



JAEA-Testing

2006-001



JP0650409

## HTTRヘリウムサンプリング設備の保守管理

Maintenance of Helium Sampling System in HTTR

関田 健司 江森 恒一 黒羽 操 君島 悟  
若林 宏

Kenji SEKITA, Koichi EMORI, Misao KUROHA, Satoru KIMISHIMA  
and Hiroshi WAKABAYASHI

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

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

## HTTR ヘリウムサンプリング設備の保守管理

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  
関田 健司、江森 恒一、黒羽 操\*、君島 悟\*、若林 宏\*

(2006年 1月 27日受理)

高温工学試験研究炉(以下、HTTR)では、炉内構造物に耐熱性に優れた黒鉛構造物を用いているが、黒鉛構造物は、酸化による材料強度の劣化を招く恐れがあるため、冷却材であるヘリウムガス中の不純物濃度を厳しく管理している。この不純物濃度を高精度で測定するためにヘリウムサンプリング設備が設置されている。

この設備には、ガスクロマトグラフ質量分析計や微量水分計が設置されている。ガスクロマトグラフ質量分析計は、使用状態が長期に及ぶ場合、分解能を維持するために、装置を停止して再調整する必要がある。この作業には数日間を要し、この間は不純物濃度の測定を中断せざるを得ない。そこで、ガスクロマトグラフ質量分析計をもう1台設置し、測定系を改善することで、不純物濃度の測定が安定して行えるようになった。また、高精度の微量水分計は、測定範囲を大きく超える水分濃度を計測した場合、その後の計測に長期間に渡り影響がでる。そこで、サンプリング系統内に高い水分濃度の残留が予想される場合のページ操作手順及び微量水分計の起動手順を確立し、水分濃度の測定が安定して行えるようになった。

本報は、ヘリウムサンプリング設備の維持管理を目的に実施してきた保守項目、改善等について纏めたものである。

## Maintenance of Helium Sampling System in HTTR

Kenji SEKITA, Koichi EMORI, Misao KUROHA\*,  
Satoru KIMISHIMA\* and Hiroshi WAKABAYASHI\*

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

(Received January 27, 2006)

Graphite structures are used as one of the HTTR core internal structures. Graphite structures have high heat resistant property but its mechanical strength degrades easily by oxidization. To prevent the oxidization of graphite structures, impurity concentrations in the coolant of helium are controlled strictly. The helium sampling system is installed to measure the impurity concentrations in the helium. The system had a gas chromatograph mass spectrometer and a precision moisture analyzer.

In a long operation, the gas chromatograph mass spectrometer should be stopped to calibrate. It takes a few days and the measurement should be stopped. The system is modified to install another gas chromatograph mass spectrometer to measure the impurities continuously.

The precision moisture analyzer can not indicate correct moisture for long period when too high moisture comes in. The purge procedure of the system when too high moisture is expected and start-up procedure of the precision moisture analyzer are improved for stable measurements.

This report describes maintenance items and improvements of the helium sampling system.

---

Keywords: HTTR , Maintenance , Helium Sampling System , Impurity of Helium

\*Research Staff on Loan

## 目 次

1.はじめに.....	1
2.設備概要.....	2
2.1 1次ヘリウムサンプリング設備.....	2
2.2 2次ヘリウムサンプリング設備.....	3
3.保守管理.....	5
3.1 本体設備.....	5
3.1.1 圧縮機.....	5
3.1.2 主要弁.....	6
3.1.3 主配管.....	6
3.2 計測設備.....	6
3.2.1 ガスクロマトグラフ質量分析計.....	6
3.2.2 電解式微量水分計.....	8
3.2.3 露点式水分計.....	8
3.2.4 放射能検出器.....	9
3.2.5 サンプリングガス切換装置.....	9
3.2.6 試料採取装置.....	10
4.改善事項.....	11
4.1 圧縮機差圧制御基準点の変更.....	11
4.2 圧縮機の追設.....	12
4.3 ガスクロマトグラフ質量分析計の追設.....	13
4.4 微量水分計の運用方法の改善.....	14
5.検討課題.....	16
5.1 データ収録制御用計算機の更新.....	16
5.2 液体窒素トラップの改良.....	16
6.おわりに.....	17
謝辞.....	17

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	System Outline .....	2
2.1	The Primary Helium Sampling System .....	2
2.2	The Secondary Helium Sampling System .....	3
3.	Maintenance and Management .....	5
3.1	The Main Facility .....	5
3.1.1	The Compressor.....	5
3.1.2	The Main Valve .....	6
3.1.3	The Main Piping .....	6
3.2	Measurement System .....	6
3.2.1	The Gas Chromatography-Mass Spectrometer .....	6
3.2.2	The High-Resoluble Moisture Analyzer .....	8
3.2.3	The Dew-Point Aquameter .....	8
3.2.4	The Radioactivity Detector .....	9
3.2.5	The Sampling Gas Switching Equipment .....	9
3.2.6	The Sampling Equipment .....	10
4.	Improvement Items .....	11
4.1	Change of Pressure Control Point of Compressor .....	11
4.2	Addition of Compressor .....	12
4.3	Addition of Gas Chromatography-Mass Spectrometer .....	13
4.4	Improvement on Operating Procedure of the Moisture Analyzer .....	14
5.	Subjects .....	16
5.1	Renewal of Data Acquisition Control Computer .....	16
5.2	Improvement on Liquid Nitrogen Trap .....	16
6.	Conclusion .....	17
	Acknowledgement .....	17

## 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・大洗研究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 は、このような高温の原子炉出口冷却材温度を得るために、炉内構造物に耐熱性に優れた黒鉛構造材を用いており、これらの使用が原子炉の固有の安全性に寄与している。しかしながら黒鉛構造物は、酸化による材料強度の劣化を招く恐れがあるため、HTTR では冷却材であるヘリウムガス中の不純物濃度に、原子炉出口温度に応じた管理目標値を設け、その値を厳しく管理している。

本報は、この不純物濃度を高い精度で測定監視することを目的に設置されている、試料採取設備について、その設備の概要、保守管理の方法、保守管理の中で実施してきた改善事項、さらには今後の検討課題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。また保守管理については、実際の作業内容を要領書等を用いて具体的にまとめ、今後の実務にも活用できるように心掛けた。さらに改善事項については、これまで試料採取設備を運用する中で実施してきた改善事象を、技術と経験を継承する観点からまとめた。最後に検討課題として、今後、さらに効率的で安定した設備運用を行っていく上で実施していく必要がある事項についてまとめた。

## 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 に示す。

一方、構造材として使用されている黒鉛は、耐熱性に優れた特長を有するが、高温域において、冷却材(He ガス)中の微量不純物( $H_2O$ 、 $O_2$  等)により酸化が促進される。同じく構造材として使用されている耐熱金属(主として Ni 基耐熱合金)は、冷却材中の微量不純物( $H_2O$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  等)により、酸化・脱浸炭の進行による強度劣化を引き起こすことが知られている。高温ガス炉では、これらの材料劣化の要因となる冷却材中の微量不純物量を、正確に把握し管理することが、極めて重要となっており、HTTR では、冷却材であるヘリウムガス中の不純物濃度に、原子炉出口温度に応じた管理目標値を設け、その値を厳しく管理している。Table2.2 に1次冷却材中の不純物管理目標値を示す。そこで、HTTR ではこれら不純物量を監視するための設備として、1次ヘリウムサンプリング設備及び2次ヘリウムサンプリング設備を設置している。それぞれの設備は、設工認において、原子炉冷却系統施設のうちの、その他の主要な事項のうちの、試料採取設備として構成されている。1次ヘリウムサンプリング設備の設計条件を Table2.3 に、2次ヘリウムサンプリング設備の設計条件を Table2.4 に示す。

### 2.1 1次ヘリウムサンプリング設備

1 次ヘリウムサンプリング設備の系統図を Fig.2.1 に示す。1次ヘリウムサンプリング設備は、1次冷却設備及び1次ヘリウム純化設備から1次冷却材を採取し、その化学的不純物濃度の測定及び放射能測定を行う設備である。この目的に添って、本設備は、1次冷却材を採取するサンプリング配管、各計測器に導入する1次冷却材を選択するサンプリングガス切換装置、サンプリングした1次冷却材を、1次ヘリウム純化設備に戻す圧縮機と主要弁から構成されている。本設備には同等の性能を有する2台の圧縮機が設置されており、使用中の1台に異常が発生した場合は、自動的に待機側の1台の切り替わるように設計されている。また本設備と1次ヘリウム純化設備を仕切る主要弁は、2台が直列に設置されており、確実に系統の切り離しができるように設計されている。圧縮機の起動停止、主要弁の開閉は、中央制御室のプラント制御装置・オペレーターズステーション(以下、OPS)からの指令により、実行されるようになっている。

系統図に示すように、1次ヘリウムサンプリング設備には、以下の計測器が設置されている。

- 微量水分濃度を計測する電解式微量水分計(水分計1)
- 高水分濃度を検出する露点式水分計(水分計2)
- $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 等を測定するガスクロマトグラフ質量分析計
- $\gamma$ 線、 $\beta$ 線を測定する放射能測定器

これらの計測器のうち、1次冷却材圧力を減圧することなく測定できる、露点式水分計と  $\gamma$ 線検出器

で使用したサンプリングガスは、圧縮機により昇圧し、1次ヘリウム純化設備を通して1次冷却設備に戻している。また、後述するバージ操作におけるプローガスも、同様に、圧縮機により昇圧し、1次ヘリウム純化設備を通して1次冷却設備に戻している。一方、電解式微量水分計、ガスクロマトグラフ質量分析計及び $\beta$ 線検出器で使用したサンプリングガスは、測定機器の耐圧上の理由から、サンプリングガス切換装置内の圧力調節器で、大気圧近傍まで減圧して測定している。そのため、測定後のサンプリングガスは、気体廃棄物の廃棄施設に導いて処理している。原子炉運転時の1次冷却設備からの最も大きなオフガスは、この1次ヘリウムサンプリング設備から排出されるサンプリングガスである。1次冷却材の年間の排出量は、被ばく評価上管理されていることから、これらオフガスを伴う計測器の測定周期は、この年間排出量を守った上で決められている。

各計測器の前段には、サンプリングガスの流路を切り換える電磁弁、サンプリングガスの圧力を調節する圧力調整器、サンプリングガスの流量を調節する質量流量計等で構成されたサンプリングガス切換装置が設置されている。本装置により、原子炉入口、原子炉出口等プラントの各計測点から、サンプリング配管によりサンプリングされた被測定ガスが、各計測器に自動選択されて導かれるようになっている。また本装置は、長い配管経路を有する各サンプリングラインを、サンプリングガスを大量に流すことにより洗浄できるように設計されており、この操作をバージ操作と呼んでいる。計測点を選択する都度このバージ操作を行うことで、被測定ガスが計測器に到達する時間を改善し、各計測器の測定データが早く取得できるようになっている。「計測点選択⇒バージ操作⇒測定⇒計測点選択…」と自動化された一連の動作は、中央制御室のプラント制御装置・OPSからの計測器起動指令により、実行されるようになっている。1次ヘリウムサンプリング設備の計測器毎の計測点と測定周期をTable2.5に示す。

なお、1次ヘリウムサンプリング設備には、燃料からの核分裂生成物の放出挙動評価試験などに使用する目的で、原子炉運転中の1次冷却材を採取する試料採取装置が設置されている。本装置は、グローボックスと試料採取容器で構成されており、サンプリングガス切換装置を経由してグローボックス内に導かれた1次冷却材を、試料採取容器に採取できるようになっている。試料採取容器は、グローボックス内で仕切弁とカップラにより、気密を損なうことなく切り離され、別に設置された核種定量分析装置などで計測できるようになっている。

## 2.2 2次ヘリウムサンプリング設備

2次ヘリウムサンプリング設備の系統図をFig.2.2に示す。2次ヘリウムサンプリング設備は、2次冷却設備及び2次ヘリウム純化設備から2次ヘリウム冷却材を採取し、その化学的不純物濃度の測定及び放射能測定を行う設備である。2次系における化学的不純物濃度の測定は、100%出力運転時における2次ヘリウム不純物濃度を目標値内に管理することにより、2次ヘリウム冷却設備の腐食速度を遅くし、構造健全性、耐久性を保持することを目的に実施している。また放射能測定は、1次冷却材側から2次ヘリウム冷却材側に漏洩する放射能濃度を監視することにより、中間熱交換器(IHX)伝熱管のクラック等の異常を検知することを目的に実施している。この目的に添って、本設備は、2次ヘリウム冷却材を採取するサンプリング配管、各計測器に導入する2次ヘリウム冷却材を選択するサンプリングガス切換装置、サンプリングした2次ヘリウム冷却材を、2次ヘリウム純化設備に戻す圧縮機と主要弁から構成されている。本設備にも同等の性能を有する2台の圧縮機が設置されており、1次ヘリウムサンプリング設備と同様に、使用中の1台に異常が発生した場合は、自動的に待機側の1台の切り替わるように設計されている。また、本設備と2次ヘリウム純化設備の系統を切り離す主要弁が1台設置されている。

圧縮機の起動停止、主要弁の開閉は、1次ヘリウムサンプリング設備と同様に、中央制御室のプラント制御装置・OPSからの指令により、実行されるようになっている。

系統図に示すように、2次ヘリウムサンプリング設備には、以下の計測器が設置されている。

- 高水分濃度を検出する露点式水分計(水分計1)
- 微量水分濃度を計測する電解式微量水分計(水分計2)
- CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>等を測定するガスクロマトグラフ質量分析計
- γ線を測定する放射能測定器

これらの計測器のうち、2次ヘリウム冷却材圧力を減圧することなく測定できる、露点式水分計とγ線検出器で使用した試料は、1次ヘリウムサンプリング設備と同様、ページ操作におけるブローガスとともに、圧縮機により昇圧し、2次ヘリウム純化設備を通して2次ヘリウム冷却設備に戻している。また、サンプリングガス切換装置内の圧力調節器で、大気圧近傍まで減圧して測定している電解式微量水分計及びガスクロマトグラフ質量分析で測定した試料は、原子炉建家Ⅰ系換気空調装置を通して屋外に排気している。

2次ヘリウムサンプリング設備の機能及び一連の動作は、1次ヘリウムサンプリング設備と同様であり、中央制御室のプラント制御装置・OPSからの起動指令により、実行されるようになっている。なお、2次ヘリウムサンプリング設備の各計測器の基本仕様及び各計測器の外観は、1次ヘリウムサンプリング設備と同様である。2次ヘリウムサンプリング設備の計測器毎の計測点と測定周期を Table2.6 に示す。

### 3. 保守管理

試料採取設備は、1次ヘリウムサンプリング設備、2次ヘリウムサンプリング設備とも、本体設備と計測設備に大別される。本体設備は、系統の He ガスを採取するための主配管、測定後の He ガスを系統に戻すための主要弁および圧縮機で構成されている。計測設備は、計測器である水分計、ガスクロマトグラフ質量分析計、放射能検出器、各計測器に複数点のサンプリングガスを分配するサンプリングガス切換装置で構成されている。本体設備および計測設備のうち水分計及び放射能検出器については、施設定期検査毎に保守管理を実施している。これ以外の計測設備については、原子炉の運転に合わせ、使用の都度必要な校正や点検を実施している。それぞれの機器の主要な仕様および保守管理に関する作業は、以下のとおりである。

#### 3.1 本体設備

##### 3.1.1 圧縮機

圧縮機は、1次ヘリウムサンプリング設備、2次ヘリウムサンプリング設備それぞれに各2台ずつ設置されており、サンプリングした冷却材を、それぞれの純化設備を通して系統に戻すために設置されている。いずれの圧縮機も、圧縮機戻し弁を自動制御することで、1次または2次ヘリウム純化設備ガス循環機入口圧力に対して、圧縮機入口圧力が、0.2MPa 低くなるように運転されている。戻し弁の自動制御により、圧縮機入口圧力の制御基準点を、プラントで最も圧力の低いヘリウム純化設備ガス循環機入口とすることで、全てのサンプリング点に対して、安定な必要流量が確保されるようになっている。なお、圧縮機2台のうちの1台は、運転中の1台のバックアップとして、待機状態で使用される。圧縮機の設計条件及び設計仕様を Table3.1 に、その外観を Photo3.1～3.2 に示す。

圧縮機の保守管理は、施設定期検査ごとの分解開放点検により実施している。分解開放点検は、圧縮機本体ではピストン部を分解し、ピストンリング、ピストンロッド、グランドパッキン等の磨耗状態、オイルシール、バリシール等の磨耗状態、フィルタ類の目づまり状態、吸入弁、吐出弁の付着物及び機能状態、各種オイルの汚れ状態等を確認するものである。また、構成部品、圧縮機内部の清掃、点検を行い、カーボン系、テフロン系部品及びパッキン類は、予防保全を考慮し必要に応じ交換している。さらに、圧力計、差圧計等計器の校正を行い、規定の精度を確認するとともに警報点の確認も同時に行っている。また、圧縮機の駆動用及びシールオイルポンプ用電動機に関しては絶縁抵抗を測定し、回路の絶縁状態を確認している。これまで行ってきた分解開放点検においては、構成部品の著しい磨耗等ではなく、定期的な部品交換を行うことで、原子炉運転中に、圧縮機の故障及び性能低下により、設備の機能喪失に至ることはなかった。また、1次冷却材を内包する1次ヘリウムサンプリング設備圧縮機の分解は、放射能汚染防護用グリーンハウスを設置して、核分裂生成物が飛散しないような対策を講じている。さらに、圧縮機開放時には各構成部品について放射能濃度を測定し、1次冷却材による汚染レベルを把握して、従事者が被爆しないようにしている。また、2次ヘリウムサンプリング設備圧縮機の分解開放点検でも、1次ヘリウムサンプリング設備と同様の方法により行っているが、2次系では放射能汚染がないため、防護措置としてのグリーンハウスではなく、防護用柵により行っている。

これまで運転経験を積んできた中で、圧縮機運用上、懸念される事項として、シールオイルがリークする事象がある。Fig.3.1 にピストンロッド部シール方法詳細図を、Fig.3.2 にロッドシール組立図

を示す。圧縮機のロッドシール部は、バリシール、スライドリング、オイルシールで構成しており、シールオイルによりオイル／ガスの圧力バウンダリを形成している。ピストンロッドはシールオイルを境界として、大気圧の下部ディスタンスピースと高圧の上部ディスタンスピース間を摺動しており、表面には油膜が形成されているが、バリシールが何らかの原因により変形、磨耗した場合、漏えいしたシールオイルはピストンロッドを伝わり、リークオイル溜めに貯留される仕組みになっている。シールオイルの液位低下は、圧縮機のトリップ信号であり、圧縮機運転中は運転員が目視により液位を監視している。リークを判断するには、シールオイル油面計による液位の低下と、リークオイル溜めに貯留される量であり、圧縮機運転中にシールオイルがリークした場合には運転員が手動により補給を行っている。これまでに行ってきた原因調査から、圧縮機のシールオイル漏れは、バリシールの変形、磨耗が原因であることが判明したため、今後はバリシールの構造変更を行い、シールオイル漏れ対策を行っていく予定である。

### 3.1.2 主要弁

主要弁は、1次ヘリウムサンプリング設備に2台、2次ヘリウムサンプリング設備に1台設置されており、ヘリウムサンプリング設備とそれぞれの純化設備の系統を隔離するために設置されている。ヘリウムサンプリング設備稼働中は、いずれの主要弁も、開状態で使用される。主要弁の設計条件及び設計仕様を Table3.2 に、その外観を Photo3.3～3.4 に示す。

主要弁の保守管理は、外観検査及び作動検査により実施している。外観検査は機能を害する傷、打こん、クラックがないことを目視により確認している。また、作動検査は、中央制御室からの指令により、開及び閉時に円滑に作動することを確認している。これまでには、ヘリウムガスの外部へのリーク及び弁座シートリーク等の不具合事象は発生していない。

### 3.1.3 主配管

主配管は、1次ヘリウムサンプリング設備、2次ヘリウムサンプリング設備とも、原子炉格納容器を貫通するサンプリング配管と、圧縮機廻りの配管に大別される。主配管の設計条件及び設計仕様を、Table3.3 に示す。

主配管の保守管理は、外観検査により実施している。外観検査は、機能を害する傷、打こん、クラックがないことを目視により確認している。これまでに主配管の異常は発生していない。

## 3.2 計測設備

### 3.2.1 ガスクロマトグラフ質量分析計

ガスクロマトグラフ質量分析計(以下、GC/MS)は、有機化合物の定性、定量を目的とした分離装置で、ガスクロマトグラフの吸着剤を充填したカラムにより、多成分系試料を成分毎に分離する機能と、質量分析装置のイオン化した試料ガスの質量スペクトルを測定する機能を結合した装置で、試料量が微量で複雑な組成試料の分析に適している。GC/MSの仕様を Table3.4 に、その外観を Photo3.5 に示す。

GC/MSは、1次ヘリウムサンプリング設備に2台、2次ヘリウムサンプリング設備に1台設置されている。1次ヘリウムサンプリング設備の1台は、バックアップとして設置されており、使用中のGC/MSが測定不能状態になったとき、手動で切り換えて計測できるようになっている。

GC/MSの計装系統図を Fig.3.3 に示す。図に示すように、各GC/MSで測定した化学的不純物濃

度は、非管理区域のH-124 室に設置されたデータ収録制御用計算機に収録されるとともに、現場制御盤を経由してプラント制御装置に伝送され、OPSのCRT上に表示される。また、GC/MSの測定開始指令も、本OPSから実行される。測定開始後の自動計測スケジュールを、Fig.3.4に示す。

GC/MSの最も重要な保守管理は、原子炉起動前に実施する調整作業である。本作業の中で最終的に実施する感度校正により、GC/MSの測定状態を整えて、原子炉運転に入る。初期には、原子炉運転時に予想される1次冷却材の不純物濃度を想定した標準ガスを用いた感度校正を実施し、原子炉停止までの期間は、この感度を用いて分析を行ってきた。しかし、出力上昇試験のなかで、使用時間とともに低下する校正感度を、原子炉停止後確認した結果、原子炉運転中に要求される精度を維持できないことが分かった。このため、測定期間中の感度の信頼性を高い状態で維持できるよう、自動測定の中で、逐次、標準ガスによる自動校正を実施する方式に変更し、現在はこの運用方式で、良好な測定結果を得ている。また、極めて微小な不純物濃度を計測するために、GC/MSで使用するキャリアガスである高純度ヘリウムガスを、Fig.3.5に示す液体窒素トラップで精製している。以下に GC/MS の調整作業内容を示す。

#### (1)部品交換

GC/MSの構成部品については、これまで分析計を運用してきた中で、装置を精度良く健全に維持していくために予防保全の観点から、以下の部品を交換している。

- ① イオン源フィラメント
- ② チャンネルトロン
- ③ 真空計球フィラメント
- ④ ロータリーポンプ(真空ポンプ)オイル

#### (2)ベーキング・エージング

分析計の性能を維持するために、部品交換を行った場合に、以下の構成部品のベーキング・エージングを行っている。これにより分析チャンバー内の吸着ガスを減少し、バックグラウンドピークを少なくし、イオン源からの放出ガスを少なくすることにより、高い検出感度が得られる。

- ① LN2 トラップ
- ② 分析チャンバー
- ③ イオン源
- ④ ガスクロマトグラフ部カラム・切換バルブ

#### (3)点検・調整

制御電源部であるコントロールユニット及び RF ユニットの電圧チェック、各部動作チェック及び測定波形調整を行い、正常動作であることを確認している。

##### ① 標準ガスによる校正

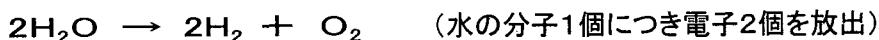
部品交換、点検・調整終了後に、既知濃度の標準ガス(ヘリウムベース、7成分)を測定し、最小検出感度を測定して各成分のリテンションタイム確認を行い、測定パラメータを設定している。

##### ② 実ガス測定

標準ガスによる校正終了後、プラント制御装置・OPS から GC/MS を起動し、正常に起動できることの確認及び測定データの確認を行い、校正データを用いた実ガス測定が正常に行われることを確認している。この測定は HTTR の原子炉運転準備が終了後に可能となる。

### 3.2.2 電解式微量水分計

微量水分を測定する水分計には、ppb レベルの水分を迅速に測定できる、電解式微量水分計を採用している。この水分計の検出部は、五酸化リン( $P_2O_5$ )の薄層フィルムを吸湿材としてコーティングしたセル壁に、純プラチナ製の不活性電極を、マトリックス状に埋め込んだ構造となっている。このセル壁で吸収されたサンプルガス中の全水分は、電極に印可された直流電圧により、次のように電気分解される。



電解法は、この際発生する電子(電流量)が水分量と正比例の関係にあることを測定原理としている<ファラデーの法則>。従って本水分計は、基準ガスを使用せず、ppb レベルの水分濃度を精度良く測定でき、また被測定ガス中の水分を除く不純物の影響を受けないことを特徴としている。微量水分計の仕様を Table3.5 に、その計器外観を Photo3.6 に、検出部外観を Photo3.7 に示す。

### 3.2.3 露点式水分計

露点式水分計(露点計)は、通常運転時において、加圧水冷却器あるいは補助冷却器の伝熱管の破損を検出することを主な目的として設置されている。従って本設備では、ガス中の高い絶対湿度を連続測定できるように開発された、広い測定範囲を有する露点計を採用している。露点計の仕様を Table3.6 に、露点計センサーの構造を Fig.3.6 に、検出部外観を Photo3.8 に示す。

この露点計の検出部には、セラミック基部上に、多孔質酸化アルミの吸着層を蒸着したセラミックセンサーが用いられており、この吸着層をサンドイッチにした電極間のアドミタンスが、露点に対応し変化することを測定原理としている。従ってこのセンサーは、雰囲気中の水蒸気分圧の変化を直ちに電気的変化として取り出すことができ、応答速度が早いこと、また耐食性に優れていることを特徴としている。しかし、ヘリウムサンプリング設備に組み込んだ露点計の応答性は、上記の仕様以上に、サンプリングガス切換装置を含む測定系に吸着した湿分の影響を受けていることが、露点計の測定結果から分かった。露点計は前述のとおり、伝熱管の破損を検出することを目的に設置されていることから、通常の使用は自動測定モードで支障がないが、正確な水分濃度を知りたい場合は、手動測定モードで測定する必要がある。

なお、水分濃度は、測定した露点温度における飽和水蒸気圧を、大気圧換算して求める。HTTR では、系統ガスを減圧することなく露点計に導いているため、求めた飽和水蒸気圧を系統圧力で除して水分濃度を求めており。露点－水分濃度の相関図を Fig.3.7 に示す。また、代表的な測定値に対する精度及び感度を Table3.7 に示す。

電解式微量水分計及び露点式水分計の保守管理は、施設定期検査ごとに行っており、点検・校正及び調整を実施し、常に良好な作動状態に維持管理するために実施するものである。点検・校正項目は、電解式微量水分計ではアンプ部特性確認、外部出力確認を行い、所定の精度であることを確認している。また、検出部である電解セルは、予防保全の観点から定期的に交換している。露点式水分計では露点特性確認、外部出力確認を行い、所定の精度であることを確認している。また、検出部である露点センサーについても、予防保全の観点から定期的に交換している。

しかし、電解式微量水分計については点検・校正後に、計測を行わない待機状態にしておくと、水分指示値が徐々に上昇して行き、レンジオーバーになる事象が起きていた。これはサンプリング配管及びサンプリングガス切換装置内の配管内部に吸着されていた高濃度の湿分が、長時間にわたり放出され、徐々に電解セルに吸着したため起こったものであると思われた。通常電解セルは、

常時通電及びガスの流通がないと、感度が低下してしまう。この点検・校正は、原子炉起動前に実施するため、一度このような事象が起きてしまうと、電解セルを再交換する必要があるため、電解式微量水分計の入口、出口及びバイパスラインに仕切弁を追加して閉とすることにより微量水分計をヘリウム雰囲気にし、原子炉停止中は計器と系統を隔離することにした。この運用方法により、電解セルの健全性及び信頼性が維持できることを確認している。

### 3.2.4 放射能検出器

放射能検出器は、1次ヘリウムサンプリング設備では $\gamma$ 線検出器と $\beta$ 線検出器を、2次ヘリウムサンプリング設備では $\gamma$ 線検出器のみを使用している。 $\gamma$ 線検出器の仕様をTable3.8に、 $\beta$ 線検出器の仕様をTable3.9に、放射能検出器監視盤の仕様をTable3.10に、また計器外観をPhoto3.9.～3.11に示す。

1次ヘリウムサンプリング設備・放射能検出器の警報設定値をTable3.11に示す。警報設定値は30MW単独運転(H13.10.23～12.14)時の計測値を基に、最大計測値の10倍に設定し、運用している。

2次ヘリウム放射能は、2次ヘリウムサンプリング設備 $\gamma$ 線検出器を用いて検出している。本計装は、1次冷却材側より2次ヘリウム冷却材中に漏洩した放射能濃度を測定することにより、中間熱交換器(IHX)伝熱管クラック等の異常を早期に検知することを目的に設置している。

2次ヘリウムサンプリング設備・放射能検出器の警報設定値をTable3.12に示す。警報設定値は、原子炉施設保安規定で定める本体施設の警報装置の作動条件である、「2次ヘリウム放射能高」に該当し、「通常運転時の放射能濃度の2倍以上。ただし、単独運転時を除く。」とされている。そこで、定格・並列運転時の計測値のヒストグラムから、並列運転を通して、2次ヘリウム放射能濃度の測定値が、一定の幅で安定しており、原子炉の運転による影響は受けていないことを確認し、通常運転時の放射能濃度の2倍に設定し、運用している。

各計器の保守管理は、施設定期検査ごとに、校正及び調整を実施し、常に良好な作動状態に維持管理するために実施するものである。 $\gamma$ 線検出器については、標準線源を用いたゲイン確認、 $\beta$ 線検出器については感度確認を行うとともに、測定部である低圧・高圧電源モジュールの出力電圧精度確認、アンプディスクリモジュールの総合直線性確認、シングルチャンネル波高分析モジュールのダイヤル目盛直線性確認、デジタル濃度モジュール及び計数率モジュールの指示精度及び時定数確認及び警報確認を行い、所定の精度であることを確認している。これらの点検校正作業により、各検出器が正常な作動状態にあることを確認している。また、これまでの原子炉運転において、1次及び2次ヘリウムサンプリング設備での放射能レベルはバックグラウンド値であり、放射能は検出されていない。

### 3.2.5 サンプリングガス切換装置

1次ヘリウムサンプリング設備のサンプリングガス切換装置系統図をFig.3.8に、2次ヘリウムサンプリング設備のサンプリングガス切換装置系統図をFig.3.9に示す。また、サンプリングガス切換装置の仕様をTable3.13に、その外観をPhoto3.12～3.13に示す。

サンプリングガス切換装置は、サンプリングガスの流路を切り換える電磁弁、サンプリングガスの圧力を調節する圧力調節器、サンプリングガスの流量を調節する質量流量計で構成されている。サンプリングガス切換装置の保守管理は、施設定期検査ごとに、自主点検として電磁弁の絶縁抵

抗測定及び作動検査により実施している。作動検査は、非管理区域である H-124 室に設置される、制御盤内の操作パネルからの開閉指令により、円滑に作動することを確認している。絶縁抵抗測定は、同じく制御盤内の遮断器から電磁弁までの絶縁抵抗値を測定し、回路の絶縁状態を確認している。

### 3.2.6 試料採取装置

試料採取装置・手サンプリング系統構成図を Fig.3.10 に、その外観を Photo3.14 に示す。

試料採取装置であるグローブボックスは、1次冷却材を手動でサンプリングすることを目的に設置されており、グローブボックス本体、サンプリング容器を搬入するパスボックス及び真空ポンプ、気送ポンプで構成されるポンプボックスで構成している。試料採取装置の保守管理は、自主点検として、機能検査により実施している。機能検査は、グローブボックス内に設置されている排気ファンを運転した状態で、グローブからの操作が支障なくできること、また、グローブを装着した状態で、ボックス内が規定の圧力範囲であること、パスボックスからサンプリング容器の出し入れが支障なく出来ることを確認している。

#### 4. 改善事項

これまで試料採取設備である1次ヘリウムサンプリング設備及び2次ヘリウムサンプリング設備を運用する中で、不具合事象に伴う改善や設備のより安定した運用を目的とした改善を実施してきたので、主要な改善事項について以下に纏めた。

##### 4.1 圧縮機差圧制御基準点の変更

試料採取設備を設置した後のサンプリング手順確認試験において、1次ヘリウム純化設備コールドチャコールトラップ(以下、CCT)出口サンプリング点からのサンプリングガス流量が、十分確保できないことが判明した。本事象に対する対策として、圧縮機の差圧制御を行う圧力基準点を、適切な箇所に変更することで、設備の改善を図った。

###### (1)経緯

サンプリング手順確認試験において、1次ヘリウム純化設備CCT出口サンプリング点からのサンプリングガス流量が採れないことが判明した。同一のラインから分岐している燃料破損検出装置(以下、FFD)のバージガスを停止した結果、サンプリング設備側へのサンプリングガスは流れようになるが、規定のガス流量に満たないことが確認された。なお、本系統から冷却材をサンプリングしている計測器は、ガスクロマトグラフ質量分析計と $\gamma$ 線検出器の2台である。

###### (2)調査

本事象の発生原因は、当初、CCT出口圧力と圧縮機入口圧力の差が小さいことに加え、同一ラインからサンプリングしているFFDの圧縮機の能力が大きいため、サンプリング設備側で必要な流量が確保できないためと考えられたが、その後の調査の結果、以下のことを確認し、対策を実施した。

まず、本事象の発生原因を確認するために、「1次ヘリウム純化設備CCT出口サンプリング点のガス圧力と1次ヘリウムサンプリング設備圧縮機入口のガス圧力の差」をパラメータにとりサンプリングガス流量を計測した。確認試験の結果、基準としている1次加圧水冷却器出口ガス圧力からCCT出口サンプリング点までの圧力損失が、設計で想定した0.12MPaを超えており、従って、CCT出口サンプリング点と圧縮機入口のガス圧力の差が小さいことが、必要流量を確保できない原因と確認された。

###### (3)対策

対策として、差圧0.2MPaを大きな値(0.3MPa)に変更するか、もしくは、圧力基準点を、全サンプリング点のなかで唯一必要流量が確保できなかったCCT出口サンプリング点近傍(1次ヘリウム純化設備G/C入口圧力)に移すことにより、本事象が改善できることが分かった。検討の結果、圧力制御基準点とサンプリング圧縮機入口の差圧0.2MPaは、定格運転時における1次系圧力分布の設計データから各サンプリング点の圧力を算出するとともに、各サンプリング点からのサンプリング系統の圧力損失(配管、弁、計測機器類による圧力損失の総和)を考慮して決められていることが分かった。そこで、圧力制御基準点と圧縮機入口圧力との差圧を、必要以上に大きくると、各測定器の流量調節計の調節限界を超える可能性があることから、「必要流量を確保できる範囲でできるだけ小さな値」とする方針に基づき、後者の措置を採用した。

###### (4)結果

本対策の妥当性及びFFDのバージガス流量の影響がないことを、その後実施した確認試験(2)の

中で、全てのサンプリング点の流量を記録計により記録することにより、規定の流量が確保できることを確認した。なお、本変更に伴う影響の範囲は、1次ヘリウムサンプリング設備サンプリング系統に限られおり、他設備への影響がないことも、併せて確認した。

#### 4.2 圧縮機の追設

設計及び工事の進捗に伴う系統別・総合機能試験及び確認試験を行うなかで、それまで1台で運用してきた2次ヘリウムサンプリング設備の圧縮機に、既設の圧縮機と同等の性能を有する圧縮機を予備機として設置し、2次ヘリウムサンプリング設備に係わる測定を安定して行うことが、2次ヘリウムサンプリング設備を円滑に運用する上で必要となり、予備機の設置に係わる変更申請を行い、圧縮機を新たに1台設置した。

##### (1) 設置の目的

2次ヘリウムサンプリング設備の円滑な運用が妨げられる要因としては、水分計及びガスクロマトグラフ質量分析計の検出素子の故障と圧縮機の故障が考えられる。このうち、検出素子の故障については、検出素子を予備品と交換することにより、比較的短時間に復旧が可能であるため、特に問題とはならない。しかし、圧縮機の故障については、その故障内容により、材料部品の手配を含め、復旧に長時間を要する可能性がある。この場合は、試料採取装置からの手動操作に切り替え、測定・監視を継続することにより、原子炉の安全性を確保することとしている。ただし、手動操作による測定には、人的負担の増加等が伴い、状況により原子炉を停止することもある。そこで、それまで、2次ヘリウムサンプリング設備の圧縮機は1台で運用してきたが、2次ヘリウムサンプリング設備に係わる測定を安定して行うために、既設の圧縮機と同等の性能を有する圧縮機を予備機として設置することとした。

##### (2) 設置許可及び設工認との関連

本件の実施により設置許可本文及び添付書類の記載に変更はなかった。但し、設工認の原子炉冷却系統施設(その2、その3)のうち下記図書の変更を申請し、認可を受けて実施した。

本-3-7-3 図-1.2 試料採取設備2次ヘリウムサンプリング設備の申請範囲

本-3-7-6 3.2 設計仕様

本-3-10-3 図-1.2 試料採取設備2次ヘリウムサンプリング設備の申請範囲

本-3-10-9 3.2 設計仕様

添付計算書 図-3.1 強度計算箇所

##### (3) 設置の効果

2次ヘリウムサンプリング設備を2台の圧縮機により運用できるようになり、1台の圧縮機が停止した場合でも、予備機に切り換えて、設備の円滑な運用が維持できるようになった。また、定期点検における圧縮機の分解点検も、予備機の存在で、圧縮機の稼働時間を考慮した上で必要な点検項目を取捨選択できるようになり、実効的内容とすることができるようになった。

#### 4.3 ガスクロマトグラフ質量分析計の追設

HTTRでは、黒鉛構造材に対する構造健全性を維持するために、原子炉出口ガス温度に応じて、1次冷却材中の化学的不純物濃度を、不純物の種類毎に厳しく規定している。このため、1次冷却設備及び1次ヘリウム純化設備の複数の測定点から採取した1次冷却材を、ガスクロマトグラフ質量分析計及び水分計で順次、自動的に分析することにより、設備全体の化学的不純物濃度を監視している。当初この分析は、1台のガスクロマトグラフ質量分析計及び2台の水分計で行ってきたが、その運用実績の中で、ガスクロマトグラフ質量分析計をもう1台追設し、設備の円滑な運用を図ることとした。

##### (1)設置の目的

本設備で使用しているガスクロマトグラフ質量分析計は、高い分解能をもつ分析計であるが、真空容器である分析チャンバー内に、イオン源フィラメントを内蔵する構造であることから、使用状態が長期に及ぶ場合は、イオン源の汚れ、フィラメントの消耗等による分解能の低下は避けられない。このような状態になった場合は、分析チャンバーを解放し、フィラメントを交換した後、イオン源を清浄な状態に戻すためのイオン源の焼き出し作業を実施する必要がある。また、吸着材の劣化によるリテンションタイムのずれが、許容できる値を超えた場合も、装置を停止し、吸着材を内包するカラムのエージングを実施する必要がある。いずれの場合も、一連の作業で停止した装置を、元の正常な状態に戻すためには、数日間を要する。従って、1台のガスクロマトグラフ質量分析計で運用し、このような状態に至った場合、1次冷却材中の化学的不純物濃度の監視は、水分濃度を除いて中断せざるを得ない。

そこで、既設ガスクロマトグラフ質量分析計と同等の性能を有するガスクロマトグラフ質量分析計をもう1台設置し、かかる状況でも、化学的不純物濃度の測定を継続して行えるようにした。

##### (2)設置許可及び設工認との関連

ガスクロマトグラフ質量分析計の追加設置により、設置許可本文及び添付書類の記載に変更はなかった。但し、設工認の試料採取設備・1次ヘリウムサンプリング設備及び計測制御系統施設のうち、下記図書の一部に変更が発生した。

本-3-10-2 図-1.1 試料採取設備・1次ヘリウムサンプリング設備の申請範囲

添付計算書 1次ヘリウムサンプリング設備主配管の強度計算書

本-4-19 安全保護系以外のプロセス計装の表

本-4-50 図-3.17 1次ヘリウムサンプリング設備・計測制御系統図

##### (3)設置の効果

2台のガスクロマトグラフ質量分析計を設置することにより、1台のガスクロマトグラフ質量分析計のメンテナンス等による停止期間中も、化学的不純物濃度の継続監視が可能になることから、1次ヘリウムサンプリング設備の円滑な運用が可能になった。また、ガスクロマトグラフ質量分析計の校正は標準ガスを用いて実施しているが、同一の化学的不純物濃度組成を持つ実ガスを、2台のガスクロマトグラフ質量分析計でクロスチェックすることが可能となり、より信頼性のおけるデータ採取がきるようになった。

#### 4.4 微量水分計の運用方法の改善

HTTR では冷却材中の微量不純物量を、正確に管理することが求められており、水分濃度の測定に微量水分計を用いている。本計器は、その特性上極めて慎重な取扱いが求められており、特にプロセス計装機器として用いる場合は、相当な注意を持って使用する必要があることが、運用実績で分かった。その経験から、使用状況に合わせた運用方法を確立し、安定した計測を実施することとした。

##### (1)経緯

RS-2 運転サイクルにおいて、1次ヘリウムサンプリング設備の電解式微量水分計が、測定開始直後から、測定範囲を越える水分濃度を示し続け、その後までに長時間を要する事象が発生した。本事象は、サンプリングラインを含む水分測定系に、多量の湿分が吸着した状態で、微量水分計を起動したために発生したと考えられた。そこで、それまでの運転で得られた微量水分計の応答特性を踏まえた運用方法について整理するとともに、この経験を生かした運用方法の改善を実施することとした。

##### (2)特性の確認

微量水分計は、検出部センサーに極めて吸着能力の高い五酸化リンを用いている。このため、乾燥状態から湿り状態へのセンサーの応答は早いが、反対に、湿り状態から乾燥状態へのセンサーの応答は遅い。これは、スポンジが水分を容易に吸うが、乾燥させるのに時間がかかることで説明される。しかし、サンプリング設備に組み込んだ水分計は、それ以上に、サンプリングラインに吸着した湿分の影響が大きいことが、測定状態における微量水分計の応答速度の測定から分かった。微量水分計の水分濃度を、1ppm 近傍で変化させた場合の水分計の応答を確認したところ、最終値の 90% 到達時間は約 3 時間、最終値には、6~10 時間程度要していることが分かった。従って、微量水分濃度を正確に測定しようとする場合は、測定対象点からのガスサンプリングと測定を自動的に行う自動測定モードを、測定点を固定した手動測定モードとともに、測定中もページ操作を継続して実施し、サンプリングラインに吸着した湿分の影響を取り除く必要があることが分かった。

##### (3)運用方法の改善

RS-2 運転サイクルの事象は、その運転が、循環機フィルタ交換に伴う 1 次系開放及び 1 次冷却材漏えい検査に伴う新ヘリウム充填直後の運転であり、原子炉起動時には 1 次系内の水分濃度が高い状態であったことが、大きな要因であったと考えられる。すなわち、水分濃度が高い状態で 1 次ヘリウムサンプリング設備を起動したため、サンプリングラインと微量水分計に吸着した湿分が、長時間に渡って放出し続けたものと考えられる。各点のサンプリング配管( $6.35\phi^{00}$ )の長さは数十 m に及ぶことから、このように系統内に高い水分濃度の残留が予想されるケースでは、事前に、湿分の低いガスによるサンプリング系統内の十分なページ操作を行う必要があることが分かった。そこで、微量水分計については、本事象発生後、以下の手順で運用することとした。

- 1) 微量水分計測定開始前に、CCT 入口サンプリング配管ヒータを ON するとともに、サンプリングガス切換装置のマスフローメータ(MC5)流量設定値を0とする。
- 2) 微量水分計を自動起動し、サンプリング配管、サンプリング切換え装置内に吸着した水分を、系統ガスで除去するためのページ操作を実施する。
- 3) 自動起動した露点計の水分濃度測定値が全て 10ppm 以下になり、本体設備内の水分濃度が十分下がったことを確認した後、微量水分計の自動測定を停止し、測定点を「原子炉入口」等測

定対象点に固定する。

- 4) 微量水分計の指示値の変化を確認しながら、マスフローメータ(MC5)の流量設定値を、規定値(0.028Nm<sup>3</sup>/h)までゆっくり増加させる。
- 5) 水分計の指示値が、20ppm を越えるようであれば、その時点で測定を中断し、マスフローメータ(MC5)流量設定値を0とし、再度ページ操作を実施する。
- 6) 原子炉運転前に、CCT 入口サンプリング配管ヒータは OFF とする。

## 5. 検討課題

今後、さらに効率的で安定した試料採取設備の運用を行っていく上で、近い将来実施していく必要がある事項について纏めた。

### 5.1 データ収録制御用計算機の更新

HTTRでは、1次ヘリウムサンプリング設備及び2次ヘリウムサンプリング設備に、計3台のガスクロマトグラフ質量分析計を設置し、1次冷却設備と1次ヘリウム純化設備から採取した1次冷却材及び2次ヘリウム冷却設備と2次ヘリウム純化設備から採取した2次冷却材の化学的不純物濃度の測定を行っている。ガスクロマトグラフ質量分析計の測定データは、Fig.3.3 ガスクロマトグラフ質量分析計・計装系統図に示すように、データ収録処理システムを構成する2台のデータ収録制御用計算機に送信されて、収録処理されるとともに、現場制御盤を介して上位のプラント制御装置に転送されている。これらのシステムは、原子炉運転中、規定の測定感度を維持しながら、安定して稼動することが要求されている、重要な測定系の一つとなっている。

本システムで現在使用しているデータ収録制御用計算機のソフトウェアは、PC9801 アーキテクチャ(Windows95)対応のソフトウェアである。このため、DOS/V 機に移行した現状では、PC9801 に関する部品供給の保証が得られず、システムにハードウェア上の故障が発生した場合、システムの運用が困難となることが予見される。そこで、今後、DOS/V 機に対応したシステムにハードウェア及びソフトウェアを更新し、ガスクロマトグラフ質量分析計のデータ収録処理システムの信頼性を確保する必要がある。またガスクロマトグラフ質量分析計本体を制御している計算機システムについても、設置からの経過時間を考慮し、予防保全的観点から、計画的に更新していく必要がある。

### 5.2 液体窒素トラップの改良

ガスクロマトグラフ質量分析計は、化学的不純物濃度を高い分解能で分析する分析計であるが、ガスクロマトグラフ質量分析計は、測定中、超高純度ヘリウムガスをキャリアガスとして必要とする。そのため、本設備には高純度ヘリウムガス中の不純物を除去する、液体窒素トラップが、1次ヘリウムサンプリング設備及び2次ヘリウムサンプリング設備に1台ずつ設置されている。

液体窒素トラップは、液体窒素で冷却したカラムにヘリウムガスを流し、ヘリウムガス中の不純物を捕獲する。従って、消費される液体窒素のレベルを一定範囲に保つよう、レベルコントローラと自動弁により自動制御されている。しかしながら、液体窒素トラップの容量が少ないと、液体窒素の供給時に発生する液体窒素の液面変動により、カラムで捕獲した不純物がヘリウムガス中に再放出されることがある。その事象がガスクロマトグラフ質量分析計の計測動作と重なった場合、検出感度を低下させる恐れがあることが、設備の運用の中で明らかになった。そこで、1次ヘリウムサンプリング設備の液体窒素トラップについては、Fig.3.5に示すように、液体窒素トラップの容器を真空断熱型にして、液体窒素の消費量を改善するとともに、容器の容量を増やし、液体窒素供給時の液面変動を少なくした。

同様の改良を、2次ヘリウムサンプリング設備の液体窒素トラップにも実施し、安定したデータ収録に結び付けていく必要がある。

## 6. おわりに

HTTR は炉内構造物である黒鉛の酸化防止を主眼として、冷却材中の不純物濃度に、原子炉出口温度に対応した厳しい管理目標値を設け、その値を超えないように制御しながら運転している。これを支える試料採取設備は、プラント設備でありながら、実験室レベルの分解能と測定精度を備えた計測機器を、長期間安定した状態で運用することが要求されている。特に電解式微量水分計やガスクロマトグラフ質量分析計については、多数の計測点を対象とした冷却材中の不純物濃度を、高い精度で測定することが求められ、様々な工夫や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、本体設備及び計測設備それぞれについて、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、これまで試料採取設備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、試料採取設備に関する図表類も、できるかぎり添付するよう努めたつもりである。本報が、新しく HTTR の保守管理業務に携わる従事者に、有用な教材となることを希望する。

高温ガス炉システムの実用化に向けた高温機器の長寿命化の課題として、冷却材中の微量不純物組成による、高温機器の材料劣化の問題が指摘されている。今後このような実用的課題に取り組んでいく上で、不純物組成や濃度についてより正確に測定する技術が、ますます求められものと考えており、引き続き試料採取設備における基礎技術の構築を目指すものである。

## 謝辞

本報告書をまとめるにあたり、貴重な御助言を頂いた 小森芳廣 高温工学試験研究炉部長、川崎幸三 同部次長、中澤利雄 同部次長、藤本望 原子炉主任技術者並びに水島俊彦 HTTR 運転管理課長 に深く感謝致します。

また、HTTR 運転管理課の方々による着実な業務の遂行により保守管理を確実に実施することができました。関係者に感謝致します。

Table2.1 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 <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)
主冷却回路数	1 ループ(中間熱交換器及び加圧水冷却器)

Table2.2 1次冷却材中の不純物濃度の管理目標値(vol ppm)

不純物	原子炉出口温度(°C)			
	400 以上 600 未満	600 以上 700 未満	700 以上 800 未満	800 以上
H <sub>2</sub> O	200	20	2	0.2
H <sub>2</sub>	3000	300	30	3
O <sub>2</sub>	20	2	0.2	0.04
N <sub>2</sub>	200	20	2	0.2
CH <sub>4</sub>	500	50	5	0.5
CO	3000	300	30	3
CO <sub>2</sub>	600	60	6	0.6

Table2.3 1次ヘリウムサンプリング設備の設計条件

耐震クラス	B(S1) (但し、気体廃棄物の廃棄設備へ接続される減圧弁下流側はB)
機器種別	第4種機器
安全クラス	PS-3 (但し、S/A バウンダリ部は MS-1)
電源区分	常用電源
最高使用圧力	4.7 MPa [gauge]
最高使用温度	60°C
流体の種類	ヘリウムガス
主要部材質	SUS304 及び相当品
機器表面温度	55°C以下

Table2.4 2次ヘリウムサンプリング設備の設計条件

耐震クラス	C
機器種別	第4種機器
電源区分	常用電源
最高使用圧力	5.0 MPa [gauge]
最高使用温度	60°C
流体の種類	ヘリウムガス
主要部材質	SUS304 及び相当品
機器表面温度	55°C以下

Table2.5 1次ヘリウムサンプリング設備の測定所要時間

計測器	自動測定対象	測定所要時間	備考
ガスクロマトグラフ 質量分析計 (165AE1)	51A 原子炉入口 51B 原子炉出口 51C 1次He純化入口 51D 1次He純化CCT入口 51E 1次He純化CCT出口 51F 1次He純化冷却器出口	80 min 80 min 70 min 120 min 120 min 145 min	10hr25min
ガスクロマトグラフ 質量分析計 (165AE2)	51A 原子炉入口 51B 原子炉出口	80 min 80 min	2hr50min
ガンマ線検出器 (165RE1)	52B 原子炉出口 52D 1次He純化CCT入口 52E 1次He純化CCT出口	50 min 90 min 90 min	4hr00min
ベータ線検出器 (165RE2)	53B 原子炉出口 53C 1次He純化入口 53D 1次He純化CCT入口	30 min 20 min 30 min	1hr30min
水分計1 (165ME1)	54A 原子炉入口 54C 1次He純化入口 54D 1次He純化CCT入口 54F 1次He純化冷却器出口	50 min 40 min 90 min 115 min	5hr05min
水分計2 (165ME2)	55B 原子炉出口 55H 1次PWC出口 55I G/C(PWC用)出口 55J G/C(IHX用)出口	35 min 35 min 35 min 45 min	2hr40min

\* 1サイクル毎に10min休止する。

\* 自動測定対象の 51A～55J はサンプリング弁である。

Table2.6 2次ヘリウムサンプリング設備の測定所要時間

計測器	自動測定対象	測定所要時間	備考
ガスクロマトグラフ 質量分析計 (166AE1)	61A 2次HeG/C出口 61C IHX2次側出口 61D 2次He純化冷却器出口 61E 2次He純化CCT入口 61F 2次He純化出口	85 min 85 min 65 min 65 min 70 min	6hr20min
ガンマ線検出器 (166RE1)	IHX2次側出口	連続測定	
水分計1 (166ME1)	64A 2次HeG/C出口 64B 2次PWC出口 64F 2次He純化出口	40 min 40 min 25 min	1hr55min
水分計2 (166ME2)	65C IHX2次側出口 65D 2次He純化冷却器出口 65E 2次He純化CCT入口	55 min 35 min 35 min	2hr15min

\* 1サイクル毎に10min休止する。

\* 自動測定対象の 51A～55J はサンプリング弁である。

Table3.1 圧縮機の設計条件及び設計仕様

1次ヘリウム サンプリング設備	設計条件	名称	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
2次ヘリウム サンプリング設備	設計仕様	形 式	往復動無給油式
		容 量	0.3 m <sup>3</sup> /h／台
		昇圧(最大)	0.19 MPa
		原動機種 類	誘導電動機
		出 力	3.7 kW
		台 数	2
	設計条件	名称	圧縮機
		機器種別	機器種別外
		耐震クラス	C
		流体の種類	ヘリウムガス
	設計仕様	形 式	往復動無給油式
		容 量	0.4 m <sup>3</sup> /h／台
		昇圧(最大)	0.19 MPa
		原動機種 類	誘導電動機
		出 力	3.7 kW
		台 数	2

Table3.2 主要弁の設計条件及び設計仕様

1次ヘリウム サンプリング設備	設計条件	弁番号	主要弁 165V19 165V20
		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
		最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]
		最高使用温度	60 °C
設計仕様	弁番号	主要弁 165V19 165V20	
	形式	ベローシール玉形弁	
	呼び径	3/4 (B)	
	駆動方式	空気作動	
	取付け箇所	圧縮機出口配管	
2次ヘリウム サンプリング設備	設計条件	弁番号	主要弁 166V11
		機器種別	機器種別外
		耐震クラス	C
		流体の種類	ヘリウムガス
		最高使用圧力	5.0 MPa[gauge]
		最高使用温度	60 °C
設計仕様	弁番号	主要弁 166V11	
	形式	ベローシール玉形弁	
	呼び径	3/4 (B)	
	駆動方式	空気作動	
	取付け箇所	圧縮機出口配管	

Table3.3 主配管の設計条件及び設計仕様

1次ヘリウム サンプリング設備	設計条件	名称	主配管
	機器種別	高温ガス炉第4種管	
	耐震クラス	区分1: A	
		区分2: B	
	流体の種類	ヘリウムガス	
	最高使用圧力	4.7 MPa[gauge]	
設計仕様	最高使用温度	区分1: 420 °C	
		区分2: 60 °C	
	名称	主配管	
	主要寸法	区分1: 6.35/1.0 mm	
2次ヘリウム サンプリング設備	外径／厚さ	区分2: 27.2/2.9 mm	
	主要材料	SUS304TP	
	設計条件	名称	主配管
	機器種別	高温ガス炉第4種管	
	耐震クラス	C	
	流体の種類	ヘリウムガス	
設計仕様	最高使用圧力	5.0 MPa[gauge]	
	最高使用温度	区分1: 350 °C	
		区分2: 60 °C	
	名称	主配管	
	主要寸法	区分1: 6.35/1.0 mm	
	外径／厚さ	区分2: 27.2/2.9 mm	
	主要材料	SUS304TP	
	区分1: 入口配管	区分2: 圧縮機廻りの配管	

Table3.4 ガスクロマトグラフ質量分析計の仕様

測定対象	測定対象ガス	ヘリウム H <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub> / CO / CO <sub>2</sub>
	不純物種類	H <sub>2</sub> 0.08 O <sub>2</sub> 0.01
	検出感度 (ppm)	N <sub>2</sub> 0.02 CH <sub>4</sub> 0.02
		CO 0.08 CO <sub>2</sub> 0.02
AGS-7000 型 質量分析計	質量分析計	質量数範囲 2~400a.m.u 分解能 $M/\Delta M \geq 2M$ @50% Peak Height ダイナミックレンジ 10 <sup>6</sup> and SEM/HV
	3分割式分離型	質量分析部
	分析管	イオン源部 二次電子増倍管部 ターボ分子ポンプ排気装置 分析チャンバー SUS-304 電解研磨仕上げ コンフラットフランジ 最高加熱温度 200°C 真空計球 NIG-2F
GC-1930 型ガスクロ サンプリング装置	パックドカラム	材質・形状 $\phi 1/8OD \times \phi 2.18ID \times 2m$ SU 接続部 1/8"VCR 充填材 モレキュラーシーブ5A 30/60 メッシュ ポラパック Q 50/80 メッシュ
オーブン	方 式	強制循環式空気恒温槽
	温度範囲	室温+10°C~200°C
	ヒータ	100V 600W ニクロム
	電力ユニット	SSR 時分割比例制御
データシステム仕様	ハードウェア構成	パーソナルコンピュータ ハードディスク ディスプレー プロッター インターフェイス デジタル I/O・32 接点
	ソフトウェア機能	Monitor & Diagnostics Auto Tune MC(GC) Measure MC Output MF(MI) Measure MF Output

Table3.5 電解式微量水分計の仕様

測定範囲	0.000 ~ 20.00 ppm
最小検出値	20ppb 以下
感度	10ppb (@20ppm レンジ)
精度	読み値の±2%もしくは±20ppb(大きい方)
繰り返し精度	読み値の±0.4%
応答時間	水分 1.5ppm のとき水分変化に対する初期の 応答時間は5秒以下 最終値の90%倒置時間は15分以下
サンプル圧力	0.2 ~ 7 kg/cm <sup>2</sup> (最大 210 kg/cm <sup>2</sup> )
サンプル流量	100 cc/min
セル・サンプル流量	100 sccm
バイパス流量	0 ~ 900 cc/min
信号出力	4 ~ 20 mA / 0 ~ 20 ppm
製造元	MEECO 社(USA)

Table3.6 露点式水分計の仕様

測定範囲	-80 ~ +20 °CDP
指示精度	±2 °CDP
90%応答	90%応答      高湿度→低湿度 5min 低湿度→高湿度 5 sec
分解能	0.1°C
信号出力	4 ~ 20 mA / -80 ~ +20 °CDP
製造元	MICHELL 社(UK)

Table3.7 代表的な測定値に対する精度及び感度

測定圧力	測定値	精度	感度
1 atm	-76°C (1.0 ppm)	±2 °C (-0.3,+0.4 ppm)	0.1 °C (0.02 ppm)
	-60.5°C (10.0 ppm)	±2 °C (-2.4,+4.0 ppm)	0.1 °C (0.15 ppm)
37 atm	-50.5°C (1.0 ppm)	±2 °C (-0.2,+0.3 ppm)	0.1 °C (0.015 ppm)
	-30.5°C (10.0 ppm)	±2 °C (-2.0,+2.1 ppm)	0.1 °C (0.10 ppm)

Table3.8  $\gamma$ 線検出器の仕様

検出器	シンチレータ	2" $\phi \times 2"$ NaI(Tl)
	温度補償範囲	+5 ~ +45 °C
	温度安定度	$^{137}\text{Cs}$ フォトピーク 662KeV 波高値に対し $\pm 2\%$ 以内
	分解能	$^{137}\text{Cs}$ フォトピーク 662KeV 波高値に対し $\pm 8\%$ 未満
プリアンプ	伝送距離	150m (MAX)
アンプディスクリ	増幅度	20倍
モジュール	増幅度調整	微調整可能
シングルチャンネル	波高分析方法	L-∞、L-U、L-ΔE 3段切換
波高分析モジュール	波高分析精度	LL、UL: F.S $\pm 0.5\%$ 以内 ΔE : F.S $\pm 1.5\%$ 以内
デジタル計数率計	表示方式	デジタル計数率
モジュール	表示範囲	0.1 ~ 999.999
	表示精度	表示値に対して $\pm (1\% + 1\text{digit})$ 以内
	記録計出力	$10^{-1} \sim 10^3 \text{ min}^{-1}$
	記録精度	$\pm 0.08\%$ 以内
	時定数	標準偏差 1 ~ 10% 任意設定可能
	警報	HI、LO アラーム付
	機能	自己診断可能
高圧電源モジュール	出力電圧	+500V ~ +1500V 連続可変
	最大出力電流	約 100 $\mu\text{A}$
	安定度	電源電圧 $\pm 10\%$ 変動に対し $\pm 0.1\%$ 以内
低圧電源モジュール	出力電圧	各モジュールの電圧供給
	安定度	電源電圧 $\pm 10\%$ 変動に対し $\pm 1\%$ 以内
信号ケーブル	複合4芯シールド	外径 11.2mm (MAX 11.8mm)

Table3.9  $\beta$  線検出器の仕様

電離箱検出器	検出器	通電式電離箱検出器(補正電極付)
	有効容積	10ℓ
	気密度	$1 \times 10^{-6}$ atm·cc/sec以下
	耐圧	1.5 kg/cm <sup>2</sup> ·G
デジタル濃度率計 モジュール	表示方式	* . * * E ± * Bq/cm <sup>3</sup>
	記録計出力	$10^{-1} \sim 10^3$ Bq/cm <sup>3</sup> (4テ'カート')
	表示・記録精度	±0.12 テ'カート'以内
	時定数	FS～37%FSに落ちるまで約10秒
	警報	HI、LOアラーム付
高圧電源モジュール	出力電圧	-1000V
	最大出力電流	約100 μA
	安定度	電源電圧±10%変動に対し±0.1%以内
低圧電源モジュール	出力電圧	各モジュールの電圧供給
	安定度	電源電圧±10%変動に対し±1%以内
信号ケーブル	10芯シールド	外径 11.6mm (MAX 12.2mm)
	同軸ケーブル	外径 6.15mm (MAX 6.65mm)

Table3.10 放射能検出器監視盤の仕様

監視盤本体	信号出力	4～20 mA (ログ)
	警報出力	最大許容不可 500 Ω
	寸法	$\gamma$ 線 $10^{-1} \sim 10^3$ min <sup>-3</sup> に対応 $\beta$ 線 $10^{-1} \sim 10^3$ Bq/cm <sup>3</sup> に対応
記録計	入力点数	6打点
	入力感度	0～10 mV
	チャート幅	180 mm

Table3.11 1次ヘリウムサンプリング設備・放射能検出器の警報設定値

名 称 (Tag)	項 目	設 定 値	単 位
1次 $\gamma$ 線 (165RS1)	警報値	8.33	cps
	GAP 値	0.42	cps
1次 $\beta$ 線 (165RS2)	警報値	100	Bq/cm <sup>3</sup>
	GAP 値	25	Bq/cm <sup>3</sup>

Table3.12 2次ヘリウムサンプリング設備・放射能検出器の警報設定値

名 称 (Tag)	項 目	設 定 値	単 位
2次 $\gamma$ 線 (166RS1)	警報値	$6.20 \times 10^{-6}$	Bq/cm <sup>2</sup>
	GAP 値	0	Bq/cm <sup>2</sup>

Table3.13 サンプリングガス切換装置の仕様

電磁弁	形式	直動形2方向電磁弁
	電源	DC 100V
	接続形式	差し込み溶接形
	呼び口径	1/4"
流量制御装置 (ブロー用)	形式	マスフローコントローラ
	接続形式	スウェジロック継手
	呼び口径	1/4"
	定格流量	0.65 Nm <sup>3</sup> /h
流量制限装置 (計測器導入ライン用)	形式	マスフローコントローラ
	接続形式	スウェジロック継手
	呼び口径	1/4"
	定格流量	0.006 Nm <sup>3</sup> /h
圧力調整装置 (2次圧調整用)	形式	プレッシャコントローラ
	接続形式	スウェジロック継手
	呼び口径	1/4"
	1 次圧	15~41 kg/cm <sup>2</sup>
	2 次圧	2 kg/cm <sup>2</sup>
圧力計 (現場指示形)	形式	ブルドン管形圧力計
	計測範囲	0 ~ 70 kg/cm <sup>2</sup>
発信器付圧力指示計	形式	ダイヤフラムシール形
	計測範囲	0 ~ 15 kg/cm <sup>2</sup>
配管及び附属品	管	1/4 " SUS304TP
	ベローズシール手動弁	
	逆止弁	
	減圧弁	
	ラインフィルタ類	
	キャリアガスフィルタ	

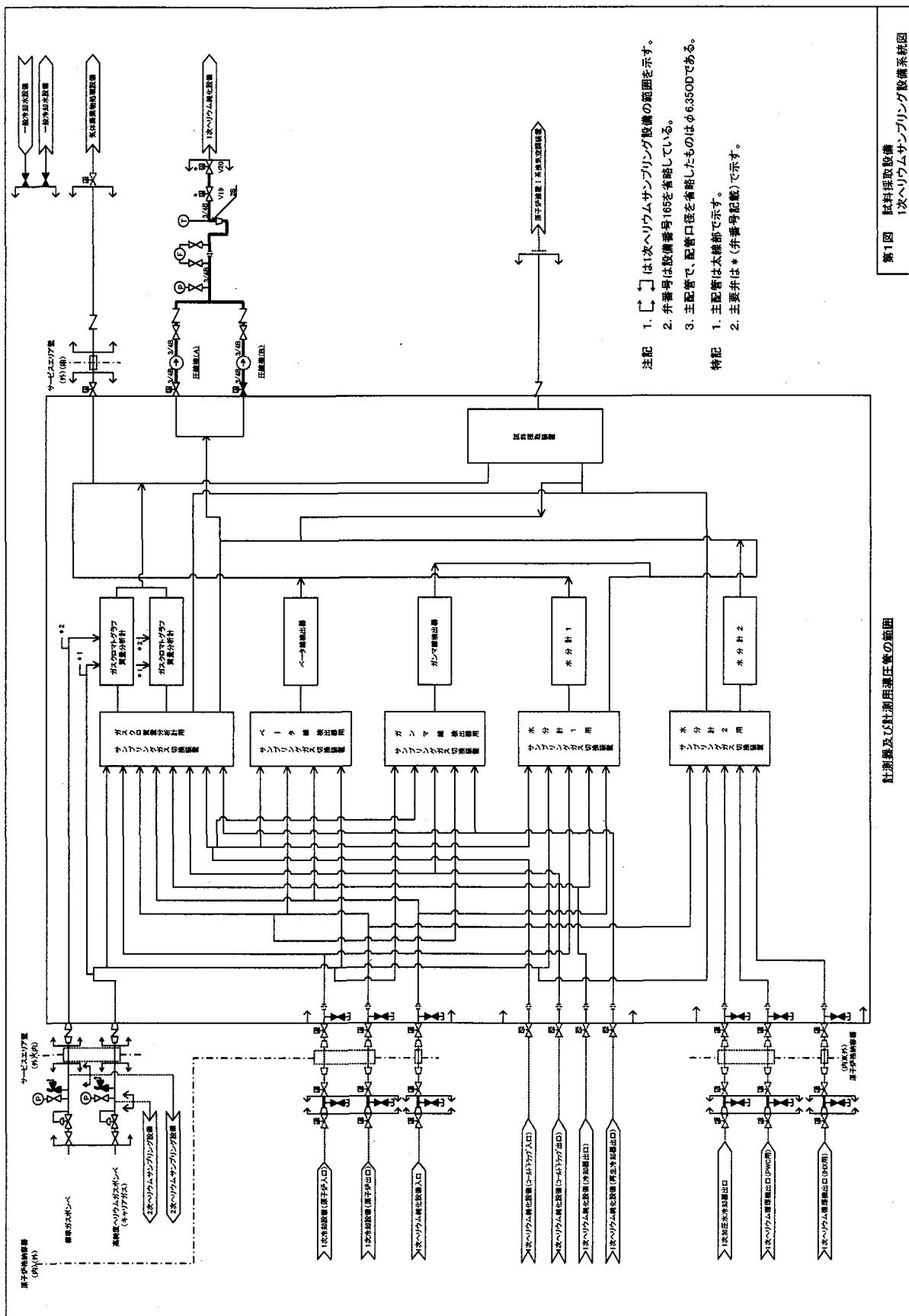


Fig.2.1 試料採取設備 1次ヘリウムサンプリング設備系統図

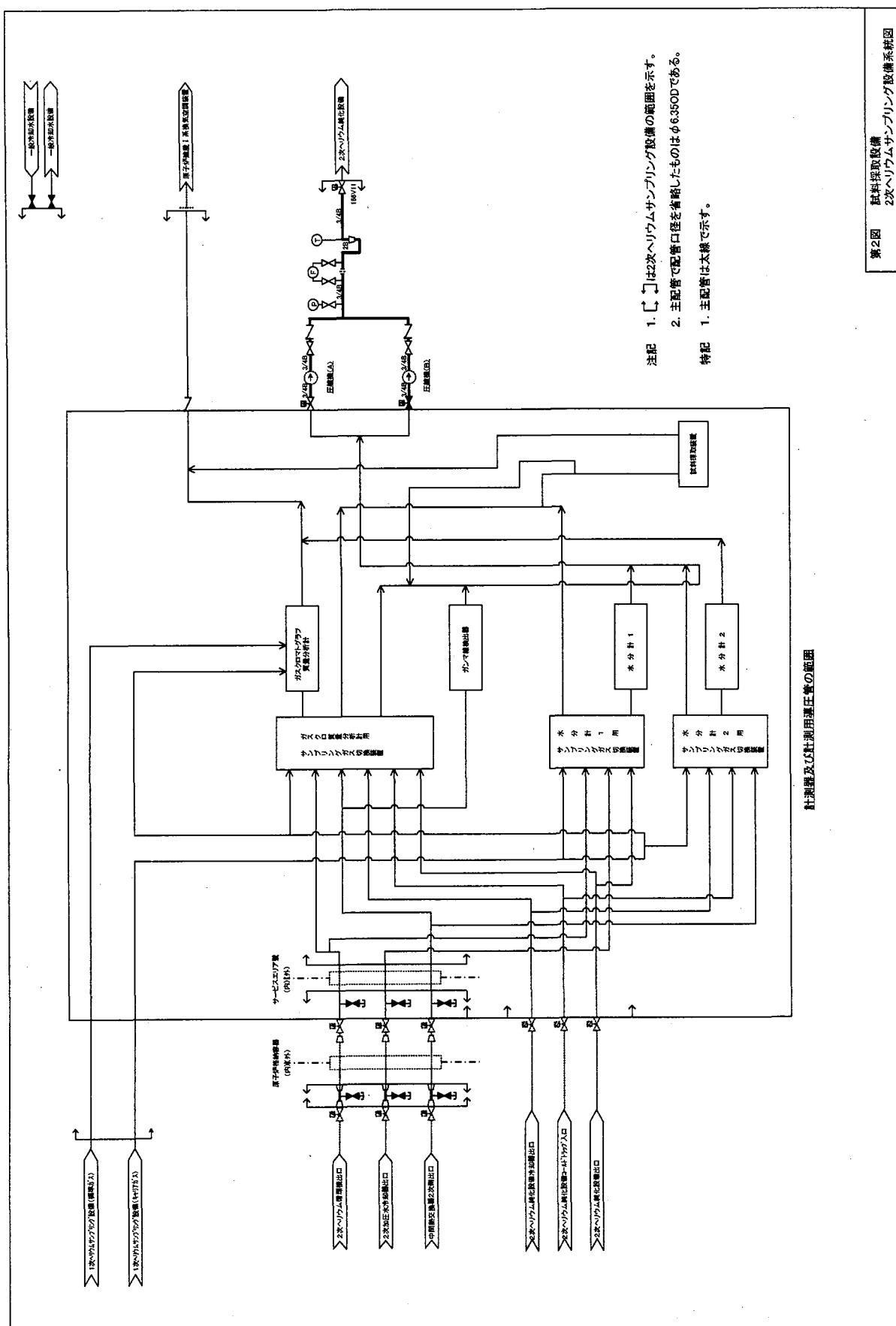


Fig.2.2 試料採取設備 2次ヘリウムサンプリング設備系統図

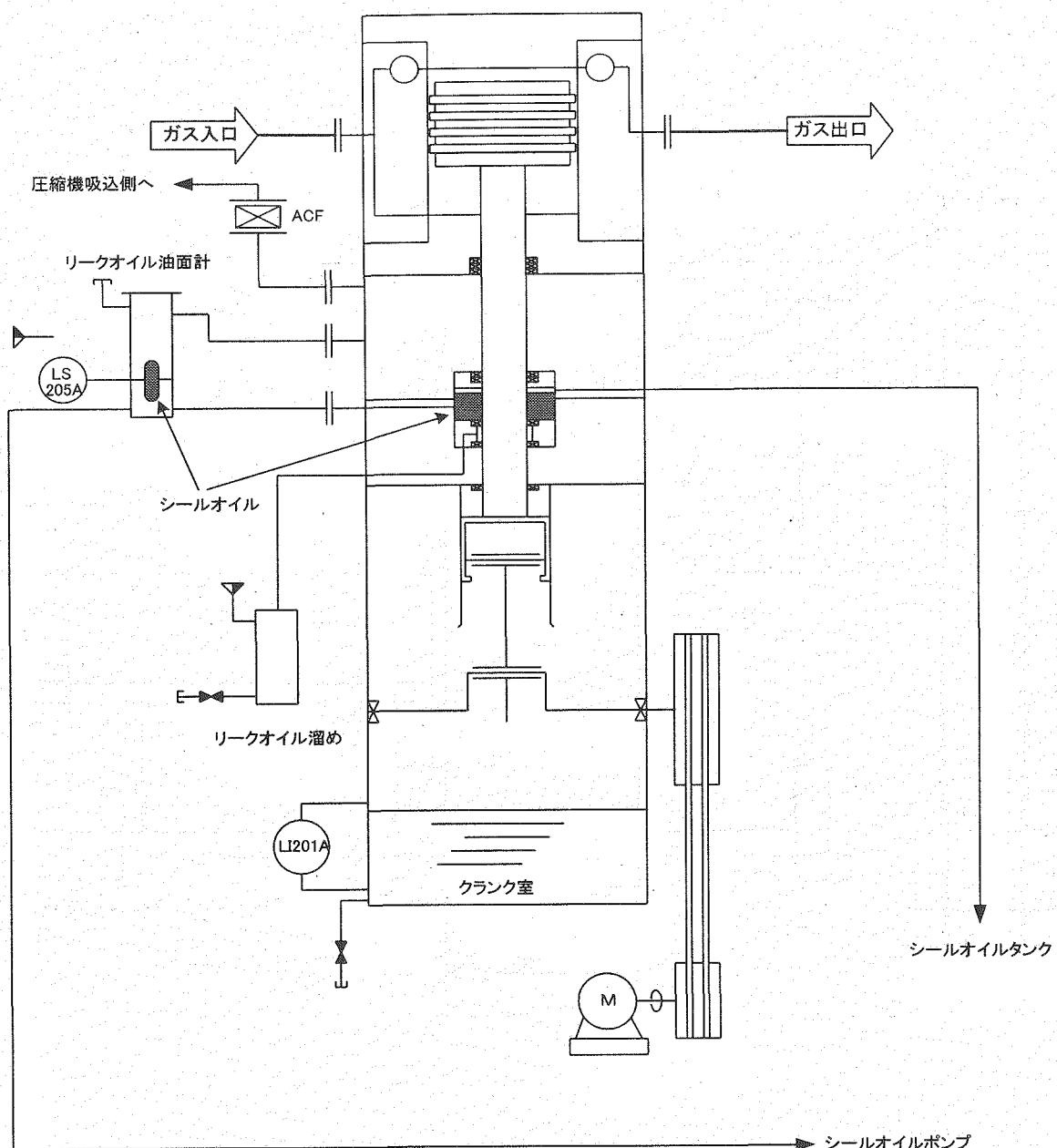


Fig.3.1 ピストンロッドシール部詳細図

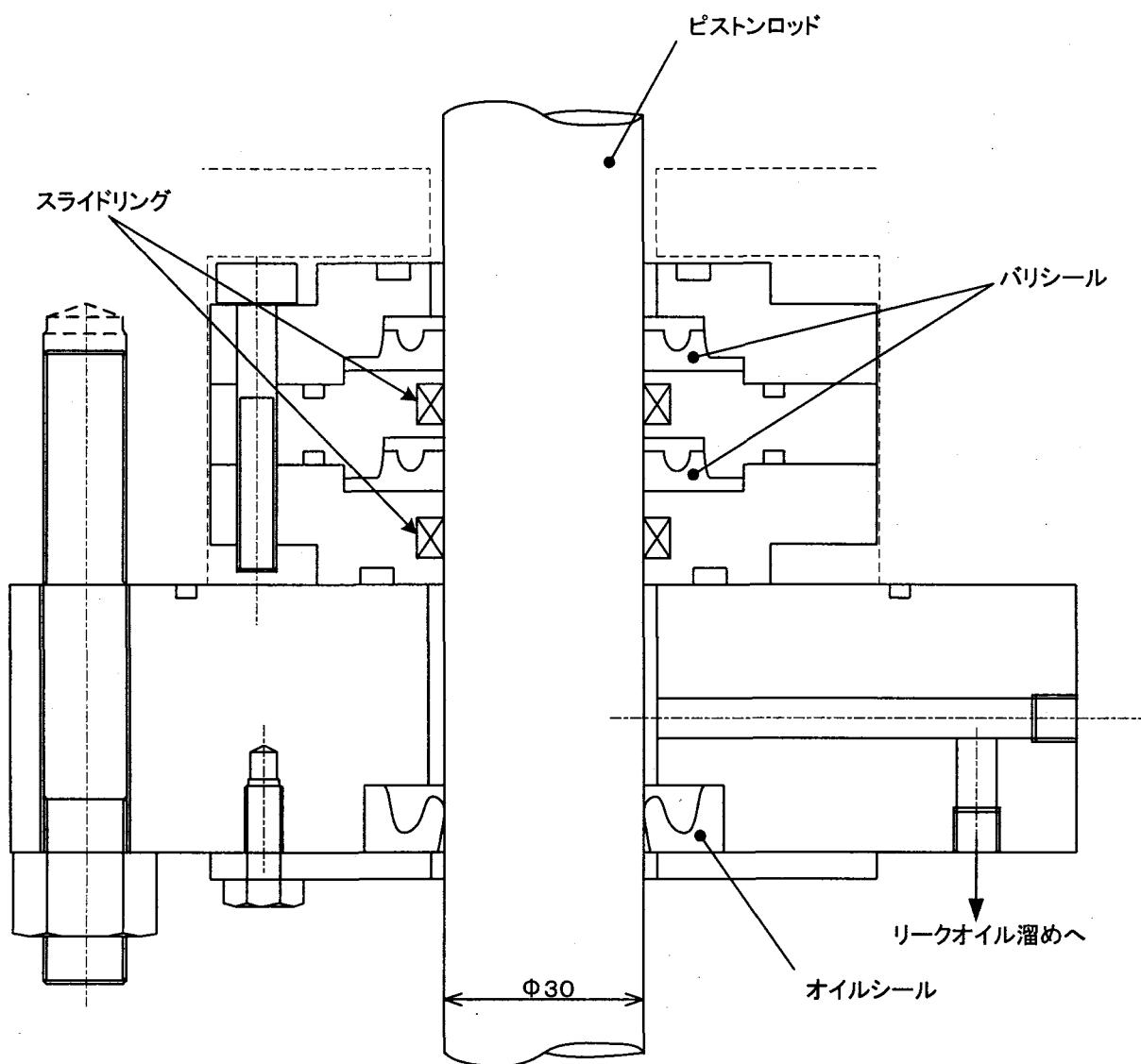


Fig.3.2 ロッドシール部組立図

1次ヘリウムサンプリング設備

## ガスクロマトグラフ質量分析計

ガスクロマトグラフ質量分析計

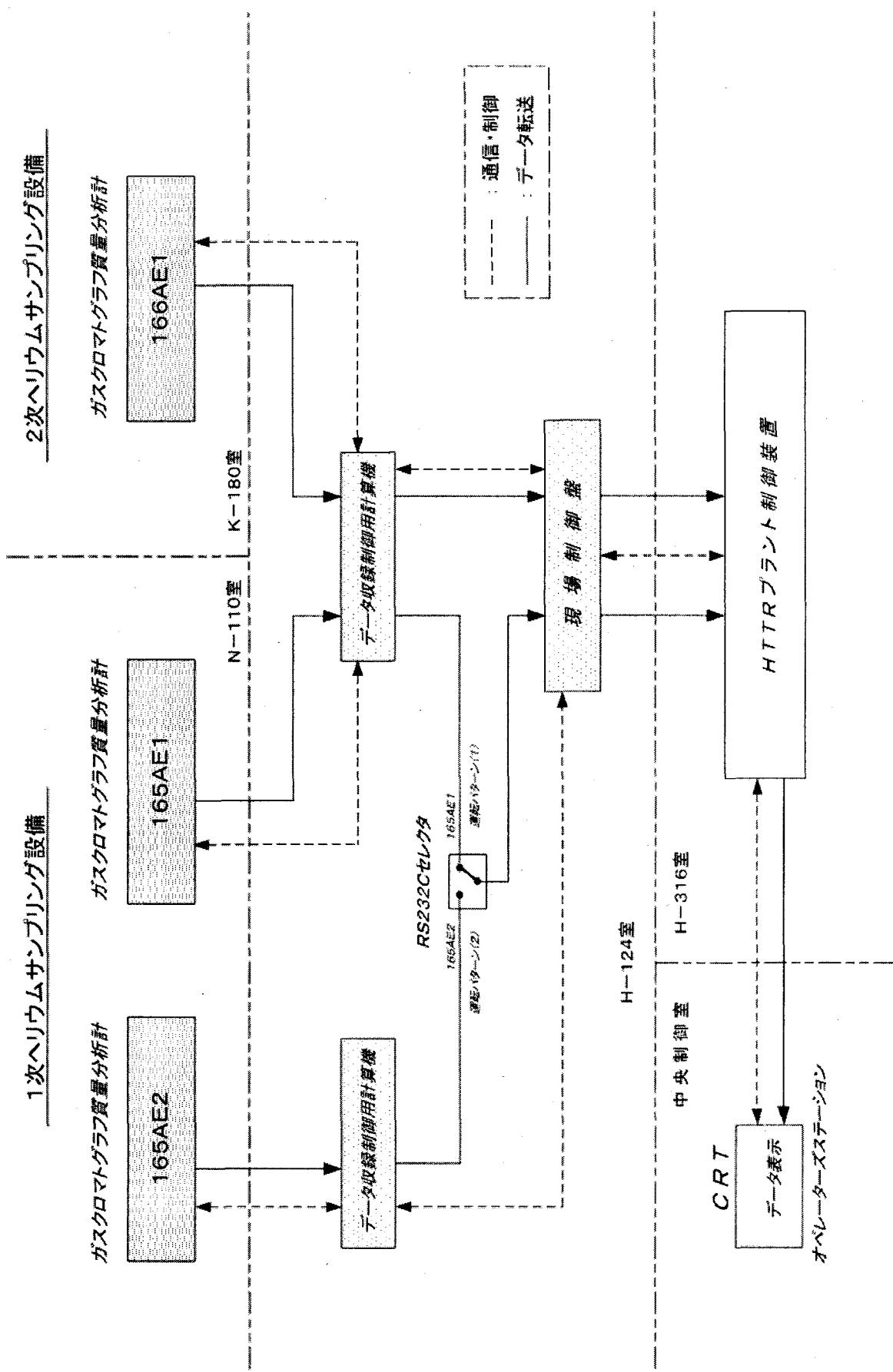


Fig.3.3 試料採取設備 ガスクロマトグラフ質量分析計・計装系統図

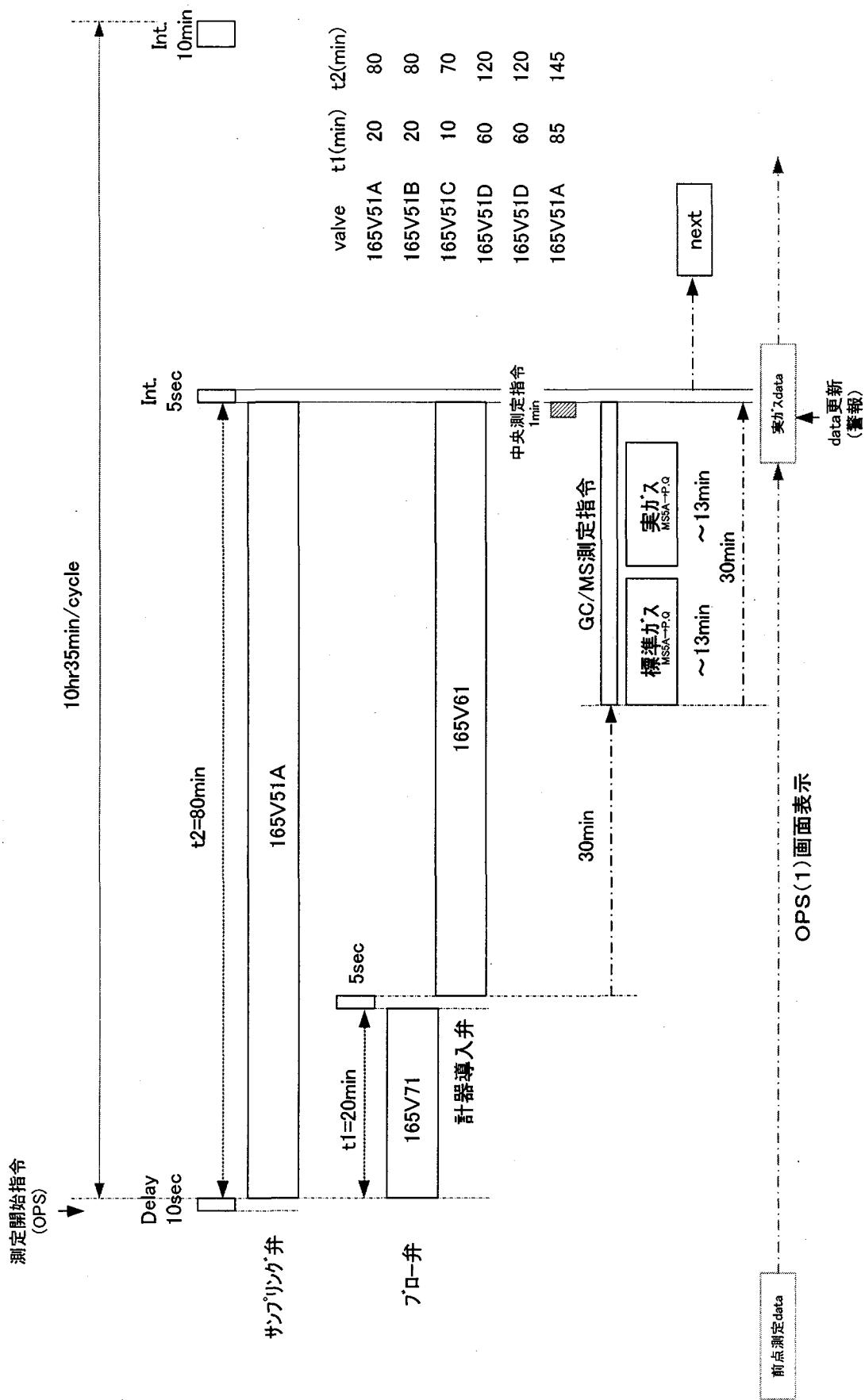


Fig.3.4 試料採取設備 ガスクロマトグラフ質量分析計・自動計測スケジュール

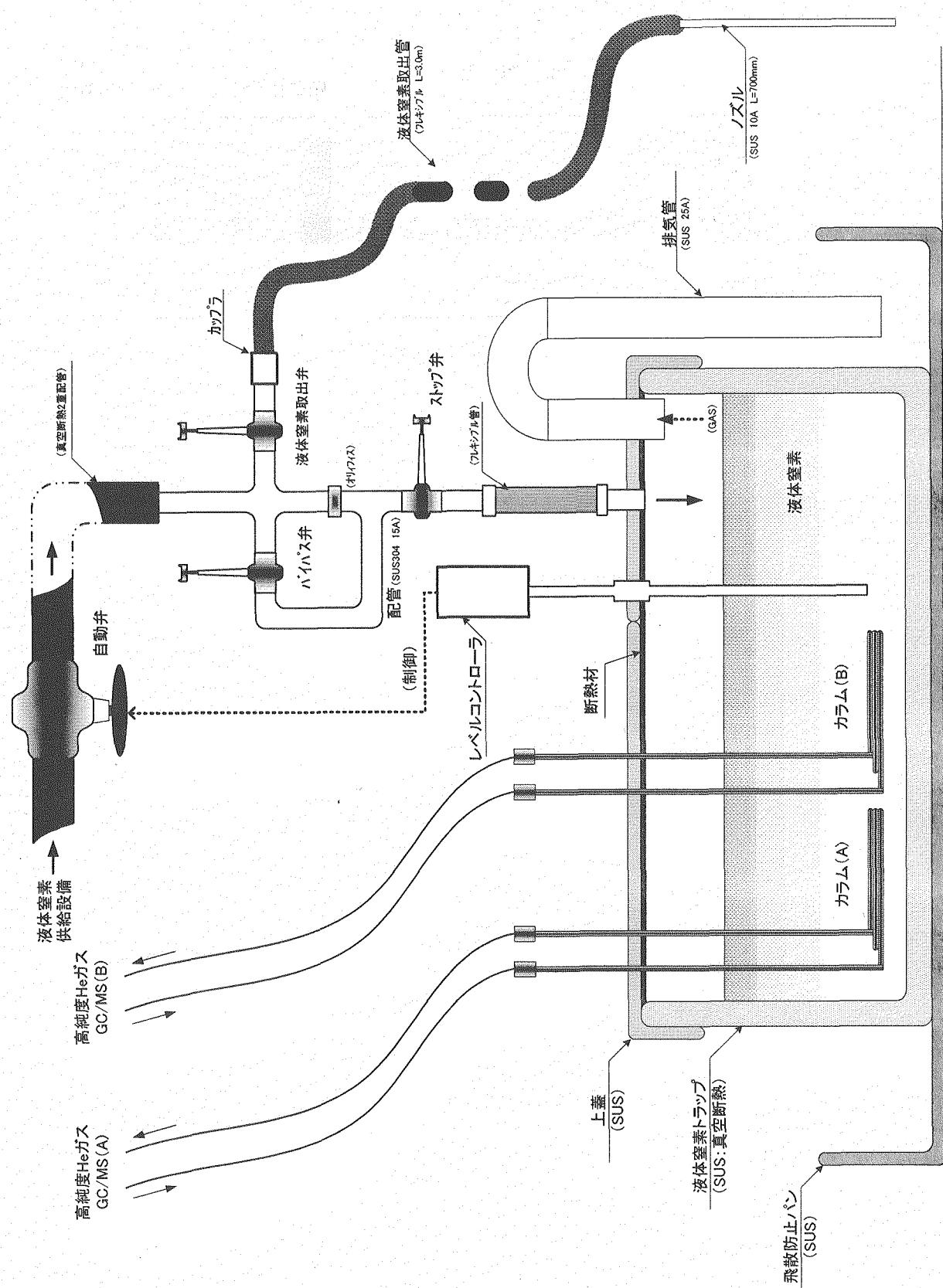


Fig.3.5 試料採取設備 ガスクロマトグラフ質量分析計・液体窒素トラップ

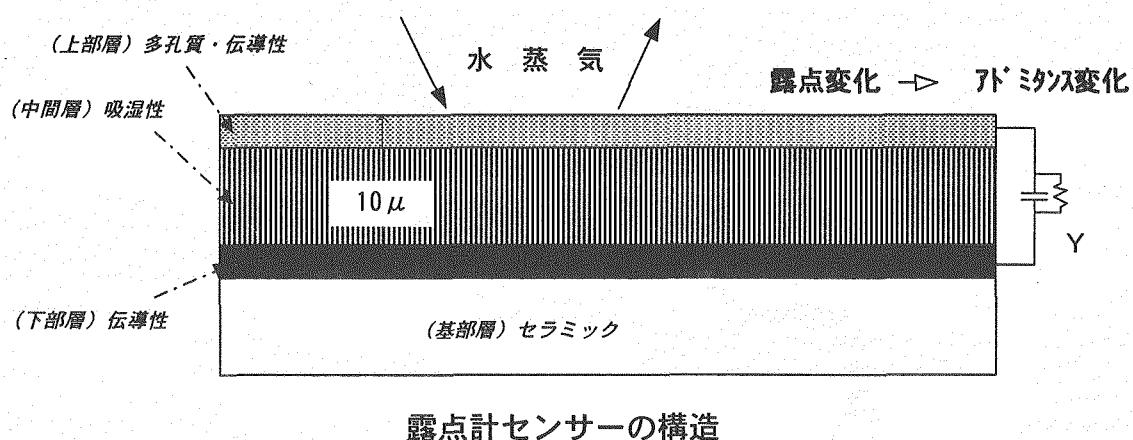


Fig.3.6 露点計センサーの構造

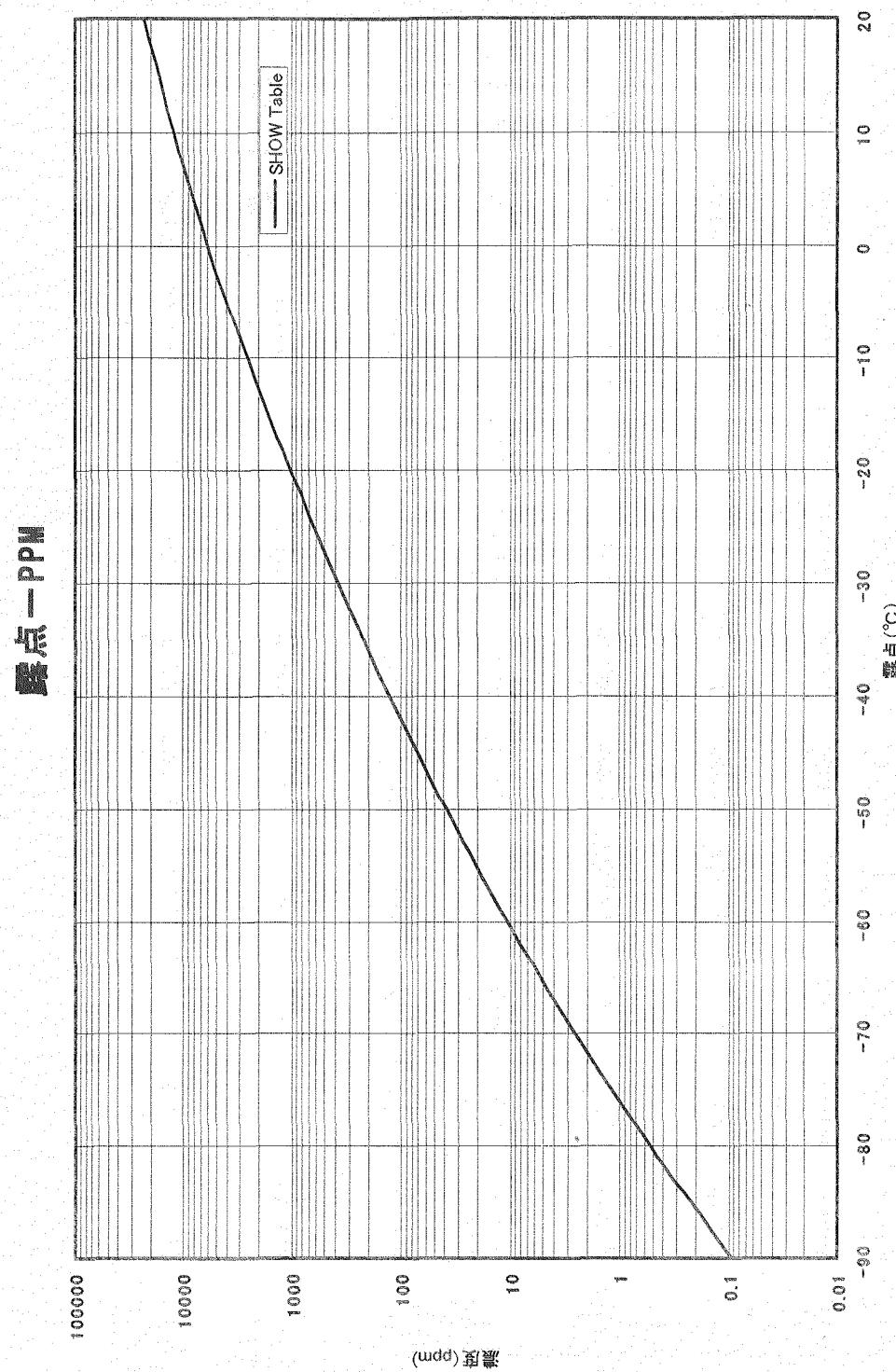


Fig.3.7 露点-水分濃度の相関図

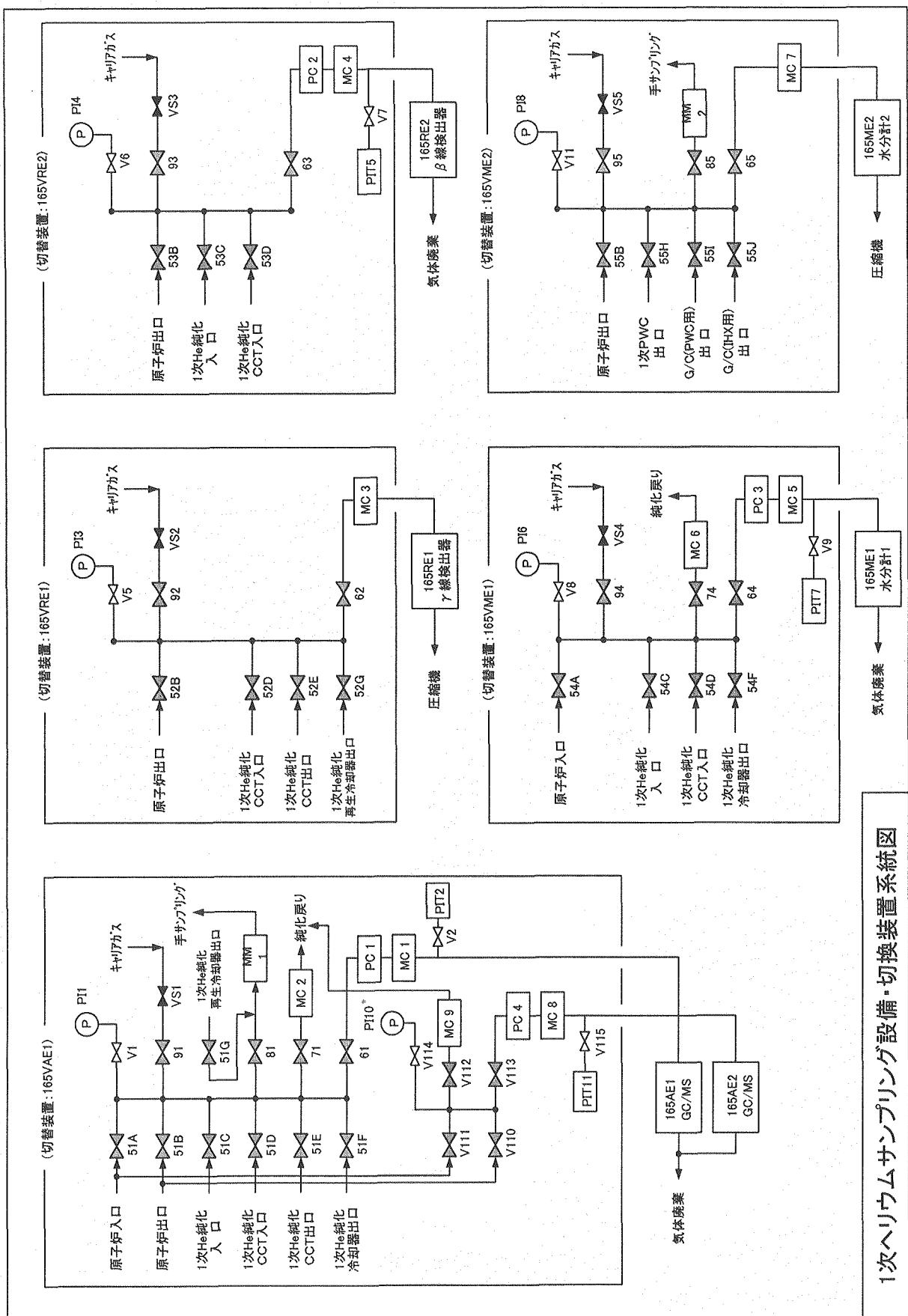


Fig.3.8 1次ヘリウムサンプリング設備のサンプリングガス切換装置系統図

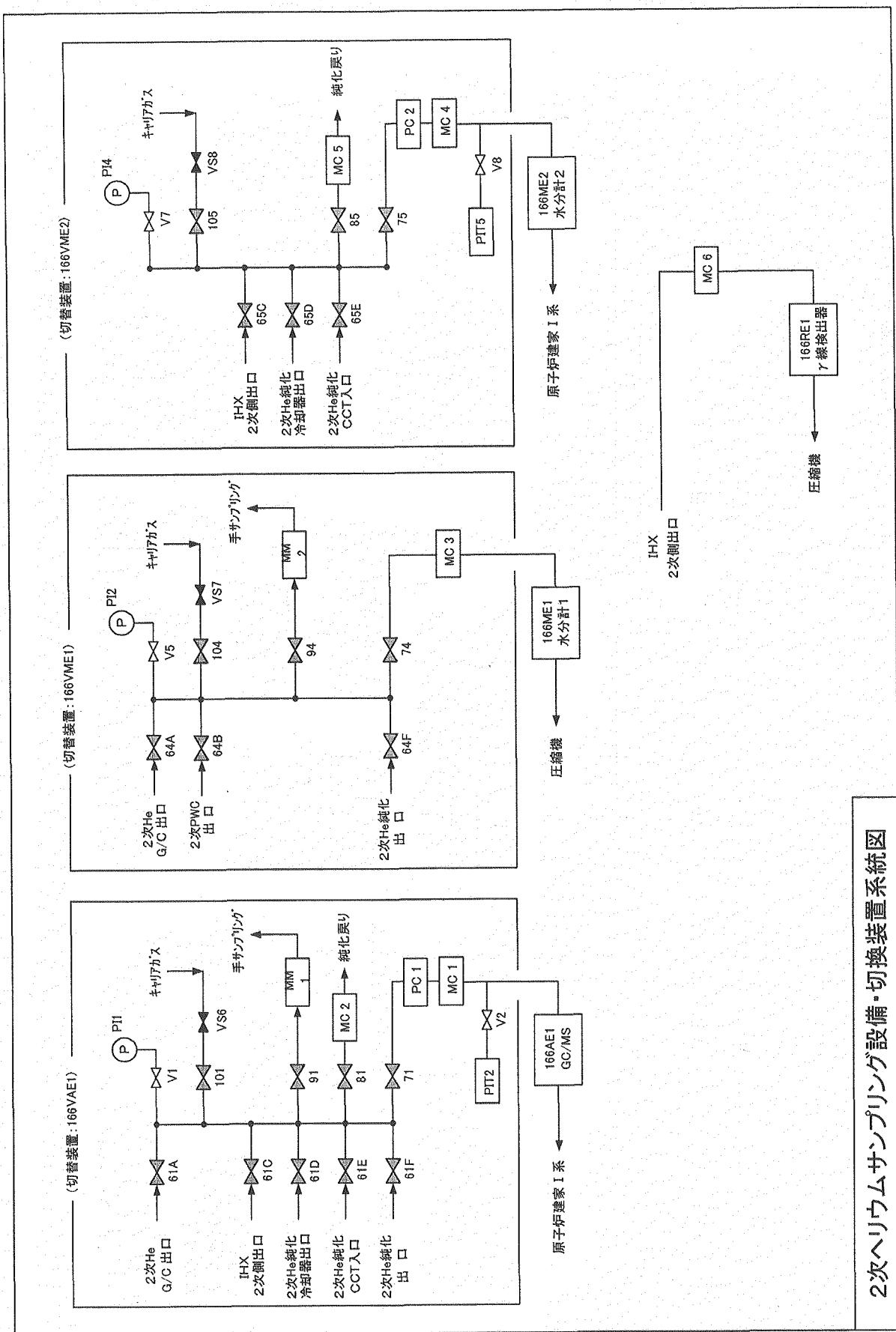


Fig.3.9 2次ヘリウムサンプリング設備のサンプリングガス切換装置系統図

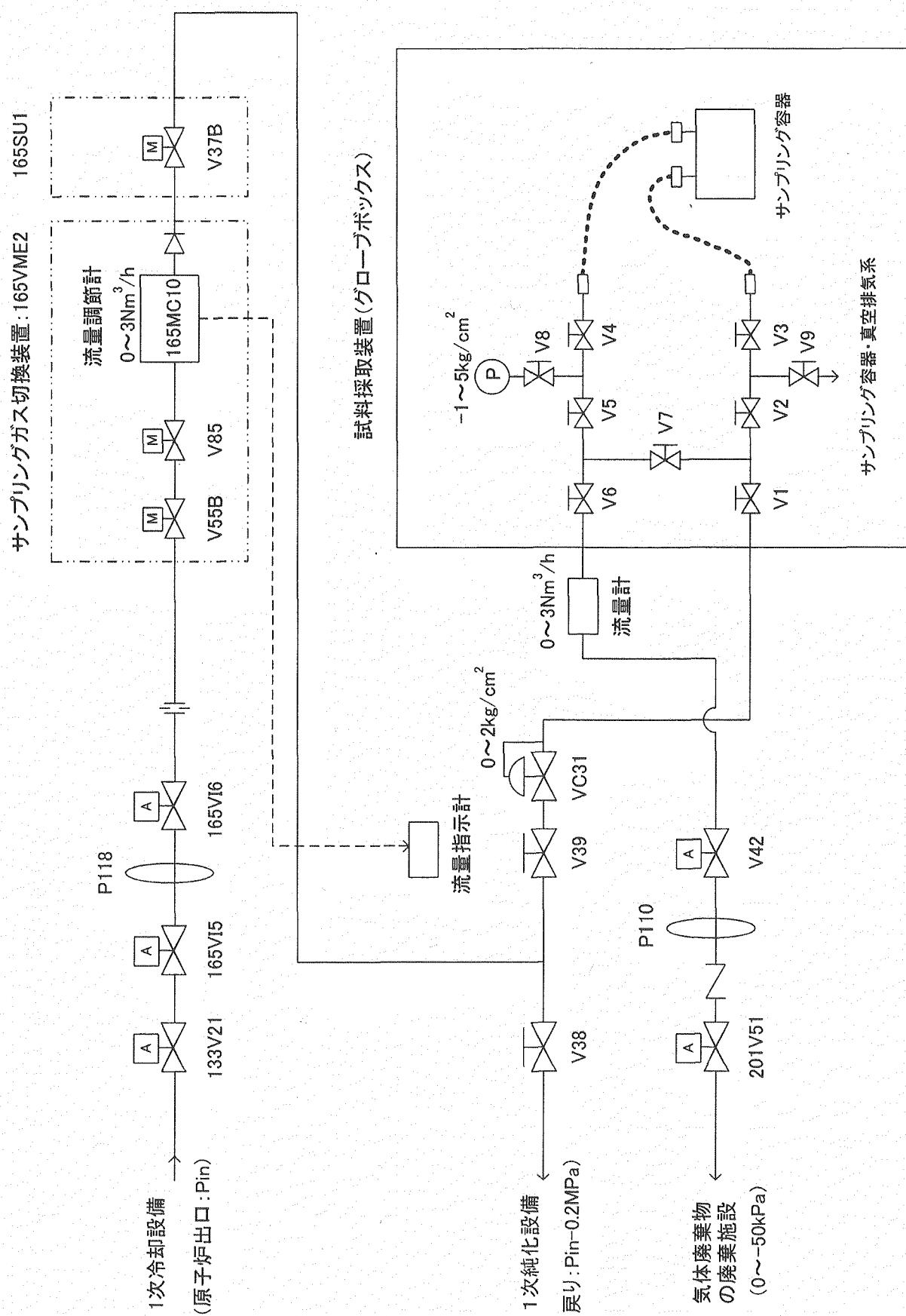


Fig.3.10 試料採取装置・手サンプリング系統構成図

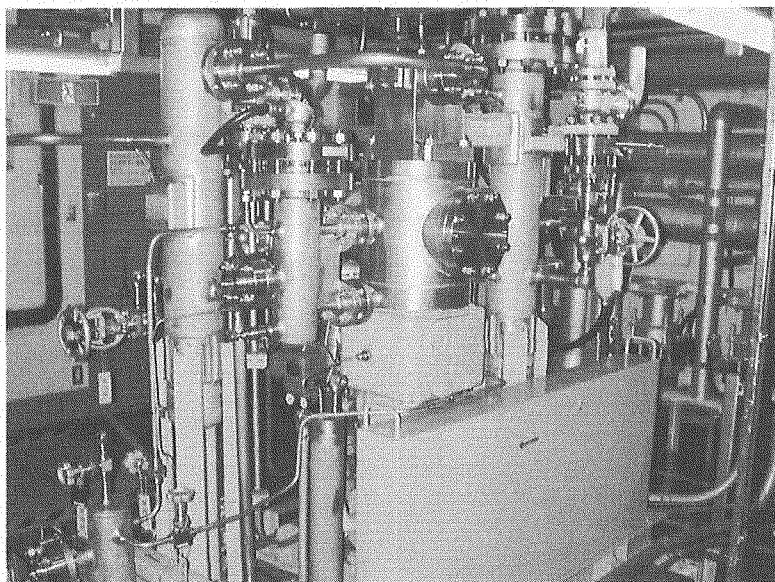


Photo3.1 1次ヘリウムサンプリング設備 圧縮機

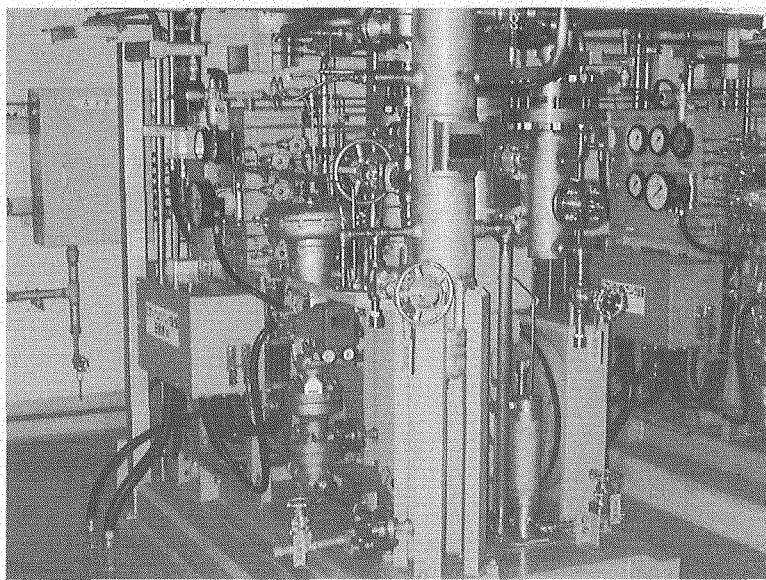


Photo3.2 2次ヘリウムサンプリング設備 圧縮機

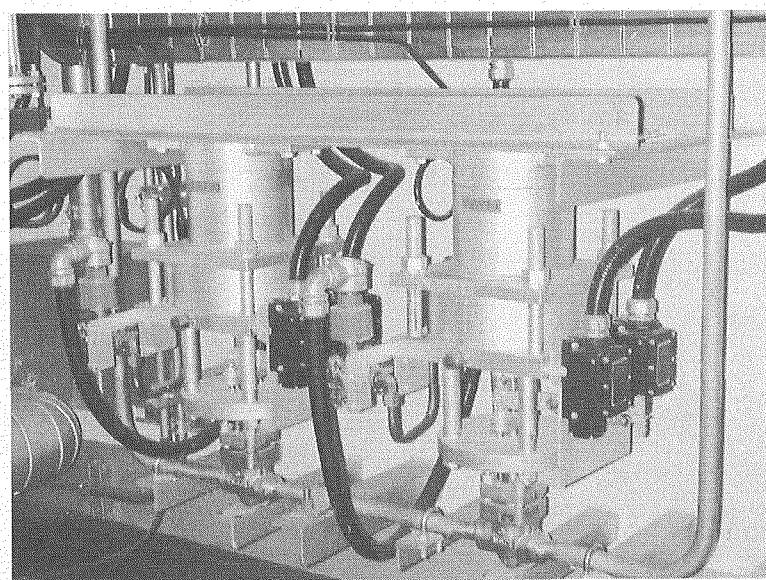


Photo3.3 1次ヘリウムサンプリング設備 主要弁

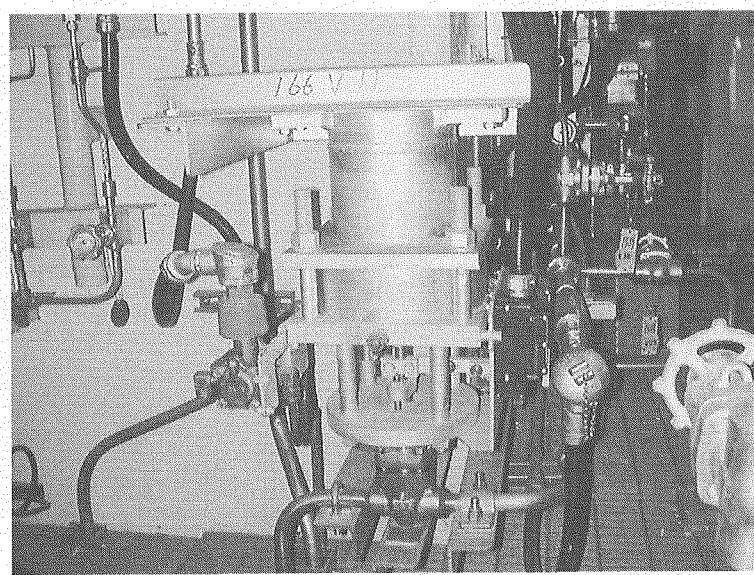
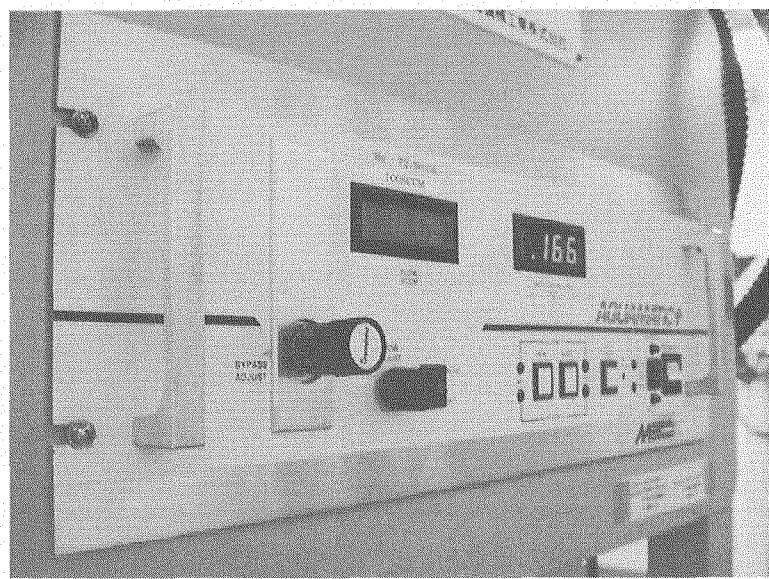
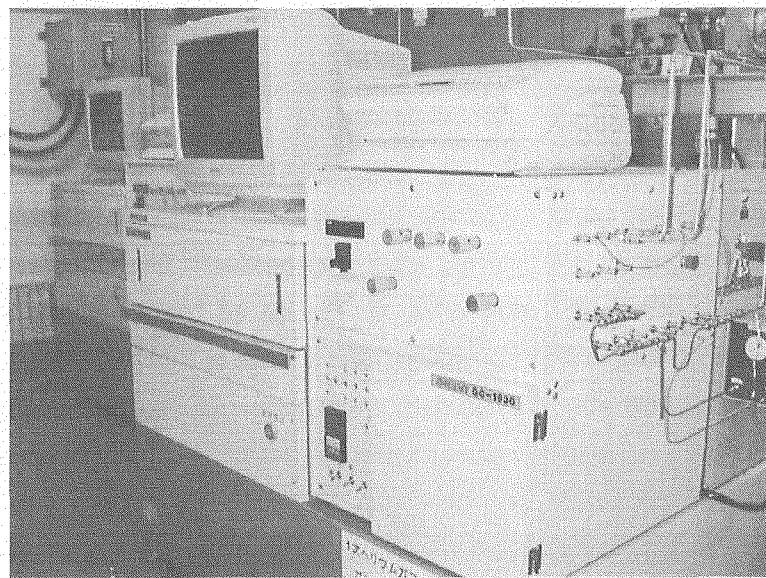


Photo3.4 2次ヘリウムサンプリング設備 主要弁



## Photo3.5 1次ヘリウムサンプリング設備 ガスクロマトグラフ質量分析計



## Photo3.6 1次ヘリウムサンプリング設備 微量水分計

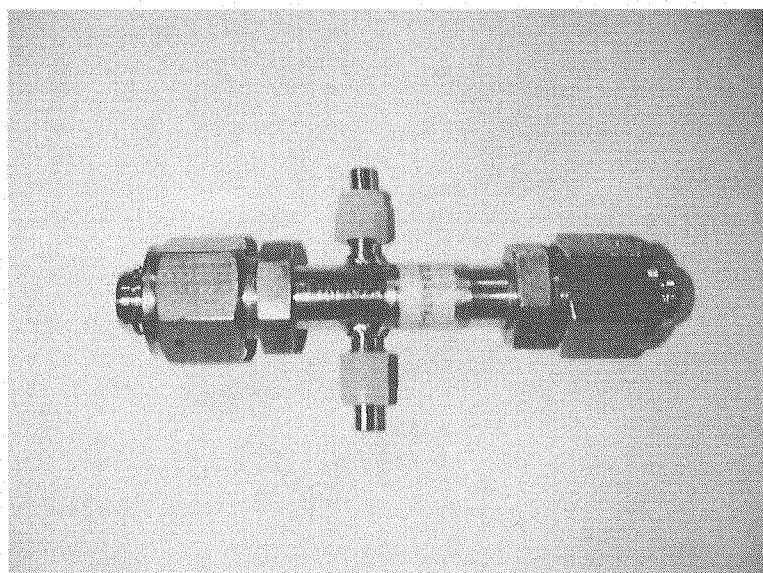


Photo3.7 1次ヘリウムサンプリング設備  
微量水分計・検出部

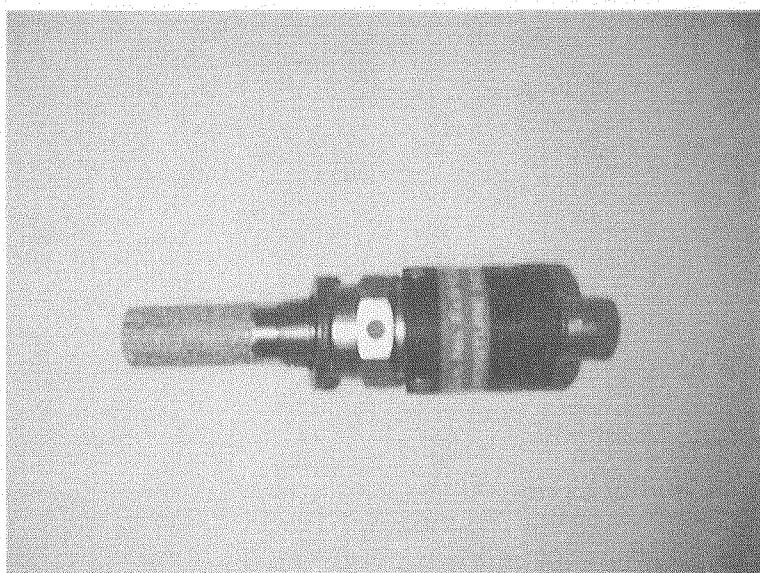


Photo3.8 1次ヘリウムサンプリング設備  
露点式水分計・検出部

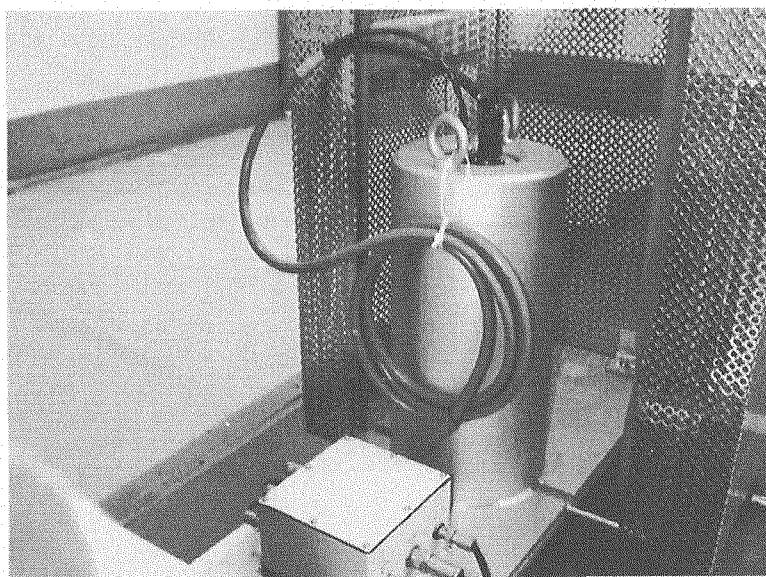


Photo3.9 1次ヘリウムサンプリング設備  
γ線検出器

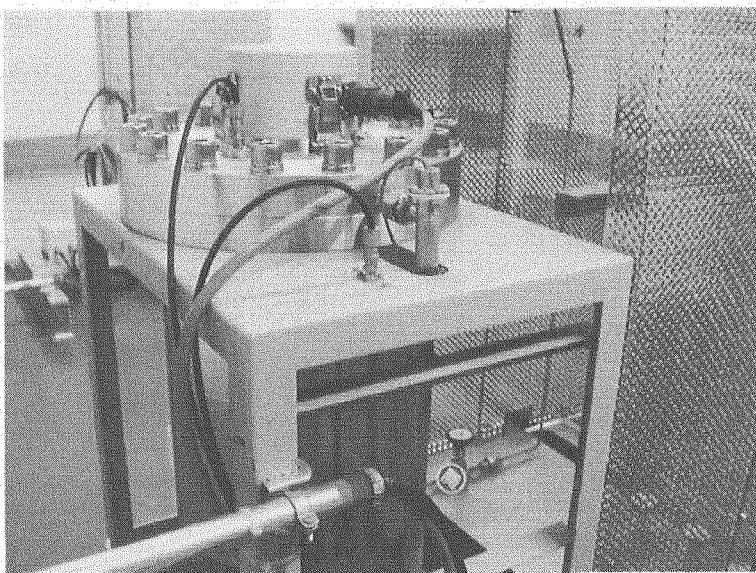


Photo3.10 1次ヘリウムサンプリング設備  
β線検出器

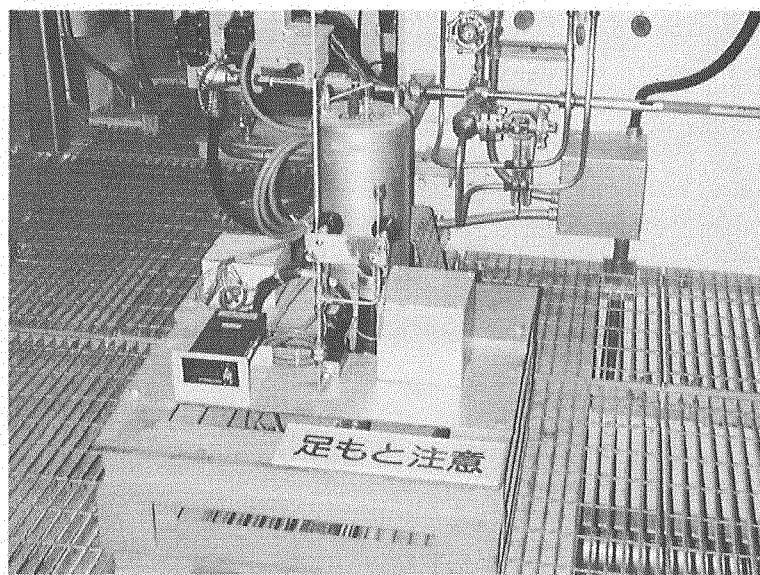


Photo3.11 2次ヘリウムサンプリング設備  
γ線検出器

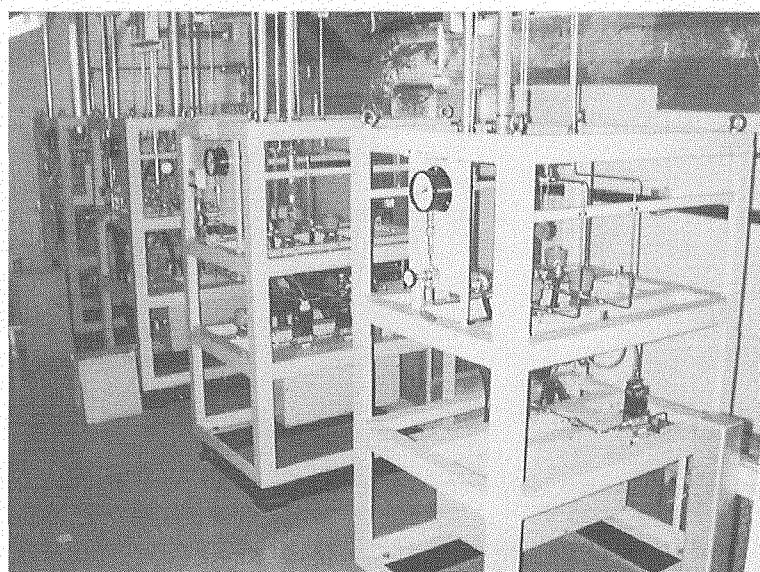


Photo3.12 1次ヘリウムサンプリング設備  
サンプリングガス切換装置

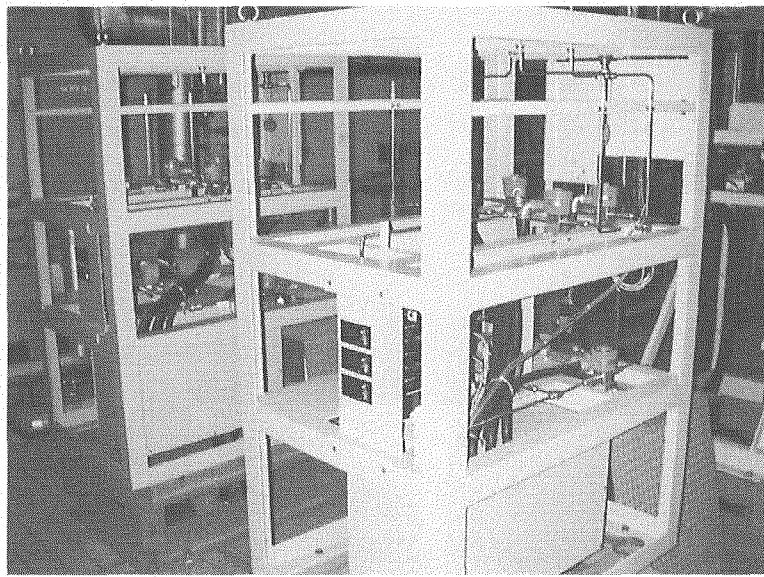


Photo3.13 2次ヘリウムサンプリング設備  
サンプリングガス切換装置

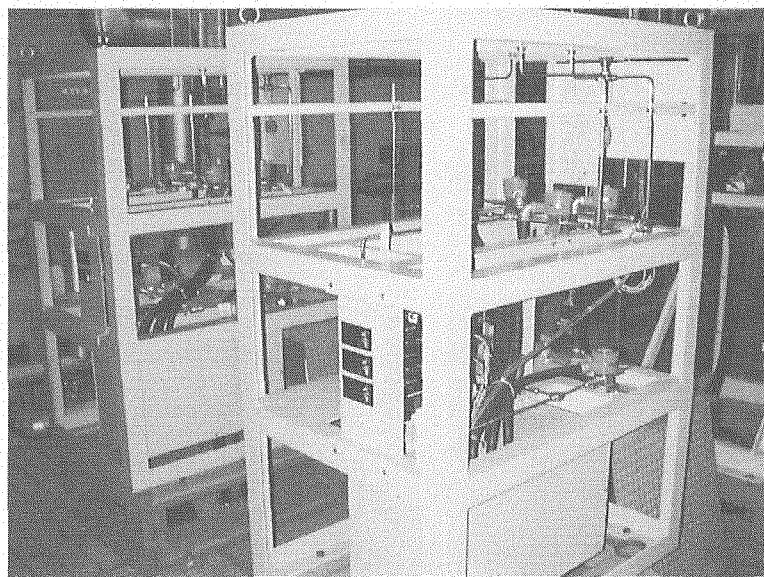


Photo3.14 試料採取装置・グローブボックス

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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ(物質量の濃度)	アンペア毎メートルモル毎立方メートル	A/m mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
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 <sup>4</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エク	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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 <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放熱	ワット	W	$J/s$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	アンドラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$N \cdot A$
コンダクタンス	シージメンス	S	$A/V$
磁束密度	ウェーバー	Wb	$Wb/m^2$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
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	$K$
光度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(e)}$
(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	$J/kg$
ギーゼル分与、カーマ			$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量			
方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	$J/kg$
人線量当量、組織線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(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	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	每ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	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 <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
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 <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg \cdot s^{-4} \cdot A^2$
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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
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	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$m^1 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

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	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) rad$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) rad$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーピル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

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	$1eV=1.6021773(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

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
アード	ル	$1a=1 dam^2=10^3 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バール	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10^5 Pa$
オンストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
ペーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

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	$1 erg=10^{-7} J$
ダイン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s=10^{-2} m/s$

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	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-3} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 IX unit=1.002 \times 10^{-3} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トーラ	Torr	$1 Torr=(101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101.325 Pa$
カリ	cal	$1 cal=1 J=10^3 erg$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$