B202 冷減速材容器内部の流動実験及び解析

麻生 智一[○] (日本原子力研究所), 神永 雅紀, 寺田 敦彦,
日野 竜太郎

Hydraulic Experiments and Analyses of a Cold Moderator

Tomokazu Aso, Masanori Kaminaga, Astuhiko Terada and Ryutaro Hino

ABSTRACT

A cold moderator using supercritical hydrogen is one of the key components in a MW-scale spallation target system, which directly affects the neutronic performance both in intensity and resolution. Since a hydrogen temperature rise in the moderator vessel affects the neutronic performance, it is necessary to suppress the local temperature rise within 3K. In order to suppress the occurrence of the stagnant region which causes the local temperature rise, we have tried to examine the effect of the blowing flow from the inlet pipe. Experiments were carried out under water flow conditions using a moderator vessel model made of acrylic resin. Flow patterns were measured with a PIV system, which were compared with the analytical results obtained with the STAR-CD code. From the experimental and analytical results, the blowing flow could be feasible for the suppression of the stagnant region.

Keywords: Spallation Target System, Cold Moderator, Flow Pattern, Blowing Flow, PIV System

1. 緒 論

日本原子力研究所 (以下、原研) と高エネルギー加速器研究機構が共同で進めている大強度陽子加速器計画では、MW規模の陽子加速器から極短パルス陽子ビームを重金属製のターゲットに入射して核破砕反応により大強度中性子ビームを発生させ、生命科学、物質科学等の広範囲な分野で先端的研究を行う中性子散乱施設を早期に建設する予定である⁽¹⁾。原研では、本施設の中性子源となる核破砕ターゲットシステムについて、その概念を構築するための設計研究及びR&Dを実施している⁽²⁾。

核破砕ターゲットシステムの中性子性能を決定する上で、ターゲットで発生する大強度の高エネルギー中性子を各々の中性子散乱実験に応じたエネルギーレベルに減速する減速材の開発が特に重要である^(3,4)。Fig. 1にターゲットと減速材の配置を示す。このうち、冷・熱中性子領域で使用する超臨界水素減速材 (以下、冷減速材と呼ぶ) については、利用者側から高い中性子強度/パルス性能等の達成を要望されている。このため、中性子の吸収散乱を低減できるように、コンパクトな薄肉・扁平構造とし、水素温度の上昇を3K以内に抑制する必要がある⁽⁵⁾。このような構造概念を実現するには、超臨界水素条件 (1.5MPa, 20K) に耐える構造設計とともに、局所的な水素温度上昇を防止するために冷減速材容器内部での流動を最適化することが要件である。

そこで、冷減速材容器内部での衝突噴流による流動状況の把握を目的とした水による基礎流動実験を行い、容器内の可視化によって再循環流や流れの停滞域などの流動パターンを明かにした⁽⁶⁾。また、同時に実施した解析評価結果は、流動実験結果をよく再現した。その後、Fig. 2に示す冷減速材容器の構造材 (アルミ合金) の発熱を考慮した容器内温度分布の解析評価を行い、その結果を基に、ポンプトリップ時等の低流速条件下でも局所的な水素温度上昇が抑制できるようにブローホール (吹

Fig. 1 Layout of Target and Moderators

き出し孔)からの流れにより再循環流や流れの停滞域の拡大を防止する方策を考案した。本報告では、容器内温度分布の解析結果と吹き出し流の可視化実験結果等について報告する。

Fig. 2 Concept of the Cold Moderator

2. 冷減速材容器内部の温度分布解析結果

解析には非構造格子・有限体積法による汎用3次元熱流体解析コードであるSTAR-CDを使用し、定常非圧縮性流れとして計算した。圧力補正アルゴリズムはSIMPLE法、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデル、境界層内部の流れは壁関数を用いた。解析モデルはFig. 2に示した構造を約40万メッシュ数でモデル化した。流体は液体水素とし、入口温度を運転条件として予定している20Kとした。また、熱流動解析に必要な液体水素及びアルミ合金の核発熱密度分布は、ニュートロニクス解析の結果⁽⁷⁾を基にして与えた。Fig. 3は流量を約1.5L/s(入口管出口の噴流流速3.0m/s)とした時の解析結果の一例である。

液体窒素よりもアルミ合金の発熱密度が高いために、

Fig. 3 Analytical Result of Temperature Distribution under Liquid Hydrogen Flow

図のように容器の温度が高くなり、容器底部のコーナ部で最高温度23.8Kとなっている。液体水素に関しては、再循環流の中心部で低速の領域があるが、周囲の流速が比較的大きいために局所的な温度上昇を生じていない。一方、容器中央の入口管周りには流れの停滞域が発生しており、局所的な温度上昇(約21.6K)を生じている。

流れの停滞域における水素最高温度は、容器壁面と接する極薄い層を除けば流体部の中でも温度の高い領域で、この領域での3K以上の温度上昇によって中性子収率が大きく低下する。Fig. 4に熱流動解析で得られた流れの停滞域での温度上昇と液体水素流量の関係を示す。図より流れの停滞域の温度を目標温度23K以下に抑制するには、0.8L/s(噴流流速1.6m/s)以上にすればよいことが分かる。このことから、現行の運転条件である水素流量1.5L/s(噴流流速3.0m/s)は妥当と言える。

Fig. 4 Relationship between Flow Rate and Hydrogen Temperature Obtained by Analytical Results

また、HFIRやISISなどの従来の冷減速材システムでは、循環ポンプトリップ時の流量喪失を避けるため通常はポンプ2基の並列運転をしており⁽⁸⁾、原研の設計でもポンプを2基設置する予定である。このとき、水素インベントリーの低減と保守・交換性を考慮し、かつ、上記の結果を踏まえて1L/s程度の小型軽量ポンプを2基並列運転することになっている。この設定で、2基のポンプのうち1基がトリップした場合には、Fig. 4から目標温度の23Kを上回る。そこで、ポンプの水素流量を大幅に増やすことなく、流れの停滞域の温度上昇を抑えるために入口管に多数のブローホールを設ける方策を提案した⁽⁹⁾。また、ブローホールからの吹き出しによる噴流流量の低下に伴う容器底面での熱伝達率低下を防ぐために、入口管内にツイストテープを設置して発生する旋回流で熱伝達率を確保することを検討している。Fig. 5にブローホールとツイストテープを設置した冷減速材容器の概要を示す。これらの方策の有効性を確認するために、水による可視化流動実験及び解析評価を行った。

Fig. 5 Improved Concept of the Cold Moderator

3. 実験装置の概要

Fig. 6に減速材基礎流動実験装置の水ループとPIVシステムの概要を示す。実験装置は、タンク、ポンプ、電磁流量計から成る水ループに、Fig. 2に示した冷減速材容器を模擬したアクリル製の試験体（入口管内径 25mm、容器寸法 120 (L) × 120 (H) × 50 (W) mm）を接続した構成である。水流量は約 0.25 ~ 1.5 L/s（噴流流速: 0.5 ~ 3 m/s、レイノルズ数: $1.4 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$ ）の範囲の流動が可能で、また、噴流出口高さ（試験体内の入口管出口と容器底面との距離）を数 mm から約 50 mm まで変えることができる。

Fig. 7に試験体に設置したツイストテープ及びブローホール付入口管の概要を示す。ツイストテープのピッチは予備的に行った実験で 280/ピッチのツイストテープを使用した際、旋回流の円周方向ベクトルが小さかったため、今回はその約 1/2 のピッチのツイストテープとした。ブローホールの径は $\phi 5$ mm とし、中心角 60° ピッチで入口管出口から 50 mm までの範囲に設けた。なお、ブローホールの径は $\phi 2$ mm で予備解析を行った際、水の吹き出しがほとんど無かったので 5 mm とした。また、設置範囲についても予備解析結果を基に設定した。流れ場の計測には PIV システムを使用し、計測データはパソコンに入力して記録・保存した。実験は、ほぼ大気圧、室温条件下で行った。

Fig. 6 Experimental Apparatus for Flow Pattern Measurement

Fig. 7 Twisted Tape and Inlet Pipe with Blow Holes using the Experiments

4. 実験結果及び解析結果

Fig. 8に噴流出口高さが 10 mm、中心軸断面上にブローホールが位置する場合の PIV システムで得られた画像の例を示す。下方からレーザーを照射しているため、モデル容器のえん曲構造の影響から底面で光の強い反射が見られる。このため、えん曲部分の PIV 測定データには流速の過誤ベクトルが多く含まれる可能性が高い。また、ブローホール部分でもレーザー光の反射が強く、吹き出し流の流速ベクトルの計測が困難であった。

Fig. 9に流量が約 1 L/s（噴流流速約 2.5 m/s）のときの容器内流速分布の測定結果と解析結果の例を示す。測定では、Fig. 8のように入口管の噴流出口高さを 10 mm とし、中心軸断面上にブローホールを位置させた。実験結果は、PIV システムのダブルパルスレーザーの間隔を $150 \mu s$ として 1.4 秒間隔で流速のベクトルマップを取得し、100 枚の流速のベクトルマップを平均化処理したものである。Fig. 9に併せて示してある解析結果は前述の STAR-CD コードを使用して実験と同じ条件で得たもので、モデル等は 2 章で述べたものと同一である。

Fig. 9の測定結果では、水は入口管から約 2.5 m/s で容器内に噴出して容器底面に衝突し、その後底面に沿って流れている。ブローホールからの吹き出しは、下方に行くに従い流量が増大している。この吹き出し流により、

Fig. 8 Particle Image Obtained by PIV

Fig. 9 Experimental and Analytical Results of Flow Pattern Measurements at 2.5 m/s Inlet Velocity

ブローホールを設けない入口管を使用したときに発生していた再循環流がほとんど確認できなくなった。解析結果でも同様な流動パターンを示しているが、ブローホールからの吹き出し量と比べると測定結果の方が少ないことが分かる。これは、前述したようにブローホールにおけるレーザー光の反射による影響と解析の方が計測感度よりも5倍細かいメッシュを使用していることなどが原因と考えられる。

Fig. 10は中心から14mm水平移動した位置（内管の外径の面）において、縦軸に底面からの高さ、横軸に水平方向の流速ベクトル成分をプロットした図である。底面から10mmの間で衝突噴流による水平方向の流速成分は、よく一致している。一方、ブローホールからの吹き出しによる水平方向の流速成分は、Fig. 9からも分かるように解析結果の方が大きい。また、解析結果では水平方向に吹き出す前に管厚による水の巻き込みによって負の値

Fig. 10 Horizontal Velocity Component at the Blow Holes

を生じている。測定結果でこれが現れないのは、前述のブローホールにおける光の反射や計測感度などの影響が原因と考えられる。各々のブローホールからの吹き出す速度成分のピークの現れる位置は、実験と解析ではほぼ一致した。

以上のように、実験と解析では吹き出し速度の大きさは異なっているものの、ブローホールによって再循環流領域が縮小する効果が確認できた。しかし、2章の温度分布解析結果で述べたように、局所的な温度上昇は再循環流領域よりも容器中央の入口管周辺の流れの停滞域で発生する。今回のブローホールの配置では流れの停滞域の抑制効果はほとんど見られなかったが、本実験結果からブローホールの配置等を変更することにより抑制可能と考えられる。

6. 結 論

冷減速材に適した水素を用いた減速材システムの重要な設計課題である温度上昇の抑制を実現するために、容器内の温度分布を解析した結果、水素の局所的な温度上昇は再循環流領域よりも容器中央の入口管周辺で生じる可能性が高いことを確認した。この対応策として提案したブローホール等の効果を調べるためにPIVシステムにより可視化実験及び解析を行い、再循環流領域の縮小を確認した。可視化実験結果は解析結果より吹き出し量が少なかったが、相対的な流動状況はよく一致した。今後、流れの停滞域を抑制するのに効果的なブローホールの位置や大きさ、数などを実験及び解析から検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構 共同推進チーム：大強度陽子加速器計画、JAERI-Tech 2000-003, KEK Report 99-5, JHF-99-4(2000)
- 2) R. Hino, et al.: Present Status of Target R&D at JAERI -JAERI/KEK Joint Project-, 6th ESS General Meeting, Portonovo near Ancona, Italy, Sep. 20-22(1999)
- 3) N. Watanabe, et al.: A Target-Moderator-Reflector Concept of the JAERI 5MW Pulsed Spallation Neutron Source, JAERI-Tech 98-011(1998)
- 4) 勅使河原誠、他：JAERI 5MW スポレーションパルス中性子源における中性子特性及びターゲット、冷モデレータの核発熱、日本原子力学会「1998 春の年会」D30(1998)
- 5) T. Aso, et al.: Structural and Hydraulic Study on Cold Source Moderator, 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, Utsunomiya(1998)
- 6) 麻生智一、他：冷減速材開発のための流動実験及び解析、可視化情報学会全国講演会（関西講演会）、B201(1999)
- 7) 勅使河原誠（原研 中性子工学グループ）、私信
- 8) A. T. Lucas: A Modular Approach to the Design of Cold Moderators, AccApp' 98, Gatlinburg, TN, USA, Sep. 20-23(1998)
- 9) 麻生智一、他：冷減速材の流動に関する研究、日本原子力学会「2000 春の年会」Q45(2000)