

JAERI - M  
83-078

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 ——

1983年6月

文沢 元雄・鈴木 邦彦・宮本 喜晟

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

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 原子力資料サービス

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 ——

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・鈴木邦彦・宮本喜晟

( 1983年5月11日受理 )

本報告は、多目的高温ガス実験炉の炉心をバイパスする漏れ流れを防止する目的で設置した黒鉛ブロック間シール部における流動特性を検討したものである。この検討により1段及び多段シール構造におけるシール性能の特徴が明らかになった。結果は以下の通りである。

- (1) 実験炉設計に適用する多段シール性能表示式は漏れ流れ損失係数  $K/A^2$  を用いて次式で表わされる。

$$K/A^2 = F(\Delta p, n) = G(Re, n)$$

ここで、 $\Delta p$  はシール部の差圧、 $n$  はシール要素の段数、 $Re$  はレイノルズ数である。

- (2) シール要素部ギャップ  $d_s$  は  $\Delta p$  と  $n$  の関数として表わされる。 $\Delta p$  の増加及び  $n$  の減少に伴い  $d_s$  は減少する。
- (3) 1段シール構造において、 $d_s$  がブロック面間ギャップの10%以下では、シール要素部の流動抵抗が支配的であり、全抵抗の96%以上を占める。

Analytical Study on Seal Performance between Graphite Blocks  
in the Experimental VHTR Core  
-- The Effect of Single-Layer and Multi-Layer Seal Elements --

Motoh FUMIZAWA, Kunihiro SUZUKI, Yoshiaki MIYAMOTO

Department of Power Reactor Projects, JAERI

( Received May 11 , 1983 )

This report describes an analysis of seal performance between graphite blocks. The seal elements are provided on the blocks in order to reduce the leak flows which bypass main coolant flow path in the experimental VHTR core. The analysis clarified single- and multi-layer seal performance.

The results are as follows:

(1) The correlations of multi-layer seal performance can be expressed in the form

$$K/A^2 = F(\Delta p, n) = G(Re, n)$$

where  $K/A^2$  is leak flow factor,  $\Delta p$  pressure difference,  $n$  the number of seal element layer and  $Re$  the Reynolds number.

(2) The gap at a seal element  $d_s$  is obtained as a function of  $\Delta p$ , and  $n$ . The value of  $d_s$  decreases with increasing  $\Delta p$  and with  $n$ .

(3) When  $d_s$  is less than 10 % of the gap between adjacent blocks, flow resistance through a seal element is dominant and it is greater than 96 % of total flow resistance.

Keywords: Seal Performance, Graphite Blocks, VHTR, Single-Layer, Multi-Layer, Seal Element, Leak Flows, Bypass, Pressure Difference, Gap, Flow Resistance Reactor Core

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. シール部流動解析 .....	3
2.1 シール部のモデル化 .....	3
2.2 基 礎 式 .....	3
2.2.1 1段シール要素の場合 .....	3
2.2.2 多段シール要素の場合 .....	5
2.3 解析結果 .....	5
2.3.1 1段シール要素の場合 .....	6
2.3.2 多段シール要素の場合 .....	6
3. シール性能表示式の検討 .....	20
3.1 1段シール要素の場合 .....	20
3.2 多段シール要素の場合 .....	21
3.3 実験炉設計に適用する表示式 .....	22
4. 結 論 .....	29
あとがき .....	30
参考文献 .....	30
付録1 流路出入口部圧力損失の評価 .....	31
付録2 実験データに基づくシール性能の評価 .....	31

Contents

1. Introduction .....	1
2. Leak flow analysis .....	3
2.1 Modeling of leak flow path with seal elements .....	3
2.2 Basic equations .....	3
2.2.1 Single-layer seal element .....	3
2.2.2 Multi-layer seal elements .....	5
2.3 Results .....	5
2.3.1 Single-layer seal element .....	6
2.3.2 Multi-layer seal elements .....	6
3. Seal performance correlation .....	20
3.1 Single-layer seal element .....	20
3.2 Multi-layer seal elements .....	21
3.3 Application to reactor core design .....	22
4. Conclusion .....	29
Acknowledgements .....	30
References .....	30
Appendix-1 .....	31
Appendix-2 .....	31

## List of Figures

- Fig.1.1 Main coolant flow and leak flow in the reactor core
- Fig.2.1 Seal model for leak flow in the hot plenum blocks
- Fig.2.2 Seal model for leak flow in the permanent reflectors
- Fig.2.3 Modeling of leak flow path with seal element
- Fig.2.4 Modeling of leak flow path with multi-layer seal element
- Fig.2.5 The effect of friction pressure drop in the flow path with seal element
- Fig.2.6 Volumetric flow rate vs. pressure drop with seal element in air at 20°C
- Fig.2.7 Total pressure loss coefficient vs. pressure drop with seal element in air at 20°C
- Fig.2.8 Leak flow factor vs. pressure drop with seal-element in air at 20°C
- Fig.2.9 Total pressure loss coefficient vs. Reynolds number with seal element in air at 20°C
- Fig.2.10 Leak flow factor vs. Reynolds number with seal element in air at 20°C
- Fig.2.11 Volumetric flow rate vs. pressure drop with seal element in helium at 700°C
- Fig.2.12 Total pressure loss coefficient vs. pressure drop with seal element in helium at 700°C
- Fig.2.13 Leak flow factor vs. pressure drop with seal element in helium at 700°C
- Fig.2.14 Total pressure loss coefficient vs. Reynolds number with seal element in helium at 700°C
- Fig.2.15 Leak flow factor vs. Reynolds number with seal element in helium at 700°C
- Fig.2.16 Volumetric flow rate vs. pressure drop with multi-layer seal element in air at 20°C (Case A)
- Fig.2.17 Leak flow factor vs. pressure drop with multi-layer seal element in air at 20°C (Case A)
- Fig.2.18 Leak flow factor vs. Reynolds number with multi-layer seal element in air at 20°C (Case A)
- Fig.2.19 Volumetric flow rate vs. pressure drop with triple-layer seal element in air at 20°C

- Fig.2.20 Leak flow factor vs. pressure drop with triple-layer seal element in air at 20°C
- Fig.2.21 Leak flow factor vs. Reynolds number with triple-layer seal element in air at 20°C
- Fig.3.1 Comparison between numerical calculation and experimental result of seal performance for metal element (SUS304, thickness 0.3 mm)
- Fig.3.2 Comparison between numerical calculation and experimental result of seal performance for graphite element (thickness 6 mm)
- Fig.3.3 Gap at metal seal element vs. pressure difference
- Fig.3.4 Gap at graphite seal element vs. pressure difference
- Fig.3.5 Comparison between numerical calculation and experimental result of triple-layer seal performance for metal element
- Fig.3.6 Comparison between numerical calculation and experimental result of triple-layer seal performance for graphite element
- Fig.3.7 Gap at triple-layer metal seal element vs. pressure difference
- Fig.3.8 Gap at triple-layer graphite seal element vs. pressure difference
- Fig.3.9 Pressure difference ratio vs. helium temperature



## 1. 序 論

多目的高温ガス実験炉は炉心が黒鉛ブロックの積み重ね構造であるので、原子炉压力容器内の流動特性を正確に予測することは現状では困難である。压力容器内の冷却材流れとしては、Fig. 1.1 に示すようにブロックに開けられた冷却材流路を通り燃料ピンの熱除去を行なう主流のほか、ブロック水平面間のすき間を通るクロス流れ、カラム間ギャップ流れ、および炉心をバイパスして周囲から直接高温プレナムへ流入する流れが考えられる<sup>1)</sup>。これらの流れは炉心全体の流動分布、さらには炉心の除熱性能に大きな影響を与える可能性がある。特に、炉心をバイパスして固定反射体の内側や高温プレナムへ直接流入する流れは主流の有効流量を減少させ、原子炉出口冷却材温度の低下を招く。従って、炉心をバイパスする流れを防止することは、炉心有効流量を確保する上で、極めて重要である<sup>2)</sup>。

流れ流量の低減化のためには、例えば構造物間のギャップをできるだけ小さくすることが考えられる。そのため、固定反射体を炉心拘束機構で拘束し、炉床部の各ブロック間のすき間をできるだけ小さくする設計になっている<sup>3)</sup>。しかし、ブロックの加工精度や、温度分布に伴う各部の熱膨張差を考慮すると、許容できる流れ流量に抑えるために要求されるブロック間ギャップにするのは困難である。従って、流れ流量の低減化のためには炉床部ブロック間にシール要素を設置する必要がある。シール要素としては、約 1,000 °C という高温のプレナムブロック間には黒鉛板シールを<sup>4)</sup>、比較的低温の固定反射体間には金属ストリップシールを用いることが考えられる。また多段シール要素を設置することで、炉内流量配分の改善やシール要素破損時の安全性向上に寄与することが考えられる。

炉内流動特性はシール要素の性能に大きく依存するので<sup>5)</sup>、シール性能の実験及び解析より適切なシール性能表示式の選定を行ない、炉内流動解析の精度を向上させる必要がある。

本報告では、高温プレナムブロック部や固定反射体部の流れを防止するため、1 段及び多段シール要素を設置したシール部の効果を検討する。2 章ではシール部流動解析を行ない、3 章ではシール部流動データ<sup>6)</sup>を検討し、シール性能表示式を選定する。最後の 4 章では、全体として得られる結論について述べる。

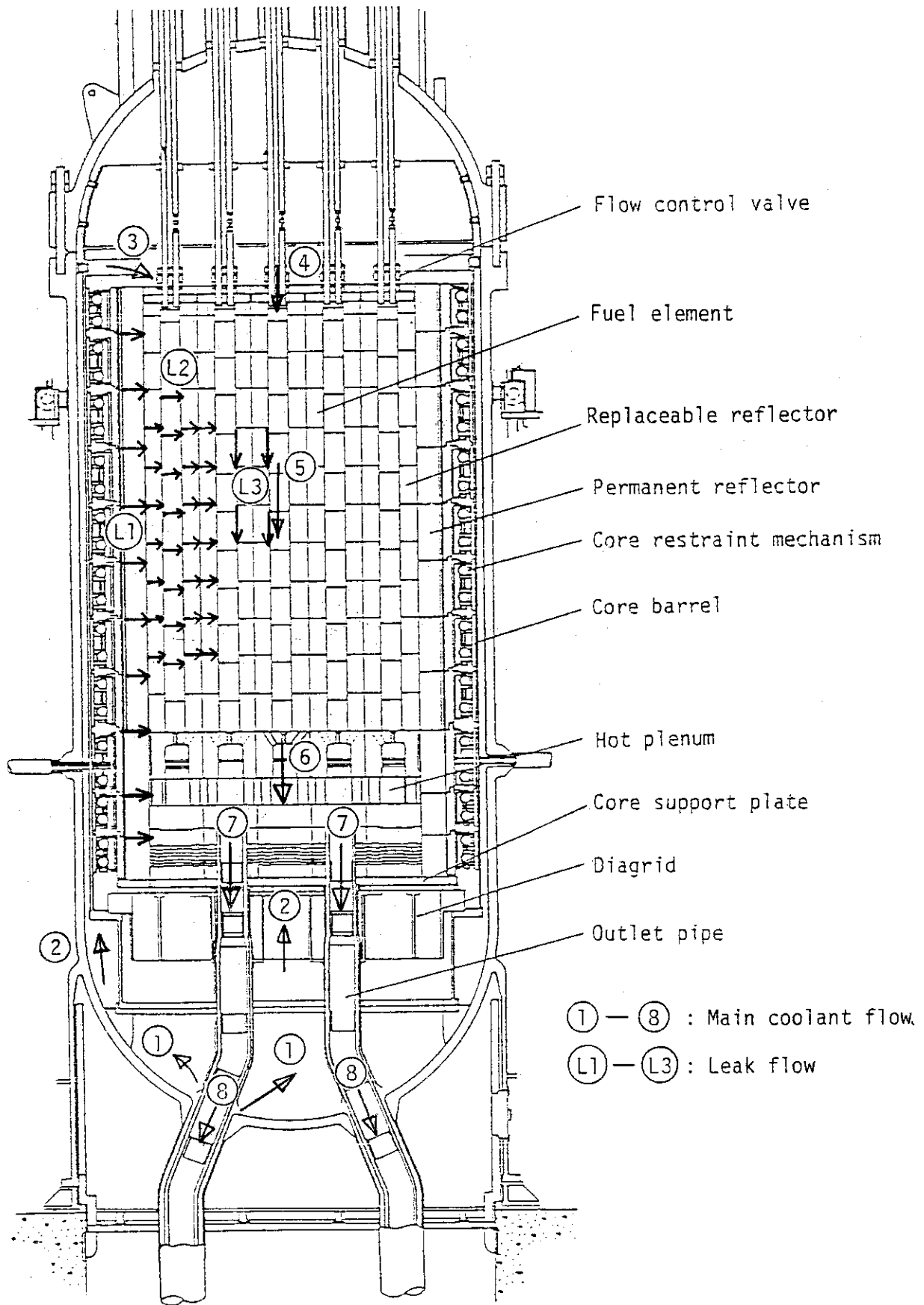


Fig.1.1 Main coolant flow and leak flow in the reactor core

## 2. シール部流動解析

本章では、シール要素部ギャップ  $d_s$  が差圧  $\Delta p$  に依存しない場合の流動解析を行なう。解析の対象とする炉内構造物は1段及び多段のシール要素を設置した高温プレナムブロックや固定反射体シール部である。

### 2.1 シール部のモデル化

1段シール要素を設置した高温プレナムブロックや固定反射体シール部の漏れ流路の計算モデルをそれぞれFig. 2.1およびFig. 2.2に示す。高温プレナムブロックでは、AB間の流路1および流路2はそれぞれシール要素部流路およびシール接続部流路を、BC間は高温プレナムブロック間流路を示す。また固定反射体では、BP1間の流路1および流路2はそれぞれ上下ブロック間外側流路および隣接ブロック間外側流路を、P1P2間の流路1および流路2はそれぞれ上下ブロック間シール接続部流路および上下ブロック間シール要素部流路、P1P3間の流路1および流路2はそれぞれ隣接ブロック間シール接続部流路および隣接ブロック間シール要素部流路を、P2G間は上下ブロック間内側流路それにP3G間は隣接ブロック間内側流路を示す。実験炉の設計では固定反射体部漏れ流路におけるブロック面間流路の流路抵抗として外周から200mmの部分(BP1)についてのみを考慮し、これより炉心側のブロック面間流路(P2G, P3G)については構造的に1mmの隙間が設けられているのでこの部分の流路抵抗は無視している。

高温プレナムブロックや固定反射体のシール部はさらに次のようにモデル化できる。1段シール要素の場合および多段(3段)シール要素の場合の計算モデルをそれぞれFig. 2.3およびFig. 2.4に示す。1段シール要素の場合、漏れ流れはギャップ幅  $d_s$  が等しい2本の平行2平板流路を通りブロック面間流路(ギャップ幅は  $d$ )へ流入する。

多段シール要素の場合、漏れ流れはシール要素部流路(ギャップ幅は  $d_s$ )をシール要素の段数だけ直列に通過する。

### 2.2 基礎式

#### 2.2.1 1段シール要素の場合

1段シール要素を設置した漏れ流れでは次のように仮定する。

- i) シール要素部ギャップ  $d_s$  は差圧  $\Delta p$  に依存しない。
- ii) 漏れ流路は  $d_s$  が等しい2本の平行2平板流路である。
- iii) 流路抵抗としては、出入口部の縮拡流による圧力損失は無視し、シール要素部とブロック面間流路の摩擦圧力損失のみとする。詳細は付録1に示す。
- iv) 漏れ流れは層流である。

以上の仮定より漏れ流路の差圧(圧力損失)は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p}{r} = \frac{v_d^2}{2g} \left( f_s \frac{l_s d^2}{8 d_s^3} + f \frac{l}{2d} \right) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

$$\Delta p = p_0 - p_3$$

$$f_s = \frac{96}{Re_s}$$

$$f = \frac{96}{Re_d}$$

$$Re_s = \frac{2 v_s d}{\nu} = \frac{Q}{\nu a} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$Re_d = \frac{2 v_d d}{\nu} = 2 Re_s \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

なお、 $p$ は圧力、 $v$ は流速、 $f$ は摩擦係数、 $l$ は流路長、 $d$ は流路ギャップ、 $a$ は流路幅、 $r$ は比重量、 $g$ は重力加速度、 $\nu$ は動粘性係数、 $Q$ は体積流量、 $Re$ はレイノルズ数であり、下付添字 $s$ はシール要素部、 $d$ はブロック面間、 $0$ は流路入口、 $3$ は流路出口を表わす。詳細はFig. 2.3に示す。

さらにシール要素部損失係数 $K_1$ 、ブロック面間流路損失係数 $K_2$ 及び総損失係数 $K$ をそれぞれ次のように定義する。

$$K_1 \equiv f_s \frac{l_s d^2}{8 d_s^3} = \frac{12 \nu a l_s d^2}{Q d_s^3} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$K_2 \equiv f \frac{l}{2d} = \frac{24 \nu a l}{Q d} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$K \equiv K_1 + K_2 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

従って、漏れ流れ損失係数 $K/A^2$ は次式で与えられる。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{12 \nu}{Q a} \left( \frac{l_s}{d_s^3} + \frac{2l}{d^3} \right) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

(2.2)式～(2.7)式を用いて(2.1)式を整理すると次式が得られる。

$$\frac{\Delta p}{r} = \frac{v_d^2}{2g} \cdot K$$

または

$$\frac{\Delta p}{r} = \frac{Q^2}{2g} \cdot \frac{K}{A^2} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、 $Q$ は体積流量(漏れ流量)、 $A$ はブロック面間流路断面積である。またシール要素がない場合は $K_1 = 0$ である。

ブロック面間流路の摩擦圧力損失を無視すると(2.1)式は

$$\frac{\Delta p}{r} = f_s \cdot \frac{\ell_s d^2}{8 d_s^3} \cdot \frac{v_d^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

となり、無視しない場合との差圧比  $R_{dp}$  は(2.9)式、(2.1)式より

$$R_{dp} = \frac{1}{1 + \frac{2\ell d_s^3}{\ell_s d^3}} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

で与えられる。実験炉の設計で検討されている代表的な寸法を用いると、 $R_{dp}$  は Fig. 2.5 で示される。 $d_s$  が  $10^{-4}$  m における  $R_{dp}$  は約 0.96 であり、シール要素部摩擦圧力損失が支配的である事を示す。従って、 $d_s$  が  $d$  に比べて 1 桁程度小さい場合には差圧の式として(2.1)式の代わりに(2.9)式を用いると誤差は 4% 以下である。

## 2.2.2 多段シール要素の場合

同一形状のシール要素を直列に設置した多段( $n$ 段)シール部の漏れ流れでは次のように仮定する。

- i) 2.2.1 項の仮定を満足する。
- ii) 各段のシール要素部差圧は等しい。
- iii) ブロック面間流路長は 1 段シール要素の場合に等しい。

以上の仮定と(2.4)、(2.5)、(2.8)式より、 $n$  段シール要素を設置した漏れ流路の差圧は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p}{r} = \frac{Q^2}{2gA^2} (nK_1 + K_2) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、

$$K = nK_1 + K_2 \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

とおけば(2.8)式が得られる。従って、差圧比  $R_{dp}$  は次式となる。

$$R_{dp} = \frac{nK_1}{nK_1 + K_2} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

$d_s$  が  $d$  に対して 1 桁程度小さい場合 3 段シール構造における  $R_{dp}$  は約 0.986 であり、1 段シール構造に比べてブロック面間流路の圧力損失の効果はさらに小さくなる。

## 2.3 解析結果

### 2.3.1 1 段シール要素の場合

大気圧 20°C 空気中(常温大気中)及び 40 atg 700°C ヘリウム中において解析計算を行なった。シール要素がない場合の解析結果や実験結果と比較するため、形状パラメータのうち  $a$ 、 $\ell$ 、 $d$ 、 $\ell_s$  を実験形状<sup>6)</sup>に一致させる。すなわち、 $a = 0.2$  m、 $\ell = 0.3$  m、 $d = 1$  mm、 $\ell_s = 15$  mm とする。計算パラメータはシール要素部ギャップ  $d_s$  (0.01~0.3 mm) と漏れ流体体積流量  $Q$  ( $10^{-5}$  ~  $10^{-2}$  m<sup>3</sup>/s) である。

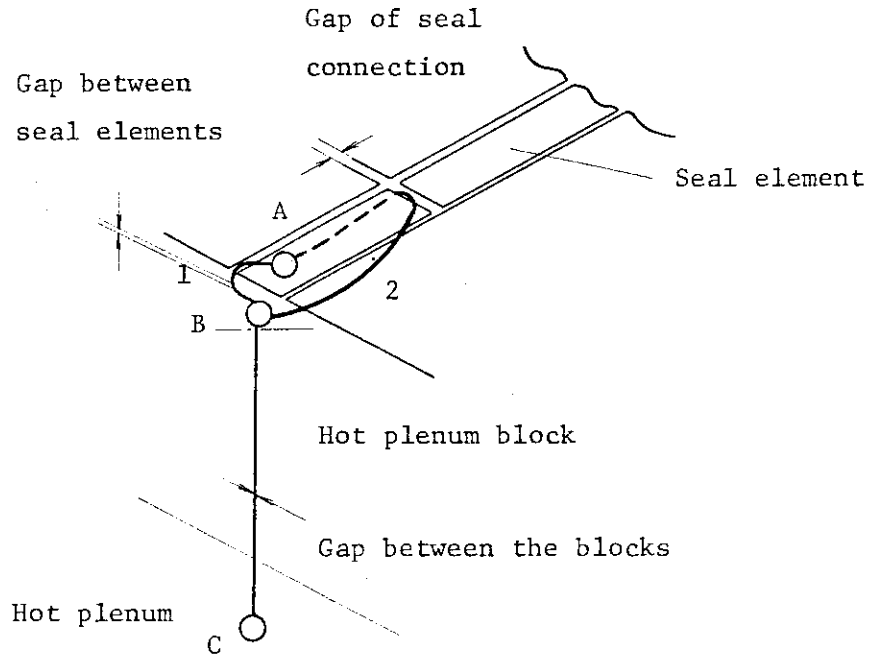
20°C 空気中の  $Q - \Delta p$ ,  $K - \Delta p$ ,  $K/A^2 - \Delta p$ ,  $K - Re_d$ ,  $K/A^2 - Re_d$  の関係をそれぞれ Fig. 2.6 ~ Fig. 2.10 に示し, 700°C He 中の結果をそれぞれ Fig. 2.11 ~ Fig. 2.15 に示す。これらの図のパラメータは  $d_s$  である。

20°C 空気中における  $Q - \Delta p$  の関係を Fig. 2.6 に示す。Q は  $\Delta p$  のべき乗に比例し, 層流理論式を用いているので, 両対数グラフでは傾きは 1 である。 $\Delta p$  や  $d_s$  が増加すると, Q は増加する。 $d_s$  が 0.01 mm ( $\ll d$ ) の場合, 流量 Q はシール要素がない場合に比べて非常に小さいが,  $d_s$  が 0.3 mm ( $\approx d$ ) の場合には流量はシール要素がない場合の値に近くなる。同じ傾向は 700°C He の場合 (Fig. 2.11 参照) にも現われる。両図を比較すると空気中の方が漏れ流量が多いことがわかる。空気中及び He 中の  $K - \Delta p$  関係はそれぞれ Fig. 2.7 及び Fig. 2.12 に示すが, 両図とも,  $\Delta p$  や  $d_s$  が増加すると K は減少する。K の値は He 中の方が大きいので, 空気中の方が漏れやすいことを示す。またこのことは, 空気中の  $\Delta p$  が  $10^4$  (kg/m<sup>2</sup>),  $d_s$  が 0.03 (mm) の場合には, Fig. 2.7 より, K の値は約  $6.3 \times 10^4$  となるが, 700°C He 中で K の値が  $6.3 \times 10^4$ ,  $d_s$  が 0.03 (mm) に対応する  $\Delta p$  は, Fig. 2.12 より, 約  $3.3 \times 10^4$  (kg/m<sup>2</sup>) となることからわかる。空気中及び He 中の  $K - Re_d$  の関係をそれぞれ Fig. 2.9 及び Fig. 2.14 に示す。両図とも  $Re_d$  や  $d_s$  が増加すると K 値は減少する。

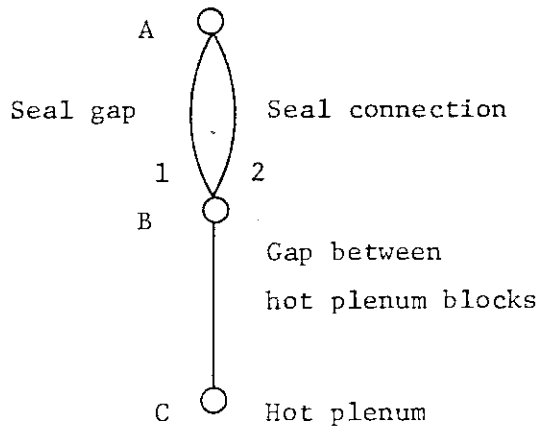
### 2.3.2 多段シール要素の場合

20°C 大気中における解析結果を Fig. 2.16 ~ Fig. 2.21 に示す。Case A はブロック面間流路の圧力損失を考慮する場合であり, Case B はその圧力損失を無視する場合である。流路形状は 2.3.1 項と同様であり,  $d_s$  は 0.1 mm とする。2.2 節に記したように,  $d_s$  は  $d$  より 1 桁小さいので, 両者の結果は約 4% の誤差である。Case A 及び Case B における  $Q - \Delta p$ ,  $K/A^2 - \Delta p$ ,  $K/A^2 - Re$  の関係をそれぞれ Fig. 2.16, Fig. 2.17, Fig. 2.18 に示す。これらの図において段数がパラメータである。段数が増加すると (2.11) 式に従って漏れ流量が減少し,  $K/A^2$  値は増加する。

3 段シール要素を設置した漏れ流路における  $Q - \Delta p$ ,  $K/A^2 - \Delta p$ ,  $K/A^2 - Re$  の関係をそれぞれ Fig. 2.19, Fig. 2.20, Fig. 2.21 に示す。これらの図においてシール要素部ギャップ  $d_s$  がパラメータである。Case B が Case A より漏れやすい事は明らかであり,  $d_s$  が 0.3 mm では両者の差異は顕著であるが,  $d_s$  が 0.1 mm 以下になると両者の誤差は 4% 以下になる。

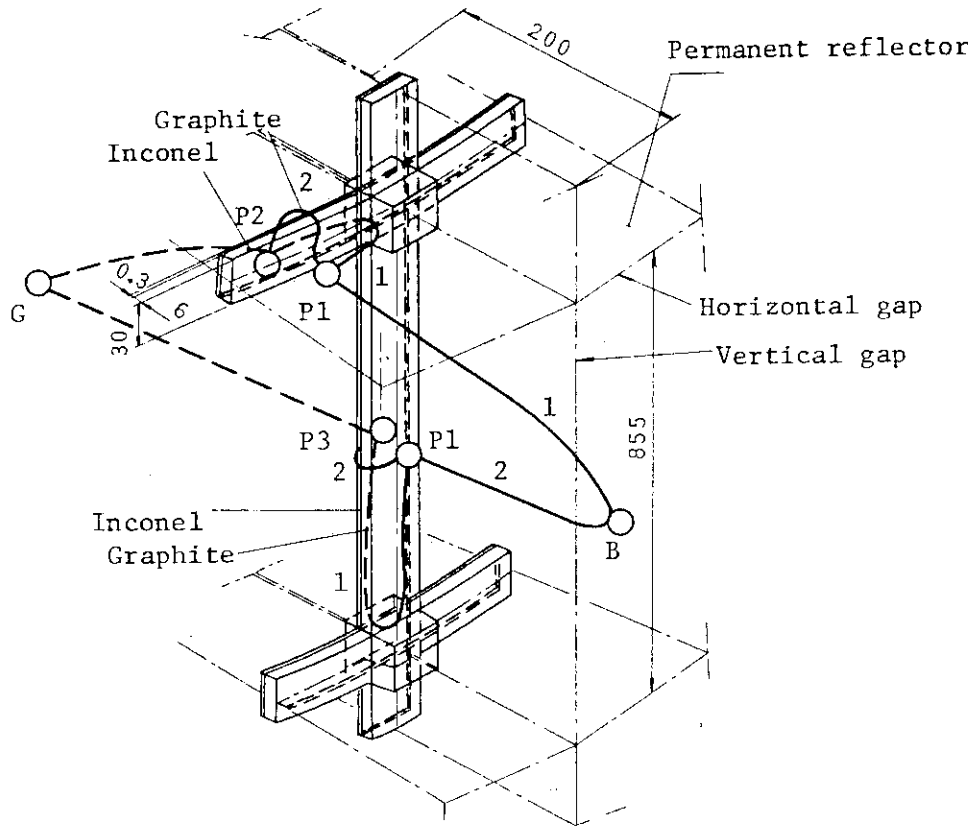


(a) Structure and Flow Branches

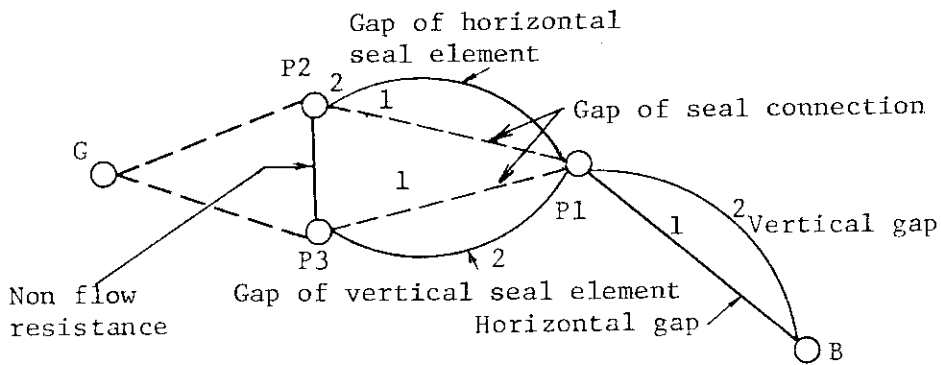


(b) Analytical Model

Fig.2.1 Seal model for leak flow in the hot plenum blocks



(a) Structure and Flow Paths



(b) Analytical Model

Fig.2.2 Seal model for leak flow in the permanent reflectors



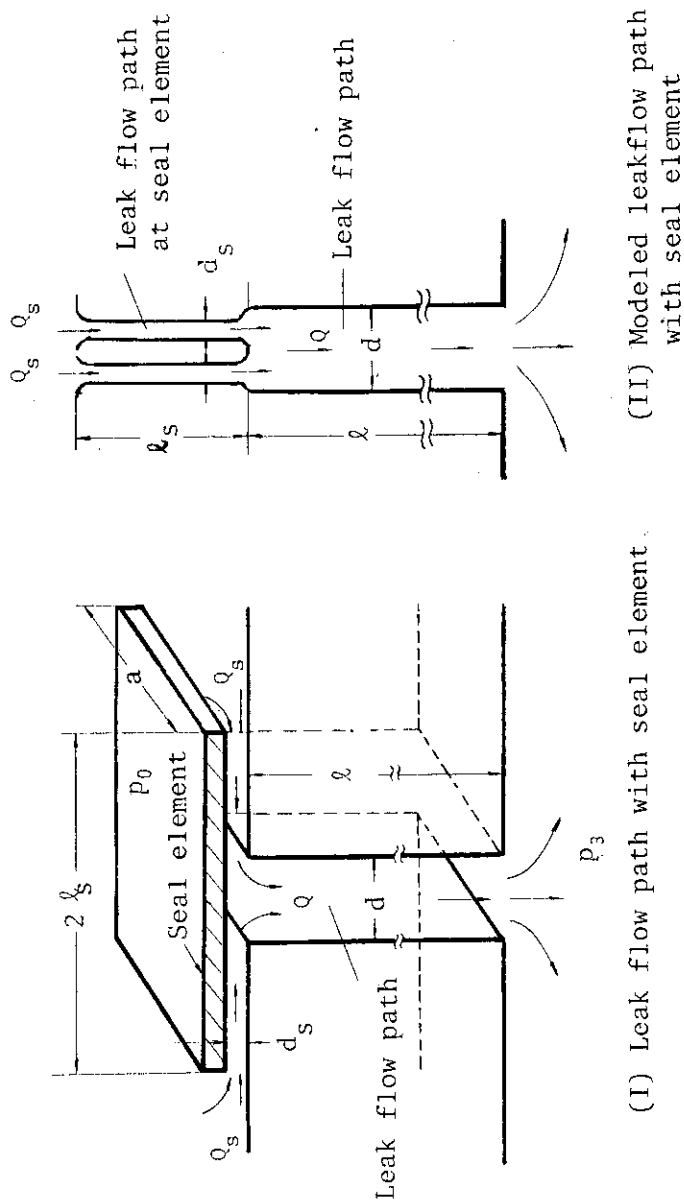
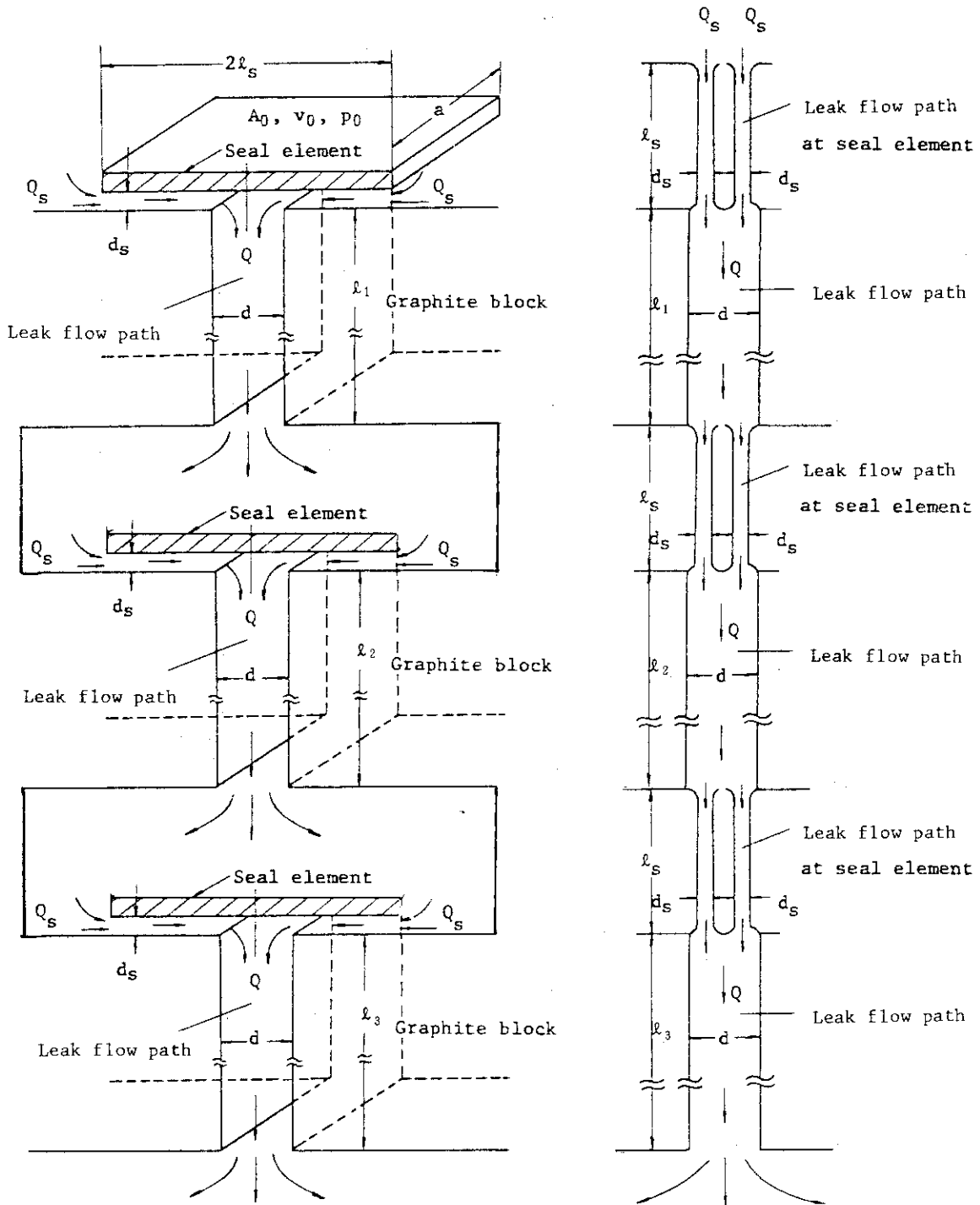


Fig.2.3 Modeling of leak flow path with seal element



(I) Leak flow path with multi-layer seal element

(II) Modeled leak flow path with multi-layer seal element

Fig.2.4 Modeling of leak flow path with multi-layer seal element

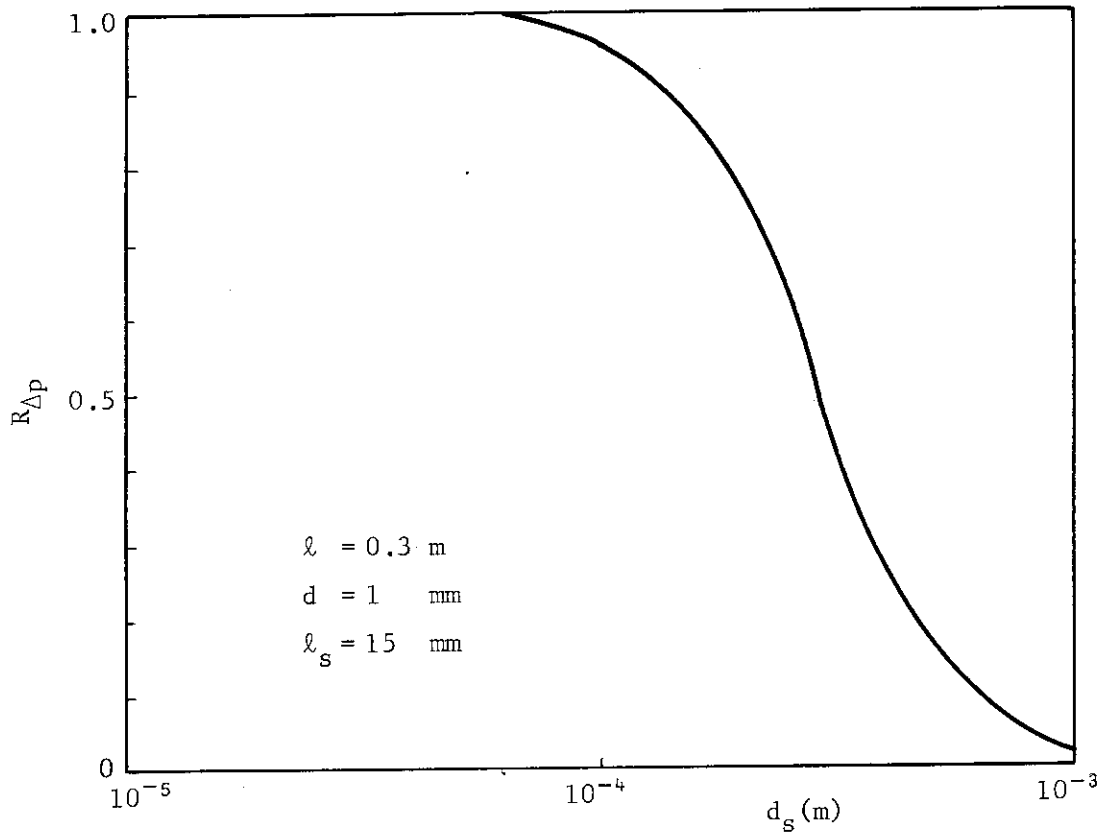


Fig.2.5 The effect of friction pressure drop in the flow path with seal element

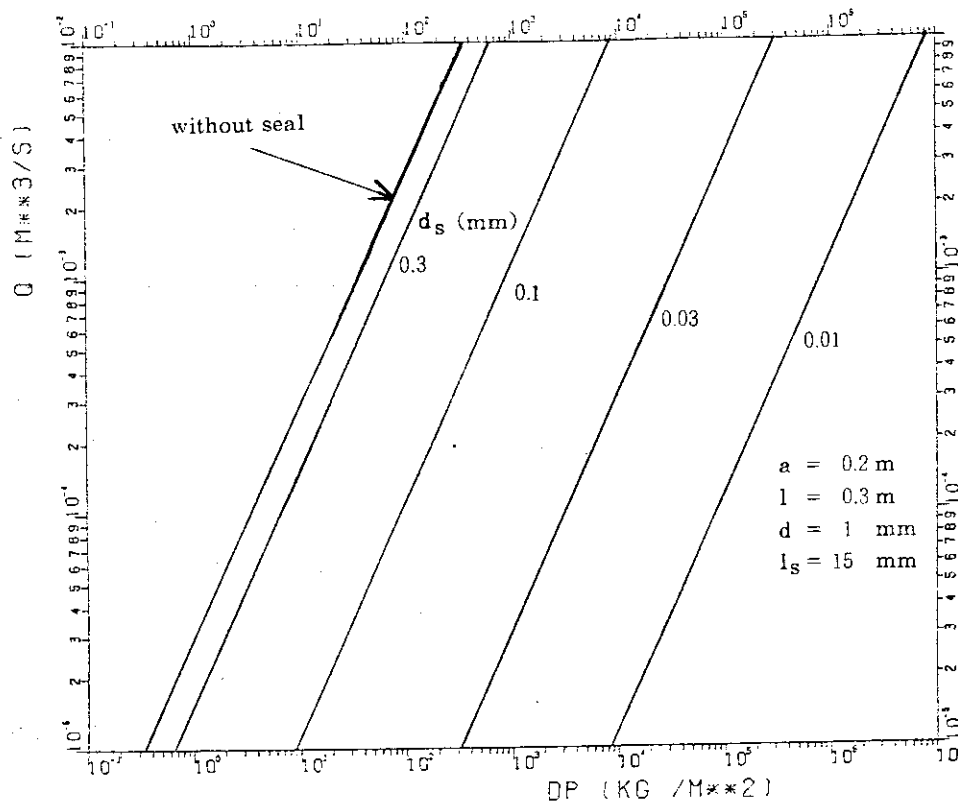


Fig.2.6 Volumetric flow rate vs. pressure drop with seal element in air at 20°C

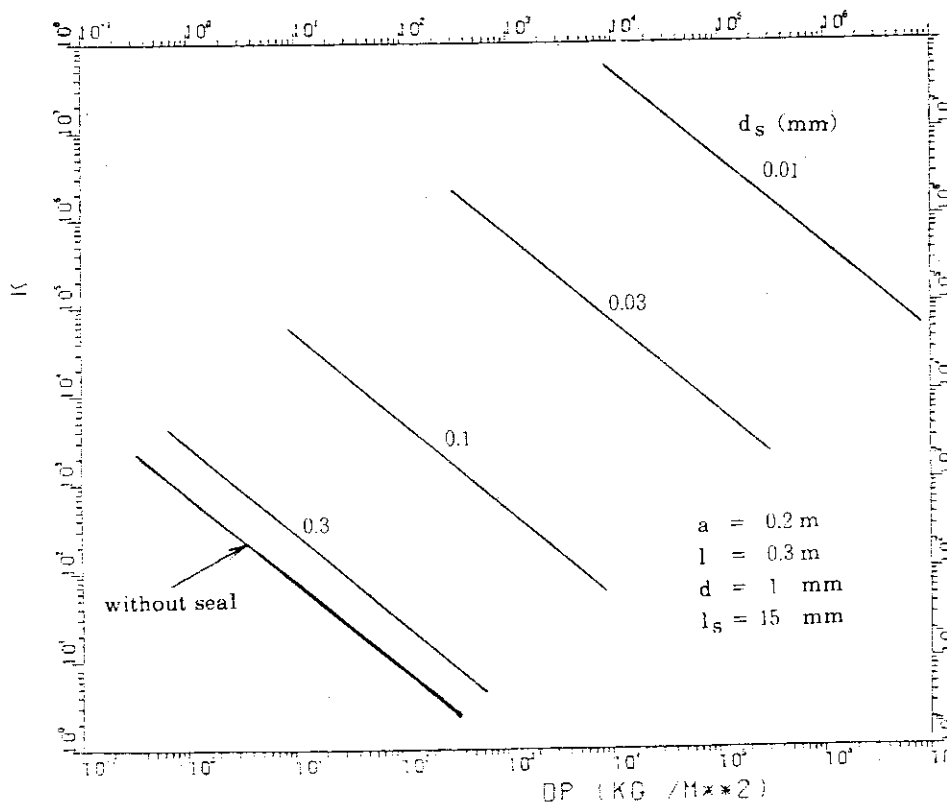


Fig.2.7 Total pressure loss coefficient vs. pressure drop with seal element in air at 20°C

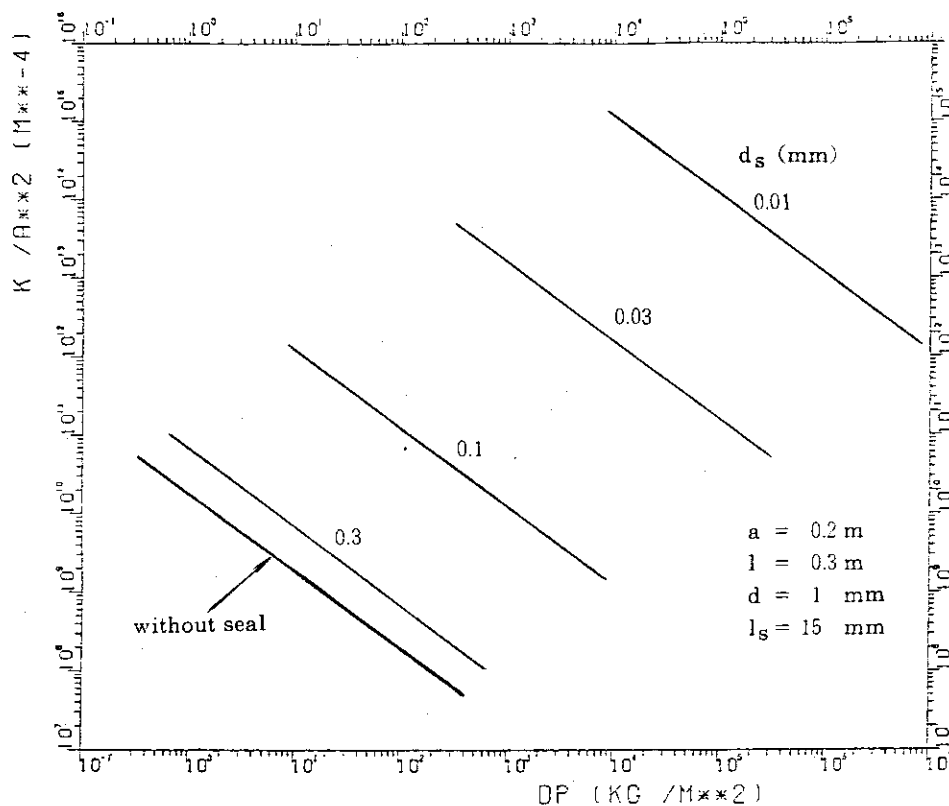


Fig.2.8 Leak flow factor vs. pressure drop with seal-element in air at 20°C

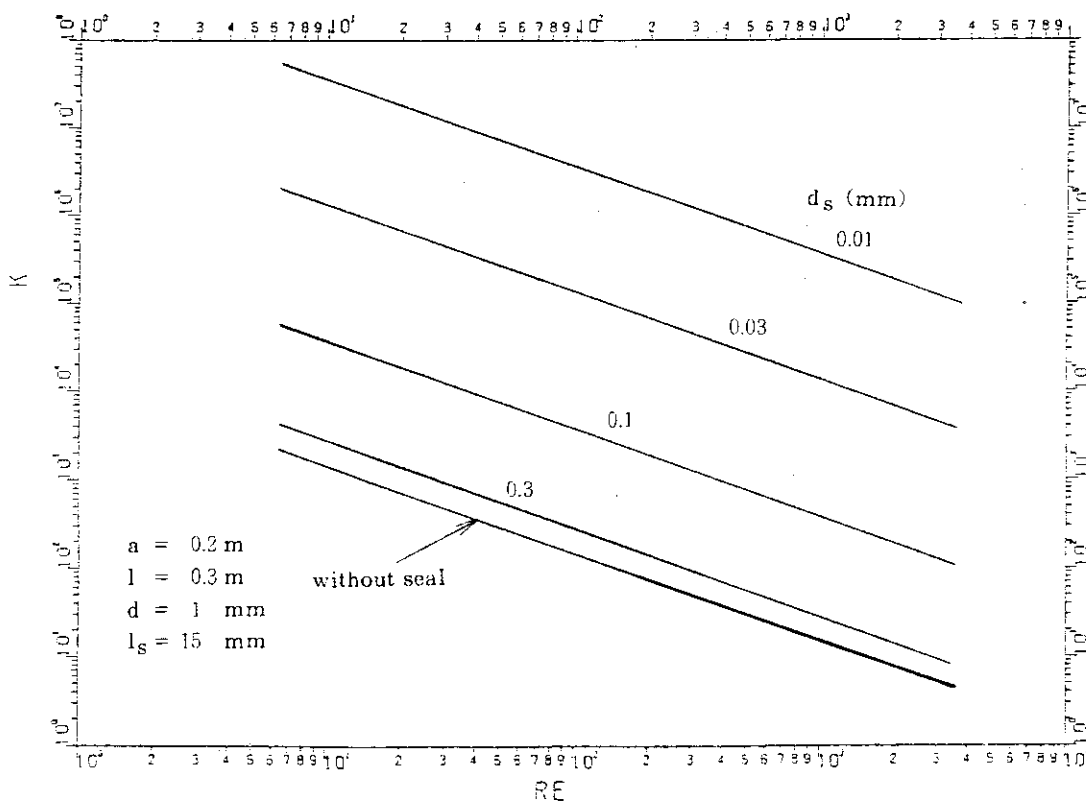


Fig.2.9 Total pressure loss coefficient vs. Reynolds number with seal element in air at 20°C

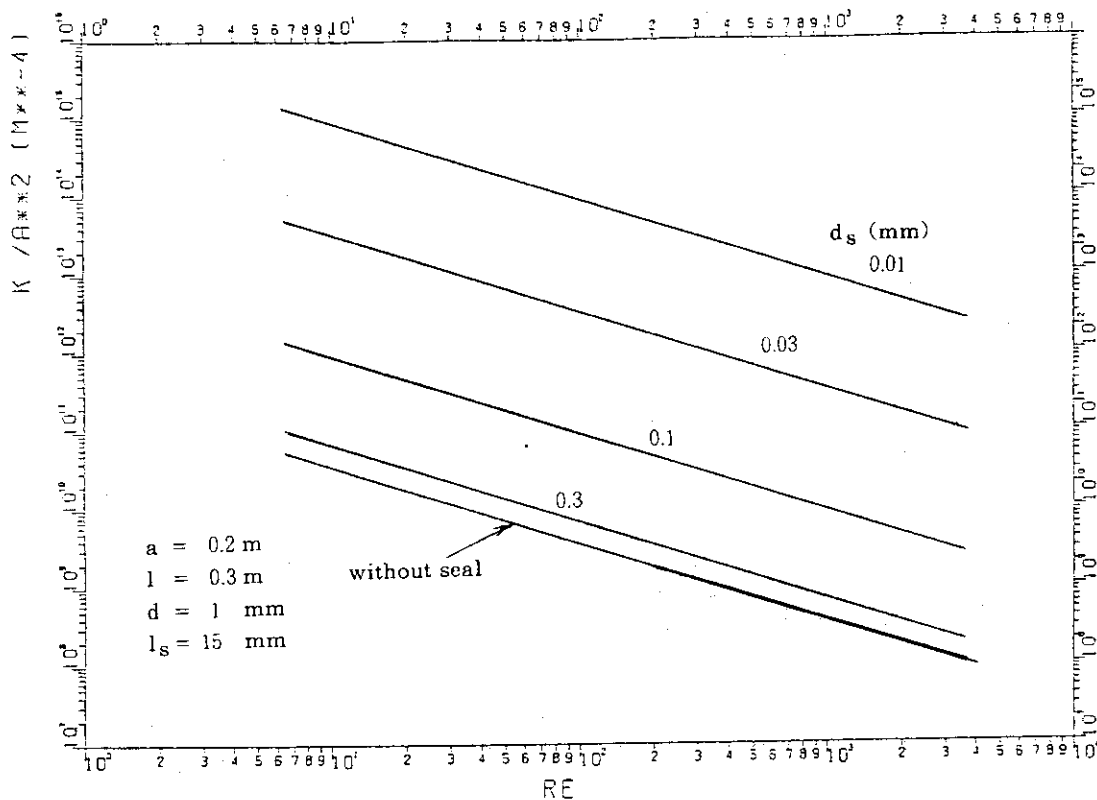


Fig.2.10 Leak flow factor vs. Reynolds number with seal element in air at 20°C

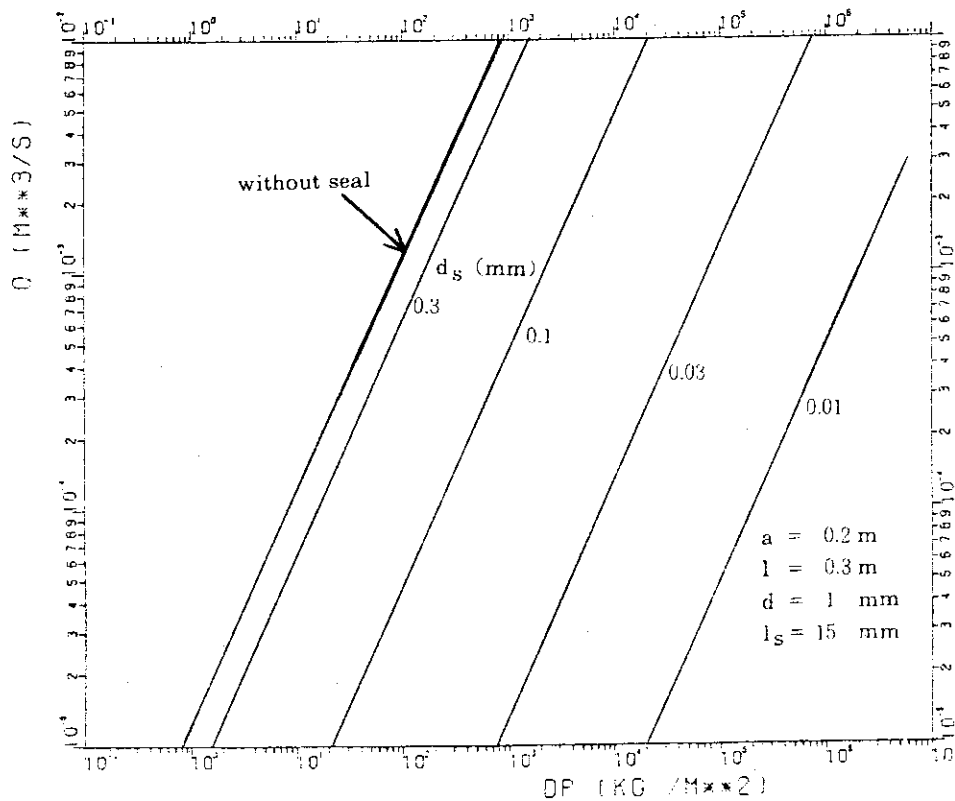


Fig.2.11 Volumetric flow rate vs. pressure drop with seal element in helium at 700°C

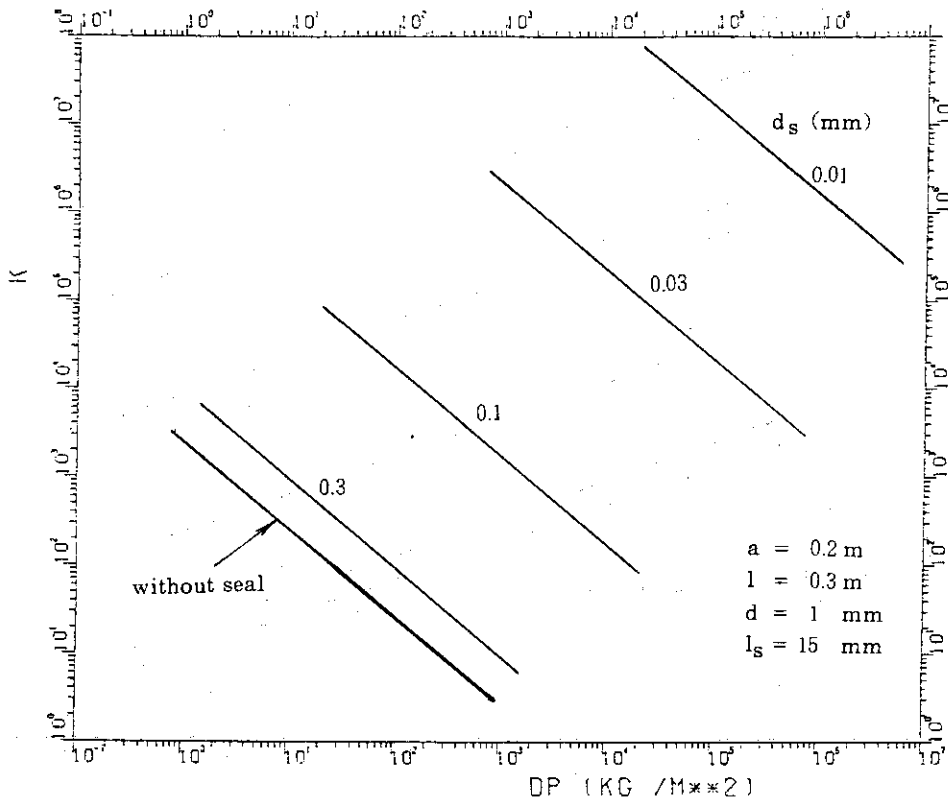


Fig.2.12 Total pressure loss coefficient vs. pressure drop with seal element in helium at  $700^\circ\text{C}$

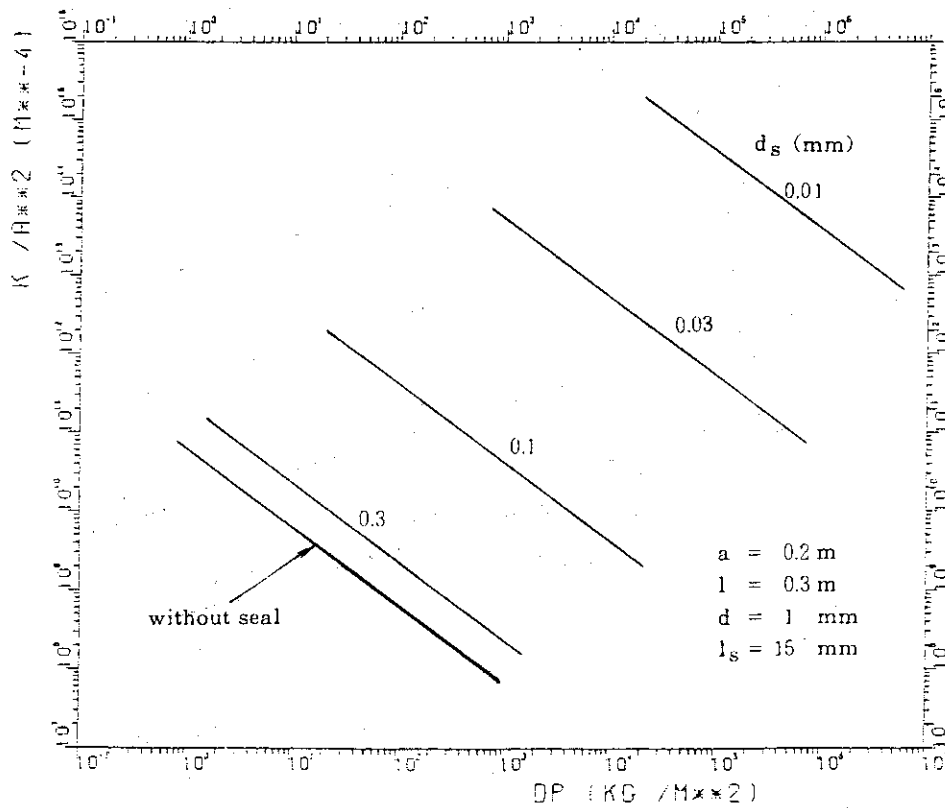


Fig.2.13 Leak flow factor vs. pressure drop with seal element in helium at  $700^\circ\text{C}$

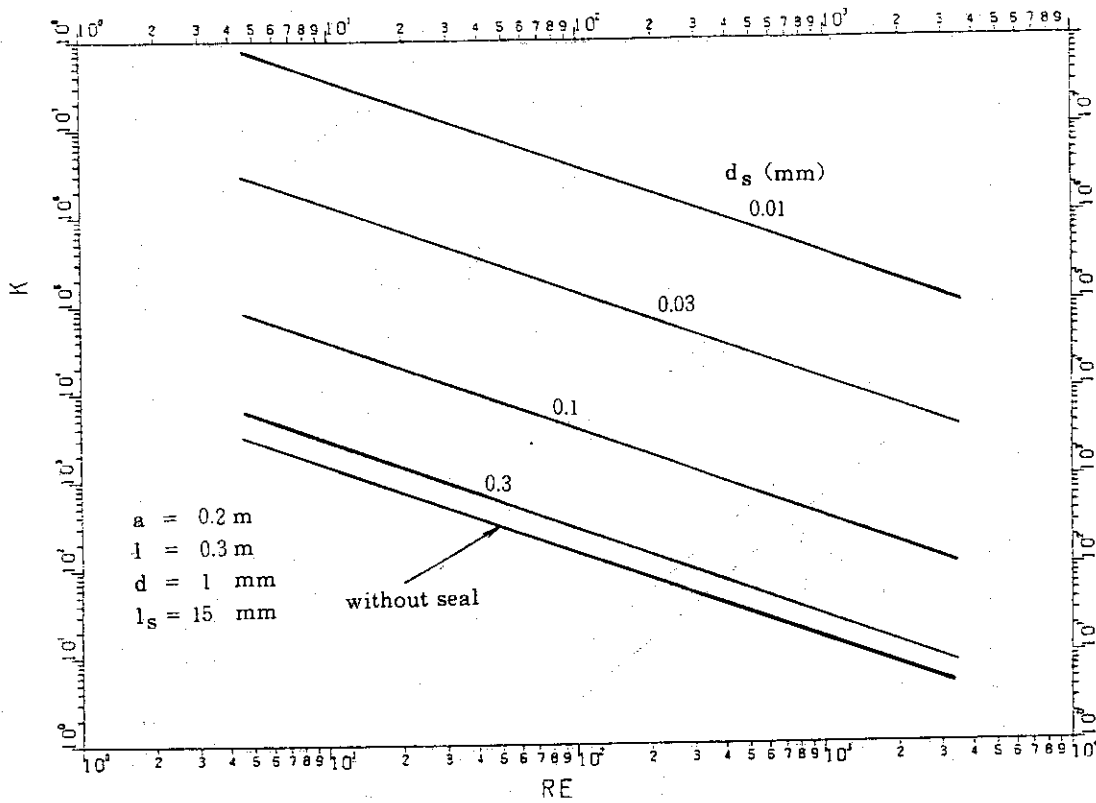


Fig.2.14 Total pressure loss coefficient vs. Reynolds number with seal element in helium at 700°C

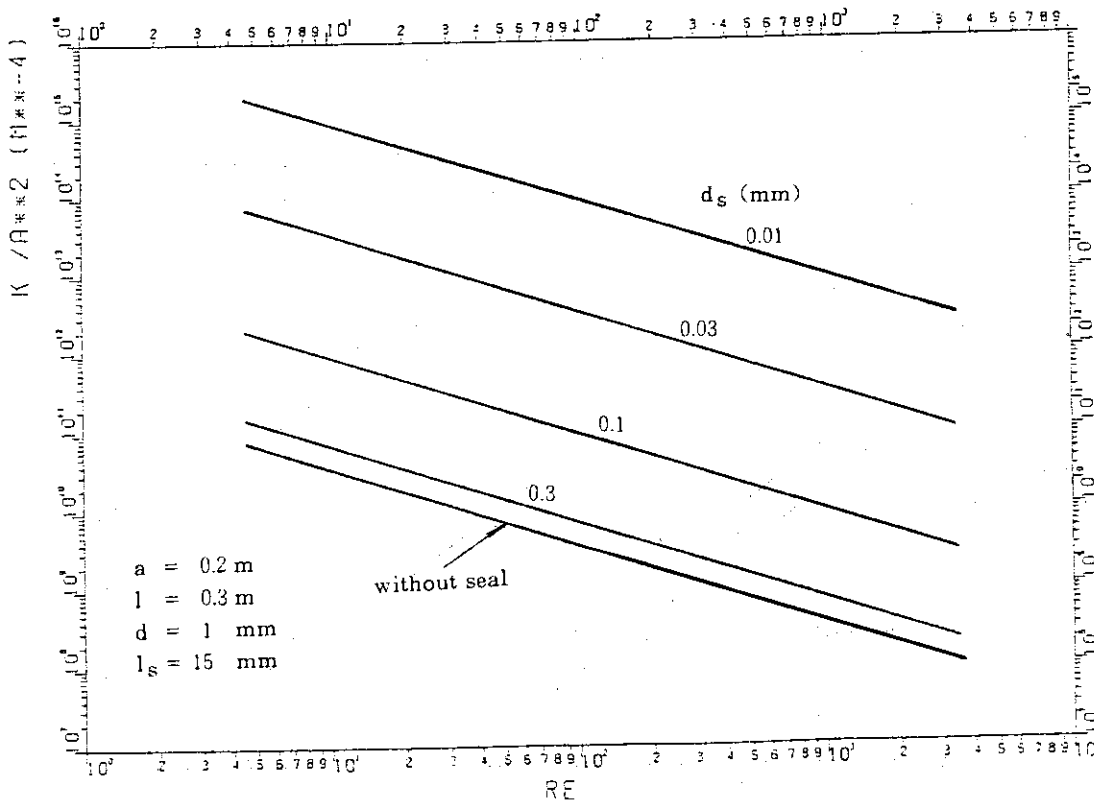


Fig.2.15 Leak flow factor vs. Reynolds number with seal element in helium at 700°C



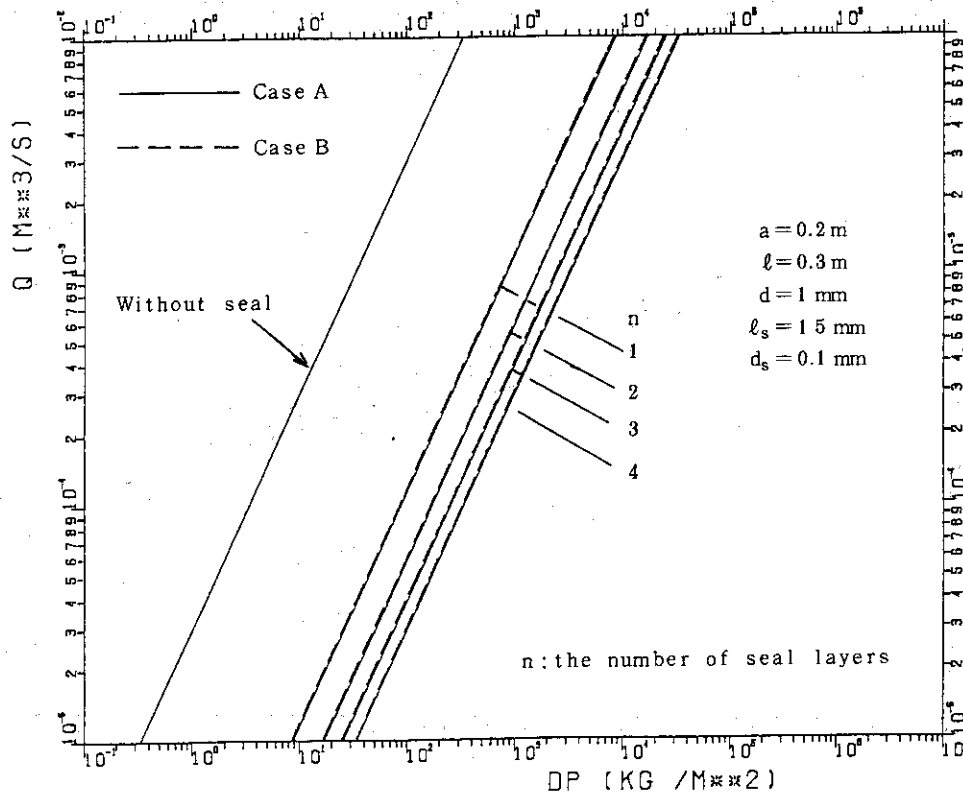


Fig.2.16 Volumetric flow rate vs. pressure drop with multi-layer seal element in air at 20°C (Case A)

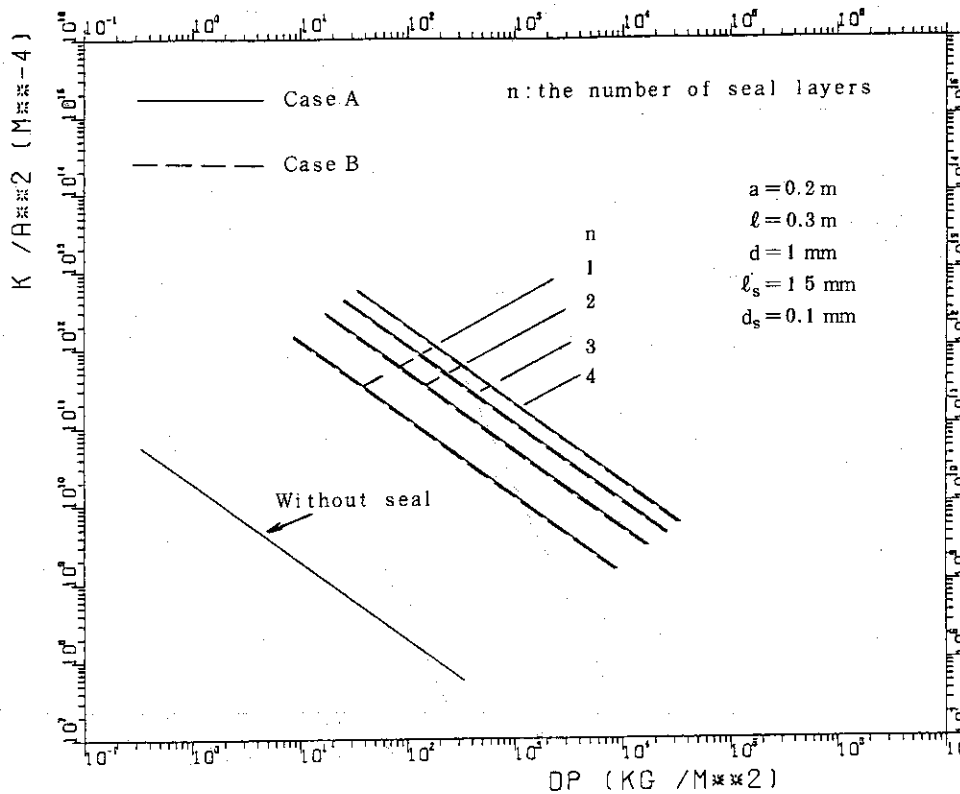


Fig.2.17 Leak flow factor vs. pressure drop with multi-layer seal element in air at 20°C (Case A)

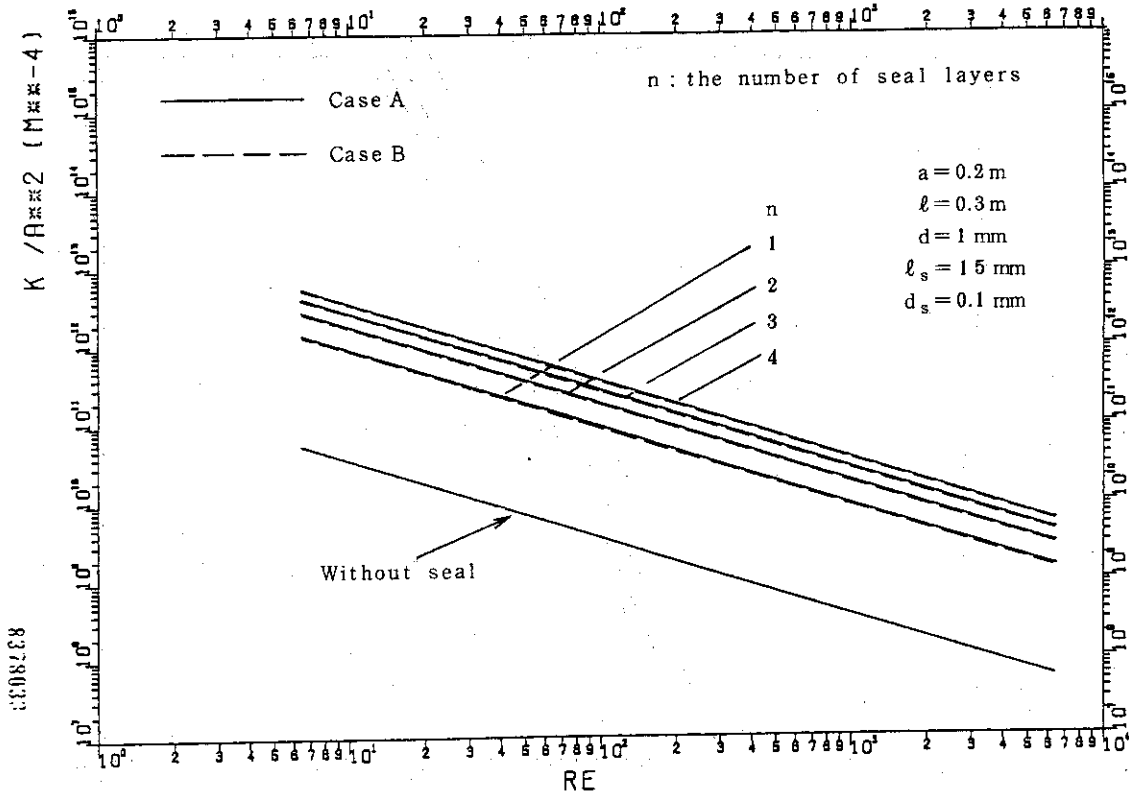


Fig.2.18 Leak flow factor vs. Reynolds number with multi-layer seal element in air at 20°C (Case A)

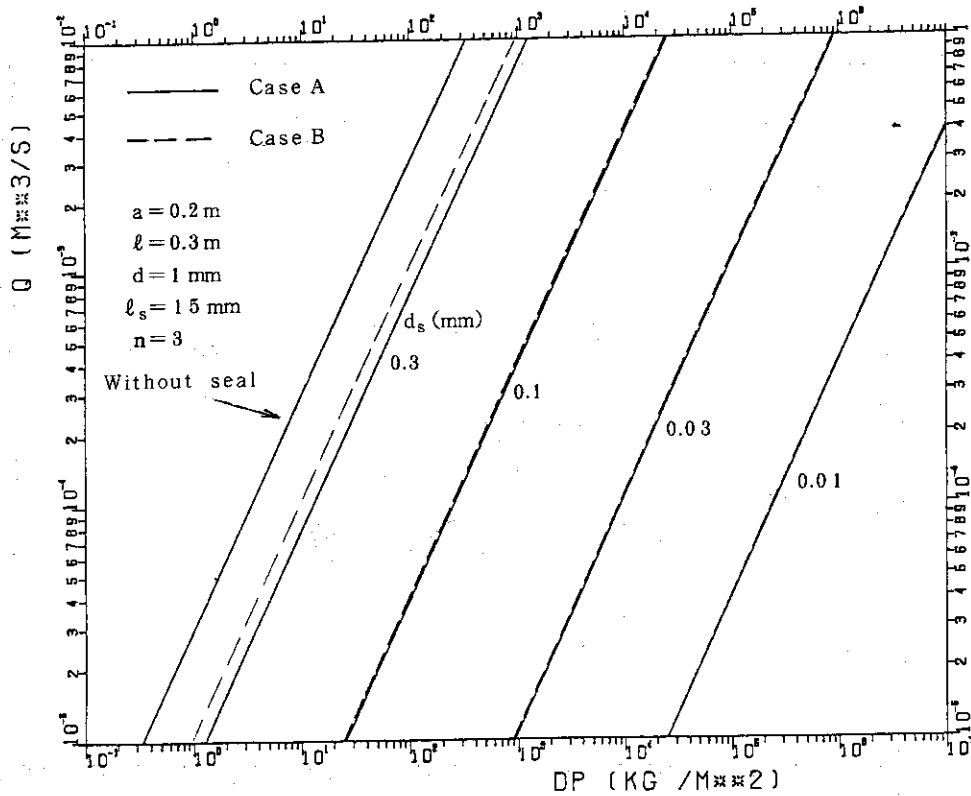


Fig.2.19 Volumetric flow rate vs. pressure drop with triple-layer seal element in air at 20°C

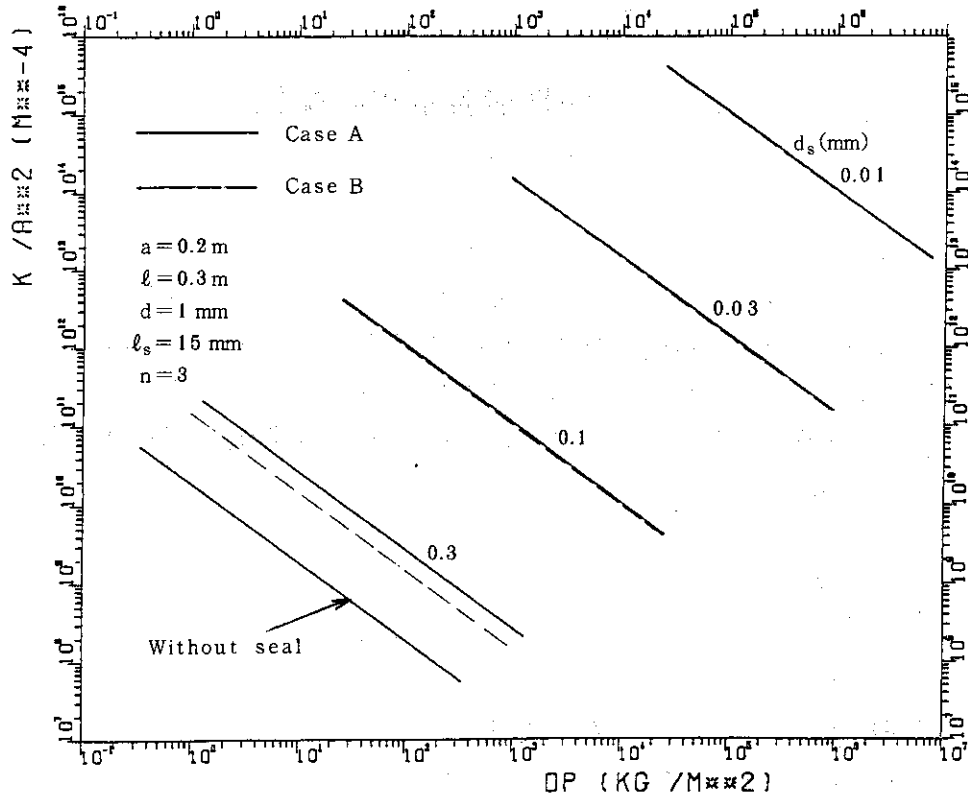


Fig.2.20 Leak flow factor vs. pressure drop with triple-layer seal element in air at 20°C

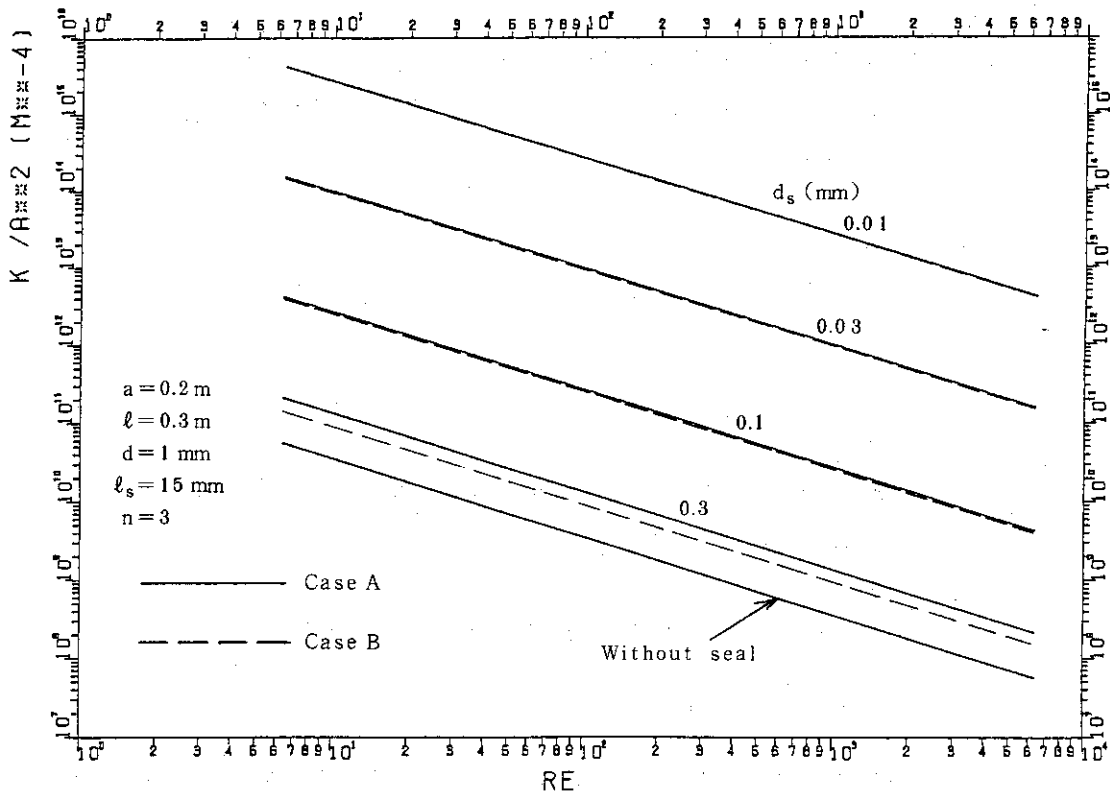


Fig.2.21 Leak flow factor vs. Reynolds number with triple-layer seal element in air at 20°C

### 3. シール性能表示式の検討

実験炉の設計によるとシール部はブロック面間ギャップの漏れ流れを防ぐために黒鉛板や金属板を設けた構造になっている。従って、シール要素部ギャップ  $d_s$  が差圧  $\Delta p$  によって変化することが考えられる。 $d_s$  と  $\Delta p$  の関係は実験より求まるものである。井出ら<sup>6)</sup>は常温大気中でシール要素基礎実験を行ない、 $Q$  が  $\Delta p$  のべき乗に比例する関係を得ている。本章では、 $Q$  と  $\Delta p$  の関係から  $d_s$  と  $\Delta p$  の関係式を導出する。さらに1段及び多段シール要素を設置した漏れ流路のシール性能表示式を選定する。

#### 3.1 1段シール要素の場合

本節では次のように仮定する。

- i) 漏れ流量はシール部差圧のべき乗に比例する。
  - ii) 漏れ流路は  $d_s$  が等しい2本の平行2平板流路である。
  - iii) 流路抵抗としては、出入口部の縮拡流による圧力損失は無視し、シール要素部とブロック面間流路の摩擦圧力損失のみとする。
- i) の仮定より次式が成立する。

$$Q = \eta \Delta p^\xi \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 $\eta$ 、 $\xi$  は実験より得られる定数である。

層流乱流を問わず成立する(2.8)式と(3.1)式より漏れ流れ損失係数  $K/A^2$  と  $\Delta p$  の関係が得られ、次式で与えられる。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r\eta^2} \Delta p^{1-2\xi} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

また、(2.2)式、(3.1)式及び(3.2)式より  $K/A^2$  と  $Re_s$  の関係が得られ、次式で与えられる。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r\eta^{1/\xi}} (\nu a)^{1/\xi-2} \cdot Re_s^{1/\xi-2} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

さらに漏れ流れが層流であると仮定し、上述のii)及びiii)の仮定を用いると次式が成立する。

$$\Delta p = \frac{6\nu r Q}{ga} \left( \frac{l_s}{d_s^3} + \frac{2l}{d^3} \right) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

(3.1)式、(3.4)式より  $d_s$  と  $\Delta p$  の関係が得られ、次式で与えられる。

$$d_s = l_s^{1/3} \left( \frac{ga}{6\nu r \eta} \Delta p^{1-\xi} - \frac{2l}{d^3} \right)^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

2章では  $d_s$  が一定で考えたが、本章では  $Q = \eta \Delta p^\xi$  であることを考えると  $d_s$  は  $\Delta p$  に依存することがわかる。

(3.2)式及び(3.3)式は1段シールにおける  $K/A^2$  の表示式であり、それぞれ  $Z$ 、 $A$  とお

く。これらの式を用いて検討すると、井出らの実験より得られた定数 $\eta$ 、 $\xi$ から1段シール構造のシール性能表示が具体的に求まる。これらの表示式を付録2のTable A 2.1に示す。 $\eta$ 値は段差(differential level of adjacent blocks, 図では $d_\ell$ と略す)が大きいほど大きな値になるが、 $\xi$ 値は段差に関し明確な相関は得られない。Fig. 3.1及びFig. 3.2はシール性能に関する $Q$ と $\Delta p$ との関係について解析結果と実験結果を比較したものである。両図に共通する点は $Q$ が $\Delta p$ のべき乗に比例することである。また、破線は20°C大気中でシール要素部ギャップ $d_s$ が一定の場合の解析結果を表わす。実線(実験式)と破線の交点すなわち、実験の差圧に一致する $d_s$ の値は $\Delta p$ が増加すると減少する。

Table A 2.1の定数 $\eta$ 、 $\xi$ を(3.3)式に代入すると、 $d_s$ と $\Delta p$ の関係が得られるが、この関係をFig. 3.3及びFig. 3.4に示す。Fig. 3.3は金属シール要素の場合であり、Fig. 3.4は黒鉛シール要素の場合である。両図に共通する点は $\Delta p$ が増加すると $d_s$ が減少すること及びパラメータである段差が大きいほど $d_s$ が大きいことである。Fig. 3.3の金属シール要素では、差圧 $\Delta p$ が $1 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$ の場合シール要素部ギャップ $d_s$ は0.04~0.095mmである。Fig. 3.4の黒鉛シール要素では $\Delta p$ が $1 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$ の場合 $d_s$ は0.05~0.11 mmである。従って、金属シール要素を用いた場合の $d_s$ が黒鉛シール要素に比べて小さいことがわかる。なお、 $\Delta p$ の増加とともに $d_s$ が減少することの原因としては、 $\Delta p$ が増加するとシール要素が接触面に押し付けられるためであると考えられる。

### 3.2 多段シール要素の場合

同一形状のシール要素を直列に設置した多段( $n$ 段)シール部の漏れ流れでは次のように仮定する。

- i) 3.1節の仮定を満足する。
- ii) 各段のシール要素部差圧は等しい。
- iii) ブロック面間流路長は1段シール要素の場合に等しい。

以上の仮定より、漏れ流量は次式で与えられる。

$$Q = \eta \Delta p^\xi n^{-\xi} \dots\dots\dots (3.6)$$

(2.8)式と(3.6)式より $K/A^2$ と $\Delta p$ の関係が得られ、次式で与えられる。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r \eta^2} \Delta p^{1-2\xi} \cdot n^{2\xi} \dots\dots\dots (3.7)$$

また、(2.2)式、(3.6)式及び(3.7)式より $K/A^2$ と $Re_s$ の関係が得られ、次式で与えられる。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r \eta^{1/\xi}} (\nu a)^{1/\xi-2} \cdot Re_s^{1/\xi-2} \cdot n \dots\dots\dots (3.8)$$

(3.7)式の $K/A^2$ を $Z_n$ 、(3.8)式の $K/A^2$ を $A_n$ とおけば、

$$Z_n = Z_1 \cdot n^{2\xi} \dots\dots\dots (3.9)$$

$$A_n = A_1 \cdot n \dots\dots\dots (3.10)$$

が得られる。

特に  $\xi = 0.5$  の場合には、(3.7)式と(3.8)式は同一式で表わすことができ、次式となる。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2gn}{r\eta^2} \dots\dots\dots (3.11)$$

従って、 $K/A^2$ 値は  $\Delta p$  や  $Re_s$  に依存しない。よって、(3.9)式及び(3.10)式も同一式で表わすことができ、次式となる。

$$Z_n = A_n \dots\dots\dots (3.12)$$

漏れ流れが層流であると仮定すれば、(2.11)式と(3.6)式より  $d_s$  と  $\Delta p$  の関係が得られ、次式で与えられる。

$$d_s = (\ell_s n)^{1/3} \left( \frac{gan^\xi}{6\nu r \eta} \Delta p^{1-\xi} - \frac{2\ell}{d^3} \right)^{-1/3} \dots\dots\dots (3.13)$$

また(3.13)式に  $\xi = 0.5$  を代入すれば次式が得られる。

$$d_s = (\ell_s n)^{1/3} \left( \frac{gan^{0.5}}{6\nu r \eta} \Delta p^{0.5} - \frac{2\ell}{d^3} \right)^{-1/3} \dots\dots\dots (3.14)$$

(3.14)式では、 $\xi < 1$  なので  $\Delta p$  の増加に伴ない  $d_s$  は減少する。

金属及び黒鉛シール要素を3段設置した場合における  $Q$  と  $\Delta p$  の関係をそれぞれ Fig. 3.5 及び Fig. 3.6 に示す。実線は(3.6)式から得られる半実験値を表わし、破線は解析結果を表わす。ここで使用した  $\eta$ 、 $\xi$  は Table A 2.1 に示されている。また2段及び3段シール構造のシール効果は付録2の Table A 2.2 に示す。金属シールにおける漏れ流量は黒鉛シールに比べて少ない。段差がない場合、金属及び黒鉛シールにおける漏れ流量は1段シール構造に比べてそれぞれ約0.62倍及び約0.67倍に減少する。

Fig. 3.7 及び Fig. 3.8 はそれぞれ金属及び黒鉛シール要素を3段設置した場合における  $d_s$  と  $\Delta p$  の関係を示す。金属シールにおける  $d_s$  は黒鉛シールに比べて小さい値を示すが、これは漏れ流量が少ない事によると考えられる。段差がない場合、金属及び黒鉛シールにおける  $d_s$  は1段シール構造に比べてそれぞれ約1.23倍及び約1.26倍に増加する。これは各ギャップにおける押し付け圧力が減少することが原因であると考えられる。

### 3.3 実験炉設計に適用する表示式

本来、実験炉設計条件の He 中においてシール性能実験を行ない、シール性能表示式を得ることが望ましい。しかし、現状では常温大気中における1段シール構造の実験結果が得られているにすぎない。また3.2節で提案した多段シール性能表示式も常温大気中における式である。本節では、これらの結果を実験炉設計に適用することを試みる。

実験炉のシール構造と実験モデルのレイノルズ数を一致させると次式が得られる。

$$\Delta p_p = \frac{\nu_p^2 r_p}{\nu_m^2 r_m} \Delta p_m \dots\dots\dots (3.15)$$

ここで、下付添字 p は実験炉設計条件(40 atg, 400~1000°C He)、m は実験モデル条件(常温大気中)を表わす。実験炉とモデルの差圧比を Fig. 3.9 に示す。He 温度が上昇すれば差圧比は増加する。

( 3.15 ) 式を考慮すれば、実験炉における  $K/A^2$  と  $\Delta p_p$  の関係は

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r_m \eta^2} \left( \frac{\nu_m^2 r_m}{\nu_p^2 r_p} \right)^{1-2\xi} \Delta p_p^{1-2\xi} \cdot n^{2\xi} \dots\dots\dots ( 3.16 )$$

となる。ここで、流路断面積  $A$  は実験炉とモデルで同じ値とする。実験炉設計条件下では Fig. 3.9 より

$$\Delta p_p > \Delta p_m$$

である。( 3.7 ) 式の  $\Delta p$  に  $\Delta p_p$  を代入した場合に比べて、( 3.16 ) 式の  $K/A^2$  値は低い値を示す。従って、漏れ流れの流動解析において( 3.16 ) 式は安全側の式である。なお  $K/A^2$  とレイノルズ数 ( $Re_s$ ) の関係は( 3.8 ) 式を使用する。従って、多段シール性能に関しては( 3.16 ) 式及び( 3.8 ) 式が推奨される。

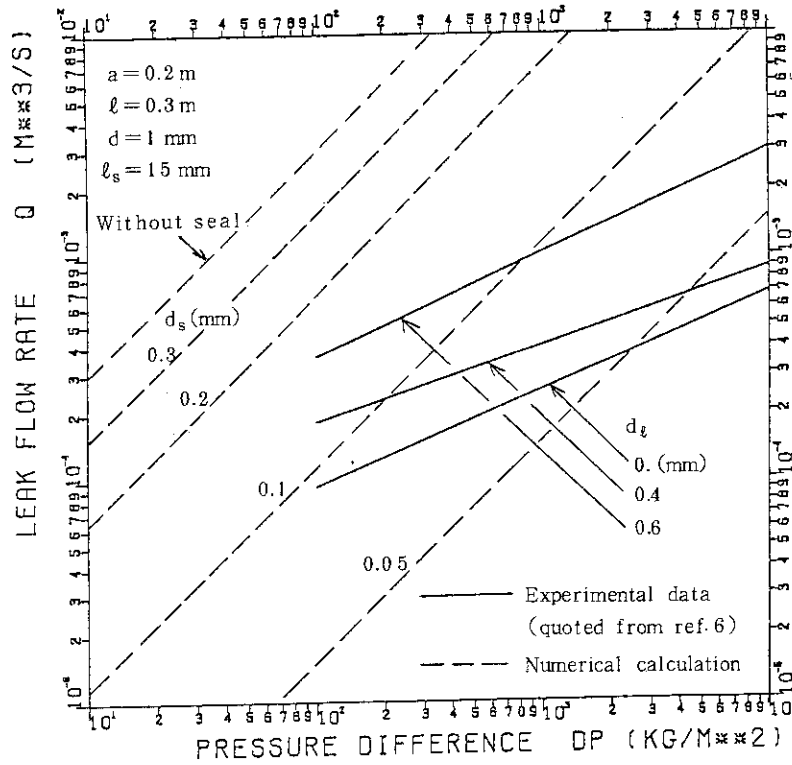


Fig.3.1 Comparison between numerical calculation and experimental result of seal performance for metal element (SUS304, thickness 0.3 mm)

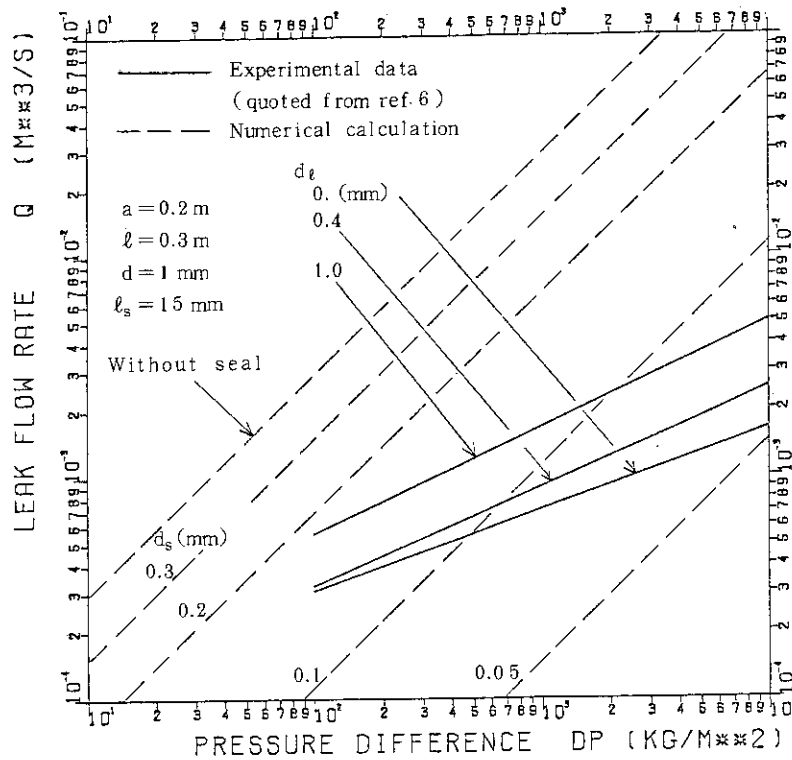


Fig.3.2 Comparison between numerical calculation and experimental result of seal performance for graphite element (thickness 6 mm)



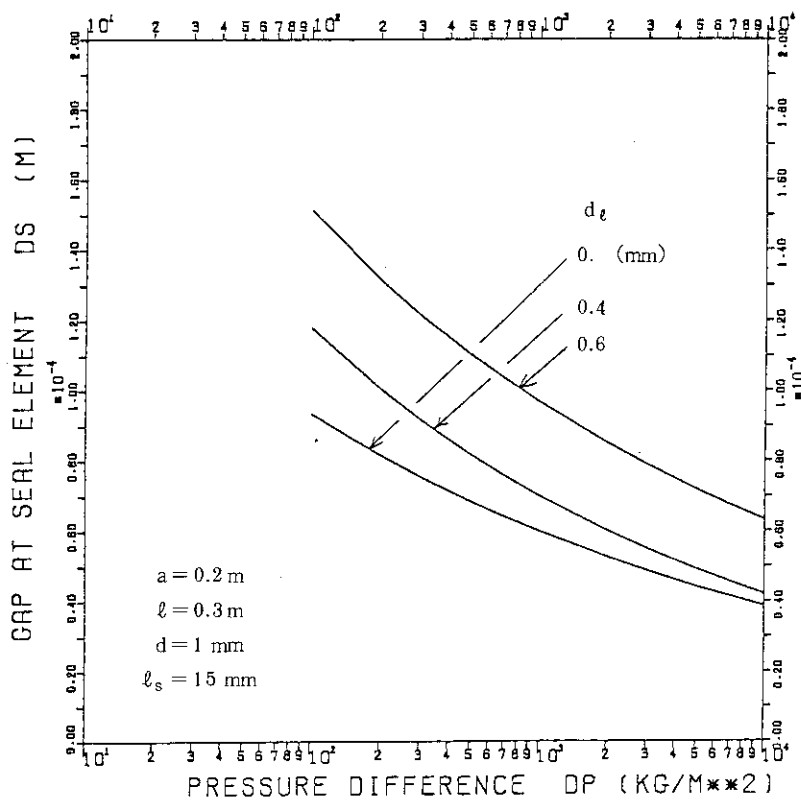


Fig.3.3 Gap at metal seal element vs. pressure difference

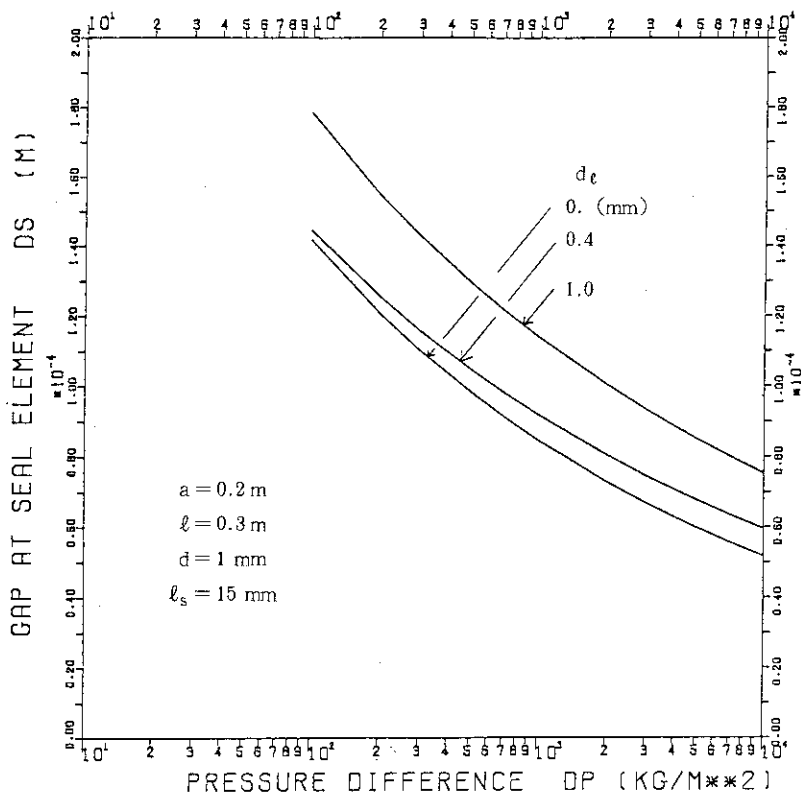


Fig.3.4 Gap at graphite seal element vs. pressure difference

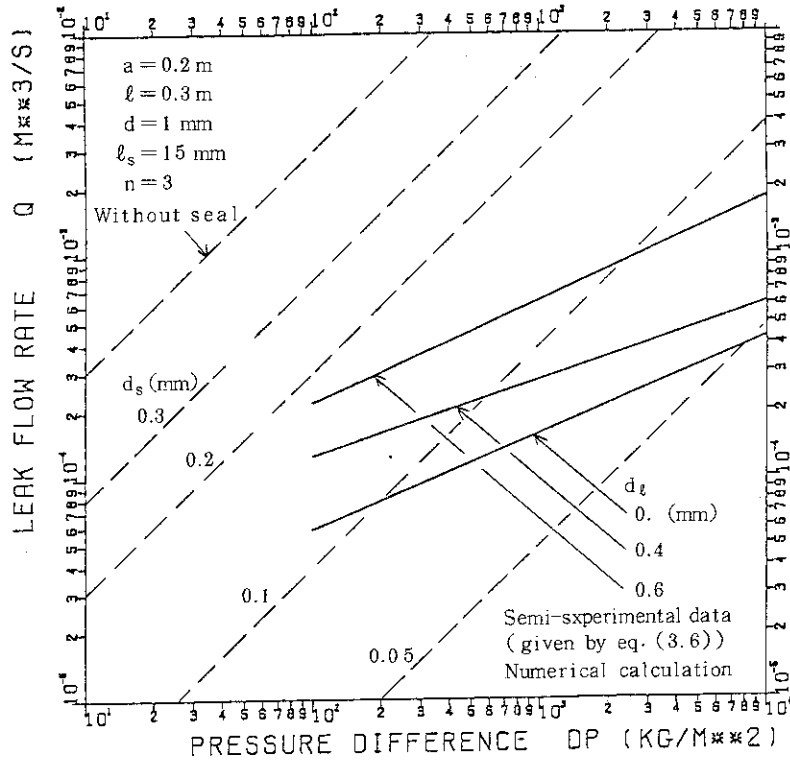


Fig.3.5 Comparison between numerical calculation and experimental result of triple-layer seal performance for metal element

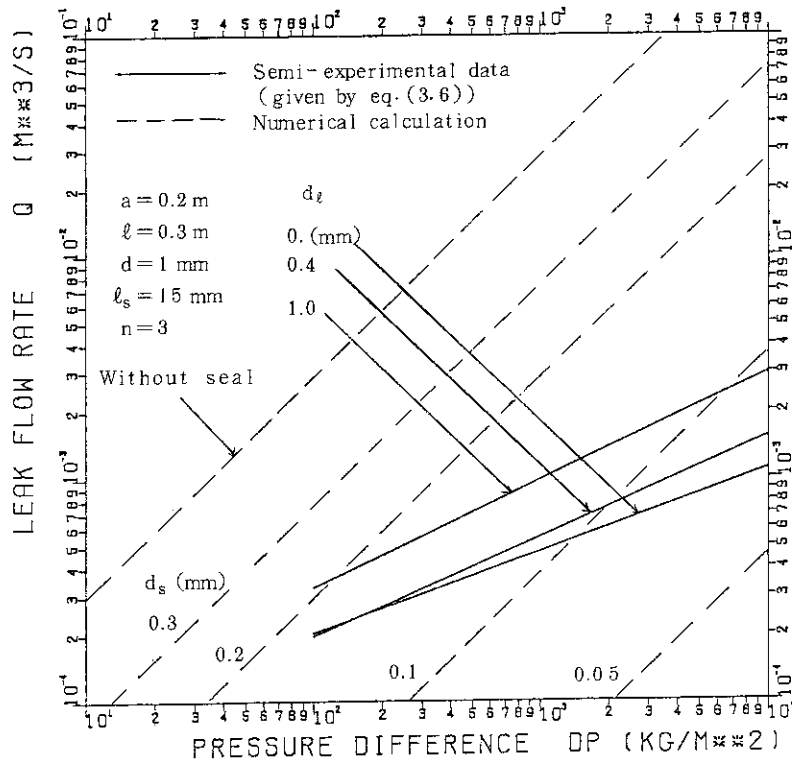


Fig.3.6 Comparison between numerical calculation and experimental result of triple-layer seal performance for graphite element

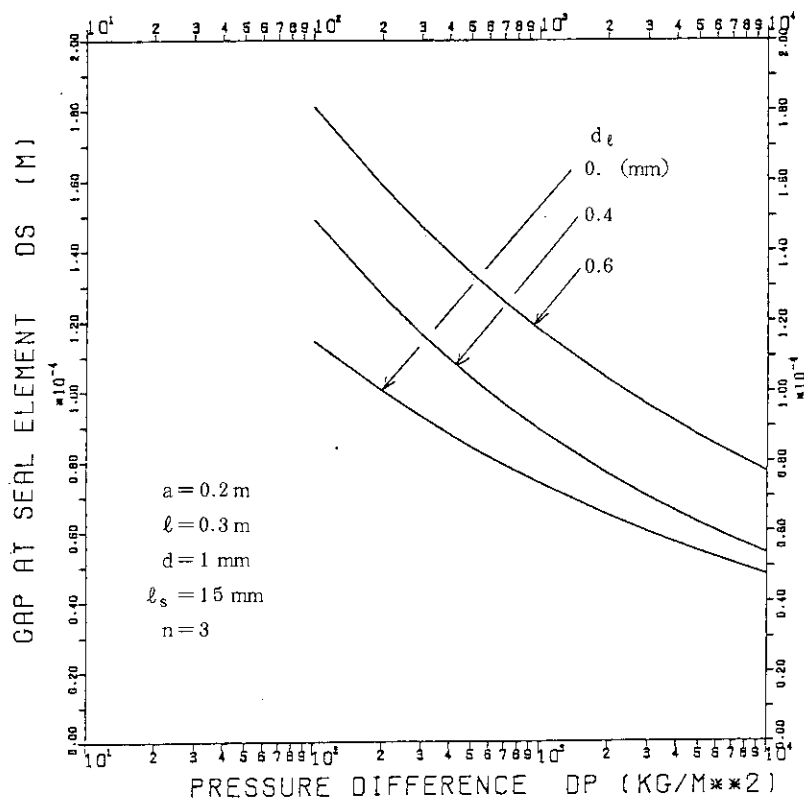


Fig.3.7 Gap at triple-layer metal seal element vs. pressure difference

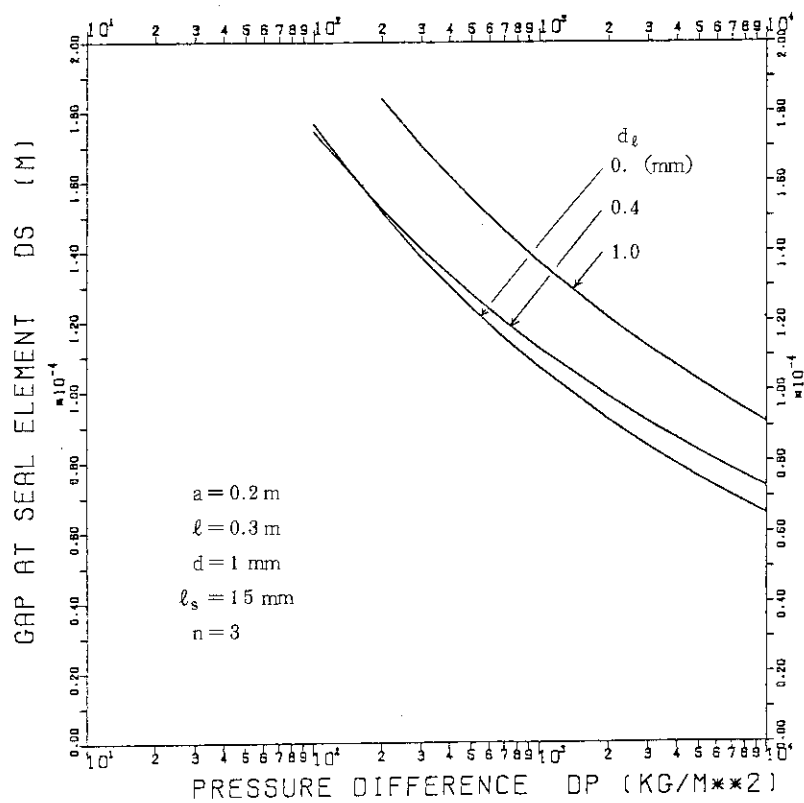


Fig.3.8 Gap at triple-layer graphite seal element vs. pressure difference

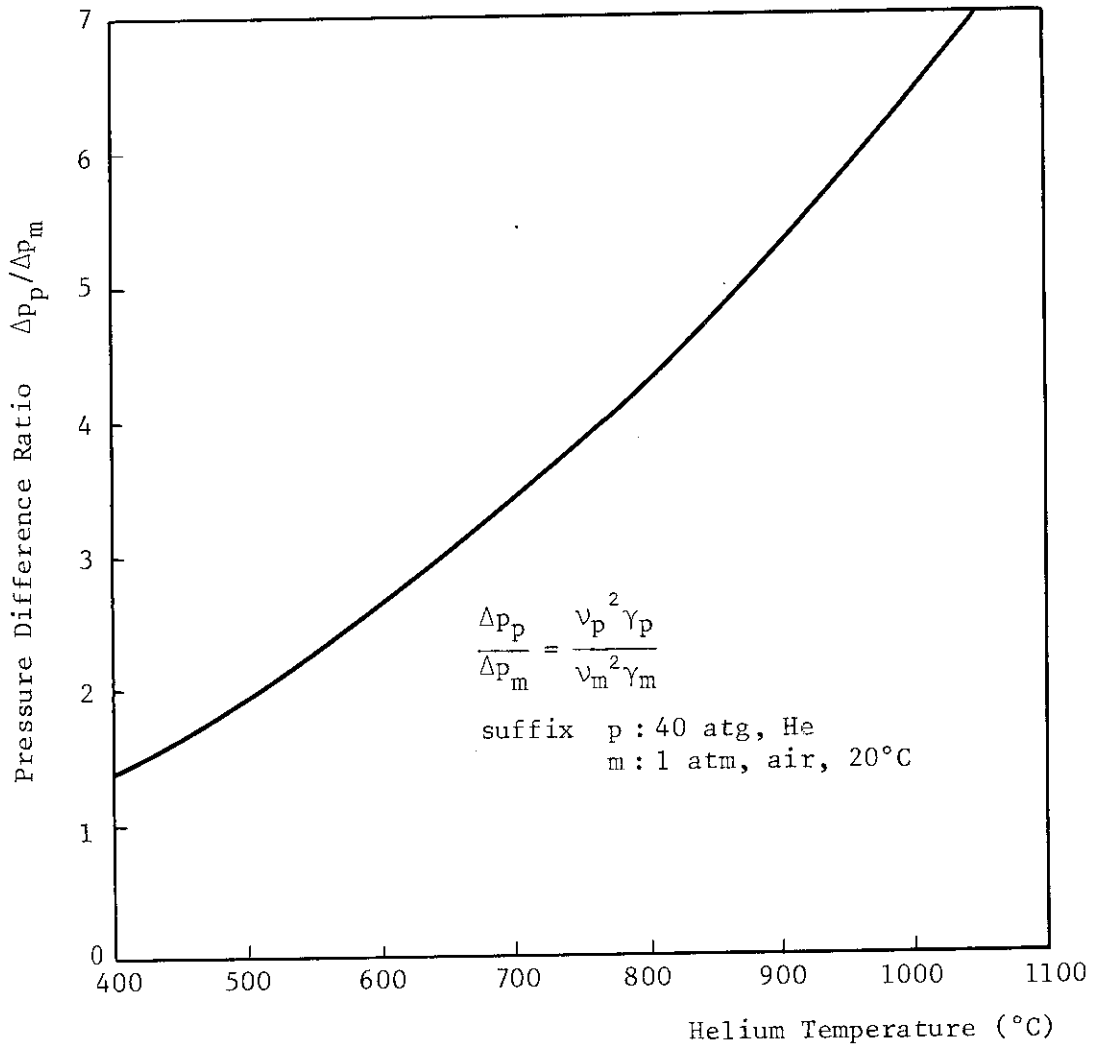


Fig.3.9 Pressure difference ratio vs. helium temperature

## 4. 結 論

本報告では、多目的高温ガス実験炉の炉内流動解析を行なうために、固定反射体部や高温プレナムブロック部の1段及び多段シール構造におけるシール性能表示式の検討及び選定を行なった。以下、表示式の選定に至った経緯を順を追って記す。

1章では本研究を行なう意義について述べた。2章では、黒鉛板シールや金属ストリップシールを用いた1段及び多段シール構造についてシール部の流動解析を行なった。流路のモデル化に際し、シール要素部ギャップ  $d_s$  を導入した。この解析結果より、 $d_s$  が差圧  $\Delta p$  に依存しない場合の漏れ流量と差圧の関係を定量的に把握することができた。3章では、井出らが実施したシール要素基礎実験結果に基づき、シール部流動データの検討を行ない、1段及び多段シール構造におけるシール性能表示式の選定を行なった。

本来、シール性能を理論的に解析することは困難であるが、代表長さ  $d_s$  を用いて実験結果と比較検討を行なった。2章及び3章の検討結果からシール性能を或る程度予測する可能性が示された。またシール性能表示式の妥当性について検討することができた。

本研究によって、高温ガス実験炉の固定反射体部及び高温プレナムブロック部のシール性能の特徴が明らかになった。その結果を以下に記す。

- (1) 実験炉設計に適用する多段シール性能表示式は漏れ流れ損失係数  $K/A^2$  を用いて次式で表わされる。

$K/A^2$  は差圧の関数として、

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r\eta^2} \cdot \left( \frac{\nu^2 r}{\nu_p^2 r_p} \right)^{1-2\varepsilon} \cdot \Delta p_p^{1-2\varepsilon} \cdot n^{2\varepsilon}$$

レイノルズ数の関数として、

$$\frac{K}{A^2} = \frac{2g}{r\eta^{1/\varepsilon}} \cdot (\nu a)^{1/\varepsilon-2} \cdot Re_s^{1/\varepsilon-2} \cdot n$$

で与えられる。下付添字  $p$  は実験炉設計条件 (40atg, 400~1000°C He) を表わす。

- (2) シール要素部ギャップ  $d_s$  は  $\Delta p$  と  $n$  の関数として次式で表わされる。

$$d_s = (l_s n)^{1/3} \cdot \left( \frac{g a n^\varepsilon}{6 \nu r \eta} \Delta p^{1-\varepsilon} - \frac{2l}{d^3} \right)^{-1/3}$$

$\Delta p$  の増加及び  $n$  の減少に伴い  $d_s$  は減少する。

- (3) 1段シール構造において、 $d_s$  がブロック面間ギャップの10%以下では、シール要素部の流動抵抗が支配的であり、全抵抗の96%以上を占める。

## あ と が き

本報告は、昭和56年度に富士電機製造(株)にて実施した「実験炉の設計条件設定に関する特性解析」の中で行なった炉内流動解析及び昭和56年度から開始した「実験炉詳細設計(Ⅱ)」設計基本条件の見直しに関する設計の中で行なった炉内流動解析に関連して、1段及び多段シール構造の流動特性を検討したものである。シール部の実験データを提示され、シール性能表示式の検討に協力された富士電機製造(株)の井出 朗、早川 均、村上知行氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 文沢, 他: “多目的高温ガス実験炉の炉内漏れ流れ冷却材温度解析”, JAERI-M 82-101 (1982)
- 2) 宮本, 他: “多目的高温ガス実験炉炉内流動特性の検討とその課題”, 私信
- 3) 元木, 他: “多目的高温ガス実験炉炉心拘束機構の設計とその課題”, 私信
- 4) 青地, 他: “多目的高温ガス実験炉第1次概念設計”, JAERI-M 6845 (1977)
- 5) 日本原子力研究所: “多目的高温ガス炉研究開発の現状” (1981)
- 6) 井出, 他: “多目的高温ガス炉および関連技術の研究開発”, FAPIG No.99, P79 (1981-12)

## あ と が き

本報告は、昭和56年度に富士電機製造(株)にて実施した「実験炉の設計条件設定に関する特性解析」の中で行なった炉内流動解析及び昭和56年度から開始した「実験炉詳細設計(Ⅱ)」設計基本条件の見直しに関する設計の中で行なった炉内流動解析に関連して、1段及び多段シール構造の流動特性を検討したものである。シール部の実験データを提示され、シール性能表示式の検討に協力された富士電機製造(株)の井出 朗、早川 均、村上知行氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 文沢, 他: “多目的高温ガス実験炉の炉内漏れ流れ冷却材温度解析”, JAERI-M 82-101 (1982)
- 2) 宮本, 他: “多目的高温ガス実験炉炉内流動特性の検討とその課題”, 私信
- 3) 元木, 他: “多目的高温ガス実験炉炉心拘束機構の設計とその課題”, 私信
- 4) 青地, 他: “多目的高温ガス実験炉第1次概念設計”, JAERI-M 6845 (1977)
- 5) 日本原子力研究所: “多目的高温ガス炉研究開発の現状” (1981)
- 6) 井出, 他: “多目的高温ガス炉および関連技術の研究開発”, FAPIG No.99, P79 (1981-12)

## 付録1 流路出入口部圧力損失の評価

1 段シール要素を設置した漏れ流路において、流路出口部の拡大流による圧力損失（損失係数は  $K_3$ ）を考慮した場合の差圧（圧力損失）は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p}{r} = \frac{v_d^2}{2g} (K_1 + K_2 + K_3)$$

$$\text{ここで, } K_1 = \frac{12 \nu a l_s d^2}{Q d_s^3}, \quad K_2 = \frac{24 \nu a l}{Q d}, \quad K_3 = 1$$

である。

総損失係数を  $K (= K_1 + K_2 + K_3)$  とおき、流路形状及び物性値は井出らの実験に一致させる。また、高温プレナムブロック部及び炉床部固定反射体の漏れ流路差圧は約  $10^3 \text{ kg/m}^2$  である。従って、Fig. 3.1 ~ Fig. 3.4 より、 $\Delta p = 10^3 \text{ kg/m}^2$  における  $K$  値を最小にする場合、すなわち、段差 1mm の黒鉛シール要素における  $Q$  及び  $d_s$  を求めるとそれぞれ約  $1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  及び約  $1.15 \times 10^{-4} \text{ m}$  となる。従って、

$$K_3/K = 0.00407 \ll 1$$

となり、 $K_3$  を無視した場合には約 0.4% の誤差である。またシール要素部出入口部は、圧力損失が無視できるように、丸味をつけた形状でモデル化している。従って、流路出入口部の縮拡流による圧力損失は無視する。

## 付録2 実験データに基づくシール性能の評価

1 段及び多段のシール性能表示式的具体例を示す。

井出らの実験<sup>6)</sup>より得られる 1 段のシール性能に関する  $Q$  と  $\Delta p$  との関係を Fig. A 2.1 及び Fig. A 2.2 に示す。また、シール面段差に着目した実験形状を Fig. A 2.3 に示す。 $Q - \Delta p$  は直線関係があるので、 $Q$  は  $\Delta p$  のべき乗に比例する。従って、(3.1) 式が成立する。

$$Q = \eta \Delta p^\xi \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

実験より得られる定数  $\eta$ 、 $\xi$  及びシール性能表示式を Table A 2.1 に示す。 $\xi$  を (3.12) 式に代入し 2 段及び 3 段シール構造のシール効果を求め、Table A 2.2 に示す。

シール段数が増加すれば、 $K/A^2 (= Z)$  は増加する。Table A 2.1 より  $\xi$  は 0.5 未満なので、1 段シールとの比は

$$\frac{Z_n}{Z_1} = n^{2\xi} < n$$

なる関係がある。従って、シール効果はシール段数ほどは増加しない。



Table A2.1 The correlation of seal performance

No.	seal element		parameter				
	material	$d_{\ell}^{**}$ (mm)	$\eta^*$	$\xi^*$	A	Z	
1	SUS 304 (0.3 mm <sup>t</sup> )	0.	$1.3 \times 10^{-5}$	0.43	$6.2 \times 10^{10} Re_S^{0.32}$	$9.9 \times 10^{10} \Delta p^{0.14}$	
2	SUS 304 (0.3 mm <sup>t</sup> )	0.4	$3.8 \times 10^{-5}$	0.34	$1.2 \times 10^9 Re_S^{0.92}$	$1.2 \times 10^{10} \Delta p^{0.32}$	
3	SUS 304 (0.3 mm <sup>t</sup> )	0.6	$4.4 \times 10^{-5}$	0.46	$5.5 \times 10^9 Re_S^{0.18}$	$8.7 \times 10^9 \Delta p^{0.08}$	
4	Graphite (6 mm <sup>t</sup> )	0.	$5.7 \times 10^{-5}$	0.37	$6.7 \times 10^8 Re_S^{0.74}$	$5.2 \times 10^9 \Delta p^{0.26}$	
5	Graphite (6 mm <sup>t</sup> )	0.4	$4.2 \times 10^{-5}$	0.45	$5.3 \times 10^9 Re_S^{0.25}$	$9.5 \times 10^9 \Delta p^{0.10}$	
6	Graphite (6 mm <sup>t</sup> )	1.0	$6.1 \times 10^{-5}$	0.48	$3.5 \times 10^9 Re_S^{0.092}$	$4.5 \times 10^9 \Delta p^{0.04}$	

\*  $\eta$  and  $\xi$  are quoted from ref.6.\*\*  $d_{\ell}$  : differential level of adjacent blocks

Table A2.2 The effect of multi-layer seal element

No.	seal element		parameter		
	material	$d_g$ (mm)	$\xi$	$\frac{Z_2}{Z_1}^*$	$\frac{Z_3}{Z_1}^*$
1	SUS 304 (0.3 mm <sup>t</sup> )	0.	0.43	1.82	2.57
2	SUS 304 (0.3 mm <sup>t</sup> )	0.4	0.34	1.60	2.11
3	SUS 304 (0.3 mm <sup>t</sup> )	0.6	0.46	1.89	2.75
4	Graphite (6 mm <sup>t</sup> )	0.	0.37	1.67	2.25
5	Graphite (6 mm <sup>t</sup> )	0.4	0.45	1.87	2.69
6	Graphite (6 mm <sup>t</sup> )	1.0	0.48	1.95	2.87

\*  $Z_n$  is given by eq.(3.9).

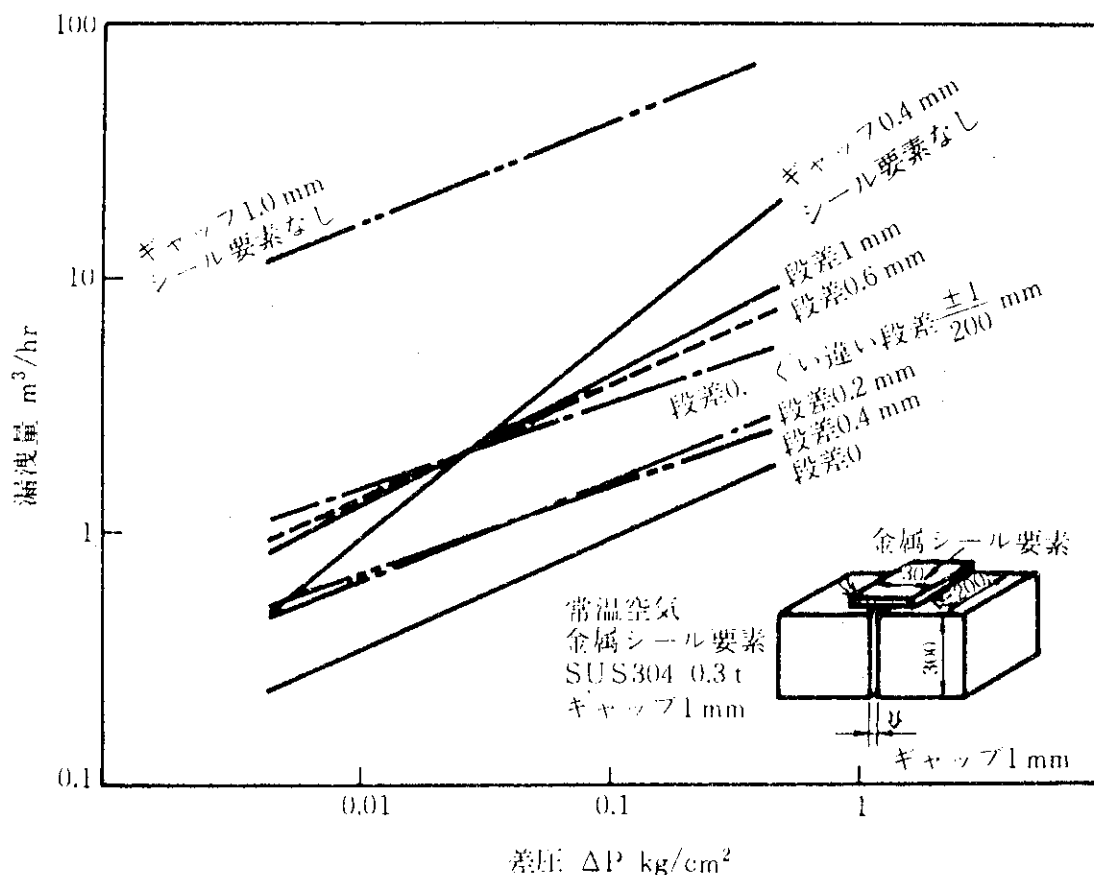


Fig.A2.1 Experimental results of seal performance for metal element

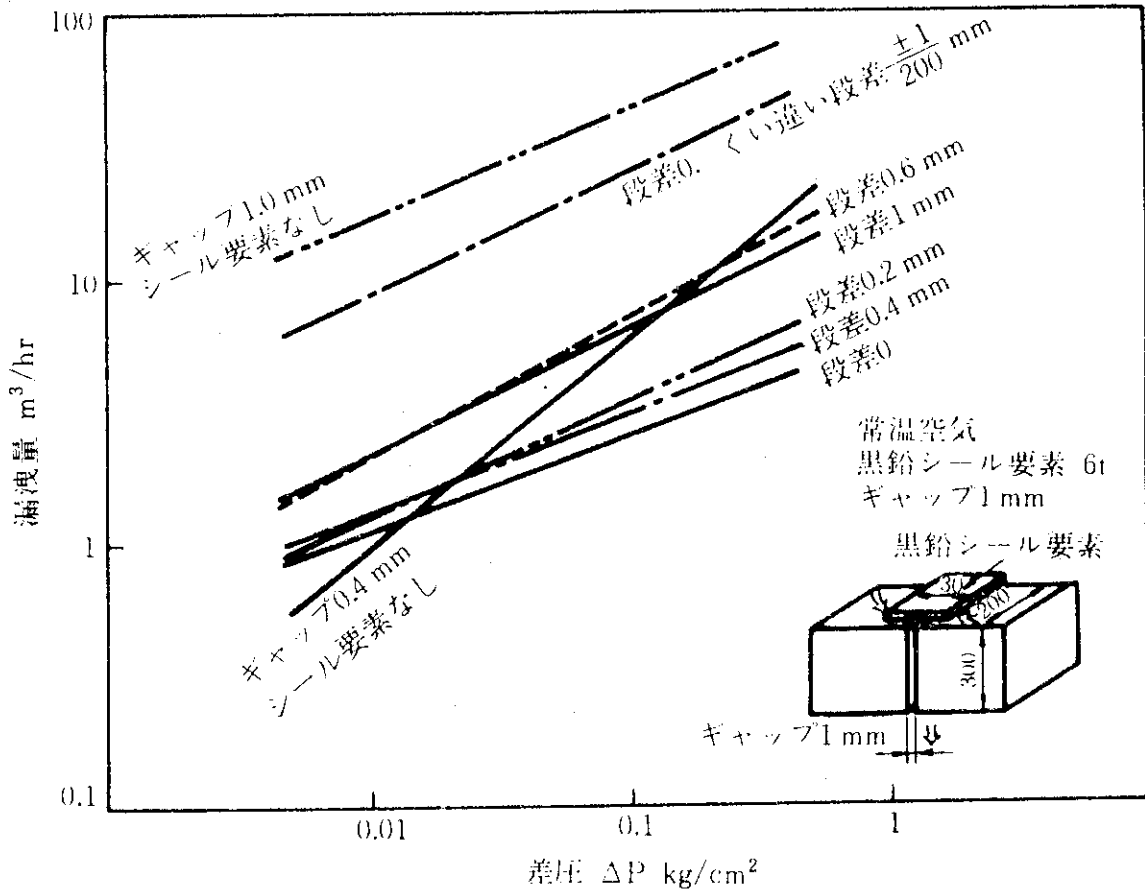


Fig.A2.2 Experimental results of seal performance for graphite element

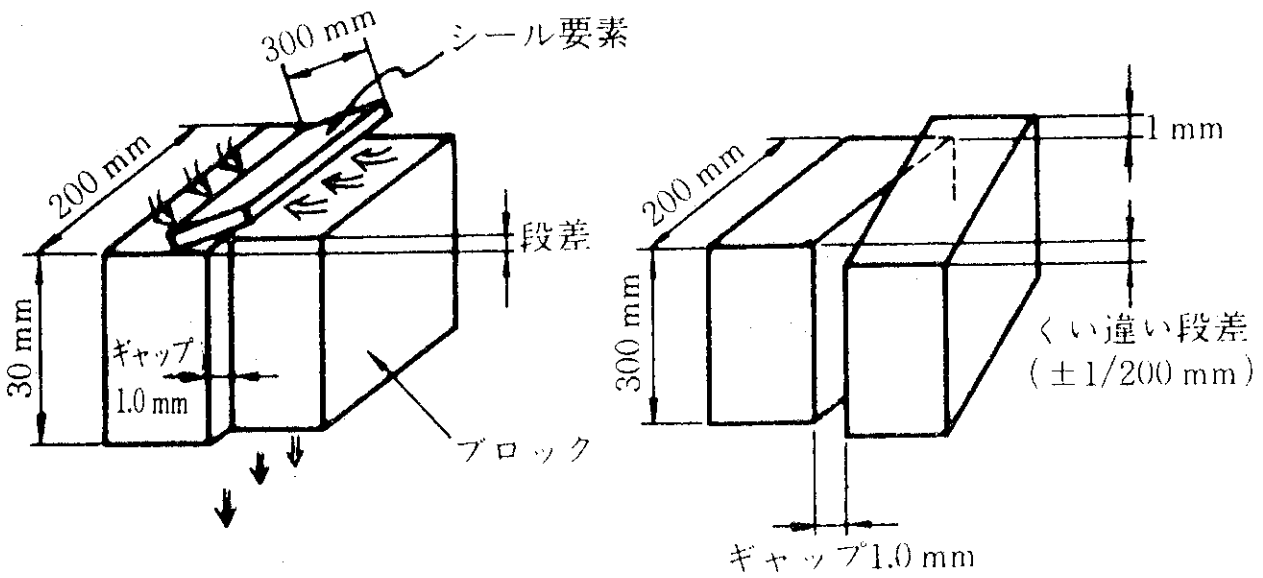


Fig.A2.3 Geometry of test section