



JAERI-Tech

99-049

JP9950428



## 冷減速材内流動特性の研究

第2報 流動パターン測定・解析と冷減速材容器内熱流動解析

1999年6月

麻生智一・神永雅紀・寺田敦彦・日野竜太郎

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

冷減速材内流動特性の研究  
第2報 流動パターン測定・解析と冷減速材容器内熱流動解析

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究中心  
麻生 智一・神永 雅紀・寺田 敦彦・日野竜太郎

(1999年5月25日受理)

原研で開発を進めている 5MW 規模の核破碎ターゲットシステムにおいて、超臨界水素を用いる冷減速材は中性子強度やパルス性能などの中性子性能に直接影響する重要な機器である。特に冷減速材容器内における水素温度の上昇が中性子収率に影響するため、冷減速材容器の設計では再循環流や停滞流の発生などホットスポットの発生要因を抑制して円滑な流動を実現する必要がある。そこで、冷減速材容器の概念設計に反映するため、冷減速材容器の簡易モデル試験体を用いて、入口噴流管による衝突噴流とその随伴流の流動パターンを水流動条件下で測定した。入口噴流管の位置が底面より 10mm 以上では噴流速度が 1m/s 以上において再循環流領域の高さは約 50mm であり、STAR-CD コードによる流動解析結果はこの流動パターンをよく再現した。この結果を基に STAR-CD を用いて実機用冷減速材容器内の予備的な熱流動解析を行い、水素の局所的な温度上昇を 3K 以内に抑制するための流動条件を明らかにした。

Study on Flow Characteristics in Cold Source Moderator  
II . Flow Pattern Measurement and Analysis,  
Thermal-hydraulic Analysis in Cold Source Moderator Vessel

Tomokazu ASO, Masanori KAMINAGA, Atsuhiko TERADA and Ryutaro HINO

Center for Neutron Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 25, 1999)

The Japan Atomic Energy Research Institute is developing a 5MW-spallation target system under the Neutron Science Project. A cold source moderator using supercritical hydrogen is one of the key components in the target system, which directly affects the neutronic performance both in intensity and resolution. Since a hydrogen temperature rise in the moderator vessel affects the neutronic performance, it is necessary to ensure the smooth flow of hydrogen while suppressing the recirculation and stagnant flows which cause hot spots. In order to contribute to the conceptual design of the moderator structure in progress, the flow patterns of the impinging jet flow and the jet induced flow were measured with a PIV system under water flow conditions using the simplified moderator model. From these results, the recirculation flow region was about 50mm high when the height of the impinging nozzle was more than 10mm from the bottom and the inlet velocity was more than 1m/s. The hydraulic analytical results obtained using the STAR-CD code agreed well with this experimental result. Preliminarily thermal-hydraulic analyses in the moderator vessel were carried out using the STAR-CD code, and we clarified the flow conditions in order to suppress the uniform temperature rise within 3K.

Keywords: Spallation Target System, Neutron Science Project, Cold Source Moderator, Supercritical Hydrogen, Temperature Rise, Water Flow Experiments, Flow Pattern, Jet Flow, Recirculation Flow, Thermal-Hydraulic Analysis

## 目 次

1. 概要 .....	1
2. 流動パターン測定と解析 .....	2
2.1 実験装置の概要 .....	2
2.2 測定結果と解析評価 .....	2
2.3 ツイストテープによる予備実験 .....	4
3. 冷減速材容器内の予備的な熱流動解析 .....	29
3.1 解析条件 .....	29
3.2 解析結果 .....	30
4. あとがき .....	44
謝 辞 .....	44
参考文献 .....	45

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Measurement and Analysis of Flow Patterns .....	2
2.1 Outline of Experimental Apparatus .....	2
2.2 Experimental Results and Analytical Estimations .....	2
2.3 Preliminary Experiments with Twisted Tape .....	4
3. Preliminary Thermal-Hydraulic Analyses in Cold Moderator Vessel .....	29
3.1 Analytical Conditions .....	29
3.2 Analytical Results .....	30
4. Concluding Remarks .....	44
Acknowledgment .....	44
References .....	45

This is a blank page.

## 1. 概 要

日本原子力研究所（原研）では、1.5GeV-5.3mA 級（出力 8MW）の大強度陽子加速器を用いた中性子科学研究計画<sup>(1, 2)</sup>の下で、最初に建設する施設として中性子散乱施設（5MW）を予定している<sup>(3)</sup>。本施設の中性子源となる核破碎ターゲットシステム概念を構築するために、平成 9 年度から設計研究及び R & D に着手した<sup>(4)</sup>。核破碎ターゲットシステムでは、ターゲットで発生する大強度高エネルギー中性子を実験に応じたエネルギーレベルに減速する減速材の開発が重要である<sup>(5, 6)</sup>。特に、冷・熱中性子領域で使用する超臨界水素減速材（以後、冷減速材と呼ぶ）は、高い中性子パルス性能、中性子収率等を確保するために、コンパクトな薄肉・扁平構造にし、水素温度の上昇を 3 K 以内に抑制する必要がある<sup>(7)</sup>。このような構造を実現させるためには、超臨界水素条件（1.5MPa, 20K）に耐える構造設計とともに、局所的な水素温度上昇を防止するために冷減速材容器内の流動を最適化する必要がある。

構造設計では、中性子透過性能が高く、強度的に優れたアルミニウム合金の探索とともに、応力集中などを緩和する構造の検討を進めている。一方、熱流力設計では、中性子収率に大きく影響する水素温度上昇を 3K 以内に抑制するための流動挙動の最適化が重要な課題になっている。中性子科学研究計画ではターゲット、減速材及び反射体の配置など既存の施設や現在計画中の施設を参考に概念設計を進めており、冷減速材については中性子収率やハンドリングの面で有効な構造である ISIS 又は SNS 計画と同型式の冷減速材構造<sup>(8, 9)</sup>を採用する予定である。この場合、噴流状態で液体水素が容器内に流入するため、噴流と容器底面で衝突流が同時に生じている冷減速材容器内の流れ場の挙動を明確にして、水素の再循環・滞留を防ぐための工学因子を明らかにし、構造設計に早急に反映する必要がある。

そこで、第一段階として減速材容器内における流動状況、特に衝突噴流による随伴流の 2 次元挙動に注目した水流動実験とその解析評価を行った。本報告書では、減速材容器を 2 次元的に模擬した二重管噴流試験体<sup>(10)</sup>を用いて得られた流動実験結果及び実験をシミュレートした解析結果、この結果を踏まえて行った実機用冷減速材容器の予備的な熱流動解析結果について報告する。

## 2. 流動パターン測定と解析

### 2.1 実験装置の概要

高い中性子収率を維持するには減速材（ここでは水素）の温度上昇を3K程度に抑える必要がある<sup>(7)</sup>。しかし、容器内発熱に対し容器出入口温度差を3K以内となるように水素流量を確保した場合でも、減速材容器内部において流れの再循環・滞留を生じると減速材温度が局所的に3K以上に上昇する可能性が極めて高い。減速材容器には衝突噴流の状態で水素が流入するため、容器内で反転する噴流により再循環流や流れの滞留が生じやすいと考えられる。このような流れ場の挙動を明らかにし、再循環流や流れの滞留を抑制する工学因子を抽出して構造設計に反映するため、流速分布等の流動データを取得し、容器内の流動状況を定量的に評価する実験計画を立案した<sup>(10)</sup>。

この第一段階として減速材容器内における流動状況を把握し、解析コードの検証を目的に、水を用いた減速材基礎流動実験装置を製作した<sup>(10)</sup>。装置には、特に衝突噴流の挙動を2次元的に把握可能な二重円筒試験体を組み込み、レーザー流速分布システム(DANTEC PIV2000 システム)によって流動状況が可視化できるようにした。減速材基礎流動実験装置はタンクから、ポンプ、流量計、減速材模擬試験体を通して再びタンクへ戻る一般的な水の閉ループ構成である。実験装置の概要をFig.2.1に示す。PIVシステムによる計測は以下の条件で行った。

撮影画像数：100（1秒間隔）

カメラ画素：横 1008pixels、縦 1018pixels

1画像撮影時のレーザーパルス光：120μs 間隔で2ショット

### 2.2 測定結果と解析評価

#### 2.2.1 噴流出口高さ一定で入口流速を変えた場合

噴流出口高さ（試験体の外管底面と内管下端との隙間）を実機の設計と同じ10mmと固定し、水の入口流速を約0.5m/s、1m/s、1.5m/s、2m/s、2.5m/s、3m/sと変えて測定を行った。流入する水はほぼ大気圧で常温である。このときの噴流出口前のレイノルズ数は、それぞれ約 $1.4 \times 10^4$ 、 $2.8 \times 10^4$ 、 $4.2 \times 10^4$ 、 $5.6 \times 10^4$ 、 $7.0 \times 10^4$ 、 $8.4 \times 10^4$ である。実機におけるレイノルズ数の例として、例えば米国SNS計画における冷減速材容器の設計では容器入口において約 $4.6 \times 10^5$ （噴き出し口径=13mm、液体水素流速約6m/s）<sup>(11)</sup>と本実験条件よりも一桁高い値であるが、本実験結果を基にして解析コードの検証・高度化を行えば、十分に信頼可能な解析評価を行うことができる。

本条件による流動パターンの測定結果は既に報告した<sup>(10)</sup>。今回、実験に供した試験体を忠実にモデル化した解析モデルを使用して、実験結果を再評価した。前回使用した解

析モデルを Fig.2.2 に、試験体全体をモデル化した今回の解析モデルを Fig.2.3 に示す。解析には、前回同様に非構造格子・有限体積法による汎用 3 次元熱流体解析コードである STAR-CD を使用し、定常非圧縮性流れとして解いた。圧力補正アルゴリズムは SIMPLE 法、乱流モデルは標準  $k \cdot \varepsilon$  2 方程式モデル、境界層内部の流れは壁関数を用いた。

噴流が衝突している底面から再循環流の境界である上向きの流れと下向きの流れの境界までの高さを既報と同様に再循環流高さと呼び、比較対象のひとつとした。解析結果の例を挙げて再循環流高さについて Fig.2.4 に示す。入口流速に対する再循環流高さの測定結果及び解析結果を Table 2.1 に示す。また、入口流速 0.5、2.0 及び 3.0m/s 時の測定結果を Fig.2.5、解析結果を Fig.2.6 に抜粋して示す。測定結果は、PIV システムで得られた 100 枚のベクトルマップを統計処理して約 100 秒間の時間平均的な流速分布で表してある。

Table 2.1 をグラフ化して Fig.2.7 に示す。前回の報告では、解析結果が測定結果を下回っていたことについて、実験における PIV 測定の分解能や解析における試験体のモデル条件等によるものと考え今後の検討課題としていた。今回、試験体全体の構造を忠実にモデル化して解析した結果、前回の結果に比べてさらに測定値に近づき、その差は最高で測定値の約-8%である（前回では約-15%）。これは、試験体全体構造をモデル化したことで最終端で 90° 横向きに水が流出することによる流れの影響を加味できたことが第一の要因に挙げられる。また、前回のモデルでは円管中心部の要素分割を非構造格子（プリズムメッシュ）として計算したが、今回は流体計算で従来から基本的に用いられる構造格子で要素分割して計算したことが若干影響しているものと考えられる。

このように解析モデルを忠実にモデル化し、モデル手法を変えたことによって実験結果の再現性をより高め、今後の STAR-CD による減速材容器内の流動解析を精度良く行える目処を得た。

## 2.2.2 入口流速一定（3m/s）で噴流出口高さを変えた場合

水の入口流速を約 3m/s とした時に、噴流出口高さを 2mm、5mm、10mm、15mm、20mm、25mm、30mm と変えて測定した結果について、解析は Fig.2.3 に示す新しい解析モデルを用いて解析評価した。噴流出口高さに対する再循環流高さの測定結果及び解析結果を Table 2.2 に示す。また、噴流出口高さ 2、10 及び 30mm 時の測定結果を Fig.2.8、解析結果を Fig.2.9 に抜粋して示す。両者の流動パターンを比べると、噴流出口高さが 2mm の場合を除いてほぼ同様の流速分布を表している。噴流出口高さが 2mm の場合は相対的に同じ流動パターンに見えるが、解析結果の最高流速値が 10m/s を超えているのに対して実験結果では約 8m/s と約 2m/s の差がある。これは、解析結果は定常流動（時間平均的に安定な流れ）を表しているのに対して、流路が狭すぎるために実際には噴出方向と反対方向に流れを押し戻す作用が働き、局所的に流量が大きく変化し

て噴流出口前や出口付近の流速が極めて不安定となることが要因と考えられる。測定においても、噴流出口付近のみならず、測定領域（図に表した範囲）のさらに上部の内管部においても水の流速が大きく変動する様子が観察された。

Table 2.2 をグラフ化して Fig.2.10 に示す。噴流出口高さが 10mm 以上では、再循環流高さの測定結果は約 50mm であり、解析結果は 49mm から 43mm 近くへ漸減するものの測定結果とよく一致しており、解析に用いた STAR-CD は実験結果をよく再現していると見なすことができよう。一方、噴流出口高さが 10mm 以下では、噴流出口高さが小さくなるほど測定値は小さくなり、反対に解析値は大きくなつた。これは、前述の噴流出口付近の流速の不安定性によるものと考えられる。さらに、測定中、噴流出口高さを小さくしていくと噴流管（ノズル部）が振動している様子が観察できた。この振動が噴流出口付近の流れに大きな影響を及ぼし、再循環流高さを小さくした要因のひとつと考えられる。なお、この自励振動の振動は流速が早くなるほど、噴流出口高さが小さくなるほど大きくなることを確認した。見方を変えれば、噴流管の振動が減速材容器又は配管の構造強度に影響を与えないければ、再循環流の抑制手法として有効な方法となりうる。今後、構造強度評価に加えて、噴流管の自励振動発生のメカニズムや振動によって生じる流動の不安定等について実験及び解析評価の両面からより明確化し、再循環流抑制手法のひとつとして技術的確立を図りたい。

### 2.2.3 各噴流出口高さで入口流速を変えた場合

噴流出口高さを 2mm、10mm、30mm とした時、水の入口流速を約 0.5m/s、1m/s、1.5m/s、2m/s、2.5m/s、3m/s と変えて行った測定結果を Table 2.3 及び Fig.2.11 に示す。Fig.2.7 に示した噴流出口高さ 10mm の結果に加えて、他の 2 ケースの結果を並べると、いずれも入口流速が 1m/s まで再循環流高さが多少上昇し、1m/s 以上でほぼ一定となる傾向が見られる。また、噴流出口高さ 10mm 及び 30mm の時の再循環流高さは約 50mm とほぼ同じで、流速が変わっても同じ傾向を示すことが分かる。この傾向は噴流出口高さが 10mm から 30mm の間の例ええば 20mm でも同じであり、再循環流高さは 10mm と 30mm の間に位置している。しかし、図に見られるように、噴流出口高さ 2mm の場合は上記 2 ケースの再循環流高さ（約 50mm）よりも約 10mm 低くなつており、1m/s 以上では流速が変わっても再循環流高さはほとんど変わらず一定である。

## 2.3 ツイストテープによる予備実験

再循環流を防止して減速材容器内の流動を最適化するために、Fig.2.12 のようにプローホール（吹き出し孔）及びツイストテープの設置を提案している<sup>(7)</sup>。プローホールは噴流出口から再循環流領域が及ぶ高さまでの区間で噴流管に穴を開け、そこからの吹き出しにより流れを強制的に拡散して再循環流を抑制しようとするものである。一方、ツイストテ

ープは、噴流管の上流に設置して強制的に旋回流を発生させ、プローホールからの吹き出しを促進し、吹き出しによる噴流流量減少に伴う容器底面の熱伝達率の低下を防ぐことを目指している。ツイストテープについては、このような目的に加えて、旋回流が再循環流の抑制につながる可能性があれば、熱流動設計において極めて有利な条件を得ることができる。

そこでツイストテープによる流動パターンの変化を調べるために、Fig.2.13 に示すツイストテープを試験体の噴流管上流部に設置して予備的な測定を行った。使用したツイストテープは、製作の都合からねじり比（テープピッチ／噴流管の等価水力直径）が 11.2 で、その先端部から 313mm 下流に噴流管の出口がある。測定は 2.2.2 項と同様に水の入口流速を約 3m/s とし、噴流出口高さを 2mm、5mm、10mm、15mm、20mm、25mm、30mm と変えて行った。Fig.2.15 は、ツイストテープを設置して入口流速を約 2m/s、噴流出口高さを 10mm とした時、減速材模擬試験体の底面から約 25mm の高さにおける水平方向のある瞬間的なベクトルマップである。中央部で反時計（左）回りに旋回している流れがあるところがちょうど噴流管（ $\phi 25\text{mm}$ ）内部にあたり、その周りのベクトルが疎になる部分に噴流管の厚み（3mm）が存在する。さらに、その周囲に乱雑なベクトルが観察できる領域は噴流管と円筒外管（ $\phi 60\text{mm}$ ）の間のチャネルにあたり、底面から反転していく流動の水平状況を示す。この外側は円筒外管の管厚及び水槽で、速度ベクトルは存在しないところだが、過誤ベクトルや水槽内の微少な流動などにより多少ランダムにベクトルが現れている。このツイストテープによる旋回流の水平成分の最大流速は約 0.4m/s であった。一方、Fig.2.16 はツイストテープ無しで、同様の条件下（入口流速 2m/s、噴流出口高さ 10mm 時、試験体底面から約 25mm 高さの水平方向のある瞬間）におけるベクトルマップである。既に報告したように<sup>(10)</sup>、ツイストテープが無くても配管の曲がりなどによって時計（右）回りの旋回流が生じており、この時の水平成分の最大流速は約 0.5～0.6m/s であった。つまり、今回使用したツイストテープは旋回流の向きを変えただけで、ツイストテープが無い場合とほとんど流動の条件が変わらなかつたことになる。

Table 2.4 及び Fig.2.14 に再循環流高さの測定結果をツイストテープ無しの結果（Table 2.2、Fig.2.10 に示した測定値）とともに示す。ツイストテープを設置したときの再循環流高さは、ツイストテープ無しの結果と比べて若干高くなっているが、前述したように設置したツイストテープの効果については現段階では明言できない。そこで、比較検討ができるように、ツイストテープのピッチを変えて強力な旋回流を発生させた実験を行うとともに、ツイストテープが無い場合でも旋回流が発生していたことから、整流板などを用いて旋回流が存在しない基本的な流動データを取得する準備を進めている。さらに、プローホールの効果を実験的に検証するための準備を併せて進めている。

Table 2.1 Relationship between recirculation flow length and inlet velocity.

Inlet velocity (m/s)	Recirculation flow length (mm)		
	Experimental results	Analytical results (new model)	Analytical results (first model)
0.5	47.5	48	46
1.0	50.5	—	—
1.5	52	—	—
2.0	53.5	49	46
2.5	52	—	—
3.0	51	49	46

Table 2.2 Relationship between recirculation flow length and nozzle height at 3m/s of inlet velocity.

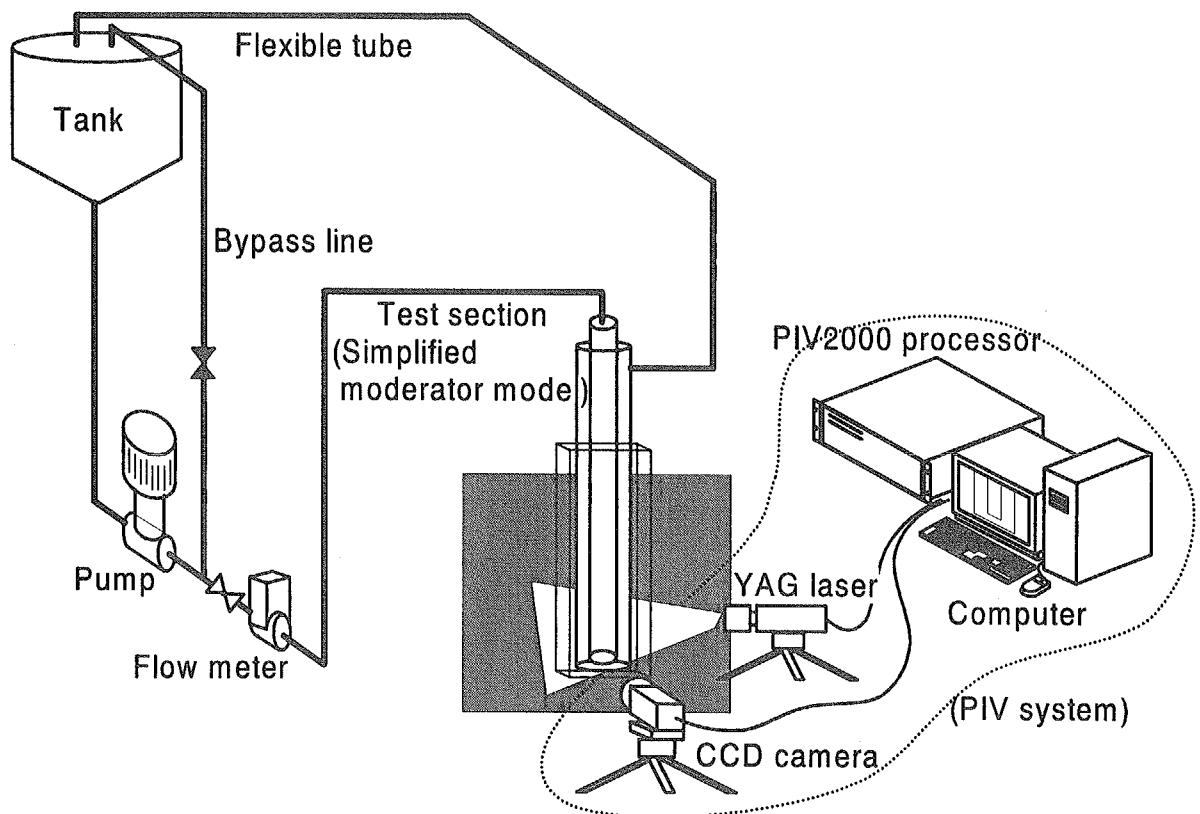
Nozzle height (mm)	Recirculation flow length (mm)	
	Experimental results	Analytical results
2	40.5	57
5	44	—
10	51	49
15	51	—
20	50.5	—
25	51	—
30	48	43

Table 2.3 Relationship between recirculation flow length and inlet velocity at nozzle height of 2, 10 and 30mm.

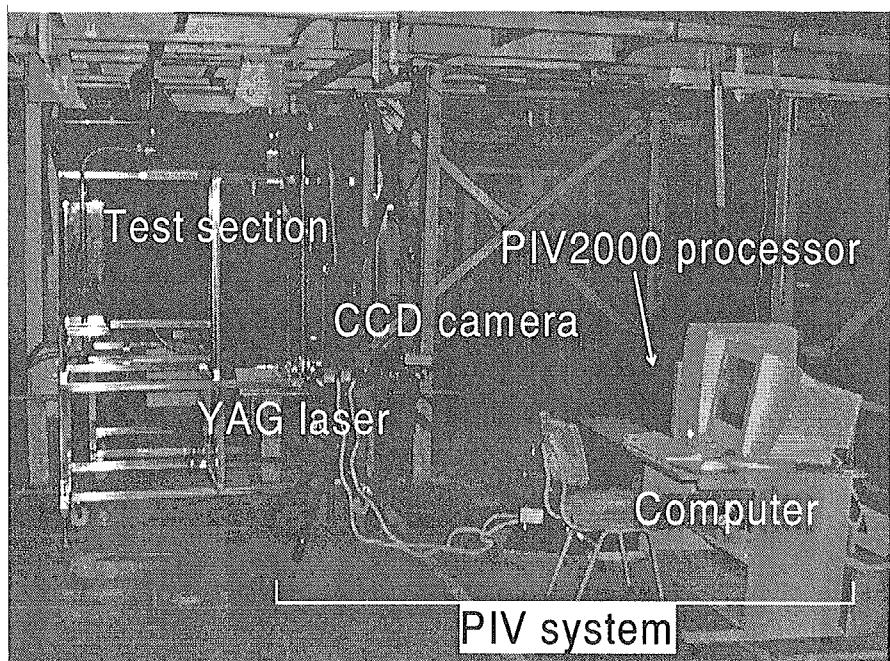
Inlet velocity (m/s)	Experimental results of recirculation flow length (mm)		
	Nozzle height 2mm	Nozzle height 10mm	Nozzle height 30mm
0.5	35	47.5	46.5
1.0	40.5	50.5	49.5
1.5	40.5	52	50
2.0	40.5	53.5	48.5
2.5	40	52	49
3.0	40.5	51	48

Table 2.4 Recirculation flow length with twisted tape.

Nozzle height (mm)	Recirculation flow length (mm)	
	Experimental results (without twisted tape)	Experimental results (with twisted tape)
2	40.5	38
5	44	44.5
10	51	55
15	51	53
20	50.5	54.5
25	51	53.5
30	48	53



(a) Flow diagram



(b) Outer view

Fig.2.1 Experimental apparatus for flow pattern measurement.

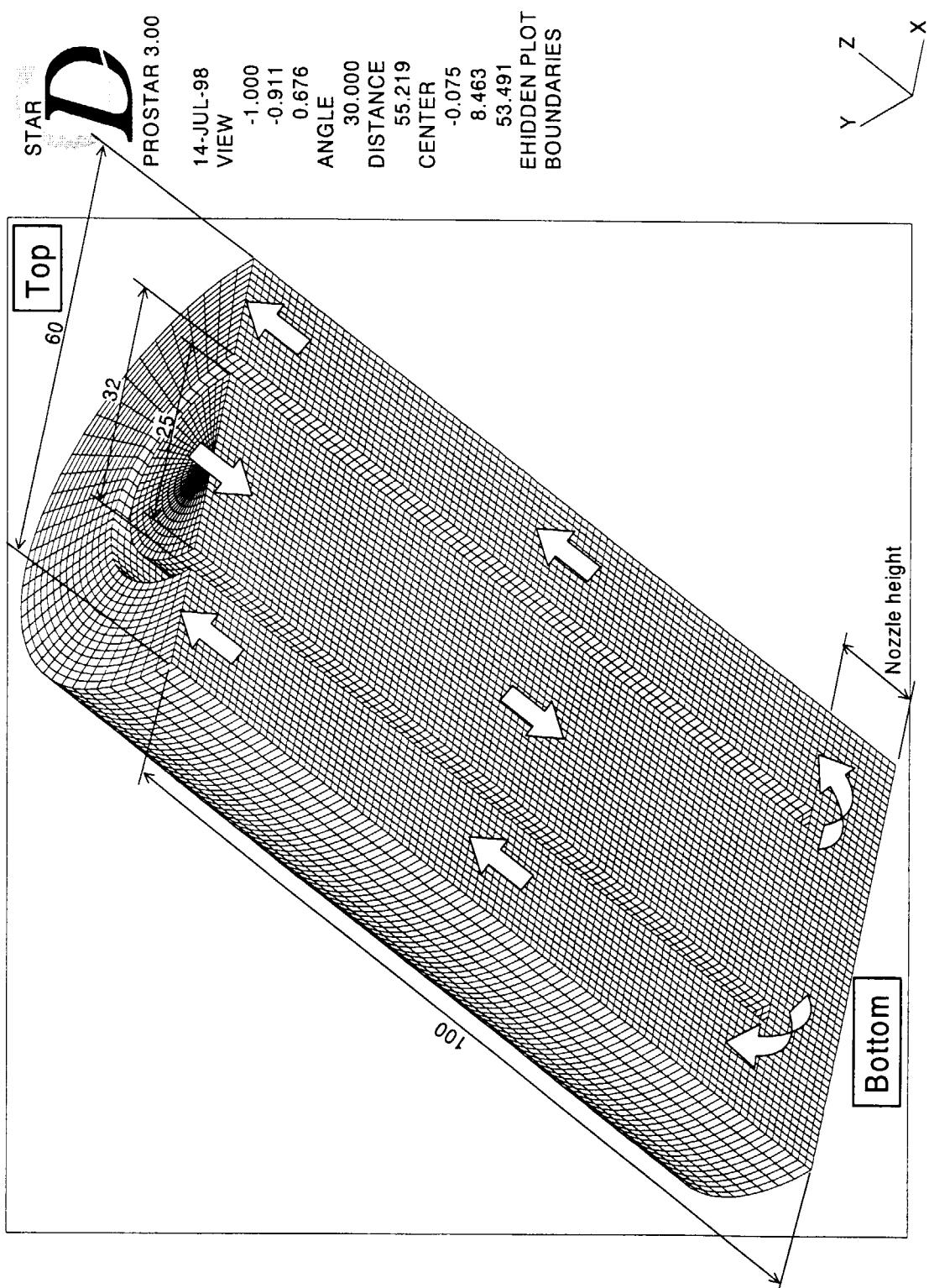


Fig.2.2 Analytical model on the bottom structure (First model).

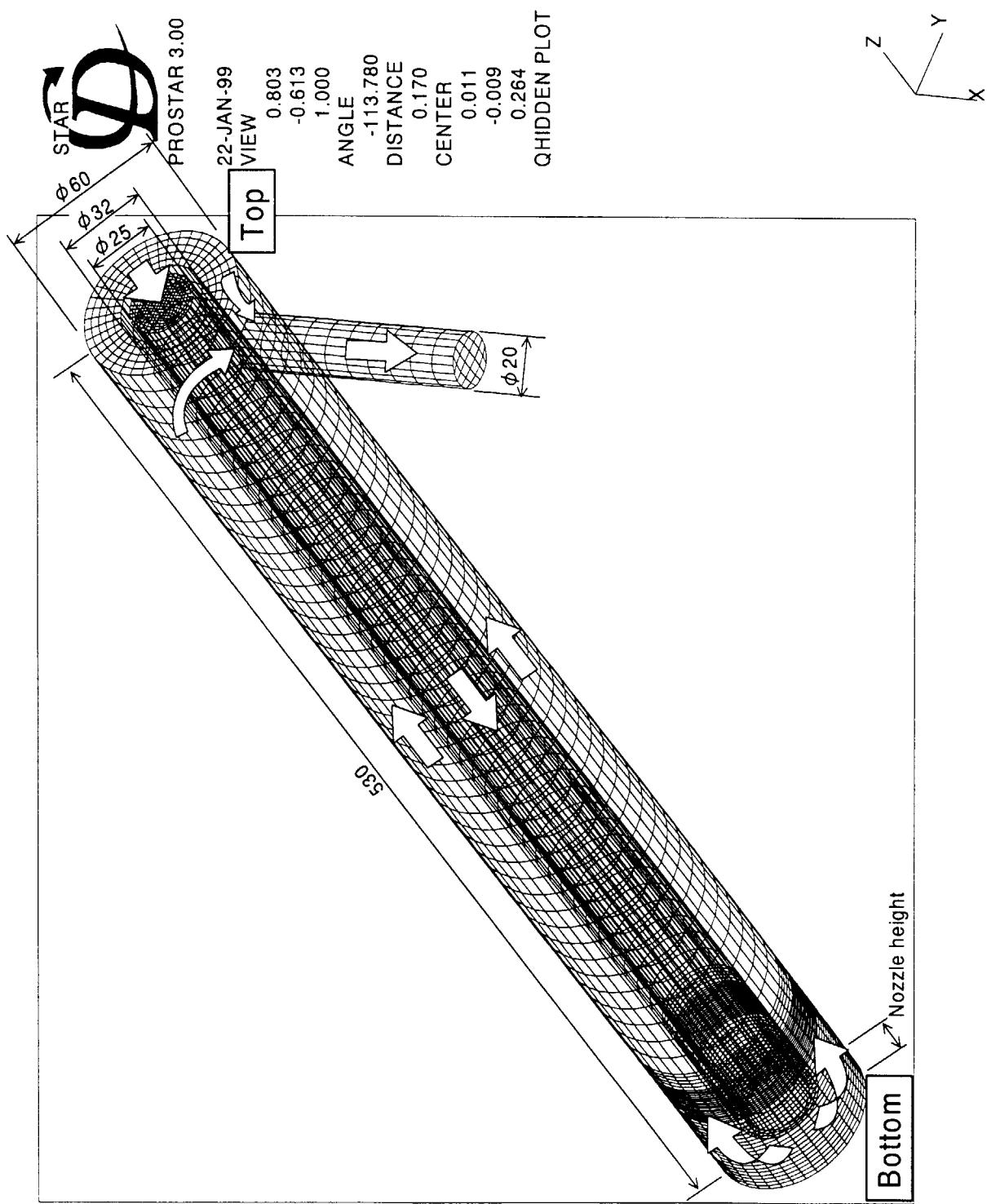


Fig.2.3 Analytical model of test section (New model).

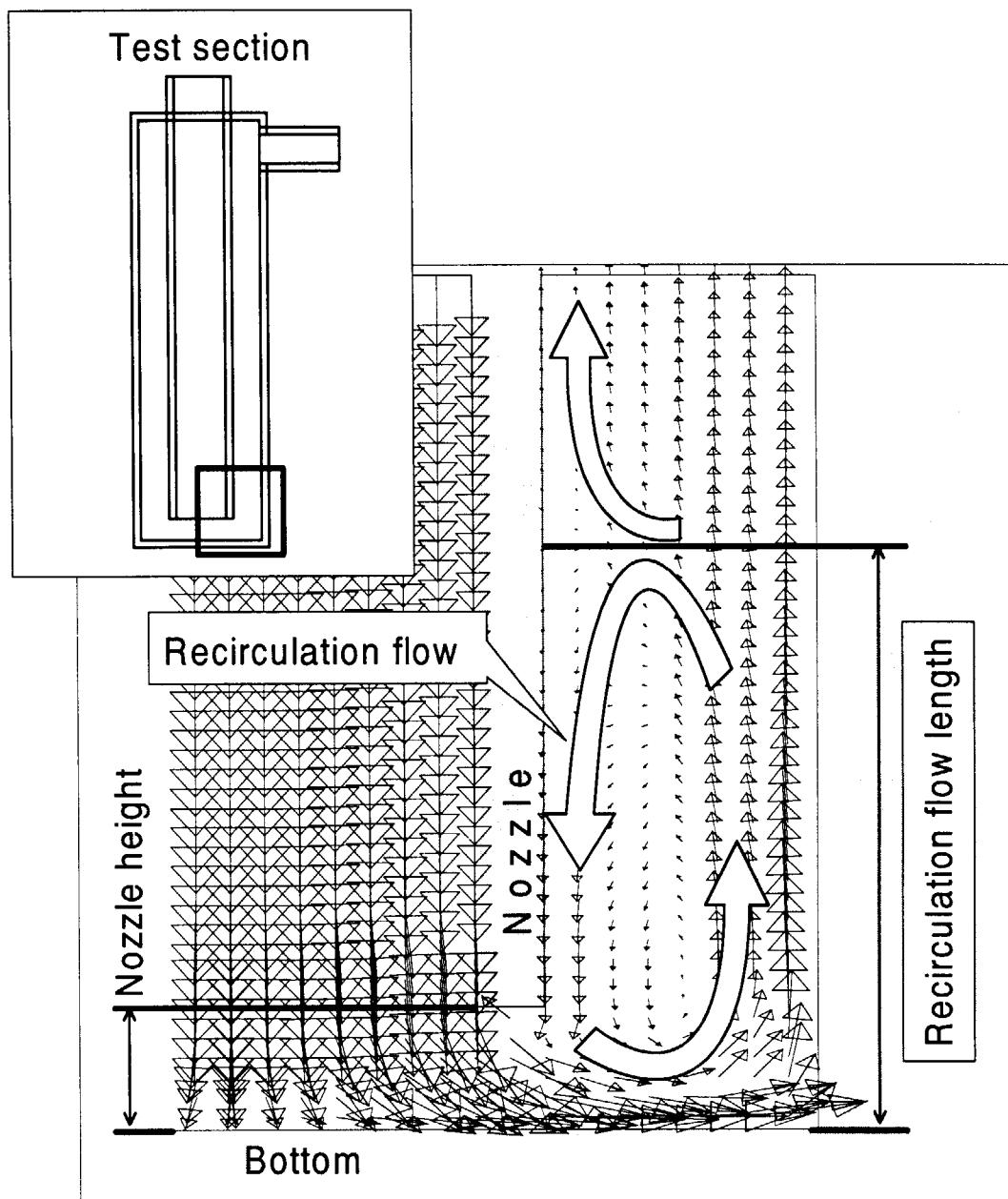


Fig.2.4 Recirculation flow and recirculation flow length.

This is a blank page.

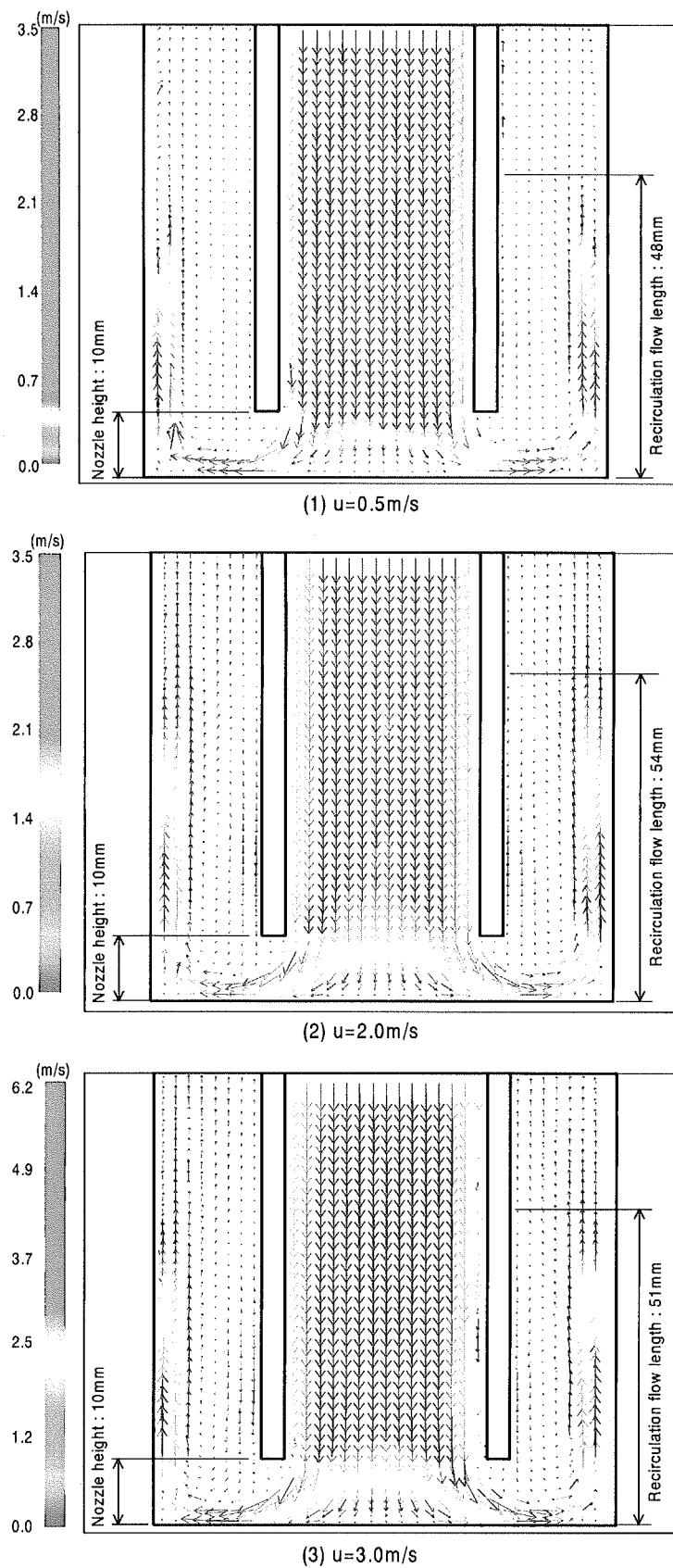


Fig.2.5 Velocity distributions measured with PIV system, when the nozzle height was 10mm and inlet velocity,  $u$  was (1) 0.5, (2) 2.0 and (3) 3.0 m/s.

This is a blank page.

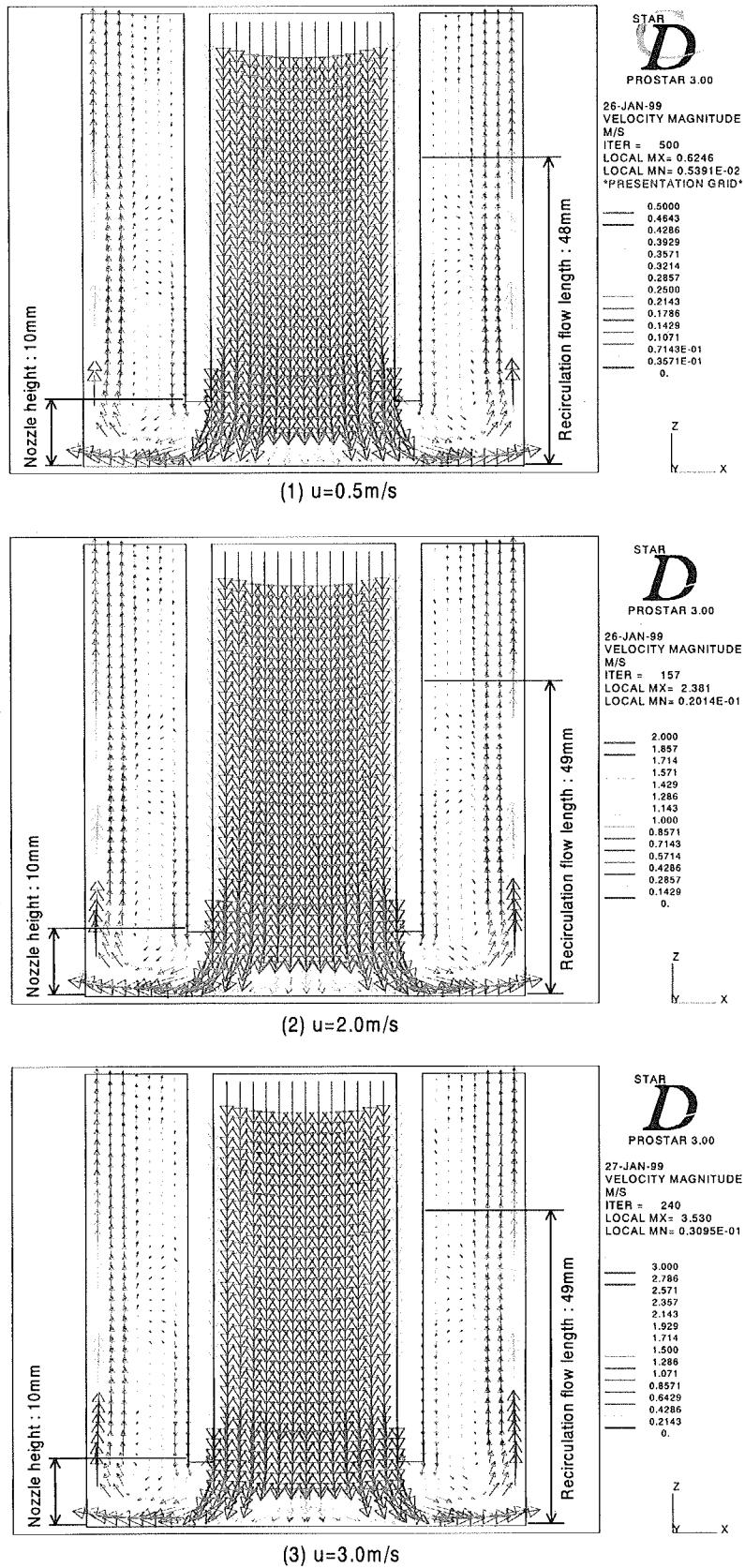


Fig.2.6 Velocity distributions analyzed with STAR-CD code, when the nozzle height was 10mm and inlet velocity,  $u$  was (1) 0.5, (2) 2.0 and (3) 3.0 m/s.

This is a blank page.

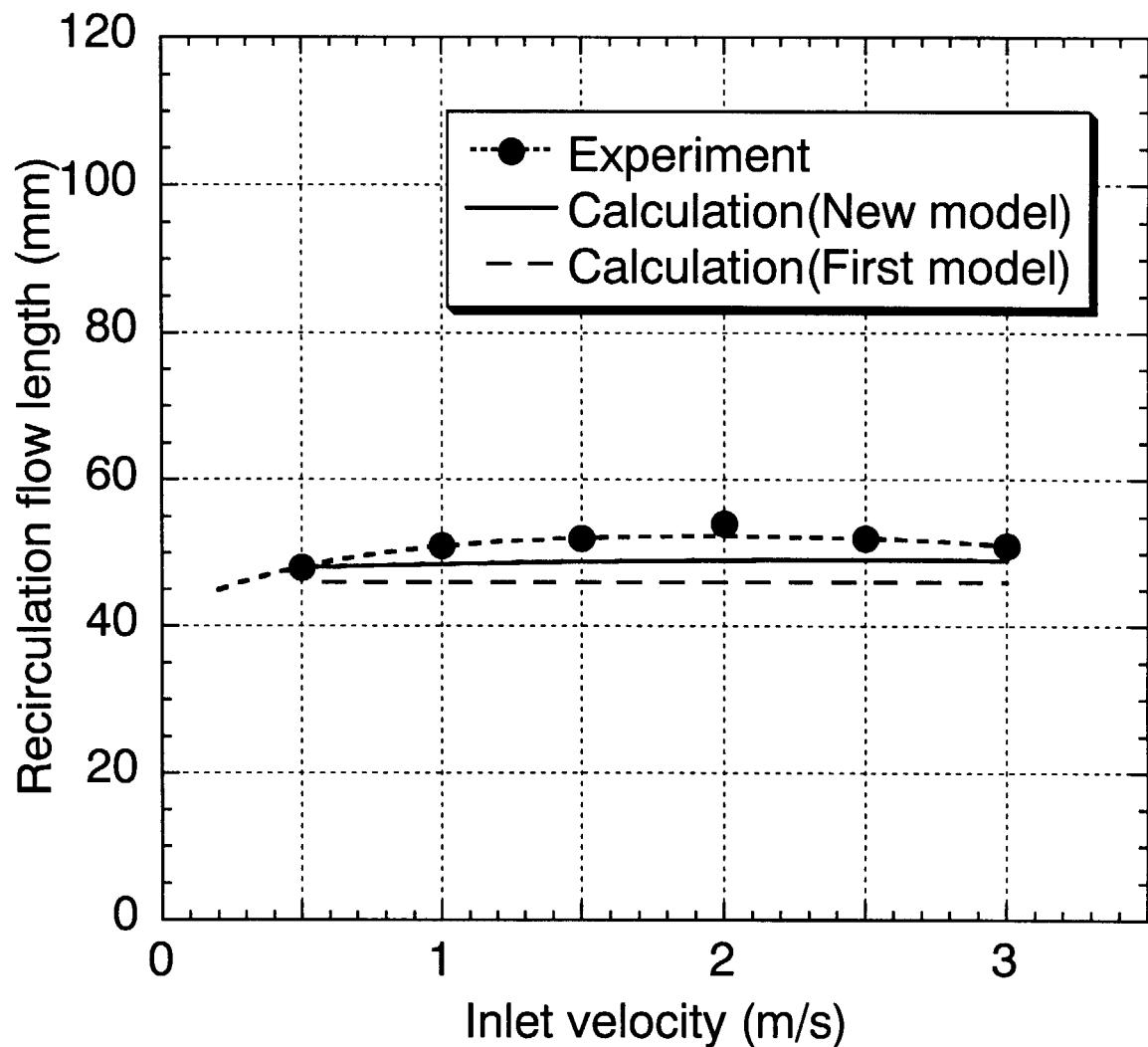


Fig.2.7 Relationship between inlet velocity and recirculation flow length.  
(Nozzle location : 10mm apart from the bottom surface)

This is a blank page.

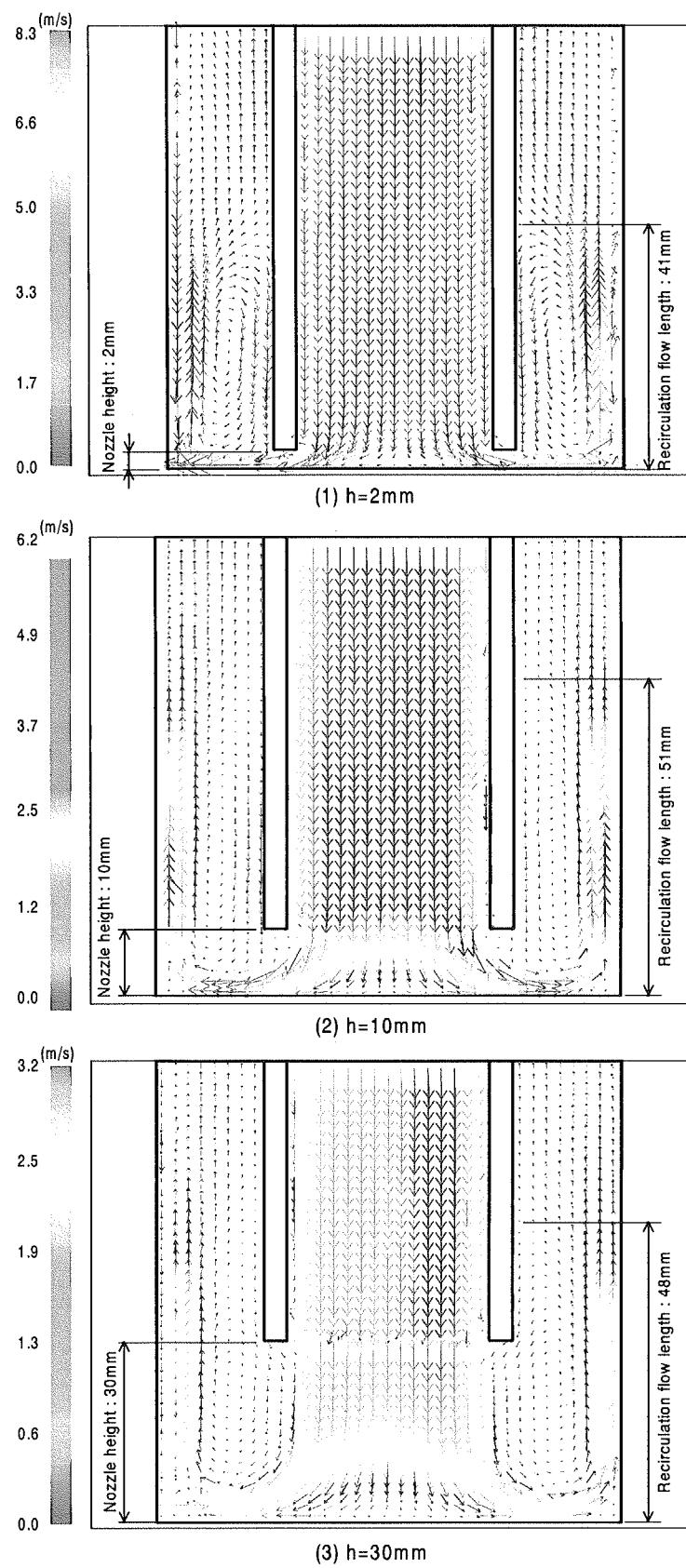


Fig.2.8 Velocity distributions measured with PIV system, when inlet velocity,  $u$  was 3.0m/s and the nozzle height,  $h$  was (1) 2, (2) 10 and (3) 30 mm.

This is a blank page.

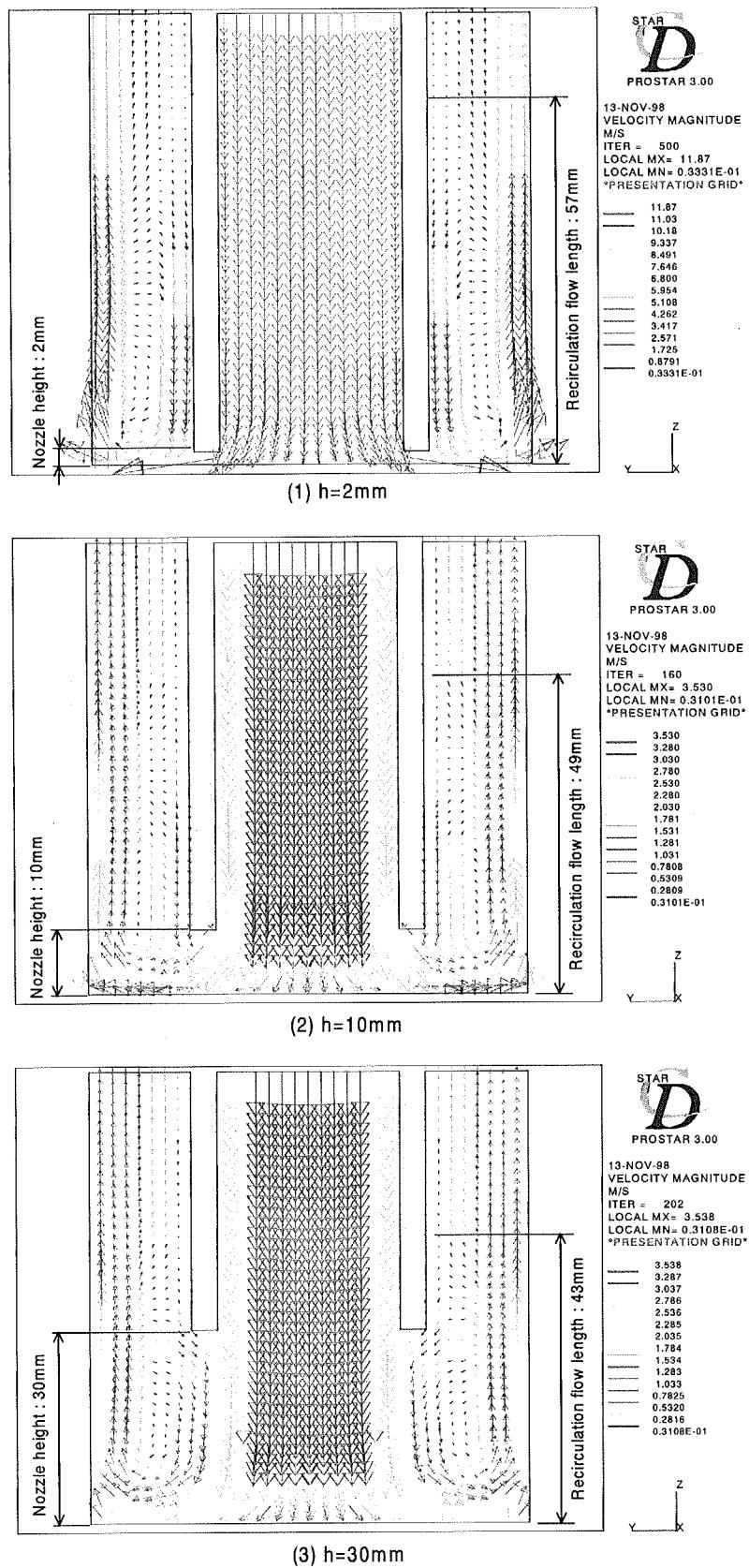


Fig.2.9 Velocity distributions analyzed with STAR-CD code, when inlet velocity,  $u$  was 3.0m/s and the nozzle height,  $h$  was (1) 2, (2) 10 and (3) 30 mm.

This is a blank page.

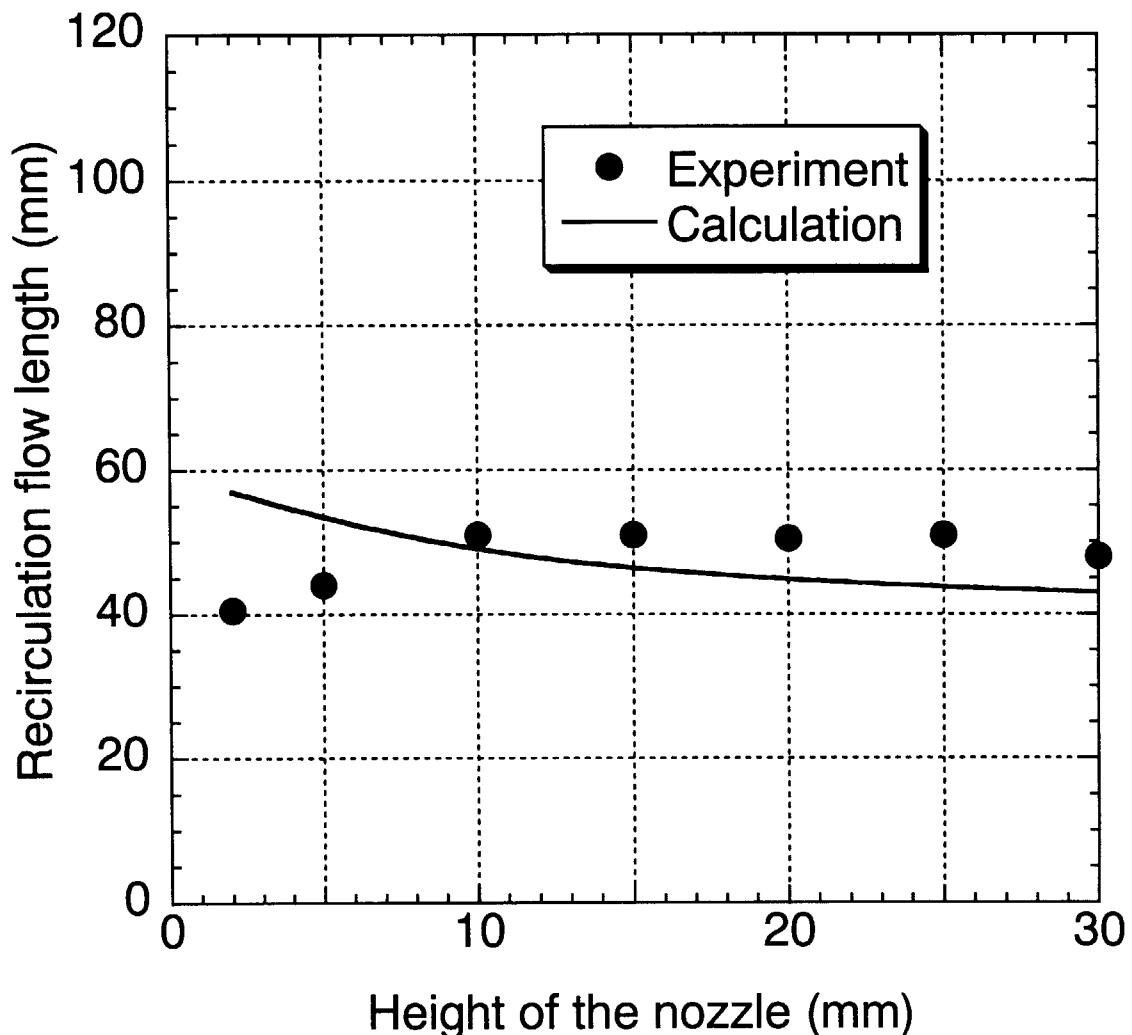


Fig.2.10 Relationship between height of the nozzle and recirculation flow length.  
(Inlet velocity : 3m/s)

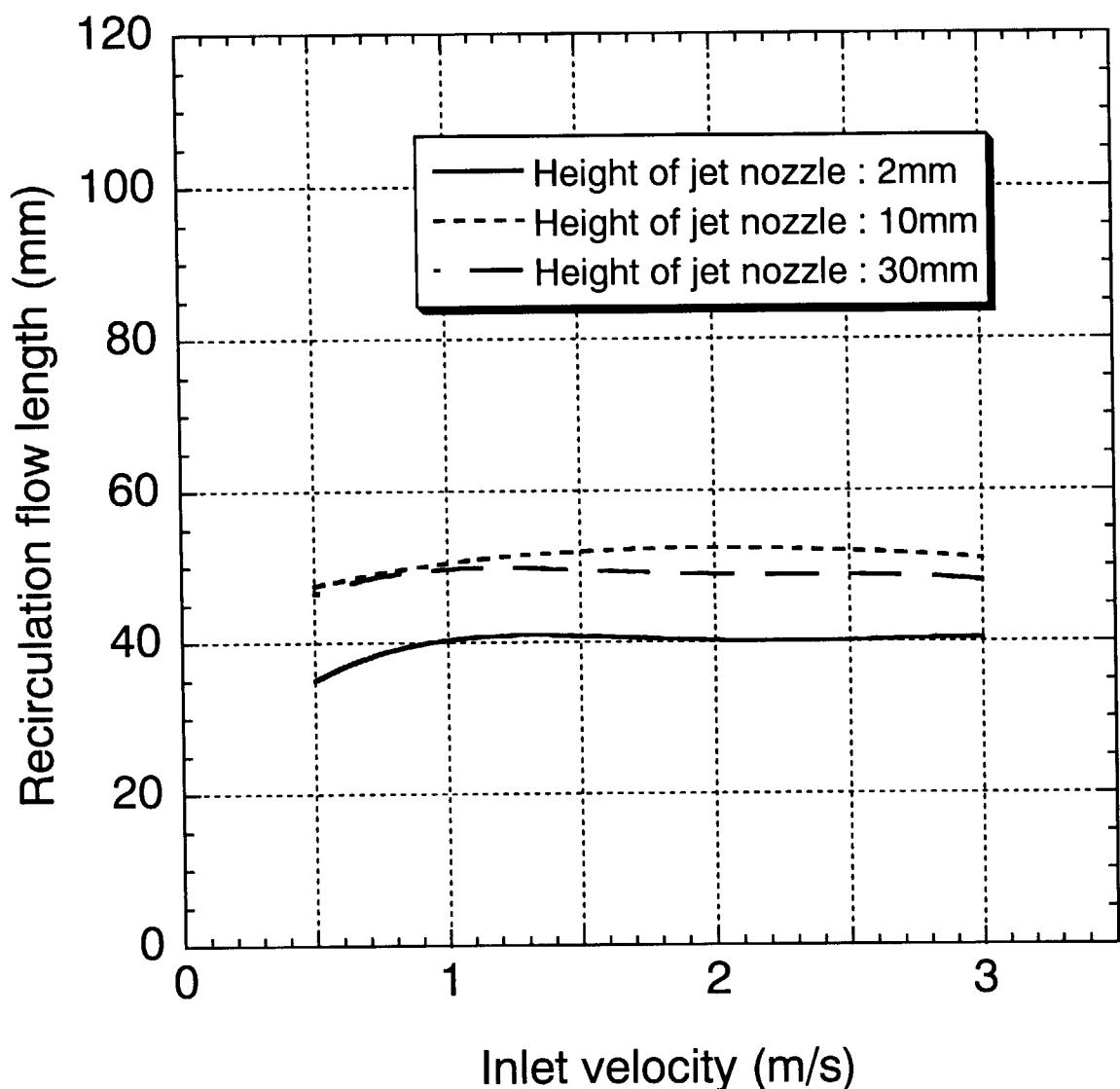


Fig.2.11 Relationship between inlet velocity and recirculation flow length at 2mm, 10mm and 30mm height of jet nozzle.

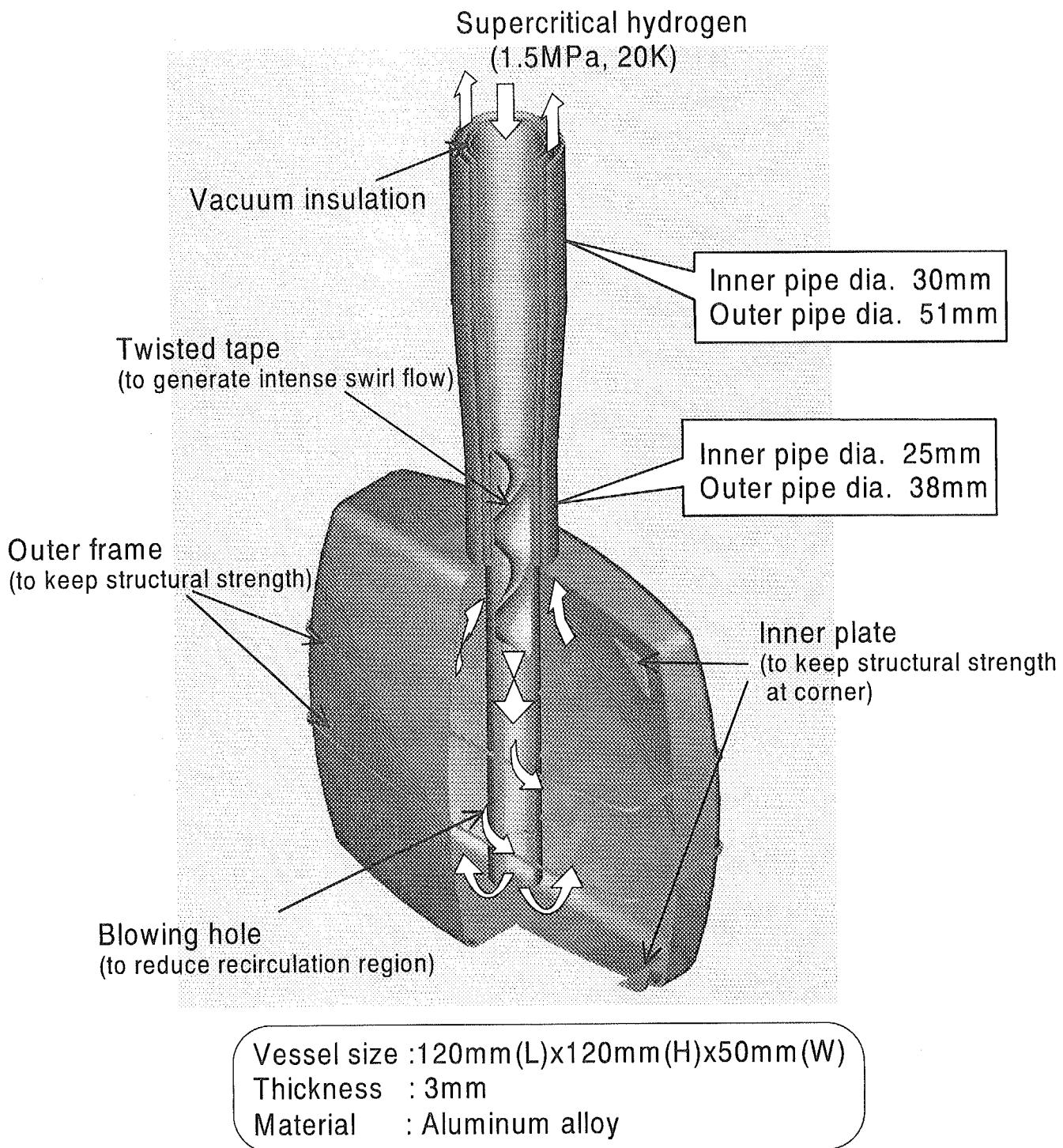


Fig.2.12 New concept of the cold source moderator.<sup>(7)</sup>

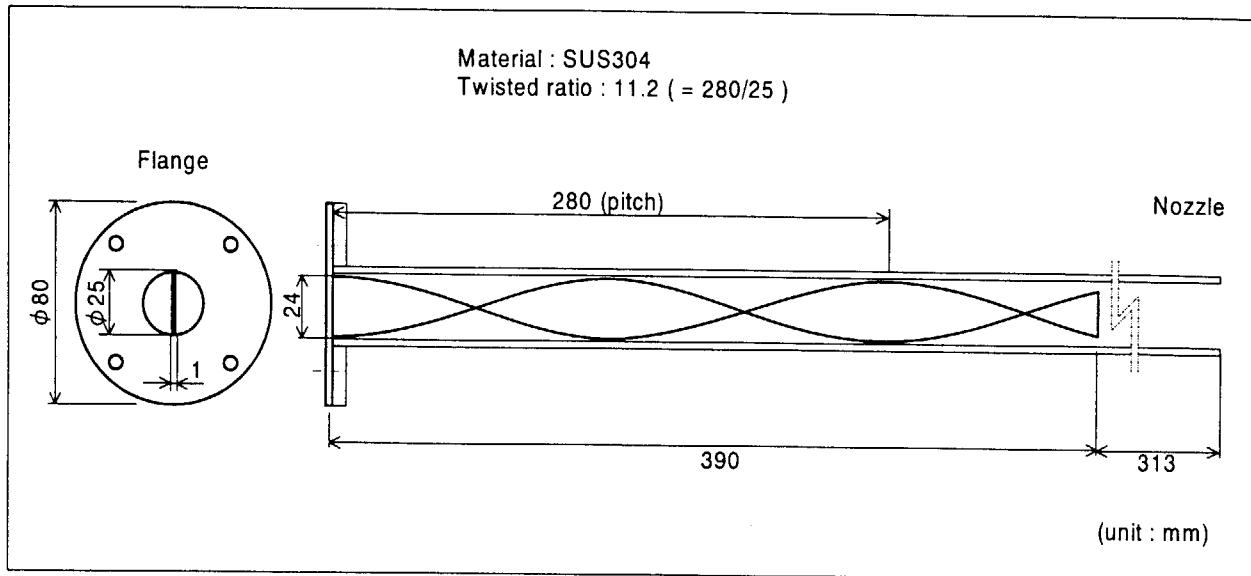
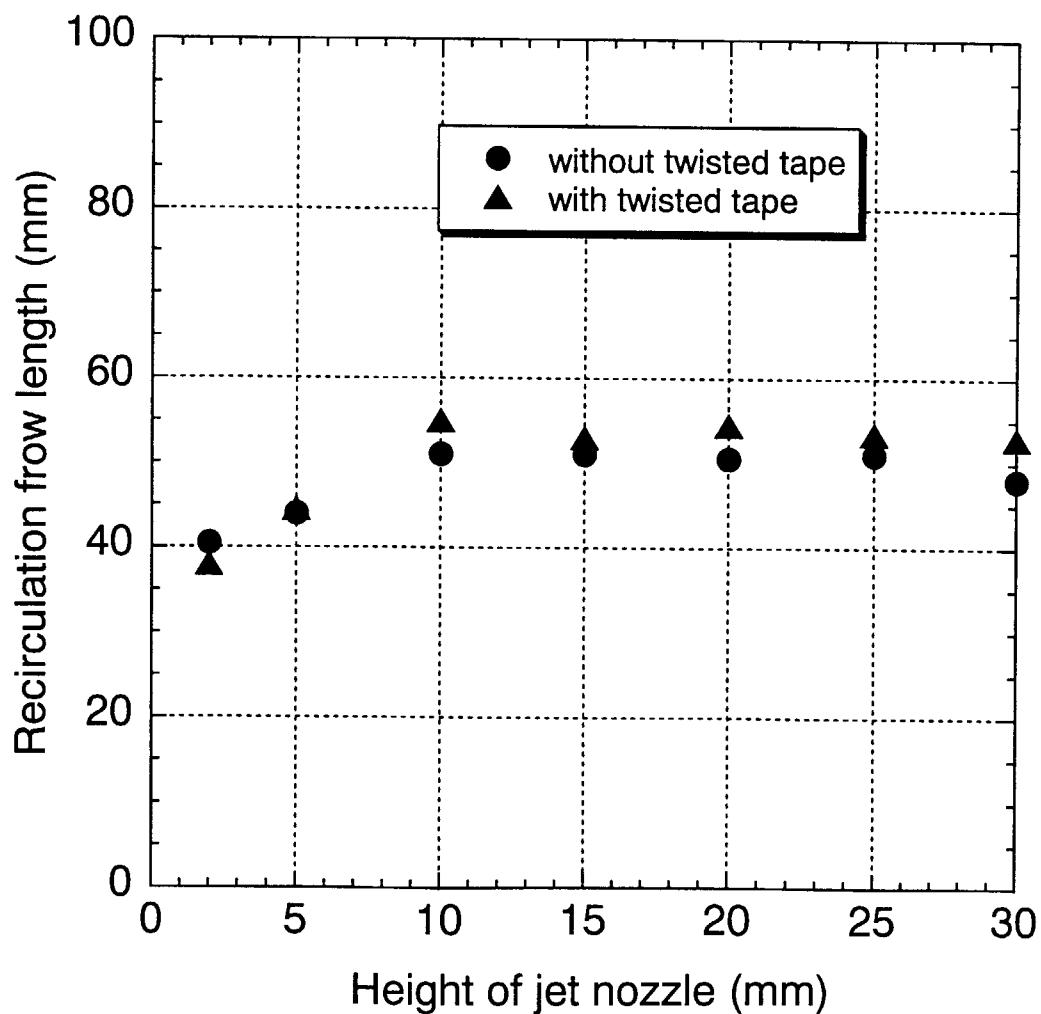


Fig.2.13 Structure of twisted tape.

Fig.2.14 Experimental results of recirculation flow length with and without a twisted tape.  
(Twisted ratio : 11.2, Inlet velocity : 3m/s )

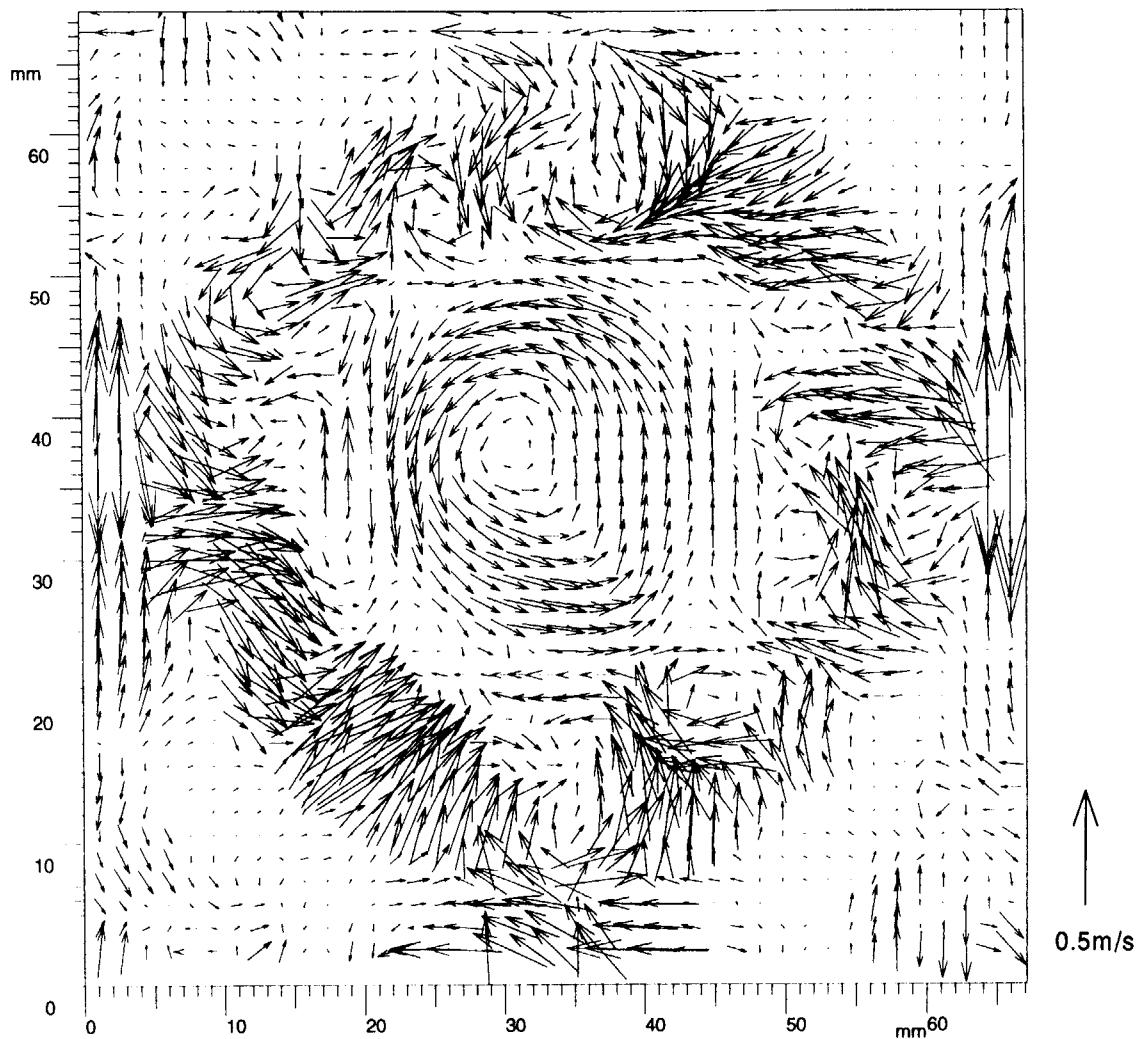


Fig. 2.15 Instantaneous velocity distribution obtained with twisted tape at 25mm upper horizontal plane from the bottom surface.

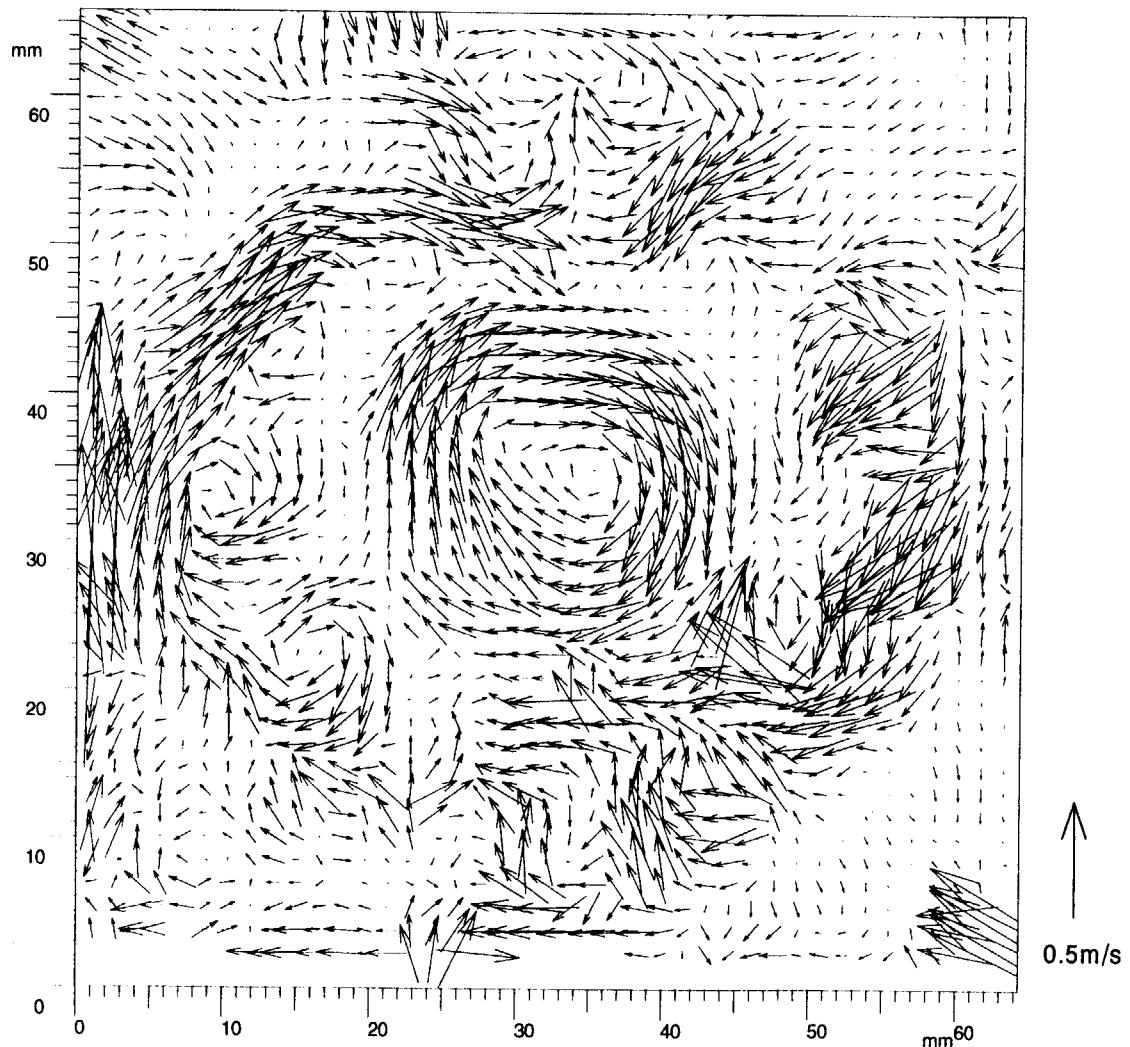


Fig.2.16 Instantaneous velocity distribution obtained without twisted tape at 25mm upper horizontal plane from the bottom surface.

### 3. 冷減速材容器内の予備的な熱流動解析

前述したように STAR-CD コードによる流動解析結果は水を用いた減速材基礎流動実験結果をよく再現し、設計解析コードとして十分に使用できることを確認した。本章では STAR-CD を用いて、実機用冷減速材を模擬した薄肉扁平容器内の液体水素の流動状況及び温度分布を予備的に解析した結果について述べる。

#### 3.1 解析条件

##### 3.1.1 解析モデル

以下の 2 つの解析モデルについて STAR-CD コードを使用して熱流動解析を実施した。

###### (1) モデル A (Fig.3.1)

減速材容器構造を箱形にして、曲率部のない状態でどのような熱流動状況を生じるかを調べるためにものである。ただし、噴流管の肉厚及び噴流管周りの真空断熱層を管厚を含めて考慮している。なお、真空断熱層は噴流管の先端まで設けている。

###### (2) モデル B (Fig.3.2)

実機用冷減速材容器構造を忠実に模擬した解析モデルである。モデル A と配管径や外寸は同じで、超臨界水素条件 (20K, 1.5MPa) に耐えるように曲面構造としている。真空断熱層はモデル A と異なり、容器入口の直前までとしている。

いずれのモデルも内部熱流動の基本特性の把握するために、ブローホールやツイストテープは設置していない。

##### 3.1.2 水素の物性値

超臨界水素の詳細なデータが不明なため、解析には 20K の飽和状態の物性値<sup>(12)</sup>を使用した。

- ・ 密度         $\rho$  : 71.49 kg/m<sup>3</sup>
- ・ 粘性係数     $\eta$  : 13.1  $\mu$ Pa·s
- ・ 比熱        Cp : 9454 J/kg·K
- ・ 热伝導率     $\lambda$  : 0.1184 W/m·K

##### 3.1.3 発熱密度

ニュートロニクス解析の結果を基にして、冷減速材における発熱密度分布、すなわち液体水素中での体積発熱密度分布を Fig.3.3<sup>(13)</sup>のように与えた。ニュートロニクス解析では減速材の配置等を変えた幾つかのケースについて解析を行っているが、ここでは最も高い発熱密度の結果を用いた。熱流動解析に当たっては、発熱密度を下記のフィッティング関数で与えて入力した。なお、実際には水平方向の発熱密度分布も考慮する必要

があるが、ここでは安全側に、水平方向のピーク発熱密度が水平方向に一様に分布する条件を与えた。

$$\text{Energy deposition (W/cm}^3\text{)} = -0.002203 x^3 + 0.083787 x^2 - 1.1606 x + 8.3729$$

x : 冷減速材容器底面からの距離(cm)

### 3.2 解析結果

Fig.3.4(a)はモデルAの流速分布の解析結果で、入口流速 3m/s、噴流出口高さが 10mm の時のものである。Fig.3.4(b)は同じ条件における温度分布の解析結果である。流速分布の解析結果から、流速が遅くなっている領域は、x 軸断面では底面付近に発生している再循環流の中心部と噴流管の外側に沿った領域であり、y 軸断面でも噴流管の外側に沿った領域で流速が遅くなっている。このため温度分布の解析結果では、これらの領域で温度が高くなっている。x 軸断面の温度分布では、再循環流の中心付近で温度が高くなる傾向を示しているが、顕著なホットスポットになっていない。これは、再循環流の周りの流速が比較的大きいため、周囲からの乱流拡散が強いものと考えられる。モデルAで最も水素温度が高くなるのは y 軸断面で見られ、噴流管の外側に沿った出口に近い領域において 26.3K に達する。

Fig.3.5(a)に入口流速 3m/s、噴流出口高さ 10mm の時のモデルBの流速分布解析結果を、Fig.3.5(b)に温度分布の解析結果を示す。流速分布は容器の曲率の影響を受けて、モデルAよりも滑らかな流動が実現している様子が見られる。特に、容器側面及び容器出口付近の流速がモデルAに比べて高くなっているのが分かる。一方、最高温度は噴流管周りではなく、容器表面の再循環流の影響を受けた中央部の領域で発生し、約 24.7K と流動のスムーズ化の影響を受けてモデルAよりも低くなっている。

その他、モデルA、Bについて、噴流出口高さ 10mm で入口流速 6m/s と 9m/s の場合、噴流出口高さ 30mm で同様に入口流速を変えた解析を行った。Fig.3.6 に解析から得られた最高温度を示す。横軸は入口流速、縦軸は最高温度で、凡例の（ ）内は噴流出口高さを示している。全体的に流動のスムーズ化の影響を受けて、モデルBの方が最高温度はモデルAよりも低い傾向にある。モデルAでは噴流出口高さ 2mm が最も最高温度が低く、10mm、50mm と高くなり、噴流出口高さ 30mm が最も温度が高い。モデルBは上述のように曲面構造のためモデルAよりも温度上昇（最高温度）が低く、ここでも噴流出口高さ 30mm よりも 10mm の方が温度上昇を抑えることができる。モデルAのように噴流出口高さ 2mm をモデル化しなかったのは、底面が曲面であるため、容器内側と噴流管が接近あるいは接触して流動に悪影響を及ぼす可能性を懸念したためである。

また、入口流速を高めると最高温度も大きく低下する傾向にある。モデルBの噴流出口高さ 10mm の場合、入口流速を約 5m/s とすれば目標とした水素温度上昇 3 K 以内に抑えることができる。ただし、入口流速を高めると圧力損失が増大して、液体水素の循環に必要なポンプ動力も大きくなる。ポンプ動力の増大はポンプの大型化のみならずポンプ部で

の入熱増大につながり、冷凍機の容量を大きくする必要があるなどシステムコストが大幅に植える恐れがある。このため、できるだけ低流速で冷減速材容器内の最高温度を低減する工夫が必要である。前節で述べたように、プローホールを設置する案は、穴をあけた噴流管で流れの吹き出しにより再循環流の防止を図るものであるが、温度分布解析結果から明らかになった噴流管外側周囲の温度上昇を抑制することにも有効であると考える。すなわち、プローホールから温度の低い水素が吹き出し、再循環流を拡散させるだけでなく温度の高くなる領域を攪拌して温度上昇を抑えることが可能である。今後、前節で述べたツイストテープの設置と併せて実験的及び解析的に調査・検討していく予定である。

最後に、現在詳細なニュートロニクス解析が進められており、その結果が整い次第、減速材容器内熱流動解析に反映させるつもりである。今回の解析で、噴流管の肉厚部は断熱している状態で温度を高く見積もっており、熱伝導の条件を的確に行えば多少温度上昇が低下する可能性があることを付記する。

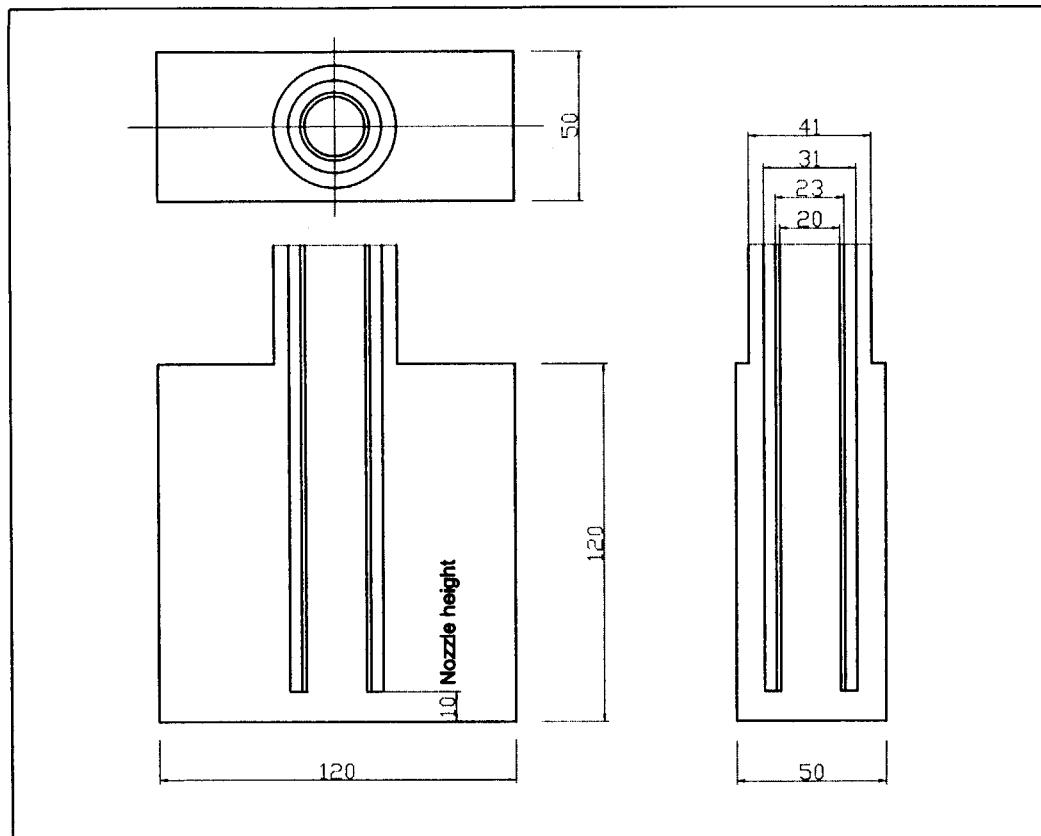


Fig.3.1 Structural drawing of model A.

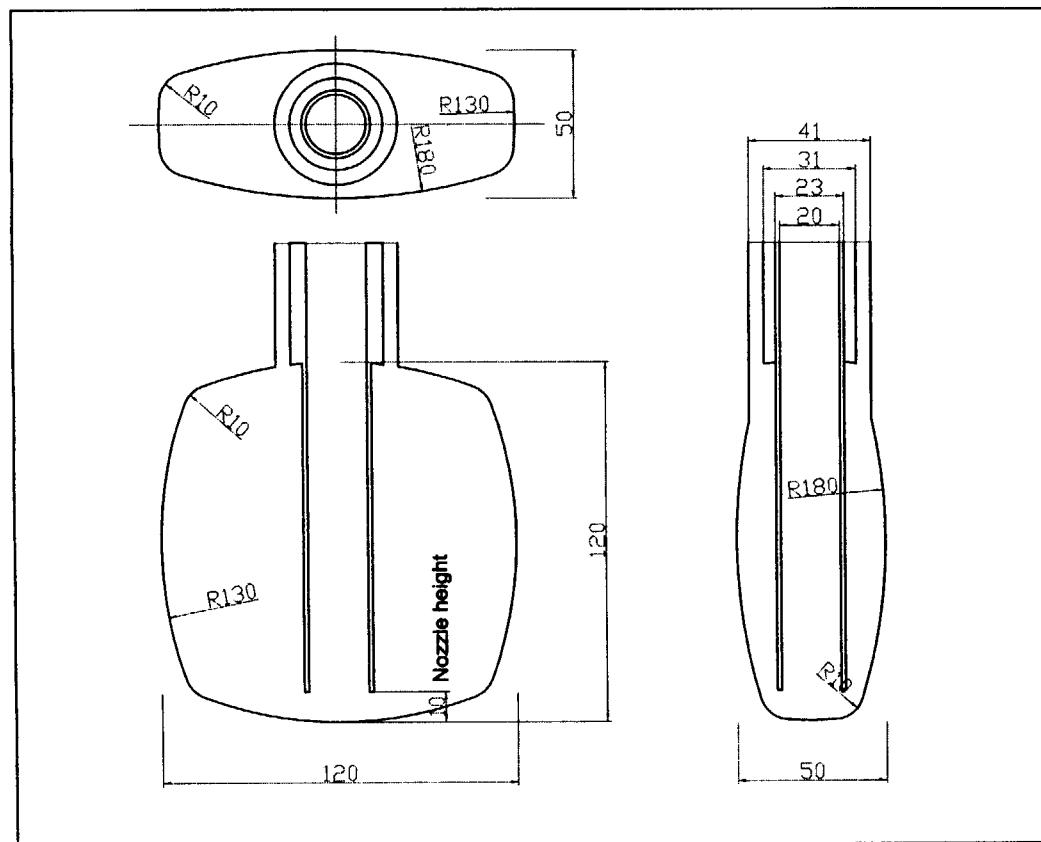


Fig.3.2 Structural drawing of model B.

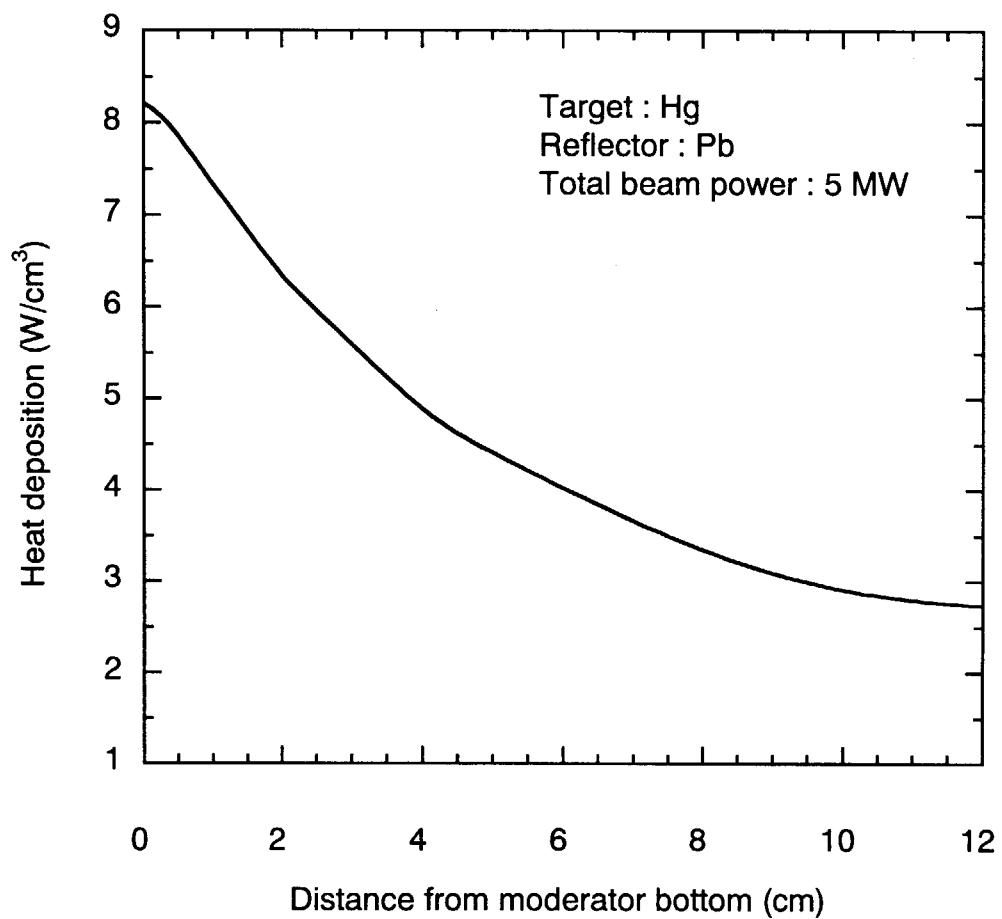


Fig.3.3 Heat deposition in the cold source moderator using liquid hydrogen.

This is a blank page.

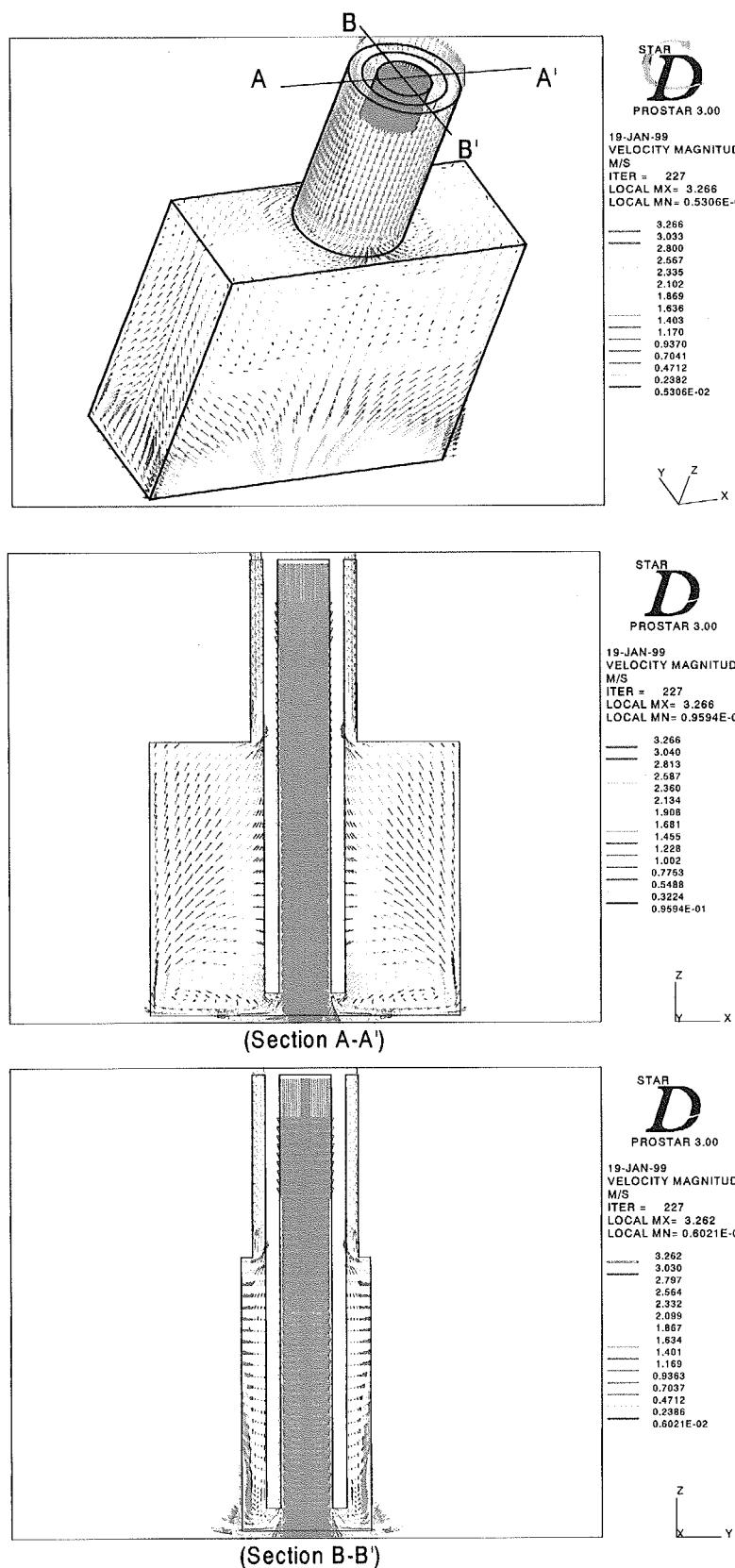


Fig.3.4(a) Velocity distributions ( Model A ).

This is a blank page.

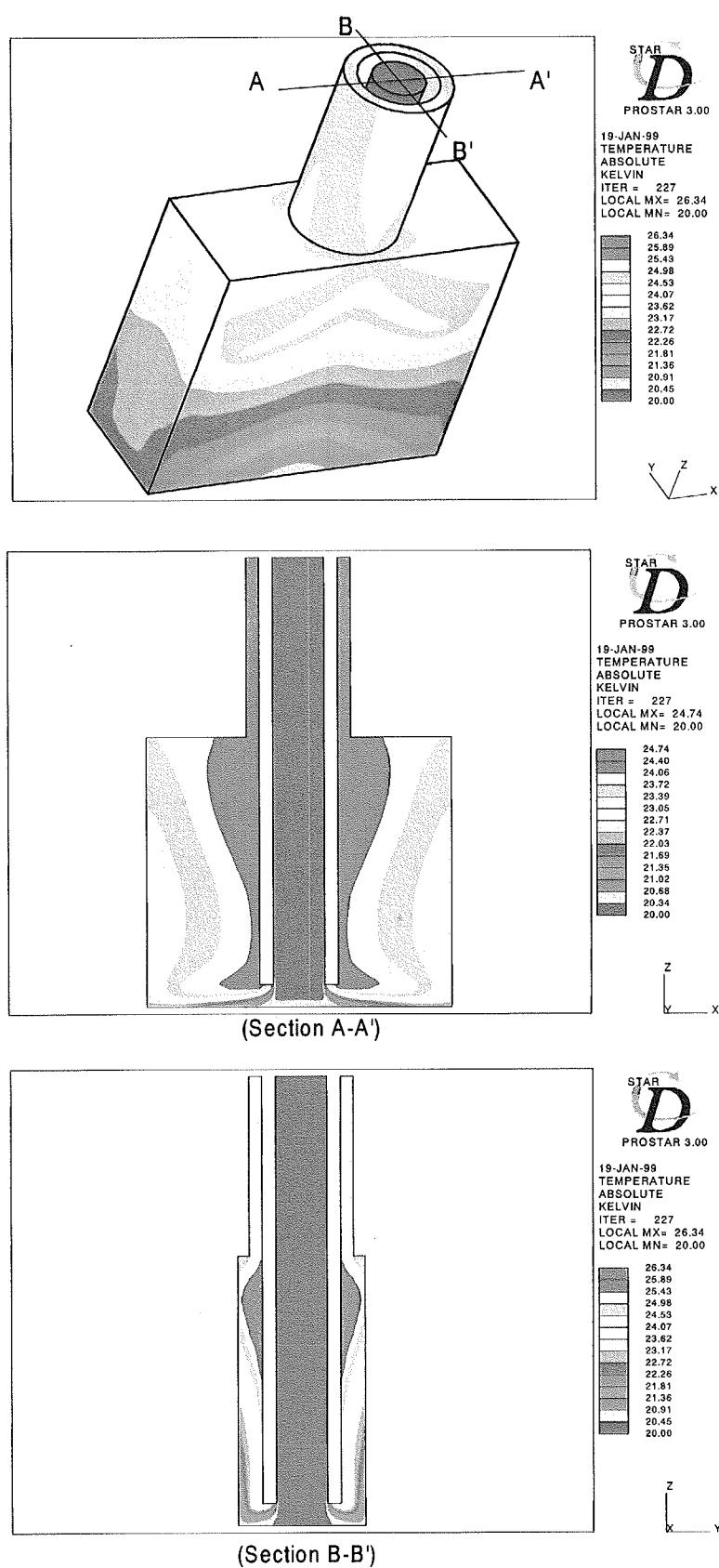


Fig.3.4(b) Temperature distributions ( Model A ).

This is a blank page.

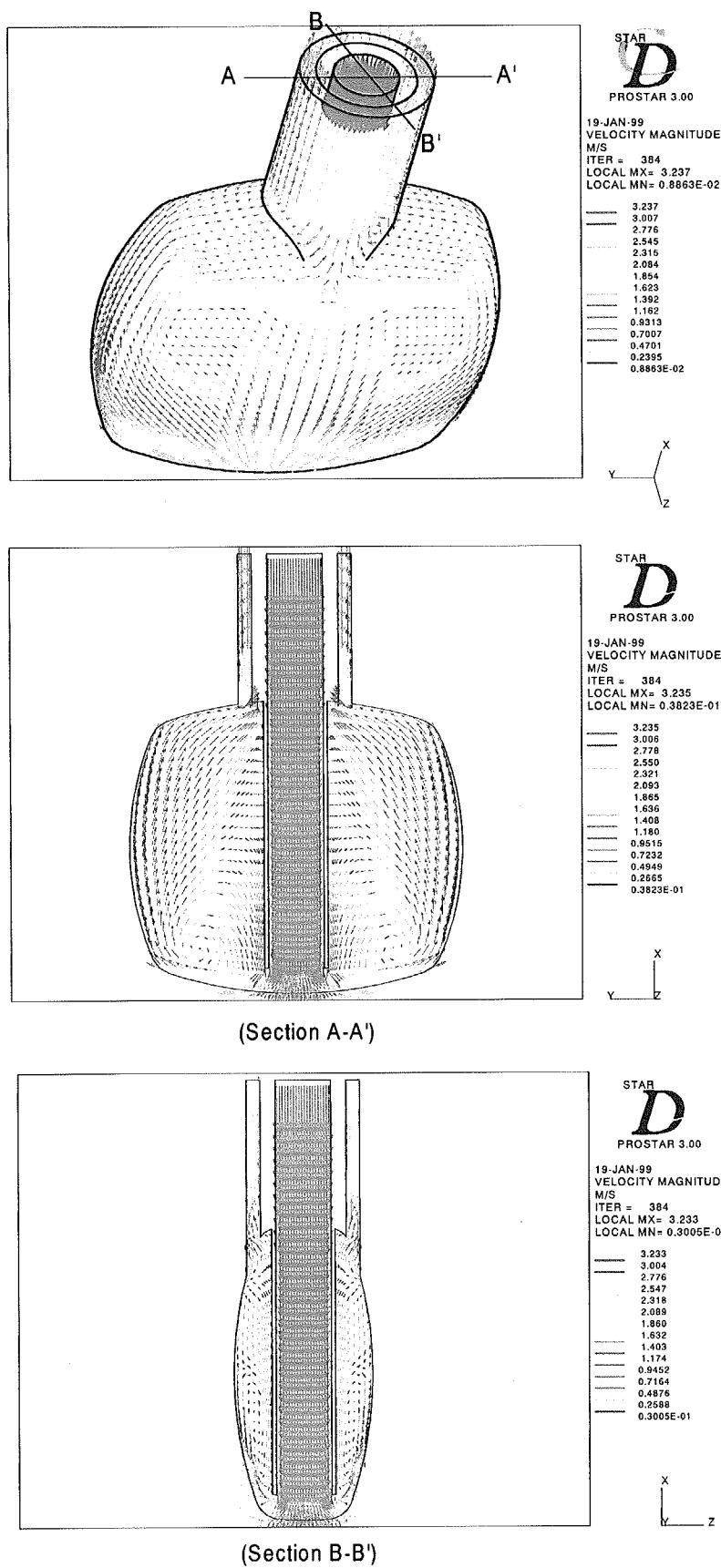


Fig.3.5(a) Velocity distributions ( Model B ).

This is a blank page.

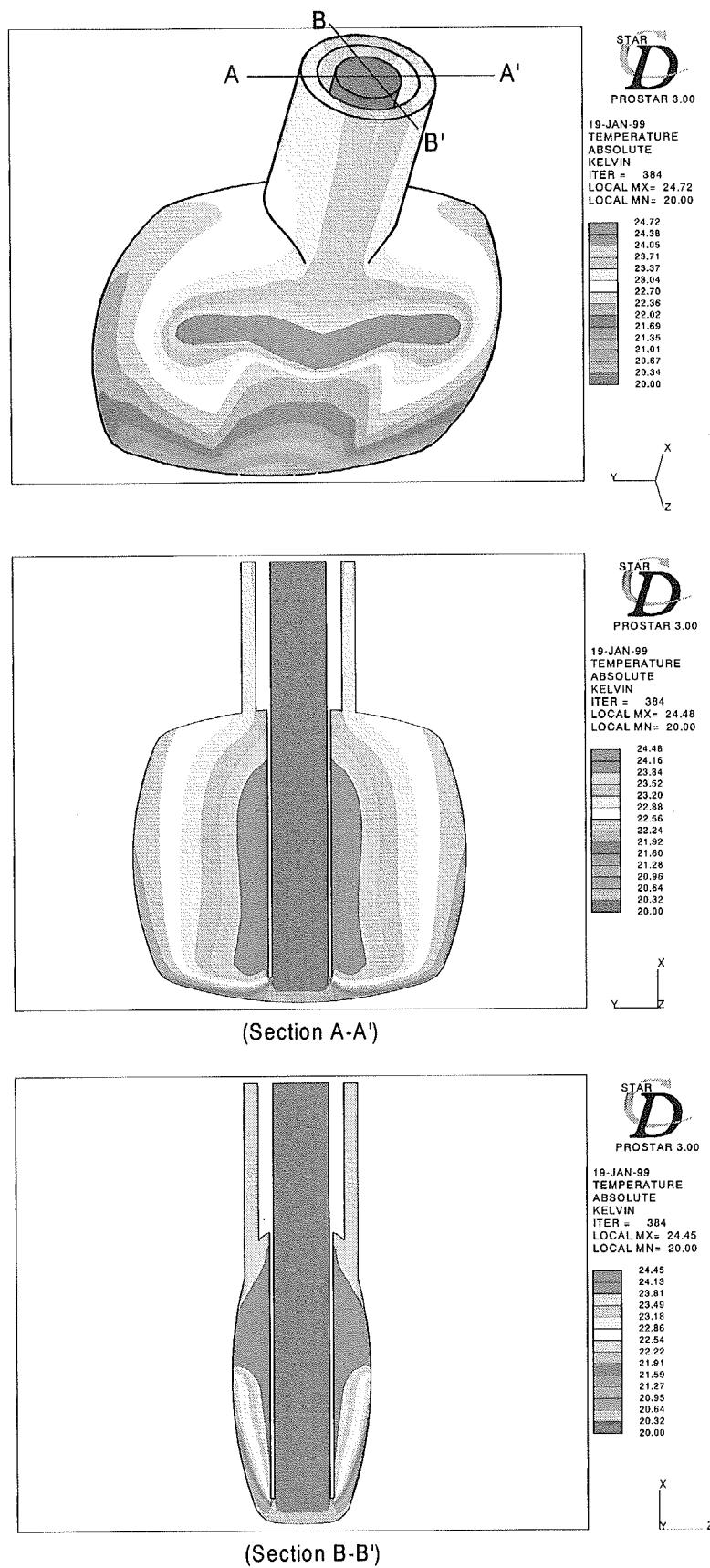


Fig.3.5(b) Temperature distributions ( Model B ).

This is a blank page.

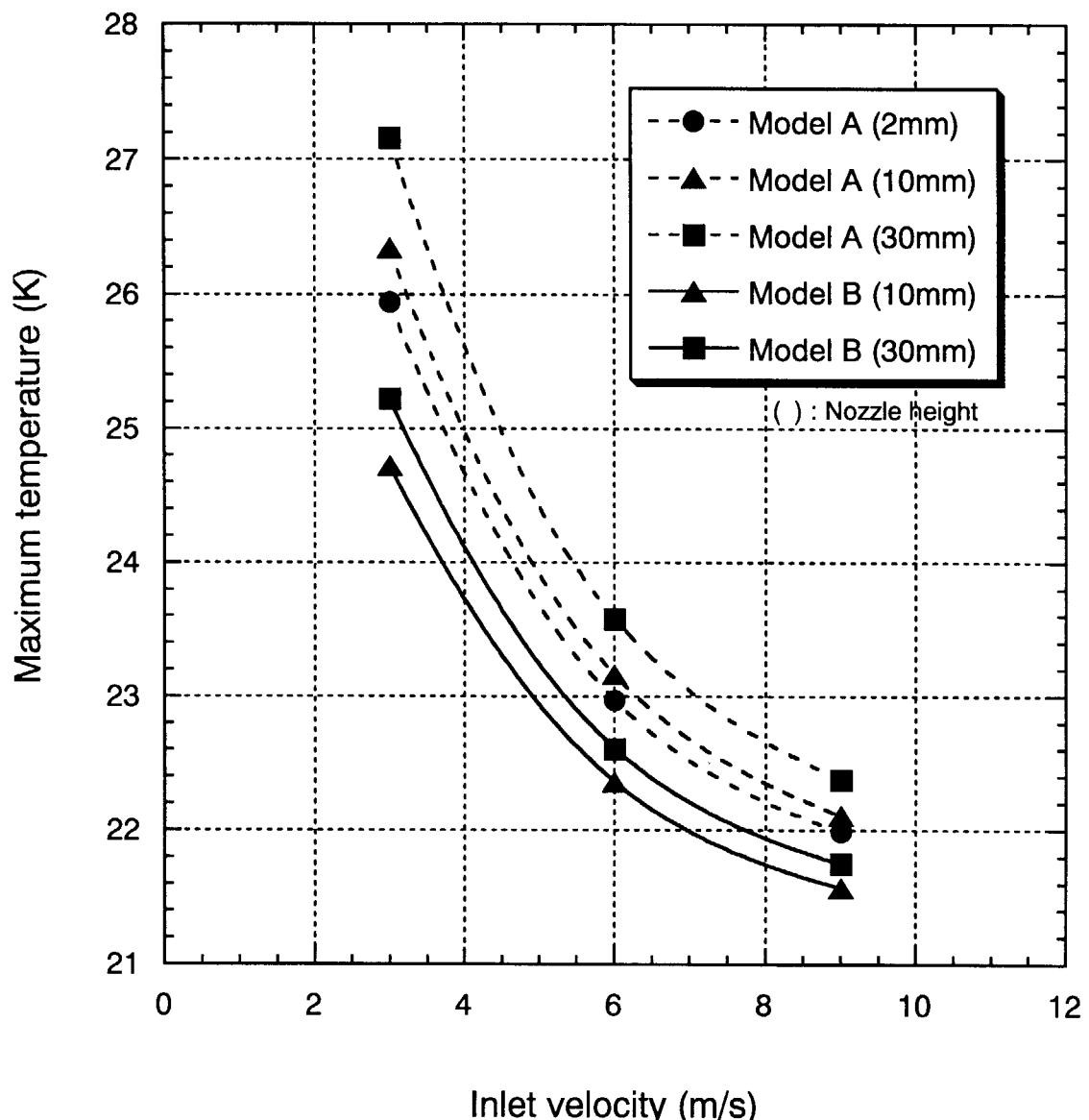


Fig.3.6 Relationship between inlet velocity and maximum hydrogen temperature.

#### 4. あとがき

冷減速材に適した液体水素を用いた減速材システムの重要な設計課題である温度上昇の抑制を実現するために、第一段階として水による衝突噴流による流動状況の把握を目的とした基礎流動実験と同時に解析評価を実施した。既に報告した噴流出口高さ一定で入口流速を変えた場合の流動パターンの測定結果と解析結果について再度解析評価を行った結果、解析モデルを忠実にモデル化し、モデル手法を変えたことによって実験結果の再現性をより高めることができた。また、入口流速一定で噴流出口高さを変えた場合の測定結果は、噴流管の流体誘起振動の影響が大きい噴流出口高さが2mmの場合を除いて解析結果とよく一致した。

この結果を踏まえて、STAR-CDコードを用いて実機用冷減速材容器内の水素流動状況及び温度分布を予備解析し、再循環流や流速の遅くなる領域及びこれが原因となって温度が上昇する領域を確認するとともに、水素温度上昇を3K以内に抑制する熱流動設計の目処を得ることができた。今後、減速材容器をモデル化した試験体による流動の可視化実験を実施し、解析結果と比較して解析コードの検証等を行うとともに、できるだけ入口流速が低い条件で再循環流を抑制するために提案したプローホールとツイストテープの効果を実験及び解析によって明らかにする予定である。

#### 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、核熱利用研究部高温機器開発試験室の稻垣嘉之氏に懇切丁寧な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1)向山武彦，“中性子科学研究計画－(1)概要”，日本原子力学会「1998 春の年会」D21 (1998)
- (2) T. Mukaiyama, et al., “Neutron Science Project at JAERI,” ANS Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (ACCAPP'97), Nov. 16-20 (1997)
- (3)大山幸夫、他，“中性子科学研究計画－(2)研究施設計画”，日本原子力学会「1998 春の年会」 D22 (1998)
- (4)日野竜太郎、他，“中性子科学研究計画－(4)ターゲット開発”，日本原子力学会「1998 春の年会」 D24 (1998)
- (5) N. Watanabe, et al., “A Target-Moderator-Reflector Concept of the JAERI 5MW Pulsed Spallation Neutron Source,” JAERI-Tech 98-011 (1998)
- (6)勅使河原誠、他，“JAERI 5MW スパレーションパルス中性子源における中性子特性およびターゲット、冷モデレータの核発熱”，日本原子力学会「1998 春の年会」 D30 (1998)
- (7) T. Aso, et al., “Structural and Hydraulic Study on Cold Source Moderator,” 14<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, Utica (1998)
- (8) T. A. Broome, “Prospects for Targets and Methane Moderators at ISIS,” 13<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, pp.632-643, Villigen PSI (1995)
- (9) National Spallation Neutron Source Conceptual Design Report Volume 1, The NSNS Collaboration, Oak Ridge National Laboratory, p.5-27-p.5-41 (1997)
- (10)麻生智一、他，“冷減速材内流動特性の研究 第1報 流動パターンの測定と流動解析”，JAERI-Tech 99-014 (1999)
- (11) A. Trevor Lucas (Oak Ridge National Laboratory) 私信
- (12)日本機械学会，“技術資料 流体の熱物性値集” (1983)
- (13) N. Watanabe, et al., “Towards a high-efficiency pulsed cold neutron source,” 14<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, Utica (1998)

This is a blank page.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電圧、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンタクトタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
光強度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

### 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
					1
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>			
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>			
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>3</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>			
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>			
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem			
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100		1	3876		1	100			
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1												
		0.01		1										

冷減速材内流動特性の研究 第2報 流動パターン測定・解析と冷減速材容器内熱流動解析