

JAERI-M

7 4 4 6

再冠水試験装置のテスト部建設報告書

1977年12月

深谷 好夫・数土 幸夫・村尾 良夫・平野 見明

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、複製などのお問合せは、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.

再冠水試験装置のテスト部建設報告書

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

深谷 好夫・数土 幸夫・村尾 良夫・平野 見明

( 1 9 7 7 年 1 1 月 2 4 日受理 )

原子炉の配管破断等による冷却材喪失事故に対する炉心の再冠水現象を究明するために試験装置を製作した。

本報告書は、製作された再冠水試験装置のうち、炉心燃料体を模擬したテスト部について述べた。テスト部は、1号機、2号機および3号機と実験の進行に伴い順次製作された。このテスト部の設計・製作の要点および製作上の技術的問題点について述べた。

Design and Construction of Test Sections for  
Reflood Phase of PWR LOCA

Yoshio FUKAYA, Yukio SUDO, Yoshio MURAO

and Kenmei HIRANO

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment,  
JAERI

(Received November 24, 1977 )

To study the reflood phase of PWR loss-of-coolant accidents(LOCA),  
the reflood test facility is installed in JAERI since 1974.

Details of the three test sections simulating the core of PWR ( fuel  
assembly simulators ) are given ; they have been constructed successively  
according to the purposes of the respective reflood tests.

Described are especially design considerations and technological  
problems encountered.

Keywords: Safety, Loss of Coolant, Reflood, Test Facility  
Design and Construction, PWR, Fuel Assembly Simulators

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. テスト部の構成 .....	1
3. テスト部仕様 .....	10
4. テスト部の設計製作 .....	11
5. テスト部製作上の技術的問題点 .....	29
6. 謝 辞 .....	30
参考文献 .....	30

Contents

1. Introduction .....	1
2. Constitution of Test Section .....	1
3. Details of Test Section .....	10
4. Design and Construction of Test Section .....	11
5. Technical Problems through Construction of Test Section .....	29
6. Acknowledgments .....	30
References .....	30

## 1. まえがき

軽水炉の一次冷却系の配管破断による冷却材喪失事故時には、緊急冷却系の作動により炉心が冷却される。この緊急冷却系の一つである低圧注水系による燃料体の冷却過程が再冠水過程である。

再冠水過程における炉心燃料体の安全評価を行なうため、1974年に再冠水試験装置が製作され<sup>(1)</sup>、<sup>(2)(3)(4)</sup> 炉心内の流動伝熱現象の解析が行なわれてきた。

再冠水試験装置は、炉心燃料体を模擬したテスト部を中心に、低圧注水系、ダウンカマ模擬部、破断ループ流動抵抗模擬部等より構成されている。テスト部は、加圧水型原子炉の燃料体を模擬した外径10.5mm、加熱長3.6mの直接通電型発熱ピン16本を4×4の正方格子状(ピッチ13.8mm)に配置させ、容器内に収納したものである。

このテスト部は、1974年7月に1号機が完成されて以来、その後実験の進行に伴い、1975年1月に2号機、そして1976年4月に3号機と順次製作してきた。

製作されたテスト部は次のようである。

1号機 大気圧実験用

2号機 加圧実験用

3号機 加圧高温実験用

本報告書は、テスト部1号機、2号機および3号機の設計・製作および製作上の技術的問題点について述べたものである。

## 2. テスト部の構成

Fig. 2.1に再冠水試験装置のフローシート、Fig. 2.2にテスト部の設置状況、Fig. 2.3にテスト部の概略図を示す。

テスト部は上方より、上部プレナム模擬部、上部電極、電極アダプター、模擬燃料用発熱ピン、発熱ピンを収納するチャンネル外筒、下部電極収納を兼ねた下部プレナム模擬部および下部電極からなる。

Fig. 2.4に上部プレナムの断面図を示す。

上部プレナムは、原子炉のシステム効果を調べるために適切な容積を有し、上部に蒸気配管、下部にキャリオーバ水用配管が、各々一次系破断ループ流動抵抗模擬部およびキャリオーバ水測定用液滴ホールドタンクに接続されている。

上部プレナムの内部には、発熱ピンの間を通過して出てきた水と蒸気の混合物を分離するための分離筒および水滴の付着を防止するための反射板が設けられている。さらに内部には、分離筒と反射板を加熱するためのヒータや蒸気、水および各加熱部の温度計測用熱電対が取付け

## 1. まえがき

軽水炉の一次冷却系の配管破断による冷却材喪失事故時には、緊急冷却系の作動により炉心が冷却される。この緊急冷却系の一つである低圧注水系による燃料体の冷却過程が再冠水過程である。

再冠水過程における炉心燃料体の安全評価を行なうため、1974年に再冠水試験装置が製作され<sup>(1)</sup>、<sup>(2)(3)(4)</sup> 炉心内の流動伝熱現象の解析が行なわれてきた。

再冠水試験装置は、炉心燃料体を模擬したテスト部を中心に、低圧注水系、ダウンカマ模擬部、破断ループ流動抵抗模擬部等より構成されている。テスト部は、加圧水型原子炉の燃料体を模擬した外径10.5mm、加熱長3.6mの直接通電型発熱ピン16本を4×4の正方格子状(ピッチ13.8mm)に配置させ、容器内に収納したものである。

このテスト部は、1974年7月に1号機が完成されて以来、その後実験の進行に伴い、1975年1月に2号機、そして1976年4月に3号機と順次製作してきた。

製作されたテスト部は次のようである。

- 1号機 大気圧実験用
- 2号機 加圧実験用
- 3号機 加圧高温実験用

本報告書は、テスト部1号機、2号機および3号機の設計・製作および製作上の技術的問題点について述べたものである。

## 2. テスト部の構成

Fig. 2.1に再冠水試験装置のフローシート、Fig. 2.2にテスト部の設置状況、Fig. 2.3にテスト部の概略図を示す。

テスト部は上方より、上部ブレナム模擬部、上部電極、電極アダプター、模擬燃料用発熱ピン、発熱ピンを収納するチャンネル外筒、下部電極収納を兼ねた下部ブレナム模擬部および下部電極からなる。

Fig. 2.4に上部ブレナムの断面図を示す。

上部ブレナムは、原子炉のシステム効果を調べるために適切な容積を有し、上部に蒸気配管、下部にキャリオーバ水用配管が、各々一次系破断ループ流動抵抗模擬部およびキャリオーバ水測定用液滴ホールドタンクに接続されている。

上部ブレナムの内部には、発熱ピンの間を通過して出てきた水と蒸気の混合物を分離するための分離筒および水滴の付着を防止するための反射板が設けられている。さらに内部には、分離筒と反射板を加熱するためのヒータや蒸気、水および各加熱部の温度計測用熱電対が取付け

られている。また上部プレナム胴には、模擬炉心から上部プレナムに運ばれてくる冷却水の状態を観察するために、分離筒の上面と水平な場所に覗き窓が設けられている。

模擬炉心は、16本の直接通電型発熱ピンを4×4本の正方形格子配列で組み、ステンレス鋼製のチャンネル外筒に収納されている。

発熱ピンはパイプの肉厚に変化を持たせ、電気抵抗の変化により軸方向に対し階段状コサイン分布の発熱が得られるよう配慮されている。また発熱ピンには温度計測用としての熱電対が各々6本付と1本付とに分けて合計16本取付けられている。

Fig. 2.5に発熱ピンの断面図、Fig. 2.6に発熱ピンの温度計測用熱電対の取付位置を示す。

発熱ピンを収納するチャンネル外筒は、ステンレス鋼管を7分割し、その各々をフランジにより接続して構成されている。チャンネル外筒のフランジ接続部には発熱ピンをスペーシングするためのスペーサーグリッドが内装されており、各々電気絶縁用の石英ガラスを介してフランジに固定されている。またチャンネル外筒には、外筒壁の加熱用ヒータ、内部の圧力測定用リード管および内部の流体温度測定用の熱電対取付座が装備されている。

下部プレナムは、発熱ピンに電力を供給するための電極収納箱を兼ねたもので、上部にチャンネル外筒に接続されるフランジと下部に注水系と結ばれるノズル2本が設けられている。

下部プレナム内には、各々の発熱ピンの熱膨張による伸びを考慮して常に発熱ピンに張力を付加するためのスプリングや、発熱ピンを加熱するための電力供給用平編リード線が内蔵されている。さらに内部には、発熱体に注入する冷却水の温度を調節するための加熱ヒータや、冷却水の温度を測定するための熱電対が取付けられている。

Table 2.1 に電気絶縁材の種類と使用場所を示す。

テスト部の電気絶縁には、各々の場所に適合した絶縁材を選んで使用されている。上部の電極部には気密性と耐熱性を兼ねたモンタニットが、スペーサ部には絶縁性の優れた石英ガラス、また下部プレナム等の比較的低温部には加工性の良いテフロンが各々用いられている。

Fig. 2.7, Fig. 2.8 にテスト部の組立状態を示す。

上部プレナムを除くテスト部は、組立および据付の際の破損や変形の防止と、実験時の熱膨張を考慮して、水平方向の変位を抑制した取付台に固定されている。またテスト部外筒には全て保温が施こされており、保温表面は鋼製の外被により保護されている。

- ◇ Stopper valve
- ☒ Electro magnetic valve
- ☒ Remote controlled valve
- ☒ Pressure regulator
- ☒ Safety valve

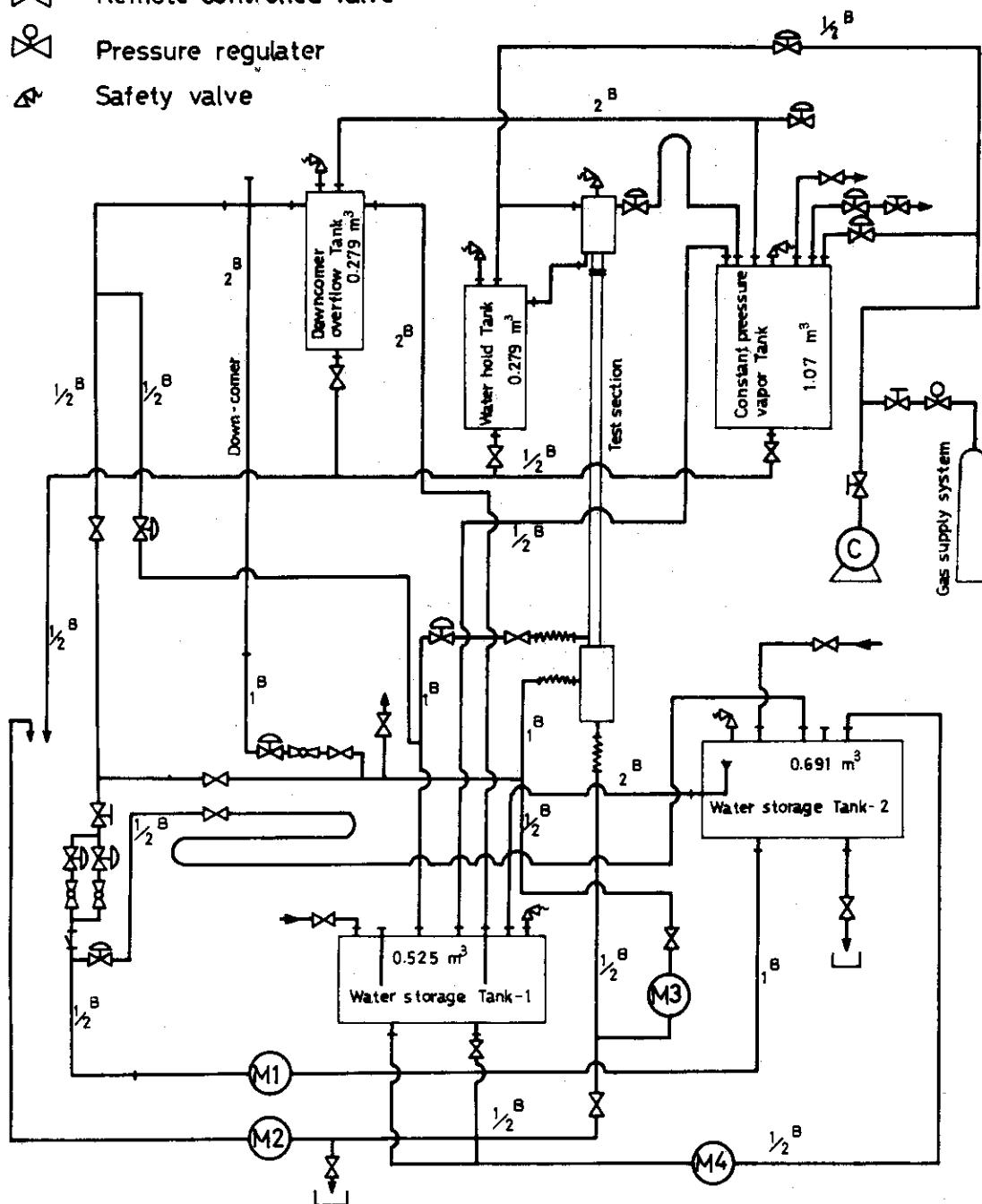


Fig 2.1 Flow sheet of the reflood test facility

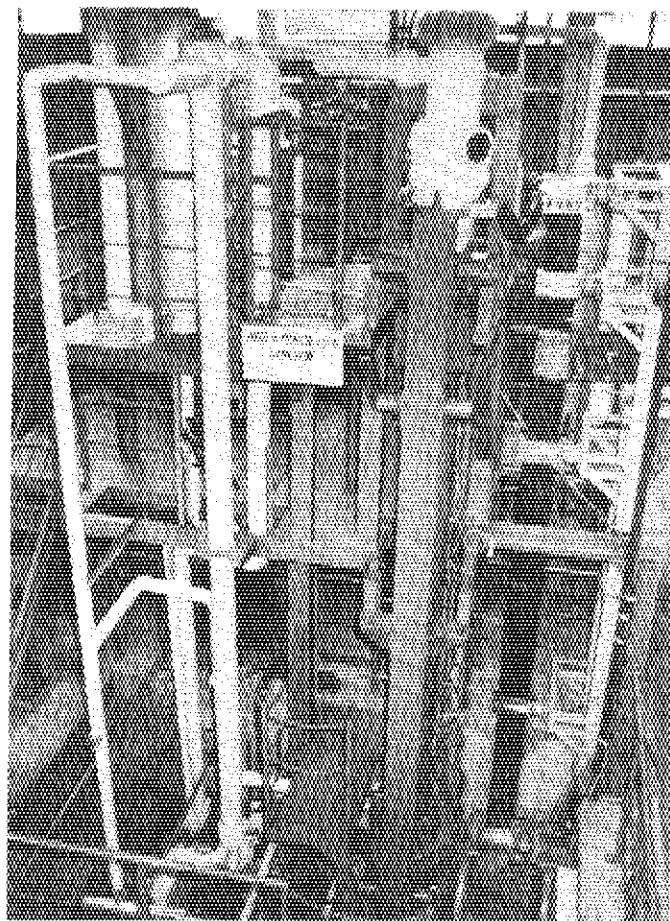


Fig. 2.2 Test facility

Table 2.1 Species of electric insulator and the locations used

material	temperature (C)	pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	environments	use	locations used
Montanit	600	7.5	steam warm water	seal and insulator	upper electric terminal (steam line)
Quarty Glass	ditto	ditto	steam warm water	only as insulator	spacer grid
teflon	ditto	ditto	steam warm water	seal and insulator	lower plenum (always in water)

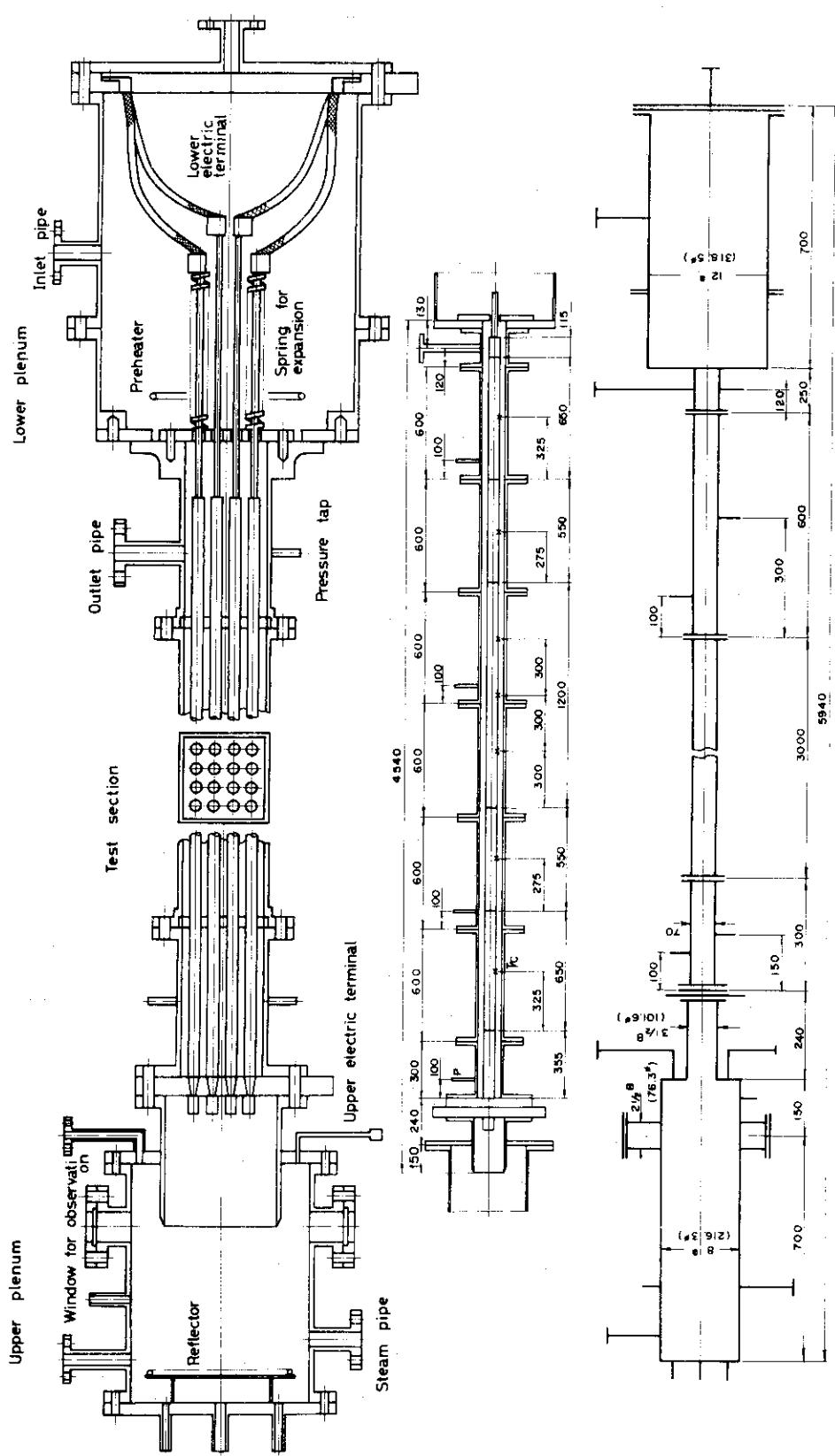


Fig. 2.3 Schematic diagram of the test section in reflood test facility

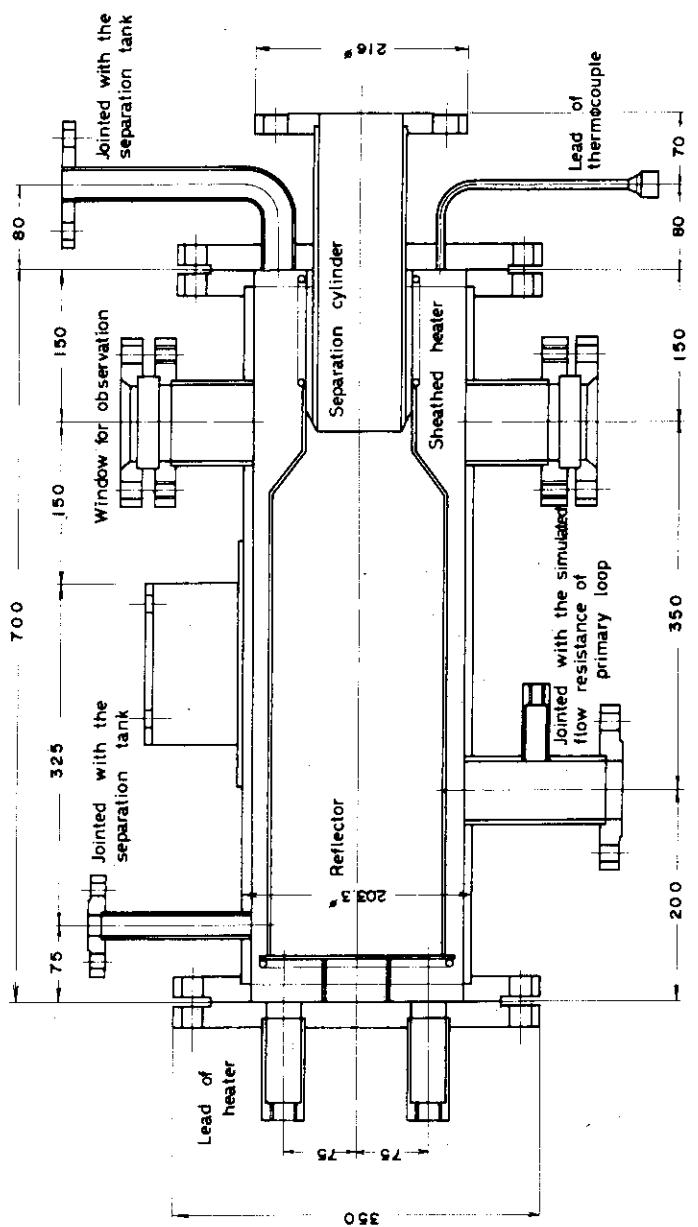


Fig.2.4 Upper plenum of the reflow test facility

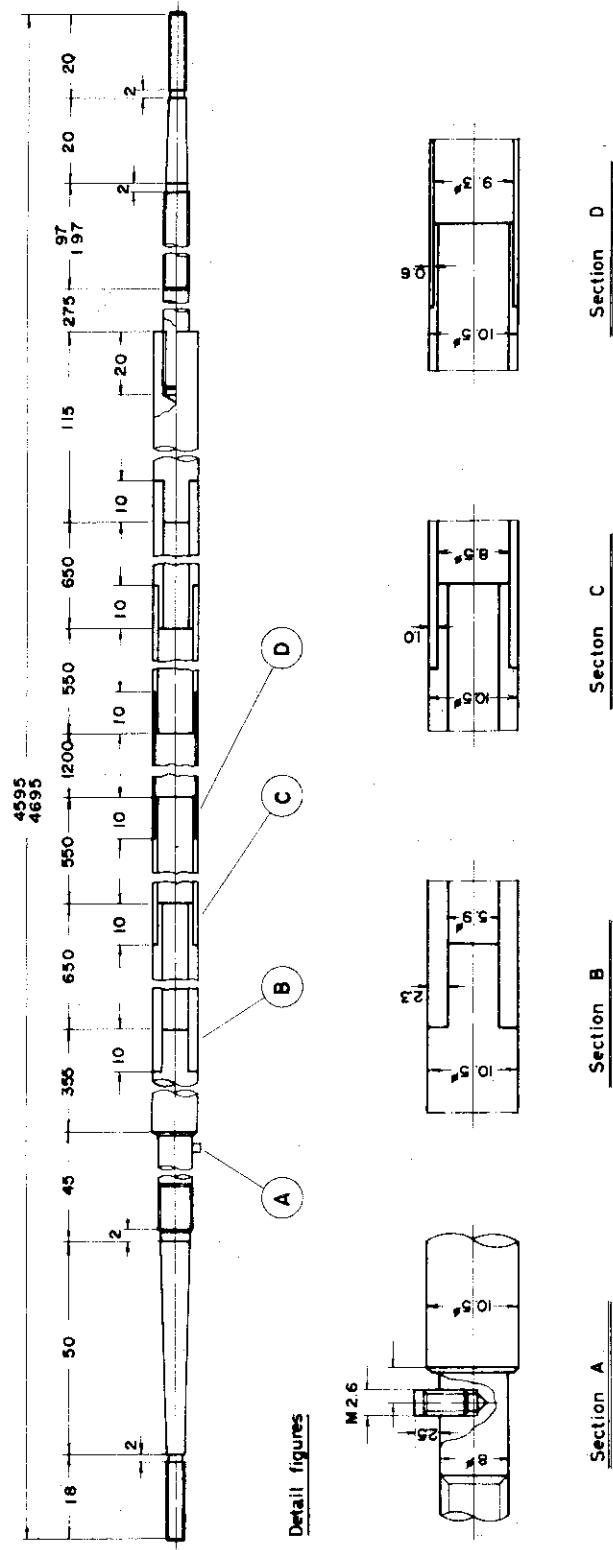


Fig. 2.5 Heating rod used in the reflood test facility

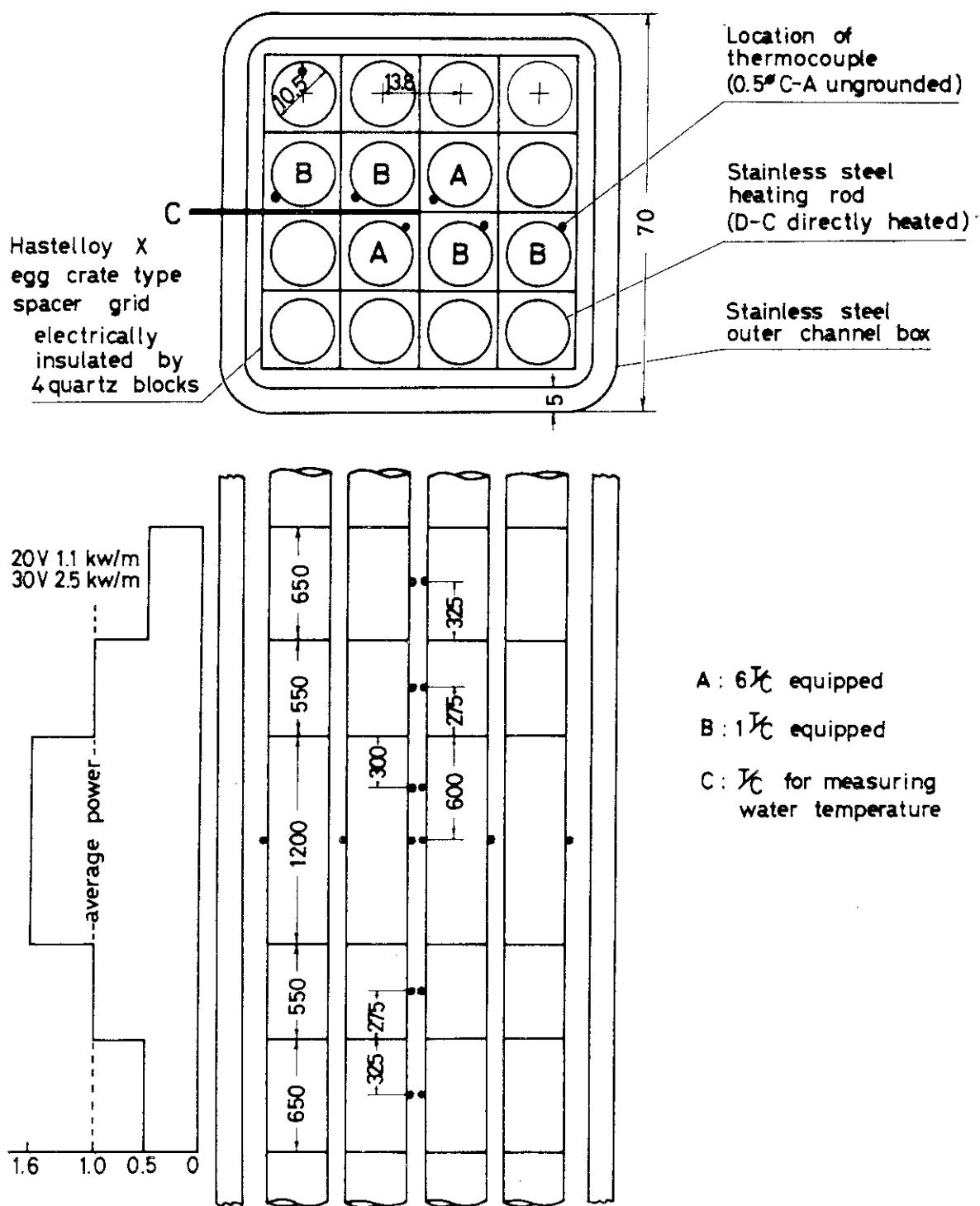


Fig.2.6 Cross-section of test channel and locations of thermocouples equipped

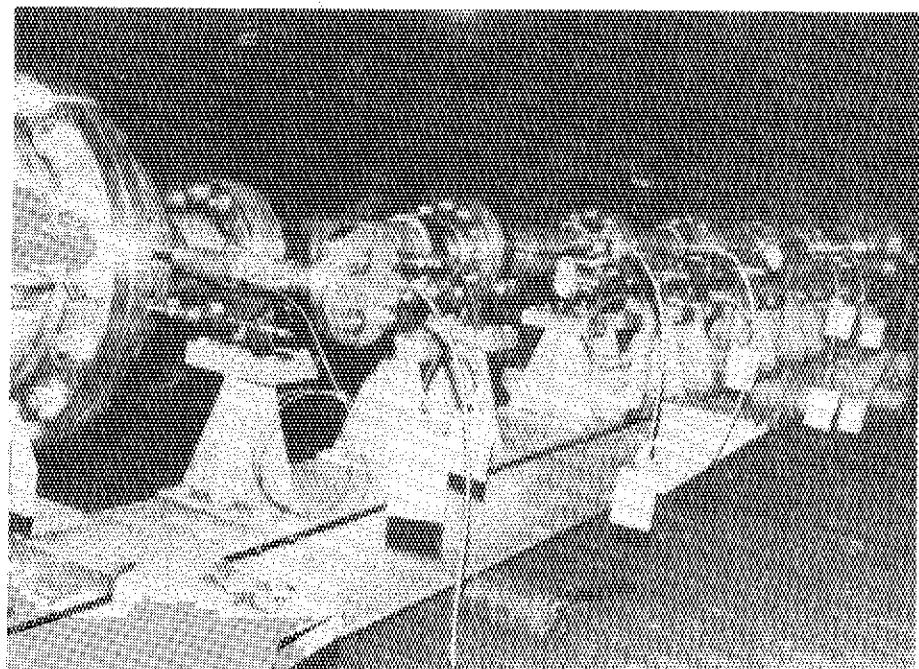


Fig. 2.7 Test section -(1)

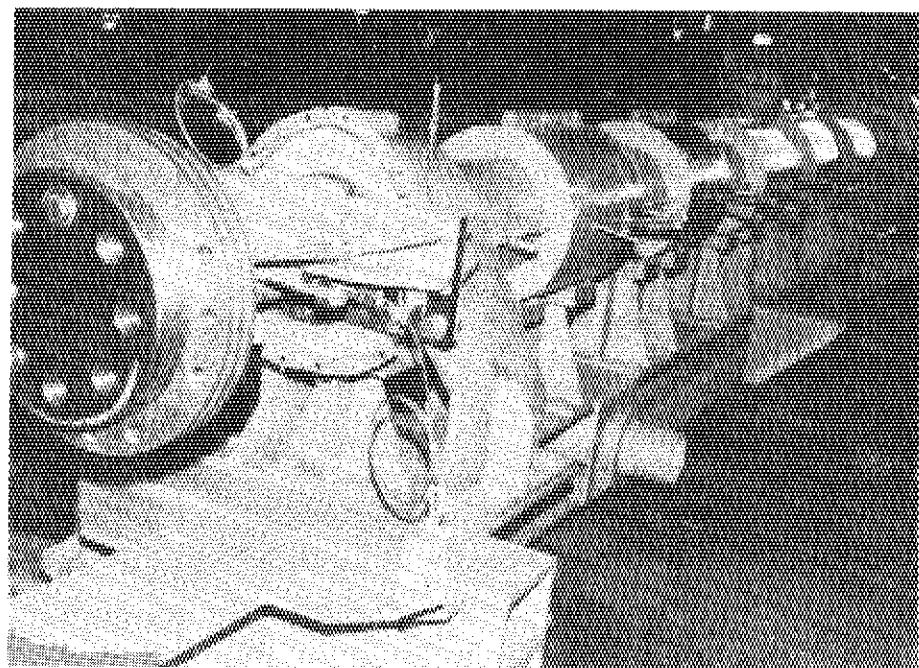


Fig. 2.8 Test section -(2)

### 3. テスト部仕様

#### 1. 上部プレナム

主要部材質	SUS-304
容 積	23ℓ(長さ 700mm, 内径 203.3mm, 肉厚 6.5mm)
設計圧力	4.5 kg/cm <sup>2</sup> g
設計温度	150°C
予熱器	テスト部本体接続部, 内部分離筒および上部反射板にはシーズヒータ(各々 200V で 500W および 1kW)が取付けられている。
熱電対	1 mmφ 非接地型 5 本取付
圧力計取付座	1 個
その 他	ヒータ付反射板 1 個, 観窓 2 個, 保温施工

#### 2. テスト部本体

外筒材質	SUS-304
外筒全長	約 4000mm
外筒寸法	外径 60×60mm 正方形, 肉厚 5mm 外径 87mmφ, 肉厚 5mm 外径 97mmφ, 肉厚 5mm
設計圧力	4.5 kg/cm <sup>2</sup> g
設計温度	150°C
内部発熱体	外径 10.5mmφ, SUS-316L 及びハステロイ-X, 円管 電気抵抗 0.125±0.002Ω
絶縁方式	上下電極部, スペーサ部で外筒と絶縁
使用最高電圧	50V
電流容量	5000A
テスト部固定方法	上部より吊下げ方式(垂直方向移動自由, 水平方向抑制型)
予熱器	シーズヒータ(200V 0.5kW×2, 200V 1kW×13)外巻
その 他	圧力測定用リード管および内部流体温度測定用熱電対取付座付, 保温施工

#### 3. 下部プレナム

主要部材質	SUS-304
容 積	48ℓ(長さ 650mm, 内径 305.5mm, 肉厚 6.5mm)

	32ℓ (長さ 650mm, 内径 248.8mm, 肉厚 9.3mm)
設計圧力	4.5 kg/cm <sup>2</sup> g
設計温度	150°C
予熱器	200V, 1kW
絶縁方式	外筒内面にテフロン板の内張り等にて絶縁
その他	熱電対取付座および冷却水給排ノズル付, 保温施工

#### 4. テスト部の設計製作

緊急冷却水の注水による燃料体の再冠水現象は、燃料体の形状や長さに依存されるところが大きく、その注水速度はダウンカム、下部および上部ブレナム、一次冷却系等の原子炉構造体の影響を受ける。また再冠水実験の主眼としている燃料体間隙を流れる冷却水への燃料体表面における伝熱挙動は、その冷却水の流速と燃料体の形状に大きく左右されるものと考えられる。

このためテスト部は、原子炉構造体のスケールダウンと共に燃料体の温度分布や冷却水流路も模擬するように発熱体の寸法、形状および長さを適切に模擬した。

またテスト部は、実炉の適切なスケールダウンに対する配慮のみでなく、試験目的から要求される苛酷な使用条件、すなわち注水時における高温から低温への急激な温度変化を受ける。再冠水実験は、発熱ピンおよびチャンネル外筒を加熱した状態で下部ブレナムより冷却水を注入する。試験は予熱温度、加熱速度、冷却水温度および冷却水流量を種々変化させて行なわれるが、テスト部はこの急激な加熱冷却の繰返しに対応できる構造である必要がある。

このようにテスト部は、燃料体を主体とした適格な模擬と使用条件に適応する構造について配慮し、設計製作された。

##### 4.1 テスト部1号機

Fig. 4.1にテスト部1号機の組立図を示す。

テスト部1号機は、データの収集とともに装置の確証、データ処理の確立等を主眼に製作されたもので、設計温度は最高 600°C (燃料ピン表面温度)、設計圧力は大気圧である。

このテスト部の主な特徴は、チャンネル外筒として均一な肉厚の四角管を採用したことである。

テスト部1号機の各部の主な設計上の配慮点を以下に述べる。

###### 1) 上部ブレナム模擬部

上部ブレナムは、発熱体部から上昇する蒸気やキャリオーバー水を分離 (キャリオーバー水の一部は環流する) する機能と内部における蒸気やキャリオーバー水の挙動の把握、また、これらの相互干渉による注水速度等への影響を解明すること等を考慮して、炉心部の流路断面積

	32ℓ (長さ 650mm, 内径 248.8mm, 肉厚 9.3mm)
設計圧力	4.5 kg/cm <sup>2</sup> g
設計温度	150°C
予熱器	200V, 1kW
絶縁方式	外筒内面にテフロン板の内張り等にて絶縁
その他	熱電対取付座および冷却水給排ノズル付, 保温施工

#### 4. テスト部の設計製作

緊急冷却水の注水による燃料体の再冠水現象は、燃料体の形状や長さに依存されるところが大きく、その注水速度はダウンカム、下部および上部プレナム、一次冷却系等の原子炉構造体の影響を受ける。また再冠水実験の主眼としている燃料体間隙を流れる冷却水への燃料体表面における伝熱挙動は、その冷却水の流速と燃料体の形状に大きく左右されるものと考えられる。

このためテスト部は、原子炉構造体のスケールダウンと共に燃料体の温度分布や冷却水流路も模擬するように発熱体の寸法、形状および長さを適切に模擬した。

またテスト部は、実炉の適切なスケールダウンに対する配慮のみでなく、試験目的から要求される苛酷な使用条件、すなわち注水時における高温から低温への急激な温度変化を受ける。再冠水実験は、発熱ピンおよびチャンネル外筒を加熱した状態で下部プレナムより冷却水を注入する。試験は予熱温度、加熱速度、冷却水温度および冷却水流量を種々変化させて行なわれるが、テスト部はこの急激な加熱冷却の繰返しに対応できる構造である必要がある。

このようにテスト部は、燃料体を主体とした適格な模擬と使用条件に適応する構造について配慮し、設計製作された。

##### 4.1 テスト部1号機

Fig. 4.1にテスト部1号機の組立図を示す。

テスト部1号機は、データの収集とともに装置の確証、データ処理の確立等を主眼に製作されたもので、設計温度は最高 600°C (燃料ピン表面温度)、設計圧力は大気圧である。

このテスト部の主な特徴は、チャンネル外筒として均一な肉厚の四角管を採用したことである。

テスト部1号機の各部の主な設計上の配慮点を以下に述べる。

###### 1) 上部プレナム模擬部

上部プレナムは、発熱体部から上昇する蒸気やキャリオーバー水を分離 (キャリオーバー水の一部は環流する) する機能と内部における蒸気やキャリオーバー水の挙動の把握、また、これらの相互干渉による注水速度等への影響を解明すること等を考慮して、炉心部の流路断面積

に対応する内容積を有するとともに試験装置としての必要な分離筒、観窓等を設けた。さらに内部の分離筒により分離されたキャリオーバー水を液滴ホールドタンクに蓄積させ、発熱ピンの温度と注水速度との関連等によるキャリオーバー水量の変化等を測定可能なよう考慮した。

## 2) テスト部本体

緊急冷却系による注水時の燃料体表面における熱伝達の多少(核沸騰、膜沸騰等による熱伝達の差異)による燃料体軸方向の温度変化は、燃料体の長さや冷却水の流路断面積に依存される。また発熱体軸方向の温度分布は、その冷却水の流動状態を異ならしめる要因になるものと推定される。

このためテスト部の発熱体は、発熱体表面温度の推移を重視して、その長さや流路断面積について実炉ができるだけ模擬するよう配慮した。さらに個々の発熱ピンに対しては軸方向の肉厚を階段状に変えることにより電気抵抗変化による近似的なコサイン状の発熱分布を与え、実物燃料体の発熱分布に相似するよう設計した。

また発熱ピンの数は製作上の簡略化や試験精度の向上を考慮して、 $4 \times 4$ 本を正方格子状に配列した16本とした。すなわち中央部の発熱ピンを試験の対象とし、その周囲の発熱ピンはチャンネル外筒壁の熱容量の差異等による影響を避けるための温度補償用と考えた。

このほか試験時におけるテスト部の熱膨張に対しては、各々の発熱ピンに常時張力を付加するスプリングの取付やチャンネル外筒の垂直方向へのスライド機構の付設等により吸収させるよう配慮した。

## 3) 下部プレナム模擬部

下部プレナムは、予熱タンクからの冷却水を滞留(一部循環)させ、一定温度の注入水を得る機能を有し、そのほかに発熱ピンの熱膨張のための張力付加用スプリングや発熱ピン各々に電力を分配供給する平編リード線等を内蔵せるよう設計した。

## 4.2 テスト部2号機

Fig. 4.2, Fig. 4.3 にテスト部2号機の組立図を示す。

テスト部2号機は、テスト部1号機の試験結果を参考にして一部改良を加え、さらに加圧下での実験が可能ないように設計した。テスト部2号機の設計温度は最高  $600^{\circ}\text{C}$ (燃料ピン表面温度)、設計圧力は  $4.5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$  である。

Fig. 4.4 にテスト部の中間チャンネル断面図を示す。

テスト部2号機の特徴は、圧力容器としての法規上の制約を受けチャンネル外筒を円筒型にしたことと、スペーサ固定用フランジを専用に設けたこと等である。このため発熱ピンとチャンネル外筒の間には流路スペーサを設けることにより流路断面積をテスト部1号機と合せた。またスペーサ固定用フランジはチャンネル外筒接続用フランジの間に重ねて締付けるよう設計した。

そのほか、フランジ部への予熱ヒータ付加、流路スペーサ内外面壁温測定用熱電対の付加、

さらに下部プレナム胴径の縮少等がなされた。

テスト部2号機は、全て圧力容器安全規則の規定に基づき、第1種圧力容器として設計された。以下に主要部の強度計算結果を記す。

### 1) 上部プレナム

上部プレナム蓋(SUS-304)の厚さは、

$$\begin{aligned} t &= d \sqrt{\frac{CP}{100 \sigma_x} + \frac{1.78Wk_G}{\sigma_x d^3}} + \alpha \\ &= 246 \times \sqrt{\frac{0.6 \times 4.5}{100 \times 9.5} + \frac{1.78 \times 3704 \times 24.5}{9.5 \times 246^3}} + 0 \\ &= 15.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

となり、実際には26 mmとした。

$t$  : 蓋板の最小厚さ mm

$P$  : 最高使用圧力  $4.5 \text{ kg/cm}^2$

$d$  : 蓋の直径  $246 \text{ mm}$

$\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5 \text{ kg/mm}^2$

$\alpha$  : 腐食代 0

$W$  : 全体のボルトに作用する力  $3704 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} &\frac{\pi GP}{400} (G+8bm) \\ &= \frac{3.14 \times 256 \times 4.5}{400} \times (256 + 8 \times 9.6 \times 2.0) \\ &= 3704 \text{ kg} \end{aligned}$$

$G$  : 最小スパン  $256 \text{ mm}$

$b$  : ガスケット座の有効巾  $9.6 \text{ mm}$

$m$  : ガスケット係数  $2.0$

$k_G$  : モーメントアーム  $24.5 \text{ mm}$

$C$  : 係数  $0.6$

上部プレナム胴(SUS-304TP)の厚さは、

$$\begin{aligned} t &= \frac{pD_0}{200 \sigma_x \eta + 2kp} + \alpha \\ &= \frac{4.5 \times 216.3}{200 \times 9.5 \times 1 + 2 \times 0.4 \times 4.5} + 0 \\ &= 0.50 \end{aligned}$$

となり、実際には6.5 mmとした。

$t$  : 脳板の最小厚さ mm  
 $p$  : 最高使用圧力  $4.5 \text{ kg/cm}^2$   
 $D_0$  : 脳外径  $216.3 \text{ mm}$   
 $\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5 \text{ kg/mm}^2$   
 $\eta$  : 繰手効率 1  
 $k$  : 係数 0.4  
 $\alpha$  : 腐食代 0

上部プレナムフランジ(SUS-304)の厚さは、

使用状態でのフランジの厚さ

$$\begin{aligned}
 t &= \sqrt{\frac{YM_0}{\sigma_x B}} + \alpha \\
 &= \sqrt{\frac{4.3 \times 123643}{9.5 \times 216.3}} + 0 \\
 &= 16.0 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

と、ガスケット締付時のフランジの厚さ

$$\begin{aligned}
 t &= \sqrt{\frac{YM_g}{\sigma_x B}} + \alpha \\
 &= \sqrt{\frac{4.3 \times 276287}{13 \times 216.3}} + 0 \\
 &= 20.6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

とを考慮して、24 mmとした。

$t$  : ボルト締フランジの板厚 mm  
 $M_0$  : 使用状態のフランジに作用するモーメント  $123643 \text{ kg-mm}$

$$\begin{aligned}
 M_0 &= M_D + M_G + M_T \\
 &= 123643 \text{ kg-mm} \\
 M_D &= H_D \times h_D = 73393 \text{ kg-mm}
 \end{aligned}$$

$H_D$  : フランジに加わる内圧による荷重

$$\frac{\pi}{400} \times (\text{フランジ内径})^2 \times (\text{圧力}) = 1653 \text{ kg}$$

$h_D$  : モーメントアーム

$$\frac{(\text{ボルト穴の中心径}) - (\text{フランジ内径})}{2} = 44.4 \text{ mm}$$

$$M_G = H_G \times h_G = 34031 \text{ kg-mm}$$

$H_G$  : ボルト荷重とフランジ内面に加わる荷重との差

$$( \text{ボルト荷重} ) - ( \text{内圧による荷重} ) = 1389 \text{ kg}$$

$h_G$  : モーメントアーム

$$\frac{(ボルト穴の中心径)-(ガスケット径)}{2} = 24.5 \text{ mm}$$

$$M_T = H_T \times h_T = 16219 \text{ kg-mm}$$

$H_T$  : フランジに加わる内圧による全荷重とフランジ面に加わる荷重との差

$$(内圧による全荷重) - (内径面に作用する圧力による荷重) = 662 \text{ kg}$$

$h_T$  : モーメントアーム

$$\frac{(ボルト穴の中心径)-(ガスケット径)}{2} = 24.5 \text{ mm}$$

$\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5, 13 \text{ kg/mm}^2$

$B$  : フランジの内径  $216.3 \text{ mm}$

$\alpha$  : 腐食代  $0$

$M_g$  : ガスケット締付時のボルト荷重

$$M_g = W_g \times \frac{C-G}{2} = 276287 \text{ kg}$$

$$W_g = \frac{A_M + A_B}{2} \quad \sigma_a = 11277 \text{ kg}$$

$A_M$  : 所要ボルト総断面積

$$\frac{\text{ガスケット締付時の荷重}}{\text{ボルトの許容応力}} = 2058 \text{ mm}^2$$

$A_B$  : ボルトの総断面積

$$M22 \times 12 \text{ 本} = 3312 \text{ mm}^2$$

$$A_B > A_M$$

$\sigma_a$  : ボルトの許容応力  $4.2 \text{ kg/mm}^2$

$C$  : ボルト穴の中心径  $305 \text{ mm}$

$G$  : ガスケット接触面の平均径  $249 \text{ mm}$

$Y$  : 係数

$$K = \frac{\text{フランジ外径}}{\text{管外径}} = 1.62 \longrightarrow Y = 4.3$$

ノズル (SUS-304Tp) の厚さは

$$\begin{aligned} t &= \frac{pD_0}{200\sigma_x\eta + 2kp} + \alpha \\ &= \frac{4.5 \times 76.3}{200 \times 9.5 \times 1 + 2 \times 0.4 \times 4.5} + 0 \\ &= 0.18 \text{ mm} \end{aligned}$$

となり、実際には  $3.5 \text{ mm}$  とした。

$t$  : ノズルの板厚 mm  
 $p$  : 最高使用圧力  $4.5 \text{ kg/cm}^2$   
 $D_0$  : ノズル外径  $76.3 \text{ mm}$   
 $\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5 \text{ kg/mm}^2$   
 $\eta$  : 繰手効率 1  
 $\alpha$  : 腐食代 0

## 2) テスト部本体

テスト部外筒 (SUS-304Tp) の厚さは、

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{PD_0}{200\sigma_x\eta + 2kp} + \alpha \\
 &= \frac{4.5 \times 97}{200 \times 9.5 \times 1 + 2 \times 0.4 \times 4.5} + 0 \\
 &= 0.23 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

となり、実際には 5 mm とした。

$t$  : 洞の厚さ mm  
 $p$  : 最高使用圧力  $4.5 \text{ kg/cm}^2$   
 $D_0$  : 洞の外径  $97 \text{ mm}$   
 $\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5 \text{ kg/mm}^2$   
 $\eta$  : 繰手効率 1  
 $k$  : 係数 0.4  
 $\alpha$  : 腐食代 0

テスト部フランジ (SUS-304) の厚さは、

使用状態でのフランジの厚さ

$$\begin{aligned}
 t &= \sqrt{\frac{YM_0}{\sigma_x B}} + \alpha \\
 &= \sqrt{\frac{3.3 \times 21556}{9.5 \times 97}} + 0 \\
 &= 8.8 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

と、ガスケット締付時のフランジの厚さ

$$\begin{aligned}
 t &= \sqrt{\frac{YM_g}{\sigma_x B}} + \alpha \\
 &= \sqrt{\frac{3.3 \times 69140}{13 \times 97}} + 0 \\
 &= 13.5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

とを考慮して、20 mmとした。

$t$  : フランジの板厚 mm

$M_0$  : 使用状態のフランジに作用するモーメント

$$M_0 = M_D + M_G + M_T$$

$$= 21556 \text{ kg-mm}$$

$$M_D = H_D \times h_D$$

$$= 10458 \text{ kg-mm}$$

$$H_D = \frac{\pi \times (\text{フランジ内径})^2 \times p}{400}$$

$$= 332 \text{ kg}$$

$$h_D = \frac{(\text{ボルト穴の中心径}) - (\text{フランジ内径})}{2}$$

$$= 31.5 \text{ kg}$$

$$M_G = H_G \times h_G = 7775 \text{ kg-mm}$$

$$H_G = (\text{ボルト荷重}) - (\text{内圧による荷重}) = 365 \text{ kg}$$

$$h_G = \frac{(\text{ボルト穴の中心径}) - (\text{ガスケット径})}{2} = 21.3 \text{ mm}$$

$$M_T = H_T \times h_T = 3323 \text{ kg-mm}$$

$$H_T = (\text{内圧による全荷重}) - (\text{内径面に作用する圧力による荷重})$$

$$= 156 \text{ kg}$$

$$h_T = \frac{(\text{ボルト穴の中心径}) - (\text{ガスケット径})}{2} = 21.3 \text{ mm}$$

$\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5, 13 \text{ kg/mm}^2$

B : フランジの内径  $97 \text{ mm}$

$\alpha$  : 腐食代 0

$M_g$  : ガスケット締付時のボルト荷重

$$M_g = W_g \times \frac{C-G}{2} = 69140 \text{ kg}$$

$$W_g = \frac{A_M + A_B}{2} \sigma_a = 3246 \text{ kg}$$

$A_M$  : 所要ボルト総断面積

$$\frac{\text{ガスケット締付時の荷重}}{\text{ボルトの許容応力}} = 710 \text{ mm}^2$$

 $A_B$  : ボルトの総断面積

$$M14 \times 12 \text{ 本} = 1319 \text{ mm}^2$$

$$A_B > A_M$$

$$\sigma_a : ボルトの許容応力 4.2 \text{ kg/mm}^2$$

$$C : ボルト穴の中心径 160 \text{ mm}$$

$$G : ガスケット接触面の平均径 117.5 \text{ mm}$$

 $Y$  : 係数

$$K = 2.01 \longrightarrow Y = 3.3$$

## 3) 下部プレナム

下部プレナム胴(SUS-304Tp)の厚さは、

$$\begin{aligned} t &= \frac{p D_0}{200 \sigma_x \eta + 2 k p} + \alpha \\ &= \frac{4.5 \times 267.4}{200 \times 9.5 \times 1 + 2 \times 0.4 \times 4.5} + 0 \\ &= 0.63 \text{ mm} \end{aligned}$$

となり、実際には 9.3 mm とした。

 $t$  : 脳の板厚 mm $p$  : 最高使用圧力  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  $\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5 \text{ kg/mm}^2$  $\eta$  : 繙手効率 1 $k$  : 係数 0.4 $\alpha$  : 腐食代 0

下部プレナム蓋(SUS-304)の厚さは

$$\begin{aligned} t &= d \sqrt{\frac{C_p}{100 \sigma_x} + \frac{1.78 W k G}{\sigma_x d^3}} + \alpha \\ &= 304 \sqrt{\frac{0.6 \times 4.5}{100 \times 9.5} + \frac{1.78 \times 3265 \times 25.5}{9.5 \times 304^3}} + 0 \\ &= 17.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

となり、実際には 28 mm とした。

 $t$  : 蓋の板厚 mm $d$  : 蓋の直径 304 mm

$p$  : 最高使用圧力  $4.5 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5 \text{ kg/mm}^2$

$W$  : 全体のボルトに作用する力

$$\frac{\pi G p}{400} \cdot (G + 8bm) = 3265 \text{ kg}$$

$G$  : ガスケット接触面の平均径  $304 \text{ mm}$

$b$  : ガスケット座の有効巾  $5.5 \text{ mm}$

$m$  : ガスケット係数  $0$

$k_G$  : モーメントアーム

$$\frac{C-G}{2} = 25.5 \text{ mm}$$

$C$  : ボルト穴の中心径  $355 \text{ mm}$

$C$  : 係数  $2 \times 0.3$

$\alpha$  : 腐食代  $0$

下部プレナムフランジ(SUS-304)の厚さは、

使用状態でのフランジの厚さ

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{\frac{Y M_0}{\sigma_x B}} + 0 \\ &= \sqrt{\frac{5 \times 129473}{9.5 \times 267.4}} + 0 \\ &= 16 \text{ mm} \end{aligned}$$

と、ガスケット締付時のフランジの厚さ

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{\frac{Y M_g}{\sigma_x B}} + \alpha \\ &= \sqrt{\frac{5 \times 278100}{13 \times 267.4}} + 0 \\ &= 20 \text{ mm} \end{aligned}$$

と考慮して、 $28 \text{ mm}$ とした。

$t$  : フランジの板厚  $\text{mm}$

$M_0$  : 使用状態のフランジに作用するモーメント

$$M_0 = M_D + M_G + M_T$$

$$= 129473 \text{ kg-mm}$$

$$M_D = H_D \times h_D$$

$$= 110639 \text{ kg-mm}$$

$$H_D = \frac{\pi \times (\text{フランジ内径})^2 \times p}{400}$$

$$= 2526 \text{ kg}$$

$$h_D = \frac{(\text{ボルト穴の中心径}) - (\text{フランジ内径})}{2}$$

$$= 43.8 \text{ mm}$$

$$M_G = H_G \times h_G = 0$$

$$M_T = H_T \times h_T = 18834 \text{ kg-mm}$$

$$H_T = (\text{内圧による全荷重}) - (\text{内径面に作用する圧力による荷重})$$

$$= 738.6 \text{ kg}$$

$$h_T = \frac{(\text{ボルト穴の中心径}) - (\text{ガスケット径})}{2} = 25.5 \text{ mm}$$

$\sigma_x$  : 材料の許容応力  $9.5, 13 \text{ kg/mm}^2$

B : フランジの内径  $267.4$

$\alpha$  : 腐食代  $0$

$M_g$  : ガスケット締付時のボルト荷重

$$M_g = W_g \times \frac{C-G}{2} = 278100 \text{ kg}$$

$$W_g = \frac{A_M + A_B}{2} \sigma_a = 10906 \text{ kg}$$

$A_M$  : 所要ボルト総断面積

$$\frac{\text{ガスケット締付時の荷重}}{\text{ボルトの許容応力}} = 777.3 \text{ mm}^2$$

$A_B$  : ボルトの総断面積

$$M22 \times 16 \text{ 本} = 4416 \text{ mm}^2$$

$$A_B > A_M$$

$\sigma_a$  : ボルトの許容応力  $4.2 \text{ kg/mm}^2$

C : ボルトの許容応力  $4.2 \text{ kg/mm}^2$

G : ガスケット接触面の平均径  $304 \text{ mm}$

Y : 係数  $5$

$$K = 1.5 \longrightarrow Y = 5$$

Fig. 4.5 に変形した流路スペーサを Fig. 4.6 に改造後の流路スペーサの組込状況を示す。

テスト部 2 号機は実験中に、流路スペーサの変形により、発熱体と流路スペーサ間に電気的

短絡を生じたため、一体形（4本の発熱ピンをダミーとして冷却材の流路を維持した外周円筒形のもの）の流路スペーサを新たに製作して置き換えた。これによりテスト部2号機を使用した1・2本の発熱ピンによる実験がテスト部3号機の製作までしばらくの間続けられた。

#### 4.3 テスト部3号機

Fig. 4.7, Fig. 4.8 にテスト部3号機の組立図を示す。

テスト部3号機は、テスト部2号機の上下プレナム部分を除くテスト部本体のみを新たに製作して置き換えることにより、加圧下での実験とより高温での使用が可能になるよう設計された。

テスト部の本体は、テスト部2号機と同様な圧力容器としての円筒形の外筒、内部に矩形状流路を形成する流路スペーサおよびこれらを縦方向に接続するフランジよりなっている。

テスト部本体、流路スペーサおよび接続用フランジには全てSUS-304を使用し、第1種圧力容器構造規格に準拠して設計製作した。

テスト部外筒は、外径97φ、肉厚5tを用い、外筒と発熱ピンの間には4×4本のバンドルに対応する冷却材の流路を維持するために、外周を円筒形、内部を60×60mmの矩形状に加工した流路スペーサを設けることにより圧力容器の構造規格から制約される形状を補うよう配慮している。なお外筒と流路スペーサは互に軸方向の熱膨張を抑制しないよう固定し、一体となった外筒と流路スペーサは各々発熱ピンを絶縁固定するスペーサ固定用フランジを介して接続され、テスト部本体を形成するようにしている。

スペーサ固定用フランジは、内部に発熱体の電気的絶縁を目的とした石英ガラスを介してスペーサが取付けられているものであり、各々は外筒接続用フランジの間に固定される。

その他、テスト部には流路スペーサの内外壁温の測定用熱電対取付座、圧力計取付座等が設けられている。さらに外筒表面には予熱用ヒータがフランジを含め取付けられ、その表面は全て保温および外被が施されている。

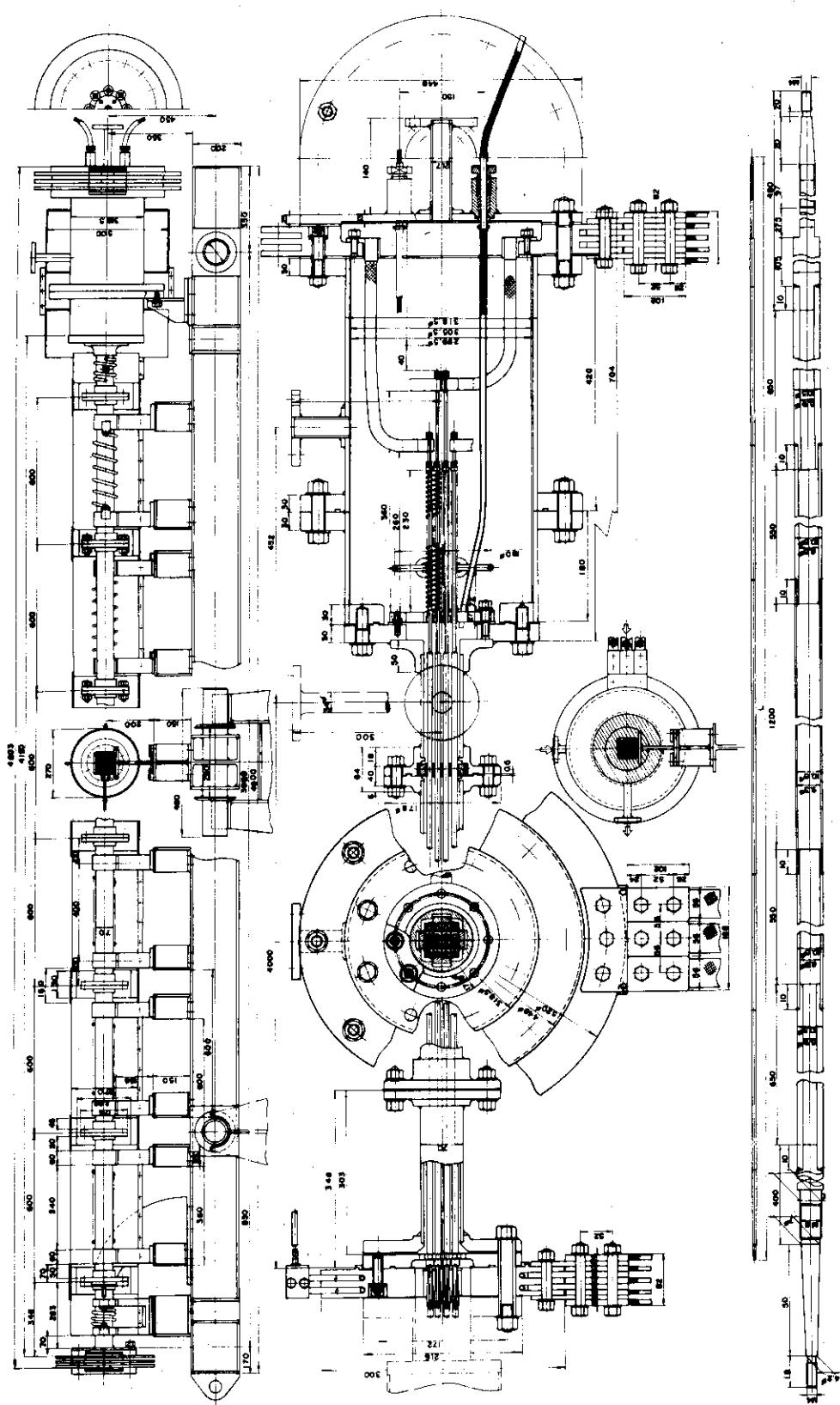


Fig.4.1 Test section - (3)

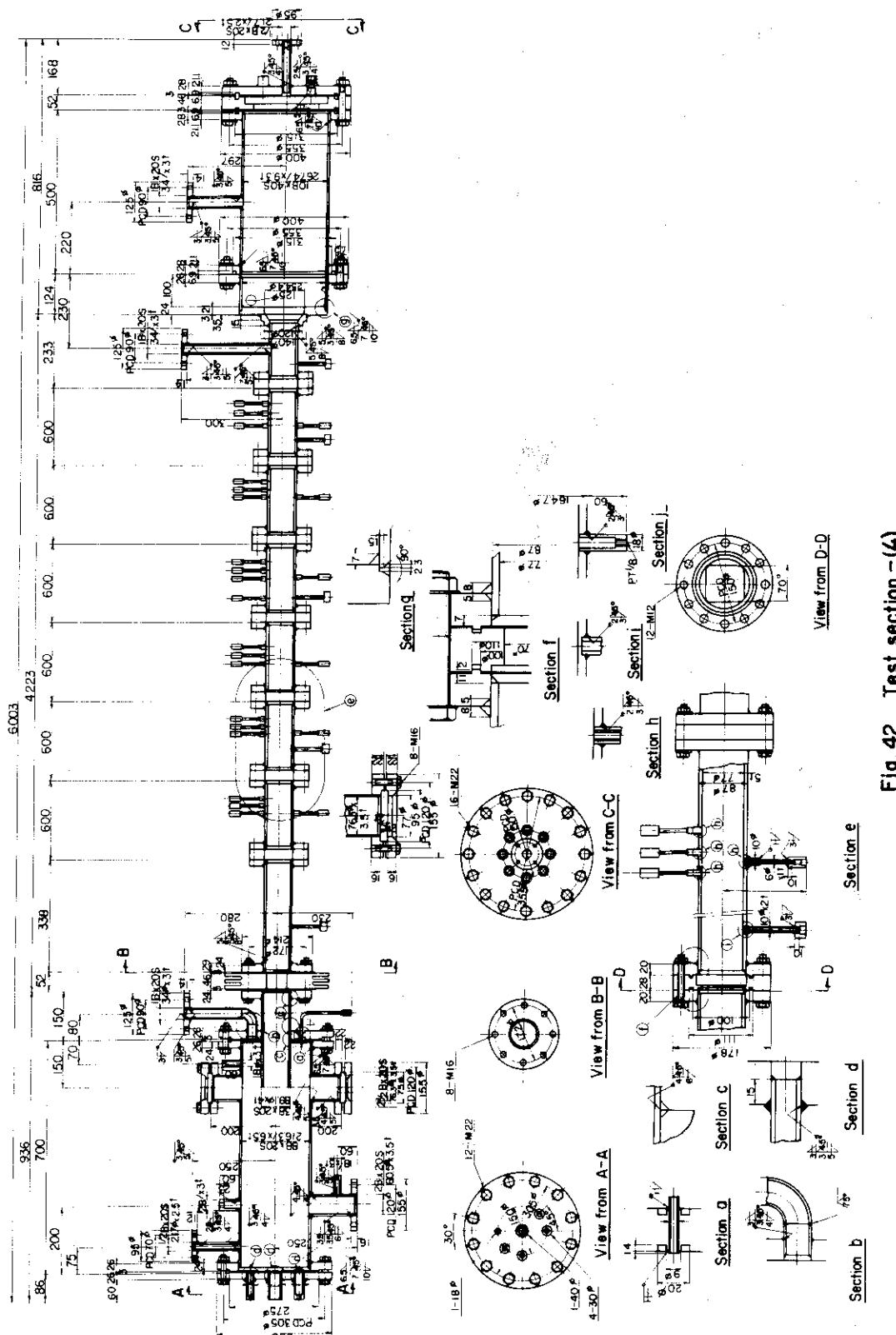


Fig. 4.2 Test section -(4)

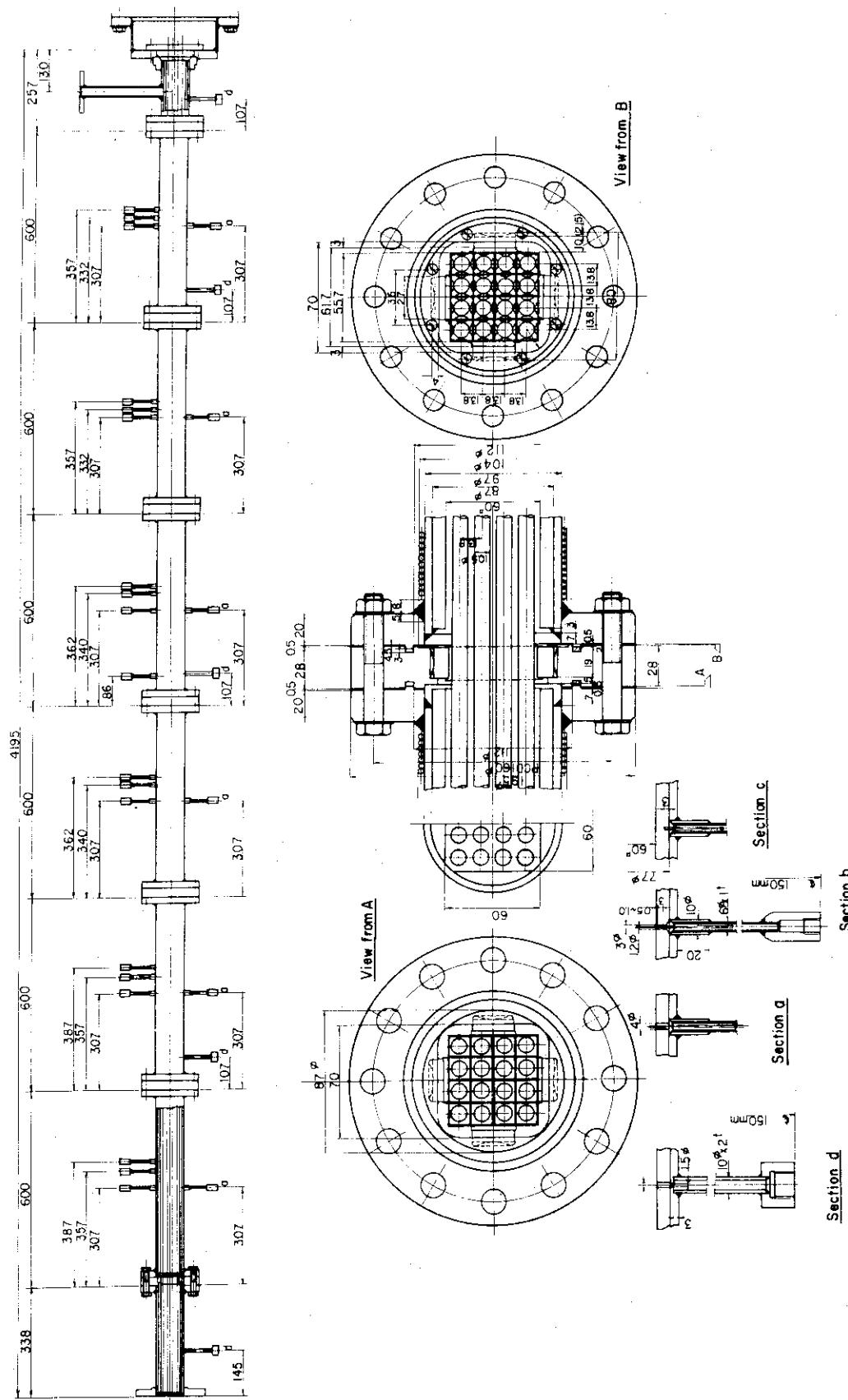


Fig. 4.3 Test section -(5)

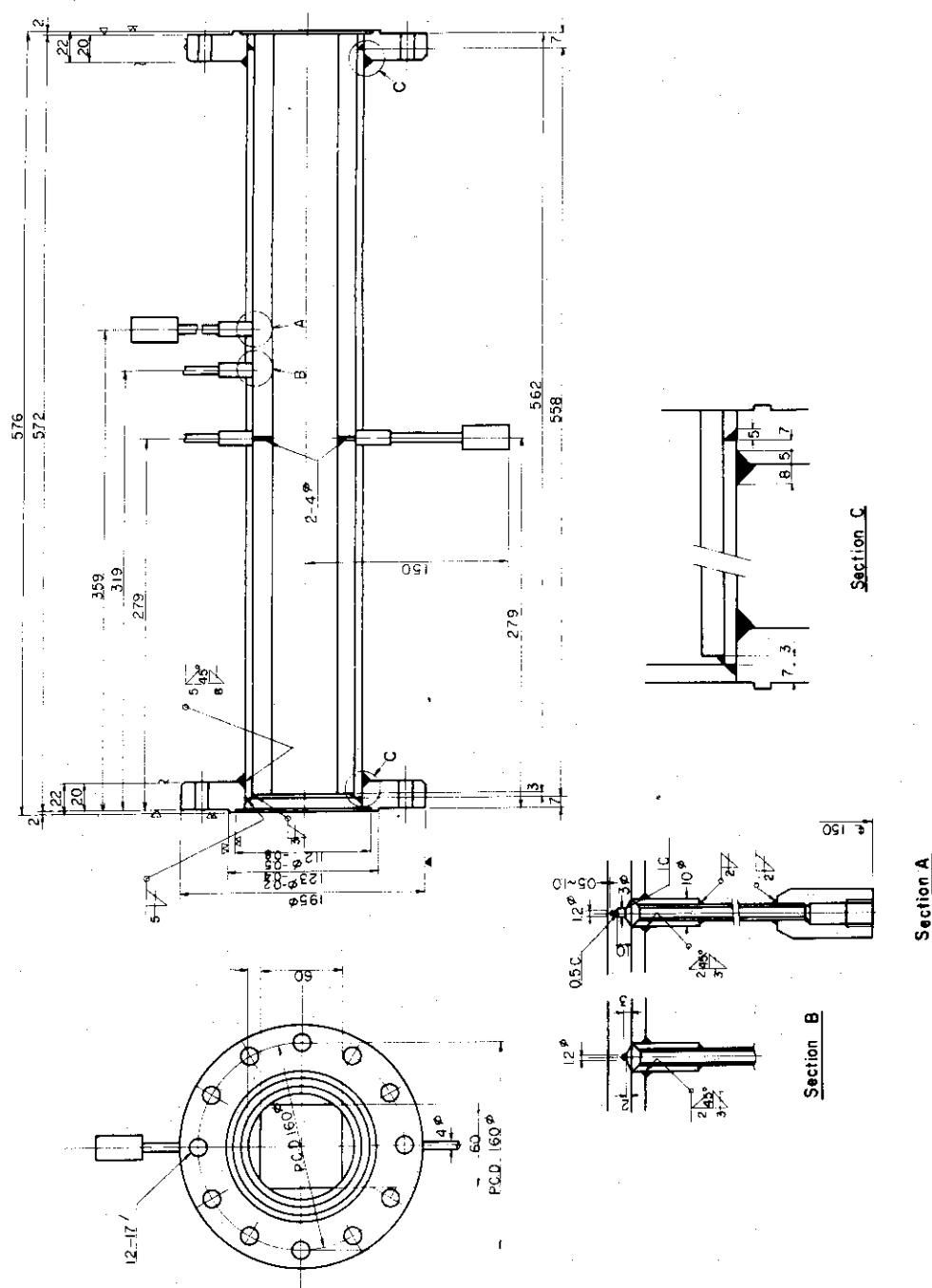


Fig. 4.4 Test section - (6)

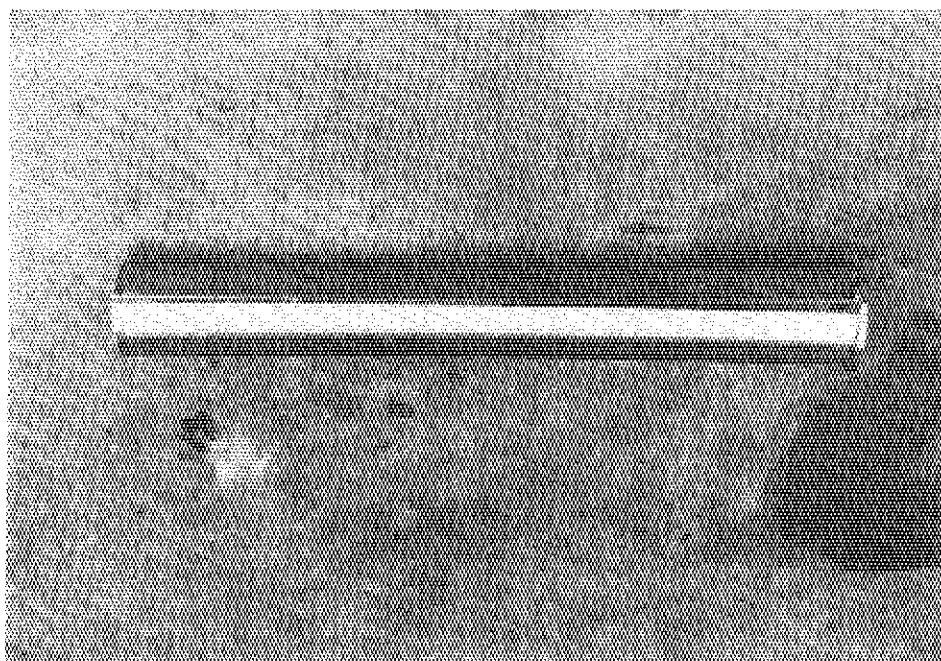


Fig. 4.5 Flow spacer after bowing

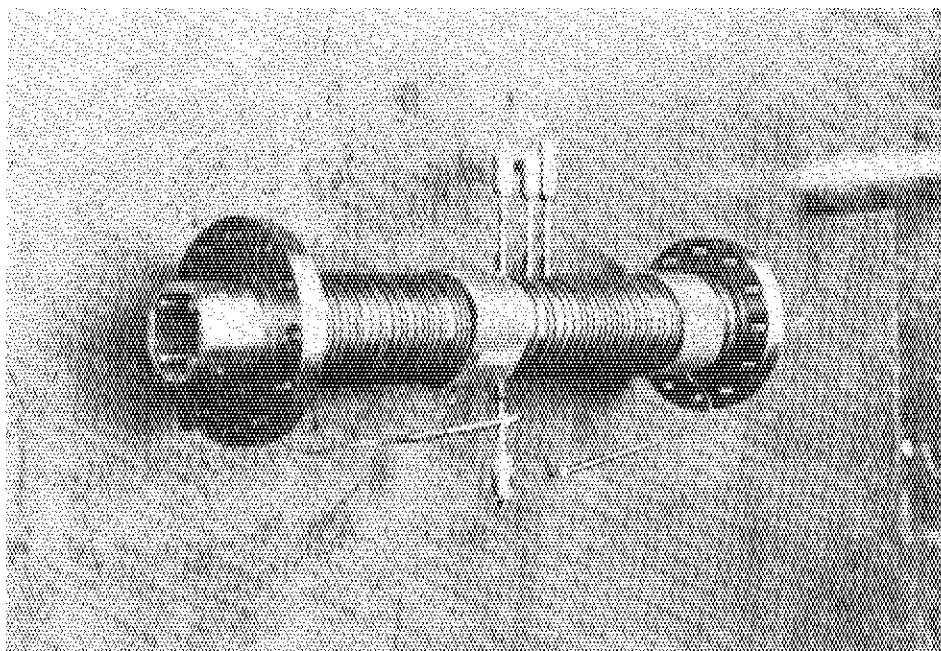


Fig. 4.6 Flow spacer

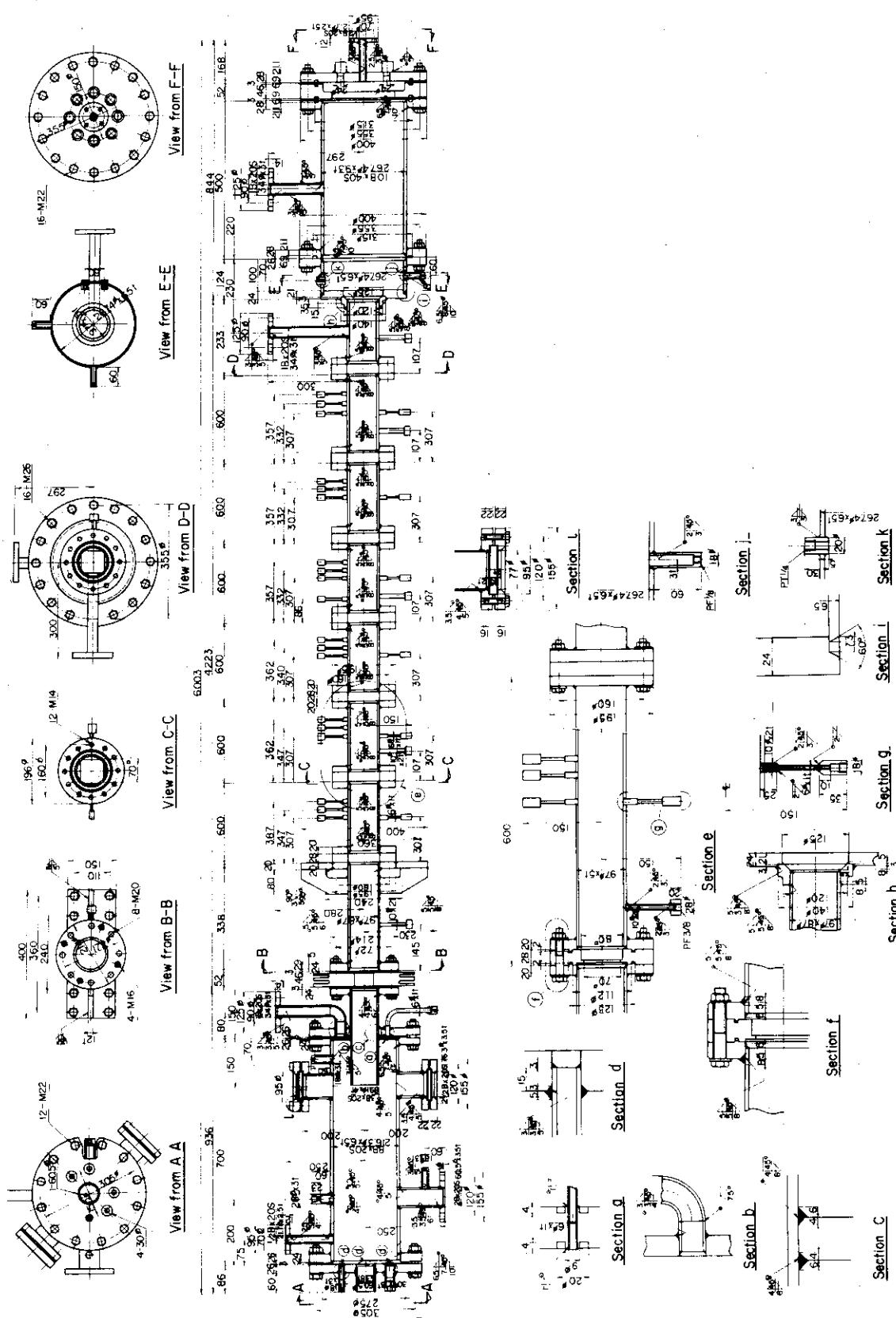


Fig. 4.7 Test section - (7)

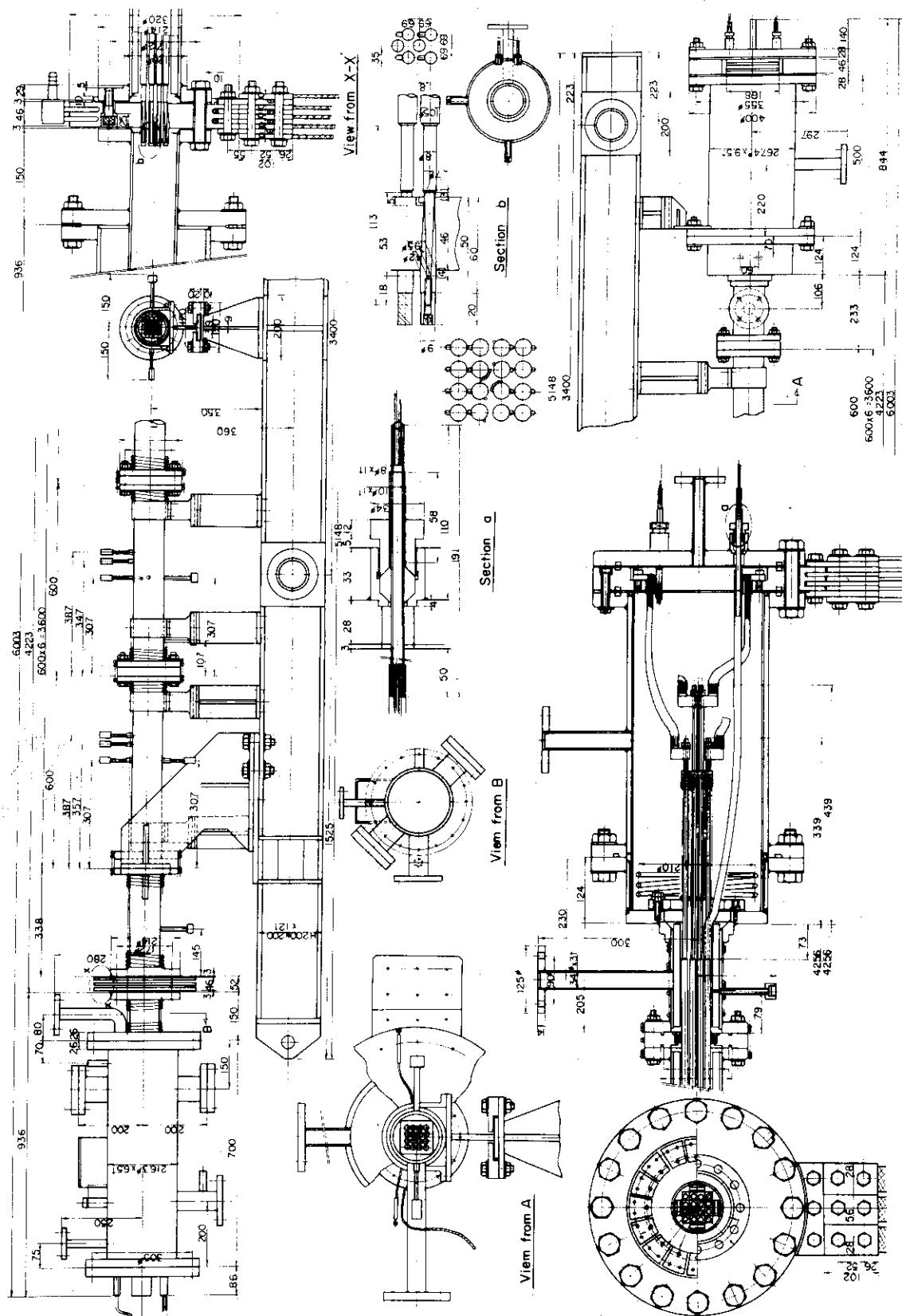


Fig. 4.8 Test section - (8)

## 5. テスト部製作上の技術的問題点

テスト部製作上の技術的問題点は、前にも述べたように実炉の適切なスケールダウンの配慮のみでなく、注水時における高温から低温への急激な温度変化に対応できるテスト部の製作にあると考えられる。

再冠水実験では、実炉における定常稼動と異なり燃料体を加熱した状態において下部ブレナムより冷却水を注入させる。試験は、予熱温度、加熱速度、冷却水温度および冷却水流量を種々変化させて行なわれるので、テスト部はこの急激な加熱冷却の繰返しを受ける。

このようなテスト部の加熱冷却の繰返しで問題となることは、温度変化による構造材の膨張と収縮、それに急激な加熱冷却のため生ずる熱応力による変形や破壊であると考えられる。特にテスト部の構成材料は、腐食等を考慮して、オーステナイト系ステンレス鋼を使用しているため熱による膨張は比較的大きく、縦方向に長いテスト部の伸縮を十分考慮する必要がある。また構成材であるオーステナイト系ステンレス鋼は、熱伝導度が低いため、熱応力が発生しやすく、この苛酷な熱サイクルを受けて変形や破壊等が懸念される。

テスト部2号機では、試験中に、熱サイクルによる流路スペーサの変形が起り、電気短絡を生じた。また注水時においてチャンネル外筒の接続フランジ部より蒸気の漏洩等、幾つかの改善すべき問題点が生じている。

発熱ピンに取付けられる熱電対は発熱ピンの表面温度の推移を把握するためのもので、再冠水実験では加熱された発熱ピンに対して冷却水が注入され、その時の急激な温度変化を精確に測定することが重要となる。

そして加熱された発熱ピンは冷却水の注入により急激に冷却されていく、この時発熱ピン表面温度応答を精確に測定することは非常に難かしく、その測定精度が熱電対の取付状態により大きく左右されることとは既に周知のことである。

発熱ピン表面に近接する冷却水の温度勾配は非常に大きく、熱電対の接点の位置によっては冷却水の影響を受け発熱ピン表面の温度と著しく異なる場合も考えられる。

このようなことを考慮した場合、発熱ピンに取付けられる熱電対は、発熱ピン表面より伝わる熱に対しての抵抗が少なく単独で冷却水の影響を受けないことが大切である。すなわち熱電対の接点部が極小のことと表面に取付けられる熱電対と発熱ピンとが一体となることが望ましい。

本テスト部では可能な限り小径の熱電対を選択、採用すると共に、その取付法も種々検討し順次改良してきた。

Fig. 5.1 に発熱ピンの熱電対取付法を示す。

現時点までに採用した取付方法は、

溝無先端スポット溶接取付け， - (a)

溝埋込先端プラズマ溶接取付け， - (b)

内装取付（先端外表面プラズマ溶接）， - (c)

発熱ピン製作初期に採用した先端スポット溶接取付けは、取付時の作業能率や経費の面では他に比類なく有利であるが、前にも述べたように測定値が真の発熱ピン表面の温度である確証が薄く、不安な要素が幾つか考えられる。また取付溶接部に亀裂等の欠陥が生じ易く著しく熱電対の寿命を短縮させる欠点があり、1号機と2号機の一部に使用しただけである。

先端プラズマ溶接取付けは、作業性も比較的容易であり、その取付状態の信頼性も高い。現在採用されているものはほとんどがこの方法で先端を溝内に埋込むことにより冷却水の影響を極力避けるよう配慮している。

溝切りは熱電対の先端（感温部30mm程度）を埋込むだけのもので、その他のリード部はステンレス鋼箔によりスポット溶接で固定している。溝の加工は、発熱ピン軸方向に対して平行に直走る溝と、その他に周方向に90°回転してリード部と感温部が同一線上に重なるのを防いだものと二種類採用している。

この他、リード部を発熱ピンの内部に導き先端のみを外表面に露出させてプラズマ溶接によりシールと共に固定するいわゆる内装型も採用している。

このように発熱ピンへの熱電対取付けは種々検討され実験等も行なって改良されてきた。しかし前にも述べたように、急激に冷却される発熱ピンの表面温度の測定には多くの問題があり、今後ともさらに検討していく必要があると思われる。

## 6. 謝 辞

本テスト部の設計製作に当り種々御指導をいただいた安全工学部、能沢 正雄部長、山崎 弥三郎主任研究員、関口 一雄室長代理および安全工学第2研究室の皆様に深く感謝致します。

また本テスト部1号機の製作に当った有限会社原子力技術サービスおよび2号機、3号機の製作に当った株式会社荒友製作所に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 深谷、村尾等、再冠水試験装置の建設報告書、未公開資料、1975年5月
- 2) 村尾、井口等、再冠水実験計画とシリーズ1実験の概要、未公開資料、1975年3月
- 3) 新妻、村尾等、再冠水実験装置用計装設備の概要、未公開資料、1975年8月
- 4) 村尾、井口等、再冠水実験データ報告・1(シリーズ2A) 未公開資料、  
1975年10月
- 5) 中川 一郎、ボイラー及び圧力容器安全規則 三晃社
- 6) 化学工学協会、熱交換器 丸善
- 7) 斎藤 勇、圧力容器構造規格による計算例集 産業図書

発熱ピン製作初期に採用した先端スポット溶接取付けは、取付時の作業能率や経費の面では他に比類なく有利であるが、前にも述べたように測定値が真の発熱ピン表面の温度である確証が薄く、不安な要素が幾つか考えられる。また取付溶接部に亀裂等の欠陥が生じ易く著しく熱電対の寿命を短縮させる欠点があり、1号機と2号機の一部に使用しただけである。

先端プラズマ溶接取付けは、作業性も比較的容易であり、その取付状態の信頼性も高い。現在採用されているものはほとんどがこの方法で先端を溝内に埋込むことにより冷却水の影響を極力避けるよう配慮している。

溝切りは熱電対の先端（感温部30mm程度）を埋込むだけのもので、その他のリード部はステンレス鋼箔によりスポット溶接で固定している。溝の加工は、発熱ピン軸方向に対して平行に直走る溝と、その他に周方向に90°回転してリード部と感温部が同一線上に重なるのを防いだものと二種類採用している。

この他、リード部を発熱ピンの内部に導き先端のみを外表面に露出させてプラズマ溶接によりシールと共に固定するいわゆる内装型も採用している。

このように発熱ピンへの熱電対取付けは種々検討され実験等も行なって改良されてきた。しかし前にも述べたように、急激に冷却される発熱ピンの表面温度の測定には多くの問題があり、今後ともさらに検討していく必要があると思われる。

## 6. 謝 辞

本テスト部の設計製作に当り種々御指導をいただいた安全工学部、能沢 正雄部長、山崎 弥三郎主任研究員、関口 一雄室長代理および安全工学第2研究室の皆様に深く感謝致します。

また本テスト部1号機の製作に当った有限会社原子力技術サービスおよび2号機、3号機の製作に当った株式会社荒友製作所に感謝致します。

### 参考文献

- 1) 深谷、村尾等、再冠水試験装置の建設報告書、未公開資料、1975年5月
  - 2) 村尾、井口等、再冠水実験計画とシリーズ1実験の概要、未公開資料、1975年3月
  - 3) 新妻、村尾等、再冠水実験装置用計装設備の概要、未公開資料、1975年8月
  - 4) 村尾、井口等、再冠水実験データ報告・1(シリーズ2A) 未公開資料、
- 1975年10月
- 5) 中川 一郎、ボイラー及び圧力容器安全規則 三晃社
  - 6) 化学工学協会、熱交換器 丸善
  - 7) 斎藤 勇、圧力容器構造規格による計算例集 産業図書

発熱ピン製作初期に採用した先端スポット溶接取付けは、取付時の作業能率や経費の面では他に比類なく有利であるが、前にも述べたように測定値が真の発熱ピン表面の温度である確証が薄く、不安な要素が幾つか考えられる。また取付溶接部に亀裂等の欠陥が生じ易く著しく熱電対の寿命を短縮させる欠点があり、1号機と2号機の一部に使用しただけである。

先端プラズマ溶接取付けは、作業性も比較的容易であり、その取付状態の信頼性も高い。現在採用されているものはほとんどがこの方法で先端を溝内に埋込むことにより冷却水の影響を極力避けるよう配慮している。

溝切りは熱電対の先端（感温部30mm程度）を埋込むだけのもので、その他のリード部はステンレス鋼箔によりスポット溶接で固定している。溝の加工は、発熱ピン軸方向に対して平行に真直走る溝と、その他に周方向に90°回転してリード部と感温部が同一線上に重なるのを防いだものと二種類採用している。

この他、リード部を発熱ピンの内部に導き先端のみを外表面に露出させてプラズマ溶接によりシールと共に固定するいわゆる内装型も採用している。

このように発熱ピンへの熱電対取付けは種々検討され実験等も行なって改良されてきた。しかし前にも述べたように、急激に冷却される発熱ピンの表面温度の測定には多くの問題があり、今後ともさらに検討していく必要があると思われる。

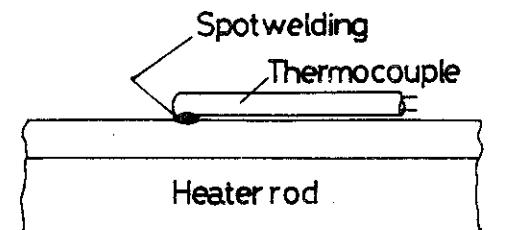
## 6. 謝 辞

本テスト部の設計製作に当り種々御指導をいただいた安全工学部、能沢 正雄部長、山崎 弥三郎主任研究員、関口 一雄室長代理および安全工学第2研究室の皆様に深く感謝致します。

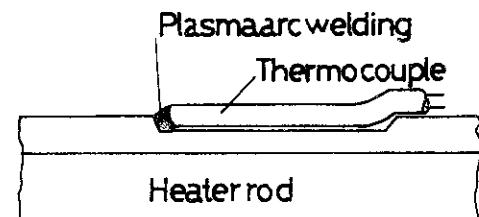
また本テスト部1号機の製作に当った有限会社原子力技術サービスおよび2号機、3号機の製作に当った株式会社荒友製作所に感謝致します。

## 参考文献

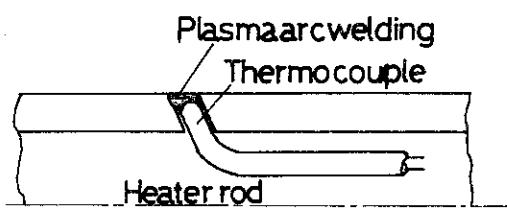
- 1) 深谷、村尾等、再冠水試験装置の建設報告書、未公開資料、1975年5月
- 2) 村尾、井口等、再冠水実験計画とシリーズ1実験の概要、未公開資料、1975年3月
- 3) 新妻、村尾等、再冠水実験装置用計装設備の概要、未公開資料、1975年8月
- 4) 村尾、井口等、再冠水実験データ報告・1(シリーズ2A) 未公開資料、  
1975年10月
- 5) 中川 一郎、ボイラー及び圧力容器安全規則 三晃社
- 6) 化学工学協会、熱交換器 丸善
- 7) 齋藤 勇、圧力容器構造規格による計算例集 産業図書



Type a



Type b



Type c

Fig.5.1 Thermo couple attachment method