JAEA-Technology 2010-036



HTTR 高圧ガス製造施設の保守管理

Maintenance of Manufacturing Facility of High Pressure Gas in HTTR

関田 健司 新垣 悦史 若林 宏 Kenji SEKITA, Etsushi ARAKAKI 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 November 2010

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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 研究技術情報部 研究技術情報課
〒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 Intellectual Resources Section, Intellectual Resources 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

HTTR 高圧ガス製造施設の保守管理

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、新垣 悦史、若林 宏

(2010年8月20日受理)

高温工学試験研究炉(以下、HTTR)では、高圧ガス製造施設として液化窒素製造施設が設置されて おり、1 次へリウム純化設備及び 2 次へリウム純化設備のコールドチャコールトラップ、また、1 次へリウ ムサンプリング設備及び 2 次へリウムサンプリング設備のガスクロマトグラフ質量分析計の不純物ガスト ラップに液体窒素を使用している。

HTTR の液化窒素製造施設は、法令に基づいて定期自主検査を行っており、その結果、各項目とも 規定値の範囲内であることから、設備の維持管理は適切である。

また、これまでの液体窒素貯蔵タンクの液位監視の実績、及び原子炉運転中及び原子炉停止中にお ける液体窒素の消費量から、貯蔵タンクへの充填時期、充填回数及び充填量を考慮した効率的かつ有 効な液体窒素の使用量を明確にした。

本報は、これまでに行ってきた定期自主検査の実施方法及び結果、さらに、設備の管理方法と実績について纏めたものである。

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

JAEA-Technology 2010-036

Maintenance of Manufacturing Facility of High Pressure Gas in HTTR

Kenji SEKITA, Etsushi ARAKAKI and Hiroshi WAKABAYASHI

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

(Received August 20, 2010)

The Liquid Nitrogen (LN2) manufacturing facility in HTTR, is a high-pressure gas manufacturing facility. The facility provides LN2 to cold charcoal trap (CCT) in primary and secondary helium purification systems, impurities gas trap for gas chromatography mass spectrometer in primary and secondary helium sampling systems.

The facility has been performed periodical inspection according to the law and rule, and each inspection item satisfied the judgment value. Thus, it was confirmed that the maintenance of LN2 manufacturing facility was appropriate.

In addition, the effective and efficient LN2 amount to be consumed was clarified on the basis of the monitoring.. Results of the liquid level of the storage tank and the consumption of LN2 as the reactor was operated or stopped, by considering the filling frequency and amount of the filling of LN2 to the facility by a tank lorry.

This report describes method and result of periodical inspection and equipment management.

Keywords: HTTR, Maintenance, High Pressure Gas, Liquefied Nitrogen

欠

1. はじめに	·· 1			
2. 設備概要	·· 2			
2.1 液体窒素の概要	·· 2			
2.2 液体窒素供給系	·· 2			
2.3 1 次及び2 次へリウム純化設備	3			
2.4 1 次及び2 次へリウムサンプリング設備	·· 4			
3. 設備の保守管理	5			
3.1 CE 設備の保守管理 ····································	5			
3.2 運転要領	6			
3.3 巡視点検及び記録の保存	7			
3.4 保安教育訓練	7			
4. 定期自主検査	8			
4.1 整備経歴	8			
4.2 定期自主検査結果	8			
5. 液体窒素の消費量	12			
5.1 液体窒素の充填量	12			
5.2 原子炉運転中における消費量	12			
5.3 原子炉停止中における消費量	14			
5.4 検討課題	14			
6. おわりに	16			
謝辞				
参考文献	16			

Contents

1.	Int	troduction ······1
2.	Sy	stem Outline ······2
2	2.1	Outline of Liquid Nitrogen ······2
2	2.2	System of Liquid Nitrogen Supply ······2
2	2.3	Primary and Secondary Helium Purification Systems
2	2.4	Primary and Secondary Helium Sampling Systems4
3.	Se	curity management of System5
3	8.1	Security management of Cold Evaporator ·······5
3	3.2	Operation Points ····································
3	8.3	Inspection Check and Preservation of Record7
3	8.4	Security Education Training ······7
4.	Re	gularly Inspection ······8
4	.1	Results of Maintenance ······8
4	.2	Results of Regularly Inspection ······8
5.	Co	nsumption of Liquid Nitrogen12
5	5.1	Amount of Filling of Liquid Nitrogen ·····12
5	5.2	Operation of Nuclear Reactor ·····12
5	5.3	Stop of Nuclear Reactor 14
5	5.4	Examination problem14
6.	Co	nclusion ······16
Ack	kno	wledgements ······16
Ref	ere	nces16

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¹⁾。

HTTR は、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後、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℃ を達成し²⁾、2002 年 3 月 6 日に、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、2004 年 4 月 29 日に原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 950℃を達成 し³⁾、2004 年 6 月 24 日に、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、2007 年 3 月から 2007 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、2009 年 11 月から 2010 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 日間長期連続運転を達成した。

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、さらに鋼構造物である中間熱交換器等が設置されているが、冷却材中に含まれる不純物に より、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の値を厳しく 管理している。

HTTR を構成する施設のうち、原子炉の運転及び安全を保持するために設置する、原子炉補助施設 である1次へリウム純化設備及び2次へリウム純化設備のコールドチャコールトラップ、さらに1次へリ ウムサンプリング設備及び2次へリウムサンプリング設備で使用する、ヘリウムガス中の不純物を高い 検出感度で測定するガスクロマトグラフ質量分析計に液体窒素を使用している。

HTTR ではこれらの設備に液体窒素を供給するために、液化窒素製造施設が設置されている。HTTR の液化窒素製造施設は、高圧ガス保安法に基づき、年1回の定期自主検査を行っており、設備の状態 が法で定める技術上の基準に適合しているかを確認している。液化窒素製造施設は、コールドエバポレ ータによりこれらの設備に液体窒素を供給しており、設備の運用を開始してから今日に至るまで、高圧 ガス製造施設特有の漏えい、破裂、爆発等の事故は一度も発生しておらず、十分な保守管理を行って きたことがその結果に反映されている。また、液体窒素貯蔵タンクの液位を常時監視しており、原子炉 運転中及び原子炉停止中における、液体窒素の消費量について着目した結果、効率的かつ有効な液 体窒素の使用量を明確にできた。

本報は、これまでに行ってきた定期自主検査の実施方法及び結果、さらに、設備の管理方法と実績 について纏めたもので、今後の HTTR の運転に反映していくことを目的としている。

2. 設備概要

HTTR の液化窒素製造施設は、窒素供給設備の液体窒素供給系として区分されおり、高圧ガス保安 法に基づいて、茨城県から「HTTR 液化窒素製造施設」として、高圧ガス製造の許可を受けている。

2.1 液体窒素の概要

表 2.1 に液体窒素の一般的性質を示す。液体窒素は冷却された窒素の液体であり、-196℃で沸騰し て気化する。そのため容器の中では絶えず蒸発し続けており、仮に 12の液体窒素が気化し膨張した場 合には、体積が約 650 倍にもなることから、容器は密閉してはならない。液体窒素の容器を密閉した場 合、蒸発した窒素ガスが圧縮され、超高圧状態になってしまい、容器が破裂を起こしてしまう。また、室 内に液体窒素が大量にこぼれた場合は、急速に蒸発した窒素が酸素濃度を下げるため、酸欠状態に 陥るので、室内の換気に注意する必要がある。この窒素は、ガスの性状から不活性ガスに分類される が、その不活性ガスによる事故の大半は酸欠によるものである。また、液体窒素は極低温であるため、 取扱い時に皮膚にかかった場合には凍傷になる可能性があるので、取扱う場合には必ず専用の皮手 袋を使用する必要がある。

2.2 液体窒素供給系

液体窒素供給系は、コールドエバポレータ型(以下、「CE」)で、移動式製造設備(以下、「タンクロー リ」)により液体窒素を超低温状態にて貯槽に貯蔵し、真空断熱配管で各系統、機器に供給するもので、 液体窒素貯蔵タンク、加圧蒸発器、配管及び弁類から構成される。表 2.2 に構成機器仕様を、図 2.1 に 液体窒素供給系の系統図、図 2.2 に CE の外観を示す。一般に CE とは、超低温液化ガスを安全に貯蔵 し、加圧蒸発器で一定の圧力を維持しながら自圧で送液し、送ガス蒸発器で気化させて、あるいは液状 のまま消費系統へ供給する設備のことである。

貯槽は、ステンレス鋼製の内槽及び外槽からなる二重殻構造で、3本の脚で支持され、各々は基礎ボ ルト4本により鉄筋⊐ンクリート台上に固定されている。内槽と外槽の空間には熱伝導度の小さい粉末断 熱材(パーライト)を充填し、かつ、空間を真空に保持して、熱の浸入を抑え、高度の断熱性を持たせてい る。加圧蒸発器は、液体窒素を気化する機能を有し、ここで生成された窒素ガスは貯槽の加圧源となり、 液体窒素を各消費先に送液している。また、操作に必要な貯槽内圧力計、液面計等の計器類は外槽正 面に装備され、弁類は外槽正面下部に配置してある。以下に、液体窒素供給系の各ラインの機能を示 す。

(1)充填ライン

充填ラインは、貯槽に超低温の液体窒素を受け入れるラインである。最初に、タンクローリ搭載の チャージポンプの出口と液入逆止弁(1761VC3)とをフレキシブルチューブで接続し、下部液入口弁 (1761V7)又は上部液入口弁(1761V8)を用いて行う。入口弁が下部と上部にそれぞれある理由は、 CEの運転圧力を一定に保ちながらチャージ作業(受入れ)を行うためのもので、下部液入口弁を用 いれば、貯槽内の液量の増加により内槽上部のガス層が圧縮されCEの圧力は上昇し、上部液入 口弁を用いれば、内槽上部にあるガスが充填された液の冷熱により再液化しCEの圧力は下降す る。

(2)加圧ライン

加圧ラインは、貯槽内の液化ガスの消費による圧力降下に応じて作動し、貯槽内のガス圧力を

ー定に保つために設けられている。まず、貯槽の底部から液体窒素を取り出し、加圧弁(1761V5)を 経て、加圧蒸発器に送られる。ここで気化されたガスは加圧調整弁(1761VC1)、加圧ガス弁(1761V 6)を経て貯槽頂部に送られ、貯槽の液面を一定圧力になるように加圧する。ここで用いる加圧調整 弁は二次圧力調整弁であり、貯槽圧力を検知し、所定圧力以下では開、所定圧力以上では閉とな る。また、CEは高度の真空を保持した断熱貯槽ではあるが、外部からの僅かな熱の浸入によって 液体窒素を気化させ、貯槽上部空間の圧力を上昇させる。この圧力上昇をひきおこす余分なガスを ブリーダ弁(1761VC2)により大気中に排気し、貯槽圧力を一定圧力まで降下させる。

(3)送液ライン

貯槽の底部から液体窒素を取り出すラインで、送液弁(1761V1)を通り、出口弁(1761V17)、取り 合い弁(1761V3、1761V15、1761V4)を経て各消費先に供給される。

(4)検液ライン

CEに充填するとき過充填を防止するために最大充填量(内容積の90%)を確認するためのラインである。

(5) 放出ライン

緊急時等必要に応じてCEの頂部からガスを外部に放出し、貯槽の圧力を下げるためのラインである。

(6)安全弁

安全弁は、加圧ライン(1761VR1)、内槽(1761VR2)、充填ライン(1761VR3)、送液ライン(1761VR 4)に合計4台設置しており、各々のラインの設定条件により、貯槽若しくは配管内のガスの圧力が異 常に上昇した場合に動作し、その圧力を所定の圧力まで降下させる。

2.3 1 次及び 2 次ヘリウム純化設備

1次ヘリウム純化設備は、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ヘリウムガスを純化して補助冷却設備及びスタンドパイプに戻すことにより、 1次冷却設備の不純物濃度を制限濃度内にする。図 2.3 に概略系統図を示す。不純物を含むヘリウム ガスは補助冷却設備から1次ヘリウム純化設備に導入され、入口フィルタにて黒鉛粉塵などのダストが 除去される。入口フィルタを出たヘリウムガスはプレチャコールトラップに入り、放射性ヨウ素等が吸着除 去される。プレチャコールトラップを出たヘリウムガスは、入口加熱器を経て、酸化銅反応筒(以下、 「CuOT」)、モレキュラシーブトラップ(以下、「MST」)に入る。MSTを出たヘリウムガスの 1/4 はコールド チャコールトラップ(以下、「CCT」)に入る。CCT には液体窒素が常時入っており、液体窒素バス(液体 窒素が入っている部分)は、-196°Cに維持されている。CCT では、メタン(CH₄)、窒素(N₂)、酸素(O₂)及 び放射性希ガスが吸着除去されるとともに、吸着した不純物を保持させるために液体窒素による冷却を 継続する。CH₄等が除去されたヘリウムガスは、CCTをバイパスさせたヘリウムガスと混合してガス循環 機に入り昇圧され、戻り加熱器により昇温して、補助冷却設備及びスタンドパイプへ入る。

2 次へリウム純化設備は、2 次へリウム冷却設備の加圧水冷却器のヘリウムガス循環機吐出側及び 2 次へリウムサンプリング設備からヘリウムガスを取り入れ、純化した後、2 次へリウム冷却設備の加圧 水冷却器へリウムガス循環機吸込側に戻す系統である。図 2.4 に概略系統図を示す。2 次へリウム冷却 設備より取り入れられたヘリウムガスは、入口フィルタでダストを除去する。入口フィルタを出たヘリウム ガスは、2 次へリウムサンプリング設備からのヘリウムガスと混合し、入口加熱器を経て、CuOT、MST に 入る。MSTを出たヘリウムガスはCCTに入る。CCTには液体窒素が常時入っており、液体窒素バスは、 -196℃に維持されている。CCT では、CH₄、N₂、O₂を吸着除去するとともに、吸着した不純物を保持させるために液体窒素による冷却を継続する。CH₄等が除去されたヘリウムガスは、ガス循環機で昇圧し、 戻り加熱器により昇温して、2次ヘリウム冷却設備加圧水冷却器に入る。

2.4 1 次及び 2 次ヘリウムサンプリング設備

1次へリウムサンプリング設備は、1次冷却設備及び1次へ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。図 2.5 に概略系統図を示す。 1 次へリウムサンプリング設備には冷却材であるへリウムガス中の化学的不純物濃度を、高い分解能で 分析するガスクロマトグラフ質量分析計(以下、「GC/MS」)が設置されている。この高い分解能を得るた め、GC/MS には、測定中、超高純度へリウムガスをキャリアガスとして供給し続ける必要がある。その ため、本設備には高純度へリウムガス中の不純物を除去する、液体窒素トラップが設置されており、測 定中は液体窒素の自動供給を行っている。図 2.6 にガスクロマトグラフ質量分析計及び液体窒素トラッ プ概略図を示す。

2次へリウムサンプリング設備は、2次冷却設備及び2次へリウム純化設備から2次へリウム冷却材 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。図 2.7 に概略系統図を示 す。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次へリウム不純物濃度を 目標値内に管理することにより、2次へ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次へ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。2次へリウムサンプリング設備には1次へリウムサンプリング設備同様、冷却材で あるへリウムガス中の化学的不純物濃度を、高い分解能で分析する GC/MS が設置されている。この高 い分解能を得るため、GC/MS には、測定中、超高純度へリウムガスをキャリアガスとして供給し続ける 必要がある。そのため、本設備には高純度へリウムガス中の不純物を除去する、液体窒素トラップが設 置されており、測定中は液体窒素の自動供給を行っている。

3. 設備の保守管理

原子力機構 大洗研究開発センターでは、高圧ガス保安法(以下、「法」)に基づき、一般高圧ガス保 安規則(以下、「一般則」)の適用を受ける高圧ガス製造施設に関する保安について、危害予防規程(以 下、「大洗センター危害予防規程」)を定めており、災害の発生を防止するとともに、保安管理組織の設 置、運転要領の作成、異常時及び事故時の措置等を定め、安全を確保することを目的としている。

高圧ガスとは、以下に掲げるいずれかに該当するものをいい、法に定義されている。また、法では高 圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他の取扱い及び消費並び に容器の製造及び取扱いを規制するとともに、事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスの保安に 関する自主的な活動を促進し、もって公共の安全を確保することを目的としている。 【高圧ガスの定義】

- ① 常用の温度においてゲージ圧力(以下同じ)が 1MPa 以上となる圧縮ガスであって現にその圧力が 1MPa 以上あるもの又は温度 35℃において圧力が 1MPa 以上となる圧縮ガス。(圧縮アセチレンガス を除く)
- ② 常用の温度において圧力が 0.2MPa 以上となる圧縮アセチレンガスであって現にその圧力が
 0.2MPa 以上であるもの又は温度 15℃において圧力が 0.2MPa 以上となる圧縮アセチレンガス。
- ③ 常用の温度において圧力が 0.2MPa 以上となる液化ガスであって現にその圧力が 0.2MPa 以上であるもの又は圧力が 0.2MPa 以上となる場合の温度が 35℃以下である液化ガス。
- ④ その他、温度が 35℃において圧力 0Pa を超える液化ガスのうち、液化シアン化水素、液化ブロムメ チル及び液化酸化エチレン。

また、高圧ガス保安法では、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(以下、「原子 炉等規制法」)により規制を受けるものは、適用除外となっており、HTTR内の施設は高圧ガス保安法の 規制は受けないが、原子炉施設に直接影響を与えない液体窒素供給系は、高圧ガスの製造行為に該 当するため、高圧ガス保安法の規制対象となっている。

3.1 CE 設備の保守管理

表 3.1 に CE の設置、改造及び廃止にあたって必要な手続きと法令条項一覧表を示す⁽⁴⁾。

第一種製造者とは、0°C、0Pa(1atm)のガスに換算したガスの処理能力が、第一種ガス(窒素が該当、 その他へリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン、二酸化炭素、フルオロカーボン、空気を いう。)は 300m³/日以上、第一種ガス以外は 100m³/日以上である CE を運転するものであって、許可 を受けた者をいい、処理能力が第一種ガスでは 300m³/日未満、第一種ガス以外では 100m³/日未満 の場合は第二種製造者となり、届け出を行わなければならない。この許可を受けた事業者を第一種製 造者と呼ぶが、第一種製造者は、完成検査を受け、これに合格し、さらに危害予防規程の届出、保安教 育計画の作成、保安統括者等の選任、製造開始の届け出をして、はじめて製造を開始することができる。 さらに、第一種製造者は、法第 11 条第 1 項の規定により高圧ガス製造施設を、技術上の基準に適合す るように維持し、同条第 2 項の規定により、その基準に従って高圧ガスを製造する義務がある。

また、CE のみを設置する第一種製造者の場合には、一定条件に該当する者に CE の保安について 監督させれば保安統括者等の選任は不要であるが、大洗研究開発センターにおいては、高圧ガス製造 施設が 12 施設あるため、保安統括者を選任しており、そのうち 6 施設については、保安監督者を選任し ている。

HTTR 液化窒素製造施設では、気化器若しくは減圧弁により高圧ガスを製造する CE のみを設置して いるという条件に該当するため、保安監督者を選任して製造に係る保安について監督している。以下に 保安監督者の職務を示す。

(1) 製造施設の位置、構造、設備が法第8条第1号の技術上の基準に適合するよう監督する。

- (2) 製造の方法が、法第8条第2号の技術上の基準に適合するよう監督する。
- (3) 製造施設の巡視及び点検並びに定期自主検査に係る業務の指導及び監督を行う。
- (4) 高圧ガス製造施設運転要領の作成に関し、保安上必要な指導及び助言を行う。
- (5)法に基づく完成検査及び保安検査に立会い、その結果に基づく措置及び対策に関し、保安上必 要な指導及び助言を行う。
- (6) 製造施設の増設、修理及び改造に係る業務の指導助言を行う。
- (7)保安教育について、保安上必要な指導及び助言を行う。
- (8) 製造施設に係る災害の発生又はそのおそれがある場合における応急の措置について、保安上 必要な措置を行う。
- (9)請負業者に対し、製造施設の製造並びに増設、改造及び修理に関する業務の保安について、指 導及び助言を行う。

また、保安監督者が監督すべき CE における、日常作業上の一般事項を以下に示す。これらは、一般作業者についても準用される。

- (1)標識等は常にきれいな状態にしておくこと。
- (2)CEの周辺の整理整頓に心掛けること。
- (3) 電気設備等は異常のないように常に整備点検に心掛けること。
- (4)塗装の状態に注意し、腐食防止に心掛けること。
- (5) CE の充填液量は内容積の 90%を超えないこと。
- (6)バルブの開閉状態は常に開閉表示板で表示すること。
- (7)安全弁の元弁は常に全開の状態を維持し、元弁のハンドルには回り止めを施し、封印すること。
- (8) 超低温ガスを取扱うときは、常に凍傷防止のため、専用の皮手袋を着用すること。

3.2 運転要領

運転要領は、製造施設の運転、点検及び保守に関すること、教育訓練に関すること、異常時及び事 故時の措置、記録作成・保管に関すること、その他保安のために必要な事項等を定めており、災害の発 生を未然に防止するとともに、自主保安の管理を徹底して行っている。その中の主な作業として、液体 窒素をタンクローリから CE に受入れる(充填)作業があり、特に原子炉運転中には頻繁に行う必要があ る。以下にタンクローリからの液体窒素受入れ手順を示す。

(1)受入れ前の保安確認

- 受入れ前には次の事項を確認すること。
- ①タンクローリは所定の位置に停車し、車止めがなされていること。
- ②付近に火気及び引火性又は発火性のものがないこと。
- ③「高圧ガス充填中」の警戒標識が出されていること。
- ④貯槽圧力が正常であること。

⑤液面計の指示を確認すること。

⑥弁の開閉が通常運転時の状態になっており、バルブ等からの漏洩がないこと。

(2)受入れ要領

受入れは次の要領で行うこと。

- ①充填用ホースを確実に取り付け、漏れのないように締付ける。この際、過大な力を加えてはならない。
- ②ブロー弁を開いてガスをブローしてホースの予冷を十分に行う。予冷終了後は弁を閉じる。
- ③タンクローリのポンプを予冷し、予冷終了後起動する。
- ④上部液入口弁及び下部液入口弁を操作して、貯槽圧力を変動させないように充填する。
- ⑤受入れ作業中は加圧弁を閉じる。
- ⑥過充填にならないように液面計の指示に常に注意し、最大充填量マークに近くなったら適時検液 弁により液面を確かめる。
- ⑦規定充填量に達したならば充填を終了してポンプを停止する。
- ⑧充填終了後は上部液入口弁及び下部液入口弁を閉じ、加圧弁を開き通常運転時の状態に戻す。
- ⑨タンクローリの液出口弁を閉じ、ホース内の液体窒素及び内圧をブロー弁によりゆるやかにブローした後、取り外す。
- (3)受入れ時の注意事項
 - ①受入れ中に貯槽圧力の上昇等異常が発生したときは、直ちに受け入れ作業を中止して処置を講 ずる。
 - ②ポンプの音及びモータの電流値に注意し、異常を認めたときは直ちにポンプを停止する。
 - ③過充填にならないように、特に液面計の指示値に注意する。
 - ④受入れ作業中は、各部のガス漏れの有無を監視する。

なお、受入れ作業を行った場合には、運転要領中の「液化窒素受入れ記録表」に必要事項を記入 する。

3.3 巡視点検及び記録の保存

製造施設は1日に1回以上巡視及び点検を行っており、貯槽の圧力、液体窒素の貯蔵液位等を点検 している。表 3.2 に日常巡視点検項目を示す。また、巡視点検において CE の異常を発見した場合の措 置を表 3.3 に示す。なお、製造施設に係る各記録等については表 3.4 に掲げる期間保存することが義務 付けされている。

3.4 保安教育訓練

高圧ガス製造施設に従事する者に対して、大洗センター危害予防規程及び運転要領に基づいて、年 度ごとに保安教育訓練を行っている。また、設備の異常や事故を想定した応急措置訓練を実施し、危険 な状態が発生したときにとるべき措置等を確認するとともに、保安意識の高揚、技術、技能の習熟を図 っている。

4. 定期自主検査

HTTR 液化窒素製造施設では、高圧ガス保安法第35条の2に基づき、設備の状態が法で定める技術上の基準に適合しているかを定期的に確認し、保安のために自主検査を行っている。この期間は、一般則第83条に、1年に1回以上と定められている。表4.1に定期自主検査の内容を示す。

4.1 整備経歴

液化窒素製造施設において、これまでに実施した整備経歴を表4.2 に示す。特に重要となる改造等の 整備は行っていないが、H11年5月及び7月に液面計の修理を行った。これは、通常時において中央制 御室で貯槽の液面指示値を監視していたところ、H11年5月に、1時間の間に指示値が約100cm、H11 年7月に4時間30分の間に約200cm変動していることが確認されたため、調査した結果、CE内槽に 混入した大気及び水分等の凍結したものが液面計導圧管に混入したと推測された。そのため導圧管内 を不活性ガスでパージすることで、氷結物を除去し指示値が正常に復帰したことを確認した。

さらに、H11 年 8 月には同事象の解決策として、CE の加温作業を実施した。作業は、まず CE 内槽に 混入したと推測される不純物(水分氷結物)を除去するために、液抜きを行い、その後 3 日間連続の加 温作業を行うことにより氷結物を溶かして放出除去したものである。この作業以降、液面計の指示値変 動事象は起こっていない。

また、H18年2月に、貯槽タンクの液位指示計及び液位伝送器、並びに貯槽タンク圧力指示計の各計 器を交換した。これは、液位指示計の精度低下及び劣化のために行ったものであり、液位伝送器及び 圧力指示計については予防保全のため交換した。

H21 年 12 月には、計器用計測配管、支柱及び配管サポート等について、潮風の影響による塩害のため錆びが発生していたことから、錆を除去した後、当該部の補修塗装を行った。その中で、圧力計取付 架台については、腐食が進行していたため、新規に更新した。

4.2 定期自主検査結果

H21 年 11 月に実施した定期自主検査の結果を以下に示す。また、測定値を計測するものについては、 過去の記録とともに結果を示す。

(1)境界線、警戒標

境界線は、フェンスにより明示されており、外観に異常は無かった。また、警戒標は、外部の者が 明瞭に識別できる大きさであり、出入口付近に掲げてあり、所定の事項が明示されており、外観に 異常は無かった。

(2)保安距離

保安距離とは、高圧ガス設備に事故が発生した場合に、周囲にある保安物件に対する危害を防止するために確保すべき距離のことで、貯蔵設備、処理設備の外面から第一種保安物件まで 8.0m 以上の第一種設備距離を有する必要があるところ、約 2200m であった。また、第二種保安物件ま で 5.3m 以上の第二種設備距離を有する必要があるところ、約 370m であった。HTTR 液化窒素製 造施設の第一種保安物件には小学校が該当し、第二種保安物件には民家が該当する。

(3) 高圧ガス設備の気密性能

貯槽について常用圧力 0.490MPa に対して 0.50MPa、液入口配管について常用圧力 1.47MPa に対して 1.50MPa、真空二重管について常用圧力 0.490MPa に対して 0.50MPa の圧力で気密試験を

行い、漏れ等の異常は無かった。

(4) 高圧ガス設備の強度

高圧ガス設備の強度を確認するために、配管の肉厚測定を実施し確認している。

配管の肉厚測定位置を図4.1に、これまでに確認した肉厚測定結果を表4.3に示す。肉厚は測定 箇所1761PP7(2・2')、1761PP17(4・4')、1761PP10(6・6')、1761PP11(7・7')、1761PP53(10・10') については、据付け時から測定値の変化はないと判断している。1761PP6(1・1')は、据付け時から H20年までX方向が1.7mm、Y方向が1.6mmであったが、H21年にX、Y両方向とも1.6mmまで低 下した。1761PP8(3・3')は、据付け時はX方向及びY方向とも1.7mmであったが、H14年にはX 方向が1.6mmに低下し、H15年にはX方向及びY方向ともに1.6mmに低下した。1761PP12(5・5') は、据付け時はX方向及びY方向とも1.7mmであったが、H14年に1.6mmまで低下した。1761PP2 (8・8')は、据付け時X方向及びY方向とも1.7mmであったが、H13年にはX方向が1.6mmに低 下し、H15年にはX、Y両方向ともに1.6mmに低下した。1761PP54(9・9')は、据付け時X方向及 びY方向とも1.6mmであったが、H13年にはX方向及びY方向ともに1.5mmに低下した。これらの肉 厚測定値については、値が0.1mmの範囲で前後しているが、これは計測器の測定精度の問題と推 定しており、実際には減肉していないと判断しているが、今後も定期的に測定し、継続的に監視し ていく。

(5)ガス設備に使用する材料

ガス設備に使用する材料は、ガスの種類、性状、温度及び圧力等に応じ、当該設備の材料に及 ぼす化学的影響及び物理的影響に対し、安全な化学的成分及び機械的性質を有するものである が、これについては、設置時に確認して以来変更がないため、問題はない。

(6)高圧ガス設備の基礎

高圧ガス設備の基礎は、不同沈下等により有害なひずみは生じていない。また、貯槽の支柱は 同一の基礎に緊結してあり、沈下状況を測定するための措置が講じられている。

(7)貯槽の沈下状況

不同沈下測定位置及び計算式を図 4.2 に、貯槽の不同沈下測定結果を表 4.4 に示す。沈下率は、 H10 年に B-C 間及び A-C 間で 0.06%であったが、その後は 0%となった。H19 年に再度 A-C 間で 0.06%、H20 年には A-B 間及び A-C 間で 0.06%が測定された。また、H21 年では A-B 間が 0.06%、 B-C 間が 0.19%、A-C 間で 0.25%が測定された。しかし、この値は非常に小さいものであり設備に影 響はない。不同沈下の状況は、貯槽を設置後 5 年以上が経過し、かつ過去 3 年間の沈下率が 0.5% 以下の場合は 3 年に 1 回の測定で良いが、HTTR では他項目と同様に毎年確認している。なお、 沈下率が 0.5%を超えた場合は、測定を 1 ヶ月に 1 回行わなくてはならず、さらに 1.0%を超えた場合 は、貯槽の使用を停止して適切な措置を行わなくてはならない。そのため、今後も引き続き継続し て測定し、監視していく。

(8)高圧ガス設備の耐震設計構造物

貯蔵能力 3 トン以上の貯槽及び配管並びにその支持構造物及び基礎は、耐震設計の基準により、地震に対して安全な構造であることを、記録により確認したが、設置時以来変更がないため、問題は無い。

(9) 高圧ガス設備の圧力計及び安全装置

高圧ガス設備には圧力計を設置して、定められた期間内に、目視・精度検査又は代替比較検査 を行っている。定められた期間とは1年間のことであり、貯槽用及び真空二重管用の2個とも判定 基準である、最大誤差が最小目盛の2分の1以下の範囲であり、また、外観についても特に問題な く良好な状態であった。 安全装置とは、当該設備内の圧力が許容圧力を超えた場合に直ちに許 容圧力の範囲内に戻すことができるものであり、通常は安全弁のことである。安全弁は合計4台設 置しているが、何れも判定基準である、吹出圧力が設定圧力の-5%以内であり、吹止圧力が設定 圧力の10分の8以上の範囲であった。また、外観についても特に問題なく良好な状態であった。 (10)液面計

液化ガスの貯槽には液面計を設置しているが、圧力計のように定められた期間内に検査をする 必要はないが、HTTRでは圧力計と同様に1年に1回指示精度を確認している。この結果、判定基 準のフルスケールの±1.5%以内であることを確認した。また、合わせて貯槽液位用の差圧伝送器 及び圧力用の圧力伝送器の測定精度の確認を行い、判定基準のフルスケールの±0.2%の範囲内 であった。さらに、この伝送器の値は中央制御室のオペレータズステーション(OPS)で確認すること ができ、何れも問題なく指示されることを確認した。通常、運転員は、この指示値を24時間の中で 定期的に確認し、貯槽の状態を確認している。

(11)保安電力等

対象設備に適切な保安電力等を設けてあり、また、設備の状態及び周辺の状態は良好であった。

(12) 通報設備

事業所の保安統括者等が常駐する事務所と製造施設を運転又は管理する者が常駐する事務 所間に、構内電話、構内放送設備が設けられており、事業所全体には校内放送設備及び携帯用 拡声器、事業所の任意の場所における作業員相互間の通報用にページング設備及び携帯用拡声 器が設けられている。また、外観に異常は無く、使用状況は良好であった。

(13) バルブ等の操作に係る措置

作業員がバルブ等を誤操作しないように、バルブの開閉方向、流体の種類、流れ方向が明示さ れており、重要なバルブには施錠、封印等の措置が講じられている。また、バルブの操作に必要な 足場、照明が確保されており、何れも外観に異常は無く良好な状態であった。

(14) 貯槽の真空度

貯槽の断熱性能の状態を確認するため真空度を確認している。CE の真空度測定結果を表 4.5 に示す。真空度は H10 年から徐々に増加傾向であり、H21 年は 9.0Pa であった。これらの値は何れ も、判定基準値の 27Pa 以下であり問題はないと考えられるが、このまま値が増加していくと、断熱 性能が低下し、外槽から熱が浸入し、液体窒素の蒸発ロスに繋がる可能性があるので、今後も定 期的に測定し、継続的に監視していく。

(15)CE 設備の絶縁抵抗測定

絶縁抵抗測定結果を表 4.6 に示す。絶縁抵抗はタンクローリのチャージポンプ用電源である電源 箱を測定するものであり、H10 年から H13 年の測定値は無限大であったものの、H14 年は 50M Ω で あり、H15 年は 10M Ω まで低下した。これらの理由は、天候によるもので、定期自主検査数日前か らの雨の影響により、地面が湿っていたためである。その後 H16 年からは 100M Ω 以上となり、安全 確保上十分な値となっている。ちなみに H21 年の 90M Ω も天候の影響によるものである。

(16)CE 設備の接地抵抗測定

接地抵抗測定結果を表 4.7 に示す。接地抵抗はタンクローリのチャージポンプ用電源である電源 箱の接地抵抗を測定するものであり、接地工事により 300V 以下の機械器具の外箱を 100Ω以下 にすることが電気設備技術基準により規定されている。H10年からH21年まで0.2Ωから3.0Ωまで 変化しているが、判定基準 100Ωに対して十分に低い値であり、安全確保上十分な値となってい る。

以上の結果、高圧ガス保安法に定める技術上の基準である規定値等を逸脱している項目はなく、設 備管理上、問題のないことを確認した。

5. 液体窒素の消費量

HTTRのCEに貯蔵される液体窒素は、原子炉運転中及び原子炉停止中において、ヘリウム純化設備 のコールドチャコールトラップ(以下、「CCT」)及びヘリウムサンプリング設備のガスクロマトグラフ質量分 析計に使用される。CEの設置場所から各供給先までは真空断熱二重配管により供給しているが、配管 経路が100m以上と非常に長い。そのため、供給初期は配管内を予冷する必要があることから、液体窒 素の消費量は多くなる。また、ヘリウム純化設備のCCTは、設備の起動時に、2系統のうち片系統のCCT に液体窒素が制御範囲上の上限まで充填される。その後はCCTの運用で使用される他に、断熱ロスや 蒸発等により、低下した液位分に対して、自動供給弁により規定値まで供給される。CCTの制御範囲は、 トラップの上側を基準に0cm~-15cmの液位であり、空の場合には1次系が-190cm、2次系は-150cmとな っている。

液体窒素貯蔵タンクに充填される液体窒素は、法によりタンク内容積の90%を超えて充填することができない。そのためタンクの液位高警報を680cmに設定しており、過充填を防止している。また、充填残量確認のための液位低警報は100cmに設定している。さらに、タンク圧力については、0.355MPa~0.49 MPaの範囲に自動調整するように加圧調整弁を設定しているが、応答性が緩慢であることから、安全性を考慮して、自動調整範囲内の約0.40MPa~0.48MPaを目安に手動で降圧している。

5.1 液体窒素の充填量

図5.1に、H18年10月からH21年10月までの期間における液体窒素の充填量の実績を示す。この間の 運転サイクルは、RS-8(H18年10月~12月)、RS-9(H19年1月~2月)、RP-10(H19年3月~5月に実施)及 び HP-11-1~3(H21年1月~5月)の合計6回行った。但し、HP-11-1~3については、原子炉運転は行っ ていない。原子炉運転中の液体窒素の充填間隔は2日~3日に1回であり、その充填重量は平均で約60 00kgである。液体窒素の消費量は、設備の運転状態及び気象条件に影響されており、外気温が比較的 高い場合は、CEでの蒸発等のロス分が増加し、見かけ上の消費量が増えていく。また、設備側の補給要 求により補給回数が増加すれば、液体窒素の消費量は多くなる。これについては、設備に起因すること から原状を維持していくことになる。因みに、充填作業は平日に行うことを基本としている。

また、原子炉停止中では、液体窒素の消費量は少ないため、充填回数は比較的少なくなっており、一 度充填すると、設備側の条件により14日~70日は使用することができる。また、液体窒素重量(W)と液 面計指示値(∠P)の関係は図5.2に示す相関にあり、液面計指示値からCE内の液体窒素の重量が推定 できる。また、液面計における差圧∠P(kPa)と液位H(cm)の関係は図5.3のとおりである。

5.2 原子炉運転中における消費量

図5.4に、RS-8サイクルにおけるCEの圧力及び液位の推移を示す。

RS-8は、H18年10月10日に設備を起動したが、原子炉起動前の液体窒素の消費は、1次及び2次へリウム純化設備のCCTだけであり、液位の低下量はCCTに液体窒素を充填後は、約2KPa/日と比較的少ない。また、その期間のCEの液体窒素は10日間にわたり使用することができた。しかし、1次及び2次へリウムサンプリング設備のガスクロマトグラフ質量分析計の点検校正を開始したH18年10月21日からは、消費量は増加している。また、ガスクロマトグラフ質量分析計の測定を開始したH18年10月26日からは、さらに消費量は増加しており、その後運転終了まで、CEの液体窒素は2日~3日程度しか使用することができなくなった。また、CEの圧力は390Pa~460Paの範囲で変動しているが、通常の範囲内のため問題で

はない。液位はcm値とPa値を同時にプロットしたがほぼ同じ傾向であり、計器が正常であることが分かる。

液体窒素の消費量が増加する要因の一つに、2次ヘリウムサンプリング設備に供給する液体窒素供 給系の占める割合が大きく、その状況は以下に示すとおりとなる。

原子炉建家外に設置する液体窒素供給系から、2次へリウムサンプリング設備の液体窒素トラップが 設置される原子炉建家内管理区域であるK-180 室までは、真空断熱二重配管経路が約140mと非常に 長いことから、実際に液体窒素トラップに液体窒素が供給されるまでには相当の時間を要してしまう。ま た、液体窒素トラップへの補給要求により、自動供給弁が開となってから真空断熱二重配管に液体窒素 が供給される場合、供給初期においては、供給配管が予冷により冷却されるため、気化した窒素ガス (N₂)が多量に、かつ長時間流入することで、液体窒素トラップに溜まっていた液体窒素(LN₂)を吹き飛 ばしてしまうため、一時的に液体窒素トラップ内がカラになってしまう状態が確認された。この補給間隔 は数時間ごとであり、比較的頻繁に行われることから、結果として消費量は多くなってしまう⁽⁵⁾。この状 況は設備の配置上、改善することが困難であることから、CEの液体窒素消費量の傾向は変わらないと 推測される。

図 5.5 に RS-9 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移を、図 5.6 に RP-10 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移を示す。RS-9 では、ガスクロマトグラフ質量分析計の点検校正に関係なく、液体窒素トラップへの液体窒素供給を継続していたことから、原子炉起動前の液体窒素の消費量は一定量で減少している。これは、RS-9 の運転サイクル期間が短いことと、RS-8 終了後からそれほど時間が経過していないことから、ガスクロマトグラフ質量分析計を計測可能状態に維持していたことによるものである。しかし、原子炉の運転が開始された H19 年 1 月 23 日からは CE の液体窒素は、2 日~3 日程度しか使用することができなくなった。また、圧力については 390Pa~460Pa の範囲であり、通常の圧力変動幅のため問題はなかった。

一方 RP-10 では、CCT に液体窒素を供給開始した H19 年 3 月 11 日から、液位の減少量は増加して いる。これは、RP-10 に向けて、ガスクロマトグラフ質量分析計の点検校正を行ったことも影響している。 H19 年 3 月 19 日に原子炉を起動してからは、CE の液体窒素は 1 回の充填で、2 日~3 日程度しか使 用することができなくなった。また、圧力は 390Pa~460Pa の範囲であり、通常の圧力変動幅のため問題 はなかった。

図 5.7 に HP-11-4 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移を示す。HP-11-4 では H21 年 11 月 25 日に設備を起動し、CCT に液体窒素の供給を開始した。それまでは CCT をバイパスしていたことから、 液体窒素の消費量は約 0.5KPa/日であったが、CCT への供給を開始すると約 2KPa/日に上昇するが、 それでも約 10 日間は CE に充填することなく使用することができた。H21 年 12 月 17 日に原子炉を起動 してからも、液体窒素の消費はガスクロマトグラフ質量分析計及び CCT の維持だけであり、消費量も約 2KPa/日程度であった。しかし、H22 年 1 月 3 日に CCT への通気を開始してからは、約 10~15KPa/ 日で CE の液位は低下した。そのため、CE への液体窒素充填は 2 日~3 日に 1 回の割合で行った。ま た、圧力については 380Pa~470Pa の範囲であり、通常の圧力変動幅のため問題はなかった。H22 年 3 月 22 日に、2 次へリウム純化設備 CCT の再生運転を開始したこと、並びに H22 年 3 月 23 日に 1 次へ リウム純化設備 CCT への通気停止を行ってからの消費量は約 3~4KPa/日に変化している。

これらのデータから、原子炉運転中における CE の液体窒素の液位及び圧力変化は、ほぼ同様の傾向を示しており、消費量から判断する液体窒素の充填タイミング及び充填間隔、充填回数、充填量の目 安を確認することができた。 5.3 原子炉停止中における消費量

原子炉停止中は、通常の状態として、1 次及び 2 次へリウム純化設備の各トラップは再生されて待機 状態にある。これは、系統の各トラップに吸着された不純物が除去されて、次期運転に備えて使用可能 な状態のことである。ここで、施設定期自主検査に移行する等、長期の停止状態が続く場合は、CCT に は液体窒素が入っていない空の状態である。また、次期運転が予定されており、トラップの再生を行わ ない場合には、CCT には運転中に引き続き、液体窒素が充填されているが、蒸発ロス等により、時間経 過とともに CE の液位は減少していく。また、1 次及び 2 次へリウムサンプリング設備は停止しており、そ れに伴ってガスクロマトグラフ質量分析計での測定は行っていないことから、液体窒素は使用しておら ず、原子炉停止中における液体窒素の消費は、ヘリウム純化設備が占めている。

図 5.8 に CCT に液体窒素を供給している場合の原子炉停止中における CE の圧力及び液位の推移 を示す。液体窒素は平均約2kPa/日程度低下しており、実液位では約20~30cm低下している。この状 態での CE の液体窒素の運用日数は 14 日~17 日間程度であり、液位の低下量を考慮して充填を行っ ている。

図 5.9 に CCT に液体窒素を供給していない場合(CCT が再生済待機状態)の原子炉停止中における CE の圧力及び液位の推移を示す。液体窒素は平均約 0.5kPa/日程度低下しており、変動はあるが実 液位では約 5cm 低下している。この状態での CE の液体窒素の運用日数は 60 日~70 日間であり、CCT に液体窒素を供給している場合と比較して約 4 倍になっている。

また、図 5.10 に HP−11−3 サイクル終了後の CE の圧力及び液位の推移を示す。液体窒素は約 0.2~ 0.4kPa/日程度低下しており、変動はあるが実液位で約 5cm 低下している。この状態での CE の液体窒素の運用日数は 50 日~60 日間程度であり、CCT に液体窒素を供給している場合と比較して約 3.5 倍になっている。また、圧力については 390Pa~450Pa の範囲であり、原子炉運転中と比較しても同様の値である。

これらのデータから以下のことが明らかになった。

- ①CE への液体窒素の充填重量は 1 回あたり平均約 6000kg である。
- ②原子炉運転中の CE への液体窒素の充填は、2 日~3 日ごとに行う。
- ③原子炉停止中に、CCT に液体窒素を供給中の場合、CE に液体窒素を充填してから 14 日~17 日 程度は負荷側への供給が可能である。
- ④原子炉停止中に、CCTでの液体窒素の消費がない場合、CEに液体窒素を充填してから60日程度 は負荷側への供給が可能である。
- ⑤CEの液位及び圧力を常時監視することで、異常状態を早期に発見することができる。

5.4 検討課題

(1) CE の外面腐食対策

CE 設備の設置場所は、原子炉建家に隣接する屋外であることから、潮風による塩害を受け易い。 そのため、H21年12月には、計器用計測配管、配管サポート等の錆対策処置を行った。しかし、CE タンクの錆対策処置は行っていないことから、外槽に錆の影響による外面腐食が発生する可能性 があることから、定期自主検査期間中に外表面の塗装を実施して健全性の確保を行うことが必要 である。

(2)液体窒素の消費率

原子炉運転中及び停止中における液体窒素の消費率を表 5.1 に纏めて示す。液体窒素の消費

率は、ケース1からケース5に分類することができ、その消費率は表中に示すとおり原子炉の運転状態 及び各設備の状態によって変化している。これらをもとに、液体窒素の手配等の充填計画を立てる ことができる。また、原子炉及びヘリウム純化設備等の運転状態に応じた消費率を監視することで、 異常を早期に発見することができる。

(3) 液体窒素使用量の低減化

5.2 項で述べたとおり、原子炉運転中における液体窒素(LN₂)は、2 日~3 日に1回の割合で充 填を行っており、予算等の問題を考慮すると、運転状態により使用量を低減することが課題となっ ている。具体的方法として、原子炉出力が安定しており、系統内不純物の発生量が極めて少なく、 ヘリウム純化設備により十分に除去されていると判断できる場合には、CCT への系統ガス量を減 少させることで、液体窒素の消費量を抑えることが出来る。また、ヘリウムサンプリング設備におい ては、液体窒素供給配管の真空引きの実施、さらに、液体窒素トラップの導入配管部断熱効率の 改善を行うことで消費量が低減すると推測される。

6. おわりに

HTTR の液化窒素製造施設は、高圧ガス保安法に基づき、年 1 回の定期自主検査を行っており、設備の状態が法で定める技術上の基準に適合しているかを確認している。定期自主検査の結果、全ての項目が規定値の範囲内であることから、設備の維持管理は適切である。

また、これまでの液体窒素貯蔵タンクの液位監視の実績から、原子炉運転中及び原子炉停止中にお ける液体窒素の消費量を把握することができ、貯蔵タンクへの液体窒素充填のタイミング、充填回数及 び充填量を考慮することで、効率的かつ有効な液体窒素の使用量を明確にした。

さらに、HTTR の液化窒素製造施設は、運用開始以来、高圧ガス製造施設特有の漏えい、破裂、爆 発等の事故は一度も発生しておらず、十分な保守管理を行ってきたことがその結果に反映されている。 これについては、今後も引続き保守管理を徹底して行うことで、安全を継続して確保する。

今後は、運転経験を蓄積して信頼性を検証するとともに、引続き液体窒素供給設備及び高圧ガス製 造施設における基礎技術の構築を目指す。

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、伊与久 達夫 同部研究主席、中澤利雄 同部次長、藤本望 原子炉主任者、篠崎正幸 HTTR 運転管理課長並 びに江森恒一 前 HTTR 運転管理課長 に深く感謝致します。さらに、HTTR 運転管理課員の方々の着 実な業務の遂行により、これまで事故等がなく安全に運転、設備維持ができたことを関係者の皆様に感 謝致します。

参考文献

- S.Saito,et al.: "Design of High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)"; JAERI-1332 (1994)
- 2)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;vol.1, No.4,PP.361-372(2002)
- S.Fujikawa,et al: "Achievement of Reactor-outlet coolant Temperature of 950°C in HTTR"; J.of Nucl.Sci.and Technol.vol.41,No.12,PP.1245-1254(2004)
- 4) コールドエバポレータ取扱いハンドブック ; 高圧ガス保安協会
- 5) 関田健司他 :HTTRヘリウムサンプリング設備の改善 ; JAEA-Technology 2008-002(2008)

ガス名		液化窒素
性状		不燃性
色·臭等	液体	無色透明
	気体	無色·無臭
分子量		28.01
"油"下	°C	-195.8
冲 泉	К	77.4
液密度	kg/l	0.809
蒸発潜熱	kJ/kg	199
防用泪由	°C	-147.2
師介加及	К	126.0
臨界圧力	MPa	3.399

表 2.1 液体窒素の一般的性質

表 2.2 液体窒素供給系の構成機器及び仕様

製造施設名	HTTR 液化窒素製造施設	
許可年月日	平成 6 年 10 月 20 日 工振指令第 1395 号	
	型式	竪型円筒二重殻式(CE-15X)
液体窒素貯蔵タンク	内容積	16,712m ³
	充填量	12.1831t
	最高使用圧力	1.082MPa(11.033kg/cm²G)
	製作番号	6 東 1006
	製作年月日	平成 6 年 12 月
	設備検査番号	工振指令第 1617 号
	型式	フィンチューブ(EAL-40Z)
加圧蒸発器	加熱方式	自然通風型空温式
	能力	40Nm³/h
	最高使用圧力	1.961MPa(20kg/cm²G)
	伝熱面積	16.2624m ²
	内容積	7.12
	製作年月日	平成7年1月
	製作番号	6 東 1311
	設備検査番号	工振指令第 1617 号
	型 式	真空断熱型二重配管
配管	流量	約140 ℓ/h
	真空断熱方式	スーパーインシュレーション
	設計圧力	1.082MPa(11.033kg/cm²)
	設計温度	−196 ~ +40°C
	設計真空圧力	5×10⁻⁴Torr 以下
	主要材料	SUS304 又は相当品
弁類	型 式	ダイヤフラム自力式
	基数	2基
調節弁	材質	SCS13 又は相当品
	圧力調整範囲	0.39~0.98MPa、0.39~1.47MPa
	型 式	バネ式
安全弁(系統内)	基数	4基
	材質	SCS13 又は相当品
	設定圧力	約 0.98~1.96MPa
	型 式	長軸グローブ式
一般弁	流体	液体窒素
	基数	4 基
	材質	BC7 又は相当品
	操作方式	手動

表	3.1	CE の設置、改造及び廃止にあた~	って必要な手続きと法令条項一覧表
		(高圧ガス保安法規集	第9次改訂版)

対象	製造		製造野蔵所		特定高圧ガス
条件	第一種	第二種	第一種	第二種	消費
許可	法5条1項		法 16 条 1 項		
届出		法5条2項		法 17 条の 2	法 24 条の 2
				1項	1項
危害予防規程	法 26 条 1 項				
の届出					
保安教育計画	法 27 条 1 項				
の作成					
保安統括者等	法 27 条の 2	法 27 条の 2			(取扱主任者)
の届出	5項、6項	5項、6項			
完成検査申請	法 20 条、		法 20 条、		法 28 条 3 項
	法 20 条の 2		法 20 条の 2		
開始届	法 21 条 1 項				
廃止届	法 21 条 1 項	法 21 条 2 項	法 21 条 4 項	法 21 条 4 項	法 24 条の 4
					2 項
設備等の変更	法 14 条 1 項、	法 14 条 4 項	法 19 条 1 項	法 19 条 4 項	法 24 条の 4
(許可又は届	2 項		2 項		1項
出)					
事故届	法 63 条 1 項	法 63 条 1 項	法 63 条 1 項	法 63 条 1 項	法 63 条 1 項
備考	特定高圧ガス消費については、液化酸素の場合、3000kg以上が対象				

法:高圧ガス保安法

注:網掛け部は対象外条項

表 3.2 日常巡視点検項目

点検対象	点検項目	点検要領	備考
貯槽	1.安全弁、圧力計、	全開されていることを確認する。	
	液面計の元弁		
	2.圧力計、液面計の	目視により正常であることを確認	圧カ計、液面計の指示
	指示	する。	値を記入
	3.ガス漏れ	目視及び漏洩音により点検し、疑	弁、継手部は入念に点
		わしいときは石鹸水でガス漏れの	検する。
		ないことを確認する。	
	4.重要な弁類の開閉	目視により確認する。	
	表示		
	5.外観	異常な霜付き、塗装不良、腐食等	
		がないことを確認する。	
蒸発器	1.ガス漏れ	目視及び漏洩音により点検し、疑	弁、継手部は入念に点
		わしいときは石鹸水でガス漏れの	検する。
		ないことを確認する。	
	2.外観	異常な霜付き、結露、変形、破損、	
		腐食等がないことを確認する。	
電源設備	1.電源箱	開閉器ターミナル、アースクリップ	
		等に破損、焼損のないことを確認	
		する。	
	2.照明設備	適度な照度があり、非常用電源と	
		して携帯灯が備えられていること。	
その他	1.周囲の状況	境界柵は破損のないこと、警戒標	
		は立入禁止等規定されたものが	
		取り付けてあること。	
		周囲 2m 以内において火気の使用	
		並びに油脂類等の可燃物がない	
		ことを確認する。	
		タンクローリの通行、停車位置が	
		確保されていること。	
	2.通報設備	拡声器等通報設備が備えられて	
		いること。	

表 3.3 CE 異常時の処置

現象	原因	対策(処置)
貯槽内のガスの圧力が異常に	(1)自然蒸発による圧力上昇	放出弁からガスを放出する。
高い	(2)真空劣化	真空排気を行う。
	(3)加圧自動弁の作動不良	加圧自動弁の調整及び修理を
		する。
	(4)圧力計の指示不良	内槽圧力計を検査して不良の場
		合は交換する。
貯槽内のガスの圧力が異常に	(1)液量不足	液化ガスを充填する。
低い	(2)安全弁作動不良	安全弁を再調整するか取り換え
		る。
	(3)加圧自動弁の作動不良	加圧自動弁の調整及び修理を
		する。
	(4)加圧弁又は加圧ガス弁の閉	加圧弁又は加圧ガス弁を開く
	Ŀ	
	(5)液の取出し過剰による貯槽内	液の取出し量を調整する。
	圧能力不足	
	(6)圧力計の指示不良	圧力計を検査して不良の場合は
		交換する。
安全弁作動	(1)貯槽内のガスの圧力の異常	「貯槽内のガスの圧力が異常に
	上昇	高い」場合の対策に従うこと。
	(2)作動圧力調整不良	安全弁作動圧力を調整する。
外槽安全板作動	貯槽又は断熱層内配管からの	使用を停止し、貯槽内の液化ガ
	ガスの漏えい	スを抜き取る。
液面計指示不良	(1)液面計配管又は弁のガス漏	ガス漏れの修理をする。
	れ	
	(2)液面計配管又は弁の閉鎖	閉鎖部分の修理・清掃をする。
	(3)液面計の指示不良	液面計の検査又は交換をする。

表 3.4 記録等の保存期間

No	記録等	保存期間
1	保安教育訓練実施記録	3 年間
2	液化窒素製造施設日常巡視点検記録	3 年間
3	液化窒素受入れ記録表	6 年間
4	定期自主検査報告書	製造施設を廃止するまでの期間
5	工事実施計画書	製造施設を廃止するまでの期間
6	完成検査報告書	製造施設を廃止するまでの期間
7	異常・事故報告の記録	製造施設を廃止するまでの期間
8	設備台帳	製造施設を廃止するまでの期間

No	検査項目	規定条項等	内容
1	境界線	6条の2第1項	はっきりと分かる境界柵等により施設
		(6条1項1号)	の境界線を明示すること。
	警戒標		①外部から見やすい場所に下記の警
			戒標を掲げること。
			「高圧ガス製造施設」/「第一種貯蔵
			所」/「第二種貯蔵所」
			「立入禁止」または「係員以外立入禁
			L
			②緊急連絡先、保安監督者氏名、ガス
			名、許可年月日、許可番号も明示する
			こと。
2	保安距離	6条の2第1項	①第一種保安物件に対し第一種設備
		(6 条 1 項 2 号)	距離以上の距離を有すること。
			②第二種保安物件に対し第二種設備
			距離以上の距離を有すること。
3	高圧ガス設備の気密性能	(6 条 1 項 12 号)	常用の圧力以上の圧力で行う試験に合
			格すること。
4	高圧ガス設備の強度	(6条1項13号)	所定の肉厚を有すること。
5	ガス設備に使用する材料	(6 条 1 項 14 号)	高圧ガス設備の材料は所定のものであ
			ること。

表 4.1 定期自主検査項目

6	高圧ガス設備の基礎	(6 条 1 項 15 号)	①高圧ガス設備の基礎は、不同沈下等
			により有害なひずみが生じないようなも
			のであること。
			②貯蔵能力が 1 トン以上の貯槽の支柱
			は同一の基礎に緊結すること。
7	貯槽の沈下状況	(6 条 1 項 16 号)	貯蔵能力が 1 トン以上の貯槽の沈下測
			定を行うこと。
8	高圧ガス設備の耐震設計構造	(6 条 1 項 17 号)	貯蔵能力3トン以上の貯槽、支柱及び基
	物		礎は、地震に対し安全な構造とするこ
			と。
9	高圧ガス設備の圧力計及び安	(6 条 1 項 19 号)	圧力計及び安全弁の設置
	全装置		
10	液面計	(6 条 1 項 22 号)	貯槽には液面計を設けること。
11	保安電力等	(6 条 1 項 27 号)	保安設備や制御装置に停電時等の保
			安電力を備えること。
12	通報設備	(6 条 1 項 40 号)	①事業所内で緊急時に必要な通報を
			速やかに行うための携帯用拡声器、メ
			ガホン等を備えること。
			②携帯用拡声器には、予備電池を用意
			しておくこと。
13	バルブ等の操作に係る措置	(6 条 1 項 41 号)	作業員がバルブ等を誤操作しないよう
			な措置を講ずること。(開閉表示/開閉
			方向/ガスの種類及びガスの流れ)

適用条項は一般高圧ガス保安規則第6条の2 注:かっこ書は準用規定

表 4.2 整備経歴

実施日	項目	内容
H11.5	液面計の修理	液面計の指示が変動したため調査した結果、CE 内
		槽に混入した大気及び水分等が凍結したものが液
		面計導圧管に混入したと推測されたため、導圧管内
		をガスパージした。
H11.7	液面計の修理	同上
H11.8	CE 加温作業	CE 内槽に混入したと推測される不純物(水分氷結
		物)を除去するために、液抜きを行い、3 日間連続の
		加温作業を行い、氷結物を溶かし、放出除去した。
H18.2	計器交換	液位指示計の精度低下及び劣化のため。液位伝送
	 液位計(伝送器、現場計) 	器及び圧力計については予防保全のため交換した。
	器)	
	 ・圧力計(現場計器) 	
H21.12	計器用計測配管、サポート	塩害により腐食していたため、電線管、配管サポート
	等の補修塗装	等を錆除去処置後、補修塗装を行った。また、圧力
		計取付架台が腐食していたため新規更新した。

	計算肉	जा भ म्य						西こ倉	턐の肉厚(m	m)					
測定箇所	厚 (mm)	题 X L L L (mm)	据付け時	H10年 8月3日	H11年 8月12日	H12年 8月28日	H13年 7月27日	H14年 8月16日	H15年 8月19日	H16年 9月15日	H17年 8月3日	H18年 9月25日	H19年 9月20日	H20年 9月26日	H21年 11月13日
1761PP6 (1-1')	0.26	0	1.7/1.6	1.7/1.6	1.7/1.6	1.7/1.6	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.6/1.6
1761PP7 (2-2')	0.13	0	1.5/1.6	1.5/1.6	1.5/1.6	1.5/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP8 (3•3')	0.13	0	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.6/1.7	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP17 (4-4')	0.06	0	1.2/1.1	1.2/1.1	1.2/1.1	1.2/1.1	1.2/1.2	1.2/1.1	1.2/1.1	1.2/1.2	1.2/1.2	1.2/1.2	1.2/1.2	1.2/1.2	1.2/1.2
1761PP12 (5-5')	0.11	0	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP10 (6-6')	0.09	0	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP11 (7•7')	0.12	0	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP2 (8-8')	0.18	0	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.7/1.7	1.6/1.7	1.6/1.7	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP54 (9-9')	0.04	0	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.6/1.6	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.6/1.6	1.6/1.6
1761PP53 (10-10')	0.04	0	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5	1.5/1.5

表 4.3 配管の肉厚測定結果

JAEA-Technology 2010-036

表中の値 : X方向/Y方向

表 4.4	不同沈	下測定結果
-------	-----	-------

				不同沈	下率(%)			
測定箇所	H10 年	H11 年	H12 年	H13 年	H14 年	H15 年	H16 年	H17 年
	8月3日	8月12日	8月28日	7月27日	8月16日	8月19日	9月15日	8月3日
CE15X	0	0	0	0	0	0	0	0
A-B	0	0	0	0	0	U	0	0
CE15X	0.06	0	0	0	0	0	0	0
B-C	0.00	0	0	0	0	U	0	0
CE15X	0.06	0	0	0	0	0	0	0
A-C	0.00	0	0	0	0	U	0	0

		不同沈	下率(%)		
測定箇所	H18 年	H19 年	H20 年	H21 年	
	9月25日	9月20日	9月26日	11月13日	
CE15X	0	0	0.06	0.06	
A-B	0	0	0.00	0.00	
CE15X	0	0	0	0.19	
B-C	0	0	0		
CE15X	0	0.06	0.06	0.25	
A-C	U	0.06	0.06	0.20	

表 4.5 真空度測定結果

				真空度	₹(Pa)			
測定箇所	H10 年	H11 年	H12 年	H13 年	H14 年	H15 年	H16 年	H17 年
	8月3日	8月12日	8月28日	7月27日	8月16日	8月19日	9月15日	8月3日
CE15X	0.07(*)	0.00075(*)	1.5	4.0	4.0	4.0	5.0	7.0

		真空度	芰(Pa)	
測定箇所	H18 年	H19 年	H20 年	H21 年
	9月25日	9月20日	9月26日	11月13日
CE15X	7.0	8.0	9.0	9.0

(*****)Torr

判定基準:27Pa 以下

JAEA-Technology 2010-036

表 4.6 絶縁抵抗測定結果

				絶縁抵持	亢(MΩ)			
測定箇所	H10 年	H11 年	H12 年	H13 年	H14 年	H15 年	H16 年	H17 年
	8月3日	8月12日	8月28日	7月27日	8月16日	8月19日	9月15日	8月3日
ローリ用 電源箱	8	8	8	œ	50	10	100 以上	100 以上

		絶縁抵打	亢(MΩ)	
測定箇所	H18 年	H19 年	H20 年	H21 年
	9月25日	9月20日	9月26日	11月13日
ローリ用	100 11 -	100 11 -	100 11 -	00
電源箱	100 以上	100 以上	100 以上	90

判定基準:0.2MΩ以上

表 4.7 接地抵抗測定結果

				接地抵	抗(Ω)			
測定箇所	H10 年	H11 年	H12 年	H13 年	H14 年	H15 年	H16 年	H17 年
	8月3日	8月12日	8月28日	7月27日	8月16日	8月19日	9月15日	8月3日
□-リ用 電源箱	1.6	1.0	0.7	1,9	1.4	0.2	2.8	0.5

		接地抵	抗(Ω)	
測定箇所	H18 年	H19 年	H20 年	H21 年
	9月25日	9月20日	9月26日	11月13日
ローリ用	2.0	1.6	1.0	0.2
電源箱	3.0	1.0	1.2	0.2

判定基準:100Ω以下

	設住	備の状態 (Ο∶≵	起動中、× :停止中	户)	液体窒素	
ケース	1 次純化設備	2 次純化設備	1 次 SMP 設備	2次SMP設備	消費率	備考
	ССТ	ССТ	ガスクロ	ガスクロ	(kPa∕day)	
1	0	0	×	×	~2	原子炉起動前
2	0	0	0	0	10~15	原子炉運転中
3	×	×	×	×	∼0.5	原子炉停止中 (運転終了後)
4	×	×	×	×	3~4	原子炉運転中 (再生運転中)
5	×	×	×	×	~2	原子炉停止中 (再生運転中)

表 5.1 液体窒素の消費率



JAEA-Technology 2010-036



図 2.2 CEの外観





図 2.4 2 次ヘリウム純化設備概略系統図



- 33 -













図 4.2 不同沈下測定位置及び計算式















図 5.4 RS-8 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移



図 5.5 RS-9 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移



図 5.6 RP-10 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移



図 5.7 HP-11-4 サイクルにおける CE の圧力及び液位の推移



図 5.8 原子炉停止中における CE の圧力及び液位の推移(CCT へ供給中)



図 5.9 原子炉停止中における CE の圧力及び液位の推移(CCT が再生済待機状態)



図 5.10 原子炉停止中における CE の圧力及び液位の推移(HP-11-3 以降)

表 1. SI 基本单位				
甘木昌	SI 基本単位			
本平里	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	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
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					
a d d d d d d d d d d d d d d d d d d d	基本単位				
和立重 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 さ , 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

			SI 組立甲位	
組立量	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 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 血 // 立 体 鱼	ステラジア、/(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力, 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	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Η	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	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	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,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ		ay	ong	
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² e ⁻²
性線量当量,個人線量当量		51	Orkg	
酸素活性	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

(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み、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(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

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘质	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、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)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	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 sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
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)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	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}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У

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	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される剱旭が夫厥的に待られるもの				
名称 記号		SI 単位で表される数値		
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg		
統一原子質量単位	u	1u=1 Da		
天 文 単 位	ua	1ua=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	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa	
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa	
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m	
海		里	М	1 M=1852m	
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²	
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネ	-	パ	Np		
ベ		N	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.	
デ	ジベ	N	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			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹			

(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					
	3	名利	尓		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	Ŧ		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	ļ	cal	lcal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています