

JAERI - M  
90-151

HENDELにおける高温工学試験研究炉用  
制御棒駆動装置の信頼性試験結果

1990年9月

白野竜太郎・福島 久\*・宮本 喜晟

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)原子力資料サービス

HENDELにおける高温工学試験研究炉用制御棒駆動装置  
の信頼性試験結果

日本原子力研究所東海研究所高温工学部  
日野 竜太郎・福島 久\*・宮本 喜晟

(1990年8月14日受理)

原研の大型ヘリウムガスループ(HENDEL)に設置された燃料体スタック実証試験部の1チャンネル試験装置を用いて、高温工学試験研究炉(HTTR)と同じ温度圧力条件のもとで、制御棒駆動装置の信頼性試験を実施した。使用した制御棒駆動装置と制御棒は実機とほぼ同じ仕様である。

本試験では、実機のプラント寿命20年間の想定駆動回数を上回る駆動試験を行い、通常挿入・引抜き運転において挿入・引抜き不能は一度もなく、また、位置制御において設定値と指示値はよく一致した。HTTR仕様の電磁クラッチ切離し自由落下スクラムにおいてもスクラム不能は一度もなく、オーバーランは63mm～71mmの範囲と比較的短距離であった。制御棒の挿入・引抜きによる圧力損失の変化は小さく、燃料体のヘリウムガス流量配分に影響することはない。試験終了後に構成部品の分解検査を行ったが、とくに異常はみられず健全であった。

Reliability Test on Control Rod Driving Mechanism  
of HTTR with HENDEL

Ryutaro HINO, Hisashi FUKUSHIMA\* and Yoshiaki MIYAMOTO

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 14, 1990)

Tests on a control rod driving mechanism (CRDM) including a control rod (C/R) of the high temperature engineering test reactor (HTTR) have been performed to verify their reliability with the single-channel test rig of the fuel stack test section in the helium engineering demonstration loop (HENDEL) under the same operational conditions of the HTTR.

The CRDM has been operated far more than the total driving number considered on 20-year HTTR operation. It was observed that there was no failure of scram and no occurrence impossible to insert or draw out the C/R at normal operations. The CRDM could move the C/R to given positions in the channel without error at normal operations. Overruns at scrams by disconnection of an electromagnetic clutch were short distances ranged from 63 mm to 71 mm. Pressure drop change in the channel with C/R movement was found to be so small not to affect flow rate distribution of coolant in fuel stacks. After the test, parts of the CRDM and C/R were disassembled and examined. The test results showed no failure of them.

Keywords: Reliability Test, Control Rod Driving Mechanism, Control Rod HTTR, HENDEL, Insertion, Drawing Out, Scram, Pressure Drop, High Pressure, High Temperature, Helium Gas, Disassembling

---

\* Toshiba Co. Ltd.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 試験装置の概要 .....	2
3. 試験方法及び内容 .....	12
3.1 試験方法 .....	12
3.2 試験内容 .....	12
4. 試験結果 .....	16
4.1 駆動試験結果 .....	16
4.2 C/R スクラム停止位置保持試験結果 .....	17
4.3 ワイヤロープの伸び量測定結果 .....	17
4.4 圧力損失測定結果 .....	18
4.5 部品供用後検査結果 .....	18
5. 結 論 .....	35
謝 辞 .....	35
参考文献 .....	36

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental apparatus .....	2
3. Experimental method and test items .....	12
3.1 Experimental method .....	12
3.2 Test items .....	12
4. Test results .....	16
4.1 Driving test results .....	16
4.2 C/R rapid heating test results .....	17
4.3 Extension of wire rope .....	17
4.4 Pressure loss in C/R channel .....	18
4.5 Examination of parts after disassembling .....	18
5. Conclusion .....	35
Acknowledgement .....	35
References .....	36

# 1. 緒 言

日本原子力研究所（原研）では、高温ガス炉（HTGR）の技術的基盤の確立とその高度化を目的として、ヘリウムガスを冷却材とする高温工学試験研究炉（HTTR）の建設準備を進めている<sup>(1)</sup>。原研の大型ヘリウムガスループ「大型構造機器実証試験ループ（HENDEL）」では、燃料体スタック実証試験部の1チャンネル試験装置（ $T_{1-s}$ ）を用いて、HTTRの運転条件と同じ高温高圧条件のもとで、炉心部燃料体、とくに燃料棒及び燃料チャンネルの伝熱流動特性の把握と安全性の実証を目的とした試験を実施してきた<sup>(2,3,4)</sup>。しかし、炉心の重要な構成要素である反応度制御系については、これまでHTTR運転条件と同じ高温高圧のヘリウムガス雰囲気中で試験は行われておらず、原子炉の安全性を確保するためにその実証試験が急がれていた。そこで、制御棒駆動装置（以下CRDMと呼ぶ。）と制御棒（以下C/Rと呼ぶ。）を $T_{1-s}$ に設置し、CRDMの駆動特性と耐久性及びC/Rの健全性を確認するための信頼性試験を実施した。使用したCRDMは、HTTRの基になった“多目的高温ガス実験炉・詳細設計（Ⅱ）”の設計仕様<sup>(5)</sup>に従って製作されたものを、HTTRの仕様を付加して改造したものである。

試験は、HTTRの運転条件と同じ4MPaのヘリウムガス雰囲気中で、C/Rの通常挿入と引抜き、スクラム挿入等の駆動試験を実施し、CRDMの駆動性能、耐久性等を調べた。これと並行して、ワイヤーロープの伸び量と制御棒チャンネルの圧力損失の測定を行った。ところで、HTTR設計ではC/Rを完全に引き抜いた状態からスクラムさせると、挿入してから約2000秒経過後にC/Rは最高温度に達すると予想している。このときの外側被覆管温度は約840℃になり、C/Rには大きな熱応力が発生する。そのため、C/Rは熱応力を十分に吸収して健全性を維持する構造にしてあるが、構造健全性の実証試験は行われていない。そこで、C/Rの健全性を実証するためにC/Rをスクラム挿入した後、そのまま高温雰囲気中に保持するスクラム停止位置保持試験を行った。

これらの試験はHENDELのNo.25からNo.27サイクル（1サイクルは約28日間の連続運転）までの試験運転において実施された。試験終了後にCRDMとC/Rを分解し、異常等の有無、性能変化、材料強度等について調べた。

本報では、HTTR用CRDMの駆動試験結果、C/Rに対するスクラム停止位置保持試験結果、ワイヤーロープの伸び量と制御棒チャンネルの圧力損失測定結果及びCRDMとC/Rの部品供用後検査結果について報告する。

## 2. 試験装置の概要

CRDM 信頼性試験装置（以後、試験装置と呼ぶ。）は燃料体スタック実証試験部の 1 チャンネル試験装置 ( $T_{1-s}$ ) に設置され、ヘリウムガス供給系である  $M_1$  ループから圧力 4 MPa のヘリウムガスが供給される。全体のフローシートを Fig. 2.1 に示す。 $M_1$  ループのガス循環機から送り出されたヘリウムガスは加熱器で所定の温度に調整された後、試験部に流入する。試験部で昇温したヘリウムガスは内蔵冷却器で 200 °C 以下に冷却され、 $M_1$  ループの冷却器、混合タンク、フィルターを経てガス循環機に戻る。全体の圧力調節は混合タンクに接続されたメイクアップ系で行われる。

Fig. 2.2 に試験装置の概要を示す。試験装置は、CRDM、模擬スタンドパイプ (S/P) 内遮蔽体、圧力容器、模擬制御棒 (C/R)、予熱ヒータ、ヒータ付き案内管及び流路管、水冷巻き、パネルヒータ、制御・計測系等から構成される。CRDM と S/P 内遮蔽体を収納する圧力容器は  $T_{1-s}$  接続用圧力容器を介して  $T_{1-s}$  の頂部に設置され、 $T_{1-s}$  を通して圧力 4 MPa のヘリウムガスが供給される。

C/R は CRDM のワイヤロープで吊り下げられ、案内管を介して流路管に挿入される。CRDM による C/R の駆動距離（ストローク）は最大 4060 mm である。案内管に流入するヘリウムガスは予熱ヒータで実機運転温度に調節され、また、案内管及び流路管に巻き付けられたヒータで炉心部温度条件を模擬する。

CRDM 収納部の雰囲気温度は、水冷巻きに所定の温度の温水を流して調節する。また、S/P 内遮蔽体周りからの周囲環境への放熱の模擬は、CRDM 収納用圧力容器下部に円筒形のパネルヒータを設置し、パネルヒータと圧力容器の間の環状空間の空気温度を調節して行う。

以下に主要な機器の概要を述べる。

### (1) 制御棒駆動装置

CRDM の主要機器構成を Fig. 2.3 に示す。CRDM の駆動源は AC サーボモータで、1/30 の減速比を有する減速機と 1/2 の減速比を有する駆動歯車を介してワイヤロープの巻取りドラムと連結している。巻取りドラムには、C/R の粗位置を検出するためのリミットスイッチと連続的な位置検出を行うためのエンコーダが接続されている。

AC サーボモータ軸と減速機の入力軸間には電磁クラッチが設けられており、スクラム時にはこの電磁クラッチを切離して C/R 自重による自由落下で急速挿入される。電磁クラッチには、スクラム時の C/R 落下速度を一定速度に制御するための遠心ブレーキと、電源喪失時に C/R の位置を保持させるため等の電磁ブレーキが歯車を介して接続されている。通常のスクラムでは、C/R は電磁クラッチ切離し後、遠心ブレーキによる制動を受けて電磁ブレーキにより停止する。電磁ブレーキの動作不良という事態を考慮して、ワイヤロープの巻取りドラム側面に設けられた螺旋状溝に摺動ストッパーがガイドされており、これが螺旋状溝の最終端に当たると強制的に停止するようにしている。このとき、停止時の衝撃を吸収するためにバネ機構が設けられている。

これらの一連の機構をメカニカルブレーキと称している。

なお、本試験で使用した CRDM には、HTTR 仕様の電磁クラッチ切離し自由落下スクラム方式の試験に加えて、AC サーボモータによる直動スクラム方式の試験もできるようにしてある。

また、CRDM 最下部には絶対位置検出機構が設置されている。これは、S/P 内遮蔽体を貫通させて設置した感知ロッドに C/R 頂部が当たるときにリミットスイッチを動作させ、そのときのエンコーダ指示値を基準位置とするものである。この指示値の変化分からワイヤロープの伸び量を求めて C/R 位置を補正する。

歯車等の機械的駆動部には潤滑剤をコーティングしてかじり等を防止している。ただし、歯車については固体被膜潤滑剤の焼付け処理を施しているのみで、潤滑油、グリース等を塗布していない。また、電気部品でケースに収納されているものは、CRDM の雰囲気圧力（4 MPa）を考慮してケースに均圧孔を開けるなどの対策を施している。

主要な機器仕様は次のとおりである。

通常駆動方式	: AC サーボモータ駆動
スクラム方式	: (1) AC サーボモータ高速回転による直動方式 (2) 電磁クラッチ切離しによる C/R 自由落下方式
C/R 挿入・引抜方式	: ロープ巻き取りドラム方式 (通常運転, 直動スクラム時)
ドラム巻き取り方式	: 一層巻き
C/R ストローク	: 最大 4060 mm
通常駆動速度	: 1 mm/s ~ 10 mm/s (任意可変)
スクラム速度	: 約 370 mm/s
主要寸法	: (1) ドラム径 $\phi 250$ mm (ワイヤロープ中心径) (2) ワイヤロープ $\phi 6$ mm
主要材質	: (1) 駆動歯車 SMCM 420 (2) ワイヤロープ SUS 316 (3) 摺動ストッパ S 45 C (表面高周波焼入れ処理) (4) その他 SS 41 (ユニクロームメッキ処理)

## (2) 模擬制御棒

C/R の概要を Fig. 2.4 に示す。C/R は 10 個の C/R 要素と 1 個のショックアブソーバを直径 10 mm のスパイン（インコロイ 800 H 製）に等間隔に取り付けたもので、直径 6 mm の SUS 316 製のワイヤロープに連結されている。すべての C/R 要素の寸法は実機と同じであるが、重量は実機が 68 kg であるのに対して本試験用の C/R は多目的高温ガス実験炉詳細設計（II）の仕様に合わせて 102 kg にしてある。

高温に曝される最下部に位置する 2 個の C/R 要素については、被覆管に実機材料のインコロイ 800 H を使用し、内部には模擬中性子吸収体（高純度黒鉛）を収納した。その他の 8 個の C/R 要素は、模擬吸収体を収納しない SUS 304 製の中空厚肉被覆管構造とした。外側被覆管の



ガイドフィンが設置された部分は、ガイドフィンを含めて周方向に  $\text{Cr}_3\text{O}_2$  等を成分とした溶射コーティングが施されている。最下端の C/R 要素に連結するショックアブソーバはインコロイ 800 H を使用した成形ペローズクラッシュブルタイプで、寸法、構造及び重量ともに実機と同じである。

主要な機器仕様は次のとおりである。

型式	:	(1) C/R 軸方向 10 分割 2 重円筒ベント型 (2) ショックアブソーバ 厚肉成形ペローズクラッシュブルタイプ
主要寸法	:	(1) C/R 要素 外径 110 mm, 内径 70 mm, 全長 304 mm 最大径 116 mm (ガイドフィン径) (2) ショックアブソーバ 最大径 106 mm, 全長 500 mm (3) 模擬吸収体 外径 105 mm, 内径 75 mm, 全長 291 mm (4) スパイン 直径 10 mm, 全長 3100 mm
主要材質	:	(1) C/R 要素 インコロイ 800 H ..... 2 個 (被覆管) SUS 304 ..... 8 個 (2) ショックアブソーバ インコロイ 800 H ..... 1 個 (3) 模擬吸収体 高純度黒鉛 ..... 2 個 (4) スパイン インコロイ 800 H ..... 1 本
総重量	:	102 kg

### (3) スタンドパイプ内遮蔽体

HTTR における S/P 内遮蔽体は、SUS 材と黒鉛を交互に重ね合わせて最下部に断熱材を配した構成で製作されるが、今回の試験では外径 550 mm の炭素鋼を 6 段重ね、最下部に実機と同じカオウル製の断熱層を設けた。遮蔽体内部には温度分布計測用の熱電対挿入孔と、CRDM からのワイヤロープ及び絶対位置検出機構の感知ロッドの貫通孔を設けてある。

主要な機器仕様は次のとおりである。

型式	:	鋼製円板多重連結型
寸法	:	外径 550 mm, 全長 1492 mm
材質	:	(1) 遮蔽体本体 炭素鋼 (2) 断熱材 カオウル (セラミックファイバー) (3) 断熱材ケース SUS 304
使用温度	:	最高 400 °C
重量	:	約 2000 kg

## (4) 流路管等

流路管は実機制御棒挿入孔と同じ内径 (123 mm) のインコロイ 800 H 製円管で、軸方向の 5 箇所には圧力・差圧計測用の導圧管が設けられている。また、流路管の外周にはシースヒータが設置され、独自に加熱できるようになっている。案内管は SUS 316 製の円管で、その外周には保温用のシースヒータが設置されている。案内管に流入するヘリウムガス温度は予熱ヒータで調節される。流路管、案内管等には、温度計測と監視のために多数の熱電対が設置されている。

S/P 内遮蔽体から周囲環境への放熱の模擬は、パネルヒータと圧力容器の間の環状空間の空気温度を実機環境温度に設定して行う。空間の幅は約 250 mm で、下部と上部は閉め切り、空気の流入・流出を防ぐようにしている。また、パネルヒータの表面温度が軸方向に一様になるようにヒータ出力が制御される。

## (5) 制御・計測系

Fig. 2.5 に制御系の概要を示す。CRDM の駆動制御は HENDEL 中央制御室に設置したラインコンピュータ (YEWMAC) と T<sub>1</sub> 架台 6 階に設置した現場中継盤で行う。現場中継盤には CRDM をコントロールするための AC サーボモータ制御装置のほか、エンコーダからの信号を処理するデジタルカウンター、YEWMAC 及びその他の装置との間で制御信号と計測信号の通信を行うラインコントローラ等が収納されている。手動による C/R 駆動と電磁クラッチ切り離しスクラムを現場でも行えるように、遠方・現場切り替えスイッチ、速度、移動方向等の現場設定機器を設置してある。

周辺機器の予熱ヒータ、案内管ヒータの出力はサイリスタ盤 (1) のサイリスタで、水加熱器及びパネルヒータの出力はサイリスタ盤 (2) のサイリスタでそれぞれ調整される。これらのサイリスタの制御と、ヒータ及び周辺機器本体保護のための監視と警報発令は中央制御室に設けた調節ユニット (1) と (2) で行う。また、流路管ヒータの出力調整は中央制御室に設置している既設の T<sub>1</sub> 用制御盤で行う。

Fig. 2.6 に計測系の概要を示す。C/R の位置、駆動速度、駆動方向等の信号、CRDM 部、S/P 内遮蔽体内部及び CRDM 収納部圧力容器に設置した熱電対信号、CRDM 部露点信号は現場中継盤を経由してセンサーターミナルに入力される。また、流路管の軸方向の 5 箇所に設けた導圧管は既設の T<sub>1-s</sub> 圧力・差圧ラインに接続され、圧力・差圧信号は T<sub>1-s</sub> 端子盤を経てセンサーターミナルに入力される。流路管表面温度、案内管表面温度、ヘリウムガス温度、パネルヒータ温度、水冷巻き温度等の熱電対信号は、サイリスタ盤 (1)、(2) を経由してセンサーターミナルに入力される。これらの信号を集約するセンサーターミナルは T<sub>1</sub> 架台に設置されており、信号は専用ケーブルで中央制御室に設置されたデータロガーに送られる。データロガーは計測・制御用のパーソナルコンピュータに接続されており、データロガーでサンプリングされたデータは CRT 上に逐次表示される。同時に、コンピュータからの指示でフロッピーディスクとハードディスクにデータが保存される。本試験におけるデータのサンプリング周期は 7 分 30 秒である。

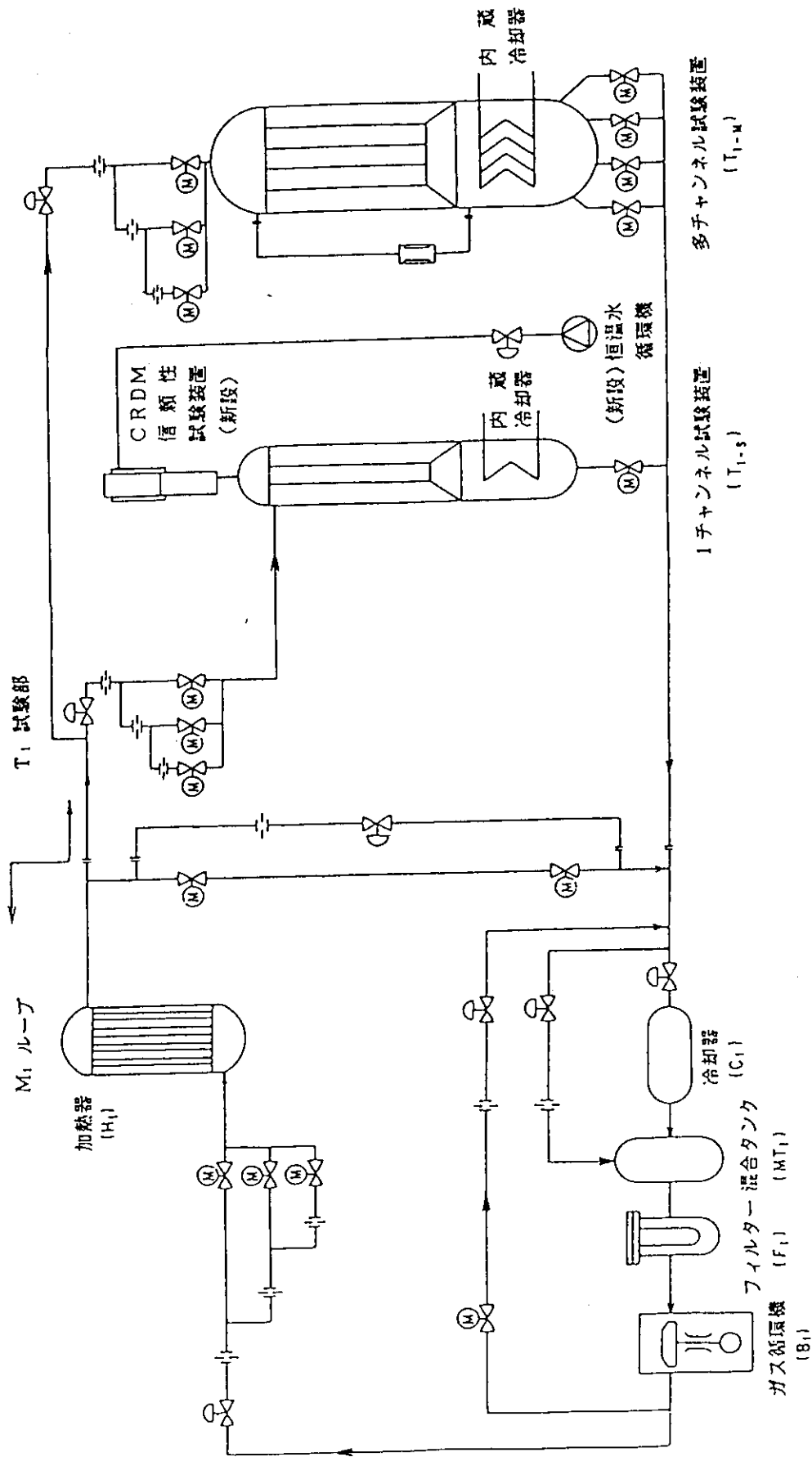


Fig. 2.1 Flow sheet of M<sub>1</sub> loop and T<sub>1</sub> test section

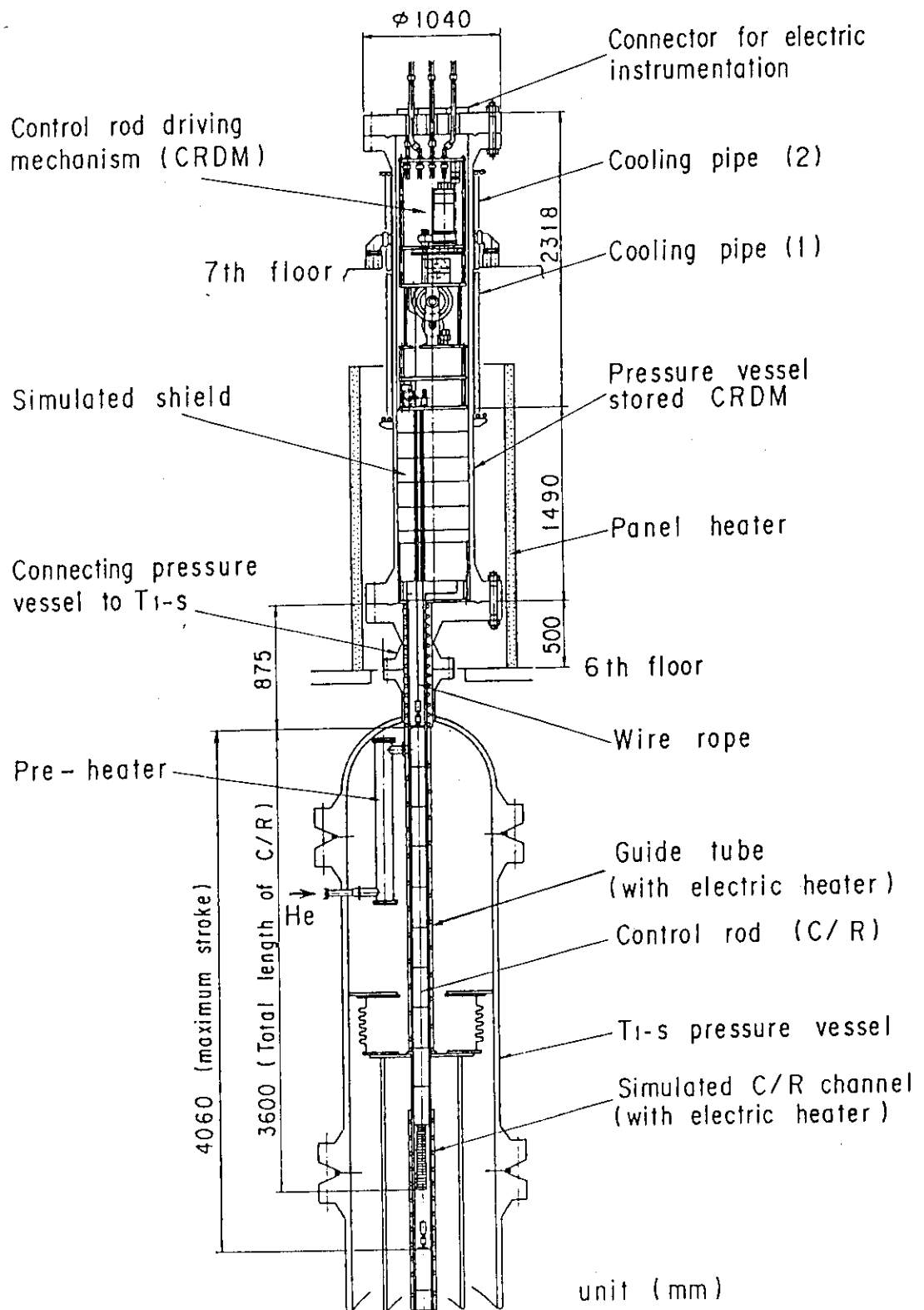


Fig. 2.2 Schematic drawing of test section

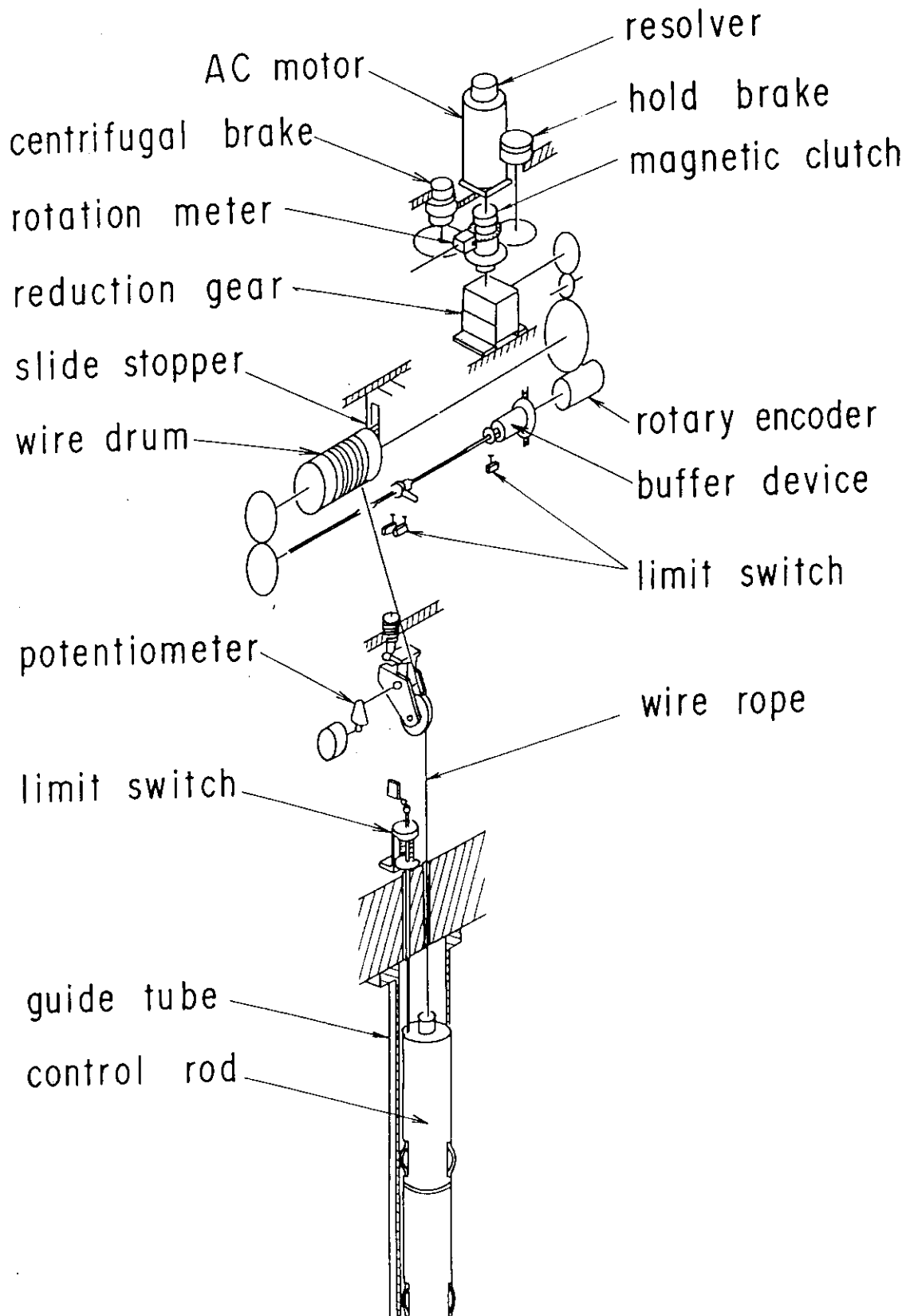
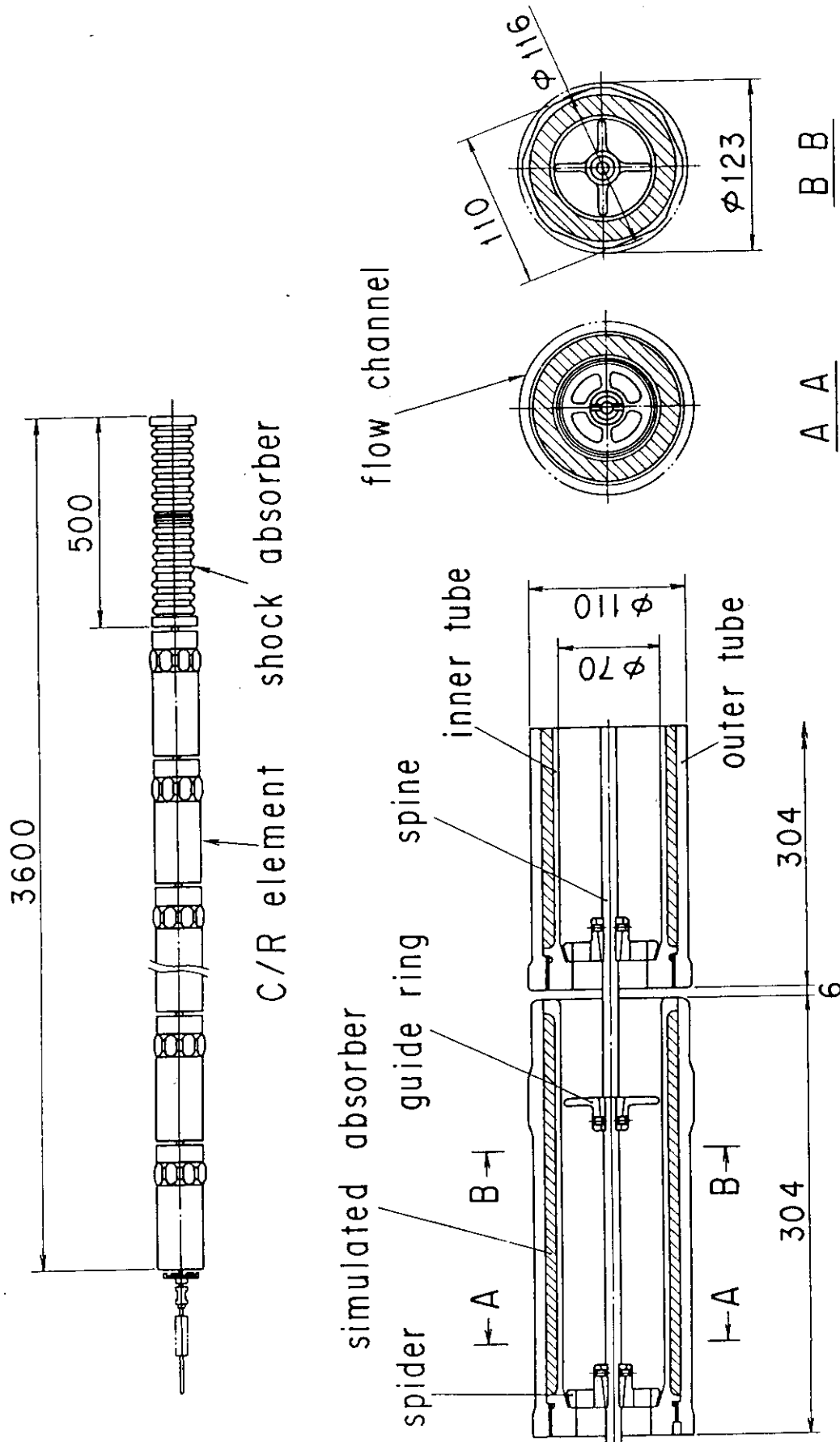


Fig. 2.3 Schematic drawing of CRDM structure



unit (mm)

Fig. 2.4 Schematic drawing of control rod

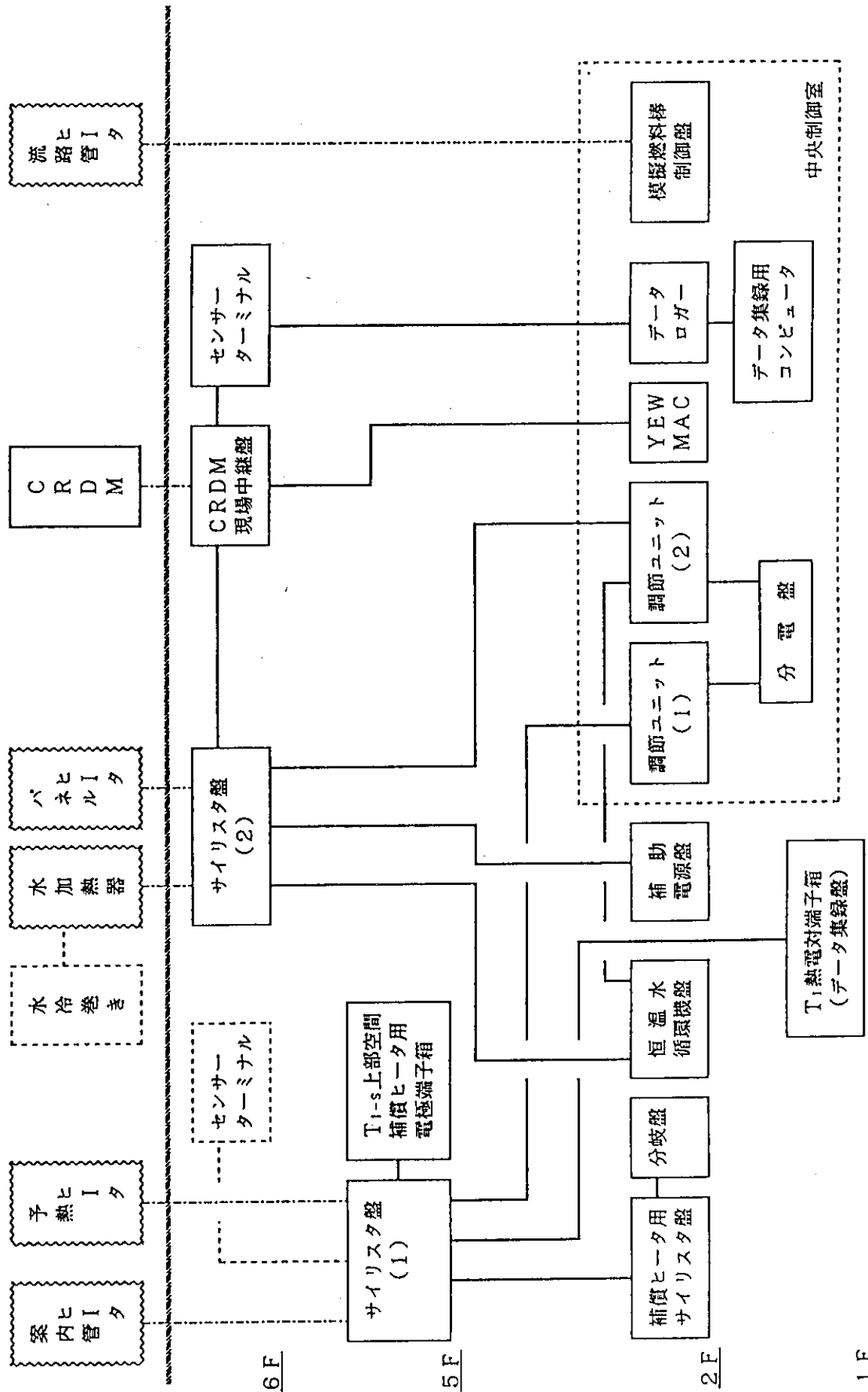


Fig. 2.5 Outline of control system

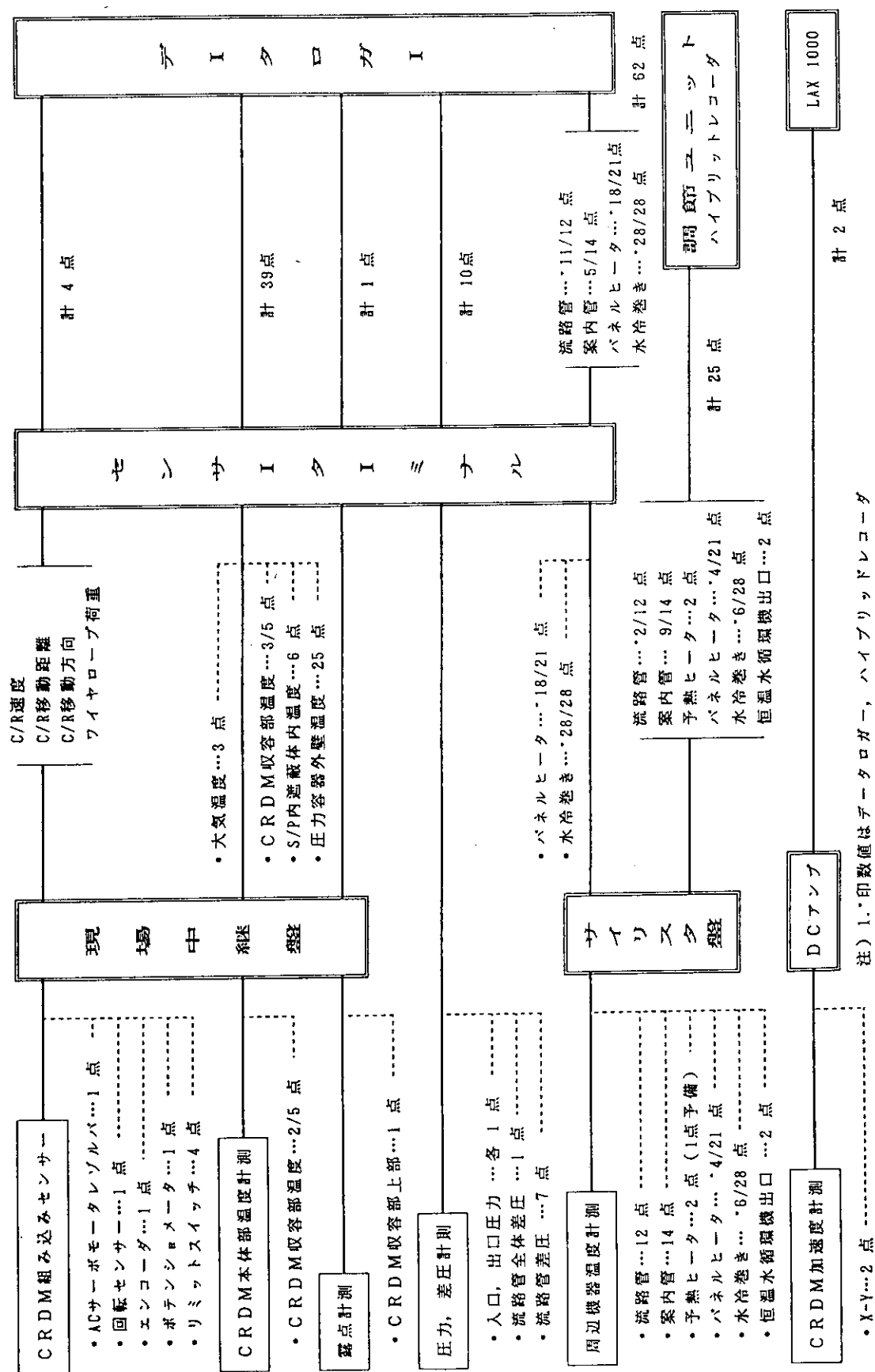


Fig. 2.6 Outline of data acquisition system



### 3. 試験方法及び内容

#### 3.1 試験方法

$M_1$  ループから流入したヘリウムガスを流路管に設置したヒータで最高 980 °C まで加熱するために、ヘリウムガスを流量 5 g/sec で  $T_{1-s}$  に流入させ、予熱ヒータで最高 450 °C まで昇温させた。後述の圧力損失測定においては、常温のヘリウムガスを 40 g/sec まで流した。CRDM 収納部雰囲気温度は、圧力容器外周部に設置した水冷巻きに温水を流して所定の温度に調節する。同時に、パネルヒータ表面温度も同じ温度に調節する。実機では、CRDM 収納部及び S/P 内遮蔽体周囲の雰囲気温度は約 60 °C である。また、S/P 遮蔽体下部のヘリウムガス温度は実機では 100 °C 以下であるが、本試験では約 220 °C まで昇温させた。

本試験における運転モードを Table 3.1 に示す。運転モードは

- (a) 手動運転 (単一モード運転)
- (b) 自動運転 (連続運転)

の 2 種類がある。これらの運転モードの内容は、

- (a) 通常駆動 (シム運転)
- (b) スクラム

に大別される。

シム運転による挿入・引抜きでは、C/R の駆動速度を 1 mm/s ~ 10 mm/s、ストロークを最高 4000 mm まで任意に変えて試験した。

スクラム方式には、前述したように AC サーボモータ直動方式と HTTR に用いられる電磁クラッチ切離し自由落下方式の 2 種類がある。AC サーボモータ直動方式では C/R 速度を変えることができ、最高速度は 400 mm/s である。本試験では 370 mm/s に設定した。電磁クラッチ切離し自由落下方式では、最高速度は約 370 mm/s で、遠心ブレーキによる一定速度制御が行われて電磁ブレーキで停止する。スクラム時の駆動ストロークは最高 4000 mm である。

自動運転には、挿入・引抜の一往復を 1 パターンとしたシム運転を連続して行わせるモードと、シム運転を繰り返してスクラムを 1 回実施するのを 1 サイクルとした連続サイクルモードの 2 種類がある。本試験では、サイクルモードのスクラムは、HTTR におけるスクラムを模擬するために電磁クラッチ切離し自由落下を行い、電磁ブレーキで停止させた。シム運転とスクラム運転における停止位置保持時間はそれぞれ 2 秒である。

#### 3.2 試験内容

試験開始前に、YEWMAC による制御性能の確認を目的とした手動シム運転を C/R 速度と距離をパラメータにして行い、YEWMAC による駆動制御性能を確認した。

この手動試験の後、自動運転を行った。自動のシム運転は通常駆動特性の把握と長期間安定性

の検証を目的として行った。この試験では、HTTR 総合調整設計時の C/R 寿命評価においてプラント寿命を 20 年間として、その間に想定される通常挿入と引抜き回数（挿入：371 回、引抜き：71 回）と C/R 移動距離（最大 2320 mm）を考慮して、移動距離の長い（3800 mm）シム動作を中心とした駆動試験を行った。

C/R 自重による重力落下スクラムでは、スクラムの確実性、電磁ブレーキによる停止性、スクラム特性の確認等を目的として、手動及び自動運転によるスクラム試験を行った。この試験では、プラント寿命 20 年間の想定回数である 300 回を大幅に越える回数を行うことを目標とした。前述したように、このときのスクラム停止位置保持時間は 2 秒である。

その他、試験開始前から試験終了後にかけて、制御棒を手動で引抜いて絶対位置検出機構を動作させ、ワイヤロープの伸び量を測定した。また、C/R 要素の健全性を確認するために、一種の熱衝撃試験といえるスクラム停止位置保持試験を実施した。この試験では、C/R を最上部の引抜き位置に保持し、流路管ヒータと補償ヒータブロックを加熱してヘリウムガスを最高 980 °C まで昇温した。このとき、C/R は案内管から流路管入口部に置かれ、その領域を流れるヘリウムガス温度 370 °C ~ 450 °C になる。この状態から手動でスクラム挿入して、スクラム停止位置で C/R が十分加熱されるまで保持し、再び C/R を最上部まで引抜いた位置で冷却した。

No. 25 ~ 27 サイクルにおける試験内容と日程の概要は次のとおりである。

(1) No. 25 サイクル試験（1988 年）；

ヘリウムガス圧力 4 MPa, CRDM 収納部雰囲気温度 60 °C という実機と同じ雰囲気中で、C/R の通常挿入と引抜き、スクラム挿入等について行った。本サイクルにおける試験日程の概要は以下の通りである。

7 月 9 日 ~ M<sub>1</sub> ループ、加熱器 H<sub>1</sub> によるヘリウムガス昇温開始

7 月 10 日 … T<sub>1-s</sub>, 圧力 4 MPa 到達

7 月 10 日 ~ T<sub>1-s</sub> 内、高温ガス（案内管入口温度で約 180 °C）循環による周辺機器（予熱ヒータ、案内管、流路管）ヒータの乾燥作業

7 月 13 日 ~ 予熱ヒータ、案内管ヒータによるヘリウムガス昇温

7 月 15 日 ~ 流路管ヒータによるヘリウムガス昇温

7 月 16 日 ~ 7 月 23 日

実機雰囲気を模擬した環境内で CRDM 駆動試験を実施

7 月 24 日 ~ 試験終了

(2) No. 26 サイクル試験（1988 年）；

ヘリウムガス圧力 4 MPa, CRDM 収納部雰囲気温度 60 °C という実機と同じ雰囲気中で、C/R の通常挿入と引抜き、スクラム挿入等について行った。また、C/R をスクラム挿入した後、そのまま高温雰囲気中に保持し、C/R 温度が上昇した後に再び引抜いて冷却するという C/R スクラム停止位置保持試験も実施した。

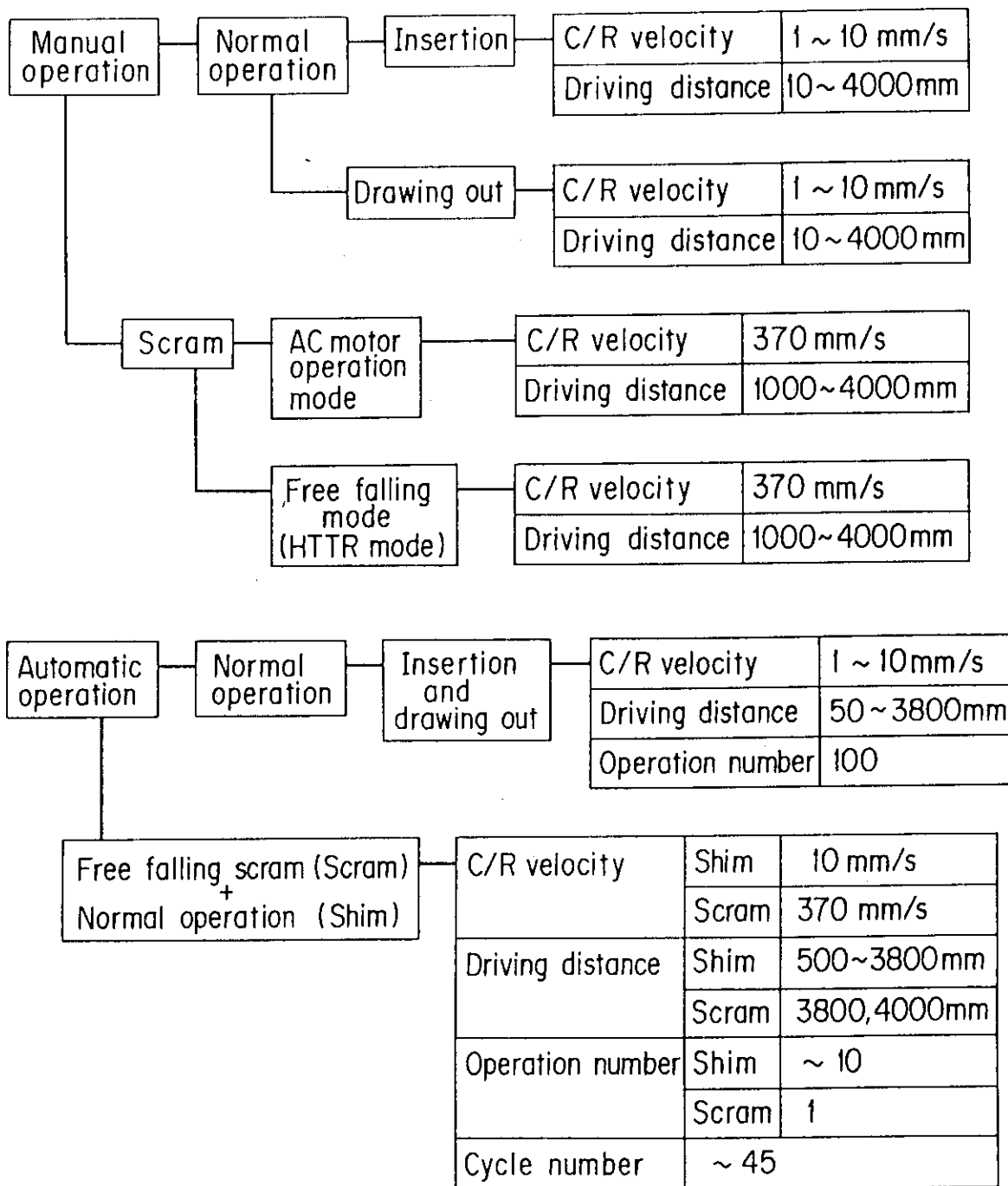
なお、本サイクル運転は 10 月 19 日より開始されたが、T<sub>1</sub> 試験部でのヘリウムガス中の不純物濃度が高かったため、精製運転等により試験条件の設定作業は 10 月 25 日からとなった。T<sub>1</sub> 試験部は本サイクル運転期間中、YEWMAC の故障修理の期間を利用して、容器内圧力を下げてヘリウムガス精製作業を 2 回行った。

- 10月19日 ~  $M_1$  ループによる昇圧開始  
 10月21日 ~ 加熱器  $H_1$  による昇温開始  
 10月25日 ~  $T_{1-s}$ , 圧力 4 MPa 到達  
 10月26日 ~ 予熱ヒータ, 案内管ヒータによるヘリウムガス昇温  
           パネルヒータ, 水冷巻きによる CRDM 収納部雰囲気気温度調整  
 10月27日 ~ CRDM 収納部雰囲気気温度 60 °C に到達  
           CRDM 駆動試験開始 (手動モードによるシム, スクラム試験)  
 10月29日 ~ ヘリウムガス精製のため容器内圧力降下,  
           ヘリウムガス精製  
 10月31日 ~ ヘリウムガス昇圧作業  
 11月1日 ~ 圧力 4 MPa 到達  
           流路管ヒータによる昇温  
           CRDM 駆動試験再開 (自動運転モード)  
 11月9日 ~ C/R スクラム停止位置保持試験  
 11月10日 ~ ヘリウムガス精製のため容器圧力降下,  
           ヘリウムガス精製  
           C/R スクラム停止位置保持試験 (圧力 2.6 MPa)  
           ヘリウムガス昇圧, 圧力 4 MPa 到達  
 11月11日 ~ CRDM 駆動試験  
           (手動モードによるシム, スクラム試験)  
 11月12日 ~ C/R スクラム停止位置保持試験 (1回),  
           ヘリウムガス量調整のため圧力降下  
 11月14日 ~ 差圧測定試験 (圧力 4 MPa に昇圧後)  
 11月15日 ~ No.26 サイクル運転終了
- (3) No.27 サイクル試験 (1989年) ;

CRDM 収納部雰囲気気温度を実機よりも約 10 °C 高い温度 (約 70 °C) にして, 通常駆動時の挿入・引抜き動作 (シム運転), 電磁クラッチ切離しによる制御棒の自由落下スクラムを行い, さらに, C/R スクラム停止位置保持試験を行った。

- 2月2日 ~ 加熱器  $H_1$  による昇温開始  
 2月4日 ~  $T_{1-s}$ , 圧力 4 MPa 到達  
           予熱ヒータ, 案内管ヒータによるヘリウムガス昇温  
           パネルヒータ, 水冷巻きによる CRDM 収納部雰囲気気温度調整  
 2月5日 ~ CRDM 収納部雰囲気気温度約 70 °C に到達  
 2月6日 ~ CRDM 実機雰囲気模擬環境内駆動試験  
           (手動モードによるシム, スクラム試験)  
           (自動モードによるシム, スクラム試験)  
           (C/R スクラム停止位置保持試験)  
 2月21日 ~ 試験終了, 降温開始

Table 3.1 Operation mode of CRDM reliability test



## 4. 試験結果

### 4.1 駆動試験結果

CRDM 駆動試験では、HENDEL のサイクル試験開始時と終了時に制御性能の確認を目的とした手動による通常駆動運転とスクラム運転を行い、それ以外は自動による連続運転と手動操作による C/R スクラム停止位置保持試験を実施した。

Table 4.1 は、本試験での駆動回数と総移動距離を CRDM 収納部雰囲気に対して整理したものである。表中の自由落下スクラムには、後述のスクラム停止位置保持試験におけるスクラム回数も含まれている。CRDM 収納部温度が 60 °C 未満の試験は予備試験に相当し、本試験初期 (No. 24 サイクル) に実施した。

HTTR 設計において、プラント寿命 20 年間における制御棒の想定駆動回数は、原子炉の停止・起動におけるストロークの長い挿入と引抜きがそれぞれ約 70 回と約 370 回、スクラムが 300 回である。CRDM 収納部温度が実機雰囲気条件である約 60 °C のときと、それよりも 10 °C 高い温度条件下での駆動回数を合計すると、通常の引抜きと挿入がそれぞれ約 8900 回、自由落下スクラムは約 840 回である。このうち、ストロークの非常に長い 3000 mm 以上の試験回数は、通常の引抜きと挿入がそれぞれ約 840 回、自由落下スクラムが約 810 回と、いずれも想定駆動回数を大幅に上回っている。このとき、通常の引抜き・挿入運転における C/R の位置制御において、設定値と指示値は CRDM 収納部の雰囲気温度によらずよく一致した。電磁クラッチ切離し自由落下スクラムでは、停止位置に対するオーバーランは 63 mm ~ 71 mm の範囲にあり、比較的短距離であった。このオーバーランは実用上問題のない距離である。また、直動スクラムではオーバーランはなかった。これらの試験における総移動距離は 14 km に達し、この間に挿入・引抜き不能は一度もなく、また、自由落下スクラム、直動スクラムともに確実に行われ、スクラム不能という事態は一度もなかった。

Fig. 4.1 に自由落下スクラムにおける制御棒位置の時間変化を示す。このときの設定ストロークは 3800 mm である。スクラムを開始してから遠心ブレーキにより一定挿入速度制御が行われ、設定位置近くで電磁ブレーキによる制動を開始して停止している。図ではスクラム時間は 11.5 秒であるが、本試験において設定ストロークが 3800 mm のときのスクラム時間は 10.5 秒から 12.5 秒の間であった。なお、HTTR 仕様では、最引抜き位置から炉心 80 % 挿入位置までのストロークは 2755 mm で、その挿入時間は 12 秒以下と規定している。これを Fig. 4.1 等の本試験結果から評価するとスクラム挿入時間は約 8 秒となり、十分に仕様を満足することが分かる。

また、Table 4.1 に示したように実機 CRDM 収納部温度よりも約 10 °C 高い約 70 °C の温度下でも試験を行ったが、この温度は AC サーボモータをはじめとする電気部品にとっては非常に厳しい試験温度である。それにもかかわらず CRDM 性能に変化はなく、本 CRDM は実機雰囲気温度よりも高い温度域においても十分な信頼性を有していることが明かとなった。

#### 4.2 C/R スクラム停止位置保持試験結果

試験は、案内管から流路管入口部にかけてのヘリウムガス温度が  $370^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$  の範囲において、流路管出口部のヘリウムガス温度を  $660^{\circ}\text{C} \sim 740^{\circ}\text{C}$  にした状態で 12 回、 $840^{\circ}\text{C} \sim 980^{\circ}\text{C}$  において 26 回実施した。

スクラム後、流路管出口部のヘリウムガス温度は約 15 分間で  $70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  ほど低下し、その後、徐々に温度は上昇するが、30 分を経過しても  $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  程度しか温度は回復しなかった。スクラム前の温度まで回復するのに 60 分から 120 分を要した。これは、流路管を含む試験部の熱容量が実機炉心に比べてはるかに小さいためである。また、制御棒を引抜くと、案内管温度と流路管入口部の表面温度は制御棒の熱容量により上昇したが、ヘリウムガスによる冷却により 60 分程度で元の温度に回復した。

スクラム直前の温度分布例を Fig. 4.2 に、スクラム挿入して引抜き直前の温度分布例を Fig. 4.3 にそれぞれ示す。このときの CRDM 収納部雰囲気温度は  $70^{\circ}\text{C}$  程度になるように設定してある。案内管入口部から流路管のヒータ加熱部にかけては案内管ヒータ及び  $T_{1-s}$  補償ヒータブロックで放熱を防止しており、その領域のヘリウムガス温度は案内管表面温度と流路管入口部温度にほぼ一致していると考えられる。一方、流路管のヒータ部と流路管下部の補償ヒータブロックではヘリウムガスを加熱するため、その領域では流路管表面温度とヘリウムガス温度に温度差を生じる。図中の流路管部の実線は、円管内の層流熱伝達式<sup>(7)</sup>を用いて予想したヘリウムガス温度を示したもので、C/R 温度もこのヘリウムガス温度分布とほぼ同じ分布であると考えられる。図にみられるように、C/R 下部は、スクラム直前には  $400^{\circ}\text{C}$  程度の温度状態にあり、引抜き直前の温度は  $800^{\circ}\text{C}$  以上の高温になっている。この温度分布から、C/R 要素とショックアブソーバーは、実機におけるスクラム後の温度分布とほぼ同じ状態にあると考えられる。また、S/P 内遮蔽体下部のヘリウムガス温度は約  $220^{\circ}\text{C}$  になっているが、S/P 内及び CRDM 下部では  $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  に維持されている。これは、S/P 内遮蔽体下部に設置された断熱層が有効に作用しているためと考えられる。

#### 4.3 ワイヤロープの伸び量測定結果

Fig. 4.4 にワイヤロープの伸び量の測定結果を示す。図中の温度は測定開始前にワイヤロープを曝していた案内管領域の平均ヘリウムガス温度で、また、試験開始前の絶対位置をゼロ点としてある。ワイヤロープの最大伸び量は、初めてワイヤロープを高温域に曝した No. 25 サイクルにおいて 16 mm、2 回目の高温試験となった No. 26 サイクルでは 11 mm、3 回目の高温試験の No. 27 サイクルでは 13 mm である。また、試験終了後に常温下で測定した結果では、No. 25 サイクルにおいて 7 mm、No. 26 サイクルにおいて 2 mm 伸びたままであった。

この原因は、約 0.3 mm の素線を縊り合わせて構成されているワイヤロープに、スクラム停止等の衝撃及び熱膨張が加わって素線の縊りが締まり、回復しない伸びを生じたためである。本試験を開始した No. 25 サイクル終了後にかなりの伸びあみられるのは、このサイクルから開始したスクラム停止等による衝撃力で素線の縊りがかなり締まったためと考えられる。

また、No. 26 サイクルにおいて 380 °C 付近での伸び量の変化分と試験終了後の伸び量はほぼ同じである。これは、熱膨張で緩りが締まっているものと考えられる。No. 27 サイクル終了後の伸びは測定していないが、その伸びは 420 °C 付近での伸び量の変化分に相当する値であると推定される。HTTR では、起動前後に C/R を引抜いて絶対位置を検出し、ワイヤロープの伸び量を補正する必要がある。

#### 4.4 圧力損失測定結果

Fig. 4.5 に制御棒チャンネルの圧力損失測定結果を示す。これらは、案内管、流路管等のヒータを加熱しない常温下での測定結果である。そのため、ここでの測定結果は流路の摩擦損失と形状抵抗による圧力損失を示している。また、図中の  $\Delta P_1$  と  $\Delta P_3$  には制御棒入口・出口部における流路の急縮小と急拡大の影響をそれぞれ含んでいる。

図にみられるように、制御棒チャンネルの圧力損失は制御棒下部のショックアブソーバーで最も大きく、入口部の圧力損失はかなり小さいことが分かる。測定合計値 ( $\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$ ) は、流量が相当地に大きい 40 g/sec のときに約 290 Pa、流量の少ない 10 g/sec のときには 20 Pa 程度である。

ところで、HTTR の制御棒チャンネルの流量は約 18 g/sec であるが、この流量における本試験の測定合計値 ( $\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$ ) はわずかに 80 Pa 程度である。実際のチャンネルではヘリウムガスが昇温するために、速度増加に伴う加速損失が加わる。制御棒が挿入された領域で 400 °C から 950 °C までヘリウムガスが昇温するという条件で加速損失を計算すると 20 Pa 以下になり、上記の測定結果の 25 % 以下である。また、制御棒が完全に引抜かれたときの圧力損失を円管の摩擦損失計算式<sup>(8)</sup>を用いて計算すると、加速損失を加えても 20 Pa 以下である。ちなみに、燃料チャンネルの圧力損失は、実機流量とほぼ同じ 10 g/sec において、入口・出口ヘリウムガス温度が約 250 °C と 750 °C のときに約 1700 Pa である<sup>(2)</sup>。このことから、制御棒の挿入・引抜きによる圧力損失の変化は燃料チャンネルに比べて相当に小さく、燃料体のヘリウムガス流量配分に影響することはないと考えられる。

#### 4.5 部品供用後検査結果

CRDM 構成部品の健全性を確認するために、部品を全数分解して検査を行った。以下に主要な結果について述べる。

##### (1) 外観・寸法検査

圧力容器から取り出した後の CRDM の外観を Photo. 4.1 と 4.2 に示す。CRDM 各部品に錆の発生は認められなかったが、フランジ面には多少の付着物がみられた。この付着物を発光分光による定性分析、X線マイクロアナライザーによる定量分析及び化学成分分析で調べたところ、鉄及び酸素が強く検出され、クロム、マンガン、ニッケルといった一般炭素鋼の成分も検出された。この結果から付着物は、ヘリウムガスによって運ばれてきた鉄の酸化物(鉄サビ)

や、後述するウォーム減速機中間歯車の歯面が摩耗して生じた粉であると考えられる。

Photo. 4.3 と 4.4 にドラム機構部の正面と側面の外観を、Photo. 4.5 と 4.6 に分解した後のドラムの外観を示す。Photo. 4.6 はドラムの側面写真で、摺動ストッパーがガイドされる螺旋溝の概況を示している。ドラムのワイヤロープと接触する部分、螺旋溝、ガイドプリー等々に摩耗等の異常は見られなかった。ただし、ドラム表面に焼付け処理した固体被膜潤滑剤には、スクラム停止時のワイヤロープの締めり作用により固体被膜潤滑剤の被膜が除去されている部分が若干認められた。また、遠心ブレーキのブレーキシュー、それに取り付けられるスプリング板等に異常な摩耗、変形、へたり等は見られなかった。摺動ストッパーにも異常はみられなかった。

Photo. 4.7 にモータ機構部の外観を、Photo. 4.8 にウォーム減速機歯車の外観を、Photo. 4.9 に取り外した歯車の外観を示す。ウォーム減速機の歯車を除いては異常な摩耗や損傷はみられなかった。ウォーム減速機の歯車については、とくに、中間歯車に相当な摩耗がみられた。これは歯車の歯面の硬度が浸炭焼入れをした歯車の標準値の約  $1/2$  という低い値で製作していたことと、駆動試験の過程において歯面の固体被膜潤滑剤が摩滅して金属表面が直接接触したことが原因と考えられる。実機では中間歯車は使用されないが、この点を考慮して歯面の硬度を高めるとともに、歯面の潤滑方法として固体被膜潤滑剤とともにグリース等の使用が不可欠と考えられる。また、ウォール減速機のウォールホイール側に偏荷重または集中荷重によると思われる局部的な摩耗が若干見られた。しかし、ベアリング、軸、キー溝等に異常は認められなかった。

ワイヤロープの素線で切れているものは全長にわたって1本もなく、また、ワイヤロープ素線の金属内部組織に変化は見られなかった。そのほか、AC サーボモータ、電磁クラッチ、電磁ブレーキ、リミットスイッチ、ポテンショメータ等の電気部品にも異常はみられず、その絶縁抵抗値も HENDEL 据付時の検査記録と変化なく、電気部品が健全であることを確認した。

Photo. 4.10 に C/R の全体外観を、Photo. 4.11 に最下段の C/R 要素の外観を、Photo. 4.12 にショックアブソーバーの外観を示す。各部品とも表面が酸化して黒色に変色しているものの、傷、割れ等の有害な欠陥は認められなかった。また、C/R 要素のガイドフィン部表面の容射コーティング部にも、割れ、剥がれ等の異常はみられなかった。この部分を顕微鏡で断面観察をしたが、気孔率、皮膜と母材間部のアルミナ残留率等の組織状態には供用前後で顕著な違いは認められず、また、皮膜と母材間の割れ、空隙等の欠陥は発生していなかった。C/R 各部の供用前後の寸法を比較すると、約 0.1 mm 程度のばらつきで一致しており測定誤差を考慮すると変形はほとんど発生していない。被覆管の真直度、真円度も  $1/100$  mm のオーダであり、変形はほとんど発生していない。

## (2) 強度試験

ワイヤロープの引張破断試験用のテストピースを5本製作して、常温引張破断試験を行った。テストピースは、ドラム部の捨て巻き部と、ヘリウムガスに最高 100 °C、250 °C 及び 450 °C に曝された部分の4本と使用していないバージン材の合計5本である。450 °C に曝されたテストピースは、C/R との接続部の端末処理部（スウェーピング加工）を含んでいる。結果を Table 4.2 に示す。使用したワイヤロープから製作した4本のテストピースの破断荷重はバー



ジン材よりも最高 2000 N 程度低下しているが、いずれもまだ仕様値の 2700 N を上回っている。また、C/R との接続部の末端処理部は、引張試験においてもワイヤロープ側が先に破断して、ワイヤロープが金具部から抜け出すことはなかった。

制御棒要素の母材（インコイ 800 H）の強度を供用前と供用後について比較するため、外側及び内側被覆管より幅 6 mm、長さ 27 mm の試験片を切り出して常温引張試験を実施した。比較材は、被覆管と同部位のものを切り出したバージン材である。その結果を Table 4.3 に示す。供用した外胴及び内胴の引張強さは供用前のものとは ± 10 % 程度の違いがあるが、0.2 % 耐力及伸びは供用前後でほとんど変化していない。

一方、スパインについては、バージン材がないため材料購入時の材料試験データを参考として比較した。その結果を Table 4.4 に示す。伸びは材料試験データの 54 % に対して供用材料は 40.2 % と約 14 % ほど低下していたが、引張強さ 596 MPa、0.2 % 耐力 214 MPa と材料試験データと ± 数 % で一致した。

Table 4.1 Total operation number of CRDM

Temperature at CRDM	Operation mode		Operation number	Total driving distance (mm)
below 60°C	Normal operation	Insertion	767	219,920
		Drawing out	761	219,320
	Scram	AC motor	12	30,000
		Free falling	20	66,351
around 60°C	Normal operation	Insertion	4,204	2,641,010
		Drawing out	4,199	2,639,700
	Scram	AC motor	24	60,000
		Free falling	324	1,217,250
around 70°C	Normal operation	Insertion	4,738	2,942,850
		Drawing out	4,737	2,939,900
	Scram	AC motor	9	25,019
		Free falling	524	1,862,975

Table 4.2 Rupture test results of wire rope

Item	Rupture weight (N)
Sample No. 1 (~450°C)	22,600
Sample No. 2 (~250°C)	23,500
Sample No. 3 (~100°C)	24,500
Sample No. 4 ( drum )	22,600
Virgin	24,500

Table 4.3 Tensile test results of control rod element

Item	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Outer tube No.1	248	589	49.5
Outer tube No.2	239	585	49.5
Virgin No.1	247	581	49.0
Virgin No.2	270	589	49.0
Inner tube No.1	247	581	49.0
Inner tube No.2	270	589	49.0
Virgin No.1	244	584	52.5
Virgin No.2	237	582	52.5

Table 4.4 Tensile test results of spine

Item	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Spine No.1	212	595	40.3	59.1
Spine No.2	215	596	40.0	57.1

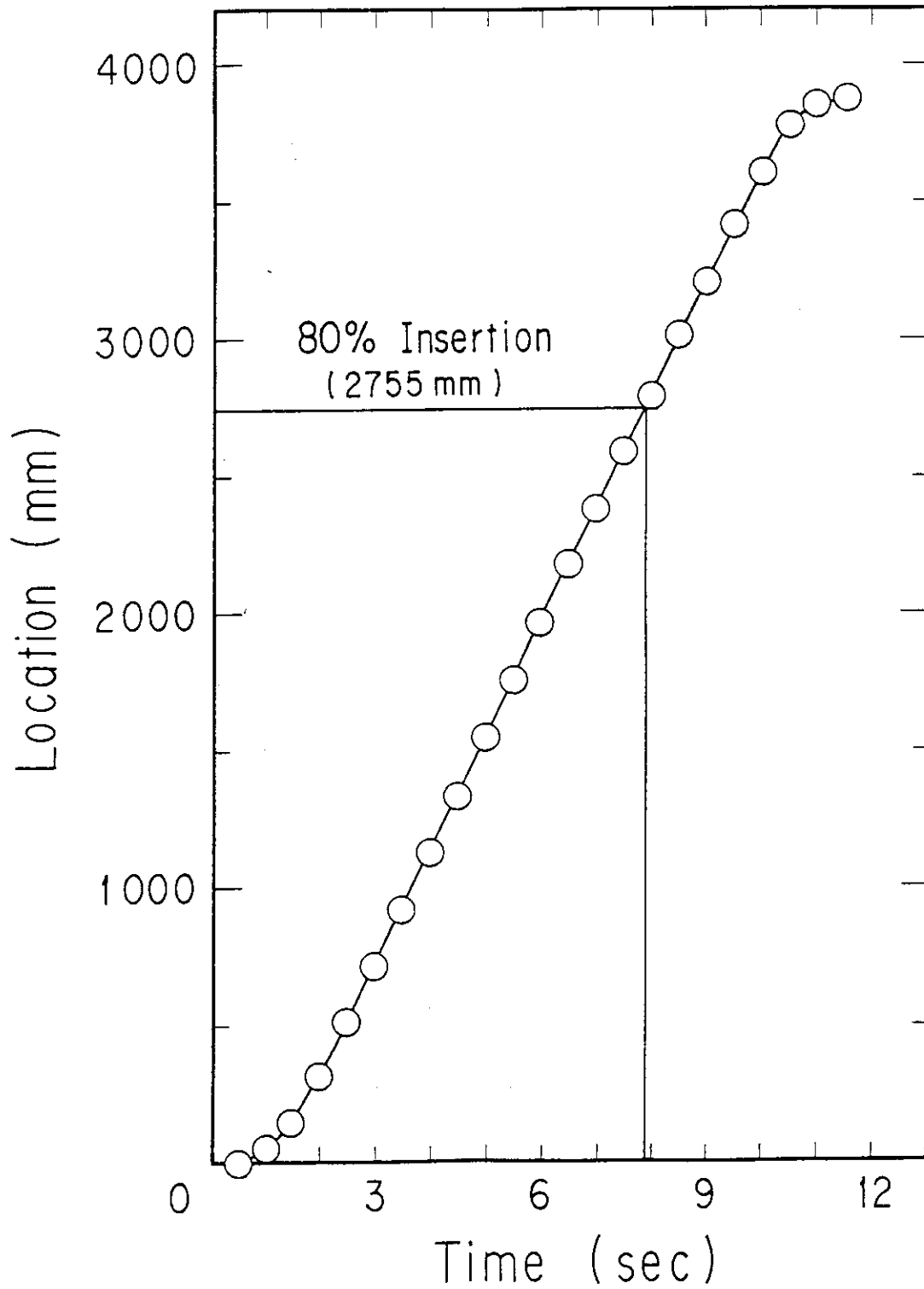


Fig. 4.1 Relation between C/R location and insertion time at free falling scram

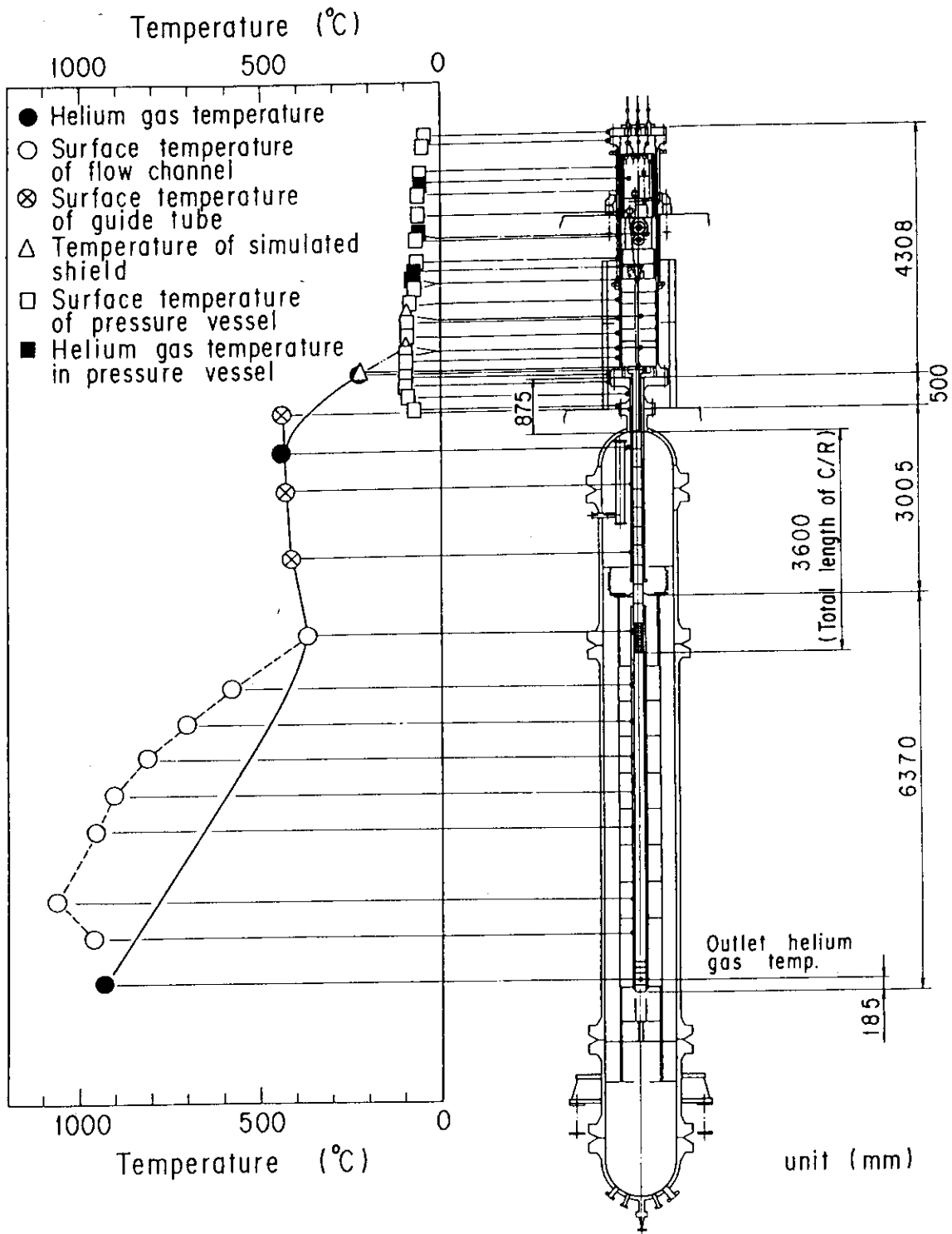


Fig. 4.2 Temperature distribution just before scram

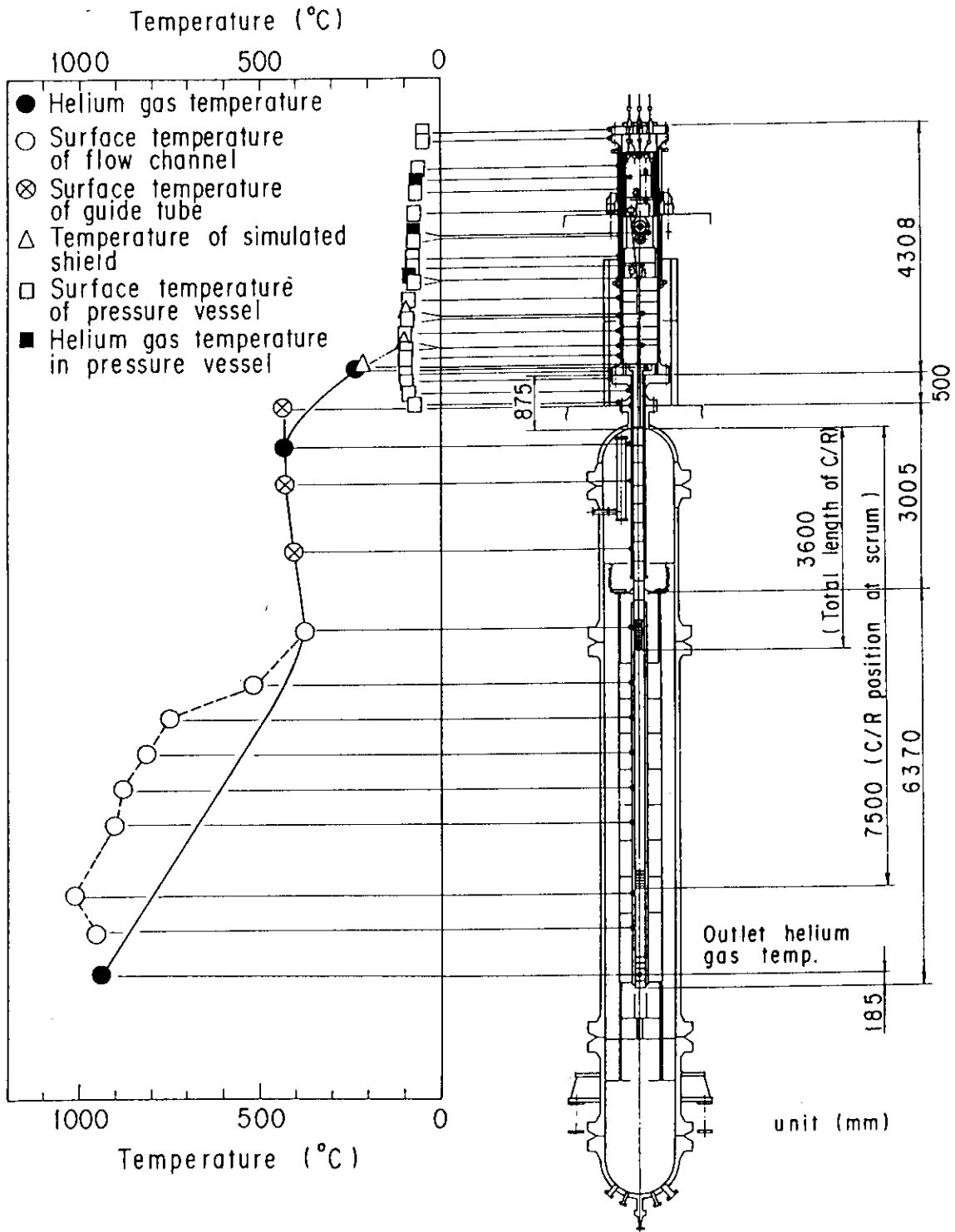


Fig. 4.3 Temperature distribution just before C/R drawing out

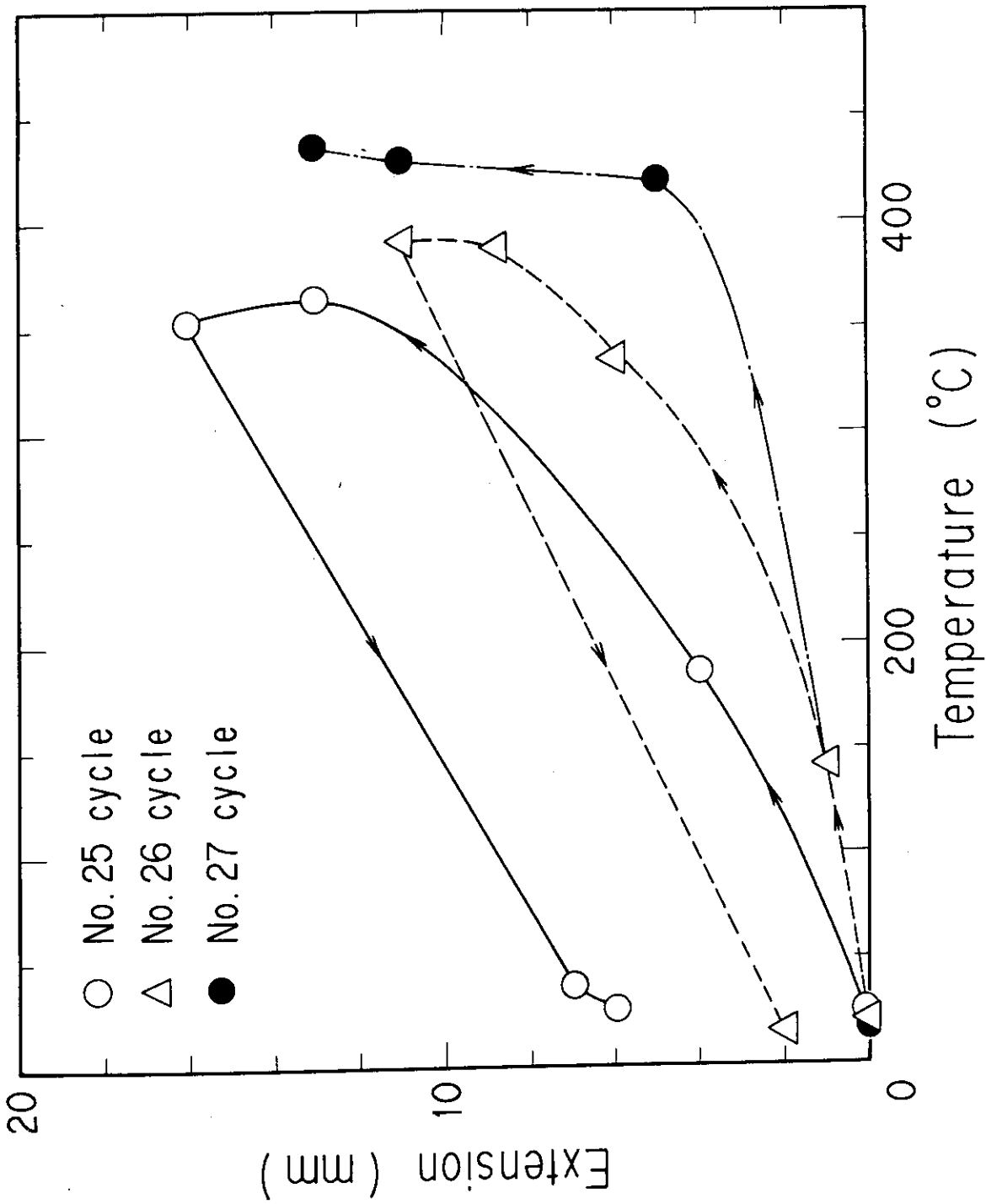


Fig. 4.4 Relation between extension and helium gas temperature at guide tube inlet

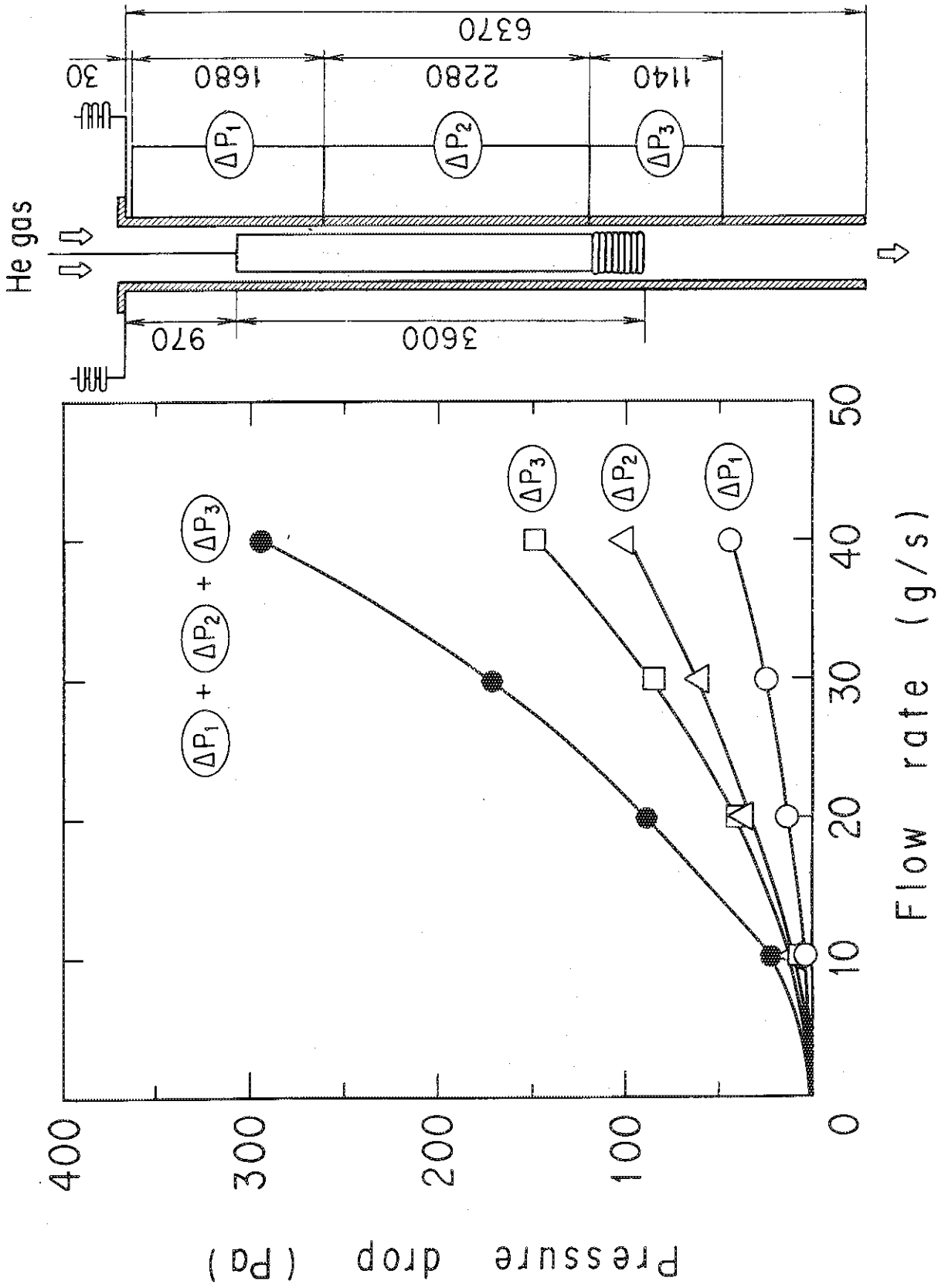


Fig. 4.5 Relation between pressure drop and flow rate



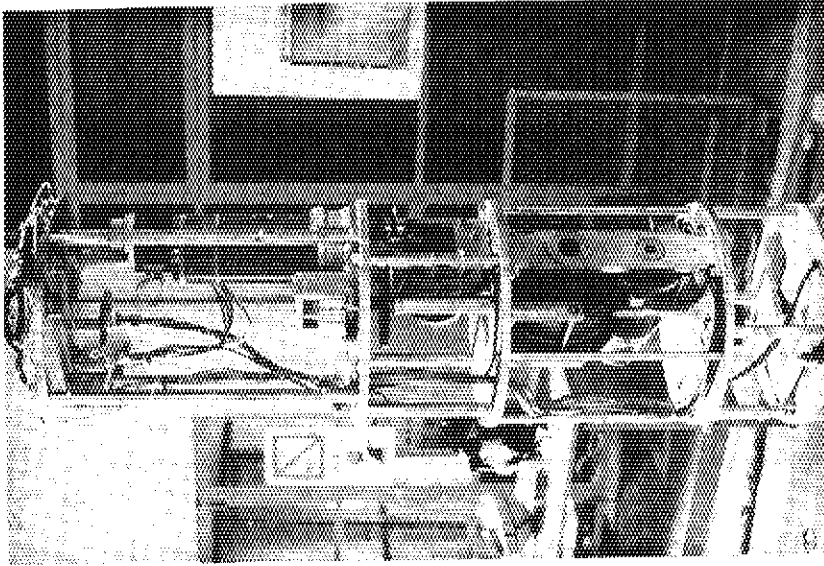


Photo. 4.2 Appearance of CRDM after dismantling (II)

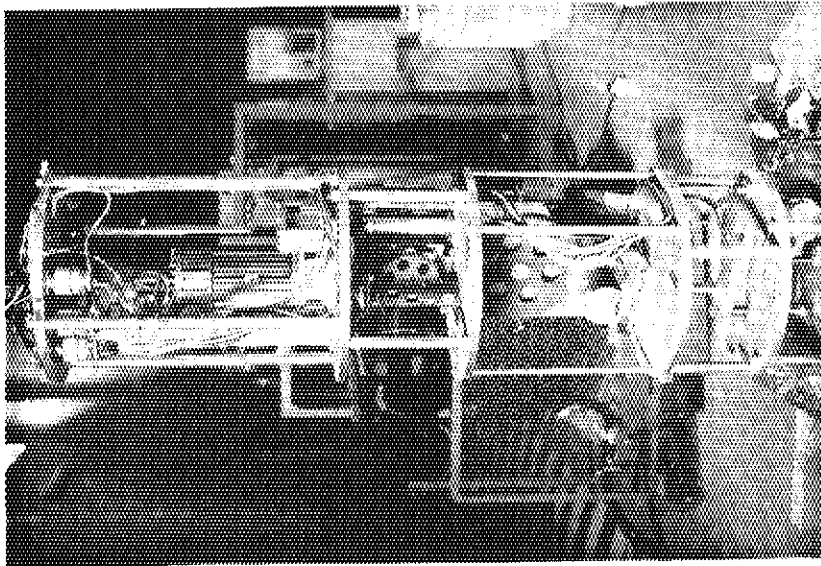


Photo. 4.1 Appearance of CRDM after dismantling (I)

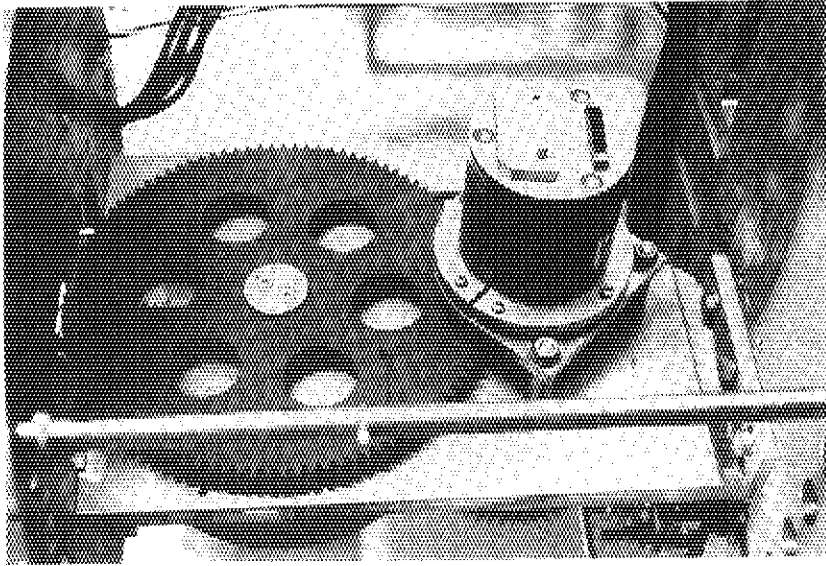


Photo. 4.4 Side view of drum mechanism

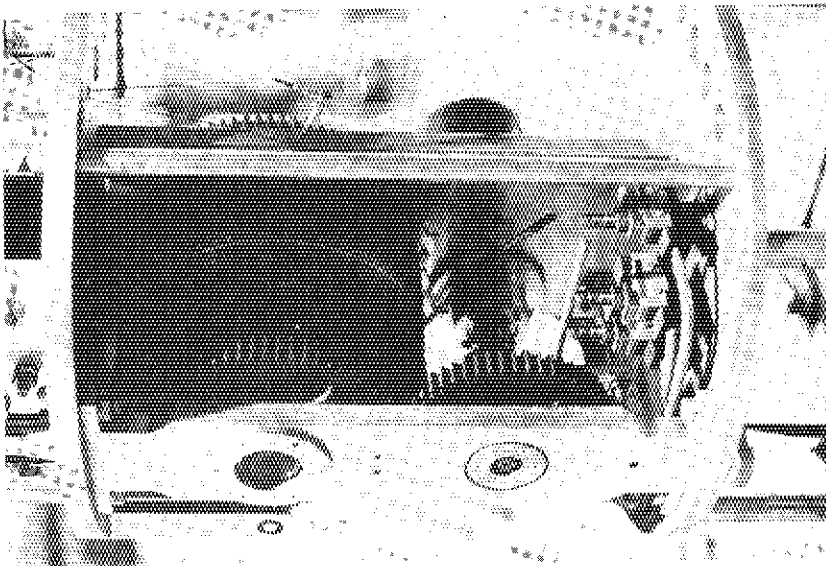


Photo. 4.3 Front view of drum mechanism

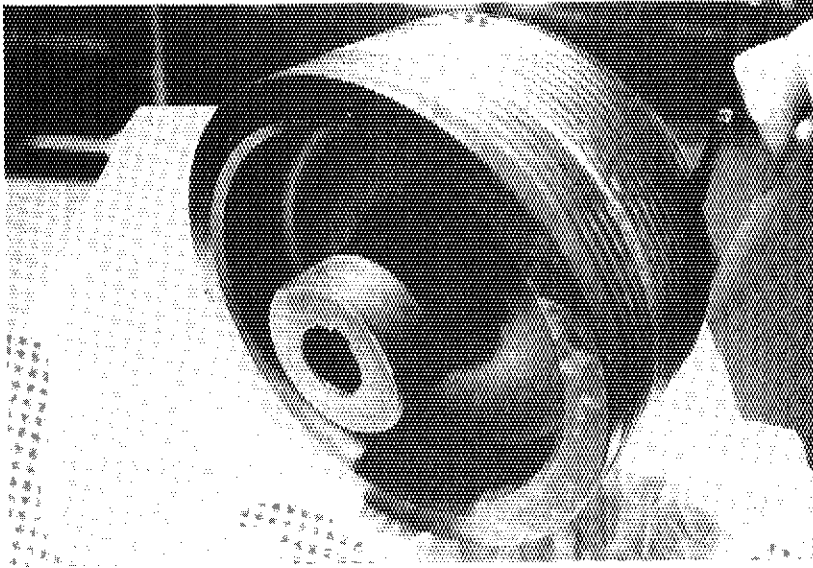


Photo.4.5 Appearance of drum

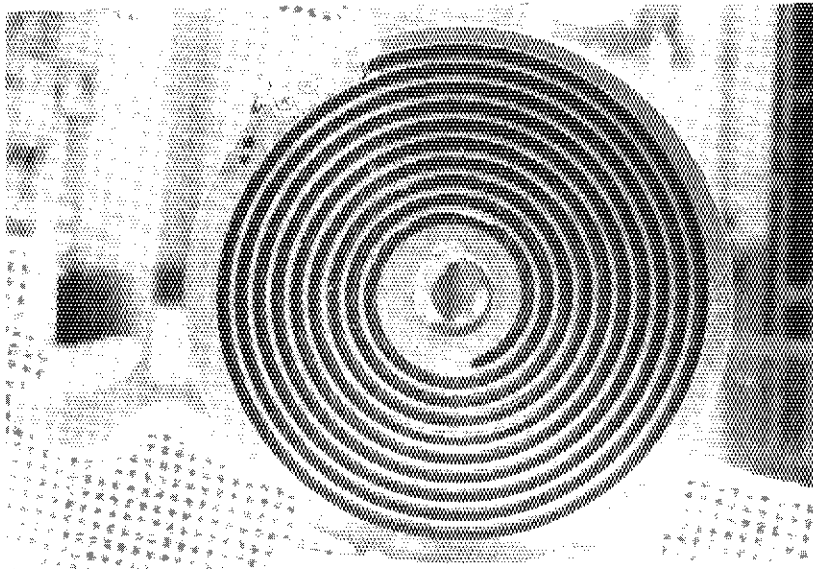


Photo.4.6 Side view of drum

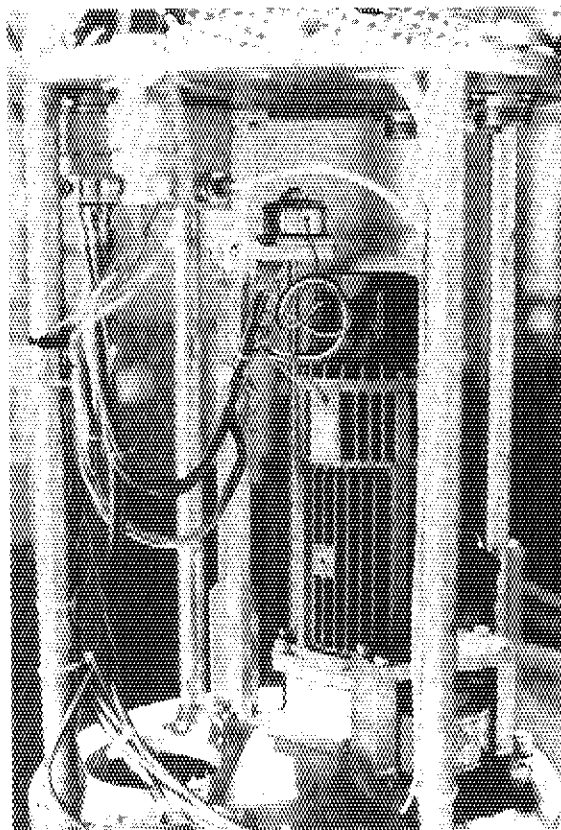


Photo. 4.7 Appearance of motor mechanism

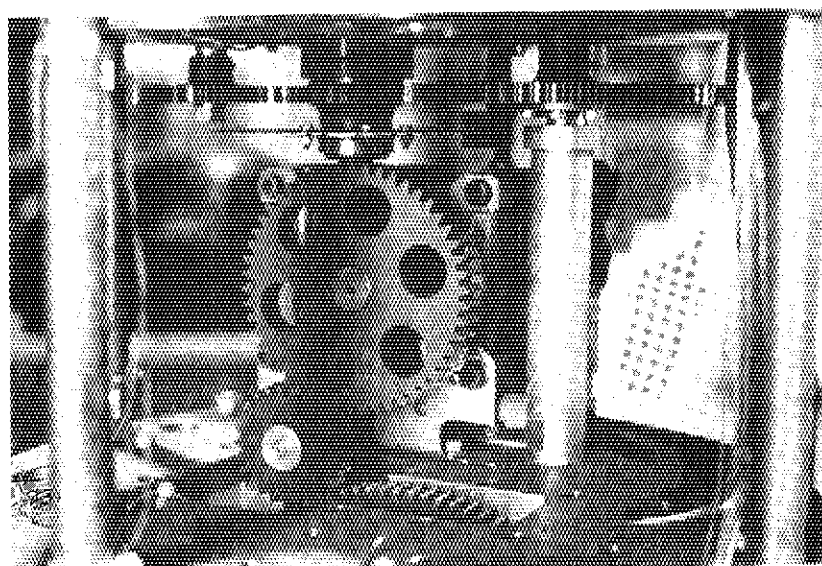


Photo. 4.8 Appearance mounting in worm reduction gear

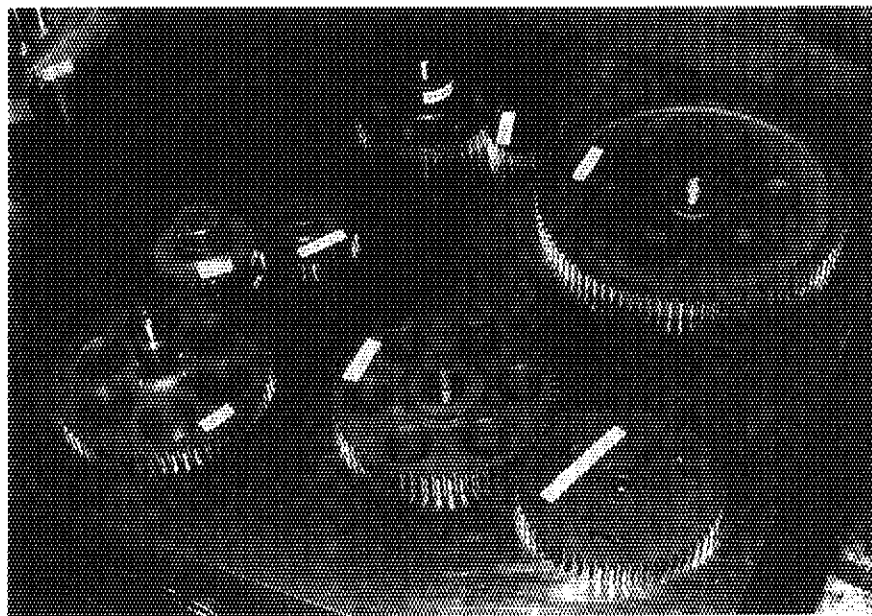


Photo. 4.9 Appearance of gears  
after dismantling

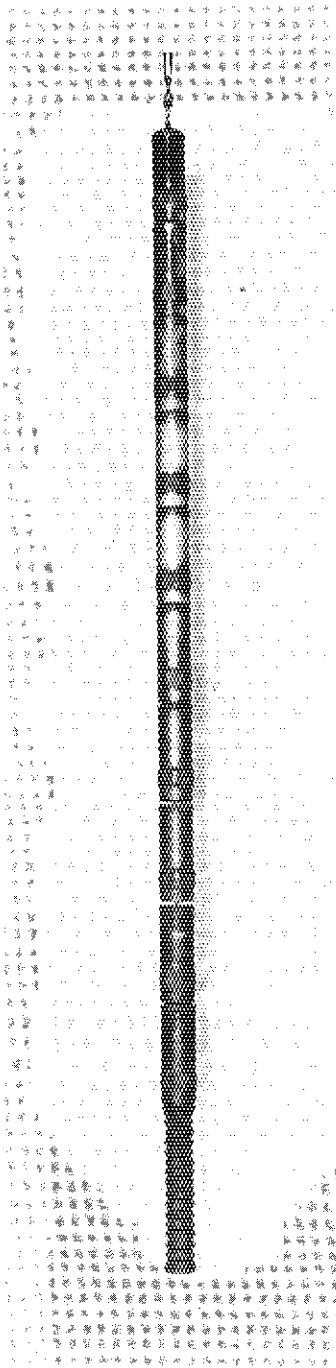


Photo. 4.10 Appearance of control rod after tests

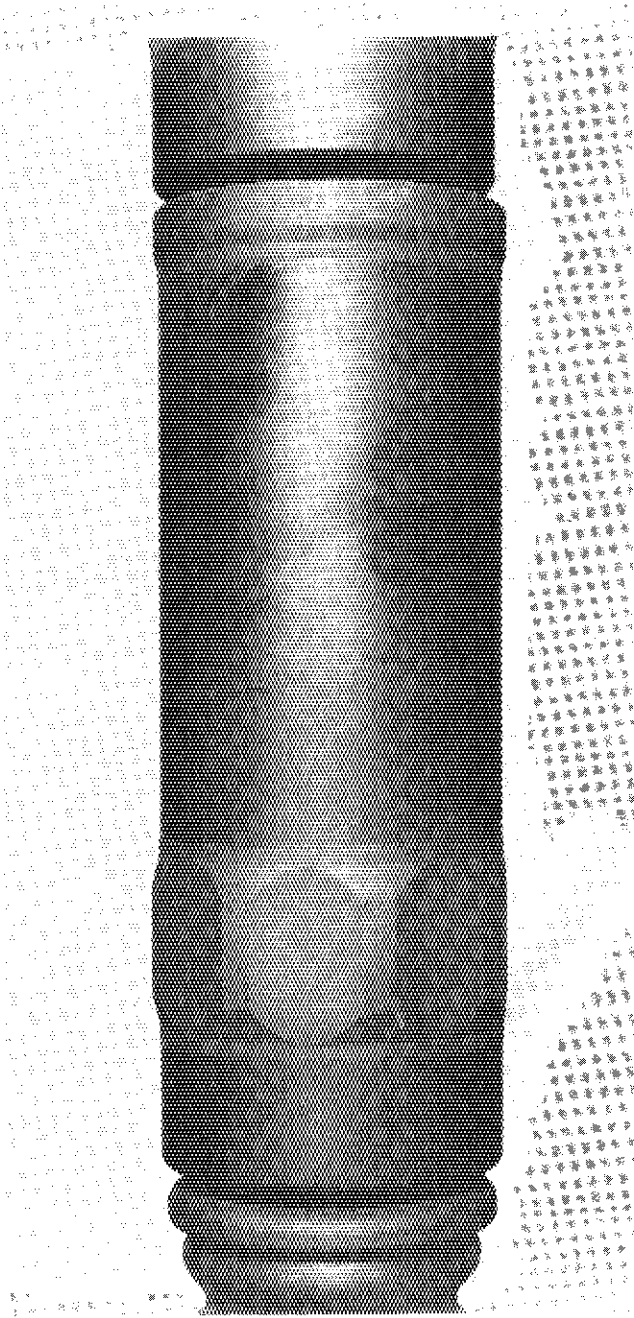


Photo. 4.11 Appearance of control rod element above shock absorber

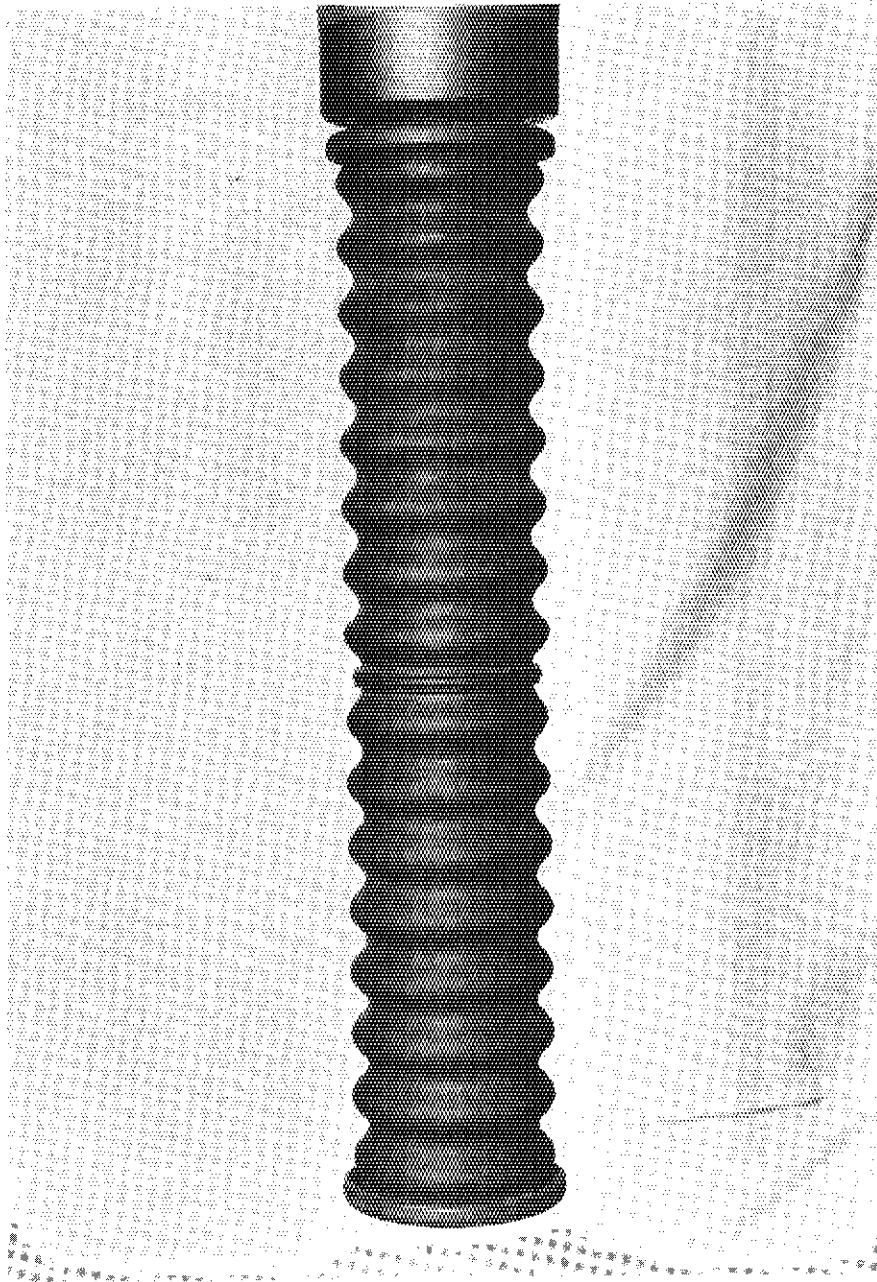


Photo. 4.12 Appearance of shock absorber

## 5. 結 論

HENDEL の燃料体スタック実証試験部の 1 チャンネル試験装置に CRDM と C/R を設置して、HTTR の運転条件と同じ温度・圧力条件のもとで、通常駆動特性、スクラム特性、制御棒の熱衝撃試験等を実施し、さらに、試験後に部品供用後検査を行った。それにより、次の結果が得られた。

- (1) 実機雰囲気条件を模擬した条件下での CRDM 駆動回数は、実機のプラント寿命 20 年間の想定駆動回数を大幅に上回り、試験期間中に挿入不能、引抜き不能、スクラム不能という事態は一度もなかった。
- (2) 通常駆動運転において、C/R の位置制御は設定値と指示値はよく一致した。電磁クラッチ切離し自由落下スクラムにおけるオーバーランは 63 mm ～ 71 mm の範囲にあり、実用上問題のない距離であった。
- (3) ワイヤロープは試験終了後に回復しない伸びを生じたが、これはスクラム停止等の衝撃や熱膨張により素線の撓りが締まったためと考えられる。
- (4) 制御棒の挿入・引抜きによる圧力損失の変化は極めて小さく、燃料体のヘリウムガス流量配分に影響することはない。
- (5) CRDM 構成部品及び C/R にとくに異常は認められず、健全であった。

上記の結果から、CRDM と C/R は HTTR 運転条件下においても十分な性能と耐久性を有していることが明らかとなった。

## 謝 辞

本試験の遂行に多大なご協力を頂いた原研の安野武彦高温工学部長、HENDEL 開発試験室高瀬和之氏、HENDEL 管理室、HTTR 建設室並びに (株) 東芝の関係者各位に深く感謝いたします。



## 5. 結 論

HENDELの燃料体スタック実証試験部の1チャンネル試験装置にCRDMとC/Rを設置して、HTTRの運転条件と同じ温度・圧力条件のもとで、通常駆動特性、スクラム特性、制御棒の熱衝撃試験等を実施し、さらに、試験後に部品供用後検査を行った。それにより、次の結果が得られた。

- (1) 実機雰囲気条件を模擬した条件下でのCRDM駆動回数は、実機のプラント寿命20年間の想定駆動回数を大幅に上回り、試験期間中に挿入不能、引抜き不能、スクラム不能という事態は一度もなかった。
- (2) 通常駆動運転において、C/Rの位置制御は設定値と指示値はよく一致した。電磁クラッチ切離し自由落下スクラムにおけるオーバーランは63mm～71mmの範囲にあり、実用上問題のない距離であった。
- (3) ワイヤロープは試験終了後に回復しない伸びを生じたが、これはスクラム停止等の衝撃や熱膨張により素線の縊りが締まったためと考えられる。
- (4) 制御棒の挿入・引抜きによる圧力損失の変化は極めて小さく、燃料体のヘリウムガス流量配分に影響することはない。
- (5) CRDM構成部品及びC/Rにとくに異常は認められず、健全であった。

上記の結果から、CRDMとC/RはHTTR運転条件下においても十分な性能と耐久性を有していることが明らかとなった。

## 謝 辞

本試験の遂行に多大なご協力を頂いた原研の安野武彦高温工学部長、HENDEL開発試験室高瀬和之氏、HENDEL管理室、HTTR建設室並びに(株)東芝の関係者各位に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所： 高温工学試験研究の現状 (1989) .
- (2) 高瀬, 丸山, 日野他： 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験 (I), HENDEL 1チャンネル試験装置による一様発熱試験の結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 28, No.5, pp. 428 (1986) .
- (3) Maruyama, S., Takase, K., Hino, R. et al. : " Experimental studies on the thermal and hydraulic performance of the fuel stack of the VHTR, Part 1 : HENDEL single-channel tests with uniform heat flux ", J. Nucl. Eng. Des., Vol. 102, pp. 1 (1987) .
- (4) 日野, 高瀬, 丸山他： 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験 (IV), HENDEL 1チャンネル試験装置による高温試験結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 30, No.4, pp. 343 (1988) .
- (5) 多目的高温ガス実験炉設計室： 「多目的高温ガス実験炉設備設計の概要 - 詳細設計 (II) に基づく -」, JAERI-M 84-210 (1984) .
- (6) 井澤, 高瀬, 丸山他： 「燃料体スタック実証試験部 (HENDEL T<sub>1</sub>) の概要と建設」, 日本原子力学会誌, Vol. 27, No.12, pp. 1136 (1985) .
- (7) 内田秀雄編： 伝熱工学, 裳華房, pp. 105 (1975) .
- (8) 古屋善正, 他： 流体工学, 朝倉書店, pp. 104 (1974) .