

図 4-5 高压ピトー静圧間差圧

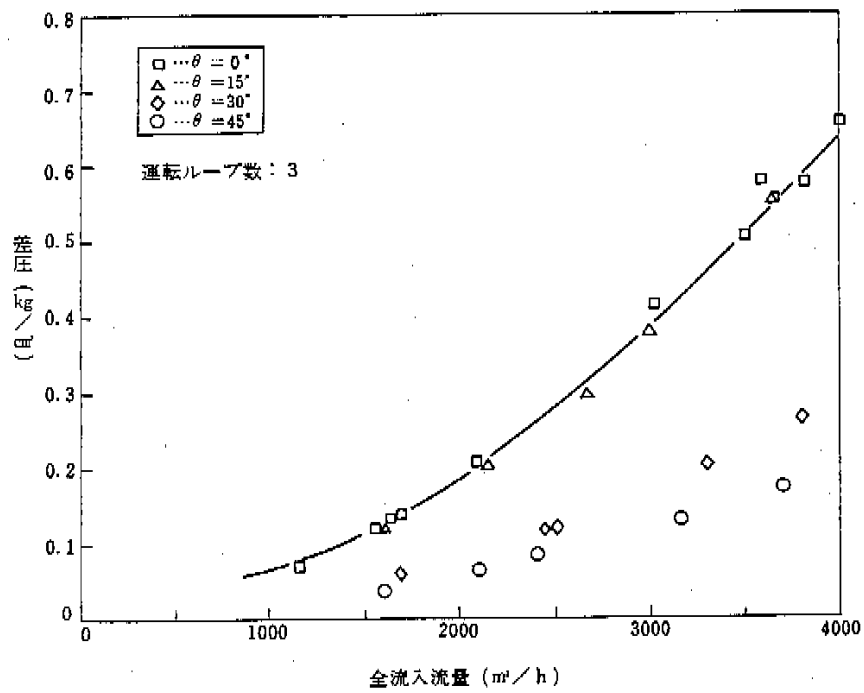


図 4-6 低压ピトー静圧間差圧

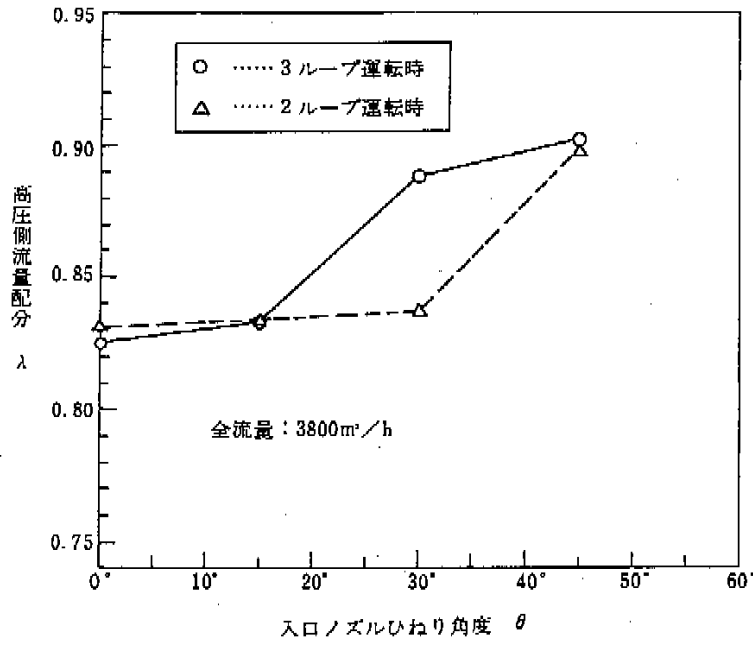


図 4-7 高圧・低圧領域流量配分

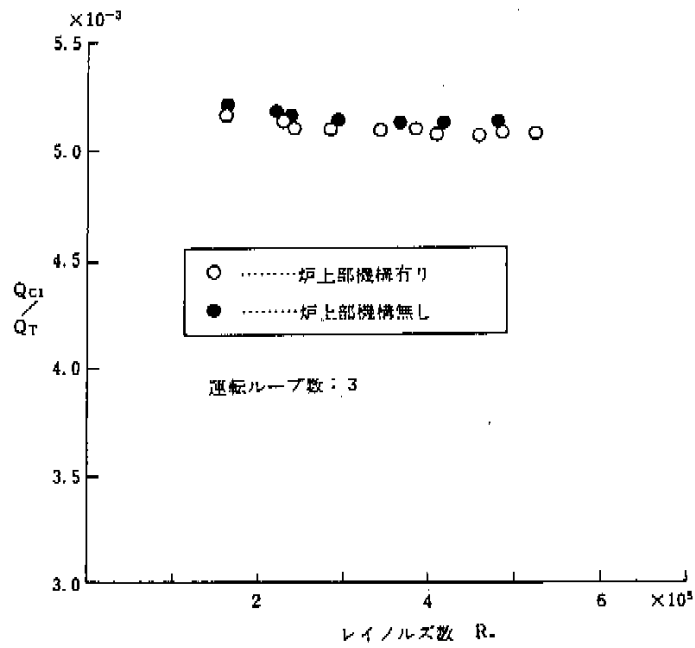


図 4-8 C I 領域集合体流量

図4-8に炉心第1流量ゾーン(C1領域)の流量配分を示す。縦軸はC1領域の1集合体の流量を全流量で無次元化した値であり、横軸は全流入流量と炉容器内径に基づくレイノルズ数 Re を表わしている。この図を見るとC1領域の流配は Re がある程度以上大きくなると Re 数依存性がなくなることを示している。また炉上部機構無しの場合には、有りの場合より僅かに高くなる傾向を示しているが、その差は実験誤差範囲内である。炉心領域の他の流量ゾーンの流配もほぼ同様であり、また、同じゾーン内でタービン流量計付集合体の装荷位置を変更しても、エントランスノズルの方位を変更しても、炉心集合体流量に有意差は認められなかった。次に図4-9にブラケット第一領域(B1領域)の流量配分を示す。 Re 数依存性は殆ど見られないが炉上部機構無しの場合には有りの場合に比べて1~2%減少する。これは炉上部機構を除くと、炉心領域の強い噴流に引っぱられる割合が減少するため、B2及びB3領域ではこのような減少は見られなかった。また中心領域の制御棒では、炉上部機構を除くと逆に流量が増加する傾向が見られた。これは熱遮蔽板部での噴流衝突による圧力上昇がなくなったからである。次に、ここには示していないが、同一流量ゾーン内でタービンメータ付き集合体の装荷位置を変えると流量計指示値は大きく変動した。これは前述の低圧プレナム内での複雑な圧力分布に帰因するもので、B3領域では最大30%もの差異が見出された。さて、炉内全体での流量配分について実験と計算の比較を図4-10に示す。これを見ると炉心領域ではC7領域で実験値の方が少し低くなる以外は実験と計算の一致はよく、炉心領域の流配設計はほぼ問題がないことがわかった。しかし、低圧側を見ると実験と計算の差異は大きく、特にB3領域は低圧プレナムフローホールの近くにあるためその傾向が著しい。以上の考察より、低圧プレナム形成機構の設計上の問題点を指摘した。実機設計においても、本試験結果を反映し、対策が施された。

4.4 上部プレナム流況

上部プレナムでの流動解析は出口ノズルその

他の部分での熱衝撃の解析や、炉制御のための過渡応答解析に必要である。ここでは、まずその基礎となる定常時の流況を、5孔ピトー管あるいは塩水注入法による流速、流向測定及び可視化観察による流向確認により把握した。図4-11に内筒が有る場合の流速分布測定結果の一例を示す。この図を見ると、炉心から流出して来た噴流は炉上部機構の熱遮蔽板に衝突した後ななめ上向きの噴流となり、周囲の流体を巻き込むことによりその幅を広げながら内筒に向う。内筒衝突後は大部分は内筒壁に沿う上昇流となるが、一部は下降流となり噴流の下部に循環流領域を形成している。ディッププレート下部ではタフト法により流向を可視化したところ中心方向へ向う流れが観察された。また塩水注入法により炉上部機構に沿う下降流が存在することが確認され、噴流上部に大きい循環流領域が存在することがわかった。つまり内筒衝突後の上昇流はディッププレートと内筒上端のすき間及び大フローホールから流出すると共に、一部はディッププレート下面に沿って中心へ向う循環流となる。また内筒衝突後の下降流は小フローホールから流出すると共に、一部は中心へ向う下部循環流となる。この上下2つの循環流の強さが後述する上部プレナムでの冷却材ミキシングの大きさに対応するものであり、この値が大きいほど出口ノズル部の熱衝撃が緩和されるが、反面、炉制御上の応答は鈍くなるということになる。内筒が無い場合の流況は、噴流の上下に循環流領域が存在することは同じであるが、噴流は炉容器内壁に衝突する以前に下方に弓なりに曲り出口ノズルへ向う。下部循環流速は内筒有りの場合と同程度であるが、炉上部機構に沿う下降流速は内筒有りの場合の約半分で、上部循環流はかなり弱くなっている。次に図4-12に内筒が有る場合についてのAURORAコードによる流速分布計算結果を示す。図を見ると噴流が斜め上方に広がりながら進み、内筒衝突後噴流の上下に循環流領域を形成しており、実験から推定された流動状況を良く説明している。

4.5 上・下プレナム冷却材ミキシング

塩水をトレサーとして注入し、塩水の濃度拉

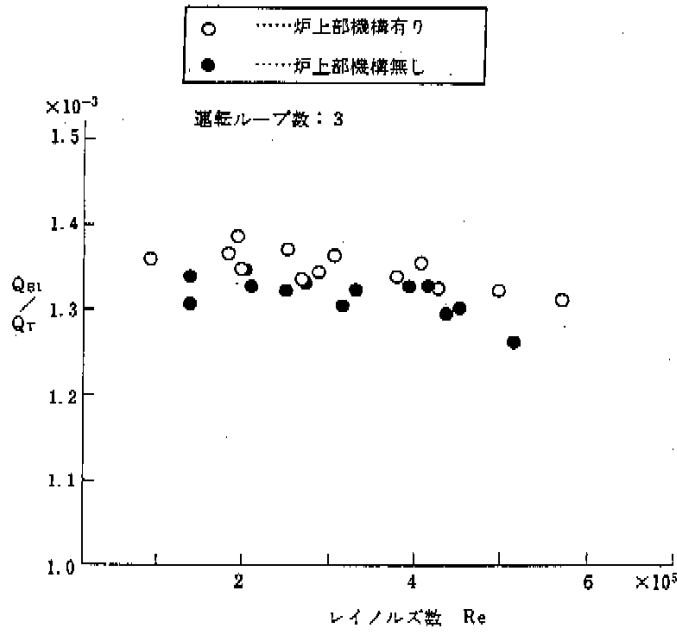


図4-9 B1領域集合体流量

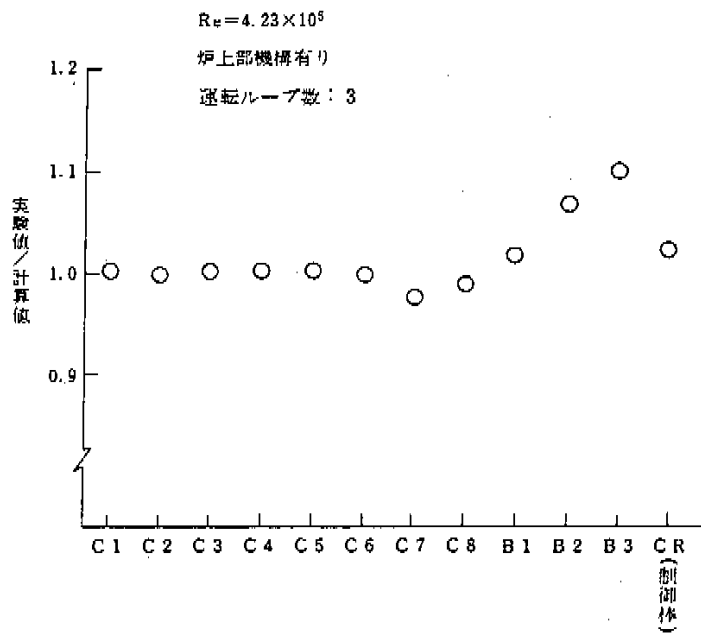


図4-10 炉内流量配分実験値と計算値の比較

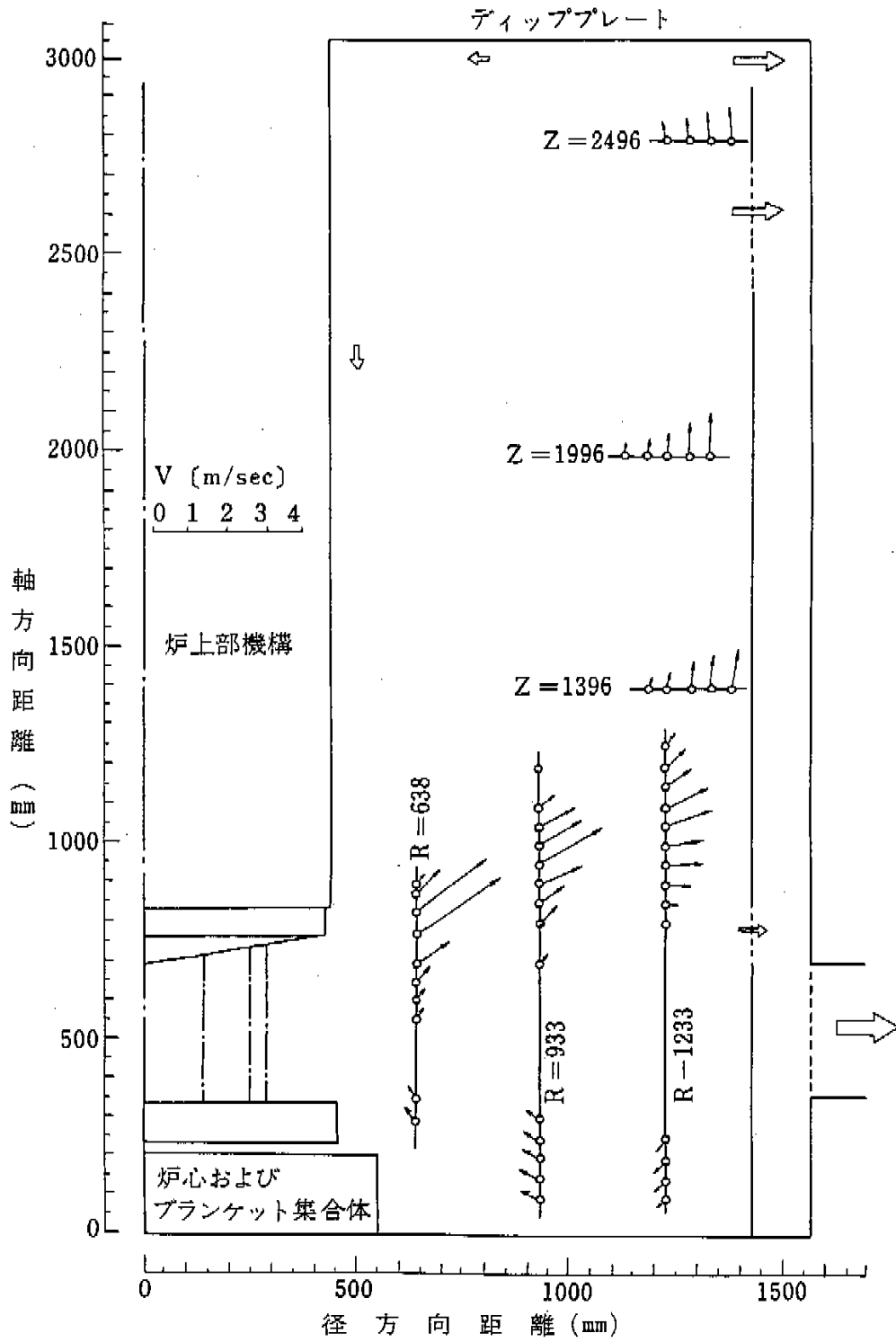


図4-11 上部プレナム流速分布

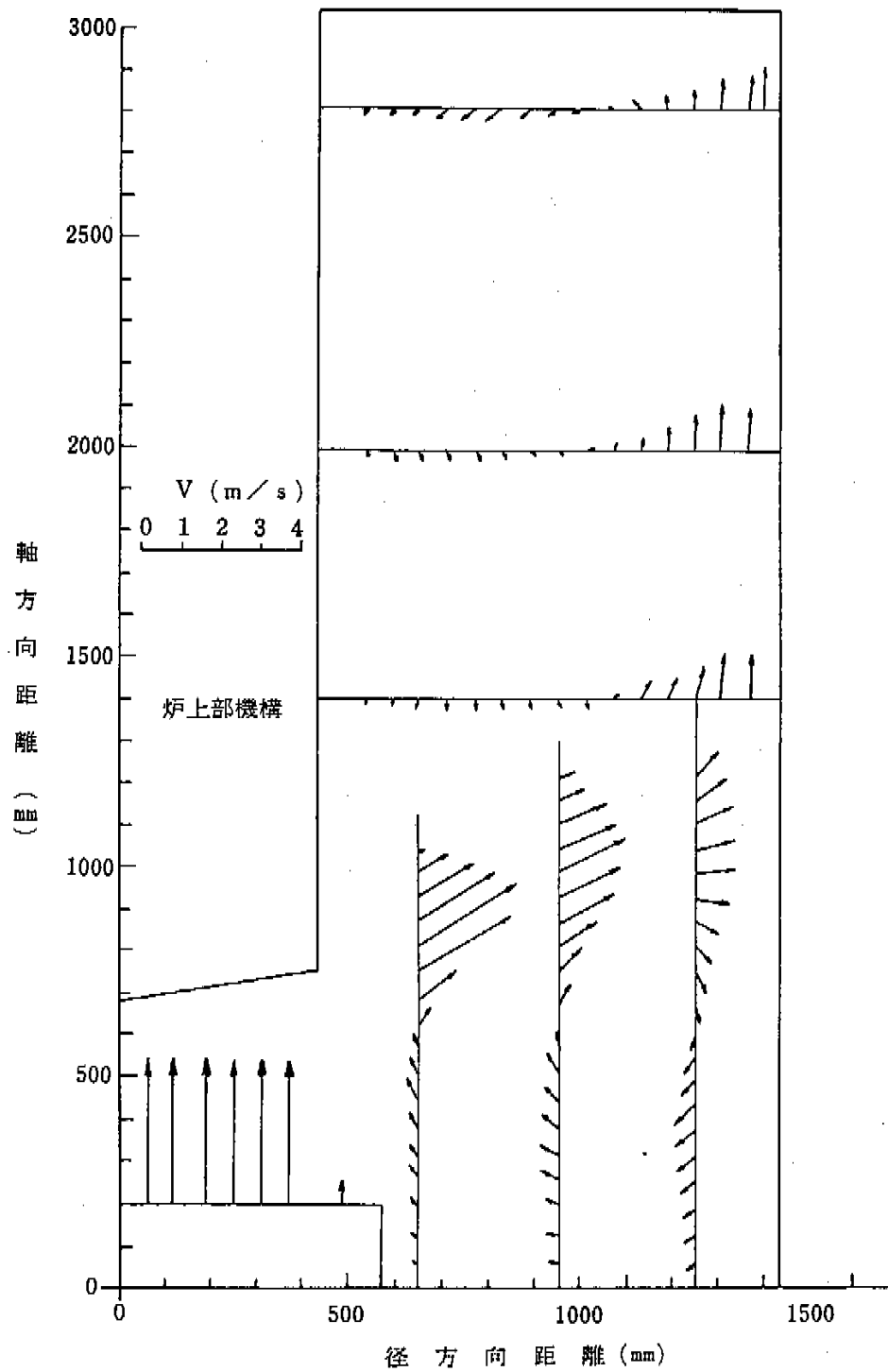


図4-12 上部プレナム流動ベクトル図計算値 (AURORAコードによる)

散を調べることにより冷却材ミキシングの程度を推定する。

(1) 上部プレナム冷却材ミキシング

図4-13に内筒有りの場合の濃度変化測定結果の一例を示す。横軸は炉心出口濃度の立上り開始時点からの経過時間を、縦軸は炉心出口ピーク濃度値で無次元化した各点の濃度を表わしている。この図をみると炉心出口①から内筒壁②に達するまでにかなり冷却材ミキシングがあり、塩水濃度は減少していることがわかる。その後徐々に濃度は下るが、ディッププレート下でもかなりの濃度を示している。出口ノズル③ではピーク値に達するのは遅いが、小フローホールを通過するバイパス流の影響で立ち上りは早い。次に図4-14に出口ノズル部での濃度変化について、実験値と循環流モデルによる計算値との比較を示す。循環流モデルは小フローホールからのバイパス流は無視しているので立ち上り部分は一致しないが、ピーク値に近づくあたりから $\xi = 1.5$ の計算値は実験値とほぼ一致している。なお循環流領域の体積比率 η は全流量 $3800\text{m}^3/\text{h}$ と、噴流が炉心出口から出口ノズルまで到達するのに必要な時間を基に推定したものである。同様の比較を内筒無しの場合について行くと、 $\xi = 1.3$ 、 $\eta = 0.926$ とすると実験と計算とがよく一致した。循環モデルによると ξ が大きいほど、また η が小さいほどミキシングが良いから結局内筒有りの場合の方が無しの場合よりミキシングが良いということになる。

(2) 下部プレナム冷却材ミキシング

図4-15に入口ノズルのひねり角度を θ パラメータとした濃度変化の一例を示す。ここで縦座標は入口ノズル部でのピーク濃度で無次元化した各点の濃度を、横座標は入口濃度の立上り開始時からの経過時間を表わす。この図を見ると $\theta = 15^\circ$ 及び 30° の場合一定時間間隔をおいて2個のピークが現われている。これは入口ノズルから流出した噴流が、鏡板に衝突後旋廻流となることを示唆するもので、下部プレナム圧力分布の項における推定を裏付けている。 $\theta = 0^\circ$ の場合は勿論このような現象は見られない。次に高圧プレナム入口④のピーク値を比較すると

$\theta = 15^\circ$ の場合が最も低くミキシングが促進していることを示している。中圧プレナム入口①では、 $\theta = 0^\circ$ の場合噴流が鏡板に衝突した後旋廻することなく上昇流となるため高い濃度を示しているが、 $\theta = 15^\circ$ ではある程度旋廻しながら上昇するためミキシングが促進されて低いピーク値となっている。 $\theta = 30^\circ$ では旋廻流が強くなり過ぎるため大部分の流れは高圧入口側に流れるため中圧入口では極めて低い濃度になり、高圧入口側は高いピーク値を示している。結局、 $\theta = 0^\circ$ では噴流は中圧プレナム入口を直撃し、 $\theta = 30^\circ$ では高圧プレナム入口側にばかり向うことになり、いずれも好ましくない。従って、下部プレナムミキシングという観点から見ても $\theta = 15^\circ$ ぐらいが最適であるということになる。

4.6 入口ノズル順・逆流抵抗

入口ノズル角度 θ (0° 、 15° 、 30° 、 45°)及び運転ループ数(2及び1)をパラメータとして測定したところ、順流抵抗係数は約4.1、逆流抵抗係数は5.6~5.7で、入口ノズル角度及び運転ループ数に依らずほぼ一定であった。つまりこれらの抵抗値は下部プレナム内の流況の影響を殆ど受けていないことになる。

5. 突機設計への反映

既に述べたとおり、上述の試験結果は主として調整設計モデルに対するもので、製作準備設計では試験結果に基づき改善が行われている。それらのうち主なものをあげると以下のとおりである。

(1) 低圧プレナムの高さの変更

調整設計では低圧プレナムの高さが低過ぎたため、プレナム床面のオリフィス孔から出る噴流の影響が天井面で残っており、大きな圧力分布を示した。これはブランケット・反射体領域の流量配分に悪影響を与えるので、プレナム高さを高くするように設計変更が行われた。

(2) 低圧プレナム床面オリフィス孔の変更

上記と同様に低圧プレナム天井面での不均一圧力分布を緩和するため、オリフィス孔の口径を小さくし、数を多くするように変更された。

(3) オリフィスドラムの穴のあけ方の変更

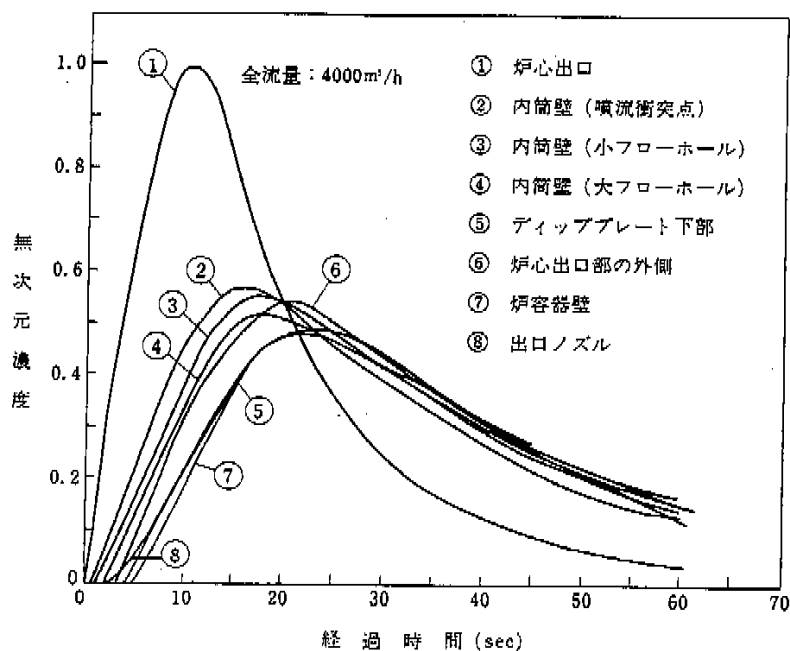


図4-13 上部プレナム各点での濃度変化

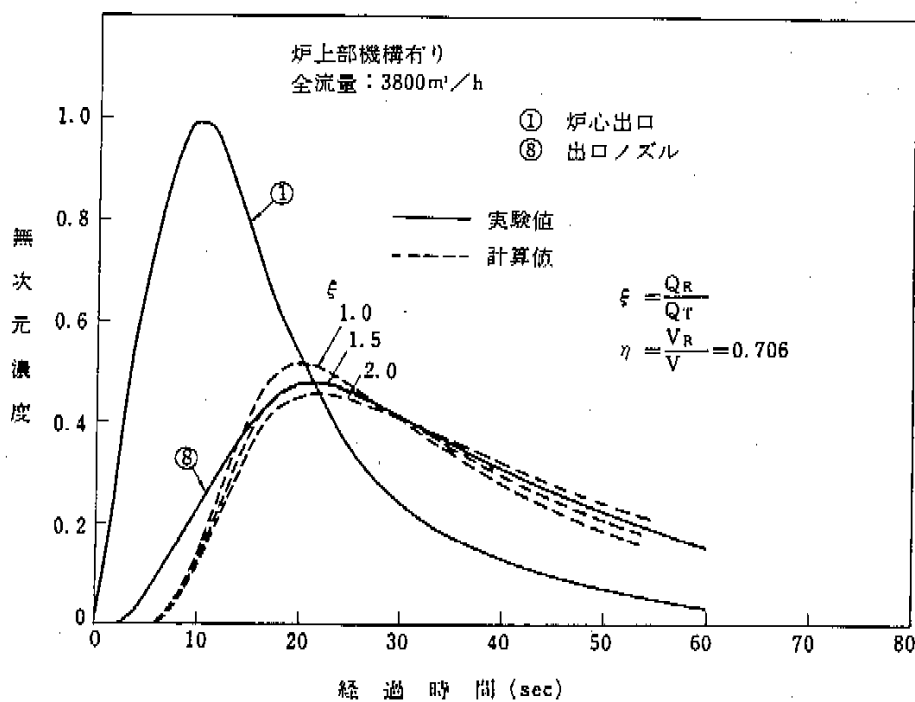
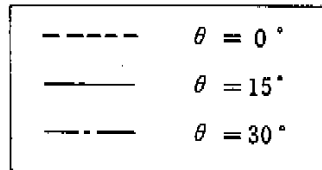
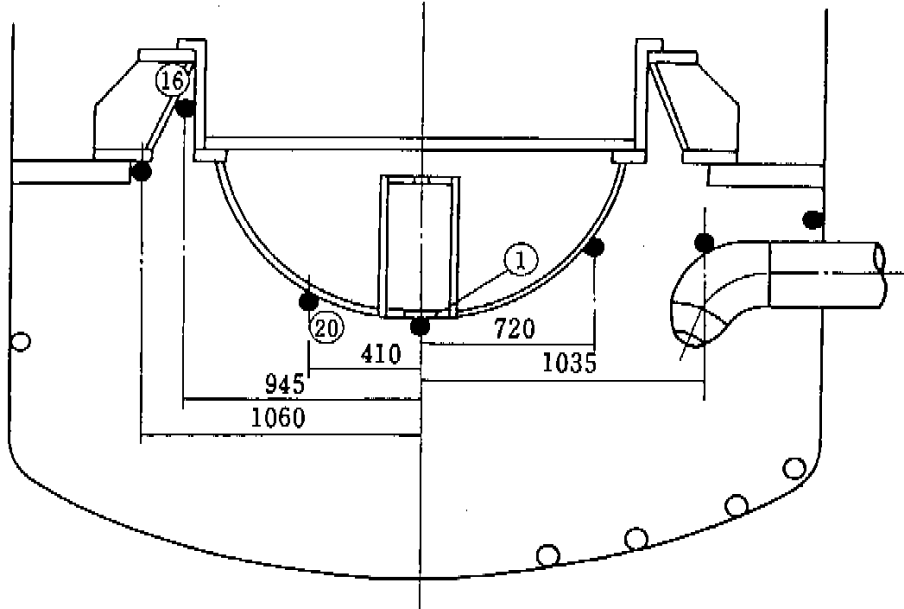


図4-14 出口ノズル部濃度変化実験値と計算値の比較



全流量：1000 m³/h

3 ループ運転

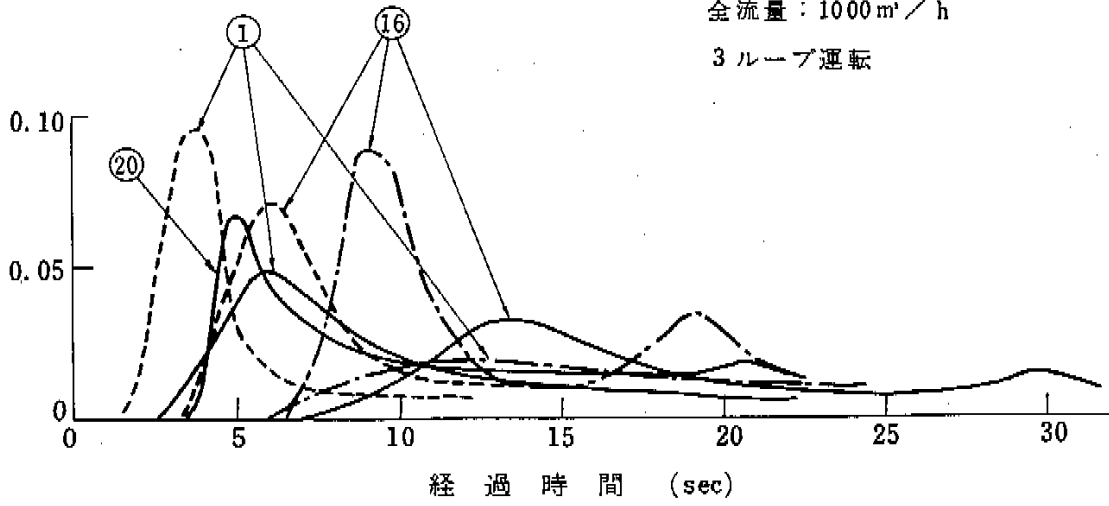


図4-15 下部プレナム濃度変化

ドラム入口が大きく開口していると下部プレナムから上昇して来る流れの動圧や旋廻流の影響を受け易いので、小さい孔7個に変更された。また、ドラム天井面の孔から出る噴流は中圧プレナム内に不均一な圧力分布を作るので、そこを塞ぐよう変更された。

(4) 入口ノズルひねり角度の変更

調整設計では0°、すなわち入口ノズルは真下を向いていたが、流量配分から考えても、下部プレナム内のミキシングから考えても、15°程度ひねるのが最適であることが判明したので、15°に変更された。

(5) 内筒構造の変更

炉心部から流出する噴流は内筒壁に衝突する点までにミキシングをほぼ終了しており、また大フローホール位置を変えてもその影響は殆ど見られなかったので、内筒の高さは噴流衝突点以上に余り高くする必要がない。従って、内筒の高さを下げ、大フローホールをなくすよう設計変更された。

以上の改善点については再試験が行われ、検証済みであるが、ここでは紙面の制限上省略した。

6. あとがき

1/2縮尺の「もんじゅ」原子炉構造模型を使い炉内での冷却材の流動に関する諸特性を明らかにしてきたが、これまでの実験及び解析は等温でかつ定常の条件に限られていた。しかし、流量過渡現象を解析するためには、それらを模擬した非定常流動試験や解析手法の開発が必要となる。更に低流量運転時には温度分布による浮力の効果が無視できなくなる。

これらの問題点について、既に幾つかの試験が実施されているが、今後更にこれらの分野における検討が必要であろう。

おわりに、本試験の計画、遂行に御協力いただいたFBR本部、メーカ及び常陽産業の方々に厚く謝意を表します。