

J M T R 用密封形制御棒駆動装置

Canned Type Control Rod Drive for JMTR

吉 柳 清 美*
Kiyomi Kiryu

要 旨

日本原子力研究所が大洗研究場に建設する材料試験炉(JMTR)の制御棒駆動装置については、試作1基および本体用9基を日立製作所が製作することになった。JMTRはアメリカの工学試験炉(ETR)を参考に設計製作されているが、この制御棒駆動装置に関しては日立製作所が独自で開発した無漏えいの密封形駆動装置が採用され、本製作にさき立った試作試験によって、その性能が従来の軸封形のものよりすぐれていることが確認された。

1. 緒 言

JMTRは燃料および原子力用材料の放射線による影響を研究することを目的として設置されるもので、熱出力50 MW、最大中性子束 6.7×10^{14} n/cm²s、濃縮ウラン板状燃料使用、軽水減速、冷却研究用原子炉である。JMTRにはすでに実証された構造のものを重視するという見地からアメリカのETRの構造が多く取り入れられている。制御棒駆動装置についても、計画当初日本原子力研究所でもETRのものとほとんど同じ軸封形のものを採用する予定で、その予備試作1基を日立製作所が受注し、製作を行なった。

原子炉の一次冷却水は放射能を有するため、その漏えいがしばしばやっかいな問題を生じていることが報告されているが、軸封形のものは無漏えいというわけにはゆかず、将来とも大丈夫という保証はむずかしい。また、場所的な制約から軸封部を取り換えに不便な所に設けざるを得ないので、一次冷却水の漏えいの恐れのあるものは非常に好ましくない。これらの観点から日立製作所としては軸封形の製作と並行して独自で無漏えいの密封形の駆動装置の開発を行なった。

2. 制御棒駆動装置の構造

2.1 主 要 仕 様

JMTRの制御棒駆動装置は原子炉压力容器の下面に下から上向きに取り付けられ、制御体、燃料要素およびフォローからなる制御要素を常時は上下に駆動し、スクラム時には制御要素を駆動装置と切り離すことによって自重および水流により下向きに急速にそう入する。また微調整としての働きは、粗調整のストロークの一部を可変速駆動系に切り換えて使用することになっている。この駆動装置に課せられるおもな仕様は下記のとおりである。

2.1.1 設 計 条 件

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| (1) 設計圧力 | 18 kg/cm ² |
| (2) 設計温度 | 最高 60°C |
| (3) 燃料要素部での冷却水流速 | 10 m/s |
| (4) 制御要素荷重(水流力を含む) | 約 150 kg |
| (5) 外形寸法 | 150×150×5,500 mm 以内 |

2.1.2 性 能 仕 様

- | | |
|-----------|-----------------------------|
| (1) 常駆動仕様 | |
| (a) ストローク | |
| 粗調整棒, 安全棒 | 800 mm |
| 微調整棒 | 100~250 mm 可変 |
| (b) 速 度 | |
| 粗調整棒, 安全棒 | 40 mm/min および
200 mm/min |

- | | |
|-------------|-------------------|
| 微調整棒 | 0~2,000 mm/min 可変 |
| (2) スクラム仕様 | |
| (a) 切離し遅れ時間 | 40 ms 以内 |
| (b) 平均落下加速度 | 1 G 以上 |
| (3) 位置指示精度 | 1 mm 以内 |

2.2 形 式 の 選 定

JMTR用としての駆動部の仕様とその压力容器貫通部とを組み合わせると種々の形式が考えられるが、そのうち検討したおもなものは概略次のとおりである。

2.2.1 軸封形モータ駆動—電磁石スクラム式

ETRで採用されている形式で、常駆動は外部のモータからの回転をネジナットで上下駆動に変え、軸封を介して原子炉压力容器内の制御要素を駆動する。制御要素は電磁石によって作動するボールラッチにより保持されており、電磁石を消磁して急速にスクラムさせることができる。また外部モータの回転からシンクロ電機に精密に位置を指示させる。軸封部からの漏えいは一応集めて取り出すようにしているが、構造的な制約から軸封部がかなり奥にあるため締め付け作業がたいへんであり、いったん運転開始後は放射能のため容易に近寄りがたいので、軸封部からの漏えいは保守上好ましくない。

2.2.2 水圧駆動—水圧スクラム式

これはG. E社がBWRに使用している駆動装置である。制御要素を水圧ピストンで上下動させ、スクラムも水圧で上向きに行なっているが、あやまって落下しないように約150 mmごとにつめで引っかけており、途中で自由な位置に保持することはできないようになっている。また位置指示も内部の動きを直接外部に取り出すことができないので、ストロークに沿って並べたリードスイッチによって間欠的に示している。

駆動は水圧配管中の弁の開閉によって行なわれるため、信号が出てから実際に動き始めるまでかなりの時間遅れを生じるので、JMTRのように非常に高級かつ精密な制御を要求されるものにはこの種の駆動装置の採用は不適當と思われる。

2.2.3 キャンドリラクタンスモータ駆動—水圧スクラム式

これは日立製作所がBWR用駆動装置として開発したものである。水圧でスクラムさせるこの方式の場合には、現在実用化されている弁の開閉に少なくとも200ないし300msかかるのでJMTRのスクラム切離し遅れ時間を大幅に上回ることになる。また内部の位置指示もリードスイッチによる間欠指示の方法しか取り得ないので、1 mm以内の指示精度は困難で、JMTRの仕様を満足することは不可能である。

2.2.4 キャンドリラクタンスモータ駆動—電磁石スクラム式

これがJMTR用に日立製作所が独自で開発した方式である。本方式は上記各種の方式のうち2.2.1のスクラム特性の良さと位

* 日立製作所日立工場

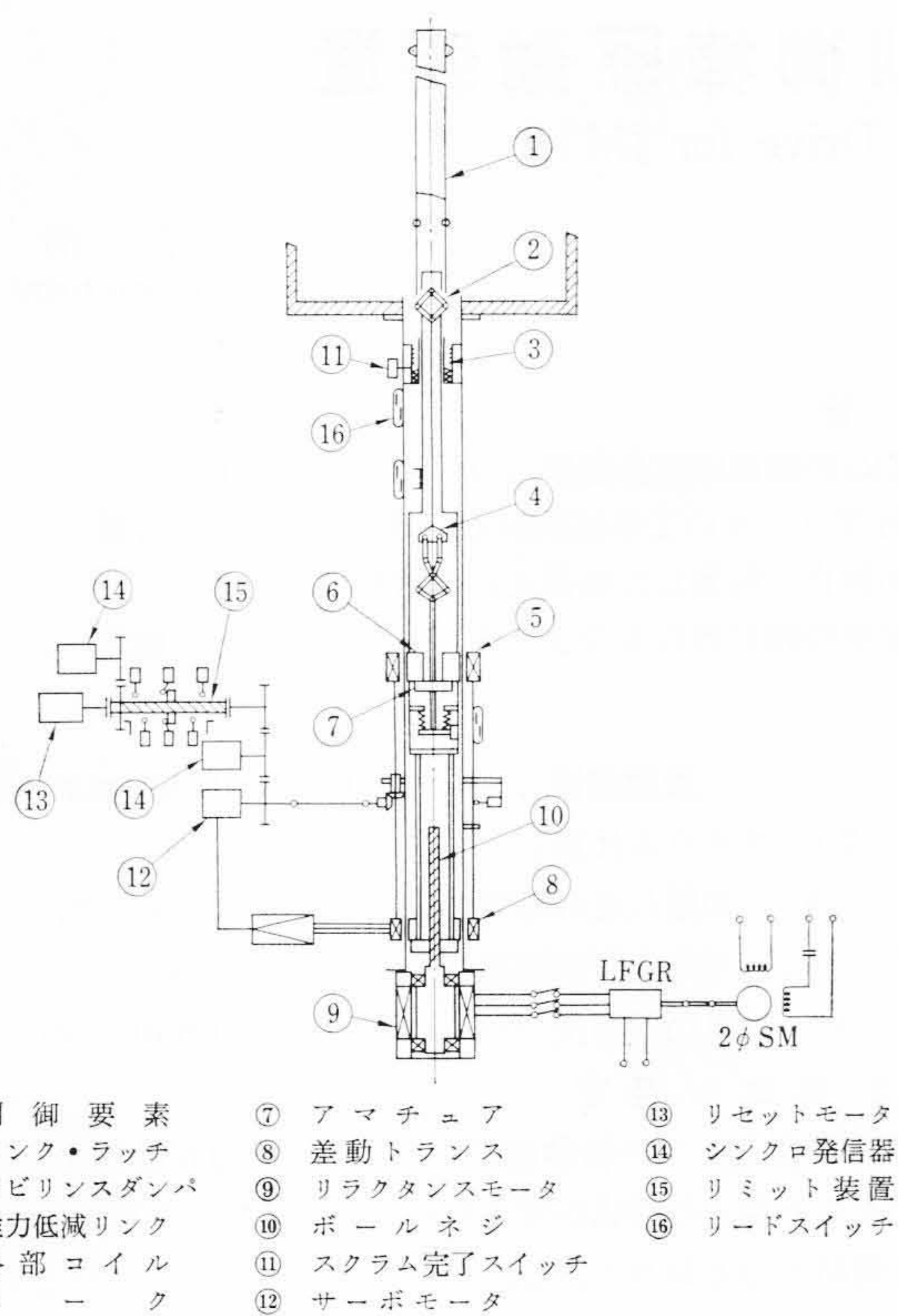


図 1 密封形駆動装置機能図

置指示精度の良さおよび 2.2.3 の駆動特性の良さと無漏えいなどの長所を集めて計画されたものである。この方式の機能を図 1 に示す。制御要素の駆動はキャンドリラクタンスモータの回転運動を水中ボールネジによって上下動に変換して行なわれ、一方スクラムはリンク・ラッチを介して制御要素を保持している電磁石を消磁して行なわれる。電磁石を水中に設けることは材料および絶縁などにいろいろ問題があるので、コイル部を圧力容器の一部を形造る密封筒の外におき、ヨークおよびアマチュアのみ内部の水中に浸している。このとき内部の動きを差動トランスによって検出し、サーボ系により外部コイルが常に正確に内部ヨークとの関係位置を保つように追従させる。したがってこの外部コイルの位置をシンクロ電機で指示させれば制御要素の位置を精度よく指示することができる。リラクタンスモータは低周波電源発生装置 (LFGR) によって駆動し、周波数を制御することによって制御要素の駆動速度を制御する。

2.3 構造設計

キャンドリラクタンスモータ駆動—電磁石スクラム式による密封形制御棒駆動装置は大別して駆動装置本体と外部コイル駆動装置からなる。

2.3.1 駆動装置本体

駆動装置本体を図 2 に示す。

(1) キャンドリラクタンスモータ

ロータとコイルの間に薄い密封管を設け、ロータを水浸させてステンレス鋼の水中ボールベアリングで保持し、モータのコイル部は密封管外部におき回転力を与えている。密封管には磁性ステンレス鋼板を使用し、磁力線の透過を良くしてトルクを得やすくし、さらに小形化するためにコイル部を水冷している。

(2) 水中ボールネジ

回転運動を上下運動に変換するネジナット部の摩擦を少なくするためにボールネジを使用し、特に水中のごみが沈殿してボールネジに悪影響を与えないようにワイパを設けている。

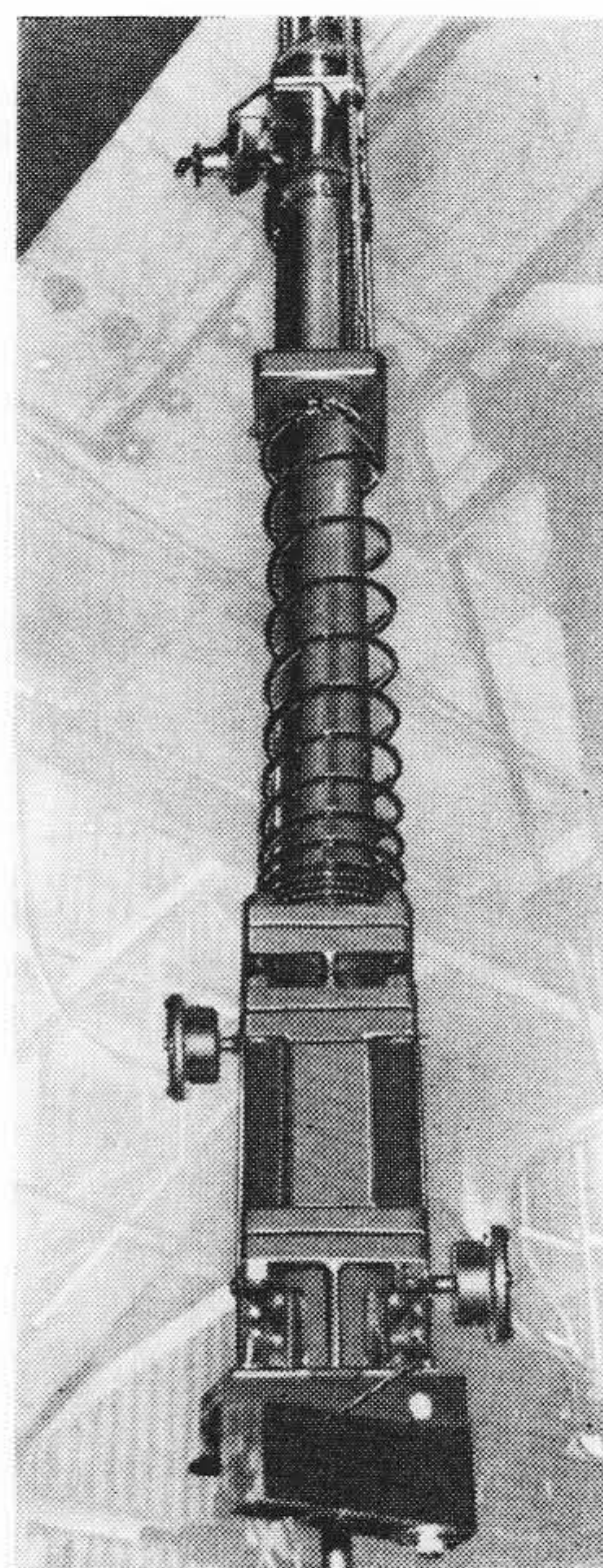


図 2 下から見た駆動装置本体

(3) 電 磁 石

コイルを水中に浸すことには問題があるので密封筒の外部におき、密封筒を通して内部水中のヨークとアマチュアを保持せしめている。磁力線が密封筒壁内をバイパスし、内部ヨークおよびアマチュアを通る磁力線が減少することを防ぐために、密封筒は磁力線の透過するところのみ磁性、他は非磁性のステンレス鋼となるような特殊パイプを使用している。

(4) リンク・ラッチ

運転中に制御要素に加わる力は燃料要素部の水流力を含めると約 150 kg にもなると想定され、ボール・ラッチを用いた場合には電磁石に要求される保持力は約 100 kg となる。密封形の電磁石の場合はその形状的な制約から保持力は 45 kg が限度と考えられるので、保持電磁石にかかる力を減少させるため制御要素との連結部をリンク・ラッチにして切り離し遅れ時間を短くするとともに保持電磁石との間にスラスト軽減リンクを設け、スラストを電磁石の保持力以下に減少させている。

(5) リセット機構

駆動装置が下限まで降りてくるとリセット棒によりスクラムスプリングが圧縮されて電磁石のアマチュアとヨークが接触すると同時にリンク・ラッチが開き、電磁石を励磁すれば保持可能な状態にさせる。

(6) 緩 衝 器

スクラム時には制御要素が急速に落下するが、ストロークの終端における衝撃のため機器が破損したり、ゆるみが生じたりするのを防ぐためにストロークの下端に緩衝器を設けている。緩衝器としては制御要素のフォロー部と駆動装置緩衝部とにラビリンスみぞを設け、フォロー部が緩衝器部に突入するときラビリンスすき間より流出する水の動圧によって減速させている。

(7) リミットスイッチ

駆動装置本体にはストロークの上下限、微調整棒移行、スクラム開始および完了、外部コイル上下限にリミットスイッチまたはリードスイッチを取り付け、指示およびインターロックの信号を取り出している。

2.3.2 外部コイル追従系

外部コイル追従系を図 3 に示す。

(1) 外部コイル駆動装置

密封筒を通して内部の動きを差動変圧器によって検知し、この

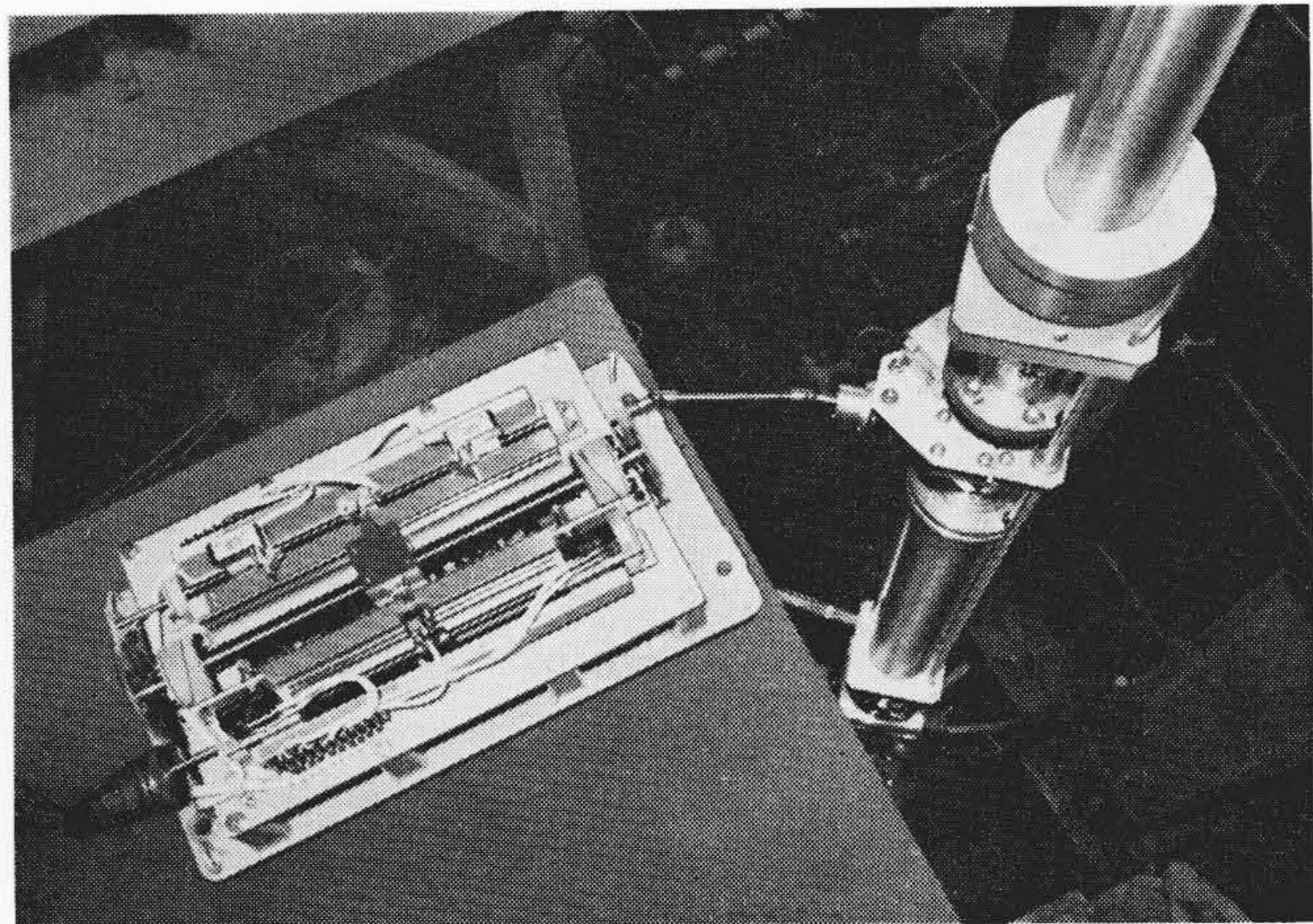


図3 上から見た外部コイル駆動装置

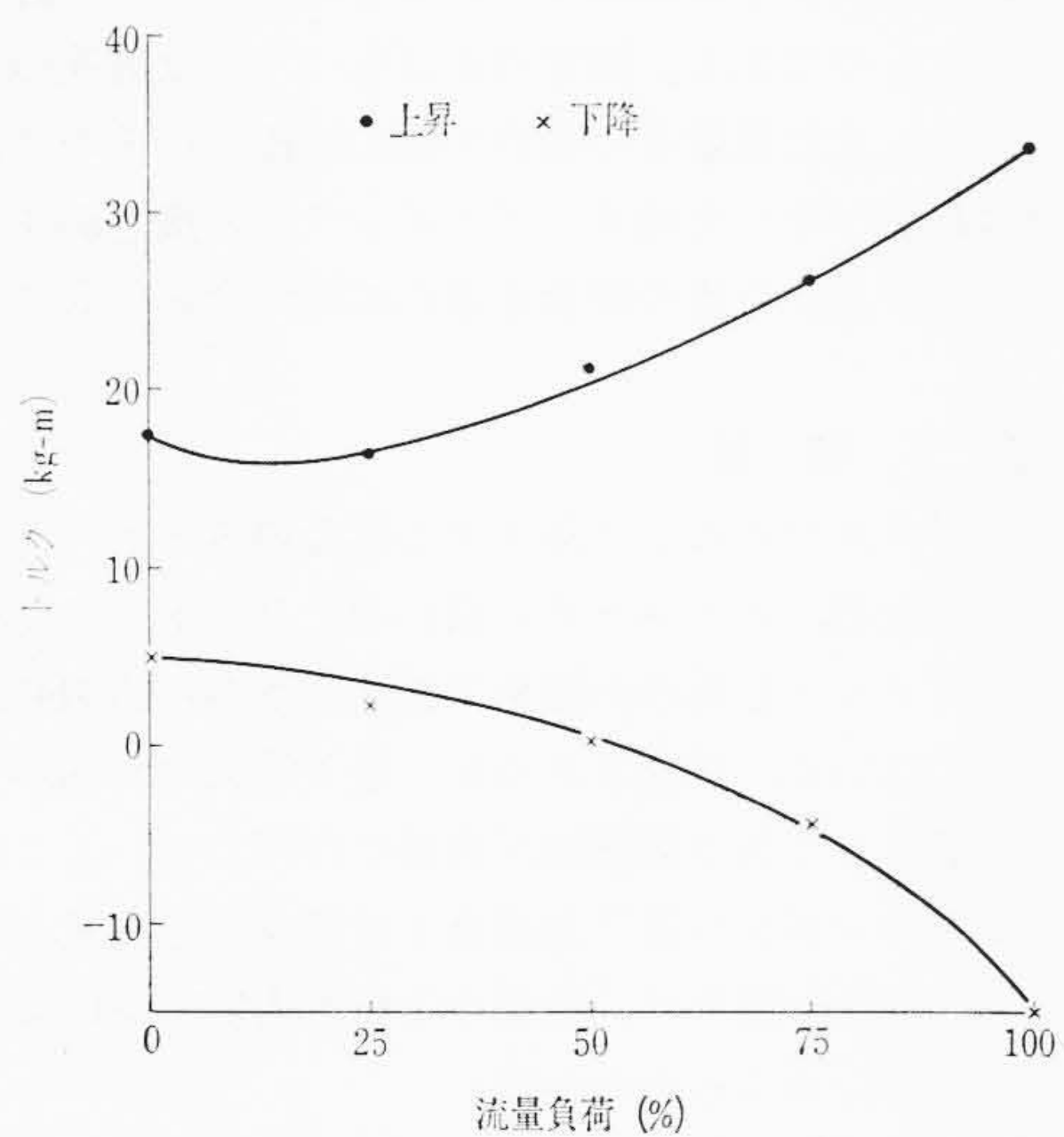


図4 負 荷 ト ル ク

偏差をなくすように前置増幅器，主増幅器を経てサーボモータを駆動し，常に外部コイルを内部のアマチュアの動きに精度よく追従させている。

(2) リミット装置

微調整棒としての作動範囲の決定は，制御要素の動きを外部コイル駆動軸から歯車と電磁クラッチを介してリミット装置内に再現し，この中のリミットスイッチの調整により行なわれる。万一リミットスイッチが破損した場合に微調整ストロークを逸脱して高速駆動が行なわれるのを防ぐために上下限に機械的ストップを設けて外部コイルの動きを機械的に制限する。こうすれば，内部ヨークの動きに対して外部コイルの偏差が大きくなって電磁石が保持力を失い，スクラムして炉の安全が確保される。

(3) 位置指示計

全ストロークに対する位置指示はサーボモータ軸の回転角を復針のシンクロ電機にて測定し，操作盤上に指示する。微調整棒のストロークは微調整棒移行点を原点としてリミット装置内の回転軸からシンクロ電機にて操作盤上に指示させる。

(4) リミットスイッチ

リミット装置内には微調整ストローク上下限，上下限付近，中央点およびリセット用などのリミットスイッチが設けられ，上下限および上下限付近のリミットスイッチ位置は中央を中心としておのおの上下対称である。また微調整ストローク中央点は安全棒ストロークの任意の一部を選ぶことができる。

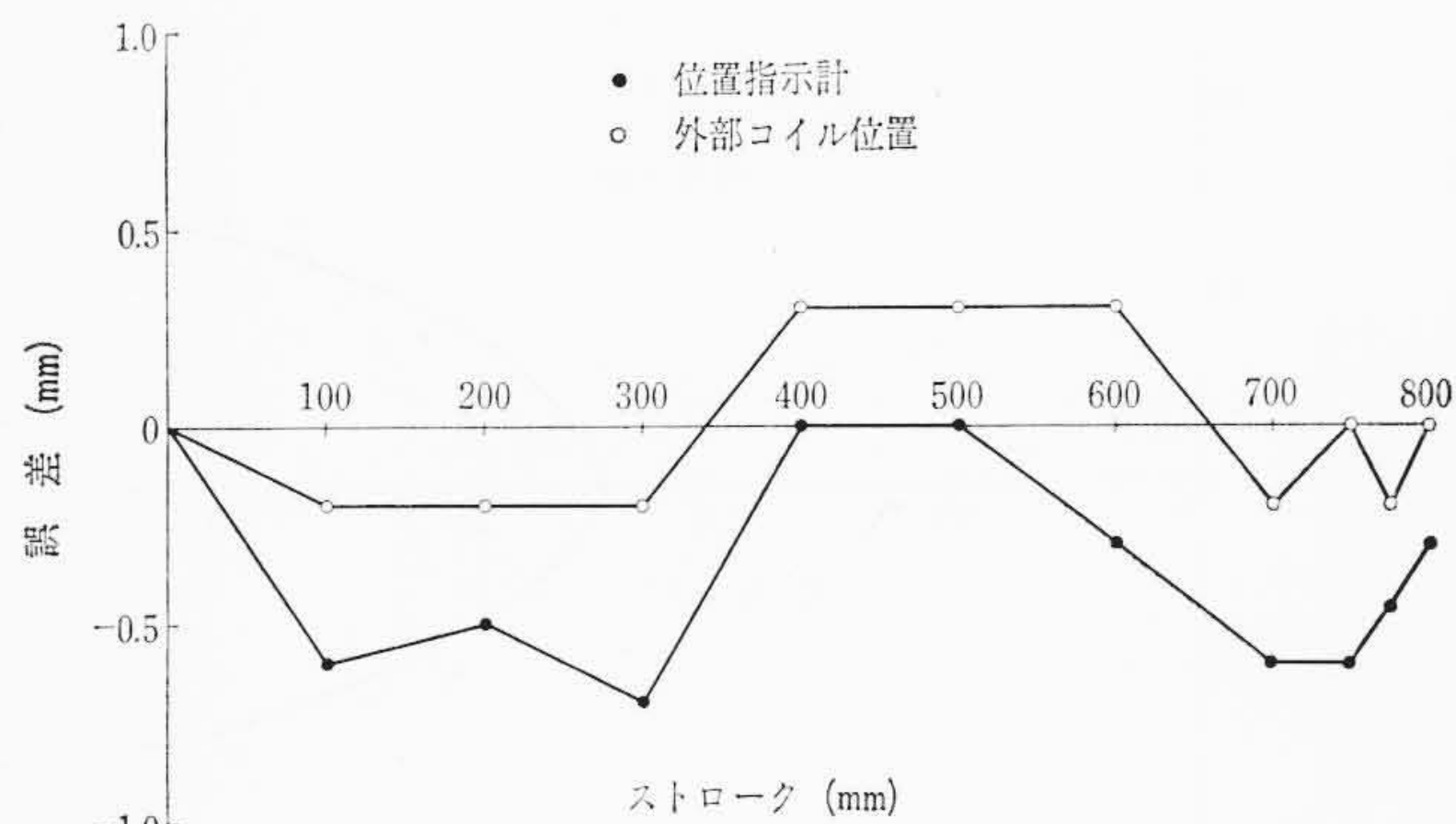


図5 位 置 指 示 精 度

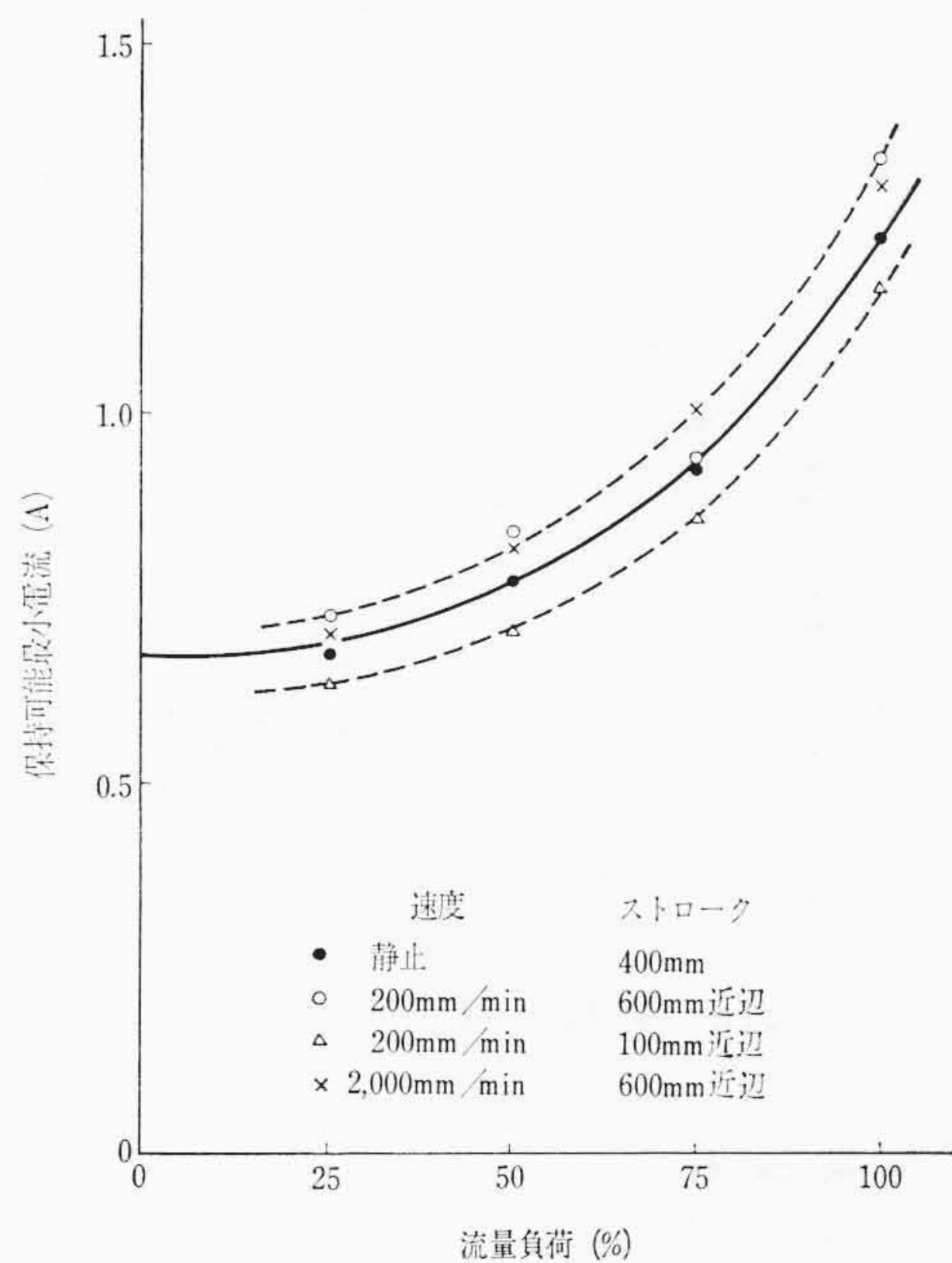


図6 保 持 可 能 最 小 電 流

3. 試験および結果

3.1 試験方法

JMTR の実際の運転時に制御棒駆動装置にかかる荷重の大部分は水流力によるものであり，これを模擬することはきわめて困難なので実際の運転状態を実現させる試験ループを準備し，実物と同じ形状，重量の制御要素に同じ流量の水を流して試験した。

3.2 試験結果

3.2.1 負 荷 ト ル ク

制御要素を駆動するに必要なトルクは図4に示すとおり流量に対して急激に増加する傾向がある。上昇のとき流量0の場合より流量25%のときのほうがトルクが小さいのは，流れにより見かけの摩擦係数が減るためと考えられる。リラクタンスマータのトルクは電流4Aで保持の場合に0.54 kg-m，2,000 rpmで0.50 kg-mが得られるので，この駆動装置を駆動するには十分余裕を持っていると言える。

3.2.2 位 置 指 示 計

前述のように内部の位置指示は外部追従系から指示されているため実際の位置との間に差を生ずるがその指示精度は図5に示すとおりである。これから内部の位置と外部コイルの位置のずれは0.5 mm以内であり，シンクロ電機の誤差を含んでも十分1 mm以内にはいることを示している。

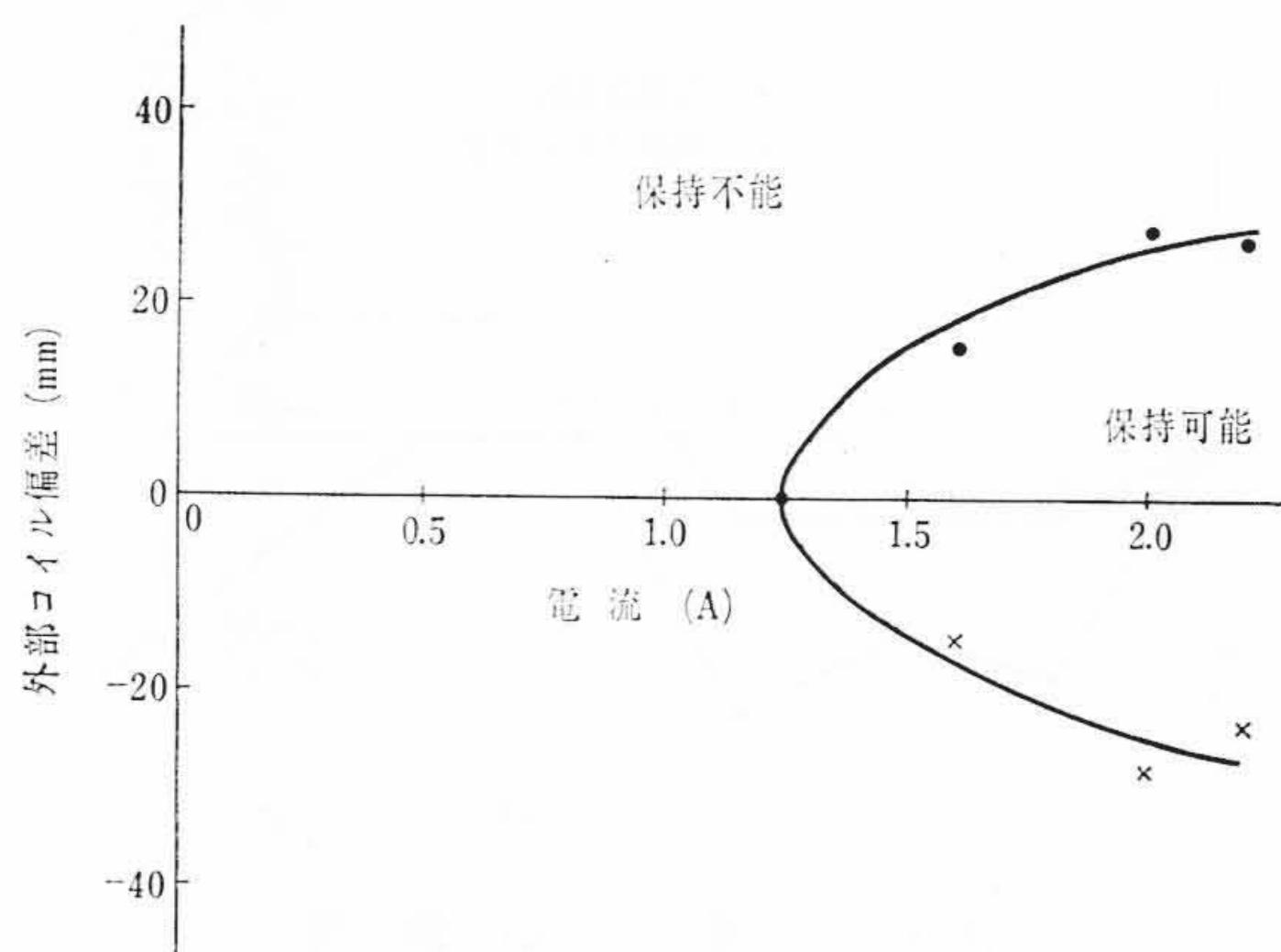


図 7 保持可能外部コイル偏差量

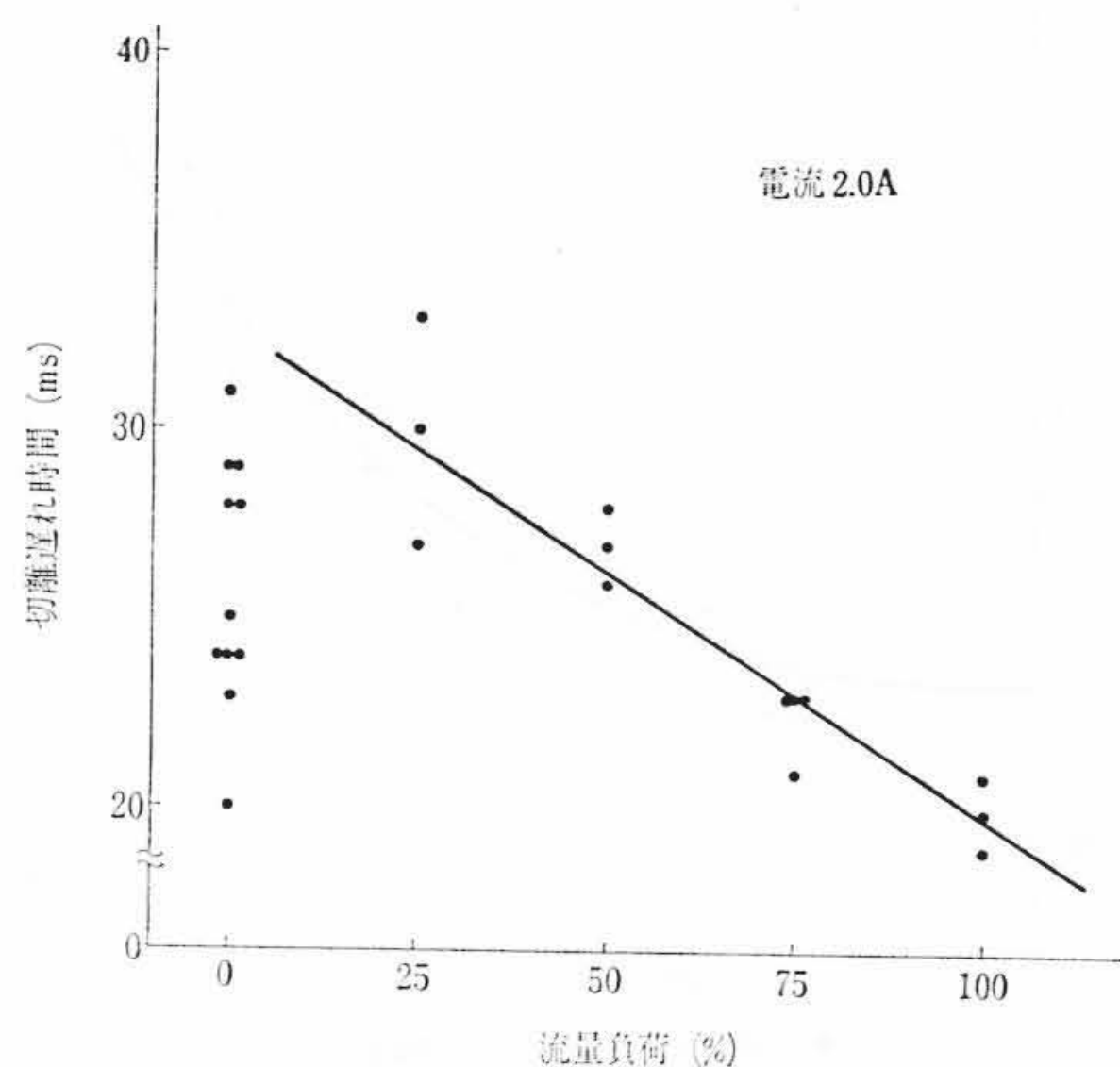


図 8 切離し遅れ時間

3.2.3 保持電磁石

(1) 保持力

制御要素を保持するに必要な最小電流の変化を図 6 に示す。流量 0 の場合は制御要素およびリンク類の重量およびスクラムスプリングによる力の総和に対して保持するに必要な電流で、流量が増すにつれて上に凹の曲線を示している。保持電磁石は定格電流 2A で計画されており、十分な保持力を持つことを示している。

(2) 外部コイルと内部ヨークの偏差

内部ヨークに対して外部コイルの位置がある程度以上ずれた場合は磁力線のずれから保持力が減少し保持不能となる。したがって外部コイルの動きを規制することにより内部の制御要素は一定の範囲以外にはずれた場合はスクラムし、原子炉の安全性からは有利である。保持可能な偏差は図 7 に示すとおり、流量 100 % の場合は定格 2 A で上下約 25 mm 程度で、それ以上内外部がずれて移動することはないことを示している。

(3) 切離し遅れ時間

切離し遅れ時間とはスクラム信号がはいってから電磁石の切離しを生じるまでの時間をいうが、密封形駆動装置での流水負荷状態ではこの動きを外部へ直接取り出す方法がないので測定は非常に困難である。したがって本試験ではリードスイッチを使用し、スイッチが作動するごく近くに制御要素を保持し、スクラム後そのスイッチが作動するまでの時間を測定した。したがってこの時間には制御要素がリードスイッチの位置まで落下する時間を含む

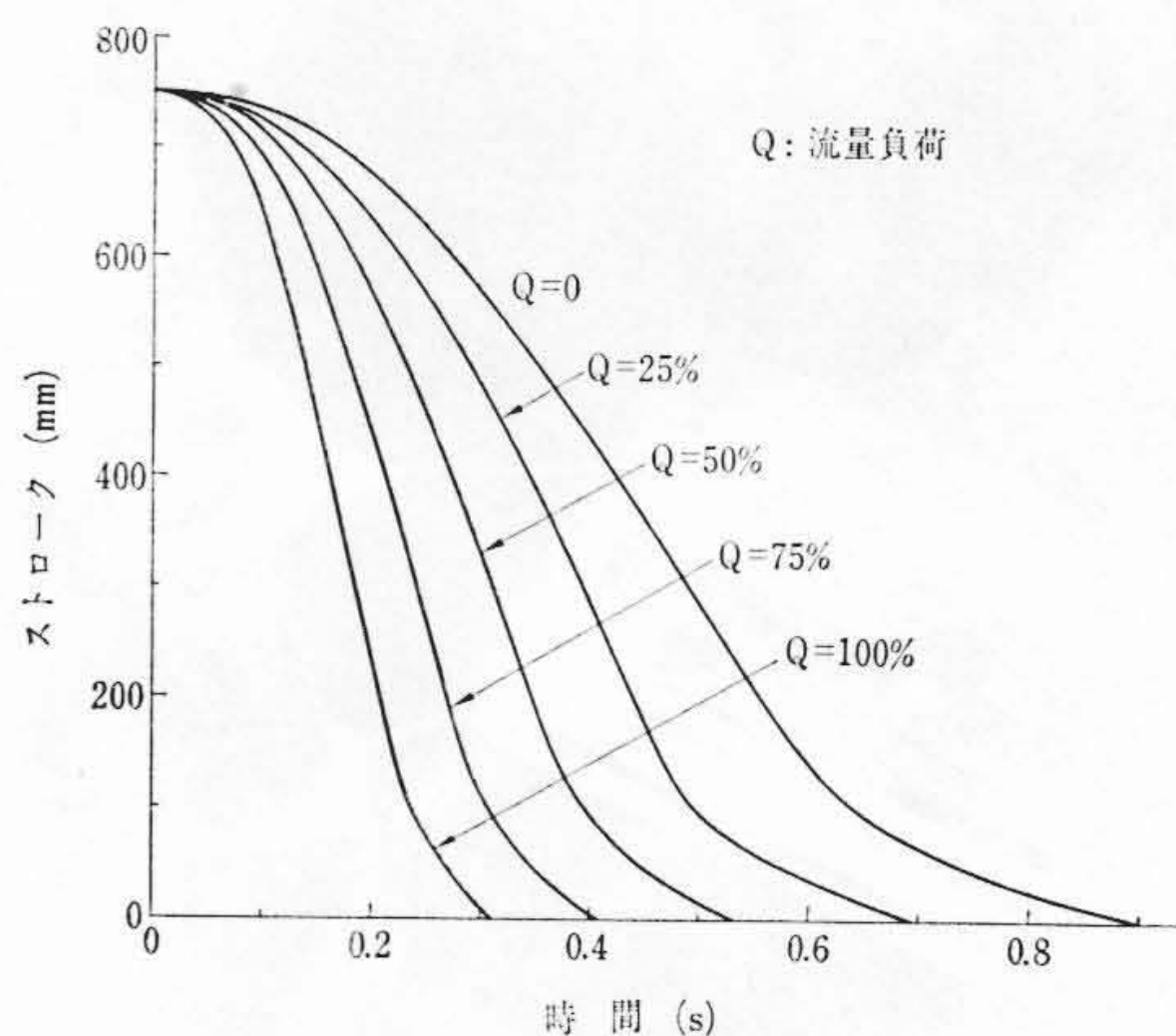


図 9 スクラム落下特性

ため、実際の時間より長めに出ていると考えられる。図 8 はその結果を示したものである。測定点がばらつくのは前述の理由によるものであり、また流量 0 の場合が短めに出ているのは水を流さない場合は振動がないためリードスイッチへの接近がすぐれているためで、この点から他の場合もさらに時間は短いものと期待できる。

3.2.4 落下特性

制御要素がスクラムにより落下する場合のストロークの時間的变化を調べるため、ストロークに沿わせたリードスイッチの作動する時間をプロットしたのが図 9 である。下から約 180 mm の所から緩衝部にはいり、減速されるが、最下端ではねあがりもなくなめらかに静止しており緩衝器が有効に作用していることを示している。このカーブから落下加速度を計算すると流量 100 % のときに約 3.5~4.0 G が得られ、仕様の 1 G を大幅に上回る早い速度でそう入されていることがわかる。

3.2.5 寿命試験

この種原子炉における制御棒駆動装置の運転条件を考慮し、現在までにスクラムに関しては 10 年分、常駆動に対しては約 4 年以上の寿命試験を行なったが、別に異常は認められなかった。ETR などでは主要部品は約 1 年間で交換すると言われており、今後さらに運転実績が積み上げられるが、寿命的に十分使用に耐えることが明らかである。

4. 結 言

以上述べたように密封形制御棒駆動装置は JMTR の仕様を十分満足することが立証された。JMTR 軸封形を採用するか、密封形を採用するかについては、日本原子力研究所では密封形は機構的には軸封形に比べてやや複雑であるが、保守の面を考えれば無漏えいであることの利点が大きい点から正式に採用されることになった。JMTR 本体用のものは今後さらに改善が加えられ昭和 42 年秋に現地据付が完了される予定である。

本制御棒駆動装置の開発に当たって終始ご指導をいただいた日本原子力研究所材料試験炉部平山次長をはじめ担当のかたがたおよび開発にご協力いただいた日立製作所日立工場電二設課広主任、日立研究所第 8 部井上研究員をはじめ担当のかたがたに感謝の意を表する次第である。