

J A E R I - M
84-234

V H T R シール性能試験装置用
黒鉛材中のガス透過

1985年1月

文沢 元雄・滝塚 貴和・鈴木 邦彦

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、お申しこしください。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

V H T R シール性能試験装置用黒鉛材中のガス透過

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

文沢 元雄・滝塚 貴和⁺・鈴木 邦彦

(1984年12月10日受理)

多目的高温ガス実験炉の設計におけるシール性能データの取得に関連して、シール性能試験装置で使用しているEG-NPL黒鉛材の透過率を測定した。使用した気体はヘリウムガス、窒素ガス、空気及びアルゴンガスであり、常温で、圧力範囲は約0.2～4 MPa、差圧範囲は約0.2～50 kPaである。測定の結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 分子量の小さい気体ほど透過率は高い。ヘリウムガス、窒素ガス、空気及びアルゴンガスにおける平均透過率はそれぞれ、9.68, 8.89, 8.80 及び $8.51 (10^{-14} \text{ m}^2)$ である。
- (2) 透過率は圧力や差圧が増加すると減少する。
- (3) 透過流れは分子流れや慣性項の影響を受けるので、これらの影響を考慮して透過率を評価すれば、無次元標準偏差は0.0145～0.0295の範囲にあり、これらの影響を考慮しない場合の約30%に減少する。

⁺ 高温工学部

Gas Permeability in Graphite used in Seal Performance Test
for the experimental VHTR Core

Motoh FUMIZAWA, Takakazu TAKIZUKA⁺ and Kunihiko SUZUKI

Department of Power Reactor Projects, JAERI

(Received December 10, 1984)

This report describes a study on gas permeability in EG-NPL graphite used in seal performance test for the experimental VHTR Core. The permeability was measured using helium, nitrogen, air and argon gases at room temperature. The range of system pressure is from 0.2 to 4.0 MPa and that of pressure difference is from 0.2 to 50 kPa.

The results are as follows:

- (1) The permeability rises with reduction of the molecular weight of the gas. The average permeabilities in the gases of He, N₂, Air and Ar are 9.68, 8.89, 8.80 and $8.51 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ respectively.
- (2) The permeability decreases with increasing the system pressure and the pressure difference.
- (3) Since permeation flow is affected by both slip flow and inertial force, the range of nondimensional standard deviation of permeability data derived with both effects is from 0.0145 to 0.0295, which decreases to approximately 30 % of that without them.

Keywords: Experiment, Permeability, Graphite, Seal Performance, VHTR, EG-NPL Graphite, System Pressure, Pressure Difference, Slip Flow, Inertial Force, Standard Deviation

+ Department of High Temperature Engineering

目 次

1.はじめに	1
2.透過率測定の基礎	1
2.1 基礎式	2
2.2 円筒状試験体への適用式	3
3.透過率測定試験	4
3.1 試験方法	5
3.2 試験条件	5
3.3 試験結果	5
4.透過率の実験式	6
4.1 分子流れの影響	6
4.2 慣性項の影響	7
4.3 分子流れ及び慣性項の影響	8
5.結論	8
謝辞	9
参考文献	9
付録 1 透過率測定データ	26
付録 2 平均圧力における流路断面積	38
付録 3 実験炉における透過流量の推定	39

Contents

1. Introduction	1
2. Foundation of permeability	1
2.1 Basic equations	2
2.2 Equations for cylindrical test piece	3
3. Measurements of permeability	4
3.1 Experimental procedure	5
3.2 Experimental condition	5
3.3 Experimental results	5
4. Correlation of permeability	6
4.1 Effect of slip flow	6
4.2 Effect of inertial forces	7
4.3 Effect of both slip flow and inertial forces	8
5. Conclusion	8
 Acknowledgements	9
References	9
Appendix-1	26
Appendix-2	38
Appendix-3	39

記号表

- A : 流路断面積, m^2
 b : 慣性係数, m^{-1}
 B_0 : 粘性流れ透過係数, m^2
 Da : 1 darcy ($= 9.87 \times 10^{-13} \text{ m}^2$)
 G : 質量流量, kg/s
 h : 試験体の高さ, m
 K : 透過率係数, m^2/s
 K_D : 透過率, m^2
 \bar{K}_D : 平均透過率, m^2
 K_0 : 滑り流れ透过係数, m
 m : 分子量, kg/kmol
 p : 圧力, MPa
 p_0 : r_0 における圧力, MPa
 p_1 : r_1 における圧力, MPa
 p_m : p_0, p_1 の平均圧力 ($= \frac{p_1 + p_0}{2}$), MPa
 Δp : 差圧 ($= p_1 - p_0$), MPa
 Q : 体積流量, m^3/s
 Q_m : p_m における体積流量, m^3/s
 r : 試験体の半径方向座標, m
 r_0 : 試験体の内半径, m
 r_1 : 試験体の外半径, m
 R : ガス定数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 R_0 : 一般ガス定数 ($= mR$), $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
 T : 流体の温度, K
 v : 流体のみかけ速度, m/s

ギリシャ文字

- μ : 粘性係数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ν : 動粘性係数, m^2/s
 $\bar{\nu}$: 平均分子速度 ($= \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi m}}$), m/s
 ρ : 密度, kg/m^3
 σ : 標準偏差 (SD)
 σ^+ : 無次元標準偏差 ($= \sigma/\bar{K}_D$, NSD)

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉（VHTR）の炉心を構成する黒鉛材料は多孔質であるため、黒鉛の内部を冷却材であるヘリウムガスが透過する。炉容器内冷却材流れの様子を Fig.1 に示すが、黒鉛材料中のガス透過は FP の移行や黒鉛材料の内部酸化などの問題ばかりでなく、炉内の漏れ流量評価においても重要である。

実験炉の固定反射体や高温プレナムブロックにはシール要素を設置しているが、漏れ流れとしては Fig.2 に示すように、ブロック間のすき間を流れるギャップ流れとブロック内を貫通する透過流れが考えられる。漏れ流量評価に関し、実験炉の詳細設計(I)では富士電機株⁽¹⁾が実施した 1 段シール構造のシール要素基礎試験データを用いた。その後、炉心有効流量の増加とシール部の信頼性向上のため、多段シール構造を採用するなど設計の詳細化が進み⁽²⁾、上記の基礎試験データでシール性能を表示することが不十分となった。このため、詳細設計(II)では、シール性能試験装置を用いて多段シール構造におけるシール性能データの取得試験を行った。試験に用いた試験体ブロックはシール性能がシール要素設置部表面状態に影響されることから、粒径、密度、外観が固定反射体や高温プレナムブロックの候補材 PGX 黒鉛に類似すること、試験体ブロック寸法 $70 \times 250 \times 500$ （単位は mm）が切り出せること及び材料の入手性を考慮して、日本カーボン社製の EG - NPL 黒鉛を使用した。この黒鉛は透過率が大きいことが予想され、シール性能データを正確に把握するため、透過率をあらかじめ測定しておく必要があった。このため、原研高温工学部高温構造工学研究室に設置してある透過率測定装置を使用し、EG-NPL 黒鉛の透過率を測定し、理論的考察を行った。

本報告では、2 章で透過率測定の基礎的事項を記述し、3 章で透過率測定試験について、また 4 章で透過率の実験式の導出について示す。最後の 5 章では結論について述べる。なお、付録 1 に透過率測定データ、付録 2 に平均圧力における流路断面積、付録 3 に実験炉における透過流量の推定を記す。

2. 透過率測定の基礎

黒鉛材のような多孔質中の透過率に関しては従来から多くの研究が行われている。^{(3)～(10)} 多孔質中のガス透過の程度は、通常透過率によって示され、分子流れや慣性項の影響を無視する場合と考慮に入れる場合がある。両者を無視する場合には Darcy の法則⁽⁴⁾を用いる。一方両者を考慮する場合、分子流れに対しては、Carman-Arnell の関係⁽⁵⁾を用い、また慣性項に対しては、Forchheimer の法則⁽⁶⁾を用いる。両者を考慮した 1 例として、米国 Brookhaven 国立研究所（BNL）⁽⁷⁾では PGX 黒鉛の透過率係数を求めている。

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉（VHTR）の炉心を構成する黒鉛材料は多孔質であるため、黒鉛の内部を冷却材であるヘリウムガスが透過する。炉容器内冷却材流れの様子を Fig.1 に示すが、黒鉛材料中のガス透過は FP の移行や黒鉛材料の内部酸化などの問題ばかりでなく、炉内の漏れ流量評価においても重要である。

実験炉の固定反射体や高温プレナムブロックにはシール要素を設置しているが、漏れ流れとしては Fig.2 に示すように、ブロック間のすき間を流れるギャップ流れとブロック内を貫通する透過流れが考えられる。漏れ流量評価に関し、実験炉の詳細設計(I)では富士電機株が実施した 1 段シール構造のシール要素基礎試験データを用いた。⁽¹⁾その後、炉心有効流量の増加とシール部の信頼性向上のため、多段シール構造を採用するなど設計の詳細化が進み、上記の基礎試験データでシール性能を表示することが不十分となった。このため、詳細設計(II)では、シール性能試験装置を用いて多段シール構造におけるシール性能データの取得試験を行った。試験に用いた試験体ブロックはシール性能がシール要素設置部表面状態に影響されることから、粒径、密度、外観が固定反射体や高温プレナムブロックの候補材 PGX 黒鉛に類似すること、試験体ブロック寸法 $70 \times 250 \times 500$ （単位は mm）が切り出せること及び材料の入手性を考慮して、日本カーボン社製の EG-NPL 黒鉛を使用した。この黒鉛は透過率が大きいことが予想され、シール性能データを正確に把握するため、透過率をあらかじめ測定しておく必要があった。このため、原研高温工学部高温構造工学研究室に設置してある透過率測定装置を使用し、EG-NPL 黒鉛の透過率を測定し、理論的考察を行った。

本報告では、2 章で透過率測定の基礎的事項を記述し、3 章で透過率測定試験について、また 4 章で透過率の実験式の導出について示す。最後の 5 章では結論について述べる。なお、付録 1 に透過率測定データ、付録 2 に平均圧力における流路断面積、付録 3 に実験炉における透過流量の推定を記す。

2. 透過率測定の基礎

黒鉛材のような多孔質中の透過率に関しては従来から多くの研究が行われている。^{(3)～(10)}多孔質中のガス透過の程度は、通常透過率によって示され、分子流れや慣性項の影響を無視する場合と考慮に入れる場合がある。両者を無視する場合には Darcy の法則を用いる。一方両者を考慮する場合、分子流れに対しては、Carman-Arnell の関係を用い、また慣性項に対しては、Forchheimer の法則を用いる。両者を考慮した 1 例として、米国 Brookhaven 国立研究所（BNL）⁽⁶⁾では PGX 黒鉛の透過率係数を求めている。⁽⁷⁾

多孔質層内の流れに適用される基本的な法則は連続の式と運動量の式である。Navier-Stokes の方程式で表わされる運動量の式は、多孔質層内のすべての粒子の表面で流速がゼロとすると境界条件が複雑であり、この方程式をそのままの形で使用することは困難である。従って、何らかの近似が必要となる。本章では従来からよく用いられている Darcy の法則を適用する。

2.1 基 础 式

多孔質層内の流れは複雑であるが、次のように仮定すれば Darcy の法則が成立し、運動量の式は(1)式で表わされる。

- 仮定 (i) 流れは等温定常流である。
- (ii) 多孔質層内は充てん物を含めた空間が巨視的に均質である。
- (iii) 一様なみかけ速度で流れる。
- (iv) 慣性力は粘性力に比べて無視できる。
- (v) 粘性力はその位置における局所速度に比例する減衰力である。

$$\vec{v} = - \frac{K_D}{\mu} \nabla p \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 \vec{v} は流体のみかけ速度、 K_D は透過率（浸透率）、 μ は粘性係数である。

Darcy の法則に従えば、 K_D は圧力や質量流量によらず一定となる。すなわち、

$$K_D = \text{Const.} (= B_0) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

定常圧縮性流体の連続の式は

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで ρ は密度である。

完全ガスの状態方程式は、

$$p = \rho R T \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、 R はガス定数、 T は温度である。

圧力 p が差圧 Δp に比べて非常に大きい場合には密度 ρ の変化は相対的に小さく、非圧縮性流体として取り扱える。

ゆえに(2)式は、

$$\nabla^2 p = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

また圧縮性流体の場合、(1)式及び(4)式より(3)式は

$$\nabla^2 p^2 = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

また、 $\mu = \rho \nu$ (ν は動粘性係数) なので、

$$\vec{v} = - \frac{RT K_D}{\rho \nu} \nabla p \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

となり、透過率係数 K として

$$K = \frac{RT K_D}{\nu} \left(= \frac{K_D}{\mu} p \right) \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

を用いれば、

$$\vec{v} = -\frac{K}{p} \nabla p \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

を得る。

2.2 円筒状試験体への適用式

(i) 非圧縮性流体の場合

円筒状試験体モデルをFig.3に示す。v, pが半径方向(r方向)だけの成分をもつ流れでは、(6)式は、

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dp}{dr} \right) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

(1)式は、

$$v = -\frac{K_D}{\mu} \cdot \frac{dp}{dr} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

となる。(9)式より、一般解は、

$$p = C_1 \ln r + C_2$$

ここで、Fig.3に示す境界条件より

$$C_1 = \frac{p_1 - p_0}{\ln(r_1/r_0)}, \quad C_2 = \frac{p_0 \ln r_1 - p_1 \ln r_0}{\ln(r_1/r_0)}$$

ゆえに、

$$p = \frac{p_1 - p_0}{\ln(r_1/r_0)} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) + p_0$$

$$v = -\frac{K_D}{\mu r} \cdot \frac{p_1 - p_0}{\ln(r_1/r_0)}$$

を得る。流量Qは、 $Q = |v| \cdot 2\pi rh$ (hは試験体の高さ) なので、 $\Delta p = p_1 - p_0$ を用いると次式で表わされる。

$$Q = \frac{2\pi h K_D \Delta p}{\mu \ln(r_1/r_0)} \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

透過率 K_D 及び透過率係数Kはそれぞれ次式となる。

$$K_D = \frac{Q \mu \ln(r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

$$K = \frac{Q p \ln(r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

透過率係数は、圧力pに依存し、半径方向rの関数となるので、平均圧力 p_m の透過率係数を代表値とする。また p_0, p_1 の平均圧力を p_m とし、圧力 p_m における体積流量を Q_m とする。
(12), (13)式より透過率 K_D 及び透過率係数Kの代表値はそれぞれ次式となる。

$$K_D = \frac{Q_m \mu \ln (r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

$$K = \frac{Q_m p_m \ln (r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

(ii) 圧縮性流体の場合

非圧縮性流体の場合と同様に v , p が半径方向 (r 方向) だけの成分をもつので、(6)式は

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \frac{dp^2}{dr}) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

一般解は、

$$p^2 = C_3 \ln r + C_4$$

ここで、Fig.3 に示す境界条件より、

$$C_3 = \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln (r_1/r_0)}, \quad C_4 = \frac{p_0^2 \ln r_1 - p_1^2 \ln r_0}{\ln (r_1/r_0)}$$

ゆえに

$$p^2 = \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln (r_1/r_0)} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + p_0^2 \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

質量流量 G は $G = \rho |v| \cdot 2\pi r h$ なので、

$$G = \frac{\rho}{RT} \frac{K_D}{\mu} \frac{dp}{dr} \cdot 2\pi r h \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

(4)式及び(17)式より(18)式は

$$G = \frac{2\pi h \Delta p \cdot p_m}{\mu \ln (r_1/r_0)} \cdot \frac{K_D}{RT} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

また $G = \rho_m Q_m$ なので

$$K_D = \frac{Q_m \mu \ln (r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

従って、圧縮性・非圧縮性を問わず、 K_D 及び K の代表値の式はそれぞれ、(14)式及び(15)式で与えられる。

3. 透過率測定試験

高温構造工学研究室に設置されている黒鉛材ガス透過率測定装置を用いて PGX 相当黒鉛材 EG-NPL のガス透過率を測定した。

$$K_D = \frac{Q_m \mu \ln (r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

$$K = \frac{Q_m p_m \ln (r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

(ii) 圧縮性流体の場合

非圧縮性流体の場合と同様に v , p が半径方向 (r 方向) だけの成分をもつので、(6)式は

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dp^2}{dr} \right) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

一般解は、

$$p^2 = C_3 \ln r + C_4$$

ここで、Fig.3 に示す境界条件より、

$$C_3 = \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln (r_1/r_0)}, \quad C_4 = -\frac{p_0^2 \ln r_1 - p_1^2 \ln r_0}{\ln (r_1/r_0)}$$

ゆえに

$$p^2 = \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln (r_1/r_0)} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + p_0^2 \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

質量流量 G は $G = \rho |v| \cdot 2\pi r h$ ので、

$$G = \frac{p}{RT} \frac{K_D}{\mu} \frac{dp}{dr} \cdot 2\pi r h \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

(4)式及び(7)式より(18)式は

$$G = \frac{2\pi h \Delta p \cdot p_m}{\mu \ln (r_1/r_0)} \cdot \frac{K_D}{RT} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

また $G = \rho_m Q_m$ ので

$$K_D = \frac{Q_m \mu \ln (r_1/r_0)}{2\pi h \Delta p} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

従って、圧縮性、非圧縮性を問わず、 K_D 及び K の代表値の式はそれぞれ、(14)式及び(15)式で与えられる。

3. 透過率測定試験

高温構造工学研究室に設置されている黒鉛材ガス透過率測定装置を用いて PGX 相当黒鉛材 EG-NPL のガス透過率を測定した。

3.1 試験方法

透過率測定に使用した装置を Fig.4 に、詳細な試験部を Fig.5 に示す。また試験装置正面、裏面、試験容器内部及び EG-NPL 試験体をそれぞれ Photos 1 ~ 4 に示す。円筒状試験体の寸法は、 $r_0 = 0.015 \text{ m}$ ， $r_1 = 0.03 \text{ m}$ ， $h = 0.05 \text{ m}$ である (Fig.3 参照)。試験体は上下面にゴムのガスケットをあて、ステンレス板を乗せて、ネジ付の円筒状ふたで締め付け、固定する。試験体とゴム及びステンレス板からガス洩れが生じないよう十分注意した。

測定項目は圧力 p_1 ，差圧 Δp ，出口体積流量 Q 及び各測定場所における温度 T である。透過率及び透過率係数は気体が円筒状試験体を半径方向内向きに透過する時の $p_m (= p_1 - \frac{1}{2} \Delta p)$ ， Q_m ， Δp を(14)式及び(15)式に代入して求める。圧力計は長野計器製の GC 11 型デジタル圧力計で、測定圧力は最大 19.7 MPa であり、精度は $\pm (0.2\% \text{ F.S.} + 1 \text{ dig})$ である。差圧計は大倉電気製の 1151 DP 型差圧伝送器、旭計器製の MP-1400 型デジタルパネルメータ及び大倉電気製の SE 4101 型 2 線式電源を組み合わせて使用し、最大差圧は 187 kPa (19050 mm H₂O)，精度は $\pm 0.2\% \text{ F.S.}$ である。流量計は TELEDYNE HASTINGS - RAYDIST 社製の NALL-10 KP 質量流量計で最大流量は $1.665 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (9.99 SLM)，精度は $\pm 1\% \text{ F.S.}$ である。また作動流体としてはヘリウムガス (He)，窒素ガス (N₂)，空気 (Air)，アルゴンガス (Ar) を使用した。

3.2 試験条件

試験は次のような条件で行った。

温 度	室温
作動流体	ヘリウムガス，窒素ガス，空気，アルゴンガス
差 圧	0.2 ~ 49 kPa
压 力	0.2 ~ 4.024 MPa
試 験 体	EG - NPL (日本カーボン社製)

試験体 EG - NPL の粒径，密度について，PGX と比較すると次のようになる。

	PGX ⁽⁸⁾	EG-NPL
最大粒径 (m)	0.76×10^{-3}	0.8×10^{-3}
密 度 (kg/m^3)	1.76×10^3	1.58×10^3

3.3 試験結果

各気体における平均透過率 \bar{K}_D を Table 1 に示し、透過率測定データを付録 1 に示す。ヘリウムガスにおける透過率が他の気体に比較して高く、分子量の小さい気体ほど透過率は高い。また各気体において、試験体番号 2，1，3 の順序で透過率は高い値を示す。標準偏差と平均透過率の比で与えられる無次元標準偏差 $\sigma^+ (= \sigma/\bar{K}_D)$ は 0.041 ~ 0.072 の範囲にある。

ヘリウムガス，窒素ガス，空気及びアルゴンガスにおける透過率 K_D と差圧 Δp の関係をそ

それぞれ Figs. 6 ~ 9 に示す。透過率は差圧に対してほぼ一定値となるが、圧力や差圧が増加すると、減少する傾向にある。これが Darcy の法則からのずれであり、標準偏差 σ が大きくなる原因の 1 つである。透過率係数 K と平均圧力 p_m の関係をそれぞれ Figs. 10 ~ 13 に示す。いずれの場合も K は p_m に比例し、(15) 式に一致する。

ヘリウムガス及び空気における全試験体（3 個）の \bar{K}_D はそれぞれ $9.68 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.098 darcy) 及び $8.80 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.089 darcy) であり、ヘリウムガスにおける PGX 黒鉛の透過率⁽³⁾ (0.12 darcy) と比較して、多少低い値になっている。Union Carbide 社 (UCC) の技術資料によると PGX 黒鉛の透過率は粒子に平行方向 (WG) で 0.031 darcy、直角方向 (AG) で 0.034 darcy であり、BNL の実験によると、WG で 0.18 darcy、AG で 0.072 darcy である。PGX 黒鉛の透過率は測定結果にはらつきが大きく、AG と WG についても明確な傾向は言えない。

4. 透過率の実験式

透過率測定データの誤差は σ^+ で 0.041 ~ 0.072 の範囲にあるが、 K_D の値は圧力や差圧が増加すると減少する傾向にある。この原因は分子流れや慣性項の影響であり、これらが透過流れに及ぼす影響を評価し、EG-NPL 黒鉛の透過率に関する実験式を導出する。

4.1 分子流れの影響

多孔質黒鉛材のように、その流路幅が気体の平均自由行程の 10^3 倍以下になる可能性のある場合には、流れの分子的性格を取り入れる必要がある。滑り流れ領域では壁面で滑りを起こし、壁面での気体の速度はゼロではなくなる。⁽¹⁰⁾ これは分子流れの影響である。

また、細孔を有する黒鉛材中の気体の流れでは、分子流れの影響を考慮した Carman-Arnell^{(5), (9), (10)} の関係により表現することが適当であるとの報告がある。

Carman-Arnell の関係に(7)式を適用すると次式が得られる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} K_0 \frac{\mu}{p_m} \bar{v} \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

ここで、 \bar{v} は平均分子速度 $\left(= \sqrt{\frac{8 R_0 T}{\pi m}} \right)$

Table 1 に示した平均透過率 \bar{K}_D と分子量の関係を Fig. 14 に示すが、分子量が大きくなると \bar{K}_D が減少する。(21) 式は分子量 m が増加すると K_D が減少することを表わしており、試験結果はこの傾向を示している。

空気中の透過率 K_D と質量流量 G の関係を Fig. 15 に示す。傾向としては G が増加するほど、また圧力 p_1 が増加するほど K_D は減少する。圧力 p_1 は $p_1 = p_m + \frac{1}{2} \Delta p$ であり、試験範囲では一般に Δp は p_m よりも十分小さいので、 $p_1 \approx p_m$ と考えてよい。(21) 式は p_m が増加すると K_D

それぞれ Figs. 6 ~ 9 に示す。透過率は差圧に対してほぼ一定値となるが、圧力や差圧が増加すると、減少する傾向にある。これが Darcy の法則からのずれであり、標準偏差 σ が大きくなる原因の 1 つである。透過率係数 K と平均圧力 p_m の関係をそれぞれ Figs. 10 ~ 13 に示す。いずれの場合も K は p_m に比例し、(15)式に一致する。

ヘリウムガス及び空気における全試験体（3 個）の \bar{K}_D はそれぞれ $9.68 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.098 darcy) 及び $8.80 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.089 darcy) であり、ヘリウムガスにおける PGX 黒鉛の透過率⁽³⁾ (0.12 darcy) と比較して、多少低い値になっている。Union Carbide 社 (UCC) の技術資料によると PGX 黒鉛の透過率は粒子に平行方向 (WG) で 0.031 darcy、直角方向 (AG) で 0.034 darcy であり、BNL の実験によると、WG で 0.18 darcy、AG で 0.072 darcy である。PGX 黒鉛の透過率は測定結果にはらつきが大きく、AG と WG についても明確な傾向は言えない。

4. 透過率の実験式

透過率測定データの誤差は σ^+ で 0.041 ~ 0.072 の範囲にあるが、 K_D の値は圧力や差圧が増加すると減少する傾向にある。この原因は分子流れや慣性項の影響であり、これらが透過流れに及ぼす影響を評価し、EG-NPL 黒鉛の透過率に関する実験式を導出する。

4.1 分子流れの影響

多孔質黒鉛材のように、その流路幅が気体の平均自由行程の 10^3 倍以下になる可能性のある場合には、流れの分子的性格を取り入れる必要がある。滑り流れ領域では壁面で滑りを起こし、壁面での気体の速度はゼロではなくなる。⁽¹⁰⁾ これは分子流れの影響である。

また、細孔を有する黒鉛材中の気体の流れでは、分子流れの影響を考慮した Carman-Arnell^{(5), (9), (10)} の関係により表現することが適当であるとの報告がある。

Carman-Arnell の関係に(7)式を適用すると次式が得られる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} K_0 \frac{\mu}{p_m} \bar{v} \quad \dots \quad (21)$$

ここで、 \bar{v} は平均分子速度 $\left(= \sqrt{\frac{8 R_0 T}{\pi m}} \right)$

Table 1 に示した平均透過率 \bar{K}_D と分子量の関係を Fig. 14 に示すが、分子量が大きくなると \bar{K}_D が減少する。(21)式は分子量 m が増加すると K_D が減少することを表わしており、試験結果はこの傾向を示している。

空気中の透過率 K_D と質量流量 G の関係を Fig. 15 に示す。傾向としては G が増加するほど、また圧力 p_1 が増加するほど K_D は減少する。圧力 p_1 は $p_1 = p_m + \frac{1}{2} \Delta p$ であり、試験範囲では一般に Δp は p_m よりも十分小さいので、 $p_1 \approx p_m$ と考えてよい。(21)式は p_m が増加すると K_D

が減少することを表わしており、試験結果はこの傾向を示している。

次に、(21)式を次式で置き換える、

$$K_D = B_0 + \frac{B_1}{p_m} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

p_m を独立変数として、係数 B_0, B_1 を最小二乗法により求める。その結果を Table 2 に示す。無次元標準偏差 σ^+ は 3.3 節の結果 ($K_D = B_0$) に比べて、小さくなる。特にヘリウムガスの場合に σ^+ は約 $1/3$ に減少する。これは分子量の小さい気体ほど、平均分子速度が大きく、分子流れが透過率に及ぼす影響が大きいことを意味する。

4.2 慣性項の影響

多孔質中の実際の流れの道すじは著しく曲がっているので、速度の空間微分は大きい。流れに乱れを生じるほどではないにしても、流速が比較的大きい場合には、圧力勾配が慣性項（速度の 2 乗項）の影響を受けるので、Darcy の法則よりも、次式で与えられる Forchheimer の法則⁽⁶⁾がより正確である。

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{B_0} v + b \rho v^2 \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

ここで、 b は慣性係数であり、 $b = 0$ の場合には $B_0 = K_D$ となる。

(10)式と(23)式より K_D は次式となる。

$$K_D = \frac{1}{\frac{1}{B_0} + \frac{b}{\mu A} G} \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

ここで、 A は p_m における流路断面積 ($2\pi h \sqrt{r_0 r_1}$) であり、この値を用いた理由は付録 2 に示す。

従って、(24)式は G が増加すれば K_D が減少することを表わしており、試験結果はこの傾向を示している。

次に(24)式を次式で置き換える、

$$K_D = \frac{1}{\frac{1}{B_0} + B_2 G} \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

また、 $B_2 G \ll \frac{1}{B_0}$ の場合には(25)式は次式で近似できるので、

$$K_D = B_0 - B_0^2 B_2 G \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

G を独立変数として、(25)式及び(26)式の係数 B_0, B_2 を最小二乗法により求める。その結果を Table 3 に示す。 σ^+ は 3.3 節の結果に比べて小さくなる。特にアルゴンガスの場合に σ^+ は約 $1/2$ に減少する。同一差圧では、粘性係数にも依存するが、一般に密度の大きい気体ほど質量流量が多く、慣性項の効果が大きいことを意味する。また σ^+ に関し、(25)式と(26)式を比べると、ほとんど差がないので、 $B_0 G \ll \frac{1}{B_0}$ はこの試験条件において、よい近似である。

4.3 分子流れ及び慣性項の影響

透過流れに関し、分子流れ及び慣性項の影響を考慮すると、(25)式及び(26)式より透過率は次式で与えられる。

$$K_D = B_0 + \frac{B_1}{p_m} - B_0^2 B_2 G \quad \dots \dots \dots \quad (27)$$

p_m 、 G を独立変数として、係数 B_0 、 B_1 、 B_2 を最小二乗法により求める。その結果をTable 4に示す。また、検討した各式における、無次元標準偏差と分子量の関係をFig. 16に示す。 σ^+ は3.3節の結果と比べて、いずれの気体でも、約30%に減少する。その理由は、(27)式が分子流れ及び慣性項の影響を含めて評価しているからである。従って、(27)式は透過率を求める実験式として適切であると言える。

(27)式において、

$$B_1 = \frac{4}{3} \mu \bar{\nu} K_0 \quad , \quad B_0^2 B_2 = \frac{B_0^2}{\mu A} b$$

従って、滑り流れ透過係数 K_0 及び慣性係数 b を粘性流れ透過係数 B_0 とともに示すと、Table 5となる。 B_0 はいずれの気体でもほとんど一定であり、 K_0 及び b はヘリウムガスにおける値が少し低いだけで、他はほとんど一定である。従って、EG-NPL 黒鉛材の透過率 K_D は(27)式及びTable 5より、次式となる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} \mu \bar{\nu} K_0 \cdot \frac{1}{p_m} - \frac{B_0^2 b}{\mu A} \cdot G \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

$$\text{ここで}, \quad B_0 = 9.03 \times 10^{-14} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$K_0 = 1.20 \times 10^{-7} \text{ (m)}$$

$$b = 6.38 \times 10^8 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

また試験に使用した全気体(He, N₂, Air 及び Ar)における無次元標準偏差 $\sigma^+ = 0.0194$ で与えられる。

5. 結論

多目的高温ガス実験炉の炉心を構成する黒鉛材料中のガス透過はFPの移行、黒鉛材料の内部酸化及び炉内の漏れ流量評価に影響を与える可能性がある。その基礎データ取得として、ガス透過率を測定する必要があった。このため透過率測定装置を使用して、EG-NPL 黒鉛材(シール性能試験装置で使用した黒鉛試験体)の透過率を測定した。

その結果、得られた結論は次の通りである。

- (1) ヘリウムガス、窒素ガス、空気及びアルゴンガスにおける平均透過率はそれぞれ、9.68, 8.89, 8.80 及び 8.51 (10^{-14} m^2) である。
- (2) 分子量の小さい流体ほど透過率が高い。これは分子流れの影響である。

4.3 分子流れ及び慣性項の影響

透過流れに関し、分子流れ及び慣性項の影響を考慮すると、(25)式及び(26)式より透過率は次式で与えられる。

$$K_D = B_0 + \frac{B_1}{p_m} - B_0^2 B_2 G \quad \dots \dots \dots \quad (27)$$

p_m , G を独立変数として、係数 B_0 , B_1 , B_2 を最小二乗法により求める。その結果を Table 4 に示す。また、検討した各式における、無次元標準偏差と分子量の関係を Fig. 16 に示す。 σ^+ は 3.3 節の結果と比べて、いずれの気体でも、約 30 % に減少する。その理由は、(27)式が分子流れ及び慣性項の影響を含めて評価しているからである。従って、(27)式は透過率を求める実験式として適切であると言える。

(27)式において、

$$B_1 = \frac{4}{3} \mu \bar{\nu} K_0, \quad B_0^2 B_2 = \frac{B_0^2}{\mu A} b$$

従って、滑り流れ透過係数 K_0 及び慣性係数 b を粘性流れ透過係数 B_0 とともに示すと、Table 5 となる。 B_0 はいずれの気体でもほとんど一定であり、 K_0 及び b はヘリウムガスにおける値が少し低いだけで、他はほとんど一定である。従って、EG-NPL 黒鉛材の透過率 K_D は(27)式及び Table 5 より、次式となる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} \mu \bar{\nu} K_0 \cdot \frac{1}{p_m} - \frac{B_0^2 b}{\mu A} \cdot G \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

$$\text{ここで}, \quad B_0 = 9.03 \times 10^{-14} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$K_0 = 1.20 \times 10^{-7} \text{ (m)}$$

$$b = 6.38 \times 10^8 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

また試験に使用した全気体 (He, N₂, Air 及び Ar) における無次元標準偏差 $\sigma^+ = 0.0194$ で与えられる。

5. 結論

多目的高温ガス実験炉の炉心を構成する黒鉛材料中のガス透過は FP の移行、黒鉛材料の内部酸化及び炉内の漏れ流量評価に影響を与える可能性がある。その基礎データ取得として、ガス透過率を測定する必要があった。このため透過率測定装置を使用して、EG-NPL 黒鉛材 (シール性能試験装置で使用した黒鉛試験体) の透過率を測定した。

その結果、得られた結論は次の通りである。

- (1) ヘリウムガス、窒素ガス、空気及びアルゴンガスにおける平均透過率はそれぞれ、9.68, 8.89, 8.80 及び 8.51 (10^{-14} m^2) である。
- (2) 分子量の小さい流体ほど透過率が高い。これは分子流れの影響である。

- (3) 圧力や差圧が増加すると透過率は減少する。
- (4) 質量流量が増加すると透過率は減少する。これは慣性項の影響である。
- (5) 黒鉛材中の透過流れは、分子流れや慣性項の影響を受ける。両者を考慮して透過率を評価すれば、無次元標準偏差は 0.0145 ~ 0.0295 の範囲にあり、両者を考慮しない場合の約 30 % に減少する。
- (6) 分子流れや慣性項の影響を考慮すると、EG-NPL 黒鉛材の透過率 K_D の実験式は次式で与えられる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} \mu \nu K_0 \cdot \frac{1}{p_m} - \frac{B_0^2 b}{\mu A} \cdot G$$

ここで、 $B_0 = 9.03 \times 10^{-14}$ (m²)

$K_0 = 1.20 \times 10^{-7}$ (m)

$b = 6.38 \times 10^8$ (m⁻¹)

なお、透過率の実験式について、さらに精度を上げるために他の黒鉛材（例えば原研実験炉で使用が予定されている IG-11, PGX 等）に関して、各種の分子量の異なるガスを使用した透過率の測定を行う必要がある。

謝 辞

本検討を行うに当たり、このような機会を与えられた多目的高温ガス実験炉設計室長の宮本喜晟氏並びに透過率測定に関し種々の便宜をいたいた高温工学部高温構造工学研究室長の武藤康氏に深く感謝致します。またシール性能試験装置に用いる EG-NPL 黒鉛の試験体を提供された富士電機製造株の井出朗氏並びに実験炉の炉心内冷却材流量配分特性解析との関係で適切な助言をいたいた村上知行氏に深く感謝致します。

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) 文沢、他：“多目的高温ガス実験炉炉内シール性能の解析検討－1段及び多段シール要素の効果－”，JAERI-M 83-078（1983）
- (3) 文沢、他：“高温ガス炉用黒鉛材中のガス透過”，原子力学会「昭59年会」，B4（1984）
- (4) Cheng, Ping : "Advances in Heat Transfer", 14, 3. Academic Press (1978).
- (5) Carman, P.C. : "Flow of Gasses Through Porous Media", Butterworths, London (1956).
- (6) Cheng, Ping : "Advances in Heat Transfer", 14, 4. Academic Press (1978).
- (7) Advanced Reactor Safety Research Division Quarterly Progress Report, January 1 - March 31, NUREG/CR-2161 (BNL-NUREG-51402) (1981).
- (8) Union Carbide Corporation Technical Information : "UCAR" Graphite

- (3) 圧力や差圧が増加すると透過率は減少する。
- (4) 質量流量が増加すると透過率は減少する。これは慣性項の影響である。
- (5) 黒鉛材中の透過流れは、分子流れや慣性項の影響を受ける。両者を考慮して透過率を評価すれば、無次元標準偏差は 0.0145 ~ 0.0295 の範囲にあり、両者を考慮しない場合の約 30 % に減少する。
- (6) 分子流れや慣性項の影響を考慮すると、EG-NPL 黒鉛材の透過率 K_D の実験式は次式で与えられる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} \mu \nu K_0 \cdot \frac{1}{P_m} - \frac{B_0^2 b}{\mu A} \cdot G$$

ここで、 $B_0 = 9.03 \times 10^{-14}$ (m²)

$K_0 = 1.20 \times 10^{-7}$ (m)

$b = 6.38 \times 10^8$ (m⁻¹)

なお、透過率の実験式について、さらに精度を上げるために他の黒鉛材（例えば原研実験炉で使用が予定されている IG-11, PGX 等）に関して、各種の分子量の異なるガスを使用した透過率の測定を行う必要がある。

謝 辞

本検討を行うに当たり、このような機会を与えられた多目的高温ガス実験炉設計室長の宮本喜晟氏並びに透過率測定に関し種々の便宜をいただいた高温工学部高温構造工学研究室長の武藤康氏に深く感謝致します。またシール性能試験装置に用いる EG-NPL 黒鉛の試験体を提供された富士電機製造株の井出朗氏並びに実験炉の炉心内冷却材流量配分特性解析との関係で適切な助言をいただいた村上知行氏に深く感謝致します。

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) 文沢、他：“多目的高温ガス実験炉炉内シール性能の解析検討－1段及び多段シール要素の効果－”，JAERI-M 83-078（1983）
- (3) 文沢、他：“高温ガス炉用黒鉛材中のガス透過”，原子力学会「昭59年会」，B4（1984）
- (4) Cheng, Ping : "Advances in Heat Transfer", 14, 3. Academic Press (1978).
- (5) Carman, P.C. : "Flow of Gasses Through Porous Media", Butterworths, London (1956).
- (6) Cheng, Ping : "Advances in Heat Transfer", 14, 4. Academic Press (1978).
- (7) Advanced Reactor Safety Research Division Quarterly Progress Report, January 1 - March 31, NUREG/CR-2161 (BNL-NUREG-51402) (1981).
- (8) Union Carbide Corporation Technical Information : "UCAR" Graphite

- (3) 圧力や差圧が増加すると透過率は減少する。
- (4) 質量流量が増加すると透過率は減少する。これは慣性項の影響である。
- (5) 黒鉛材中の透過流れは、分子流れや慣性項の影響を受ける。両者を考慮して透過率を評価すれば、無次元標準偏差は 0.0145 ~ 0.0295 の範囲にあり、両者を考慮しない場合の約 30 % に減少する。
- (6) 分子流れや慣性項の影響を考慮すると、EG-NPL 黒鉛材の透過率 K_D の実験式は次式で与えられる。

$$K_D = B_0 + \frac{4}{3} \mu \nu K_0 \cdot \frac{1}{P_m} - \frac{B_0^2 b}{\mu A} \cdot G$$

ここで、 $B_0 = 9.03 \times 10^{-14}$ (m²)

$K_0 = 1.20 \times 10^{-7}$ (m)

$b = 6.38 \times 10^8$ (m⁻¹)

なお、透過率の実験式について、さらに精度を上げるために他の黒鉛材（例えば原研実験炉で使用が予定されている IG-11, PGX 等）に関して、各種の分子量の異なるガスを使用した透過率の測定を行う必要がある。

謝 辞

本検討を行うに当たり、このような機会を与えた多目的高温ガス実験炉設計室長の宮本喜晟氏並びに透過率測定に関し種々の便宜をいたいた高温工学部高温構造工学研究室長の武藤康氏に深く感謝致します。またシール性能試験装置に用いる EG-NPL 黒鉛の試験体を提供された富士電機製造株の井出朗氏並びに実験炉の炉心内冷却材流量配分特性解析との関係で適切な助言をいたいた村上知行氏に深く感謝致します。

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) 文沢、他：“多目的高温ガス実験炉炉内シール性能の解析検討－1段及び多段シール要素の効果－”，JAERI-M 83-078 (1983)
- (3) 文沢、他：“高温ガス炉用黒鉛材中のガス透過”，原子力学会「昭59年会」，B4 (1984)
- (4) Cheng, Ping : "Advances in Heat Transfer", 14, 3. Academic Press (1978).
- (5) Carman, P.C. : "Flow of Gasses Through Porous Media", Butterworths, London (1956).
- (6) Cheng, Ping : "Advances in Heat Transfer", 14, 4. Academic Press (1978).
- (7) Advanced Reactor Safety Research Division Quarterly Progress Report, January 1 - March 31, NUREG/CR-2161 (BNL-NUREG-51402) (1981).
- (8) Union Carbide Corporation Technical Information : "UCAR" Graphite

Properties, Grade PGX (1976).

- (9) 菊池, 岩本: "種々の黒鉛材料のガス透過率の測定", JAERI-M 5937 (1975).
- (10) Nightingale, R.E., "Nuclear Graphite", 177. Academic Press (1962).

Table 1 Permeability of EG-NPL graphite in several gases

Gas	Run	Test piece number	Mean permeability \bar{K}_D of the test piece (10^{-14} m^2)	Mean permeability \bar{K}_D of all test pieces (10^{-14} m^2)	Standard deviation nondimensional σ^- (10^{-14} m)	Standard deviation nondimensional σ^+ (10^{-14} m)	Molecular weight
He	1	1	9.81	9.68	0.528	0.0538	
	3	2	10.00	(0.098)	0.716	0.0714	4.003
	5	3	9.24		0.631	0.0683	
N_2	2	1	9.03	8.89	0.437	0.0484	
	4	2	9.25	(0.090)	0.417	0.0451	28.016
	6	3	8.39		0.397	0.0473	
Air	7	1	8.84	8.80	0.514	0.0582	
	9	2	9.11	(0.089)	0.376	0.0413	28.964
	11	3	8.45		0.360	0.0426	
Ar	8	1	8.56	8.51	0.579	0.0677	
	10	2	8.81	(0.086)	0.556	0.0631	39.944
	12	3	8.16		0.487	0.0596	

Remark: Mean permeability of all runs = $8.97 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.091 darcy)

Table 2 The effect of slip flow on permeability
parameters for EG-NPL graphite

Gas	Run No.	Test piece No.	\bar{K}_D (10^{-14} m ²)	*	**		
				σ^+	σ^+	B_0 (10^{-14} m ²)	B_1 (10^{-9} N)
He	1	1	9.81	0.0538	0.0191	9.32	0.272
	3	2	10.00	0.0714	0.0177	9.35	0.384
	5	3	9.24	0.0683	0.0189	8.64	0.331
N_2	2	1	9.03	0.0484	0.0421	8.82	0.122
	4	2	9.25	0.0451	0.0356	8.99	0.144
	6	3	8.39	0.0473	0.0335	8.11	0.157
Air	7	1	8.84	0.0582	0.0439	8.50	0.189
	9	2	9.11	0.0413	0.0336	8.89	0.123
	11	3	8.45	0.0426	0.0332	8.22	0.127
Ar	8	1	8.56	0.0677	0.0515	8.19	0.209
	10	2	8.81	0.0631	0.0510	8.48	0.182
	12	3	8.16	0.0596	0.0430	7.83	0.187

Remarks

$$* K_D = B_0 \quad (\text{Viscous flow})$$

$$** K_D = B_0 + \frac{B_1}{P_m} \quad (\text{Viscous flow and slip flow})$$

Table 3 The effect of inertial force on permeability parameters for EG-NPL graphite

Gas	Run No.	Test piece No.	\bar{K}_D (10^{-14} m^2)	*		**		***	
				σ^+	σ^+ (10^{13} m^{-2})	$1/B_0$ (10^{15} s/kg m^2)	B_2 (10^{-14} m^2)	σ^+	B_0 ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{s/kg}$)
He	1	1	9.81	0.0538	0.0533	1.02	1.56	0.0538	9.85
	3	2	10.00	0.0714	0.0693	0.998	1.43	0.0713	10.1
	5	3	9.24	0.0683	0.0664	1.08	3.06	0.0682	9.30
N ₂	2	1	9.03	0.0484	0.0308	1.04	6.62	0.0312	9.59
	4	2	9.25	0.0451	0.0323	1.03	5.54	0.0322	9.73
	6	3	8.39	0.0473	0.0430	1.16	3.81	0.0425	8.68
Air	7	1	8.84	0.0582	0.0489	1.08	5.52	0.0490	9.29
	9	2	9.11	0.0413	0.0289	1.05	5.11	0.0293	9.54
	11	3	8.45	0.0426	0.0313	1.13	5.42	0.0315	8.85
Ar	8	1	8.56	0.0677	0.0382	1.07	6.04	0.0389	9.32
	10	2	8.81	0.0631	0.0293	1.04	5.70	0.0302	9.60
	12	3	8.16	0.0596	0.0342	1.13	5.45	0.0346	8.81
Remarks	* $K_D = B_0$		(Viscous flow)						
	** $K_D = \frac{1}{\frac{B_0}{B_0} + B_2 G}$		(Viscous flow and inertial force)						
	*** $K_D = B_0 - B_0^2 B_2 G$		(Viscous flow and inertial force)						

Table 4 The effect of slip flow and inertial force on
permeability parameters for EG-NPL graphite

Gas	Run No.	Test Piece No.	\bar{K}_D (10^{-14} m^2)	*	**				
				σ^+	σ^+	B_0 (10^{-14} m^2)	$B_0^2 B_2$ ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{s/kg}$)	B_1 (10^{-9} N)	B_2 (10^{15} s/kg m^2)
He	1	1	9.81	0.0538	0.01868	9.384	3.172	2.727	3.602
	3	2	10.00	0.0714	0.01712	9.420	3.628	3.849	4.089
	5	3	9.24	0.0683	0.01781	8.730	4.717	3.318	6.189
N_2	2	1	9.03	0.0484	0.01889	9.370	5.539	1.259	6.309
	4	2	9.25	0.0451	0.01524	9.475	4.825	1.478	5.375
	6	3	8.39	0.0473	0.02552	8.406	2.949	1.601	4.173
Air	7	1	8.84	0.0582	0.02950	8.964	4.629	1.935	5.761
	9	2	9.11	0.0413	0.01574	9.327	4.347	1.273	4.997
	11	3	8.45	0.0426	0.01579	8.627	3.977	1.297	5.344
Ar	8	1	8.56	0.0677	0.02160	8.940	3.701	1.584	4.631
	10	2	8.81	0.0631	0.01616	9.284	3.845	1.285	4.461
	12	3	8.16	0.0596	0.01452	8.454	3.000	1.454	4.198
Remarks									
$* K_D = B_0$ (Viscous flow)									
$** K_D = B_0 + \frac{B_1}{P_m} - B_0^2 B_2 G$ (Viscous flow, slip flow and inertial force)									

Table 5 Permeability parameters for EG-NPL graphite

Gas	Run No.	Test piece No.	\bar{K}_D (M**2)	\bar{K}_D/D_a (DARCY)	B_0 (M**2)	b (1/m)	K_0 (m)	\bar{V} (M/S)	μ (PA·S)	
He	1	1	9.81E-14	9.94E-02	9.38E-14	4.68E+08	8.37E-08	1.25E+03	1.95E-05	
	3	2	1.00E-13	1.01E-01	9.42E-14	5.31E+08	1.18E-07	1.25E+03	1.95E-05	
	5	3	9.24E-14	9.36E-02	8.73E-14	8.08E+08	1.01E-07	1.26E+03	1.96E-05	
N ₂	2	1	9.03E-14	9.15E-02	9.37E-14	7.44E+08	1.13E-07	4.74E+02	1.77E-05	
	4	2	9.25E-14	9.37E-02	9.47E-14	6.38E+08	1.31E-07	4.76E+02	1.78E-05	
	6	3	8.39E-14	8.50E-02	8.41E-14	4.95E+08	1.42E-07	4.75E+02	1.78E-05	
Ar	7	1	8.84E-14	8.96E-02	8.96E-14	7.06E+08	1.69E-07	4.67E+02	1.84E-05	
	9	2	9.11E-14	9.23E-02	9.33E-14	6.13E+08	1.11E-07	4.66E+02	1.84E-05	
	11	3	8.45E-14	8.56E-02	8.63E-14	6.59E+08	1.12E-07	4.68E+02	1.85E-05	
Ar	8	1	8.56E-14	8.67E-02	8.94E-14	6.91E+08	1.34E-07	3.97E+02	2.24E-05	
	10	2	8.81E-14	8.93E-02	9.28E-14	6.66E+08	1.08E-07	3.97E+02	2.24E-05	
	12	3	8.16E-14	8.27E-02	8.45E-14	6.32E+08	1.21E-07	3.99E+02	2.26E-05	
\bar{K}_D^* (m ²)		MEAN	=	8.97E-14	SD	=	5.33E-15	NSD	=	5.95E-02
B_0 (m ²)		MEAN	=	9.03E-14	SD	=	3.80E-15	NSD	=	4.20E-02
b (1/m)		MEAN	=	6.38E+08	SD	=	9.59E+07	NSD	=	1.50E-01
K_0 (m)		MEAN	=	1.20E-07	SD	=	2.08E-08	NSD	=	1.73E-01
Remark:										$* K_D = B_0 + \frac{4}{3} \bar{V} K_0 \frac{1}{P_m} - \frac{B_0^2 b}{\mu A} G$

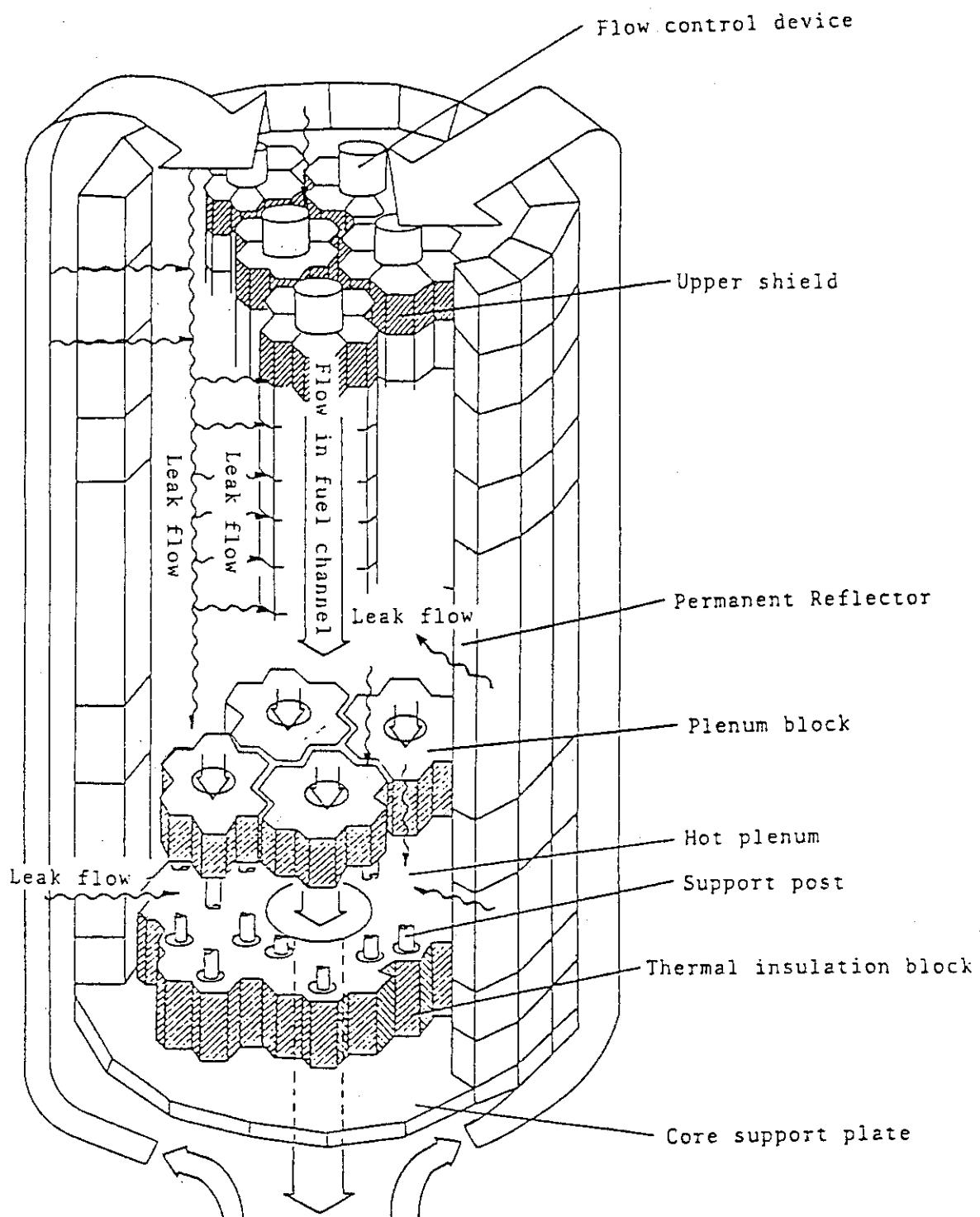


Fig. 1 Coolant flow paths in reactor core

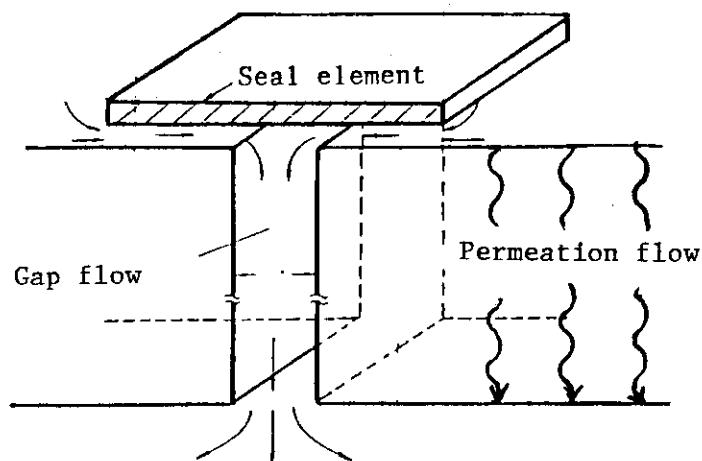


Fig. 2 Concept of leak flow path

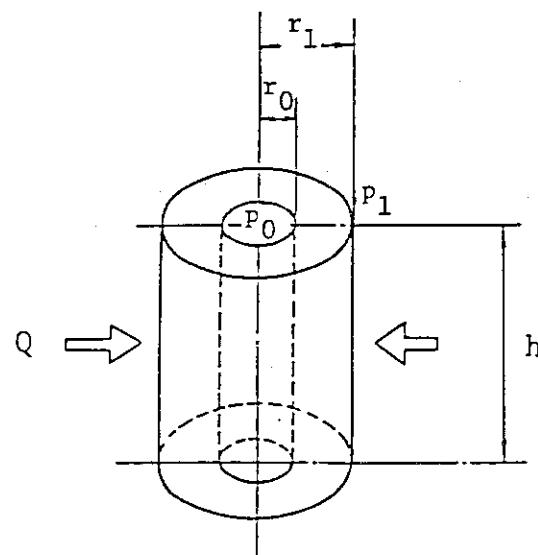


Fig. 3 Cylindrical test piece

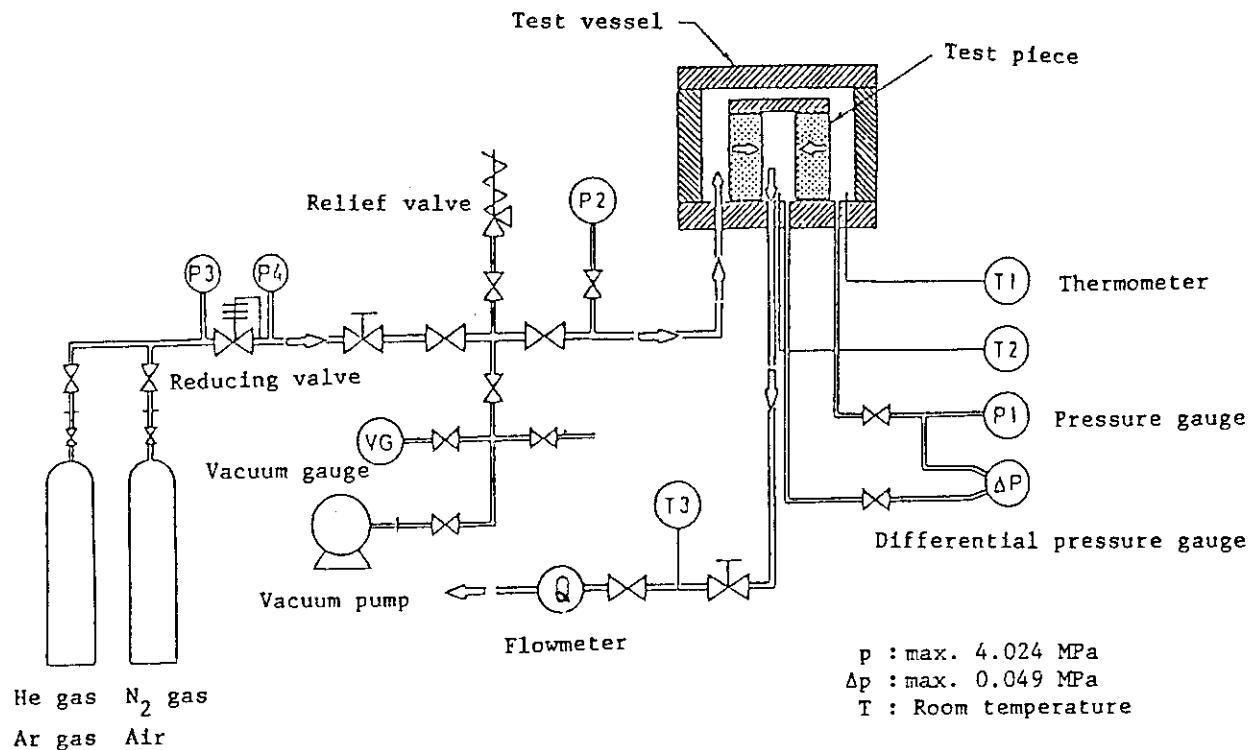


Fig. 4 Experimental apparatus

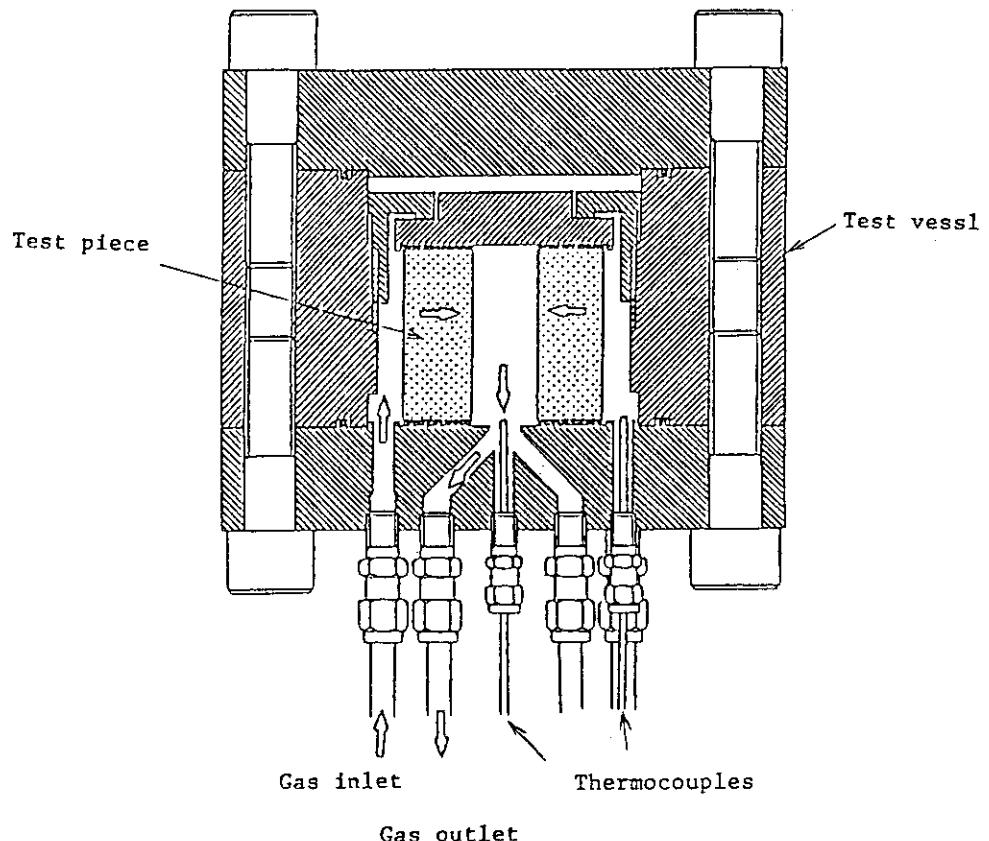


Fig. 5 Cross-sectional view of test section

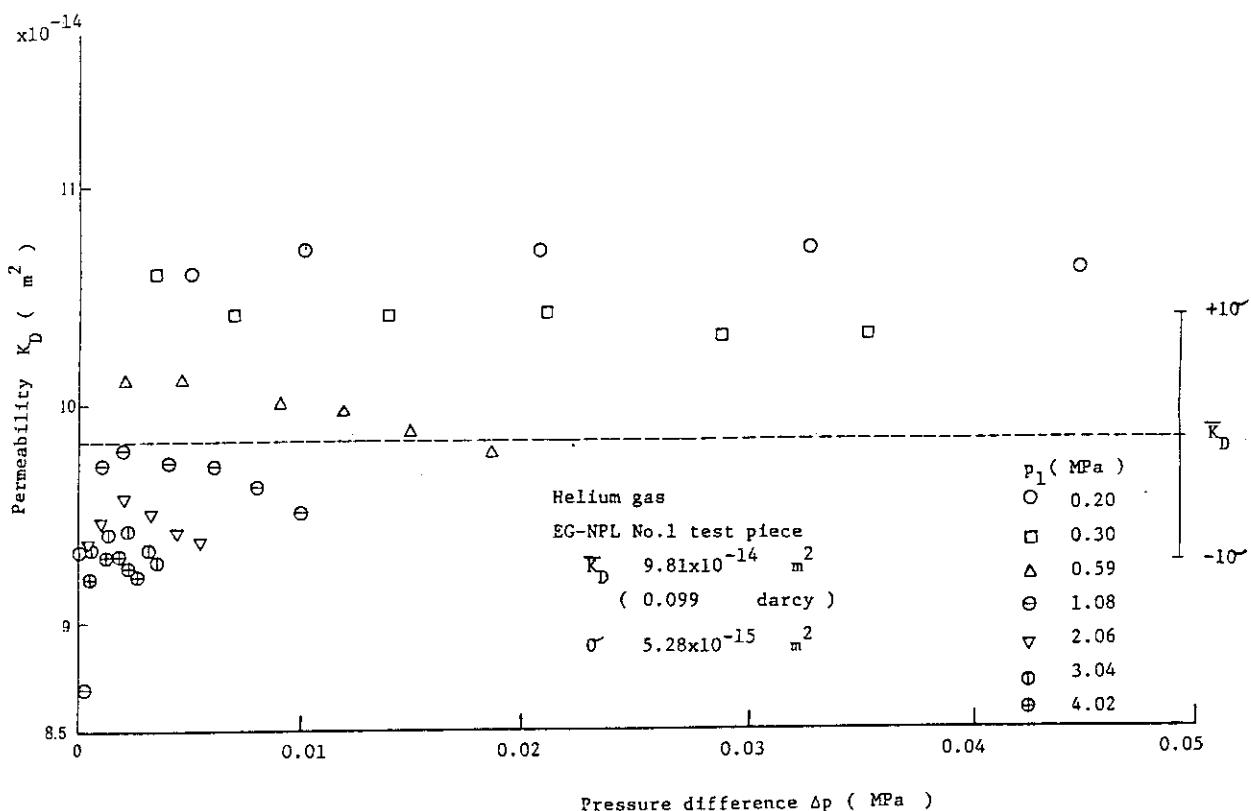


Fig. 6 Permeability vs. pressure difference in Run 1

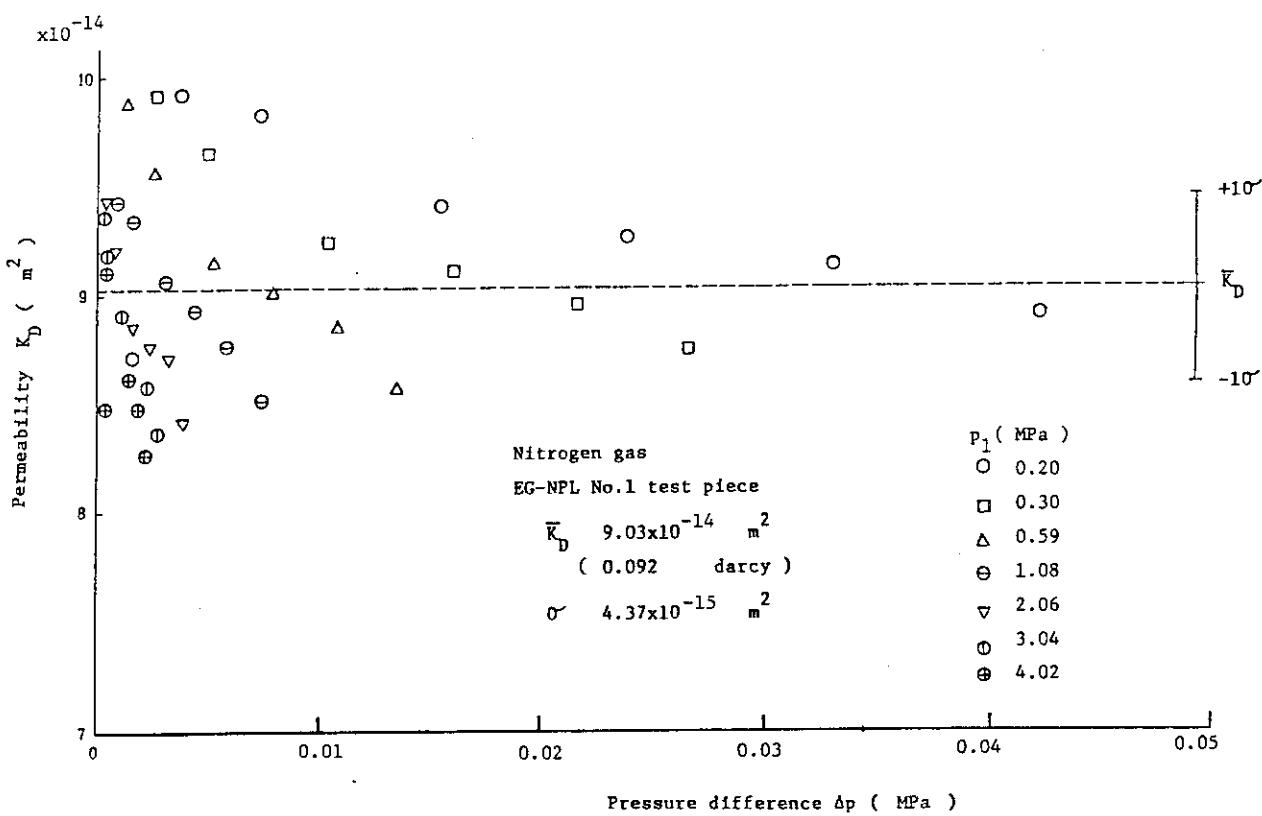


Fig. 7 Permeability vs. pressure difference in Run 2

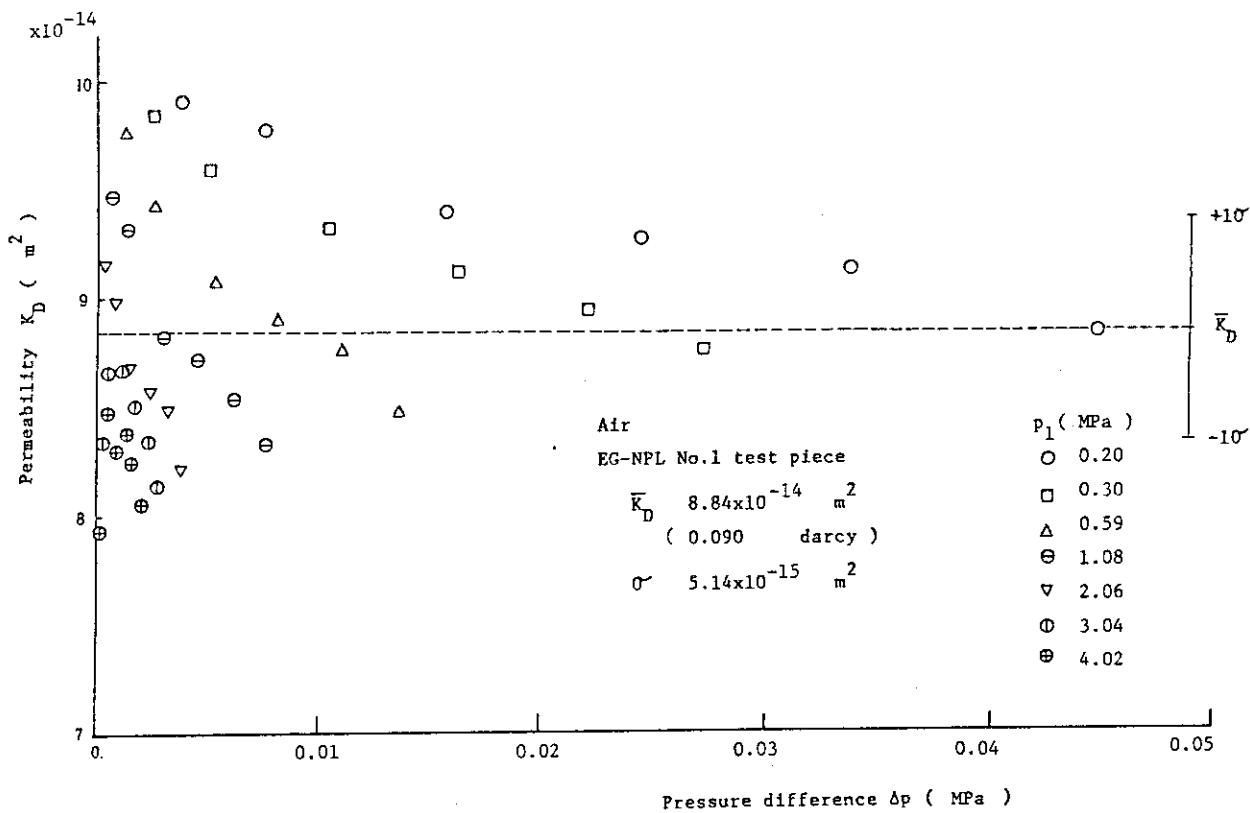


Fig. 8 Permeability vs. pressure difference in Run 7

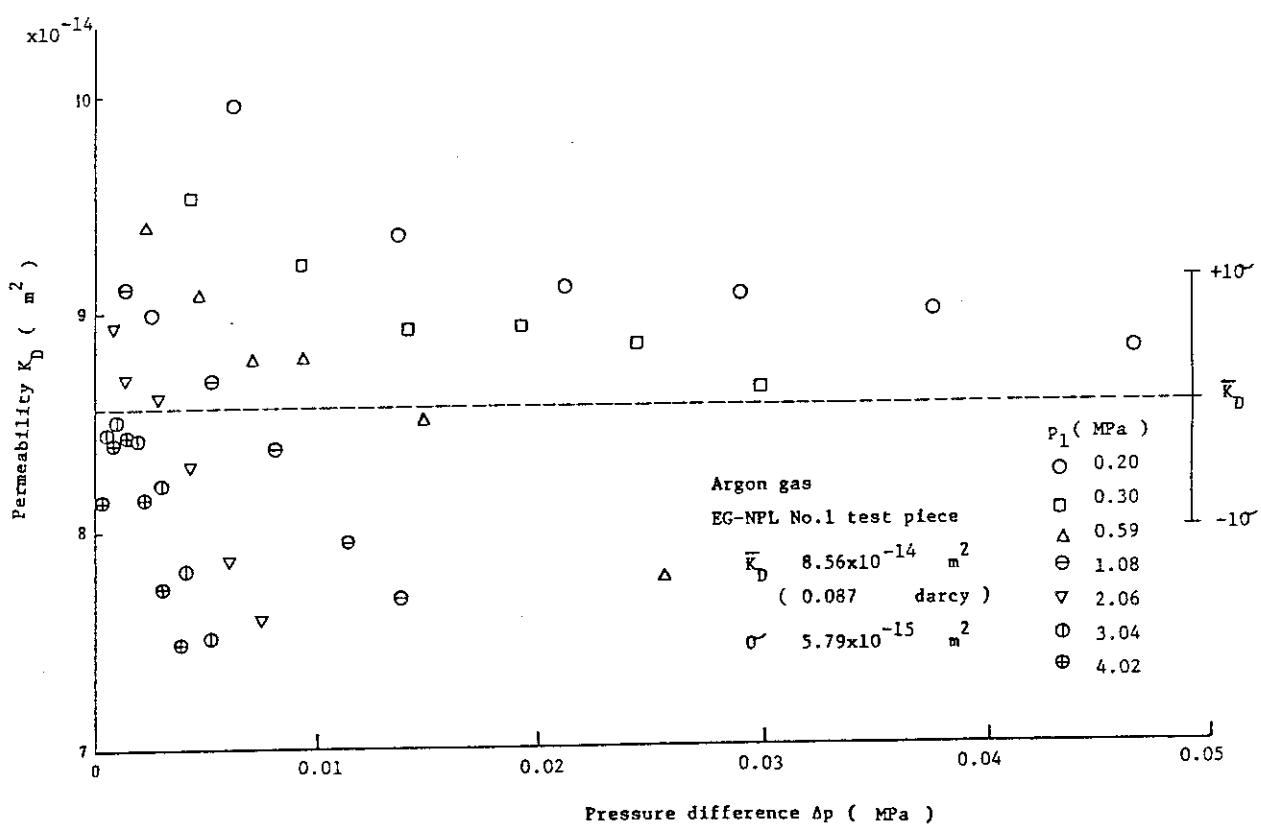


Fig. 9 Permeability vs. pressure difference in Run 8

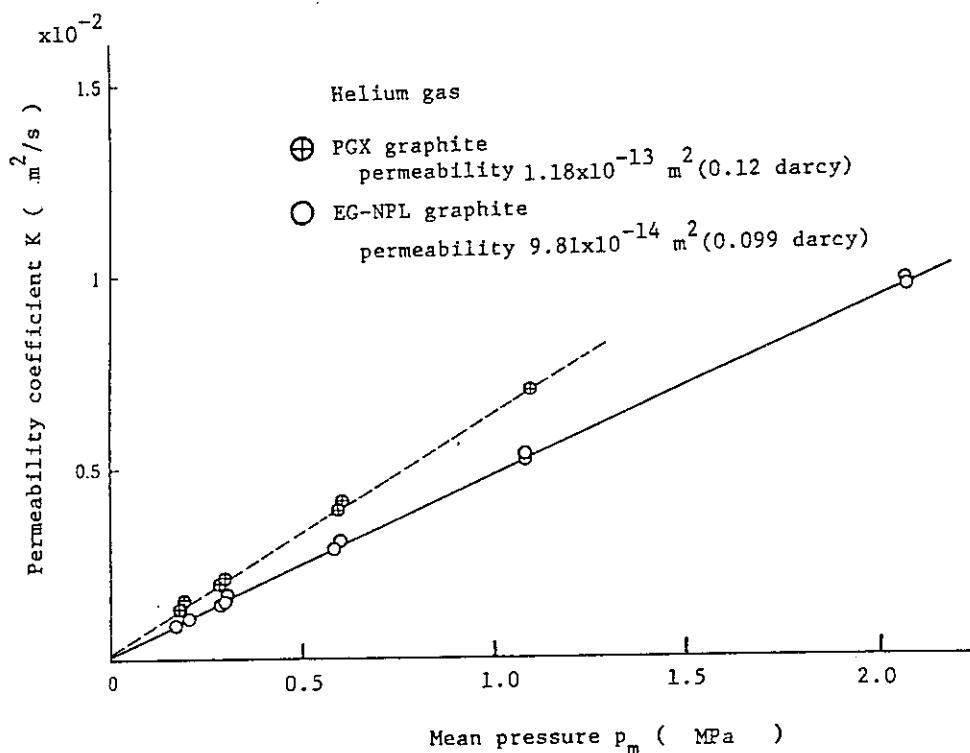


Fig. 10 Permeability coefficient vs. mean pressure in Run 1

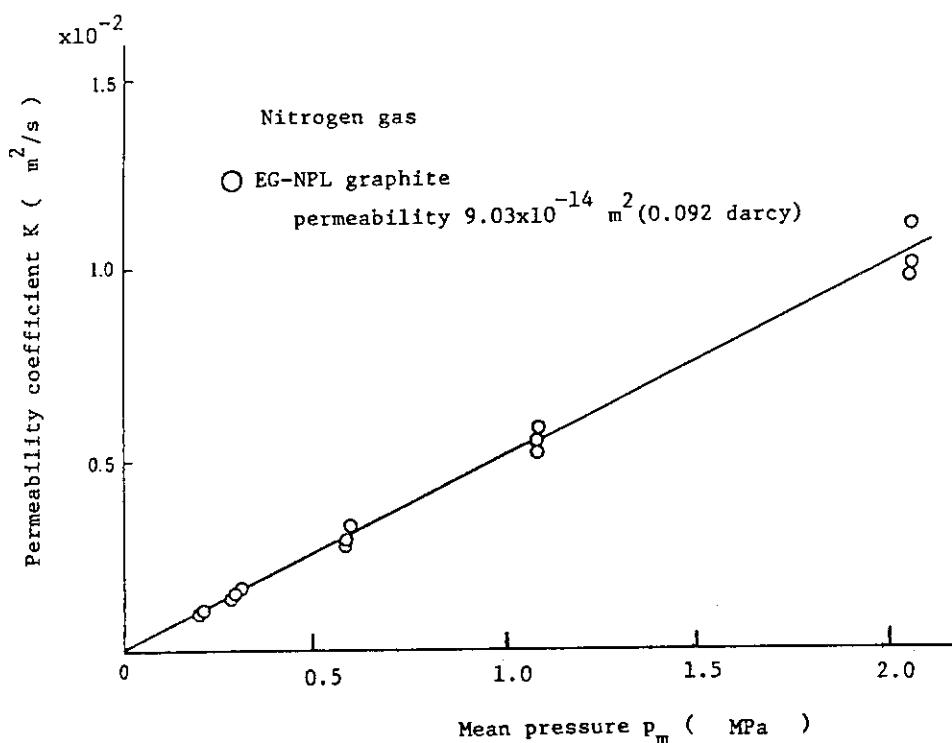


Fig. 11 Permeability coefficient vs. mean pressure in Run 2

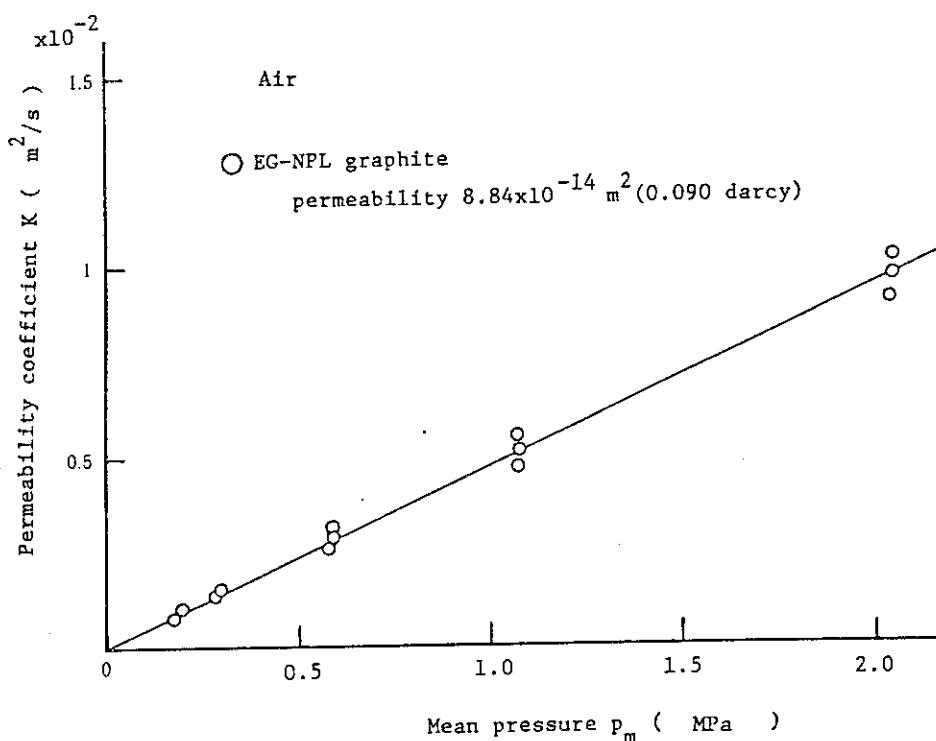


Fig. 12 Permeability coefficient vs. mean pressure in Run 7

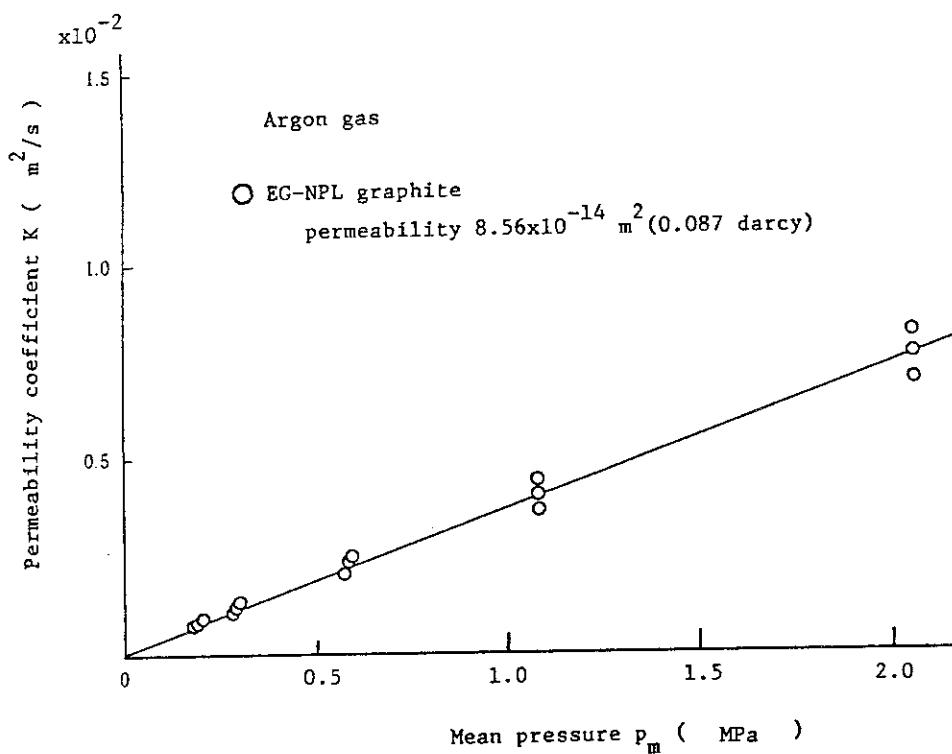


Fig. 13 Permeability coefficient vs. mean pressure in Run 8

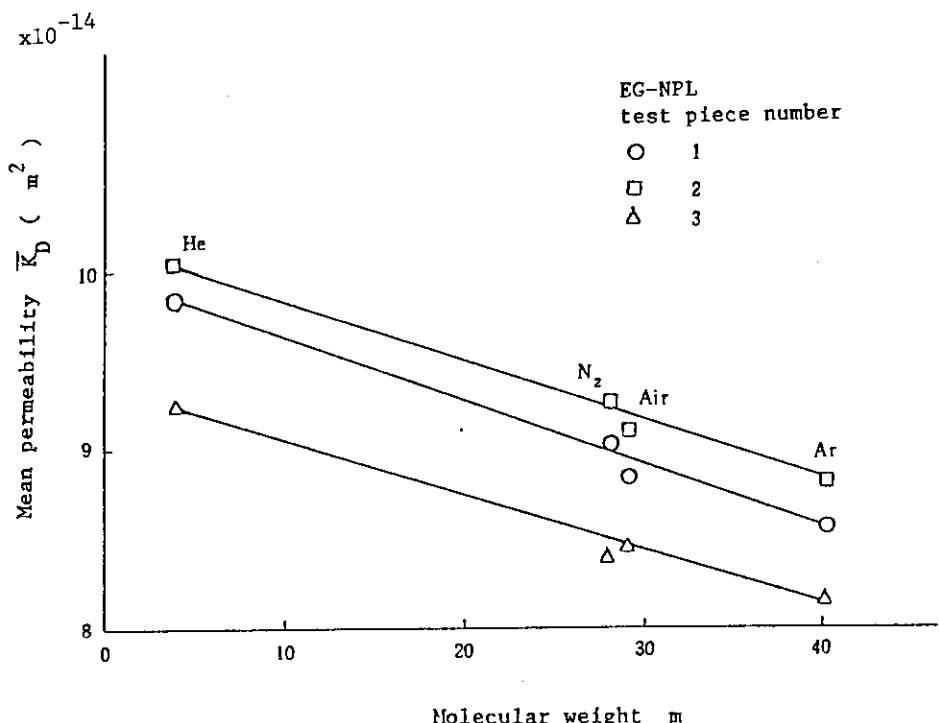


Fig. 14 Mean permeability vs. molecular weight

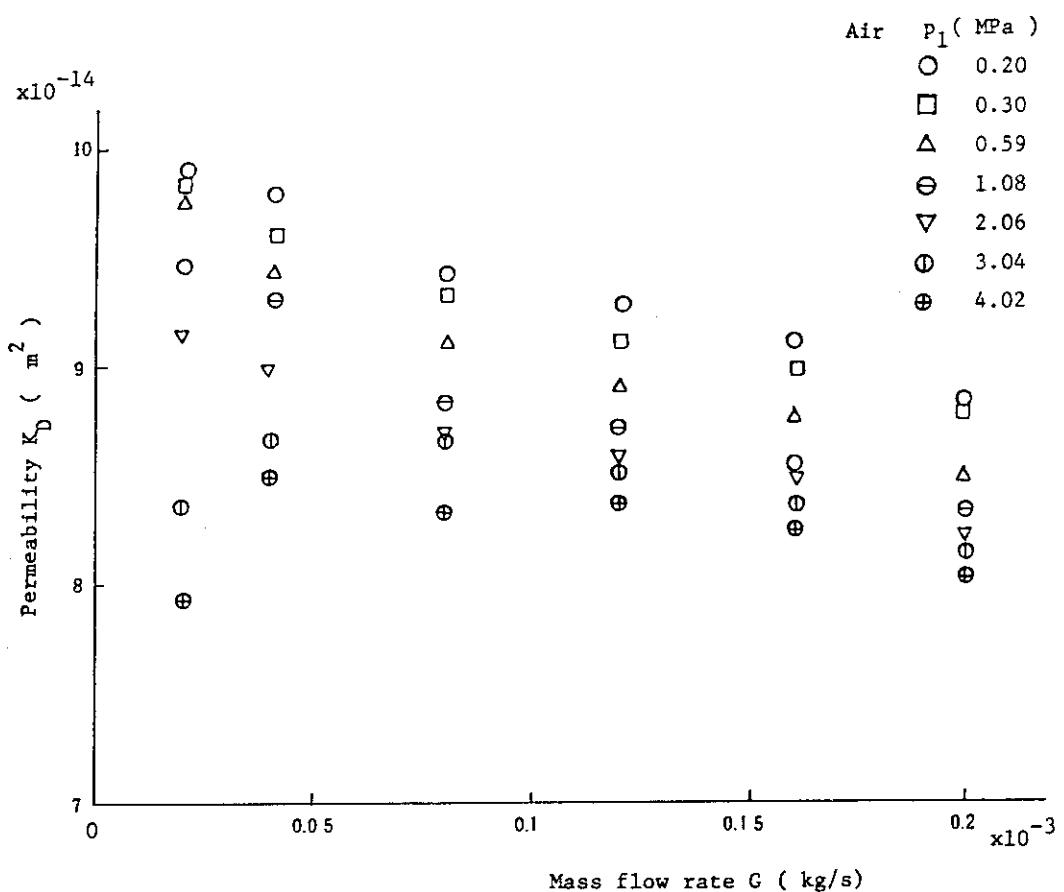


Fig. 15 Permeability vs. mass flow rate in Run 7

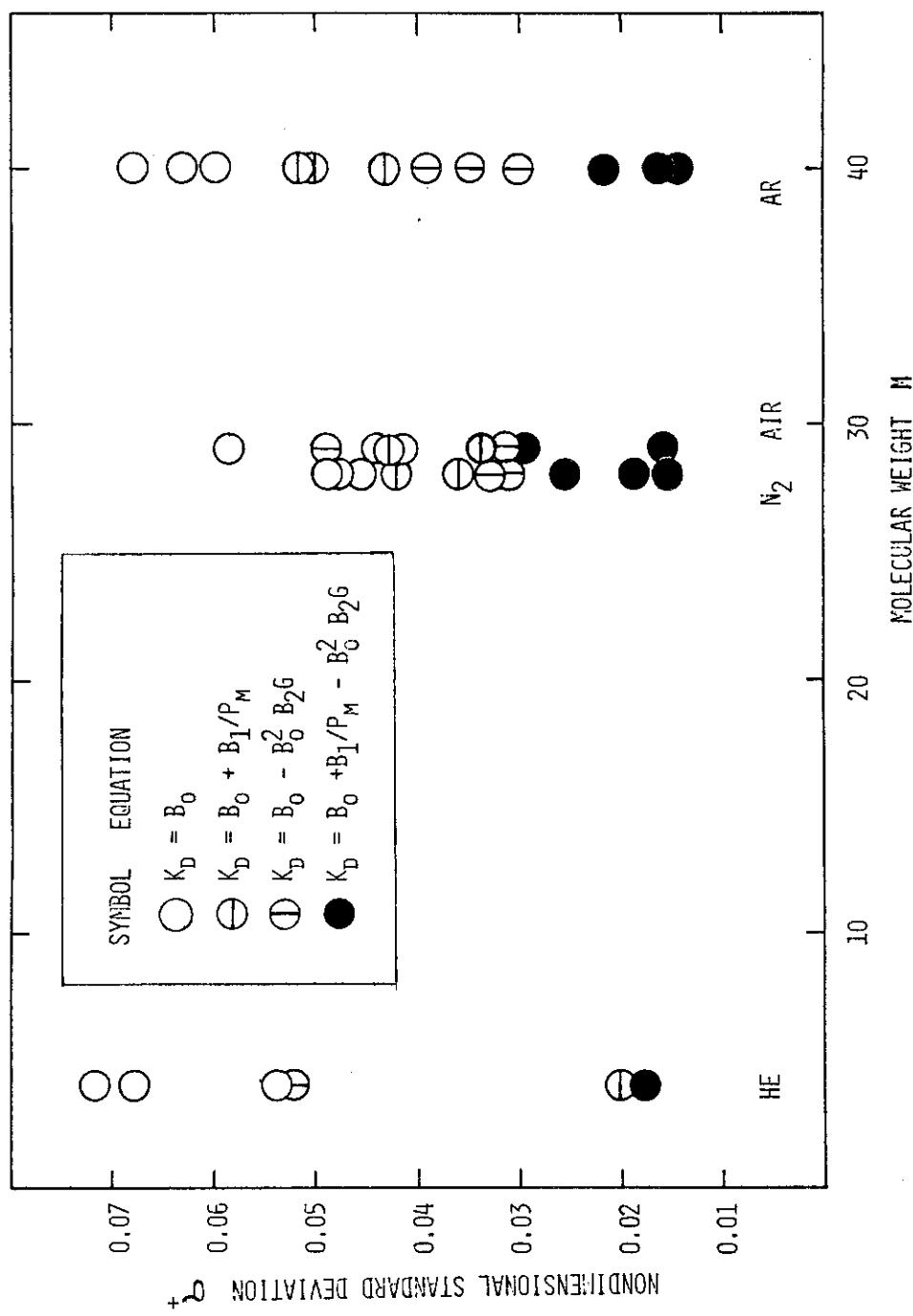


Fig. 16 NONDIMENSIONAL STANDARD DEVIATION OF PERMEABILITY VS. MOLECULAR WEIGHT

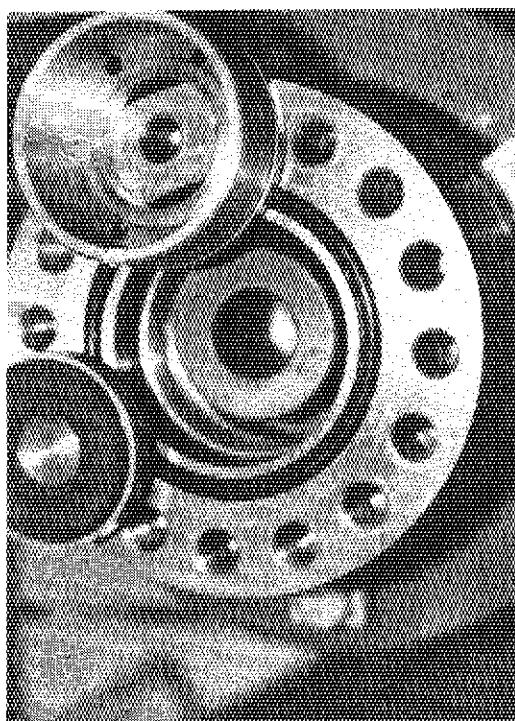


Photo. 1 Experimental apparatus

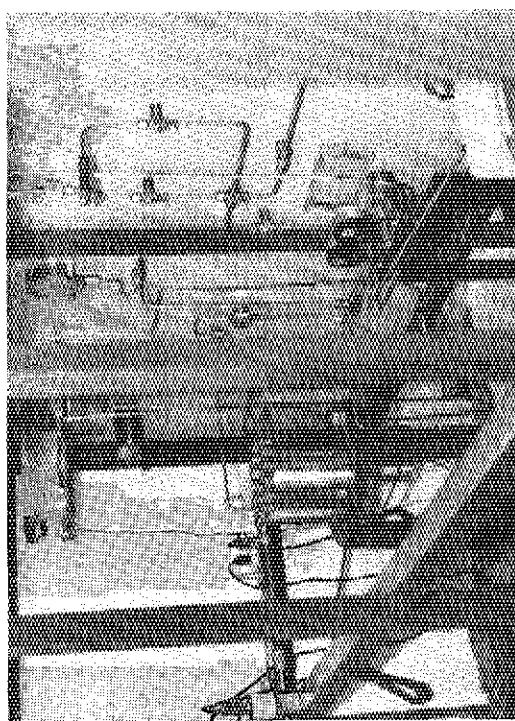


Photo. 2 Controlling board of apparatus

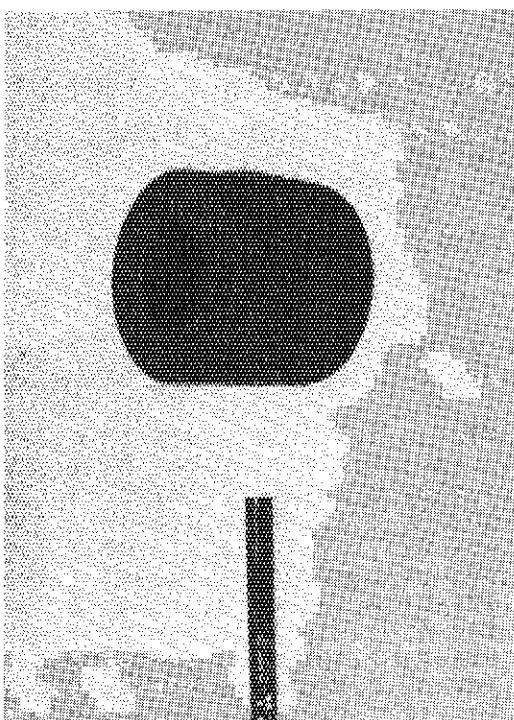


Photo. 3 Test vessel

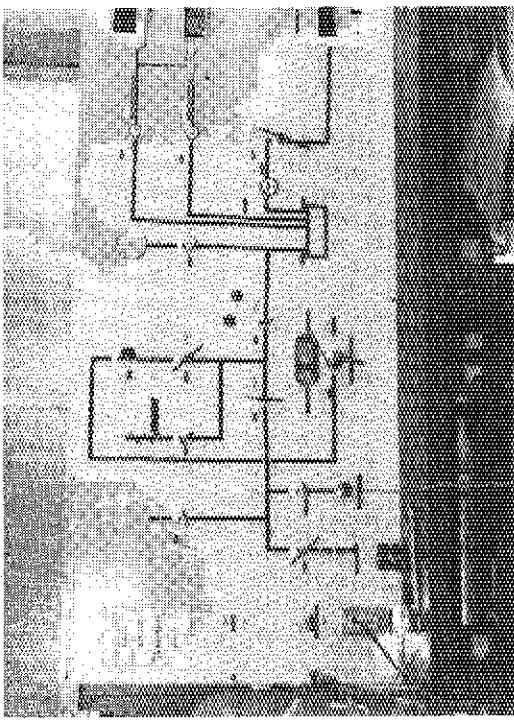


Photo. 4 EG-NPL graphite test piece

付録 1 透過率測定データ

本試験により得られたデータをテストランごとにそれぞれ Table A 1.1 ~ A 1.12 に示す。
Table の測定条件は Table 2 に示す。

Table A1.1 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN1

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.97E-01	4.98E-03	1.22E-05	3.92E-06	1.06E-13	1.07E-01	1.07E-03
2	1.99E-01	1.94E-01	1.00E-02	2.50E-05	7.89E-06	1.07E-13	1.08E-01	1.07E-03
3	1.99E-01	1.89E-01	2.06E-02	5.13E-05	1.58E-05	1.07E-13	1.09E-01	1.04E-03
4	1.99E-01	1.83E-01	3.25E-02	8.05E-05	2.39E-05	1.07E-13	1.08E-01	1.00E-03
5	1.99E-01	1.77E-01	4.47E-02	1.11E-04	3.18E-05	1.06E-13	1.08E-01	9.65E-04
6	1.99E-01	1.71E-01	5.68E-02	1.40E-04	3.87E-05	1.06E-13	1.07E-01	9.26E-04
7	2.97E-01	2.95E-01	3.35E-03	8.26E-06	3.96E-06	1.06E-13	1.07E-01	1.60E-03
8	2.97E-01	2.93E-01	6.88E-03	1.66E-05	7.93E-06	1.04E-13	1.05E-01	1.56E-03
9	2.97E-01	2.90E-01	1.39E-02	3.39E-05	1.59E-05	1.04E-13	1.06E-01	1.55E-03
10	2.98E-01	2.87E-01	2.10E-02	5.08E-05	2.37E-05	1.04E-13	1.06E-01	1.53E-03
11	2.98E-01	2.84E-01	2.86E-02	6.87E-05	3.17E-05	1.03E-13	1.05E-01	1.51E-03
12	2.96E-01	2.79E-01	3.51E-02	8.39E-05	3.80E-05	1.03E-13	1.04E-01	1.47E-03
13	5.91E-01	5.89E-01	2.11E-03	4.97E-06	4.76E-06	1.01E-13	1.03E-01	3.06E-03
14	5.89E-01	5.87E-01	4.63E-03	1.08E-05	1.03E-05	1.01E-13	1.02E-01	3.03E-03
15	5.91E-01	5.87E-01	8.75E-03	2.03E-05	1.93E-05	1.00E-13	1.01E-01	3.00E-03
16	5.88E-01	5.82E-01	1.19E-02	2.75E-05	2.60E-05	9.97E-14	1.01E-01	2.97E-03
17	5.90E-01	5.83E-01	1.43E-02	3.27E-05	3.10E-05	9.87E-14	1.00E-01	2.95E-03
18	5.91E-01	5.82E-01	1.84E-02	4.17E-05	3.94E-05	9.76E-14	9.89E-02	2.91E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	9.99E-04	2.25E-06	3.96E-06	9.72E-14	9.85E-02	5.38E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	2.00E-03	4.56E-06	8.01E-06	9.79E-14	9.92E-02	5.42E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	3.99E-03	9.02E-06	1.58E-05	9.73E-14	9.86E-02	5.38E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	5.89E-03	1.33E-05	2.32E-05	9.71E-14	9.83E-02	5.35E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	7.88E-03	1.76E-05	3.08E-05	9.62E-14	9.75E-02	5.31E-03
24	1.08E+00	1.08E+00	1.00E-02	2.21E-05	3.87E-05	9.53E-14	9.65E-02	5.26E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	5.46E-04	1.18E-06	3.96E-06	9.35E-14	9.47E-02	9.86E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	1.07E-03	2.35E-06	7.89E-06	9.46E-14	9.58E-02	9.98E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	2.11E-03	4.70E-06	1.57E-05	9.57E-14	9.70E-02	1.01E-02
28	2.06E+00	2.06E+00	3.25E-03	7.18E-06	2.40E-05	9.50E-14	9.63E-02	1.00E-02
29	2.06E+00	2.06E+00	4.32E-03	9.46E-06	3.16E-05	9.42E-14	9.54E-02	9.94E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	5.31E-03	1.15E-05	3.86E-05	9.36E-14	9.48E-02	9.87E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	3.74E-04	8.11E-07	4.00E-06	9.33E-14	9.46E-02	1.45E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	7.42E-04	1.61E-06	7.97E-06	9.36E-14	9.48E-02	1.46E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.48E-03	3.23E-06	1.59E-05	9.40E-14	9.53E-02	1.47E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	2.20E-03	4.82E-06	2.38E-05	9.42E-14	9.55E-02	1.47E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	2.95E-03	6.40E-06	3.16E-05	9.34E-14	9.47E-02	1.46E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	3.55E-03	7.65E-06	3.78E-05	9.28E-14	9.40E-02	1.45E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	3.00E-04	6.07E-07	3.96E-06	8.69E-14	8.81E-02	1.79E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	5.70E-04	1.22E-06	7.97E-06	9.20E-14	9.32E-02	1.90E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	1.12E-03	2.42E-06	1.59E-05	9.30E-14	9.43E-02	1.92E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	1.69E-03	3.64E-06	2.38E-05	9.30E-14	9.43E-02	1.92E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	2.25E-03	4.84E-06	3.16E-05	9.26E-14	9.38E-02	1.91E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	2.70E-03	5.79E-06	3.78E-05	9.21E-14	9.33E-02	1.90E-02

$$KDM (M**2) = 9.81E-14$$

$$SD (M**2) = 5.28E-15$$

$$NSD (---) = 5.38E-02$$

Table A1.2 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN2

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	2.00E-01	1.99E-01	3.49E-03	8.84E-06	1.99E-05	9.93E-14	1.01E-01	1.11E-03
2	1.99E-01	1.96E-01	7.10E-03	1.78E-05	3.95E-05	9.83E-14	9.96E-02	1.08E-03
3	1.99E-01	1.91E-01	1.52E-02	3.66E-05	7.93E-05	9.41E-14	9.54E-02	1.01E-03
4	2.00E-01	1.88E-01	2.36E-02	5.57E-05	1.19E-04	9.26E-14	9.38E-02	9.80E-04
5	1.99E-01	1.83E-01	3.28E-02	7.64E-05	1.59E-04	9.13E-14	9.25E-02	9.41E-04
6	1.98E-01	1.77E-01	4.22E-02	9.60E-05	1.93E-04	8.91E-14	9.03E-02	8.89E-04
7	2.96E-01	2.95E-01	2.35E-03	5.95E-06	1.99E-05	9.92E-14	1.01E-01	1.65E-03
8	2.97E-01	2.94E-01	4.80E-03	1.18E-05	3.95E-05	9.65E-14	9.78E-02	1.60E-03
9	2.95E-01	2.89E-01	1.02E-02	2.41E-05	7.93E-05	9.23E-14	9.35E-02	1.51E-03
10	2.95E-01	2.87E-01	1.57E-02	3.64E-05	1.19E-04	9.10E-14	9.22E-02	1.47E-03
11	2.97E-01	2.86E-01	2.13E-02	4.87E-05	1.58E-04	8.95E-14	9.07E-02	1.44E-03
12	2.95E-01	2.82E-01	2.64E-02	5.90E-05	1.88E-04	8.76E-14	8.88E-02	1.39E-03
13	5.89E-01	5.88E-01	1.16E-03	2.92E-06	1.95E-05	9.88E-14	1.00E-01	3.27E-03
14	5.88E-01	5.86E-01	2.42E-03	5.91E-06	3.93E-05	9.56E-14	9.69E-02	3.16E-03
15	5.89E-01	5.87E-01	5.11E-03	1.19E-05	7.93E-05	9.14E-14	9.26E-02	3.02E-03
16	5.88E-01	5.84E-01	7.78E-03	1.79E-05	1.19E-04	9.01E-14	9.13E-02	2.96E-03
17	5.88E-01	5.83E-01	1.06E-02	2.40E-05	1.58E-04	8.85E-14	8.96E-02	2.90E-03
18	5.88E-01	5.81E-01	1.34E-02	2.92E-05	1.93E-04	8.57E-14	8.68E-02	2.81E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	6.68E-04	1.61E-06	1.97E-05	9.43E-14	9.55E-02	5.73E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.35E-03	3.23E-06	3.95E-05	9.34E-14	9.46E-02	5.67E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	2.79E-03	6.46E-06	7.89E-05	9.06E-14	9.18E-02	5.50E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	4.27E-03	9.73E-06	1.19E-04	8.91E-14	9.03E-02	5.40E-03
23	1.08E+00	1.07E+00	5.80E-03	1.30E-05	1.58E-04	8.76E-14	8.88E-02	5.31E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	7.23E-03	1.57E-05	1.91E-04	8.52E-14	8.63E-02	5.15E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	3.49E-04	8.44E-07	1.97E-05	9.46E-14	9.59E-02	1.10E-02
26	2.06E+00	2.06E+00	7.17E-04	1.69E-06	3.93E-05	9.20E-14	9.32E-02	1.07E-02
27	2.06E+00	2.06E+00	1.50E-03	3.39E-06	7.91E-05	8.85E-14	8.96E-02	1.03E-02
28	2.06E+00	2.06E+00	2.27E-03	5.08E-06	1.19E-04	8.75E-14	8.87E-02	1.01E-02
29	2.06E+00	2.05E+00	3.06E-03	6.80E-06	1.58E-04	8.70E-14	8.82E-02	1.01E-02
30	2.05E+00	2.05E+00	3.83E-03	8.23E-06	1.92E-04	8.41E-14	8.52E-02	9.73E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	2.39E-04	5.73E-07	1.97E-05	9.38E-14	9.50E-02	1.60E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	4.84E-04	1.14E-06	3.91E-05	9.19E-14	9.31E-02	1.57E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.01E-03	2.30E-06	7.91E-05	8.90E-14	9.02E-02	1.52E-02
34	3.04E+00	3.03E+00	1.55E-03	3.45E-06	1.19E-04	8.71E-14	8.83E-02	1.49E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	2.10E-03	4.61E-06	1.59E-04	8.58E-14	8.69E-02	1.47E-02
36	3.04E+00	3.03E+00	2.59E-03	5.54E-06	1.90E-04	8.36E-14	8.47E-02	1.43E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	2.02E-04	4.37E-07	1.99E-05	8.47E-14	8.58E-02	1.92E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	3.74E-04	8.73E-07	3.97E-05	9.14E-14	9.26E-02	2.07E-02
39	4.01E+00	4.01E+00	7.66E-04	1.74E-06	7.93E-05	8.91E-14	9.03E-02	2.02E-02
40	4.01E+00	4.01E+00	1.18E-03	2.60E-06	1.18E-04	8.61E-14	8.72E-02	1.95E-02
41	4.01E+00	4.01E+00	1.61E-03	3.48E-06	1.58E-04	8.45E-14	8.56E-02	1.91E-02
42	4.01E+00	4.01E+00	1.98E-03	4.17E-06	1.90E-04	8.25E-14	8.36E-02	1.87E-02

KDM (M**2) = 9.03E-14

SD (M**2) = 4.37E-15

NSD (----) = 4.84E-02

Table Al.3 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN3

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.97E-01	4.60E-03	1.21E-05	3.86E-06	1.13E-13	1.15E-01	1.14E-03
2	1.99E-01	1.95E-01	9.51E-03	2.50E-05	7.87E-06	1.13E-13	1.15E-01	1.13E-03
3	1.98E-01	1.89E-01	1.95E-02	5.14E-05	1.57E-05	1.14E-13	1.15E-01	1.10E-03
4	2.00E-01	1.85E-01	3.01E-02	7.89E-05	2.37E-05	1.13E-13	1.14E-01	1.07E-03
5	1.98E-01	1.77E-01	4.20E-02	1.10E-04	3.17E-05	1.13E-13	1.15E-01	1.03E-03
6	1.99E-01	1.73E-01	5.35E-02	1.40E-04	3.92E-05	1.13E-13	1.14E-01	9.98E-04
7	2.98E-01	2.97E-01	3.14E-03	7.96E-06	3.83E-06	1.09E-13	1.11E-01	1.66E-03
8	2.96E-01	2.93E-01	6.52E-03	1.64E-05	7.79E-06	1.08E-13	1.10E-01	1.63E-03
9	2.95E-01	2.89E-01	1.35E-02	3.39E-05	1.58E-05	1.08E-13	1.10E-01	1.60E-03
10	2.96E-01	2.86E-01	2.05E-02	5.13E-05	2.38E-05	1.08E-13	1.09E-01	1.58E-03
11	2.97E-01	2.84E-01	2.79E-02	6.91E-05	3.17E-05	1.07E-13	1.08E-01	1.55E-03
12	2.96E-01	2.79E-01	3.50E-02	8.59E-05	3.88E-05	1.06E-13	1.07E-01	1.51E-03
13	5.91E-01	5.90E-01	1.74E-03	4.13E-06	3.94E-06	1.02E-13	1.04E-01	3.09E-03
14	5.93E-01	5.91E-01	3.46E-03	8.19E-06	7.83E-06	1.02E-13	1.03E-01	3.09E-03
15	5.92E-01	5.88E-01	7.05E-03	1.67E-05	1.59E-05	1.02E-13	1.03E-01	3.07E-03
16	5.92E-01	5.86E-01	1.06E-02	2.50E-05	2.37E-05	1.02E-13	1.03E-01	3.05E-03
17	5.91E-01	5.84E-01	1.43E-02	3.35E-05	3.16E-05	1.01E-13	1.02E-01	3.01E-03
18	5.91E-01	5.82E-01	1.76E-02	4.08E-05	3.85E-05	9.99E-14	1.01E-01	2.98E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	9.68E-04	2.21E-06	3.86E-06	9.82E-14	9.95E-02	5.44E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.96E-03	4.50E-06	7.87E-06	9.88E-14	1.00E-01	5.47E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	3.94E-03	9.01E-06	1.58E-05	9.87E-14	1.00E-01	5.46E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	5.96E-03	1.36E-05	2.38E-05	9.84E-14	9.97E-02	5.44E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	7.99E-03	1.81E-05	3.17E-05	9.78E-14	9.91E-02	5.41E-03
24	1.08E+00	1.08E+00	9.83E-03	2.21E-05	3.85E-05	9.67E-14	9.80E-02	5.33E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	5.15E-04	1.16E-06	3.86E-06	9.69E-14	9.82E-02	1.02E-02
26	2.06E+00	2.06E+00	1.05E-03	2.36E-06	7.87E-06	9.63E-14	9.76E-02	1.02E-02
27	2.06E+00	2.06E+00	2.11E-03	4.72E-06	1.58E-05	9.65E-14	9.77E-02	1.02E-02
28	2.06E+00	2.06E+00	3.20E-03	7.11E-06	2.37E-05	9.58E-14	9.71E-02	1.01E-02
29	2.06E+00	2.06E+00	4.30E-03	9.51E-06	3.17E-05	9.52E-14	9.65E-02	1.00E-02
30	2.06E+00	2.06E+00	5.25E-03	1.15E-05	3.84E-05	9.45E-14	9.57E-02	9.96E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	3.68E-04	7.85E-07	3.86E-06	9.20E-14	9.32E-02	1.43E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	7.23E-04	1.60E-06	7.87E-06	9.52E-14	9.65E-02	1.48E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.45E-03	3.20E-06	1.58E-05	9.53E-14	9.66E-02	1.49E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	2.19E-03	4.81E-06	2.37E-05	9.44E-14	9.57E-02	1.47E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	2.94E-03	6.42E-06	3.16E-05	9.40E-14	9.53E-02	1.46E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	3.63E-03	7.86E-06	3.87E-05	9.34E-14	9.46E-02	1.45E-02
37	4.03E+00	4.02E+00	2.94E-04	6.00E-07	3.90E-06	8.79E-14	8.90E-02	1.81E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	5.76E-04	1.22E-06	7.91E-06	9.10E-14	9.21E-02	1.87E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	1.12E-03	2.44E-06	1.58E-05	9.41E-14	9.53E-02	1.94E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	1.68E-03	3.65E-06	2.37E-05	9.37E-14	9.49E-02	1.93E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	2.24E-03	4.87E-06	3.16E-05	9.35E-14	9.48E-02	1.93E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	2.73E-03	5.91E-06	3.84E-05	9.32E-14	9.44E-02	1.92E-02

KDM (M**2) = 1.00E-13

SD (M**2) = 7.16E-15

NSD (----) = 7.14E-02

Table A1.4 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN4

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.98E-01	3.44E-03	8.81E-06	1.97E-05	1.00E-13	1.02E-01	1.12E-03
2	1.99E-01	1.96E-01	7.01E-03	1.80E-05	3.97E-05	1.00E-13	1.02E-01	1.10E-03
3	1.99E-01	1.91E-01	1.47E-02	3.65E-05	7.89E-05	9.74E-14	9.87E-02	1.05E-03
4	1.99E-01	1.87E-01	2.28E-02	5.61E-05	1.19E-04	9.63E-14	9.76E-02	1.01E-03
5	1.99E-01	1.84E-01	3.13E-02	7.64E-05	1.59E-04	9.57E-14	9.69E-02	9.88E-04
6	1.98E-01	1.78E-01	4.06E-02	9.68E-05	1.94E-04	9.35E-14	9.47E-02	9.35E-04
7	2.96E-01	2.95E-01	2.30E-03	5.88E-06	1.95E-05	1.00E-13	1.02E-01	1.66E-03
8	2.95E-01	2.93E-01	4.78E-03	1.20E-05	3.95E-05	9.84E-14	9.97E-02	1.62E-03
9	2.95E-01	2.90E-01	1.01E-02	2.42E-05	7.91E-05	9.45E-14	9.57E-02	1.54E-03
10	2.95E-01	2.87E-01	1.55E-02	3.67E-05	1.19E-04	9.33E-14	9.45E-02	1.50E-03
11	2.95E-01	2.84E-01	2.10E-02	4.95E-05	1.58E-04	9.23E-14	9.35E-02	1.47E-03
12	2.95E-01	2.82E-01	2.65E-02	6.06E-05	1.92E-04	9.00E-14	9.12E-02	1.43E-03
13	5.89E-01	5.89E-01	1.18E-03	2.95E-06	1.95E-05	9.83E-14	9.96E-02	3.25E-03
14	5.88E-01	5.87E-01	2.43E-03	6.02E-06	3.97E-05	9.74E-14	9.87E-02	3.21E-03
15	5.88E-01	5.85E-01	5.05E-03	1.20E-05	7.91E-05	9.35E-14	9.48E-02	3.07E-03
16	5.86E-01	5.83E-01	7.71E-03	1.81E-05	1.19E-04	9.24E-14	9.36E-02	3.02E-03
17	5.87E-01	5.82E-01	1.04E-02	2.42E-05	1.58E-04	9.12E-14	9.24E-02	2.98E-03
18	5.87E-01	5.80E-01	1.31E-02	2.96E-05	1.93E-04	8.89E-14	9.01E-02	2.90E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	6.74E-04	1.63E-06	1.97E-05	9.51E-14	9.64E-02	5.75E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.34E-03	3.26E-06	3.93E-05	9.59E-14	9.72E-02	5.79E-03
21	1.08E+00	1.07E+00	2.77E-03	6.55E-06	7.89E-05	9.30E-14	9.42E-02	5.61E-03
22	1.08E+00	1.07E+00	4.24E-03	9.90E-06	1.19E-04	9.18E-14	9.30E-02	5.53E-03
23	1.08E+00	1.07E+00	5.72E-03	1.32E-05	1.59E-04	9.06E-14	9.18E-02	5.46E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	7.13E-03	1.60E-05	1.92E-04	8.82E-14	8.94E-02	5.30E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	3.43E-04	8.48E-07	1.95E-05	9.72E-14	9.85E-02	1.12E-02
26	2.05E+00	2.05E+00	7.23E-04	1.72E-06	3.95E-05	9.36E-14	9.49E-02	1.08E-02
27	2.06E+00	2.05E+00	1.48E-03	3.44E-06	7.89E-05	9.12E-14	9.24E-02	1.05E-02
28	2.05E+00	2.05E+00	2.27E-03	5.19E-06	1.19E-04	9.00E-14	9.12E-02	1.04E-02
29	2.06E+00	2.05E+00	3.04E-03	6.89E-06	1.58E-04	8.92E-14	9.04E-02	1.03E-02
30	2.05E+00	2.05E+00	3.78E-03	8.32E-06	1.91E-04	8.69E-14	8.80E-02	9.98E-03
31	3.03E+00	3.03E+00	2.45E-04	5.87E-07	1.99E-05	9.44E-14	9.56E-02	1.60E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	4.90E-04	1.16E-06	3.93E-05	9.32E-14	9.44E-02	1.58E-02
33	3.03E+00	3.03E+00	1.02E-03	2.33E-06	7.89E-05	9.02E-14	9.14E-02	1.53E-02
34	3.03E+00	3.03E+00	1.54E-03	3.50E-06	1.19E-04	8.93E-14	9.04E-02	1.52E-02
35	3.03E+00	3.03E+00	2.10E-03	4.67E-06	1.59E-04	8.78E-14	8.90E-02	1.49E-02
36	3.03E+00	3.03E+00	2.66E-03	5.71E-06	1.94E-04	8.46E-14	8.58E-02	1.44E-02
37	4.01E+00	4.01E+00	1.84E-04	4.33E-07	1.95E-05	9.28E-14	9.40E-02	2.08E-02
38	4.01E+00	4.01E+00	3.80E-04	8.71E-07	3.93E-05	9.03E-14	9.15E-02	2.03E-02
39	4.01E+00	4.01E+00	7.97E-04	1.76E-06	7.93E-05	8.68E-14	8.80E-02	1.95E-02
40	4.01E+00	4.01E+00	1.19E-03	2.63E-06	1.19E-04	8.73E-14	8.85E-02	1.96E-02
41	4.01E+00	4.01E+00	1.59E-03	3.51E-06	1.59E-04	8.67E-14	8.78E-02	1.95E-02
42	4.01E+00	4.01E+00	1.97E-03	4.23E-06	1.91E-04	8.44E-14	8.55E-02	1.90E-02

KDM (M**2) = 9.25E-14

SD (M**2) = 4.17E-15

NSD (---) = 4.51E-02

Table Al.5 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUNS

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.97E-01	5.18E-03	1.25E-05	3.96E-06	1.04E-13	1.05E-01	1.05E-03
2	1.99E-01	1.94E-01	1.05E-02	2.51E-05	7.85E-06	1.04E-13	1.05E-01	1.03E-03
3	1.98E-01	1.87E-01	2.18E-02	5.23E-05	1.58E-05	1.04E-13	1.05E-01	9.89E-04
4	1.99E-01	1.82E-01	3.40E-02	8.12E-05	2.38E-05	1.03E-13	1.05E-01	9.58E-04
5	1.97E-01	1.74E-01	4.75E-02	1.13E-04	3.18E-05	1.03E-13	1.05E-01	9.15E-04
6	1.98E-01	1.69E-01	5.85E-02	1.40E-04	3.80E-05	1.03E-13	1.05E-01	8.90E-04
7	2.95E-01	2.93E-01	3.56E-03	8.31E-06	3.92E-06	1.01E-13	1.02E-01	1.51E-03
8	2.96E-01	2.92E-01	7.29E-03	1.68E-05	7.93E-06	9.99E-14	1.01E-01	1.49E-03
9	2.94E-01	2.87E-01	1.50E-02	3.43E-05	1.59E-05	9.89E-14	1.00E-01	1.45E-03
10	2.94E-01	2.83E-01	2.30E-02	5.24E-05	2.39E-05	9.83E-14	9.96E-02	1.42E-03
11	2.95E-01	2.79E-01	3.12E-02	7.05E-05	3.17E-05	9.75E-14	9.88E-02	1.39E-03
12	2.96E-01	2.76E-01	3.93E-02	8.81E-05	3.92E-05	9.69E-14	9.82E-02	1.37E-03
13	5.89E-01	5.89E-01	1.88E-03	4.18E-06	3.96E-06	9.59E-14	9.72E-02	2.88E-03
14	5.87E-01	5.85E-01	3.82E-03	8.40E-06	7.93E-06	9.50E-14	9.63E-02	2.84E-03
15	5.88E-01	5.84E-01	7.74E-03	1.68E-05	1.58E-05	9.37E-14	9.50E-02	2.80E-03
16	5.88E-01	5.82E-01	1.18E-02	2.53E-05	2.38E-05	9.29E-14	9.42E-02	2.76E-03
17	5.87E-01	5.80E-01	1.58E-02	3.39E-05	3.17E-05	9.24E-14	9.36E-02	2.73E-03
18	5.87E-01	5.77E-01	1.97E-02	4.17E-05	3.88E-05	9.16E-14	9.28E-02	2.70E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	1.08E-03	2.29E-06	3.96E-06	9.11E-14	9.23E-02	5.00E-03
20	1.08E+00	1.07E+00	2.16E-03	4.58E-06	7.93E-06	9.14E-14	9.26E-02	5.02E-03
21	1.08E+00	1.07E+00	4.37E-03	9.17E-06	1.59E-05	9.07E-14	9.19E-02	4.97E-03
22	1.08E+00	1.07E+00	6.55E-03	1.37E-05	2.37E-05	9.05E-14	9.17E-02	4.96E-03
23	1.08E+00	1.07E+00	8.84E-03	1.84E-05	3.18E-05	9.00E-14	9.12E-02	4.93E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	1.07E-02	2.21E-05	3.80E-05	8.91E-14	9.02E-02	4.87E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	5.95E-04	1.21E-06	4.00E-06	8.80E-14	8.92E-02	9.24E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	1.17E-03	2.39E-06	7.89E-06	8.82E-14	8.93E-02	9.25E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	2.32E-03	4.79E-06	1.58E-05	8.91E-14	9.03E-02	9.35E-03
28	2.06E+00	2.05E+00	3.52E-03	7.23E-06	2.39E-05	8.87E-14	8.99E-02	9.30E-03
29	2.06E+00	2.05E+00	4.73E-03	9.62E-06	3.17E-05	8.80E-14	8.92E-02	9.22E-03
30	2.06E+00	2.05E+00	5.69E-03	1.15E-05	3.79E-05	8.74E-14	8.86E-02	9.15E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	4.11E-04	8.06E-07	3.92E-06	8.48E-14	8.59E-02	1.31E-02
32	3.04E+00	3.03E+00	8.27E-04	1.64E-06	8.01E-06	8.59E-14	8.71E-02	1.33E-02
33	3.03E+00	3.03E+00	1.60E-03	3.27E-06	1.59E-05	8.83E-14	8.95E-02	1.37E-02
34	3.03E+00	3.03E+00	2.41E-03	4.88E-06	2.37E-05	8.76E-14	8.88E-02	1.36E-02
35	3.03E+00	3.03E+00	3.24E-03	6.53E-06	3.18E-05	8.71E-14	8.83E-02	1.35E-02
36	3.03E+00	3.03E+00	3.93E-03	7.85E-06	3.82E-05	8.65E-14	8.76E-02	1.34E-02
37	4.01E+00	4.01E+00	3.25E-04	6.10E-07	3.92E-06	8.12E-14	8.23E-02	1.66E-02
38	4.01E+00	4.01E+00	6.19E-04	1.24E-06	7.97E-06	8.66E-14	8.77E-02	1.77E-02
39	4.02E+00	4.01E+00	1.23E-03	2.46E-06	1.59E-05	8.65E-14	8.76E-02	1.77E-02
40	4.01E+00	4.01E+00	1.86E-03	3.71E-06	2.39E-05	8.64E-14	8.75E-02	1.77E-02
41	4.01E+00	4.01E+00	2.48E-03	4.93E-06	3.17E-05	8.59E-14	8.70E-02	1.76E-02
42	4.01E+00	4.01E+00	3.02E-03	5.95E-06	3.83E-05	8.52E-14	8.63E-02	1.74E-02

KDM (M**2) = 9.24E-14

SD (M**2) = 6.31E-15

NSD (----) = 6.83E-02

Table Al.6 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN6

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	2.00E-01	1.98E-01	3.73E-03	8.80E-06	1.98E-05	9.29E-14	9.42E-02	1.03E-03
2	1.99E-01	1.95E-01	7.67E-03	1.79E-05	3.96E-05	9.17E-14	9.29E-02	1.00E-03
3	1.99E-01	1.91E-01	1.64E-02	3.67E-05	7.94E-05	8.81E-14	8.92E-02	9.44E-04
4	1.99E-01	1.86E-01	2.54E-02	5.63E-05	1.19E-04	8.73E-14	8.84E-02	9.13E-04
5	1.99E-01	1.82E-01	3.48E-02	7.71E-05	1.59E-04	8.72E-14	8.83E-02	8.89E-04
6	1.99E-01	1.76E-01	4.52E-02	9.76E-05	1.95E-04	8.49E-14	8.60E-02	8.41E-04
7	2.98E-01	2.97E-01	2.50E-03	5.83E-06	1.96E-05	9.16E-14	9.28E-02	1.53E-03
8	2.97E-01	2.94E-01	5.20E-03	1.19E-05	3.96E-05	8.98E-14	9.09E-02	1.48E-03
9	2.97E-01	2.91E-01	1.08E-02	2.39E-05	7.90E-05	8.69E-14	8.81E-02	1.42E-03
10	2.97E-01	2.88E-01	1.66E-02	3.63E-05	1.19E-04	8.59E-14	8.71E-02	1.39E-03
11	2.97E-01	2.85E-01	2.26E-02	4.89E-05	1.58E-04	8.51E-14	8.63E-02	1.36E-03
12	2.97E-01	2.83E-01	2.82E-02	5.97E-05	1.91E-04	8.31E-14	8.42E-02	1.32E-03
13	5.90E-01	5.89E-01	1.31E-03	2.99E-06	2.00E-05	8.96E-14	9.08E-02	2.97E-03
14	5.91E-01	5.89E-01	2.64E-03	5.89E-06	3.94E-05	8.79E-14	8.90E-02	2.91E-03
15	5.91E-01	5.88E-01	5.48E-03	1.19E-05	7.92E-05	8.52E-14	8.63E-02	2.81E-03
16	5.91E-01	5.86E-01	8.31E-03	1.79E-05	1.19E-04	8.45E-14	8.56E-02	2.78E-03
17	5.90E-01	5.84E-01	1.13E-02	2.39E-05	1.59E-04	8.34E-14	8.45E-02	2.73E-03
18	5.91E-01	5.84E-01	1.42E-02	2.94E-05	1.95E-04	8.11E-14	8.22E-02	2.66E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	7.23E-04	1.62E-06	1.98E-05	8.77E-14	8.89E-02	5.33E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.47E-03	3.24E-06	3.96E-05	8.64E-14	8.75E-02	5.24E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	3.03E-03	6.49E-06	7.94E-05	8.42E-14	8.53E-02	5.11E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	4.55E-03	9.69E-06	1.18E-04	8.37E-14	8.48E-02	5.07E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	6.15E-03	1.30E-05	1.59E-04	8.30E-14	8.41E-02	5.03E-03
24	1.08E+00	1.08E+00	7.77E-03	1.60E-05	1.95E-04	8.06E-14	8.17E-02	4.88E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	4.05E-04	8.58E-07	2.00E-05	8.33E-14	8.44E-02	9.64E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	7.97E-04	1.71E-06	3.98E-05	8.42E-14	8.53E-02	9.74E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	1.61E-03	3.40E-06	7.92E-05	8.31E-14	8.42E-02	9.62E-03
28	2.06E+00	2.06E+00	2.43E-03	5.10E-06	1.19E-04	8.25E-14	8.36E-02	9.55E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	3.29E-03	6.81E-06	1.59E-04	8.14E-14	8.25E-02	9.42E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	4.00E-03	8.11E-06	1.89E-04	7.96E-14	8.07E-02	9.22E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	2.70E-04	5.69E-07	1.96E-05	8.28E-14	8.39E-02	1.42E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	5.52E-04	1.16E-06	3.98E-05	8.22E-14	8.33E-02	1.41E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.10E-03	2.29E-06	7.90E-05	8.16E-14	8.27E-02	1.39E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	1.67E-03	3.45E-06	1.19E-04	8.13E-14	8.24E-02	1.39E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	2.24E-03	4.61E-06	1.59E-04	8.06E-14	8.17E-02	1.38E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	2.75E-03	5.51E-06	1.90E-04	7.87E-14	7.98E-02	1.35E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	2.33E-04	4.39E-07	2.00E-05	7.40E-14	7.50E-02	1.67E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	4.29E-04	8.74E-07	3.98E-05	7.99E-14	8.10E-02	1.81E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	8.46E-04	1.73E-06	7.90E-05	8.05E-14	8.15E-02	1.82E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	1.29E-03	2.61E-06	1.19E-04	7.95E-14	8.06E-02	1.80E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	1.70E-03	3.47E-06	1.58E-04	8.00E-14	8.11E-02	1.81E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	2.11E-03	4.18E-06	1.90E-04	7.77E-14	7.87E-02	1.76E-02

KDM (M**2) = 8.39E-14

SD (M**2) = 3.97E-15

NSD (----) = 4.73E-02

Table A1.7 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN7

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.98E-01	1.97E-01	3.64E-03	8.86E-06	2.03E-05	9.89E-14	1.00E-01	1.06E-03
2	1.98E-01	1.94E-01	7.39E-03	1.77E-05	4.02E-05	9.76E-14	9.89E-02	1.03E-03
3	2.00E-01	1.92E-01	1.56E-02	3.60E-05	8.05E-05	9.38E-14	9.51E-02	9.77E-04
4	1.99E-01	1.86E-01	2.44E-02	5.55E-05	1.20E-04	9.25E-14	9.37E-02	9.35E-04
5	1.99E-01	1.82E-01	3.38E-02	7.58E-05	1.61E-04	9.11E-14	9.23E-02	9.01E-04
6	1.98E-01	1.76E-01	4.48E-02	9.74E-05	1.99E-04	8.84E-14	8.95E-02	8.42E-04
7	2.96E-01	2.95E-01	2.38E-03	5.74E-06	1.97E-05	9.83E-14	9.95E-02	1.57E-03
8	2.97E-01	2.94E-01	5.01E-03	1.18E-05	4.04E-05	9.58E-14	9.70E-02	1.53E-03
9	2.96E-01	2.91E-01	1.04E-02	2.37E-05	8.01E-05	9.30E-14	9.42E-02	1.46E-03
10	2.96E-01	2.88E-01	1.60E-02	3.59E-05	1.20E-04	9.11E-14	9.23E-02	1.42E-03
11	2.96E-01	2.85E-01	2.21E-02	4.86E-05	1.61E-04	8.94E-14	9.06E-02	1.38E-03
12	2.96E-01	2.82E-01	2.73E-02	5.86E-05	1.92E-04	8.75E-14	8.86E-02	1.34E-03
13	5.88E-01	5.88E-01	1.23E-03	2.94E-06	2.01E-05	9.75E-14	9.88E-02	3.11E-03
14	5.87E-01	5.86E-01	2.54E-03	5.86E-06	4.00E-05	9.41E-14	9.53E-02	2.99E-03
15	5.89E-01	5.86E-01	5.27E-03	1.17E-05	7.99E-05	9.05E-14	9.17E-02	2.88E-03
16	5.89E-01	5.85E-01	8.09E-03	1.77E-05	1.20E-04	8.88E-14	9.00E-02	2.81E-03
17	5.88E-01	5.83E-01	1.10E-02	2.36E-05	1.60E-04	8.75E-14	8.86E-02	2.76E-03
18	5.87E-01	5.80E-01	1.37E-02	2.84E-05	1.92E-04	8.47E-14	8.58E-02	2.66E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	6.74E-04	1.57E-06	1.97E-05	9.45E-14	9.58E-02	5.52E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.39E-03	3.16E-06	3.98E-05	9.30E-14	9.42E-02	5.42E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	2.94E-03	6.37E-06	8.01E-05	8.82E-14	8.93E-02	5.14E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	4.49E-03	9.60E-06	1.21E-04	8.71E-14	8.83E-02	5.08E-03
23	1.08E+00	1.07E+00	6.09E-03	1.28E-05	1.61E-04	8.54E-14	8.65E-02	4.97E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	7.51E-03	1.54E-05	1.93E-04	8.32E-14	8.43E-02	4.84E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	3.68E-04	8.26E-07	1.99E-05	9.14E-14	9.26E-02	1.02E-02
26	2.06E+00	2.06E+00	7.60E-04	1.67E-06	4.04E-05	8.97E-14	9.08E-02	1.00E-02
27	2.06E+00	2.06E+00	1.56E-03	3.32E-06	7.99E-05	8.67E-14	8.78E-02	9.66E-03
28	2.06E+00	2.05E+00	2.38E-03	5.01E-06	1.21E-04	8.57E-14	8.68E-02	9.55E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	3.20E-03	6.66E-06	1.61E-04	8.47E-14	8.58E-02	9.44E-03
30	2.06E+00	2.05E+00	3.94E-03	7.94E-06	1.91E-04	8.20E-14	8.31E-02	9.14E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	2.70E-04	5.52E-07	1.97E-05	8.33E-14	8.44E-02	1.37E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	5.27E-04	1.12E-06	4.00E-05	8.65E-14	8.77E-02	1.42E-02
33	3.03E+00	3.03E+00	1.07E-03	2.27E-06	8.07E-05	8.64E-14	8.76E-02	1.42E-02
34	3.04E+00	3.03E+00	1.62E-03	3.38E-06	1.20E-04	8.49E-14	8.60E-02	1.40E-02
35	3.04E+00	3.03E+00	2.19E-03	4.50E-06	1.60E-04	8.34E-14	8.45E-02	1.37E-02
36	3.03E+00	3.03E+00	2.72E-03	5.43E-06	1.94E-04	8.12E-14	8.22E-02	1.34E-02
37	4.01E+00	4.01E+00	2.21E-04	4.30E-07	2.03E-05	7.92E-14	8.02E-02	1.72E-02
38	4.01E+00	4.01E+00	4.05E-04	8.42E-07	3.98E-05	8.46E-14	8.57E-02	1.84E-02
39	4.01E+00	4.01E+00	8.34E-04	1.70E-06	8.03E-05	8.30E-14	8.41E-02	1.81E-02
40	4.01E+00	4.01E+00	1.24E-03	2.55E-06	1.20E-04	8.36E-14	8.48E-02	1.82E-02
41	4.01E+00	4.01E+00	1.68E-03	3.40E-06	1.61E-04	8.24E-14	8.34E-02	1.79E-02
42	4.01E+00	4.01E+00	2.06E-03	4.08E-06	1.92E-04	8.04E-14	8.15E-02	1.75E-02

KDM (M**2) = 8.84E-14

SD (M**2) = 5.14E-15

NSD (----) = 5.82E-02

Table A1.8 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN8

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	2.00E-01	1.97E-01	6.09E-03	1.22E-05	3.92E-05	9.94E-14	1.01E-01	8.74E-04
2	1.99E-01	1.93E-01	1.34E-02	2.53E-05	7.92E-05	9.35E-14	9.47E-02	8.02E-04
3	2.00E-01	1.90E-01	2.09E-02	3.84E-05	1.18E-04	9.10E-14	9.22E-02	7.69E-04
4	1.99E-01	1.85E-01	2.87E-02	5.26E-05	1.58E-04	9.07E-14	9.19E-02	7.47E-04
5	1.99E-01	1.80E-01	3.74E-02	6.78E-05	1.99E-04	8.99E-14	9.10E-02	7.22E-04
6	2.00E-01	1.77E-01	4.66E-02	8.29E-05	2.38E-04	8.81E-14	8.93E-02	6.94E-04
7	2.97E-01	2.95E-01	4.20E-03	8.09E-06	3.88E-05	9.53E-14	9.66E-02	1.25E-03
8	2.95E-01	2.91E-01	8.97E-03	1.67E-05	7.88E-05	9.21E-14	9.33E-02	1.19E-03
9	2.97E-01	2.90E-01	1.40E-02	2.51E-05	1.18E-04	8.91E-14	9.03E-02	1.15E-03
10	2.96E-01	2.87E-01	1.89E-02	3.40E-05	1.58E-04	8.92E-14	9.04E-02	1.14E-03
11	2.97E-01	2.85E-01	2.40E-02	4.28E-05	1.98E-04	8.83E-14	8.94E-02	1.12E-03
12	2.97E-01	2.82E-01	2.97E-02	5.17E-05	2.37E-04	8.63E-14	8.74E-02	1.08E-03
13	5.90E-01	5.89E-01	2.18E-03	4.14E-06	3.96E-05	9.39E-14	9.51E-02	2.46E-03
14	5.91E-01	5.89E-01	4.50E-03	8.23E-06	7.88E-05	9.06E-14	9.18E-02	2.38E-03
15	5.91E-01	5.87E-01	7.02E-03	1.24E-05	1.19E-04	8.77E-14	8.89E-02	2.30E-03
16	5.90E-01	5.85E-01	9.38E-03	1.67E-05	1.58E-04	8.79E-14	8.91E-02	2.29E-03
17	5.91E-01	5.84E-01	1.47E-02	2.51E-05	2.38E-04	8.48E-14	8.59E-02	2.20E-03
18	5.91E-01	5.78E-01	2.55E-02	4.00E-05	3.75E-04	7.76E-14	7.87E-02	2.00E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	1.23E-03	2.26E-06	3.96E-05	9.11E-14	9.23E-02	4.39E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	2.50E-03	4.54E-06	7.96E-05	8.98E-14	9.09E-02	4.32E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	5.16E-03	9.05E-06	1.58E-04	8.68E-14	8.79E-02	4.17E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	8.02E-03	1.36E-05	2.37E-04	8.37E-14	8.48E-02	4.02E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	1.13E-02	1.81E-05	3.17E-04	7.95E-14	8.05E-02	3.81E-03
24	1.08E+00	1.08E+00	1.36E-02	2.12E-05	3.70E-04	7.68E-14	7.79E-02	3.68E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	6.62E-04	1.19E-06	4.00E-05	8.93E-14	9.05E-02	8.20E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	1.35E-03	2.37E-06	7.92E-05	8.68E-14	8.80E-02	7.97E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	2.72E-03	4.74E-06	1.58E-04	8.61E-14	8.73E-02	7.90E-03
28	2.06E+00	2.06E+00	4.24E-03	7.10E-06	2.38E-04	8.28E-14	8.39E-02	7.61E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	5.97E-03	9.49E-06	3.17E-04	7.86E-14	7.97E-02	7.22E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	7.34E-03	1.13E-05	3.77E-04	7.59E-14	7.69E-02	6.97E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	4.66E-04	7.93E-07	3.92E-05	8.43E-14	8.54E-02	1.14E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	9.19E-04	1.59E-06	7.84E-05	8.54E-14	8.66E-02	1.16E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.89E-03	3.21E-06	1.59E-04	8.42E-14	8.53E-02	1.14E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	2.91E-03	4.81E-06	2.38E-04	8.19E-14	8.30E-02	1.11E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	4.06E-03	6.42E-06	3.17E-04	7.82E-14	7.93E-02	1.06E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	5.11E-03	7.75E-06	3.83E-04	7.50E-14	7.60E-02	1.02E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	3.68E-04	6.06E-07	3.96E-05	8.15E-14	8.25E-02	1.46E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	7.11E-04	1.21E-06	7.92E-05	8.43E-14	8.54E-02	1.51E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	1.41E-03	2.42E-06	1.58E-04	8.47E-14	8.59E-02	1.52E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	2.21E-03	3.63E-06	2.38E-04	8.14E-14	8.25E-02	1.46E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	3.09E-03	4.84E-06	3.16E-04	7.74E-14	7.85E-02	1.39E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	3.86E-03	5.84E-06	3.81E-04	7.47E-14	7.57E-02	1.34E-02

KDM (M**2) = 8.56E-14

SD (M**2) = 5.79E-15

NSD (----) = 6.77E-02

Table A1.9 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN9

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.98E-01	3.62E-03	8.65E-06	2.01E-05	9.69E-14	9.82E-02	1.04E-03
2	1.99E-01	1.96E-01	7.15E-03	1.74E-05	4.00E-05	9.85E-14	9.98E-02	1.05E-03
3	2.00E-01	1.93E-01	1.49E-02	3.53E-05	7.99E-05	9.60E-14	9.72E-02	1.01E-03
4	2.00E-01	1.88E-01	2.33E-02	5.46E-05	1.21E-04	9.48E-14	9.61E-02	9.72E-04
5	2.00E-01	1.84E-01	3.20E-02	7.44E-05	1.60E-04	9.40E-14	9.53E-02	9.41E-04
6	1.99E-01	1.78E-01	4.15E-02	9.44E-05	1.97E-04	9.20E-14	9.33E-02	8.91E-04
7	2.97E-01	2.96E-01	2.33E-03	5.60E-06	1.95E-05	9.75E-14	9.88E-02	1.57E-03
8	2.97E-01	2.95E-01	4.94E-03	1.17E-05	4.04E-05	9.58E-14	9.70E-02	1.54E-03
9	2.96E-01	2.91E-01	1.03E-02	2.35E-05	8.01E-05	9.26E-14	9.38E-02	1.47E-03
10	2.96E-01	2.88E-01	1.58E-02	3.56E-05	1.20E-04	9.15E-14	9.27E-02	1.44E-03
11	2.97E-01	2.86E-01	2.14E-02	4.78E-05	1.60E-04	9.06E-14	9.18E-02	1.41E-03
12	2.97E-01	2.83E-01	2.70E-02	5.87E-05	1.95E-04	8.81E-14	8.93E-02	1.36E-03
13	5.90E-01	5.89E-01	1.19E-03	2.88E-06	1.99E-05	9.81E-14	9.94E-02	3.15E-03
14	5.89E-01	5.88E-01	2.48E-03	5.76E-06	3.98E-05	9.43E-14	9.56E-02	3.02E-03
15	5.88E-01	5.86E-01	5.15E-03	1.17E-05	8.03E-05	9.20E-14	9.33E-02	2.94E-03
16	5.89E-01	5.85E-01	7.86E-03	1.76E-05	1.20E-04	9.06E-14	9.17E-02	2.89E-03
17	5.90E-01	5.85E-01	1.06E-02	2.34E-05	1.60E-04	8.98E-14	9.09E-02	2.86E-03
18	5.89E-01	5.82E-01	1.30E-02	2.81E-05	1.92E-04	8.73E-14	8.85E-02	2.77E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	6.50E-04	1.57E-06	1.99E-05	9.80E-14	9.93E-02	5.76E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.37E-03	3.18E-06	4.02E-05	9.39E-14	9.51E-02	5.50E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	2.83E-03	6.32E-06	7.99E-05	9.05E-14	9.17E-02	5.31E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	4.28E-03	9.50E-06	1.20E-04	9.00E-14	9.12E-02	5.27E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	5.80E-03	1.27E-05	1.60E-04	8.88E-14	9.00E-02	5.20E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	7.33E-03	1.56E-05	1.97E-04	8.64E-14	8.75E-02	5.05E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	3.56E-04	8.24E-07	1.99E-05	9.40E-14	9.52E-02	1.05E-02
26	2.06E+00	2.06E+00	7.23E-04	1.66E-06	4.00E-05	9.28E-14	9.40E-02	1.04E-02
27	2.06E+00	2.06E+00	1.52E-03	3.33E-06	8.03E-05	8.89E-14	9.00E-02	9.95E-03
28	2.06E+00	2.06E+00	2.28E-03	5.00E-06	1.20E-04	8.89E-14	9.00E-02	9.95E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	3.06E-03	6.66E-06	1.61E-04	8.81E-14	8.93E-02	9.87E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	3.81E-03	8.06E-06	1.94E-04	8.56E-14	8.68E-02	9.58E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	2.57E-04	5.58E-07	1.99E-05	8.79E-14	8.91E-02	1.45E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	4.90E-04	1.12E-06	3.98E-05	9.23E-14	9.35E-02	1.53E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.02E-03	2.24E-06	7.99E-05	8.94E-14	9.06E-02	1.48E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	1.56E-03	3.38E-06	1.20E-04	8.81E-14	8.93E-02	1.46E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	2.10E-03	4.50E-06	1.60E-04	8.70E-14	8.82E-02	1.44E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	2.56E-03	5.37E-06	1.91E-04	8.50E-14	8.61E-02	1.40E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	1.84E-04	4.18E-07	1.97E-05	9.21E-14	9.33E-02	2.01E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	3.80E-04	8.48E-07	4.00E-05	9.05E-14	9.17E-02	1.98E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	7.85E-04	1.71E-06	8.03E-05	8.81E-14	8.93E-02	1.93E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	1.18E-03	2.55E-06	1.20E-04	8.77E-14	8.89E-02	1.92E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	1.59E-03	3.40E-06	1.60E-04	8.66E-14	8.77E-02	1.89E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	1.95E-03	4.06E-06	1.91E-04	8.44E-14	8.56E-02	1.85E-02

KDM (M**2) = 9.11E-14

SD (M**2) = 3.76E-15

NSD (----) = 4.13E-02

Table A1.10 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN10

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.96E-01	6.17E-03	1.25E-05	3.98E-05	1.01E-13	1.02E-01	8.80E-04
2	1.99E-01	1.93E-01	1.33E-02	2.56E-05	7.98E-05	9.53E-14	9.66E-02	8.18E-04
3	2.00E-01	1.90E-01	2.08E-02	3.87E-05	1.19E-04	9.23E-14	9.35E-02	7.81E-04
4	1.98E-01	1.84E-01	2.85E-02	5.34E-05	1.59E-04	9.29E-14	9.42E-02	7.62E-04
5	2.00E-01	1.82E-01	3.63E-02	6.75E-05	1.99E-04	9.21E-14	9.33E-02	7.47E-04
6	1.99E-01	1.76E-01	4.56E-02	8.31E-05	2.37E-04	9.03E-14	9.15E-02	7.10E-04
7	2.98E-01	2.96E-01	4.13E-03	8.14E-06	3.90E-05	9.76E-14	9.89E-02	1.29E-03
8	2.98E-01	2.94E-01	8.79E-03	1.66E-05	7.90E-05	9.37E-14	9.49E-02	1.23E-03
9	2.96E-01	2.89E-01	1.39E-02	2.56E-05	1.20E-04	9.12E-14	9.24E-02	1.17E-03
10	2.98E-01	2.89E-01	1.84E-02	3.39E-05	1.58E-04	9.12E-14	9.24E-02	1.17E-03
11	2.97E-01	2.85E-01	2.37E-02	4.30E-05	1.99E-04	9.00E-14	9.12E-02	1.14E-03
12	2.99E-01	2.84E-01	2.88E-02	5.16E-05	2.37E-04	8.87E-14	8.99E-02	1.12E-03
13	5.91E-01	5.90E-01	2.12E-03	4.17E-06	3.98E-05	9.73E-14	9.86E-02	2.56E-03
14	5.91E-01	5.89E-01	4.50E-03	8.37E-06	7.98E-05	9.22E-14	9.34E-02	2.42E-03
15	5.92E-01	5.87E-01	9.21E-03	1.67E-05	1.59E-04	8.97E-14	9.09E-02	2.35E-03
16	5.91E-01	5.84E-01	1.43E-02	2.51E-05	2.37E-04	8.68E-14	8.80E-02	2.26E-03
17	5.92E-01	5.82E-01	2.00E-02	3.36E-05	3.17E-04	8.31E-14	8.42E-02	2.16E-03
18	5.92E-01	5.79E-01	2.53E-02	4.09E-05	3.84E-04	8.01E-14	8.11E-02	2.07E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	1.16E-03	2.23E-06	3.90E-05	9.47E-14	9.60E-02	4.56E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	2.44E-03	4.52E-06	7.90E-05	9.18E-14	9.30E-02	4.41E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	5.03E-03	9.03E-06	1.58E-04	8.90E-14	9.01E-02	4.28E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	7.86E-03	1.37E-05	2.38E-04	8.62E-14	8.73E-02	4.13E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	1.09E-02	1.82E-05	3.17E-04	8.23E-14	8.34E-02	3.95E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	1.39E-02	2.21E-05	3.84E-04	7.90E-14	8.00E-02	3.78E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	6.37E-04	1.19E-06	3.98E-05	9.27E-14	9.39E-02	8.51E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	1.30E-03	2.36E-06	7.86E-05	8.99E-14	9.11E-02	8.25E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	2.68E-03	4.76E-06	1.59E-04	8.77E-14	8.89E-02	8.06E-03
28	2.06E+00	2.06E+00	4.13E-03	7.12E-06	2.37E-04	8.54E-14	8.65E-02	7.84E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	5.77E-03	9.51E-06	3.17E-04	8.16E-14	8.27E-02	7.49E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	7.32E-03	1.16E-05	3.87E-04	7.86E-14	7.96E-02	7.21E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	4.54E-04	8.17E-07	4.02E-05	8.92E-14	9.04E-02	1.21E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	8.95E-04	1.61E-06	7.94E-05	8.93E-14	9.05E-02	1.21E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.81E-03	3.22E-06	1.59E-04	8.80E-14	8.91E-02	1.19E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	2.83E-03	4.83E-06	2.38E-04	8.45E-14	8.57E-02	1.15E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	3.92E-03	6.43E-06	3.16E-04	8.12E-14	8.23E-02	1.10E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	4.89E-03	7.73E-06	3.80E-04	7.82E-14	7.92E-02	1.06E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	3.43E-04	6.12E-07	3.98E-05	8.83E-14	8.94E-02	1.58E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	6.99E-04	1.22E-06	7.94E-05	8.65E-14	8.76E-02	1.55E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	1.40E-03	2.43E-06	1.58E-04	8.62E-14	8.74E-02	1.54E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	2.15E-03	3.65E-06	2.37E-04	8.42E-14	8.54E-02	1.51E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	3.00E-03	4.89E-06	3.18E-04	8.06E-14	8.17E-02	1.44E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	3.73E-03	5.86E-06	3.81E-04	7.79E-14	7.89E-02	1.39E-02

KDM (M**2) = 8.81E-14

SD (M**2) = 5.56E-15

NSD (----) = 6.31E-02

Table A1.11 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN11

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.97E-01	3.92E-03	8.78E-06	2.02E-05	9.14E-14	9.26E-02	9.76E-04
2	1.98E-01	1.94E-01	7.99E-03	1.78E-05	4.03E-05	9.08E-14	9.20E-02	9.55E-04
3	1.99E-01	1.91E-01	1.66E-02	3.61E-05	8.02E-05	8.85E-14	8.97E-02	9.14E-04
4	2.01E-01	1.88E-01	2.55E-02	5.49E-05	1.20E-04	8.77E-14	8.88E-02	8.93E-04
5	2.00E-01	1.82E-01	3.55E-02	7.57E-05	1.61E-04	8.70E-14	8.81E-02	8.57E-04
6	2.01E-01	1.78E-01	4.48E-02	9.32E-05	1.93E-04	8.49E-14	8.60E-02	8.20E-04
7	2.97E-01	2.95E-01	2.62E-03	5.87E-06	2.02E-05	9.15E-14	9.27E-02	1.46E-03
8	2.97E-01	2.94E-01	5.25E-03	1.16E-05	3.97E-05	9.00E-14	9.12E-02	1.43E-03
9	2.96E-01	2.91E-01	1.11E-02	2.36E-05	8.00E-05	8.68E-14	8.80E-02	1.37E-03
10	2.97E-01	2.89E-01	1.69E-02	3.58E-05	1.20E-04	8.61E-14	8.73E-02	1.35E-03
11	2.97E-01	2.86E-01	2.31E-02	4.83E-05	1.60E-04	8.53E-14	8.64E-02	1.32E-03
12	2.96E-01	2.82E-01	2.90E-02	5.93E-05	1.94E-04	8.34E-14	8.45E-02	1.27E-03
13	5.88E-01	5.88E-01	1.31E-03	2.89E-06	1.98E-05	9.04E-14	9.16E-02	2.87E-03
14	5.89E-01	5.88E-01	2.73E-03	5.89E-06	4.03E-05	8.80E-14	8.92E-02	2.80E-03
15	5.90E-01	5.87E-01	5.65E-03	1.18E-05	8.04E-05	8.51E-14	8.62E-02	2.70E-03
16	5.90E-01	5.86E-01	8.55E-03	1.76E-05	1.20E-04	8.42E-14	8.53E-02	2.67E-03
17	5.91E-01	5.85E-01	1.16E-02	2.37E-05	1.61E-04	8.32E-14	8.43E-02	2.63E-03
18	5.89E-01	5.81E-01	1.46E-02	2.89E-05	1.96E-04	8.10E-14	8.21E-02	2.55E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	7.29E-04	1.59E-06	2.00E-05	8.89E-14	9.01E-02	5.19E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	1.50E-03	3.22E-06	4.05E-05	8.75E-14	8.87E-02	5.11E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	3.10E-03	6.39E-06	8.02E-05	8.42E-14	8.53E-02	4.91E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	4.70E-03	9.57E-06	1.20E-04	8.30E-14	8.41E-02	4.84E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	6.38E-03	1.28E-05	1.61E-04	8.19E-14	8.30E-02	4.77E-03
24	1.08E+00	1.08E+00	7.81E-03	1.54E-05	1.92E-04	8.01E-14	8.12E-02	4.66E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	3.86E-04	8.35E-07	2.00E-05	8.82E-14	8.93E-02	9.82E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	8.15E-04	1.67E-06	4.01E-05	8.37E-14	8.48E-02	9.32E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	1.65E-03	3.35E-06	8.02E-05	8.28E-14	8.39E-02	9.23E-03
28	2.06E+00	2.06E+00	2.49E-03	5.04E-06	1.21E-04	8.23E-14	8.34E-02	9.17E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	3.37E-03	6.71E-06	1.61E-04	8.13E-14	8.24E-02	9.05E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	4.10E-03	8.00E-06	1.91E-04	7.96E-14	8.07E-02	8.86E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	2.76E-04	5.71E-07	2.02E-05	8.45E-14	8.56E-02	1.39E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	5.33E-04	1.12E-06	3.97E-05	8.59E-14	8.70E-02	1.41E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	1.11E-03	2.26E-06	8.00E-05	8.32E-14	8.43E-02	1.37E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	1.71E-03	3.41E-06	1.20E-04	8.13E-14	8.24E-02	1.34E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	2.30E-03	4.55E-06	1.61E-04	8.07E-14	8.18E-02	1.33E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	2.85E-03	5.48E-06	1.94E-04	7.84E-14	7.95E-02	1.29E-02
37	4.02E+00	4.02E+00	2.15E-04	4.23E-07	1.98E-05	8.05E-14	8.15E-02	1.75E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	4.11E-04	8.57E-07	4.01E-05	8.51E-14	8.62E-02	1.85E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	8.64E-04	1.72E-06	8.04E-05	8.13E-14	8.23E-02	1.77E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	1.29E-03	2.57E-06	1.20E-04	8.10E-14	8.20E-02	1.76E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	1.73E-03	3.43E-06	1.60E-04	8.07E-14	8.17E-02	1.75E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	2.15E-03	4.11E-06	1.92E-04	7.80E-14	7.90E-02	1.70E-02

KDM (M**2) = 8.45E-14

SD (M**2) = 3.60E-15

NSD (----) = 4.26E-02

Table A1.12 EXPERIMENTAL DATA OF PERMEABILITY IN RUN12

NO	P1 MPA	PM MPA	DP MPA	QM M**3/S	G KG/S	KD M**2	KD/DA DARCY	K M**2/S
1	1.99E-01	1.96E-01	6.97E-03	1.27E-05	4.00E-05	9.12E-14	9.24E-02	7.90E-04
2	1.98E-01	1.91E-01	1.45E-02	2.59E-05	7.92E-05	8.90E-14	9.01E-02	7.52E-04
3	1.99E-01	1.88E-01	2.26E-02	3.92E-05	1.18E-04	8.64E-14	8.76E-02	7.18E-04
4	2.00E-01	1.85E-01	3.05E-02	5.33E-05	1.58E-04	8.73E-14	8.84E-02	7.13E-04
5	1.99E-01	1.79E-01	3.96E-02	6.89E-05	1.98E-04	8.69E-14	8.80E-02	6.89E-04
6	2.00E-01	1.75E-01	4.98E-02	8.46E-05	2.37E-04	8.48E-14	8.60E-02	6.57E-04
7	2.97E-01	2.95E-01	4.68E-03	8.39E-06	3.96E-05	8.95E-14	9.07E-02	1.17E-03
8	2.97E-01	2.92E-01	9.65E-03	1.69E-05	7.92E-05	8.75E-14	8.86E-02	1.13E-03
9	2.96E-01	2.88E-01	1.52E-02	2.58E-05	1.19E-04	8.48E-14	8.59E-02	1.08E-03
10	2.97E-01	2.87E-01	2.01E-02	3.45E-05	1.58E-04	8.54E-14	8.65E-02	1.08E-03
11	2.97E-01	2.84E-01	2.57E-02	4.35E-05	1.98E-04	8.47E-14	8.58E-02	1.06E-03
12	2.97E-01	2.81E-01	3.18E-02	5.29E-05	2.38E-04	8.31E-14	8.42E-02	1.03E-03
13	5.91E-01	5.90E-01	2.36E-03	4.15E-06	3.92E-05	8.78E-14	8.89E-02	2.29E-03
14	5.91E-01	5.88E-01	4.91E-03	8.45E-06	7.96E-05	8.59E-14	8.70E-02	2.23E-03
15	5.90E-01	5.85E-01	1.01E-02	1.69E-05	1.58E-04	8.35E-14	8.46E-02	2.16E-03
16	5.92E-01	5.84E-01	1.56E-02	2.54E-05	2.37E-04	8.13E-14	8.23E-02	2.10E-03
17	5.91E-01	5.81E-01	2.19E-02	3.41E-05	3.17E-04	7.77E-14	7.87E-02	1.99E-03
18	5.91E-01	5.78E-01	2.69E-02	4.07E-05	3.77E-04	7.54E-14	7.63E-02	1.93E-03
19	1.08E+00	1.08E+00	1.33E-03	2.31E-06	4.00E-05	8.67E-14	8.78E-02	4.14E-03
20	1.08E+00	1.08E+00	2.68E-03	4.53E-06	7.84E-05	8.44E-14	8.55E-02	4.03E-03
21	1.08E+00	1.08E+00	5.51E-03	9.13E-06	1.58E-04	8.27E-14	8.38E-02	3.94E-03
22	1.08E+00	1.08E+00	8.60E-03	1.38E-05	2.38E-04	8.01E-14	8.12E-02	3.81E-03
23	1.08E+00	1.08E+00	1.19E-02	1.83E-05	3.16E-04	7.67E-14	7.77E-02	3.65E-03
24	1.08E+00	1.07E+00	1.48E-02	2.20E-05	3.78E-04	7.43E-14	7.52E-02	3.52E-03
25	2.06E+00	2.06E+00	7.17E-04	1.20E-06	3.96E-05	8.35E-14	8.46E-02	7.61E-03
26	2.06E+00	2.06E+00	1.45E-03	2.41E-06	7.96E-05	8.29E-14	8.40E-02	7.55E-03
27	2.06E+00	2.06E+00	2.95E-03	4.79E-06	1.58E-04	8.11E-14	8.21E-02	7.38E-03
28	2.06E+00	2.06E+00	4.55E-03	7.22E-06	2.38E-04	7.91E-14	8.01E-02	7.20E-03
29	2.06E+00	2.06E+00	6.31E-03	9.60E-06	3.16E-04	7.59E-14	7.70E-02	6.91E-03
30	2.06E+00	2.06E+00	7.80E-03	1.15E-05	3.78E-04	7.33E-14	7.43E-02	6.67E-03
31	3.04E+00	3.04E+00	4.96E-04	8.05E-07	3.92E-05	8.10E-14	8.20E-02	1.09E-02
32	3.04E+00	3.04E+00	9.87E-04	1.63E-06	7.92E-05	8.22E-14	8.33E-02	1.11E-02
33	3.04E+00	3.04E+00	2.02E-03	3.25E-06	1.58E-04	8.05E-14	8.16E-02	1.08E-02
34	3.04E+00	3.04E+00	3.11E-03	4.88E-06	2.38E-04	7.84E-14	7.94E-02	1.05E-02
35	3.04E+00	3.04E+00	4.32E-03	6.51E-06	3.17E-04	7.52E-14	7.62E-02	1.01E-02
36	3.04E+00	3.04E+00	5.31E-03	7.77E-06	3.78E-04	7.30E-14	7.39E-02	9.80E-03
37	4.02E+00	4.02E+00	3.74E-04	6.09E-07	3.92E-05	8.13E-14	8.24E-02	1.44E-02
38	4.02E+00	4.02E+00	7.66E-04	1.22E-06	7.84E-05	7.93E-14	8.04E-02	1.41E-02
39	4.02E+00	4.02E+00	1.53E-03	2.45E-06	1.58E-04	8.02E-14	8.13E-02	1.43E-02
40	4.02E+00	4.02E+00	2.36E-03	3.68E-06	2.37E-04	7.80E-14	7.90E-02	1.38E-02
41	4.02E+00	4.02E+00	3.28E-03	4.92E-06	3.17E-04	7.49E-14	7.59E-02	1.33E-02
42	4.02E+00	4.02E+00	4.13E-03	5.97E-06	3.85E-04	7.23E-14	7.32E-02	1.28E-02

KDM (M**2) = 8.16E-14

SD (M**2) = 4.87E-15

NSD (----) = 5.96E-02

付録 2 平均圧力における流路断面積

Fig. 3 に示した円筒状試験体において流路断面積は $2\pi rh$ となり、半径 r に比例する。従って、(24)式において、慣性係数 b が半径 r に依存しないので、透過率 K_D は半径 r の関数となる。平均圧力 p_m における透過率 K_D を代表値とし、その場所の流路断面積を求める。

Fig. 3 に示した円筒状試験体モデルにおいて、圧縮性流体の圧力の式は、次式で与えられる。

$$p^2 = \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln(r_1/r_0)} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) + p_0^2 \quad \dots \quad (A.2.1)$$

従って、

$$p_m^2 = \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln(r_1/r_0)} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) + p_0^2, \quad \text{ここで } r_m \text{ は } p_m \text{ を与える半径}$$

よって、

$$\frac{\ln(r_m/r_0)}{\ln(r_1/r_0)} = \frac{p_m^2 - p_0^2}{p_1^2 - p_0^2} = \frac{1}{2} + \frac{\Delta p}{8 p_m} \quad \dots \quad (A.2.2)$$

この試験条件下では、一般に $\Delta p / (8 p_m) \ll 1/2$ が成立する。

ゆえに、

$$r_m = \sqrt{r_0 r_1} \quad \dots \quad (A.2.3)$$

よって、流路断面積 A は次式となる。

$$A = 2\pi h \sqrt{r_0 r_1} \quad \dots \quad (A.2.4)$$

なお、(A.2.4) 式は非圧縮性流体においても成立する。

付録3 実験炉における透過流量の推定

実験炉の詳細設計(II)炉心の固定反射体及び高温プレナムブロックの透過流量を検討する。
炉内流量配分及び炉内圧力分布をそれぞれ Fig. A 3.1 及び Fig. A 3.2 に示す。

(1) 固定反射体から炉心部への透過流量

透過流量 G_P は次式で与えられる。

$$G_P = \frac{K_D \Delta p A}{\nu l_{eff}} \quad \dots \dots \dots \text{(A 3.1)}$$

ここで、 K_D は固定反射体の透過率、 Δp は固定反射体側面間差圧の最大値 (= 6.46 kPa)、
 A は流路断面積 (= 169 m²)、 ν は 400 °C, 4 MPa のヘリウムガスの動粘性係数 (= 1.19 × 10⁻⁵ m²/s)、 l_{eff} は透過に関する固定反射体の実効厚さである。

透過率をパラメータとした透過流量と実効厚さの関係を Fig. A 3.3 に示す。透過率として
0.12 darcy を用いると、 l_{eff} がブロック面間シール厚さ (0.13 m) であれば、 $G_P = 0.086 \text{ kg/s}$
(注)^(注)、炉心全流量に対する透過流量割合 $\eta_P = 0.492\%$ である。炉内有効流量割合 η が 1 % 減少すれば燃料最高温度は約 10 °C 上昇するので、固定反射体の透過流量は炉内流量配分や燃料最高温度評価において無視できない。

従って、固定反射体の透過流量を炉内流量配分解析に取り入れるとともに、実効厚さ l_{eff} 評価の精度を高めるため、炉内流動実験が必要である。

(2) 炉心部から高温プレナムへの透過流量

高温プレナムブロックの透過流量 G_P は (A 3.1) 式で評価できる。

ここで、差圧はブロックの上下間差圧で 1.76 kPa、流路断面積は 18.8 m²、動粘性係数は 2.21 × 10⁻⁵ m²/s (700 °C, 4 MPa) を用いる。

透過率をパラメータとした透過流量と実効厚さの関係を Fig. A 3.4 に示す。透過率として
0.12 darcy を用いると、 l_{eff} が 1 段シール要素の幅 (= 0.015 m) であれば $G_P = 0.0157 \text{ kg/s}$
 $\eta_P = 0.09\%$ である。 l_{eff} が 3 段シール要素の幅であれば、 $G_P = 0.0052 \text{ kg/s}$ 、 $\eta_P = 0.03\%$ である。従って、高温プレナムブロックの透過流量は炉内流量配分や燃料最高温度評価において、無視できる。

注 原研の炉心構造試験体における固定反射体の透過流量測定によれば、実効厚さはブロック面間シール厚さにはほぼ等しくなる。

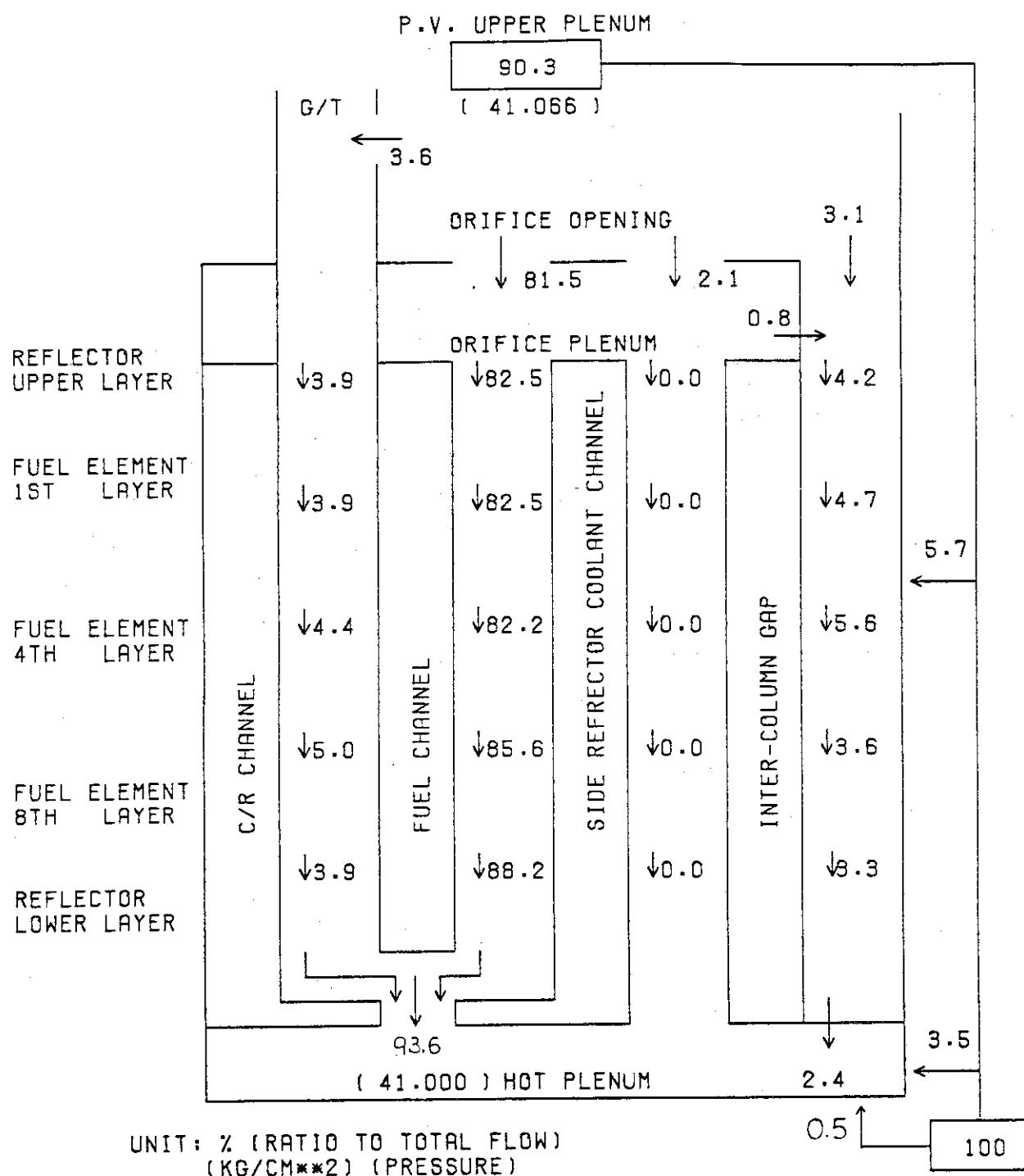
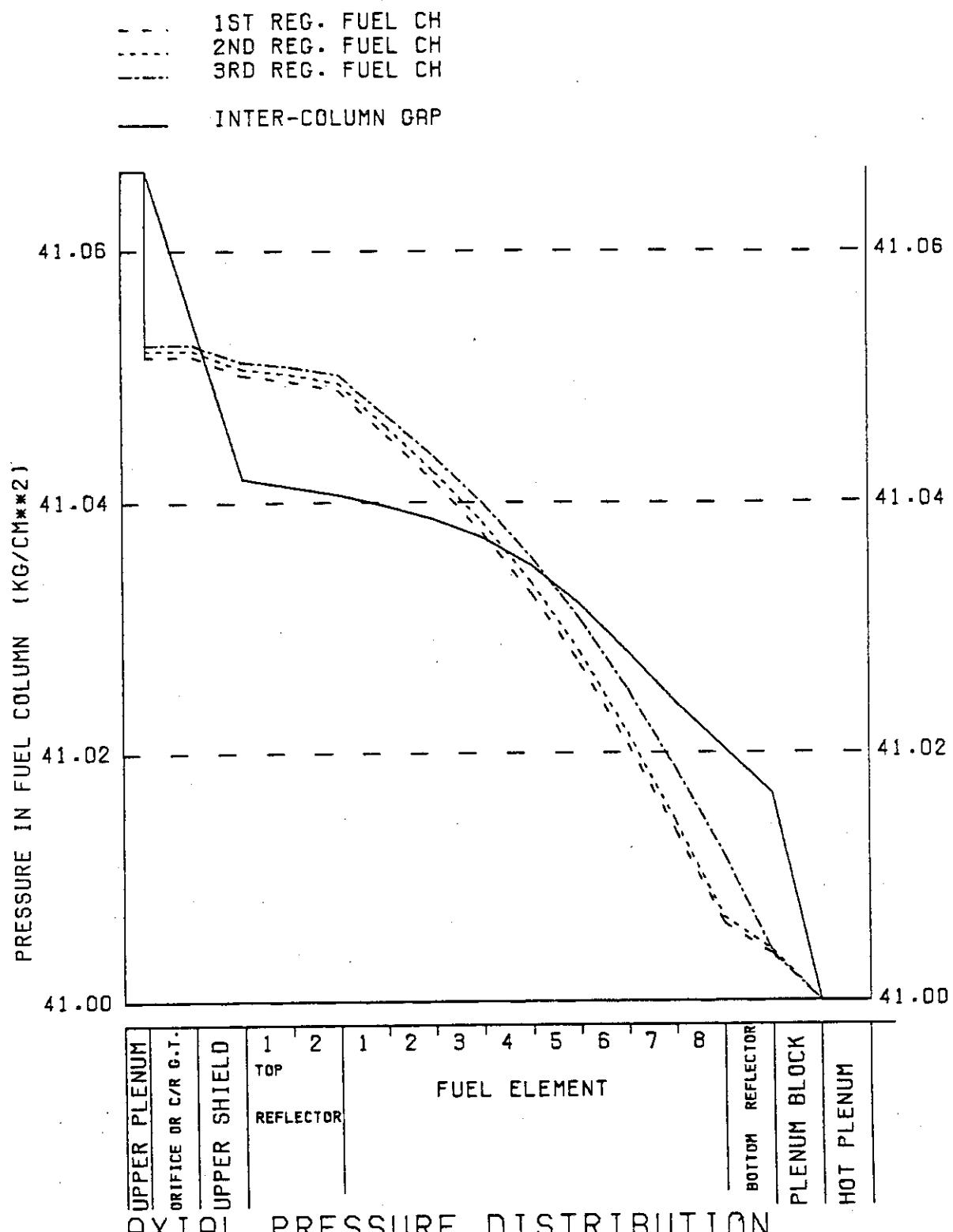


Fig. A3.1 Flow distribution in VHTR-D2 reactor core



VHTR-D2 CASE- DII-000

Fig. A3.2 Axial pressure distribution in VHTR-D2 reactor core

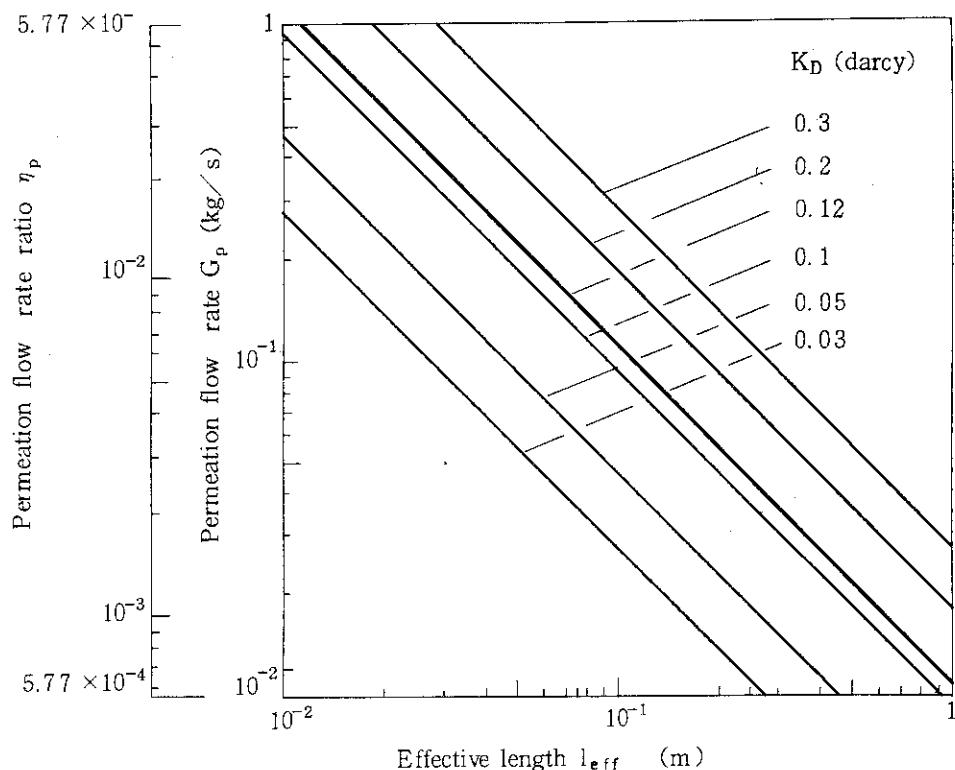


Fig.A 3.3 Permeation flow rate through permanent reflectors into VHTR-D2 reactor core

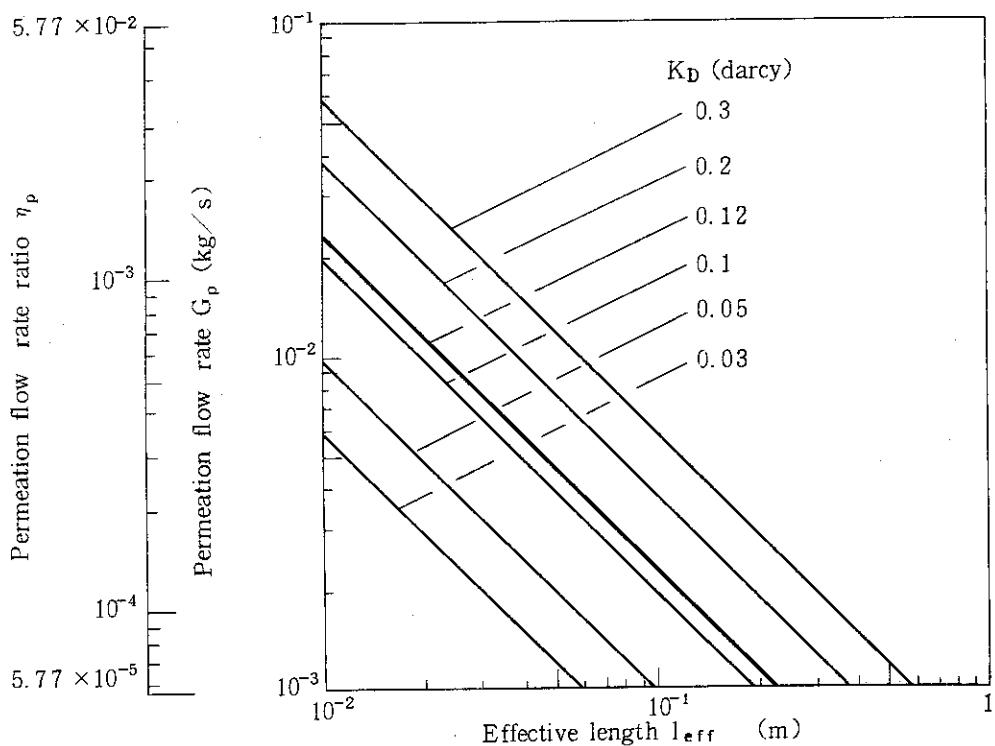


Fig.A 3.4 Permeation flow rate through hot plenum blocks into VHTR-D2 reactor core