歪を電気出力として検出する方法。
- c. ヘリウムマイクロ型歪測定法………空気マイクロメータの原理による歪測定法。使用ガスには高温における試料の劣化を防ぐため空気に代えてヘリウムガスを用いる。

最初のインパイル・クリープキャプセル(67M-28J)の歪測定条件として研究側より提示されたものは測定範囲10mm、感度1 $\mu$ という値である。試料のゲージ長さは30mm、予想される最小クリープ速度は10<sup>-4</sup>/hrであるから、測定範囲は全伸びがゲージ長の30%強、感度は歪速度3 $\mu$ /hrに対して1 $\mu$ という状況となる。

## まえがき

日本原子力研究所・材料試験炉部では照射試験中に原子炉材料のクリープ試験を行うためにインパイル・クリープ試験装置を開発し、現在までに2本のクリープ・キャプセルの照射を完了した。

本報告はインパイル・クリープキャプセル、荷重装置、歪測定装置および温度制御装置など一連の装置についてその概要と性能を述べるほか、照射試験の結果についても装置の性能、運転実績という面からまとめたものである。

歪測定技術のように現在も継続して改良をすすめている部分もあるが、全体としては技術的に確立された段階に達しているので、今後J M T Rにおいてクリープ試験を計画される場合の参考として載せたい。

## 1. インパイル・クリープキャプセルの設計

## 1.1 キャプセルの基本構造

J M T Rにおけるインパイル・クリープキャプセルの構造は金属材料の引張クリープ試験を対象として設計された。図1にキャプセルの構造を示す。本項では図1に示す構造を採用するに当たった経緯を歪測定部、荷重部、温度制御部、駆動部などに分けて述べ、さらに、キャプセル全体構造について説明する。

## 歪測定部

金属材料の引張クリープ試験には破断強度あるいはクリープ変形に関する2種の試験方法があり、J I Sでは個別に規格が定められている。クリープにおける破断強度は定温・定荷重における破断までの時間として求められるから、試験中におけるクリープ歪の測定はそれほど必要とはされないがクリープ変形に関する試験では試験中での歪測定を欠くことはできない。

J M T R用インパイル・クリープキャプセルでは研究側の要望もあり、クリープ変形に主眼をおいた試験法が選ばれた。従って照射中での歪測定が必須の要件となっている。

歪測定法の選定に先立って既に海外において実施されている実例について調査を行った。調査結果の要点を表1に示す。照射下での使用実績をもつ歪測定法としては下記の3つの方法をあげることができる。

- a. 電気抵抗型歪測定法……電気抵抗体の表面を試料に固定した接触子を摺動させ、電気抵抗体の一端と摺動子間の抵抗変化をクリープ歪として検出する方法。
- b. 差動トランス型歪測定法……差動トランスを用いて試料の伸びを鉄心に伝達し、クリープ歪を電気出力として検出する方法。
- c. ヘリウムマイクロ型歪測定法……空気マイクロメータの原理による歪測定法。使用ガスには高温における試料の劣化を防ぐため空気に代えてヘリウムガスを用いる。

最初のインパイル・クリープキャプセル(67M-28J)の歪測定条件として研究側より提示されたものは測定範囲10mm、感度1 $\mu$ という値である。試料のゲージ長さは30mm、予想される最小クリープ速度は $10^{-4}$ /hrであるから、測定範囲は全伸びがゲージ長の30%強、感度は歪速度3 $\mu$ /hrに対して1 $\mu$ という状況となる。



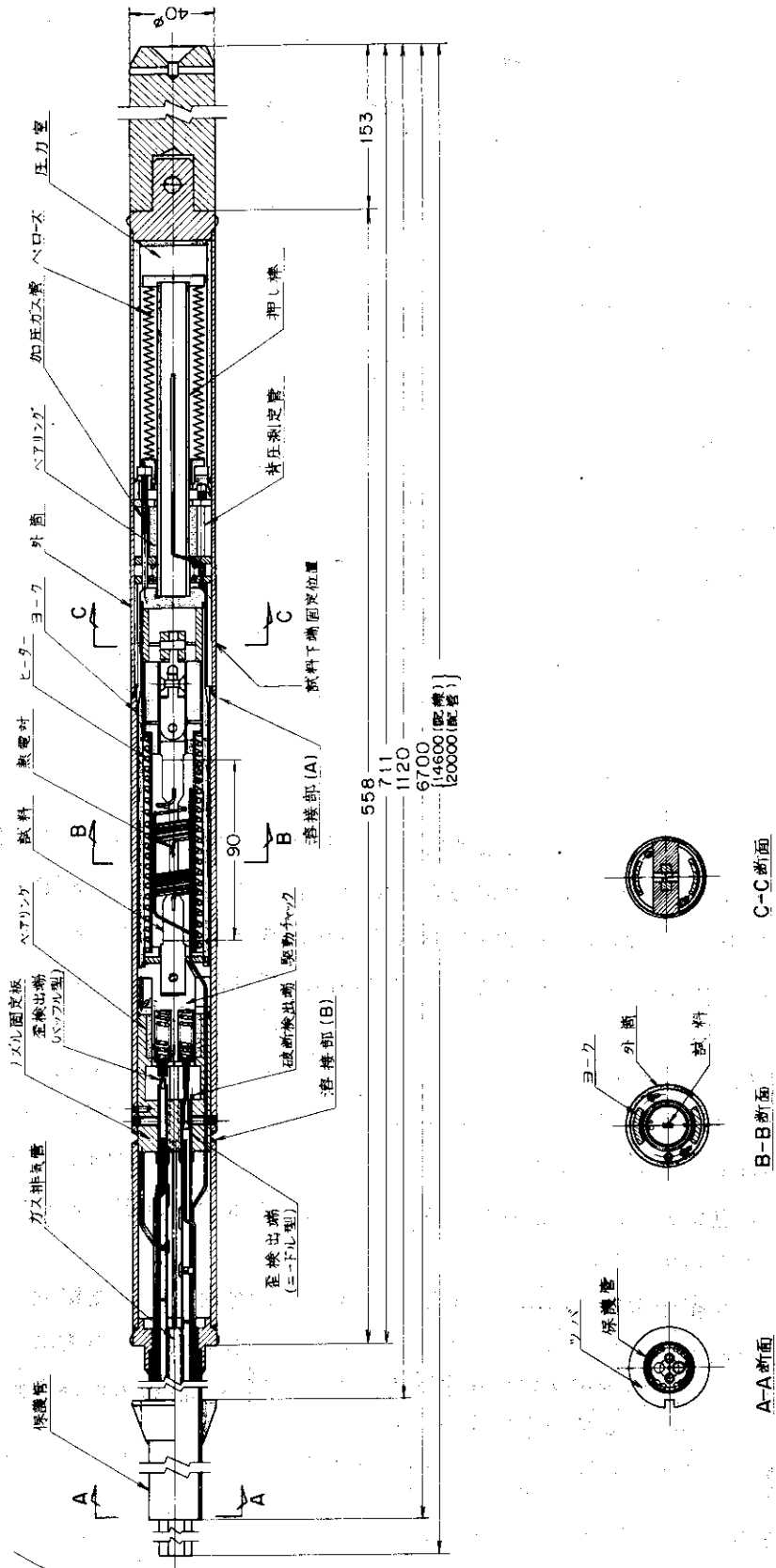


図1 インパイルクリープキャプセル構造図 (67M-28J)

表1 イソパイル・クリープ・キャプセルの実例

項目	(1) 文献	(3) UKAEA・Downreay	(4) UKAEA & Vickers	(5) AECL Mark-I	(6) AECL Mark V	(7) ORNL
査検出方法		電気的方法 (Transducer)	Pneumatic Gauge (He)	Pneumatic Gauge (N <sub>2</sub> )	Pneumatic Gauge (He)	電気抵抗体
査測定範囲		0~0.11in	0~0.02in および 0~0.125in	約 0.15in	0~0.03in	~約 0.7in
査測定感度		0.54in	± 10 <sup>-4</sup> in		0~0.03in/0~1.8in Hg 精度±15 <sup>-4</sup> in	10 <sup>-4</sup> in
荷重方法		Dead Weight		ガス圧・ベロ-	ガス圧・ベロ-	真空・ベロ- Cantilever
最大荷重		840 lb		ガス圧力 240 lb/in <sup>2</sup> 電力 30,000 psi (相当)	ガス圧力 2000 lb/in <sup>2</sup>	
荷重精度				±3%	±0.2%	1~2%
試料応力		15 ton/in <sup>2</sup>	15000~50000 psi	30000 psi	10,000~30,000 lb/in <sup>2</sup>	
試料材質・寸法		0.1786inφ G. L=1.0in 300~700C	G. L=125in	0.04inφ G. L=20in 300C	0.04inφ G. L=2in 300C (280~500C)	
試料温度			±3C	±4C(時間的変動) 約5C(位置的変動)	±4C(時間的変動) 3C(位置的変動)	
試料温度精度					外径 1.12inφ	箱型 12×3×24in
キャプセル寸法						
実験孔		7in φth=25×10 <sup>-3</sup> nv ベリウム	3w/gr	NRX-N-3 position	ガンマ発熱 3w/gr φf=5×10 <sup>-3</sup> nv(NRU)	φf=1×10 <sup>-3</sup> nv
試料雰囲気		不純物 50 ppm以下			ベリウム	
備考			至測定関係の記述が大部分	荷重前に約 10 <sup>19</sup> nv.t. φ=2.5×10 <sup>18</sup> nv.E> 0.5Mev		

歪測定範囲10mm, 感度1 $\mu$ を満足させるのに必要な分解能は $\frac{1}{10000}$ となり, 前述の3種の歪検出法はいずれも条件を満足できない。設計の見地からみると研究者の試験条件(歪測定条件)を変更するか, または歪検出端を複数個用いて条件をカバーするかという選択が必要となる。67M-28Jでは2個の歪検出端を用いる方法を採用する方針をとり, 複式に最も適した方法としてヘリウムマイクロメータが選定された。

ヘリウムマイクロメータには測定範囲が大で感度がわるいニードル型と範囲が小さく感度のよいバップル型がある。67M-28J用としてはニードル型, バップル型各1本を組合せることにより表2および図2に示すような性能をもたせることにした。

従来空気マイクロメータとして確立されている技術に加えてヘリウムマイクロメータでは下記の事項に関する知識が必要となる。

- a. 原子炉内ではガンマ発熱によりガス温度も上昇するので温度補正の方法を確立する必要がある。
- b. 歪検出端から計測機器までの距離が30~40mあり, かつ, 配管径も制限されているのでヘリウムガス導管部におけるガス圧力損失が大となり誤差を導入しやすい状況にある。このため導管部と歪検出端部との挙動を分離して知ることができるような測定方法を確立するのが望ましい。
- c. ヘリウムガスはJMTB第2排気系統に排出されるが排気系の圧力変動が歪測定値に影響する。排気系の圧力調節か, 圧力変動が影響しないような測定方法を確立する必要がある。
- d. ガスの物性による特性の違いの把握。

ヘリウムマイクロメータをインパイル・クリープキャプセルに用いるため, 実験的手段により技術が確立された。

#### 荷重部

試料への応力はガス圧力をベローズを介して力に変換し, 軸棒を用いて伝達する方法が採用された。

キャプセル構造は試料への荷重の伝達機構が主要部となるので, 伝達機構の適否は大きな問題となっている。

表3はキャプセルにおける荷重伝達方法を分類図示したもので, 各々の長短が付記してある。

表3の判定欄に示されているようにキャプセル構造上有利な荷重形式としては, まず, 163, 166, 168, 169をあげることができる。166, 168, 169は試料部を高圧側とすることによって構造が単純化されている例で, 中でも166は試料加熱用のスペースをとり易く, 自己求心的荷重状態になるなどの点において他の2例より秀れているように思われる。

163は試料部が常圧で, 荷重を伝達するのにヨーク型の押し棒が試料部にも存在する構造となっている。

JMTB用インパイル・クリープキャプセルの構造として, 163と166の型が選ばれ, 構造組立図を作成して検討が加えられた。両者ともに致命的な構造上の欠点はなく, どちらも実用性があるが結局は試料が高圧側にある場合は計測線やヒータ線も高圧側に装着することになるので, この点が嫌われ, 最終構造は163型に決定された。なお, デッド・ウェイトやて

表2 ヘリウム・マイクロメータ歪検出端の設計目標

歪検出端型式	測定方法	感度
バツフル型	300 $\mu$	1 $\mu$
ニードル型	10mm	20~30 $\mu$

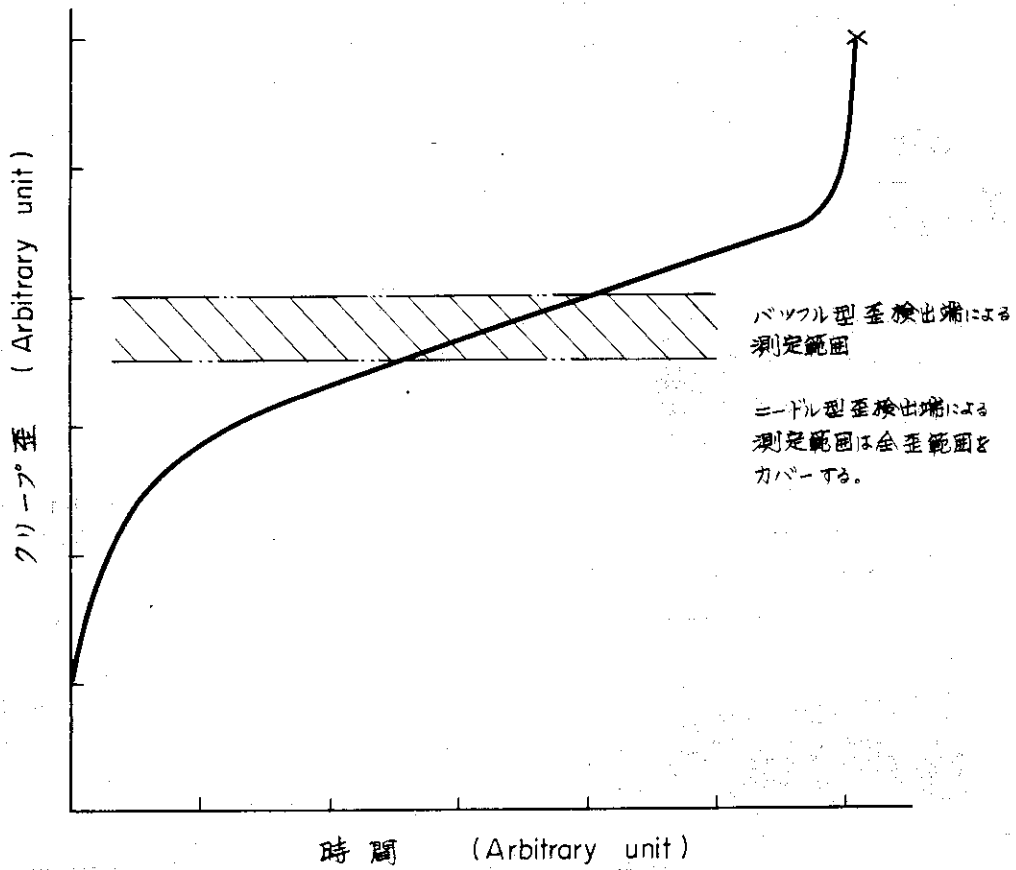


図2 ヘリウム・マイクロメータによる歪測定範囲

表3 荷重伝達方法の分類と性質

№	ベローズの加圧と位置	荷重の伝達方法	利点	欠点	評価
1	内圧 キャプセルの底部		ヘリウムマイクロは上、試料部は常圧	ベローズのバックリング ヨークあり	× №3よりもベローズのバックリングの点で不利
2	内圧 底部		ヨークなし、荷重は自己求心的	ヘリウムマイクロは下 試料部高圧	× №6よりもヘリウムマイクロが下に あるので不利
3	外圧 底部		ヘリウムマイクロは上 試料部は常圧	ヨークあり	◎ 試料部常圧型では最も条件がよい
4	外圧 底部		ヨークなし	ヘリウムマイクロは下 試料部は高圧	× №8よりもヘリウムマイクロが下に あるので不利
5	内圧 キャプセルの上部		試料部は常圧	ヘリウムマイクロは下 ヨークあり ベローズのバックリング	× №1よりもさらに不利
6	内圧 上部		ヘリウムマイクロは上 荷重は自己求心的 ヨークなし	試料部は高圧	◎ 試料部は高圧型では最も条件がよい
7	外圧 上部		試料部は常圧	ヘリウムマイクロは下 ヨークあり	× №3よりもヘリウムマイクロが下に あるので不利
8	外圧 上部		ヘリウムマイクロは上 ヨークなし	試料部は高圧	△ №6の方が構造的に好ましい
9	内圧 キャプセル中央部		ヘリウムマイクロは上 ヨークなし 荷重は自己求心的	試料部は高圧	△ ベローズと試料部が同じ高さ位置にあるのでスペース的に困難

こを用いた荷重方式はJ M T R標準照射孔ではスペースが小さく使用できないので検討対象からはずされた。

#### 温度制御部

キャプセル各部分はガンマ発熱によって昇温する。従ってキャプセル各部分は試験に支障がない温度になるように熱設計される。試料部の温度がガンマ発熱だけで試験温度より高くなる場合には冷却が、また低くなる場合には加熱が必要となる。67-28Jの場合には加熱が必要となるよう設計され、試料のまわりにコイル状のヒータを設ける構造となった。

試料の温度分布についてはJ I S - Z - 2271 (1968)「金属材料の引張クリープ試験方法」に示されている値、すなわち $600^{\circ}\text{C}$ をこえ $800^{\circ}\text{C}$ 以下のときは $\pm 4^{\circ}\text{C}$ を目標としてヒータの設計および実験的検討が行われた。

原子炉内でガンマ発熱が存在する状態においても3段階ヒータを用いて良好な試料温度条件が得られている。

#### 駆動部

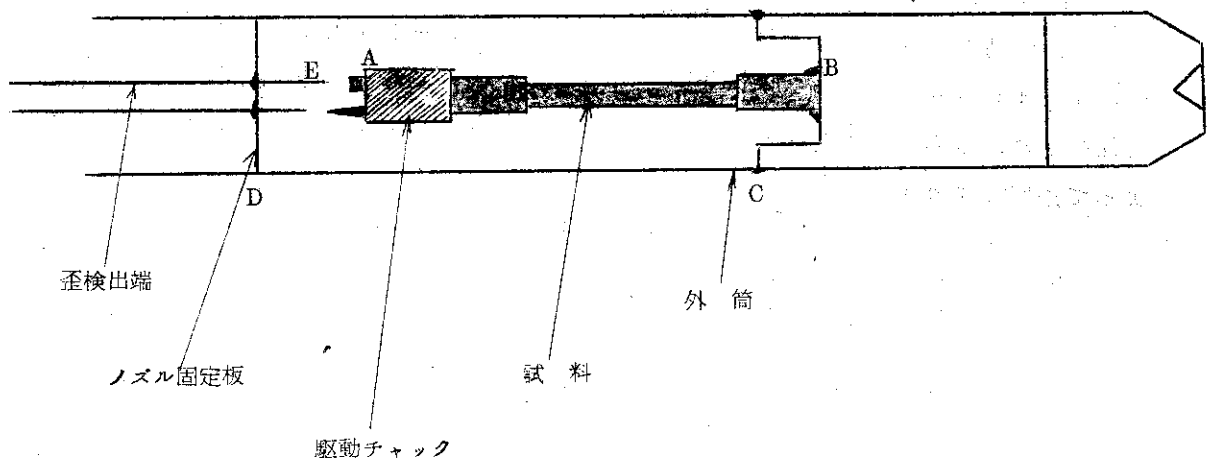
図1に示された構造から分るように荷重は押し棒およびヨークを介して伝達されるが、その場合荷重の方向を試料の軸線に保ち、かつ高温において円滑に摺動するような軸受が必要となる。押し棒の材質はステンレス鋼なので上述の目的に合致するベアリング材としてカーボンが選ばれた。駆動部も上述のようにガンマ発熱によって昇温するので摺動面におけるクリアランスはカーボンとステンレスの熱膨張差によって昇温と共に小さくなる。このような状況における軸受の最適条件は実験的検討に基づいて決定された。結果的には摺動抵抗が $300\text{gr}$ 以下でクリアランスが $20\sim 50\mu$  (Diametral Clearance)のものが得られている。

#### キャプセルの全体構造

キャプセルの構造設計にあたって留意した事項について以下に述べる。

- a. キャプセルの温度変動と歪測定精度：先に述べたように照射中のキャプセル各部分はガンマ発熱によって昇温した状態にあるが、ガンマ発熱は変動するのでそれにつれてキャプセルの温度も変動する。キャプセル温度と歪量とはキャプセル各部の熱膨張の集積された形で直接関係しているため、キャプセル構造は温度変動に伴う歪の変化量が最小となるようにしなければならない。

上記の問題について図1に示したキャプセルでは下図に示すような構造を採用した。



いま、温度変動に基づく伸縮量について、見かけ上の試料の伸び方向、すなわち $\Delta \bar{E}A$ が小となる方向を正とすると次式で伸縮量を表すことができる。

$$\Delta \bar{E}A = (\Delta \bar{A}B + \Delta \bar{D}E) - (\Delta \bar{B}C + \Delta \bar{D}C)$$

キャプセル構成上試料固定端と歪検出端の固定位置との間隔は $\bar{B}D$ の距離がどうしても必要である。

$\bar{B}D$ 間は試験片側と支持棒側に分けられるが試験片側、すなわち、 $(\bar{D}E + \bar{E}A + \bar{A}B)$ の温度条件のうち最も支配的な $\bar{A}B$ は試験条件として温度制御され変動量は微少である。そこで $\Delta \bar{E}A$ の大きさにつては支持棒側、すなわち、 $(\bar{D}C + \bar{B}C)$ の温度条件が設計の要点となる。支持棒側も温度制御を行い、 $(\Delta \bar{A}B + \Delta \bar{D}E) = (\Delta \bar{B}C + \Delta \bar{D}C)$ すなわち、 $\Delta \bar{E}A = 0$ なる条件を実現するのが好ましいが、40mm $\phi$ のSUS管内に納められている複雑な内挿物の中でそのような条件を設定することは非常に困難である。支持棒側のうち $\bar{D}C$ 部をできる限り低い温度にすることによって温度変動の絶対値を小さくする方法が用いられた。支持棒として図1のキャプセルでは外筒そのものが $\bar{D}C$ 間を構成している。実際には $\bar{D}C$ 間は原子炉の一次冷却水温度に応じて変動しその変動巾は3~5℃であり、 $\Delta \bar{D}C$ は16~27 $\mu$ 程度となり、ニードル型歪検出端の感度と同程度となる。

- b) 試料への熱電対の取付法：試料温度を正確に知るために外径0.5mm $\phi$ のSUS被覆型OA熱電対を試料表面に直接取付けることにした。先端の試料表面への固定は埋めこみ、ロウ付等はできないので0.3mm $\phi$ のSUS針金でしばりつけることにした。しばりつけた先端が試験中に試料が伸びてもきちんと固定されているかどうかを引張試験機を用いて観察し、試料の断面収縮につれて先端の固定がゆるまるが伸びがゲージ長の20~30%では温度指示値が異常になることは考えられないとの判断を得た。また、試料の伸びにつれて熱電対の先端あるいは試料に余分な力が加わらないよう熱電対先端部はコイル状に巻いて自由に伸縮しうる構造とした。
- c) 歪検出端の並置とバップルの逃げ：バップル型とニードル型歪検出端を並置することにより図2からも分るようバップルがニードル型測定範囲の途中でつきあたるようになる。バップルがつきあつたのちもニードル型の測定に支障を生じないために図1に見られるようにバップルは孔の中へもぐりこむ構造とし、スプリングで上に押し上げるようにした。スプリングによる抗力はバップル型10gr/mm、ニードル型167gr/mmであり荷重に及ぼす影響は殆んど無視しうるようになっている。図1ではニードル型にもスプリングが入っているが、これは不必要で、むしろ一寸したひっかかりなどによりニードルがへこむので2本目のキャプセルからはバップルのみがもぐりこむ構造とした。
- d) 軸線の保持：試料の曲がりとおよび歪検出端のずれを防ぐために駆動チャックとノズル固定板の間にまわり止めを設けた。ノズル固定板側が材質SUS-27で4.3 $\phi$ 孔が2個、駆動チャック側が材質17-4PH鋼(SUS-27とかじらない性質をもっている)と4.0 $\phi$ 柱2本の組合せとなっている。試料の荷重方向は上下のベアリングによって保持され、さらに試料への曲げ応力は試料上下のユニバーサル・ジョイント型掴み部によって逃げるよう工夫されている。

1.2 キャプセルの熱設計

キャプセルの各種構成部分は照射下においてガンマ加熱により構成材自身が発熱し昇温する。通常のクリープ試験機であれば常温に保持される構造部分もインパイル・クリープキャプセルでは不必要に昇温するので、部材の強度低下や熱膨張による摺動部の膠着現象などに留意する必要がある。

照射中におけるキャプセル各部の温度は熱設計を行って求め、これらの温度に基づいて各部の材質・寸法等を決定する。本項ではインパイル・クリープキャプセルの熱設計について、方法の概要と67M-28Jにおける計算例について述べる。

1.2.1 熱計算の方法

インパイル・クリープキャプセルは図1にみられるように円筒状の外形を有しているの  
で、熱計算にあたっては通常、円筒形照射キャプセルの温度分布を計算するのに用いられ  
ている一次元熱計算コード“GENGTC”を用いている。しかし内部の構造が複雑でGE  
NGTCが適用できない場合には状況に応じて計算方法を定めている。

特殊な形状における熱計算方法は後述の67M-28Jに関する計算例で説明することと  
しここでは一般的手法について述べる。

GENGTCは円筒形照射キャプセルの温度分布を計算するためのもので、計算方法は下  
記のようなものである。

(1) キャプセル外表面の伝熱

$$T_s = T_{\infty} + \frac{Q}{\alpha A} \dots\dots\dots(1)$$

$T_s$  はキャプセル外表面温度

$T_{\infty}$  は冷却水温度

$Q$  は伝熱量

$A$  は伝熱面積

$\alpha$  は熱伝達率

(2) 固層・液層部分の伝熱

$$T_i = T_o + \frac{G(R_o^2 - R_i^2)}{4\lambda} + \left[ \frac{QR_i^2}{A_i\lambda} - \frac{GR_i^2}{2\lambda} \right] \ln \frac{R_o}{R_i} \dots\dots\dots(2)$$

$T$  は温度

$R$  は半径

$G$  は単位体積あたりの発熱量

$Q$  は伝熱量

$\lambda$  は熱伝導率

熱伝導率の温度依存性は(3)式の形で考慮される。

$$\lambda = C_0 + C_1 \bar{T} + C_2 \bar{T}^2 + C_3 \bar{T}^3 + C_4 \bar{T}^4 \dots\dots\dots(3)$$



$$\bar{T} = \frac{T_o + T_i}{2}$$

温度と熱伝導率は5回まで収束計算を行う。

(3) ガス層部分の伝熱

伝導と輻射による伝熱を考慮し(4)~(6)式を用いてキャプセル温度を求める。

$$Q = Q_C + Q_R \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_C = \frac{\lambda A_i (T_i - T_o)}{R_i \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right)} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_R = 0.174 F A_i \left[ \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \dots\dots\dots(6)$$

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_i} + \left( \frac{R_i}{R_o} \right) \left[ \left( \frac{1}{\epsilon_o} \right) - 1 \right]}$$

(4) 各熱計算においてキャプセル各部の寸法は熱膨脹による寸法変化を考慮するようになっている。

昇温時の半径 (R') は

$$R' = R + \frac{1}{3} \{ R_{70} [ 1 + \beta ( T_m - 70 ) ] - R \} \dots\dots\dots(7)$$

R は常温における半径

β は熱膨脹係数

$$T_m = \frac{T_o + T_i}{2}$$

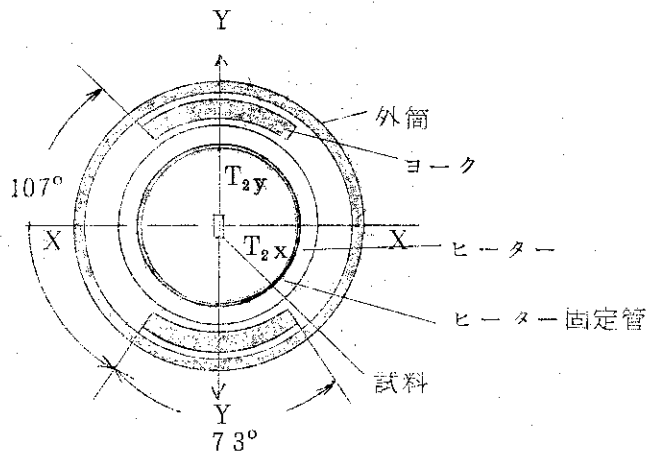
(5) キャプセルが核燃料の場合は核燃料ピン内の温度分布計算部分が GENGTC に含まれているがここでは省略する。

キャプセル断面に方向性がなく、一次元熱計算を適用しても問題がないと考えられる状態の個所には GENGTC をそのまま適用するが、方向性がある GENGTC を適用し難い場合には、それぞれの方向ごとに GENGTC による一次元熱計算を行いそれらの平均値を求めた。平均値の算出方法としては角度荷重平均法を用いた。すなわち、下図の例ではヒータ固定管内面温度 (T<sub>2</sub>) は

$$T_2 = \frac{(214 \cdot T_{2X}) + (146 \cdot T_{2Y})}{360}$$

T<sub>2X</sub> : x 方向での GENGTC 計算値

T<sub>2Y</sub> : y 方向での " "



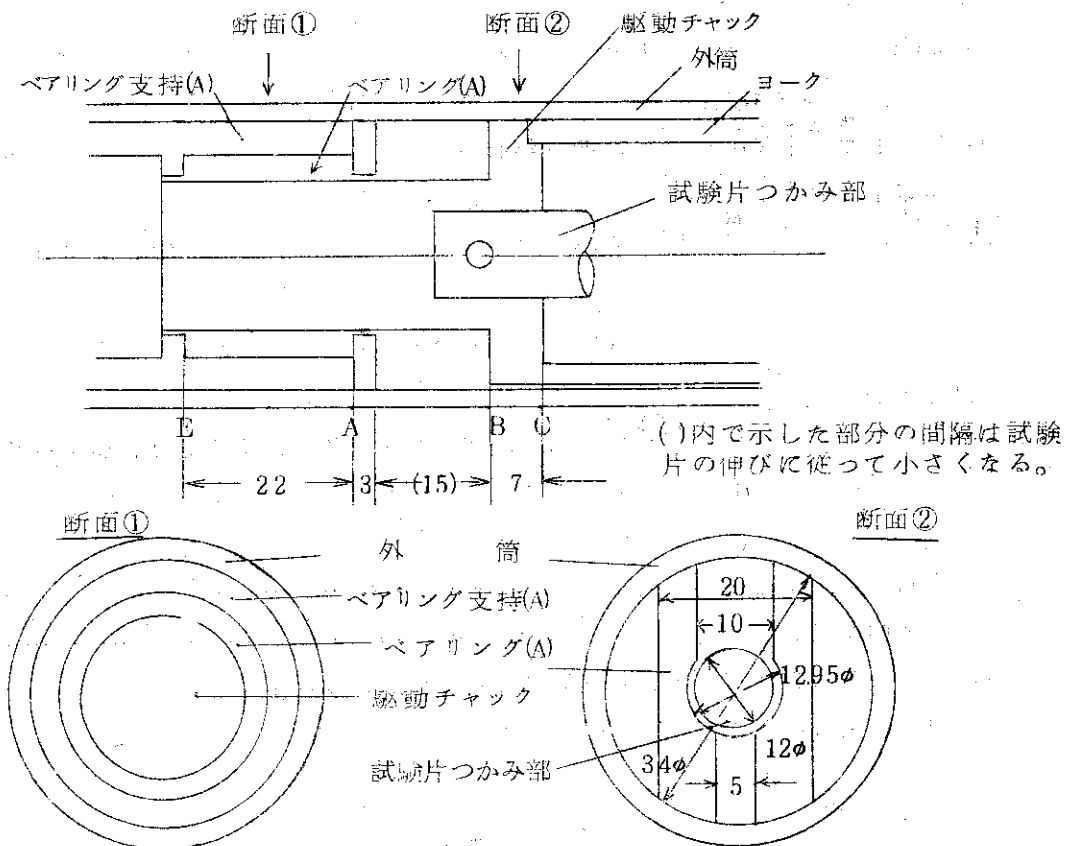
また、一次元熱計算の結果、キャプセル軸方向（高さ方向）に大きな温度差が生じている箇所では熱流の軸方向への流れを考慮する必要があると思われるので、このような場合には軸方向についても熱計算を行い一次元熱計算を修正する方法をとった。軸方向熱流に対する修正方法については次に述べる計算例で示す。

1.2.2 67M-28Jにおける熱計算例

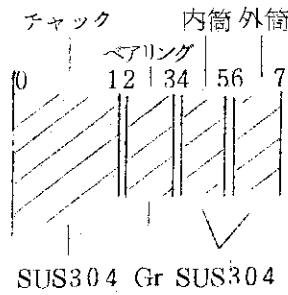
67M-28Jの構造概要と一次元熱計算を行った箇所を断面①から⑦を図3に、また、断面①～⑦における一次元熱計算結果を表4に示す。表4の上段に示した数値は各断面における一次元熱計算の結果をそのまま記載したもので、下段の数値は軸方向の熱流に関する修正あるいは方向性のある場合の修正を行った値である。

各断面における熱計算の方法は下記の通りである。

(1) 断面①および②



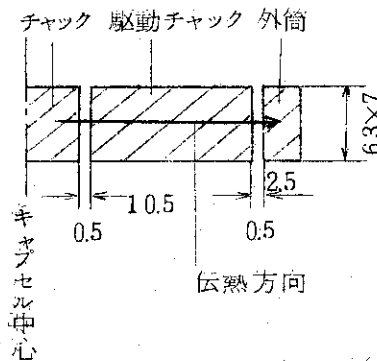
断面①（上部ベアリング部）の寸法



- $d_1 = 19.99 \text{ mm}\phi$
- $d_2 = 20.10$
- $d_3 = 26.01$
- $d_4 = 26.06$
- $d_5 = 34.92$
- $d_6 = 34.98$
- $d_7 = 39.95$

断面②（試料固定部）の形状・寸法

断面②は特殊な形状となっているので矩形断面を有する棒を通して外部へ熱が伝わるような計算モデルを想定する。



軸方向の熱流は表4上段の該当個所の温度から判断して、断面②から断面①へ流れるものとする。

計算にあたって下記の仮定を設定する。

- a. 駆動チャックのうちA B間における発生熱は全量が断面①側へ流入するものとする。
- b. 断面②部分（BC間）での発生熱〔 $Q_{BC}$ 〕のうち1部〔 $\alpha \cdot Q_{BC}$ 〕が断面①へ流入するものとする。
- c. 断面②における径方向への熱はすべて矩形断面を有する駆動チャック下部を通して外部へ伝わるものとする。
- d. 断面①に流入した熱はEA間に均等に分布されるものとする。

計算手順

- a. 断面①および②における径方向の温度分布を求める。このとき、軸方向の流入あるいは流出熱量を考慮できるようにしておく。

計算結果は次のように整理しておく。

$$\text{断面①の中心温度 } T_{01} = C_1 + C_2 \cdot \alpha \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{断面②の中心温度 } T_{02} = C_3 + C_4 \cdot \alpha \dots\dots\dots(9)$$

- b. 断面①および②間の軸方向熱流によって生ずる温度差を求める。

計算結果は次のように整理しておく。

$$\Delta T = C_b + C_g \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots(8)$$

- c. 上記 a. b の計算結果より  $T_{0,2} - T_{0,1} = \Delta T$  における  $\alpha$  を求める。
- d. このようにして求められた  $\alpha$  における断面①および②の中心温度を(8)および(9)式により求める。

計算式

- a. 断面①の径方向熱計算式

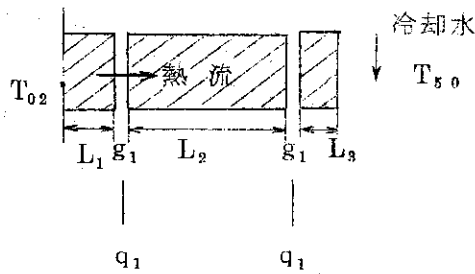
一次元熱計算コード "GENGTCC" を用いる。

軸方向より流入する熱は E A 間で均等に分布し、ノード・1 において  $Q_{AB} + \alpha Q_{BC}$  だけ加算されるものとする。

- b. 断面②の径方向熱計算式

断面②は矩形断面を有する特殊な形状をしているので(11)式を用いる。

$$T_{0,2} = T_{5,0} + \frac{q_g}{h} + \frac{P}{2\lambda_{SUS}} (L_2^2 + L_2^2 + L_1^2) + \frac{1}{\lambda_{SUS}} (q_2 L_3 + q_1 L_2) + \frac{1}{\lambda_{He}} \cdot (q_1 g_1 + q_2 g_2) \quad \dots\dots\dots(11)$$



- L : 長さ
- g : ガス・ギャップ
- q : 熱流束
- P : 単位体積当りの発熱量

P はガンマ加熱による発熱量から断面①への軸方向熱流分を差し引いたもので(12)式で表される。

$$P = r \cdot \rho (1 - \alpha) \quad \dots\dots\dots(12)$$

- r : ガンマ発熱率
- $\rho$  : 比重量

- c. 断面②から①への熱計算には(13)式を用いる。

$$\Delta T = \frac{PL^2}{2\lambda_{SUS}} + \frac{qL}{\lambda_{SUS}} \quad \dots\dots\dots(13)$$

- ただし  $P = r \cdot \rho$
- L は断面②①間の距離
- $q = \alpha \cdot Q_{BC}$

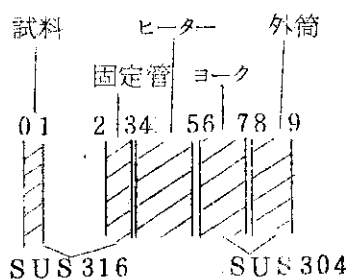
(2) 断面③④⑤

これらの断面については一次元熱計算コードを使用する。断面③④⑤はいずれも方向性があるので前述の方法により平均値を算出する。

各断面の寸法・材質は次のようである。

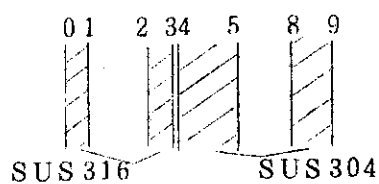
断面③

ヨークのある方向



- $d_1 = 3.6 \text{ mm}\phi$
- $d_2 = 20.05$
- $d_3 = 22.03$
- $d_4 = 2.22$
- $d_5 = 26.8$
- $d_6 = 28.08$
- $d_7 = 33.97$
- $d_8 = 34.98$
- $d_9 = 39.95$

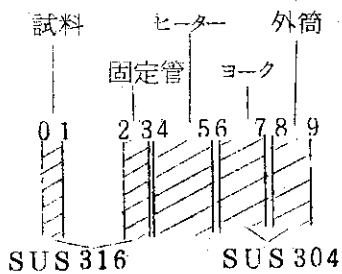
ヨークのない方向



- $d_1 = 3.6 \text{ mm}\phi$
- $d_2 = 20.05$
- $d_3 = 22.03$
- $d_4 = 2.22$
- $d_5 = 26.8$
- $d_8 = 34.98$
- $d_9 = 39.95$

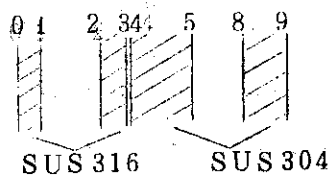
断面④

ヨークのある方向



- $d_1 = 10 \text{ mm}\phi$
- $d_2 = 20.05$
- $d_3 = 22.03$
- $d_4 = 2.22$
- $d_5 = 26.8$
- $d_6 = 28.08$
- $d_7 = 33.97$
- $d_8 = 34.98$
- $d_9 = 39.95$

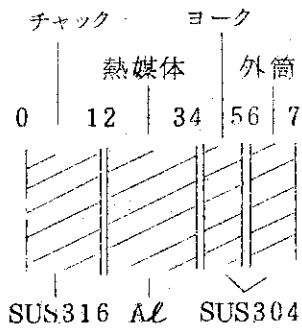
ヨークのない方向



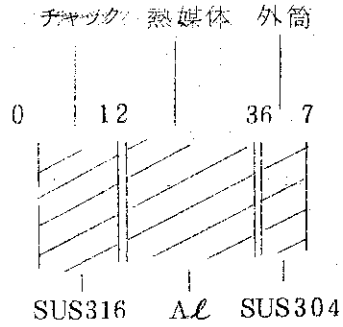
- $d_1 = 10 \text{ mm}\phi$
- $d_2 = 20.0$
- $d_3 = 22.0$
- $d_4 = 2.22$
- $d_5 = 26.8$
- $d_8 = 34.98$
- $d_9 = 39.95$

断面⑤

ヨークのある方向



ヨークのない方向



$d_1 = 12.0 \text{ mm}$

$d_2 = 13.04$

$d_3 = 27.0$

$d_4 = 28.08$

$d_5 = 33.98$

$d_6 = 34.98$

$d_7 = 39.95$

$d_1 = 12.0 \text{ mm}$

$d_2 = 13.04$

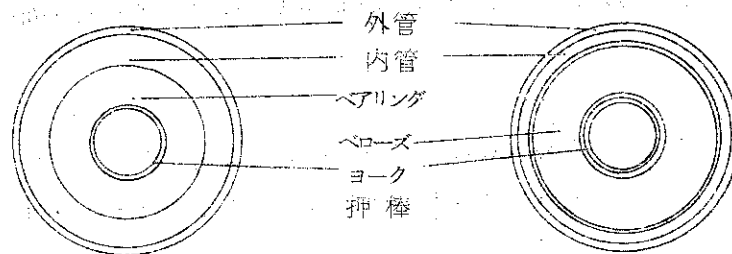
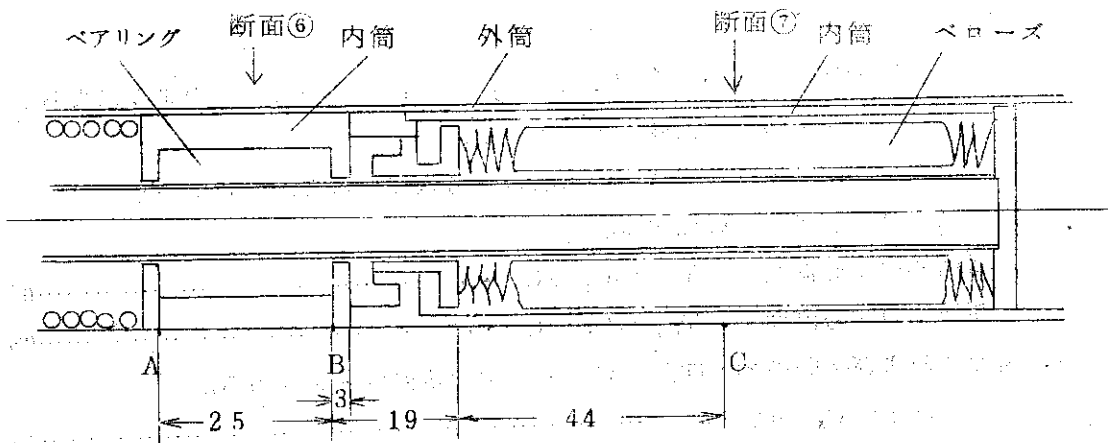
$d_3 = 34.90$

$d_6 = 34.98$

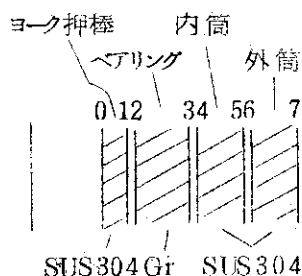
$d_7 = 39.95$

断面③～⑤の方向性はいずれの断面についても「ヨークのある方向」の全体に占める割合が14.6°「ヨークのない方向」の割合が21.4°となっている。

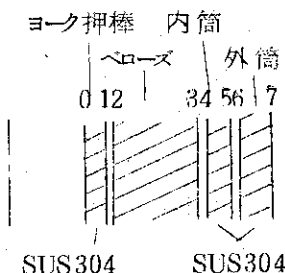
(3) 断面⑥および⑦



断面⑥



断面⑦



- $d_0 = 12.0 \text{ mm}\phi$
- $d_1 = 15.97$
- $d_2 = 16.06$
- $d_3 = 23.99$
- $d_4 = 24.06$
- $d_5 = 36.93$
- $d_6 = 36.975$
- $d_7 = 39.95$

- $d_0 = 12.0 \text{ mm}\phi$
- $d_1 = 15.97$
- $d_2 = 16.90$
- $d_3 = 30.00$
- $d_4 = 31.51$
- $d_5 = 36.90$
- $d_6 = 36.975$
- $d_7 = 39.95$

軸方向の熱流は GENGTC による計算結果 (表 4 参照) から判断して、断面⑥から⑦へ流れるものとする。計算にあたって下記の仮定を設定する。

- a. BC間の発熱量のうち、ヨーク押棒の1部が断面⑥に流入するものとする。
- b. 断面⑥に流入した熱はAB間に均等に分布されるものとする。

計算手順

計算手順は断面①②の場合と同様であるが、一応記述すると下記のようになる。

- a. 断面⑥および⑦の径方向温度分布を求める。

このとき軸方向の流入あるいは流出熱量を考慮できるようにしておく。

計算結果は次のように整理する。

断面⑥の中心温度  $T_{0.6} = C_1 + C_2 \cdot \alpha$  .....(14)

断面⑦の中心温度  $T_{0.7} = C_3 + C_4 \cdot \alpha$  .....(15)

- b. 断面⑥および⑦間の軸方向熱流によって生ずる温度差を求める。

$\Delta T = C_5 + C_6 \cdot \alpha$  .....(16)

- c. 上記 a, b, の計算結果より  $T_{0.7} - T_{0.6} = \Delta T$  における  $\alpha$  を求める。

- d. このようにして求められた  $\alpha$  における断面⑥および⑦の中心温度を(14)および(15)式より求める。

計算式

- a. 断面①および②の径方向の熱計算には GENGTC を使用する。

断面①に軸方向より流入する熱は AB 間で均等に分布し、ノード・1 において加算されるものとする。

- b. 断面⑥⑦間については(17)式を適用する。

$$\Delta T = \frac{P L^2}{2 \lambda_{\text{SUS}}} \dots\dots\dots(17)$$

$$P = r \cdot \rho \cdot a$$

Lは断面⑥⑦間の距離

以上が断面①～⑦までの熱計算方法である。

67M-28Jについての計算結果を表4の下段に示す。計算の妥当性については照射データの章で論ずることになっている。



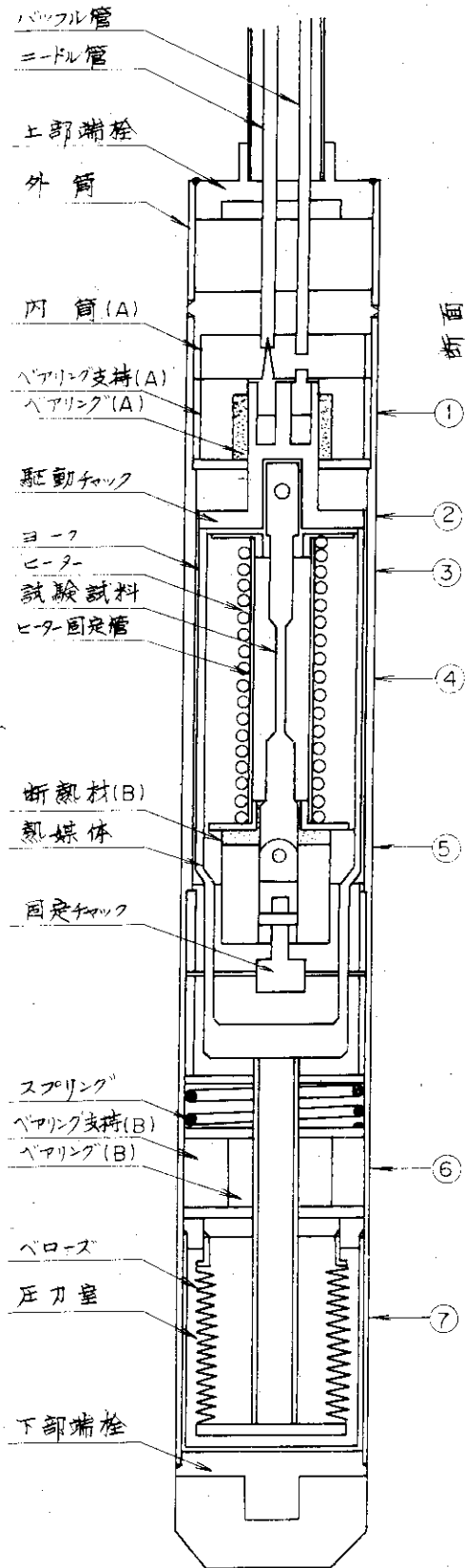


図3 67M-28Jの熱計算箇所

表4 67M-28J熱設計結果

上段には一次元計算結果を、下段には方向性を考慮した計算結果を示す。

単位 : °C

ノード 断面	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
①	223	188	171	168	143	105	89	59			
	335	282	241	224	204	138	102	61			
②	1347	1331	1174	1061	127	68					
	536	530	471	429	79	57					
③	a	670	669	449	448	442	376	287	277	74	56
	b	848	847	652	652	646	580	-	-	62	53
	c	776	775	570	569	563	497	-	-	67	54
④	a	533	533	436	435	429	368	284	274	74	56
	b	710	709	625	624	619	558	-	-	62	53
	c	638	638	548	547	542	481	-	-	67	54
⑤	a	603	594	470	468	344	329	80	57		
	b	274	262	90	86	-	-	73	56		
	c	407	397	244	241	-	-	76	56		
⑥	150	147	141	139	127	84	74	58			
	169	161	149	146	137	94	72	58			
⑦	493	491	424	388	111	92	71	57			
	487	483	430	418	107	95	68	57			

断面③④⑤について

- a : ヨークのある方向
- b : ヨークのない方向
- c : a, bの平均値

断面①②⑥⑦について

- 上段はGENGTIC計算値
- 下段は軸方向熱流修正値

## 2. キャプセルに関する実験的検討

### 2.1 摺動部ベアリングについて

試料への荷重方向を正しく保持するために押し棒および駆動チャック部はベアリングで支持する構造(図1参照)を用いているが、ベアリング部のクリアランスは試験時の昇温した状態においても適正なクリアランスを保ち、摺動に伴う摩擦抵抗は試料にかかる荷重に対して無視しうる大きさでなければならない。

ベアリング材質としては押し棒および駆動チャックの材質(SUS-27)に対して昇温状態で潤滑性を有するグラファイトが用いられた(グラファイトは物性に異方性があるので非結晶性のカーボンが本目のキャプセルから使用されている)。グラファイトには製造過程に起因する物性のバラツキがあり、ベアリングに用いるグラファイトの物性に対する信頼性に不安があるので実験的に設計データの裏づけを行うことにした。

#### 実験条件

- 押し棒と駆動チャックの外径および表面仕上状態は67M-28Jと同一仕様とし、ベアリング内径はガンマ発熱が3 w/grにおける温度(熱計算値)におけるクリアランス(以下ではHot-Gapという)がDiametral Gapで0.05mm, 0.1mm, 0.15mmとなるような3種の寸法について試験を行う。表5に試験体の寸法を示す。
- 試験温度は3 w/grの発熱における計算値の1.5倍を最高温度とし、常温から最高温度までの範囲について試験を行う。(表6参照)
- 試験はヘリウム雰囲気において行う。

#### 試験装置

図4に摺動部試験装置の構成を示す。

押し棒の上部より出ている熱電対とヒータのリード線およびヘリウム供給管等は摺動部の抵抗とならないよう充分たわませてある。試験温度は熱電対#4の指示値とする。熱電対#4の先端はベアリング内面より外側へ約1mmの深さに取付けてある。

#### 試験要領

##### a. 装置の調整

押し棒のつりあげ方向のセンタリングを行い摺動による摩擦抵抗が充分小さいことを確認する。ロードセルはDead Weightを用いて較正する。

##### b. 試験方法

摺動速度と摩擦抵抗の関係は表7に示す通りである。摩擦抵抗は摺動速度に関係なくほぼ一定となっているので摺動速度は0.86~1.3mm/secの範囲であればよい。

常温にて押し棒を巻きあげ摩擦抵抗を測定する。ヒータをいれ、ベアリング温度を $T_1$ に設定し、温度が定常に達したのち摩擦抵抗を測定する。この時押し棒の上下方向の温度(熱電対#1~#3)指示が±5℃以下であることを確認する。温度差が大きいときはHot-Gapの値を必要に応じて修正する。

順次 $T_2$ ,  $T_3$ において試験を行う。摩擦抵抗の測定は同一条件において3回くり返し平均値をとる。

#### 試験結果

表⑤に示されたベアリング(2), (3), (5), (6)のケースについては試験温度範囲において摩擦抵抗は殆んど変化が認められず100~300grの抵抗を示し,最適ギャップに関して定量的判断の材料となるデータは得られなかった。ベアリング(1)および(4)については図5に示すようなデータが得られている。図5において下部駆動部では200℃,上部駆動部については300℃附近で急激な摩擦抵抗の増加がみられる。

試験時の温度データから摺動部間隙とベアリング温度との関係を計算により求めると図6のようになり,摩擦抵抗が急激に増加するときの間隙はいずれも0.017mmとなる。

実際の設計では安全率として3をとり,摺動部間隙をHot-Gapで0.050mmと定めた。

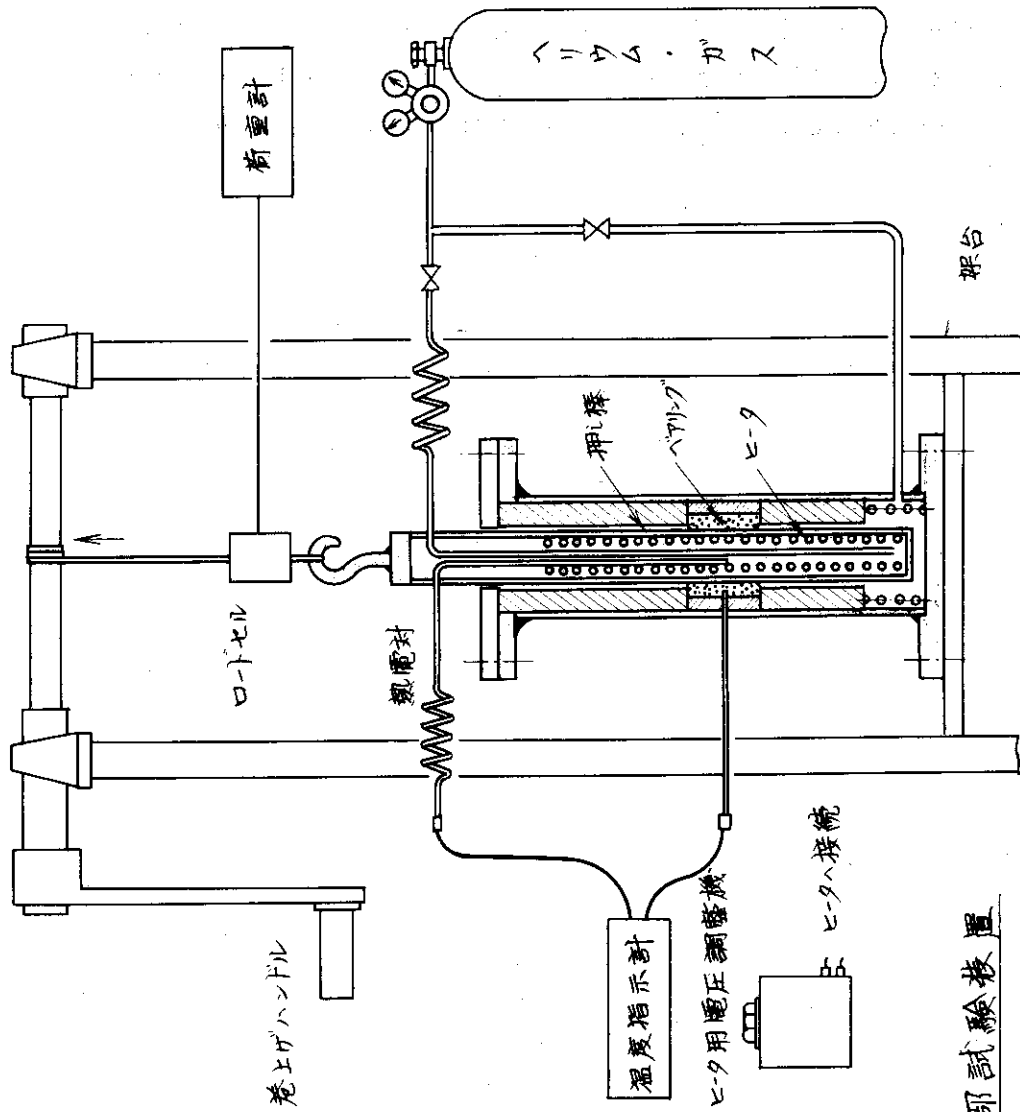


図4 摺動部試験装置

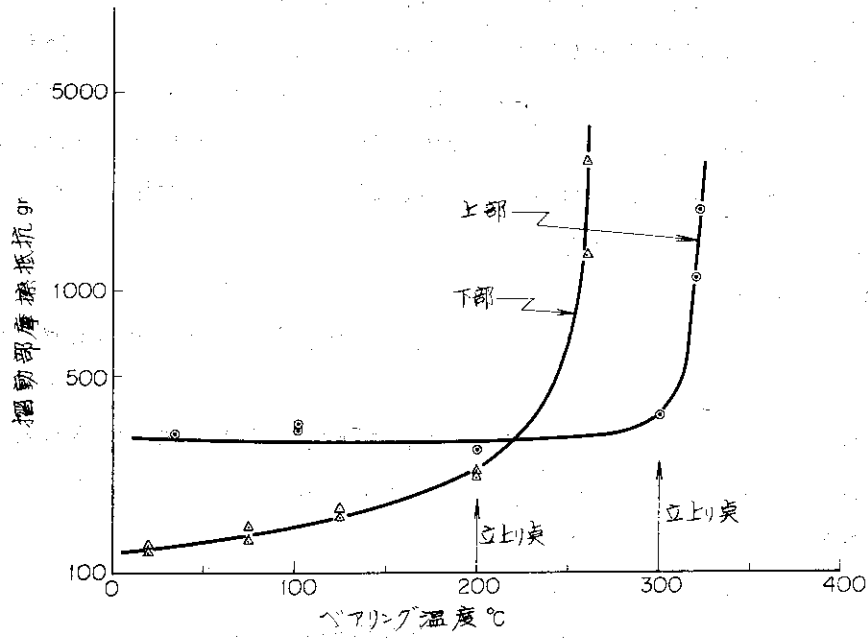


図5 摺動部実験データ

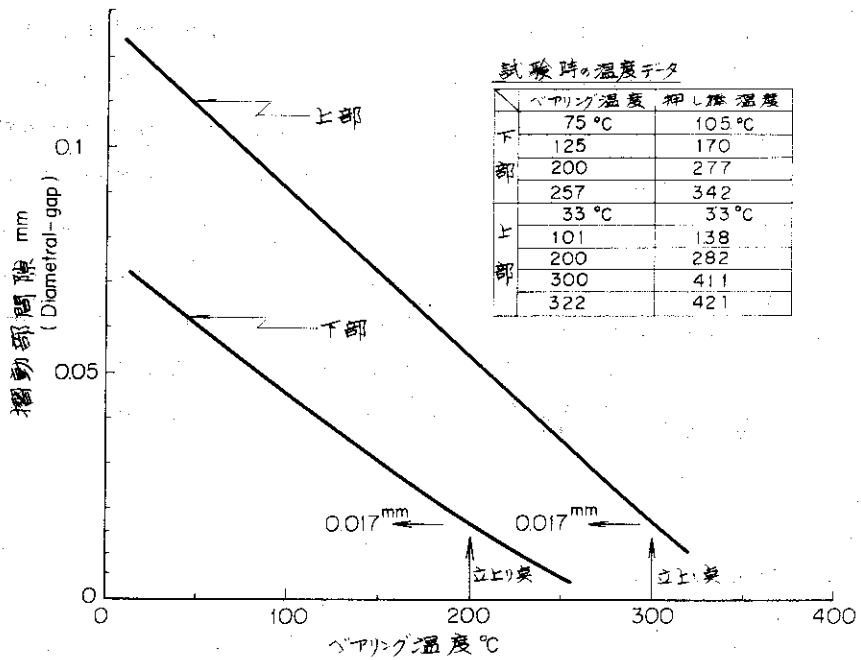


図6 摺動部間隙とベアリング温度の関係

## 2.2 試料部ヒータについて

照射試験中の試験片温度についてはJIS-Z-2271(1968)「金属材料の引張試験方法」に示されている値を目標とする。すなわち、600℃をこえ800℃以下のときは試験片標点距離の全範囲にわたり±4℃以下、という規定が設計目標値となる。

原子炉内ではガンマ加熱による試験片およびキャプセル自身の発熱によって温度分布が生ずるので炉外試験では完全な模擬はできないが、温度制御用ヒータの形状・寸法・材質および出力などを決定するため炉外模擬試験体による実験的検討を行うことにした。また、炉外試験と平行して試料部ヒータ部の構造および熱設計を行い炉外試験結果と対比することによって熱設計の妥当性をチェックする方法をとった。

### 2.2.1 ヒータの構造および寸法

試験片は円筒形キャプセル外筒内に装着されるので試料温度制御用ヒータの形状も円筒形であれば都合がよい。円筒形ヒータとしては細径のシーズヒータをコイル状に巻く構造を採用した。この場合、ヒータ・コイルはキャプセル内で所定の位置に保持する必要から高温用ステンレス製管(ヒータ固定管)に巻きつける構造とし、試験片はステンレス管内部に装着する方法を用いる。

炉外試験では試験片温度が均一で、しかもできる限りシンプルなヒータ構造を求めるためにヒータ・コイルは高さ方向について1段のものと3段のものが考えられた。試料標点間距離は30mmであるが、1段型ヒータではコイル高さを110mmとし、中央部の温度が平坦になると思われる部分に試料標点間部をもつてくるように配慮した。3段型ヒータでは中央部のコイル高さを55mm、上下のコイル高さをそれぞれ27.5mmとし、上下のヒータ出力を調節することによって試験片温度を均一に保持しようとするものである。

キャプセル構成上の理由から固定管およびヒータ・コイルが占有しうるスペースは内径14mm、外径27mm、高さ110mmの円筒形に制約されている。このスペースはヒータを装着するためのスペースであると同時に、照射中のガンマ発熱によって試料温度が所定の制限値を超えないように適切な寸法・材質の熱媒体で充填しなければならない。67M-28Jの場合の制限温度としては照射試験温度750℃から温度制御のためのヒータ投入分として100℃を差引いた650℃という値を設定する。67M-28Jの場合、照射孔M-11におけるガンマ発熱として3w/grを用いると試料温度が650℃となるときのヒータ部寸法は次のようになる。

#### (1) ヒータ線の仕様

外径 : 2.3mm $\phi$   
 被覆管材質 : SUS-316  
 絶縁物材質 : MgO  
 発熱線材質 : ニクロム線一種

#### (2) ヒータ・コイル寸法

外径 : 26.8mm $\phi$   
 内径 : 22.2mm $\phi$

#### (3) 固定管

外径：22.0mm $\phi$

内径：20.0mm $\phi$

### 2.2.2 炉外試験

図7にヒータ部炉外試験装置の構成図を示す。図では3段型ヒータが示されているが1段型の場合もテスト部を入れかえることによって試験を行うことができる。炉外装置ではガンマ発熱を模擬することはできないが図7の装置では試料部上下にヒータを設置し、たて方向に逃げる熱の影響を調節できるようにして上下方向の温度レベルをガンマ発熱がある場合と同じようにすることができるように配慮した。

図8はヒータ部の炉外試験結果を示したものである。1段ヒータの場合には図中の1点鎖線にみられるように凸型の温度分布となり試料温度を均一に保持することはできない。3段ヒータの場合には点線および実線にみられるように#3, #4, #5熱電対温度を均一に保持することができる。

#3, #4, #5熱電対指示値が均一となったとき、各熱電対間の温度分布も均一であるかどうか図8の結果からは判らない。熱電対間の温度分布を知るために試験片の代りにパイプを用い、パイプの外側に固定熱電対を取付け、パイプ内部には高さ方向にトラバースできるような熱電対を挿入して両者の温度指示値を軸方向への熱損失量を離れた3つのケース(ヒータ出力:大, 中, 小)について較べてみた。図9に対比の結果を示す。図9にみられるように#3, #4, #5熱電対間では両者の分布は非常によく一致しており、目標値 $\pm 4\text{C}$ をはずれることは少ないと思われる。

上に述べた結果から3段ヒータは必要な条件をかなりよく満足するものと判定された。試料部温度分布に関してガンマ加熱の影響がどのようになるか分らないが、67M-28J用ヒータとして3段型コイル状ヒータを採用することになった。



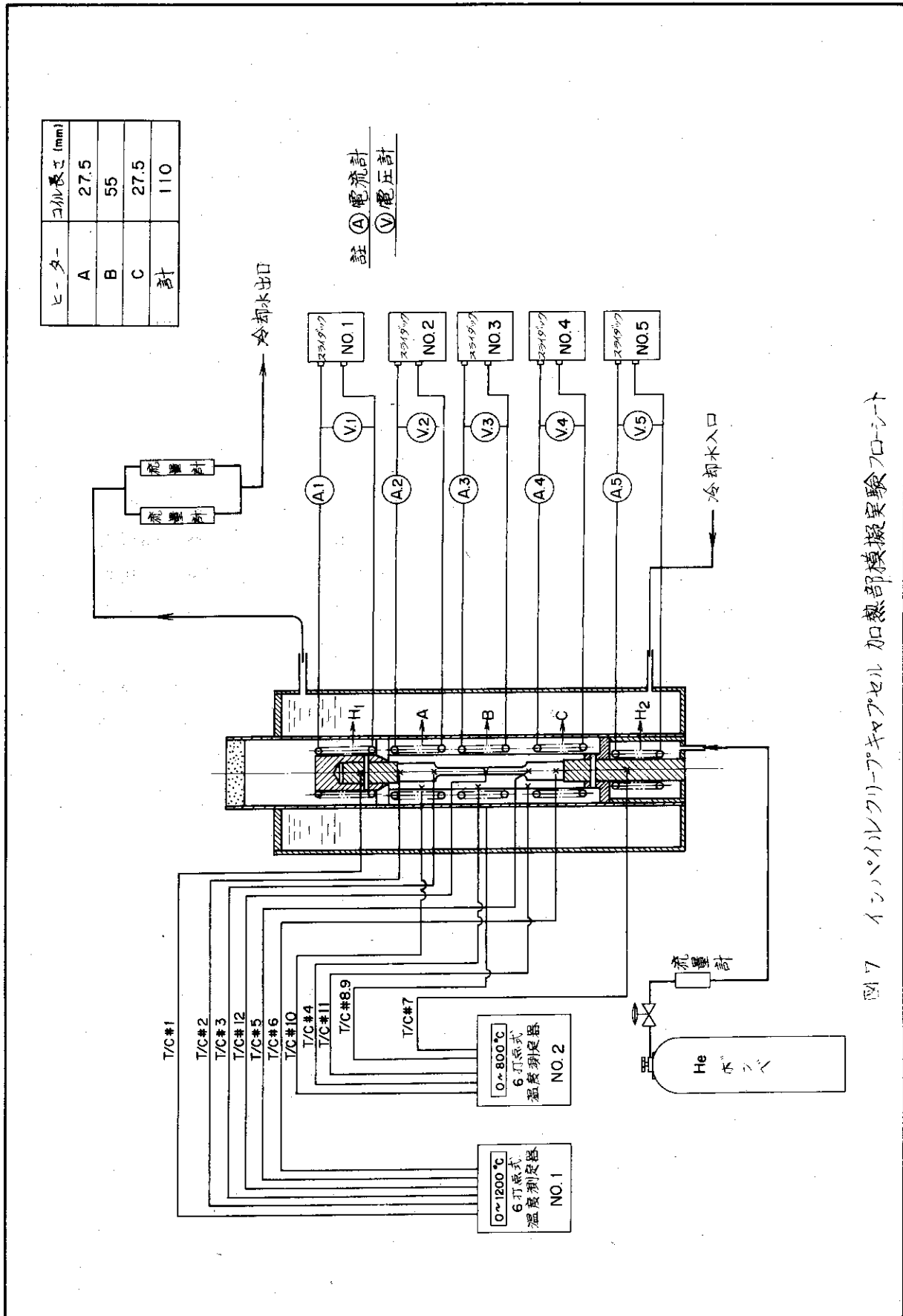


図7 インパルスクリップセル加熱部模擬実験フローシート

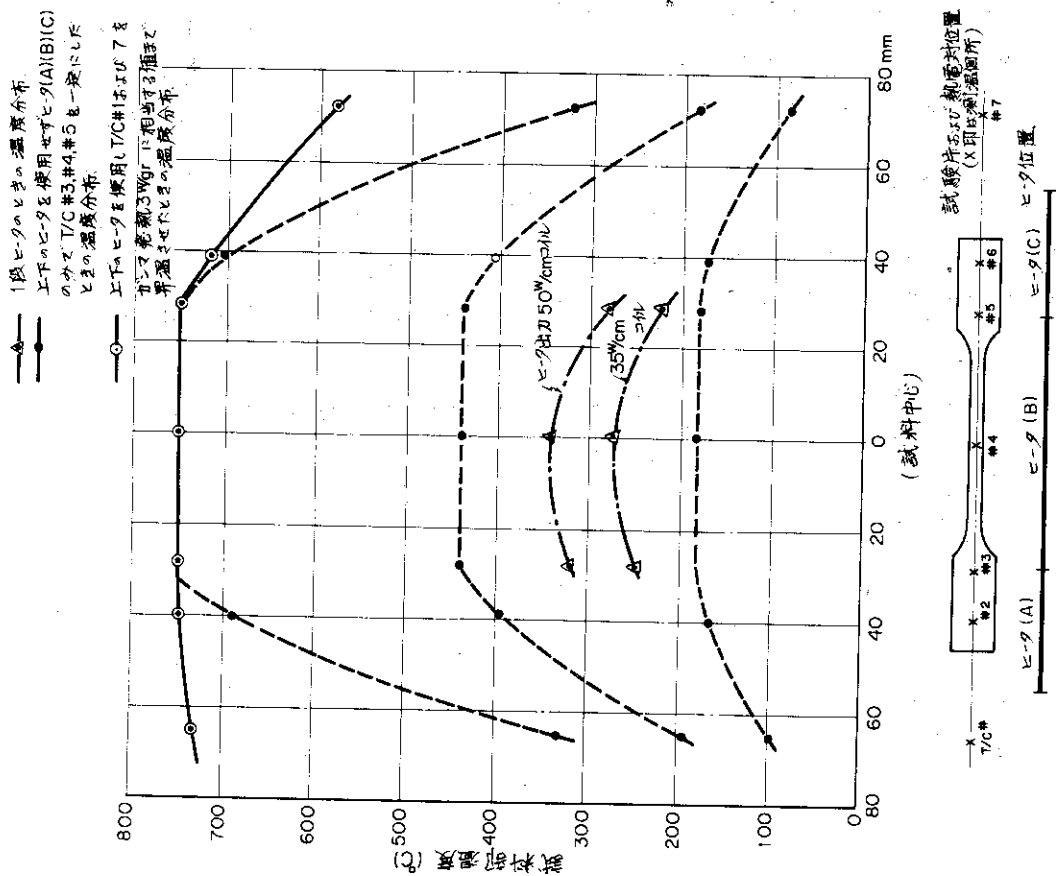


図8 ヒータ部外試験結果：1段3段ヒータの温度分布

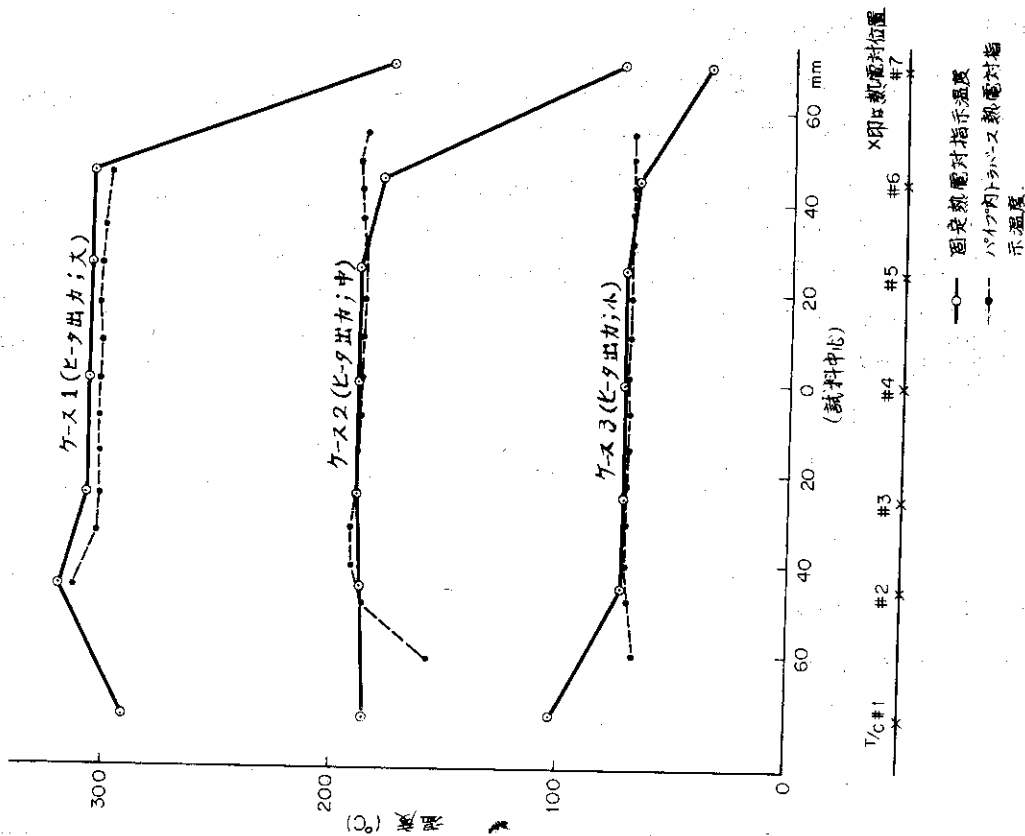


図9 試料部温度分布詳細測定結果

## 2.3 荷重用ベローズの有効断面積および抗力

67M-28J用ベローズに必要な条件は荷重60kg、圧縮量11mm、温度400℃で42φ孔用キャプセル内に装着しうる形状寸法であることの4点である。

市販品について調査した結果、上記の条件を満足するものとして「S型溶接ベローズ」が選定された。表8に67M-28J用ベローズの製作仕様を示す。表8の仕様では必要な荷重60kgに対して、得られる荷重は約200kgとなっているが、これは将来のことを考慮し、42φ孔用キャプセルで実現しうる最大荷重を知るために意識的に67M-28Jに必要な値以上のものを製作することにしたものである。

試料への荷重は(18)式によって求められる。

$$W = P \cdot A_{eff} - R \cdot L \quad \dots\dots\dots(18)$$

W：荷重

P：加圧ガスの圧力

$A_{eff}$ ：ベローズ有効断面積

R：バネ定数（ベローズ圧縮時の抗力）

L：ベローズ圧縮量

また、試料への応力〔 $\sigma$ 〕は $W/A_s$ （ $A_s$ は試料断面積）として求められ、ベローズ圧縮量はクリープ歪測定により知ることができるから、結局ベローズの有効断面積とバネ定数が分れば試料応力を知ることができる。

ベローズの有効断面積およびバネ定数はベローズ固有の性質であるからインパイル・クリープキャプセルに組込まれる個々のベローズについて較正データを採取しておく必要がある。

ベローズの有効断面積およびバネ定数に関する較正データを得るため図10に示すような装置が製作された。図10の装置を用いて測定された67M-28J用ベローズの有効断面積およびバネ定数を図11および図12に示す。有効断面積は製作仕様とほぼ同じ値が得られており、温度による影響はほとんどみられないがベローズ圧縮量と共にわずかに減少する傾向がみられる。ベローズの常用圧力は最大5.0kgであるから荷重としては約200kgまでとることができる。

バネ定数は製作仕様0.7kg/mmに対して0.39~0.455kg/mmでかなり小さくなっており、性質のよいものが得られている。バネ定数は温度によって変わり、温度の上昇により減少する傾向にある。

表5 駆動部予備試験用試験体

試験体名称		常 温 時		Hot gap
		外 径	内 径	
上 部	駆動チャック	20.0 mm $\phi$	16.0 mm $\phi$	
	ベアリング(1)	20.13	"	0.05mm
	" (2)	20.20	"	0.10
	" (3)	20.26	"	0.15
下 部	押し棒	16.0 mm $\phi$	12.0 mm $\phi$	
	ベアリング(4)	16.10	"	0.05mm
	" (5)	16.15	"	0.10
	" (6)	16.20	"	0.15

表6 駆動部試験温度

	設計温度	試験温度範囲
上駆動部	182℃	常温 ~ 273℃
下駆動部	161℃	常温 ~ 241℃

表7 摺動速度と摩擦抵抗の関係(於常温時)

摺動速度	摩擦抵抗
0.86 mm/sec	265 gr
0.3	265
0.72	200
1.0	230
1.3	235

表8 荷重用ベローズの仕様

材質	SUS-28	常用伸縮量	軸方向-11 mm
内径	17 mm	有効面積	43 cm <sup>2</sup>
外径	30 mm	バネ定数	0.7 kg/mm
板厚	0.15+0.15 mm	常用流体	ヘリウムガス
山数	80	常用圧力	外圧 50 kg/cm <sup>2</sup>
ピッチ	1.06 mm	常用温度	400 ℃
自由長	85 mm	寿命	1×10 <sup>3</sup> 回以上

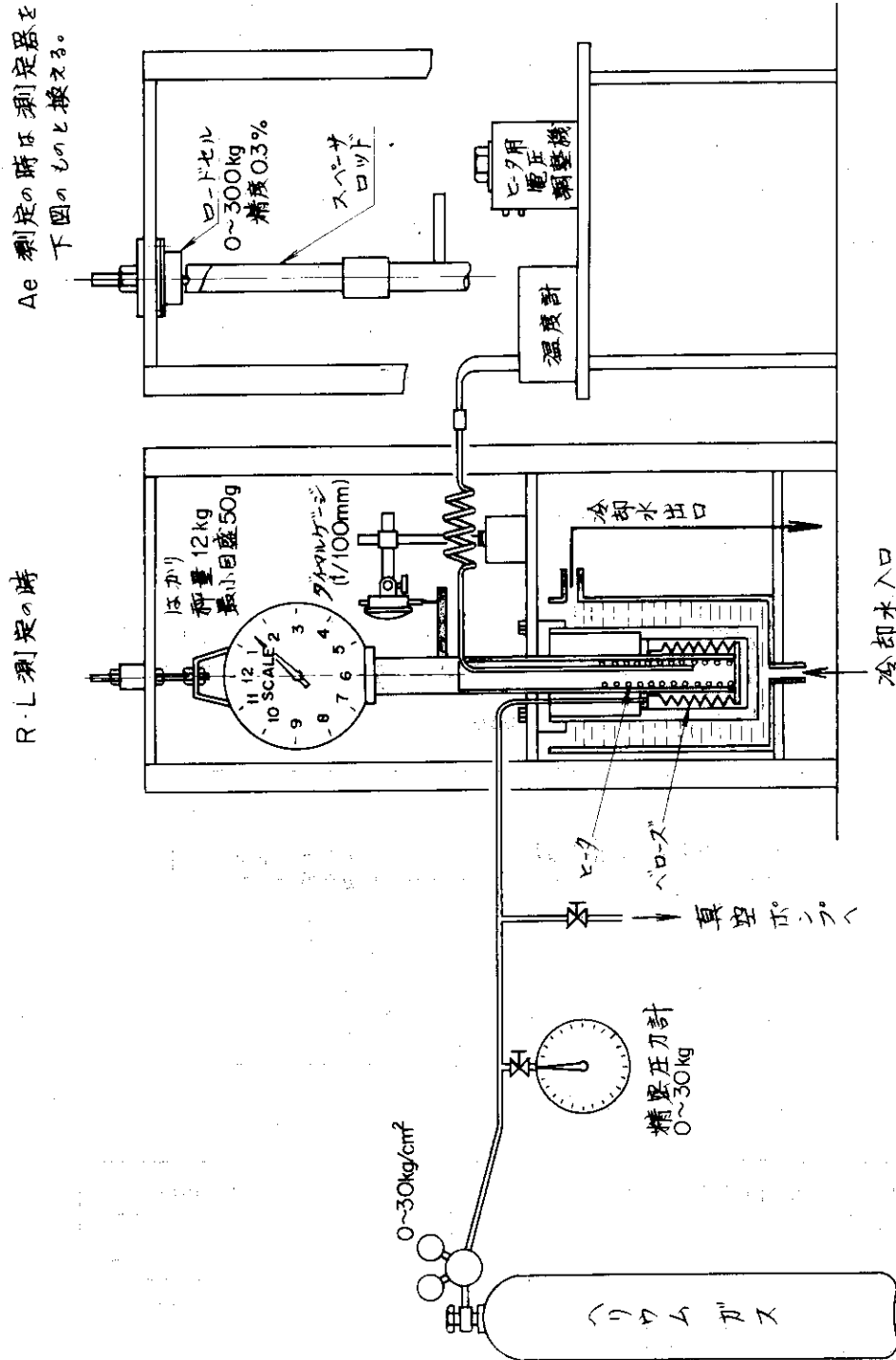
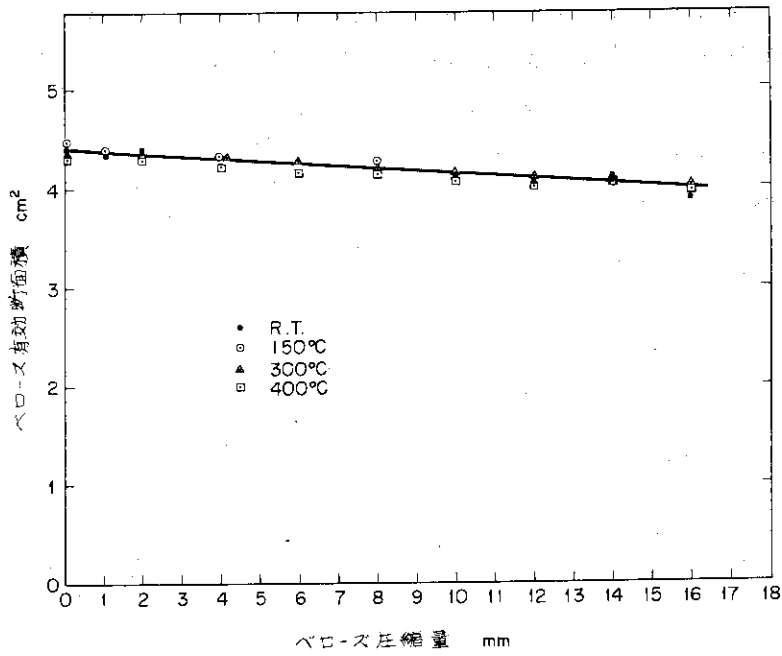
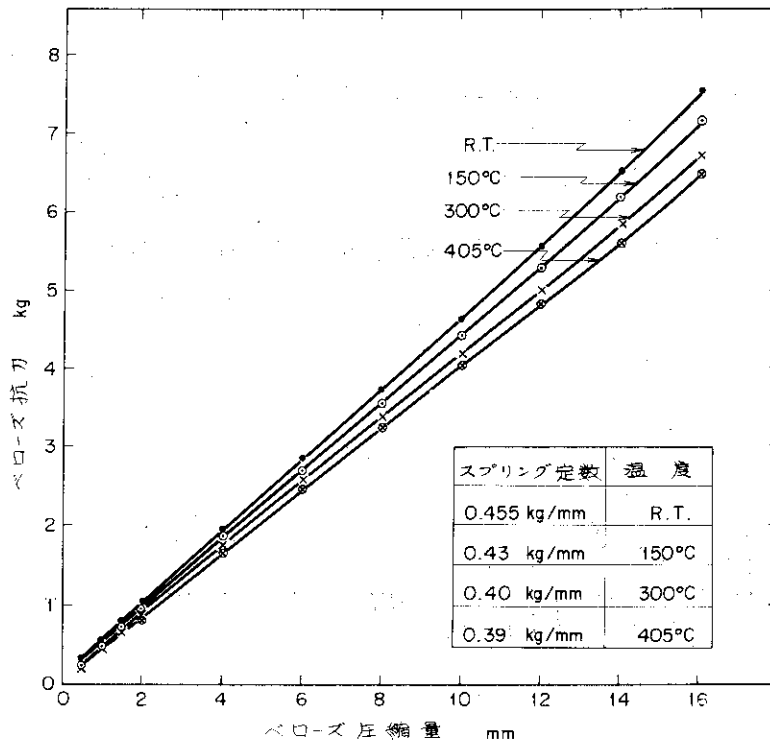


図10 ベローズ校正試験装置



オ11図 ベローズ有効断面積校正データ



オ12図 ベローズ圧縮時の抗力

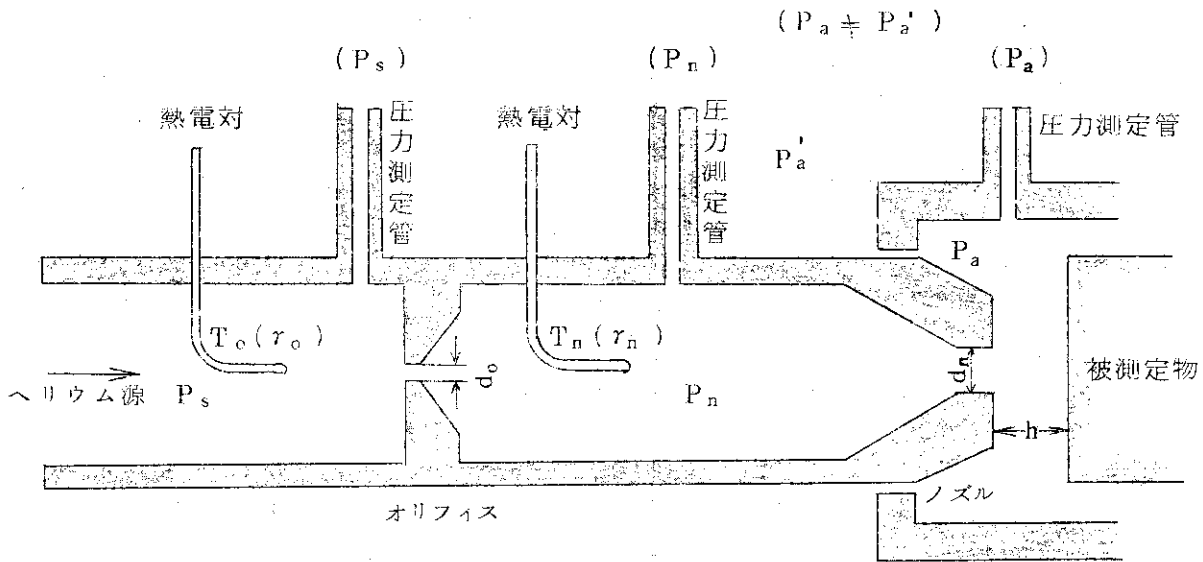
2.4 ヘリウム・マイクロメータの特性

本節ではヘリウム・マイクロメータの原理，キャプセルに適用する場合の技術的考察，試作した歪検出端の特性試験，および歪検出端の較正試験などについて述べる。

2.4.1 ヘリウム・マイクロメータの原理

ヘリウム・マイクロメータは空気マイクロメータとして知られている比較測長器において空気の代わりにヘリウムガスを用いたものである。従って原理的にはとくに目新しいものではなく，ガス吐出部の間隔（変位量）は間隔の変化に伴なって生ずる供給ガス系における背圧あるいはガス流量の変化として捕えられる。

ヘリウム・マイクロメータ検出端の構成を下図に示す。



オリフィスおよびノズルを通るガスの重量流量はそれぞれ(19)および(20)式で表される。

$$G_o = C_o \cdot \frac{\pi}{4} d_o^3 \sqrt{2 g r_o} \cdot \sqrt{P_s - P_n} \dots\dots\dots(19)$$

$$G_n = C_n \cdot \pi d_n h \sqrt{2 g r_n} \cdot \sqrt{P_n - P_a} \dots\dots\dots(20)$$

$G_o = G_n$  であるから

$$h = \frac{1}{4} \cdot \frac{C_o}{C_n} \cdot \frac{d_o^2}{d_n} \cdot \sqrt{\frac{r_o}{r_n}} \cdot \sqrt{\frac{P_s - P_n}{P_n - P_a}} \dots\dots\dots(21)$$

- ここで  $G_o$  : オリフィス部の流量
- $G_n$  : ノズル部の流量
- $C_o$  : オリフィスの流量係数
- $C_n$  : ノズルの流量係数
- $r_o$  : オリフィス部のガス密度
- $r_n$  : ノズル部のガス密度

- $P_s$  : ガスの供給圧力  
 $P_n$  : オリフィスとノズル間の圧力  
 $P_a$  : 吐出部の圧力  
 $d_o$  : オリフィスの直径  
 $d_n$  : ノズルの直径  
 $h$  : 測定すべき間隔

いま、(21)式において  $h$  を  $\sqrt{\frac{P_s - P_n}{P_n - P_a}}$  の形でガスの静圧として測定するものとする、 $r_o$  と  $r_n$  はガス温度測定より求まり、 $C_o$ 、 $d_o$ 、 $d_n$  は検出端の固有値で使用範囲では一定値とみなしうるので、ヘリウムマイクロメータの特性は主として  $C_n$  の性質によって左右される。

$C_n$  の性質はノズル部の形状寸法に依存するところが大きく、 $h$  と共に変化する。同一の  $h$  に対しては  $C_n$  は一定であるから、あらかじめ  $C_n$  と  $C_o$  を求めておけば  $\sqrt{\frac{P_s - P_n}{P_n - P_a}}$  を測定することにより(21)式から  $h$  を求めることができる。

実際問題としては  $C_n$ 、 $C_o$  を測定するよりも  $\sqrt{\frac{P_s - P_n}{P_n - P_a}}$  と  $h$  の関係を直接測定して図13に示すような較正曲線を用いる方が便利なので  $C_n$ 、 $C_o$  を算出することは行わない。

ヘリウムマイクロメータを原子炉内で使用する場合には歪測定系は図14に示すようになる。この場合、ガス供給管はキャプセルの構造上の制限により外径4mmφ、内径3mmφで長さが15ないし20メートルとなり、ガス供給管部における供給ガスの圧力損失は検出端部における圧力損失に比べて無視できない大きさとなる。このため、ガス供給管部のガス温度や吐出部圧力の変動に伴うガス流量の変化に基因する  $\sqrt{\frac{P_s - P_n}{P_n - P_a}}$  の変動量が  $h$  の変化による変動量と識別困難となる状態が生じてくる。

原子炉内でヘリウムマイクロメータを使用する場合、上述の欠点を排除するために、歪測定条件を検出端部で整えるような方法を採用することにした。すなわち、 $P_s$  を調圧弁を用いて一定に、また、 $P_a$  を絞り弁および空気の導入によって一定に保持する方法が用いられる。

$P_s$  と  $P_a$  を一定に保持することによって生ずる利点を要約すると次のようになる。

- (1) 歪測定に直接関係する部分が小さなスペースに限定されるのでガスの温度分布に基因する誤差が小さくなる。
- (2) 検出端部以外の個所で生じた現象によって流量変動が生じたときの誤差を排除できる。

以上、簡単に原子炉内で使用するヘリウムマイクロメータの原理等について説明したが、ヘリウムマイクロメータの型式として上述のもの以外についても検討を行っている。これらについては67M-28J以降のインパイルクリープキャプセルにおける歪測定方法として採用される可能性が大きい、また技術的に確立されたものではないので別途報告することにした。

この改良型のヘリウムマイクロメータはガスの供給量を常に一定に保持することを基本条件とし、 $P_s$  および  $P_a$  の制御を廃止するものである。ガス流量を一定に保持した場合、



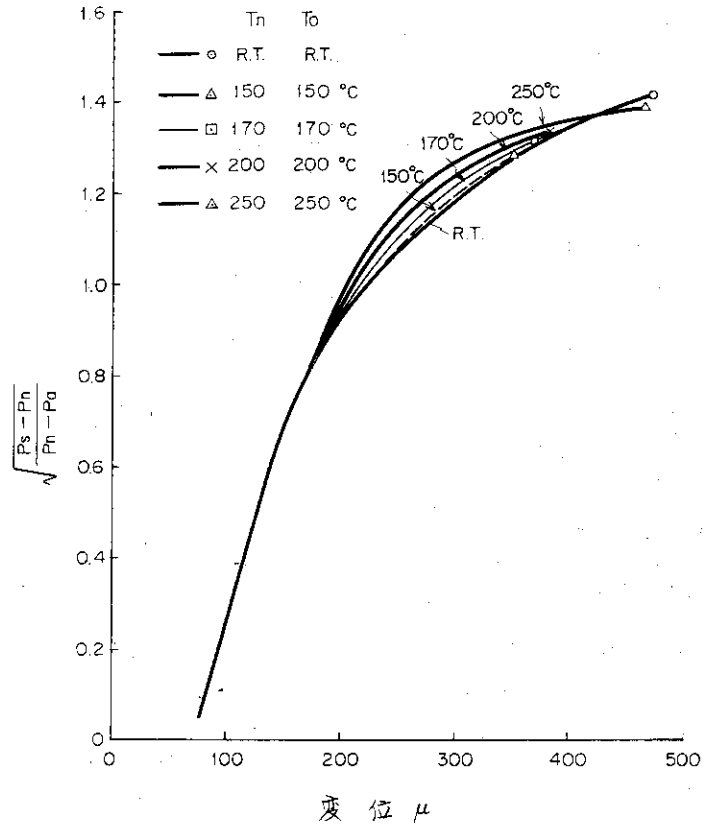


図 13 ヘリウムマイクロ(バツフル型) 校正曲線の例

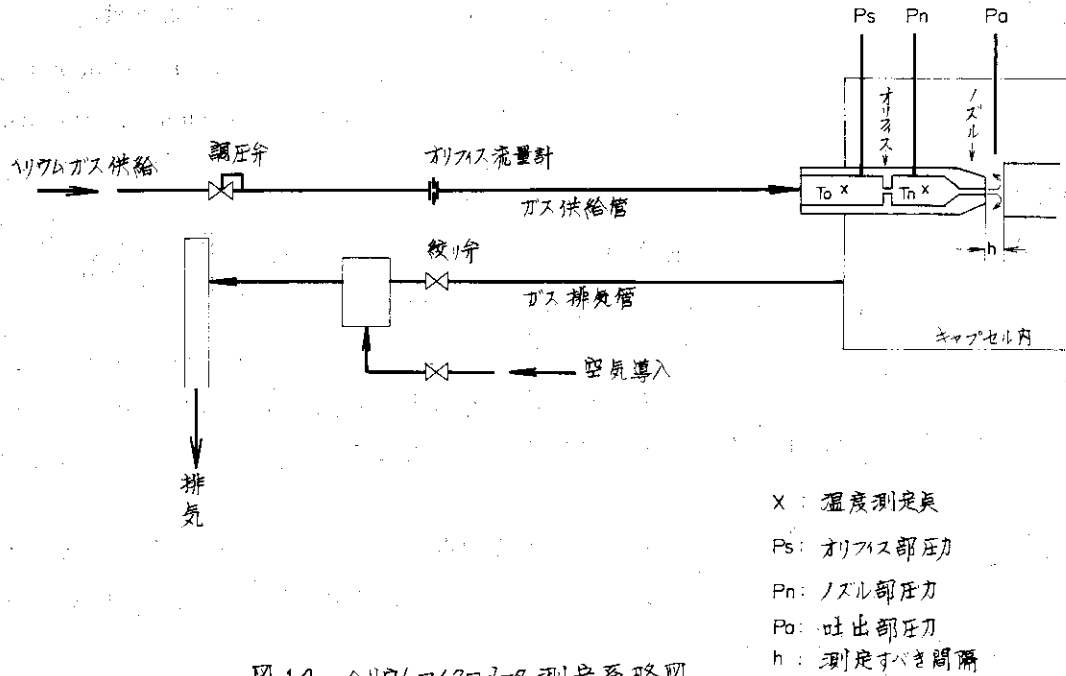


図 14 ヘリウムマイクロメータ測定系略図

(19式)における $(P_s - P_n)$ は常に一定となるので、変位 $[h]$ を $(P_s - P_n)/(P_n - P_a)$ という形で校正することによる利点は消滅するので、変位は $(P_n - P_a)$ として測定し、オリフィスを廃することができるので背圧測定管は1本でよいことになる。

温度補正も $r$ については不要となり $r_n$ についてのみ補正すればよくなるので測定系をかなり簡略化することができる。

ガス供給量を一定に保持する方法としてはオリフィス部の流速を音速流に保持する方法と定流量弁を用いる方法が考えられる。両者について実験的検討を実施した結果、適切な定流量弁が入手できたこともあつて、性質の複雑な音速流型は得策でないとの判断がでている。

#### 2.4.2 歪検出端の特性

67M-28Jの歪検出端試作に関連した技術調査および試作検出端に関する実験的検討結果について述べる。

##### (1) 歪検出端の試作

67M-28Jにおけるクリープ歪の測定では表2および図2に示されている使用範囲、感度を満足させる必要がある。このため、パッフル型とニードル型歪検出端各1個を併用する方法が考えられた。技術的検討対象としては主としてパッフル型をとりあげ以下に説明する。

試作に先立って、まず空気マイクロメータについて技術調査を行った。一般には空気マイクロメータとして低圧系パッフル型が多く使用されており、大気圧雰囲気中で測定が行われる。従つてガス温度は常温、吐出部圧力は大気圧となつている。市販されている空気マイクロメータは測定範囲が50ないし200ミクロン、感度が0.1ないし1ミクロンのものが多い。

いま、インパイルクリープキャプセルで必要としているヘリウムマイクロメータとして低圧型を採用するものとし、ガスの圧縮性に基因する測定誤差が実用上無視しうる状態を考えてみると、(19式)および(20式)において温度一定(密度が一定)のとき $C_0$ 、 $C_n$ を定数とみなしうる状態にあることが低圧型成立の要件と考えられる。

$C_0$ 、 $C_n$ を定数とみなしうるかどうかはガスの圧縮性の問題とみられ、空気マイクロメータの場合 $\frac{P_n}{P_s} \geq 0.95$ および $\frac{P_a}{P_n} \geq 0.95$ という値が実用上の限界値と考えられているが、ヘリウムマイクロメータの場合も同様の取扱ができると思われるが、ガスの種類が異なつた場合、0.95という値がそのまま適用できないことも考えられるので実験的にヘリウムマイクロメータの使用範囲を確認しておく必要がある。

オリフィス部とノズル部の差圧の大きさは逆比例となるような特性を有している。

すなわち、図14において

$$\begin{array}{lll} h=0 \text{ のとき,} & P_s - P_n = 0, & P_n - P_a \text{ は最大。} \\ h \text{ の増大と共に} & P_s - P_n \text{ は増大,} & P_n - P_a \text{ は減少。} \\ h = \infty \text{ のとき} & P_s - P_n \text{ は最大,} & P_n - P_a \text{ は最小。} \end{array}$$

となる。

$\frac{P_n}{P_s}$  および  $\frac{P_a}{P_n}$  の値を図13に示した例についてプロットしてみると図15に示すようになる。図15で制限値を0.95とすると200~400 $\mu$ , 0.94とすると100~400 $\mu$ が測定可能な範囲となる。

現実問題として、常温から250℃の温度範囲にわたって100~200 $\mu$ 間でガス圧縮性に基づく測定データの変調はみられないので  $\frac{P_a}{P_n} = 0.94$  においても実用上は大きな誤差の導入はないものと思われる。

上述の考察結果から、供給ガス圧力を1000mmA<sub>g</sub> (0.1kg/cm<sup>2</sup>・G)程度にとり、 $p_a$ をほぼ大気圧に保持することによって低圧型ヘリウムマイクロメータが成立しうるとの判断を得たので、原子炉用マイクロメータの設計を行った。

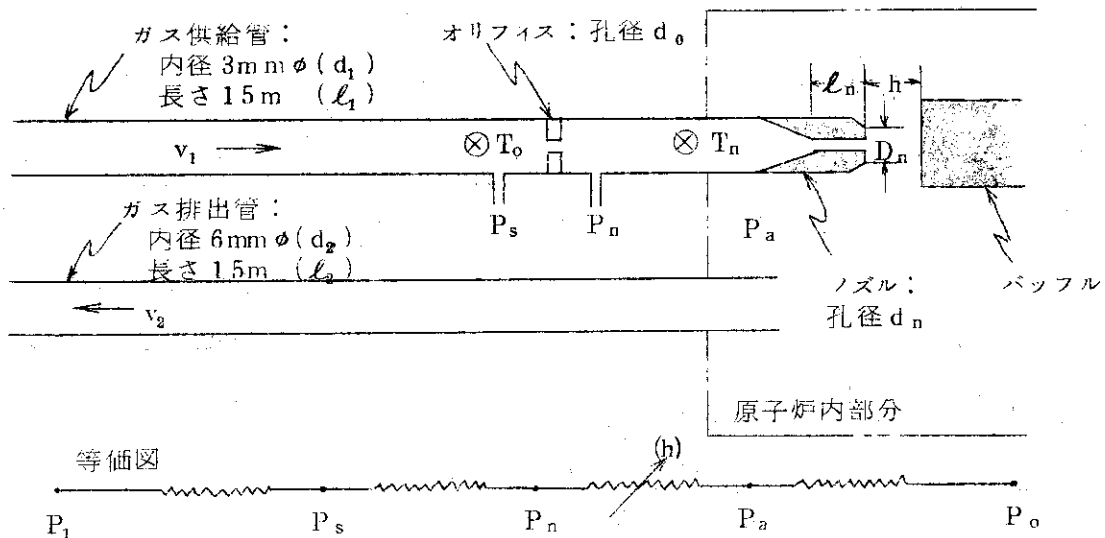
(2) 低圧型ヘリウムマイクロメータの設計

設計にあたり配慮しなければならない事項としては次のものをあげることができる。

1) 測定精度および感度

- ロ) 原子炉内に設置される歪検出端と計測器間の距離(約20m)
- ハ) 原子炉内でのガンマ発熱の影響
- ニ) ヘリウムガス消費量
- ホ) ヘリウムガス中の不純物による検出端の酸化
- ヘ) ヘリウムガス中の不純物の放射化
- ト) ガスの供給方法 ( $P_s$ を一定に保持する方法)
- チ) ガス圧測定の方法
- リ) 検出端の設定方法
- ヌ) ヘリウムマイクロメータ較正の方法

これらの要検討事項のうちガスの供給と測定精度に関連する事項としてロ), ニ), ト), チ)について考察してみる。歪検出端と計測器間の距離が約20mあるためにガス供給管における圧力損失も比較的大きくなる。このため流量変動あるいは温度変動に基づく  $P_s$  の変動量も大きくなり  $P_s$  を常時一定に保持することが難かしい。ヘリウムガスの供給排出系に関する流動特性は(22)~(25)式で表すことができる。



$$P_1 - P_s = \frac{64 \cdot \rho v_1^2 \ell_1}{Re \cdot 2 g d_1} = \frac{64 \rho v_1 \ell_1 \nu}{2 g d_1^2} \dots (22)$$

$$P_s - P_n = (G_o / C_o \frac{\pi}{4} d_o^2 \sqrt{2 g \rho_o})^2 = \frac{\rho v_1^2}{2 g C_o^2} (\frac{d_1}{d_o})^4 \dots (23)$$

$$P_n - P_a = (G_n / C_n \frac{\pi}{4} d_n h \sqrt{2 g \rho_n})^2 = \frac{\rho v_1^2 d_1^4}{2 g d_n^2} \cdot \frac{1}{C_n^2 \cdot h^2} \dots (24)$$

$$P_a - P_o = \frac{64 \cdot \rho v_2^2 \ell_2}{Re \cdot 2 g d_2} = \frac{32 \nu \rho d_1^2 v_1 \ell_2}{g \cdot d_2^2} \dots (25)$$

(22) ~ (25) 式を用いた計算例を以下に示す。

$$P_1 - P_s = 125.4 v_1 \quad (\text{kg/m}^2)$$

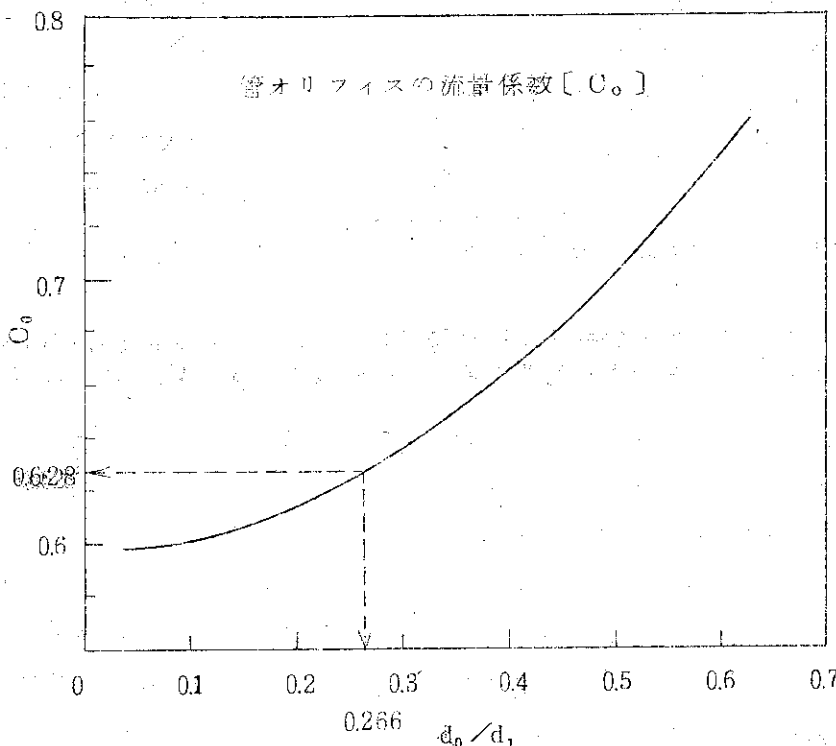
$$P_s - P_n = 2.77 v_1^2 \quad (\text{kg/m}^2)$$

$$P_n - P_a = 0.494 \cdot \frac{v_1^2}{C_n^2 \cdot h^2} \times 10^{-6} \quad (\text{kg/m}^2)$$

$$P_a - P_o = 7.84 v_1 \quad (\text{kg/m}^2)$$

ただし、

- ガス供給管内径:  $d_1 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$
- 〃 長さ:  $\ell_1 = 15 \text{ m}$
- ガス排出管内径:  $d_2 = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$
- 〃 長さ:  $\ell_2 = 15 \text{ m}$
- オリフィス径:  $d_o = 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
- ノズル径:  $d_n = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$
- オリフィス流量係数:  $C_o = 0.625$  (下図参照)



- ノズル流量係数 :  $C_n$  …… 図 16 参照  
 ヘリウム比重量 :  $\rho = 0.172 \text{ Kg/m}^3$  at 100°C  
 ヘリウム動粘性係数 :  $\nu = 1.34 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  at 100°C

計算によるヘリウムマイクロメータ各部の圧力損失を表 9 に示す。表 9 の結果から  $(P_s - P_n) / (P_n - P_a)$  の値は変位  $[h]$  に対応しており、ヘリウム流量が変化しても殆んど影響をうけないことが分り  $(P_s - P_n) / (P_n - P_a)$  の形で変位を測定する利点が裏づけされている。

計算例ではオリフィスおよびノズルの孔径を限定しているので一般論的な推察は差し控えるが、各部の圧力損失から下記のような傾向を指摘することができる。

- (1) ガス供給管部の差圧は比較的大きく、変位  $[h]$  が大でノズル部の差圧が比較的小さい状態では系全体の圧力損失に対して支配的となり、ガス供給管部のガス温度変動に基因する圧力変動が大きな誤差を導入する原因となりやすい。従ってノズル径が 1.2 mm $\phi$  の場合には供給管内径は 3 mm $\phi$  では小さすぎるので 5 ~ 6 mm $\phi$  程度にする必要がある。
- (2) オリフィス部の差圧  $(P_s - P_n)$  は変位  $[h]$  の小さい状態では非常に小さな値を示し、差圧測定に支障を生ずる恐れがある。従ってオリフィス径はガス流量が小さい範囲においても測定に必要な差圧を保持できるような小孔径のものにするのが望ましい。本例の場合は  $(P_s - P_n)$  は 0.7 mm $\phi$  では 1.7 倍、0.6 mm $\phi$  では 3.2 倍、0.5 mm $\phi$  では 6.6 倍となる。実用上は 0.5 mm $\phi$  とするのが妥当と思われる。
- (3) ノズル部の差圧は変位  $[h]$  に対応して変化し、1.2 mm $\phi$  のノズル径では 100 ~ 150  $\mu$  程度の測定範囲をとることができる。ノズル径は差圧の大きさのほか、歪測定範囲およびガス流量に関係しており目的に応じて使い分ける必要がある。一般的にはノズル径を大きくすると歪測定範囲は大きくなるがガス流量も大きくする必要がある。

以上バツフル型歪検出端の特性について考察してきたがニードル型についても同様のことがいえる。ただ、ニードル型ではノズル部の形状係数  $[C_n]$  がバツフル型のように定まっておらず、ニードルの形状寸法に応じて特性が異なる。

#### 2.4.3 歪検出端（ヘリウムマイクロメータ）の較正

歪検出端の較正を行うために原子炉内での使用条件を模擬した試験装置および測定装置を製作した。図 18 ~ 図 20 にこれらの歪検出端較正装置の構成を示す。図 18 および図 19 は歪検出端を照射キャプセルと同様の配置関係に設置するための構造物で、ヘリウムガス雰囲気とすることができる。また、歪検出端に供給されるガスの温度はヒータによって 300°C まで昇温できるようになっている。

バツフルおよびニードルの駆動は図 19 の微動送りの部分にマイクロメータのネジ部を利用して変位を与える方法を用い、較正試験中の温度変動に基因する変位の変動を小さくするため石英製の歪伝達棒を使用している。変位量は微動送りのマイクロメータ目盛 ( $\frac{1}{100} \text{ mm}/1 \text{ 目盛}$ ) でも測定できるが、バツフル型では全測定範囲が 0.1 ~ 0.15 mm 程度なので  $\frac{1}{1000} \text{ mm}/1 \text{ 目盛}$  のダイヤルゲージを併用できるようになっている。

図20は歪検出端へのガス供給系と歪測定のための圧力および温度測定系を1つのパネルに構成したものを示している。歪検出端へのガスは減圧弁および流量調節弁を経てオリフィス流量計で流量測定をしたのち供給される。較正装置に設置されたオリフィスの特性を図21に示す。オリフィスから取出された差圧は0~1000mmAqを0~50mVの電気信号に変換して指示記録される。

温度および圧力は歪検出端1個分を測定記録できるようになっておりバツフル型とニードル型は切換えて使用するので同時測定はできない。温度および圧力も切換えて測定できるようになっており、温度については1個の指示記録計でノズル部およびオリフィス部の切換、圧力(1)については $(P_s - P_a)$ と $P_s$ の切換圧力(2)については $(P_n - P_a)$ 、 $P_n$ 、 $P_a$ が切換えとなる。指示記録計は流量、温度、圧力ともミリボルト設定器を介して偏差を測定する方式を採用している。

67M-28J用の歪検出端は前節で述べた諸特性を参考にして設計されたが、実際には照射時期の関係で特性試験と較正試験が時期的に重複し特性試験の結果を28J用歪検出端の仕様にとり入れることができない部分も生じた。図17は67M-28J用歪検出端の構造図である。図17でオリフィスの径はニードル型が0.72mmφ、バツフル型が0.95mmφとなっており少し孔径が大きすぎ、変位〔h〕の小さいところの測定精度が悪いという欠点が生じたが、それ以外の特性については充分満足できるものとなっている。

図22および図23は67M-28J用歪検出端の較正曲線である。図22はバツフル型の場合で、温度補正をしたのちプロットしたものである。データはかなりバラツキしており充分満足できる状態にはないが較正試験に用意された機器の精度から考えてこれ以上望むのは当時は無理であった。データのバラツキの原因と考えられるものは下記の2点である。

- (1) 歪検出端内部に挿入されている熱電対の先端が壁に接触すると供給ガスの温度を正確に指示できない恐れがある。
- (2) 試験時に変位〔h〕を変えるとガス流量が変わりガス温度も変化する。ガス温度が変わると熱膨張による歪が生じ、人為的に与えた変位と判別をつけにくくなる。

図23はニードル型の較正曲線で較正試験の方法はバツフル型と同様である。しかし、ニードル型では測定感度が20ないし30μとなっているため上述の原因によるデータのバラツキは問題とはなっていない。

表9 パワフル型歪検出端圧損計算値

へリウム流量 $L/min$	0.2						0.35						0.5					
	30	50	70	100	150	200	30	50	70	100	150	200	30	50	70	100	150	200
変位 $\mu$	1480																	
$P_1 - P_s$ mmH <sub>2</sub> O	5.29																	
$P_s - P_n$ mmH <sub>2</sub> O	0.6																	
* $P_n - P_a$ mmH <sub>2</sub> O	351.2	261.9	197.6	95.2	66	0.7	1076	802.4	605.3	291.5	20.3	2.2	2197	1638	1236	595.2	41.3	4.5
$P_a - P_0$ mmH <sub>2</sub> O	3.7																	
$P_1 - P_0$ mmH <sub>2</sub> O	408.4	319.1	254.8	158.5	69.5	64.2	1188	914.4	717.3	403.5	128.0	114.2	2358	1799	1397	756.4	202.5	165.7
$(P_s - P_n) / (P_n - P_a)$	0.00171	0.00229	0.00304	0.0063	0.091	0.857	0.00177	0.00237	0.00314	0.0065	0.0936	0.863	0.00177	0.00238	0.00316	0.0066	0.0944	0.867

\* 計算時に用いたC<sub>n</sub>の値は図16より下記のような値をとった。

h	C <sub>n</sub>
30 (4)	0.59
50	0.405
70	0.315
100	0.34
150	0.86
200	1.96

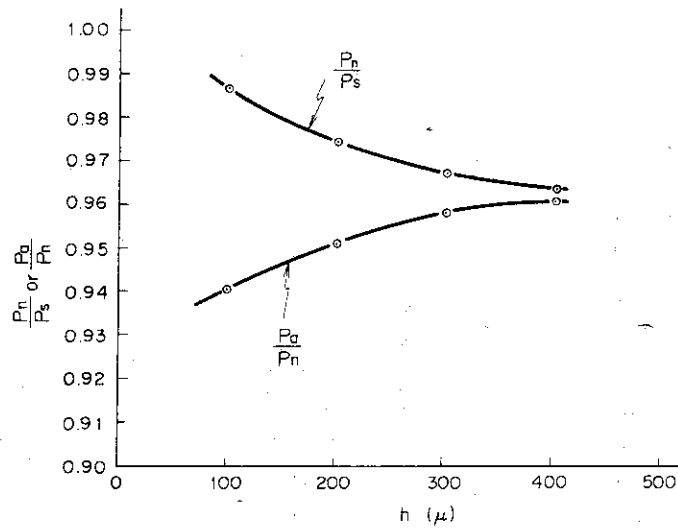


図15 低圧型成立条件に関するデータ

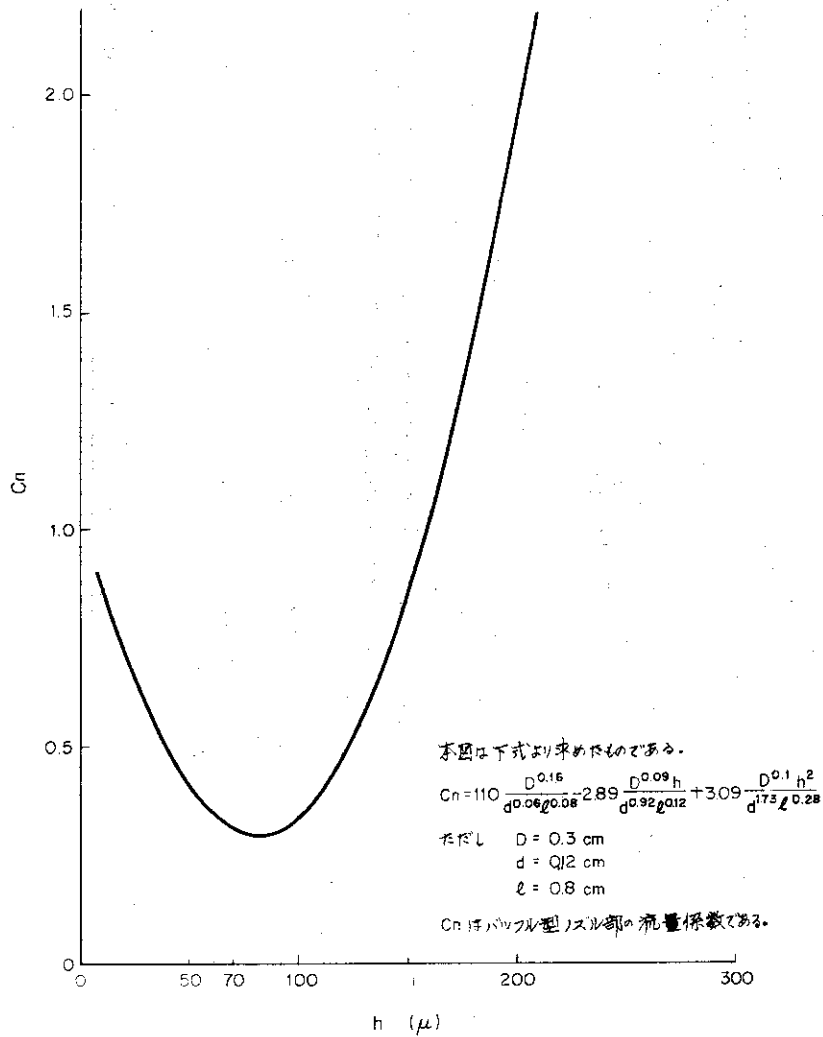
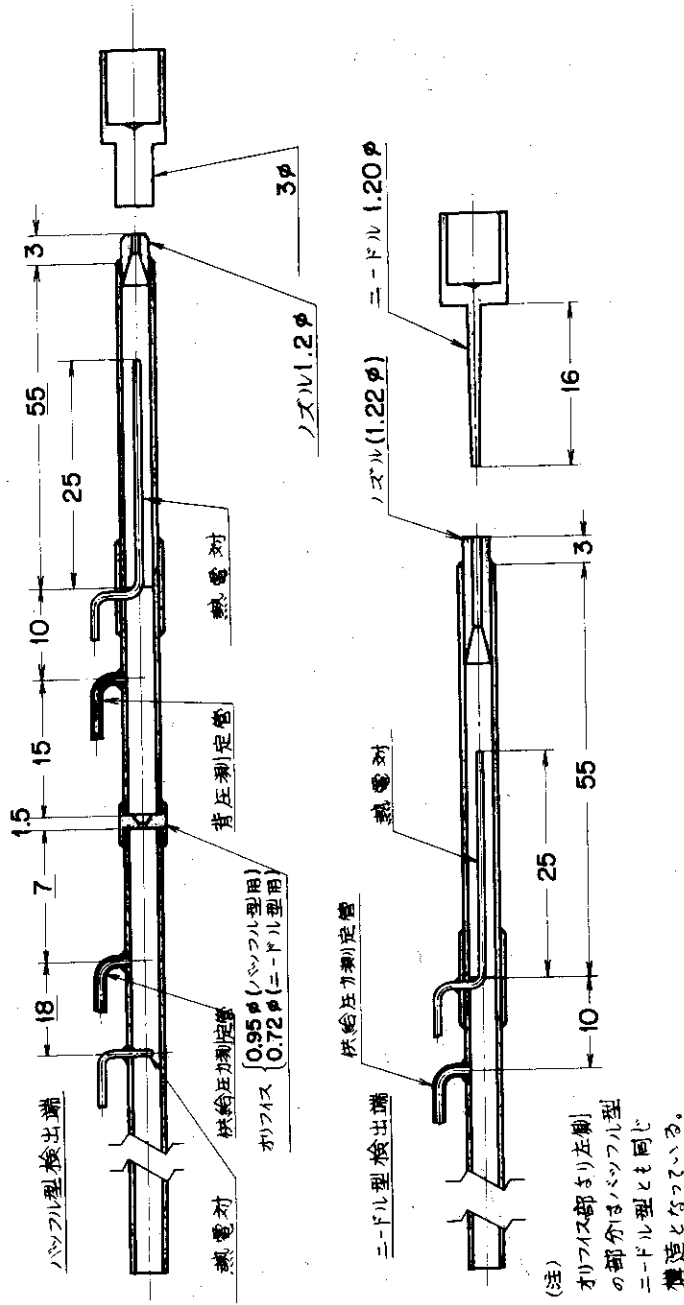


図16 ヘリウムマイクロメータノズル部流量係数  $C_n$





カ17図 ヘリウム・マイクロメータ検出端構造図 (67M-28J用)



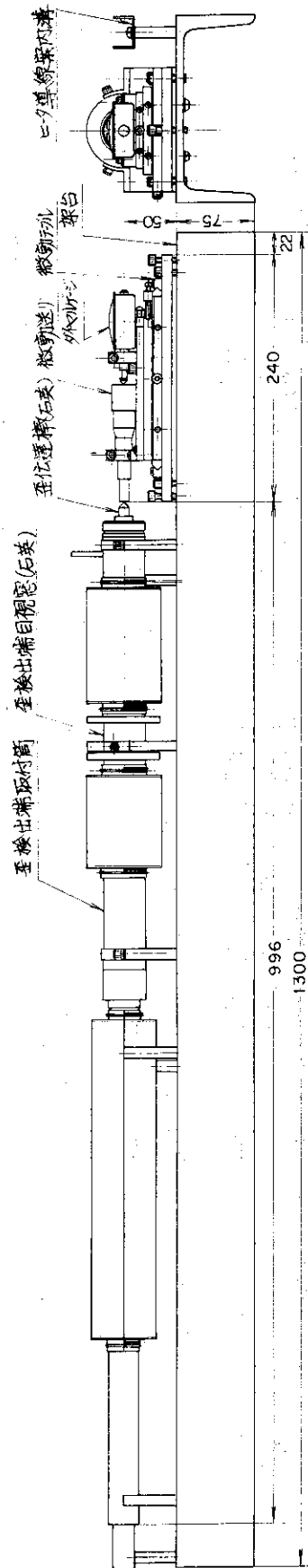
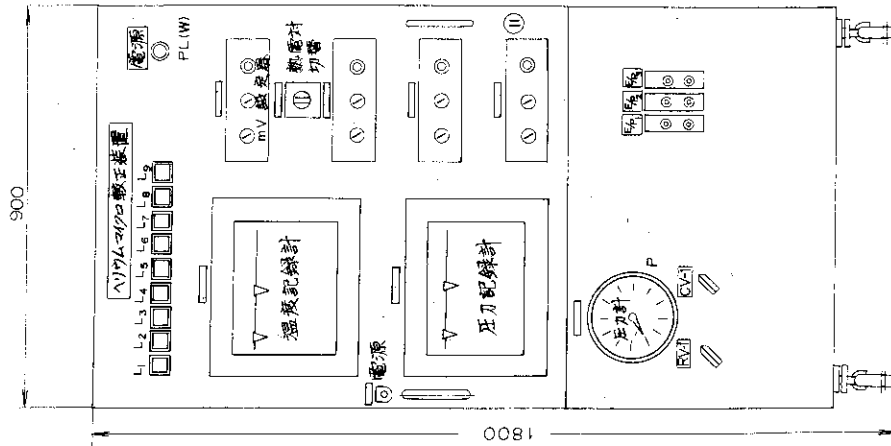
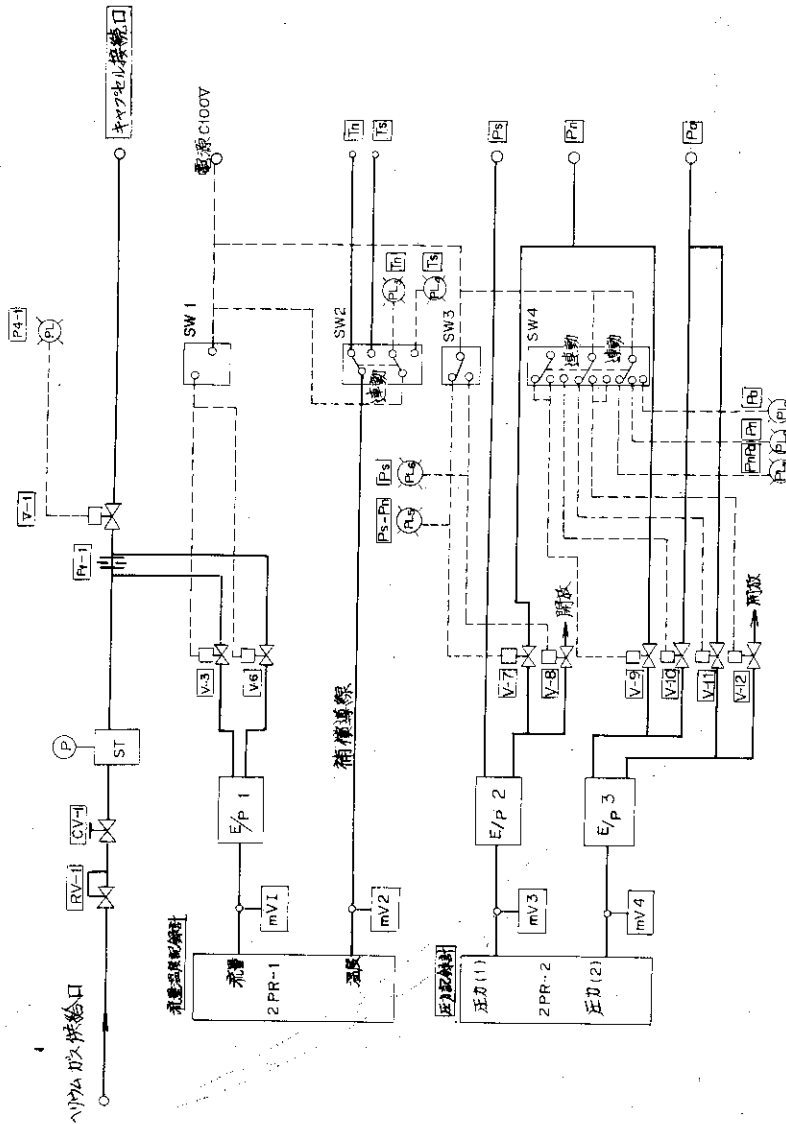


図 19 歪檢出端較正装置構成図(2)



パネル前面図



記号	名称	型式	数量	備考
2PR-1, 2	校正装置	2PR-FER-4000	2台	
mV1-4	mV 電圧器	I-8160/4	4台	
E/P1-3	四電流変換器	TP-202	3台	東京理科大学
V1-12	電磁弁	126 EI	12台	小倉洋行
SW1, 3, 4	切替スイッチ	長型切替スイッチ	3台	
SW 2	"	IML-438	1台	
RV-1	減圧弁	2302-002	1台	焼野野野野
ST	サージスタック	3B	1台	SUS-2T
P	圧力計	2-05 Kg/cm <sup>2</sup>	1台	長野野野野
PI-1, 2	オリフィス	3φ/min/100mm <sup>2</sup>	2台	長野野野野
CV-1	手動調節弁	1335 G 4Y	1台	HOKE
PL	表示ランプ			

図20 校正装置構成図

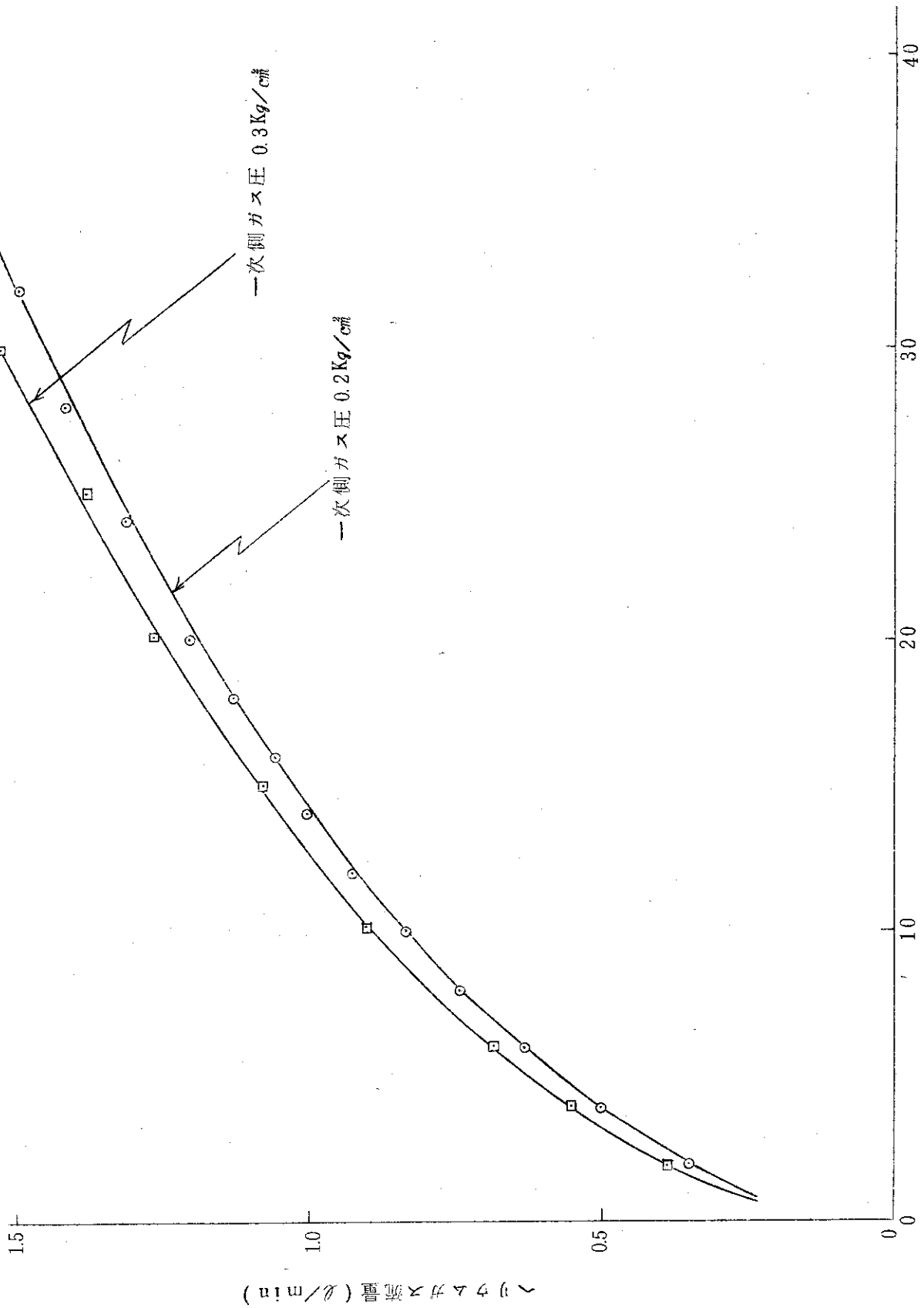


図 21 至検出端較正装置流量計 (オリフィス I) 較正曲線

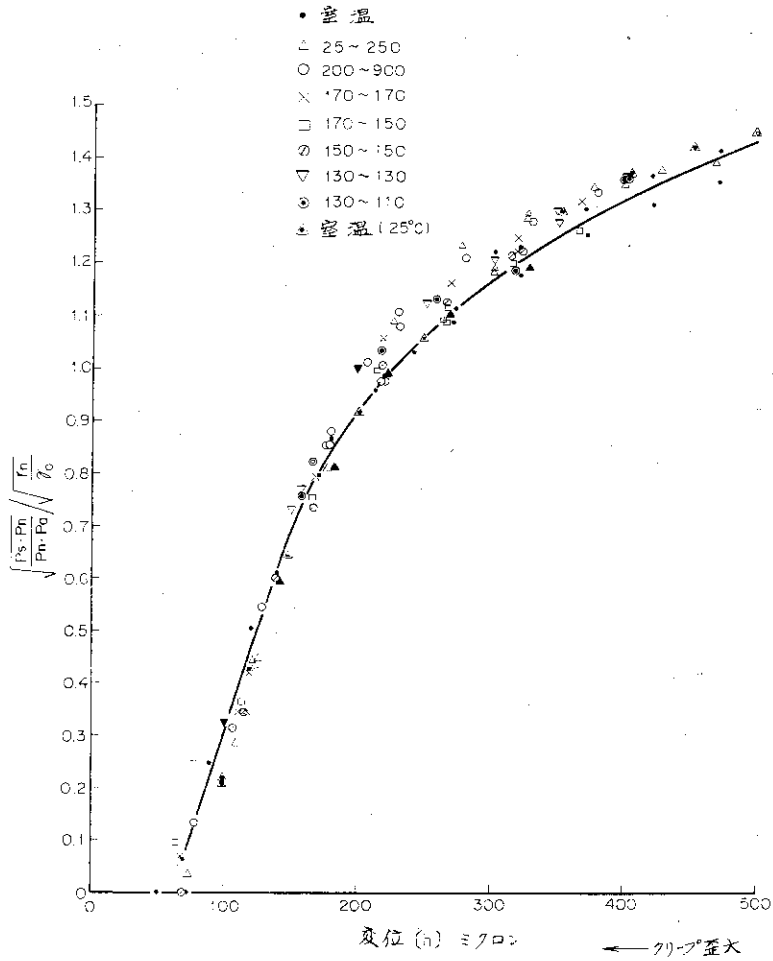


図22 バブル型歪検出端較正曲線(67M-28J)

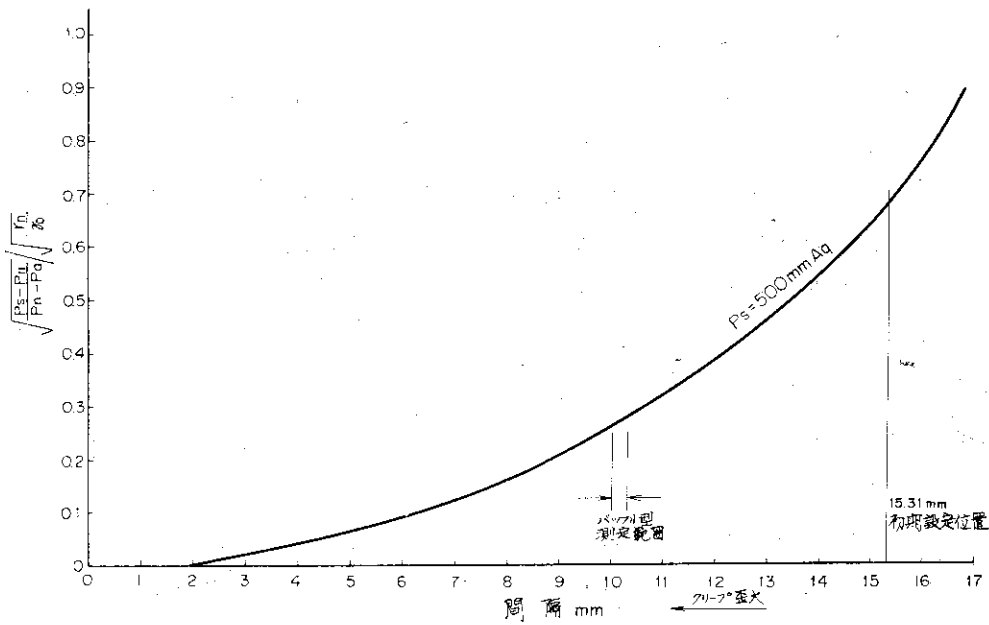


図23 ワ이어型歪検出端較正曲線(67M-28J)

### 3. 荷重装置

荷重装置はインパイル・クリープキャプセル内に装着された試料へガス圧を用いて荷重を加えるためのものである。加圧のためのガスにはヘリウムガスを用いる。荷重装置の構成を図24～図26に示す。

荷重装置の性能は次のようになっている。

- (1) 最大加圧ガス圧力  $50 \text{ Kg/cm}^2$
- (2) 加圧ガスの許容圧力変動量  $\pm 0.5 \%$  以下
- (3) 加圧ガス圧力は自動制御できるものとする。
- (4) 加圧ガス圧力は手動でも設定できるものとする。

#### 3.1 荷重装置の仕様

荷重装置の設計製作にあたりメーカーに提示した仕様書を以下に示す。

##### 荷重装置仕様書

#### (1) 目的

本荷重装置はインパイルクリープキャプセル内に組みこまれた試験片にガス圧を用いて荷重を加えるためのものである。

#### (2) 設計条件

- 2-1 加圧用ガス(ヘリウムガス)は常時は流動させないこと。
- 2-2 加圧用ガスの圧力は  $3 \text{ Kg/cm}^2 \text{ G}$  より  $50 \text{ Kg/cm}^2 \text{ G}$  までの範囲で任意の値に設定しうること。
- 2-3 加圧ガスの圧力は自動制御すること。  
自動制御した場合の圧力変動は加圧ガス室のガス温度の変動が  $\pm 5 \text{ C/mm}$  のとき、設定圧力の  $\pm 0.5 \%$  以下とすること。
- 2-4 加圧ガスの圧力は手動制御もおこなえること。
- 2-5 10,000時間程度の長時間連続運転に耐えるものであること。
- 2-6 キャプセル内の加圧ガス室の容積はベローの伸縮による変動を考慮して定めること。
- 2-7 キャプセルよりタンクIまでの配管系は長さ約20mと考えること。
- 2-8 高压ガス容器として関連法規に基づく定期検査の適用をうけない内容積、圧力を有するものとする。

#### (3) 装置の構造

参考図1に装置のフローシートを示す。

主要機器の仕様は下記の項目を満足すること。

##### 3-1 タンクI

タンクIの容積は下記の事項を考慮して設計すること。

加圧ガスの放出、供給に際して加圧ガス圧力は設定圧の  $\pm 0.5 \%$  をこえないこと。

キャプセル内のガス温度変動及び室温の変動に基づくガスの供給排出がひんばんに生じないようにすること。

ガスが密封された状態では室温の変動に基づく圧力変動が生ずるのでタンク I は一定温度に保持されるよう配慮すること。

タンク内ガス圧測定用の精密級圧力指示計を設けること。

### 3-2 P/E変換器(空気圧→電圧変換器) I及びII

精度  $\pm 0.2\%$ 以下

再現性  $0.1\%$ 以下

フルスパン応答時間  $0.3$ 秒以下

P/E変換器 I の信号電圧出力の範囲はガス圧力設定器、圧力調節計及び圧力記録計の仕様と適合させること。

P/E変換器 II の信号出力範囲はキャプセル内ガス圧、圧力記録計の仕様と適合させること。

### 3-3 ガス圧力設定器

設定圧力範囲は  $3 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ とする。

精度は  $0.1\%$ 以上とすること。この精度は電源電圧の変動が  $\pm 10\%$ ある場合でも保持しうること。

圧力調節計へは偏差信号(P/E変換器出力と圧力設定値の差)を伝送する方式とすること。

設定は手動で容易におこなえと同時に誤操作等により設定値の移動が生じないようにロックできるようにすること。

### 3-4 圧力調節計

圧力偏差信号をうけ偏差をゼロにする作動方式を用いること。

タンク I へのガスの供給及び排出は、本調節計からの信号に基づいておこなわれるが、信号をオンオフとするか、PID調節による連続信号とするかは弁MV-1, MV-2の仕様に合わせて定めること。

ガスの供給排出を電磁弁を用いてオンオフ制御する場合は弁の作動及び休止の時間間隔を0から60秒の間で任意に設定できるようタイマーを設けること。

### 3-5 圧力記録計

2ペン書方式とすること。

記録はインク等の滲まない方法によること。

記録紙巾は250mmとすること。

記録紙送り速度は  $1 \text{ mm/HR}$ ,  $6 \text{ mm/HR}$ ,  $30 \text{ mm/HR}$ ,  $300 \text{ mm/HR}$ の4段切替としレバーまたは押ボタンにより容易に切替できること。

レンジ及びレンジ切替はP/E変換器出力を考慮して定めること。

各ペン毎に上下限各1点の警報接点を設けること。

### 3-6 タンク II

設定圧力は最大  $50 \text{ kg/cm}^2$ とすること。

タンク I へのガス供給はMV-1を開くことによっておこなわれるがガスの過供給を防ぐため供給ガスの圧力はタンク II において適正値に制御されるようにす



ること。

供給ガスの圧力は  $3 \text{ kg/cm}^2$  から  $50 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$  の範囲で任意の値に設定できること。

タンクⅡ内の圧力は設計値の±2%以下に制御しうること。

ガス圧力制御用機器としてはプレッシャースイッチと電磁弁MV-3を使用するようになっているが精度の面で問題があれば別方式を用いてもよい。

プレッシャースイッチには上下限各1点の警報接点をもうけること。

タンク内ガス圧測定用の精密級圧力指示計を設けること。

### 3-6 積算型デジタルクロック (2台)

全実験時間を示す0~9999.9時間のデジタルクロック1台及び炉停止時間などを知るためのトリップ型デジタルクロック0~999.9時間のもの1台を設けること。

精度は±5HR/10000HR以上のこと。

## (4) 設計製作に関する注意事項

4-1 タンクⅠよりの排気ガスは放射化している可能性があるので、原子炉炉まわりに設けられている排気系へ接続できるようにすること。

4-2 キャプセルを原子炉よりとり出す場合はキャプセル内の放射化したガスを排気系へパージできるように考慮すること。

4-3 ガス量が  $6 \text{ m}^3 \text{ NTP}$  のポンペ1本で1000時間以上の連続運転ができるよう配慮すること。

またポンペ取替時に加圧ガス圧力が所定の精度内に保持できるようにすること。

4-4 弁MV-1, MV-2が閉の状態にあるときの弁座を通る洩れ量はできる限り少ないものとする。もし洩れ量の問題となる場合は空気作動弁など、洩れの少ないものを用いること。

4-5 逆止弁は微小流量に対して流量を妨げない構造のものを用いること。

MV-1, MV-2の洩れ量に問題がないときは、逆止弁RV-1, RV-2を省略してもよい。

## (5) 試験検査

下記項目について試験検査をおこなうこと。

### 5-1 単品検査

- (1) 外観及び寸法検査
- (2) MV-1, MV-2の漏洩検査
- (3) 逆止弁の漏洩検査
- (4) プレッシャースイッチ作動検査
- (5) 圧力指示計精度較正試験
- (6) ガス圧力設定器出力較正試験
- (7) P/E変換器較正試験
- (8) 圧力記録計較正試験

5-2 完成検査

- (1) 外観及び寸法検査
- (2) ヘリウムリーク検査
- (3) 設計条件3.に対する試験
- (4) 警報回路チェック

3.2 荷重装置の設計的検討

(1) 圧力変動吸収用タンク・Iの容積

キャプセル内温度の変化に伴う加圧ガスの膨張収縮に基因する圧力変動をキャプセル外部にタンク・Iを設けて吸収する。タンク・Iは、また、加圧ガス圧力調節時のガス供給排出に伴う圧力のオーバーシュートを防ぐための容量を提供することにもなっている。

キャプセル内加圧室の容積は約 $50\text{ cm}^3$ と小さく、例えばキャプセル内ガス温度が $400\text{ C}$ 変化したとして、加圧ガス圧力を温度上昇前の値に保持するためには約 $30\text{ cm}^3$  (NTP)のガスを加圧室外に排出すればよい。

密封された系において約 $30\text{ cm}^3$ のガスの増加を系の圧力変動5%におさえるものとする。と $6.000\text{ cm}^3$ 程度の容積があればよいので、タンク・Iの容量に関して6ℓを上限としてできる限り小さくなるよう配慮する。

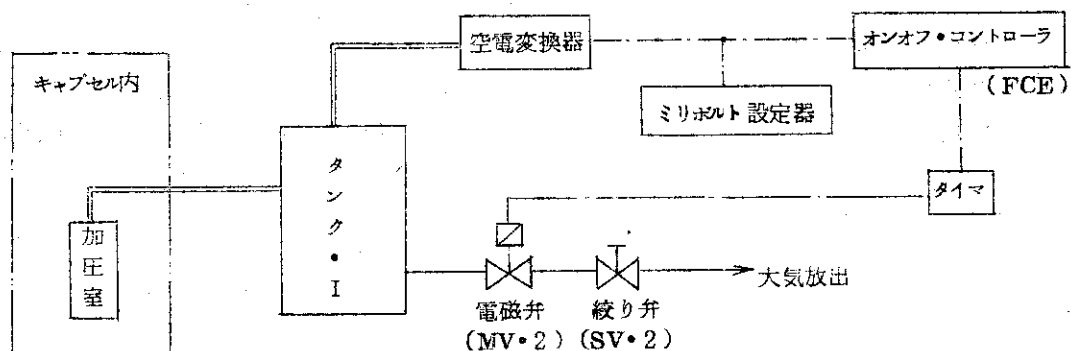
一方、密封された状態のタンク・I内の圧力は室温の変動によっても変化する。室温変化に基因するタンク・I内の圧力変動はタンク容積には無関係で0.5%の圧力変動は約 $1.4\text{ C}$ のガス温度変化によって生ずる。J M T R炉室の温度変動は $1.4\text{ C}$ より大きいのでガスを密封して荷重をかける場合にはタンク・Iの容積を6ℓ以上にする必要は認められない。

一方、タンク・I内へガスを供給排出することによって加圧ガス圧力を一定値に自動制御する場合は、弁の1回の開閉操作で供給あるいは排出しうる最小ガス量とタンク・Iの容積との関係が問題となる。タンク・Iの容積を6ℓ、ガス圧力を $3\text{ kg/cm}^2$ とした場合、1回の弁操作で0.1%の圧力調節を行うとすれば $18\text{ cm}^3$  (NTP)を制御できればよいことになる。

系の構成から考えてガスの供給時にはタンク・IIの圧力をあらかじめ調節しておくことができるので、ガス排出時の方が弁操作に関しては厳しい条件となる。

(2) ガス供給・排出用弁のサイズ

加圧ガス圧力の自動制御を行う場合、条件の厳しい排気側について検討することとし下図のような制御機構を想定する。



タンク・Iの圧力が設定値より高くなった場合、その差圧分の信号は空電変換器およびミロボトル設定器を介してオンオフ・コントローラ(FCE)に伝えられる。

FCEからは電磁弁(MV・2)を開とする操作信号が連続して出されるが、途中でタイマを設けて間欠的操作信号に変換する。電磁弁の開閉時間はタイマにより開時間を0.1~6 sec, 閉時間を3~60 sec, の範囲で任意の値に設定できるものとする。電磁弁の最小開時間は0.1 sec, ということになるが、実際の電磁弁の開時間は弁を閉じるための時間おくれがあると考えられるので、最小開時間を0.5 sec, と考える。絞り弁にはHOKE社製1335G2Y型ニードル弁(Cv=0.028)を使用し、 $\frac{1}{10}$ まで絞り可能と考えると(Cv)min=0.0028となる。

上記の条件において電磁弁1回の操作で排出されるガス量[Q]は(26)式で表される。

$$Q = 220 (Cv)_{min} \frac{P_1}{\sqrt{r \cdot t}} \times 0.5 \text{ sec} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ただし  $P_2 \leq \frac{P_1}{2}$   
 $P_1$  はタンク・I内のガス圧力  $Kg/cm^2$   
 $P_2$  は大気圧  $\doteq 1 Kg/cm^2$  Abs  
 $r$  はヘリウムガスの比重量  $= 0.18 Kg/m^3$   
 $t$  はガス温度  $= 293^\circ K$  (於室温)

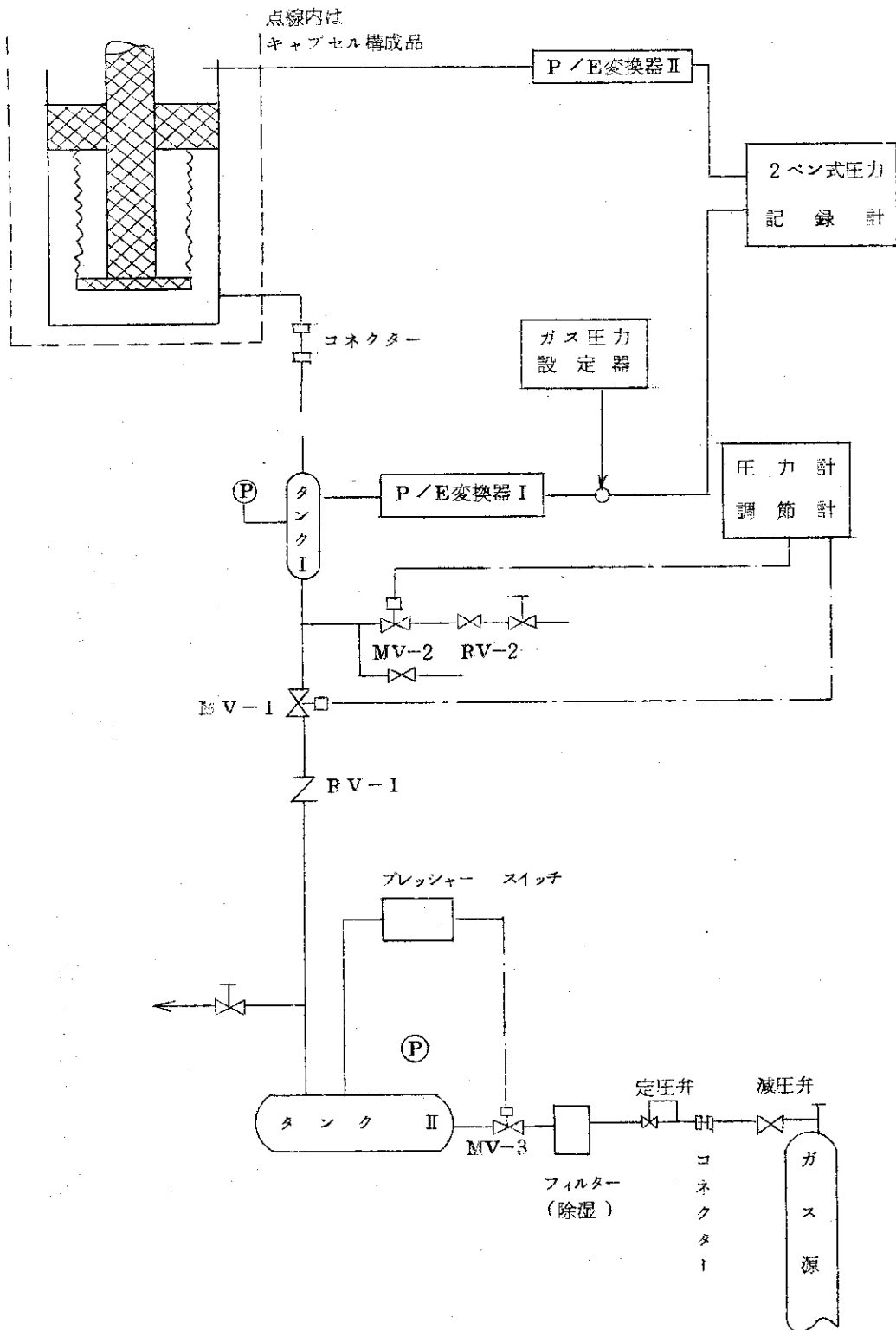
$$\Delta G = 220 \times 0.0028 \frac{P_1}{\sqrt{0.18 \times 293}} \times \frac{0.5}{3600} = 0.117 P_1 \times 10^4$$

従って、 $P_1 = 2 Kg/cm^2$  abs のときが  $(\Delta G)_{min}$  で  $0.234 cm^3$  のガスが放出されることになる。

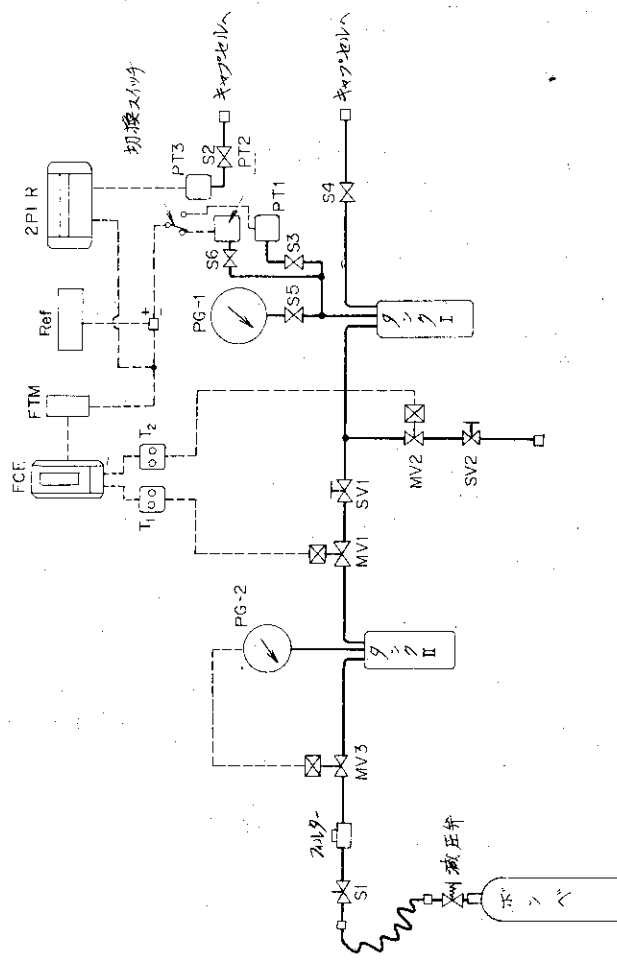
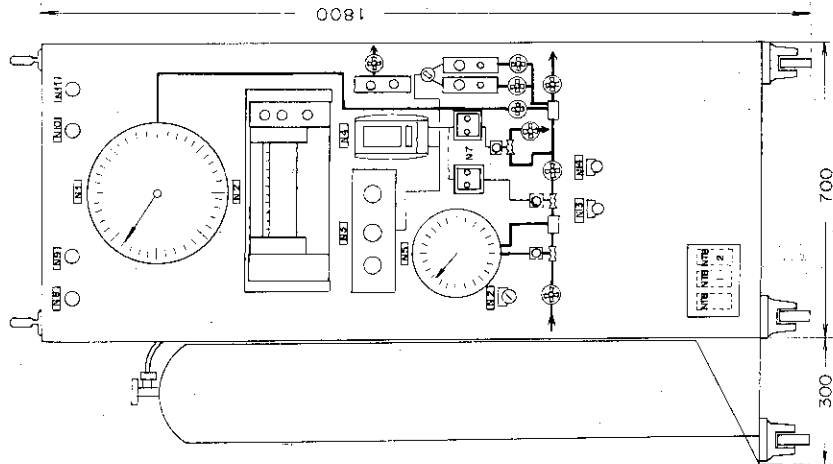
タンク・Iの容量を手動設定の場合と同じく6ℓと考えると  $(\Delta G)_{min}$  は  $9.8 \times 10^{-2} \%$  の圧力変化を生じさせることになり、制御動作としては必要充分以上の感度を有するものとなる。

図24~図26に荷重装置の構成を示す。

荷重装置は67M-28Jの荷重用として使用され所期の性能をもって稼働している。



参考図1 荷重装置フローシート



記号	名称
S	ストップ弁
MV	電磁弁
SV	エードル弁
PG	圧力指示計
PT	空電変換器
Ref	ミリボルト設定器
2PIR	2ペ.指示記録計
FTM	直流増幅器
FCE	コントローラ
T	タイマ

図 24 荷重装置構成図

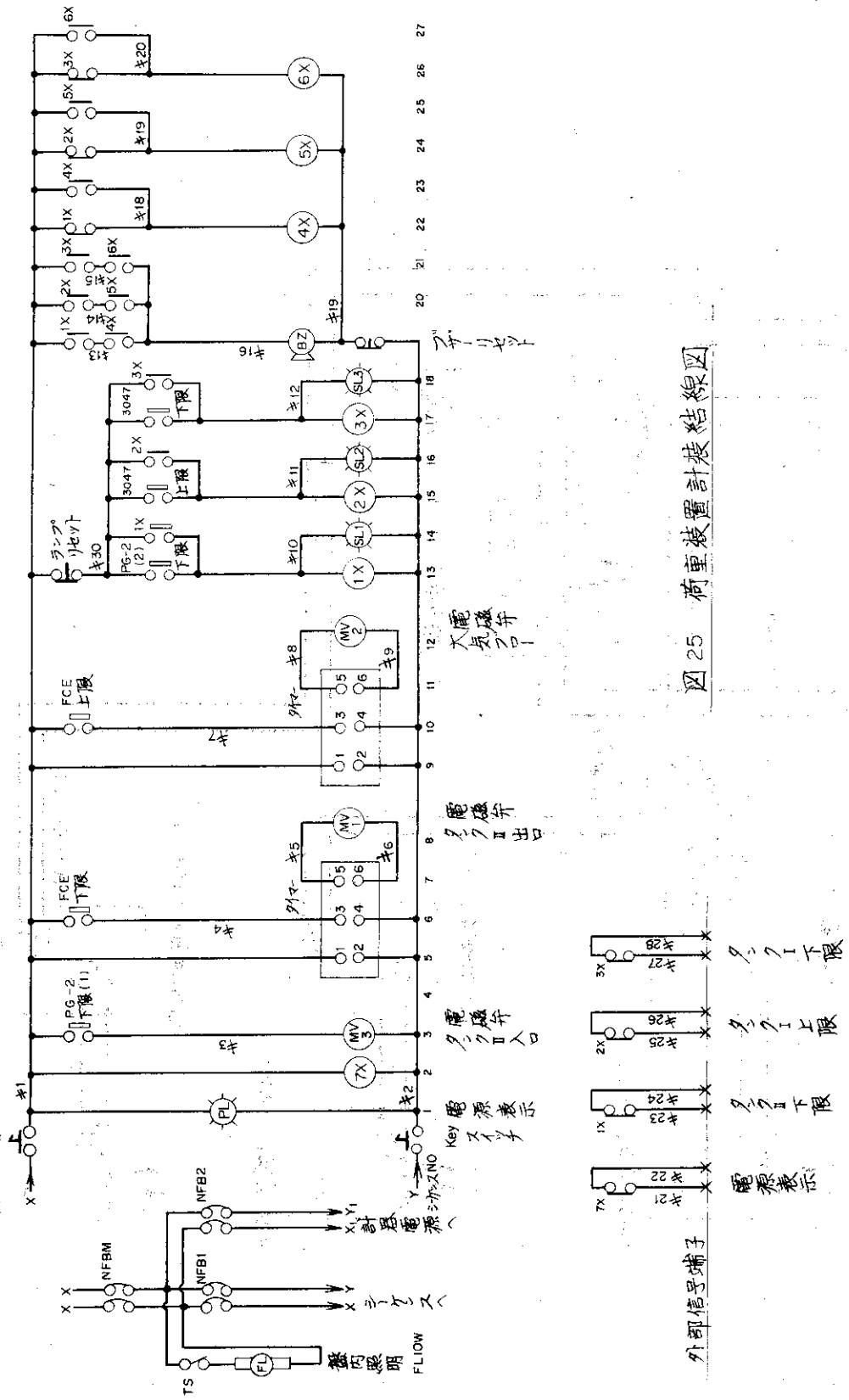


図 25 荷重装置計装結線図

外部信号端子

- 電源表示
- タクトI下限
- タクトI上限
- タクトII下限
- タクトII入口
- タクトII出口
- 電磁弁
- 入電磁弁

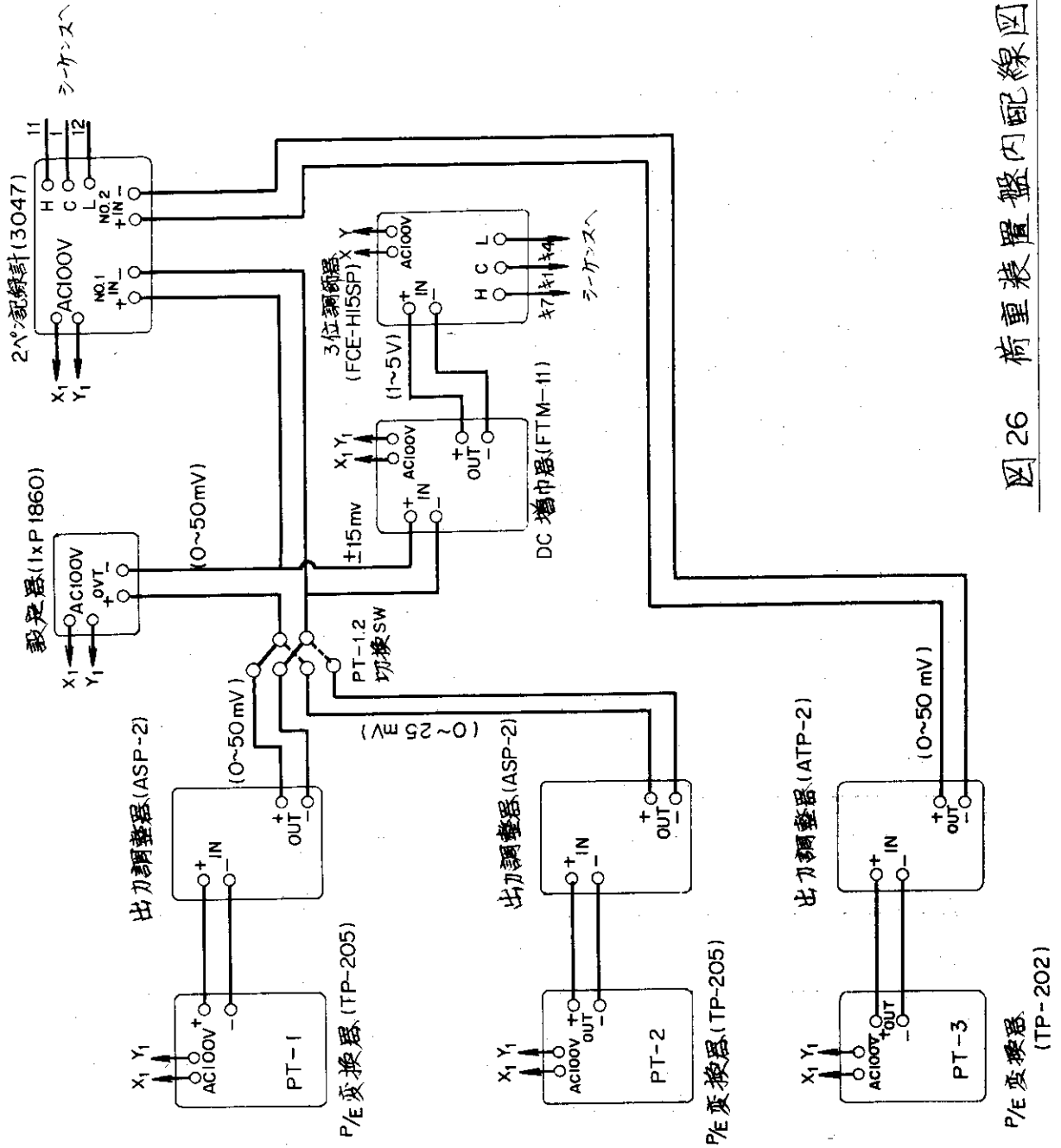


図 26 荷重装置盤内配線図

4. 歪測定装置

歪測定装置はインパイル・クリープキャプセル内に装着されたヘリウムマイクロメータ検出端と接続して照射試験中に試料の伸びを測定するためのものである。

4.1 歪測定装置の仕様

歪測定装置の設計製作にあたりメーカーに提示した仕様書を以下に示す。

歪測定装置仕様書

(1) 目的

本装置はJ M T Rに於いて照射するインパイルクリープキャプセルに装置の一部（歪検出端）を組み込み、原子炉運転中自動または手動にて試験片のクリープ歪を測定するものである。

(2) 設計条件

2-1 測定方法はヘリウムマイクロメータ（エアマイクロメータのエアの代りにヘリウムを使用する）によることとする。

2-2 ヘリウムマイクロメータの種類と本数は下記の通りであり、これらの検出端は67M-28Jキャプセルに内蔵される。

○パッフル型ヘリウムマイクロメータ……………1本

○ニードル型ヘリウムマイクロメータ……………1本

2-3 ヘリウムマイクロメータの測定範囲と感度は下記の通りとする。ただしこれは歪記録計記録巾上の最小測定目盛とする。（目標値）

マイクロメータ種類	測定範囲	感度
パッフル型	0～200μ	0.5μ
ニードル型	0～10mm	20μ

2-4 ヘリウムガスの温度は下記のとおりとする。

○ガス入口温度……………室温

○ガス出口温度範囲……………室温～600℃（目盛）

2-5 ヘリウムマイクロメータ検出端から測定装置までの距離は約15mと考えること。

2-6 ヘリウムマイクロメータ検出端の形状、寸法等は67M-28Jキャプセルと予盾のないようにすること。

2-7 パッフル型とニードル型は同時測定できること。

(3) 構造

本装置のフローシートを参考図2に示す。

ヘリウムマイクロメータ検出端は、インパイルクリープキャプセル（67M-28J）内に組込まれる。

試験片のクリープ歪は、試験片の一端に取付られたパッフルおよびニードルの変位としてヘリウムマイクロメータ背圧として検出し、検知し、これをベローズを介して差動トランスに伝え、電気信号に変換したのち測定記録する。



歪測定装置は上記のヘリウムマイクロメータ検出端のほか、背圧測定部、歪・温度記録計、ガス給排気管等より構成される。

3-1 ヘリウムマイクロメータ検出端

バツフル型1本、ニードル型1本とするが、形状寸法等は68M-28Jキャプセル、歪測定装置の他の構成部分等を考慮して設計すること。

3-2 背圧測定部

背圧測定部はベローズ、差動トランス、増巾回路等より構成される。仕様は他の機器との関連を考慮して定めること。

3-3 歪・温度記録計

本記録計は2ペン書とし、1ペンを歪記録、他の1ペンを温度記録に使用する。

(1) 数 量 (二式)

バツフル型……………一式

ニードル型……………一式

(2) レンジ (歪換算)

<input type="radio"/> バツフル型……………	$\left\{ \begin{array}{l} \text{クリープ歪} \quad 10, 50, 100 \mu \\ \text{温 度} \quad C \cdot A \quad T/C \text{で} 200, 400, 600, 800 C \end{array} \right.$
<input type="radio"/> ニードル型……………	
	$\left\{ \begin{array}{l} \text{クリープ歪} \quad 1, 5, 10 \text{mm} \\ \text{温 度} \quad C \cdot A \quad T/C \text{で} 200, 400, 600, 800 C \end{array} \right.$

手動により簡単に切換ができること。

(3) チャートスピード

バツフル型…………… 30mm/H, 6mm/H, 1mm/H

ニードル型…………… 30mm/H, 6mm/H, 1mm/H

手動により簡単に切換ができること。

(4) 入 力

バツフル型…………… ミリボルト

ニードル型…………… ミリボルト

(5) 記録方式

バツフル型…………… ペン書 (2ペン)

ニードル型…………… ペン書 (2ペン)

インクのにじまない方法とすること。

(6) 記録巾

バツフル型…………… 200mm

ニードル型…………… 200mm

(7) 精 度

バツフル型……………  $\pm 0.5\%$ 以内

ニードル型……………  $\pm 0.5\%$ 以内

精度はゆらぎ等を含めた総合精度とする。

## (8) 警報回路

○バツフル型……………上下限接点，設定数 2 種

○ニードル型……………上下限接点，設定数 2 種

警報回路のランプ表示方法等は協議して定める。

## (9) その他

バツフル型，ニードル型とも記録目盛表示は，温度および歪を併記すること。

レンジを切換えた場合は目盛板を差しかえできるようにすること。

## (4) 性能検査に必要な機器

6-2, ②項の性能検査に必要な機器は装置製作者側で用意すること。このため特に見積内で製作する場合は，本装置の納入品の一部とすること。

## (5) 設計注意事項

5-1 本装置は約 10,000 時間の連続運転に耐えること。

5-2 装置設計のさいできるだけコンパクトになるよう配慮すること。

## (6) 試験検査

## 6-1 単体検査

① 外観および寸法検査

② 歪・温度記録計較正試験

③ その他必要と認められる検査

## 6-2 完成検査

① 外観および寸法検査

② 歪測定系性能検査

クリープ歪を人為的に与え，ガス圧力，温度をパラメータとして歪測定系の較正曲線をとること。

③ 機能試験

歪・温度記録計作動試験

アラーム回路検査

④ その他必要と認められる検査

## 4.2 歪測定装置の設計的検討

歪測定装置各機器の仕様は歪検出端との対応を考慮して定める必要がある。そこで，歪検出端予備実験での経験および将来における歪検出端の改良に対する余裕などを考えて下記の条件を設定した。

(1) 歪検出端へのカスの供給量を  $0 \sim 10 \text{ l/min (NTP)}$  とする。(2) 歪検出端直前におけるカスの静圧を  $0 \sim 1000 \text{ mmAqG}$  とする。(3) 歪検出端各部における差圧，背圧の最大値を  $1000 \text{ mmAq}$  とする。

そのほか，圧力および温度の記録時の精度，感度をよくするため記録はすべて偏差記録方式とする。また，記録計のレンジは  $1 \text{ mV}$  および  $5 \text{ mV/フルスケール}$  とし，10 段切替で最大  $0 \sim 50 \text{ mV}$  まで指示記録できるものとする。

上記の設計条件に基づいて設計された歪測定装置の構成を図 2.7～図 2.9 に示す。各部の

機能は次の通りである。

#### 4.2.1 ヘリウムガスの供給

J M T R 炉まわりにおけるヘリウムガスの供給圧力は約  $10 \text{ kg/cm}^2$  なので、これを1次減圧弁で  $1 \sim 5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、2次減圧弁で  $0 \sim 1 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$  に調整し、歪検出端へは  $0 \sim 10 \text{ l/min}$  (NTP) の流量を安定に供給することができるものとする。

#### 4.2.2 カス流量の測定

歪検出端に供給するカス流量を  $0 \sim 10 \text{ l/min}$  とするには小流量部分の測定精度をよくするために2個のオリフィスを選択使用する必要がある。オリフィスの差圧および元圧は空電変換器、ミリボルト設定器を介して  $\text{mV}$  の信号が指示記録され、流量は較正曲線より求められる。

図30に歪測定装置製作時に採取された較正曲線を示す。また、流量較正時に基準流量計として用いられた石けん膜流量計の構造を図31に示す。

#### 4.2.3 歪検出端よりの圧力測定

歪検出端よりの圧力は空電変換器で  $2 \sim 10 \text{ mA}$  の電流に変換され、さらに出力調整器により  $0 \sim 50 \text{ mV DC}$  の電圧に変換される。 $0 \sim 50 \text{ mV DC}$  に変換された圧力はミリボルト設定器の設定値と比較され、その偏差を  $1 \text{ mV}$  または  $5 \text{ mV}$  のレンジで記録する。

$5 \text{ mV}$  レンジでは10段階に自動レンジ切換ができるようになっており、長期間にわたりクリープ歪の自動記録を行うことができる。実際の記録巾としては上・下とも自動切換に支障が生じないよう10%巾のマージンが設けてある。

#### 4.2.4 歪検出端カス温度の測定

歪検出端のカス温度はカスの流量に応じて著るしく変化する。このため歪測定の場合と同様、自動的にレンジ切換ができる偏差記録方式を採用した。歪検出端に挿入されている熱電対は SUS-304 シース、 $\text{MgO}$  絶縁のシース型アルメル・クロメルである。

#### 4.2.5 歪検出端の切換

前述のごとく、本装置ではニードル型とパッフル型の歪検出端を切替える場合はカス供給管、圧力測定管、熱電対等を全部切替える必要があるので本装置ではこれらの切替を1個のスイッチによりワンタッチで行えるようになっている。

#### 4.2.6 試験時間の測定および破断時間の測定

試験時間測定のためにデジタルタイマ2個を設ける。1個は積算時間数、1個は各試験毎に使えるようなトリップ型とする。

積算用のものにはクリープ試験終了時の試験片破断により停止するような機構が装置されている。破断検出端としては電気的接触により信号がでるような機構を採用した。

#### 4.2.7 警 報

歪検出端への供給カス圧力の上限および各記録計の上下限より下記の動作をとれるようになっている。

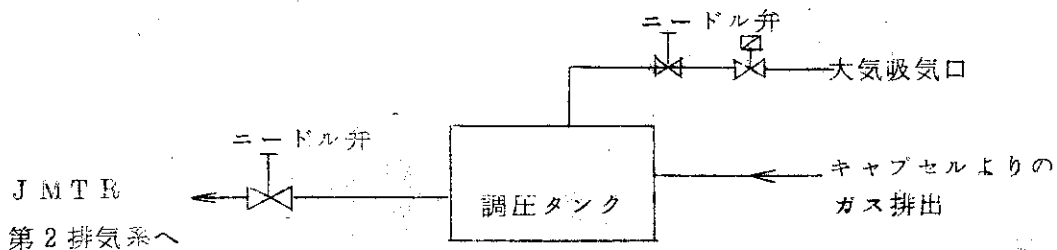
- (1) 異常が発生するとランプが点灯しブザーが鳴る。
- (2) ブザーは手動リセットできる。
- (3) ランプは異常が解除されなければ消すことができない。異常が解除されてもランプは

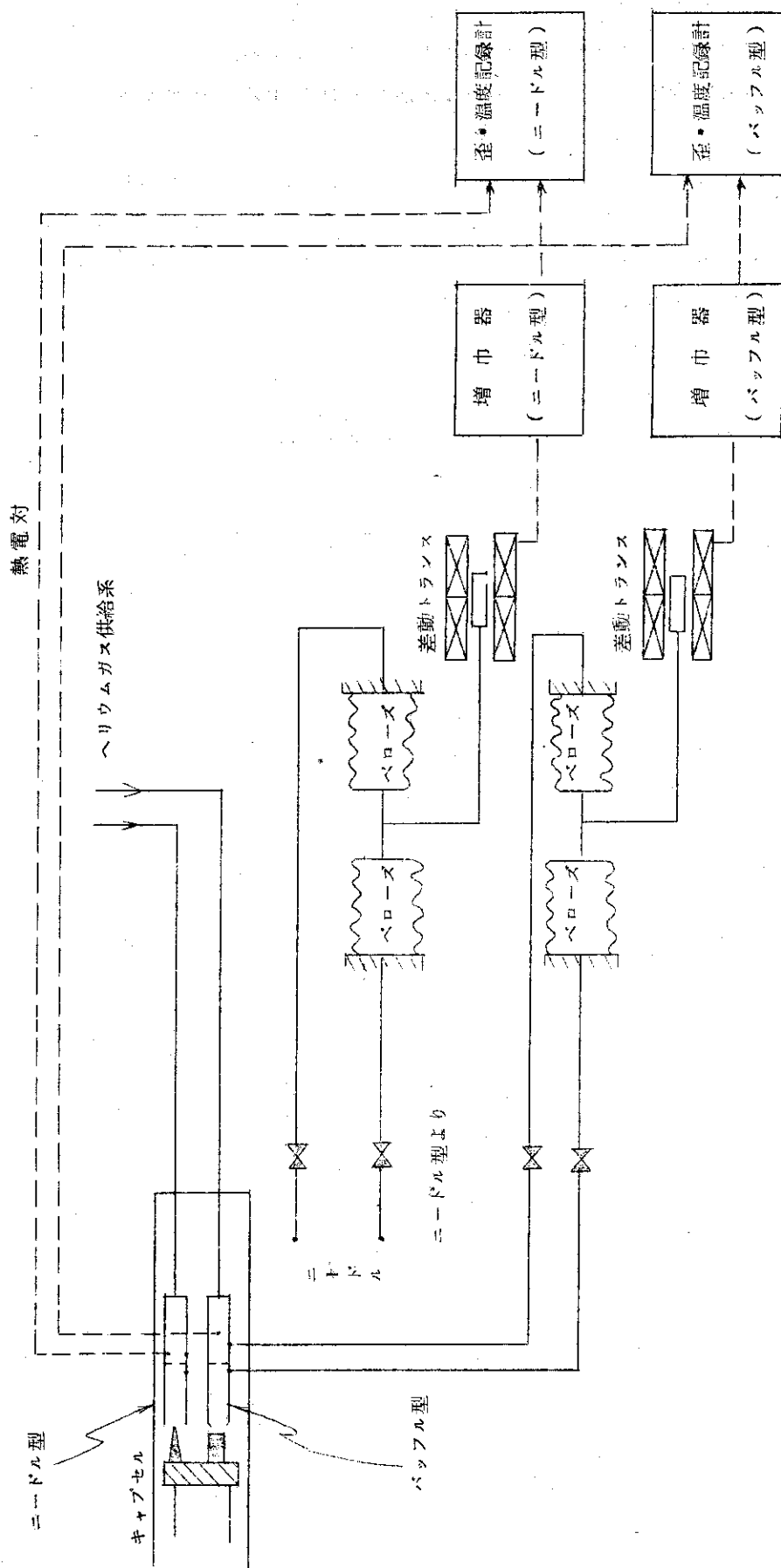
消灯せず、手動リセットにより消すことができる。

- (4) 異常の中央集中監視できるよう外部信号をとり出せるようにする。
- (5) 異常が連続して起った場合でも、上記(1)~(4)は矛盾なく作動するようにする。

#### 4.3 歪測定装置の実用性

実際に67M-28Jと接続して歪測定装置を使用した結果、歪測定装置は初期の目標通りの性能を有することが分った。しかしながら、ガスを排出するためのJMT R第2排気系の圧力が不安定であるため、キャプセル内の雰囲気圧力が大きく変動する現象がみられた。対策としては第2排気系が負圧である点を利用して下図のような機構による圧力の手動調節を行い、ガス排出部の圧力変動を安定させることができた。





参考図 2 歪測定装置フロースキーム

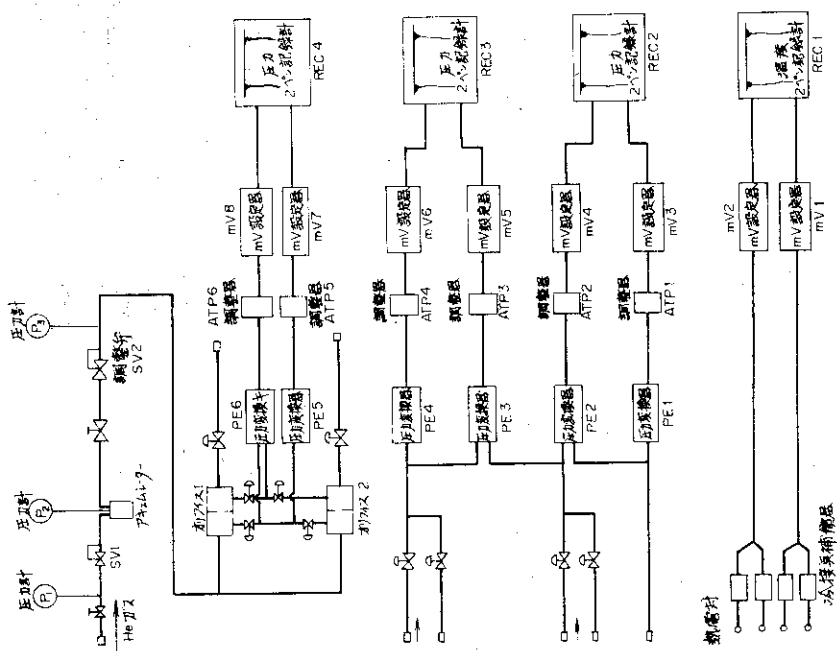
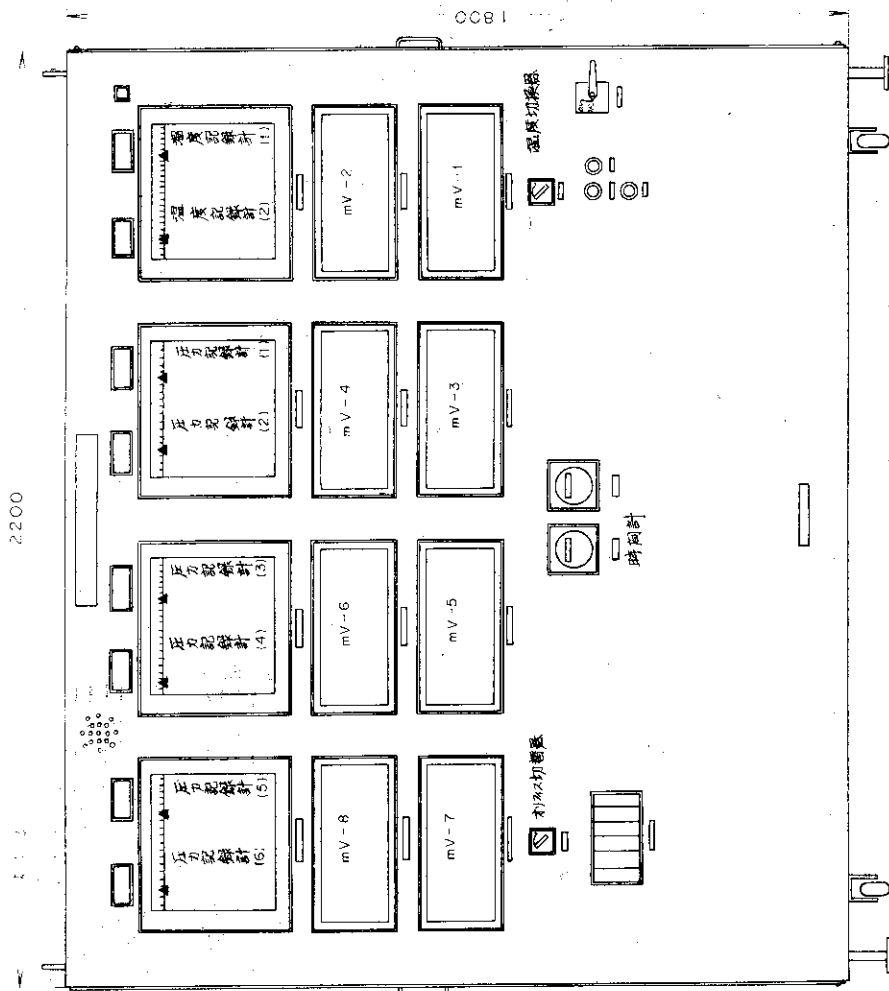


图 27 至测定装置构成图 (1)

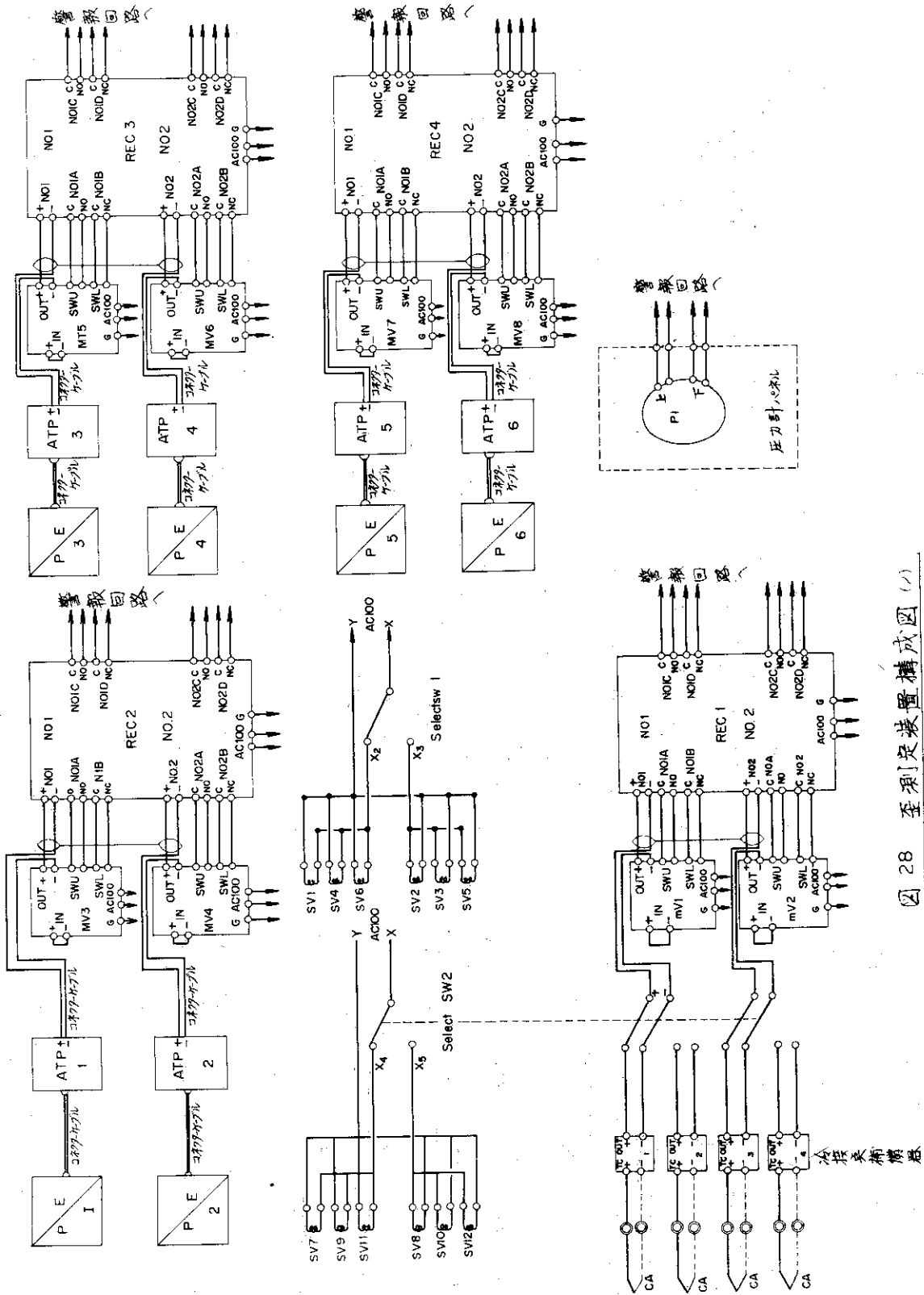


図 28 至須定装置構成図 (1)

全塔英術腐恩

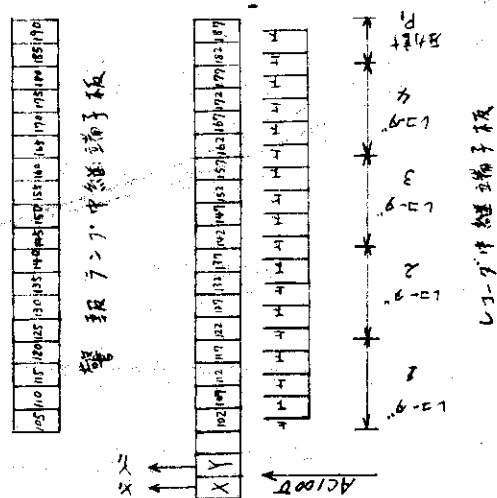
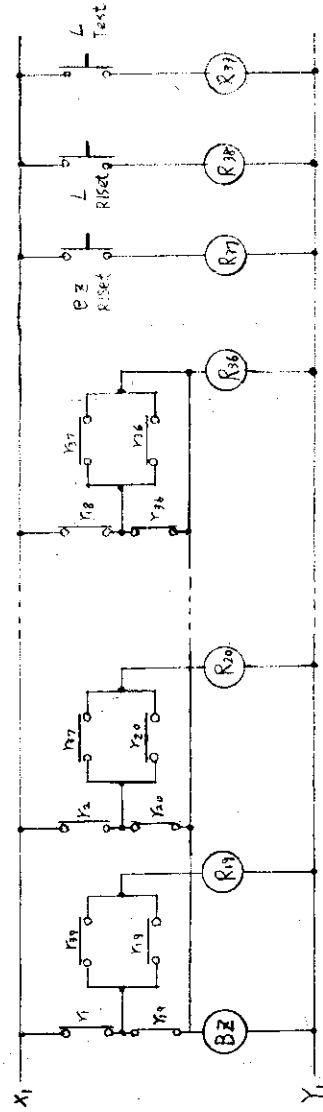
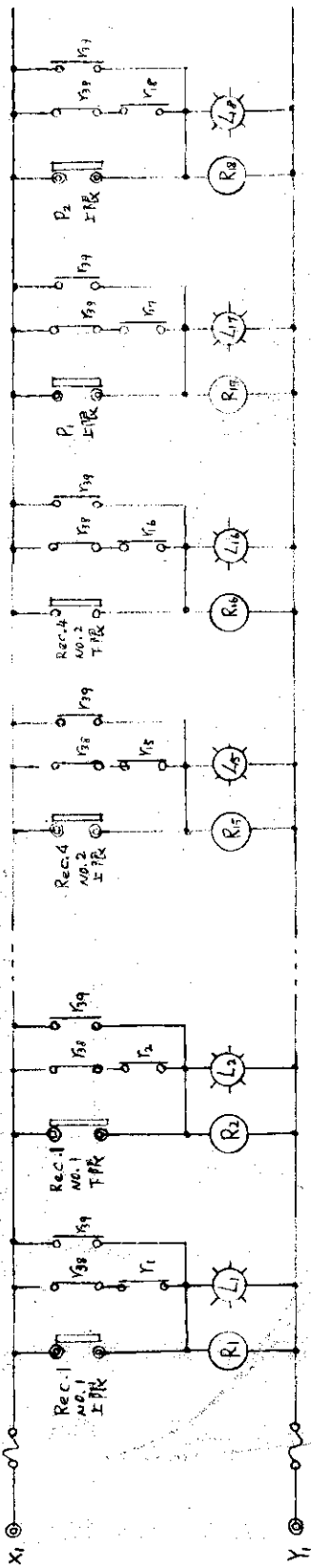
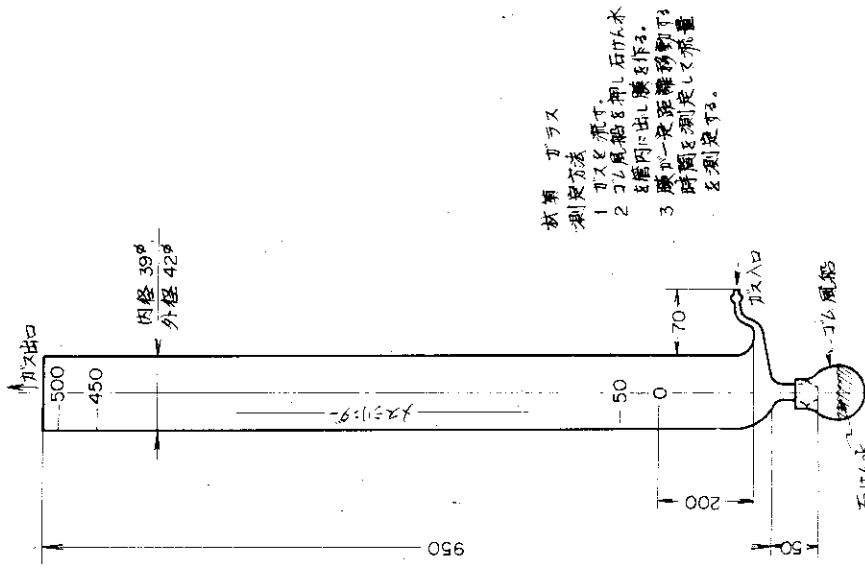


図 29 制御装置構成図 (3)





装置 ガラス  
測定方法  
1 ガスを流す  
2 ガス風船を押し石けん水  
と管内に出し液を作る。  
3 液が一定距離移動する  
時間を測定して流量  
を測定する。

図31 石けん液流量計

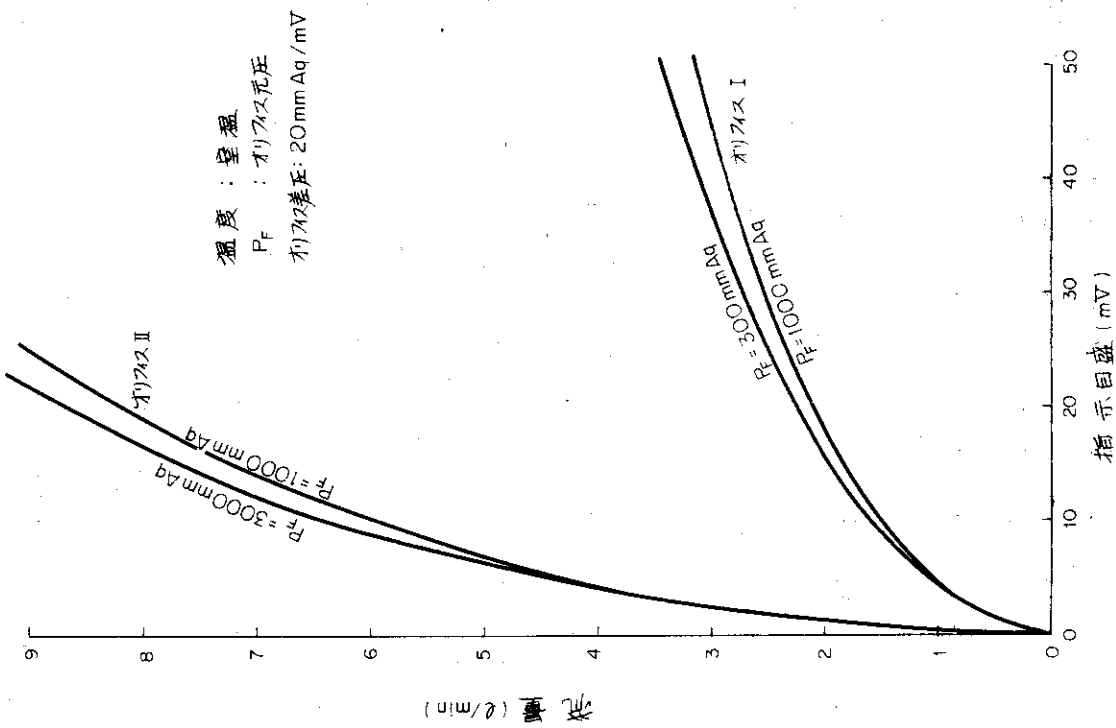


図30 至測定装置ガス流量計校正曲線

## 5. 温度制御装置

温度制御装置はインパイルクリープキャプセル内に装着された3個の温度制御用ヒータの出力を調節することによりクリープ試験片の温度を設定値に保持するためのものである。

### 5.1 装置の仕様

温度制御装置の設計・製作にあたり、メーカーに提示した仕様書を下に示す。

#### 温度制御装置仕様書

##### (1) 設計条件

- 1-1 試片温度はアルメルクロメル熱電対で検出する。
- 1-2 キャプセルに組みこまれるヒータ数は3個とする。
- 1-3 各ヒータ出力の調節は独立した制御系によること。
- 1-4 各ヒータの最大出力は3KW(AC200V)とする。
- 1-5 試片温度の設定範囲は200~800℃とし任意の値に設定できること。
- 1-6 10,000時間程度の長期連続運転に耐えるものとする。
- 1-7 キャプセルとの関連において下記の調節がおこなえるよう配慮すること。ヒータの雰囲気温度が±5℃/HRで変動する状態において試片の温度変動は±5℃以下とすること。

ヒータの雰囲気温度が±10℃/minで変動する状態において試片の温度変動は±3℃以下(設定値が300~600℃のとき)及び±4℃以下(設定値が600~800℃のとき)とすること。

##### (2) 装置の構造

参考図・3に装置のフローシートを示す。

主要機器の仕様は下記の項目を満足すること。

##### 2-1 温度設定器(3台)

200~800℃の範囲で任意の温度に設定できること。

精度は±0.5℃以内とすること。この精度は電源電圧の変動が±10%ある場合でも保持しうること。

設定は手動で容易におこなえると同時に誤操作等により設定値の移動が生じないようにロックできるようにすること。

##### 2-2 温度調節計

温度調節計は実測値と設定値との偏差信号を用い温度偏差をゼロとする作動方式を用いること。

温度調節計及び電圧調整機等の型式はとくに指定しないが、一般にクリープ試験機において使用されているものを参考とし長期間の連続運転に充分耐えるものとする。

##### 2-3 2ペン式温度偏差記録計(1台)

実測値と設定値との温度偏差を記録する。

記録紙巾は250mmとし、偏差のゼロ点は各ペン毎に記録巾上の任意の点に設定できること。

目盛巾は  $1\text{mV}/250\text{mm}$ ,  $5\text{mV}/250\text{mm}$  とし目盛は読み取りやすいものとする  
こと。上記目盛巾に対応したレンジ切替ができること。

記録紙送り速度は  $1\text{mm}/\text{HR}$ ,  $6\text{mm}/\text{HR}$ ,  $30\text{mm}/\text{HR}$ ,  $300\text{mm}/\text{HR}$  の4段切  
替としレバー式で容易に操作できること。

各ペン毎に上限1点, 下限1点の警報接点を設けること。接点は記録巾上の任意  
の点に設定できること。

#### 2-4 温度記録計(1台)

6打点色別打点方式とする。

打点間隔は5秒程度

記録紙送り速度は  $30\text{mm}/\text{HR}$ ,  $60\text{mm}/\text{HR}$ ,  $300\text{mm}/\text{HR}$  の3段切替とする。

上限2段, 1点選別, 設定数2種の警報接点を設けること。

上限接点により警報と同時にヒータ断の作動をおこなえること。

記録紙巾は  $150\text{mm}$  とする。

目盛は温度表示とし  $0\sim 400\text{C}$ ,  $0\sim 800\text{C}$  の2段切替とすること。

切替はレバーで容易におこなえること。

#### 2-5 コントロールアダプター

出力電圧調整機の出力電圧を  $50\sim 100\%$  の範囲で手動調節できるものとするこ  
と。

手動調節用のつまみはロックできること。

### (3) 試験検査

下記の項目について試験検査をおこなうこと。

#### 3-1 単品検査

- (1) 外観及び寸法検査
- (2) 温度設定器較正試験
- (3) 温度記録計較正試験 (P/E変換器較正試験を含む)
- (4) コントロールアダプター較正試験

#### 3-2 完成検査

- (1) 外観及び寸法検査
- (2) 性能検査

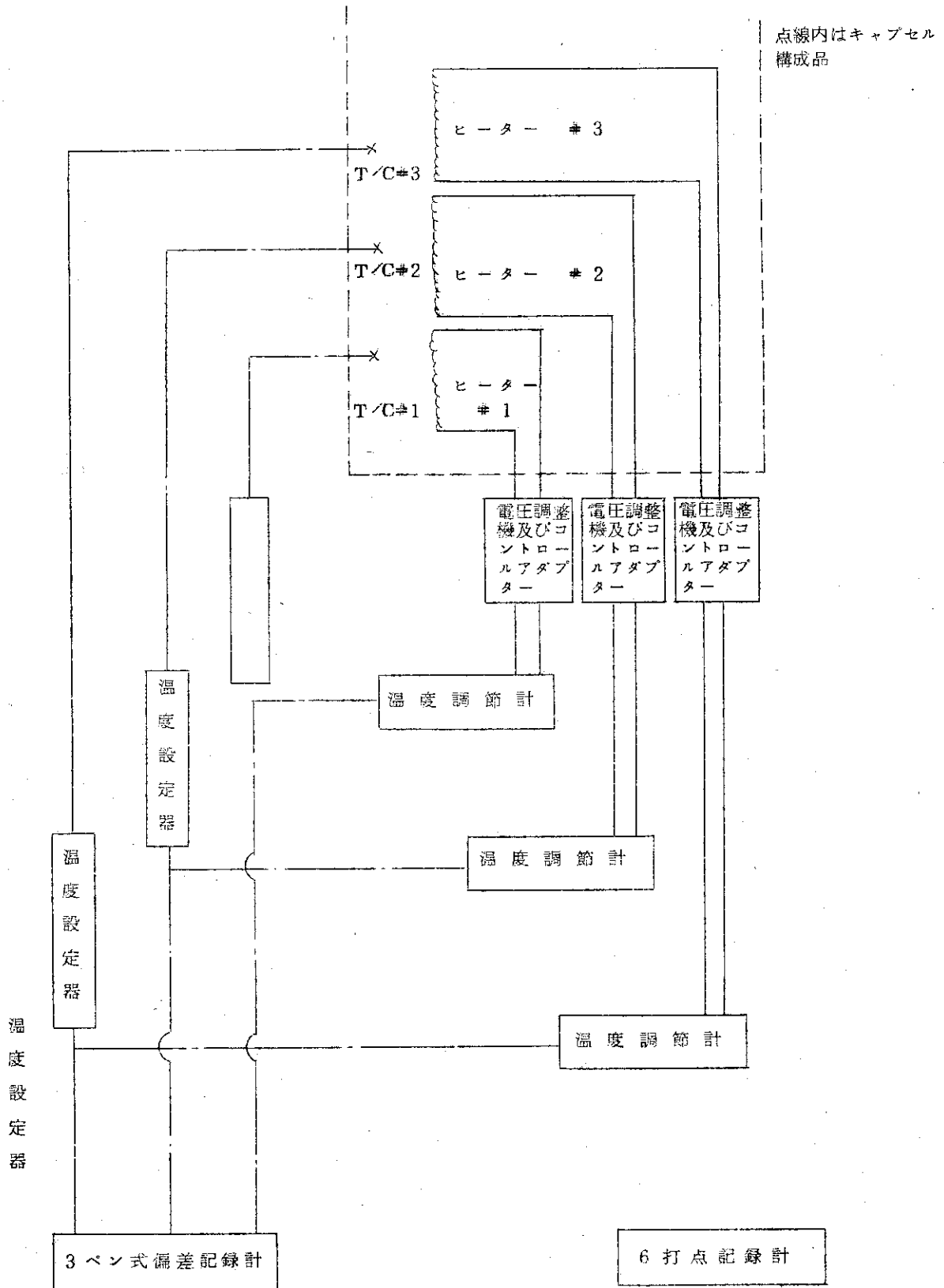
模擬キャプセル(原研より貸与)を使用し設計条件1-7に関する性能試験を  
おこなうこと。

### 5.2 温度制御装置の性能

温度制御装置について, 設計的には特記することは殆んどないので詳細は割愛する。

装置の性能としては試料部に3個のヒータが接して装着されており各々別個に自動制御を行  
った場合に干渉が生ずるかどうかが問題と考えられた。

実際に67M-28Jで温度制御を行った結果は定常時において  $\pm 1\text{C}$  以下に試料温度を保  
持できることが分った。



参考図 3 温度制御装置フローシート

- |                    |                |
|--------------------|----------------|
| 1: クリブ試験 - 温度      | 24: NO.1 調節器   |
| 2: 制御装置 (4-4 プレート) | 25: NO.2 調節器   |
| 3: キヤパシタ電圧表示用      | 26: NO.3 調節器   |
| 4: プレート (2枚)       | 27: プランリセット    |
| 5: NO.1 温度高        | 28: ランプリセット    |
| 6: NO.1 タップ        | 29: ランプリセット    |
| 7: NO.2 温度高        | 30: NO.1 ダンプ   |
| 8: NO.2 タップ        | 31: NO.2 ダンプ   |
| 9: NO.1 温度偏差上      | 32: NO.3 ダンプ   |
| 10: 同 上 下          | 33: バイパス       |
| 11: NO.2,3 温度偏差上   | 34: バイパス       |
| 12: 同 上 下          | 35: タイマ-A      |
| 13: 6打点温度記録計       | 36: タイマ-B      |
| 14: 2ペン偏差記録計       | 37: NO.1 出力SW  |
| 15: NO.2,3 信号切替    | 38: NO.2 出力SW  |
| 16: 電源 (緑色)        | 39: NO.3 出力SW  |
| 17: NO.1 mV 設定器    | 40: AC 100V SW |
| 18: NO.2 mV 設定器    | 41: ランプテスト     |
| 19: NO.3 mV 設定器    | 42: 上記名称に準ずる   |
| 20: 電源SW           | 特記以外ランプは全2色である |
| 21: NO.1 出力調整      | 43: NO.1       |
| 22: NO.2 同 上       | 44: NO.2       |
| 23: NO.3 同 上       | 45: NO.3       |

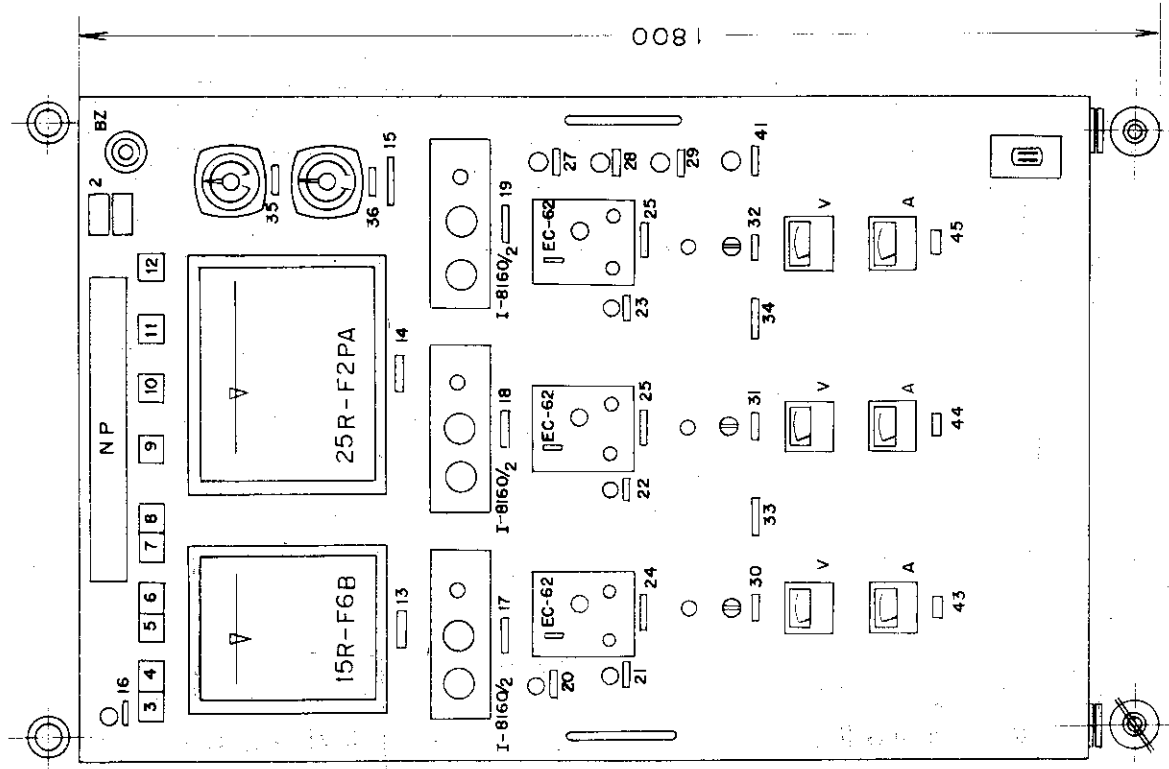


図 32 温度制御装置構成図(1)

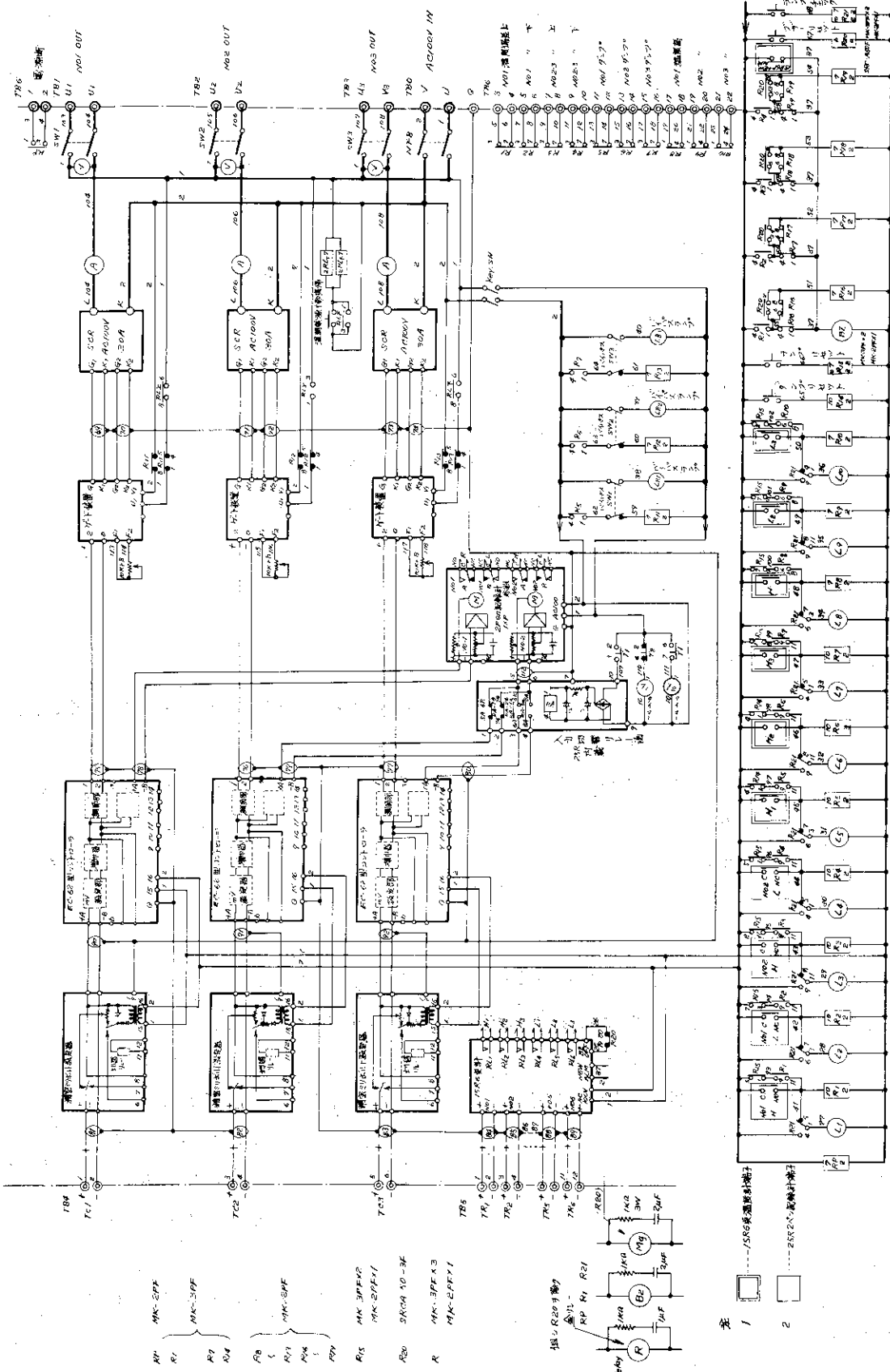


图 33 温度制御装置構造图 (2)

## 6. 照射試験

前章までインパイル・クリープキャプセルおよび装置について報告したが本章では67M-28Jの例について、照射計画、照射試験における装置の性能および運転実績などについて述べる。

### 6.1 照射試験計画

67M-28Jの照射試験計画の概要は下記の通りである。

- 照射孔 : M-11 42φ孔  
 照射サイクル : 第10から第15サイクルまで(6サイクル)  
 原子炉出力 : 第10～第11サイクルは定格熱出力30MW  
                   第12～第15サイクルは定格熱出力50MW  
 試験片材質 : SUS-32  
 試験片寸法 : ゲージ部 : 1×3mm×30ℓ  
 試験片温度 : 750℃  
 試験片応力 : 第10～第12サイクルは4kg/mm<sup>2</sup>  
                   第13サイクルは6kg/mm<sup>2</sup>  
                   第14～第15サイクルは8～12kg/mm<sup>2</sup>  
                   第15サイクル後半には試験片破断が生ずる応力とする。

原子炉停止中の試験条件は下記の通りとする。

- (1) 温度は制御ヒータを切り室温とする。
- (2) 前サイクルの応力条件を維持する。

### 6.2 照射実績

クリープ破断が第14サイクルにおいて生じたので実際の照射試験は1サイクル短かく、合計5サイクルで終了した。図34～図41に照射試験データを示す。

図34～図38までは各サイクルにおける試験片温度、応力および原子炉熱出力を示し、試験中の運転状況を知ることができる。

図39は第12サイクル以降第14サイクルのクリープ破断までのクリープ歪の測定値を示したものである。

図39におけるクリープ歪はニードル型歪検出端によって測定された。図40～図41は第12サイクルにおけるバブル型歪検出端によるクリープ歪測定データを示したものである。

本報告では装置の開発が主眼となっており、照射試料の提供および実験者は原研東海研材料研究室となっているのでクリープ・データそのものに対する討議は省略し、図34～図41に示したデータより試験が初期の目標通り実施しうることを実証するにとどめる。

図42は第12サイクル原子炉起動時における温度指示値を示したものである。試験片温度(T/C#4)についてみると設計時の計算値、すなわち表4の断面④、ノード61における638℃に対し、実測値は555℃となっており、構造が複雑な割にはよく一致していると考えたい。

図43は温度制御を行わない場合の試料温度の変動を示す例で約15℃の巾の変動が原子炉定格出力において生ずることを示している。

自動制御を行った場合には変動中設定値±0.6℃に制御することができる。

図44～図45はキャプセルの温度上昇に伴って生ずる熱膨張歪の測定値である。図44は原子炉出力上昇時のキャプセル全体の温度上昇によって生ずる熱膨張歪、図45は原子炉定格出力後、ヒータ投入によって生じた試験片部の熱膨張歪を示している。これらはニードル型歪検出端によって測定されたものである。

いずれの場合も計算による推定値とほぼ一致しており、ニードル型歪検出端の測定範囲からみて問題となるような誤差は生じないことが分った。

照射試験中の試料温度については温度制御の項で述べたように設定値±0.6℃の制御が行うことを確認したが、温度分布に関する性質については67M-28Jではとくにデータを採取しなかつた。このため、ここでは特に第2号のインパイル・クリープキャプセル(70M-7A)の例をとりあげてみた。

図46は原子炉起動時にガンマ発熱によって試料部に生ずる温度分布を3本の熱電対による測温点について表したものである。原子炉出力50MWにおいて22.5℃の温度差が生ずることが示されている。また、ヒータを投入して650℃に制御した場合に必要なヒータ出力を各段毎に示した。これで見るとガンマ発熱のみの場合は中央部の温度が低いにもかかわらず必要となる電力は中央部が上・下の半分程度となっており両端のヒータの効果が非常に大きいことを示している。

図47は上・下のヒータのみを使って試料両端部の温度を揃えた場合の温度分布を示したものである。上・下のヒータの効果が大きいにもかかわらず中央部の温度低下もかなり大きく、上・下のヒータのみでは試料温度を均一にするのは困難であることが分る。

一方、1段ヒータの場合の性質を調べるため3段ヒータの上中下とも同一出力に揃えた場合のデータを採取した。図48は原子炉出力ゼロの場合、図49は原子炉出力50MWの場合を示したものである。ガンマ発熱のみの凹型温度分布(図46参照)と図48の1段ヒータ相の凸型温度分布が相殺され、図49にみられるように炉出力50MWの場合には比較的溫度差の小さい分布が得られるが、試料全長にわたって均一温度を得るのはやはり困難と思われる。

以上の実験的検討結果から、3段ヒータによる試料温度制御法は温度分布の点から最適のものと考えられる。原子炉出力50MW時に3点の温度を均一にしたときの各熱電対間の温度分布については炉外実験におけるように詳細に測定することはできない。しかしながら、ガンマ発熱とヒータによる上述の相殺効果から考えて、図9に示した炉外試験における温度分布より均一な分布を期待することができる。



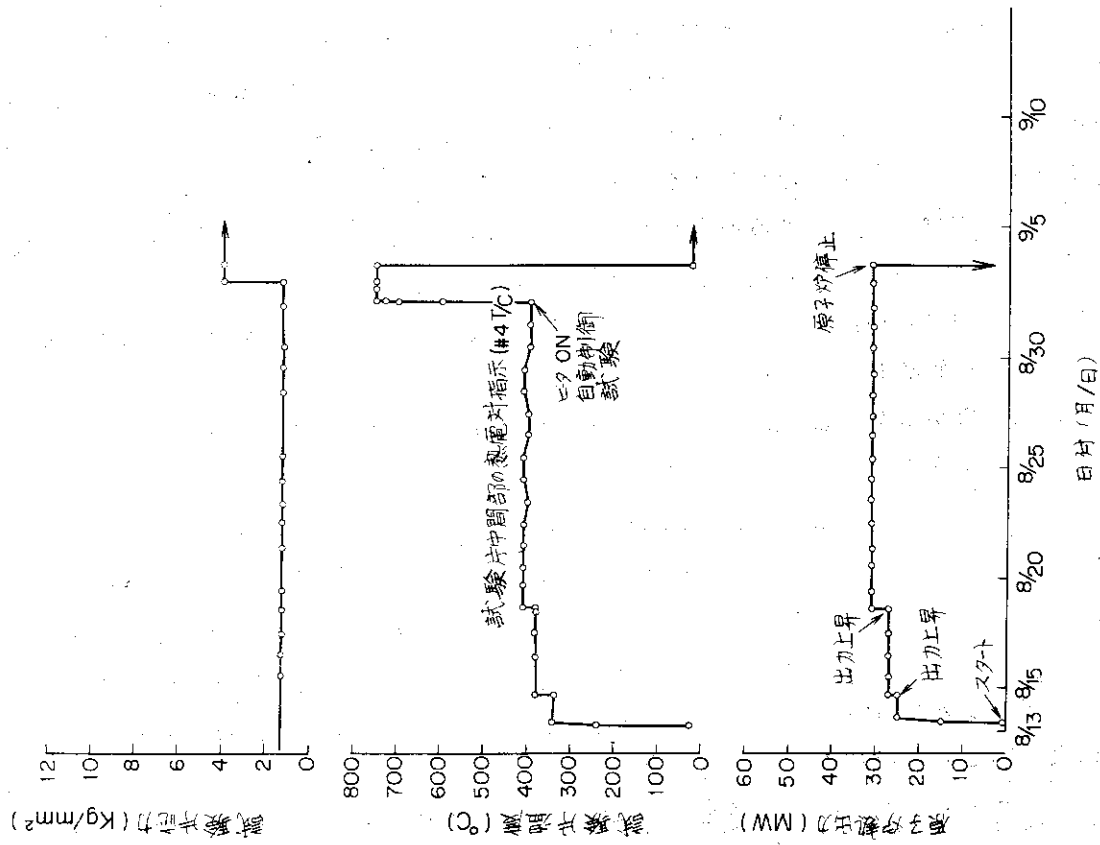


図35 67M-28Jインパルス試験データ(第IIサイクル)

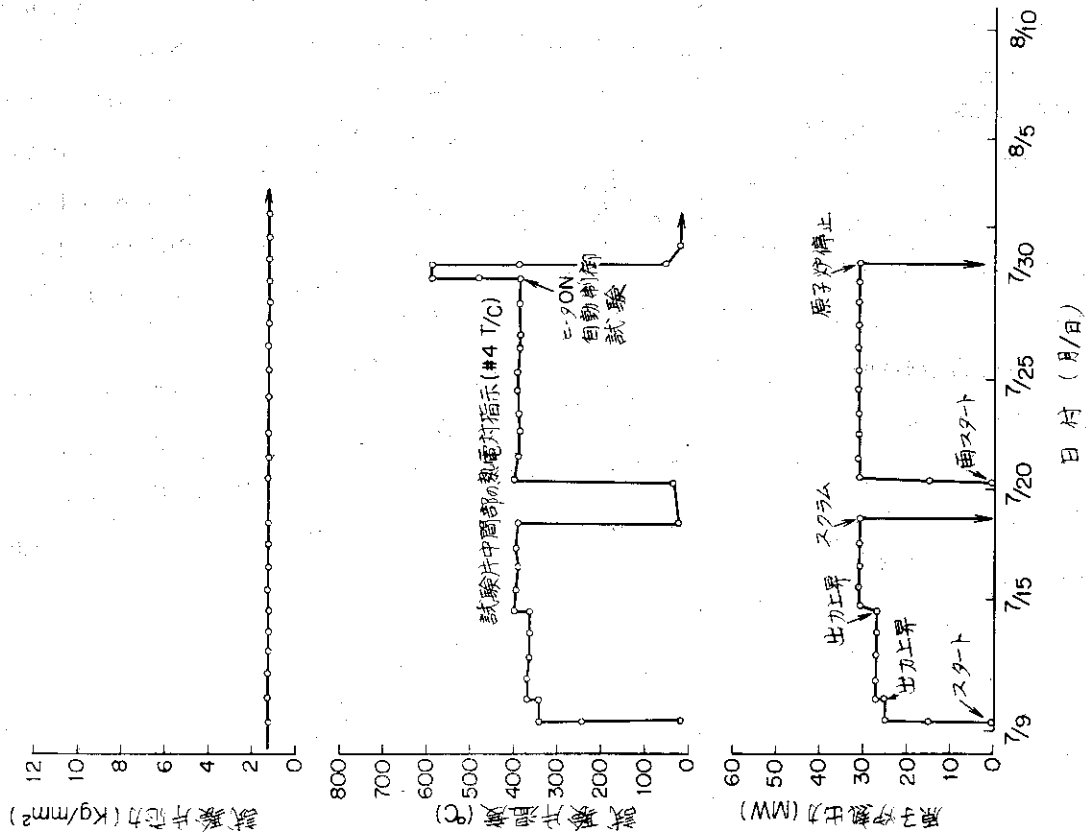


図34 67M-28Jインパルス試験データ(第Iサイクル)

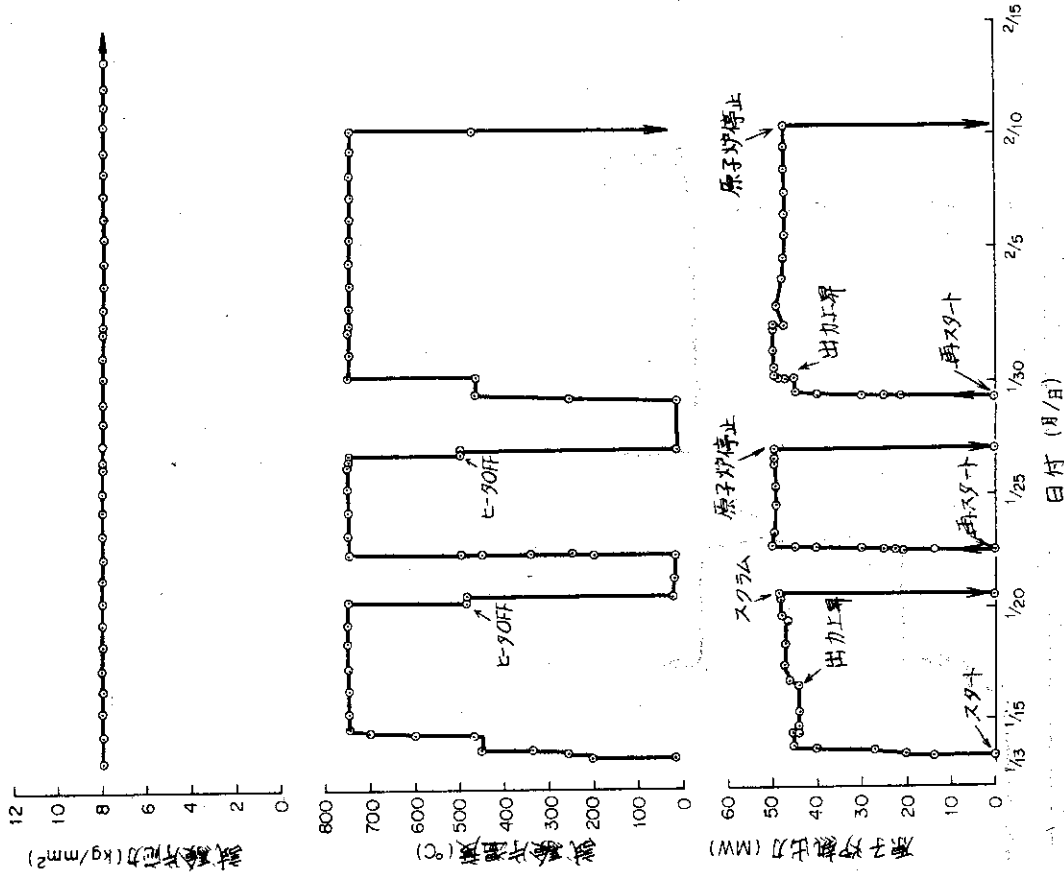


図 37 67M-28Jインパルス試験データ(第13サイクル)

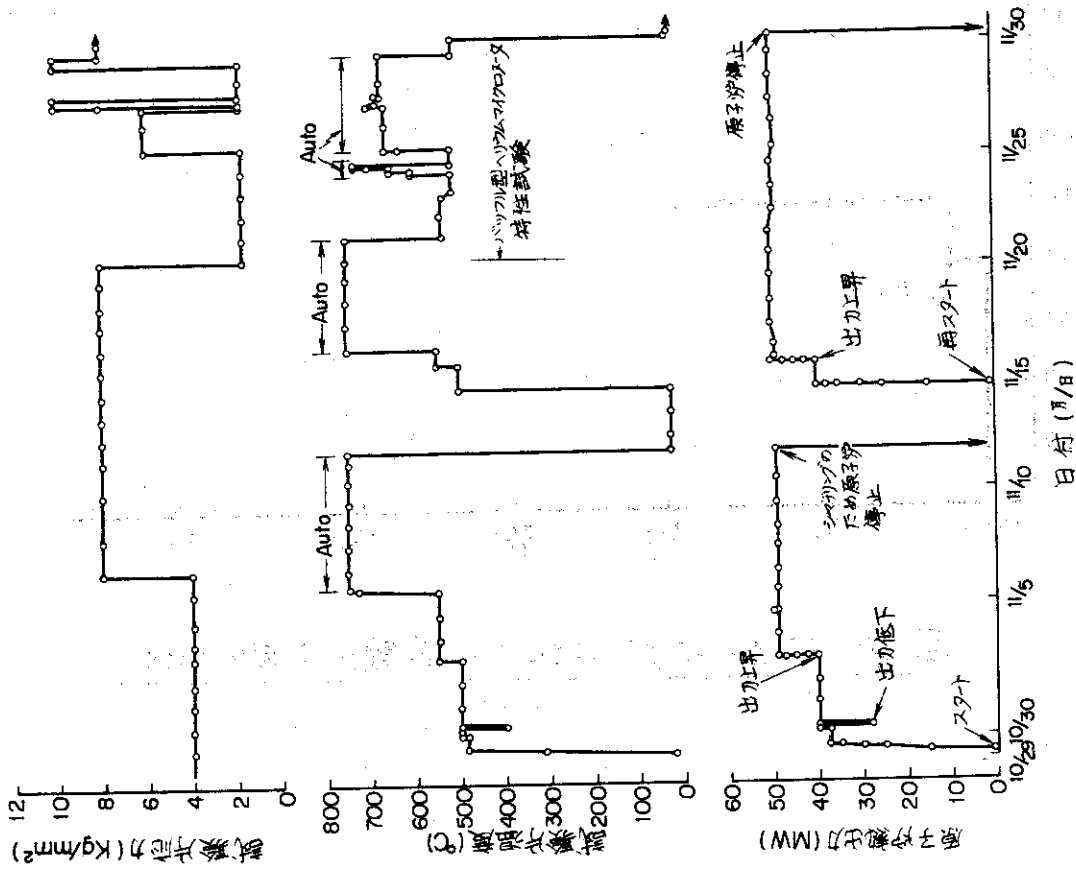


図 36 67M-28Jインパルス試験データ(第12サイクル)

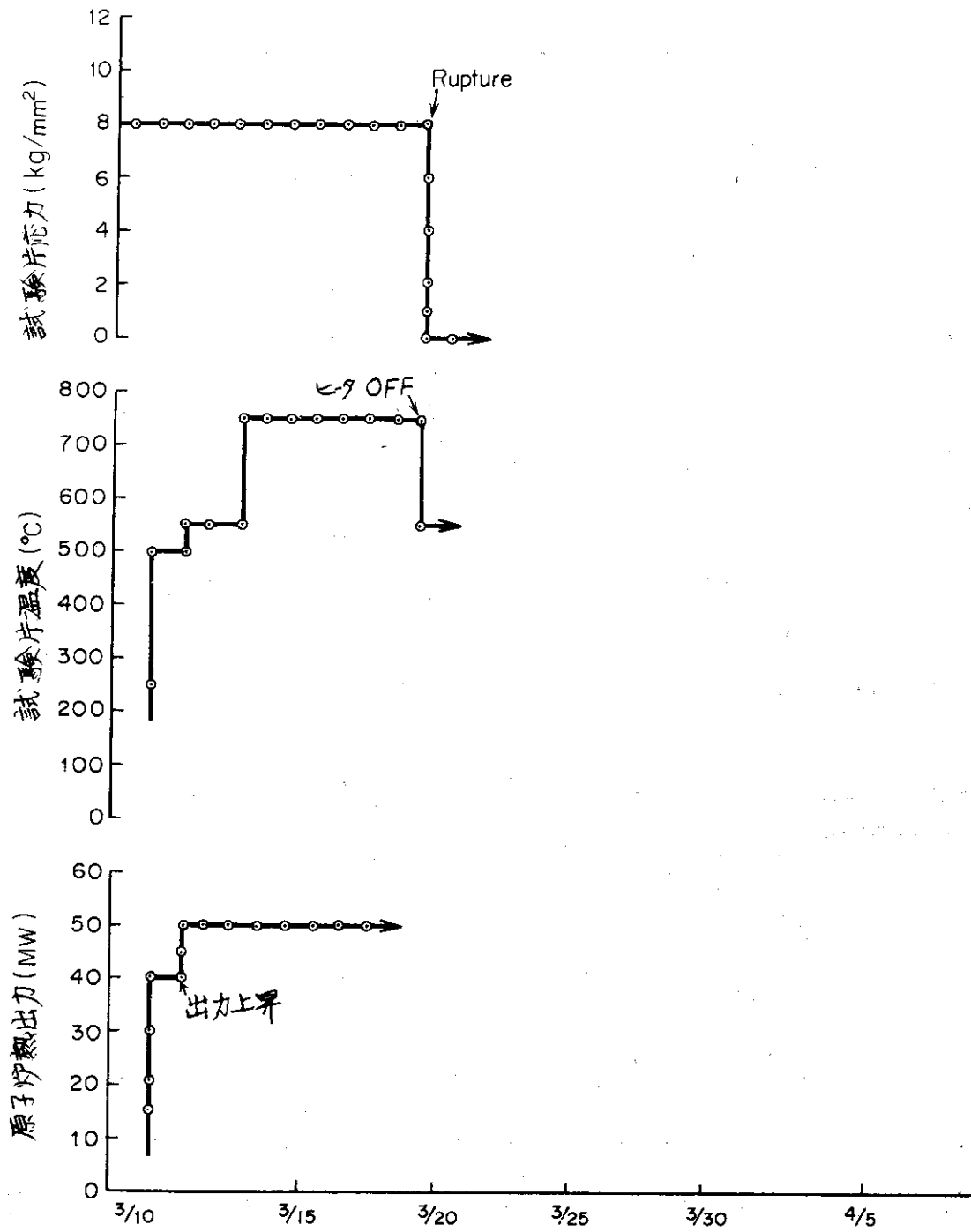


図 38 67M-28Jインパイルクリープ試験データ(第14サイクル)

Reactor Power 50MW th

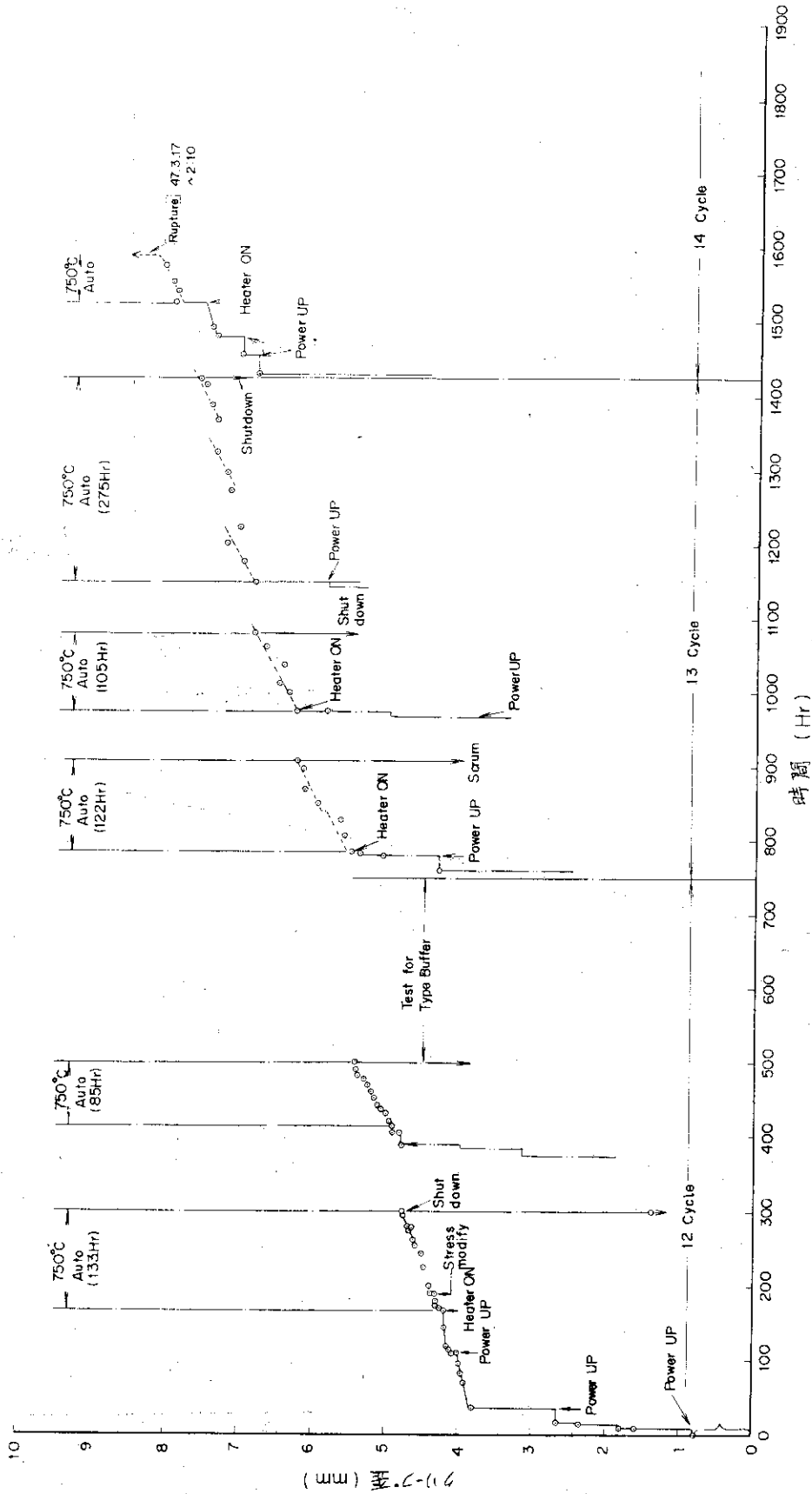


図 39 67M-28 J 照射中のクリーブ歪測定データ

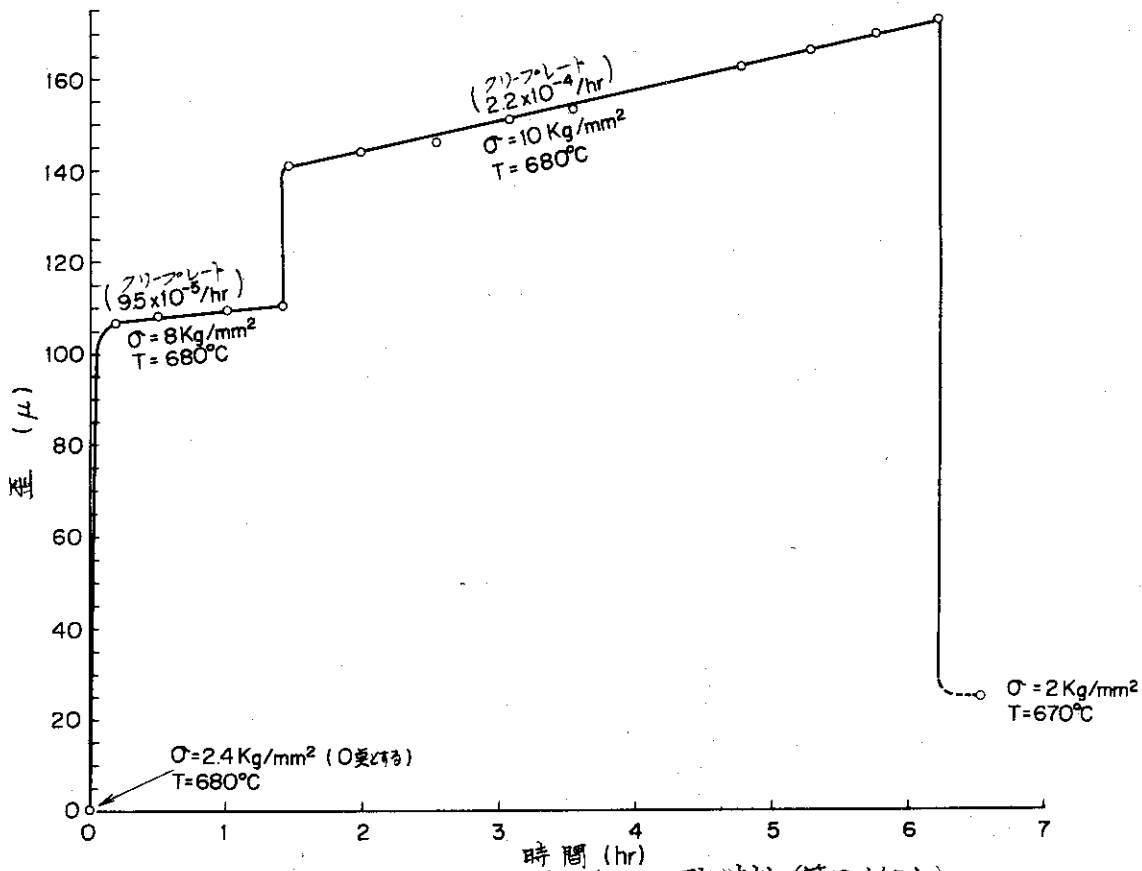


図40 ヘリウムマイクロメータ(バツフル型)特性(第12サイクル)

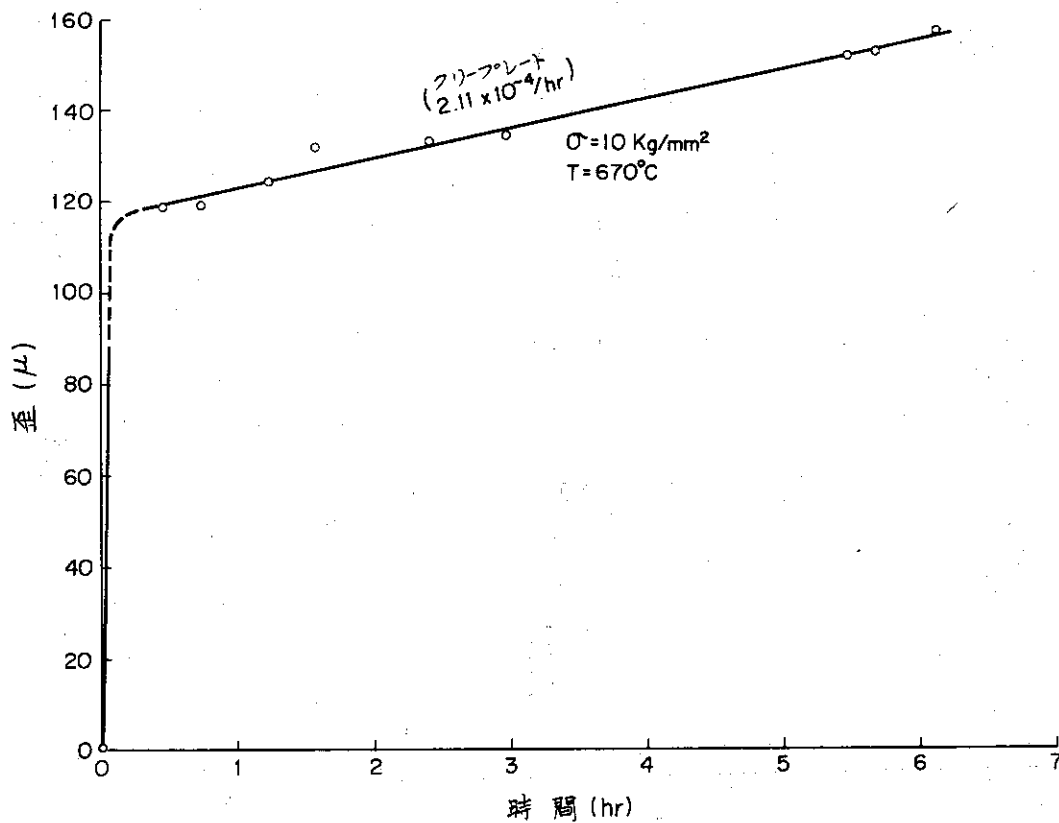


図41 ヘリウムマイクロメータ(バツフル型)特性(第12サイクル)

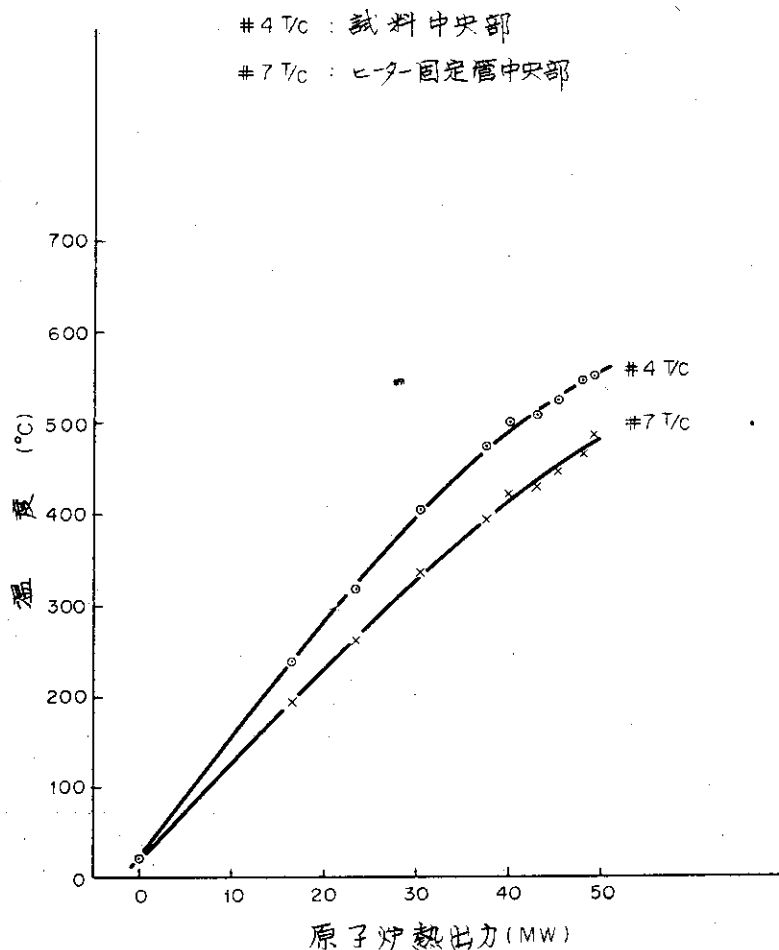


図 42 原子炉起動時試料温度(67M-28J)  
(第12 サイクル起動時)

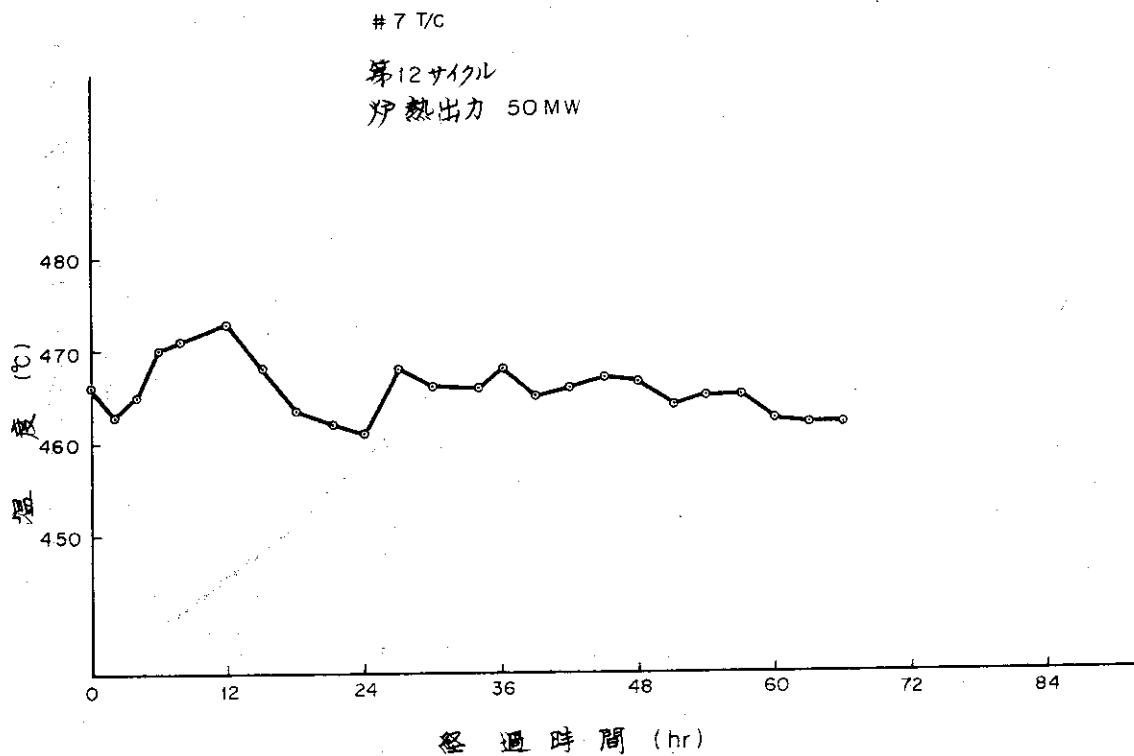
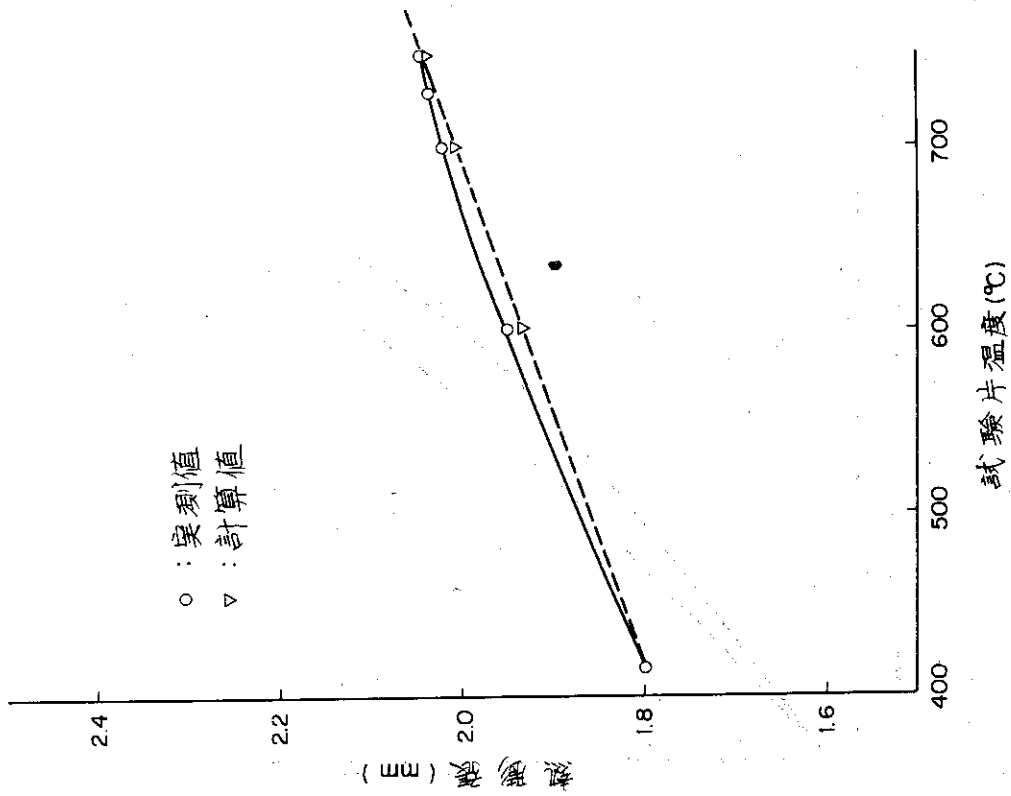
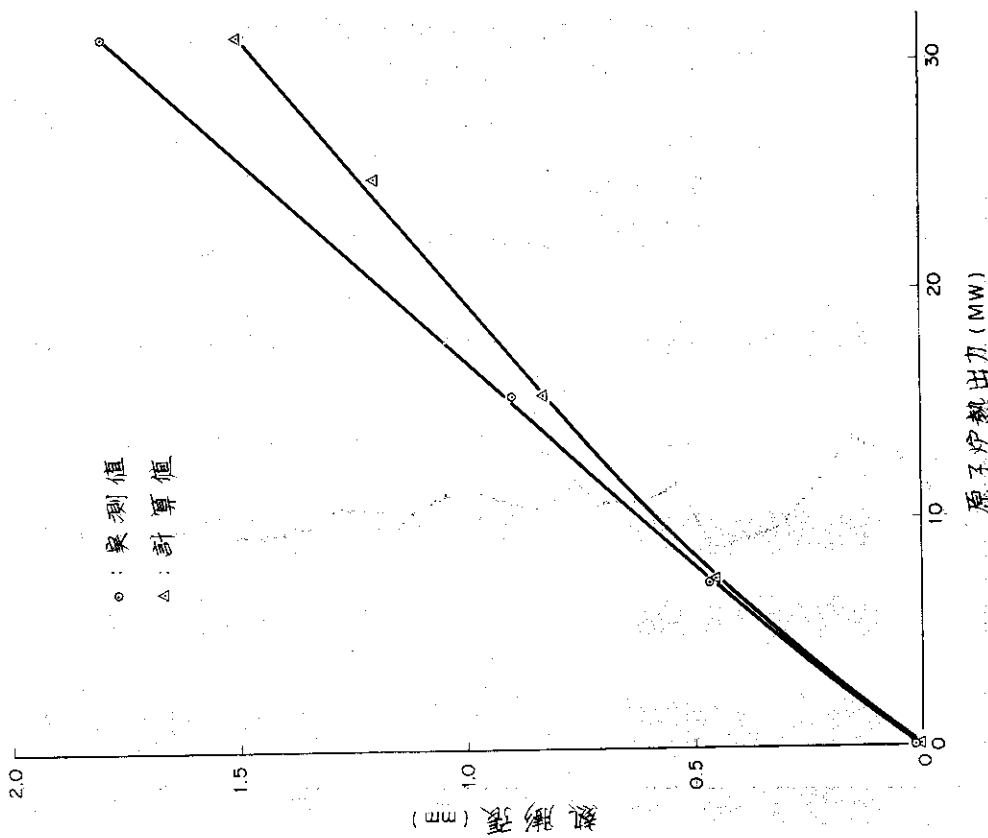


図 43 試料部温度変動 — 温度制御の無い場合(67M-28J)



試験片温度と熱膨張の関係  
図45 試験片温度と熱膨張の関係



原子炉熱出力と熱膨張の関係(第11サイクル)  
図44 原子炉熱出力と熱膨張の関係(第11サイクル)

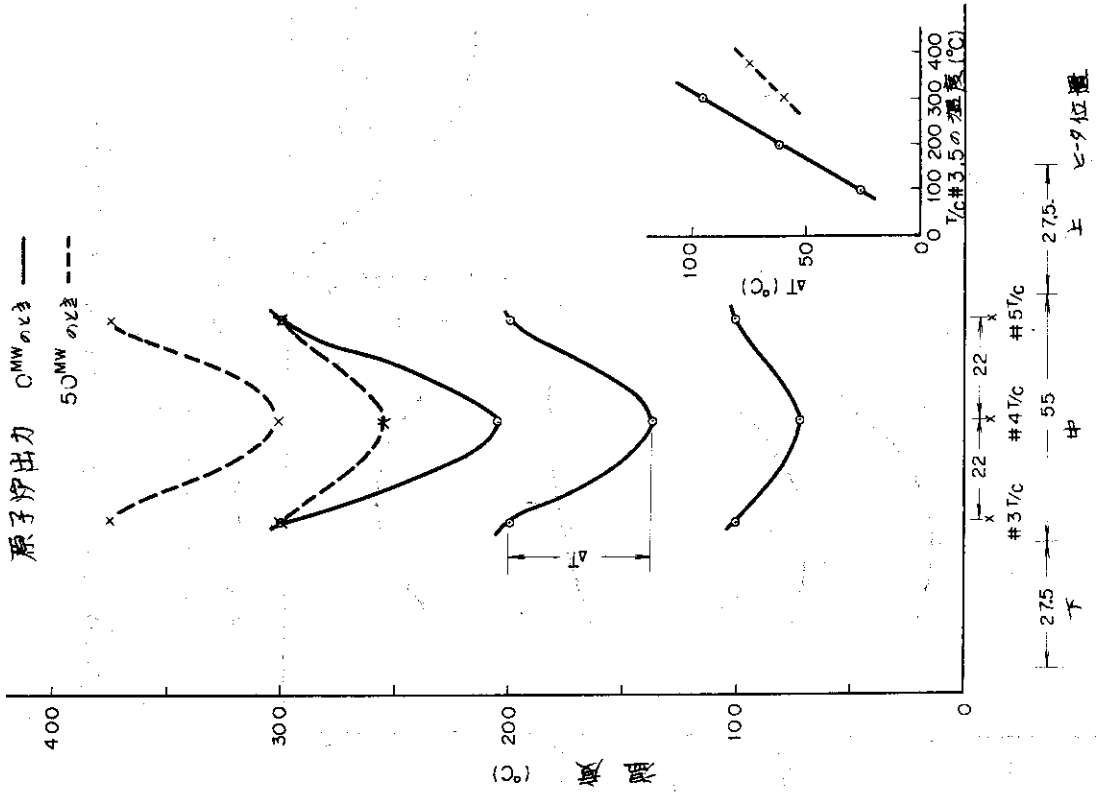


図 47 上・下のヒータのみを使ったときの温度分布 (TOM-7A)

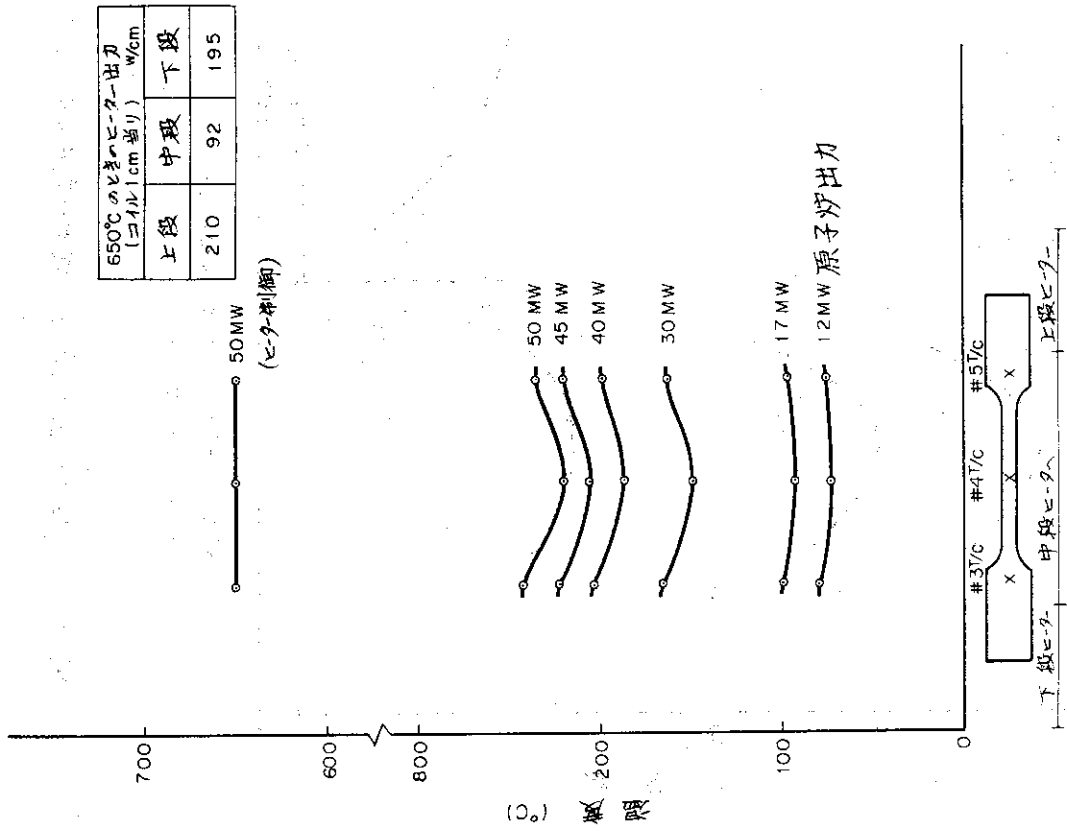


図 46 ガンマ発熱による試料部の温度分布 (TOM-7A)



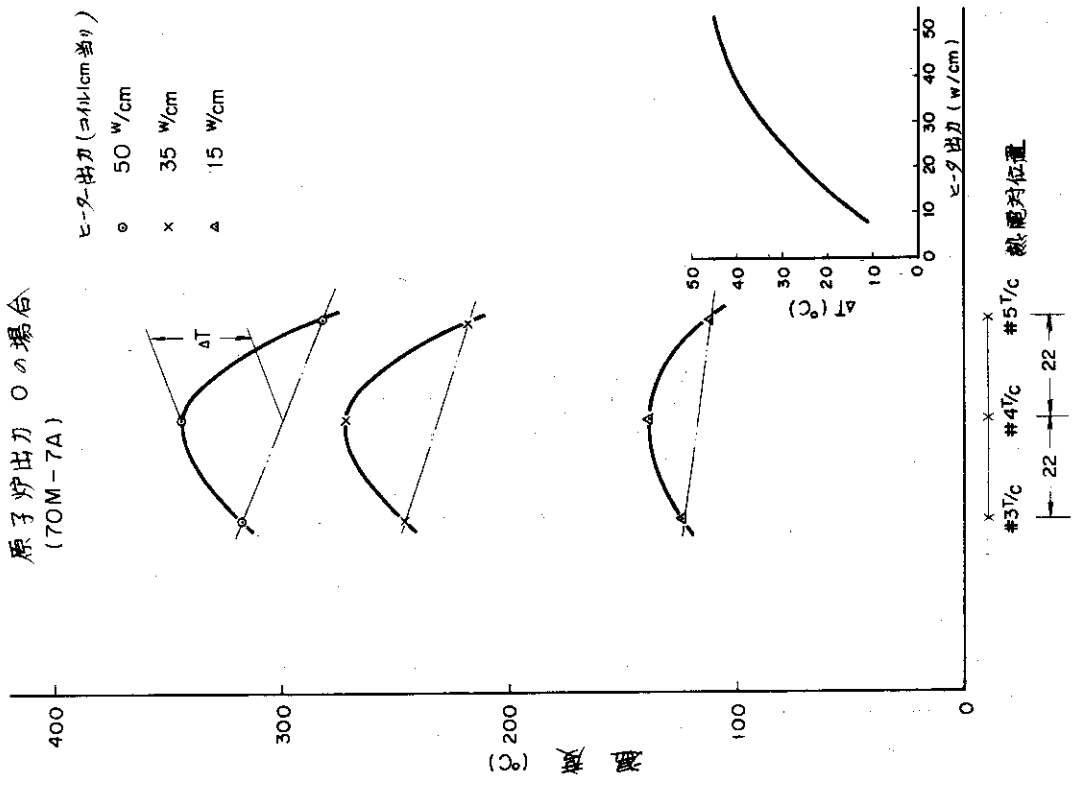


図 48 ヒータが均一出力の場合の試料温度分布(1)

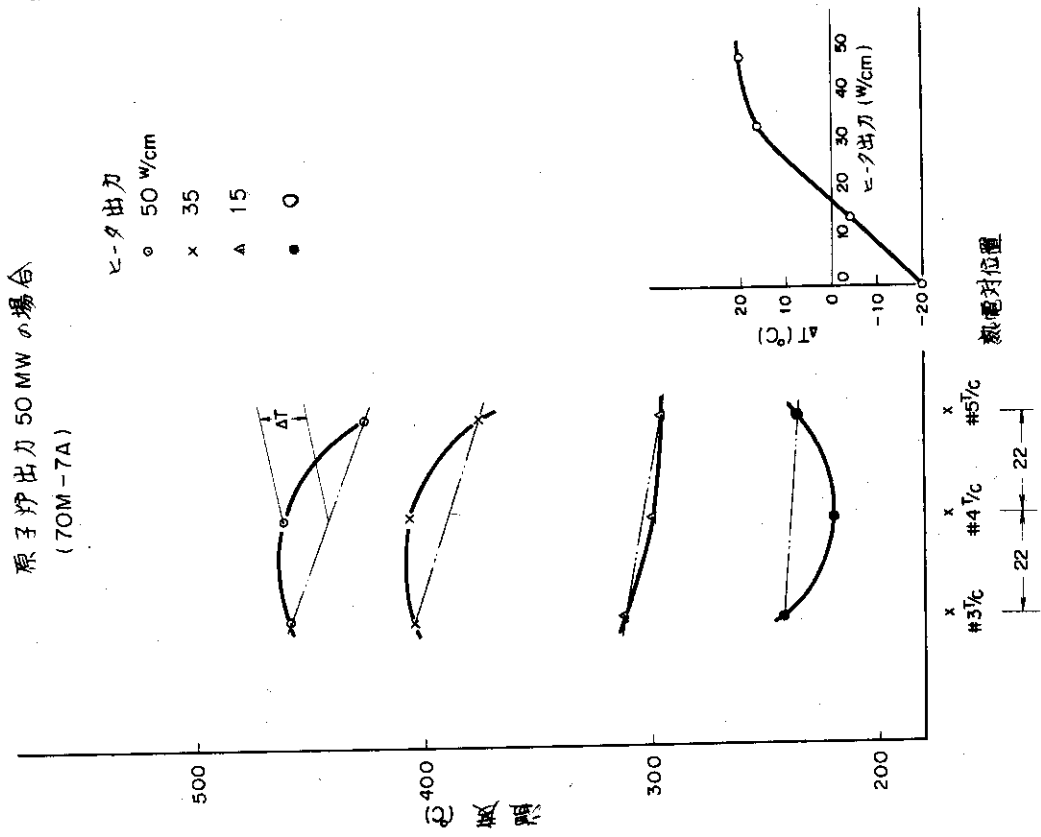


図 49 ヒータが均一出力の場合の試料温度分布(2)

## 7. まとめ

現在(昭和49年2月)までに2本のインパイル・クリープキャプセルの照射を完了し、3本目のキャプセルを照射中である。

この間、カーボン・ベアリングがガンマ発熱によつて予想以上に熱膨張して、駆動部が焼きしめる現象が観察されている。このトラブルはキャプセルをガンマ発熱の小さな照射孔へ移動させることによつて処置された。焼きしめに関するトラブルの詳細については附録I参照。焼きしめりの問題のほかはすべて良好な試験実績が得られている。

以下、各項目毎に考察結果をまとめてみる。

### 7.1 インパイル・クリープキャプセル

インパイル・クリープキャプセルの性能を列挙する。

- (1) 試験片数：1キャプセルあたり1本
- (2) 試験片寸法：装填しうる最大寸法は12mm $\phi$ ×150mm $\ell$
- (3) 荷重：最大200Kg  
荷重の安定性 $\pm 0.5\%$ 以下
- (4) 試験片温度：最高 800 $^{\circ}$ C  
精度……自動制御時は $\pm 0.6^{\circ}$ C以内
- (5) 歪測定：バツフル型 最大測定範囲は約200 $\mu$   
精度は $\pm 2\mu$ 程度  
ニードル型 最大測定範囲は約15mm  
精度は $\pm 10\mu$ 程度
- (6) J M T Rにおける最大速中性子照射量  
 $1 \times 10^{14}$  n/cm $^2$ ·sec (E>1Mev) 程度
- (7) インパイルクリープ試験装置の全体構成を図50に、キャプセル構造立体図を図51に、炉外装置の外観を図52に示す。

### 7.2 荷重装置

照射試験中のベローズ部の温度は約30 $^{\circ}$ C変動したが荷重用ガス圧力には検知しうるような変化は認められなかった。炉室室温の変動は原子炉運転中エアコンディショニングしている状態にあり、約3 $^{\circ}$ C程度となっている。室温変動に基づく荷重用ガス圧の変動はほぼ計算通り、巾で約1% ( $\pm 0.5\%$ )であった。自動制御を行った場合の圧力は $\pm 0.4\%$ 以内におさまることが確認された。

### 7.3 歪測定装置

すでに前述したごとく歪測定における測定範囲、精度感度については所期の目標を満足しうることを確認されている。

- (1) ヘリウム・マイクロ方式による歪測定では数mmAq. という圧力測定が必要であり、ガス配管系にわずかな洩れがあつても歪測定値に大きな誤差が生ずる。

67M-28Jの照射開始頃、ガス配管系の洩れのためにクリープ歪測定値が大きくバラツキ第10～第11サイクルにわたつて満足な歪測定値が得られないという時期があつた。とくに配管系に使用していたニードル弁のステム部分からのガス洩れがひどく、ベロ

ーシール弁やネオプレンダイヤフラム弁と交換することによって解決することができた。また、配管の接続部についても細心の注意が必要で、第12サイクル以降は洩れは完全に止まり再現性のある歪測定データが得られている。

- (2) 炉きわり排気系の圧力は当初キャプセルのガス排出口付近で $-70\text{mmAq}$ と推定していたが、非常に不安定なので実測したところ $-600\text{mmAq}$ もあり、予測よりもかなり低いことが判明した。また、圧力変動も $\pm 100\text{mmAq}$ 程度であることが確認された。排出部のこの低圧状態はヘリウム・マイクロからの排出ガス量程度では殆んど影響をうけないほどの容量がある。このため、ヘリウムマイクロ吐出部の雰囲気圧力〔Pa〕が大きく変動し、殆んど歪測定は不可能な状態となる。Paの変動が歪測定結果におよぼす影響は炉外実験データによると図53のようである。すなわち、Paが $100\text{mmAq}$ 変動すると歪測定値は約20%変化する。

上述の現象に対処するために4.2に述べたようなPa調圧機構が設置された。このPa調圧機構によればPaの値を非常によく安定させることができる。Pa調圧装置の性能を確認するため排気管のキャプセル側に絞り弁を設け、絞り弁の開度をいろいろ変えた状態でPaを一定値とし、そのときの歪測定値をみると絞り弁の開度と関係なく一定値を示す。このことはヘリウムマイクロからの排出ガス量に無関係にPaのみを一定値に保持すれば歪測定には誤差が殆んど生じないことを意味するものと考えられる。このことはまた、歪測定条件として検出端オリフィス直前の圧力〔Ps〕を一定とする方法を用いているので、検出端以外の部分の圧力損失の変動に伴い、例えば流量が変化しても歪測定に誤差は導入されないことを裏づけるものでもある。

#### 7.4 温度制御装置

温度制御装置についてはすでに十分な使用実績が他にあり、本装置についてもとくに取立てて云うべきことはない。クリープ試験片の温度制御という観点からみると開発的要素はキャプセル内に組みこまれるヒータの仕様と試料部の温度分布に関連した問題につきる。これらについては6章において詳述したのでここでは省略する。

#### 7.5 謝 辞

インパイル・クリープキャプセルおよび試験装置の開発に際して多くの人々の協力があり、とくに試験研究者側の意見と資料提供を寄せられた原研近藤達男氏（材料工学研究室）またメーカー側からは笠松利夫氏（旧住友電工熊取研究所工場長）ほか多数の協力が与えられた。報告書脱稿にあたり深く感謝したい。

#### 文 献

- (1) L. J. chockie, J. J. Holmes and J. C. Tobin. ASTM-STP-341, P. P. 363 ~ P. 371 1962, In-Reactor Creep Measurements on Zircaloy-2.
- (2) J. Pefhany  
Nuclear Engineering, Feb. 1961, P. 77 ~ P. 79 Pneumatic Gauges for In-Pile Measurements.
- (3) F. P. Ellen

International Symposium on "In-Pile Irradiation Equipment and Techniques," A. E. R. E. Harwell, 1966, In-Pile Creep Measuring Techniques.

- (4) E. Catling, F. G. Wallace

同上

In-Pile Creep Measuring Techniques.

- (5) L. G. Bell

CRGM-1047, 1962

The Mark 1 In-Pile Creep Test.

- (6) V. Fidleris, H. N. Isaac and H. P. Koehler

AECL-2568, 1966

In-Reactor Creep Machines.

- (7) W. W. Davis and C. R. Kennedy

ORNL-3747

Stress-Strain Measuring System for In-Reactor use in High Neutron Flux.

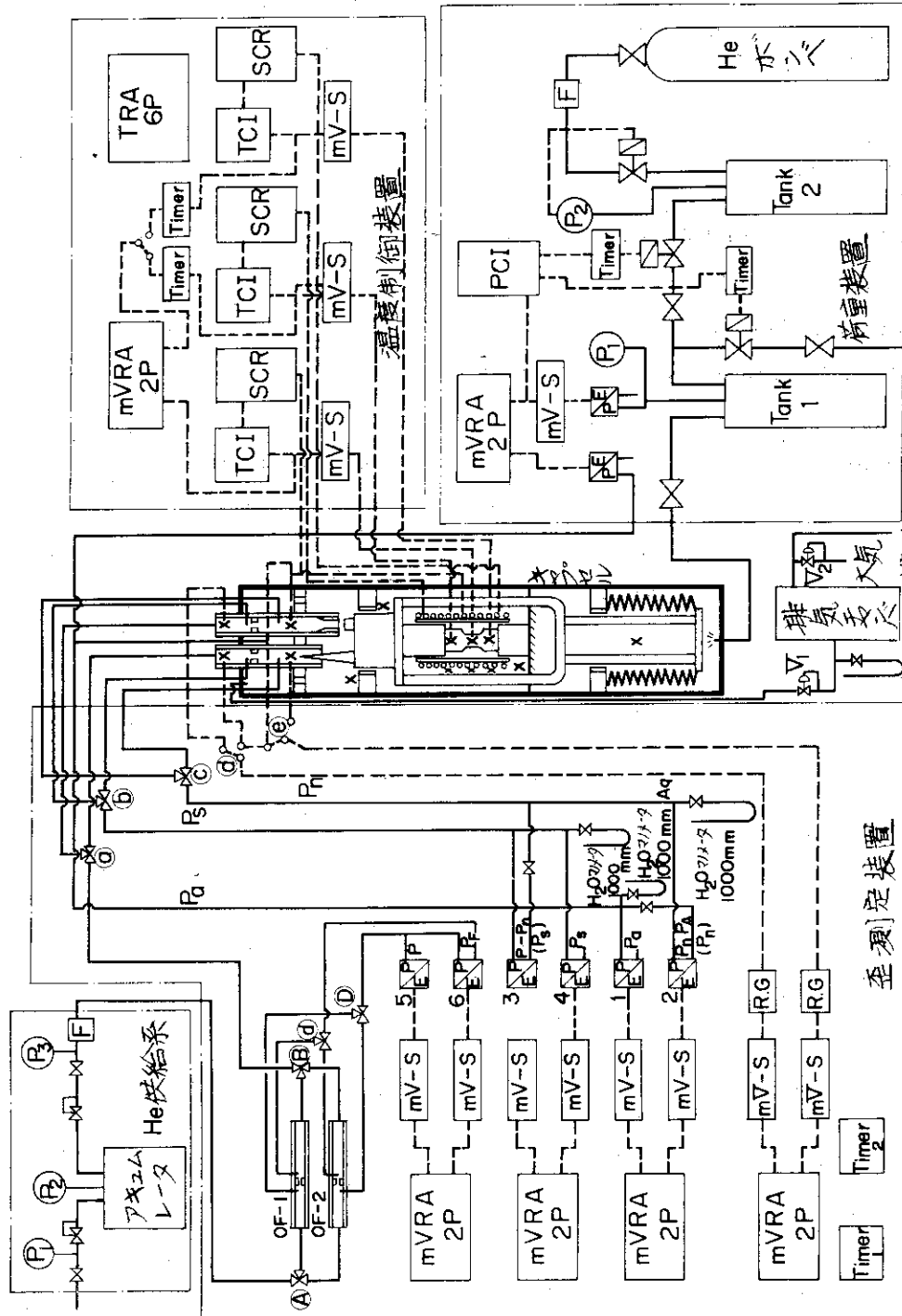


図50 インパルス照射装置(67M-28J)照射試験フロロシート

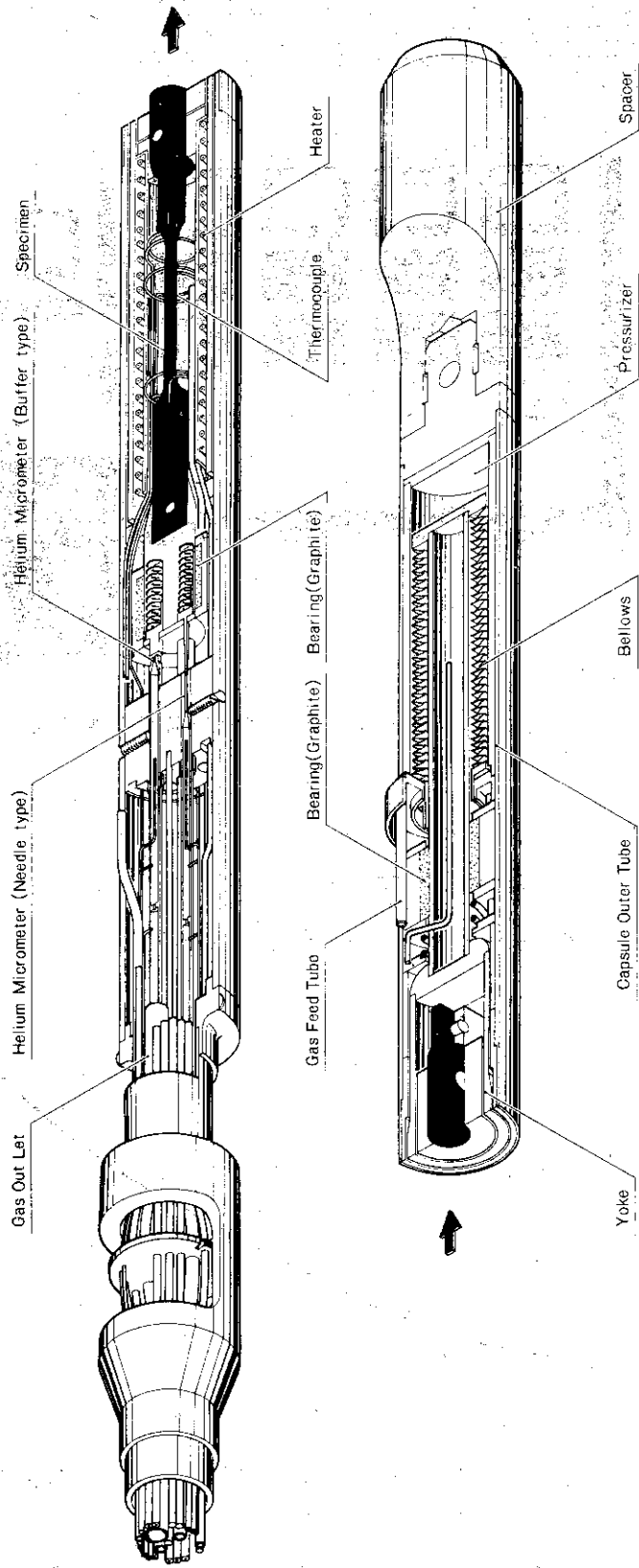


図 51 インパイル・クリープキャプセル構造立体図

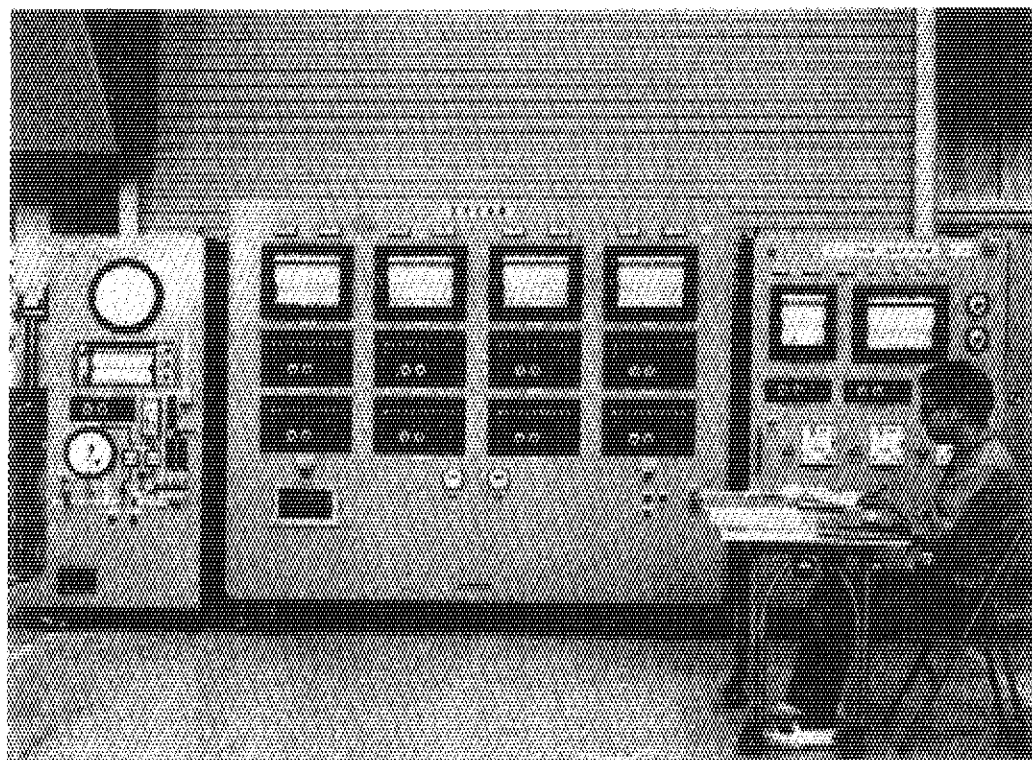


図 52 インパルスクリープ試験装置外観写真

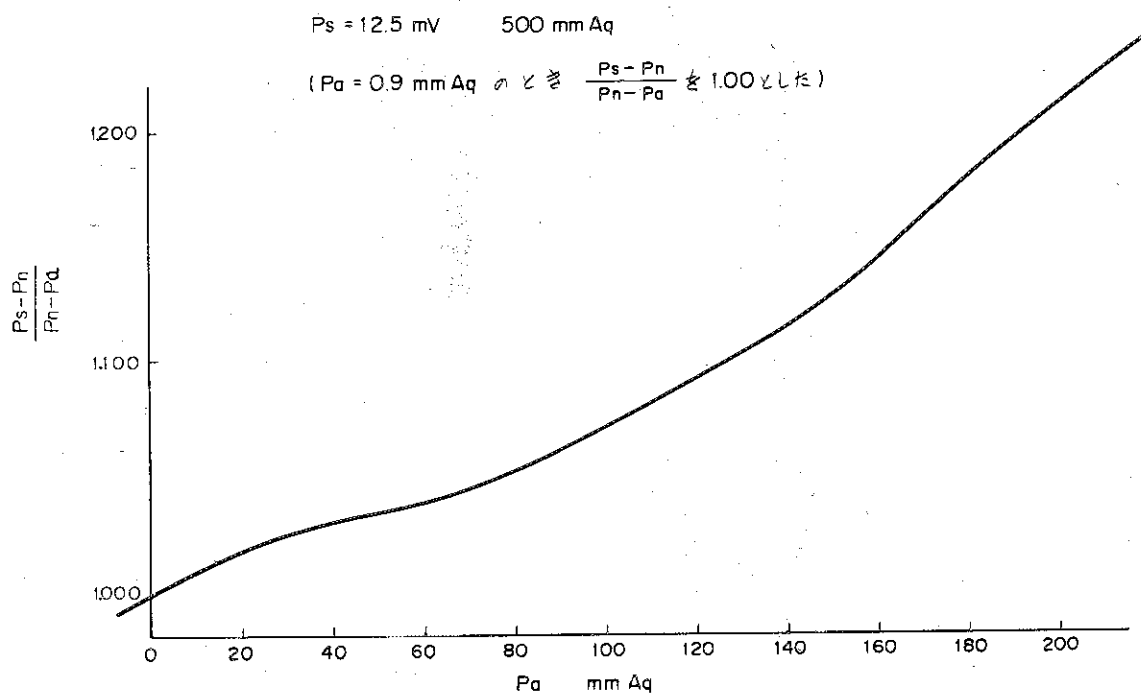


図 53 吐出部圧力 [Pa] の変動に伴う歪測定誤差

附録・I 70M-7Aクリープ歪測定データの異常について

70M-7Aは17サイクルから照射開始され21サイクルに終了する予定となっている。21サイクル後半には試料応力を大きくし、試料破断を行うことになっている。試料破断に先立って、すでに採取されたデータについて担当者ベースで検討を行ったところ、測定されているクリープ速度が異常に小さいことが判明し、5月24～5月27日にわたって、その原因解明のための作業が行われた。

原因としては加圧管の閉塞およびキャプセル内駆動系の異常が考えられた。まず、加圧用ガス管のロウ付部2個所の導通検査を行ったが閉塞などの異常はなかった。次の段階のチェックとしては炉出力上昇時に測定しうる歪をガス加圧による荷重によるものと熱膨張によるものを識別しながら各炉出力ステップ毎に測定し、駆動系の異常の有無を確認する方法がとられた。

5月25日(土)の炉熱出力45MWまではキャプセルの温度上昇に伴う歪および荷重の増減に伴う歪とも正常に検出され駆動系に異常は認められなかった。翌26日、炉熱出力50MW時に25日と同様のチェックを行ったところ、温度上昇に伴う歪は検出されるが荷重の増減に伴う歪は検出できないことが判明した。

上述の検討結果から70M-7Aは下記の状態にあるものと判断できる。

- (1) 歪測定系統は正常である。
- (2) 駆動系のうち上部摺動部には異常は認められない。
- (3)       "       下部摺動部に異常が認められる。

下部摺動部の異常としては、下部ベアリングと駆動軸間の熱膨張によるしめつけか、ヨーク下部のたわみによるヨークと外筒内面との固着が考えられる。

5月28日現在の実状の要点を材料物性研白石室長に電話にて伝え、試験目的からみて、すでに650℃低応力条件で照射した試料を、インパイルクリープ試験として実施する際の意義について問合せたところ充分意味をもっているとの回答があった。

今後の処置として下記の手段を採用するよう検討依頼したい。優先順位は案1～案3とする。

- 処置案-1 照射孔を1列外側に移して3～1サイクル追加照射する。  
 " -2 一旦ぬいておいて、あとで追加照射する。  
 " -3 21サイクル後半だけでも、炉熱出力を下げた試験を行う。

○結果

処置案1を採用し、1サイクルの追加照射を実施した。

駆動部は新しい照射孔では正常に作動した。



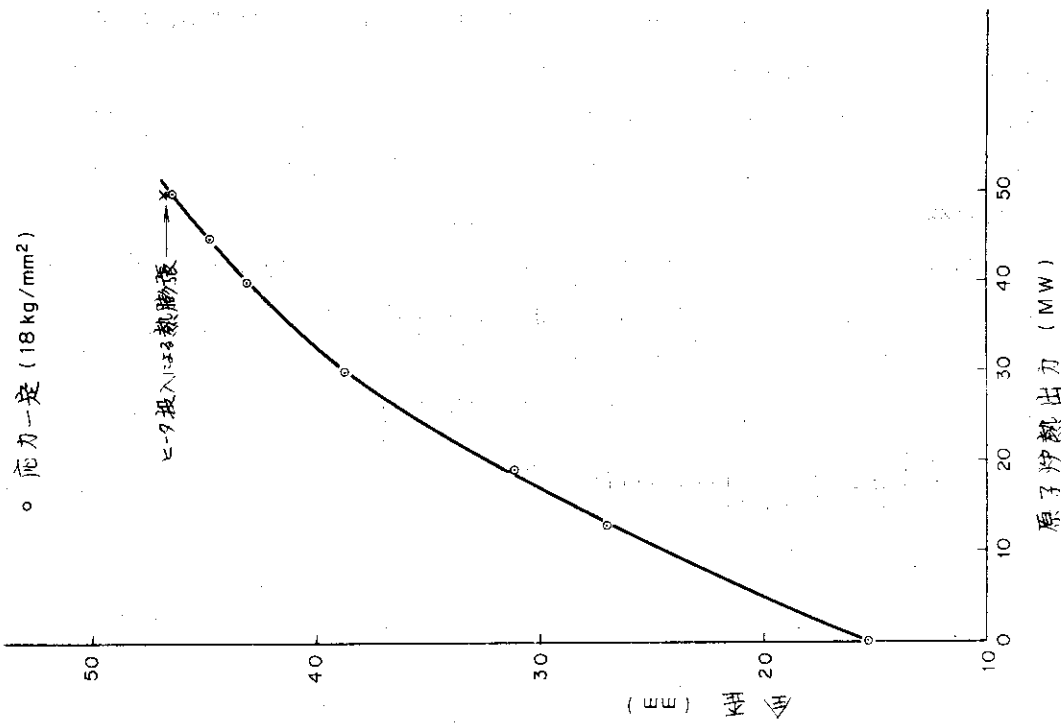


図 I-1 70M-7A 燃料型歪率決定特性

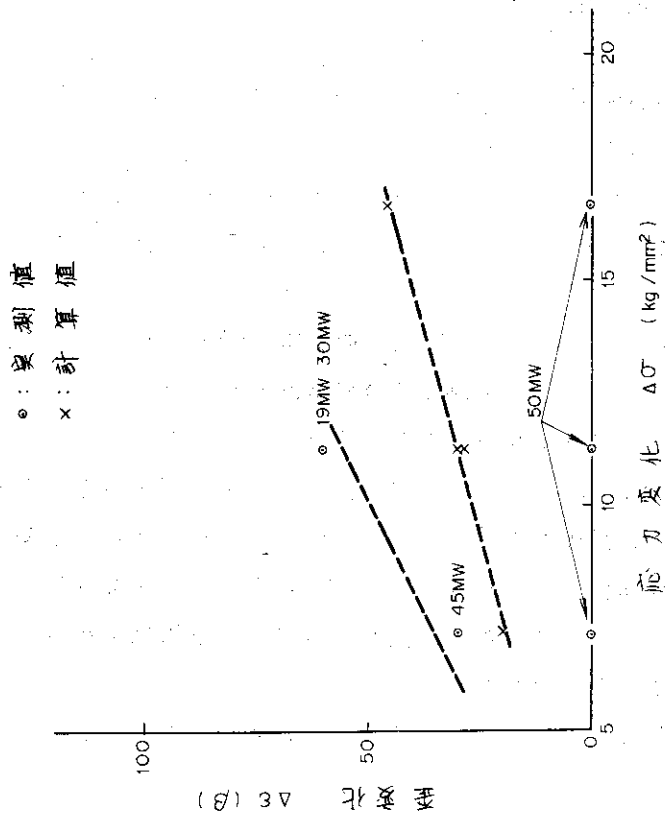


図 I-2 70M-7A 応力変化による歪変化