

JAERI-Tech
99-073



JP0050001



ブレードタイプクロスフロー型水銀ターゲットの開発
第1報：流動特性解析と検証モデルの製作

1999年11月

寺田敦彦・神永雅紀・木下秀孝・日野竜太郎
内田博幸*・安保則明*

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。

入手の間合わせは、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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

ブレードタイプクロスフロー型水銀ターゲットの開発
第1報：流動特性解析と検証モデルの製作

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

寺田 敦彦*・神永 雅紀・木下 秀孝・日野竜太郎・内田 博幸*・安保 則明*

(1999年9月9日受理)

原研では、中性子科学研究計画の下で、大強度陽子加速器（ビーム出力5 MW）による中性子散乱施設の建設を計画している。本施設の核破砕中性子源となる水銀ターゲットについては、ターゲット材となる水銀による構造材のエロージョン低減と局所的な高温領域の抑制等の工学的課題が懸案となっている。そこで、これらの課題を改善するための構造概念として案内羽根を用いるクロスフロー方式のターゲット構造を提案し、内部流動特性の解析評価を行った。その結果、ターゲット先端部のビーム窓方向に対して案内羽根を延長し、また、補助羽根を設置するなどの方策で、発熱密度に応じた水銀の流量配分を実現できる目処を得た。この成果を基にして、水流動条件下で解析結果を検証し、ブレード構造の有効性を確認するため、アクリル製の水銀ターゲットモデルを製作した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※外来研究員（石川島播磨重工業（株））

*石川島播磨重工業（株）

Development of Cross-Flow Type Mercury Target
Part I : Hydraulic Analyses and Fabrication of Verification Model

Atsubiko TERADA[※], Masanori KAMINAGA, Hidetaka KINOSHITA, Ryutaro HINO,
Hiroyuki UCHIDA* and Noriaki ANBO*

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

(Received September 9, 1999)

JAERI has planned to construct a neutron spallation facility connected with a high intensity proton accelerator (a maximum proton beam power of 5MW) under the Neutron Science Research Project. The mercury target working as the neutron source of this facility has several technical issues: decrease of the erosion of the target container by the mercury flow and suppression of the recalculation flow affecting the local temperature rise. To improve the above issues, we have proposed a new target concept, i.e. the cross-flow type (CFT) target using blade distributors.

We have carried out hydraulic analyses in order to verify the feasibility of the CFT target. From the analytical results, we have a good prospect to achieve a better mercury flow-rate distribution corresponding to the energy deposition in the mercury target, by extension of the blade length to the beam window and of the installation of a supplementary blade distributor. In order to verify the analytical results as well as to examine the effectiveness of the blade distributor, a mercury target model made of acrylic resin was manufactured, which will be tested under water flow conditions up to 5m³/min.

Keyword: Neutron Spallation Facility, Neutron Science Research Project, Mercury Target, Neutron Source, Cross-Flow Type Target, Blade Distributor, Hydraulic Analysis, Flow-Rate Distribution, Target Model

※ On leave from Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 解析方法	3
2.1 解析コードの概要	3
2.2 解析条件	3
2.3 解析モデル	4
3. 解析結果	6
3.1 Model Iの解析結果	6
3.2 Model IIの解析結果	7
3.3 Model IIIの解析結果	8
3.4 Model IVの解析結果	9
4. 検証試験	33
4.1 水銀ターゲットモデル	33
4.2 水銀ターゲットモデル試験装置	33
4.3 水銀ターゲットモデル検証試験	37
5. あとがき	41
謝辞	41
参考文献	42

Contents

1. Introduction.....	1
2. Analysis Method.....	3
2.1 Outline of Analysis Code.....	3
2.2 Analytical Conditions	3
2.3 Analytical Model	4
3. Analytical Result	6
3.1 Analytical Results of Model I	6
3.2 Analytical Results of Model II.....	7
3.3 Analytical Results of Model III.....	8
3.4 Analytical Results of Model IV.....	9
4. Verification Model.....	33
4.1 Mercury Target Model	33
4.2 Experimental Apparatus	33
4.3 Verification Experiments	37
5. Concluding Remarks	41
Acknowledgment	41
References	42

1. まえがき

原研では、大強度陽子加速器を用いた核破砕中性子源の開発を進めている⁽¹⁾。核破砕中性子源となるターゲットシステムは、パルス状の陽子ビーム（1.5GeV、3.3mA、50Hz、出力5MW）を入射して核破砕反応を引き起こす重金属製のターゲット、発生した中性子を減速材（モデレータ）に集約する反射体、中性子を必要なエネルギー領域まで減速して中性子ビームとして取り出すモデレータ等から構成される。Fig.1.1に現在提案しているターゲット・モデレータ・反射体の概念を示す^{(2),(3)}。ターゲットについては、液体金属ターゲット（水銀）をメインにして、水冷却固体ターゲット（タングステン板集合体）をバックアップとして準備する計画である。ターゲットは、保守点検性を考慮して水平に陽子ビームが入射する方式とし、中性子性能を左右するモデレータは、冷中性子用結合型プレモデレータ付き水素モデレータ（高強度・高分解能）1個をターゲットの上部に、また熱及び熱外中性子用の非結合モデレータ（共に高分解能）各1個（計2個）をターゲット下部に配置する。モデレータの周囲はベリリウム（Be）や鉛（Pb）を用いた反射体で覆う構成である。

水銀ターゲットの開発は、米国のSNS計画⁽⁴⁾及びヨーロッパのESS計画⁽⁵⁾においても進められている。いずれも入射する陽子ビームに対し水銀が並行して流れ、ビーム窓で反転する構造（反転流方式—Return-Flow Type）を採用している。この構造は、ターゲット本体がコンパクトにでき、また、容器内部の流れの取り扱いが比較的単純化できる等の利点があるものの、水銀温度を低く抑えるために水銀流速を高める必要があり、構造材のエロージョンが問題となる。さらに、先端のビーム窓部付近で、流れが反転する際に再循環流によりホットスポットが発生するなどの技術的な課題がある。

そこで、このような技術課題にターゲット内部流動の観点から対処するため、陽子ビームに対し水銀の流れが直交するターゲット構造（クロスフロー方式—Cross-Flow Type : CFT）の概念を提案した^{(6),(7)}。Fig.1.2にその概念構造を示す。容器内部に再循環流が発生しないように流量分配板を設置し、流量分配板で内部流量配分を調整してビームが入射する窓部等でのエロージョンを抑制するようにしている。この概念をさらに発展させて、水銀ターゲットの懸案である高密度の核発熱を低流速でより効果的に除去するためにブレード（案内羽根）を流入・流出側に設ける新構造を提案した⁽⁸⁾。

本報では、直線翼列案内羽根、および翼列を改良した案内羽根（ブレード）のタイプについて、羽根の形状、配置等を変えて流動特性を解析評価した結果について述べる。解析に当たっては、汎用熱流動解析コード「STAR-CD」を使用し、解析モデルの作成にはターゲット設計解析支援用に構築したCAD/CAEシステムを用いた。また、解析結果を検証するために製作したアクリル製のモックアップモデルの概要についても併せて報告する。

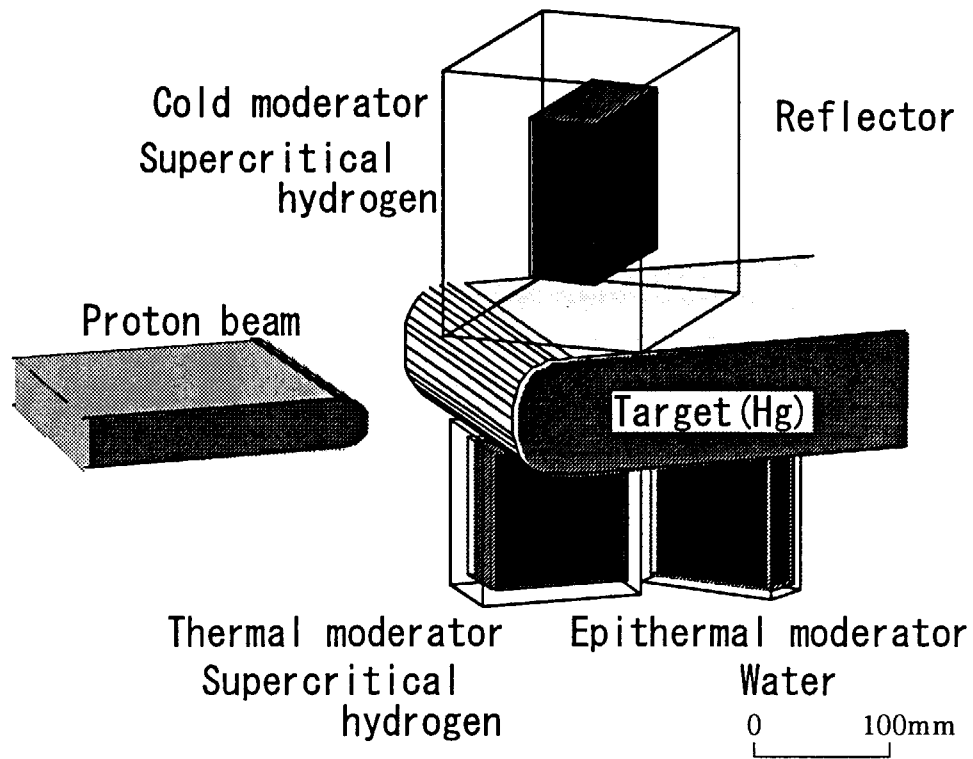


Fig.1.1 Layout of a target, moderators and reflectors

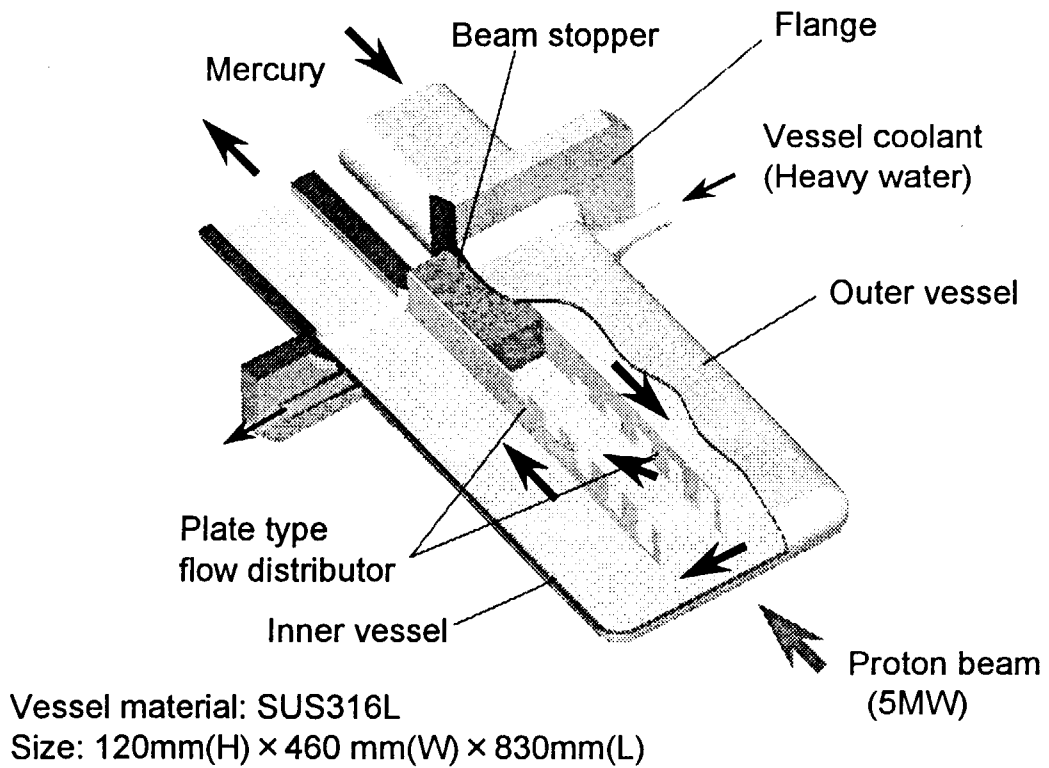


Fig.1.2 A concept of the cross-flow type target

2. 解析方法

2.1 解析コードの概要

CFT ターゲットの流動解析に当たっては、前述したように汎用熱流動解析コード STAR-CD (Computational Dynamics, 英国/CD-ADAPCO JAPAN) を使用した。STAR-CD は、解析アルゴリズムとして有限体積法に基づく SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 法、PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 法、SIMPISO 法 (SIMPLE と PISO の要素を組み合わせたもの) を使用して陰的に代数有限体積方程式を解いている。SIMPLE と SIMPISO は有限体積方程式から時間導関数の項が削除されており、定常状態の計算に使用される。PISO は、特に非定常状態の計算に適している。今回の解析評価では、有限体積法で Navier-Stokes 方程式を離散化し、SIMPLE 法で定常計算を行った。このとき、内部構造物による容器内の主流のフローパターンを把握する目的から、計算速度と精度のバランスを考え、高次の差分スキームは用いず、上述したターゲット解析支援システムにより、半自動的に計算格子の作成が可能な非構造格子法を採用した。

一方、STAR-CD で取り扱える乱流モデルとしては標準の $k-\varepsilon$ モデルに加えて、 $k-\varepsilon$ モデルを改良した RNG $k-\varepsilon$ モデル、Chen $k-\varepsilon$ モデル、2層モデル等が組み込まれている。本解析では、工学的に広く利用されている標準 $k-\varepsilon$ 2方程式モデルを用いた。このとき、解析精度に影響のある壁近傍の流速プロファイルは、後述する壁関数を使用した。

2.2 解析条件

定常温度分布を評価する場合には、水銀の輸送係数を評価するために温度依存性を考慮した多項式⁹⁾を適用していく予定であるが、本報は案内羽根に関する流動パラメータ解析を主眼としているため、物性値は一定として以下の値 (200°C の物性値) を用いて解析した。

密度	ρ :	13112.3 kg/m ³
粘性係数	η :	1.04 x 10 ⁻³ Pa·s
比熱	C_p :	135.5 J/kg·K
熱伝導率	λ :	10.64 W/m·K

一方、境界条件として、設計条件である水銀入口平均流速 1m/s、入口圧力 0.5MPa を与えた。また、固体と流体の接触面には、STAR-CD に組み込まれている対数則による次の壁関数を使用した。

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & , y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) & , y^+ > y_m^+ \end{cases} \quad (2-1)$$

$$y_m^+ - \frac{1}{\kappa} \ln(E y_m^+) = 0 \quad (2-2)$$

ここで、

$$u^+ : (u - u_w) / u_\tau$$

$$u : \text{接線方向の流速}$$

$$u_w : \text{壁面速度}$$

$$u_\tau : (\tau_w / \rho)^{1/2}$$

$$\tau_w : \text{壁面せん断応力}$$

$$y^+ : \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y / \mu$$

解析に当たっては、高 Re 数標準 k- ϵ モデルを適用する場合、流れ場全体の計算負荷を低減するため、壁面から第 1 層目の中心ノード点 Y_p と壁面間の速度プロファイルを上記の壁関数でモデル化する。したがって、中心ノード点 Y_p と壁面間の垂直距離が乱流境界層の対数領域 ($30 < y^+ < 100$) となるように、メッシュ密度を解析時間と関連させながら、できるだけ密になるように設定した。計算モデルによって異なるが、参考値として、後述する Model IV ビーム窓近傍のこの領域のメッシュ（壁面から Y_p 迄の垂直距離）は約 0.5mm である。

2.3 解析モデル

本解析に用いた各モデルの概要を Fig.2.1 に示す。以下に各モデルの特徴を述べる。

(a) 直線翼列案内羽根 (Model I)

10 枚程度の翼長の短い羽根を流入・流出側に対称に配置し、その羽根間隔を発熱分布に応じた割合に調整することにより、中心軸近傍の流速制御を実施するものである。

(b) ブレード方式 1 (Model II)

Model I の翼長を延長した案内羽根（ブレード）方式を採用したもので、ブレードは発熱分布に応じた流量配分を考慮した位置に挿入し、容器外形に沿った楕円形状とした。

(c) ブレード方式 2 (Model III)

Model II の改良型で、発熱部に近いブレード端部をターゲット先端部方向に伸ばし、先端部への流動促進を図った。

(d) ブレード方式 3 (Model IV)

Model III をさらに改良して、ビーム窓近傍に翼長の比較的短い案内羽根を追加設置し、流量配分の最適化を図ったものである。

各モデルの詳細は、内部構造の最適化の過程とともに 3 章に記す。

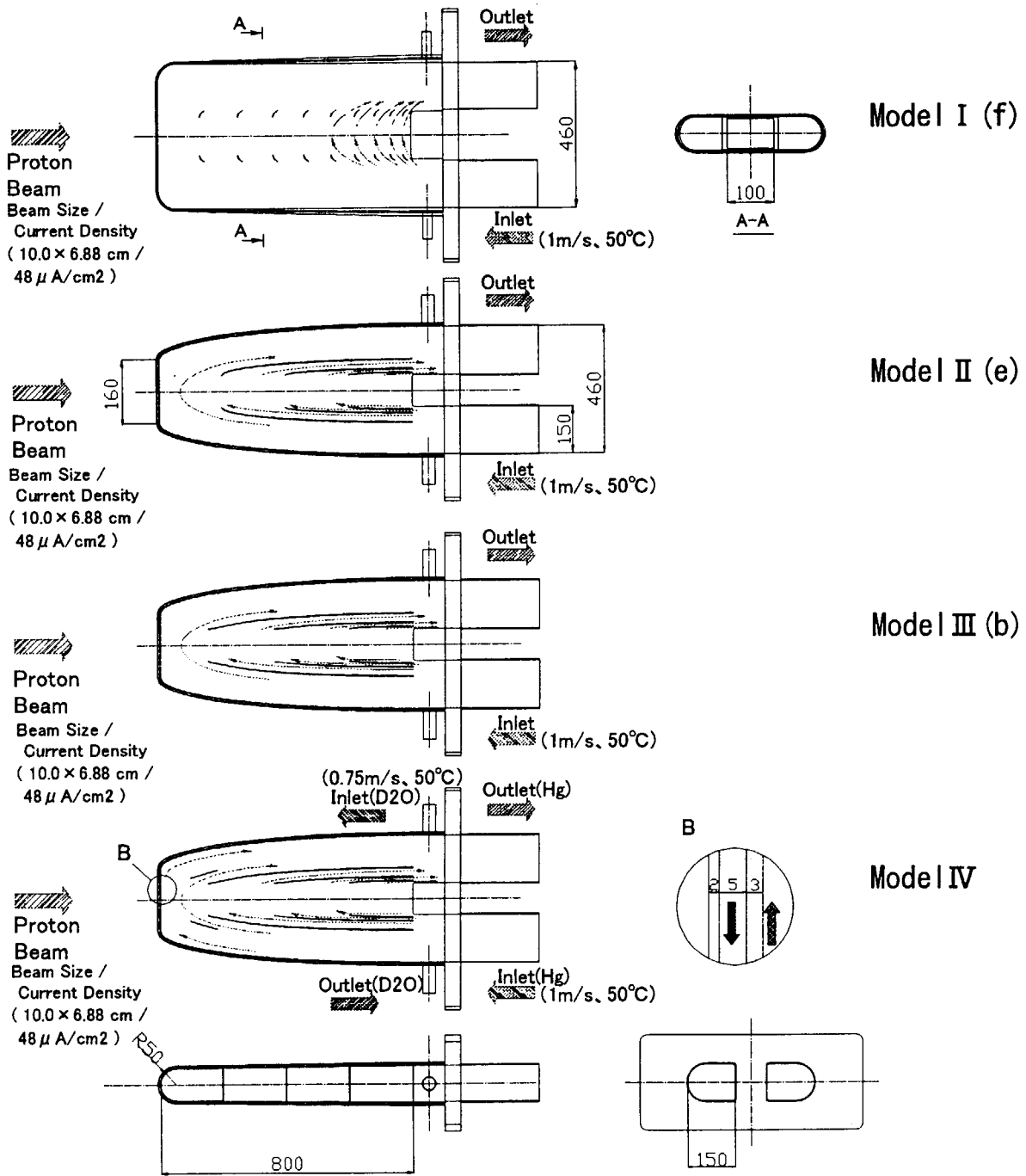


Fig.2.1 A concept of the bladed type cross-flow mercury target

3. 解析結果

3.1 Model I の解析結果

Model I では、ターゲット容器の先端部より発熱部を挟んで流入側、流出側にそれぞれ直線的に配置した翼列について、翼列を構成する羽根の形状や配置位置、傾き等をパラメータとして解析を実施した。翼列を構成する羽根相互の形状や傾きの調整を行った場合、検討項目が多いため、まず、翼列全体をすべて同一パラメータとして現実的な検討項目を模索した。羽根の枚数は、短い翼長の場合では、入口から流入した水銀を陽子ビームに垂直に流すため流れの向きを曲げる箇所（以下、コーナー部と称す）に多数の羽根を挿入することが開口部の整流化に望ましいと考えられるが、現実的な製作性等を考慮して、解析では 10 枚前後の羽根を設定することとした。形状については、板厚 3mm、長さ 30mm 程度の薄板とし、端部は半円状、あるいはくさび形とした。

本解析では、ターゲット容器内部の流動状況を把握し、ターゲット軸方向の発熱密度に応じた流量配分を達成できる内部構造について調べることを目的とした。ターゲット設計では、幅 10cm、高さ 6.88cm の矩形断面を持つ様な陽子ビームがターゲットに入射することを想定している。このため、発熱部はターゲット軸方向に幅 10cm(ターゲット中心軸から±5cm) の部分となる。軸方向の発熱密度分布については、容器内の流動解析結果と併せて後述する。

Fig.3.1 に翼列を構成する羽根全体を流出入口側に 0° 傾斜した Model I (a)、30° 傾斜させた Model I (b)、60° 傾斜させた Model I (c) の容器内速度分布を示す。翼列を構成する羽根、および容器形状を Fig.3.2 に示す。羽根は容器の先端部から等間隔にそれぞれ 10 枚配置した。

Fig.3.1 に見られるように主流は、(a)から(c)のいずれの場合も後部で出口側に大きく反転している。羽根の傾斜が大きくなるに従い、入口側では配置した翼列の形状抵抗は小さいものの、出口側に配置した羽根の形状抵抗が大きくなるため、後部から羽根に沿って発熱部に流入した流れは、発熱部に大きな再循環流を生じる傾向にある。この段階では、ターゲット先端部も流速が低いため局所的な停滞域や再循環流を生じている。これは、Fig.3.3 に示したターゲット中心軸上 (A-A) での陽子ビームに直交する方向の速度成分（以下、Y 方向速度成分と称す）からも明らかである。Fig.3.3 には、ターゲット容器内部の水銀の発熱密度分布をあわせて示した。この発熱密度分布は、陽子エネルギー 1.5GeV、3.3mA の場合のものである。発熱密度の最大値は、ビーム窓近傍で発生し、ビーム窓から離れるに従って小さくなっていく。

次に、翼列の配置位置が流量配分に及ぼす影響を調べるために翼列の傾斜を 5° に固定して羽根間隔をパラメータとして解析を行った。Fig.3.4 に Fig.3.2 に示すように容器先端部から出入口側に発熱部を隔てて直線的に配置した翼列を構成する各羽根の間隔比を等間隔

($A_{10}/A_1=1.0$) に配置した Model I (d)、先端部に対して後部側に羽根間隔を 5 倍 ($A_{10}/A_0=5.0$) 寄せた Model I (e)、さらに 10 倍 ($A_{10}/A_1=10.0$) 寄せた Model I (f) の容器内速度分布を示す。これらの解析結果を Fig.3.3 と同様にターゲット中心軸上の Y 方向速度成分の変化で表したものを Fig.3.5 に示す。Fig.3.4 及び 3.5 から、傾斜をつけた Model I (a)~(c) と同様に後部付近でのみ流れ、発熱密度の高い先端部であるビーム窓付近では弱い再循環流を生じていることわかる。

Model I の検討に使用した解析モデルのメッシュ数は、いずれも 25000 程度であり、速度、圧力分布が急激に変化する羽根近傍にメッシュ密度が密になるよう調整している。Fig.3.6 に Model I にみられる典型的なフローパターンとして Model I (f) の計算メッシュとともに流線図と速度分布を示す。流線図は、解析領域内において質量、体積のない仮想的な粒子の軌跡を計算したものである。

Model I では、羽根を発熱部を隔てた位置に直線的に配置し、羽根のような柱状物体に流れが衝突する際の形状抵抗と容器形状による圧力バランスから最適な構造の模索を試みた。が、数値解析の結果、容器のコーナー部で後部側に大きな偏流がみられ、小さな流動抵抗を組み合わせ、このフローパターンを制御するのは前述した製作性等の前提条件からも困難と考えられる。Model I における容器内流動をさらに改善するためには、10 枚以上の翼列をコーナー部に配置し、間隔比と傾きから羽根にあたる流入角度を調整することによって、流れを容器先端部に誘導する構造方式が考えられるが、大きな偏流を比較的容易に改善するためには、間隙比を調整した数枚の翼列をコーナー部に移動し、その翼長をコーナー部出入口まで伸ばすことによって偏流を押さえ、かつ、コーナー部での圧力損失の減少と出口部での整流化を図る方式（ブレード方式）を選択することが妥当と考えられる。

3.2 Model II の解析結果

Fig.3.7 は、Model I で用いた翼列案内羽根の翼長を伸ばして流量配分を行った Model II (a) の速度分布と Y 方向速度成分について Model I (f) と比較したものである。Model II (a) の構造を Fig.3.8 に示す。案内羽根は板厚 3mm の薄板を、発熱部を挟んで流入口、流出口側に各 3 枚とし、流出入口側 (Fig.3.8 の A 部)、発熱部側 (Fig.3.8 の C 部) で等間隔に配置した。羽根の形状 (Fig.3.8 の B 部) は、Model I の容器形状に沿った形とした。Model II (a) では、Fig.3.7 に示した Y 方向速度成分の比較から明らかなように Model I (f) に対して、先端部への流れが改善されている。しかし、主流は 3 枚の案内羽根が直角に曲った内側壁から剥離し、その流れがそれぞれ大きな再循環流を起こしている。

次に、Model II (b) として、この再循環流れを緩和するため、案内羽根を Fig.3.8 に示す B' のような流線形として、内側壁からの剥離を小さくする形状を試みた。Fig.3.9 上段に Model II (b) の速度分布を示す。この図にみられるように、Model II (b) では、逆に案内羽根の外側壁から流れの剥離が見られる。これは、流出口側コーナー部での流路が発熱部に対して縮小することにより、流れが加速して圧力降下が起こるため、Model II (a) の解析結果に

見られるような入口側コーナ一部での流路の拡大による流れの減速、および圧力上昇に対して生じる案内羽根内側壁からの剥離が抑制されているものと考えられる。

したがって、まず、容器外壁からの剥離によって発熱の大きなビーム窓のある容器先端部にみられる淀みを改善するため、Model II (c) として、Fig.3.10 に示すように容器形状を案内羽根に近づけた。このモデルでは、流出入口側 (Fig.3.10 の A 部)、発熱部側 (Fig.3.10 の C 部) における案内羽根の間隔比は等間隔である。Model II (c) の速度分布を Fig.3.9 中段に示す。容器外側壁からの剥離する位置は、Model II (b) に示す結果に比べて容器先端部に移動しており、流れの改善がみられるが、依然先端部は淀んでいる。そこで、Model II (d) として、入口側コーナ一部に配置した案内羽根の流入出口側の間隔比を発熱部側の発熱量に応じて間隔を調整して流量配分することにより、先端部での流れの改善を図った。Model II (d) の速度分布を Fig.3.9 下段に示す。図にみられるように先端部の淀みは小さくなったが、ビーム窓近傍に依然低速域が現れている。

これを微調整するため、Model II (e) として、Fig.3.10 に示すように案内羽根の発熱部側の間隔比を先端部方向に寄せることとした。Model II (e) の速度分布を Fig.3.11 下段に示す。速度分布では、先端部での流速の変化が捕らえにくいだが、Fig.3.12 に示す中心軸上の速度分布から先端部への流れが大きく改善されていることがわかる。

しかし、Fig.3.11 に示す Model II (e) の速度分布に示すように、発熱部に近い案内羽根後方に容器壁面からの剥離とともに流れの低速域が見られる。流れの低速域はビーム窓近傍および発熱部近傍に生じており、流れの低速域の発生を抑制してビーム窓である容器先端部への流れを保持する必要がある。

Fig.3.11 上段、中段に Model II の検討に使用した解析モデルとして、Model II (e) のメッシュ図及び流線図を示す。Model II の検討に使用した解析モデルのメッシュ数は、25000 程度であり、Model I 同様に速度、圧力分布が急激に変化する案内羽根、および容器外壁近傍にメッシュ密度を密になるように調整した。

3.3 Model III の解析結果

案内羽根後方に生じる低速域を除去し、ビーム窓である容器先端部への流れをさらに促進させるため、Fig.3.13 に示すように案内羽根の発熱部側端部 (Fig.3.13 の A 部) を先端部方向に 50mm 程度直線的に伸ばした Model III (a) を考案した。Model III (a) の流速分布を Fig.3.14 (a) に示す。Model III (a) では Fig.3.14 (a) に示すように案内羽根が先端部に偏り過ぎたためターゲット先端部から 100~400mm 後方に低流速部が出現した。そこで、この低流速部を改善するために流入出口側の案内羽根の間隔比を調整した Model III (b) を提案した。Model III (b) の速度分布、及び流線図を Fig.3.14 (b), (c) に示す。速度分布からでは捕らえにくいだが、流線図では、容器外壁からの剥離、および案内羽根間の流れの改善が確認できる。

しかし、Fig.3.15 に示す発熱密度分布との速度プロファイルの比較からわかるように、中間部での流れを改善したことによる影響が容器先端部の流速の低下として現れている。した

がって、中間部の流れを保持した状態で、先端部の速度プロファイルを改善する必要がある。

3.4 Model IVの解析結果

Model IVでは、Model IIIにて改善した中間部の流れを保持するため、コーナー部に配置した6枚の案内羽根を固定し、懸案である容器先端部の流速を改善するために、新たに短い案内羽根を先端部に2枚挿入した。Model IVの構造を Fig.3.16 に示す。挿入した案内羽根は、板厚 3mm 長さ 150mm の薄板とした。案内羽根に付着する流れをさらに先端部まで促進させるため、案内羽根近傍に配置した。出口側に挿入する案内羽根は、Fig.3.16 に示す案内羽根 B 先端部の流出口側に発生する剥離の抑制から、形状の改善が有効と考えられるが、この部分は発熱部ではなく、羽根近傍の流れが比較的速いため、A部に挿入する案内羽根は同形状とし、配置位置も他の出口側案内羽根3枚と同様、入口側案内羽根と中心軸を挟んで対称に配置した。

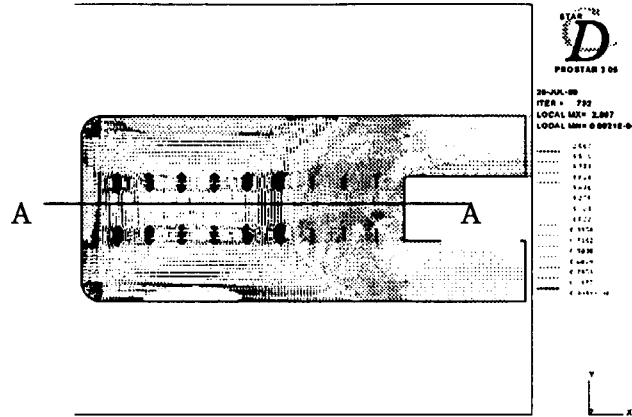
Fig.3.17 に Model IVの速度分布、および流線図を示す。先端部と比較して発熱の小さい後部に低速域がみられるが、Fig.3.18 に示すターゲット中心軸上での Y 方向速度成分からわかるように、発熱密度分布に近い速度プロファイルを得られた。また、この図に示すようにビーム窓近傍での流速は 0.8m/s 以下である。

さらに、2次元モデルで内部構造の最適化を図った Model IVを 3次元モデル化し、解析モデルに対する影響を検討した。Fig.3.19 に Model IVの 3次元解析モデルと速度分布を示す。また、Fig.3.20 にターゲット中心軸上を含む水平断面の速度分布と流線図を示す。

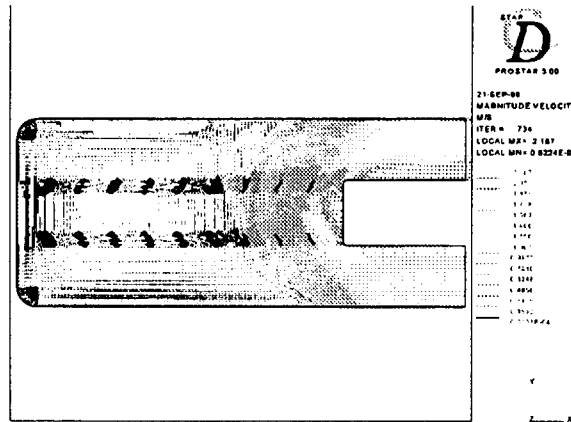
Model IV(3D)のメッシュ数は、250000 程度であり、速度、圧力分布が急激に変化する羽根近傍にメッシュ密度を高めるなどの調整をしている。ただし、現段階では3次元モデル化によるメッシュ数の増加から計算時間が飛躍的に増大(3~4日間)しており、壁面近傍のメッシュ密度の感度解析は実施していない。この点については、今後、第4章に示す検証試験を通して、解析精度を検討していく予定である。

Model IVの3次元モデル化が流れ場全体に及ぼす影響は、流体の遠心力差により容器壁面側に速度分布が偏ることが考えられるが、Fig.3.20 に示す水平断面の速度分布、流線図からは、2次元モデルと比較して大きな変化はみられない。また、Y方向速度成分を示した Fig.3.18 においても上述の影響から、先端部で若干流速が速くなっているが、大きな差異はみられない。なお、Fig.3.19 の速度分布にみられる流入口側の分流部における容器内最高流速(2.25m/s)については、上述の計算精度の問題もあり、検証試験の結果とあわせて構造の検討を行う予定である。

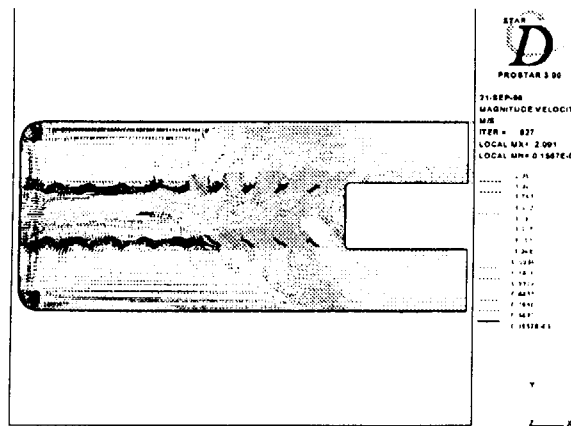
以上に示した内部構造の最適化の過程を経て、案内羽根(ブレード)の形状と間隔比を調整することにより発熱密度分布に応じた流量配分とビーム窓近傍の流れを低流速とする流量配分制御を達成できる見通しを得た。



Model I (a) (angle 0°)



Model I (b) (angle 30°)



Model I (c) (angle 60°)

Fig.3.1 Velocity distributions of Model I
(Angle of bladed distributors :0° ,30° ,60°)

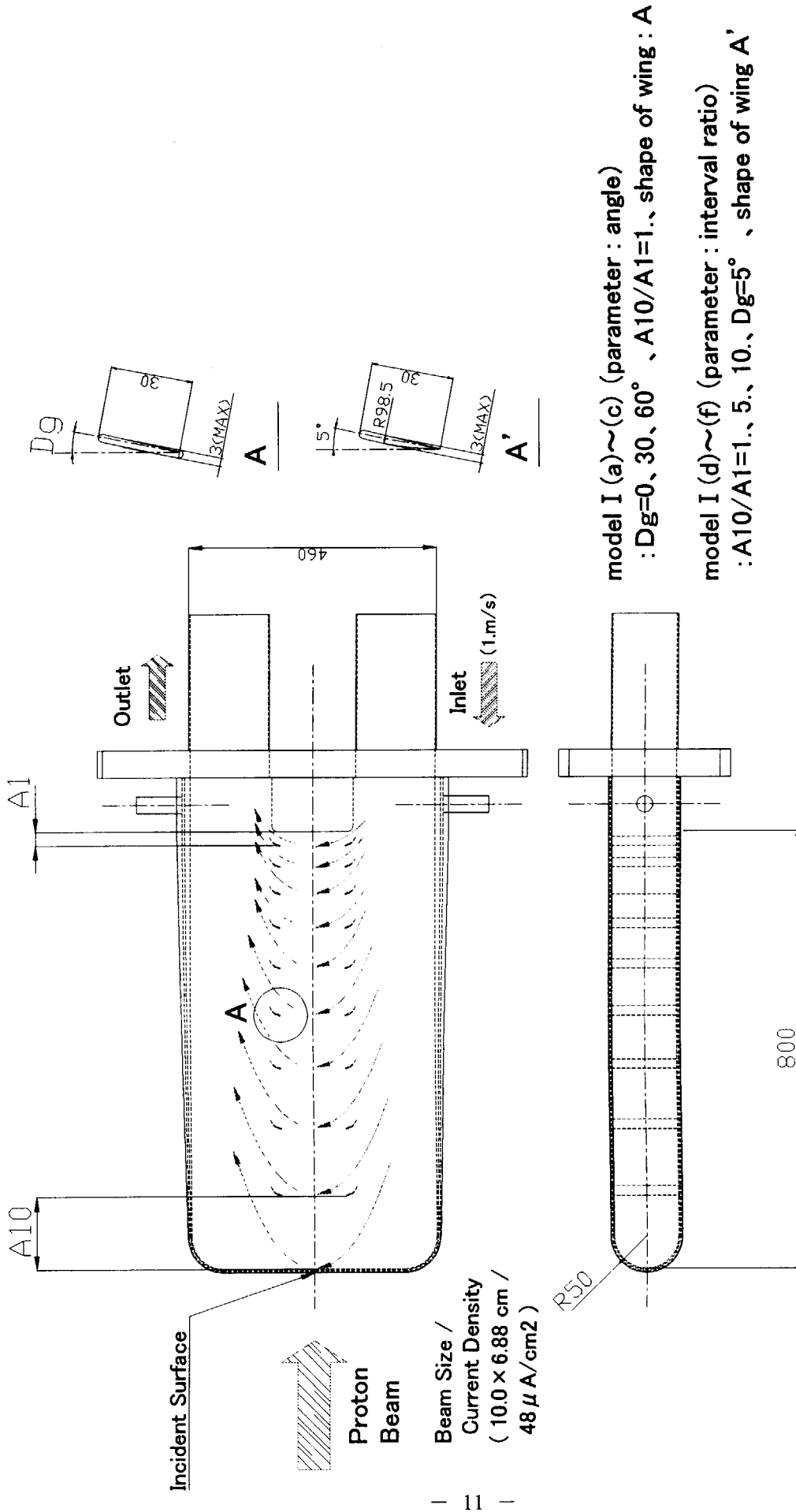


Fig.3.2 Optimization of internal structure (Model I)

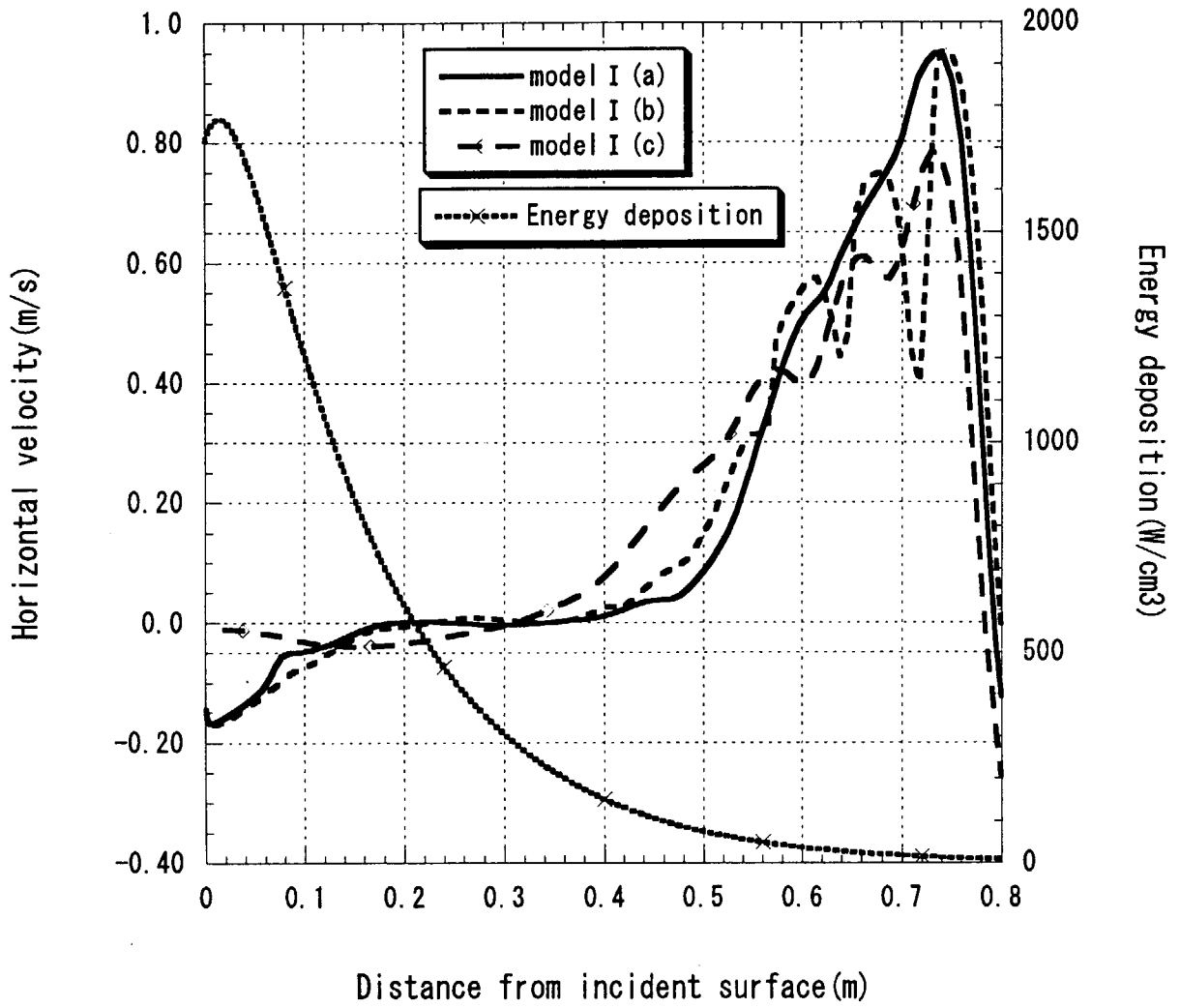
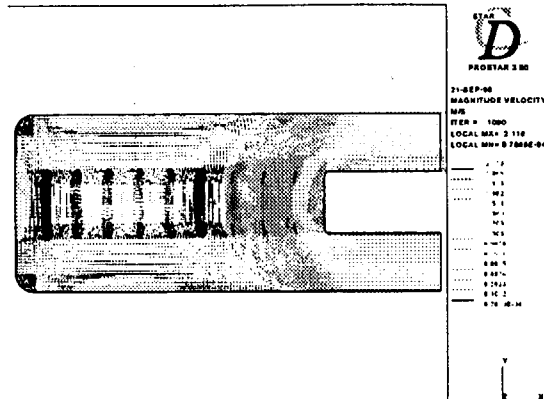
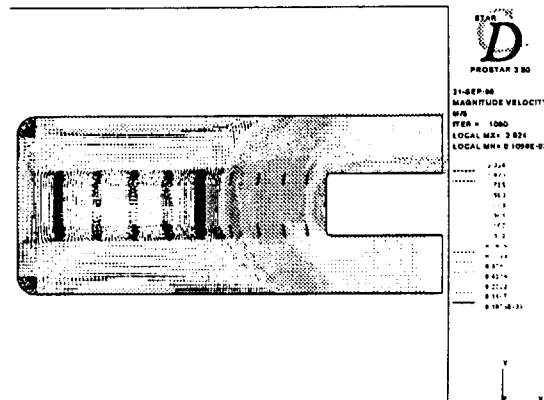


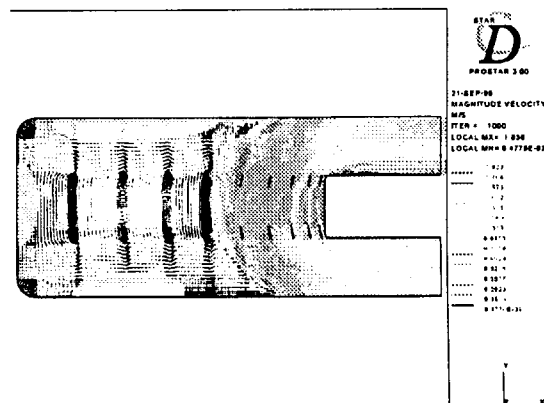
Fig.3.3 Horizontal velocity distributions on the target center axis of Model I
 (Angle of bladed distributors: 0° ,30° ,60°)



Model I (d) (interval ratio : 1.0)



Model I (e) (interval ratio : 5.0)



Model I (f) (interval ratio : 10.0)

Fig.3.4 Velocity distributions of Model I

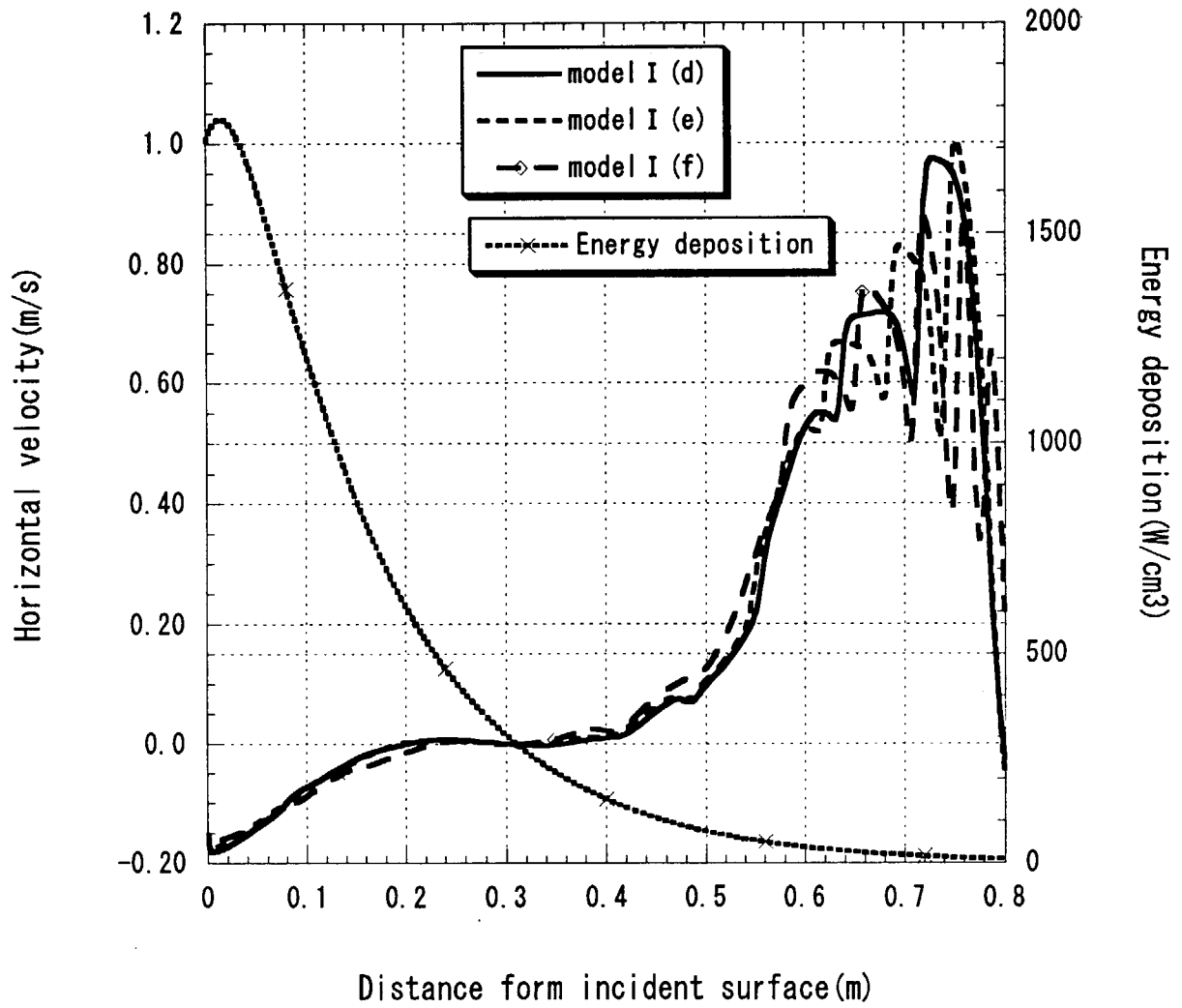
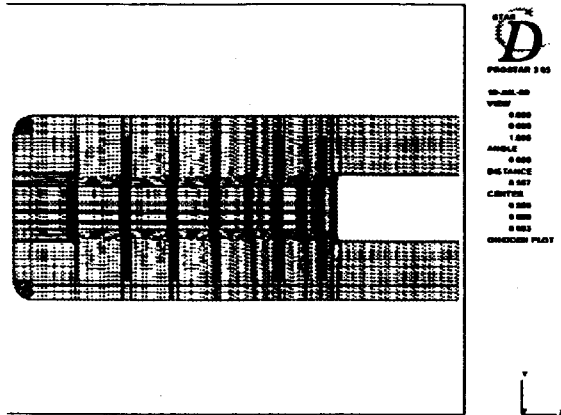
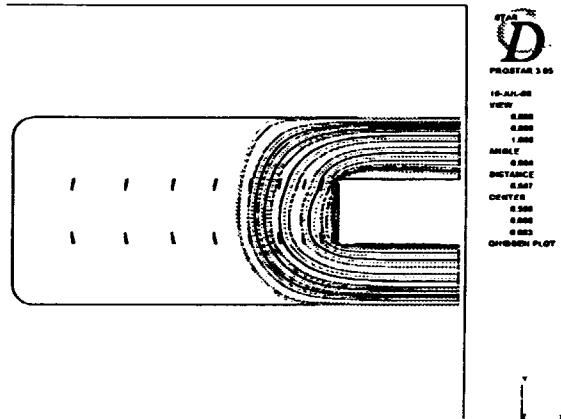


Fig.3.5 Horizontal velocity distributions on the target center axis of Model I
(Interval ratio: 1.0, 5.0, 10.0)

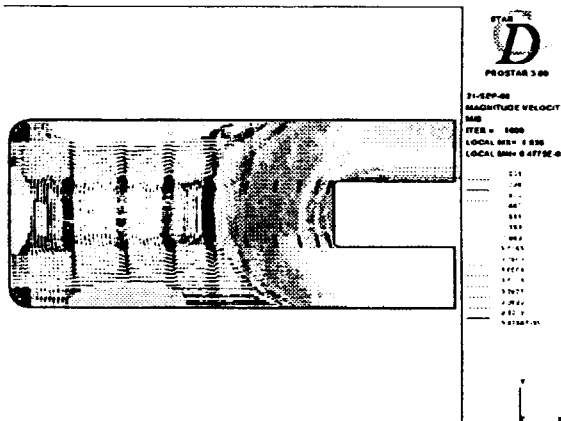


Mesh : 25000

(a) Computational Grids



(b) Particle tracks



(c) Velocity distribution

Fig.3.6 Flow patterns of Model I (f)

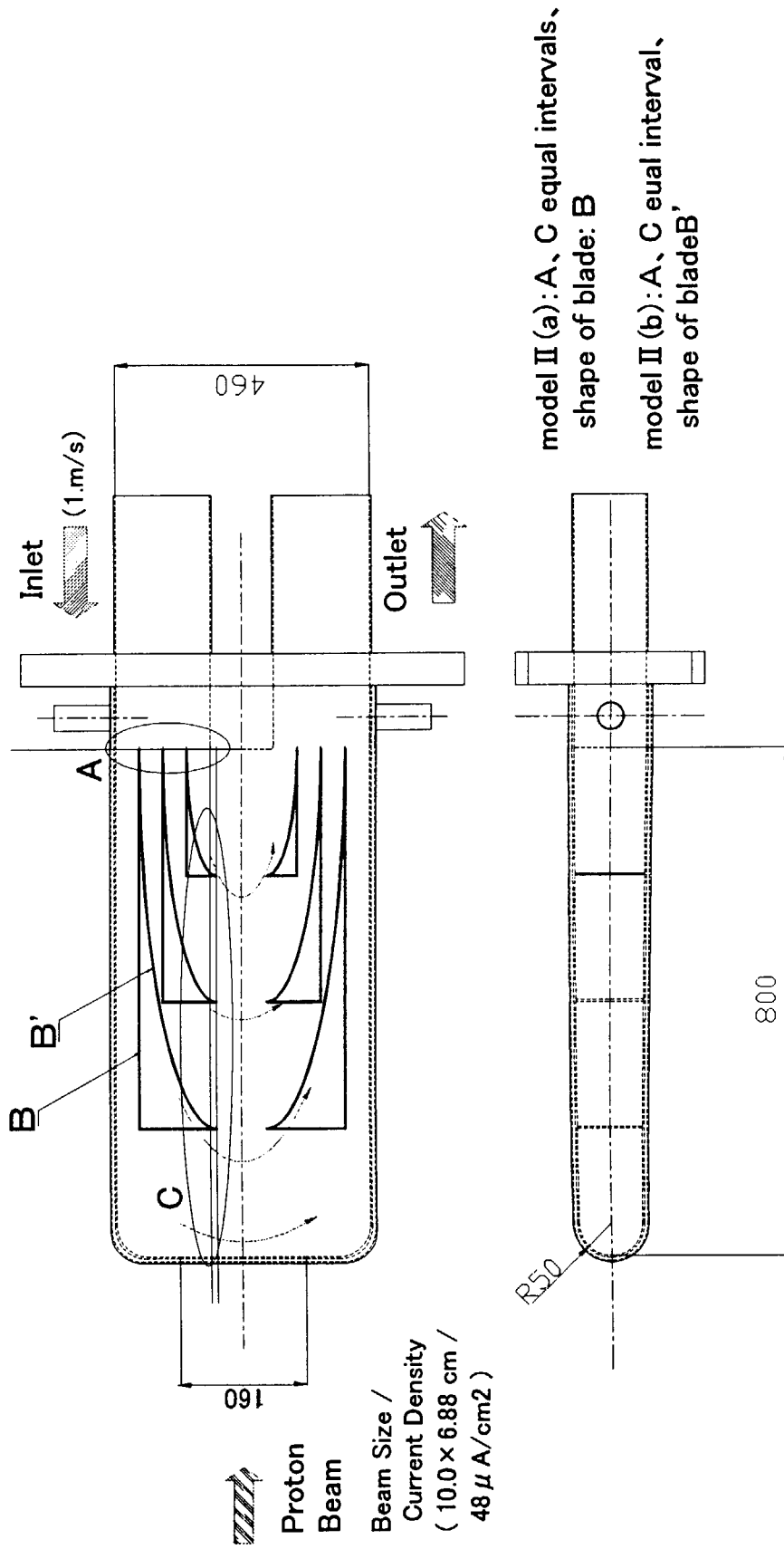


Fig.3.8 Optimization of internal structure (Model II)

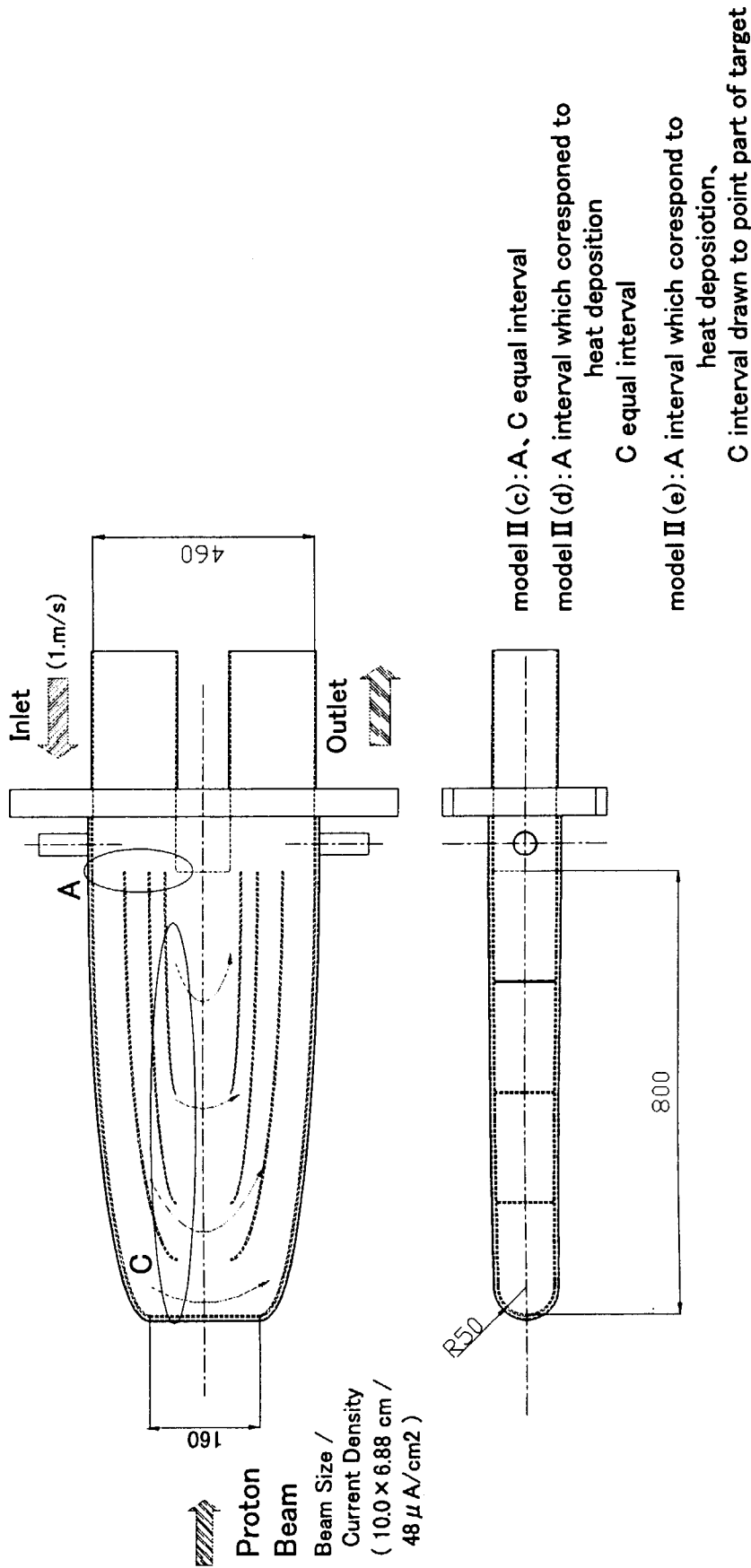
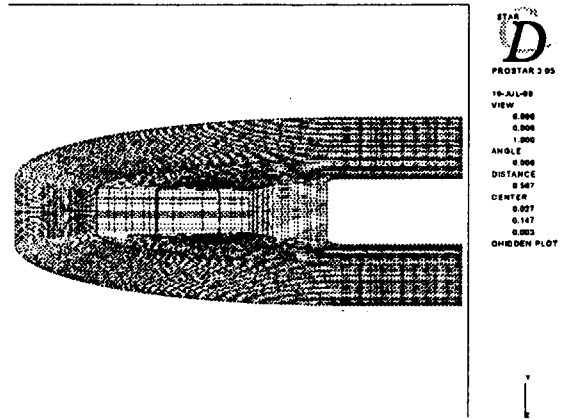
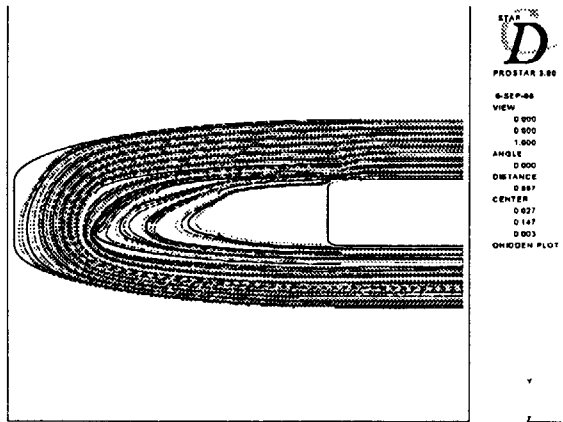


Fig.3.10 Optimization of internal structure (Model II)

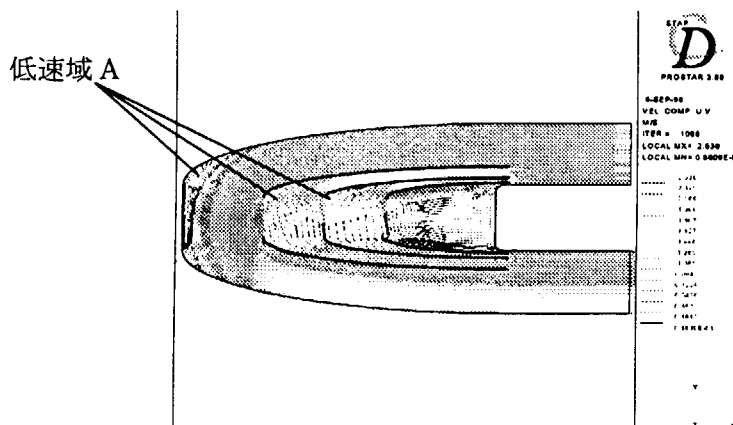


Mesh:25000

(a) Computational Grids



(b) Particle tracks



(c) Velocity distribution

Fig.3.11 Flow pattern of Model II (e)

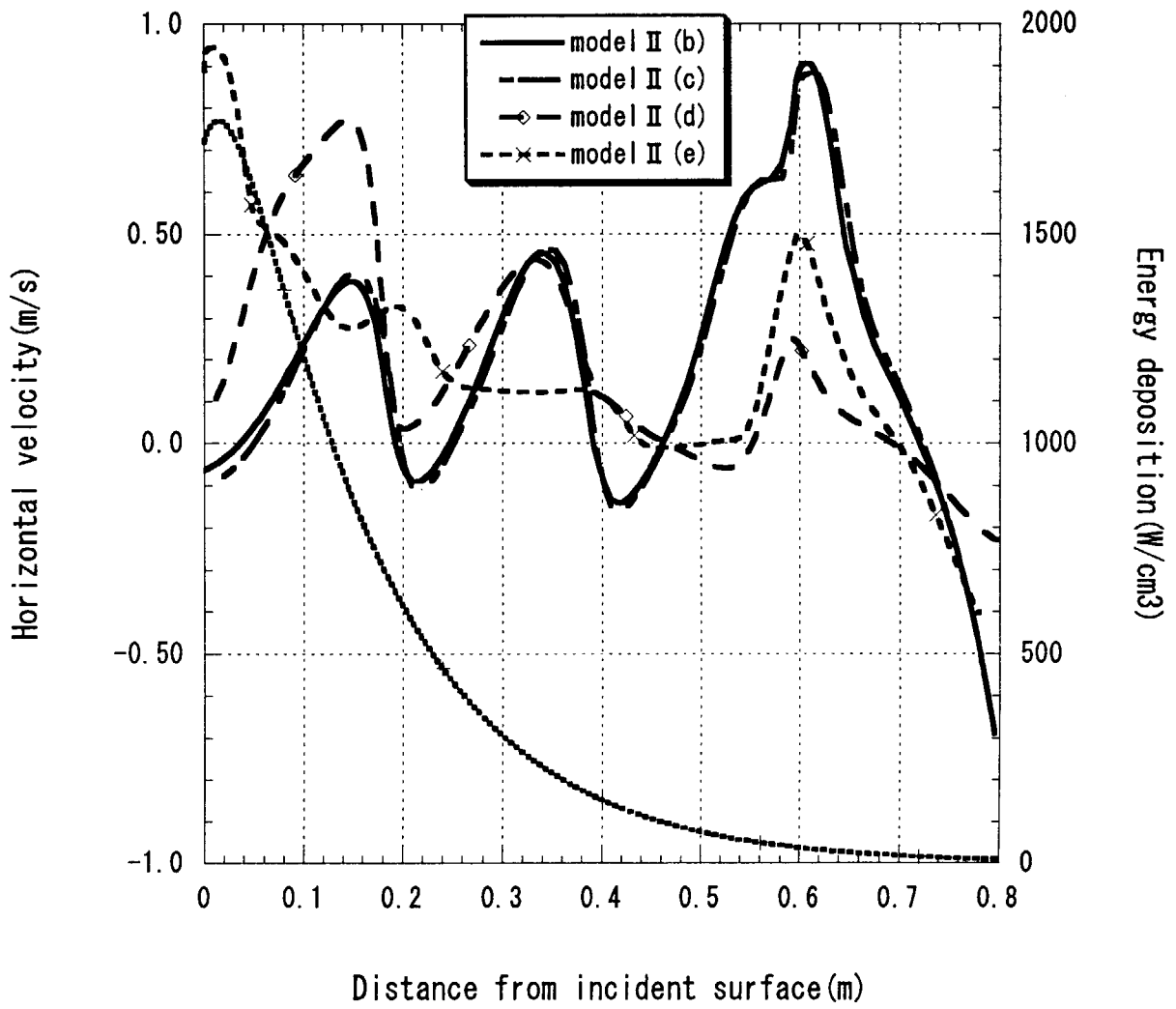


Fig.3.12 Horizontal velocity distributions on the target center axis of Model II

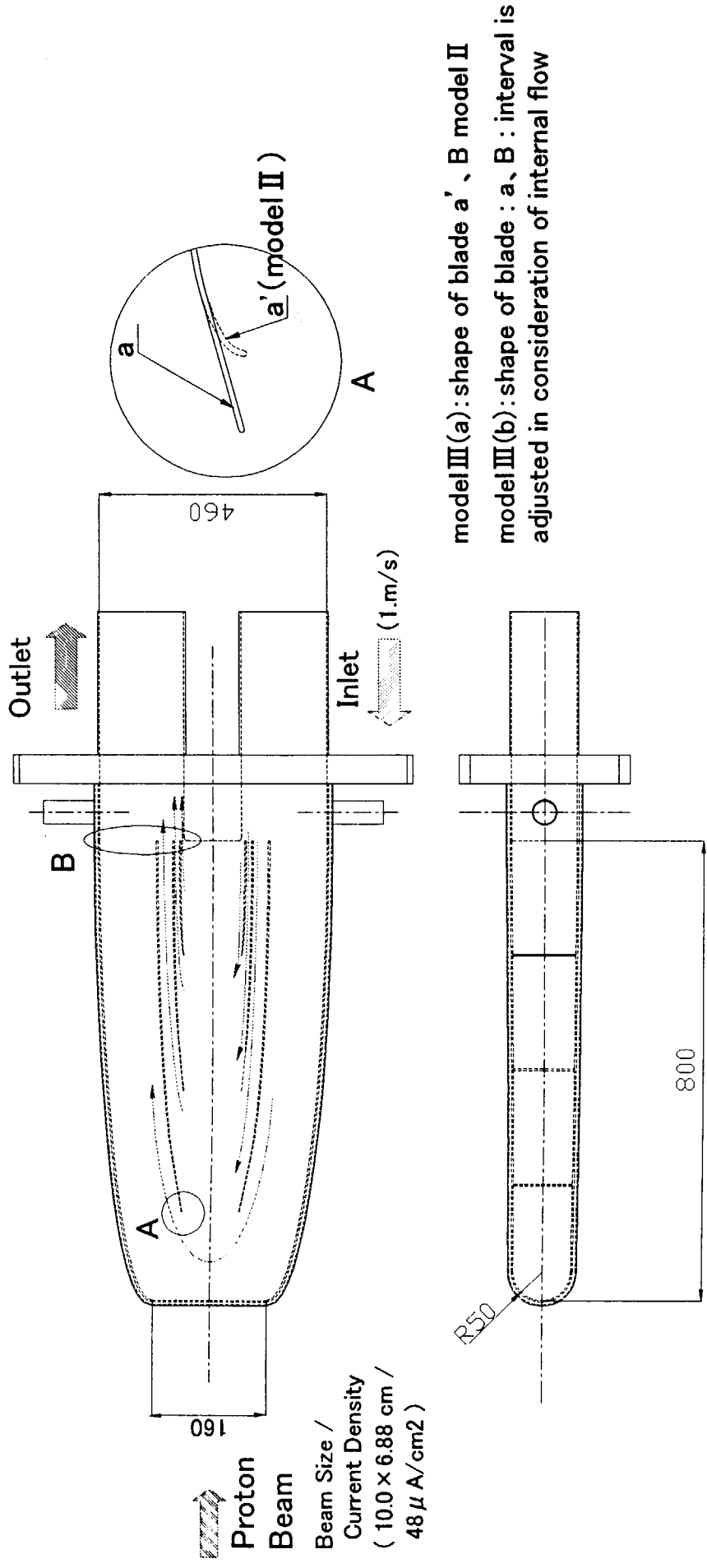


Fig.3.13 Optimization of internal structure (Model III)

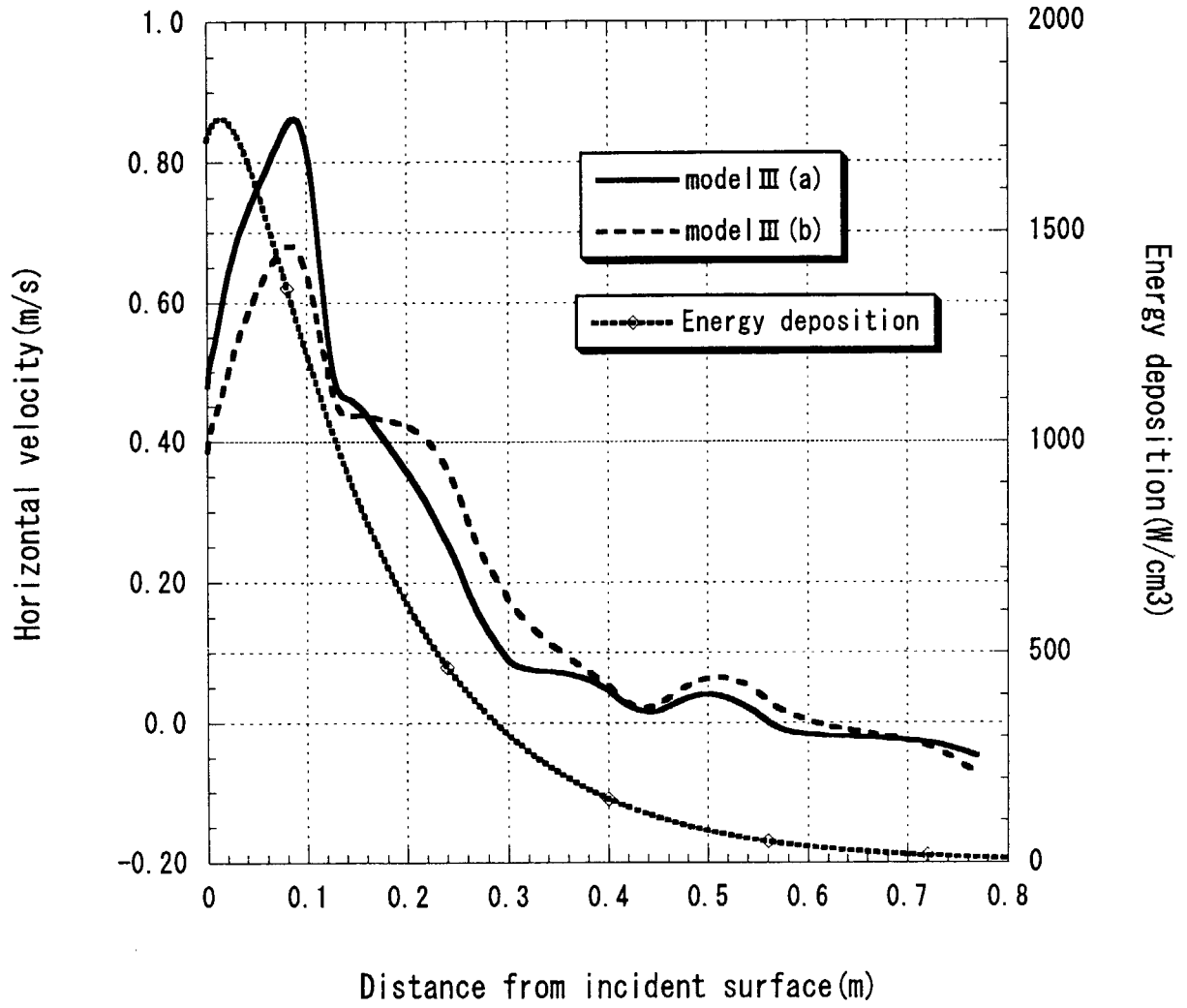


Fig.3.15 Horizontal velocity distributions on the target center axis of Model III

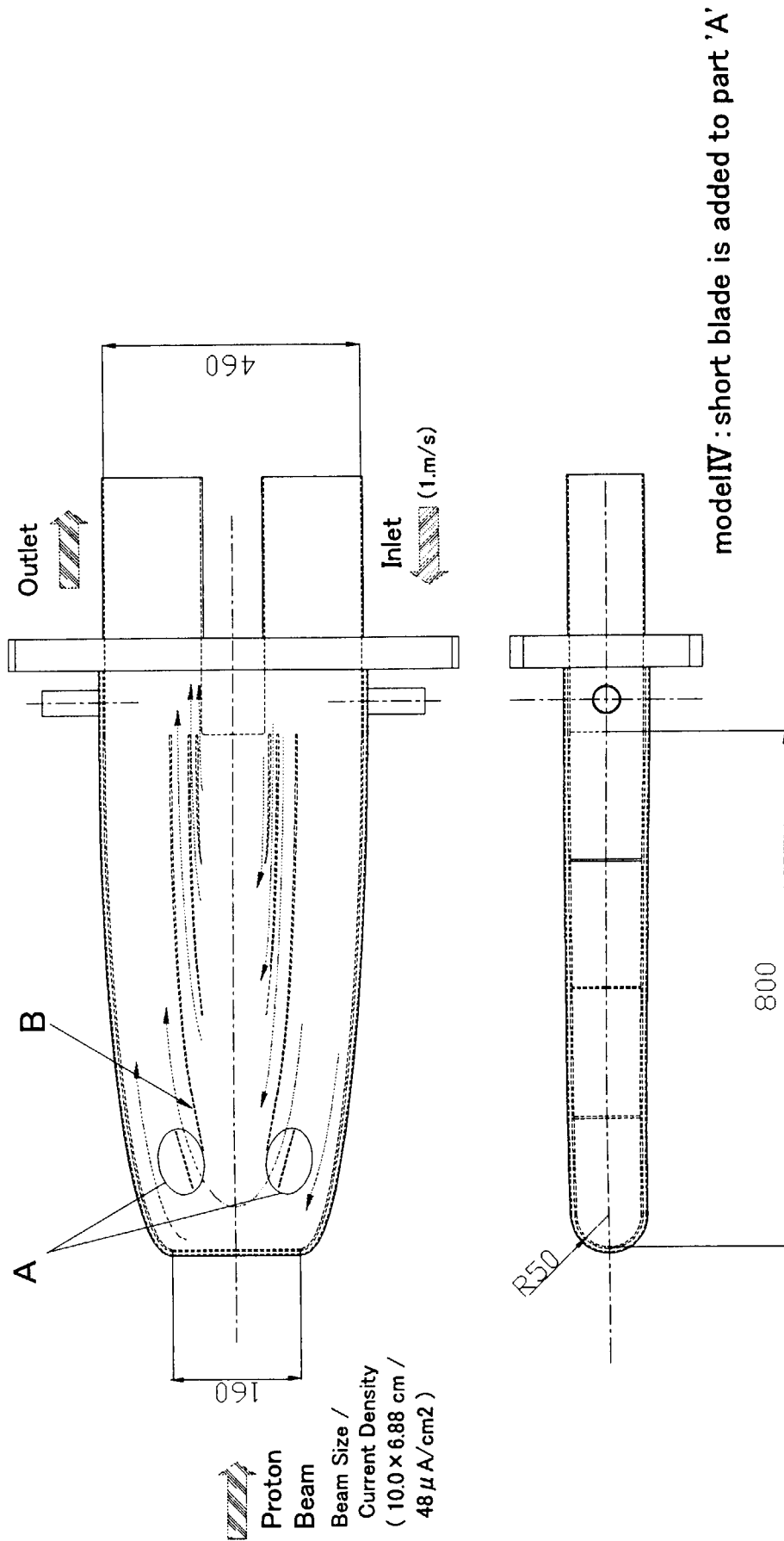


Fig.3.16 Optimization of internal structure (Model IV)

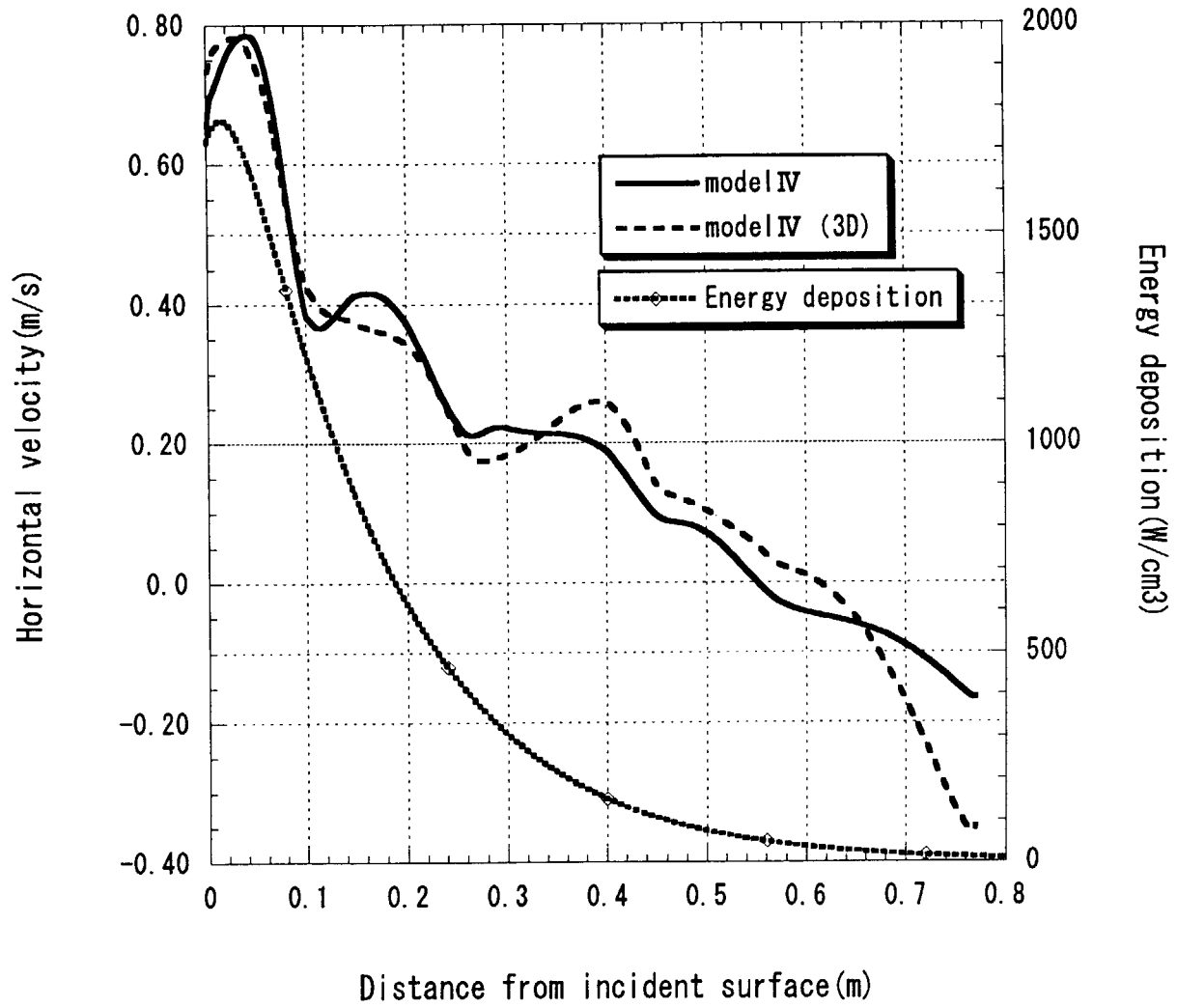
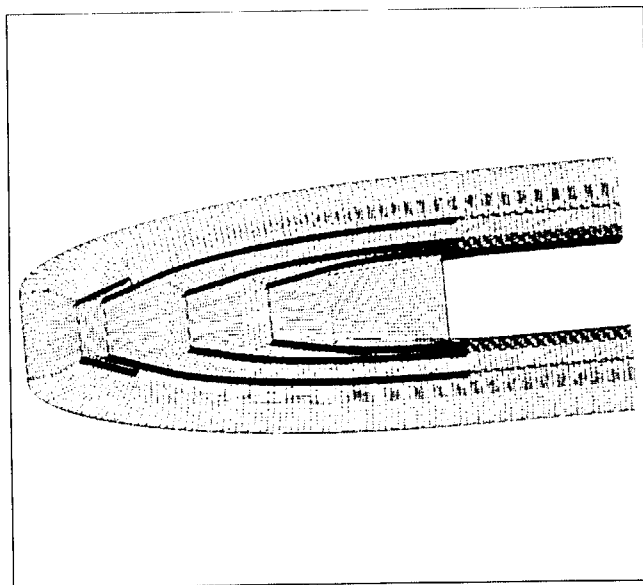


Fig.3.18 Horizontal velocity distributions on the target center axis of Model IV

This is a blank page.

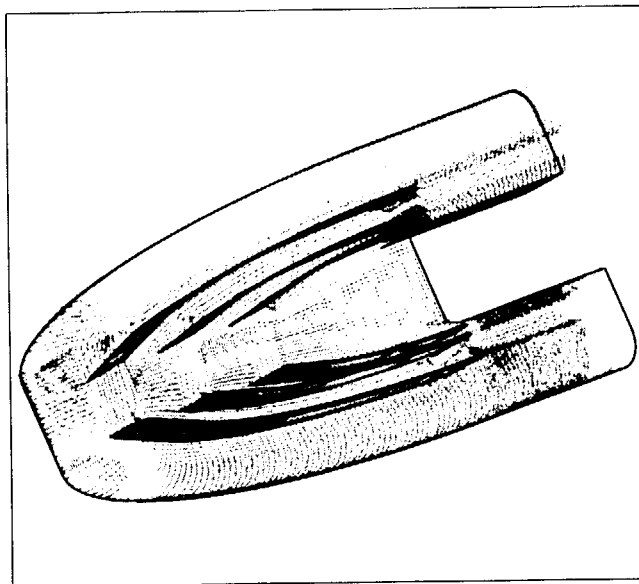


STAR
D
PROSTAR 3.05
20-JUL-98
VIEW
-0.082
-0.100
1.000
ANGLE
4.710
DISTANCE
0.578
CENTER
0.559
0.024
-0.003
HIDDEN PLOT

Mesh:250000



Model IV(3D) Computational grids



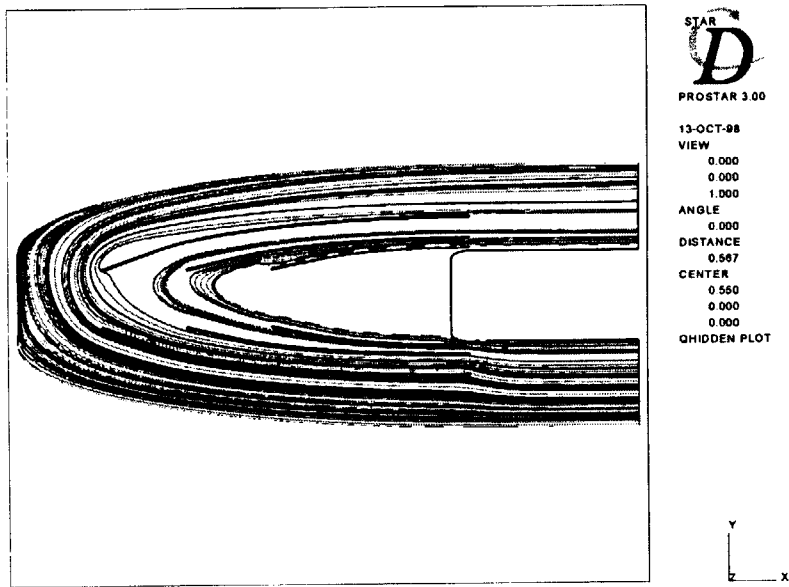
STAR
D
PROSTAR 3.00
13-OCT-98
VELOCITY MAGNITUDE
M/S
ITER = 1000
LOCAL MX= 2.244
LOCAL MN= 0.3413E-02
2.244
2.084
1.924
1.764
1.604
1.444
1.284
1.123
0.9635
0.8035
0.6435
0.4834
0.3234
0.1634
0.3413E-02



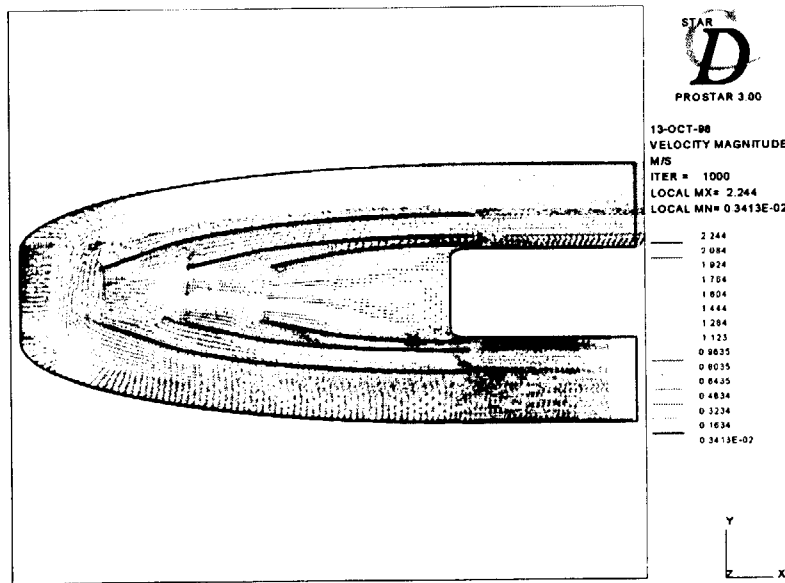
Model IV(3D) Velocity distribution

Fig.3.19 Velocity distributions of Model IV(3D)

This is a blank page.



(a) Particle tracks on horizontal section



(b) Velocity distribution on horizontal section

Fig.3.20 3-Dimensional flow patterns of Model IV(3D)

This is a blank page.

4. 検証試験

4.1 水銀ターゲットモデル

3章で示したように、陽子ビームに対して直角方向に水銀を流すクロスフロータイプ水銀ターゲット構造としてブレード（案内羽根）を用いる構造を採用することにより軸方向の発熱密度分布に応じた流量配分を達成できる目処を得た。ブレード方式の水銀ターゲット容器内部の流動解析結果を検証し、クロスフロータイプの水銀ターゲット構造の有効性を確認するために Fig.4.1 に示す水銀ターゲットモデルを設計・製作した。水銀ターゲットモデルは、良好な流量配分が得られた Model IV の内部寸法に基づき、内部の曲率に至るまで解析モデル内部構造を忠実に模擬している。流量配分検証試験は、後述の水銀ターゲットモデル試験装置（大容量水ループ）を用い、水銀に代えて水を流動させて内部の流動状況をレーザーシートを用いて可視化するとともに、流速分布測定にはパルスレーザーを用いた PIV システムを用いる。このため、ターゲットモデルは内部を可視化できるようアクリル製とし、ターゲット容器の曲面部におけるレーザーの乱反射を低減させるため、試験時には Fig.4.2 に示す水槽内にターゲットモデルを設置することとした。

水銀ターゲットモデルの主要な仕様を以下に示す。

形式	: ブレードタイプ水銀ターゲットモデル
設計圧力	: 0.2 MPa
設計温度	: 50 °C
主要材質	: アクリル
主要寸法	: 高さ 100 mm（前部）、120mm（後部） 幅 460 mm（最大）、全長 1150 mm
接続配管口径	: 250 A
付属品	: 出入口整流用ハニカム整流板

水銀ターゲットシステムの設計では、水銀ターゲットの入口水銀温度を 50°C としている。50°C の水の動粘性係数は同一温度の水銀の約 5.3 倍であることから、50°C の水の流動により水銀流動の場合のレイノルズ数を模擬するためには約 5.3 倍の流量が必要となる。解析では、水銀流量を 50m³/h としたが、水で模擬する場合には 265m³/h (4420 ℓ/min) の流量を最低限確保する必要がある。

4.2 水銀ターゲットモデル試験装置

4.1 節で述べたように、水の流動によりターゲット内部の水銀流動を模擬するためには、約 5.3 倍（50°C の場合）の流量が必要となるため、水銀ターゲットモデルの流動試験用に大容量水ポンプ（5000 ℓ/min）、冷却器、循環水供給タンク兼サージタンク、電磁流量計から成

る水銀ターゲットモデル試験装置を設計・製作した。Fig.4.3 に水銀ターゲットモデル試験装置のフローシートを示す。ターゲットモデル試験装置は、主要な機器をユニットとして製作し、各ユニット（大容量ポンプユニット、循環水浄化供給ユニット、冷却器ユニット、流量計ユニット）を組み替えることにより他の試験にも対応できるよう考慮した。以下に各ユニットの主要な仕様を示す。

(1) 大容量ポンプ

型 式：	SVG200×125R4-574 型渦巻きポンプ（日立製）
流 体 名：	水
定格流量：	最高 300m ³ /h（揚程 50 m のとき）
設計圧力：	最高 1.6 MPa
設計温度：	80°C（運転温度 最高 50°C）
本体材質：	ステンレス
接続フランジ：	JIS10K（標準）
電 動 機：	全閉外扇形、3φ 400 V 50 Hz/75 kW
数 量：	1 台

(2) 循環水浄化供給ユニット

型 式：	精製機能付き樹脂製円筒型タンク HTDM-F-003 型 （日立エンジニアリング製）
容 量：	3m ³
設計圧力：	静水頭
設計温度：	50°C（運転温度：40°C）
材 質：	F R P
設置寸法：	幅 3000 mm、奥行き 3000 mm、高さ 2500 mm（概略）
数 量：	1 基

付属主要機器

(a) 純水タンク

型 式：	樹脂製円筒型タンク
数 量：	1 基

(b) 水精製ユニット

・水フィルタ

型 式：	カートリッジ型フィルター
材 質：	ケーシング SUS等 フィルター ポリエチレン他
処理流量：	1.5m ³ /h
ろ過精度：	5μm

設計圧力：0.4 MPa (運転圧力：0.2 MPa)

設計温度：50°C (運転温度：40°C)

数 量：1 基

・脱塩器

型 式：カートリッジ型脱塩器

処理流量：1.5m³/h

設計圧力：0.4 MPa (運転圧力：0.2 MPa)

設計温度：50°C (運転温度：40°C)

数 量：1 式 (2 基並列運転)

・浄化ポンプ

型 式：縦置き多段渦巻き式ポンプ

定格流量：1.5m³/h

定格揚程：20m

設計圧力：0.4 MPa

設計温度：50°C (運転温度：40°C)

材 質：SUS304

電 動 機：電源/出力：3φ200 V、0.4 kW

数 量：1 台

(3) 冷却器ユニット

型 式：プレート式熱交換器ユニット HTCW-V-001 型
(日立エンジニアリング製)

設計圧力：0.7 MPa (運転圧力：0.5 MPa (最大))

設計温度：50°C (運転温度：40 °C)

伝熱面積：約 20m²

主用材質：本体 SUS304

流 体 名：	高 温 側	低 温 側
	1 次冷却水	2 次冷却水

流 量：	300m ³ /h	約 30m ³ /h
------	----------------------	-----------------------

入口温度：	約 30°C	約 25°C
-------	--------	--------

出口温度：	約 29°C	約 28°C
-------	--------	--------

交換熱量：約 100 kW

接続口径：主配管 250A (JIS10KF 取合い)
冷却水 80A (JIS10KF 取合い)

設置寸法：横 1500 mm、縦 2000 mm、奥行き 2500 mm (概略)

数 量：1 基

(4) 電磁流量計ユニット

型番： YIS-M-M(150A-50A)-D (山武産業システム製)
概略寸法： 幅約 5000 mm、高さ約 1500 mm、奥行き約 500 mm.
設計圧力： 1.0 MPa
設計温度： 50°C
ユニット取合部： 250A フランジ
主要機器：

・電磁流量計 1 (口径 150A)

名称： スマート MagneW3000 電磁流量計変換器
変換器： KIX20B-I12X2TV-XXX (山武製)
数量： 1 台
電源： AC220 V
出力： DC 4-20 mA

・電磁流量計 1 用検出器

型番： MGG11D-150P11LS4AAA-X2-A (山武製)
数量： 1 台
口径： 150 mm
接続： JIS10K ウエハ
電極： SUS316L
面間寸法： 160 mm

・電磁流量計 2 (口径 50A)

名称： スマート MagneW3000 電磁流量計変換器
変換器： KIX20B-I12X2TV-XXX (山武製)
数量： 1 台
電源： AC220 V
出力： DC 4-20 mA

・電磁流量計 2 用検出器

型番： MGG11D-050P11LS4AAA-X2-A (山武製)
数量： 1 台
口径： 50 mm
接続： JIS10K ウエハ
電極： SUS316L
面間寸法： 86 mm

・導電率計

名称： 工業用導電率計変換器

変換器： WD36D-4-61C10A1A100 (DKK 製)
数 量： 1 台
電 源： AC220 V
レンジ： 0～10 μ S/cm
出 力： DC 4-20mA
表 示： デジタル指示計付

・導電率計検出部

検出部： A11D-0-A10YYY1A00 (DKK 製)
数 量： 1 台
材 質： SUS316
挿入長： 150 mm

4.3 水銀ターゲットモデル検証試験

水銀ターゲットモデル試験は、4.1 節で述べたアクリル製水銀ターゲットモデルおよび水槽を水銀ターゲットモデル試験装置に接続し、水流量をパラメータとして水銀ターゲットモデル内の流動パターンをレーザーシートにより可視化して観察するとともに、PIV システムを用いて内部の流速分布を測定する。

PIV システムにより流動状況を可視化するに当たっては、良好な画像を得るためにシーディング粒子の大きさ及び比重等が重要となるが、これらについては、これまで模擬冷減速材容器内の可視化⁽¹⁰⁾で使用したエクспанセル (DU#461) を用いる予定である。エクспанセルは、塩化ビニリデン/アクリルニトリルのコポリマーを殻とし、発泡剤としてイソブタンを内包・カプセル化した熱膨張性マイクロカプセルである。本実験のように使用温度が低い (50℃) 実験中に大きな温度変化を生じないので、熱膨張性については実験に影響を及ぼすことはない。粒子径は、平均で 10 から 16 μ m である。比重も 1.3 と比較的水に近いことから直ちに沈殿することもなく可視化時において良好な性質を示す。

試験で得られた結果は、試験と並行して実施する水物性値を用て試験条件を模擬した水銀ターゲットモデルの解析結果と比較・検討し、解析モデルの妥当性等を検証する予定である。

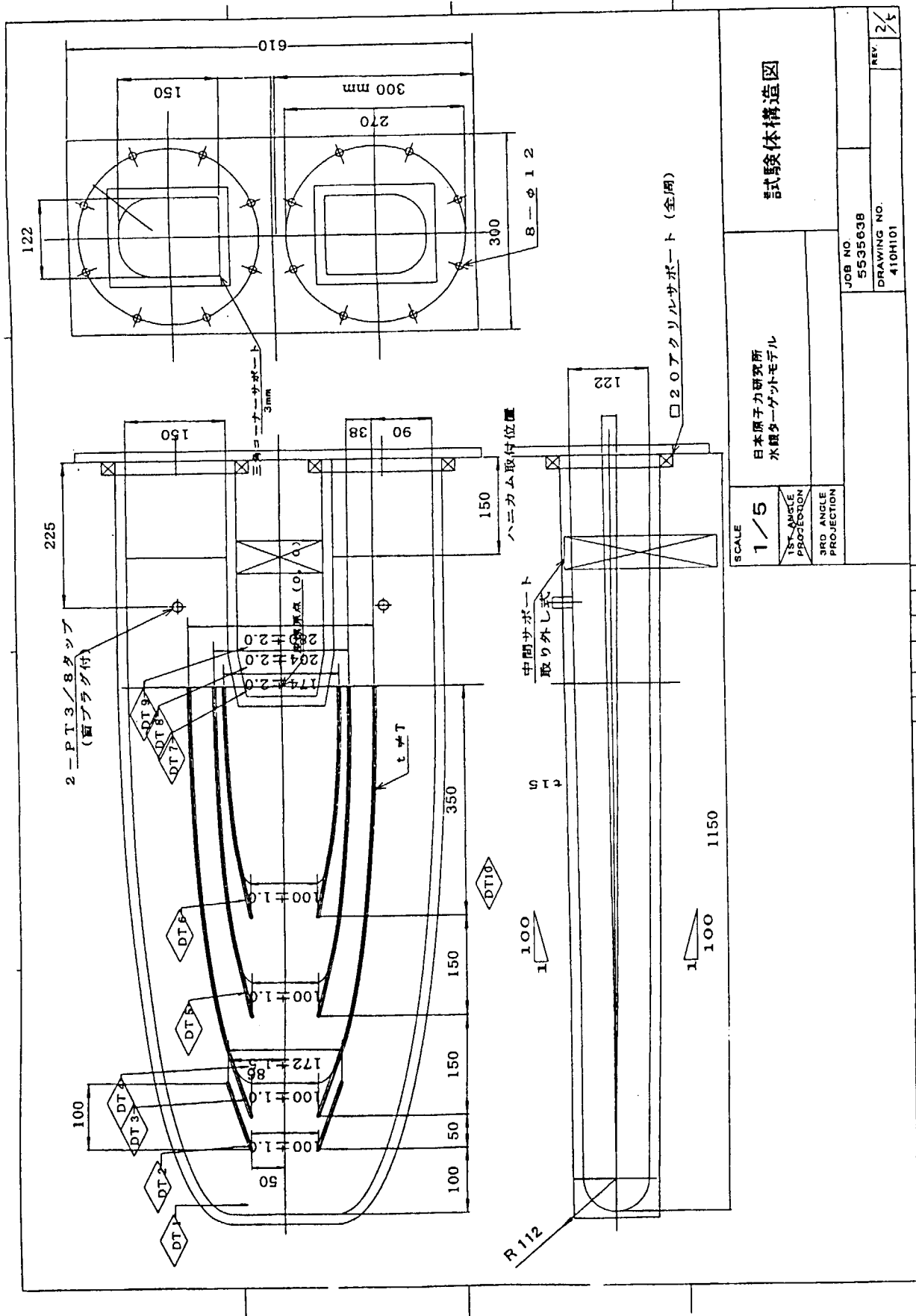


Fig. 4.1 Mercury target model

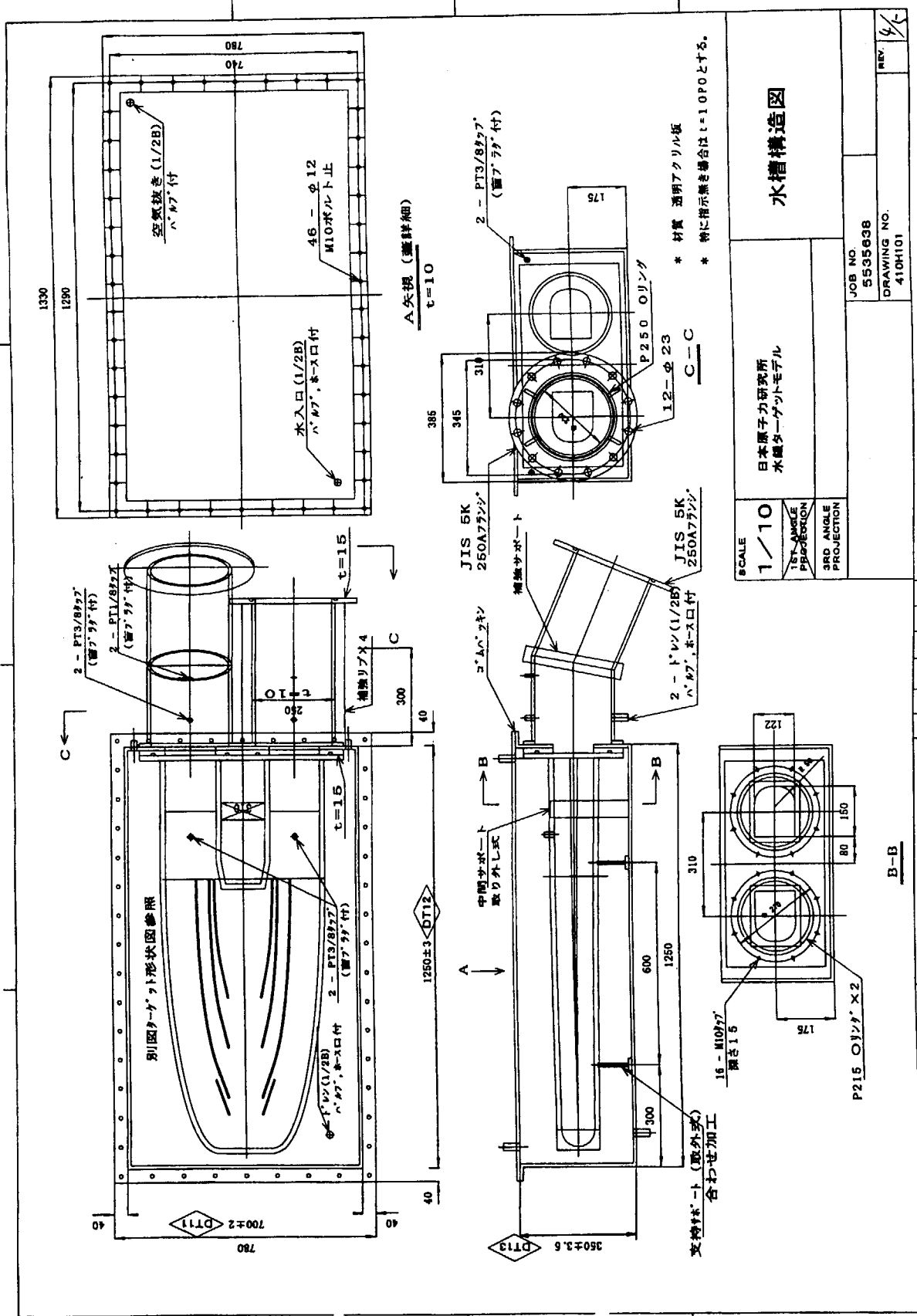


Fig.4.2 Mercury target model with lucid container

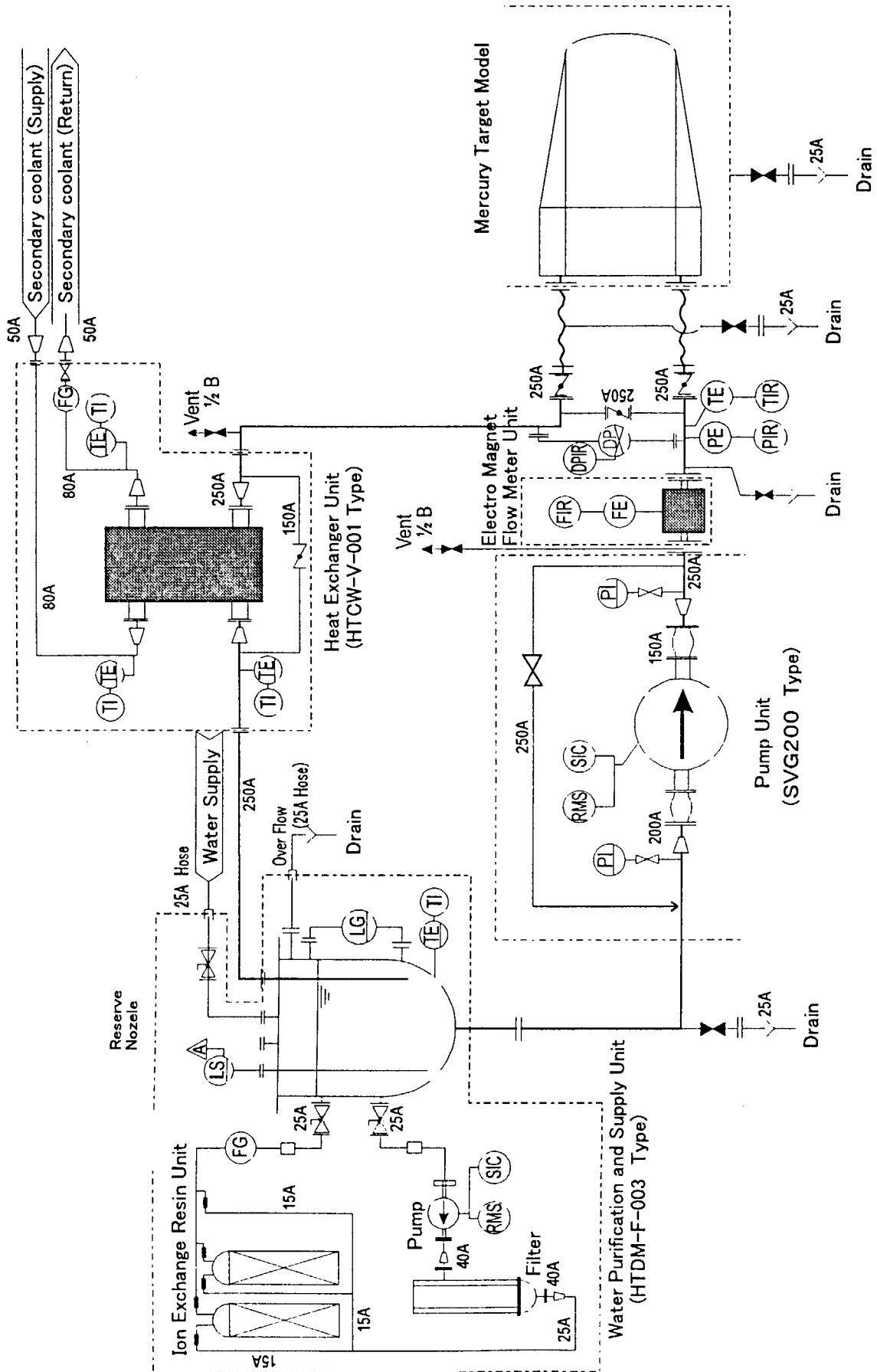


Fig.4.3 Flow diagram of water loop for mercury target flow experiments

5. あとがき

現在計画中の5 MW規模の大強度核破砕中性子源として提案したブレードタイプクロスフロー型水銀ターゲットについて、熱流動の観点から構造成立性の検討を行った。直線翼列案内羽根から始めた内部構造の最適化は、案内羽根（ブレード）の形状と間隔比を調整することにより発熱密度分布に応じた流量配分を達成できる見通しを得た。

今後は、解析結果を検証してブレード構造の有効性を確認するため、PIVシステムなどのレーザー流速計を活用して、水による流動特性試験を実施する予定である。そして、水によるターゲット流動特性試験と解析結果の検証を行うとともに、水銀、およびビーム窓の発熱を考慮した熱流動解析を実施し、容器内温度分布の平坦化（設計目標 300°C以下）を図る構造を提案する。さらに、重水冷却系を取り入れた二重容器構造をモデル化し、ターゲット容器の定常熱応力について評価検討を進めていく予定である。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、核熱利用研究部 稲垣嘉之氏には貴重な助言を戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1)Y.Oyama, R.Hino, N.Watanabe, M.Mizumoto, T.Mukaiyama, "STATUS OF NEUTRON SCATTERING FACILITY IN JAERI NEUTRON SCIENCE PROJECT", Proceedings of 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source(ICANS-XIV), pp22-31, Utica(1998)
- (2)N.Watanabe, M.Teshigawara, H.Takada, H.Nakashima, Y.Oyama, T.Nagao, T.Kai, Y.Ikeda, K.Kosako, "A Conceptual Design Study of Target-Moderator-Reflector System for JAERI 5MW Spallation Source", Proceedings of 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source(ICANS-XIV), pp.728-742, Utica(1998)
- (3)N.Watanabe, M.Teshigawara, T.Kai, K.Iga, H.Takada, H.Nakashima, Y.Oyama, T.Nagao, Y.Ikeda, K.Kosako, "Target-moderator-reflector optimization for JAERI 5MW pulsed spallation neutron source", 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7), Tokyo, Paper No.7248, (1999)
- (4)B.R.Appleton, "A Progress Report on the Spallation Neutron Source", Proceedings of 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XIV), pp.32-40, Utica(1998)
- (5)H.Lengeler, "THE EUROPEAN SPALLATION SOURCE STUDY (ESS)", Proceedings of 13th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XIII), pp.819-830, Villigen PSI(1995)
- (6)R.Hino, M.Kaminaga, T.Aso, H.Kogawa, S.Ishikura, A.Susuki, A.Terada, H.Kinoshita, K.Haga, "Spallation Target Development at JAERI", Proceedings of 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XIV), pp.252-268, Utica(1998)
- (7)M.Kaminaga, R.Hino, A.Susuki, M.Sakashita, F.Nakamura, H.Tagawa, "Thermal and Hydraulic Design of Mercury Target -Cross Flow Type-", Proceedings of 14th Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source(ICANS-XIV), pp.269-277, Utica(1998)
- (8)M.Kaminaga, A.Terada, S.Ishikura, M.Teshigawara, Y.Sudo, R.Hino, "MERCURY TARGET DEVELOPMENT FOR JAERI SPALLATION NEUTRON SOURCE", 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7), Tokyo, Paper No.7123, (1999)
- (9)日野竜太郎、羽賀勝洋、会田秀樹、関田健司、小磯浩司、神永雅紀、数土幸夫、高橋浩道、"大強度陽子加速器ターゲット試験用大型水銀ループの検討"、JAERI-Tech 97-009、(1997)
- (10)麻生智一、神永雅紀、寺田敦彦、日野竜太郎、"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)

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 ⁻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
工率, 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	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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量当量	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関係理事会指令では 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 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)
	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	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	= 735.499 W
	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	

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

ブレードタイプクロスフロー型水銀ターゲットの開発 第一報：流動特性解析と検証モデルの製作