技術

121. 多目的高温ガス実験炉の炉床部黒鉛ブロック間に生じるすき間と流れに関する試験

菊地 賢司*, 二川 正敏*,
滝塚 貴和*, 蕪木 英雄*, 佐野 好母*

(1984年 4月5日 受理)

Experiments on Graphite Block Gaps Connected with Leak Flow in Bottom-Core Structure of Experimental Very High-Temperature Gas-Cooled Reactor

By Kenji KIKUCHI, Masatoshi FUTAKAWA,
Takakazu TAKIZUKA, Hideo KABURAKI and Konomo SANOKAWA

In order to minimize the leak flow rate of an experimental VHTR (a multi-purpose very high-temperature gas-cooled reactor), the graphite blocks are tightened to reduce the gap distance between blocks by core restrainers surrounded outside of the fixed reflectors of the bottom-core structure and seal elements are placed in the gaps.

By using a 1/2.75-scale model of the bottom-core structure, the experiments on the following items have been carried out: a relationship between core restraint force and block gap, a relationship between core restraint force and inclined angle of the model, leak flow characteristics of seal elements *etc.*

The conclusions derived from the experiments are as follows:

- (1) Core restraint force is significantly effective for decreasing the gap distance between hot plenum blocks, but ineffective for the gap between hot plenum block and fixed reflector.
- (2) Graphite seal element reduces the leak flow rate from the top surface of hot plenum block into plenum region to one-third.

KEYWORDS: very high temperature, gas-cooled reactors, hot plenum, core restrainer, block gap, leaks, seals, sealing materials, graphite flow rate

I. 序 論

多目的高温ガス実験炉(以下, 実験炉)の炉床部では, 固定反射体, 高温プレナムブロック, 断熱ブロック, サポートポストなどにより高温プレナムが形成されている(Fig. 1)^①。高温プレナムは各燃料領域より噴流となって流出してくる平均 950°C, 4 MPa の高温高圧 He ガスを混合させる機能を持つ。燃料領域とは燃料体等の集合体を指し, その流量は炉心上部にある流量制御装置によって制御される(Fig. 2)。原子炉圧力容器入口温度が約 400°C の He ガス冷却材は, 炉床部下方のサポートプレートや固定反射体の外側を流れて, 炉心上部の流量制御装置より各燃料領域へ流入する。しかし, 炉心部および炉床部は主に黒鉛ブロックの集合体

であるため, 各ブロック間には炉内の圧力差(最大 10 kPa)によりすき間流れが生じる。そのため, 炉心の冷却材流量配分の推定に当っては, これらの漏れ流れも考慮に入れた流路網モデルを用いて検討が行われている^②。特に炉床部では, 高温プレナムブロック間および高温プレナムブロックと固定反射体間の垂直下向き漏れ流れ, あるいは固定反射体間などの水平方向漏れ流れが生じて, 高温プレナムへ流入することになる。その流量は炉心全流量に対して約 7% と見積られている^③。

すき間流れの流量があらかじめ計画された値より大きくなると, 炉心有効流量割合(原子炉全流量に対する

* 日本原子力研究所 高温工学部 (Dept. of High Temp. Eng., Japan At. Energy Res. Inst.)

1: Fixed reflector	10: Reactor pressure vessel
2: Lower plenum block	11: Core barrel
3: Thermal barrier block	12: Core restrainer
4: Support plate	13: Fixed reflector
5: Hot duct	14: Replaceable reflector
6: Diagrid	15: Fuel block
7: Support post	16: Flow rate control device
8: Hot plenum	17: Control rod device
9: Hot plenum block	18: Stand-pipe

Fig. 1 Core structure of experimental VHTR^ω

る燃料チャンネルを流れる冷却材流量の割合)が減少するため、燃料温度が上昇したり^ω、高温プレナムブロックに過大な熱応力が生じる可能性が出てくる。

一方、高温プレナムへのすき間流れの流量を減少させるために、すき間が発生すると考えられる高温プレナムブロック間、高温プレナムブロックと固定反射体間、固定反射体間には金属や黒鉛片のシール要素が設置される。

そこで、実験炉と同程度の加工精度、表面仕上げを有する黒鉛ブロックやシール要素を用いて、炉床部構成要素の組立て試験を行い、ブロック間のすき間やブロック間の相対段差に及ぼす拘束力の影響、および地震時を模擬した試験体傾斜時の炉心拘束力の変化、シ

Fig. 2 One-region fuel columns

ール要素の冷却材流れ特性を調べた。

製作した炉床部構造試験体は、実験炉の約1/2.75の大きさで、常温常圧の空気を作動流体として用いた。

Ⅱ. 炉床部構造試験体

1. 試験体の概要

実験炉の炉床部を模擬して製作した炉床部構造試験体の概要をFig. 3に示す。高温プレナムブロック1体は1つの燃料領域(Fig. 2)に対応して合計19体ある。実験炉の高温プレナムブロックは、炉心の荷重を支持するとともに高温のHeガスを混合させる機能を有しており、7つの冷却材流路が設けられているが、ブロッ

1: Hot plenum block	7: Lower plenum block
2: Fixed reflector	8: Core barrel
3: Key	9: Core restrainer
4: Seal element	10: Support post
5: Hot duct	11: Thermal barrier block
6: Support plate	

Fig. 3 Bird's eye view of bottom-core structure model

ク間の漏れ流れ試験には直接的な影響がないと考えられるので、試験体には特に設けなかった。炉心の内部構造物を取り囲んでいる固定反射体は、円周方向に18分割されていて、3種類の形⁽⁴⁾(Fig.4)がある。本試験体では上下2段積みとした。また、固定反射体の配置がずれないように、固定反射体側面間にキーが挿入してある。

Fig. 4 Three types of fixed reflectors

Fig. 5 Installation of seal element in gaps between side surfaces of fixed reflectors

高温プレナムブロックと固定反射体の外側領域より、ブロック間すき間を通して高温プレナムへ流入する漏れ流れを防止するため、シール要素が挿入されている。これらのシール要素挿入箇所は、固定反射体側面間(Fig.5)および上下面間(Fig.6)、高温プレナムブロック側面間および高温プレナムブロックと固定反射体側面間(Fig.7)のブロック間すき間である。それぞれのシール要素の幅は実験炉と同じ30mmである。

Fig. 6 Installation of seal element in gap between top and bottom surfaces of fixed reflectors

Fig. 7 Installation of seal element in gap between top surfaces of hot plenum block and fixed reflector

実験炉における2本の出口管は、高温プレナム内の高温高圧(950°C, 4 MPa) He ガスを原子炉圧力容器外に取り出す流路を形成する。炉床部構造物の下部の鋼製サポートプレートは、炉心と炉床部構成要素の重量をダイヤグリッドを通じて圧力容器へ伝達する。下部プレナムブロックは高温プレナムの底面を構成する。コアパレルは炉心と炉床部の構成ブロック群を囲む鋼製円筒である。炉心拘束機構は、炉心と炉床部の構成ブロック群の配列がずれるのを防ぐとともに、固定反射体同士の側面間を締め付けてブロック間に大きなすき間が生じないようにするもので、リンク⁽⁵⁾、ターンバックル⁽⁶⁾、スプリング⁽⁷⁾、バンド⁽⁸⁾などの形式が提案されている。

本試験体では力が炉心中心方向に向い、かつ力の制御が比較的簡単なスプリング方式を採用した。

炉心拘束機構の1ユニットは固定反射体1体に対応し、並列に並べた4本のスプリングより成る。また、炉心拘束機構の固定反射体と反対側の端は、炉心拘束力に対する反力壁となるコバレルに取り付けられている。サポートポストは、下部プレナムブロックに立てられて、高温プレナムブロックを支持している黒鉛の円柱である。その上下端は半球面になっており、それぞれポストシートと呼ばれる座と球面接触をする。高温プレナムブロックは1体当り3本のサポートポストで支持される。断熱ブロックの形状は高温プレナムブロックと同じ形で1体構造とした。

本試験体は、実験炉の1/2.75スケール縮小モデルで直径は約2m、高さは約1mである。Table 1に試験体各部の材質を示す。

Table 1 Material of each element used in bottom-core structure model

Component	Material
Hot plenum block	Graphite (PGX)
Fixed reflector	Graphite (PGX)
Key	Graphite (IG-11)
Seal element	Graphite(IG-11), SUS 304
Support plate	SS 41
Lower plenum block	Graphite (PGX)
Core barrel	SS 41
Core restrainer	Spring steel, Carbon steel
Support post	Graphite (IG-11)
Thermal barrier block	Carbon

2. 製作ブロックの加工精度と表面粗さ

本試験体の加工精度は実験炉の場合と同程度とした。次表にそれぞれの構成要素の加工精度を示す。ただし、()内はおおよその全長(mm)を表わす。

要素(mm)	加工精度(mm)
○高温プレナムブロック	
対辺間 (300)	-0.05~0
高さ (250)	-0.05~0.05
○固定反射体	
円周方向(300)	0~0.1
高さ (400)	-0.05~0.05
半径方向	
A, B型(250)	-0.13~0
C型 (200)	-0.3~-0.2
○サポートポスト	
高さ (220)	-0.05~0.02
○ポストシート	
高さ (40)	-0.05~0.05
○下部プレナムブロック	
高さ (130)	0~0.1
○断熱ブロック	
高さ (270)	-0.05~0.05

次に、シール面の表面粗さ曲線の例を示す。Fig. 8 (a)は固定反射体、(b)は高温プレナムブロックで、最大高さはいずれも60~70 μm である。Fig. 8(c)はシール要素の表面粗さであるが、固定反射体や高温プレナムブロックの黒鉛(PGX)と違って、シール要素は微粒等方性黒鉛(IG-11)であるため、比較的平坦で最大高さも~20 μm 程度に収まっている。ただし、いずれの黒鉛の表面粗さも表面からの食い込みの深い、偏った粗さを示している。

Fig. 8 Surface roughness of graphite blocks and seal element

3. ブロック間のすき間と相対段差

ブロック間のすき間の測定には、渦電流型の非接触式変位計とシックネスゲージを用いた。非接触式変位計はあらかじめブロックに埋め込んで、相対するブロック面との変位を測定した。測定点数と変位計の仕様を以下に示す。()内は測定可能な最大値である。

○高温プレナムブロック側面間 13点(4mm)

○高温プレナムブロックと固定

 反射体の側面間 1点(4mm)

○固定反射体の側面間 18点(2mm)

○固定反射体の上下端面間 9点(2mm)

変位計の測定精度、分解能はそれぞれ最大値の ± 1 以下、0.05%以上である。変位計のブロック埋め込み位置は、被測定面のほぼ中心とし、検定は変位計と黒鉛ブロックの実際の組合せについて、ブロック間のすき間がゼロと最大の場合の2点で行なった。なお、シ

ックネスゲージの最小厚さは0.03mmである。

高温プレナムブロック間の相対段差の測定には、最小目盛0.01mmのダイヤルゲージを用いてブロック接触面上端の中央部で行なった。

高温プレナムブロックと固定反射体間のブロック間すき間の測定位置をFig. 9(a)に、相対段差の測定位置をFig. 9(b)に示す。シックネスゲージによるすき間の測定点数は126、ダイヤルゲージによる相対段差の測

定点数は90である。固定反射体側面間の0.5~1.0mmのすき間は熱膨張を逃げるためのものである。実験炉では、ブロックの内側が高温に加熱されて、外側のブロック間すき間が大きく広がることを防止するため、固定反射体は内側に0.5mmの溝が切られている。そのため、固定反射体同士の接触面の内側には1mmのすき間が、固定反射体と高温プレナムブロックの接触面には6個所に0.5mmのすき間が生じる。

Fig. 9 Measuring points of block gaps and differential levels

4. 炉心拘束力

本試験体の炉心拘束機構は変位制御によるスプリング方式である。固定反射体1体は、1ユニットの炉心拘束機構による中心方向の力で締め付けられる。1ユニットは同じバネ定数 (10^2 N/mm) で、かつ並列結合された4個のスプリングと拘束力測定用の1個のロードセルにより構成されている。拘束力の測定範囲は1ユニット当たり 10^4 N で、測定点は全炉心拘束機構の36点である。それぞれのユニットの拘束力は同じなので、以後、炉心拘束力は1ユニット当たりの力で表わす。

5. 差圧発生装置

試験体に漏れ流れを発生させるための差圧発生装置は、2本の出口管を模擬した配管と流量計、ブロワ、バイパス管より構成される (Fig. 10)。差圧計は最大測定差圧 5 kPa のひずみゲージ方式で、導圧孔は設置用架台中央に設けられている。漏れ流れの流量測定には、次に示す測定範囲の4台の層流型流量計を使用した。

$$2.6 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$2.1 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-3} //$$

$$1.7 \times 10^{-3} \sim 2.6 \times 10^{-2} \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$1.3 \times 10^{-2} \sim 2.1 \times 10^{-1} //$$

ブロワはリングタイプで2台並列に接続されている。最大発生差圧は 30 kPa 、最大流量は2台で $0.13 \text{ Nm}^3/\text{s}$ である。作動流体である空気は、測温抵抗計により測定した。

Fig. 10 Flow diagram of differential pressure generating system

6. 試験体の傾斜

試験体に加わる水平方向の力による拘束力の変化を調べるため、試験体は傾斜可能な構造とした。すなわち、一端をピン支持された試験体設置架台の反対側の端をチェーンブロックで昇降させることにより試験体を傾斜させることができる。試験体の最大傾斜角は、

- (1) 本試験体の設計荷重制限
- (2) S_1 地震に対する原子炉本体の応答解析によると、水平方向地震加速度の最大値は約350 galの条件により 20° とした。

Ⅲ. 試験内容

実験炉では鋼製のサポートプレート上に黒鉛や炭素などのブロックが積み重ねられている。これらのブロック間のすき間は温度差(最高 550°C)と熱膨脹係数の違いにより変化するので、炉の定格運転時にすき間流れを最小にするようあらかじめブロック間のすき間を設定しておく必要がある。

本試験では、すき間流れが最小であるような理想的な実験炉の定格運転時のブロック配列に近付けた試験体を用いて、

- (1) ブロック間のすき間に及ぼす炉心拘束力の影響
- (2) ブロック間の相対段差
- (3) 試験体傾斜時の炉心拘束力の変化
- (4) 高温プレナム上部に設置されたシール要素の漏れ流れ特性

を調べるとともに、固定反射体下段のみの試験体を用いて、

- (5) 固定反射体側面間に設置されたシール要素とキーの漏れ流れ特性

を調べた。すなわち、試験項目(1)~(4)では、まず固定反射体の側面間を拘束機構で締め付けて固定反射体側部の漏れ流量を最小にし、かつ高温プレナムブロック側面間のすき間をなるべくゼロにするように試験体を組み立てた。**Photo. 1** はサポートプレート上に積載された断熱ブロックを示す。**Photo. 2** は、高温プレナムを構成する高温プレナムブロック、サポートポスト、下部プレナムブロック、固定反射体、出口管や炉心拘束機構などを示す。高温プレナムブロック、固定反射体やブロック間すき間に設置されたシール要素を**Photo. 3** に示す。

試験項目(5)では、固定反射体側面の接触シール面に、接触面での流動抵抗をシール要素やキーの流動抵抗に比べて無視できるようにするため、1.5 mm のシ

Photo. 1 Thermal barrier block on support plate

Photo. 2 Hot plenum components

Photo. 3 Seal elements on upper plenum blocks and fixed reflector

ムをはさんですき間を設けた。また、固定反射体側面間からの漏れ以外の流れを防止するため、固定反射体とサポートプレートのすき間は粘土でシールし、固定反射体上端面はカバープレートで覆った(**Fig. 11**)。

Fig. 11 Seal element and key placed in leak flow path

IV. 試験結果

1. ブロック間のすき間に及ぼす炉心拘束力の影響
シックネスゲージで測定した高温プレナムブロック側面間のすき間と頻度分布の関係に与える炉心拘束力の影響を Fig. 12 に示す。炉心拘束力が $3.2 \times 10^3 \text{ N}$ までは、拘束力の増加に従って $0 \sim 0.05 \text{ mm}$ のすき間の頻度が多くなるが、それ以上ではほとんど変わらな

Fig. 12 Distributions of gaps between side surfaces of hot plenum blocks

った。また、 $3.2 \times 10^3 \text{ N}$ 以上における最大すき間は 0.15 mm で、ほとんど変化がなかった。Fig. 13 に示すように、高温プレナムブロックと固定反射体のすき間の場合には、Fig. 12 のような頻度の鋭いピークは見られず、最大すき間は $0.4 \sim 0.5 \text{ mm}$ であった。

Fig. 13 Distributions of gaps between side surfaces of hot plenum block and fixed reflector

一方、差圧が $9.8 \times 10^2 \text{ Pa}$ のとき、非接触式変位計で測定した高温プレナムブロック側面間のすき間13点の平均値と炉心拘束力の関係は、拘束力の増加に従ってすき間の値は小さくなっている (Fig. 14)。ただし、すき間の値は拘束力が $6.4 \times 10^3 \text{ N}$ のときの平均値を基準値として表わした。さらに、図中にはシックネスゲージで測定した高温プレナムブロック側面間のすき間の平均値も示した。この結果を見ると、シックネスゲージと非接触式変位計で測定されたすき間の相対変化量は比較的良好に一致している。

なお、拘束力が $3.2 \times 10^3 \text{ N}$ のときに、シックネスゲ

Fig. 14 Comparison of gap distances measured by non-contacting displacement transducer and thickness gages

ージを用いて測定した固定反射体の側面間および上下端面間のすき間は0.03 mm以下であった。

2. ブロック間の相対段差

高温プレナムブロックの側面間などに設置されるシール要素の性能は、ブロック間の相対段差によって影響される^④ため、試験体の組立てに当っては、サポートプレート間の相対段差は0.2 mm以下、水平度は1 m当り0.3 mm以下となるように努めた。組立て後に測定したところ、それらの値はそれぞれ0.13 mm以下

と1 m当り0.28 mmの以下であった。サポートプレート間の相対段差の測定点数は90であり、水平度はそれぞれのプレート中央点で直角2方向について測定を行った。

Fig. 15に高温プレナムブロックと固定反射体の側面間の相対段差の頻度分布を示すが、拘束力の変化により相対段差はほとんど変化しない。しかし、拘束力が 6.4×10^3 Nになると比較的大きい相対段差はなくなり0.3 mm以下となった。

Fig. 15 Distributions of differential block levels between hot plenum blocks and fixed reflectors

3. 試験体傾斜時の炉心拘束力の変化

試験体に水平方向の力が加えられたとき、炉心拘束機構が受ける力がどのように変化するかを傾斜装置を用いて調べた。Fig. 16は、炉心拘束力が 3.2×10^3 Nで、試験体の傾き角が 20° のときの炉心拘束力の変化量を示す。反射体の外側法線方向を正として、下段の拘束機構が受ける力の変化は $-130 \sim 170$ N、上段の変化は $-410 \sim 510$ Nであった。

炉心拘束力の変化量の傾斜方向余弦の総和と、傾斜

角との関係をFig. 17に示す。上段の拘束機構は、傾斜角を増加させると、 20° まではほぼ直線的に増加する力を受ける。減少させると、 $15 \sim 20^\circ$ の範囲を除いてはほぼ同じ勾配で拘束力が減少したが、ゼロには戻らなかった。下段の拘束機構は、傾斜角を $15 \sim 20^\circ$ に変化させたときに受ける力が急激に増加している。また、傾斜角を元に戻しても力の傾斜方向余弦の総和に変化はなかった。傾斜前の炉心拘束力が 6.4×10^3 , 7.8×10^3 , 9.8×10^3 Nのときにも、拘束機構の受ける力の変化は 3.2×10^3 Nの場合とほぼ同様の傾向を示した。

Fig. 16 Differential forces acting on core restrainers when bottom-core structure model is inclined

Fig. 17 Relationship between sum of cosine-components of absolute differential core restraint forces and inclined angle of bottom-core structure model

4. シール要素の漏れ流れ特性

試験体において発生するすき間流れで、高温プレナ

ム上方からと側方からの漏れ流量の割合と、それに及ぼす炉心拘束力の影響を Fig. 18 に示す。固定反射体側面間にはキーと Fig. 5 に示す金属+黒鉛のシール要素、そして上下面間には Fig. 6 に示す金属+黒鉛のシール要素が設置されている。図中“漏れなし”というのは、高温プレナムブロックと固定反射体上段の上端面にカバープレート載せて、高温プレナム上方からのすき間流れを止めた状態、すなわち高温プレナム側方からのすき間流れのみの状態を指す。また、“黒鉛シール”とは、高温プレナム上方のブロック間すき間に Fig. 7 に示す黒鉛シール要素を設置した状態、“シールなし”とは高温プレナム上方のブロック間すき間にシール要素を設置しない状態をいう。

Fig. 18 Effect of core restraint forces on leak flow rate

漏れ流量の割合は高温プレナム内外の差圧によって変化するが、炉心拘束力が 3.2×10^3 N で、黒鉛シール要素を設置した高温プレナム上方からの漏れ流量と高温プレナム側方からの漏れ流量との割合はほぼ 2.5 : 1 であった。また、高温プレナム上方からのすき間流れに対し、ブロック間のすき間に黒鉛シール要素を設置すると、同じ差圧でその流量は約 1/2 に減少する。

一方、高温プレナム上方からのすき間流れは炉心拘束力の増加に従って減少するが、高温プレナム側方からのすき間流れは炉心拘束力の影響をほとんど受けなかった。

次に、固定反射体下段のみで構成される試験体について、高温プレナム側方からの漏れ流量を測定した結果を示す。Fig. 19 は、キーやシール要素だけを設置し

たときの漏れ流量を示す。流路間の差圧が $10^3 \sim 10^4$ Pa の範囲で、3 種類のシール要素の漏れ流れ特性に大きな差はないが、金属+黒鉛シール要素は全般的に漏れ流量が少なかった。これらの結果を最小二乗法により直線で近似し、キーやシール要素の 1 m 当りの漏れ流量と差圧との関係を求めたものが次式である。

$$\text{キー} : V = 2.8 \times 10^{-4} \Delta P^{0.42} \quad (1)$$

$$\text{シール要素} \begin{cases} \text{金属} : V = 3.4 \times 10^{-4} \Delta P^{0.31} & (2) \\ \text{金属+黒鉛} : V = 1.0 \times 10^{-4} \Delta P^{0.44} & (3) \\ \text{黒鉛} : V = 5.6 \times 10^{-5} \Delta P^{0.52} & (4) \end{cases}$$

ここで、 V : 漏れ流量 (Nm^3/s)

ΔP : 差圧 (Pa)

Fig. 19 Leak flow rate through vertical seal elements and key

キーとシール要素を組み合わせて流路に設置したときの漏れ流量を Fig. 20 に示す。3 種類の組合せで漏れ流量に大きな差はないが、差圧が $10^3 \sim 5 \times 10^3$ Pa の範囲ではキーと黒鉛シール要素の組合せ、および差圧が $5 \times 10^3 \sim 10^4$ Pa の範囲ではキーと金属+黒鉛シール要素が最も漏れ流量が少なかった。

Fig. 20 Combined flow resistances of key and seal element

V. 考 察

固定反射体側方からのすき間流れを最小にし、かつ高温プレナムブロック側面間のすき間をゼロに近づけるように製作した本試験体を用いて行なった試験によると、高温プレナムブロック側面間のすき間は $0 \sim 3.2 \times 10^3 \text{ N}$ の炉心拘束力の範囲では、拘束力の増加に従ってすき間は狭くなったが、拘束力をそれ以上に増加させてもすき間の分布にはほとんど変化が見られなかった。一方、高温プレナムブロックと固定反射体側面間の分布は拘束力により大きな変化を受けなかった。これは次のような理由によるものと考えられる。

拘束力を増加させて固定反射体を締め付けるときには、固定反射体同士や固定反射体とサポートプレート間に摩擦抵抗が働くが、高温プレナムブロックはサポートポストと球面転がり接触しているので僅かな力で水平方向に変位する。そのため、高温プレナム側に突出した数体の固定反射体により高温プレナムブロックが締め付けられると、拘束力を増しても他の固定反射体はほとんど動かないので、高温プレナムブロック側面間のすき間の分布は大きく変化しないと考えられる。ただし、拘束力をさらに増加させた場合には、固定反射体による高温プレナムブロックの支持状態が変化することになる。

高温プレナムブロック側面間のすき間の測定時に、固定反射体の中心方向への変位量をひずみゲージ式変位変換器で測定した例をFig. 21に示す。測定は固定反射体7ブロックについて行なった。その結果、拘束力が $3.2 \times 10^3 \text{ N}$ で固定反射体の変位が安定し、 $7.8 \times 10^3 \text{ N}$ まではほぼ一定な変位を示したが、拘束力がさらに増加して $9.8 \times 10^3 \text{ N}$ になると再び変位するのが観測された。

Fig. 21 Effect of core restraint force on displacement of fixed reflector

次に、高温プレナム上方からの漏れ流れを2つに分けて検討する。高温プレナムブロック側面間のすき間は $0 \sim 0.15 \text{ mm}$ 、流路の長さは約 7.6 m 、および高温プレナムブロックと固定反射体側面間のすき間は $0 \sim 0.4$

mm 、流路の長さは約 5 m である。平行平板流路における層流の流量は

$$V \propto d^3 \cdot l \quad (5)$$

で表わされるので、高温プレナムブロックと固定反射体側面間の漏れ流量は、高温プレナムブロック側面間より多くなることが予想される。

試験体を傾斜させて炉心拘束機構の受ける力の変化を調べた試験では、傾斜角をゼロにしても元の状態には戻らなかった。力の変化がゼロに戻らなかったということは、固定反射体が傾斜方向へずれたことを意味しており、炉心拘束機構のバネ定数の値から推定すると、そのズレは $0.28 \sim 0.36 \text{ mm}$ と推定される。

本試験体では常温常圧の空気を用いてシール要素部の漏れ流量の測定を行なったが、実験炉では $400 \sim 950^\circ \text{C}$ 、 4 MPa のHeガスであるため、その相関関係について検討する。まず、漏れ流量と差圧との関係が次式で表わされると仮定する。

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d_e} \cdot \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (6)$$

本試験と実験炉でレイノルズ数が等しい条件は

$$\frac{d_{e,m} V_m}{\nu_m A_m} = \frac{d_{e,p} V_p}{\nu_p A_p} \quad (7)$$

である。試験体ブロックの加工精度、表面粗さおよびシール要素の幅は実験炉と同じ程度なので、 $d_{e,m} \approx d_{e,p}$ 、 $A_m \approx A_p/2.75$ 、 $l_m \approx l_p$ と仮定すると、

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_p} = 0.2 \sim 0.7 \quad (8)$$

$$T_{\text{He}}(^{\circ}\text{C}) = 950 \sim 400$$

となる。したがって、実験炉の 950°C 、差圧 10^4 Pa は、この試験の $2 \times 10^3 \text{ Pa}$ に対応することになる。

高温プレナムブロック間などに水平に置かれたシール要素の漏れ流れ特性については、実験⁽⁸⁾と解析⁽⁹⁾が報告されているが、ここでは固定反射体側面間に垂直に置かれたシール要素やキーの流動抵抗について検討した。その結果、キーにもシール要素の半分程度のシール効果があることがわかった。

VI. 結 論

多目的高温ガス実験炉の炉床部構造を模擬した $1/2.75$ スケール縮小試験体を製作し、組立て試験や常温常圧の空気を用いた漏れ流れ試験を行なって、ブロック間のすき間と相対段差、炉心拘束力の影響、シール要素の漏れ流れ特性などを調べた。得られた結論は次のとおりである。

- (1) 本試験体では、炉心拘束力が $3.2 \times 10^3 \text{ N}$ 以上になると高温プレナムブロック間のすき間の分布はほとんど変わらず、 0.15 mm 以下であった。しかし、高温プレナムブロックと固定反射体間のすき間は炉心拘束力によって変化せず、 $0 \sim 0.5 \text{ mm}$ と大きな値を示した。
- (2) 試験体を傾斜させて炉心拘束機構が受ける力の変化を調べた結果、最大 20° まで傾斜させてから水平に戻したとき、力の変化はゼロに戻らなかった。したがって、地震時のように水平荷重が加わるような場合には、ブロック配列が変化するので十分注意する必要がある。
- (3) 黒鉛シール要素は同じ差圧の条件で、高温プレナム上方からの漏れ流量を $\frac{1}{2}$ に減少させた。また、黒鉛シール要素を設置した高温プレナム上方からの漏れ流量と、金属+黒鉛を組み合わせたシール要素を設置した高温プレナム側方からの漏れ流量の比はほぼ $2.5:1$ であった。

〔記 号〕

A : 流路の断面積,	d : すき間
Δd : すき間の変化量,	d_e : 相当直径
F : 固定反射体 1 体当りの炉心拘束力	
f : F の変化量,	f_t : f の傾斜方向余弦
g : 重力加速度,	h : 相対段差

L : 固定反射体の変位, l : 流路の深さ

ΔP : 差 圧, T : 温 度

V : 体積流量, α : 傾斜角

γ : 比重量, λ : 圧力損失係数

ν : 流体の動粘性係数

(添字)

m : 試験体, p : 実験炉

終りに、本試験を行うに当たり、日本原子力研究所多目的高温ガス実験炉設計室長宮本喜義氏および同高温構造工学研究室長武藤 康氏より有益なご助言とご討論を頂いた。また、当時、富士電機製造㈱から日本原子力研究所に出向されていた三木俊也氏にご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

— 参 考 文 献 —

- (1) 日本原子力研究所: “多目的高温ガス炉研究開発の現状”, (1981).
- (2) 例えば, 鈴木邦彦, 他: *FAPIG*, No. 102, (1982).
- (3) 日本原子力研究所: “多目的高温ガス炉研究開発の現状”, (1983).
- (4) 日本原子力研究所: “多目的高温ガス実験炉詳細設計(1)”, (1981).
- (5) 下川純一, 他: *JAERI-M* 6141, (1975).
- (6) 青地哲男, 他: *JAERI-M* 6845, (1977).
- (7) 日本原子力研究所: “多目的高温ガス炉研究開発の現状”, (1980).
- (8) 井出 朗, 他: *FAPIG*, No. 99, (1981).
- (9) 文沢元雄, 他: *JAERI-M* 83-078, (1983).

☆高放射性物質取扱い施設とロボット☆

「遠隔操作技術」研究専門委員会成果報告書

1983年11月30日発行 好評発売中

B 5 判 タイプオフ印刷 432ページ, 定価 8,000円(会員特価 6,000円)(〒400円)

「遠隔操作技術」研究専門委員会は1980年10月本会に設置され、原子力施設とくにホットセルにおける遠隔操作技術に関し、種々の実地見学および調査結果に基づき討論を行なってきた。

その中から日本における高放射性物質取扱い施設(ホットセル施設)およびロボット技術を中心とした遠隔操作技術について取り纏め、本委員会の成果報告書として出版されたものである。

内容の詳細は「本誌」25巻, 8号(p.672)をご参照下さい。

◎ご希望の方は学会事務局へお申込み願います。(10部以上一括お申込みの場合は送費無料です)