

JAERI-Tech
2000-076



JP0150251



格納容器 (Safety Hull) 一体型水銀
ターゲット構造の検討

2001年1月

神永 雅紀・寺田 敦彦・羽賀 勝洋・木下 秀孝・
石倉 修一・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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

格納容器 (Safety Hull) 一体型水銀ターゲット構造の検討

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
神永 雅紀・寺田 敦彦*・羽賀 勝洋・木下 秀孝
石倉 修一・日野 竜太郎

(2000年10月4日受理)

日本原子力研究所(原研)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が建設計画を進めている中性子散乱施設では、大強度陽子加速器から1MWのパルス状陽子ビームを水銀ターゲットに入射させ、核破砕反応により発生した大強度の中性子を生命・物質科学等の先端分野の研究に利用する予定である。核破砕水銀ターゲットシステム設計では、ビーム窓等の破損により水銀が漏洩する場合を想定し、その場合においても十分な安全性を確保できるように漏洩時の水銀を容易に回収可能な格納容器一体型構造の概念を提案した。水銀容器の内部構造は、3GeV・1MWの陽子ビーム条件の基で実施した熱流動解析結果に基づき決定した。格納容器はヘリウム容器/重水容器の二重容器により構成し、各容器外側に設けた容器補強材であるリブを介して水銀容器/ヘリウム容器/重水容器を接続する構造とした。格納容器一体型水銀ターゲット容器の成立性については、最大運転圧力0.5MPaに余裕をみた内圧0.8MPaを付加した静的な構造強度解析により検討した。その結果、内圧により容器に生ずる静的な応力は、各容器の表面にリブによる補強を加えることによりSUS316Lの許容応力142.5MPa以下にできる見通しを得た。

Study of Integrated Structure of Mercury Target Container with Safety Hull

Masanori KAMINAGA, Atsuhiko TERADA*, Katsuhiko HAGA,
Hidetaka KINOSHITA, Shuichi ISHIKURA and Ryutaro HINO

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

(Received October 4, 2000)

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) are promoting a plan to construct a neutron scattering facility. In the facility, 1 MW pulsed proton beam from a high-intensity proton accelerator will be injected into a mercury target in order to produce high-intensity neutrons. In the spallation mercury target system design, an integrated structure of target container with a safety hull was proposed to ensure the safety and to collect mercury in a case of mercury leakage caused by the target beam window failure. The inner structure arrangement of the mercury target container was determined based on the thermal hydraulic analytical results of 3 GeV, 1 MW proton beam injection. The safety hull consists of containers for helium and heavy water. The containers for mercury target, helium and heavy water will be connected each other by reinforcement ribs mounted on the surface of each container. As for the feasibility of the integrated mercury target container with the safety hull, the static structure strength analyses were carried out under the condition of an internal pressure of 0.8 MPa, which was determined based on the maximum operation pressure of 0.5 MPa and the safety margin, in order to clarify its structural strength. As a result, it was made clear that the maximum static stress appeared on the each container by the internal pressure could be suppressed less than the allowable stress of SUS316L at 300 °C, 142.5 MPa, by adding reinforcement ribs on the surface of each container.

Keywords: Neutron Scattering Facility, Proton Beam, Mercury Target, Target Container,
Integrated Structure, Safety Hull, Structural Strength

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

目 次

1. 緒 言	1
2. 水銀ターゲット本体構造概要	2
2.1 水銀ターゲット本体構造概要	2
2.2 水銀ターゲット熱流動解析結果	3
3. 格納容器一体型水銀ターゲット構造の検討	13
3.1 設計条件	14
3.2 構造解析	15
3.3 格納容器一体型水銀ターゲット構造図	21
3.4 製作方法及び製作上の課題	22
3.5 今後の検討課題	22
4. 結 言	69
謝 辞	69
参考文献	70

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Mercury Target Container Structure	2
2.1 Outline of Mercury Target Container Structure	2
2.2 Thermal Hydraulic Analytical Results of Mercury Target	3
3. Investigation of Integrated Structure of Mercury Target Container with Safety Hull	13
3.1 Design Basis	14
3.2 Structural Analysis	15
3.3 Drawing of Integrated Structure of Mercury Target Container with Safety Hull	21
3.4 Method and Subjects in Fabrication	22
3.5 Future Examination Subjects	22
4. Concluding Remarks	69
Acknowledgements	69
References	70

1. 緒 言

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、増大する中性子ビームの需要に応えるとともに生命・物質科学に関する新しい研究領域の開拓を開拓するため、中性子散乱施設を中核とした生命・物質科学研究施設の建設計画を進めている⁽¹⁾。中性子散乱施設では、大強度陽子加速器から1MWのパルス状陽子ビームを水銀ターゲットに入射させ、核破砕反応により発生した大強度の中性子を生命・物質科学等の先端分野の研究に利用する予定である。

水銀ターゲット本体内部構造に関しては、3次元熱流動解析に基づきMW規模の核破砕中性子源用に、クロスフロー型(Cross-Flow Type : CFT)水銀ターゲット構造を開発した⁽²⁾。米国のSNS計画⁽³⁾及びヨーロッパのESS計画⁽⁴⁾では反転流型(Return-Flow Type : RFT)水銀ターゲットを採用することとしており、再循環流による過大なホットスポットの発生と高速の水銀流でビーム窓部を冷却することによるエロージョンの低減が工学的な課題となっている。原研が提案したCFTターゲットは、ホットスポット部の温度が極めて低く、また、内部の水銀流速が制御可能であるとともに、流量配分を制御する分配板が容器の補強材として適切に機能するという優れた特徴を有している。

一方、水銀ターゲットシステムの設計では、安全性を確保しつつ中性子収率等の性能向上を図ることを基本方針として設計を進めている⁽⁵⁾。この方針に基づき、水銀ターゲットに関してはビーム窓等の破損により水銀が漏洩する場合を想定し、その場合においても十分な安全性を確保できるように漏洩時の水銀を容易に回収可能な格納容器 (Safety Hull) をターゲット容器の外側に設け、多重構造とすることを検討している。水銀ターゲット容器は、陽子ビームの入射及び核破砕により発生する高エネルギー中性子による照射並びに核破砕反応に伴う過酷な熱負荷の下で使用されるため、照射損傷により数ヶ月間の運転毎に交換が必要である。

ターゲットの交換は、容器が陽子ビーム入射及び核破砕によって発生する高エネルギー中性子の照射により高度に放射化しているため、リモートハンドリングにより実施する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。リモートハンドリングによる交換は、施設の稼働率を向上させるために運転停止から再起動作業を含めて1週間以内の短期間で実施することが要件となっている。格納容器を設けた場合、格納容器の陽子ビーム入射部もターゲットと同様に照射損傷を受けるため、格納容器の交換も同時に必要となる。ターゲット容器と格納容器を、それぞれ交換するとリモートハンドリングによる交換手順が複雑になり、かつ、作業時間も長くなる。そこで、この問題点を解決するためにターゲット・格納容器一体型ターゲット構造を提案した。

本報告書では、熱流動解析により決定したクロスフロー型ターゲットの内部構造に基づき、リモートハンドリングによる操作性を考慮して具体的なターゲット・格納容器一体構造について検討した結果を示す。第2章に熱流動解析により決定したターゲット内部構造の概要を示し、第3章ではターゲット・格納容器一体構造を検討する際の設計条件、一体型構造に対する静的応力解析結果、一体型ターゲット構造の特徴、今後の検討課題を示した。

2. 水銀ターゲット本体構造概要

2.1 水銀ターゲット本体構造概要

米国のSNS計画及びヨーロッパのESS計画で採用が予定されている水銀ターゲットは、いずれも水銀をターゲット後部からターゲット先端部に向けて入射する陽子ビームに対して並行に流し、ターゲット先端部のビーム窓部で流れを反転させ、その後核破碎により発熱する領域を出口に向けて流す、いわゆる反転流方式 (Return-Flow Type) である。Fig.2.1にSNS計画における反転流方式水銀ターゲット構造を示す⁽⁸⁾。この構造は、ターゲット本体をコンパクトにでき、容器内の構造が単純である等の利点があるものの、水銀の温度上昇を低く抑えるためには、水銀流速を高める必要があり、窓部構造材のエロージョンや、流れが反転した後の再循環流の発生による局所的な温度上昇が問題となる。

Fig.2.2に原研が提案している案内羽根 (Flow distribution Blade) を用いたクロスフロー型 (Cross-Flow Type) ターゲット本体 (格納容器を除く) の概要を示す。本構造は、反転流方式の上記の技術的な課題を解決するために提案したものである。特徴としては、①ターゲット内部の軸方向核発熱密度分布に応じた流量配分が可能であること、②最も発熱の厳しいビーム窓近傍で再循環流を生じることが無いこと、③エロージョンを抑制するためにビーム窓部の流速を案内羽根の配置により制御可能であることが挙げられる。

ターゲット後部から流入した水銀は、案内羽根に沿って入口側プレナムを流れ、発熱部を陽子ビームに対して直交 (クロス) するように流れ、出口側プレナムに設けた案内羽根に沿ってターゲット出口へと流れる。ビーム窓部の除熱は、陽子ビームパワーが2MW以下の場合には内部を流れる水銀により行い、大強度陽子加速器計画の最終目標である5MW運転時には、後述する格納容器とは別に水銀ターゲット容器本体を二重容器構造として外側容器と内側容器間に重水を流して水銀ターゲット本体のビーム窓を冷却することを計画している。容器材料はSUS316、主要寸法はビーム窓部において高さ80mm、幅260mm、有効長さ800mmである。なお、構造の詳細を3.2.1に述べる。

Table 2.1に水銀ターゲットの熱負荷を示す。原研とKEKが共同で進めている大強度陽子加速器計画では陽子エネルギー3GeVで設計を進めており、陽子エネルギー1.5GeVは、大強度陽子加速器計画に先立って原研が中性子科学計画の下で検討を進めていた条件を参考として示してある。第1期では、陽子電流値0.333mAで1MWの陽子ビーム入射を計画しており、第2期では5MWを目指している。設計では、入射エネルギーの約55%の発熱がターゲット内部で生じることを想定しており、1MW時には0.55MWの発熱がある。この値にはニュートロニクス解析結果に30%のマージンを見込んでいる。

Fig.2.3に水銀ターゲット内の軸方向発熱密度分布 (時間平均値) を示す。ターゲットに入射する陽子ビーム形状は、幅13cm、高さ5cmの矩形一様分布のビームを想定している。図には、陽子エネルギー3GeVのとき、ビームパワーが1MW、2MW、5MWの場合をそれぞれ示してある。また、比較のために陽子エネルギー1.5GeVの場合の軸方向発熱密度分布も示した。3GeVと1.5GeV

の場合を5MW同士で比較すると、3GeVの場合の発熱密度のピーク値は1.5GeVの場合よりも低く、平坦化する傾向を示す。3GeVにおける発熱密度の最大値は、5MWの場合1861W/cm³、2MWの場合744W/cm³、1MWの場合372W/cm³である。一方、陽子ビームが入射する窓部（SUS316）の発熱密度は、同じく3GeVにおいて5MWでは848W/cm³、2MWでは339W/cm³、1MWでは170W/cm³である。

2.2 水銀ターゲット熱流動解析結果

ターゲット・格納容器一体型構造は、第1期で計画している陽子ビームパワーが1MWの場合について先ず検討することとした。本節では、陽子ビームパワー1MWの場合のターゲット熱流動解析結果を示す⁹⁾。

Fig.2.4及びFig.2.5(a)、(b)に陽子エネルギー3GeV、ビームパワー1MWの場合のクロスフロー型水銀ターゲットの3次元熱流動解析結果を示す。解析には、汎用熱流動解析コードSTAR-CDを用い、乱流モデルとしては、標準のk-εモデルを用いた。主要な解析条件を以下に示す。

ターゲット入口水銀温度	: 50°C
入口平均水銀流速	: 1.0 m/s
水銀容器外側境界条件	: 断熱
ビーム窓肉厚 (SUS316)	: 2.5 mm (ビーム入射部のみの容器発熱を考慮)

Fig.2.4はターゲット高さ方向中央部の水平断面の水銀流速分布を、Fig.2.5(a)はターゲット内部の3次元流況分布を、Fig.2.5(b)は温度分布をそれぞれ示したものである。Fig.2.4に示すように、陽子ビーム窓近傍の最も発熱密度の高い部分においては、局所的な温度上昇を招く再循環流は生じていない。一方、ターゲット入口側及び出口側に設けた案内羽のうち外側から2枚目の案内羽に挟まれた発熱領域の中央から後半部にかけて、再循環流が生じており、この部分の流速が他の領域に比べ遅くなっている。この部分の流れについては、案内羽根の配置及び枚数の変更により解消することは可能であるが、本ターゲット構造は1MWの陽子ビーム入射を想定して設計しており、後述するようにこの部分の温度上昇が設計目標300°C以下に収まっていることから、1MW用としてはこの内部構造で設計検討を進めている。

ターゲット内部における水銀最高温度は、ターゲット内の発熱密度の低い部分に生じている再循環部で115.2°Cであり、設計目標300°Cに比べ十分に低く、出口平均温度は76.4°Cである。一方、容器内水銀最大流速は2.3m/sで、ターゲット先端部出口側側壁で生じている。この部分は、Fig.2.6に示すように構造材肉厚が厚いため、流速が2.3m/sと比較的速いが設計上支障が生じることはない。

Fig.2.6(a)、(b)は、Fig.2.5に示したターゲット内流動状況の基で得られた容器構造材の外表面及び内表面温度分布をそれぞれ示したものである。Fig.2.5(a)には、構造材の各部の肉厚も併せて示した。これらの肉厚は、別途構造強度解析により決定すべきもので、ここに示した値は暫定的なものである。ビームパワーが1MWの場合には、ビーム窓部の発熱は、内部を流れる水銀により除

熱する設計としている。容器外表面最高温度は、ビーム入射部に生じ176.5°Cである。一方容器内側最高温度は、同様にビーム入射部に生じ140.3°Cである。これらの温度差により、ビーム窓部に発生する静的最大熱応力は約40MPaで、SUS316Lの許容熱応力約324MPa (200°C) に比べ十分に小さい。ターゲット容器に生じる応力は、この他にパルス状水銀の瞬時発熱による体積膨張に伴って生じる圧力波に起因する応力、内圧による応力があり、最終的な容器肉厚はこれらの応力が容器の許容応力範囲内に納まるように決定する。

Table 2.1 Heat loads on the cross-flow type mercury target for 5MW and 1MW operation conditions

Heat Loads on the JAERI/KEK CFT Target for 5 MW and 1 MW (1.5 GeV, 3GeV)

		JAERI	JAERI/KEK*	JAERI/KEK**
Proton Energy	(GeV)	1.5	3.0	3.0
Proton Current	(mA)	3.3	1.67	0.333
Pulse Frequency	(Hz)	50	50	25
Pulse Duration	(μ s)	1.0	1.0	1.0
Heat Deposited in Target	(%)	60	54.7	54.7
Time-Averaged Loads				
Total Beam Power	(MW)	5.0	5.0	1.0
Total Power in Target	(MW)	3.0	2.74	0.55
Maximum Volumetric Heat Generation Rate in Mercury (Power Density)	(MW/m ³)	2360	1861	372
Loads During a Single Pulse				
Energy Deposited in Target per Pulse	(kJ)	60	54.7	21.9
Maximum Energy Density in Mercury	(MJ/m ³)	47.2	37.2	14.9
Maximum Pulse Temperature Rise	(°C)	25.3	20.0	8.0
Maximum Instantaneous Volumetric Heat Generation Rate in Mercury (Power Density)	(GW/m ³)	47,200	37,220	14,880
Max. Instantaneous Rate of Temp. Rise	(°C/sec)	25.3 x 10 ⁶	20.0 x 10 ⁶	8.0 x 10 ⁶

* 2nd Stage, ** 1st Stage

SNS Target Configuration

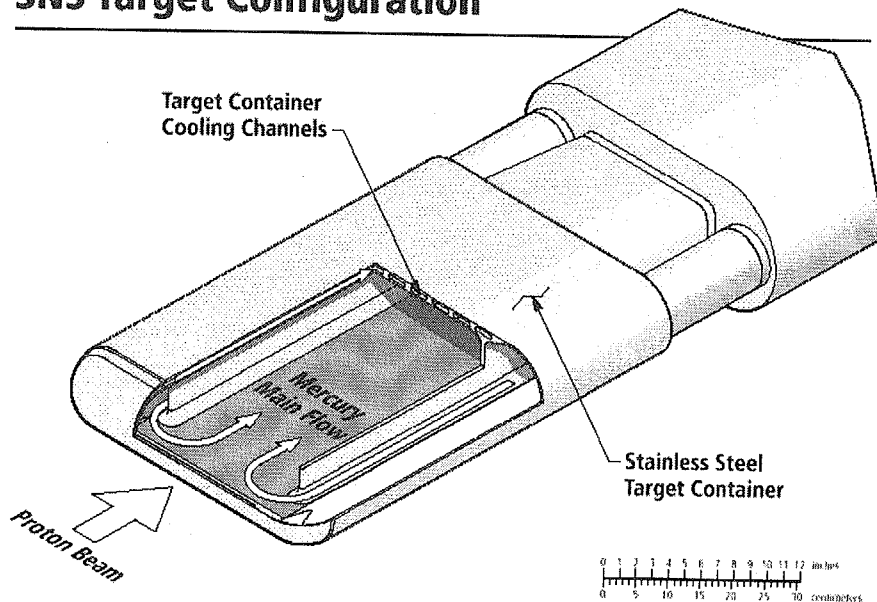


Fig.2.1 Cutaway view of return-flow type mercury target (SNS target)⁽⁸⁾

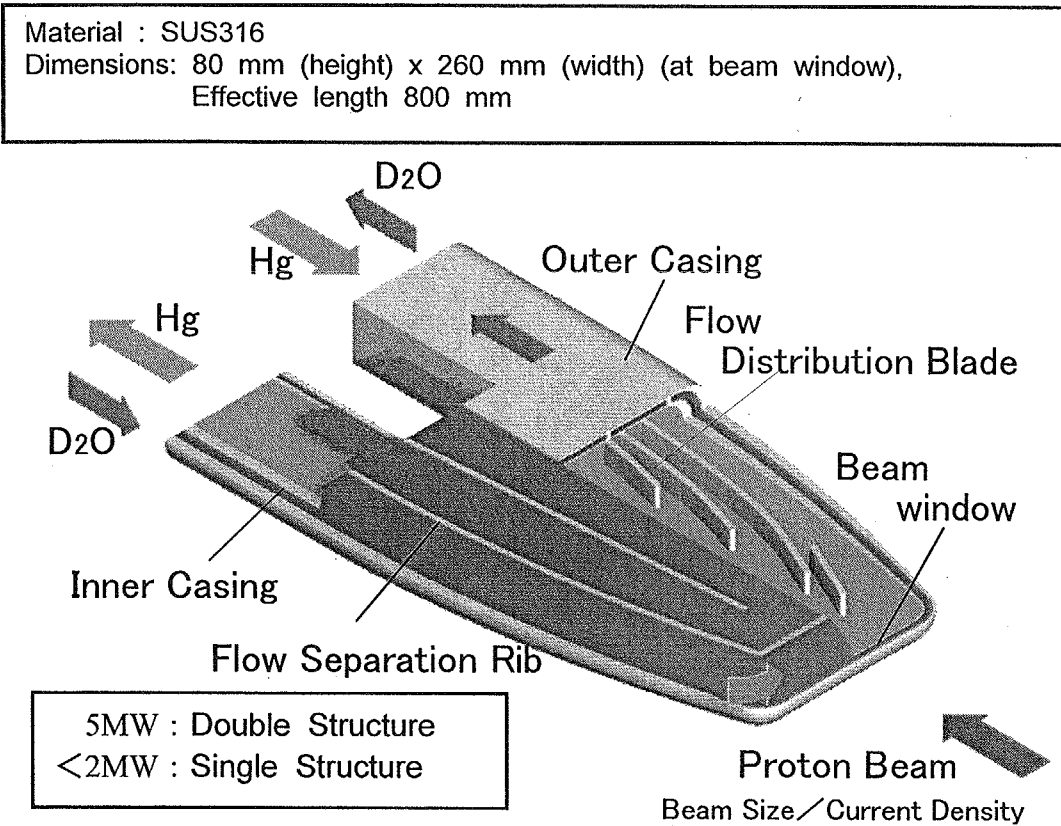
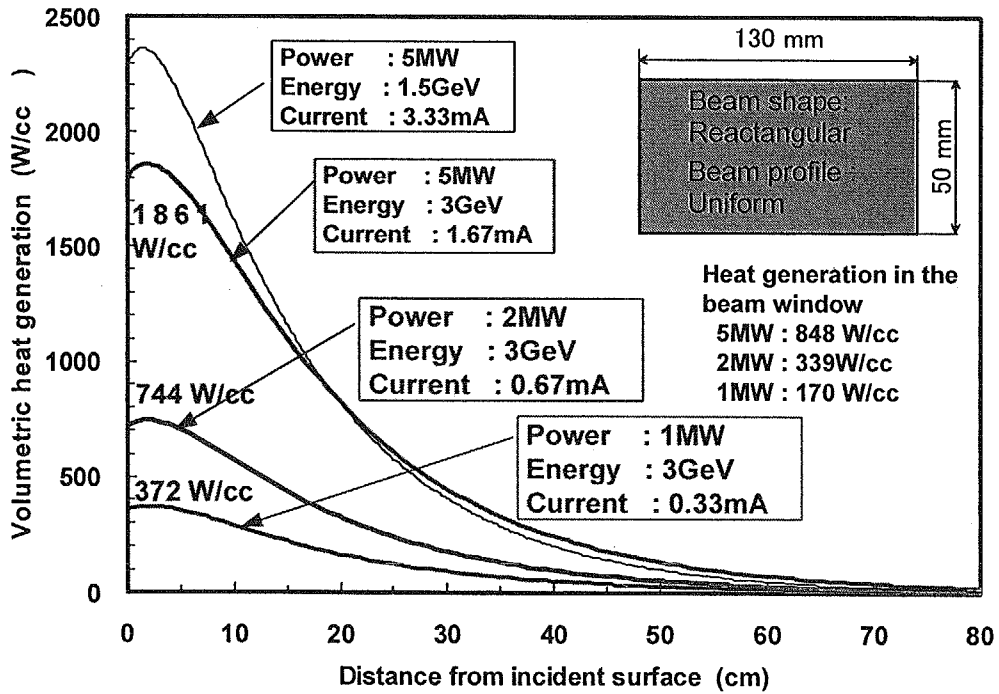


Fig.2.2 Cutaway view of cross-flow type mercury target without safety hull



(54.7 kJ of heat deposit per pulse was assumed [30% of margin included])

Fig.2.3 Volumetric heat generation along the axial length of mercury target

This is a blank page.

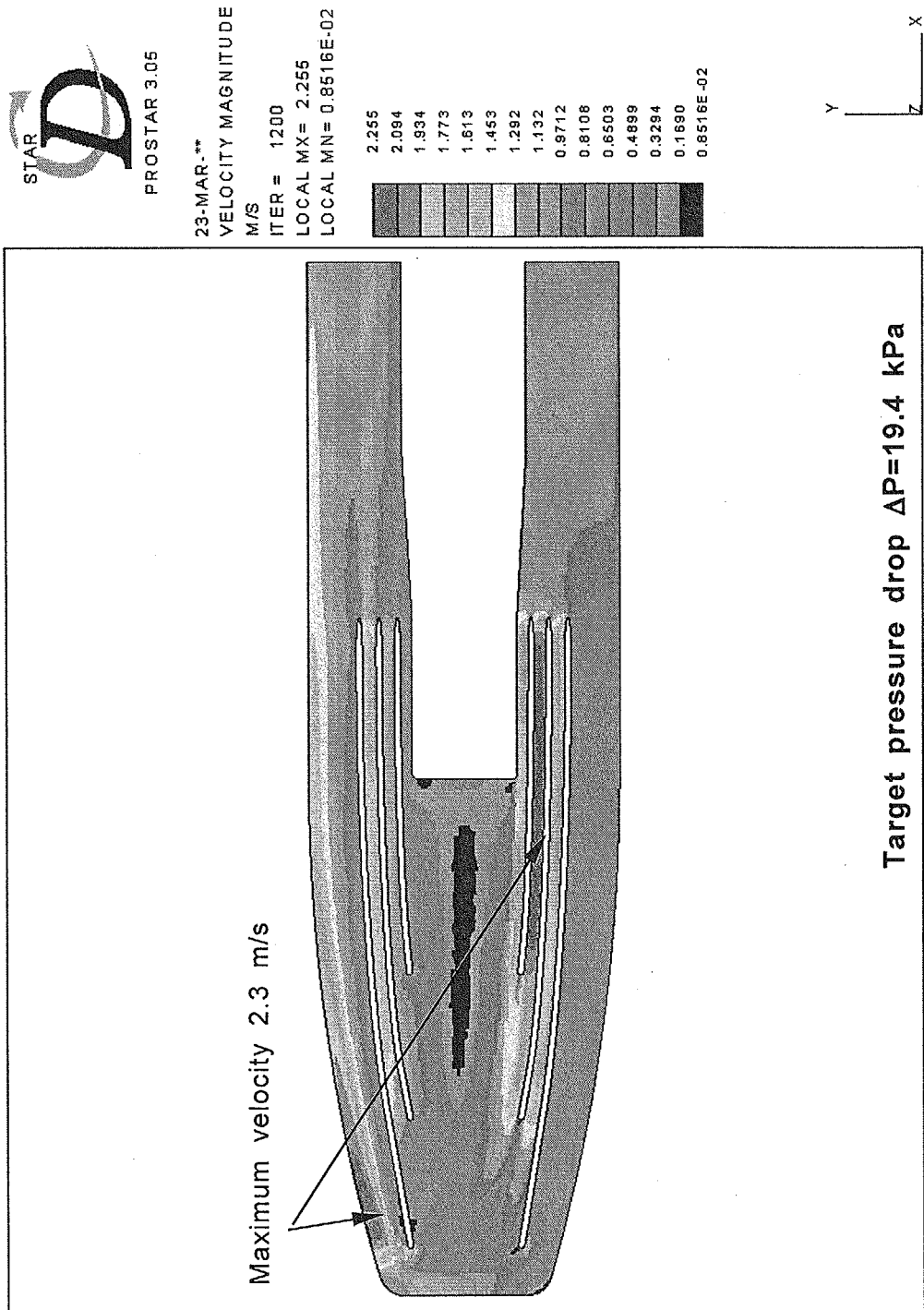
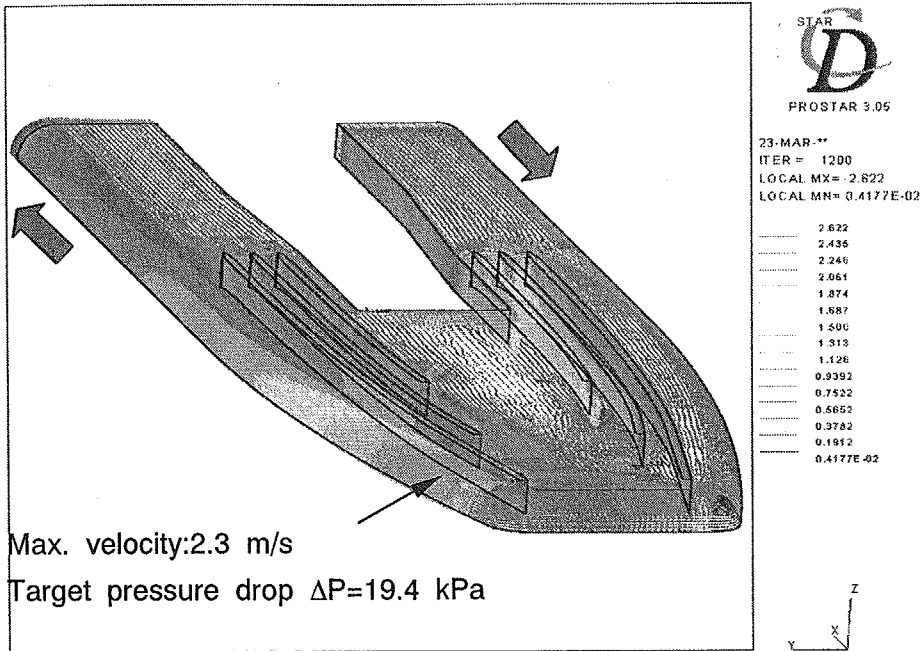
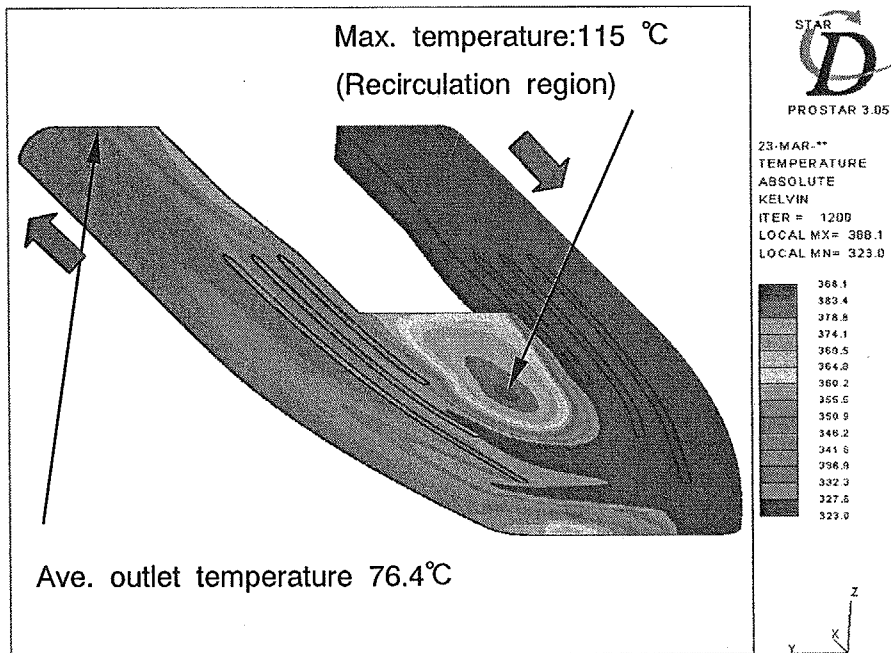


Fig.2.4 Velocity distribution in the center horizontal plane of the CHF target under the IMW operation (Inlet mercury velocity:1m/s)

This is a blank page.



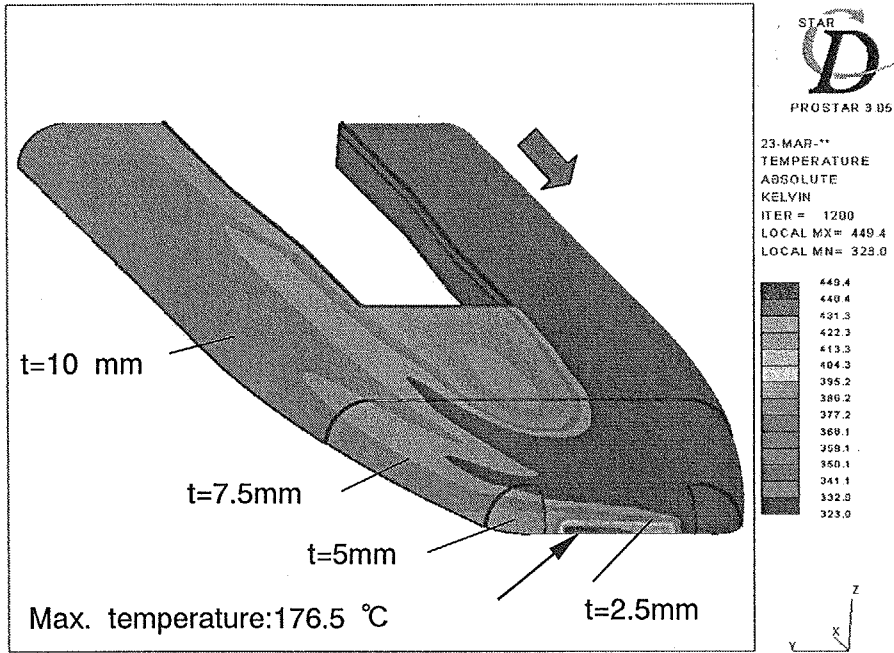
(a) Velocity distribution



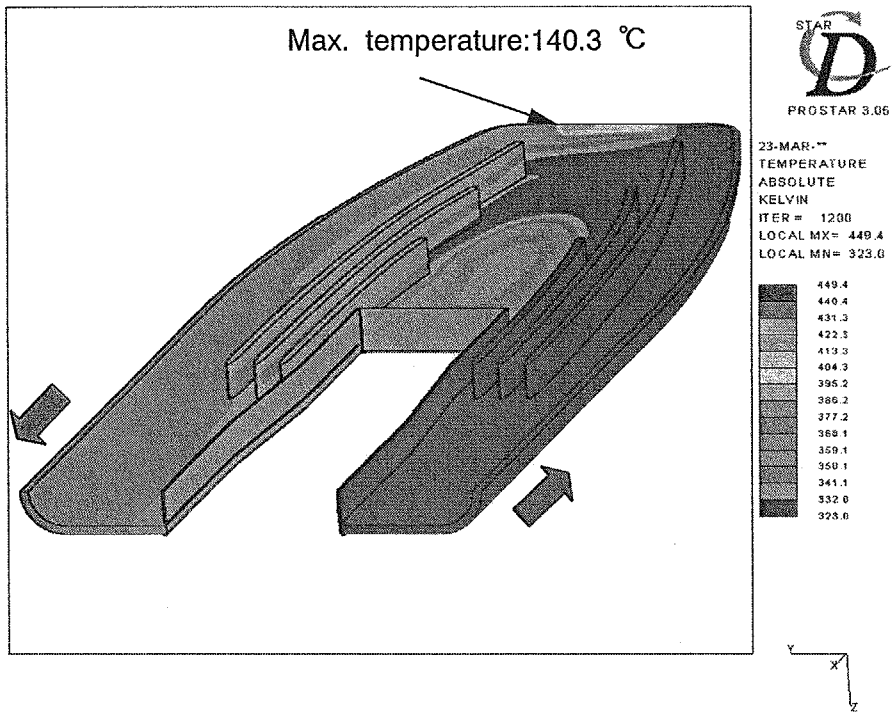
(b) Temperature distribution

Fig.2.5 Analytical results of velocity and temperature distribution in the CFT target under the 1MW operation (Inlet mercury velocity: 1m/s)

This is a blank page.



(a) Outer surface temperature distribution



(b) Inner surface temperature distribution

Fig.2.6 Analytical results of inner and outer surfaces of the CFT target container under the 1MW operation (Inlet mercury velocity:1m/s)

This is a blank page.

3.格納容器一体型水銀ターゲット構造の検討

Fig.3.1に中性子散乱施設のターゲット台車取扱室周り平面図を示す。本施設では、Fig.3.1に示すように発生した中性子を最大限に利用できるように、ターゲットを設置する水平面上において陽子ビーム入射側（陽子ビーム上流側）40度、ターゲット台車側（陽子ビーム下流側）50度の角度を、それぞれ陽子ビームライン及びターゲット台車設置のために用いることとし、ビームライン左右の各135度を中性子散乱実験用の中性子ビーム取り出し領域として確保するように設計を進めている。このため、ターゲット・格納容器一体型水銀ターゲット構造の検討に当たっては、ターゲットを設置する水平面上においてターゲット台車側（陽子ビーム下流側）50度の角度の範囲内にターゲット容器が納まるように、ターゲット容器と格納容器（Safety Hull）を一体化した構造の概念検討を進めた。以下に、検討に用いた主要な設計条件を示す。

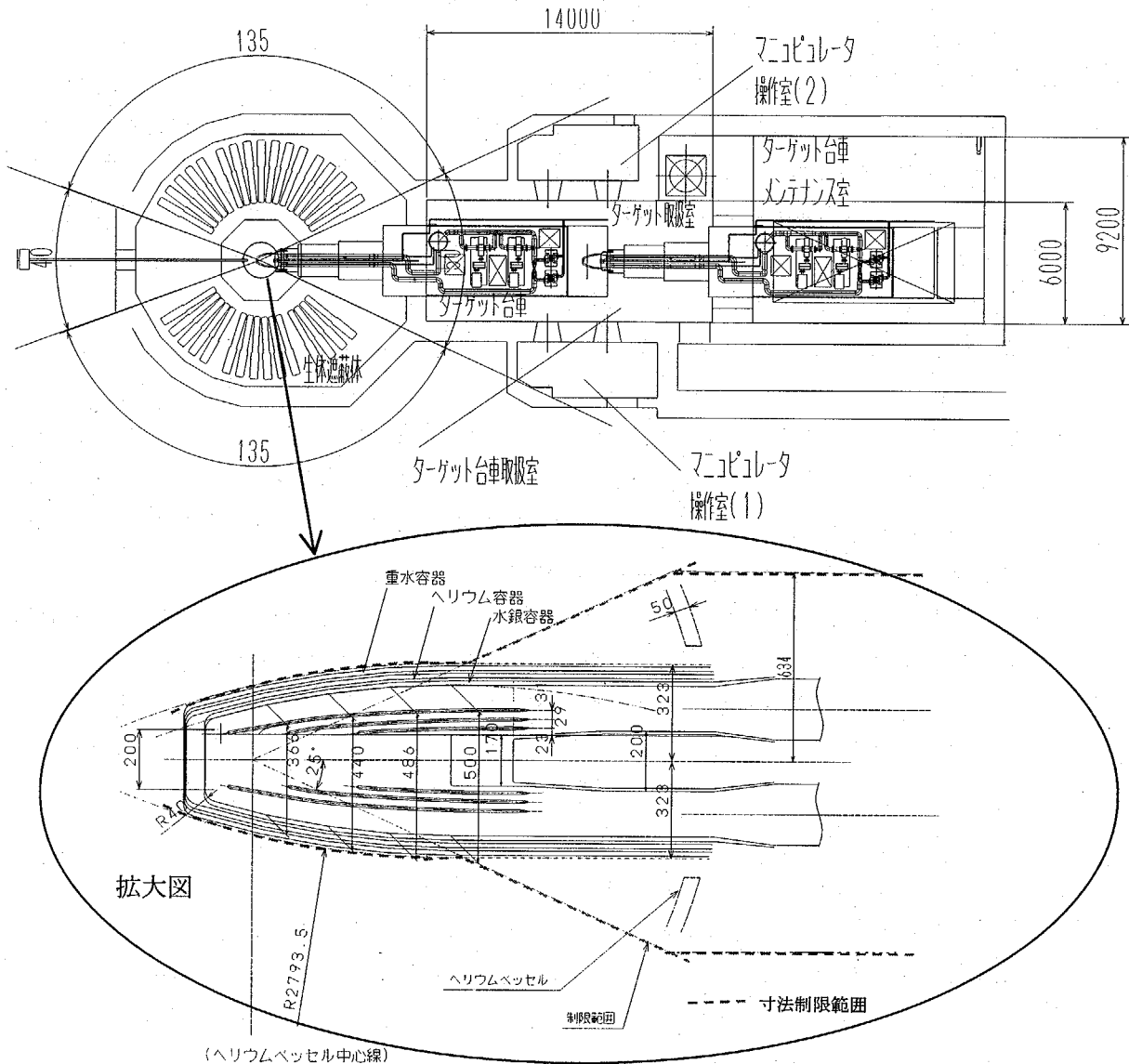


Fig.3.1 Horizontal plane around the target trolley maintenance room and the integrated CFT target container with safety hull

3.1 設計条件

3.1.1 格納容器 (Safety Hull) 一体型ターゲット設計条件

Fig.3.2に格納容器一体型ターゲットの外観図を、Fig.3.1の拡大図に容器主要部の水平断面詳細図を示す。格納容器一体型ターゲットは、Fig.2.2に示した幅広扁平容器の中に案内羽根を設けたクロスフロー型水銀ターゲットの外側にヘリウム容器／重水容器から成る格納容器を設けた構造として、水銀出入口配管接続部フランジの干渉を避けるため水銀出入口ノズル長さを変えて左右非対称の形状とした。水銀容器冷却用重水は、容器後部の重水出入口プレナム部を介してビーム窓冷却用／ターゲット上部冷却用／ターゲット下部冷却用の3流路に流量配分する。ヘリウム容器へのヘリウム供給は、容器後部のヘリウムプレナム部を介しヘリウム容器へ流入する。格納容器をヘリウム容器と重水容器の二重容器構造にした理由は、格納容器の陽子ビーム入射部を重水により除熱するためである。また、水銀容器とヘリウム容器間にヘリウムを流す構造とした理由は、ヘリウムガスのサンプリングにより水銀の漏洩を検出するためである。以下に格納容器一体型ターゲット構造設計の主要な条件を記す。

- (1) 平面内の制限寸法は、Fig.3.1の拡大図に示すようにターゲットを設置するヘリウムベッセル内配置の関係からR2793.5mmの円弧とターゲット中心線から323mmの範囲内とする。なお、核的な性能及び中性子ビーム取り出しに影響を及ぼさないターゲット後部は、ターゲットヘリウムベッセルとの交点とターゲットヘリウムベッセルの中心を結ぶ 50度の範囲を許容範囲とする。また、ターゲット台車との取り合い部（ヘリウムベッセル外）は、ターゲットの中心線から左右634mmの範囲に寸法を制限することとした。
- (2) 高さ方向の制限寸法は、平行部分で中心線から68.5mmの範囲とし、先端部分は勾配(1/100)を考慮した外形寸法以下とする。ただし、ターゲット先端部から800mmのターゲット有効長以降は中性子収率に影響しないのでこの範囲を超えることを許容する。
- (3) 水銀容器先端から後端までの寸法(内側)は800mm、後端における水銀容器の幅は500mmとし、この寸法を基に格納容器の寸法を制限範囲内に設定する。また、先端部を除き、ヘリウム容器、重水容器の流路断面形状に制限は設けない。
- (4) 各容器の上下及び左右方向の板厚は、水銀ターゲットの核的特性解析で使用している解析モデルに基づき⁽¹⁰⁾以下に示す値⁽¹¹⁾を暫定的に採用した。詳細は構造強度解析結果に基づき定める。なお、構造材としてはSUS316Lを使用することを想定して設計を進める。以下に記す水銀容器はターゲット容器であり、ヘリウム容器と重水容器は格納容器を構成するものである。

	上下方向	左右方向
① 水銀容器	: 7.5mm	10 mm
② ヘリウム容器	: 2.5mm	10 mm
③ 重水容器	: 2.5mm	10 mm
- (5) 各容器先端部の肉厚は2.5mm、水銀容器とヘリウム容器間のすき間は3mm、ヘリウム容器と重水容器間のすき間(重水流路)は5mmを目標とする。また、各容器の側板の板厚、容器間のすき間は構造強度の向上と流体圧力損失の低減を図るため制限範囲内で大きくすることを許容する。

- (7) 格納容器の強度が不足する場合には、重水容器の外面にリブ（補強材）を取り付けることで補強する。
- (10) 水銀容器の側板と上板または下板との接続部には、応力集中を防ぐため曲率を設ける。また、水銀容器の先端の断面形状は、圧力波による曲げ応力を緩和するために平面（70mm程度）とする。このとき、ヘリウム容器とのすき間は最大60mmとする。
- (18) ブレードの位置と厚さの精度は性能に影響するので、これまでの設計検討結果に基づいた配置とし、厚さを10mmとする。このとき、ブレードと水銀容器の上下板との間にすき間が生じないようにする。
- (21) 本検討作業で考慮すべき荷重は、自重、圧力、地震力とし、全ての容器の設計圧力は0.8MPaとする。また、設計温度は、水銀 300℃、ヘリウム 150℃、重水100℃とする。なお、水銀容器、ヘリウム容器については、差圧設計の考え方を採用することも可とする。なお、運転時の差圧は小さいが、起動時の差圧は大きくなるため、その点を考慮して設計圧力を0.8MPaに設定した。

3.1.2 水銀ターゲットとターゲット台車先端部取合条件

格納容器一体型ターゲット容器とターゲット台車取合部の設計条件を以下に記す。

- (1) ターゲット交換・保守点検等は、放射線レベルが高いためリモートハンドリングによるものとする。
- (1) ターゲット先端部から1650mm以降の位置（ヘリウムベッセル外）でターゲット台車の先端部と接続する。したがって、配管類もターゲット先端部から1650mm以降の位置で取り合う。
- (3) ターゲット容器内の水銀ドレンは、ターゲット台車（水銀循環系配管）との取合部フランジより後方で実施する。また、ターゲット側の水銀配管と台車との取合部は、ヘリウムベッセル外側とする。
- (5) ターゲットの交換期間は、1週間以内とすることを計画している。取り外しの最終目標は1日であるが、当面は3日間程度までを許容することとする。
- (8) 配管取り合い部は、冷却材のドレン性を考慮して下向きとする。ヘリウム容器に関しても、万一水銀が漏洩した場合、水銀のドレンが可能な構造とする。
- (9) 水銀出入口配管サイズは200Aとする（今後150Aに変更する可能性有り）。また、水銀流入出部には整流板を設ける。
- (11) 現時点では、ヘリウムベッセルとのシールは考慮せず、今後の検討課題とする。
- (12) ターゲット容器をヘリウムベッセルに挿入した後の減速材／反射体ユニットとの位置関係を常に一定に保つため、ターゲット側面はガイド板を取り付ける。

3.2 構造解析

3.2.1 解析条件

Fig.3.2に示した格納容器一体型水銀ターゲット構造の成立性を検討するため、静的な構造解析

を実施した。構造解析で用いた格納容器一体型水銀ターゲット容器の基本形状・寸法をFig.3.3及びFig.3.4に示す。Fig.3.3の水平断面図に示すように、格納容器一体型水銀ターゲットは、2.1で述べたターゲット本体容器である水銀容器と格納容器を構成するヘリウム容器及び重水容器の三重容器から成る。

各容器の容器ビーム入射部の容器肉厚は、ビーム窓部における陽子ビーム損失を少なくするために前述したように2.5mmとした。一方、側壁の容器肉厚はターゲットとしての中性子性能に大きな影響を及ぼさないため十分な強度が確保できるように10mmとした。いずれも解析モデルにおける初期値である。最終的な肉厚及び構造材料は、いずれも静的構造強度解析、動的熱衝撃解析、圧力波による動的応力解析結果に基づき決定する。一方、各容器の上下の容器肉厚（板厚）は、ターゲット上下に冷減速材容器を配置するために中性子性能の観点からは、可能な限り薄くすることが要求されている。そこで、設計方針で示したように水銀容器は7.5mm、ヘリウム容器及び重水容器については2.5mmとした（Fig.3.4参照）。ただし、後述の解析結果で示すようにヘリウム容器及び重水容器ともに、補強材により容器を補強した場合でも上下板厚を2.5mmとした場合には十分な強度が確保できないため、一部の解析モデルでは5mmを採用した。さらに、解析ケース1以外では、中性子性能に大きな影響を及ぼさないターゲット先端部から950mm以降の部分の上下板厚をすべて10mmとした。これは、後述するように容器が扁平構造であるために、板厚が2.5mmでは容器強度が十分確保できないためである。

Fig.3.5に解析で仮定した各容器の拘束条件を示す。解析モデルでは、各容器は密閉構造とし、容器後端部中心で剛体に拘束されるものとした。解析には、汎用有限要素法解析プログラムANSYSを用いた。以下に、主要な解析条件を示す。

- (1) 解析では、ターゲット容器（水銀）、ヘリウム容器（ヘリウム）、重水容器（重水）の各容器にそれぞれ単独に0.8MPaの内圧を与えて、容器の変位及び応力を求めた。実際には各容器に単独に0.8MPaの圧力が付加されることはないため、本解析は保守的な評価結果を与える。
- (2) 各解析ケースの荷重条件及び解析モデルの板厚をTable 3.1に示す。Table 3.1に示すように、容器間の補強材（リブ）の入れ方、容器の板厚をパラメータとして11ケースの解析を実施した。各解析ケースとも水銀容器は共通で、Fig.3.6に示すモデルを用いた。
- (3) ヘリウム容器及び重水容器については、解析ケース毎に容器の板厚、容器間の補強構造が異なる。Fig.3.7～Fig.3.17にケース1～ケース11で用いた解析モデルをそれぞれ示す。各図において(a)はヘリウム容器、(b)は重水容器の解析モデルを示している。
- (4) 解析モデルは容器の対称性を考慮し1/4分割モデルとし、シェル要素で模擬した。解析モデルの代表例として、水銀容器（全ケース共通）、ヘリウム容器（ケース10及びケース11）、重水容器（ケース10及びケース11）のシェル要素によるメッシュ分割図をFig.3.18(a)～(c)に示す。
- (5) 解析で用いたSUS316Lの物性値及び比較検討に用いたSUS316Lの許容応力をTable 3.2に示す⁽¹²⁾。応力解析結果との比較には、保守的に300℃における許容応力を用いることとした。なお、容器の最大許容変位は容器間の最大隙間の1/3とし、暫定的に1mmとした。

3.2.1 解析結果

解析結果一覧をTable 3.3に、各ケースの容器変形及び応力コンタ図 (Mises応力) をFig.3.19～Fig.3.29に示す。各図において(a)は水銀容器、(b)はヘリウム容器、(c)は重水容器の解析結果をそれぞれ示している。また、Table 3.3の判定の欄には、最大変位/応力をそれぞれ許容変位1mm、許容応力142.5MPa (300°Cにおける値) と比較し、許容範囲内にあるものについては○、範囲外であるものは×、僅かな構造変更で許容範囲に収まる可能性のあるものについては△の判定結果を示した。

(1) ケース1

Fig.3.19(a)～(c)に示したケース1の場合には、各容器がそれぞれ単独に近く、ヘリウム容器及び重水容器の上下板厚が2.5mmであるために、各容器の変位及び応力が最も高い値を示した。水銀容器の最大変位は0.59mmで許容変位1mmを満足しているが、最大応力は流量分配用に設けたブレード先端容器接続部で259MPaを生じ許容応力を大きく上回っており、解析で仮定した容器肉厚では水銀容器単独で構造的に成立させることが困難である。また、水銀容器及び重水容器ともに、容器肉厚が2.5mmと薄いため、容器が拘束されていない後半部において最大変位 (ヘリウム容器479mm、重水容器535mm) 及び最大応力 (ヘリウム容器12305MPa、重水容器15810MPa) を生じており、本構造では容器として成立困難である。

(2) ケース2

Fig.3.19(b)、(c)に示した解析結果から、ターゲット容器として中性子性能に有意な影響を及ぼさない (ターゲット有効長は800mm) 陽子ビーム窓から950mm以降の部分については、容器側壁と同一の10mmの板厚を採用することとした (Fig.3.8～Fig.3.17の解析モデル参照)。

Fig.3.20(a)～(c)にケース2の解析結果を示す。ケース1との違いは、ケース1で変位の大きかった重水容器及びヘリウム容器後半部の板厚の増加 (2.5mm→10mm)、ヘリウム容器及び重水容器の容器後半部分及び容器先端から後端へかけて中央部へリブを追加した点である (Fig.3.8(a)、(b)参照)。Fig.3.19(a)～(c)に示したケース1と比較すると、水銀容器については最大変位・応力ともに0.58mm、257MPaと有意な違いはないものの、ヘリウム容器及び重水容器については容器後半部の上下板厚を増加させたことにより最大変位は容器先端に近い部分に、最大応力は容器先端近くのリブの先端部に生じている。最大変位 (ヘリウム容器26.9mm、重水容器21.1mm) 及び最大応力 (ヘリウム容器3116MPa、重水容器4135MPa) は、ケース1に比べ小さくなっているものの、許容値を大きく上回っており本構造は成立困難である。

(3) ケース3

Fig.3.21(a)～(c)にケース3の解析結果を示す。ケース2との違いは、ケース2で応力及び変位の大きかった重水容器及びヘリウム容器先端中央部にリブをそれぞれ追加した点である (Fig.3.9(a)、(b)参照)。Fig.3.20(a)～(c)に示したケース2と比較すると、ケース2で最大変位・応力が生じているヘリウム容器先端部近くにリブを追加したことにより、水銀容器については最大変位が0.53mm、最大応力が249MPaとそれぞれ減少している。しかし、最大応力は依然許容応力145.2MPaを上回っている。ヘリウム容器及び重水容器については、容器先端部へのリブの追加により最大変位 (へ

リウム容器3.9mm、重水容器9.7mm)及び最大応力(ヘリウム容器1945MPa、重水容器1112MPa)は、ケース2に比べ大きく減少したが、いずれも許容値を上回っている。

(4) ケース4

Fig.3.22(a)~(c)にケース4の解析結果を示す。ケース3との違いは、ケース3で応力の大きかった重水容器及びヘリウム容器前半外側リブの前方にリブをそれぞれ追加した点である (Fig.3.10(a)、(b)参照)。Fig.3.21(a)~(c)に示したケース3と比較すると、外側のヘリウム容器前半外側にリブを追加したことにより、水銀容器については最大応力が約10MPa減少し238MPaになった。ヘリウム容器及び重水容器については、各容器先端部外側へのリブの追加により最大変位及び応力が生じている箇所が容器内側に移動した。それぞれの容器の最大応力は減少し1000MPa以下となった(ヘリウム容器815MPa、重水容器920MPa)ものの、許容応力を大きく上回っている。最大変位については生ずる位置がヘリウム容器については容器中央部外側近くに、重水容器は容器中央センターライン近くにそれぞれ移動し、それぞれ1.85mm、9.59mmへとわずかに減少したもののいずれも許容値1.0mmを上回っている。

(5) ケース5

Fig.3.23(a)~(c)にケース5の解析結果を示す。ケース4との違いは、重水容器及びヘリウム容器の陽子ビーム窓から950mmまでの上下板厚を2.5mmから5mmへ変更した点である。

(Fig.3.11(a)、(b)参照)。Fig.3.22(a)~(c)に示したケース4と比較すると、外側のヘリウム容器肉厚を増加させ強度が増したことから、水銀容器については189MPaに減少し、許容応力に近づいてきた。最大変位は、0.53mmから0.4mmへと減少した。ヘリウム容器及び重水容器については、最大応力がそれぞれ198MPa、339MPaとケース4に比べ大きく減少した。重水容器の最大応力は容器後端部に生じており、この部分の肉厚には制限はないため容器肉厚の増加により応力の低減が可能である。一方、ヘリウム容器の最大変位は0.37mmとなり、許容変位1mmを満足する結果が得られた。重水容器の最大変位は容器後部に生じており、その値は9.59mmでケース4と差が見られない。

(6) ケース6

Fig.3.24(a)~(c)にケース6の解析結果を示す。ケース6は、ケース1~4と同様に重水容器及びヘリウム容器の陽子ビーム窓から950mmまでの上下板厚を2.5mmとした。ケース4との違いは、重水容器前半部外側の縦リブに代えて横リブを採用し、容器後端の縦リブを容器の端部まで延長した点である。(Fig.3.12(a)、(b)参照)。Fig.3.22(a)~(c)に示したケース4と比較すると、最外側の重水容器の横リブによる補強の効果により、水銀容器については最大応力が44MPa減少し194MPaとなった。最大変位は、0.53mmから0.41mmへと減少した。ヘリウム容器の最大応力は、外側の重水容器の横リブによる補強の効果により815MPaから640MPaに減少したが、重水容器については最大応力の生じる場所が異なるものの920MPaから962MPaに増加した。一方、ヘリウム容器の最大変位は2.09mmと僅かにケース4に比べ増加した。重水容器の最大変位は、容器後端まで縦リブを延長したことにより9.59mmから4.14mmへと半減した。

(7) ケース7

Fig.3.25(a)~(c)にケース7の解析結果を示す。ケース6との違いは、重水容器前半部外側の横リブを設置した部分にケース4と同様な縦リブを追加した点である。ヘリウム容器はケース4と同一である。(Fig.3.13(a)、(b)参照)。Fig.3.24(a)~(c)に示したケース6と比較すると、最外側の重水容器前半部が横リブと縦リブによって補強された効果により、水銀容器については最大応力が185MPaへと約10MPa減少した。最大変位は、0.41mmから0.38mmへと減少した。ヘリウム容器の最大応力は、外側の重水容器の横リブ及び縦リブによる補強の効果により640MPaから272MPaへと大きく減少した。重水容器については最大応力の生じる場所が異なるものの962MPaから498MPaへと大きく減少した。一方、ヘリウム容器及び重水容器の最大変位は、それぞれ2.09mmから0.90mm、4.14mmから1.15mmへと大きく減少し、ヘリウム容器については許容変位1mm以内に収まった。

(8) ケース8

Fig.3.26(a)~(c)にケース8の解析結果を示す。ケース7との違いは、ヘリウム容器前半部の縦リブを横リブに変更した点、重水容器前半部外側の横リブを削除した点である。(Fig.3.14(a)、(b)参照)。Fig.3.25(a)~(c)に示したケース7と比較すると、ヘリウム容器前半部の横リブによって補強された効果により、水銀容器については最大応力が173MPaへと約12MPa減少した。最大変位は、0.38mmから0.32mmへと僅かに減少した。また、縦リブを横リブに変更したことにより、ヘリウム容器の最大応力の生じる位置が移動するとともに、最大応力は272MPaから372MPaへと100MPa増加した。重水容器については、重水容器の横リブを削除したもののヘリウム容器に横リブを追加したことにより498MPaから387MPaへと減少した。ヘリウム容器の変位は、横リブへ変更したことにより全体的に変位が均一化し、最大変位は0.90mmから0.71mmへと僅かに減少した。一方、重水容器の最大変位は、横リブを削除したことにより1.15mmから1.37mmへと僅かに増加した。

(9) ケース9

Fig.3.27(a)~(c)にケース9の解析結果を示す。ケース7との違いは、重水容器及びヘリウム容器の陽子ビーム窓から950mmまでの上下板厚を2.5mmから5mmへ変更した点である。(Fig.3.15(a)、(b)参照)。Fig.3.26(a)~(c)に示したケース8と比較すると、外側のヘリウム容器及び重水容器の肉厚を増加させ強度が増したことから、水銀容器については134MPaに減少し、許容応力以下になった。最大変位は0.32mmから0.26mmへと減少した。ヘリウム容器及び重水容器についても、最大応力がそれぞれ83MPa、158MPaとケース8に比べ大きく減少し、ヘリウム容器については許容応力以下に、また、重水容器についても許容応力142.5MPaに近づき、容器温度200°Cの許容応力162MPaと比較すると許容応力を下回るようになった。一方、ヘリウム容器の最大変位は0.19mm、重水容器の最大変位は0.92mmへと減少し、いずれも許容変位1mmを下回っている。

(10) ケース10

Fig.3.28(a)~(c)にケース10の解析結果を示す。ケース10は、ケース1~4、6~8と同様に重水容器及びヘリウム容器の陽子ビーム窓から950mmまでの上下板厚を2.5mmとした。ケース8との違

いは、ヘリウム容器前半部に横リブ追加した点、重水容器のリブによる補強をケース7と同一に縦リブと横リブを組み合わせた構造にした点である。(Fig.3.16(a)、(b)参照)。Fig.3.26(a)~(c)に示したケース8と比較すると、ヘリウム容器前半部の横リブによって補強された効果により、水銀容器については最大応力が173MPaから121MPaに減少した。最大変位は、0.32mmから0.18mmへとほぼ半減した。ヘリウム容器の最大応力は、横リブを追加したことにより372MPaから319MPaへと約50MPa減少した。重水容器については、本解析ケースで最も数多くリブにより補強しているにもかかわらず、最大応力が387MPaから563MPaへと増加している。このことから、応力の低減にリブの補強を行う場合には、3つの容器のバランスを考慮した補強方法を考慮する必要がある。一方、ヘリウム容器及び重水容器の最大変位は、それぞれ0.71mmから0.65mm、1.37mmから1.1mmへと減少している。

(11) ケース11

Fig.3.29(a)~(c)にケース11の解析結果を示す。ケース10との違いは、重水容器及びヘリウム容器の陽子ビーム窓から950mmまでの上下板厚を2.5mmから5mmへ変更した点である(Fig.3.17(a)、(b)参照)。Fig.3.28(a)~(c)に示したケース10と比較すると、水銀容器については外側のヘリウム容器及び重水容器の肉厚を増加させ強度が増したことから99MPaに減少し、許容応力以下になった。ただし、最大変位は0.18mmと変化は見られなかった。ヘリウム容器及び重水容器についても、最大応力がそれぞれ82MPa、146MPaとケース10に比べ大きく減少し、ヘリウム容器については許容応力以下に、また、重水容器についても許容応力142.5MPaに近づき、容器温度250°Cの許容応力152MPaと比較すると許容応力を下回っている。一方、ヘリウム容器の最大変位は0.19mm、重水容器の最大変位は0.92mmへと減少してケース9と同様の結果となり、いずれも許容変位1mmを下回っている。

以上の解析結果から、以下の知見を得た。

- ① 水銀容器の最大変位は、容器単独に近い状態で約0.6mmであり、許容値の1mm以下であるが、容器間の接続が無い場合の最大応力は約260MPaであり、許容値の142.5MPa(300°Cにおける値)を超えるため、容器肉厚の増加または補強の追加無しでは成立しない。
- ② 水銀容器の応力は、ヘリウム容器及び重水容器に補強材(リブ)を介して接続した場合、最大変位/最大応力ともに低下し、ヘリウム容器及び重水容器の板厚を増加させるとさらに低下する。ただし、リブの追加には各容器の補強のバランスを考慮する必要がある。
- ③ ヘリウム容器及び重水容器は、上下方向の板厚を2.5mmと薄くした場合には、容器間を強固に接続する補強材(リブ)が必須であり、リブの本数及び配置が適切でない場合過大な応力及び変位を生じる。
- ④ Fig.3.27(a)~(c)に示したケース9及びFig.3.29(a)~(c)に示したケース11の解析結果から、ヘリウム容器及び重水容器の陽子ビーム窓から950mmまでの上下板厚を5mmとした容器構造を採用し、かつ、容器温度を200°C以下にできれば、これらの構造にて一体型ターゲット容器が成立する見通しを得た。なお、本解析は、内圧による静的な応力解析の結果であり、動的な応力及び熱応力を考慮した検討を今後実施する予定である。

3.3 格納容器一体型水銀ターゲット構造図

以上の設計条件及び構造強度解析結果に基づき作成した格納容器一体型水銀ターゲット構造図をFig.3.30に示す。構造図作成のベースとした解析モデルはFig.3.14(b)に示したケース8の重水容器、Fig.3.16(a)に示したケース10のヘリウム容器である。なお、上述した構造強度解析結果から、ヘリウム容器及び重水容器の上下板厚を2.5mmとした場合には構造健全性を確保することが困難であるが、Fig.3.30では将来の目標という意味で暫定的にこれらの板厚を2.5mmとして示してある。本ターゲット構造の特徴を以下に示す。

- (1) 水銀容器本体はブレードのみを補強部材とし、その他の特別な補強無しで構造健全性を確保するようにした。
- (2) ヘリウム容器及び重水容器は、上下の板厚が2.5mmに制限される部分以外は剛性・強度を増すため板厚を15mmと大きくした。また、水銀容器の剛性を増すため水銀容器へ補強材（リブ）により接続した。上下板厚2.5mmは、中性子の吸収を少なくするため核的な解析結果から暫定的に決定した値であり、絶対的な制限値ではない。リブ等による補強を採用しても容器強度が確保できない場合には、肉厚を増す。
- (3) ヘリウム容器と水銀容器とを接続するリブは、ヘリウム流路を妨げない範囲で設けた。重水容器とヘリウム容器とを接続するリブは、重水の流路形成の機能を持たせた。重水流路は3流路とし、重水の流れに極力平行になるようにリブを設けた。
- (4) 重水容器の外面には高さ3mmのリブを設けた。
- (5) リブは容器本体に機械加工で一体成型することを目標とし、組立上それが不可能な場合にのみリブを溶接する。
- (6) 配管類との取り合いには、効率的なリモートハンドリングが可能なように遠隔フランジを採用するものとする。今後、リモートハンドリング試験装置による実証試験を通じて作業性を検討し、グレイロック方式等に変更する可能性がある。また、ガスケットには、水銀との共存性を考慮して材料を選択していく。
- (7) 全ての配管を下方に引き廻し、冷却材のドレンが可能な構造とした。なお、配管類との取り合いにはジャンパー管を使用し、ターゲット本体及び配管側の製作・据付公差を吸収できるようにした。また、リモートハンドリングによるマニピュレータのエンドエフェクタの作業スペースを確保できるように配管を配置する。
- (8) ジャンパー管（遠隔フランジ）の取り付け手順は以下に示す通りである。なお、取り外しの手順は、以下の逆となる。
 - ① 重水出口ジャンパー管を取り付ける。
 - ② 重水入口ジャンパー管を取り付ける。
 - ③ ヘリウム出口ジャンパー管を取り付ける。
 - ④ ヘリウム入口ジャンパー管を取り付ける。
 - ⑤ 水銀出口ジャンパー管を取り付ける。
 - ⑥ 水銀入口ジャンパー管を取り付ける。

このとき、ジャンパー管（遠隔フランジ）の位置決めはガイドピンで行い、マニプレ

ータ等は上方からアクセスする。

- (9) ターゲット本体は、ターゲット後方に設けた接続板にてターゲット台車に固定し、位置決めにはラフガイド、ガイドピンを使用する。

3.4 製作方法及び製作上の課題

提案した格納容器一体型水銀ターゲットの構造図に基づくターゲット容器の製作方法及び製作上の課題を以下に示す。

(1) 製作方法

- ① 溶接部を極力少なくするため、水銀容器の構成部品はヘリウム容器との補強部材も含めて鍛造ブロックから機械加工により製作し、最小限の溶接により組み立てる。
- ② 水銀容器を製作後、水銀容器外側に機械加工で設けた補強部材（リブ）にヘリウム容器の胴板を溶接してヘリウム容器を製作する。
- ③ 同様にヘリウム容器外側に機械加工で設けたリブに重水容器の胴板を溶接して重水容器を製作する。

(2) 製作上の課題

- ① 補強材（リブ）を容器の胴板と溶接で組み立てる部分が多く、溶接ひずみによる変形が考えられる。
- ② 胴板はリブと固定するために円周方向に分割する必要がある、この場合溶接による収縮等の問題がある。
- ③ 溶接線が交差する部分では、製作手順・開先形状が複雑となる。
- ④ 各フランジを取り付けた後、容器側のフランジと配管側のフランジ間の取付位置の相対関係がわかるような型を製作し、ジャンパー管の製作に反映する。

3.5 今後の検討課題

格納容器一体型水銀ターゲット構造の概念検討結果から明らかになった今後の検討課題を以下に示す。

- (1) 現在の設計条件では、一部において構造健全性を確保することが困難な部分があり、形状の制限条件及び設計荷重条件（内圧）を見直す必要がある。水銀循環系の最高使用圧力は0.5MPaを想定しているため、解析で与えた0.8MPaの内圧は保守的であると考えられる。今後は設計余裕を見直した内圧条件で、局部の変形、応力集中等の状態をより詳細に把握して構造成立性を確立したい。
- (2) 設計では、水銀容器、ヘリウム容器、重水容器間を多数の補強材（リブ）で強固に連結する必要があるため製作性が低下し、また、溶接線も多いことから構造健全性（応力集中、疲労損傷）の点で必ずしも好ましい構造ではない。したがって、容器自身の剛性を極力期待することのできる構造、例えば容器肉厚の増加によりリブ数を減少させ、また、ブロック削り出しによる薄肉容器製作技術を確立する。
- (3) 配管接続部の構造は、現時点では遠隔フランジを採用したが、リモートハンドリング性の

向上を図るためグレイロック方式、クランプチェーン方式、クイックカプラ方式等の採用について詳細な検討の必要がある。

Table 3.1 Analytical conditions

CASE No [モデル No]	荷重条件				解析モデル								解析モデル図			
	内圧 (MPa)		水銀容器板厚 (mm)		ヘリウム容器板厚 (mm)		水銀容器板厚 (mm)		ヘリウム容器板厚 (mm)		水銀容器	ヘリウム容器	重水容器			
	水銀容器	ヘリウム容器	重水容器	側板	上板・下板 <950mm	側板	上板・下板 >950mm	側板	上板・下板 <950mm	側板						
1 [1]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	2.5	10	2.5	2.5	10	Fig.3.7(a)	Fig.3.6	Fig.3.7(b)
2 [2]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.8(a)	Fig.3.6	Fig.3.8(b)
3 [3]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.9(a)	Fig.3.6	Fig.3.9(b)
4 [4-1]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.10(a)	Fig.3.6	Fig.3.10(b)
5 [4-2]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	5.0	10	10	5.0	10	10	Fig.3.11(a)	Fig.3.6	Fig.3.11(b)
6 [5]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.12(a)	Fig.3.6	Fig.3.12(b)
7 [6]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.13(a)	Fig.3.6	Fig.3.13(b)
8 [7-1]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.14(a)	Fig.3.6	Fig.3.14(b)
9 [7-2]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	5.0	10	10	5.0	10	10	Fig.3.15(a)	Fig.3.6	Fig.3.15(b)
10 [8-1]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	2.5	10	10	2.5	10	10	Fig.3.16(a)	Fig.3.6	Fig.3.16(b)
11 [8-2]	0.8	0.8	0.8	10	7.5	7.5	10	5.0	10	10	5.0	10	10	Fig.3.17(a)	Fig.3.6	Fig.3.17(b)

CASE No [モデル No]	荷重条件				解析モデル											
	内圧 (MPa)		水銀容器補強材		ヘリウム容器補強材				水銀容器補強材							
	水銀容器	ヘリウム容器	重水容器	ブレード No.1~No.3	縦リブ No.1	縦リブ No.2	縦リブ No.3	縦リブ No.4	横リブ	縦リブ No.1	縦リブ No.2	縦リブ No.3	縦リブ No.4	縦リブ No.5	横リブ	
1 [1]	0.8	0.8	0.8	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
2 [2]	0.8	0.8	0.8	○	○	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-
3 [3]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	-	-	○	○	○	-	-	-	-
4 [4-1]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	-	-
5 [4-2]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	-	-
6 [5]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○
7 [6]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○
8 [7-1]	0.8	0.8	0.8	○	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	-	-
9 [7-2]	0.8	0.8	0.8	○	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○
10 [8-1]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11 [8-2]	0.8	0.8	0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

[注記] (1) 内圧は各ケースで同一のモデルに対して各々の容器単独に考慮。 (2) ○印はリブを考慮、△印はリブの一部を削除、-印はリブ無し

Table 3.2 Allowable stress and properties used in analyses⁽¹⁰⁾

温 度	設計応力強さ	設計応力強さ	縦弾性係数	ポアソン比
T	Sm	1.5*Sm	E	v
(°C)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(-)
	[膜]	[膜+曲げ]		
25	118.0	177.0	195000	0.3
100	115.0	172.5	190000	0.3
150	115.0	172.5	186000	0.3
200	108.0	162.0	183000	0.3
250	101.0	151.5	178000	0.3
300	95.0	142.5	176000	0.3

Table 3.3 Analytical results

CASE No [試 験 用 No]	荷重条件			変位 (mm) [許容変位 (mm)]						変形図・応力コンタ図		
	内 圧 (MPa)			水銀容器		ヘリウム容器		重水容器		水銀 容器	ヘリウム 容器	重水 容器
	水銀 容器	ヘリウム 容器	重水 容器	最大値 [1.0]	判定	最大値 [1.0]	判定	最大値 [1.0]	判定			
1 [1]	0.8	0.8	0.8	0.59	○	479.00	×	534.80	×	Fig.3.19(a)	Fig.3.19(b)	Fig.3.19(c)
2 [2]	0.8	0.8	0.8	0.58	○	26.86	×	21.06	×	Fig.3.20(a)	Fig.3.20(b)	Fig.3.20(c)
3 [3]	0.8	0.8	0.8	0.53	○	3.92	×	9.69	×	Fig.3.21(a)	Fig.3.21(b)	Fig.3.21(c)
4 [4-1]	0.8	0.8	0.8	0.53	○	1.85	×	9.59	×	Fig.3.22(a)	Fig.3.22(b)	Fig.3.22(c)
5 [4-2]	0.8	0.8	0.8	0.40	○	0.37	○	9.59	×	Fig.3.23(a)	Fig.3.23(b)	Fig.3.23(c)
6 [5]	0.8	0.8	0.8	0.41	○	2.09	×	4.14	×	Fig.3.24(a)	Fig.3.24(b)	Fig.3.24(c)
7 [6]	0.8	0.8	0.8	0.38	○	0.90	○	1.15	△	Fig.3.25(a)	Fig.3.25(b)	Fig.3.25(c)
8 [7-1]	0.8	0.8	0.8	0.32	○	0.71	○	1.37	△	Fig.3.26(a)	Fig.3.26(b)	Fig.3.26(c)
9 [7-2]	0.8	0.8	0.8	0.26	○	0.19	○	0.92	○	Fig.3.27(a)	Fig.3.27(b)	Fig.3.27(c)
10 [8-1]	0.8	0.8	0.8	0.18	○	0.65	○	1.10	△	Fig.3.28(a)	Fig.3.28(b)	Fig.3.28(c)
11 [8-2]	0.8	0.8	0.8	0.18	○	0.19	○	0.92	○	Fig.3.29(a)	Fig.3.29(b)	Fig.3.29(c)

CASE No [試 験 用 No]	荷重条件			応力 (N/mm ²) [許容応力 (N/mm ²)]						変形図・応力コンタ図		
	内 圧 (MPa)			水銀容器		ヘリウム容器		重水容器		水銀 容器	ヘリウム 容器	重水 容器
	水銀 容器	ヘリウム 容器	重水 容器	最大値 [142.5]	判定	最大値 [142.5]	判定	最大値 [142.5]	判定			
1 [1]	0.8	0.8	0.8	259	×	12305	×	15810	×	Fig.3.19(a)	Fig.3.19(b)	Fig.3.19(c)
2 [2]	0.8	0.8	0.8	257	×	3116	×	4135	×	Fig.3.20(a)	Fig.3.20(b)	Fig.3.20(c)
3 [3]	0.8	0.8	0.8	249	×	1945	×	1112	×	Fig.3.21(a)	Fig.3.21(b)	Fig.3.21(c)
4 [4-1]	0.8	0.8	0.8	238	×	815	×	920	×	Fig.3.22(a)	Fig.3.22(b)	Fig.3.22(c)
5 [4-2]	0.8	0.8	0.8	189	×	198	×	339	×	Fig.3.23(a)	Fig.3.23(b)	Fig.3.23(c)
6 [5]	0.8	0.8	0.8	194	×	640	×	962	×	Fig.3.24(a)	Fig.3.24(b)	Fig.3.24(c)
7 [6]	0.8	0.8	0.8	185	×	272	×	499	×	Fig.3.25(a)	Fig.3.25(b)	Fig.3.25(c)
8 [7-1]	0.8	0.8	0.8	173	×	372	×	387	×	Fig.3.26(a)	Fig.3.26(b)	Fig.3.26(c)
9 [7-2]	0.8	0.8	0.8	134	○	83	○	158	△	Fig.3.27(a)	Fig.3.27(b)	Fig.3.27(c)
10 [8-1]	0.8	0.8	0.8	121	○	319	×	563	×	Fig.3.28(a)	Fig.3.28(b)	Fig.3.28(c)
11 [8-2]	0.8	0.8	0.8	99	○	82	○	146	△	Fig.3.29(a)	Fig.3.29(b)	Fig.3.29(c)

[注記] (1) 判定において、○：許容変位/応力を満足する、△：許容変位/応力を満足しないが、わずかな構造変更で対応できる可能性有、
 ×：許容変位/応力を満足しない
 : 上下板厚5mm

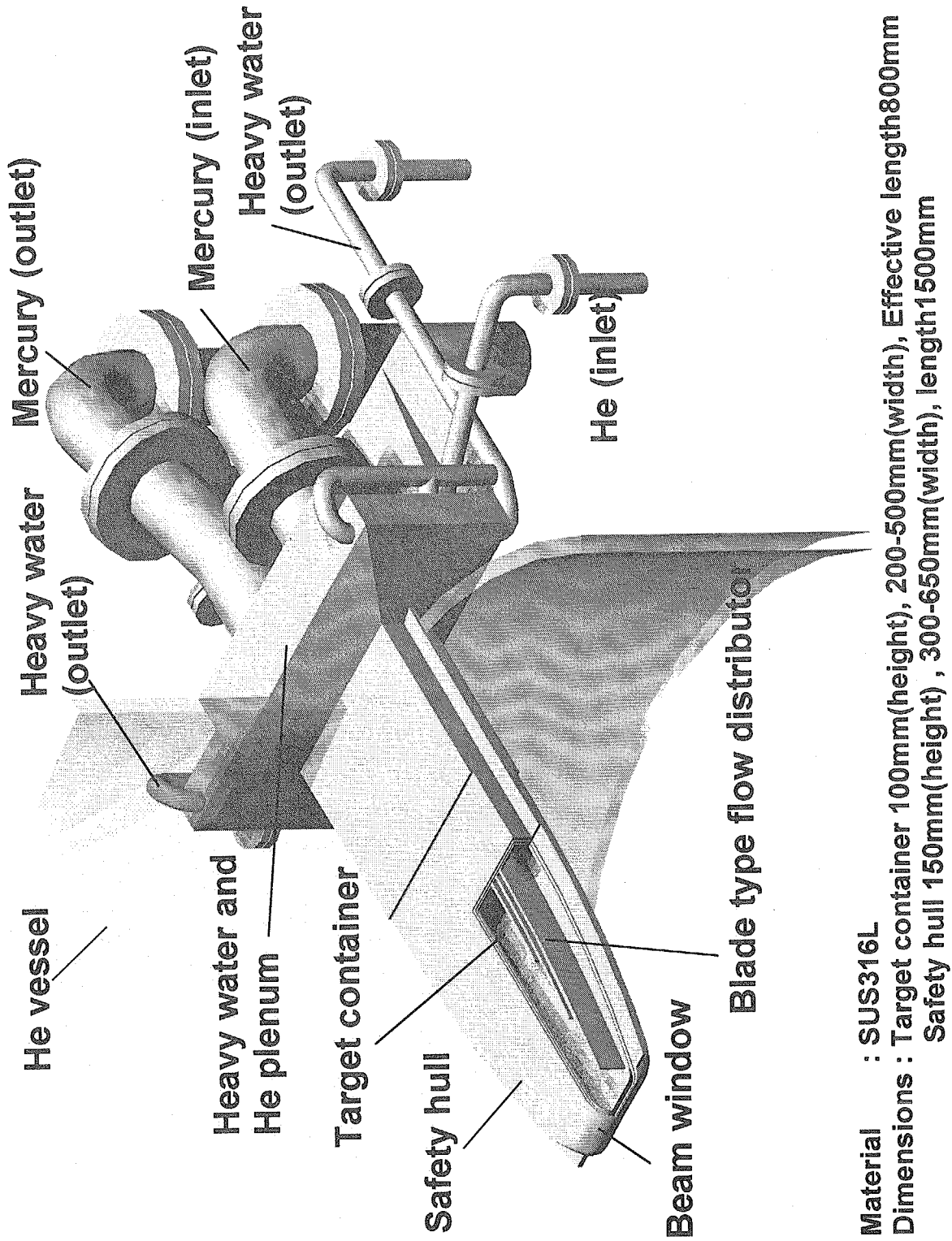


Fig.3.2 Outer and cutaway view of the integrated CFT Target container with a safety hull

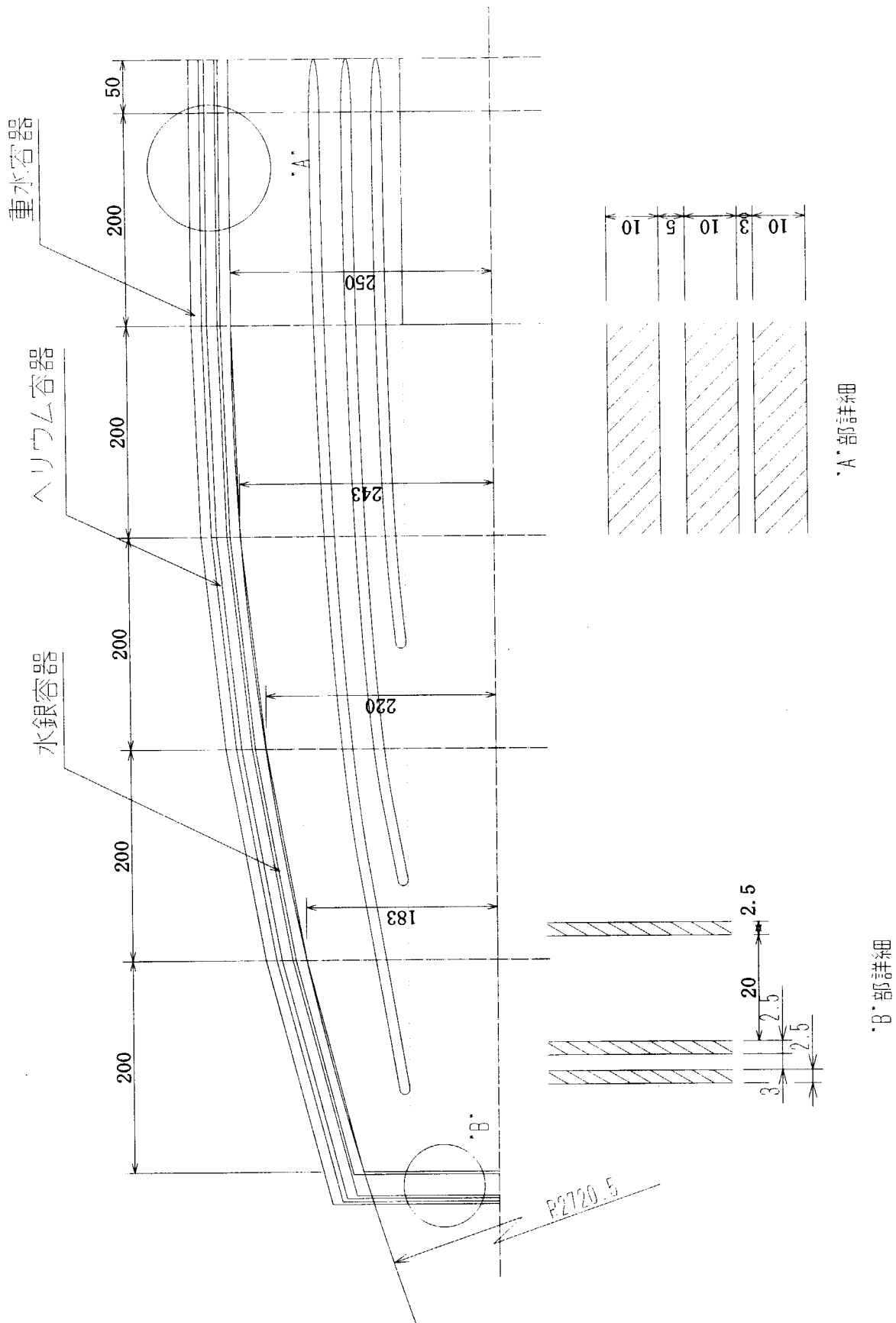


Fig.3.3 Front part of CFT target container with safety hull (Horizontal plane)

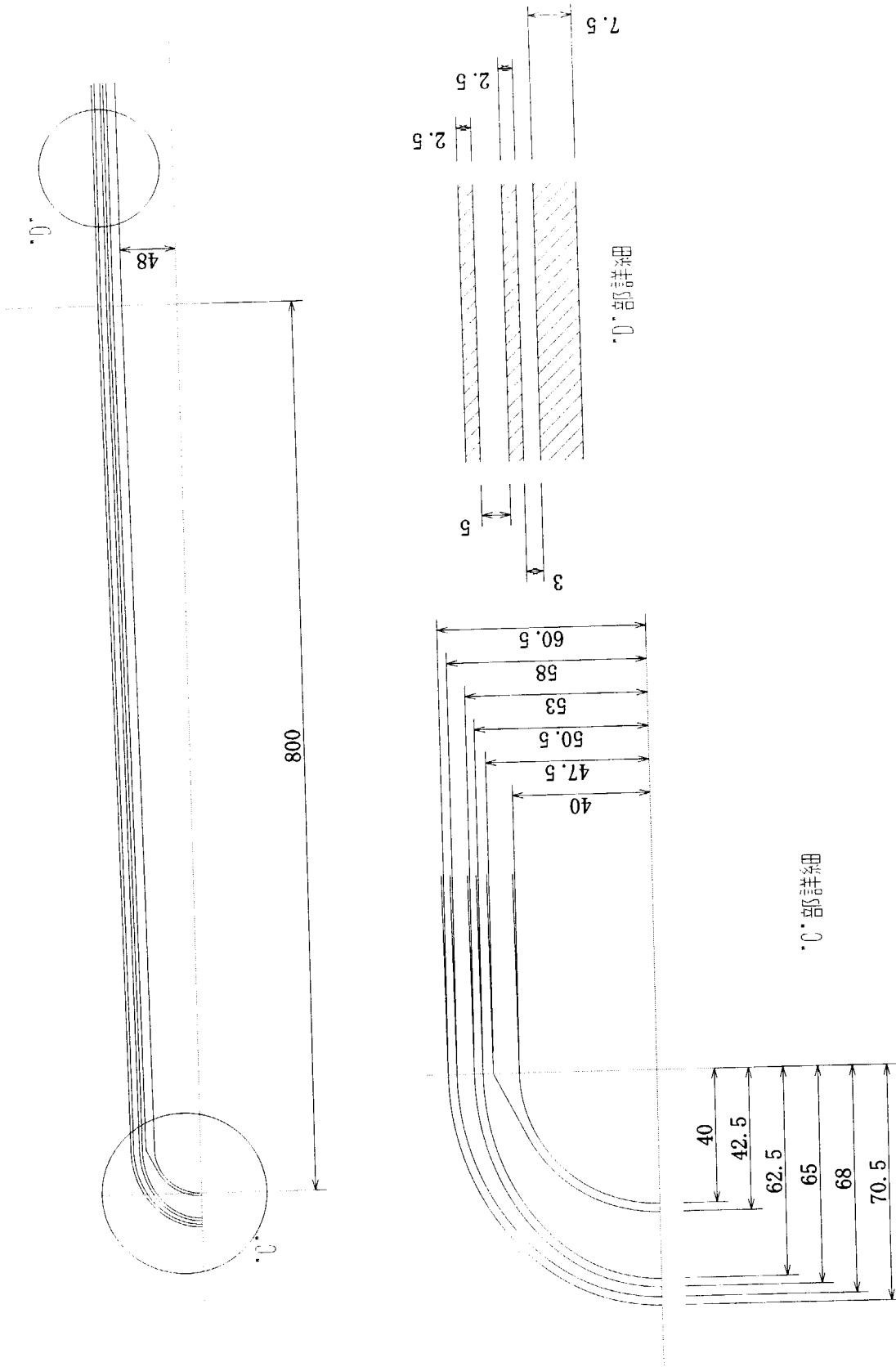
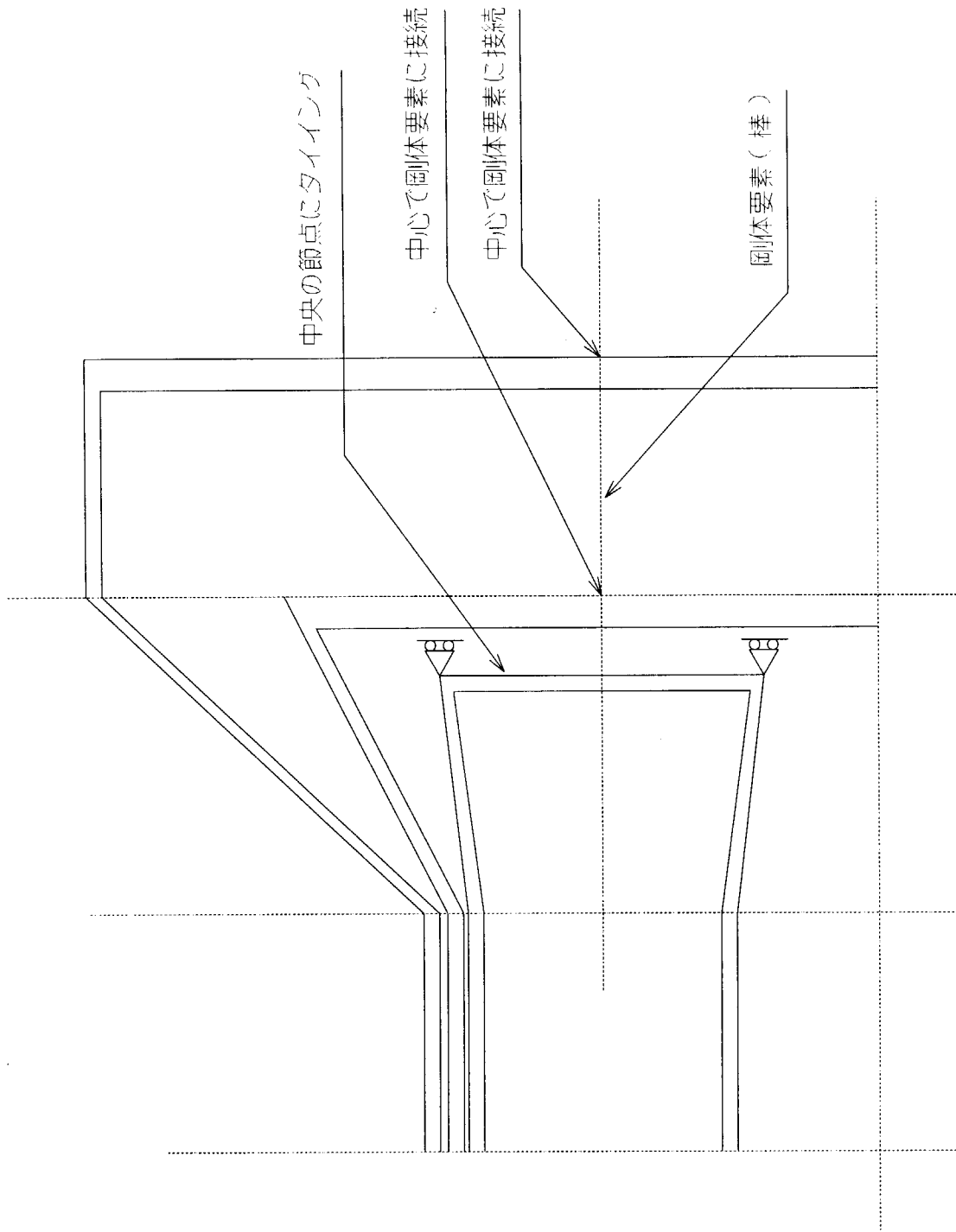
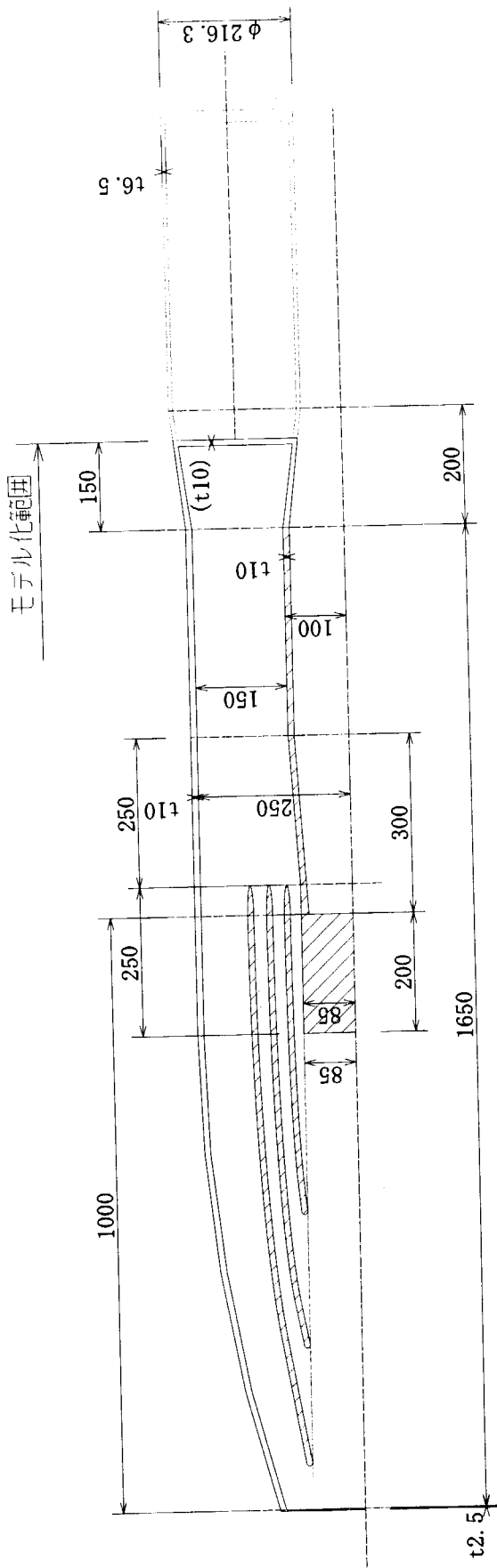


Fig.3.4 Front part of CFT target container with safety hull (Vertical plane)



拘束条件
Fig.3.5 Restriction condition of CFT target container with safety hull



ハッチング部は、
上下面で接続する部分を示す。

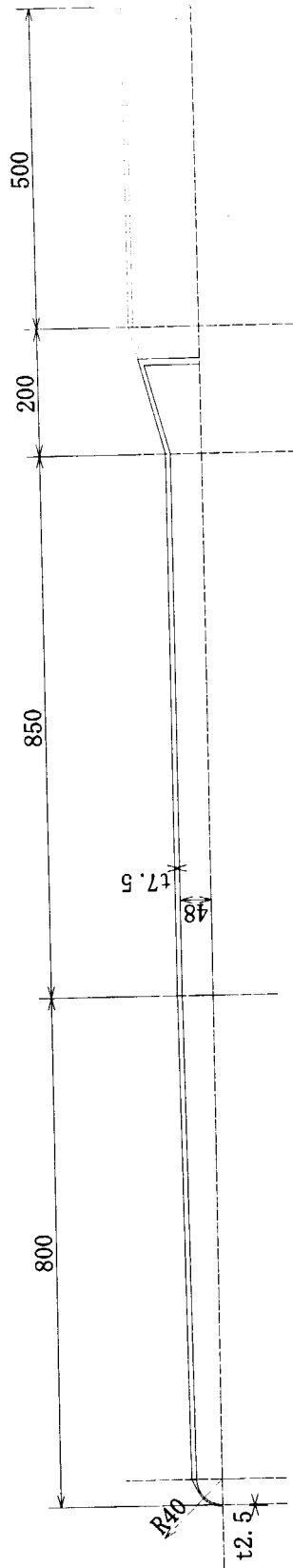


Fig.3.6 Mercury target container analytical model for all cases

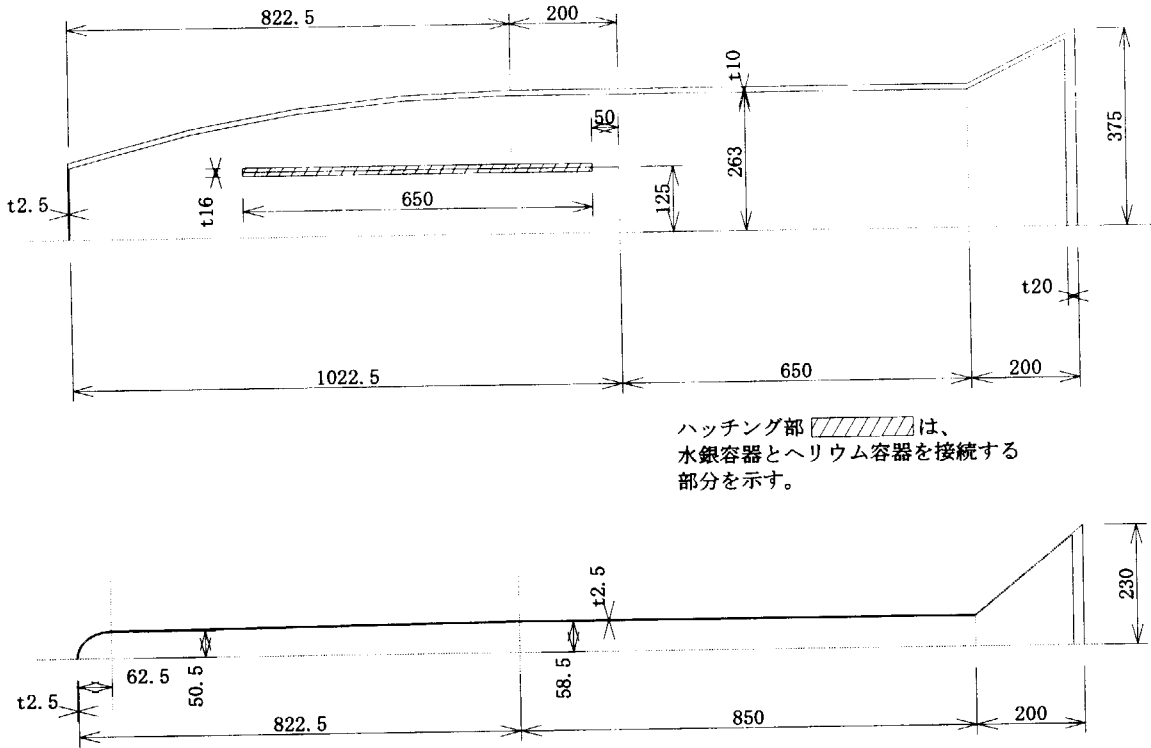


Fig.3.7(a) Helium container analytical model for Case 1

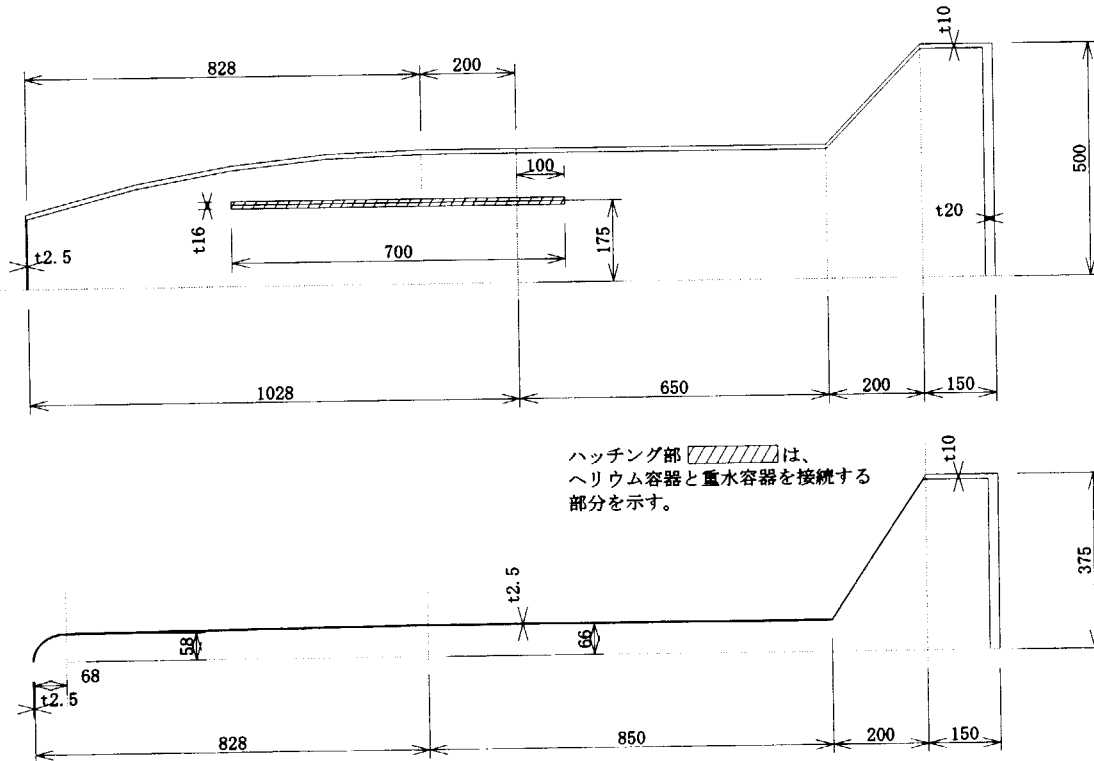
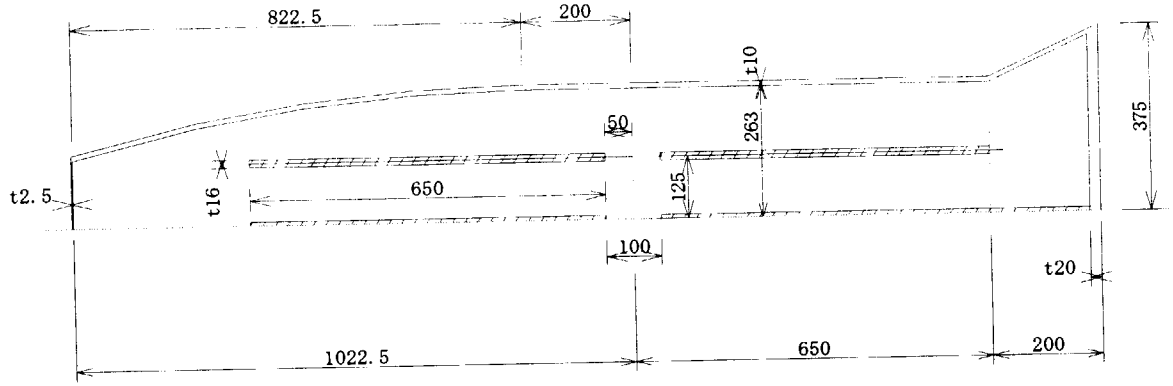



Fig.3.7(b) Heavy water container analytical model for Case 1



ハッチング部  は、水銀容器とヘリウム容器を接続する部分を示す。

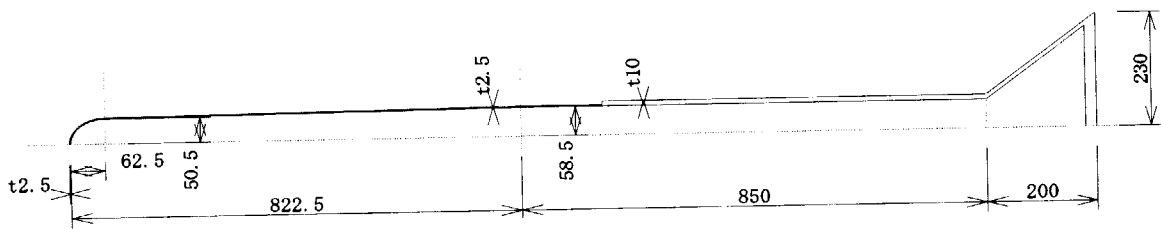
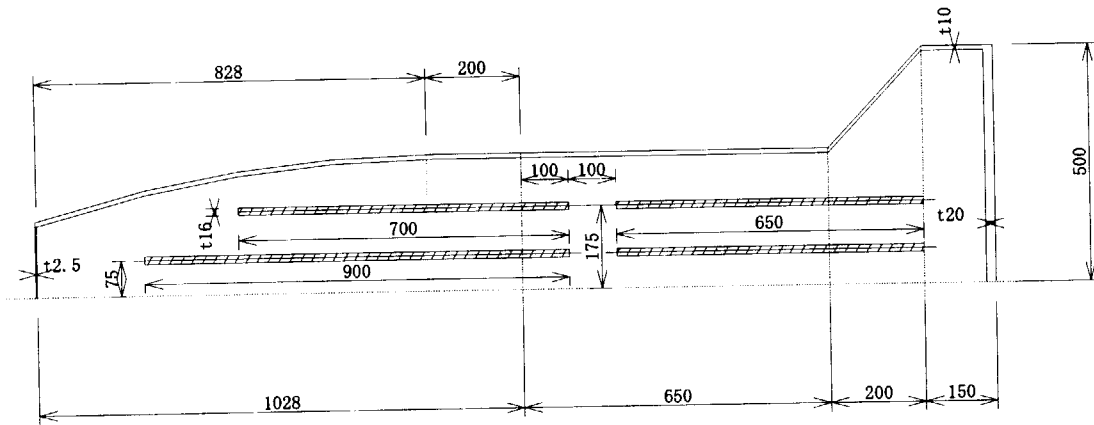



Fig.3.8(a) Helium container analytical model for Case2



ハッチング部  は、ヘリウム容器と重水容器を接続する部分を示す。

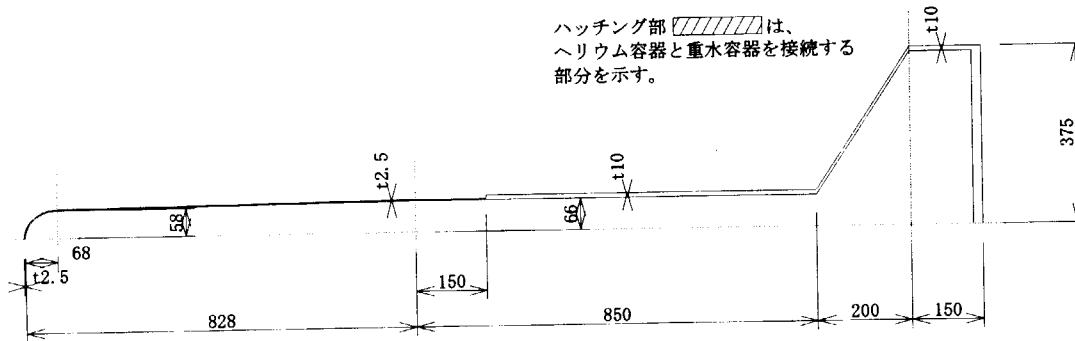
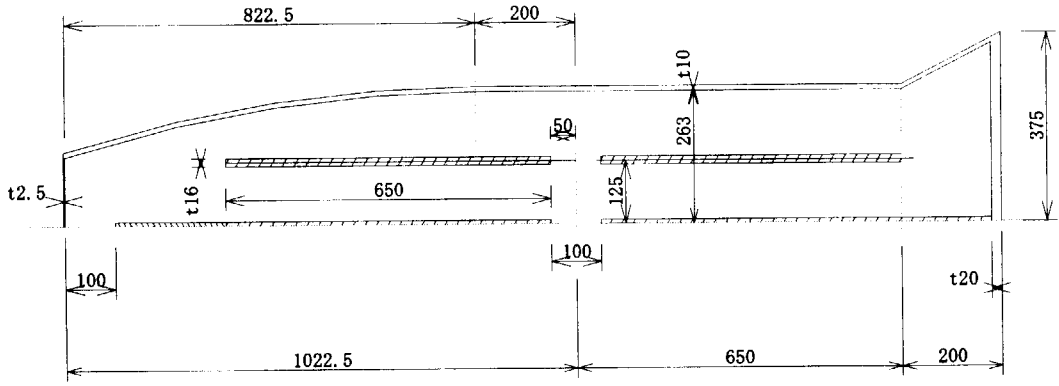


Fig.3.8(b) Heavy water container analytical model for Case2



ハッチング部 [hatched] は、
水銀容器とヘリウム容器を接続する
部分を示す。

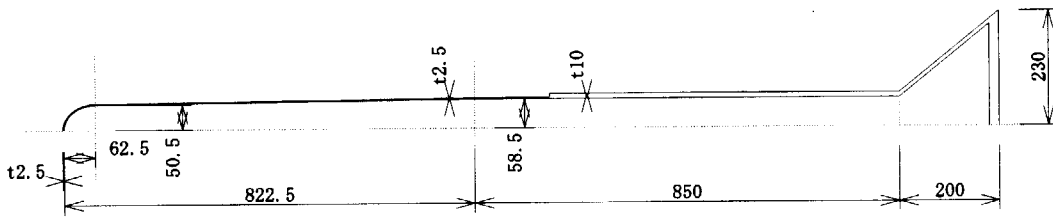
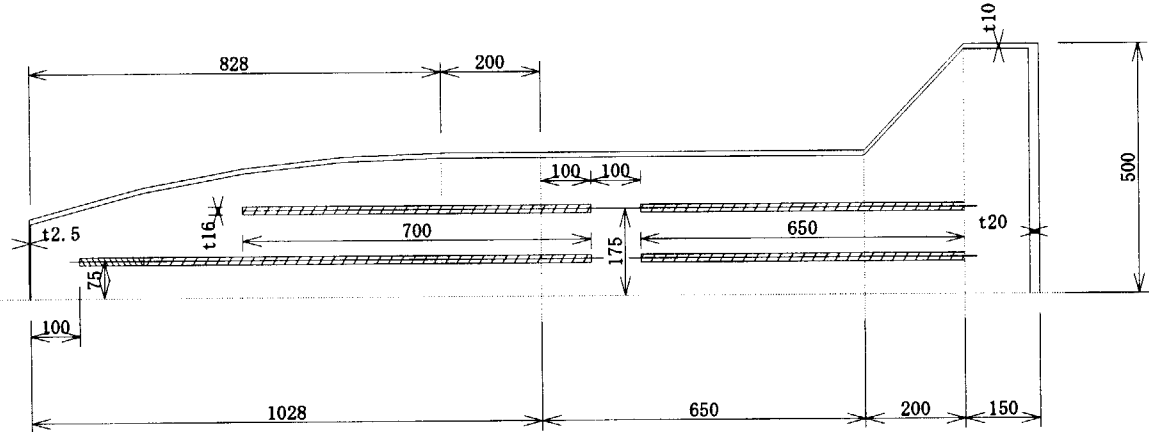


Fig.3.9(a) Helium container analytical model for Case3



ハッチング部 [hatched] は、
ヘリウム容器と重水容器を接続する
部分を示す。

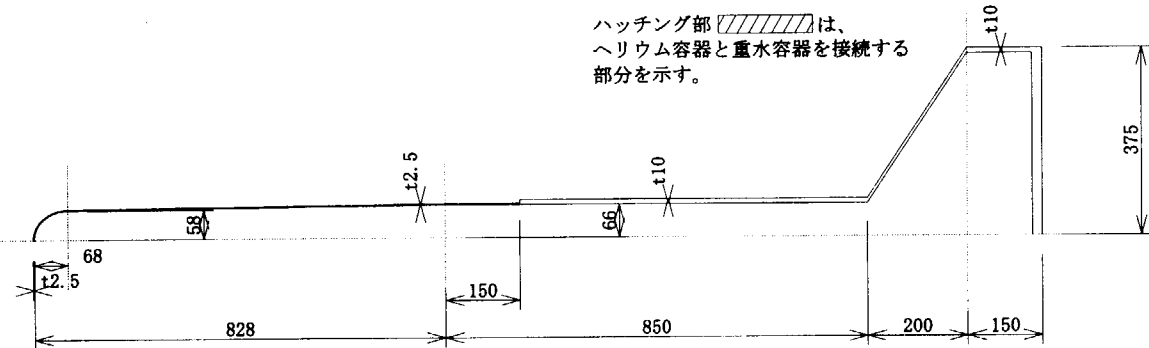
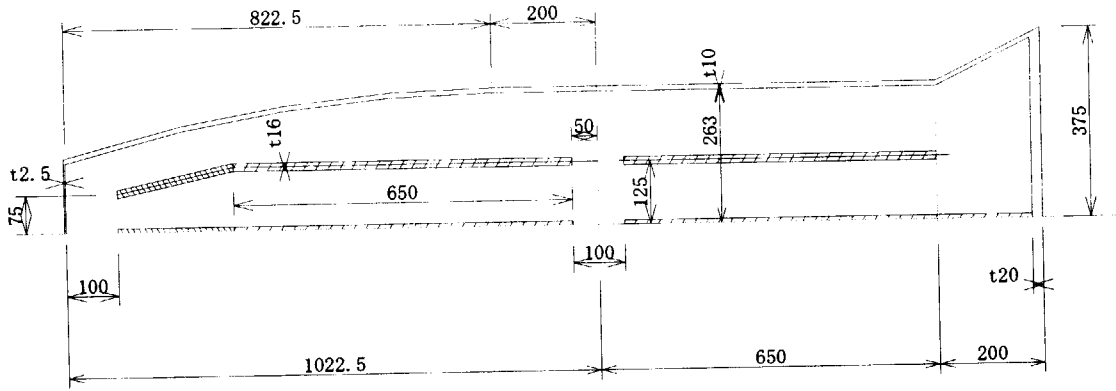



Fig.3.9(b) Heavy water container analytical model for Case3



ハッチング部  は、
水銀容器とヘリウム容器を接続する
部分を示す。

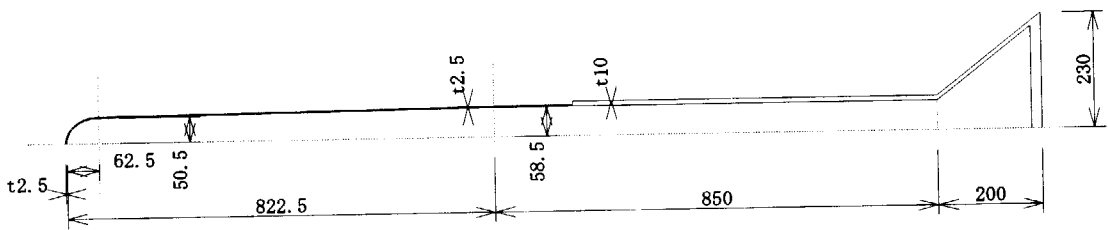
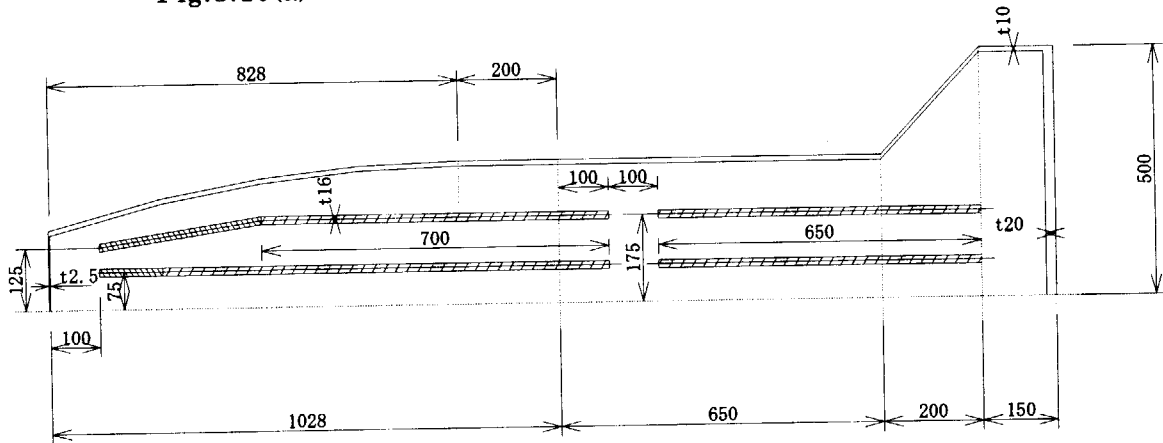



Fig.3.10(a) Helium container analytical model for Case4



ハッチング部  は、
ヘリウム容器と重水容器を接続する
部分を示す。

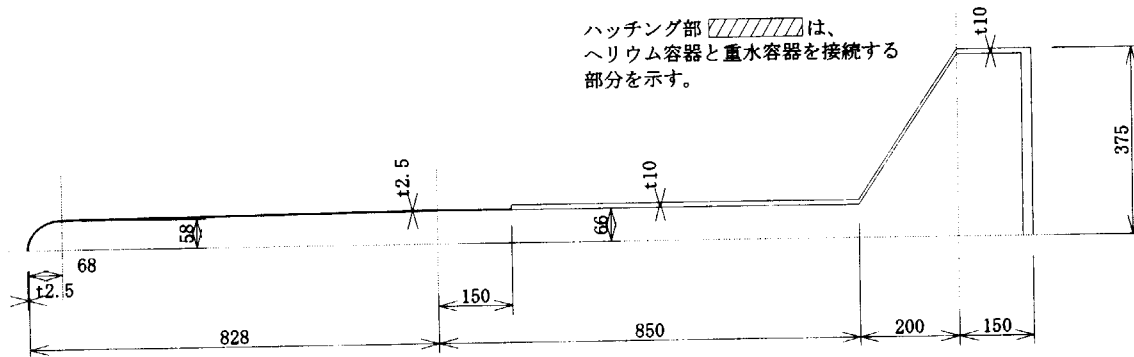
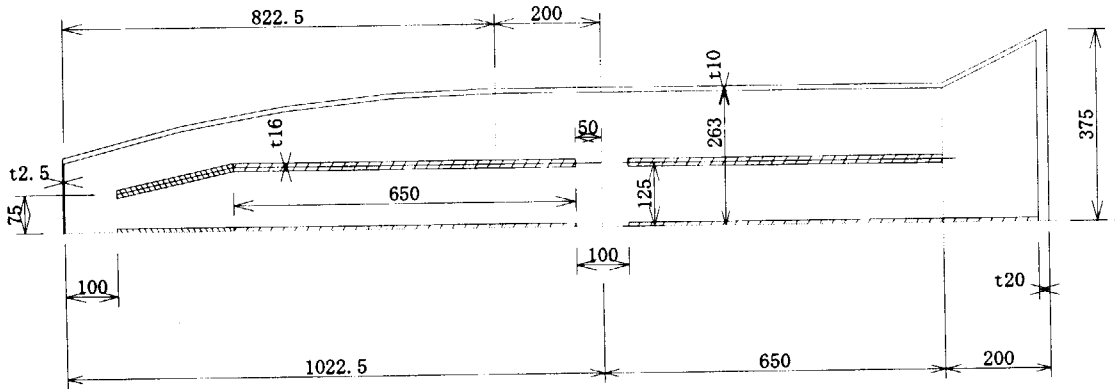



Fig.3.10(b) Heavy water container analytical model for Case4



ハッチング部  は、
水銀容器とヘリウム容器を接続する
部分を示す。

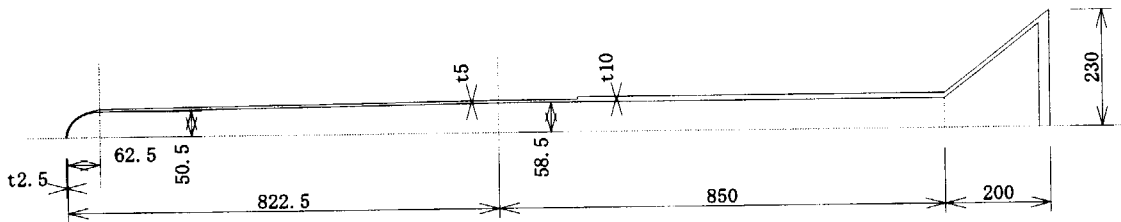
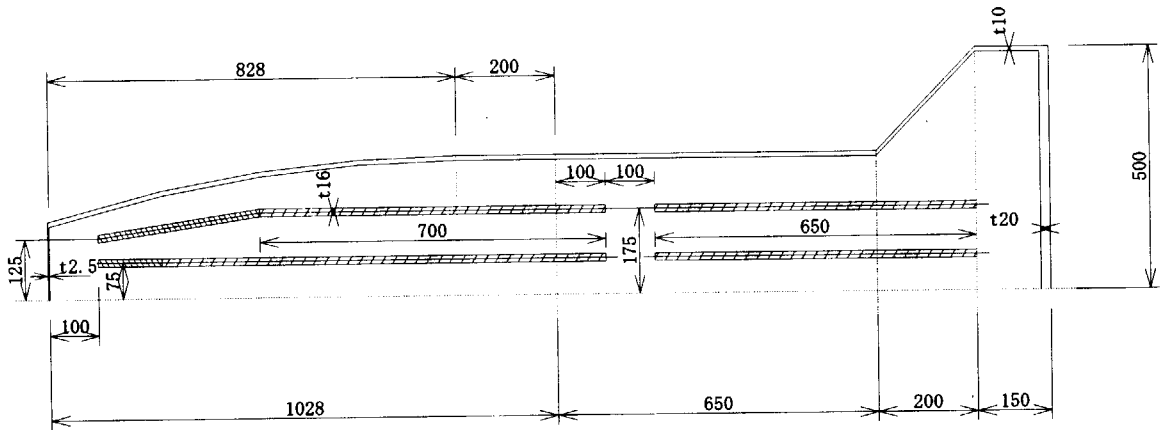



Fig.3.11(a) Helium container analytical model for Case5



ハッチング部  は、
ヘリウム容器と重水容器を接続する
部分を示す。

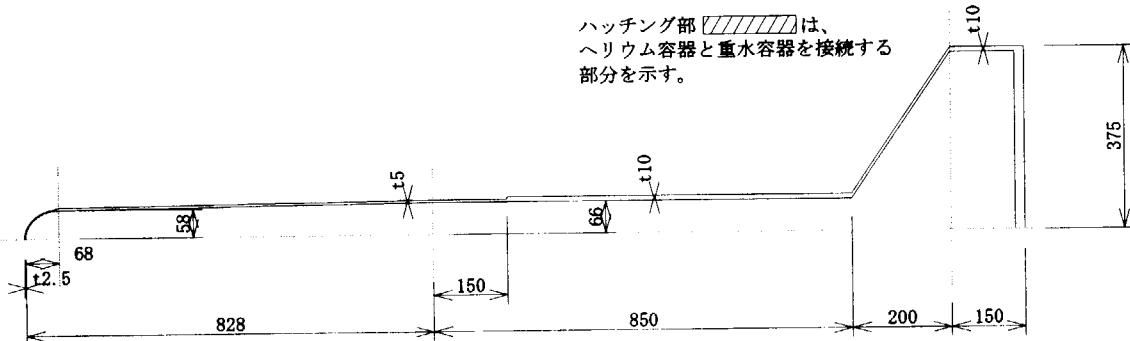
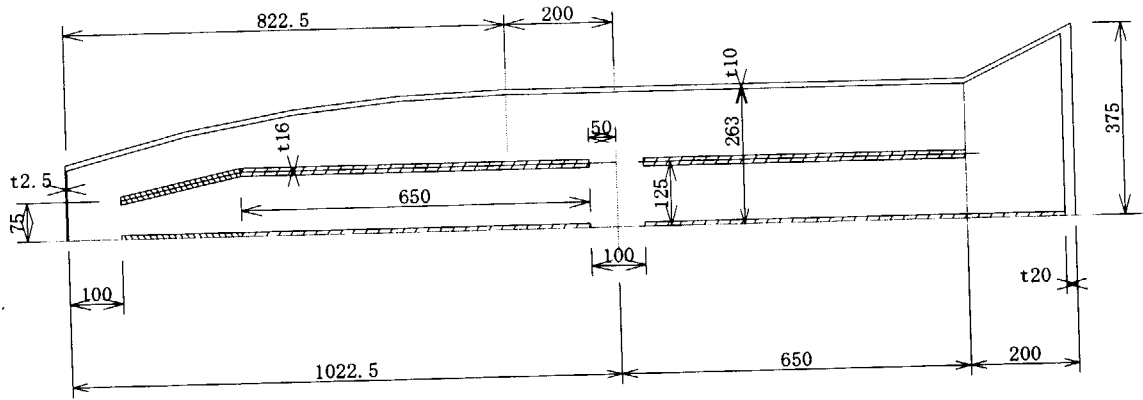



Fig.3.11(b) Heavy water container analytical model for Case5



ハッチング部  は、水銀容器とヘリウム容器を接続する部分を示す。

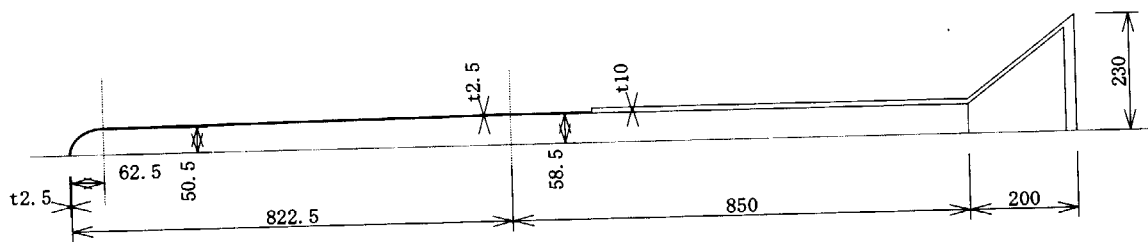
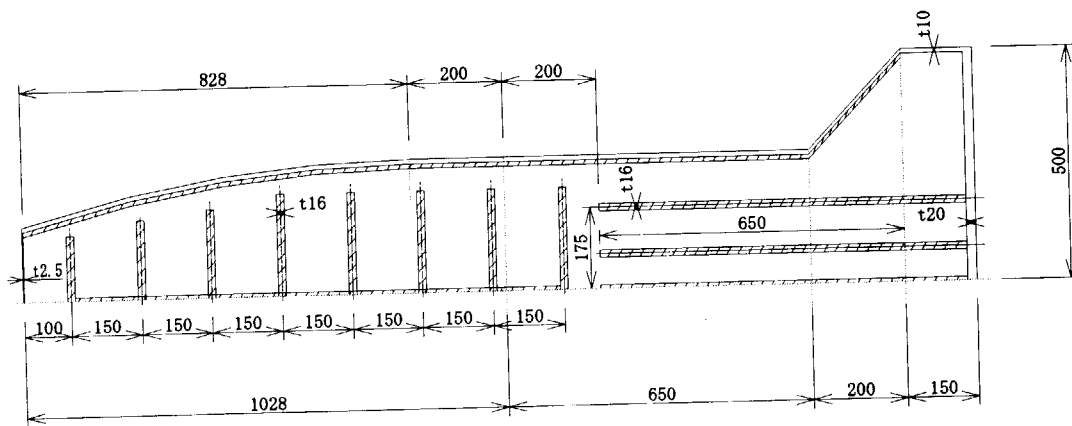



Fig.3.12(a) Helium container analytical model for Case6



ハッチング部  は、ヘリウム容器と重水容器を接続する部分を示す。

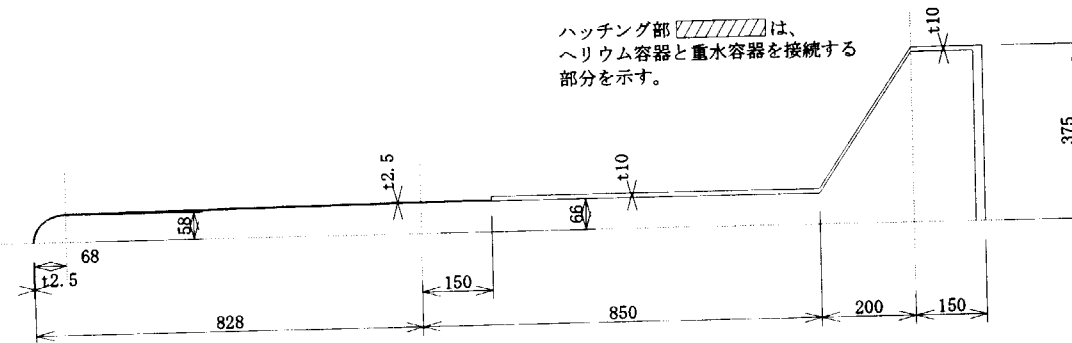


Fig.3.12(b) Heavy water container analytical model for Case6

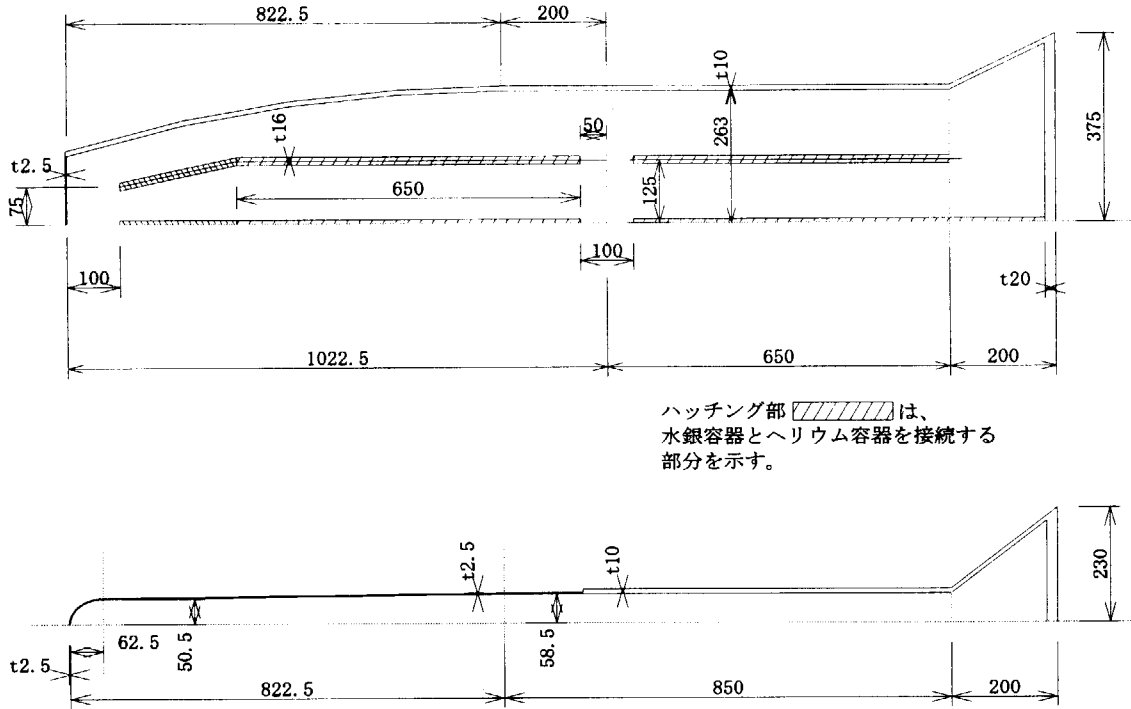


Fig.3.13(a) Helium container analytical model for Case7

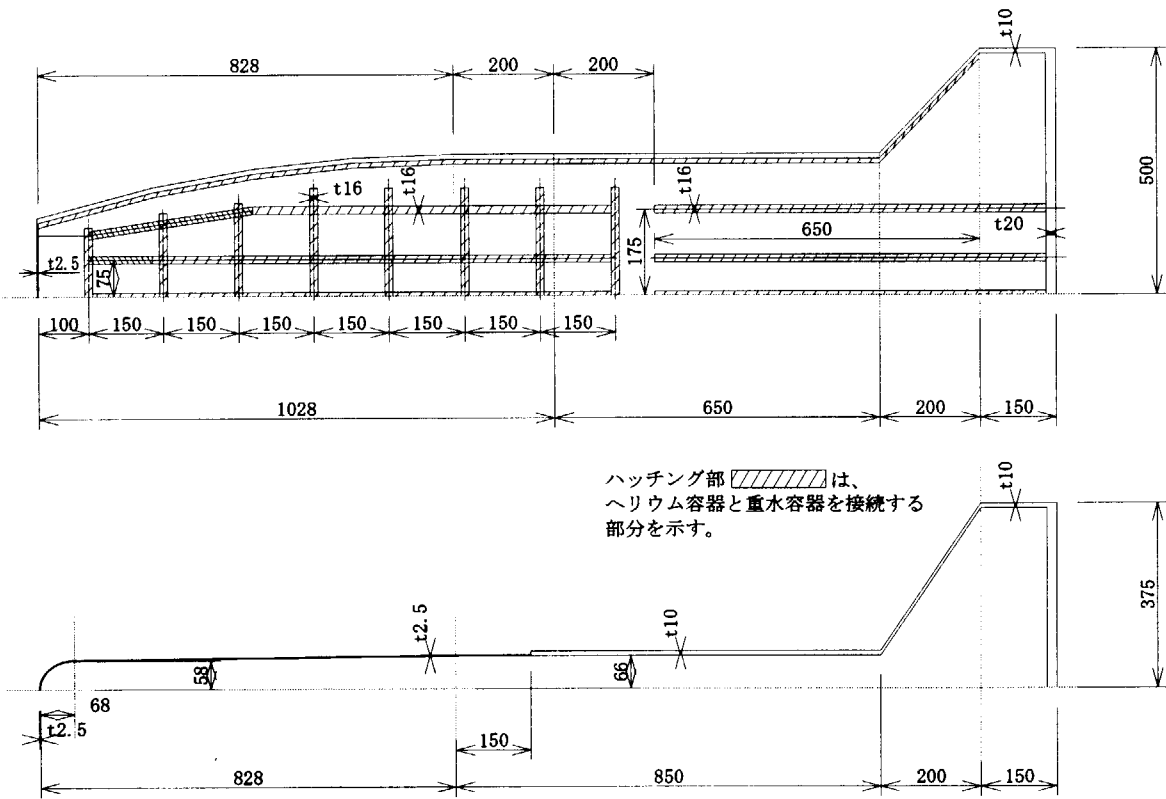
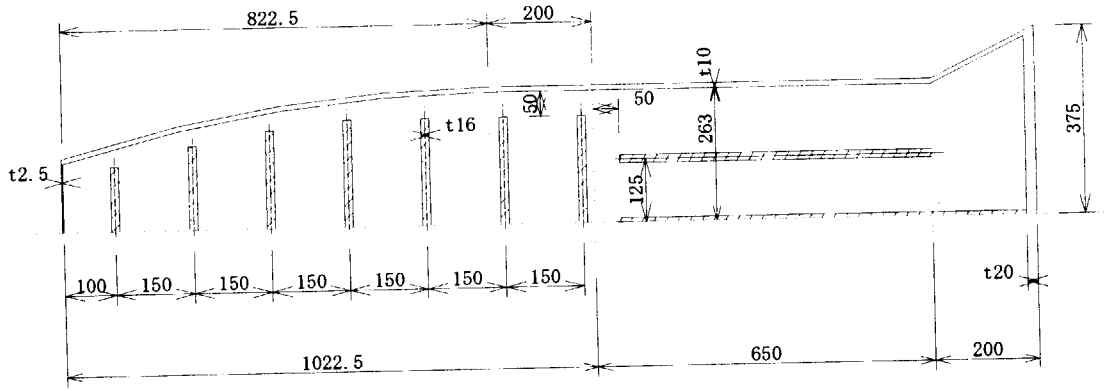



Fig.3.13(b) Heavy water container analytical model for Case7



ハッチング部  は、
水銀容器とヘリウム容器を接続する
部分を示す。

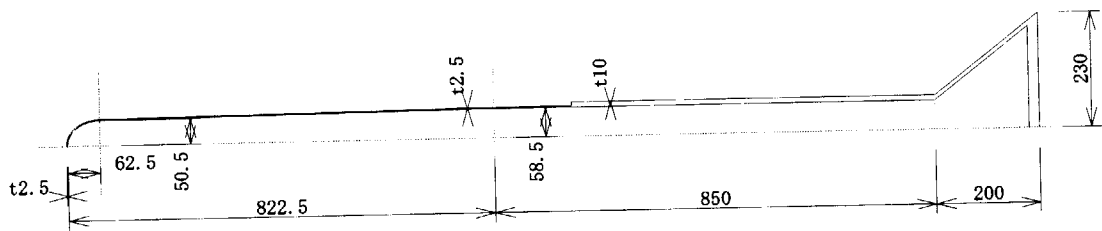
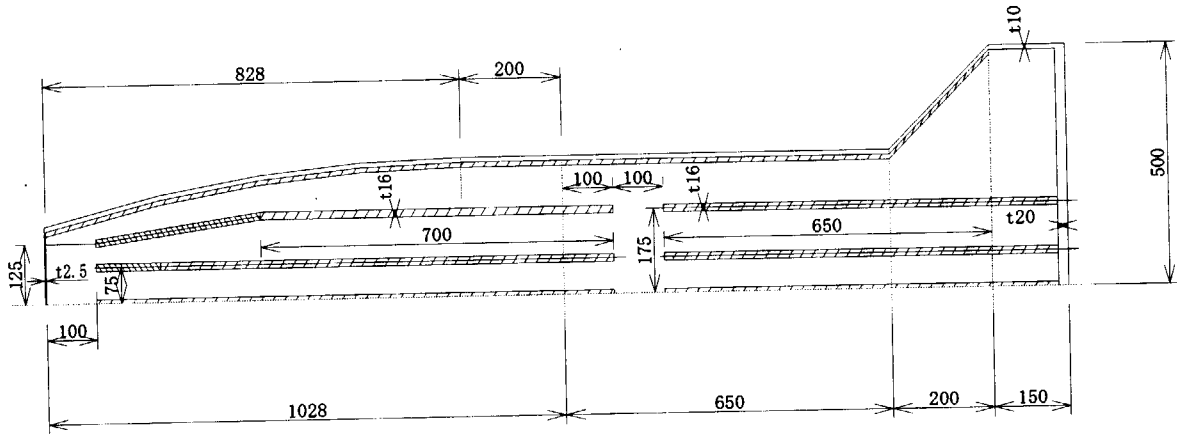



Fig.3.14(a) Helium container analytical model for Case8



ハッチング部  は、
ヘリウム容器と重水容器を接続する
部分を示す。

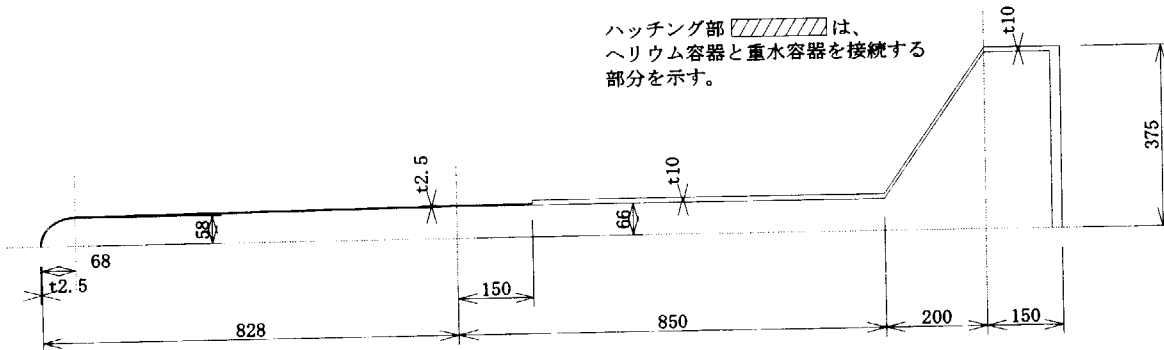
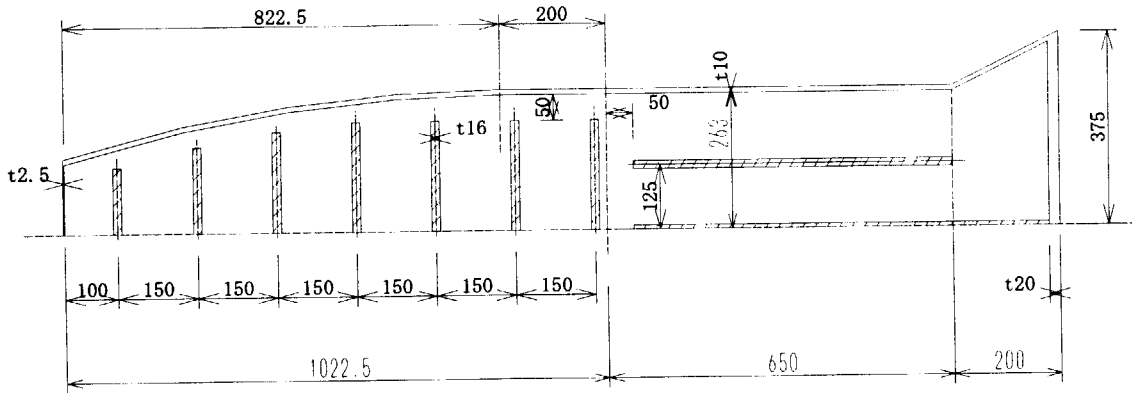



Fig.3.14(b) Heavy water container analytical model for Case8



ハッチング部  は、水銀容器とヘリウム容器を接続する部分を示す。

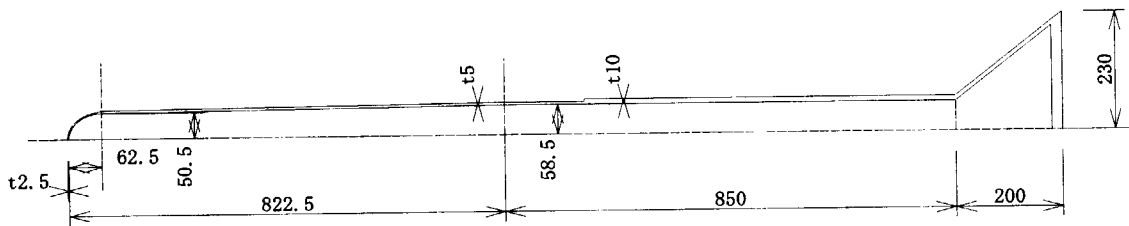
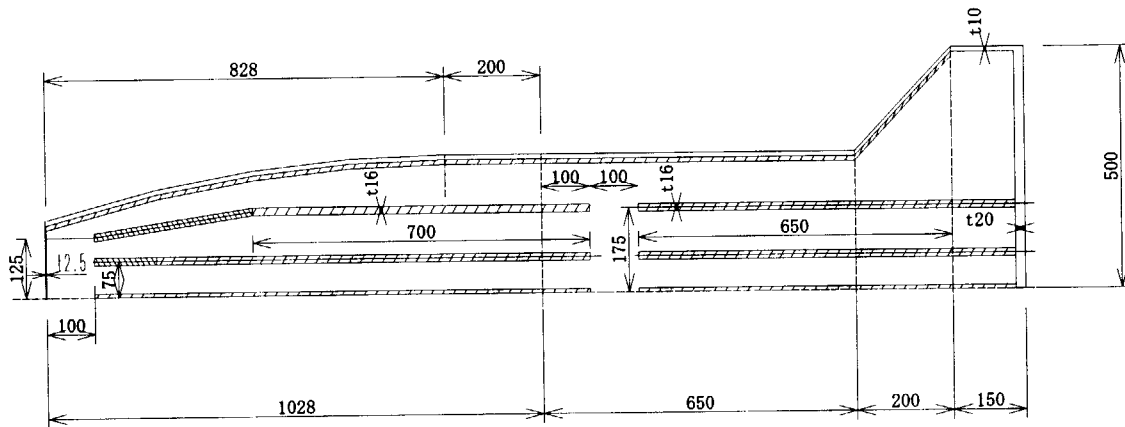



Fig.3.15(a) Helium container analytical model for Case9



ハッチング部  は、ヘリウム容器と重水容器を接続する部分を示す。

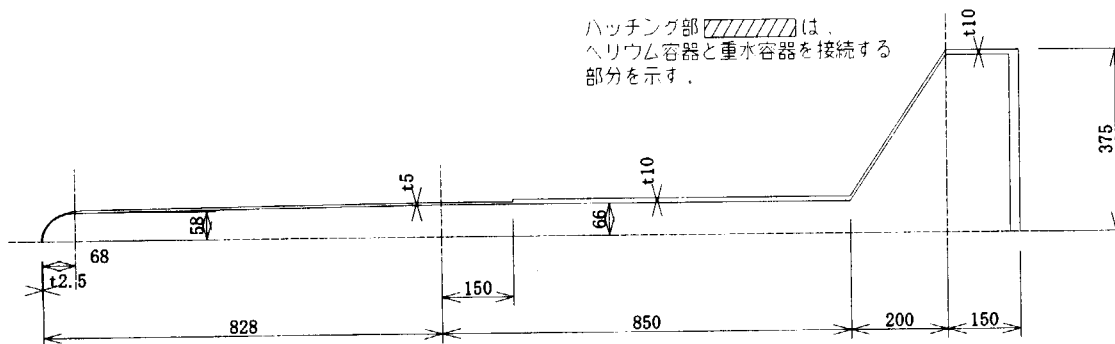
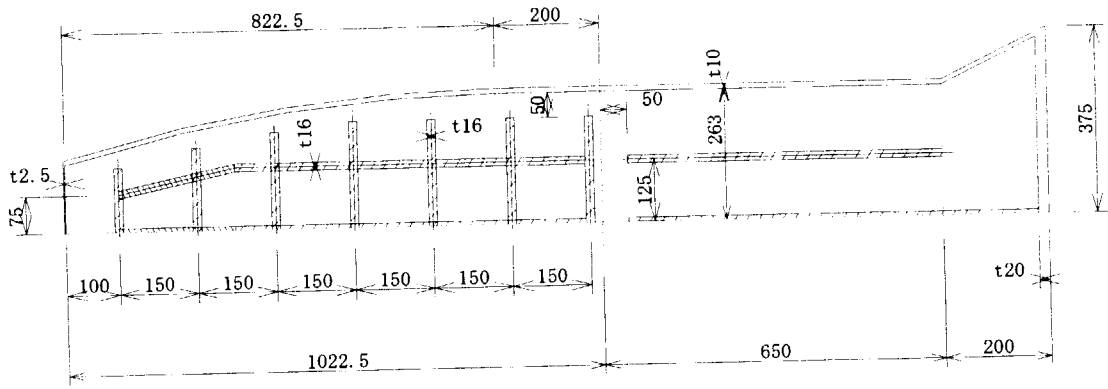



Fig.3.15(b) Heavy water container analytical model for Case9



ハッチング部  は、
水銀容器とヘリウム容器を接続する
部分を示す。

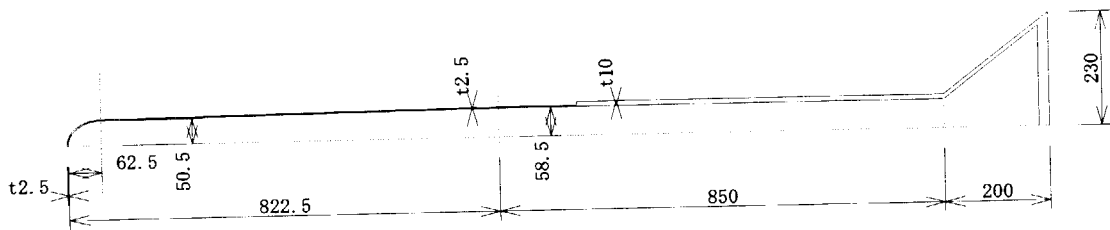
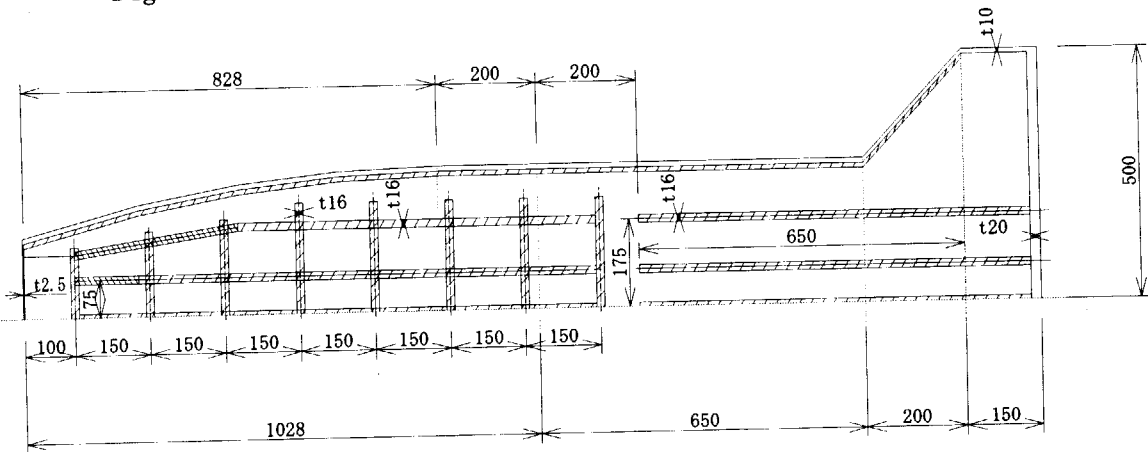



Fig.3.16(a) Helium container analytical model for Case10



ハッチング部  は、
ヘリウム容器と重水容器を接続する
部分を示す。

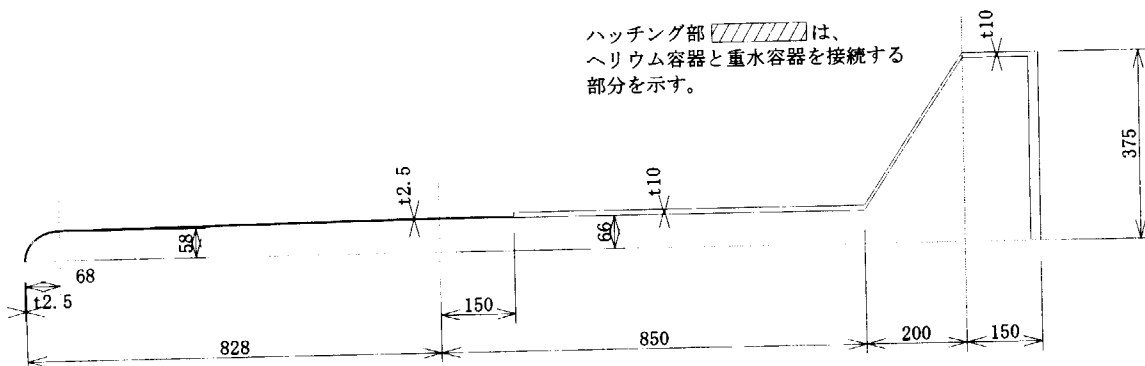
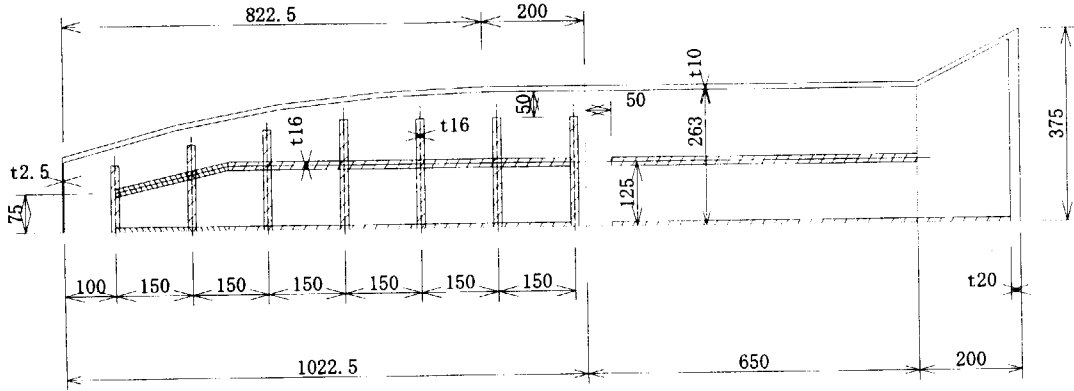
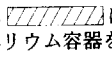


Fig.3.16(b) Heavy water container analytical model for Case10



ハッチング部  は、水銀容器とヘリウム容器を接続する部分を示す。

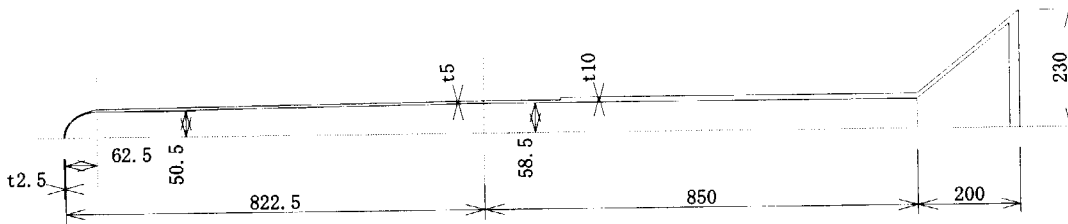
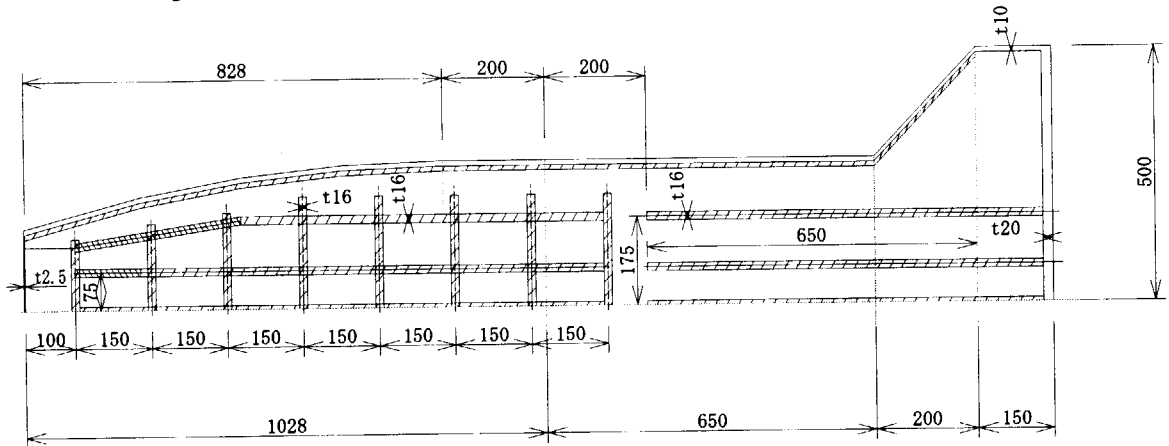
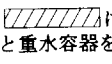


Fig.3.17(a) Helium container analytical model for Case11



ハッチング部  は、ヘリウム容器と重水容器を接続する部分を示す。

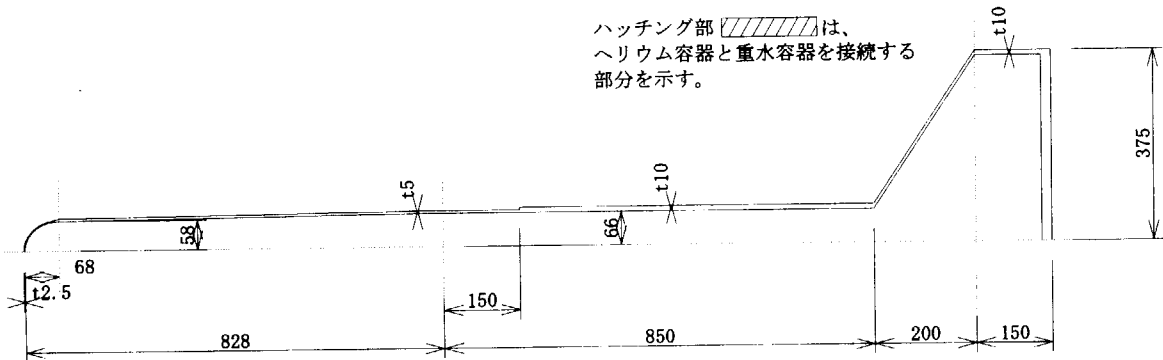


Fig.3.17(b) Heavy water container analytical model for Case11

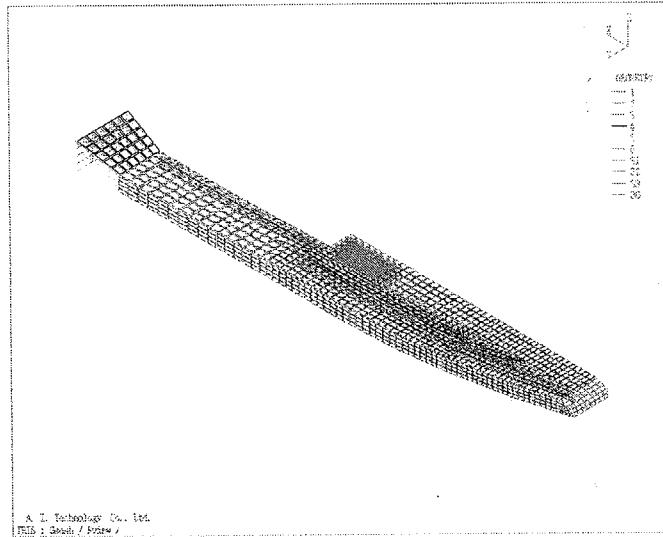


Fig.3.18(a) Analytical mesh of the mercury target container (All cases)

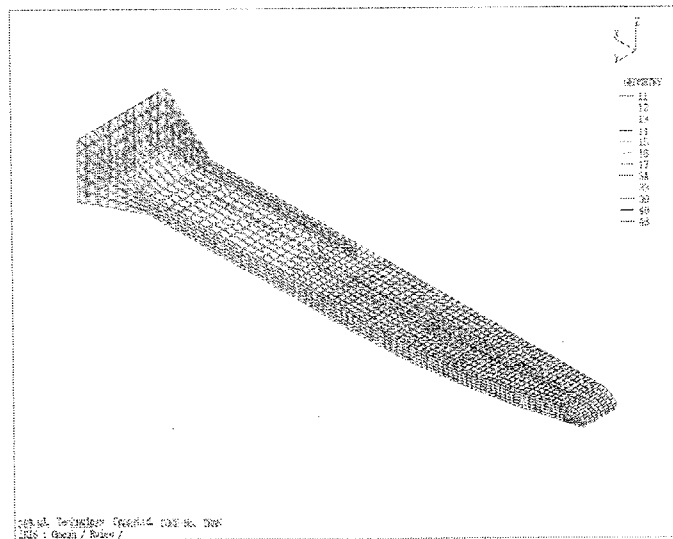


Fig.3.18(b) Analytical mesh of the helium container (Case10 &11)

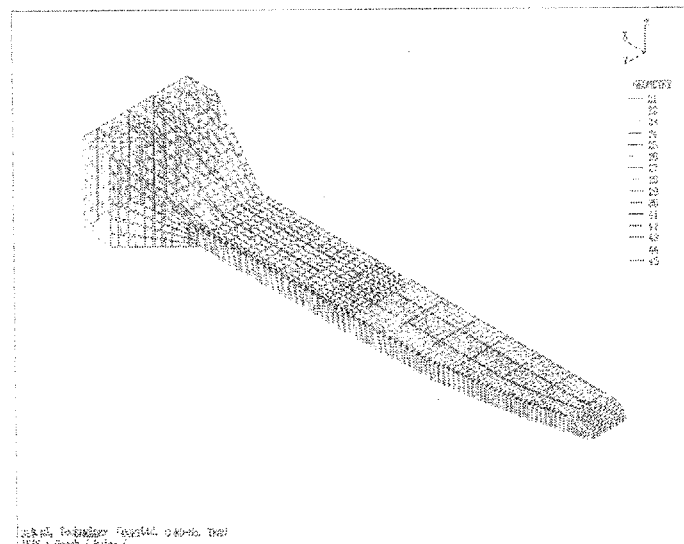
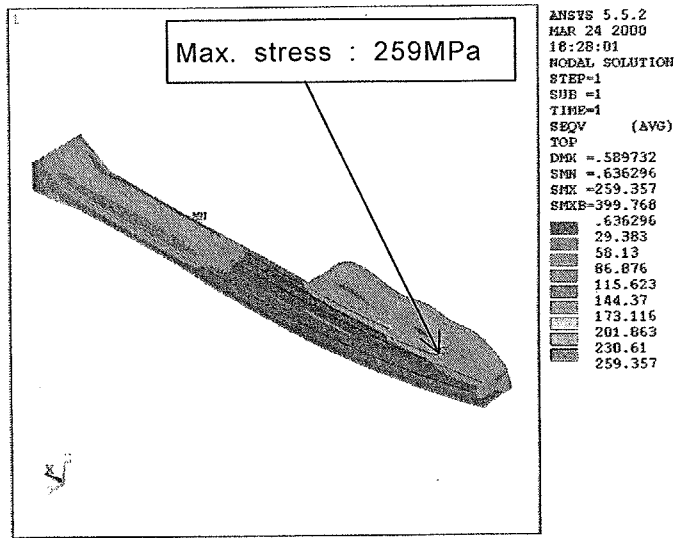


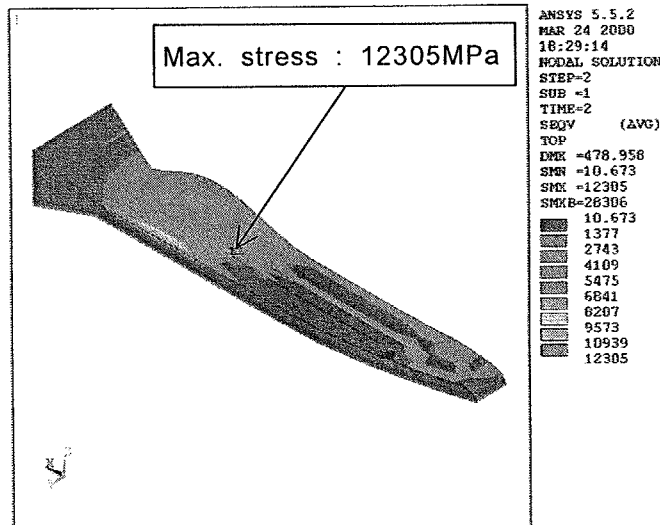
Fig.3.18(c) Analytical mesh of the heavy water container (Case10 &11)

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

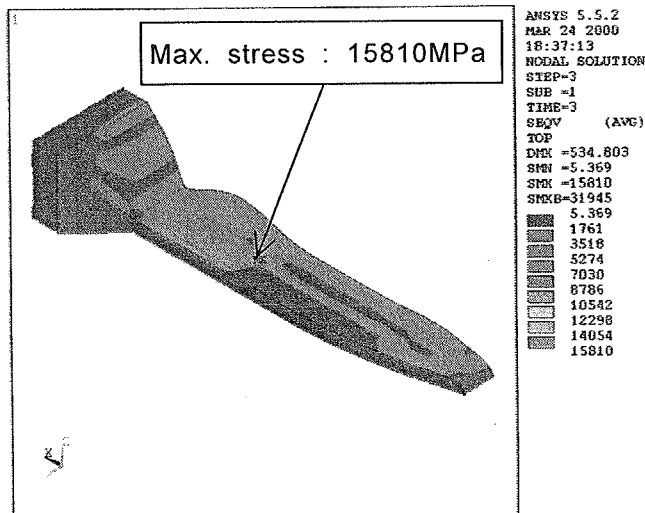
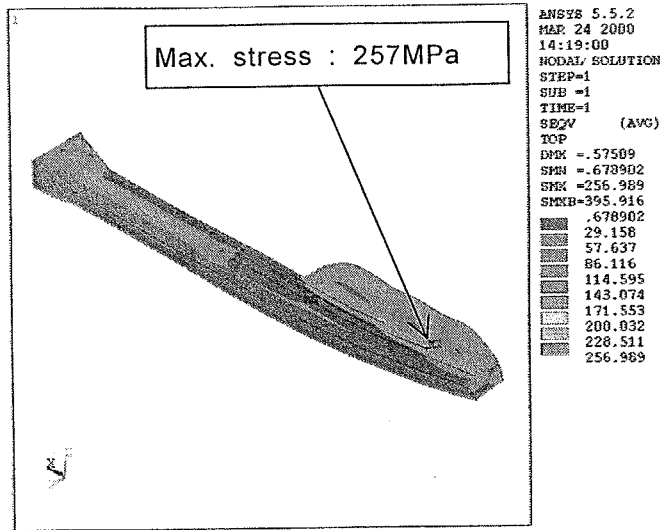


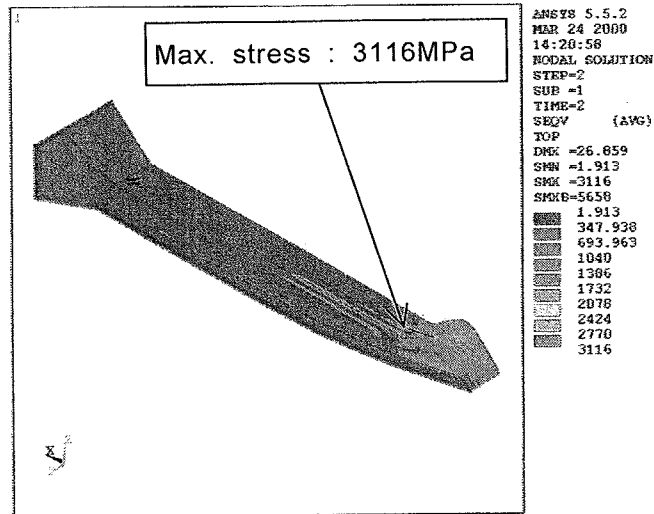
Fig.3.19 Stress and deformation degree analytical results for Case1

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

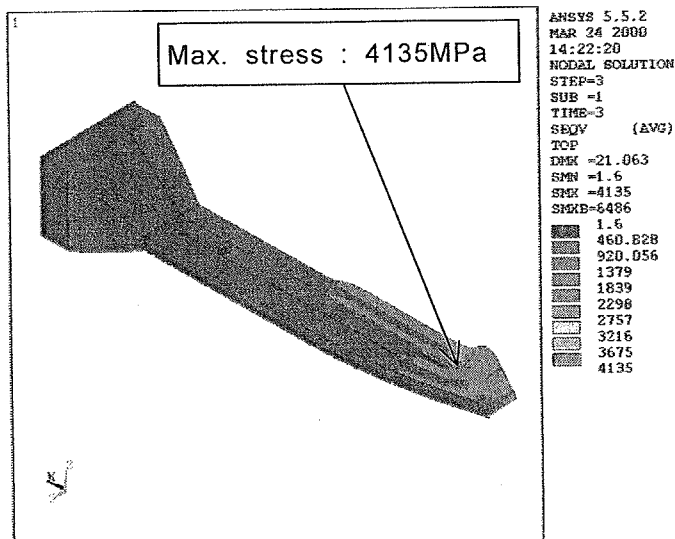
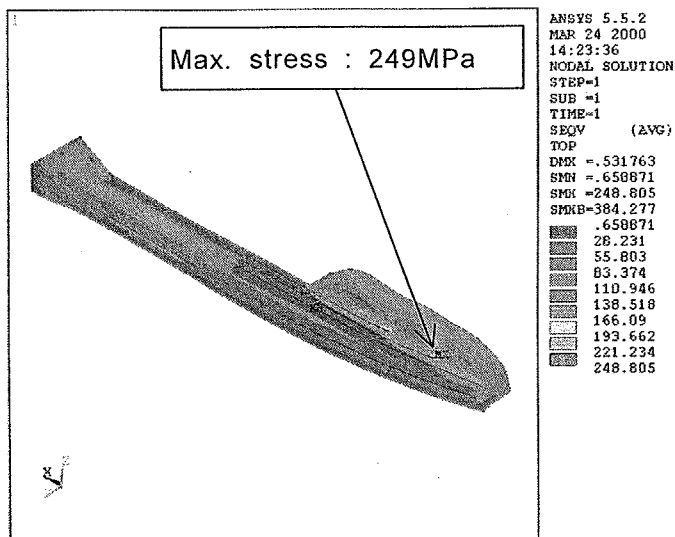


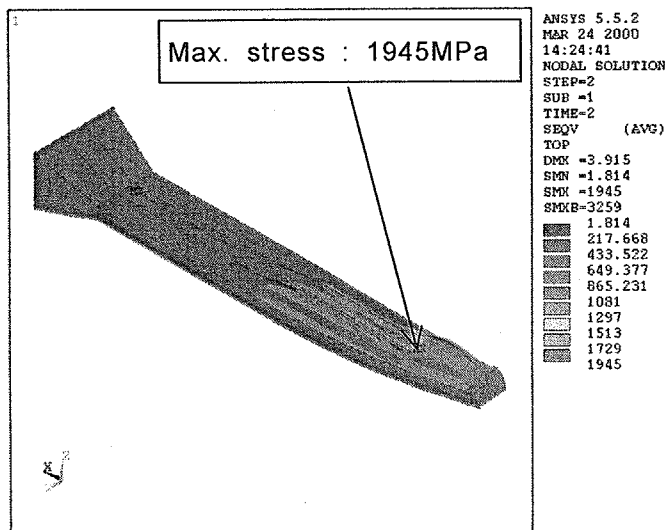
Fig.3.20 Stress and deformation degree analytical results for Case2

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

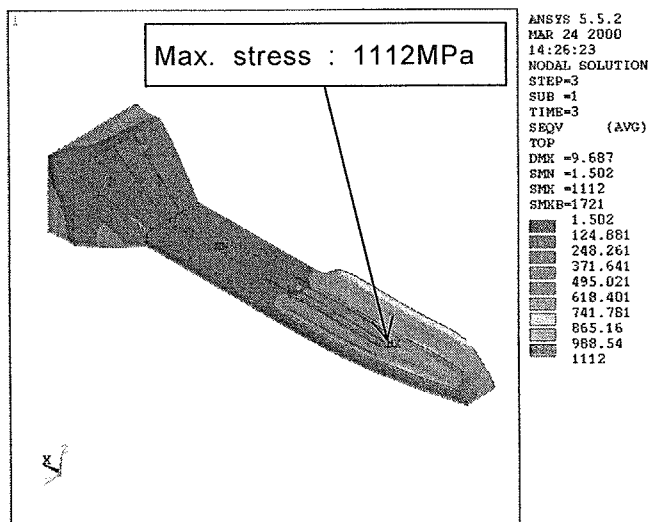
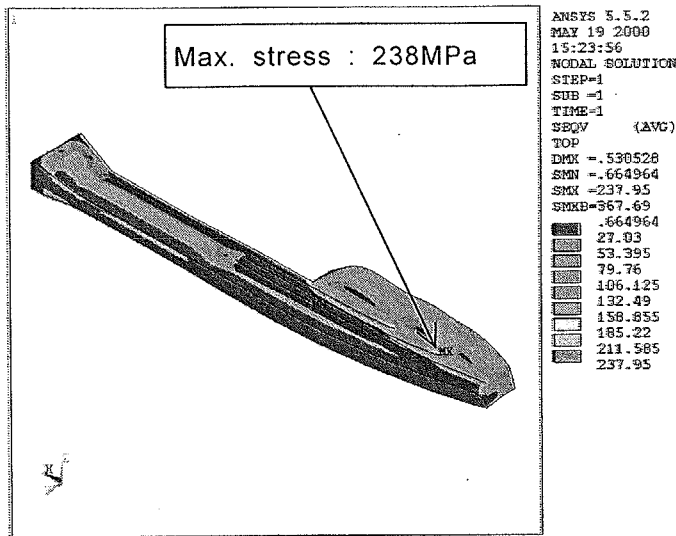


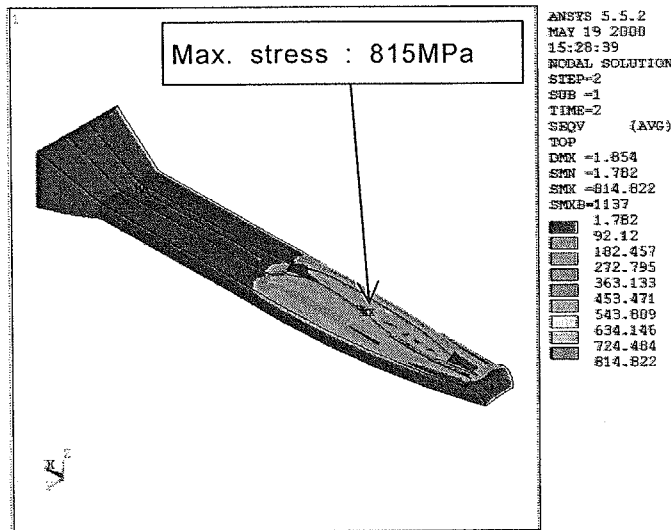
Fig.3.21 Stress and deformation degree analytical results for Case3

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

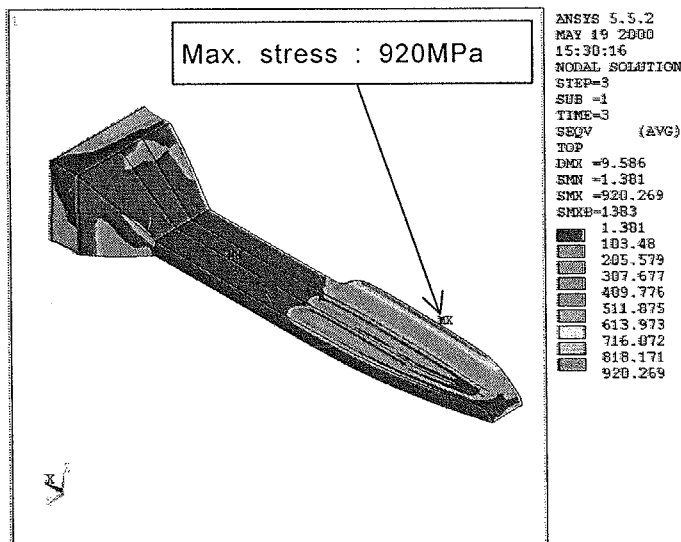
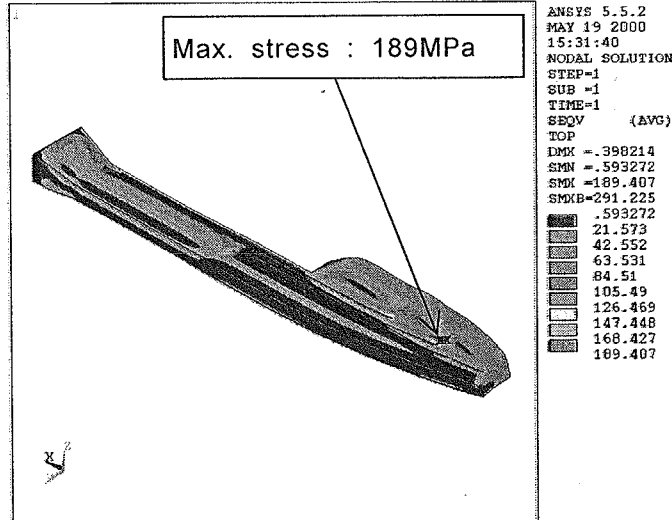


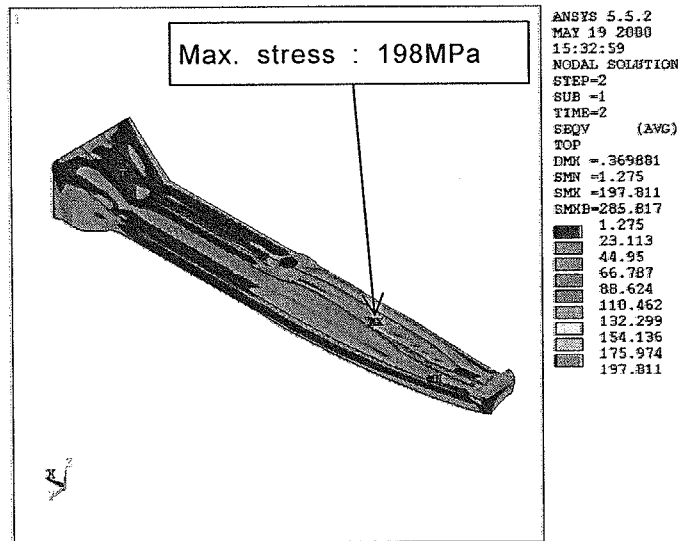
Fig.3.22 Stress and deformation degree analytical results for Case4

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

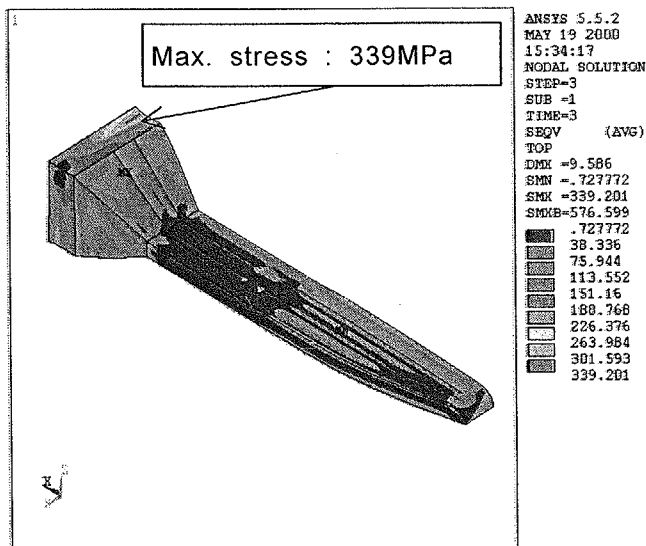
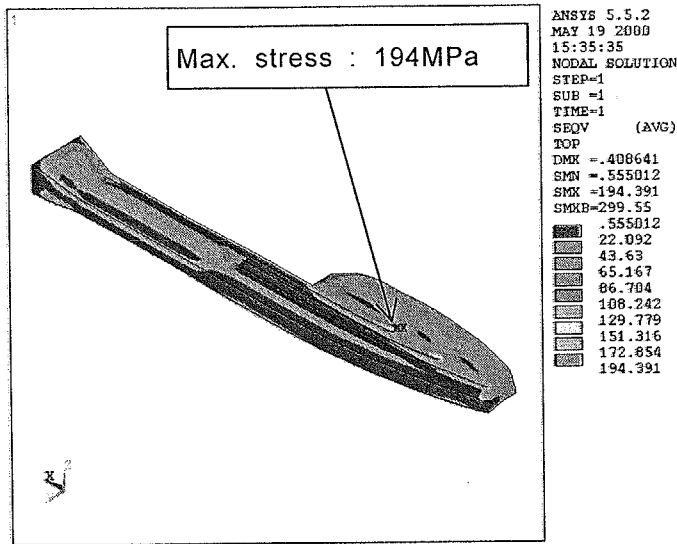


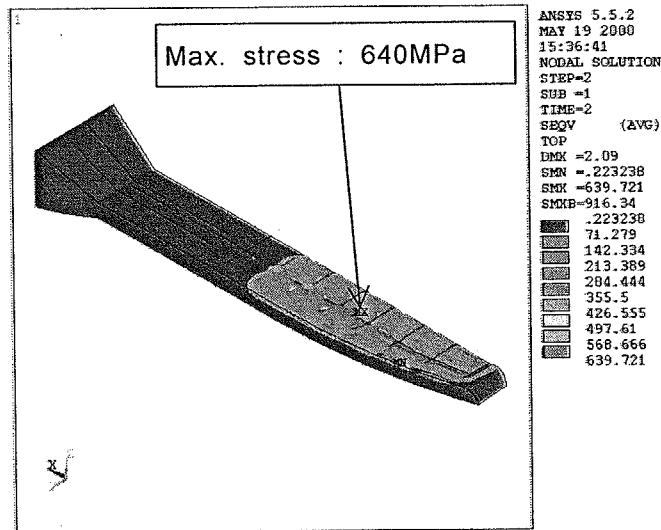
Fig.3.23 Stress and deformation degree analytical results for Case5

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

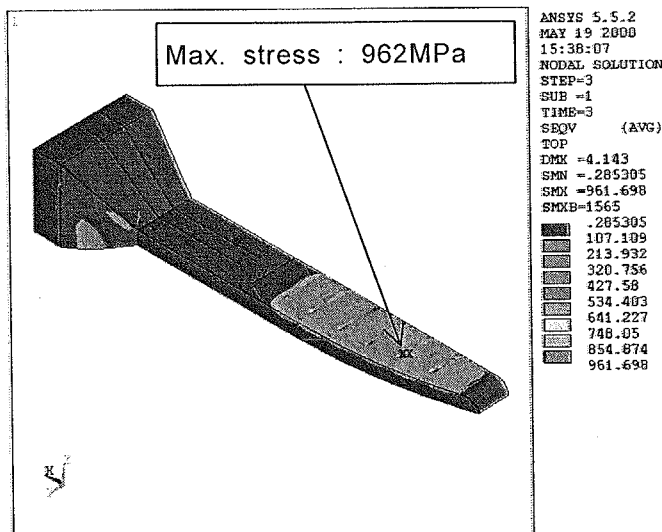
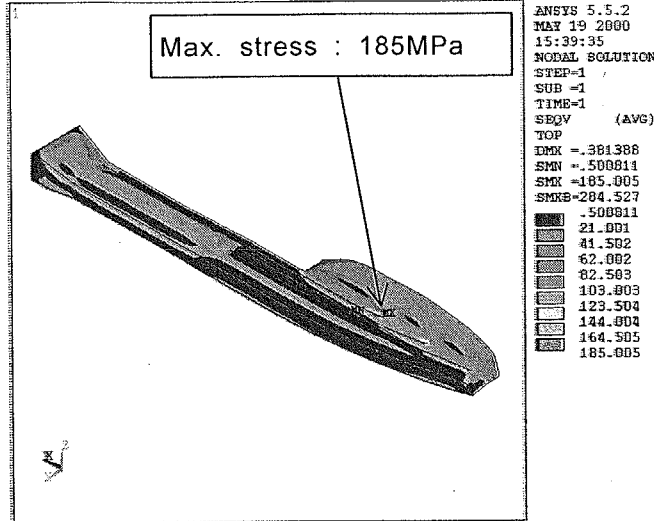


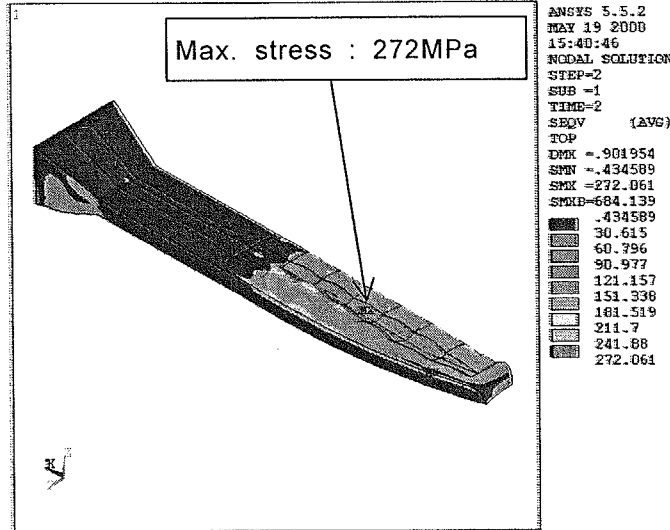
Fig.3.24 Stress and deformation degree analytical results for Case6

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

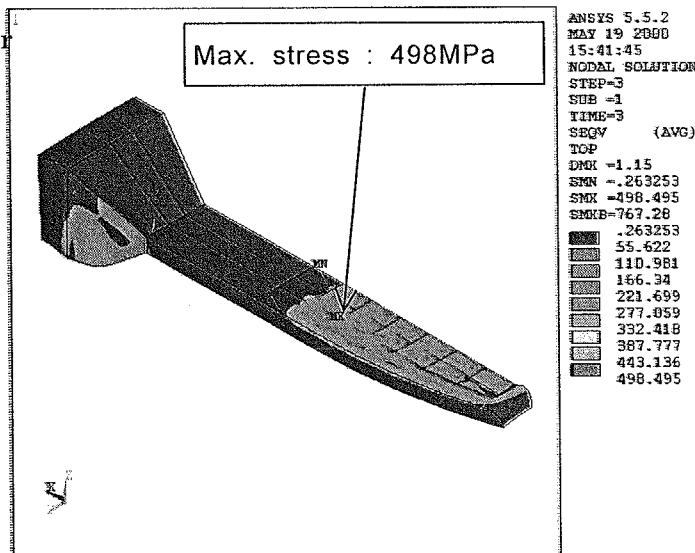
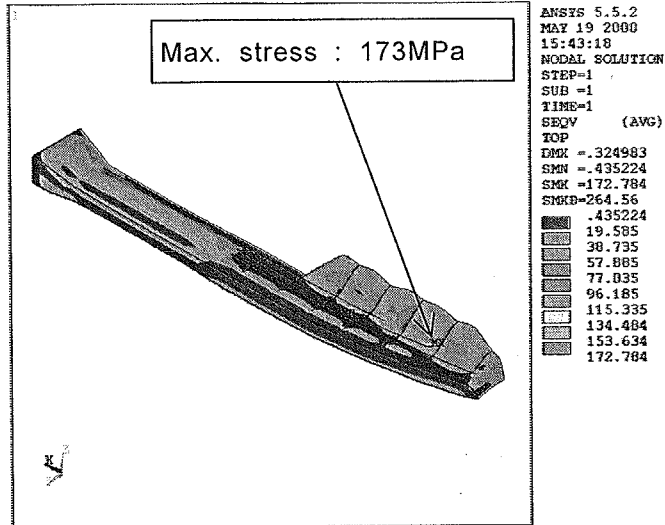


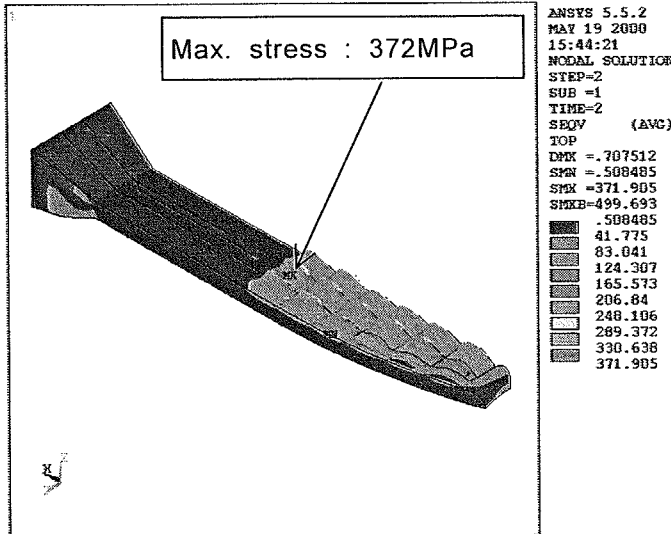
Fig.3.25 Stress and deformation degree analytical results for Case7

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

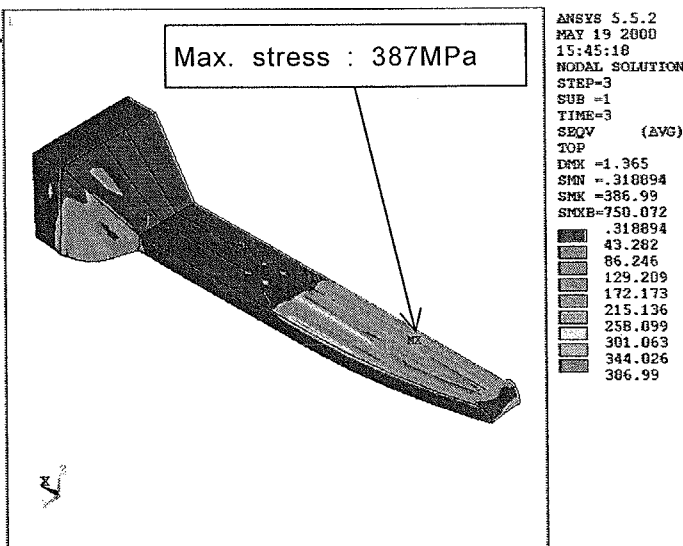
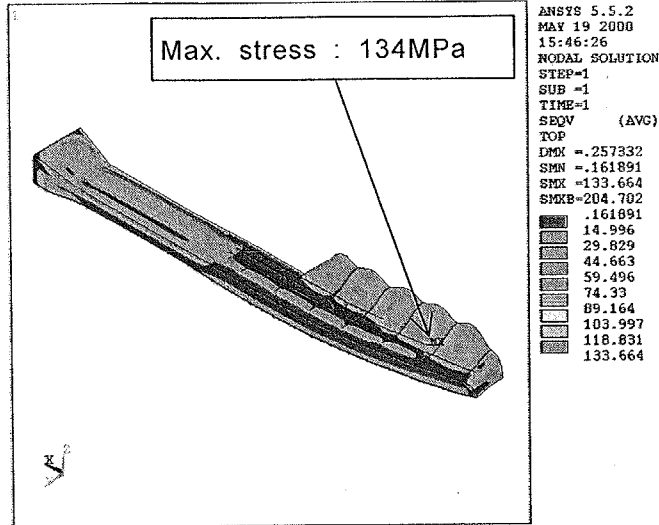


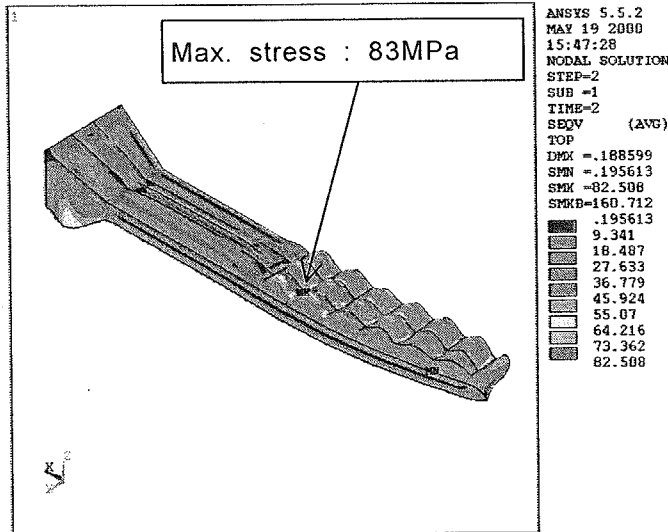
Fig.3.26 Stress and deformation degree analytical results for Case8

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

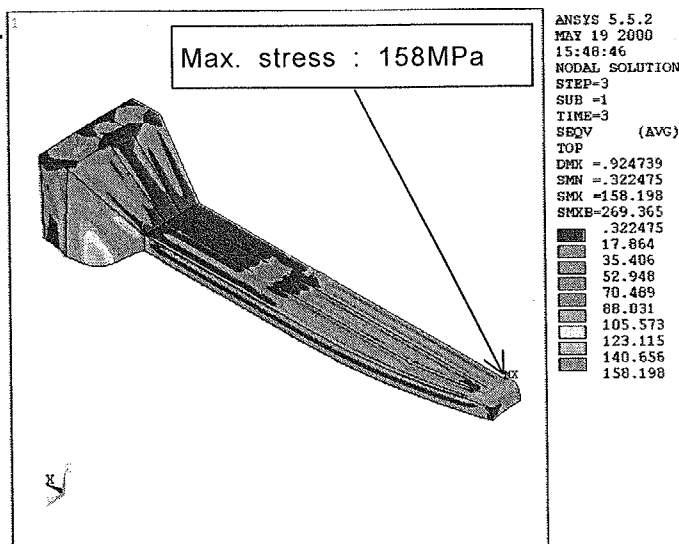
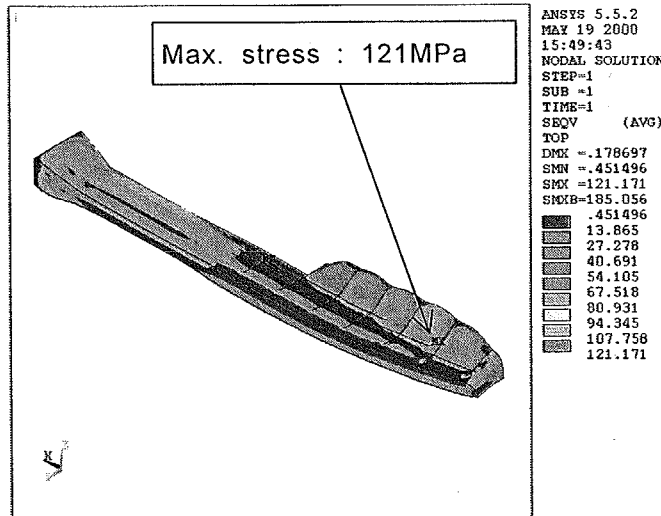


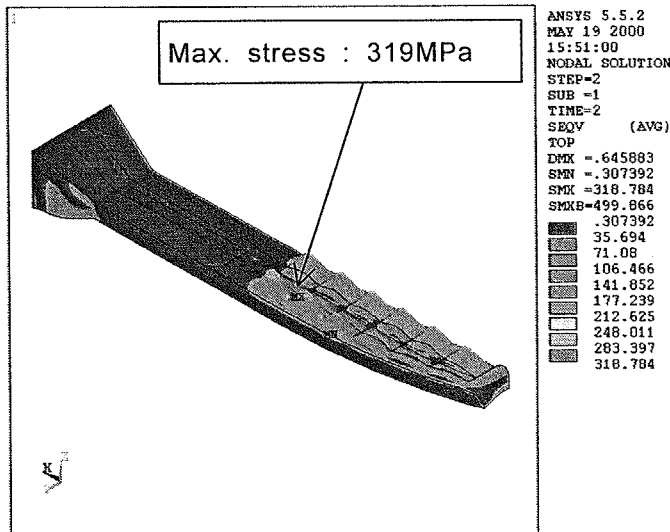
Fig.3.27 Stress and deformation degree analytical results for Case9

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

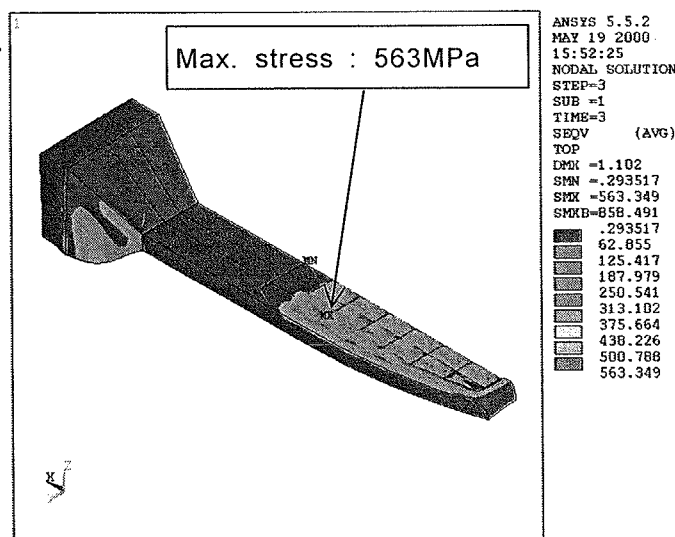
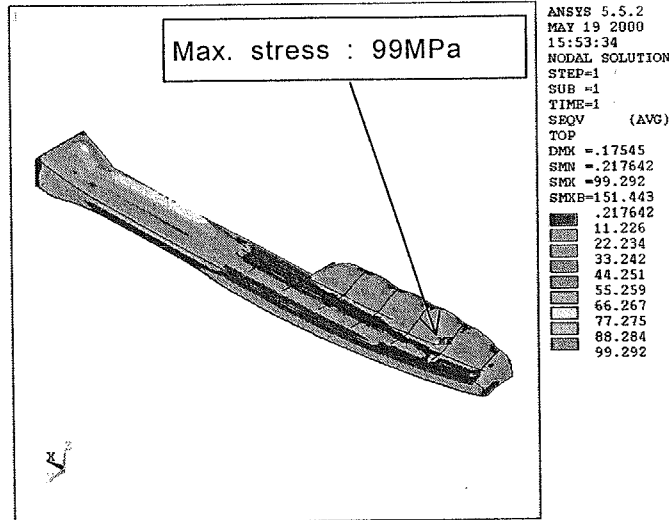


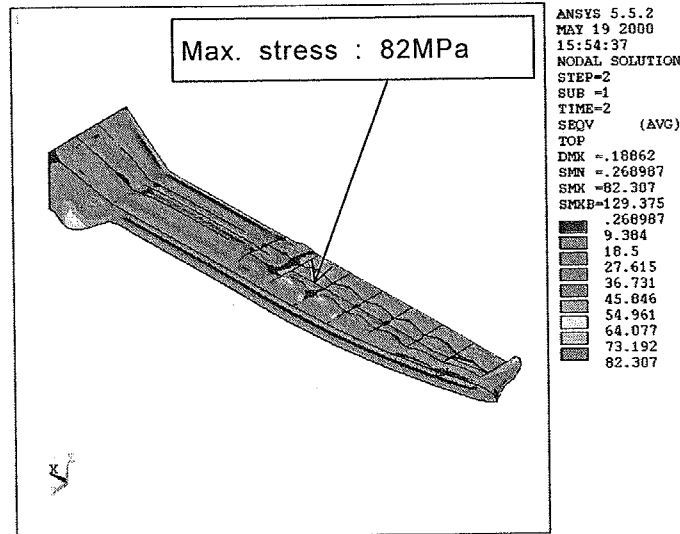
Fig.3.28 Stress and deformation degree analytical results for Case10

This is a blank page.

(a) Mercury target container



(b) Helium container



(c) Heavy water container

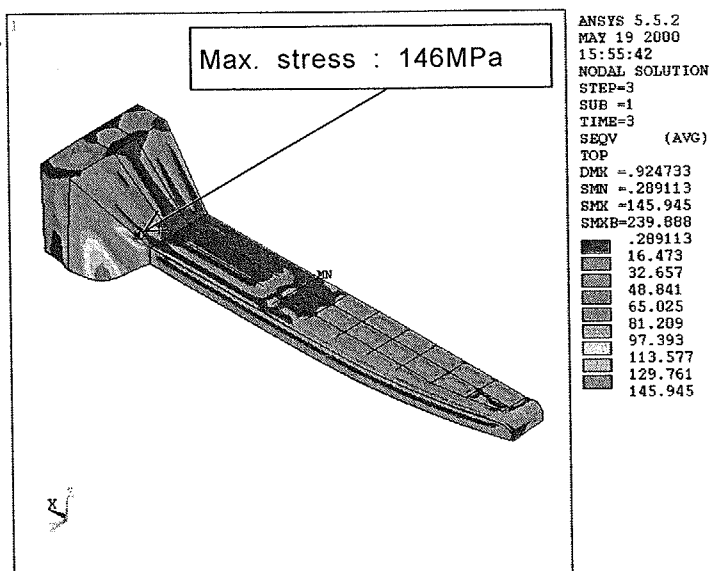


Fig.3.29 Stress and deformation degree analytical results for Case11

This is a blank page.

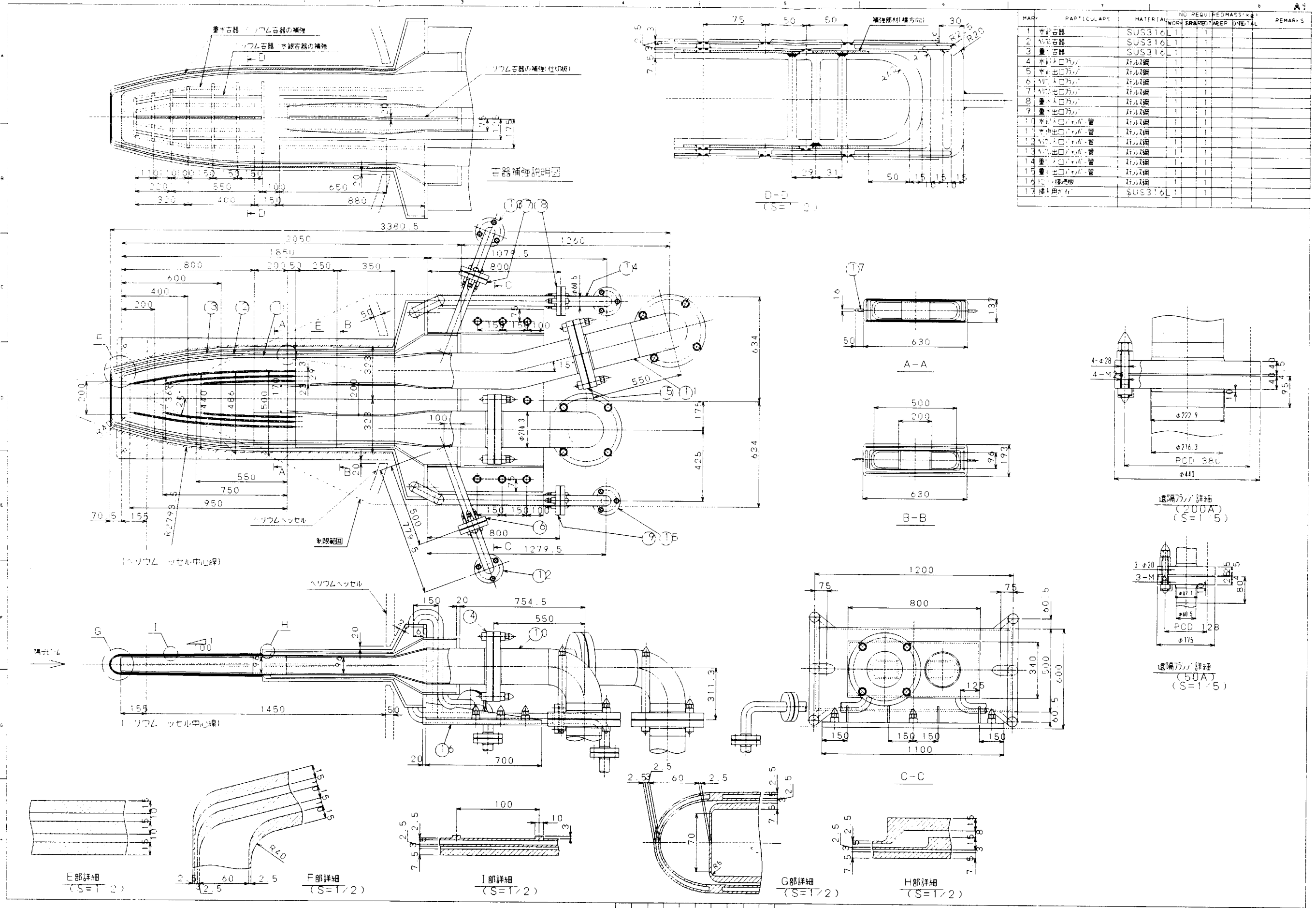


Fig.3.30 Integrated CFT Target container with safety hull

4. 結 言

水銀ターゲットシステムの設計では、安全性を確保しつつ中性子収率等の性能向上を図ることを基本方針として設計を進めている。この方針に基づき、水銀ターゲットに関してはビーム窓等の破損により水銀が漏洩する場合を想定し、その場合においても十分な安全性を確保できるように漏洩時の水銀を容易に回収可能な格納容器 (Safety Hull) をターゲット容器の外側に設けることとした。ターゲット容器は強く放射化しているためリモートハンドリングにより交換する必要がある。

ターゲット容器のリモートハンドリングによる交換は、施設の稼働率を向上させるために運転停止から再起動作業を含めて1週間以内の短期間で実施することが要件となっている。このため、交換作業を容易にし、かつ、作業時間を短縮するためにターゲット・格納容器一体型ターゲット構造を提案した。

本報告書では、3GeV・1MWの陽子ビーム条件の基で実施した熱流動解析結果に基づき水銀容器の内部構造を決定した。格納容器はヘリウム容器/重水容器の2重容器により構成し、各容器外側に設けた容器補強材であるリブを介して水銀容器/ヘリウム容器/重水容器を接続する構造とした。格納容器一体型水銀ターゲット容器の成立性については、最大運転圧力0.5MPaに余裕をみた内圧0.8MPaを付加した静的な構造強度解析により検討した。

その結果、内圧により容器に生ずる静的な応力は、各容器の表面にリブによる補強を加えることにより容器構造材であるSUS316Lの許容応力142.5MPa (300°Cにおける値) 以下にできる見通しを得た。ただし、減速材に隣接するヘリウム容器/重水容器上下板厚は、目標とする2.5mmではリブによる補強を加えても許容応力以下にすることは難しく5mm以上とする必要があることが明らかとなった。今後は、これらの板厚を5mmとした場合の核的特性を評価して中性子収率等の性能を明らかにするとともに製作性についてさらに検討を進め、圧力波及び熱衝撃による動的応力解析結果を踏まえて、より詳細な構造設計を実施していく予定である。

謝 辞

格納容器 (Safety Hull) 一体型水銀ターゲットの構造検討に当たり、株式会社 石川島播磨重工業 小池上一氏、小俣一平氏には多大なる支援・協力を戴いた。また、本報告書をまとめるに当たり、核熱利用研究部研究主幹宮本喜晟氏には貴重な助言を戴いた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム：JAERI-Tech 2000-003, "大強度陽子加速器計画" (2000).
- (2) 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 (ICONE7), Tokyo, Paper No.7123, (1999).
- (3) G.S. Bauer, et al., The European Spallation Source Study - Volume III. The ESS Technical Study, ESS-96-53-M (1996).
- (4) M. Siman-Tov, et al., "Thermal-Hydraulic Analysis of the Liquid Mercury Target for the National Spallation Source", The Second Advanced Reactors Safety Conference (ARS'97), Florida, USA, (1997).
- (5) 小林薫、神永雅紀、羽賀勝洋、木下秀孝、麻生智一、粉川広行、日野竜太郎：JAERI-Tech 2000-050, "水銀ターゲットシステムにおけるソースタームの予備的評価" (2000).
- (6) 安達潤一、神永雅紀、佐々木忍、日野竜太郎：JAERI-Tech (To be published), "中性子散乱施設使用済ターゲット取扱・保管設備の概念検討" (2000).
- (7) 神永雅紀、佐々木忍、羽賀勝洋、麻生智一、木下秀孝、粉川広行、秋元敦、安達潤一、日野竜太郎：JAERI-Tech (To be published), "核破碎ターゲットリモートハンドリング実証試験装置" (2000).
- (8) D.Lousteau : "Target Module General Arrangement", Target Assemblies Title I Review (Private communication), Oak Ridge National Laboratory, April, (2000).
- (9) 神永雅紀、寺田敦彦、羽賀勝洋、木下秀孝、日野竜太郎、内田博幸、安保則明、：原子力学会2000年春の年会Q31、"クロスフロー型水銀ターゲットの熱流動解析(3)"、(2000).
- (10) 勅使河原誠、渡辺昇、甲斐哲也、原田正英、坂田英明、池田裕二郎：原子力学会2000年春の年会Q42、"5MWパルス核破碎中性子源モデルの提案"、(2000).
- (11) 勅使河原誠：私信, "核破碎中性子散乱用基準ターゲットモデル案"、(1999).
- (12) 通商産業省資源エネルギー庁編：電力新報社、"解説 原子力設備の技術基準", (1994).

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
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, ヘクト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

格納容器(Safety HUII)一体型水銀ターゲツト構造の検討