165. 高温ガス炉フランジ型燃料ブロックの クロス流れ

滝塚 貴和*, 蕪木 英雄*,
中村 雅英**, 鈴木 邦彦*

Crossflow Characteristics of Flange Type Fuel Element for Very High Temperature Gas-Cooled Reactor

(1986年 8月6日 受理)

(1987年 3月20日 再受理)

By Takakazu TAKIZUKA, Hideo KABURAKI
Masahide NAKAMURA and Kunihiko SUZUKI

Fuel element design incorporating mating flanges at block end faces has the potential to improve thermal hydraulic performance of a VHTR (very high temperature gas-cooled reactor) core. As part of research and development efforts to establish flange type fuel element design, experiments and analyses were carried out on crossflow through interface gap between elements. Air at atmospheric pressure and ambient temperature was used as a fluid. Crossflow loss coefficient factors were obtained with three test models, having different flange mating clearances, for various interface gap configurations, gap widths and block misalignments. It was found that crossflow loss coefficient factors for flange type fuel element were much larger than those for conventional flat-faced element. Numerical analyses were also made using a simple model devised to represent the crossflow path at the fuel element interface. The close agreement between numerical results and experimental data indicated that this model could predict well the crossflow characteristics of the flange type fuel element.

KEYWORDS: *crossflow, crossflow loss coefficient factor, experiment, flanges, fuel element, numerical analysis, reactor core, thermal hydraulics, VHTR reactor*

1. 序 論

多目的高温ガス実験炉(VHTR)の炉心は、積み重ねられた多数のブロック型燃料要素から構成されている。このような型式の炉心では、燃料ブロック間の隙間を通して冷却材の漏れ流れが発生する。この漏れ流れは炉心全体の冷却材有効流量を低下させ、また冷却材流量配分にも悪影響を与える。このため、漏れ流れの流動特性を定量的に把握するとともに、漏れ流れを減少させるための設計改善の方向を見出すことが炉心設計上の重要な課題となっている。

実験炉炉心内の漏れ流れの影響を低減し、熱流動特性を向上させるための設計改善案の1つとして、フランジ型燃料ブロックを採用することが検討されてい

る。これはブロック段間接触面をはめ合い構造とすることにより、漏れ流れのなかでも特に重要なクロス流れ(接触面のギャップを通る漏れ流れ)の流量を抑制しようとするものである。フランジ型燃料ブロックの概念構造を従来の燃料ブロックと比較してFig.1に示す。フランジ型燃料ブロックの上端面および下端面には、それぞれ雌型および雄型のフランジ部が設けられており、燃料ブロックを積み重ねたときに、はめ合い結合する。従来の燃料ブロックでは、上端面および下端面が平面であり、ブロック段間の結合は3組のダウエルピンおよびダウエルソケットによって行われる。

従来の燃料ブロックについては、これまでにクロス

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

** 富士電機(株)(Fuji Elec. Co., Ltd.)

Fig. 1 VHTR fuel element

流れの流動特性を明らかにし、炉心設計に必要なデータを取得することを目的として、実寸大の2ブロック試験体による実験⁽¹⁾および有限要素法による数値計算⁽²⁾を行なった。この結果、クロス流れ抵抗係数は低レイノルズ数領域では接触面ギャップ幅の -3 乗にほぼ比例し、高レイノルズ数領域では接触面ギャップ幅の -2 乗にほぼ比例して減少することがわかった。このことは、接触面ギャップが拡がるとクロス流れ流量が非常に大きくなることを意味している。これに対しフランジ型燃料ブロックでは、はめ合い部の隙間が十分狭く保たれるようにフランジ部の形状、寸法を選定することができれば、接触面のギャップが開いた場合にも、クロス流れ流量の増加を抑制できるものと考えられる。実験炉の燃料要素としてフランジ型燃料ブロックを採用するには、クロス流れ抑制の効果を含めて、フランジ部の強度、製作性などについても検討、評価を行なって、最適なフランジ形状、寸法を選定する必要がある。このために、フランジ型燃料ブロックについて一連の開発研究が行われた。

本報では、そのうちクロス流れの特性を明らかにするため行なった実験および解析について報告する。実験では常温、大気圧の空気を用いた。フランジはめ合い部隙間の異なる3組の試験体により、接触面のギャップ形状、ギャップ幅およびブロックのオフセットを変えてクロス流れ抵抗係数を求めた。解析では、単純なクロス流れ流路モデルを用いて数値計算を行なった。

Ⅱ. 実験装置および実験方法

1. 試験体ブロック

実験に用いた試験体ブロックをFig. 2に示す。これらの試験体ブロックはフランジ型燃料ブロック(ピン・イン・ブロック型, 18ピン)の上端部を模擬した雌型ブロック1体と、下端部を模擬した雄型ブロック3体からなっている。ブロックは対面間距離(平径)が334 mmの六角柱状をしている。ブロックの材質は、実験炉の燃料ブロックの候補材料に選定された等方性高密度黒鉛 IG-11 である。

雌型ブロック端面の外周には高さ30 mmのフランジ部が設けられている。フランジ先端の平面が、積み重ねた雄型ブロックとの接触面となり、フランジ内側の側面がはめ合い部となる。中央の凹部には、冷却材流路を模擬した内径52 mmの貫通孔が軸方向に18本開けられている。雄型ブロック端面の中央は外周に設けられた接触面より29 mm高い凸部になっている。雄型ブロックには流路孔は設けられていない。

フランジ部の詳細をFig. 3に示す。積み重ねたブロックの重量は外周の接触面で支持される。はめ合い部はブロック間の横方向相対変位を拘束し、位置決め役割りを果たすが、接触面外縁の1辺を中心軸としたブロック間の相対回転運動(ロッキング)が可能な構造となっている。このロッキングによって接触面にくさび型のギャップが開いた場合においても、はめ合い部の隙間が十分狭く保たれるように、はめ合い部は対辺

Fig. 2 Crossflow test blocks

Fig. 3 Flange section detail

の接触面外縁を中心軸とした半径の大きい円筒面からなっている。3体の雄型ブロックは、共通の雌型ブロックと組み合わせたとき、それぞれはめ合い部隙間 δ_f の値(製作図面寸法)が0.1, 0.2, 0.4mmとなるように、はめ合い部円筒面半径を変えて製作した。製作後、3次元測定機によってフランジ部の寸法測定を行なった結果、各組合せに対し、 δ_f の平均値はそれぞれ0.044, 0.174, 0.436mmであり、測定点ごとのバラツキは±0.02mm程度であった。フランジ部の内側には、ブロックが正常に積み重ねられているとき、高さ1mmの狭いブレナムが形成される。このブレナムは、燃料ブロックの熱変形による接触面ギャップの開口を防止するとともに、流入したクロス流れを各冷却材流路に一樣に配分し、各冷却材流路の流量を均一化する。

2. 実験装置

実験には、常温、大気圧の空気を用いた。ブロウの最大流量は約200 g/sであり、試験体ブロックの外側と冷却材流路の間のクロス流れ部に加えられる圧力差

は最大25 kPaである。

試験部の概要をFig. 4に示す。試験部中央に試験体ブロックが2段に積み重ねられている。下段の雌型ブロックは鋼製のベースプレート上に固定されている。上段の雄型ブロックは、上面に取り付けられたサポートアームを介して3台のマイクロジャッキにより支持される。接触面ギャップ幅および上下ブロック間の横方向オフセットを正確に設定するため、ダイヤルゲージ

Fig. 4 Test section

ジを垂直方向に3個、水平方向に4個取り付け、上段ブロックの垂直方向および水平方向の変位を測定できるようにしている。

試験部周囲は大気開放されており、クロス流れは試験体ブロックの外側から接触面ギャップを通過して下段ブロックの冷却材流路に漏れ込む。18本の冷却材流路は試験部の下側に取り付けられた出口プレナムに接続しており、各冷却材流路の流れは出口プレナム内部で合流する。出口プレナムとブロウを接続する配管には4台の層流型流量計が設けられている。これらを選択することによって広範囲のクロス流れ流量を測定できる。クロス流れ部の圧力差は出口プレナム内部と大気との間で測定される。

3. 実験方法

実験では、クロス流れ部の圧力差を0.05～25 kPaの

範囲で変えて、ブロック段間接触面を漏れるクロス流れ流量を測定した。圧力差および流量の測定精度はそれぞれ1%および3%程度である。

接触面に開くギャップは、Fig. 5に示す平行ギャップおよびくさび型ギャップの2種類の形状で模擬した。平行ギャップは、上段ブロックを垂直方向に持ち上げたもので、接触面に一様なギャップが開く。くさび型ギャップは、接触面外縁の1辺を中心軸として上段ブロックを傾斜させたものであり、ギャップ幅は中心軸とした辺(閉口辺)から対辺(開口辺)に向けて線形に増加している。接触面ギャップは3台のマイクロジャッキと3個のダイヤルゲージを用いて設定した。ギャップ幅 δ の実験範囲は0.05～10 mmであり、設定精度は0.01 mm以内である。

Fig. 5 Interface gap configurations

フランジ型燃料ブロックの場合には、上下ブロック間の横方向オフセットはフランジはめ合い部の隙間の分布を変化させるため、クロス流れに大きな影響を与えることが考えられる。このオフセットの影響を調べるため、平行ギャップおよびくさび型ギャップに対して、それぞれ3通りのオフセットを与えて実験を行なった。Fig. 6にオフセットの定義および実験したオフセット条件を示す。オフセットは上下ブロック中心軸の水平方向偏心で定義している。 ϵ_x および ϵ_y は、接触面外縁の1辺に対し、それぞれ垂直方向(x 方向)および平行方向(y 方向)のオフセット成分である。くさび型ギャップの場合には、開口辺に垂直な方向に x 軸をとり、開口辺側ではめ合い部隙間が広がる方向のオフセットを正($\epsilon_x > 0$)とした。オフセットの設定は、

水平方向に取り付けた4個のダイヤルゲージを用いて行なった。その設定精度は0.01 mm程度である。

Ⅲ. 解析モデルおよび計算方法

フランジ型燃料ブロックのクロス流れを解析するために、フランジ部のクロス流れ流路を多数の平行な1次元流路に分割したモデルを用いた。

フランジ型燃料ブロックを積み重ねたとき、ブロック段間中央部に狭いプレナムが形成される。このプレナムの高さは、ブロック外周に設けられたフランジ部の接触面ギャップあるいははめ合い部隙間と比べて大きいいため、クロス流れに対しプレナム内部の流動抵抗は十分小さく、フランジ部の流動抵抗が支配的になると考えられる。したがって、解析ではプレナム内部の

Fig. 6 Block misalignments

圧力は一様と仮定し、フランジ部の流路のみを対象とした。また、フランジ部の構造は角部を除いてブロック外縁に平行であることから、フランジ部の流れはブロック外縁に対してほぼ直角方向に内向きであると考えられる。このため、クロス流れの流路を局所的に1次元の流路要素でモデル化した。フランジ部のクロス流れ流路全体はそれらを並列に接続した流路網で表わされる。

各流路要素の横方向の幅は流路分割数によって決まる。また、各流路要素の長さおよび流れ方向各位置の高さは、フランジ部の形状、寸法、接触面ギャップの形状、寸法およびブロックのオフセットから幾何学的に計算することができる。これらの各流路要素に対し、流路入口出口間の圧力差を与えて流量の計算を行なった。実際の計算では、適当に仮定した流量から流路の圧力損失を求め、この圧力損失が与えた圧力差に近づくように流量を修正し、解が収束するまで繰返し計算を行なった。

圧力損失の計算においては、流体の密度 ρ および粘度 μ は一定とし、Fig. 7に示す摩擦係数 λ とレイノルズ数 Re の関係を用いた。 λ および Re は次のように定義される。

$$\lambda = -\frac{4h}{\rho \bar{u}^2} \cdot \frac{dp}{ds} \quad (1)$$

$$Re = \frac{2\rho \bar{u} h}{\mu} \quad (2)$$

ここで、 h : 流路高さ、 $\bar{u}$: 流れの平均速度
 p : 圧力、 s : 流れ方向座標

Fig. 7 Friction factor correlation used for crossflow calculations

Fig. 7に示した関係は、層流領域で平行平板間流路の発達した層流の解析解($\lambda=96/Re$)に、また乱流領域では Blasius の式($\lambda=0.3164Re^{-0.25}$)に漸近する。流れ

方向に流路高さが変化する場合にも、局所的に平行平板間流路と仮定し、Fig. 7 に示した関係を用いた。流路断面積が急拡大あるいは急縮小する点における圧力損失係数 ζ は、一般に、形状およびレイノルズ数によって変化するが、それらの影響を正確に評価することは困難である。このため、ここでは最も単純に次のように近似した。

急拡大する点で

$$\zeta \left(= \frac{2\Delta p_t}{\rho \bar{u}_1^2} \right) = \left(1 - \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1} \right)^2 \quad (3)$$

急縮小する点で

$$\zeta \left(= \frac{2\Delta p_t}{\rho \bar{u}_2^2} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 Δp_t : 全圧の変化

添字 1, 2: それぞれ上流側, 下流側を示す。

接触面からはめ合い部に向かって流れの方向が変化するが、この曲がりによる圧力損失は無視した。

1 辺当りの流路分割数を 1 から 64 まで、相対誤差の収束判定基準を $10^{-1} \sim 10^{-8}$ の範囲で変化させて予備的な計算を行なった。この結果に基づいて、解の精度(流路分割数 64, 収束判定基準 10^{-8} の場合との相対誤差)が 0.1% 以内になるように流路分割数および収束判定基準を決定した。くさび型ギャップでギャップ幅が

2 mm より広い場合を除いて、計算に用いた流路分割数は 10, 収束判定基準は 10^{-4} である。

IV. 結果および考察

1. クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数との関係

実験結果および計算結果は、接触面のギャップ形状およびギャップ幅をパラメータとして、クロス流れ抵抗係数 Λ [m^{-4}] とレイノルズ数 Re との関係で整理した。クロス流れ抵抗係数は 1 接触面当りのクロス流れの質量流量 M と圧力差 Δp で、また Re は接触面外縁のぬれ縁長さ L ($=12a$, a : 1 辺の長さ) を用いて次のように定義した。

$$\Lambda = 2\rho\Delta p/M^2 \quad (5)$$

$$Re = 4M/\mu L \quad (6)$$

平行ギャップおよびくさび型ギャップの場合の代表的な実験結果をそれぞれ Fig. 8 (a), (b) に示す。いずれも、はめ合い部隙間 δ_f が 0.174 mm の試験体を用い、オフセットがない場合 ($\varepsilon_x = 0$, $\varepsilon_y = 0$) の結果である。接触面のギャップ幅 δ が大きくなるとともに Λ が減少することがわかる。 δ が 0.2 mm より小さい範囲では、 Λ は Re にほぼ逆比例している。これは、(5), (6) 式からわかるように、 M と Δp がほぼ比例していることを表わしており、クロス流れの圧力損失に対して粘

(a) Parallel gap case

(b) Wedge-shaped gap case

Fig. 8 (a), (b) Crossflow loss coefficient factor as functions of Reynolds number and gap width

性力が支配的であることを示している。 δ が大きくなるとともに、特に Re の高い範囲で、 A の傾きが緩やかになる。このことはクロス流れの圧力損失に対して慣性力の効果が現れてくることを示している。

平行ギャップとくさび型ギャップの場合を比較すると、くさび型ギャップの場合の方が A の値が大きい。これらの結果は従来の燃料ブロックの実験結果¹⁰⁾と定性的に類似している。ただし、 δ が 1 mm 程度より大きい範囲において、従来の燃料ブロックの A は Re によらず一定値となるが、フランジ型燃料ブロックの A は Re の増加とともに減少する傾向にある。このことは、フランジ型燃料ブロックでは、 δ が大きい範囲においてもはめ合い部の流動抵抗が大きいことを示唆している。従来の燃料ブロックの結果との定量的な比較は後節で行う。

平行ギャップの場合の実験結果と計算結果との比較を Fig. 9 に示す。 δ が 0.05 mm の場合と δ が 5 mm 以上で Re の高い領域に不一致が見られるが、全体的には計算結果は実験結果を良く再現している。

Fig. 9 Crossflow loss coefficient factor correlation, comparison between experiments and calculations

δ が 0.05 mm の場合には、 A の計算値は実験値より大きい。この不一致は、黒鉛内部を通る透過流れおよび接触面の表面粗さやうねりなどの表面形状の影響によるものと考えられる。解析では接触面を通るクロス

流れのみを考慮しているのに対し、実験で測定した流量には透過流れが含まれている。透過流量は δ によらないため、 δ が小さくなってクロス流れ流量が減少すると透過流れの影響が大きくなる。したがって、 δ が小さくなるほど A をより高めに評価することになる。図中の破線は、実験によって求めた透過流量と圧力差との関係を用いて計算結果に補正を加えたものである。

透過流量の測定は、ブロック接触面をコンパウンドでシールし、クロス流れ流量の測定と同じ条件で行なった。透過流量を補正した計算結果は実験値よりまだ高めである。この相違は、主として接触面の表面形状の影響によるものと考えられる。実験では、接触面が機械的に接触した点を $\delta=0$ としてギャップ幅 δ の値を定めた。しかしながら、接触面の粗さやうねりなどのため、流体力学的に等価なギャップ幅は実験で設定したギャップ幅 δ より一般に大きくなると考えられる。 $\delta=0.06$ mm とし、透過流量の補正を加えた計算結果は $\delta=0.05$ mm の実験結果と良好な一致を示した。

このことから、流体力学的に等価なギャップ幅は δ より 0.01 mm 程度大きいと推定される。この値は接触面の平面度(約 0.01 mm)および表面粗さ(R_{max} 約 15 μ m)と同程度であり、また黒鉛ブロックが接触している面の漏れ流れに対して得られた等価ギャップの値¹⁰⁾とはほぼ一致している。

δ が大きく Re の高い領域における、実験と計算の不一致は流れの圧縮性によるものと考えられる。計算では流体の密度を一定と仮定したのに対し、実験では常温、大気圧の空気を用いたため、圧力差および流速の大きい領域の実験結果に圧縮性の影響が現れることになる。圧縮性流れでは、流体の密度減少によって流速が増加するため、流量が同じ非圧縮性流れより圧力損失が大きくなる。したがって、圧縮性流れの A は Re の増加とともに非圧縮性流れの A より徐々に大きくなる。 Re の非常に高い領域において、 A の実験値に急激な上昇が見られるが、これは流れのチョークによるものと考えられる。流路形状、寸法の計算値と流量の測定値から流速を概算した結果、この領域でははめ合い部入口の流路断面積が最も小さくなる部分で流れはほぼ音速に達していることがわかった。流路の最小断面で流れが音速になると、流量は圧力差によらず一定となる。

実験結果と計算結果の不一致について考察を行なったが、これらの結果を炉心設計に用いる場合に、この不一致が問題になることはないと考えられる。 δ が小

さい領域における Δ の不一致は流量の絶対値から見れば非常に小さいため、炉心全体の冷却材有効流量および流量配分にはほとんど影響を与えないといえる。圧縮性の影響は高温、高圧のHeガスを用いる実際の炉心条件ではほとんど無視することができる。また、炉心におけるクロス流れの Re 範囲は本実験の最大 Re の1/10以下になると予測され、この範囲の実験条件では実験結果に対する圧縮性の影響は比較的小さいと考えられる。

2. フランジ部の形状と寸法の影響

従来の燃料ブロックのクロス流れについては、低レイノルズ数領域と高レイノルズ数領域における流動特性の考察に基づいて、 Δ を Re と δ の関係で表示する実験式を導いた⁽²⁾。フランジ型燃料ブロックの場合には、 δ が小さい領域を除いて、このような形式で整理することは困難であった。したがって、フランジ部の形状、寸法およびブロックのオフセットを変えた場合の結果の比較を容易にするため、次のように無次元化した圧力差 ΔP を一定とした条件における Δ と δ の関係で表わすことにする。

$$\Delta P = \frac{\rho L^3}{\mu^2} \Delta p \quad (7)$$

ここでは $\Delta P = 6.12 \times 10^9$ とした。この値は実験条件(常温、大気圧の空気)では6.7 kPa、代表的な炉心条件(400℃、4 MPaのHeガス)では10 kPaの圧力差に相当する。

Fig.10(a)は、はめ合い部隙間 δ_f の異なる3組の試験体による平行ギャップの実験結果を比較したものである。 Δ は δ の増加とともに減少している。また、 Δ は δ_f によって大きく変わり、 δ_f が小さいほど大きくなる。特に、 δ の中間領域において著しい相違が見られる。 δ が小さい領域および δ が大きい領域では、 Δ の相違は比較的小さい。図中の実線は、透過流れおよび表面形状の影響を補正した計算結果である。表面形状の影響を補正するため、流れを計算する流路高さに幾何学的に計算された流路高さより0.01 mm大きい値を用いた。実験結果と計算結果は比較的良好に一致していることがわかる。破線は、従来の燃料ブロックの実験式⁽²⁾を同じ条件で比較できるように書き直したものである。ただし、この実験式は透過流れの影響を考慮していないため、 δ が非常に狭い領域では Δ を過大に評価している。この領域を除けば、フランジ型燃料ブロックの Δ は破線より大きく、特に δ が δ_f より大きい領域で著しく大きくなっている。このことから、フ

(a) Parallel gap case

(b) Wedge-shaped gap case

Fig. 10(a), (b) Effect of flange mating clearance on crossflow

ランジ型燃料ブロックはクロス流れ流量の低減に有効であることが確認できる。

くさび型ギャップの結果をFig.10(b)に示す。くさび型ギャップの Λ は平行ギャップの場合と比べて大きい。全体の傾向は類似している。くさび型ギャップの場合にも、実験と計算の一致は比較的良好であり、また従来の燃料ブロックより Λ が大きいことがわかる。

はめ合い部流路長さ l_f および接触面流路長さ l の影響を調べた計算結果をFig.11に示す。Fig. 11(a)は l_f

を変えた計算結果を比較したものである。 δ が小さい領域($\delta \sim 0.1$ mm)および大きい領域($\delta \sim 10$ mm)では Λ は l_f によらないが、 δ の中間領域($\delta \sim 1$ mm)では l_f が大きいほど Λ は大きくなっている。Fig. 11(b)は l の影響を示したものである。 l が大きいほど Λ の値は大きくなっている。 l による Λ の相違は δ は0.1 mm程度の領域で最も大きく、 δ の増加とともに相違が小さくなっている。 δ が0.1 mm程度より小さい範囲で l による Λ の相違が小さくなっているが、これは透過流量の補正を行なっているためである。

Fig. 11(a), (b) Effect of flange geometry on crossflow

以上の結果から次のことがいえる。 δ が小さい領域では Λ に対し δ および l が大きな影響を与える。このことはクロス流れの圧力損失に対し接触面流路の摩擦抵抗が支配的であることを示している。 δ の中間領域では、 δ_f および l_f の影響が大きいことから、はめ合い部流路の摩擦抵抗が支配的になると考えられる。また、 δ が大きい領域では、 δ_f 、 l_f および l の影響は比較的小さくなる。したがって、この領域の圧力損失はほとんど流路の形状変化による損失(ここでは流路出口部の損失)によって決まると考えられる。

3. ブロックオフセットの影響

平行ギャップについて、ブロックのオフセットを変えて実験した結果をFig.12(a)に示す。平行ギャップの

場合には、オフセットによる Λ の変化は比較的小さいことがわかる。 δ が0.3 mmより小さい領域では、オフセットがある場合($\epsilon_x = \delta_f$, $\epsilon_y = 0$ および $\epsilon_x = 0$, $\epsilon_y = 2\delta_f/\sqrt{3}$)の Λ はない場合($\epsilon_x = 0$, $\epsilon_y = 0$)より高めになり、 δ が0.3~4 mmの領域では、逆に低めになっている。 δ が4 mm程度より大きい領域では、オフセットの影響がほとんど見られない。図には計算結果も示してあるが、計算結果は実験結果と良く一致している。

δ が小さい領域における Λ の変化は次のように説明できる。オフセットによってはめ合い部隙間が狭くなった辺では、はめ合い部の流動抵抗が大きくなるため流量が減少する。一方、はめ合い部隙間が広がった辺の流量は接触面の流動抵抗でほぼ決まるため、オフセ

ットのない場合と大きく変わらない。したがって、オフセットによりブロック全体の流量は減少し、 Λ は増加する。 δ の中間領域では、各辺の流量ははめ合い部の流動抵抗によって決まる。一般に、流量は隙間の12/7乗(乱流域)から3乗(層流域)に比例するため、オフセットによってはめ合い部隙間が広がった辺の流量の増加分は狭くなった辺の減少分より大きくなる。したがって、この領域ではオフセットによって全流量は

増加し、 Λ は減少する。 δ の大きい領域では、流路出口部の圧力損失が支配的になるため、流量は流路出口部の断面積にはほぼ比例する。流路出口部の全断面積はオフセットによってほとんど変化しないため、全流量はほとんど変わらず、 Λ に対するオフセットの影響は見られなくなる。

Fig.12(b)にくさび型ギャップの結果を示す。くさび型ギャップの場合にはオフセットの影響が顕著に現れ

Fig. 12(a), (b) Effect of block misalignment on crossflow

ている。くさび型ギャップの開口辺側ではめ合い部隙間が広がる方向にオフセットした場合($\epsilon_x = \delta_f$, $\epsilon_y = 0$)には、オフセットのない場合より Λ は小さくなり、特に δ が0.2~2mmの範囲で $1/2 \sim 1/4$ 程度の値に低下している。これに対し、逆方向にオフセットした場合($\epsilon_x = -\delta_f$, $\epsilon_y = 0$)には Λ が大きくなり、 δ が0.08~1mmの範囲で2~10倍程度の増加が見られる。 δ が小さい領域および大きい領域では、オフセットの影響は比較的小さくなっている。くさび型ギャップの場合にも、計算結果は実験結果を良く再現している。

くさび型ギャップの場合のオフセットによる Λ の変化は、主として、開口辺側のはめ合い部隙間の変化に起因するものと考えられる。閉口辺側では、はめ合い

部より接触面の流動抵抗が支配的であるため、オフセットによる閉口辺側の流量変化は小さい。一方、開口辺側の流量ははめ合い部の流動抵抗でほぼ決まるため、オフセットによって大きく変化することになる。 δ が大きい領域では、閉口辺側でも接触面の流動抵抗が相対的に小さくなるため、平行ギャップの場合と同様に、オフセットの影響は小さくなると考えられる。

V. 結 言

VHTRのフランジ型燃料ブロックについて常温、大気圧の空気を用いてクロス流れ実験を行なった。実験では、フランジはめ合い部隙間、接触面のギャップ形状、ギャップ幅、ブロックのオフセットを変えてクロス

流れ流量と圧力差の関係を求め、炉心設計に必要なクロス流れ抵抗係数のデータを取得した。この結果、フランジ型燃料ブロックのクロス流れ抵抗係数は従来の燃料ブロックと比べて大きいことがわかった。

また、単純なクロス流れ流路モデルを提案し、数値計算を行なった。計算結果は実験結果と良好な一致を示し、このモデルによりフランジ型燃料ブロックのクロス流れ特性を良く予測できることがわかった。

本研究を進めるに当たり、有益なご助言を頂いた日本原子力研究所高温工学部高温構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表する。

—参考文献—

- (1) 滝塚貴和, 蕪木英雄: 原子力誌, 27[4], 347 (1985).
- (2) 蕪木英雄, 滝塚貴和, 橋本憲吾: 同上, 27[5], 450 (1985).
- (3) KABURAKI, H., TAKIZUKA, T.: J. Nucl. Sci. Technol., 22[5], 387 (1985).

粒子線検出器

—放射線計測の基礎と応用—

クラインクネヒト著/高橋・吉城訳 A5・224頁 定価 6900円
加速器の大型化や技術の開発に伴い、粒子の反応過程の測定やデータの収集方法が急速に進展した。本書はこれら最近の進歩を含め、測定の理論および各種検出器について体系的かつ具体的に解説し、データを紹介。

物理学辞典 (縮刷版)

物理学辞典編集委員会編 A5・2440頁 定価 9800円
760余名の執筆者が隣接分野を含めた13000項目を小項目主義で詳説した初の本格的辞典。見出し項目には対応する英独仏露語を併記し、500余名の人物紹介、十分な各種データをのせるなど有用な辞典である。

センサハンドブック

片岡・柴田・高橋・山崎編 B5・1200頁 定価 58000円
センサの開発、応用に携わる研究者・技術者およびユーザーのために、その原理・構造の基礎知識と最新動向から、科学技術および産業界における応用システムまで、重要事項をすべて網羅したセンサの決定版。

統計工学ハンドブック

得丸英勝, 柴田 碧, 岡村弘之, 長谷川利治, 添田 喬, 中溝高好, 秋月影雄, 山川新二共編
A5・688頁 定価 16000円
理工学におけるデータ処理、とくにランダムデータ処理に力点を置いたハンドブック。研究室等の実験・計測により得られるデータの連の処理法について系統的に説明。さらに各種応用例についても詳説。

〒102 東京都千代田区九段南 4-3-12

培風館

TEL(03)262-5256 振替東京 4-44725