

JAERI-M
84-222

2ブロッククロス流れ実験・第1報
実験装置及び実験条件

1984年12月

滝塚 貴和・蕪木 英雄・功刀 資彰・佐野川好母

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

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

2ブロッククロス流れ実験・第1報

実験装置及び実験条件

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

滝塚 貴和・蕪木 英雄・功刀 資彰・佐野川好母

(1984年11月7日受理)

多目的高温ガス実験炉の炉心では、積み重ねられた黒鉛燃料要素段間の接触面ギャップを通して1次冷却材のクロス流れが発生する。クロス流れは炉心熱流動特性低下の原因となるため、重要な研究課題となっている。

実験炉の燃料要素について、クロス流れの流動特性を明らかにし、炉心設計に用いる実験式を導くため、実寸大の2ブロックモデルによる実験を行った。実験では、常温、大気圧の空気を用い、ブロック接触面ギャップを通るクロス流れの流量と圧力差を測定した。

本報では、2ブロッククロス流れ実験装置の概要及び実験条件の検討について述べる。

JAERI-M 84-222

Two-Block Crossflow Experiments, I
Experimental Apparatus and Conditions

Takakazu TAKIZUKA, Hideo KABURAKI, Tomoaki KUNUGI
and Konomo SANOKAWA

Department of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 7, 1984)

In the VHTR core, crossflow of primary coolant occurs at the interface gaps between vertically stacked graphite fuel elements. The crossflow has attracted much attention recently, because of its adverse effects on the thermal hydraulic performance of the core.

Two-block crossflow experiments were carried out on a full-scale two-block model based on a proposed design of the VHTR fuel element. The purposes of the experiments were to characterize crossflow and to develop crossflow coefficient correlations for the core thermal hydraulic analysis models. Measurements of crossflow rates and pressure drops were made for the simulated interface gap between blocks using atmospheric air at ambient temperature as a working fluid.

This report describes the outline of the experimental apparatus and examines the experimental conditions.

Keywords: VHTR, Reactor Core, Thermal Hydraulics, Fuel Element,
Crossflow, Two-Block Model, Primary Coolant,
Experimental Apparatus

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置	2
2.1 実験装置の構成	2
2.2 試 験 部	2
2.3 試験体ブロック	3
2.4 配 管 系	3
2.5 ブ ロ ヲ	4
2.6 計 測 系	4
3. 実験方法	6
4. 実験条件	6
4.1 幾何学的相似性	7
4.2 流体力学的相似性	8
4.3 接触面荷重	10
5. ま と め	10
謝 辞	10
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental apparatus	2
2.1 Apparatus overview	2
2.2 Test section	2
2.3 Two - block model	3
2.4 Ducting	3
2.5 Blower	4
2.6 Instrumentation	4
3. Experimental procedure	6
4. Experimental conditions	6
4.1 Geometric similarity	7
4.2 Flow similarity	8
4.3 Contact load at block interface	10
5. Summary	10
Acknowledgements	10
References	11

1. ま え が き

多目的高温ガス実験炉の炉心は、ブロック型の黒鉛燃料要素が積み重ねられた構造をしているため、これらのブロック間のすき間を通過して1次冷却材であるヘリウムガスの漏れ流れが発生する。このような漏れ流れは、炉心全体の冷却材有効流量及び流量配分に著しい影響を与えらるばかりでなく、漏れ流れが比較的低温であるため黒鉛ブロックに過大な熱応力を発生させる原因となり⁽¹⁾、また漏れ流れによって生じる不均一な炉心冷却材圧力分布はフラクチュエーションやリディストリビューション⁽²⁾など米国のFort St. Vrain 高温ガス炉で問題となった炉心カラムの不安定性現象を誘発する可能性がある。このため、漏れ流れの流動特性を定量的に把握することが実験炉炉心の設計、開発を進める上で最も重要な課題となっている。

炉心内には種々の経路を通る漏れ流れが発生するが、なかでも積み重ねられた燃料ブロックの段間接触面を通るクロス流れが炉心全体の冷却材流動特性に対し最も大きな影響を及ぼす。冷却材の大部分は炉心頂部に設けられた領域流量調節用のオリフィスバルブを通過して炉心に流入し、燃料ブロックの冷却材流路を下向きに流れる。この冷却材流路を下降する冷却材主流は、オリフィスバルブでの圧力損失があるため、一般に、燃料ブロック外周のすき間（カラム間すき間）の冷却材と比べて圧力が低くなる。一方、燃料ブロックの段間接触面には、ブロックの熱変形、照射変形、カラムの変位などによってギャップが開く。このため、ブロックの接触面に開いたギャップを通して、ブロック外周のカラム間すき間から冷却材流路に冷却材が漏れ込むことになる。このブロック接触面ギャップを通る漏れ流れは、冷却材主流に対して直角方向に流れることから、クロス流れと呼ばれる。

これまでに、米国及び西独において高温ガス炉燃料ブロックのクロス流れの実験^{(3) (4)}が行われている。しかしながら、これらはマルチホール型の燃料ブロックを対象としたものであり、実験炉に対して計画されているピン・イン・ブロック型の燃料ブロックについては研究が行われていない。従って、実験炉の設計に基づいたピン・イン・ブロック型の燃料ブロックについてクロス流れ特性を明らかにすることが必要とされている。

本実験は、密封試験装置のうち、2ブロッククロス流れ実験装置を用い、クロス流れの特性を実験的に明らかにすると共に、実験炉炉心の設計に必要なデータを取得することを目的としたものである。作動流体として、常温、大気圧の空気を用い、実験では、実寸大の2ブロックモデルにより、種々の接触面ギャップについてクロス流れの流量と圧力損失を測定した。

本報は、2ブロッククロス流れ実験装置の概要及び実験条件の検討について記したものである。2ブロッククロス流れ実験の結果及び考察については続報で述べる予定である。

2 実験装置

2.1 実験装置の構成

2ブロッククロス流れ実験装置全体のフローダイアグラムをFig. 1に示す。本実験装置は密封試験装置の一部から成り、2ブロッククロス流れ試験部、配管系、計測系などから構成されている。このうち、配管系、ブロワ、計測系などは2ブロッククロス流れ実験のほか、1カラム実験及びシール要素実験にも共用できる構成となっている。

2.2 試験部

2ブロッククロス流れ試験部をFig. 2に示す。鋼製の架構の中央に、2段に積まれた黒鉛製の試験体ブロック（2ブロックモデル）が設置されている。

試験体上段ブロックの上面（入口側）及び下段ブロックの下面（出口側）には、鋼製の入口及び出口フランジが取り付けられている。試験体ブロックの流路は、フランジを介して、各12本の入口及び出口流路のフレキシブルホース（ $1\frac{1}{2}$ B）に接続されている。試験体ブロックとフランジの間には、作動流体の漏えいを防止するためゴムシートが挟み込まれている。出口フランジは架構に固定されているが、上段ブロックの変位を可能にするため入口フランジは固定されていない。上段ブロックを変位させることにより、ブロック接触面にギャップを開けることができる。

試験体ブロックの周囲はシュラウドに囲まれている。シュラウドの上端及び下端はそれぞれ入口フランジ及び出口フランジに結合されている。シュラウドの上半部は可撓性のペロー（ステンレス鋼製）構造となっている。これにより、ブロック接触面ギャップを開ける時の上段ブロックの変位を吸収することができる。シュラウドにはバイパス流路のフレキシブルホース（ $1\frac{1}{2}$ B）が接続されている。このバイパス流路により、ブロック外周部の圧力を調節し、またブロック接触面ギャップを通るクロス流れの流量を測定できるようになっている。

ブロック外周部と各流路の入口、出口の間の圧力差を測定するため、シュラウド（1点）及び試験体入口、出口のフランジ部（各12点）に圧力タップが設けられている。

試験部架構の頂部に荷重負荷装置が設けられている。電動油圧ポンプ、微量ポンプ、デジタル圧力指示調節計などから成る油圧供給ユニットが試験部に隣接して設けられており、設定圧力（0-70 MPa）の作動油が高圧ゴムホースを通して荷重負荷装置の油圧シリンダに供給される。この荷重負荷装置により、最大20 kNまでの荷重をブロック接触面に安定に負荷することができる。負荷荷重は入口フランジに取り付けられたロードセルによって測定される。

2.3 試験体ブロック

多目的高温ガス実験炉詳細設計(I)の燃料要素をFig. 3に示す。これは対面間距離(平径)299mm, 高さ570mmの六角柱状黒鉛ブロックである。燃料要素の型式はピン・イン・ブロック型で, 円筒状の燃料棒12本がブロックの軸方向に開けられた冷却孔に挿入されている。

実験に用いた模擬燃料ブロックをFig. 4に示す。ブロックは2段に積み重ねられており, ブロック接触面の形状及び寸法は実験炉詳細設計(I)の燃料ブロックに基づいている。ただし, ブロックの高さは実寸の $1/2$ (285mm)としている。

冷却孔の内径は53mmであり, 一様な三角ピッチ65mmで配列されている。各冷却孔には, 外径46mmの鋼製模擬燃料棒が挿入されている。冷却孔と燃料棒の間に形成される幅3.5mmの環状の空間が冷却材流路となっている。

下段ブロックの上面及び上段ブロックの下面には, それぞれ, ダウエルピン及びダウエルソケットが3か所に設けられている。これらのはめ合いによって, 積み重ねたブロック間の位置決めが行われる。

ブロックの材料は, 実験炉燃料ブロックの候補材料に選定された等方性高密度黒鉛IG-11(東洋炭素(株)製)である。ブロック接触面は, 実験炉燃料ブロックに予定されている精度及び仕上げで機械加工されている。製作図面で指定した接触面の表面粗さは12.5S, また平面度許容差0.05mmである。実験前に測定した結果によれば, 接触面の表面粗さ(R_{max})は約 $10\mu m$, 平面度は約0.02mmであった。

2.4 配管系

配管系は, 入口流路管, 出口流路管及びバイパス流路管の3系統から成っている(Fig. 5)。各流路には, 流量計, 圧力計及び流量調節弁が設けられており, それぞれの流路を通る流れの流量及び圧力の測定及び調節ができるようになっている。

入口流路管の上流部分は5B(外径139.8mm)の単管であり, 入口流量調節弁及び温度計, 入口流量計 F_{i1} , 入口圧力計 P_{i1} が設けられている。入口流路管は下流部分(試験部側)で $1\frac{1}{4}$ B(外径42.7mm)の流路管12本に分岐しており, それぞれの流路にチャンネル入口流量調節弁及びチャンネル入口流量計 F_{i11} - F_{i12} , チャンネル入口圧力計 P_{i11} - P_{i12} が設けられている。これらの流路管12本の下流端は, それぞれ, $1\frac{1}{2}$ Bのフレキシブルホースを介して, 試験部の各冷却材流路に接続される。

出口流路管の上流部分(試験部側)は12本の流路管($1\frac{1}{4}$ B)から成っている。これらの流路管の上流端は, それぞれ, フレキシブルホース($1\frac{1}{2}$ B)を介して, 試験部の各冷却材流路出口に接続される。各流路には, チャンネル出口圧力計 P_{o1} - P_{o12} , チャンネル出口流量計 F_{o1} - F_{o12} 及びチャンネル出口流量調節弁が設けられている。これらの流路管12本は下流で単管(5B)に合流する。下流部分には, 出口圧力計 P_o , 出口流量計 F_o 及び出口流量調節弁が設けられている。出口流路管の下流端はブロウに接続されている。

バイパス流路管には, バイパス流量調節弁及びバイパス流量計 F_{b1} - F_{b4} , バイパス圧力計

P_b が設けられている。4台並列に設けられているバイパス流量計はそれぞれ流量範囲が異なっており、これらを選択することによりクロス流れ流量を広範囲にわたって測定できるようになっている。バイパス流路管は、フレキシブルホース(1 $\frac{1}{2}$ B)を介して、試験部のシュラウドに接続されている。

2.5 ブロウ

ブロウとしては、高流量において、比較的高い圧力差を得られることから、ルーツ型ブロウ(朝日機工(株)製M-B No.125)を用いた。周辺の騒音レベルを抑えるため、ブロウは防音チャンバ内に收容されている。ブロウ回りには、流路切換用止弁、フィルタ、サイレンサ、安全弁、吸込圧力計、吐出圧力計などが設けられている(Fig. 6)。

ブロウの吸込側は出口流路管の下流端に接続されている。ブロウは3相誘動モータ(AC 200V, 最大出力15kW)によって駆動され、最大流量200g/sの空気(常温, 大気圧)を試験部を通して流すことができる。試験部に加えられる最大圧力差は約25kPaである。

2.6 計測系

(1) 計測系

各流路管には、層流型の流量検出エレメント(株)山田製作所製LFM型)が設けられている。各流量検出エレメントの差圧は導圧管により、バルブスキャナを経て差圧変換器に導かれる(Fig. 7)。層流型流量計の特徴は、流量と差圧の関係が線形であるため流量測定範囲が広く、また圧力損失が少ないことである。

入口流量計 F_i 及び出口流量計 F_o (LFM-11型)の流量範囲は、常温, 大気圧, 空気, 取出差圧0.05-0.7kPaの条件(以下, 流量範囲はこの条件で規定する)で, 16.1-247g/sである。チャンネル入口流量計 $F_{i1}-F_{i12}$ 及びチャンネル出口流量計 $F_{o1}-F_{o12}$ (LFM-7型)の流量範囲は1.00-15.4g/sである。バイパス流路管には、流量測定範囲の異なる4台のバイパス流量計 $F_{b1}-F_{b4}$ (LFM-10, LFM-7, LFM-4, LFM-1型)が並列に設けられている。これらのバイパス流量計の測定範囲は、それぞれ, 8.07-123g/s, 1.00-15.4g/s, 0.125-1.93g/s及び0.0157-0.241g/sである。

バルブスキャナは電磁弁切換式で、切換点数2点及び4点のバルブスキャナが各1台、切換点数12点のバルブスキャナが2台設けられている。切換点数2点のバルブスキャナは入口流量計 F_i 及び出口流量計 F_o の導圧管を切り換える。切換点数4点のバルブスキャナは4台のバイパス流量計 $F_{b1}-F_{b4}$ の導圧管を切り換える。また、切換点数12点のバルブスキャナ2台は、それぞれ、チャンネル入口流量計 $F_{i1}-F_{i12}$ 及びチャンネル出口流量計 $F_{o1}-F_{o12}$ の導圧管を切り換える。

各バルブスキャナに接続されている差圧変換器(大倉電気(株)製1151DP型)はダイヤフラム、静電容量型で、差圧測定範囲は0-1.25kPaである。

(2) 圧力計

各流路管の圧力は、電磁弁切換式のバルブスキャナを経て、圧力変換器に導かれる (Fig. 9)。圧力計測系は流量計測系とほぼ同様の構成になっている。

ダイヤフラム、ひずみゲージ式の圧力変換器 (新興通信工業 (株) 製 DP / D 型) が 4 台設けられており、それぞれ、入口流路管圧力 P_i 及び出口流路管圧力 P_o 、チャンネル入口流路管圧力 $P_{i1} - P_{i12}$ 、チャンネル出口流路管圧力 $P_{o1} - P_{o12}$ 、バイパス流路管圧力 P を測定する。圧力測定範囲は $\pm 50 \text{ kPa}$ (ゲージ圧) である。

(3) 差圧計

試験部には、冷却材流路入口及び出口 (各 12 点) とブロック外周部の間の圧力差を測定するため、入口フランジ、出口フランジ及びシュラウドに圧力タップが設けられている。冷却材流路入口圧力 $P_{ui} - P_{ui2}$ 及び冷却材流路出口圧力 $P_{uo} - P_{uo2}$ は導圧管により、バルブスキャナを経て、差圧変換器に導かれる。ブロック外周部の圧力 P_s は、直接、差圧変換器に導かれる。

電磁弁切換式のバルブスキャナは 2 台設けられており、それぞれ、冷却材流路入口及び出口各 12 点の圧力を切り換える。

差圧変換器 (大倉電気 (株) 製 1151 DP 型) はダイヤフラム、静電容量型で、差圧測定範囲は $\pm 50 \text{ kPa}$ である。

(4) 絶対圧力計

大気圧を測定するため、ダイヤフラム、ひずみゲージ式の圧力変換器 (新興通信工業 (株) 製 DHF 型) が設けられている。圧力測定範囲は $0 - 200 \text{ kPa}$ (絶対圧) である。

(5) 温度計

作動流体 (空気) の温度は入口流路管に挿入されているシース型の白金測温抵抗体により測定される。温度測定範囲は $-10 - 100^\circ\text{C}$ である。

(6) 負荷荷重計

荷重負荷装置によって試験体ブロック接触面に加えられる荷重は、入口フランジに取り付けられたひずみゲージ式のロードセル (新興通信工業 (株) 製 C2S1 型) により測定される。荷重測定範囲は $0 - 20 \text{ kN}$ である。

(7) データ集収集装置及びデータ処理装置

試験部の差圧、各流路管の流量及び圧力、大気圧、温度、負荷荷重の測定値はデータ集収集装置上に表示される。試験部の差圧、各流路管の流量及び圧力については、電磁弁の切り換えによって選択した測定点の測定値が表示される。各流路管の流量及び圧力は、電磁弁の切り換えにより自動的に測定できるようになっている。これらの一連の測定値はアナログ出力としてデータ処理装置に転送され、表示及びプリントアウトが行われる。

3. 実験方法

試験体ブロックの外周部と冷却材流路の間に種々の圧力差（最大約 25 kPa）を設定して、ブロック接触面に開けた平行ギャップあるいはくさび形ギャップを通して冷却材流路に漏れ込むクロス流れ流量の測定を行った。冷却材流路を通る主流流量を 0 g/s から最大約 100 g/s まで変化させた。

1 ブロック当たりのクロス流れ流量（クロス流れ全流量）は、流量範囲により 4 台のバイパス流量計を切り換えて測定した。各冷却材流路のクロス流れ流量は、各流路に接続するチャンネル入口流量計とチャンネル出口流量計の測定値の差から求めた。流量の計算では、入口流路管の温度及び各流路管の圧力を用いて、空気の密度及び粘性係数の変化の影響を補正した。

ブロック接触面における冷却材流路とブロック外周部の間の圧力差（クロス流れ部の圧力差）は直接測定できないため、冷却材流路入口及び出口とブロック外周部の間の圧力差から計算により決定した。この計算では、あらかじめ実験的に求めた冷却材流路の流量と圧力損失の関係を用いて、実験時の冷却材流路の入口及び出口流量から試験体各段の圧力損失を推定した。

実験炉炉心燃料ブロックの熱変形などによって開く接触面ギャップは、ブロック接触面に金属製のシムを挿入することによって模擬した。用いたシムの厚さは、0.05, 0.08, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.80, 1.00, 1.50 及び 2.00 mm である。これらのシムの厚さの精度は、厚さによって異なるが、0.003-0.010 mm 以内である。

実験は、Fig. 10 に示す 2 種類のギャップ形状（平行ギャップ及びくさび形ギャップ）について行った。平行ギャップは、上段及び下段ブロックの接触面を平行に保ちながら上段ブロックを上方に変位させたものである。平行ギャップのギャップ幅は接触面内で一様である。くさび形ギャップは、接触面の一辺を支点として上段ブロックを傾斜させたものであり、ギャップ幅は支点とした辺から相対する辺（開口辺）に向かって線形に広がっている。

荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過流量の測定では、ブロック接触面にシムを挿入せず、ブロックが正常に積み重ねられている状態で実験を行った。荷重負荷実験では、荷重負荷装置によりブロック接触面に最大 20 kN までの荷重を加え、クロス流れの流動特性に与える接触面荷重の影響を調べた。黒鉛ブロック内透過流量の測定では、黒鉛ブロック接触面をコンパウンドでシールすることによって接触面を通るクロス流れを防止し、透過流量と圧力差の関係を求めた。

4. 実験条件

多目的高温ガス実験炉炉心では、400-1000°C, 4 MPa のヘリウムガスが用いられる。これに対し、2 ブロッククロス流れ実験では、常温、大気圧の空気を用いている。また、燃料

3. 実験方法

試験体ブロックの外周部と冷却材流路の間に種々の圧力差（最大約25kPa）を設定して、ブロック接触面に開けた平行ギャップあるいはくさび形ギャップを通して冷却材流路に漏れ込むクロス流れ流量の測定を行った。冷却材流路を通る主流流量を0g/sから最大約100g/sまで変化させた。

1ブロック当たりのクロス流れ流量（クロス流れ全流量）は、流量範囲により4台のバイパス流量計を切り換えて測定した。各冷却材流路のクロス流れ流量は、各流路に接続するチャンネル入口流量計とチャンネル出口流量計の測定値の差から求めた。流量の計算では、入口流路管の温度及び各流路管の圧力を用いて、空気の密度及び粘性係数の変化の影響を補正した。

ブロック接触面における冷却材流路とブロック外周部の間の圧力差（クロス流れ部の圧力差）は直接測定できないため、冷却材流路入口及び出口とブロック外周部の間の圧力差から計算により決定した。この計算では、あらかじめ実験的に求めた冷却材流路の流量と圧力損失の関係を用いて、実験時の冷却材流路の入口及び出口流量から試験体各段の圧力損失を推定した。

実験炉炉心燃料ブロックの熱変形などによって開く接触面ギャップは、ブロック接触面に金属製のシムを挿入することによって模擬した。用いたシムの厚さは、0.05, 0.08, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.80, 1.00, 1.50及び2.00mmである。これらのシムの厚さの精度は、厚さによって異なるが、0.003-0.010mm以内である。

実験は、Fig. 10に示す2種類のギャップ形状（平行ギャップ及びくさび形ギャップ）について行った。平行ギャップは、上段及び下段ブロックの接触面を平行に保ちながら上段ブロックを上方に変位させたものである。平行ギャップのギャップ幅は接触面内で一様である。くさび形ギャップは、接触面の一辺を支点として上段ブロックを傾斜させたものであり、ギャップ幅は支点とした辺から相対する辺（開口辺）に向かって線形に拡がっている。

荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過流量の測定では、ブロック接触面にシムを挿入せず、ブロックが正常に積み重ねられている状態で実験を行った。荷重負荷実験では、荷重負荷装置によりブロック接触面に最大20kNまでの荷重を加え、クロス流れの流動特性に与える接触面荷重の影響を調べた。黒鉛ブロック内透過流量の測定では、黒鉛ブロック接触面をコンパウンドでシールすることによって接触面を通るクロス流れを防止し、透過流量と圧力差の関係を求めた。

4. 実験条件

多目的高温ガス実験炉炉心では、400-1000°C、4MPaのヘリウムガスが用いられる。これに対し、2ブロッククロス流れ実験では、常温、大気圧の空気を用いている。また、燃料

ブロックの熱変形などによって開くブロック接触面ギャップは、接触面にシムを挿入することによって模擬している。このように、2ブロッククロス流れ実験の条件と実験炉炉心の運転条件には相違がある。従って、実験結果を炉心設計に適用するためには、モデル接触面の幾何学的条件及び流体力学的条件の相似性を確認しておく必要がある。

4.1 幾何学的相似性

試験体ブロック接触面の形状及び寸法は実験炉詳細設計(I)の燃料ブロック接触面を厳密に模擬している。このため、ブロック接触面の幾何学的相似性は完全に満足されている。

ブロック接触面の表面粗さ (R_{max}) は約 $10\mu m$ 、平面度は約 $0.02mm$ であり、実験炉炉心内に生じると想定される最大ギャップ幅と比べて十分に小さいと考えられる。従って、炉心内で冷却材流量配分に大きな影響を与える広いギャップのクロス流れは、接触面の加工精度によって大きく変らないものと推定される。しかしながら、ギャップ幅が比較的狭い場合及びブロックが正常に積み重ねられている場合には、接触面の加工精度はクロス流れ特性に大きな影響を与えると考えられる。このため、試験体ブロックには、実験炉燃料ブロックと同じ等方性高密度黒鉛 IG-11 を用い、接触面の機械加工の精度及び仕上げも同じものとした。

燃料ブロック接触面には、ブロックの熱変形、照射変形、カラムの変位などによってギャップが開く。燃料ブロックの熱変形によって開くギャップの大きさは、主として、冷却材流路とカラム間すき間の冷却材温度の差によって決定される。冷却材流路を通る主流と比べてカラム間すき間を通る流れの温度がかなり低いため、燃料ブロックの周辺部は中央部と比較して低温になる。このような燃料ブロックの径方向温度分布によって、ブロック周辺部と中央部では軸方向の熱膨脹に差が生じ、接触面は凸面になるように変形する。この接触面の変形により、接触面外縁部にギャップが開くことになる。実験炉の設計では、燃料ブロックの熱変形によって生じる最大ギャップ幅は $0.4mm$ 程度と推定されている。

実験炉の条件では、高速中性子照射による燃料ブロックの寸法変化は比較的小さく、ブロックの熱変形を相殺する方向に変形すると予測されている。従って、燃料ブロックの熱変形及び照射変形によって開く最大ギャップ幅は、たかだか熱変形のみによる最大ギャップ幅 $0.4mm$ 程度であると予想される。

積み重ねたブロック段間はダウエル結合によって横方向の相対変位が拘束されているため、カラムが変位すると、ブロックは接触面の一辺を支点とする相対回転運動をし、接触面にくさび形のギャップが開くことになる。カラムの変位は、炉心を支持する高温プレナムブロックの傾斜、カラムとスタンドパイプのオフセット、カラムの熱変形及び照射変形、炉心内の横方向圧力勾配、隣接カラムとの干渉など種々の原因によって生じることが考えられる。このため、カラム変位のモードあるいはそれによって開く接触面ギャップの位置及び幅を正確に予測することは極めて困難である。しかしながら、炉心が大きく片寄って、カラム間すき間の集中が生じるようなことがなければ、各カラムの変位はそれに隣接するカラムによって制限される。従って、カラム変位によって接触面に開くギャップの幅はたかだかカラム間すき間の幅のオーダ、すなわち $1mm$ 程度と考えられる。

2ブロッククロス流れ実験では、ギャップ幅2mmまでの平行ギャップ及びくさび形ギャップについて測定を行った。従って、実験炉炉心に想定されているギャップ幅の範囲は実験範囲内に含まれている。

実験に用いたモデルの接触面は平面であるため、熱及び照射による燃料ブロック接触面の変形、従ってギャップ形状は正確に模擬されていない。しかしながら、燃料ブロックの熱変形及びカラムの変位によって開く接触面ギャップ形状は、それぞれ、シム挿入によって設定した平行ギャップ及びくさび形ギャップで近似できるものと考えられる。このような近似の妥当性については、今後、熱変形を模擬した形状に接触面を機械加工した試験体を用いて実験的に確認する必要があると思われる。

4.2 流体力学的相似性

流体の密度及び粘性係数の変化が無視できる範囲では、流体力学的相似性はレイノルズ数を等しくすることによって満足される。ブロック接触面ギャップを通るクロス流れのレイノルズ数 Re を次のように定義する。

$$Re = \frac{\rho U_m d_e}{\mu} \quad (1)$$

ここで、 ρ 及び μ はそれぞれ流体の密度及び粘性係数、 U_m はクロス流れの代表速度、 d_e はクロス流れ流路（接触面ギャップ）の等価直径である。

実験炉炉心に発生するクロス流れの問題では、クロス流れ実験に先立ってその速度あるいは流量の範囲、従ってレイノルズ数の範囲について意味のある評価を行うことは不可能である。これに対し、クロス流れ部の圧力差についてはより明確な評価が可能である。このため、ここでは、レイノルズ数の範囲を直接評価するよりむしろ実験においてレイノルズ数を一致させるに必要な圧力差が設定できることを確認する。

クロス流れ部の圧力差 Δp は、一般に、流れの速度及び密度を用いて次のように無次元化される。

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_m^2} \quad (2)$$

この圧力損失係数 K は、接触面ギャップの無次元幾何学的形状パラメータを除いて、レイノルズ数のみの関数である。すなわち、

$$K = K(Re) \quad (3)$$

式(1)、(2)より

$$\frac{\rho \Delta p d_e^2}{\mu^2} = \frac{1}{2} Re^2 K \quad (4)$$

式(4)の右辺は、レイノルズ数のみの無次元の関数であることが分かる。左辺は、圧力差を代表長さ及び流体の密度、粘性係数で無次元化した形になっている。従って、幾何学的形状及び寸

法の等しいモデルに対して、レイノルズ数を等しくする条件は次のように書ける。

$$\frac{\rho \Delta p}{\mu^2} = \text{const.} \quad (5)$$

この条件から、400 °C、4MPa のヘリウムガスを常温、大気圧（20 °C、1 atm）の空気で模擬するには、圧力差を0.67 倍にとれば良いことが分かる。また、1000 °C、4MPa のヘリウムガスに対しては、0.15 倍の圧力差をとれば良い。但し、流体の密度及び粘性係数には Table 1 に示す値を用いた。

実験炉炉心全体（オリフィスバルブ入口からカラム最下段まで）の冷却材圧力損失は約15 kPa である。クロス流れ部の圧力差は、炉心の条件及び炉心内の位置によって異なるが、最大10kPa程度と予測されている。炉心内に漏れ流れがほとんど生じない理想的な条件では、クロス流れ部の最大圧力差は炉心全体の圧力損失約15kPa 程度になる。従って、常温、大気圧の空気を用いて、実験炉炉心条件を模擬するために必要な最大圧力差は約10kPa である。2ブロッククロス流れ実験では、必要な圧力差10kPa に比べて十分大きい圧力差約25kPa まで試験体ブロックのクロス流れ部に加えることが可能である。

圧力による流体の密度変化は、実験炉炉心条件で最大0.25% 程度と非常に小さい。炉心条件を模擬した実験条件では、この密度変化は最大7%程度になる。しかしながら、この程度の密度変化は十分小さく、クロス流れの流動特性に大きな影響を与えないものと考えられる。

実験炉炉心では、カラム間すき間の冷却材温度は冷却材流路主流及び燃料ブロックの温度より低い。このため、カラム間すき間から冷却材流路に漏れ込むクロス流れは、ギャップを通る間にブロック接触面からの熱伝達により加熱されることになる。実験は等温で行っているため、この温度変化による流体の密度及び粘性係数の変化がクロス流れの流動特性に与える影響を調べることができない。温度変化の影響について、今後より詳細な評価を行う必要があると考えられるが、ここでは簡単に定性的な検討を加えておく。

カラム間すき間と冷却材流路の冷却材温度差は、炉心の条件及び炉心内の位置によって異なり、炉心下部では200-300 °C になる部分が生じるが、平均的には100 °C程度と予測されている。炉心の平均的な条件では、クロス流れと燃料ブロック接触面が熱的に平衡になっているとしても、流体の密度及び粘性係数の変化はそれぞれ10%及び7%程度である。炉心下部において、300 °Cの温度変化が生じた場合、流体の密度及び粘性係数の変化はそれぞれ27%及び18%程度である。しかしながら、クロス流れと燃料ブロック接触面は熱的に平衡でないため、クロス流れの温度上昇はカラム間すき間と冷却材流路の冷却材温度差より小さく、その密度及び粘性係数の変化も小さくなる。実験炉炉心では、以下に述べるように温度差の大きいところでクロス流れの温度上昇が小さくなり、密度及び粘性係数の変化がクロス流れの流動特性に与える影響も小さくなる傾向にある。

カラム間すき間と冷却材流路の間に加わる圧力差は炉心下部で最も大きい。温度差の大きいところではブロックの熱変形が大きくなり、接触面に広いギャップが開く。ギャップ幅が広く、圧力差が大きいため多量のクロス流れが生じることになる。このような条件では、クロス流れはギャップを通る間にほとんど加熱されず、クロス流れの温度上昇はカラム間すき間と冷却材流路間の冷却材温度差よりかなり小さくなる。更に、ギャップ幅が広く、クロス流れ流量が大

きい領域では、クロス流れの圧力損失に対して、流れの粘性力に比べて慣性力が支配的になると考えられる。このことは、接触面ギャップ流路の粘性摩擦に比べて、流路入口及び出口の圧力損失が大きいことを意味している。従って、ブロック接触面近傍で流体の粘性係数が大きく変化してもクロス流れの流動特性には大きな影響を与えないと考えられる。

実験炉炉心では、冷却材流路主流のレイノルズ数範囲は3500-8000程度である。2ブロッククロス流れ実験では、各冷却材流路の流量を一様とした場合、冷却材流路主流の最大レイノルズ数は約12000である。

4.3 接触面荷重

ブロック接触面に加わる荷重がクロス流れに与える影響を調べるため、荷重負荷装置により最大23.2kNまでの荷重を加えて実験を行った。実験炉炉心の燃料ブロック接触面には、上に積み重ねられた燃料ブロック、可動反射体ブロックなどの重量及び冷却材の軸方向圧力差による力が加わる。この力は最大12kN程度と予測されている。

5 ま と め

多目的高温ガス実験炉炉心に発生する冷却材のクロス流れの流動特性を実験的に明らかにすると共に、実験炉炉心の設計に必要なデータを取得することを目的として、実寸大の2ブロックモデルを用いる2ブロッククロス流れ実験装置を製作した。本実験装置では、作動流体として常温、大気圧の空気を用いており、また燃料ブロック接触面ギャップをシムを挿入することによって模擬している。実験結果が実験炉炉心設計に適用できることを確認するため、幾何学的条件および流体力学的条件の相似性について検討を行った。この結果、実験炉炉心条件をほぼ模擬した条件で実験できることが分かった。

謝 辞

2ブロッククロス流れ実験の計画に当たりご協力を頂いた動力炉開発・安全性研究管理部多目的高温ガス実験炉設計室の宮本喜晟室長及び鈴木邦彦氏に感謝の意を表す。また、本報告をまとめるに当たりご指導を頂いた高温工学部高温構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表す。

きい領域では、クロス流れの圧力損失に対して、流れの粘性力に比べて慣性力が支配的になると考えられる。このことは、接触面ギャップ流路の粘性摩擦に比べて、流路入口及び出口の圧力損失が大きいことを意味している。従って、ブロック接触面近傍で流体の粘性係数が大きく変化してもクロス流れの流動特性には大きな影響を与えないと考えられる。

実験炉炉心では、冷却材流路主流のレイノルズ数範囲は3500-8000程度である。2ブロッククロス流れ実験では、各冷却材流路の流量を一様とした場合、冷却材流路主流の最大レイノルズ数は約12000である。

4.3 接触面荷重

ブロック接触面に加わる荷重がクロス流れに与える影響を調べるため、荷重負荷装置により最大23.2kNまでの荷重を加えて実験を行った。実験炉炉心の燃料ブロック接触面には、上に積み重ねられた燃料ブロック、可動反射体ブロックなどの重量及び冷却材の軸方向圧力差による力が加わる。この力は最大12kN程度と予測されている。

5 ま と め

多目的高温ガス実験炉炉心に発生する冷却材のクロス流れの流動特性を実験的に明らかにすると共に、実験炉炉心の設計に必要なデータを取得することを目的として、実寸大の2ブロックモデルを用いる2ブロッククロス流れ実験装置を製作した。本実験装置では、作動流体として常温、大気圧の空気を用いており、また燃料ブロック接触面ギャップをシムを挿入することによって模擬している。実験結果が実験炉炉心設計に適用できることを確認するため、幾何学的条件および流体力学的条件の相似性について検討を行った。この結果、実験炉炉心条件をほぼ模擬した条件で実験できることが分かった。

謝 辞

2ブロッククロス流れ実験の計画に当たりご協力を頂いた動力炉開発・安全性研究管理部多目的高温ガス実験炉設計室の宮本喜晟室長及び鈴木邦彦氏に感謝の意を表す。また、本報告をまとめるに当たりご指導を頂いた高温工学部高温構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表す。

きい領域では、クロス流れの圧力損失に対して、流れの粘性力に比べて慣性力が支配的になると考えられる。このことは、接触面ギャップ流路の粘性摩擦に比べて、流路入口及び出口の圧力損失が大きいことを意味している。従って、ブロック接触面近傍で流体の粘性係数が大きく変化してもクロス流れの流動特性には大きな影響を与えないと考えられる。

実験炉炉心では、冷却材流路主流のレイノルズ数範囲は3500-8000程度である。2ブロッククロス流れ実験では、各冷却材流路の流量を一様とした場合、冷却材流路主流の最大レイノルズ数は約12000である。

4.3 接触面荷重

ブロック接触面に加わる荷重がクロス流れに与える影響を調べるため、荷重負荷装置により最大23.2kNまでの荷重を加えて実験を行った。実験炉炉心の燃料ブロック接触面には、上に積み重ねられた燃料ブロック、可動反射体ブロックなどの重量及び冷却材の軸方向圧力差による力が加わる。この力は最大12kN程度と予測されている。

5 ま と め

多目的高温ガス実験炉炉心に発生する冷却材のクロス流れの流動特性を実験的に明らかにすると共に、実験炉炉心の設計に必要なデータを取得することを目的として、実寸大の2ブロックモデルを用いる2ブロッククロス流れ実験装置を製作した。本実験装置では、作動流体として常温、大気圧の空気を用いており、また燃料ブロック接触面ギャップをシムを挿入することによって模擬している。実験結果が実験炉炉心設計に適用できることを確認するため、幾何学的条件および流体力学的条件の相似性について検討を行った。この結果、実験炉炉心条件をほぼ模擬した条件で実験できることが分かった。

謝 辞

2ブロッククロス流れ実験の計画に当たりご協力を頂いた動力炉開発・安全性研究管理部多目的高温ガス実験炉設計室の宮本喜晟室長及び鈴木邦彦氏に感謝の意を表す。また、本報告をまとめるに当たりご指導を頂いた高温工学部高温構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 文沢元雄, 荒井長利, 宮本喜晟 : " 多目的高温ガス実験炉の炉内流れ冷却材温度解析", JAERI-M 82-101 (1982) .
- (2) Olson, H. G. , Brey, H. L. , Warembourg, D. W. : " The Fort St. Vrain High Temperature Gas -Cooled Reactor : X. Core Temperature Fluctuations", Nucl. Engrg. Des., 72, 125 (1982) .
- (3) Gulf General Atomic : " Public Service Company of Colorado 330-MWe High-Temperature Gas - Cooled Reactor Research and Development Program, Quarterly Progress Report for the Period Ending June 30, 1967", GA-8038 (1967) .
- (4) Groehn, H. G. : " Störung der Kühlmittelverteilung in blockförmigen Brennelementen durch Bypass-Strömungen", Jül-1185 (1975) .

Table 1 Density and viscosity of air and helium

	Density ρ (kg/m^3)	Viscosity μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
Air (20 °C, 1 atm)	1.2047	1.8135×10^{-5}
Helium (400 °C, 4 MPa)	2.8396	3.3998×10^{-5}
Helium (1000 °C, 4 MPa)	1.5074	5.3132×10^{-5}

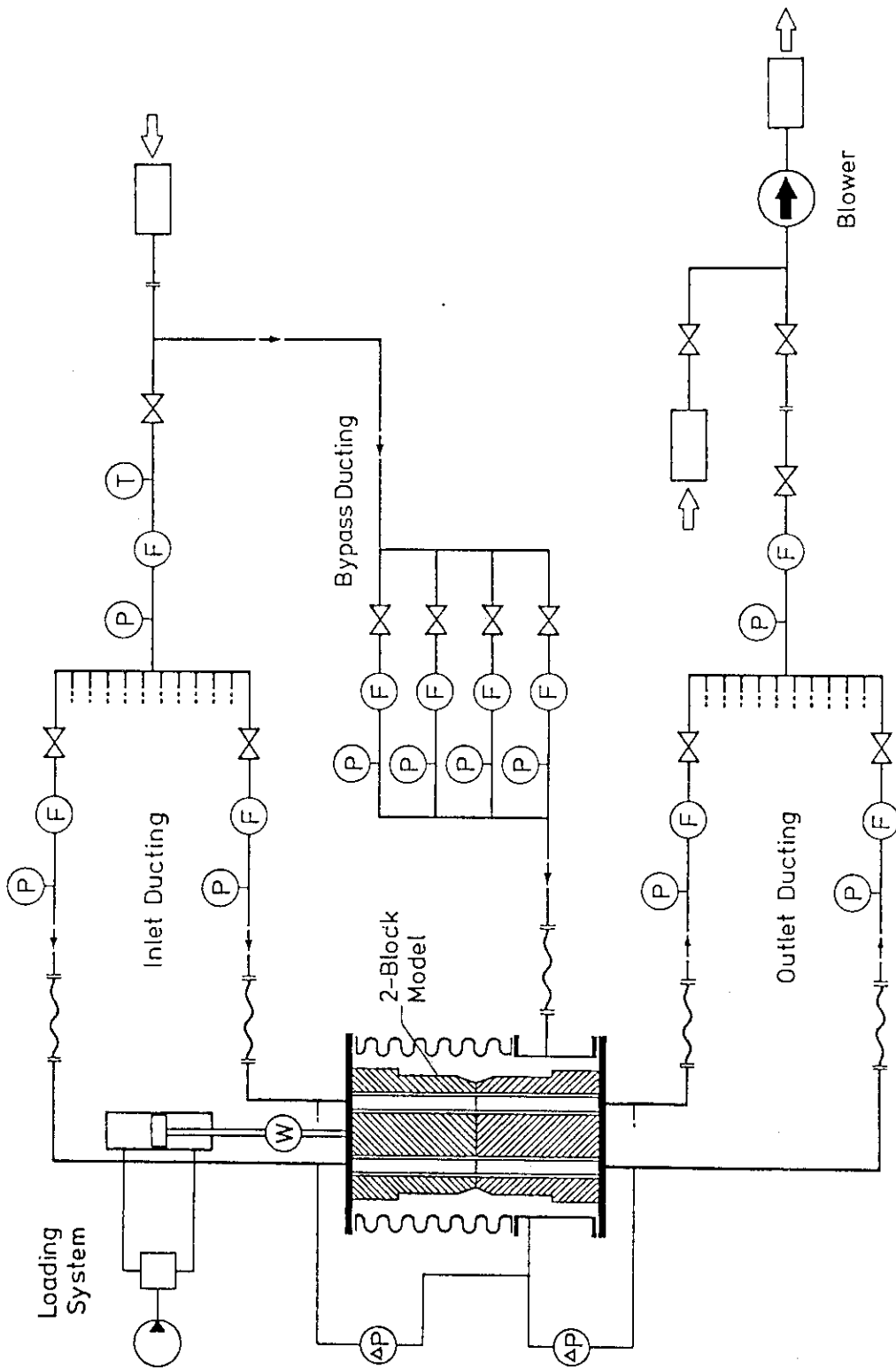


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

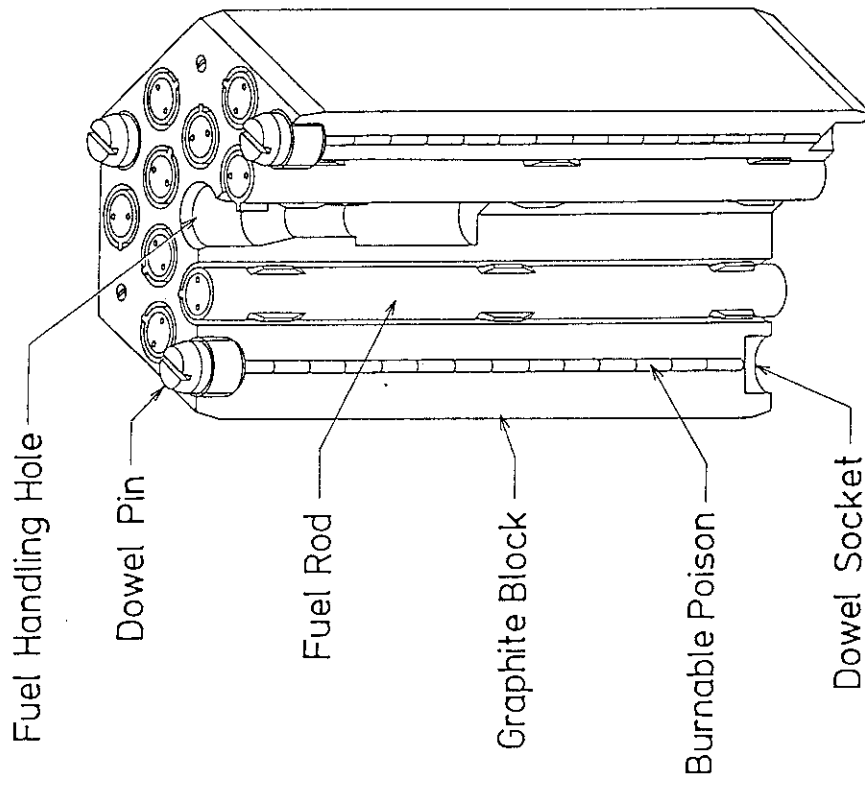


Fig. 3 VHTR Fuel Element

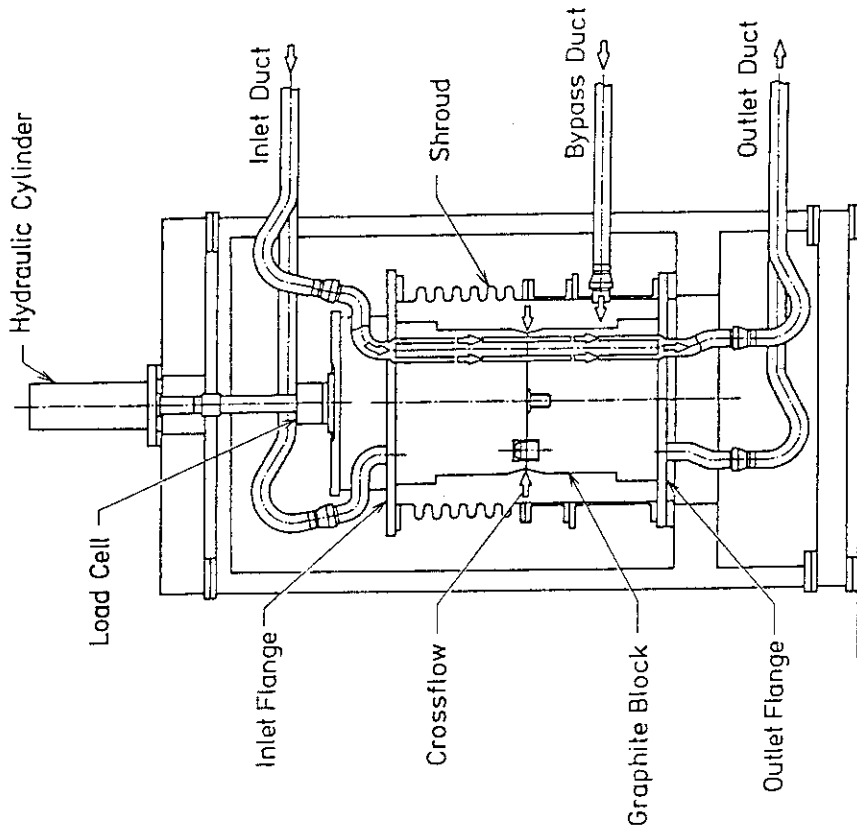


Fig. 2 Test Section

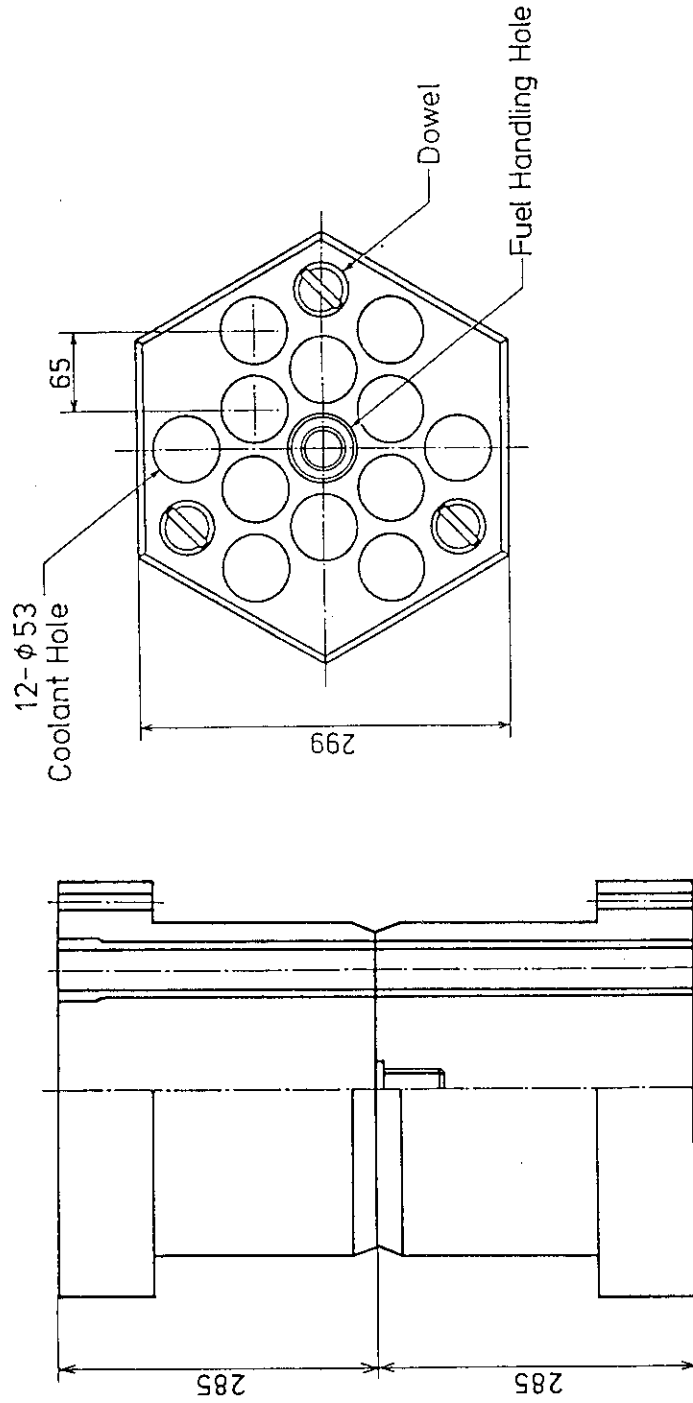


Fig. 4 Two-Block Model

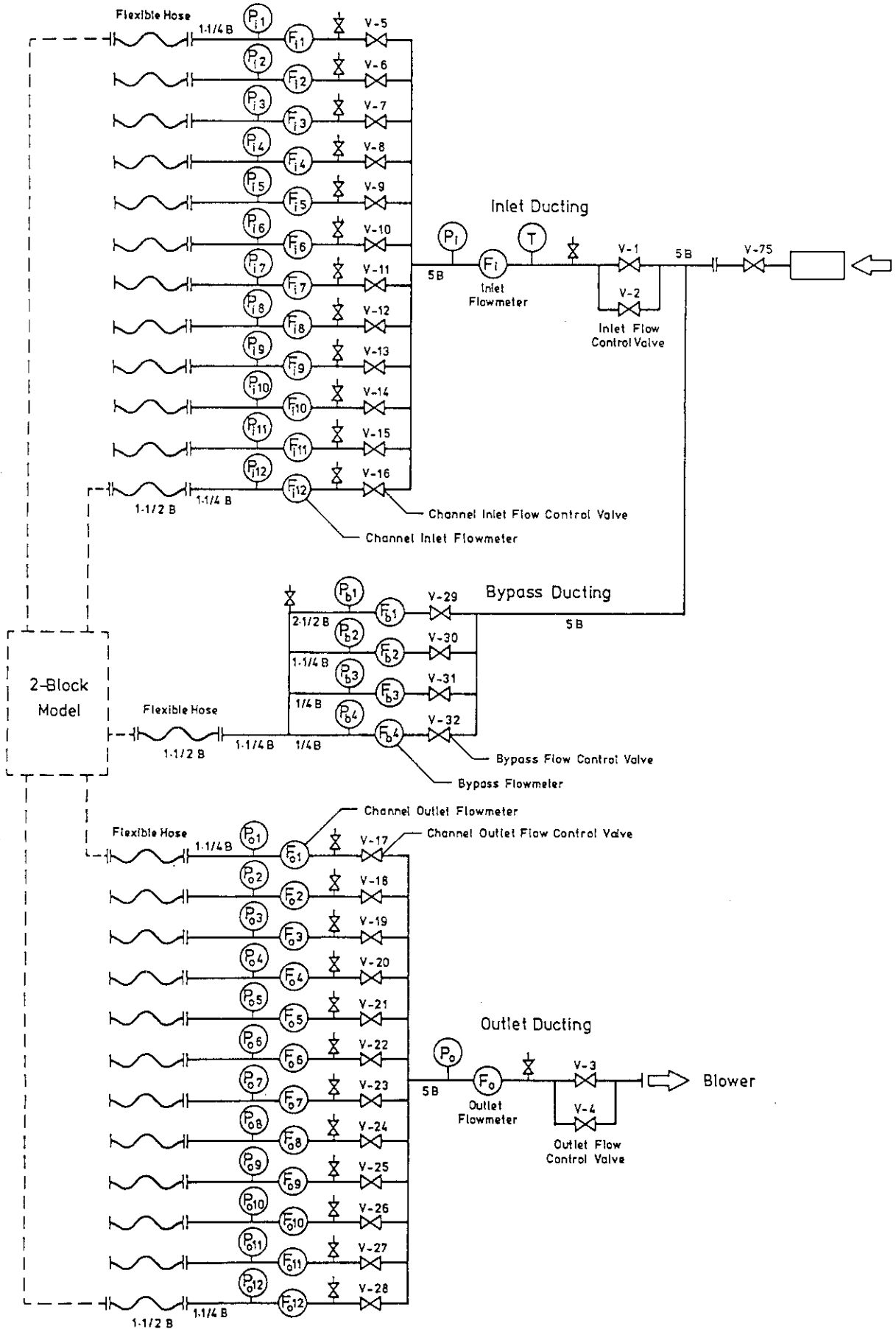


Fig. 5 Ducting

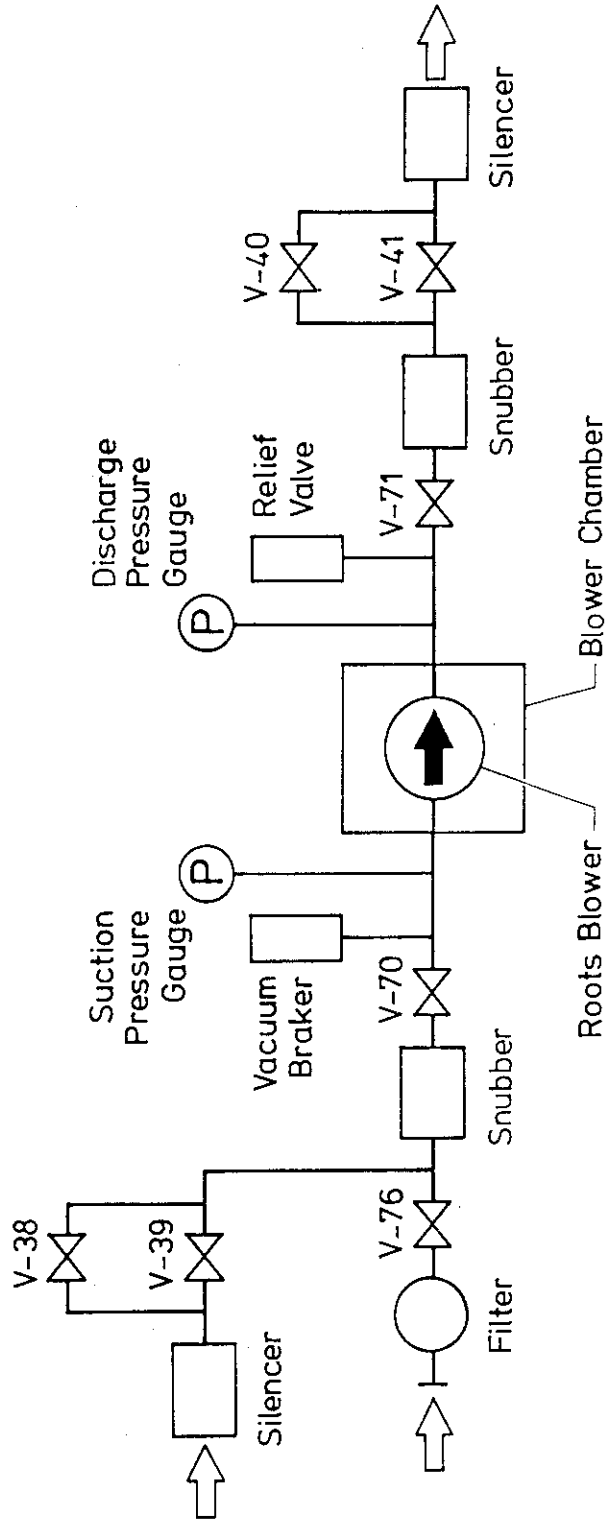


Fig. 6 Blower

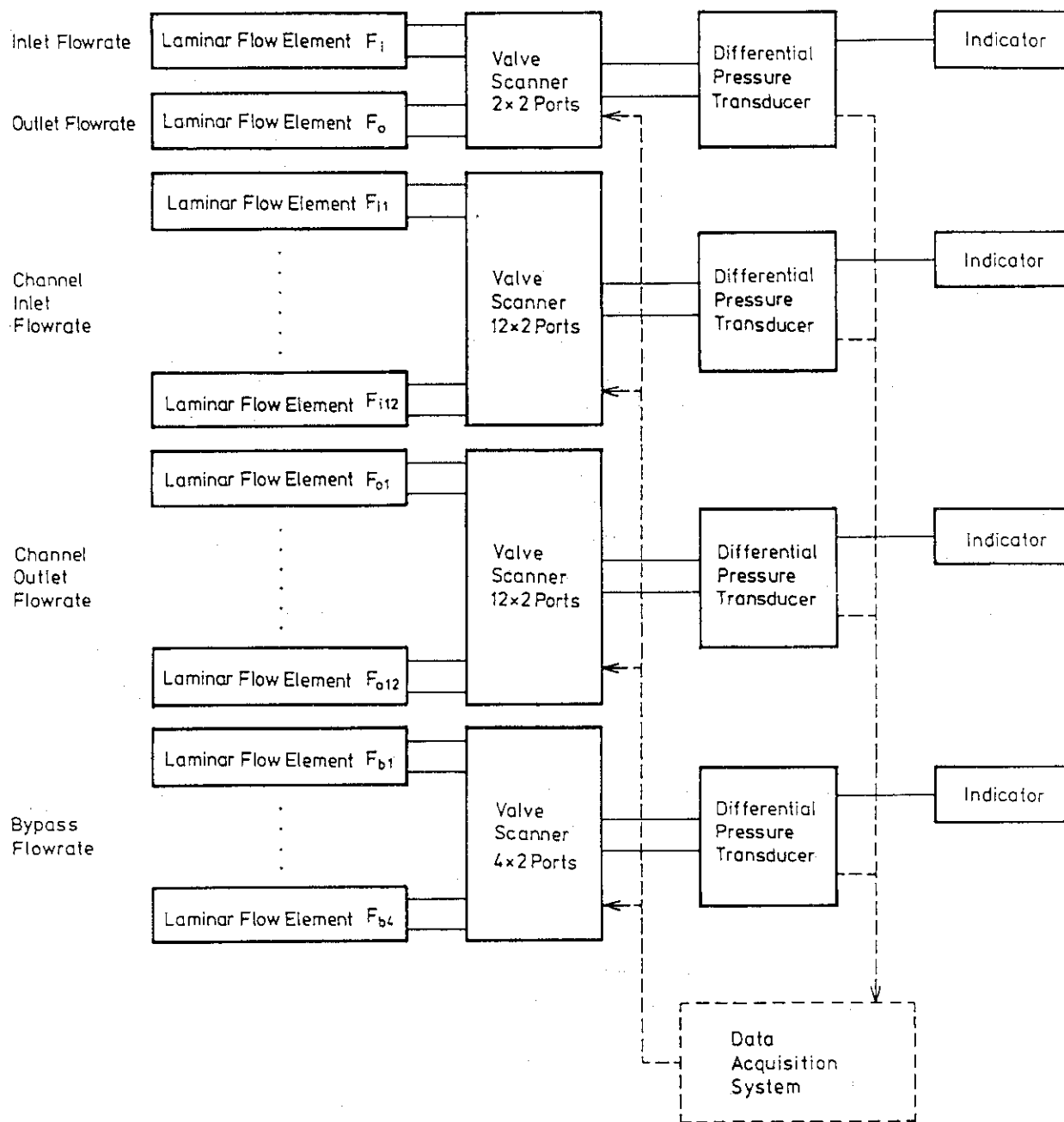


Fig. 7 Flowrate Measurement System

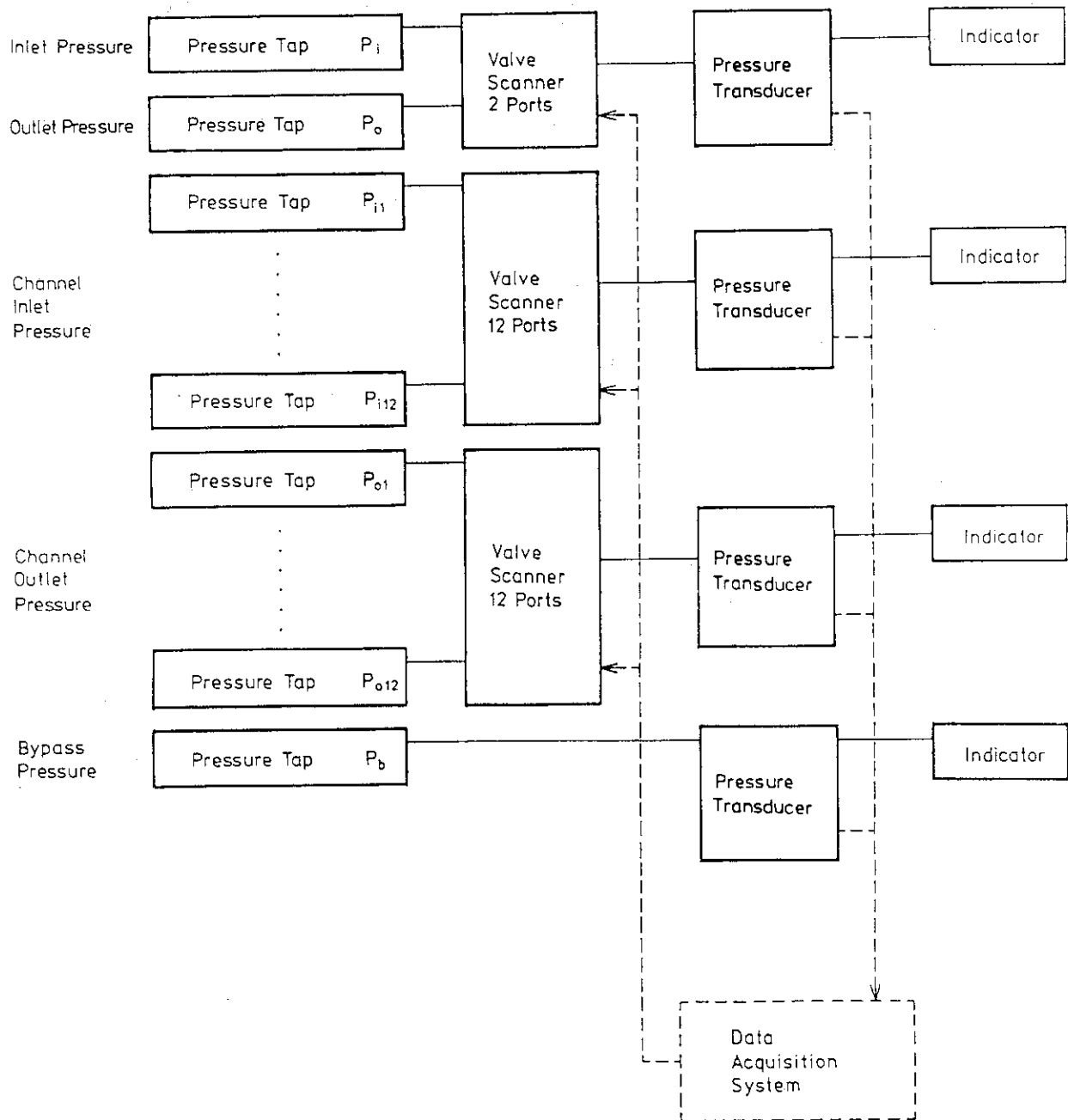


Fig. 8 Pressure Measurement System

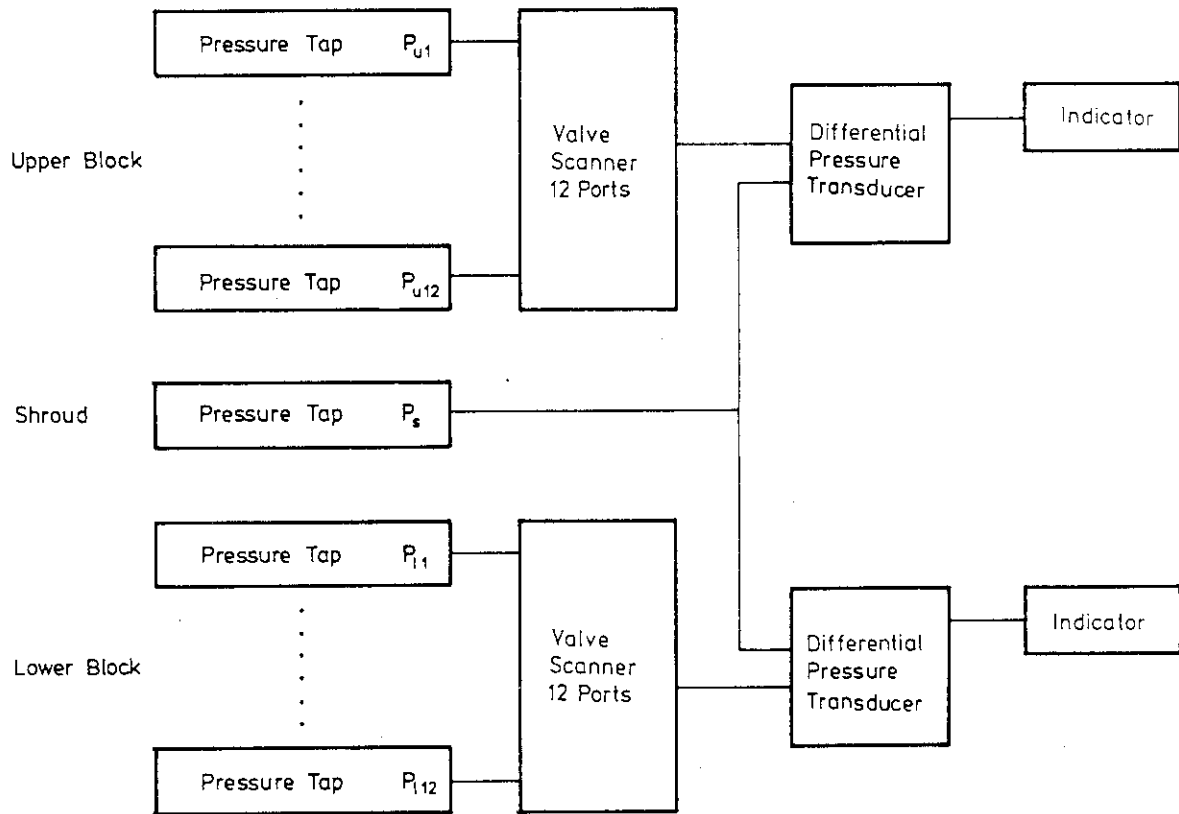


Fig. 9 Differential Pressure Measurement System

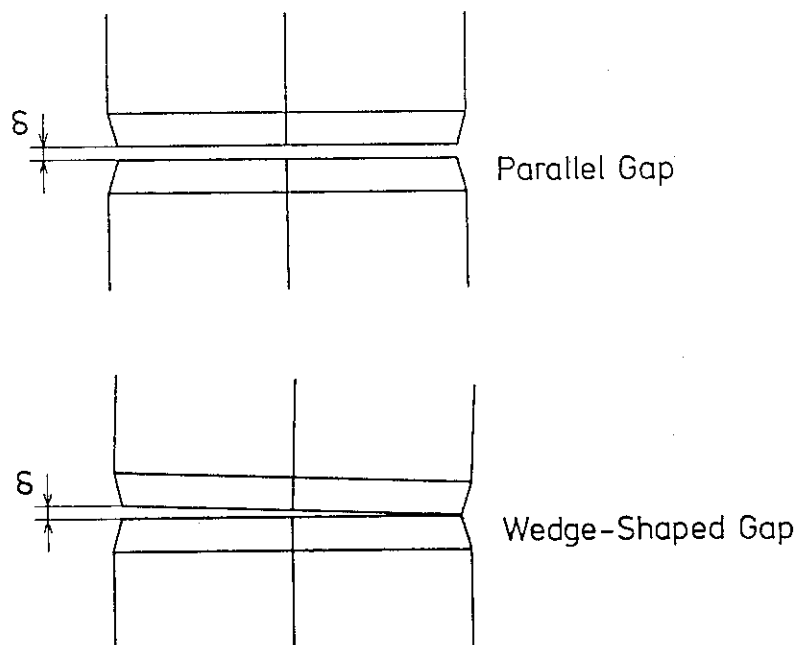


Fig. 10 Gap Configurations