

# 「もんじゅ」炉容器水流動試験

## Flow Model Study of "MONJU" Reactor Vessel

宮口 公秀\*

Kimihide Miyaguchi

### 1. まえがき

炉内構造物の設計をする場合炉内流量配分、圧損、出入口ノズルの熱衝撃等考慮すべき熱流体力上の諸問題が存在する。その基礎となる炉内での冷却材流動特性を把握するため、 $1/30$ 縮尺の「もんじゅ」原子炉構造模型を大洗工学センターの水流動試験装置に取り付け、模擬実験が実施されて来た。これまでの実験及び解析により明らかになった炉内流動特性は、定常、等温条件に対する

- (1) 炉内での高・低圧領域間の流量配分特性
- (2) 高・低圧各領域での流量ゾーン間の流量配分特性
- (3) 炉内各部の圧損特性
- (4) 上・下プレナムにおけるフローパタン及び冷却材混合効果
- (5) 下部プレナム流動特性に及ぼす入口ノズルひねり角度の影響
- (6) 上部プレナム流動特性に及ぼす内筒の影響

等である。これらの試験結果に基づき炉内構造物の設計改善が行われ、改善されたものの確性試験を更に実施するという形で試験が継続されて来た。

以下では、これまでに明らかになった試験結果の概要及び今後の問題点を述べる。

### 2. 試験方法

試験に対する基本的な考え方は高温ナトリウム流動を常温水の流動で模擬するというものであるから、単に試験体の幾可学的形状を実機と相似にするだけでなく、流動方程式を支配する無次元数を出来る限り実機に近づけることが必要となる。温度分布による浮力の効果は極めて低流量の場合にしか現われないのでここではそれを無視する。沸騰、キャビテーションあるいはガス混入による二相流状態は実機では存在しないためここでも扱わない。また自由液面の波立ちの影響はディッププレートにより抑制されており、その下部の炉内流動に与える影響は無視してよい。従ってここで扱うのは等温、单相の粘性流体の流れであり、また自由表面の影響も考えなくてよいから、定常な場合にはレイノルズ数のみを考慮すればよいことになる。最大定格流量に対する実験時のレイノルズ数は $10^5$ のオーダーで実機の約 $1/30$ であるが、この程度まで大きくとれば流況のレイノルズ数依存性も小さくなり、実機を十分に模擬しているものと考えることが出来る。非定常試験の場合は更に無次元時間を考慮することが必要になるが、 $1/30$ 程度の縮尺モデルであるから、レイノルズ数を実機より著しく下げることなく、時間軸をも実機と合せることが可能である。

#### 2.1 試験装置

試験装置は水ループ、原子炉構造模型及び計装・記録設備で構成される。

\* 大洗工学センターNa技術部Na流動伝熱試験室：O-arai Engineering Center Sodium Engineering Division Fluid Dynamics Section

(1) 水ループ (大型機器水流动試験装置)

図2-1に示すごとく、地下の300m<sup>2</sup>の貯水槽より、揚程105m、最大流量4000m<sup>3</sup>/hのポンプにより水が汲み上げられ、24B主配管を通過して試験部に送られ再び貯水槽に戻る。貯水槽及びサージタンクは自由液面を有しており開ループとなっている。図の試験部の箇所に原子炉構造模型が据え付けられ、試験部の出入口近くで主配管は3本に分岐し、模型の3本の出入口ノズルに接続される。

(2) 原子炉構造模型

「もんじゅ」原子炉容器及び炉内構造物のうち、冷却材の流動に係る部分を約1/2縮尺で模擬した模型で、図2-2に示すごとく、その主要構成は

- 1) 炉心及びブランケット
- 2) 上・下プレナム
- 3) 高・中・低圧プレナム
- 4) 炉上部機構
- 5) 内筒
- 6) ディッププレート
- 7) 出口及び入口ノズル

となっている。このうち、炉心燃料集合体は細い銅チューブを束ねた等価圧損失素子で、また径方向ブランケット集合体はオリフィスで流動抵抗を模擬している。反射体領域の流量は少ないので連結管部分のみを模擬している。なお、上部プレナムの燃料交換装置はその近傍の流れには影響を及ぼすが、上部プレナム全体の流れに対する影響は小さいのでここでは省略している。

(3) 計装・記録設備

まずループ計装としては図2-1に示すごとく電磁流量計、オリフィス流量計、ブルドン管圧力計及びパッチ式流量計校正装置がある。また図2-1には示されていないが、主配管が3本に分岐した後それぞれの枝管ごとにその流量を測る電磁流量計がある。電磁流量計及びオリフィス流量計は試験前及びあとにパッチ式校正装置により校正される。この校正装置は、一定時間ループ流量を秤量タンクへ流し込み、全重量と時間を測ることにより流量率を算出する方式のものであるから、定期的に錘を載せることによ

り検定している。炉体計装としては圧力分布を測定するための差圧変換器及び圧力変換器、模擬アセンブリ流量を測るためのタービン流量計、上部プレナムでの流速測定用の5孔ピトー管、上・下プレナムでの塩水濃度測定用の電導度計及び水温チェック用の测温抵抗体等がある。差圧変換器はマノメータ及び圧力基準器で、濃度計は標準濃度計により試験前に校正される。また圧力基準器は定期的にメーカーに依頼して検定し、標準濃度計はJIS規格に基づく標準濃度溶液により検定している。タービン流量計は購入時及び修理時にメーカーで校正したものを使用している。これらの計装設備から出る電気信号は、ブルドン管と濃度計以外は図2-3に示すようにミニコン(TOSBAC10)により集録され、紙テープパンチャー及びタイプライターにより記録される。(この集録システムは今後、磁気テープ装置、ディスク装置等の周辺装置を利用できるものに置き換え、大洗工学センターの大型計算機と接続して、データ集録とその処理を有機的に行えるよう改善する予定である。)濃度計センサーは過渡的な変化を測るので現在のシステムでは集録できず、電磁オッシロ又はデータレコーダにより集録した。

2.2 試験条件及び試験項目

試験の種類により変化させるパラメータも異なるが、まとめて列挙すると以下のようになる。

- |                          |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| (1) ループ全流量               | 1000-4000m <sup>3</sup> /h |
| (2) 運転ループ数               | 3, 2, 1                    |
| (3) 炉上部機構の有無             | 有り、無し                      |
| (4) タービン流量計の配置           |                            |
| (5) 炉心集合体エントランス<br>ノズル方位 | 0°, 30°                    |
| (6) 内筒の有無                | 有り、無し                      |
| (7) 内筒フローホールの高さ          | 高、低                        |
| (8) 入口ノズル流入角度            | 0°, 15°, 30°, 45°          |
| (9) 炉上部機構熱遮蔽板の傾斜角        | 10°, 40°                   |

具体的な試験項目及び測定方法を整理すると次のようになる。

(1) 流量配分

各流量ゾーンごとに5~6体の模擬集合体内にタービン流量計が装荷されていて、それによ

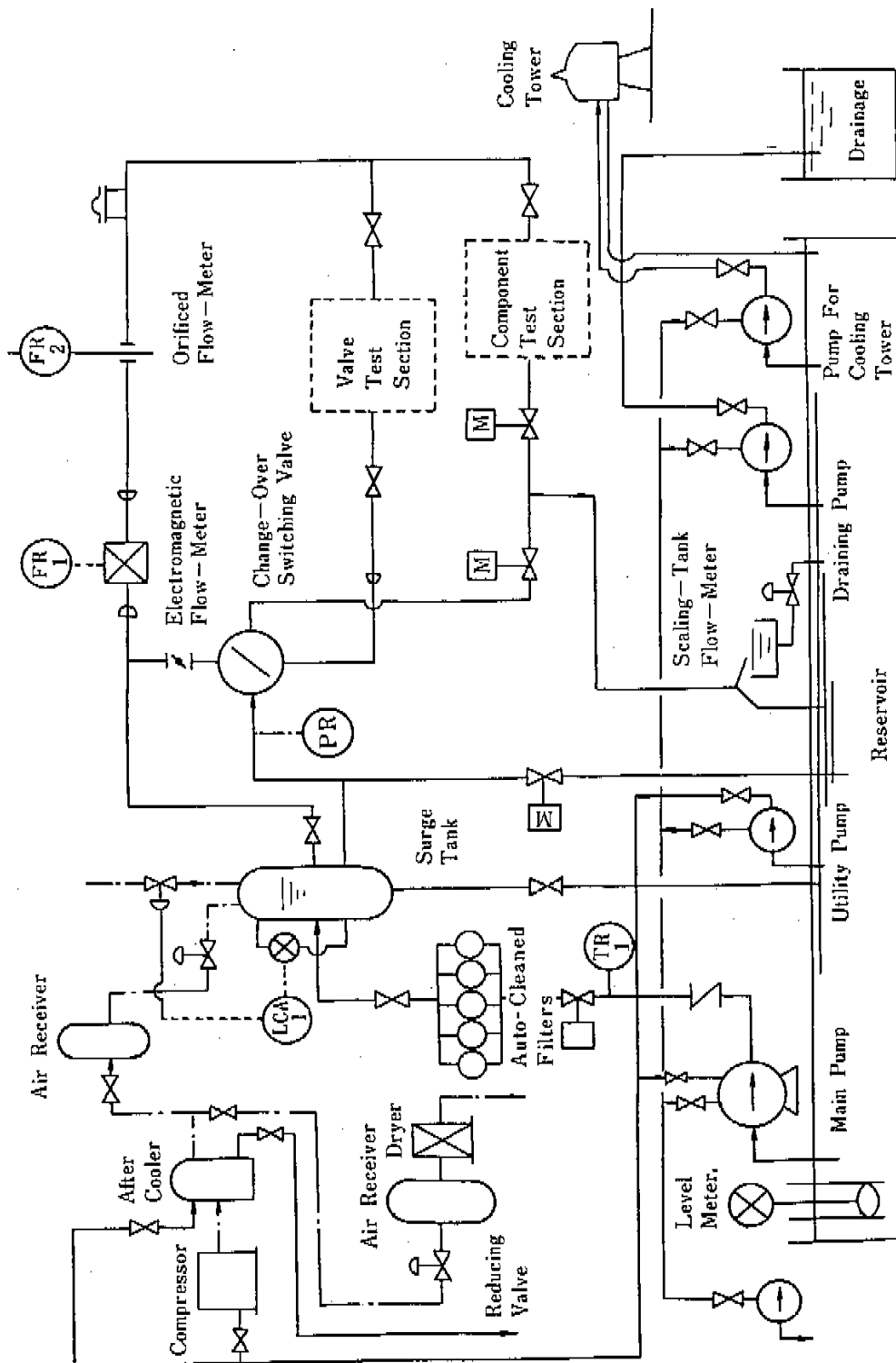


図 2-1 大型機器水流動試験装置フローシート

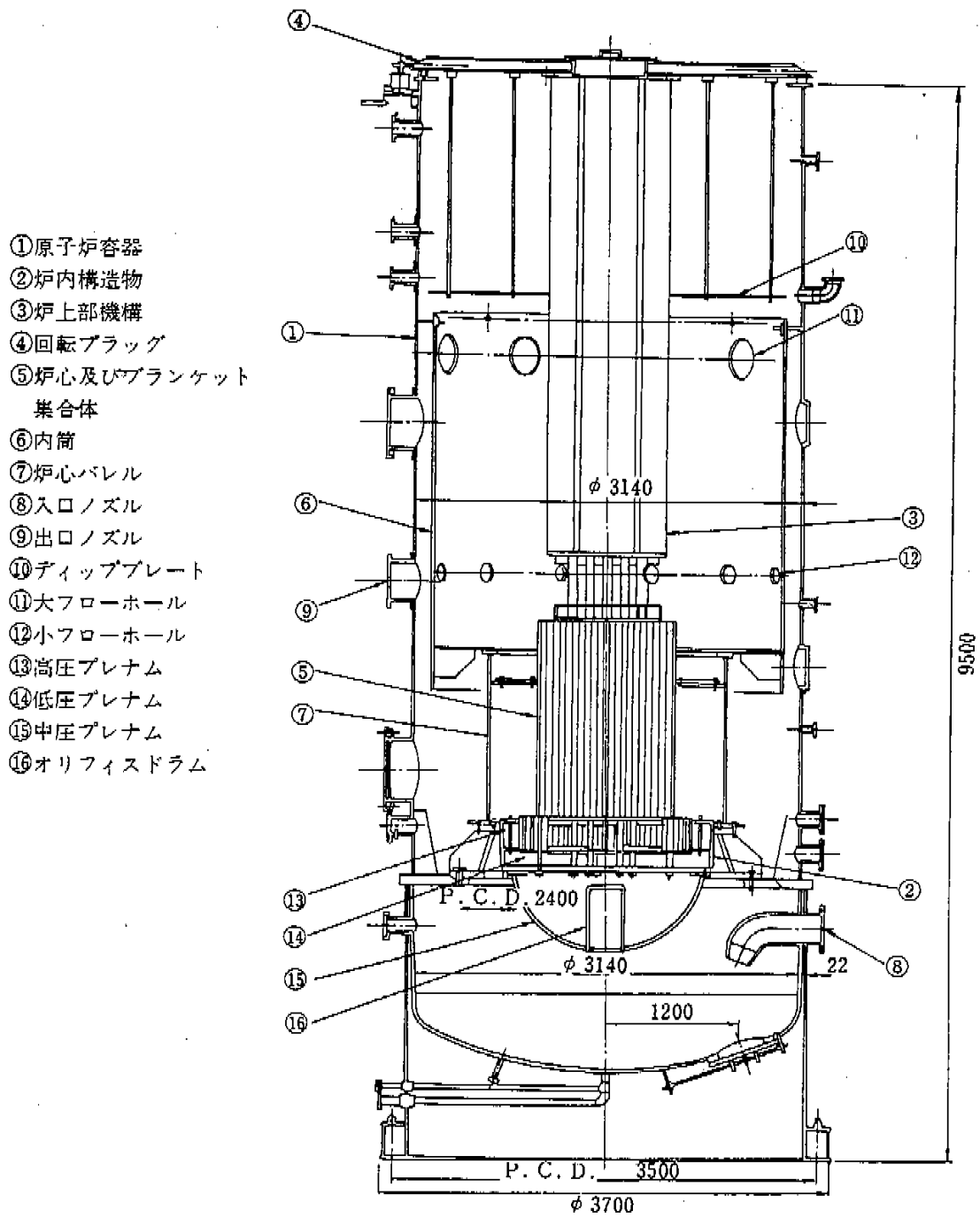


図 2 - 2 原子炉構造模型

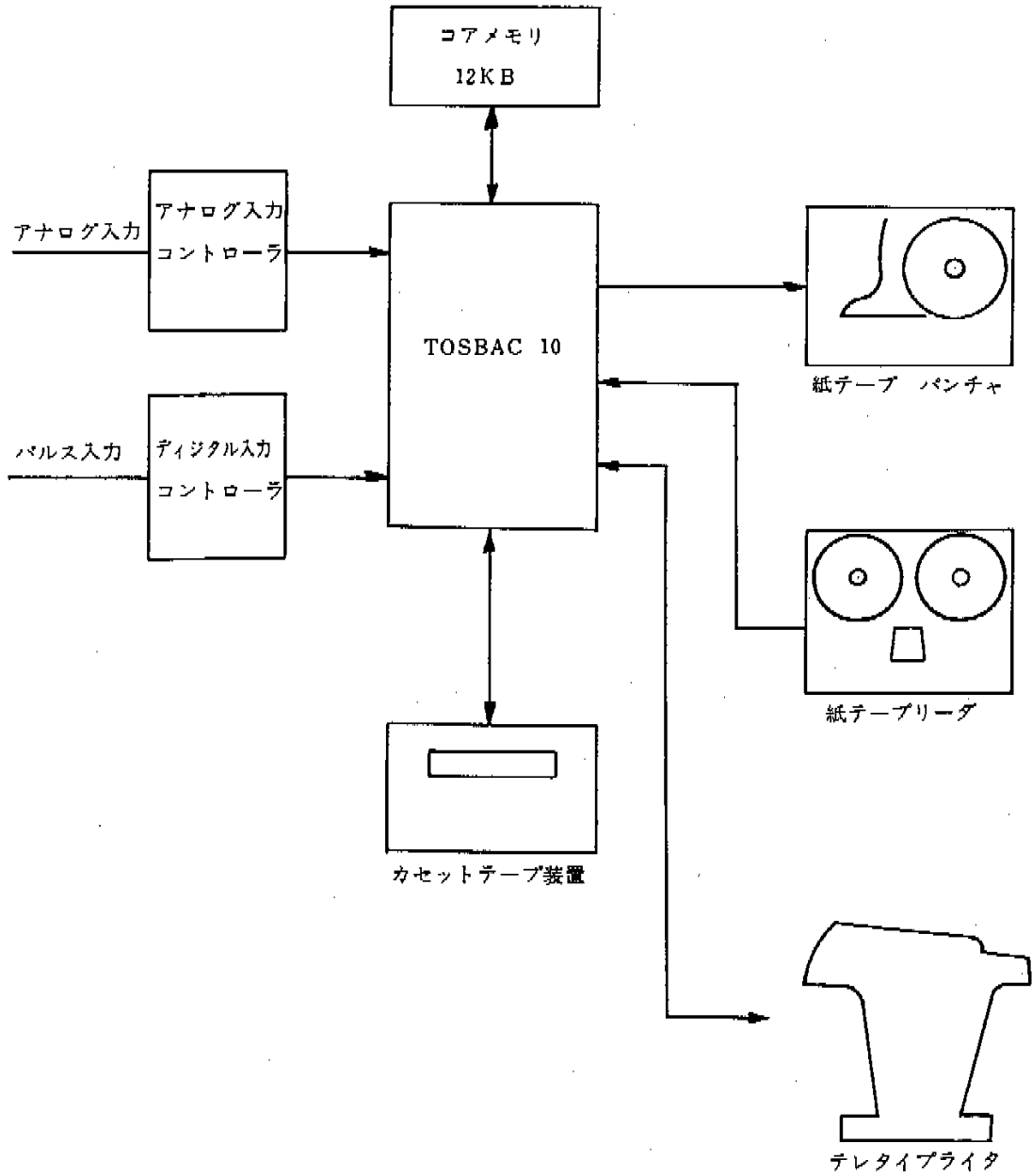


図 2 - 3 データ記録装置システム構成図

りゾーン間流量配分を測定する。高・低圧領域間の流量配分は高圧側あるいは低圧側を盲蓋により閉塞したときのデータと正常時のデータを比較することにより求められる。

なお模擬集合体の単体特性は別途に求められたものを使用する。

#### (2) 各プレナム内圧力分布、プレナム間差圧

高圧及び低圧プレナムの天井面及び床面、中圧プレナム天井面、下部プレナムの鏡面及び側面に取り付けられた圧力タップから銅又はナイロンチューブにより圧力を差圧変換器に導き測定する。

#### (3) 上部プレナム内流速分布

上部の蓋に設けられた測定孔よりディッププレートを通り5孔ビト一管が挿入される。この圧力を差圧変換器に導き速度ベクトルが測定される。

#### (4) 上・下プレナム内ミキシング

入口ノズルの少し上流の位置より塩水をトレーサとして注入し、プレナム内の各点に設置された電導度計により過渡的な濃度変化を測定することにより求める。

#### (5) 入口ノズル順・逆流抵抗

入口ノズルの少し上流及び下部プレナム内の圧力タップによりノズル部での圧損を測り、順流方向及び逆流方向の流動抵抗を求める。

### 3. 計算方法

炉内での流量配分及び圧損を計算するためにORIFICEコードが、また上部プレナムでの流速分布及び濃度分布を計算するためにAURORAコードが開発された。更に、上部プレナムでの濃度分布の簡易解析法として「循環流モデル」を使用した。下部プレナムの流れは噴流と旋廻流からなる3次元的な複雑な流れであるから、今迄のところ適切な理論解析はなく、ここでは定性的な現象解釈にとどめておく。現在、熱衝撃解析への応用のため、伝達関数による濃度解析を行っているが、まだ未完了であるためここでは省略した。

#### 3.1 ORIFICEコード

これは設計計算に使われている手法と本質的

に同じものであるが、ここでの実験解析上不要な部分は除いて簡略化したモデルを使っている。計算の前提となる仮定は以下のとおりである。

- (1) 高圧、低圧、上部及び下部プレナム間のもれ流れはない。
- (2) 下部プレナム内に圧力分布はない。
- (3) 低圧プレナム内に圧力分布はない。
- (4) 炉心出口部での圧力分布はない。

以上の仮定の下に全流入流量と各部圧損係数が与えられたとき流量配分と圧損が計算される。図3-1に計算のフローシートを示す。これは高圧側の流量配分 $Q_H$ を仮定してそれを修正しながら反復計算する外側のループと、炉心第1領域の集合体1体当りの流量 $Q_{11}$ を仮定して、それを修正しながら炉心内の流量配分を収束計算により求める内側のループで構成されている。低圧側の流量配分はプランケット集合体がオリフィスで模擬されているため圧損係数が流速に依存せず収束計算の必要がない。このようにして計算された $Q_H + Q_L$ がインプットで与えられた全流入流量 $Q_T$ に十分な精度で一致するまで、二重ループの反復計算が繰り返される。なお、高圧プレナム内の圧力分布は考慮され、連結管群の間を通り抜ける際の圧力降下が計算に含まれる。

#### 3.2 AURORAコード

上部プレナム内の流れは、内筒がある場合は軸対称流とみなすことができるので、ここでは円筒座標で流動方程式を記述し、円周方向成分を省略することにより問題を2次元化する。更に次のような仮定を置く。

- (1) 流れは定常である。
- (2) 流体の物性値は一定とする。
- (3) 熱膨脹あるいは塩水の混入による密度差が流動に与える浮力の効果は無視できる。

以上の仮定の下に流動方程式及び濃度拡散方程式を円筒座標で表わし無次元化する。更に流動方程式は流れ関数 $\psi$ と渦度 $\omega$ で変換し、方程式の数を一つ減らすとシステム方程式は以下のようなになる。

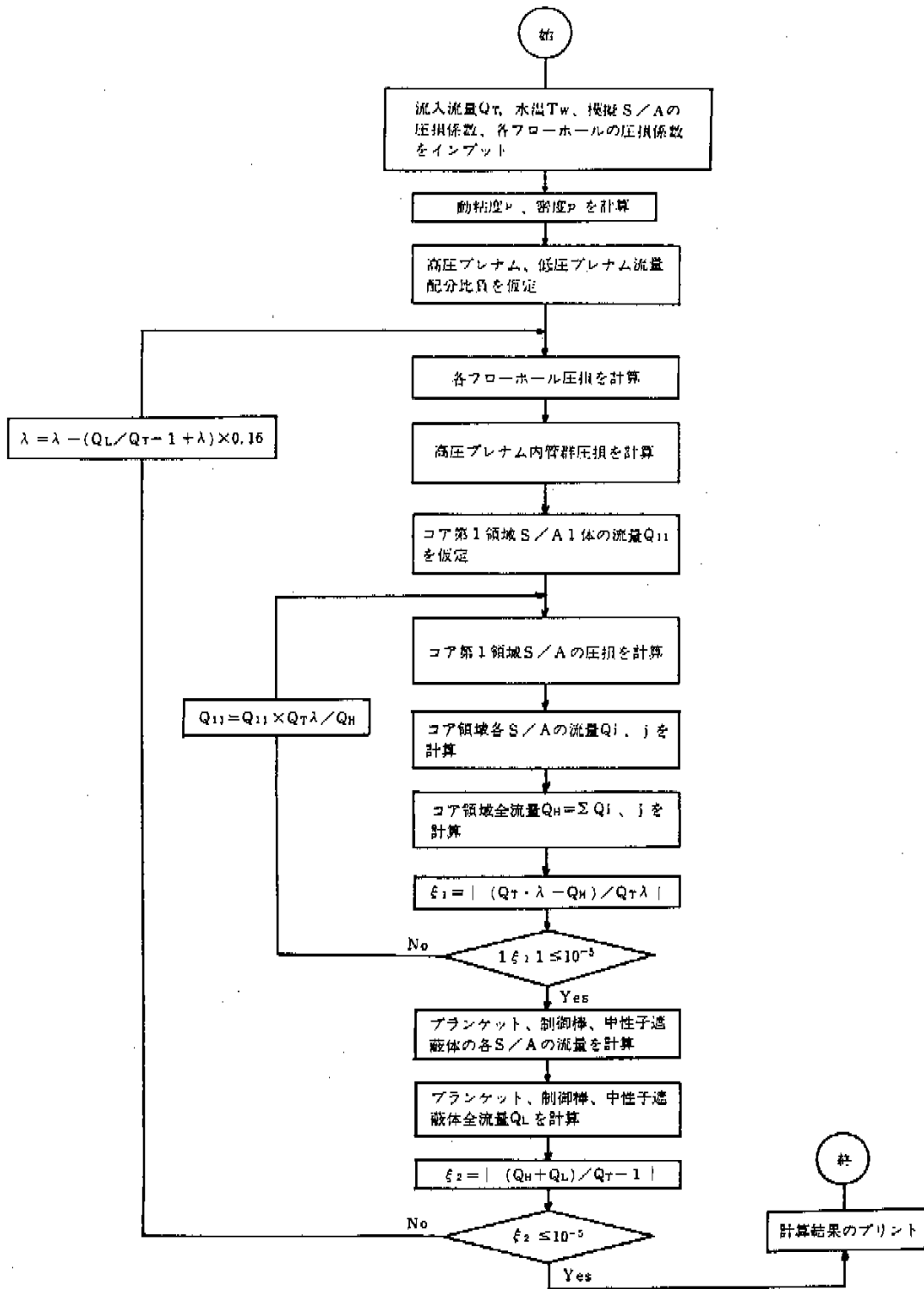


図 3-1 流量配分計算フローシート

$$r^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right) \right\}$$

$$= \frac{1}{Re} \left\{ \frac{\partial}{\partial Z} \left( r^3 \frac{\partial}{\partial Z} \left( \nu e \frac{\omega}{r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left( \nu e \frac{\omega}{r} \right) \right) \right\} \dots\dots (i)$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = -\omega \dots\dots (ii)$$

$$r \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Z} \left( c \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( c \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right) + \frac{1}{Re Sc}$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial Z} \left( D_{er} \frac{\partial c}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{er} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \right\} \dots\dots (iii)$$

ここで、 $Re = U_0 \nu_0 / \nu$ 、 $Sc = \nu / D$   
 $\nu_e = (\nu + \epsilon_m) / \nu$ 、 $De = (D + \epsilon_D) / D$   
 以上の方程式を差分化し数値解を求める。水の動粘性係数  $\nu$  及び食塩の濃度拡散件数  $D$  は既知であるが、運動量及び濃度の渦拡散件数  $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_D$  は流れの乱れの程度に依存する量で未知数である。従って  $\epsilon_m$  及び  $\epsilon_D$  をパラメータとしてサーベイ計算し実験と比較検討することが必要になる。

3.3 循環流モデル

上部プレナムにおけるミキシングの簡易解析法として以下に述べる循環流モデルを併用する。実験によると、上部プレナム内の流れは炉心から流出して出口ノズルへ向う主流と、その上下の循環流領域とに大別することができる。(図3-2参照) 炉心出口濃度を  $C_i$ 、主流と循環流領域の混合流量を  $Q_R$ 、主流及び循環流領域内ではそれぞれ完全混合と仮定したときの濃度を  $C$  及び  $C_R$  とすると次の方程式が成立する。

$$\frac{1-\eta}{1+\xi} \cdot \frac{dc}{d\tau} = -C + \frac{C_i + \xi C_R}{1+\xi}$$

$$\frac{\eta}{\xi} \cdot \frac{dC_R}{d\tau} = -C_R + C$$

ただし、 $\xi = Q_R / Q_T$ 、 $\eta = V_R / V$ 、 $\tau = t / (V / Q_T)$  であり、 $\xi$  は混合率、 $\eta$  は上部プレナム全容積に対する循環流領域の比容積を表わす。 $\eta$  は実験値に基づいて決め、 $\xi$  をパラメータとしてサーベイ計算し実験と比較する。濃度  $C_i$  の時間変化は、実験値を用いる。

4. 試験結果及び検討

以下に記述するのは調整設計モデルの試験結果で、製作準備設計ではこの試験結果が反映さ

れ改善されている。それら改善モデルについての確性試験も大部分終了しているが、それらの点については後に述べる。

4.1 各プレナム内圧力分布

(1) 下部プレナム圧力分布

下部プレナム底面における圧力分布測定結果の代表例を図4-1に示す。入口ノズル流入角度をひねらない場合 ( $\theta = 0^\circ$ ) 及び  $15^\circ$  上方へひねった場合 ( $\theta = 15^\circ$ ) を比較すると、径の大きい所では大差はなく、また分布も小さいが、中心部では  $\theta = 0^\circ$  の場合は、3本のノズルから来る噴流がそこで衝突するため高い圧を示し、逆に  $\theta = 15^\circ$  のときは下部プレナムに旋廻流が生じるため周辺部より低くなる。全体として見た場合は  $15^\circ$  ひねった場合の方がより平坦な圧力分布となっている。 $\theta = 30^\circ$  とすると旋廻流による中心部の圧力降下は更に大きくなる。これらの圧力分布が後述する高・低圧領域間の流量配分に影響を与えるので、下部プレナム圧力分布という面から考えた場合、入口ノズルは  $15^\circ$  ぐらいひねるのが最も良いということになる。

(2) 高圧プレナム圧力分布

代表的な測定結果を図4-2に計算値と共に示す。計算値は、動燃委託でメーカーにおいて行われた管群による圧損測定データに基づいて、エントランスノズルでの吸い込み流量をも考慮して得られたものである。実験と計算との間に幾分差があるが、流量配分計算上は問題になるほどの差ではない。また同じ列におけるデータのばらつきも炉心圧力降下の計画値  $3 \text{ kg/cm}^2$  に比べて十分に小さい。なお入口ノズルひねり角度を変えても高圧プレナムの圧力分布は殆ど影響を受けなかった。以上の考察より高圧プレナムの流量配分上の機能は、圧力分布から見ると問題ないと言える。

(3) 中圧プレナム圧力分布

中圧プレナム天井面圧力分布の測定結果を図4-3に示す。種々の流量のデータが含まれているため、中心位置との差圧を中・低圧プレナム間差圧で無次元化してプロットしてある。 $\theta = 0^\circ$ 、 $15^\circ$  の場合はオリフィスドラム天井面のオリフィスを通過する噴流の影響で、中圧プレナ

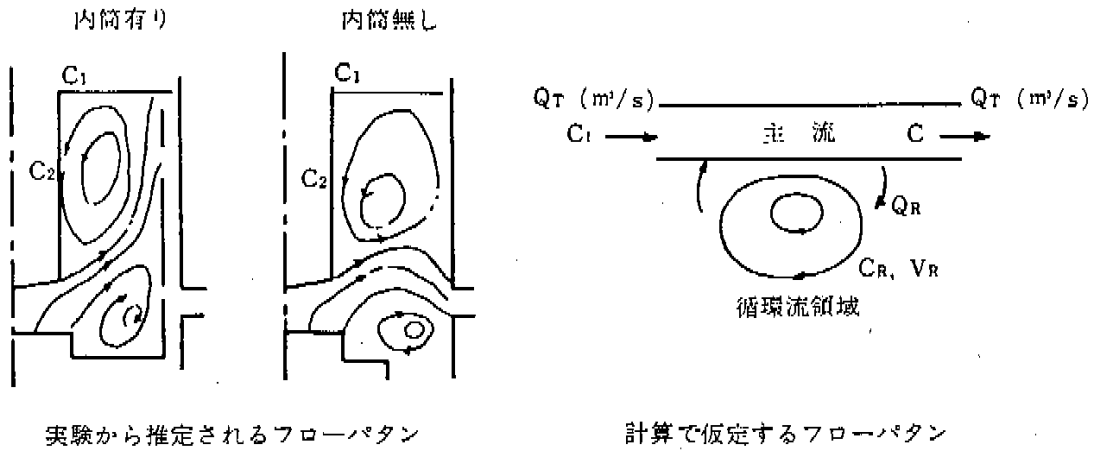


図 3 - 2 循環流モデル説明図

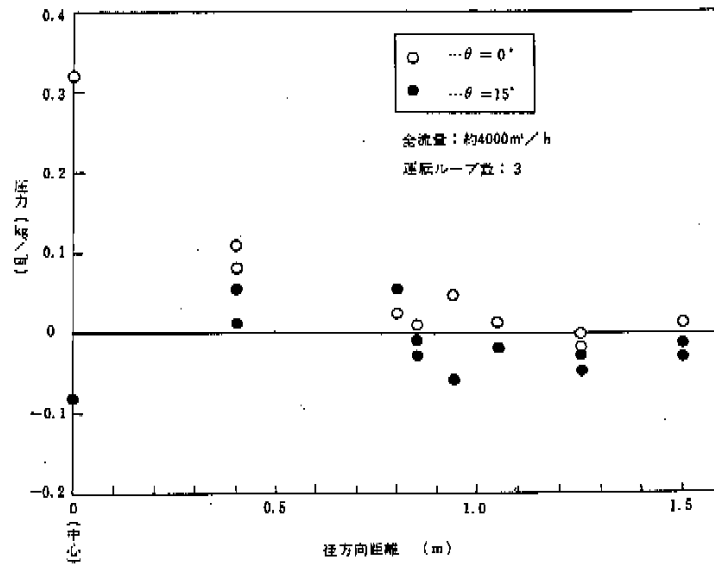


図 4 - 1 下部プレナム圧力分布

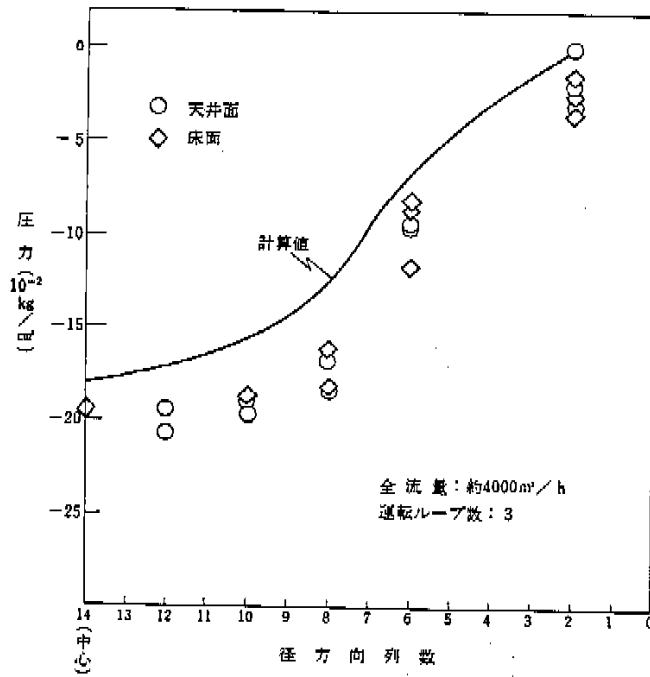


図4-2 高压プレナム圧力分布

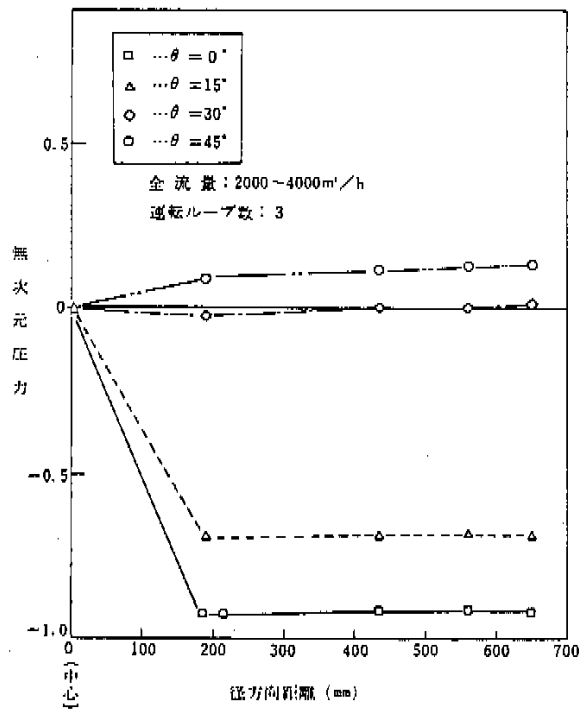


図4-3 中圧プレナム圧力分布

ム天井面の中心の圧が高くなるが、それ以外の点では殆ど平坦な分布をしている。また、 $\theta = 30^\circ$ 、 $45^\circ$ のときは下部プレナムに生じる強い旋廻流の影響がオリフィスドラムでも残っていて中心圧が下るため、全体に平坦な圧力分布になっている。従って、中圧プレナム天井面の中心位置に低圧プレナムへのフローホールがない限り減圧機構としての機能を果していると言えるが、オリフィスドラムの構造としては、下部プレナム旋廻流の影響が残ったり、中心部圧力が高くなったりするのは好ましくない。実機構造においては本試験の結果を反映し設計上の対策が施された。

#### (4) 低圧プレナム圧力分布

図4-4に低圧プレナム圧力分布の代表例をブランクセット集合体での圧損で無次元化して示す。この図を見るとフローホール位置でピークを示す圧力分布となっている。この高いピーク値は低圧プレナムから来る噴流の影響によるものでブランクセット圧損の5割以上にも達している。従って低圧領域内の流量配分設計上は無視できない圧力分布であり、噴流の影響を低減する設計改善の必要性を指摘した。なお、入口ノズルの流入角度及び運転ループ数の低圧プレナム圧力分布に対する影響は殆ど見られなかった。そして、上記問題点に対しては本試験終了後設計上の対策が施された。

### 4.2 プレナム間差圧

プレナム間差圧はそこでの流動抵抗と流量で決まるから、入口ノズル角や運転ループ数による差圧の変化は、そこを通過する流量の変化、すなわち、高・低圧領域間の流量配分の変化を表わしていると考えられる。

#### (1) 高圧プレナム-上部プレナム間差圧

図4-5に代表的な測定結果を計算値と共に示す。この図を見ると $\theta = 0^\circ$ 、 $15^\circ$ のときには計算値と良い一致を示しているが、 $\theta = 30^\circ$ 、 $45^\circ$ のときには計算値よりもかなり大きくなっている。これは下部プレナム圧力分布の項で述べたとおり、 $\theta$ が大きくなると下部プレナムでの旋廻流が強くなるため高圧側への流入割合が大きくなることを示している。 $\theta = 15^\circ$ と $30^\circ$ の間に大き

な差があり、この途中の角度で、下部プレナムフローボタンが大きく変化することがわかる。運転ループ数が2の場合についても同様の試験を行ったところ、フローボタンが急激に変化する角度は $\theta = 30^\circ$ と $45^\circ$ の間に移動していた。

#### (2) 低圧プレナム-上部プレナム間差圧

図4-6に代表的な測定結果を示す。図4-5とは丁度逆で、 $\theta = 30^\circ$ 、 $45^\circ$ の場合には計算よりも低い差圧を示し、低圧側への流量配分が少なくなっていることがわかる。これは下部プレナムでの旋廻流により、高圧側へ多く流量配分されると共に、中心部の圧が低くなり低圧側への流入が少なくなることとよく対応している。また2ループ運転の場合には先述と同様に $\theta = 30^\circ$ と $45^\circ$ の間で急激に差圧が変化した。

以上の考察より入口ノズルのひねり角度が大きくなると下部プレナムの旋廻流が強くなり、高圧側へ流量配分が片寄り、プレナム間差圧も計算値と一致しなくなる。従って入口ノズルのひねり角度が大き過ぎても流力設計上好ましくないと言える。

### 4.3 流量配分

流量配分には高圧・低圧領域間の流量配分とそれぞれの領域内での流量ゾーン間の流量配分という2通りの意味がある。

#### (1) 高圧・低圧領域間流量配分

図4-7に入口ノズル角 $\theta$ を変えたときの流量配分の変化を示す。図の縦軸は高圧側の流配入を表わしており、低圧側の流配は $1-\lambda$ となる。この値は炉心集合体流量が高圧側流入流量に比例することを考慮して、正常運転時の流量と中圧側入口を閉塞したときの流量との比をとることにより求めたものであるが、プレナム間差圧の項で述べたとおり、 $\theta$ が大きくなると高圧側流配が大きくなっている。また3ループ運転時には $\theta = 0^\circ$ となると、 $\lambda$ はやや小さくなる。 $\theta = 15^\circ$ のとき運転ループ数による相違はなく、また計算による流配値0.837と一番近くなる。故に流量配分上は $\theta = 15^\circ$ が最もよく、前述の下部プレナム圧力分布の項における考察と一致した結果を示している。

#### (2) 流量ゾーン間流量配分