

JAERI-Tech

JP0450448

2004-037



HTTR自動停止  
(2003年5月21日発生) の  
原因調査結果

2004年4月

平戸 洋次・齋藤 賢司・近藤 誠・澤畑 洋明・茂木 利広  
土山 賢・安任 敏雄・水島 俊彦・中澤 利雄

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

## HTTR自動停止（2003年5月21日発生）の原因調査結果

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

平戸 洋次・齋藤 賢司・近藤 誠・澤畠 洋明・茂木 利広

土山 賢\*・安任 敏雄\*・水島 俊彦・中澤 利雄

(2004年2月6日受理)

HTTR（高温工学試験研究炉）は、平成15年5月6日から平成15年6月18日までの予定で、並列運転モードでの運転経験の蓄積と安全性実証試験の実施を目的として、原子炉の運転を行っていた。5月21日、原子炉出力約60%（約18MW）で原子炉の運転を行っていたところ、「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号により原子炉が自動停止した。原子炉自動停止の原因是、1次ヘリウム循環機Aが自動停止したことにより、1次加圧水冷却器のヘリウム流量が低下したためであった。

調査の結果、1次ヘリウム循環機Aが自動停止した原因是、1次ヘリウム循環機Aの動力電源ラインにある遮断器の制御電源を監視している補助リレーが、常時励磁され発熱している他の電気部品と接近して設置され、使用温度の上限に近い温度条件下で使用されてきたために性能が劣化し、誤動作したためであることが明らかになった。

---

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

\*業務協力員

Investigation of Automatic Shutdown  
of HTTR on May 21st ,2003

Yoji HIRATO, Kenji SAITO, Makoto KONDO, Hiroaki SAWAHATA,

Toshihiro MOTEGI, Masaru TUTIYAMA,\* Toshio ANDO,\*

Toshihiko MIZUSHIMA and Toshio NAKAZAWA

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi,Higashibaraki-gun,Ibaraki-ken

(Received February 6,2004)

HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) was operated from May 6th, 2003 to June 18th, 2003 in order to obtain operation data that were given in parallel loaded operation mode and in safety demonstration tests. Operating with the reactor power at 60% of rated power on May 21st, HTTR was scrammed by a signal of "Primary coolant flow rate of the Primary Pressurized Water Cooler (PPWC) Low". The cause of the shutdown was the primary gas circulator (A) automatically stopped. The primary coolant flow rate of the PPWC decreased and reached the scram set value due to the primary gas circulator (A) stop.

As a result of investigations, it became clear that the cause of the gas circulator stop was malfunction of an auxiliary relay which monitored electric power of a circuit breaker in power line of the gas circulator. The cause of malfunction was deterioration of the relay under high temperature condition because the relay was installed beside an electric part which was heated up by electricity.

Keywords: HTTR, HTGR, Automatic shutdown, PGC, Auxiliary Relay

---

\*Cooperative Staff

## 目 次

1. 序論 .....	1
2. 1次冷却設備の概要 .....	2
3. 原子炉自動停止の経緯 .....	3
4. 1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査 .....	4
4. 1 盤の点検 .....	4
4. 2 運転データの確認 .....	6
4. 3 機器本体等の点検 .....	7
5. 制御電圧監視リレーの単体調査 .....	7
5. 1 制御電圧監視リレーの概要 .....	7
5. 2 設置状況確認 .....	8
5. 3 表面温度測定 .....	8
5. 4 接点の接触抵抗測定 .....	9
5. 5 設定値確認試験 .....	9
5. 6 タッピング試験 .....	9
5. 7 温度変化試験 .....	10
5. 8 考察及び対策 .....	10
6. 結論 .....	11
謝辞 .....	11
参考文献 .....	11

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of Primary Cooling System .....	2
3. Detail of Reactor Automatic Shutdown .....	3
4. Investigation of Automatic Stop of Primary Gas Circulator A .....	4
4.1 Investigation of Control Panels .....	4
4.2 Investigation of Reactor Operating Data .....	6
4.3 Investigation of Primary Gas Circulators .....	7
5. Investigation of Control Voltage Monitoring Relay .....	7
5.1 Outline of Control Voltage Monitoring Relay .....	7
5.2 Visual Inspection .....	8
5.3 Measurement of Surface Temperature .....	8
5.4 Measurement of Contact Resistance .....	9
5.5 Check of set values .....	9
5.6 Tapping Test .....	9
5.7 Heating Test .....	10
5.8 Consideration .....	10
6. Conclusion .....	11
Acknowledgements .....	11
References .....	11

## 1. 序論

H T T R（高温工学試験研究炉：High Temperature Engineering Test Reactor）<sup>1)-2)</sup>は、原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 950℃（850℃）のヘリウム冷却黒鉛減速型の高温ガス炉である。日本原子力研究所（原研）では、H T T Rを中核施設として、高温ガス炉技術の基盤の確立と技術の高度化、高温の照射環境を活かして新技術の創製を目指す高温工学に関する先端基礎研究などを推進してきている。H T T Rでは 1998 年の初臨界の後、1999 年から出力上昇試験を開始し、定格熱出力 30MW 及び原子炉出口冷却材温度約 850℃ を達成して 2002 年 3 月に使用前検査合格証を取得した。今後は燃料、材料等の各種照射試験、安全性実証試験<sup>3)-4)</sup>、原子炉出口冷却材温度 950℃ の達成を目指した高温試験運転を実施することを計画している。

H T T Rは、平成 15 年 5 月 6 日から平成 15 年 6 月 18 日までの予定で、並列運転モードでの運転経験の蓄積と高温ガス炉の固有の安全性を実証する安全性実証試験の実施を目的として、原子炉出力約 60%（約 18MW）で運転を行っていたところ、5 月 21 日 7 時 12 分頃「1 次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラン信号により原子炉が自動停止した。

原子炉停止時の運転データを確認したところ、原子炉自動停止は、何らかの原因により、3 台のうち 1 台の 1 次ヘリウム循環機に動力電源を供給している電源ラインの遮断器が開いて、このヘリウム循環機が停止し、その結果、「1 次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラン信号が発信されたことが判明した。

本報は、「1 次加圧水冷却器ヘリウム流量低」のスクラン信号により原子炉が自動停止した原因の調査結果についてまとめたもので、1 次冷却設備の概要、原子炉自動停止の経緯及び原子炉自動停止の原因と再発防止対策の検討結果について報告する。

## 2. 1次冷却設備の概要

H T T R の冷却系統のうち、炉心を直接冷却する系統は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備、原子炉の自動停止時に原子炉の崩壊熱を除去する補助冷却設備及び炉容器冷却設備からなる。主冷却設備は、1次冷却設備として中間熱交換器と1次加圧水冷却器の2種類の熱交換器を並列に配置し、原子炉で発生した熱を最終的に加圧水冷却設備の加圧水空気冷却器により大気に放散する。1次冷却設備は、中間熱交換器で10MW及び1次加圧水冷却器で約20MWの除熱を行う並列運転、または1次加圧水冷却器で約30MWの除熱を行う単独運転のいずれかの方法で運転する。

1次冷却設備は、1次冷却材を循環させて炉心を冷却する設備であり、原子炉圧力容器、1次ヘリウム循環機、中間熱交換器、1次加圧水冷却器、1次ヘリウム配管等から構成される。系統説明図をFig. 1に示す。

炉心で加熱された1次冷却材は、原子炉圧力容器に接続する二重管の内管を通って、1次加圧水冷却器あるいは中間熱交換器に送られ、加圧水あるいは2次冷却材であるヘリウムガスと熱交換して低温になり、1次ヘリウム循環機で昇圧された後、2重管の内管と外管との間の環状部を通って原子炉圧力容器に還流する。

1次ヘリウム循環機は、たて型遠心式動圧ガス軸受型の循環機で、中間熱交換器用に1台、1次加圧水冷却器用に3台設置されている。1次ヘリウム循環機は、駆動軸及び電動機をケーシング内に組み込んだ密閉構造で、冷却材を循環させる回転羽根は内蔵している電動機のロータに直結して回転する。また、1次ヘリウム循環機には、軸受温度、モータ巻線温度、ロータ振動及び回転数のセンサ並びに1次ヘリウム循環機のケーシングを冷却する冷却水の流量計が設けられており、1次ヘリウム循環機に異常が生じた場合は、機器保護のために1次ヘリウム循環機を自動停止させる。

1次ヘリウム循環機は、回転数制御装置盤内の周波数制御回路により電動機の回転数を連続的に変えて、運転状態に応じた1次冷却材の循環流量を確保する。回転数制御装置盤は、交流電源を直流電源に変換するコンバータ、直流電源から所要の周波数の交流電源に変換するインバータ、及びコンバータとインバータを制御する周波数制御回路から構成されており、1次ヘリウム循環機の出口流量が目標流量となるように制御する流量制御系からの信号に応じて、周波数制御回路において1次ヘリウム循環機に供給する電源周波数をインバータで制御し、1次ヘリウム循環機の回転数を制御する。

通常運転時は、切替遮断器盤（ブレーカパネル）に設けられている交流側トリップ遮断器が投入状態にあり、回転数制御装置盤から1次ヘリウム循環機の動力電源として交流電源を供給している。また、原子炉が自動停止した場合には、1次ヘリウム循環機を急速制動で停止するために、切替遮断器盤は原子炉が自動停止すると同時に、安全保護系からの急速制動信号を受け取り、1次ヘリウム循環機に供給される交流電源を遮断するために交流側トリップ遮断器を切り離し、1次ヘリウム循環機に蓄電池からの制動電流を印加する

ために直流側遮断器を投入する。1次ヘリウム循環機の動力及び制御系の概念図を Fig. 2 に示す。

また、並列運転時に運転する2次ヘリウム冷却設備には、1次冷却設備に設置されているヘリウム循環機と同型の2次ヘリウム循環機が1台設置されている。

### 3. 原子炉自動停止の経緯

HTTRは、平成15年5月6日から平成15年6月18日までの予定で、並列運転モードでの運転経験の蓄積と安全性実証試験の実施を目的として、原子炉出力約60%（約18MW）で運転を行っていたところ、5月21日7時12分頃「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号により原子炉が自動停止した。

原子炉が自動停止した後、運転データにて、「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号の発信前から1次加圧水冷却器用1次ヘリウム循環機A（以下、「1次ヘリウム循環機A」という。）の回転数が低下していることを確認した。その回転数の低下に伴い、1次加圧水冷却器ヘリウム流量が定格流量の93%に達したことにより、「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号が発信されていた。また、スクラム信号によりスクラム遮断器が「開」となり、1次ヘリウム循環機B、Cも急速制動により停止している。原子炉自動停止時の1次ヘリウム循環機回転数、1次加圧水冷却器ヘリウム流量及びスクラム遮断器の動作の推移をFig. 3に示す。

また、警報メッセージ履歴にて「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号の直前の警報を確認したところ、1次ヘリウム循環機Aへの動力電源が遮断されたことを意味する「1次HGC\*(A)ブレーカパネル(A)異常」及び「1次HGC(A)トリップ遮断器(A)開」が記録されていることを確認した。

以上の情報から、今回の原子炉の自動停止は、何らかの原因により、1次ヘリウム循環機Aがトリップし、その結果、1次加圧水冷却器ヘリウム流量が低下して、「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号が発信されたものと推測できる。

---

\*HGC(Helium Gas Circulator)：ヘリウム循環機

## 4. 1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査

今回の原子炉の自動停止は、1次ヘリウム循環機Aがトリップし、その結果、1次加圧水冷却器ヘリウム流量が低下して、「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号が発信されたものであるので、1次ヘリウム循環機Aのトリップの原因について以下の調査を実施した。

1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査に当たっては、(1)盤の点検、(2)運転データの確認、(3)機器本体等の点検に分類した調査フローを作成し、1次ヘリウム循環機Aの点検結果と他のヘリウム循環機のものを比較しながら実施することとした。1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査のフロー図をFig.4に示す。

### 4.1 盤の点検

運転されていた1次ヘリウム循環機A、B、C、中間熱交換器用1次ヘリウム循環機及び2次ヘリウム循環機（以下、「5台のヘリウム循環機」という。）への動力電源、制御電源を供給する切替遮断器盤、回転数制御装置盤、回転機回転数・振動計装盤、切替遮断器盤用直流分電盤の各盤について、以下の点検を行った。

#### (1) 切替遮断器盤

原子炉スクラム時にヘリウム循環機をトリップさせ、急速制動させる切替遮断器盤については、警報メッセージ履歴に「1次 HGC(A) ブレーカパネル(A)異常」及び「1次 HGC(A) トリップ遮断器(A)開」が記録されている。この警報を発信した1次ヘリウム循環機Aの切替遮断器盤、及び他の4台のヘリウム循環機の切替遮断器盤について、以下の点検を行った。1次ヘリウム循環機Aの切替遮断器盤内の配置図をFig.5に示す。

##### 1) 目視点検

5台のヘリウム循環機のそれぞれの切替遮断器盤について、盤内に取り付けられている補助リレー等の目視点検を行った結果、交流側トリップ遮断器、直流側遮断器及び補助リレー等には焼損等の外観上の異常は認められなかった。

##### 2) 補助リレー接点の接触抵抗測定

補助リレー接点の接触状態が不安定になると、補助リレー接点の接触抵抗が増加し、補助リレー接点の電圧が低下する。補助リレー接点の電圧が低下すると、補助リレーの保持電圧が不足して励磁が解け、補助リレーの誤動作の原因となることが考えられる。

補助リレー接点の健全性を確認するため、5台の切替遮断器盤内の補助リレー接点の接触抵抗を測定した。接触抵抗の測定結果をTable 1に示す。5台の切替遮断器盤内の補助

リレー接点の接触抵抗を測定した結果、1次ヘリウム循環機Aの動力電源用の交流側トリップ遮断器Aの制御電圧監視を行う補助リレー（以下、「制御電圧監視リレー」という。）（FV111）及び遮断器Bの制御電圧監視リレー（FV161）の接点の接触抵抗が、他のものの値より若干高かった。

制御電圧監視リレーの接点の接触抵抗が増加し、制御電圧監視リレーが誤動作した場合、交流側トリップ遮断器に開指令が発信されるため、1次ヘリウム循環機Aのトリップの要因となり得る。このため、制御電圧監視リレーの接点の健全性を確認するため、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレー（A側 FV111、B側 FV161）の接点の接触抵抗を連続測定した。

測定の結果、制御電圧監視リレーFV111 の接触抵抗に誤動作による急激な増加が認められた。制御電圧監視リレーFV111 が誤動作したときの接触抵抗の挙動を Fig. 6 に示す。制御電圧監視リレーFV111 の電源電圧が安定しているにもかかわらず、制御電圧監視リレーFV111 の接点が開となり、同時に補助リレーKA117 が非励磁状態になっている。補助リレーKA117 は、交流側トリップ遮断器の制御電圧が低下したときに外部に異常信号を発信する役割をするリレーで常時励磁状態にある。制御電圧監視リレーFV111 の誤動作により、補助リレーKA117 が非励磁状態となり、安全保護系に「交流側トリップ遮断器開指令」が発信されたと判断できる。また、その時「1次 HGC(A) ブレーカパネル(A) 異常」の警報が発信されたことを警報メッセージ履歴にて確認した。

一方、制御電圧監視リレーFV161 については、誤動作は認められなかった。

### 3) 遮断器の動作試験

1次ヘリウム循環機Aの交流側トリップ遮断器Aが、機械的故障等によって「開」となったことも考えられるので、模擬のトリップ信号を与えて動作確認を行った結果、遮断器の開閉動作に異常は認められなかった。交流側トリップ遮断器B及び他のヘリウム循環機に係る遮断器については、スクラム信号の発信前には動作していないこと及びスクラム信号の発信後に正常に動作していることを、警報メッセージ履歴にて確認した。

### (2) 回転数制御装置盤

回転数制御装置盤の異常により1次ヘリウム循環機Aがトリップしたこととも考えられるため、5台のヘリウム循環機へ動力電源を供給するそれぞれの回転数制御装置盤を点検し、全ての盤内の故障表示部に「Motor Overvoltage or Emergency Stop」の表示ランプが点灯していることを確認した。この警報は過電圧またはスクラム信号によって発信するが、動力電源の過電圧を示す警報メッセージは記録されていないことから、表示ランプは、スクラム信号によって点灯したものであることを確認した。

のことから、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機は、回転数制御装置盤の異常によって停止したものではないと判断できる。

### (3) 回転機回転数・振動計装盤

5台のヘリウム循環機の回転数、振動を指示する回転機回転数・振動計装盤には、回転数異常や振動異常を示す表示ランプは点灯しておらず、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機に回転数や振動の異常がなかったことを確認した。

のことから、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機は、回転数や振動の異常によって停止したものではないと判断できる。

### (4) 切替遮断器盤用直流分電盤

#### 1) 目視点検

5台の切替遮断器盤に制御電源を供給する切替遮断器盤用直流分電盤を開放して目視点検を行った結果、配線用遮断器には焼損等の外観上の異常は認められなかった。

#### 2) 制御電圧測定

5台の切替遮断器盤に供給される制御電圧が低下した場合、切替遮断器盤内の制御電圧監視リレーが誤動作する可能性があるので、切替遮断器盤用直流分電盤の制御電圧を測定した。制御電圧の測定結果をTable 2に示す。測定結果には異常は認められなかった。

のことから、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機は、切替遮断器盤用直流分電盤の異常によって停止したものではないと判断できる。

## 4.2 運転データの確認

H T T Rの運転データを高速収集する装置に保存されている運転データの調査及び制御室に設置されたプリンタからの警報メッセージ履歴を確認した。

#### (1) ヘリウム循環機の運転データ

ヘリウム循環機の振動、軸受温度、回転数、モータ巻線温度が異常の場合には、機器保護のためヘリウム循環機を停止する設計となっていることから、運転されていた5台のヘリウム循環機について、振動、軸受温度、回転数、モータ巻線温度の運転データを確認した。確認の結果、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機に異常は認められなかった。

また、1次冷却材流量及び2次冷却材流量の運転データを確認した。確認の結果、流量について、トリップ前において異常は認められず、トリップ後の流量の低下の状況にも異常は認められなかった。

さらに、警報メッセージ履歴には、これらの異常を示す警報記録は認められなかった。

#### (2) ヘリウム循環機以外の運転データ

1次ヘリウム循環機Aのトリップの要因になり得る1次冷却材流路の閉塞、1次冷却材

圧力の異常な低下及び安全保護回路の異常について、炉心差圧とHGC フィルタ差圧の運転データ及び警報メッセージ履歴の確認並びにスクラム論理回路のロジック確認試験を行った。

確認の結果、運転データ及び警報メッセージ履歴の確認並びにスクラム論理回路のロジック確認試験の結果に異常は認められなかった。

このことから、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機は、運転の異常によって停止したものではないと判断できる。

#### 4.3 機器本体等の点検

原子炉停止後に原子炉格納容器内に立ち入り、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機の外観点検を行った結果、保温材及びケーシングのフランジを締付けているボルトの脱落等の異常は認められなかった。また、1次ヘリウム循環機A、B、Cそれぞれの入口弁の開閉状態及び外観点検を行った結果、異常は認められなかった。

さらに、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機について作動試験を行った結果、振動、軸受温度、回転数、モータ巻線温度の運転データに、有意な上昇等は認められず、正常に作動することを確認した。

このことから、1次ヘリウム循環機Aを含む5台全てのヘリウム循環機は、機器本体等の異常によって停止したものではないと判断できた。

以上の調査結果から、1次ヘリウム循環機Aのトリップは、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の誤動作が原因であると判断できた。

## 5. 制御電圧監視リレーの単体調査

1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査の結果、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の誤動作が原因であると判断できることから、制御電圧監視リレーについて、設置状況、温度変化試験等の詳細な調査を行った。

### 5.1 制御電圧監視リレーの概要

制御電圧監視リレーの動作概念図と外観をFig. 7に示す。制御電圧監視リレーは、(5台の)ヘリウム循環機の交流側トリップ遮断器及び直流側遮断器の制御電圧を設定回路で監視し、制御電圧が作動設定電圧を下回った場合には、補助リレー(K1)が非励磁状態となり、補助リレー接点(11-14間)を開とする。

## 5.2 設置状況確認

5台のヘリウム循環機の交流側トリップ遮断器及び直流側遮断器の制御電圧監視リレーの取り付け状況を目視で確認した。1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111とFV161の取付状態をPhoto 1に示す。1次ヘリウム循環機Aの交流側トリップ遮断器の制御電圧監視リレーFV111とFV161は、常時励磁され発熱している補助リレーに接近して設置されていた。この補助リレーは、直流側遮断器の制御電圧が低下したときに外部に異常信号を発信する役割をするリレーで、常に通電されているため発熱している。

一方、1次ヘリウム循環機Aの直流側遮断器の制御電圧監視リレー及び1次ヘリウム循環機A以外のヘリウム循環機の交流側及び直流側制御電圧監視リレーは、常時励磁され発熱している補助リレーからは離れた位置に設置されていた。一例として、2次ヘリウム循環機の制御電圧監視リレーFV111とFV161の取付状態をPhoto 2に示す。

## 5.3 表面温度測定

1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111とFV161が、常時励磁され発熱している補助リレーに接近して設置されていたことで、制御電圧監視リレーの誤動作が発生した可能性があるため、5台のヘリウム循環機の切替遮断器盤内の制御電圧監視リレーの表面温度の測定を行った。

最初に、5台のヘリウム循環機の切替遮断器盤内の温度を測定した。日本電気工業会規格 JEM1460「配電盤、制御盤の定格及び試験」によると、盤の標準使用状態として、“周囲温度は、最低-5℃から最高40℃までの範囲とし、その24時間を通じて測定した平均値35℃以下とする。”と規定されている。温度測定は、盤の扉を全閉にした状態で行った。切替遮断器盤内温度測定結果をTable 3に示す。測定の結果、5台のヘリウム循環機の切替遮断器盤内の温度は、いずれも室温とほぼ同じ約20℃であり、異常は認められなかった。

次に、5台のヘリウム循環機の制御電圧監視リレーFV111とFV161の表面（常時励磁され発熱している補助リレーに隣接する面）の温度を測定した。制御電圧監視リレーの温度測定結果をTable 4に示す。測定の結果、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111とFV161の表面温度は、制御電圧監視リレーの使用温度の上限である70℃に近い約67℃であることが分かった。また、これらを取り外して、表面を観察したところ、制御電圧監視リレーFV111には変色と亀裂が認められ、制御電圧監視リレーFV161には僅かな変色が認められた。1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111とFV161の表面観察結果をPhoto 3に示す。

一方、1次ヘリウム循環機A以外の制御電圧監視リレーFV111とFV161の表面温度は約30℃～35℃であり、変色等の異常は認められなかった。これらは、常時励磁され発熱している補助リレーから離れて設置されているものである。

1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111は、使用温度の上限に近い条件下で使用されてきたことによって故障した可能性があるため、制御電圧監視リレーFV111を切替遮

断器盤から取り外し、室温状態で、接点の接触抵抗測定、設定値確認試験、タッピング試験を行った。

#### 5.4 接点の接触抵抗測定

室温状態で、制御電圧監視リレーFV111に制御電圧（A1-A2間に約DC100V）を印可し、補助リレー接点（11-14間）の接触抵抗をマルチメータで測定した。測定概念図をFig.8に示す。測定結果を比較するため、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の他に、1次ヘリウム循環機Aの直流側制御電圧監視リレーFV121の接触抵抗も測定した。接触抵抗の測定結果をTable5に示す。測定の結果、接点の接触抵抗に有意な差は見られなかった。

次に、室温状態で、制御電圧監視リレーFV111に制御電圧（A1-A2間に約DC100V）を印可し、補助リレー接点（11-14間）の接触抵抗の急激な変化（接点の動作）を連続監視した。測定概念図をFig.9に示す。制御電圧監視リレーFV111の接点の接触抵抗を連続監視（約1日）した結果、接点の接触抵抗の急激な変化（接点の動作）は見られなかった。

#### 5.5 設定値確認試験

1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の作動設定電圧に異常が生じ、誤動作が発生した可能性があるため、室温状態での制御電圧監視リレーFV111の作動設定電圧を確認した。確認方法については、制御電圧監視リレーFV111に印可する制御電圧（A1-A2間に約100V）を徐々に低下させ、接点（11-14間）の開閉状態（抵抗）をマルチメータで監視し、接点が動作すること及び作動設定電圧を確認した。測定結果を比較するため、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の他に、1次ヘリウム循環機Aの直流側制御電圧監視リレーFV121、2次ヘリウム循環機の交流側及び直流側の制御電圧監視リレーFV111、FV121の作動設定電圧も測定した。作動設定電圧の測定結果をTable6に示す。測定の結果、作動設定電圧に有意な差は見られなかった。

#### 5.6 タッピング試験

振動等によって、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の補助リレー接点の接触抵抗が変化するかどうか、室温状態で確認した。確認方法については、制御電圧監視リレーFV111に制御電圧（A1-A2間に約DC100V）を印可した状態で、セラミックドライバーでタッピングを行い、接点（11-14間）の接触抵抗の急激な変化（接点の動作）を確認した。結果を比較するため、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の他に、1次ヘリウム循環機Aの直流側の制御電圧監視リレーFV121、2次ヘリウム循環機の交流側及び直流側の制御電圧監視リレーFV111、FV121についてもタッピング試験を実施した。試験の結果、試験を実施した制御電圧監視リレーについて、接点の接触抵抗の急激な変化（接点の動作）は見られなかった。

### 5.7 溫度変化試験

室温状態での試験結果に異常が認められなかつたため、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の使用温度条件を模擬した温度変化試験を行つた。確認方法については、恒温槽内に制御電圧監視リレーFV111を設置して昇温し、温度による影響で補助リレー接点(11-14間)の接触抵抗の急激な変化(接点の動作)が発生しないことを確認した。測定概念図をFig.10、恒温槽内温度変化及び保持時間をFig.11に示す。結果を比較するため、1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の他に、2次ヘリウム循環機の制御電圧監視リレーFV111についても同様の試験を実施した。試験の結果、誤動作したと考えられる1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111は、室温では誤動作は確認されなかつたが、恒温槽に入れて試験したところ約60℃の条件では5時間の間に3回、また、約65℃の条件では3時間の間に5回リレーが作動する誤動作の発生が確認された。誤動作した際の接点の動作をFig.12に示す。

一方、異常が認められていない2次ヘリウム循環機の制御電圧監視リレーFV111について同様に温度変化試験を行つたところ、同一の温度条件では誤動作は確認されず、さらに、使用温度の上限の70℃で連続半日程度保持しても誤動作は確認されなかつた。

### 5.8 考察及び対策

制御電圧監視リレーFV111のような電気・電子部品の故障メカニズムとして、拡散、酸化、吸着、腐食、電解作用、クラックの成長などの化学的／物理的反応が存在する。この反応は温度に強く影響される。物理的反応と化学的反応が順次、あるいは同時に繰り返される複合的ストレスとして作用することにより部品の劣化を早め、部品固有の耐力を超えてしまうと機能が停止し、故障に至ると考えられている。反応速度理論では、温度と化学的／物理的反応の間にはアレニウスの関係式が成り立ち、温度が高くなるほど反応が速く進むとされている。<sup>(5)</sup>

また、制御電圧監視リレーFV111はドイツ製であるが、日本国内メーカーの同等品の場合、発熱機器と密着して設置すると性能の劣化が速く進むために、発熱機器と隣接して設置する場合には1～5mm程度の隙間をあけて設置することが推奨されている。

1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111は、常時励磁され発熱している補助リレーに接近して設置され、使用温度の上限に近い温度条件下で使用されてきたことによつて性能の劣化が速く進み、誤動作を引き起こしたものと考えられる。

このことから、5台の切替遮断器盤内の交流側トリップ遮断器及び直流側遮断器の制御電圧監視リレーの全てについて、以下の再発防止対策を講じた。

- (1) 制御電圧監視リレーについては、全数交換する。
- (2) 1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111は、常時励磁され発熱している補助リレーに接近して設置され、使用温度の上限に近い温度条件下で使用されてきたことによる性能の劣化等によって誤動作を引き起こしたと推定できるので、制御電圧監

視リレーの交換に当たっては、熱的影響を受け難い場所に設置する。

再発防止対策後、制御電圧監視リレーの表面温度を測定した結果、表面温度は最大で34.7°Cであり、制御電圧監視リレーの表面温度に問題のないことを確認した。表面温度測定結果をTable 7に示す。

さらに、原子炉施設内の動力電源、制御電源を供給する他の盤等について、補助リレーが熱的影響を受け難い配置となっていることを点検し、不適切なものは適切に配置するとともに、今後、盤を改造、増設するに当たっては、補助リレー等が相互に熱的影響を及ぼさない配置となるように設計する。

## 6. 結論

1次ヘリウム循環機Aのトリップの原因は、使用温度の上限に近い温度条件下で使用されてきた制御電圧監視リレーFV111の接点が「開」となる誤動作によって、1次ヘリウム循環機Aの動力電源用の交流側トリップ遮断器Aが「開」となったことによると判断できる。また、1次ヘリウム循環機Aがトリップした結果、1次加圧水冷却器ヘリウム流量が低下し、「1次加圧水冷却器ヘリウム流量低」スクラム信号によって原子炉が自動停止したと判断できた。

再発防止対策として、制御電圧監視リレーについて全数交換し、熱的影響を受け難い場所に設置し、その他の盤等についても、補助リレーが熱的影響を受け易い配置となっているものは適切に配置したことにより、今後このような事象は生じないと考えている。

## 謝 辞

今回の自動停止の対応にあたり、高温工学試験研究炉開発部藤川正剛部長、林秀行次長、藤本望原子炉主任技術者、HTTR試験室、HTTR技術開発室及びHTTR計画室の方々には多大な助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) Saito S., et al.: JAERI 1332, "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)" (1994)
- (2) 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)

- (3) 橋幸男、中川繁昭他, JAERI-Tech 2002-59, “高温工学試験研究炉（H T T R）の安全性実証試験計画”(2002)
- (4) 中川繁昭、坂場成昭他, JAERI-Tech 2003-049, 「H T T R 安全性実証試験（SR-1/S1C-1）の試験計画」(2003)
- (5) 慶伊富長:「反応度理論」第2版、東京化学同人(1984)

Table 1 接触抵抗の測定結果(1/2)

測定ポイント 補助リレー	HGC(A)-A系		HGC(B)-A系		HGC(C)-A系		HGC(IHX)-A系		HGC(SWC)-A系	
	接点名称	測定値	接点状態	測定値	接点状態	測定値	接点状態	測定値	接点状態	測定値
FV111	11-14	22.7mV	close	1.2mV	close	2.6mV	close	8.3mV	close	2.0mV
KA115	13-14	0.67V	open	0.68V	open	0.67V	open	0.67V	open	0.65V
	21-22	0.2mV	close	0.2mV	close	0.2mV	close	0.2mV	close	0.1mV
KA116	13-14	0.67V	open	0.68V	open	0.67V	open	0.67V	open	0.65V
	53-54	45.7V	open	45.7V	open	45.7V	open	45.0V	open	45.7V
	61-62	10.3mV	close	6.6mV	close	8.3mV	close	11.8mV	close	33.1mV
KA116-1	1-4	0.7Ω	close	0.6Ω	close	0.3Ω	close	0.7Ω	close	0.2Ω
KA117	31-32	45.7V	open	45.7V	open	45.7V	open	45.7V	open	45.7V
FV121	11-14	2.3mV	close	1.9mV	close	1.9mV	close	9.2mV	close	3.5mV
KA125	13-14	0.68V	open	0.68V	open	0.67V	open	0.67V	open	0.66V
	21-22	0.1mV	close	1.5mV	close	0.1mV	close	0.1mV	close	0.4mV
KA126	13-14	0.68V	open	0.68V	open	0.67V	open	0.67V	open	0.66V
KA126-1	1-4	1.1Ω	close	0.6Ω	close	0.4Ω	close	1.0Ω	close	0.6Ω
KA127	31-32	45.7V	open	45.7V	open	45.7V	open	45.7V	open	45.7V
AL	ALc1-ALb1	AC:2.6mV	close	AC:2.9mV	close	AC:2.9mV	close	AC:2.8mV	close	AC:2.8mV
		DC:2.2mV		DC:2.7mV		DC:2.2mV		DC:2.7mV		DC:2.9mV
AX	AXc1-AXa1	AC:105.9V	close	AC:105.8V	close	AC:105.9V	close	AC:106.0V	close	AC:106.0V
		DC:105.9V		DC:106.0V		DC:105.9V		DC:106.0V		DC:106.0V

Table 1 接触抵抗の測定結果(2/2)

測定ポイント		HGC(A)-B系		HGC(B)-B系		HGC(C)-B系		HGC(IHX)-B系		HGC(SWC)-B系	
補助リレー	接点名称	測定値	接点状態								
FV161	11-14	24.1mV	close	2.6mV	close	7.2mV	close	3.2mV	close	4.7mV	close
KA165	13-14	0.67V	open	0.67V	open	0.68V	open	0.68V	open	0.67V	open
	21-22	0.1mV	close	1.5mV	close	7.4mV	close	0.6mV	close	1.3mV	close
KA166	13-14	0.68V	open	0.67V	open	0.68V	open	0.68V	open	0.67V	open
	53-54	45.9V	open	45.8V	open	45.9V	open	45.9V	open	45.9V	open
	61-62	12.7mV	close	9.4mV	close	9.1mV	close	11.4mV	close	17.0mV	close
KA166-1	1-4	0.6 Ω	close	0.6 Ω	close	0.1 Ω	close	0.7 Ω	close	0.3 Ω	close
KA167	31-32	45.9V	open								
FV171	11-14	2.9mV	close	2.3mV	close	9.8mV	close	3.6mV	close	1.4mV	close
KA175	13-14	0.68V	open	0.67V	open	0.68V	open	0.67V	open	0.66V	open
	21-22	0.1mV	close	0.1mV	close	0.1mV	close	0.1mV	close	0.5mV	close
KA176	13-14	0.68V	open	0.67V	open	0.67V	open	0.67V	open	0.66V	open
KA176-1	1-4	1.3 Ω	close	0.4 Ω	close	1.0 Ω	close	0.9 Ω	close	1.1 Ω	close
KA177	31-32	45.9V	open								
AL	ALc1-ALb1	AC:2.4mV DC:3.1mV	close	AC:2.5mV DC:3.2mV	close	AC:2.7mV DC:3.0mV	close	AC:2.9mV DC:3.0mV	close	AC:2.9mV DC:3.3mV	close
AX	AXc1-AXa1	AC:106.5V DC:106.5V	close	AC:106.6V DC:106.6V	close	AC:106.6V DC:106.6V	close	AC:106.6V DC:106.6V	close	AC:106.6V DC:106.6V	close

Table 2 制御電圧の測定結果

		測定箇所(A系)	結果	測定箇所(B系)	結果	
切替遮断器用 直流分電盤	AC遮断器用	QF73	105.9V	QF103	106.6V	
		QF74	105.9V	QF104	106.6V	
		QF75	105.9V	QF105	106.6V	
		QF76	106.0V	QF106	106.6V	
		QF77	106.0V	QF107	106.6V	
	DC遮断器用	QF83	105.9V	QF113	106.6V	
		QF84	105.9V	QF114	106.6V	
		QF85	105.9V	QF115	106.6V	
		QF86	105.9V	QF116	106.6V	
		QF87	105.9V	QF117	106.6V	
切替遮断器盤	A号機	AC遮断器用	XTA 01-02	105.9V	XTB 01-02	106.6V
		DC遮断器用	XTA 03-04	105.9V	XTB 03-04	106.6V
	B号機	AC遮断器用	XTA 01-02	105.9V	XTB 01-02	106.6V
		DC遮断器用	XTA 03-04	105.9V	XTB 03-04	106.6V
	C号機	AC遮断器用	XTA 01-02	105.9V	XTB 01-02	106.6V
		DC遮断器用	XTA 03-04	105.9V	XTB 03-04	106.6V
	IHX	AC遮断器用	XTA 01-02	106.0V	XTB 01-02	106.6V
		DC遮断器用	XTA 03-04	106.0V	XTB 03-04	106.6V
	SWC	AC遮断器用	XTA 01-02	106.0V	XTB 01-02	106.6V
		DC遮断器用	XTA 03-04	106.0V	XTB 03-04	106.6V

		測定箇所	結果
循環機回転数制御盤	HGC(A)	XTA 02-04	105.8V
	HGC(B)	XTA 02-04	106.2V
	HGC(C)	XTA 02-04	106.2V
	HGC(IHX)	XTA 02-04	105.6V
	HGC(SWC)	XTA 02-04	105.6V

Table 3 切替遮断器盤内温度の測定結果

	A系	B系
HGC(A)	19.5°C	19.5°C
HGC(B)	19.7°C	19.6°C
HGC(C)	19.5°C	19.6°C
HGC(IHX)	19.7°C	19.6°C
HGC(SWC)	19.5°C	19.6°C

Table 4 制御電圧監視リレーの温度測定結果

	A系(FV111)	B系(FV161)
HGC(A)	65.2°C	66.7°C
HGC(B)	33.4°C	35.2°C
HGC(C)	31.0°C	36.3°C
HGC(IHX)	33.5°C	29.3°C
HGC(SWC)	32.7°C	30.2°C

Table 5 接点の接触抵抗の測定結果

測定ポイント		接点抵抗		
制御電圧監視リレー	接点名称	1回目	2回目	3回目
1次ヘリウム循環機Aの交流側トリップ遮断器A 制御電圧監視リレー(FV111)	11-14	0. 9Ω	0. 8Ω	0. 7Ω
1次ヘリウム循環機Aの直流側遮断器A 制御電圧監視リレー(FV121)	11-14	3. 3Ω	2. 4Ω	2. 3Ω

Table 6 作動設定電圧の測定結果

制御電圧監視リレー		1回目	2回目	3回目
1次ヘリウム循環機Aの交流側トリップ遮断器A 制御電圧監視リレー(FV111)	動作電圧	102.6V	102.6V	102.6V
	復帰電圧	96.2V	96.2V	96.2V
1次ヘリウム循環機Aの直流側遮断器A 制御電圧監視リレー(FV121)	動作電圧	101.8V	101.8V	101.8V
	復帰電圧	95.5V	95.5V	95.5V
2次ヘリウム循環機の交流側トリップ遮断器A 制御電圧監視リレー(FV111)	動作電圧	103.5V	103.6V	103.6V
	復帰電圧	97.3V	97.3V	97.3V
2次ヘリウム循環機の直流側遮断器A 制御電圧監視リレー(FV121)	動作電圧	103.3V	103.3V	103.3V
	復帰電圧	96.7V	96.7V	96.7V

Table 7 盤内での設置場所変更における制御電圧監視リレーの表面温度測定結果

	FV111左側	FV111右側	FV121左側	FV121右側	FV161左側	FV161右側	FV171左側	FV171右側
HGC(A)	27.1°C	30.6°C	28.7°C	28.8°C	27.6°C	28.9°C	27.5°C	28.4°C
HGC(B)	27.3°C	29.5°C	29.5°C	27.2°C	28.8°C	27.9°C	28.6°C	27.8°C
HGC(C)	27.9°C	31.3°C	28.6°C	28.4°C	26.6°C	30.1°C	28.6°C	27.8°C
HGC(IHX)	27.7°C	31.1°C	28.7°C	28.9°C	27.6°C	34.7°C	28.8°C	28.7°C
HGC(SWC)	28.0°C	27.8°C	28.3°C	30.4°C	28.2°C	30.0°C	28.4°C	27.6°C

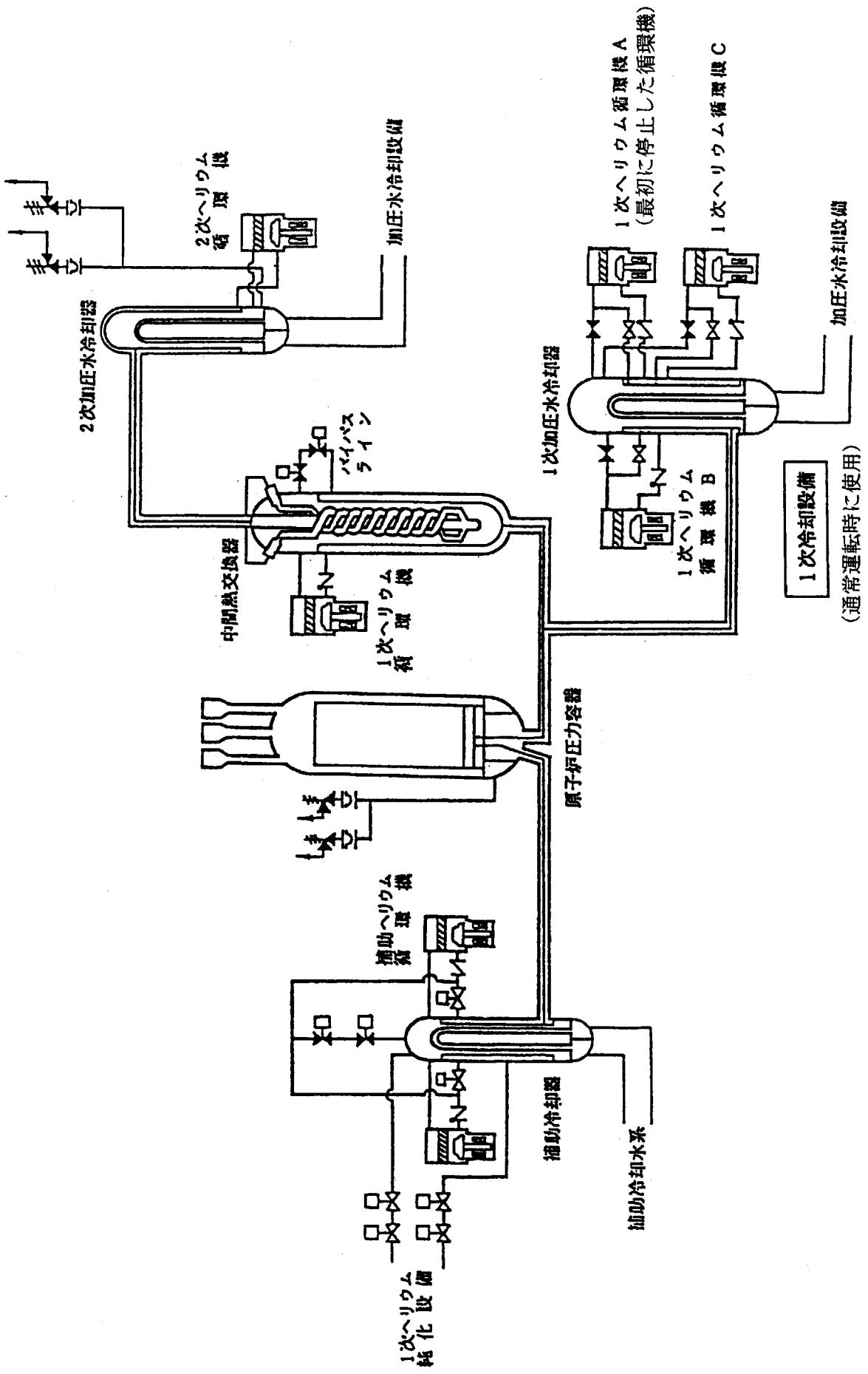


Fig.1 炉心を直接冷却する系統の説明図

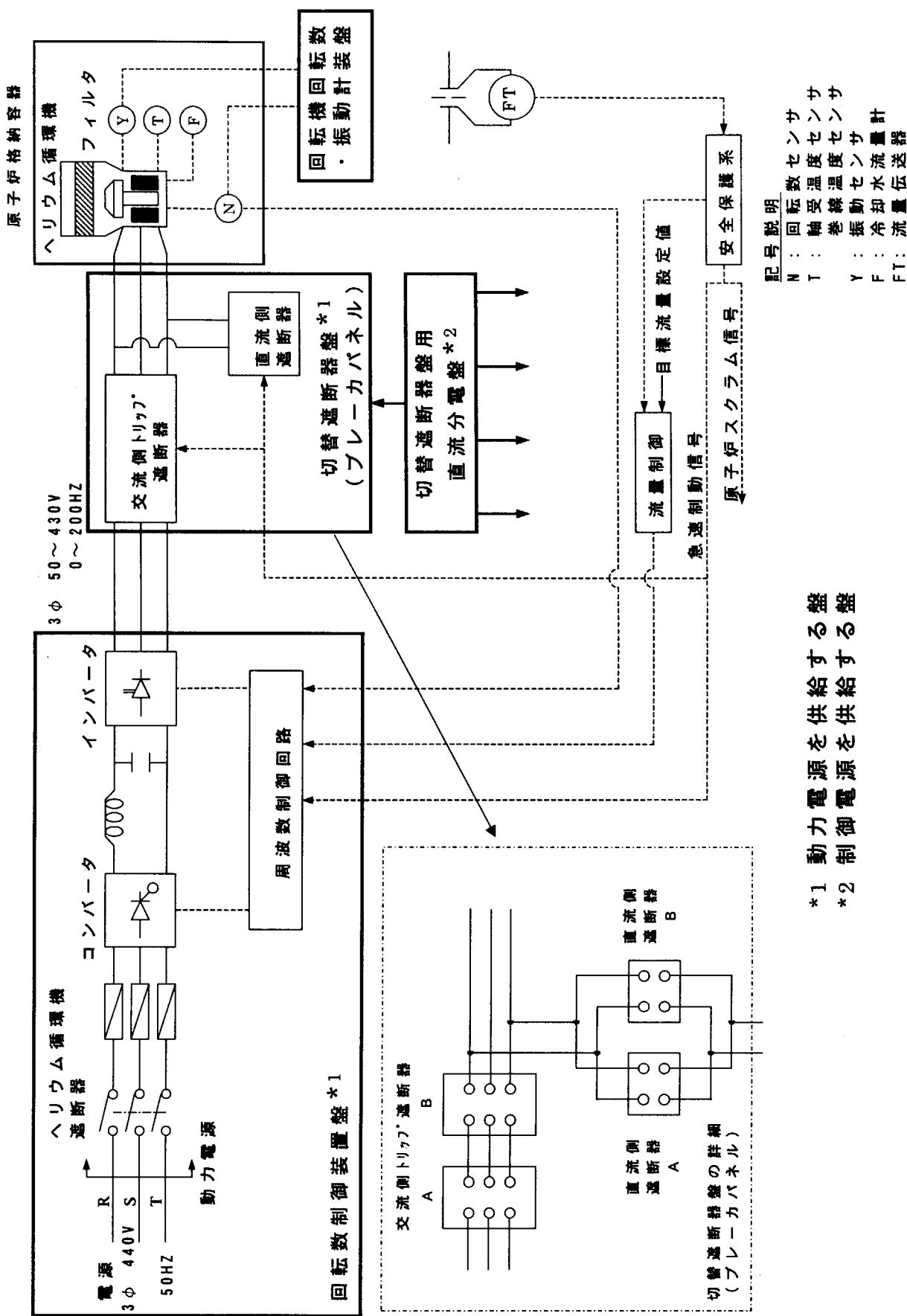


Fig.2 ヘリウム循環機の動力電源及び制御系の概要

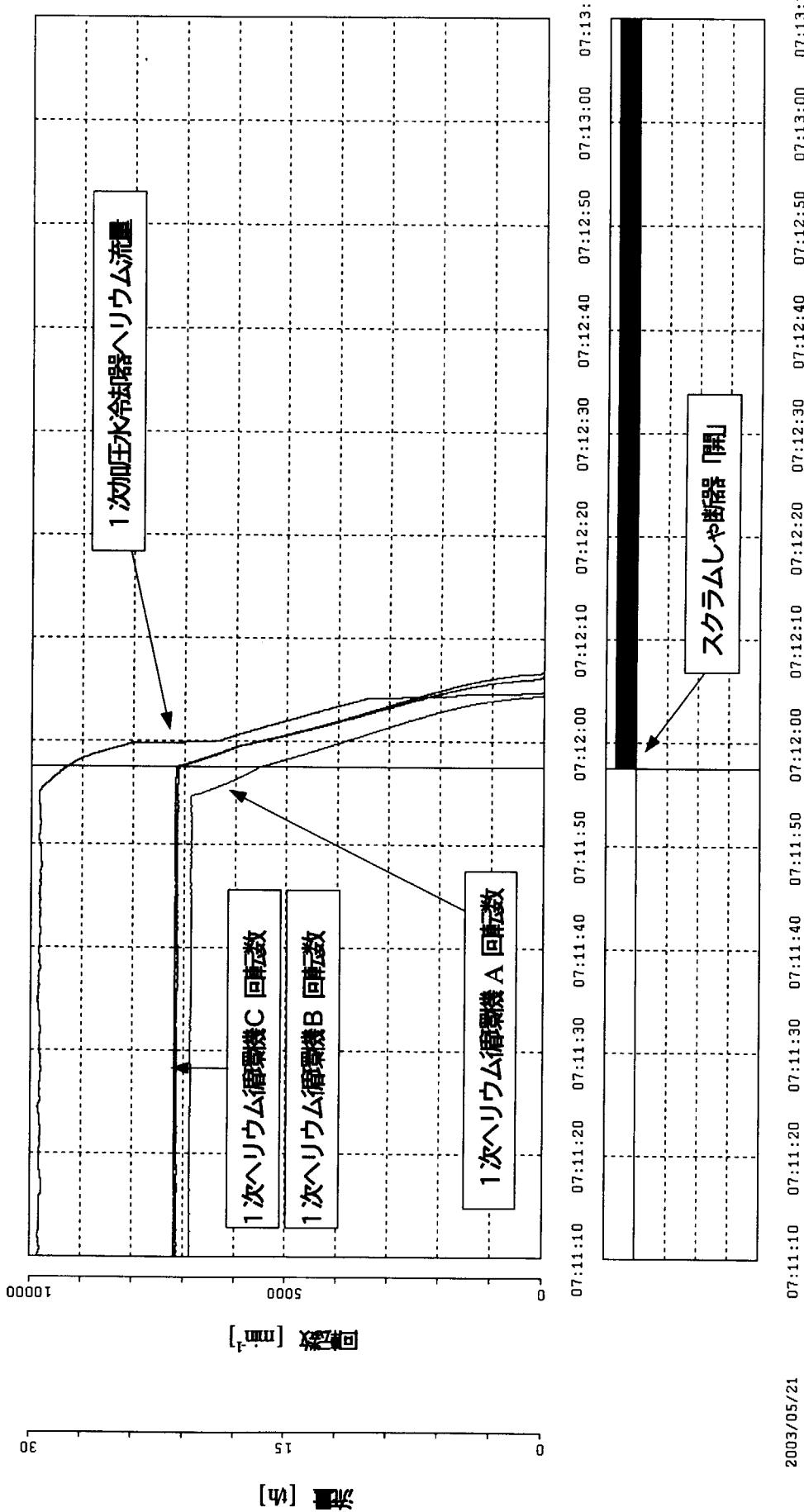


Fig.3 原子炉自動停止時の1次ヘリウム循環機の回転数と流量及びスクラム遮断器の動作の推移

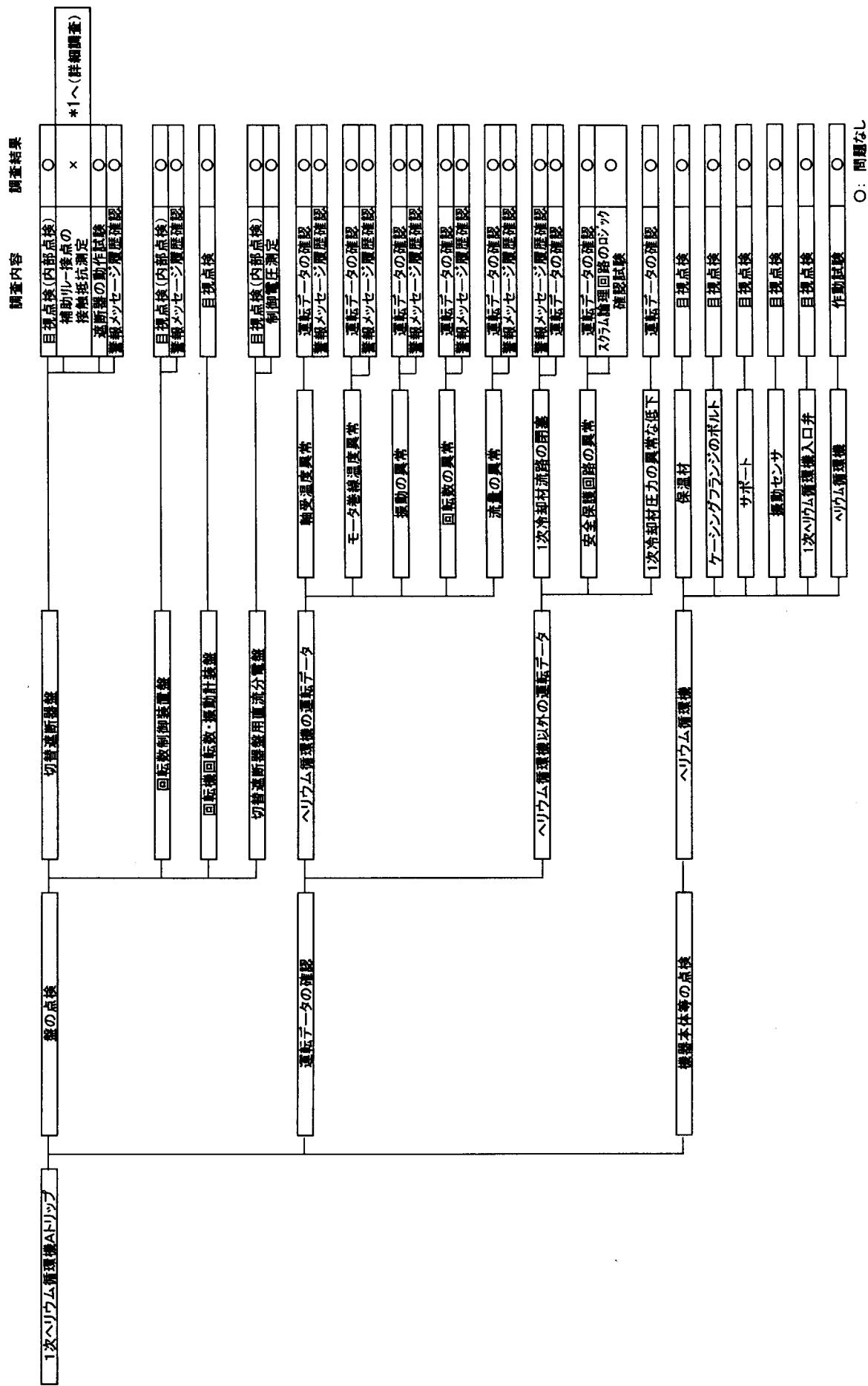


Fig. 4 1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査のフロー図 (1/2)

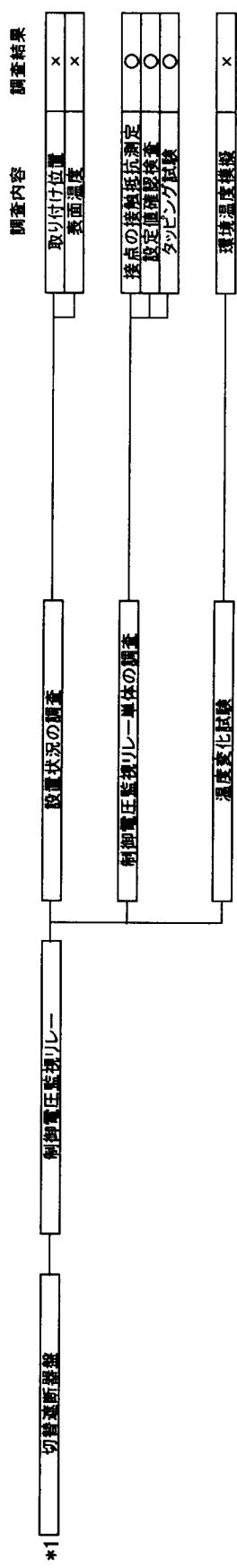


Fig. 4 1次ヘリウム循環機Aのトリップに係る要因調査のフロー図 (2/2)

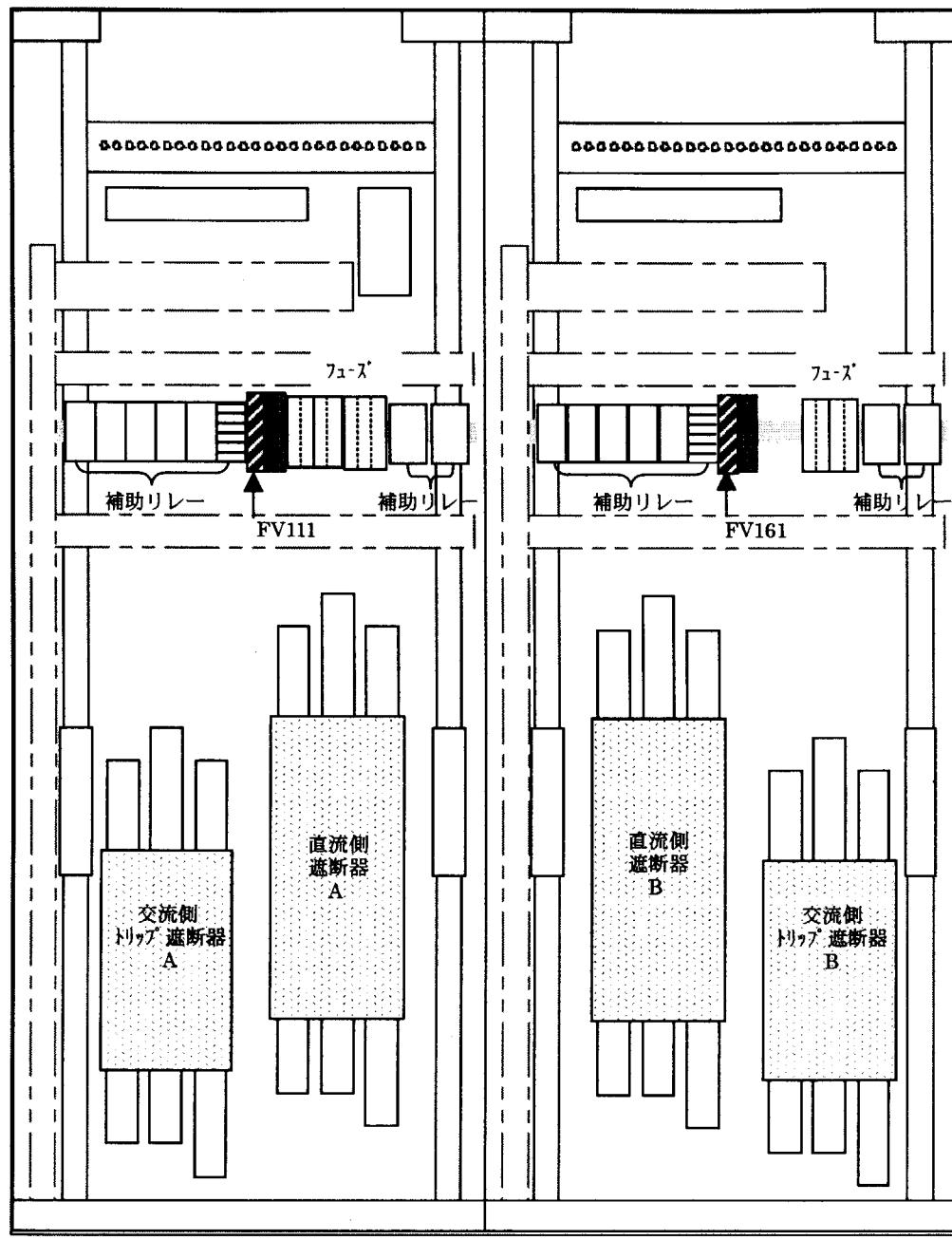


Fig. 5 1次ヘリウム循環機Aの切替遮断器盤内の配置

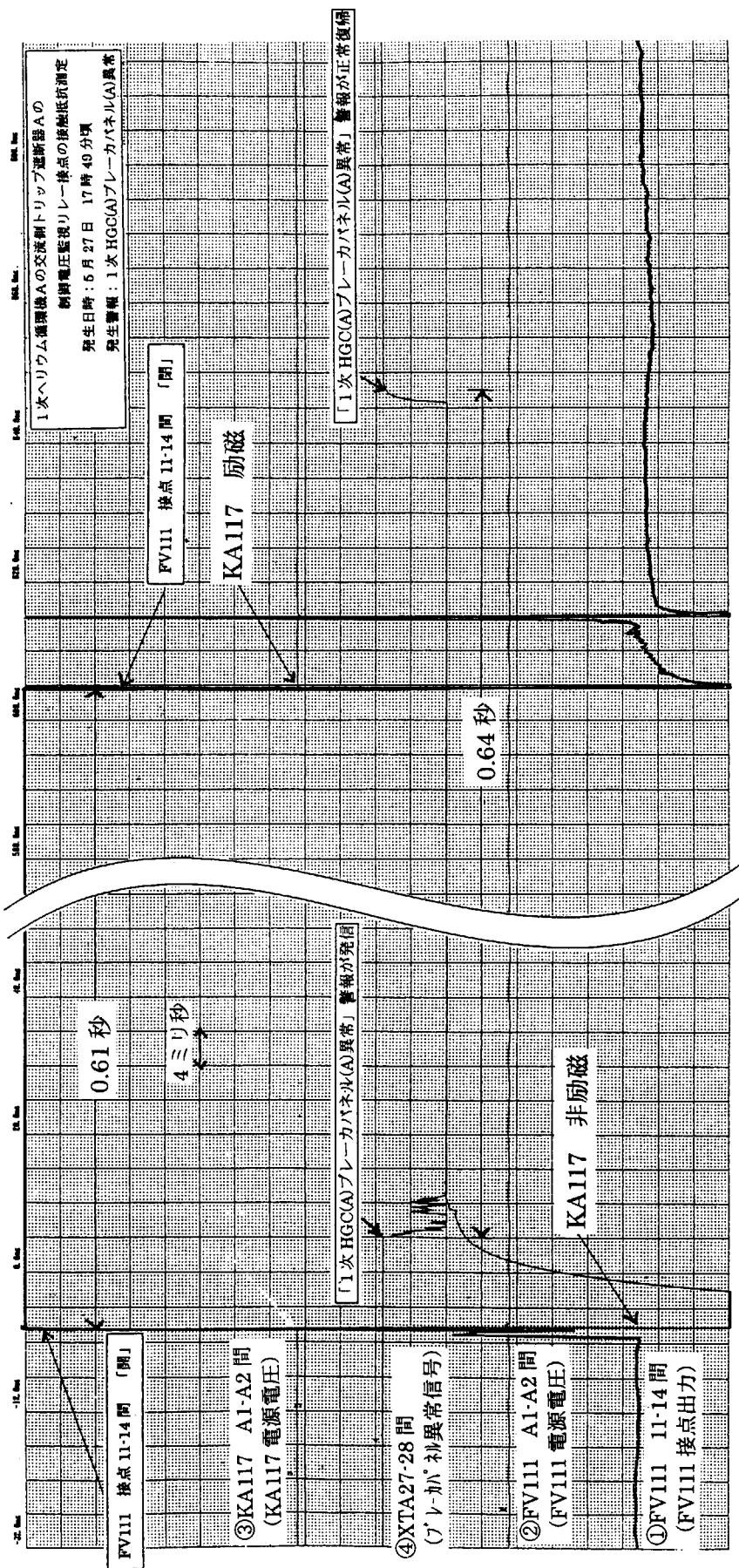
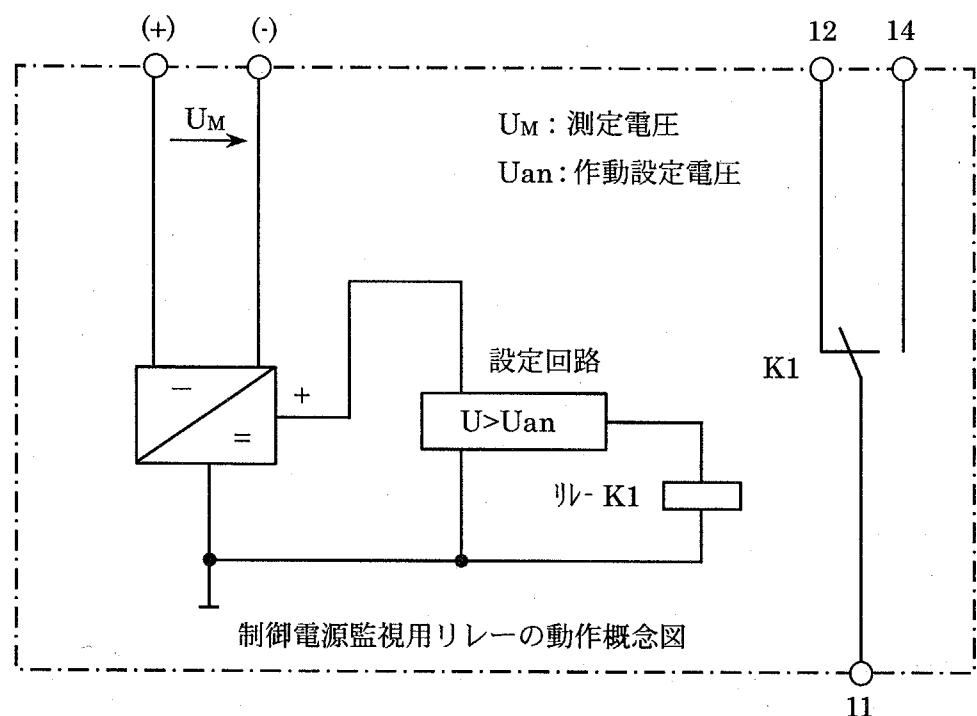


Fig.6 1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレー-FV111 の接觸抵抗測定



接点の動作

11-14 :  $U > U_{an}$ 11-12 :  $U < U_{an}$ 

Fig.7 制御電源監視を行う補助リレーの動作概念図と外観

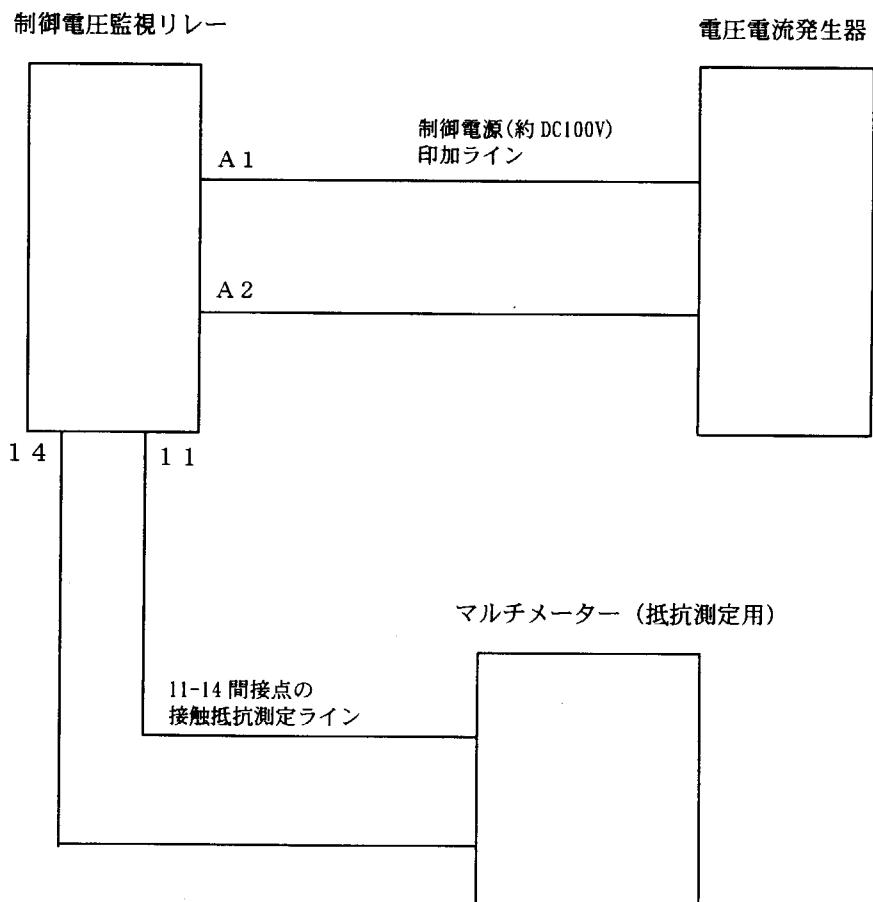


Fig. 8 接点の接触抵抗確認及び設定値確認での測定概念図

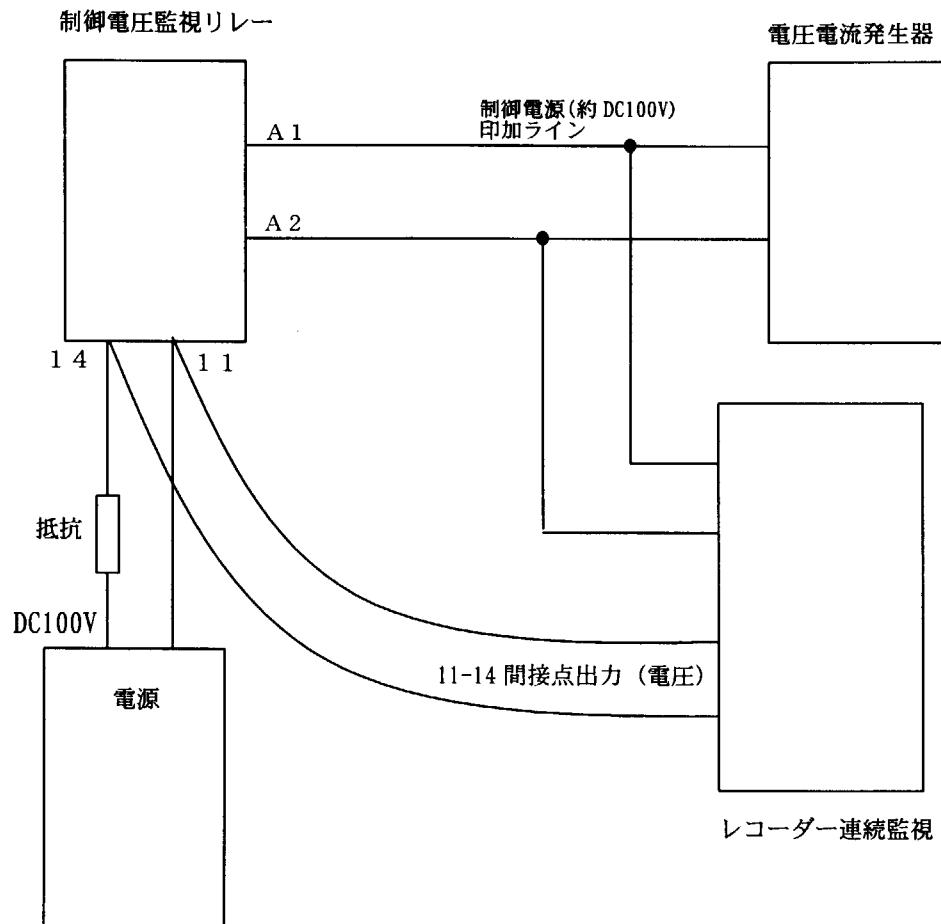


Fig. 9 接点の接触抵抗連続監視及びタッピング試験での測定概念図

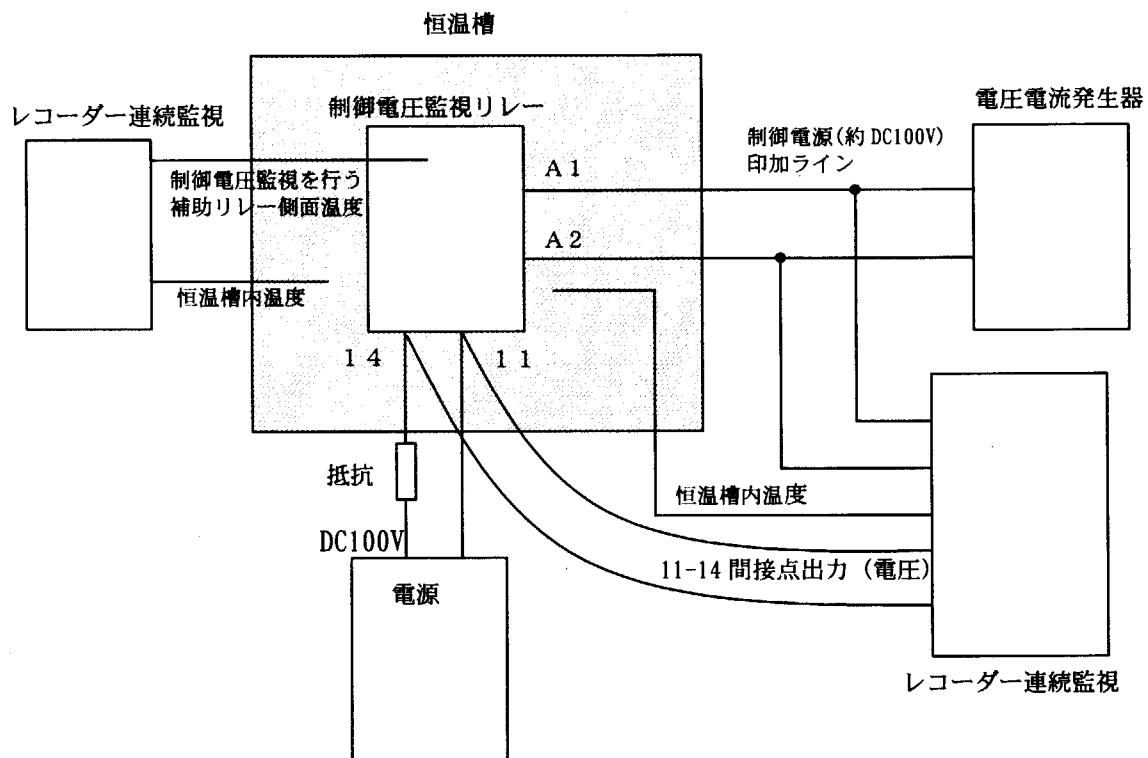


Fig. 10 温度変化に伴う作動確認での測定概念図

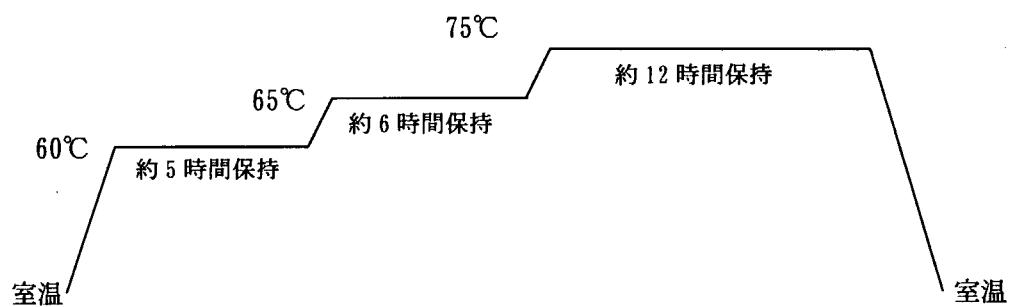


Fig. 11 恒温槽内温度变化及び保持時間

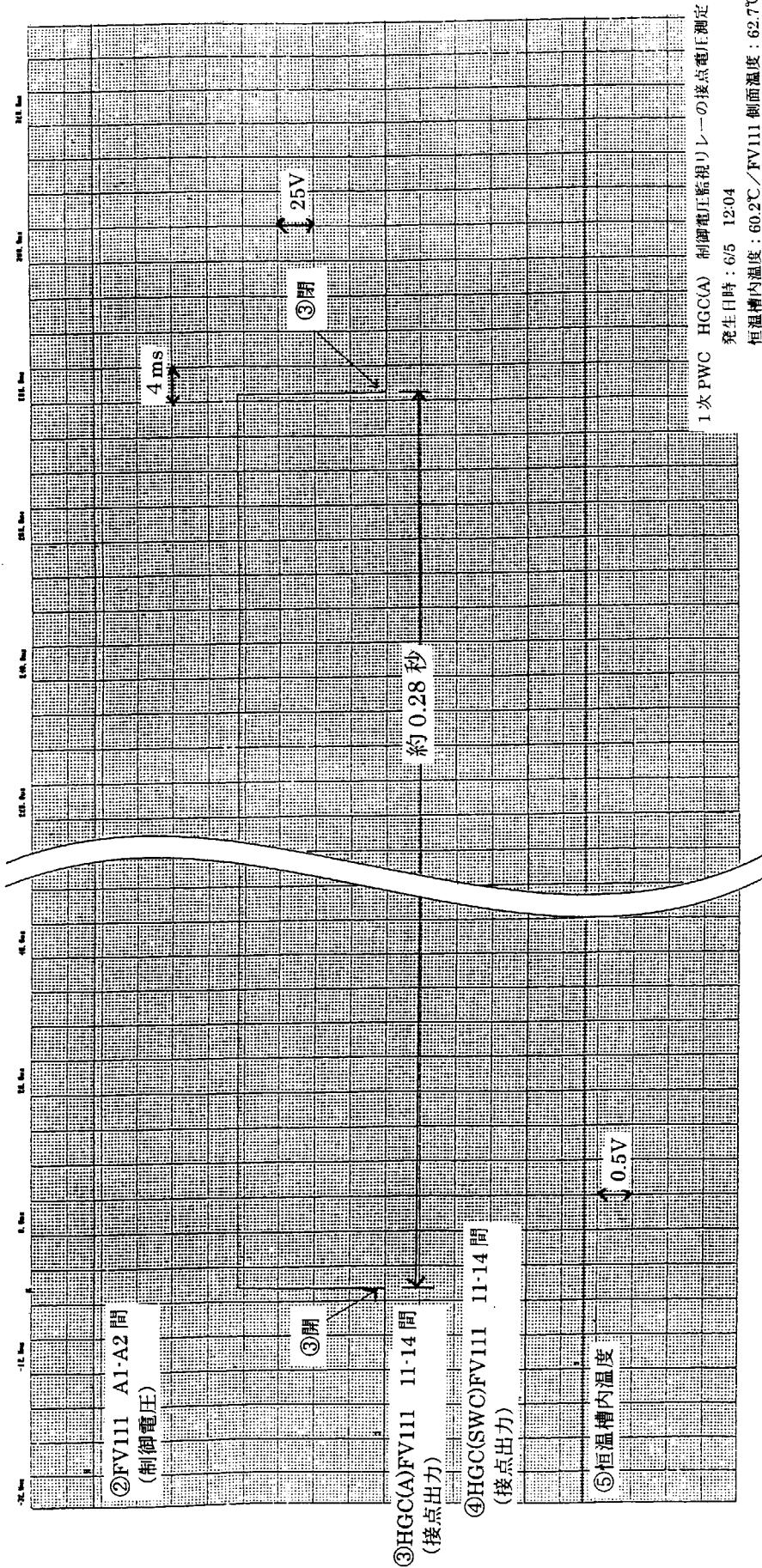


Fig.12 溫度變化試験で観察された1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーFV111の接点動作

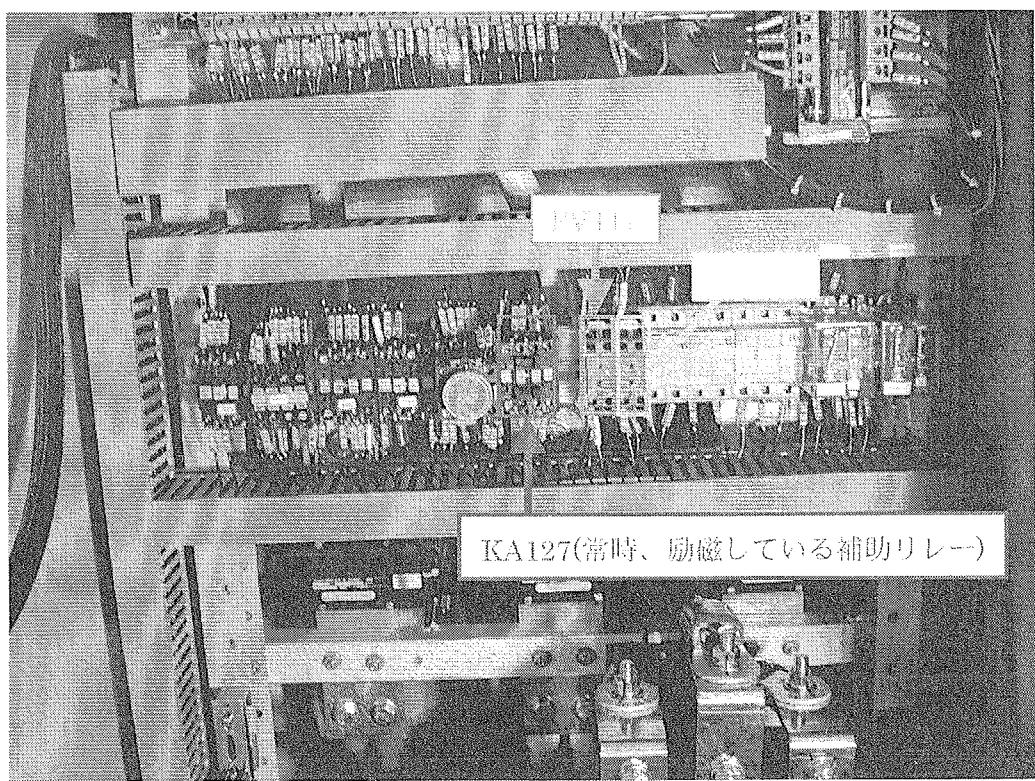


1次ヘリウム循環機 A 用の切替遮断器盤 A



1次ヘリウム循環機 A 用の切替遮断器盤 B

Photo 1 制御電圧監視リレーの取付状態 (1次ヘリウム循環機A)

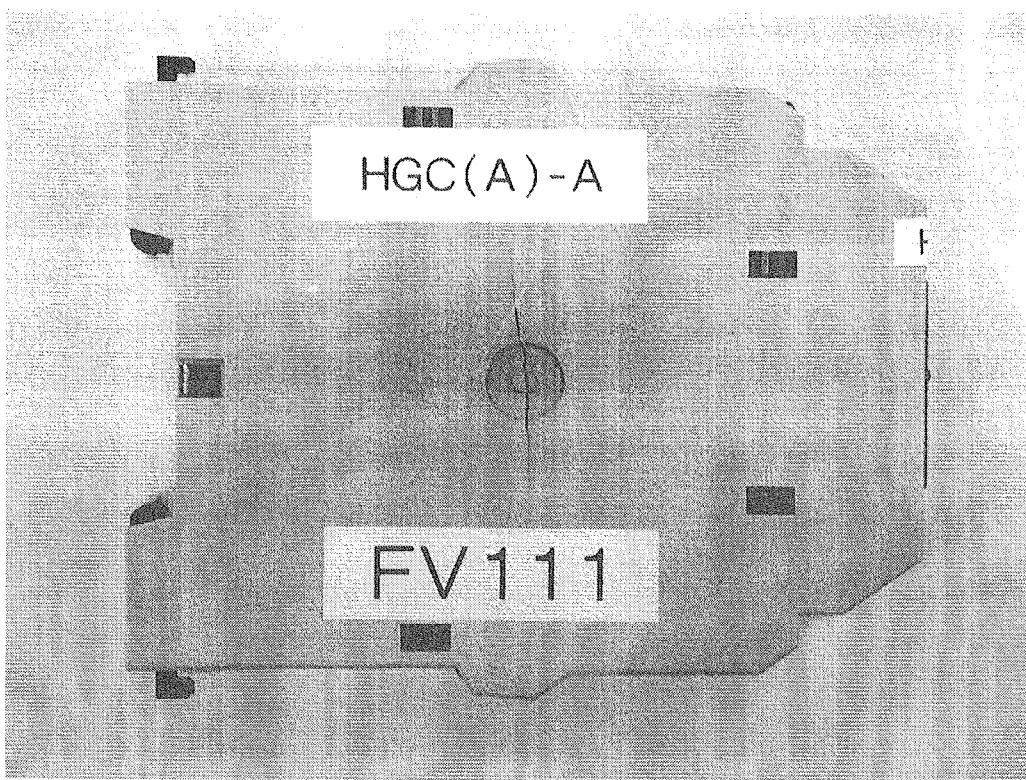


2次ヘリウム循環機用の切替遮断器盤 A

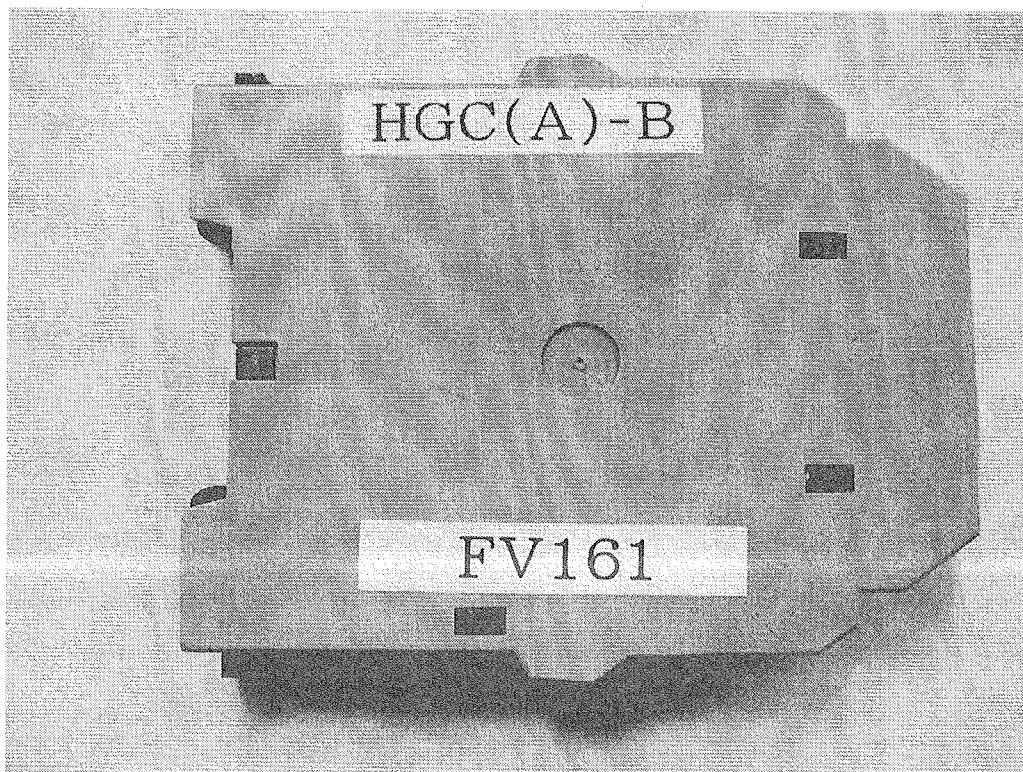


2次ヘリウム循環機用の切替遮断器盤 B

Photo 2 制御電圧監視リレーの取付状態（2次ヘリウム循環機）



1次ヘリウム循環機Aの交流側トリップ遮断器 (FV111)



1次ヘリウム循環機Aの交流側トリップ遮断器B(FV161)

Photo 3 1次ヘリウム循環機Aの制御電圧監視リレーの表面観察

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C開催理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

## 換 算 表

力 N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462
4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ボアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧 力	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
		1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー ・仕事 ・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
		1	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.184 J (熱化学)	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J (15°C)	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>3</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-10</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

H T T R 自動停止(2003年5月21日発生)の原因調査結果

R100  
古紙配合率100%再生紙を使用しています