

J A E R I - M  
93-044

核融合炉ブランケット照射試験体の  
スイープガス圧力損失評価

1993年3月

石塚 悅男・河村 弘・佐川 尚司  
長倉 正昭\*・神澤 徹\*\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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。

入手の問合せは、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、お申しこみください。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）で複写による実費領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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

## 核融合炉プランケット照射試験体のスイープガス圧力損失評価

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

石塚悦男・河村 弘・佐川尚司・長倉正昭\*・神澤 徹\*\*

(1993年2月3日受理)

国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計では、日本からペブル充填型のプランケットが提案されている。この概念設計を基にして、材料試験炉（JMTTR）では、プランケット構造を模擬した試験体の照射試験を計画している。現在は、この照射試験の準備段階であり、照射試験体を設計するために詳細な基礎データを取得している。この一環として、試験体中を流れるヘリウムスイープガスによる圧力損失の評価を行った。この結果、実験値はKozeny-Carmanの式の約+25%～-60%の範囲に収まり、本式による設計が可能であることが明らかとなった。また、ヘリウムスイープガスに100ppmまで水分を添加して圧力損失を測定したところ顕著な水分の影響は見られなかった。

---

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

\* 三菱原子力工業(株)

\*\* 三菱重工業(株)

Evaluation on Sweep Gas Pressure Drop in  
Fusion Blanket Mock-up for In-pile Test

Etsuo ISHITSUKA, Hiroshi KAWAMURA, Hisashi SAGAWA  
Masaaki NAGAKURA<sup>\*</sup> and Toru KANZAWA<sup>\*\*</sup>

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1993)

In the ITER/CDA (Conceptual Design Activity) of a tritium breeding blanket, Japan have proposed the pebble-typed blanket. The in-pile mock-up test will be preparing in JMTR (Japan Materials Testing Reactor) for Japanese engineering design with the pebble-typed blanket. Therefore, the He sweep gas pressure drop in the pebble bed was measured for the design of the mock-up used on in-pile test. From the results of this test, it was clear that the pressure drop was predicted on Kozeny- Carman's equation within +25 ~ -60%, and that the pressure drop was not affected by moisture concentration (<100 ppm).

Keywords: Tritium Breeding Blanket, Sweep Gas Pressure Drop,  
Beryllium, Lithium Ceramics

---

\* Mitsubishi Atomic Power Industries, INC.

\*\* Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 実 驗 .....	1
2.1 概 要 .....	1
2.2 試 料 .....	2
2.3 実験条件 .....	2
2.4 装 置 .....	3
3. 結果及び考察 .....	4
3.1 圧力損失 .....	4
3.2 圧力損失経時変化 .....	6
4. 結 論 .....	7
謝 辞 .....	7
参考文献 .....	8
付 錄 .....	22

## Contents

	Page
1. Introduction .....	1
2. Experiments .....	1
2.1 Summary .....	1
2.2 Specimen .....	2
2.3 Experimental Conditions .....	2
2.4 Equipment .....	3
3. Results and Discussion .....	4
3.1 Pressure Drop in the Pebble Bed .....	4
3.2 Time Dependence on Pressure Drop .....	6
4. Conclusion .....	7
Acknowledgements .....	7
References .....	8
Appendix .....	22

## 1. 序 論

国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計（CDA）において、ITER各極から様々なプランケットの概念が提案されている。日本の設計<sup>1)</sup>では、スウェリング、スイープガス特性、温度制御特性を考慮して、ペブル充填型のプランケットが選定されている。この概念設計を基にして、ITER活動は、次段階の工学設計（EDA）に移り、実機の構造を模擬した照射試験が日本の材料試験炉（JMT-R）等で計画されている<sup>2)</sup>。現在は、この照射試験の準備段階であり、照射試験体を設計するために、詳細な基礎データを取得している。

現在、検討されているペブル充填型のプランケットの概念図を Fig. 1 に示す。ペブル充填型のプランケットは、直径 1 mm の球状のトリチウム増殖材（リチウムセラミックス）及び中性子増倍材（ベリリウム）を用いる特殊な構造であるため、試験体の設計及び安全評価において重要なスイープガスによる圧力損失のデータはほとんどない。このため、模擬プランケット照射試験体のプランケット材充填層における圧力損失の測定を行うことにした。

本研究では、ITERの設計条件の範囲内で試験体温度、スイープガス流量及び圧力、水分濃度等をパラメータとして圧力損失のデータを取得し、充填層内の圧力損失評価式について考察した。

## 2. 実 験

### 2.1 概 要

本実験では、スイープガスによる圧力損失評価を以下の項目に着目して行った。

#### (1) 圧力損失に対する影響因子の評価

##### (A) 充填管の影響

- ・材質及び寸法をパラメータにして測定。

##### (B) スープガスの影響

- ・温度、流速、圧力、水分濃度をパラメータにして測定。

##### (C) 充填材の影響

- ・模擬試料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- ・トリチウム増殖材 ( $\text{Li}_2\text{O}$  及び  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ )
- ・中性子増倍材 (Be)

#### (2) 圧力損失経時変化の評価

- ・トリチウム増殖材 ( $\text{Li}_2\text{O}$  及び  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ )
- ・中性子増倍材 (Be)

圧力損失の測定における充填管の影響及びスイープガスの影響の測定時には、充填材以

## 1. 序 論

国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計（CDA）において、ITER各極から様々なプランケットの概念が提案されている。日本の設計<sup>1)</sup>では、スウェーリング、スイープガス特性、温度制御特性を考慮して、ペブル充填型のプランケットが選定されている。この概念設計を基にして、ITER活動は、次段階の工学設計（EDA）に移り、実機の構造を模擬した照射試験が日本の材料試験炉（JMT-R）等で計画されている<sup>2)</sup>。現在は、この照射試験の準備段階であり、照射試験体を設計するために、詳細な基礎データを取得している。

現在、検討されているペブル充填型のプランケットの概念図を Fig. 1 に示す。ペブル充填型のプランケットは、直径 1 mm の球状のトリチウム増殖材（リチウムセラミックス）及び中性子増倍材（ベリリウム）を用いる特殊な構造であるため、試験体の設計及び安全評価において重要となるスイープガスによる圧力損失のデータはほとんどない。このため、模擬プランケット照射試験体のプランケット材充填層における圧力損失の測定を行うことにした。

本研究では、ITERの設計条件の範囲内で試験体温度、スイープガス流量及び圧力、水分濃度等をパラメータとして圧力損失のデータを取得し、充填層内の圧力損失評価式について考察した。

## 2. 実 験

### 2.1 概 要

本実験では、スイープガスによる圧力損失評価を以下の項目に着目して行った。

#### (1) 圧力損失に対する影響因子の評価

##### (A) 充填管の影響

- ・材質及び寸法をパラメータにして測定。

##### (B) スープガスの影響

- ・温度、流速、圧力、水分濃度をパラメータにして測定。

##### (C) 充填材の影響

- ・模擬試料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- ・トリチウム増殖材 ( $\text{Li}_2\text{O}$  及び  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ )
- ・中性子増倍材 (Be)

#### (2) 圧力損失経時変化の評価

- ・トリチウム増殖材 ( $\text{Li}_2\text{O}$  及び  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ )
- ・中性子増倍材 (Be)

圧力損失の測定における充填管の影響及びスイープガスの影響の測定時には、充填材以

外の影響を調べるために、材料的に安定である $\text{Al}_2\text{O}_3$  を使用した。また、トリチウム増殖材 ( $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ ) や中性子増倍材 (Be) においては、充填材が水分やその他の影響によって生じる酸化や膨らみ<sup>3)</sup> によって圧力損失が変化することも考えられるので長時間にわたる経時変化を調べることにした。

## 2. 2 試 料

### (1) 充填試料

充填試料には、転動造粒法で製作した共立窯業原料(株) 製の $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、溶融造粒法及び転動造粒法で製作した三菱原子力工業(株) 製の $\text{Li}_2\text{O}$ 及び $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 、回転電極法で製作した日本ガイシ(株) 製の Be を使用した。各試料の平均直径及び粒径分布を Table 1 及び 2 に示す。また、試料の化学組成を Table 3 に示す。

### (2) 充 填

充填管の圧力損失を測定する場合には、充填量を一定にしなければ再現性のあるデータが得られない。このため、各充填材の充填特性を調べた。充填特性は、充填管の材料、寸法及び充填材をパラメータにして測定した。充填に際しては、バイブレータにて横振動を加えながら約 5 分間かけて充填材を充填し、その後更に 1 分間の振動を加えて充填高さが変化しない事を確認してから重量の測定を行った。バイブルータは大東電機工業(株) 製 MD-9100 を使用した。この方法で充填材を充填し、重量測定を行った結果を Table 4 に示す。同一直径球の充填率は理論的に 0.625<sup>4)</sup> になるが、Table 4 の結果もこの値に近いことから、ほとんど最大に充填されていると考えられる。また、充填管の材質、寸法の違いによる充填率の顕著な差違は認められなかった。しかし、 $\text{Li}_2\text{O}$  の充填率は他の充填材より小さい値となった。これは、粒の表面粗さが大きく、更に密度が小さいためと考えられる。

## 2. 3 実験条件

温度、スイープガス流速（ここでは粒間を流れる流速を示すのではなく、管を流れる平均の流速を示し、以後、「空塔速度」と称す）及び圧力、水分濃度等の実験条件は、ITER の設計条件<sup>5)</sup>に基づいて決めた。しかし、設計条件がある範囲で示されているものについては、設計及び安全評価上のデータを取得するために、圧力損失が大きくなる条件を標準実験条件に設定し、その近傍でパラメータを変えて実験を行った。以下には、標準実験条件の設定理由を示す。

### (1) 温 度

ITER におけるリチウムセラミックス及びベリリウムの使用温度は 450～600°C 及び 500°C 以下とされている。高温で使用する場合は、水分等による反応や、それに伴う質量移行等により圧力損失が大きくなると考えられるため、使用最高温度を標準実験条件とした。

## (2) 空塔速度

空塔速度は 0.3~10cm/sとされており、標準実験条件は、10cm/sとした。

## (3) スイープガス圧力

スイープガス圧力は 1 atm (760 Torr) 程度とされており、標準実験条件は 1 atm とした。

## (4) 水分濃度

水分濃度は 10ppm以下とされているが、それより高めになる可能性も考慮して、標準実験条件は、 30ppmとした。

## (5) 充填寸法

充填寸法は、J M T Rでの照射試験において炉心の均熱部に入る事を考慮し、充填長さ 5 cm、充填径20mmを標準実験条件とした。

## (6) 測定時間

リチウムセラミックス及びベリリウムの圧力損失の測定時間は300 時間とした。また、それ以外の測定は、圧力変化が落ち着く10分後に測定した。

以上の標準実験条件を考慮して、実験条件を Table 5 の様に定めた。また、実験結果で使用するスイープガス流速は、上記の理由から600 °C、1 atm (760 Torr) での流速で表示することにした。

## 2. 4 装置

実験装置を Fig. 2に示す。装置は、充填塔及び充填管、電気炉、ポンプ、バッファタンク、加湿器、除湿器等から成り、スイープガスにはヘリウムガス（純度約99.99%）を使用した。実験は、2. 2 節で示した方法で試料を充填した後に Table 5 の条件にセットし、充填部の圧力差を測定することによって行った。試料の充填によって生じる圧力損失を求めるには、試料を入れた時の圧力差から試料を入れない状態（充填管のみ）の圧力差を差し引く必要がある。このため、前もって充填管の圧力差を測定した。この結果を Fig. 3に示す。充填管の圧力差は、充填管と弁の圧力損失の和である。尚、弁は電気炉外部にあり、加熱していない。圧力差が温度に依存しないことから、圧力損失のほとんどが弁によるものと考えられる。また、充填管が太くなると、充填管壁面での摩擦が大きくなり圧力損失が大きくなっている。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 圧力損失

##### (1) 実験結果

充填材以外の影響を調べるために化学的に安定している模擬試料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) による圧力損失測定を行った。この結果をFig. 4 に示す（実験条件は Table 5 参照）。スイープガスの空塔速度、温度、圧力及び水分をパラメータにした実験では、アルミナ製充填管（ $\phi 20 \times 50^L$  mm）を使用し、600 °C、760Torr を標準実験条件として実験を行った。充填管の寸法をパラメータにした実験では、内部を電解研磨したステンレス鋼製充填管を用いて、25 °C、760Torr を標準実験条件として行った。

##### (A) スイープガスの空塔速度、温度、圧力の影響

充填材による圧力損失は空塔速度に比例して大きくなかった。この結果は、粉粒体工学の分野で使用される層流条件における透過流動の特性<sup>4, 6)</sup>と一致している。Fig. 4 中の実験番号 A-1, A-2, A-3 及び A-8 から得た圧力損失を温度の関数として整理し、この結果をFig. 5 に示す。圧力損失は温度が高くなると大きくなる。これは、主にヘリウムガスの粘性係数が温度上昇に伴って大きくなる<sup>7, 8)</sup>ためである。Fig. 4 中の実験番号 A-1, A-6 及び A-7 から得た圧力損失をスイープガス圧力の関数として整理し、この結果をFig. 6 に示す。圧力損失はスイープガス圧力が高くなると小さくなかった。

##### (B) 充填寸法の影響

Fig. 4 中の実験番号 A-9, A-10 及び A-11 から得た圧力損失を充填長さの関数として整理し、この結果をFig. 7 に示す。圧力損失は充填長さに比例して大きくなかった。Fig. 4 中の実験番号 A-10, A-12 及び A-13 から得た圧力損失を充填管の直径の関数として整理し、この結果をFig. 8 に示す。充填管直径が小さくなると圧力損失が小さくなかった。これは充填管の直径がある程度小さくなると充填率が小さくなり充填材表面積が小さくなるためである。また、Fig. 4 中の実験番号 A-8 及び A-9 から得た圧力損失結果から充填管材質による影響はほとんど認められなかった。

##### (C) 水分の影響

ヘリウムガス中の水分濃度の影響をFig. 9 に示す。水分濃度が100ppm以下であれば、圧力損失に与える影響はほとんどないことが明らかとなった。

これらの結果を系統立てて評価するために、以下に示す層流条件における透過流動の理論を用いてデータ処理を行った。

##### (2) 理論

充填層の圧力損失評価式は、層流のみに適応できる Kozeny-Carman の式、層流から乱流まで適応できる Ergun の式がある<sup>4, 6)</sup>。Kozeny-Carman の式と Ergun の式を記した Moody 線図を Fig. 10 に示す<sup>4)</sup>。層流領域では、Kozeny-Carman の式の方が Ergun の式より修正摩擦係数（圧力損失に比例している係数）が大きく、圧力損失を大きく評価している。本研究では、実験範囲が層流領域（本実験範囲のレイノルズ数は最大で0.5程度）であること、圧力損失を大きく評価していること、計算が容易であること等の理由から、Kozeny-

Carmanの式を用いてデータ整理を行うことにした。

Kozeny-Carmanの式は、D'Arcyの理論を基に粉体間の流れを考慮して求めた式である。

$$\delta P = f' u^2 \rho a / \varepsilon^3 \quad \dots \dots \dots \quad (a)$$

$f'$  はレイノルズ数に依存し、レイノルズ数が 2 より小さい場合には次式で評価される。

$$f' = 5 / Re \quad \dots \dots \dots \quad (b)$$

$$Re = u \rho / a \mu \quad \dots \dots \dots \quad (c)$$

ここで、

$\delta P$  : 単位長さの圧力損失 (Pa/m)

$$= \Delta P / L$$

$\Delta P$  : 圧力損失 (測定値) (Pa)

$L$  : 充填長さ (m)

$u$  : 空塔速度 (m/s)

$\rho$  : ヘリウム密度 (kg/m³)

$a$  : 充填材表面積 (m²/m³)

$\mu$  : ヘリウム粘性係数 (Pa · s)

$\varepsilon$  : 充填部空隙率 (-)

$Re$  : レイノルズ数 (-)

$f'$  : 修正摩擦係数 (-)

$$= \Delta P \varepsilon^3 / L u^2 \rho a$$

(a) ~ (c) 式より

$$\delta P = 5 u \mu a^2 / \varepsilon^3 \quad \dots \dots \dots \quad (d)$$

また、実験の空塔速度は 600°C、760Torr(0.101MPa) における値に換算した値を用いてい  
るためには、以下に示す式で換算する必要がある。

$$u = \frac{T}{873} \cdot \frac{1.01 \times 10^5}{P} u' \quad \dots \dots \dots \quad (e)$$

ここで、

$T$  : 電気炉の温度 (K)

$P$  : 実験系内圧力 (Pa)

$u'$  : 空塔速度 (測定値) (m/s)

ヘリウムの粘性係数は、付録のFig.A-1 に示す様に温度に対してほぼ直線であり大気圧近  
傍では圧力に依存しない<sup>7)</sup>ことから、300~1100Kの温度範囲で以下の式で近似できる。

$$\mu = 3.67 \times 10^{-7} T^{0.7} \quad \dots \dots \dots \quad (f)$$

(d) 式に(e)、(f)式を代入すると次式となる。

$$\Delta P = 2.12 \times 10^{-4} \frac{a^2}{\varepsilon^3} L \cdot \frac{T^{1.7}}{P} \cdot u' \quad \dots \dots \dots \quad (g)$$

### (3) 解析

上記の(g)式及びFig.4の結果をもとにレイノルズ数と修正摩擦係数を計算した。この時、計算に使用した充填材表面積及び充填部空隙率は、Table 4の値（付録A. 2節参照）を用い、ヘリウムの密度はTable 6、付録図 Fig. A-2, A-3の値を用いた。Fig. 11に(g)式及び実験値から求めたMoody線図（レイノルズ数と修正摩擦係数）を示す。大部分の測定値は Kozeny-Carmanの式よりも小さくなつたが、一部の実験値は大きい値を示し、特に Li<sub>2</sub>Oは大きく外れている。Li<sub>2</sub>Oが大きく外れている原因は、真球度及び表面粗さに起因する充填材表面積の影響と考えられるが、現在検討中である。Table 4に示した充填材表面積は、Li<sub>2</sub>Oペブルの直徑から算出した値であるが、実際のペブル表面は複雑な形状である。このため、ペブル直徑から算出した値より実際の表面積が大きい可能性がある。

Kozeny-Carmanの式から求めた計算値（予測値）を横軸に、また、測定値を縦軸にした図をFig. 12に示す。ほとんどの測定値は、計算値に対して+25~-60%の範囲に散らばっているが、Li<sub>2</sub>Oは大きく外れている。Li<sub>2</sub>Oが Kozeny-Carmanの式と一致しない原因が上述の表面積の影響であると仮定すると、Fig. 12の結果からLi<sub>2</sub>Oの充填材表面積はペブル直徑から求めた表面積の約10倍程度となる。

実際にプランケットのスープガス系統の設計及び安全評価を行う場合、ある程度の余裕を考慮するために圧力損失を大きめに評価する必要がある。Fig. 12の結果から、充填材表面積を正確に求めた後に Kozeny-Carmanの式を用いて圧力損失を計算した場合、この式に約1.3倍のファクターを見込めば適度な設計余裕を考慮できると考えられる。

## 3. 2 圧力損失経時変化

### (1) 実験結果

Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>、Li<sub>2</sub>O及びBe充填材の圧力損失経時変化をFig. 13に示す。これらの実験条件は、各々 Table 5のL-1、L-2及びB-1に示すとおりである。各充填材の圧力損失には、ヘリウムガス流量に起因するバラツキが見られるが、酸化や膨らみ、或いは充填材表面の剥離による目詰りから生じる様な大きな圧力損失の変化は認められなかった。

### (2) 充填材の表面観察

上記の測定終了後に、充填材の加熱前後の変化を調べた。Li<sub>2</sub>O、Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>及びBeの外観写真をFig. 14に示す。

$\text{Li}_2\text{O}$ 及び $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ は、加熱によって電気炉構成材から放出したと考えられるガス等によって若干黄色く変色したが、表面の膨らみや粉体化は観測されなかった。また、同試料に対して表面及び断面のSEM観察を行ったところ、加熱前後の顕著な変化は見られなかった。

Beについては、ヘリウムガス中の酸素系不純物や水分等によって生じる表面酸化によって、加熱後試料の金属光沢が低下した。また、同様に表面及び断面のSEM観察を行ったところ、加熱前後の顕著な変化は見られなかった。

以上の結果から、上記実験条件において、圧力損失に影響を及ぼす様な表面の酸化や膨らみ、或いは粉体化によって起こる目詰まり等の充填材表面変化は生じないことが明らかとなった。

#### 4. 結論

ペブル充填型プランケットの照射試験体の設計及び安全評価において必要とされている充填材領域のスイープガス圧力損失特性を調べた結果以下のことが明らかとなった。

- ① 充填層の圧力損失評価は、Kozeny-Carmanの式（層流領域）が使用できる。
- ② 圧力損失の測定値は、Kozeny-Carmanの式の+25～-60%の範囲に収まる。
- ③ Kozeny-Carmanの式を設計に用いる場合は、1. 3程度のファクターを考慮すれば良い。
- ④ ヘリウムガス中に100ppm以下の水分を添加しても圧力損失には影響しない。
- ⑤  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 及びBe充填材の圧力損失経時変化を測定したところ、充填材表面の変化等によって生じる大きな圧力損失の変化は観察されなかった。

#### 謝辞

本報告の作成に際し、材料試験炉部斎藤 実部長、同部照射第1課伊藤治彦課長代理、同部計画課佐藤 猛氏及び核融合工学部炉構造研究室倉沢利昌副主任研究員に有意義な御助言を頂いた。また、本実験の実施に際し、三菱原子力工業株式会社の今泉秀樹氏及び石井政夫氏に御助力を頂いた。以上記して謝意を表します。

$\text{Li}_2\text{O}$ 及び $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ は、加熱によって電気炉構成材から放出したと考えられるガス等によって若干黄色く変色したが、表面の膨らみや粉体化は観測されなかった。また、同試料に対して表面及び断面のSEM観察を行ったところ、加熱前後の顕著な変化は見られなかった。

Beについては、ヘリウムガス中の酸素系不純物や水分等によって生じる表面酸化によって、加熱後試料の金属光沢が低下した。また、同様に表面及び断面のSEM観察を行ったところ、加熱前後の顕著な変化は見られなかった。

以上の結果から、上記実験条件において、圧力損失に影響を及ぼす様な表面の酸化や膨らみ、或いは粉体化によって起こる目詰まり等の充填材表面変化は生じないことが明らかとなった。

#### 4. 結論

ペブル充填型プランケットの照射試験体の設計及び安全評価において必要とされている充填材領域のスイープガス圧力損失特性を調べた結果以下のことが明らかとなった。

- ① 充填層の圧力損失評価は、Kozeny-Carmanの式（層流領域）が使用できる。
- ② 圧力損失の測定値は、Kozeny-Carmanの式の+25~-60%の範囲に収まる。
- ③ Kozeny-Carmanの式を設計に用いる場合は、1.~3程度のファクターを考慮すれば良い。
- ④ ヘリウムガス中に100ppm以下の水分を添加しても圧力損失には影響しない。
- ⑤  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 及びBe充填材の圧力損失経時変化を測定したところ、充填材表面の変化等によって生じる大きな圧力損失の変化は観察されなかった。

#### 謝辞

本報告の作成に際し、材料試験炉部斎藤 実部長、同部照射第1課伊藤治彦課長代理、同部計画課佐藤 猛氏及び核融合工学部炉構造研究室倉沢利昌副主任研究員に有意義な御助言を頂いた。また、本実験の実施に際し、三菱原子力工業株式会社の今泉秀樹氏及び石井政夫氏に御助力を頂いた。以上記して謝意を表します。

$\text{Li}_2\text{O}$ 及び $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ は、加熱によって電気炉構成材から放出したと考えられるガス等によって若干黄色く変色したが、表面の膨らみや粉体化は観測されなかった。また、同試料に対して表面及び断面のSEM観察を行ったところ、加熱前後の顕著な変化は見られなかった。

Beについては、ヘリウムガス中の酸素系不純物や水分等によって生じる表面酸化によって、加熱後試料の金属光沢が低下した。また、同様に表面及び断面のSEM観察を行ったところ、加熱前後の顕著な変化は見られなかった。

以上の結果から、上記実験条件において、圧力損失に影響を及ぼす様な表面の酸化や膨らみ、或いは粉体化によって起こる目詰まり等の充填材表面変化は生じないことが明らかとなった。

#### 4. 結論

ペブル充填型プランケットの照射試験体の設計及び安全評価において必要とされている充填材領域のスイープガス圧力損失特性を調べた結果以下のことが明らかとなった。

- ① 充填層の圧力損失評価は、Kozeny-Carmanの式（層流領域）が使用できる。
- ② 圧力損失の測定値は、Kozeny-Carmanの式の+25~-60%の範囲に収まる。
- ③ Kozeny-Carmanの式を設計に用いる場合は、1.~3程度のファクターを考慮すれば良い。
- ④ ヘリウムガス中に100ppm以下の水分を添加しても圧力損失には影響しない。
- ⑤  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 及びBe充填材の圧力損失経時変化を測定したところ、充填材表面の変化等によって生じる大きな圧力損失の変化は観察されなかった。

#### 謝辞

本報告の作成に際し、材料試験炉部斎藤 実部長、同部照射第1課伊藤治彦課長代理、同部計画課佐藤 猛氏及び核融合工学部炉構造研究室倉沢利昌副主任研究員に有意義な御助言を頂いた。また、本実験の実施に際し、三菱原子力工業株式会社の今泉秀樹氏及び石井政夫氏に御助力を頂いた。以上記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) T. Kuroda, H. Yoshida, H. Takatsu, Y. Seki et al., JAERI-M 91-133 (1991).
- 2) H. Sagawa, H. Kawamura, S. Shimakawa et al., J. Nucl. Mater. 191-194(1992)1379.
- 3) 石塚悦男、河村 弘、須貝宏行、棚瀬正和、中田宏勝, JAERI-M 90-013 (1990).
- 4) 三輪茂雄：“粉粒体工学”、朝倉書店、東京 (1972).
- 5) IAEA: "ITER documentation series, No. 29", IAEA, Vienna (1991).
- 6) 井伊谷鋼一、三輪茂雄：“化学工学通論Ⅱ（改定版）”、朝倉書店、東京 (1969).
- 7) 日本機械学会編：“伝熱工学資料（第3版）”、日本機械学会、東京 (1975).
- 8) 日本機械学会編：“技術資料 流体熱物性値集”、日本機械学会、東京(1983).

Table 1 Average diameter and density of sample.

Sample	Average diameter (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	3.55 (89.0 %TD)
Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	0.97	3.69 (88.9 %TD)
Li <sub>2</sub> O	1.41	1.32 (65.7 %TD)
Be	0.85	1.85 (100 %TD)

Table 2 Distribution of sample diameter.

Mesh No. [n]	Diameter [A <sub>n</sub> ~ B <sub>n</sub> ] (mm)	Total weight fraction [C <sub>n</sub> ]			
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O	Be
1	0.5 ~ 0.71	0.0	0.002	0.0	0.003
2	0.71 ~ 0.85	0.117	0.080	0.0	0.523
3	0.85 ~ 1.00	0.379	0.567	0.005	0.400
4	1.00 ~ 1.18	0.426	0.336	0.011	0.072
5	1.18 ~ 1.40	0.078	0.015	0.521	0.002
6	1.40 ~ 1.70	0.0	0.0	0.463	0.0
Equivalent surface area S		3.24	3.01	6.27	2.36
$S = \frac{\pi}{4} \sum_{n=1}^6 [(A_n + B_n)^2 \times C_n] \quad (m^2)$		$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$
Equivalent volume V		5.62	5.02	1.50	3.50
$V = \frac{\pi}{48} \sum_{n=1}^6 [(A_n + B_n)^3 \times C_n] \quad (m^3)$		$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-10}$

S and V were calculated from pebble's diameter.

Table 3 Chemical composition of sample.

Material	Chemical Composition wt%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 93.0 SiO <sub>2</sub> : 5.3 TiO <sub>2</sub> : 0.1 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0.1 CaO : 0.3 MgO : 0.7 K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O : 0.4
Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	Li : 10.7 Zr : 57.4 Fe : 0.505 Al : 0.342 Ti : 1.52 Cu : 0.031 Sn : 0.360 Hf : 1.33 Mn : 0.007
Li <sub>2</sub> O	Li : 46.8 Fe : 0.01 Al : 0.04 Cu : 0.001 Sn : 0.001
Be	Be : 98.2 BeO : 1.51 Al : 0.078 C : 0.023 Fe : 0.11 Mn : 0.017 Si : 0.03

Table 4 Packing property.

Sample	Packed column	Packed weight (g)				Surface area *** a ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
	Size (mm)	First	Second	Third*	1- $\varepsilon$ **	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS- $\phi$ 21×50 <sup>L</sup>	39.59	39.12	39.32	0.64	3.69×10 <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS- $\phi$ 10×100 <sup>L</sup>	17.06	17.09	17.16	0.62	3.57×10 <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS- $\phi$ 39×100 <sup>L</sup>	273.17	273.38	272.99	0.63	3.63×10 <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ALU- $\phi$ 20×50 <sup>L</sup>	34.82	34.74	34.47	0.62	3.57×10 <sup>3</sup>
Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	ALU- $\phi$ 20×50 <sup>L</sup>	36.31	36.41	36.51	0.63	3.78×10 <sup>3</sup>
Li <sub>2</sub> O	ALU- $\phi$ 20×50 <sup>L</sup>	8.000	7.998	7.986	0.39	1.63×10 <sup>3</sup>
Be	ALU- $\phi$ 20×50 <sup>L</sup>	17.45	17.69	17.54	0.61	4.11×10 <sup>3</sup>

SUS : SUS316, inner wall was polished by electrolytic polishing.

ALU : Fused alumina.

\* : Third packed sample was used in this measurement.

\*\* : Packing rate ( $1 - \varepsilon$ ), the ratio of third\* packed density and material's density (see table 1).

\*\*\* : Surface area of unit volume is calculated as

$$a = S (1 - \varepsilon) / V.$$

Table 5 Measurement condition.

Run No.	Sample	Packed column		Temp. ( °C )	Flow rate (cm/s)	Pressure (Torr)	Moisture concen. (ppm)
		Materials	Size (mm)				
A- 1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	~40	760	0
A- 2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	400	~60	760	0
A- 3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	800	~40	760	0
A- 4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	10	760	30
A- 5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	10	760	100
A- 6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	~40	500	0
A- 7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	~60	1000	0
A- 8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	25	~60	760	0
A- 9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS	φ 21×50 <sup>l</sup>	25	~60	760	0
A-10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS	φ 21×100 <sup>l</sup>	25	~60	760	0
A-11	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS	φ 21×200 <sup>l</sup>	25	~60	760	0
A-12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS	φ 10×100 <sup>l</sup>	25	~60	760	0
A-13	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SUS	φ 39×100 <sup>l</sup>	25	10	760	0
L- 1	Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub>	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	10	760	30
L- 2	Li <sub>2</sub> O	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	600	10	760	30
B- 1	Be	Alumina	φ 20×50 <sup>l</sup>	500	10	760	30

SUS : SUS316, inner wall was polished by electrolytic polishing.

Alumina: Fused alumina.

Table 6 Helium gas density.

Pressure (Torr)	Temperature (°C)				
	25	400	500	600	800
500				0.0362	
760	0.1604	0.0719	0.0845	0.0551	0.0438
1000				0.0724	

Unit : kg/m<sup>3</sup>

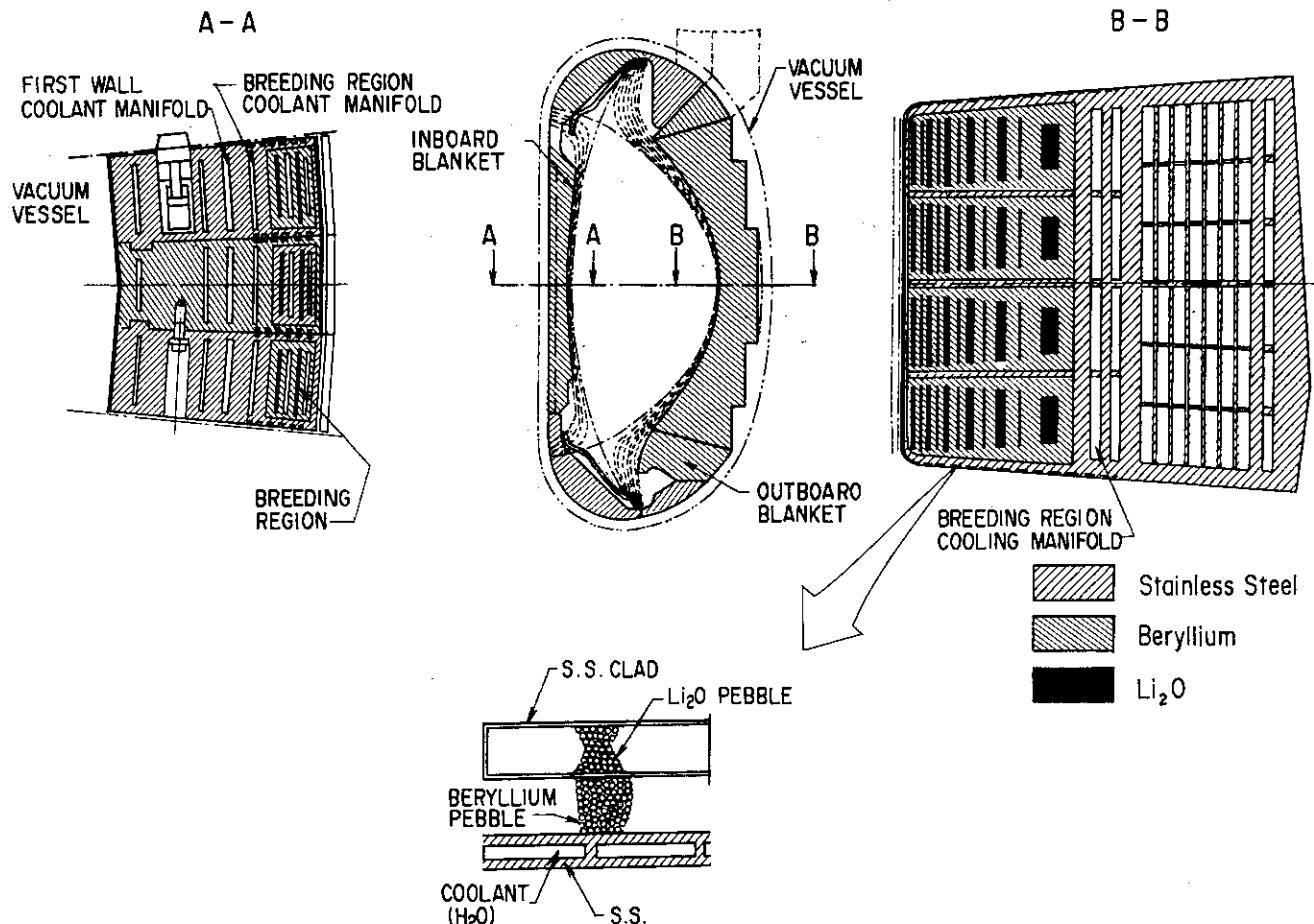


Fig. 1 Conceptual design of the pebble-typed blanket.

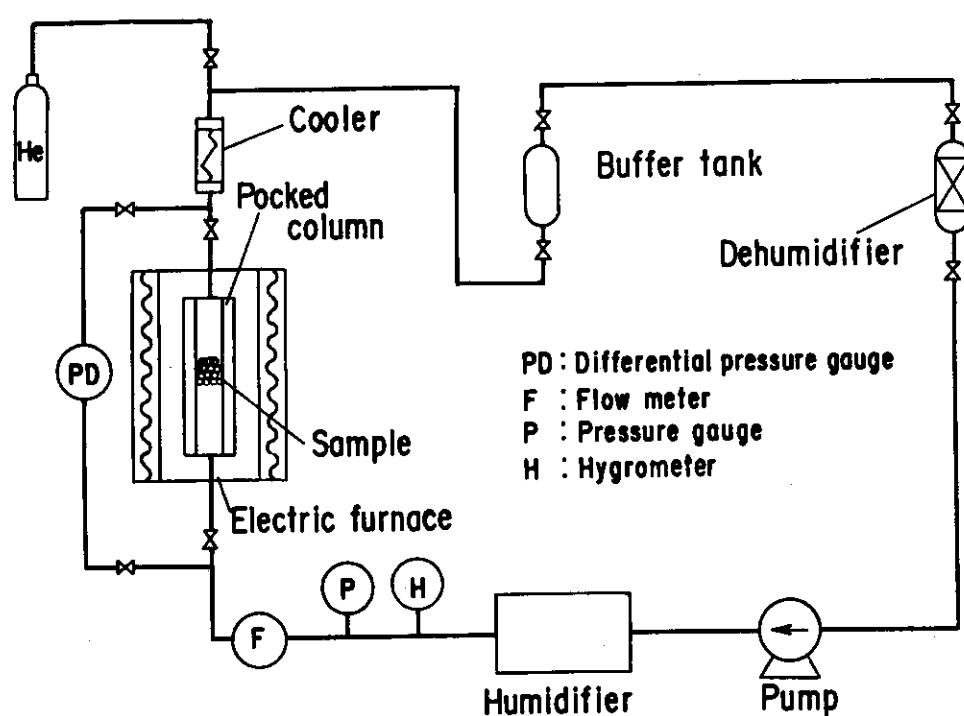


Fig. 2 Equipment for pressure drop measurement.

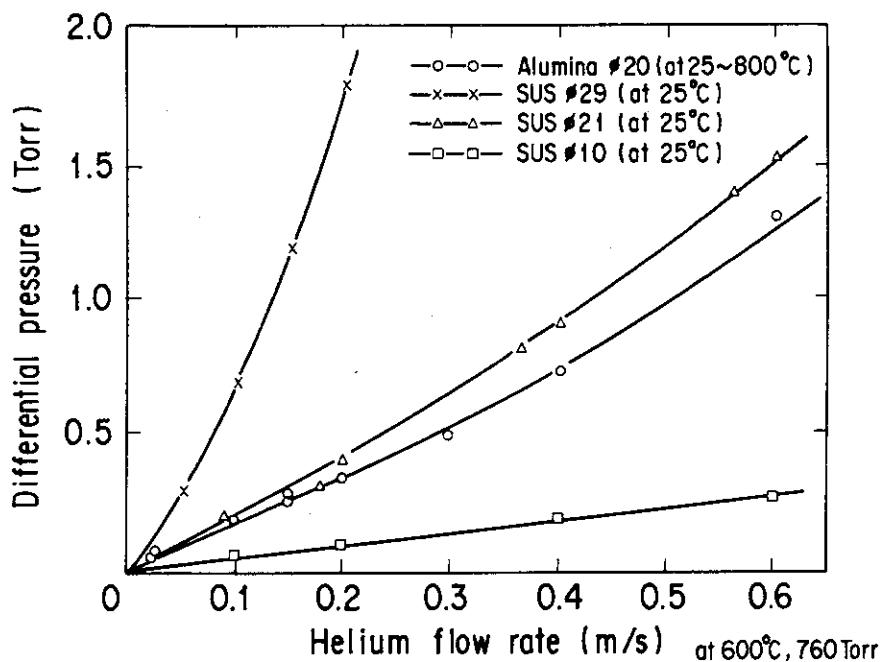


Fig. 3 Pressure drop in packing column without sample.

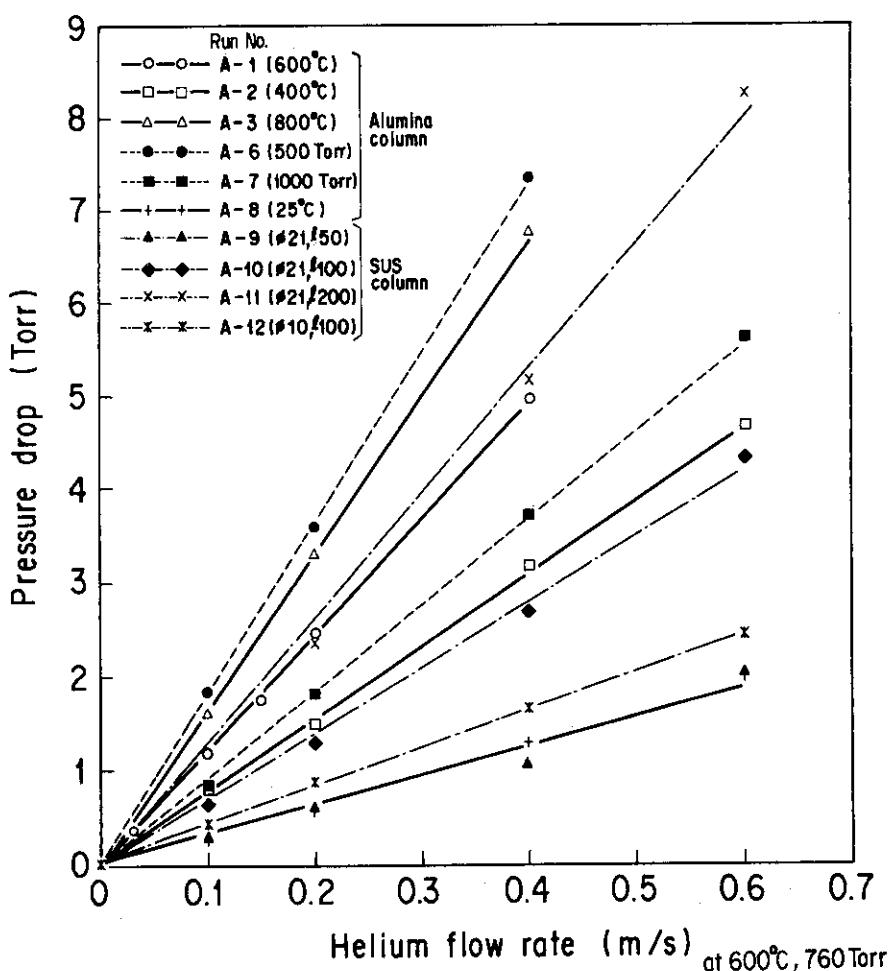


Fig. 4 Pressure drop in packing column filled sample.

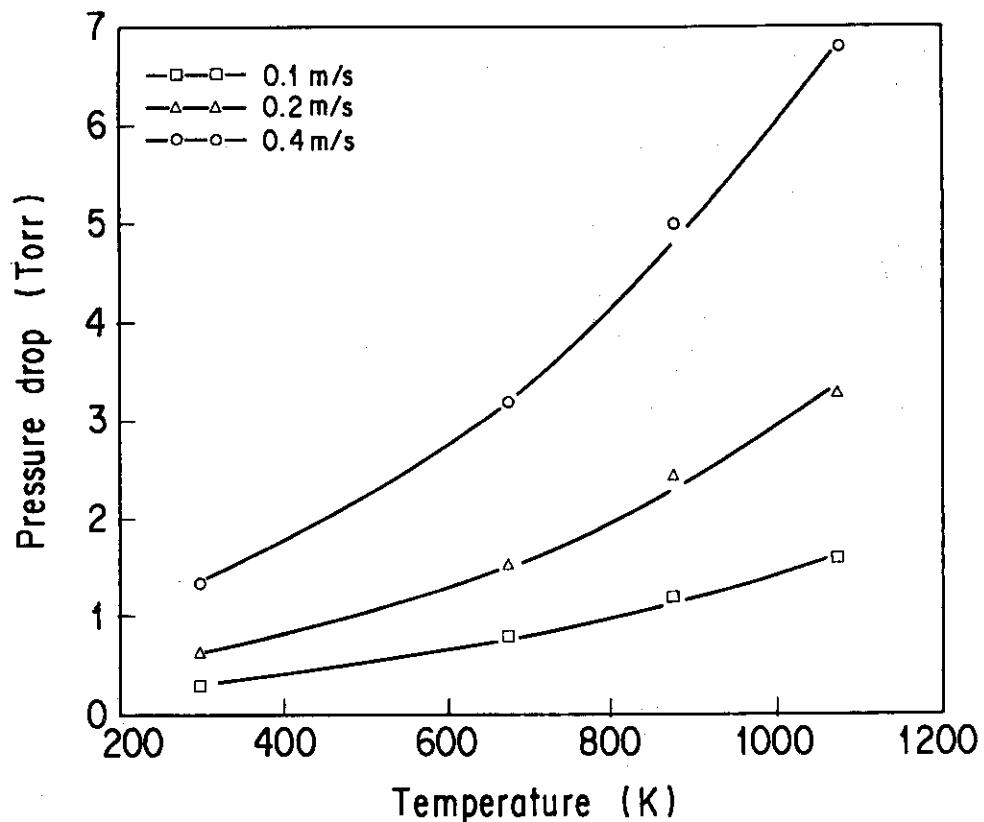


Fig.5 Temperature dependence for pressure drop.

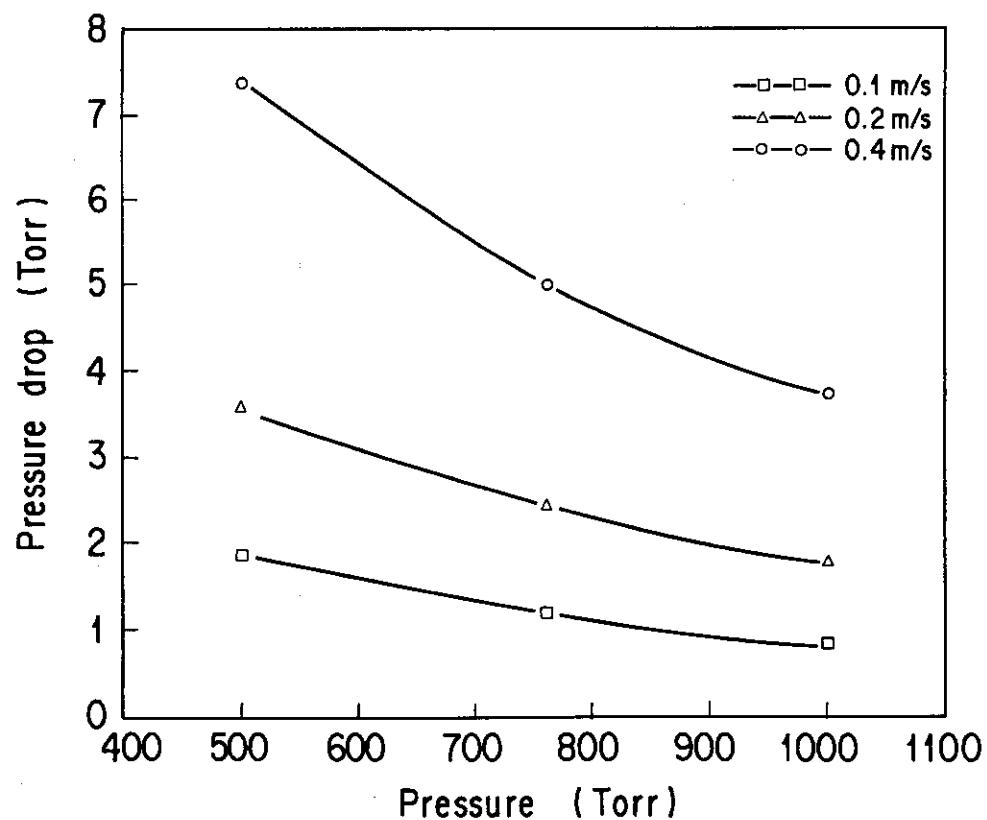


Fig.6 Experimental pressure dependence for pressure drop.

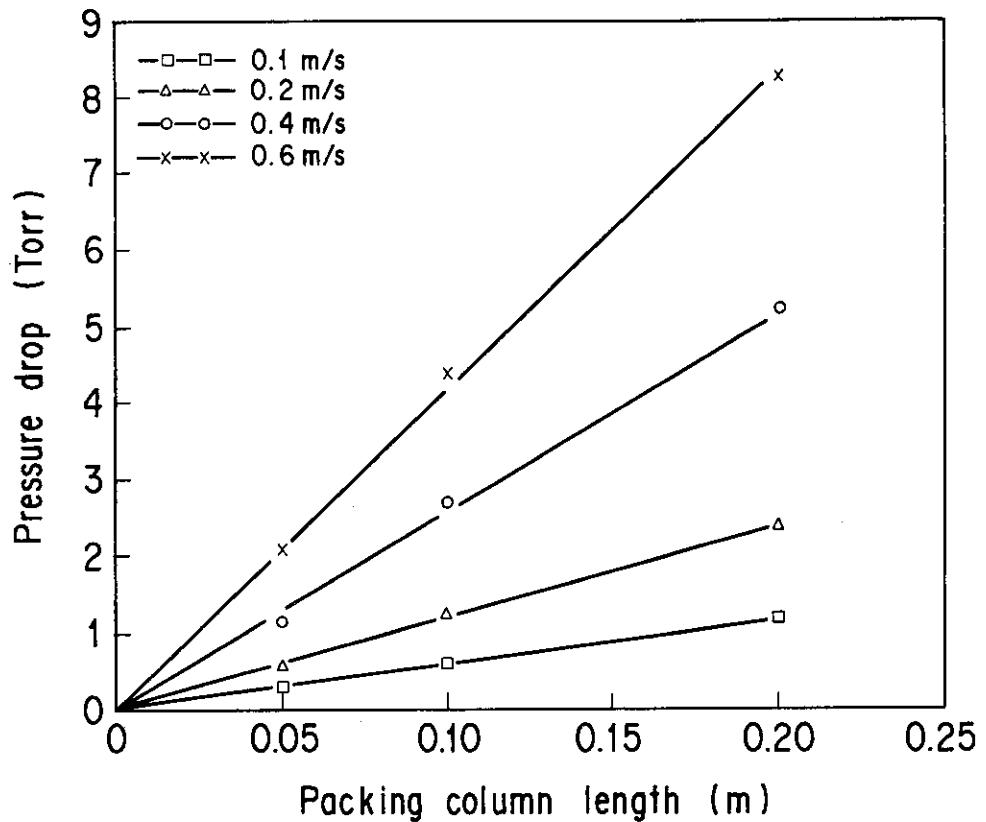


Fig. 7 Packing column length dependence for pressure drop.

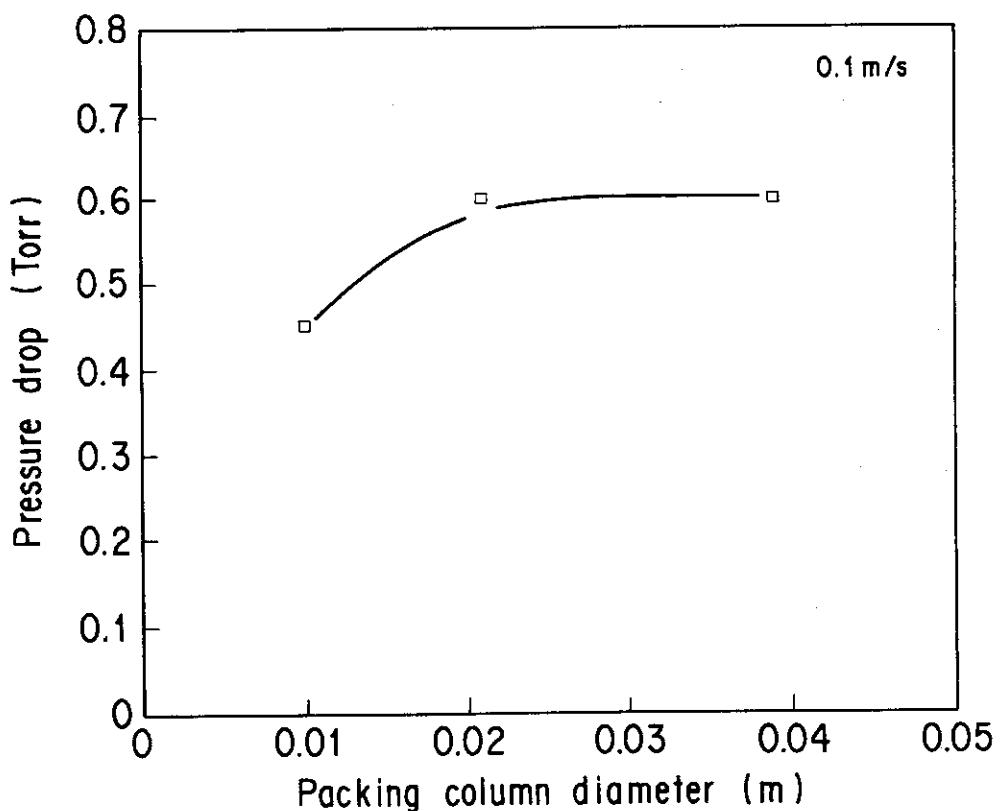


Fig. 8 Packing column diameter dependence for pressure drop.

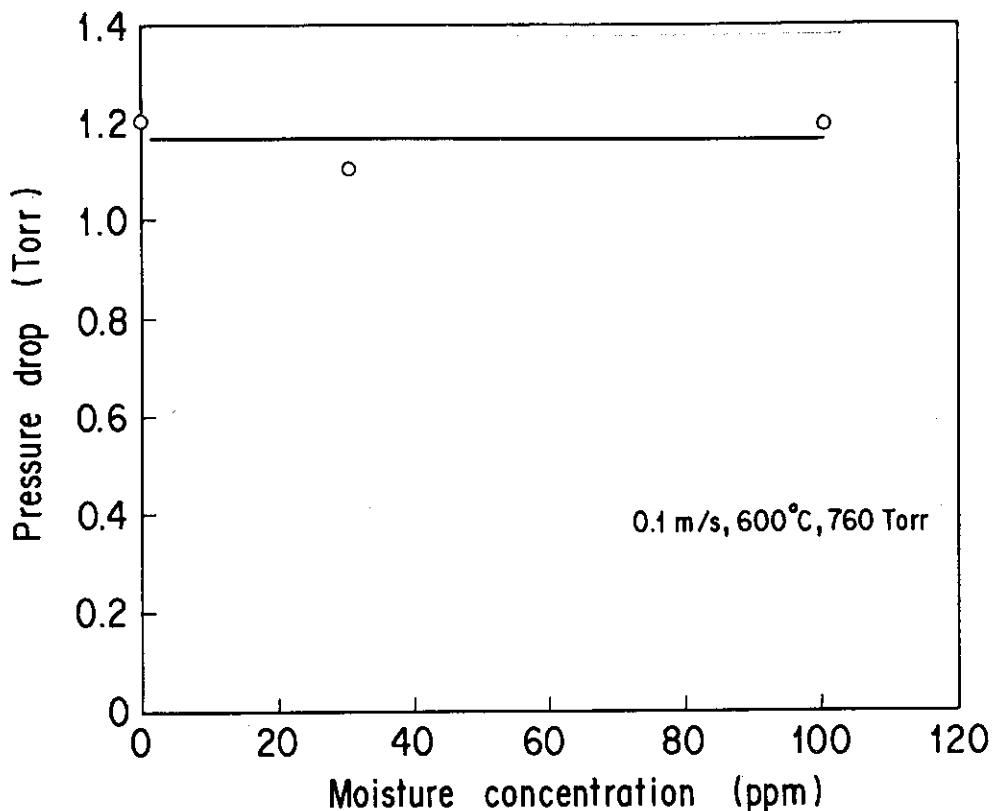
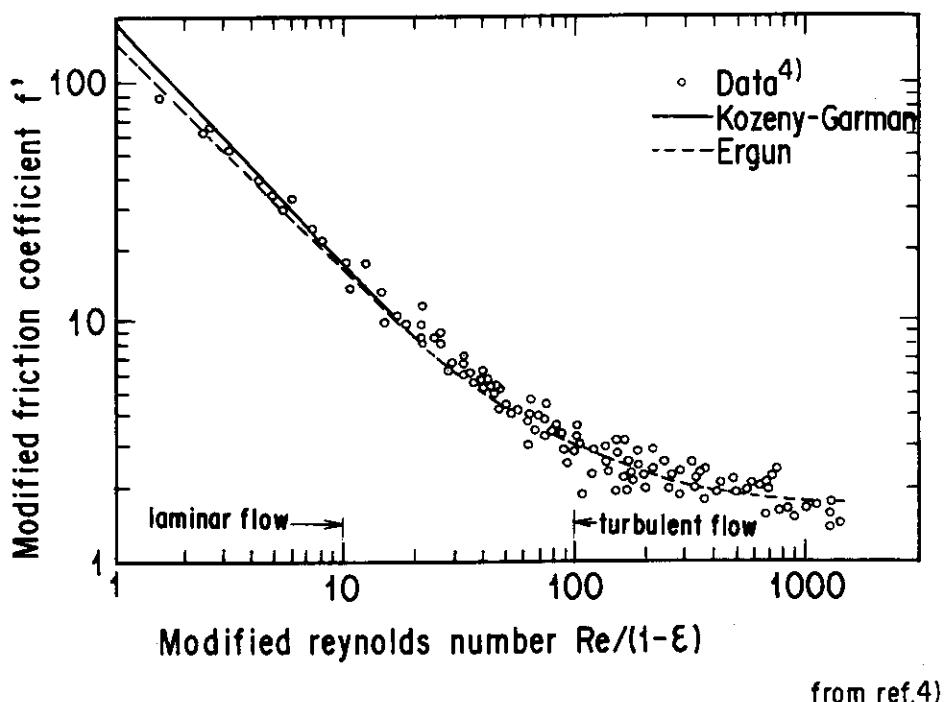


Fig.9 Moisture concentration dependence for pressure drop.



from ref.4)

Fig.10 Equation of Kozeny-Carman and Ergun.

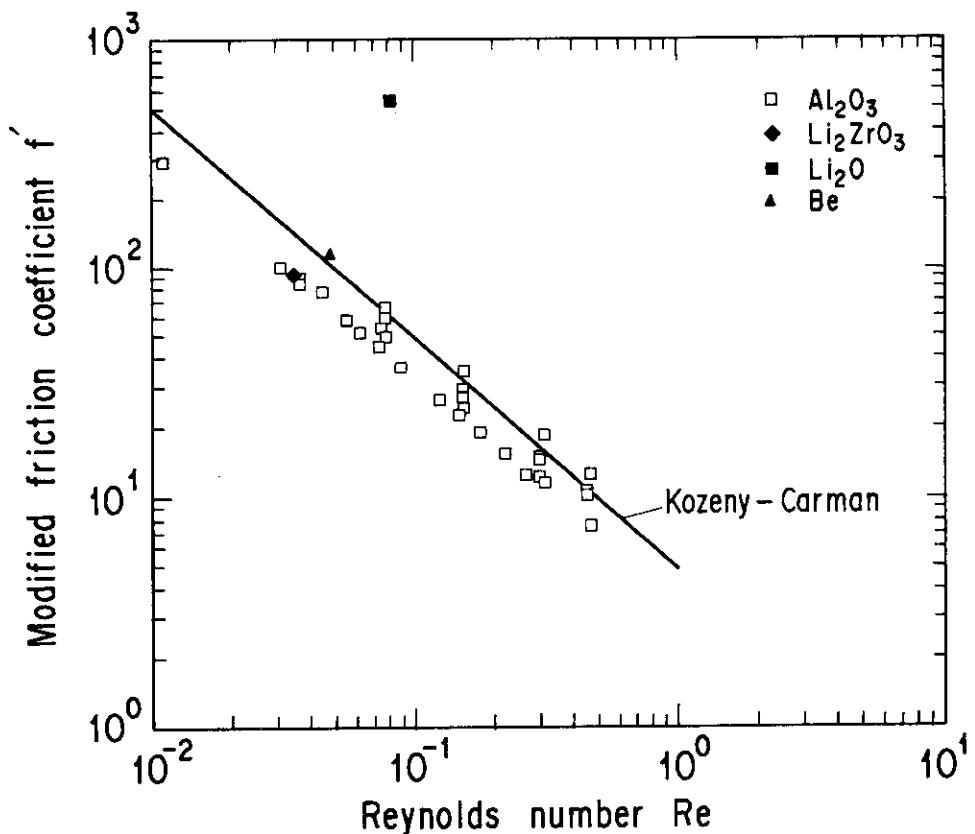


Fig.11 Moody diagram of experimental data.

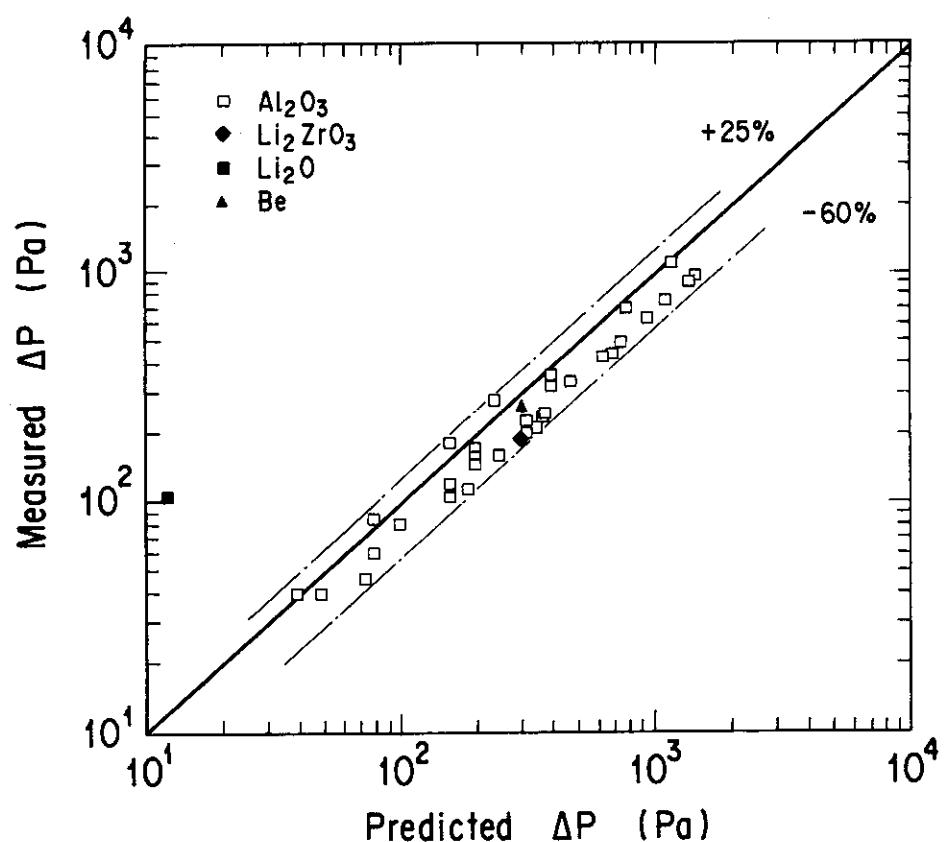


Fig.12 Comparison of experimental data with Kozeny-Carman's equation.

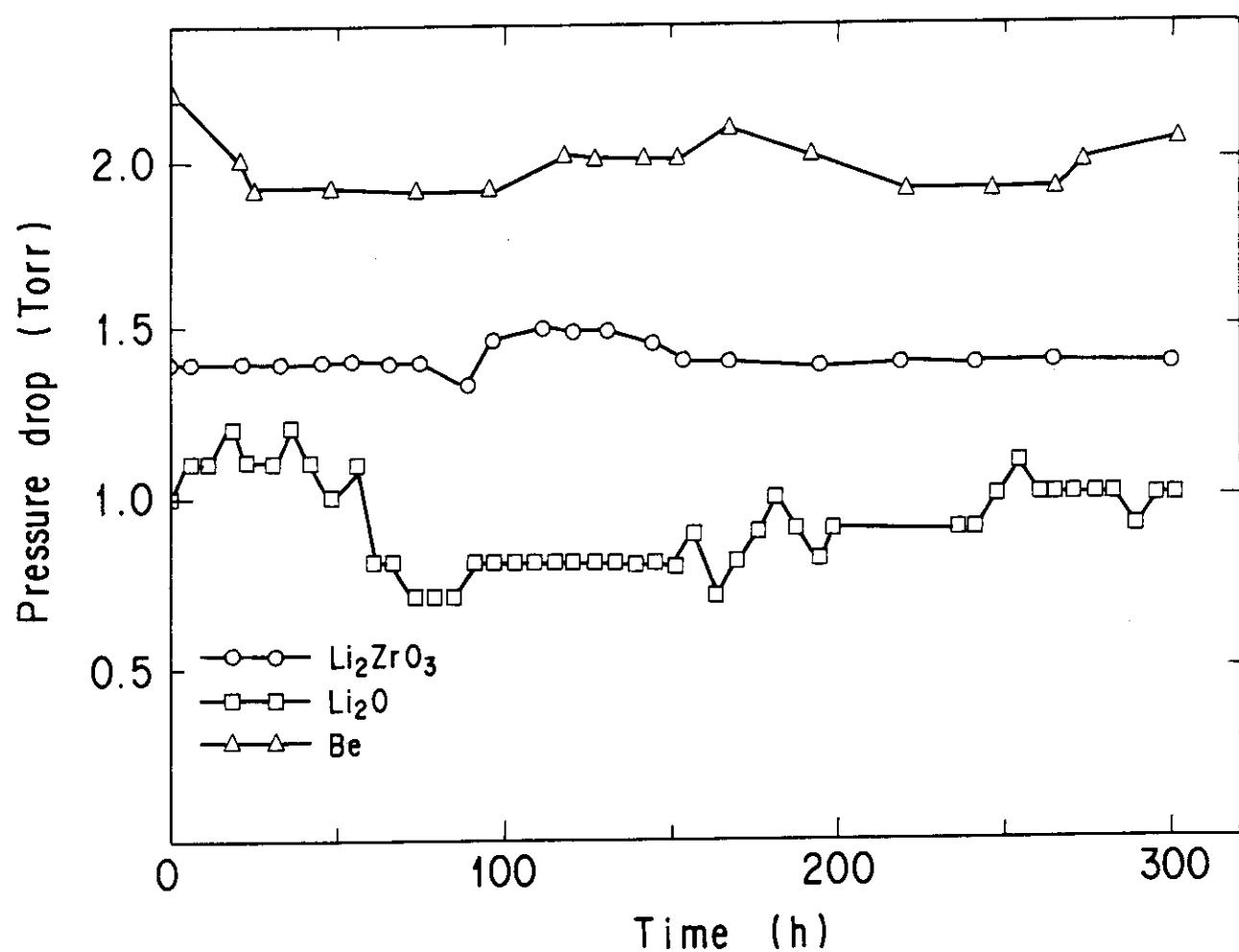
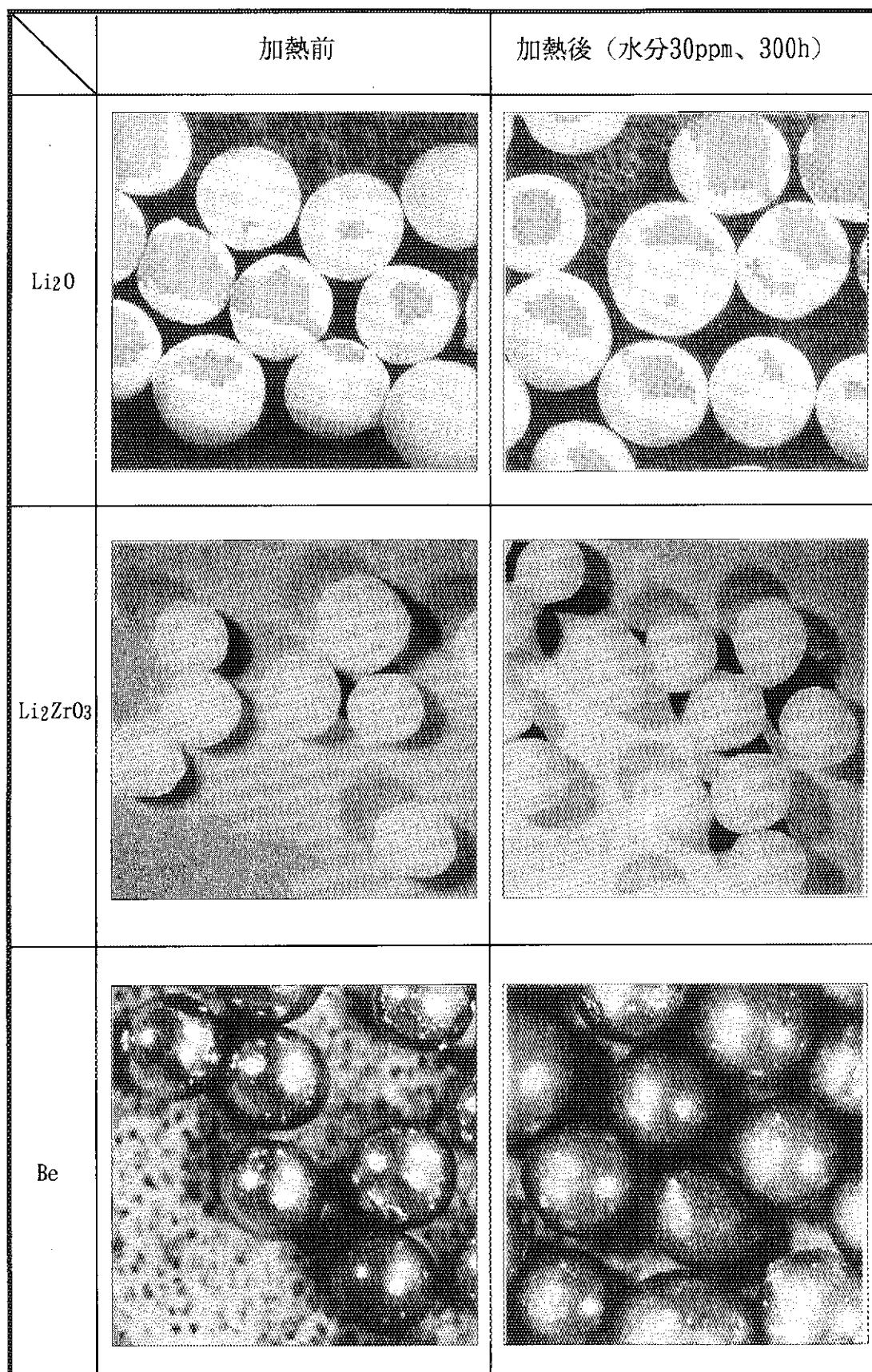


Fig.13 Time dependence of pressure drop.

Fig. 14 Photographs of Li<sub>2</sub>O, Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>, Be pebble for before and after heating.

## 付 錄

## A. 1 ヘリウムの物性値

Fig. A-1, 2, 3 に計算に使用したヘリウムの粘性係数、及び密度を示す。

## A. 2 充填材表面積の計算方法について

Table 4 に示したように、充填材表面積の計算は、充填材を球形状と仮定して等価表面積及び等価体積 (Table 2) から計算した。また、充填材の粒度分布を用いて以下の式で計算すると前述の値より約 5 % 増加するが、圧力損失に対する影響は 1 % 以下である。このため、今回の実験ではどちらの方法で充填材表面積を計算しても圧力損失に対する影響は変わらない。

$$a = \frac{\pi}{4} \sum_{n=1}^6 (A_n + B_n)^2 N_n \quad \dots \quad (A-1)$$

$$N_n = (1 - \varepsilon) C_n / V_n \quad \dots \quad (A-2)$$

$$V_n = \frac{\pi}{48} (A_n + B_n)^3 \quad \dots \quad (A-3)$$

(A-1) に(A-2)、(A-3) を代入すると

$$a = 12(1 - \varepsilon) \sum_{n=1}^6 \frac{C_n}{(A_n + B_n)} \quad \dots \quad (A-4)$$

ここで、

$a$	: 充填材表面積	$(m^2/m^3)$
$A_n$	: 各粒度範囲の直径初期値	(m)
$B_n$	: 各粒度範囲の直径最終値	(m)
$C_n$	: 各粒度範囲の存在比率	(-)
$N_n$	: 各粒度範囲の個数密度	$(1/m^3)$
$\varepsilon$	: 充填部空隙率	(-)
$V_n$	: 各粒度範囲の球の平均体積	$(m^3)$
$n$	: メッシュ番号 (粒度範囲の区切り数)	

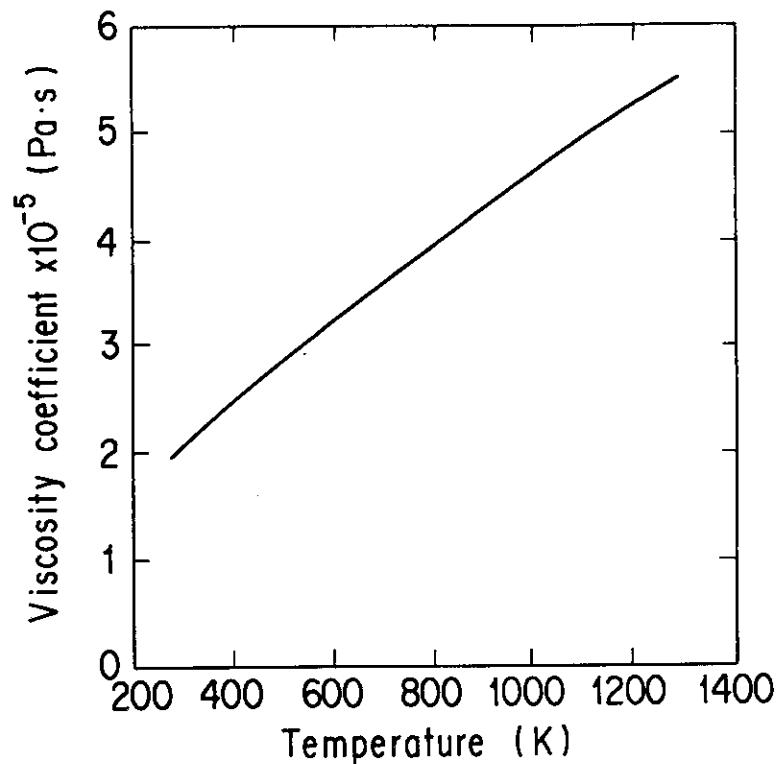


Fig.A-1 Viscosity of helium.

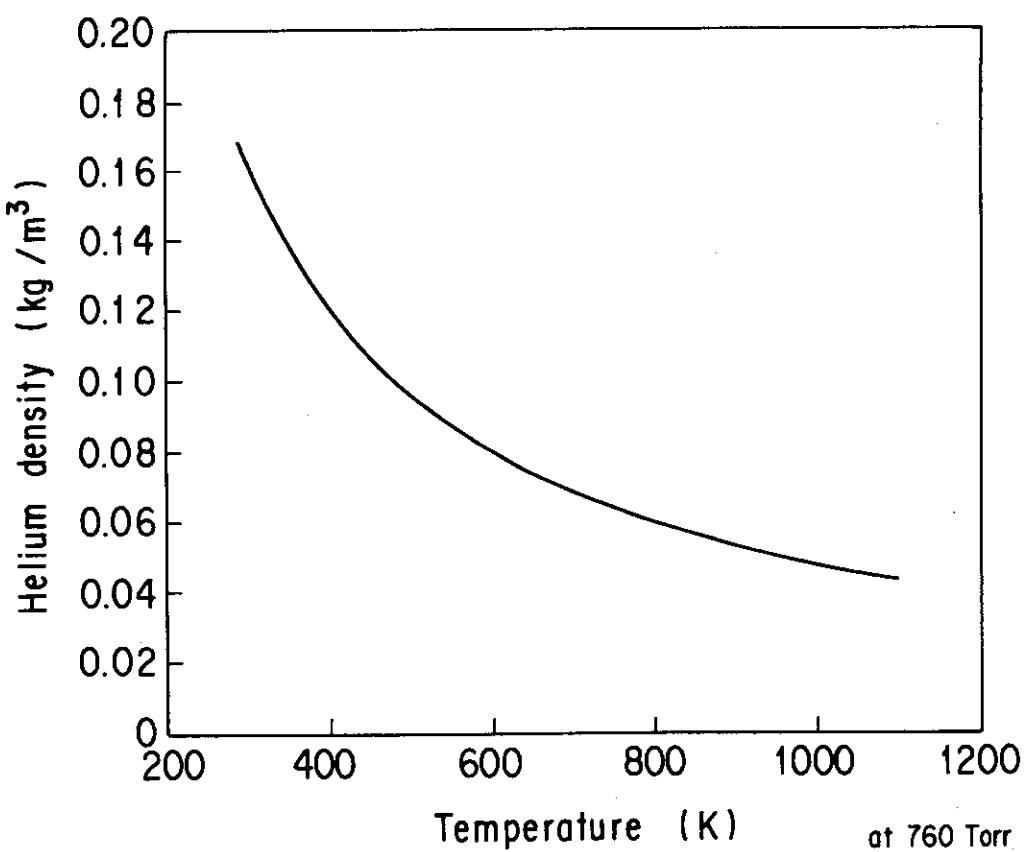


Fig.A-2 Helium density at 760 Torr.

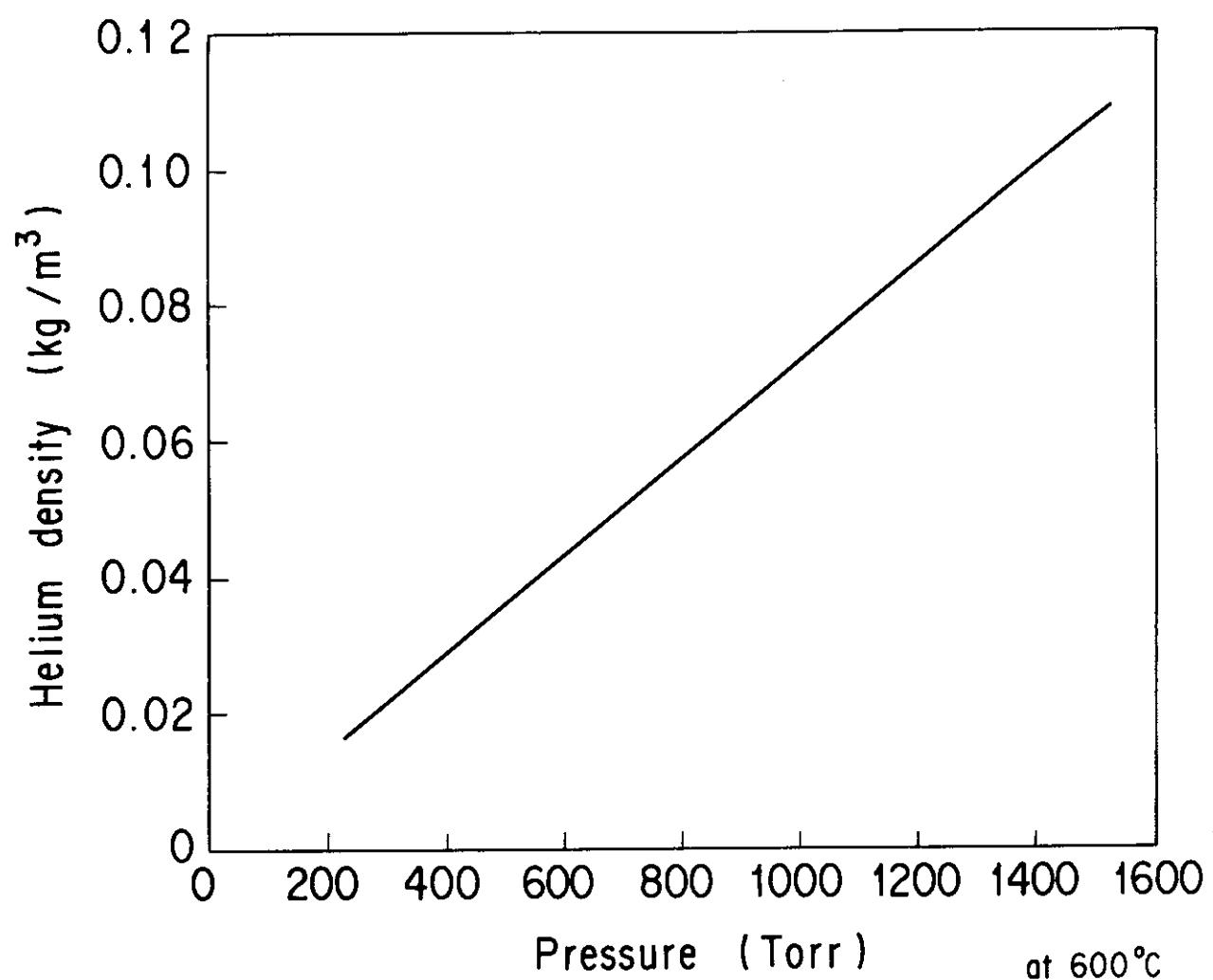


Fig.A-3 Helium density at 600°C.