研究論文

J-PARC 中性子源用低温水素システムの動的特性

達本 衡輝^{*,†}, 麻生 智一^{*}, 加藤 崇^{*}, 大都 起一^{*}Dynamic Characteristics of the Cryogenic Hydrogen System
for a Spallation Neutron Source at J-PARCHideki TATSUMOTO^{*,†}, Tomokazu ASO^{*}, Takashi KATO^{*} and Kiichi OOTSU^{*}

Synopsis: Material or biological structures are analyzed through cold neutron beam scattering experiments at the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at J-PARC. The high-energy MeV-order neutrons, which are produced via a spallation reaction between 3-GeV protons and the mercury nucleus, are moderated to cold neutrons with MeV-order energy by passing them through a supercritical hydrogen moderator. The cryogenic hydrogen system provides the supercritical hydrogen to a pressure of 1.5 MPa and temperature of approximately 20 K and removes the energy (nuclear heating), which is estimated to be 3.75 kW for a proton beam power of 1 MW. A kW-order heat load such as this is applied to the cryogenic hydrogen system as a step load. Therefore, to mitigate pressure fluctuation caused by the load, a pressure control system is a necessary requirement. Accordingly, a control system was designed and installed, using a heater as an active controller for thermal compensation and an accumulator as a passive volume controller. During operations at J-PARC, changes in pressure caused by operation of a 120-kW and a 302-kW proton beam were studied. When the proton beam was supplied, the pressure continuously increased until the heater control started, after which the accumulator spontaneously constricted. The heater control maintained a constant temperature downstream of the heater without any thermal disturbance. It was confirmed that the pressure control system was effective in mitigating the pressure fluctuation caused by the load. A simulation code was also developed and the pressure rise behavior and the accumulator variation were studied. The simulation results indicated good agreement with the experimental data within 10%. The pressure rise behavior and the accumulator variation were proportional to the proton beam power. The pressure fluctuation for a 1-MW proton beam was predicted to be 33.9 kPa, which was lower than the allowable pressure rise of 0.1 MPa, and produced an accumulator variation of 11.35 mm. We believe that the pressure control system is effective for use with the operation of a 1-MW proton beam.

Keywords: supercritical hydrogen, pressure fluctuation, cryogenic hydrogen system, spallation neutron source

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）の共同プロジェクトである大強度陽子加速器研究施設（Japan Proton Accelerator Research Complex: J-PARC）¹⁾の建設が2001年より開始され、2008年度末に完成した。J-PARCは、陽子加速器（リニアック、3 GeV シンクロトロン（1 MW）、50 GeV シンクロトロン（0.75 MW））からの陽子ビームを各標的原子核に入射させ、核破砕反応により発生した二次粒子（中性子、

ミュオン、ニュートリノ、K 中間子、 π 中間子等）を利用して、中性子散乱実験、ミュオン実験、ニュートリノ実験、ハドロン実験を行う総合的科学実験施設である。

中性子散乱実験を行う施設である物質・生命科学実験施設（MLF）では、陽子ビーム（陽子エネルギー3 GeV、定格強度1 MW）が、水銀ターゲットに入射し、発生した高速中性子が減速材（モデレータ）である超臨界圧水素（1.5 MPa、20 K 以下）と繰り返し衝突することにより減速し、冷中性子に変換される。J-PARC では、中性子散乱実験の要求に応じて、水素モデレータは3種類用意されている。結合型モデレータ（CM）は強度が最も高い冷中性子パルスを提供するもので、中性子ビームライン23本中11本のビームラインに配分され、最も多くの実験に使用される。そして、非結合型（DM）及びポイズン付モデレータ（PM）はそれぞれ強度を犠牲にして冷中性子パル

Received January 21, 2010

* 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: tatsumoto@post.j-parc.jp

スの幅を狭くし、シャープなパルスを供給する。これらは、それぞれ 6 本のビームラインに配分され高分解能が必要とされる実験に使用される。1MW 陽子ビーム時のモデレータ内で発生する核発熱はモデレータ 3 台の合計で 3.75 kW と評価されている²⁾。

これらのモデレータで冷中性子を効率よく安定に発生させるためには、モデレータへの供給水素温度は 20 K 以下で、パラ水素濃度 99%以上を維持させなければならず、なおかつ、中性子による発熱を吸収する際の密度変動を抑えるためにモデレータの出入口温度差を 3 K 以内にする必要がある。そこで、低温で駆動する遠心ポンプにより、大流量の 1.5 MPa の超臨界圧水素を強制循環させ、3 台のモデレータに約 18 K の超臨界圧水素を供給するとともに、そこで発生する核発熱(3.75 kW)を吸収し、ヘリウム冷凍機により冷却する低温水素システムを開発した³⁾。低温水素システムは、2007 年の 11 月に現地据付工事が完了し、その後、半年間の低温試験により^{4, 5)}、設計通りの性能を確認し、さらに、安定な冷却運転方法を確立した⁶⁾。その結果、2008 年 5 月 30 日、J-PARC で初めて核破砕パルス中性子の発生に成功した⁷⁾。以降、陽子ビーム出力は段階的に上昇され、2009 年 11 月から 120 kW の安定な陽子ビーム運転が実施されている。さらに、12 月には、短時間ではあるが、初めての 300 kW 陽子ビーム運転に成功した。

ここでは、陽子ビーム入射時における低温水素システムの圧力、温度の動的挙動試験結果、および、数値解析による圧力変動評価について報告する。

2. 低温水素システム

Fig. 1 に低温水素システムの概要を示す。低温水素シス

テムは、ヘリウム冷凍機の冷却端に水素循環システムが熱交換器を介して接続される二元冷凍サイクルを構成している。

水素循環システムでは、3 基のモデレータに入口温度約 18 K の超臨界圧水素を供給するために、モデレータへの水素供給流路は並列流路を採用した。また、水酸化鉄触媒のオルソ・パラ水素変換器を設置し、パラ水素濃度 99%以上にして中性子の減速を効率よく行えるようにした。さらに、モデレータ出入口温度差を 3 K 以下にするために、162 g/s 以上の安定な循環流量が得られる遠心ポンプを開発した。

水素循環ポンプの軸受けには、動圧ガス軸受け方式を採用した。本ポンプでは安定なガス膜を形成するために、30,000 rpm 以上の回転数が必要であり、ポンプの最大回転数は 60,000 rpm である。許容ポンプヘッドは 0.1 MPa である。また、冗長性をもたせるためにポンプ 2 台の並列運転を行い、1 台が停止した場合でも、もう 1 台のみで定格流量が得られ、運転継続が可能になっている。定格運転時には、回転数を 40,000 rpm とし、ポンプ 2 台の並列運転により、必要流量以上の約 200 g/s の循環流量が得られている。このときのポンプヘッドは 56 kPa であり、ポンプ吐出圧力は 1.556 MPa である。また、ポンプの 2 台並列運転により、室温付近においても十分な循環流量 (3.2 g/s) が得られるため、初期冷却時には、室温から水素を循環させて冷却することが可能である⁶⁾。

水素循環システムは、非圧縮性の性質を有する超臨界圧水素 (1.5 MPa、20 K 以下) が強制循環する閉ループを形成しているため、陽子ビームの入射、停止に伴う急峻な熱負荷変動に起因する圧力変動は大きくなる。そのため、低温水素システムでは、ヒータによりモデレータで

Fig. 1 Schematic view of the cryogenic hydrogen system for the J-PARC spallation neutron source.

の熱負荷変動 3.75 kW を補償し、かつ、圧力変動に応じて水素ループの容積を変化させられるベロー構造を有するアキュムレータを併用し、応答性の速い圧力制御が行えるシステムとした。詳細は後述する。

1 MW 陽子ビーム運転時において水素循環システムに与えられる熱負荷²⁾は、4.62 kW (モデレータ部における核発熱: 3.75 kW、熱侵入: 0.87 kW) と見積もられ、ヘリウム冷凍機の冷凍能力はマージンを見込んで 6 kW @17 K と定めた。ヘリウム冷凍機は、1 台のタービン膨張機(定格回転数: 2470 rps)、3 台の熱交換器から構成されており、補助寒冷として液体窒素を利用している。圧縮機の吸入、吐出圧力は、それぞれ、0.3 MPa、1.68 MPa であり、定格状態において、ヘリウムガスの循環流量は 260 g/s である。水素循環システムへのヘリウム供給温度 (T21) は、16.5 K に供給ラインに設置したヒータ (8 kW) により直接制御できる。水素循環システムと熱交換したヘリウムガス (20 K) は、膨張タービンに導かれ、断熱膨張によりタービン出口温度は 12.7 K まで低下する。水素-ヘリウム熱交換器内で漏洩が生じた場合、水素系からヘリウム系への漏洩を極力少なくするために、この熱交換器でのヘリウム系圧力 (1.66 MPa) を水素循環システムの圧力 (ポンプ吐出圧力: 1.56 MPa) より高い状態にすることにした。したがって、水素循環システムの定格運転時における許容圧力上昇は 0.1 MPa である。

安全対策のため、低温水素システムは、水素を内包する領域は、全てブランケット構造と呼ばれるヘリウムガス層の外層で包まれている。これは万が一、水素が漏洩した場

合でも水素と空気との混合を防ぎ、水素の燃焼を防ぐものである。また、緊急時には、インターロックにより、水素は、放出ラインを通じてスタックより外気へ希釈放出される。

3. 陽子ビーム入射・停止時の圧力制御方法

陽子ビームの入射、停止時における kW オーダーのステップ状の熱負荷変動に対する圧力変動制御が、低温水素システムにとって重要な課題であった。低温水素システムは、超臨界圧水素 (約 20 K) が強制循環する閉ループを形成しており、かつ、臨界温度 33 K 以下の超臨界圧水素は、非圧縮性の性質が強いため、モデレータ部における温度変動に起因する密度変化により、大きな圧力変動が引き起こされるからである。本システムでは、圧力変動に対して、ベロー構造を有するアキュムレータにより超臨界圧水素ループの容積を変動させる方法とモデレータで与えられる熱負荷をヒータにより補償する方法を併用した圧力制御システムを考案した。

Fig. 2 にアキュムレータの概要図を示す。低温水素システムのアキュムレータとは、ベロー構造を利用した容積可変容器を非圧縮性の性質を有する超臨界圧水素ループに内包したものであり、このベロー容器内には、20 K 領域においても圧縮性の性質を有するヘリウムガス (圧力は水素ループとほとんど同じ) が封じ込められている。水素ループの圧力が上昇するとヘリウムガスの圧縮性によりベロー容器が縮むため、水素ループの容積が膨張し、その結果、圧力上昇が自発的に抑えられる機構となっている。

Fig. 2 Structure of the accumulator.

このベロー容器には、溶接ベロー（設計圧力：2.1 MPaG）を採用し、その最大容積変化量は 15.7 L である。これは、90.5 mm のベローの変位量に相当している。このベローの変位を計測するために、設計圧力 2.1 MPaG の成型ベロー容器（内径 59 mm、自然長 1210 mm）を真空層内に設置し、Fig. 2 (a)に示すように、溶接ベロー容器と長さ 2200 m の固定シャフトで連結した。この成型ベローの長さは、ベローの作動差圧が 0.1 MPa 以内にするように決定した。また、水素側とヘリウム側で作動差圧以上の圧力差が発生した場合でも、ベローが許容変位量以上に变形しないように上部と下部にストッパーを設置している。例えば、Fig. 2 (a)は、水素側の圧力がヘリウム側の圧力より高い状態で、溶接ベローが縮みきって、上部ストッパーで固定されている状態を表している。

また、ベローの伸縮に伴うヘリウム領域の圧力変動を緩和するために、Fig. 2 (b)に示すように、常温部に容積 400 L のバッファタンクを設けた。さらに、ベローの伸縮に伴うヘリウムガスの流動による熱的不安定性を抑制するために、アキュムレータ容器外側に 10 L の低温バッファを設け、かつ、低温部と常温バッファタンクは、口径 23.2 mm、長さ 22 m の配管で繋ぎ、そのうち、1 MW 陽子ビーム入射時における予測変動量（2.0 L）の 4 倍の容積に相当する 20 m 部分は真空層に設置した。

一方、安定に約 4 kW という大容量の熱負荷を超臨界圧水素に与えるためのヒータとして、Fig. 3 に示すオリフィス型ヒータを開発した⁸⁾。超臨界圧水素は、ヒータ容器底部から上向きに流れ、流れ方向と並行に $\phi 12$ mm のシースヒータが Fig. 3 に示すように配置されている。流れ方向には、100 mm 間隔でバッフル板が設置され、シース

Fig. 3 Structure of the heater.

ヒータ径より大きい $\phi 16$ mm のオリフィスを有する。超臨界圧水素がこのオリフィス部を通過する際、攪拌効果により、シースヒータ表面に形成された温度境界層が乱されるため、熱伝達が向上する。設計値である 5 kW の熱負荷を与えた場合でも、シースヒータの表面温度は、最大で 23.8 K であり、圧力損失も 1 kPa 以下であることを数値解析により確認している。

Fig. 4 に陽子ビーム入射時におけるヒータとアキュムレータを併用した圧力制御方法を示す。熱交換器の冷端温度 (T01) が 18 K、循環流量が 190 g/s の場合、陽子ビーム停止時のヒータ入口温度 (T05) は、侵入熱により 18.3 K まで上昇する。ヒータ出口温度 (T06) を 20.9 K に保持するように、ヒータ出力は PID 制御される。この場合、ヒータによる熱負荷は、核発熱より大きい 4.3 kW である。1 MW の陽子ビームが入射されると、モデレータ部では 3.75 kW の核発熱を吸収するために温度が上昇し、それが流速に乗って下流側のヒータ部まで移動する。この温度上

(a) When proton beam is turned off.

(b) When proton beam is turned on.

Fig. 4 Pressure control system using the heater and the accumulator.

昇に伴う体積膨張分は、アキュムレータの自発的な収縮によって吸収される。ヒータ入口 (T05) で、0.2 K 以上の温度上昇を検知すると、核発熱量相当のヒータ出力を瞬時に降下させる。その後、ヒータ出力は、ヒータ出口温度 (T06) を陽子ビーム入射前と同じ 20.9 K に保持するように、PID 制御により調整され、熱負荷変動予測値と実際に印加された熱負荷との補正を行う。このようにダイナミック制御と PID 制御を組み合わせるヒータ制御を実施する。一方、陽子ビーム停止時も同様に、ヒータ入口 (T05) で 0.2 K の温度降下を検知すると、瞬時に、陽子ビーム熱負荷に相当のヒータ出力を増加させ、かつ、ヒータ出口温度 (T06) を 20.9 K 一定に保つ PID 制御を行う。陽子ビーム入射・停止時に、このようなダイナミックなフィードフォワード制御と PID 制御によるフィードバック制御を組み合わせたヒータ制御とアキュムレータによる容量制御により、ヘリウム冷凍機への熱負荷は一定に保たれ、kW 級のステップ状の熱負荷に対しても低温水素システムの安定な運転が確保できる。

4. 陽子ビーム入射時における圧力変動試験

4.1 圧力変動試験方法

120 kW、および、300 kW の陽子ビーム入射時に上述の圧力制御を行った場合の水素ループの温度、圧力変動を測定した。このとき、モデレータ部でのステップ状の熱負荷は、それぞれ 456 W、1140 W と見積もられる。約 1.5 MPa の超臨界圧水素を流量 190 g/s で循環させ、各モデレータ (CM、PM、DM) への供給流量は、ほぼ同じ流量 (61.3 g/s、62.8 g/s、59.7 g/s) とし、バイパス流量を 6.2 g/s とした。ヒータ出口温度 (T06) は、PID 制御により、常に 20.9 K に保持した。アキュムレータの変動はレーザ変位計により計測し、初期のアキュムレータレベルは、ほぼ中心位置である 45 mm 近傍に調整した。ベローが伸びると、変位量が増加する方向に動き、完全に収縮した状態は 0.0 mm、伸びきった状態は 90.5 mm となる。アキュムレータの最大変動容積は 15.7 L である。

120 kW 陽子ビーム運転時の熱負荷は比較的小さいため、液体窒素を補助寒冷として使用しないスタンバイ運転モードでヘリウム冷凍機を運転した。水素供給温度 (T01) は 19.56 K であり、ヒータによる定常熱負荷は 1870 W 程度であった。ヒータ制御として PID 制御のみの場合と核発熱相当 (450 W) の熱負荷を瞬時に変動させるダイナミック制御と PID 制御を併用した場合の水素ループの温度、および、圧力の動的挙動を測定した。

一方、300 kW 陽子ビーム運転の場合は、補助寒冷である液体窒素を使用した定格運転モードでヘリウム冷凍機を運転した。このときの水素供給温度 (T01) は 17.85 K であり、ヒータによる定常熱負荷は約 4500 W であった。300 kW 陽子ビーム運転時の熱負荷は 1190 W と大きいので、

ダイナミック制御と PID 制御を併用したヒータ制御を行った。

4.2 120 kW 陽子ビーム時における圧力変動

Fig. 5 に 120 kW 陽子ビーム入射時に、PID 制御のみのヒータ制御を行った場合の温度、圧力、ヒータ、および、アキュムレータの挙動を示す。陽子ビーム入射前、アキュムレータは変動中心位置である 45.75 mm であり、このときの水素ループ、および、ベロー内ヘリウムガスの圧力は、それぞれ 1.519 MPa、1.530 MPa であった。

陽子ビーム入射から 23 秒後にヒータ出口温度 (T06) が上昇したため、PID 制御により、ヒータ出力は、徐々に降下した。PID 制御は、モデレータ部で核発熱を吸収した超臨界圧水素が、ヒータ部を通過した後に開始するので、ヒータ出口温度 (T06) は、最大で 21.11 K まで上昇した。

Fig. 5 Temperatures, pressures, heater power, and accumulator level using only the PID heater control for 120-kW proton beam injection.

この余剰熱負荷の影響により、供給温度 (T01) も上昇したが、その温度上昇は、ヒータ出口 (T06) の温度上昇より小さく、0.08 K であった。その影響で、ヒータ出力は、一時的に 1382.8 W まで降下したが、陽子ビーム入射から 10 分後には、ヒータ出口温度 (T06)、および、供給温度 (T01) は、PID 制御により、それぞれ初期値である 20.94 K、19.56 K に戻った。このときのヒータ出力は 1430 W であり、陽子ビーム入射前後における最終的な変動値は、443 W であった。

一方、水素ループの圧力 (P1) は、陽子ビーム入射直後から上昇し、モデレータ部で核発熱の吸収により膨張した超臨界圧水素は、流速に乗って移動するため、圧力は連続的に上昇する。アキュムレータは、その圧力変動を吸収するために、自発的に収縮し、その結果、アキュムレータ内部のヘリウムガス圧力 (P2) も上昇した。ヒータ下流域で温度が一時的に上昇するため、圧力はさらに上昇し、その影響がヒータ入口にまで及んだとき、圧力 (P1) は、最大 1.534 MPa まで上昇した。このときの最大圧力変動は 15 kPa であり、アキュムレータ変動は 2.7 mm (0.47 L の容積変動量に相当) であった。以降、ヒータ下流域での温度分布は、ヒータの PID 制御により、陽子ビーム入射前の状態に戻ったが、水素ループの圧力 (P1) は、1.522 MPa までしか下がらず、最終的な圧力変動は、3.5 kPa となった。また、このときのアキュムレータ変動量は、1.35 mm (0.235 L に相当) であった。このように、PID 制御のみのヒータ制御では、ヒータ下流域における一時的な温度変動により、定常状態の約 4 倍に相当する圧力変動が発生した。したがって、水素ループ内の圧力変動を抑制するためには、陽子ビーム入射後においてヒータ下流域の過渡的な温度変動をできるだけ小さくすることが必要であることがわかった。

Fig. 6 に PID 制御とダイナミック制御を併用したヒータ制御を行った場合の 120 kW 陽子ビーム入射時における温度、圧力、ヒータ、および、アキュムレータの挙動を示す。陽子ビーム入射から 18 秒後に、ヒータ入口温度 (T05) は上昇し、27 秒後には、0.2 K の温度上昇を検知したため、ダイナミック制御により、陽子ビーム熱負荷に相当する 445 W のヒータ出力を瞬時に降下させた。その後、ヒータ出口 (T06) の温度変動はほとんどなく、PID 制御により、20.94 K 一定に制御できた。また、供給温度 (T01) の温度変動もみられなかった。

陽子ビーム入射と同時に圧力 (P1) は上昇するが、アキュムレータの自発的な収縮により、その圧力上昇は緩和されている。この圧力上昇とアキュムレータの収縮は、ヒータのダイナミック制御が開始されるまで継続し、圧力 (P1) は、1.525 MPa まで上昇し、アキュムレータは 44.01 mm まで収縮した。それ以降、圧力の変動はなく、安定に制御できた。このときの圧力上昇、および、アキュ

Fig. 6 Temperatures, pressures, heater power, and accumulator level using the dynamic control and the PID heater control for 120-kW proton injection.

ムレータの収縮量は、それぞれ 3.5 kPa、1.35 mm であり、PID 制御のみの場合の定常時の値と同じである。

ステップ状熱負荷が水素ループ内に与えられても、フィードフォワード制御であるダイナミック制御とフィードバック制御である PID 制御を併用したヒータ制御により、ヒータ下流域における温度変動が抑制され、その結果、過渡的な圧力変動が与えられることなく、短時間で安定した状態を得ることができた。

4.4 300 kW 陽子ビーム時圧力変動

Fig. 7 に 302 kW 陽子ビーム入射時における温度、圧力、ヒータ、アキュムレータの挙動を示す。302 kW 陽子ビームが入射されると、水素ループの圧力 (P1) は上昇し、

Fig. 7 Temperatures, pressures, heater power, and accumulator level using the dynamic control and the PID heater control for 302-kW proton injection.

アキュムレータも収縮し、これらの変動は、ヒータのダイナミック制御が開始されるまで継続した。27 秒後、ヒータ入口 (T05) で 0.2 K の温度上昇を検知したので、ダイナミック制御により、陽子ビーム熱負荷に相当する 1013 W のヒータ出力を降下させた。ヒータ出口温度 (T06) が一時的に 20.85 K まで降下したが、PID 制御により、15 秒以内に初期値まで回復した。それ以降、ヒータ出口温度 (T06) は一定に制御されたが、ダイナミックヒータ制御の後、圧力、および、アキュムレータの挙動に、それぞれ 2.7 kPa、0.6 mm の僅かなオーバーシュートがみられた。それらの変動は約 500 秒後に収束した。302 kW 陽子ビーム入射時の最終的な圧力上昇は 12 kPa、アキュムレータ収縮量は 3.16 mm となった。Fig. 8 に、302 kW 陽子ビーム入射前後におけるヘリウム供給温度 (T21)、ヘリウム

Fig. 8 Temperatures, valve opening and heater power in the helium refrigerator.

冷凍機の熱交換器 (HX2) の冷端温度 (T22)、冷凍機ヒータ出力、および、液体窒素供給弁開度 (TCV1002) の変化を示す。液体窒素を補助寒冷として使用した場合、液体窒素供給弁 (TCV1002) 開度は、熱交換器 (HX2) 冷端温度を 79 K 一定に保持するように制御される。また、ヘリウム供給温度 (T21) は、冷凍機ヒータにより、16.4 K に保持される。しかし、液体窒素供給弁制御により熱交換器冷端温度 (T22) が上昇したため、ヘリウム供給温度 (T21) は、冷凍機のヒータ制御の時間遅れにより、0.12 K 上昇した。その結果、水素供給温度 (T01) も上昇し、Fig. 7 に示すような水素ループの圧力、および、アキュムレータの僅かなオーバーシュートが生じたと考えられる。したがって、PID 制御とダイナミック制御を併用したヒータ制御とアキュムレータによる容量制御により、ステップ状の熱負荷が水素ループに与えられた場合の圧力変動を短時間で制御できることがわかったが、ヘリウム冷凍機の液体窒素供給弁制御が低温水素システムの安定化に向けた課題であることが明らかになった。

120 kW、300 kW 時における各モデレータでの核発熱量を各モデレータへの供給流量、および、温度上昇から評価した。その評価結果をそれぞれ Table 1、および、Table 2 に示す。モデレータでの核発熱は、12 桁に及ぶエネルギー範囲に適用できる全ての粒子と原子核の物質中の輸送と核反応を評価できる 3 次元モンテカルロシミュレーションコード (PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System) で予測した²⁾。1 kW 陽子ビームあたりの DM、PM、CM の各モデレータ内での核発熱予測値は、それぞ

Table 1 Nuclear heating for operation of a 120-kW beam

	ΔT (K)	Flow (g/s)	$\dot{Q}$ (W)	q (W/kW beam)
DM	0.21	60.79	112.55	0.923
PM	0.24	62.34	133.74	1.096
CM	0.35	59.61	186.90	1.532
Total	0.26	189.46	433.19	3.551

Table 2 Nuclear heating for operation of a 302-kW beam

	ΔT (K)	Flow (g/s)	$\dot{Q}$ (W)	q (W/kW beam)
DM	0.58	61.15	283.84	0.923
PM	0.62	62.72	312.24	1.034
CM	0.94	59.73	458.97	1.520
Total	0.69	189.92	1055.07	3.494

れ、0.986 W、1.026 W、1.739 Wである²⁾。測定結果と比較すると、DM、CMでの核発熱は、予測値より、わずかに大きく、PMでは、小さかったが、測定結果に対して12%以内で一致することを確認した。

5. 陽子ビーム入射時における圧力変動解析

1 MW 陽子ビーム運転時における低温水素システムの安定な運転方法を確立するために、水素ループ、および、アキュムレータを簡略化したモデル化を行い、陽子ビーム入射後の定常状態における水素ループの圧力変動、および、アキュムレータの変動量を評価した。

5.1 解析モデル、および、解析方法

Fig. 9 に解析モデルを示す。熱負荷に基づく温度分布より、水素ループは、主に、熱交換器からモデレータ入口までの領域 (V_I)、モデレータからヒータ出口までの領域

Fig. 9 Analytical model.

(V_{II})、および、ヒータ出口から熱交換器までの領域 (V_{III}) の3つの領域に分割することができる。各モデレータから合流ヘッダまでの領域では、戻り温度が各モデレータの核発熱量と供給流量に依存し、合流ヘッダからヒータ入口まではそれらが混合した温度分布となるため、領域 V_{II} の領域は Fig. 9 に示すように、さらに細分化を行い、それぞれの代表温度は、Table 1、および、Table 2 に示す流量と核発熱量から求めた。さらに、ヒータ内部の温度分布の影響を考慮するため、ヒータ領域 (17.58 L) を 10 分割し、ヒータ内の温度分布は線形であると仮定し、それぞれの代表温度を求めた。ただし、本解析では、水素ループの熱侵入による温度上昇は考慮しなかった。

領域 V_{III} には、容積可変のアキュムレータが設置されている。ペローが伸びきった状態でのアキュムレータの水素側、ヘリウム側の容積は、それぞれ 63.6 L、110.3 L であり、ペローの最大可変容積は 15.7 L とした。ペロー内のヘリウムガスは、Fig. 2 に示すように、アキュムレータ容器外側の低温バッファ (10 L) を通り、真空容器内に設置した内径 23.2 mm、長さ 22 m 配管による常温-低温間のバッファ領域を介して常温部に設置したヘリウムバッファタンク (400 L) に接続されている。そのため、本解析モデルでは、常温のヘリウムバッファタンク (V_a)、低温-常温間の連結配管領域 (V_b)、および、ヘリウムガス領域を 20 K 領域であるペロー部と低温バッファの領域 (V_c) の3つの領域に分割した。領域 V_c の代表温度 (T_c) は、 V_{III} と同じ値 (T_{III}) を使い、 V_a の代表温度 (T_a) は 300 K とした。 V_b は真空層内にあるため、代表温度 (T_b) は、20 K と 300 K 間のヘリウムの密度の積分平均値に相当する 77 K とした。

水素ループの初期温度は、 V_I 、 V_{III} 領域の測定データに基づき、それぞれ、 $T_I=17.85$ K、 $T_{III}=20.9$ K とした。 V_{II} の各領域の初期温度は Fig. 9 中に示している。水素ループの初期圧力は、1.478 MPa、とし、アキュムレータの初期レベルは 57.1 mm とし、その中のヘリウムガスの圧力は、1.499 MPa とした。

まず、初期温度、および、圧力から陽子ビーム入射前の各領域の密度と容積から、水素ループ、および、ヘリウム領域の初期重量を求めた。陽子ビーム入射後、モデレータからヒータ入口の温度は、熱負荷により上昇するため、各モデレータでの核発熱量、および、供給流量から、陽子ビーム出力に相当する温度上昇を求めた。陽子ビーム入射前後で、質量は保存されるため、ある任意の圧力における水素ループ、および、ヘリウム領域の容積変動量を求め、反復法により、これらが等しくなるまで、圧力を変化させて計算を実施した。

Fig. 10 に水素とヘリウムの圧力差に対するアキュムレータレベルを示す。アキュムレータの駆動には、水素とヘリウム間の圧力差が必要であり、差圧に比例してペローが収

Fig. 10 Effect of the pressure difference on the accumulator level.

縮するため、アキュムレータレベルは小さくなる。ペローを 1 mm 収縮させるためには、0.81 kPa の差圧が必要である。本解析では、各計算ステップにおいて、水素の圧力とその変動容積からヘリウム側の圧力補正を行った。

5.2 解析結果

陽子ビーム出力に対する水素ループの圧力上昇、および、アキュムレータの収縮量の解析結果を **Fig. 11** に示す。また、120 kW、302 kW 陽子ビーム運転時だけでなく、20 kW、48 kW 陽子ビーム運転時の実験結果も同図に示している。循環流量、および、モデレータへの供給流量が同一であれば、圧力上昇、および、アキュムレータ変動量は、陽子ビーム出力に比例して大きくなる。解析結果と実験結果は 10%以内で一致し、陽子ビーム入射時における定常状態の圧力上昇、および、アキュムレータ収縮量は、本解析モデルにより予測できることがわかった。解析結果から、1 MW 陽子ビーム運転時における水素ループの圧力上昇は 33.9 kPa、アキュムレータ収縮量は 11.35 mm (2.01 L に相

Fig. 11 Predicted pressure rise and accumulator variation according to the proton beam power.

当) と予測され、圧力変動は、許容値である 0.1 MPa 以内に抑えられ、かつ、アキュムレータ変動量も最大変動量 (± 7.8 L) の 30%以内であることがわかった。

PID 制御のみのヒータ制御の場合、ヒータ下流域の僅かな温度上昇により、一時的に大きな圧力上昇が引き起こされることがわかった。その温度上昇が流速に乗って移動し、ヒータ入口部まで到達した時、その圧力上昇は最大となった (**Fig. 6** 参照)。また、ダイナミック制御と PID 制御を併用した場合でも、予測ヒータ出力変動値と実際のモデレータでの核発熱に差異が生じた場合、ヒータ下流域の温度が上昇し、過渡的な圧力上昇が引き起こされる可能性がある。低温水素システムでは、前述したように、水素-ヘリウム熱交換器内で漏洩が生じる場合を想定して、この熱交換器のヘリウム系圧力を水素ループの圧力より 0.1 MPa 高い状態に保つことにより、水素系からヘリウム系への漏洩を極力少なくする対策を施している。そのため、陽子ビーム入射時における水素ループの一時的な圧力上昇は 0.1 MPa 以下に保持しなければならない。そこで、本解析モデルを用いて、ヒータ下流域における許容温度上昇を評価した。本解析では、ヒータ出口からヒータ入口の温度、すなわち、 V_{III} 、 V_I 、 $V_{II-A} \sim V_{II-D}$ の領域の温度が、陽子ビーム入射後の温度分布に対して、さらに一様に 0.1 K、0.3 K、0.52 K、0.7 K 上昇した場合の圧力上昇を求めた。

Fig. 12 にヒータ下流域の温度上昇 (ΔT) によって生じる水素ループの圧力上昇を示す。陽子ビーム出力が大きくなると、圧力上昇は大きくなり、ヒータ下流域の温度上昇 (ΔT) が大きくなると、圧力上昇は大きくなる。解析結果により、1 MW 陽子ビーム運転時には、ヒータ下流域の許容温度上昇は 0.52 K であることがわかった。

Fig. 12 Pressure rise caused by a temperature rise downstream of the heater.

6. まとめ

陽子ビームの入射・停止時に発生する kW オーダーのステップ状の熱負荷変動により、超臨界圧水素が強制循環する閉ループに生じる圧力抑制方法として、ヒータ制御による熱負荷補償とアキュムレータによる水素ループの容積変動制御を併用した圧力制御システムを開発した。120 kW、300 kW 陽子ビーム入射時における温度、圧力の変動を測定し、圧力制御システムの動的特性を評価した。

(1) 陽子ビーム入射直後、圧力は上昇し、それと同時に、アキュムレータも収縮した。122 kW 陽子ビーム運転時において、PID 制御のみのヒータ制御を行った場合では、モデレータ部での核発熱を吸収した超臨界圧水素が、ヒータを通過した後、PID 制御が開始するため、ヒータ下流域において温度が上昇し、その結果、15 kPa の圧力変動のオーバーシュートが発生した。安定な温度分布、圧力分布に至るまで 10 分を要し、その時の圧力上昇は 3.5 kPa であった。

(2) 120 kW 陽子ビーム運転時において、ダイナミック制御と PID 制御を組み合わせたヒータ制御を行った場合、陽子ビーム入射前後でヒータ下流域における温度変動はなく一定に保持された。その結果、圧力変動のオーバーシュートも発生せず、時間の遅れなく、安定な圧力制御を行うことができた。このときの圧力上昇は、PID 制御のみの最終的な圧力上昇と同じ 3.5 kPa であった。

(3) 302 kW 陽子ビーム入射時においても、PID 制御とダイナミック制御により、ヒータ出口温度はほとんど一定に保つことができた。302 kW 陽子ビーム入射時の圧力上昇は 12 kPa であり、そのときの、アキュムレータ収縮量は 3.16 mm であった。

(4) 水素ループ、および、アキュムレータをモデル化し、陽子ビーム入射後の定常状態における水素ループの圧力変動、および、アキュムレータの変動解析を行った。圧力変動、および、アキュムレータの収縮量は陽子ビーム出力に比例して大きくなり、実験結果と解析結果は、10%以内で一致し、解析モデルの妥当性を明らかにした。1 MW 陽子ビーム運転時には、アキュムレータは、11.35 mm 収縮し、圧力上昇は、33.9 kPa と予測され、圧力変動許容値である 0.1 MPa 以内に抑えられることが確認できた。

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) M. Harada, et al.: "Nuclear heating calculation for JSNS", Proc. of 18th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XVIII), Donggun, Guangdong, P R China, April 25-29, 2007

- 3) T. Kato, et al.: "Spallation neutron source at J-PARC and its cryogenic hydrogen system," TEION KOGAKU **42** (2007) 244-254 (in Japanese)
加藤 崇ら:「J-PARC 中性子源と低温水素システム」、低温工学 **42** (2007) 244-254
- 4) H. Tatsumoto, et al.: "Performance test of a helium refrigerator for the cryogenic hydrogen system in J-PARC", Proc. of 22th Int. Cryogenic Engineering Conference (ICEC 22) (2008) 711-716
- 5) H. Tatsumoto, et al.: "Commissioning of the cryogenic hydrogen system in J-PARC: first cool-down operation with helium", Proc. of 22th Int. Cryogenic Engineering Conference (ICEC 22) (2008) 717-722.
- 6) H. Tatsumoto, et al.: "Development of the cryogenic hydrogen system for a spallation neutron source in J-PARC", (accepted to Adv. Cryo. Eng. **55**)
- 7) T. Kato, et al.: "Cryogenic hydrogen system for a spallation neutron source in J-PARC," TEION KOGAKU **43** (2008) 409-416 (in Japanese)
加藤 崇ら:「J-PARC 中性子源用極低温水素システム」、低温工学 **43** (2008) 409-416
- 8) H. Tatsumoto, et al.: "Design of a high power heater for the cryogenic hydrogen system at J-PARC", Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics, Matsue, Japan, December 6-8, 2009

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、日本中性子学会会員。エネルギー科学博士。

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、日本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、可視化情報学会会員。工学博士。

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 センター研究主席、運営推進支援セクションリーダー。本年 9 月まで経営企画部に勤務。核融合炉用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、大強度陽子加速器計画（J-PARC）の中性子源施設の開発及び建設を経て J-PARC センターの運営・企画等の推進に従事。低温工学協会、プラズマ核融合学会、原子力学会会員。

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、日本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。