



JAEA-Testing

2006-003



JP0650410

燃料破損検出装置の保守管理

Maintenance of Fuel Failure Detector System of the HTTR

野地 喜吉 亀山 恭彦 江森 恒一 青野 哲也

Kiyoshi NOJI, Yasuhiko KAMEYAMA, Koichi EMORI and Tetsuya AONO

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

JAEA-
Testing

June 2006

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 is issued by Japan Atomic Energy Agency irregularly.
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. 81 29 282 6387, Fax. 81 29 282 5920

燃料破損検出装置の保守管理

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
野地 喜吉※・亀山 恭彦・江森 恒一・青野 哲也

(2006年1月27日受理)

原子炉通常運転時、燃料の健全性を監視するための設備として、HTTR には燃料破損検出装置 (Fuel Failure Detection (FFD) System) が設置されている。本装置は、7領域に分割した原子炉の高温プレナム部から1次冷却材をサンプリングし、それぞれの領域の短半減期核分裂生成物希ガスを検出することにより、燃料破損が発生した際に、その領域を特定できるようになっている。

設計では、本装置における1次冷却材サンプリング流量は運転中変更する必要がないと考えていた。しかしながら、原子炉の運転状況により変化する1次冷却材圧力の影響でサンプリング流量が変動し、測定値が不安定になることが明らかとなつた。また、サンプリング流量の変更は、運転中立入が制限されるサービスエリア内に設置された手動弁で行わなければならぬため、運転中の流量調整が困難であった。そこで、サービスエリア外からサンプリング流量の制御ができるように流量制御系を改善した結果、安定した計測が可能となった。また、計測時のノイズの低減化、ガス圧縮機のオイルレベル計の改善等を実施したことにより、現在は良好な運転状態を維持している。

本報は、FFD を運用するまでの検出器(プレシピテータ)による検出性能の維持、設備の維持管理を目的に実施してきた保守項目、改善等についてまとめたものである。

Maintenance of Fuel Failure Detector System of the HTTR

Kiyoshi NOJI*, Yasuhiko KAMEYAMA, Koichi EMORI and Tetsuya AONO

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

(Received January 27,2006)

The FFD (Fuel Failure Detection) System has been installed in the HTTR in order to detect the abnormal release of fission products from the fuel during the operations. The FFD system samples the primary coolant from the high-temperature plenum division of the reactor core divided into seven regions. The system detects short life fission product(FP) gases from each region. The damaged region can be specified by the FFD system.

In the design, it was considered that the change in the sampling flow rate during operation was not necessary. However, it became clear that the measured value became unstable because of a fluctuation of the sampling flow rate due to change in the primary coolant pressure during operation. Moreover, it was difficult to change the sampling flow rate during operation. The sampling flow rate was controlled by manual valves located in the service area where the entry is limited during operation. Therefore, an improvement was carried out to control the sampling flow rate from the outside of the service area. The stable measured value was obtained by the improvement. Moreover, noise reduction, improvement of oil level gauge of compressors gives excellent operation of the FFD.

This report summarizes the maintenance work of detectors (precipitator), equipment and improvement items of the system.

Keywords: HTGR, HTTR, FP, Fuel Failure Detection, Maintenance, Primary Coolant, Precipitator

* Research Staff on Loan

目 次

1. はじめに.....	1
2. 設備概要.....	2
2.1 ガス圧縮機.....	3
2.2 プレシピテータ.....	3
2.3 制御盤.....	4
2.4 格納容器貫通部.....	5
2.5 フィルタ.....	5
3. 保守管理.....	6
3.1 ガス圧縮機.....	6
3.2 プレシピテータ.....	8
3.3 制御盤.....	9
4. 運用手順.....	10
4.1 ガス圧縮機運転方法.....	10
4.2 プレシピテータ運転方法.....	10
5. 改善事項.....	12
5.1 サンプリング流量の自動制御化.....	12
5.2 ノイズの低減化.....	13
5.3 クランクシャフトの耐磨耗性向上.....	13
5.4 オイルレベル計の改善.....	14
6. おわりに.....	16
謝辞.....	16
参考文献.....	16

Contents

1. Introduction	1
2. System Outline	2
2.1 Gas Compressor	3
2.2 Precipitator	3
2.3 Control Panel	4
2.4 Penetration of Reactor Containment Vessel	5
2.5 Filter	5
3. Maintenance and Management	6
3.1 Gas Compressor	6
3.2 Precipitator	8
3.3 Control Panel	9
4. Operation Procedure	10
4.1 Gas Compressor	10
4.2 Precipitator	10
5. Improvements of System	12
5.1 Automatic Control of Sampling Flow Rate	12
5.2 Reduction of Noise	13
5.3 Improvement in Abrasion Resistance of Crank Shaft	13
5.4 Improvement on Oil Level Indicator	14
6. Concluding Remarks	16
Acknowledgements	16
References	16

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)の高温工学試験研究炉(HTTR: High temperature Engineering Test Reactor)は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化、高温工学に関する先端的基礎研究の実施を主目的として、原子力機構・大洗開発センターに建設された日本初の高温ガス炉である。

当初、高温ガス炉の開発は、多目的高温ガス実験炉の開発を目的として、1969 年に開始された。その後、原子力界を取り巻く社会情勢の変化の中で、1987 年に策定された「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画」により、21 世紀に向けた先導的プロジェクトとして、HTTR の建設が決まった。原子力機構は、この方針に従い、HTTR の建設に向けた設計、研究開発を進め、1990 年 11 月に原子炉の設置許可を取得し、1991 年 3 月から 5 年有余の歳月を掛けて原子炉建家建設及び機器据付を行った。

HTTR はその後、系統別機能試験、総合機能試験を経て、1998 年 11 月 10 日に初臨界に達した。さらに、1999 年 9 月から出力上昇試験を開始し、2001 年 12 月 7 日に原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C を達成し、2002 年 3 月 6 日に、定格運転(原子炉冷却材温度 850°Cまでの運転)の使用前検査合格証を取得した。

引き続き、原子炉出口冷却材温度が 950°Cとなる高温試験運転に向けた準備を進め、2004 年 3 月 31 日から、出力上昇試験を開始し、2004 年 4 月 29 日に原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 950°C を達成した。これまでの高温ガス炉の歴史において、950°Cの冷却材を原子炉圧力容器外へ取り出すことに成功したのは、HTTR が世界で初めてである。その後 2004 年 6 月 24 日に、高温試験運転(原子炉冷却材温度 950°Cまでの運転)の使用前検査合格証を取得し、現在に至っている。

HTTR の燃料体は、燃料棒とこれを挿入・保持する六角柱の黒鉛ブロック等から成る。燃料棒は、円筒形の黒鉛スリーブ中に燃料コンパクトを封入したものである。原子炉通常運転時、これらの燃料の健全性を監視するための設備として、HTTR には燃料破損検出装置(Fuel Failure Detection (FFD) System)が設置されている。本装置は、7 領域に分割した原子炉の高温プレナム部から 1 次冷却材をサンプリングし、それぞれの領域の短半減期核分裂生成物希ガスを測定することにより、燃料破損が発生した際に、その領域を特定できるようになっている。

本報は、FFD の設備概要、保守管理、運転手順及び改善事項についてまとめたものである。設備概要については、図表を多く用い、できるだけ分かりやすく記述することで、新しく HTTR の保守管理業務に携わる従事者にも、設備全体を容易に理解してもらえるように努めた。また保守管理及び運転手順については、実際の作業内容を具体的に記述し、今後の実務に活用できるよう心掛けた。さらに改善事項については、これまで FFD を運用する中で実施してきた改善事項を、技術と経験を継承する観点からまとめた。

2. 設備概要

HTTR は、熱出力 30MW で、定格運転時に 850°C、高温試験運転時に 950°C の原子炉出口冷却材温度を得ることができる、国内唯一の高温ガス炉である。高温ガス炉は、冷却材として化学的に安定な He ガスを用い、その炉内構造物に、熱容量が大きく耐熱性に優れた黒鉛構造材等を使用している。また、燃料に核分裂生成物の閉じ込め機能が高い被覆燃料粒子を使用していることから、万一重大事故が発生した際も、受動的設備だけで、燃料の大規模破損や炉心溶融が防止できることが、安全性実証試験等で確認されている。このように、原子炉の極めて高い固有の安全性が、高温ガス炉の優れた特長となっている。その基本仕様を、Table2.1.1 に示す。

HTTR の燃料棒は、外径約 34mm の円筒形の黒鉛スリーブ中に、外径約 26mm 高さ約 39mm の燃料コンパクト 14 個を封入したものであり、1 燃料体あたり 31 本（又は 33 本）挿入されている。燃料コンパクトは円筒形状で、黒鉛と炭素の混合物から成る黒鉛素地に被覆燃料粒子を分散して製作されている。被覆燃料粒子は、二酸化ウラン(UO₂)の燃料核を熱分解炭素(PyC)及び炭化ケイ素(SiC)の薄い層で被覆した、外径約 1mm の粒子であり、HTTR 炉心では約 10⁹ 個という膨大な数の被服燃料粒子が使用されている。このため、HTTR では、製造時及び運転時に一定レベルまでの燃料破損を許容しており、設置許可申請書の設計方針では「初期破損率は 0.2%以下」「運転中の破損は十分許容しうる小さな値」に制限すると定めている⁽¹⁾。

HTTR では、運転中の燃料破損を、1 次冷却材中の放射能濃度により監視している。HTTR の燃料棒が前述のような構造を持つことから、運転中には、1 次冷却材中に燃料コンパクト素地に存在する微量のウラン及び製造時の破損燃料それぞれから放出される希ガス（クリプトン、キセノン）のバックグラウンドが存在する。そこで、0.01%程度の燃料破損率を検出することができる、原子炉保護設備の1次冷却材放射能計装により、破損率は Table2.1.2 のように管理されている。

このような燃料破損率の管理において、原子炉通常運転時の燃料の健全性を監視する設備として、10⁻⁶%程度の燃料破損率まで計測できるよう設計された FFD が設置されている。本設備はまた、原子炉の高温プレナム部を 7 領域に分割し、それぞれの領域の短半減期核分裂生成物希ガスを測定することにより、燃料破損が発生した領域も特定できるよう設計されている。FFD の構成図を Fig.2.1 に、系統図を Fig.2.2 に示す。

系統図に示すように、サンプリング配管によりサンプリングされた各領域の1次冷却材は、切換バルブラック内のサンプリング選択弁により、任意の2領域が選択され、2基のプレシピテータで短半減期核分裂生成物希ガスを測定できるようになっている。また測定後の1次冷却材及び1次ヘリウム純化設備から供給されるプレシピテータページ用ヘリウムガス（ページガス）は、ガス圧縮機により昇圧され、1 次ヘリウム純化設備を通して、再び系統に戻されるようになっている。なお、各サンプリングラインは、原子炉格納容器(CV)熱電対交換ハッチ内の CV 内隔離弁及び CV 外に設置された隔離弁ラック内の CV 外隔離弁により、事故時には完全に隔離されるように設計されている。

2.1 ガス圧縮機

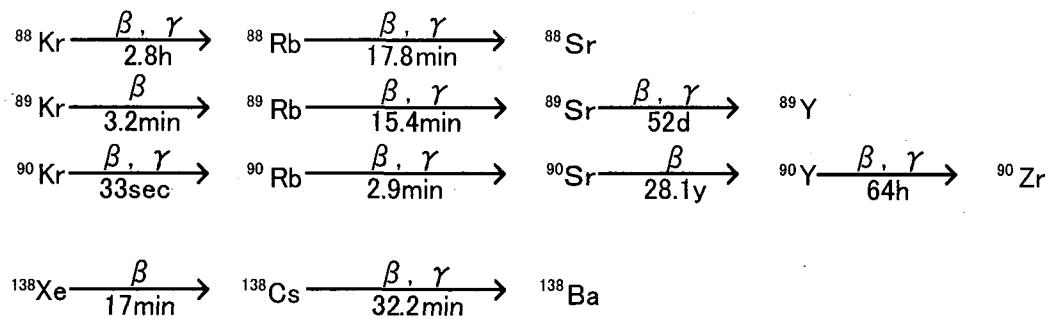
ガス圧縮機は、原子炉炉床部の高温プレナム部から1次系冷却材をサンプリングすること、1次ヘリウム純化設備からバージガスを取り入れること、さらに、測定を終えたこれらのガスを1次ヘリウム純化設備へ戻すことを目的に設置されている。1次系冷却材のサンプリングは、高温プレナムブロックの7つの燃料領域に挿入したサンプリング配管により、CV 隔離弁、切換バルブブラックを通して行われる。また、プレシピテータ洗浄用の清浄なバージガスの取り入れは、1次ヘリウム純化設備のコールド・チヤコール・トラップ(CCT)出口から行われる。

ガス圧縮機は圧縮機本体、原動機、吸入側と吐出側のスナバ、配管、弁及び計器から構成され、各機器は、共通台盤上に設置されている。ガス圧縮機の駆動方式は、たて形水冷単動で、サンプリングガス中に油が混入しないよう無給油式を採用している。ガス圧縮機断面図をFig.2.3に示す。FFD系統図及び断面図に示すように、ガス圧縮機は、吸入側スナバからサンプリングガスを吸い込んで昇圧し、吐出側スナバに排出する。吐出側スナバには、ガス圧縮機出口圧力が異常上昇しても機器を破損させないよう、逃し弁(安全弁)が設けられており、その吐出ガスは吸入側スナバに回収されるようになっている。ガス圧縮機本体シリンダ部の上部に吸入弁、吐出弁が取り付けられ、ピストンの往復運動によって吸入、圧縮が行われ、断熱圧縮により発生する熱はシリンダ回りの冷却水ジャケットにより除熱されるようになっている。シリンダ部下部には、ディスタンスピース内のオイルがサンプリングガス中に混入しないよう中間室が設けられ、さらにフィルタが設けられている。ディスタンスピース内の上部室には、共通台盤上に設置された手動オイルポンプにより、潤滑油が供給されるようになっており、オイルレベルを確認するための可視レベルゲージ、レベル計(レベルスイッチ)が取り付けられている。ディスタンスピース部下部及びクランクケース内には、原動機からVブーリに伝えられた回転運動を往復運動に変換するコネクティングロッド、クロスヘッド等が納められている。なお、ガス圧縮機本体の耐圧パウンダリは、このディスタンスピース上部室までである。

ガス圧縮機は、原子炉建家管理区域地下3階のFFD機器室(N-108)に設置され、原子炉運転中当室は、サービスエリアとして施錠管理される。ガス圧縮機の運転は、同じ管理区域地下3階のFFD制御盤室(K-103)に設置してあるFFD制御盤より行われる。ガス圧縮機の設計条件及び設計仕様をTable 2.1.4に、ガス圧縮機と逃し弁の機器仕様をTable 2.2.1及びTable 2.2.2に、またガス圧縮機の外観をPhoto 2.1に示す。

2.2 プレシピテータ

プレシピテータは、原子炉の高温プレナムブロックよりサンプリングした1次冷却材に含まれる、短半減期の希ガス核分裂生成物(FP)の崩壊 β 線を計数し、その変化から燃料破損を検出する目的で設置されている。すなわち、原子炉内で燃料破損が発生した場合、燃料破損により1次冷却材中に放出された短半減期のFPのうち、Kr、Xeなどの希ガスは β 崩壊して正の電荷をもったRb、Csとなる。これを負に帯電したワイヤに吸着させ、Rb、Csがさらに β 崩壊してSr、Baになる時に出す β 線をシンチレーションカウンタにより検出する。本検出法による代表的な崩壊系列は、以下のとおりである。



前述のとおり計測は、最初に Kr、Xe の娘核種である Rb、Cs を、チェンバ内で静電圧をかけた静止状態のワイヤに収集することによりスタートする。次に、ワイヤ駆動装置によりチェンバ内のワイヤをフォスファー内に引き込み、崩壊 β 線を計測する。この時同時にチェンバ内では次のサンプリングガスが取込まれ、その FP のワイヤへの収集が行われる。このようにプレシピテータによる計測は、ワイヤをステップ状に駆動して行われるため、FP ガスの崩壊による時間遅れと、Rb、Cs をワイヤに吸着させる時間遅れが重畠し、応答速度が遅くなる。しかし、1 次系 FP のバックグラウンドが高い HTTRにおいて、バックグラウンドとの分離が良く、かつ高感度であるというプレシピテータの優れた特長が、検出器として採用されるに至った理由となっている。FFD 運転時の測定例を Fig.2.4 に示す。

FFD プレシピテータ断面図を Fig.2.5 に示す。断面図に示すように、プレシピテータは、サンプリングガスを取り込み、ガス中の FP をワイヤに吸着させるためのプレシピテーションチャンバ、ワイヤを駆動させるためのワイヤ駆動装置、ワイヤに吸着した FP を計測するためのシンチレーション検出器で構成されている。ワイヤはヘリカルコイル式ステンレスワイヤを使用し、全長約 18 m のワイヤがストレージドラムに巻取られ、ワイヤ駆動モータにより、チェンバ内を順回するようになっている。プレシピテータ内では 1 次冷却材がサンプリングガスとしてチェンバ内に流れ込むようになっている。また、フォスファー及び計測実施後のワイヤ部のバックグラウンド低減及びワイヤ駆動装置等の汚染を防止するため、1 次ヘリウム純化設備から取込まれた清浄なヘリウムガスが、フォスファーからのバージガスとしてチェンバ内に流れ込むようになっている。チェンバ内で合流したガスは、プレシピテータから流出し系統に戻る。プレシピテータは、同一仕様の 2 基が、共通台盤上に設けられた架台に組み込まれて設置されている。

プレシピテータはガス圧縮機と同じ、原子炉建家管理区域地下 3 階の FFD 機器室 (N-108) に設置されている。プレシピテータの運転は、FFD 制御盤に設置されている 2 台のプレシピテータコントローラより制御される。プレシピテータの設計条件及び設計仕様を Table 2.1.5 に、機器仕様を Table 2.2.3 に、また外観を Photo 2.2 に示す。

2.3 制御盤

制御盤は、プレシピテータ、ガス圧縮機及びサンプリング領域切換弁の制御機器、表示機器、警報機器等で構成される FFD 制御盤と、サンプリング流量等を監視制御するサンプリング流量外部監視装置制御盤で構成される。それぞれの制御盤は、原子炉建家管理区域地下 3 階 FFD 制御盤室 (K-103) に並んで設置されている。制御盤の仕様を Table 2.2.4 に、外形図を Fig.2.6 に、外観を Photo

2.3 に示す。

2.3.1 FFD 制御盤

FFD 制御盤は、FFD を構成する主要機器の操作と制御を行う。また、プラント計算機への計測データの転送を行うとともに、異常時には警報を発し、プラント計算機へ異常信号を送出し、中央制御室に異常の発生を知らせる。FFD 制御盤の機能と内容は、Table 2.2.5 のとおりである。

2.3.2 サンプリング流量外部監視装置制御盤

サンプリング流量外部監視装置制御盤(流量監視盤)は、プレシピテータのサンプリング流量及びバージガス流量、圧力の監視及び制御を行う。また、プレシピテータ廻りのヘリウムガス圧力の監視を行い、異常時には FFD 制御盤を経由して警報を発する。流量監視盤の機能と内容は、Table 2.2.6 のとおりである。

2.4 格納容器貫通部

格納容器貫通部は、原子炉の7領域の高温プレナムブロックよりサンプリングした1次冷却材を、格納容器内から、格納容器耐圧バウンダリを保持したまま格納容器外へ導き出すために、熱電対交換ハッチ管台側部に2基(P107、P108)設置されている。格納容器貫通部は、想定される1次冷却設備の二重管破断事故等による減圧事故に対しても、事故後の最大圧力と温度に耐えるものとするため、貫通スリーブと貫通短管及び端板、端板と貫通配管がカラーを介して溶接により取り付けられており、格納容器貫通部の内部には断熱材が充填されている。

格納容器貫通部の仕様を Table 2.2.7 に、断面図を Fig.2.7.1 及び Fig.2.7.2 に、また外観を Photo 2.4 に示す。断面図に示すように、貫通部 P107 を経由して 4 本、貫通部 P108 を経由して 3 本のサンプリング配管が貫通している。

2.5 フィルタ

フィルタは、原子炉の7領域の高温プレナムブロックよりサンプリングした1次冷却材中に含まれる、FFD の機器に有害な異物を除去する目的で、プレシピテータ A 及び B、ガス圧縮機入口側に設置されている。フィルタの構造は、円筒形であり、焼結ステンレスメッシュのフィルタエレメントを内蔵し、フィルタ交換作業時の作業性を考慮して出入口をジョイント式としている。

フィルタは、原子炉建家管理区域地下3階の FFD 機器室(N-108)に設置されている。

フィルタの仕様を Table 2.2.8 に示す。

3. 保守管理

FFD の保守管理は、原子炉施設保安規定及び核燃料物質使用施設保安規定により定められた HTTR 定期点検期間中に実施する定期点検と、原子炉施設保安規定によりガス圧縮機及び検出器(プレシピテータ)について、施設定期検査を行うよう規定され実施している。

定期点検は、ガス圧縮機、逃がし弁、プレシピテータ、制御盤、現場指示計器、伝送器、CV 外隔離弁及び遠隔操作弁等について、予め策定した点検要領書に基づき実施している。各機器の一部については、積算運転時間、運転中の不具合事象の有無などを勘案して決定しているが、本設備の重要性に鑑み、予防保全の観点をもって決定している。CV 外隔離弁ラック外観を Photo 2.5 に、切替バルブラック外観を Photo 2.6 に示す。

定期検査は点検終了後に実施し、原子炉施設の性能が主務省令で定める技術上の基準に適合していることを確認する施設定期検査、原子炉施設保安規定の保守管理で定める施設定期自主検査及び HTTR 運転手引の保守管理で定める自主検査に分類され、検査項目との対応は Table 2.1.3 のとおりとなっている。

主要機器であるガス圧縮機、プレシピテータ、FFD 制御盤及びサンプリング流量外部監視装置制御盤の定期点検と定期検査の方法について、以下に述べる。

3.1 ガス圧縮機

(1) 定期点検

ガス圧縮機の定期点検は、分解点検、点検後の作動確認及び漏えい確認を実施する。点検内容は、分解点検開始前の外観確認実施後、各部品の分解及び各部品の清掃、各部品の手入れ及び寸法測定、部品毎の外観確認を実施し、消耗品の交換及び部品の取り付け寸法を確認しながら組立てを実施する。組立て終了後、ガス圧縮機に付属する計器の取り付け状況及び外観確認、ガス圧縮機本体の外観確認を行う。分解点検は、極力系統内に空気を混入させないよう、ガス圧縮機本体の前後で隔離して実施する。また、分解点検は1次系雰囲気の耐圧バウンダリを開放するため、グリーンハウスを設営して実施する。組立て後の単体作動確認は、ガス圧縮機を隔離した状態で、ガス圧縮機のバイパス弁を全開として大気圧の状態でガス圧縮機を運転し、異音、振動がなく、円滑に作動することを確認する。

ガス圧縮機の漏えい検査は、設備内各機器の定期点検終了後に実施する系統全体のヘリウムリーク試験時に、1次系雰囲気の耐圧バウンダリとなる部分の開放部品組合せ部に対してヘリウムリーク試験を実施する。また、設備内各機器の定期点検終了後に実施する系統全体の漏えい試験時に、1次系雰囲気の耐圧バウンダリとなる部分の漏えい検査を実施する。

FFD 運転開始後から、今までのガス圧縮機の保守履歴を Table 3.1 に示す。

(2) 定期検査

定期検査はガス圧縮機単体の作動検査として、ガス圧縮機、プレシピテータ及び接続配管部を1次系側と隔離し、ガス圧縮機内部を3.8 MPa[gauge]以上に加圧して実施する。系統の隔離は、プレシピテータ A 及び B の入口側止め弁、ページライン止め弁、ガス圧縮機出口側止め弁を閉として

行う。ガス圧縮機の系統構成は、ガス圧縮機で昇圧されたガスが吐出側から吸入側スナバに、バイパス弁を経由して循環するように実施する。以下に作動検査の確認項目、検査前条件及び検査手順を示す。

1) 確認項目

- ① ガス圧縮機を運転し、異音がなく、円滑に作動することの確認。
- ② 規定吸込圧力(3.8MPa[gauge]以上)におけるガス圧縮機の昇圧値が0.15MPa 以上であることの確認。
- ③ ガス圧縮機作動中の振動が $150 \mu\text{m}$ 以下であることの確認。

2) 検査前条件

- ① ガス圧縮機周りの系統校正が、ガス圧縮機単体作動検査系統図のとおりになっていること。
- ② FFD 制御盤内のガス圧縮機電源が投入されていること。
- ③ ガス圧縮機の冷却水が規定量流れていること。
- ④ ガス圧縮機のオイルレベルが規定量以上あること。
- ⑤ 1次ヘリウム純化設備ガス循環機が起動されていること。
(ガス循環機を起動出来ない場合は、インターロックを解除して実施。)
- ⑥ ガス圧縮機周りの系統内圧が 3.8MPa[gauge]以上あること。
- ⑦ 検査に使用する既設圧力計及び差圧指示計は、校正されていること。
- ⑧ 検査に使用する振動計は適切に管理、校正されたものであること。

3) 検査手順

- ① K-103 室 FFD 制御盤で差圧指示計(2415PIC3)の設定値を 0.16MPa に設定し、自動とする。
- ② K-103 室 FFD 制御盤でガス圧縮機を起動する。
- ③ N-108 室で、ガス圧縮機吐出圧力が 3.95MPa[gauge]以上あることを、圧力計(2415PIS4)で確認する。
- ④ K-103 室 FFD 制御盤で、ガス圧縮機の昇圧値が規定値(0.15MPa)以上であることを、差圧指示計(2415PIC3)で確認する。
- ⑤ N-108 室で、ガス圧縮機に異音、異常がなく、円滑に作動すること、また振動が $150 \mu\text{m}$ 以下であることを確認する。

3.2 プレシピテータ

(1) 定期点検

プレシピテータの定期点検は、分解点検、点検後の作動確認及び漏えい確認を実施する。分解点検は使用状況に応じ2～3年周期で実施し、それ以外は簡易点検を実施してきた。

点検内容は、分解点検開始前の外観確認実施後、ワイヤドライブモータカバー及びエンドカバーフランジを取り外し、各部品の取り付け状況、ワイヤの状況を確認して各部品の清掃、手入れを実施し、消耗品を交換して組立てを実施する。組立て終了後に接続ケーブルの取り付け状況及び本体の外観確認を実施する。ワイヤの確認については、プレシピテータラックに設置してある盤から手動でワイヤ駆動モータを起動し、ワイヤの巻取り、外観、伸び、接続部の形状を確認する。プレシピテータ1台のワイヤの長さは約18mである。

分解点検は、極力系統内に空気を混入させないよう、プレシピテータ本体の前後で隔離して実施する。また、分解点検は1次系雰囲気の耐圧バウンダリを開放するため、グリーンハウスを設営して実施する。分解点検後の作動確認(プレシピテータ組合せ試験)は、プレシピテータの検出性能劣化状況を確認することを目的とし、標準外部線源($^{90}\text{Sr}220\text{kBq}$)をプレシピテータ本体に設置されている外部線源挿入口から挿入後、プレシピテータを起動してプレシピテータコントロールユニットで計測する。計測は1時間実施し、計測値をプレシピテータ製作時の校正グラフ(プラトー特性)と比較する。作動確認は、FFD制御盤及びプレシピテータコントロールユニットの点検終了後に実施する。

プレシピテータの漏えい検査は、設備内各機器の定期点検終了後に実施する系統全体のヘリウムリーク試験時に、1次系雰囲気の耐圧バウンダリとなる部分の開放部品組合せ部に対してヘリウムリーク試験を実施する。また、設備内各機器の定期点検終了後に実施する系統全体の漏えい試験時に、1次系雰囲気の耐圧バウンダリとなる部分の漏えい検査を実施する。尚、プレシピテータ本体のヘリウムリーク試験は分解点検実施時のみ実施する。

FFD運転開始後から、現在までのプレシピテータの保守履歴をTable 3.2に示す。

(2) 定期検査

定期検査は点検校正検査として、標準外部線源を使用し、プレシピテータの検出性能を確認するプラトー特性試験を実施する。以下にプラトー特性試験の確認項目、検査前条件及び検査手順を示す。

1) 確認項目

- ① 検出器の高圧電源と計数率の関係を求め、1.2kVから1.5kVの範囲に変曲点が存在し、検出器の高圧電源設定値がその値に設定されていること。

2) 検査前条件

- ① プレシピテータコントロールユニット内各モジュールの計器が校正されていること。
- ② 標準外部線源($^{90}\text{Sr}220\text{kBq}$)が準備されていること。
- ③ プレシピテータの警報が発報していないこと。
- ④ FFD制御盤内のプレシピテータ電源が投入されていること。
- ⑤ 検査に使用する計測器は、校正されていること。

3) 検査手順

- ① K-103 室 FFD 制御盤でプレシピテータを起動する。
- ② N-108 室でプレシピテータ本体に設置されている外部線源挿入口から標準外部線源を挿入する。
- ③ K-103 室で FFD 制御盤端子に接続したファンクションシンセサイザにより、フォトマル高圧電源を変化させ、デジタルマルチメータで電圧を確認後、プレシピテータコントロールユニットでインテグレータカウント値及びソークタイムを計測する。
- ④ 計測は 1 サイクル 20 秒の繰り返し運転を 1 時間実施して確認する。

3.3 制御盤

FFD 制御盤の定期点検は、絶縁抵抗測定、性能作動確認を実施する。性能作動確認は、盤単体ループチェック、警報出力試験、プレシピテータ組合せ試験で構成される。

点検内容は、FFD 制御盤及び流量監視盤の電源回路部について DC500V メガーで絶縁抵抗を測定し、 $5M\Omega$ 以上であることを確認する。

盤単体ループチェックは、盤の入力端子に標準電圧電流発生器により模擬信号を入力し、盤内計器の組合せループ精度を確認する。精度の確認は、各系統についてアップダウン 5 点（計 9 点）の模擬信号を入力して確認する。警報出力試験は、FFD の警報項目について、模擬信号の入力及び警報条件設定により FFD 制御盤に設けてある警報窓に警報が発報されることを確認する。プレシピテータ組合せ試験は、標準外部線源 ($^{90}\text{Sr}220\text{kBq}$) を使用し、プレシピテータを起動後プレシピテータコントロールユニットで計測する。計測はフォトマル高圧電源を 0.9kV～2.0kV の範囲において 0.1kV 毎に変化させ、インテグレータが表示する数値を計測する。計測時間は 1 時間である。尚、流量監視盤の性能作動確認は盤単体ループチェックのみ実施する。

FFD 制御盤に設置されているプレシピテータコントロールユニットの点検は、ユニットに組み込まれている各モジュールについて、それぞれ、入出力特性、計数動作及び表示確認、アラーム確認、周波数及び出力波形確認を実施する。

FFD 運転開始から、現在までの制御盤の保守履歴を Table 3.3 に示す。

4. 運用手順

FFD の運用は、1次ヘリウム純化設備が運転され、CCT 通気後に設備の運転が開始される。運転は K-103 室に設置してある FFD 制御盤でガス圧縮機及びプレシピテータを起動することにより行われる。尚、プレシピテータは2基の内1基に異常が発生して計測不能となつても、1基で7領域が計測出来るよう設計され、異常時、インターロックにより自動的に切り替わる。

以下に、ガス圧縮機及びプレシピテータの運転方法を示す。

4.1 ガス圧縮機運転方法

ガス圧縮機の起動は、FFD 制御盤に設置してある起動・停止スイッチで行う。

(1) 起動

① 起動前に N-108 室で下記確認を実施する。

- ・ ガス圧縮機の冷却水が約13 l/min 流れていることを冷却水流量計で確認する。
- ・ ガス圧縮機のオイルレベルが13mm 以上あることをガス圧縮機本体設置の可視レベルゲージで確認する。
- ・ Vベルトの張り、ガス圧縮機の廻りに異常のないことを確認する。

② ガス圧縮機出入口差圧の設定

差圧(昇圧値)の設定は、FFD制御盤に設置してある差圧指示計(2415DPIC3)で行う。差圧指示計前面の押しボタンの調整によりSVの設定値を0.16MPa に設定する。また、差圧指示計の制御モードを手動(M:マニュアル)・自動(A:オート)切換えスイッチで自動モードとする。

③ ガス圧縮機の起動

ガス圧縮機の起動・停止スイッチを起動としてガス圧縮機を起動する。

起動後、コントローラによりガス圧縮機バイパス差圧調整弁が制御され、設定値である0.16 MPa まで昇圧されることを確認する。昇圧に要する時間は約200秒前後である。

④ 起動後確認

起動後、ガス圧縮機に異音、異臭、振動等異常のないことを確認する。

(2) 停止

① 停止前にコントローラの制御状態に異常のないことを確認する。

② ガス圧縮機の停止

ガス圧縮機の起動・停止スイッチを停止としてガス圧縮機を停止する。

4.2 プレシピテータ運転方法

プレシピテータの起動は、FFD 制御盤に設置してあるサンプリング起動・停止スイッチ及びプレシピテータコントロールユニットで行う。

(1) 起動

① 起動前に、N-108 室でプレシピテータ廻りに異常のないことを確認する。

② 計測準備

- ・コントロールユニットパネルA及びBの「MAIN POWER」押しボタンスイッチをONとし、コントロールユニットの電源を投入する。
- ・コントロールユニットパネルA及びBの「PUSH RESET」押しボタンスイッチをONとし、パネルのアラームをリセットする。

③ 計測領域の設定

サンプリング領域の設定は、FFD制御盤に設置してある操作表示器(タッチパネル)又は、ファンクションスイッチでサンプリング領域設定画面を表示し、設定を行う。計測領域の設定は、通常プレシピテータAが1領域から4領域、プレシピテータBが5領域から7領域である。

④ プレシピテータの起動

プレシピテータの起動は、ガス圧縮機が起動された後に実施する。

- ・FFD制御盤に設置してあるサンプリングモード切換えスイッチを自動位置とする。
- ・FFD制御盤に設置してあるサンプリングスイッチを起動位置とする。

⑤ 起動後確認

プレシピテータ起動後、流量監視盤に設置してある流量指示計で下記流量を確認する。

- ・プレシピテータAサンプリング流量が約 $23.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ であること。
- ・プレシピテータBサンプリング流量が約 $23.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ であること。
- ・プレシピテータAページ流量が約 $5 \text{ cm}^3/\text{s}$ であること。
- ・プレシピテータBページ流量が約 $5 \text{ cm}^3/\text{s}$ であること。

⑥ 計測開始

コントロールユニットパネルA及びBの「START」押しボタンスイッチを同時にONとし、プレシピテータの計測を開始する。

⑦ 計測開始後確認

プレシピテータの計測開始後、A及びBのコントロールユニットとパネルが正常に作動していることを確認する。

(2) 停止

① 停止前にコントロールユニットとパネルの作動状況に異常のないことを確認する。

② プレシピテータの停止

- ・FFD制御盤に設置してあるサンプリングスイッチを停止位置とする。
- ・FFD制御盤に設置してあるサンプリングモード切換えスイッチを手動位置とする。
- ・プレシピテータA及びBのサンプリング選択弁が全数閉となっていることをFFD制御盤で確認する。
- ・ガス圧縮機停止後、コントロールユニットパネルA及びBの「MAIN POWER」押しボタンスイッチをOFFとする。

5. 改善事項

5.1 サンプリング流量の自動制御化

5.1.1 概要

サンプリング流量の設定は、当初の計画ではサービスエリア内である N-108 室で、原子炉起動前に定格運転状態を想定して実施するものとしていた。しかしながら、原子炉の状態により変化する1次冷却材圧力によりサンプリング流量が変動するため、安定した計測を行なうためには、原子炉起動後もサンプリング流量の監視及び調整を行なう必要があることが分かった。流量の監視及び調整をする計器及び流量調節弁は N-108 室に設置されており、原子炉起動中は立入りが制限されているため、サービスエリア外の K-103 室からサンプリング流量の監視及び調整が実施できるよう流量計の変更、圧力計伝送器の追加、流量監視盤の新設等により、外部から監視及び調整できるよう改善した。

5.1.2 実施期間

平成11年3月8日 ~ 平成11年3月29日

5.1.3 改善内容

(1) 流量計の変更

サンプリング調節弁の調整で流量の微調整が困難であったため、サンプリング調節弁は全開状態で使用するものとし、既設の現場型金属管面積式流量計を、温度や圧力の影響を受けない質量流量計で、流量制御機能を備えたマスフローコントローラに変更し、K-103 室に新設したサンプリング流量外部監視装置制御盤で制御出来るものとした。また制御盤には、流量表示器と流量を制御するポテンショメータを設置した。

変更した流量計は下記の4台である。

- ・ プレシピテータ A サンプリング流量計
- ・ プレシピテータ B サンプリング流量計
- ・ プレシピテータ A パージ流量計
- ・ プレシピテータ B パージ流量計

(2) サンプリング流量外部監視装置制御盤の新設

2.3.2 項「サンプリング流量外部監視装置制御盤」参照

(3) 圧力計伝送器の追加

サンプリング流量及びパージ流量の圧力補正用としての圧力値を入力するため、既設現場型圧力計の検出配管部から分岐して圧力計伝送器を設け、圧力信号を K-103 室に新設したサンプリング流量外部監視装置制御盤に入力するものとした。

追加した圧力計伝送器は下記の3台である。

- ・ プレシピテータA入口サンプリング圧力計
- ・ プレシピテータ B 入口サンプリング圧力計
- ・ パージライン元圧力計

5.2 ノイズの低減化

5.2.1 概要

プレシピテータ運転時、放射能検出器の計数値が通常1cps以下であったが、平成9年10月1日1次及び2次ヘリウム循環機の運転を開始すると、放射能検出器の計数値が連続的に2000cpsとなった。原因を調査した結果、計測ラインにノイズが重畠して計数値が上昇している事がわかつたためノイズ対策を実施した。

5.2.2 実施期間

平成10年3月8日～平成10年3月29日

5.2.3 改善内容

ノイズ発生の原因を調査した結果、計測ラインのプレシピテータ中継ボックス部と制御盤内プレシピテータコントローラ部の2箇所で接地されていることが判明した。

同一計測ライン上2箇所で接地すると、接地間の電位差によって回路に電流が流れ、これがノイズの原因となる。プレシピテータ中継ボックス部側の接地が構造的に切り離せないため、プレシピテータコントローラ側の接地を切り離し、1箇所接地に変更した。

しかし、1箇所接地に変更後、波形観測を実施した結果、ノイズ波形のレベルは約1/2に下がったが、1次及び2次ヘリウム循環機を運転していることにより、プレシピテータコントローラDC電源ラインにノイズが重畠して計測ラインに影響を与えていていることから、ノイズを低減するため、電源ラインに絶縁トランスを設置した。これにより、1次及び2次ヘリウム循環機を運転している状態でも、計数値は1cps以下となった。

5.3 クランクシャフトの耐磨耗性向上⁽²⁾

5.3.1 概要

平成15年3月19日停止中のガス圧縮機基礎コンクリート架台上に、ガス圧縮機から漏れたと思われる少量(数十CC程度)のオイル溜りがクランクケースの動力側に確認されたため、Vブリカバーを取り外して確認した結果、クランクシャフトのオイルシール部に漏えい痕が確認された。その後、ベアリングハウジングを取り外して内部を確認した結果、クランクシャフトとオイルシールとの接触面に溝が見受けられたため、その改善策を検討し、対策を実施した。

5.3.2 実施期間

平成15年4月9日～平成15年9月25日

5.3.3 改善内容

(1) オイル漏れの対応

平成15年4月9日～10日、Vブリカバーを取り外し、オイルシール押さえ取付ボルト、ベアリングハウジング取付ボルトの締め付け状態を確認したが緩みは見受けられなかったため、ベアリングハウジングを取り外してクランクシャフトとオイルシールとの接触位置を確認した結果、

周状に深さ約0.1mm、幅1mm以下の溝が発生しているのが発見された。オイルシールを取り外して確認したがオイルシール自体に傷等の異常は見受けられなかった。

クランクシャフトの溝発生原因及び対策を検討して次回定期分解点検時に対応するものとして、クランクシャフトは溝の発生した部分の手入れを実施して滑らかに仕上げて復旧した。尚、オイルシールは新品と交換した。

復旧に際して、オイルシールとベアリングハウジングの間に厚さ1.5mmのガスケットを装着し、オイルシールとクランクシャフトの当たり面がクランクシャフトに発生した溝に入らないよう位置をずらしてオイルシールをセットした。また、オイルの漏えい防止及びオイルシールの取り付け位置を調整するため、オイルシール押さえとオイルシールの間に厚さ1.5mmのガスケットを設置して復旧した。

(2) 改善策検討結果

上記(1)の確認により、オイル漏れがクランクシャフトの磨耗から発生していることから、クランクシャフトの耐磨耗性を向上させるため、オイルシールとクランクシャフトの当たり面の部分に硬質クロムメッキの表面処理を実施した。また、本ガス圧縮機のオイルシールは、油膜でオイルのシールを行っているが、オイルシールが設置されているクランクケース内の油膜の形成は、クランクシャフトの回転による飛沫で行っているため、機器が起動してから油膜が形成されるまでに時間を要する場合が考えられる。そのため、分解点検でのオイルシール交換時にはダストリップ部とシールリップ部にグリースを塗布して取り付けることとした。

Fig.5.1 にオイルシールの構造と各部の働きを示す。

(3) 改善策に対する対応

平成15年9月18日～25日、平成15年度設備定期点検作業時で、硬質クロムメッキの表面処理を実施したクランクシャフトを新規製作し、交換を実施した。また、分解点検後の組立て時に、ダストリップ部とシールリップ部にグリースを塗布して復旧した。

5.4 オイルレベル計の改善

5.4.1 概要

原子炉格納容器隔離試験において、ガス圧縮機を起動したが、起動から7分後に「オイルレベル低」警報が発報され、ガス圧縮機が停止した。停止後、現場でガス圧縮機のオイルレベルを確認したところ、「オイルレベル低」警報の警報設定値である13mm以下に対して26mmであった。その後も警報が発報したため、オイルレベル計本体の調査、取り付けた状態でガス圧縮機を起動してオイルの状態確認した結果、ガス圧縮機を起動することによりオイル中に微小な気泡が発生し、気泡がオイルレベル計センサ部に付着してオイルの検出が正常に行われない状態が発生していることが確認されたため、オイルレベル計の取り付け方法を検討し改造した。

5.4.2 実施期間

(1) 発生期日

平成9年4月1日、8日

(2) 改造実施期日

平成9年12月16日

5.4.3 改善内容

(1) 原因調査

1) 平成9年5月21日

ガス圧縮機の「オイルレベル低」警報発報の原因として、オイルレベル計本体の不具合が疑われるため、レベル計の動作確認を実施した。

動作確認項目を以下に示す。

- ① 外観検査
- ② センサ特性試験
- ③ アンプ特性試験
- ④ ゲインVRの確認及び設定

上記確認結果、オイルレベル計本体に異常は見受けられなかった。そのため、警報が発生した原因を考察すると、オイル中に気泡が発生した場合、音波の通りが妨げられて警報が発生する場合が考えられるため、オイルレベル計のゲイン調整を実施して僅かな気泡には動作しないようにして復旧した。

2) 平成9年8月6日、7日

ガス圧縮機起動状態でオイルの状況が確認出来るように、オイルレベル計保護用逆止弁を取り外し、内部の状況を確認した。

ガス圧縮機を起動して約5分後、ピストンロッド表面に細かい粒子状の気泡（約0.5mm程度）が発生しているのが確認され、オイルの上部に浮いてきているのが確認された。その後、運転は約35分間継続して実施したが、気泡の変化はほとんど見受けられなかった。

上記原因調査から、オイル中に発生した気泡がオイルレベル計センサ部に付着したことにより、音波の通りが妨げられてオイルが正常に検出されず、警報が発生したものと考えられるため、対策を実施することとした。

(2) 対策内容

ガス圧縮機オイルレベル計改造前及び改造後の構造を Fig.5.2 に示す。

気泡がオイルレベル計センサ部に付着する対策として、既設オイルレベル計が取り付けてあるフランジを取り外し、シェルを新設して、シェル内にレベル計を取り付ける構造とした。シェル内に気泡が入らないようシェルのオイル入口にフィルタを設け、オイルレベル計センサ部に気泡が付着しない構造とした。

6. おわりに

HTTR では、運転中の燃料破損を、1次冷却材中の放射能濃度により監視しているが、燃料破損率の管理において、原子炉通常運転時の燃料の健全性を監視する設備として、管理している燃料破損率に対して初期の小さな燃料破損率を検出できる FFD が設置されている。本設備の重要性に鑑み、特にガス圧縮機については 1 台で運用していることから、消耗部品の交換頻度の適正化を図るなど、その保守管理については、万全を期して実施してきた。また、安定した計測を実施するために、サンプリング流量やバージガス流量の制御系を自動化するなど、測定方法の改良を行いながら運用してきた。本設備は本格的な運用開始から間もなく 10 年を迎えようとしている。これまでの経験から、本設備について、基本的な保守管理の方法は確立できたと考える。

この機会に、これまで FFD を運用する中で蓄積してきた保守管理の方法を中心に、設備を構成する機器及び計測器の概要、設備を運用する中で実施してきた改善事項などについて纏めた。本文は分かりやすく、具体的に記述するよう努めたつもりである。また、FFD に関する図表類も、できるかぎり添付した。本報が、新しく HTTR の保守管理業務に携わる従事者への教材としても有効活用されることを期待する。

これまでの運転では、核分裂生成物濃度の計数率は極めて低い値を示しており、HTTR 燃料の良好な健全性が確認されている。今後、高温ガス炉システムの実用化に向け、燃料及び 1 次冷却材中の核分裂生成物の挙動評価などにおける FFD の計測データが、ますます求められものと考えており、引き続き FFD の安定した運用を目指すものである。

謝 辞

本書を纏めるにあたり、貴重なご助言を頂いた高温工学試験研究炉部長小森芳廣氏、同部次長川崎幸三氏並びに中澤利雄氏、同部原子炉主任技術者藤本望氏、HTTR運転管理課長水島俊彦氏に深く感謝致します。

また、本設備の運転、点検作業及び改善作業に携わり、ご尽力いただきましたHTTR運転管理課各位に感謝致します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所：“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)原子炉の設置」”(1989).
- (2) 日本原子力研究所 高温工学試験研究炉開発部：HTTR(高温工学試験研究炉)の試験・運転と技術開発(2003 年度)、JAERI-Review 2005-010 (2005).

Table2.1.1 HTTRの基本仕様

原子炉熱出力	30MW
1次冷却材	ヘリウムガス
原子炉入口／出口冷却材温度	395/850—950°C
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 ³
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)
主冷却回路数	1 ループ(中間熱交換器及び加圧水冷却器)

Table2.1.2 燃料破損率の管理値

設定値 (MBq/cm ³)	相当する破損率 (%)	主な運転対応
0.07	1	原子炉スクラム
0.03	0.4	手動停止及び破損燃料取り出し
0.01	0.2	警報発報

Table2.1.3 検査区分一覧

対象機器	施設定期検査	施設定期自主検査	自主検査
			外観検査
ガス圧縮機	作動検査	作動検査	絶縁抵抗検査 分解検査
検出器		点検校正検査	外観検査

Table 2.1.4 ガス圧縮機の設計条件と設計仕様

設計条件	名称	ガス圧縮機
	機器種別	機器種別外
	耐震クラス	B
	流体の種類	ヘリウムガス
設計仕様	形 式	たて形単動無給油式
	容 量	0.54 m ³ /h
	昇 圧	0.15 MPa
	原動機 種 類	誘導電動機
	出 力	3.7 kW
	台 数	1

Table 2.1.5 プレシピテータの設計条件と設計仕様

設計条件	名称	燃料破損検出装置検出系
	耐震クラス	C
設計仕様	検出器種類	プラスチックシンチレーション検出器
	計測範囲	$1 \sim 1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
	警報動作範囲	$1 \sim 1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
	個 数	2

Table 2.2.1 ガス圧縮機の機器仕様

ガス圧縮機本体	形 式	たて形単動無給油式
基 数	1 台	
最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]	
最高使用温度	50 °C	
容 量	0.54 m ³ /h [150cm ³ /sec]	
昇 圧	0.15 MPa	
回転数	290 r.p.m	
耐震クラス	B(S ₁)	
機器種別	機器種別外	
原動機	形 式	誘導電動機(全閉防まつ型)
基 数	1 基	
出 力	3.7 kW	
電 壓	440 V 3 相 50 Hz	
極 数	4 極	
回転数	1500 r.p.m	
絶縁種別	F 種	
スナバ (吸入側及び吐出 側)	形 式	たて置円筒型
基 数	各 1 基	
最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]	
最高使用温度	50 °C	
幾何容量	吸入側スナバ 0.013 m ³ 吐出側スナバ 0.019 m ³	
耐震クラス	B(S ₁)	
機器種別	高温ガス炉第4種容器相当	

Table 2.2.2 ガス圧縮機・逃し弁の機器仕様

形 式	ばね安全弁
基 数	1 基
最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]
最高使用温度	50 °C
吹出し量	412 kg/h
呼び径	1B × 1B
主要材質	SCS13A
耐震クラス	B(S ₁)
機器種別	機器種別外

Table 2.2.3 プレシピテータの機器仕様

形 式	プレシピテータ法(プレッシー社製 Mark-11)
基 数	2 基
チェンバ容量	1000 cm ³
最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]
最高使用温度	50 °C
使用流体	ヘリウムガス
使用圧力	3.9 MPa[gauge]
使用温度	40 °C
サンプリングガス流量	約 0.5 kg/h (23cm ³ /s)
ページガス流量	約 0.1 kg/h (5cm ³ /s)
検出器	プラスチックシンチレーションカウンタ
計測範囲	1 ~ 1 × 10 ⁶ s ⁻¹
対象核種	Kr ⁸⁸ 、Kr ⁸⁹ 、Kr ⁹⁰ 、Xe ¹³⁸
耐震クラス	B(S ₁)
機器種別	機器種別外
概略寸法(外径 × 長さ)	280mm × 700mm
材質 チェンバ	SB970 302S25 (SUS302相当)
ボディ、カバー	BS1503 221-430E (SFVC相当)
重量	約 225 kg/基
支持構造	固定

Table 2.2.4 制御盤の仕様

FFD 制御盤	形 式	自立閉鎖形
	数 量	1 面
	耐震クラス	C
	寸 法	W1400 × D1000 × H1900
サンプリング流量	形 式	自立閉鎖形
外部監視装置	数 量	1 面
制御盤	耐震クラス	C
	寸 法	W800 × D1000 × H1900

Table 2.2.5 FFD 制御盤の機能

機 能	内 容
プレシピテータの制御	<ul style="list-style-type: none"> ・プレシピテータ運転のためのサンプリングモード切替えスイッチ ・サンプリング起動/停止スイッチ ・FP の測定を制御する2台のコントローラユニット
ガス圧縮機の制御	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス圧縮機の起動/停止スイッチ ・ガス圧縮機出入口差圧が一定になるよう、ガス圧縮機バイパス差圧調整弁の開度を調整するコンパクトコントローラ
操作表示器	<ul style="list-style-type: none"> ・「メニュー画面」の表示 ・「サンプリング領域設定画面」の表示 ・「サンプリング時間設定画面」の表示 ・「放射能高警報設定画面」の表示 ・「サンプリング表示画面」の表示 ・「選択弁故障表示画面」の表示
警報の表示	<ul style="list-style-type: none"> ・警報窓への警報表示 (Table 4.1 警報項目一覧参照) ・中央制御室への「燃料破損検出装置 異常」警報等の送出
領域選択弁の制御	<ul style="list-style-type: none"> ・高温プレナム部7領域の2台のプレシピテータへの領域選択 ・領域選択弁の手動開閉

Table 2.2.6 サンプリング流量外部監視装置制御盤の機能

機能	内 容	備 考
流量監視及び流量調節	<ul style="list-style-type: none"> ・プレシピテータ A サンプリング流量 ・プレシピテータ B サンプリング流量 ・プレシピテータ A パージ流量 ・プレシピテータ B パージ流量 	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプリング流量制御範囲 0~30 cm³/s ・パージ流量制御範囲 0~10 cm³/s
圧力監視	<ul style="list-style-type: none"> ・プレシピテータA入口サンプリング圧力 ・プレシピテータ B 入口サンプリング圧力 ・パージライン元圧 	<ul style="list-style-type: none"> ・圧力表示範囲 0~5MPa[gauge]

Table 2.2.7 格納容器貫通部の機器仕様

格納容器貫通部	形 式	固定式
	基 数	2 基
	最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]]
	最高使用温度	420 °C
	貫通短管寸法	12B × Sch 80
	貫通短管材質	STPL380
	耐震クラス	As
	機器種別	高温ガス炉第2種容器
格納容器貫通配管	貫通配管数	計7本
	最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]]
	最高使用温度	420 °C
	貫通配管寸法	1/8B × Sch 80
	貫通配管材質	SUS304TP
	耐震クラス	As
	機器種別	高温ガス炉第3種管

Table 2.2.8 フィルタの機器仕様

共通仕様	形 式	円筒形出入口ジョイント式
	最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]
	最高使用温度	50 °C
	流 体	ヘリウムガス
	流体の放射能濃度	高濃度 H (Co60 換算で 0.7×10^{-2} Ci/g-He)
	運転圧力	3.9 MPa[gauge]
	運転温度	40 °C
	初期圧損	約 0.3 kPa 以下
フィルタエレメント仕様		
ガス圧縮機	形 式	焼結ステンレスメッシュ
	ろ過性能	粒径 5 μm 以上の異物を 95%以上除去
	材 質	SUS304、SUS316
	主要材質 外 筒	SUS304TP
	カッピング	SUS304
	機器種別	機器種別外
	耐震クラス	B(S ₁)
	基 数	1 基
流量		
約 1.2 Kg/h (56cm ³ /s)		
フィルタエレメント仕様		
プレシピテータ	数 量	1本
	寸 法	O/D 25mm × L 145mm
	主要寸法 外筒寸法	O/D 60.5mm × t 5.5mm
	外形高さ	約 425mm
	幅	300mm(ジョイント組合せ寸法)
	基 数	2 基
	流 量	約 0.5Kg/h (23cm ³ /s)
	フィルタエレメント仕様	
	数 量	2本(1本／基)
	寸 法	O/D 18mm × L 145mm
	主要寸法 外筒寸法	O/D 48.6mm × t 5.1mm
	外形高さ	約 385mm
	幅	210mm(ジョイント組合せ寸法)

Table 3.1 燃料破損検出装置 ガス圧縮機保守履歴

年月日	項目	保守内容
H7.5.1	現地据付工事開始	
H9.4.1	ガス圧縮機運転開始	
H9.4.1、H9.4.8	「オイルレベル低」警報発報	機能試験時、ガス圧縮機オイルレベル低の警報発報によりガス圧縮機停止事象発生。
H9.12.16	オイルレベルスイッチ改善	「オイルレベル低」警報発報時に、実機オイルレベルは警報設定値以上であることを確認。原因調査結果、オイル内に粒子状の気泡が発生し、レベルスイッチセンサ部に付着したことにより発生したことが判明。対策として、レベルスイッチをシェルに収納し、シェル入口にオイルフィルタを取り付けることによりレベルスイッチセンサ部に気泡が付着しない構造とした。
H11.2.9 ～ H11.3.30	平成10年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換作業を実施。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認を実施。
H12.2.2 ～ H12.2.21	平成11年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換作業を実施。冷却水による結露で錆びの発生したシリンダーボルト4本交換。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認を実施。
H12.5.1	容量低下の兆候発生	ガス圧縮機容量低下の兆候(戻り弁開度の減少、ページガス流量低下)発生。
H12.8.1	グリーンハウス製作・設置	定検作業時の機器開放のためグリーンハウスを製作し、設置。
H12.10.2 ～ H12.10.24	平成12年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換作業を実施。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認を実施。現場型圧力計導管部に校正用テスト弁設置。
H13.7.24 ～ H13.9.6	平成13年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換作業を実施。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認を実施。

Table 3.1 燃料破損検出装置 ガス圧縮機保守履歴(続)

年月日	項目	保守内容
H13.8.30	平成13年度定期点検作業 (続)	開放点検時、ガス圧縮機吸入・吐出弁押さえの座屈判明。座屈の原因は、吸入・吐出弁のバルブカバー取付けボルト締め過ぎによるものと判明。工場における確認試験を経て、下記対策実施。 ①弁押さえの肉厚を増やし強度を高める ②取付けボルトのトルク管理実施 ③組立て時の管理寸法の詳細化 ④組立て手順を明確化し、要領書への記載
H14.9.2 ～ H14.10.4	平成14年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換作業を実施。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認作業を実施。
H15.3.26	クランクシャフト部オイル漏れ	停止後点検でガス圧縮機クランクシャフト部から少量のオイル漏れ発見。原因調査の結果、クランクシャフトの磨耗と判明。新規製作し平成15年度定期点検作業時交換実施。
H15.9.1 ～ H15.10.2	平成15年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換、クランクシャフト交換作業を実施。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認作業を実施。
H16.3.17	ガス圧縮機容量低下調査	ガス圧縮機容量低下事象の対策として、吸入・吐出弁ガスケット及び当たり面の調査、ガスケット交換を実施。
H16.5.13 ～ H16.5.14	ガス圧縮機容量低下調査	ガス圧縮機容量低下事象の対策として、吸入・吐出弁交換を実施。
H16.8.16 ～ H16.9.3	平成16年度定期点検作業	開放点検、消耗品交換作業を実施。組立て後漏洩確認、Heリーク確認、性能作動確認作業を実施。バイパス差圧調整弁 VC4 エアセット交換及び開度調査実施。ガス圧縮機冷却水循環部の結露により、シリンダ及びシリンダカバー取付ボルトに錆びが発生。対策として、ボルトの材質を SCM435 から SUS316 に変更。

Table 3.2 燃料破損検出装置 プレシピテータ保守履歴

月 日	項 目	保 守 内 容
H7.5.1	現地据付工事開始	
H8.8.1	単体機器性能試験開始	
H9.4.1	設備運転開始	
H11.2.4 ～ H11.3.30	平成10年度定期点検作業	開放点検、外観検査、プラトー特性確認を実施。 組立て後漏洩確認、Heリーコンデンサー確認を実施。
H12.2.1 ～ H12.2.22	平成11年度定期点検作業	プラトー特性確認、外観検査を実施。 系統全体漏洩確認を実施。
H12.8.1	グリーンハウス製作・設置	定検作業時の機器開放のためグリーンハウスを作成し、設置。
H12.9.7 ～ H12.10.24	平成12年度定期点検作業	プラトー特性確認、外観検査を実施。 系統全体漏洩確認を実施。現場型圧力計導管部に校正用テスト弁設置
H13.7.23 ～ H13.9.6	平成13年度定期点検作業	開放点検、外観検査、プラトー特性確認を実施。 組立て後漏洩確認、Heリーコンデンサー確認を実施。
H14.9.17 ～ H14.10.26	平成14年度定期点検作業	プラトー特性確認、外観検査を実施。 系統全体漏洩確認を実施。
H15.9.10 ～ H15.9.30	平成15年度定期点検作業	プラトー特性確認、外観検査を実施。 系統全体漏洩確認を実施。
H16.8.16 ～ H16.9.2	平成16年度定期点検作業	開放点検、外観検査、プラトー特性確認を実施。 組立て後漏洩確認、Heリーコンデンサー確認を実施。
H17.2.12	プレシピテータ(A)コネクタ部 断線	プレシピテータ起動時、プレシピテータ(A)本体の高圧電源計測取り出しコネクタ部の同軸ケーブル素線とピン接合部の断線判明。原因は、コネクタ着脱時の荷重と推定。プレシピテータ(A)、(B)全ての接合部の状態確認と当該断線箇所の補修、保護カバー取り付けを実施。

Table 3.3 燃料破損検出装置 制御盤保守履歴

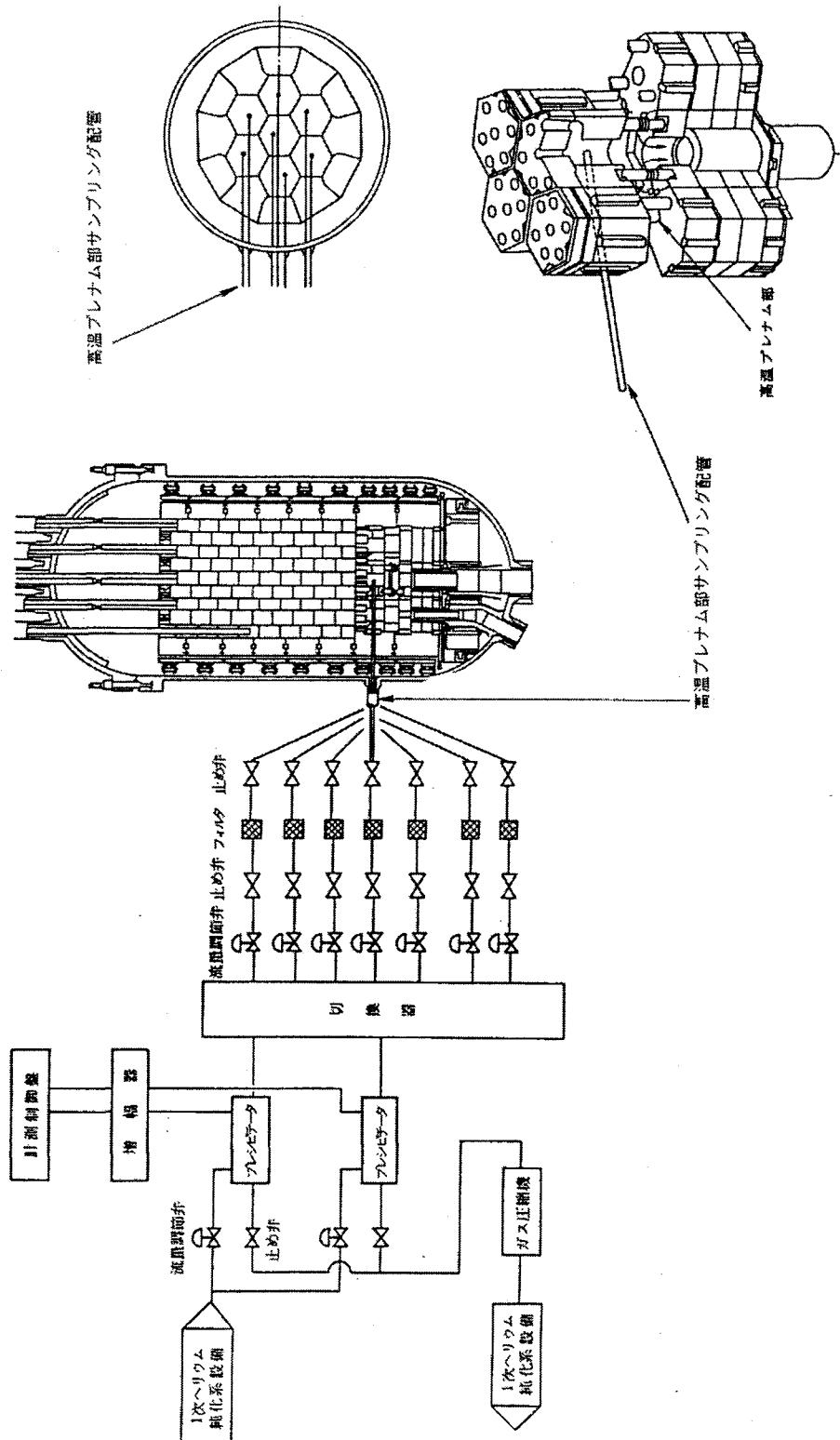
年月日	項目	保守内容
H7.5.1	現地据付工事開始	
H9.4.1	設備運転開始	
H11.2.1 ～ H11.2.4	平成10年度定期点検作業	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗検査 ・プレシピテータコントロールユニット モジュール特性確認 ・性能作動試験 <ul style="list-style-type: none"> ①盤単体ループチェック ②警報出力試験 ③プレシピテータ組合せ試験
H11.3.9 ～ H11.3.15	サンプリング流量外部監視 装置制御盤の設置	原子炉運転中の流量調整及び流量監視がサービス エリア外から行なえるよう、流量計の改造、制御盤等 の追加設置を実施。
H12.2.1 ～ H12.2.22	平成11年度定期点検作業	<p>(1)FFD 制御盤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗検査 ・プレシピテータコントロールユニット モジュール特性確認 ・性能作動試験 <ul style="list-style-type: none"> ①盤単体ループチェック ②警報出力試験 ③プレシピテータ組合せ試験 <p>(2)サンプリング流量外部監視装置 制御盤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗検査、 ・性能作動試験 <ul style="list-style-type: none"> ①盤単体ループチェック
H12.9.12 ～ H12.9.20	平成12年度定期点検作業	平成11年度定期点検作業と同様
H13.7.24 ～ H13.8.1	平成13年度定期点検作業	平成11年度定期点検作業と同様

Table 3.3 燃料破損検出装置 制御盤保守履歴(続)

年月日	項目	保守内容
H13.12.13 H14.1.23 H14.5.29	「プレシピテータ(A)異常」の警報発報	「LOW EHT」アラームによりプレシピテータ(A)異常の警報発報。警報によりプレシピテータ(A)計測停止し、プレシピテータ(B)で全領域計測。その後、警報がリセット出来たためプレシピテータ(A)を再起動し、通常計測に復旧。
H14.8.21 ～ H14.9.26	平成14年度定期点検作業	平成11年度定期点検作業と同様
H14.8.25 ～ H14.8.26	プレシピテータ(A) 高圧電源モジュール警報発生調査	プレシピテータ(A)異常の警報「LOW EHT」発報により、プレシピテータ(A)高圧電源モジュール及び高圧アラームモジュールを工場へ込み、警報発生原因調査を実施するが異常が見受けられなかった。
H15.8.5	「プレシピテータ(B)異常」の警報発報	「LOW EHT」アラームによりプレシピテータ(B)異常の警報発報、プレシピテータ(B)計測停止。(プレシピテータ(A)で発生した警報調査のため、モジュールを(A)と(B)入れ替えて確認中。)プレシピテータ(A)側使用モジュール内の警報に要因確認。
H15.9.2 ～ H15.9.5	プレシピテータコントローラユニット内コンデンサの交換	コンデンサの経年劣化予防措置による、プレシピテータコントローラユニット内のコンデンサ交換。
H15.9.8 ～ H15.9.19	平成15年度定期点検作業	平成11年度定期点検作業と同様
H16.2.6	プレシピテータ(A) 「サンプリング流量低」警報発報	「サンプリング流量低」の警報発報。発生原因を調査した結果、流量計本体の電源ユニット接続コネクタ部の緩み判明。再装着した結果発生要因解除。 全ての接続コネクタ部の緩みを調査、他に該当箇所の無いことを確認。
H16.8.16 ～ H16.8.27	成16年度定期点検作業	平成11年度定期点検作業と同様

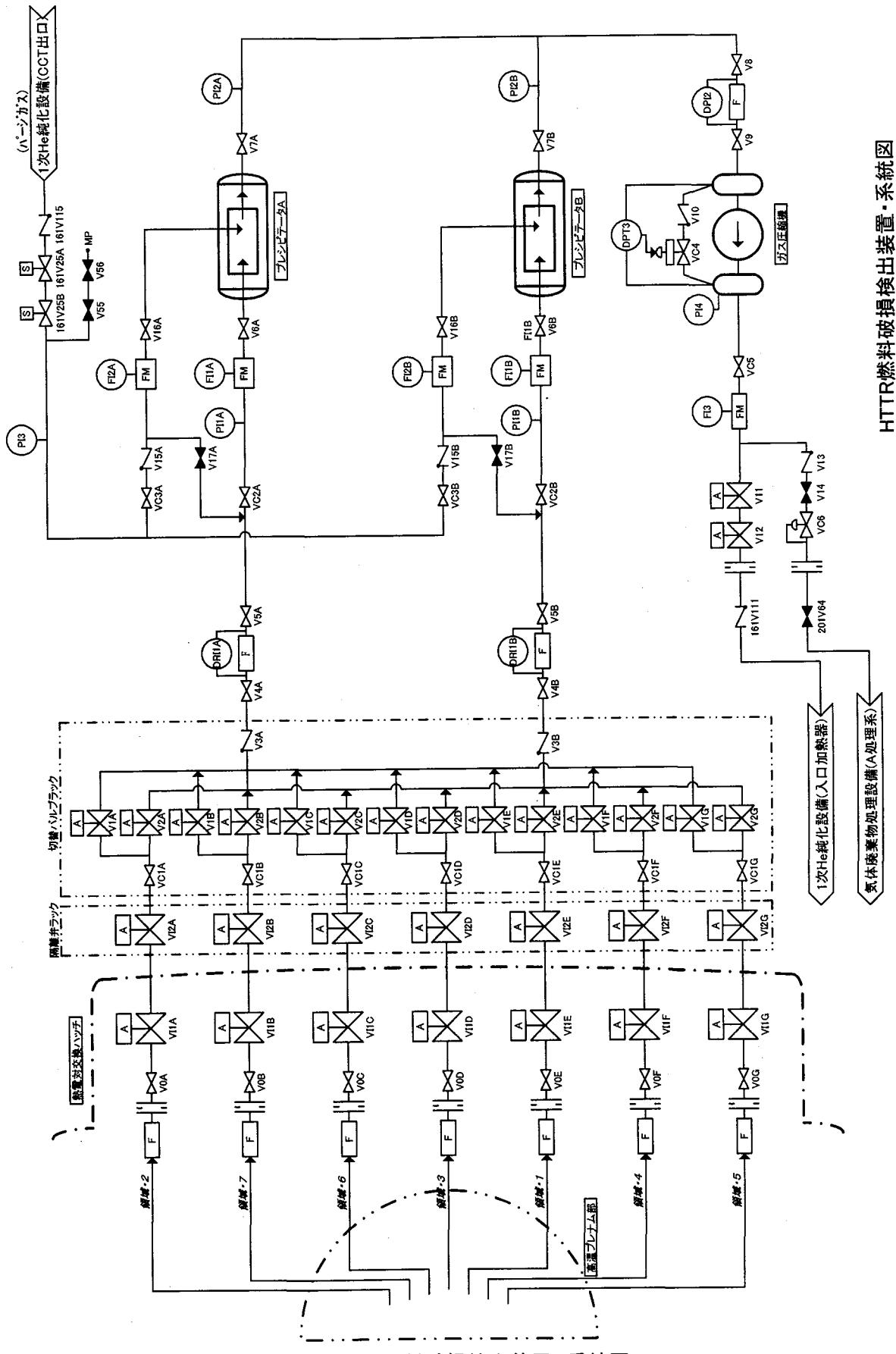
Table 4.1 燃料破損検出装置 警報項目一覧

No.	警 報 項 目	警 報 設 定 値
1	領域1放射能 高	2500 S ⁻¹
2	領域2放射能 高	2500 S ⁻¹
3	領域3放射能 高	2500 S ⁻¹
4	領域4放射能 高	2500 S ⁻¹
5	領域5放射能 高	2500 S ⁻¹
6	領域6放射能 高	2500 S ⁻¹
7	領域7放射能 高	2500 S ⁻¹
8	プレシピテータA異常	—
9	プレシピテータB異常	—
10	ガス圧縮機出口ガス温度 高	48 °C
11	ガス圧縮機冷却水流量 低	10 l/min
12	ガス圧縮機オイルレベル 低	13 mm
13	ガス圧縮機出入口差圧 高	0.5 MPa[gauge]
14	吐出スナバ圧力 高	4.27 MPa[gauge]
15	プレシピテータAサンプリング流量 低	12 cm ³ /s
16	プレシピテータBサンプリング流量 低	12 cm ³ /s
17	制御盤 故障	—
18	電源盤 故障	—
19	サンプリング選択弁 故障	—



HTTR 燃料破損検出装置 構成図

Fig.2.1 燃料破損検出装置 構成図



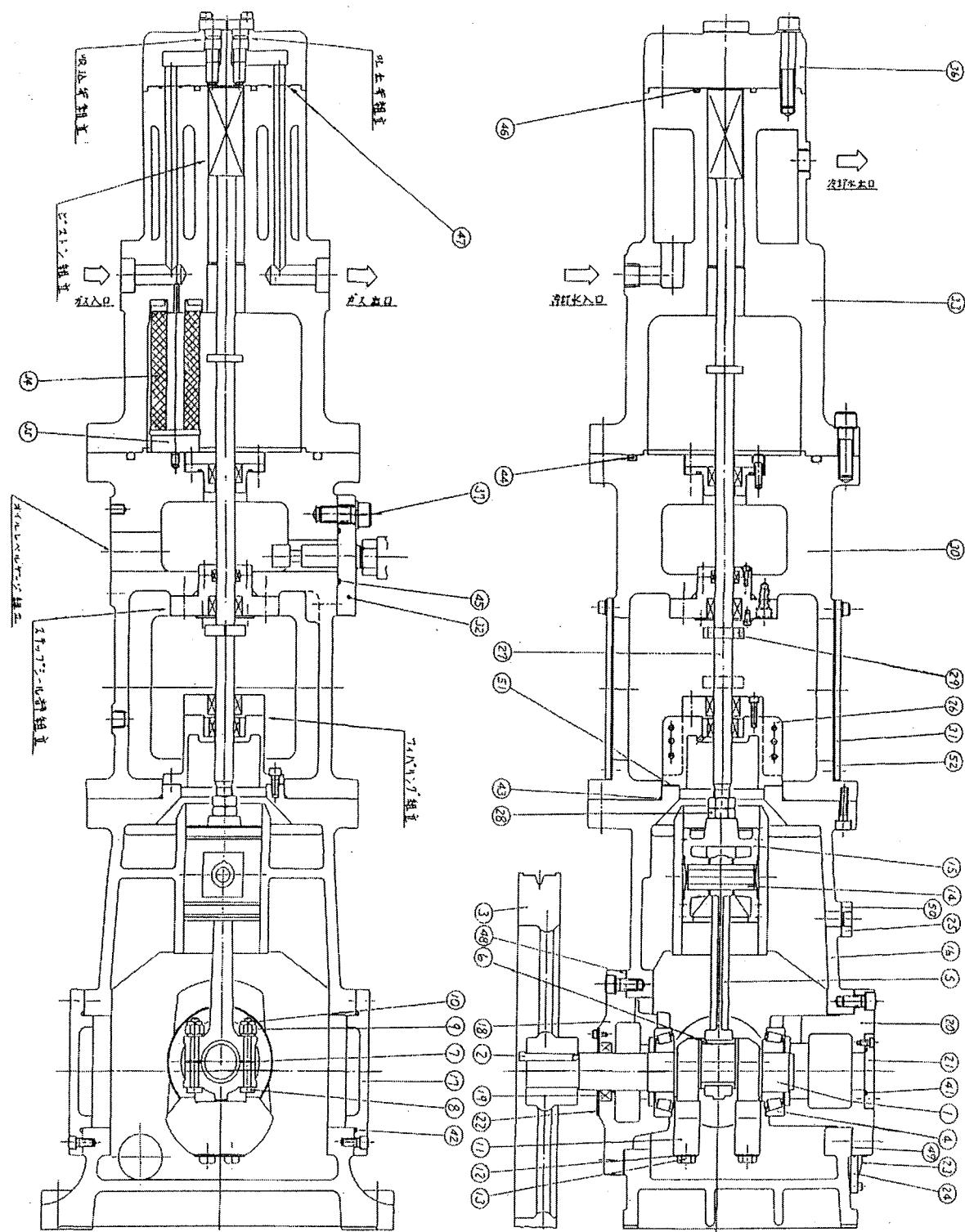


Fig.2.3.1 燃料破損検出装置 ガス圧縮機断面図

番号	部品名	番号	部品名
1	クランクシャフト	26	クロスヘッドガイドカバー
2	頭付テーパキー	27	ピストンロッド
3	Vブーリ(本体)	28	ピストンロッドナット
4	テーパローラベアリング	29	オイルストッパー
5	コネクティングロッド	30	ディスタンスピース
6	クランクピンメタル	31	ディスタンスピースサイドカバー
7	シム	32	フランジ(レベルスイッチ)
8	コネクティングロッドボルト	33	シリンドラ
9	コネクティングロッドナット	34	フィルタ
10	割りピン	35	フィルタ支持台
11	カウンタウエイト	36	シリンドラカバー
12	カウンタウエイトワッシャ	37	フランジボルト
13	カウンタウエイトボルト	41	Oリング(ベアリングハウジングカバー)
14	クロスヘッドピン	42	Oリング(クランクケースカバー)
15	クロスヘッド	43	Oリング(ディスタンスピース下)
16	クランクケース	44	Oリング(ディスタンスピース上)
17	クランクケースカバー	45	Oリング(レベルスイッチ)
18	ベアリングハウジング(動力側)	46	Oリング(シリンドラ)
19	オイルシール(クランクシャフト)	47	Oリング(シリンドラ)
20	ベアリングハウジング(反動力側)	48	ガスケット(ベアリングハウジング動力側)
21	ベアリングハウジングカバー	49	ガスケット(ベアリングハウジング反動力側)
22	オイルシール押さえ	50	ガスケット(エアブリーザフランジ)
23	オイルレベルゲージ	51	ガスケット(クロスヘッドガイドカバー)
24	オイルレベルゲージ押さえ	52	ガスケット (ディスタンスピースサイドカバー)
25	フランジ(エアブリーザ)		

Fig.2.3.2 燃料破損検出装置 ガス圧縮機断面図(部品表)

RS-2 30MW定格／単独運転（安全性実証試験） FFD計数値

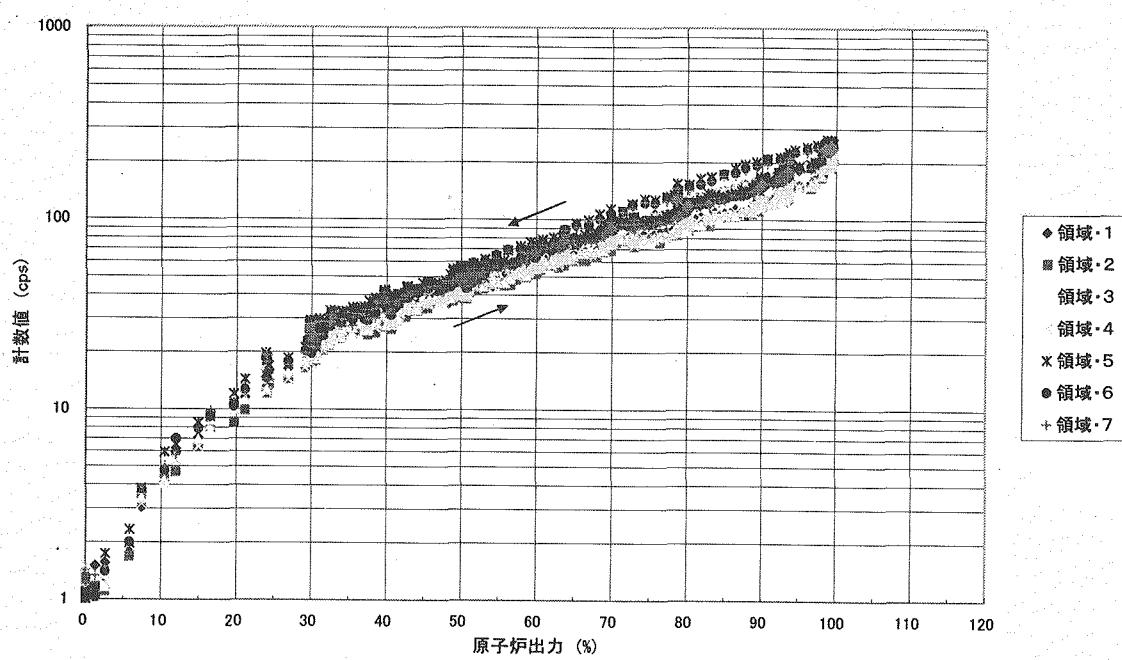


Fig.2.4 燃料破損検出装置 測定例

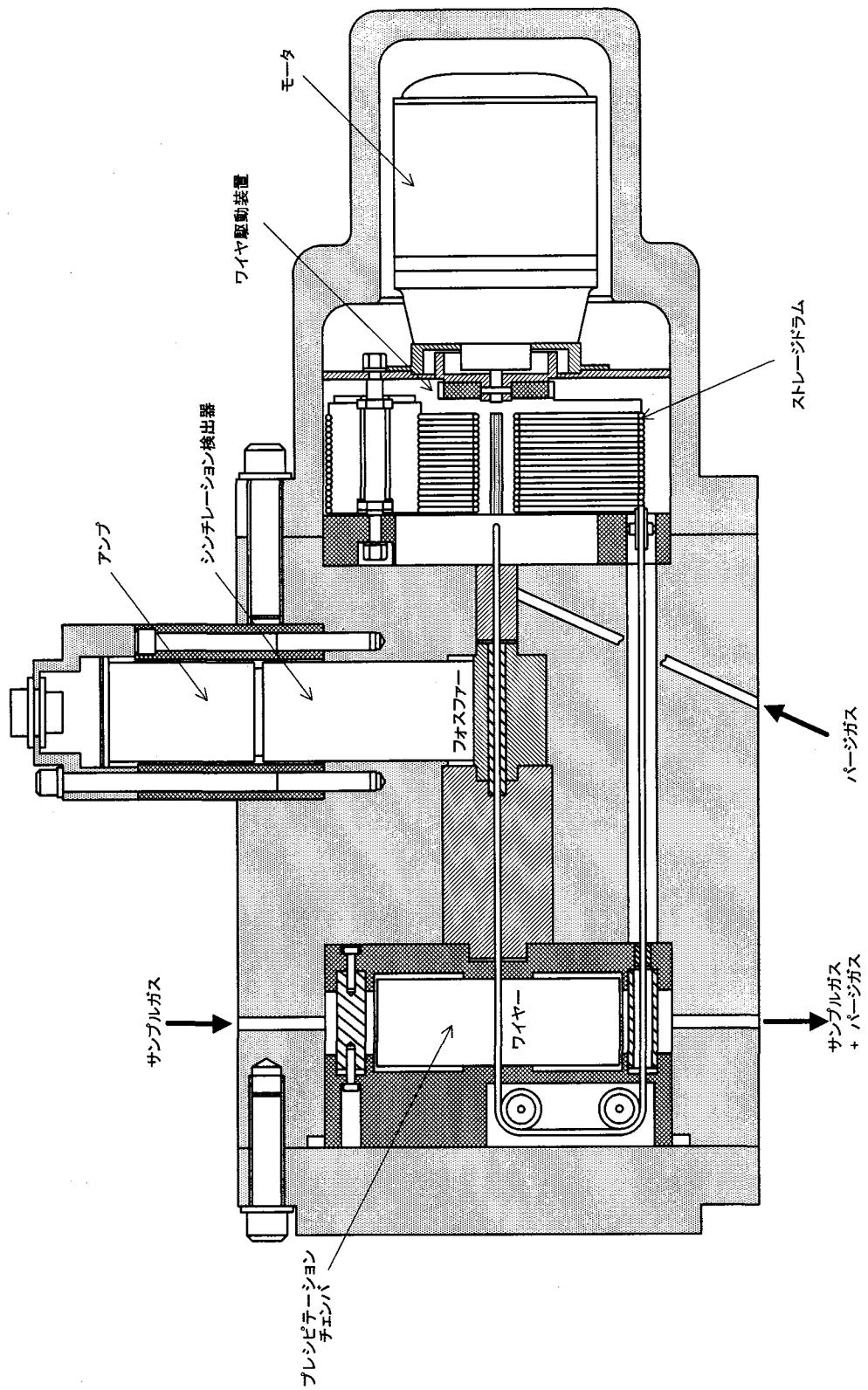


Fig.2.5 燃料破損検出装置 プレシピテータ断面図

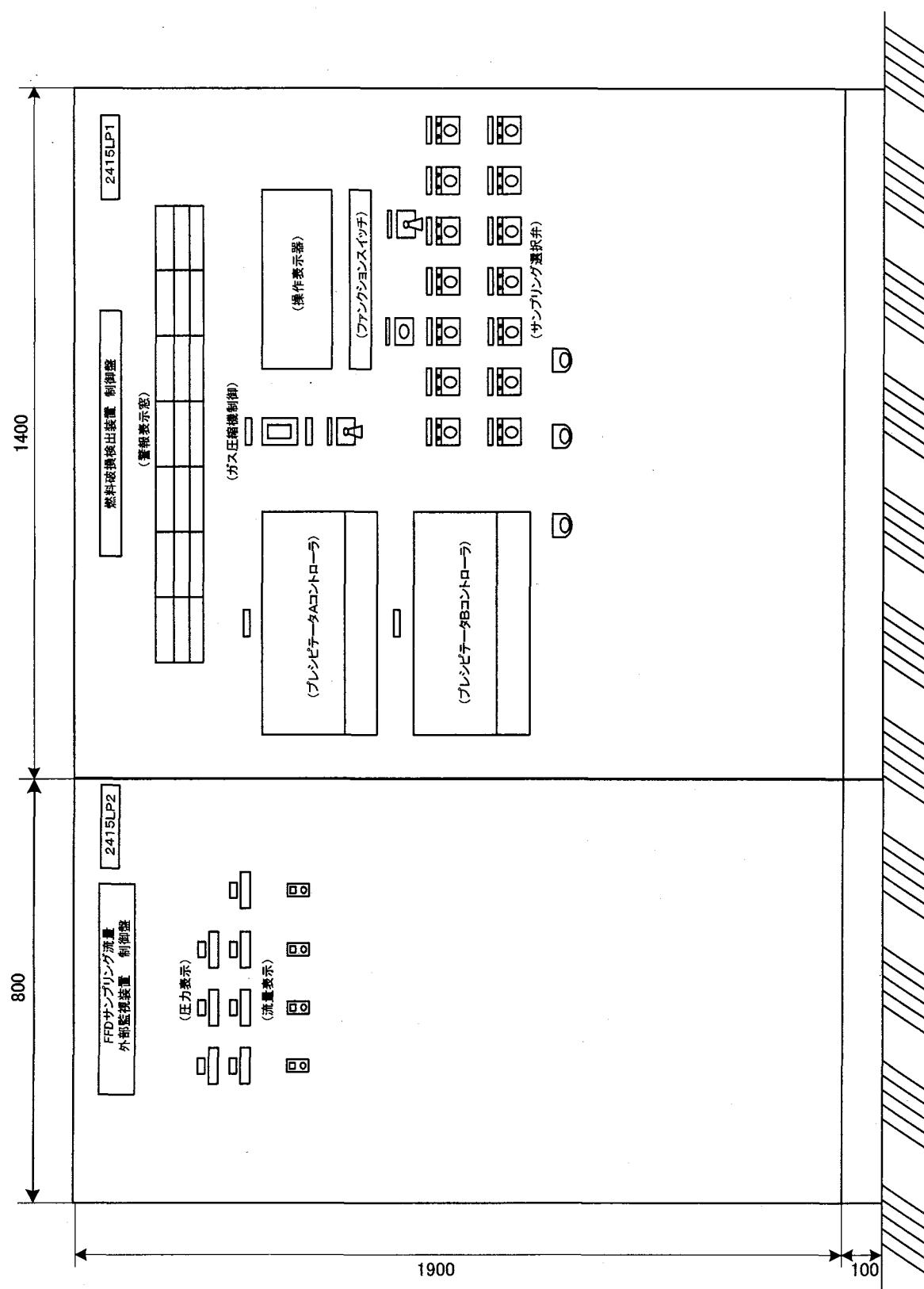
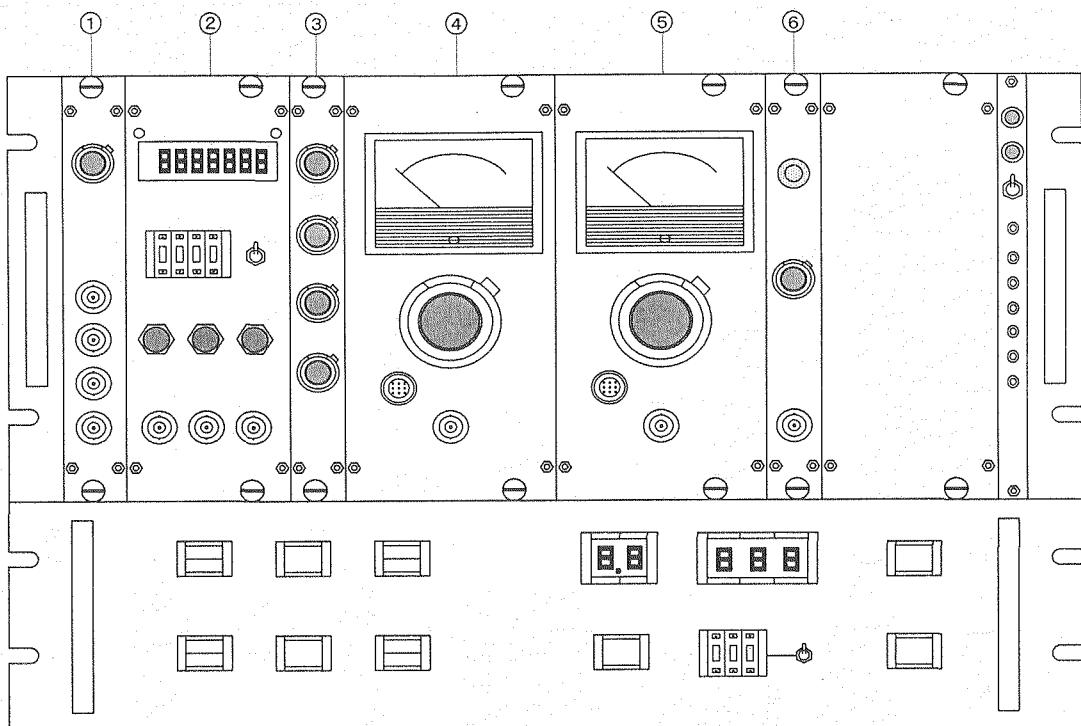
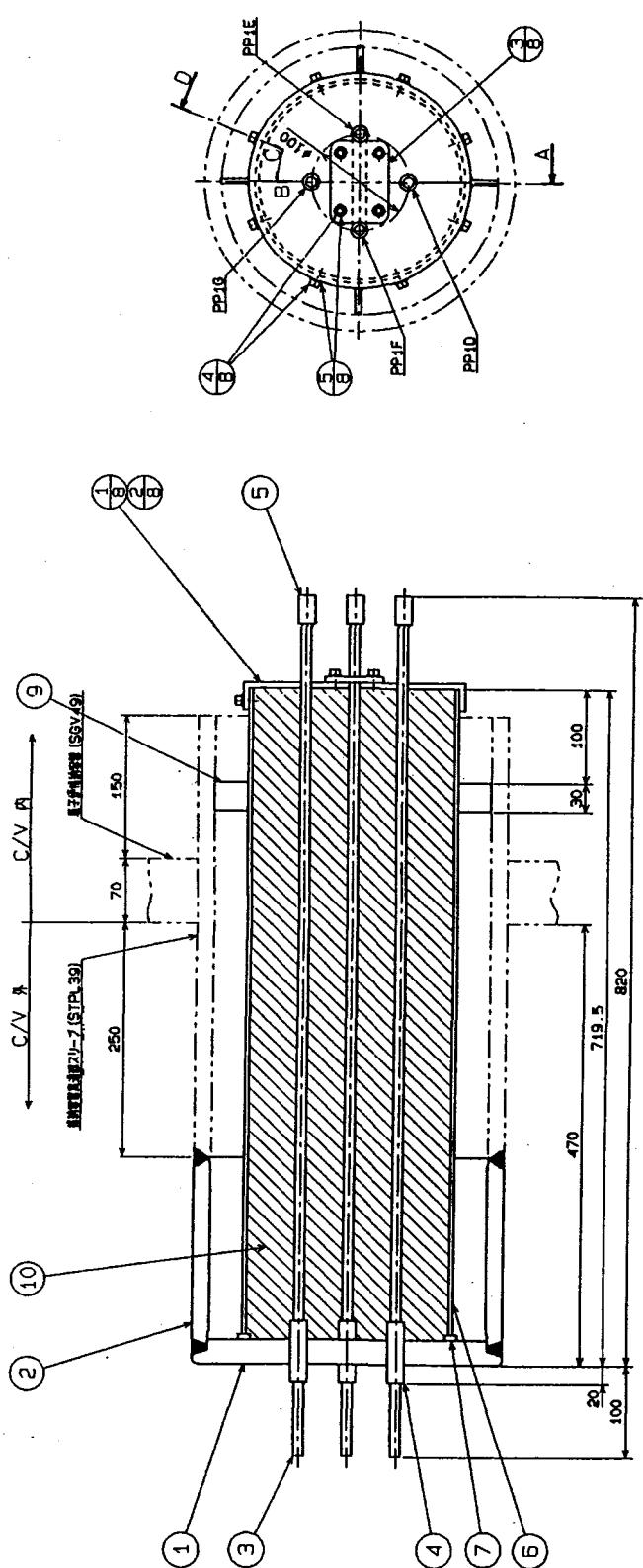


Fig.2.6.1 燃料破損検出装置 制御盤外形図



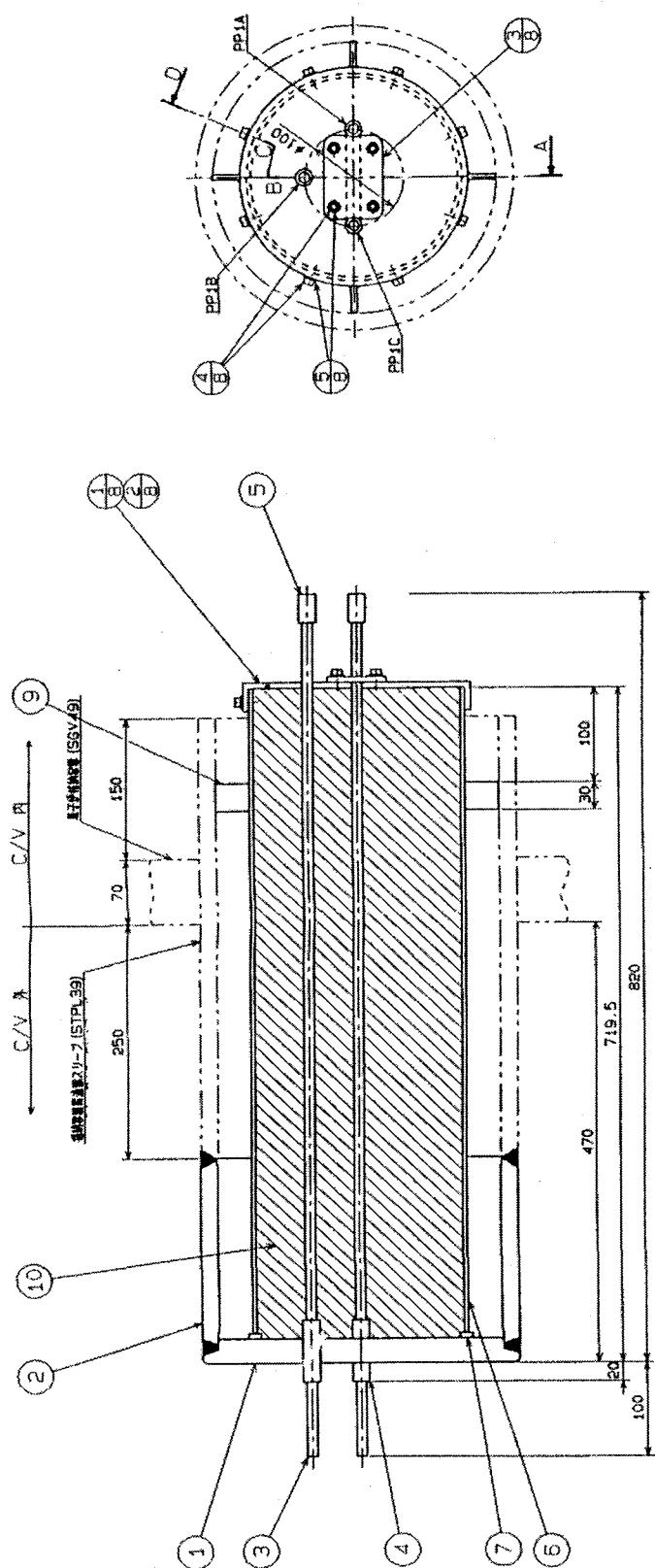
番号	モジュール名称	機能
1	アンプ & ディスクリ・モジュール	フォトマルからの信号を初段反転アンプで10倍に増幅し、その後、反転アンプを通り、コンバレータ(ディスクリ)で設定電圧と比較され、設定電圧より高いパルスを検出して出力する。
2	インテグレータ・モジュール	プレシピテータの計測タイムをカウントする。計測は入力BNCコネクタからのパルス信号を、AUTO/MANUAL切換スイッチがAUTOに設定されている時のみ、コントロールユニットからのゲート信号によりソークタイムの間計数される。
3	高圧アラーム・モジュール	フォトマル用高圧及びプレシピテータ用高圧より分圧された信号をそれぞれボルテージ・フォロアで受け、パネル面で設定された値と比較し、自動測定の時に設定値から逸脱した場合高圧アラームを発生させる。
4	フォトマル用高圧電源モジュール	発振方式により高圧を発生させる。高圧出力は検出回路とパネル面のヘリポットの設定による基準と比較し、安定化を行い、高圧のモニタを行うため高圧出力を分圧して低下させている。
5	プレシピテータ用高圧電源モジュール	回路はフォトマル用と同様。フォトマル用と異なる点は、出力がプレシピテータ本体を通って帰り、メータ及びモニタ用分圧回路に印加される。
6	パルス発生器	出力パルスの周波数(1秒当りのパルス数)を変更するためのものであり、基準発振源は、水晶振子と分圧回路をまとめたICを使用。周波数の可変は、このICの文周回路をコントロールすることを行っている。

Fig.2.6.2 燃料破損検出装置 コントロールユニット外形図



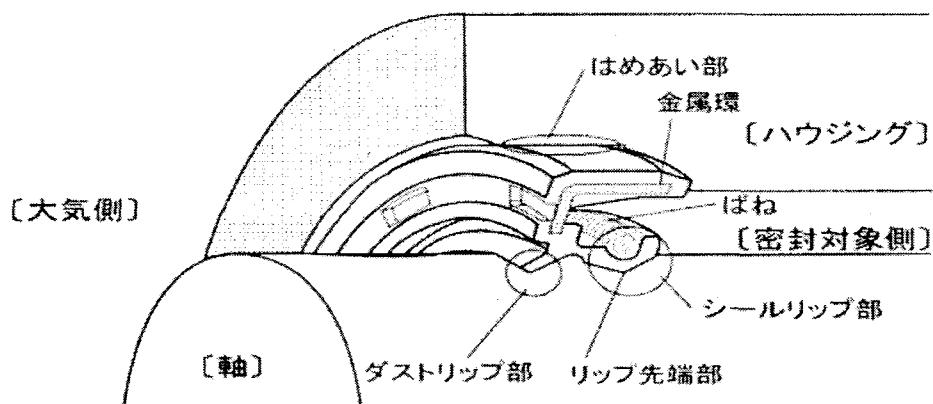
番号	名 称	番号	名 称
1	端板	1	断熱材押さえ
2	短管	2	断熱材押さえ
3	貫通配管	8	3 パーブレート
4	カラー	4	六角穴付ボルト
5	フルカッピング	5	バネ座金
6	ガードパイプ	9	ガイド
7	プレート	10	断熱材

Fig.2.7.1 燃料破損検出装置 格納容器貫通部断面(P107)



番号	名 称	番号	名 称
1	端 板	1	断熱材押さえ
2	短 管	2	断熱材押さえ
3	貫 通 配 管	3	カバーブレート
4	カ ラ ー	4	六 角 穴 付 ボルト
5	フルカップリング	5	バネ座金
6	ガードパイプ	9	ガイド
7	プレート	10	断熱材

Fig.2.7.2 燃料破損検出装置 格納容器貫通部断面(P108)

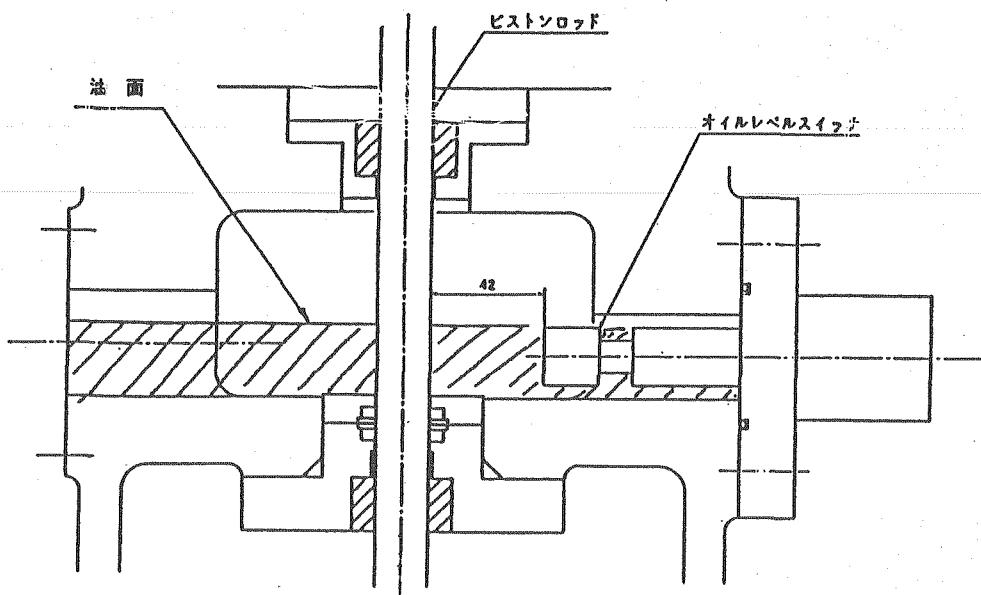


オイルシールの構造

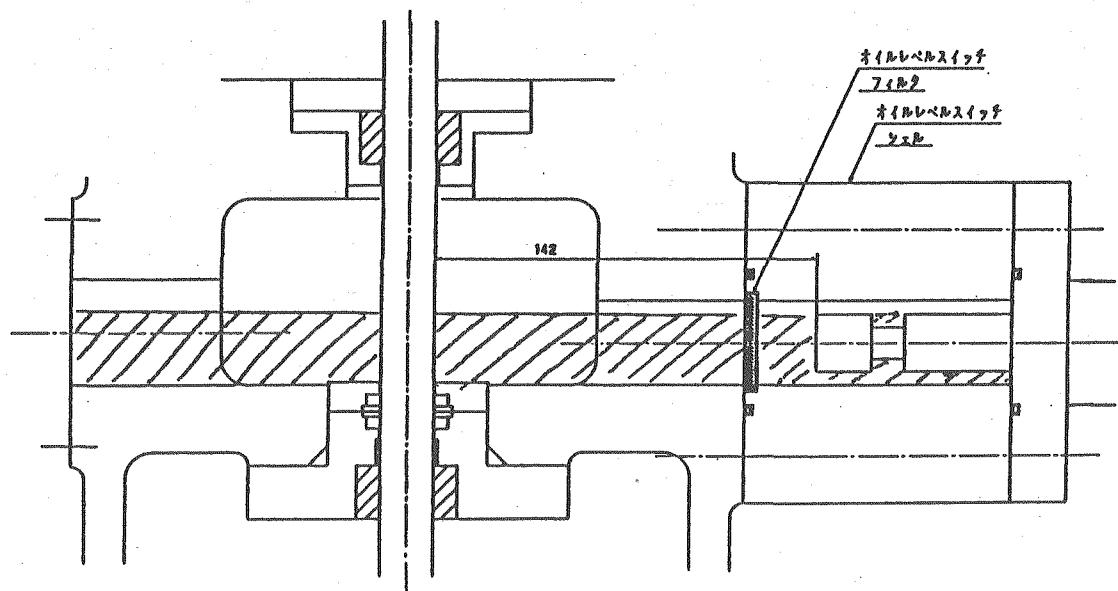
各部の働き

名 称		各部の働き
リップ部	リップ先端部	リップ先端はくさび状の断面形状をなし、軸表面に押しつけられて流体を密封する働きをする。
	シールリップ部	シールリップはフレキシブルなエラストマーで出来ており、機械の振動や密封流体の圧力変動に対して安定した密封作用を保つよう設計されている。ばねはシールリップ部の軸への押し付け力を長期間維持する。
	ダストリップ部	ダストリップは補助的に作られたばねなしリップで、ダストの侵入を防ぐ働きをする。
はめあい部		はめあい部はオイルシールをハウジング穴に固定すると同時に、オイルシール部外周面とハウジング内面との接觸面からの流体の漏れ、またはダストの侵入を防ぐ役目をする。尚、金属環はオイルシールをハウジングに固定するためのはめあい力を確保する。

Fig.5.1 燃料破損検出装置 ガス圧縮機・オイルシール構造図

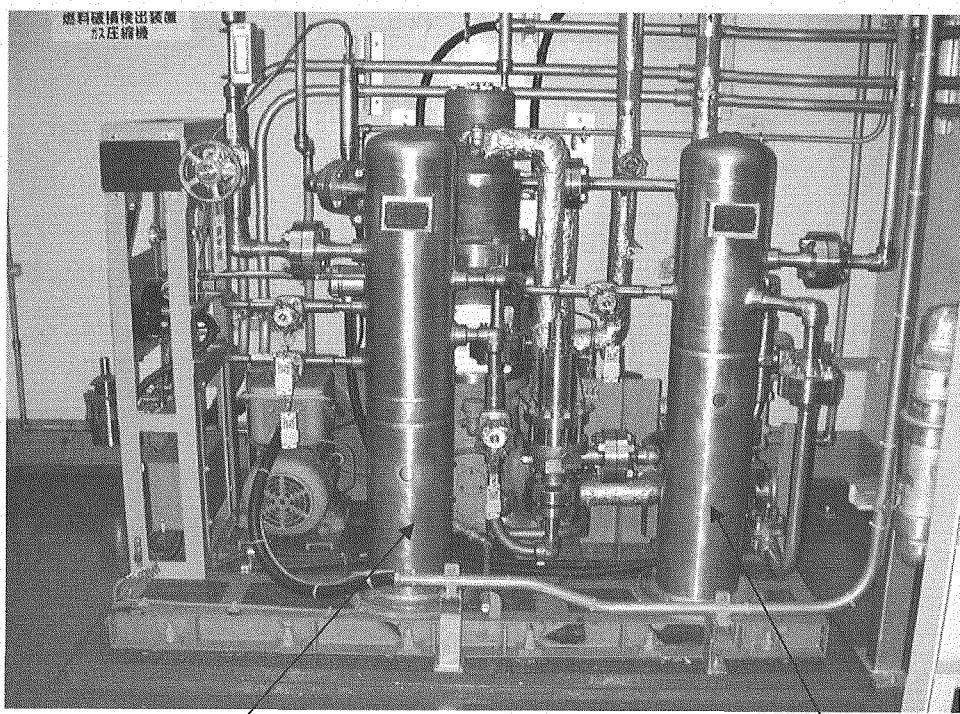


オイルレベル計改造前



オイルレベル計改造後

Fig.5.2 燃料破損検出装置 ガス圧縮機・オイルレベル計改造図



吐出側スナバ

吸入側スナバ

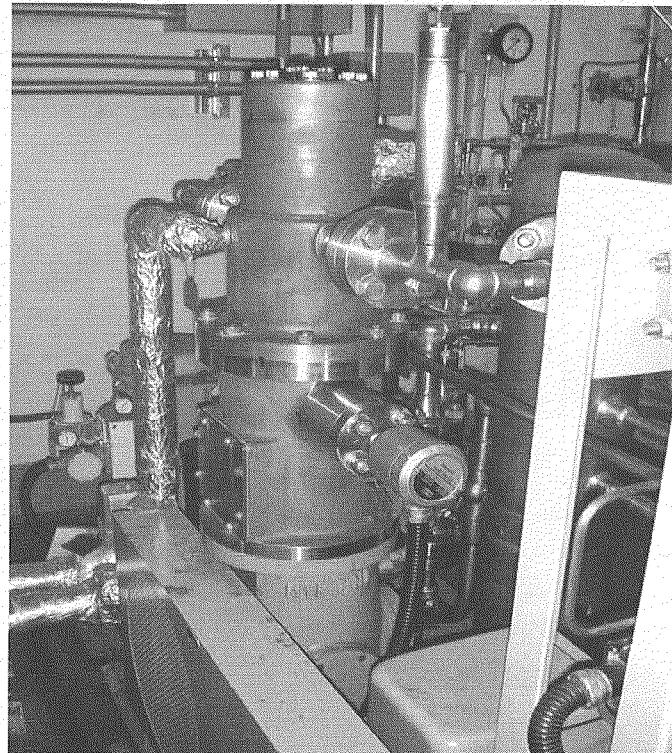


Photo 2.1 ガス圧縮機外観

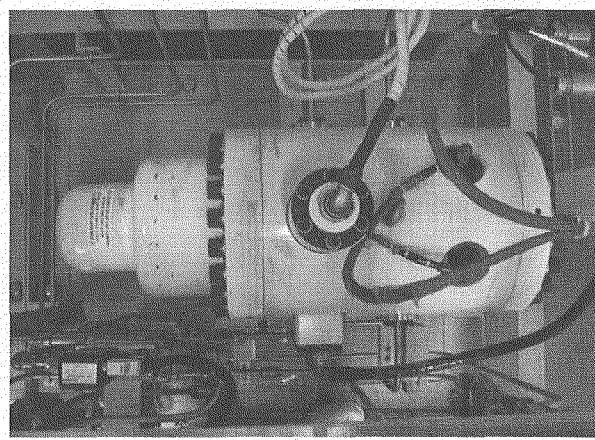
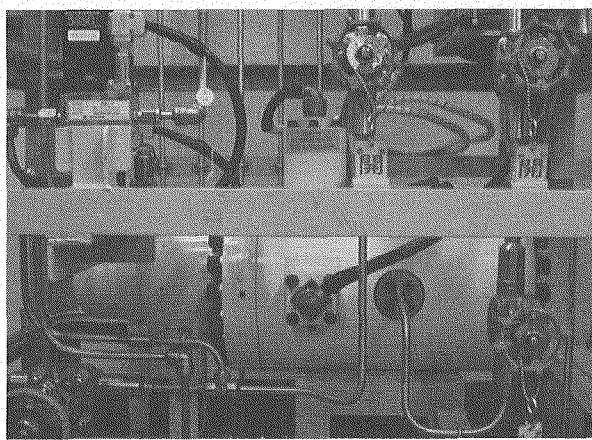
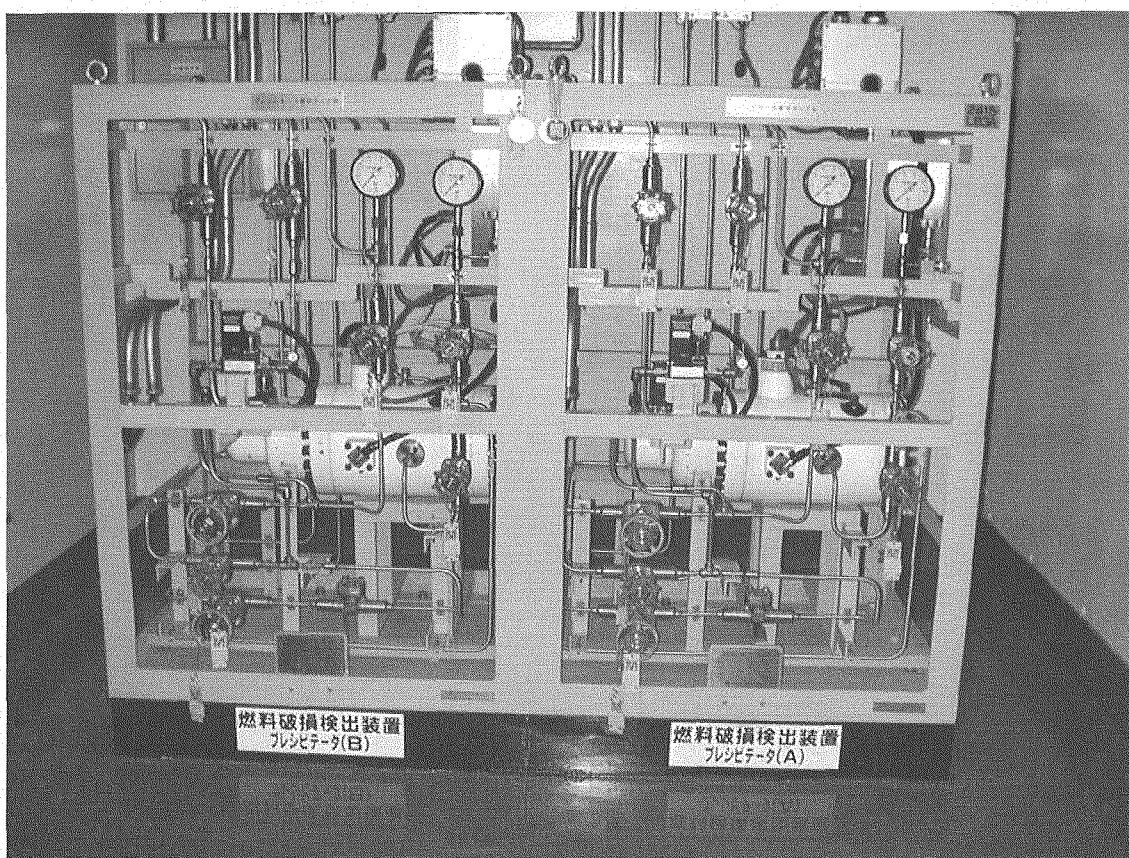
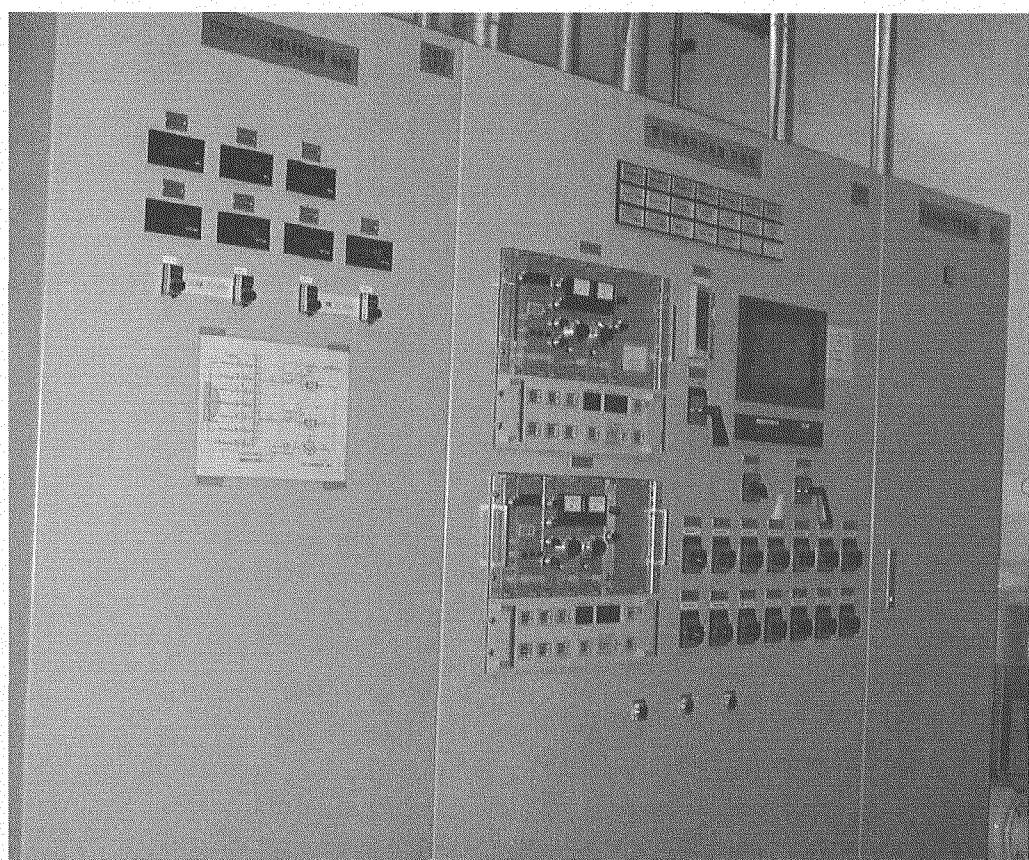


Photo 2.2 プレシピテータ外観



サンプリング流量外部監視装置制御盤

燃料破損検出装置制御盤

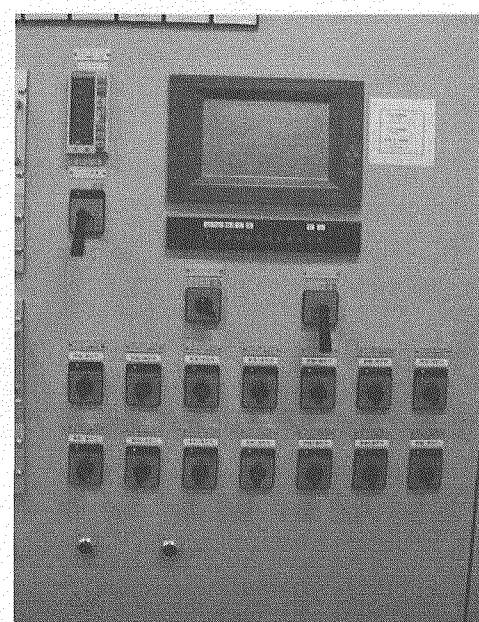
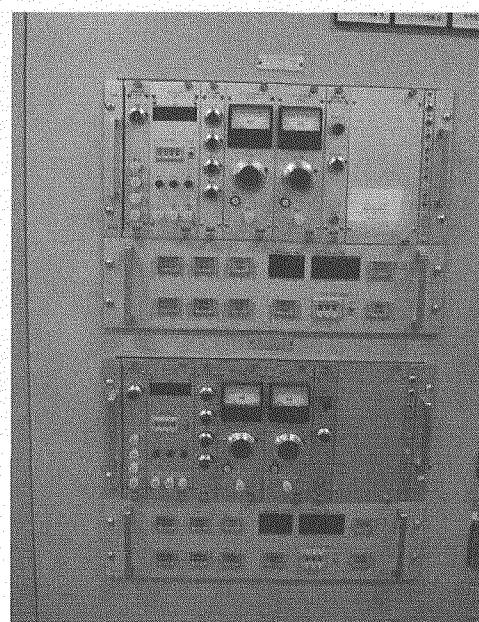


Photo 2.3 制御盤外観

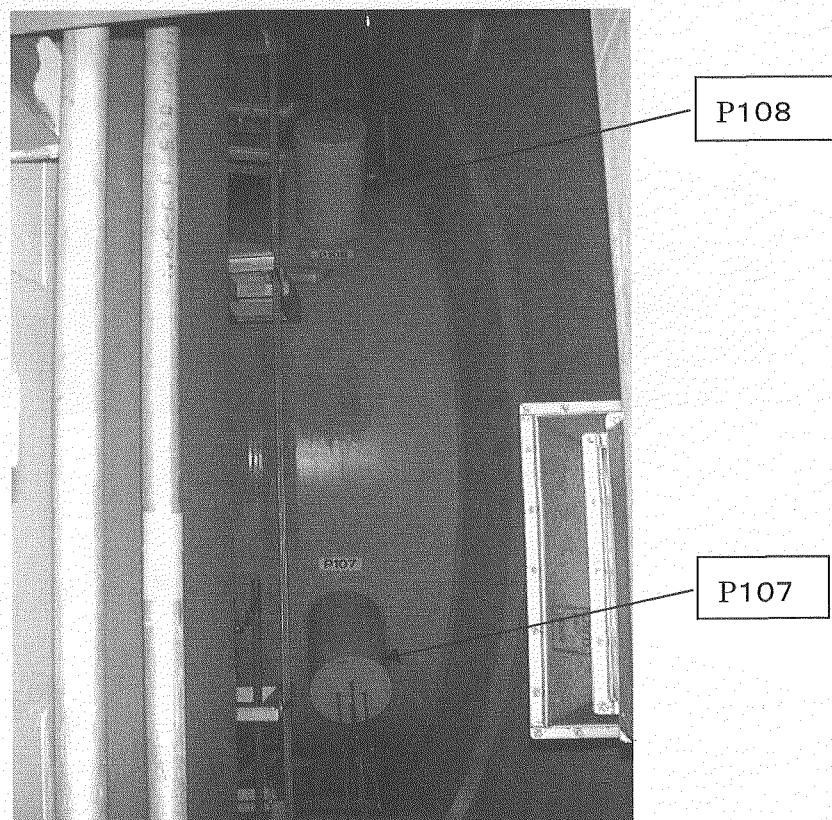
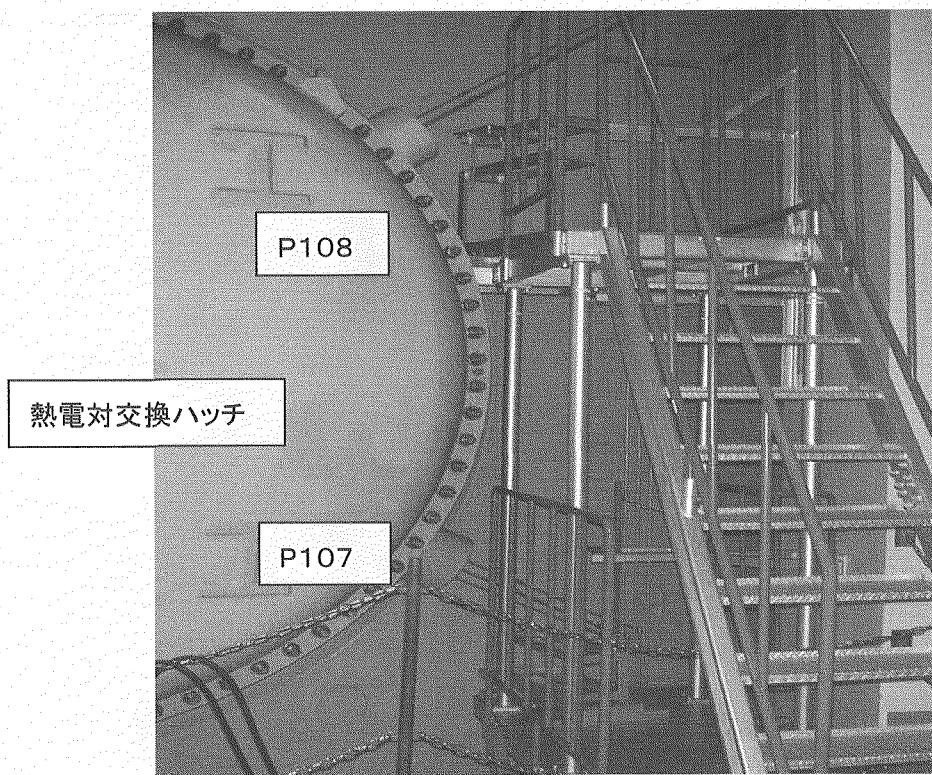


Photo 2.4 格納容器貫通部外観

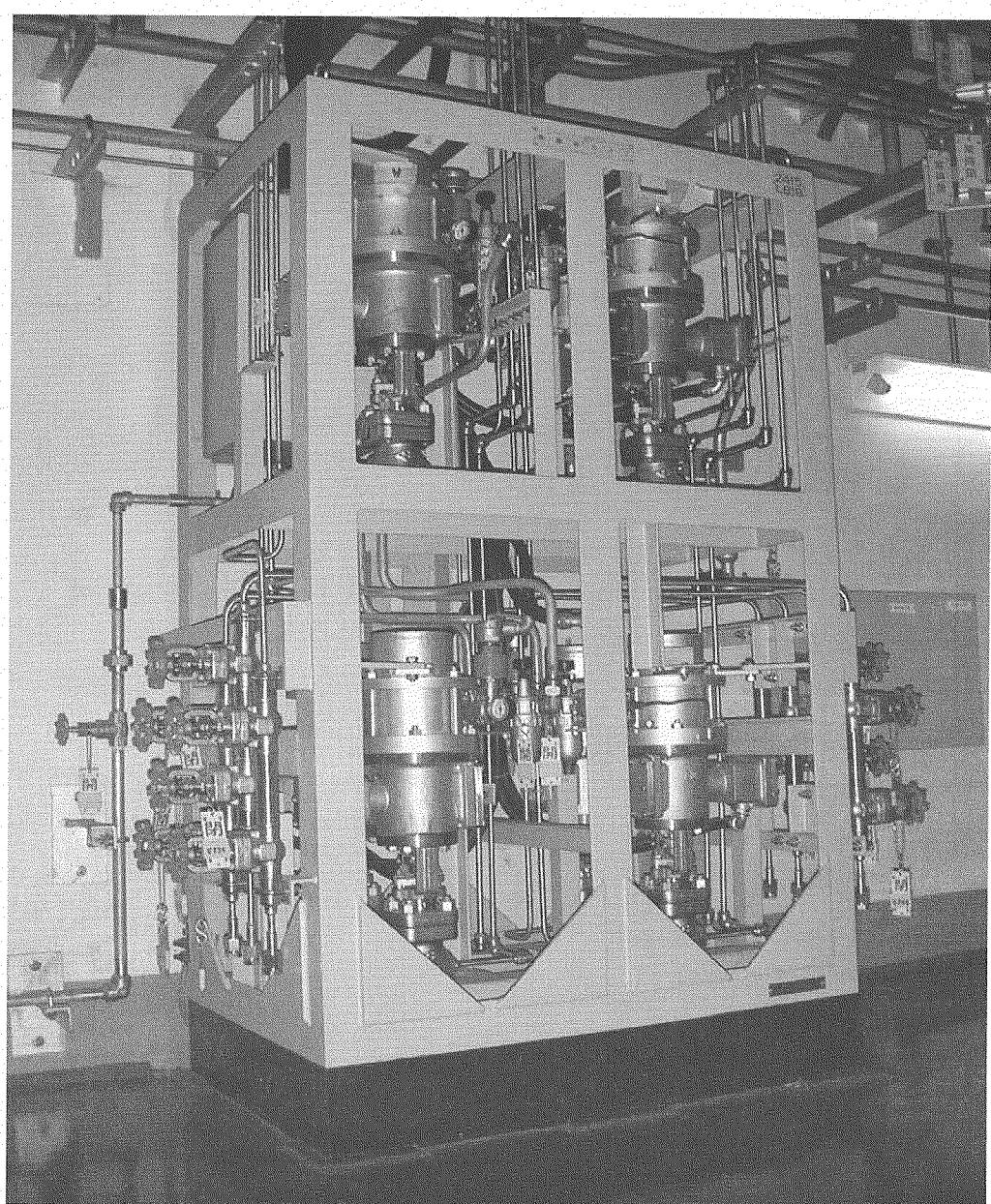


Photo 2.5 CV 外隔離弁ラック外観

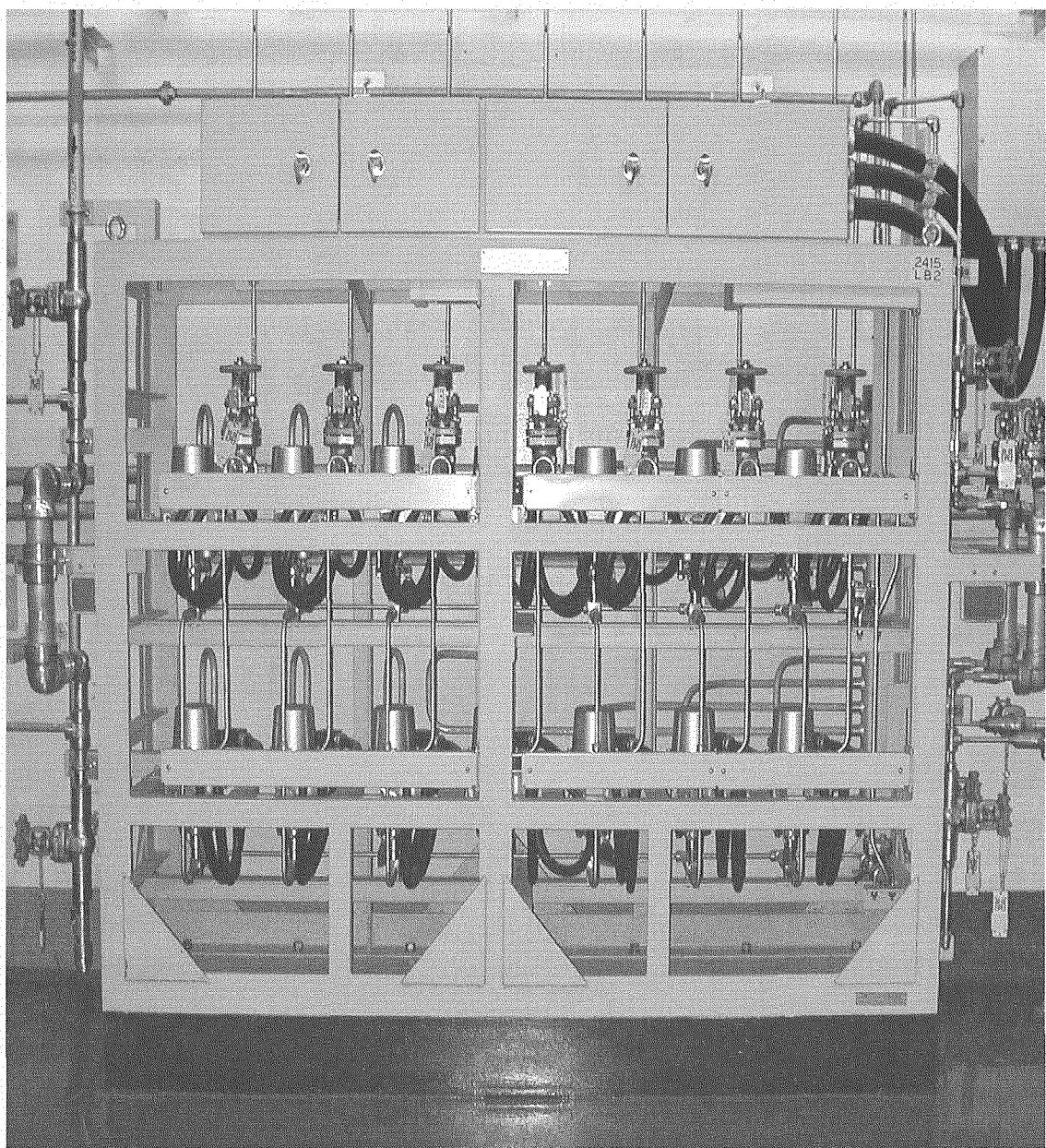


Photo 2.6 切替バルブラック外観

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
立体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘク	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	パスカル	Pa	N/m^2
功率,放射束	ワット	W	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電荷,電気量	クーロン	C	$J \cdot s$
電位差(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
磁束密度	テスラ	T	$V \cdot s$
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/m^2
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸収線量,質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg
線量当量,周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量,個人線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号 “1” は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m°C のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	N/m
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot s^{-1}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$m \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
熱容量,エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-3}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	ジュール毎ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^1 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot kg \cdot s^{-3}$

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーバ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ⁴ m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm ² =0.1Pa · s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャニスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カリ	cal	1 cal=1000J
ミクロ	μ	1 μ=1pm=10 ⁻⁶ m