

ITER CSモデル・コイル試験装置 ヘリウム冷凍機システムの整備状況

Maintenance of Helium Refrigerator/Liquefier System
in ITER CS Model Coil Test Facility

海老澤 昇 木内 重巳 菊池 勝美 河野 勝己
磯野 高明

Noboru EBISAWA, Shigemi KIUCHI, Katsumi KIKUCHI, Katsumi KAWANO
and Takaaki ISONO

核融合研究開発部門
那珂核融合研究所
ITERプロジェクト部

Department of ITER Project
Naka Fusion Institute
Sector of Fusion Research and Development

March 2015

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

ITER CS モデル・コイル試験装置 ヘリウム冷凍機システムの整備状況

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所

ITER プロジェクト部

海老澤 昇、木内 重巳*、菊池 勝美*、河野 勝己、磯野 高明

(2014 年 12 月 16 日 受理)

ITER CS モデル・コイル試験装置は、直径 1.5m の空間に 13T の高磁場を発生する中心ソレノイド(CS)モデルコイルを用いて核融合炉用超伝導導体の試験を行うための装置であり、大別するとヘリウム冷凍機システム、直流電源システム、真空システム及び計測システムで構成される。

本報告は、上記ヘリウム冷凍機システムについて、2011 年 3 月に発生した東日本大震災(以下「震災」という)から 2012 年 12 月に行われたヘリウム液化試験運転までの期間を対象に本システムの整備状況についてまとめた。

本ヘリウム冷凍システムは、5kW の冷凍能力を有し、世界に類を見ない 1.0kg/sec の超臨界ヘリウム循環システムを備えている。震災時は休止状態であったが、建屋が復旧した 2011 年 3 月末より、システムの点検を開始した。点検としては、外観目視点検、動力・制御盤の絶縁抵抗測定、液体窒素貯槽や主ヘリウムバッファタンク等の屋外設備の不同沈下測定及び各機器の気密漏洩試験を実施した。2012 年 4 月よりヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備を開始し、主ヘリウム圧縮機の分解点検、タービン膨張機の常温動作試験及び低温循環ポンプの分解点検を実施した。これらの後、2012 年 12 月からヘリウム冷凍機システムの運転を再開した。

今後、米国との二国間協定に基づき ITER 実機で使用される中心ソレノイドコイル(CS コイル)及びトロイダル磁場コイル(TF コイル)用導体を用いた試験コイルを製作し、ITER CS モデル・コイル試験装置に実装して性能評価試験をすることが計画されている。その他、インドとの二国間協定に基づき ITER インドで製作する低温ヘリウム循環装置を本システムに接続し性能評価試験を行う計画がある。

Maintenance of Helium Refrigerator/Liquefier System in ITER CS Model Coil Test Facility

Noboru EBISAWA, Shigemi KIUCHI*, Katsumi KIKUCHI*, Katsumi KAWANO
and Takaaki ISONO

Department of ITER Project, Naka Fusion Institute,
Sector of Fusion Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken
(Received December 16, 2014)

Objective of the ITER CS Model Coil Test Facility is to evaluate a large scale superconducting conductor for fusion using the Central Solenoid (CS) Model Coil, which can generate a 13T magnetic field in the inner bore with a 1.5m diameter. The facility is composed of a helium refrigerator / liquefier system, a DC power supply system, a vacuum system and a data acquisition system.

This report describes that maintenance of the helium refrigerator / liquefier system since the Great East Japan Earthquake in March 2011 until the first operation after the earthquake in December 2012.

Refrigeration capacity of the system is 5 kW and the system includes cryogenic circulation system of 1.0 kg/sec, which is largest in the world. This system was stopped at the earthquake and check of the system started since March 2011 when the building was recovered. Visual check, insulation resistance measurement of electric power and control device, subsidence measurement of large tanks outside, and air tight test of each components were performed. Maintenance for restart of operation started since April 2012. Overhaul of main compressors, mechanical running test of turbines and overhaul of the cryogenic circulator were carried out. After the maintenance, the system operation started since December 2012.

Further plan of the facility is to evaluate the conductors used for ITER CS and Toroidal Field (TF) Coils. In addition, Indian cold circulator will be tested using this facility.

Keywords: Helium Refrigerator, Helium Liquefier, Cryogenic System, ITER, CS Model Coil

* Nuclear Engineering Co., Ltd.

目 次

1. はじめに -----	1
2. ヘリウム冷凍機システムの概要-----	1
3. ヘリウム冷凍機システムの運転-----	2
3.1 ヘリウム精製運転-----	2
3.1.1 部分精製運転-----	2
3.1.2 精製移送運転-----	2
3.2 ヘリウム液化運転-----	2
3.3 コイル冷凍運転-----	3
4. ヘリウム冷凍機システムの震災後点検-----	3
5. ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備-----	4
6. まとめ-----	4
参考文献-----	5

Contents

1. Introduction -----	1
2. Overview of the helium refrigerator / liquefier system -----	1
3. Operation of the system -----	2
3.1 Purification -----	2
3.1.1 Purification of main line -----	2
3.1.2 Purification of recovery line -----	2
3.2 Liquefaction -----	2
3.3 Refrigeration -----	3
4. Check of the system after the earthquake-----	3
5. Maintenance of the system for restart of operation -----	4
6. Conclusion -----	4
References -----	5

表リスト

Table 1	ヘリウム冷凍機システム性能-----	6
Table 2	ヘリウム冷凍機システム主要機器一覧-----	9
Table 3	ヘリウム冷凍機システムの震災後点検状況-----	21
Table 4	ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況-----	24

図リスト

Fig.1	ITER CS モデル・コイル試験装置構成図-----	6
Fig.2	ヘリウム冷凍機システム構成図-----	7
Fig.3	ヘリウム冷凍機システム主要機器-----	9
Fig.4	部分精製運転フローシート-----	10
Fig.5	部分精製運転フローチャート-----	11
Fig.6	精製移送運転フローシート-----	12
Fig.7	精製移送運転フローチャート-----	13
Fig.8	ヘリウム液化運転フローシート-----	14
Fig.9	ヘリウム液化運転フローチャート-----	15
Fig.10	コイル冷凍運転フローシート-----	18
Fig.11	震災による第一工学試験棟損傷状況 -----	19
Fig.12	震災後の設備補修及び点検例-----	20
Fig.13	5kW コールドボックス(CB30)ヘリウムリーク試験結果-----	29
Fig.14	低温ヘリウム循環ユニット(VCP)ヘリウムリーク試験結果-----	30
Fig.15	真空容器(CB50)気密漏洩試験結果-----	31
Fig.16	真空容器(CB50)ヘリウムリーク試験結果-----	32
Fig.17	主ヘリウム圧縮機点検整備-----	33
Fig.18	ヘリウムタービン膨張機性能確認結果-----	34
Fig.19	80K シールド配管真空リーク補修-----	35
Fig.20	低温ヘリウム排気ポンプ(P02)及び低温循環ポンプ(P03)分解点検-----	36
Fig.21	クールダウン/液化試験運転時温度変化データ-----	37

1. はじめに

ITER CS モデル・コイル試験装置¹⁾は、直径 1.5m の空間に 13T の高磁場を発生する中心ソレノイド(CS)モデルコイルを用いて核融合炉用超伝導体の試験を行うための装置であり、大別するとヘリウム冷凍機システム、直流電源システム、真空システム及び計測システムで構成される。本装置の大きな特徴は大電流出力の直流電源と大型のヘリウム冷凍機システムを有することであり、特にヘリウム冷凍機システムでは 5kW の冷凍能力を有するヘリウム冷凍機に世界に類を見ない最大 1.0kg/sec の超臨界ヘリウム(SHe)を循環できる超臨界ヘリウム循環システムを備えている。

Fig.1 に ITER CS モデル・コイル試験装置構成図を示す。

本報告は、上記ヘリウム冷凍機システムについて、2011 年 3 月に発生した東日本大震災(以下「震災」という)から 2012 年 12 月に行われたヘリウム液化試験運転までの期間を対象に本システムの整備状況についてまとめた。

2. ヘリウム冷凍機システムの概要

ヘリウム冷凍機システムは、ITER CS モデル・コイル試験装置の一部として、試験コイルを液体ヘリウム温度まで冷却・冷凍するために用いられる。その機能は、試験コイルを室温から 10K 以下までに冷却し、その後、4.5K 及び 0.6~1.0MPa の SHe を定格 600g/s で試験コイル及び試験コイル支持構造物に供給し、コイル試験に必要な期間(数箇月)冷凍保持することと同時に CS モデルコイルと試験コイルのそれぞれの電流リードに最大定格 300L/h の液体ヘリウムを供給することである。

Table1 にヘリウム冷凍機システム性能を示す。

本システムは、5kW(4.5K)の定格冷凍能力を有するヘリウム冷凍機を中心に真空容器内のコイル系を SHe で強制循環冷却する SHe 循環システムと 20,000 L の液体ヘリウムタンク(LHe タンク)及びヘリウムガス回収・精製システムから構成される。

Fig.2 にヘリウム冷凍機システム構成図、Fig.3 にヘリウム冷凍機システム主要機器、及び Table 2 にヘリウム冷凍機システム主要機器一覧を示す。

3. ヘリウム冷凍機システムの運転

ヘリウム冷凍機システムの運転は、ヘリウム液化運転とコイル冷凍運転の二つに大別される。ヘリウム液化運転は、第一工学試験棟内で行う実験で使用する液体ヘリウムを供給するために液体ヘリウム貯槽(R90)に液体ヘリウムを溜めることを目的に行うものである。一方、コイル冷凍運転は、真空容器(CB50)内に実装された試験コイルを超伝導状態にして試験コイルに通電し各種実験を行うための運転である。なお、これらの運転操作は分散型制御システム(Distributed Control System, 以下「DCS」という)から行われる。

3.1 ヘリウム精製運転

系内のヘリウム精製運転は、以下に示す部分精製運転と精製移送運転とがある。

3.1.1 部分精製運転

主ヘリウム圧縮機(C11)を運転し主ヘリウムバッファタンク(B03)のヘリウムガスの一部(400Nm³/h)をヘリウム精製器(CB12)に通し、ヘリウム精製器(CB12)入口のヘリウムガスが露点-70℃以下、O₂濃度 1ppm 以下及びその他不純ガス 1ppm 以下になるまで精製を行う運転である。

Fig.4 に部分精製運転フローシートを、Fig.5 に部分精製運転フローチャートを示す。

3.1.2 精製移送運転

主ヘリウム圧縮機(C11)とヘリウム回収圧縮機(C10)を運転し試験装置で使用された不純なヘリウムガスをヘリウム回収タンク(B10/B02)からヘリウム精製器(CB12)を通しヘリウムガスを精製し主ヘリウムバッファタンク(B03)へ戻す運転である。

Fig.6 に精製移送運転フローシートを、Fig.7 に精製移送運転フローチャートを示す。

3.2 ヘリウム液化運転

ヘリウム精製器(CB12)及び主ヘリウム圧縮機(C11)を起動し 5kW コールドボックス(CB30)内にヘリウムガスを圧送しその一部をヘリウム精製器(CB12)に通して部分精製運転を行い 5kW コールドボックス(CB30)のヘリウムガスが露点-70℃以下、O₂濃度 1ppm 以下及びその他不純ガス 1ppm 以下であることを確認する。

主ヘリウム圧縮機(C11)から 5kW コールドボックス(CB30)に供給された常温の高圧ヘリウムガスは、コールドボックス(CB30)内の第 1、第 2 熱交換器(E31,E32)で液体窒素温度まで冷却された後、吸着器(T31)により、不純物を吸着、除去し第 3 熱交換器(E33)でさらに冷却される。冷却された低温の高圧ヘリウムガスの一部は、高圧段及び低圧段タービン膨張機(D31,D32)で、ほぼ大気圧まで断熱膨張され寒冷を発生し、残りは、その寒冷により一連の熱交換器(E34～E38)により順次冷却される。これらは第 1、第 2 膨張弁(JT1,JT2)により、ほぼ大気圧まで自由膨張することにより液化し、液体ヘリウム貯槽(R90)に液体ヘリウムが貯液される。

Fig.8 にヘリウム液化運転フローシートを、Fig.9 にヘリウム液化運転フローチャートを示す。

3.3 コイル冷凍運転

5kWコールドボックス(CB30)の第8熱交換器(E38)から取り出される加圧状態で低温のヘリウムガスの一部は、低温ヘリウム循環ユニット(VCP)に寒冷として供給する。低温ヘリウム循環ユニット(VCP)は、真空容器(CB50)にSHeを循環供給し、真空容器(CB50)内に設置される試験コイルで発生する熱の冷却を行う。

一方、5kWコールドボックス(CB30)の第7熱交換器(E37)出口ラインから取り出す少量の低温で高圧のヘリウムガスは、真空容器(CB50)内のCSモデルコイル冷却ラインに圧力補給用として用いられる。

液体ヘリウム貯槽(R90)に貯蔵された液体ヘリウムは、真空容器(CB50)に送られ電流リードの冷却に用いる。

電流リード及び他の実験装置からの低圧ヘリウムガスは、戻りガス加温器(H01)経由でガスバック(B01A/B)に一時回収された後、ヘリウム回収圧縮機(C10)により昇圧されてヘリウム回収タンク(B10/B02)に貯えられ再使用される。ヘリウム回収タンク(B10/B02)に回収されたヘリウムガスは、ヘリウム回収圧縮機(C10)によりヘリウム精製器(CB12)に送られ、そこで不純物を除去された後にヘリウムガス循環系に供給される。5kWコールドボックス(CB30)、低温ヘリウム循環ユニット(VCP)及び真空容器(CB50)に液体窒素貯槽(R60)から80Kシールドに冷却用として液体窒素が供給される。

Fig.10にコイル冷凍運転フローシートを示す。

4. ヘリウム冷凍機システムの震災後点検

震災発生当時は、液体窒素貯槽(CE49)と液体窒素ライン以外の高圧ガス製造設備は高圧ガス保安法上の休止設備であり、ヘリウム冷凍機システムとしては、液体窒素貯槽(CE49)と付帯設備である計装空気圧縮機(C80)並びに冷却水循環装置(CT70)のみ使用していた。震災直後はITER CSモデル・コイル試験装置が収納される第一工学試験棟大実験室の建屋構造物が大きく損傷しこれらは落下する危険があったため安全への配慮からこれらの区域への立入が禁止または制限されている状態であった。

Fig.11に震災による第一工学試験棟損傷状況を示す。

震災後点検は、まず、設備の損傷及びガス漏れを重視した外観目視点検を行うこととした。これは設備の損傷による危険性の確認と本ヘリウム冷凍機システムの使用ガスであるヘリウム及び窒素は不活性ガスであることから爆発、燃焼の危険性は無いものの窒息性ガスであるため酸素欠乏症の危険があるためである。また、配管及び機器からの微小なガス漏れ確認のため気密漏洩試験を行うこととした。その他、塔槽類については沈下も懸念されるため不同沈下測定を行うこととした。

2011年3月末より高圧ガス保安法に基づく日常点検を再開し、ヘリウム冷凍機システム全体の点検を順次開始した。

点検の結果、液体窒素貯槽(R60)及びヘリウム回収タンク(B10/B02)基礎の一部に損傷が見られた以外、ガス漏れも無く設備に大きな異常は見られなかった。また、液体窒素貯槽(R60,CE49)及び主ヘリウムバッファタンク(B03)について不同沈下測定を行い直近の高圧ガス自主検査時の測定データと比較し沈下していないことを確認した。配管及び機器については自圧による気密漏洩試験を行い漏れが無いことを確認した。液体窒素貯槽(CE49)と液体窒素ラインは気密漏洩試験後に窒素の供給を再開した。動力・制御盤については、外観目視点検と絶縁抵抗測定を行い回路の健全性確認後に順次受電した。なお、付帯設備である計装空気圧縮機(C80)並びに冷却水循環装置(CT70)についても試験運転後に連続運転を再開した。

Fig.12 に震災後の設備補修及び点検例を、Table 3 にヘリウム冷凍機システムの震災後点検状況を示す。

5. ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備

2012 年 4 月よりヘリウム冷凍機システムの運転再開に向け整備を開始した。主ヘリウム圧縮機 4 台の分解点検は 8 月から 10 月に掛けて、低温ヘリウム排気ポンプ及び低温ヘリウム循環ポンプの分解点検は 7 月から 12 月に掛けて、タービン膨張機の常温動作試験は 11 月に、制御弁及び圧力等制御機器の点検は 5 月に実施し、その他の設備機器についても点検整備を実施した。2012 年 8 月末から高圧ガス保安法上の休止設備(液体窒素貯槽(CE49)と液体窒素ラインは休止設備外)の運転再開に向けた高圧ガス自主検査を行い 2012 年 9 月に茨城県の保安検査を受検した。その後、ヘリウム冷凍機システムの試験運転を開始し、系内ヘリウムガスの精製運転を行って 5kW コールドボックス(CB30)並びに液体ヘリウム貯槽(R90)のクールダウン後、2012 年 12 月に液化試験運転を行いヘリウム冷凍機システムの整備が完了した。

Table 4 及び Fig.13～Fig.21 にヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況を示す。

6. まとめ

ITER CS モデル・コイル試験装置のヘリウム冷凍機システムについて、2011 年 3 月末より震災後点検を順次開始し 2012 年 4 月からは今後の運転再開に向けた整備を行った。2012 年 9 月に高圧ガス保安法上の保安検査に合格し試験運転を開始して最終的に 2012 年 12 月にヘリウム液化試験運転を行い本システムの健全性を確認することができた。

今後、米国との二国間協定に基づき ITER 実機で使用する中心ソレノイドコイル(CS コイル)及びトロイダル磁場コイル(TF コイル)用導体を用いた試験コイルを製作し、ITER CS モデル・コイル試験装置に実装して性能評価試験をすることが計画されている。その他、インドとの二国間協定に基づき ITER インドで製作する低温ヘリウム循環装置を本システムに接続し性能評価試験を行う計画がある。

参考文献

- 1) 加藤崇他：“CS モデル・コイル試験装置”，低温工学，Vol.30, No.1, 2001, pp.315-323.

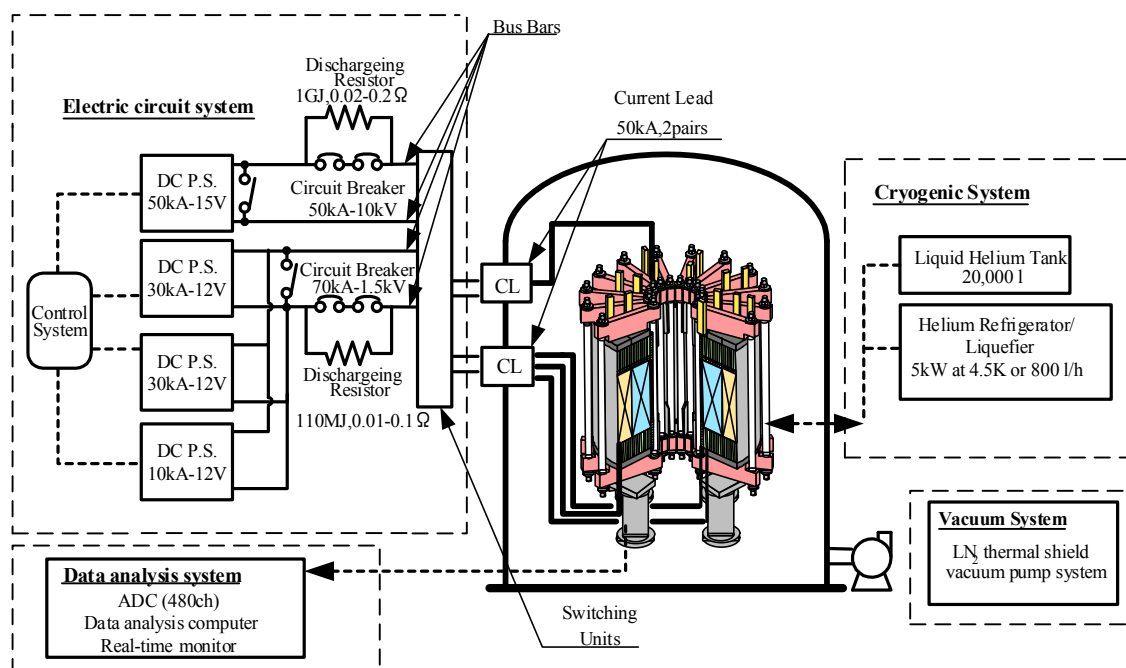


Fig.1 ITER CS モデル・コイル試験装置構成図

Table1 ヘリウム冷凍機システム性能

項 目	性 能
冷凍機能力	5kW
CS モデルコイルパルス通電時の冷凍液化負荷	3kW+380L/h
液化能力	800L/h
超臨界(SHe)供給流量	1,000g/sec
超臨界(SHe)供給温度	3.8~5.0K
超臨界(SHe)供給圧力	0.6~1.0MPa

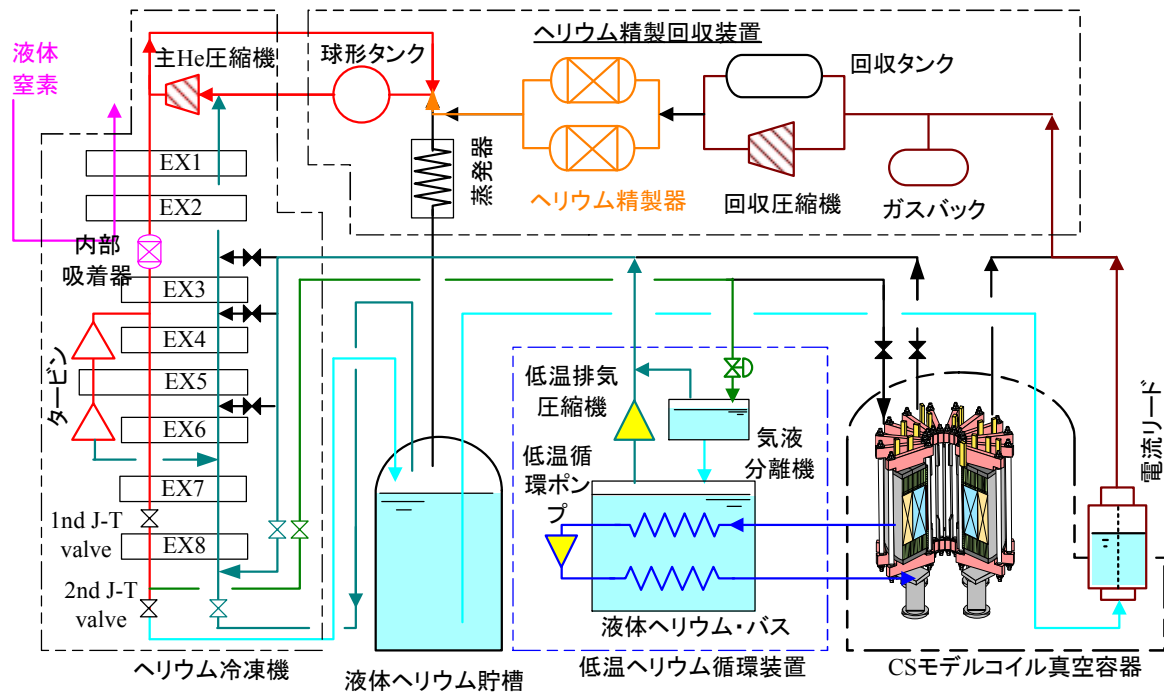


Fig.2 ヘリウム冷凍機システム構成図

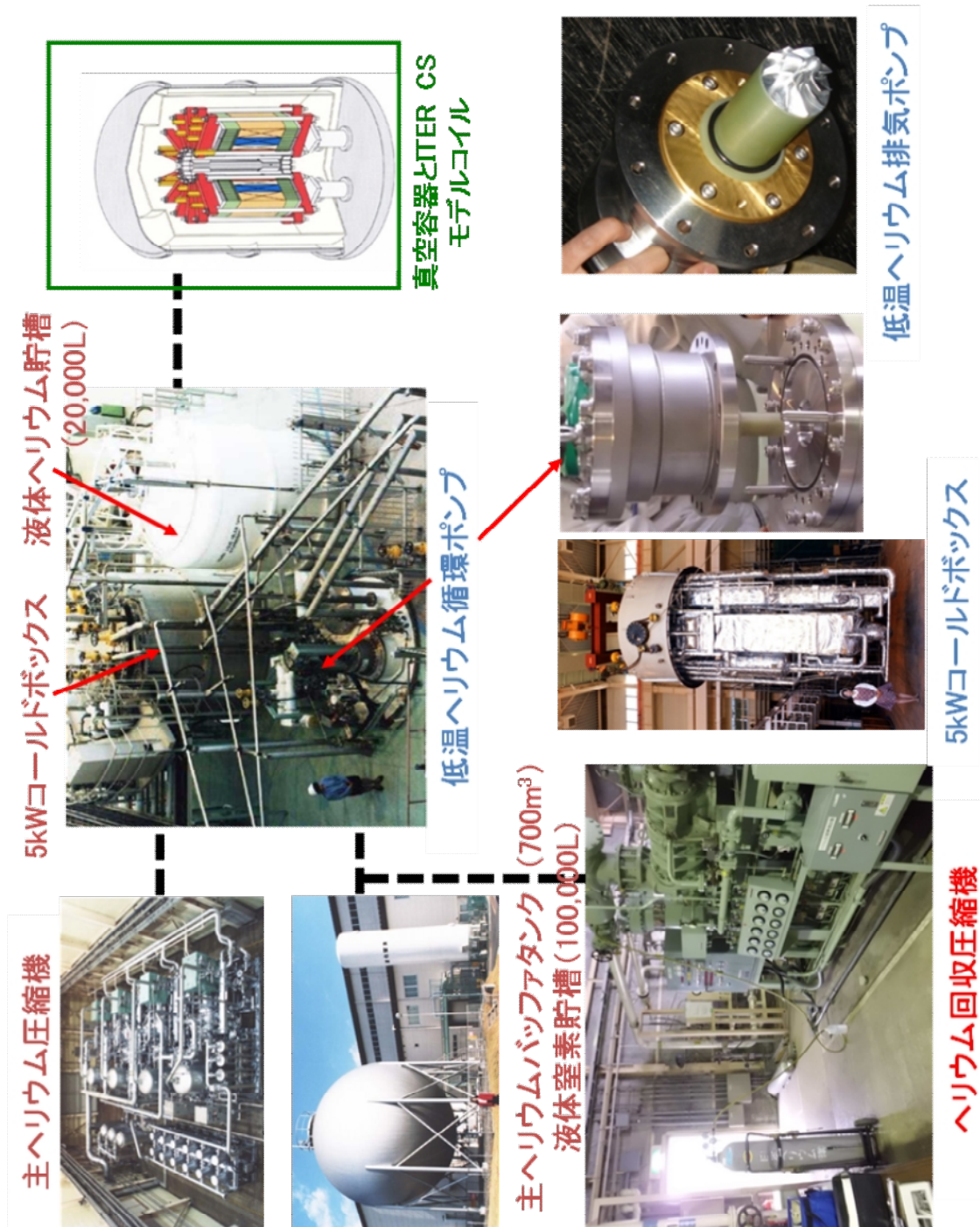


Fig.3 ヘリウム冷凍機システム主要機器

Table2 ヘリウム冷凍機システム主要機器一覧

No	対象機器	機器番号
1	5kW コールドボックス	【CB30】
2	主ヘリウム圧縮機ユニット	【C11A～D】
3	活性炭吸着器ユニット	【U11B】
4	高性能油分離器ユニット	【U11A】
5	液体ヘリウム貯槽	【R90】
6	ヘリウム回収圧縮機	【C10】
7	ヘリウム精製器	【CB12】
8	低温ヘリウム循環ユニット	【VCP】
9	ヘリウム回収タンク	【B10/B02】
10	ガスバック	【B01A/B】
11	液体窒素貯槽	【R60】
12	5kW 冷凍機制御装置	【DCS システム】
13	冷却水循環装置	【CT70】
14	計装空気圧縮機	【C80】
15	主ヘリウムバッファタンク	【B03】
16	液体窒素貯槽	【CE49】
17	真空容器	【CB50】
18	電流リード	【CSCL1/2】
19	真空排気装置	【DP/MBP/RP】

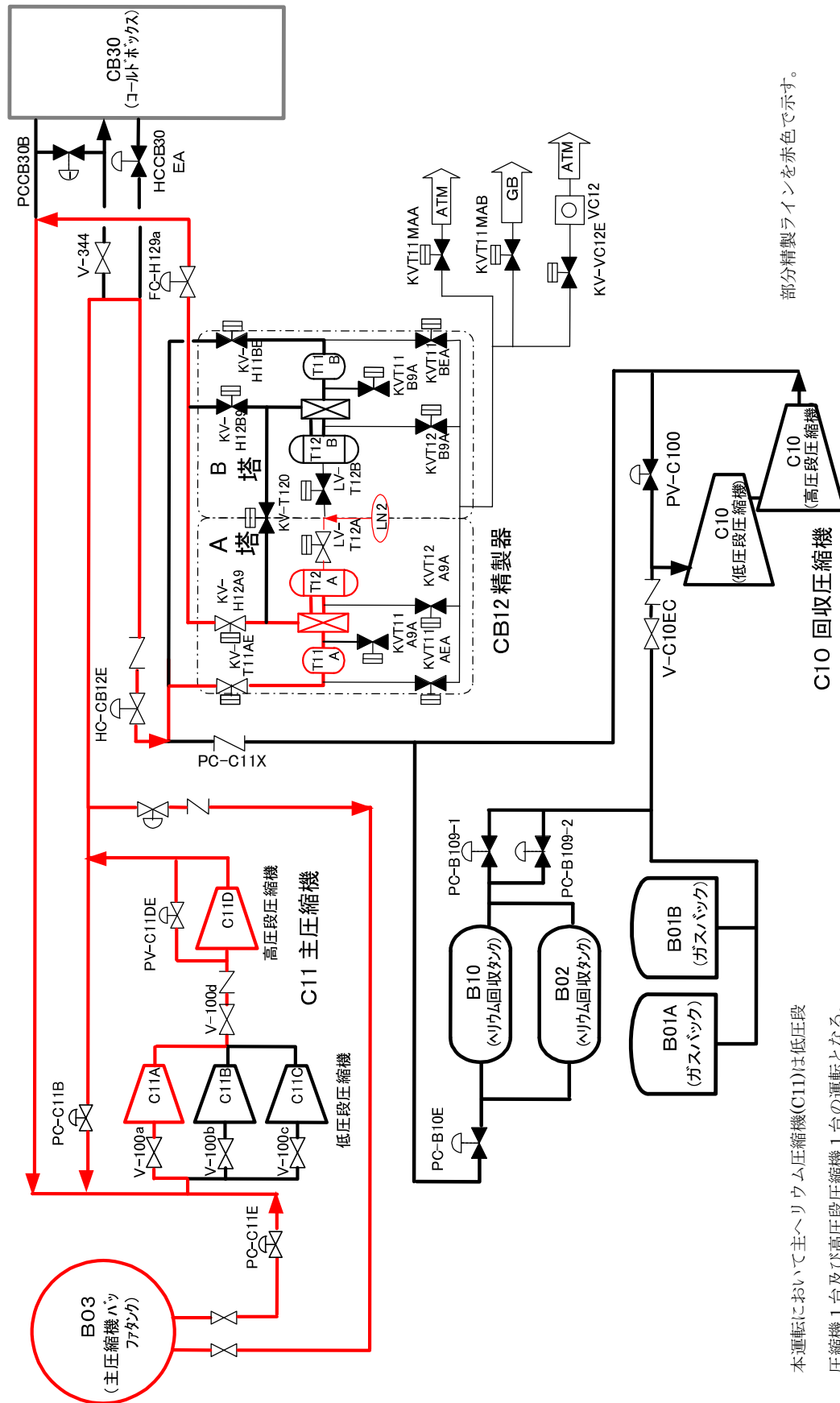


Fig.4 部分精製運転フローシート

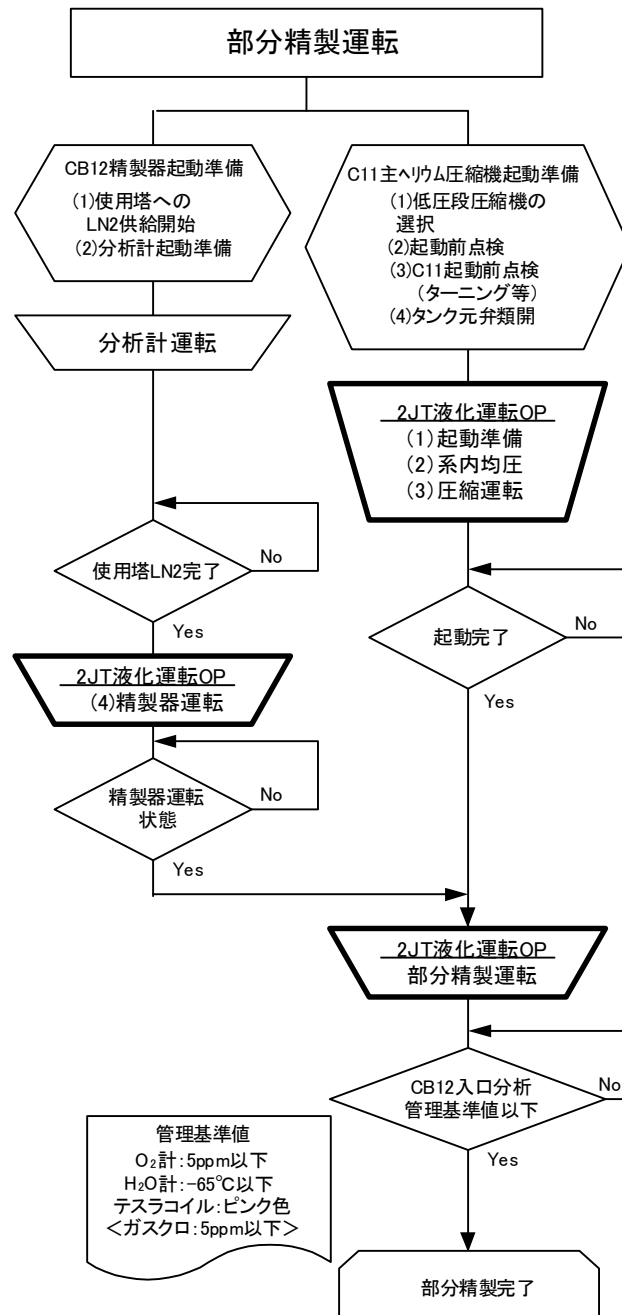


Fig.5 部分精製運転フローチャート

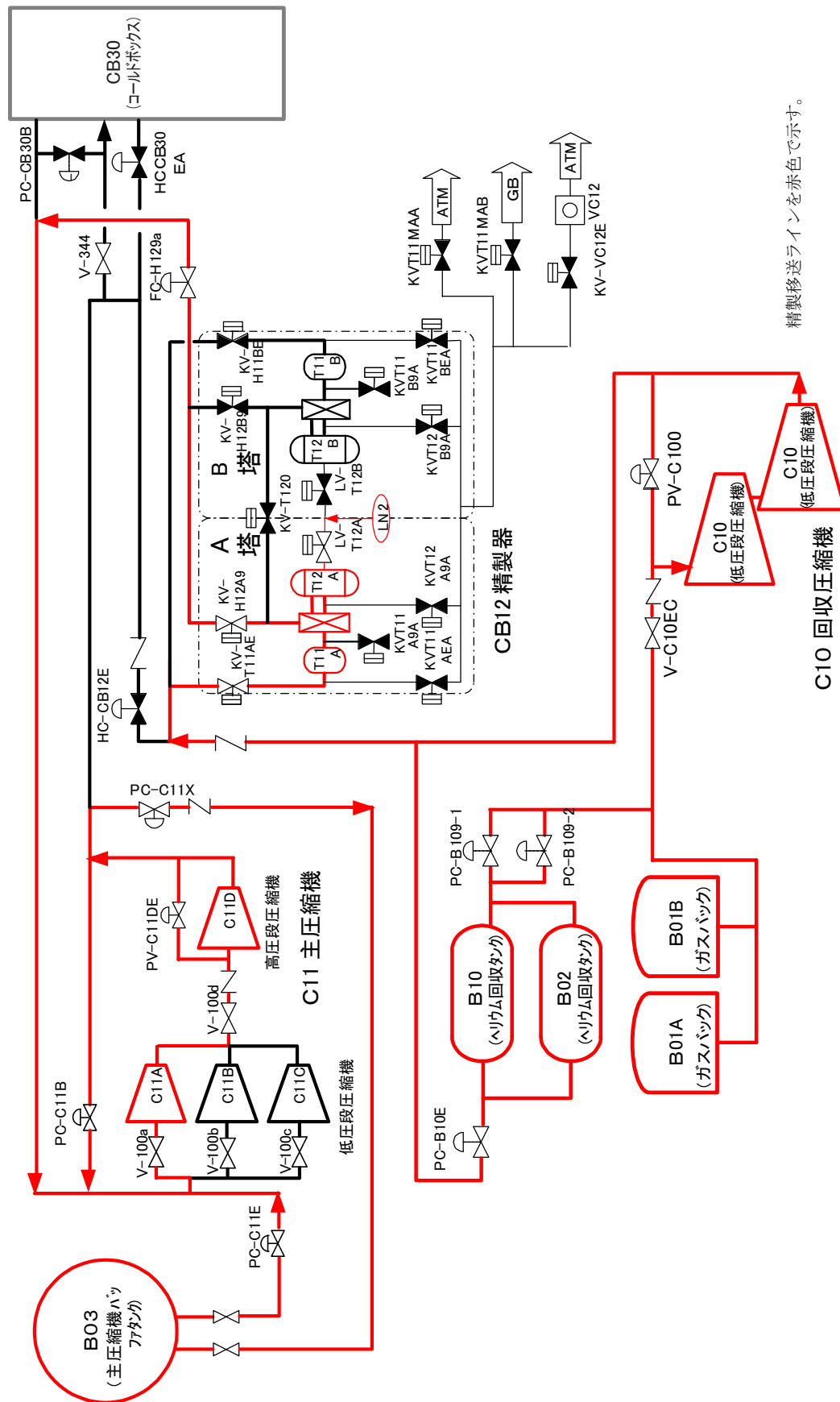


Fig.6 精製移送運転フローシート

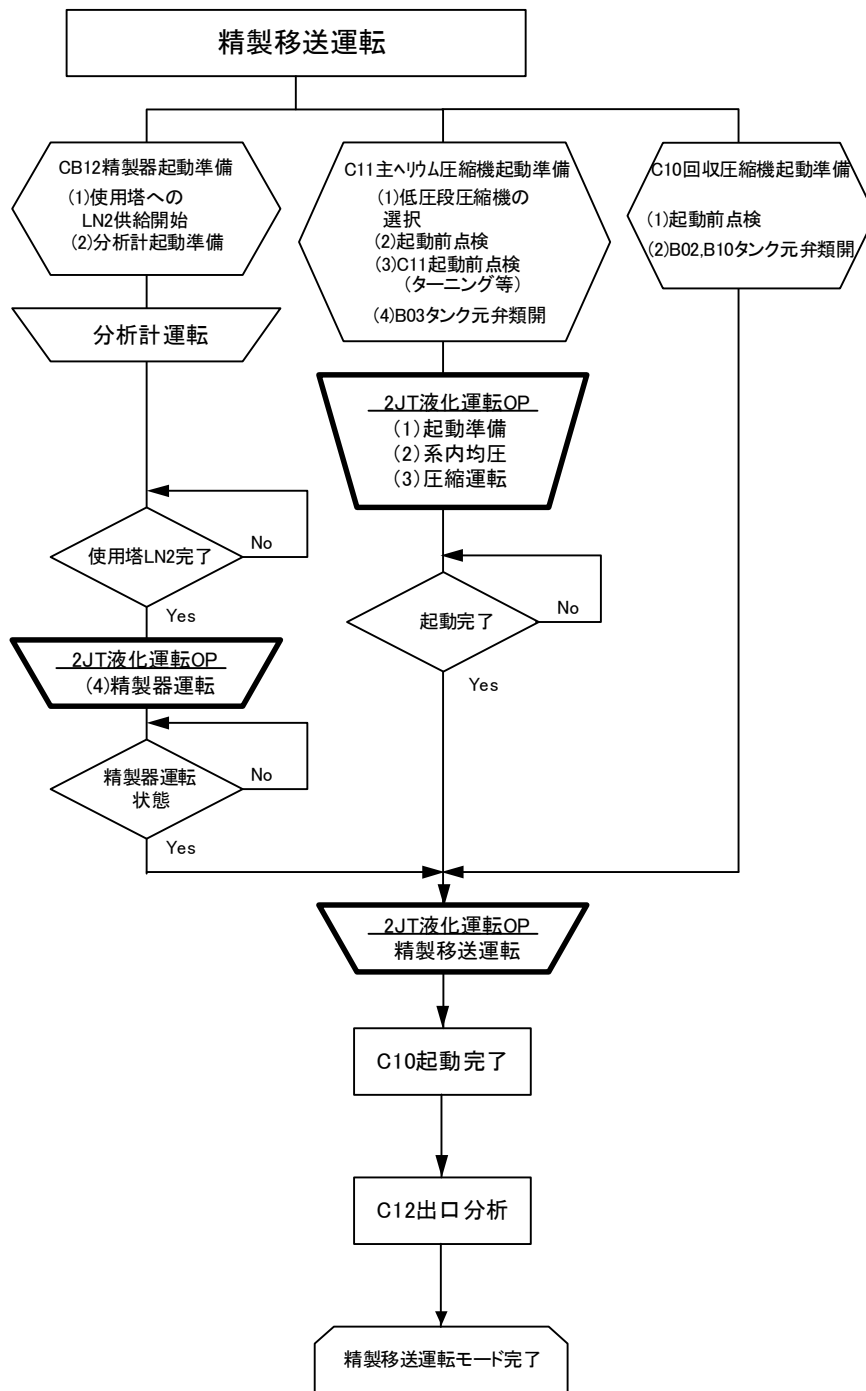
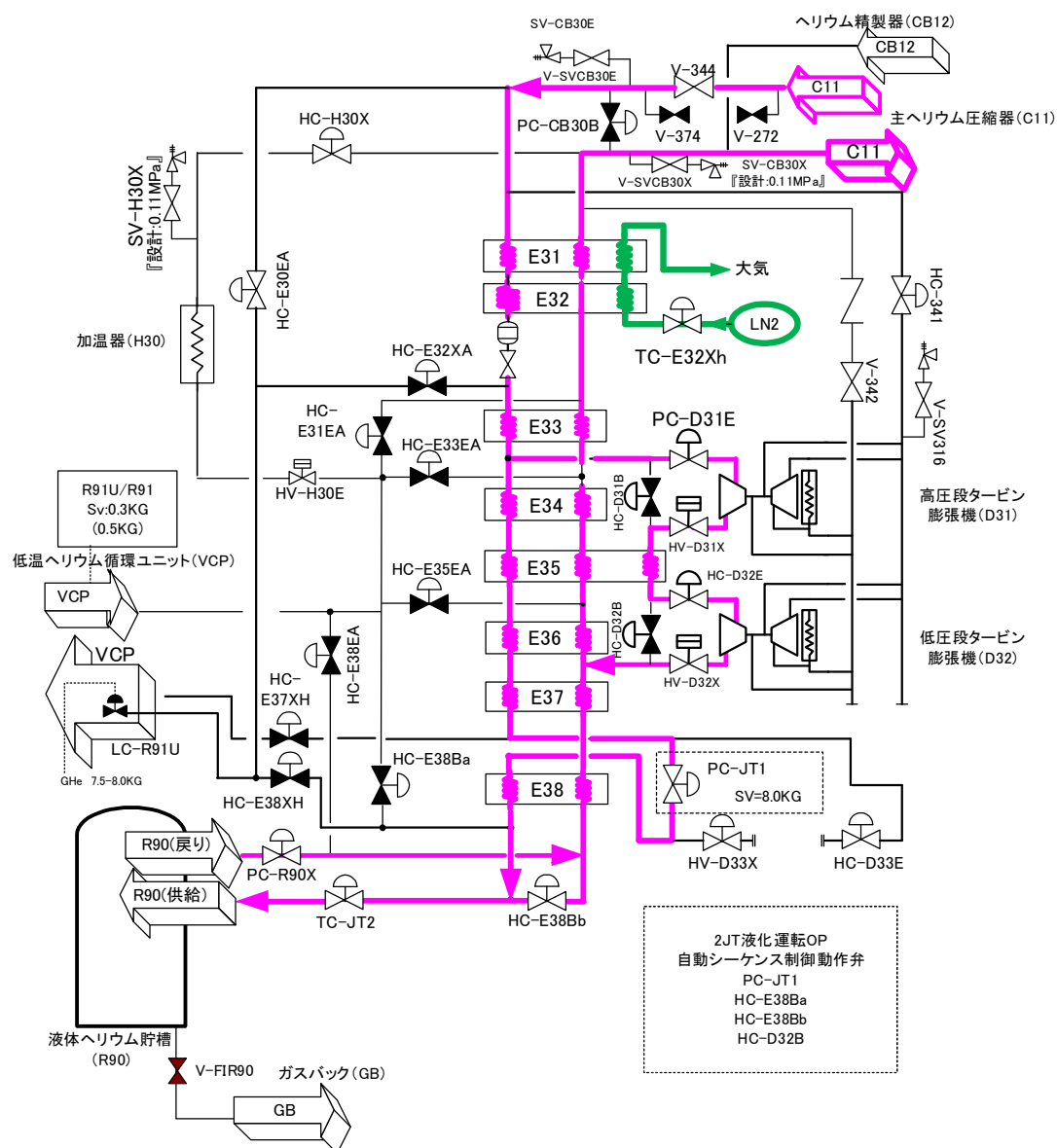


Fig.7 精製移送運転フローチャート



ヘリウム液化ラインを赤紫色で示す。

液体室素冷却ラインを緑色で示す。

Fig.8 ヘリウム液化運転フローシート

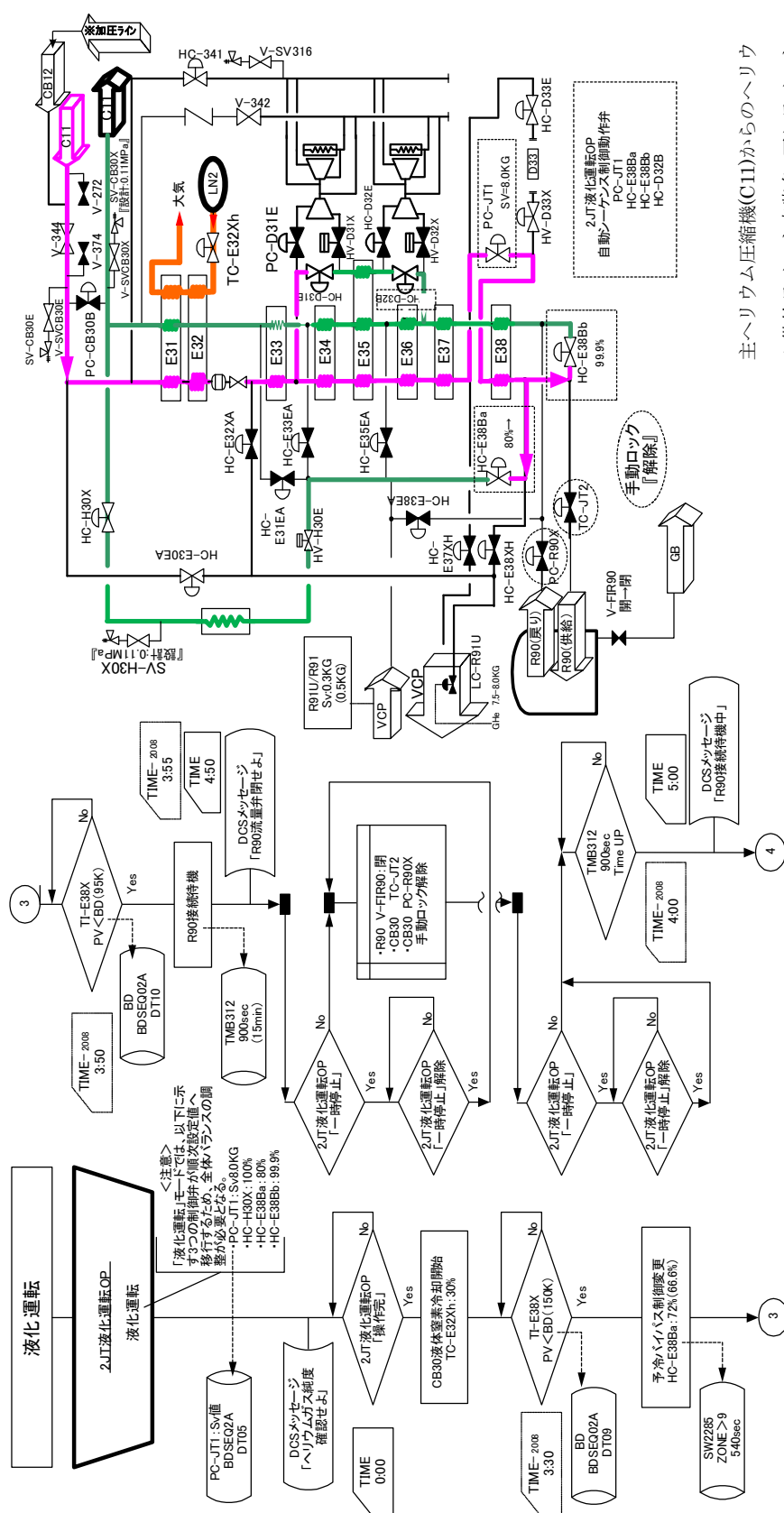


Fig.9 ヘリウム液化運転フローチャート(1/3)

主ヘリウム圧縮機(C11)からのヘリウ

ム供給ラインを赤紫色、戻りラインを

緑色で示す。

液体窒素ラインを橙色で示す。

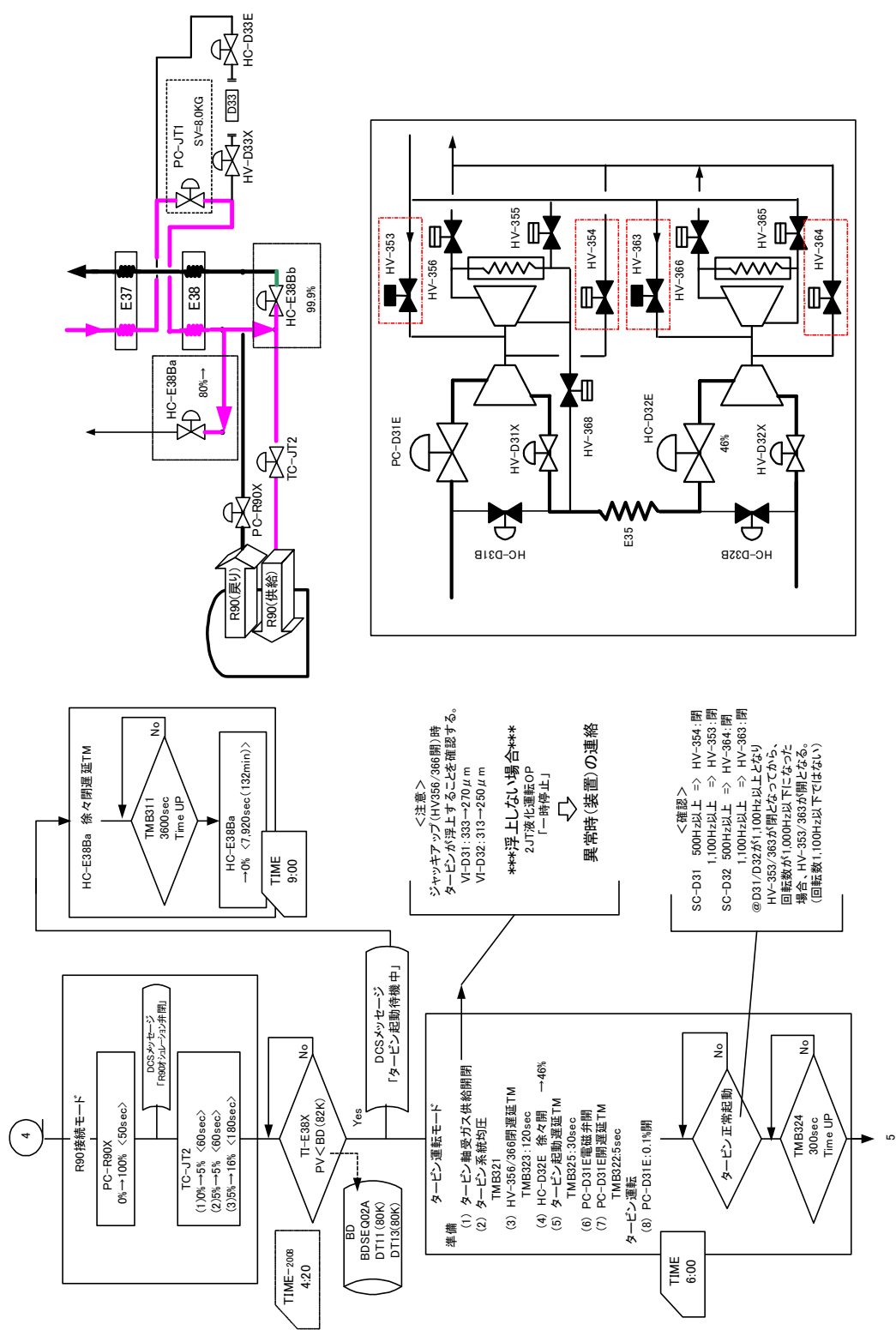


Fig.9 ヘリウム液化運転フローチャート(2/3)

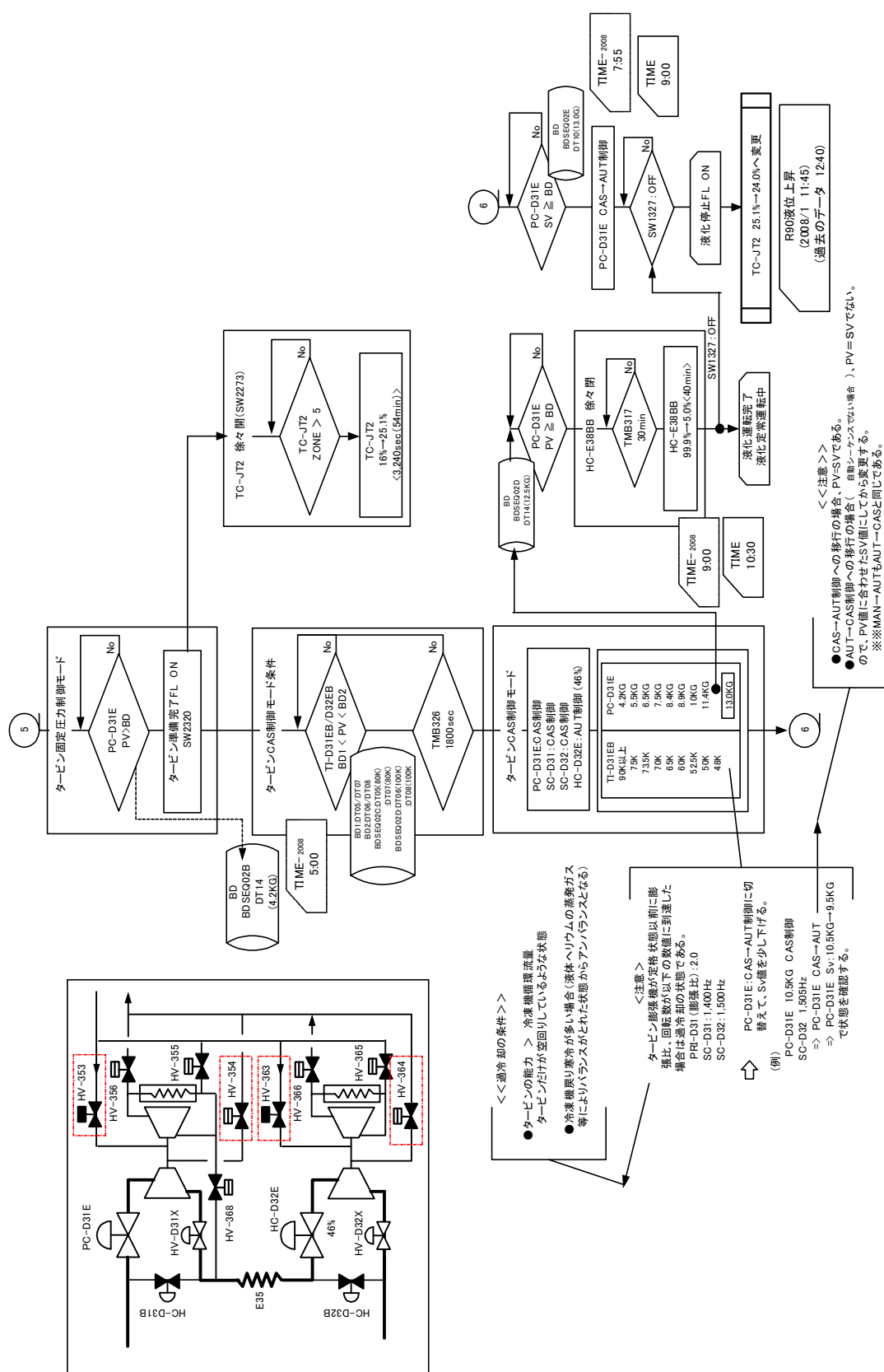


Fig.9 ヘリウム液化運転フローチャート(3/3)

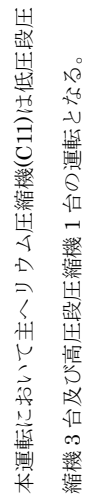


Fig.10 コイル冷凍運転フローシート



天井及び側面部空調ダクトの損傷、落下



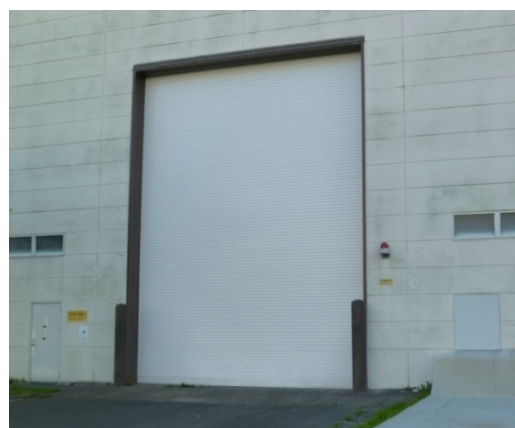
空調ダクト損傷箇所の補修



空調ダクト補修後（2012年2月）



シャッターの損傷



シャッター補修後（2011年7月）

Fig.11 震災による第一工学試験棟損傷状況



基礎化粧モルタル部の損傷
液体窒素貯槽(R60)



液体窒素貯槽(R60)補修後



不同沈下測定
液体窒素貯槽(CE49)



気密試験
主ヘリウム圧縮機(C11)廻り配管

Fig.12 震災後の設備補修及び点検例

Table3 ヘリウム冷凍機システムの震災後点検状況(1/3)

実施年：2011 年

装置・機器名	項目	内容
全般	高圧ガス製造設備の日常点検	3 月 23 日より高圧ガス保安法に基づく日常点検を実施
5kW コールドボックス 【CB30】	外観目視点検	4 月 1 日に真空容器、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 11 日に発泡試験(自圧)を実施
主ヘリウム圧縮ユニット 【C11A～D】	外観目視点検	3 月 23 日に制御盤、圧縮機、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日～4 月 15 日に発泡試験(自圧)を実施
活性炭吸着器ユニット 【U11B】	外観目視点検	3 月 23 日に吸着器及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日～4 月 15 日に発泡試験(自圧)を実施
高性能油分離器ユニット 【U11A】	外観目視点検	3 月 23 日に油分離器及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日～4 月 15 日に発泡試験(自圧)を実施
液体ヘリウム貯槽 【R90】	外観目視点検	4 月 1 日に貯槽、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 11 日に発泡試験(自圧)を実施
ヘリウム回収圧縮機 【C10】	外観目視点検	3 月 23 日に制御盤、圧縮機、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日に発泡試験(自圧)を実施
ヘリウム精製器 【CB12】	外観目視点検	4 月 1 日に制御盤、精製器及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日～4 月 15 日に発泡試験(自圧)を実施
低温ヘリウム循環ユニット 【VCP】	外観目視点検	4 月 1 日に貯槽、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 11 日に発泡試験(自圧)を実施
ヘリウム回収タンク 【B10/B02】	外観目視点検	3 月 23 日にタンク、基礎及び配管類の点検を実施 ※基礎コンクリートの化粧モルタル部に損傷が発見され 4 月 25 日に補修を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日～4 月 15 日に発泡試験(自圧)を実施
ガスバック 【B01A/B】	外観目視点検	4 月 1 日にガスバック及び架台の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 14 日～4 月 15 日に放置試験(自圧)を実施

Table3 ヘリウム冷凍機システムの震災後点検状況(2/3)

実施年：2011 年

装置・機器名	項目	内容
液体窒素貯槽 【R60】	外観目視点検	3 月 23 日に貯槽、基礎及び配管類の点検を実施 ※基礎コンクリートの化粧モルタル部に損傷が発見され 4 月 25 日に補修を実施
	気密漏洩試験	4 月 5 日に発泡試験（自圧）を実施
	不同沈下測定	4 月 8 日に実施 結果：自主検査結果と比較し沈下無く良好
5kW 冷凍機制御装置 【DCS システム】	外観目視点検	4 月 1 日に制御盤及びオペレータステーションの点検を実施 4 月 1 日に表示状態の確認を実施 4 月 1 日に異音・異常振動の確認を実施
冷却水循環装置 【CT70】	外観目視点検	3 月 23 日に制御盤、ポンプ、電動機、基礎及び配管類の点検を実施
	試験運転	4 月 6 日に実施
計装空気圧縮機 【C80】	外観目視点検	3 月 23 日に圧縮機、除湿機、油除分離器、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 4 日に発泡試験（自圧）を実施
	試験運転	4 月 4 日に実施
主ヘリウム主ヘリウムガス貯槽 【B03】	外観目視点検	3 月 23 日に貯槽、基礎及び配管類の点検を実施
	不同沈下測定	4 月 8 日に実施 結果：自主検査結果と比較し沈下無く良好
	気密漏洩試験	4 月 13 日に発泡試験（自圧）を実施
液体窒素貯槽 【CE49】	外観目視点検	3 月 23 日に貯槽、基礎及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 5 日に発泡試験（自圧）を実施
	不同沈下測定	4 月 8 日に実施 結果：自主検査結果と比較し沈下無く良好

Table3 ヘリウム冷凍機システムの震災後点検状況(3/3)

実施年：2011 年

装置・機器名	項目	内容
真空容器 【CB50】	外観目視点検	4 月 8 日に真空容器、基礎及び配管類の点検を実施
電流リード 【CSCL1/2】	外観目視点検	4 月 1 日にタンク及び配管類の点検を実施
	気密漏洩試験	4 月 11 日に発泡試験を実施
真空排気装置 【DP/MBP/RP】	外観目視点検	4 月 1 日に制御盤、排気ポンプ、基礎及び配管類の点検を実施

Table 4 ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況(1/5)

実施年：2012 年

装置・機器名	項目	内容
全般	電気保安点検	4 月 13 日～5 月 9 日に各機器装置の絶縁抵抗測定及び外観点検（損傷、熱変色、腐食、ゆるみ、回路表示）を実施
	高圧ガス製造設備の自主検査	8 月 29 日～9 月 14 日に高圧ガス保安法に基づく検査を実施
	高圧ガス製造設備の保安検査	9 月 28 日に高圧ガス保安法に基づく検査を受検
5kW コールドボックス 【CB30】	真空排気装置性能確認（DP,MBP,RP）	4 月 12 日～4 月 17 日に性能確認運転を実施 到達真空度の結果は以下のとおり ポンプ側： $8.0 \times 10^{-5} \text{Pa}$ CB30 側： $5.0 \times 10^{-5} \text{Pa}$
	ヘリウムリーク試験	4 月 18 日～4 月 23 日に実施 結果：リーク量 $1.53 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下で良好 Fig.13 に試験結果を示す。
	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に開閉状態確認を実施
	圧力・差圧伝送器較正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施
	温度センサ断線チェック	6 月 27 日～7 月 11 日に実施
	タービン膨張機熱交換器点検整備	11 月 5 日～11 月 8 日に熱交換器の分解点検を実施
	初期冷却	11 月 12 日～11 月 16 日に常温から 80K までの冷却を実施
	タービン膨張機点検確認	11 月 27 日～11 月 29 日に系内ガス純度点検、常温動作試験及びインターロック試験を実施 Fig.18 にヘリウムタービン膨張機性能確認結果を示す。
	クールダウン/液化試験運転	12 月 17 日～12 月 21 日に 80K から 4K までの冷却、液化運転を実施

Table 4 ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況(2/5)

実施年：2012 年

装置・機器名	項目	内容
主ヘリウム圧縮機ユニット 【C11A～D】	電動機点検	6 月 11 日～6 月 21 日に電気工作物保安規程に定める点検を実施
	試験運転	7 月 2 日に性能確認試験を実施
	圧縮機点検整備	8 月 27 日～10 月 19 日に圧縮機本体分解点検、油ポンプ分解点検、潤滑油性状分析、計装点検、ガス・油冷却器水側開放点検及び試験運転を実施 Fig.17 に点検整備の一部を示す。
液体ヘリウム貯槽【R90】	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に実施
	圧力伝送器校正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施
	初期冷却	11 月 12 日～11 月 16 日に常温から 80K までの冷却を実施
	クールダウン/液化試験運転	12 月 17 日～12 月 21 日に 80K から 4K までの冷却、液溜めを実施 Fig.21 にクールダウン及び液溜め結果を示す。
ヘリウム回収圧縮機 【C10】	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に実施
	電動機点検	6 月 11 日～6 月 21 日に電気工作物保安規程に定める点検を実施
	回収圧縮機点検整備	9 月 12 日～11 月 20 日に低段及び高段電動機交換、油ポンプ開放点検、油フィルタ開放点検、潤滑油性状分析、計装点検及び試験運転を実施
ヘリウム精製器 【CB12】	精製器点検整備	7 月 10 日～10 月 4 日に制御弁及び電磁弁の点検を実施
	再生工程確認試験(試験運転)	10 月 16 日～10 月 18 日に全 13 工程の確認を実施
	性能確認運転	10 月 19 日に精製運転を実施

Table 4 ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況(3/5)

実施年：2012 年

装置・機器名	項目	内容
低温ヘリウム循環ユニット 【VCP】	真空排気装置性能確認 (DP、RP)	4 月 12 日～4 月 20 日に実施 到達真空度結果 ポンプ側： $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa}$ VCP 側： $6.6 \times 10^{-5} \text{Pa}$
	ヘリウムリーク試験	4 月 12 日～4 月 20 日に実施 結果：リーク量 $3.7 \times 10^{-9} \text{Pam}^3/\text{sec}$ 以下で良好 試験結果を Fig.14 に示す。
	P/P 変換器動作試験	5 月 9 日～5 月 10 日に実施
	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に実施
	圧力・差圧伝送器較正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施
	温度センサ断線チェック	6 月 27 日～7 月 11 日に実施
	低温ヘリウム排気ポンプ(P02)及び低温ヘリウム循環ポンプ(P03)分解点検	7 月 23 日～12 月 24 日に分解点検及び常温動作試験を実施 Fig.20 に P02 及び P03 を示す。
ヘリウム回収タンク 【B10/B02】	80K シールド配管真空リーク補修	7 月 31 日に 80K シールド配管のヘリウムリーク試験（スニファ法）でリークが発見され 12 月 5 日～12 月 14 日に補修を実施 補修後リーク量： $1.68 \times 10^{-9} \text{Pam}^3/\text{sec}$ 以下で良好 Fig.19 に補修内容を示す。
	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に制御弁動作確認試験を実施
ガスバック 【B01A/B】	圧力伝送器較正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に圧力伝送器較正試験を実施
	駆動部動作確認	5 月 7 日に機械的動作確認、駆動部へのグリス塗布及びレベル計・LS 等点検を実施

Table 4 ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況(4/5)

実施年：2012 年

装置・機器名	項目	内容
液体窒素貯槽 【R60】	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に実施
	圧力伝送器校正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施
	R60 液体窒素貯槽点検整備	8 月 27 日～9 月 4 日に液面計、自動弁、加圧弁動作試験及び貯槽外面補修塗装を実施
	R60 液体窒素貯槽初期冷却	9 月 4 日に常温から 80K までの冷却を実施
5kW 冷凍機制御装置 【DCS システム】	µXL ネスト盤	7 月 30 日～9 月 11 日に制御バルブ、圧力、温度等の指示値及び動作信号並びに警報信号等の動作確認を実施
	OPS 盤	7 月 30 日～9 月 11 日に制御バルブ、圧力、温度等の指示値及び動作信号並びに警報信号等の動作確認を実施
	DCS システム点検整備	7 月 30 日～9 月 11 日にモニタリングユニット点検整備、フィールドコントロールユニット点検整備及びオペレータステーション点検整備を実施
冷却水循環装置 【CT70】	冷却塔貯槽内部清掃	5 月 1 日に水洗等による洗浄、Y 型ストレーナー及びタービン冷却水フィルター洗浄を実施
	冷却塔設備更新	9 月 13 日～10 月 10 日に既設冷却塔一式の更新を実施
計装空気圧縮機 【C80】	油除分離器確認	5 月 31 日にフィルター等の点検清掃を実施
	除湿器動作確認	5 月 31 日に A/B 塔の切替動作確認を実施
	計装圧縮機整備	8 月 20 日～8 月 24 日に圧縮機本体の分解点検及びバッファタンク内部点検を実施
主ヘリウムガス貯槽 【B03】	圧力伝送器校正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施

Table 4 ヘリウム冷凍機システムの運転再開に向けた整備状況(5/5)

実施年：2012 年

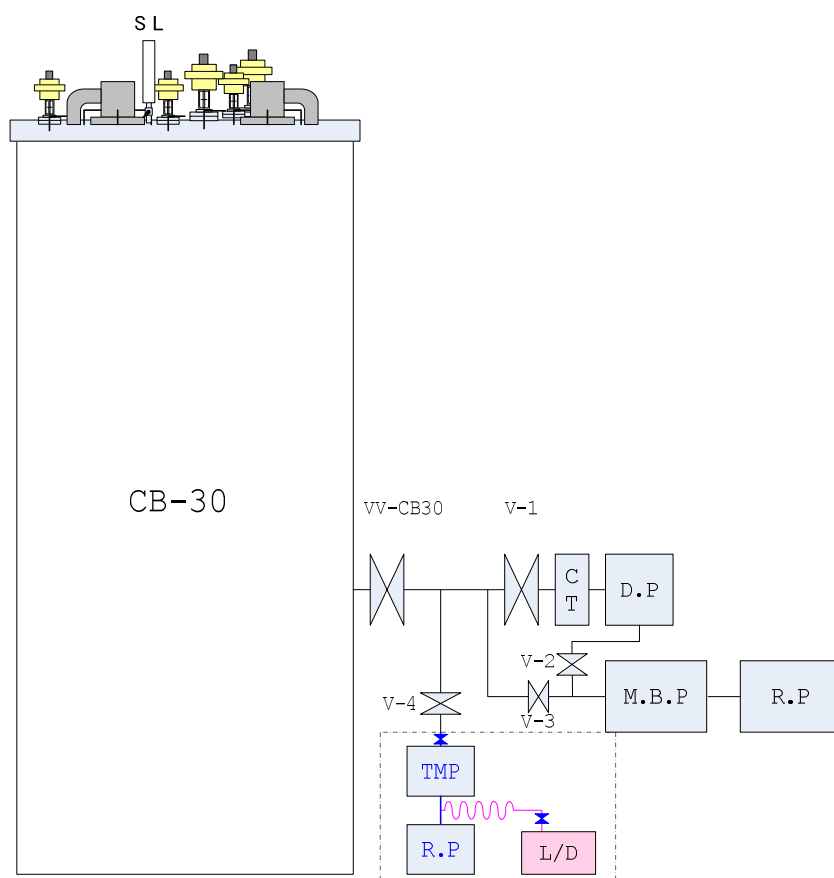
装置・機器名	項目	内容
液体窒素貯槽 【CE49】	圧力伝送器校正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施
真空容器 【CB50】	気密漏洩試験	4 月 25 日に CS モデルコイル、PF インサートコイル及び支持構造物の気密漏洩試験を実施 Fig.15 に気密漏洩試験結果を示す。
	ヘリウムリーク試験 (上胴 80K シールド部)	4 月 27 日～5 月 8 日に実施 結果：リーク量： $3.81 \times 10^{-10} \text{Pam}^3/\text{sec}$ 以下で良好 試験結果を Fig.16 に示す。
	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に実施
	P/P 変換器動作試験	5 月 9 日～5 月 10 日に実施
	圧力・差圧伝送器校正試験	5 月 17 日～5 月 25 日に実施
	温度センサ断線チェック	6 月 27 日～7 月 11 日に実施
電流リード 【CSCL1/2】	制御弁動作確認試験	5 月 11 日～5 月 28 日に実施
真空排気装置 【DP/MBP/RP】	CB50 真空排気装置点検整備	8 月 6 日～10 月 15 日に MBP 及び RP 分解点検並びに DP 作動油交換を実施
	CB50 真空排気装置冷却水配管洗浄	8 月 22 日～8 月 23 日に DP,MBP,RP の冷却水配管内部について薬品洗浄を実施
ガス分析計	点検校正	7 月 10 日～9 月 21 日に酸素濃度計及び露点計点検校正を実施

ヘリウムリーク試験成績書

試験日：平成 24 年 4 月 18 日

対象機器：5kW コールドボックス(CB30)

試験方法：真空法



- ・ 上部、系統図のように TMP 排気ユニット背圧部にヘリウムリークディテクターを接続して測定した。
- ・ 感度測定は、TMP 背圧側で RP との並列排気状態で実施している。
- ・ 計測機器名：ヘリウムリークディテクター アルバック製 HELIOT 2000
 使用標準リーク： $1.5 \times 10^{-7} \text{Pam}^3/\text{sec}$
 標準リーク感度測定値： $1.45 \times 10^{-10} \text{Pam}^3/\text{s}$ 最小読取感度： $1.0 \times 10^{-11} \text{Pam}^3/\text{sec}$

真空度	8.2×10^{-4} Pa
最小検出感度	1.53×10^{-8} Pam ³ /sec
ヘリウムリーク量	$< 1.53 \times 10^{-8}$ Pam ³ /sec

試験結果：良好（漏れなし）

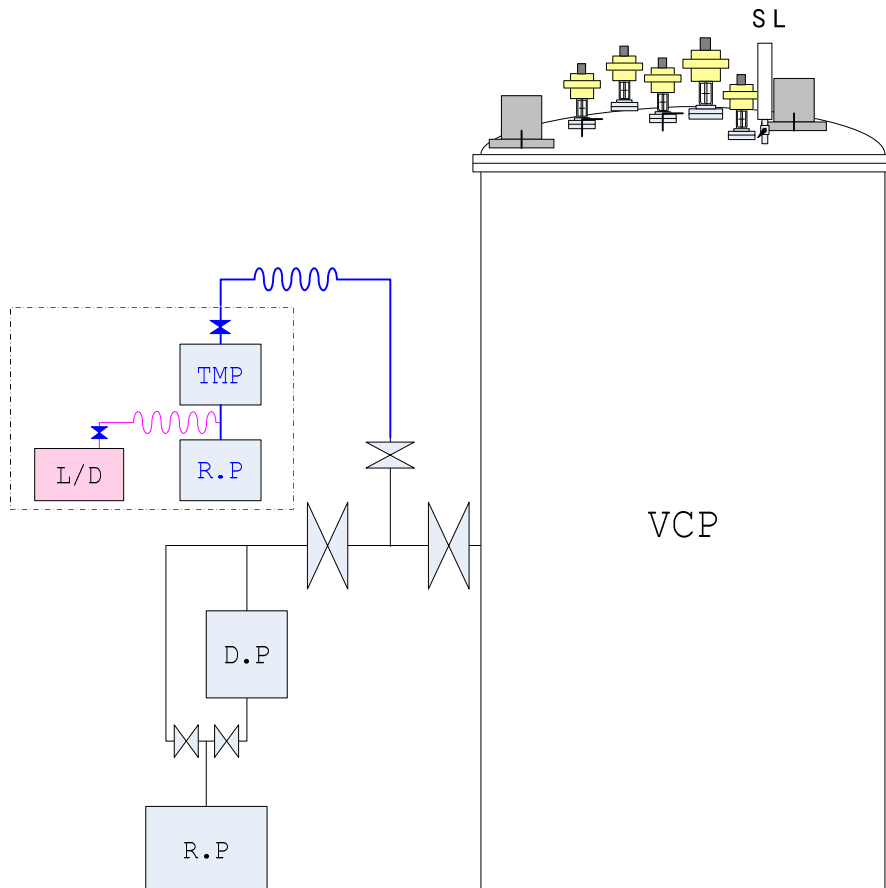
Fig.13 5kW コールドボックス(CB30)ヘリウムリーク試験結果

ヘリウムリーク試験成績書

試験日:平成 24 年 4 月 20 日

対象機器:低温ヘリウム循環ユニット (VCP)

試験方法:真空法



- ・ 上部、系統図のように TMP 排気ユニット背圧部にヘリウムリークディテクターを接続して測定した。
- ・ 感度測定は、TMP 背圧側で RP との並列排気状態で実施している。
- ・ 計測機器名:ヘリウムリークディテクター

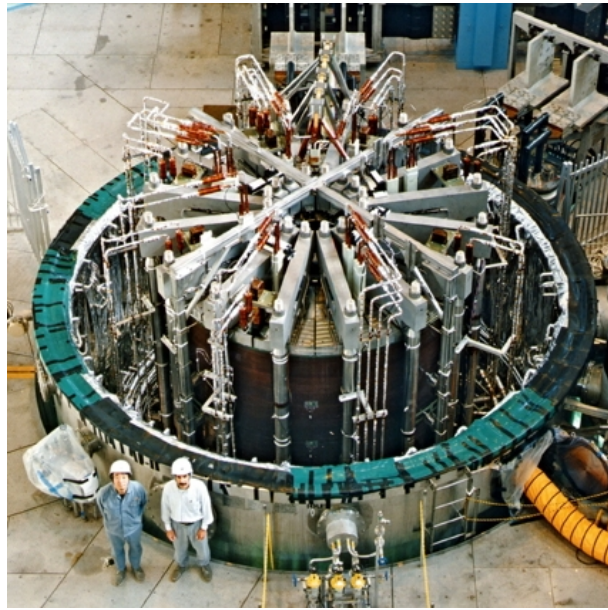
アルバック製 HELIOT 2000

使用標準リーク: $6.2 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{sec}$

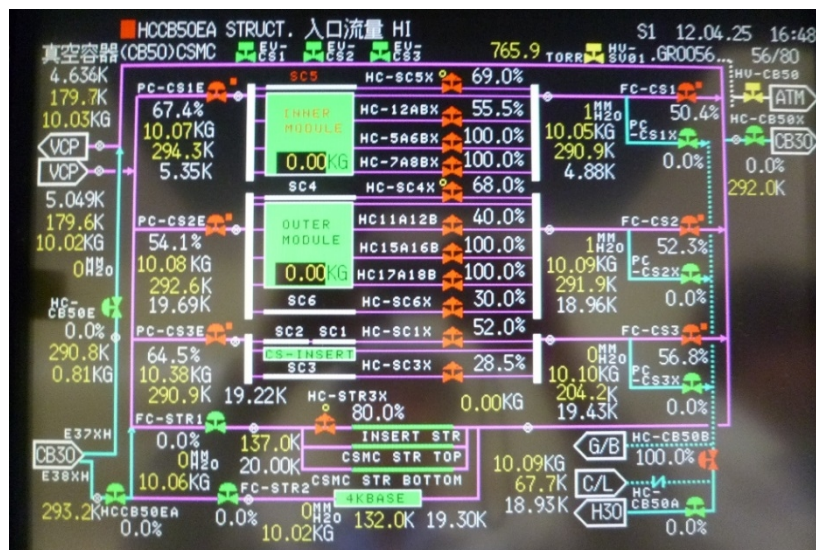
真空度	1.2×10^{-5}	Pa
最小検出感度	3.7×10^{-9}	Pam^3/sec
ヘリウムリーク量	$< 3.7 \times 10^{-9}$	Pam^3/sec

試験結果:良好 (漏れなし)

Fig.14 低温ヘリウム循環ユニット(VCP)ヘリウムリーク試験結果



真空容器(CB50)



気密漏洩試験時の DCS 画面

試験箇所	CS モデルコイル、PF インサートコイル及び支持構造物
試験条件	試験ガス：ヘリウム、試験圧力：1MPaG、保持時間：60 分
試験結果	良好：漏れ無し

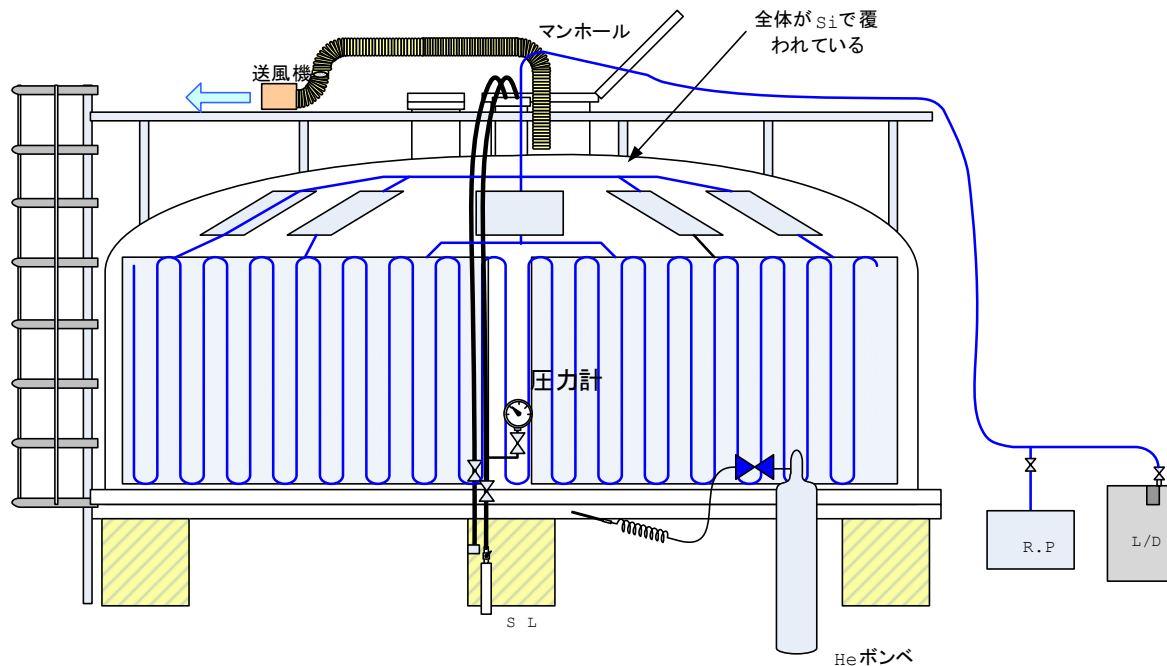
Fig.15 真空容器(CB50)気密漏洩試験結果

ヘリウムリーク試験成績書

試験日：平成 24 年 5 月 2 日

対象機器：真空容器(CB50)

試験方法：真空法



- ・80K シールドラインにヘリウムリークディテクターを接続し真空排気した。
- ・ヘリウムリーク試験は、真空容器上蓋内部にヘリウムガスを導入し配管等にガス吸引が無いことを確認した。

計測機器名：ヘリウムリークディテクター

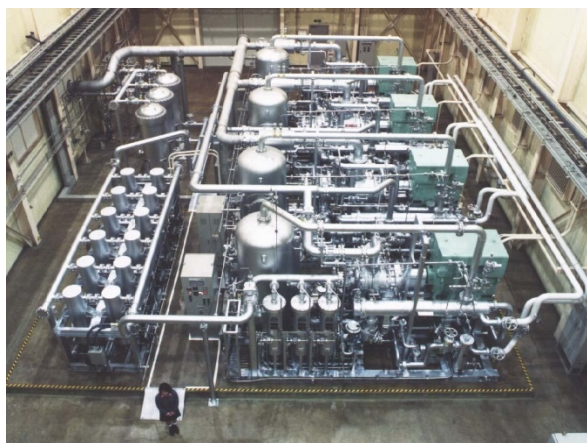
アルバック製 HELIOT 2000

使用標準リーク： $2.9 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{sec}$

真空度	5.1×10^{-2} Pa
最小検出感度	3.81×10^{-10} Pam^3/sec
ヘリウムリーク量	$< 3.81 \times 10^{-10}$ Pam^3/sec

試験結果：良好（漏れなし）

Fig.16 真空容器(CB50)ヘリウムリーク試験結果



主ヘリウム圧縮機ユニット(C11A~D)



熱交換器分解点検

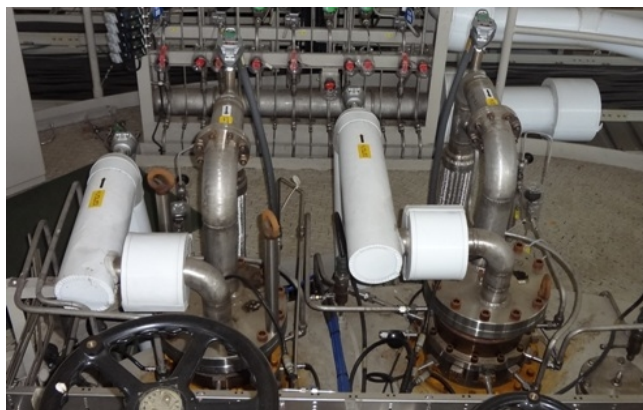


油ポンプ分解点検



メカニカルシール交換

Fig.17 主ヘリウム圧縮機点検整備



ヘリウムタービン膨張機



5kW コールドボックス(CB30)

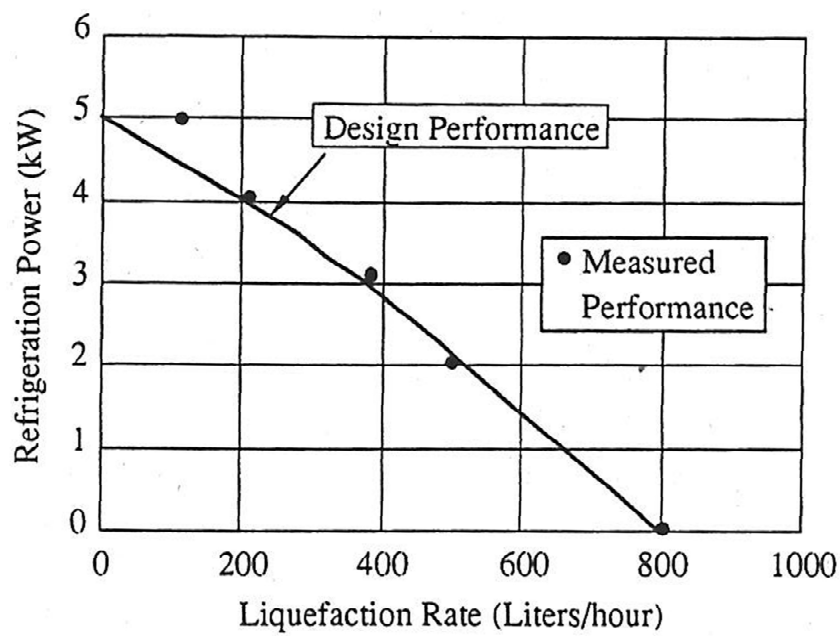


Fig.18 ヘリウムタービン膨張機性能確認結果

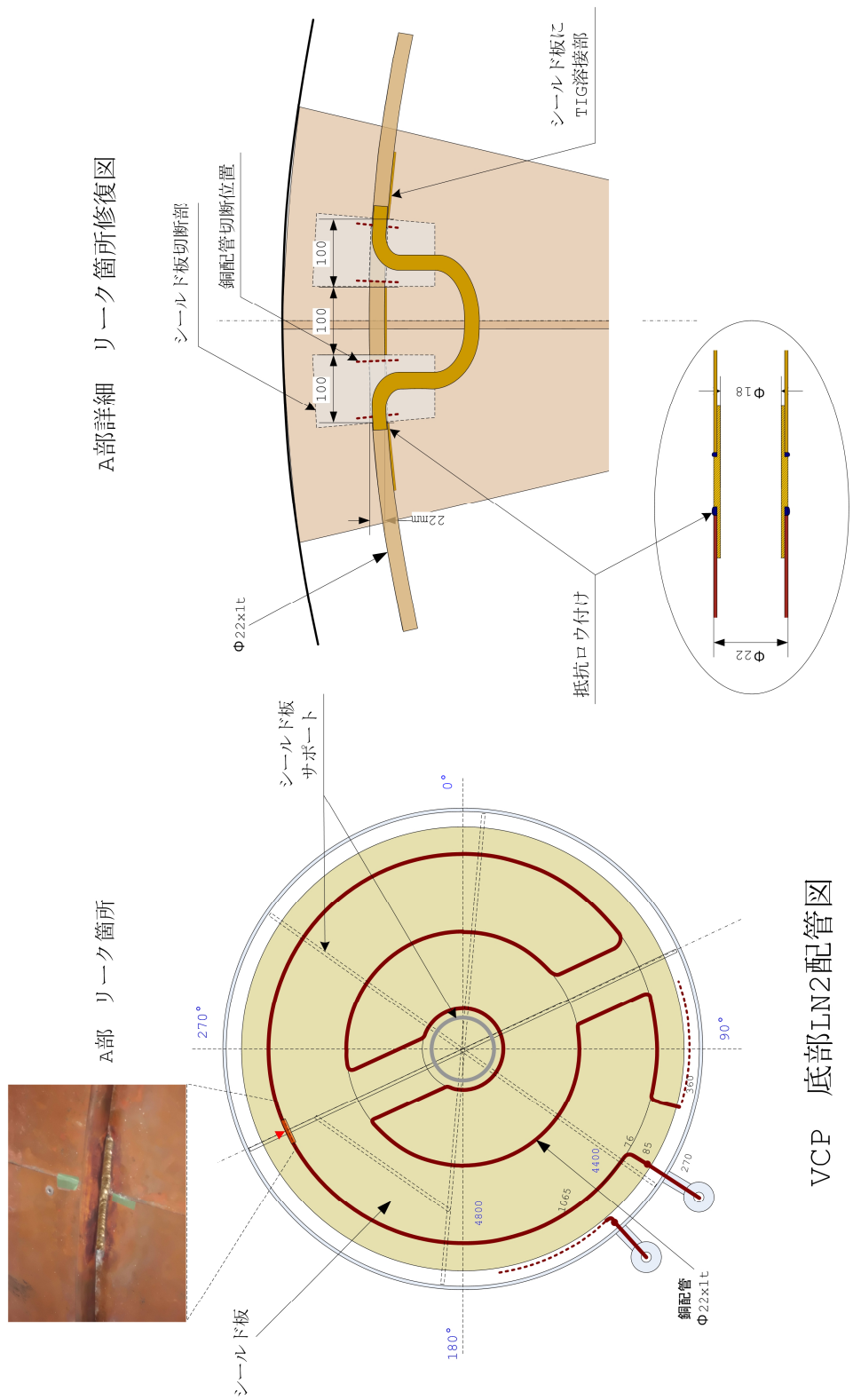
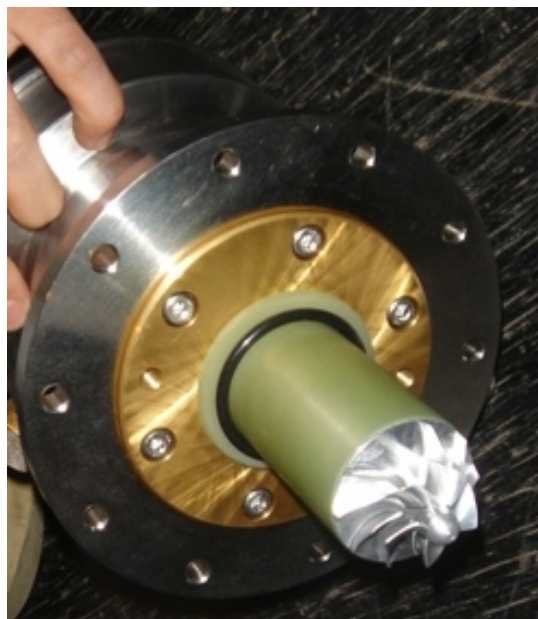
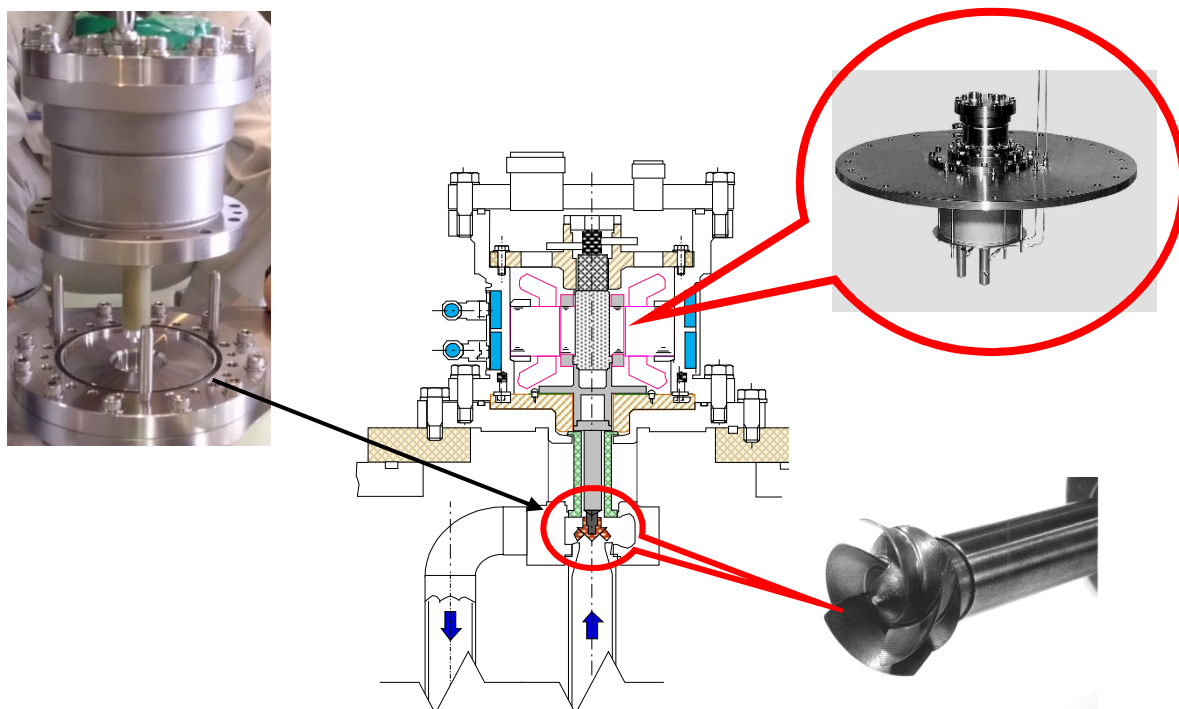


Fig.19 80K シールド配管真空リーク補修



P02 分解点検



低温循環ポンプ(P03)

Fig.20 低温ヘリウム排気ポンプ(P02)及び低温ヘリウム循環ポンプ(P03)分解点検

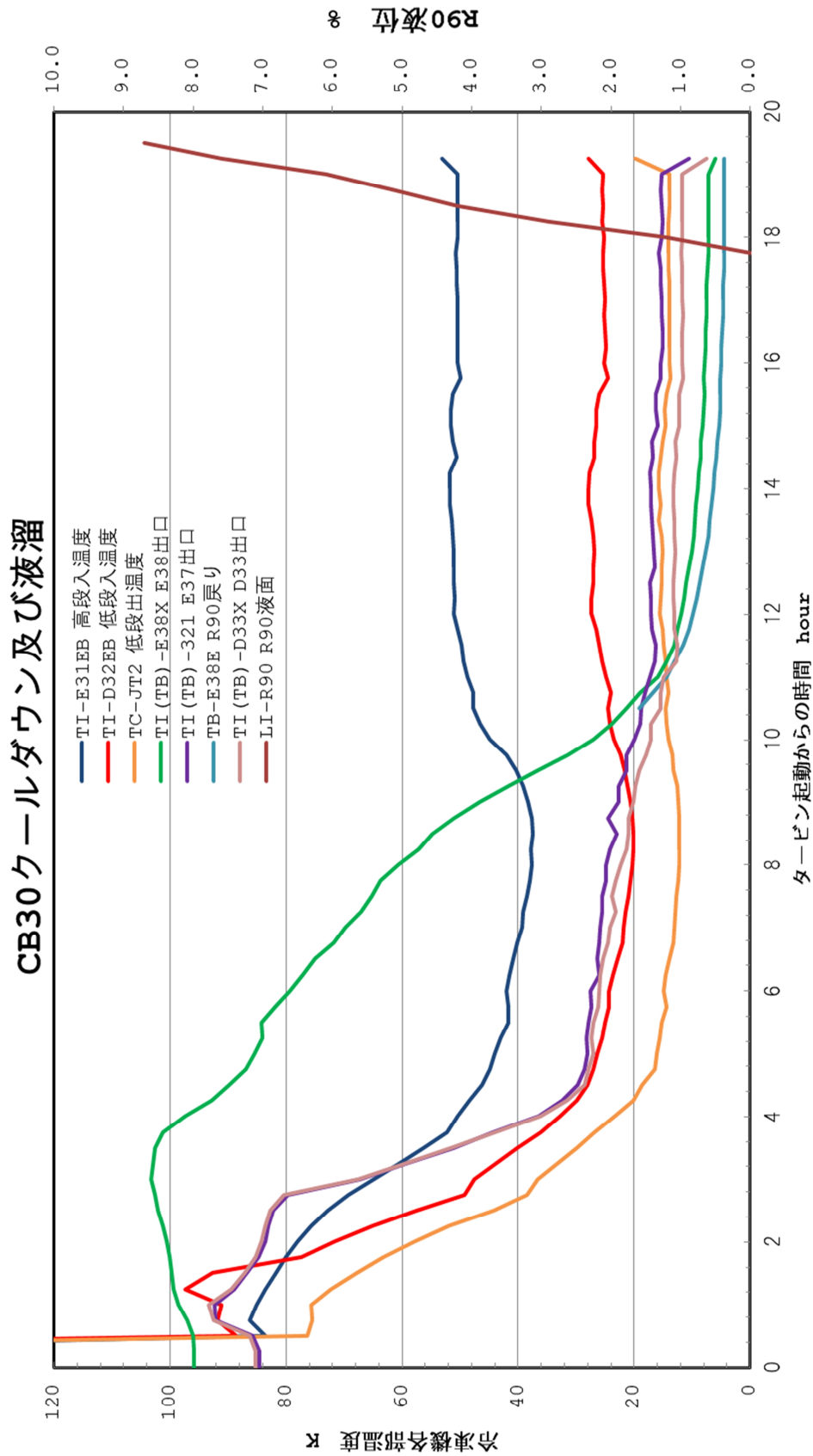


Fig.21 クーラダウン/液化試験運転時温度変化データ

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 ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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 ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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 ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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.2002,20,705) 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 ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	セ	c
10 ¹⁸	エ	E	10 ⁻³	ミ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピ	p
10 ⁶	メ	M	10 ⁻¹⁵	フェ	f
10 ³	キ	k	10 ⁻¹⁸	ア	a
10 ²	ヘ	h	10 ⁻²¹	ゼ	z
10 ¹	デ	da	10 ⁻²⁴	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 ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ 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 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
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、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	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 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元素の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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

