

「ふげん」用制御棒駆動装置の試作

Development of Control Rod Drive Mechanism for Advanced Thermal Reactor

佐々木 正 祥*
Masayoshi Sasaki

前 谷 弘 道*
Hiromichi Maetani

副 島 宏 之***
Hiroyuki Soejima

石 川 良 雄**
Yoshio Ishikawa

佐 藤 春 夫*
Haruo Satô

要 旨

新形転換炉原型炉「ふげん」用制御棒駆動装置は、ステンレス・ワイヤロープの先端に制御棒をつるし、これを巻胴に巻き上げるワイヤドラム方式のものである。このたび制御棒および同駆動装置を試作し、一連の開発試験を実施した。スクラム用の電磁クラッチおよび軸封用のメカニカル・シールについて、まず単独にて部品試験を実施し、その結果により試作した制御棒駆動装置を実機を模擬した水流動条件下で性能試験した。試作機のスクラム(急速そう入)特性はストローク 4,500 mm の 80%, そう入時間が 1.65 秒以下であり、緩衝時の制御棒のはね上がりも無く、安全の要求を満足する良好な性能が得られた。ヘリウム・パージガス・シール用のメカニカル・シールは無潤滑状態で使用されたが、ヘリウムガスの漏えい量はきわめて少なく、350 h 運転後で 20 cc/h 以下であった。

1. 緒 言

このたび動力炉・核燃料開発事業団からの受注により、ナショナル・プロジェクトとして開発が進められている新形転換炉原型炉「ふげん」用の制御棒および制御棒駆動装置⁽¹⁾を試作し、一連の開発試験を実施した。制御棒は中性子吸収材の炭化ボロン (B_4C) 粉末を充填(じゅうてん)した細管を二重円筒形にたばねたものであり、制御棒駆動装置はステンレス・ワイヤロープの先端に制御棒をつるし、これを巻胴に巻き上げるワイヤドラム方式のもので、制御棒を炉心中に出し入れすることにより、原子炉の起動、停止および出力調整を行なうものである。制御棒駆動装置の開発に際し、スクラム用の電磁クラッチおよびヘリウム・パージガス・シール用のメカニカル・シールについては、それぞれ単独に部品試験を実施した。試作した制御棒および制御棒駆動装置は、実機の使用条件を近似した水流動条件下において常駆動特性、スクラム特性およびその他の項目について性能試験が行なわれた。以下に部品試験の方法、結果、試作制御棒および制御棒駆動装置の仕様、構造ならびに性能などについて述べる。

2. 制 御 棒

「ふげん」の制御棒には反応度の長期的変動の補償および原子炉の緊急停止を行なうためのシム安全棒と、原子炉出力の微調整を行なう領域出力調整棒の 2 種類があるが両者は全く同一の仕様および構造となっている。

2.1 主 要 仕 様

- 中性子吸収材
- 炭化ボロン (B_4C) 粉末
- ポ イ ズ ン 管
- SUS 27 TP
- ポイズン部長さ
- 3,700 mm
- 主 要 材 質
- SUS 27
- 外 形 寸 法
- 85φ×6,600 mm

2.2 構造および機能

制御棒の構成は 図 1 に示すとおりである。制御棒は B_4C 粉末を充填したポイズン管を 図 1 に示すように、二重円筒形にたばね、下端

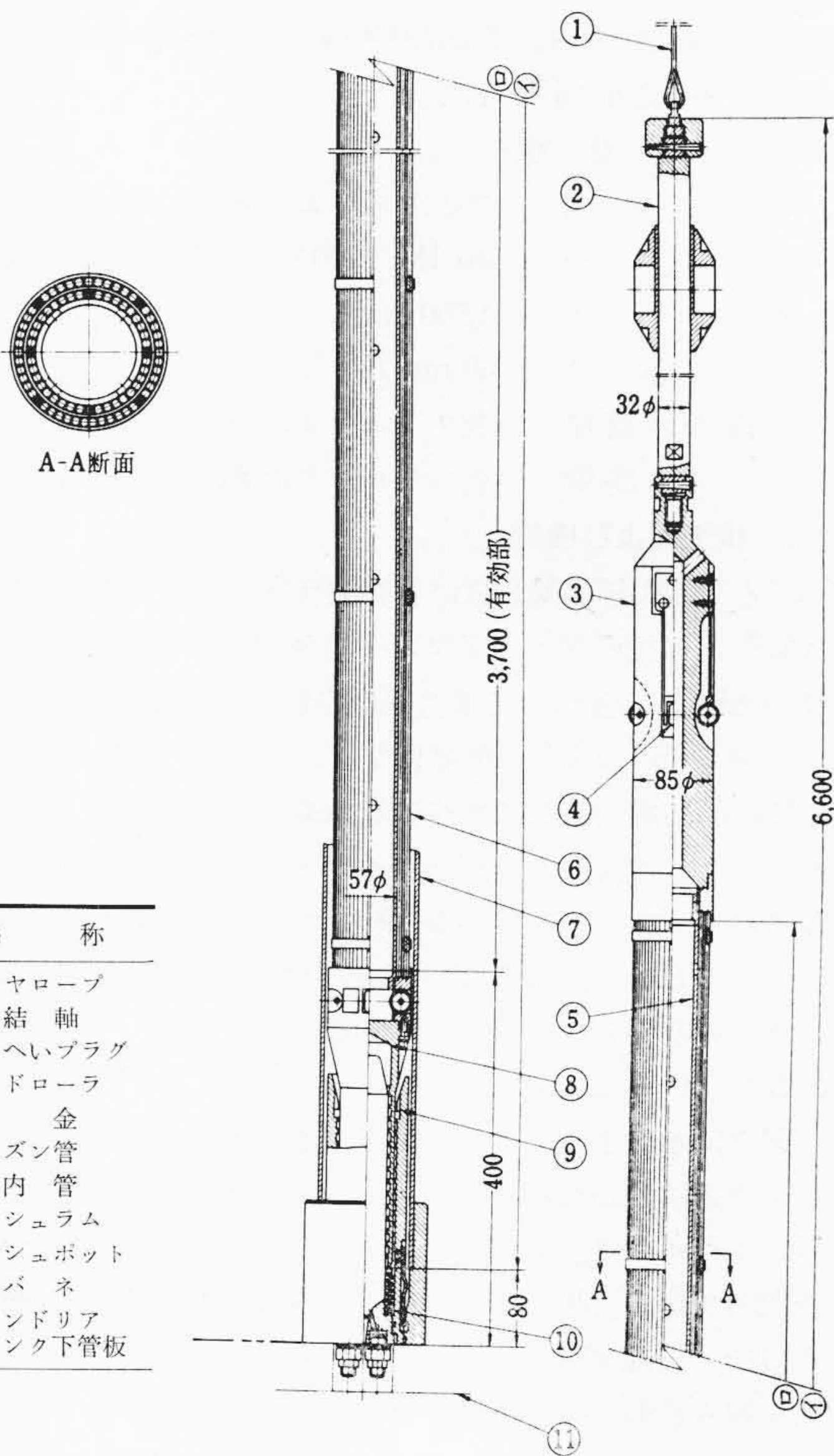


図 1 制 御 棒

にはダッシュラム、上部には遮蔽(しゃへい)プラグその他を取り付けたものである。原子炉の緊急停止の際、制御棒は自重により炉心中に急速落下する。このとき落下完了直前において制御棒下端のダッシュラムがカランドリア・タンク下管板上のダッシュポットにそう入され、落下エネルギーは水力的に吸収される。ダッシュポットは材料試験炉(JMTR)の制御棒駆動装置⁽²⁾を参考にして設計され、ダッシュラムのダッシュポットとの隙間(すきま)寸法の異なるもの

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所日立研究所
*** 日立製作所大みか工場

4種類を製作試験し、比較検討した。制御棒上部の遮蔽プラグは炉心から放射線が案内管内を通して上方に漏えいするのを防止するものである。制御棒は内径95mmの案内管中を上下動する。制御棒を案内管中心に保ち、同時に制御棒の振動を防止するため、制御棒の上下に各4個のガイドローラが設けてある。制御棒の上端はワイヤロープで制御棒駆動装置に結び付けられている。

3. 制御棒駆動装置

制御棒駆動装置には制御棒に対応して、シム安全棒駆動装置および領域出力調整棒駆動装置があるが、「ふげん」においては両者は全く同一の構造を持っている。「ふげん」の炉心平面における制御棒の配列は、炉心中心に1本、炉心中心に対称に48本合計49本あるが、炉心を四つの領域に分け、各領域から1本合計4本を選定して、領域出力調整棒として使用することになっている。

「ふげん」用制御棒駆動装置は図2(a)からわかるように、原子炉のかなり上方に配置され、その駆動ストロークは4.5mである。この配置および機能上の条件を満たすものとして、ワイヤドラム—電磁クラッチ形の機構が選定された。動力炉用のワイヤドラム—電磁クラッチ形制御棒駆動装置の例としては、コルダーホール^{(3)~(5)}、EDF-1⁽⁶⁾、ハンターストン⁽⁶⁾、SSEB⁽⁷⁾、LATINA⁽⁸⁾、AGR⁽⁹⁾などの炭酸ガス冷却炉およびDRAGON⁽¹⁰⁾、EGCR^{(11)~(13)}その他のヘリウム冷却高温ガス炉がある。

3.1 主要仕様

形 式	ワイヤドラム—電磁クラッチ形
電 動 機	3φ IM, 200V, 60 Hz, 電磁ブレーキ付き
ス ト ロ ーク	4,500 mm
駆 動 速 度	60 mm/s
位置指示精度	全ストロークの±1%
スクラム時間	全ストロークの80% そう入時間2秒以内

3.2 構造および機能

ふげん用制御棒駆動装置は日立製作所における王禅寺臨界実験装置(OCF)その他のワイヤドラム—電磁クラッチ形制御棒駆動装置開発の経験⁽¹⁴⁾に基づいて設計製作された。制御棒駆動装置の機構骨組は図2(b)および外観は図3に示すとおりである。「ふげん」用制御棒駆動装置の特長は後述の加減速機構とダッシュポットとの組合せにより、前述のガス炉のワイヤドラム—電磁クラッチ形制御棒駆動装置のスクラム時間が5~9秒^{(3)~(6)~(13)}であったのに対し、全ストロークの80% そう入時間が2秒以内という軽水炉よりさらに短いスクラム時間を達成した点にある。

3.2.1 ケーシング

図2に示すようにケーシングは上部気密ケーシングと下部ケーシングとに分かれる。下部ケーシングは開放形であり、内部に巻胴、ベベルギヤ、テンション・プーリおよびガイド・プーリなどを収めている。下部ケーシング下端には厚さ約200mmの遮蔽体を設け、上部ケーシングとの隔壁とともに炉心部から漏えいする放射線を遮蔽する。下部ケーシングまではカランドリア・タンク内のヘリウム・カバー・ガスと重水蒸気が上がってくるので、この中の部品はすべてステンレス鋼製とし、ベベルギヤおよびベアリングは無給油で使用しなければならない。

上部気密ケーシングを貫通する電気ケーブル・コネクタには気密形を使用し、軸貫通部にメカニカル・シールを用いている。上部気密ケーシング内には常時乾燥ヘリウム・パージ・ガスを吹き込み、内部の乾燥を保っている。これにより上部気密ケーシング内の機器には通常のものが使用できる。

3.2.2 駆 動 部

駆動モータの回転力は減速機、電磁クラッチ、ボールスクリュ

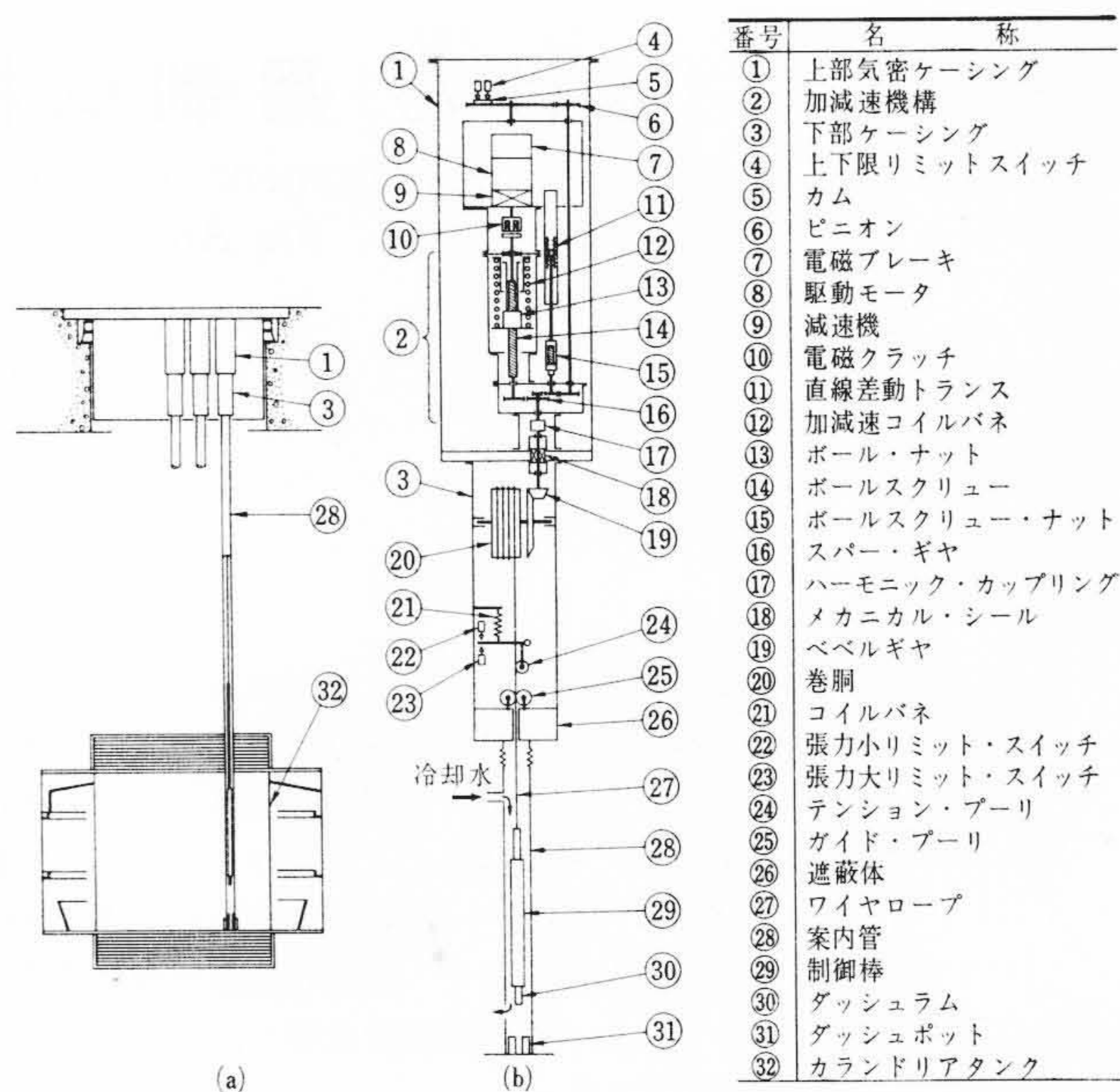


図2 制御棒駆動装置骨組図

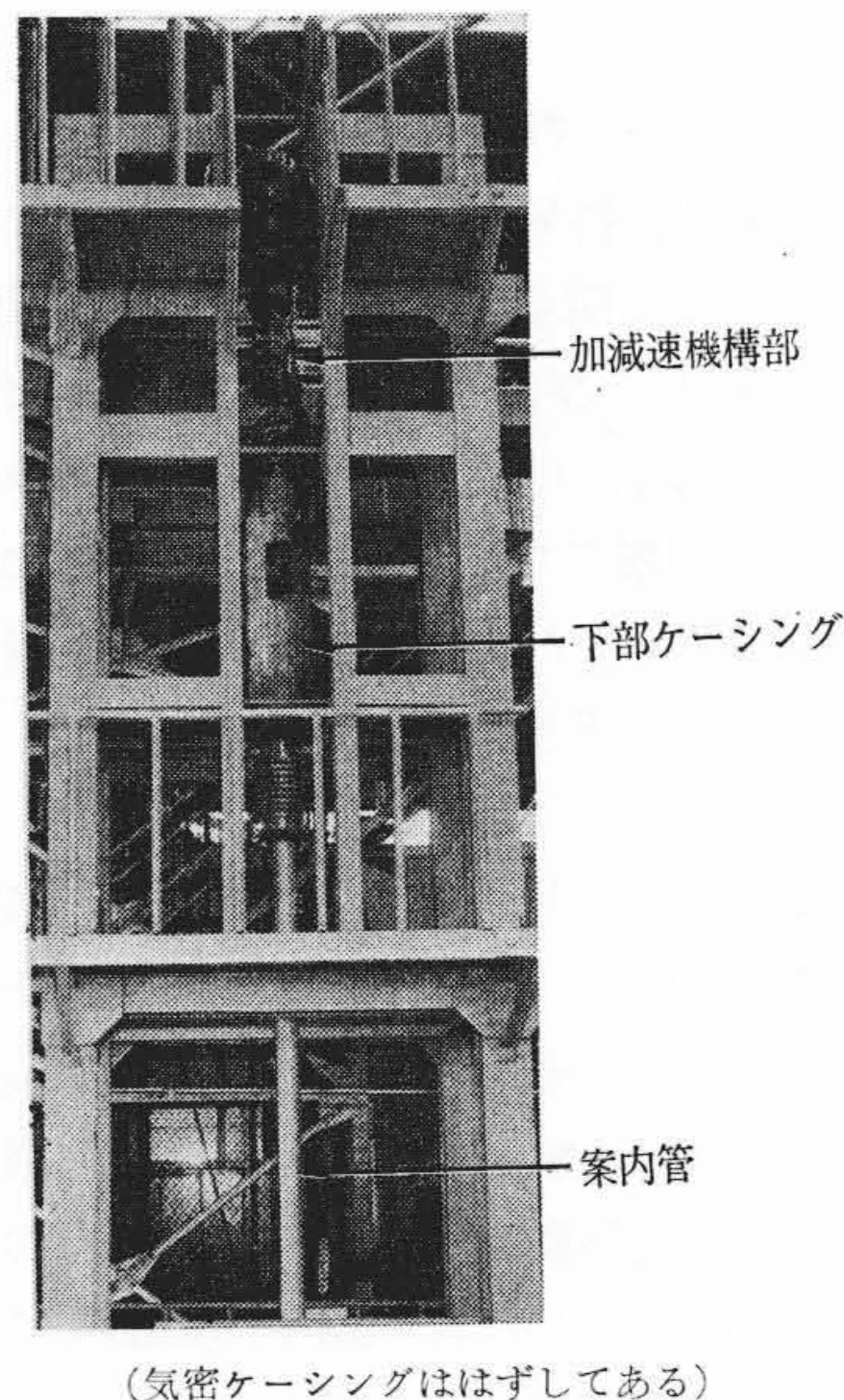


図3 試験中の制御棒駆動装置

ー、スパー・ギヤ、ハーモニック・カップリングおよびベベル・ギヤを経て巻胴に伝えられ、ステンレス・ワイヤロープにつるした制御棒を巻き上げ、または巻き降ろす。巻上げの際ボールスクリュに係合するボールナットは加減速コイルばねを圧縮し、スクラム時の加速用エネルギーをたくわえる。ハーモニック・カップリングは巻胴と加減速機構との相対関係を最適値に調整するものである。ワイヤロープの張力過大または過小はテンション・プーリのリミット・スイッチにより検出される。駆動モータ直結の電磁ブレーキは通電開形であり、駆動モータの電源を断てば制御棒の位置を一定に保持することができる。

3.2.3 スクラム機構

スクラムは電磁クラッチを消勢して制御棒の重力落下により行なわれるが、この際、加減速コイルバネの推力はボールスクリュ・ナット機構により回転力に変換され、巻胴およびこれに連動する回転部分の摩擦力および慣性に打ち勝って巻胴を回転し、制御棒の自由落下を妨げないように作用する。制御棒が完全そう入位置から1,000mm上の点以下に落下すると、加減速コイルバネ

はボールスクリュ・ナット機構により再び圧縮され、巻胴に巻上げ方向の回転力を与え、ワイヤロープのゆるみを防止するとともに、制御棒の落下運動エネルギーを吸収し、減速作用を行なう。加減速コイルバネの加速または緩衝時の圧縮量は調整可能であり、最適値に設定できるようになっている。制御棒のダッシュラムがカランドリア・タンク下管板上に設けたダッシュポット内にはいると、制御棒は水力学的に緩衝され、次いで皿(さら)バネにより緩衝されその上に静止する。なお制御棒は任意の位置からのスクラムが可能である。

スクラム中の制御棒位置信号は直線差動トランス式位置検出器の場合は制御棒の動きに1対1に対応しているが、シンクロ式位置検出器の場合は受信器のサーボ系追従速度の関係で数秒の遅れがある。

3.2.4 位置検出器

制御棒位置の検出器としては直線差動トランス式とシンクロ式の両方式について試作試験した。

(1) 直線差動トランス式位置検出器

図2(b)に示すように、ボールスクリュ・ナット機構により駆動軸の回転を直線運動に変換し、直線差動トランスのコアを動かし、二次コイルの誘起電圧を整流して位置指示計の入力とする方式である。直線差動トランスの励磁電源には2kHz矩(く)形波安定化電源を使用し、位置指示計には日立VIP₅₃形自動平衡式横形指示計を使用した。

(2) シンクロ式位置検出器

図2のボールスクリュ・ナット機構と直線差動トランスを取りはずし、代わりにシンクロ発信器を取り付け、受信部はサーボシンクロ機構によりポテンショメータを回転し、その出力電圧を位置指示計の入力とする方式である。ポテンショメータとしては信頼性を高めるために2連のものを使用した。

3.2.5 リミット・スイッチ

駆動装置の最上部に設けた回転カムにより、制御棒の上限および下限を検出するリミット・スイッチを作動させる。テンション・プリー機構部にはワイヤロープの張力過大および過小を検出するリミット・スイッチが設けてある。このリミット・スイッチは重水蒸気中で使用されるので、完全密封形を採用している。各リミット・スイッチはそれぞれ2個並列に使用され、機構の信頼性を高めている。

4. 部 品 試 験

制御棒駆動装置試作品の設計および性能試験に先だて、以下に述べる重要構成部品の単体試験を行なった。

4.1 電磁クラッチ

電磁クラッチおよびその励磁電源回路の特性は、スクラム時間の短縮に重大な影響を及ぼすので、電磁クラッチの静摩擦トルク特性、切離し時間特性および温度上昇特性を測定した。

4.1.1 静摩擦トルク特性

図4は静摩擦トルク特性を示したものである。定格は励磁電流1.25Aにおいて静摩擦トルク5kg・mであり、30%の余裕がある。一方、制御棒駆動装置の負荷トルク計算値は4kg・mである。

4.1.2 切離し時間特性

電磁クラッチ励磁電源のON、OFFはトランジスタを使用する場合と、電磁リレーを使用する場合の両方について検討した。

使用トランジスタは新電元2SC412で、コレクタ・エミッタの最大定格電圧は200Vである。コンデンサ容量を100または150μFとしたときの切離し時間特性は図5に示すとおりである。図5よりコンデンサ容量は100μF、抵抗は40~70Ωが最適値であ

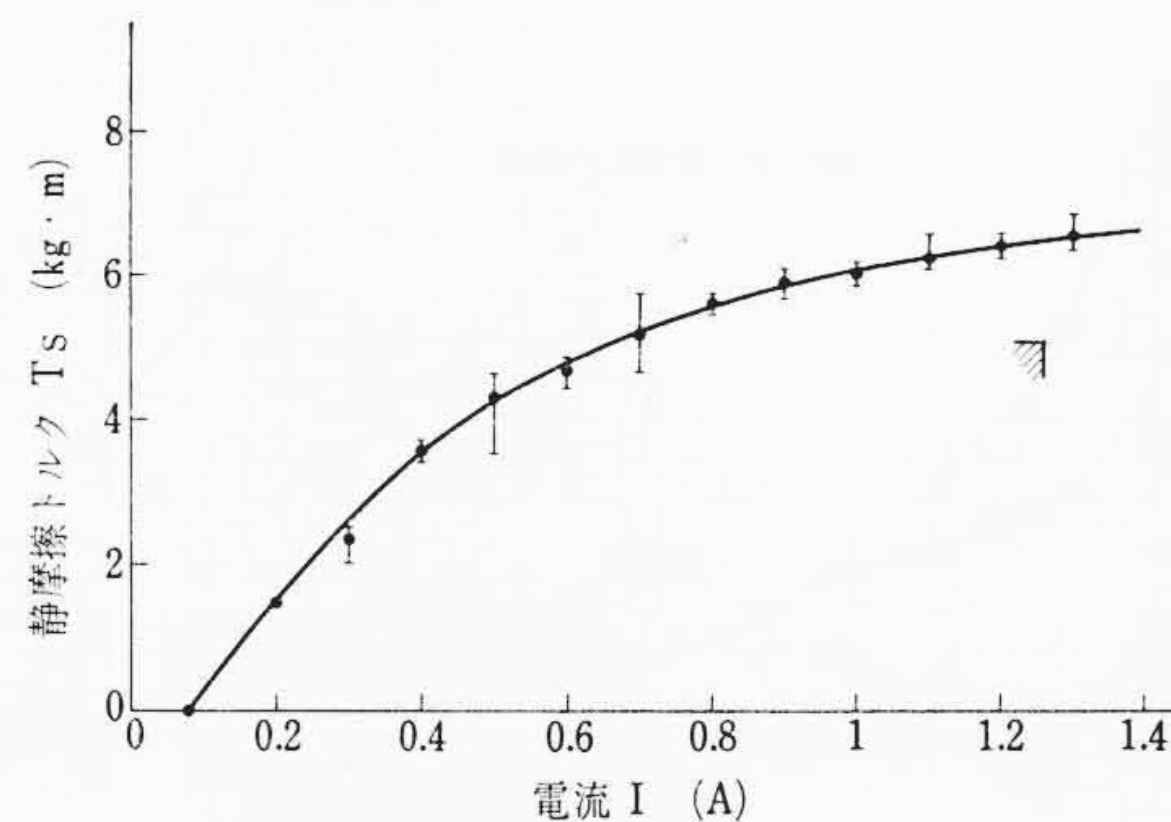


図4 静摩擦トルク特性

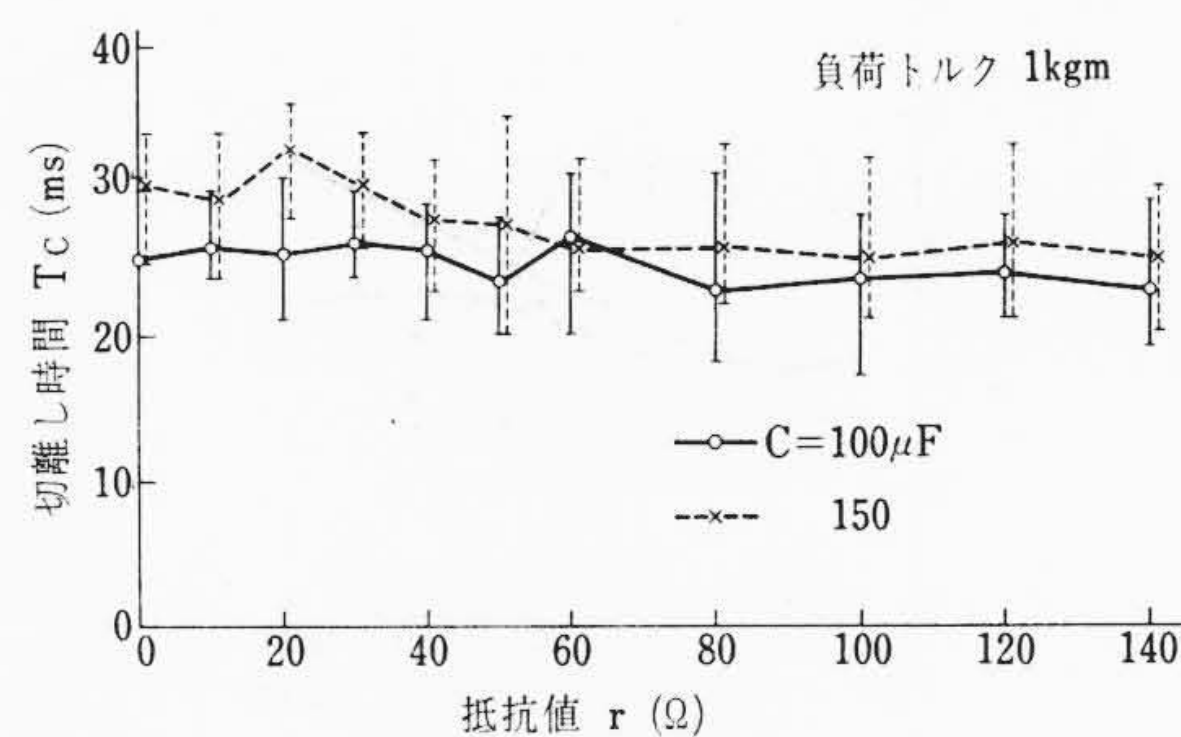


図5 切離し時間特性

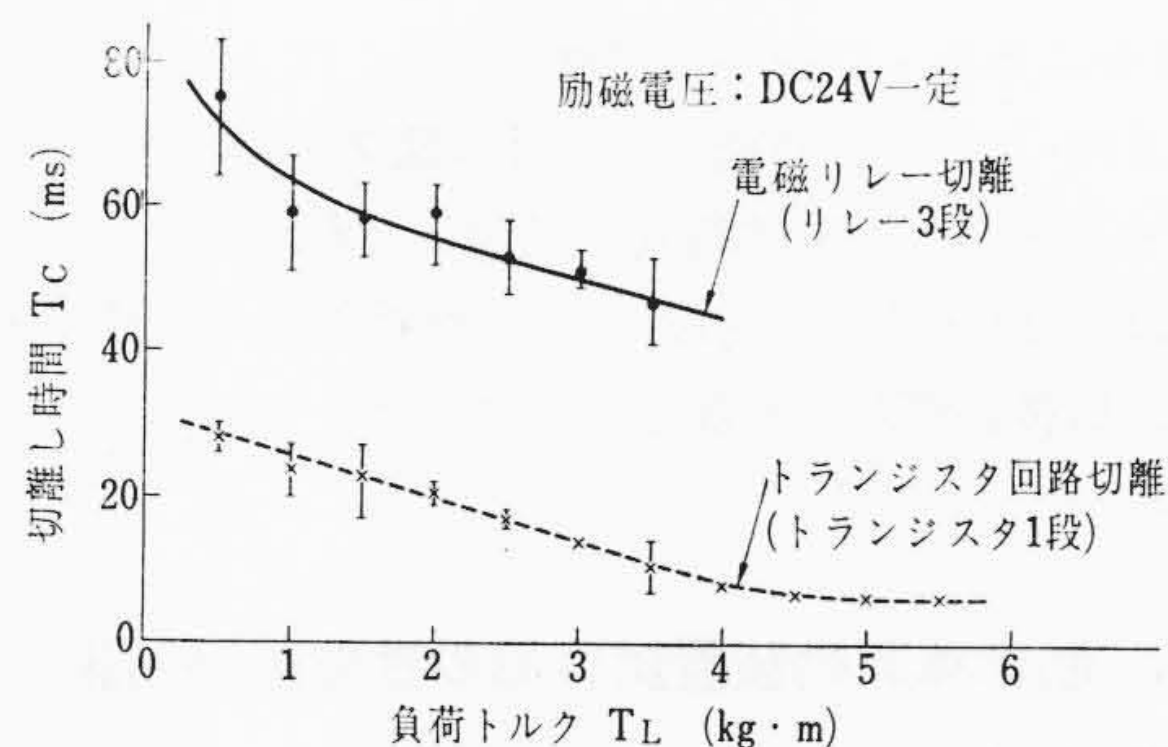


図6 負荷トルク一切離し時間特性

ることがわかる。前記条件における負荷トルク一切離し時間特性は図6に示すとおりである。図6よりトランジスタを使用するとリレーより約35ms早く切り離されることがわかる。

4.1.3 温度上昇特性

室温29℃のとき電磁クラッチに24Vの定格電圧を加えて放置した場合、電磁クラッチの最高温度は57℃であった。なお、温度上昇10℃あたり約6%の静摩擦トルクの低下が認められた。

4.2 メカニカル・シール

「ふげん」用制御棒駆動装置においては、前述のように主要機構部を気密ケーシングに封入し、ヘリウム・ガス・パージを行ない、機構部品の重水蒸気による劣化を防止している。この気密ケーシングを貫通する駆動軸シール用のメカニカル・シールの摩擦トルク、漏れ量および寿命について検討するためメカニカル・シールを単独で実機を模擬した条件下で試験した。

4.2.1 メカニカル・シール試験装置

メカニカル・シール試験装置は、制御棒駆動装置の運転を、引抜き→そう入→引抜き→スクラムのサイクルの繰返しと仮定し、これに対応するメカニカル・シールの回転数、常駆動19.2rpm、スクラム960rpmで繰返し運転するようになっている。

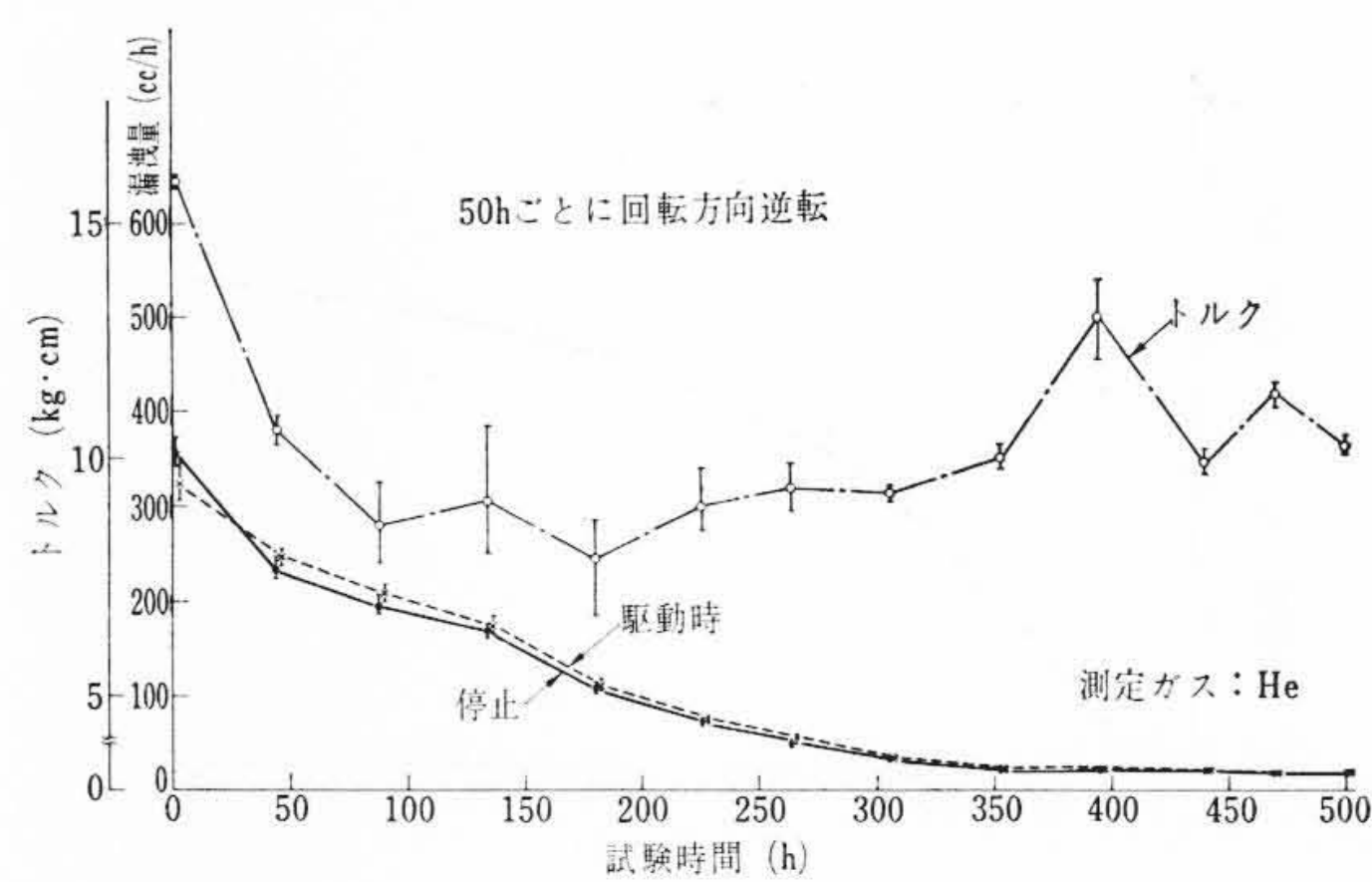


図7 メカニカル・シールの連続運転特性

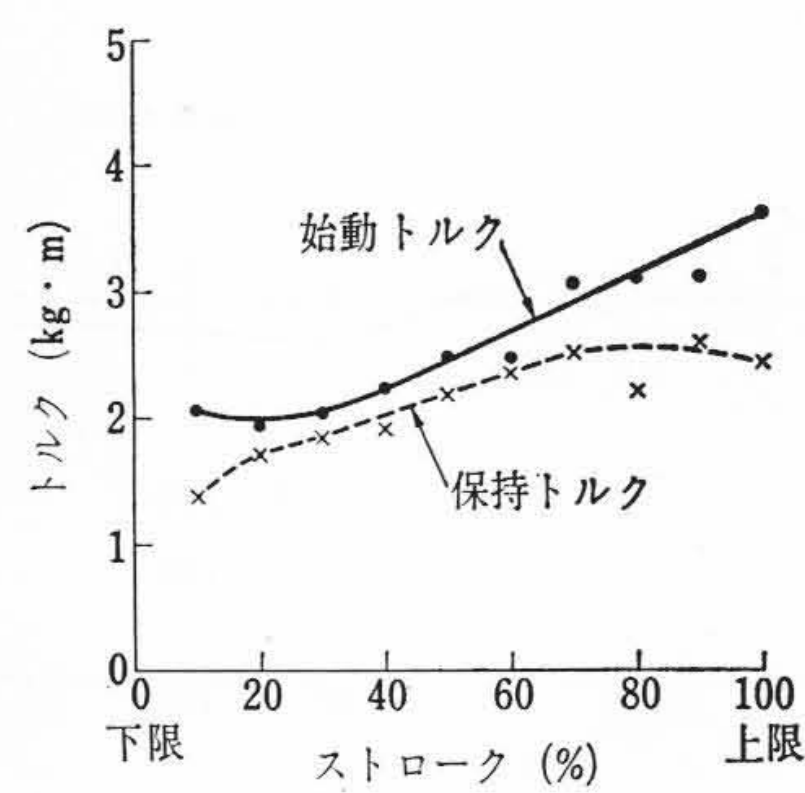


図8 負荷トルク特性

4.2.2 メカニカル・シールの特性

メカニカル・シールの連続運転特性は図7に示すとおりである。ヘリウム・ガス漏えい量は時間の経過とともに減少し、約350時間以後はほぼ20cc/hに落ち着いた。摩擦トルクは約180時間まで低下し、以後わずかに増加した。これはなじみによるものと考えられる。

5. 制御棒駆動装置試作品の性能試験結果

5.1 負 荷 ト ル ク

まず駆動モータを取りはずし、電磁クラッチ軸のトルクを測定した。測定結果は図8に示すとおりである。測定の際、制御棒の冷却水は流さなかった。保持トルクは制御棒の静止状態を保つに必要なトルク、始動トルクは制御棒が引抜き方向に動き始めるトルクである。始動トルクが下限付近で少し大きく、20%付近で最低となり、上限に近づくに従って大きくなるのは、加減速コイルバネが圧縮されるためである。

5.2 常 駆 動 特 性

5.2.1 駆 動 速 度

駆動速度の測定値は表1に示すとおりである。制御棒の上昇速度は冷却水流量にほとんど関係なく60.9~61.1mm/sであった。下降速度は冷却水流量の増大に従って61.8mm/sから62.4mm/sにわずかながら増大した。

5.2.2 応 答 特 性

スイッチ投入後、駆動モータに電流が流れ始めるまでの時間および制御棒始動時間は表2に示すとおりである。制御棒引抜きの際はスイッチ投入後、制御棒が動き始めるまでに0.124~0.530秒かかる。そう入方向ではいくぶん速く0.075~0.240秒である。

5.3 スクラム特性

スクラム位置および冷却水流量をパラメータとして、制御棒始動時間、時間一変位特性、加速度、ダッシュポット内圧力およびスクラム完了時間を測定した。冷却水を流すスクラム特性試験において

表1 制 御 棒 駆 動 速 度

冷却水流量 (m ³ /h)		駆 動 速 度 (mm/s)	誤 差 (%)
19.4	上 昇	61.1	1.83
	下 降	62.4	4.00
15.0	上 昇	61.1	1.83
	下 降	62.2	3.67
10.0	上 昇	61.0	1.67
	下 降	61.9	3.17
5.0	上 昇	61.0	1.67
	下 降	61.9	3.17
0	上 昇	60.9	1.50
	下 降	61.8	3.00

表2 制御棒駆動装置の応答特性

	循環水流量 (m ³ /h)	モータ電流が流れ始 める時間 (s)	制御棒始動時間 (s)
制 御 棒 上 昇	19.4	0.044~0.070	0.175~0.530
	10.0	0.045~0.070	0.124~0.315
	0	0.041~0.075	0.129~0.260
制 御 棒 下 降	19.4	0.020~0.030	0.095~0.205
	10.0	0.015~0.030	0.079~0.240
	0	0.020~0.035	0.075~0.240

表3 スクラム始動時間

制御棒切離し位置 (mm)	試 験 No.	制御棒始動までの時間 (ms)
4,500	1	52
	2	51
	3	60
4,100	1	58
	2	66
	3	55
3,600	1	65
	2	66
	3	60
2,700	1	63
	2	68
	3	66
1,800	1	67
	2	72
	3	72
900	1	60
	2	68
	3	73

試験条件 1. 冷却水流量：0
2. 電磁クラッチ励磁回路：電磁リレー

は、案内管の外面にリード・リレーを置き、制御棒に取り付けた永久磁石でこれを作動させ、制御棒位置を検出した。加速度の測定にはスリット付きの案内管を使用した。

5.3.1 制御棒始動時間

スクラム信号がはいってから制御棒が始動するまでの時間は表3に示すとおりである。電磁クラッチ電源回路に電磁リレーを使用し、冷却水流量0の場合、始動時間は0.051~0.072秒であった。

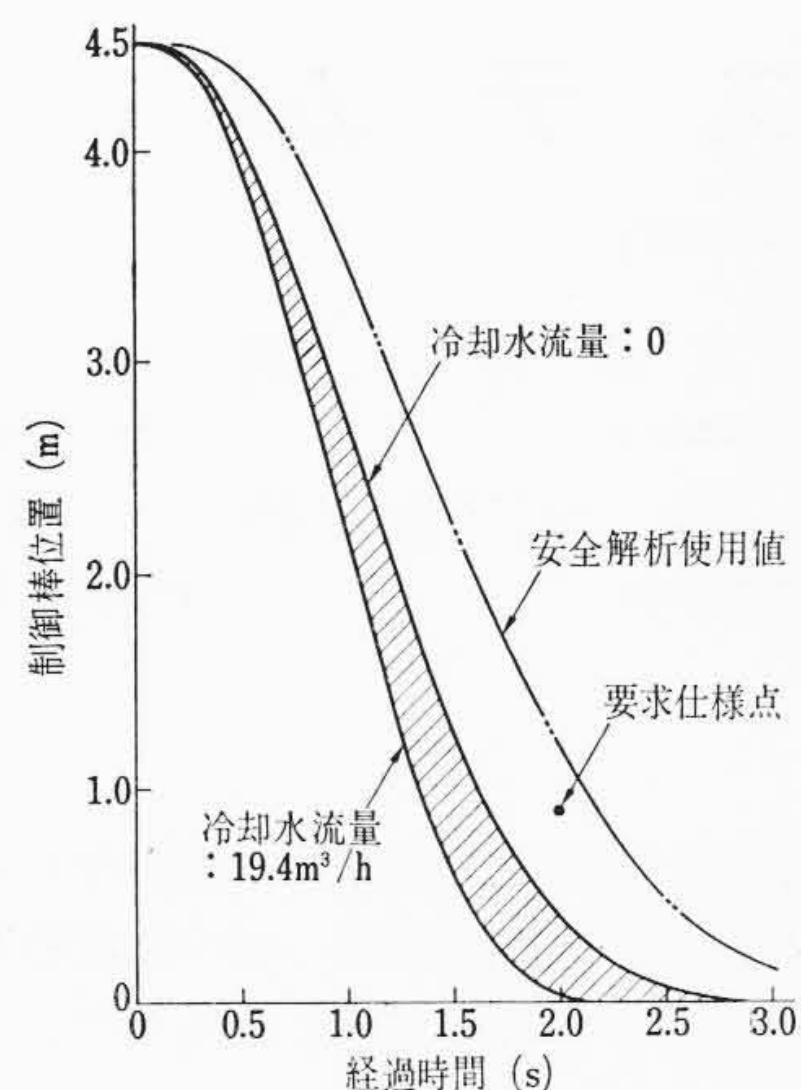


図9 スクラム時間—変位特性

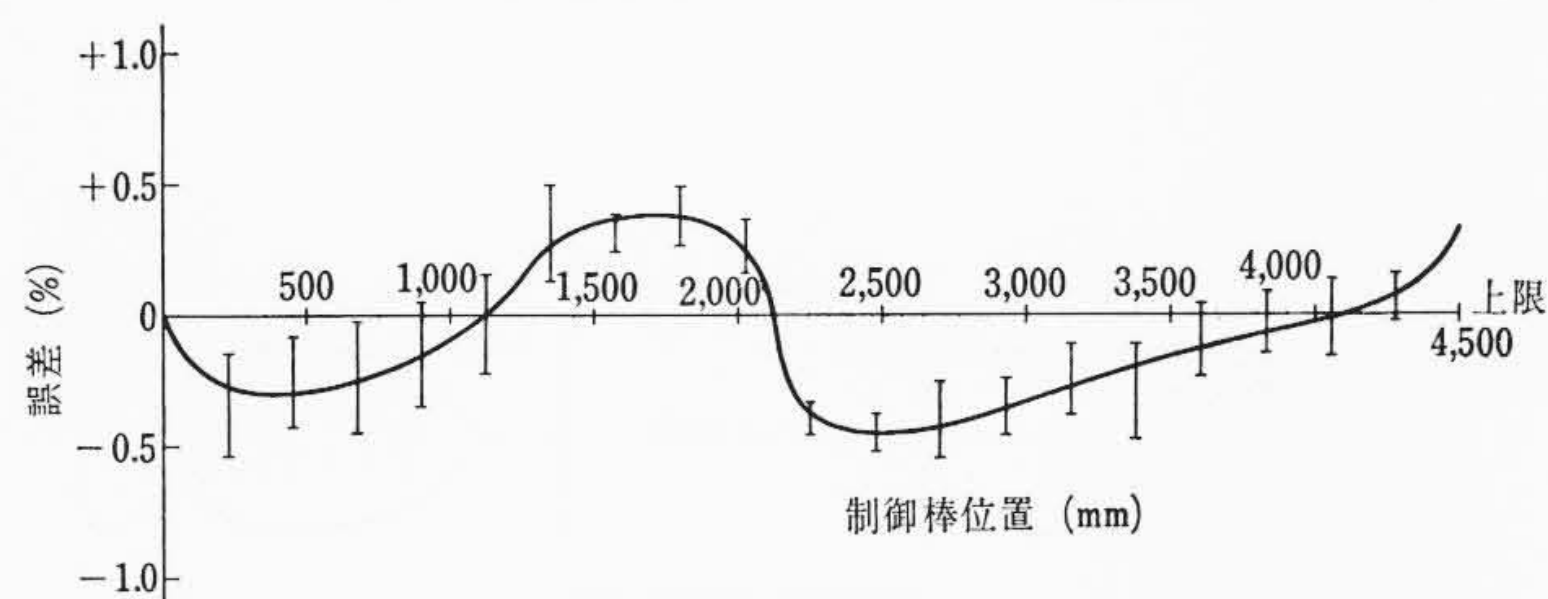


図10 直線差動トランス式位置検出器の精度

5.3.2 時間—変位特性

図9は時間—変位特性の一例を示したもので、当然のことながら冷却水流量が増せばスクラム時間は短縮する。80% 所入時間は $19.4 \text{ m}^3/\text{h}$ の冷却水流により、冷却水流量 0 に比べ 0.15 秒短縮し 1.36 秒となった。これは仕様値 2 秒をじゅうぶん上回る値である。スクラム完了時の制御棒のはね上がりはダッシュポットの性能によるが、性能の良いダッシュポットにおいてはほとんどはね上がりは認められなかった。

5.3.3 スクラム完了時間

スクラム完了時間もダッシュポットの性能により変わる。試作

した4種類のダッシュポットにおいて冷却水流量 0 の場合、スクラム完了時間は 1.68～3.65 秒であった。

5.4 位置指示精度

直線差動トランス式位置検出器の位置指示計の指示に対する制御棒位置の精度は図10に示すとおりである。誤差は最大約 0.6% で仕様値 1% を満足している。誤差の傾向は直線差動トランス単体の特性に一致している。

6. 結 言

以上述べたように「ふげん」用試作制御棒駆動装置は、「ふげん」の仕様をじゅうぶん満足することが立証された。今後、今回の試作試験の成果を折り込んで改良を加えた制御棒駆動装置を試作し、じゅうぶんな寿命試験を行なったのち実機の量産にはいることにしている。次の試作ではストロークの上限より 10% および 80% の中間位置リミット・スイッチを追加するとともに、駆動モータにスリール・モータを採用するほか、製作、調整および保守点検上の改良を行なう予定である。

本制御棒駆動装置の開発にあたって、終始ご指導いただいた動力炉・核燃料開発事業団の鵜木理事をはじめ、新形転換炉開発担当のかたがたに心からお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 川口啓造ほか：原子力工業 16, 21 (昭45-2)
- (2) 吉柳：日立評論 48, 821 (昭41-7)
- (3) Nuclear Eng. 1, 284 (Oct. 1956)
- (4) Nuclear Power 1, 282 (Nov. 1956)
- (5) S. A. Ghalib, J. H. Bowen: J. Brit. Nucl. Energy Conf. 2, 187 (Apr. 1957)
- (6) Nucleonics 16, 74 (May 1958)
- (7) Nuclear Eng. 2, 56 (Feb. 1957)
- (8) R. D. Vaughan, G. Calabria: Nuclear Eng. 4, 331 (Oct. 1959)
- (9) A. D. Wright, K. F. Lebeau: Nuclear Eng. 6, 159 (Apr. 1961)
- (10) J. R. Dean: Nuclear Eng. 5, 306 (July. 1960)
- (11) W. F. Ferguson: ORNL-TM-855 (Mar. 1965)
- (12) W. F. Ferguson: ORNL-TM-1026 (June 1965)
- (13) W. F. Ferguson: ORNL-TM-1197 (Sept. 1965)
- (14) 江幡, 井上: 日立評論 47, 1093 (昭40-12)

第 34 卷

目

次

第 3 号

・グラフ / 春を求めて空の旅
・対談 / シャンツェよもやま話
・ルポ / 食品汚染に挑む
おふくろの味を売る
風の美 学

・美術館めぐり / 西陣織物館
・家電コーナー / 新しい主婦はラクラク形
・新製品紹介
・ホームサイエンス

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内一丁目5番1号
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101

振替口座 東京 20018番