

# 「もんじゅ」第6次試作模擬燃料集合体

1984年5月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

# 「もんじゅ」第6次試作模擬燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験

高橋 伸 友\* 山下 幸 広\*  
大坪 章\* 井口 達 郎\*

## 要 旨

「もんじゅ」第6次試作模擬燃料集合体 (M6 CWP) の高温ナトリウム中における流動耐久試験を実施した。試験はナトリウム温度 397°C、ナトリウム流量 17.36 kg/sec、コールドトラップ温度 120°C の条件で積算 2384 時間実施した。本試験の結果、以下の事が明らかになった。

- 1) ナトリウム流動試験の結果、初期の集合体全体の平均圧力損失係数  $C_D$  は次式で表わすことができる。

$$C_D = 113.584 \times Re_B^{-0.107754}$$

- 2) 全圧力損失の経時変化については、試験開始後約 300 時間で飽和状態となり、最終的に約 3% の増加が認められた。
- 3) 「もんじゅ」EVST (Ex-vessel Storage Tank) の設計条件に準じたナトリウムドレンを行なったところ、集合体に約 90 g のナトリウムが残留付着していた。
- 4) ナトリウム流動試験後、模擬燃料集合体の外観目視検査を行なった結果、燃料ピンが支持機構 (ノックバー) より外れることはなく健全であった。

本試験は「もんじゅ」試作燃料集合体についての最終流動耐久試験であるので、本報告書では今迄の流動耐久試験で生じた圧力損失上昇及び、耐久性に関する色々な問題点についてまとめを行なった。

Sodium Flow and Endurance Test of "MONJU" Dummy Fuel  
Subassembly of 6th Test Production

N. Takahashi, Y. Yamashita,  
A. Ohtsubo, and T. Iguchi

Abstract

Sodium flow and endurance test for "MONJU" dummy fuel subassembly of the 6th test production (abbreviated name M6CWP) was carried out in Sodium Flow Test Loop. This test was performed for 2,384 hours with the inlet sodium temperature of 397°C, the flow rate of 17.36 kg/sec and the cold trap temperature of 120°C. The results of this test showed that;

- 1) The initial average pressure loss coefficient  $C_D$  of M6CWP was given by following equation.

$$C_D = 113.58 \times Re_B^{-0.10775}$$

- 2) In the measurement of total pressure, the increase of pressure loss became to saturation at about 300 hours after the beginning of the test and finally approached to 3% larger than the initial value.
- 3) As a result of the sodium draining conducted in accordance with the design condition for "MONJU" EVST (Ex-vessel Storage Tank), it was found that the sodium of about 90g remained in the subassembly.
- 4) The eye inspection of the subassembly after the test showed that the subassembly was intact without separation of fuel pins from knock bars.

Since this was the final test for "MONJU" dummy fuel subassembly of test production, this report summarized the total pressure loss increase and various points concerning endurance found in the test series until now.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 試験装置 .....	2
2.1 ナトリウム流動伝熱試験装置 .....	2
2.2 供試燃料集合体 .....	2
2.3 測定機器 .....	3
2.4 データ整理と測定誤差 .....	4
3. 試 験 .....	6
3.1 試験体の挿入・据え付け .....	6
3.2 圧力計・差圧計の校正 .....	6
3.3 ナトリウム充填及び精製運転 .....	6
3.4 ナトリウム流動耐久試験 .....	6
3.5 ナトリウムドレン・集合体引抜及び洗浄 .....	7
4. 試験結果 .....	8
4.1 ナトリウム流動耐久試験 .....	8
4.2 ナトリウム洗浄 .....	8
5. 試作回数による比較検討 .....	9
5.1 供試燃料集合体 .....	9
5.2 試験結果 .....	10
5.2.1 圧力損失特性 .....	10
5.2.2 圧力損失の経時変化 .....	11
5.2.3 耐 久 性 .....	12
5.2.4 その他特記事項 .....	13
謝 辞 .....	14
参考文献 .....	15

## Appendix

1. M6CWPナトリウム流動耐久試験時間経過 .....	83
2. ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績 .....	85
3. ワイヤ型燃料束摩擦損失係数に関する半経験式 .....	97
4. 燃料束摩擦損失計算式評価 .....	98

## List of Tables

Table 2-1	Specification of M6CWP
Table 2-2	Nomenclature and Definition
Table 3-1	Experimental Condition of "MONJU" Core Fuel Subassembly Test
Table 4-1	Analytical Result of Sodium Flow Test M6CWP
Table 5-1	Specification of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly
Table 5-2	Analytical Result of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly Sodium Flow Test
Table 5-3	Analytical Result of Sodium Flow Test M2CWH, M2CWM
Table 5-4	Analytical Result of Sodium Flow Test M3CWM, M3CWT
Table 5-5	Analytical Result of Sodium Flow Test M3CWG, M3CWH
Table 5-6	Analytical Result of Sodium Flow Test M5CWT
Table 5-7	Experimental Knowledge on Pressure Loss Variation
Table 5-8	Experimental Results about Endurance Test of Dummy Fuel Subassemblies
Table 5-9	Important Experimental Results except Those Explained Already

## List of Figures

- Fig. 2-1 Flow Diagram of Sodium Flow Test
- Fig. 2-2 "MONJU" Fuel Subassembly Test Section (3rd Production)
- Fig. 2-3 "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)
- Fig. 2-4 Sodium Pressure Gauge
- Fig. 2-5 Instrumentation of "MONJU" Fuel Subassembly Test Section
- Fig. 3-1 Calibration Curve for  $\Delta P_E$
- Fig. 3-2 Calibration Curve for Px2-1
- Fig. 3-3 Calibration Curve for Px2-2
- Fig. 3-4 Calibration Curve for Px2-3
- Fig. 4-1 Result of Sodium Flow Test M6CWP (Sodium Flow Rate V.S. Total Pressure Loss)
- Fig. 4-2 Result of Sodium Flow Test M6CWP (Reynolds Number V.S. Total Pressure Loss Coefficient)
- Fig. 4-3 Increase in Total Pressure Loss of M6CWP
- Fig. 4-4 Analysis of Ethyl Alcohol Used for Sodium Cleaning of M6CWP
- Fig. 5-1 Operation History of Sodium Flow Test Loop
- Fig. 5-2 (a) "MONJU" Fuel Subassembly Test Section (1st Production)
- Fig. 5-2 (b) "MONJU" Fuel Subassembly Test Section (2nd Production)
- Fig. 5-3 (a) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CGF)
- Fig. 5-3 (b) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CGH)
- Fig. 5-3 (c) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CGT)
- Fig. 5-3 (d) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CGM)
- Fig. 5-3 (e) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CGS)
- Fig. 5-3 (f) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CWT)
- Fig. 5-3 (g) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CWS)
- Fig. 5-4 (a) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 2nd Test Production (M2CWG)
- Fig. 5-4 (b) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 2nd Test Production (M2CWH)

- Fig. 5-5 (a) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 3rd Test Production (M3CWM)
- Fig. 5-5 (b) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 3rd Test Production (M3CWT)
- Fig. 5-5 (c) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 3rd Test Production (M3CWG)
- Fig. 5-5 (d) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 3rd Test Production (M3CWH)
- Fig. 5-6 "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 4th Test Production (M4CWT)
- Fig. 5-7 (a) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 5th Test Production (M5CWT)
- Fig. 5-7 (b) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 5th Test Production (M5CWT-2)
- Fig. 5-8 "MONJU" Dummy Blanket Fuel Subassembly of the 4th Test Production (M4BG)
- Fig. 5-9 Result of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly Sodium Flow Test
- Fig. 5-10 Comparison of Increase in Total Pressure Loss of "JOYO" Dummy Fuel Subassembly
- Fig. 5-11 Comparison of Increase in Total Pressure Loss of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly
- Fig. 5-12 The Maximum Pressure Loss Increase Determined v.s. Bundle Hydraulic Diameter



## 1. 緒 言

これまでに実施してきた高速原型炉「もんじゅ」燃料集合体第5次試作のナトリウム流動耐久試験<sup>1,2)</sup>に引続き、「もんじゅ」製作設計準備—その2に基づいて設計、製作された「もんじゅ」第6次試作模擬炉心燃料集合体第4領域（略称M6CWP）のナトリウム流動耐久試験を実施した。

今回実施したナトリウム流動耐久試験は自動組立性を考慮して試作された模擬燃料集合体を高温ナトリウムで長時間流動させ、耐久性について調べるとともに燃料ピンの支持機構の健全性、及び圧力損失特性を把握する最後のナトリウム流動試験である。

本報告書は「もんじゅ」第6次試作模擬炉心燃料集合体第4領域のナトリウム流動耐久試験とナトリウム洗浄に関して得られた知見、及び、これまでに行われた各試作燃料集合体のナトリウム流動耐久試験結果の要約について報告するものである。なお第6次試作模擬燃料集合体の解体検査については、本報とは別に東海事業所より報告される予定である。

## 2. 試験装置

### 2.1 ナトリウム流動伝熱試験装置

ナトリウム流動伝熱試験装置は1969年8月の完成以来、各種の試験を行ってきており、今回の試験に先立ち適正な試験条件が得られるよう試験部を改造した。Fig. 2-1 にナトリウム流動伝熱試験装置のフローシートを示す。また Fig. 2-2 に「もんじゅ」燃料集合体流動試験部の構造を示す。

改造を実施した試験部は8Bの胴部、4Bの出入口配管から成る。胴内部には上・下支持板があり、高圧プレナム、低圧プレナムとに分けられている。高圧プレナム内には整流部が設けられており12Bで構成されている。また高圧プレナム内にはキャビテーションノイズ検出のためのナトリウム中マイクロホンが取り付けられている。各プレナムには静圧孔があり孔径1mmのタップが同一プレナムについて胴の周方向8ヶ所に設けられ、これらの平均の静圧を測定出来るようにしてある。内部の集合体の軸方向の支持は上・中・下の3つのパッドのうち、上部のパッドのみを使用している。本試験部は連結管とエントランスノズルを1体とした集合体を設置するため上・下支持板の孔径を実機寸法とは異なって製作してある。

### 2.2 供試燃料集合体

今回 M6CWP としてナトリウム流動耐久試験を実施した「もんじゅ」第6次試作模擬炉心燃料集合体は「もんじゅ」製作設計準備その2に基づいて試作<sup>3,4)</sup>されたものである。しかしナトリウム流動耐久試験を実施するため設計仕様とは若干異なっている。以下に主な変更点を示す。

- 1) ナトリウム流動試験に供したピン東部はワイヤ巻付荷重を5kg、10kgの2種のピンで構成している。
- 2) 第4領域の連結管とエントランスノズルとが一体となった模擬炉心燃料集合体である。
- 3) エントランスノズル部の下流圧力が測定できるような静圧タップが球面座上部に設けられている。(キャビテーション試験用)
- 4) 下部端栓のワイヤ孔方向を90°(エントランスノズルから見て時計廻り方向) ずらした。(端栓溶接ビードとワイヤの干渉防止のため)
- 5) 模擬ペレットはブランケットに相当する部分に W-Cu ペレット、コア部には SUS ペレットを用いて、できるだけ実機重量に近づけて充填してある。

Table 2-1 に M6CWP の主要仕様を示す。また Fig. 2-3 に構造図を示す。なおワイヤ巻付荷重の異なる2種のピンはそれぞれ70本と99本でバンドルを構成している。

さらに、今回試験した集合体（M6 CWP）と前回の集合体（M5 CWT-2）とに形状、寸法上の相違点があるがそれらをあげると次の通りである。

- 1) エントランスノズル外径が70 mm $\phi$ から72 mm $\phi$ に変更になった。
- 2) エントランスノズルオリフィスの面取り方法が座ぐり無し面取りから、座ぐり有（2 mm）面取りに変更になった。また面取りの大きさも変更になった。
- 3) 上部端栓長さが5 mm短くなったため、燃料ピン長さが2818 mmから2813 mmに変更になった。
- 4) 上部端栓部ワイヤ止め方法が割りピン方式に変更になった。
- 5) パッドは溶接パッドを採用し、表面処理はしていない。

### 2.3 測定機器

ナトリウム流動試験に用いた測定機器はナトリウム圧力計（低圧プレナム、高圧プレナム、上部プレナム）、差圧計（高圧プレナム－エントランス下流間差圧）、電磁流量計（入口流量、下部流量）、ナトリウム温度測定用クロメル・アルメル熱電対、キャビテーション試験用のナトリウムマイクロホンおよび加速度計である。各々の測定機器の仕様および精度は次の通りである。

#### 1) ナトリウム圧力計・差圧計

型 式	NaK－シリコンオイル置換型
測定範囲	低圧プレナム圧力計（P×2－1）－1.0～2.0 kg/cm <sup>2</sup> G 高圧プレナム圧力計（P×2－2）－1.0～7.0 “ 上部プレナム圧力計（P×2－3）－1.0～2.0 “ エントランスノズル差圧計（ $\Delta P_e$ ） 0～5 “
封入液	ナトリウム接液部 NaK キャピラリーチューブ部 シリコンオイル
入力電圧	DC 24 V
出力電流	DC 4～20 mA
使用温度	大気圧以上において最高650℃
周囲温度	0～80℃
材 質	ダイヤフラム SUS 316 L 構造部 SUS 316, SUS 304
精 度	直 線 性 $\pm 0.5\%$ F.S. ヒステリシス $\pm 0.5\%$ F.S.

Fig. 2-4 に圧力計接液部の構造図を示す。

## 2) ナトリウム流量計

## ① 試験部入口流量計

型 式	永久磁石式電磁流量計
測定範囲	160 ~ 1600 ℓ/min
取合配管	4 B × Sch 20 S
出 力	10.67 mV at 1600 ℓ/min
精 度	相対校正 (0 ~ 1600 ℓ/min) の結果より ± 1.5 %

## ② 試験部下部流量計

型 式	永久磁石式電磁流量計
測定範囲	40 ~ 400 ℓ/min
取合配管	4 B × Sch 20 S
出 力	10 mV at 400 ℓ/min
精 度	ドライキャリブレーションにより ± 1.0 %

## 3) ナトリウム温度測定用熱電対

型 式	クロメル-アルメル熱電対, W-エレメント, 非接地型
シース外径	3.2 mm φ
シース材質	SUS 316
シース長さ	365 mm
精 度	ANSI Special Class ± 0.375 %

以上の測定機器を用いて得られたデータは U-1500 (FACOM) に取込み燃料集合体流動試験計算処理プログラム「NALS」, 「WMB-M6CWP」を用いて処理している。各センサー配置図を Fig.2-5 に示す。

## 2.4 データ整理と測定誤差

ナトリウム流動試験により M6CWP の圧力損失の状態を調べてこれまで実施してきた試験と同様に圧力損失係数 ( $C_D$ ) と Reynolds 数 ( $Re$ ) との関係で整理した。Table 2-2 に圧力損失係数および Reynolds 数の定義を示す。なお圧力損失係数および Reynolds 数は燃料ピンバンドル部で定義している。またナトリウム流動試験で得られた結果は、各試験毎に  $C_D = A \times Re^B$  の関数形に最小二乗法を用いて整理し実験式とした。

圧力損失の経時変化量を評価する場合には用いた計測器の測定精度から圧力損失係数に含まれる誤差を明らかにする必要がある。圧力損失係数は  $C_D = 4P / \frac{\rho}{2g} V^2$  で定義されているが入口ナトリウム圧力  $P_{in}$ , 出口ナトリウム圧力  $P_{out}$  および入口ナトリウム流量  $V_{in}$ , 下部リークナトリウム流量  $V_1$  を測定して  $C_D$  を求める場合、Gauss の誤差の伝播法則よりそれぞれ

の測定値が持つ誤差と  $C_D$  値に含まれる誤差の間には次の関係がある。

$$\delta C_D = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial C_D}{\partial \Delta P}\right)^2 \delta \Delta P^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial V}\right)^2 \delta V^2}$$

圧力損失係数の定義式より

$$\delta C_D = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{r}{2g} V^2}\right)^2 \delta \Delta P^2 + \left(-2 \frac{\Delta P}{\frac{r}{2g} V^3}\right)^2 \delta V^2}$$

したがって

$$\frac{\delta C_D}{C_D} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}\right)^2 + \left(2 \frac{\delta V}{V}\right)^2}$$

それぞれの圧力計の持つ誤差は  $\pm 0.5\%$  であるので差圧は  $\delta \Delta P / \Delta P = \pm 1.0\%$ 、また入口ナトリウム流量計の持つ誤差は  $\delta V / V = 1.5\%$  である。なお下部リークナトリウム量は入口ナトリウム量に比較して少ないので誤差の評価からは省略する。したがって得られた圧力損失係数に含まれる誤差は  $\pm 3.2\%$  となる。

## 3. 試 験

### 3.1 試験体の挿入、据え付け

受け入れ検査を終了したM6CWP供試体は「もんじゅ」炉心第4領域の連結管とエントランスノズルが一体となった集合体である。この供試体は製作時に各部材をアセトンにて洗浄し、清浄な手袋等を用いて取扱い製作されているので、ナトリウム流動耐久試験前のアルコール洗浄は省略して試験部に挿入した。

今回の供試体にはエントランスノズル下流圧力を測定できるよう静圧タップが設けられており、ラッパ管外壁にそって導圧管がハンドリングヘッド上部まで延びている。これを容器外へ引き出すための結合を集合体出口部で行ない、その上にテストセクション上部、抑制板を組み込み据え付けを行なった。

### 3.2 圧力計・差圧計の校正

ナトリウム圧力計・差圧計はナトリウム充填前に接液部の温度を300℃に保ちアルゴンガスを用いて精密圧力計により校正を行った。校正範囲は大気圧から5 kg/cm<sup>2</sup> Gの間で実施した。いずれも±0.5%の範囲内で直線性をもっており、また零点の変動も認められなかった。Fig. 3-1～Fig. 3-4に校正結果を示す。

### 3.3 ナトリウム充填及び精製運転

ナトリウムのループへの充填はこれまでの手順と同様に機器、配管の予熱温度を200℃として約170℃のナトリウムを真空加圧法にて実施した。チャージ後、定格の約20%の流量で循環運転を行い397℃に昇温させるとともにコールドトラップメッシュ温度を120℃まで降温させ、ループ内ナトリウムの不純物量を安定させるため2日間の精製運転を実施した。その後、定格流量に設定を行ない流動耐久試験を開始した。

### 3.4 ナトリウム流動耐久試験

ナトリウム流動耐久試験は浸漬における積算ナトリウム流動時間2636時間（定格条件：2384時間）にわたって流動特性及び耐久性について調べた。今回実施したナトリウム流動耐久試験の試験条件をTable 3-1に示す。なおナトリウム流動耐久試験はナトリウム温度を397℃に保持した状態で流量を定格流量の1,215 ℓ/minから20%流量まで減少させ再び定格流量まで増加させることにより行った。圧力損失の経時変化現象を調べるために精製運転を2日間行ない、ナトリウム純度がほぼ安定した後に第1回目の流動試験を実施し、この結

果を基準として以後の変化を調べた。さらに、4時間毎に定常データを採取し、定数  $Re$  数における圧力損失の時間的変化のデータを採るとともに、キャビテーションについてのデータも取得した。

また今回のナトリウム流動耐久試験中にループ定期点検、所内全停電等を実施する必要があり、その間試験を中断し装置は休転とした。この間装置内のナトリウムは貯蔵タンクに完全にドレンし、常温、アルゴンガス封入の状態を保った。ナトリウム流動伝熱試験装置の運転条件に関しては APPENDIX 1 及び 2 に時間経過及びその時の「試験装置ナトリウム温度、流量、圧力及び純度管理記録」を示す。

### 3.5 ナトリウムドレン、集合体引抜及び洗浄

ナトリウム流動時間 2384 時間（定格）にわたる流動耐久試験終了後、ナトリウム温度を  $397^{\circ}\text{C}$  から  $250^{\circ}\text{C}$  まで降温し、「もんじゅ」試験部を弁にて切離してループ側のドレンを行った。次に試験部の液位変化が約  $420\text{ mm/min}$  となるよう弁開度で調整し、約 10 分間でドレンを実施した。ドレン後は予熱温度を  $200^{\circ}\text{C}$  で約 5 時間保持した後に予熱を切り、自然冷却で常温まで下げ試験部より供試体を引き抜いた。

引き抜きは試験部のリップシールの切断を行いテストセクション上部を撤去して、導圧管を切り離し、ビニールシートで作成したジャバラを取り付け大気に触れないようにして引き抜いた。この時の引き抜き荷重は最大で  $700\text{ kg}$  を掛けたが、この荷重でも抜けなかったのが最終的には上・下支持板部の予熱を投入し引き抜いた。

ナトリウム流動耐久試験後の供試体の付着ナトリウムの洗浄はこれまでと同様に、工業用アルコールを約  $180\text{ l}$  用いて横型のアルコール循環洗浄装置で実施した。洗浄はアルコールの循環洗浄を 24 時間行った後に全量をドレンし、水に置換して約 15 時間循環させ行った。なおアルコール循環洗浄の途中で洗浄液であるアルコールをサンプリングして中和滴定法によりナトリウム付着量を調べた。

## 4. 試験結果

### 4.1 ナトリウム流動耐久試験

本流動耐久試験は 2384 時間（定格）にわたって流動耐久試験を 6 回実施し、圧力損失の経時変化現象を調べてきた。この流動試験から得られた流量と M6CWP 供試体全体の圧力損失の関係、Reynolds 数と全体の圧力損失係数の関係を Fig. 4-1, 2 に示す。また、各流動試験の結果を最小二乗法を用いて整理して求められた実験式を Table 4-1 に示す。

第 1 回流動試験（初期）の集合体全体の圧力損失係数（第 4 領域）は Reynolds 数  $5.35 \times 10^4$  において 35.14 であった。この結果をもとにして第 2 回目以降の各流動試験の圧力損失係数の変化を求め、試験時間に対する圧力損失係数の変化率を Fig. 4-3 に示す。なお本図には流量を変化させて行う流動試験で得られた値とともに、参考として定格流量を流動させている定常状態（Reynolds 数が  $5.35 \times 10^4$  付近）の圧力損失係数から求めた変化率もあわせて示す。

以上のデータから次のような結論を得た。

- 1) 圧力損失の増加率はこれまで実施してきた「もんじゅ」第 5 次試作模擬燃料集合体及び第 3 次試作模擬燃料集合体のナトリウム流動耐久試験結果とほぼ同様であり、最大値で約 4% の増加が認められた。
- 2) また、経時変化の状態はナトリウム流動耐久試験開始から約 300 時間で圧力損失の増加量がほぼ飽和状態となり、以後の圧力損失の増加率は 1.5 ~ 4% の値で変動し、最終的には初期の圧力損失の約 3% 増加となった。

### 4.2 ナトリウム洗淨

M6CWP の付着ナトリウムのエチルアルコールによる洗淨において、洗淨途中にアルコールをサンプリングしてアルコール中に溶解しているナトリウムの定量分析を中和滴定法を用いて行ない、洗淨時間に対する溶融ナトリウム量の関係を求めた。結果を Fig. 4-4 に示す。この結果、付着ナトリウムの除去は洗淨開始初期の 60 分程度でほぼ終了していた事が明らかになった。またネジ部等の間隙部に入ったナトリウム除去はこれまでの経験でも非常に困難であり、アルコールによる洗淨、水洗淨を実施しても残留しているが、表面に付着しているナトリウムは 60 分程度で十分洗淨出来ることがわかった。なお今回の M6CWP 試作集合体表面に付着していたナトリウム量は約 90 g であった。



## 5. 試作回数による比較検討

高速原型炉「もんじゅ」の模擬燃料集合体は試作回数を重ね、ナトリウム流動耐久試験、水流動試験、その他各種試験が行われてきた。今回の第6次試作模擬炉心燃料集合体M6CWPは先の試験結果を十分に反映させて設計、製作されたものであり、かつ高温ナトリウム流動耐久試験用最終試作集合体である。本試験で「もんじゅ」模擬燃料集合体のナトリウム流動耐久試験を終るにあたり、これまでに当室において実施されたナトリウム流動耐久試験の試験結果を集約し、「もんじゅ」模擬燃料集合体ナトリウム流動耐久試験のまとめとする。これまでのナトリウム流動伝熱試験装置の運転状態を Fig. 5-1 に示す。また、これらの試験を行ってきた試験部を Fig. 5-2 に示す。

### 5.1 供試燃料集合体

今までのナトリウム流動耐久試験に供試された「もんじゅ」燃料集合体の概略図および仕様を Fig. 5-3 から Fig. 5-8, および Table 5-1 に示す。これらの供試体において形状の異なる点があるので代表的なものを記述する。

- 1) 燃料ピン東部はグリッドスペーサとワイヤスペーサの二種類がある。
- 2) 燃料ピン東部の周辺流れ抑制のために、最外周ピンのラッピングワイヤ径を細くする、最外周ピンのラッピングワイヤを2重巻きにする、ラップチューブ内面にじゃまものを入れる等行ったものもある。
- 3) エントランスノズルオリフィスの面取りは、施して有るものと無いものがあるとともにも有る場合においても座ぐりの有無がある。
- 4) 上・下しゃへい体は大別すると4つの形状がある。

このように最初は形状の異なった供試体の各種試験が行われたが、第4次試作からはほぼ統一された供試体形状となった。それらは

- 1) ワイヤスペーサ方式
- 2) エントランスノズルオリフィスに面取り有
- 3) 砲弾形上・下しゃへい体

等である。しかし、さらに部分的には改造を行いながら試作、ナトリウム流動耐久試験が行われてきた。また全体構造では今回のM6CWPを除く全ての供試体は炉心第1領域を模擬(連結管無し)しているが、M6CWP供試体は同じ炉心燃料集合体でも第4領域の連結管を接合した1体構造となっている点などが相異点として挙げられる。

## 5.2 試験結果

### 5.2.1 圧力損失特性

ナトリウム流動耐久試験を実施した各供試体（第2次試作体から第6次試作体までを含む）の試験温度が条件に達した直後に、流量をパラメータにして測定した初期の圧力損失係数の実験結果を Fig. 5-9 及び Table 5-2 に示す。これらの図表を見てわかるように圧力損失係数は各供試体に依り多少異なるが、第2次試作体から第5次試作体までの連結管無し（炉心第1領域を模擬）の状態では Reynolds 数  $7.5 \times 10^4$  において 20.5 ~ 23.2 とほぼ同じ値になっている。今回実施した M6 CWP 供試体についても同じように比較するため第1領域のエントランスノズルに置き換え圧力損失係数を補正<sup>5)</sup>すると破線のようになりこれまでの試験結果とほぼ等しくなる。これは先に述べたように第4領域の連結管を接合した1体型の供試体であるため直接比較できないので行った。第4領域の連結管を接合した状態では定格 Reynolds 数  $5.35 \times 10^4$  において圧力損失係数は約 35.1 であった。

一方、水流動試験<sup>6)</sup>において「もんじゅ」のワイヤ型炉心燃料集合体各部の圧力損失分担率が求められている。これらの値は供試作によって多少異なるが、燃料束部の圧力損失が全体の圧力損失に対する割合は約 80 % で、燃料集合体の大部分を占めており、約 20 % はエントランスノズルと残りの部分、即ち下部遮蔽体、燃料束出入口、上部遮蔽体及びハンドリングヘッドで二分するような割合になっているのが確認されている。このことから燃料束部の圧力損失を評価することは燃料集合体の設計を行ううえでも重要なことであることが言える。

そこで、これまでの水流動試験で得られた「もんじゅ」型、「常陽」型の炉心燃料集合体及びブランケット燃料集合体などの形状の異った燃料束部に関する実験値をもとに、ワイヤ型燃料集合体の燃料束部摩擦損失係数の評価が行われた<sup>6)</sup>。現在までに発表されているワイヤ型燃料束摩擦損失係数に関する半経験式を APPENDIX 3 に示す。表中で Novendstern 及び Sangster の式に用いている添字 1, 2 及び 3 はサブチャンネルの形状を示し、それぞれ内側、外周及びコーナ部を表わしている。この従来の計算式は燃料束の設計評価式として必ずしも適当な式と言えなかったため、この改善を目的として行われた。この改良に当たって特に注意を払った点は Reynolds 数に対する依存性及び低 Reynolds 数域への適当な内挿法の選択であったことが述べられている。従来の半経験式を実験値と比較すると Novendstern 及び Rehme の式は良い精度で一致し、特に Rehme の式では、他の計算式が低い Reynolds 数域 ( $Re = 1 \times 10^4$  以下) において計算精度が悪くなるのに対し、比較的良い結果を与えている。計算精度は高 Reynolds 数域で  $\pm 1.9 \%$ 、低 Reynolds 数で  $\pm 2.5 \%$  であった。これらの燃料束部摩擦損失係数の評価式について水流動試験データを用いた比較検討結果を APPENDIX 4<sup>6)</sup> に示す。

## 5.2.2 圧力損失の経時変化

これまで実施してきた試作模擬燃料集合体のナトリウム流動耐久試験において圧力損失の経時変化が認められ、今日までの約10年間この現象の定量化に向けた努力が傾注されてきた。各供試体の流動耐久試験及び圧力損失の経時変化を Table 5-3 ~ Table 5-6 および Fig. 5-10, 11 に示す。

試験時間は供試体に応じ異なるが、「常陽MK-I」タイプ約2000時間~4000時間、「常陽MK-II」タイプ約1000時間~1500時間、「もんじゅ」炉心第1次試作体544時間~3715時間、第2次試作体4790時間、第3次試作体1647時間と1204時間、第5次試作体1291時間と4838時間、第6次試作体2384時間と、それぞれの時間の経時変化を調べた。さらにブランケット燃料集合体(M4BG)についても1033時間の試験を行った<sup>7)</sup>。なお、第4次試作体についてはナトリウム流動耐久試験を行わず、水流動試験<sup>8)</sup>のみ実施した。一方この間、試験装置主要機器の解体検査やナトリウム中粒状不純物挙動試験<sup>9)</sup>なども並行して行われ、この現象との関連性を示す貴重なデータが得られた。

今回で「もんじゅ」模擬燃料集合体のナトリウム流動耐久試験を終わるにあたり、これから炉心燃料集合体の圧力上昇率を推定する目的で、これまでに得た圧力損失上昇データ<sup>10-12)</sup>並びに上記の関連するR&Dで得られた各データ<sup>13,14)</sup>の検討を行ない、別途行われている「燃料ピン流動試験<sup>15,16)</sup>」の代表的な結果とともに総合報告<sup>17)</sup>する。これらの試験から得られた知見を Table 5-7 に示す。

圧力損失の増加は Fig. 5-10, 11 より、程度の差は認められるものの圧力損失の上昇は全ての試験で生じており、またいずれも時間とともにある飽和値に漸近する傾向を持つことがわかる。ただ定量的な再現性は乏しく、飽和値と上昇速度は試験毎に異なっている。

また、一つの試みとして圧力損失最大上昇率とこれら装置改造記録を比較してみると、定性的ではあるが、改造工事を行なった場合、その直後は高い圧力損失の上昇率が得られ圧力損失の上昇傾向と改造との間に相関があることが認められる。これをより明確にするため圧力損失最大上昇率を個々の燃料集合体ピンバンドル流力直径Dとの関係で表わすと Fig. 5-12 を得た。ここで流力直径を用いたのは、燃料集合体の圧力損失上昇原因がバンドル摩擦損失係数の増加にあたるため、またバンドル摩擦損失係数はこの流力直径との関係で表わすことができたからである。同図にはFFTF用燃料集合体であるCCTL-MK-IIのデータもプロットしてある。このようにして装置改造の有無から得られた圧力損失上昇率の相違は明確で、装置の改造を行わない場合は「常陽MK-II」燃料集合体で最大7%、「もんじゅ」燃料集合体で最大4.5%の圧力損失上昇率となることがわかる。

先に述べた装置改造が圧力損失上昇率に及ぼす影響については、その直接原因を改造によるナトリウム中不純物濃度の上昇、すなわち新しいステンレス材を投入することによる

高い初期腐食とそれに伴う不純物量増加と考えられる。従来行われてきた本試験装置主要機器の解体検査をみても、各機器の流動滞留部もしくは極低流速部付近に金属性の不純物の堆積しているのが見られる。堆積物はいずれも粒状で、これらは長期間にわたる装置の高温運転によってナトリウム中に生成され堆積したものと考えられる。同様な粒状不純物はナトリウム流動試験後に燃料集合体のナトリウム洗浄に用いたアルコール液及び再生熱交換器伝熱管表面からも回収されている。またループよりサンプリングし、アルコールに溶解させ1 $\mu$  濾紙で濾すと前者と同じような成分の粒状不純物が検出された。この事実はコールドトラップで純度管理されたナトリウム中にも粒状不純物が存在しており常に循環していることを示している。したがって粒状不純物の付着により圧力損失経時変化現象を生じると言うモデルの可能性を示すものである。

次にこれまで述べてきた粒状不純物のより具体的な圧力損失上昇現象への関与を明らかにする目的で、燃料ピン流動試験で得たピン表面のSEM写真<sup>15)</sup>を調べた。これは流動試験後、ピン表面状態がアルコール循環洗浄により変化するのを避けるため、注意深く真空洗浄法を行ないその後得られたもので、表面に10 $\mu$ 前後の大きさの付着物がありこのため表面があらくなっていることが示された。

これまでの圧力損失上昇データ及び関連のR&Dデータの評価検討から次の結論を得た。

- 1) 圧力損失の上昇は程度の差はあるものの全ての燃料集合体の流動試験で生じ、その時間依存性はある飽和値に漸近する傾向を有す。
- 2) 圧力損失の上昇はサブミクロン径と推定される粒状物の付着によるもので、この付着によってピン表面があらくなりバンドルの摩擦損失係数が増加するためと考えられる。又、これは一般のナトリウム流動試験と定量的に一致している。
- 3) この摩擦損失係数の増加割合、すなわち圧力損失の上昇は装置の改造規模に依在し、大規模な改造が行われた後ほど高い上昇を示している。
- 4) 冷却系の大幅な改造を行わないとすると、「もんじゅ」炉心燃料集合体の最大の圧力損失上昇率は4.5%程度であることが推定出来る。

### 5.2.3 耐久性

これまでに炉心模擬燃料集合体第1次試作体7体、第2次試作体2体、第3次試作体4体、第5次試作体2体、第6次試作体1体、及び、ブランケット模擬燃料集合体1体の計17体のナトリウム流動耐久試験が行われてきた。これらの試験において耐久性（健全性）に関して得られた結果をTable 5-8に示す。それらは次のような項目である。

- |                              |         |
|------------------------------|---------|
| 1) 燃料ピンのずれ                   | (M1CWS) |
| 2) ウェア・マークの発生 <sup>18)</sup> | (M2CWH) |
| 3) 最外周ピンの移動・変形               | (M3CWM) |

4) 組棒の変形 (M3 CWT)

5) パッド部コーティング材の剥離 (M5 CWT)

これらの問題はそれぞれの対応が取られ設計に反映されてきた。

今回、最後のナトリウム流動耐久試験を終えた M6 CWP 供試体の集合体外観目視検査を行ったが、何の異常もなく健全であったことを報告しておく。

#### 5.2.4 その他特記事項

これまでのナトリウム流動耐久試験を通じ先に述べた圧力損失特性，経時変化，耐久性以外のナトリウム洗浄及びその他の項目について得られた結果を Table 5-9 に示す。

その他に試験装置の設計，製作及び運転を行なう上での注意点を以下に述べる。

- 1) 実機の場合と同じナトリウム純度条件を確保する。このため，ダンプタンクを含めて装置全系のナトリウム純化を試験前に完全に行なえるようにする。
- 2) ナトリウム流動耐久試験の精度を向上させるためにナトリウム計測器の較正系，テストセクションの構造を充分検討する。
- 3) 供試燃料集合体の装荷，取出し工程を検討し必要な治具等を設置，準備を行ない空気の混入を防止する。

## 謝 辞

本試験研究の遂行にあたり高所からの御指導をいただいた高速炉安全工学部三本保秀部長，計画及び実施にあたり御協力を戴いたFBR本部吉見 宏孝 主任研究員，八木隆雄主任研究員，前FBR本部藤原優行副主任研究員及び東海事業所プルトニウム燃料部設計開発課上村勝一郎研究員の諸氏に感謝の意を表わす。また有益なる助言を戴いたプラント安全工学室姫野嘉昭副主任研究員をはじめ本試験を実施するために長期にわたってナトリウム流動伝熱試験装置の運転及び水流動試験に携った関係諸氏に厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 佐々木他：「もんじゅ」第5次試作模擬燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN841 79-158 1979年9月
- 2) 西沢 他：「もんじゅ」第5次試作模擬燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 81-154 1981年8月
- 3) 田中 他：「もんじゅ」炉心燃料集合体第6次試作報告書  
PNC報告書 SN841 83-30, 31 1983年5月
- 4) 沢山 他：「もんじゅ」炉心燃料集合体第6次試作報告書  
PNC報告書 SN841 83-35 1983年5月
- 5) 佐野 他：水キャビテーション試験（I）  
PNC報告書 SN941 80-41 1980年4月
- 6) 佐藤 他：「もんじゅ」燃料集合体水流動試験（IV）  
PNC報告書 SN941 77-193 1977年12月
- 7) 田中 他：「もんじゅ」第4次試作ブランケット燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 82-78 1982年3月
- 8) 佐藤 他：「もんじゅ」燃料集合体水流動試験（V）  
PNC報告書 SN941 78-128 1978年7月
- 9) 佐々木他：ナトリウム中の粒状不純物挙動試験  
PNC報告書 SN941 81-06 1981年1月
- 10) 藤本 他：「もんじゅ」模擬燃料集合体ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 76-47 1976年5月
- 11) 藤本 他：「もんじゅ」模擬三次試作燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 77-65 1977年4月
- 12) 佐々木他：「もんじゅ」模擬三次試作燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 78-95 1978年3月
- 13) 藤本 他：「もんじゅ」模擬一次試作燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 76-49 1976年5月
- 14) 木下 他：「もんじゅ」模擬燃料集合体 ナトリウム流動耐久試験  
PNC報告書 SN941 76-100 1976年8月
- 15) 林 他：燃料集合体圧損経時変化解明（IV）  
PNC報告書 SN941 79-117 1979年7月

- 16) 林 他：燃料集合体圧損経時変化説明 (VI)  
PNC 報告書 SN 941 83-02 1983 年 1 月
- 17) 姫野 他：燃料集合体圧損経時変化に関する総合報告  
Na 流伝技術メモ ND-12-10 1981 年 7 月
- 18) 田中 他：高速実験炉「常陽」炉心燃料ピンのウェア・マークに関する炉外での評価試験  
PNC 報告書 SN 941 81-65 1981 年 12 月



Table 2-1 Specification of M6CWP

Item	Specification	Note
(1) Fuel Subassembly Outer Form Number of Fuel Pin Pitch of Fuel Pin P/D Fuel Pin Spacer Length of F/S Fuel Pin Support	M6CWP Hexagonal Cross Section 169 7.87 mm 1.2111 Wire Wrap Type 4200 mm Knock Bar Type	Design 4200 mm
(2) Fuel Pin Diameter of Pellet Material of Pellet Length of Fuel Pin Enclosed Gas Length of Gas Plenum Material of Spacer Wire Diameter Pitch Number of Turn	5.4 mm $\phi$ SUS304 2813 mm He 1160 mm SUS316 (20%CW) 1.315 mm $\phi$ 308 mm 9	UO <sub>2</sub> + PuO <sub>2</sub>
(3) Fuel Pin Tube Material Outer Diameter Thickness	SUS316 6.5 mm $\phi$ 0.45 mm	
(4) Wrapper Tube Material Outer Form Facing Distance of Outside Thickness Spacer Pad Fitting Width of Spacer Pad Coating Method	SUS316 (20%CW) Hexagonal Cross Section 110.6 mm 3.0 mm Welding 40 mm Chromium-Carbide Detnation Method	

Table 2-1 Specification of M6CWP (Cont'd)

Item	Specification	Note
(5) Entrance Nozzle Material Length Diameter of Nozzle 74 mmφ 72 mmφ 73.5 mmφ Position of Entrance Orifice	SUS316 510 mm 74 mmφ 72 mmφ 73.5 mmφ 7 x 4	Design 510 mm Design 74 mmφ
(6) Lower Reflector i) Type (A) Material Form Length Outer Diameter Fitting Method ii) Type (B) Material Form Length Outer Diameter Inner Diameter Fitting Method	SUS316 Cannon Ball Type 265 mm 66 mmφ Support Pin SUS316 Cylinder Type 275 mm 90 mmφ 55 mmφ Support Pin	
(7) Handling Head Material Form Length	SUS316 Hexagonal Cross Section 250 mm	
(8) Upper Shelter Material Form Length Outer Diameter Fitting Method	SUS316 Cannon Ball Type 103 mm 67 mmφ Support Pin	

Table 2-2 Nomenclature and Definition

Drag Coefficient	Reynolds Number
$C_D = \frac{\Delta P}{\frac{\gamma \cdot V^2}{2g}}$ $V = \frac{W}{A}$ <p> <math>C_D</math> : Drag coefficient  <math>\gamma</math> : Specific weight of Sodium (kg/m<sup>3</sup>)  <math>V</math> : Fluid velocity (m/s)  <math>g</math> : Acceleration of Gravity (m/sec<sup>2</sup>)  <math>W</math> : Volume flow (m<sup>3</sup>/s)  <math>A</math> : Flow Area (m<sup>2</sup>)  <math>\Delta P</math> : Fuel Subassembly Pressure Loss </p>	$Re = \frac{V \cdot De}{\nu}$ <p> <math>Re</math> : Reynolds number  <math>De</math> : Hydraulic Diameter (m)  <math>\nu</math> : Kinematic viscosity of Sodium (m<sup>2</sup>/s) </p>

Table 3-1 Experimental Condition of "MONJU" Core Fuel Subassembly Test

Fuel Subassembly	M6CWP (Region 4)
Sodium Flow Rate (m <sup>3</sup> /min.) (kg/sec.)	1.215 (17.36)
Sodium Temperature (°C) (Inlet)	397 ± 5
Cold Trap Min. Temp. (°C)	120 ± 5
Oxygen Concentration (ppm)	1.03 *
Hydrogen Concentration (ppm)	0.07 **
Test Duration (Hrs)	2,636 (2,384)***
Date of Test	Dec. 1982 ~ Apr. 1983

\* by Eichelberger

\*\* by Vissers

\*\*\* ( ) : at 397°C

Table 4-1 Analytical Result of Sodium Flow Test M6CWP

No.	Total Time (at M/P) (hr)	Total Time (at 397°C) (hr)	Experimental Formula Re <sub>B</sub> Number Range (2 ~ 5.5 × 10 <sup>4</sup> )	C <sub>D</sub> Value (at Re <sub>B</sub> = 5.35 × 10 <sup>4</sup> )	Up Rate (%)
F-1	58.6	000	$C_D = 113.584 \text{ Re}_B^{-0.107754}$	35.14	-
F-2	501.0	435.6	$C_D = 199.933 \text{ Re}_B^{-0.156974}$	36.19	3.00
F-3	575.5	435.6	$C_D = 146.362 \text{ Re}_B^{-0.127480}$	36.53	3.95
F-4	1099.5	954.7	$C_D = 150.629 \text{ Re}_B^{-0.132068}$	35.76	1.77
F-5	1170.5	954.7	$C_D = 131.367 \text{ Re}_B^{-0.119800}$	35.65	1.44
F-6	2610.2	2383.9	$C_D = 152.930 \text{ Re}_B^{-0.132068}$	36.11	2.75

Table 5-1 Specification of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly

Fuel Subassembly	Subassembly		Fuel Pin			Grid Spacer			Wire Spacure				Hydraulic Dia. m × 10 <sup>-3</sup>	Flow Cross Section m <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup>	E/N Orifice Beveling	Total Time hrs	ΔP Increase Rate (max. value) %
	Length	Wrapper Tube Scale	Dia.	Length	Number	Number	Pitch	Height	Center		Periphery						
									Dia.	Pitch	Dia.	Pitch					
mm	mm	mmφ	mm			mm	mm	mmφ	mm	mmφ	mm						
M1CGT	4245	110.0	6.5	2850	169	14	200	15	-	-	-	-	4.057	3.867	-		
M1CGF	4258	110.0	6.5	2800	169	18	150	15	-	-	-	-	4.057	3.867	-	916	-
M1CGS	4398	110.0	6.5	2795	169	15	200	15	-	-	-	-	4.057	3.367	-	3323	-
M1CGH	4387	110.0	6.5	2795	169	12	280 180	26	-	-	-	-	3.713	3.761	-	544	-
M1CGM	4200	110.0	6.5	2795	169	14	180	20	-	-	-	-	4.057	3.867	-	2795	-
M1CWT	4245	110.0	6.5	2850	169	-	-	-	1.3	406	1.1	406	3.296	3.659	-		
M1CWS	4398	110.0	6.5	2795	169	-	-	-	1.3	205	-	-	3.236	3.643	-	3715	-
M2CWH	4270	110.6	6.5	2790	169	-	-	-	1.3	395	1.0	197.5	3.2776	3.6594	-	4847	about 11.0
M2CWM	4270	110.6	6.5	2800	169	-	-	-	1.3	252	1.0	252	3.2769	3.6591	0.5C	(4790)	(11.8)
M3CWM	4265	110.6	6.5	2825	169	-	-	-	1.3	306	*2 1.0	306	3.190	3.670	0.8C	1788	about 4.5
M3CWT	4265	110.6	6.5	2806	169	-	-	-	1.36	307	-	-	3.222	3.713	0.4C	(1647)	(5.5)
M3CWG	4265	110.6	6.5	2800	169	-	-	-	1.3	307	1.0	307	3.307	3.693	-	1337	about 3.0
M3CWH	4265	110.6	6.5	2800	169	-	-	-	1.37	252	*2 0.9	252	3.191	3.609	0.2C	(1204)	(3.3)
M4CWT	4265	110.6	6.502	2800	169	11	205 256	*1 10	1.362	307	-	-	3.362	3.661	1.2C	-	-
M5CWT	4360	110.6	6.5	2818	169	-	-	-	1.32	308	-	-	3.221	3.631	0.5C	1330 (1291)	about 3.0 (4.0)
M5CWT-2	4200	110.6	6.5	2818	169	-	-	-	1.32	308	-	-	3.2185	3.6278	0.5C	5094 (4838)	about 3.0 (5.2)
M4BG	4200	110.6	11.6	2805	61	-	-	-	1.5	251	0.9	251	4.138	2.924	2C	(1033)	(8.0)
M6CWT	4200	110.6	6.496	2813	169	-	-	-	1.315	308	-	-	3.199	3.604	0.6C 1.0C	2636 (2384)	about 3.0 (4.0)

\* 1 Periphery Flow Control Grid

\* 2 Doble

Table 5-2 Analytical Result of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly Sodium Flow Test

Experiment	Experimental Formula	Re <sub>B</sub> Number Range	C <sub>D</sub> Value (Re <sub>B</sub> = 7.5 × 10 <sup>4</sup> )
M2CWH M2CWG	$C_D = 244.6 \text{ Re}_B^{-0.2175}$	$2.0 \times 10^4 \sim 8.8 \times 10^4$	21.29
M3CWT M3CWM	$C_D = 412.9 \text{ Re}_B^{-0.2566}$	$2.0 \times 10^4 \sim 8.4 \times 10^4$	23.17
M3CWH M3CWG	$C_D = 146.3 \text{ Re}_B^{-0.1670}$	$1.5 \times 10^4 \sim 8.1 \times 10^4$	22.44
M4CWT	-	-	-
M5CWT	$C_D = 522.9 \text{ Re}_B^{-0.2822}$	$2.5 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$	22.01
M5CWT-2	$C_D = 137.71 \text{ Re}_B^{-0.16968}$	$1.5 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^4$	20.50
M4BG	$C_D = 186.3 \text{ Re}_B^{-0.2114}$	$1.0 \times 10^4 \sim 2.1 \times 10^4$	-
M6CWP (Region 4)	$C_D = 113.584 \text{ Re}_B^{-0.107754}$	$1.0 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$	33.89
( Region 1 estimated line	$C_D = 356.728 \text{ Re}_B^{-0.251775}$	-	21.13 )

Table 5-3 Analytical Result of Sodium Flow Test M2CWH, M2CWM

No.	Total Time (at M/P) (hr)	Total Time (at 600°C) (hr)	Experimental Formula Re <sub>B</sub> Number Range (2×10 <sup>4</sup> ~ 8.5×10 <sup>4</sup> )	C <sub>D</sub> Value (at Re <sub>B</sub> = 7.5 × 10 <sup>4</sup> )	Up Rate (%)
*1	Before sodium flow test		$C_D = 191.4 Re_B^{-0.1955}$	21.32	0.0
F-1	52	16	$C_D = 244.6 Re_B^{-0.2175}$	21.29	0.0
F-2	652	616	$C_D = 156.9 Re_B^{-0.1723}$	22.67	6.5
F-3	1152	1116	$C_D = 224.4 Re_B^{-0.2030}$	22.98	7.9
F-4	1656	1620	$C_D = 171.3 Re_B^{-0.1777}$	23.31	9.5
F-5	2184	2148	$C_D = 219.8 Re_B^{-0.1991}$	23.52	10.5
F-6	2736	2700	$C_D = 260.6 Re_B^{-0.2132}$	23.81	11.8
F-7	3312	3276	$C_D = 211.2 Re_B^{-0.1946}$	23.77	11.7
F-8	3864	3828	$C_D = 216.7 Re_B^{-0.1987}$	23.32	9.5
F-9	4344	4308	$C_D = 208.2 Re_B^{-0.1944}$	23.48	10.3
F-10	4823	4787	$C_D = 238.0 Re_B^{-0.2057}$	23.65	11.1
*1	After sodium flow test		$C_D = 154.2 Re_B^{-0.1716}$	22.46	5.4

\* 1 Water Flow Test Re<sub>B</sub> Number Range (10<sup>4</sup> ~ 7×10<sup>4</sup>)



Table 5-4 Analytical Result of Sodium Flow Test M3CWM, M3CWT

No.	Total Time (at M/P) (hr)	Total Time (at 600°C) (hr)	Experimental Formula Re <sub>B</sub> Number Range (2×10 <sup>4</sup> ~ 8×10 <sup>4</sup> )	C <sub>D</sub> Value (at Re <sub>B</sub> = 7.5 × 10 <sup>4</sup> )	Up Rate (%)
*1	Before sodium flow test		$C_D = 195.8 Re_B^{-0.1886}$	23.49	0.0
F-1	25	12	$C_D = 424.7 Re_B^{-0.1886}$	22.82	0.0
F-2	217	204	$C_D = 295.0 Re_B^{-0.1249}$	23.62	3.5
F-3	433	420	$C_D = 280.1 Re_B^{-0.2193}$	23.89	4.7
F-4	769	732	$C_D = 295.1 Re_B^{-0.2246}$	23.71	3.9
F-5	913	910	$C_D = 241.2 Re_B^{-0.2036}$	23.81	4.3
F-6	1129	1116	$C_D = 334.9 Re_B^{-0.2536}$	23.78	4.2
F-7	1393	1380	$C_D = 228.0 Re_B^{-0.2011}$	23.85	4.5
F-8	1633	1620	$C_D = 372.3 Re_B^{-0.2440}$	24.07	5.5
*1	Between F-8 and F-9 tests		$C_D = 227.8 Re_B^{-0.1774}$	24.34	3.6
F-9	1788	1647	$C_D = 227.8 Re_B^{-0.2031}$	23.30	2.1

\* 1. Water Flow Test Re<sub>B</sub> Number Range (10<sup>4</sup> ~ 8×10<sup>4</sup>)

Table 5-5 Analytical Result of Sodium Flow Test M3CWG, M3CWH

No.	Total Time (at M/P) (hr)	Total Time (at 600°C) (hr)	Experimental Formula $Re_B$ Number Range ( $1.8 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$ )	$C_D$ Value (at $Re_B = 7.5 \times 10^4$ )	Up Rate (%)
*1	Before sodium flow test		$C_D = 181.36 Re_B^{-0.1835}$	23.12	0.0
F-1	49	9	$C_D = 146.3 Re_B^{-0.1670}$	22.44	0.0
F-2	164	119	$C_D = 176.2 Re_B^{-0.1820}$	22.86	1.87
F-3	308	257	$C_D = 174.1 Re_B^{-0.1802}$	23.3	2.63
F-4	498	444	$C_D = 160.7 Re_B^{-0.1747}$	22.60	0.71
F-5	737	680	$C_D = 134.8 Re_B^{-0.1576}$	22.98	2.41
F-6	952	891	$C_D = 178.8 Re_B^{-0.1820}$	23.19	3.32
F-7	1118	1055	$C_D = 132.8 Re_B^{-0.1556}$	23.16	3.21
F-8	1260	1198	$C_D = 203.8 Re_B^{-0.1941}$	23.07	2.81
*1	Between F-8 and F-10 tests		$C_D = 170.11 Re_B^{-0.1756}$	23.71	2.55

\* 1 Water Flow Test  $Re_B$  Number Range ( $0.9 \times 10^4 \sim 6.9 \times 10^4$ )

Table 5-6 Analytical Result of Sodium Flow Test M5CWT

No.	Total Time (at M/P) (hr)	Total Time (at 600°C) (hr)	Experimental Formula Re <sub>B</sub> Number Range (2.5×10 <sup>4</sup> ~ 8×10 <sup>4</sup> )	C <sub>D</sub> Value (at Re <sub>B</sub> = 7.5 × 10 <sup>4</sup> )	Up Rate (%)
F-1	48	7.2	$C_D = 522.9 Re_B^{-0.2822}$	22.02	-
F-2	72	31.0	$C_D = 514.2 Re_B^{-0.2800}$	22.19	0.77
F-3	143	102.1	$C_D = 564.5 Re_B^{-0.2866}$	22.61	2.68
F-4	215	173.7	$C_D = 675.5 Re_B^{-0.3003}$	22.60	2.63
F-5	407	365.7	$C_D = 491.6 Re_B^{-0.2730}$	22.95	4.22
F-6	647	605.8	$C_D = 359.8 Re_B^{-0.2453}$	22.90	4.00
F-7	911	869.9	$C_D = 402.5 Re_B^{-0.2566}$	22.58	2.54
F-8	1079	1037.5	$C_D = 596.0 Re_B^{-0.2923}$	22.39	1.68
F-9	1319	1277.6	$C_D = 530.6 Re_B^{-0.2813}$	22.56	2.45

Table 5-7 圧力損失経時変化に関する知見

## Experimental Knowledge on Pressure Loss Variation

試作回数 (供試体名)	知見	備考
第1次試作	1) ナトリウムと接触していた面には結晶状の付着物が観察されそれは腐食生成物と考えられる。表面あさは付着物の有無とその状態に影響される。	ループ内のナトリウム純度(酸素濃度)が悪いため集合体テストセクションにおいて、付着領域となりピン表面に付着物が観察された。
第2次試作	1) 圧力損失は約3000時間で約12%まで上昇し、その後ほぼ一定になる特性を示した。	この圧力損失経時変化量は「もんじゅ」模擬燃料集合体の流動耐久試験中、これが最も大きく変化している。
第3次試作	1) ナトリウム試験後の集合体を洗浄した液を1 $\mu$ の沓紙でフィルタするとフェライト主体の粒状不純物が検出された。またループよりナトリウムをドレンしアルコールに溶解させ、フィルタすると前者と同様に粒状不純物が検出された。 2) 今回の試験において初めて磁気フィルタ、網目フィルタを用いてナトリウム中の粒状不純物の捕集を行なった。しかし捕集量は期待に反し極く少量であり圧力損失の経時変化との関連を明らかにすることは出来なかった。	コールドトラップで純度管理されたナトリウム中にも鉄主成分の粒状不純物が存在していることを示す。したがって粒状不純物の付着により、圧力損失経時変化現象が生じると言うモデルの可能性を示すものである。 サンプリングラインの構造上ドレン時には捕集された粒状物の一部が放出されてしまう可能性があり正確に知る事は出来なかった。

<p>単純形状 (円管, 二重管) の予備試験</p>	<p>1) ナトリウム流動試験後の流路壁面上には粒状不純物の付着による凹凸が見られるが、これはアルコールまたは水洗浄により容易に取り除くことができる。さらには洗浄後の流路壁面粗さは流体力学的に圧力損失上昇に寄与する程変化していない。一方、圧力損失特性はナトリウム流速、コールドトラップ温度およびナトリウム循環流路内に挿入された焼結金属フィルタなどにより顕著に変わる。</p>	<p>圧力損失特性変化が腐食によるものでなく粒状不純物の付着に基づくものである可能性が大きい事が明らかである。</p>										
<p>ナトリウム中の 不純物挙動試験</p>	<p>1) ナトリウム流動伝熱試験装置内流動ナトリウム中の粒状不純物濃度はループ内のナトリウム流速に依存するが、この試験では1~5 ppbであった。</p> <p>2) 捕集された粒状不純物の粒径は50<math>\mu</math>からサブミクロンまでの広い分布を持ち、コールターカウンタでの測定では2~3<math>\mu</math>にピークが認められた。</p> <p>3) 粒状不純物の主要構成物質は</p> <table border="0" data-bbox="446 1568 845 1836"> <tr> <td>鉄</td> <td>(18~43%)</td> </tr> <tr> <td>クロム</td> <td>(4.4~18%)</td> </tr> <tr> <td>マンガン</td> <td>(4~9%)</td> </tr> <tr> <td>ニッケル</td> <td>(2~3%)</td> </tr> <tr> <td>シリコン</td> <td>(3~4%)</td> </tr> </table> <p>であった。</p>	鉄	(18~43%)	クロム	(4.4~18%)	マンガン	(4~9%)	ニッケル	(2~3%)	シリコン	(3~4%)	<p>機器解体検査及びダンプタンク中粒状不純物濃度の推定等より、粒状不純物は流速及び温度の変化によって機器や配管の底部に沈降し蓄積される。</p> <p>ナトリウム中から粒状不純物を捕集する手段としてのメッシュフィルタ及び磁気フィルタとも有効であった。</p>
鉄	(18~43%)											
クロム	(4.4~18%)											
マンガン	(4~9%)											
ニッケル	(2~3%)											
シリコン	(3~4%)											

Table 5-8 試作供試体の耐久性試験結果

## Experimental Results about Endurance Test of Dummy Fuel Subassemblies

試作回数 (供試体名)	知見	備考
第1次試作 (M1CGF) (M1CGH) (M1CGT) (M1CGM) (M1CGS) (M1CWT) (M1CWS)	1) M1CWS 供試作において3715時間の高温ナトリウム中耐久試験を行なった結果、燃料ピン1本のずれが生じた。	他の6本の供試体についてはおおむね健全であった。
第2次試作 (M2CWG) (M2CWH)	1) 4800時間の連続耐久試験を実施した結果、外観上異常は認められなかった。	最近になってM2CWH 供試体被覆管表面にウェア・マークが発生していたことが報告されている。
第3次試作 (M3CWM) (M3CWT)	1) M3CWM 供試作において周辺ピン42本が周辺流れ方向に4本ずつまがって移動していた。下流部の上部端栓部では、これらはきれいなちどり配列となっており、1本のピンに着目して長さ方向におって行くと初めてその移動がわかるほどである。この移動には塑性変形が伴っており、バンドル解体後、燃料ピンがまがっている事が確認された。この様なピンの移動変形は「常陽」、「もんじゅ」のナトリウム流動耐久試験を通じて初めての	これは高温長時間という条件と周辺せん回流によって生じた力が加わり曲ったと考えられる。それにこの集合体の特徴はバンドルがルーズであり、ラップ管のコーナ部が広く、流路断面積が大となってバンドルの移動状況によっては、周辺ピンが移動できるだけのスペースが確保される。したがって何らかの力が加わるとピンが移動する可能性は大である。さらにはMAPIでの可視化した試験によると、周辺流れ効果によりピンがそのサブチャンネル内で移動することが認められた。また流力振動に

	<p>現象であった。</p> <p>2) M3CWT 供試体においてはバンドル最下流にある組棒が変形しているのが解体により判明した。この変形状況は組棒支持部が変形し下流に押されていると同時に組棒その物が下流方向にたわんでいた。</p>	<p>より移動量が増加することが認められた。したがって周辺せん回流、流力移動がピンの移動の力であり、バンドルがルーズであったこととあいまって移動したと考えられる。</p> <p>これらの原因は組棒支持方法に問題があったこと、組棒そのものに強度上問題があったためと考えられる。この組棒の変形のためと思われるがバンドル出口部での圧損が相当量変化していることが水試験で確認されている。しかし変形に起因する全体圧損の変化は微々たる量であることは推定される。</p>
<p>(M3CWG) (M3CWH)</p>	<p>1) 定格流量を流した高温ナトリウム中における耐久性に関しては外観および燃料ピンバンドル解体までの目視検査では重大な異常は認められなかった。</p>	
<p>第4次試作 (M4CWT)</p>		<p>ナトリウム流動耐久試験は実施していない。</p>
<p>第5次試作 (M5TWT-1)</p>	<p>1) パッド部のコーティング材が剥離していた。このコーティング材はクロム・カーバイドの Detonation 溶射によるものであり「もんじゅ」燃料集合体のパッド部のコーティング材としては「もんじゅ」第4次試作より採用している。ただし M4CWT は水流動試験のみを実施し、ナトリウム流動耐久試験は実施し</p>	<p>実機燃料集合体の製作においてパッド部は剥離の起こりにくかった本体と1体形の成形パッドにするとともに、表面処理手法をクロムカーバイド(LC-IC)からD-GUN表面処理法に進む方向で設計に反映される。</p>

	<p>ていないので今回の試験が燃料集合体にクロム-カーバイトをパッド部コーティング材として長期間高温ナトリウムで使用した初めてのデータである。剥離はラップ管に溶接した後、コーティングした中間パッド及び補助パッドに多く認められ本体と1体加工したものにコーティングしたハンドリングヘッド部分の上部パッド及びエントランスノズル上部のパッドには特に異常は認められなかった。</p>	
<p>(M5CWT-2) M5CWT を解体検査後に再組立てたもので名称を M5CWT-2 とした。</p>	<p>1) 再使用したパッド部はコーティング材の剥離は進行したが、新規に交換したパッド部については異常は認められなかった。</p>	<p>新しいラップ管の製作にあたって3つの異なる形状にパッドを加工し、後の解体検査で相互間の優劣の判定ができるようにした。パッド部のコーティング材はいずれもクロム・カーバイトであるが、加工方法を分けた。</p>
<p>第6次試作 (M6CWP)</p>	<p>1) ナトリウム流動試験後、供試体外観の目視検査を行なった結果、燃料ピンが支持機構(ノックバー)より外れることはなく健全であった。またその他についても、何の異常も認められなかった。</p>	<p>パッド部は溶接パッドを採用し、表面処理はしていないものを供した。</p>

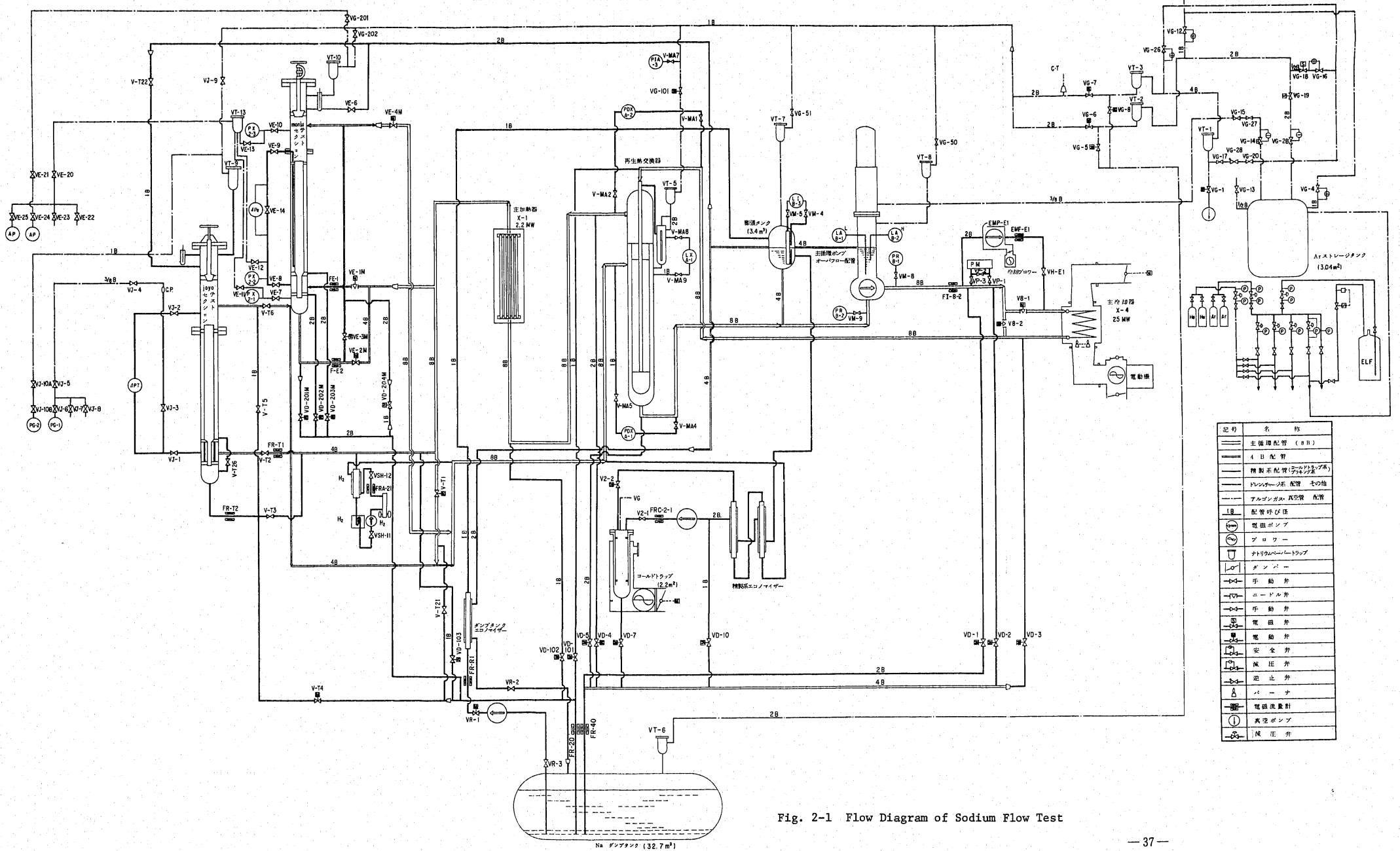


Table 5-9 その他特記事項

## Important Experimental Results except Those Explained Already

項 目	知 見	備 考
1) ナトリウム洗浄	<p>1) 第1次試作体においてナトリウム流動耐久試験後, M1CGH 供試体を低圧水蒸気洗浄で行なったが, 他のアルコール洗浄の供試体に比べて, 燃料集合体のピン表面がひどく荒れていたのが観察された。</p> <p>2) アルコールを用いた循環洗浄において, 燃料集合体に付着又は付着ナトリウム中に混入していたと思われる黒色微粒子状物質の離脱が相当量観察された。</p>	<p>1) 以後のナトリウム洗浄には低圧水蒸気洗浄法を採用しないこととした。</p>
2) 解体検査	<p>1) ワイヤ型燃料集合体ピン束部の一部に長さ数mm程度の切断加工屑が見られた。</p> <p>2) M2CWH 供試体において座覆管表面にウェア・マークが発生していたことが, 最近になって報告されている。</p>	<p>1) 分析によると試験装置配管材の一部である SUS 304 であり, 装置改造工事における切粉が混入し, 流動していたものと考えられる。装置改造工事における注意が今まで以上に必要なのは勿論であるが不純物フィルター装置の検討も必要である。</p> <p>2) ウェア・マークは長さ0.3~11.5mmで, 巾0.5~0.9mm程度で, 最大深さは使用被覆管肉厚(0.45mm)の約10%にあたる51μであった。</p>
3) 材料検査	<p>1) 燃料ピン表面あらさの増大は確認されたが, 表面あらさと触</p>	<p>1) 表面あらさの測定法の開発が必要である。</p>

4) その他	式式あらし計で測定すると実際より小さめの結果を出す。 (触針径 5 $\mu$ )  1) 粒状不純物を捕集する目的で網目フィルタ, 磁気フィルタを設置して実験を行った。	1) 捕集された粒状不純物の絶対量は少なかった。
--------	--	--------------------------



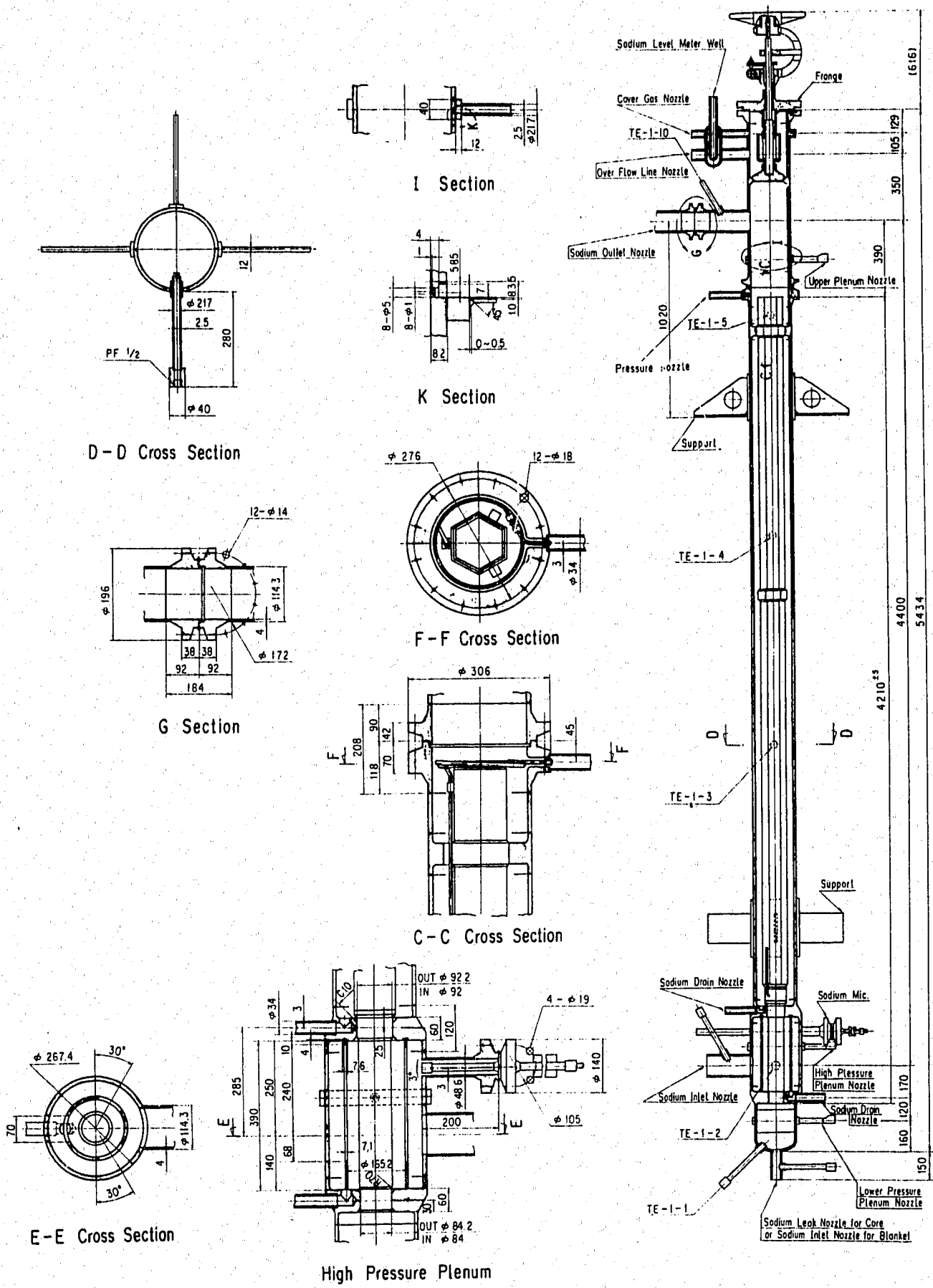


Fig. 2-2 "MONJU" Fuel Subassembly Test Section - III

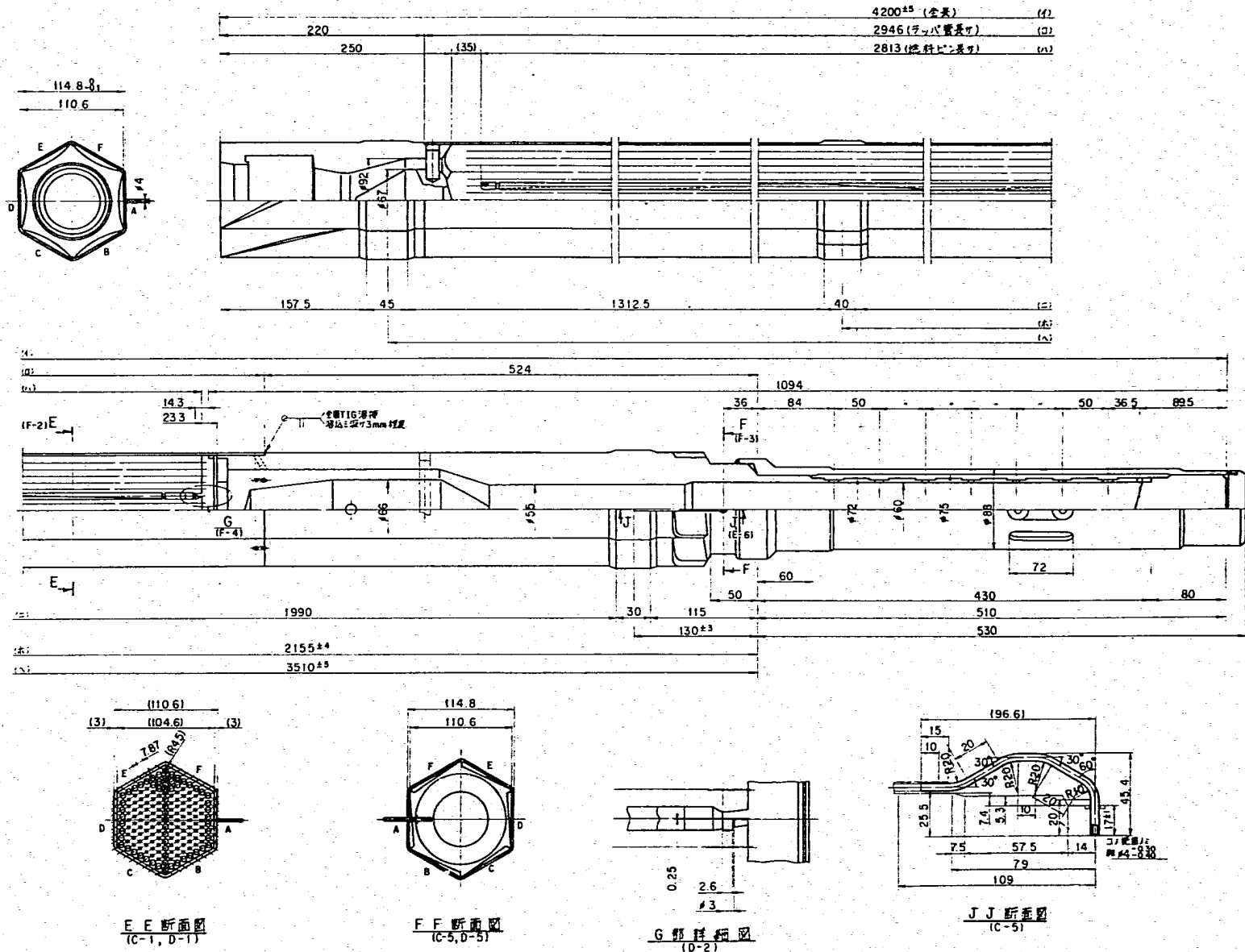


Fig. 2-3 (a) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)

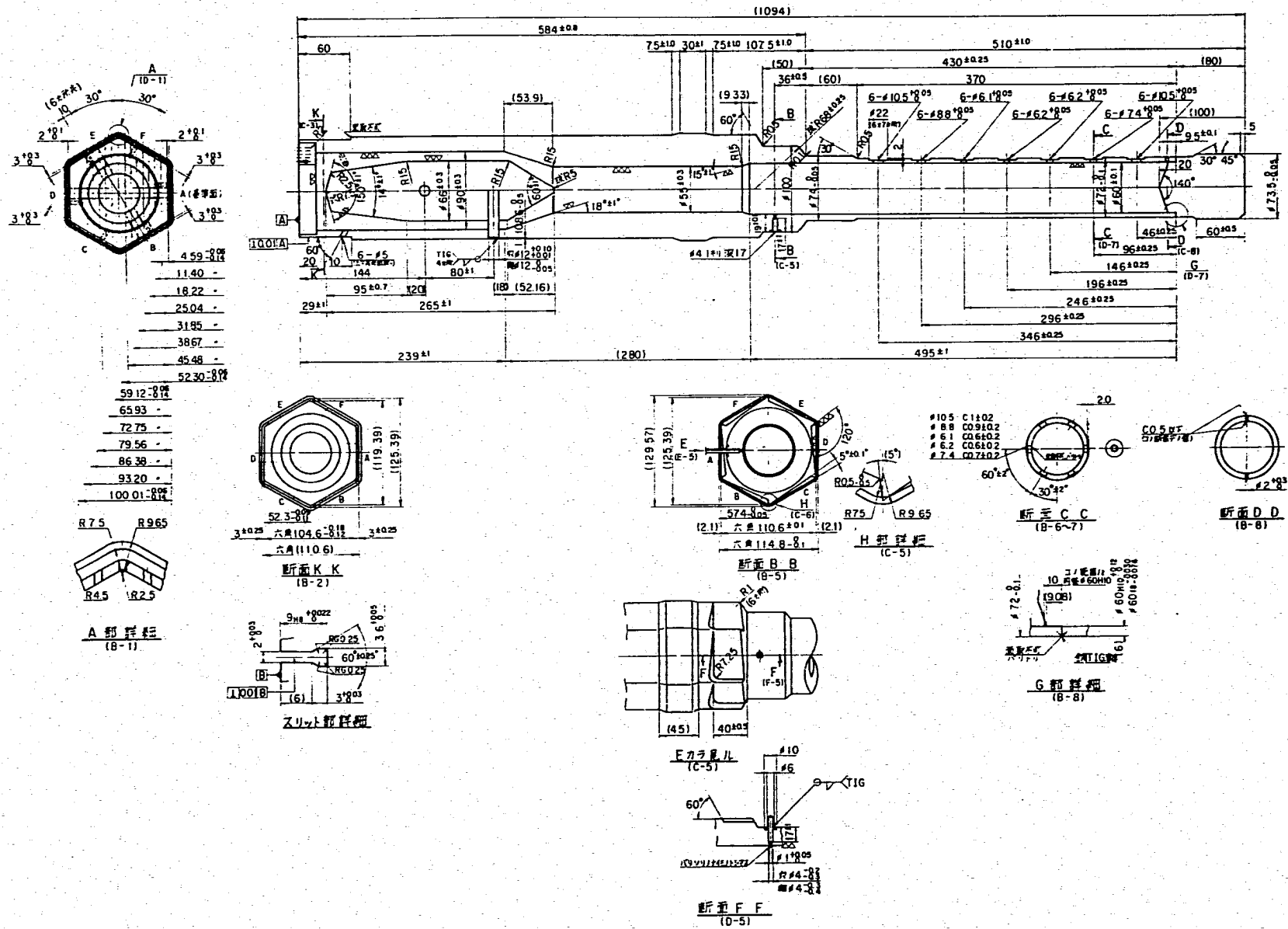


Fig. 2-3 (b) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)

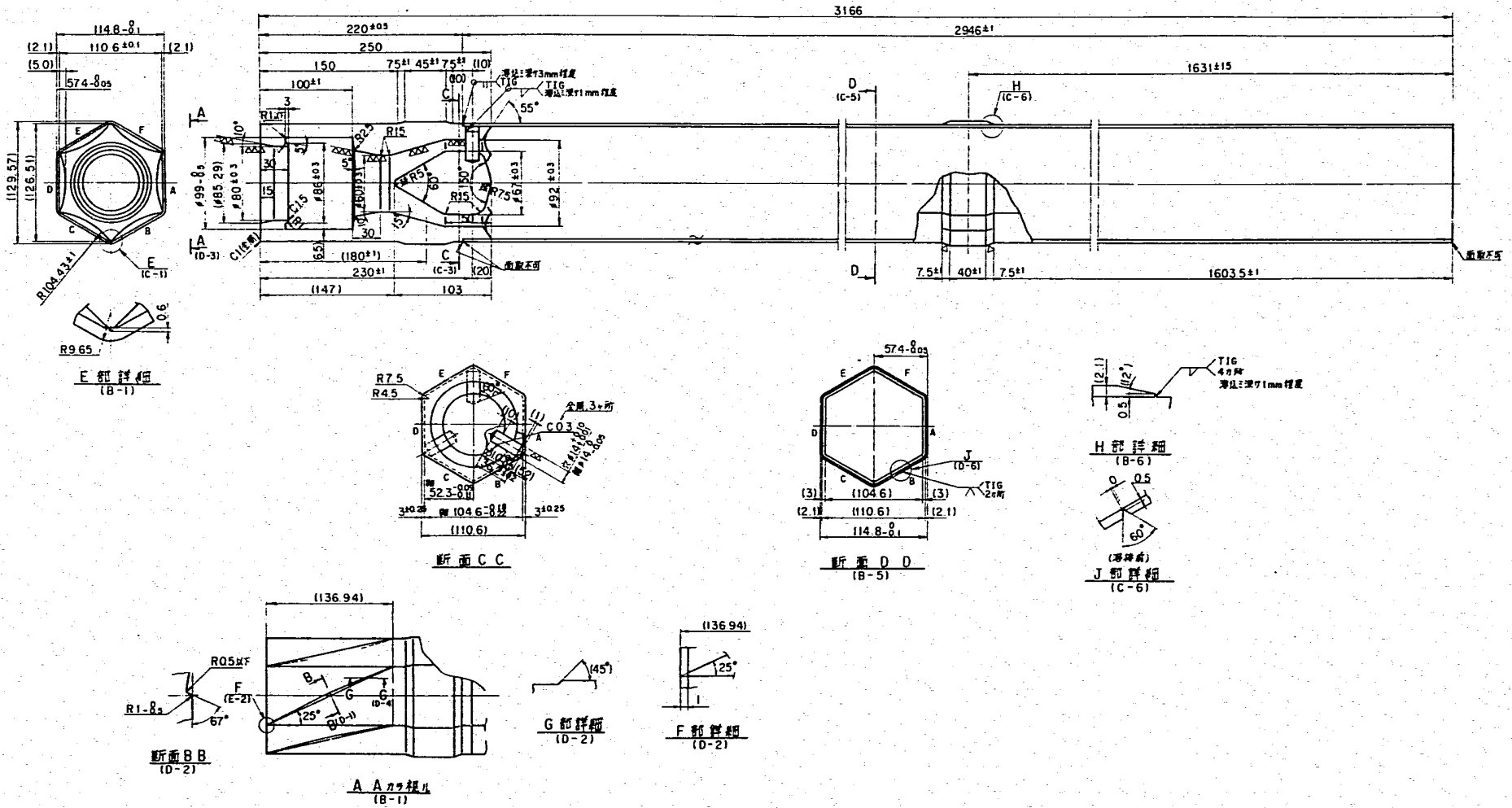


Fig. 2-3 (c) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)

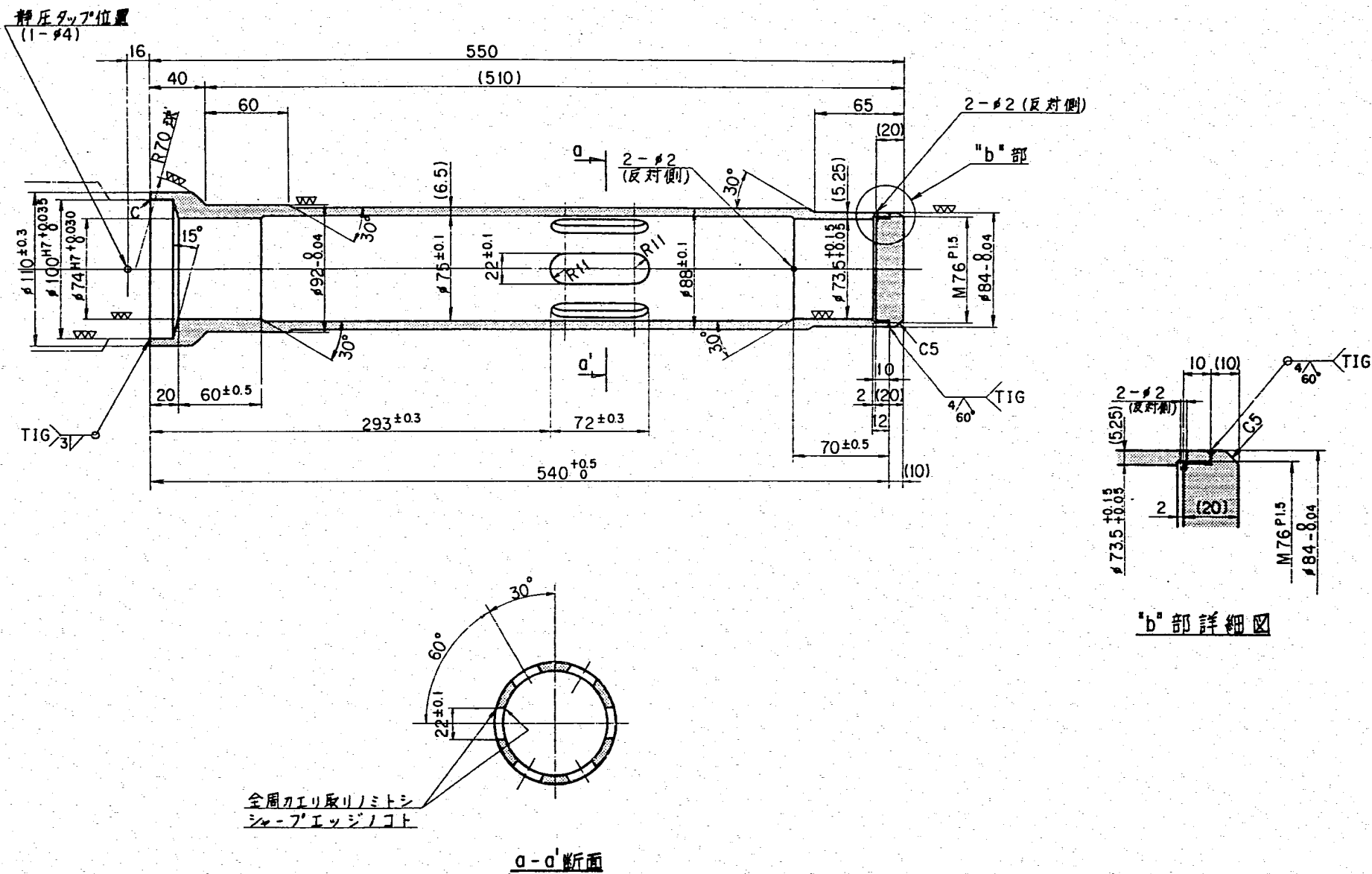


Fig. 2-3 (d) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)



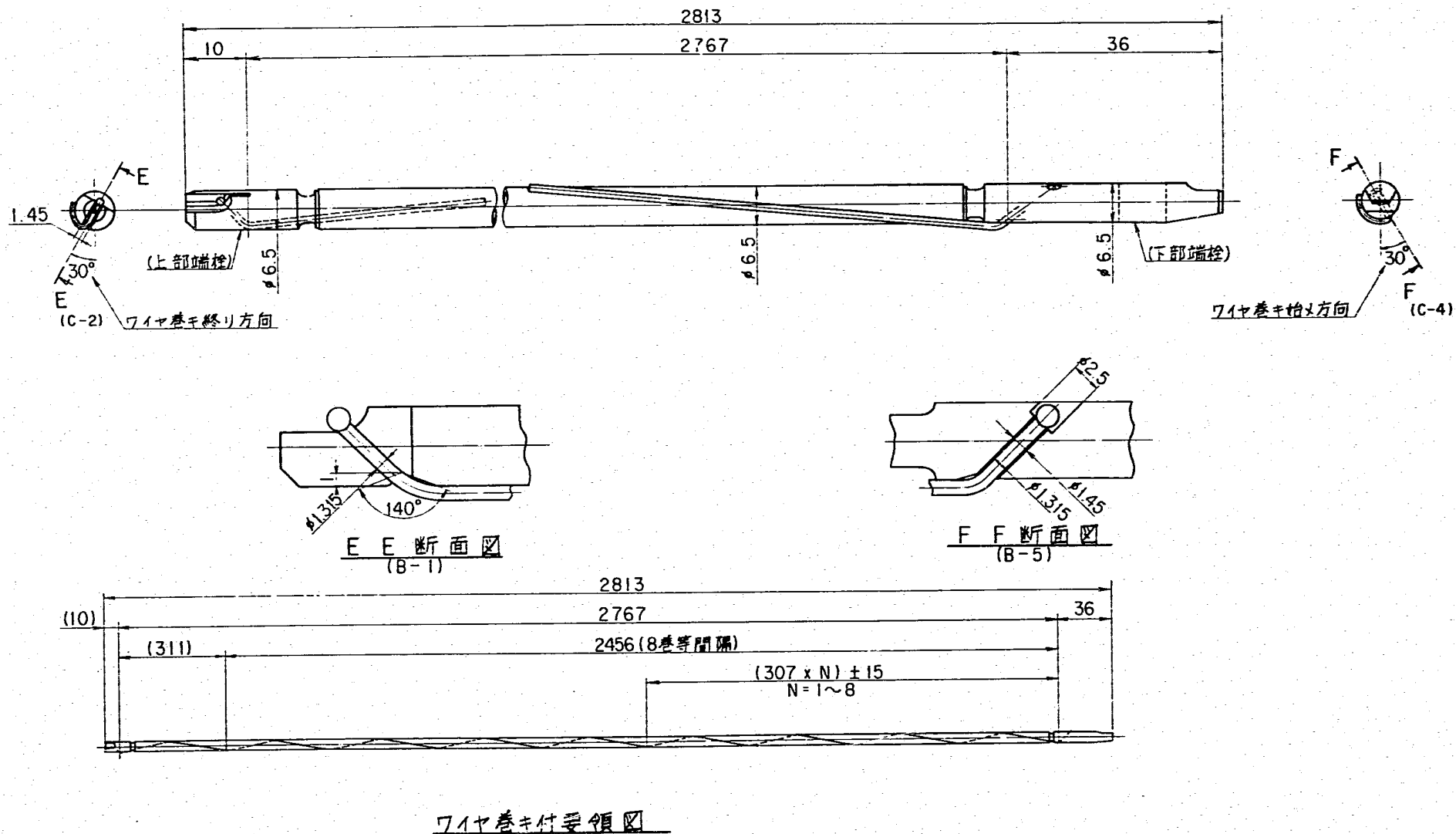


Fig. 2-3 (e) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)

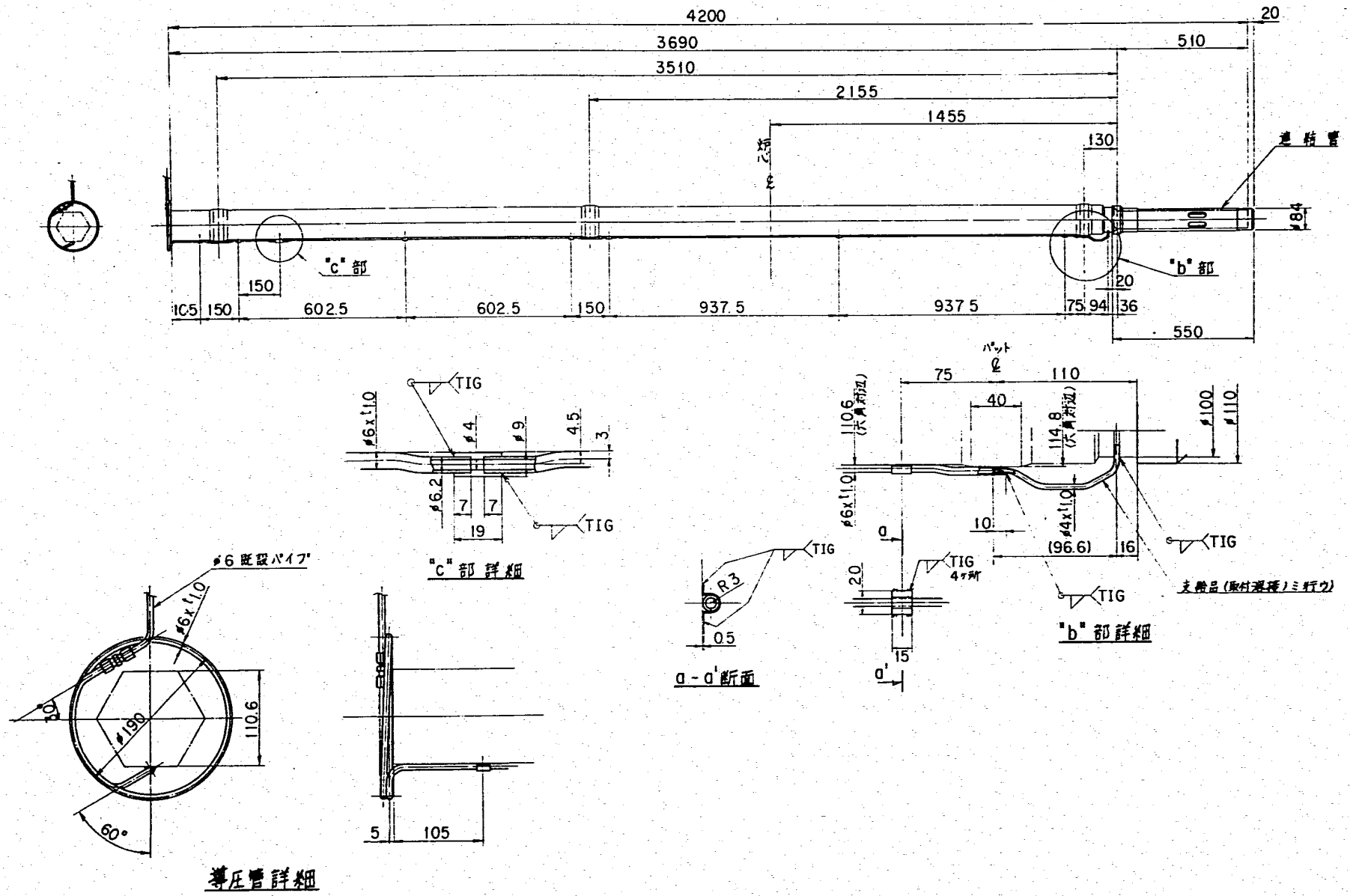


Fig. 2-3 (f) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly (M6CWP)

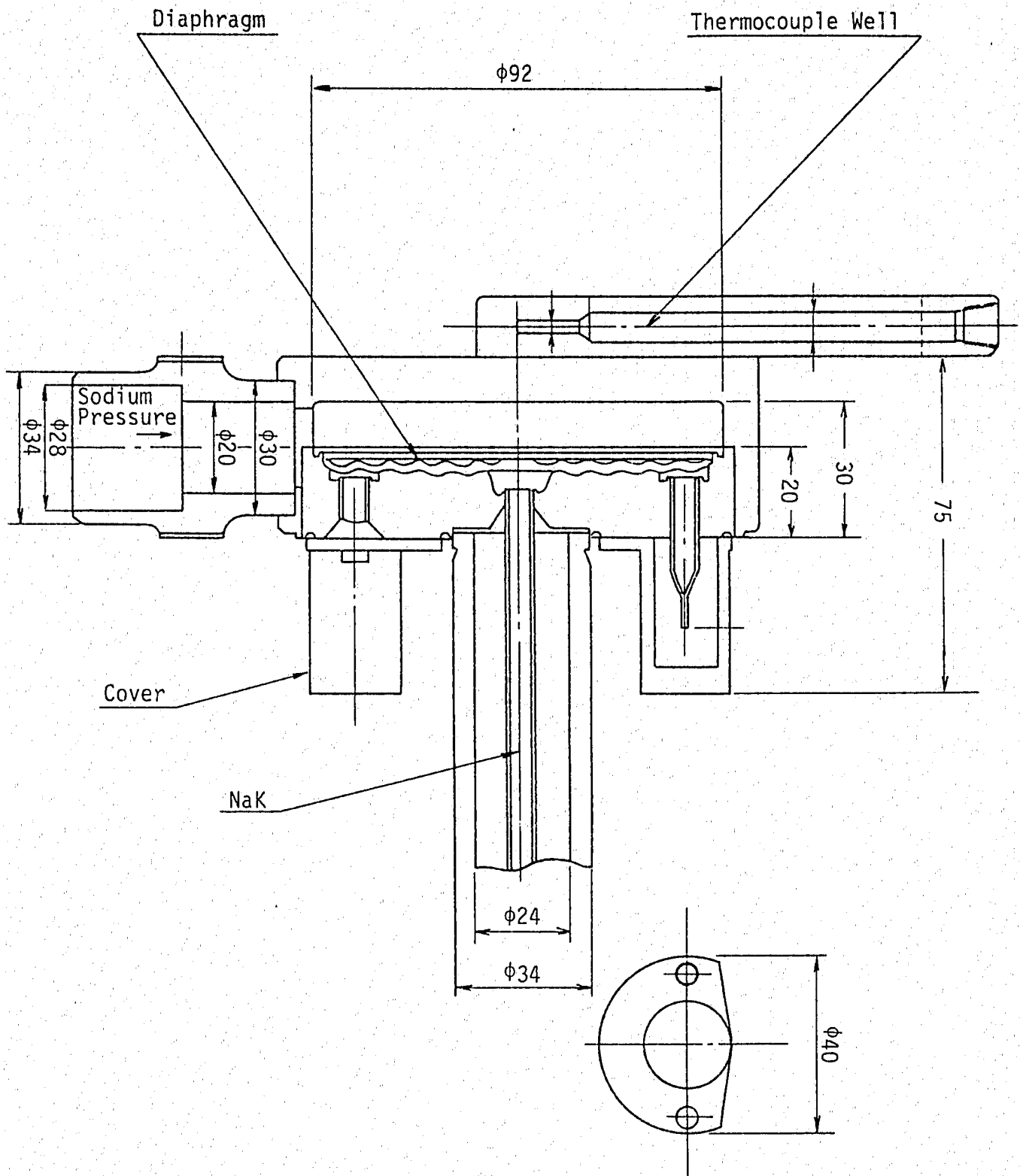


Fig. 2-4 Sodium Pressure Gauge

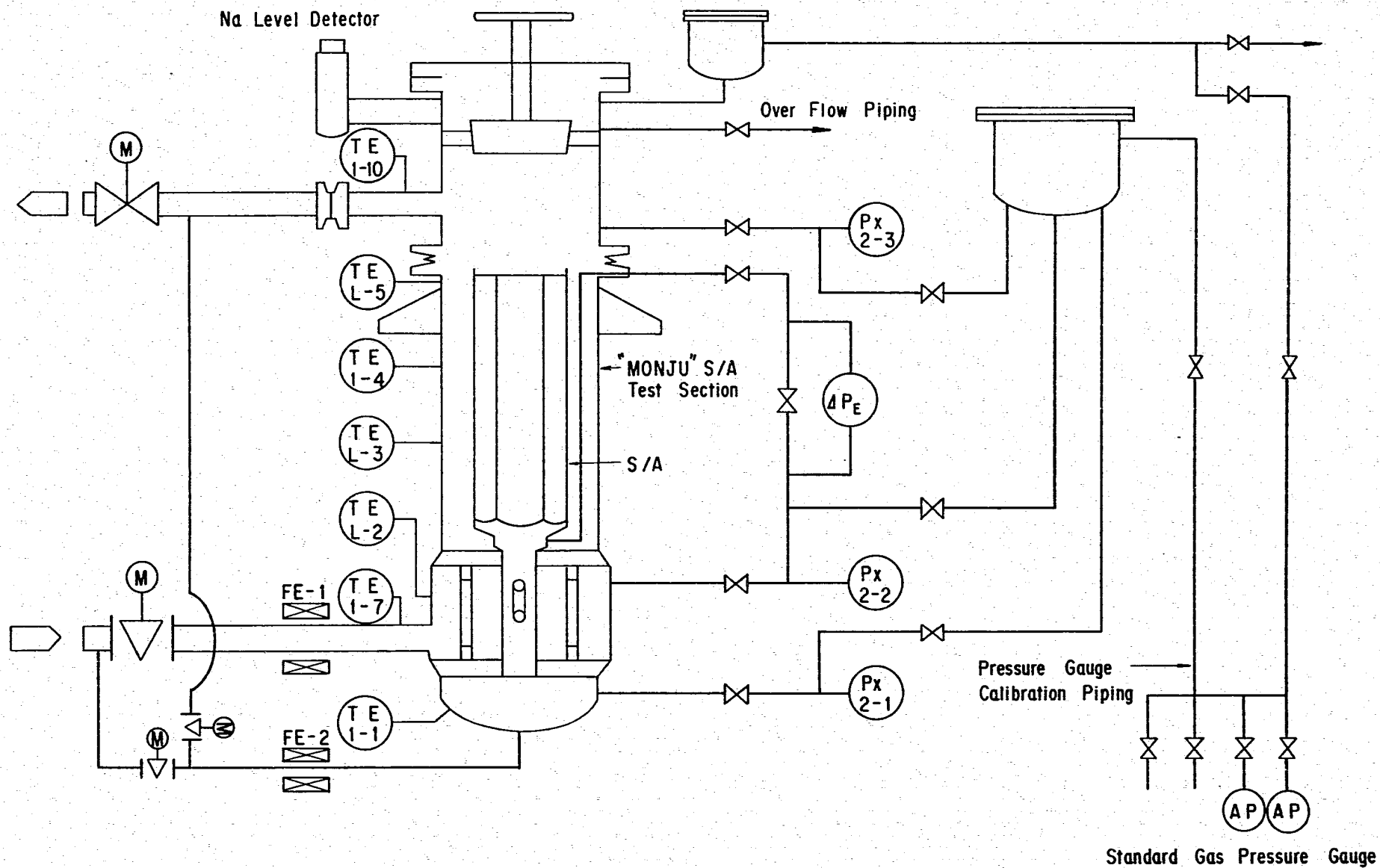


Fig. 2-5 Instrumentation of "MONJU" Fuel Subassembly Test Section

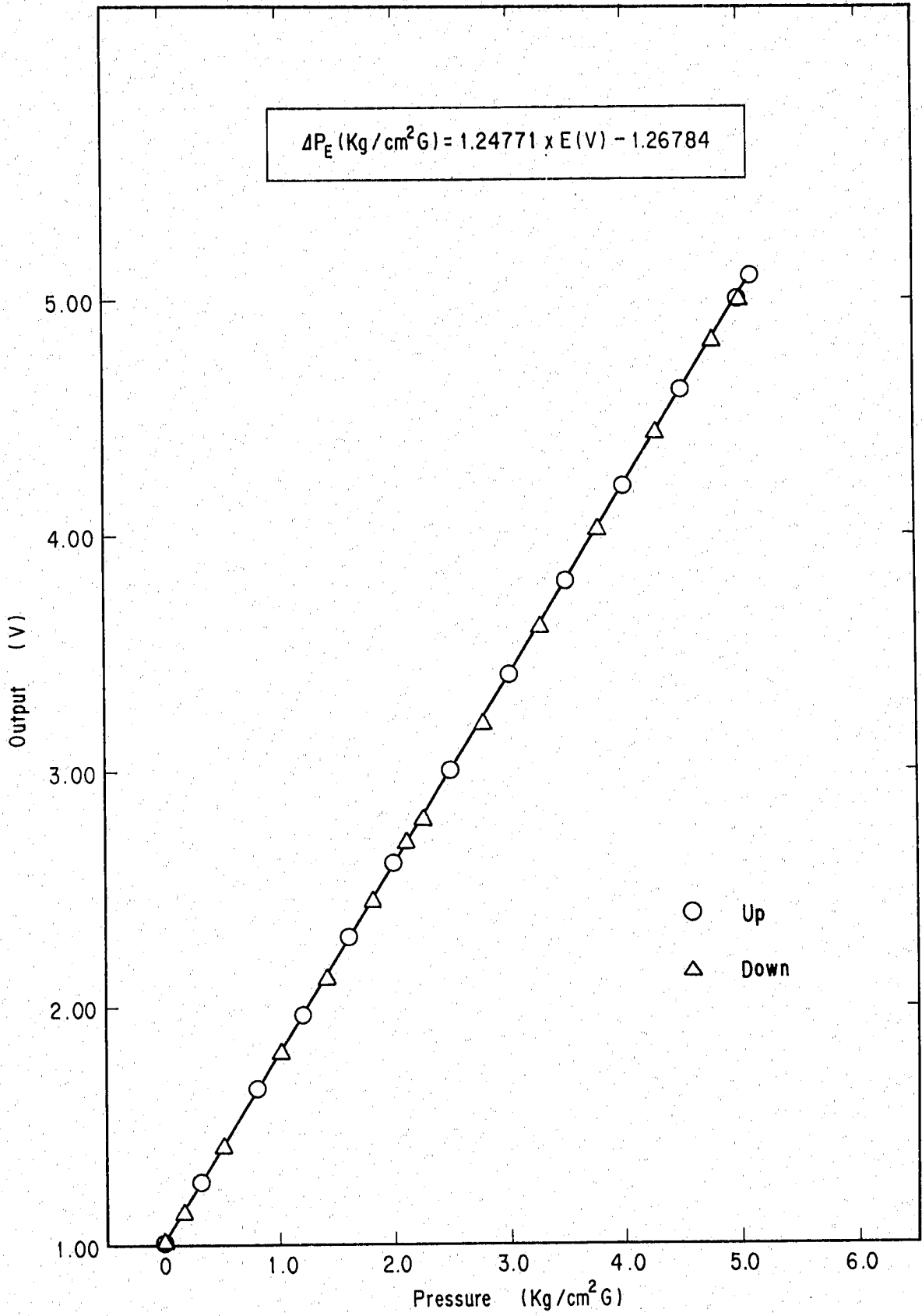


Fig. 3-1 Calibration Curve for ΔPE

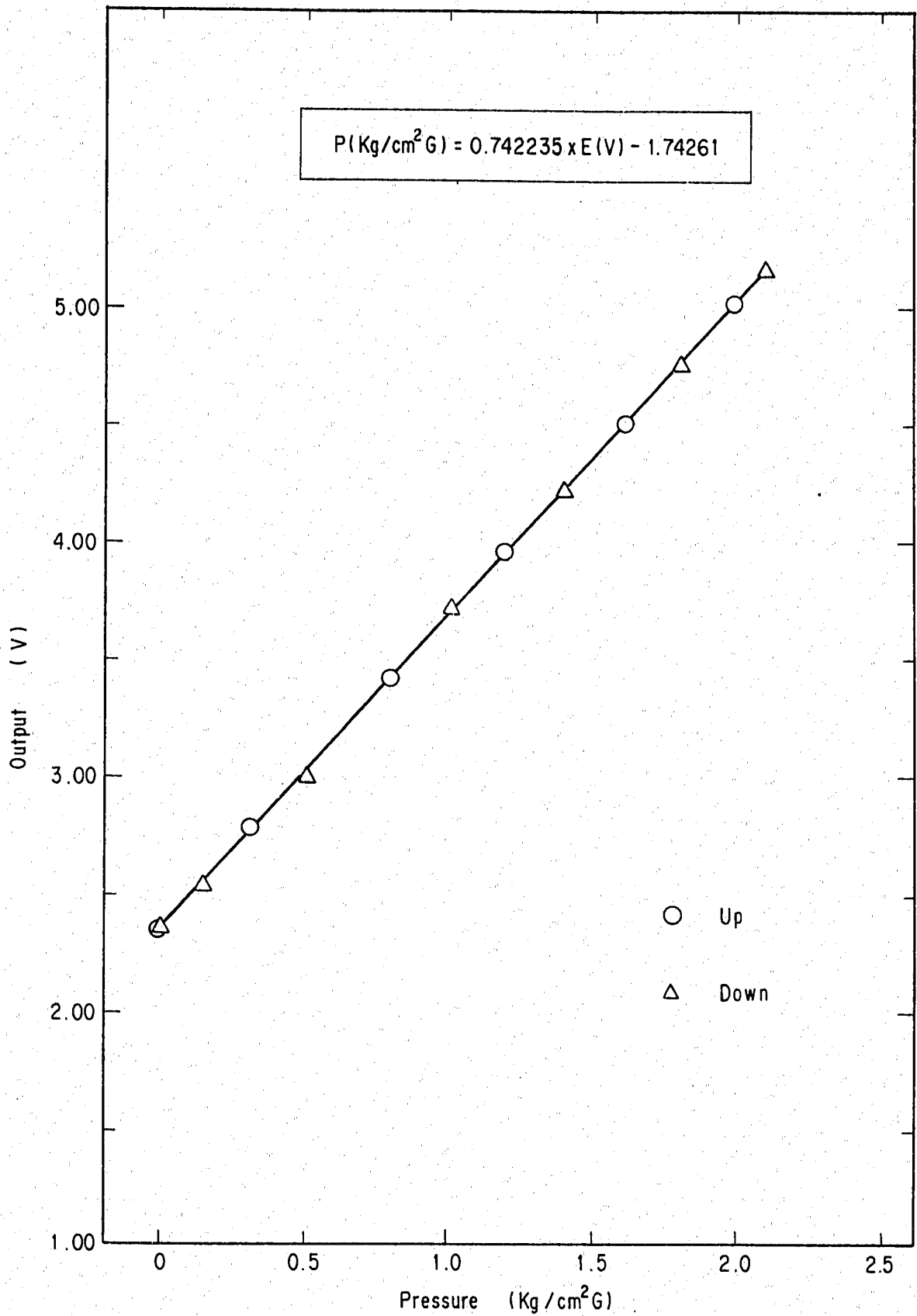


Fig. 3-2 Calibration Curve for Px2-1

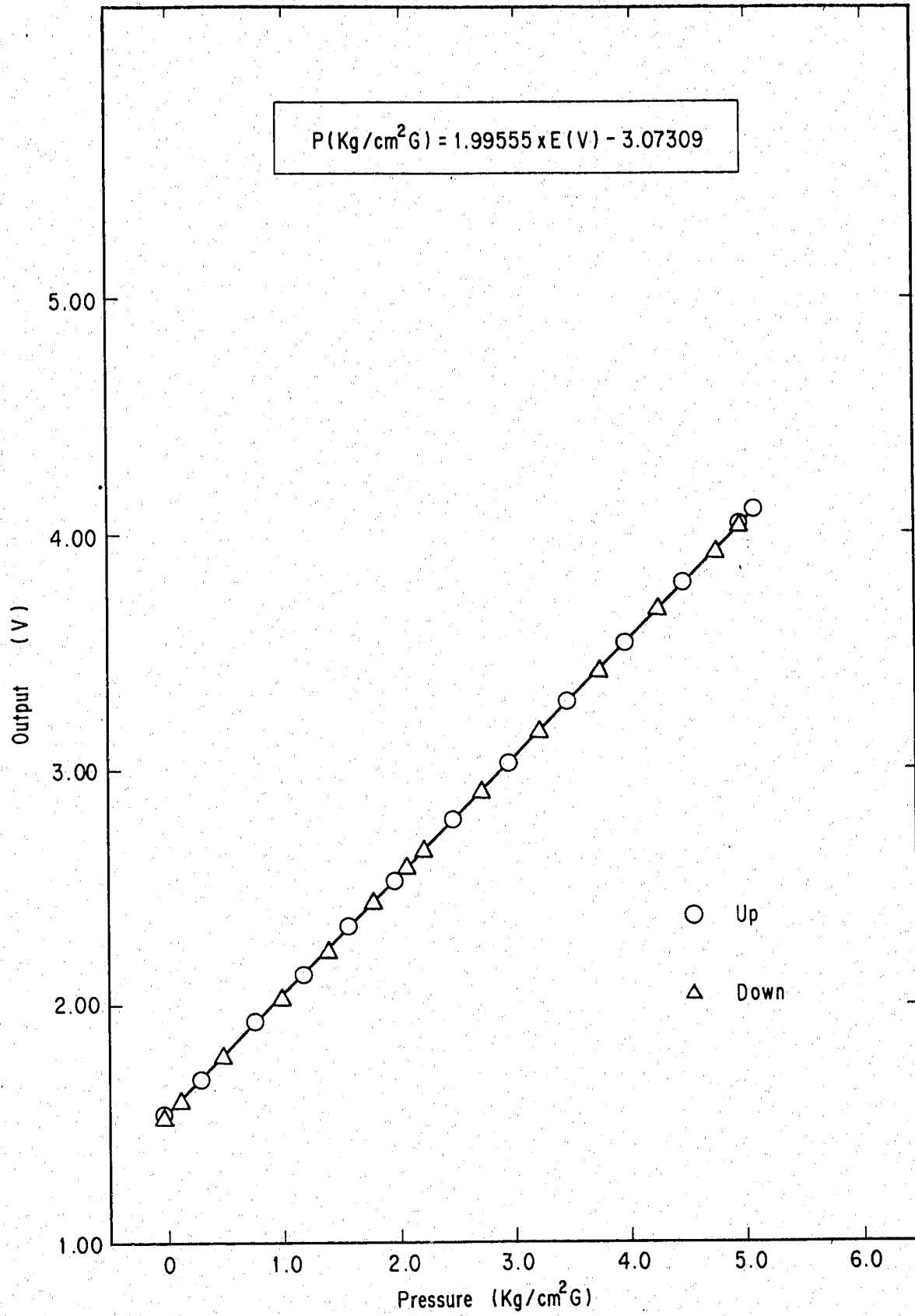


Fig. 3-3 Calibration Curve for Px2-2

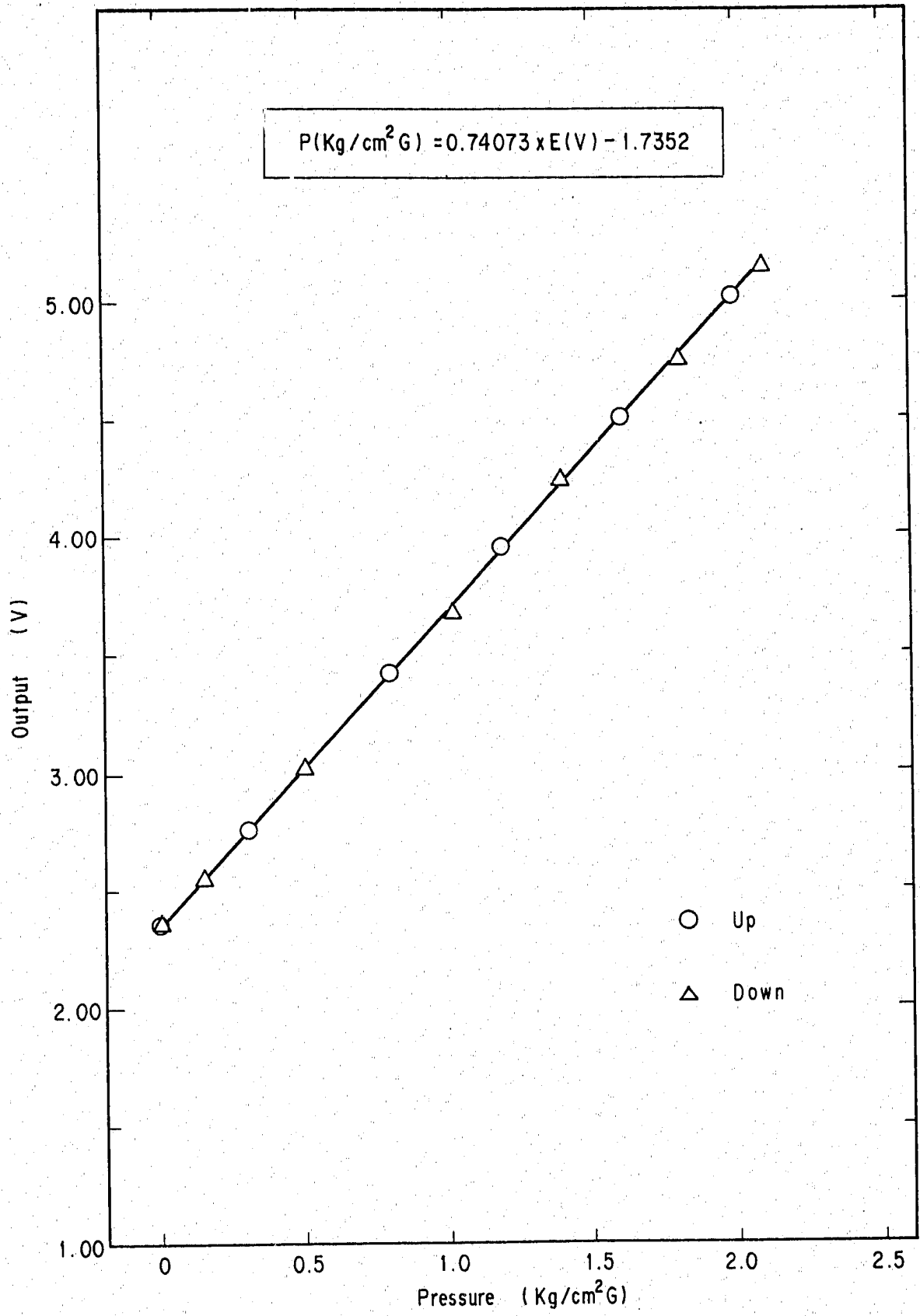


Fig. 3-4 Calibration Curve for Px2-3



F-1 1982. 12.05 58.6 hrs.

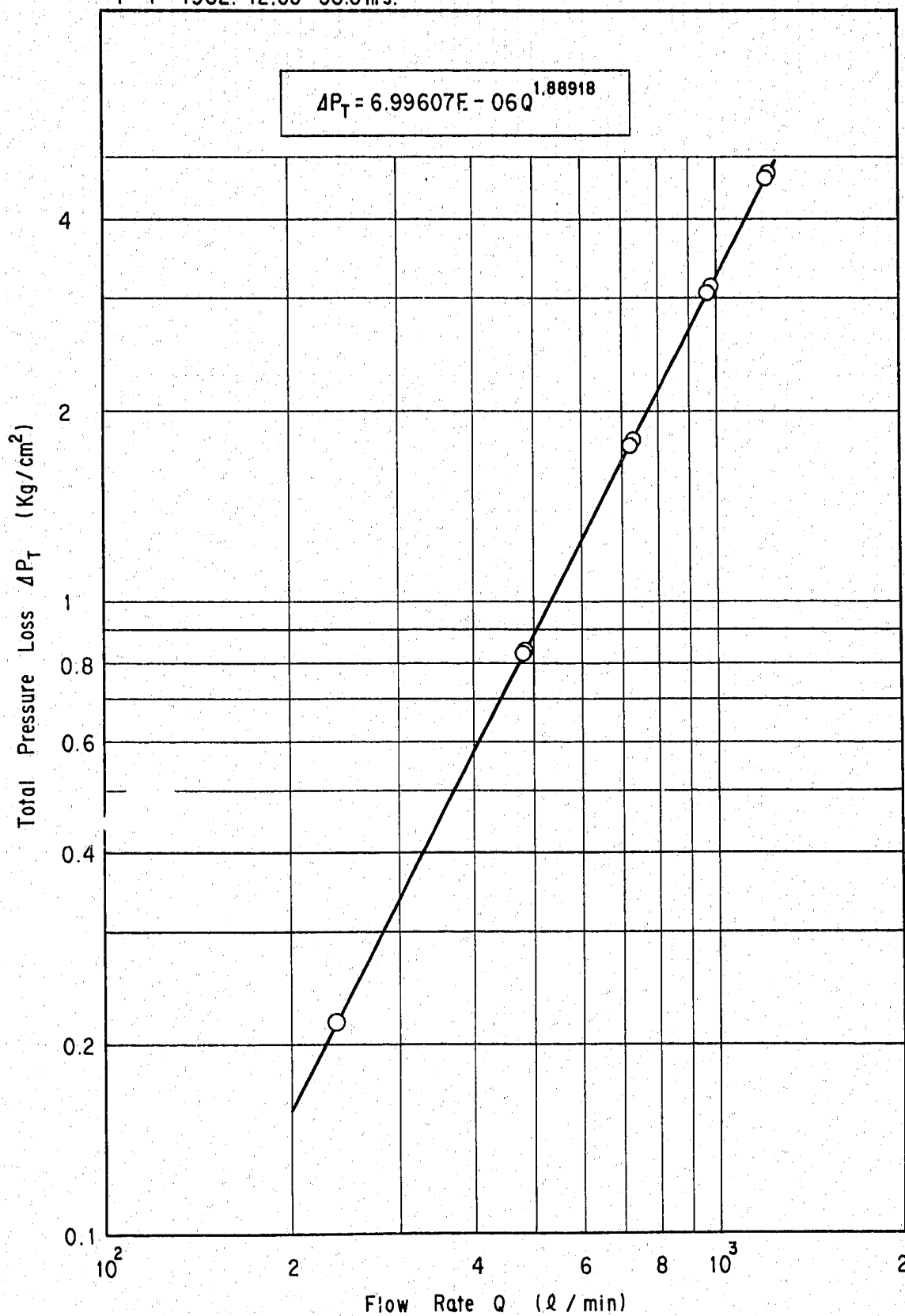


Fig. 4-1 Result of Sodium Flow Test on M6CWP

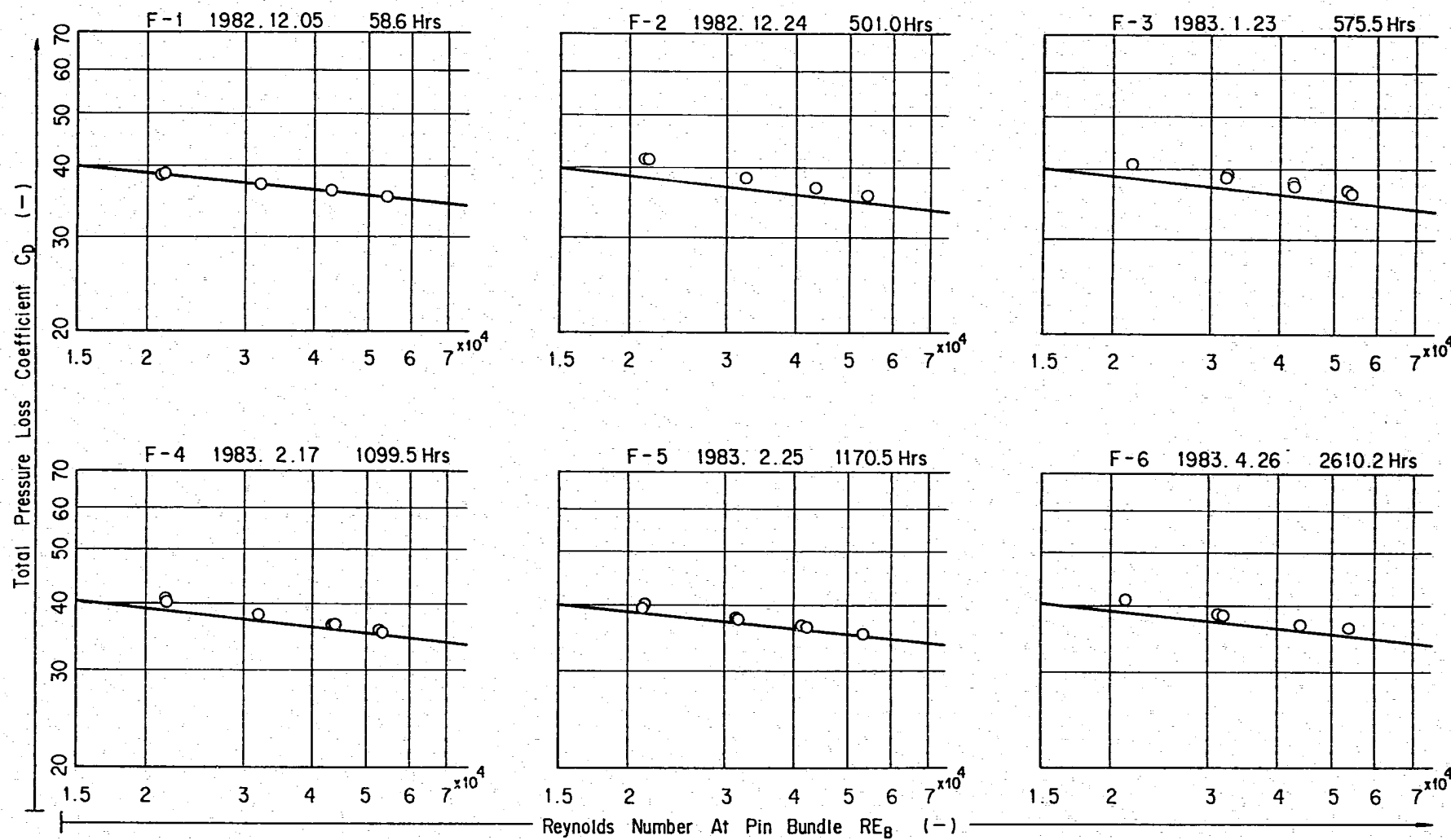


Fig. 4-2 Results of Sodium Flow Test on M6CWP

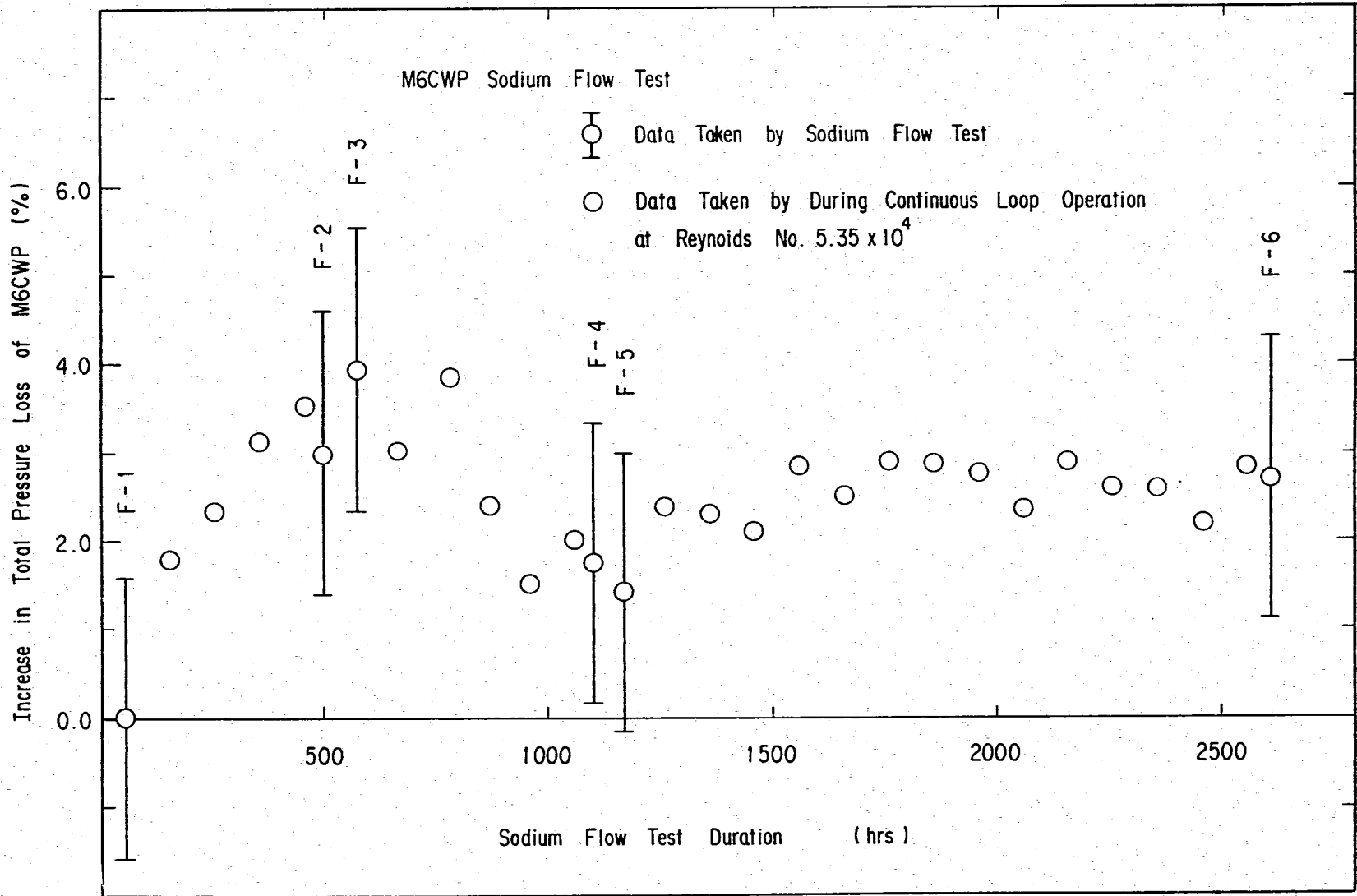


Fig. 4-3 Increase in Total Pressure Loss of M6CWP

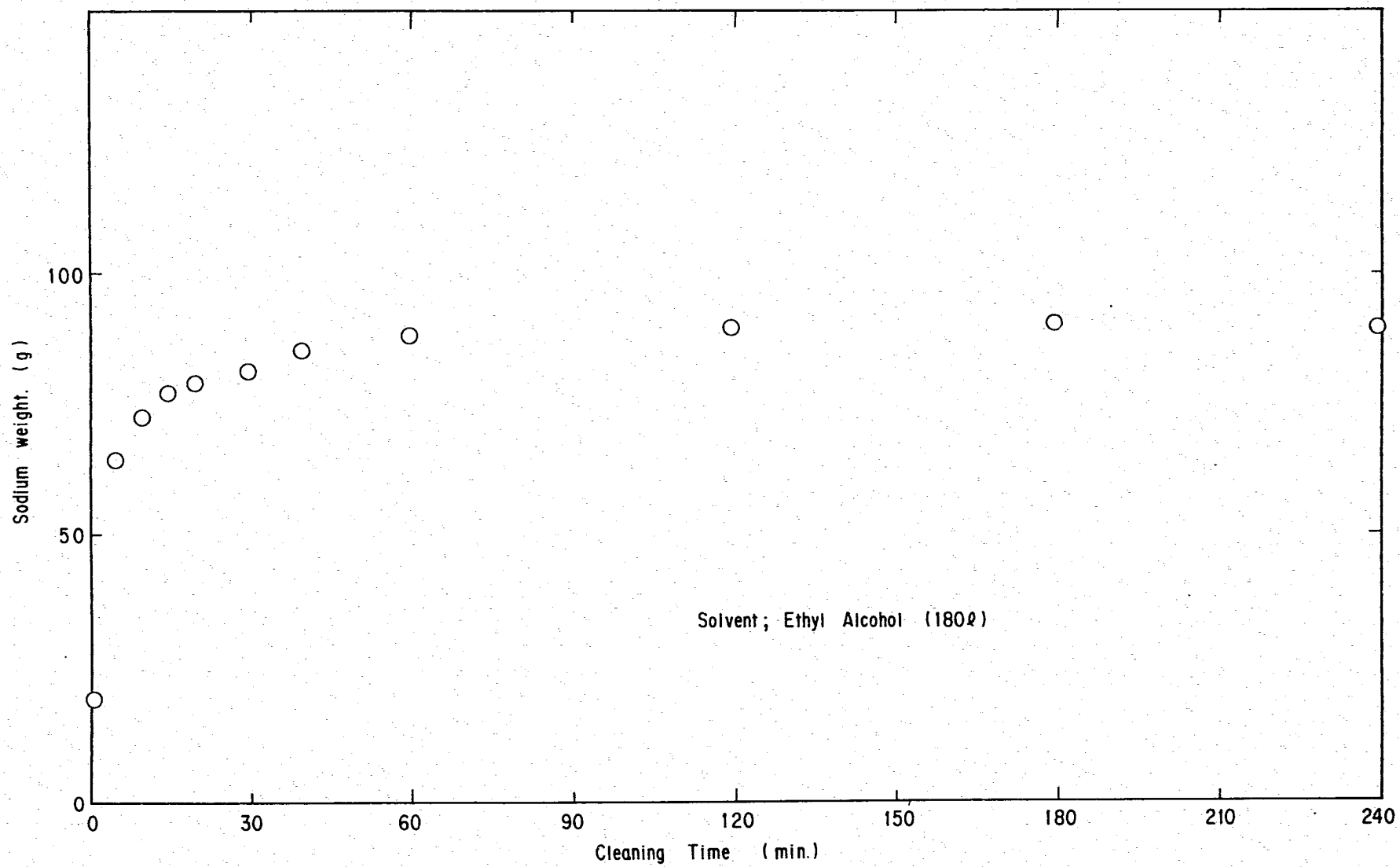


Fig. 4-4 Analysis of Ethyl Alcohol Used for Sodium Cleaning of M6CWP

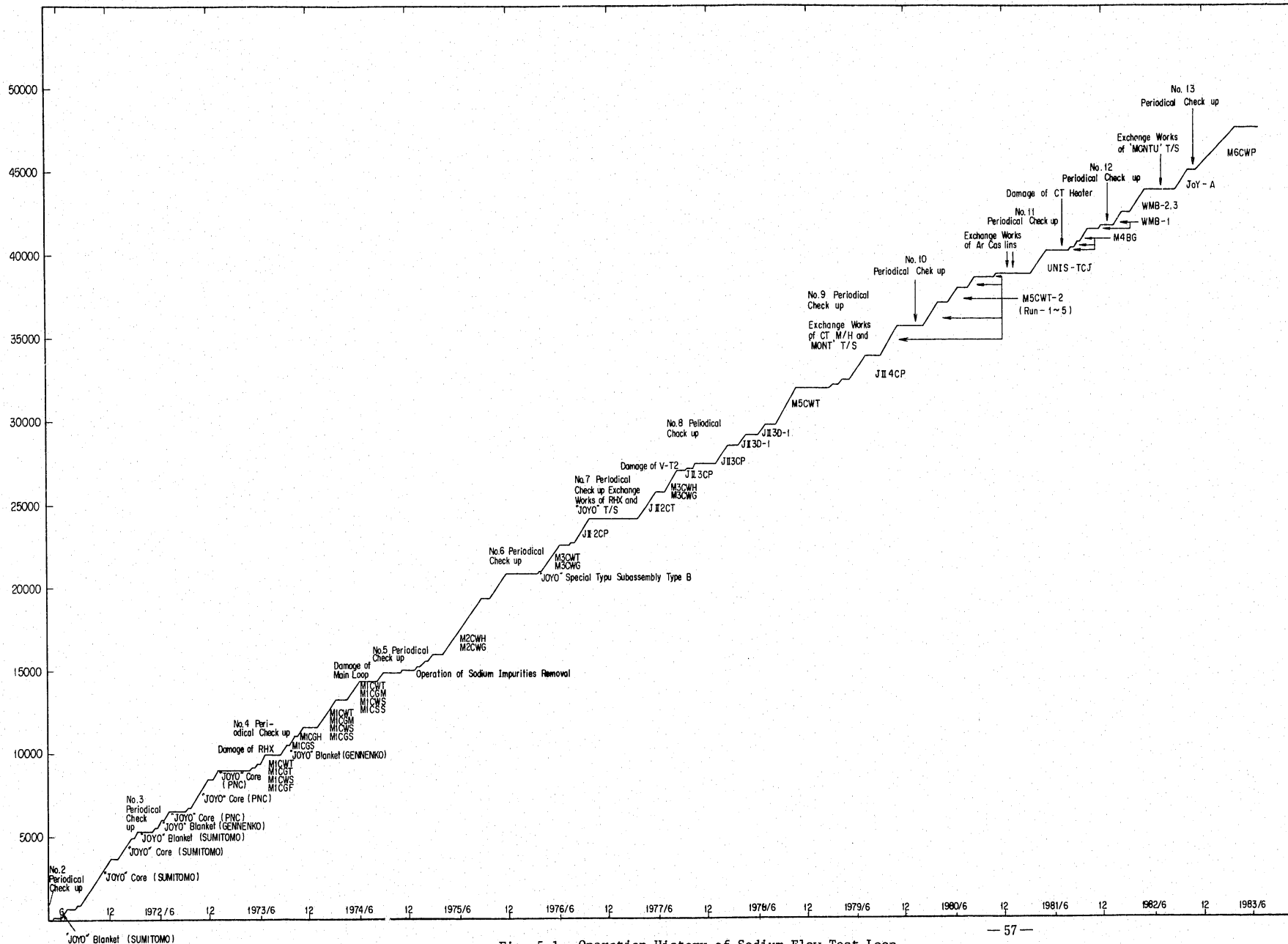


Fig. 5-1 Operation History of Sodium Flow Test Loop

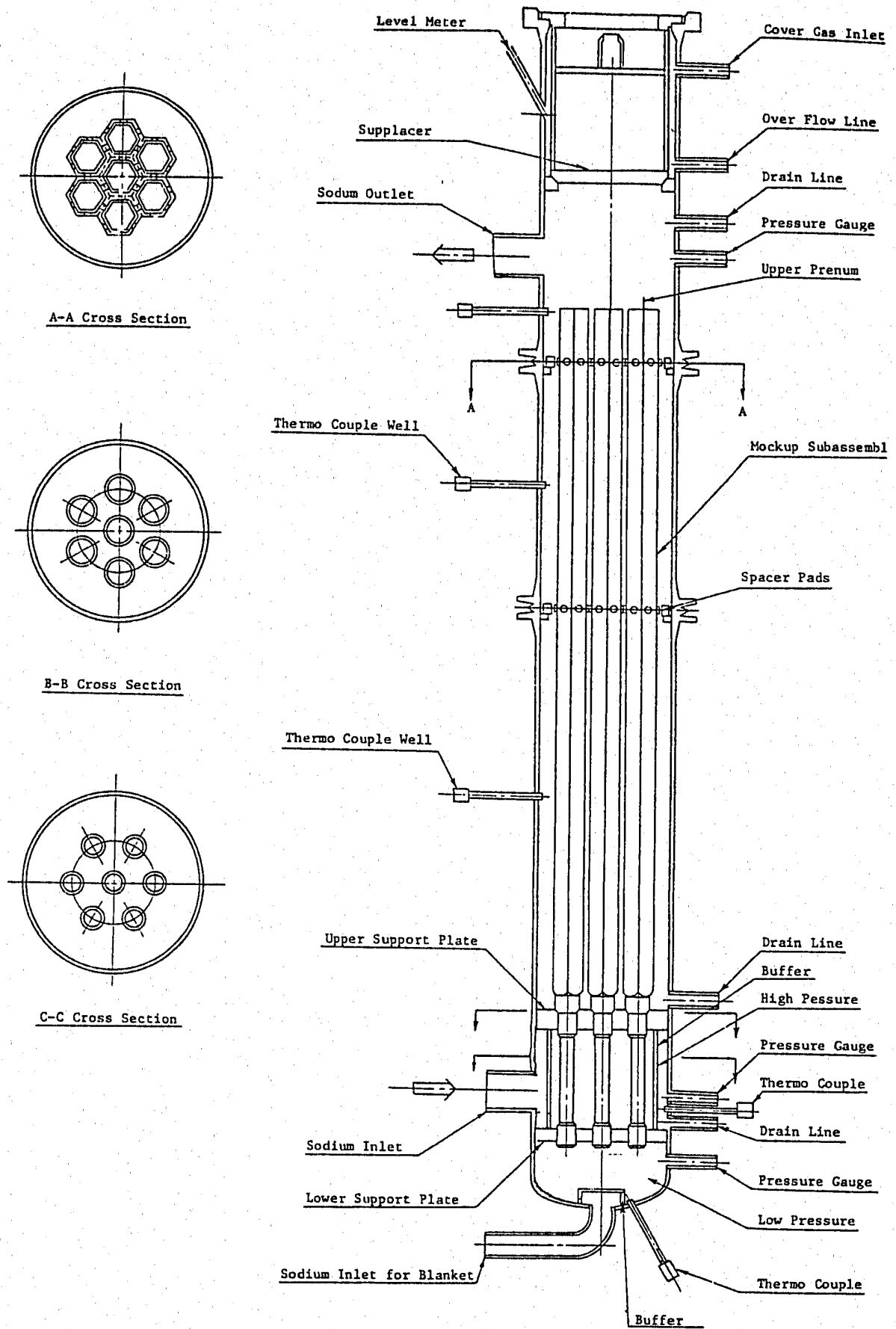


Fig. 5-2 (a) "MONJU" Fuel Subassembly Test Section - I

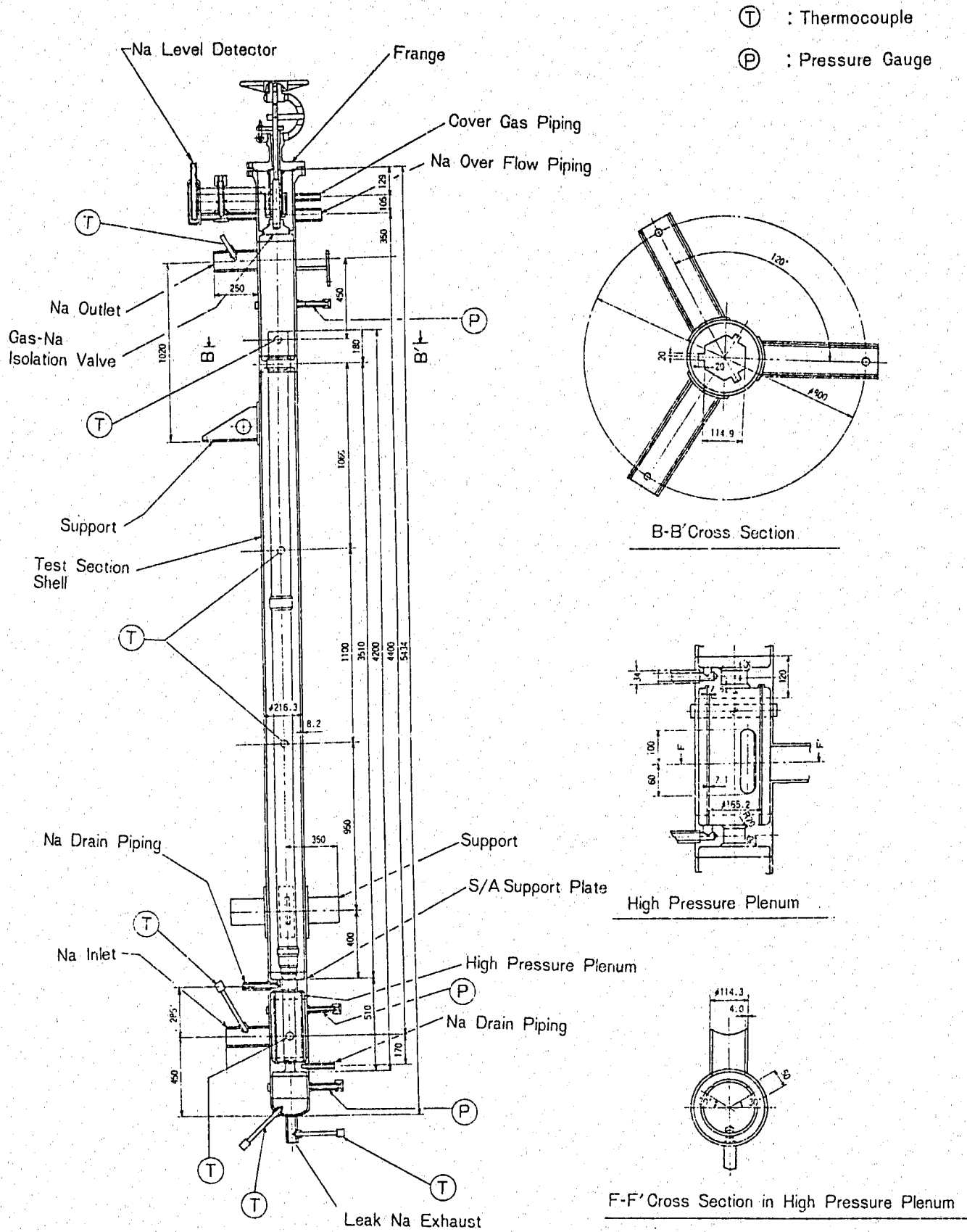
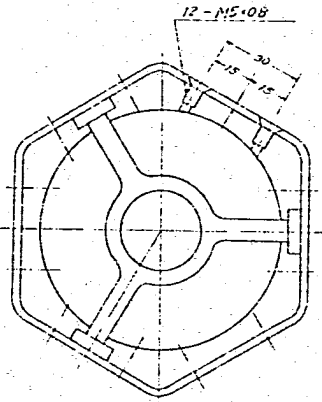
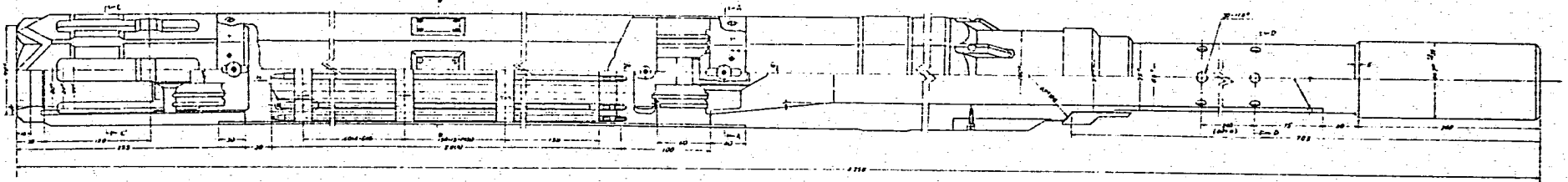
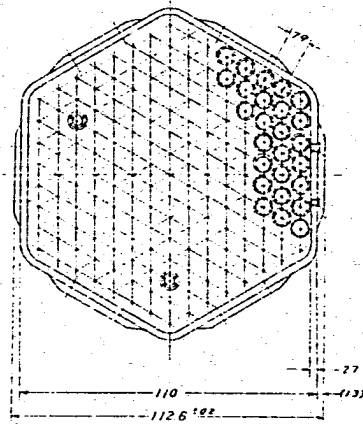


Fig. 5-2 (b) "MONJU" Fuel Subassembly Test Section - II

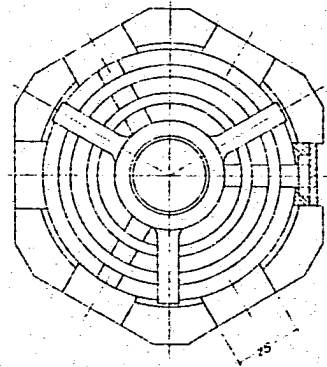
details



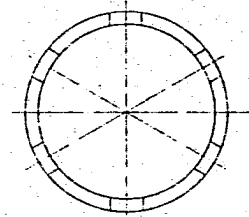
A-A' cross-section



B-B' cross-section



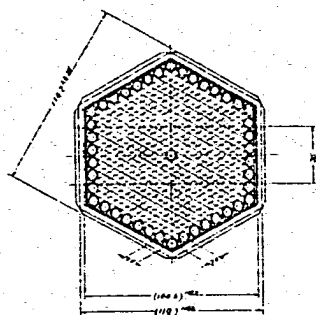
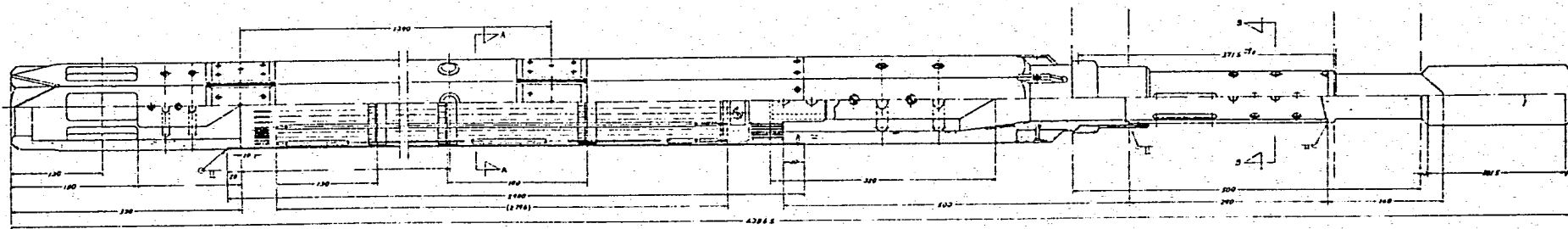
C-C' cross-section



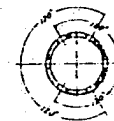
D-D' cross-section

Fig. 5-3 (a) "MONJU" Dummy Core Fuel Subassembly of the 1st Test Production (M1CGF)

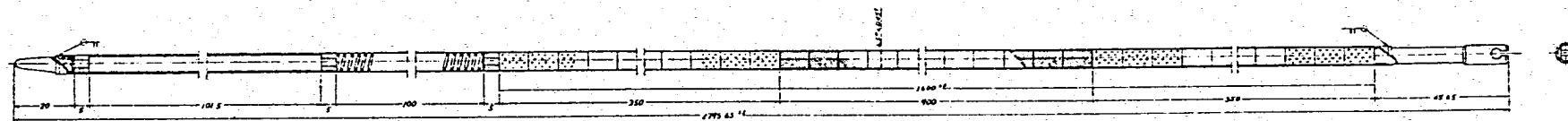




A-A cross-section



B-B cross-section



Fuel element

Fig. 5-3 (b) "MONJU" Core Fuel Subassembly (MLCGH)

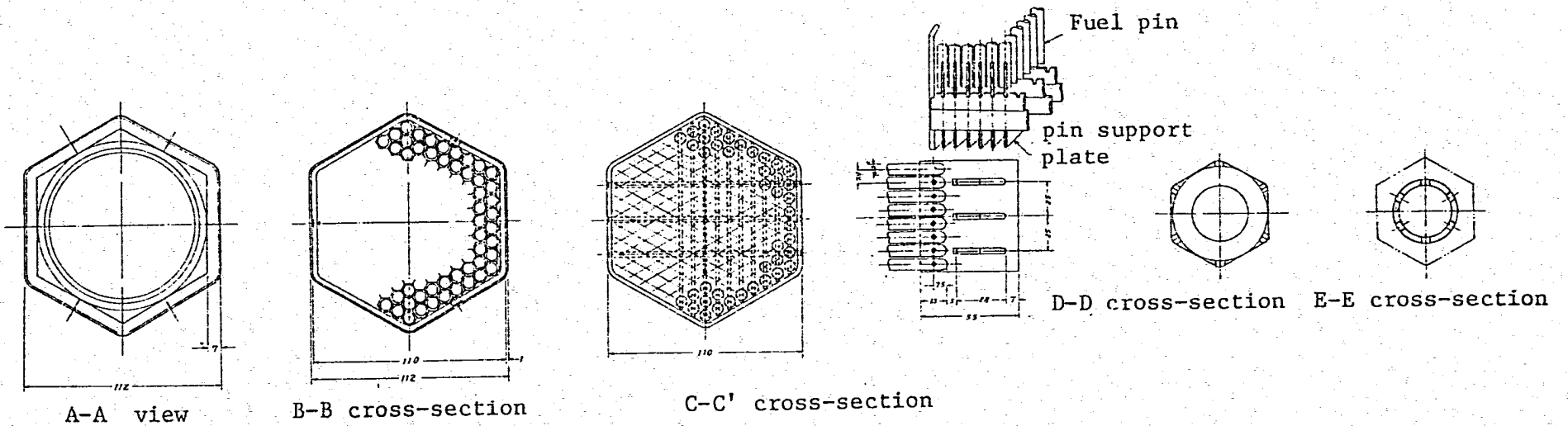
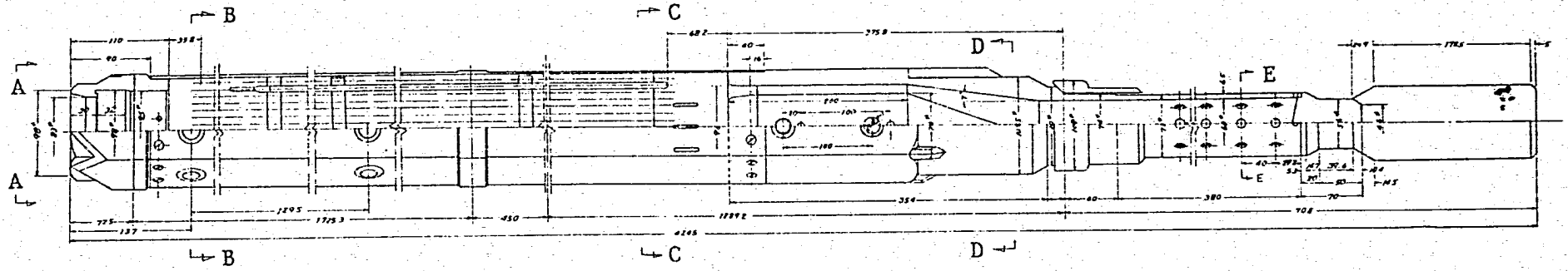
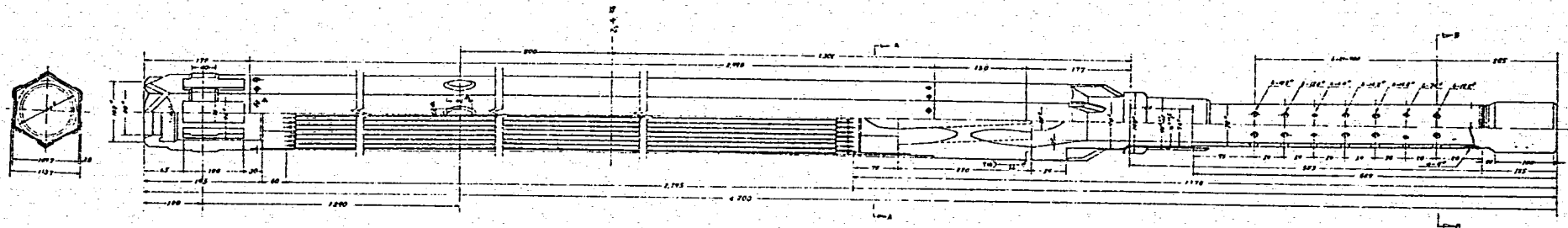
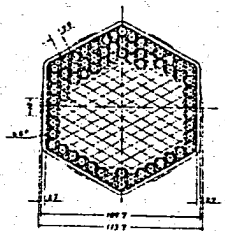


Fig. 5-3 (C) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M1CGT)

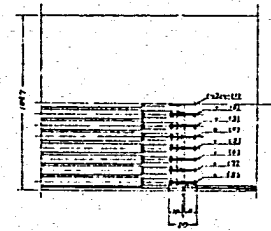
Core fuel subassembly



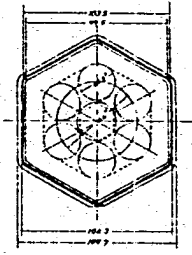
— 64 —



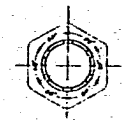
Cross-section of grid type fuel subassembly



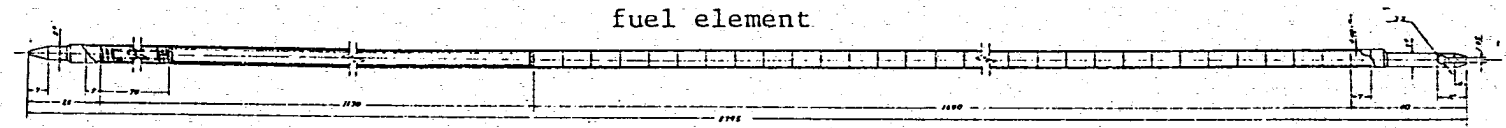
Details of knock bar



A-A cross-section



B-B cross-section



fuel element

Fig. 5-3 (d) "MONJU" Core Fuel Subassembly (MICGM)

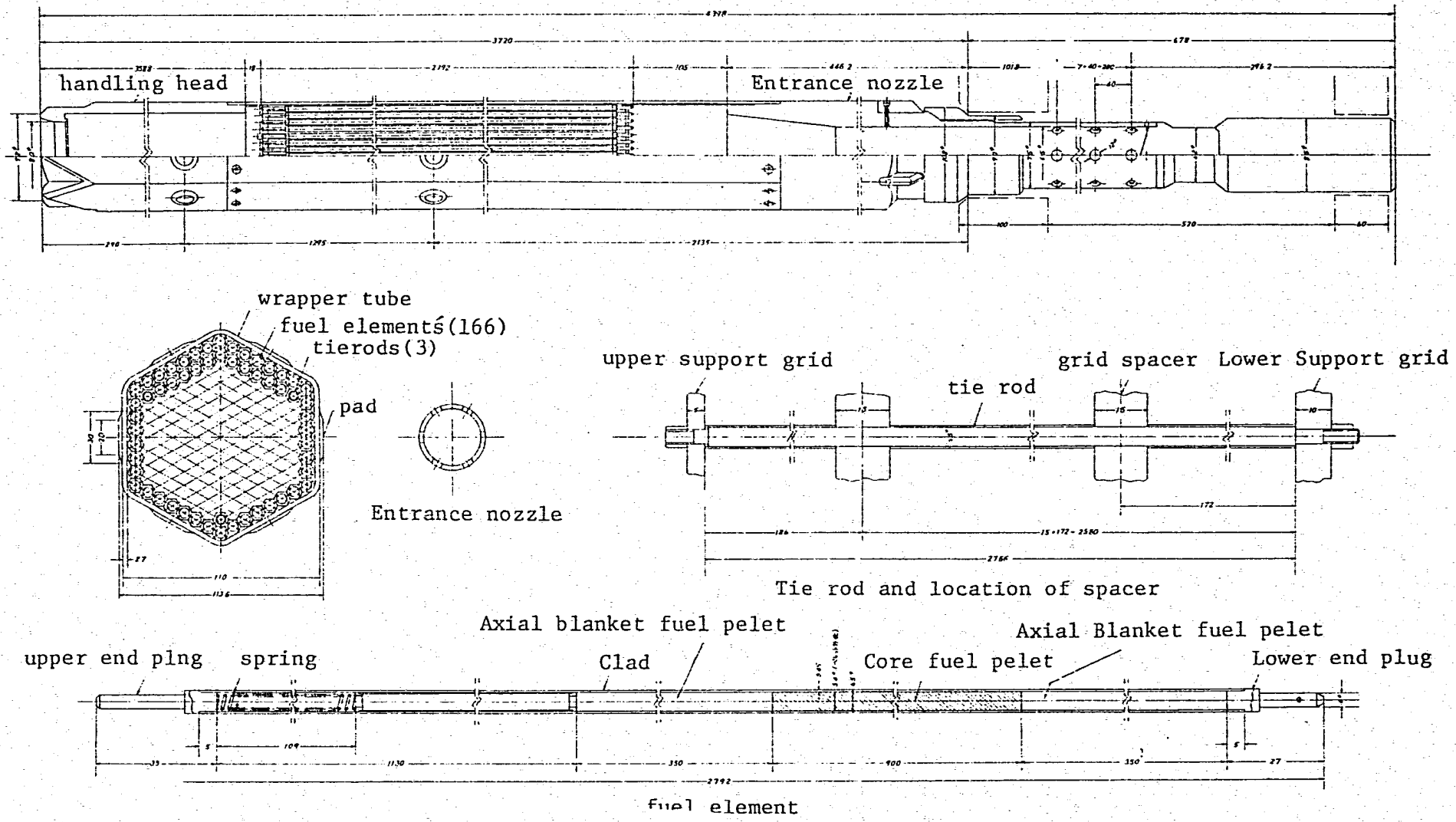
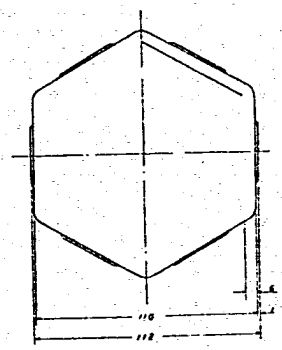
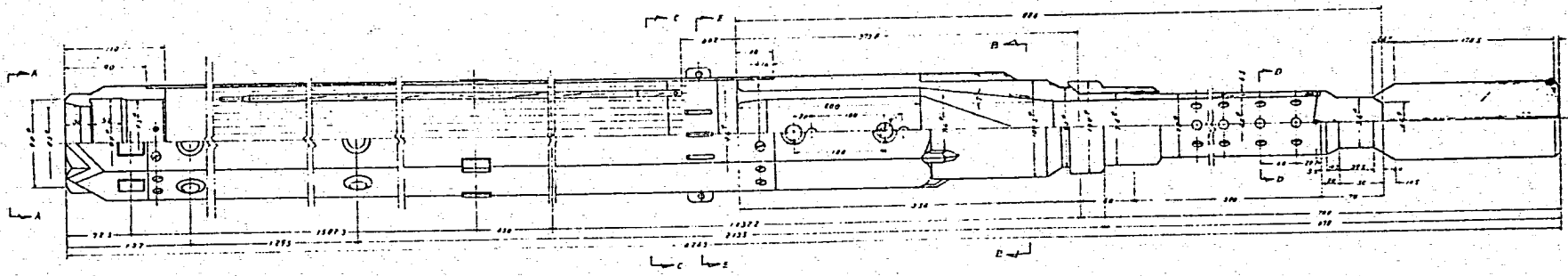
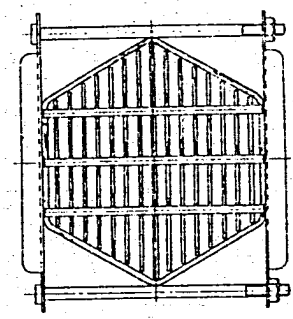


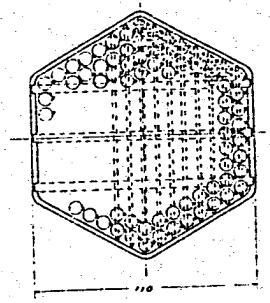
Fig. 5-3 (e) "MONJU" Core Fuel Subassembly (MLCGS)



A-A cross section

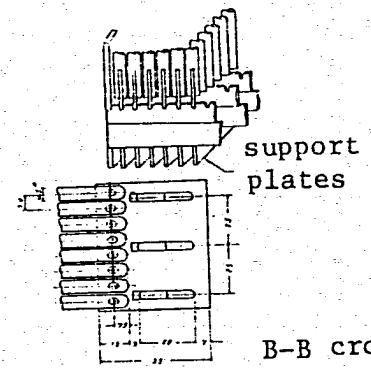


E-E cross section



C-C cross-section

details of pin support



B-B cross-section D-D cross-section

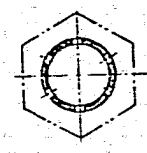
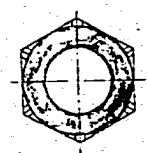
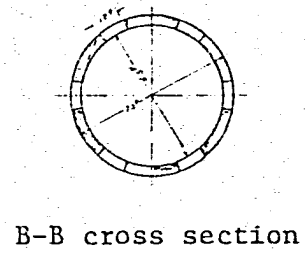
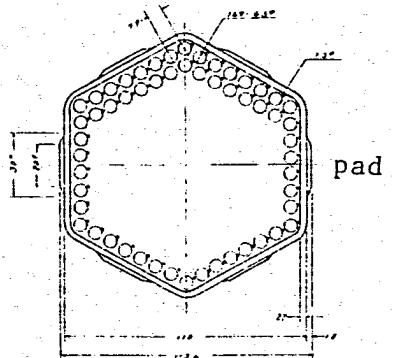
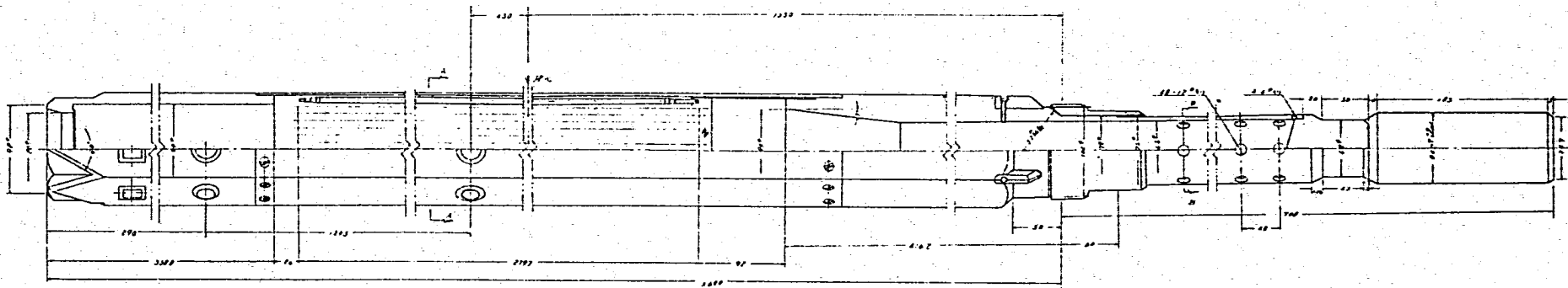


Fig. 5-3 (f) "MONJU" Core Fuel Subassembly (MICWT)



A-A cross-section

B-B cross section

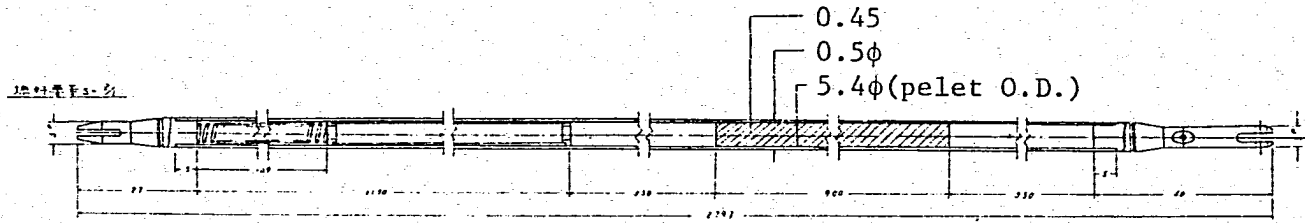


Fig. 5-3 (g) "MONJU" Core Fuel Subassembly (MFCWS)

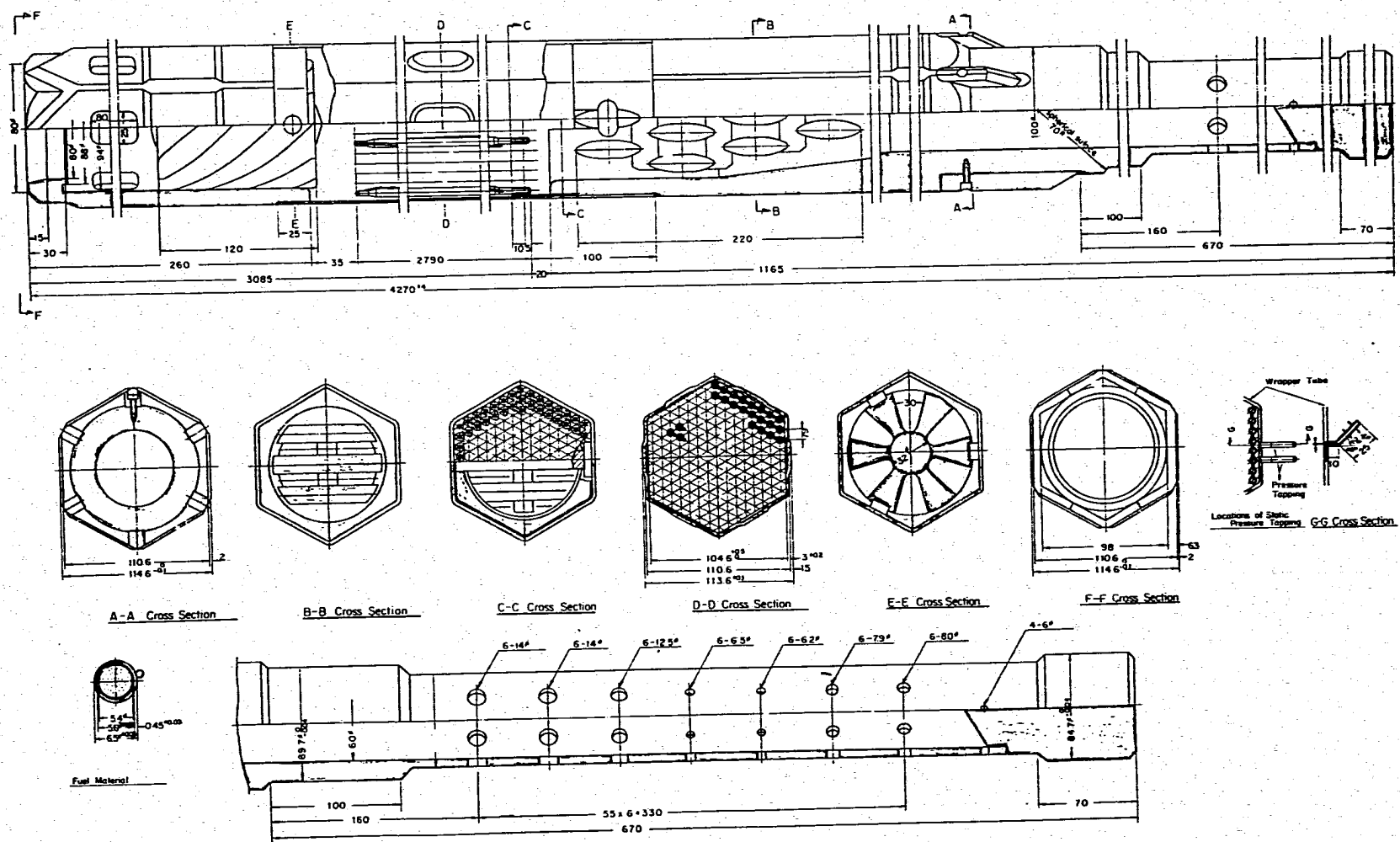
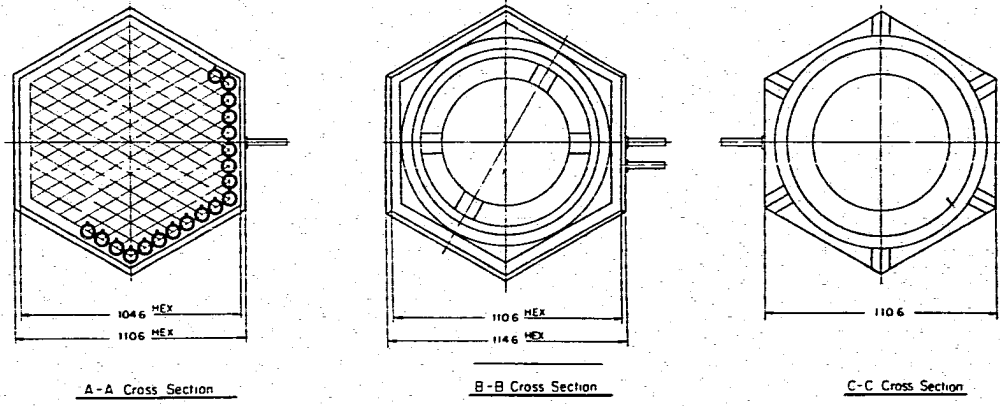
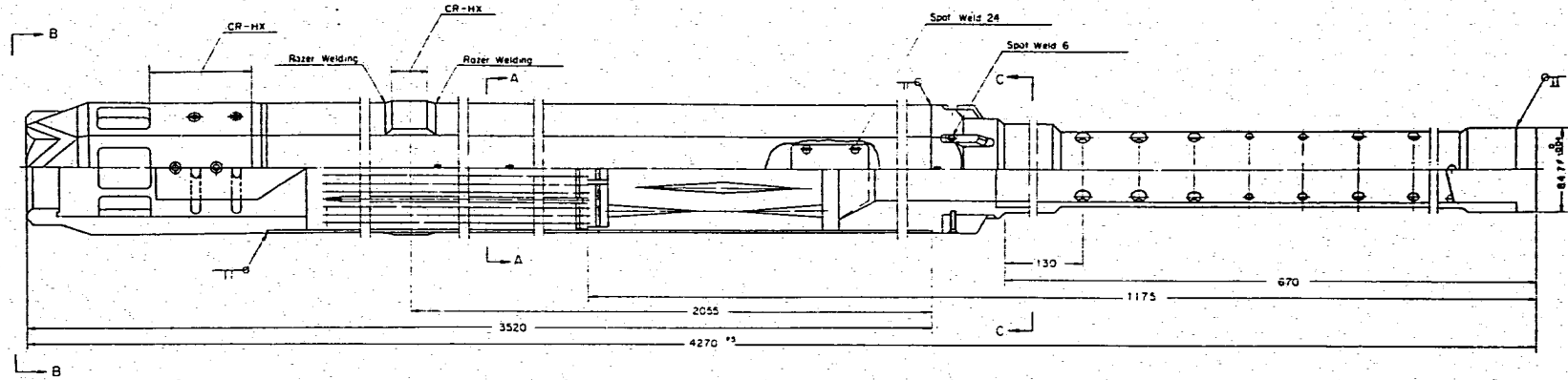


Fig. 5-4 (a) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M2CWG)



Wire Wrapping  
 Wrapping pitch 252  
 Wire Turns 11  
 Wire for Bundle other Pin 10 OD  
 Wire for Other Pin 13 OD

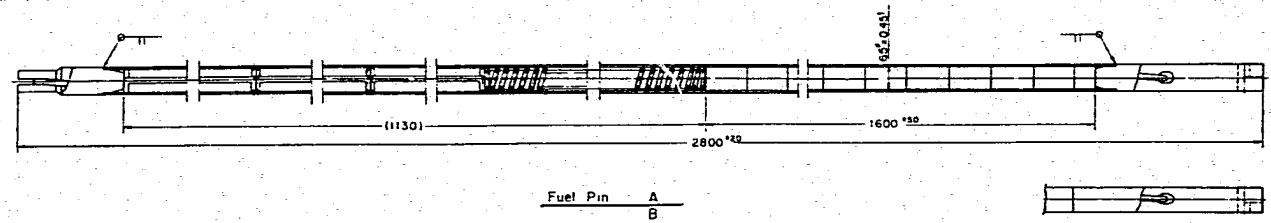


Fig. 5-4 (b) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M2CWH)



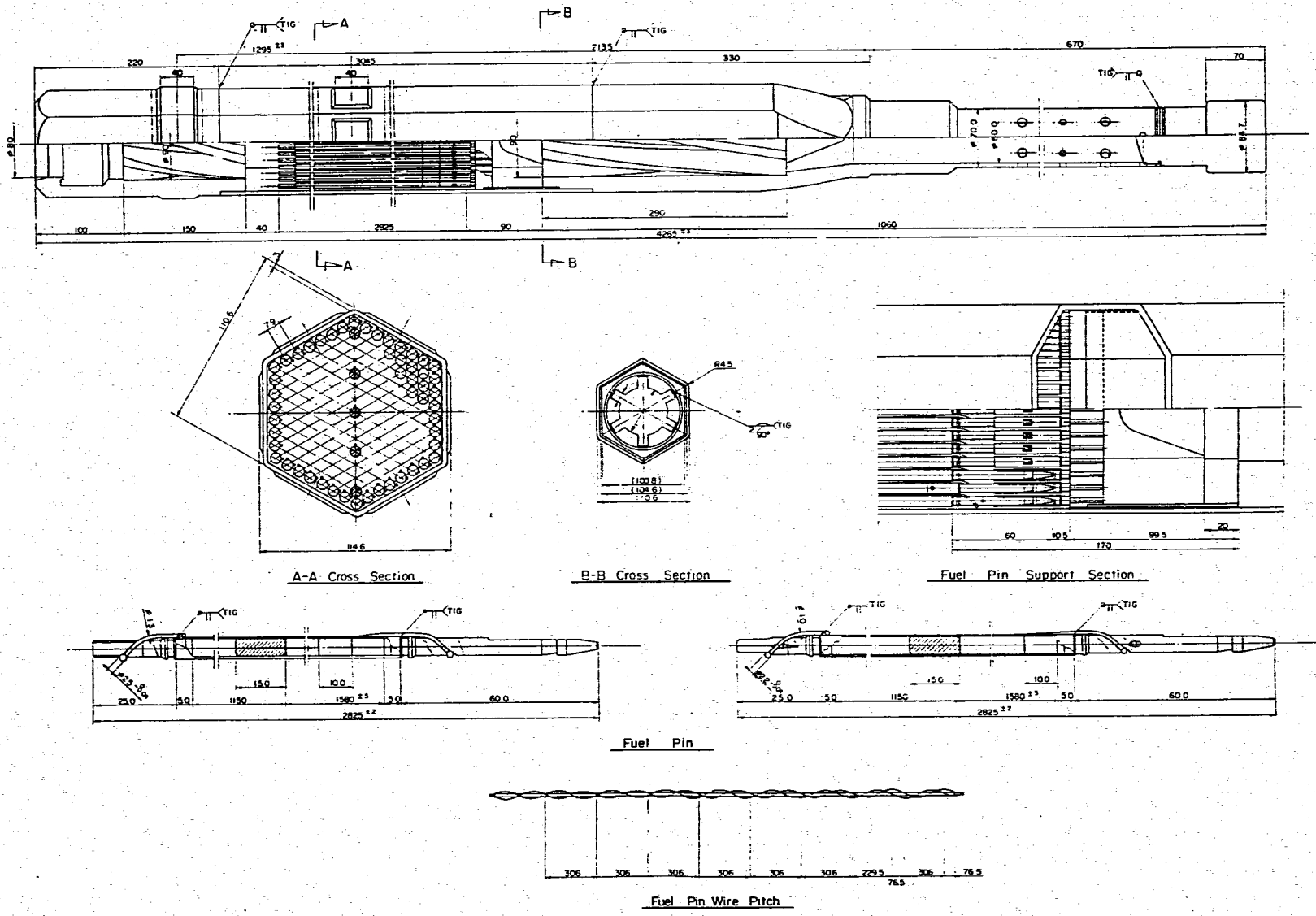


Fig. 5-5 (a) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M3CWM)

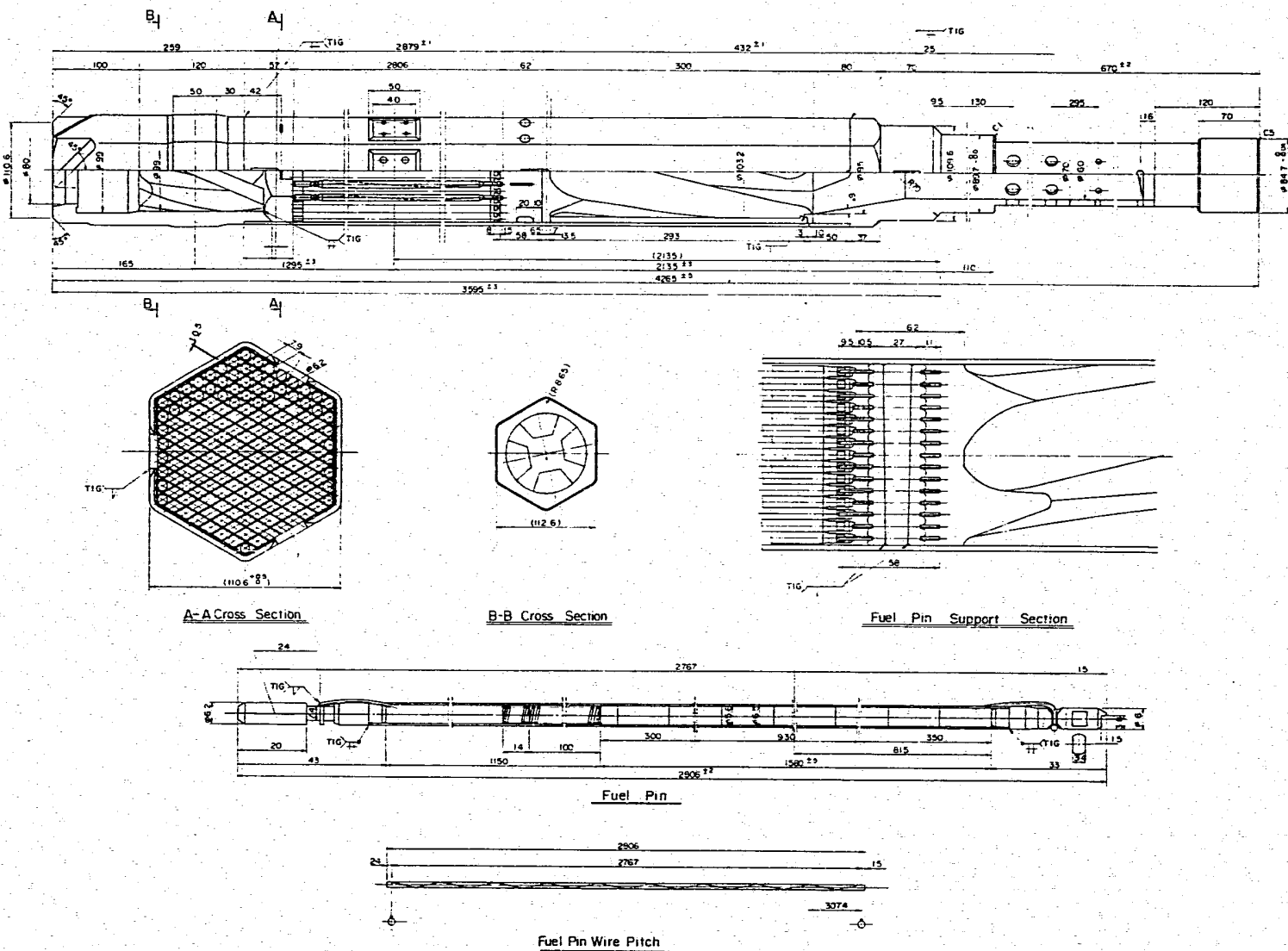
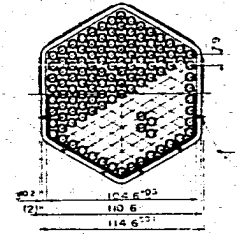
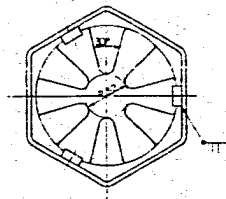
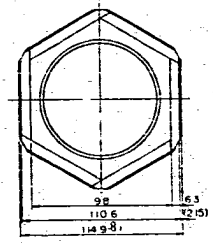
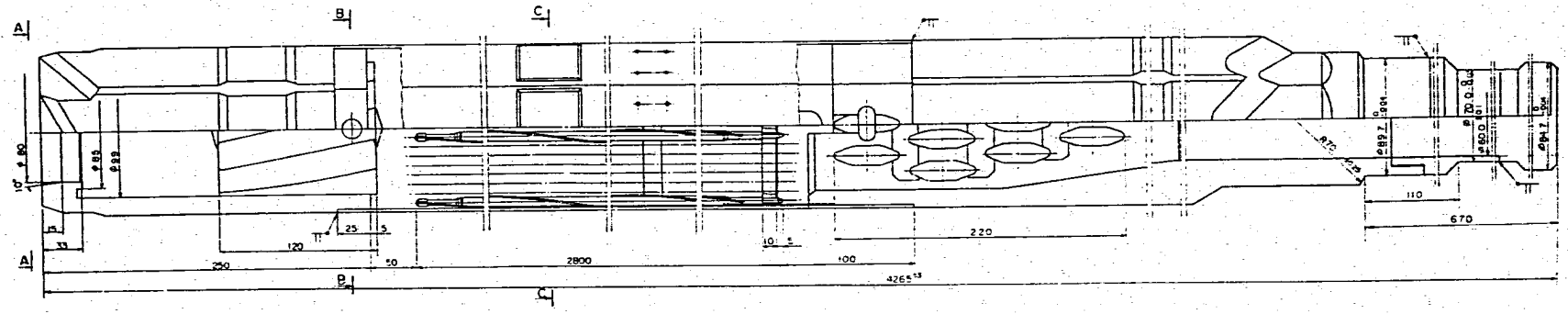


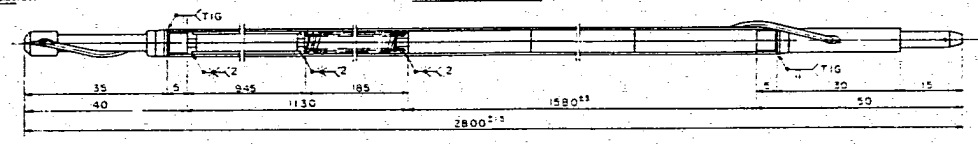
Fig. 5-5 (b) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M3CWT)



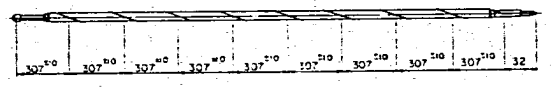
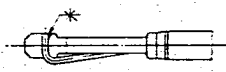
A-A Cross Section

B-B Cross Section

C-C Cross Section



Fuel Pin



Wire Pitch

Fig. 5-5 (c) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M3CWG)

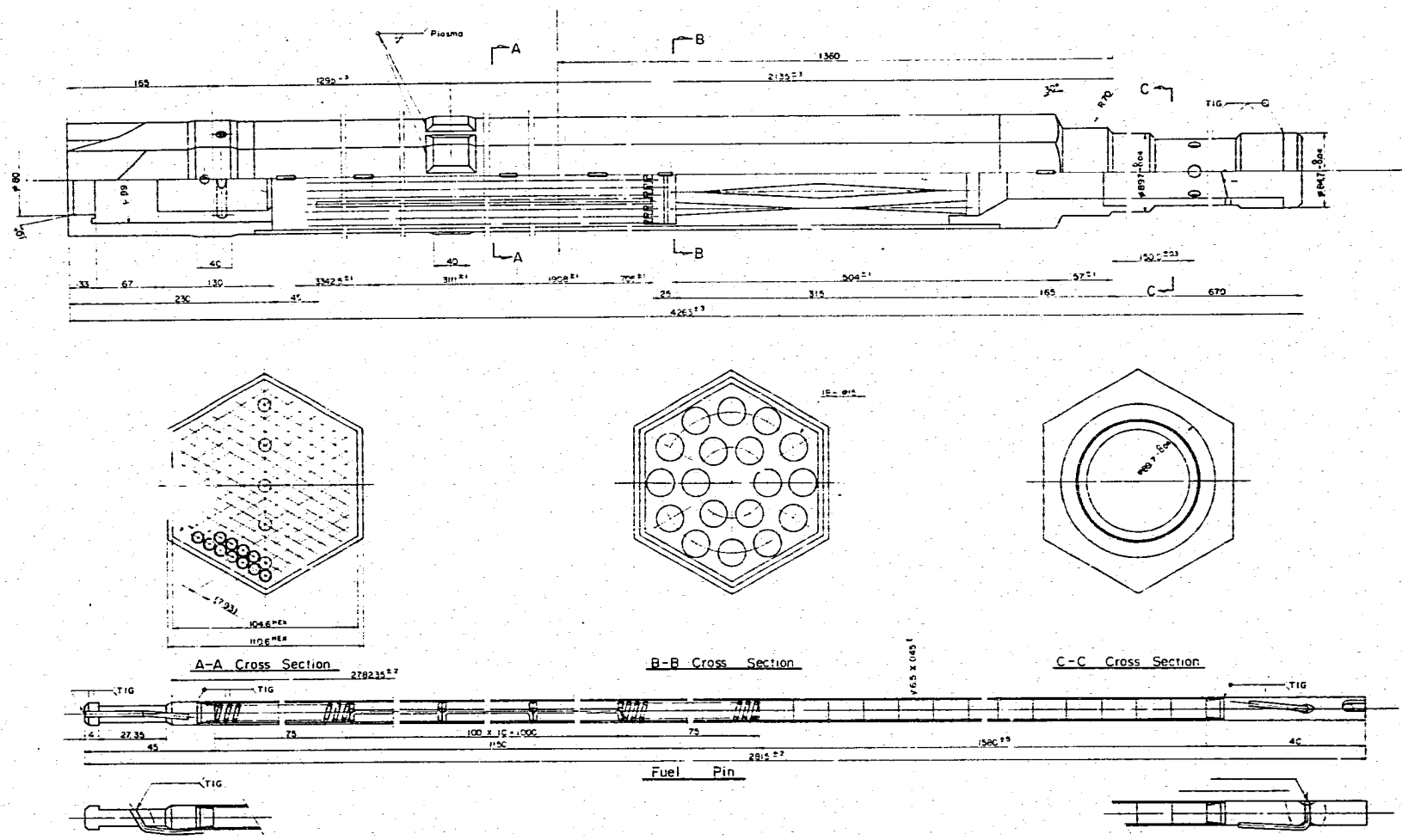
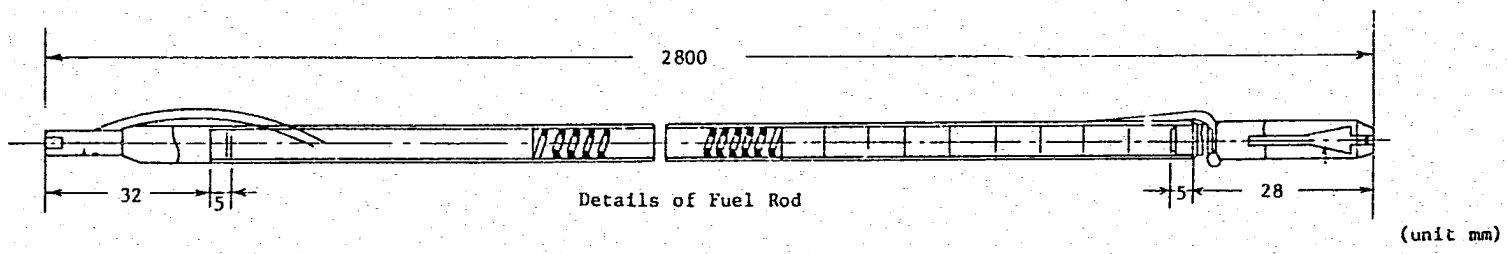
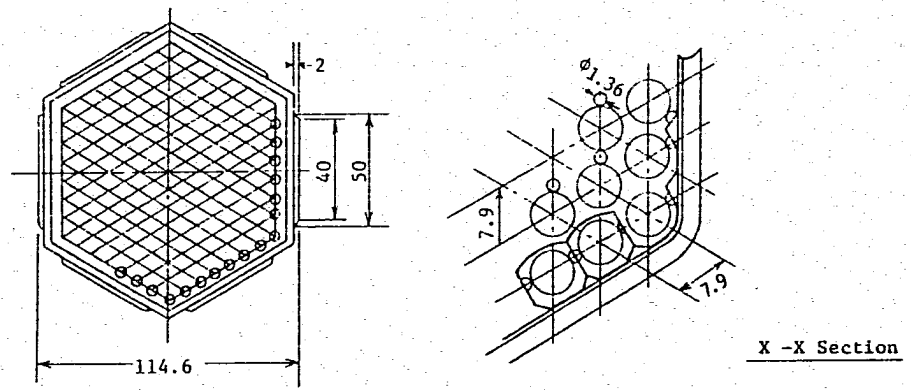
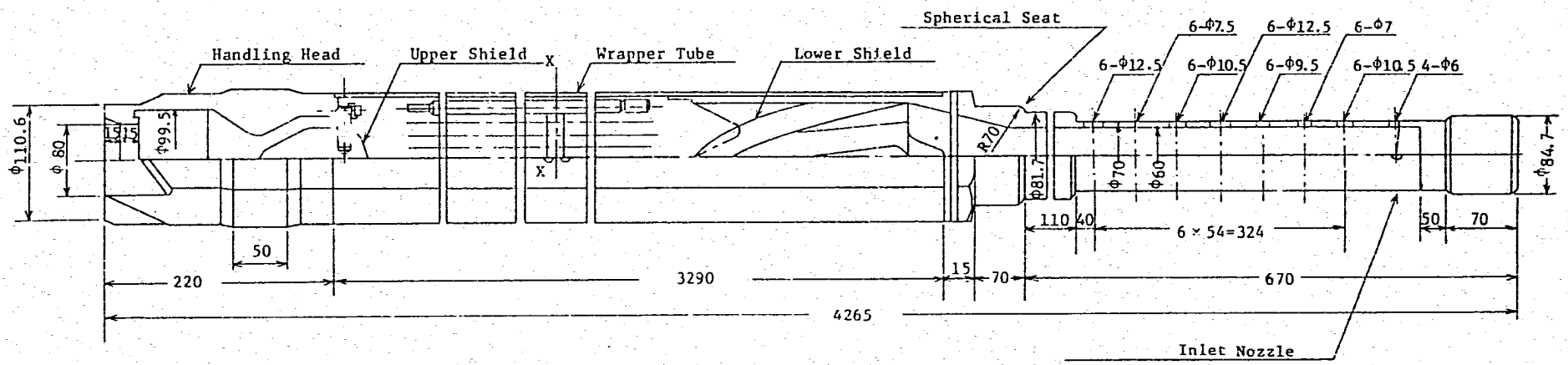


Fig. 5-5 (d) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M3CWH)



(unit mm)

Fig. 5-6 "MONJU" Core Fuel Subassembly (M4CWT)

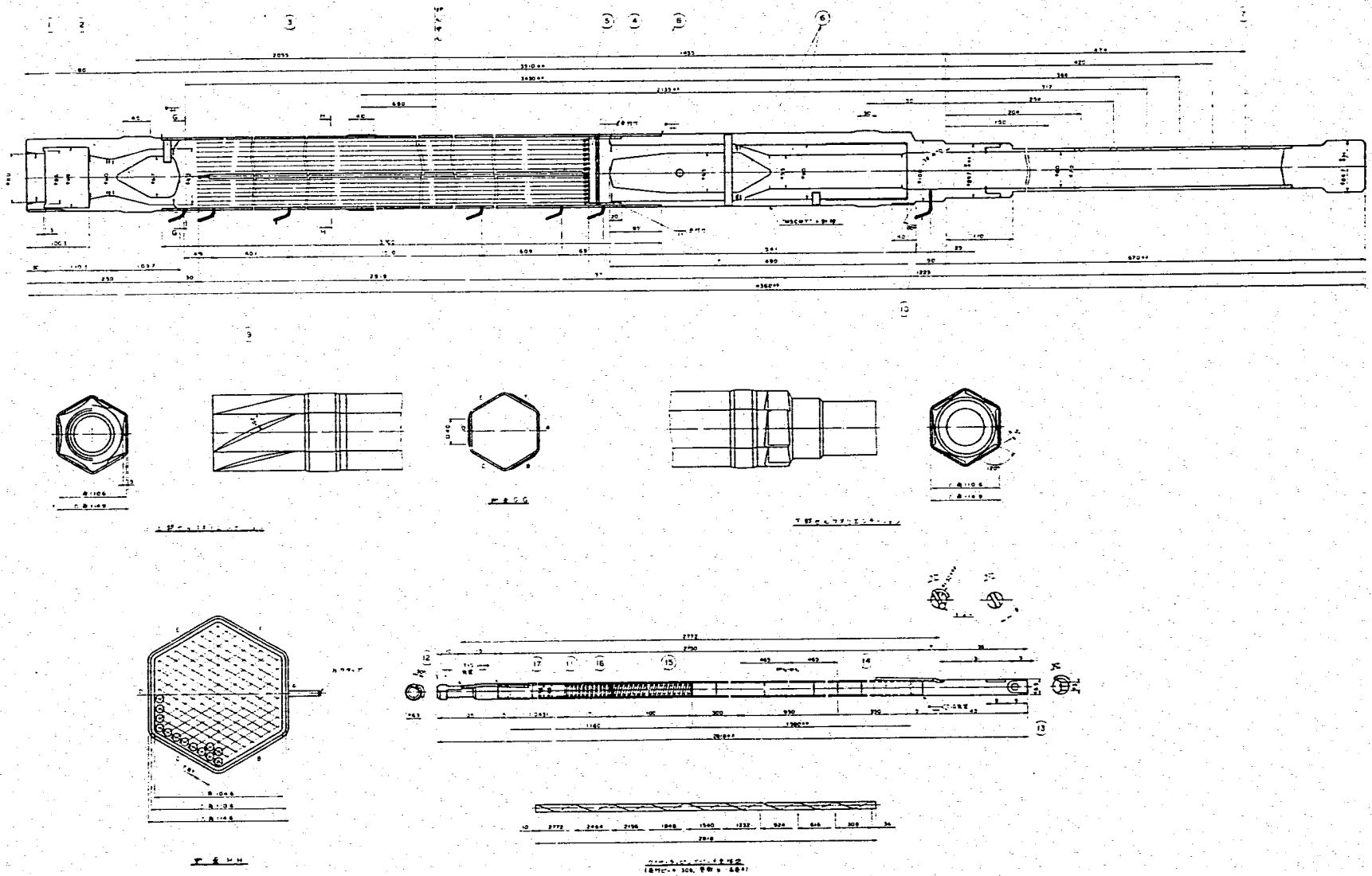


Fig. 5-7 (a) "MONJU" Core Fuel Subassembly (MSCWT)

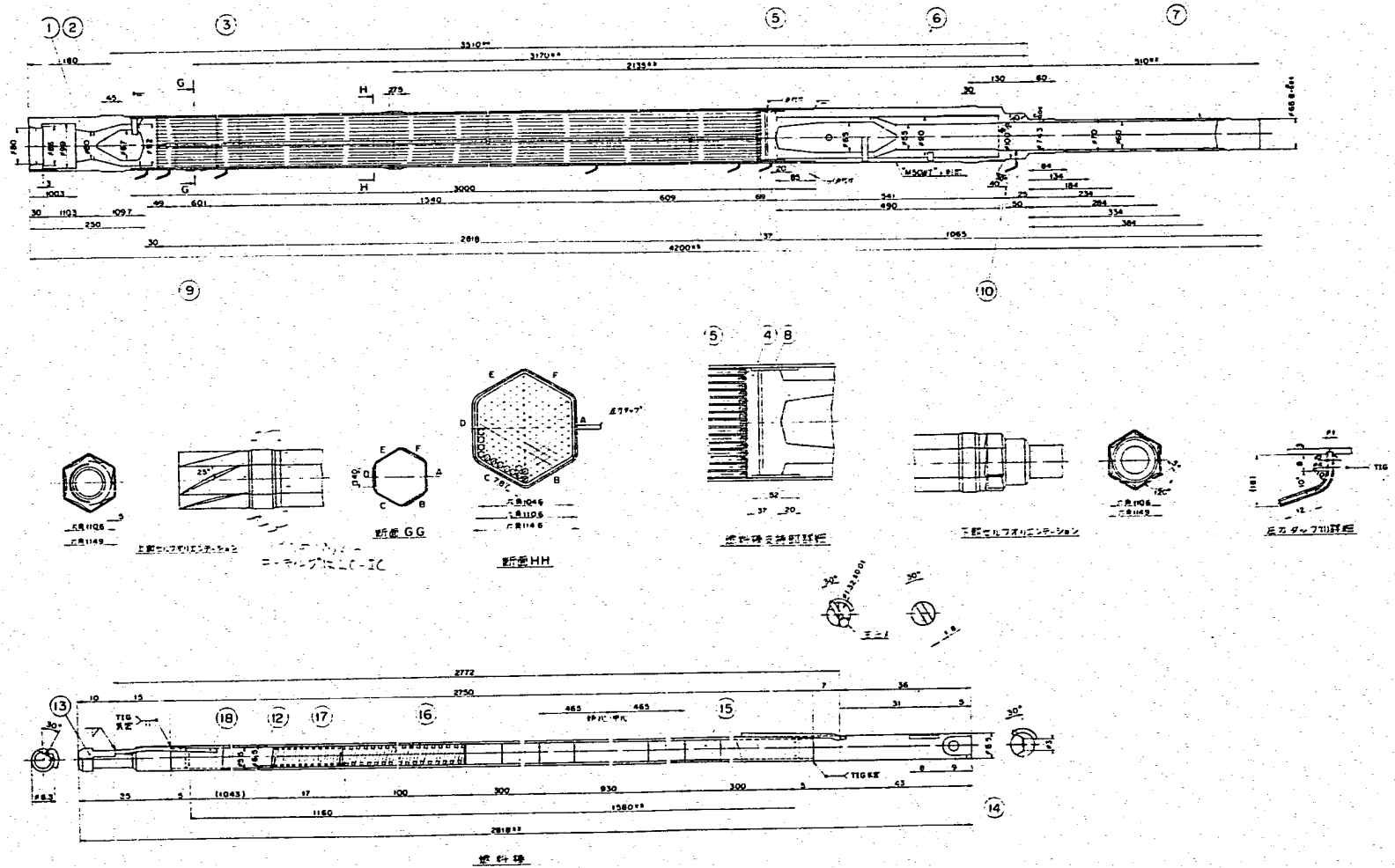


Fig. 5-7 (b) "MONJU" Core Fuel Subassembly (M5CWT-2)

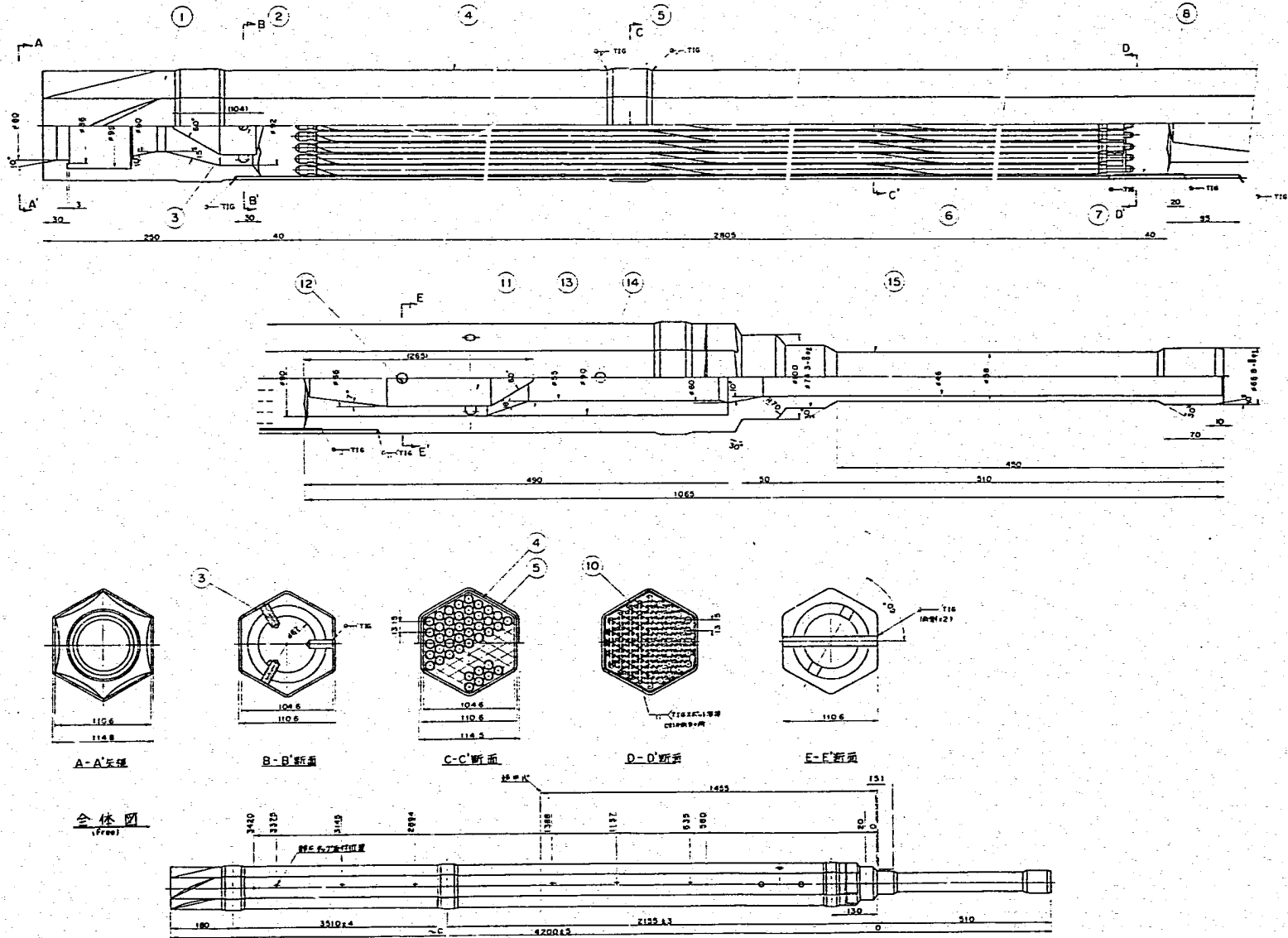


Fig. 5-8 "MONJU" Blanket Fuel Subassembly (M4BG)



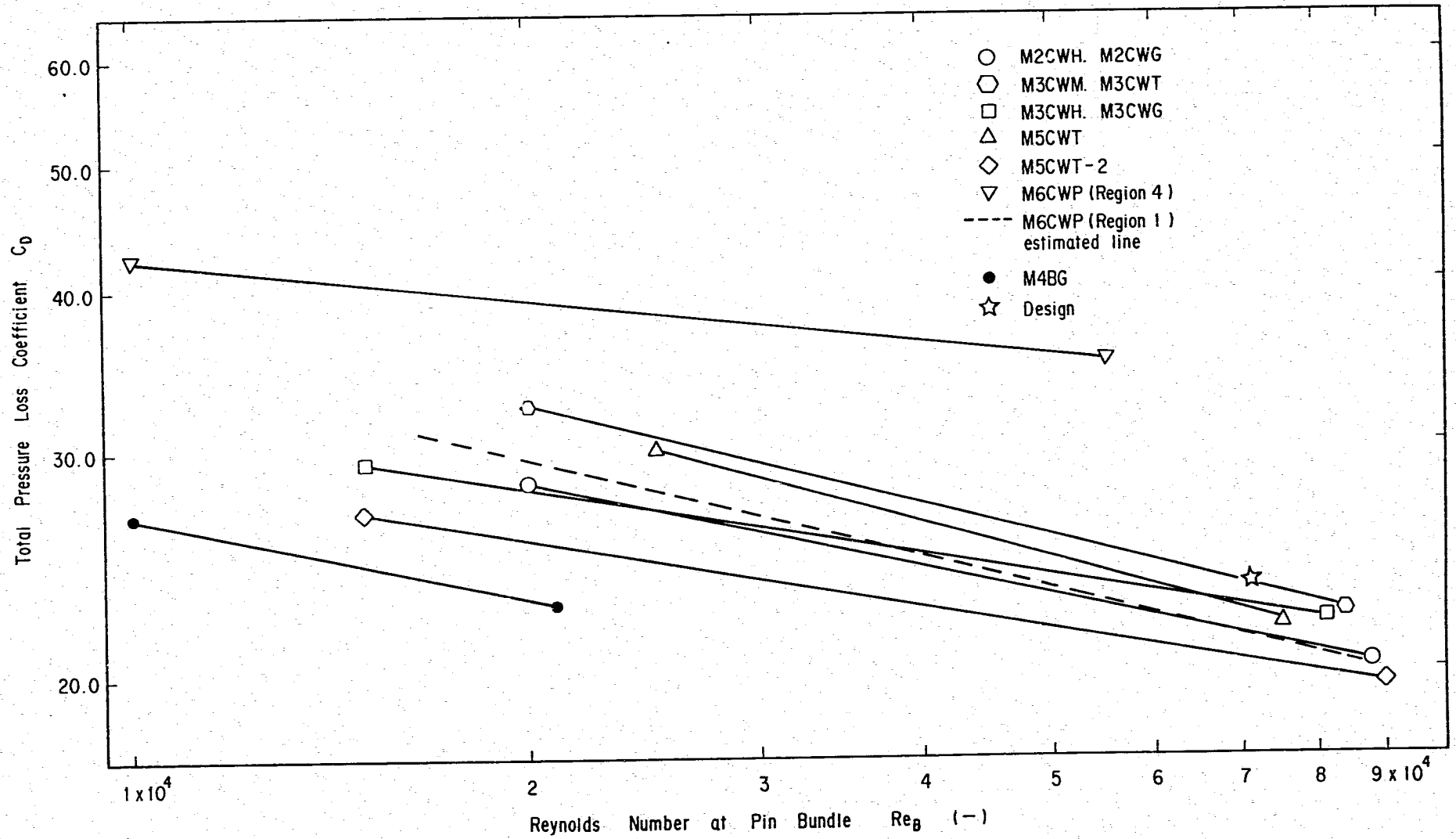


Fig. 5-9 Result of "MONJU" Dummy Fuel Subassembly Sodium Flow Test

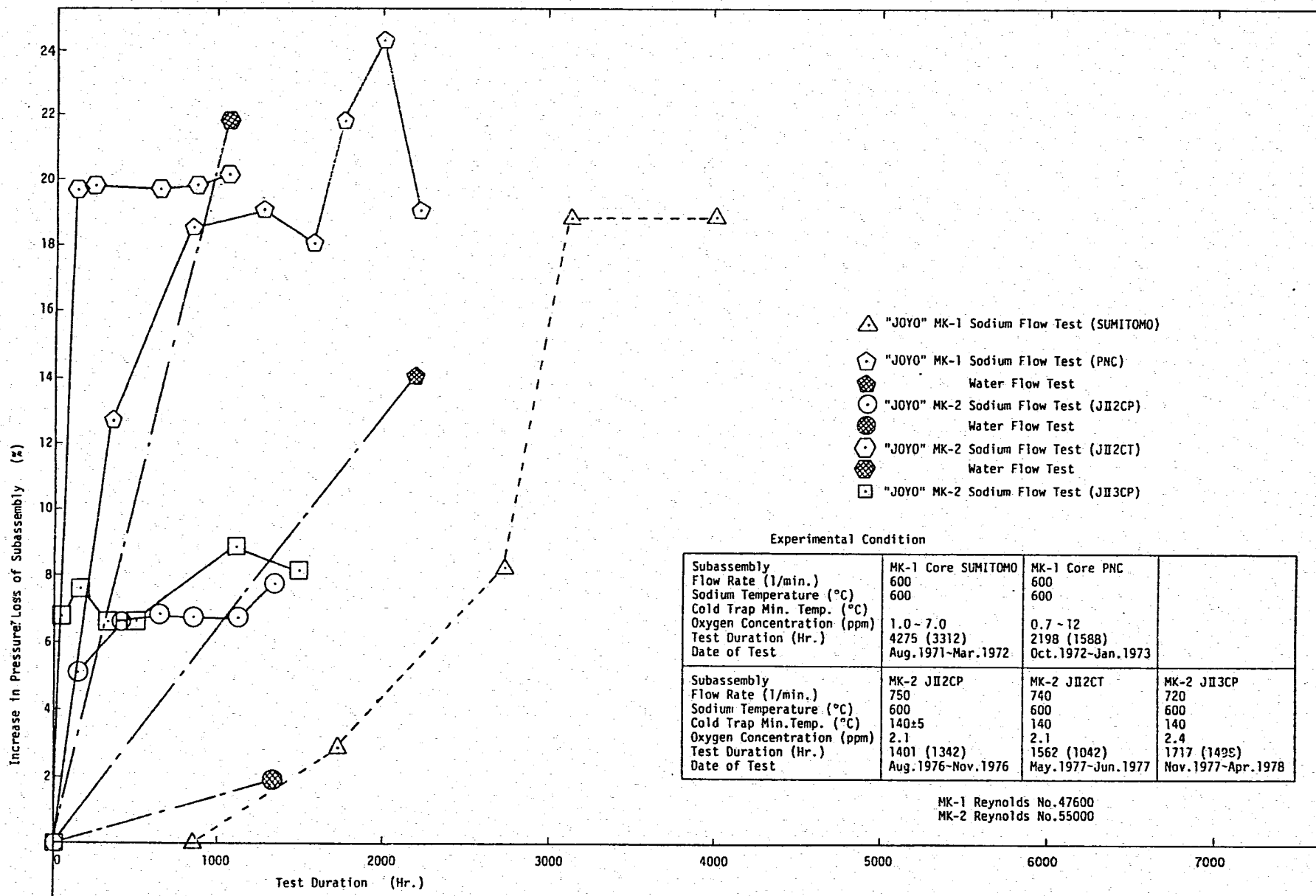


Fig. 5-10 Comparison of Increase in Total Pressure Loss of "JOYO" Fuel Subassembly

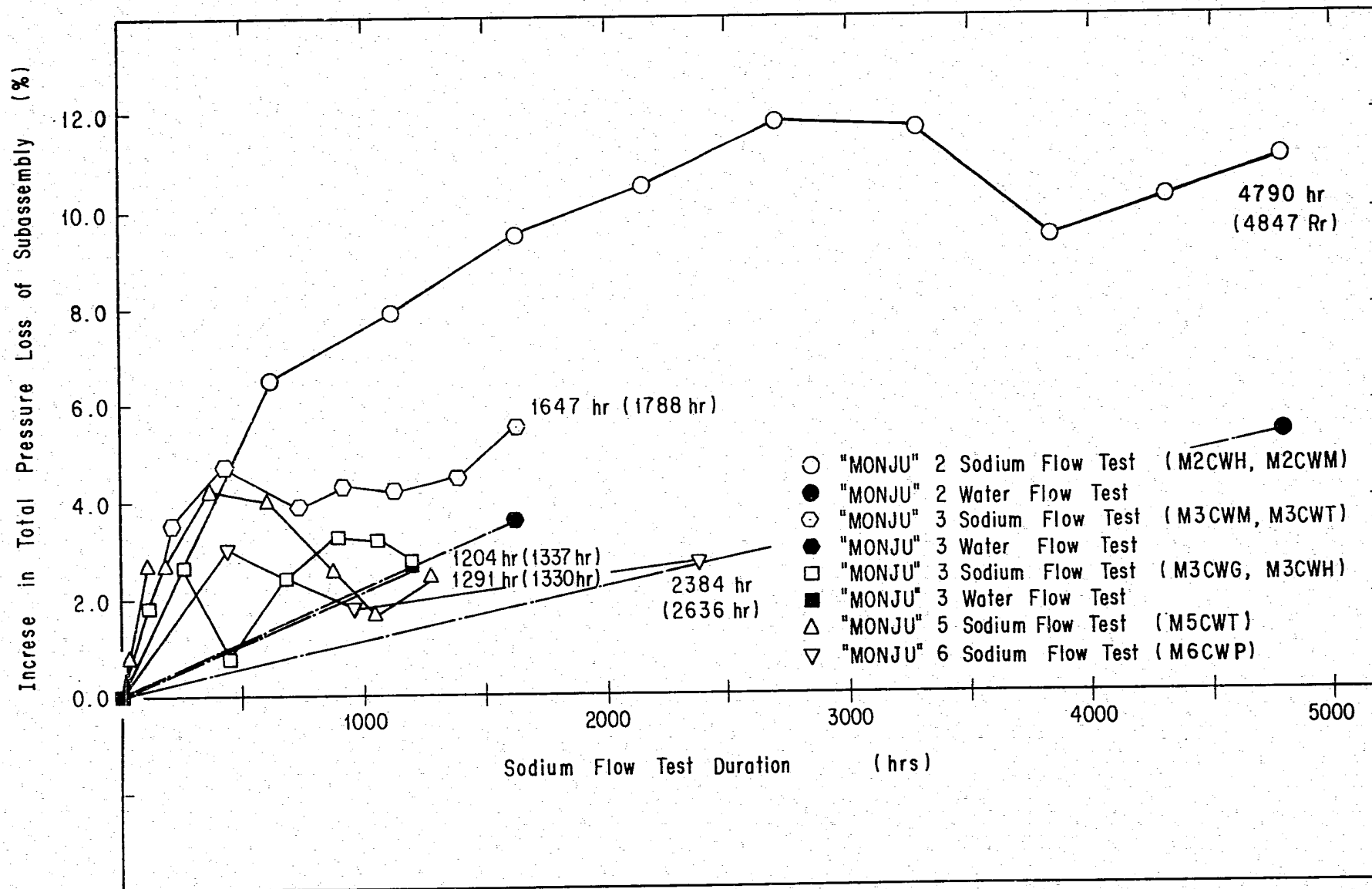


Fig. 5-11 Increase in Total Pressure Loss of "MONJU" Fuel Subassembly

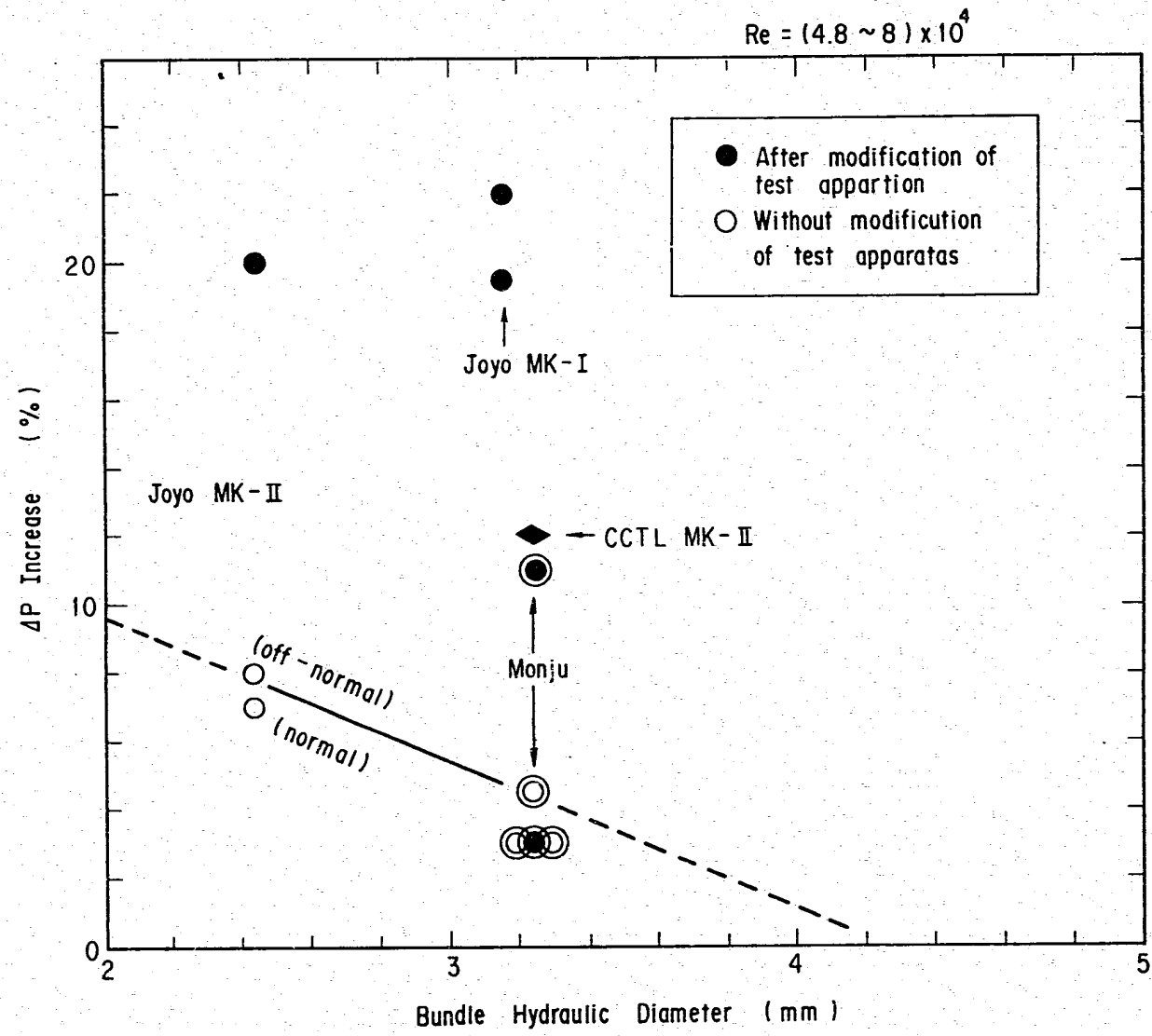


Fig. 5-12 The Maximum Pressure Loss Increase Determined V.S. Bundle Hydraulic Diameter

## APPENDIX 1

## M6CWP ナトリウム流動耐久試験 時間経過

年 月 日 時 分	項 目	定 格 時 間	Na 浸漬時間
		hr	hr
57. 12. 3 10:00	ナトリウムチャージ開始		
12:12	非常系起動		0000
14:59	主循環ポンプ起動 精製運転		
5 13:28	第1回 流動試験		
22:45	定格設定完了	0000	0059
7 1:40	主循環ポンプトリップ (出口圧高)	- 2.3	
23 14:34	主循環ポンプトリップ (液面異常H)	- 4.5	
24 9:13	第2回 流動試験	0436	0501
25 9:20	ナトリウムドレン		0525
58. 1. 24 9:00	ナトリウムチャージ		
10:53	非常系起動		0525
11:17	主循環ポンプ起動 精製運転		
26 13:15	第3回 流動試験		0576
18:08	定格設定完了	0436	0580
2. 17 9:10	第4回 流動試験	0955	1099
18	ナトリウムドレン		1124

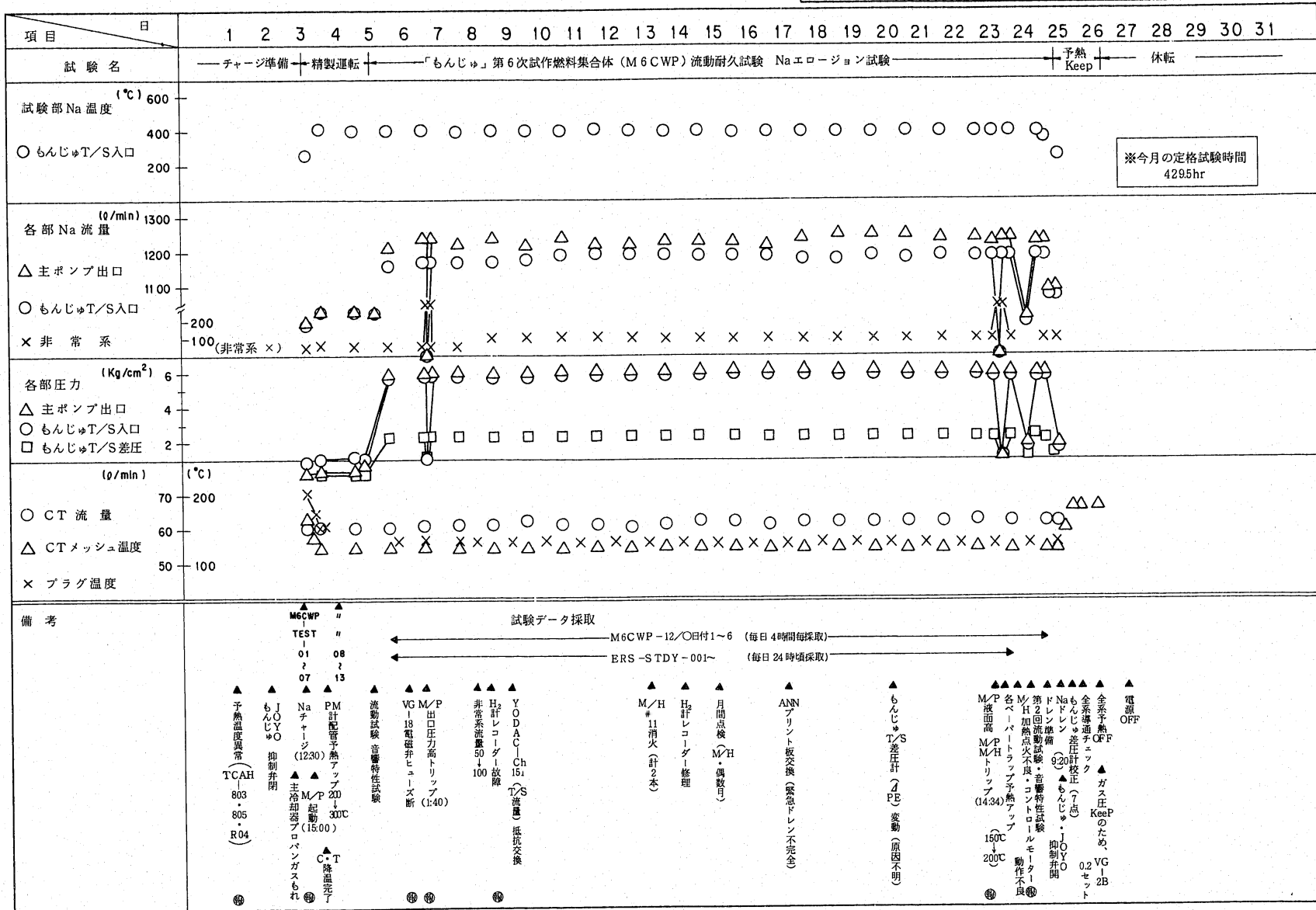
## APPENDIX 1

年 月 日 時 分	項 目	定 格 時 間 hr	Na 浸漬時間 hr
58. 2. 23 9:00	ナトリウムチャージ		
10:23	非常系起動		1124
10:43	主循環ポンプ起動		
	精製運転		
25 9:15	第5回 流動試験		1170
16:00	定格設定完了	0955	1177
4. 15 0:00	主循環ポンプトリップ (液面異常H)	- 4.0	
26 9:00	第6回 流動試験	2384	2610
27 10:00	ループナトリウムドレン		
11:00	「もんじゅ」試験部ナトリウムドレン		2636
4. 28 10:20	全系予熱OFF		
5. 7 15:00	M6CWP 集合体引抜		
16:26	“ アルコール洗浄		
8 17:00	“ 水洗浄		
9 10:00	“ 乾 燥		
10	“ 東海へ搬出		

APPENDIX 2

ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績 1982年12月

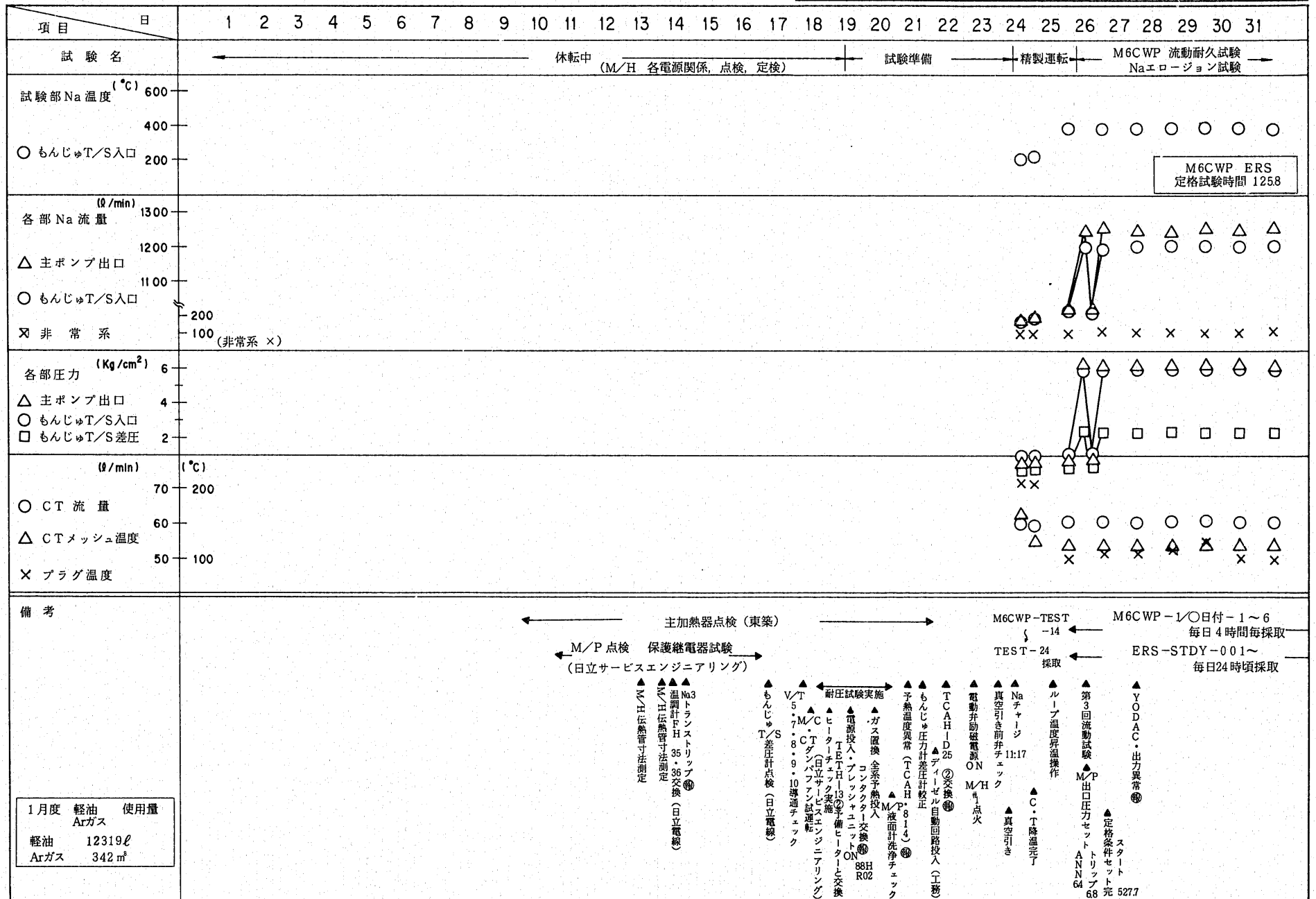
運転時間	前月までの積算	今月の運転時間	今月までの積算	
	507439	5381	512820	12/1 507439 12/31 512820



APPENDIX 2

ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績 1983年 1月

運転時間	前月までの積算	今月の運転時間	今月までの積算	
	512820	1808	514628	1/1 0:00 512820 1/31 24:00 514678



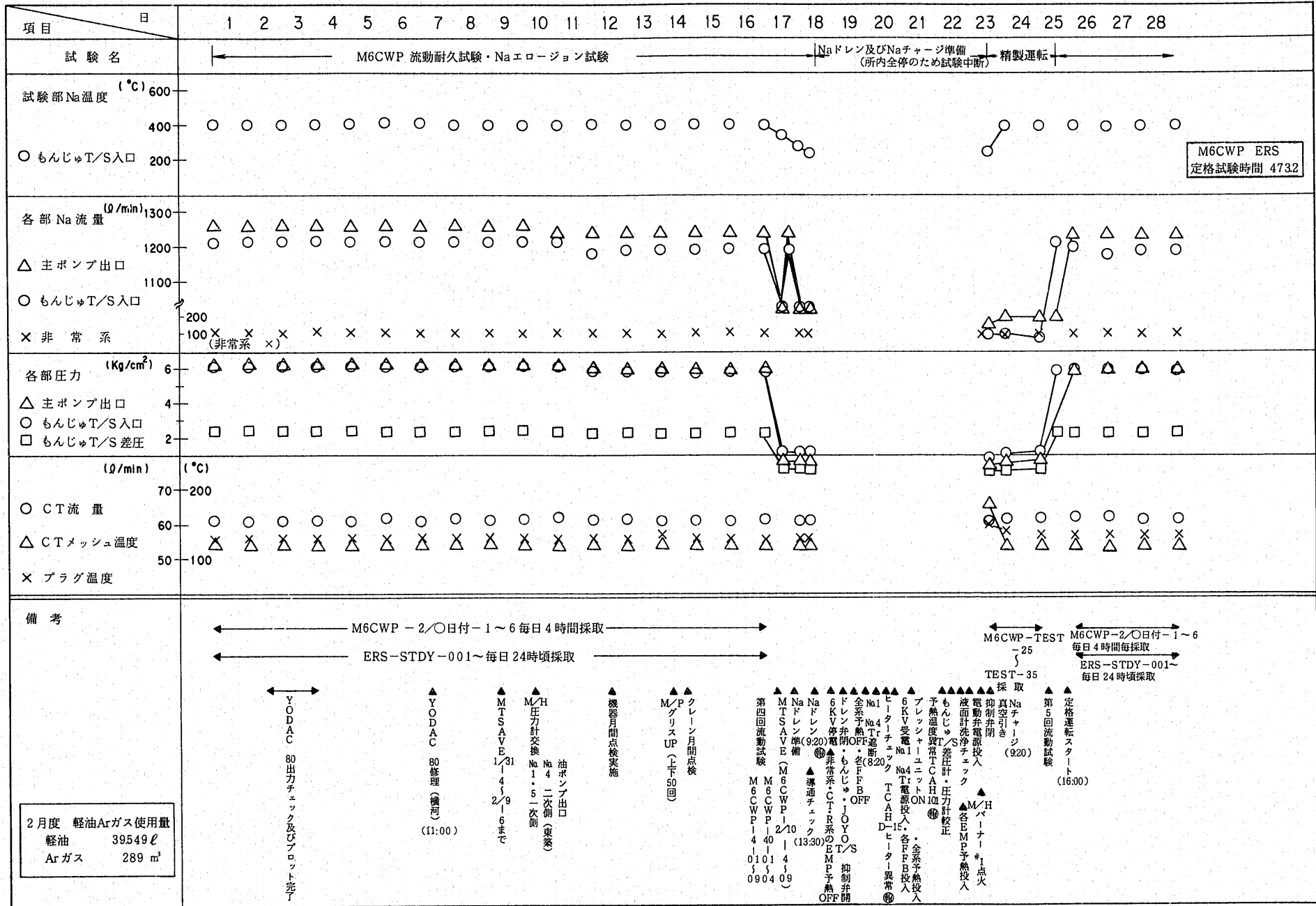
1月度 軽油 使用量	
Arガス	
軽油	12319ℓ
Arガス	342 m³



APPENDIX 2

ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績 1983年 2月

運転時間	前月までの積算	今月の運転時間	今月までの積算	
	514628	5506	520134	2/1 0:00 514628 2/28 0:00 520134



M6CWP ERS  
定格試験時間 4732

APPENDIX 2

ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績 1983年 3月

運転時間	前月までの積算	今月の運転時間	今月までの積算	
	520134	7440	527574	3/1 0:00 520134 3/31 0:00 527574

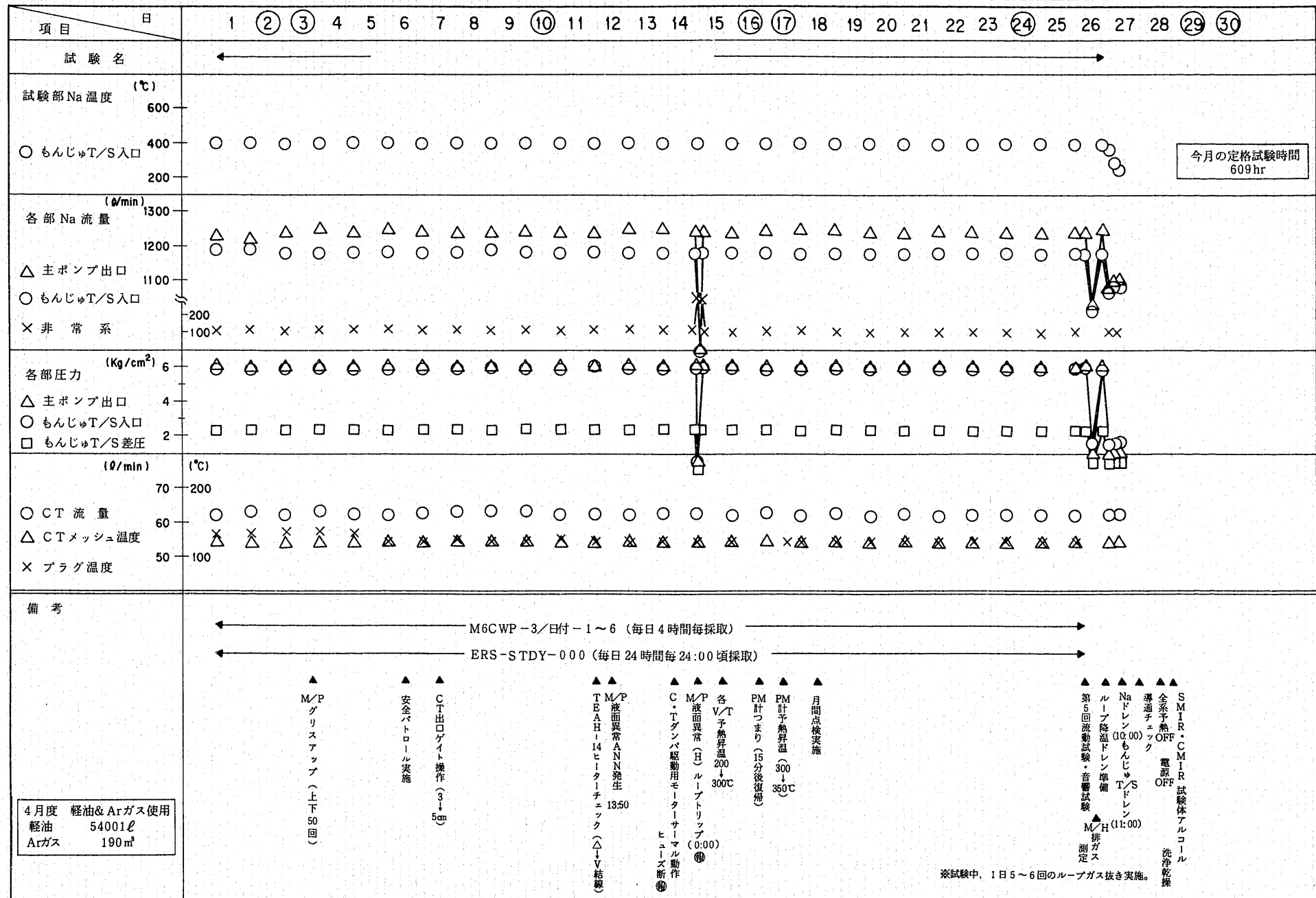
項目	日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
試験名		← M6CWP 流動耐久試験 Naエロージョン試験 →																																	
試験部Na温度 (l/min)																																			
○ もんじゅT/S入口	600 400 200	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
各部Na流量 (l/min)																																			
△ 主ポンプ出口	1300 1200 1100	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△		
○ もんじゅT/S入口	200	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
× 非常系	100X	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			
各部圧力 (Kg/cm <sup>2</sup> )																																			
△ 主ポンプ出口	6 4	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△			
○ もんじゅT/S入口	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
□ もんじゅT/S差圧		□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□			
CT流量 (l/min) (°C)																																			
○ CT流量	70 200	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
△ CTメッシュ温度	60	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△			
× プラグ温度	50 100	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			
備考		<p>← M6 M6CWP-4/日付-1~6 (毎日4時間毎採取) →</p> <p>← ERS-STDY-○○○ (毎日24時間24:00頃採取) →</p> <p>▲ クレーン月間点検</p> <p>▲ 安全パトロール (直回覧)</p> <p>▲ Na2 Tr トリップ</p> <p>▲ TCAH-811 現場ヒーターチェック (予備なし)</p> <p>▲ TCAH-14811 OFF</p> <p>▲ バッテリー (電気室) 定検</p> <p>▲ H/P グリスアップ (上下40回)</p> <p>▲ 月間点検</p> <p>▲ M/H 油ポンプ出口圧力計不良</p>																																	
3月度 軽油 使用量		<table border="1"> <tr> <td>軽油</td> <td>54001ℓ</td> </tr> <tr> <td>Arガス</td> <td>268 m<sup>3</sup></td> </tr> </table>																														軽油	54001ℓ	Arガス	268 m <sup>3</sup>
軽油	54001ℓ																																		
Arガス	268 m <sup>3</sup>																																		
		※試験中ループガス抜きを1日5~6回実施した。																																	

APPENDIX 2

ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績

1983年 4月

運転時間	前月までの積算	今月の運転時間	今月までの積算	
	527574	6326	533900	4/1 0:00 527574 4/30 24:00 533900



APPENDIX 2

ナトリウム流動伝熱試験装置運転実績 1983年 5月

運転時間	前月までの積算	今月の運転時間	今月までの積算	
	533900	非常系EMPで運転 1048	534948	533900

項目	日	①	2	③	4	⑤	6	⑦	⑧	9	10	11	12	13	14	⑮	16	17	18	19	20	⑳	21	22	23	24	25	26	27	28	㉑	30	31			
試験名		← ループ休転中 →														チャージ準備	CMIRモックアップ 流動				← ループ休転中 →	チャージ準備	SMIR 流動試験													
試験部Na温度 (°C)		← もんじゅT/S工事試験体 入れ替え →																																		
各部Na流量 (g/min)																																				
試験部差圧 (Kg/cm <sup>2</sup> )																																				
CT流量 (g/min)																																				
CTメッシュ温度 (°C)																																				
備考																<ul style="list-style-type: none"> <li>▲安全パトロール</li> <li>▲M6CWP 試験体引き抜き</li> <li>▲試験体アルコール洗浄</li> <li>▲水洗浄</li> <li>▲洗浄完了乾燥</li> <li>▲箱詰め搬出(東海)</li> <li>▲CMIR試験体セット (1kg/cm<sup>2</sup>)</li> <li>▲もんじゅT/S He加圧 (1kg/cm<sup>2</sup>)</li> <li>▲プレッシャーユニットON</li> <li>▲JOYOフランジ増締め</li> <li>▲ヒーターチェック</li> <li>▲TCAH-207端子部異常</li> <li>▲ガス置換 (He/Ar)</li> <li>▲電源投入 RHX関係予熱投入</li> <li>▲VG-1増補</li> <li>▲全系予熱投入</li> <li>▲Naチャージ (15:30)</li> <li>▲CMIR 1-4</li> <li>▲CMIR 1-5</li> <li>▲Naドレン (ループ 16:50)</li> <li>▲JOYO T/S Naドレン (18:20)</li> <li>▲全系予熱OFF</li> <li>▲ループ昇温 CT降温</li> <li>▲ループ降温</li> <li>▲流動試験</li> <li>▲M/バーナー用ファンコンタクター交換</li> <li>▲FR-10切替</li> <li>▲JOYO差圧計校正 M/H加熱モジュール (RHX) ジャンプ</li> <li>▲ループ昇温 CT降温</li> <li>▲M/バーナー用ファンコンタクター交換</li> <li>▲Naドレン (ループ 16:50)</li> <li>▲JOYO T/S Naドレン (18:20)</li> <li>▲全系予熱OFF</li> <li>▲ループ昇温 CT降温</li> <li>▲ループ降温</li> <li>▲流動試験</li> <li>▲M/バーナー用ファンコンタクター交換</li> <li>▲FR-10切替</li> <li>▲JOYO差圧計校正 M/H加熱モジュール (RHX) ジャンプ</li> <li>▲ヒーターチェック</li> <li>▲CMIR試験体引き抜き</li> <li>▲SMIR試験体引き抜き</li> <li>▲液面計洗浄</li> <li>▲動作チェック</li> <li>▲差圧計校正 (中止) JOYO差圧計ラインつまり</li> <li>▲ガス置換 全系予熱投入</li> <li>▲試験体セット</li> <li>▲M/P</li> <li>▲TCAH D01断線</li> <li>▲圧力計校正</li> <li>▲復補操作</li> <li>▲TCAH D01交換</li> <li>▲Naチャージ (16:26)</li> <li>▲SMIR 1-1採取</li> <li>▲VE・2Mパイプ定格セット</li> <li>▲ループ昇温 CT降温</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲SMIR 1-1採取</li> <li>▲VE・2Mパイプ定格セット</li> <li>▲ループ昇温 CT降温</li> </ul>																			
5月度 軽油 Arガス使用量		<table border="1"> <tr> <td>軽油</td> <td>8283ℓ</td> </tr> <tr> <td>Arガス</td> <td>490m<sup>3</sup></td> </tr> </table>																															軽油	8283ℓ	Arガス	490m <sup>3</sup>
軽油	8283ℓ																																			
Arガス	490m <sup>3</sup>																																			

APPENDIX 3<sup>6)</sup>

## ワイヤ型燃料束摩擦損失係数に関する半経験式

## Several Semi-Empirical Equations for Wire-Wrap System Fuel Rod Bundle.

Rehme	Novendstern	Sangster
$\Delta P = f_R \cdot F \cdot \frac{S_B}{S_T} \cdot \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\rho V_B^2}{2g}$	$\Delta P = f_N \cdot M \cdot \frac{L}{D_{e1}} \cdot \frac{\rho V_{N1}^2}{2g}$	$\Delta P = f_S \cdot Y \cdot Z \cdot \frac{L}{D_{e1}} \cdot \frac{\rho V_1^2}{2g}$
$f_R = \frac{64}{Re_R} + \frac{0.0816}{Re_R^{0.133}}$	$f_N = \frac{0.3164}{Re_N^{0.25}} \dots\dots\dots (1)$	$f_S = \frac{0.316}{Re_S^{0.25}} \dots\dots\dots (3)$
$Re_R = \frac{V_B \cdot D_e}{\nu} \cdot \sqrt{F}$	<p>or</p> $f_N = \left\{ 2 \log_{10} \left[ - \frac{5.028}{Re_N} \log_{10} \left( \frac{16.76}{Re_N} \right) \right] \right\}^{-2} \dots (2)$	<p>or</p> $f_S = \frac{0.192}{Re_S^{0.2}} \dots\dots\dots (4)$
$F = \frac{P^{0.5}}{d} + \left\{ 7.6 \left( \frac{dm}{H} \right) \left( \frac{P}{d} \right)^2 \right\}^{2.16}$	$Re_N = \frac{V_{N1} \cdot D_{e1}}{\nu} = \frac{V \cdot D_{e1}}{\nu} \cdot X_N$	$Re_S = \frac{V_1 \cdot D_{e1}}{\nu}$
	$M = \left\{ \frac{1.034}{(P/d)^{0.124}} + \frac{29.7(P/d)^{6.94} \cdot Re_N^{0.086}}{(H/d)^{2.239}} \right\}^{0.885}$	$\begin{cases} 0.974 \left( \frac{P}{d} \right)^{0.80} & , 1.135 < P/d < 1.195 \\ 1.048 \left( \frac{P}{d} \right)^{0.37} & , 1.195 < P/d < 1.225 \\ 1.138 & , 1.225 < P/d \end{cases}$
	$V_{N1} = X_N \cdot V_B$	$Z = 4.76 \cdot \left( \frac{H}{d} \right)^{-0.47}$
	$X_N = \frac{n_1 A_1 + n_2 A_2 + n_3 A_3}{n_1 A_1 + n_2 A_2 \left( \frac{D_{e2}}{D_{e1}} \right)^{0.714} + n_3 A_3 \left( \frac{D_{e3}}{D_{e1}} \right)^{0.714}}$	$V_1 = \frac{W_B}{r A_1} \cdot X_S$
		$X_S = \frac{1}{n_1 + n_2 \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \left( \frac{D_{e2}}{D_{e1}} \right)^{0.715} + n_3 \left( \frac{A_3}{A_1} \right) \left( \frac{D_{e3}}{D_{e1}} \right)^{0.715}}$
$10^3 \leq Re_R \leq 3 \times 10^5$ $1.125 \leq P/d \leq 1.417$ $6.0 \leq H/d \leq 45.0$ $7 \leq N \leq 61$	$2.6 \times 10^3 \leq Re_N \leq 2 \times 10^5$ $1.06 \leq P/d \leq 1.42$ $8.0 \leq H/d \leq 96.0$ $19 \leq N \leq 217$	$4 \times 10^3 \leq Re_S \leq 10^5$ $1.14 \leq P/d \leq 1.30$ $10.0 \leq H/d \leq 50.0$

## APPENDIX 4<sup>6)</sup>

### 燃料束摩擦損失計算式評価

Novendstern の式は燃料束の形状因子に関する評価に対してかなりよい結果を与えるが、レイノルズ数依存性に関して、特に低レイノルズ数域の評価に問題があり、Rehme の式は  $1.5 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^4$  付近の値が多少低めとなる傾向にあることが明らかとなった。よってまず、Novendstern と Rehme の式のレイノルズ数に対する依存性を改善することを目的として、摩擦損失係数評価式の改良を行なう。摩擦損失係数を与える式の形としては、低レイノルズ数域までカバーすることを考えて、次の2式を採用した。

$$f_M = A + B R_{cM}^C \dots\dots\dots ①$$

$$f_M = \frac{A}{R_{cM}} + B R_{cM}^C \dots\dots\dots ②$$

ここで、 $f_M$  および  $R_{cM}$  は各評価式で与えられる修正摩擦損失係数および修正レイノルズ数であり、 $A$ 、 $B$  および  $C$  は実験値に基いて最小二乗法により求める未定定数である。最小二乗法の計算においては式の形が非線形であるので、デミングの方法を用い、両座標に誤差が伴ない、かつ各データの重みが等しくないとし、重みはデータの個数および形状因子の重要度から適当に定めている。

計算に使用したデータは本報告書の供試体だけでなく、現在まで本試験室で実施した次の11体のデータ計369個を用いた。

- (a) M2CWH ..... 「もんじゅ」二次試作, 炉心
- (b) M2CWG ..... " "
- (c) M3CWG ..... 「もんじゅ」三次試作, "
- (d) M3CWH ..... " "
- (e) M3CWP ..... " "
- (f) M3CWT ..... " "
- (g) M3CWM ..... " "
- (h) M3BWG ..... " ブランケット
- (i) JII2CP ..... 「常陽」二次試作, 炉心
- (j) JII2CT ..... " "
- (k) JII3CP ..... 「常陽」三次試作, "

Table 1 に各集合体の仕様および Rehme および Novendstern 形状因子パラメータ ( $P/d$ ,  $H/d_m$ ,  $F$ ,  $S_B$ ,  $S_T$ ,  $H/d$ ,  $X_N$ ,  $M$ ,  $D_e/D_{e1}$ ) また、これらのパラメータと摩擦損失係数修正

項 (Rehme に対しては  $F \cdot \frac{S_B}{S_T}$ , Novendstern に対しては  $M \cdot X_N^2 \cdot \frac{D_e}{D_{ei}}$ ) の関係を Fig. 1 および 2 に示す。Fig. 1 は Rehme の式の修正摩擦損失係数 ( $f_R$ ) に対する燃料束の形状に関する修正係数 ( $F \cdot \frac{S_B}{S_T}$ ) と P/d および H/dm の関係を示している。図によれば、修正係数 ( $F \cdot \frac{S_B}{S_T}$ ) は P/d および燃料ピン本数の減少によって小さくなり、H/dm の増加によって減少する傾向がわかる。しかし、Rehme の修正係数では周辺流れ抑制による最外周サブチャンネル流路面積の減少の効果は考慮することはできない。Fig. 2 は Novendstern の式の  $f_N$  に対する修正係数 ( $M \cdot X_N^2 \cdot \frac{D_e}{D_{ei}}$ ) と P/d および H/d の関係を示している。Novendstern の修正係数はレイノルズ数に対する依存性があるので、図にはレイノルズ数に対する幅も示している。Novendstern の修正係数は前述の Rehme の修正係数のように P/d, H/dm および燃料ピン本数だけでなく、サブチャンネル間の流れ分布係数 ( $X_N$ ) によっても変化していることがわかる。この流れ分布係数 ( $X_N$ ) は周辺流れ効果抑制を施し、最外周流路面積を小さくしたもののほど大きくなる。この傾向は実験結果と一致する傾向であり、Novendstern の式によれば、ある程度周辺流れ効果抑制の効果を表現できる可能性が考えられる。

なお、Table 1 で示した各パラメータの計算においては次のように仮定をしている。

- (1) 最外周燃料ピンのワイヤはラッパ管に接している。
- (2) 燃料ピン間ギャップは燃料束内で平均的に分布している。
- (3) 最外周ワイヤ巻きピッチが内側と最外周で異なる場合は、内側の値を用いる。
- (4) 周辺流れ効果対策を施している燃料束の流れ分布係数 ( $X_N$ ) は、各サブチャンネル間の連続の条件を拡張して次式で定義する。

$$X_N = \frac{A_T}{n_1 A_1 + n_2 A_2 \left(\frac{D_{e2}}{D_{e1}}\right)^{0.714} + n_3 A_3 \left(\frac{D_{e3}}{D_{e1}}\right)^{0.714} + n_4 A_4 \left(\frac{D_{e4}}{D_{e1}}\right)^{0.714} + n_5 A_5 \left(\frac{D_{e5}}{D_{e1}}\right)^{0.714}} \dots \quad (3)$$

このような仮定のもとに計算を行ない、Rehme および Novendstern の  $f_R$  および  $f_N$  を求める式の修正を行なった結果を Table 2 に示す。また、Fig. 3 に実験値の摩擦損失係数 ( $f$ ) とレイノルズ数 ( $Re$ ) の関係を示す。Table 1 および 2, Fig. 3 の結果から摩擦損失係数の評価方法について検討すると次のようなことがいえる。

- (1) 計算方法としては Novendstern の式を用い、 $f_N$  を②式の形で与えると比較的各集合体実験値に近い値が得られ、計算精度は約 ± 2.5 % となる。
- (2)  $Re$  と  $f$  の関係は  $Re > 1 \times 10^4$  で両対数座標上で直線関係があり、 $Re < 1 \times 10^4$  でその直線性がなくなる。よって、①および②式の形で全レイノルズ数範囲をカバーするのは無理

であり、レイノルズ数範囲で式の形を別個に与える方が望ましい。ここでは、次のような形で与えるのが最適と考えられる。

(a)  $1.3 \times 10^3 < R_e < 2 \times 10^4$  において、

$$f_N = \frac{A}{R_{eN}} + B \cdot R_{eN}^C \quad \text{..... ④}$$

(b)  $1 \times 10^4 < R_e < 7 \times 10^4$  において、

$$f_N = a \cdot R_{eN}^b \quad \text{..... ⑤}$$

(3) Novendstern の修正係数 ( $M \cdot X_N^2 \cdot \frac{D_e}{D_{ei}}$ ) と摩擦損失係数実験値との関係を見ると、 $\left(\frac{D_e}{D_{ei}}\right)$  に対して  $\left(\frac{D_e}{D_{ei}}\right)^d$  とおく方が計算精度の改善されることが考えられる。たとえば、M3CWP は修正係数をもっと大きい方がよく、M3CWH および M3CWM はもっと小さい方がよい。M3CWP は周辺流れ効果抑制をせず、M3CWH および M3CWM は最外周ピンのワイヤを 2 重巻きしているので  $\alpha$  は、燃料束最外周部の形状の相違が原因する流れ分布係数 ( $X_N$ ) の補正係数と考えることができる。

上述の検討より、 $f_N$  を④および⑤式で与え、Novendstern の修正係数を  $M \cdot X_N^2 \cdot \left(\frac{D_e}{D_{ei}}\right)^d$  で定義して、A, B, C, a, b および  $\alpha$  を求めた結果を Table 3 に示す。

また、修正摩擦係数 ( $f_N$ ) と修正レイノルズ数 ( $R_{eN}$ ) の関係を Fig. 4 に示す。Table 3 の最終結果と Table 2 の結果を比較すると、最終結果では各供試体に対してかなり改善され、周辺流れ効果抑制を施した燃料束に対しても適用可能（ただし、M3CWG 型のような流路を閉塞するタイプには不可）な計算式が得られたものと考えられる。また、Fig. 3 と 4 を比較すると、実験値 (Fig. 3) に修正を施した修正摩擦損失係数 (Fig. 4) では各供試体相互の実験値の相違が改善されていることがわかる。最終結果の計算精度は Table 3 より、高レイノルズ数域で  $\pm 1.9\%$ 、低レイノルズ数域で  $\pm 2.5\%$  となった。



Table 1 Rod Bundle Geometrical Parameters of the Fuel Assemblies.

Fuel Assembly	N	P ( $\times 10^{-3}$ m)	d ( $\times 10^{-3}$ m)	Wd ( $\times 10^{-3}$ m)	H ( $\times 10^{-3}$ m)	A ( $\times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> )	De ( $\times 10^{-3}$ m)	P/d	Rehme				Novendstern				
									H/dm	$S_U/S_T$	F	$F \cdot \frac{S_U}{S_T}$	H/d	De/De <sub>1</sub>	$X_N$	M	$M \cdot X_N^2 \cdot \frac{De}{De_1}$
M2CWH	169	7.939	6.496	$\frac{1.3}{1.0}$	252	3.695	3.314	1.222	32.3	0.919	1.210	1.112	38.8	1.009	0.992	1.066 ~1.083	1.059 ~1.075
M2CWG	169	7.942	6.502	$\frac{1.3}{1.0}$	$\frac{395.1}{197.5}$	3.692	3.309	1.221	$\frac{50.6}{26.3}$	0.919	1.145	1.052	$\frac{60.8}{30.4}$	1.009	0.992	1.029 ~1.035	1.022 ~1.028
M3CWG	169	7.941	6.5	$\frac{1.3}{1.0}$	306.9	3.693	3.311	1.222	39.3	0.919	1.173	1.079	47.2	1.009	0.992	1.046 ~1.056	1.038 ~1.049
M3CWH	169	7.962	6.496	$\frac{1.37}{0.9}$	252.4	3.670	3.196	1.226	32.1	0.922	1.214	1.119	38.9	0.973	1.017	1.070 ~1.085	1.077 ~1.092
M3CWP	169	7.908	6.496	1.26	306.2	3.714	3.317	1.218	39.5	0.919	1.170	1.076	47.1	1.021	0.983	1.045 ~1.055	1.031 ~1.041
M3CWT	169	7.924	6.502	$\frac{1.36}{1.1}$	307.3	3.647	3.219	1.219	39.1	0.921	1.172	1.079	47.3	1.008	0.993	1.044 ~1.056	1.037 ~1.049
M3CWM	169	7.946	6.502	$\frac{1.3}{1.0}$	305.5	3.671	3.195	1.222	39.2	0.921	1.174	1.082	47.0	0.972	1.019	1.046 ~1.057	1.055 ~1.066
M3BWG	61	13.14	11.6	$\frac{1.4}{1.0}$	306.7	2.957	4.193	1.133	23.6	0.872	1.213	1.058	26.4	1.011	0.988	1.092 ~1.116	1.077 ~1.101
JH2CP	127	6.469	5.500	0.9	293.5	1.708	2.433	1.176	45.9	0.909	1.126	1.024	53.4	1.032	0.974	1.034 ~1.040	1.012 ~1.019
JH2CT	127	6.478	5.503	0.902	210.9	1.716	2.442	1.177	32.9	0.909	1.170	1.064	38.3	1.030	0.975	1.060 ~1.071	1.037 ~1.049
JH3CP	127	6.479	5.502	0.9	211.3	1.719	2.446	1.178	33.0	0.909	1.170	1.064	38.4	1.030	0.975	1.061 ~1.072	1.040 ~1.050

Table 2 Results of the Modified Friction Factor Equations.

FUEL ASSEMBLY	REHME			NOVENDSTERN		
	ORIGINAL EQUATION	$f_R = 0.0162 + \frac{6.86}{Re_R^{0.673}}$	$f_R = \frac{5.19}{Re_R} + \frac{0.094}{Re_R^{0.143}}$	ORIGINAL EQUATION	$f_N = 0.0157 + \frac{4.36}{Re_N^{0.621}}$	$f_N = \frac{4.17}{Re_N} + \frac{0.111}{Re_N^{0.158}}$
M2CWH	± 7.9%	± 4.0%	± 3.8%	± 3.5%	± 2.5%	± 2.2%
M2CWG	± 4.8	± 2.5	± 1.6	± 1.4	± 2.4	± 1.7
M3CWG	± 5.0	± 2.6	± 1.8	± 1.1	± 2.5	± 1.7
M3CWH	± 7.6	± 3.8	± 3.6	± 3.3	± 2.3	± 2.0
M3CWP	± 2.8	± 4.3	± 3.7	± 3.1	± 5.2	± 4.7
M3CWT	± 4.6	± 2.3	± 1.5	± 2.0	± 2.5	± 1.9
M3CWM	± 8.2	± 4.4	± 4.2	± 4.0	± 3.2	± 2.9
M3BWG	± 4.3	± 6.3	± 5.6	± 9.0	± 2.6	± 2.1
JII2CP	± 3.6	± 2.5	± 1.7	± 2.4	± 1.8	± 1.3
JII2CT	± 3.6	± 2.6	± 1.9	± 1.7	± 1.9	± 1.2
JII3CP	± 1.5	± 4.6	± 4.1	± 1.7	± 3.4	± 2.9
Mean Variation Coefficient	± 5.6%	± 4.0%	± 3.5%	± 3.9%	± 3.0%	± 2.5%

Table 3 Final Results of the Modified Equation.

FUEL ASSEMBLY	NOVENDSTERN	
	Low Reynolds Number $1.3 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^4$	High Reynolds Number $1 \times 10^4 < Re < 7 \times 10^4$
	$f = f_N \cdot M \cdot X_N^2 \cdot \left( \frac{D_e}{D_{e1}} \right)^{1.5}$	
	$f_N = \frac{47.4}{Re_N} + \frac{0.074}{Re_N^{0.118}}$	$f_N = 0.237 \cdot Re_N^{-0.226}$
M2CWH	$\pm 2.0\%$	$\pm 2.2\%$
M2CWG	$\pm 2.3$	$\pm 1.2$
M3CWG	$\pm 1.8$	$\pm 1.0$
M3CWH	$\pm 3.1$	$\pm 0.6$
M3CWP	$\pm 4.3$	$\pm 3.8$
M3CWT	$\pm 1.9$	$\pm 1.4$
M3CWM	$\pm 4.4$	$\pm 1.1$
M3BWG	$\pm 2.0$	$\pm 1.9$
JII2CT	$\pm 3.0$	$\pm 2.2$
JII2CP	$\pm 1.8$	$\pm 1.0$
JII3CP	$\pm 1.3$	$\pm 1.7$
Mean Variation Coefficient	$\pm 2.5\%$	$\pm 1.9\%$

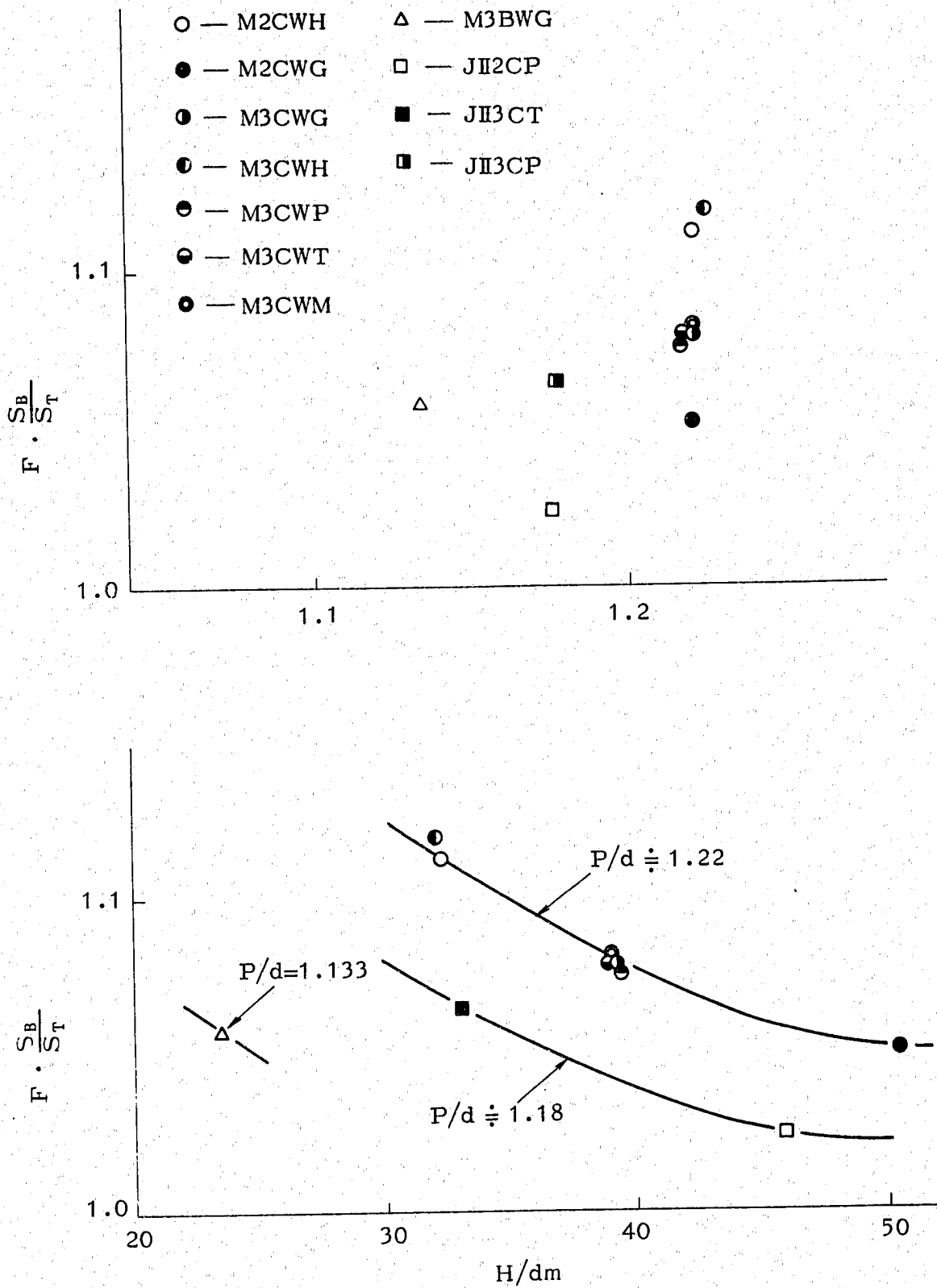


Fig. 1 Relations of Rod Bundle Geometrical Parameters ( $P/d$  and  $H/dm$ ) and Rehme's Modification Factor ( $F \cdot \frac{S_B}{S_T}$ ).

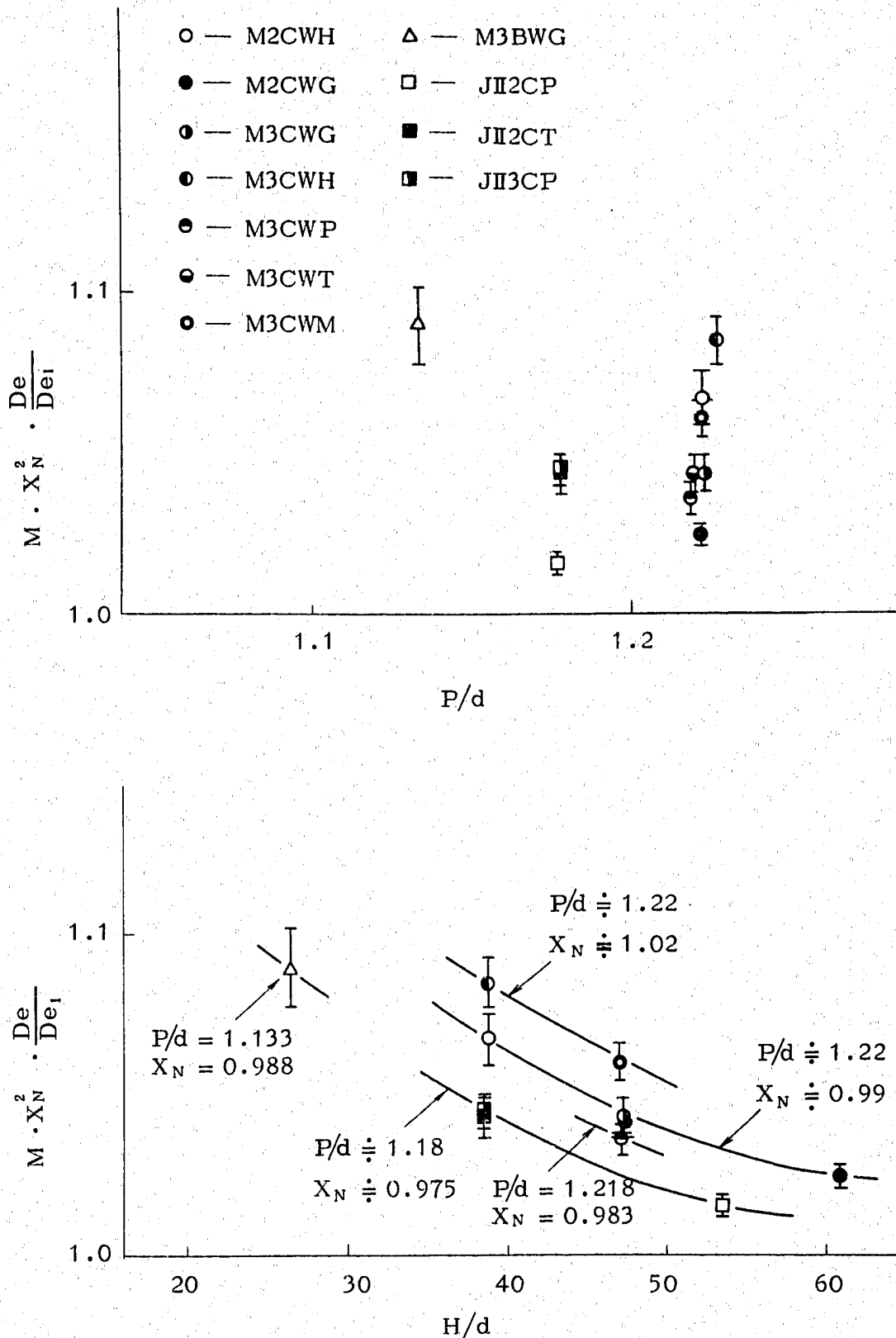


Fig. 2 Relations of Rod Bundle Geometrical Parameters ( $P/d$  and  $H/d$ ) and Novendstern's Modification Factor ( $M \cdot X_N^2 \cdot \frac{De}{De_1}$ ).

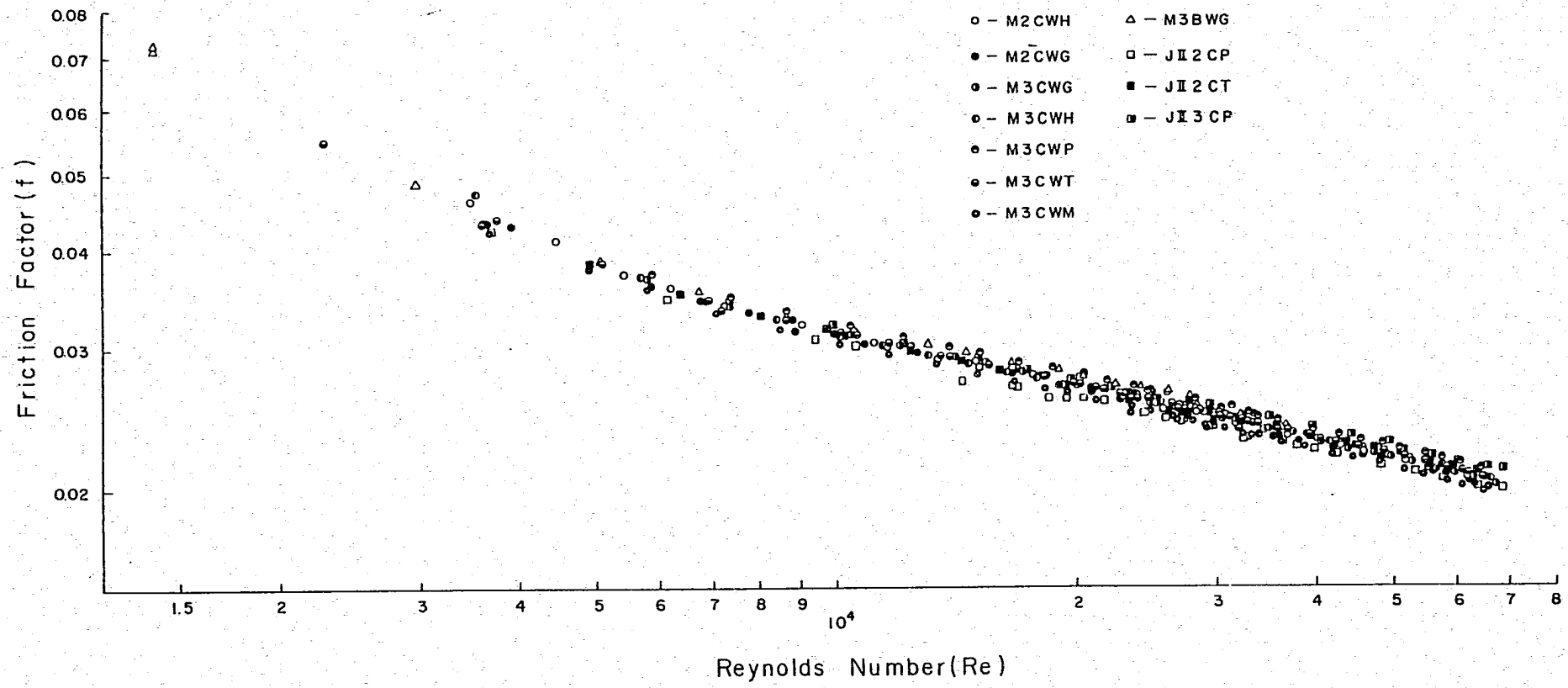


Fig. 3 Relations of Experimental Friction Factor vs. Reynolds Number

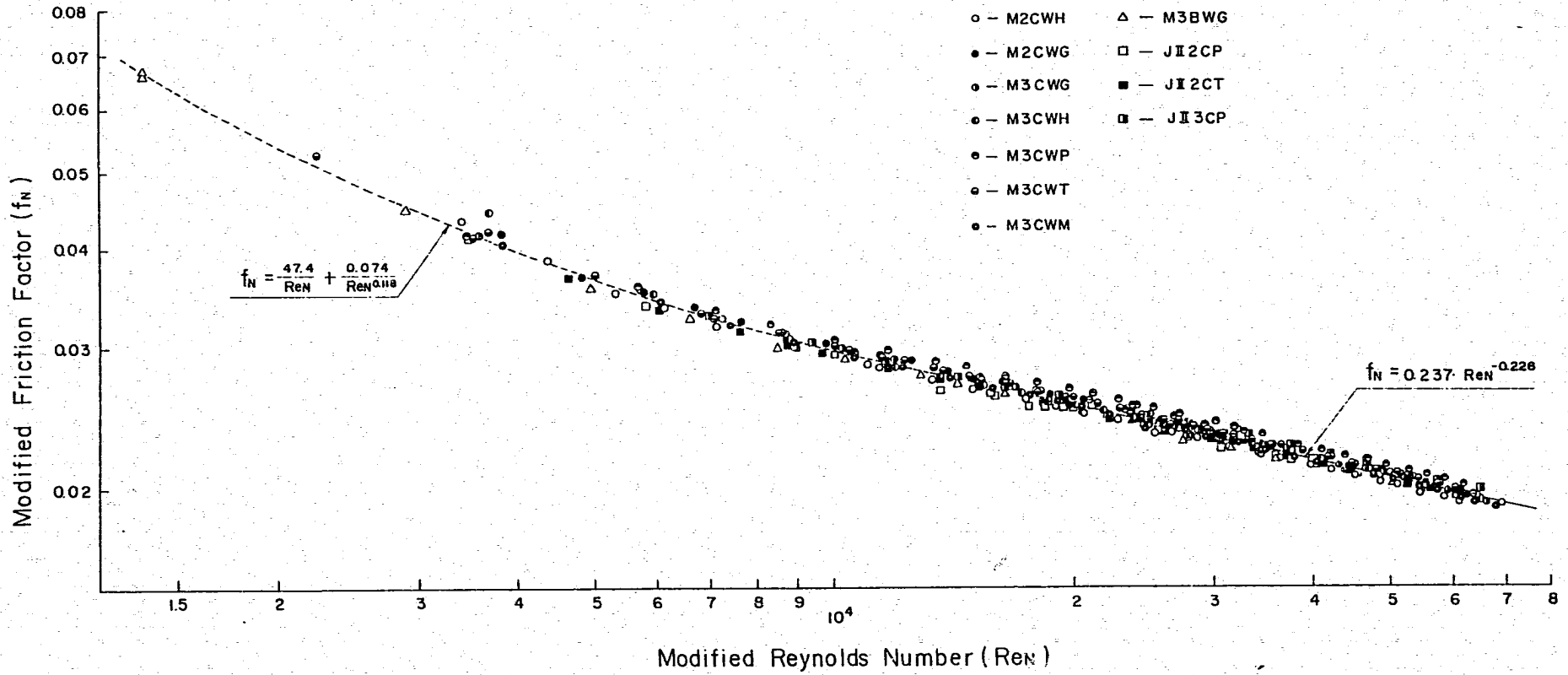


Fig. 4 Relations of Modified Friction Factor vs. Modified Reynolds Number