J-PARC 中性子源用低温水素システムの安全設計

加藤 崇^{*1,†}, 麻生 智一^{*1}, 達本 衡輝^{*1}, 長谷川 勝一^{*1}, 大都 起一^{*1}

Safety Design of the Cryogenic Hydrogen System at J-PARC

Takashi KATO^{*1,†}, Tomokazu ASO^{*1}, Hideki TATSUMOTO^{*1}, Shoichi HASEGAWA^{*1} and Kiichi OOTSU^{*1}

Synopsis: The Japan Atomic Energy Agency has been constructing the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), a high intensity proton accelerator complex with MW beam power, in collaboration with the High-Energy Accelerator Research Organization. The materials and life science experimental facility (MLF), where materials and biological structures are analyzed using neutron beam-scattering experiment, has been constructed as one of the experimental science facilities at J-PARC. A spallation neutron source that produces neutrons through nuclear spallation reaction using high-energy proton beam injection and provides neutron beams for experimental users has been installed at the MLF. Hydrogen nuclei are used as a neutron moderating material (moderator) to reduce the neutron energy from MeV to meV order. Therefore, a cryogenic hydrogen system should be installed at the spallation neutron source to provide supercritical hydrogen to moderators. This paper describes the safety design of the cryogenic hydrogen system. Especially, the system is subject to high-pressure gas safety laws, and refrigeration safety regulations are applied to the system for the first time. We also discuss the technical contents that were argued through this application.

Keywords: spallation neutron source, safety design, cryogenic hydrogen system, high-pressure gas safety law

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は共同で大強度陽子加速器研究施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex: J-PARC) を建設している¹⁾。これは、陽子加速器が発生する 1 MW の大強度陽子ビームを標的 (ターゲット) 原子核に入射させ、その原子核を破壊 (核破砕) することにより発生する 2 次粒子である中性子、反陽子、K 中間子、 π 中間子等を用い、中性子散乱実験、ミュオン実験、原子核・ハドロン実験、さらにニュートリノ実験を行うための総合的科学実験施設である。

中性子散乱実験を行う施設は物質・生命科学実験施設と呼ばれ²⁾、実験に供する低エネルギー中性子 (主に冷中性子) を発生する中性子源を保有する。ここではターゲットとして常温で液体金属である水銀が用いられている。そして、水銀原子核の核破砕により生成される高エネルギー中性子を衝突を繰り返すことで低エネルギー中性子に変換する物質として中性子の質量と同等な質量を持つ水素が用い

られる。実際には水素原子密度が高い状態である超臨界水素を用いている。この超臨界水素をターゲット近傍に輸送させ、中性子のエネルギーを吸収 (中性子を冷却) し、それを熱負荷として受け取った超臨界水素を再び冷却し、ターゲット近傍へ輸送するという冷凍サイクルを形成する低温水素システムが中性子源を構成する主要機器として位置づけられている。

本システムは水素液化機以外では本邦初の水素冷凍システムとなり、高圧ガス保安法の対象設備として設計・製作された。高圧ガス保安法の対応では原子力安全・保安院 (国) 及び茨城県庁 (県) と 1 年以上に亘り協議を重ね、最終的に高圧ガス保安法冷凍保安規則 (冷凍則) が一部改正されることになり、その結果、国内で初めて冷凍則の適用を受ける水素を使用した冷凍機となった。一方、本システムの実際の安全設計及び対応については、システム固有の条件の安全対応も必須事項となる。本システムでは、設置場所が放射線管理区域であり、さらに、中性子を冷却する場所は人が容易に近づけない放射線場になる。従って、高圧ガスに関する法や基準だけでなく、放射線に関する基準や国内外の類似のシステムが採用している安全対策を検討し、積極的に利用した。昨今の安全は、製造物責任法 (PL 法) への対応や、自主保安を求める傾向にある。本システムの安全設計として固有の設置環境等に依存した安

Received August 10, 2007

^{*}1 日本原子力研究開発機構

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun,

Ibaraki 319-1195, Japan

[†] E-mail: kato.takashi41@jaea.go.jp

Fig. 1 Schematic flow diagram of cryogenic hydrogen system.

全対策の実施を通して、自主安全の必要性を痛感した。特に国との法対応の協議では、本システムの特殊性を含めた全般的な安全対策が問われ、さながら特定案件評価（特認）を受けているようであった。そこで、本解説では、国と協議を行った内容や本システムの安全設計及び安全対策について紹介する。

2. 低温水素システムのプロセス

本システムはどのような冷凍システムであるか、本システムのプロセス構成を紹介する。

Fig. 1 に本システムのプロセス概要図を示す。ヘリウム冷凍機により 17 K のヘリウム寒冷を発生させ、極低温水素循環システム内の熱交換器に導く。そこで、熱交換器を介して循環する超臨界水素を 18 K まで冷却し、中性子のエネルギーを吸収するモデレータまで約 20 m の水素輸送管より運ばれる。水銀ターゲットで発生した高エネルギー中性子 (MeV オーダー) は、3 基のモデレータの超臨界水素と衝突を繰り返し、中性子は水素温度と同等な 20 K 程度のエネルギー (meV オーダー) まで低下 (冷却) され、冷中性子ビームとして実験施設に供給される。一方、超臨界水素は中性子からエネルギーを熱負荷として吸収し、水素輸送管を通り水素循環システムに戻される。設計では、超臨界水素は中性子から熱負荷を受け初期温度 18 K から約 21 K に 3 K 温度を上昇させる。モデレータを通過した超臨界水素は、水素循環システムに戻り、圧力を調整するためヒータや、アキュムレータ (容積可変式の圧力緩衝タンク) を経て、水素循環ポンプへ導かれ、循環流量に必要なとされる圧力まで昇圧 (約 0.1 MPa) される。最後に、オルソ-パラ水素変換器 (水酸化鉄触媒) を通過し、パラ水素濃度を 99%以上とし、これら一連のプロセスで暖めら

れた水素は再び熱交換器に入り、再び約 18 K に冷却されモデレータへ向かい、中性子を冷却するというサイクルを構成する。

このように本システムのサイクルは、ターゲットで発生した高温（高エネルギー）中性子を極低温（低エネルギー）まで冷却（変換）する閉じた系を形成する冷凍サイクルといえる。そこで、超伝導マグネット等を冷却するヘリウム冷媒により閉じた系の冷凍サイクルが冷凍則の適用を受けていることから、本システムの法的取り扱いについて冷凍則の適用が可能か県及び国に問い合わせを行った。

3. 冷凍則における冷凍プロセス

高圧ガス取締法（現在は高圧ガス保安法）冷凍則での冷凍設備に関する定義は、昭和 41 年 9 月 1 日 41 化局第 658 号、通牒第 1 条関係（冷凍則の運用及び解釈について）にて以下のように示されている。『「冷凍にかかる高圧ガス」とは、冷凍のためのみ（高圧ガス製造設備以外の対象物のみを冷凍することをいう。）に使用される冷凍設備内の高圧ガスをいい、……』そこで、高圧ガス製造設備内の対象物を冷却する「冷凍設備」と高圧ガス製造設備以外の対象物、すなわち、高圧ガスに該当しないものを冷却する「冷凍設備」が区別され、前者が「付属冷凍」設備として取り扱われ一般高圧ガス又は液化石油保安規則により運用され、後者が「冷凍」設備として定義され、冷凍則により運用されるようになった³⁾。

さらに、昭和 53 年 12 月 1 日付け商企第 2575 号における「ヘリウムガス製造施設の適用省令」にてヘリウム冷凍設備の液化を伴わない閉サイクルの設備及び液化を伴う閉サイクルの冷凍設備の両方が冷凍則の適用を受けるとの回答が出された³⁾。すなわち、ヘリウムを冷媒ガスとし、

ディスプレイサ（圧縮及び膨張を行うピストンと同じ機能をするもの）、蓄冷器そして圧縮機から構成され、断熱膨張（サイモン膨張）を繰り返し行うことにより 4 K 程度の温度まで冷却できる冷凍設備である。このような冷凍設備は、スターリングサイクル、ギホード・マクマホンサイクルを用いたものが代表的である。

そして、従来の冷凍則で想定していた圧縮機、凝縮器、受液器、そして蒸発器より構成される蒸気圧縮式冷凍設備から、断熱膨張と冷媒ガスの顕熱による冷凍設備も冷凍則による冷凍設備として取り扱われるようになり、特に、超伝導の応用研究に利用されるヘリウム冷凍設備においては、閉サイクルを構成する冷凍設備は、小型から大型に到るまで冷凍則による冷凍設備として取り扱われるようになった。

上記に示した冷凍則に従うヘリウム冷凍設備を模式化した冷凍サイクルを Fig. 2 に示す。同様に、本システムを模式化した冷凍サイクルとして Fig. 3 に示す。これらを比べ、また冷凍則の考え方に沿って、本システムが冷凍則の条件に適用するか否かを以下のように検討した。

Vapor compression refrigeration cycle

Helium refrigeration cycle used by latent heat

Helium refrigeration cycle used by sensible heat

Fig. 2 Refrigeration cycle subjected to the refrigeration safety regulations of the Japanese high-pressure safety laws.

Fig. 3 Refrigeration cycle of our cryogenic hydrogen system.

(1) 本システムは「冷凍にかかる高圧ガス」の冷凍装置であるか。

本システムの冷却対象（被冷却体）は、中性子及び中性子冷却容器となる。これらはヘリウム冷凍機における超伝導コイルや低温パネルと同等であり、高圧ガスに該当するような被冷却体ではない。従って、本システムは冷凍にかかる高圧ガスの冷凍装置である。

(2) 本システムは冷凍則に対応する冷凍サイクルか。

本システムのヘリウム冷凍機は冷凍則に従う冷凍システムとして一致しているが、水素循環部分をどのように定義できるかで見解が分かれるところである。本システムの水素循環は、相変化のない超臨界水素の循環であり、被冷却体である中性子を効率的に冷却するためのものであることから、ブラインに相当すると考えた。すなわち、本システムは、顕熱を利用したヘリウム冷凍設備に超臨界水素のブラインが取り付けられた形式になる。一方、水素循環部分を二元目の冷凍サイクルと考え、二元冷凍システムと見ることできる。この場合、水素循環部分は膨張弁や凝縮器、蒸発器を持たず、熱交換器とポンプによる循環による冷凍サイクルとなり、冷凍則の自然循環式冷凍設備と見ることができる。

水素ブライン及び二元冷凍設備のいずれにせよ、水素循環部分が付属冷凍設備か否かが問われる。しかし、(1)で示したように、ブライン及び二元目の冷凍サイクルとしても、冷却の対象は、中性子であり高圧ガス製造設備でない。

(3) 水素は冷凍則の冷媒であるか。

冷凍則の第 2 条（用語の定義）のガス名称の中に水素が挙げられていない。しかし、前項で示した昭和 53 年の「ヘリウムガス製造設備の適用省令」が示された当時、高圧ガス取締法の冷凍則第 2 条にヘリウムの記載がなかったが、冷凍則のヘリウム冷凍システムが出現した。その後、平成 11 年の省令（平 11 通令 87）で冷凍則第 2 条にヘリウムの記載が行われた。すなわち、用語の定義に記載されていないガスでも冷凍則のシステムとなりうる例があった。

(4) 冷凍則の冷凍能力の算定に対応できるか。

ヘリウム冷凍設備における 1 日の冷凍能力の算定は、昭和 53 年の省令に関する質問の回答（昭和 53 年 12 月 1 日付け商企第 2575 号）³⁾にて、圧縮機の原動機の定格出力 1.2 kW を持って 1 冷凍トンとされた。そこで、本システムもヘリウム冷凍機が中心を成しており、冷凍温度はヘリウム冷凍機（4 K）より高い（20 K）が、ヘリウム冷凍機と同等とすることで過小評価にはならないので、同様な定格出力 1.2 kW を持って 1 冷凍トンとすることが適当であると考えた。

以上の考え方を持って、県と協議を行った。その時、(2)及び(3)について県単独では判断しかねる項目とされ、国（原子力安全・保安院）への照会が行われ、本件に関する国との協議が始まった。

4. はじめの見解と安全に関する問われた課題

国との協議を開始し、はじめに以下の見解を得た。

- ・ 本システムの冷凍サイクルが冷凍則に対応したものであることを理解する。
- ・ 主張される水素のブラインは、高圧ガスを用いるブラインとなる。一方、ブラインは冷凍則にその技術上の基準がない。従って、高圧ガスを用いたブラインに対する安全を担保する手段がない。また、大臣による特認でブラインの安全基準を定義しようとしても冷凍則に技術基準がないため、特認として挙げられない。
- ・ 本システムを冷凍則に適用するためには、水素ブラインの技術上の基準を規定できる特認が行えるような省令改正を行うことが必要になる。

すなわち、冷凍則第 7 条（定置式製造設備に係わる技術上の基準）にブラインの技術上の基準を特認で問えるような文言を付加すると言うものであった。我々は、省令改正まで持っていくことが必要であると認識した。

見解に伴い、本システムの安全面に関し以下に示す質問を受けた。これらの質問は、本邦初の水素冷凍機を実現する上での安全上の課題に相当するものであった。また、本件に関する国との協議は、さながら本システムの特認ヒアリングのようなものとなった。

- (1) 低温水素配管の長さ、設置場所周辺の状況
- (2) 液体又は超臨界水素量と危険度
- (3) 水素を漏洩させない対策
- (4) 水素が漏洩した場合の措置
- (5) 水素による配管等の腐食の可能性
- (6) その他の水素に対する対策

5. 安全への考え方と課題への回答

我々は、本システムを構築するに当たり、安全への考え方を以下の 4 つにまとめた。

- ・ 保有水素量をできるだけ少なくし可燃性ガスとして水素が持つハザードポテンシャルを極力小さくする。
- ・ 水素漏洩の可能性をできるだけ少なくする。水素配管の継ぎ手は溶接継ぎ手を原則とする。水素容器や配管材料は、低温高圧水素、放射線場を考慮して選択する。
- ・ 万一の水素漏洩に関しは、できるだけ空気との混合を避け、可燃性気体にしない対策を施す。また、漏洩をできるだけ早く検知し、検知した場合、陽子ビームを停止すると同時に本システムも停止し、速やかに水素を外気へ放出する。放出する場合は、水素濃度が爆発下限界(4%)以下になる工夫を行う。
- ・ 国内外で同様なシステムに採用されている自主的安全基準や安全対策に関する情報を集め、積極的に取り入れる。

特に、英国ラザフォードアップルトン研究所（RAL）で 20 年近く安全に稼働してきた中性子源装置 ISIS（アイシス）の水素配管に採用している安全対策を取り入れる。これは水素配管の外側に不活性ガスであるヘリウムガス層を設け、水素配管をくるんでしまうというもので、ブランケット（毛布）構造と呼んでいる。詳細は 5.3 で述べる。

上記の考え方に基づき、国からの質問に以下の内容を回答した。

5.1 低温水素配管の長さ、設置場所周辺の状況

本システムの建家内の配置を Fig. 4 に示す。水素循環系からは、3 台のモデレータへ超臨界水素を供給循環する 3 本の水素輸送配管が接続されている。モデレータと水素循環ユニットは、放射線遮蔽の関係から離せざるを得なく、これらの配管の長さは約 20 m で、水素の行き、真空断熱層、水素戻り、断熱真空層、そしてヘリウムブランケット層からなる 5 重配管となっている。水素配管の口径は JIS 規格口径で 25 A（内径約 30 mm）を中心とし、超臨界水素が定格流量（約 0.16 kg/s）で循環している場合の水素循環ポンプの揚程が約 0.1 MPa になるような配管口径の設計を行っている。

水素循環ユニットは低温水素設備室に設置され、水素輸送配管は低温水素設備室から冷却系分配室を通り、配管ピットを通してターゲット近傍に設置されているモデレータへつながる。配管ピットは中性子の遮蔽コンクリート（壁厚さ 1～2 m）に囲まれて設けられている。低温水素設備室の天井はグレーチング（網鋼板）で構成され、その上部にある大型機器取扱作業室と空間的につながっている。大型機器取扱室は物質・生命科学実験施設建家の 3 階中央部として構成され、長さ約 145 m、幅約 14 m、高さ約 17 m で、容積約 34,500 m³ の部屋である。また、この大型機器取扱室は約 0.5 m のコンクリート壁による密閉構造で換気は空調によって行われ、換気量は約 16,600 m³/h である。従って、約 2 時間毎に部屋全体が換気されることになる。

Fig. 4 Layout of the cryogenic hydrogen system in the materials and life science experimental building.

5.2 液体又は超臨界水素量と危険度

(1) 本システムの水素保有量

安全の考え方で示したように、まず、ハザードポテンシャルを直接軽減する手法として、系内の水素保有量の最小化を図った。この考えにより、2章で紹介したように水素循環系を冷凍サイクルから分離し、水素の冷却にヘリウム冷凍機を用いるシステムとした。さらに、水素循環系の保有量を極力少なくするため、室温で水素ガスを回収するようなガスタンクを持たないシステムとした。すなわち、冷凍機が停止し、系が昇温される場合、内部の水素は外気に放出する方式を採用した。水素放出設備は5.5に記述する。もちろん緊急停止の場合も水素は素早く大気に放出できる仕組みにしている。本項(3)に記述するが、水素は極めて放射化されにくい物質であり、モデレータで中性子と反応してもほとんど放射化せず熱負荷を得るだけである。すなわち、水素は問題なく大気放出が行えるのでタンクを無くすことができた。水素循環系内の各種機器の水素が占める容積及び水素輸送配管の水素が占める容積をTable 1に示す。水素循環系と水素輸送配管系は、それぞれ約0.14 m³と約0.1 m³あり、全体容積は約0.24 m³となった。水素循環系が最も高い密度で運転される場合は、水素圧力1.5 MPa、平均水素温度20 Kの場合である。この時の水素密度は約73 kg/m³になり、全系の水素重量は18.3 kgになる。

Table 1 Hydrogen inventory of hydrogen circulation system

Items	Volume (m ³)
Hydrogen circulation unit	Heat exchanger
	Ortho-para converter
	Accumulator
	Piping
Three cryogenic hydrogen transfer lines	0.100
Three moderators	0.004
Total	0.241

(2) 危険度

水素全量を元に水素の危険度として、超臨界水素が室温大気圧になった場合の容積を算出し、それらの危険性を検討する。

1) 室温大気圧になった場合の容積

20 Kで18.3 kgの水素が、288 K(15℃)、1気圧の水素ガスになったとすると、その密度が0.084 kg/m³であることから、288 K(15℃)、1気圧で218 m³となる。すなわち、系内の水素容積約0.25 m³に比べ約870倍に膨張することになる。低温流体の危険性は、それらが室温状態に開放されたときの体積膨張が非常に大きいところにある。ちなみに液体ヘリウムでは約750倍、液体窒素では約690倍である。このため、循環系には安全弁や、破裂板を設置し、設計圧力(本システムの場合2.0 MPaG)以上の圧力にならないような処置を講じている。

2) 水素が室内に漏洩した場合の危険度

仮にこの水素ガス全てが水素循環系より漏洩したとしても容積が34,500 m³ある大型機器取扱室へ向かうことになる。この部屋における水素濃度は0.63%にしかならず、この水素濃度は、水素の空気中における爆発下限界4%の1/6以下で、仮に着火源があっても爆発しない。さらに、漏洩による圧力上昇も約6/1000気圧程度で、換気により約2時間で全て外気へ放出される。

しかし、水素配管の漏洩部近傍では水素濃度が4%を超える部分が発生するので、ヘリウムガス層のブランケット構造を採用し、万が一水素配管から漏洩が生じても、建家内に漏洩させず、大気へ放出できる構造を採用した。

尚、水素は最も拡散しやすいガスで、水素の拡散係数は空気中0℃、1気圧で約6.7×10⁻⁵ m²/sである。これは、ヘリウム(6.16×10⁻⁵ m²/s)よりも大きく、窒素や酸素(1.3~1.8×10⁻⁵ m²/s)の3~5倍であり⁴⁾、高濃度部分が短時間に低く

なる性質を持っている。

(3) 水素の放射化⁵⁾

中性子による水素の放射化とは、重水素と中性子が反応してトリチウムを生成することである。トリチウムは β 線を放出する放射能である。水素に含まれる重水素量は原子数比で 150 ppm 程度であり、重水素と熱中性子の反応断面積も $5.2 \times 10^{-4} \text{ b}$ と小さく、トリチウム生成量は基本的に非常に少ない。本システムでのモデレータ部における中性子強度を元に 1 年間の運転で生成されるトリチウムの放射能を評価すると約 $8 \times 10^6 \text{ Bq}$ となり法令で放射能として取り扱う必要が生じる下限数量 $1 \times 10^9 \text{ Bq}$ に比べ、2 桁以上低い値である。比較のため、中性子によるヘリウムの放射化を検討する。ヘリウムの場合、ヘリウム 3 と中性子が反応してトリチウムを生成する場合と、ヘリウム 4 と中性子が反応してトリチウムを生成する 2 つの場合がある。ヘリウム 3 の反応断面積は約 $5.3 \times 10^3 \text{ b}$ と非常に大きい、ヘリウム 4 中のヘリウム 3 の原子数比は非常に少なく 1.4 ppm 程度である。これを元に、水素と同様に 1 年間の運転で生成される放射能を評価すると約 $7.6 \times 10^{11} \text{ Bq}$ となり、これだけで水素の 10 万倍となる。さらに、ヘリウム 4 での 1 年間の運転で生成される放射能を評価すると約 $1.5 \times 10^{10} \text{ Bq}$ となり、約 2000 倍になる。そして、ヘリウムは放射能として扱う必要が出てくる。以上より、水素は非常に放射化されにくい物質であることが分かる。よって、緊急時、直ちに水素を大気に放出することができる。実際には、放出水素はスタック（排気塔）からの排気空気希釈され 4% 以下で放出されるのでトリチウムの排気中の濃度限度値より 4 桁以上低くなる。

5.3 水素を漏洩させない対策

水素配管（水素を内包する容器も含む）は、冷凍則第 6 ～ 7 条の技術上の基準、同規則例示基準、同製造細目告示に加え、必要に応じて同法一般高圧ガス規則第 6 条、同法一般高圧ガス規則例示基準を設計及び製作に反映した。配管材料は低温圧力容器等に使用可能なオーステナイト系ステンレス鋼（304L 及び 316L）とアルミニウム合金（A6061T6 及び A5083）を使用する。

NASA の水素取扱に関する Safety Standard⁶⁾には、水素雰囲気下で使用するための材料適合性について、水素の性状（ガス水素、液体水素、スラッシュ水素）、材料の用途ごとにまとめられ、アルミニウム及びその合金、7% 以上 Ni を含有するオーステナイト系ステンレス鋼（304、304L、308、316・・・）は、ガス水素、液体水素、スラッシュ水素の使用状態で使用可能であると述べられている。特に、アルミニウム合金は放射線損傷に強い金属あり⁷⁾、従って、本システムのモデレータ部分を中心とした配管部分は全てアルミニウム合金（A6061T6）とした。

上記以外に本設備における低温水素配管の安全対策として、本章の冒頭で述べたブランケット構造を採用した。こ

(a) Cryogenic hydrogen (b) Room-temperature hydrogen

Fig. 5 Conceptual design of the blanket structure for hydrogen piping.

れは Fig. 5 に示す構造であり、低温水素配管の最外層の断熱真空層の外側に室温ヘリウムガス（純度 99.9% 以上）を充満したガス層を設けるもので、以下に示す 3 つの役割を担う。

- ・ 空気と水素の間に不活性ガスであるヘリウムガスを置くことにより、万が一水素が漏洩した場合、漏洩した水素が直接空気（酸素）に触れることを防ぎ、可燃性雰囲気を作らない。
- ・ 空気が断熱真空層へ漏洩することを防ぐ。真空層では僅かな空気の漏洩があった場合でも、水素配管の表面は低温になっているため、空気は水素配管の表面で液化や固化され蓄積される。すなわち、高濃度の酸素が水素配管の表面に付着する状態を防ぐ。
- ・ 水素が配管から室内へ漏洩するためには、水素配管の管壁に漏洩を生じ、断熱真空配管の管壁に漏洩を生じ、さらに、ブランケットの管壁に漏洩を生じるといった 3 重の壁に漏洩を生じることになり、漏洩する可能性を低くする。

室温水素ガス配管では、その外層に、上記と同様なブランケットを設けるが、ブランケットのガスは窒素ガス（純度 99.9% 以上）とした。これは、ブランケット・ガスが凍ることがないので、耐電圧の高い窒素ガスをブランケット・ガスとしたものである。特に、室温水素ガスの充満が想定される計装電気機器、すなわち水素系の圧力伝送器や差圧伝送器の受圧部には室温水素ガスが充満されるので、これらの機器は水素防爆構造のものを採用し、上記に示した窒素ガスのブランケット内に設置している。

5.4 水素が漏洩した場合の措置

前項で示したように、水素配管には高純度な不活性ガスが充填されたブランケットが設けられているため、このブランケット構造を利用した水素漏洩の監視を行うこととした。

1) 低温水素配管における漏洩監視方法

配管の断熱真空層は真空排気装置につなげられ、そこで、ヘリウムリークディテクター及び四重極質量分析計により、微小なリーク（例えば $10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 程度）も監視でき

るようにしている。また、ヘリウムガス・ブランケットの圧力の監視も行い、この圧力の相対的変動量で、水素ガスやブランケット・ガスの漏洩を検知する。

水素漏洩の検知後、漏洩量が基準値を超えた場合、インターロック等により直ちに、陽子ビーム及び本システムを停止し、系内の水素を大気に放出する。

2) 室温水素ガス配管及び水素系計装電気機器等の漏洩監視方法

窒素ガス・ブランケットの圧力を監視し、この圧力の相対的変動量で、水素ガスやブランケット・ガスの漏洩を検知する。また、水素圧力の長時間に亘る減少傾向を観測することによって水素漏洩を検知する。このような圧力の観測は、コンピュータによる自動計測を行い、グラフで確認できるシステムを構築する。

また、水素設備が設置される部屋に水素検知器を設置し、水素の漏洩を監視する。そして、水素が検知された場合、漏洩量の大きさが基準値を超える場合は、上記と同様、インターロック等により直ちに、陽子ビーム及び本システムを停止し、系内の水素を大気に放出する。

5.5 水素による配管等の腐食の可能性

水素環境下における腐食（材料劣化）として注意すべきことは、水素侵食と水素脆化であると考えられる。そこで、本システムの水素配管に使用する材料について、水素侵食と水素脆化に関し検討した。

1) 水素配管に使用する材料

水素配管に使用する材料は、常温から極低温の圧力機器に使用可能なオーステナイト系ステンレス鋼、304L 又は 316L とアルミニウム合金 6061T6 と 5083 である。ステンレス鋼 304L 及び 316L は水素系配管等に使用し、アルミニウム合金 6061T6 は中性子が通過するモデレータ配管部分に、アルミニウム合金 5083 は水素-ヘリウム熱交換器に使用する。

2) 水素侵食

水素侵食は高温高压の水素ガス環境で炭素鋼などの鋼材の機械的強度が低下する現象で、高温高压の水素ガス環境では、以下に示す化学式のように、水素が鋼中の炭化物（セメンタイト）と反応して脱炭させると共にメタンガスを生成する。

この反応で生成されたメタンガスが結晶粒界に蓄積され、微小亀裂を生じ、結果的に機械的特性を低下させる。

しかし、本システムでは、高温の水素環境ではなく低温（運転条件では極低温）であり、使用するステンレス鋼は極低炭素鋼であるため、上記のような化学反応は生じない。

3) 水素脆化

低温域での水素脆化現象として、水素環境脆化が水素利

用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）等で検討されている。最近の研究では、低温用の材料であるオーステナイト系ステンレス鋼において 100～300 K (-173～27℃) の温度で水素環境脆化が発生するという報告がある⁸⁾。しかし、安定オーステナイト系ステンレス鋼では生じることはなく、この脆性は歪み誘起マルテンサイトによるものであるといわれている⁸⁾。そして、引張試験結果から、オーステナイト系ステンレス鋼において、破断に到るような 20%以上（熱処理部は 10%以上）の伸びが与えられた場合に生じる現象とされている⁹⁾。

使用する材料（304L 及び 316L）は、上記の現象の対象になるが、これらの材料を使用した配管等の設計は、法による規則や規格の基準に対応し、弾性範囲内の設計が行われ、設計限界での伸びは 1%以下であり、上記の現象の原因となるマルテンサイト化するほどの歪みがそれらの材料に加えられることはない。したがって水素脆化（水素環境脆化）が生じることはないと考ええる。

5.6 その他の水素に対する対策

1) 異常事象の対応

停電、地震はもとより、構成される機器やシステムの異常による本システムの緊急停止が考えられる。さらに、インターロックで規定する異常事象の検知や、運転の状態から設備を停止した方がよいと判断される場合、安全の考え方で示したように、本システムを直ちに停止し、速やかに保有している水素を大気へ安全に放出する操作を行う。すなわち、何か異常が生じた場合、ハザードポテンシャルの高い水素を放出し、水素による 2 次的災害の発生を防ぐという考え方である。

また、水素配管には安全弁や破裂板が設けられ、異常時にはそれらが動作する場合もある。この時、水素を建家内に放出することはできない。そこで、緊急停止時も含め、これらの放出された水素を安全に大気へ放出する水素放出設備を設けることにした。以下に水素放出設備の概要について紹介する。

2) 水素放出設備

本設備は、放出される水素を圧力系統別の配管ヘッダーで集め、水素放出配管を形成し、放出配管は本設備が設置される建家の排気スタック(排気塔)につなぐれ、スタックを通じて大気へ放出する設備で、その概略系統図を Fig. 6 に示す。

- ① 低温水素配管等の放出弁や安全弁、破裂板から放出される水素や、設計圧力 2.0 MPa 以下の常温水素配管の放出弁や安全弁、破裂板から放出される水素は、全て中圧水素放出ヘッダーに集められる。
- ② 中圧水素放出ヘッダーは、普段は水素がなく、空気（酸素）が入ることを避けるために逆止弁を設置し、且つ低温水素が放出されても凍らないヘリウムガスを

Fig. 6 Schematic diagram of the hydrogen relief system.

いつも充滿させておく。そして、中圧水素放出ヘッダーは水素放出配管につながる。

- ③ ガス置換用の真空排気系からの放出ガス（水素、ヘリウム、窒素）、ブランケットの放出弁等からのヘリウムガスや窒素ガスは低圧（0.2 MPa 以下）で放出されるので、これらの放出ガスも①と同様な低圧水素放出ヘッダーに集める。
- ④ 低圧水素放出ヘッダーは、中圧水素放出ヘッダーの下流の水素放出配管に接続される。
- ⑤ 低圧水素放出ヘッダーには、ヘリウム冷凍機で予冷に使用され室温となった窒素ガス又は液体窒素タンクからの窒素ガスを供給する。この窒素ガスは絶えずスタックより大気へ放出される。そうすることによって、水素放出配管内部への空気の混入を防止する。すなわち、中圧水素放出ヘッダーと低圧水素放出ヘッダー、水素放出配管の内部は、水素が放出されないときは常にヘリウムガスと窒素ガスで満たされ、空気の混入がない状態を保つ。
- ⑥ 水素が放出された場合、水素は水素放出配管内では空気に触れることなくスタックにつながれ、そこで空気と混合され、大気へ放出される。
- ⑦ 水素放出配管がスタックとつながれる手前に逆火防止装置（フレイムアレスター）を取り付け、万が一スタック内で水素が着火した場合でも水素系への火災の進行を防ぐ。
- ⑧ 建家全体が放射線管理区域であるため空調による排気量が非常に大きく、スタックから排出される総空気排気量は 163,000 m³/h で、スタックへ放出する水素量をスタックから放出される空気の 4%以下を保つことができる。4%は 6,520 m³/h であり、水素系の放出弁や安全弁等の放出量に対し対応できる大きさになっている。実際、6,520 m³/h で、系内の水素を全て放出すると、2 分程度でほとんど放出できる。
- ⑨ 停電の場合、スタックの排気ブロワーが停止するが、非常用電源により数台のブロワーが確保され、15,840

m³/h の排気量が確保される。そこで、停電時の水素放出量は、その 4%である 634 m³/h 以下で行えるシステムにしている。

3) その他

- ・ 水素配管の外管は、一般高圧ガス保安規則の例示基準に準拠した静電気の除去を行い、万が一の水素漏洩に対し、着火しない対策を取っている。
- ・ 本システムの停止時は、水素放出後、真空排気を行い、ヘリウムガスを充填し、正圧状態で保持する。
- ・ 運転を開始する場合、充填する水素の純度は 99.99% 以上の水素を用い、純度監視装置を取り付けている。

6. 中性子は冷却の客体になりうるか

前章に示した課題への回答を国に示し、国の委員会等で議論がなされた結果、我々の安全対策の考え方に理解が得られ、省令改正への方に動き出した。ところが、中性

Fig. 7 Mechanism of neutron cool-down and neutron temperature distribution before and after passing moderators

Fig. 8 Comparison among H₂, O₂, N₂ and Ne as a moderator for the cold neutron production.

子の冷却に関する本質的な質問が挙がった。すなわち、「中性子は冷却の客体になりうるか。（中性子は冷凍設備の被冷却体なのか。）また、水素が冷媒である必要性は何か」というものだった。すなわち、水素循環系が付属冷凍でないことの確認であった。

水銀ターゲットで発生した高エネルギー（高温）中性子がモデレータで超臨界水素に冷中性子まで冷却されるイメージと、モデレータへ入ってくる中性子のエネルギー分布と冷却され出て行く中性子のエネルギー分布を粒子及び重イオン輸送計算コード¹⁰⁾で計算した結果を **Fig. 7** に示す。図では、エネルギー（単位 eV）を温度換算した分布に変換している。入射中性子温度分布は $10^4 \sim 10^{10}$ K であるが、超臨界水素により、モデレータから出てくる中性子の主要部分の中性子温度分布は $10^0 \sim 10^3$ K まで冷却され

ていることが分かる。

また、「水素が冷媒である必要性は何か。」に関しては、モデレータ媒質を水素、酸素、窒素、ヘリウムとした時のモデレータから出てくる中性子エネルギー分布計算を行った結果、**Fig. 8** に示すように水素をモデレータとした場合が、実験に使用する冷中性子領域 ($10^{-1} \sim 10^{-3}$ eV) での中性子強度が圧倒的に高く、水素以外の元素ではモデレータとして使用できないことを示した。

7. 最終的な見解

本システムの法対応を検討している時期に、地球温暖化に配慮した「フロンを使用しない自然冷媒(二酸化炭素・アンモニア)の二元冷凍設備」に関する冷凍則の照会があった。これは、**Fig. 9** に示すような冷凍サイクルを構成している。本サイクルとよく似ており、ヘリウム部分がアンモニアであり、ブライン部分が二酸化炭素となる。このシステムでは、二元目の二酸化炭素の循環はブラインではなく自然循環式冷凍設備とし、全体として二元冷凍設備として位置づけられた。そこで、この考えを我々のシステムに当てはめ、以下のように整理した。

- ・ 極低温水素の循環をブラインではなく、圧縮機、膨張機を持たない二元目の自然循環式冷凍設備と捉え、一元目は単段圧縮機と膨張タービンからなるヘリウム冷凍サイクルとした二元冷凍設備と考える。
- ・ 一元目が稼働しないと二元目は冷凍設備として機能できないため、二元目の冷凍能力は 0 と定義できる。これは、冷凍則第 5 条（冷凍能力の算定基準）で冷媒ガス水素の Q 値を定義する必要がない。すなわち、ヘリウム冷凍設備の冷凍能力の算定基準（圧縮機動力 $1.2 \text{ kW} = 1$ 冷凍トン）でよい。

上記の考え方により、本システムの冷凍則への適用に必要とされる省令改正点は、冷凍則第 2 条（用語の定義）の可燃性ガスに水素を追加するだけでしたことになった。

そして、上記の考え方で、国、県と合意が取れ、平成 16 年 11 月 10 付けで国より以下の冷凍則の一部改正が提案され、パブリックオピニオンが求められた。

- ・ 用語の定義の改正（冷凍則第 2 条第 1 号関係）可燃性ガスの定義として水素を追加する。

そして、同年 12 月 3 日パブリックオピニオンが締め切られ、12 月 8 日公布、施行された。その結果、フロンを使用しない二元冷凍設備と同様に、本システムも冷凍則の適用を受けることになった。

8. まとめ

本システムの安全設計に対して、(1)系内の水素量の軽減を図り、危険度を直接減らす。(2)外国の安全対策施工例からブランケット構造を取り入れ、水素を建家内に漏洩させない構造を採用する。(3)水素は、ほとんど放射化し

Fig. 9 The ammonia and carbon dioxide refrigeration cycle.

ないので、異常時等では系内の水素を速やかに大気に放出し、危険度を減らす。という3つの安全設計の中心的考え方を構築し、これらを中心とした多重安全構造を展開した。

これらの考え方に従った安全設計は、本システムの冷凍則適用に関する原子力安全・保安院及び茨城県との1年以上に亘る協議の中で検討され、まさに第3者による評価を受けることになった。協議を通じて、安全設計の内容、ロジック等が洗練され、その結果、本邦初の冷凍則に適用した水素冷凍設備である、J-PARC 中性子源用低温水素システムが建設されるに至った。

本件の協議では、原子力安全・保安院及び茨城県の担当の方々には、粘り強く内容の本質を理解する努力をしていただき、親身なご指導をいただいた。一連の安全設計作業を通じて、安全の本質的な確保は、安全な設計と確実な製作で終わるものではなく、実際の運転経験を安全設計にフィードバックさせることが重要であると感じている。本システムは今後数十年運転される。その間、機器の管理者や運転員が変わって行く。しかし、ここに示した安全設計の考え方を風化させず持続し、将来の設計にフィードバックして行きたいと考える。そのようなことを実施してゆくためにも自主安全をしっかりと行って行きたい。

本システムの設計・製作では、永宮 J-PARC センター長、大山 J-PARC 副センター長、池田物質生命科学ディビジョン長より熱心なご指導をいただいた。また、中性子源セクションのメンバー、KEK と JAEA の低温技術者の集まりである J-PARC 低温タスクフォースのメンバーには安全設計及び国との協議において献身的な協力をいただいた。ここに感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) The Joint Project Teams of JAERI and KEK : “The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerator”, JAERI-Tech 99-056, JAERI, 1999
 - 2) T. Kato : “Materials and life science experimental facility”, J-PARC special edition, Genshikaku Kenkyu **50**, No.4 (2006) 49-58
加藤 崇 : 「物質・生命科学実験施設」、J-PARC 特集号、原子核研究 **50**, No.4 (2006) 49-58
 - 3) T. Toyonaka : “Application of high pressure gas control law to cryogenic refrigerator (helium cryogen or mixed cryogen)”, REFRIGERATION **54**, No. 625 (1979) 907-916 (in Japanese)
豊中俊之 : 「低温冷凍装置 (ヘリウム冷媒・混合ガス冷媒) の高圧ガス取締法の適用について」、冷凍 **54**, No. 625 (1979) 907-916
 - 4) JSME (ed) : “Technical Data, Thermal Properties of Fluid”, JSME, (1983) 505 (in Japanese)
日本機械学会 (編) : 「技術資料 流体の熱物性値集」、日本機械学会 (1983) 505
 - 5) F. Maekawa, T. Kai: private communication.
 - 6) NASA : “Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems”, Paragraph 300, NSS 1740.16
 - 7) K. Farrell : “Materials selection for the HFIR cold neutron source”, ORNL/TM-99-208, ORNL, 1999
 - 8) JIM (ed) : “Recent Hydrogen Detection Method and Protection of Hydrogen Embrittlement”, JIM (1999) (in Japanese)
日本金属学会 (編) : 「最新の水素の検出方法と水素脆化防止法」、日本金属学会、1999
 - 9) G. HAN, J. HE, et al.: “Effect of strain-induced martensite on hydrogen environment embrittlement of sensitized austenitic stainless steels at low temperatures”, Acta Mater. **46** (1998) 4559-4570
 - 10) M. Harada, et al.: “Nuclear heating calculation for JSNS”, Proc. of 18th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVIII), Dongguan, Guangdong, P R China, April 25-29, 2007.
-
- 加 藤 崇** 1980 年立教大学理学部物理学科卒業。同年日本原子力研究所 (現 日本原子力研究開発機構) 入所。現在 J-PARC センター・物質生命科学ディビジョン・中性子源セクションリーダー。大型超伝導コイル及び大型ヘリウム冷凍システムの研究開発から、現在、大強度陽子加速器計画 (J-PARC) の中性子源施設の建設を担当。低温工学協会、プラズマ核融合学会、原子力学会会員。
- 麻 生 智 一** 1989 年神戸商船大学原子動力学科卒業。1989 年日本原子力研究所 (現 日本原子力研究開発機構) 入所。2006 年佐賀大学大学院工学系研究科博士課程修了。現在、原子力研究開発機構 J-PARC センター所属。主に、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の中性子源施設の研究開発及び建設業務に従事。低温工学協会、日本機械学会、日本原子力学会、日本中性子学会、可視化情報学会員。工学博士。
- 達 本 衡 輝** 1997 年関西大学工学部材料工学科卒業。2002 年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程 (エネルギー応用科学専攻) 修了。2002 年高エネルギー加速器研究機構博士研究員を経て、2003 年より日本原子力研究所 (現 日本原子力研究開発機構) 入所。J-PARC センター所属。主に、核破砕中性子源用水素システムの研究開発及び建設業務に従事。低温工学協会会員。エネルギー科学博士。
- 長谷川 勝 一** 1995 年名古屋大学理学部物理学科卒業。1997 年同大学院素粒子宇宙物理学専攻博士課程前期修了。2003 年同大学院素粒子宇宙物理学専攻博士課程後期修了。大阪大学核物理研究センター教務補佐員を経て、2004 年 2 月より日本原子力研究所 (現 日本原子力研究開発機構) 入所。J-PARC センター所属。主に、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の中性子源施設の研究開発及び建設業務に従事。低温工学協会、日本物理学会会員。理学博士。
- 大 都 起 一** 1992 年東邦大学理学部物理科中退。1992 年より原子力エンジニアリング株式会社に入社。日本原子力研究所 那珂研究所にてヘリウム冷凍機の運転・保守などに従事。現在、原子力研究開発機構 J-PARC センターに所属し、主に、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の核破砕中性子源用水素システムの研究開発及び建設業務に従事。