

# HTTRにおけるガス圧縮機のシールオイル漏れに係る改善

## —第2報—

Improvement in Oil Seal Performance of Gas Compressor in HTTR  
- Part 2 -

根本 隆弘 金城 紀幸 関田 健司 古澤 孝之  
黒羽 操 川上 悟 近藤 雅明

Takahiro NEMOTO, Noriyuki KANESHIRO, Kenji SEKITA, Takayuki FURUSAWA  
Misao KUROHA, Satoru KAWAKAMI and Masaaki KONDO

原子力科学研究部門  
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  
Sector of Nuclear Science Research

March 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

HTTR におけるガス圧縮機のシールオイル漏れに係る改善 ー第2報ー

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

根本 隆弘・金城 紀幸<sup>\*1</sup>・関田 健司・古澤 孝之<sup>+1</sup>  
黒羽 操<sup>※1</sup>・川上 悟・近藤 雅明

(2015年2月3日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）の原子炉補助施設に設置しているガス圧縮機は、冷却材ヘリウムの漏えい防止等の観点から複雑なロッドシール機構を有している。一方、これまでの運転経験において当該シール機構からのシールオイル漏れが頻発していたため、シール材の変更等による洩れ対策を行ってきたが、期待した効果が得られなかった。

そこで、シールオイル漏れが頻発しているガス圧縮機のシール材を、仕様の異なるものに交換したところ、シールオイル漏れの発生が大幅に低減した。

検討の結果、個々のガス圧縮機の特性に応じた適切なシール材を選定することが、シールオイル漏れ対策に有効であることが確認出来た。また、これまでの運用経験を踏まえて、HTTR のガス圧縮機により適切なシールオイル漏れに関する判断基準と運用方法を立案した。

本報は、HTTR で使用しているガス圧縮機のシールオイル漏れに係る改善方法について検討した結果をまとめたものである。

---

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

+1 安全・核セキュリティ統括部 安全・核セキュリティ推進室

※1 技術開発協力員

\*1 株式会社加地テック

Improvement in Oil Seal Performance of Gas Compressor in HTTR - Part 2-

Takahiro NEMOTO, Noriyuki KANESHIRO<sup>\*1</sup>, Kenji SEKITA, Takayuki FURUSAWA<sup>+1</sup>,  
Misao KUROHA<sup>※1</sup>, Satoru KAWAKAMI and Masaaki KONDO

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

(Received February 3, 2015)

The High-Temperature engineering Test Reactor (HTTR) has been developed for establishing and upgrading the technical basis of HTGR.

HTTR facilities have their structures, systems and a lot of components including reciprocating gas compressors, commonly used to extract and/or discharge reactor coolant helium gas contained in primary/secondary coolant systems.

From the fact of the operational experiences of these compressors, seal-oil leakage has been frequently observed, although rod-seal mechanisms with complicated structures are equipped and improved for preventing coolant helium gas.

Therefore, we tried to change the rod-seal materials which might be a primary reason of frequent seal-oil leakage, that resulted in decreasing a mass and frequently of seal-oil leakage.

It is confirmed that it is important to select adequate materials of rod seal for sliding speed of the piston of the compressor to prevent seal-oil leakage.

Additionally, the procedure to estimate seal-oil leakage for each compressor is discussed.

This report describes the results of investigation for improvement on seal-oil leak tightness of the compressors in HTTR facilities.

Keywords: HTTR, Gas Compressor, Seal-oil Leakage, HTGR

---

+ 1 : Planning Office for Safety and Nuclear Security, Safety and Nuclear Security Administration Department

※1 : Collaborating Engineer

\*1 : KAJI Technology Corporation



## 目次

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1. はじめに                  | 1  |
| 2. 設備の概要                 | 2  |
| 2.1 HTTR の概要             | 2  |
| 2.2 原子炉補助施設の概要           | 2  |
| 2.3 ガス圧縮機の構造             | 4  |
| 3. シールオイル漏れの発生状況         | 5  |
| 3.1 これまでの運転状況及び対策        | 5  |
| 3.2 シールオイル漏れ対策後の供用後検査    | 5  |
| 3.3 その他の設備のシールオイル漏れの発生状況 | 7  |
| 4. シールオイル漏れの原因特定         | 8  |
| 4.1 シールオイルへの摩耗粉混入による影響評価 | 8  |
| 4.2 シールオイルの粘度による影響評価     | 8  |
| 4.3 シール材の材質再変更           | 9  |
| 4.4 シールオイル漏れの原因調査の結果     | 9  |
| 4.5 シール材の選定              | 9  |
| 5. 今後の対策                 | 11 |
| 5.1 バリシールの運用方法           | 11 |
| 5.2 シールオイル漏れ量の判定方法       | 11 |
| 5.3 シールオイル補給時の改善事項       | 12 |
| 6. おわりに                  | 13 |
| 謝辞                       | 13 |
| 参考文献                     | 13 |

## Contents

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction                                              | 1  |
| 2. Outline of HTTR                                           | 2  |
| 2.1 Outline of HTTR facility                                 | 2  |
| 2.2 Outline of reactor assistance facility                   | 2  |
| 2.3 Structures of gas compressor                             | 4  |
| 3. Occurrence details of seal-oil leakage                    | 5  |
| 3.1 Conditions operating of the past and measures            | 5  |
| 3.2 After-service inspection after seal-oil leakage measures | 5  |
| 3.3 Seal-oil leakage occurrence of other equipment           | 7  |
| 4. Specific cause of seal-oil leak                           | 8  |
| 4.1 Assessment of seal-oil abrasion powder mixed impact      | 8  |
| 4.2 Seal-oil viscosity impact assessment                     | 8  |
| 4.3 Material change of the sealing material                  | 9  |
| 4.4 Seal-oil leaks cause specific results                    | 9  |
| 4.5 Selection of the sealing material                        | 9  |
| 5. Future measures                                           | 11 |
| 5.1 Gas compressor operation method                          | 11 |
| 5.2 Judgment of seal-oil leakage amount                      | 11 |
| 5.3 Improved matters at the time of seal-oil supply          | 12 |
| 6. Conclusion                                                | 13 |
| Acknowledgements                                             | 13 |
| References                                                   | 13 |

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター（以下「大洗センター」という。）の高温工学試験研究炉（HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor）<sup>1)</sup>は、高温ガス炉技術基盤の確立および高度化並びに高温工学に関する先端的基礎研究を積極的に進めるための施設として建設された日本初の高温ガス炉である。

HTTR は平成 10 年 11 月に初臨界した後、平成 11 年 9 月から出力上昇試験<sup>2)</sup>を開始し、平成 13 年 12 月に定格熱出力 30MW で原子炉出口冷却材温度 850℃を達成し、平成 14 年 3 月に定格運転（原子炉出口冷却材温度 850℃までの運転）の使用前検査合格証を取得した。その後、定常運転を実施すると共に、平成 15 年 3 月からは高温ガス炉の優れた固有の安全性を実証する目的で安全性実証試験を行い、平成 16 年 4 月に定格熱出力 30MW で原子炉出口冷却材温度 950℃を達成し<sup>3)</sup>、平成 16 年 6 月に高温試験運転（原子炉出口冷却材温度 950℃までの運転）の使用前検査合格証を取得した。また、平成 19 年 3 月から平成 19 年 5 月にかけては、定格・並列運転モードにおいて、約 30MW での 30 日間長期連続運転を実証した。さらに、平成 21 年 11 月から平成 22 年 3 月にかけて、高温試験・並列運転モードにおいて、約 30MW での 50 日間連続運転を達成した。

今後は、HTTR の運転管理・保守管理技術の確立から、高温ガス炉開発のための HTTR を用いた運転・試験の実施へと軸足を移しながら、引き続き、高温ガス炉の優れた安全性を実証するための安全性実証試験等を進めていく計画である。

HTTR を構成する施設のうち、原子炉の運転及び安全をサポートする原子炉補助施設には、往復圧縮機型のガス循環機及びヘリウム移送圧縮機（以下「ガス圧縮機」という。）が設置されている。このガス圧縮機は冷却材漏洩防止等の観点から複雑なロッドシール機構を有しているが、原子炉運転中におけるシールオイル漏れが頻発しており、長期連続運転における信頼性に問題があった。シールオイル漏れを起こしたガス圧縮機を点検した結果、シールオイル漏れの直接的な原因は、ロッドシール機構内のメタルスプリングを内蔵したポリウレタン製のシール材（以下「バリシール」という。）が限界摺動特性を超えた範囲で使用していたために、バリシールとピストンロッド摺動部のシールを行うリップ（以下「リップ部」という。）が摩耗・変形してしまったことであった。このため、長期連続運転に耐え得るバリシールの選定を行い、ポリウレタン製からテフロン製への交換を行った。

その結果、1 次冷却材の純化（不純物の除去）等を行うための設備（以下「1 次ヘリウム純化設備」という。）のガス圧縮機については、約 3000 時間の運転を行ってもシールオイル漏れが発生しなかった。また、残存寿命評価を行ったところ、約 12000 時間の残存寿命があることも分かった。

しかし、その他のガス圧縮機については、依然としてシールオイル漏れを防止できない状況である。

本報は、ガス圧縮機のシールオイル漏れ対策を再検討し、今後の点検方法等を含めた改善方法について検討した結果を纏めたものである。

## 2. 設備の概要

### 2.1 HTTR の概要

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

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

HTTR の運転には、2 つの原子炉出口冷却材温度運転モードと 2 つの系統的な運転モードがある。原子炉出口冷却材温度運転モードについては、定格熱出力 30MW で原子炉出口冷却材温度が 850℃ となる「定格運転」と、同定格熱出力で原子炉出口冷却材温度が 950℃ となる「高温試験運転」がある。これらの運転モードは、1 次冷却材流量を変化させることで、原子炉出口冷却材温度を変化させている。また系統的な運転モードには、定格熱出力 30MW 時に、PPWC で 20MW、IHX・SPWC で 10MW の除熱を行う「並列運転」と、IHX・SPWC は使用せずに PPWC のみで 30MW の除熱を行う「単独運転」がある。HTTR ではこれらの 2 つの運転モードが組み合わされており、運転モードは通常「定格／単独」運転等のように呼ばれている。

### 2.2 原子炉補助施設の概要

原子炉の運転及び安全をサポートする原子炉補助施設には、1 次・2 次ヘリウム純化設備、1 次・2 次ヘリウム貯蔵供給設備及び 1 次・2 次ヘリウムサンプリング設備がある。

#### 2.2.1 1 次ヘリウム純化設備

1 次ヘリウム純化設備の系統を図 2.2 に示す。1 次ヘリウム純化設備は、原子炉圧力容器内の黒鉛構造物及び 1 次冷却設備等の金属構造物の腐食低減、並びに 1 次冷却設備の循環放射能低減のために、1 次冷却材の純化（不純物の除去）等を行うための設備であり、1 次冷却材の純化等を行うための「主系統」とトラップ類を再生するための「再生系統」の 2 系統で構成されている。

主系統は、補助冷却設備、1 次ヘリウムサンプリング設備及び燃料破損検出装置から 1 次ヘリウム純化設備に入る冷却材を純化して補助冷却設備、スタンドパイプ及び燃料破損検出装置に戻す系統で、入口フィルタ、プレチャコールトラップ、入口加熱器、酸化銅反応筒、冷却器、モレキュラーシーブトラップ、コールドチャコールトラップ、ガス圧縮機用フィルタ、ガス圧縮機、戻り加熱器等から構成されている。

再生系統は、酸化銅反応筒、モレキュラーシーブトラップ及びコールドチャコールトラップを再生するための系統で、再生系冷却器、再生系ガス圧縮機、再生系加熱器、真空ポンプ等から構成されている。

1 次ヘリウム純化設備にあるガス圧縮機は、主系統に 2 台、再生系統に 1 台設置されている。

各ガス圧縮機の仕様を表 2.2 に示す。

### 2.2.2 2 次ヘリウム純化設備

2 次ヘリウム純化設備の系統を図 2.3 に示す。2 次ヘリウム純化設備は、2 次ヘリウム冷却設備の金属構造物の腐食低減のために、2 次冷却材の純化（不純物の除去）等を行うための設備であり、2 次冷却材の純化等を行うための「主系統」とトラップ類を再生するための「再生系統」の 2 系統で構成されている。

主系統は、2 次ヘリウム冷却設備から 2 次ヘリウム純化設備に入る冷却材を純化して 2 次ヘリウム冷却設備に戻す系統で、入口フィルタ、入口加熱器、酸化銅反応筒、冷却器、モレキュラーシーブトラップ、コールドチャコールトラップ、ガス圧縮機用フィルタ、ガス圧縮機、戻り加熱器等から構成されている。

再生系統は、酸化銅反応筒、モレキュラーシーブトラップ及びコールドチャコールトラップを再生するための系統で、再生系冷却器、再生系ガス圧縮機、再生系加熱器、真空ポンプ等から構成されている。

2 次ヘリウム純化設備にあるガス圧縮機は、主系統に 2 台、再生系統に 1 台設置されている。各ガス圧縮機の仕様を表 2.3 に示す。

### 2.2.3 1 次ヘリウム貯蔵供給設備

1 次ヘリウム貯蔵供給設備の系統を図 2.4 に示す。1 次ヘリウム貯蔵供給設備は、1 次冷却材の貯蔵供給及び圧力調整等を行うための設備であり、1 次ヘリウム純化設備を介して 1 次冷却材の充填・排出・圧力調整を行うための「貯蔵供給ライン」、外部からの新規ヘリウムガスを受け入れる「新ヘリウム受入ライン」及び余剰ヘリウムガスを排出する「余剰ヘリウム排出ライン」の 3 ラインで構成されている。

1 次ヘリウム貯蔵供給設備は、貯蔵タンク、供給タンク、移送圧縮機等から構成されており、ガス圧縮機は、2 台設置されている。移送圧縮機の仕様を表 2.4 に示す。

### 2.2.4 2 次ヘリウム貯蔵供給設備

2 次ヘリウム貯蔵供給設備の系統を図 2.5 に示す。2 次ヘリウム貯蔵供給設備は、2 次冷却材の貯蔵供給及び圧力調整等を行うための設備であり、2 次ヘリウム純化設備を介して 2 次冷却材の充填・排出・圧力調整を行うための「貯蔵供給ライン」及び外部からの新規ヘリウムガスを受け入れる「新ヘリウム受入ライン」の 2 ラインで構成されている。

2 次ヘリウム貯蔵供給設備は、貯蔵タンク、供給タンク、移送圧縮機等から構成されており、ガス圧縮機は、2 台設置されている。移送圧縮機の仕様を表 2.5 に示す。

### 2.2.5 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を図 2.6 に示す。1 次ヘリウムサンプリング設備は、1 次冷却材の採取・分析を行うための設備であり、1 次冷却材の化学的不純物濃度及び放射性不純物濃度を分析するための「サンプリング系統」、分析機器へ高純度ヘリウムガス(キャリアガス)及び標準ガスを供給するための「キャリアガス・標準ガス供給系統」の 2 系統で構成されている。

1 次ヘリウムサンプリング設備は、分析機器、ガス圧縮機、グローブボックス等から構成され

ており、ガス圧縮機は、2 台設置されている。ガス圧縮機の仕様を表 2.6 に示す。

### 2.2.6 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を図 2.7 に示す。2 次ヘリウムサンプリング設備は、2 次冷却材の採取・分析を行うための設備であり、2 次冷却材の化学的不純物濃度及び放射性不純物濃度を分析するための「サンプリング系統」、分析機器へ高純度ヘリウムガス(キャリアガス)及び標準ガスを供給するための「キャリアガス・標準ガス供給系統」の 2 系統で構成されている。

2 次ヘリウムサンプリング設備は、分析機器、ガス圧縮機等から構成されており、ガス圧縮機は、2 台設置されている。ガス圧縮機の仕様を表 2.7 に示す。

## 2.3 ガス圧縮機の構造

HTTR に設置しているガス圧縮機は、往復圧縮機の型式を採用している。

往復圧縮機は、圧縮機本体、電動機、Vベルト、圧力脈動緩衝タンク、冷却器等の機器とこれらを連結する配管によって構成されており、圧縮機本体は、回転運動を往復運動へ変換する「クランク機構」と、ピストンロッドを介してクランク機構に連結されガスを圧縮する「ピストン機構」から構成されている。クランク機構はプーリ、クランク室、クランク軸、連接棒、クランク軸受、クロスヘッド等により、ピストン機構はシリンダ、シリンダカバー、吸入吐出弁、ピストン、グランドパッキン等により構成されている。往復圧縮機の概略構造を図 2.8 に示す。

また、HTTR のガス圧縮機は、クランク機構からピストン機構への潤滑油混入防止及びピストン機構からクランク機構へのヘリウムガスの漏洩防止の観点から、ピストン機構とクランク機構とを完全に仕切る必要があり、ピストンロッドの中間位置にシールオイル(シリコンオイル)、バリシール等で構成される複雑な「ロッドシール機構」を有している。

ロッドシール機構を図 2.9 に示す。ロッドシール機構はシールオイルボックス部、レベルスイッチチャンバ部で構成されており、漏れたシールオイルはリークオイル溜めに回収できる構造となっている。また、1 次ヘリウム純化設備及び 1 次ヘリウムサンプリング設備にあるガス圧縮機は運転中立入制限がある部屋に設置されているため、循環式のシールオイル補給機構が別途設置されている。シールオイルボックス部はシールオイル室、シールオイル、シール構成部位、リークオイル回収部位等により、レベルスイッチチャンバ部はチャンバ室、覗き窓、レベルスイッチ等により構成されている。また、ロッドシール機能喪失(シールオイル全量喪失)前に、レベルスイッチを介してガス圧縮機停止等のインターロックが動作することにより、クランク機構へのヘリウムガス漏洩を防止できる構造となっている。

シールボックス部を図 2.10 に示す。バリシールは単動シールで、U 字型のシールジャケットと V 字型の耐腐食性スプリングとで構成され、シールオイル室下部に上下 2 個あり、往復するピストンロッドをシール材のリップで押えることにより、高压側(冷却材と同圧力となったシールオイル)と低压側(大気)間をシールしている。



### 3. シールオイル漏れの発生状況

#### 3.1 これまでの運転状況及び対策

HTTR のガス圧縮機は、冷却材漏洩防止等の観点から複雑なロッドシール機構を有しているが、原子炉運転中においてシールオイル漏れが頻繁に発生しており、長期連続運転における信頼性に問題があった。

これまでの運転において、シールオイル漏れが発生するまでの運転時間は数十時間～3000 時間の範囲であり、機種により様々であるが、メーカー保証動作時間である 6000 時間に比べて大幅に短い。シールオイル漏れが発生した場合は、予備機に切り替える必要があることから、原子炉の運転を妨げる要因となる可能性があった。そこで、シールオイル漏れの原因を調査するため、ガス圧縮機を分解点検した結果、直接的な原因は、ロッドシール機構内のバリシールと呼ばれるメタルスプリングを内蔵したポリウレタン製のシールが、限界摺動特性を超えた範囲で使用していたために、リップ部が摩耗・変形したことであった。そのため、長期連続運転に耐え得ることが可能なバリシールの選定を行うこととなった。

製作メーカーの工場試験装置を用いた、摺動速度 1.6m/s の試験において、シールオイル漏れが発生しなかったことから、テフロン製のバリシールを 1 次ヘリウム純化設備及び 2 次ヘリウム貯蔵供給設備ガス圧縮機に取り付けて、耐久性実証試験を行った。

その結果、試験後に行った目視点検及び断面形状の確認結果から、バリシールのリップに変形等はなく、リップ断面の摩耗量も極微量であり、十分な寿命を有するものと判断した。

また、シールオイル漏れが頻発する運転条件の場合においても、漏れ量は微量であることから、実用上問題ないと判断し、テフロン製バリシールを採用することとした。

その後、順次他のガス圧縮機に組み込んで、その有効性を確認することとした。<sup>5)</sup>

#### 3.2 シールオイル漏れ対策後の供用後検査

1 次ヘリウム純化設備ガス圧縮機 161B1A は、定格単独運転第 8 サイクル (RS-8) 及び定格並列運転第 10 サイクル (RP-10) における、約 3000 時間の運転では、シールオイル漏れは発生しなかった。

そこで、分解点検を行い、構成部品の使用状態の確認及び、テフロン製バリシール供用後の残存寿命評価を行った。

構成部品及びバリシールの供用後検査結果を以下に示す。

##### (1) 構成部品の供用後検査

##### ① 下部ディスタンスピース

クランク室からのクランク油上りが有り、クランク油が極微量たまっていた。

##### ② 上部ディスタンスピース

内部に微量のグラントパッキンの摩耗粉が付着していた。

##### ③ シールオイル

シールオイルには、バリシール及びグラントパッキンの摩耗粉と思われるものが混入し、僅

かに黒く濁っていた。また、注入量と採取量に変化はなく、漏れはなかった。

#### ④ シール材ホルダー及びバリシール

シール材ホルダーの組立高さは基準値に対し、許容差内であった。

また、シール材ホルダーを分解し、バリシールの外観を確認したところ、バリシールに変形等は無かったが、上側リップ部に一部縦傷を確認した。下側リップ部については、傷、変形等は確認されなかった。

#### ⑤ ピストンリング、ライダーリング、グランドパッキン

ピストンリング及びライダーリングについては、リングの破損及び、偏摩耗は無かった。ピストンリングは、摩耗度を 0.1mm としているが、分解点検時の寸法については、基本寸法に対し、使用限界値を超えていた。

ライダーリングについては、リングの破損及び、偏摩耗は無く、寸法も基本寸法に対し、許容差内であった。

グランドパッキンについては、リングの破損及び、偏摩耗は無く、基本寸法に対し、許容差内であった。

#### ⑥ ピストンロッド

表面に有害な傷、錆及びメッキ剥離等の発生は無く、寸法も基本寸法に対し、許容差内であった。

### (2) バリシールの供用後検査

#### ① 外観目視検査

上部バリシールは、リップ部に深い傷があり、摺動痕が確認されたが、摩耗は殆んどなかった。

また、下部バリシールは、摺動痕とともに摩耗が若干確認された。

このことから、上部バリシールは機能せず、下部バリシールのみでシールしていたものと推測される。

図 3.1 に供用後のバリシールを、図 3.2 にバリシールリップの断面形状確認結果を示す。

#### ② 摩耗量からの残存寿命評価

下部バリシールについて、リップ部の摩耗状況を調査し、リップ断面形状及び、摩耗量と摩耗限度量の関係から残存寿命を、バリシールメーカー（日本トレルボルグシーリングソリューションズ(株)）の評価方法<sup>6)</sup>により算出すると、12000 時間程度となる。

以上の結果から、161B1A については、バリシールをテフロン製に交換後、約 3000 時間の運転を行ってもシールオイル漏れがなく、供用後の残存寿命評価の結果 12000 時間程度の残存寿命があると推定され、シール性能担保期間の 6000 時間を大幅に上回ることがわかった。



### 3.3 その他の設備のシールオイル漏れの発生状況

1 次ヘリウム純化設備以外の設備について、シールオイル漏れの発生状況を以下に示す。また、表 3.1 にバリシール材質変更前後のシールオイル漏れ状況を示す。

#### (1) ヘリウムサンプリング設備

1 次、2 次系ともに、シールオイル漏れが頻発しており、特に 166CP1B のシールオイル漏れ発生時間は、約 50～80 時間であった。これは、バリシール材質変更前より、約 20～40 倍も速くなっている。

また、HP-11-4 における 165CP1A のシールオイル漏れ状況を図 3.3 に示す。165CP1A は、平成 21 年 11 月 25 日 14 時 09 分に起動後、24 日後（約 560 時間後）に約 60cc のシールオイル漏れを確認した。以降、漏れはなく経過監視していたが、平成 22 年 1 月 11 日 0 時頃にシールオイル漏れが再び発生し、1 月 13 日 17 時頃にシールオイルを補給した。その後、3 日間（約 72 時間）は漏れなかったが、そこから 12 日間で約 280cc のシールオイルが漏れたことから、ガス圧縮機を切り替えた。

#### (2) 2 次ヘリウム純化設備

バリシールの材質変更後から、シールオイル漏れが頻発しており、162B1A、162B1B の漏れ発生時間は、約 30 時間であった。

表 3.1 に示すように、バリシール材質変更前に比べ、162B1A、162B1B とも、シールオイル漏れの発生時間が短縮しており漏れ発生回数についても増加した。

#### (3) ヘリウム貯蔵供給設備

1 次、2 次系とも漏れ発生時間は、約 2～200 時間の範囲であり、バリシール材質変更前に比べ、シールオイル漏れ発生時間は短くなったが、シールオイル漏れ量は減少している。

また、HP-11-4 における 164COM1B のシールオイル漏れ状況を図 3.4 に示す。164COM1A は、平成 21 年 12 月 3 日に起動したが、10 日後（約 50 時間）にシールオイル漏れ量が一気に 600cc を超えたため、ガス圧縮機の切替えを行った。

164COM1B は、微量のシールオイル漏れが継続していたが、許容漏れ量には到達しなかったためシールオイルの補給は行わなかった。

## 4. シールオイル漏れの原因特定

これまでに、シールオイル漏れ対策としてバリシールの材質変更を行ったが、1次ヘリウム純化設備ガス圧縮機を除き、シールオイル漏れが継続していることから、その原因をバリシール自体に起因するものと機器固有の特性等に起因するものの観点で分類して、これまで検討項目として考えられなかったものについて影響の可能性を検討した。

### 4.1 シールオイルへの摩耗粉混入による影響評価

ガス圧縮機の分解点検の結果、シールオイルにグランドパッキンの摩耗粉が混入していることが確認されたことから、その摩耗粉がバリシール摺動部に付着することで、リップ部に傷を発生させたと推定した。そこで、工場試験装置を用いて、シールオイルに混入した摩耗粉が、バリシールに与える影響を評価するための摩耗粉混入試験を行った。

#### (1) 試験方法及び条件

グランドパッキン材をヤスリで人工的に粉化した摩耗粉(実機と同様の約  $1\mu\text{m}$ )をシールオイルに混入して、工場試験装置を吸込圧力  $4.0\text{MPa}$  で 100 時間の連続運転を行い、運転中におけるシールオイル漏れの有無、運転後のバリシールの使用状況（リップ部の傷発生の有無）について調査を行った。

摩耗粉混入量はこれまでの分解点検実績から、摺動速度の遅い 2 次ヘリウム純化設備のグランドパッキン平均摩耗量約  $0.35\text{g}$  と摺動速度の速い 1 次ヘリウム純化設備のグランドパッキン平均摩耗量約  $0.9\text{g}$  の 2 ケースとした。表 4.1 に工場試験装置の仕様を示す。

#### (2) 結果

摩耗粉混入量  $0.35\text{g}$  の試験の結果、試験開始 71 時間後にシールオイル漏れが発生したが、その後は漏れがなかったことから、シールオイル漏れは、初期馴染み等によりシール機能が一時的に低下したものと考えられる。試験後の分解点検では、バリシールのリップ部には傷は無かったが、若干の摩耗が確認された。

摩耗粉混入量  $0.9\text{g}$  の試験の結果、シールオイル漏れは発生しなかったが、試験後の分解点検では、バリシールのリップ部に縦傷が確認された。図 4.1 に摩耗粉混入試験後のバリシール観察結果を示す。

以上の結果から、グランドパッキンの摩耗粉がシールオイルに混入した場合、バリシールのリップ部に傷が発生し、シール機能が低下するが、リップ部に傷が発生した場合でも、シールオイル漏れは発生するとは限らず、摩耗粉がシールオイル漏れの主要原因ではないと推定する。

### 4.2 シールオイルの粘度による影響評価

次に、シールオイルの粘度がバリシールに与える影響を評価するための試験を行った。

#### (1) 試験方法

工場試験装置に注入するシールオイルについて、粘度をパラメータとして、100 時間の連続運転を行い、運転中におけるシールオイル漏れの有無について確認した。

試験で使用したシールオイルは、200cSt、100cSt、50cSt、20cSt、10cSt、1cSt の 6

種類であり、50cSt が実機にて使用しているものである。

表 4.2 にシールオイル粘度確認試験に使用したシールオイルの仕様を示す。

## (2) 結果

高粘度シールオイル（200cSt、100cSt）については、試験後、約 10 時間程度でシールオイル漏れが発生した。逆に、低粘度シールオイル（20cSt、10cSt、1cSt）については、漏れ難いが、バリシールのリップ部に形成された油膜が途切れてしまい、リップ部が摩耗するとともに、その影響からバリシール自体の摩耗粉によりシールオイルが黒ずんでしまった。図 4.2 に試験後のシールオイル観察結果を示す。

以上の結果から、シールオイルの粘度を変更すると、バリシールの寿命低下、または短時間でのシールオイル漏れに繋がると推定し、現状で使用するシールオイルが最適であることを確認した。

## 4.3 シール材の材質再変更

テフロン製バリシールに交換しても、シールオイル漏れが頻発しているヘリウムサンプリング設備の圧縮機 165CP1A、165CP1B、166CP1B 及び 2 次ヘリウム純化設備のガス圧縮機 162B1A、162B1B、162B2 の 6 台について、テフロン製のバリシールの適応性についての評価を行った。

表 3.1 に示すバリシール材質変更前後のシールオイル漏れ状況から、テフロン製バリシールに変更後、シールオイル漏れ発生時間が大幅に早くなり、シールオイル漏れ発生頻度についても増加していることから、これらのうち、2 次ヘリウムサンプリング設備の圧縮機 166CP1B を代表機として選定し、従来まで使用していたポリウレタン製バリシールを組込んで、RS-12 及び RS-13 の運転の中で、有効性確認を行った。

その結果、何れの運転においても、シールオイル漏れは発生しなかったことから、ポリウレタン製のバリシールの方が適していることが分かった。また、他の 5 台についても、ピストン摺動速度が近似していることから、ポリウレタン製が有効であると推定した。

## 4.4 シールオイル漏れの原因検討の結果

シールオイル漏れの原因検討の結果から、以下のことが分かった。

- (1) グランドパッキンの摩耗粉がシールオイルに混入することで、バリシール摺動面に付着し、リップ部の摩耗やシール機能低下に繋がるが、シールオイル漏れの主要な原因ではない。
- (2) シールオイルは粘度による影響があり、従来品が最適である。
- (3) バリシールの材質とピストン摺動速度に相関があり、機種ごとにバリシールを使い分けることが、シールオイル漏れ対策に有効である。

## 4.5 シール材の選定

これまでのシールオイル漏れ原因調査及び運転経験において得られた結果から、テフロン製とポリウレタン製シール材の違いを考察した。また、表 4.3 にシール材の特性を示す。

### (1) テフロン製バリシール

シール材の摺動速度をパラメータとして、停止直後のピストンロッド温度測定により不連

続な温度上昇が無い<sup>5)</sup>か調査した結果、摺動速度 0.64m/s 以上になると、ピストンロッド温度が急上昇する。<sup>5)</sup>

このため、テフロン製は耐熱性に優れていることから、リップ部の変形、変色しにくい<sup>6)</sup>が、リップ部の摩耗、傷は発生しやすい。

## (2) ポリウレタン製バリシール

摺動速度の速い機器に使用するとピストンロッド温度が高くなるため、リップ部の変形、変色が発生するが、耐摩耗性及び耐傷性に優れているため、リップ部の摩耗、傷が発生しにくい。

以上のことから、摺動速度の速い 1 次ヘリウム純化設備及び 1 次・2 次ヘリウム貯蔵供給設備ガス圧縮機は、ピストンロッド温度が高温になるためテフロン製バリシールを使用し、摺動速度の遅い 2 次ヘリウム純化設備及び 1 次・2 次ヘリウムサンプリング設備にはポリウレタン製バリシールを使用することで、摺動速度の使用条件での使い分けをすることが対策に有効であると推定した。

## 5. 今後の対策

### 5.1 バリシールの運用方法

- (1) 1次ヘリウム純化設備ガス圧縮機 161B1A、161B1B については、テフロン製バリシールに変更後、シールオイルが漏れていないことから、今後も継続して使用し、更に有効性を確認していく。
- (2) 1次、2次ヘリウム貯蔵供給設備のヘリウム移送圧縮機 163COM1A、163COM1B、164COM1A、164COM1B については、テフロン製バリシールに変更後もシールオイル漏れが継続して発生しており、現状では有効な対策がない。ピストン摺動速度が速いことから、今後も、テフロン製バリシールを使用することとするが、運転中においては、シールオイルレベルを遠隔監視装置により常時監視するとともに、定期的にシールオイルを補給することで対応していくこととする。
- (3) 1次2次ヘリウムサンプリング設備の圧縮機 165CP1A、166CP1A、166CP1B については、H23年8月までにポリウレタン製バリシールに変更しており、変更後のシールオイル漏れは発生していないことから、今後も継続して使用し、有効性を確認していく。

また、1次ヘリウムサンプリング設備の圧縮機 165CP1B 及び、2次ヘリウム純化設備のガス圧縮機 162B1A、162B1B、162B2 の4台については、2次ヘリウムサンプリング設備の圧縮機 166CP1B の結果を反映し、表 5.1 に示す計画で、順次ポリウレタン製バリシールに変更していくこととする。

### 5.2 シールオイル漏れ量の判定方法

これまでシールオイル漏れ発生の判断は、図 5.1 に示すシールオイルのリークオイル溜めによって行っていたが、リークした全量がリークオイル溜めに導かれず、上下のディスタンスピース内等への漏れもあることから、リークオイル溜めによる判断には誤差がある。

そのため、運転継続可否の判断をするためには、シールオイル漏れ量の基準を、シールオイルレベルスイッチ部とシールオイルタンク（ポンプ付きの圧縮機のみ）の両方の液面量によって評価する必要がある。

また、レベルスイッチ部の液面が可視範囲外まで低下してしまうと監視不可能となることから、可視範囲下限より 2mm 上部（以下「シールオイル補給レベル」という。）まで低下した時点で、表 5.2 に示す単位時間当たりのシールオイル許容漏れ量と比較し、次に示す通り運用することとした。

#### (1) シールオイルタンク液面低下速度での判定

161B1A/B、161B2、165CP1A/B、201COM1A/B の7台については、シールオイルを自己補給することが可能なシールオイルポンプが設置してあることから、図 5.2 に示すシールオイルタンクの液面にて判定する。シールオイルタンク液面がシールオイル補給レベルまで低下し、さらにレベルスイッチ部の液面がシールオイル補給レベルまで低下した場合の運転時間が、表 5.3 に示す基準時間より短い場合、許容範囲を超えた漏れが発生していると判断し、予備機に切り替える措置を行う。（162B2 を除く）また、当該機は、シールオイルを補給し、予備機とする。

なお、シールオイルタンク液面の低下速度で判断する場合、漏れ始めの時期を明確にするため、液面低下が確認された時点でいったんシールオイルを補給し、補給後の運転時間で判断する。

また、シールオイルタンクへのシールオイル補給後の液面が、基準液面からシールオイル補給レベルまで低下した時間が表 5.4 に示す基準時間より短い場合は、シールオイルの許容漏れ量を逸脱しているので、予備機に切り替える（161B2 を除く）措置を行う。

## (2) シールオイルレベルスイッチ液面低下速度での判定

162B1A/B, 162B2, 166CP1A/B, 163COM1A/B, 164COM1A/B の 9 台についてはシールオイルタンクを付属していないため、シールオイル漏れの判断は、図 5.3 に示すレベルスイッチ部の覗き窓によって行う。（漏れ始めの時期が不明確の時は、シールオイルを補給する。）

漏れが始まった時点（液面低下の傾向が確認された時点）または、シールオイルを補給した時点から、レベルスイッチ部の液面がシールオイル補給レベルまで低下した時点までの運転時間が、表 5.5 に示す基準時間より短い場合、許容範囲外の漏れが発生していると判断し、予備機に切り替える処置を行う。（162B2 を除く）また、当該機はシールオイルを補給し、予備機とする。

なお、163COM1A/B, 164COM1A/B は、運転中の圧力変動時にレベルスイッチ部の液面が一時的に変動することがあるため圧力が安定した状態で液面を確認する必要がある。

## (3) シールオイル補給レベルでの判定

シールオイルの液面監視方法は、LAN 回線を使用したインターネットカメラで行い、単位時間当たりの漏れ量を計測する。

表 5.6 にシールオイルが「シールオイル補給レベル」まで到達した場合の総漏れ量を示す。

## 5.3 シールオイル補給時の改善事項

これまでは、シールオイルを補給する場合、シールオイル補給機と、補給口をスウェジロックで接続していたが、操作性と時短効果を考慮し、ワンタッチカップラ式に変更した。

その結果、シールオイル補給作業における作業効率が改善されるとともに、運転員の負担を軽減することができた。

## 6. おわりに

高温工学試験研究炉（HTTR）の原子炉補助施設に設置しているガス圧縮機は、冷却材漏洩防止等の観点から複雑なロッドシール機構を有しているが、そこからのシールオイル漏れが頻発していたため、シール材の変更により洩れ対策を行ってきた。

今回の検討の結果、ガス圧縮機固有の性能等に適合したシール材を使用することが、シールオイル漏れ対策に有効であることを確認するとともに、シールオイル漏れに対する判断基準と運用方法を新たに設定した。

今後は、HTTR の安定運転に向けて、引き続き、ロッドシール機構の信頼性を検証するとともに、ガス圧縮機の運転技術を蓄積していく。

## 謝辞

本検討を行うにあたり、多大なご指導、ご助言を頂いた高温工学試験研究炉部長 石原 正博氏、同部次長 沢 和弘氏に感謝致します。

また、多大なるご助力を頂いた（株）加地テック取締役社長 砥上 剛氏、及び同社の皆様方、並びに（株）橋本商会機器営業部長 竹馬一郎氏、営業部 林田博之氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Saito S. et al. : “ Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) ” JAERI 1332 (1994),247p.
- 2) Fujikawa S. et al. : “ Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950℃ in HTTR ”, J. Nucl. Sci. Technol., 41, 12(2004), pp.1245-1254.
- 3) 藤川正剛他 : “HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”, 日本原子力学会和文論文誌, 1, 4(2002), pp.361-372.
- 4) 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）原子炉施設の設置」”(1989).
- 5) 小山直他 : “HTTR におけるガス圧縮機のシールオイル漏れに関する改善” ,JAEA-Technology 2007-047 , 2007 , 40p.
- 6) 日本トレルボルグシーリングソリューションズ(株) , 私信.



表 2.1 HTTR の主要目

| 項 目        | 仕 様                          |
|------------|------------------------------|
| 原子炉熱出力     | 30MW                         |
| 燃料         | 二酸化ウラン・被覆燃料粒子                |
| ウラン濃縮度     | 3～10% (平均 6%)                |
| 燃料体形式      | ピン・イン・ブロック型                  |
| 出力密度       | 2.5MW/m <sup>3</sup>         |
| 炉心構造材      | 黒鉛                           |
| 炉心有効高さ     | 2.9m                         |
| 炉心等価直径     | 2.3m                         |
| 主冷却回路数     | 1 ループ                        |
| 冷却材        | ヘリウムガス                       |
| 1 次系冷却材圧力  | 4MPa                         |
| 原子炉入口冷却材温度 | 395℃                         |
| 原子炉出口冷却材温度 | 850℃ (定格運転)<br>950℃ (高温試験運転) |

表 2.2 1 次ヘリウム純化設備 ガス圧縮機 仕様

|      | 項 目  | 仕 様           |
|------|------|---------------|
| 主系統  | 機器名称 | ガス圧縮機(A)／(B)  |
|      | 機器番号 | 161B1A／161B1B |
|      | 型 式  | 往復動無給油式       |
|      | 数 量  | 2 台           |
|      | 流 量  | 200kg/h       |
|      | 設計圧力 | 4.7MPa        |
|      | 設計温度 | 100℃          |
|      | 摺動速度 | 1.37m/s       |
| 再生系統 | 機器名称 | 再生系ガス圧縮機      |
|      | 機器番号 | 161B2         |
|      | 型 式  | 往復動無給油式       |
|      | 数 量  | 1 台           |
|      | 流 量  | 50kg/h        |
|      | 設計圧力 | 4.7MPa        |
|      | 設計温度 | 100℃          |
|      | 摺動速度 | 1.07m/s       |

表 2.3 2 次ヘリウム純化設備 ガス圧縮機 仕様

| 項 目  | 仕 様           |
|------|---------------|
| 主系統  | 機器名称          |
|      | ガス圧縮機(A)/(B)  |
|      | 機器番号          |
|      | 162B1A/162B1B |
|      | 型 式           |
|      | 往復動無給油式       |
|      | 数 量           |
|      | 2 台           |
| 再生系統 | 流 量           |
|      | 10kg/h        |
|      | 設計圧力          |
|      | 5.0MPa        |
|      | 設計温度          |
|      | 100℃          |
|      | 摺動速度          |
|      | 0.64m/s       |
| 再生系統 | 機器名称          |
|      | 再生系ガス圧縮機      |
|      | 機器番号          |
|      | 162B2         |
|      | 型 式           |
|      | 往復動無給油式       |
|      | 数 量           |
|      | 1 台           |
| 再生系統 | 流 量           |
|      | 6.8kg/h       |
|      | 設計圧力          |
|      | 5.0MPa        |
|      | 設計温度          |
|      | 100℃          |
|      | 摺動速度          |
|      | 0.32m/s       |

表 2.4 1 次ヘリウム貯蔵供給設備 ガス圧縮機 仕様

| 項 目  | 仕 様               |
|------|-------------------|
| 機器名称 | ヘリウム移送圧縮機(A)/(B)  |
| 機器番号 | 163COM1A/163COM1B |
| 型 式  | 往復動無給油式           |
| 数 量  | 2 台               |
| 吐出圧力 | 7.2MPa            |
| 設計圧力 | 4.7、8.6MPa        |
| 設計温度 | 80、220℃           |
| 摺動速度 | 1.77m/s           |

表 2.5 2次ヘリウム貯蔵供給設備 ガス圧縮機 仕様

| 項 目  | 仕 様               |
|------|-------------------|
| 機器名称 | ヘリウム移送圧縮機(A)/(B)  |
| 機器番号 | 164COM1A/164COM1B |
| 型 式  | 往復動無給油式           |
| 数 量  | 2 台               |
| 吐出圧力 | 7.2MPa            |
| 設計圧力 | 5.0、8.6MPa        |
| 設計温度 | 80、220℃           |
| 摺動速度 | 1.77m/s           |

表 2.6 1次ヘリウムサンプリング設備 ガス圧縮機 仕様

| 項 目  | 仕 様             |
|------|-----------------|
| 機器名称 | 圧縮機(A)/(B)      |
| 機器番号 | 165CP1A/165CP1B |
| 型 式  | 往復動無給油式         |
| 数 量  | 2 台             |
| 昇圧値  | 0.19MPa         |
| 設計圧力 | 4.7MPa          |
| 設計温度 | 60℃             |
| 摺動速度 | 0.32m/s         |

表 2.7 2次ヘリウムサンプリング設備 ガス圧縮機 仕様

| 項 目  | 仕 様             |
|------|-----------------|
| 機器名称 | 圧縮機(A)/(B)      |
| 機器番号 | 166CP1A/166CP1B |
| 型 式  | 往復動無給油式         |
| 数 量  | 2 台             |
| 昇圧値  | 0.19MPa         |
| 設計圧力 | 5.0MPa          |
| 設計温度 | 60℃             |
| 摺動速度 | 0.32m/s         |

表 3.1 バリシール材質変更前後のシールオイル漏れ状況

| 対象機器     | 変更前<br>(ポリウレタン製) |          |        | 変更前<br>(テフロン製) |           |       |
|----------|------------------|----------|--------|----------------|-----------|-------|
|          | 運転サイクル           | 発生日時     | 運転時間※  | 運転サイクル         | 発生日時      | 運転時間※ |
| 161B1A   | RS-2             | H15.1.31 | 約 460  |                |           |       |
|          | RS-4             | H15.8.4  | 約 740  |                |           |       |
| 161B1B   | PT-5             | H16.4.7  | 約 1370 |                |           |       |
|          | RS-7             | H17.8.20 | 約 590  |                |           |       |
| 162B1A   | 出力上昇試験(4)        | H14.2.27 | 約 3630 | HP-11-1        | H21.1.23  | 約 30  |
|          |                  |          |        | HP-11-4        | H21.11.28 | 約 80  |
| 162B1B   |                  |          |        | HP-11-2        | H21.4.12  | 約 420 |
|          |                  |          |        | 確認運転           | H21.10.3  | 約 80  |
|          |                  |          |        | RS-12          | H22.12.3  | 約 45  |
| 162B2    |                  |          |        | HP-11-4        | H22.3.9   | 約 38  |
|          |                  |          |        | RS-13          | H23.1.26  | 約 32  |
| 163COM1A | PT-5             | H16.5.27 | 約 110  | RS-8           | H18.9.26  | 約 15  |
|          | RS-6             | H17.1.12 | 約 30   | RS-12          | H22.12.2  | 約 2   |
| 163COM1B | RS-4             | H15.7.30 | 約 280  | RS-9           | H19.1.17  | 約 200 |
|          | PT-5             | H16.5.2  | 約 340  | HP-11-1        | H21.1.19  | 約 25  |
|          |                  |          |        | RS-13          | H23.1.10  | 約 5   |
| 164COM1A | 出力上昇試験(2)        | H12.6.30 | 約 1300 | HP-11-4        | H19.1.17  | 約 50  |
|          | RS-2             | H15.1.23 | 約 900  |                |           |       |
|          | RS-5             | H16.2.27 | 約 900  |                |           |       |
|          | PT-5             | H16.6.11 | 約 330  |                |           |       |
|          | RS-6             | H17.2.12 | 約 20   |                |           |       |
| 164COM1B | RS-2             | H15.1.23 | 約 270  | RS-8           | H18.10.26 | 約 105 |
|          | PT-5             | H16.3.24 | 約 270  | RS-12          | H22.12.11 | 約 85  |
|          | RS-6             | H17.2.11 | 約 80   |                |           |       |
|          | RS-7             | H17.8.20 | 約 710  |                |           |       |
| 165CP1A  | 出力上昇試験(4)        | H14.2.13 | 約 3160 | PT-10          | H19.4.14  | 約 820 |
|          |                  |          |        | HP-11-4        | H21.12.04 | 約 225 |
| 165CP1B  |                  |          |        | PT-10          | H19.8.31  | 約 575 |
|          |                  |          |        | HP-11-2        | H21.4.13  | 約 670 |
|          |                  |          |        | 確認運転           | H21.10.3  | 約 80  |
|          |                  |          |        | RS-12          | H22.12.5  | 約 105 |
| 166CP1A  | 出力上昇試験(4)        | H14.2.2  | 約 3290 |                |           |       |
|          | PT-5             | H16.6.22 | 約 3120 |                |           |       |
| 166CP1B  | PT-5             | H16.4.21 | 約 1960 | RS-9           | H19.1.17  | 約 50  |
|          |                  |          |        | HP-11-1        | H21.1.15  | 約 60  |
|          |                  |          |        | HP-11-3        | H21.5.13  | 約 80  |
|          |                  |          |        | 確認運転           | H21.10.3  | 約 80  |

※：分解点検後からシールオイル漏れ発生までの運転時間

表 4.1 工場試験装置 ガス圧縮機 仕様

| 項 目   | 仕 様                      |
|-------|--------------------------|
| 型 式   | 往復動無給油式                  |
| シリンダ径 | 50mm                     |
| ストローク | 60mm                     |
| 回転速度  | 160～800min <sup>-1</sup> |
| 吐出圧力  | 5.0MPa                   |
| 摺動速度  | 0.32m/s～1.6m/s           |

表 4.2 シールオイルの仕様

| 製品名        | 比重<br>(25℃) | 粘度<br>(25℃)mm <sup>2</sup> /s<br>[cSt] | 揮発分<br>(150℃,24h)% | 粘度温<br>度係<br>数 | 屈折率<br>(n <sub>D</sub> <sup>25</sup> ) | 引火点<br>℃ | 流動点<br>℃ |
|------------|-------------|----------------------------------------|--------------------|----------------|----------------------------------------|----------|----------|
| TSF451-1   | 0.758       | 1                                      | Bp152℃             | 0.37           | 1.382                                  | 35       | -70 以下   |
| TSF451-10  | 0.935       | 10                                     | 25                 | 0.56           | 1.399                                  | 190      | -60 以下   |
| TSF451-20  | 0.945       | 20                                     | 15                 | 0.57           | 1.401                                  | 215      | -55 以下   |
| TSF451-50  | 0.960       | 50                                     | 0.3                | 0.59           | 1.403                                  | 330      | -50 以下   |
| TSF451-100 | 0.968       | 100                                    | 0.3                | 0.59           | 1.403                                  | 330      | -50 以下   |
| TSF451-200 | 0.969       | 200                                    | 0.3                | 0.59           | 1.403                                  | 330      | -50 以下   |

表 4.3 シール材の特性

| 特性項目                   | テフロン | ポリウレタン |
|------------------------|------|--------|
| 比重(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.07 | 1.20   |
| 硬度(ショア D)              | 64   | 68     |
| 引張強度(MPa)              | 20   | 54     |
| 伸び(%)                  | 185  | 200    |
| 耐摩耗性                   | 良    | 優      |
| 耐傷性                    | 可    | 優      |
| 耐熱性                    | 優    | 良      |

表 5.1 ポリウレタン製バリシール組込み計画

| 名 称            | 機器番号    | H23(済) | H26 | H27 |
|----------------|---------|--------|-----|-----|
| 2次ヘリウム純化設備     | 162B1A  |        |     | ○   |
|                | 162B1B  |        |     | ○   |
|                | 162B2   |        | ○   |     |
| 1次ヘリウムサンプリング設備 | 165CP1A |        |     | ○   |
|                | 165CP1B | ○      |     |     |
| 2次ヘリウムサンプリング設備 | 166CP1A | ○      |     |     |
|                | 166CP1B | ○      |     |     |

表 5.2 単位時間当たりのシールオイル許容漏れ量

| 機 番                           | 161B1A/B | 161B2 | 162B1A/B | 162B2<br>165CP1A/B<br>166CP1A/B | 163COM1A/B<br>164COM1A/B |
|-------------------------------|----------|-------|----------|---------------------------------|--------------------------|
| ロッド径<br>d(mm)                 | 30       | 30    | 30       | 30                              | 40                       |
| ストローク<br>(m)                  | 0.10     | 0.10  | 0.06     | 0.03                            | 0.14                     |
| 回転速度<br>(min <sup>-1</sup> )  | 400      | 320   | 320      | 320                             | 380                      |
| 摺動距離<br>(m/h)                 | 4800     | 3840  | 2304     | 1152                            | 6384                     |
| 許容漏れ量 <sup>※3</sup><br>(cc/h) | 11.52    | 9.21  | 5.52     | 2.76                            | 20.42                    |

※3 : JIS B 8354 「複動油圧シリンダ」に定める C 種基準の準用による算出

表 5.3 シールオイル補給レベルまで低下した時の基準時間(ポンプ付き圧縮機)

| ガス圧縮機      | 基準時間※  |
|------------|--------|
| 161B1A/B   | 190 時間 |
| 161B2      | 238 時間 |
| 165CP1A/B  | 797 時間 |
| 201COM1A/B | 129 時間 |

※:各ガス圧縮機の許容漏れ量からシールオイル可視範囲内液面の単位面積当たりの容積 8.2cc/mm による算出

表 5.4 シールオイル補給後、シールオイル補給レベルまで低下した時の基準時間

| ガス圧縮機      | 基準時間※      |
|------------|------------|
| 161B1A/B   | 5 時間 40 分  |
| 161B2      | 7 時間 7 分   |
| 165CP1A/B  | 23 時間 46 分 |
| 201COM1A/B | 3 時間 51 分  |

※: 表 5.3 の基準時間と同じ定義

表 5.5 シールオイル補給レベルまで低下した時の基準時間(ポンプ無し圧縮機)

| ガス圧縮機      | 基準時間※ |
|------------|-------|
| 162B1A/B   | 36 時間 |
| 162B2      | 72 時間 |
| 166CP1A/B  | 72 時間 |
| 163COM1A/B | 39 時間 |
| 164COM1A/B | 39 時間 |

※: 表 5.3 の基準時間と同じ定義

表 5.6 シールオイル補給レベルまで低下した時の総漏れ量

| 機 番                          | φ30 ロッド機                                  |                             | φ40 ロッド機                 |
|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                              | 161B1A/B,161B2<br>165CP1A/B<br>201COM1A/B | 162B1A/B,162B2<br>166CP1A/B | 163COM1A/B<br>164COM1A/B |
| シールオイルタンク部<br>液面低下時の総漏れ量(cc) | 66                                        | —                           | —                        |
| レベルスイッチ部<br>液面低下時の総漏れ量(cc)   | 2200                                      | 200                         | 800                      |



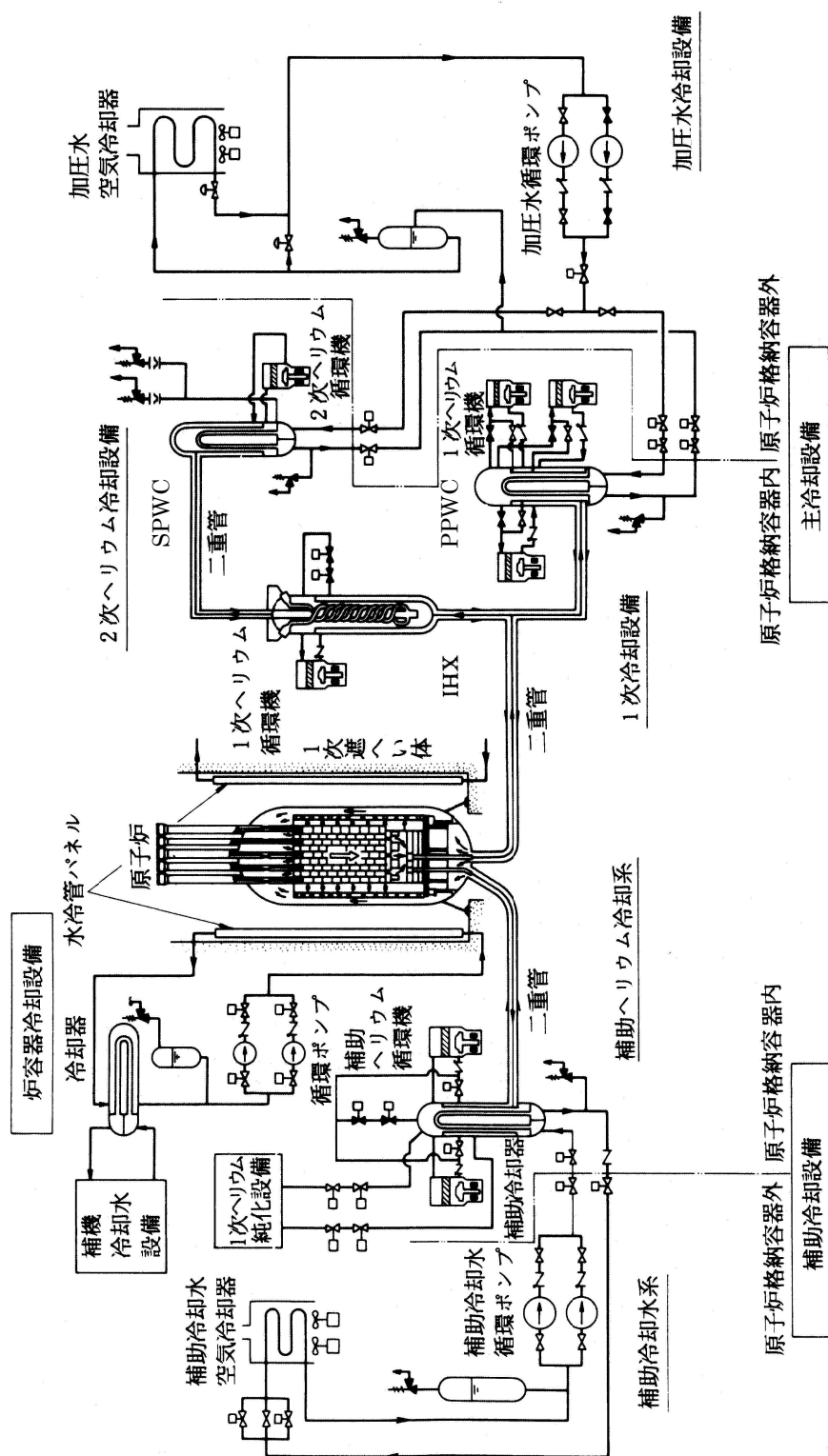
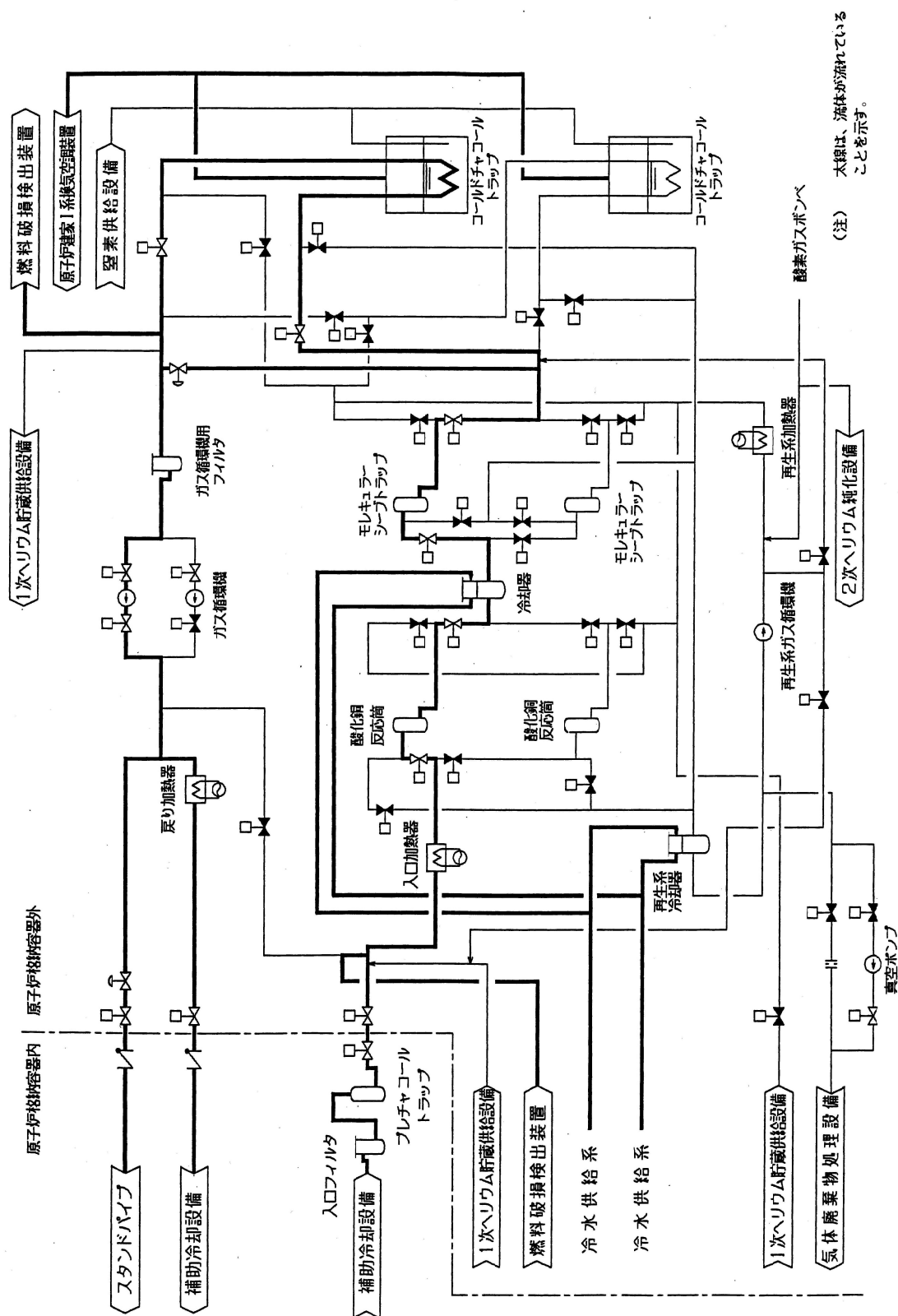


図 2.1 HTTR 冷却設備系統図



## 図 2.2 1 次へリウム純化設備の系統図

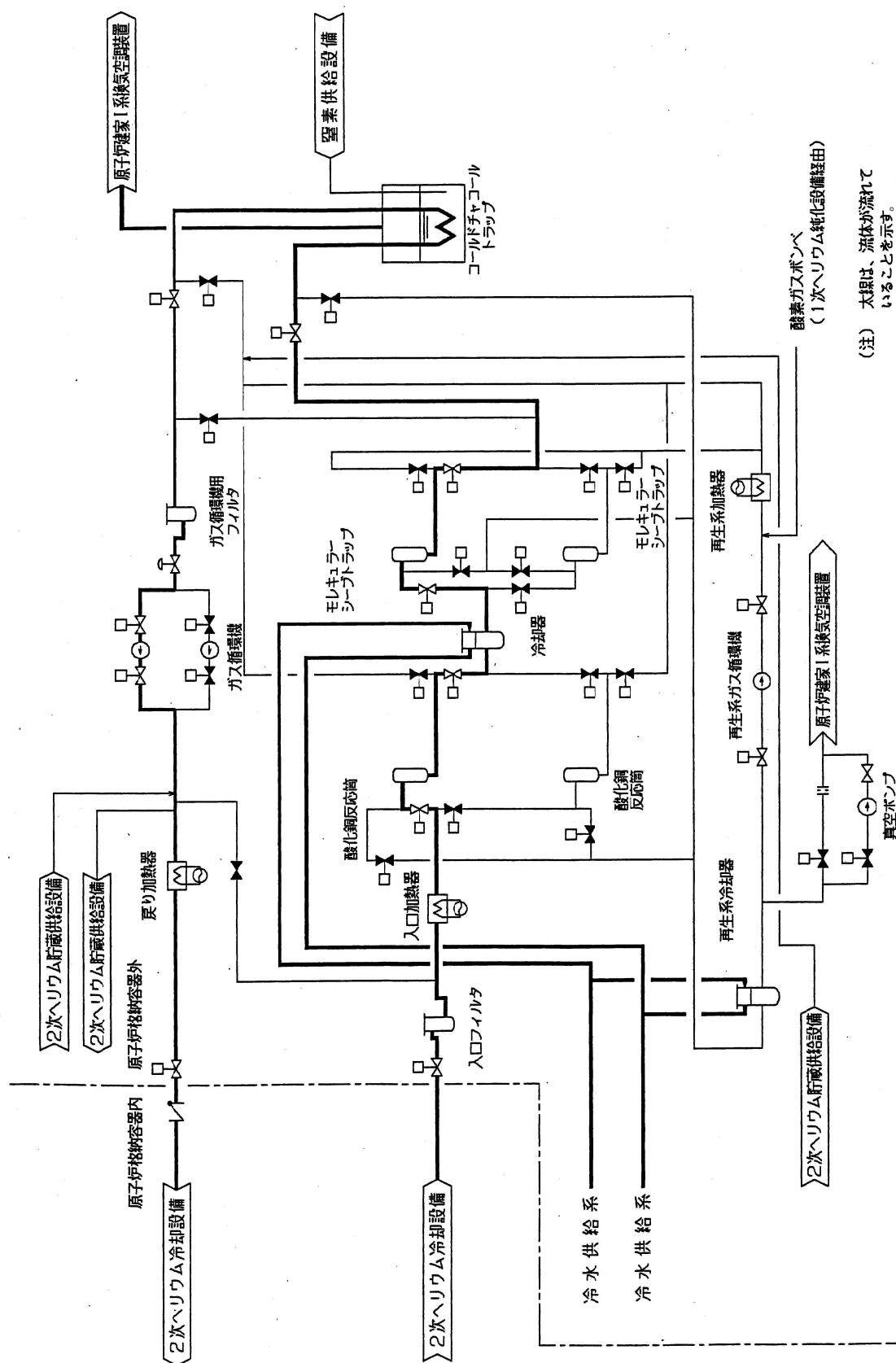


図 2.3 2 次ヘリウム純化設備の系統図

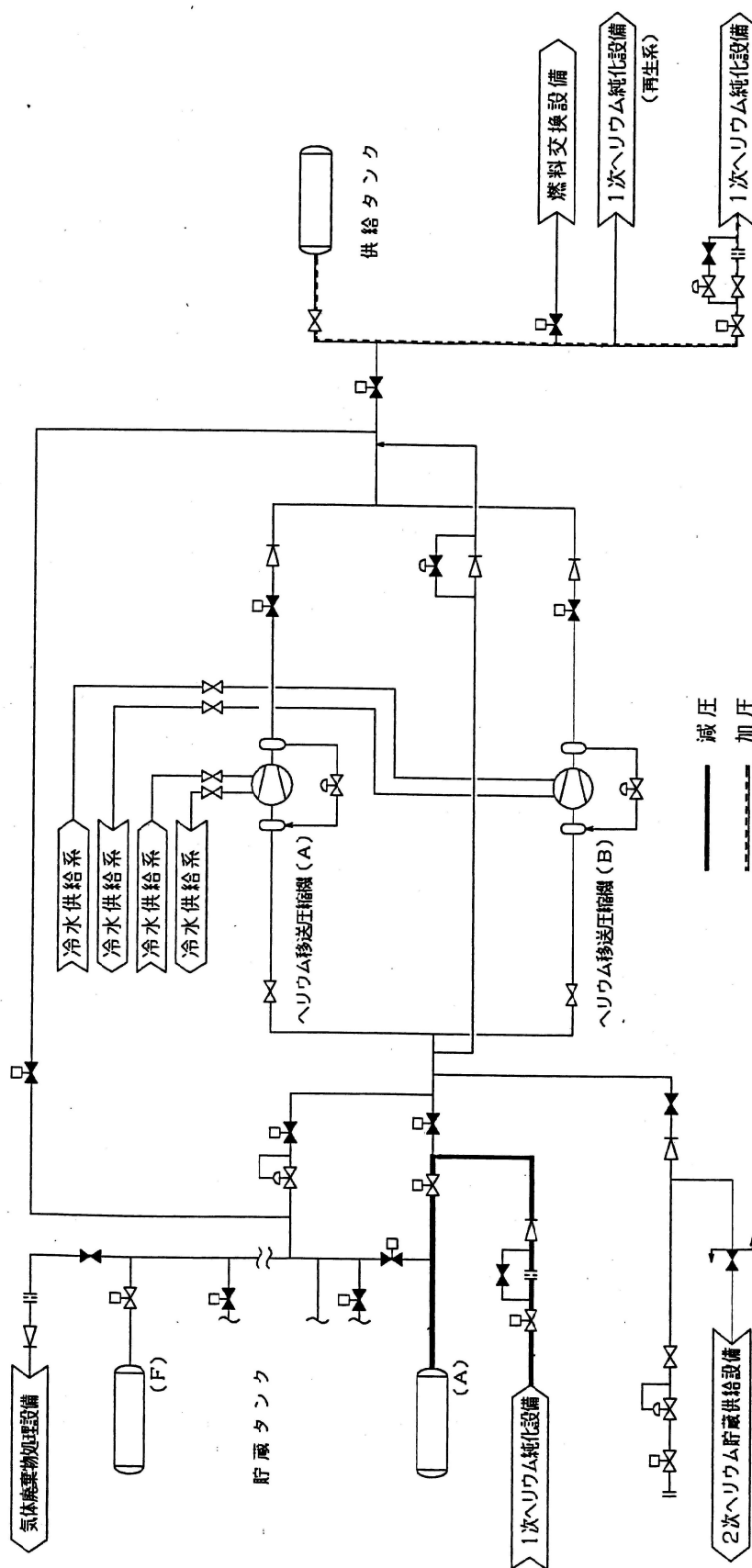
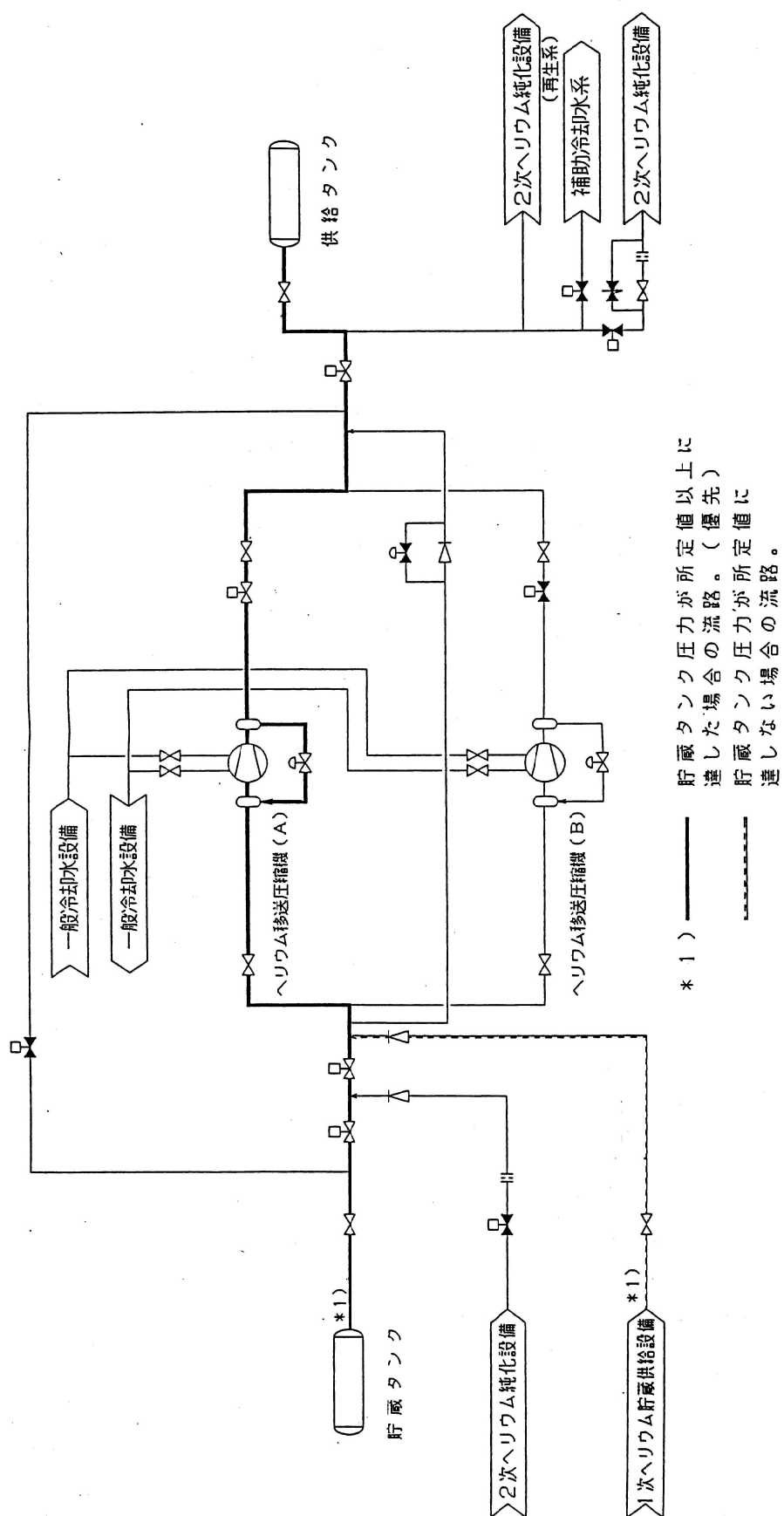


図 2.4 1 次ヘリウム貯蔵供給設備の系統図 (圧力調整時)



## 図2.5 2次へリウム貯蔵供給設備の系統図（出力上昇圧力調整時）

## 図 1 次ヘリウムサンプリング設備系統図

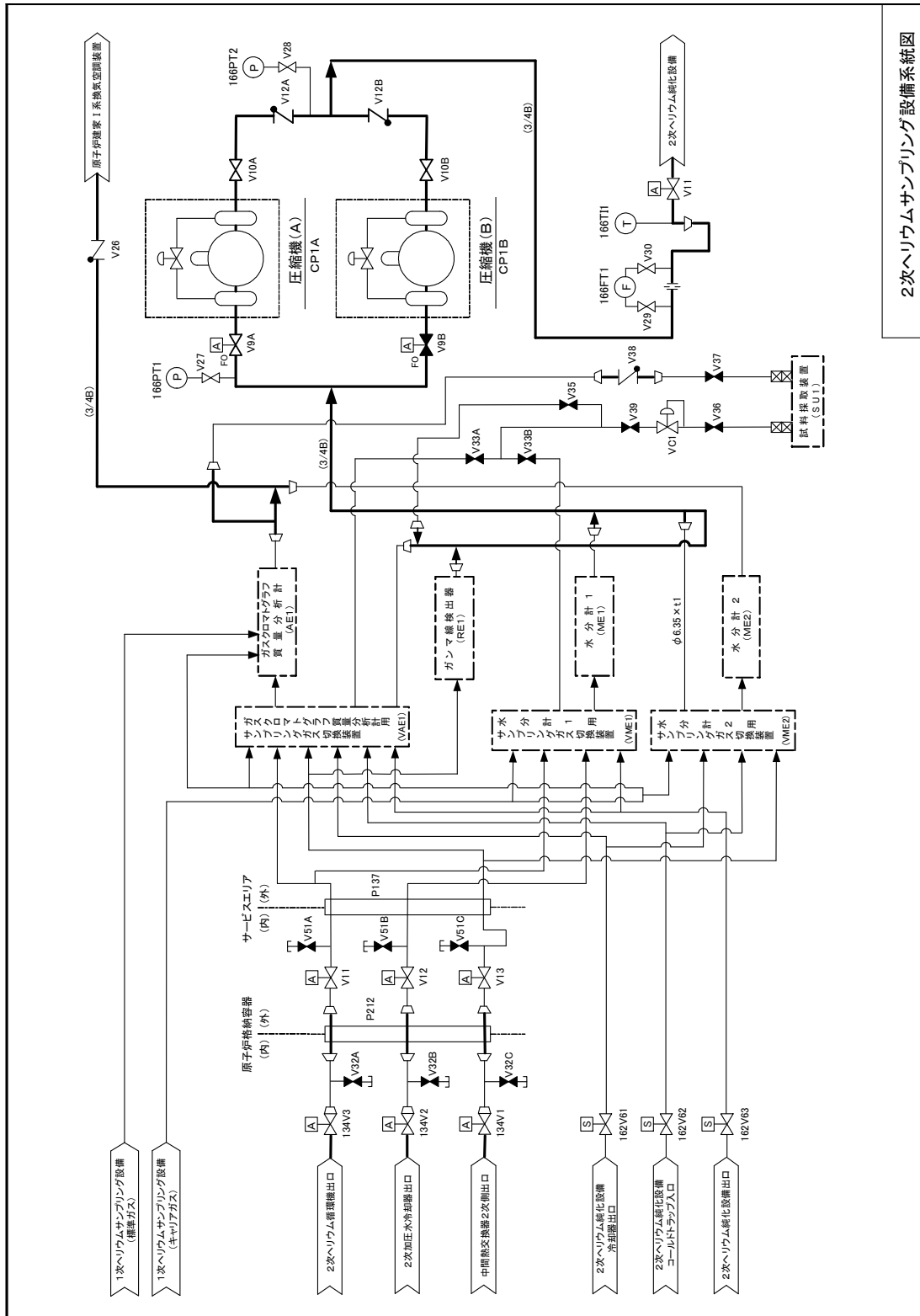


図 2.7 2 次ヘリウムサンプリング設備の系統図

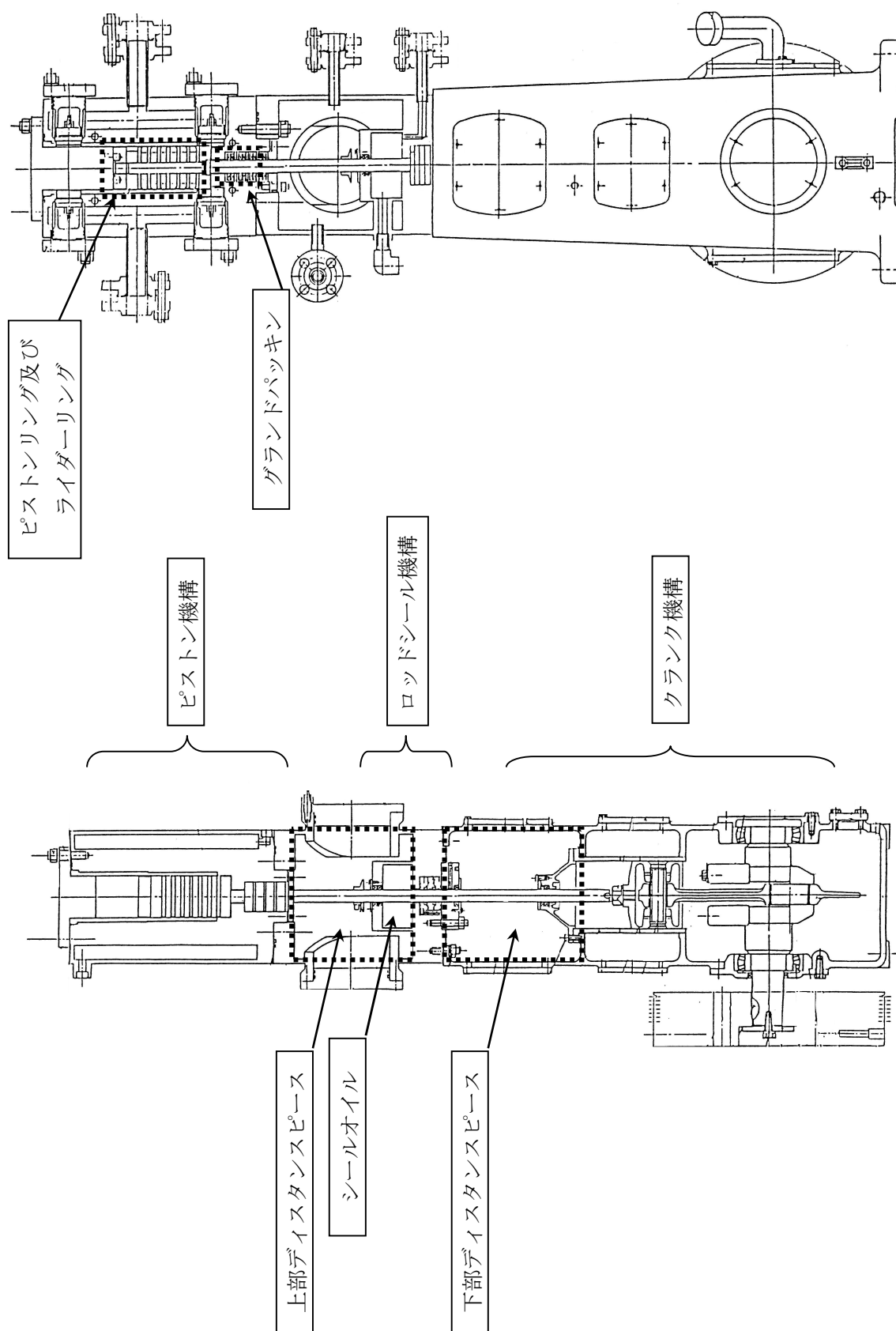


図 2.8 往復圧縮機の概略構造



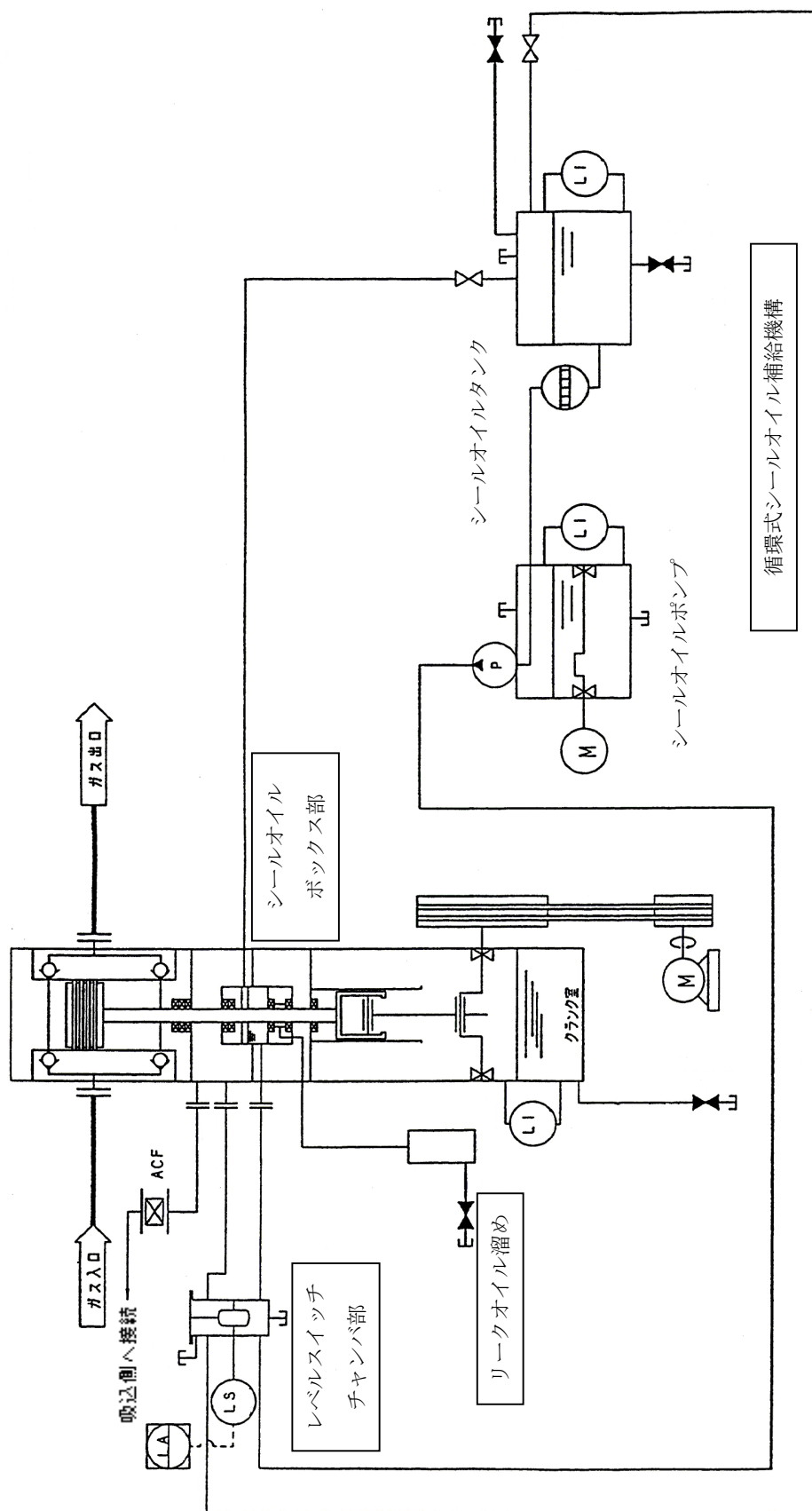


図 2.9 ガス圧縮機のロッドシール機構

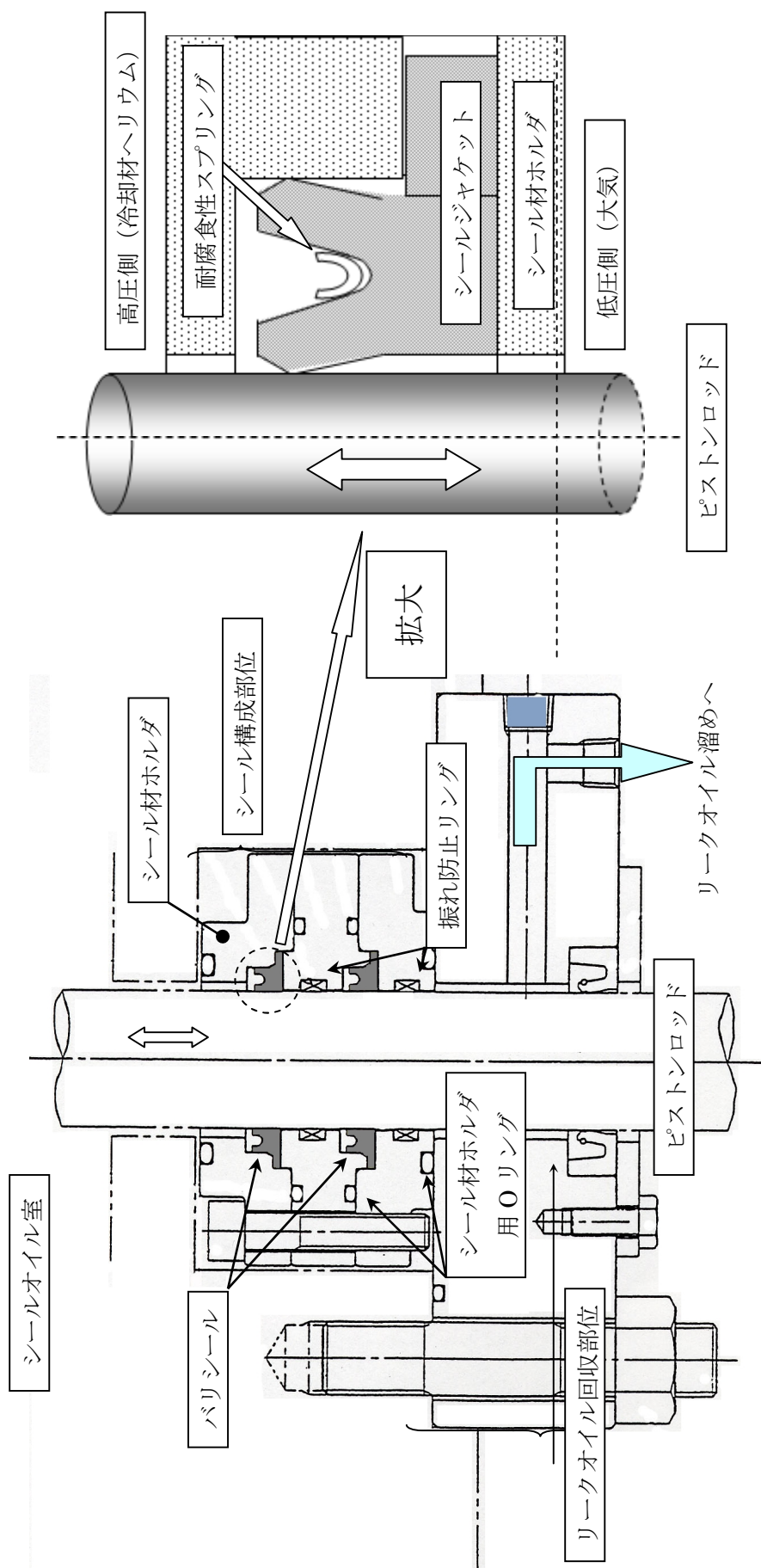
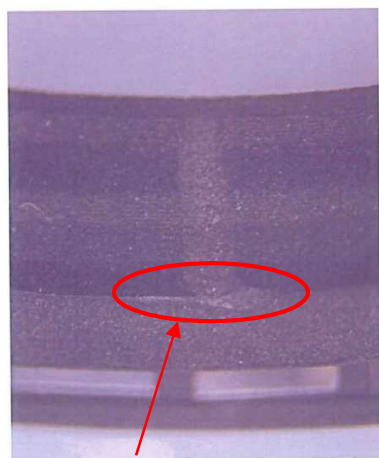


図 2.10 ガス圧縮機のロッドシール機構のシールボックス部

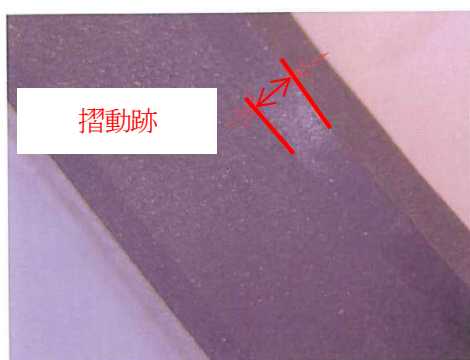


大きなえぐれ

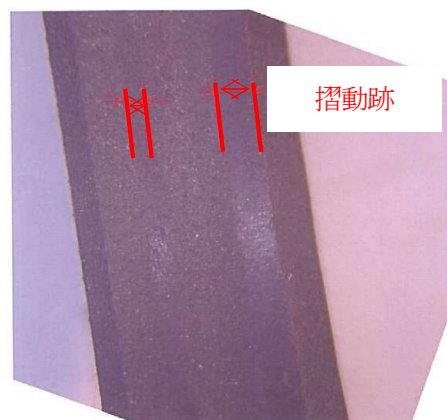
上側バリシール



上側バリシール



下側バリシール



下側バリシール

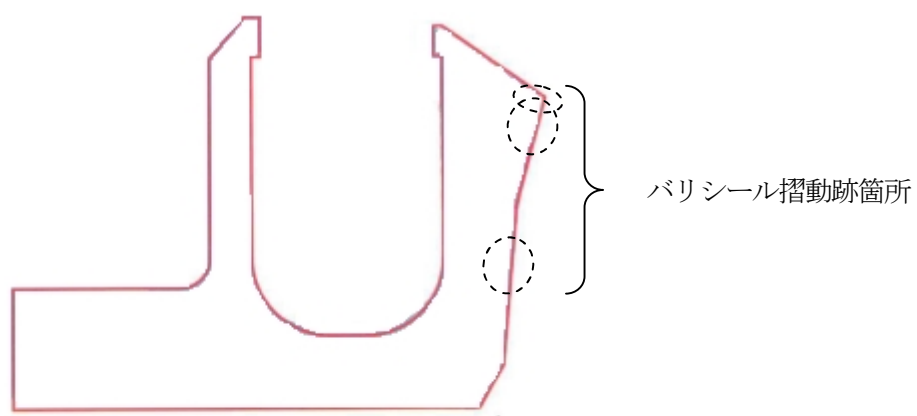


図 3.1 バリシール状態調査結果

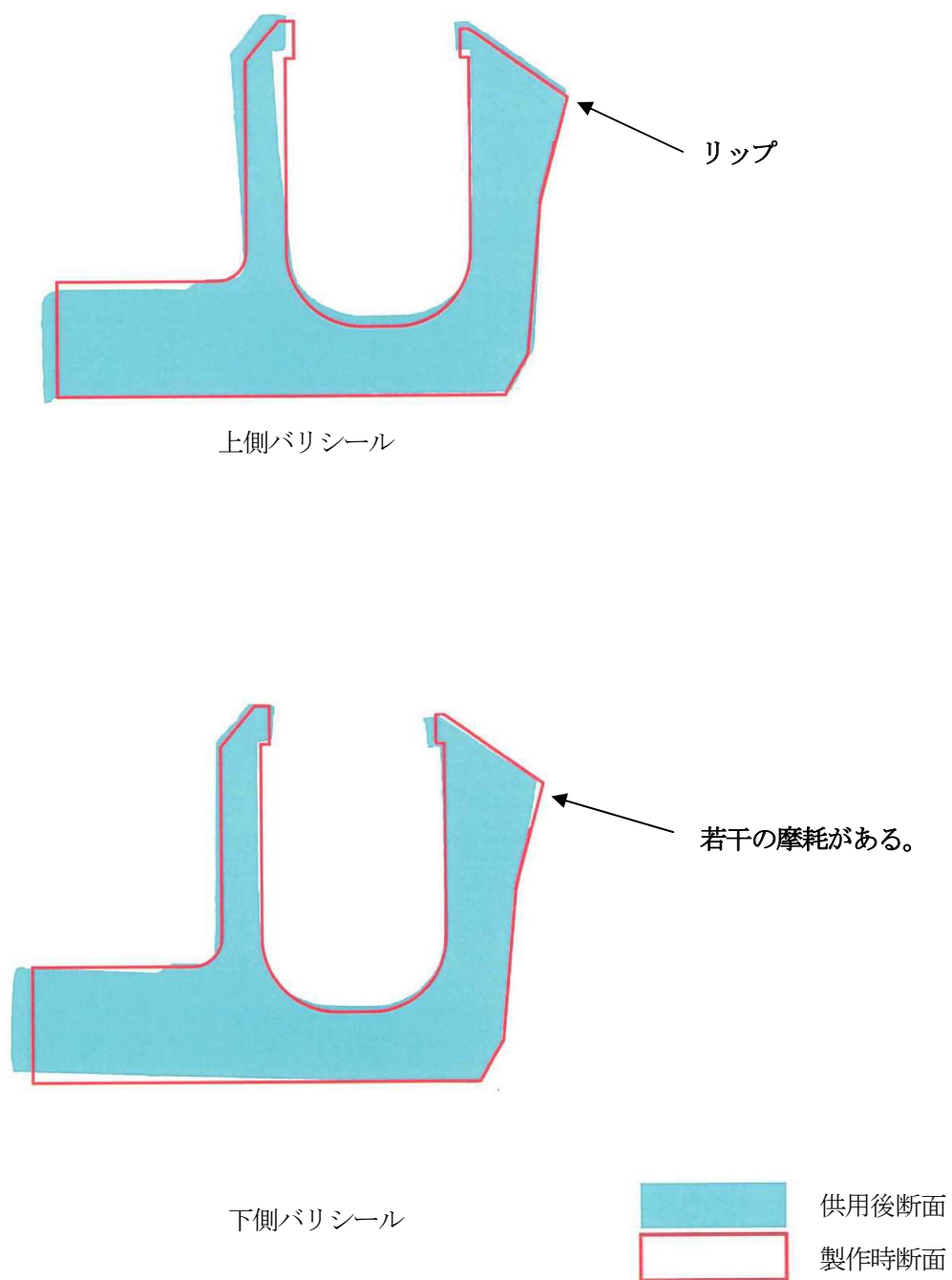


図 3.2 バリシールリップの断面形状確認結果

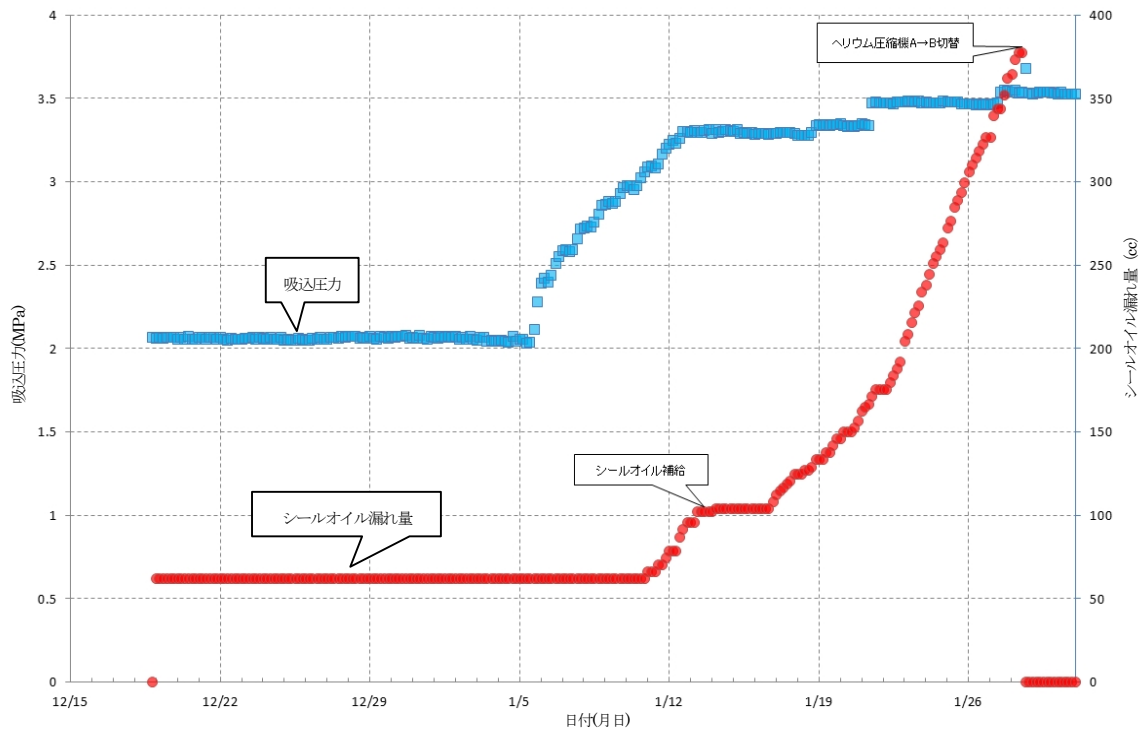


図 3.3 HP-11-4 における 165CP1A のシールオイル漏れ状況

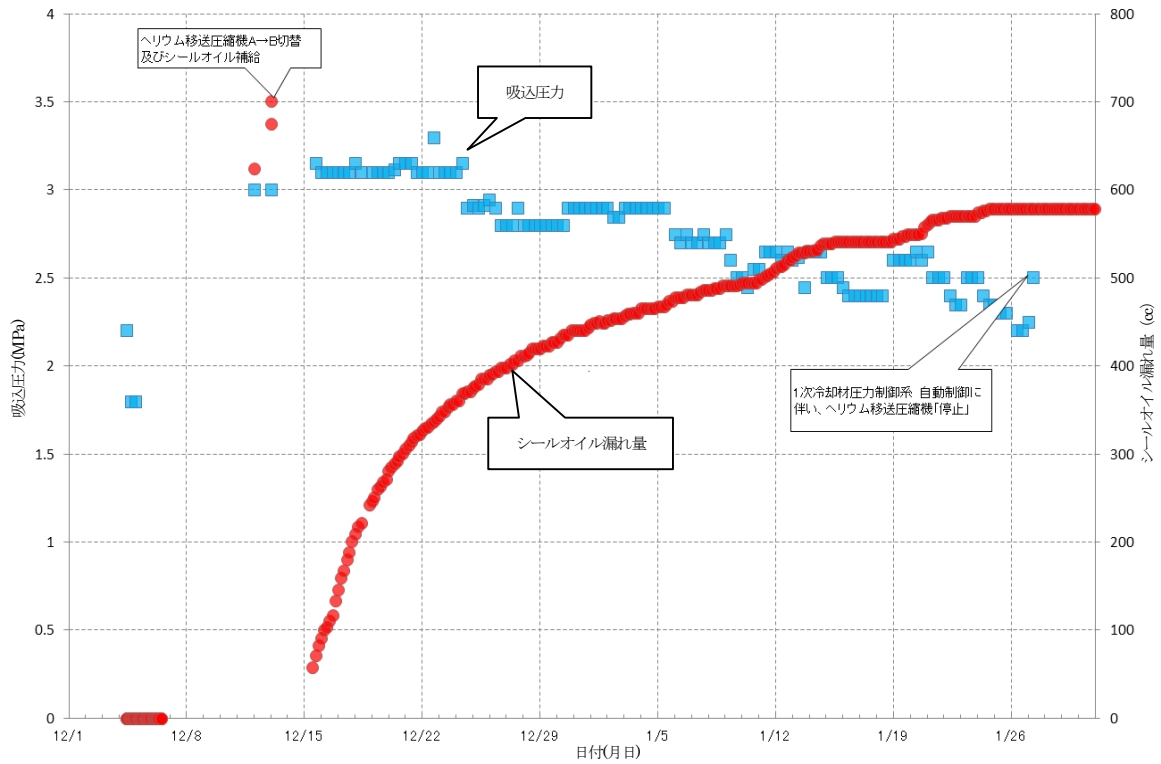


図 3.4 HP-11-4 における 164COM1B のシールオイル漏れ状況



試験 No.1 の摩耗粉 : 0.35 g



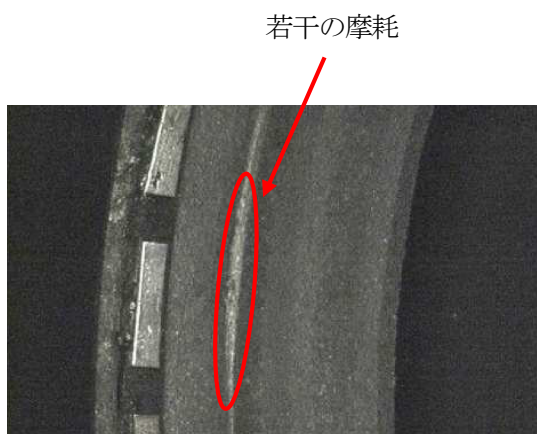
試験 No.2 の摩耗粉 : 0.9 g



試験 No.1 の下側バリシール



試験 No.2 の下側バリシール



試験 No.1 のバリシール拡大



試験 No.2 のバリシール拡大

図 4.1 摩耗粉混入試験後のバリシール観察結果





**1cSt のシールオイル**

バリシールリップの摺動により発生した摩耗粉がシールオイルに多く混入し、黒ずんでいる。



**10cSt のシールオイル**

バリシールリップの摺動により発生した摩耗粉がシールオイルに僅かに混入し、薄らと黒ずんでいる。



**20cSt のシールオイル**

バリシールリップの摺動により発生した摩耗粉がシールオイルに僅かに混入し、薄らと黒ずんでいる。(10cSt と同等)



**50cSt のシールオイル**

無色透明であり、摩耗粉の混入等はない。

図 4.2 シールオイル粘性確認試験後のシールオイル観察結果

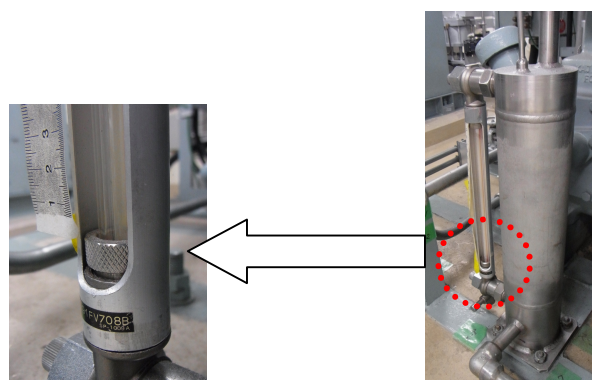


図 5.1 リークオイル溜めのリーク量での判定

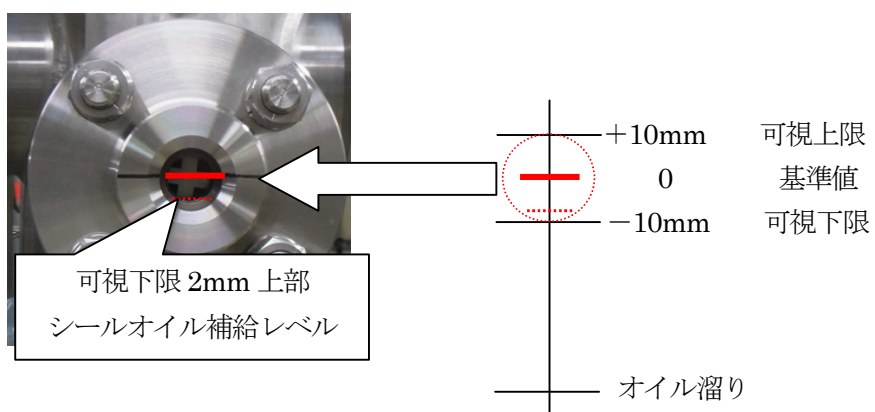


図 5.2 シールオイルタンク液面での判定

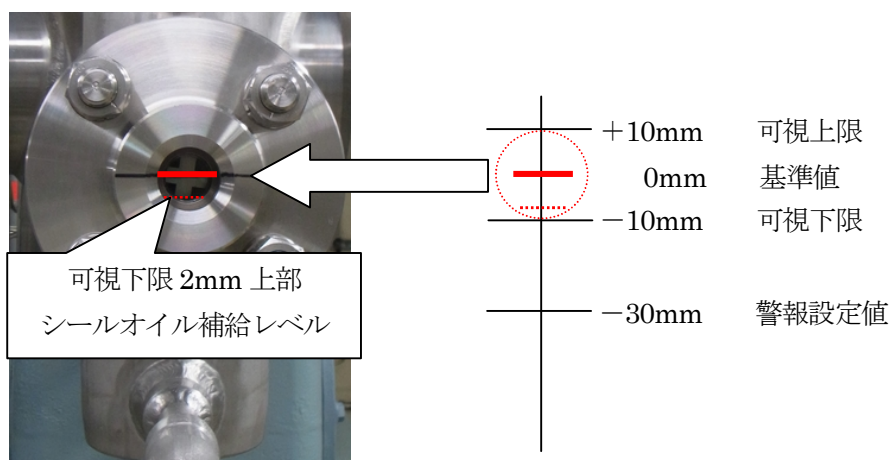


図 5.3 シールオイルレベルスイッチ液面での判定



# 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량   | 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                      | 立法メートル       | 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                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方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                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立法メートル | kg/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 <sup>(b)</sup>      | (数字の) 1      | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の) 1      | 1                  |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表される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         | SI基本単位による表し方                                                   |
| 平面角                           | ラジアン <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m                                                            |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | 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>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 電荷, 電気量                       | クーロン                  | C                 |                      | s A                                                            |
| 電位差 (電圧), 起電力                 | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                       | ジーメンズ                 | S                 | A/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス温度                       | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K                                                              |
| 光束度                           | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd                                                             |
| 照射度                           | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd                                             |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性化                         | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> mol                                            |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の 1 は明示されない。

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

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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                                                                        |
| 粘着力のモーメント       | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>                                                   |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 角速度             | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 角速度             | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 熱伝導率            | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 体積エネルギー         | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                   |
| 電界の強さ           | ボルト毎メートル          | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 電荷密度            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> s A                                                                  |
| 表面電荷            | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 誘電率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                       |
| 透磁率             | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエネルギー         | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 照射線量 (X線及びγ線)   | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> s A                                                                 |
| 吸収線量率           | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射強度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 放射輝度            | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
| 酵素活性濃度          | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                  |

表 5. SI 接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|-----|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨ   | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼ   | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | セ   | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エ   | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペ   | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイ  | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テ   | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギ   | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メ   | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェ  | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キ   | k  | 10 <sup>-18</sup> | ア   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘ   | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼ   | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デ   | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨ   | y  |

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 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=86 400 s                                                                           |
| 度     | °    | 1°=(π/180) rad                                                                              |
| 分     | ′    | 1′=(1/60)°=(π/10800) rad                                                                    |
| 秒     | ″    | 1″=(1/60)′=(π/648000) rad                                                                   |
| ヘクタール | ha   | 1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                      |
| リットル  | L, l | 1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1 t=10 <sup>3</sup> kg                                                                      |

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値                                |
|----------|----|---------------------------------------------|
| 電子ボルト    | eV | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1 u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m |

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値                                                                                   |
|-----------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa                                                       |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg=133.322 Pa                                                                              |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m                                                          |
| 海里        | M    | 1 M=1852 m                                                                                     |
| バイン       | b    | 1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600) m/s                                                                           |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的な関係は、<br>対数量の定義に依存。                                                                   |
| ベレル       | B    |                                                                                                |
| デジベール     | dB   |                                                                                                |

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称                    | 記号  | SI 単位で表される数値                                                                            |
|-----------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| エル                    | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J                                                                |
| ダイ                    | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                                |
| ポア                    | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s                                                  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>                          |
| フオト                   | ph  | 1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                        |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                           |
| ガウス                   | G   | 1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≡ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>                                          |

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値                                                         |
|-----------|------|----------------------------------------------------------------------|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                         |
| レントゲン     | R    | 1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                       |
| ラド        | rad  | 1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                      |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                      |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                          |
| フェルミ      | f    | 1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                      |
| メートル系カラット |      | 1 メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg                             |
| トル        | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa                                              |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm=101 325 Pa                                                     |
| カロリ       | cal  | 1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー) |
| マイクロン     | μ    | 1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m                                          |

