

冷中性子源用極低温水素循環システム

Cryogenic Hydrogen Circulation System for Cold Neutron Source

宮井 玲* 信時 実* 撫原 浩嗣* 牛島 勇*
 MIYAI Ryo NOBUTOKI Minoru NADEHARA Koji USHIJIMA Isamu

日本原子力研究開発機構内に建設されている大強度陽子加速器研究施設内の物質・生命科学実験施設に世界最大級の水素循環量を有する極低温水素循環システムを納入した。極低温水素循環システムは、冷中性子を生成するために、高密度の超臨界水素(1.5 MPa, 18 K)を大流量(162 g/s)で循環することが要求される。併せて、システム内を循環する超臨界水素に対する急激な熱負荷変動に対応し、水素循環ループ内の圧力を安定して維持することが、本システムの重要な技術的課題である。本報では、極低温水素循環システムのプロセスの概要、装置の特徴(技術的課題とその設計結果)および試運転で確認された設備性能について報告する。

The cryogenic hydrogen circulation system that has one larger hydrogen circulating capacity in the world has been delivered in the material and life science experimental facility inside the Japan Proton Accelerator Research Complex constructed in Japan Atomic Energy Agency. The cryogenic hydrogen circulation system is required to circulate large hydrogen flow rate (162 g/s) of the supercritical condition (1.5 MPa, 18 K) with high density for the purpose of producing cold neutron. Furthermore, to achieve a stable pressure condition against the fluctuation of heat load to the hydrogen circulation loop is an important design requirement for this system. In this paper, process, features of this system (technical missions and these result) and system performances measured in commissioning are described.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構内に、タンパク質の生体高分子構造、ナノ物質や機能性材料の結晶構造等の多岐にわたる研究の発展に期待される中性子散乱実験を行う物質・生命科学実験施設¹⁾が建設された。

物質・生命科学実験施設は、大強度陽子加速器研究施設(陽子加速器で生成された大強度陽子ビームを各種標的(ターゲット)に入射させ、ターゲット原子核を破壊することによって発生する中性子や反陽子等の2次粒子を用い、最先端の科学研究を行う実験施設²⁾, J-PARC と略称される)の一施設である。

施設内で実験に供せられる中性子は、エネルギーの低い冷中性子であることが必要とされる。冷中性子は施設内の水銀標的から陽子ビームの入射によって発生される熱中性子を減速、冷却して生成される。熱中性子から冷中性子への減速材は、中性子とほぼ同じ質量

* オンサイト・プラント事業本部プラント事業部プラントエンジニアリングセンター

である水素原子が用いられている。

物質・生命科学実験施設では、大強度で高性能な冷中性子を生成するために、密度が高い超臨界水素(1.5 MPa, 18 K)の状態で約3.8 kWの中性子エネルギー(核発熱)を除熱して循環させる冷凍サイクルが要求された。今回、納入した極低温水素循環システム(以下、「本システム」と略す)は中性子源施設を構成する主要機器として位置づけられており³⁾, 世界最大級の水素循環量を有する極低温水素循環設備である。

また、本システムにおいて、超臨界水素が循環する水素循環ループ内部の急激な熱負荷変動に対し、内部の圧力を安定して維持することは重要な技術的課題である。これに対して、容積可変式のアキュムレータによる圧力制御機構を極低温用としては国内で初めて設計製作し、極低温での動作試験で良好な結果が得られたので報告する。

併せて、可燃性である水素に対する安全性を十分に確保すべく採用された不活性ガスブランケット構造に

ついても報告する。

2. プロセスの概要

2.1 プロセスの構成

2.1.1 水素循環ループ

発生させる冷中性子特性の要求から減速材である水素が高密度で均一であることが求められており、そのための温度条件として①各減速材容器内平均温度20 K 以下、②減速材容器入出温度差3K 以下が設定された。

また、減速材容器としては、結合型 (CM : Coupled Moderator)、非結合型 (DM : Decoupled Moderator)、ポイズン型 (PM : Poisoned Moderator) の3タイプが用意されており、核発熱量の異なるこれら3台の減速材容器を均等に冷却させることが要求された。

本システムの概略系統を Fig. 1 に示す。本システムは、3台の減速材容器に超臨界水素を循環させる水素循環ループ、熱交換器を介して水素循環ループを冷却させるヘリウム冷凍系による二元冷凍サイクルによって構成される。それぞれ並列に接続されている3台のモデレータは、前述の冷却条件を満足させ、かつ、全循環流量の10% 相当のバイパス流を考慮して、吐出流量162 g/s の水素循環ポンプによって循環冷却され

る。なお、系統内の運転圧力は、水素の臨界圧力である1.298 MPa⁴⁾ よりも高い1.5 MPa に設定された。

水素循環ポンプには、IHI 製動圧ガスベアリング式遠心式ポンプが採用され、冗長系を備えた2台並列運転を基本とし、1台故障時においても運転回転数の変更により定格流量162 g/s での運転が可能となっている。水素流体への動圧ガスベアリング式ポンプの適用は世界初である。水素循環ポンプの主要諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Design condition of hydrogen pump.

Type	Centrifugal radial type
Bearing type	Dynamic gas bearing type
Fluid	Supercritical hydrogen
Suction temperature	19.52 K
Suction pressure	1.47 MPa
Discharge pressure	1.57 MPa
Flow rate	81.1 g/s (Max 162 g/s)

水素循環ループ内には、冷中性子の高性能特性を確保の為に、パラ水素比99% 以上を維持させるためのオルソ・パラ水素変換器⁵⁾ (水酸化鉄触媒) を備えている。

減速材容器内部での水素の核発熱により水素循環ループに加わる3750 W の熱負荷は、25 Hz の陽子ビー

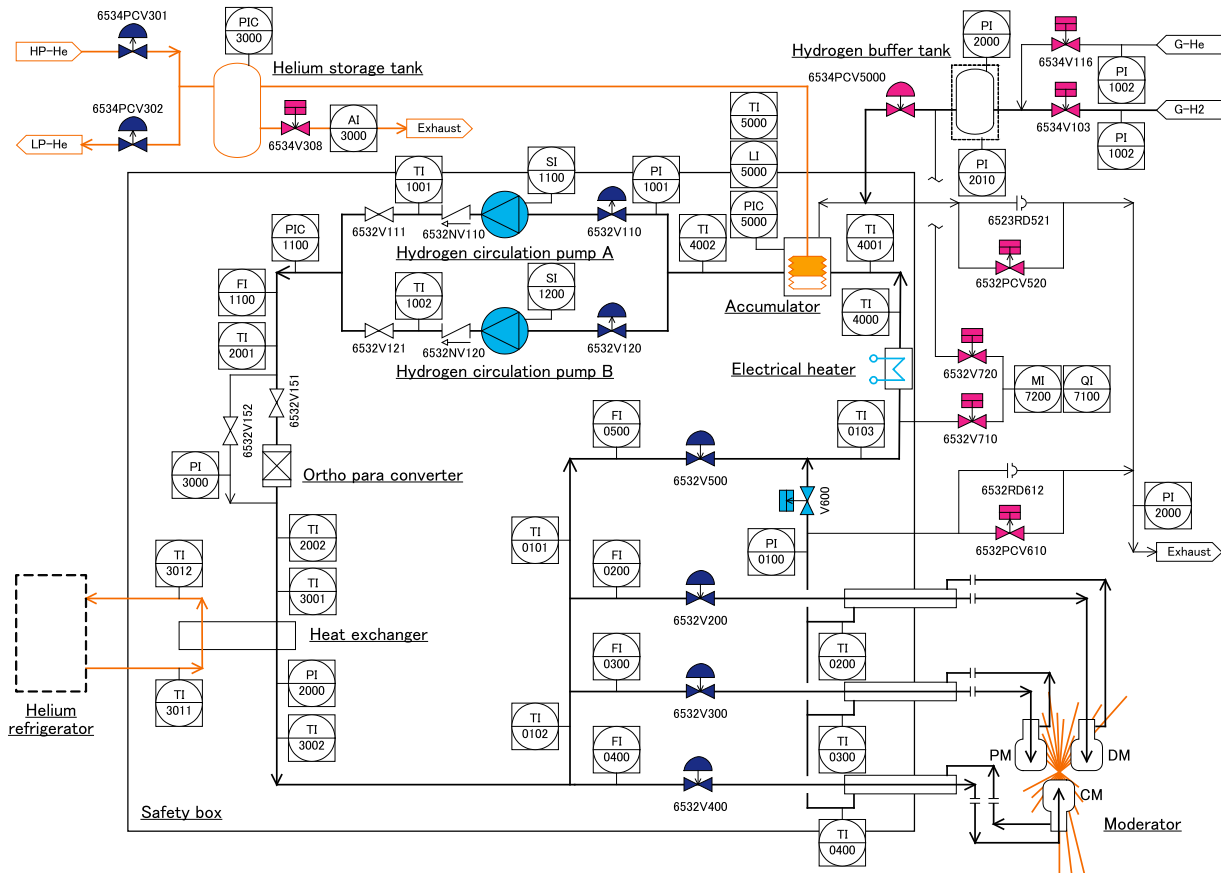


Fig. 1 Flow diagram of cryogenic hydrogen system.

ムの入射及び停止に応じて、瞬時に負荷されたり、消滅するという現象が生じる。水素循環ループの熱負荷の内訳を Table 2 に示す。このように水素循環ループに必要とされる全熱負荷である 4616W の 81% にも相当する熱負荷 (3750W) が変動することになる。

Table 2 Summary of heat load in cryogenic hydrogen system.

	Heat load (W)
Static heat load	475
Work of hydrogen pump	391
Dynamic heat load	3750
Total	4616

超臨界流体は、液体と同様に非圧縮性が高い特性を持つため、本システムのように閉じた系での運用を行う場合、適切な熱負荷補償が行われないと、系統内の急激な圧力変化をもたらすことになる。例えば、0.1 MPa, 18K のパラ水素が 3K 温度上昇した場合は 1.8 MPa 以上の圧力上昇となる⁶⁾。

このように、本システムでは、大きくかつ速い熱負荷変動に対し、安定した運転を行うことが、重要な技術的課題である。この熱負荷変動対応については、後述する。

2.1.2 ヘリウム冷凍系

水素循環ループに加わる熱負荷は、熱交換器を介し、ヘリウム冷凍機によって除熱される。水素循環ループの冷却に際しヘリウム冷凍系へ対しては、①水素を固化させることなく安定に冷却すること、②可燃性ガスである水素の漏洩を避けるために水素循環ループよりも高い圧力に維持することが要求された。

本システムでは膨張タービン 1 台構成のヘリウムブレイトンサイクルを採用した。1.5 MPa におけるパラ水素の固化温度は 14.3K⁷⁾ であり、冷媒としてのヘリウム供給温度はこれよりも高い温度を維持することが必要である。上述したような陽子ビーム停止時にヒータ入力を多く必要とする系の特性も考慮し、冷凍能力は液体窒素を補助寒冷として供給した状態で、17K において 6000W とした。なお、本冷凍機は、液体窒素の補助寒冷を使用せずに系統内の静的入熱のみに対応した減量運転にも対応する。

2.2 熱負荷変動対応

前述した通り、水素循環ループの内部の熱負荷は陽子ビーム入射、停止に応じて、瞬時に負荷されたり、消滅したりする。

これにより、本システムの水素循環ループのような、特に非圧縮性の強い超臨界水素を閉じ込めた系内では、温度変化に対する圧力変化が非常に大きくなる。

これに対応するために、本システムでは、ヒータによる熱負荷補償とアキュムレータによる圧力制御機構を組み合わせた方法を採用している。

水素循環ポンプ、アキュムレータ、ヒータ等の機器類は放射線による影響を避けるために減速材容器から約 20m 離れた人のアクセスできる場所に設置される。このため核発熱による動的負荷が加わった状態では、モデレータからヒータを経由して熱交換器までの配管内は暖められた流体で満たされた状態となるが、核発熱が消滅した状態においては暖められた流体の占める範囲がヒータから熱交換器の範囲に狭まる。系統内の圧力を陽子ビーム運転停止の前後で圧力を一定に保とうとすると、相対的にビーム停止時に核発熱分より大きな時間遅れを伴ったヒータ入力を必要とってしまう系の特性を有している。

アキュムレータはヒータ制御の欠点を補完する意味で本システムに不可欠な圧力制御機構であり、このような熱負荷変動を内部の圧力に応じて容積を可変化する構造が求められる。

3. 装置の特徴

前章に記載した通り、本システムの設計においては、水素循環ループ内の圧力を安定に維持することが重要な技術的課題である。この技術的課題に対して、アキュムレータによる圧力制御機構を設計製作することが、構造設計における大きな技術的課題であった。

また、可燃性である水素に対する安全性を十分に確保出来る構造設計も必須の技術的課題であり、これに対しては、不活性ガスのブランケット構造を採用している。

本章では、これらの技術的課題に対する設計結果について紹介する。また、本章の最後に、本システムで採用した制御システムについて説明する。

3.1 アキュムレータ

前述した通り、アキュムレータは容器内部の容積を、水素循環ループの圧力に応じて可変化する構造を持つ。Fig. 2 は、アキュムレータの圧力制御方法を概念化して示したものである。

閉空間の水素循環ループに及ぼされる熱負荷変動は、ループ内部の圧力変化として顕れる。熱負荷の増加は、ループ内部の圧力上昇となり、その場合、Fig. 2 における内部の境界が中立位置から上方へと移動、水素の空間容積を増加させる。熱負荷が減少した場合は、この逆となる。

この容積を可変化する構造により、水素循環ループ内の圧力は熱負荷変動に関わらず、一定に制御される。

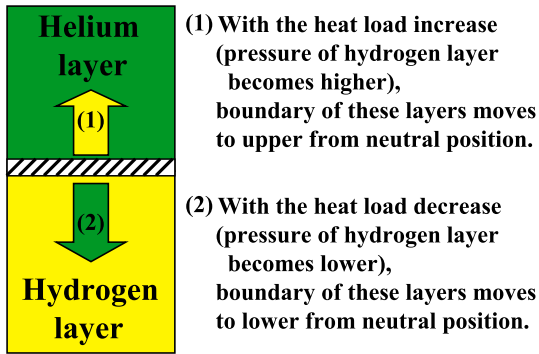


Fig. 2 Concept of pressure control by accumulator.

また、アキュムレータによる水素循環ループの圧力制御を維持するためには、境界によって仕切られた水素と反対側の空間の圧力を一定に保つ必要がある。つまり、水素の空間内の温度 (18~20K) においても凝縮しないガスが要求される。本システムのアキュムレータにおいて、反対側の空間にはヘリウムガスが封入されている。

Fig. 3は本システムにおいて製作されたアキュムレータの概略構造を示したものである。

アキュムレータは、後述するセーフティボックス内部に設置されており、極低温水素容器 (a)、極低温水素容器 (b) 内部に収納され、ヘリウム層を内包する内ベローズ、極低温水素容器連結された外ベローズ (c) により構成されている。

水素循環ループ内部の熱負荷変動は内ベローズの変位により吸収される。外ベローズは内ベローズの変位

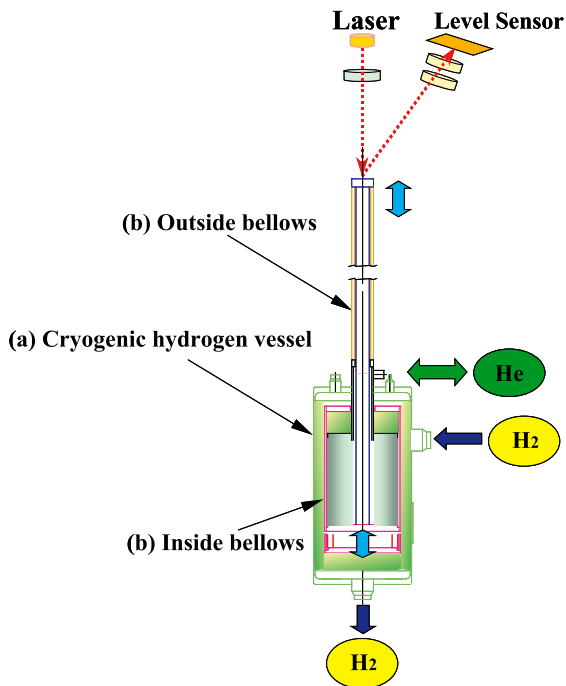


Fig. 3 Structure of accumulator.

を測定するために内ベローズと連動して変位する構造となっている。アキュムレータでは、外ベローズの上部位置を非接触式のレーザ変位計で測定することにより、断熱真空容器外部から変位量の検出を可能としている。この構造もアキュムレータの特徴の一つである。

3.2 ブランケット構造

本システムのブランケット構造の設計における基本思想は以下の通りである。なお、ブランケット構造とは、以下に述べる不活性ガスを封入した圧力容器を総称したものである。

- (1) 水素が漏洩した場合でも空気 (酸素) との接触による爆発性雰囲気を作らないため、ヘリウムや窒素の不活性ガスにより水素配管や機器を覆う。
- (2) 真空断熱容器は外部からの空気混入による低温配管表面への酸素凝縮を防止し、また、万が一、内部への水素漏洩と外部から内部への漏洩が同時発生した場合でも、空気 (酸素) との接触による爆発性雰囲気を作らないことを防止するため、真空層の外側を更にヘリウムを封入したブランケット構造で覆う。

安全装置 (安全弁、破裂板)、自動放出弁および計器類は、(1) の思想に従い、計装チェンバと呼ばれる圧力容器に収納される。

計装チェンバにおいて、一時的に 20K 近くの水素が流れる安全装置や放出弁を収納する計装チェンバ内は、非凝縮性のヘリウムガスを封入し、それ以外の計装チェンバ内は窒素ガスを封入している。

水素循環ループ内部の低温機器や低温弁は、(2) の思想により、真空断熱容器の外筒部にヘリウムを封入したブランケット構造を持った三重殻容器に収納される。この三重殻容器をセーフティボックスと呼ぶ。

Fig. 4にセーフティボックスの外部および内部写真を示す。セーフティボックスは外径が 2136 mm、高さが 2900 mm の円筒容器であり、この容器の中に低温機器や低温弁が収納されている。18~20 K の水素が循環するこれらの低温機器や配管は、多層断熱が施工されている。

セーフティボックスに対する (2) の基本思想は外筒容器部のみならず、シール部においても適用されている。Fig. 5はセーフティボックスの外筒フランジ部のシール構造の拡大を例示したものである。セーフティボックスの外筒フランジ部は、シール部を二重の O-リング構造とし、内側と外側の O-リングの間にヘリウムガスを導入している。

更に、セーフティボックスに設置される手動弁や自動弁の弁類に対しては、(1) の基本思想が反映されて

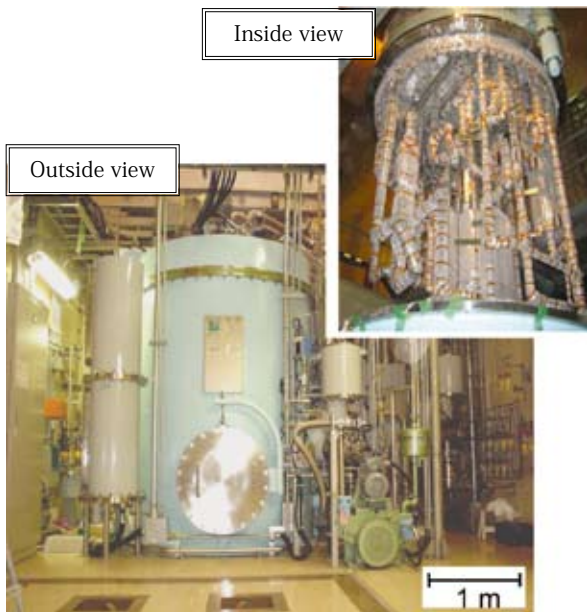


Fig. 4 Outside and inside view of SAFETY-BOX.

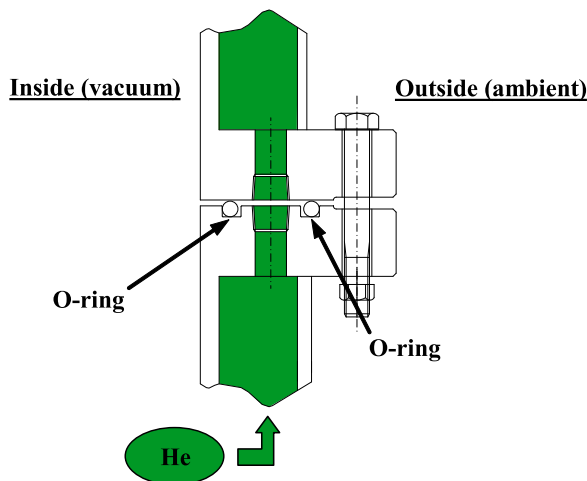


Fig. 5 Enlarged partial drawing of flange for outer shell of SAFETY-BOX.

いる。Fig. 6はセーフティボックスの弁の概略構造を示したものである。これらの弁にはベローズ弁を採用し、ベローズの内部にはヘリウムガスを導入している。

最後に、水素が漏洩した場合の検知方法について述べる。セーフティボックスの真空容器内部への水素漏洩は真空容器内部の真空圧力を常時監視し、併せて、真空容器内部の残留ガス成分も監視する。かつ、ブランケット層から真空容器内部への漏洩は、ヘリウムリークディテクタを装備しており、真空容器内部へのヘリウム漏洩量を監視する。

ブランケット構造内部は不活性ガスで加圧(0.05 MPa (gauge))した状態で封じ切り、内部の圧力を常時監視し、水素漏洩を検知する。

更には、水素機器が収容される建屋内には、水素ガス検知器を5台設置し、建屋内への外部漏洩濃度も常

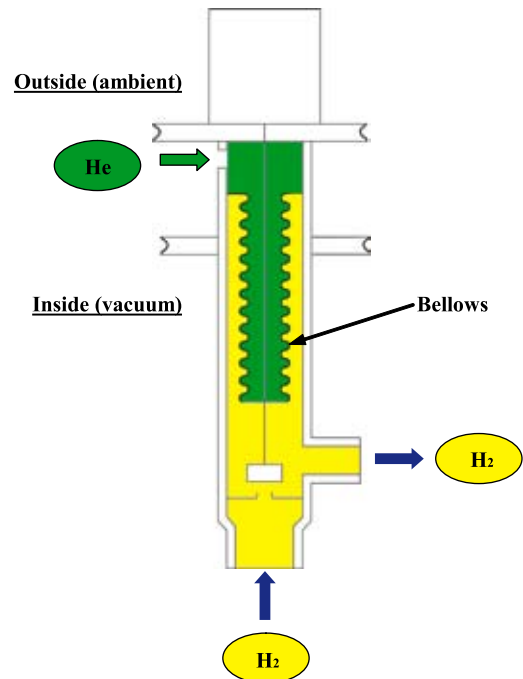


Fig. 6 Cross sectional sketch of bellows seal valve.

時監視している。

本システムでは、これら、真空圧力、ブランケット圧力、外部漏洩濃度が規定値を超えた場合は、本システム及び陽子ビームを直ちに停止させ、水素を建屋外に放出させるインターロック機能が動作し、水素漏洩の拡大を防止する安全システムが構築されている。

3.3 制御システム

Fig. 7に制御システムの構成図を示す。

本制御システムでは、制御系ソフトウェアとして当社のデジタル計装システム(De-MPICS)を採用し、マンマシンインターフェイスとしてFAPP for Win(ニッテツ北海道制御システム製)と当社のOPA(LabVIEW(ナショナルインストロメンツ製)をベースとして構築した監視・操作ソフト)を組み合わせ使用している。一方、ハードウェアは、Fig. 7に示す構成となっており、運転操作は、運転用コンピュータより行い、制御は、VME(VERSAmodule Eurocard)バスを使用した制御装置で行っている。

なお、本制御システムでは、制御装置と上位側の客先設備(以下、MLFと略す)監視システムとのインターフェイスを行うために制御装置をPLC(Programmable Logic Controller)経由でMLF監視システムであるMELSECNETに接続している。これにより、他の設備の運転状態に応じた陽子ビームの運転停止を含めた上位での一元管理がなされている。

本制御システム上では、今まで述べてきた各種機能を満足させるためのタービン発生寒冷制御、冷媒分配

制御, 液体窒素制御, 冷媒供給温度制御, アクムレータ制御, ヒータ制御を最適化した精製運転, 予冷運転, 定常運転, 昇温運転, 緊急放出運転を含む一連の全自動運転プログラムが構築されている。

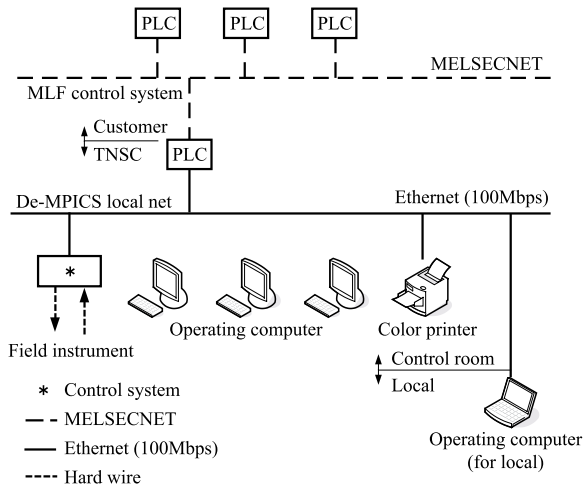


Fig. 7 Diagram of control system network.

4. 試運転結果

本設備の試運転は2008年2月から3月にかけて, システム全体の試験が実施され, 冷凍能力 (18Kにおいて5400W), 水素循環流量 (162g/s) 等の各性能について所定の仕様を満足していることを確認した。

アクムレータの動作試験結果の一例を Fig. 8 に示す。この試験では, ヒータの出口温度を一定とするヒータ制御を行った状態で, ヒータへ流入する水素温度を低下させた時の水素循環系各部の挙動を確認した結果である。ヒータへ流入する水素温度の低下とともに水素循環ループ内部の流体の容積は収縮し, アクムレータ位置も38mmから41mmへと変位している。その結果, 水素循環ループ内の圧力は, 外乱を与えた前後でも1.40MPa (gauge) から1.42MPa (gauge) の変動の範囲内で安定して維持されている。

5. まとめ

当社の試運転に引き続き, 日本原子力研究開発機構では, 本設備を含む全体設備の総合試験を実施し,

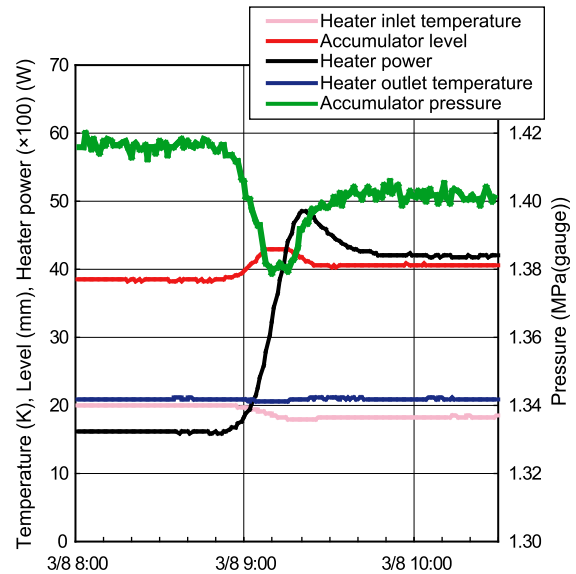


Fig. 8 Pressure stability test result in cryogenic hydrogen system.

2008年5月30日に初ビームを入射, 設備内において, 冷中性子の生成が確認された。

現在, 2008年12月からの共用開始に向け, ビーム入射試験を実施中である。

謝辞

本設備の基本設計, 建設そして試運転に至るまで, 多くの御指導や御協力を頂いた日本原子力研究開発機構の多くの関係者の方々, 特に, 中性子源セクションの方々には, 感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤崇. 原子核研究. 50 (4), 49-50 (2006).
- 2) 加藤崇, 麻生智一, 達本衡輝, 長谷川勝一, 大都起一. 低温工学. 42 (8), 244 (2007).
- 3) 加藤崇, 麻生智一, 達本衡輝, 長谷川勝一, 大都起一. 低温工学. 42 (8), 255-256 (2007).
- 4) Robert, D. M. Hydrogen: Its Technology and Implications Hydrogen Properties Volume III. Florida, CRC PRESS, 1975, 20.
- 5) 肥後盛長, 深野隆. 日本酸素技報. (7), 28-29 (1988)
- 6) Kato, T. et al. *Advances in Cryogenic Engineering*. 51, 763-770 (2006).
- 7) Robert, D. M. Hydrogen: Its Technology and Implications Hydrogen Properties Volume III. Florida, CRC PRESS, 1975, 123.