B201 案内羽根を用いたクロスフロー方式水銀ターゲットモデルのPIV法による水流動実験及び熱流動解析

羽賀勝洋○、寺田敦彦、神永雅紀、日野竜太郎
(日本原子力研究所東海研究所)

Water Flow Experiment using the PIV Technique and the Thermal Hydraulic Analysis on the Cross-Flow Type Mercury Target Model with the Blade Flow Distributors

Katsuhiro HAGA, Atsuhiko TERADA, Masanori KAMINAGA and Ryutaro HINO

ABSTRACT

The flow patterns in the mock-up model of the cross-flow type mercury target were measured using the PIV technique under water flow conditions at room temperature. The experimental results were compared with the analytical results conducted with the thermal hydraulic analysis code, STAR-CD. As a result, it was confirmed experimentally that the cross-flow could be realized in most of the proton beam path area, where the removal of the high density heat is important, with the proper flow rate distribution along the proton beam path. The analytical result showed the good correspondence to the experimental result. Then the mercury flow field and the temperature distribution were analyzed taking the volumetric heat generation by the spallation reaction into consideration. The volumetric heat generation calculated for the proton beam energy and power of 1.5GeV and 5MW were assumed in the analysis. The mercury flow analysis showed that the maximum mercury temperature less than the design criteria of 300 deg C can be attained with the inlet mercury velocity of more than 1.1m/s and that the recirculation flow seen in the rear of the proton beam path is considered to cause no excessive temperature rise.

Keywords : Water flow experiment, PIV technique, Cross-flow type, Mercury target, Thermal hydraulic analysis

1. はじめに

日本原子力研究所では高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同で、MW規模の大強度陽子加速器を用いた次世代の中性子散乱実験施設の設計検討を進めている⁽¹⁾。中性子源となるターゲットには水銀をターゲット材に用いるが、陽子ビームの照射領域では核破碎反応により大量の熱が発生するため、この領域内に再循環流などによる水銀の停滞域が存在すると、温度が局所的に上昇して沸騰を生じ、中性子収率の低下や流量配分の変動、流体誘起振動を引き起こす可能性がある。このため、ターゲット構造の設計では陽子ビーム照射領域に水銀の停滞域を生じないようにすることが要件である。また、核破碎反応による発熱密度は陽子ビームが入射するターゲット先端部分が最も高く、ターゲット後方へ行くに従い指数関数的に減少するので、ターゲット先端部分で流速が大きくなるように水銀流量を配分する必要がある。

このような技術課題に対処するため、原研では陽子ビームの入射方向に対し水銀の流れが直交するクロスフロー方式を考案し、3次元熱流動解析を通してターゲット内部の水銀流路構造の最適化設計を行ってきた。その結果、水銀流路中の適切な場所に案内羽根(ブレード)を配置することにより、ターゲット内の発熱密度分布に応じた流量配

分、特にターゲット先端部の高発熱密度領域に集中的に水銀を流動させることが可能な見通しを得た⁽²⁾。この評価結果を検証するため、アクリル製の実規模水銀ターゲットモデルを製作して非加熱の水流動実験を行い、PIV(Particle Image Velocimetry)法を用いて流速分布を測定した。その結果、陽子ビーム入射窓近傍に優先的に流量が配分されることが分かった⁽³⁾。本報では、水流速をパラメータとしたより詳細な実験結果と、計算精度を高めた解析結果について述べるとともに、核破碎反応に伴う体積発熱を考慮に入れた水銀熱流動解析を行い、水銀の流れ場及び温度場を評価した結果について報告する。

2. 水銀ターゲットシステムの概要

水銀ターゲットシステムの検討は、所定の流量等の条件で最大5MWの陽子ビーム入射に対応できるようにすることを想定して進めている。Fig.1に水銀ターゲットシステムの概要を示す。陽子加速器システムで加速された陽子ビームがターゲットに入射すると、陽子がターゲット材と衝突して核破碎反応を生じ、大量の高エネルギー中性子が発生する。この中性子は直接、あるいはターゲット周囲に設置された反射体で反射された後、ターゲット上下に置かれた減速材に入射して所定のエネルギーまで減速され、中

性子ビームラインを通して利用者に供給される。ターゲット材である水銀は陽子ビームと直交するようにターゲット容器内を流れ、核破砕反応により高密度の熱を発生して温度が上昇し、ターゲット容器後方から流出して冷却器へ向かう。ターゲット容器はステンレス製で陽子ビームが入射する部分を特にビーム窓と呼び、ビーム窓近傍は核破砕による発熱が大きいので、その除熱が重要となる。

3. 水銀ターゲットモデル

Fig.2は水流動実験に用いた水銀ターゲット実規模モデルの構造図である。このモデルは陽子ビームエネルギーが1.5GeV、陽子ビームの断面形状が高さ70mm×幅100mmの矩形一様分布を想定して設計してある。ブレードは8枚設けてあり、左右に並んだブレードの間、幅100mmの陽子ビーム照射領域(図のハッチング部分)を横切るような流れ場が形成されるようにしている。ビーム窓近傍は核破砕反応による発熱密度が最も高いため(1.5GeV、5MW陽子ビーム条件で最高 $2.3\text{kW}/\text{cm}^3$)、ビーム窓に水銀を送る

Fig.1 Schematic view of a mercury target

No.1 流路は大量の水銀を流す必要がある。このため、ブレード間隔を中心に近いほど狭くし流量配分の最適化を図っている。

レーザーシートとCCDカメラを組み合わせたPIV法を用いて内部の流速分布を測定するためにモデル全体は透明なアクリル製であり、モデルの寸法は全長1150mm、幅460mmで、ビーム窓部の高さは100mmである。流路面及び上面はドレン等のために後方へ向かって1/100の勾配を設けてあり、最後部の高さは122mmである。また、モデルの入口、出口には整流用にハニカム整流板を挿入してある。整流板については実機でも導入を検討している。また、アクリル製の容器壁は内部圧力に耐えられるように15mmの厚みを持たせてあるが、実機ではステンレス製の容器で数mmの厚さである。本モデルをアクリル製の水槽内に設置し、PIV法で内部流速分布測定を行った。

4. 実験条件

実験用の循環水は常温(20℃)であるのに対し水銀ターゲットの設計では入口水銀温度は50℃である。この条件

Fig.2 Experimental model

で動粘性係数を比べると、常温水で50℃の水銀流動の入口レイノルズ数を模擬するには水銀の約8.2倍の流速が必要となる。本実験装置では、アクリルモデルの耐圧性から入口流速は5m/s以下に抑える必要があり、この時のレイノルズ数は805000で、これは0.6m/sの水銀流速に相当する。5MW規模の水銀ターゲットの流速是水銀流動によるエロージョンを防ぐために1m/s前後かそれ以下にすることを目標としており、流動のみに注目すれば本実験装置で実機水銀ターゲットに近い入口条件を実現できると考えられる。実験は水の入口流速をパラメータにして、1m/s～5m/sまで変化させて行った。

5. 実験結果

ここでは水銀流動を模擬する観点から、最もレイノルズ数の大きな入口流速5m/sの場合の実験結果をFig.3に示す。ターゲットの成立性に重要な陽子ビーム照射領域及びブレード近傍の流動状況に注目して測定したので、入口、出口流路の一部は空白になっている。説明のために各ブレード間の流路にはFig.2に示すように番号を付けて区別することとする。

No.3、No.4流路入口では流路が急に狭くなるので流速が最も速く、10m/sである。次いでNo.2流路入口では7m/sであり、No.1流路入口では入口平均流速5m/sより若干遅い3.8m/s程度の流速である。しかし、これらを流量配分で表すとNo.1流路は全体の約40%、No.2流路は約32%、No.3、No.4流路では約14%となり、発熱密度の高いターゲット先端部分に最も多く冷却材が流れる流量配分が実現できている。No.8流路の入口部で流速が大きくなっているのは、No.1流路の他にNo.2、No.3流路からの流れの一部も合流するためである。No.7、No.8流路出口のブレード下流側では流れが剥離して小さな渦が生じているが、ここは陽子ビームに直接晒される場所ではないので温度的な問題はない。Fig.2に示した陽子ビーム照射領域の流れに注目すれば、特に重要なビーム窓部から $x=500\text{mm}$ までの発熱密度の高い領域では陽子ビームを横切るように水が流れており、クロスフロー型の流れ構造が実現できていることが分かる。 $x=500\text{mm}$ 以降で再循環流を生じているものの、この領域での発熱密度は5MW陽子ビーム条件で $100\text{W}/\text{cm}^3$ 以下であり、後に述べるように水銀熱流動解析

の結果から、大きな温度上昇を生じる可能性は低い。

Fig.4はターゲット中心軸上での流速のy方向成分 V_y を、入口流速1m/sから5m/sの場合について示している。いずれの場合も発熱密度がピークに達するターゲット先端部で最も速い流速分布を実現できていることが分かる。ビーム窓からの距離 x が100mm～350mmの部分で一時的に流速が低下するが入口流速3m/s及び5m/sの場合、値は正でありターゲット入口側から出口側へ向かってクロスフロー流れ場が出来ていることが分かる。入口流速1m/sの場合については $x=200\text{mm} \sim 300\text{mm}$ で V_y が零になっている。これはNo.3流路出口部分で広範囲の低流速領域が生じているのが原因であり、これは水銀の局所的な温度上昇につながる恐れがある。しかしながら、実際の水銀流動のレイノルズ数は大きいことから、流動パターンは入口流速3m/s～5m/sの場合とほぼ同様になり、クロスフロー型の流れ構造は維持されると考えられる。 V_y はNo.4流路からの流れにより再び流速が増加し、600mm以降では上述した大きな再循環流による逆流を生じている。

6. 数値解析及び結果

6.1 水流動解析

実験結果と比較するため、実験に用いたターゲットモデルと同じ構造で3次元解析モデルを作成し、水の流れの解析

を行った。前報⁽³⁾では空間差分に2次精度のハイブリッド法を用いたが、本報では解析精度を向上させるため空間差分に3次精度のQUICKを用いて数値粘性の影響を小さくした。解析には設計に使用している汎用熱流体解析コードのSTAR-CDを用い、以下の手法を用いて乱流の定常計算を行った。

数値スキーム	: 有限体積法
圧力解法	: SIMPLE 法
空間差分	: QUICK (3次精度)
乱流モデル	: 標準 $k-\epsilon$ モデル ⁽⁴⁾

解析モデルはターゲット中心面について面对称を仮定したハーフモデルで、計算格子は総計242632の六面体格子を用いた。また、入口流速は常温水で5m/sとした。

解析結果をFig.5に示す。全体的な流速分布のパターンは実験結果と良く一致している。特にNo.3、No.4流路の入口で流速が速くなっていることや、各流路の流量配分、No.8流路のブレード先端部で流速が速く、ブレード下流側で渦が生じていることなどFig.3の実験結果で見られる特徴的な点は解析においても再現されている。

Fig.6はFig.4と同様にターゲット中心軸上で流速のy方向成分 V_y を、実験結果と解析結果で比較したグラフである。全体的な流れのパターンは良く一致しており、特に、除熱の観点から流量を多くする必要のあるビーム窓近傍に

Fig.3 Experimental result of the flow Field
(Inlet velocity : 5m/s)

Fig.5 Analytical result of the flow Field
(Inlet velocity : 5m/s)

Fig.4 V_y distributions along the center axis
($y=0\text{mm}$)

Fig.6 Experimental and analytical results of
the V_y distribution along the center axis
(Inlet velocity : 5m/s)

ついては、解析値と実験値が良く一致している。 $x=150\text{mm} \sim 350\text{mm}$ で流速分布が低下している部分では実験結果に比べて解析結果が2倍程大きな値になっている。これはNo.3流路出口からの噴流が陽子ビーム照射領域を横切る部分で生じており、実験の噴流流速が解析値より遅いことを示している。この原因としては、流路間の圧力差でアクリル製のブレードが歪んだことによりNo.3流路の圧力損失が増大し、噴流流速が低下したことが考えられる。これより後方では、 $x=400\text{mm}$ に見られる V_y のピーク、及びそれに続く再循環流の中心位置($V_y=0\text{m/s}$)もよく再現されている。

これらの結果から、現在用いている解析コード及び解析モデルはクロスフロー型水銀ターゲット内の全体的な流れ構造を良く再現し、ターゲット構造の設計に有効であると言える。

6.2 水銀熱流動解析

前節と同じ解析モデルを用いて、核破砕反応による発熱を考慮に入れた水銀の熱流動解析を行った。陽子ビームエネルギーは1.5GeV、ビームパワーは5MWとし、陽子ビームの断面形状は高さ70mm×幅100mmの矩形一様分布を想定して、ニュートロニクス計算で得られた以下の体積発熱分布を用いた。

$$Q = 6488 * (1 - 2.9621 * \text{EXP}(-0.25636 * (x + 8.7952))) * \text{EXP}(-0.069935 * (x + 9.5499))) \text{ [MW/m}^3\text{]}$$

乱流プラントル数は1.5、水銀物性値は50℃の値で一定とし、壁は断熱条件とした。ただし陽子ビーム窓は壁面の体積発熱による水銀への入熱(255W/cm^2)を考慮した。

入口流速1.2m/sについて行った解析結果の流速ベクトル図をFig.7に示す。Fig.5とFig.7を比べると流動パターンにほとんど違いは見られず、水銀でもクロスフロー型の流れ構造が達成できている。Fig.8は温度分布コンター図であり、水銀の最高温度はNo.7流路の入口部で281℃となった。この部分はFig.6で見たようなNo.3流路出口の低流速部がブレードに衝突する場所であり、除熱性が低下したためホットスポットになっているが、水銀の最高温度は構造材腐食を抑え、沸騰を防止する観点から沸点356℃に対する余裕を見て300℃以下を目標にしており、解析結果の最高温度はこの条件を満たしている。入口流速をパラメータに解析を行いホットスポットの最高温度を調べた結

果、入口流速1.1m/s以上で最高温度を300℃以下にできることが分かった。この時、 $x=500\text{mm}$ 以降で生ずる再循環流領域での最高温度は200℃以下であり、この再循環流が熱的な問題を生じさせる可能性は低いと言える。

7. まとめ

原研が提案しているクロスフロー型水銀ターゲットの、アクリル製実規模モデルを製作して非加熱の水流動実験を行い、ターゲット内の流速分布をPIV法で測定して、解析結果と比較した。また、同じ解析モデル、解析手法を用いて水銀の熱流動解析を行った。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) ターゲットの陽子ビーム照射領域において、特に熱負荷の高いビーム窓近傍を含む大部分の領域で設計目標であるクロスフローを実現できることが実験的に確かめられた。
- 2) 標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析では、高次精度の空間差分を採用することで全体的な流動パターンの特徴を再現することができた。
- 3) 水銀流動解析より、ターゲット設計目標である水銀入口流速1m/s前後で水銀最高温度を300℃以下に抑えることが出来る見通しが得られた。また、ターゲット後部に発生する再循環流領域の温度は200℃以下であり、熱的な問題が生じる可能性は低いことが分かった。

参考文献

- (1) Oyama, Y. et al.: Proc. 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source(ICANS-XIV), Utica, p.22 (1998)
- (2) Kaminaga, M. et al.: Proc. 7th International Conference on Nuclear Engineering(ICONE-7), Tokyo, Japan, April 19-23, ICONE-7123 (1999)
- (3) 羽賀勝洋他：日本原子力学会誌、42(8)、(2000)掲載予定
- (4) 乱流解析(数値流体力学シリーズ3)、東京大学出版会、p.27(1995)

Fig.7 Analytical result of the mercury flow Field (Inlet velocity : 1.2m/s)

Fig.8 Analytical result of the mercury temperature Field (Inlet velocity : 1.2m/s)