



JP0650359

JAEA-Technology

## HTTR 後備停止系不具合の調査報告書

Report of Investigation on Malfunction of Reserved Shutdown System in HTTR

濱本 真平 飯垣 和彦 清水 厚志 澤畠 洋明  
近藤 誠 小山 直 河野 修一 小林 正一  
川本 大樹 鈴木 尚 金田 誠 関田 健司  
黒羽 操 君島 悟 山崎 和則 新垣 悅史  
若林 宏 猪井 宏幸 早川 雅人 根本 隆弘  
篠原 正憲 土山 賢\* 石井 喜樹 水島 俊彦

Shimpei HAMAMOTO, Kazuhiko IIGAKI, Atsushi SHIMIZU, Hiroaki SAWAHATA,  
Makoto KONDO, Sunao OYAMA, Shuichi KAWANO, Shoichi KOBAYASHI,  
Taiki KAWAMOTO, Hisashi SUZUKI, Makoto KANEDA, Kenji SEKITA,  
Misao KUROHA, Satoru KIMISHIMA, Kazunori YAMAZAKI, Etushi ARAKAKI,  
Hiroshi WAKABAYASHI, Hiroyuki INOI, Masato HAYAKAWA, Takahiro NEMOTO,  
Masanori SHINOHARA, Masaru THUCHIYAMA\*, Yoshiki ISHII and Toshihiko MIZUSHIMA

大洗研究開発センター  
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR  
Oarai Research and Development Center

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :  
Intellectual Resources Section,  
Intellectual Resources Department  
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN  
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

## HTTR 後備停止系不具合の調査報告書

日本原子力研究開発機構

大洗研究開発センター高温工学試験研究炉部

濱本 真平・飯垣 和彦・清水 厚志・澤畠 洋明・近藤 誠・小山 直※1・河野 修一・  
小林 正一・川本 大樹・鈴木 尚・金田 誠※2・関田 健司・黒羽 操※3・君島 悟※4・  
山崎 和則・新垣 悅史※3・若林 宏※5・猪井 宏幸・早川 雅人・根本 隆弘・篠原 正憲・  
土山 賢\*・石井 喜樹・水島 俊彦

(2006年1月31日受理)

日本原子力研究開発機構が所有する高温工学試験研究炉（HTTR）の反応度制御設備は、制御棒系と後備停止系の、動作原理の異なる二つの独立した系統で構成されている。通常運転時、原子炉の反応度を制御するとともに、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に安全かつ確実に原子炉を停止させるものである。後備停止系は、万一制御棒系のみで原子炉を停止できない場合に、中性子吸収材である炭化ホウ素ペレットを炉心内に重力落下させ、いかなる運転状態からも原子炉を停止する機能を有するものであり、炭化ホウ素ペレットと、ペレットを収めるホッパ、電動プラグ、後備停止系駆動機構、ガイドチューブ等で構成されている。

HTTRでは、平成16年7月26日から平成17年3月4日までの計画で、施設定期検査を実施してきたところ、2月21日の後備停止系の作動試験時に、本装置の16基のうち1基が正常に動作しないことが分かった。

調査の結果、後備停止系が正常に動作しなかった原因是、後備停止系を駆動するモータの上部のオイルシールが変形したことによってグリースから分離した油がブレーキに到達し、ブレーキの磨耗した粉と混合することによって粘着物となり、粘着物がブレーキの解除を阻害したことによって、モータの駆動を妨げたことが分かった。

---

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

※1：三菱重工業株式会社から出向中

※2：富士電機システムズ株式会社から出向中

※3：日本アドバンストテクノロジー株式会社出向中

※4：株式会社東芝から出向中

※5：株式会社 原子力エンジニアリングから出向中

\*：三菱電機株式会社

Report of Investigation on Malfunction of Reserved Shutdown System in HTTR

Shimpei HAMAMOTO, Kazuhiko IIGAKI, Atsushi SHIMIZU, Hiroaki SAWAHATA,  
Makoto KONDO, Sunao OYAMA<sup>\*1</sup>, Shuichi KAWANO, Shoichi KOBAYASHI,  
Taiki KAWAMOTO, Hisashi SUZUKI, Makoto KANEDA<sup>\*2</sup>, Kenji SEKITA, Misao KUROHA<sup>\*3</sup>,  
Satoru KIMISHIMA<sup>\*4</sup>, Kazunori YAMAZAKI, Etushi ARAKAKI<sup>\*3</sup>, Hiroshi WAKABAYASHI<sup>\*5</sup>,  
Hiroyuki INOI, Masato HAYAKAWA, Takahiro NEMOTO, Masanori SHINOHARA,  
Masaru THUCHIYAMA\*, Yoshiki ISHII and Toshihiko MIZUSHIMA

Department of HTTR  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2006)

During normal operation of High Temperature engineering Test Reactor (HTTR) in Japan Atomic Energy Agency (JAEA), the reactivity is controlled by the Control Rods (CRs) system which consists of 32 CRs (16 pairs) and 16 Control Rod Drive Mechanisms (CRDMs). The CR system is located in stand-pipes accompanied by the Reserved Shutdown System (RSS). In the unlikely event that the CRs fail to be inserted, the RSS is provided to insert B<sub>4</sub>C/C pellets into the core. The RSS shall be designed so that the reactor should be held subcriticality from any operation condition by dropping in the pellets. The RSS consists of B<sub>4</sub>C/C pellets, hoppers which contain the pellets, electric plug, driving mechanisms, guide tubes and so on. In accidents when the CRs cannot be inserted, an electric plug is pulled out by a motor and the absorber pellets fall into the core by gravity.

A trouble, malfunction of one RSS out of sixteen, occurred during a series of the pre-start up checks of HTTR on February 21, 2005. We investigated the cause of the RSS trouble and took countermeasures to prevent the issue.

As the result of investigation, the cause of the trouble was attributed to the following reason: In the motor inside, The oil of grease of the multiplying gear flowed down from a gap of the oil seal which had been deformed and was mixed with abrasion powder of a brake disk. Therefore the adhesive mixture prevented the motor from rotating.

Keywords: HTTR, Reserved Shutdown System

---

\*1 On loan from Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

\*2 On loan from Fuji Electric Systems Co., Ltd.

\*3 On loan from Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

\*4 On loan from Toshiba Corporation

\*5 On loan from Nuclear Engineering, Ltd.

\* Mitsubishi Electric Corporation

## 目次

1.はじめに	1
2.設備の概要	2
2.1 HTTRの概要	2
2.2 反応度制御設備の概要	2
3.不具合事象の概要	3
3.1 RSSの施設定期自主検査等の状況	3
3.2 RSSの不具合発生前の原子炉運転状況	3
3.3 RSSの不具合発生時の状況	4
4.原因調査	5
4.1 調査の進め方	5
4.2 調査の工程および分解手順	5
4.3 不具合部位の調査および結果	6
4.4 不具合の原因を明らかにする調査および結果	8
4.5 動作不良が発生したメカニズムおよび原因	11
5.対策	11
5.1 分離油の浸入についての検討	11
5.2 R1-3以外のRSSの性能確認	12
5.3 対策	13
6.おわりに	14
謝辞	15
参考文献	15

## Contents

1. Introduction	1
2. Outline of HTTR	2
2.1 Outline of HTTR facility	2
2.2 Outline of Reserved Shutdown System (RSS)	2
3. Detail of issue	3
3.1 Result of periodical voluntary inspection of RSS	3
3.2 Situation of HTTR operation before trouble	3
3.3 The situation at the time of trouble occurred	4
4. Investigation	5
4.1 Procedures of investigation	5
4.2 Work process and decomposition procedure	5
4.3 Investigation of a failure part and a result	6
4.4 Result of tests for inquiring the cause of the trouble	8
4.5 Sequence of unexpected events	11
5. Countermeasure	11
5.1 Study for the relationship of motor behavior and leak oil	11
5.2 Confirmation of RSS performance except for R1-3	12
5.3 Countermeasure	13
6. Conclusion	14
Acknowledgements	15
References	15

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、高温ガス炉技術の基盤の確立および高度化並びに高温工学に関する先端的基礎研究を積極的に進めるための施設として、高温工学試験研究炉（HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor）<sup>①</sup>の建設を進めてきた。HTTR では平成 10 年の初臨界の後、平成 11 年から出力上昇試験<sup>②</sup>を開始し、平成 13 年 12 月に定格出力 30MW で原子炉出口冷却材温度 850°C を達成し、2002 年 3 月に使用前検査合格証を取得した。その後、2 年の間に定常運転および安全性実証試験を実施する等の運転データの蓄積を行うとともに保守技術の蓄積を行い、平成 16 年 4 月に原子炉出口冷却材温度 950°C<sup>③</sup>を達成した。今後は、高温ガス炉技術の高度化を目指して、運転データの取得、高温での長期連続運転、炉心燃焼特性、ヘリウム純度管理、高温機器の性能評価、炉内構造物等の健全性に関するデータを取得・評価を行う計画である。

HTTR は、平成 16 年 7 月 26 日から平成 17 年 3 月 4 日までの計画で、施設定期検査を実施してきた。その中で平成 17 年 2 月 21 日に行った原子炉起動前点検の 1 つである後備停止系の作動試験で、本装置の 16 基のうち 1 基が正常に動作しないことが分かった。後備停止系とは、反応度制御設備に属し、制御棒系とは異なった駆動機構で、万一制御棒による原子炉停止が不可能となつた場合に、いかなる運転状態からも原子炉を未臨界することができる装置として設置されている。後備停止系は、原子炉圧力容器内に設置されており取り出すには、格納容器の開放等が必要となることから、初期の原因調査は、後備停止系を原子炉圧力容器に設置した状態での駆動部に関連するモータおよびブレーキの電圧、電流および絶縁抵抗等の電気特性の測定並びに制御盤等の断線の有無等の確認を行つた。制御盤等には異常はなかつたが、電気特性の測定の結果、正常に動作しなかつた 1 基は、他の後備停止系の電気特性と異なることを確認した。これらの原因を特定するため、正常に動作しなかつた 1 基について原子炉圧力容器から取り出し、原因の調査を行つた。

本報告では、第 2 章で設備の概要、第 3 章で不具合事象の概要、第 4 章で動作不良原因の究明、第 5 章で対策について述べる。

## 2. 設備の概要

### 2.1 HTTR の概要

HTTR の基本仕様を表 2.1 に示す。HTTR は燃料に被覆粒子燃料、減速材に黒鉛、冷却材にヘリウムガスを使用する定格熱出力 30MW、原子炉出口冷却材最高温度 950°C の高温ガス炉である。

HTTR の冷却設備系統を図 2.1 に示す。HTTR の原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備、原子炉停止後に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備、原子炉圧力容器の周囲に設置した水冷管により 1 次遮へい体を冷却するとともに補助冷却設備による炉心の冷却が期待できないような事故時にも原子炉の残留熱を除去する炉容器冷却設備で構成される。主冷却設備は 1 次冷却設備として中間熱交換器(IHX : Intermediate Heat Exchanger)と 1 次加圧水冷却器(PPWC : Primary Pressurized Water Cooler)の 2 種類の熱交換器を並列に配置しており、IHX の 2 次側に 2 次冷却設備として 2 次加圧水冷却器(SPWC : Secondary Pressurized Water Cooler)を配置している。原子炉内で発生した熱は、これらの熱交換器を経由して最終的に加圧水冷却設備に設置されている加圧水空気冷却器より大気へ放散させる。HTTR の運転方法には、PPWC で 20MW、IHX・SPWC で 10MW の除熱を行う並列運転と、IHX・SPWC は使用せずに PPWC のみで 30MW の除熱を行う単独運転がある。

### 2.2 反応度制御設備の概要

反応度制御設備<sup>4)</sup>は、図 2.2 に示すように原子炉格納容器内に設置されている原子炉圧力容器のスタンドパイプ内に収納されている。本設備の取扱いについては、原子炉格納容器の燃料交換ハッチを開放した状態で、制御棒交換機を用いて、原子炉圧力容器から取り出し・挿入を行う。原子炉圧力容器から取り出した反応度制御設備の保守点検は、メンテナンスピットで行う。反応度制御設備は、原子炉停止系として、制御棒系と後備停止系の原理の異なる 2 つの独立した系からなり、図 2.3 に示す炉心配置図のように、センター(C)、リング 1(R1-1~6)、リング 2(R2-1~6)およびリング 3(R3-1~3)の合計 16 基が配置されており、1 つの反応度制御設備に制御棒系として 2 本の制御棒と 1 つの後備停止系を備えている。反応度制御設備の構造図を図 2.4 に示す。

#### (1) 制御棒系

制御棒系は、制御棒 2 本を 1 対として炉心内に 16 対配置され、1 対ごとに制御棒スタンドパイプ内に設置され、制御棒は制御棒駆動装置(CRDM)により炉心内を上下に移動する。原子炉スクラム時には、電磁クラッチの切り離しにより、制御棒は炉心内に自重により落下挿入される。

#### (2) 後備停止系

後備停止系(RSS: Reserved Shutdown System)は、制御棒系のバックアップとして、中性子吸収材である炭化ホウ素ペレットを炉心内に落下させ、原子炉を停止する機能を有するものであり、図 2.5 に示すように、炭化ホウ素ペレット(直径約 13mm、高さ約 13mm)、炭化ホウ素ペレットを収納するホッパ、電動プラグ、電動プラグを作動する駆動機構および案内管で構成する。駆動機構は、電動機、ポールネジ、電動プラグの位置検出器等から構成される。本装置の動作は、中央制御室の手動スイッチにより電動プラグが上下することによって、ホッパ内の炭化ホウ素であるペレットが炉心内に落下させるものである。電動プラグは、図 2.5 に示すようにモータを駆動させることによって上下させるが、作動しない時はモータの下部に配置されているブレーキによって電動プラグの駆動にブレーキをかけている。RSS 電動プラグ駆動モータが起動されると、

図 2.6 に示すように、起動電流が流れ、徐々に安定した電流に落ち着く。モータ起動後に安定した電流に達するまでの時間をモータ起動電流継続時間と定義する。モータ起動電流継続時間を測定することで、モータの引っかかり等の異常を検知できる。ブレーキは、無励磁作動スプリング型電磁ブレーキであり、図 2.7 に示すようにプレート、ディスク、コイルおよびアーマチュア等で構成され、モータの停止時には電磁ブレーキの保持力により停止位置を保持されている。本ブレーキは、励磁時（電圧印加時）にブレーキを開放し、無励磁時にはスプリングによる押し付け力により、ブレーキを動作させるものである。即ち、励磁時は電磁力により稼動アーマチュアに吸引力が働き、アーマチュアがブレーキ電磁コイル側に引っ張られ、摩擦力で軸を固定するブレーキディスクと引き離され、ブレーキが開放される。一方、無励磁時には、吸引された稼動アーマチュアがブレーキ軸方向に埋め込まれたスプリング力により、ブレーキディスクに密着、軸を固定するように動作する。ブレーキ動作説明図を図 2.8 に示す。ブレーキは電圧を印加するとコイルに電流が流れ、この電流はなだらかな右肩上がりで増加したのち、一定値に落ち着く。このように、コイルに電流が流れるとアーマチュアが吸引されるが、その際コイルに逆起電力が発生するため、これを妨げる向きに電流が流れようとする。その結果、アーマチュアの作動前後で特異点を有する電流応答波形となる。電流が流れ始めてから、特異点が現れるまでの時間をブレーキ開放時間と定義する。RSS のように、ブレーキ電源装置として直流全波整流電源を使用しているブレーキ電流応答波形の例を図 2.9 に示す。

RSS は、原子炉運転中において月に 1 回の作動試験が保安規定で義務付けられており、その作動状況を確認している。作動試験では、図 2.5 に示す電動プラグが炭化ホウ素ペレットの落ちない範囲で駆動することをランプ表示が点灯および消灯することによって確認する。電動プラグの引き抜きの場合は、盤面の「下限ランプ」が消灯および「試験（位置）ランプ」が点灯することを確認する。電動プラグを挿入の場合は、「試験（位置）ランプ」が消灯および「下限ランプ」が点灯することを確認する。また、作動試験時では、駆動範囲は 20mm であり、リミットスイッチによって約 2 秒後に停止する。万一、試験時に電動プラグが動きすぎて炭化ホウ素ペレットが落ちないように、タイマーによって駆動時間を最大 3 秒間に制限している。

### 3. 不具合事象の概要

#### 3.1. RSS の施設定期自主検査等の状況

平成 14 年度から順次毎年 4 基の RSS を炉外に取り出し、外観、作動試験等の点検を行っており（当該 R1-3 RSS は平成 15 年度に点検を行った。）、いずれの RSS にも異常は無かった。また、平成 12 年度から炉内据付状態での RSS の作動試験も、施設定期自主検査期間を除き毎月 1 回行なわれており、今回の事象まで異常は無かった。

#### 3.2. RSS の不具合発生前の原子炉運転状況

HTTR では平成 17 年 2 月 14 日から原子炉を起動し、炉停止余裕等の施設定期検査の自主検査として制御棒反応度価値測定を行い、2 月 18 日に施設定期検査を受検した後、C 制御棒を全挿入状態とした。翌 2 月 19 日 9 時 30 分から運転指示書の出力上昇ステップに基づき原子炉出力の上昇操作を開始した。

17時30分から原子炉出力を8.55MWから9MWへ出力上昇中、17時32分に「制御棒位置偏差大」のスクラム信号（R3 制御棒を除く制御棒間の位置偏差が 200mm 以上で発信し、原子炉出力 9MW までは手動でスクラムをブロックできるが、設定出力を超えるとブロックが自動解除されスクラムする。）により原子炉が自動停止した。

制御棒はすべて下限まで挿入され原子炉は安全に停止し、補助冷却設備が自動起動して崩壊熱除去運転を開始した。また、排気塔、原子炉施設内の放射線モニタの指示値も通常範囲であることを確認した。

### 3.3. RSS の不具合発生時の状況

計画外のスクラムであったが、通常の計画的に実行するスクラムと比較して、運転パラメータ等に有意な違いはなかった。2月19日のスクラムの原因は誤操作によるものであり、機器の故障に起因するものでないことから、2月21日から再起動のための起動前点検を実施していたところ、起動前点検のうち「後備停止系駆動装置の作動試験」を実施した際に、R1-3 の RSS が動作しない不具合が発生した。

点検は図 3.1 に示すように、RSS 制御盤を試験モードにした後、引抜押しボタン（以下、PB という）を押下し正常に動作することを電動プラグの位置表示ランプの点灯を確認することで行う。ここで R1-3 について、引抜 PB を押下しても電動プラグが下限に位置していることを示す「下限ランプ」が点灯し続け、電動プラグが試験位置まで上昇したことを示す「試験（位置）ランプ」が点灯しない不具合が発生した。

R1-3 RSS 動作不良の発生を確認後直ちに、RSS 制御装置盤にて、盤内の配線、端子及び表示灯を点検した。また、電動プラグのモータおよびブレーキの電圧、電流、絶縁抵抗、巻線抵抗を測定した結果、モータ電流が定格電流値の約 0.8A に対して約 2.5A が流れしており、モータが過負荷状態にあることから、後備停止系駆動機構内に問題があることが推定された。（2月21日の発生から2月22日までの間に、調査のため引抜 PB を約 25 回押下しているが、変化は認められなかった。）

さらに詳細な調査を行う体制が整った2月26日、モータ電流波形を取得するために引抜 PB を押下したところ、4回目の押下操作で「下限ランプ」が消灯したが、下限位置から約 20mm 上昇した時に表示される「試験（位置）ランプ」は点灯しなかった。この時のモータ電流は約 2.5A であり、ブレーキ電流は約 0.38A、ブレーキ開放時間は約 93ms であった。この測定結果から、モータの過負荷状態は継続しており、またブレーキ開放時間は他の健全な RSS のブレーキ開放時間と比較して伸びていることが判明した。

その後、2月27日に挿入 PB を押下したときの動作は、ブレーキ開放時間が 60ms と短くなり、また「下限ランプ」が点灯したことにより、RSS が動作していることを確認した。さらに、モータ電流は約 0.8A であり、正常値となった。ブレーキ電流は約 0.33A であり、正常に動作表示している R1-4RSS ブレーキ電流の約 0.36A とほぼ同じ値であった。ただしブレーキ開放時間は約 73ms であり、正常に動作表示している R1-4RSS の約 31ms に比べ長かった。

以上のことから、2月21日から2月26日までの間に発生していた R1-3 RSS の動作不良は、電磁ブレーキの作動不良が原因であった可能性が高いと考えられる。RSS の機能は復帰したものので、当該装置は原子炉停止系であることから、安全確保に万全を期すため、電磁ブレーキに着目した分解点検を実施し、不具合の原因を確認して適切な予防保全措置を講じることとした。

## 4. 原因調査

### 4.1 調査の進め方

3章にも記したとおり、RSS の動作不良は一時的なものであったが、当該設備はすべての制御棒が炉心に挿入されない場合、原子炉を安全に停止させるための設備という重要性から、安全確保に万全を期す必要がある。このため、①不具合の部位を特定することと、②さらにその原因を明らかにすることを目的にして、RSS の分解点検を行い、適切な予防保全措置を講ずることとした。

### 4.2 調査の工程および分解手順

不具合の発生から、本件に関わる全ての作業を終了するまでの工程を表 4.1 に示す。

2月 21 日の発生から 27 日までの調査した内容を検討し、2月 28 日の時点での分解点検が必要であると判断されたが、HTTR では RSS の分解点検は初めて行うため、分解作業に必要な治具の製作および分解作業要領の作成に時間が必要であったことから、分解点検作業の開始を 3月 30 日とした。ただし、先行して 3月 22 日から格納容器ハッチの開放、3月 28 日から分解作業を行う場所となるメンテナンスピット内機器の点検、制御棒交換機の点検等を行った。

4月 6 日から CRDM を炉内から取り出す作業を開始した。CRDM はメンテナンスピットに移動され、そこで汚染の無い部分を分離し、燃料取扱フロアに設置したグリーンハウス内に移し、4月 11 日から図 4.1 要因分析フローの 4~6・15 に示す分解前点検を実施した。

4月 17 日から RSS モータを分解し、図 4.1 要因分析フローの 7~14 に示す分解点検を実施した。この日、ブレーキ部に油分が浸入していることを外観点検で確認した。

RSS の分解は、図 4.2 示す作業・分解手順に従い行った。その手順は、RSS を炉心から制御棒交換機によって引き抜き、メンテナンスピットに移動し、分解前の点検として外観、電気および駆動試験を行った後、図 4.3 に示す RSS 駆動機構を燃料交換フロアに設置したグリーンハウスに移し、分解・調査を進めていった。調査の方法は、図 4.1 に示す要因調査フローに従い、発生事象「動作を示すランプが点灯しない」の 1 次要因を出発点として、不具合原因の発生場所を 2 次要因、3 次要因と細分化していく、それらについて電気的な原因と機械的な原因に分けて調査を実施した。図 4.2 示す各分解の段階で調査した事項については、図 4.1 に要因項目番号で示した。

5月 2 日から、再現試験と、RSS の機能の低下に対する油分浸入の影響を評価するための粘着模擬試験を行った。5月 16 日からグリースの分離油とブレーキディスクの磨耗粉の混合系のレオロジー特性の分析調査を行った。再現試験と粘着予測試験は 6月 1 日から開始した。

6月 3日に 2月 21日の事象を再現したことで、再現試験を終了した。引き続き粘着予測試験を実施し、6月 19日に終了した。

7月 1 日から復旧作業を開始し、7月 7 日に R1-3 を炉内へ据付け、作動確認を行った。その後格納容器燃料交換ハッチを 7月 14 日に閉鎖し、本調査に係る作業をすべて終了した。

### 4.3 不具合部位の調査および結果

不具合の部位を特定する調査では、図 4.1 に示すように「盤点検」と「本体の点検」に分類し、不具合の部位を特定することとした。

#### 4.3.1 RSS 駆動電源盤の点検

RSS への動力電源を供給する RSS 駆動電源盤について、盤表面の表示灯の断線等がないこと、盤内配線・端子の変色断線等がないこと、盤内電源では、動力電源の電圧低下等がないことを確認した。

この結果、RSS 駆動電源盤には、RSS の動作を妨げる要因はなかった。

#### 4.3.2 本体の点検

本体の点検では、電動プラグ・駆動軸および駆動機構が何らかの原因により、駆動の摩擦抵抗が増加した場合には、モータが過負荷状態となることが考えられるので、以下の点検を行った。

##### (1) 電動プラグ・駆動軸の点検

図 4.4 に示す電動プラグと案内管との干渉、駆動軸と電動プラグ上部ガイドとの干渉および駆動軸と制御棒駆動装置遮へい体内ガイドパイプとの干渉について仕様の検討および作動点検により調査を行った。

仕様の検討では、隙間寸法等を製作図および製作時の検査記録で確認し、干渉の恐れのないことを確認した。

作動点検では、R1-3RSS を炉外へ取り出した状態で電動プラグを試験位置まで引抜/挿入を行い、駆動中のモータ電流を測定した。モータ電流は約 0.8A であり、2 月 27 日の動作表示が正常に復帰した時の値（約 0.8A）とほぼ同じであること、目視にて電動プラグの駆動軸が円滑に作動することを確認し、当該部に干渉のないことを確認した。また、電動プラグの駆動力が大きいことから、干渉することによって駆動を損ねることはない。

##### (2) 駆動機構

駆動機構は、図 4.5 に示すようにモータ、ボルネジ、ボルナットガイドおよび平歯車等から構成され、これらの部品について外観点検等を行った。

###### 1) モータ

モータは、図 4.6 に示すように上からサイクロ減速機、モータ本体、ブレーキの順で縦に配置されており、これらの部品について分解・調査を行った。

###### 1) モータ本体

モータ本体は、図 4.7 に示すように、回転子鉄心、固定子鉄心、シャフトおよびオイルシールから構成される三相の誘導電動機である。これら構成部品の外観を図 4.8 に示す。調査は電気系と機械系に分けて行った。

電気系については、電気特性として電流、電圧、巻線抵抗および絶縁抵抗を測定並びに目視による破損、ケーブルの損傷および駆動中の異音の有無について調査を行った。

その結果、電気特性については、モータ駆動時の電流は定格の約 0.8A であり、電圧は定格の AC200V が印加されていることを確認した。巻線抵抗は設計値の  $35\Omega$  とほぼ同じであり、絶縁抵抗は管理値の  $10M\Omega$  異常であることを確認した。外観については破損、ケーブルの損傷がなく、異音も認められなかった。

機械系については、目視により破損、変形および異物の混入等についての点検を行った。その結果、図 4.9 に示すようにモータ本体上部に取付けられているオイルシールのばねが一部飛び出し、オイルシールに変形があることを確認した。また、モータ本体上部のオイルシール取り付け部に、グリースは認められなかつたが、サイクロ減速機のグリースから分離したオイル（以下「分離油」という。）の流れ込んだ跡が確認された。なお、モータ本体の構成部品の表面には、分離油が薄く付着していた。しかしながら、オイルシールの変形は、シャフトの駆動の摩擦抵抗を上げ、モータを過負荷状態にする直接の要因ではない。

#### ①) ブレーキ

ブレーキは、無励磁作動型電磁ブレーキであり、図 2.7 に示すようにヨーク、アーマチュア、ディスク、ハブおよびプレート等から構成される。ブレーキの分解状況を図 4.10 に示す。調査はモータ本体と同様に電気系と機械系に分けて行った。

電気系については、電気特性として電流、電圧、巻線抵抗および絶縁抵抗を測定並びに目視による破損、ケーブルの損傷および駆動中の異音の有無について調査を行った。

その結果、ブレーキ電流は約 0.33A で巻線抵抗から計算した値とほぼ同じであり、電圧は定格の DC24V が印可されていたことを確認した。巻線抵抗は設計値の  $82\Omega$  とほぼ同じであり、絶縁抵抗は管理値の  $20M\Omega$  以上であることを確認した。外観については破損、ケーブルの損傷がなく、異音も認められなかつた。

機械系については、目視により破損、変形等の異常の有無を確認するとともに、ブレーキ動作の確認を行つた。その結果、ブレーキの動作確認では、ブレーキ動作時の音を聴音棒を用いて比較したところ、予備品のモータのブレーキ動作音は金属音であったが、R1-3RSS ブレーキ解除時の動作音は鈍かつた。また、ブレーキ開放時間は約 38ms であった。この時間は、分解前に測定した時間より短くなっているが、R1-4RSS（約 31ms）に比べて若干長かった。

外観点検では、ヨーク、ハブには、分離油とディスクの表面に接着されているポリイミド樹脂の黄色磨耗粉（以下、磨耗粉といふ。）が付着していた。また、プレートとディスクの間およびアーマチュアとディスクの間には、分離油と磨耗粉の混合物が付着しており、アーマチュアとディスクは混合物によって粘着していた。図 4.11 に粘着状況を、また、図 4.12 にブレーキの構成部品の外観を示す。

従つて、アーマチュアとディスクが混合物によって粘着していたことが RSS の動作を妨げる要因になると考えられる。

#### ②) サイクロ減速機

サイクロ減速機はモータ本体上部に取り付けられモータの回転数を約 1/90 に減速する。機械的な異常があり大きな抵抗力を生じている場合には、モータが過負荷状態になることが考えられるので、目視により異物の混入および外観に損傷がないことを確認し、また、手動により、異音がなく円滑に回転することを確認した結果、RSS の動作を妨げる要因はない。サイクロ減速機の外観を図 4.13 に示す。

#### 2) ポールねじ

ポールねじはモータの回転運動を直線運動に変換するものであり、ポールねじ・ナット間の干渉およびポールねじ用軸受・ポールねじの干渉について、目視により、有害な傷および異物の有無、また、駆動軸、平歯車 1 を取り外して、手動により平歯車 2 を回転させた時の円滑は

作動、異音の有無を確認し、異常のないことを確認した。

### 3) ボールナットガイド

ボールナットガイドは、図4.5に示すようにリニアボールベアリングとボールナットガイド用シャフトにより構成される。電動プラグは駆動軸に片持構造でボールねじのナットに固定されているため、ボールナットガイドで偏心を防止している。これらの部品について目視により、有害な傷および異物の有無、また、駆動軸、平歯車1を取り外して、手動により平歯車2を回転させた時の円滑な作動、異音の有無を確認し、異常のないことを確認した。

### 4) 平歯車

平歯車1および2は、モータの回転運動をボールねじに伝達するものであり、歯車に何らかの抵抗が生じた場合には、この伝達が妨げられることが考えられるので、平歯車を取り外して、目視により歯面の欠け、損傷、異物のないことを確認した。

以上のことから、不具合の部位は、駆動機構のうち、モータ本体上部に取付けられている変形したオイルシールと、磨耗粉と分離油の混合物により粘着したモータの構成部品であるブレーキであることを特定した。ただし、オイルシールの変形は、シャフトの駆動に摩擦抵抗を上げ、モータを過負荷状態にする直接の原因ではなかった。

## 4.4 不具合の原因を明らかにする調査および結果

4.3項の調査結果からオイルシールの変形と、分離油と磨耗粉の混合物によるブレーキの粘着について調査・検討を行った。

### 4.4.1 オイルシール変形についての検討

モータ本体上部に取付けられているオイルシールの変形が認められたことから、この要因および変形が起こった時期についての調査を行った。

(1) R1-3RSS オイルシールの変形の原因を調査するため、オイルシールの変形の要因と考えられる組立不良、仕様と異なった部品の使用、材料の劣化および潤滑切れ等について、予備品のモータとの外観および寸法の比較、仕様の確認ならびに潤滑切れを模擬した動作試験を行った。

原因調査の結果を表4.2に示す。また、このうち主な結果は、以下のとおりである。

- ・R1-3RSS のオイルシールに潤滑切れに起因する焼き付きおよび劣化は認められなかった。  
(図4.14参照)
- ・R1-3RSS のオイルシールにシャフトと接触して付いた磨耗痕が認められるが、予備品のモータのオイルシールに比べて磨耗幅が狭い。(図4.14参照)
- ・R1-3RSS のシャフトにオイルシールと接触して付いた接触痕が認められるが、予備品のモータのシャフトに比べて接触痕の幅は狭く、傷の深さは浅かった。(表4.3参照)
- ・R1-3RSS のシャフトには、ばねが接触して発生したと思われる接触痕が認められ、ばねの拡大観察をしたところ、ばねには、シャフトと接触したと思われる傷が認められた。(図4.15参照)

(2) オイルシールの変形の時期を調査するため、RSSの組立・据付工程を確認した。

RSSの組立・据付工程は、工場およびHTTRの現地作業に大別される。

### 1) 工場での主要な組立工程

- イ. ブレーキの組立後、オイルシールを組み込んだモータ本体にブレーキを取り付け、モータ本体・ブレーキの作動試験を行う。
  - ロ. モータ本体・ブレーキにサイクロ減速機を取り付け後、モータの作動試験を行う。(予備品のモータは、この工程の作動試験後 HTTR に納入)
  - ハ. モータを駆動機構へ組み込んだ後、駆動機構の作動試験を行う。
- 二. 駆動機構を RSS へ組み込んだ後に CRD に組み込み、駆動機構の作動試験を行う。

## 2) HTTR の現地での主要な組立・据付工程

- イ. CRD (RSS を含む) 搬入後、RSS の作動試験を行う。
- ロ. CRD (RSS を含む) の組立、炭化ホウ素ペレットを装荷し RSS の作動試験を行う。
- ハ. CRD (RSS を含む) を炉内へ据え付ける。

以上の調査により、①R1-3RSS のオイルシールに磨耗痕が認められたことから、R1-3RSS は上記 1)ロ.の工程以前には、オイルシールに変形がなかったと推定されること ②R1-3RSS のオイルシールには、焼き付きおよび劣化が認められないことから、潤滑切れに起因する変形とは考えにくいこと ③R1-3RSS のオイルシールの磨耗幅が予備品のモータのオイルシールの磨耗幅と比べ狭く、シャフトの接触痕も浅いことから、変形した時期は上記 1)ハの工程以前と推定されること ④オイルシールの寸法および仕様等に問題ないこと等が判明した。これらのことから、R1-3RSS のオイルシールは、オイルシールの組立不良により、工場組立の段階で変形し、ばねが外れたものと推定した。

### 4.4.2 粘着現象

粘着現象は、磨耗粉と分離油の混合物によって発生していることより、この現象の再現を確認するため、混合物の物性等の調査およびこれに係わる試験を実施した。

#### (1) 粘着物に係る物性の調査

##### 1) ブレーキの混合物のオイル分

油分については、モータ本体上部に設置されているサイクロ減速機に塗布されているグリースが分離して変形したオイルシールの隙間を通って流れてきたと推測されることから、グリースの分離した油とブレーキに付着している油を赤外分光分析により比較した。分析の結果を図 4.16 に示す。透過率の絶対値の差は、両試料の量の違いによるものであるが、赤外スペクトルは重なっている。これは、モータ本体上部のサイクロ減速機のグリースの分離油(ベース油)と成分とその組成が同等と見なせるため、オイル分はモータ本体上部のグリースの分離油であることを確認した。

##### 2) ブレーキの混合物の磨耗粉

ブレーキのディスクは、ステンレス製であり、表面にポリイミド樹脂が接着されている。R1-3 ブレーキディスク面に付着していた混合物から黄色粉末のみを分離させることができなかつたため、フーリエ変換赤外分光分析装置を用いて混合物と固形分の混ざっていない分離油のみの赤外線吸収スペクトルを比較した。分析の結果を図 4.17 に示す。1650~1800cm<sup>-1</sup>に、分離油には無い吸収ピークがある。この吸収帯は、炭素と酸素の二重結合 (C = O) の吸収帯であり、またブレーキディスクの材質も C=O を含むポリイミドである。更に、ブレーキを構成するその他の材料はこの二重結合を含むものがないことから、混合物中の固形分は、ブレーキディスクの磨耗粉であると判断した。また、R1-3RSS のブレーキを用いてモー

タ単体の作動試験を行った結果、ディスクとプレートの間およびディスクとアーマチュアの間に黄色の磨耗粉が発生することが分かった。磨耗粉の発生状況を図 4.18 に示す。

### 3) ブレーキの混合物

1), 2)の結果から、ブレーキの混合物は、サイクロ減速機に塗布されているグリースの分離油と、ブレーキのディスクの表面のポリイミド樹脂の磨耗した磨耗粉の混合物であることを確認した。混合物の粘着力は、磨耗粉と分離油の混合比によって異なることから、粘着力と磨耗粉および分離油の混合比との関係を調べるとともに、ブレーキに付着していた粘着物の混合比をフーリエ変換赤外分光分析装置により分析を行った。

#### ○ 粘着力と磨耗粉および分離油の混合比との関係

ポリイミド樹脂から採取した磨耗粉と分離油と同じ成分の油の混合比を変化させ、そのときの粘着力を測定した。その結果、図 4.19 に示すように最大の粘着力は約 25wt%（混合物に対する磨耗粉の重量）の混合比のときに生じることを確認した。

#### ○ 粘着物の磨耗粉と分離油の混合比および粒径分布

事前に作成した 0, 5, 10, 15, 20wt% の混合比の混合物の分析結果と粘着物の分析結果を比較した。その結果、図 4.20 に示すように混合比は 10~15wt% であることを確認した。また、顕微鏡検査により磨耗粉の粒径は、約 1~10μm に多く分布していることが分かった。

### (2) 粘着模擬試験

RSS の作動試験では、ブレーキが解除されモータが作動し、電動プラグが上下する。この時にブレーキに磨耗粉と分離油があると作動試験をするたびにブレーキのディスクが回転し、磨耗粉と分離油が攪拌されて混合・練り合わされる。このことからモータ作動回数（練り合わせ回数）と粘着力の関係および RSS の動作を妨げたことの再現を確認するため、粘着模擬試験を行った。実施にあたっては、ブレーキの混合物の磨耗粉と同じ粒径の磨耗粉（約 1~10μm）を用いて、試験条件が厳しくなるように、R1-3RSS のブレーキの混合物の混合比を超える約 20wt% の混合比に、磨耗粉と分離油を練り合わせた混合物をディスクの上下面に塗り、モータのみで RSS の作動試験（引抜・挿入）を模擬した試験を行った。試験では、ブレーキの動作を確認するためのブレーキ開放時間とモータ起動電流継続時間を測定した。RSS の作動試験時、電動プラグが試験位置から下限位置の間を駆動時間は 2500ms 以内である。作動試験時にモータの過負荷状態が 500ms 以上継続しモータの動作を妨げると、モータは、電動プラグがリミットに到達する前にタイマー（3 秒）によって停止し、表示ランプは点灯しないと考えられる。このことから、模擬試験では、モータ起動電流継続時間が 500ms 以下の場合をモータの正常動作とした。また、ブレーキの動作は、ブレーキが粘着している場合、ブレーキ電流波形にブレーキが解除動作した時に見られる電磁作用による電流の過渡低下が認められないことをブレーキの動作不良とした。

試験の結果は表 4.4 に示すように、作動試験回数が 39 回の場合は、ブレーキは解除し正常であったが、モータ起動電流継続時間は 1236ms であり、モータの動作は不良であった。作動試験回数が 44 回の場合は、ブレーキは解除せず、モータ起動電流継続時間は 2000ms 以上でモータの回転はほぼ固着状態となり、ブレーキおよびモータの動作不良の再現を確認した。

以上のことから、混合物のオイル分はモータ本体上部のグリースの分離油であり、磨耗粉はディスク表面に接着されているポリイミド樹脂であること、磨耗粉と分離油が十分に練り合わせ（攪

拌) しないと RSS の一時的な動作不良は発生しないことを確認した。

#### 4.5 動作不良が発生したメカニズムおよび原因

##### (1) オイルシールの変形

R1-3RSS のオイルシールに磨耗痕が認められたこと、磨耗幅は予備品のモータの磨耗幅と比べ狭いこと、さらに焼き付きおよび劣化が認められないこと等から、オイルシールは、工場組立の初期の段階で変形し、ばねが外れた。

##### (2) オイルシールの変形による分離油の流入

モータ本体上部に取付けられているサイクロ減速機のグリースからの分離油が、変形したオイルシールの隙間を伝わり、長期間にわたってモータ本体内部に流れ込んだ。

##### (3) 分離油の流入経路

モータ本体内部に流入した分離油は、シャフトに沿ってブレーキへ流れていった。

##### (4) ブレーキ部での磨耗粉と分離油の混合

ブレーキへ達した分離油は、作動試験によりディスクとプレートの間およびディスクとアーマチュアの間に生じた磨耗粉と練り合わされた。

##### (5) ブレーキの解除を阻害した粘着

ブレーキへの分離油の浸入及び作動試験による分離油と磨耗粉との練り合わせが、長期間にわたって行われ、徐々に混合物に粘着力が生じ増大した。このため、ディスクとプレートの間およびディスクとアーマチュアの間が粘着し、ブレーキの解除を阻害するに至った。

##### (6) 電動プラグの動作の不具合

ディスクとプレートの間およびディスクとアーマチュアの間に生じた混合物による粘着力によりブレーキが解除されず、モータの回転を阻害した。その結果、電動プラグが一時的に動作せず位置表示灯が点灯しなかった。

## 5. 対策

今後の対策に先立ち、炉内に挿入されている R1-3RSS 以外の RSS についての健全性を確認するため、ブレーキに分離油が浸入したことを検知する方法を確認するための予備試験、また、磨耗粉と分離油が混合した後、練り合わせ(攪拌)が進むことで粘着が高まることを確認したことから作動試験の回数に対する粘着特性を確認するための粘着予測試験を行い、これらの試験結果を元に R1-3RSS 以外の RSS の健全性を確認するとともに、後述の対策を講じることとした。

### 5.1 分離油の浸入についての検討

R1-3 以外の RSS についてのブレーキへの分離油の浸入およびその健全性を確認するため、および、作動試験の回数に対する粘着特性を確認するための以下の 2 つの試験を行った。

#### 5.1.1 予備試験

これまでの試験結果から、ブレーキに混合物が付着している場合は、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間に変化が現れることが確認されていることから、以下の条件においての RSS の作動試験を模擬した試験を行い、各時間を測定した。

試験の条件および結果は、以下のとおりである。

- (1) ブレーキに分離油および磨耗粉が浸入していない場合
  - ・モータ起動電流継続時間 : 約 81~85ms
  - ・ブレーキ開放時間 : 26~27ms (3 サイクル<sup>\*1</sup>相当)
- (2) ブレーキに分離油が浸入している場合
  - ・モータ起動電流継続時間 : 約 161~184ms
  - ・ブレーキ開放時間 : 38ms (4 サイクル相当)
- (3) ブレーキに磨耗粉と分離油が混在している場合 :
  - ・モータ起動電流継続時間 : 約 161~202ms
  - ・ブレーキ開放時間 : 38~47ms (4~5 サイクル相当)

この試験結果から、分離油および磨耗粉が浸入していない場合に比べ、ディスクに分離油が浸入している場合および磨耗粉と分離油が混在している場合は、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間が共に増加することが明らかになった。

のことから、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間を測定することで早期に分離油の浸入を検知できることを確認した。

### 5.1.2 粘着予測試験

5.章の粘着模擬試験の結果より、磨耗粉と分離油が混合した後、練り合わせ（搅拌）が進むことで粘着力が高まることを確認したことから、粘着予測試験では、ブレーキに磨耗粉がある状態から分離油が浸入し、最大の粘着力となる混合比（25wt%）の混合物が発生する場合を保守的に想定して、磨耗粉と分離油を混合しないで、別々にブレーキに塗布した。さらに、練り合わせが進むように RSS の作動試験（引抜・挿入）を模擬した試験を行い、作動試験の回数（搅拌回数）に対する粘着特性の確認を行った。

試験の結果を表 5.1 に示し、その内容は以下のようにまとめられる。

- (1) 1 回の作動試験でブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間は、それぞれ 28ms (3 サイクル相当) から 38ms (4 サイクル相当)、および、約 105ms から約 202ms に増加した。
- (2) 引続き、約 22 回作動試験を行ったところ、モータ起動電流継続時間が急に増加したが、ブレーキは解除できることを確認した。

以上のことより、ディスクに分離油が浸入している場合は、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間を測定することで早期に分離油の浸入を検知できること、さらに、保守的に最大の粘着力となる混合比（25wt%）の混合物が発生する場合を想定しても、RSS の性能が維持できなくなるまでには、数回の作動試験を要することを確認した。

## 5.2 R1-3 以外の RSS の性能確認

5.1.1 の結果を基に、分離油または混合物の浸入の有無を確認するため、R1-3 以外の他の 15 基の RSS について、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間の測定を行った。また、モータおよびブレーキの健全性を確認するために電流および絶縁抵抗等の電気特性を測定し、製

---

<sup>\*1</sup>サイクル：コイルに印加される全波整流した電流にみられる波形の周期（1 サイクル（約 10ms））。

作時のものと比較を行い、その性能を確認した。

ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間の測定結果を表 5.2 に、巻線抵抗、絶縁抵抗および電流の測定結果を表 5.3 に示す。測定の結果の概要を以下に示す。

(1) ブレーキ開放時間の確認

ブレーキ開放時間は 28~31ms (3 サイクル相当) であった。

(2) モータ起動電流継続時間の確認

モータ起動電流継続時間は、約 81~87ms であった。

(3) 巷線抵抗、絶縁抵抗の確認

巷線抵抗は、設計値 (モータ本体は  $35\Omega$ 、ブレーキは  $82\Omega$ ) とほぼ同じであること、絶縁抵抗は、管理値 (モータ本体  $10M\Omega$  およびブレーキは  $20M\Omega$ ) 以上の値であった。

(4) 動作表示確認 (下限消灯から試験位置点灯までの時間)

動作表示灯の確認及び下限消灯から試験位置点灯までの時間を測定した結果、正常動作を示す表示灯の点灯を確認するとともに作動時間が約 2.1~2.4s であった。その結果は、平成 12 年度から今まで測定した (1 回/年) データの約 2.0~2.4s とほぼ同じであった。

(5) モータ電流の確認

モータ電流は、モータが過負荷状態でない約 0.6~0.7A (モータの定格電流値 0.8A) であった。

(6) ブレーキ電流の確認

ブレーキ電流は、約 0.33~0.35A であり、巷線抵抗から算出した電流値とほぼ同じ値であった。

以上のことより、R1-3 以外の他の 15 基は、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間が、ブレーキに分離油が浸入していない場合と同じ値であること、また、他の特性の値が製作時と同じであることから、分離油の浸入はなく、性能に問題ないと判断できる。

### 5.3 対策

- (1) R1-3RSS については、当該モータを予備品のモータと交換する。
- (2) 全ての RSS のモータが交換される間、RSS の運転中に 1 回／月で実施する作動試験においては、表示灯の点灯による作動の確認に加えて、ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間の測定を行い RSS の機能が維持されていることを確認する。
- (3) 全ての RSS モータを今後 5 年以内に交換する予定とする。

## 6. おわりに

施設定期検査期間中の原子炉停止時に RSS の作動試験を行ったところ、正常動作を示す表示ランプが点灯しない不具合が発生した。この原因を調査したところ、モータ上部にあるオイルシールが変形していたこと、ブレーキに粘着物が付着しておりブレーキが解除されなかつたことが分かった。

不具合の推移は、モータ上部にある変形したオイルシールの隙間を伝わって分離油がブレーキに到達し、ブレーキの磨耗によって発生したポリイミド樹脂の磨耗粉と混合し練り合わさったことによって、混合物が粘着物となり、ブレーキの解除を阻害し、モータの駆動を妨げ RSS の動作の不具合を引き起こしたものである。

また、モータ起動電流継続時間およびブレーキ開放時間を測定することによって、ブレーキに分離油が浸入したことが確認できることから、炉心に挿入されている R1-3 以外の RSS の各時間を測定した結果、R1-3 以外の RSS は、全て、分離油の浸入はなく、性能に問題ないと判断した。

今後は、全ての RSS の分解点検を実施するまでは、作動検査時にモータ起動電流継続時間およびブレーキ開放時間を測定し、分離油が浸入していないことおよび RSS の健全性を確認する。

### 謝辞

本調査を進めるにあたり、多大なご指導、ご助言を頂いた小森芳廣 高温工学試験研究炉部長、中澤利雄次長、川崎幸三次長、井与久達夫次長、藤本望 原子炉主任技術者、及び同部の皆様方に感謝いたします。

本調査及び原子炉施設保安規定と HTTR 運転手引の改定に係る作業に尽力していただいた、高温工学試験研究炉部の関係各位に感謝いたします。

また各種分析機器を使用させていただいた、核熱応用工学ユニット 馬場信一氏、山地雅俊氏(現 東洋炭素)、柴田大受氏、角田淳弥氏に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Saito S., et al.:JAERI 1332 “Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)” (1994)
- 2) Fujikawa S., et al.” Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR”, J. Nucl. Sci. Technol., 41, 12(2004)
- 3) 藤川正剛,他：“HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”, 原子力誌, 1, 4(2002)
- 4) 原研：“日本原子力研究所大洗研究所設置許可申請書「HTTR（高温工学試験研究炉）原子炉施設の設置」” (1989)

This is a blank page.

## 図表リスト

- 表 2.1 HTTR の基本仕様  
 表 4.1 調査の工程  
 表 4.2 オイルシール変形の調査結果  
 表 4.3 シャフトの接触痕の状況  
 表 4.4 粘着模擬試験結果  
 表 5.1 粘着予測試験結果  
 表 5.2 ブレーキ開放時間およびモータ起動電流継続時間測定結果  
 表 5.3 卷線抵抗、絶縁抵抗および電流測定結果

- 図 2.1 HTTR 冷却設備系統  
 図 2.2 反応度制御設備の設置状況  
 図 2.3 炉心配置図  
 図 2.4 反応度制御設備構造図  
 図 2.5 後備停止系構造図  
 図 2.6 モータ起動電流継続時間説明図  
 図 2.7 ブレーキ構造図  
 図 2.8 ブレーキ動作説明図  
 図 2.9 ブレーキ電流応答波形  
 図 3.1 RSS 制御盤  
 図 4.1 要因調査フロー  
 図 4.2 作業・分解手順  
 図 4.3 RSS の分解  
 図 4.4 後備停止系駆動装置構造図  
 図 4.5 駆動機構構造図  
 図 4.6 モータ外観  
 図 4.7 モータ構造図  
 図 4.8 モータ本体構成部品外観  
 図 4.9 オイルシール変形図  
 図 4.10 ブレーキ分解状況  
 図 4.11 アーマチュアとディスクの粘着状態  
 図 4.12 ブレーキ構成部品外観  
 図 4.13 サイクロ減速機外観  
 図 4.14 オイルシール外観状況  
 図 4.15 オイルシールばねの外観  
 図 4.16 オイルの赤外線吸収スペクトル分析結果  
 図 4.17 磨耗粉の分析結果  
 図 4.18 磨耗粉発生状況  
 図 4.19 粘着力が最大となる混合比  
 図 4.20 粘着物の混合比測定結果

This is a blank page.

表 2.1 HTTR の基本仕様

項 目	仕 様
原子炉熱出力	30MW
1次冷却材	ヘリウムガス
原子炉入口冷却材温度	395°C
原子炉出口冷却材温度	850°C (定格運転時) 950°C (高温試験運転時)
1次冷却材圧力	4MPa
炉心構造材	黒鉛
炉心有効高さ	2.9m
炉心等価直径	2.3m
出力密度	2.5MW/m <sup>3</sup>
燃料	二酸化ウラン・被覆粒子/黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3~10% (平均 6%)
燃料体形式	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製 (2 1/4Cr-1Mo 鋼)
冷却回路数	1 ループ (中間熱交換器および加圧水冷却器)

表 4.1 調査の工程 (1/2)

作業項目	2月										3月										4月																		
	月日	21	22	23	24	25	26	27	28	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
1.調査項目等の検討																																							
2.盤内詳細調査 ①②③																																							
3.電気系の調査 (7)(8)																																							
4.分解要領の検討																																							
5.分解台具の製作等																																							
6.格納容器ハッチ取外し																																							
7.シランクス等の内機器点検、 制御棒交換機の点検 (注入部機器を含む)																																							
8.運動装置等の炉内からの 取り出し																																							
9.分解前点検																																							
10.分解点検 (7)~(14)																																							
11.原因調査																																							
12.ケーシング内のオイル 成分分析																																							
13																																							
14																																							
15																																							

表 4.1 調査の工程 (2/2)

月日	作業項目	開始日	終了日
5月	11.原因調査	5/1	5/1
	12.組立及び組立後点検	5/10	5/15
	13.駆動装置等の炉内への移動搬付	5/15	5/20
	14.炉内での作動確認	5/20	5/25
	15.格納容器ハッチ閉鎖	5/25	5/30
6月	16.再現試験	6/1	6/15
	17.データベース建玉粉の作製	6/15	6/20
	18.粘着物の物性調査	6/20	6/25
	19.再現試験用高純度石英粉	6/25	6/30
	20.2/2の現象を再現	6/30	7/5
7月	21.レーザー顕微鏡でコイルバネの傷を確認	7/5	7/10
	22.原因調査	7/10	7/15

表4.2 オイルシール変形の調査結果

(1/2)

要因	調査内容	調査結果	異常の有無
潤滑切れ	オイルシールの外観確認	オイルシールの潤滑切れに起因する焼き付きのないことを確認した。	×
	潤滑切れを模擬したモータ動作試験	新品のオイルシール及び予備品のモータを使用し、オイルシールにグリースを塗布せずに潤滑切れを模擬してモータ動作試験を行ったところ、約5分間の連続動作で、オイルシールとの接触部が焼きつき、黒色の粉末の発生及び異臭が確認された。しかし、オイルシールの変形、ばねの外れは起らなかった。	×
施工不良	オイルシールの外観確認	R1-3RSSと予備品のモータのオイルシールについて、拡大観察を実施した結果を以下に示す。 ・ R1-3RSSのオイルシールにシャフトと接触して付いた磨耗痕が認められるが、予備品のモータのオイルシールに比べて磨耗量は少ない。 ・ オイルシール変形の起点となつた部分2箇所にへこみがある。 オイルシール外周に損傷はない。	△
	シャフトの外観確認	R1-3RSSと予備品のモータのシャフトについて、拡大観察を実施した結果を以下に示す。 ・ R1-3RSSモータのシャフトにオイルシールと接触して付いた接触痕が認められるが、予備品のモータのシャフトに比べて接触痕の幅は狭く、深さは浅い。 ばねが接触して付いた接触痕が認められた。	△
	ばねの外観確認	ばねの拡大観察を行い、シャフトと接触した傷を確認した。	△
	オイルシール取付け部の外観確認	オイルシール取り付け部の外観を確認し、損傷のないことを確認した。	×
	オイルシール組み高さ測定	オイルシール組み高さを測定し、組込高さが規定値以内であることを確認した。	×
	シャフトの偏芯測定	シャフトの偏芯を測定し、シャフトの偏芯が規定値以内であることを確認した。	×

(2/2)

要 因	調 査 内 容	調 査 結 果	異常の有無
仕様と異なった部品の使用	仕様の確認 部品の寸法測定等	オイルシールの刻印を確認し、仕様通りのものであることを確認した。 <シャフト> シャフトの外径及び表面粗さを測定し、規定値以内であることを確認した。 <オイルシール> オイルシール内径、外径、幅を測定し、規定値以内であることを確認した。 また、オイルシールのばねが嵌め込み部に、ばねか正しく取付けられることを確認した。なお、ばねによる圧迫力が交換品のオイルシールと同等であることを確認した。 <オイルシール取付け部> オイルシール取付け部の内径を測定し、規定値以内であることを確認した。	×
材料の劣化	オイルシール劣化	オイルシールの外観観察により、劣化による割れ等がないこと及び硬さ測定により劣化がないことを確認した。	×
△；オイルシールの変形又はばねの外れの要因になる可能性がある		×；異常なし	

表 4.3 シャフト接触痕の状況

## 【接触痕の幅】

## R1-3RSSモータのシャフト

単位:  $\mu\text{m}$ 

測定方位	①ばねとの接触痕	②オイルシールとの接触痕
0度	149	585
60度	132	761
120度	185	516
180度	175	754
240度	176	815
300度	156	921
平均	162	725

## 予備品モータのシャフト

単位:  $\mu\text{m}$ 

測定方位	②オイルシールとの接触痕
0度	836
60度	834
120度	860
180度	849
240度	852
300度	843
平均	846

\* ばねとの接触痕はない。

## 【接触痕の深さ】

## R1-3RSSモータのシャフト

単位:  $\mu\text{m}$ 

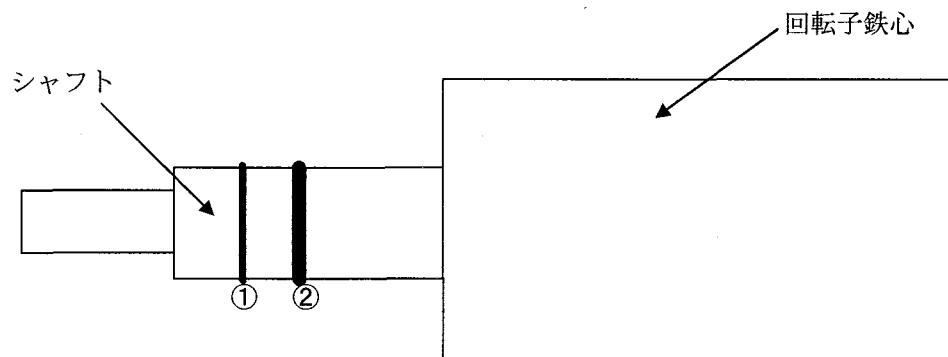
測定方位	①ばねとの接触痕	②オイルシールとの接触痕	
		上側	下側
0度	5.7	7.7	6.2
60度	7.2	8.2	2.6
120度	5.1	8.2	4.1
180度	4.6	8.2	5.7
240度	7.7	8.2	4.6
300度	7.2	8.7	8.7
平均	6.3	8.2	5.3

## 予備品モータのシャフト

単位:  $\mu\text{m}$ 

測定方位	②オイルシールとの接触痕
0度	9.8
60度	9.8
120度	10.8
180度	8.7
240度	13.7
300度	8.7
平均	10.3

\* ばねとの接触痕はなく、また、接触痕深さは、上・下側とも同等。



シャフト接触痕幅、深さ測定箇所 説明図

表 4.4 粘着模擬試験結果

試験条件 (作動回数)	モータ起動電流 継続時間	ブレーキ 開放時間	モータ 正常動作 ※1	ブレーキ 動作 ※2
初期値 (1回)	140ms	38ms (4 サイクル)	○	○
6/2 (39回)	1236ms	38ms (4 サイクル)	×	○
6/3 引抜(43回)	1646ms	動作せず	×	×
6/3 挿入(43回)	1823ms	動作せず	×	×
6/4 引抜(44回)	2000ms 以上	動作せず	×	×
6/4 挿入(44回)	2000ms 以上	動作せず	×	×

※1 モータ正常動作とは、モータ起動電流継続時間が 500ms 以下とする

※2 ブレーキ動作とは、ブレーキ解除の可否をいう。

#### 試験条件

混合比（約 20%）で、磨耗粉と分離油を練り合わせた混合物をディスクの上下に塗り、RSS の作動試験（引抜・挿入）を模擬する。

表 5.1 粘着予測試験結果

試験条件 (作動回数)	モータ起動電流 継続時間	ブレーキ 開放時間	モータ 正常動作 ※1	ブレーキ 動作 ※2
初期値 引抜(1回)	105ms	28ms (3サイクル)	○	○
挿入(1回)	202ms	38ms (4サイクル)	○	○
6/5 挿入(8回)	570ms	38ms (4サイクル)	×	○
6/9 引抜(19回)	786ms	38ms (4サイクル)	×	○
6/11 引抜(21回)	859ms	37ms (4サイクル)	×	○
6/11 挿入(21回)	1101ms	38ms (4サイクル)	×	○
6/12 引抜(22回)	481ms	38ms (4サイクル)	○	○

※1 モータ正常動作とは、モータ起動電流継続時間が 500ms 以下とする

※2 ブレーキ動作とは、ブレーキ解除の可否をいう。

#### 試験条件

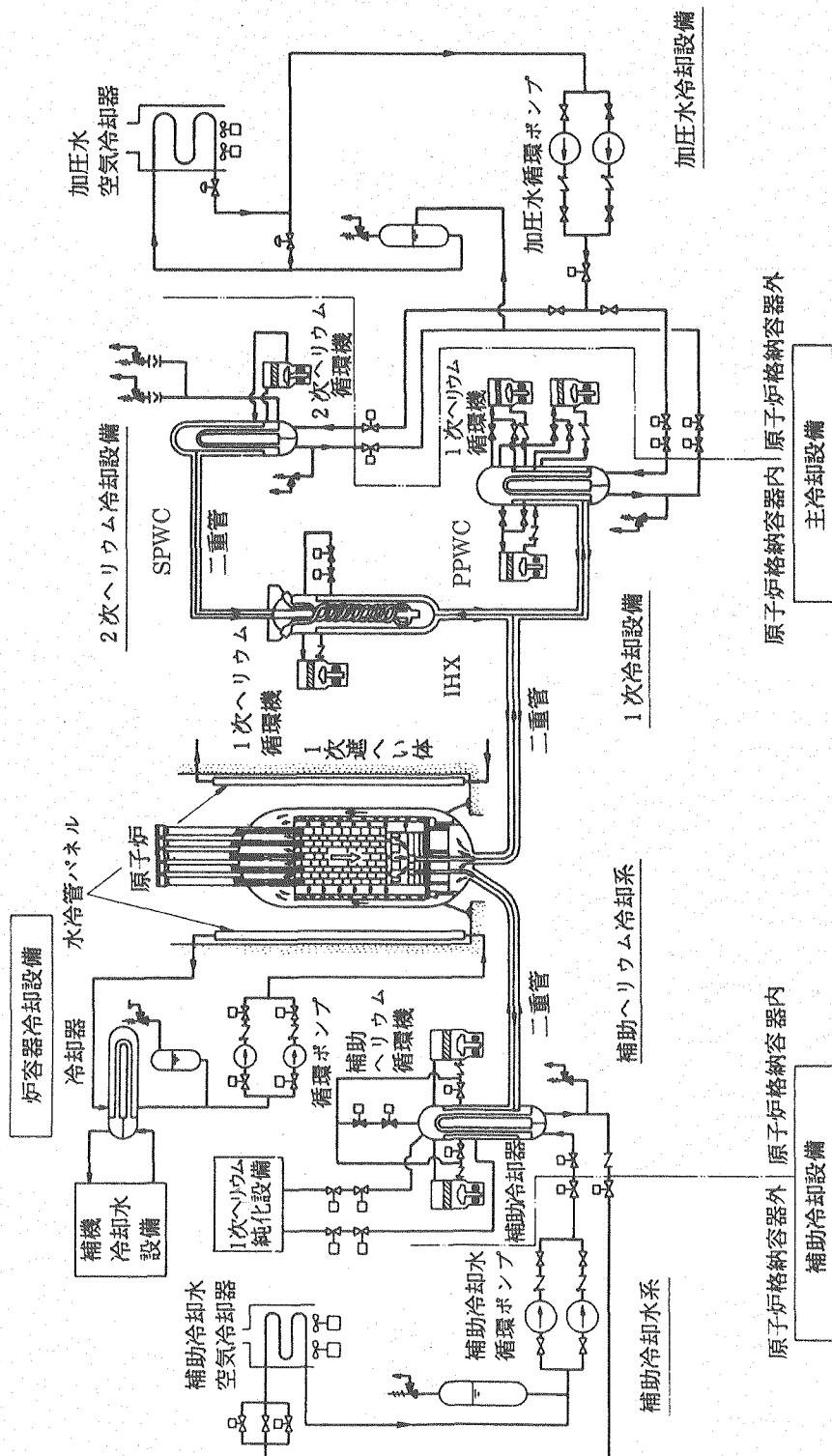
最大の粘着力となる混合比 (25%) で、磨耗粉と分離油を混合しないで、別々にブレーキに塗布し、RSS の作動試験 (引抜・挿入) を模擬する。

表 5.2 ブレーク開放時間およびモータ起動電流継続時間測定結果

制御棒No.	操作	ブレーク開放時間			モータ起動電流継続時間 [ms]	ランプ点灯状態	
		引抜/挿入	引抜[ms]	挿入[ms]		サイクル相当	引抜一「下限」消灯、「試験」点灯 挿入一「下限」点灯、「試験」消灯
C	引抜 挿入	30 -	- 28	3 3	3 84	84 83	○ ○
R1-1	引抜 挿入	29 -	- 29	3 3	3 87	87 82	○ ○
R1-2	引抜 挿入	29 -	- 29	3 3	3 84	84 81	○ ○
R1-4	引抜 挿入	29 -	- 29	3 3	3 85	85 81	○ ○
R1-5	引抜 挿入	30 -	- 31	3 3	3 84	84 82	○ ○
R1-6	引抜 挿入	30 -	- 29	3 3	3 85	85 81	○ ○
R2-1	引抜 挿入	28 -	- 29	3 3	3 85	85 82	○ ○
R2-2	引抜 挿入	30 -	- 30	3 3	3 85	85 82	○ ○
R2-3	引抜 挿入	30 -	- 31	3 3	3 84	84 81	○ ○
R2-4	引抜 挿入	31 -	- 29	3 3	3 85	85 82	○ ○
R2-5	引抜 挿入	28 -	- 29	3 3	3 85	85 82	○ ○
R2-6	引抜 挿入	28 -	- 29	3 3	3 85	85 82	○ ○
R3-1	引抜 挿入	29 -	- 29	3 3	3 86	86 82	○ ○
R3-2	引抜 挿入	29 -	- 29	3 3	3 84	84 82	○ ○
R3-3	引抜 挿入	29 -	- 29	3 3	3 86	86 82	○ ○

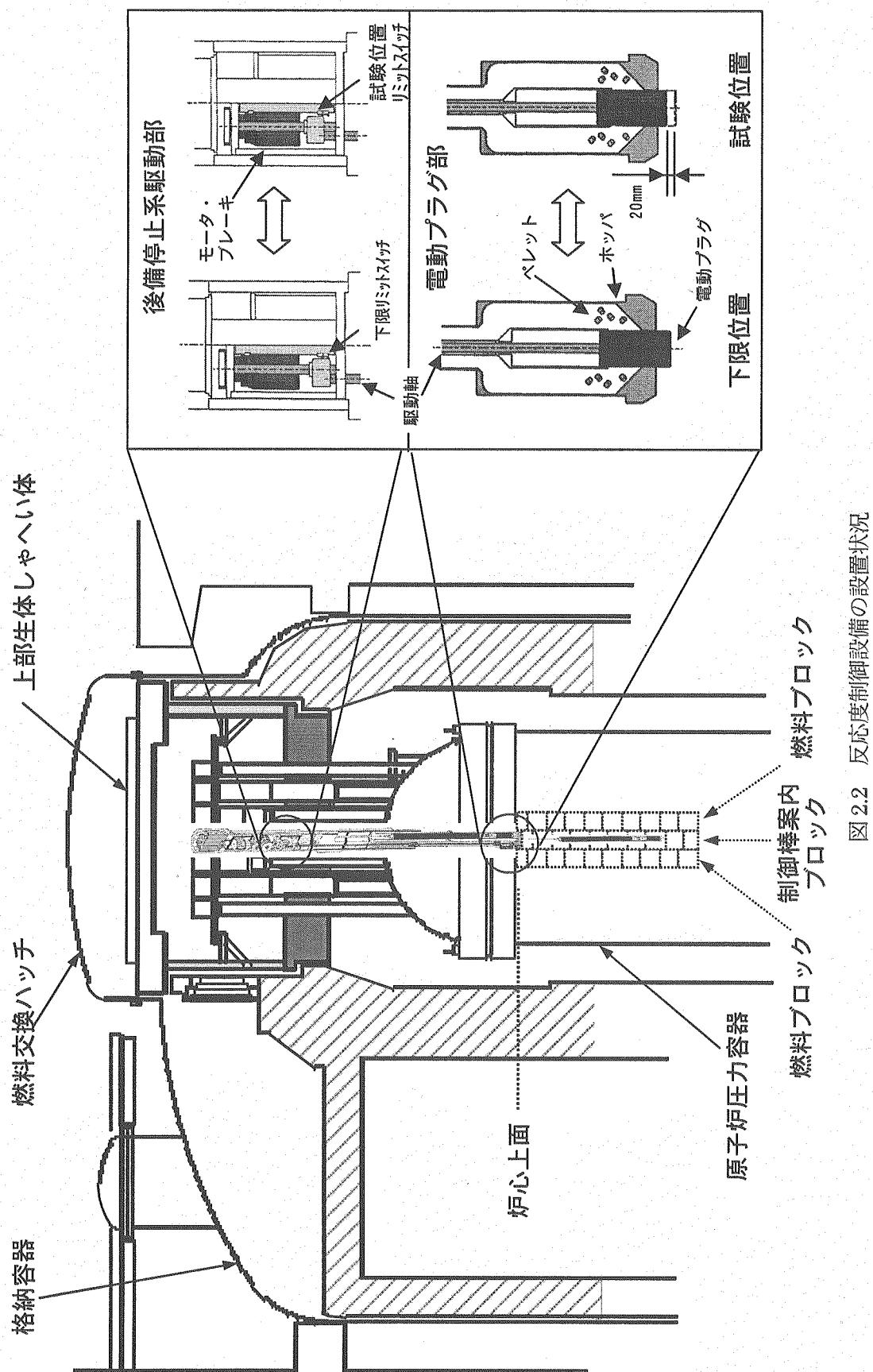
表 5.3 卷線抵抗、絶縁抵抗および電流測定結果

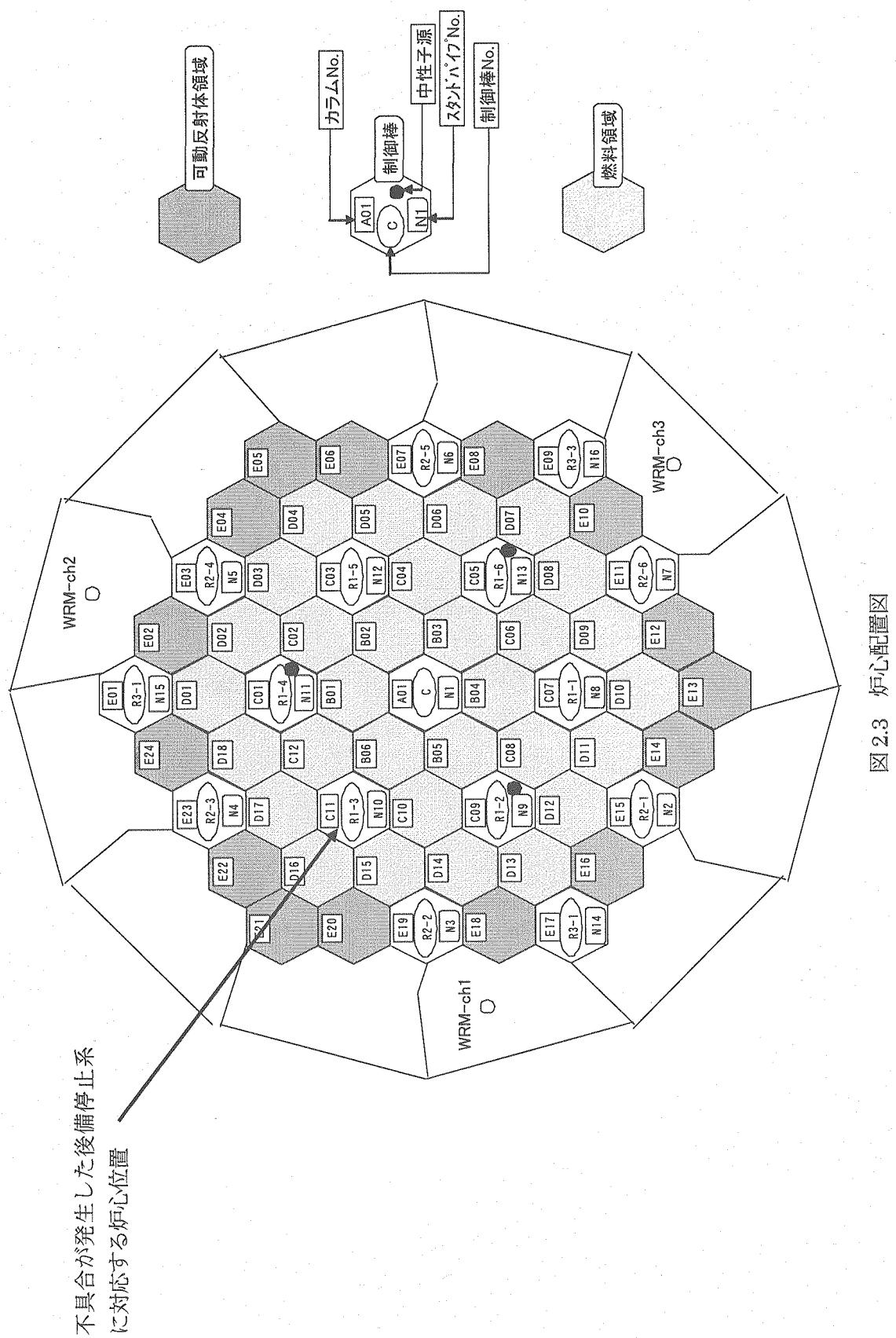
制御棒No.	操作	ブレーキ				モータ			
		巻線抵抗 [Ω] 82.28±10% (75°C換算)	絶縁抵抗 [Ω] 20MΩ以上	電流 [A] 約0.35	作動時間 [s] —	巻線抵抗 [Ω] 34.8±5% (20°C換算)	絶縁抵抗 10MΩ以上	電流 (R相) [A] 定格 約0.8	
C	引抜挿入	80.4	良	0.35 0.35	2.3 2.3	35.1	良	0.6 0.6	
R1-1	引抜挿入	79.1	良	0.35 0.35	2.2 2.3	34.5	良	0.7 0.6	
R1-2	引抜挿入	79.7	良	0.34 0.34	2.2 2.4	34.6	良	0.7 0.6	
R1-4	引抜挿入	79.1	良	0.35 0.34	2.2 2.2	34.7	良	0.7 0.6	
R1-5	引抜挿入	79.1	良	0.35 0.35	2.2 2.3	34.6	良	0.7 0.6	
R1-6	引抜挿入	80.9	良	0.35 0.34	2.2 2.1	35.2	良	0.7 0.6	
R2-1	引抜挿入	79.4	良	0.35 0.35	2.2 2.3	35.4	良	0.7 0.6	
R2-2	引抜挿入	79.5	良	0.34 0.34	2.2 2.1	34.9	良	0.6 0.6	
R2-3	引抜挿入	79.5	良	0.34 0.35	2.3 2.3	34.7	良	0.6 0.6	
R2-4	引抜挿入	79.8	良	0.34 0.35	2.2 2.2	35	良	0.6 0.6	
R2-5	引抜挿入	79.6	良	0.34 0.35	2.3 2.3	34.6	良	0.7 0.6	
R2-6	引抜挿入	80.7	良	0.34 0.33	2.3 2.3	35.4	良	0.7 0.6	
R3-1	引抜挿入	81.3	良	0.33 0.34	2.3 2.2	35.5	良	0.7 0.6	
R3-2	引抜挿入	83.5	良	0.34 0.34	2.3 2.2	35.9	良	0.7 0.6	
R3-3	引抜挿入	81.3	良	0.33 0.34	2.2 2.2	35.8	良	0.6 0.6	

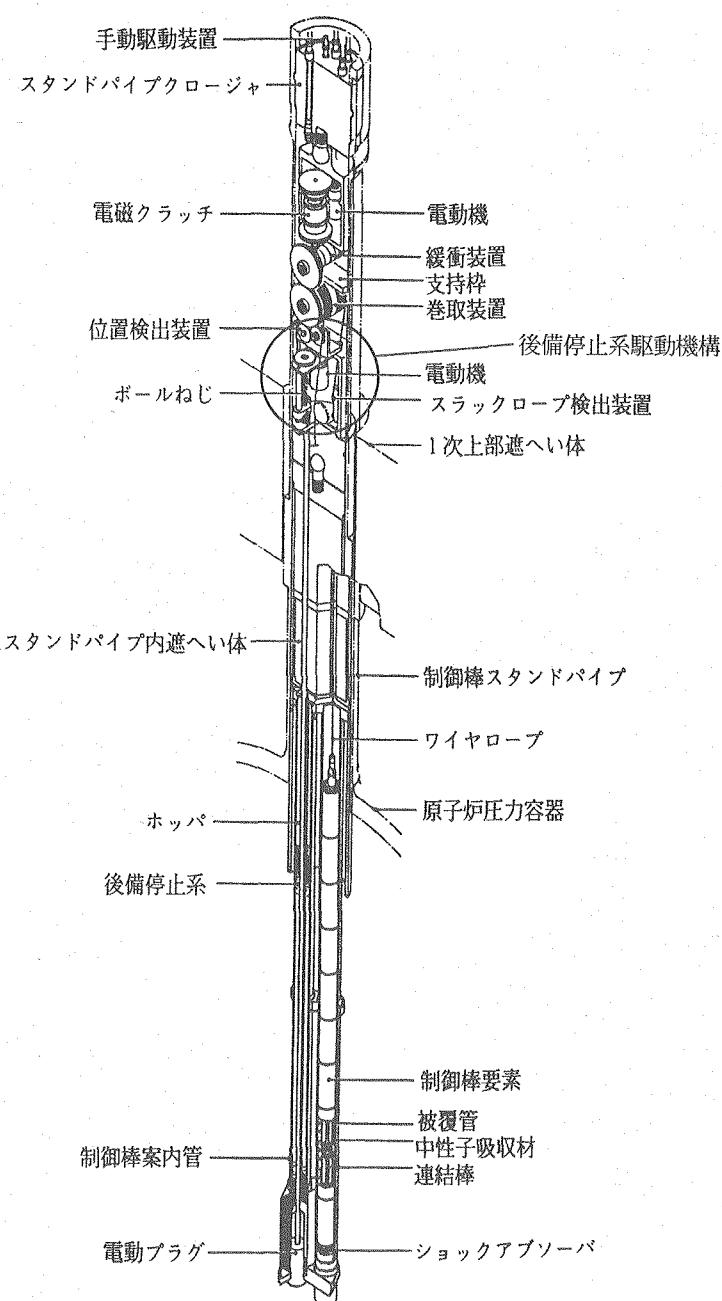


原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備、原子炉停止後に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備、原子炉圧力容器の周囲に設置した水冷管により1次遮へい体を冷却するとともに補助冷却設備による炉心の冷却が期待できないような事故時にも原子炉の残留熱を除去する炉容器冷却設備で構成される。

図 2.1 HTTR 冷却設備系統







制御棒駆動装置と後備停止系の駆動装置が同一のスタンドパイプ内に収納されている。

スクラム時には電磁クラッチを切り離し、重力により制御棒を落させる。

図 2.4 反応度制御設備構造図

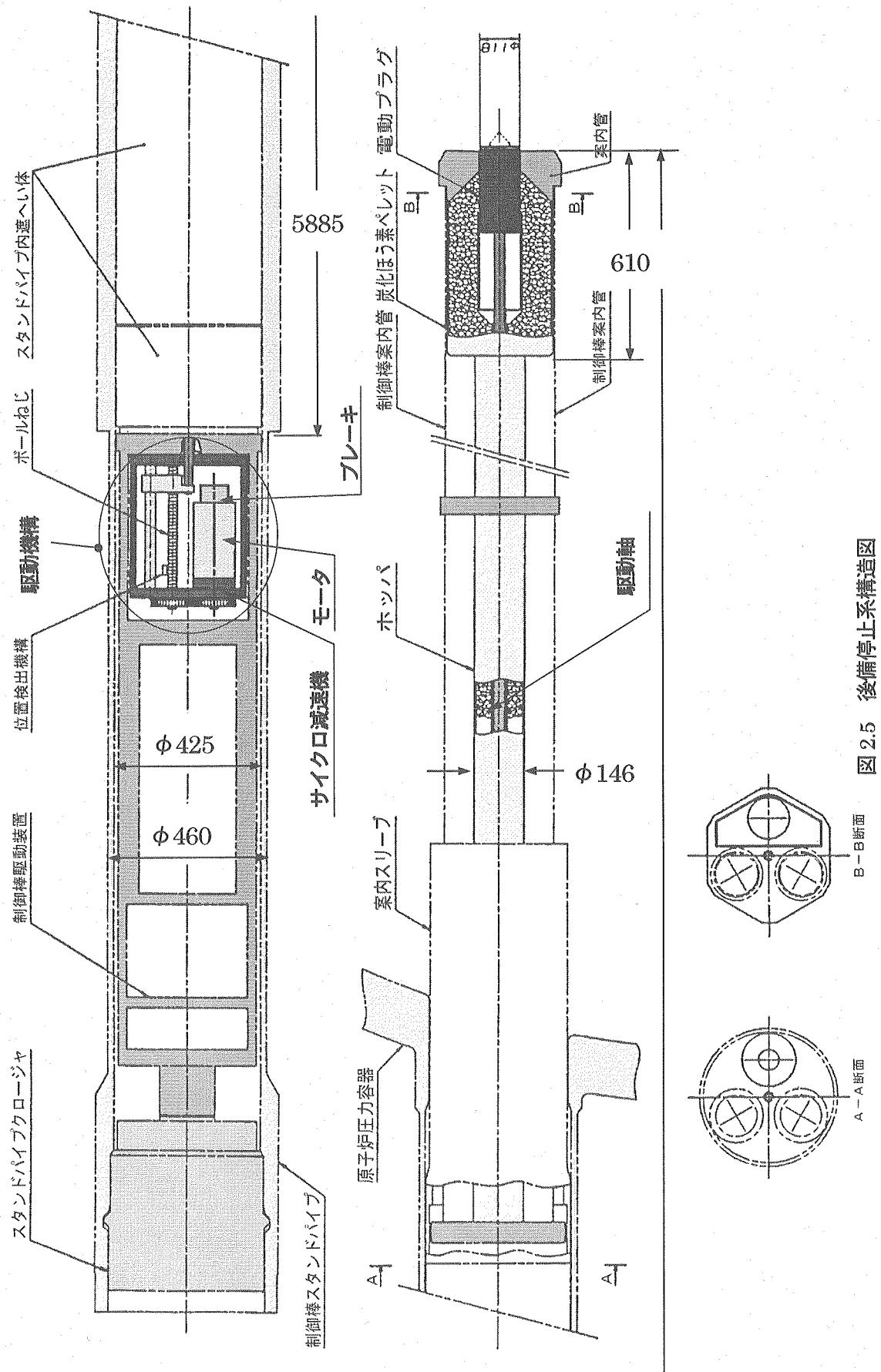


図 2.5 後端停止系構造図

B-A断面

A-A断面

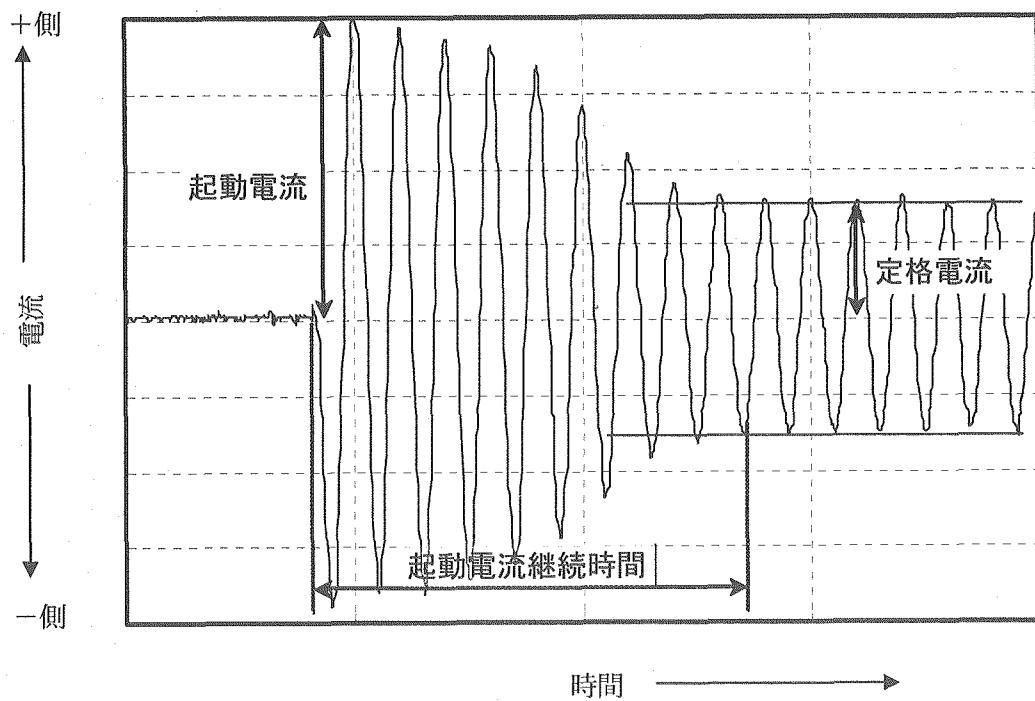


図 2.6 モータ起動電流継続時間説明図

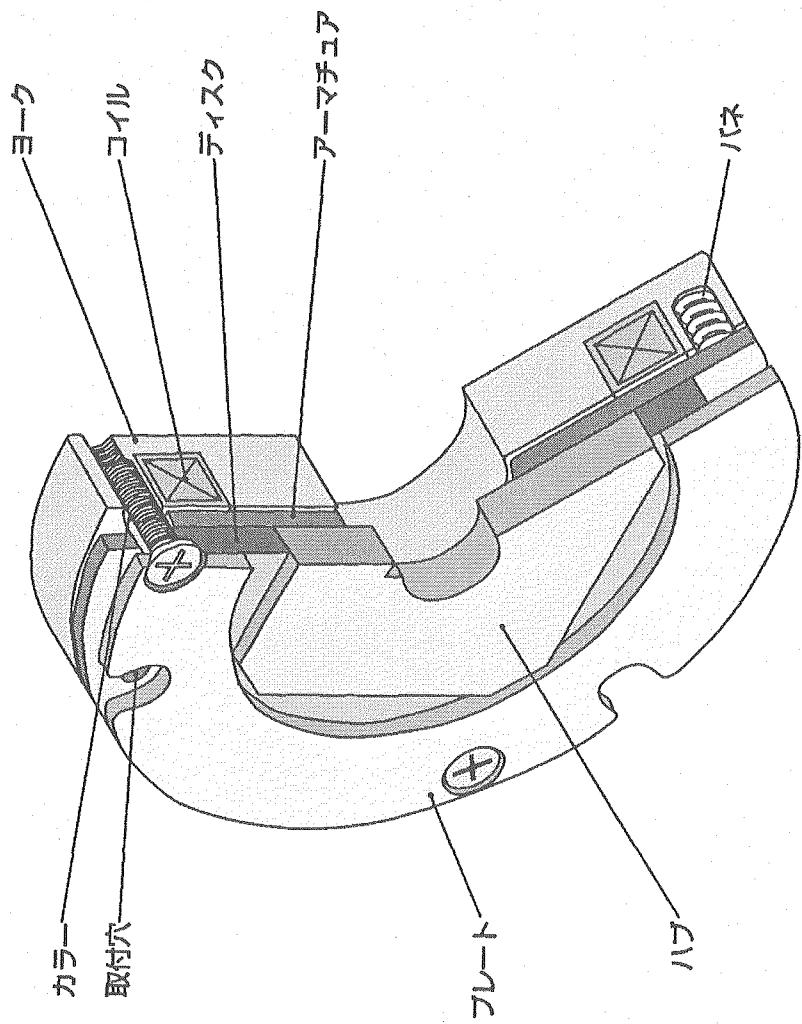


図2.7 ブレーキ構造図

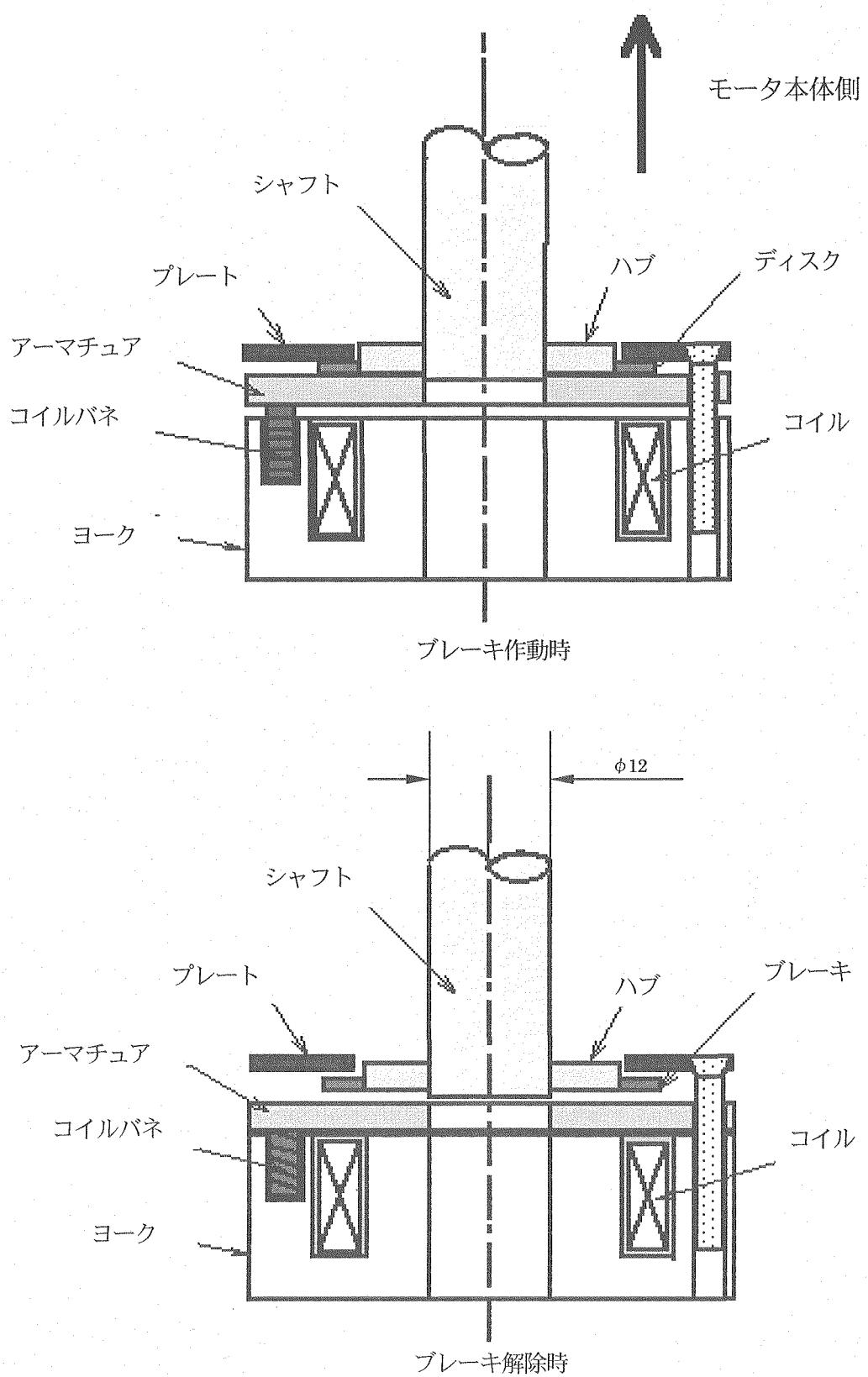


図 2.8 ブレーキ動作説明図

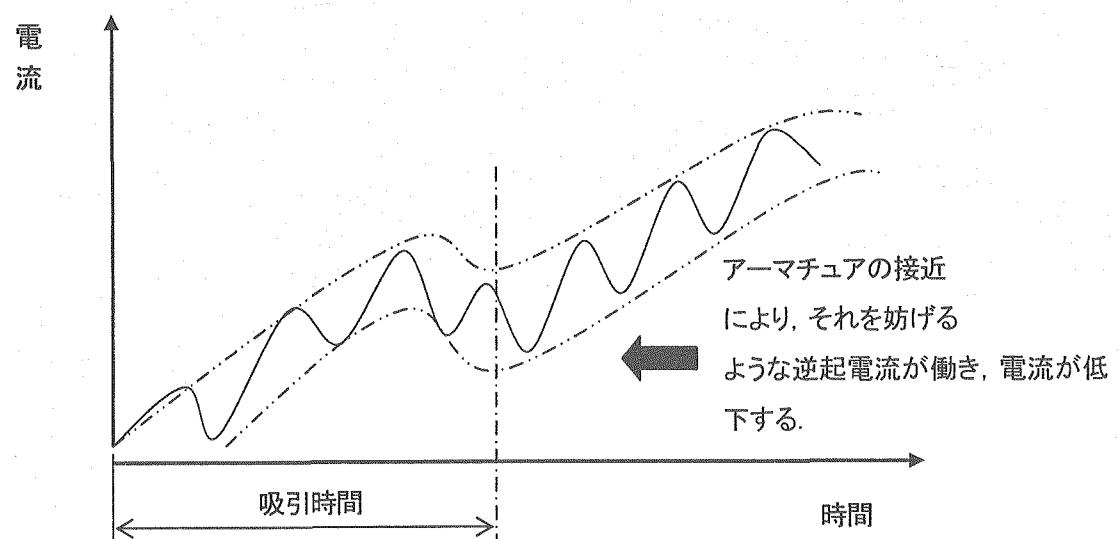
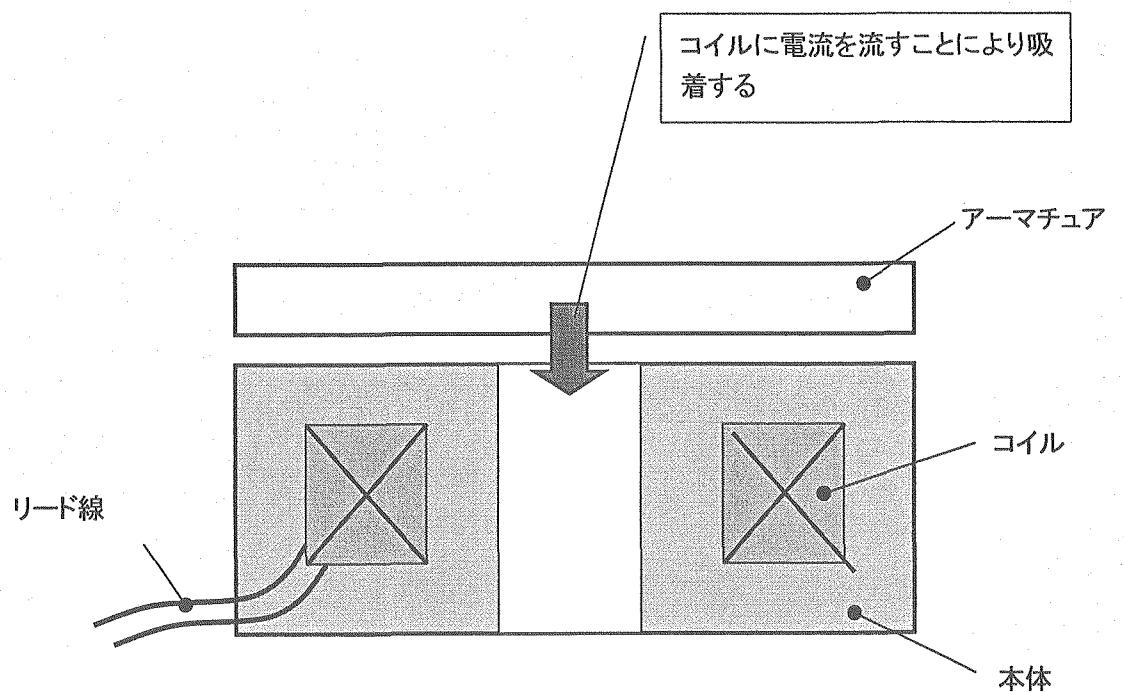


図 2.9 ブレーキ電流応答波形

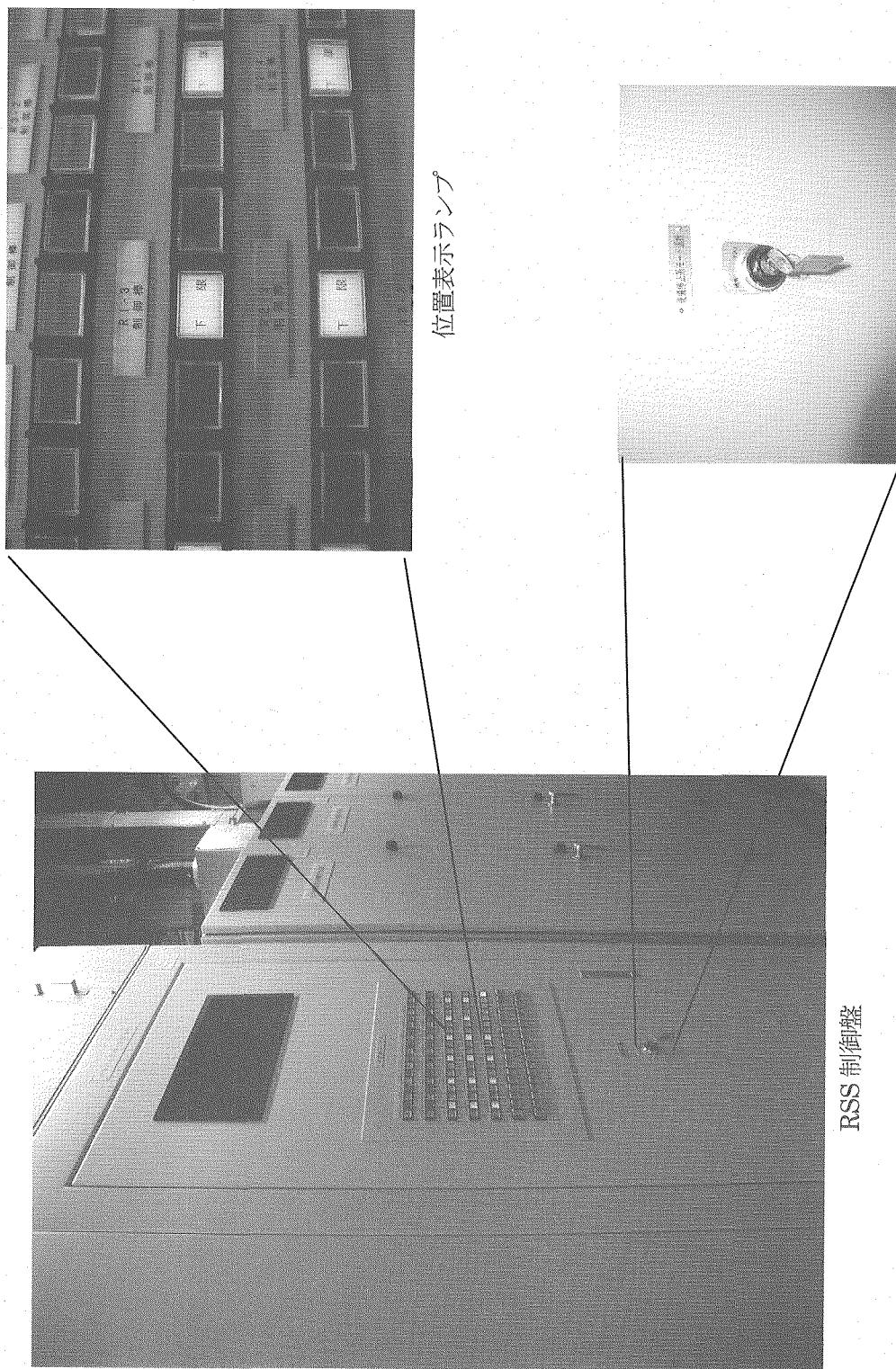
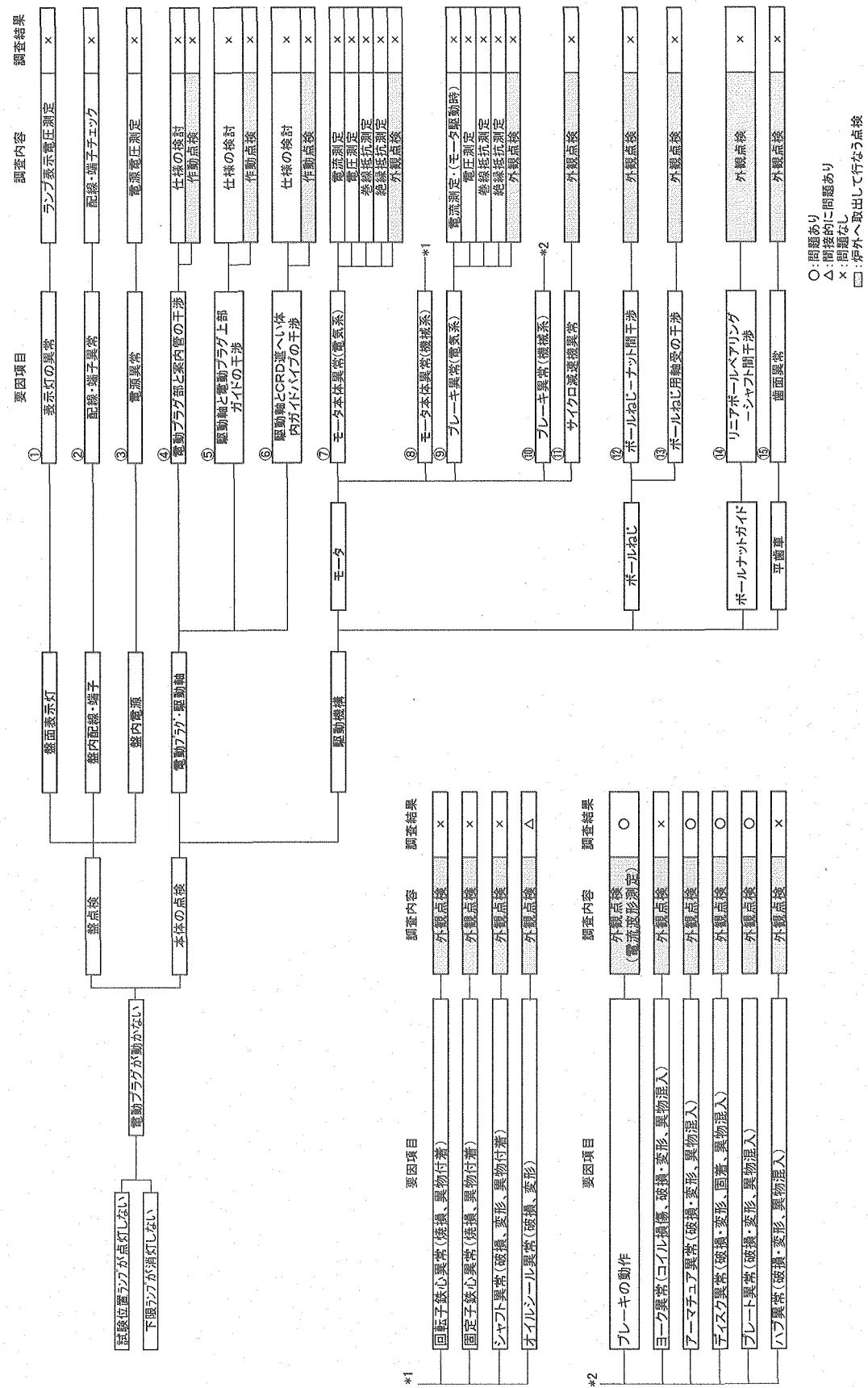
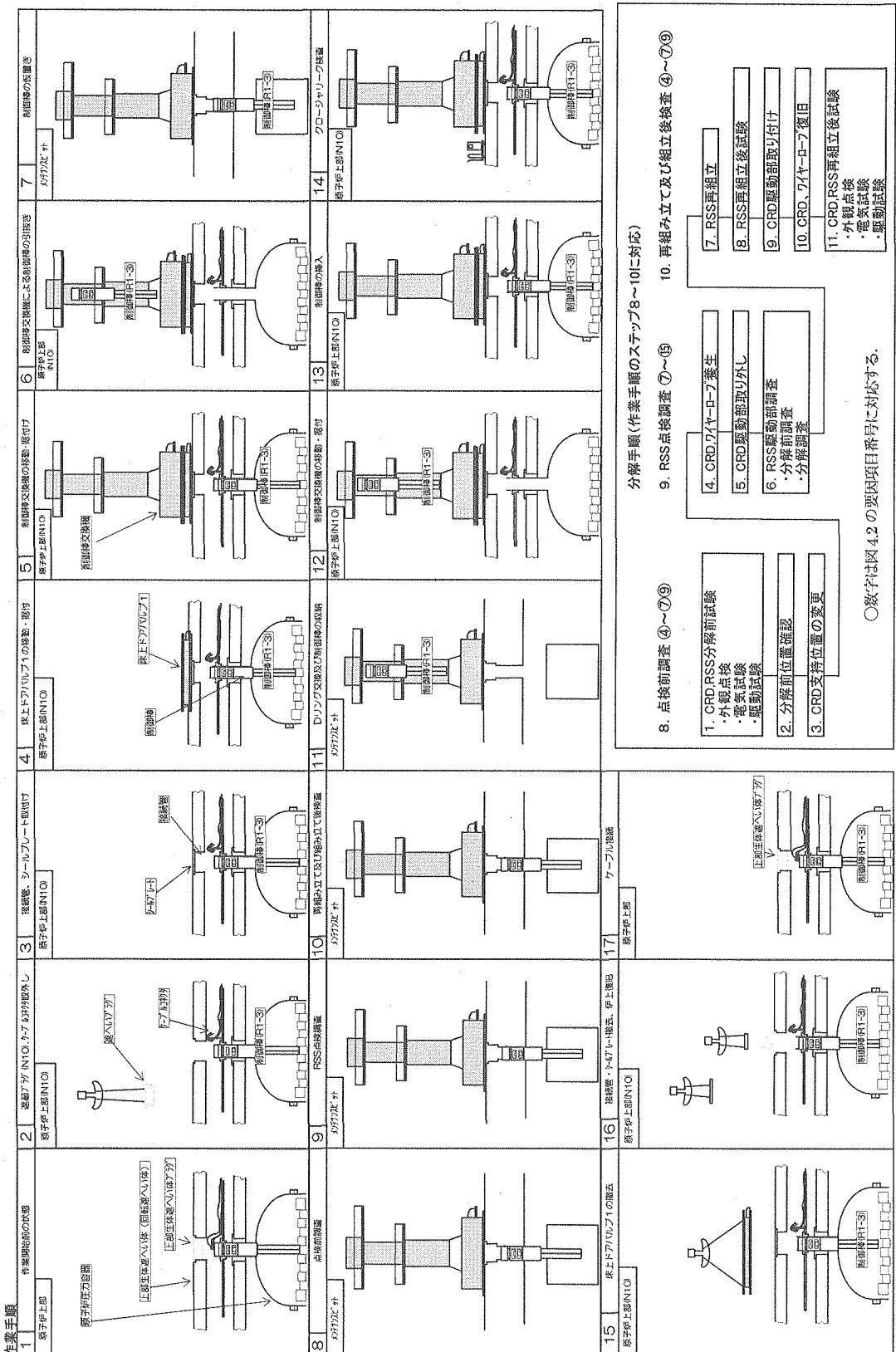


図 3.1 RSS 制御盤  
試験モードスイッチ

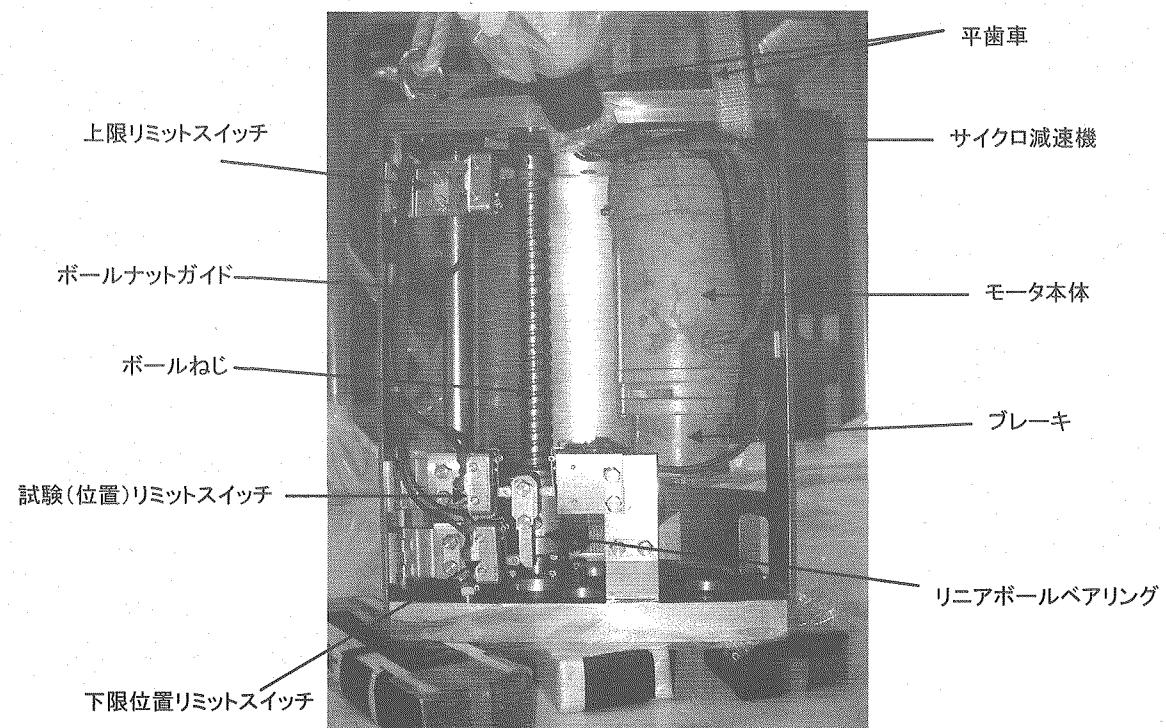


## 図 4.1 調査要因

**図 4.2 作業・分解手順**



メンテナスピットからCRDM一体を取り出したところ



CRDMから取り出したRSS駆動装置

図 4.3 RSS の分解

(CRDM から分離した RSS 駆動機構をグリーンハウス内で分解し、点検・調査していく。)

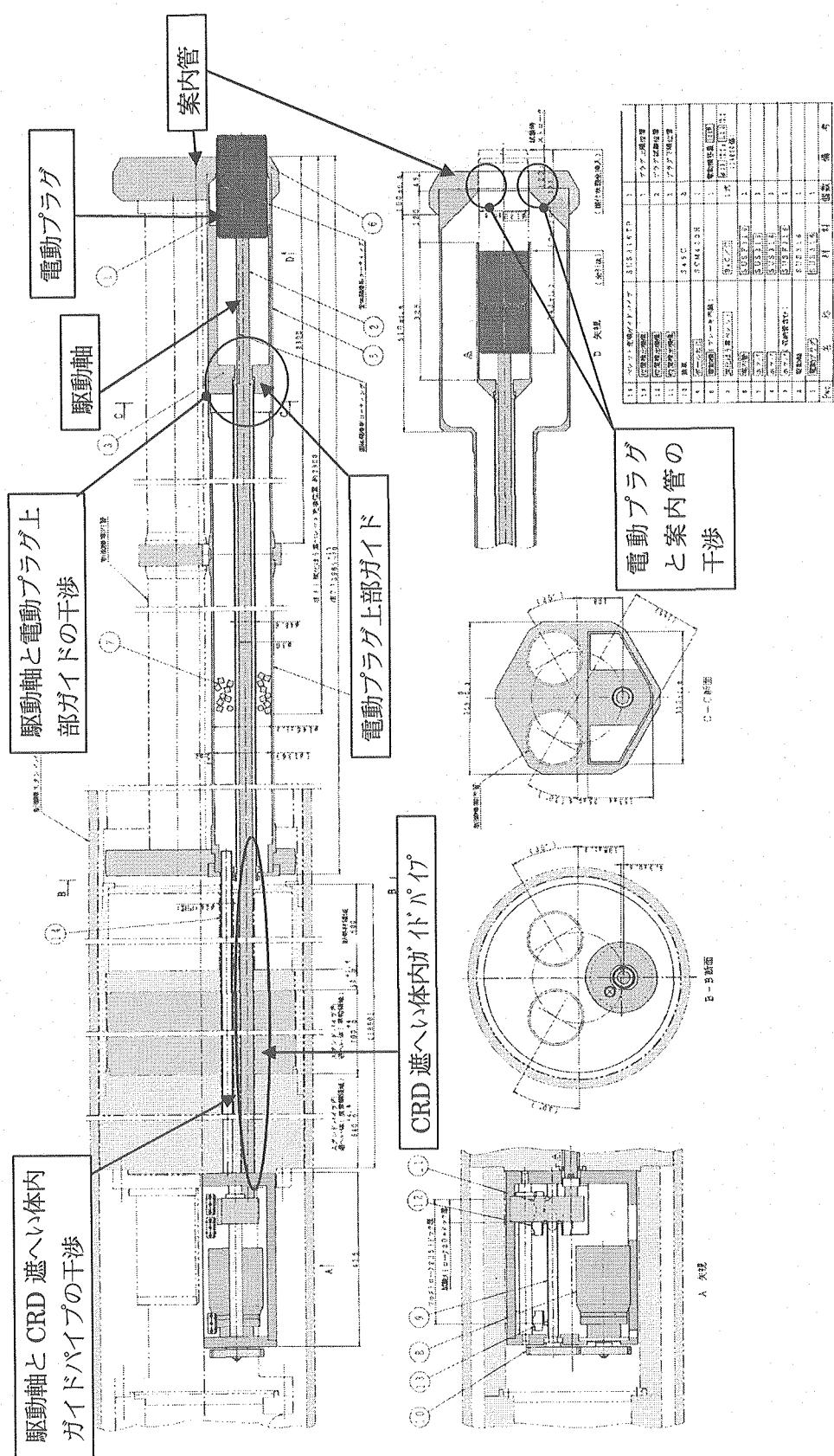


图 4.4 后备停止系驱动装置構造圖

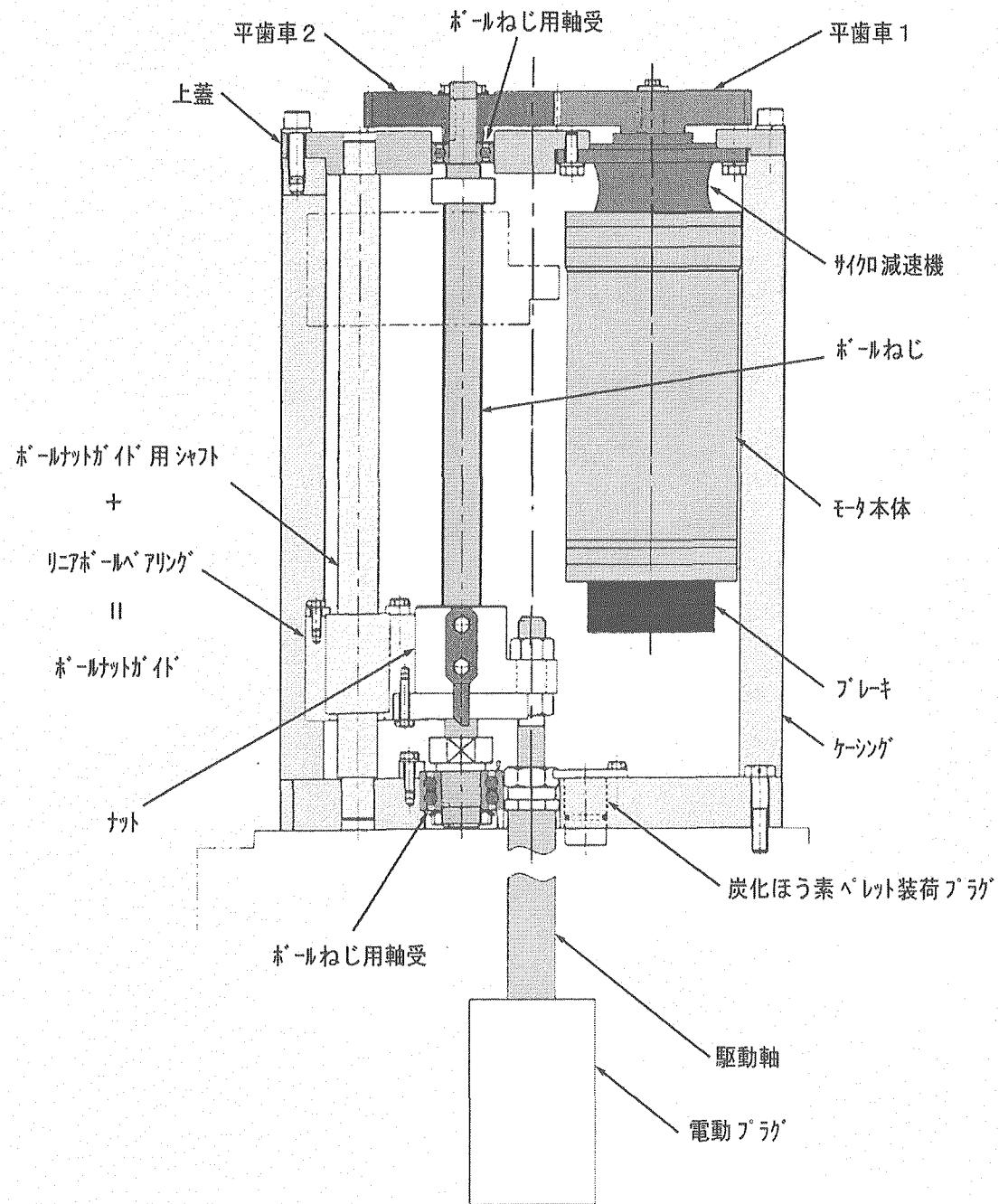




図 4.6 モータ外観

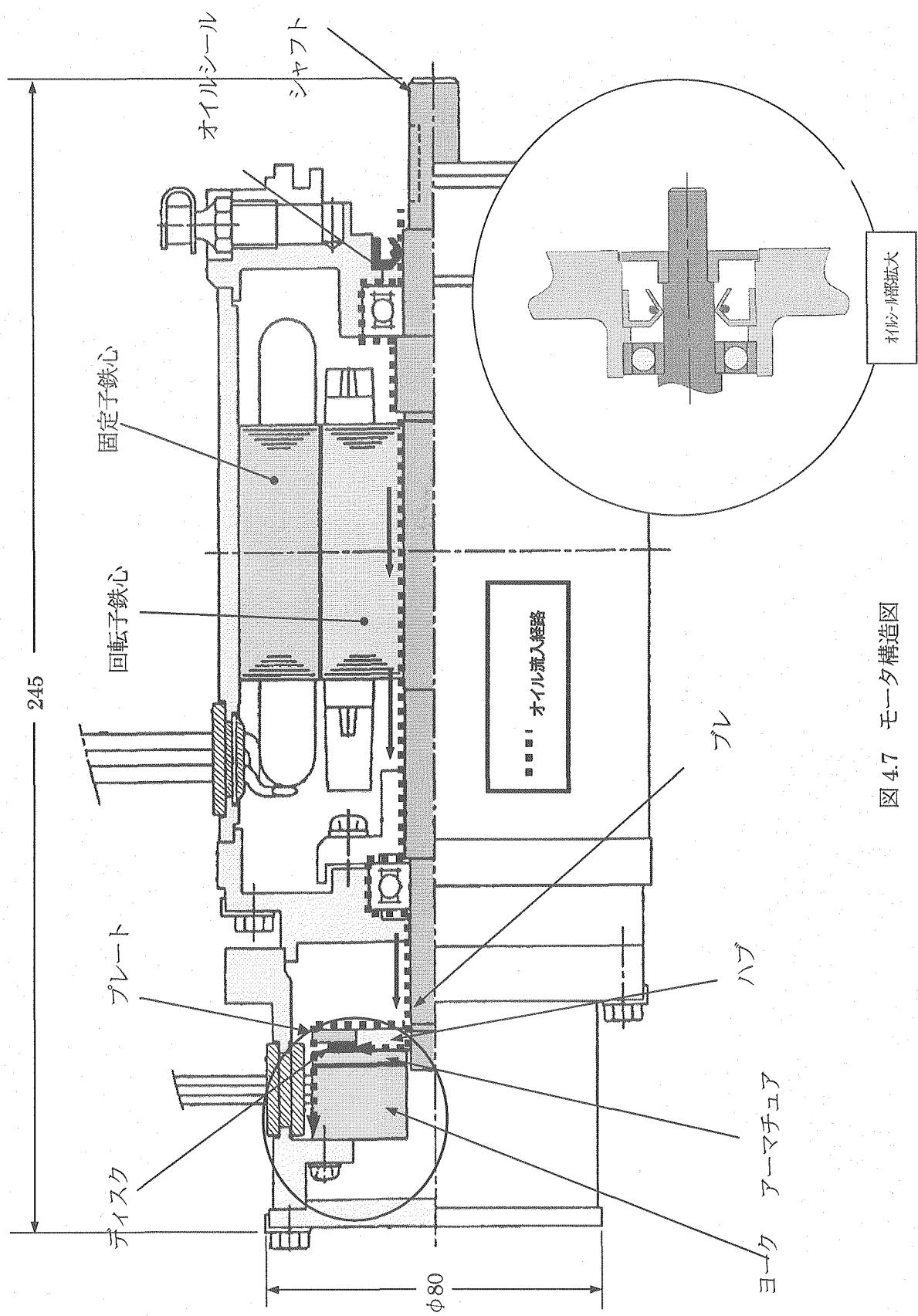
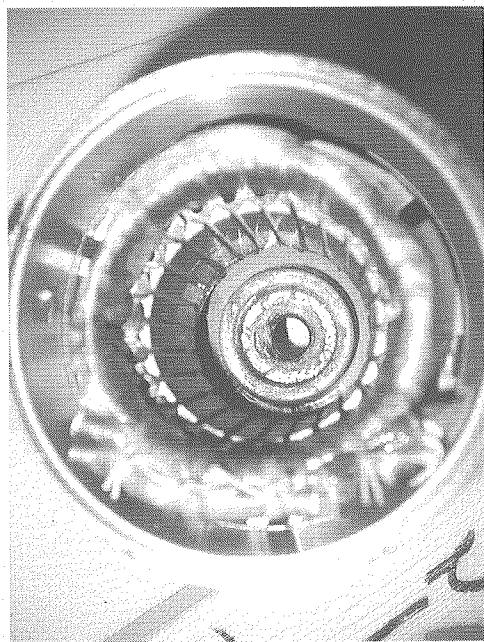
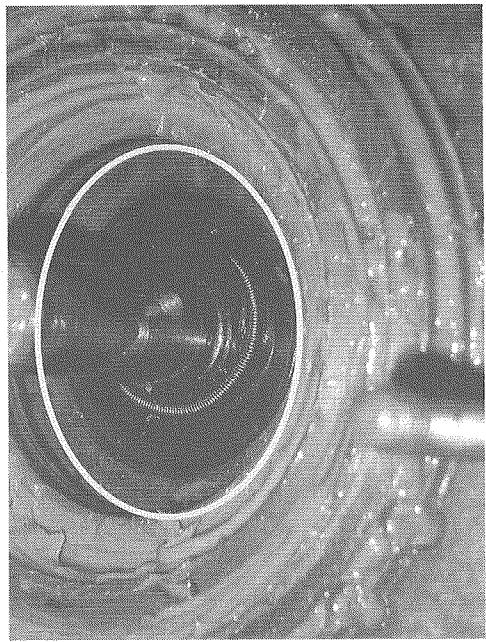


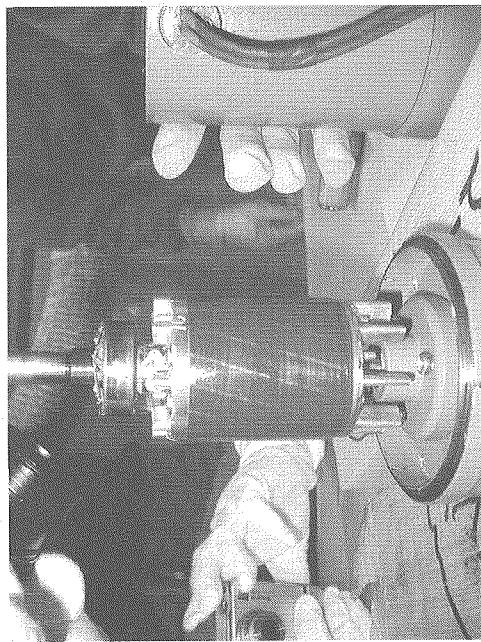
図 4.7 モータ構造図



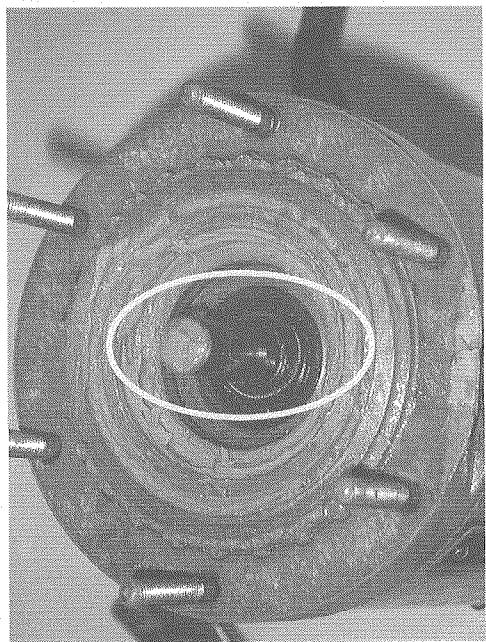
固定子鉄心



オイルシール



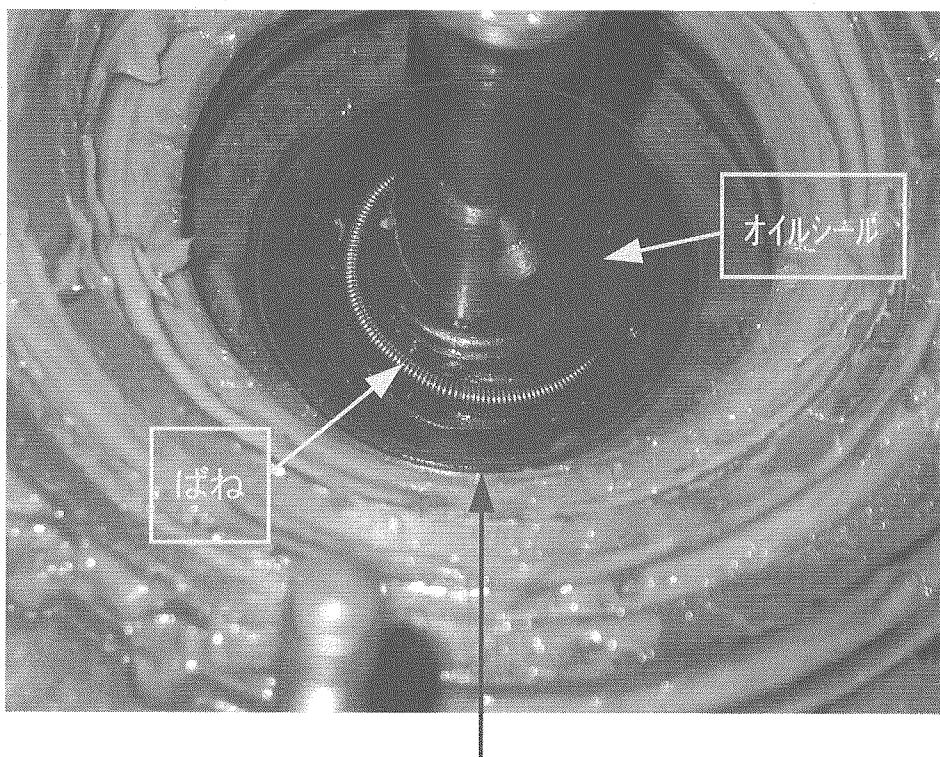
回転子鉄心



シャフト

図 4.8 モータ本体構成部品外観

モータ本体上部に取付けられている オイルシール



オイルシール用のばねが一部飛び出し、  
オイルシールの変形がある。  
(ばね:外径20mm)

図4.9 オイルシール変形図

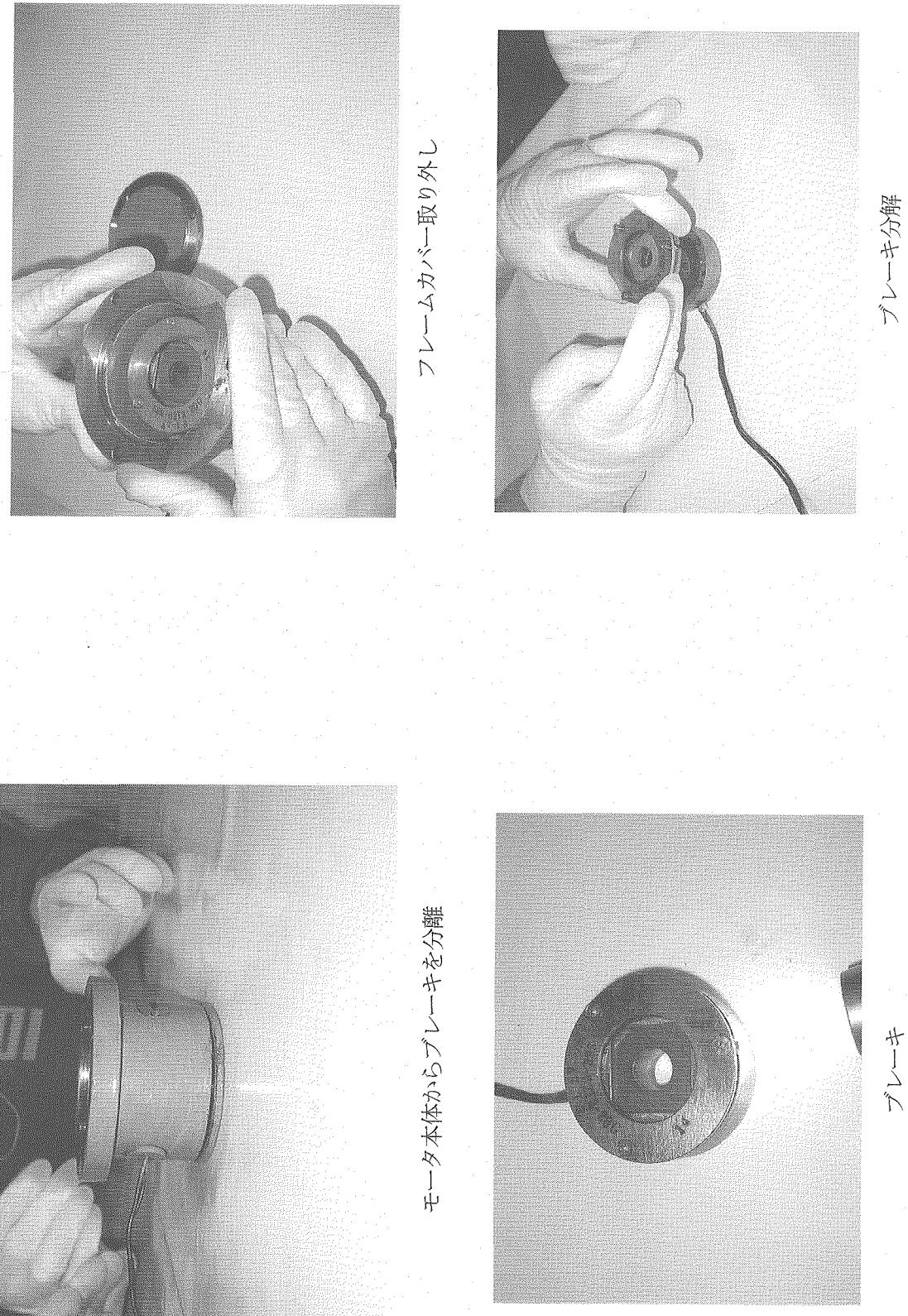
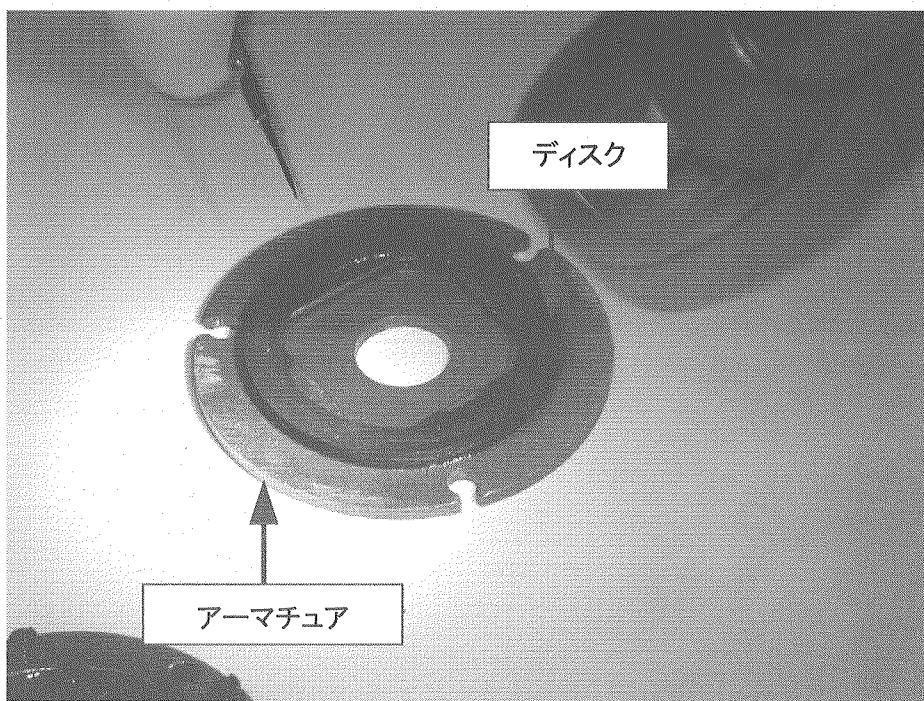
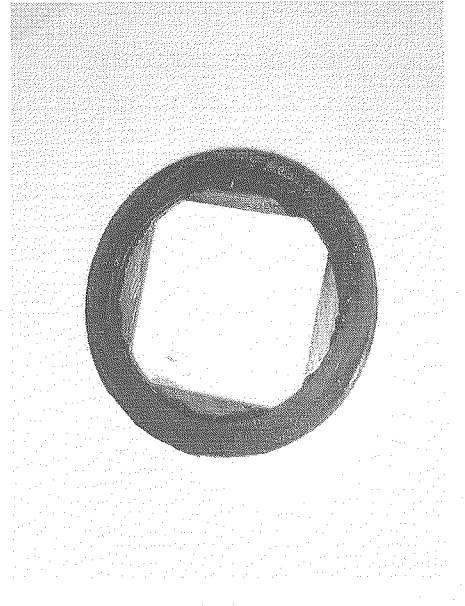


図 4.10 ブレーキ分解状況

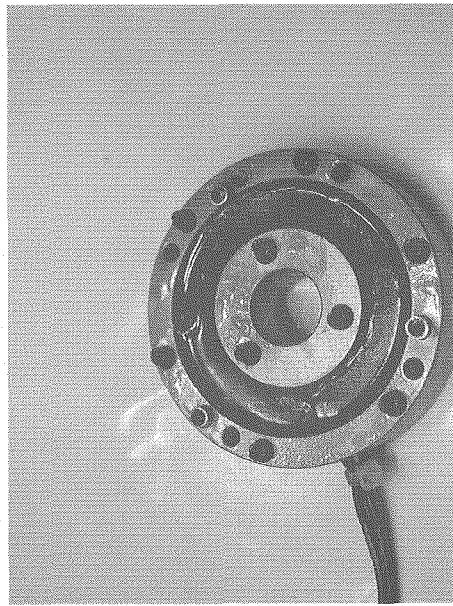


アーマチュアにディスクが粘着している状態

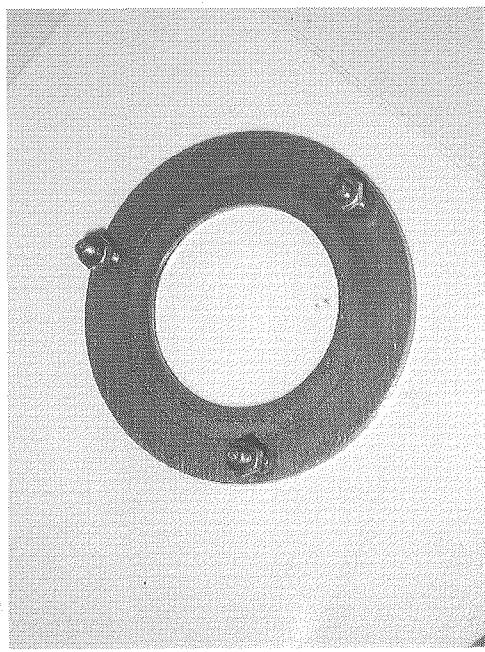
図 4.11 アーマチュアとディスクの粘着状態



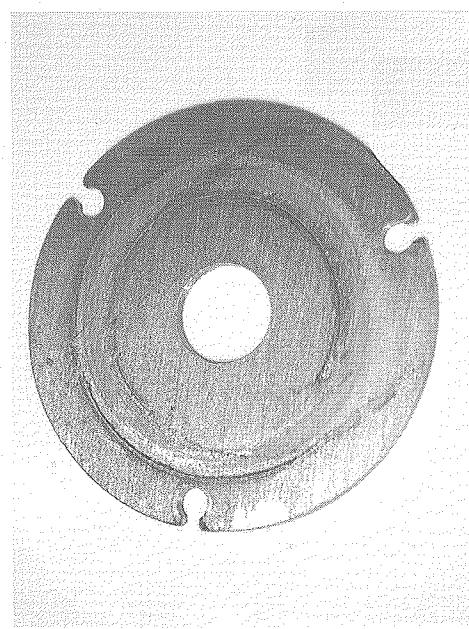
ディスク



ヨーク



プレート

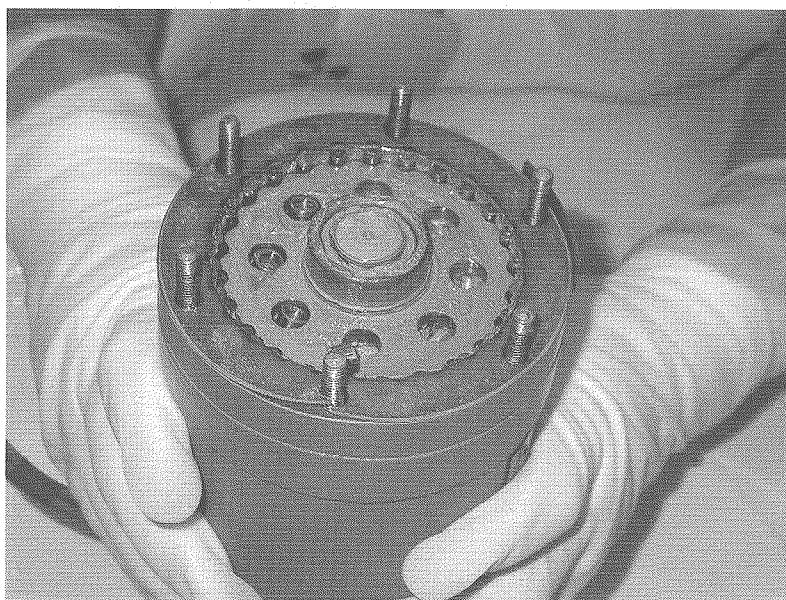


アーマチュア

図 4.12 プレーク構成部品外観



サイクロ減速機（低速側）



サイクロ減速機（高速側）

図 4.13 サイクロ減速機外観

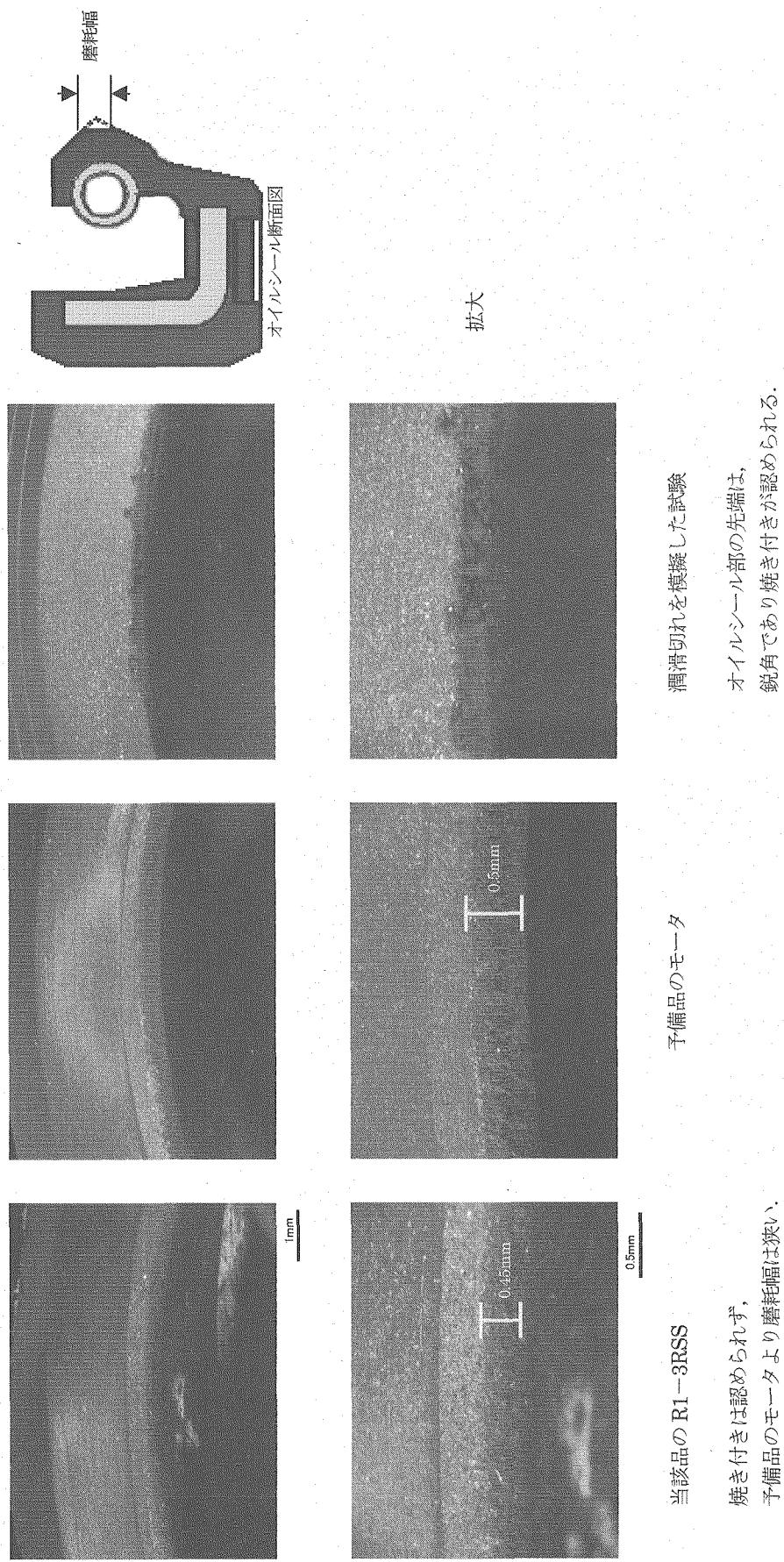


図 4.14 オイルシール外観状況

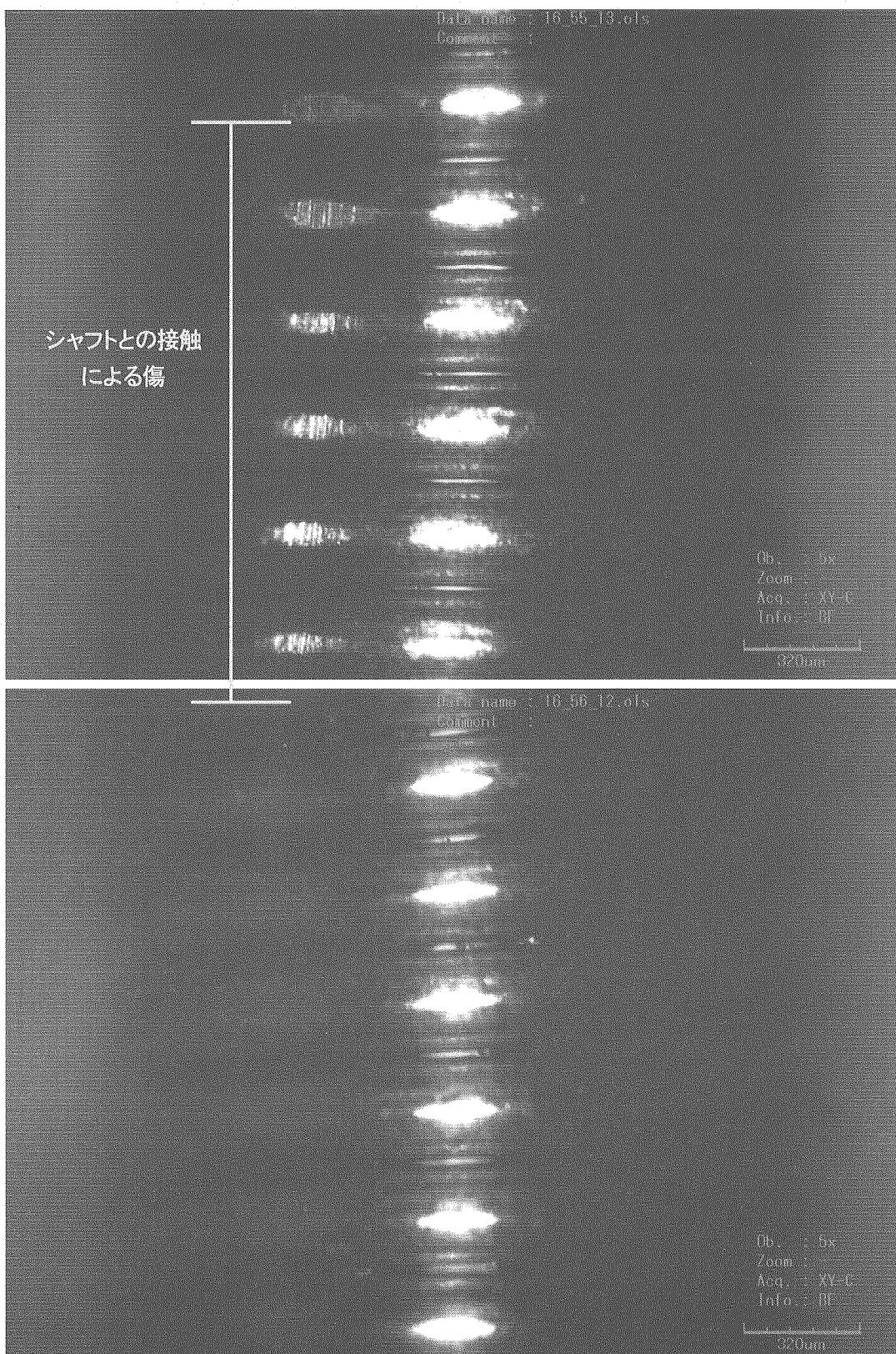


図 4.15 オイルシールばねの外観

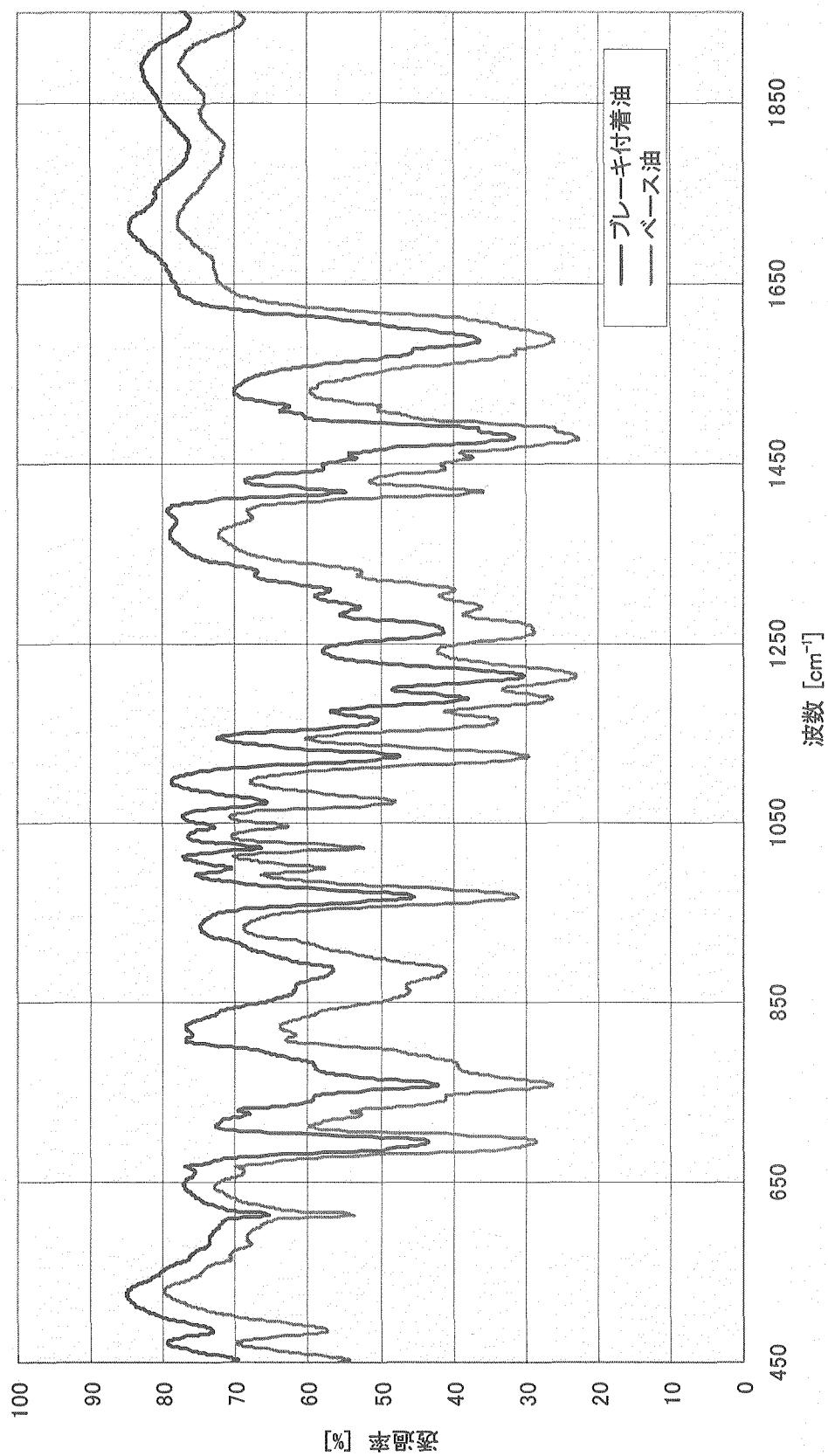


図 4.16 オイルの赤外線吸収スペクトル分析結果

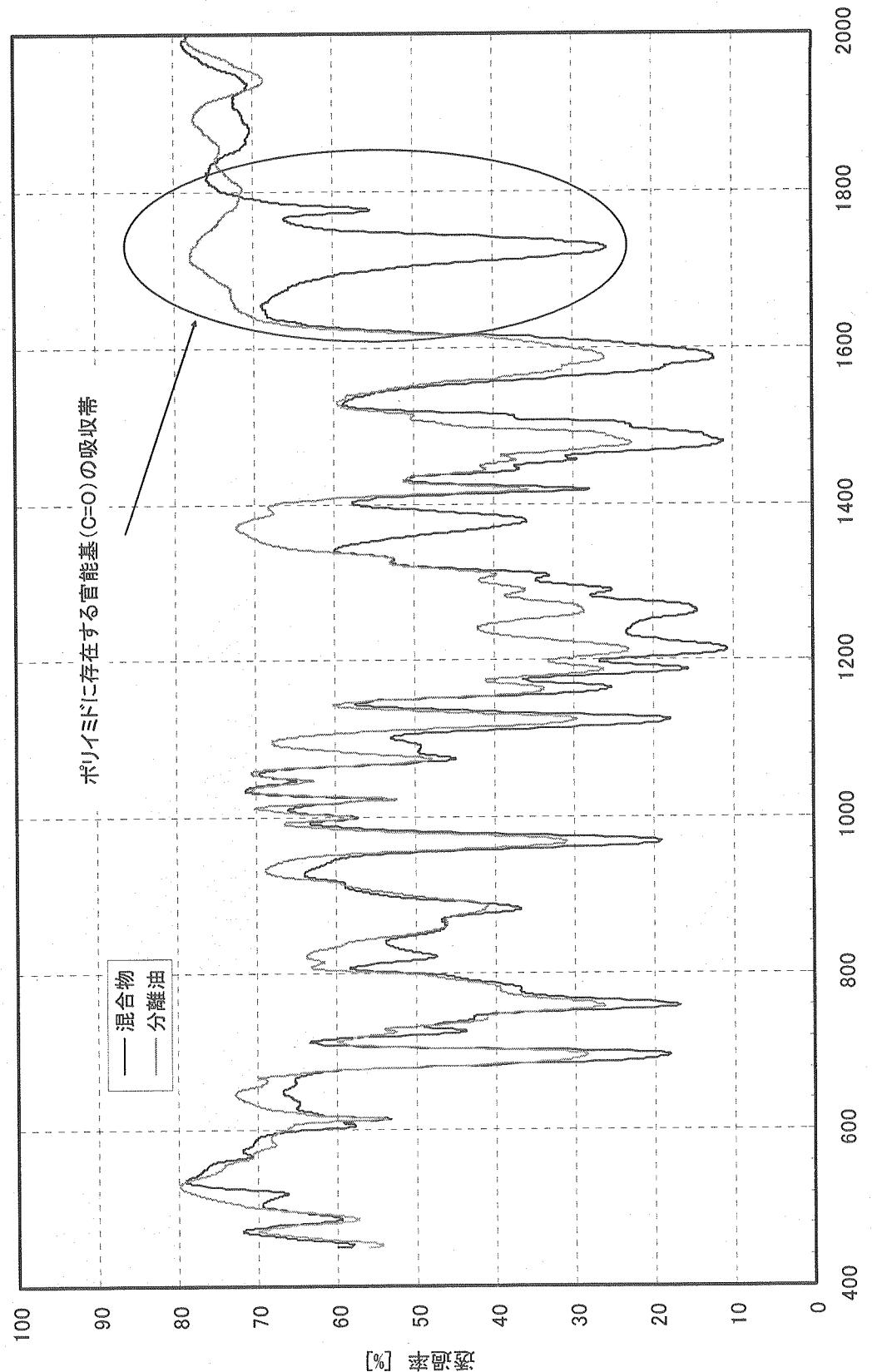


図 4.17 磨耗粉の分析結果

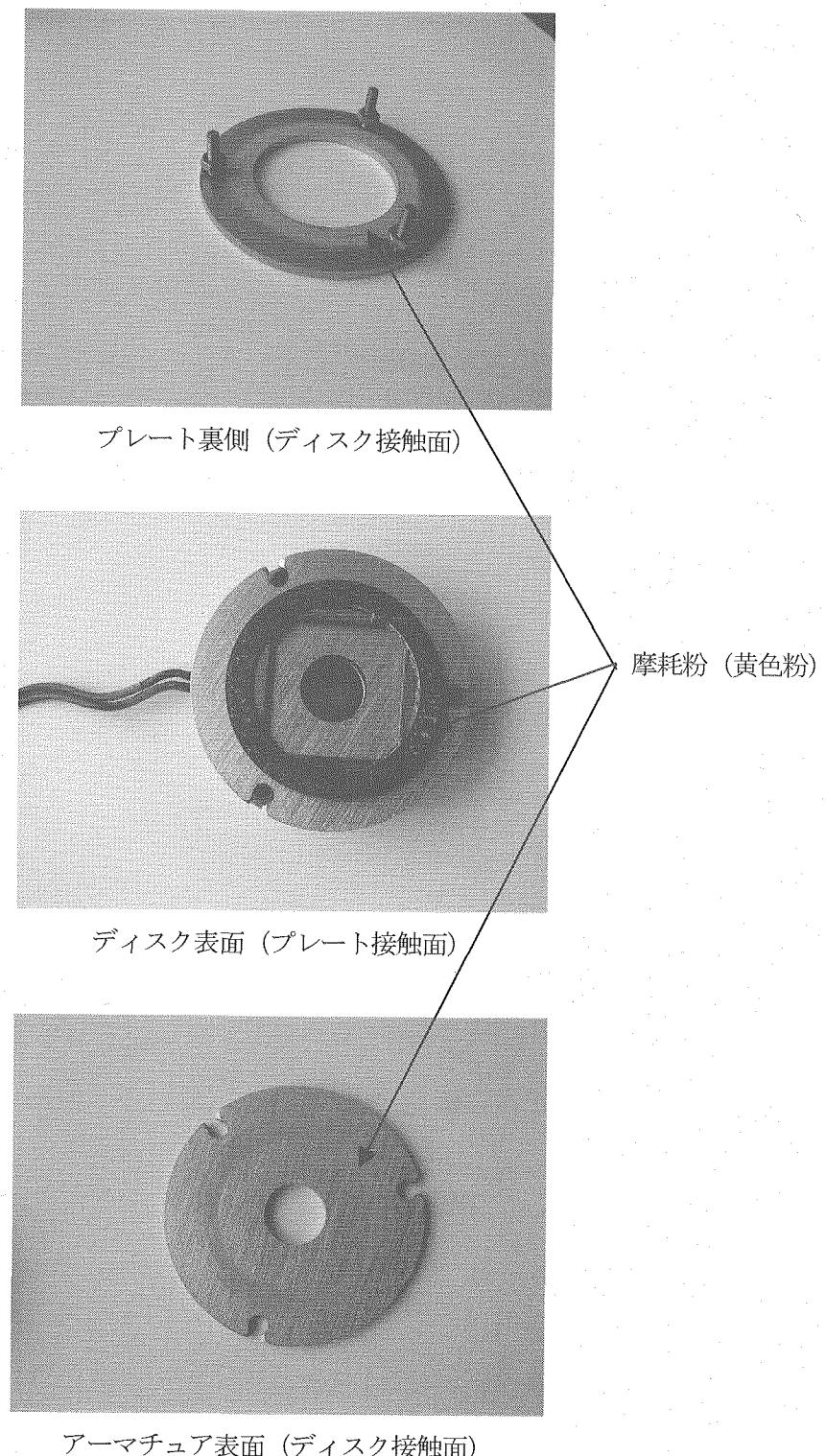


図 4.18 摩耗粉発生状況



図 4.19 粘着力が最大となる混合比

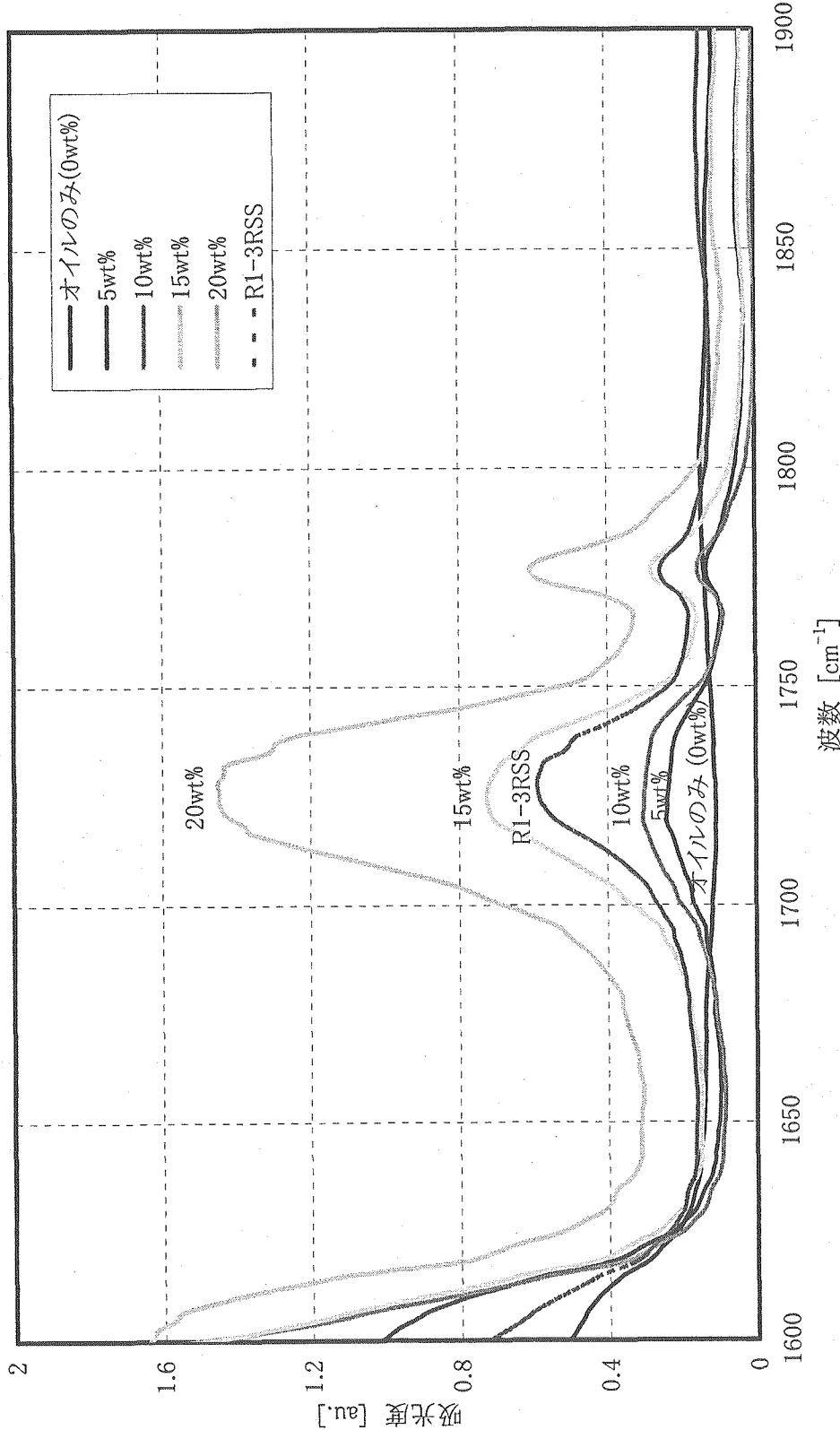


図 4.20 粘着物の混合比測定結果