

JAERI-M
92-104

増殖材・増倍材ペブル充填層振動特性
実験装置の製作

1992年7月

榎枝 幹男・吉田 浩・平田 慎吾*・石田 勝敏*

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, 1992

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

増殖材・増倍材ペブル充填層振動特性実験装置の製作

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

榎枝 幹男・吉田 浩・平田 慎吾*・石田 勝敏*

(1992年6月12日受理)

国際熱核融合実験炉 (ITER) 用ブランケットとしてわが国が開発を担当している多層ペブル充填層型ブランケットでは、増殖材領域 (Li_2O 層) 3層、中性子増倍材領域 (Be 層) 9層、冷却材領域 (軽水冷却パネル) 5層が交互に配列された構造となっており、増殖材領域及び中性子増倍材領域には、各々直径約1mmの微小ペブルが充填される。このようなブランケットの熱的挙動は、各領域のペブル充填状態により大きく影響を受けるため、ITERの運転特性を考慮した安定性の高い充填層を実現する事が必要である。

標記試験装置は、実ブランケット構造を模擬したステンレス鋼製パネル試験体、アクリル製パネル試験体及びそれらを各種条件で加振するための加振機、計測機器及び模擬ペブルで構成され、工学規模の試験体による充填特性 (静的特性及び動的特性) を把握し、ブランケットの設計及び製作に反映する事が可能となっている。

Test Apparatus for ITER Blanket Pebble Packing Behavior

Mikio ENOEDA, Hiroshi YOSHIDA, Singo HIRATA*
and Katutoshi ISHIDA*

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 12, 1992)

Current Japanese design for ITER Driver Blanket consists of three breeder layers, nine multiplier layers and five cooling panels. The breeder layers and the multiplier layers contain 1mm diameter spheres of Li₂O and Be, respectively. The heat transfer in such "Pebble Layered Blanket" is largely affected by the packing fraction of the pebbles which can be easily changed by the vibration during the operation. The packing fraction of the pebbles are expected to be as high as possible on the view point of nuclear heat design to maintain the optimum temperature of the breeder layer. Thus, it is necessary to establish the stable packed bed of the breeder and multiplier.

The present experimental apparatus was fabricated for the engineering tests with the partial model of Japanese blanket. Test apparatus consists of stainless steel test panels, transparent plastic test panels, vibrators and measurement instruments. The apparatus can examine various parameters of sphere packed beds such as packing fraction, panels deformation, loading weight at the bottom of the panels and so on) under various vibrating conditions.

Keywords : ITER, Pebble Layered Blanket, Breeder Layer, Test Pannel

* Kawasaki Heavy Industry Co.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置構成	1
3. 実験装置設計検討	3
4. 試運転結果及び考察	11
5. まとめ	15
引用文献	15

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus	1
3. Theoretical Considerations	3
4. Results and Discussions	11
5. Conclusions	15
References	15

1. はじめに

I T E R 計画においては、燃料とするトリチウムを自己生産するためのドライバーブランケットを装着することを検討している¹⁾。わが国が提案しているペブル充填型多層ブランケットの構造は図1に示すように、増殖材領域(Li₂O層)3層、中性子増倍材領域(Be層)9層、冷却材領域(軽水冷却パネル)5層が交互に配列された構造となっている²⁾。増殖材領域及び中性子増倍材領域には、各々直径約1mmの微小ペブルが充填される。図2³⁾に示すように、ペブル充填層における熱伝導を支配する充填層有効熱伝導度は、ペブル充填率の値により大きく影響を受けるため、ブランケット組立過程においてペブルを均一に高い充填率で充填する方法の確立、及び運転中の振動に対するペブル充填状態の安定性の確保が必要である。特に、第一壁に近い領域の各層の厚みは、10mm前後と薄いため²⁾、I T E Rの運転特性を考慮した安定性の高い充填層を実現するためには、工学規模の試験体による充填特性(静的特性及び動的特性)を予め十分に把握し、ブランケットの設計及び製作に反映する必要がある。

本実験装置は、以上に述べたような観点から、I T E Rブランケットにおけるペブル充填パネルを模擬したパネル試験体を用いて、種々の振動条件におけるペブル充填率変化、パネル側壁の歪、底部における負荷荷重等の、充填層ペブル充填状態に関する予備的データの取得を目的とするものである。

2. 実験装置構成

本実験装置は、実ブランケット構造を模擬したステンレス鋼製パネル試験体、アクリル製パネル試験体及びそれらを各種条件で加振するための加振機、計測機器及び模擬ペブルで構成される。図3に実験装置概略構成を示す。本試験装置は、パネル試験体を加振機に固定し種々の振動条件で上下方向に振動する構造となっている。加振運転中の安定性を増すために、加振機と加振台は一体構造となっており、加振台には転倒防止アングルが取り付けられている。測定対象としては図4に示すように、充填層高さ、充填層側壁の歪量、底部における負荷荷重を設定している。以下に各構成機器の概略をまとめる。ステンレス鋼製及びアクリル製パネル試験体の形状、寸法については、現在のI T E Rブランケット設計を反映させるために、アウトボードブランケット第一層と第3層の断面寸法を採用した。

1. はじめに

I T E R 計画においては、燃料とするトリチウムを自己生産するためのドライバーブランケットを装着することを検討している¹⁾。わが国が提案しているペブル充填型多層ブランケットの構造は図1に示すように、増殖材領域(Li₂O層)3層、中性子増倍材領域(Be層)9層、冷却材領域(軽水冷却パネル)5層が交互に配列された構造となっている²⁾。増殖材領域及び中性子増倍材領域には、各々直径約1mmの微小ペブルが充填される。図2³⁾に示すように、ペブル充填層における熱伝導を支配する充填層有効熱伝導度は、ペブル充填率の値により大きく影響を受けるため、ブランケット組立過程においてペブルを均一に高い充填率で充填する方法の確立、及び運転中の振動に対するペブル充填状態の安定性の確保が必要である。特に、第一壁に近い領域の各層の厚みは、10mm前後と薄いため²⁾、I T E Rの運転特性を考慮した安定性の高い充填層を実現するためには、工学規模の試験体による充填特性(静的特性及び動的特性)を予め十分に把握し、ブランケットの設計及び製作に反映する必要がある。

本実験装置は、以上に述べたような観点から、I T E Rブランケットにおけるペブル充填パネルを模擬したパネル試験体を用いて、種々の振動条件におけるペブル充填率変化、パネル側壁の歪、底部における負荷荷重等の、充填層ペブル充填状態に関する予備的データの取得を目的とするものである。

2. 実験装置構成

本実験装置は、実ブランケット構造を模擬したステンレス鋼製パネル試験体、アクリル製パネル試験体及びそれらを各種条件で加振するための加振機、計測機器及び模擬ペブルで構成される。図3に実験装置概略構成を示す。本試験装置は、パネル試験体を加振機に固定し種々の振動条件で上下方向に振動する構造となっている。加振運転中の安定性を増すために、加振機と加振台は一体構造となっており、加振台には転倒防止アングルが取り付けられている。測定対象としては図4に示すように、充填層高さ、充填層側壁の歪量、底部における負荷荷重を設定している。以下に各構成機器の概略をまとめる。ステンレス鋼製及びアクリル製パネル試験体の形状、寸法については、現在のI T E Rブランケット設計を反映させるために、アウトボードブランケット第一層と第3層の断面寸法を採用した。

また、パネル試験体高さについては、実験データの信頼性を考慮し、1.8 mとした。表1にパネル試験体の寸法とITERブランケット設計寸法の比較を示す。

1) ステンレス鋼製パネル試験体

① 寸法及び員数

(厚み)	(幅)	(高さ)	(員数)
(a) 10 mm	× 300 mm	× 1800 mm	2体
(内1体は圧損測定用とする。)			
(b) 30 mm	× 300 mm	× 1800 mm	1体

② 構造 (図4参照)

- (イ) 試験体の上板は、模擬ペブルが容易に装加できるとともに、ペブル充填高さの動的変化を測定する計測センサーの脱着が容易にできる構造とした。
- (ロ) 試験体の底板は、模擬ペブル充填層の荷重測定センサーの脱着が容易にできる構造とした。
- (ハ) 試験体は、加振機への装着、脱着が容易にできる構造とした。
- (ニ) ステンレス鋼製パネル試験体は自立することが困難なため、補強構造を付加した。

2) アクリル製パネル試験体

① 寸法及び員数

(厚み)	(幅)	(高さ)	(員数)
(a) 10 mm	× 300 mm	× 1000 mm	1体
(b) 30 mm	× 300 mm	× 1000 mm	1体

② 構造

- (イ) 試験体の上板は、模擬ペブルが容易に装加できるとともに、ペブル充填高さの動的変化を測定する計測センサーの脱着が容易にできる構造とした。
- (ロ) 試験体の底板は、模擬ペブル充填層の荷重測定センサーの脱着が容易にできる構造とした。
- (ハ) 試験体は、加振機への装着、脱着が容易にできる構造とした。
- (ニ) アクリル製パネル試験体においては、模擬ペブル充填時のパネル変形を防

止するための補強構造を設けた。また、自立するために高さを1 mとした。

3) 加振機

- (イ) 数量 : 1 式
- (ロ) 型式 : 振動テーブル方式
- (ハ) 振動方向 : 上下方向
- (ニ) 最大加振力 : 約 300 kg

運転中のパネル試験体の転倒防止のため、加振機は加振台と一体構造とした。

4) 計測機器

- 動歪・荷重計 1 式
- 充填層高変位計測計 1 式
- 制御記録計 1 式

5) 模擬ペブル

- アルミナ球 (直径 0.3 mm $\phi \pm 0.15$ mm) 12 kg
- アルミナ球 (直径 1.0 mm $\phi \pm 0.30$ mm) 60 kg
- アルミナ球 (直径 3.0 mm $\phi \pm 0.30$ mm) 40 kg

3. 実験装置設計検討

3. 1 パネル試験体圧損

充填層の圧損評価式としては、一般的によく知られている評価式として、Kozeny-Carmanの式及びErgunの式が挙げられる⁴⁾。

(1) Kozeny-Carmanの式⁴⁾

次式で定義されるレイノルズ数が以下の範囲の場合、圧力損失は、

$$Re = u \rho / (a_v \mu) = \phi_c D_p u \rho / \{ 6 (1 - \epsilon) \mu \}$$

$$= 0.01 \sim 10000 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta P = 6 f L u \rho (1 - \epsilon) / (\phi_c D_p \epsilon^3) \quad \dots \dots \dots (2)$$

にて推算される。ただし、 ϕ_c はCarmanの形状係数で次式により定義される。

$$\phi_c = 6 (1 - \epsilon) / S_v D_p \quad \dots \dots \dots (3)$$

止するための補強構造を設けた。また、自立するために高さを1 mとした。

3) 加振機

- (イ) 数量 : 1 式
 (ロ) 型式 : 振動テーブル方式
 (ハ) 振動方向 : 上下方向
 (ニ) 最大加振力 : 約300 kg

運転中のパネル試験体の転倒防止のため、加振機は加振台と一体構造とした。

4) 計測機器

- 動歪・荷重計 1 式
 充填層高変位計測計 1 式
 制御記録計 1 式

5) 模擬ペブル

- アルミナ球 (直径0.3 mm $\phi \pm 0.15$ mm) 12 kg
 アルミナ球 (直径1.0 mm $\phi \pm 0.30$ mm) 60 kg
 アルミナ球 (直径3.0 mm $\phi \pm 0.30$ mm) 40 kg

3. 実験装置設計検討

3.1 パネル試験体圧損

充填層の圧損評価式としては、一般的によく知られている評価式として、Kozeny-Carmanの式及びErgunの式が挙げられる⁴⁾。

(1) Kozeny-Carmanの式⁴⁾

次式で定義されるレイノルズ数が以下の範囲の場合、圧力損失は、

$$\begin{aligned} Re &= u \rho / (a_v \mu) = \phi_c D_p u \rho / \{6(1-\varepsilon)\mu\} \\ &= 0.01 \sim 10000 \quad \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

$$\Delta P = 6 f L u \rho (1-\varepsilon) / (\phi_c D_p \varepsilon^3) \quad \dots \dots \dots (2)$$

にて推算される。ただし、 ϕ_c はCarmanの形状係数で次式により定義される。

$$\phi_c = 6(1-\varepsilon) / S_v D_p \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 S_v は、充填層の単位かさ密度当りの表面積をあらわす。ただし、球に対しては $\phi_0 = 1$ である。

球、くら型充填物、破碎固体等の中実充填物に対しては、 $Re < 2.0$ 、ラシヒリングの様な中空充填物に対しては、 $Re < 0.25$ の場合、流れは層流と考えられるが、このような場合、 f は精度 $\pm 10\%$ で次式により示される。

$$f = 5 / Re \quad \dots \dots \dots (4)$$

レイノルズ数がこれより大きな乱流範囲では、精度 $\pm 35\%$ で次式により示される。

$$\text{中実充填物: } f = 5 / Re + 0.4 / Re^{0.1} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{中空充填物: } f = 5 / Re + 1.0 / Re^{0.1} \quad \dots \dots \dots (6)$$

(2) Ergun の式⁴⁾

Ergun は、充填層の流動抵抗は、層流及び乱流に起因する抵抗の和として、扱うことができるという観点から、推算式を整理し次式を得ている。

$$\Delta P = \left\{ Lu^2 \rho (1 - \varepsilon) / (D_p \varepsilon^3) \right\} \\ \times \left\{ (150 (1 - \varepsilon) \mu / D_p u \rho + 1.75) \right\} \quad \dots \dots (7)$$

ここで、第1項は層流項、第2項は、乱流項をあらわしている。厚損の計算に際しては、図5に示すヘリウムの密度及び粘性係数を用いた。

本実験装置の厚損測定用パネル試験体を設計するにあたり、ITERブランケットの増殖材層におけるスィープガス条件を模擬することを念頭におき、以下のITERブランケット設計条件に従った。

(1) 増殖材

- 形状 : 球
 寸法 : 1 mm ϕ (寸法をパラメータとしてこれ以外も評価する。)
 充填率 : 65%

(2) 増殖材充填層パネル

- 形状 : 直方体
 流路断面寸法 : 10 mm \times 1000 mm (0.01 m²)
 流路長さ : 6 m
 パネル数 : 48層

(3) スィープガス

流体	:	ヘリウムガス
温度	:	873 K (平均温度)
圧力	:	0.1 MPa
密度	:	図5参照
粘性係数	:	図5参照

空塔速度の設計値は、増殖材層パネル内のトリチウム分圧を一定値以下とするように設定される。そのためには、トリチウム生成量に応じた必要流量でガススweepをする必要がある。図1からもわかるように第一層では、トリチウム生成量は非常に大きく、従って、流量も大きくする必要があり、空塔速度としては、大きな値を設定する必要がある。これに対して、第3層では、空塔速度は、小さい値となる。スweepガス流路の設計としては、各増殖材層を独立にガススweepする場合と、全増殖材層を共通にガススweepする場合が考えられる。実験を行うにあたっては、これらの場合の内最大空塔速度と最小空塔速度を実験範囲とすることが必要である。そのため、以下に述べる2ケースを想定した。

(1) 各増殖材層を独立にガススweepする場合

各増殖材層内トリチウムガス分圧を10 Pa ($G_{He}/G_{T2} = 1.0^4$ 、0.1 MPa) とする場合には、各増殖材層のスweepガス空塔速度は、 $0.4 \cdot 1 \sim 6.1 \cdot 2 \text{ cm/s}$ (0.1 MPa, 873 K) となる。

* 1 アウトボードブランケット第3層

* 2 アウトボードブランケット第1層

(2) 全増殖材層を共通にガススweepする場合

全増殖材層内トリチウムガス分圧を10 Pa ($G_{He}/G_{T2} = 1.0^4$ 、0.1 MPa) とする場合には、スweepガス空塔速度は、 $4.0 \cdot 3 \sim 17.0 \cdot 4 \text{ cm/s}$ (0.1 MPa, 873 K) となる。

* 3 アウトボードブランケット第1層

* 4 インボードブランケット

以上の空塔速度範囲にたいして、Ergunの式及びKozeny-Carmannの式を用いて計算した圧損推算値を図6に示す。図6は、温度873 K、ペ

ブル径 1 mm、充填層空隙率 35%、流路断面積 0.01 m²、流路長 6 m の場合についての推算値である。図 6 より、単位充填層長さあたりの概略圧損値は、各増殖材層に独立にガススリーブする場合には、10² ~ 10³ Pa/m、全増殖材層に共通にガススリーブする場合は、10³ ~ 4 × 10³ Pa/m と評価される。また、同じ推算式を用いて、充填層温度、充填層空隙率及び充填球の寸法をパラメータとして圧損に対する依存性として示したものが図 7、8 及び 9 である。これらの図より温度の影響は、空隙率及びペブル径の影響に比べて、小さいことがわかる。

3. 2 増殖材パネル内ペブル圧力評価

本章では、粉粒体貯層設計基準に採用されている代表的な式である Janssen の式⁵⁾に基づき静置状態での増殖材ペブルにより増殖材パネルに作用する圧力を評価する。一般的に粉粒体を充填する貯層の設計にあたっては、充填される粉粒体の貯層壁や貯層底板に作用する圧力及び貯層内の挙動を正しく把握する必要があるが、現状においては未解決で不明の点が多く、取り扱う内容物の諸物性や貯層形状、貯層の使用状態などにより、粉粒体圧力は複雑に変化する。断面積 A、内壁周長 L の充填層にかさ密度 ρ のペブルを均一充填した場合（図 10 参照）、その自由表面からの深さ x におけるペブルの垂直方向圧力 P_v、水平方向圧力 P_h は次式で表される。

$$P_v = \rho A \{ 1 - \exp(-\mu K L x / A) \} / (\mu K L) \quad \dots (8)$$

$$P_h = K P_v \quad \dots (9)$$

ここで、μ は粉流体と壁との摩擦係数である。また、Janssen 係数と呼ばれる K の値の算定は、一般的には、ペブルの内部摩擦角 φ_i を用い、次の Rankine 式⁵⁾にて与えられる。

$$K = (1 - \sin \phi_i) / (1 + \sin \phi_i) \quad \dots (10)$$

式 (8)、(9) で x → ∞ とおくと最大圧が次式で示される。

$$P_{v,max} = \rho A / (\mu K L) \quad \dots (11)$$

$$P_{h,max} = \rho A / (\mu L) \quad \dots (12)$$

上記圧力を算出するために必要な物性値、ρ、φ_i、μ に対しては、以下の数値を用いる。

(a) かさ密度 ρ

酸化リチウムペブルのかさ密度は、酸化リチウムペブル密度 $1.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ($2.01 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 85% TD)、充填率 65% から次の値とする。

$$\rho = 1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

(b) 内部摩擦角 ϕ'

内部摩擦角は、次の Coulomb の式⁵⁾により、垂直応力 σ 、せん断応力 τ 、及び粘着力を関係づける。

$$\tau = \sigma \tan \phi' + C \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここで ϕ' の値としては、ガラスの摩擦係数⁶⁾ ($\tan \phi'$) の値 1.13 から

$$\phi' = \tan^{-1}(1.13) = 48.5^\circ$$

を用いることとする。また Janssen 係数 K の値としては、 $\sin \phi' = 0.749$ から

$$K = (1 - 0.749) / (1 + 0.749) = 0.144$$

(c) ペブルと壁との摩擦係数 μ

増殖材ペブルとステンレス鋼の固体摩擦係数についてのデータは測定されていないため、石と金属の固体摩擦係数⁷⁾を用いて次の値とする。

$$\mu = 0.4$$

(d) 幾何寸法

評価対象としては、ステンレス鋼製パネル試験体 I (#1) 及び II (#2)、アウトボードブランケット第 1 層 (#3) 及び第 3 層 (#4) をとりあげた。これらについて幾何形状及び形状パラメータを表 1 に示す。

以上の条件により増殖材パネル底面での垂直方向圧力 $P_{v,i}$ 及び $P_{h,i}$ を計算した結果を表 2 に示す。これらの計算結果から、静置圧力は静水圧近似の場合の値よりも大幅に小さいことがわかる。粉体摩擦力に関する第 0 次近似値を使用した評価によれば、アウトボードブランケット第 1 層に対応する充填層高 3.5 m のパネル底面では垂直圧力は静水圧近似値 $4.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$ の 2.2%、また水平圧力は 0.3% に低減する。この計算結果は増殖材パネル内のペブル重量の大部分が側壁との摩擦力により支持され、パネル底部の荷重とならないこと

を示している。特に本評価で適用した増殖材パネル寸法は、水圧半径 $R = A / L$ が 5 mm 及び 16 mm と小さく、断面が偏平な直方体であり、かつ充填高さが、ITERブランケット設計では $3.9 \sim 4.5 \text{ m}$ と水圧半径に比べて極端に大きいため、摩擦力の効果は顕著となるものと考えられる。

ペブル圧力の垂直方向分布に関しては、Janssenの式では次式に示す \exp 関数の形をとる。

$$P_v = P_{v, \max} \{ 1 - \exp(-x/x') \} \quad \dots \dots (14)$$

$$x' = A / \mu K L \quad \dots \dots (15)$$

本評価においては、 x' が $8.4 \times 10^{-2} \text{ m}$ 及び $2.8 \times 10^{-1} \text{ m}$ と、充填高さに比べて短いことから、ペブル圧力は充填部の大部分で均一と考えられる。また増殖材パネル側板 ($300 \text{ mm} \times 3900 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}^t$) について、均一分布荷重では、4 偏固定条件における発生圧力は以下のように評価される。

$$\sigma_{\max} = \beta p a^2 / h^2 \quad \dots \dots (16)$$

ここで、 β (応力係数) = 0.5 ($b/a = 13$ より)

$$p \text{ (評価圧力)} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^2$$

$$a \text{ (単辺長)} = 300 \text{ mm}$$

$$h \text{ (板厚)} = 1.0 \text{ mm}$$

を代入して、

$$\sigma_{\max} = 0.59 \text{ kg/mm}^2$$

となる。

3. 3 試験体パネル歪量評価

増殖材/増倍材層を構成するパネルの板厚は約 1 mm と非常に薄いため、充填された増殖材/増倍材ペブル荷重による側板の歪量を評価する必要がある。本章では、ステンレス鋼製パネル試験体 (板厚 1 mm) について、微小たわみ理論⁷⁾による歪量の評価を行う。

たわみが板厚に比べて小さいことを前提とする微小たわみ理論では、各種の支持条件及び垂直荷重条件に対して、各々適切な最大たわみ量 w_{\max} と最大曲げ応力 σ_{\max} の計算式が適用される⁷⁾。本項における支持条件については、パネル試験体側板は、上端及び下端がフランジに溶接されていることから、相対する2辺

固定、2辺支持と見なされる。また荷重条件については、前章の検討から等分布荷重と見なされる。したがって評価モデルとしては、次式が適用できる⁷⁾。

$$w_{\max} = \alpha^{-3} p b^4 / E h^3 \quad \dots \dots \dots (17)$$

$$\sigma_{\max} = \beta^{-3} p b^2 / h^2 \quad \dots \dots \dots (18)$$

評価式中のパラメータのうち寸法 a 、 b 及び h に関しては、評価対象とするパネル試験体の寸法より、

$$\text{支持辺長: } a = 1800 \text{ mm}$$

$$\text{固定辺長: } b = 300 \text{ mm}$$

$$\text{板厚: } h = 1 \text{ mm}$$

を使用する。また縦弾性係数に関しては、20℃におけるオーステナイト系ステンレス鋼の縦弾性係数⁸⁾を使用して、

$$E = 19,300 \text{ kgf/mm}^2$$

とする。荷重条件としては、前章における検討より、水平方向静置圧力として、

$$p = 7.8 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^2$$

を用いる。また、最大たわみ係数及び最大応力係数の値としては、 $a/b = 6$ より、

$$\alpha^{-3} = 0.14 \quad ; \quad \beta^{-3} = 0.75^{7)}$$

を使用する。

以上の物性値を用いて計算を行うと、最大たわみとしては、

$$w_{\max} = 4.6 \text{ mm} \quad (\text{発生位置は、側板中心})$$

最大曲げ応力としては、

$$\sigma_{\max} = 5.3 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{発生位置は、固定辺中央})$$

が得られる。

このように算定された最大たわみは、4.6 mm と板厚より大きいので、たわみ量が板厚の半分以下において成立する微小たわみ理論は適用できない。大きなたわみが生じる場合には、板の中央面に生じる引張りの影響を無視できなくなり、大たわみ理論による解析が必要となる。一般的に大たわみ理論によるたわみ及び最大応力の計算値は、微小たわみ理論によるよりも小さくなると推定される。このことから、今回の評価で得られた最大曲げ応力の値(5.3 kg/mm²)はさらに低下するものと考えられるため、本実験装置のパネル試験体の構造上の健

全性は確保できるものと思われる。なお、本試験装置では、たわみによるパネル形状の変化の無い状態での充填特性データを取得することも目的としているので、パネル試験体に着脱可能な補強リブを取り付けパネル側板の変形を防止することとした。パネル試験体側板のリブの効果については、以下の手順で評価を行う。

(a) パネル試験体を横リブにより4分割する効果

パネル試験体を横リブにより4分割する場合、 $a = 450 \text{ mm}$ (4分割)
 $b = 300 \text{ mm}$ より $a/b = 1.5$ となる。上部及び下部についての評価式としては、1辺固定3辺支持の等分布荷重であるから、

$$w_{\max} = \alpha^{-4} p b^4 / E h^3 \quad \dots \dots \dots (19)$$

$$\sigma_{\max} = \beta^{-4} p b^2 / h^2 \quad \dots \dots \dots (20)$$

が適用される⁷⁾。また中央部については4辺支持等分布荷重であるから

$$w_{\max} = \alpha_1 p a^4 / E h^3 \quad \dots \dots \dots (21)$$

$$\sigma_{\max} = \beta_1 p a^2 / h^2 \quad \dots \dots \dots (22)$$

ただし α^{-4} 、 β^{-4} 、 α_1 、 β_1 の値は機械工学便覧4-76頁の図より各々読み取る。たわみ及び応力緩和効果は、たわみ係数及び応力係数の比で示される。ここでは緩和効果をリブ無しの状態に対する百分率で表3に示す。たわみとしては50~60%、応力としては70~80%に緩和されることがわかる。

(b) 縦リブの効果

縦リブによるパネル分割は、最大たわみは b^4 に比例し、最大応力は b^2 に比例するのできわめて効果的である。たわみ及び応力係数が同じ場合は、縦2分割により最大たわみは $1/16$ 、最大応力は $1/4$ になる。

荷重については、本評価では、ペブルの水平方向静置圧力 $7.8 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^2$ ($= 7.8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2 = 7.6 \times 10^2 \text{ Pa}$)を使用した。荷重の値とたわみ及び応力は、微小たわみ理論においては線形関係にある。従って、ペブル圧力を付加する場合には、許容限度を越えないよう十分な注意が必要となる。例えば、バージガス圧力を $0.1 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とした場合に、面積 0.54 m^2 のパネル試験体側板にかかる総荷重は、 540 kg となる。

3. 4 加振機性能評価

振動運動を記述する際に必要となる物理量は、振幅、振動数及び加速度であり、これらの物理量は次式で関係付けられる。

$$a = (2\pi f)^2 d / g \quad \dots \dots \dots (23)$$

ただし、 a は振動加速度(G)、 f は振動数(Hz)、 d は片振幅(cm)、 g は重力加速度(=980G)である。式(19)により計算した加振機の性能曲線を図11の波線に示す。本加振機の許容使用範囲は振動数15Hz以上60Hz以下、振動加速度10G以下、片振幅1.25mm以下である。これらの許容使用範囲を図11中に実線で示してある。本実験装置に適用した加振機は、図9に示すように、15~45Hzで最大片振幅が1.25mmが得られ、45~60Hzにて最大加速度10Gが得られるように製作されている。また、被加振物重量と振動条件の関係は、加振機の加振力600kg、加振テーブルの重さ49kgより、次式で与えられる。

$$d = 600g / (2\pi f)^2 / (w + 49) \quad \dots \dots \dots (24)$$

式(24)により計算した、振動数45Hzにおける被加振物重量と振動条件の関係を図12に示す。また、最大加振性能が得られる振動数45Hzにおけるステンレス鋼性パネル試験体の加振性能を図12より読み取った結果を表4に示す。

4. 試運転結果及び考察

4. 1 気密試験

充填層圧損の測定を行うための圧損測定用パネル試験体については、圧損測定結果に対する漏洩の影響が無視できる気密度(漏洩量 1×10^{-2} Acc/sec以下)が要求される。本パネルの気密試験(加圧放置法)の試験結果を表5に示す。試験方法としては、ステンレス鋼製パネル試験体にガスを充填し、圧力変化を経時的に記録し、圧力変化速度より気密度を測定した。漏洩量 1×10^{-2} Acc/secは、圧力降下速度としては -1 mmAq/minに相当するが、試験結果は -0.24 mmAq/minと基準漏洩量以下であった。

4. 2 圧損測定試験

圧損測定用パネル試験体に、 1 mm ϕ 及び 3 mm ϕ アルミナペブルを充填して

3. 4 加振機性能評価

振動運動を記述する際に必要となる物理量は、振幅、振動数及び加速度であり、これらの物理量は次式で関係付けられる。

$$a = (2\pi f)^2 d / g. \quad \dots \dots \dots (23)$$

ただし、 a は振動加速度(G)、 f は振動数(Hz)、 d は片振幅(cm)、 g は重力加速度(=980G)である。式(19)により計算した加振機の性能曲線を図11の波線に示す。本加振機の許容使用範囲は振動数15Hz以上60Hz以下、振動加速度10G以下、片振幅1.25mm以下である。これらの許容使用範囲を図11中に実線で示してある。本実験装置に適用した加振機は、図9に示すように、15~45Hzで最大片振幅が1.25mmが得られ、45~60Hzにて最大加速度10Gが得られるように製作されている。また、被加振物重量と振動条件の関係は、加振機の加振力600kg、加振テーブルの重さ49kgより、次式で与えられる。

$$d = 600g. / (2\pi f)^2 / (w + 49) \quad \dots \dots \dots (24)$$

式(24)により計算した、振動数45Hzにおける被加振物重量と振動条件の関係を図12に示す。また、最大加振性能が得られる振動数45Hzにおけるステンレス鋼性パネル試験体の加振性能を図12より読み取った結果を表4に示す。

4. 試運転結果及び考察

4. 1 気密試験

充填層圧損の測定を行うための圧損測定用パネル試験体については、圧損測定結果に対する漏洩の影響が無視できる気密度(漏洩量 1×10^{-2} Acc/sec以下)が要求される。本パネルの気密試験(加圧放置法)の試験結果を表5に示す。試験方法としては、ステンレス鋼製パネル試験体にガスを充填し、圧力変化を経時的に記録し、圧力変化速度より気密度を測定した。漏洩量 1×10^{-2} Acc/secは、圧力降下速度としては -1 mmAq/minに相当するが、試験結果は -0.24 mmAq/minと基準漏洩量以下であった。

4. 2 圧損測定試験

圧損測定用パネル試験体に、 1 mm ϕ 及び 3 mm ϕ アルミナペブルを充填して

アルゴンガスを流通し、充填層における圧損とバージガス流速との関係を測定した。パネル試験体の寸法は、厚さ10mm×幅300mm×高さ1800mmであり、3.1章において述べたErgunの式による計算値と実測値の比較を行った。得られた結果を図13及び図14に示す。図中実線は充填率60%、65%及び70%に対する計算値であり、記号○は、実測値を示す。充填率の実測値は、3mmφペブルの場合65.5%、1mmφの場合68.6%であったので、各実測データとも充填率誤差±5%程度の範囲内で計算値と一致していることがわかる。

4.3 加振性能試験

加振機の加振性能は、3.3章に述べたように振動数、振幅及び振動加速度により評価される。本試験では、加振機の振幅及び振動数を種々に設定して運転し、デジタルバイブレーションメータにより振幅及び振動加速度を測定した。測定結果を図11に示す。図11中の記号△、□、○、▽、◇及びはそれぞれ振動数60Hz、50Hz、40Hz、30Hz、20Hz及び15Hzについての実測値である。図より予想性能と実測値は、ほぼ一致していることがわかる。

4.4 振動充填試験

1) ステンレス鋼製パネル試験体に1mmφ及び3mmφアルミナペブルを充填して加振し充填層高さ変化、及びそれにともなう底面荷重及び側板における歪量の変化を測定した。パネル試験体の寸法とアルミナペブルの直径の組合せとしては、以下に示す組合せを試験した。

ケース1: ステンレス鋼製パネル試験体II(厚さ30mm)+3mmφ

ケース2: ステンレス鋼製パネル試験体I(厚さ10mm)+3mmφ

ケース3: ステンレス鋼製パネル試験体I(厚さ10mm)+1mmφ

図15に各ケースでの充填層高さの経時変化を示す。ケース1では、振動数20Hz、振幅1.06mmで加振を開始し2分10秒後に振動数を24Hzに変化させた。ケース2では、振動数20Hz、振幅1.03mmで加振を開始し7分33秒後に振動数を22Hzに変化させた。ケース1及びケース2から、ある固有な振動条件で充填層高さが急激に減少し、充填率が高

くなっていることがわかる。ケース3では、ケース2において高充填率が得られた振動数22Hzにて振幅を2.02mmに増加し加振をおこなった。この場合加振開始直後から、充填率の急激な改善がみられる。これらの結果から、高い充填率を振動によって得るためには、適切な振動条件の設定が重要となることがわかる。振動充填前後のパネル形状の変化については、表6に充填前のパネル試験体の歪の初期値と、充填試験後の歪の測定値の比較を示す。表6よりペブル充填前後の歪は、 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ であることがわかる。この歪測定値より、パネル側板におけるたわみは実験データ取得時支障が無いと思われる。ただし、歪測定位置はパネル中央部であり、他の部分での歪の確認も必要であろう。

2) アクリル製パネル試験体に3mmφ及び0.3mmφアルミナペブルを充填しバイナリーベッドを形成した。使用したパネル試験体の寸法は、厚さ30mm×幅300mm×高さ1000mmであり、以下の手順にしたがって行った。

1. 3mmφアルミナペブル(1次球)を充填して加振し充填層高さを80cmとした。
2. 上部に押え板を装着し1次球充填層を固定した。
3. 0.3mmφアルミナペブル(2次球)を押え板の上に注ぎ込んだ。
4. 振動を加え、2次球を1次球充填層内に充填した。

以上の過程において1次球及び2次球の充填量を測定した。その結果、1次球のみの充填率は、64.7%が得られ、2次球充填率との合計で71.2%が得られた。なお、これらの充填率データは、2次球が十分に充填されない状態のものであり、十分な充填状態では、81.1%の充填率が見込まれるものと思われる。

3) アクリル製パネル試験体に0.5mmφ及び0.3mmφのアルミナペブルを、50重量%ずつ混合容器内で攪拌し均一に充填した後、振動を加え、分球現象の進行状況を観察した。また充填層高さ方向の粒径分布を測定した。粒径分布の測定としては、適当な高さ分の充填球を掃除機で吸い取った後、メッシュサイズ0.425mmのふるいでふるい分けして各々の粒径の球の

重量測定を行った。

充填層高さ方向の粒径分布測定結果を図16及び図17に示す。図16は、充填層高さ265mmに充填した場合の、充填初期粒径分布を測定した結果である。充填層高さ5mmまでの部分（充填層底部）では、0.5mmφペブルの割合が90%を越えているが、それ以外の部分では約50重量%で均一に充填されていることがわかる。図17は同様にして充填した混合充填層を振動条件として、振動数35Hz、振幅2.08mm、加速度4.93Gで約50分間加振を行った後の測定結果である。加振中は充填層高さ約16cmより上部（充填層上部約10cm）で活発な流動が起こり下部は非常に緩やかな移動が起こっていた。粒度分布測定結果で底部で0.5mmφペブルが多いのは、初期充填時の偏奇によるものであり、移動はほとんど起こっていないものと考えられる。充填層高さ約21cm～16cm（上部から約5cm～10cm）の部分で0.5mmφペブルが多くなっており、充填層高さ約6cm～16cm（上部から約17cm～12cm）の範囲で0.3mmφペブルが多くなっている。これは、振動に起因する分級現象によるものと思われる。粒度分布の初期均一混合割合（50%）からの偏りは、±8%以下であった。また充填率の高さ方向分布は観察されず、充填層全体にわたってほぼ均一な充填率が得られていた。

5. まとめ

- 1) ベブル充填パネルの加振充填特性及び振動に対する安定性についての実験装置の製作を行った。
- 2) ベブル充填時に充填率を高めるためには、適切な加振条件の選定が重要であることが確認された。
- 3) ベブル充填層を振動した時の底面負荷荷重は静水圧近似値に比べ1%以下の小さな値となることが観察され、Janssenの式による推算が正しいことが確認された。
- 4) ベブル充填パネルにスイープガスを流通したとき発生する圧損実測値は、充填率誤差±5%程度の範囲内で、Ergunの式による計算値と一致していることが観察された。

以上、層状構造ブランケット設計において問題となっている増殖材パネルの高充填率充填方法、及び加振動に対する充填層安定性に関する工学的データを、ほぼ実機サイズの模擬パネルにより測定することが可能となった。

引用文献

- 1) ITER Conceptual Design Report, ITER Documentation Series #18, IAEA, Vienna,(1991).
- 2) Kuroda, et al., Japanese Contributions to Blanket Design for ITER, JAERI-M 91-133(1991).
- 3) Yagi, S. and D. Kunii, AIChEJ., 3, 373(1957).
- 4) 化学工学便覧、241頁(1988)。
- 5) 化学工学便覧、867頁(1988)。
- 6) 三輪茂雄、粉粒体工学、朝倉書店(1972)。
- 7) 機械工学便覧、(1977)。
- 8) J I S B 8250(1983)。

5. まとめ

- 1) ペブル充填パネルの加振充填特性及び振動に対する安定性についての実験装置の製作を行った。
- 2) ペブル充填時に充填率を高めるためには、適切な加振条件の選定が重要であることが確認された。
- 3) ペブル充填層を振動した時の底面負荷荷重は静水圧近似値に比べ1%以下の小さな値となることが観察され、Janssenの式による推算が正しいことが確認された。
- 4) ペブル充填パネルにスリーブガスを流通したとき発生する圧損実測値は、充填率誤差±5%程度の範囲内で、Ergunの式による計算値と一致していることが観察された。

以上、層状構造ブランケット設計において問題となっている増殖材パネルの高充填率充填方法、及び加振動に対する充填層安定性に関する工学的データを、ほぼ実機サイズの模擬パネルにより測定することが可能となった。

引用文献

- 1) ITER Conceptual Design Report, ITER Documentation Series #18, IAEA, Vienna, (1991).
- 2) Kuroda, et al., Japanese Contributions to Blanket Design for ITER, JAERI-M 91-133(1991).
- 3) Yagi, S. and D. Kunii, AIChEJ., 3, 373(1957).
- 4) 化学工学便覧、241頁(1988)。
- 5) 化学工学便覧、867頁(1988)。
- 6) 三輪茂雄、粉粒体工学、朝倉書店(1972)。
- 7) 機械工学便覧、(1977)。
- 8) J I S B 8250(1983)。

表1 パネル試験体幾何形状

#	断面形状	同寸法	断面積	濡れ辺長	充填層高さ	A / L
			A (m ²)	L (m)	l (m)	(m)
1	直方体	10mm×300mm	3.0×10 ⁻³	0.62	1.8	4.84×10 ⁻³
2	直方体	30mm×300mm	9.0×10 ⁻³	0.66	1.8	1.36×10 ⁻²
3	直方体	10mm×300mm	3.0×10 ⁻³	0.62	3.9	4.84×10 ⁻³
4	直方体	35mm×300mm	1.1×10 ⁻²	0.67	4.5	1.64×10 ⁻²

*アウトボードブランケット第1層

**アウトボードブランケット第3層

表2 パネル試験体底面における垂直及び水平方向圧力計算値

#	P _{vmax} (kg/m ²)	P _{hmax} (kg/m ²)	P _{v1} (kg/m ²)	P _{h1} (kg/m ²)	静水圧近似値 (kg/m ²)
1	1.9×10 ²	2.8×10 ¹	1.9×10 ²	2.8×10 ¹	4.1×10 ³
2	5.4×10 ²	7.8×10 ¹	5.4×10 ²	7.8×10 ¹	4.1×10 ³
3	9.3×10 ¹	1.3×10 ¹	9.3×10 ¹	1.3×10 ¹	4.3×10 ³
4	3.0×10 ²	4.4×10 ¹	3.0×10 ²	4.4×10 ¹	5.0×10 ³

表3 パネル試験体における横リブによるたわみ、応力緩和効果

	a / b	α	たわみ	β	応力
上部及び下部	1.5	0.070	50%	0.63	84%
中央部	1.5	0.085	61%	0.50	67%

表4 ステンレス鋼製パネル試験体搭載時加振性能

	I	I (圧損測定用)	II
ペブル充填無し (30.9 kg)	1. 8 mm 7. 7 G	1. 6 mm 6. 9 G	1. 8 mm 7. 7 G
50%充填 (36.7 kg)	1. 6 mm 7. 0 G	1. 5 mm 6. 4 G	1. 4 mm 6. 1 G
100%充填 (42.5 kg)	1. 5 mm 6. 5 G	1. 4 mm 6. 0 G	1. 2 mm 5. 3 G

表5 圧損測定用ステンレス鋼製パネル試験体気密試験結果

経過時間 (分)	指示圧力 (mm A q)	圧力変化率	室温 (°C)
0	253. 2	---	17. 0
5	250. 0	---	---
44	237. 2	---	---
61	238. 4	0. 24	15. 5

表 6 ステンレス鋼製パネル試験体 (I), (II) 側板歪み測定結果
(表中の数字の単位は 10^{-6} [-] (歪))

歪ゲージ#	ケース1		ケース2		ケース3	
	充填前	充填加振後	充填前	充填加振後	充填前	充填加振後
1 X	-253	-268	-511	-480	-511	-526
Y	-1662	-1677	-1299	-1329	-1299	-1329
2 X	-753	-768	-1208	-1192	-1223	-1208
Y	-526	-692	-1541	-1556	-1571	-1586
3 X	-1102	-935	-1056	-1056	-1056	-1071
Y	-1374	-1162	-1268	-1268	-1223	-1268
4 X	-344	-314	-1223	-1192	-1223	-1208
Y	-662	-829	-1314	-1329	-1314	-1314

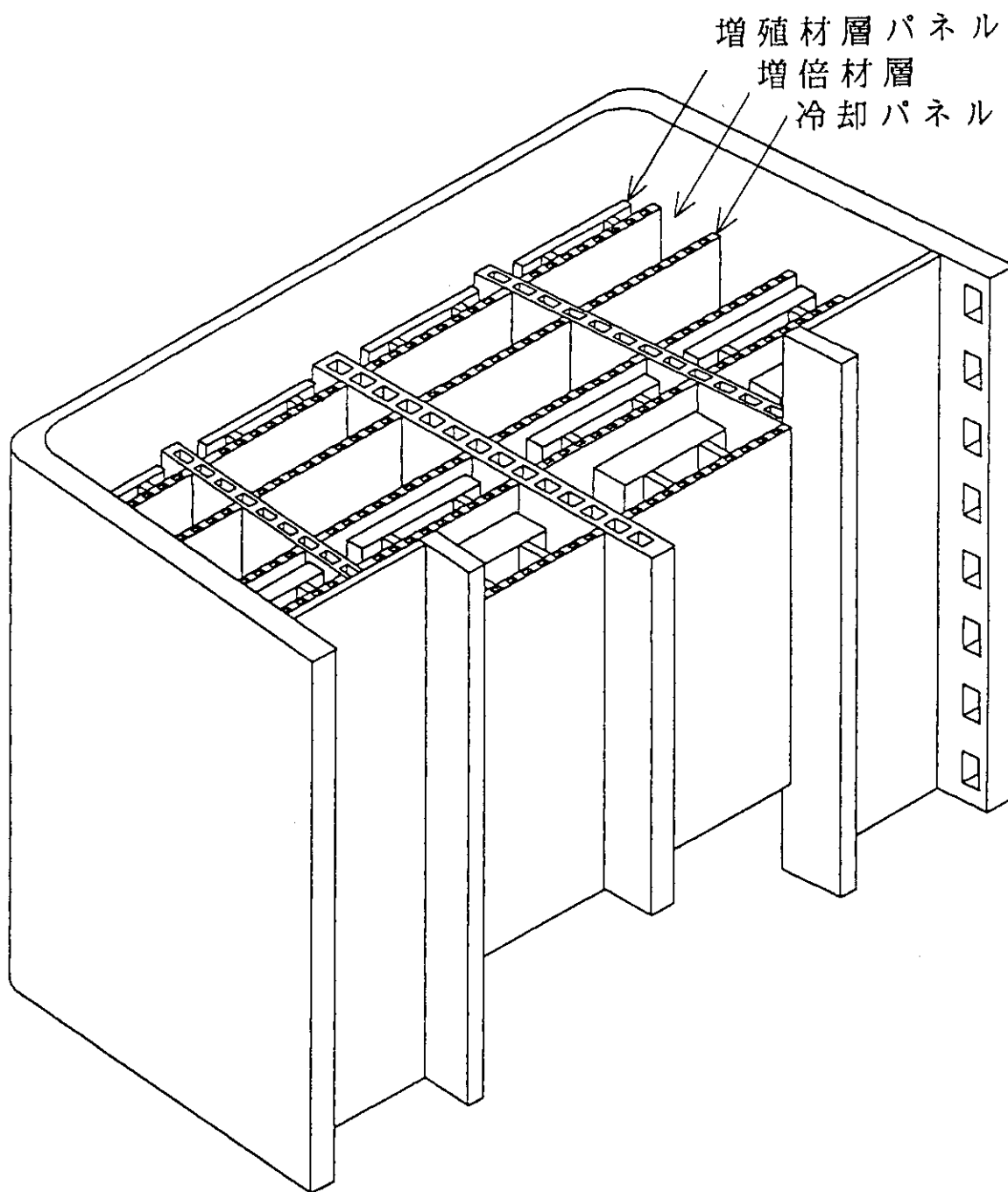


図1 ITER/日本ブランケット構造図
(アウトボードブランケット)

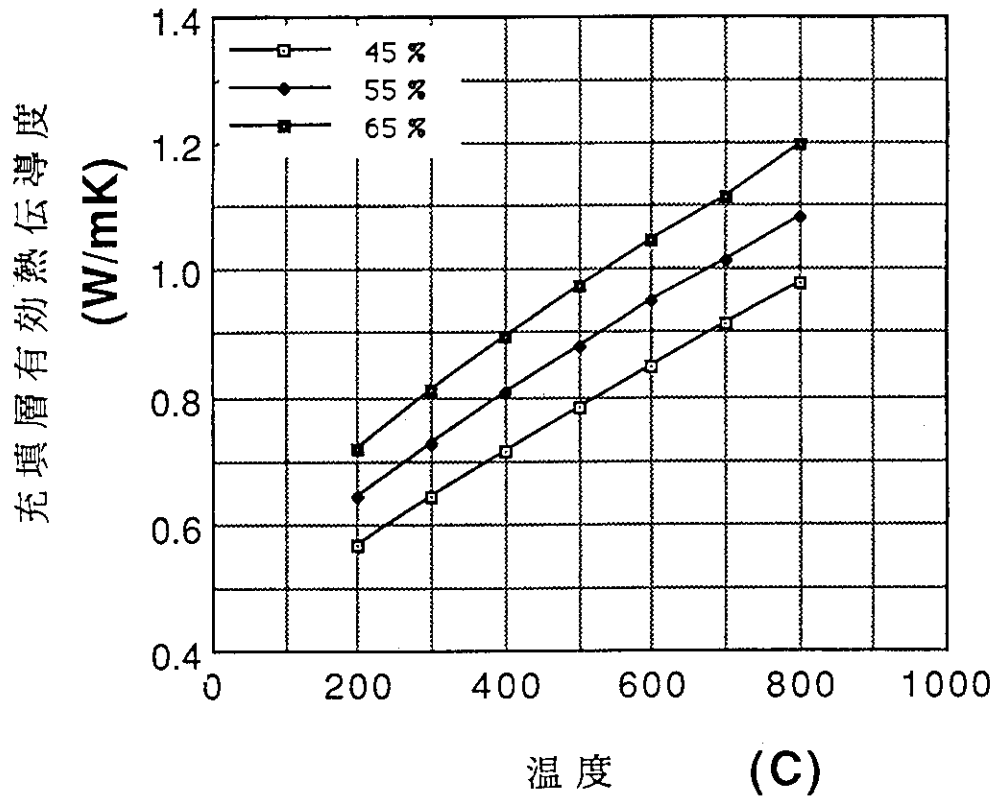


図2 増殖材充填層有効熱伝導度の増殖材 (Li₂O) ベブル充填率依存性推算値

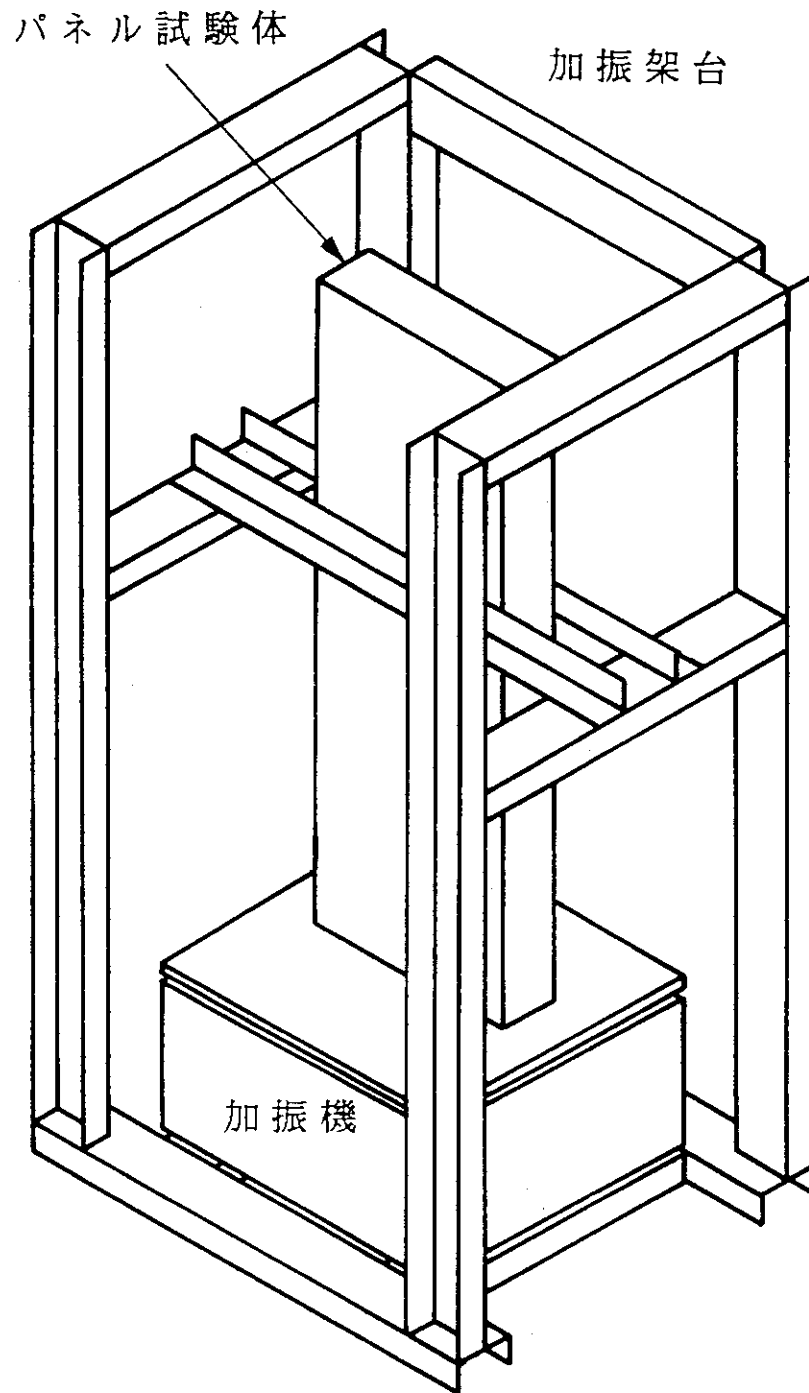


図3 ペブル充填層振動特性実験装置概略図

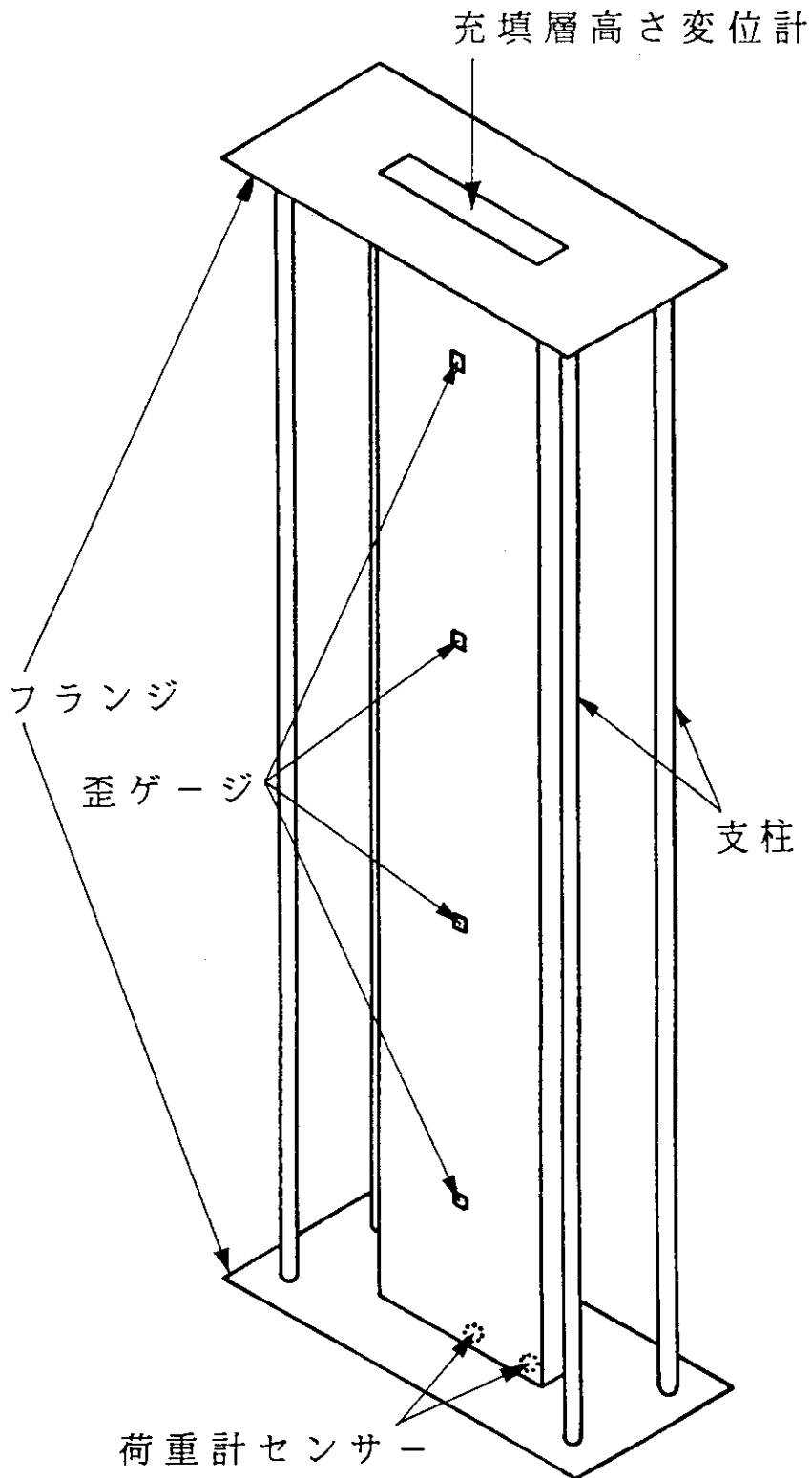


図4 パネル試験体概略図

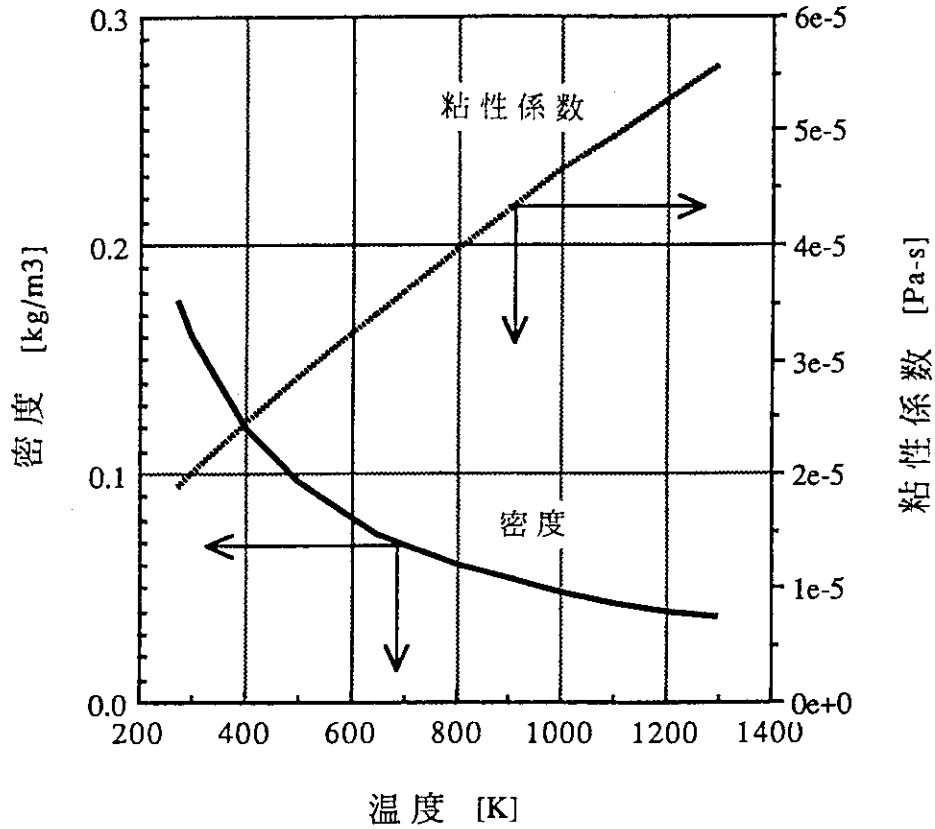


図5 ヘリウムガスの密度及び粘性係数

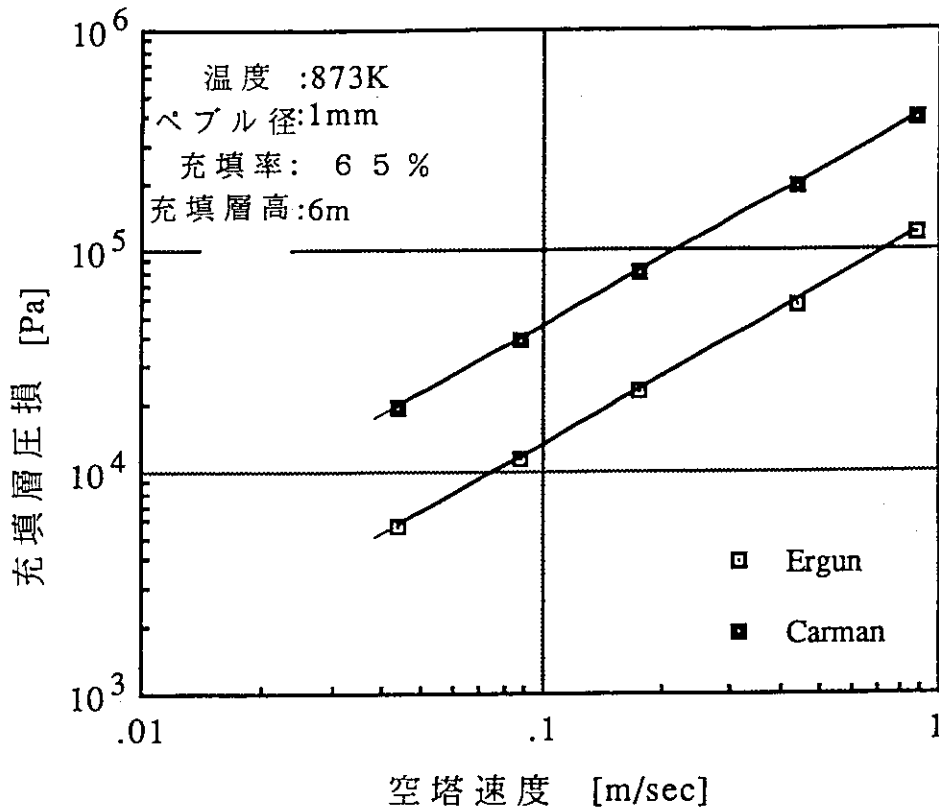


図6 充填層圧損のページガス流速依存性推算値

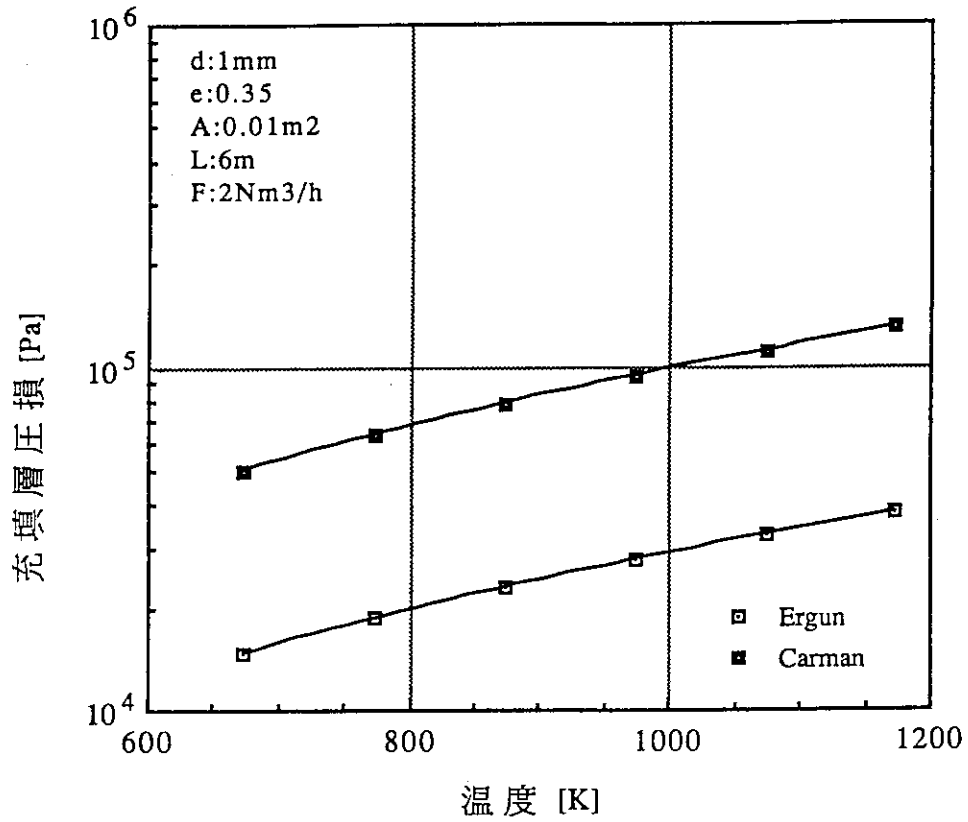


図7 1 mm ϕ 球充填層圧損の温度依存性推算値

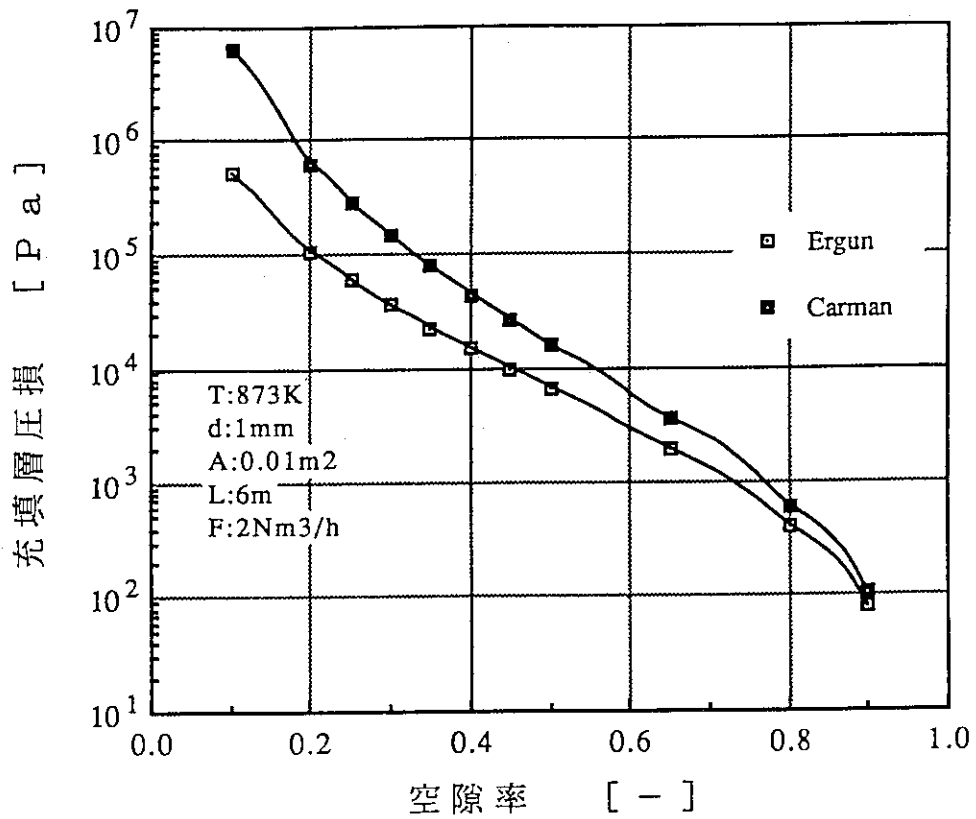


図8 1 mm ϕ 球充填層圧損の充填層空隙率依存性推算値

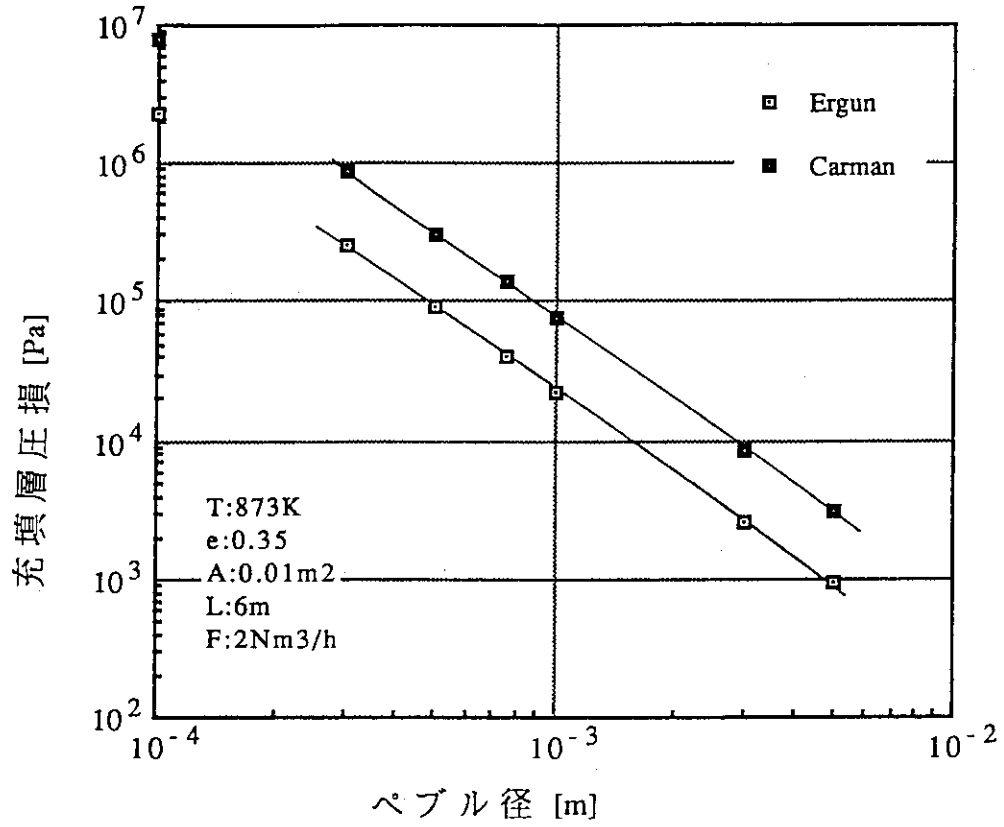


図9 充填層圧損のペブル径依存性推算値

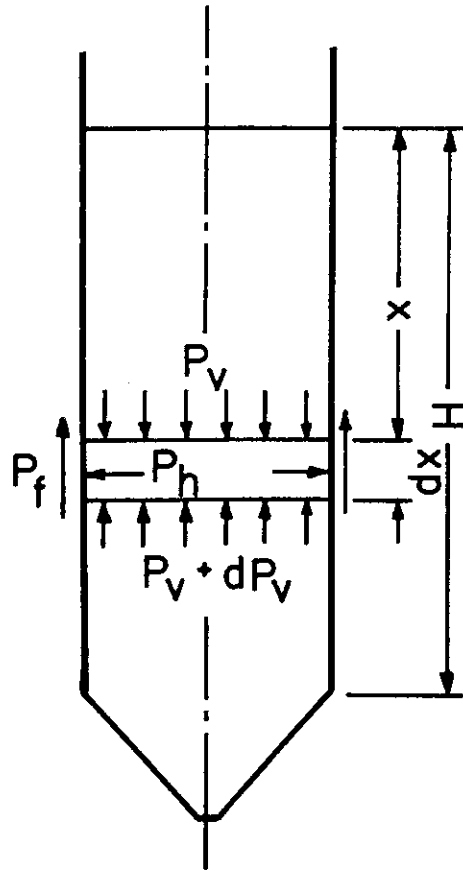


図10 粉粒体を均一に充填した場合の粉粒体圧力

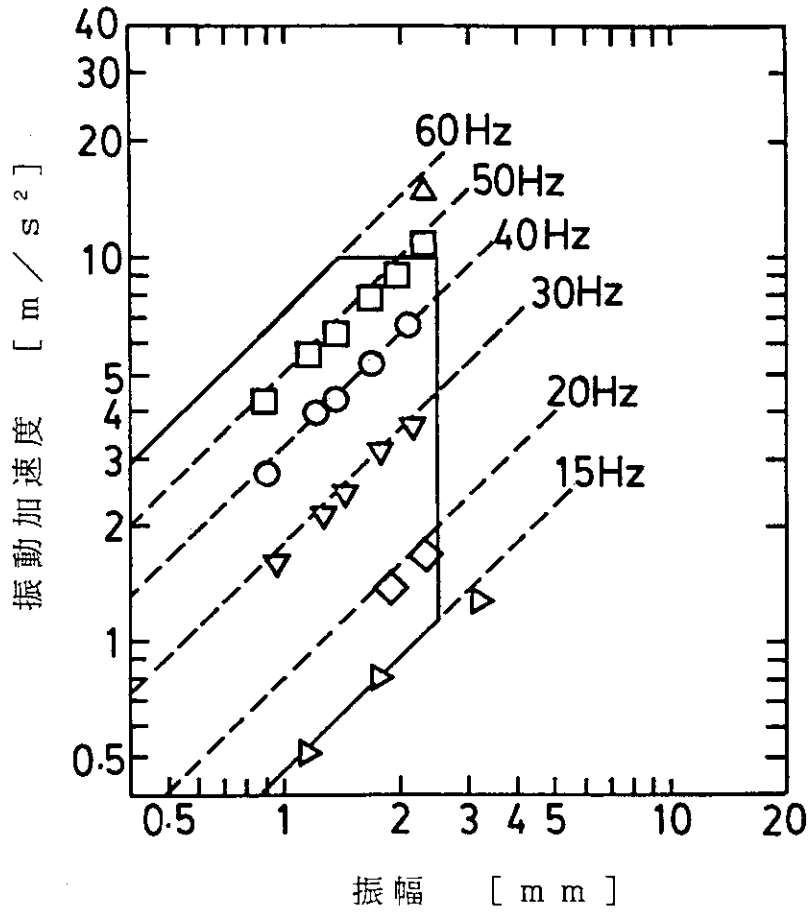


図11 加振機性能特性

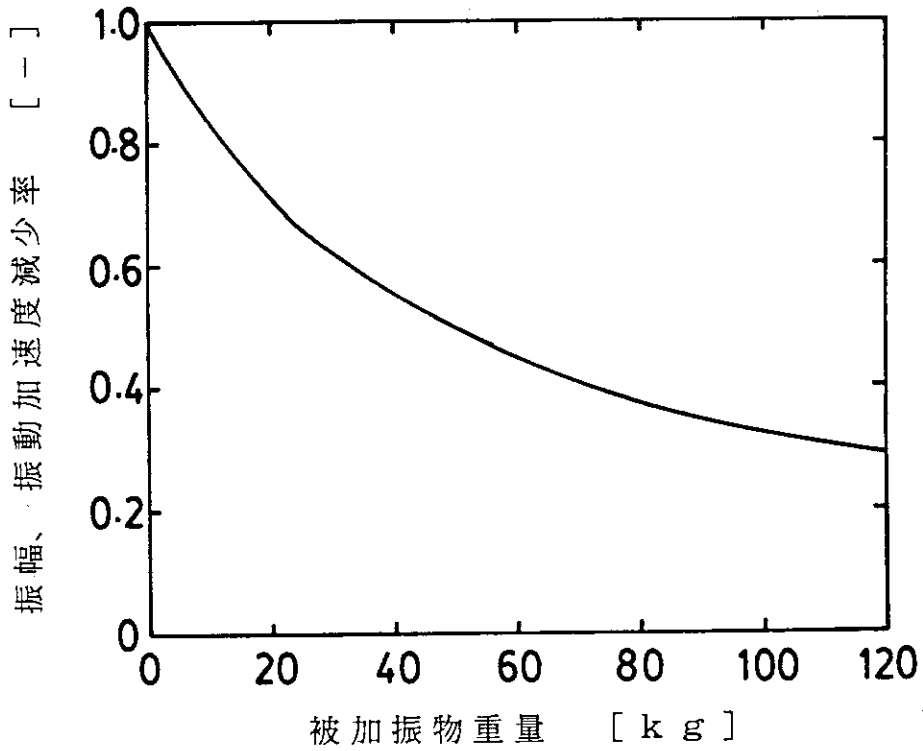


図12 加振機性能の被加振物重量依存性

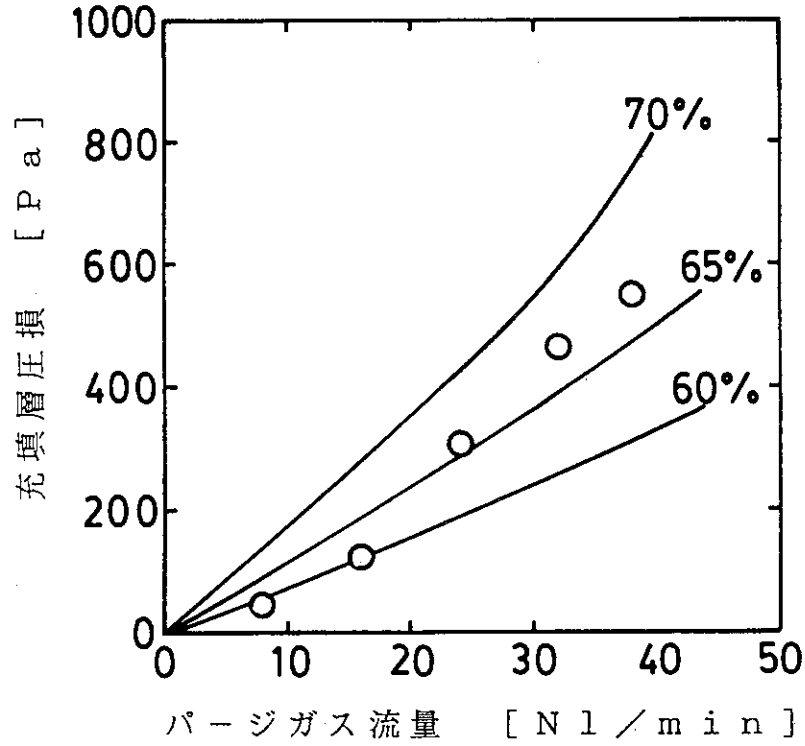


図13 充填層圧損測定値
(3 mm ϕ Al₂O₃, 充填率65.5%)

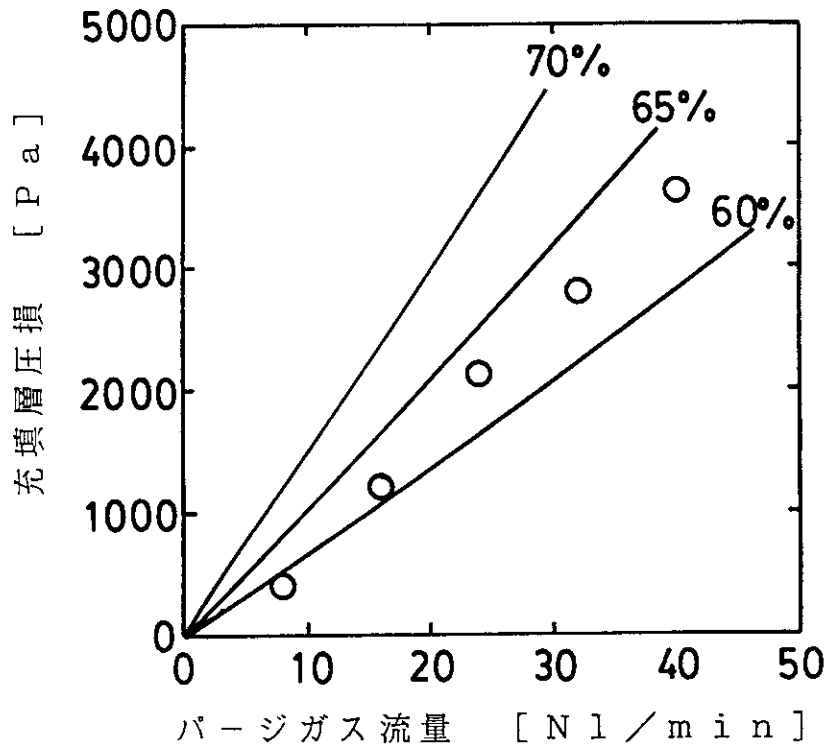


図14 充填層圧損測定値
(1 mm ϕ Al₂O₃, 充填率68.6%)

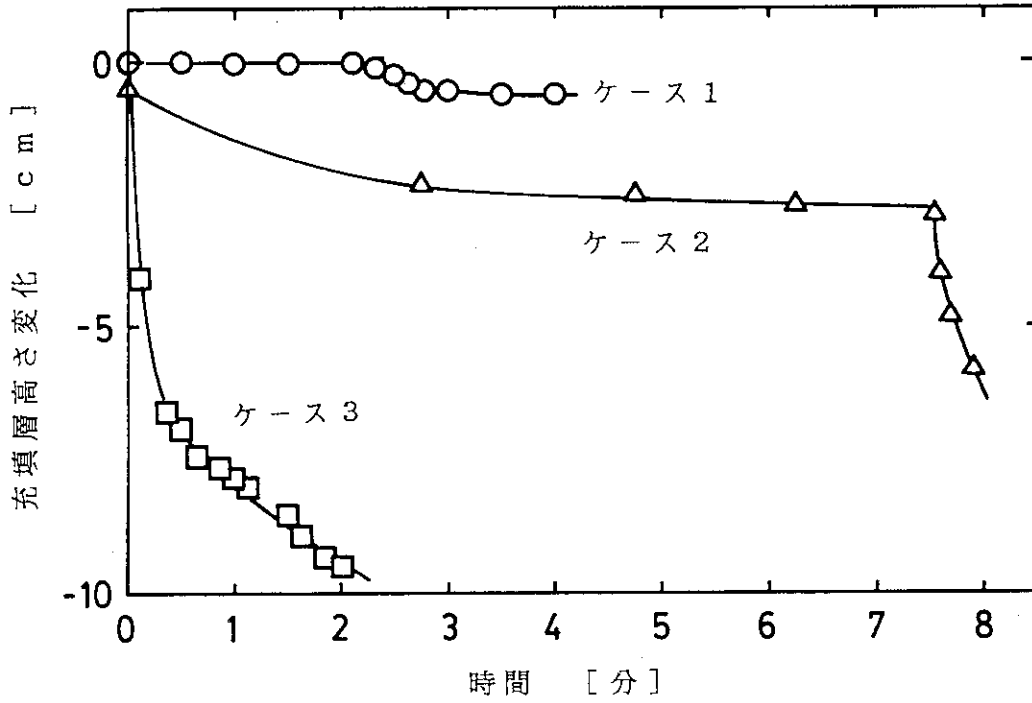


図15 パネル試験体加振時の充填層高さ経時変化

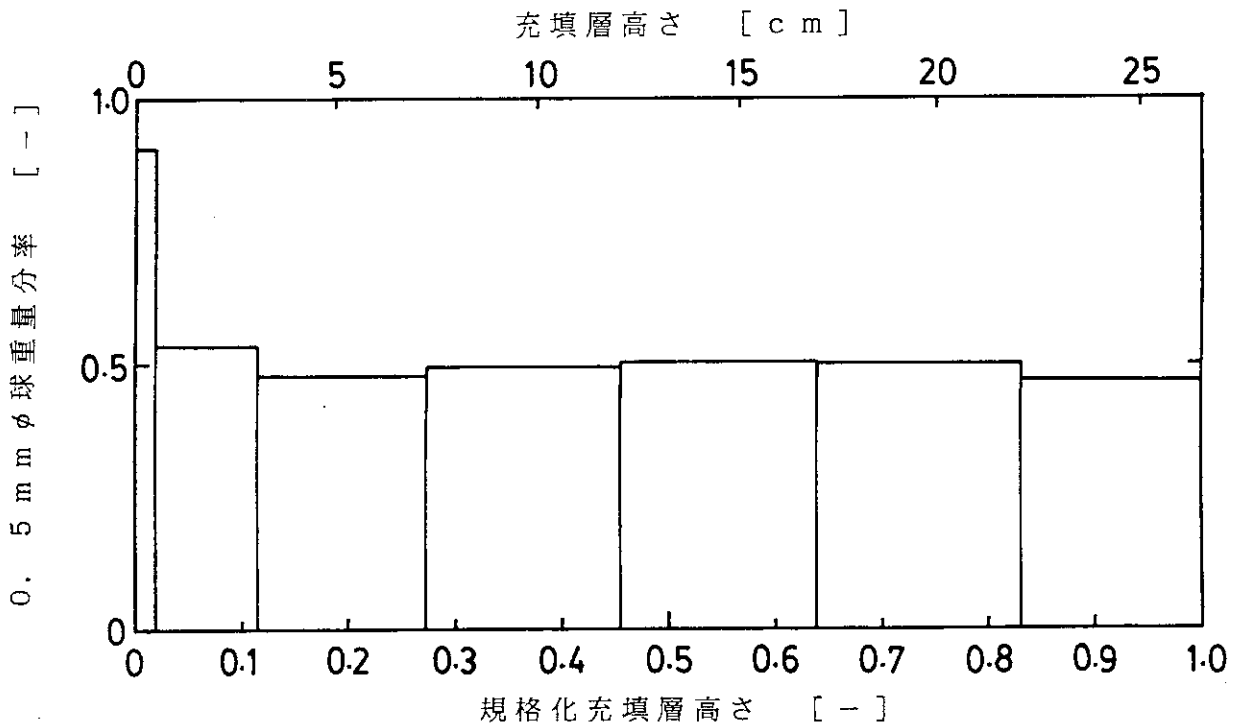


図16 0.3 mm ϕ / 0.5 mm ϕ 混合充填層充填直後の充填層高さ方向粒径分布
 (充填層高さ 265 mm, パネル寸法 10 mm 厚 \times 300 mm 幅
 充填量 0.3 mm ϕ 823 g, 0.5 mm ϕ 823 g)

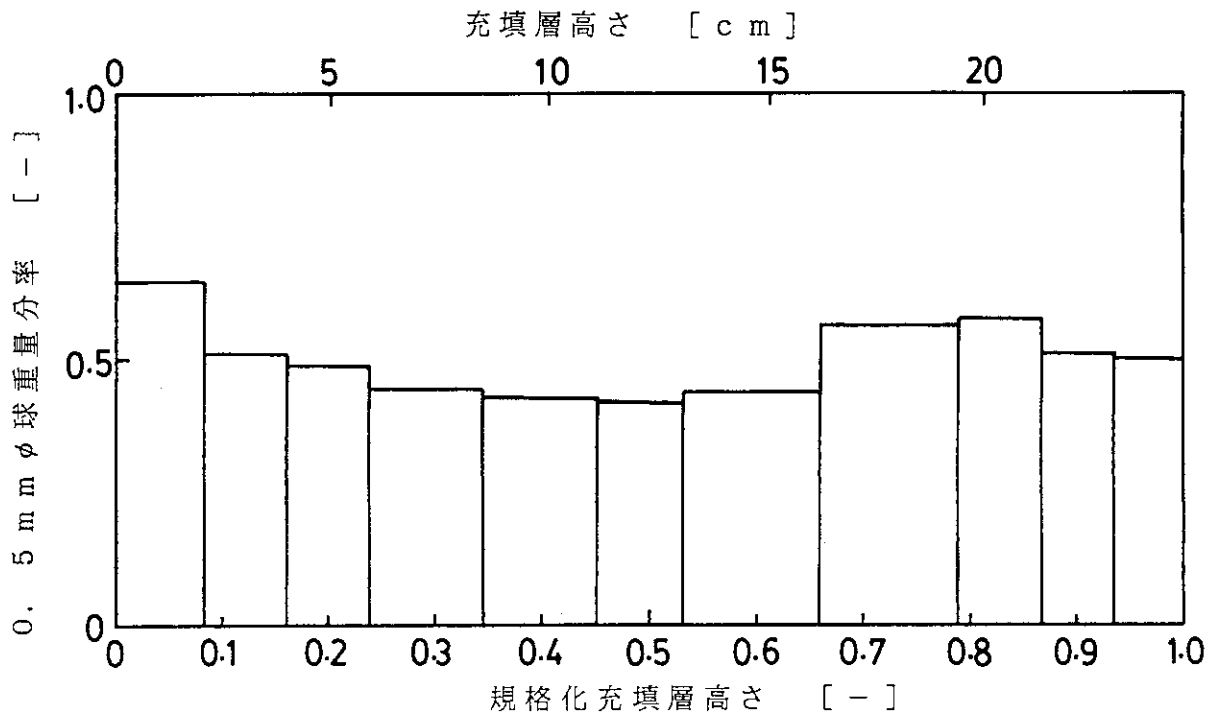


図17 0.3 mm φ / 0.5 mm φ 混合充填層を50分間加振後の充填層高さ方向粒径分布
 (充填層高さ 267 mm, パネル寸法 10 mm 厚 × 300 mm 幅
 充填量 0.3 mm φ 827 g, 0.5 mm φ 827 g,
 振動条件 35 Hz, 振幅 2.08 mm, 加速度 4.91 G)