加速器駆動核変換システムの技術開発におけるビーム窓熱流動試験

林 健一^{1,*}, 小野 幹訓², 菊地 賢司³,
徳永 典也⁴, 北野 照明², 大井川 宏之³

Thermal-Hydraulic Experiment on Beam Window for Developing the Accelerator-Driven Transmutation System

Ken-ichi HAYASHI^{1,*}, Mikinori ONO², Kenji KIKUCHI³,
Noriya TOKUNAGA⁴, Teruaki KITANO² and Hiroyuki OIGAWA³

¹CAE Center, Research & Development Hq., Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.,
3-16-1 Tamahara, Tamano-shi, Okayama 706-0014, Japan

²Engineering Dept., Nuclear Energy Systems, Plant & Environment Hq., Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.,
8-4-6 Nishikasai, Edogawa-ku, Tokyo 134-0088, Japan

³J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

⁴Corporate Planning Dept., Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd., 5-6-4 Tsukiji, Chuo-ku, Tokyo 104-8439, Japan

(Received April 9, 2007 and accepted in revised form September 18, 2007)

The accelerator-driven nuclear transmutation system aims at transmuting minor actinides (MAs) and long-lived fission products to stable or short-lived nuclei. A feasibility design study of the proton beam window, which is an interface component between an accelerator and a nuclear reactor, needs a method to be able to evaluate heat transfer characteristics of the beam window under flowing lead bismuth. However, the validity of the numerical simulation model of the beam window has not been proven yet and a database on heat transfer characteristics has also not been established. Two experiments were conducted: one was particle image velocimetry measurement around the beam window in flowing water and the other was temperature measurement at the beam window under flowing lead bismuth. Numerical simulation was also done to validate the beam window model for design work. Results show that heat transfer characteristics of the beam window averaged in space and time under flowing lead bismuth was formulized by the experimental equation. The numerical simulation model can estimate the mean heat transfer coefficient. However, the local heat transfer coefficient was not stable: it fluctuates with time and even in space, especially around the stagnation point. The reason is discussed in detail.

KEYWORDS: *accelerator-driven nuclear transmutation system, proton beam window, thermal-hydraulic experiment, lead bismuth, heat transfer coefficient, particle image velocimetry, fluctuation, temperature, numerical simulation*

I. はじめに

原子力エネルギーの利用において使用済み核燃料に含まれる長寿命核種を、短半減期や安定な核種に積極的に変換する技術に、加速器を利用する方法¹⁾がある。核変換の対象はネプツニウム(Np)アメリシウム(Am), キュリウム(Cm)からなるマイナーアクチニド(MA), およびテクネ

チウム(Tc), ヨウ素(I)等の長寿命核分裂生成物である。高エネルギー陽子による核破砕反応²⁾のみでMA核を破砕し、核変換する方法より、鉛ビスマスなど標的核の核破砕により多量に発生する中性子を、さらにMA燃料で構成される未臨界炉心で増倍させ、高速中性子による核分裂反応を主体とする変換方法が、高い変換率と熱出力が期待できる新たな技術として研究されている。この加速器と未臨界炉心を組み合わせた加速器駆動核変換システム(ADS: Accelerator Driven transmutation System)³⁾では、陽子入射領域と炉心領域の境界を形成する、いわゆるビーム窓には、陽子の照射を受けて材料内部に核発熱が生じる。このビーム窓は、原子炉側表面を流動する核破砕標的でもある

¹ 三井造船㈱ 技術本部 CAE センター

² 三井造船㈱ 環境・プラント事業本部原子力技術部

³ ㈱日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

⁴ 三井造船㈱ 経営企画部

* Corresponding author, E-mail: hayashi@mes.co.jp

高温の鉛ビスマス (LBE : Lead Bismuth Eutectic) で冷却される。このように、熱的に厳しい条件にさらされる可能性のあるビーム窓の熱伝達率を精度よく予測することは、装置設計上その性能と健全性を確保するために重要である。しかしながら、冷却材として用いられる LBE に関して、ビーム窓のような特殊形状の物体における熱伝達率を予測する手法は、いまだ確立されていない。そこで、ADS のビーム窓形状に対する LBE による伝熱特性を把握し、設計に使用される熱流動解析コードの開発に必要なデータを取得し、整備することを目的としてビーム窓熱流動試験を実施した。さらに、これらのデータについて汎用熱流動解析ソフト STAR-CD⁴⁾ による解析結果と比較検討を行った。ビーム窓から LBE への熱伝達率は流れの様相と密接に関係するので、ビーム窓の熱流動解析コードを開発するには、ビーム窓の熱伝達のみならず、流速分布も計測し解析結果を検証する必要がある。しかし、高温の LBE の流速分布を直接計測するのは、技術的に困難であるため、流体に LBE を用い、ビーム窓をヒータで加熱し、その熱伝達を計測する熱流動試験と、流体に常温の水を用い、ビーム窓周りの流速分布を粒子映像速度計測法 (PIV) で計測する水流動試験に分けて実施した。

II. ビーム窓水流動試験

1. 水流動試験

ビーム窓周りの流れ場の詳細なデータを取得することを目的に、流体に水を用い PIV にて流速分布を計測する水流動試験を実施した。一般に流れ場の特徴は、レイノルズ数に依存するので、水流動試験の試験条件は、鉛ビスマス

による熱流動試験条件とレイノルズ数を一致させた。ビーム窓水流動試験装置は、流体に常温の水を用い、**Fig. 1** に示すようにビーム窓模擬試験体、試験部流路、ポンプ、流量計などで構成されている。ビーム窓模擬試験体は、熱流動試験装置と同一寸法とした。直径 89 mm の円筒の先端に半球形状のビーム窓が接続した形状とし、直径 115 mm の円管流路に挿入した。試験部流路の最上流部には整流装置を設置した。整流装置は、管内径の約 1/8 の小孔を多数配置したもので、中心部が密に、周辺部が粗に小孔が配置された多孔板である。PIV による流速分布計測装置設置の概略図を **Fig. 2** に示す。試験部流路は、透明アクリル管で作成した。流路周辺部の光の屈折による測定精度低下を防ぐために試験部の外側に矩形のアクリル容器を設置し、水を充填した。PIV 装置には、1 パルス当たり出力 50 mJ のダブルパルス YAG レーザに同期させた、解像度 $1,280 \times 1,280$ ピクセル $\times$ 12 ビットの CCD カメラを用いた。トレーサに、粒径 $4 \mu\text{m}$ 、比重 1.02、材質ポリアミド 12 のナイロンパウダーを用いた。PIV 装置では、1 回の計測に 2 枚の画像データを 1 セットとして使用する。1 セットの画像は、流速に応じて $50 \sim 200 \mu\text{s}$ の時間間隔で撮影した。各瞬時画像の流速分布は、取り込んだ画像を 40×32 分割し、その内部の 39×31 の格子点上で、格子点ごとに 64×64 ピクセルの探查窓を設定し、各セットの 2 枚の画像から相関を取って求めた。1 回の計測範囲は縦 151 mm $\times$ 横 115 mm (大領域) あるいは縦 75.5 mm $\times$ 横 75.5 mm (小領域) とし、可視化領域を分割して、ビーム窓近傍の流速分布と解析における境界条件とするために整流装置出口の流速分布を計測した。データはサンプリング周波数

Fig. 1 Outer view of the water loop

Fig. 2 Instrumentation of particle image velocimetry (PIV) equipment

3.9 Hz で10秒間の計測を3回行い、それぞれ10秒間平均流速の値として求めた。計測範囲の大きさによる計測精度の差異を考慮し、大領域における平均流速は、小領域における平均流速結果をもとに補正した。なお、データ長については、別途、30秒間の計測を実施し計測結果に有意な差がないことを確認した。実施した試験条件は、ビーム窓模擬試験体上流の平均流速が1.2～6.0 m/s の範囲である。ビーム窓直径を代表長とするレイノルズ数は約 1×10^5 から約 6×10^5 の範囲である。水流動試験におけるレイノルズ数 5.6×10^5 でのビーム窓周りの流速分布計測結果を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。また、水流動解析入力条件として用いる流路入口付近の流速分布計測結果を Fig. 5 に示す。Figure 3 と Fig. 4 より、ビーム窓模擬試験体の先端に近づくに従い流速は減少し、先端部近傍での流速はゼロに近くなる。直径方向では流速が極めて低くなる領域がみられ、また、ビーム窓曲面部からビーム窓模擬試験体下流側へと流路面積が減少するに従い流速は急激に大きくなり、下流入口側の平均流速に比べて約2.5倍(流路面積比とほぼ等しい)の流速となる結果が得られた。

2. 水流動解析

LBE に対する熱流動解析コードの検証を補強するために、汎用熱流体解析ソフト STAR-CD を用いて水流動試験と同一条件で水流動解析を行い、ビーム窓周りの流速分布について解析結果を計測結果と比較した。解析対象は、水流動試験装置の試験部流路とし、整流装置出口から1.5 D (D: ビーム窓流路管内径 115 mm) 下流面(ビーム窓先端から約4.7 D 上流面)を入口境界とし、模擬試験体の上端面を出口境界とした。格子数は約230万である。水の物性

値は、水流動試験における温度に基づいて、一定値とした。入口境界は流速指定境界とし、流速分布は水流動試験における計測値を用い、乱流パラメータは、当初、乱流強度を0.03、渦スケールを試験部流路管径の10%としたが、計測結果との比較より、乱流強度を0.1、渦スケールを多孔板式整流装置の小孔径の10%とした。出口境界は流出条件、模擬試験体および流路管の壁面境界はすべりなし条件とした。乱流モデルと対流項(運動量、乱流特性)の差分法は、STAR-CD で利用できる低レイノルズ数型線形 $k-\epsilon$ モデル、低レイノルズ数型二次非線形 $k-\epsilon$ モデル、低レイノルズ数型三次非線形 $k-\epsilon$ モデルの三種類の乱流モデルと、一次精度風上差分、二次精度 TVD (Total Variation Diminishing) スキームの1つである MARS (Monotone Advection and Reconstruction Scheme)、発散型の対流項に対する代表的な三次精度風上差分である QUICK (Quadratic Upstream Interpolation of Convective Kinematics) スキームの三種類の差分スキームを組み合わせた、計9ケースの比較解析を実施した結果、ビーム窓周りの流れ場には有意な差はなかったが、解析が収束に至るまでのステップ数と計算時間に大きな違いがあった。このため、収束解を得るのに必要な計算時間が最も短かった、低レイノルズ数型線形 $k-\epsilon$ モデルと MARS を用いた。水流動試験と水流動解析におけるレイノルズ数 2.5×10^5 での流速分布を、ビーム窓先端から5 mm 上流の位置で比較したものを Fig. 6 に、ビーム窓先端から6 mm 下流の位置で比較したものを Fig. 7 に示す。ビーム窓近傍における流速分布は、Fig. 6 に示した試験部流路の壁面付近を除いて、計測結果と解析結果は一致したが、計測結果に比べて解析結果の流速が約10～20%ほど小さくなった。

Fig. 3 Experimental results of the flow field around the beam window by wide field
Water inlet boundary velocity 5.9 m/s, Reynolds number 5.6×10^4 .

Fig. 4 Experimental results of the flow field around the beam window by small field
Water inlet boundary velocity 5.9 m/s, Reynolds number 5.6×10^5 .

III. ビーム窓熱流動試験

1. 熱流動試験装置と試験条件

熱流動試験装置は、熱出力 800 MW 設計における構造を考慮した半球形状のビーム窓試験部と、LBE 流動装置からなる。想定される装置では入力される陽子ビームのプロファイルに依存してビーム窓材の発熱密度は異なる。装置製作の容易さと計測精度を考慮して、窓の発熱密度は一定となるようにした。また、想定している ADS では LBE が、陽子ビーム照射によって内部発熱し温度上昇するとともに、ビーム窓を冷却する。試験では、LBE の温度上昇は入口温度を高くすることにより模擬し、入口面での温度は一樣とした。**Figure 8** に熱流動試験装置の系統図を示

Fig. 5 Experimental results of the velocity profile around the inlet boundary
Water inlet boundary velocity 5.9 m/s, Reynolds number 5.6×10^5 .

Fig. 6 Experimental and analysis results of the velocity profile at 5 mm upstream from the top of beam window
Water inlet boundary velocity 2.7 m/s, Reynolds number 2.5×10^5 .

Fig. 7 Experimental and analysis results of the velocity profile at 6 mm downstream from the top of beam window
Water inlet boundary velocity 2.7 m/s, Reynolds number 2.5×10^5 .

Fig. 8 Instrumentation of the LBE loop

す。試験装置はビーム窓模擬試験体、試験部流路、機械式ポンプ、ダンプタンク、温度計、流量計などで構成される。試験装置は、原子力機構東海研究センター原子力科学研究所に設置した。ビーム窓模擬試験体の主要材質はオーステナイトステンレス鋼 SUS316 である。窓部発熱体の加熱範囲は半球部内面全体とし、半球面全体が均一に発熱するように、半球状の銅の中にシースヒータを螺旋状に埋め込んだ。窓部発熱体表面の最終仕上げはバフ研磨で、中心線平均粗さの区分値は 3.2 a である。発熱の均一性は、試験装置に LBE を充填する前に、冷却材がない状態で、発熱体を 300℃ まで加熱し、そのときの熱電対温度の差異が 1℃ 未満であることを確認した。最大発熱量は 6 kW、発熱密度は約 63 W/cm³、中子にロウ付けしたヒータピンの温度がロウ材の軟化温度 550℃ を超過しないように出力を調整した。ビーム窓模擬体の計測では、Fig. 9 に示すように厚さ 5 mm のビーム窓の表裏 12 箇所に合計 24 本の熱電対を取り付け、ビーム窓の局所熱伝達率を求めた。熱電対の種類は K で、クラス 1、シース外径 0.5 mm である。熱電対は先端の半球部に深さ約 0.6 mm の溝を切り埋め込んだ。外面の熱電対は流れを乱さないよう表面をロウ付けして滑らかにした。ロウ材の材質は Ni ロウである。試験部流路の最上流部には、水流動試験と同様に、多孔板式整流装置を設置した。試験計測は、試験装置を稼動後、LBE 流量や各部の温度ができるだけ安定した定常状態における値をサンプリング周波数 2~4 Hz で 1 時間以上計測し、30 分間~1 時間の平均温度を求めた。熱損失に伴う誤差を最小にするため、試験部周囲には保温用のヒータを取り付け、LBE の温度と流路管内壁の温度が同一になるよう制御した。試験計測は LBE 流量と入口温度を試験パラメータとして実施した。LBE 流量は最小 100 l/min から最大 500 l/min まで 100 l/min ごとに 5 ケース、入口温度は最低 330℃ から最高 430℃ まで 50℃ ご

Fig. 9 Schematic drawing of the beam window mock-up model

とに 3 ケースである。ビーム窓直径を代表長とするレイノルズ数の範囲は約 1×10^5 から約 5×10^5 である。再現性を確認するため一連の計測を数回繰り返して実施した。また、LBE の品質は酸素濃度により変わり、飽和酸素濃度以上では、余分な酸素と鉛が反応して酸化鉛を形成し、スラグとなる。溶存酸素が少な過ぎると LBE に接触する鋼材の腐食が促進されるので、溶存酸素濃度を酸素センサーで測定し、監視した。

2. ヌセルト数の算出

試験部入口温度と模擬試験体の局所熱流束測定用熱電対の温度計測値から、次式により局所ヌセルト数 Nu_i ($i=1, 2, \dots, 12$) を算出する。

$$Nu_i = \frac{D}{\lambda_{LBE}} \cdot \frac{\lambda_{SUS}(T_{in,i} - T_{surf,i})}{t(T_{surf,i} - T_{\infty})} \quad (1)$$

ここで、

T_{∞} : 試験部入口温度 (°C),

$T_{in,i}$: 計測箇所 i の模擬試験体内面温度 (°C),

$T_{surf,i}$: 計測箇所 i の模擬試験体外表面温度 (°C),

D : 模擬試験体の外径 (= 0.0891 m),

λ_{LBE} : LBE の熱伝導率, $\lambda_{LBE} = 7.26 + 0.00123 T_{surf,i}$ (W/mK),

λ_{SUS} : SUS316 の熱伝導率, $\lambda_{SUS} = 19.3 - 0.026 T_{surf,i} + 6 \times 10^{-5} T_{surf,i}^2 - 3 \times 10^{-8} T_{surf,i}^3$ (W/mK),

t : 模擬試験体内外熱電対間距離 (= 0.0044 m)

添字の i は、天頂角 ϕ が 0° から 80° までのビーム窓の裏表に取り付けられた 12 対 (24 本) の熱電対の番号を指す。

なお、熱電対線の中心は SUS 製ビーム窓モデルの中に 0.3 mm の位置にあることを考慮して、表面温度を補正した。

ビーム窓の平均ヌセルト数 Nu は、上 (1) 式の局所ヌセルト数 Nu_i を、熱電対が取り付けられた天頂角を中心とする半球面上の帯の表面積 S_i による加重平均することによって算出した。

$$Nu = \frac{\sum Nu_i \cdot S_i}{\sum S_i} = \sum Nu_i (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}) \quad (2)$$

ここで、 θ_i : i 番の熱電対が取り付けられた天頂角

3. 熱流動試験結果

LBE 流量 100~500 l/min と入口温度 330~430°C を試験パラメータとして計測した全 71 ケースについて、ビーム窓全体の熱伝達率関数 (平均ヌセルト数 Nu とペクレ数 Pe の関係) を Fig. 10 にまとめた。その結果、ビーム窓の伝

熱特性に関する近似式として次式を得た。

$$Nu = 0.5547 Pe^{0.6831} \quad (3)$$

なお、ビーム窓の接液 (運転) 時間は延べ 933 時間である。ビーム窓表面温度分布の例として LBE 流量 100~500 l/min, 入口温度 330~430°C の試験条件の場合を Fig. 11 に示す。なお、温度はそれぞれ 1 時間の計測における平均値を示した。Figure 11 より、LBE 流量 100 l/min および 200 l/min では、天頂角 $\phi = 0 \sim 40^\circ$ の範囲における温度分布が、天頂角 $\phi = 0^\circ$ 付近で極小となるケース (ケース I) と相対的に高温となるケース (ケース II) の二通り観測された。ケース I およびケース II におけるビーム窓模擬試験体先端表面温度の時間変化の例を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。さらに、Fig. 14 にケース II における温度変化を 18 時間に渡って計測した例を示す。Figure 14 より、LBE 流量 110 l/min, 入口温度 380°C の試験条件の場合では、ビーム窓先端における温度変動に、持続時間が 3 時間から 6 時間程度で、ほぼ一定勾配で温度が 20°C から 25°C 程度上昇した後、一瞬のうちに低下する長周期変動が繰り返して現れた。LBE 流量が 100 l/min から 300 l/min へと大きくなるのに伴い、ケース I が減り、ケース II が支配的となる。LBE 流量 300 l/min では、温度分布はほぼ一様となり、ビーム窓先端 $\phi = 0^\circ$ 付近における温度は高温となる。さらに、LBE 流量 300 l/min 以上では、ビーム窓先端付近において温度分布が相対的に高温となる天頂角の範囲が狭くなり、天頂角 $\phi = 0^\circ$ と $\phi = 40^\circ$ 付近だけとなる。ビーム窓模擬試験体表面温度の時間変化の例を Fig. 15 に示す。Figure 15 より、LBE 流量 400 l/min 以上では、ビーム窓先端における表面温度は、数秒の短い周期に 15°C 程度の大きな振幅でスパイク状に変動するようになる。さらに、LBE 流量の増加あるいは入口温度の上昇に伴い、この温度変動の振幅は 5°C 程度に小さくなった。ビーム窓先端の局所熱伝達率とペクレ数の関係を Fig. 16 に示す。既往の一樣流中における円柱あるいは球周りの局所ヌセルト数分布から判断すると⁹⁾、ビーム窓先端における局

Fig. 10 Mean heat transfer coefficients for LBE on the beam window

(a) LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(d) LBE inlet boundary fluxes 200 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(b) LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 380 degrees Celsius.

(e) LBE inlet boundary fluxes 200 l/min, temperature 380 degrees Celsius.

(c) LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

(f) LBE inlet boundary fluxes 200 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

Fig. 11 Mean temperature fields on the beam window

LBE inlet boundary fluxes 100 to 500 l/min, temperature from 330 to 430 degrees Celsius.

所ヌセルト数は極大値となり、平均ヌセルト数よりも大きくなると考えられる。しかし、ビーム窓先端において特異な温度変動が発生したため、局所ヌセルト数は大きく低下する結果を得た。具体的には、流量 300 l/min 未満で発生した長周期(3 時間から 6 時間)の温度上昇と瞬時の温度低下時には最大 60% 程度、流量 300 l/min 以上のとき発生したビーム窓先端近傍に現れる短周期(数秒)のスパイク状の

温度変動では最大 25% 程度、平均ヌセルト数に対して局所ヌセルト数が低下した。

4. 熱流動解析

LBE におけるビーム窓の熱流動解析コードの検証を行うために、汎用熱流体解析ソフト STAR-CD を用いて熱流動試験と同一条件で熱流動解析を行い、ビーム窓周りの

(g) LBE inlet boundary fluxes 300 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(j) LBE inlet boundary fluxes 400 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(h) LBE inlet boundary fluxes 300 l/min, temperature 380 degrees Celsius.

(k) LBE inlet boundary fluxes 400 l/min, temperature 380 degrees Celsius.

(i) LBE inlet boundary fluxes 300 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

(l) LBE inlet boundary fluxes 400 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

Fig. 11 Continue

熱伝達特性について解析結果を計測結果と比較検討した。解析対象は、熱流動試験装置の試験部流路とし、整流装置出口から 1.5 D 下流面（ビーム窓先端から約 4.7 D 上流面）を入口境界、窓部供試体の上端面を出口境界とした。模擬試験体の解析モデルを Fig. 17 に示す。格子数は約 220 万である。物性値は、鉛ビスマスの粘性係数と熱伝導率、SUS316 および Cu の中性子の熱伝導率は温度依存性を考慮

して温度 $T(^{\circ}\text{C})$ の関数とし^{5,6)}、その他は、熱流動試験における温度に基づいて、一定値とした。入口境界は流速指定境界とし、流速分布は円管内の発達した乱流速度分布とした。乱流パラメータは、乱流強度を 0.1、渦スケールを多孔板式整流装置の小孔径の 10% とした。出口境界は流出条件。容器壁面はすべりなし条件とし、熱的には断熱面とした。ビーム窓は、すべりなし条件とし、熱的には対流

(m) LBE inlet boundary fluxes 500 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(n) LBE inlet boundary fluxes 500 l/min, temperature 380 degrees Celsius.

(o) LBE inlet boundary fluxes 500 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

Fig. 11 Continue

熱伝達面とした。発熱条件は、熱流動試験におけるヒータ出力実測値とし、ヒータピンの単位体積当たりの発熱密度は一定とした。乱流モデルは低レイノルズ数型の線形 $k-\epsilon$ モデルを、対流項(運動量, 乱流特性, 温度)の差分法は MARS を用いた。乱流プラントル数は, STAR-CD の default 値 0.9, 明と笠木による近似式⁷⁾から求めた値 1.4 の 2 種類を用いて解析を行った。2 種類の流量 (100 l/min と

Fig. 12 Typical temperature fluctuation type I at a stagnation point of the beam window
LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

Fig. 13 Typical temperature fluctuation type II at a stagnation point of the beam window
LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

Fig. 14 Typical temperature fluctuation type II at a stagnation point of the beam window
LBE inlet boundary fluxes 110 l/min, temperature 380 degrees Celsius.

500 l/min) と 2 種類の入口温度 (330℃ と 430℃) における熱流動試験 4 ケースについて, 比較解析を実施した。その結果得られたビーム窓表面温度分布の比較を Fig. 18 に示

す。ビーム窓全体の平均熱伝達における試験結果と解析結果との比較を **Fig. 19** に示す。ビーム窓先端の局所熱伝達における試験結果と解析結果との比較を **Fig. 20** に示す。まず、熱流動試験の Case 4 (LBE 流量 500 l/min, 入口温度 430°C) について乱流プラントル数の影響を比較した。Figure 18 より、Case 4 では乱流プラントル数 $Prt = 0.9$ の解析結果を基準に比較すると、 $Prt = 1.4$ の場合、温度は一樣に約 2°C 高く、局所ヌセルト数はビーム窓先端で約 50 小さくなった。この結果を、熱流動試験と比較して、 $Prt = 0.9$ の場合が試験結果とよく整合するものと判断して、残りの 3 ケースについて、 $Prt = 0.9$ を用いて解析を行った。Figure 18 より、Case 1 (LBE 流量 100 l/min, 入口温度 330°C) および Case 2 (LBE 流量 100 l/min, 入口温度 430°C) において、先端からの角度が $\phi = 0 \sim 40^\circ$ の範囲で表面温度および局所ヌセルト数分布は、定性的・定量的によく一致した。また、Case 3 (LBE 流量 500 l/min, 入口温度 330°C) では、表面温度および局所ヌセルト数の分布がビーム窓先端において、試験結果と比較して、正反対

の結果となった。Figure 19 より、ビーム窓全体の平均ヌセルト数で比較すると 4 ケースとも 10~30% 程度の誤差で一致する結果を得た。Figure 20 より、ビーム窓先端における局所ヌセルト数で比較すると、試験結果に比べて局所ヌセルト数が大きく算出された。

IV. 討 論

1. 水流動試験と水流動解析

水流動試験と水流動解析との比較では、ビーム窓周りの流速分布では、試験部流路付近を除いて、計測結果と解析結果が定性的に一致することを明らかにした。ただし、計測結果に比べて解析結果の流速が約 10~20% ほど小さい値を示した。このとき、水流動解析における流量が、水流動試験における実際の流量に比べ約 14% ほど少なかった。つまり、この流量の違いによって流速に差が生じたも

Fig. 15 Typical temperature fluctuation at a stagnation point of the beam window
 LBE inlet boundary fluxes 500 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

Fig. 17 Numerical simulation model of the beam window

Fig. 16 Local heat transfer coefficients for LBE at a stagnation point of the beam window

(a) LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(c) LBE inlet boundary fluxes 500 l/min, temperature 330 degrees Celsius.

(b) LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

(d) LBE inlet boundary fluxes 500 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

Fig. 18 Experimental and analysis results of mean temperature field on the beam window

Fig. 19 Experimental and analysis results of the local heat transfer coefficient on the overall beam window

のと考えられる。その原因は、水流動試験において、ある一断面だけの二次元 PIV による流速分布測定結果をもとに三次元に拡張した流速分布を水流動解析で用いたが、この仮定した流速分布が、実際の流速分布と差異があったためと考えられる。つまり、水流動試験において、試験部流路の上流側にある曲がり管によって発生する偏流を防ぐこ

とを意図して、試験部流路に整流装置を設けたが、十分ではなく、偏流の影響が残ったと判断される。なお、試験部流路付近における流速分布の差異は、Fig. 6 に示した、無次元距離0.98の位置を境にセル分割の間隔を不連続に変化させた影響である。

水流動解析では、PIV による流速分布測定結果を正と

Fig. 20 Experimental and analysis results of the local heat transfer coefficients at a stagnation point of the beam window

して、解析を行ったが、熱流動解析では、流量の差が、ビーム窓部における徐熱量に大きく影響することから、流量計の計測結果を正として、速度分布は円管内の発達した乱流速度分布を用いて解析を実施することにした。

2. 熱流動試験における温度変動

設計パラメータを考慮して決定した流量 100～500 l/min、入口温度 330～430℃の範囲において、窓部全体の平均ヌセルト数 Nu とペクレ数 Pe の関係で、LBE 中に置かれた ADS ビーム窓の伝熱特性を評価した結果、ビーム窓の平均的な伝熱特性を表す実験式(3)を得た。データのばらつきはファクターで 2 程度であった。LBE 流量が 100 l/min から 200 l/min では、 Nu 数のばらつきに及ぼす LBE 温度の影響は特にみられないが、 Pe 数が 7,000 以上に相当する流量 400 l/min 以上で、LBE 温度が高いほど平均 Nu 数がやや高めに表示されることがわかる (Fig. 9)。LBE 流量が 100 l/min から 200 l/min では、ビーム窓先端付近における温度のばらつきが大きく、LBE 温度の影響が現れないが、500 l/min へと大きくなるのに伴い、ビーム窓先端付近における温度のばらつきは小さくなる。かつ、平均 Nu 数の算出は、熱電対が取り付けられた天頂角を中心とする半球面上の帯の表面積による加重平均することによって算出しているため、LBE 温度が 330℃から 430℃へと高くなるのに伴い、ビーム窓先端付近における温度のばらつきが小さくなったことに起因している。このとき、LBE の熱伝導率は 330℃から 430℃の温度変化により 7.67 Wm/K から 7.79 Wm/K と、SUS316 の熱伝導率も実測値の 345℃から 445℃の範囲において 16.2 Wm/K から 17.0 Wm/K と 5% 以内の変化であるから、これらの因子の影響はほとんどないことがわかる。

ビーム窓の天頂角 $\phi=0^\circ$ より円筒部との接続部 ($\phi=90^\circ$) に至る温度分布は、大きく分けて 2 種類に分類することが可能であった。すなわち、天頂角 $\phi=0^\circ$ 付近で極小となるケース (ケース I) と相対的に高温となるケース (ケース

II) である。どちらの温度分布となるかを流量との関連から整理すると、LBE 流量が 100 l/min および 200 l/min では、両方のケースが現れていたが、300 l/min へと大きくなると、ケース I が減り、ケース II が支配的となり、さらに流量が増加すると、温度分布の均一化が促進されるようである。温度分布の変化は、LBE 温度にも依存しており、温度上昇との関連から整理すると、330℃から 430℃に増加すると、低流量の場合 (100～300 l/min) には、温度分布の均一化傾向が顕著になった。LBE 流量 400 l/min 以上では、すでに均一化された状態であり、それ以上の変化は特にみられない。ただし、ビーム窓先端から $\phi=40^\circ$ の位置では周囲のほぼ均一な温度より 5℃程度高温となる特徴があった。一様流中における円柱あるいは球周りの局所ヌセルト数分布から判断すると⁹⁾、ビーム窓先端における局所ヌセルト数は平均ヌセルト数よりも高くなる。したがって、ビーム窓先端における温度は平均温度よりも低くなる上述のケース I の温度分布が予想された。しかし、実験の結果、予想とは異なる結果が得られた。原因を温度変動との関係により考察する。

天頂角 $\phi=0^\circ$ に相当するビーム窓先端部で、温度が静定せずに、特異な温度変動が発生した。温度の変動状況は、LBE 流量に依存して変化した。これらの事象に再現性があることも数回の計測により確認した。LBE 流量が 100～200 l/min では、ビーム窓先端付近における平均温度が高温となる場合、ビーム窓の表面温度は不安定な温度の上昇と低下が繰り返された。すなわち、一定の勾配で 3 時間から 6 時間と長時間持続し、20℃から 25℃程度温度が上昇し、その後、一瞬にして低下する。ビーム窓先端付近における平均温度が低温となる場合には、上記の現象は起こらず、静定した温度状態であった。LBE 流量が 300 l/min では、温度が静定した状態と比べて相対的に 5～15℃程度高く計測される場合と、突然数秒の短い間隔で 15℃程度の大きな振幅で変動する場合が観測された。LBE 流量が 400 l/min 以上では、ビーム窓先端の表面温度の時

間変動は数秒の短い間隔で15℃程度の大きな振幅で変動するようになる。この変動は、低温側から高温側にスパイク状に変動し、流量の増加あるいは入口温度の上昇とともに、その変動幅は小さくなる傾向があった。予想されたケースⅠの温度分布に必ずしもならなかった理由として、前述の温度変動が関係していると考えられる。

温度変動の原因は、ビーム窓周りの流れの状態とあわせて判断するべきであるが、状況は不明である。しかし、以下の項目が原因として考えられる。すなわち、

- (1) ビーム窓周囲流れの変化、
- (2) 鋼材との濡れ性および腐食の効果、
- (3) スラッグの影響、
- (4) 偏流の影響、

である。以下に、これらの項目と温度変動の関係について考察する。

(1) ビーム窓周囲流れの変化

温度変動の現象はLBE流量300 l/minを境にして変化する。LBE流量300 l/minはレイノルズ数に換算すると約 3×10^5 であるが、ビーム窓が半球形状であることから、はく離を伴う物体の代表例である円柱や球周りの流れ⁸⁾とのアナロジーから、物体のよどみ点から形成される境界層が層流から乱流に遷移する臨界レイノルズ数に相当している可能性がある。つまり、ビーム窓周りの流れは、レイノルズ数が $1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5$ では層流の状態でよどみ点から $\phi = 78^\circ$ 付近で剥離するが、 $2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ になると層流境界層がいったんはく離し、壁面に再付着して乱流境界層となり、さらにレイノルズ数が大きくなると層流境界層ははく離する前に乱流境界層に遷移すると考えられる。このため、ビーム窓表面からのはく離を抑制することを意図して、ビーム窓模擬試験体による測定部断面の閉塞率を60%とした。実際、水流動試験および水流動解析においてレイノルズ数 1×10^5 , 2.5×10^5 , 4×10^5 におけるビーム窓周りの流速分布の比較から、ビーム窓表面からのはく離は明らかではなかった。ただし、水流動試験におけるPIV測定、水流動解析における定常解析では、マクロ的な流速分布の測定を意図していたため、ビーム窓表面の境界層におけるミクロ的な流れ場については検討する必要

がある。

さらに、水中でのアクリル製のビーム窓周りの流れとは異なり、LBE中でのSUS製のビーム窓周りの流れでは、鋼材との濡れ性および腐食の効果も考慮する必要がある。

(2) 鋼材との濡れ性および腐食の効果

濡れ性は鋼材とLBEの表面張力および界面張力に関連する量であり、伝熱特性には接触圧力が影響を及ぼすと考えられる⁵⁾。本実験におけるビーム窓のLBE中深さは約1 mであり、LBEの密度を考慮して静水圧は0.1 MPa程度であった。ビーム窓の接液(運転)時間は延べ933時間であったが、試験終了後にビーム窓表面を目視で観察した結果、ビーム窓表面にはLBEが付着していなかった(**Fig. 21**)。これは、伝熱特性を評価したビーム窓は物理的には完全に濡れた状態ではなかったことを示唆している。温度計測用の溝をビーム窓表面に刻み、熱電対を埋め込んだ後、Niロウで埋め戻したが、Niの部分も濡れていなかった。SUS316材をLBEに浸す実験でも、濡れなかった⁹⁾ことから、本実験の運転時間の間、ビーム窓の表面が必ずしもLBEに濡れた状況ではなかったと評価される。腐食に関しては、試験前後の窓の色は変化しており、非等温でLBEを循環させたことから窓材の主要構成元素であるNi, Cr, FeのLBE中への溶解による表面層の物質移行、ならびにサブミクロン程度の酸化膜が鋼材表面に形成された可能性がある。ビーム窓先端から $\phi = 40^\circ$ の位置では周囲のほぼ均一な温度より5℃程度高温となる特徴があった。これは、熱電対を埋め戻したNiロウ近辺で、流れのはく離や、濡れ性の変化等の流動状況に生じた変化に起因した可能性があったと考えられる。

(3) スラッグの影響

LBE中での伝熱特性に影響を及ぼす因子として、スラッグの影響も考えられる。酸素センサーで測定したLBE中の溶存酸素濃度は、飽和酸素濃度であった。余分な酸素と鉛が反応して酸化鉛を形成したため、流量校正タンクにはスラッグが大量に残存していた。流量校正タンクにLBE循環用に機械式ポンプを取り付けていたが、ポンプ本体とポンプ軸とのシール性に問題があったと考える。特にLBE流量300 l/min未満で発生する長周期の温度上昇には、系

Fig. 21 Observation of beam window from the bottom before test (left) and after test (right)

Fig. 22 Comparison of mean temperature fields on the beam window
LBE inlet boundary fluxes 100 l/min, temperature 430 degrees Celsius.

統内に浮遊するスラグがビーム窓の表面に付着する現象（スラッシング）の発生によりデポジット（付着瘤）が促進された可能性がある。さらに、LBE 流量 300 l/min 以上で、長周期の温度上昇が発生しなくなるとともに、流量増加に従い短周期の温度変動幅も小さくなるのは、Fig. 3 および Fig. 4 にみられるように流量の増加とともに、ビーム窓先端のよどみ点を中心とする滞留領域が縮小し、デポジットが起き難くなったことによると考えられる。

（４）偏流の影響

LBE 中での伝熱特性に影響を及ぼす因子として、スラグの影響のほかに、偏流の影響も考えられる。熱流動試験において、試験部流路の上流側にある曲がり管によって発生する偏流を防ぐことを意図して、試験部流路に整流装置を設けた。しかし、水流動試験結果を考慮すると、十分ではなく、偏流の影響が残ったと判断される。つまり、熱流動試験においても、同様に、偏流の影響が残存し、ビーム窓への接近流が偏向するとともに、二次流れに伴う強い非定常流れが発生していた可能性がある。この非定常流れによって、LBE 流量 300 l/min 以上で、顕著となる、短周期の温度変動が発生したとも考えられる。

3. 熱流動試験と熱流動解析の比較

熱流動解析結果との比較では、本解析で用いた汎用熱流体解析ソフト STAR-CD において、実験を通して検証したモデルを使えば、ビーム窓全体の平均ヌセルト数は、試験結果よりも 10～30% 程度大きく算出されるが、定性的にはよく一致することを明らかにした。ただし、ビーム窓先端部の LBE 入口温度に対する局所ヌセルト数の解析値は実験値に比べてやや高い値を示した。なお、計算モデルでは、ビーム窓表面ですべりなし条件とした。すべりが熱伝導に及ぼす検討例として、LBE 流量 100 l/min、入口温度 430°C の試験条件におけるすべり条件とすべりなし条件との比較解析結果を Fig. 22 に示す。このとき、ビーム窓は、発熱条件を用いる代わりに、仮定した熱流束分布を与

えた。また、すべり条件は、ビーム窓壁面上の流速を壁面近傍第 1 層セルの流速と同じとした。すべり条件とすべりなし条件によるビーム窓表面の温度分布を比較すると、ビーム窓先端ではほとんど同じであるが、 $\phi = 60^\circ$ から $\phi = 90^\circ$ へと、ビーム窓先端から周辺部へと行くにつれて温度差が大きくなる。このため、すべり条件における温度分布は、Fig. 11 に示した熱流動試験における計測結果と定性的に一致することがわかる。実験では窓表面が濡れていなかったことから、すべり条件を考える可能性を示唆している。しかし、濡れ性の定量的な評価およびすべりに及ぼす影響の評価は、今後の課題である。

V. おわりに

熱流動試験を実施し、ビーム窓の熱伝達率を計測して熱流動特性データを取得した。さらに、熱流動解析を実施して試験結果と比較し、ビーム窓の熱流動特性に関して、定常状態における平均熱伝達率について妥当な解析ができることを明らかにした。ただし、熱流動試験においてビーム窓先端のよどみ点を中心とする長周期と短周期の特異な温度変動がみられた。今後、ADS ビーム窓の熱流動設計上、その性能と健全性を確保するためには、ビーム窓先端に生じる特異な温度変動と速度場との関連、温度変動に対するビーム窓の構造耐久性に及ぼす影響を評価する必要があると考える。

本研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構が実施した平成 15 年度および平成 16 年度「加速器駆動核変換システムの技術開発等」の成果である。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力学会編，総説 分離変換工学（2004）。
- 2) 渡辺 昇，核破砕中性子源工学概論，JAERI-Review 2000-031，日本原子力研究所（2001）。
- 3) K. Tsujimoto, T. Sasa, K. Nishihara *et al.*, “Study of accelerator-driven system for transmutation of high-level waste from LWR,” *Proc. 7th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-7)*, Tokyo, Japan, Apr. 19-23, 1999, ICONE-1246 (1999)。
- 4) Computational Fluid Dynamics Software STAR-CD, Version 3.15, User Guide, シーディー・アダプコ・ジャパン（2001）。
- 5) 伝熱工学資料(改定第 4 版)，日本機械学会（1986）。
- 6) S. Cevolani, *et al.*, *Review of the Liquid Lead-Bismuth Alloy Physical Properties*, Reported in ENEA-DT-SBD-0004 (1998)。
- 7) 河村 洋，乱流の数値流体力学，大宮司久明，三宅 裕，吉澤 徹編，東京大学出版会，385（1998）。
- 8) 流体力学ハンドブック（第 2 版），日本流体力学会，441（1998）。
- 9) K. Kikuchi, Y. Takeda, H. Obayashi *et al.*, “Measurement of LBE flow velocity profile by UDVP,” *J. Nucl. Mater.*, **356**, 273-279 (2006)。