

JAERI-M  
85-054

炉床部構造試験体による傾斜試験

1985年4月

二川 正敏・菊地 賢司

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

炉床部構造試験体による傾斜試験

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

二川 正敏・菊地 賢司

(1985年4月2日受理)

静的水平地震荷重を模擬した VHTR 炉心構造試験体の傾斜試験によって、炉心拘束機構の拘束力の変化量を調べた。更に、傾斜時の炉床部構造物の挙動を簡易ブロック群の滑りモデルによって解析した。また、黒鉛同士および黒鉛と鋼間の見掛けの摩擦係数を摩擦係数測定試験結果と比較、検討した。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 炉心拘束機構の拘束力の変化量は、傾斜後ゼロに戻らない。
- (2) 見掛けの摩擦係数は、大気中で黒鉛同士が 0.10、黒鉛と鋼間が 0.19 となった。

Inclining Test for the Bottom-core Structure of VHTR

Masatoshi FUTAKAWA and Kenji KIKUCHI  
Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 2, 1985)

The change of acting forces on the core restrainers is studied by inclining a small-scale bottom-core structure model of VHTR. The forces produced by the inclination of the model simulate the horizontal seismic static forces. The behavior of the bottom-core structure was also analysed by using a simplified sliding-block model. The estimated apparent friction coefficients of both graphite against itself and graphite against steel are compared with the results obtained by means of a friction coefficient measuring apparatus and discussed.

The conclusions derived are as follows:

- (1) The change of acting forces on the core restrainers die not reduce to zero after the inclining test.
- (2) The apparent friction coefficients were estimated to be 0.10 for graphite against itself and 0.19 for graphite against steel at the atmospheric environment.

Keywords: VHTR, Bottom-core, Core Restrainer, Seismic Force, Friction Coefficient, Gas-cooled Reactor, Graphite, Friction Coefficient Measuring Test.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 試験体及び試験方法 .....	1
2.1 試験体 .....	1
2.2 試験方法 .....	2
3. 解析方法 .....	3
4. 実験結果 .....	5
4.1 傾斜試験結果 .....	5
4.2 摩擦係数測定試験結果 .....	5
5. 解析結果 .....	5
6. 討 論 .....	6
7. 結 論 .....	7
参考文献 .....	7

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Experimental model and method .....	1
2.1 Experimental model .....	1
2.2 Experimental method .....	2
3. Analytical method .....	3
4. Experimental results .....	5
4.1 Including test .....	5
4.2 Friction coefficient measuring test .....	5
5. Analytical results .....	5
6. Discussion .....	6
7. Conclusion .....	7
References .....	7

## Figures list

- Fig. 1 Core structure of experimental VHTR
- Fig. 2 Bird's eye view of bottom-core structure model
- Fig. 3 Three types of fixed reflectors
- Fig. 4 Inclined bottom-core structure model
- Fig. 5 Measurement apparatus for friction coefficient
- Fig. 6 Simplified sliding-block model
- Fig. 7 Behavior of a simplified sliding-block model  
at each critical inclined-angle
- Fig. 8 Differential forces acting on core restrainers  
when bottom-core structure model is inclined
- Fig. 9 Relationship between sum of cosine-components  
of absolute differential core restraint forces  
and inclined angle of bottom-core structure model
- Fig.10 Friction coefficients of a graphite block against  
itself
- Fig.11 Friction coefficients of a graphite block against  
a steel plate
- Fig.12 Analytical results of core restraint forces and  
inclined angle  
( friction coefficient ; graphite/graphite=0.27,  
graphite/steel=0.23 )
- Fig.13 Analytical results of core restraint forces and  
inclined angle  
( friction coefficient ; graphite/graphite=0.10 ,  
graphite/steel=0.19 )
- Fig.14 Gap between upper and lower fixed reflectors
- Fig.15 Hysteresis loop in re-inclining test

## 〔記号〕

- F : 固定反射体 1 体当たりの炉心拘束力  
f : F の変化量  
 $f_i$  : f の傾斜方向余弦  
gap1 : 傾斜時下側の R と Q 間のすき間  
gap2 : 傾斜時上側の R と Q 間のすき間  
P : 上部プレナムブロック群  
Q : 下部プレナムブロックと断熱ブロック群  
R : 固定反射体ブロック群  
W : 重量  
 $\theta$  : 傾斜角  
 $\mu$  : 摩擦係数

## 〔添字〕

- 1 : 下段  
2 : 上段  
G : 黒鉛と黒鉛間  
P : 上部プレナムブロック群  
Q : 下部プレナムブロックと断熱ブロック群  
R : 固定反射体ブロック群  
S : 黒鉛と鋼間



## 1. 序 論

多目的高温ガス実験炉（以下、実験炉）の炉床部では、固体反射体、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）<sup>(1)</sup>。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℃、4MPaの高温高圧Heガスを混合させる機能を持つ。原子炉压力容器入口温度が約400℃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、炉心上部の流量調整装置を経て各燃料領域へ流入する。

炉心部及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流路の圧力差によりすき間流れが生じる。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燃料チャンネルを流れる冷却材流量の割合）が減少し、燃料温度が計画値を超えるほか、高温プレナムブロックに過大な熱応力が生じる恐れがある。固定反射体とコアバレルとの間に取り付けられる炉心拘束機構は、固定反射体間のすき間を小さくして漏れ流れを少なくしたり、地震時の固定反射体変位を抑えるなどの機能を持っている。地震による固定反射体の配列のずれは、すき間流れの増加や制御棒の挿入性を悪くさせる可能性がある。

すでに、著者らは、実験炉の炉床部の約1/2.75倍の大きさを有する炉床部構造試験体を製作して、炉床部構成要素の組み立て試験を行い、炉床部黒鉛ブロック間に生じるすき間と漏れ流れ及び炉心拘束力とすき間の関係などについて調べた<sup>(2)</sup>。その結果、○黒鉛シール要素は高鉛プレナム上方からの漏れ流量を1/3に減少させる。○炉心拘束力は高温プレナムブロック間のすき間を減少させる効果があるが、高温プレナムブロックと固定反射体間のすき間にはほとんど影響しない、などの知見を得た。

本報では、傾斜法により静的水平地震荷重を試験体に加えて炉心拘束力の変化量を調べ、簡易ブロック群の滑りモデルにより解析を行い、地震時の固定反射体群の挙動を評価すると共に、固定反射体間及び固定反射体とサポートプレート間などの摩擦係数の検討を行った。

## 2. 試験体及び試験方法

### 2.1 試験体

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. 2に示す。試験体の大きさは実験炉の約1/2.75倍で、直径は約1.7mである。星形の高温プレナムブロック、下部プレナムブロック及び断熱ブロックはそれぞれ合計19体あり、炉心の円周方向に18分割された固定反射体によって取り囲まれている。固定反射体には3種類の形<sup>(3)</sup>（Fig. 3）があり、本試験体ではそれぞれ上下2段積みとした。円周方向で隣接する固定反射体間には、配置のずれを防ぐ

## 1. 序 論

多目的高温ガス実験炉（以下、実験炉）の炉床部では、固体反射体、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）<sup>(1)</sup>。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℃、4MPaの高温高圧Heガスを混合させる機能を持つ。原子炉压力容器入口温度が約400℃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、炉心上部の流量調整装置を経て各燃料領域へ流入する。

炉心部及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流路の圧力差によりすき間流れが生じる。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燃料チャンネルを流れる冷却材流量の割合）が減少し、燃料温度が計画値を超えるほか、高温プレナムブロックに過大な熱応力が生じる恐れがある。固定反射体とコアバレルとの間に取り付けられる炉心拘束機構は、固定反射体間のすき間を小さくして漏れ流れを少なくしたり、地震時の固定反射体変位を抑えるなどの機能を持っている。地震による固定反射体の配列のずれは、すき間流れの増加や制御棒の挿入性を悪くさせる可能性がある。

すでに、著者らは、実験炉の炉床部の約1/2.75倍の大きさを有する炉床部構造試験体を製作して、炉床部構成要素の組み立て試験を行い、炉床部黒鉛ブロック間に生じるすき間と漏れ流れ及び炉心拘束力とすき間の関係などについて調べた<sup>(2)</sup>。その結果、○黒鉛シール要素は高鉛プレナム上方からの漏れ流量を1/3に減少させる。○炉心拘束力は高温プレナムブロック間のすき間を減少させる効果があるが、高温プレナムブロックと固定反射体間のすき間にはほとんど影響しない、などの知見を得た。

本報では、傾斜法により静的水平地震荷重を試験体に加えて炉心拘束力の変化量を調べ、簡易ブロック群の滑りモデルにより解析を行い、地震時の固定反射体群の挙動を評価すると共に、固定反射体間及び固定反射体とサポートプレート間などの摩擦係数の検討を行った。

## 2. 試験体及び試験方法

### 2.1 試験体

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. 2に示す。試験体の大きさは実験炉の約1/2.75倍で、直径は約1.7mである。星形の高温プレナムブロック、下部プレナムブロック及び断熱ブロックはそれぞれ合計19体あり、炉心の円周方向に18分割された固定反射体によって取り囲まれている。固定反射体には3種類の形<sup>(3)</sup>（Fig. 3）があり、本試験体ではそれぞれ上下2段積みとした。円周方向で隣接する固定反射体間には、配置のずれを防ぐ

ためキーが挿入してある。高温プレナムブロックは、下部プレナムブロックに立てられた円柱のサポートポストによって支持されている。サポートポスト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。これらの構造物の自重は鋼製のサポートプレートによって支持される。

コアバレルに取り付けられる炉心拘束機構は、炉心と炉床部の構成ブロック群の配列がずれのを防ぐと共に、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<sup>(4)</sup>、ターンバックル<sup>(5)</sup>、スプリング<sup>(1)</sup>、バンド<sup>(6)</sup>などの形式が提案されている。本試験体では、力が炉心中心方向へ向かい、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（1本のバネ定数： $10^2 \text{ N/mm}$ ）から成る。また各拘束機構には、拘束力測定用のロードセルが内蔵されている。拘束力の測定範囲は1ユニット当たり  $0 \sim 10^4 \text{ N}$  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であるので、以後、初期炉心拘束力は1ユニット当たりの力で表す。

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質量を示す。

要 素	質 量 (kg)
○高温プレナムブロック	30
○固定反射体	
A, B 型	43
C 型	28
○サポートポスト	0.8
○ポストシート	0.2
○下部プレナムブロック	14
○断熱ブロック	34

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に、試験体は傾斜可能な構造となっている。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 (Fig. 4)。

## 2.2 試験方法

本試験では、すき間流れが最少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た。すなわち、傾斜開始前に、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少にし、かつ高温プレナムブロック側面間のすき間を少なくするように試験体を組み立てた。初期拘束力は、 $3.2 \times 10^3 \text{ N} \sim 9.8 \times 10^3 \text{ N}$  と変化させて、それぞれについて、 $0^\circ$  から最大傾斜角  $20^\circ$  まで  $5^\circ$  間隔で上昇させた後に  $20^\circ$  から  $5^\circ$  間隔で  $0^\circ$

まで降下させた。拘束力の変化は、各ステップ（5°間隔）ごとに測定した。なお、試験体の最大傾斜角は、S、地震に対する原子炉本体の応答解析によれば、炉床部に生じる水平方向の最大応答加速度が 350 gal であることから決定した。

本試験体は黒鉛ブロック群が鋼製のサポートプレート上に積み上げられているため、黒鉛ブロック同士及び黒鉛ブロックとサポートプレート間の摩擦係数が傾斜時の拘束力の変化に与える影響は大きい。そこで、Fig. 5 に示す摩擦係数測定装置により、黒鉛と黒鉛及び黒鉛と鋼の大气中での摩擦係数（臨界傾斜角）を測定した。面圧が摩擦係数に及ぼす影響を調べるために、黒鉛には試験体で用いられた固定反射体黒鉛ブロックとキーの2種を用い、更に重量ブロックによって滑り面を加圧した。鋼にはサポートプレートと同程度にエメリ紙で研磨（中仕上げ）した炭素鋼板を用いた。但し、炭素鋼と黒鉛の摩擦係数には炭素鋼板表面の酸化物が影響するため、研磨後10日及び130日間大气中に放置して再度測定した。

### 3. 解析方法

本試験体は黒鉛ブロック群がサポートプレート上に積み上げられているため、個々のブロック間の相互作用の積算が傾斜時の拘束力の変化に影響する。しかし、総計150体（サポートポストを含む）もの複雑な形状をした各ブロック一体ごとの挙動を把握することは困難である。そこで、静的水平地震荷重による（試験体傾斜時の）炉心拘束力の変化を調べることに主眼を置いて各ブロック群を次のように包括した解析モデルを考案した。すなわち、

- 他のブロック間の摩擦抵抗に比べて、サポートポストとポストシート間のころがり抵抗は無視できるほど小さい。従って、その抵抗をゼロとする。
- 固定反射体間に挿入されたキーによる力の伝達を無視する。

と仮定して、各ブロック群を

- それぞれ、18体で構成されている固定反射体上段ブロック群及び下段ブロック群は、環状の一体ブロック（ $R_2$ 、 $R_1$ ）である。
- 19体で構成される高温プレナムブロック群は、円柱状の一体ブロック（ $P$ ）である。
- 総計38体で構成される下部プレナムと断熱ブロック群は、円柱状の一体ブロック（ $Q$ ）である。

とした。このモデルをFig. 6に示す。各ブロック群の重量は、それぞれ  $W_P = 5600\text{N}$ 、 $W_Q = 9500\text{N}$ 、 $W_{R_1} = W_{R_2} = 6700\text{N}$  である。また、本モデルでは、固定反射体下段ブロック群と下部プレナム及び断熱ブロック群間のすき間（傾斜時上側：gap 2、下側：gap 1）は考慮してあるが、固定反射体上段ブロック群と高温プレナムブロック群間のすき間はサポートポストのころがり抵抗をゼロとしたため無視している。

解析は次の2つの方針に従って行った。

- 摩擦係数測定試験で測定された各摩擦係数を使用した場合
- 試験体の傾斜試験で得られた“傾斜角と拘束力の変化曲線”に一致するように摩擦係数を推定した場合

まで降下させた。拘束力の変化は、各ステップ（5°間隔）ごとに測定した。なお、試験体の最大傾斜角は、S、地震に対する原子炉本体の応答解析によれば、炉床部に生じる水平方向の最大応答加速度が 350 gal であることから決定した。

本試験体は黒鉛ブロック群が鋼製のサポートプレート上に積み上げられているため、黒鉛ブロック同士及び黒鉛ブロックとサポートプレート間の摩擦係数が傾斜時の拘束力の変化に与える影響は大きい。そこで、Fig. 5 に示す摩擦係数測定装置により、黒鉛と黒鉛及び黒鉛と鋼の大气中での摩擦係数（臨界傾斜角）を測定した。面圧が摩擦係数に及ぼす影響を調べるために、黒鉛には試験体で用いられた固定反射体黒鉛ブロックとキーの2種を用い、更に重量ブロックによって滑り面を加圧した。鋼にはサポートプレートと同程度にエメリ紙で研磨（中仕上げ）した炭素鋼板を用いた。但し、炭素鋼と黒鉛の摩擦係数には炭素鋼板表面の酸化物が影響するため、研磨後10日及び130日間大气中に放置して再度測定した。

### 3. 解析方法

本試験体は黒鉛ブロック群がサポートプレート上に積み上げられているため、個々のブロック間の相互作用の積算が傾斜時の拘束力の変化に影響する。しかし、総計150体（サポートポストを含む）もの複雑な形状をした各ブロック一体ごとの挙動を把握することは困難である。そこで、静的水平地震荷重による（試験体傾斜時の）炉心拘束力の変化を調べることに主眼を置いて各ブロック群を次のように包括した解析モデルを考案した。すなわち、

- 他のブロック間の摩擦抵抗に比べて、サポートポストとポストシート間のころがり抵抗は無視できるほど小さい。従って、その抵抗をゼロとする。
- 固定反射体間に挿入されたキーによる力の伝達を無視する。

と仮定して、各ブロック群を

- それぞれ、18体で構成されている固定反射体上段ブロック群及び下段ブロック群は、環状の一体ブロック（ $R_2$ 、 $R_1$ ）である。
- 19体で構成される高温プレナムブロック群は、円柱状の一体ブロック（ $P$ ）である。
- 総計38体で構成される下部プレナムと断熱ブロック群は、円柱状の一体ブロック（ $Q$ ）である。

とした。このモデルをFig. 6に示す。各ブロック群の重量は、それぞれ  $W_P = 5600\text{ N}$ 、 $W_Q = 9500\text{ N}$ 、 $W_{R_1} = W_{R_2} = 6700\text{ N}$  である。また、本モデルでは、固定反射体下段ブロック群と下部プレナム及び断熱ブロック群間のすき間（傾斜時上側：gap 2, 下側：gap 1）は考慮してあるが、固定反射体上段ブロック群と高温プレナムブロック群間のすき間はサポートポストのころがり抵抗をゼロとしたため無視している。

解析は次の2つの方針に従って行った。

- 摩擦係数測定試験で測定された各摩擦係数を使用した場合
- 試験体の傾斜試験で得られた“傾斜角と拘束力の変化曲線”に一致するように摩擦係数を推定した場合

また、解析では、傾斜角の増減に従って変化する各ブロック群の状態の力の釣り合いのみを考慮した。解析方針に従って想定され得る、傾斜角の $0^\circ$ から $20^\circ$ までの増減に伴う状態の変移をFig. 7に示す。変移の経路は、gap 2がgap 1より先に閉じた場合 (Case ①) では、傾斜角 $0^\circ \rightarrow (a) \rightarrow (b) \rightarrow (c) \rightarrow (d) \rightarrow (e) \rightarrow (f) \rightarrow$ 傾斜角 $20^\circ \rightarrow (g) \rightarrow (h) \rightarrow (i) \rightarrow$ 傾斜角 $0^\circ$ となり、gap 1は閉じるがgap 2は開いたままの場合 (Case ②) では、傾斜角 $0^\circ \rightarrow (a) \rightarrow (b) \rightarrow (c) \rightarrow (f) \rightarrow$ 傾斜角 $20^\circ \rightarrow (g) \rightarrow (h) \rightarrow (i) \rightarrow$ 傾斜角 $0^\circ$ となる。以下に各状態での力の釣り合い式を示す。

(a) Pは $R_2$ に寄り掛かる。 $R_2, R_1, Q$ は滑り抵抗のため静止している。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= 0 \\ \sum f_{2i}(\theta) &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

(b) Pと $R_2$ が一体となって滑り出す。 $Q$ と $R_1$ はまだ滑り出していない。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= 0 \\ \sum f_{2i}(\theta) &= (W_P + W_{R_2}) \cdot \sin \theta - \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} (2)$$

(c) Pと $R_2$ は一体となって滑る。 $Q$ は静止しているが、 $R_1$ は滑り出している。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta + W_{R_1} \cdot \sin \theta - \mu_S (W_{R_1} + W_{R_2}) \cdot \cos \theta \\ \sum f_{2i}(\theta) &= (W_P + W_{R_2}) \cdot \sin \theta - \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} (3)$$

(d) gap 2 = 0となり、 $Q$ の滑り抵抗のため $R_1$ と $Q$ は静止する。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta^* + W_{R_1} \cdot \sin \theta^* - \mu_S (W_{R_1} + W_{R_2}) \cdot \cos \theta^* \\ \sum f_{2i}(\theta) &= (W_P + W_{R_2}) \cdot \sin \theta - \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} (4)$$

( $\theta^*$ は、gap 2 = 0となったときの傾斜角である。)

(e), (f) Pと $R_2$ 及び $Q$ と $R_1$ がそれぞれ一体となって滑る。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta + W_{R_1} \cdot \sin \theta - \mu_S \cdot (W_{R_1} + W_{R_2}) \cdot \cos \theta \\ &\quad + W_Q \cdot \sin \theta - \mu_S \cdot (W_P + W_Q) \cdot \cos \theta \\ \sum f_{2i}(\theta) &= (W_P + W_{R_2}) \cdot \sin \theta - \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} (5)$$

(g) Pと $R_2$ 及び $Q$ と $R_1$ は滑り抵抗のため静止している。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= \sum f_{1i}(20)^\circ \\ \sum f_{2i}(\theta) &= \sum f_{2i}(20)^\circ \end{aligned} \right\} (6)$$

( $\sum f_{1i}(20)^\circ$ と $\sum f_{2i}(20)^\circ$ は、それぞれ(5)式の $\theta = 20^\circ$ としたときの値である。)

(h)  $R_2$ とPは一体となって滑る。 $R_1$ と $Q$ は滑り抵抗のため静止している。

$$\left. \begin{aligned} \sum f_{1i}(\theta) &= \sum f_{1i}(20)^\circ \\ \sum f_{2i}(\theta) &= (W_P + W_{R_2}) \cdot \sin(\theta) + \mu_G \cdot W_{R_2} \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} (7)$$

(i)  $\theta = 0$ であり、 $R_1$ と $Q$ は滑り出さないまま静止している。

$$\left. \begin{aligned} \Sigma f_{ji}(\theta) &= \Sigma f_{ji}(20)^* \\ \Sigma f_{2i}(\theta) &= \mu_G \cdot W_{R2} \end{aligned} \right\} (8)$$

## 4. 実験結果

### 4.1 傾斜試験結果

Fig. 8 は、傾斜前の炉心拘束力が  $3.2 \times 10^3$  N で、試験体の傾き角が  $20^\circ$  のときの炉心拘束力の変化量を示す。反射体の外側への法線方向を正としたときに、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. 9 に示す。上段の拘束機構は、傾斜角を増加させると、 $20^\circ$  まではほぼ直線的に増加する力を受ける。減少させると、 $15^\circ \sim 20^\circ$  の範囲を除いてほぼ同じ勾配で拘束力が減少するが、ゼロには戻らなかった。下段の拘束機構は、傾斜角を  $15^\circ \sim 20^\circ$  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はそのまま変化はなかった。

なお、傾斜前の炉心拘束力が  $6.4 \times 10^3$ 、 $7.8 \times 10^3$ 、 $9.8 \times 10^3$  N のときにも、拘束機構の受ける力の変化は  $3.2 \times 10^3$  N の場合とほぼ同様な傾向を示した。

### 4.2 摩擦係数測定試験結果

黒鉛同士の測定結果を Fig. 10 に示す。(I)は臨界傾斜角と滑り面の面圧との関係について示している。面圧が約  $5.9 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^4$  Pa となる範囲では、臨界傾斜角はほぼ  $15$  度で一定であり、摩擦係数は約  $0.27$  となる。また、(II)は黒鉛を10日間及び130日間大気中に放置した後の臨界傾斜角の変化を示しており、臨界傾斜角の経時変化は観測されなかった。

Fig. 11 に炭素鋼と黒鉛の摩擦係数の測定結果を示す。面圧による臨界傾斜角の変化は、炭素鋼板が酸化する前に測定された結果である。約  $5.9 \times 10^2 \sim 5.1 \times 10^3$  Pa の面圧の範囲では、臨界傾斜角は約  $9$  度で一定であり、摩擦係数は約  $0.16$  となっており、炭素鋼板上に生じた酸化物による経時変化が観測された。

## 5. 解析結果

摩擦係数測定試験より得られた各摩擦係数を用いて解析した結果を Fig. 12 に示す。サポートプレートと固定反射体下段及びサポートプレートと断熱ブロック間の摩擦係数  $\mu_s$  には、サポートプレートの経時変化（酸化）を考慮して、 $0.23$  を用いた。また、固定反射体上段と下段間の摩擦係数  $\mu_G$  は、 $0.27$  である。

(I)図は、固定反射体下段と下部プレナム及び断熱ブロック間のすき間 gap 2 が  $0.5$  mm の結

$$\left. \begin{aligned} \Sigma f_{1i}(\theta) &= \Sigma f_{1i}(20)^* \\ \Sigma f_{2i}(\theta) &= \mu_G \cdot W_{R2} \end{aligned} \right\} (8)$$

## 4. 実験結果

### 4.1 傾斜試験結果

Fig. 8 は、傾斜前の炉心拘束力が  $3.2 \times 10^3$  N で、試験体の傾き角が  $20^\circ$  のときの炉心拘束力の変化量を示す。反射体の外側への法線方向を正としたときに、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. 9 に示す。上段の拘束機構は、傾斜角を増加させると、 $20^\circ$  まではほぼ直線的に増加する力を受ける。減少させると、 $15^\circ \sim 20^\circ$  の範囲を除いてほぼ同じ勾配で拘束力が減少するが、ゼロには戻らなかった。下段の拘束機構は、傾斜角を  $15^\circ \sim 20^\circ$  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はそのまま変化はなかった。

なお、傾斜前の炉心拘束力が  $6.4 \times 10^3$ 、 $7.8 \times 10^3$ 、 $9.8 \times 10^3$  N のときにも、拘束機構の受ける力の変化は  $3.2 \times 10^3$  N の場合とほぼ同様な傾向を示した。

### 4.2 摩擦係数測定試験結果

黒鉛同士の測定結果を Fig. 10 に示す。(I)は臨界傾斜角と滑り面の面圧との関係について示している。面圧が約  $5.9 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^3$  Pa となる範囲では、臨界傾斜角はほぼ  $15^\circ$  で一定であり、摩擦係数は約 0.27 となる。また、(II)は黒鉛を10日間及び130日間大気中に放置した後の臨界傾斜角の変化を示しており、臨界傾斜角の経時変化は観測されなかった。

Fig. 11 に炭素鋼と黒鉛の摩擦係数の測定結果を示す。面圧による臨界傾斜角の変化は、炭素鋼板が酸化する前に測定された結果である。約  $5.9 \times 10^2 \sim 5.1 \times 10^3$  Pa の面圧の範囲では、臨界傾斜角は約  $9^\circ$  で一定であり、摩擦係数は約 0.16 となっており、炭素鋼板上に生じた酸化物による経時変化が観測された。

## 5. 解析結果

摩擦係数測定試験より得られた各摩擦係数を用いて解析した結果を Fig. 12 に示す。サポートプレートと固定反射体下段及びサポートプレートと断熱ブロック間の摩擦係数  $\mu_S$  には、サポートプレートの経時変化(酸化)を考慮して、0.23 を用いた。また、固定反射体上段と下段間の摩擦係数  $\mu_G$  は、0.27 である。

(I)図は、固定反射体下段と下部プレナム及び断熱ブロック間のすき間 gap 2 が 0.5 mm の結



$$\left. \begin{aligned} \Sigma f_{1i}(\theta) &= \Sigma f_{1i}(20)^* \\ \Sigma f_{2i}(\theta) &= \mu_G \cdot W_{R2} \end{aligned} \right\} (8)$$

## 4. 実験結果

### 4.1 傾斜試験結果

Fig. 8 は、傾斜前の炉心拘束力が  $3.2 \times 10^3$  N で、試験体の傾き角が  $20^\circ$  のときの炉心拘束力の変化量を示す。反射体の外側への法線方向を正としたときに、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. 9 に示す。上段の拘束機構は、傾斜角を増加させると、 $20^\circ$  までにはほぼ直線的に増加する力を受ける。減少させると、 $15^\circ \sim 20^\circ$  の範囲を除いてほぼ同じ勾配で拘束力が減少するが、ゼロには戻らなかった。下段の拘束機構は、傾斜角を  $15^\circ \sim 20^\circ$  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はそのまま変化はなかった。

なお、傾斜前の炉心拘束力が  $6.4 \times 10^3$ 、 $7.8 \times 10^3$ 、 $9.8 \times 10^3$  N のときにも、拘束機構の受ける力の変化は  $3.2 \times 10^3$  N の場合とほぼ同様な傾向を示した。

### 4.2 摩擦係数測定試験結果

黒鉛同士の測定結果を Fig. 10 に示す。(I)は臨界傾斜角と滑り面の面圧との関係について示している。面圧が約  $5.9 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^4$  Pa となる範囲では、臨界傾斜角はほぼ  $15$  度で一定であり、摩擦係数は約  $0.27$  となる。また、(II)は黒鉛を10日間及び130日間大気中に放置した後の臨界傾斜角の変化を示しており、臨界傾斜角の経時変化は観測されなかった。

Fig. 11 に炭素鋼と黒鉛の摩擦係数の測定結果を示す。面圧による臨界傾斜角の変化は、炭素鋼板が酸化する前に測定された結果である。約  $5.9 \times 10^2 \sim 5.1 \times 10^3$  Pa の面圧の範囲では、臨界傾斜角は約  $9$  度で一定であり、摩擦係数は約  $0.16$  となっており、炭素鋼板上に生じた酸化物による経時変化が観測された。

## 5. 解析結果

摩擦係数測定試験より得られた各摩擦係数を用いて解析した結果を Fig. 12 に示す。サポートプレートと固定反射体下段及びサポートプレートと断熱ブロック間の摩擦係数  $\mu_s$  には、サポートプレートの経時変化（酸化）を考慮して、 $0.23$  を用いた。また、固定反射体上段と下段間の摩擦係数  $\mu_G$  は、 $0.27$  である。

(I)図は、固定反射体下段と下部プレナム及び断熱ブロック間のすき間 gap 2 が  $0.5$  mm の結

果である。傾斜角増加時では、傾斜角  $0^{\circ}$ ～約  $8^{\circ}$ 間は解析モデルの状態変移図 (Fig. 7) の(a)状態、約  $8^{\circ}$ ～ $10^{\circ}$ 間は(b)、約  $10^{\circ}$ ～ $13^{\circ}$ 間は(c)、約  $13^{\circ}$ ～ $17^{\circ}$ 間は(d)、約  $17^{\circ}$ ～ $20^{\circ}$ 間は(e)、(f)に相当し、減少時では、 $20^{\circ}$ ～約  $3^{\circ}$ 間は(g)、約  $3^{\circ}$ ～ $0^{\circ}$ 間は(h)、(i)に相当する。

(II)図は、gap 2が0 mmのときの結果である。上段の炉心拘束力の変化はgap 2が0.5 mmの場合と同様であるが、下段は  $15^{\circ}$ 以上で(e)状態から変化を開始する。

次に、試験体の傾斜試験で得られた“傾斜角と拘束力の変化曲線”(Fig. 9)に一致するように推定された、摩擦係数の組合せを用いて解析した結果を Fig. 13 に示す。摩擦係数は、傾斜角  $\theta = 20^{\circ}$ のときの下段、上段の炉心拘束力の変化量の傾斜方向余弦の総和 ( $\sum f_{1i}(20)^*$ ,  $\sum f_{2i}(20)^*$ )が実験値に等しいとした連立方程式を解くことで求め、その値は  $\mu_G$ が0.10、 $\mu_S$ が0.19であった。(I)図は、gap 2が0.1 mmのときの結果であり、状態変移図 (Fig. 7) のCase ②の経路に従って変化する。(II)図は、gap 2が0 mmの場合の結果であるが、gap 2の値による下段炉心拘束力の変化はほとんど見られない。

## 6. 討 論

水平地震加速度 350 gal に相当する最大傾斜角  $20^{\circ}$ まで試験体を傾斜させた後に、元に戻しても炉心拘束力の変化量は上、下段ともゼロにならなかった。これは、主にブロック配列のずれを回復させるために作用する炉心拘束力と、ブロック間やブロックとサポートプレート間に生じる摩擦抵抗力が釣り合った状態でブロック配列が再編成されたためであると考えられる。従って、地震時に、最大静止摩擦抵抗力を超える水平荷重を炉床部の構造物が受けた後では、ブロック配列は変化することが考えられるので十分注意する必要がある。

摩擦係数測定試験から得られた摩擦係数の組み合わせ ( $\mu_S = 0.23$ ,  $\mu_G = 0.27$ )を用いた解析結果では、最大傾斜角  $20^{\circ}$ のときの下段の拘束力の変化量は実験値の約 1.1 倍であったのに対して、上段は、約 0.7 倍でありかつ傾斜角減少時の回復が遅いなど、下段に比べて実験値との差異が大きい。また、傾斜試験結果に一致するように、最大傾斜角  $20^{\circ}$ の上、下段の炉心拘束力の変化量から求めた見掛けの摩擦係数  $\mu_S (= 0.19)$ ,  $\mu_G (= 0.10)$  は、それぞれ実測値の約 0.83, 0.37 倍であり、特に上段の拘束力に影響する  $\mu_G$ が著しく低下している。このように解析値と実験値との差異が下段に比べて上段に大きく表れた原因の一つとして、固定反射体一体ごとの傾き(転倒)の影響が考えられる。本試験体に使用された固定反射体には、炉心半径方向に生じる温度差による熱膨張差の逃げ部が上、下段間に設定されている (Fig. 14)。そのため、上段固定反射体の底面の面積は、下段に比べて A, B 型で約 2/5 倍、C 型で約 3/5 倍とそれぞれ小さくなっており、上段は下段より固定反射体一体ごとの内側への傾き(転倒)が発生し易い。上段固定反射体に転倒が生じたと仮定すれば、その偶力も炉心拘束機構に加わったことになる。そのため、ブロック群の滑り抵抗力和自重の釣り合いだけを考慮した本解析モデルから得られた見掛けの摩擦係数では、特に固定反射体の上、下段間に用いられた  $\mu_G$ の実測値との差異が大きくなったと考えられる。

見掛けの摩擦係数の組み合わせ ( $\mu_G = 0.10$ ,  $\mu_S = 0.19$ )を用いた解析により、試験体を繰

果である。傾斜角増加時では、傾斜角  $0^\circ \sim 8^\circ$ 間は解析モデルの状態変移図 (Fig. 7) の(a)状態、 $8^\circ \sim 10^\circ$ 間は(b)、 $10^\circ \sim 13^\circ$ 間は(c)、 $13^\circ \sim 17^\circ$ 間は(d)、 $17^\circ \sim 20^\circ$ 間は(e)、(f)に相当し、減少時では、 $20^\circ \sim 3^\circ$ 間は(g)、 $3^\circ \sim 0^\circ$ 間は(h)、(i)に相当する。

(II)図は、gap 2が0 mmのときの結果である。上段の炉心拘束力の変化はgap 2が0.5 mmの場合と同様であるが、下段は $15^\circ$ 以上で(e)状態から変化を開始する。

次に、試験体の傾斜試験で得られた“傾斜角と拘束力の変化曲線”(Fig. 9)に一致するように推定された、摩擦係数の組合せを用いて解析した結果をFig. 13に示す。摩擦係数は、傾斜角 $\theta = 20^\circ$ のときの下段、上段の炉心拘束力の変化量の傾斜方向余弦の総和( $\sum f_{1i}(20)^\ast$ ,  $\sum f_{2i}(20)^\ast$ )が実験値に等しいとした連立方程式を解くことで求め、その値は $\mu_G$ が0.10、 $\mu_S$ が0.19であった。(I)図は、gap 2が0.1 mmのときの結果であり、状態変移図 (Fig. 7) のCase ②の経路に従って変化する。(II)図は、gap 2が0 mmの場合の結果であるが、gap 2の値による下段炉心拘束力の変化はほとんど見られない。

## 6. 討 論

水平地震加速度 350 galに相当する最大傾斜角  $20^\circ$ まで試験体を傾斜させた後に、元に戻しても炉心拘束力の変化量は上、下段ともゼロにならなかった。これは、主にブロック配列のずれを回復させるために作用する炉心拘束力と、ブロック間やブロックとサポートプレート間に生じる摩擦抵抗力が釣り合った状態でブロック配列が再編成されたためであると考えられる。従って、地震時に、最大静止摩擦抵抗力を超える水平荷重を炉床部の構造物が受けた後では、ブロック配列は変化することが考えられるので十分注意する必要がある。

摩擦係数測定試験から得られた摩擦係数の組み合わせ ( $\mu_S = 0.23$ ,  $\mu_G = 0.27$ )を用いた解析結果では、最大傾斜角  $20^\circ$ のときの下段の拘束力の変化量は実験値の約 1.1 倍であったのに対して、上段は、約 0.7 倍でありかつ傾斜角減少時の回復が遅いなど、下段に比べて実験値との差異が大きい。また、傾斜試験結果に一致するように、最大傾斜角  $20^\circ$ の上、下段の炉心拘束力の変化量から求めた見掛けの摩擦係数  $\mu_S (= 0.19)$ 、 $\mu_G (= 0.10)$ は、それぞれ実測値の約 0.83, 0.37 倍であり、特に上段の拘束力に影響する  $\mu_G$ が著しく低下している。このように解析値と実験値との差異が下段に比べて上段に大きく表れた原因の一つとして、固定反射体一体ごとの傾き (転倒) の影響が考えられる。本試験体に使用された固定反射体には、炉心半径方向に生じる温度差による熱膨張差の逃げ部が上、下段間に設定されている (Fig. 14)。そのため、上段固定反射体の底面の面積は、下段に比べてA、B型で約 2/5倍、C型で約 3/5倍とそれぞれ小さくなっており、上段は下段より固定反射体一体ごとの内側への傾き (転倒) が発生し易い。上段固定反射体に転倒が生じたと仮定すれば、その偶力も炉心拘束機構に加わったことになる。そのため、ブロック群の滑り抵抗力と自重の釣り合いだけを考慮した本解析モデルから得られた見掛けの摩擦係数では、特に固定反射体の上、下段間に用いられた  $\mu_G$ の実測値との差異が大きくなったと考えられる。

見掛けの摩擦係数の組み合わせ ( $\mu_G = 0.10$ ,  $\mu_S = 0.19$ )を用いた解析により、試験体を繰

り返し“傾斜一回復”させた場合の拘束力の変化を推定すると、Fig.15のようになる。すなわち、ブロック群の移動は、2回目以降も同一の摩擦抵抗力によるヒステリシスループをたどり、拘束力の変化が増加することはないと考えられる。

## 7. 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による地震時模擬傾斜試験を行った。また、摩擦係数測定試験と傾斜試験より求められた結果を簡易ブロック群の滑りモデルで解析した。得られた結論は次のとおりである。

- (1) 試験体を傾斜させて上段及び下段の炉心拘束機構が受ける力の変化量は、上段の方が下段よりも大きかった。これは、サポートポストで球面支持された上部プレナムブロックが動き易く、その荷重の影響を直接上段が受けるためと考えられる。
- (2) 最大20°まで傾斜させてから水平に戻したとき、力の変化量はゼロにならなかった。すなわち、ブロック配列は、傾斜前の状態に復元しなかった。
- (3) 簡易ブロック群の滑りモデルによる解析結果は、上記2つの特性を定性的には良く説明できた。
- (4) 摩擦係数測定試験より得られた値を用いた解析結果は、上段の拘束力の変化量が実験値より小さい。
- (5) 解析に用いた摩擦係数を、傾斜試験による拘束力の実測値に一致するように求めると、 $\mu_G$  (黒鉛/黒鉛) = 0.10,  $\mu_S$  (黒鉛/鋼) = 0.19 となり、特に  $\mu_G$  が摩擦係数の測定値よりかなり小さい。
- (6) モデル解析結果によれば、傾斜を繰り返した場合、ブロック配列の変化量 (拘束力の変化量) が増加することは無い。

本研究を行うに当たり、有益な御助言と御討論を頂いた日本原子力研究所高温工学部 佐野川好母部長及び同高温構造工学研究室 武藤康室長に謝意を表する。

### 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) 菊池賢司，他：日本原子力学会誌，Vol. 26, No. 11, pp. 977～987，(1984)。
- (3) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス実験炉詳細設計(I)”，(1981)。
- (4) 下川純一，他：JAERI-M6141，(1975)。
- (5) 青地哲男，他：JAERI-M6845，(1977)。
- (6) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス炉研究開発の現状”，(1980)。

り返し“傾斜一回復”させた場合の拘束力の変化を推定すると、Fig.15のようになる。すなわち、ブロック群の移動は、2回目以降も同一の摩擦抵抗力によるヒステリシスループをたどり、拘束力の変化が増加することはないと考えられる。

## 7. 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による地震時模擬傾斜試験を行った。また、摩擦係数測定試験と傾斜試験より求められた結果を簡易ブロック群の滑りモデルで解析した。得られた結論は次のとおりである。

- (1) 試験体を傾斜させて上段及び下段の炉心拘束機構が受ける力の変化量は、上段の方が下段よりも大きかった。これは、サポートポストで球面支持された上部プレナムブロックが動き易く、その荷重の影響を直接上段が受けるためと考えられる。
- (2) 最大20°まで傾斜させてから水平に戻したとき、力の変化量はゼロにならなかった。すなわち、ブロック配列は、傾斜前の状態に復元しなかった。
- (3) 簡易ブロック群の滑りモデルによる解析結果は、上記2つの特性を定性的には良く説明できた。
- (4) 摩擦係数測定試験より得られた値を用いた解析結果は、上段の拘束力の変化量が実験値より小さい。
- (5) 解析に用いた摩擦係数を、傾斜試験による拘束力の実測値に一致するように求めると、 $\mu_G$  (黒鉛/黒鉛) = 0.10,  $\mu_S$  (黒鉛/鋼) = 0.19 となり、特に $\mu_G$ が摩擦係数の測定値よりかなり小さい。
- (6) モデル解析結果によれば、傾斜を繰り返した場合、ブロック配列の変化量(拘束力の変化量)が増加することは無い。

本研究を行うに当たり、有益な御助言と御討論を頂いた日本原子力研究所高温工学部 佐野川好母部長及び同高温構造工学研究室 武藤康室長に謝意を表す。

### 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) 菊池賢司，他：日本原子力学会誌，Vol. 26, No. 11, pp. 977～987，(1984)。
- (3) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス実験炉詳細設計(I)”，(1981)。
- (4) 下川純一，他：JAERI-M6141，(1975)。
- (5) 青地哲男，他：JAERI-M6845，(1977)。
- (6) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス炉研究開発の現状”，(1980)。

り返し“傾斜一回復”させた場合の拘束力の変化を推定すると、Fig. 15のようになる。すなわち、ブロック群の移動は、2回目以降も同一の摩擦抵抗力によるヒステリシスループをたどり、拘束力の変化が増加することはないと考えられる。

## 7. 結 論

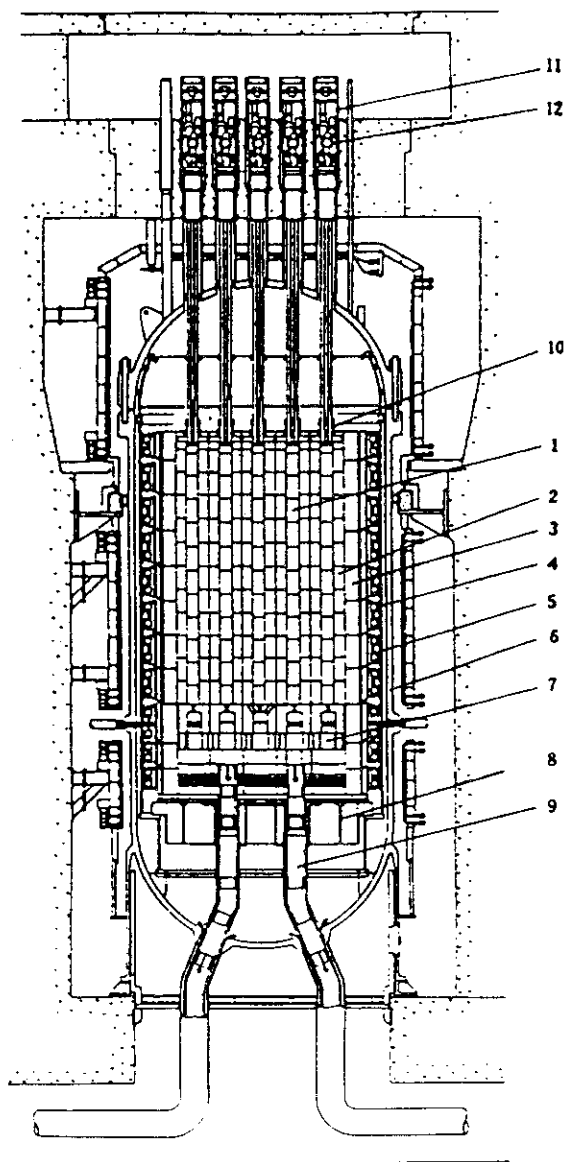
多目的高温ガス実験炉の炉床部構造を模擬した1/2.75スケール縮小試験体による地震時模擬傾斜試験を行った。また、摩擦係数測定試験と傾斜試験より求められた結果を簡易ブロック群の滑りモデルで解析した。得られた結論は次のとおりである。

- (1) 試験体を傾斜させて上段及び下段の炉心拘束機構が受ける力の変化量は、上段の方が下段よりも大きかった。これは、サポートポストで球面支持された上部プレナムブロックが動き易く、その荷重の影響を直接上段が受けるためと考えられる。
- (2) 最大20°まで傾斜させてから水平に戻したとき、力の変化量はゼロにならなかった。すなわち、ブロック配列は、傾斜前の状態に復元しなかった。
- (3) 簡易ブロック群の滑りモデルによる解析結果は、上記2つの特性を定性的には良く説明できた。
- (4) 摩擦係数測定試験より得られた値を用いた解析結果は、上段の拘束力の変化量が実験値より小さい。
- (5) 解析に用いた摩擦係数を、傾斜試験による拘束力の実測値に一致するように求めると、 $\mu_G$  (黒鉛/黒鉛) = 0.10,  $\mu_S$  (黒鉛/鋼) = 0.19 となり、特に $\mu_G$ が摩擦係数の測定値よりかなり小さい。
- (6) モデル解析結果によれば、傾斜を繰り返した場合、ブロック配列の変化量(拘束力の変化量)が増加することは無い。

本研究を行うに当たり、有益な御助言と御討論を頂いた日本原子力研究所高温工学部 佐野川好母部長及び同高温構造工学研究室 武藤康室長に謝意を表す。

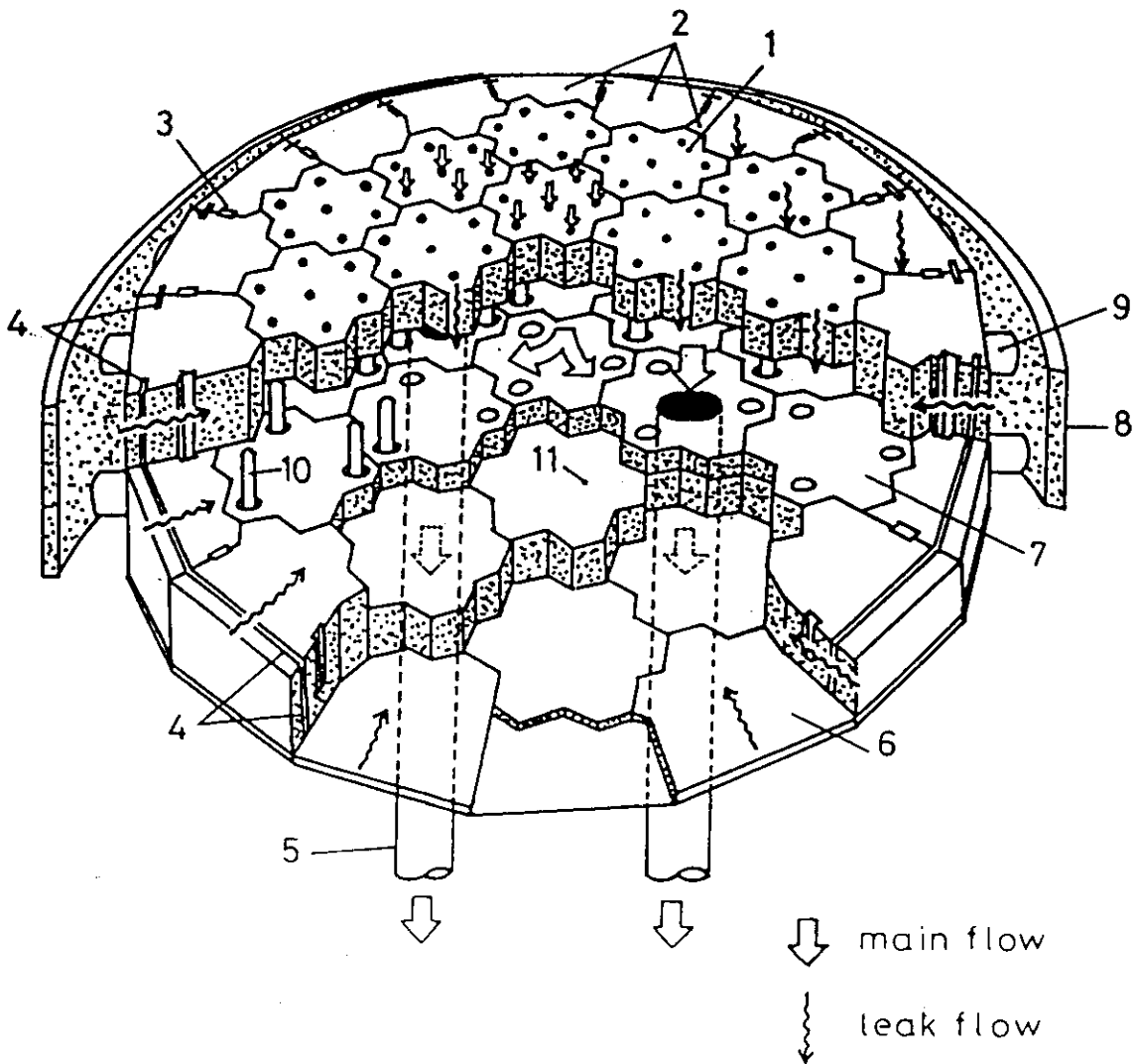
### 参考文献

- (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) 菊池賢司，他：日本原子力学会誌，Vol. 26, No. 11, pp. 977～987，(1984)。
- (3) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス実験炉詳細設計(I)”，(1981)。
- (4) 下川純一，他：JAERI-M6141，(1975)。
- (5) 青地哲男，他：JAERI-M6845，(1977)。
- (6) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス炉研究開発の現状”，(1980)。



- 1 Fuel element
- 2 Replaceable reflector
- 3 Permanent reflector
- 4 Core restrainer
- 5 Core barrel
- 6 Reactor pressure vessel
- 7 Hot plenum
- 8 Diagrid
- 9 Coolant outlet duct
- 10 Flow rate control devices
- 11 Stand-pipe
- 12 Control rod devices

Fig. 1 Core structure of experimental VHTR



- |                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| 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. 2 Bird's eye view of bottom-core structure model



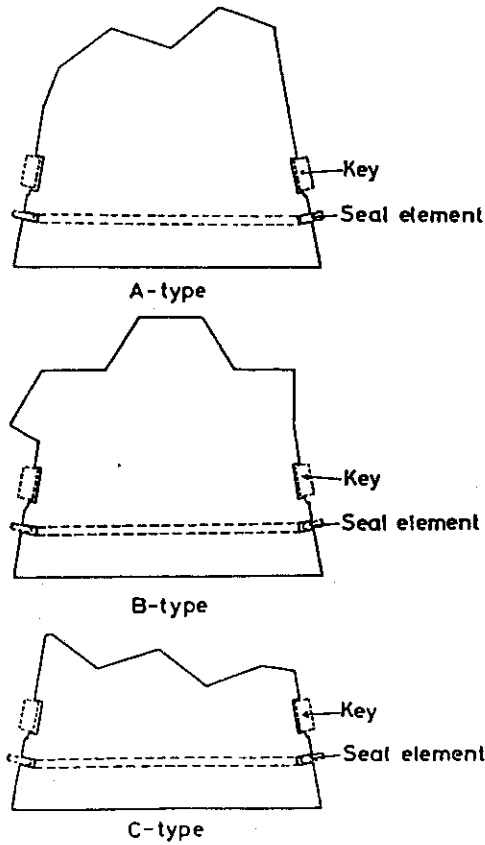


Fig. 3 Three types of fixed reflectors

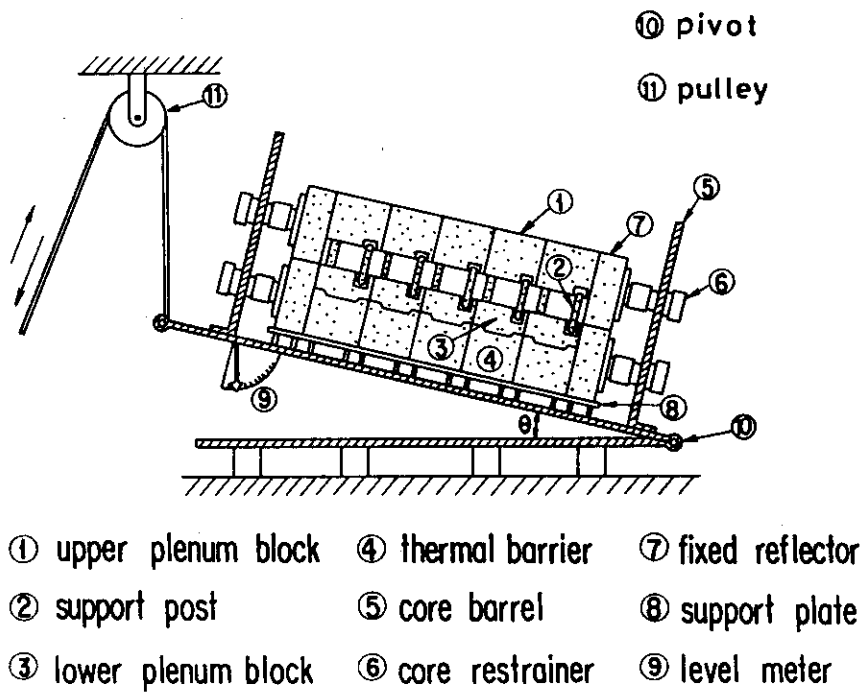


Fig. 4 Inclined bottom-core structure model

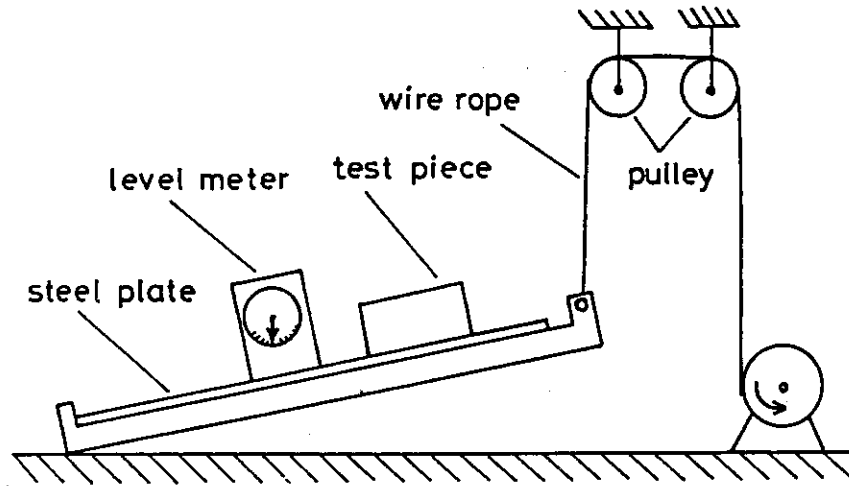


Fig. 5 Measuring apparatus for friction coefficient

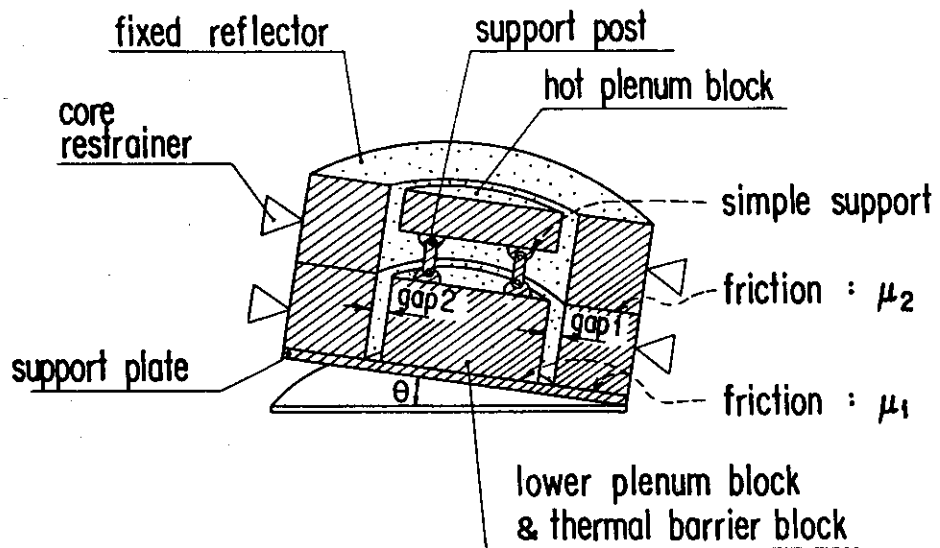


Fig. 6 Simplified sliding-block model

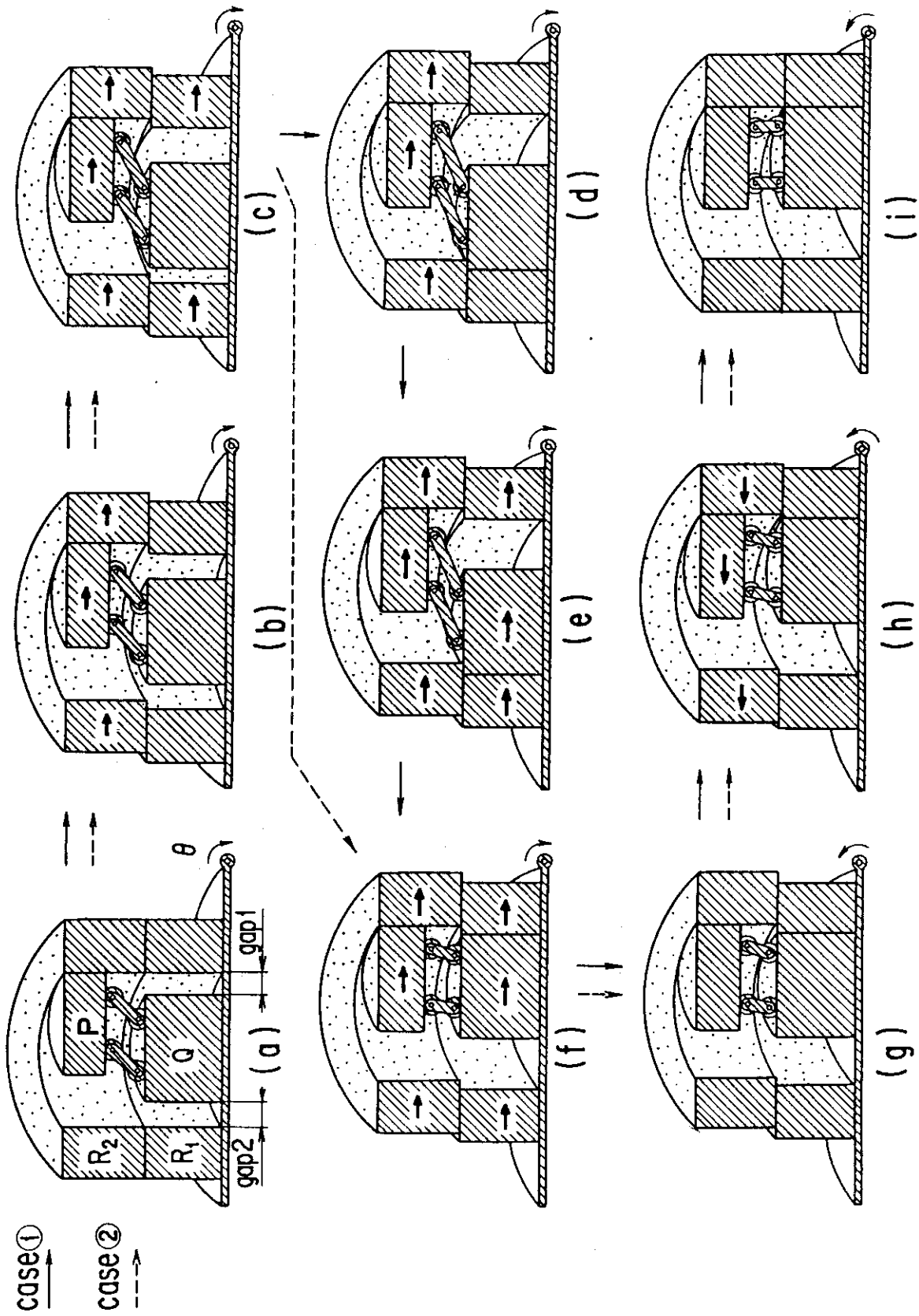


Fig. 7 Behavior of a simplified sliding-block model at each critical inclined-angle

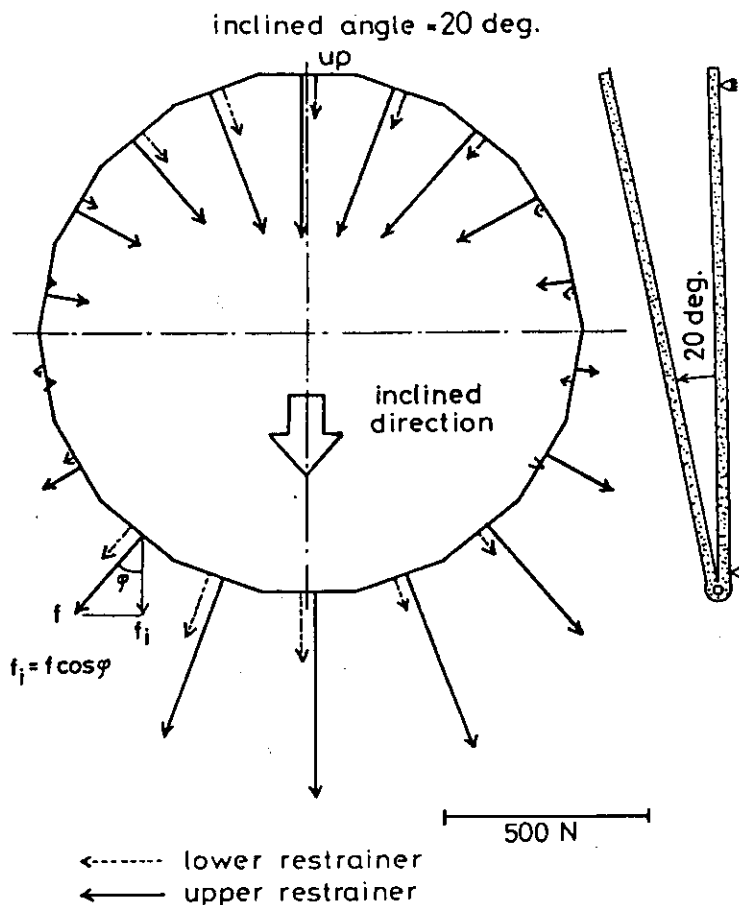


Fig. 8 Differential forces acting on core restrainers when bottom-core structure model is inclined

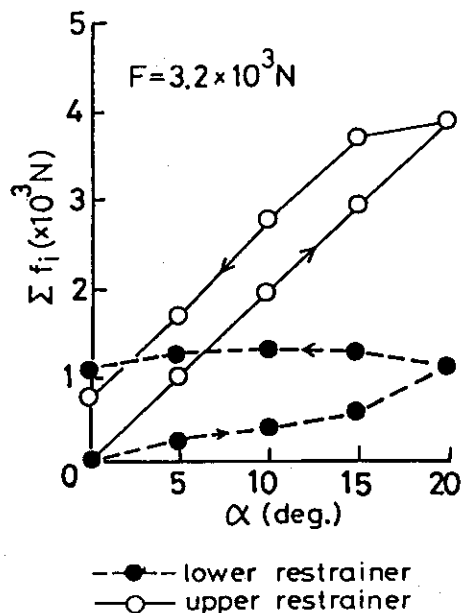


Fig. 9 Relationship between sum of cosine-components of absolute differential core restraint forces and inclined angle of bottom-core structure model

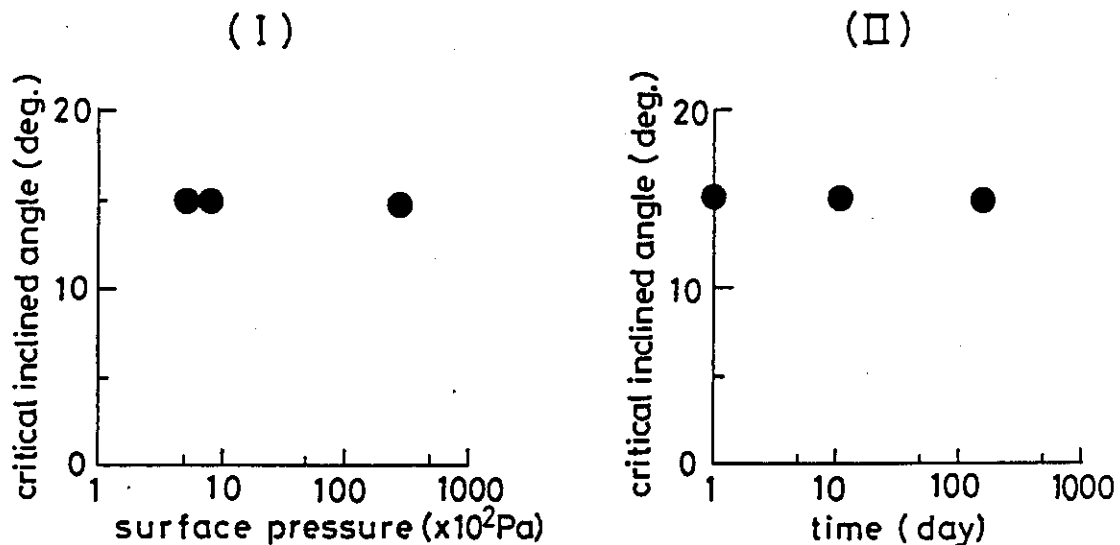


Fig.10 Friction coefficients of a graphite block against itself

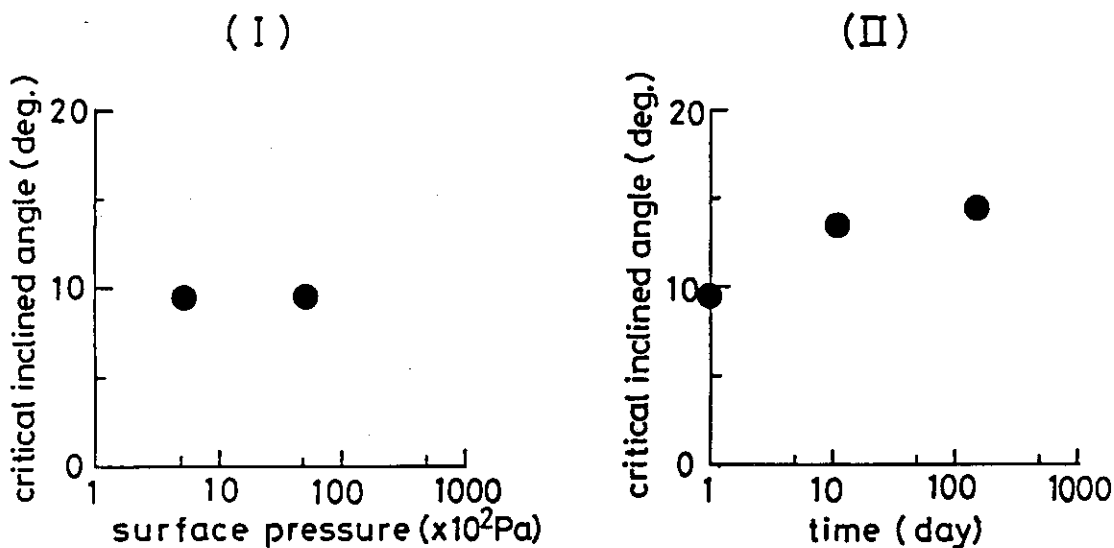


Fig.11 Friction coefficients of a graphite block against a steel plate

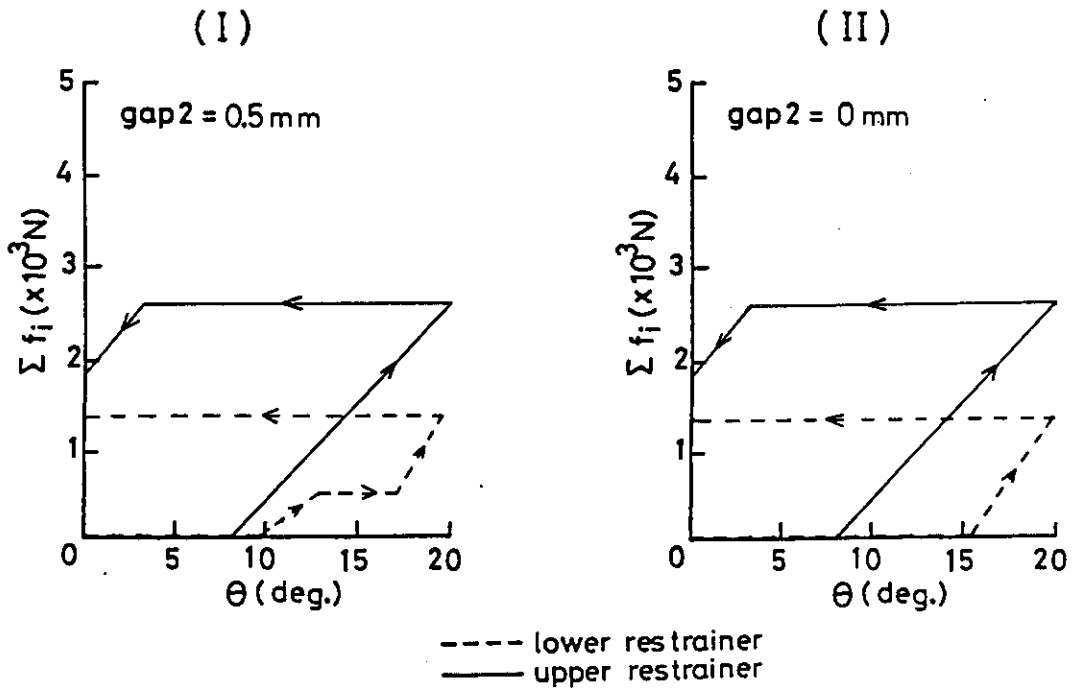


Fig.12 Analytical results of core restraint forces and inclined angle  
 ( friction coefficient: graphite/graphite=0.27, graphite/steel=0.23 )

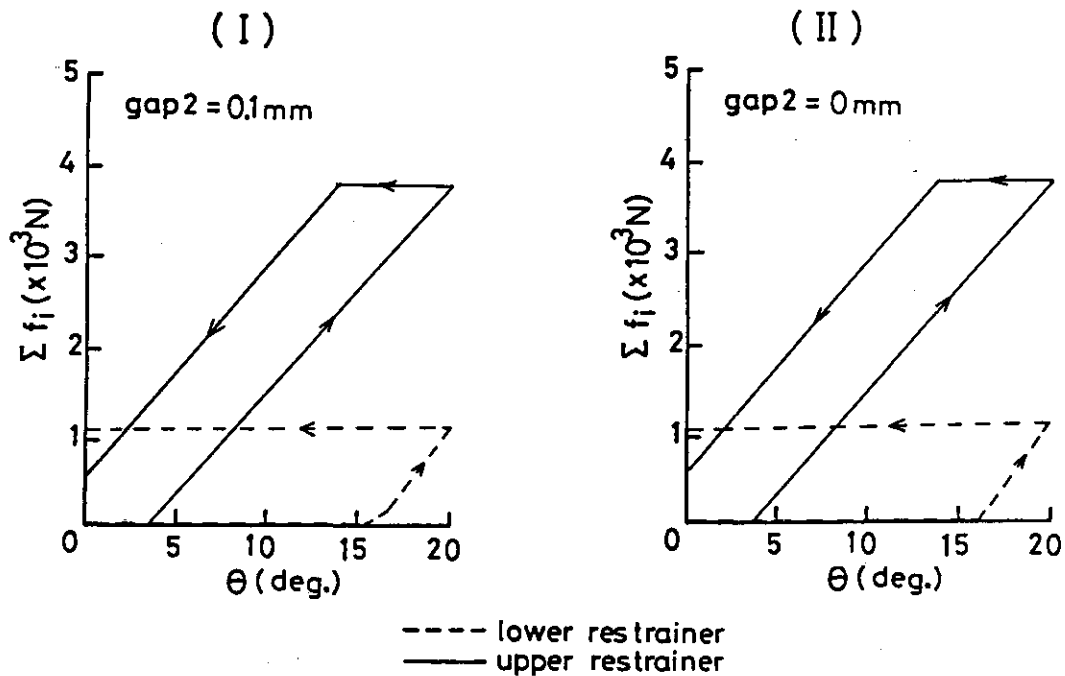


Fig.13 Analytical results of core restraint forces and inclined angle  
 ( friction coefficient: graphite/graphite=0.10, graphite/steel=0.19 )

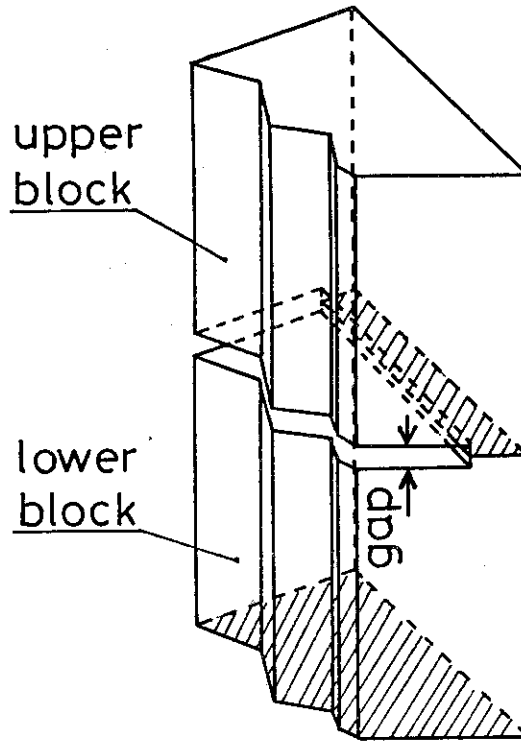


Fig.14 Gap between upper and lower fixed reflectors

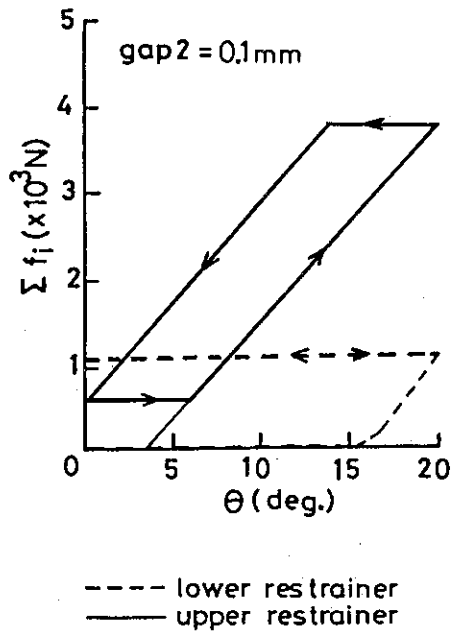


Fig.15 Hysteresis loop in re-inclining test