

JAERI-Tech
2000-018



JP0050339



冷減速材内流動特性の研究
第3報 扁平モデルの流動パターン測定と解析

2000年3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。
入手の問合わせは、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（〒319-1195 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, 2000

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3報 扁平モデルの流動パターン測定と解析

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

(2000年2月1日受理)

原研で開発を進めている MW 規模の核破砕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ホットスポットの発生要因となる再循環流や停滞流の発生など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、冷減速材容器を模擬した扁平モデル試験体を用いて、容器内の流動パターンを PIV システムにより水流動条件下で測定した。その結果、衝突噴流に随伴する再循環流や流れの停滞域などの流動パターンを明らかにし、併行して実施した STAR-CD コードによる流動解析は測定した流動パターンをよく再現した。この結果を基に実機用冷減速材容器内の熱流動解析を行い、2MW 運転時において液体水素の温度上昇を 3K 以内に抑制できることを確認した。

Study on Flow Characteristics in a Cold Moderator
III. Flow Pattern Measurement and Analysis with Flat Model

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 February 1, 2000)

The Japan Atomic Energy Research Institute is developing a MW-scale spallation target system under the Neutron Science Project. A cold 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 develop the conceptual design of the moderator structure in progress, the flow patterns were measured using a PIV system under water flow conditions using a flat model that simulated a moderator vessel. From these results, the flow patterns (such as recirculation flows, stagnant flows etc.) were clarified. The hydraulic analytical results obtained using the STAR-CD code agreed well with experimental results. Thermal-hydraulic analyses in the moderator vessel were carried out using the STAR-CD code. Based on these results, we clarified the possibility of suppressing the local temperature rise to within 3K under 2MW operating condition.

Keywords: Spallation Target System, Neutron Science Project, Cold Moderator, Supercritical Hydrogen, Temperature Rise, Recirculation and Stagnant Flow, Flow Pattern, Flat Model, PIV System, Thermal-Hydraulic Analysis

目 次

1. 概要	1
2. 実験装置の概要	2
3. 測定結果及び解析評価	2
3.1 噴流出口高さ 10mm のときの流動パターン	3
3.2 噴流出口高さ 30mm のときの流動パターン	5
3.3 噴流出口高さ 50mm のときの流動パターン	5
4. 冷減速材容器内の熱流動解析	6
4.1 解析条件	6
4.2 解析結果	7
5. あとがき	9
謝 辞	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Experimental Apparatus	2
3. Experimental Results and Analytical Estimations	2
3.1 Flow Pattern at 10mm Nozzle Height	3
3.2 Flow Pattern at 30mm Nozzle Height	5
3.3 Flow Pattern at 50mm Nozzle Height	5
4. Thermal-Hydraulic Analyses in Cold Moderator	6
4.1 Analytical Conditions	6
4.2 Analytical Results	7
5. Concluding Remarks	9
Acknowledgment	9
References	10

This is a blank page.

1. 概 要

日本原子力研究所（以下、JAERI）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^(1, 2)の下で、最初に建設する研究施設として中性子散乱施設（5MW）の設計検討を進めてきた⁽³⁾。平成 11 年度から中性子科学研究計画は高エネルギー加速器研究機構（KEK）の大型ハドロン計画と統合して、両機関の能力を結集して進めることとなった。本施設の中性子源となる核破碎ターゲットシステムについては、その概念を構築するために設計研究及び R&D を JAERI が主体となって実施している⁽⁴⁾。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の高エネルギー中性子を各々の中性子散乱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^(5, 6)。Fig.1.1 にターゲットと減速材の配置を示す。特に、冷・熱中性子領域で使用する超臨界水素減速材（以下、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・扁平構造とし、水素温度の上昇を 3K 以内に抑制する必要がある⁽⁷⁾。このような構造概念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での流動を最適化することが要件である。

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して概念設計を進めており、冷減速材についても中性子収率やハンドリングの面で有効な構造である ISIS（英）⁽⁸⁾又は SNS 計画（米）⁽⁹⁾と同型式の冷減速材構造を採用する予定である。Fig.1.2 に冷減速材容器部の構造概要を示す。ここで超臨界水素は噴流状態で容器内に流入し、容器底面で衝突して反転しながら流出する。このような流動では、局所的な温度上昇の原因となる水素の再循環・滞留を生じやすいため、それらの発生状況を明らかにして熱流動条件の最適化を図り、構造設計に反映することが急務となっている。

そこで、容器内の流動パターンを把握して最適な構造概念を構築するため、水による可視化実験を実施し、並行して熱流動に関する解析評価を行った。第 1 報⁽¹⁰⁾及び第 2 報⁽¹¹⁾では、特に衝突噴流による随伴流の 2 次元挙動に注目し、減速材容器を 2 次元的に模擬した二重管噴流試験体を用いて実施した実験と解析の結果、試験体内の流動パターンを明らかにし解析コードの有効性を確認した。本報では、冷減速材容器を忠実に模擬した扁平モデルの試験体を製作して実施した水流動実験及び解析結果について述べるとともに、これらの結果に基づいて実施した実機用冷減速材容器内の熱流動解析結果を示す。

2. 実験装置の概要

減速材基礎流動実験装置の水ループとレーザー流速分布計 (DANTEC PIV2000 システム、以下 PIV システムと呼ぶ) の概要を Fig.2.1 に示す。実験装置は、タンク、ポンプ、電磁流量計から成る水ループに、Fig.1.2 に示した扁平タイプの冷減速材容器を模擬したアクリル製の試験体 (内径 25mm、120(L)×120(H)×50(W)mm) を接続した構成である。水流量は約 0.25～1.5L/s (噴流流速:0.5～3m/s) の範囲の流動が可能で、また、噴流出口高さ (試験体において噴流を噴出する内管出口と容器底面との距離) を数 mm から約 50mm まで変えることができる。流れ場の計測には PIV システムを使用し、計測データはパーソナルコンピュータに入力して記録・保存した。実験は、ほぼ大気圧、室温条件下で行った。

3. 測定結果及び解析評価

実験は以下のように流量及び噴流出口高さを変えて実施した。

流量：0.25～1.23L/s (噴流流速：0.5～2.5m/s)

(レイノルズ数 $Re(=vDe/\nu)$, v :噴流速度, De :内管径, ν :動粘性係数)： $1.4 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$)

噴流出口高さ：10、30、50mm

Fig.3.1 に噴流出口高さを 10mm とした時に PIV システムで得られた画像の例を示す。計測面は中心軸断面で、正面 (ここで、中性子ビームを取り出す 120(L)×120(H)mm の面を正面とし、他方、120(H)×50(W)mm の面を側面とする) から見た平面である。下方からレーザーを照射しているため、えん曲構造の影響から底面が反射している。このため、この部分の PIV 測定データには流速の過誤ベクトルが多く含まれる可能性が高い。また、容器内壁近傍も側面のえん曲構造の影響からトレーサー粒子が見えない領域があるため、測定データへの影響が予想される。

流動解析には非構造格子・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計算した。圧力補正アルゴリズムは SIMPLE 法、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ 2 方程式モデル、境界層内部の流れは壁関数を用いた。解析条件は実験条件と合わせ、流体を水とした。Fig.3.2 に解析モデルを示す。メッシュ数は約 28 万のテトラメッシュである。

3.1 噴流出口高さ 10mm のときの流動パターン

(1) 正面から見た中心軸垂直断面の流動パターン

Fig.3.3 の上図に噴流出口高さを 10mm、入口流量を約 1.23L/s (噴流流速 2.5m/s) のときの容器内流速分布の測定結果を示す。水ループを上記流量条件で運転し、PIV のダブルパルスレーザーの間隔を $150\mu\text{s}$ として 1.4 秒間隔で計測し、流速のベクトルマップを取得した。図は、計測した 100 枚のベクトルマップを平均化処理したものである。

図に見られるように、水は内管から約 2.5m/s ($Re=7.0\times 10^4$) で容器内に噴出して容器底面に衝突し、その後底面に沿って流れている。中心部に流速が遅く見える領域が生じているが、ここから境界層が発達し始めるため、この領域の熱伝達率は一般的に高く、底面の冷却に有効である。流動パターンはほとんど対称的で、図中の A 点を中心とした再循環流が確認できる。再循環流の中心部の流速は遅くなっているが、ここで発生した再循環流の渦が容器出口に向かって絶えず流動していることが連続的な計測から観察できた。従って、図に見られる再循環流領域は平均化処理によって明確になった領域であり、確率的に流速が遅くなる領域といえる。このため、温度上昇への影響は小さいと考えられる。一方、容器出口に向かって側面壁付近から流速が次第に増していくが、内管壁近傍の図中の B 点で停滞域が生じている。B 点については、連続的な計測においても常に低流速の領域であった。減速材の温度上昇をもたらす核発熱密度分布は、鉛直方向では容器の底面部、水平方向では容器の中心部で最大となるため、この領域の温度上昇が最大となることが予想される。

Fig.3.3 の下図は実験と同じ条件 (噴流出口高さ 10mm、噴流流速 2.5m/s) の下で流速分布を解析した結果である。実験結果と解析結果を比較すると、ソフトウェアの関係で流速分布の色分けが異なるものの、ほぼ同じ流動パターンを示した。すなわち、内管から 2.5m/s で容器内に噴出した水は、底面と衝突して底面に沿って流れ、図中の A 点を中心とした再循環流が発生している。そして、容器出口に向かって側面壁付近の流速が次第に増加する一方で、内管壁近傍の図中 B 点で停滞域が生じている。

Fig.3.3 で容器底面から水平高さ約 10、60、90mm の高さにおいて、流速ベクトルの鉛直成分をプロットしたグラフを Fig.3.4 に示す。内管出口である噴流出口高さ 10mm の位置で実験結果と解析結果を比較すると、グラフは一致しているとはいえない。これは、まず実験側で、前述したように底面のレーザーの反射や側面のえん曲構造によってトレーサー粒子が見えにくく、良好なデータが得られていないと考えられ、中央部の分布も対称性を欠いている。また、噴流管の先端部に面取りしたときの不透明な部分があるため、多少流れが見えにくくなっていることも考えられる。一方、解析側では、使用した標準 $k-\varepsilon$ 2 方程式モデルは衝突領域で乱流強度エネルギー k を過大評価するといわれており⁽¹²⁾、これが影響していると考えられる。今後、衝突噴流の解析に適していると言われている高レイノルズ数乱流モデル (RNG $k-\varepsilon$ モデル) など他の乱流モデルを用いた解析を行い、比較検討する予定である。水平高さ 60mm、90mm はそれぞれ容器の中心及び容器出口

の直前手前の高さで、いずれも実験と解析の流速鉛直成分の分布は良く一致している。しかし、側面の近傍、すなわちグラフの両端で実験値が急激に下がっているのは、側面のえん曲構造によりデータが欠落しているためである。

以上のように、衝突領域での乱流モデルに関する課題はあるものの、流動パターン及び流速分布において解析結果は実験結果をほぼ再現しているといえる。

Fig.3.5 は、噴流流速を約 0.5m/s とした時の容器内流速分布の測定結果及び解析結果である。流動パターンは噴流流速 2.5m/s の時と同様に実験と解析でほぼ一致していることが確認できる。また、相対的に噴流流速 2.5m/s の流動パターンとほぼ同じパターンを表しており、今回の実験の流速範囲 0.5~2.5m/s ($Re : 1.4 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$) では容器内の相対的な流動状況はほとんど変わらないことが分かった。なお、実機の Re 数は約 4.1×10^5 を想定している。

(2)他断面の流動パターン

レーザーシートが中心線上に位置する(1)の測定及び解析結果に対し、レーザーシートを中心線から約 10mm 離れた位置で、正面から見た垂直断面の流動パターンの測定及び解析結果を Fig.3.6 に示す。(1)の流動パターンである Fig.3.3 では容器出口に向かって側面壁付近から流速が次第に増していくパターンが見られるが、Fig.3.6 では側面付近流速は減少している。また、全体的に流速が低く、再循環流の中心が Fig.3.3 では明確に確認できるのに比べて Fig.3.6 では不明瞭である。これは、容器内の 3 次元的な流れの影響が考えられる。すなわち、中心から離れた場所では容器のえん曲形状等の影響を多く受けやすく、測定面であるレーザーのスリットを横切る流れ成分が顕著なものと考えられる。解析結果は、上述のような流動パターンをよく再現している。

さらに、中心線から約 15mm 離れた場合の垂直断面の流動パターンの測定及び解析結果を Fig.3.7 に示す。この位置は入口噴流管が見えない断面であり、容器のえん曲形状によるレーザーの屈折等で容器出口周辺などの流れが十分に測定できていない。噴流管の出口から容器底面で噴流の影響により流速の高い領域があるが、底面から上部の流動パターンは、Fig.3.6 と同様に 3 次元的な流れの影響により複雑で全体的に流速が低い。解析結果は、容器上部周辺に測定結果と同様に左右対照的な再循環流の渦が確認できるなどほぼ測定結果を再現している。

Fig.3.8 に示すような容器の横方向から見た垂直断面及び容器の下方から見た水平断面の流動パターンについて、幾つかの断面位置で測定し、測定及び解析結果を比較した。Fig.3.9 から Fig.3.12 に、レーザーシートを正面の中心線上、中心線から約 15mm、30mm、45mm 離れた位置で容器の側面方向から見た垂直断面の流動パターンの測定及び解析結果を示す。いずれも容器のえん曲形状によって容器底部及び側面付近でのデータの信頼性は低いが、容器のえん曲形状の影響が非常に小さい中心部周辺での流動は解析結果と一致している。今後、容器底部及び側面付近での信頼性の高いデータが取得可能な測定方法を

検討する必要がある。

Fig.3.13 から Fig.3.18 に、レーザーシートを容器底面から 5、10、35、60、85、110mm の水平高さの位置にしたときの容器の下方から見た水平断面の流動パターンの測定及び解析結果を示す。測定結果の外側の曲線は容器の中心である水平高さ 60mm における形状を示し、その内側の線は容器のえん曲形状などの影響が少なく測定データの信頼性の高い領域を示している。Fig.3.13 及び Fig.3.14 は容器底面付近の水平断面なので、噴流管から噴き出した流速の高いベクトルが確認できる。また、測定結果において流動パターンが左右対称になっていないことから、入口噴流管が多少偏って（図では右寄りに）挿入されていることが分かる。このため解析結果と異なる流れが発生しているところがあるので、入口噴流管の偏りを考慮した温度解析なども今後実施していく予定である。

3.2 噴流出口高さ 30mm のときの流動パターン

噴流出口高さを 30mm、入口流量を約 1.23L/s（噴流流速約 2.5m/s）のときの容器内流速分布の測定及び解析を行った。Fig.3.19 に正面から見た中心軸垂直断面の流動パターンを示す。噴流出口高さ 10mm のとき（Fig.3.3）と同じように、水は内管から約 2.5m/s で容器内に噴出して容器底面に衝突して底面に沿って流れ、左右対称的な再循環流が生じているのが確認できる。その後、容器出口に向かって側面壁付近から流速が次第に増していくが、内管壁近傍で停滞域が生じている。解析結果についても同様の流動パターンが確認できる。

Fig.3.19 で容器底面から水平高さ約 10、30、60、90mm の高さにおいて、流速ベクトルの鉛直成分をプロットしたグラフを Fig.3.20 に示す。内管出口である噴流出口高さ 30mm と容器底面近傍の 10mm の位置では、実験結果と解析結果で多少のずれがある。これは前述同様、容器のえん曲構造及び噴流管の加工の理由や、解析における乱流モデルなどの影響のためと考える。容器の中心及び容器出口の直前手前の高さである水平高さ 60mm、90mm では、いずれも実験と解析の流速鉛直成分の分布は良く一致している。ただし、側壁近傍の流速は噴流出口高さ 10mm の Fig.3.4 の方が大きく、側壁での発熱を冷却する観点からは噴流出口高さ 10mm の方がよい。

3.3 噴流出口高さ 50mm のときの流動パターン

噴流出口高さを 30mm、入口流量を約 1.23L/s（噴流流速約 2.5m/s）のときの容器内流速分布の測定及び解析を行った。Fig.3.21 に正面から見た中心軸垂直断面の流動パターンを示す。噴流出口高さ 10mm、30mm のときと同じように、水は内管から約 2.5m/s で容器内に噴出したあと容器底面に衝突し、その後底面に沿って流れ、左右対称的な再循環流が生じている。その後、容器出口に向かって側面壁付近から流速が次第に増していくが、内管壁近傍で停滞域が生じている。解析結果についても同様の流動パターンが確認できる。

Fig.3.21 で容器底面から水平高さ約 10、30、50、60、90mm の高さにおいて、流速ベ

クトルの鉛直成分をプロットしたグラフを Fig.3.22 に示す。内管出口である噴流出口高さ 50mm と容器底面近傍の 10mm の位置では多少実験結果と解析結果でずれがあるが、その他は良く一致しており、解析結果は実験結果をほぼ再現している。側壁近傍の流速は噴流出口高さ 30mm の場合よりも低下しており、側壁の冷却の観点からは、噴流管を容器底面から離さないようにした方がよい。

4. 冷減速材容器内の熱流動解析

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で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。

4.1 解析条件

4.1.1 解析モデル

Fig.4.1 に熱流動解析に用いた解析モデルを示す。Fig.4.1 の上の図は正面から見た中心軸垂直断面で、側面及び底面のアルミ合金板厚は 4mm である。下の図は横から見た中心軸垂直断面で、中性子ビームを放出する面の最小板厚は 2mm である。噴流出口高さを 10mm とし、流量は運転条件として予定している 1.5L/s (噴流流速 3.0m/s) とした。流体部分の寸法は前章の実験及び解析のものと同じである。本解析では、減速材容器を構成するアルミ合金の発熱を初めて考慮する。これにより、実機の温度分布をより忠実に再現することが可能となる。

4.1.2 水素の物性値

超臨界水素の詳細なデータが不明なため、解析には以下に記す 20K の飽和状態の液体水素物性値⁽¹³⁾を使用した。

- ・密度 ρ : 71.49 kg/m³
- ・粘性係数 η : 13.1 μ Pa·s
- ・比熱 C_p : 9454 J/kg·K
- ・熱伝導率 λ : 0.1184 W/m·K

4.1.3 発熱密度

Fig.4.2⁽¹⁴⁾に、ニュートロニクス解析の結果による液体水素及びアルミ合金の発熱密度分布を示す。図のように発熱密度は液体水素よりもアルミ合金の方が大きい、体積を勘案した総発熱量は液体水素が 3.2kW、アルミ合金が 0.94kW となる⁽¹⁴⁾。なお、Fig.4.2 は最終目標である 5MW 陽子ビーム運転時の発熱密度であるが、今回は当面の目標である 2MW 陽子ビーム運転に換算して解析を行うこととした。このとき、Fig.4.2 に示す発熱密度に 25%の裕度を与え、水平方向にはその発熱密度が一様に分布する保守的な条件を与えた。このような条件の下で、液体水素及びアルミ合金の発熱密度分布を下記のフィッティング関数で表し、熱流動解析条件として入力した。

Energy deposition of liquid hydrogen (W/cm³)

$$= -0.00084381 x^3 + 0.034134 x^2 - 0.5187 x + 3.6121$$

Energy deposition of aluminum alloy (W/cm³)

$$= -0.0018644 x^3 + 0.067421 x^2 - 0.90428 x + 6.2958$$

x : 冷減速材容器底面からの距離(cm)

4.2 解析結果

前節の解析条件から求めた流速分布の解析結果を Fig.4.3 に示す。最上段の図は冷減速材の流体部分の表面、中央の図は正面から見た中心軸垂直断面、最下段の図は横から見た中心軸垂直断面の流速分布を表している。冷減速材の表面では、底面付近に衝突噴流によって約 3~4m/s の流速の速いベクトルが放射状に上に向かっている。その後流速が下がり、容器側面では約 1~2m/s で出口に向かって流れている。正面から見た中心軸垂直断面の流速分布では、前章の流動パターンと同様に、液体水素が噴流管から 3m/s で容器内に噴出したあと容器底面に衝突し、その後底面に沿って流れ、底面付近に左右対称的な再循環流を生じている。その後、容器出口に向かって側面壁付近から流速が次第に増していくが、内管壁近傍で停滞域を生じている。横から見た中心軸垂直断面の流速分布では、容器底面に衝突したあと反転した液体水素は直ぐに流速が下がり、容器中央付近で下向きに流れを変えて再循環流を生じている。容器中央部より上の部分は流速が 1m/s 以下の領域で、容器出口では入口流速と同程度となる。

Fig.4.4 及び Fig.4.5 に温度分布の解析結果を示す。Fig.4.4 の上の図は容器構造材であるアルミ合金の表面、下の図は流体部分の表面の温度分布を表している。両者とも同様な温度分布を示しており、底面付近に温度の低い領域、正面中央部及び側面に温度の高い領域が確認できる。底面付近は上述の流速分布から流速の速い領域なので、温度上昇が低く

抑えられている。反対に、正面中央部は流速が遅いため温度上昇が大きい。側面の温度上昇が大きい理由は、容器構造材であるアルミ合金の板厚を構造強度を維持するために正面より厚くしているため、体積発熱が増加したためと考えられる。

Fig.4.5 の上の図は正面から見た中心軸垂直断面、下の図は横から見た中心軸垂直断面の温度分布を表している。上の図では、3.1 節(1)で述べたように、Fig.4.3 に示した再循環流の中心部は確率的に流速が遅くなっているために温度上昇は起こらず、内管壁近傍に生じた停滞域で 2K 程度温度が上昇している。また、Fig.4.2 に示したようにアルミ合金の発熱密度の方が液体水素より大きいので、流体部周りのアルミ合金の温度上昇が顕著である。特に、上述したように容器側面及び底面の板厚が厚いため 3K 以上温度が上昇し、底面で液体水素の衝突噴流による冷却作用があるものの、底面両端で最高温度 23.8K まで上昇している。容器上部でアルミ合金の温度が下がっているのは、Fig.4.2 に示したようにターゲットから離れるにしたがって発熱密度が小さくなるためである。Fig.4.5 の下の図でも Fig.4.3 に見られる液体水素の流速が低い領域で温度上昇があるが、2K 程度である。この液体水素の流速が低い領域では除熱効果が小さいために、アルミ合金の温度上昇が顕著に表れている。一方、衝突噴流で流速の高い領域の容器壁は、アルミ合金の板厚が容器側面や底面よりも薄いので、液体水素の流動によって確実に除熱されていることが分かる。

このように冷減速材容器の発熱を考慮して熱流動解析を行った結果、アルミ合金の発熱が大きいために、容器壁に接している流体部表面で最大約 3.8K の温度上昇が生じた。しかし、流体部表面を除いた容器内部の液体水素についていえば、温度上昇は約 2K 以下に抑えられた。これは、中性子収率を維持するために目標とした温度上昇 3K 以内という条件を十分満たしており、冷減速材容器の構造設計に対して熱流動条件は十分に満足できる見通しを得た。

5. 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1報、第2報に引き続き、冷減速材容器を忠実に模擬した扁平モデルの試験体を使って水流動実験及び解析を行った。容器内流動状況の可視化により、再循環流や流れの停滞域などの流動パターンが明らかとなり、噴流速度を0.5~2.5m/sとした時の流動パターンは相対的にはほぼ同一であることが分かった。噴流出口高さを10、30、50mmとした時の流動パターンについても大きな違いは見られなかった。STAR-CDコードを用いた解析結果は測定結果をよく再現した。

以上の結果を踏まえて、STAR-CDコードを用いて実機用冷減速材容器内の液体水素流速分布及び温度分布を解析した。液体水素の流速分布は水を用いた本実験結果の流動パターンとよく一致し、再循環流や流速の遅くなる領域が確認できた。2MW陽子ビーム運転における冷減速材容器の発熱を考慮した温度分布から、容器内部の液体水素の温度上昇は約2K以下に抑えられ、中性子収率を維持するために目標とした温度上昇3K以内という条件を十分満足することが分かった。これにより、現行の冷減速材容器の構造設計に対して熱流動に関しては成立する目処が得られた。今後、構造強度等に関する構造設計の検討結果と併せて最終的な評価を行い、詳細設計を進めていく予定である。また、冷減速材システムについても設計検討を進めており、液体窒素を用いた流動実験やシステム解析等を実施する予定である。

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稲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) R. Hino, et al., “Present Status of Target R&D at JAERI – JAER/KEK Joint Project –”, 6th ESS General Meeting, Portonovo near Ancona, Italy, Sep. 20-22 (1999)
- (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 スポ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,” 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, Utica (1998)
- (8) T. A. Broome, “Prospects for Targets and Methane Moderators at ISIS,” 13th 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 流動パターン測定と流動解析”, JAERI-Tech 99-014 (1999)
- (11)麻生智一、他, “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”, JAERI-Tech 99-049 (1999)
- (12)数値流体力学編集委員会, “数値力学シリーズ 3 乱流解析”, 東京大学出版会, pp.35-37 (1995)
- (13)日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集”(1983)
- (14)勅使河原誠(原研 核破碎中性子利用研究室)私信

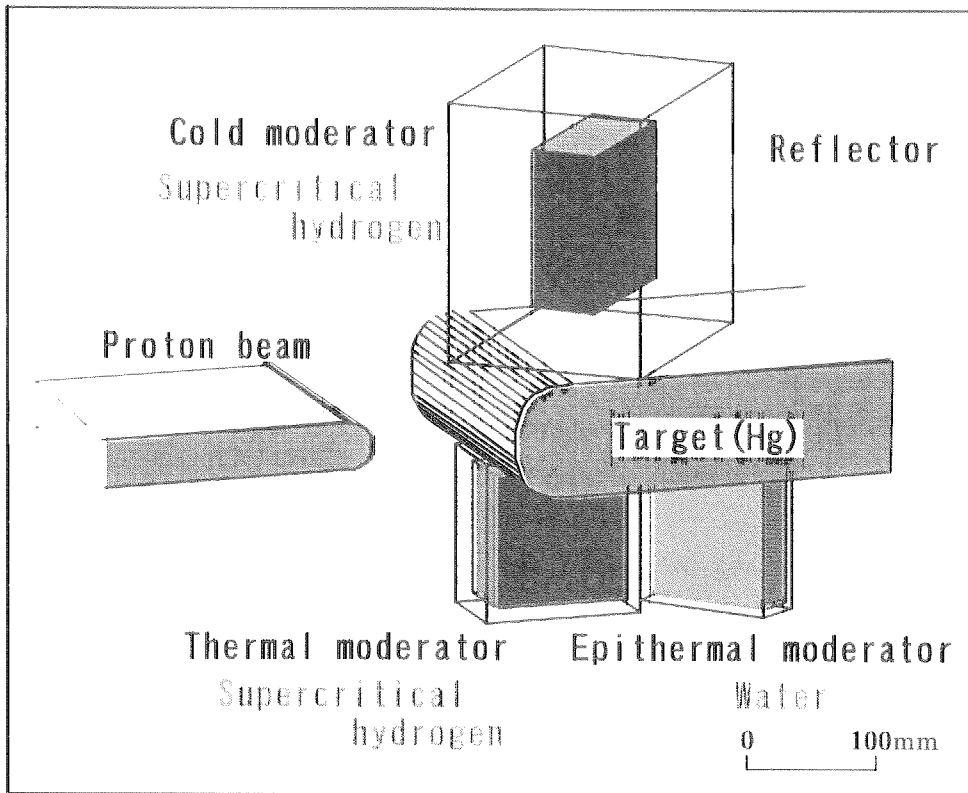


Fig.1.1 Layout of target and moderators.

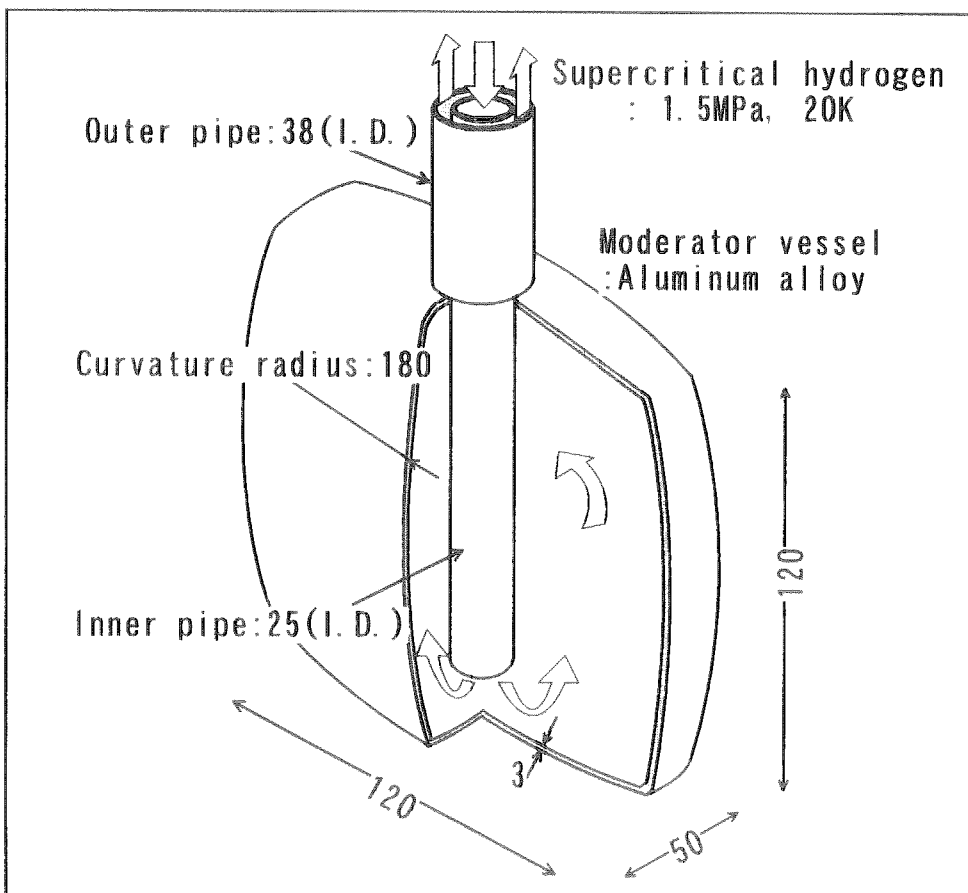
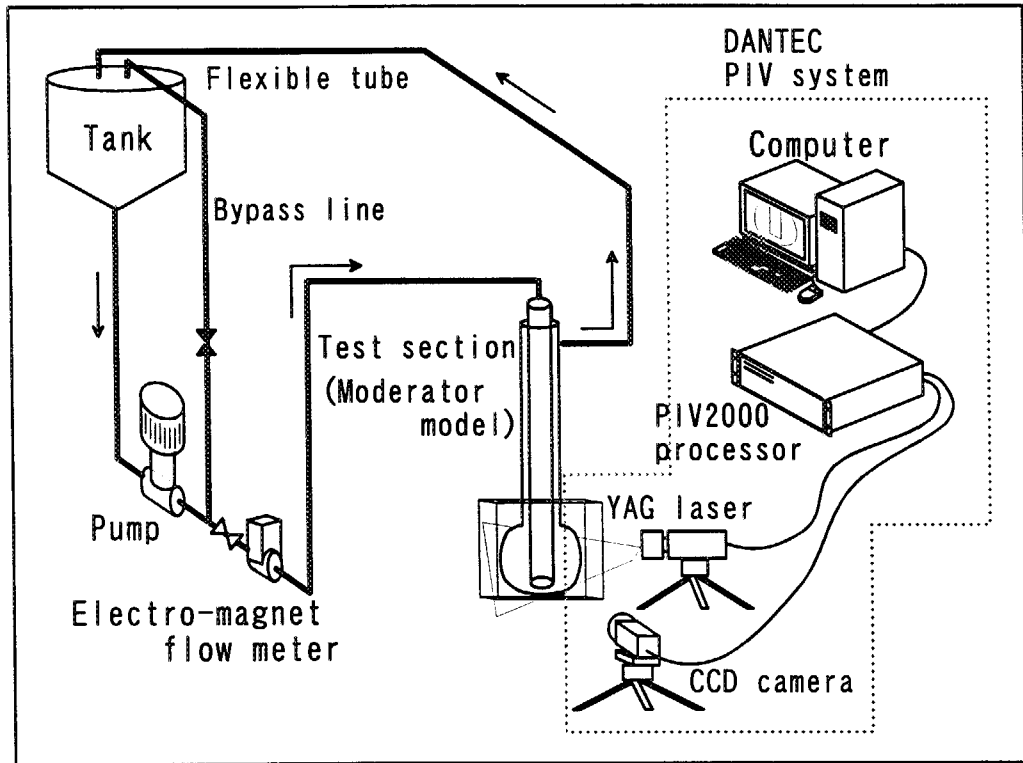
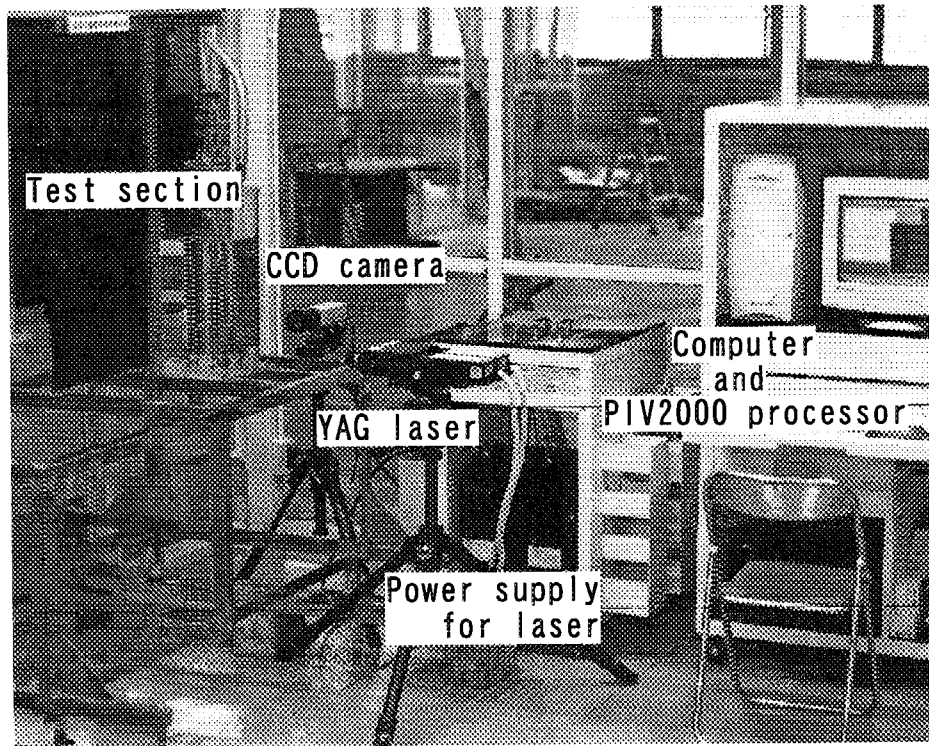


Fig.1.2 Concept of the cold moderator.



(a) Flow diagram.



(b) Outer view.

Fig.2.1 Experimental apparatus for flow pattern measurement.

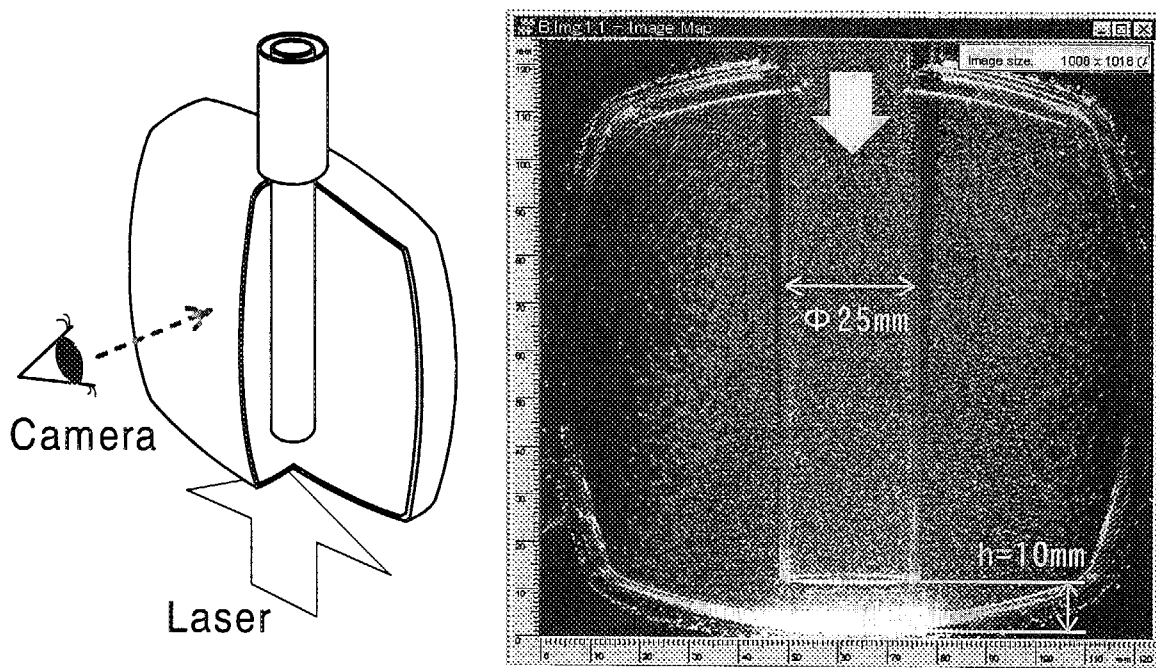


Fig.3.1 Particle image obtained by PIV at $h=10\text{mm}$

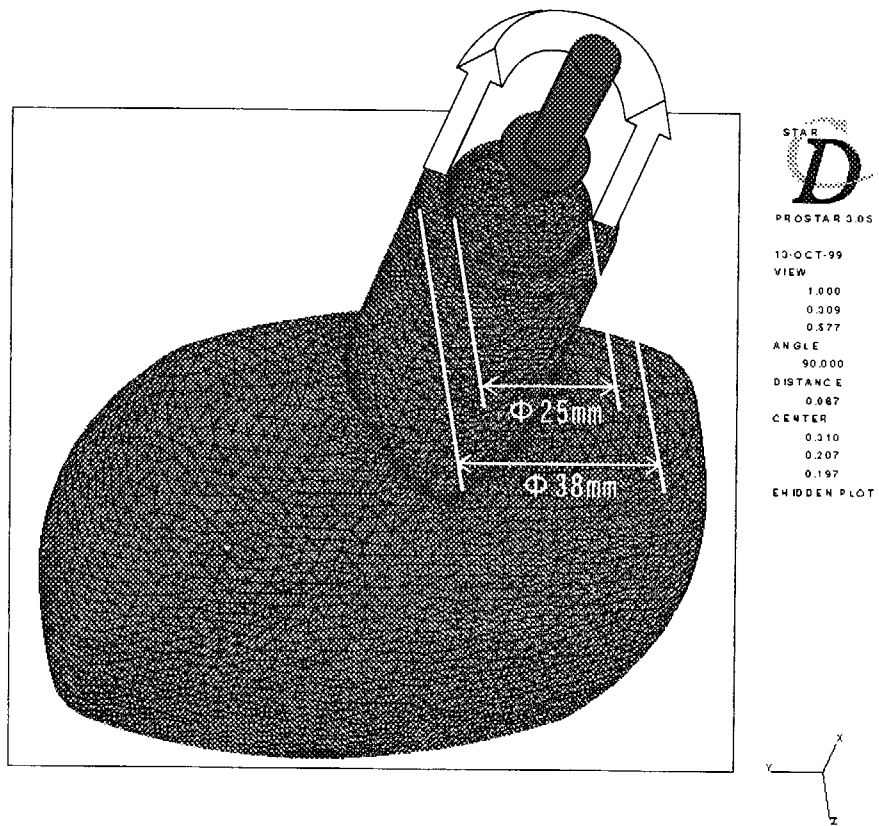


Fig.3.2 Model of moderator vessel for hydraulic analysis

This is a blank page.

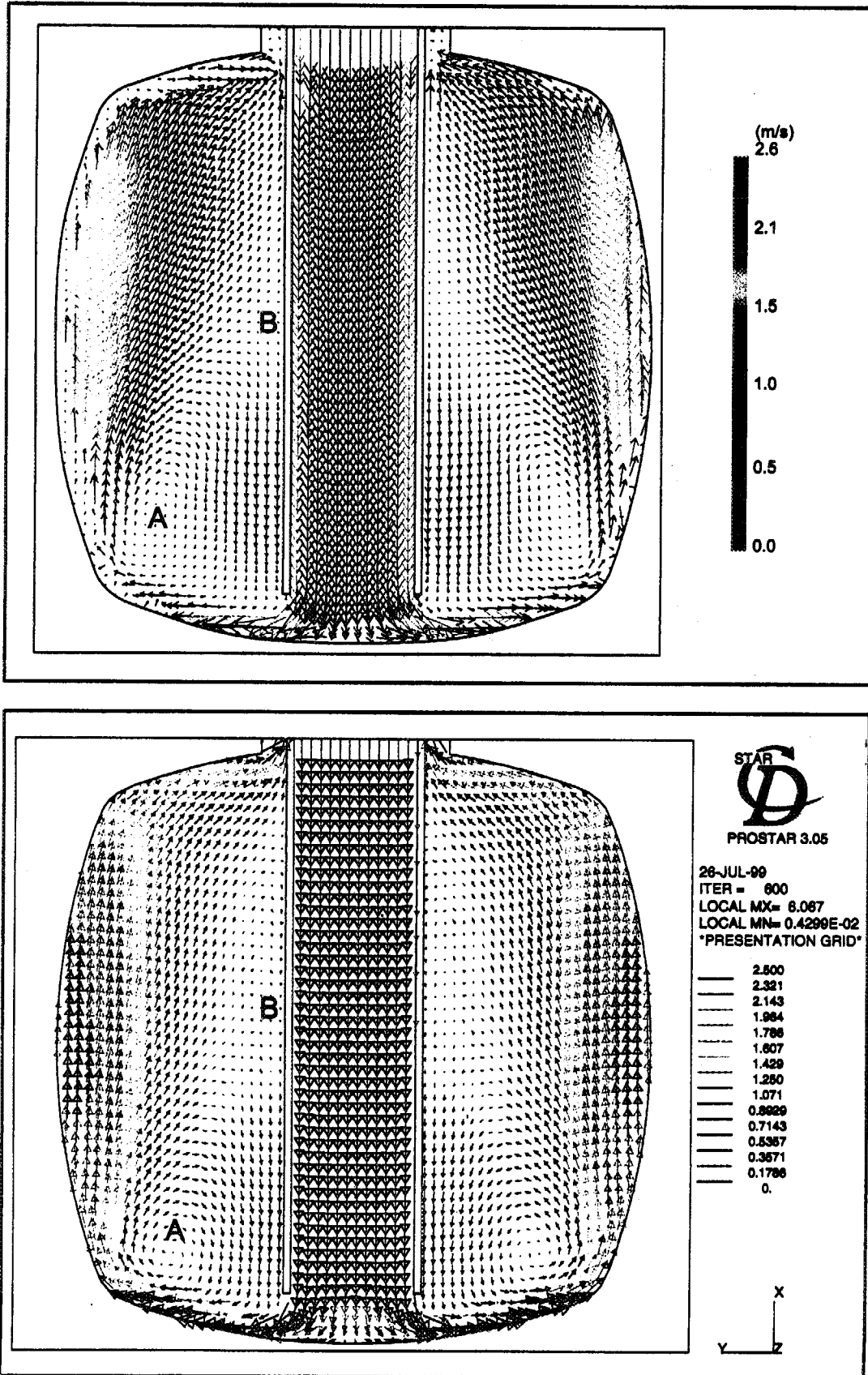


Fig.3.3 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow.

This is a blank page.

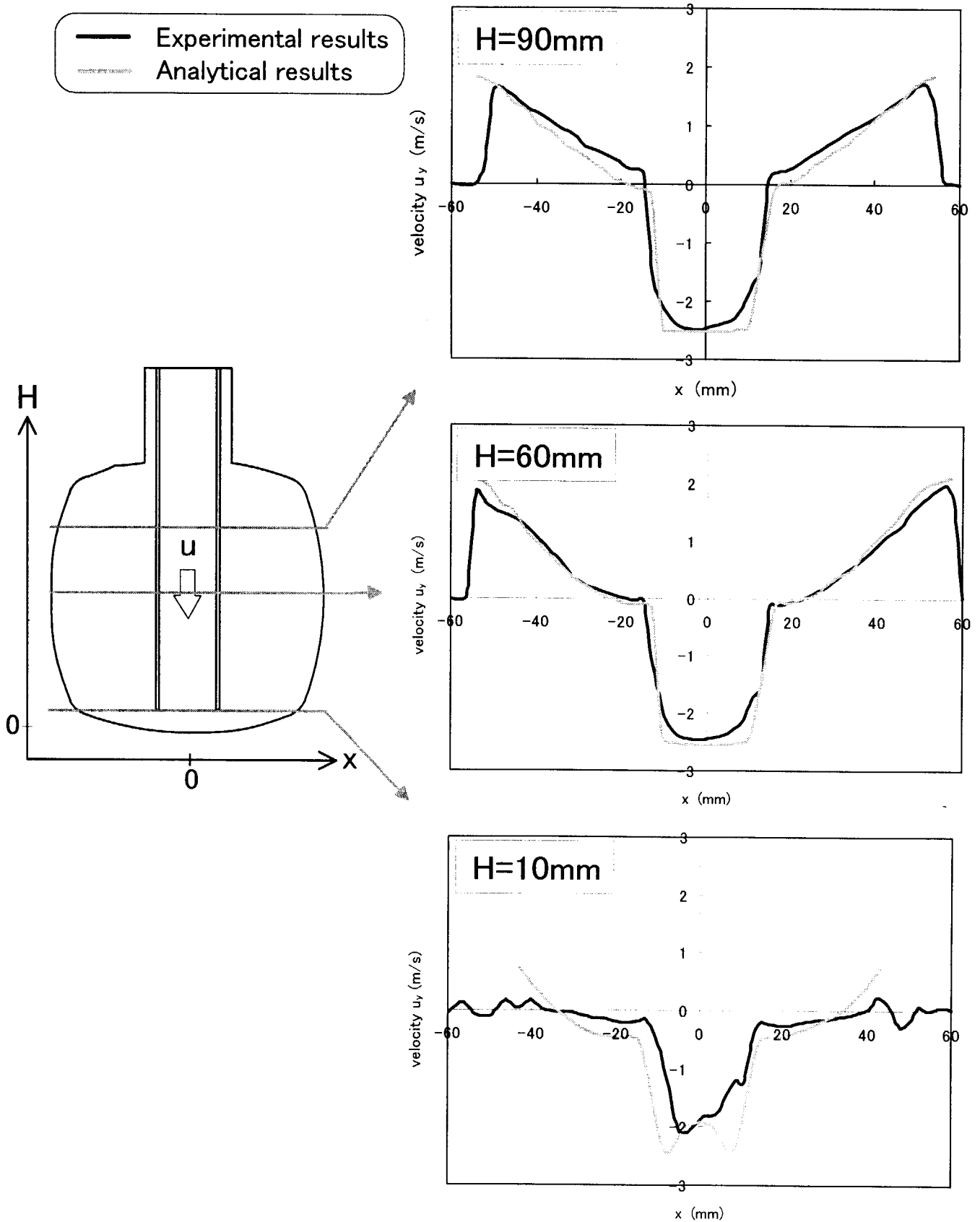


Fig.3.4 Comparison of experimental and analytical velocity distributions.

This is a blank page.

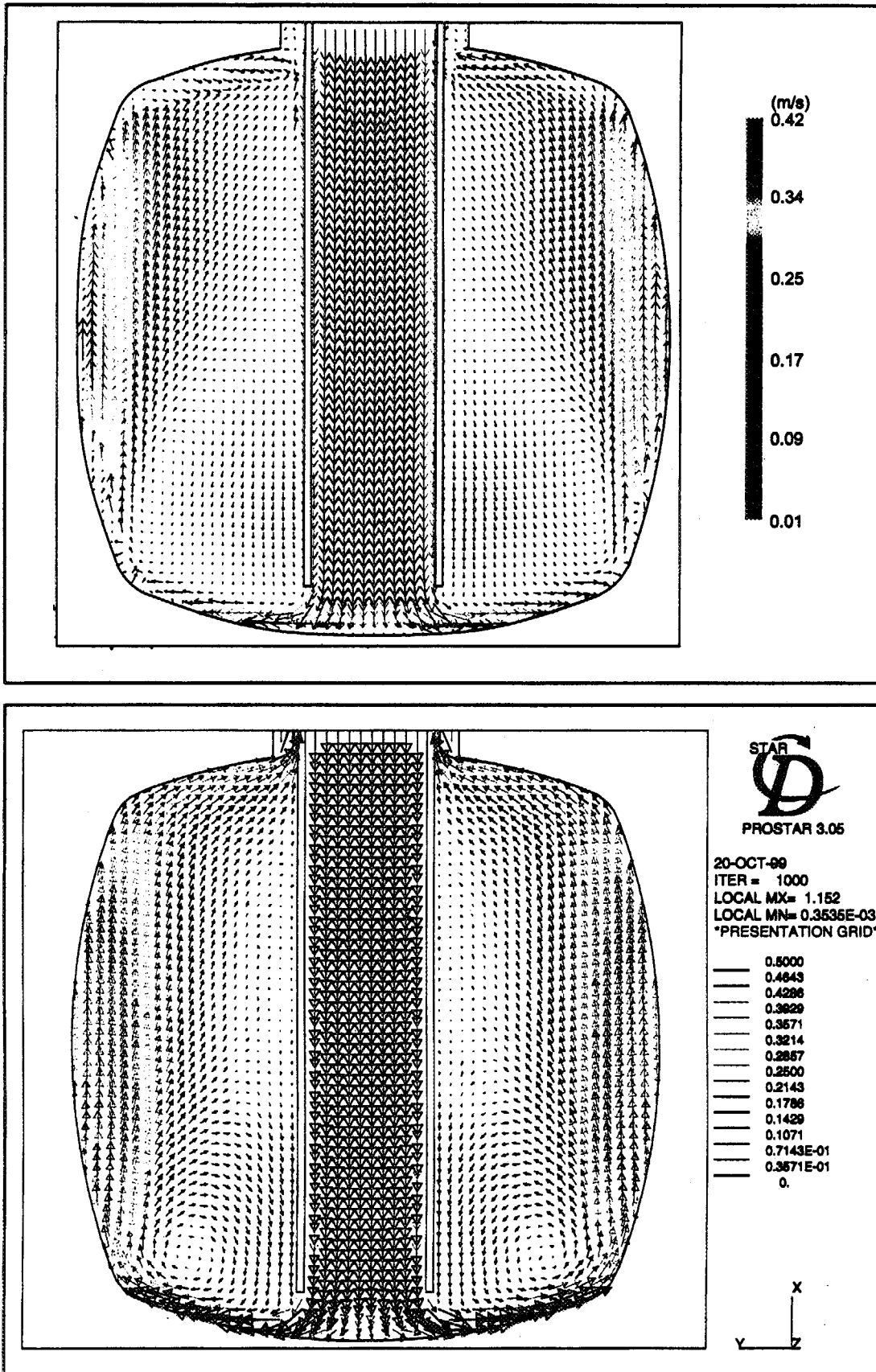


Fig.3.5 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 0.5m/s of water jet flow.

This is a blank page.

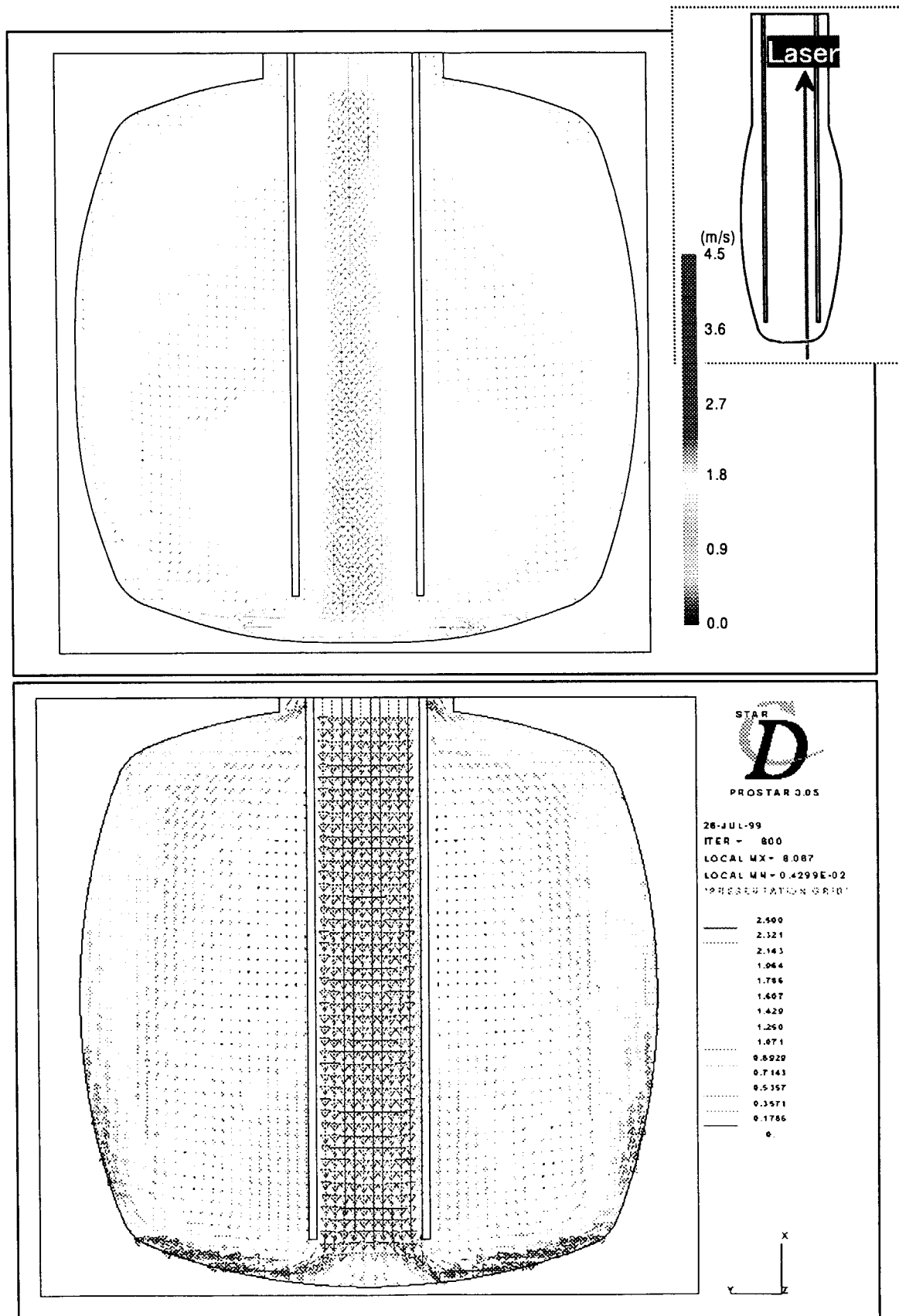


Fig.3.6 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 10mm from the center.

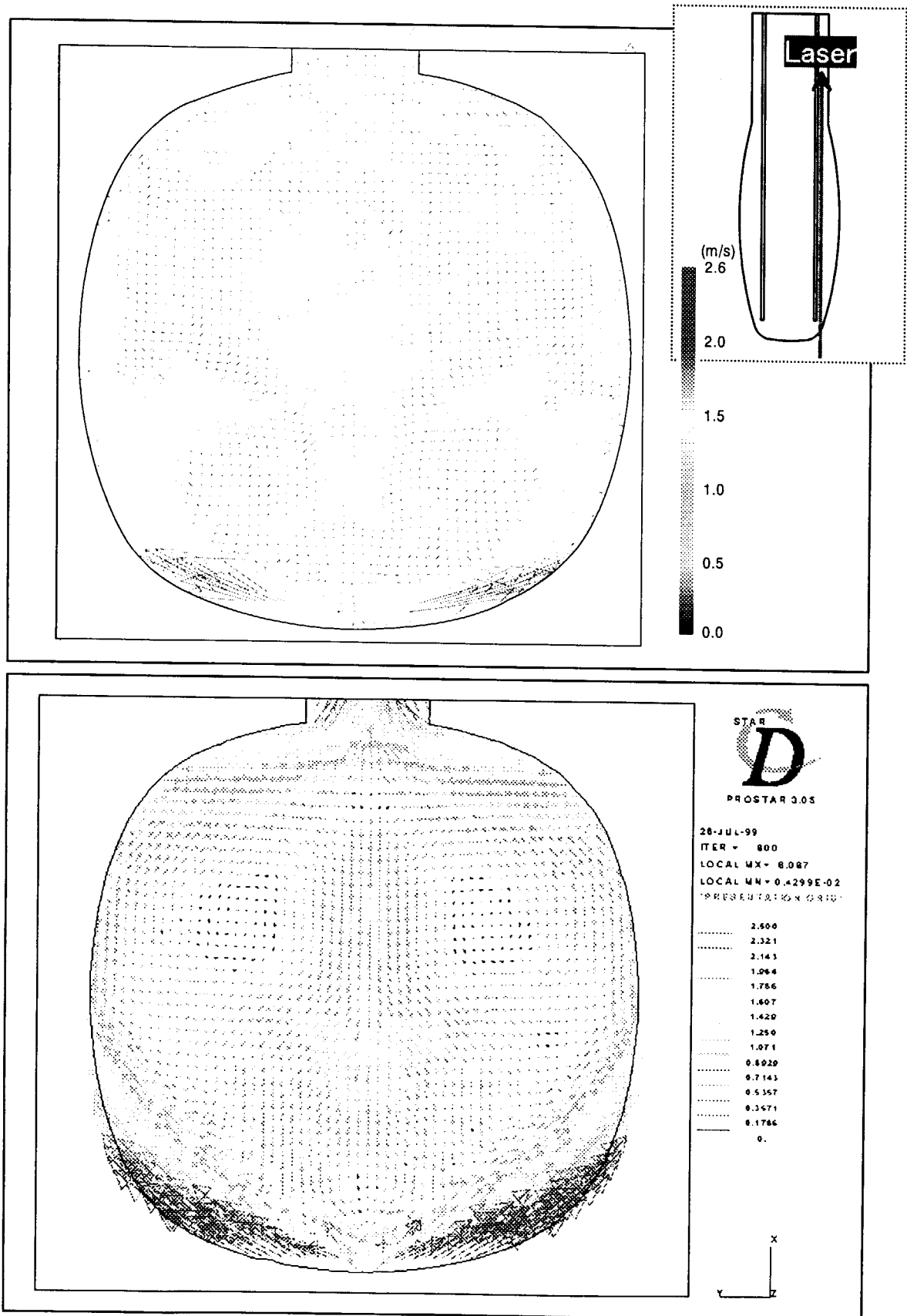


Fig.3.7 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 15mm from the center.

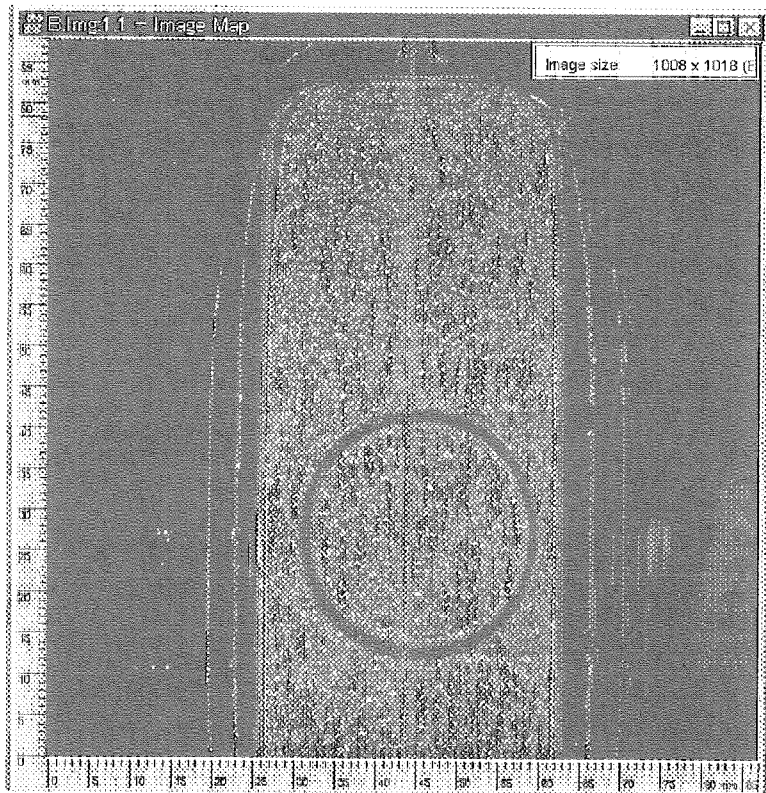
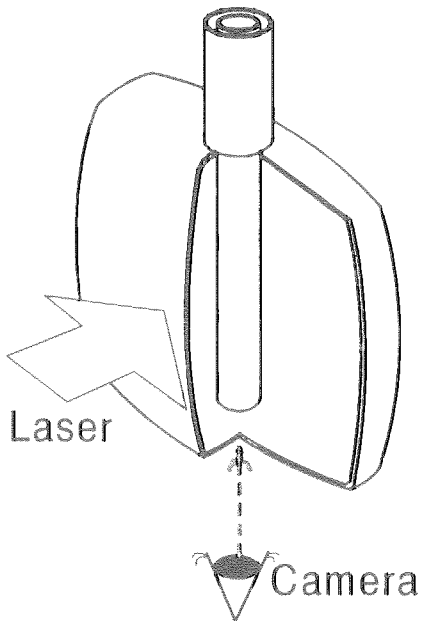
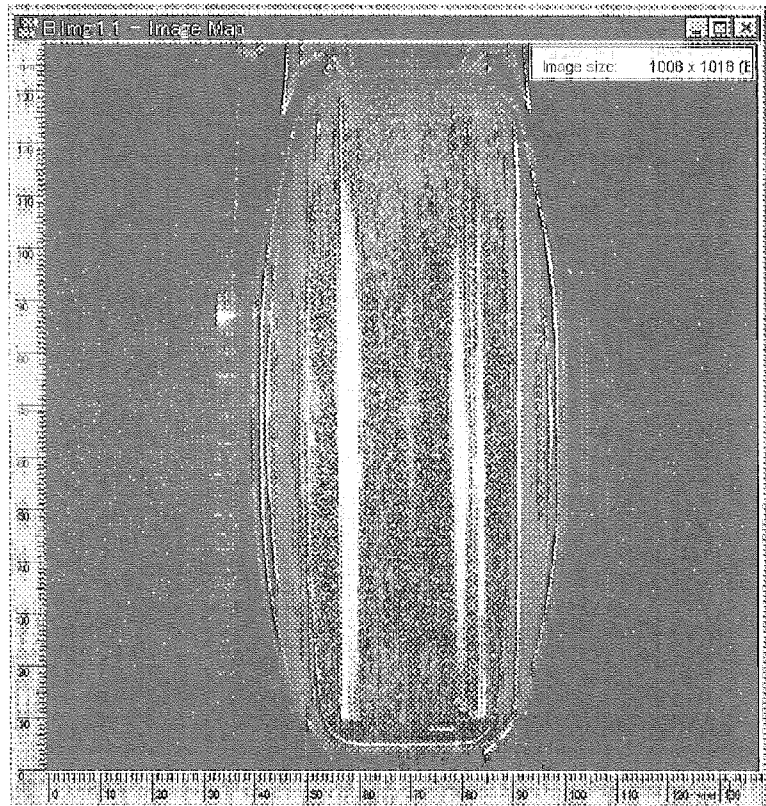
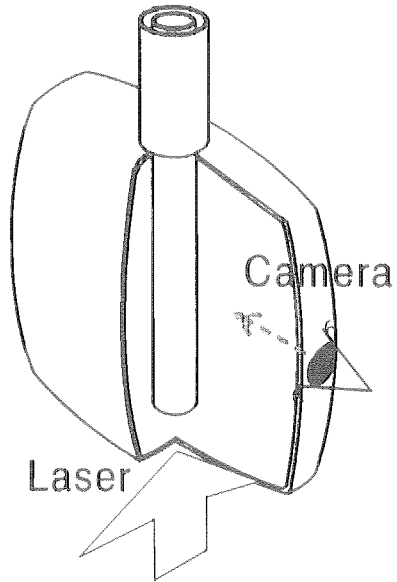


Fig.3.8 Particle image obtained with changing view points by PIV at $h=10\text{mm}$.

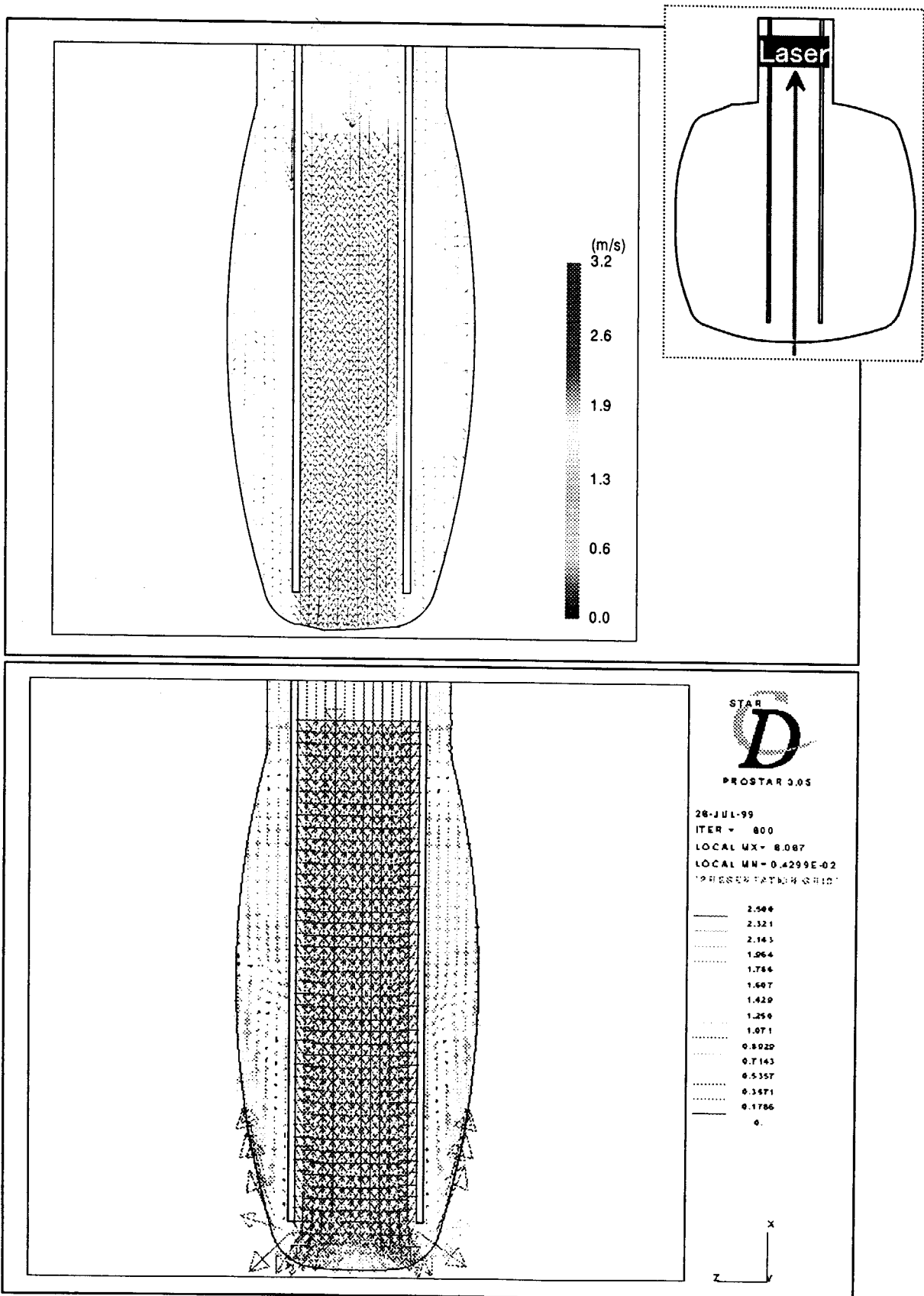


Fig.3.9 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, center.

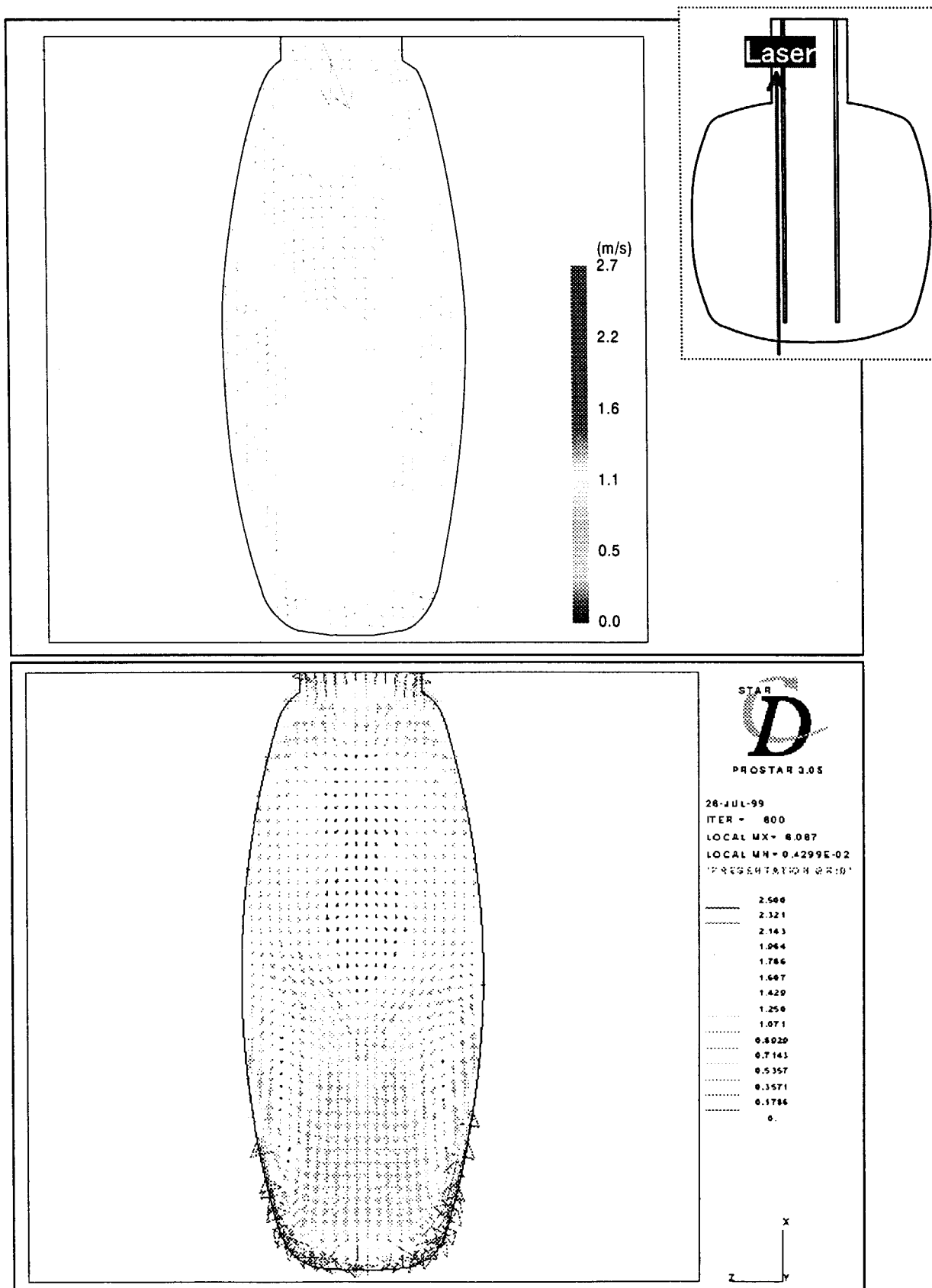


Fig.3.10 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 15mm from the center.

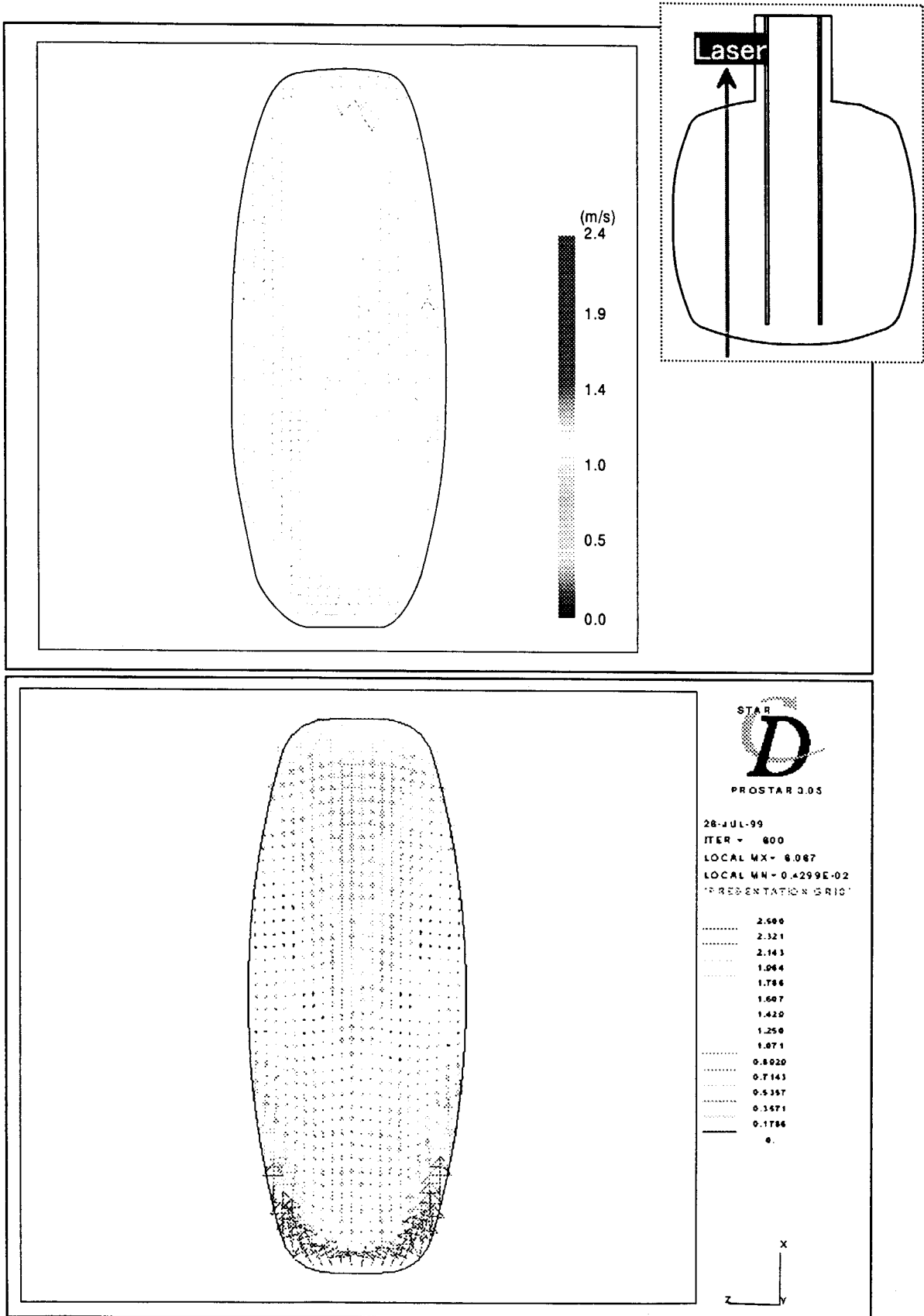


Fig.3.11 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 30mm from the center.

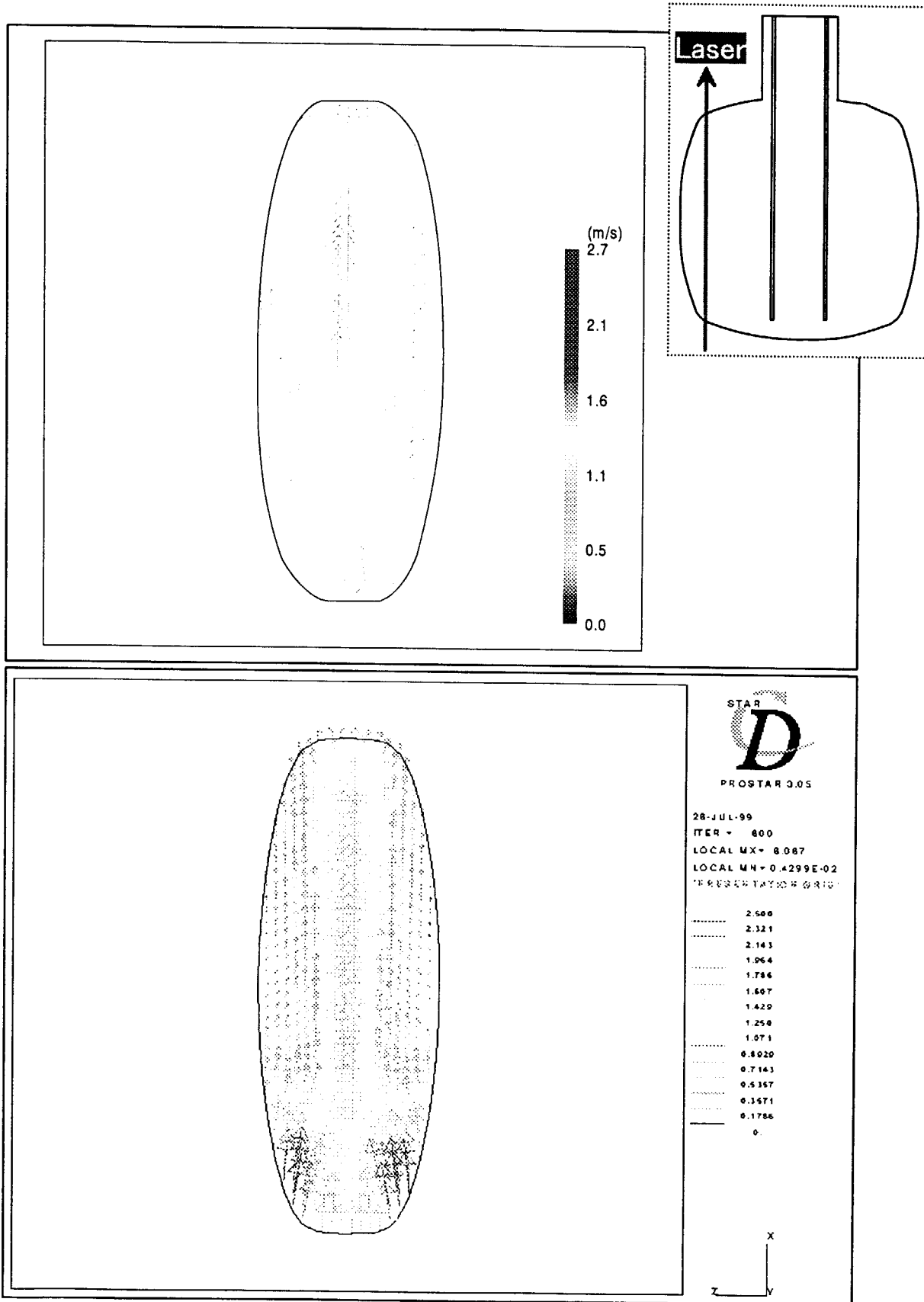


Fig.3.12 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 45mm from the center.

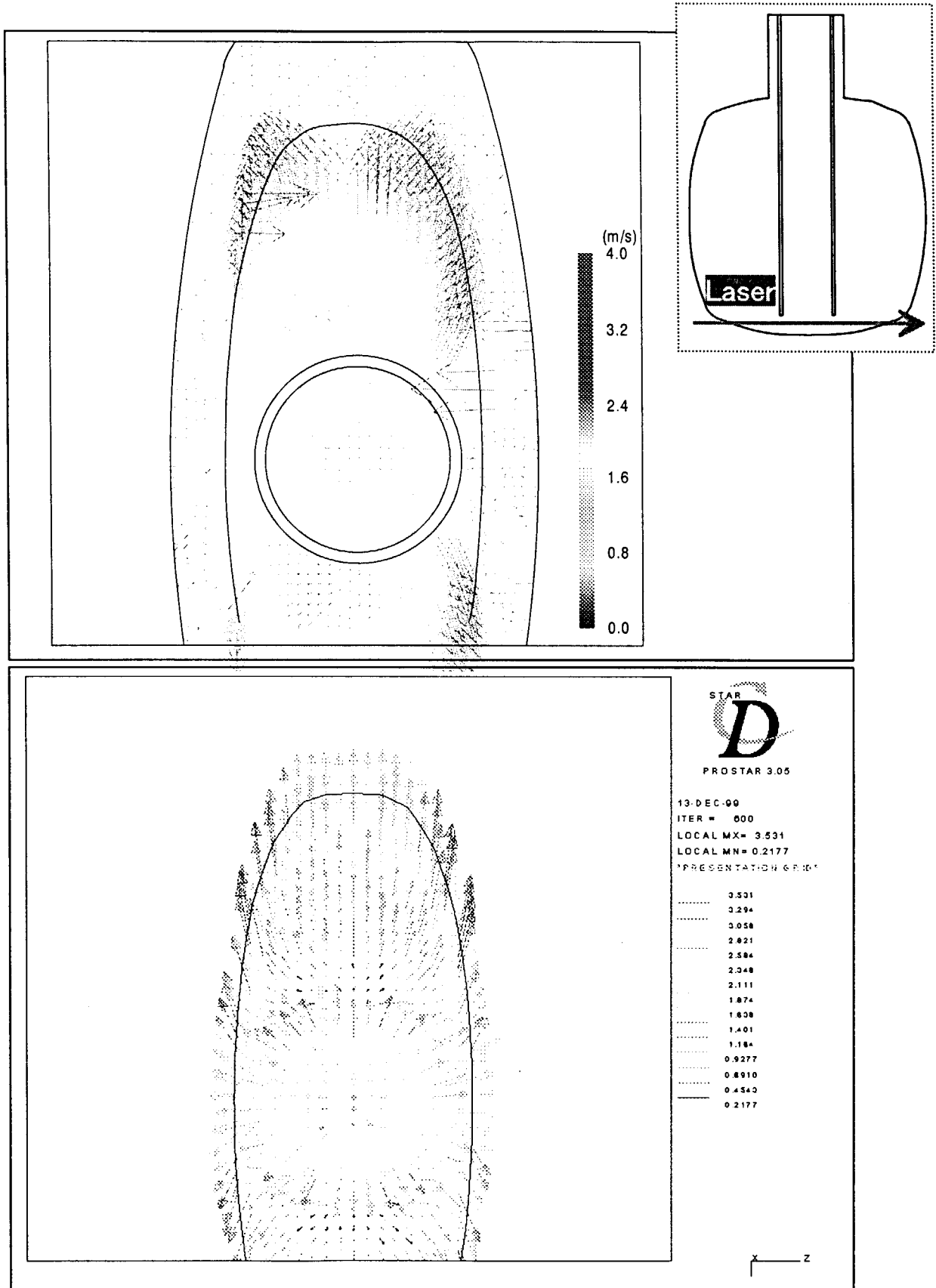


Fig.3.13 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 5mm from the bottom.

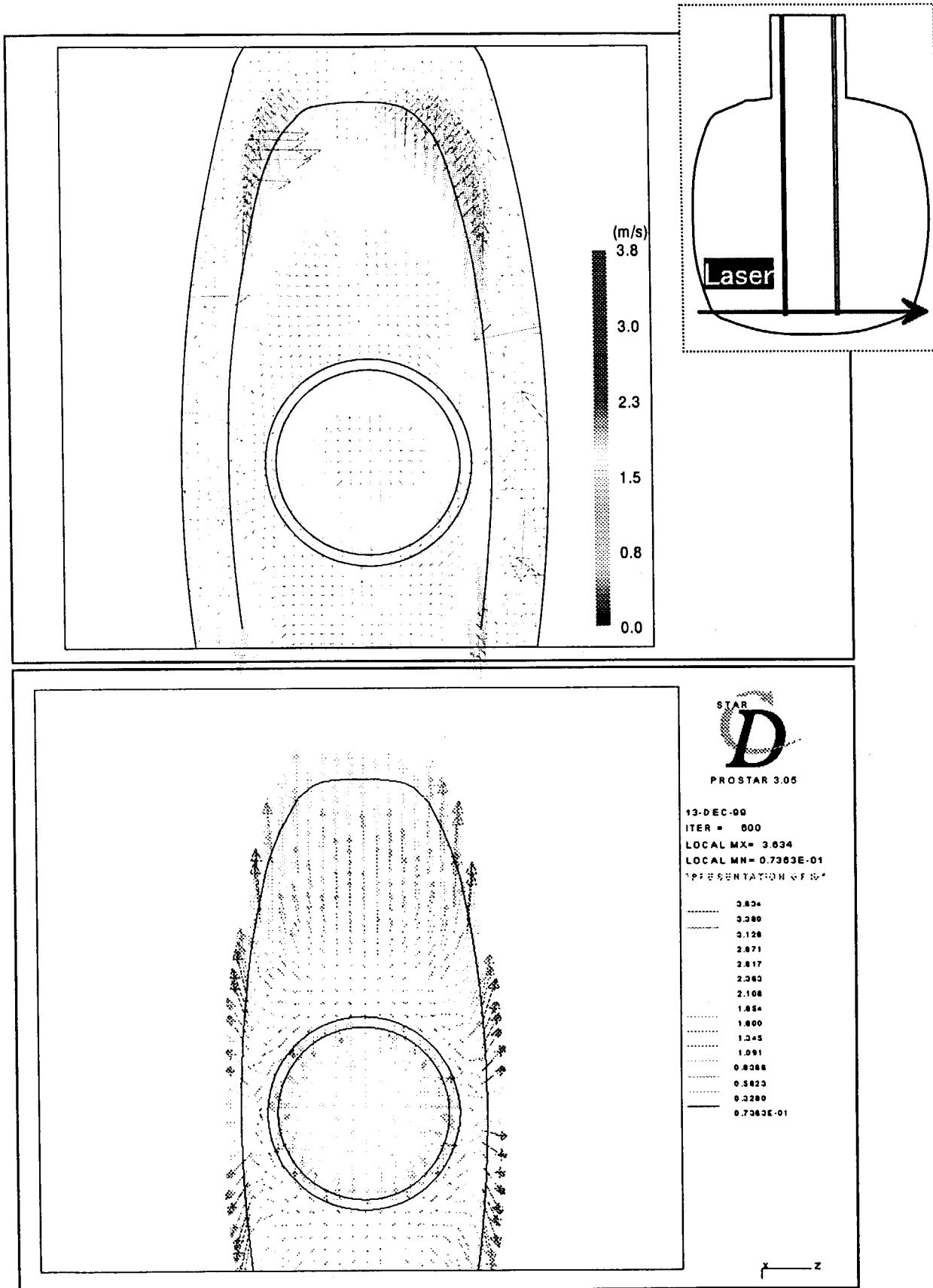


Fig.3.14 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 10mm from the bottom.

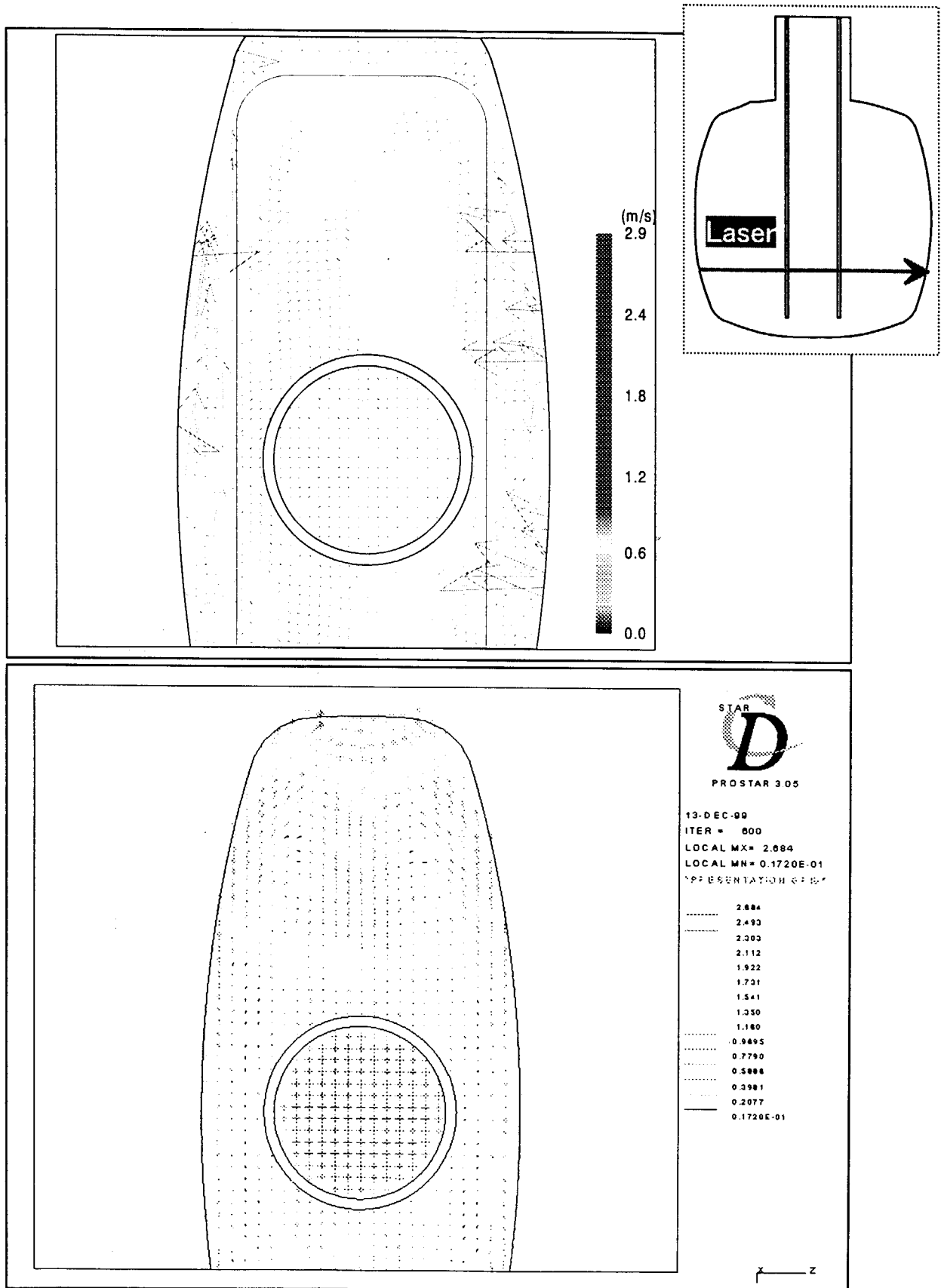


Fig.3.15 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 35mm from the bottom.

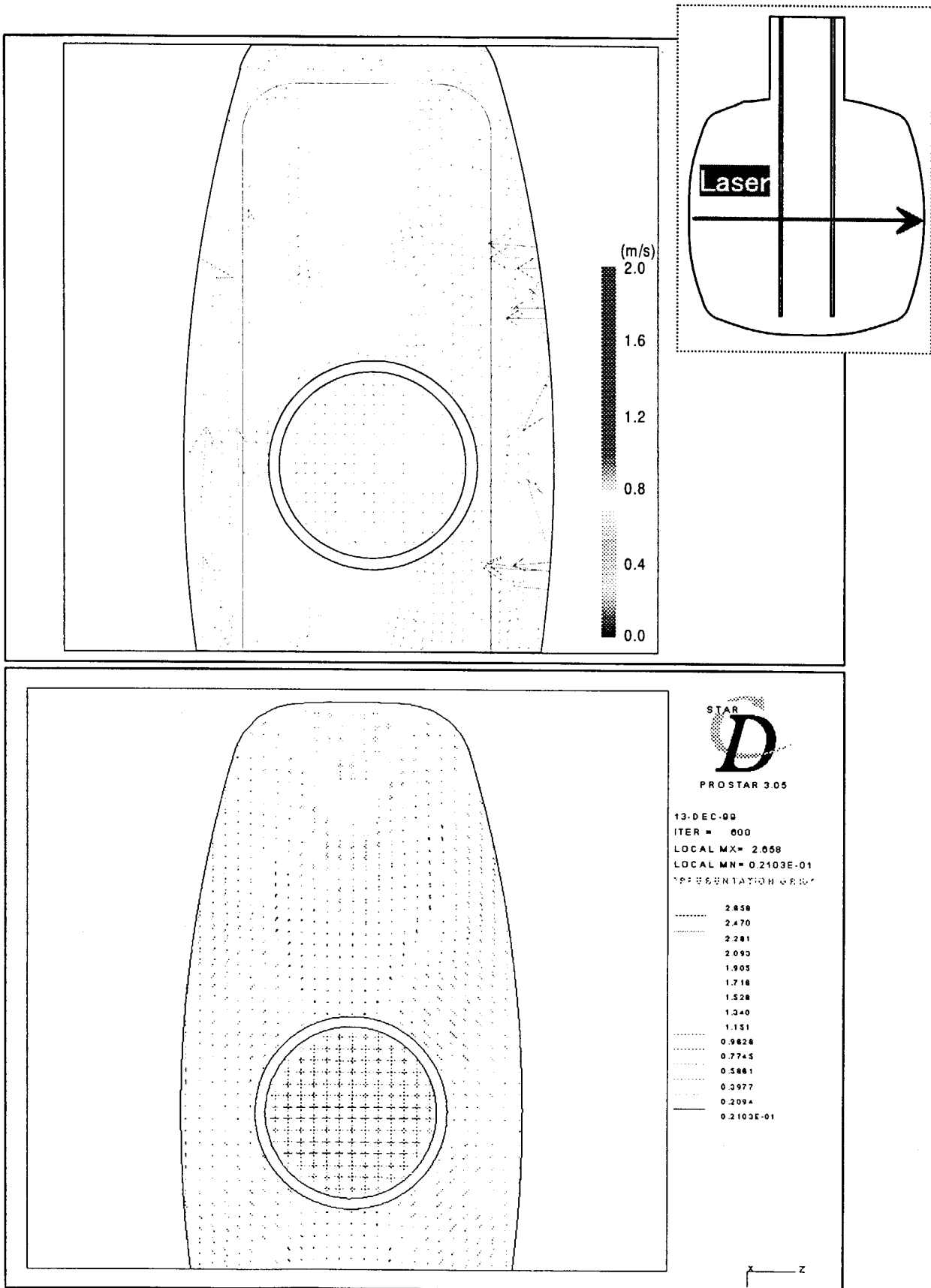


Fig.3.16 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 60mm from the bottom.

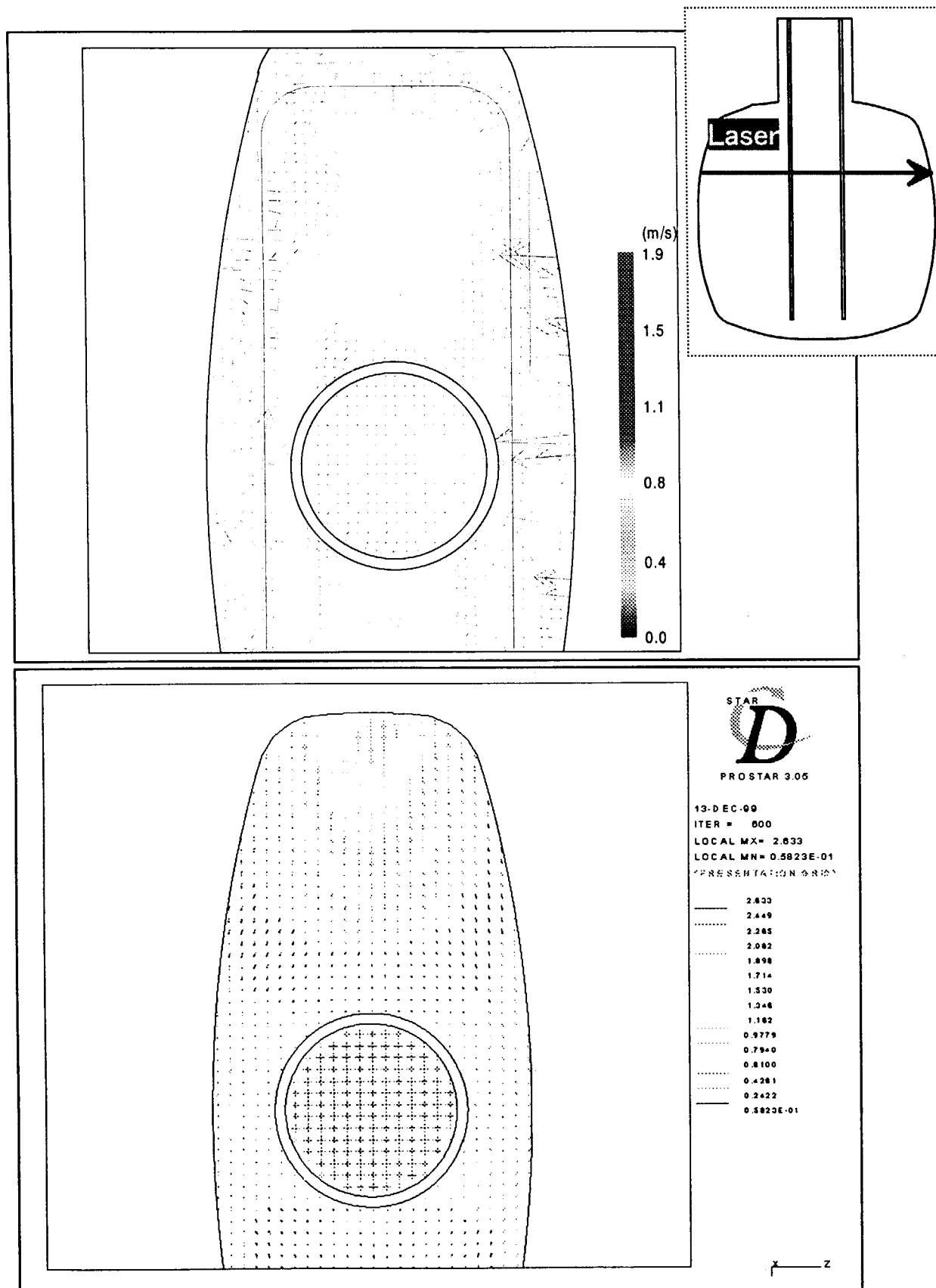


Fig.3.17 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 85mm from the bottom.

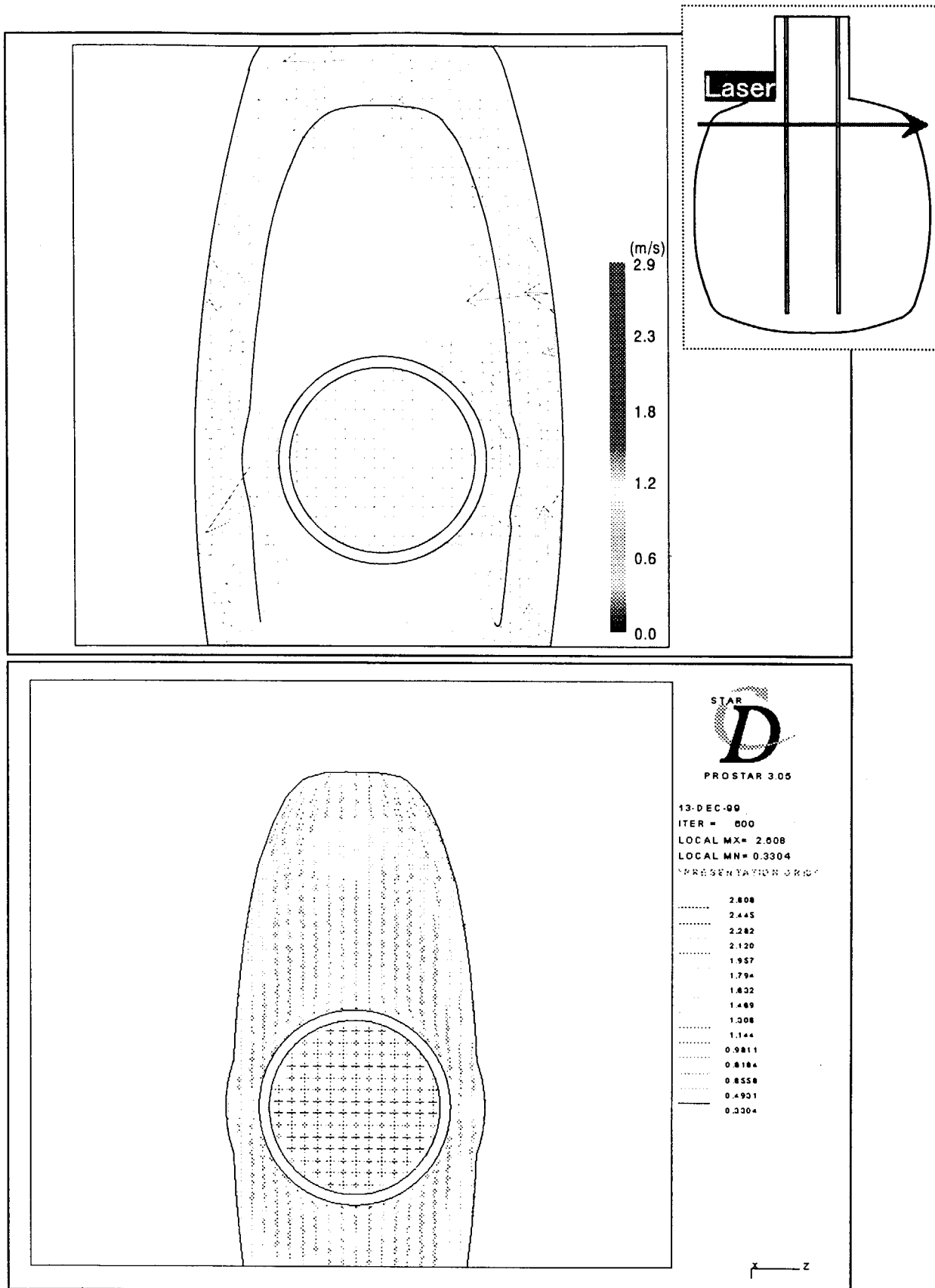


Fig.3.18 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow, 110mm from the bottom.

This is a blank page.

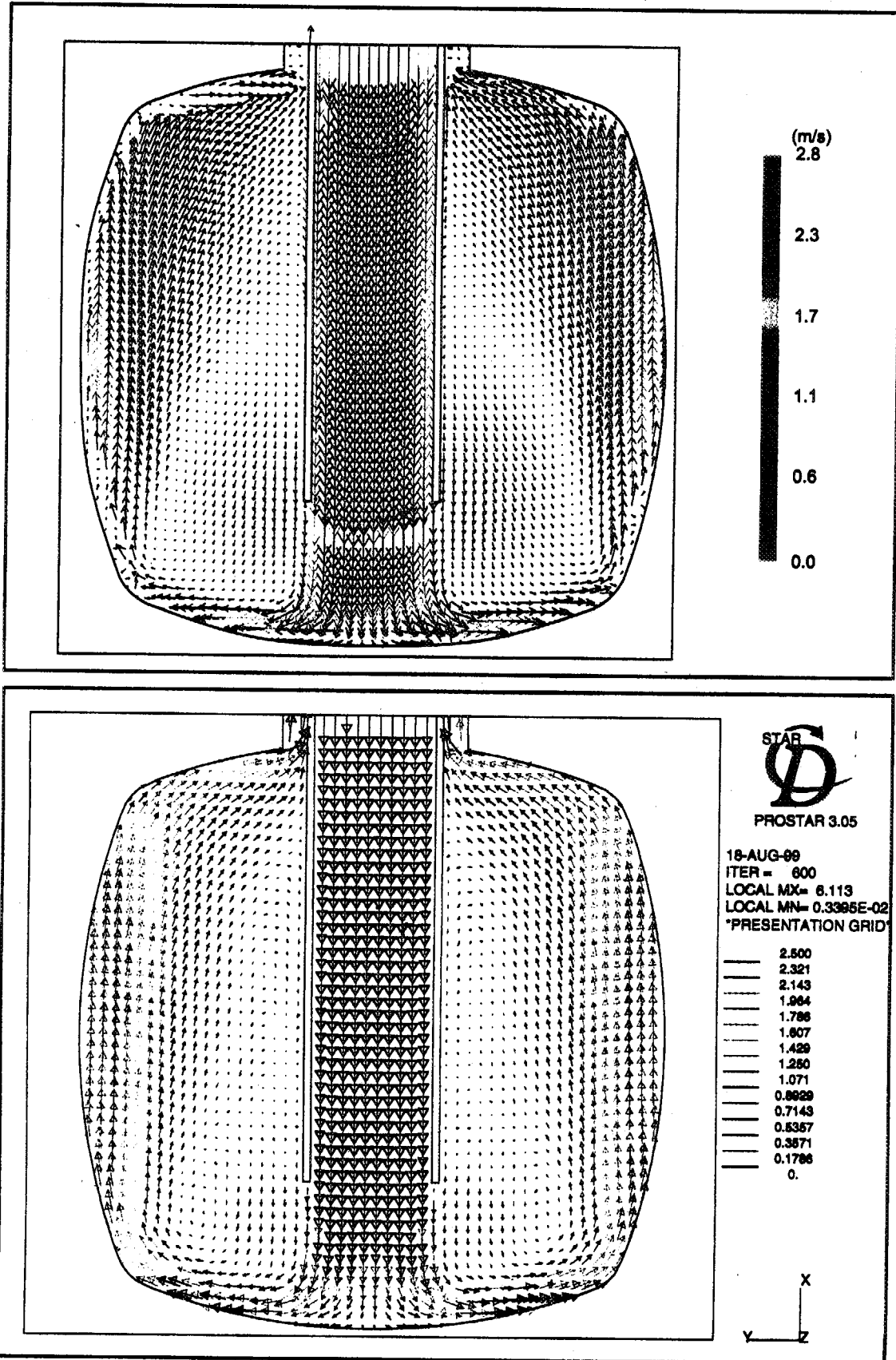


Fig.3.19 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow at 30mm jet nozzle height.

This is a blank page.

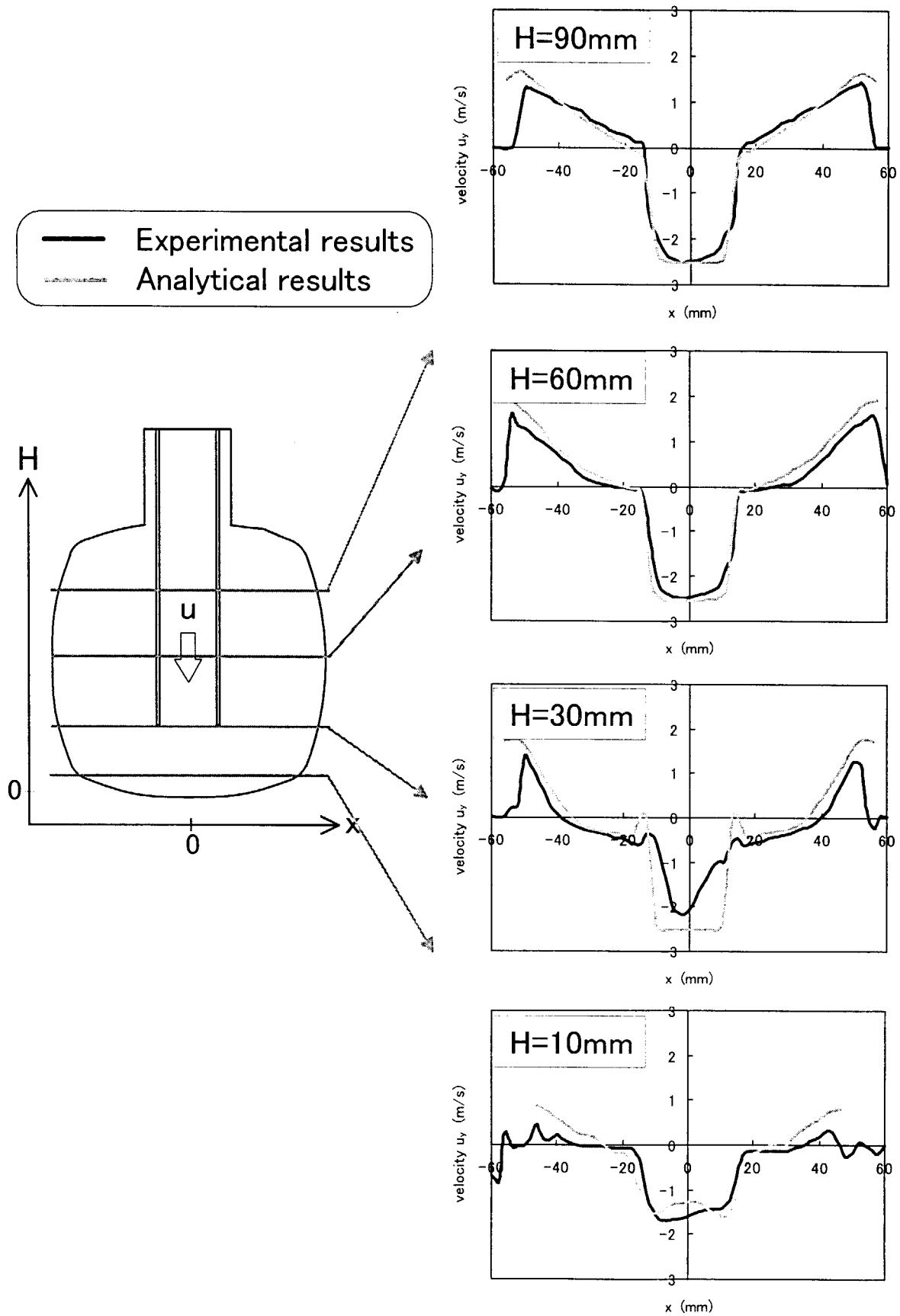


Fig.3.20 Comparison of experimental and analytical velocity distributions at 30mm jet nozzle height for H(horizontal height) =10, 30, 60, 90mm.

This is a blank page.

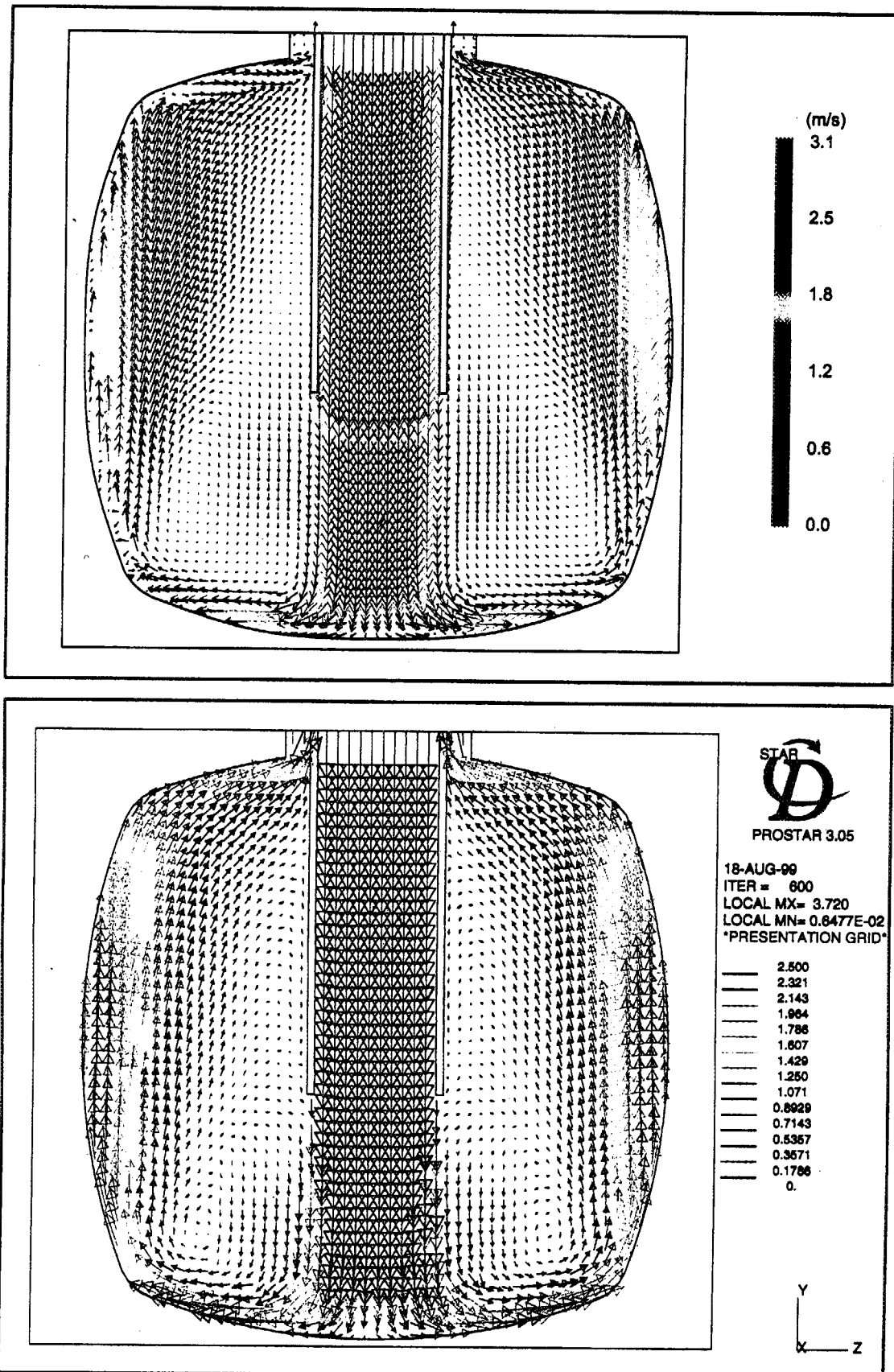


Fig.3.21 Experimental (upper) and analytical (down) results of velocity distribution under 2.5m/s of water jet flow at 50mm jet nozzle height.

This is a blank page.

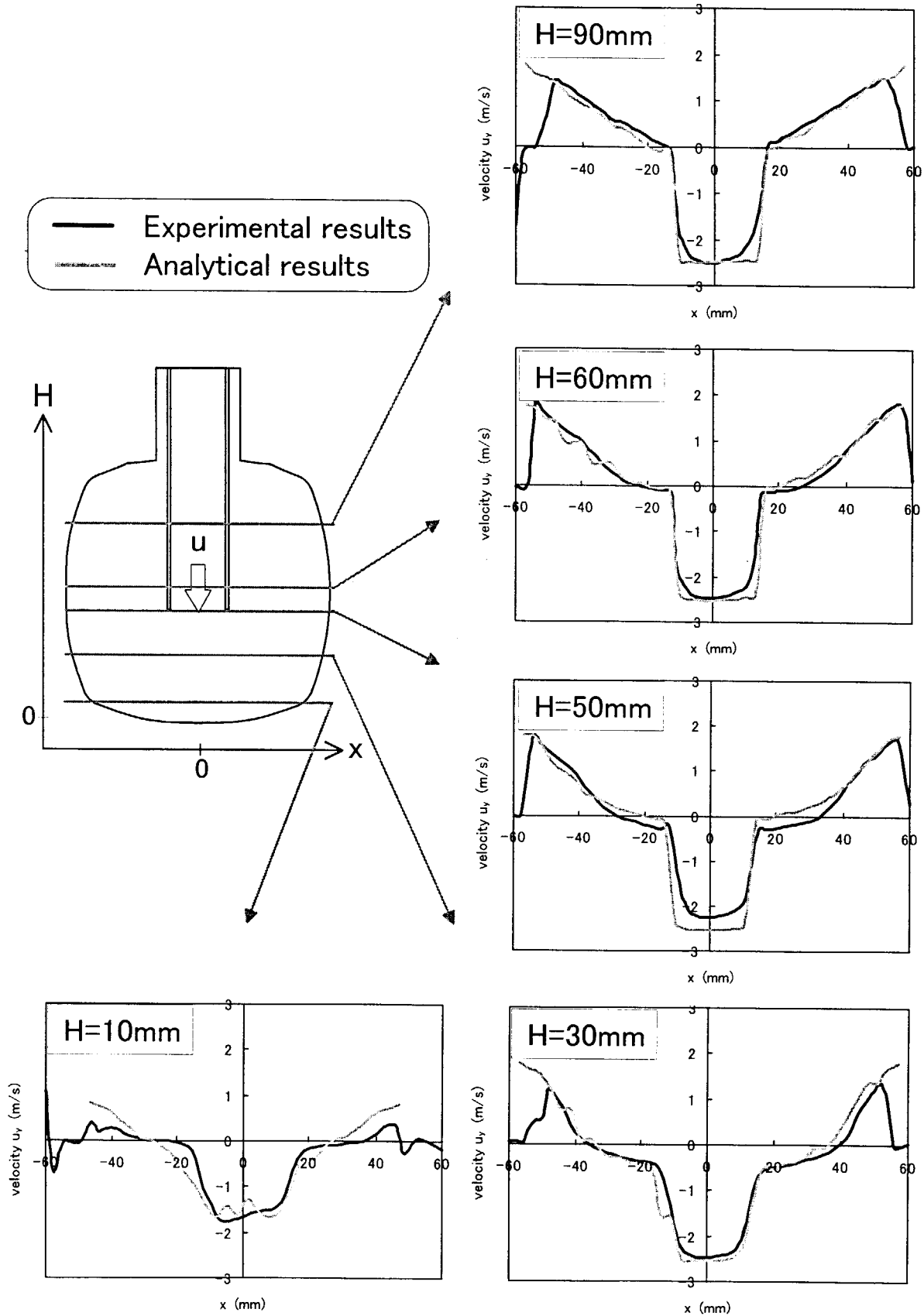
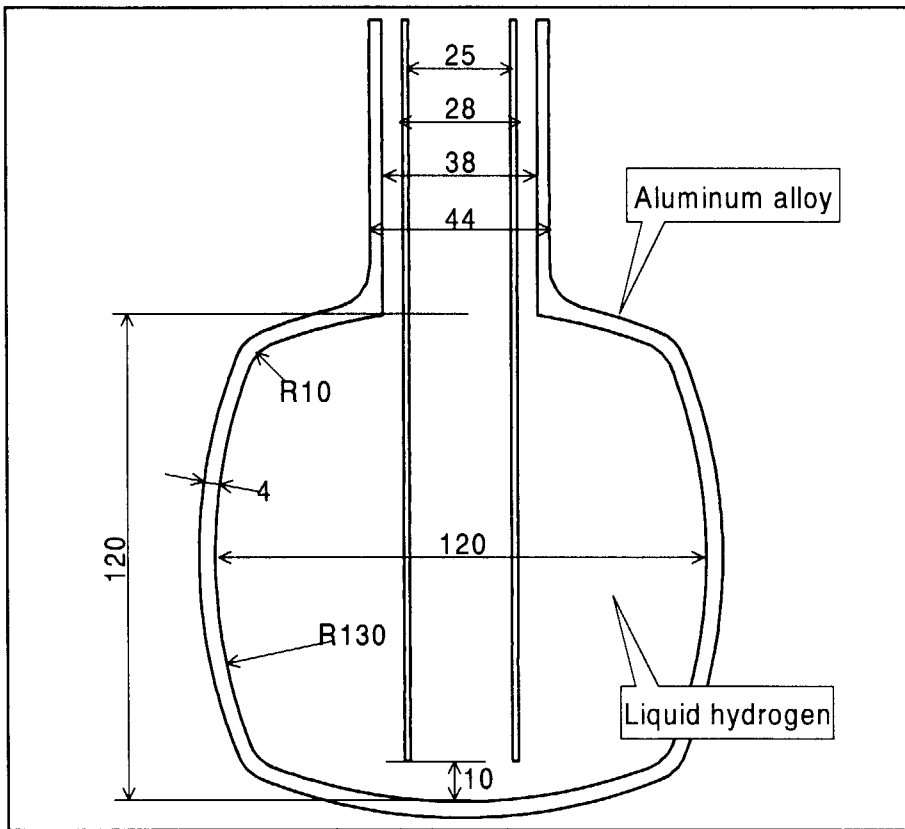


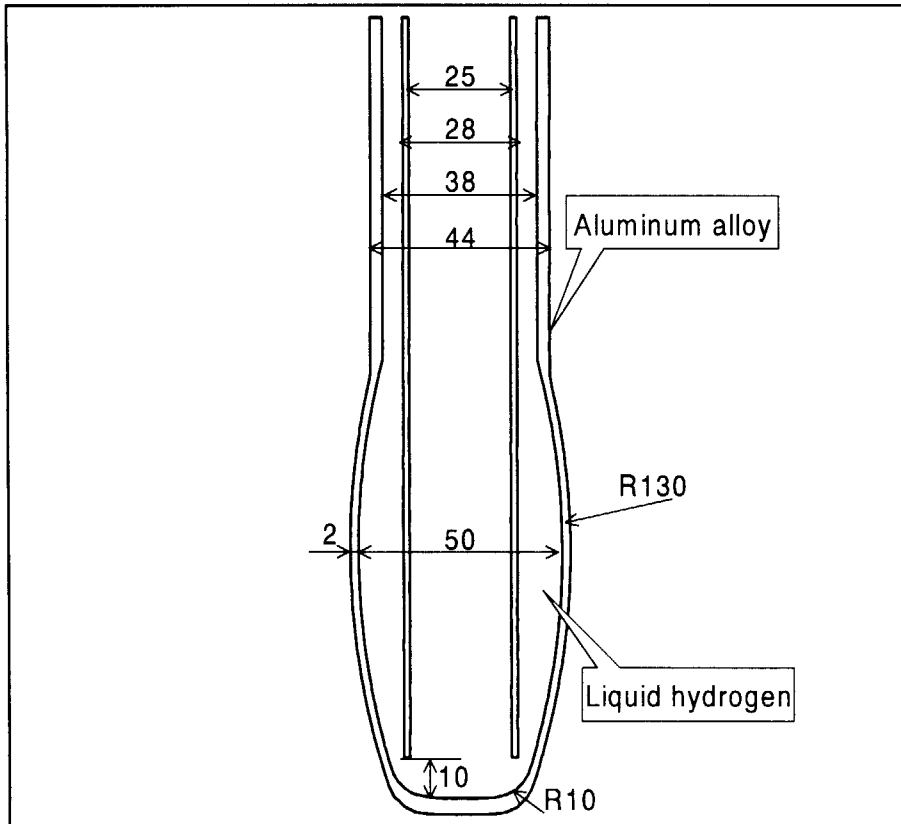
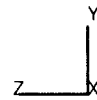
Fig.3.22 Comparison of experimental and analytical velocity distributions at 50 mm jet nozzle height for H (horizontal height) = 10, 30, 50, 60, 90 mm.



STAR

 PROSTAR 3.05

12-JAN-**
 VIEW
 1.000
 0.000
 0.000
 ANGLE
 0.000
 DISTANCE
 0.111
 CENTER
 0.000
 0.033
 0.000
 SECTION PLOT
 SECTION POINT
 0.000
 0.000
 0.000



STAR

 PROSTAR 3.05

12-JAN-**
 VIEW
 0.000
 0.000
 1.000
 ANGLE
 0.000
 DISTANCE
 0.111
 CENTER
 0.000
 0.033
 0.000
 SECTION PLOT
 SECTION POINT
 0.000
 0.000
 0.000

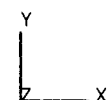


Fig.4.1 Cold moderator model for the thermal hydraulic analysis.

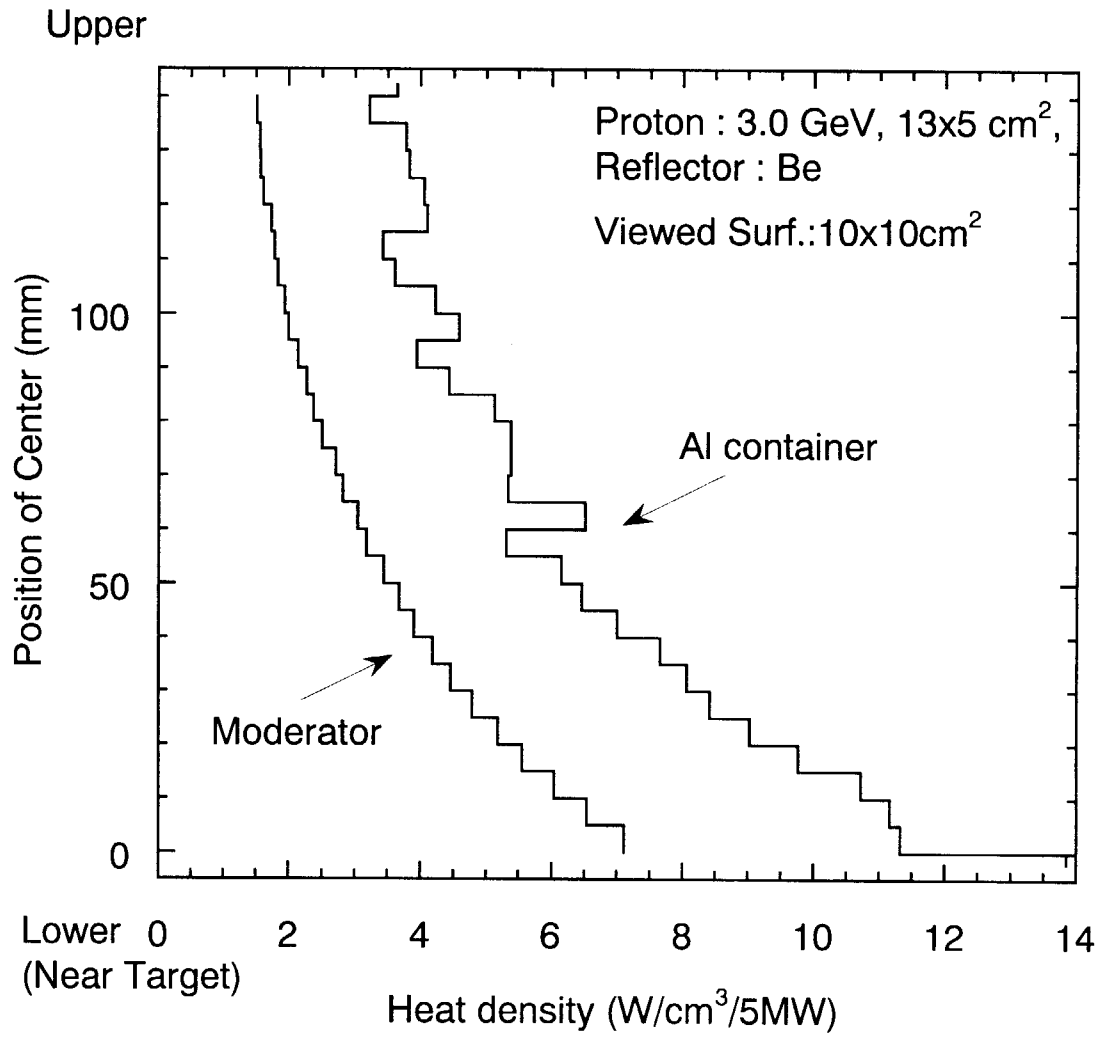


Fig.4.2 Heat density distribution in decoupled moderator with extended premoderator(5 cm extension, 1.5 cm thick)

This is a blank page.

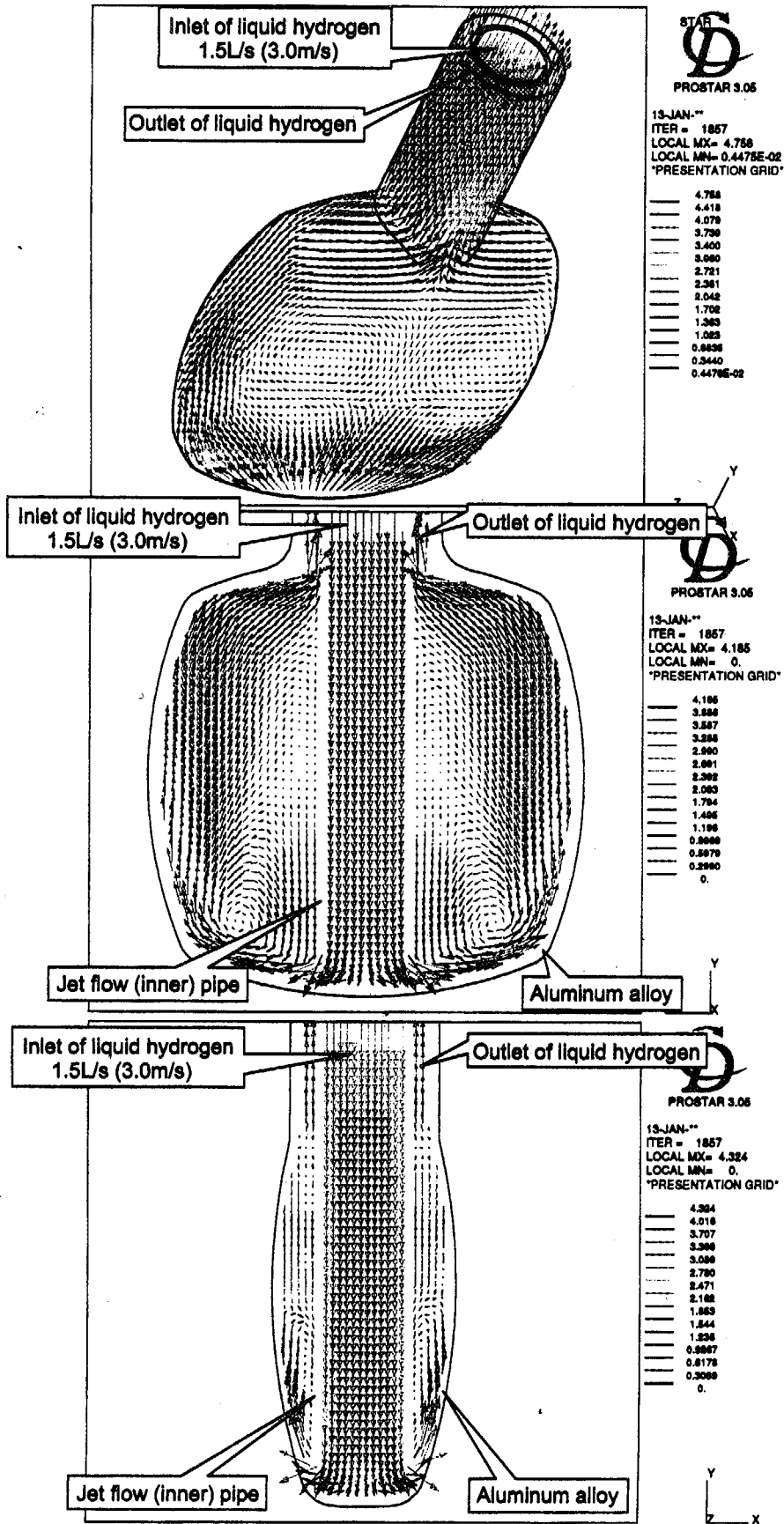


Fig.4.3 Analytical results of velocity distributions in the cold moderator.

This is a blank page.

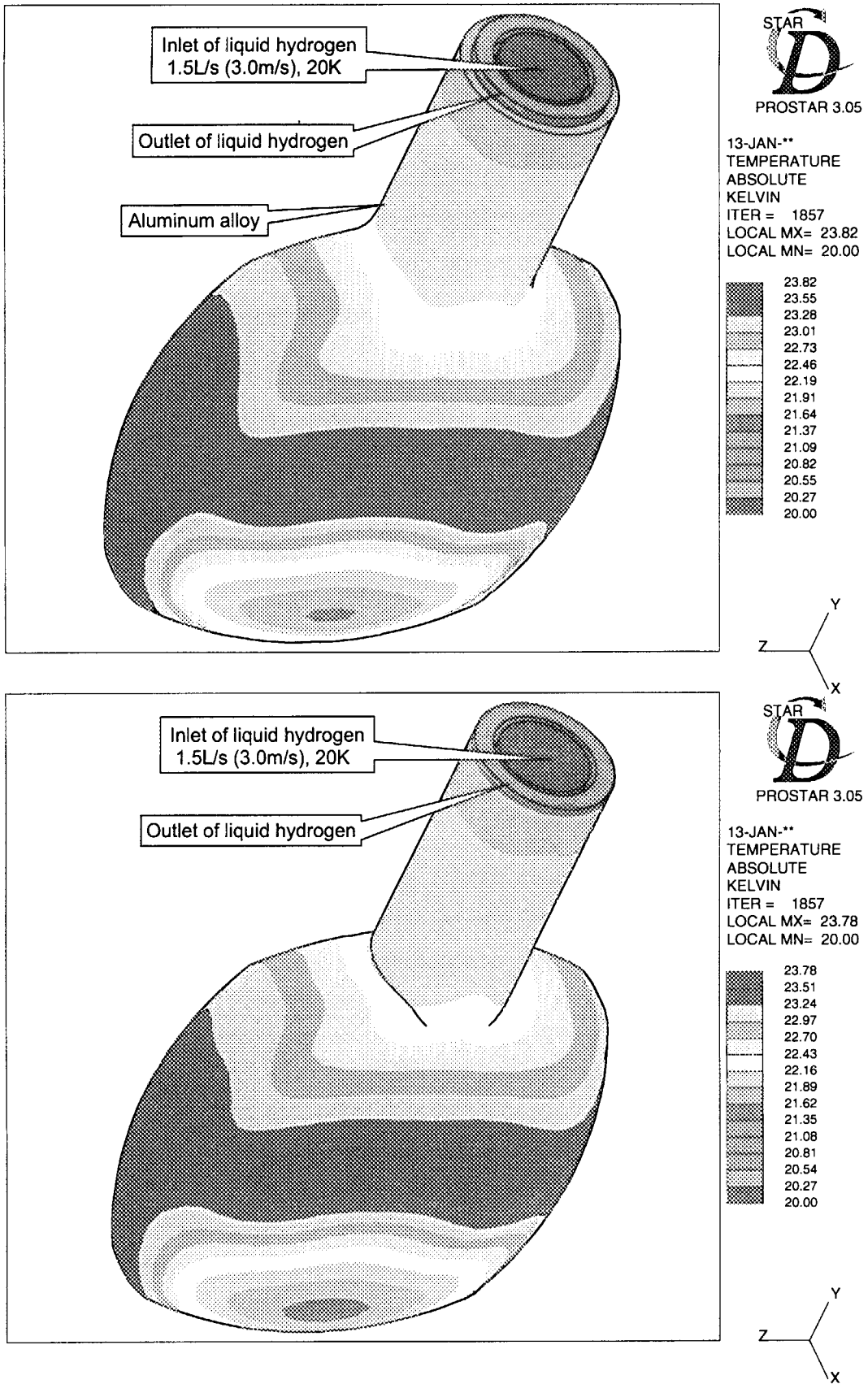


Fig.4.4 Analytical results of temperature distributions on the cold moderator surface.

This is a blank page.

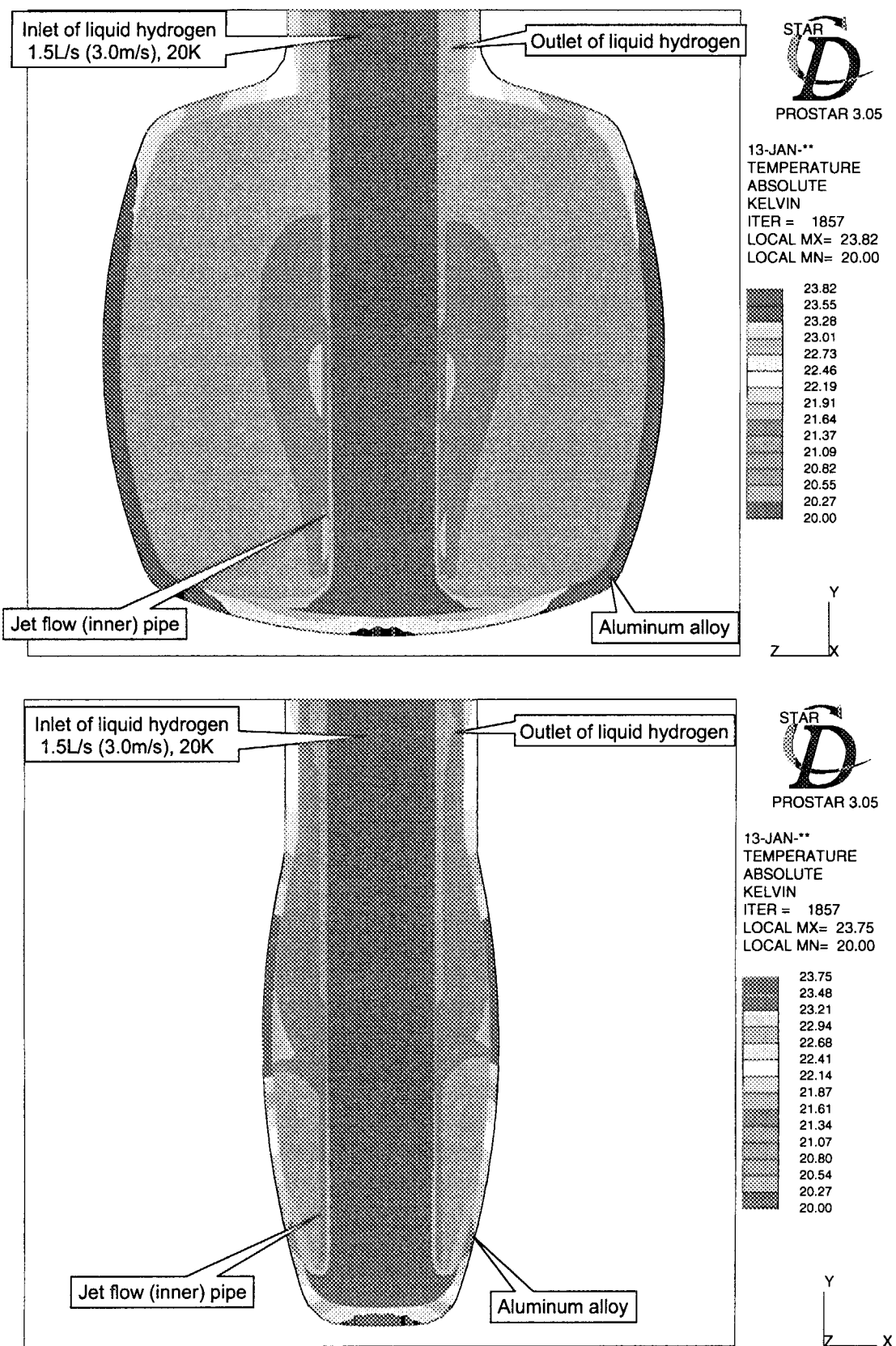


Fig.4.5 Analytical results of temperature distributions in the cold moderator.

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
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
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	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、1 eV および 1 u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わす場合に限り表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 ⁵ 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/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

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

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

