

JAERI-Tech

2003-026



JP0350212



1 MW核破碎中性子源における  
陽子ビーム窓の構造設計検討

2003年3月

寺奥 拓史・寺田 敦彦・前川 藤夫・明午 伸一郎  
神永 雅紀・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。  
入手の問い合わせは、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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

1MW 核破碎中性子源における陽子ビーム窓の構造設計検討

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター

寺奥 拓史\*・寺田 敦彦\*・前川 藤夫・明午 伸一郎

神永 雅紀・石倉 修一・日野 竜太郎

(2003年1月31日受理)

原研と KEK が共同で推進している大強度陽子加速器計画 (J-PARK) では、物質・生命科学の展開を図るため、1-MW の核破碎中性子源を建設する。陽子ビームは陽子ビーム窓を通過し、中性子源ターゲットに入射する。この陽子ビーム窓は、陽子ビームラインの高真空領域とターゲットやモデレータを格納しているヘリウムベッセル内のほぼ大気圧のヘリウム雰囲気との境界壁となる。陽子ビームとの反応で窓材料は高密度の熱を発生するため、陽子ビーム窓は軽水で冷却される。従って、過大な熱応力や冷却水沸騰の要因となるホットスポットが発生しないように窓部における均一な流量配分を実現し、冷却水の内圧応力や発熱による熱応力に対する十分な構造強度を満足する必要がある。

本報では、製作性に優れた平板型構造及び応力的に有利な曲面型構造の陽子ビーム窓を提案し、設計検討の一環として構造強度評価及び熱流動解析評価を行った。その結果、窓部では均一な冷却水の流動により十分な除熱性能が確保でき、また内部の冷却水圧力による応力及び熱応力を許容応力値以下に抑えることができたため、現設計で陽子ビーム窓として成立することを確認した。

Structural Design Study of a Proton Beam Window  
for a 1-MW Spallation Neutron Source

Takuji TERAOKU\*, Atsubiko TERADA\*, Fujio MAEKAWA, Shin-ichiro MEIGO,  
Masanori KAMINAGA, Syuichi ISHIKURA and Ryutaro HINO

Center for Proton Accelerator Facilities  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2003)

A 1-MW spallation neutron source aiming at materials and life science researches will be constructed under the JAERI-KEK High-intensity Proton Accelerator Project (J-PARC). A proton beam passes through a proton beam window, and be injected into a target of the neutron source. The proton beam window functions as a boundary wall between a high vacuum area in the proton beam line and a helium atmosphere at about atmospheric pressure in a helium vessel which contains the target and moderators. The proton beam window is cooled by light water because high heat-density is generated in the window material by interactions with the proton beam. Then, uniformity of the water flow is requested at the window to suppress a hot-spot that causes excessive thermal stress and cooling water boiling. Also, the window has to be strong enough in its structure for inner stress due to water pressure and thermal stress due to heat generation.

In this report, we propose two types of proton beam windows; one flat-type that is easy to manufacture, and the other, curved-type that has high stress resistivity. As a part of design study for the windows, evaluation of strength of structure and thermal hydraulic analysis were conducted. As a result, it was found that sufficient heat removal was assured with uniform water flow at the window, and stress caused by internal water pressure and thermal stress could be maintained below allowable stress values. Accordingly, it was confirmed that the proton beam window designs were feasible.

Keywords : Spallation Neutron Source, Proton Beam Window, Structural Design,  
Thermal Hydraulic Analysis, Structural Strength Analysis,  
Flat Type Window, Curved Surface Type Window, Structure Strength

---

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

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 陽子ビーム窓の設計条件 .....	2
2. 1 構造概念及び仕様 .....	2
2. 2 物性値 .....	3
2. 3 構造強度評価基準 .....	3
3. 陽子ビームが矩形一様分布の場合 .....	5
3. 1 平板型 .....	5
3. 2 曲面型 .....	6
4. 陽子ビームが分布を持つ場合 .....	25
4. 1 陽子ビーム窓部発熱分布 .....	25
4. 2 窓部形状の大型化検討 .....	25
4. 2. 1 冷却無しの場合 .....	25
4. 2. 2 冷却有りの場合 .....	26
5. その他の設計検討 .....	57
5. 1 冷却系圧力損失の評価 .....	57
5. 2 曲率と板厚の関係 .....	57
5. 3 陽子ビーム窓本体及び交換プラグの温度分布解析 .....	57
5. 4 陽子ビーム窓交換プラグの耐震解析 .....	58
5. 5 SNS 陽子ビーム窓との比較 .....	58
6. おわりに .....	67
謝 辞 .....	67
参考文献 .....	69
付 録 .....	70

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Design Condition of Proton Beam Window .....	2
2. 1 Structure Concept and Specification .....	2
2. 2 Properties of Materials .....	3
2. 3 Basises for Structure Strength Evaluation .....	3
3. In a Case of a Rectangular and Uniform Proton Beam Distribution .....	5
3. 1 Flat Type .....	5
3. 2 Curved Type .....	6
4. In a Case of a Non-uniform Proton Beam Distribution .....	25
4. 1 Heat Generation Distribution of the Proton Beam Window .....	25
4. 2 Examination to Enlarge the Window Size .....	25
4. 2. 1 In a Case without Cooling .....	25
4. 2. 2 In a Case with Cooling .....	26
5. Supplementary Design Examination .....	57
5. 1 Evaluation of Pressure Loss in Cooling System .....	57
5. 2 Relation between Curvature and Thickness of the Window .....	57
5. 3 Temperature Distribution Analysis of the Proton Beam Window and the Plug for Proton Beam Window Replacement .....	57
5. 4 Earthquake-resistant Analysis of the Plug .....	58
5. 5 Comparison with the SNS Proton Beam Window .....	58
6. Concluding Remarks .....	67
Acknowledgment .....	67
References .....	69
Appendix .....	70

## 1. はじめに

原研と KEK が共同して推進している大強度陽子加速器計画<sup>(1)</sup>の中核施設である物質・生命科学実験施設の中性子散乱実験施設は、陽子加速器からの陽子ビーム (MW 規模) を水銀ターゲットに入射して核破碎反応を起こし、発生する大強度中性子ビームを用いて物質科学、生命科学等の各種先端的研究を行う施設である<sup>(2)</sup>。

そのうち、ターゲットに隣接して設置する陽子ビーム窓は、陽子ビームラインの高真空状態を維持しつつターゲット、モデレータ等を格納しているヘリウムベッセルをほぼ大気圧のヘリウム雰囲気に保持するためのバウンダリ機能を有する極めて重要な構成要素である。陽子ビーム窓では、陽子ビームにより金属窓部が高密度の熱を発生するため軽水で冷却するが、過大な熱応力や沸騰の要因となるホットスポットが発生しないように、窓部での冷却性能、特に均一な流量配分の実現とともに冷却水内圧による応力や発熱による熱応力に対する窓の構造強度維持が課題となっている。

海外では、同様な規模の中性子散乱実験施設を建設しようとしている欧州の ESS 計画<sup>(3)</sup>及び米国の SNS 計画<sup>(4)</sup>において、概念的な構造は提示されている。

本報では、製作性に優れた平板型構造及び応力的に有利な曲面型構造を提案し、構造の成立性について検討した。陽子ビーム窓部の板厚評価および全体モデルによる熱流動評価、構造強度の観点からビーム窓部に負荷される熱応力等について解析評価した結果について述べる。

## 2. 陽子ビーム窓の設計条件

### 2. 1 構造概念及び仕様

陽子ビーム窓の構造概念を図 2.1-1 に示す。陽子ビーム窓部は2枚の金属板から成り、陽子ビームライン（真空）およびヘリウムベッセル（ヘリウム雰囲気）との耐圧境界を形成する。このとき、陽子ビームにより金属板に発生する熱を除去するために金属板の間には軽水を流して冷却する。冷却水には系統の圧力損失を考慮した圧力を負荷するため、陽子ビーム窓部の金属板はその圧力に耐え得る厚さを確保する必要がある。しかし、陽子ビームにより金属板が発熱して板厚に比例した熱応力が発生することから、熱応力を低減する観点からは板厚を極力薄くする必要がある。以下にその設計条件を示す。

#### ①陽子ビーム

・出力 : 1~5MW

#### ②冷却水

・入口圧力 : 最高 1MPa

・入口流速 : 最高 3m/sec

・入口温度 : 313K (40℃)

・最大温度 : 冷却水沸点以下 (0.5MPa で約 158℃)

#### ③陽子ビーム窓

・候補材 : インコネル 718、アルミニウム合金など

・使用温度 : クリープ温度以下

・窓部板厚 : 3mm 以下 (目標値)

・窓部冷却流路幅 : 5mm 以下 (目標値)

・窓部冷却水流速 : 最大 10m/sec



## 2. 2 物性値

本検討に用いた材料の代表温度における物性値を以下に示す。

### (1)軽水<sup>(5)</sup> (at 0.5MPa、340K)

比重	: 979.65 kg/m <sup>3</sup>
粘性係数	: 422.6 μPa·s
比熱	: 4.187 kJ/kgK
熱伝導率	: 0.6571 W/mK

### (2)インコネル 718<sup>(6),(7)</sup>

縦弾性係数	: 195 GPa (at 100°C)
熱膨張係数	: 14.32E-6 /K (at 100°C)
熱伝導率	: 8.37E-6 W/mK (at 294K)

### (3)SUS316<sup>(6),(7)</sup>

縦弾性係数	: 190 GPa (at 100°C)
熱膨張係数	: 16.84E-6 /K (at 100°C)
熱伝導率	: 14.19E-6 W/mK (at 373K)

### (4)アルミニウム合金(A5083-O)<sup>(8)</sup>

縦弾性係数	: 70 GPa
ポアソン比	: 0.33
熱膨張係数	: 24E-6 /K
熱伝導率	: 120 W/mK

## 2. 3 構造強度評価基準

陽子ビーム窓で発生する応力と比較する構造強度評価基準は、参考として通産省告示 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」<sup>(9)</sup>を用いることとする。(添付資料 1-1,2 参照)

内圧による一次応力の評価基準は、以下となる。

$$(a) P_m < S_m$$

$$(b) P_L + P_b < 1.5S_m$$

ここで、 $P_m$ ：一次一般膜応力

$S_m$ ：設計許容応力

$P_L$ ：一次局部膜応力

$P_b$ ：一次曲げ応力

また、熱膨張による二次応力の評価基準は、以下となる。

$$P_L + P_b + Q < 3S_m$$

ここで、 $Q$ ：二次応力

設計許容応力  $S_m$  をインコネル 718 で 560MPa<sup>(10)</sup> (at 425°C)、SUS316 で 115MPa<sup>(9)</sup> (at 150°C) 及びアルミニウム合金 5083-O で 91MPa<sup>(8)</sup> (at 100°C) とし、対象となる応力の種類によって、許容応力を  $S_m$ 、 $1.5S_m$  あるいは  $3S_m$  とする。

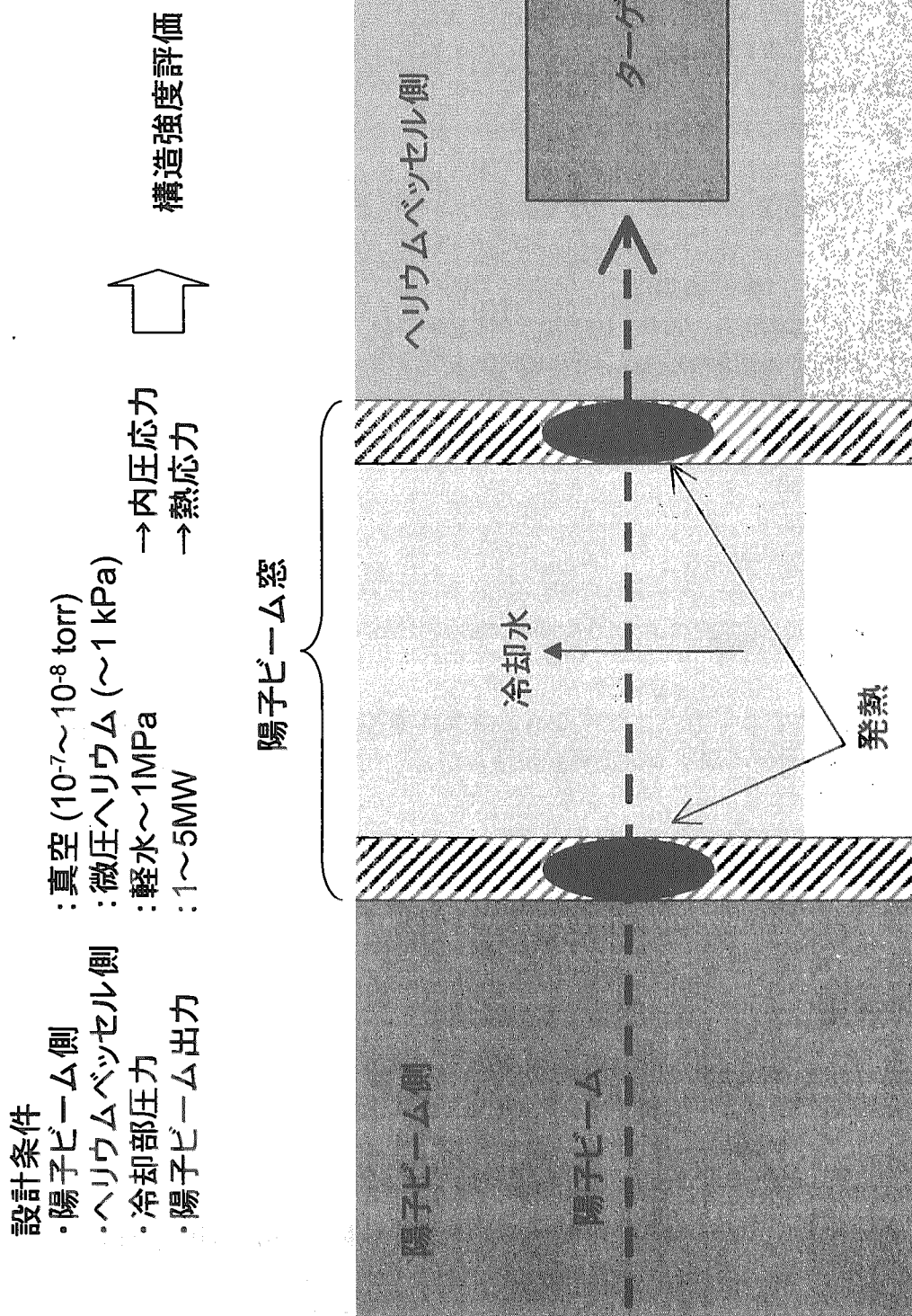


図2.1-1 陽子ビーム窓の構造概念

### 3. 陽子ビームが矩形一様分布の場合

#### 3. 1 平板型

##### (1)基本構造

陽子ビーム出力 5MW に対応可能な平板型陽子ビーム窓主要部の構造について検討した。検討した結果を鳥瞰図として図 3.1-1 に、構造図を図 3.1-2(1/2),(2/2)にそれぞれ示す。陽子ビーム窓主要部の構造は、幅 330mm、高さ 235mm、奥行き 65mm の箱型形状とし、上部に接続された出入口配管によって冷却水を供給する。本構造は、陽子ビームが通過する陽子ビーム窓部と全体を支持する周辺構造物で構成する。冷却水内圧による応力及び陽子ビーム核発熱による熱応力に対する構造強度の観点から、構造材料をインコネル 718 とする。ビーム窓周辺部は断面形状が 1/4 円の円筒で囲み、窓部と周辺部の付け根部を R 加工することによって応力集中を緩和している。ビーム窓部の大きさは、陽子ビーム形状（水平方向 130mm × 垂直方向 50mm）にビームの揺れ等を考慮して 200mm × 60mm とした。

冷却水は、ビーム窓上部両端の 2 箇所入口配管から流入し、下部にある案内羽根の間を通過して反転し、陽子ビームによって核発熱する窓部を冷却して中央上部の出口配管から出ていく。除熱を必要とする窓部の流路は、陽子ビームの損失をできるだけ少なくし、また、流路部の変形による流量配分の変化を小さくするために 5mm とした。また、陽子ビーム窓部平均流速が最大 10m/sec のとき、入口配管流速が 3m/sec 以下となるように、流路断面積の比から入口および出口配管径を 2in(内径φ52.7mm)とする。このときの配管内流速は 2.5m/sec である。

本形状は陽子ビーム出力 5MW 相当の場合を想定して検討しており、ビーム出力が低ければ、発熱量が小さくなることによって必要流速も下がり、配管径も小さくすることが可能である。陽子ビーム出力を 2MW とした場合も、5MW と同じく上部配管から冷却水が流入し案内羽根で反転しビーム窓部を冷却する構造であり、窓部流路幅は 5mm と同じであるが、入口配管径は 1/2in、出口配管径は 1 1/4in と細くすることが可能である。このときの入口／出口配管内流速は 2m/sec である。

##### (2)冷却水圧力による応力解析評価

構造強度解析には汎用有限要素解析コード ABAQUS (11)を用い、3次元ソリッド要素（要素数：9 万メッシュ）により陽子ビーム窓構造をモデル化した。モデル図を図 3.1-3 に示す。窓部板厚を 3mm、冷却水圧力を 1MPa とした場合の変位及び応力を求めた。本結果を図 3.1-4 に示す。最大変位は窓部中央で 0.3mm となり、最大応力は窓部周辺部の R 加工部で発生し、トレスカ相当応力で 254MPa となった。通産省告示 501 号に示されている曲げによる許容応力値 1.5Sm(インコネル 718 では 840MPa)と比較すると、内圧による応力は許容応力値の 1/3 以下である。

また、窓部板厚を 1.5mm、冷却水圧力 0.6MPa とした場合の結果を図 3.1-5 に示す。発生応力は許容応力値の半分以下となっているが、最大変位が 0.8mm となり、流路幅 5mm に対する窓の変位量が 2 枚で 1.6mm と大きい。

### (3)陽子ビーム発熱による熱流動及び熱応力解析評価

陽子ビームによる発熱を軽水で冷却する熱流動解析を行い、構造材の温度分布を求めて熱応力を解析評価した。熱流動解析には3次元汎用熱流動解析コード STAR-CD (12)を用い、構造解析には前項同様 ABAQUS を用いた。図 3.1-6 に解析モデル図を示す。上図が構造モデル（要素数：12万メッシュ）で、下図が流体モデル（要素数：15万メッシュ）である。境界条件は入口配管流速 2.5m/sec、入口温度 40℃とし、窓部構造材の発熱密度は水銀ターゲットの解析結果を基に 960W/cm<sup>3</sup>/5MW とした。容器外側の境界条件は断熱とし、乱流モデルには標準 k-ε モデルを用いた。熱流動解析結果については次項で述べる。

陽子ビーム出力 5MW 及び窓部板厚 3mm とした場合の熱応力解析結果を図 3.1-7 に示す。最高温度は金属外表面で 650K(377℃)となり、熱応力は陽子ビームにより発熱するビーム窓部に集中しており 1179MPa となった。通産省告示 501 号に示されている熱膨張による2次応力の許容応力値 3Sm(インコニ 718 では 1680MPa)と比較すると、発熱による熱応力は許容応力値以下であり、前述の内圧による応力評価と合わせて、提案した平板型は構造強度的に十分成立すると考えられる。

前項で述べた熱流動解析結果について記す。2 箇所の入口配管からの流量が均等な場合の流速分布及び表面近傍の流体温度分布を図 3.1-8 に示す。案内羽根が適切に機能して陽子ビーム窓部では均一な流量配分が実現されている。このときの平均流速は約 10m/sec である。冷却水温度（ほぼ窓部表面温度と一致）は最高 92℃となり、窓部冷却水圧力を 0.5MPa とすると沸点 150℃に達することなく窓部が冷却されている。

また、2 箇所の入口配管のうち一方の流量を+10%、他方を-10%とし、流量のバランスが崩れた場合について解析評価した結果を図 3.1-9 に示す。冷却水の最高温度は 92.3℃となり上記の結果とほとんど変わらず、入口流量バランスが変動しても熱応力への影響はほとんど無いことが分かった。

### (4)まとめ

以上のことから、平板型の陽子ビーム窓は、陽子ビーム出力が 5MW 以下であれば、窓部材質をインコニ 718 とし、冷却水圧力 1MPa、陽子ビーム窓板厚 3mm とすれば構造強度的に十分成立する見通しを得た。また、入口流量が変動しても窓部ではほぼ均一な流量配分が実現でき、冷却性能に問題ないことが分かった。陽子ビーム損失の観点から窓板厚を 1.5mm と薄くしても冷却水圧力を 0.6MPa 程度に抑えれば構造強度的に問題ないものの、窓部での変位が流路幅に対して無視できない大きさとなることから、流動への影響等の詳細評価を検討する必要がある。

## 3. 2 曲面型

### (1)基本構造

曲面型陽子ビーム窓の基本的な構造・機能については、前項で述べた平板型と同様である。主な相違点としては、ビーム照射部が円筒形であること、そして、平板型ではビーム照射部を下から上に冷却するのに対して、曲面型のそれは、流動の観点から水平方向に冷却する必要があることが挙げられる。陽子ビーム窓部を円筒形にすることによって、変位量及び発生応力を低減できるのが特徴であるが、製作性については

平板型よりも難しくより詳細な製作検討が必要である。構造材は、高強度のインコネル 718 を第一候補とする。図 3.2-1 に曲面型陽子ビーム窓の構造概念を示す。冷却材である軽水は入口配管から流入し、入口プレナムを通過して陽子ビームによって発熱する窓部（ビーム照射部）を水平方向に流れながら冷却して、出口プレナムを経て出口配管から流出する。窓部は幅 200mm×高さ 110 mm、曲率は 120mm、窓部板厚は 1.5mm、冷却流路幅は 3mm である。

### (2)冷却水圧力による応力評価

解析コード ABAQUS を用いて、本構造の 1/2 を 3 次元ソリッド要素（要素数：3.6 万メッシュ）でモデル化し、プレナム上面部を完全固定として変位及び応力を求めた。モデル図を図 3.2-2 に示す。窓部板厚を 1.5mm、冷却水圧力を 0.6MPa とした結果を図 3.2-3 に示す。最大変位は窓部中央で 0.07mm となり平板型の 0.8mm に比べ約一桁小さい。また、最大応力は窓部周辺部の R 加工部で発生し、トレスカ相当応力で 78MPa となり、インコネル 718 の許容応力値(840MPa)を十分に満足している。

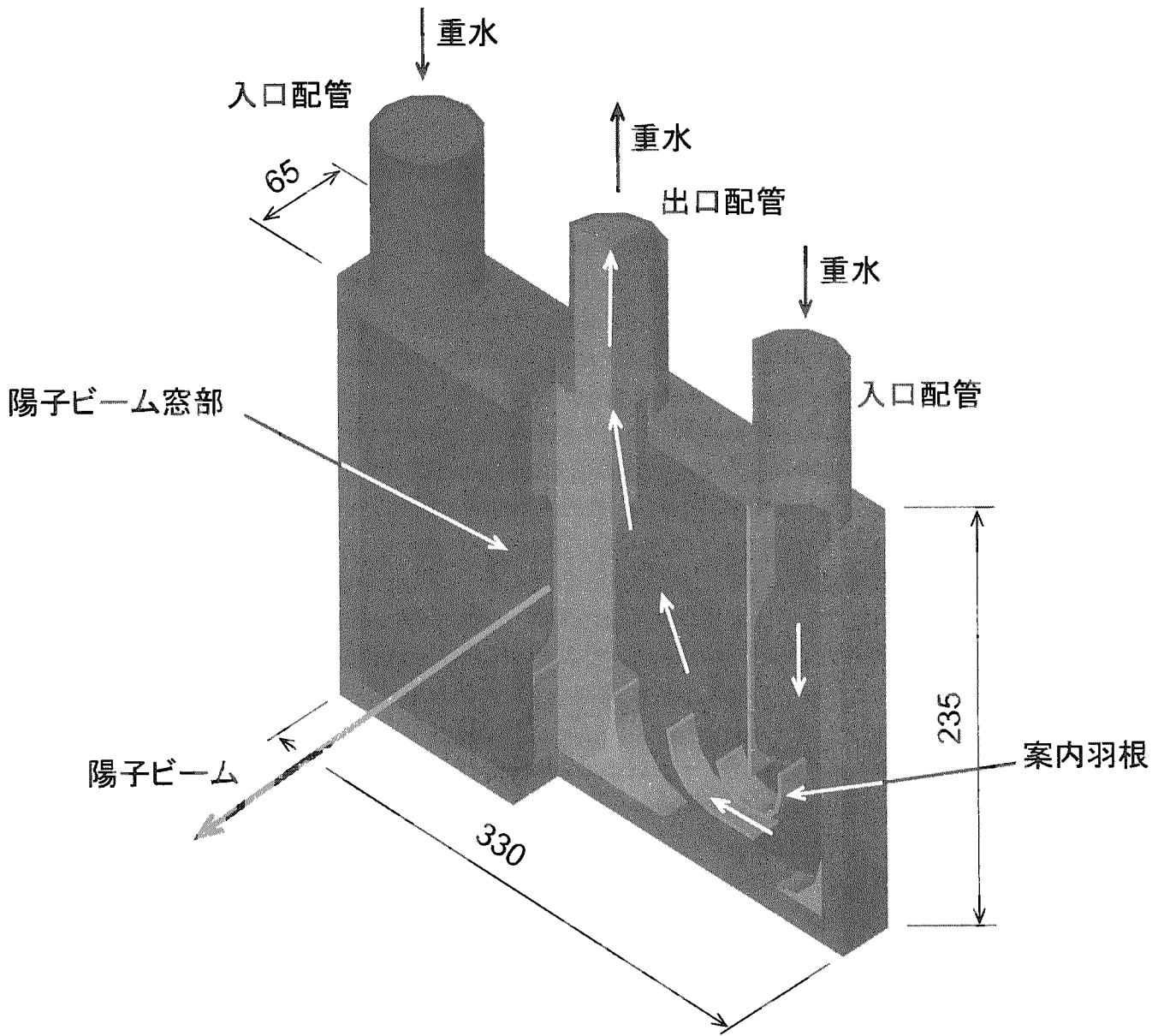
### (3)熱流動及び熱応力評価

解析コード STAR-CD を用いて熱流動解析を実施した。陽子ビーム窓を 3 次元ソリッド要素（要素数：8.4 万メッシュ）でモデル化し、2MW までの陽子ビーム入射に対応できるように、陽子ビーム窓部構造材の核発熱密度はニュートロニクス解析結果より  $420\text{W}/\text{cm}^3$  の一様とし、入口プレナム流速 0.3m/s、入口温度  $40^\circ\text{C}$  とした。容器外側の境界条件は断熱、乱流モデルは標準  $k-\varepsilon$  モデルである。モデル図を図 3.2-4 に示す。図 3.2-5 に速度分布及び温度分布の解析結果を示す。ビーム窓部で約 2.5m/sec の流速となり、流量配分の偏差はほとんどなく均一な速度分布が得られている。また、ビーム窓部の冷却水に接する壁面の最高温度が  $72^\circ\text{C}$  であり、冷却水圧力 0.5MPa での沸点  $150^\circ\text{C}$  よりも低く沸騰することなく窓部を均一に冷却できると考えられる。

次に、窓部板厚 1.5mm、発熱密度  $420\text{W}/\text{cm}^3$  とした場合の陽子ビーム窓に発生する熱応力を 2 次元シェル要素（要素数：1,100 メッシュ）で簡易的に計算した。モデル図を図 3.2-6 に示す。図 3.2-7 に示すように、最高温度は金属外表面で  $106^\circ\text{C}$  となり、発生熱応力は 291MPa となった。これは許容応力値(1680MPa)を十分に満足している。

### (3)まとめ

以上のことから、曲面型の陽子ビーム窓は平板型に比べ、変位及び応力的に有利であることが分かった。陽子ビーム出力 1MW 時においても同様のことが言える。ただし、曲面構造の製作性については、詳細検討する必要がある。



- ・ビーム照射部形状 : 平板 200 mm × 60 mm
- ・配管部流速 : 2~3m/s
- ・出入口冷却配管径 : 2 in
- ・窓部流速 : 10m/s

図3.1-1 陽子ビーム5MW用平板型陽子ビーム窓構造

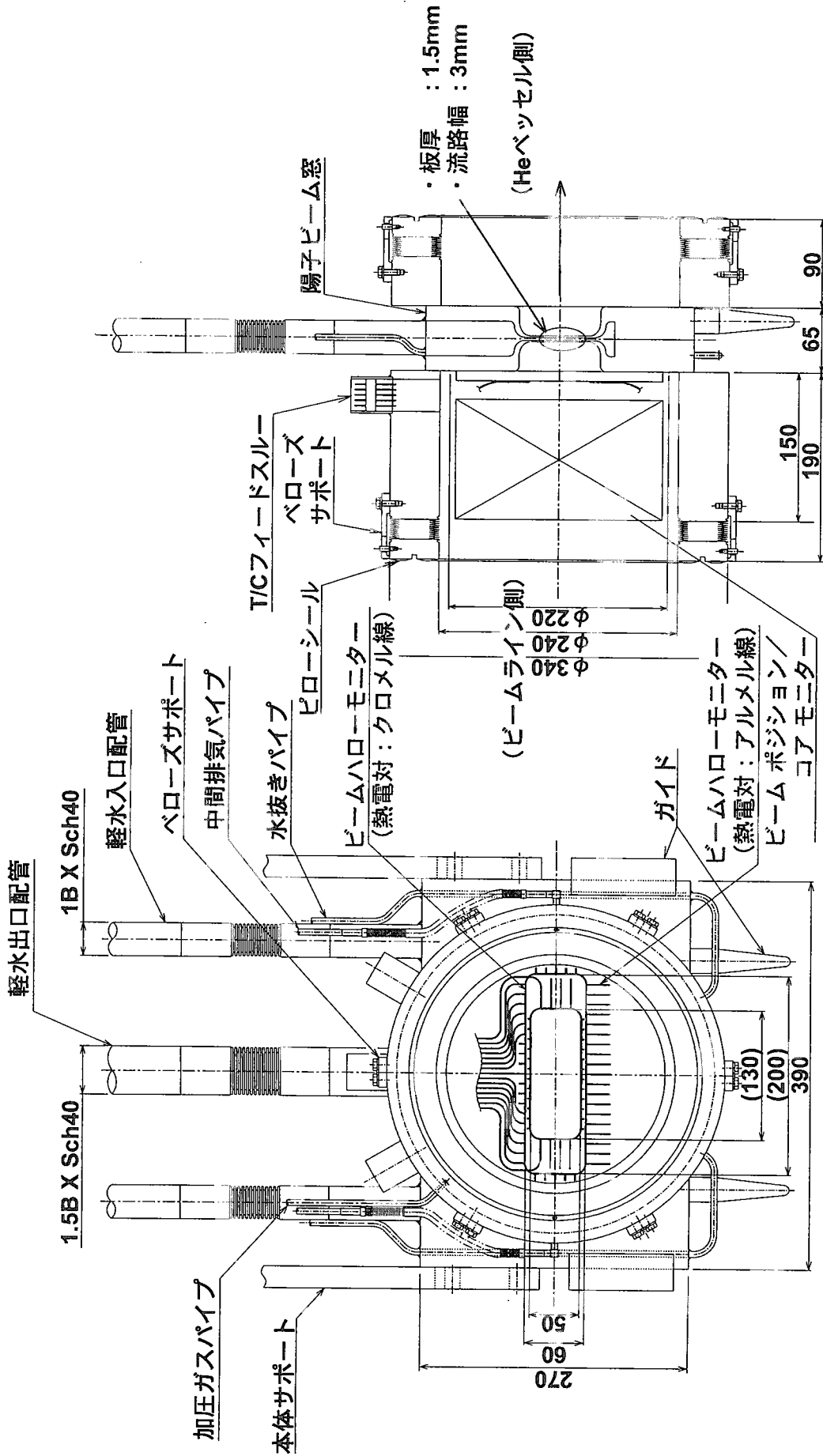


図3.1-2(1/2) 平板型陽子ビーム窓構造図 (1)

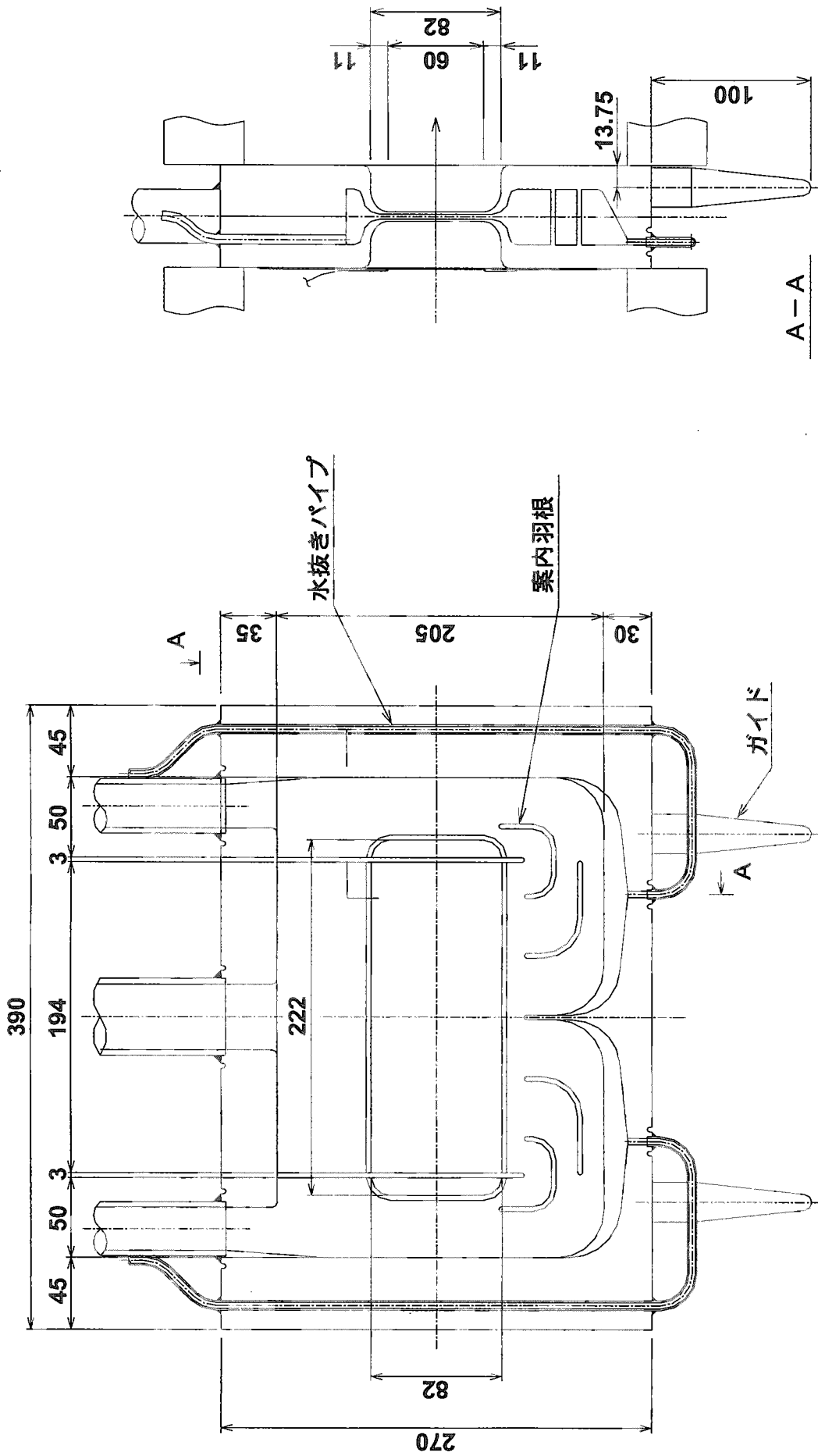


図3.1-2(2/2) 平板型陽子ビーム窓構造図(2)



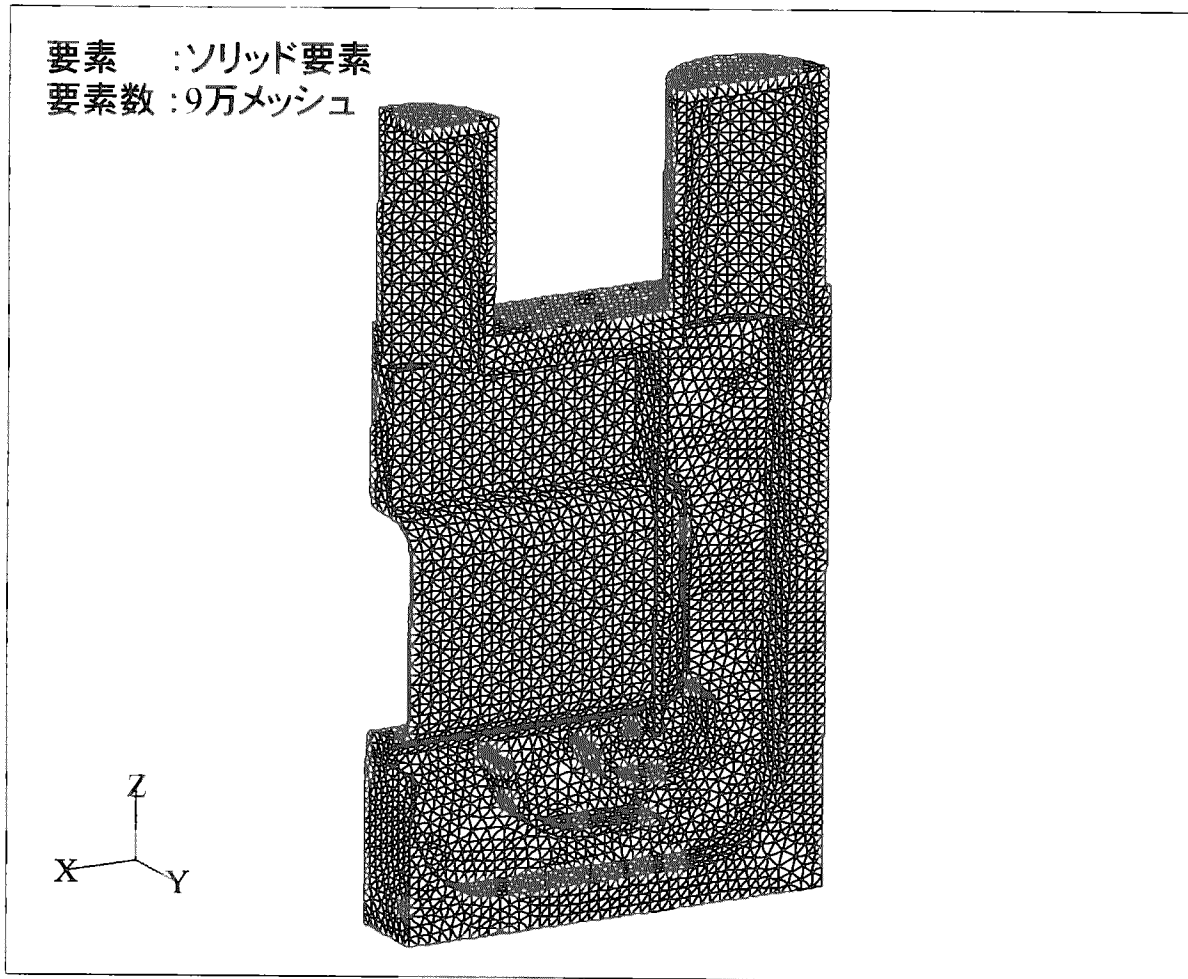


図3.1-3 平板型陽子ビーム窓モデル図

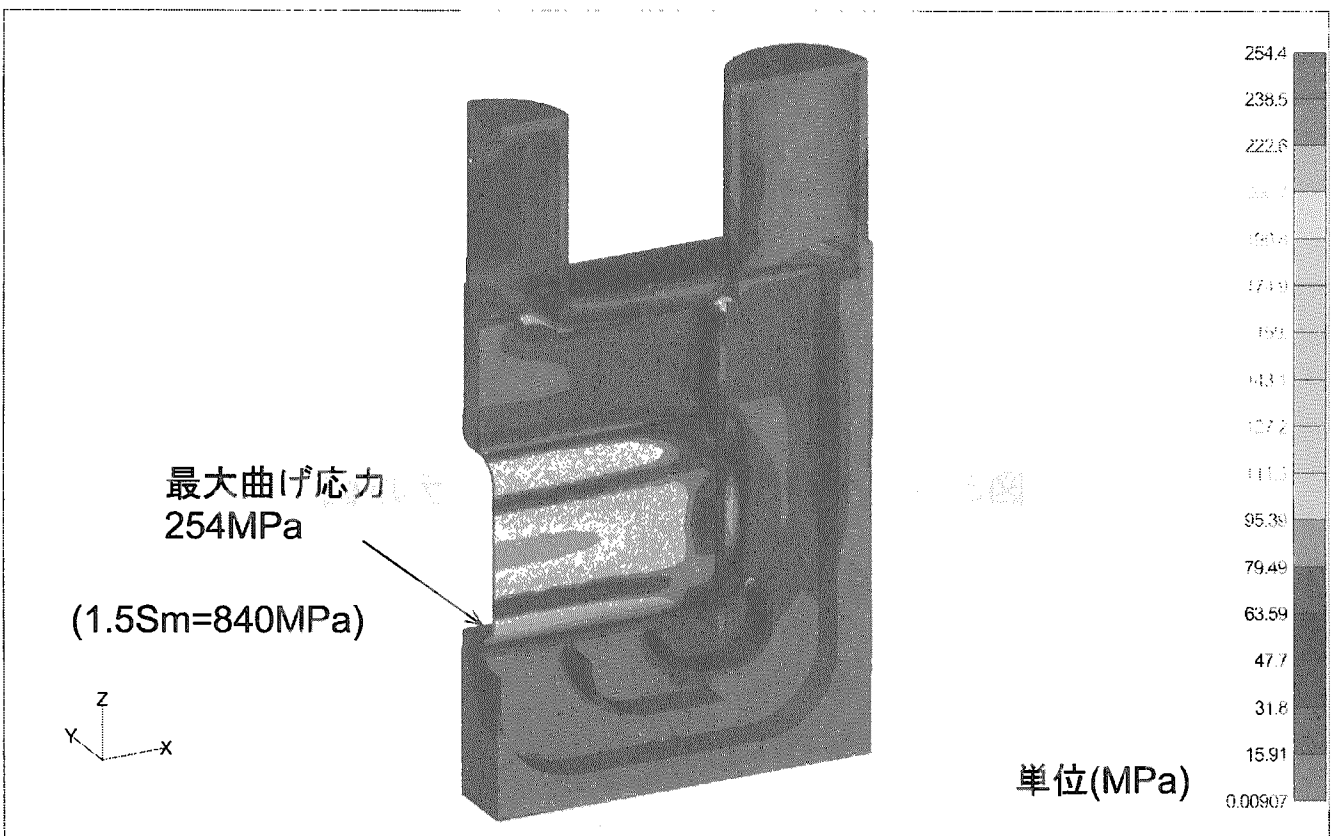
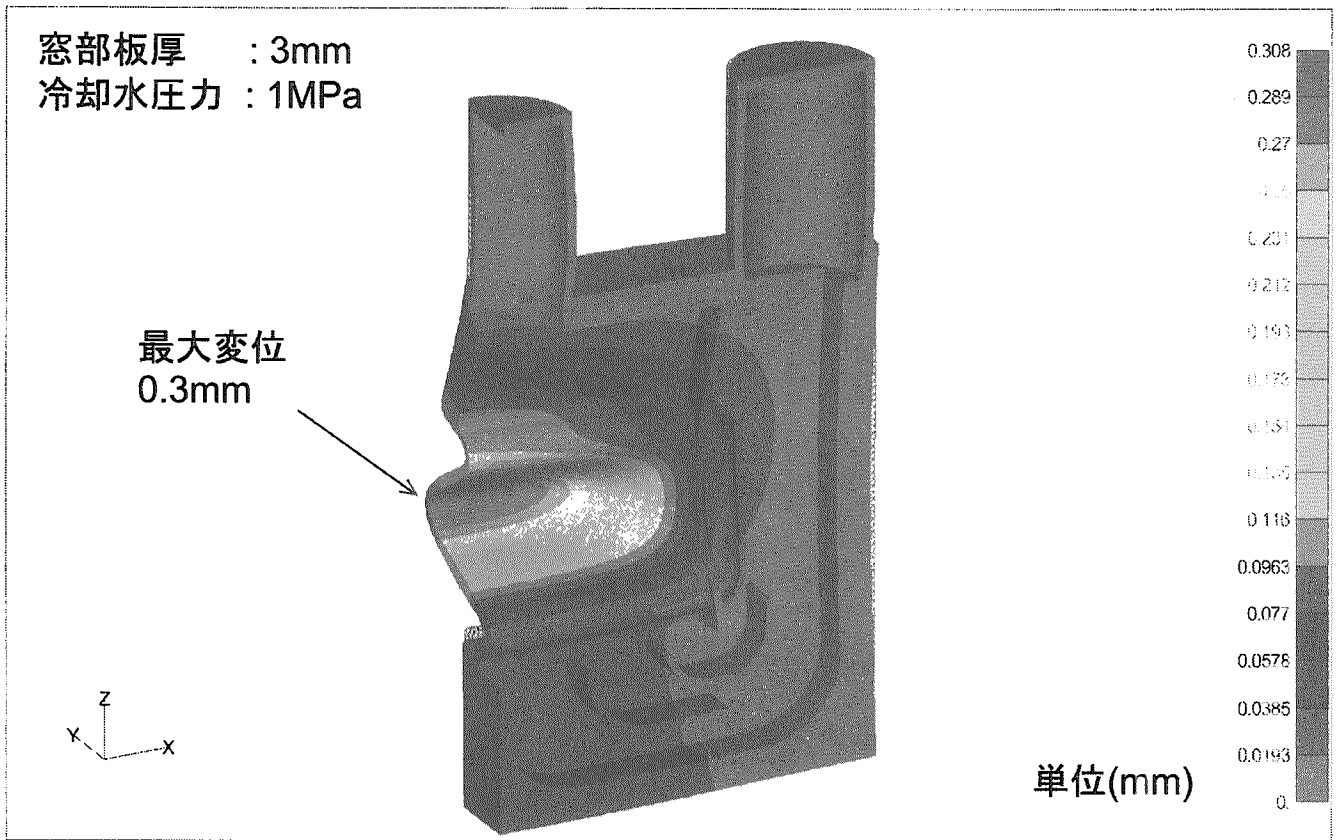


図3.1-4 内圧による変位及び応力解析結果(1)

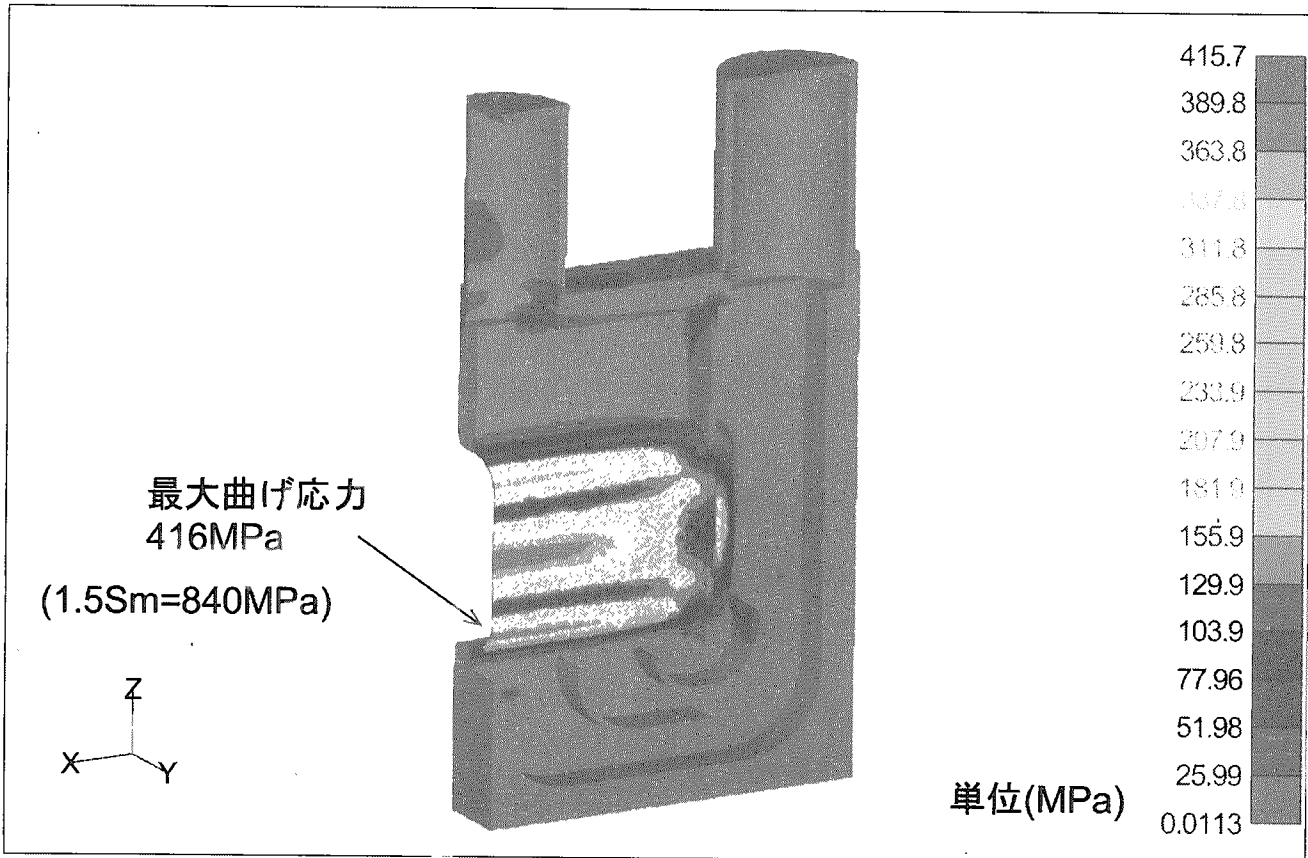
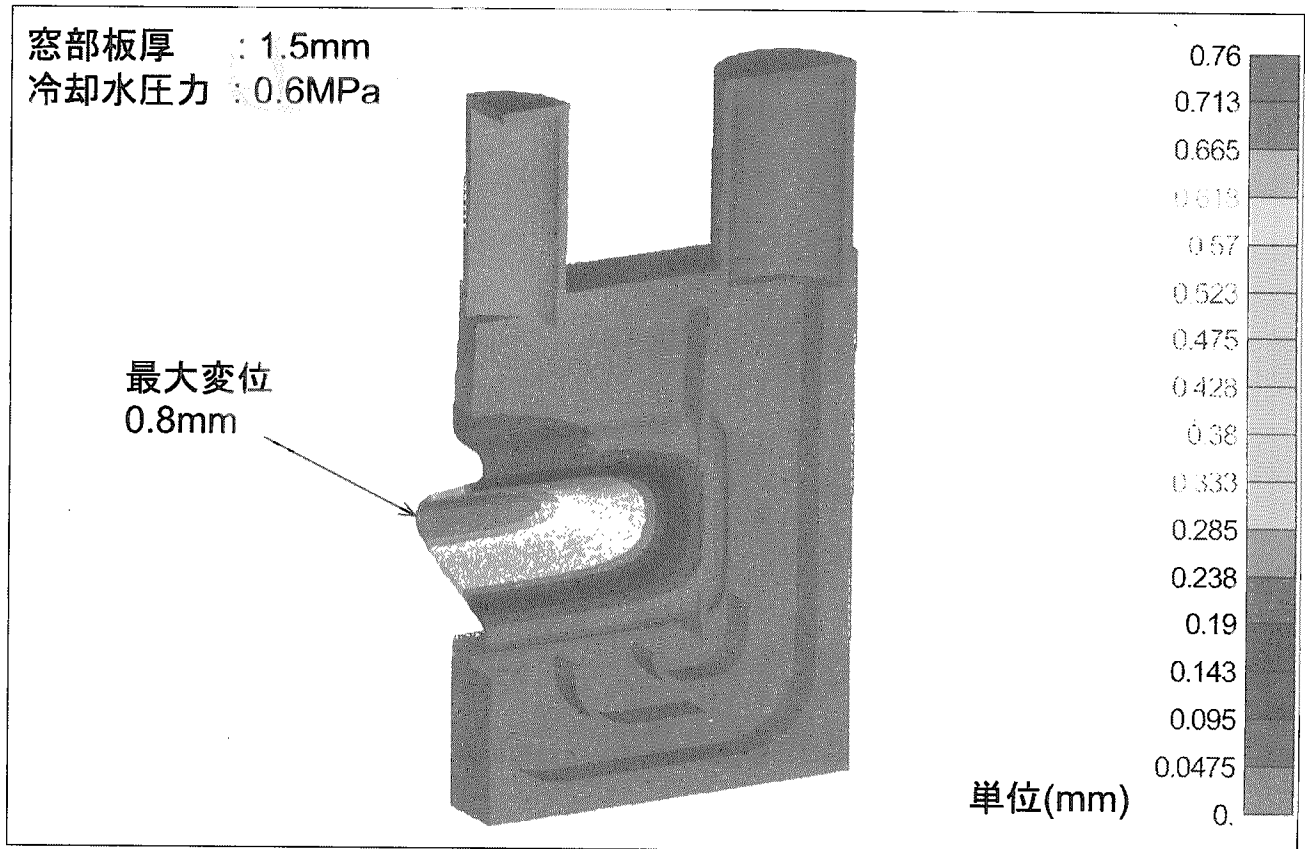
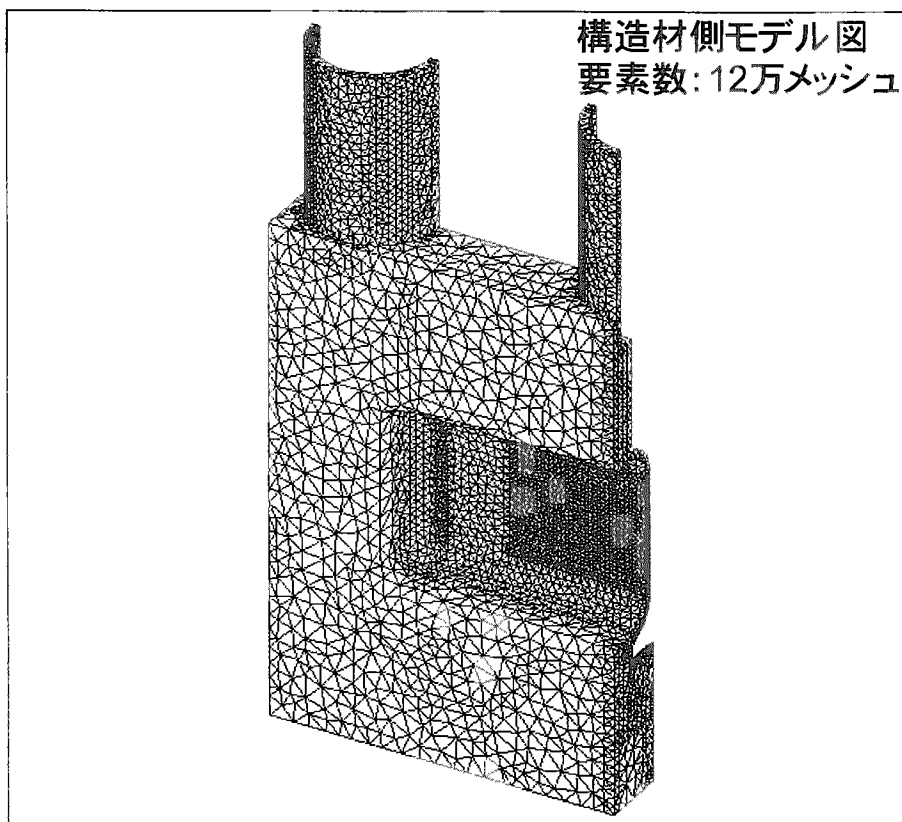
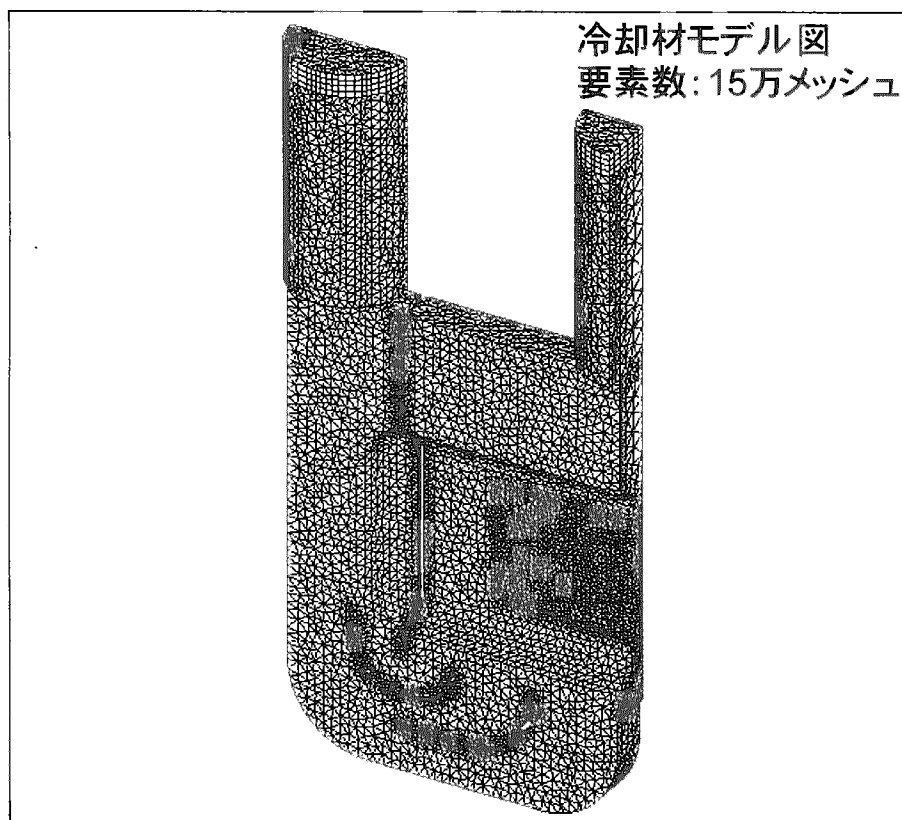


図3.1-5 内圧による変位及び応力解析結果(2)



STAR  
PROSTAR 3.10  
13-SEP-01  
VIEW  
-0.577  
1.000  
0.667  
ANGLE  
-229.107  
DISTANCE  
0.188  
CENTER  
1.083  
1.016  
0.842  
EHIDDEN PLOT



STAR  
PROSTAR 3.10  
13-SEP-01  
VIEW  
-0.577  
1.000  
0.667  
ANGLE  
-229.107  
DISTANCE  
0.176  
CENTER  
1.074  
1.013  
0.863  
EHIDDEN PLOT

- 入口流速 / 温度  
2.5m/sec / 40°C
- 発熱密度 960W/cm<sup>3</sup>
- 境界条件  
容器外側断熱
- 乱流モデル  
標準k-εモデル

図3.1-6 熱流動解析用3次元モデル

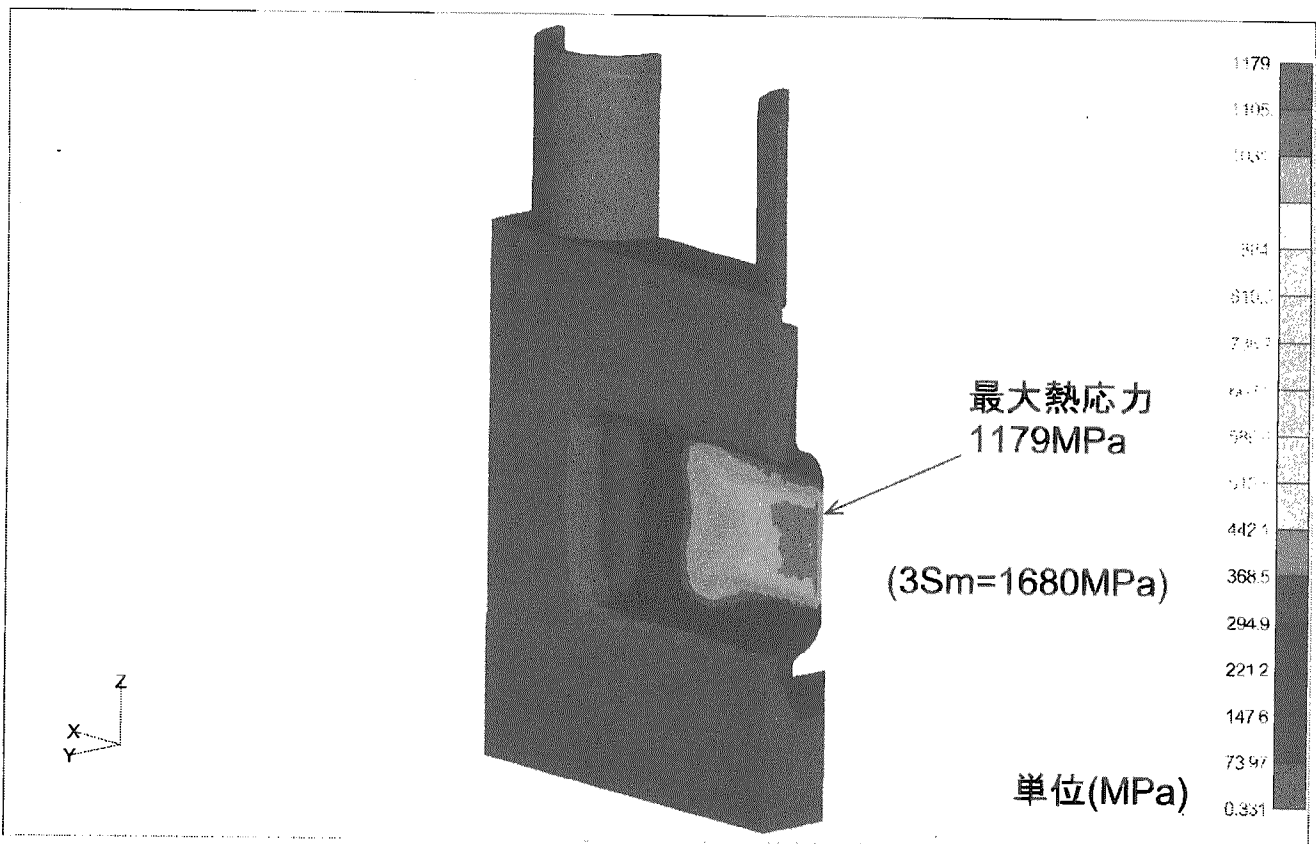
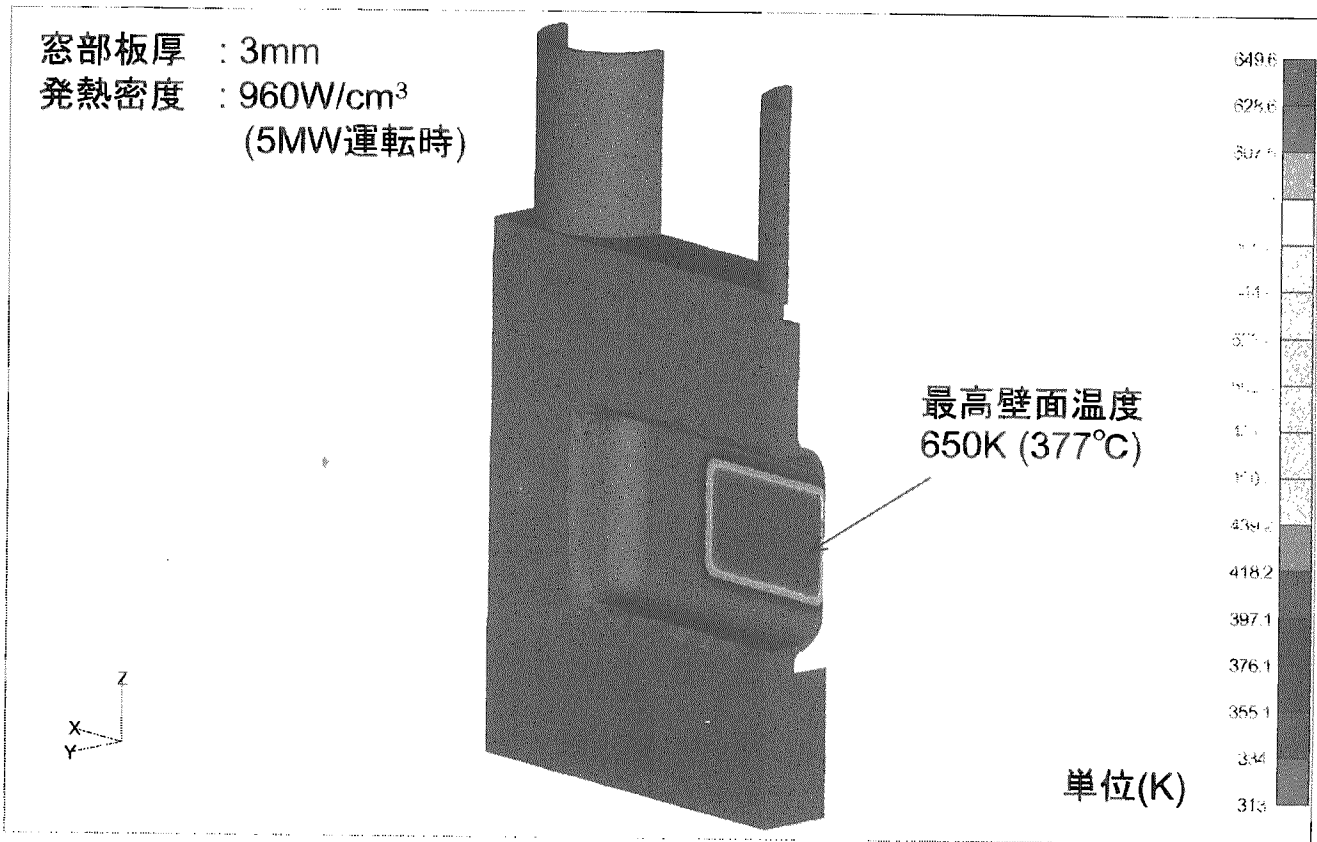
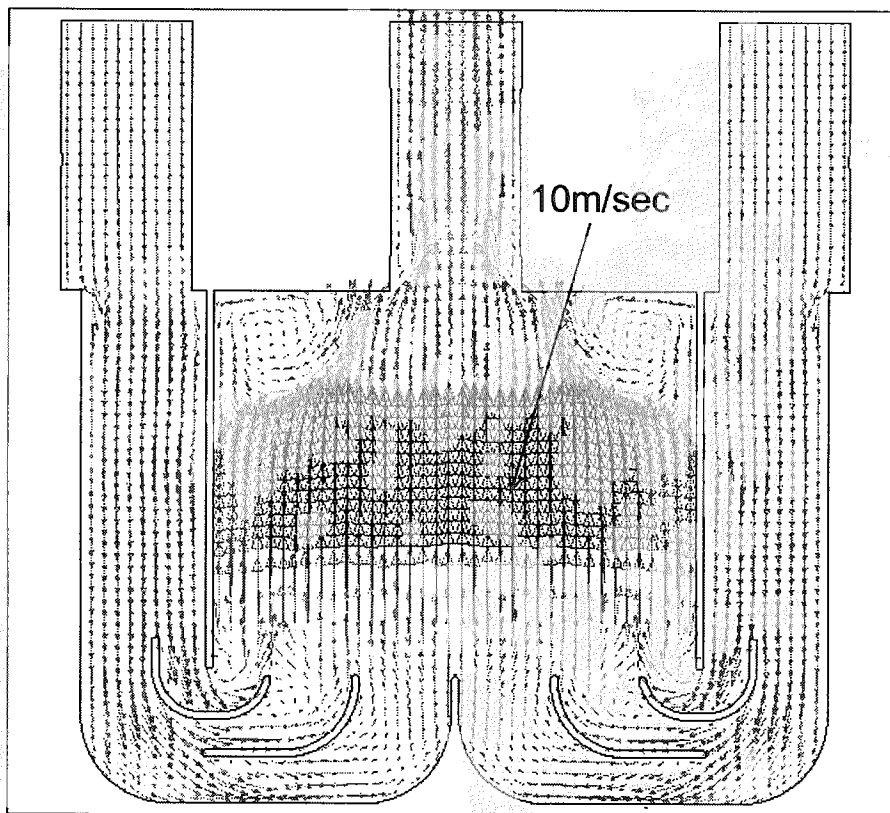


図3.1-7 ビーム発熱による温度及び熱応力解析結果

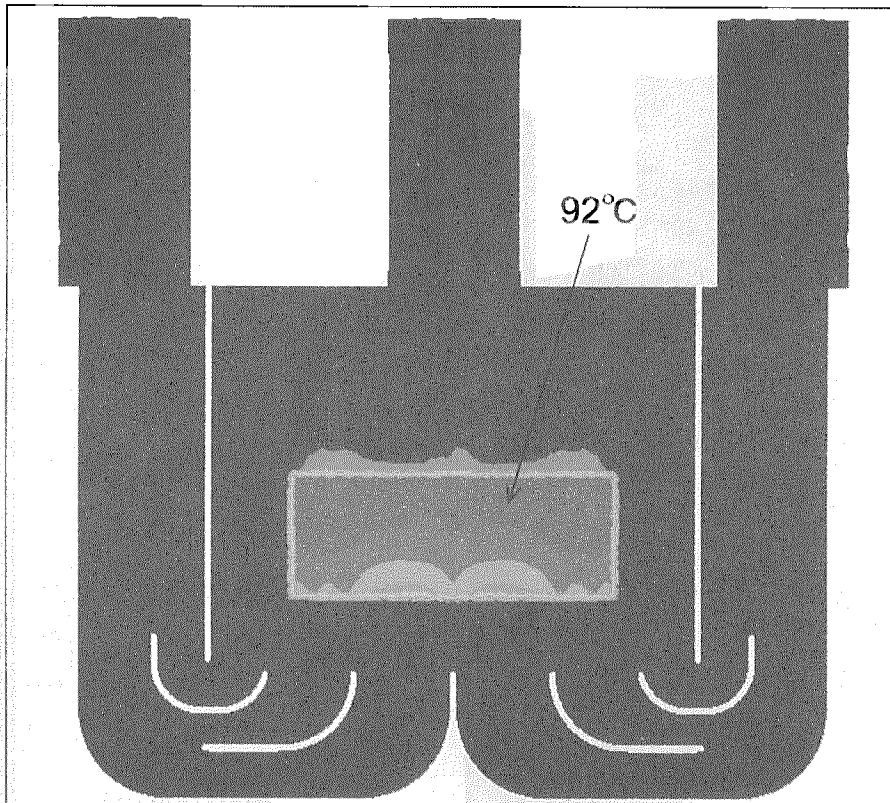


STAR  
D  
PROSTAR 3.10

28-JUL-00  
VELOCITY MAGNITUDE  
M/S  
ITER = 1500  
LOCAL MX = 12.97  
LOCAL MN = 0.6703E-02  
PRESENTATION GRID

12.97
12.0+
11.12
10.19
9.266
8.340
7.41+
6.488
5.562
4.636
3.710
2.78+
1.859
0.9326
0.6703E-02

流速分布図



STAR  
D  
PROSTAR 3.10

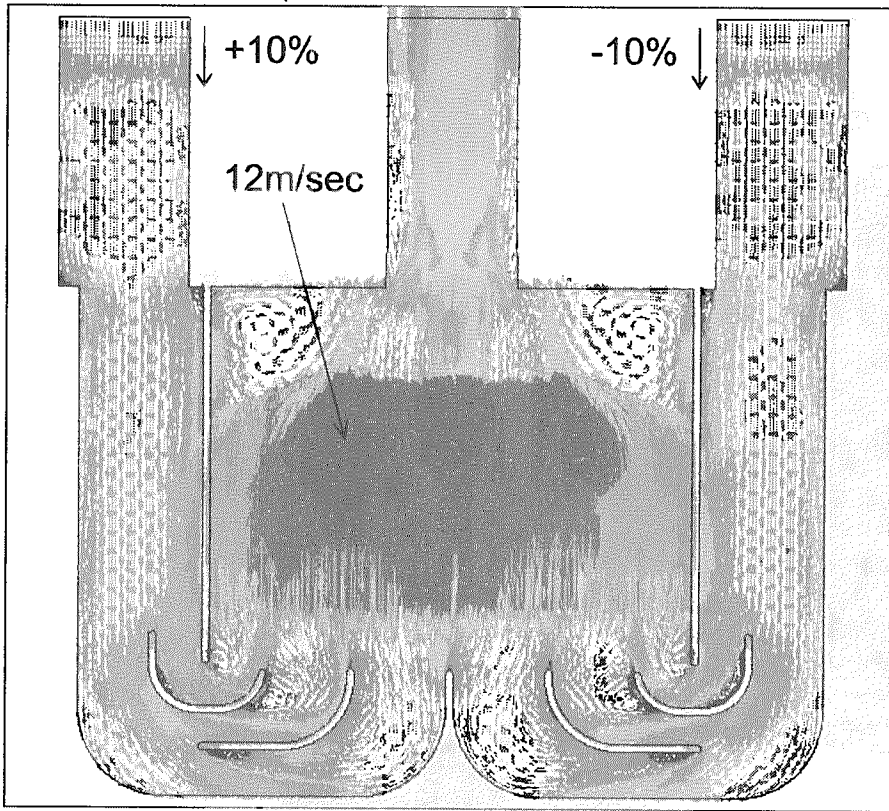
28-JUN-00  
TEMPERATURE  
ABSOLUTE  
KELVIN  
ITER = 1500  
LOCAL MX = 364.7  
LOCAL MN = 313.0

364.7
361.0
357.3
353.6
349.9
346.2
342.5
338.8
335.1
331.5
327.8
324.1
320.4
316.7
313.0

壁面温度分布図



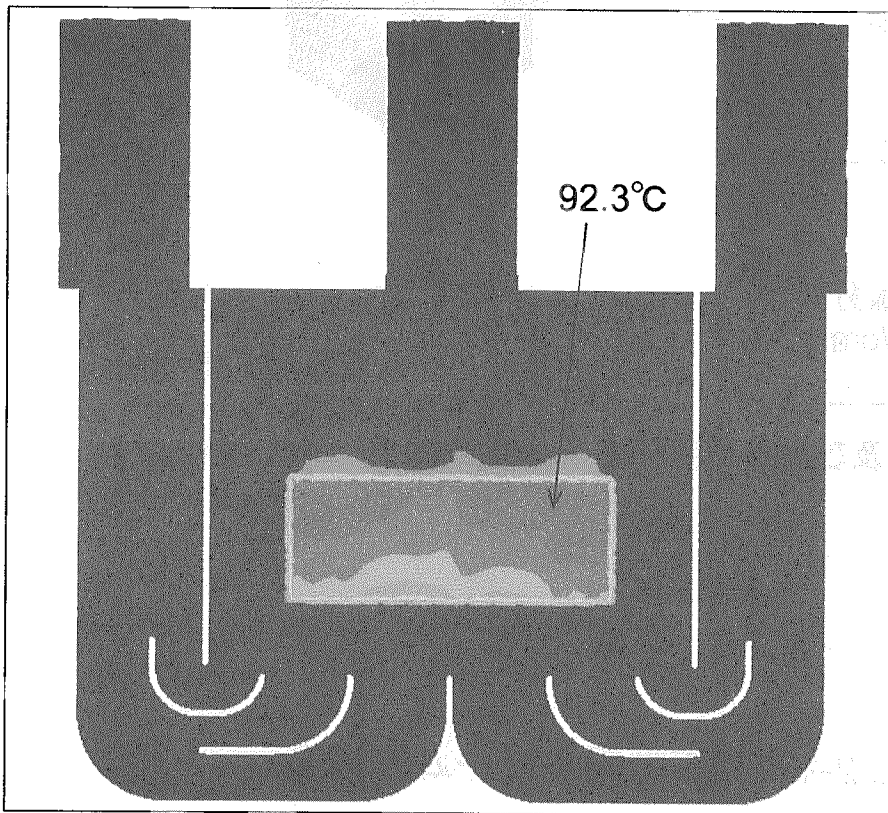
図3.1-8 冷却水の熱流動解析結果(1)



3-JUL-00  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 ITER = 1500  
 LOCAL MX = 12.96  
 LOCAL MN = 0.2561E+01

- 12.96
- 12.0+
- 11.11
- 10.19
- 9.265
- 8.341
- 7.417
- 6.493
- 5.569
- 4.645
- 3.721
- 2.797
- 1.873
- 0.9495
- 0.2561E+01

流速分布図



3-JUL-00  
 TEMPERATURE  
 ABSOLUTE  
 KELVIN  
 ITER = 1500  
 LOCAL MX = 369.3  
 LOCAL MN = 313.0

- 369.3
- 361.6
- 357.8
- 354.1
- 350.3
- 346.6
- 342.9
- 339.1
- 335.4
- 331.7
- 327.9
- 324.2
- 320.5
- 316.7
- 313.0

壁面温度分布図



図3.1-9 冷却水の熱流動解析結果(2)

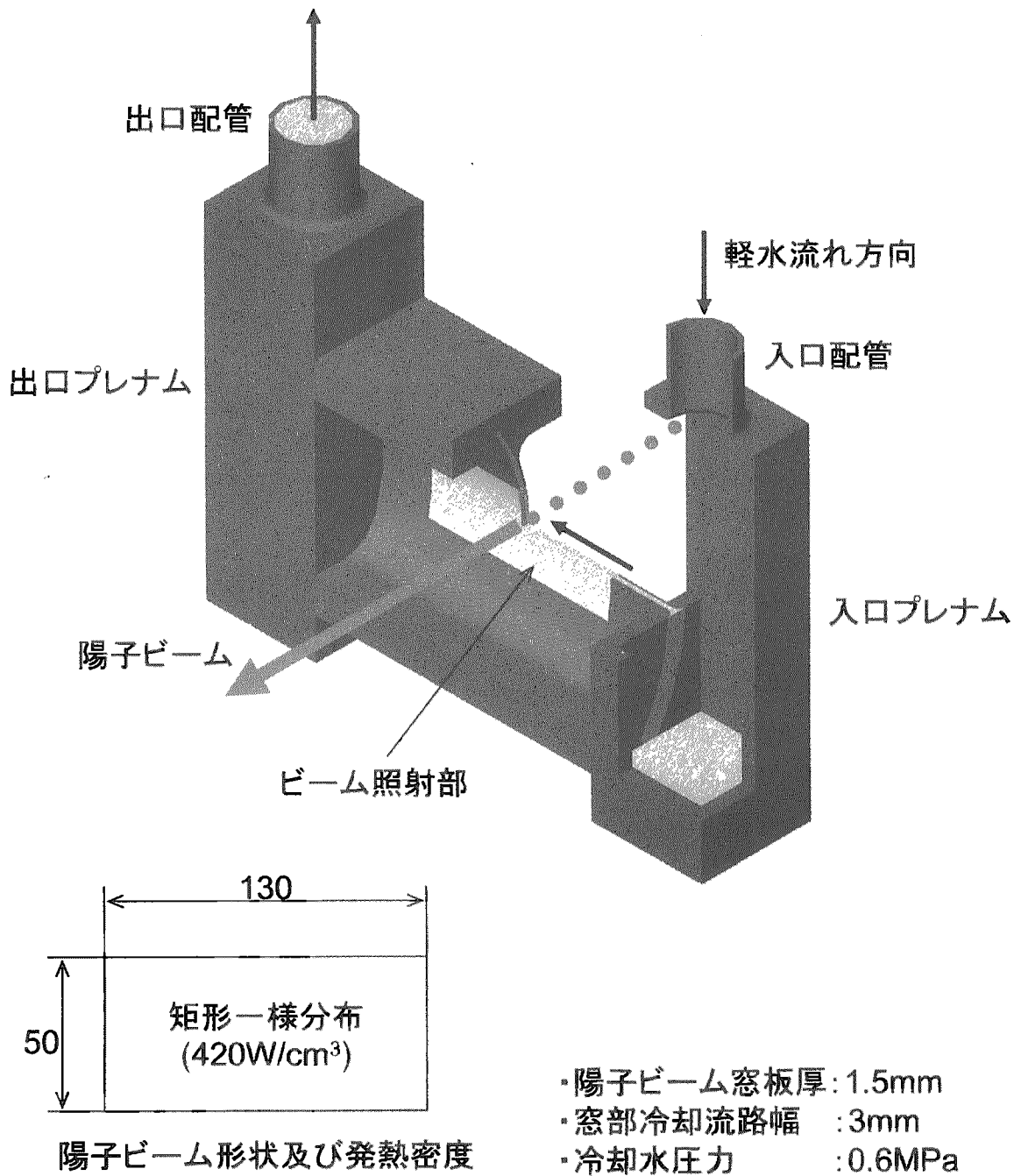


図3.2-1 曲面型陽子ビーム窓構造



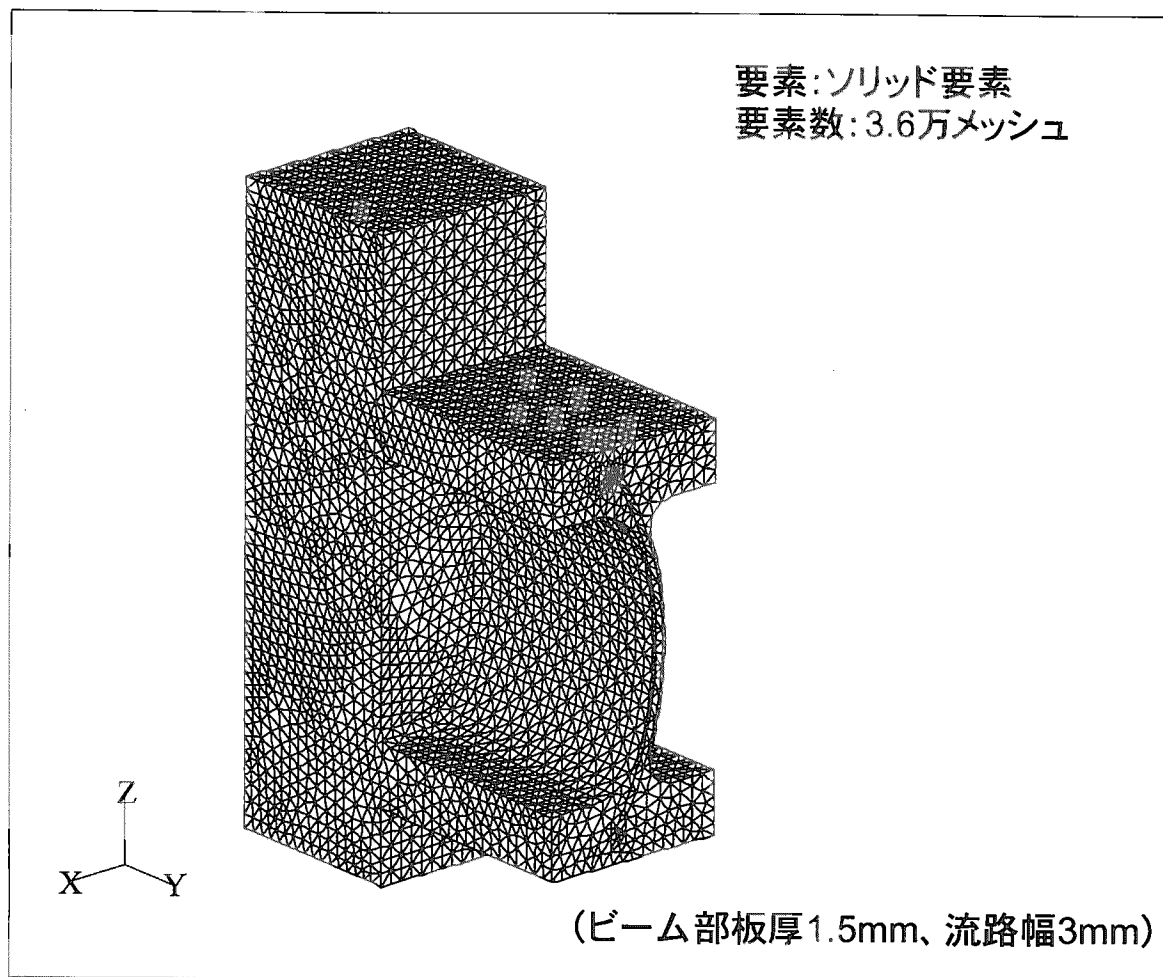


図3.2-2 曲面型陽子ビーム窓モデル図

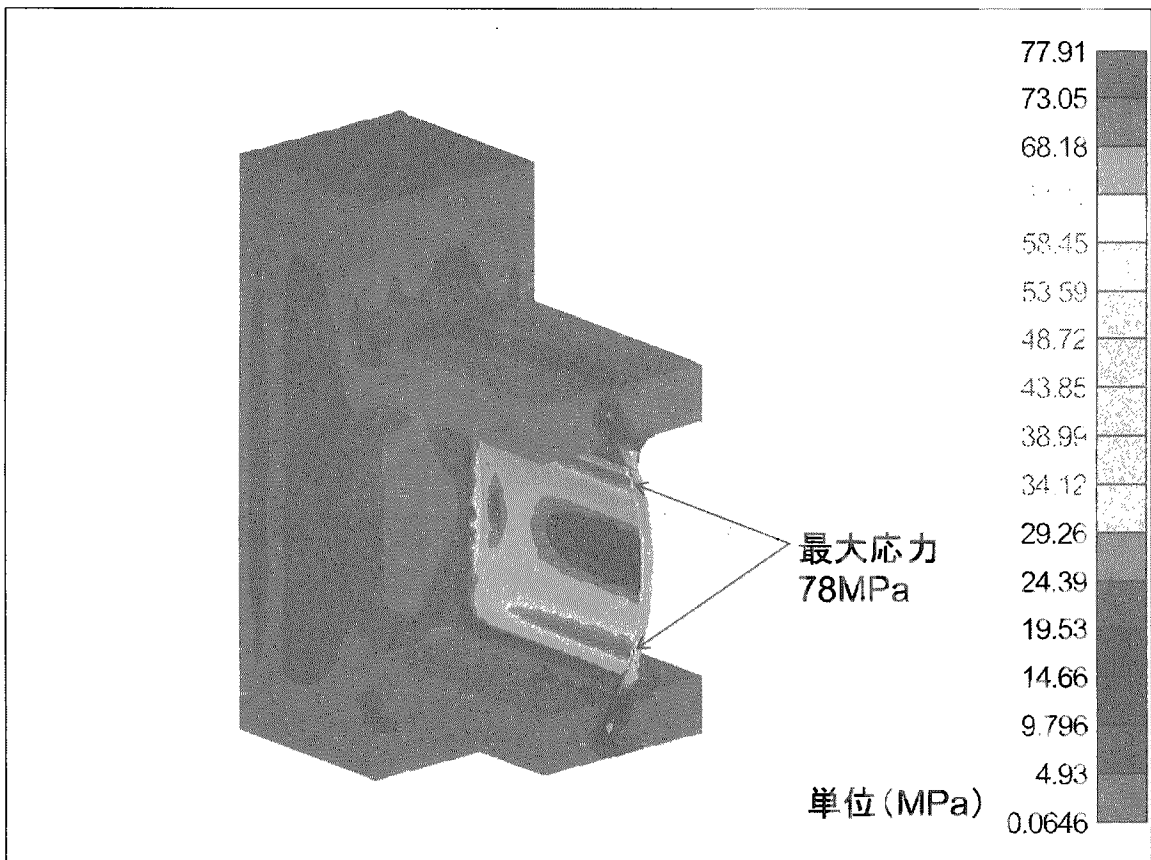
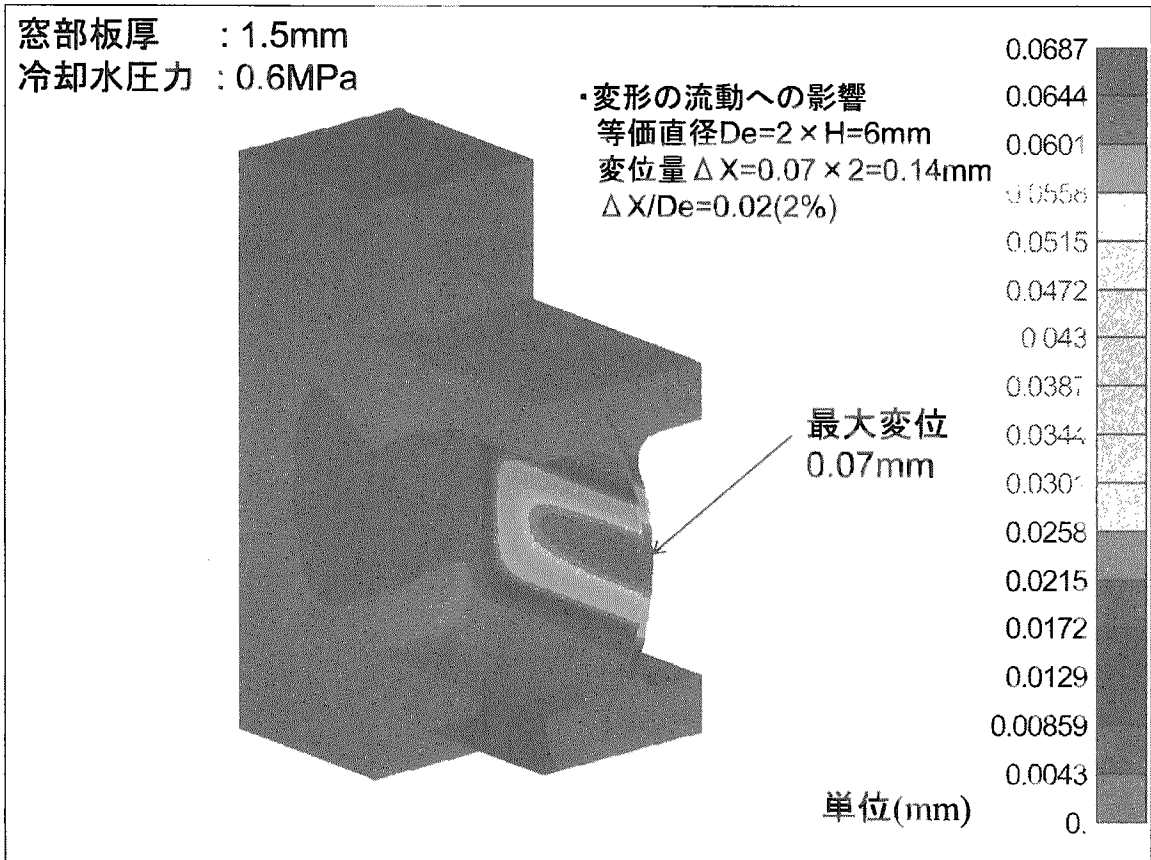


図3.2-3 内圧による変位及び応力解析結果

軽水流路:片側のプレナムから入り、  
他方のプレナムから出る。  
円筒部冷却流路: 3mm

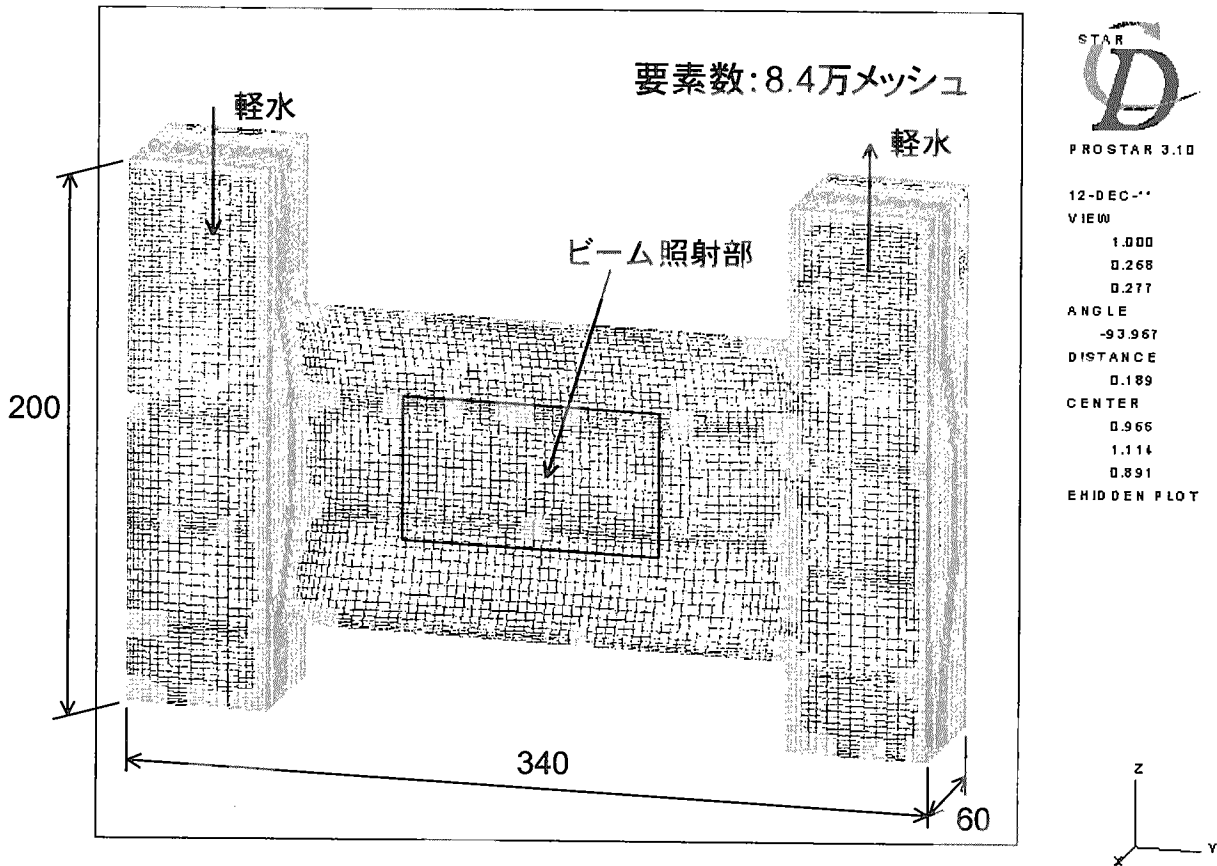
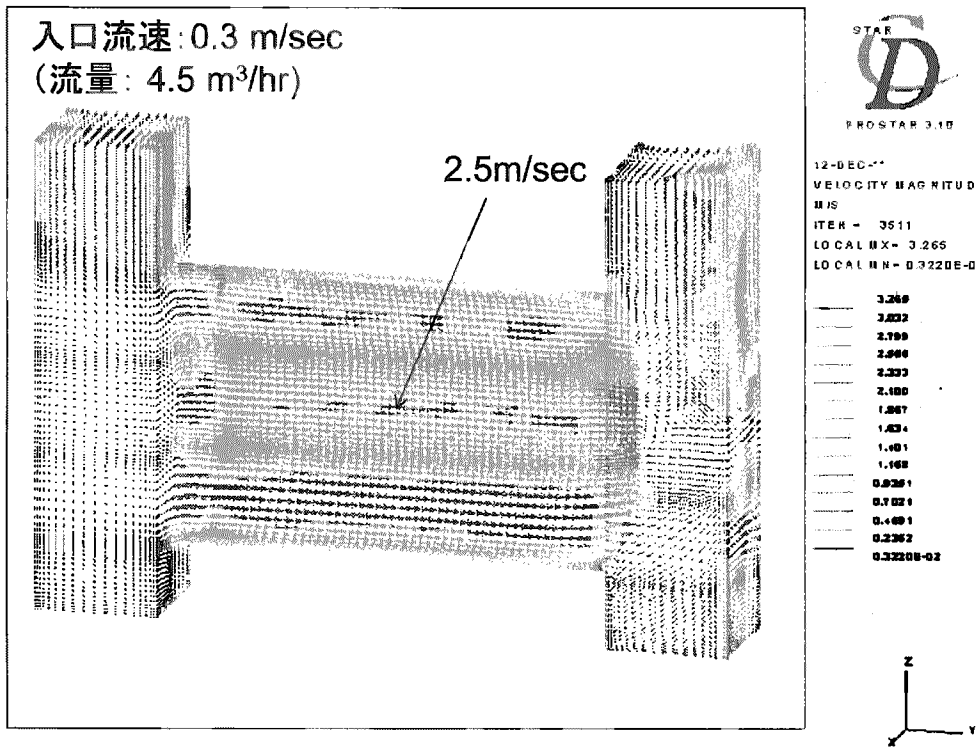
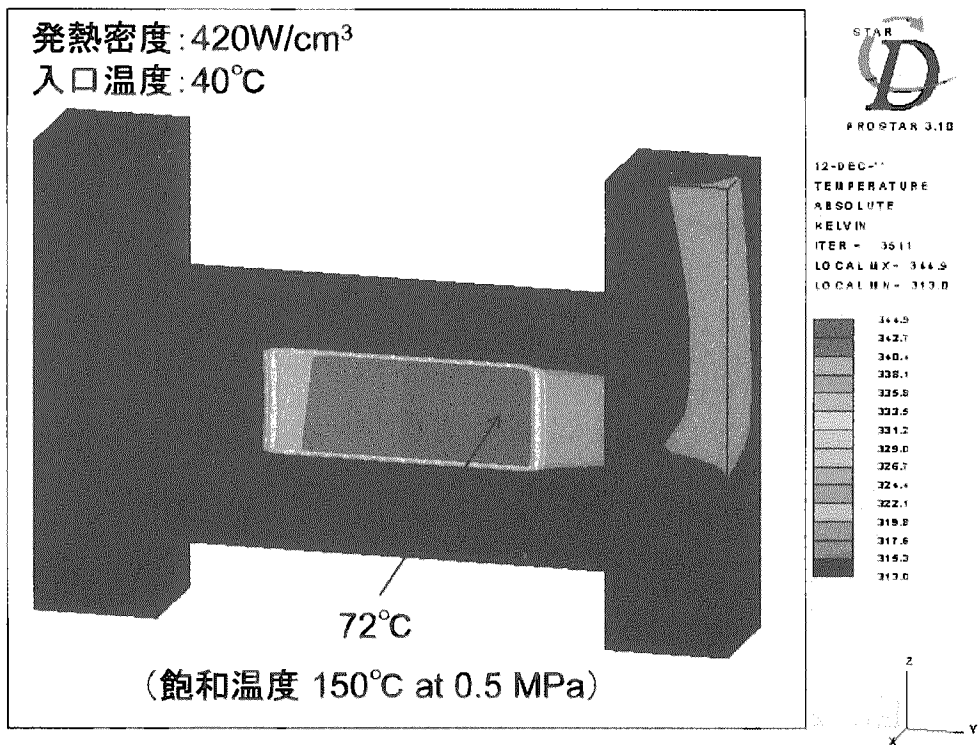


図3.2-4 熱流動解析用曲面型モデル図



曲面型モデル流速分布 (流路幅3mm)



曲面型モデル壁温分布 (流路幅3mm)

図3.2-5 熱流動解析による流速分布及び温度分布結果

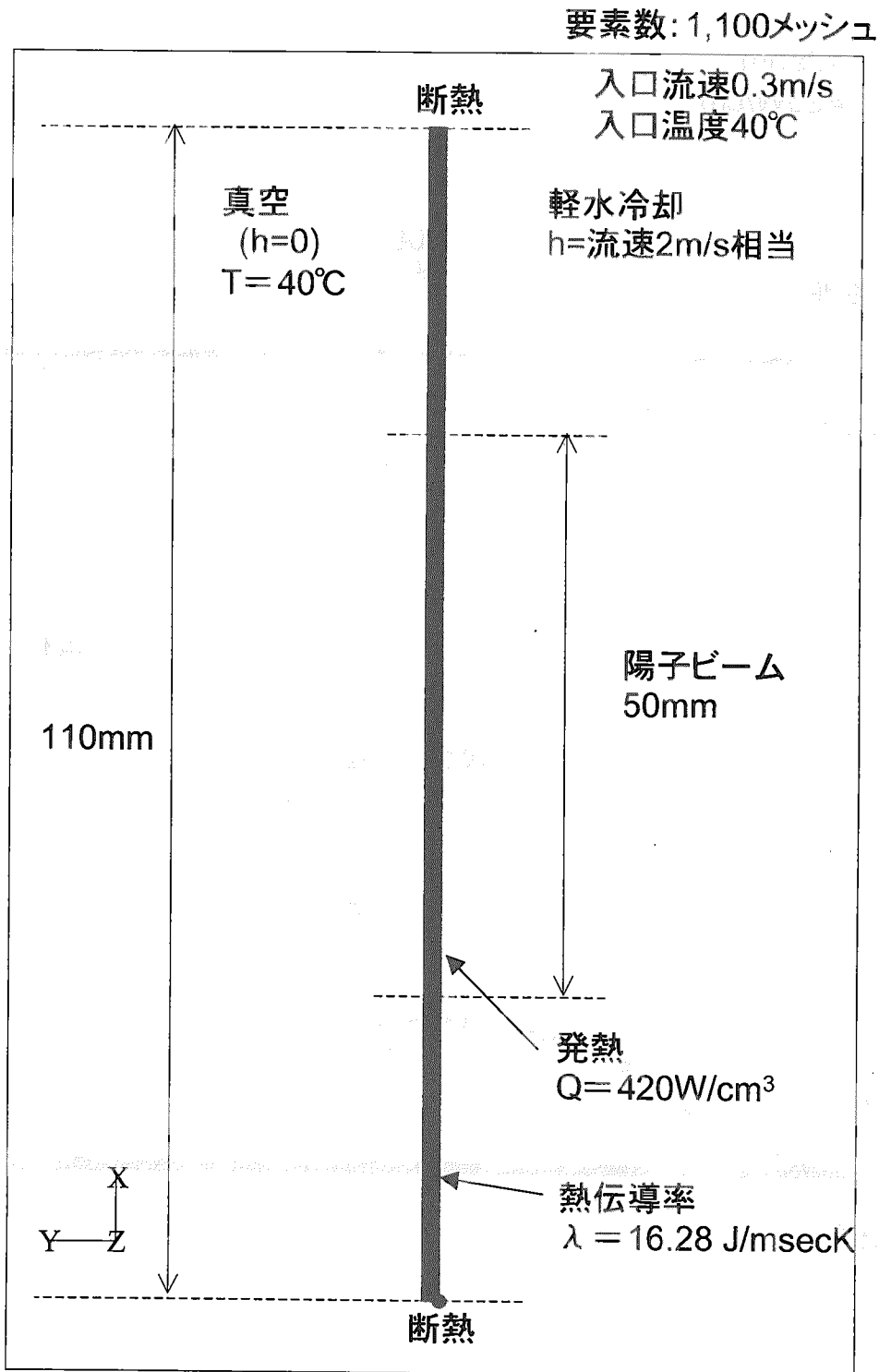
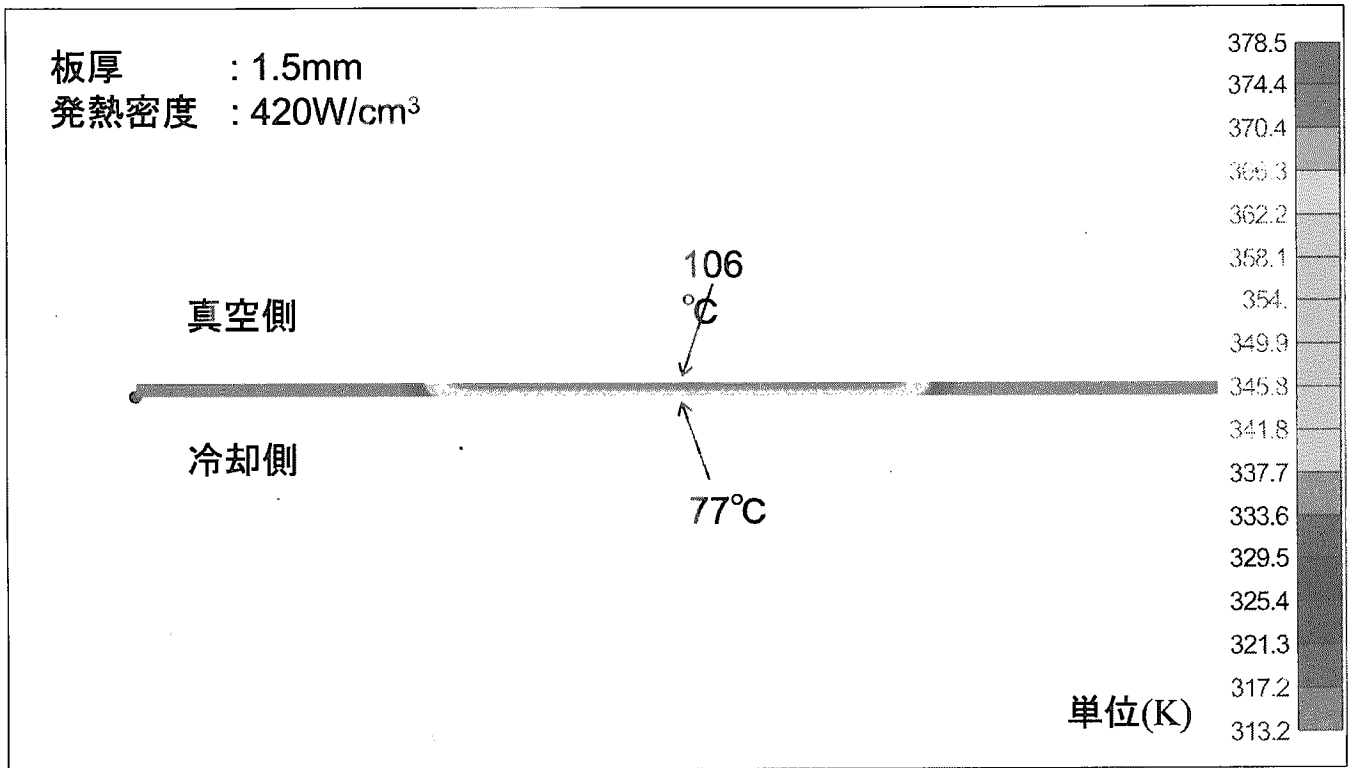
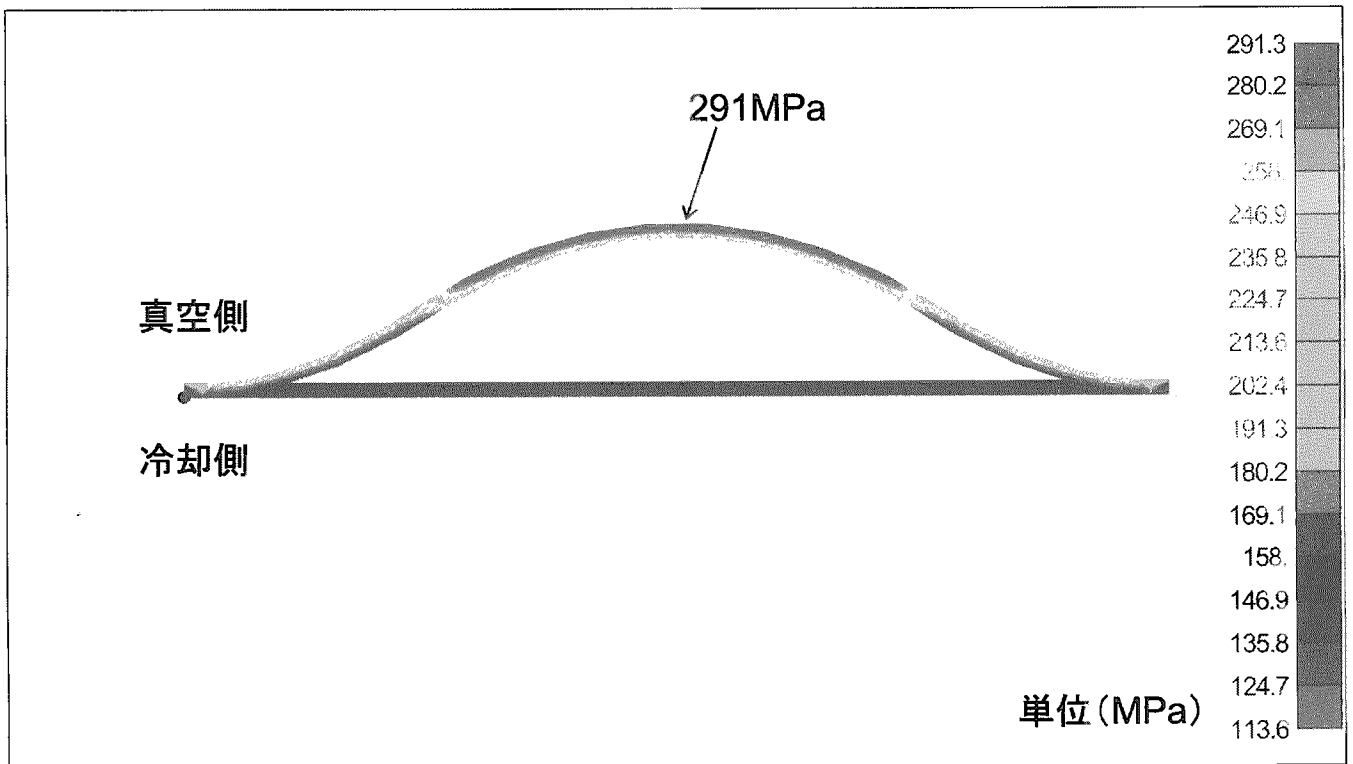


図3.2-6 熱応力簡易解析モデル



簡易モデル温度分布(板厚1.5mm)



簡易モデル熱応力分布(板厚1.5mm)

図3.2-7 温度分布及び熱応力解析結果

## 4. 陽子ビームが分布を持つ場合

### 4. 1 陽子ビーム窓部発熱分布

核発熱密度計算結果<sup>(13)</sup>(添付資料 2-1~5)を基に、解析で用いる発熱分布の近似式を求める。窓部は材質をインコネル 718 とし、板厚を 1.5mm とする。陽子ビームを考慮する範囲は、水平方向 300mm、垂直方向 120mm とする。

図 4.1-1(1/2)、(2/2)に Uniform 分布の水平及び垂直方向の計算値と近似曲線を、図 4.1-2(1/2)、(2/2)に Gaussian 分布の水平及び垂直方向の計算値と近似曲線を比較したものを示す。近似式は核計算値のピーク値を包絡するように係数を設定した。更に、総発熱量が 1.26kW (核計算による総発熱量 1.2kW/908.3kW\*の 1.1 倍)となるように近似式にマージンを加えた。

\* 陽子ビーム出力 1 MW よりも小さい理由は添付資料に示すとおりミューオンターゲットによる減衰を考慮したためである。

以下に、その近似式を示し、図 4.1-3 に分布図を示す。

#### ①Uniform 分布

$$Q1(x,y)=C1 \cdot \{9^3 - \text{abs}(A1 \cdot x^3) - \text{abs}(B1 \cdot y^3)\}^{15} \quad (\text{窓中心}(x,y)=(0,0)、\text{単位 } W/m^3)$$

$$A1=4.3E+5, B1=5.5E+6, C1=3.13E-35$$

ここで、 $Q1(x,y)$  : 点 $(x,y)$ での Uniform 発熱密度とする。

(最大 270W/cm<sup>3</sup>、総発熱量 1.26kW/1.5mm、範囲：幅 300mm×高さ 120mm)

#### ②Gaussian 分布

$$Q2(x,y)=C2 \cdot \text{EXP}\{-\{(x/A2)^2+(y/B2)^2\}\} \quad (\text{窓中心}(x,y)=(0,0)、\text{単位 } W/m^3)$$

$$A2=3.99E-2, B2=1.55E-2, C2=4.3016E+8$$

ここで、 $Q2(x,y)$  : 点 $(x,y)$ での Gaussian 発熱密度とする。

(最大 430W/cm<sup>3</sup>、総発熱量 1.26kW/1.5mm、範囲：幅 300mm×高さ 120mm)

### 4. 2 窓部形状の大型化検討

陽子ビームの照射範囲 (300mm × 120mm) を冷却可能とする場合、前項で検討した矩形分布 130mm × 50mm に対して縦横 2 倍以上となる。陽子ビーム窓形状を平板型構造とした場合、高さ方向を 2 倍とすると、曲げ応力は 2 乗に比例することから単純に計算すると 4 倍になる。図 3.1-5 に示した窓部板厚を 1.5mm、冷却水圧力を 0.6MPa とした結果から発生応力は許容応力値を超えると考えられ、平板型構造では強度的に成立が困難である。そこで、ここでは、変位量及び応力的に有利である曲面型に絞ってその形状を検討する。

#### 4. 2. 1 冷却無しの場合

軽水による冷却を行わない構造が可能であるならば施設の軽減化が図れる。そこで、陽子ビーム窓を冷却しない場合の構造強度評価を行い、その成立性を確認する。

## (1) 圧力による応力評価

冷却水を使用しない場合、窓部は冷却水による圧力が無いため、窓部板厚を薄くすることが可能である。ただし、窓部は陽子ビームラインの真空及びヘリウムベッセル側の圧力を受けるため、その荷重に耐え得るだけの板厚は必要である。ここでは、窓部板厚及び圧力をパラメータとして発生応力を計算し、陽子ビーム窓の候補材であるインコネル 718、SUS316 及びアルミニウム合金 5083-O の許容応力値と比較し、構造強度を満足する最小板厚を求める。圧力は、通常運転状態及び非常時を想定して 0.2MPa 及び 0.4MPa とした。解析は汎用有限要素解析コード ABAQUS を用い、図 4.2.1-1 に示す 3 次元シェルモデル（要素数：4,300 メッシュ）により計算する。板厚を 0.1mm、圧力を 0.2MPa とした場合の変位量及び発生応力を図 4.2.1-2 に示す。変位量は最大で 0.2mm、発生応力は周辺部で約 250MPa、中央部で約 200MPa となっている。実際の構造では周辺部を R 加工するため周辺部の応力は緩和されるため、ここでは、中央部の膜応力を見ることとする。図 4.2.1-3 に窓部板厚の圧力に対する Mises 相当応力を示す。圧力を 0.4MPa とした場合、インコネル 718 では板厚が 0.1mm で成立するが、他の材料では 0.5mm 以上を必要とする。

## (2) 熱流動及び熱応力評価

陽子ビーム出力 1MW 時の窓部発熱密度を Gaussian 分布とし、窓部の温度分布及び熱応力を計算した。真空側の熱伝達率を  $10\text{W/m}^2\text{K}$  とし、ヘリウムガス側の熱伝達率をパラメータとした。解析結果として、図 4.2.1-4 にヘリウムガス側熱伝達率の窓部板厚に対する最高温度、図 4.2.1-5 にその温度分布により生じる熱応力を示す。窓部板厚を 0.1mm とし、ヘリウムガス側熱伝達率を  $10\text{W/m}^2\text{K}$  とした時の温度分布及び熱応力を図 4.2.1-6 に示す。最高温度は、窓部中心部で 1453K (1180°C) となり、熱応力は 1057MPa となっている。図 4.2.1-5 に示すように、材質がインコネル 718 で板厚が 0.1mm であれば熱応力は許容応力値の範囲に入っているものの、図 4.2.1-4 に示すように、窓部の最高温度がヘリウムガス側熱伝達率を  $10\text{W/m}^2\text{K}$  とした場合に 1000°C 以上となり、同熱伝達率を過大に  $50\text{W/m}^2\text{K}$  としても 500°C 以上となっている。

以上のことから、陽子ビーム出力が 1MW の時、材質をインコネル 718、板厚を 0.1mm、圧力を 0.4MPa とすれば、冷却無しの陽子ビーム窓構造は強度的に成立するものの、金属温度が 500°C を超えクリープ温度領域に入ることから、構造成立性から考えると製作が困難であると言える。

## 4. 2. 2 冷却有りの場合

軽水により冷却する場合の陽子ビーム窓の最小板厚を評価し、構造強度的に成立する陽子ビーム窓構造を検討する。

## (1) 冷却水圧力による応力評価

陽子ビーム窓の形状は、幅 360mm×高さ 220mm とし、曲率 R150 の円筒形とする。図 4.2.2-1 に示す 3 次元ソリッドモデル（要素数：5.7 万メッシュ）により窓部板厚及び圧力をパラメータとして発生応力を計算し、陽子ビーム窓の候補材であるインコネ



ル 718、SUS316 及びアルミ合金 A5083-O の許容応力値と比較する。板厚を 1.5mm、圧力を 1MPa とした場合の変位量及び発生応力をターゲット側から見たもの及びビームライン側から見たものを各々図 4.2.2-2(1/2)、(2/2) に示す。最大変位はターゲット側窓部中央で生じ 0.23mm となっている。最大発生応力はビームライン側の窓部とプレナム部の付け根部で生じ 109MPa となり、窓中央部では 101MPa となっている。窓周辺部では R 加工により応力集中が緩和されるため、窓中央部の膜応力の方が許容応力値に対して裕度が小さくなっている。このことから中央部の膜応力に注目して強度的に満足する窓部の最小板厚を評価する。図 4.2.2-3 に窓部板厚の冷却水圧力に対する Mises 相当応力を示す。冷却水圧力を 1MPa とした場合、インコネル 718 では板厚 0.3mm で成立し、SUS316 では 1.5mm、アルミニウム合金では 3mm とすることによって成立すると考えられる。陽子ビーム損失の観点から板厚を最も薄くできるインコネル 718 が有力候補材となるが、一般的な加工精度を考慮すると窓部板厚を 1.5mm とする必要がある。この板厚は SUS 材と同値であるが、陽子ビーム照射による材料強度低下に対する裕度からインコネル 718 の方が望ましいと考えられる。また、材質の密度が小さいほど陽子ビーム損失は小さく、アルミニウム合金板厚 3mm はインコネル 718 の板厚 1.5mm と同程度のビーム損失と考えられるが、ビーム発熱による窓部温度がクリープ温度領域である 100℃を超えることから、構造的に成立するのは困難であると考えられる。

## (2)陽子ビーム窓構造モデルの分割及び簡略化

計算時間短縮のため構造強度解析では、陽子ビーム窓をターゲット側の窓部とビームライン側の窓部に分割し、プレナム部を省略してモデル化する。ターゲット側陽子ビーム窓モデル（要素数：4.7 万メッシュ）及びビームライン側陽子ビーム窓モデル（要素数：3.9 万メッシュ）を各々図 4.2.2-4 の上図及び下図に示す。モデルの妥当性を確認するために、内圧による応力を求め前項の結果と比較する。図 4.2.2-5 に変位、図 4.2.2-6 に応力を示す。図 4.2.2-2(1/2)及び(2/2)と比較すると、最大変位は 0.23mm に対して 0.26mm、最大応力は 109MPa に対して 103MPa とモデルによる違いが若干現われているものの、全体的な変位分布及び応力分布の傾向が一致していることから分割モデルでも解析上問題ないと考えられる。

## (3)熱応力の予備解析

次項では熱流動解析で得られた窓部での水側熱伝達率を用いて温度分布を求め熱応力解析を実施するが、ここではその予備解析として、手計算による水側熱伝達率を用いて、陽子ビーム発熱を考慮した温度分布解析及び熱応力解析を実施する。冷却水の窓部流速を 1m/sec とした場合の水側熱伝達率を Dittus-Boelter の式で求めた値  $2 \times 10^4 \text{W/m}^2\text{K}$  とし、陽子ビーム出力 1MW の窓部発熱密度を矩形一様分布 ( $210 \text{W/cm}^3$ )、Gaussian 分布及び Uniform 分布として温度分布及び熱応力解析を実施した。

図 4.2.2-7 に発熱分布を矩形とした場合の温度分布を示し、図 4.2.2-8 にその時の熱応力を示す。この結果から最高温度はビームライン側の金属外表面で 77℃となり、最大熱応力はターゲット側の窓中央部で 48MPa となっている。図 4.2.2-9 に発熱分布を Uniform 分布とした場合の温度分布を示し、図 4.2.2-10 にその時の熱応力を示す。こ

の結果から最高温度は矩形と同じ個所で生じ 86℃となり、最大熱応力は 57MPa となっている。図 4.2.2-11 に発熱分布を Gaussian 分布とした場合の温度分布を示し、図 4.2.2-12 にその時の熱応力を示す。この結果から最高温度は同様の個所で 108℃となり、最大熱応力は 80MPa となっている。

以上より、熱応力的に厳しいのは発熱密度を Gaussian 分布とした場合であるが、窓部発熱による最大熱応力は 100MPa 以下であり、許容応力値 1680MPa (3Sm) を十分満足することが分かった。

#### (4)熱流動及び熱応力評価

窓部板厚を 1.5mm、流路幅を 3mm、ビーム窓の大きさを幅 360mm×高さ 220mm、曲率を R150mm とし、陽子ビーム発熱分布を Uniform 及び Gaussian 分布とした場合の熱流動解析を実施する。解析コードは STAR-CD を用い、陽子ビーム窓を 3次元ソリッド要素(要素数:74万メッシュ)でモデル化した。冷却材を軽水とし、入口配管流速 1.0m/sec (4.8m<sup>3</sup>/hr)、入口温度 40℃とする。容器外側の境界条件は断熱、乱流モデルは標準 k-εモデルである。モデル図を図 4.2.2-13 に示す。図 4.2.2-14 に発熱を Uniform 分布とした場合の速度分布及び温度分布の解析結果を示す。ビーム窓部で約 1.2m/sec の流速となり、流量配分の偏差はほとんどなく均一な速度分布が得られている。また、ビーム窓部の冷却水に接する壁面の最高温度が 94℃であり、冷却水圧力 0.5MPa での沸点 150℃よりも十分低く沸騰することなく窓部を均一に冷却できると考えられる。図 4.2.2-15 に発熱を Gaussian 分布とした場合の速度分布及び温度分布の解析結果を示す。速度分布については Uniform 分布と同様で、壁面の最高温度が 120℃となり、沸騰することなく窓部を均一に冷却できると考えられる。

また、熱流動解析により求めた温度分布を用いて、ターゲット側及びビームライン側の陽子ビーム窓分割モデルで熱応力解析を実施する。図 4.2.2-16 に示すように、最大応力はターゲット側の陽子ビーム窓中央部で発生し、Uniform 分布で 107MPa、Gaussian 分布で 153MPa となった。この熱応力は許容応力値 1680MPa (3Sm) を十分満足している。

#### (5)まとめ

以上より、3次元熱流動解析結果から、陽子ビーム窓部では均一な流動が得られ、冷却水が沸騰せずに冷却することが可能であることを確認した。また、熱応力解析結果から、構造強度的にも問題ないことが分かった。

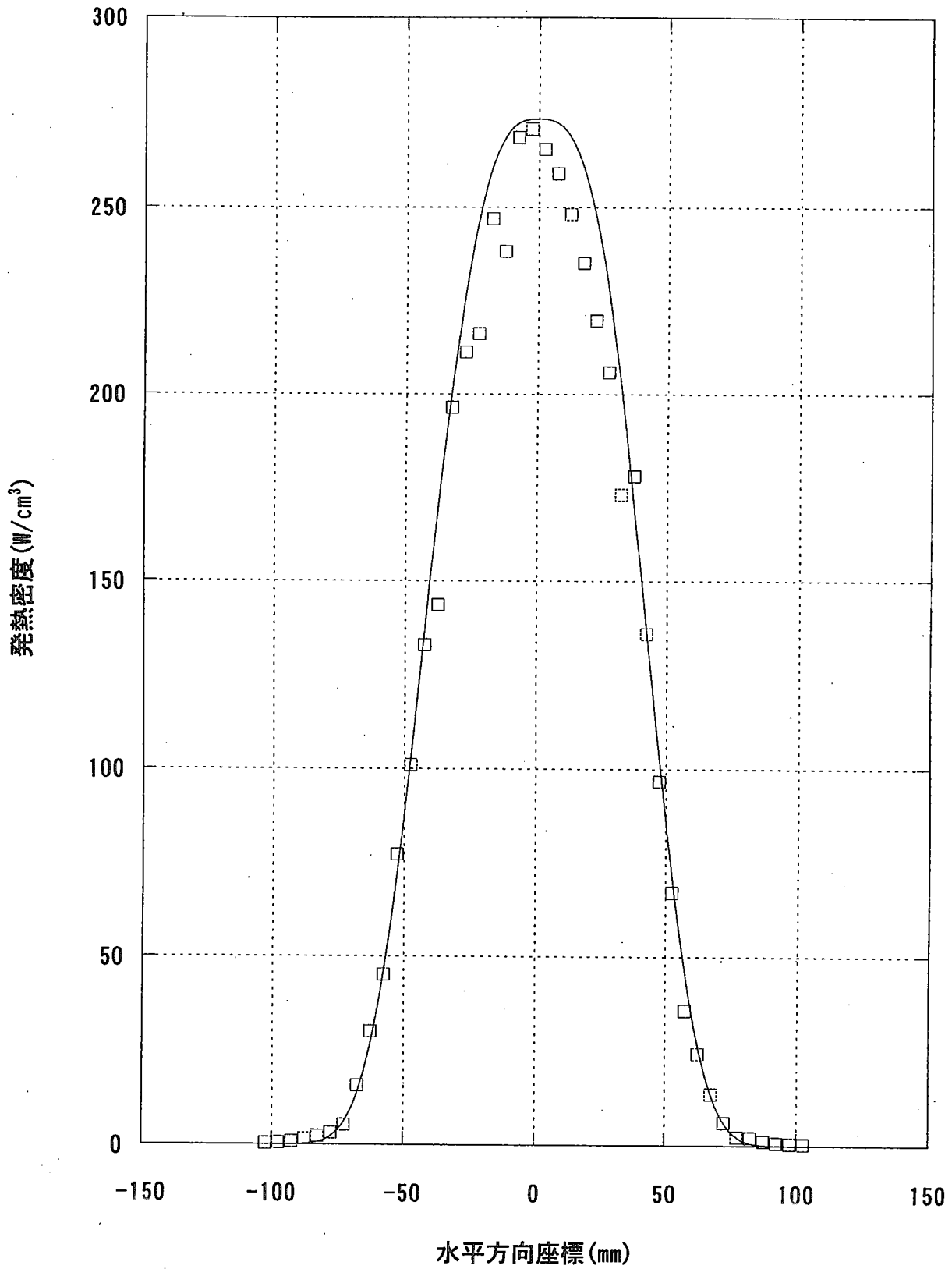


図4.1-1(1/2) 陽子ビーム発熱：Uniform分布（水平方向）  
（Inconel718,t=1.5mm）

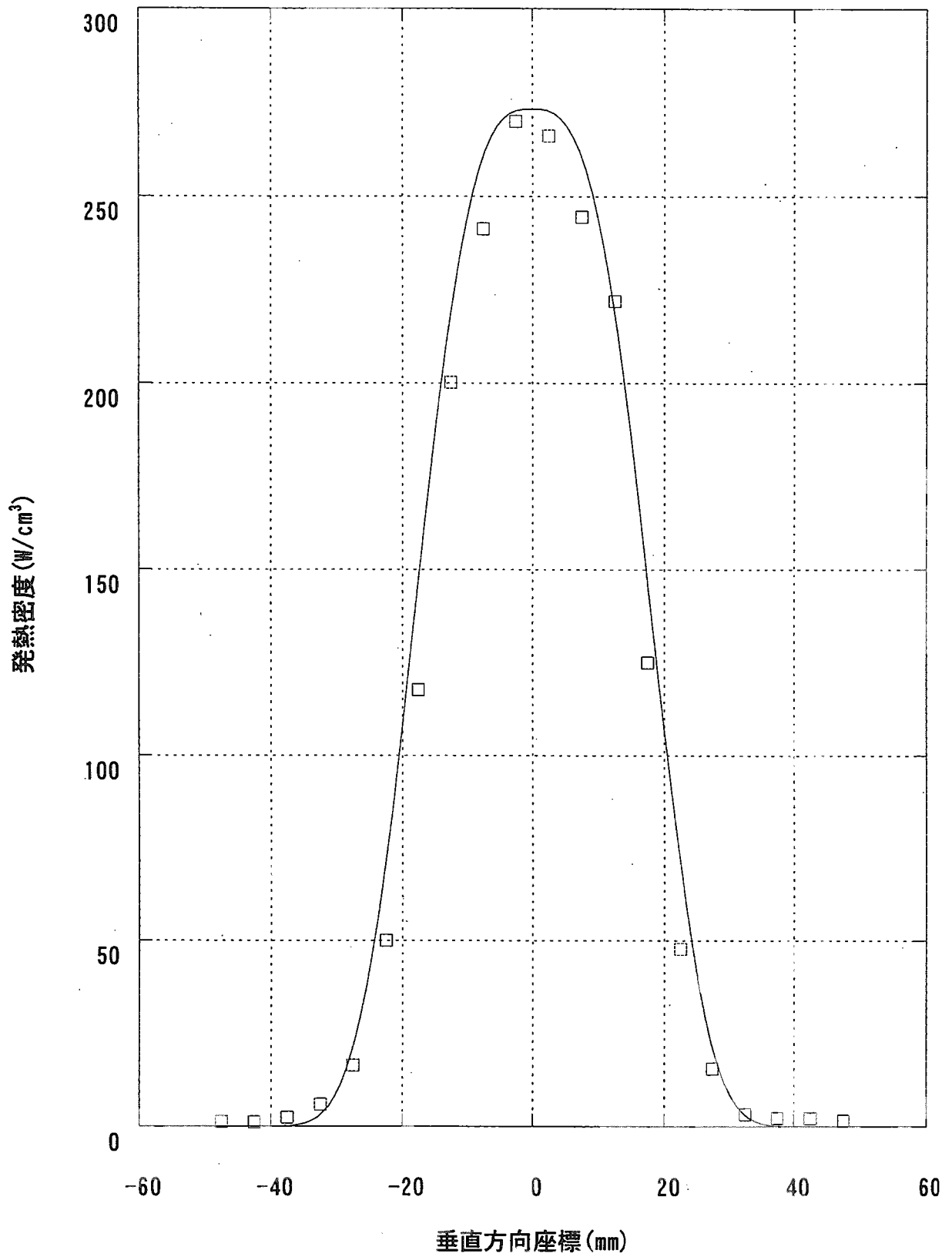


図4.1-1(2/2) 陽子ビーム発熱：Uniform分布（垂直方向）  
（Inconel718,t=1.5mm）

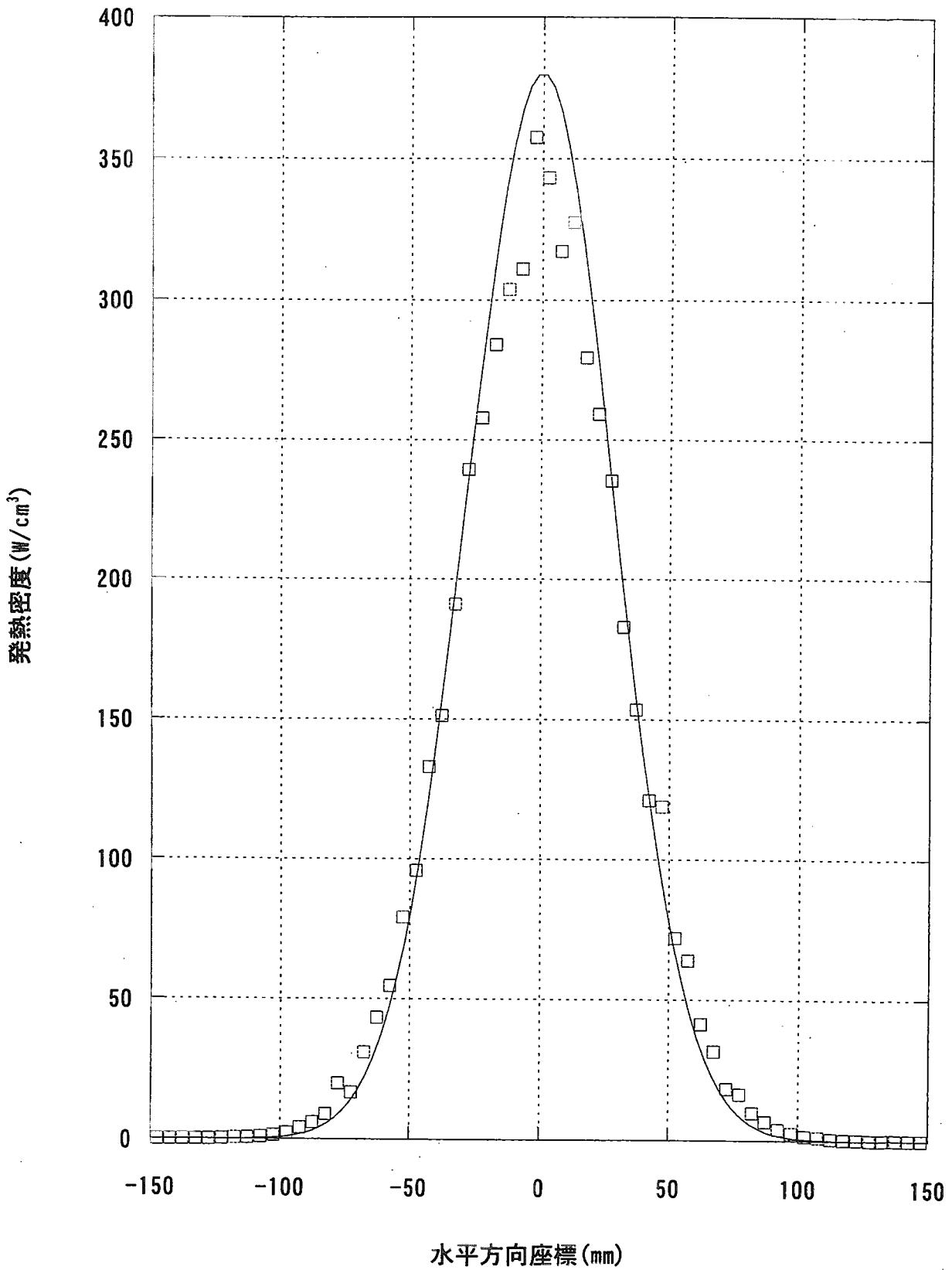


図4.1-2(1/2) 陽子ビーム発熱 : Gaussian分布 (水平方向)  
(Inconel718,  $t=1.5\text{mm}$ )

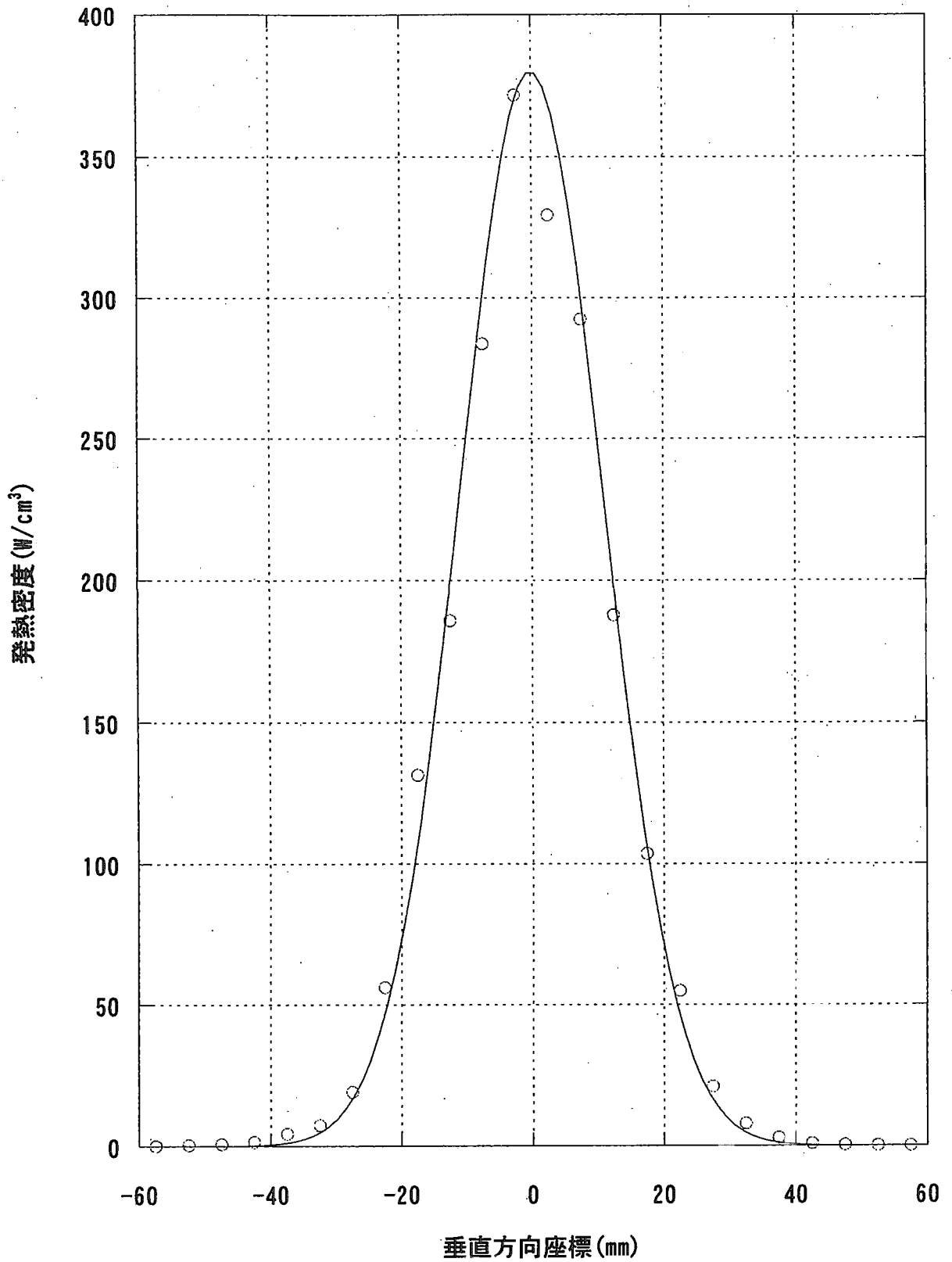


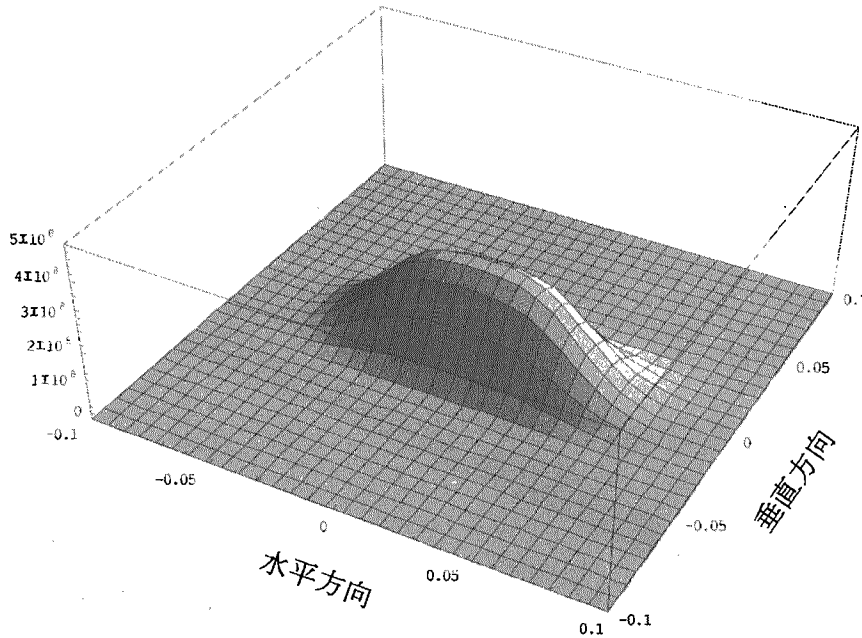
図4.1-2(2/2) 陽子ビーム発熱：Gaussian分布（垂直方向）  
（Inconel718,t=1.5mm）

• Uniform分布

$$Q1(x,y)=C1 \cdot \{9^3 - \text{abs}(A1 \cdot x^3) - \text{abs}(B1 \cdot y^3)\}^{15}$$

(窓中心(x,y)=(0,0)、単位W/m<sup>3</sup>)

$$A1=4.3E+5, B1=5.5E+6, C1=3.13E-35$$



• Gaussian分布

$$Q2(x,y)=C2 \cdot \text{EXP}\{-[(x/A2)^2 + (y/B2)^2]\}$$

(窓中心(x,y)=(0,0)、単位W/m<sup>3</sup>)

$$A2=3.99E-2, B2=1.55E-2, C2=4.3016E+8$$

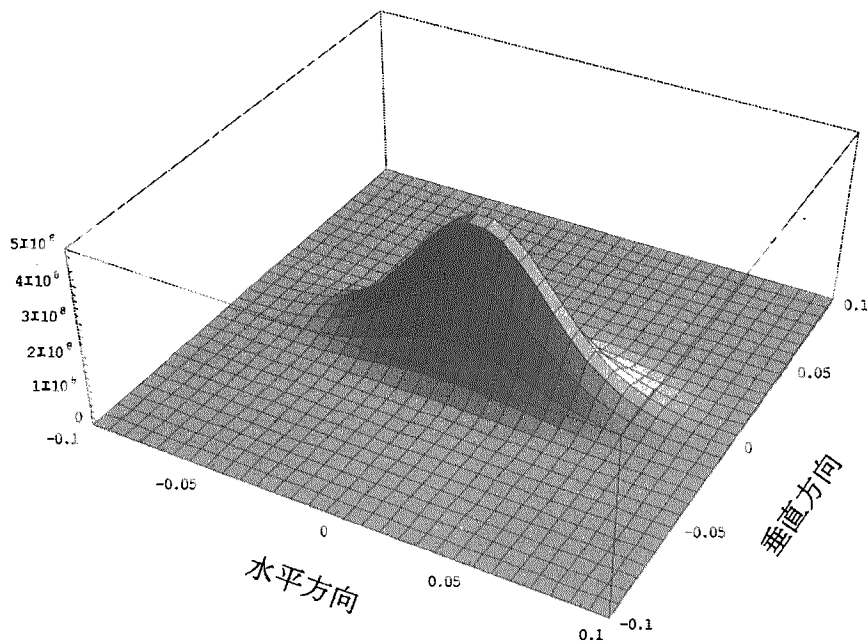


図4.1-3 窓部陽子ビーム発熱分布

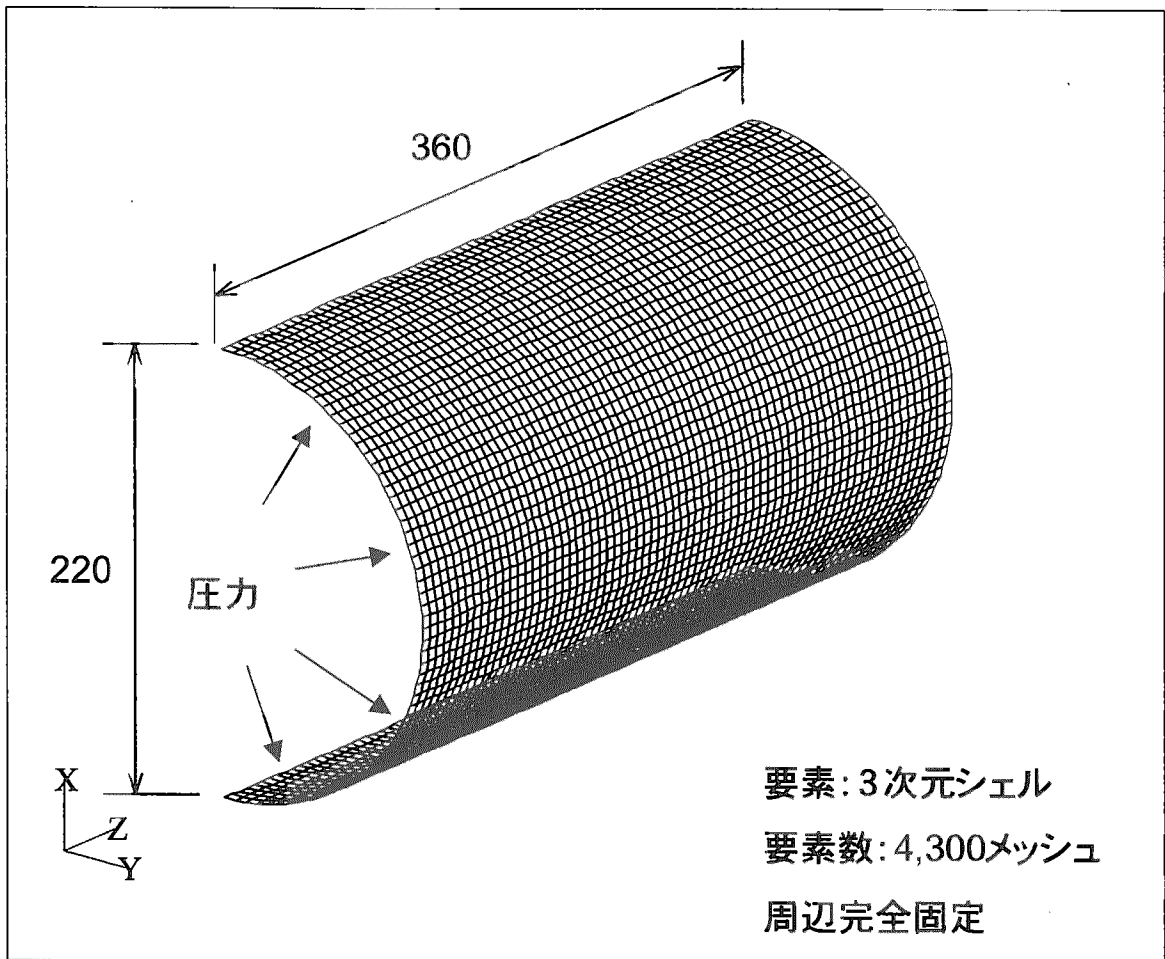


図4.2.1-1 冷却無し陽子ビーム窓モデル図



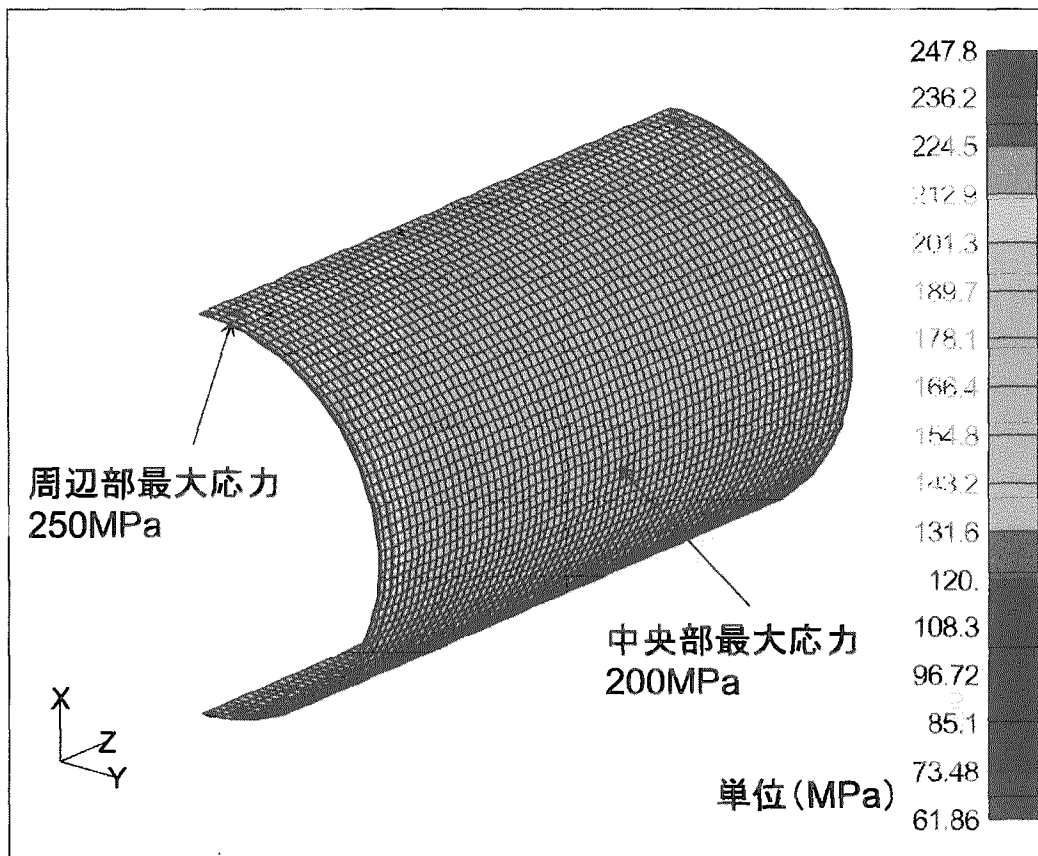
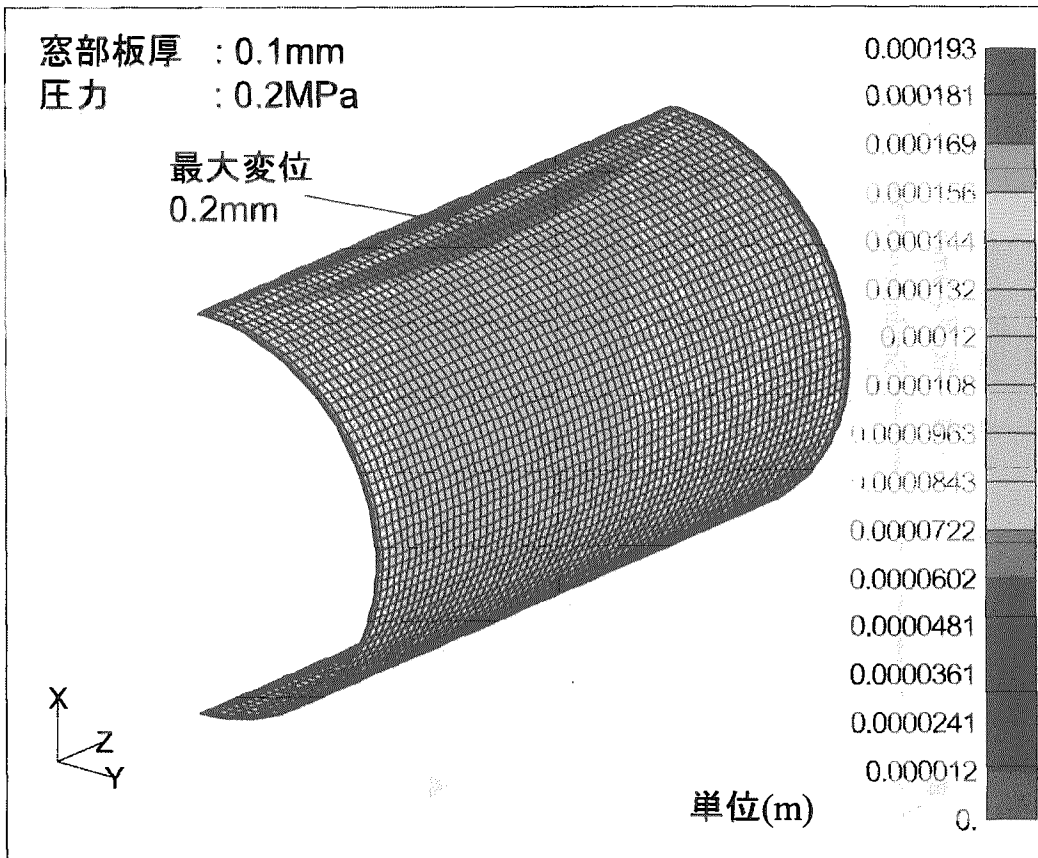


図4.2.1-2 変位及び応力解析結果 (冷却無し)

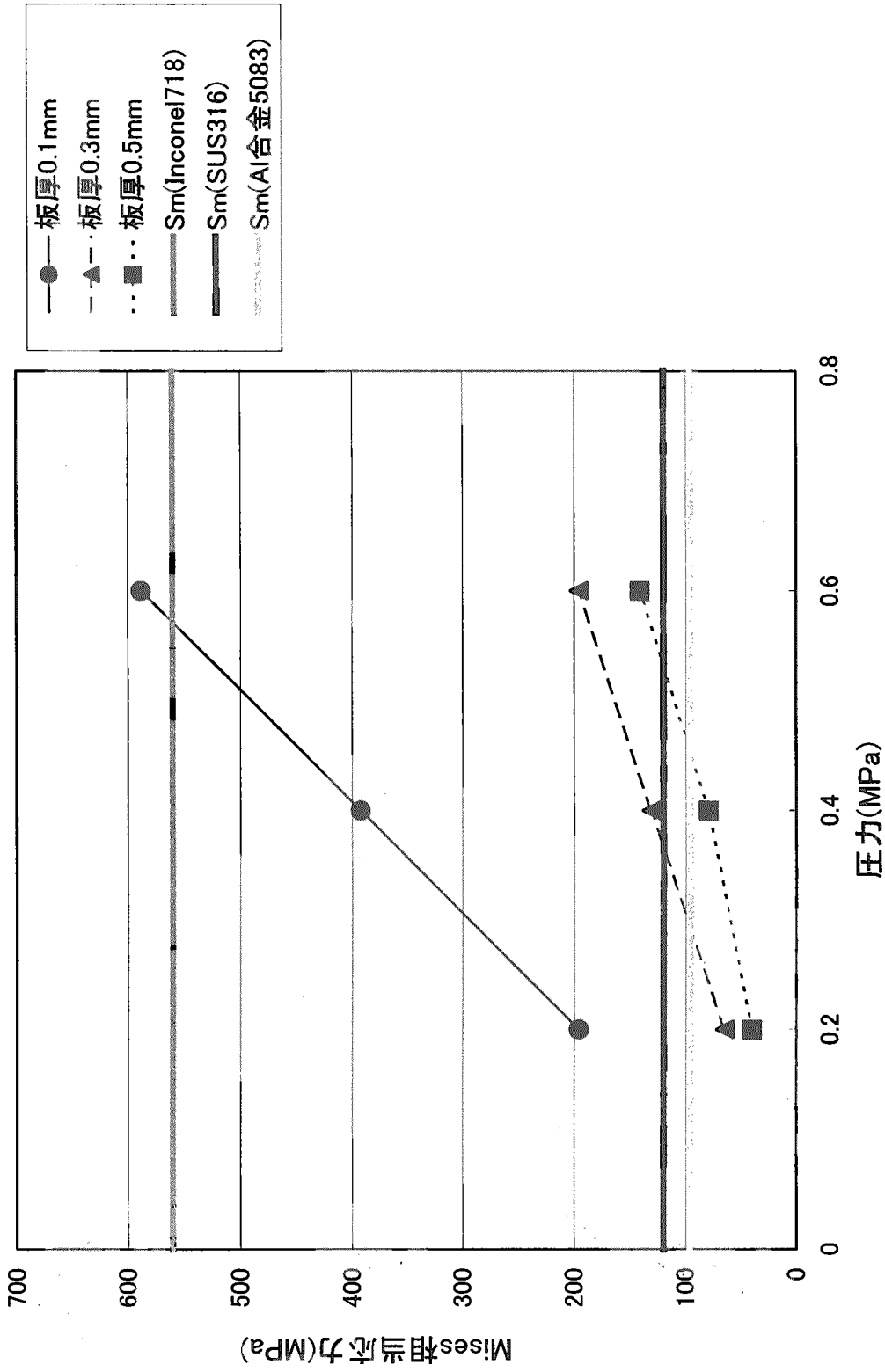


図4.2.1-3 最小板厚評価(冷却無し)

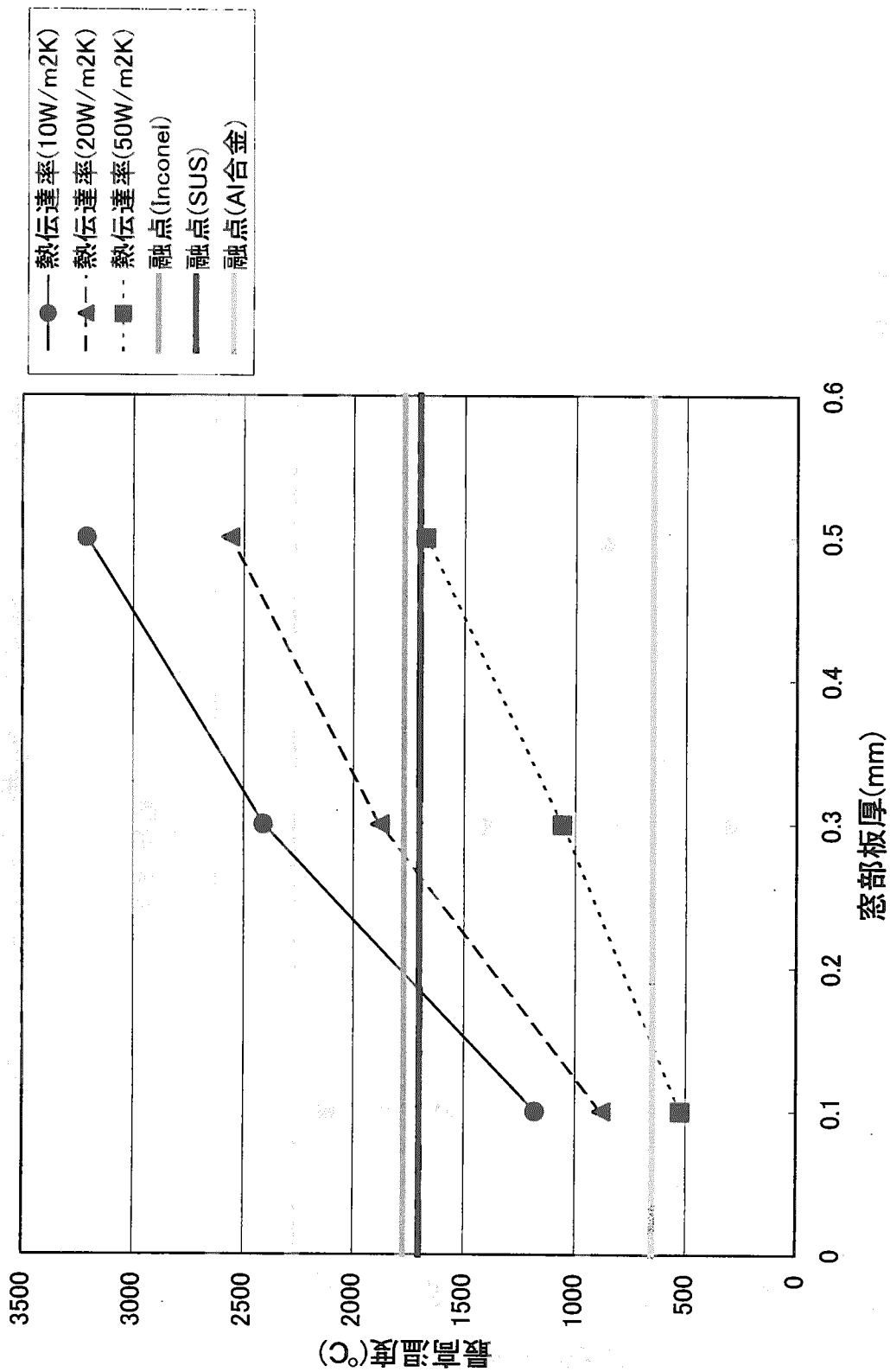


図4.2.1-4 ビーム発熱による最高金属温度(冷却無し)

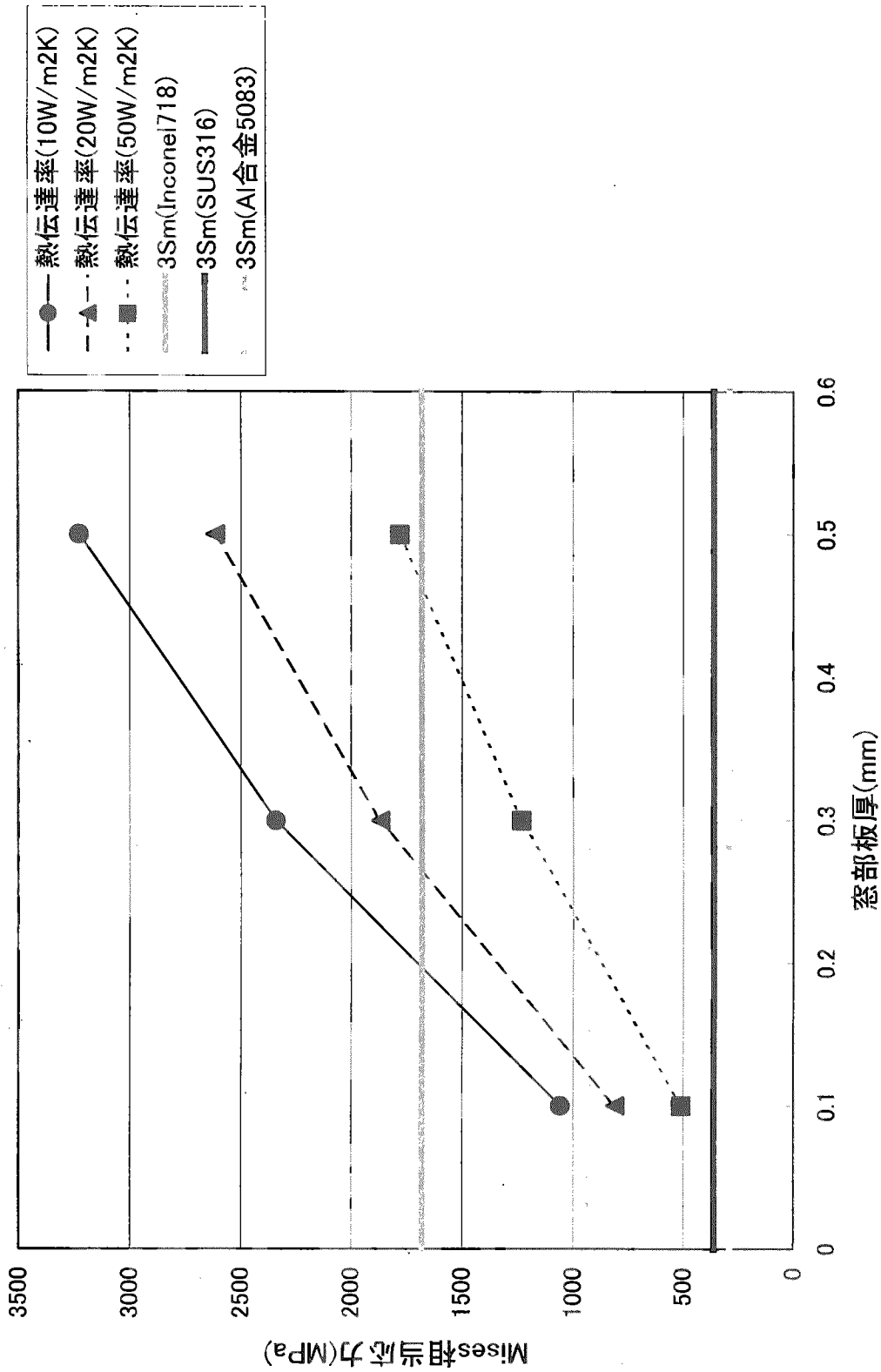


図4.2.1-5 ビーム発熱による熱応力(冷却無し)

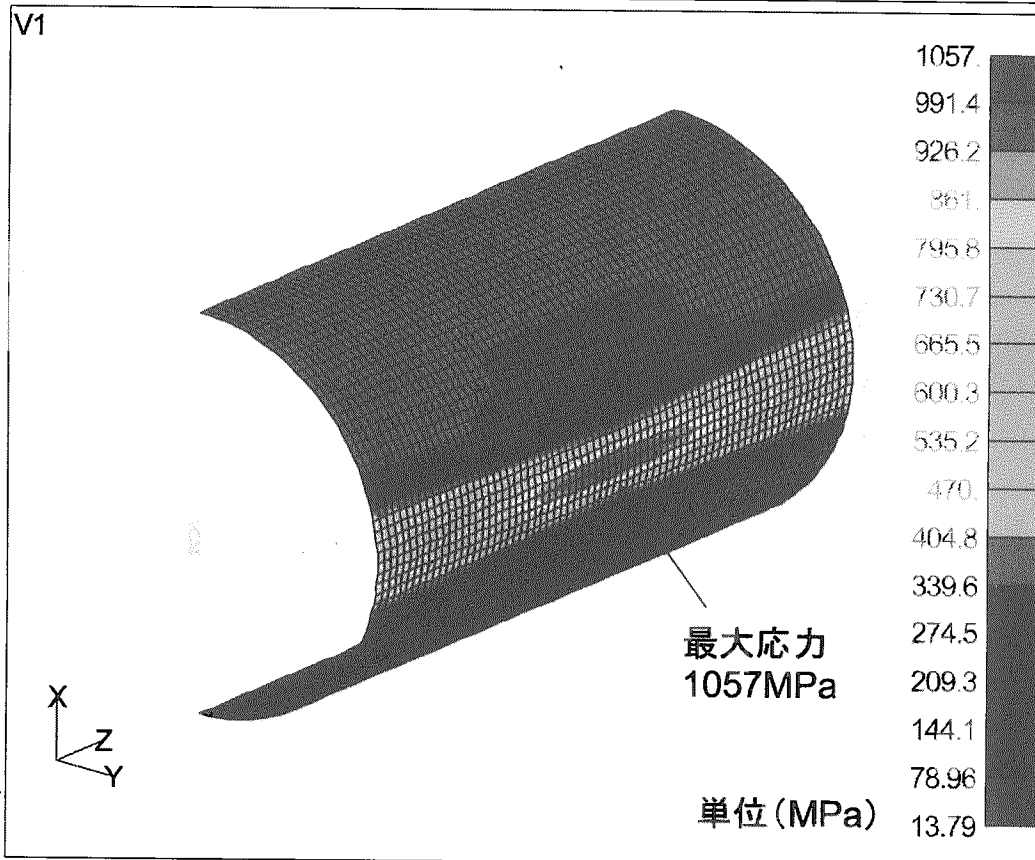
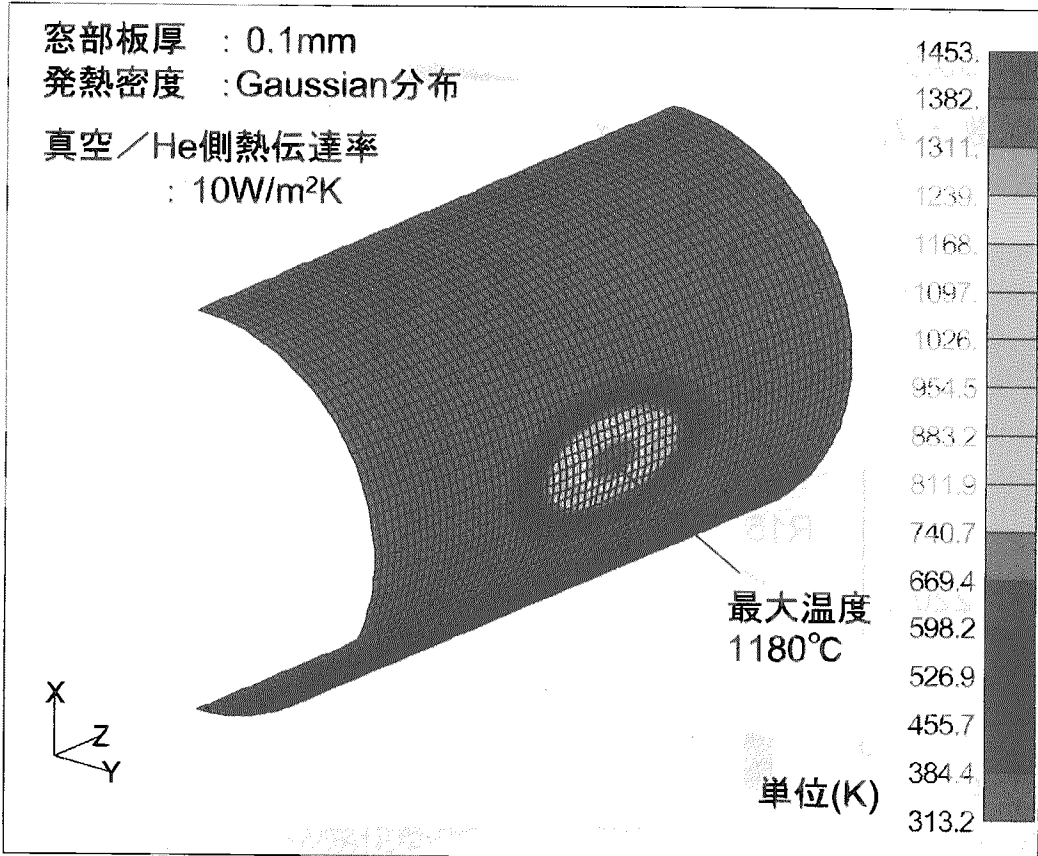


図4.2.1-6 温度及び熱応力解析結果 (冷却無し)

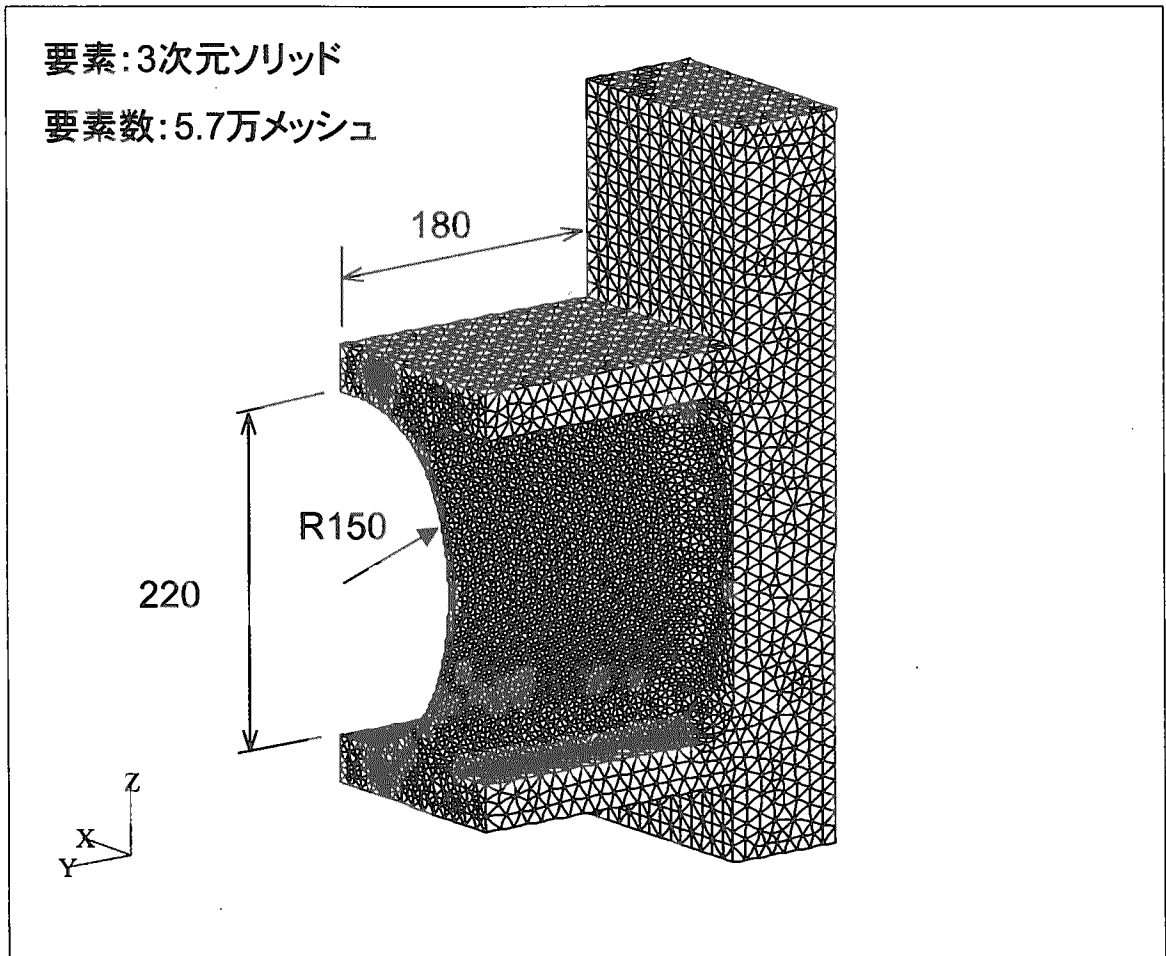


図4.2.2-1 窓部冷却有りモデル図

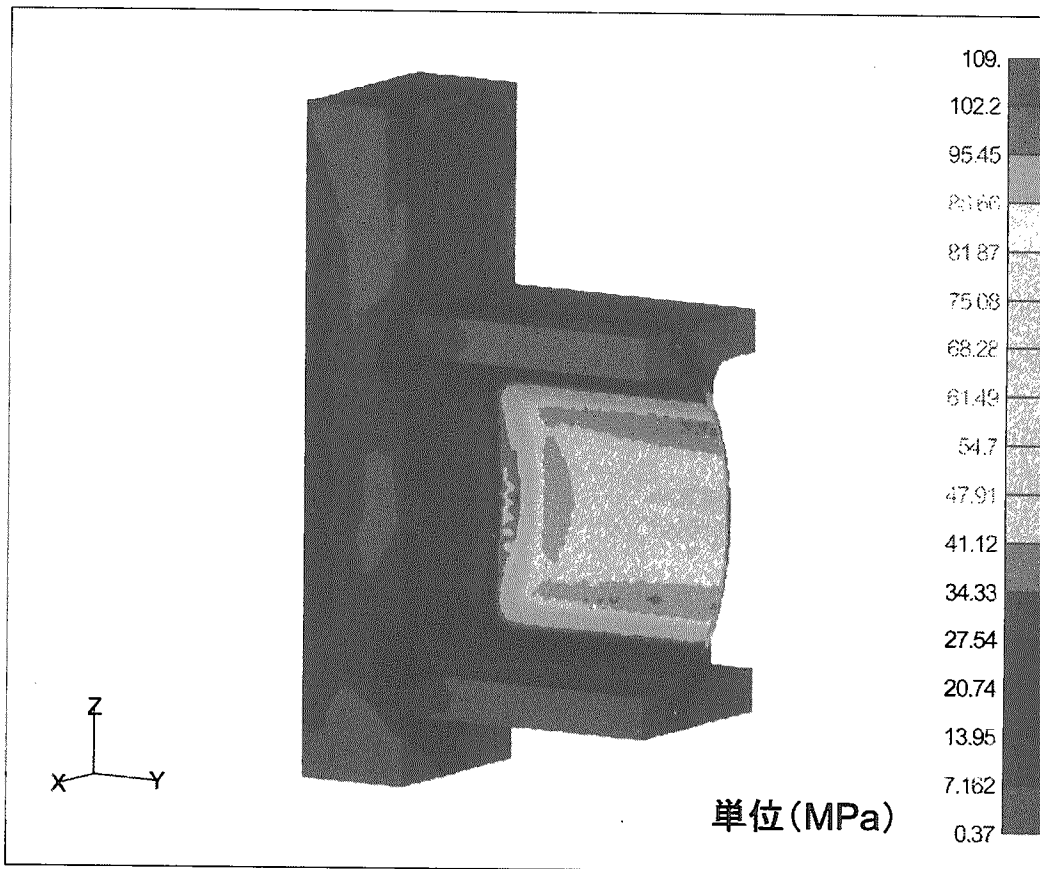
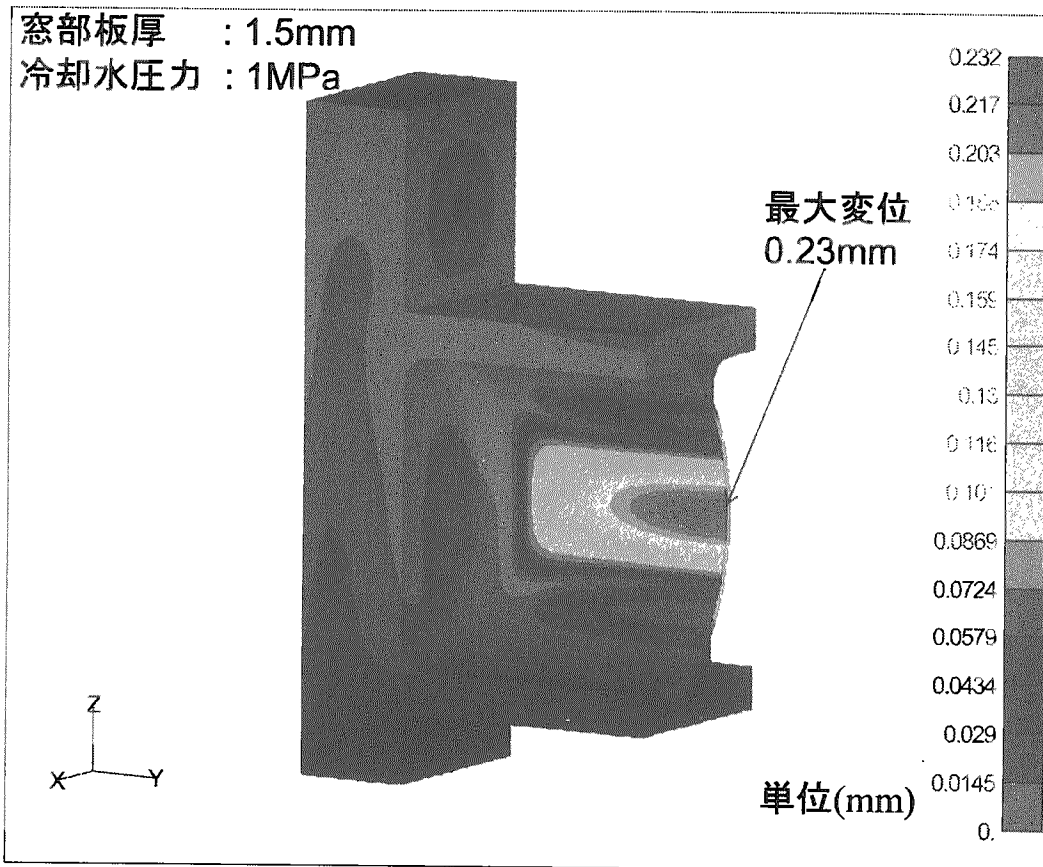


図4.2.2-2(1/2) 変位及び応力解析結果 (ターゲット側)

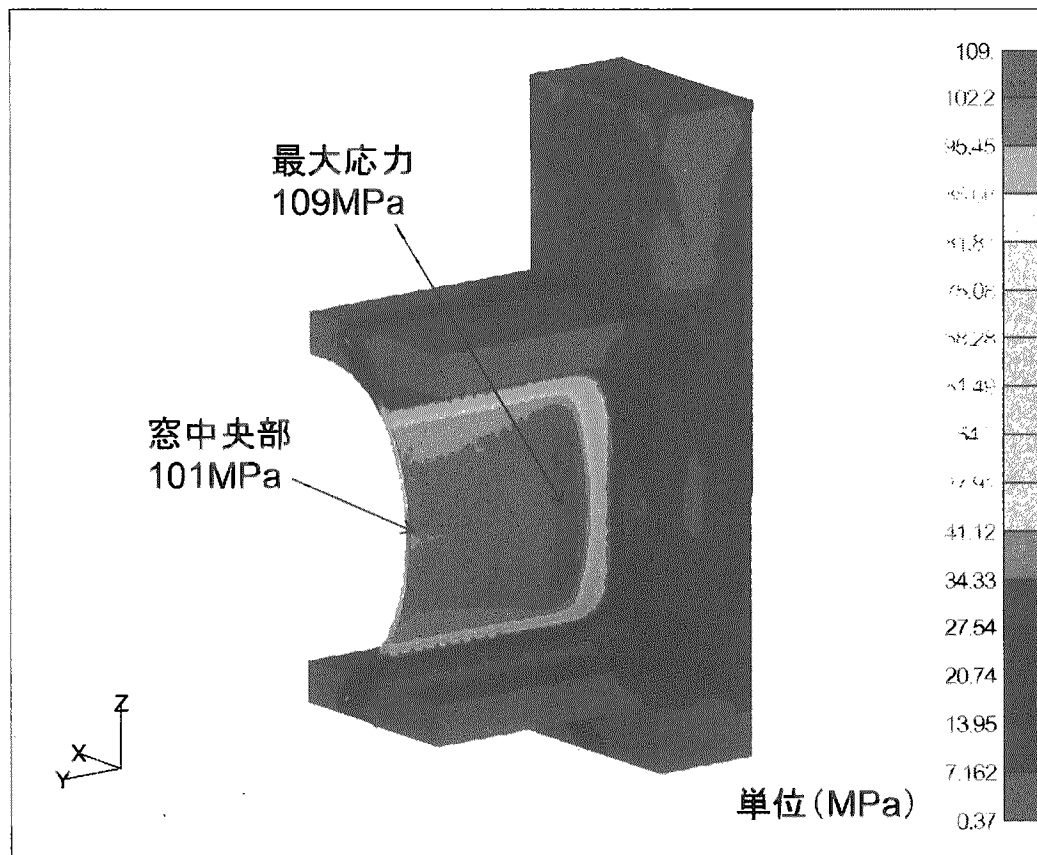
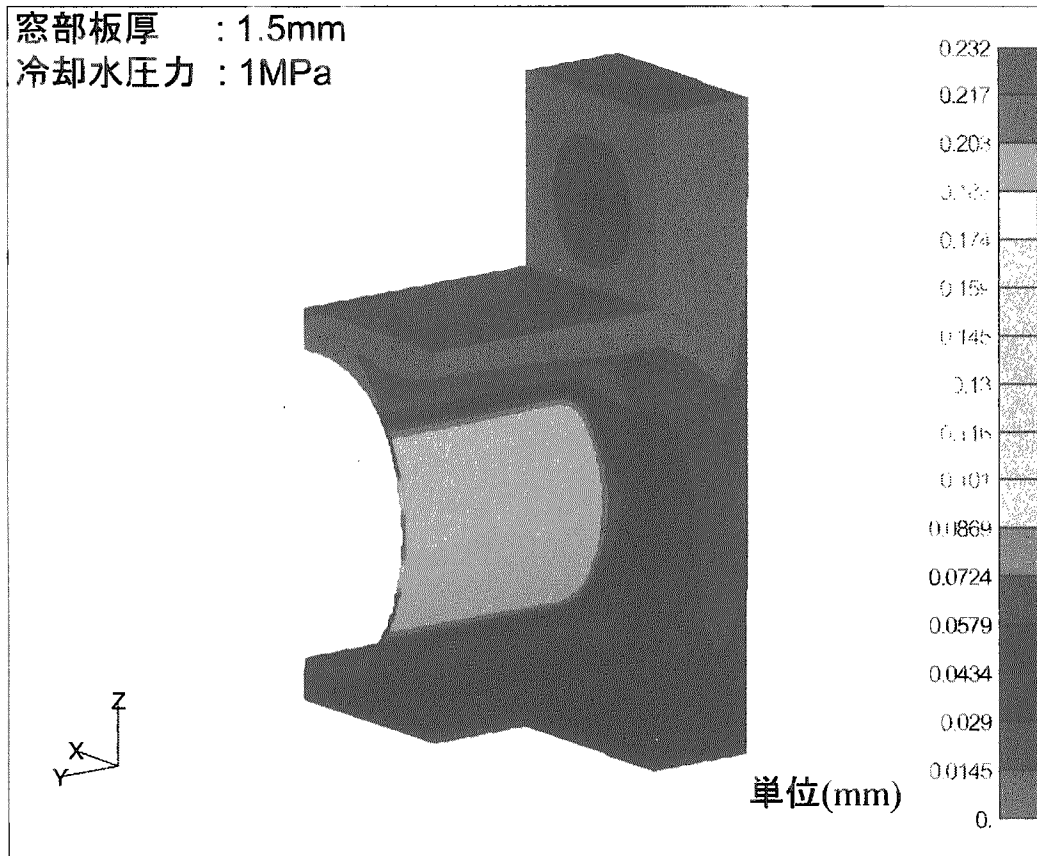


図4.2.2-2(2/2) 変位及び応力解析結果 (ビームライン側)



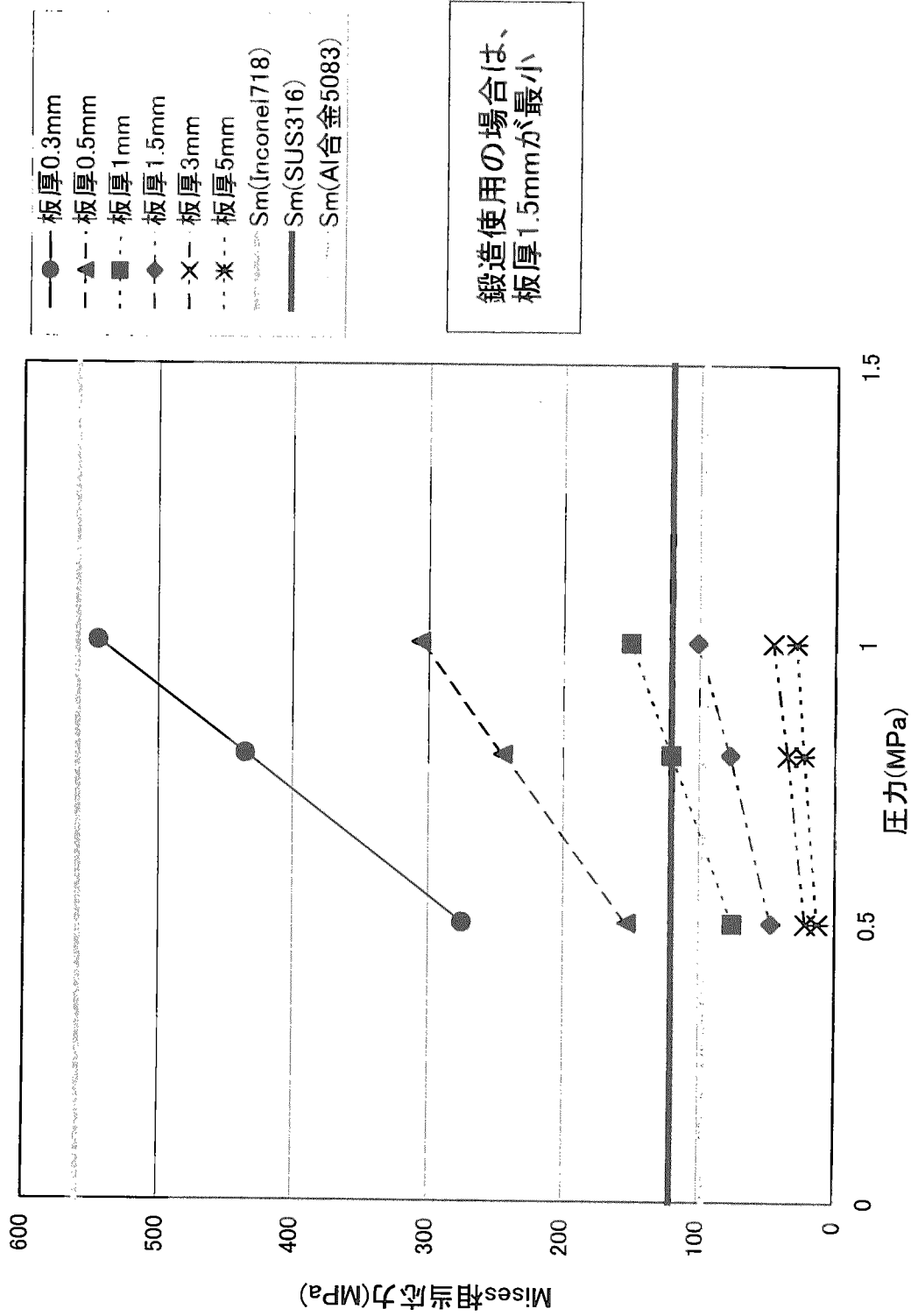


図4.2.2-3 最小板厚評価(冷却有り)

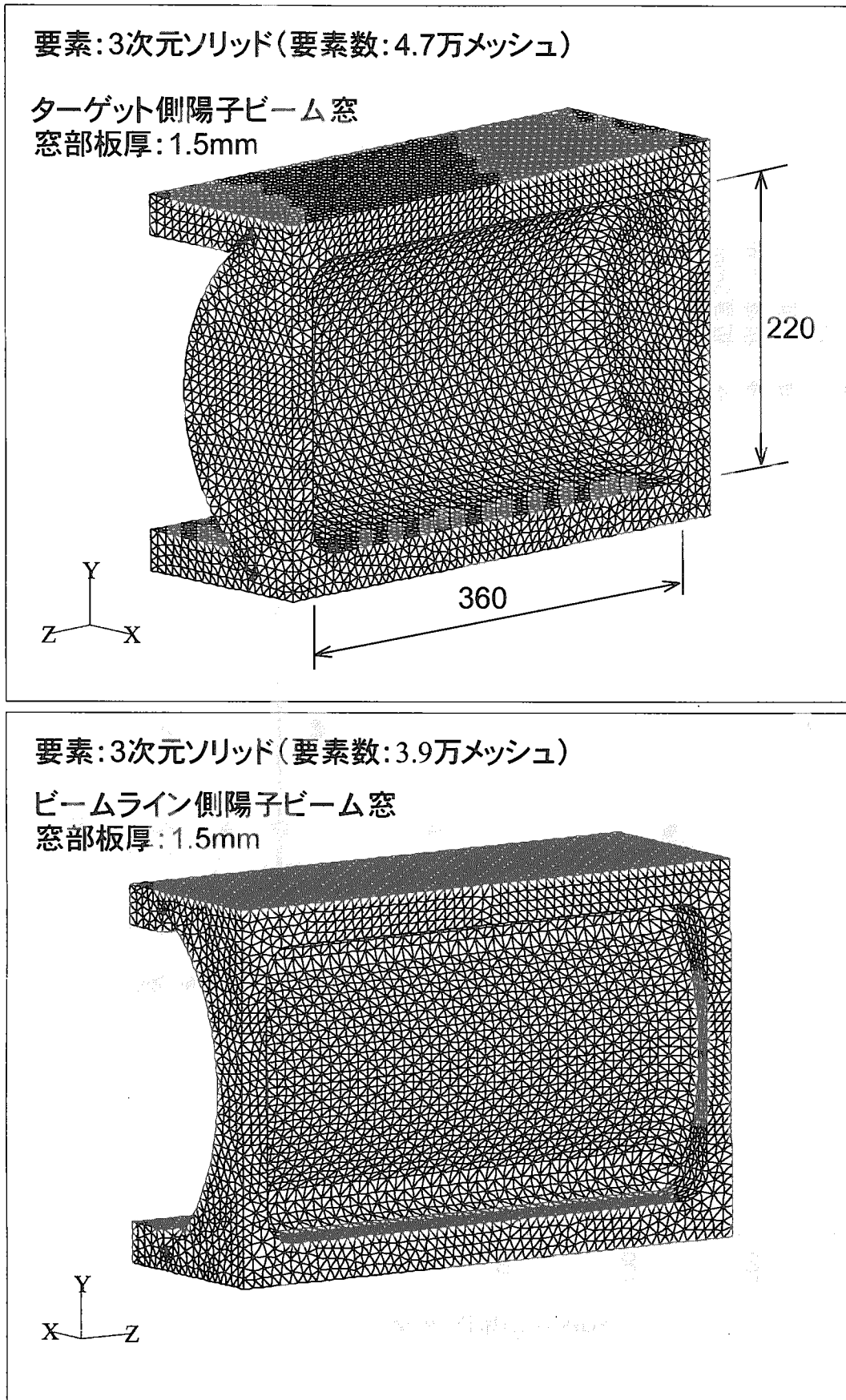


図4.2.2-4 曲面型陽子ビーム窓の分割モデル

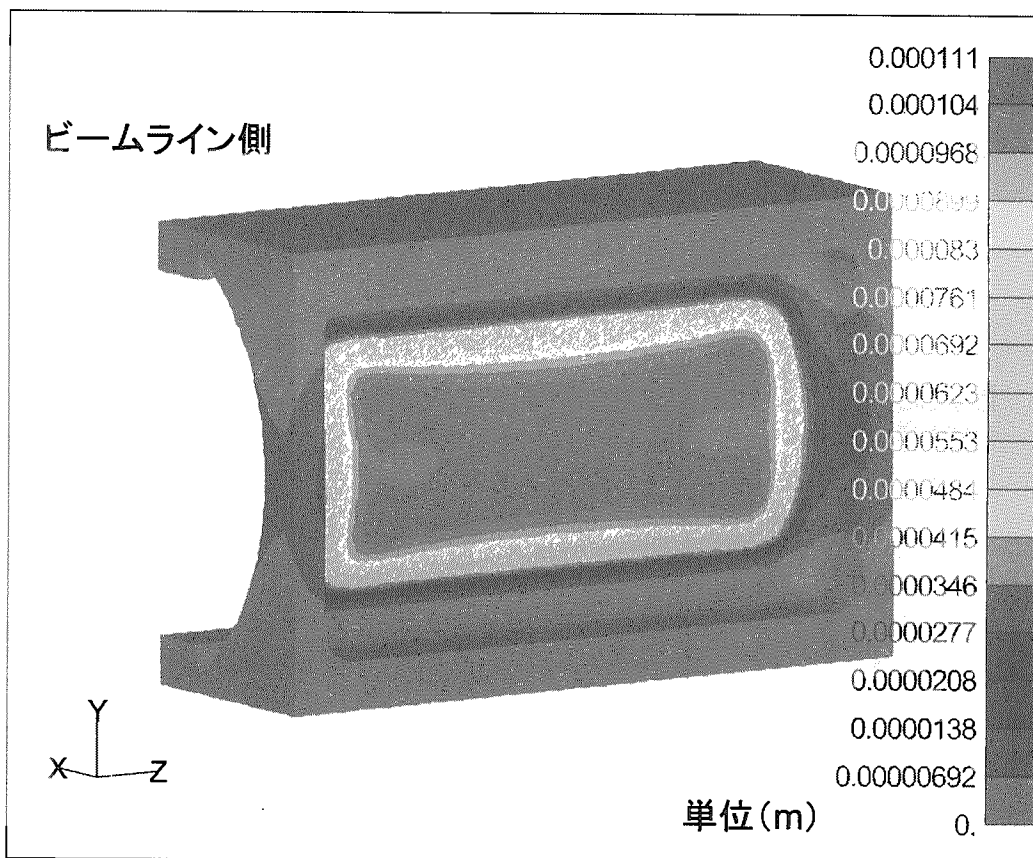
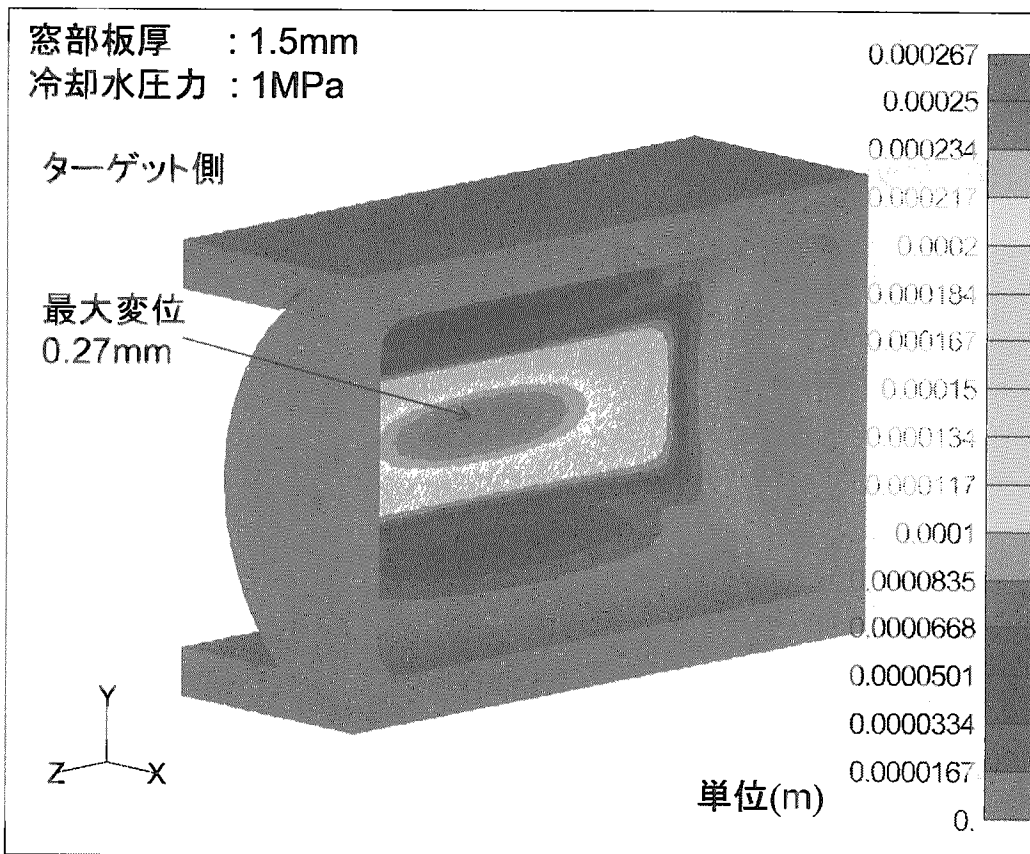


図4.2.2-5 分割モデルによる確認解析 (変位)

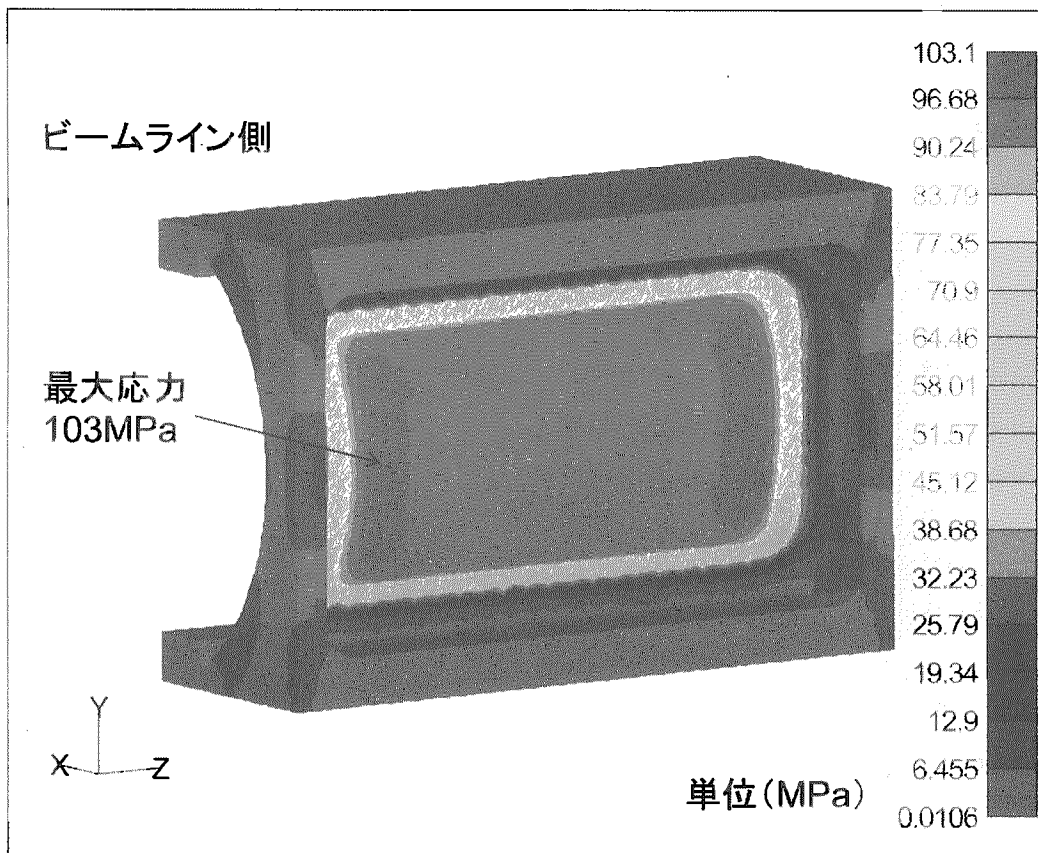
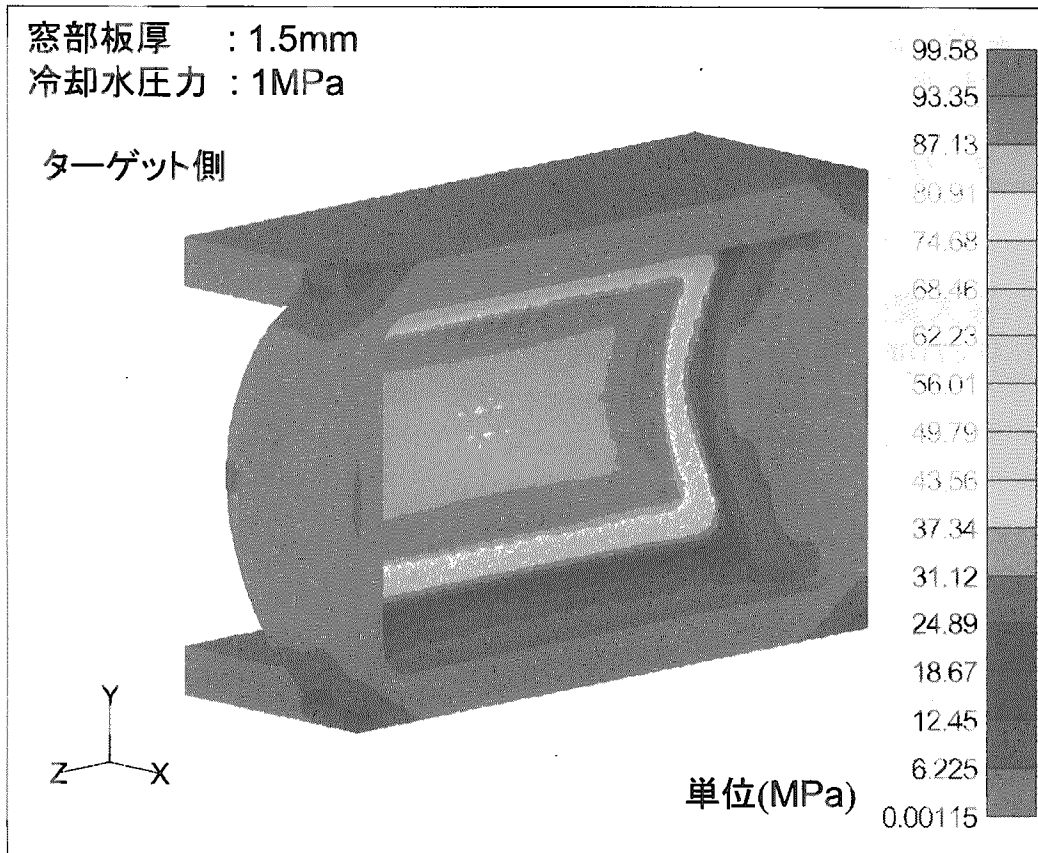


図4.2.2-6 分割モデルによる確認解析 (応力)

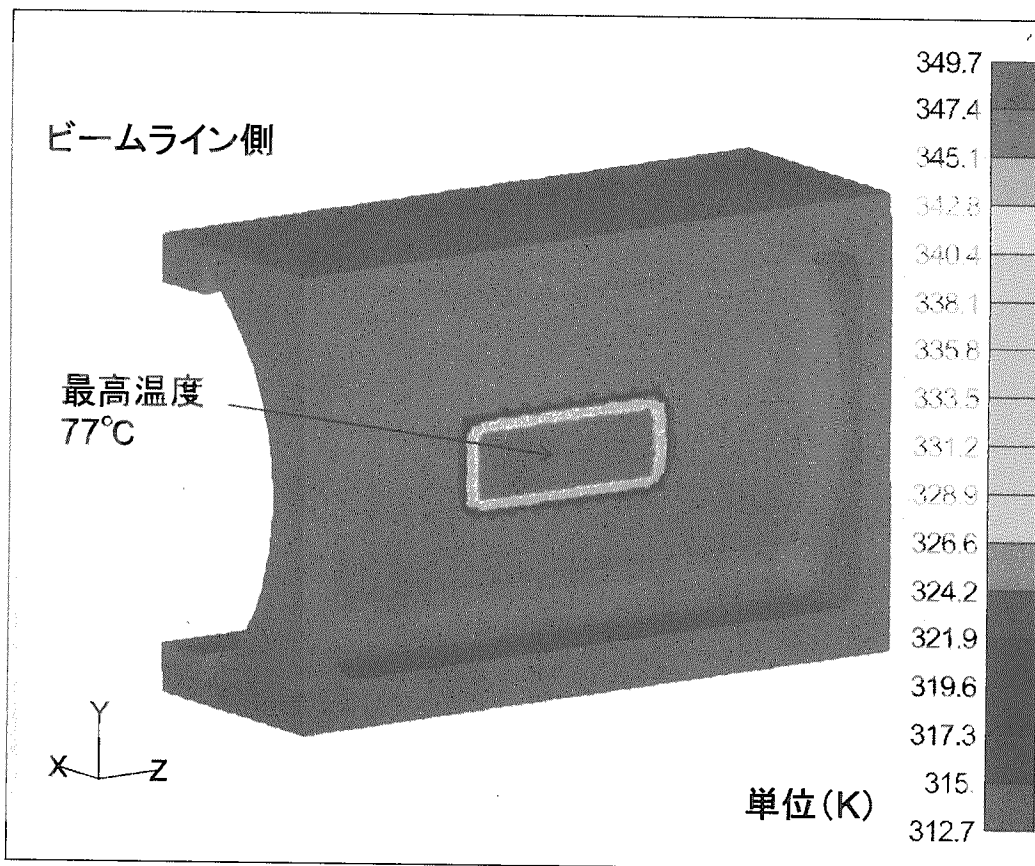
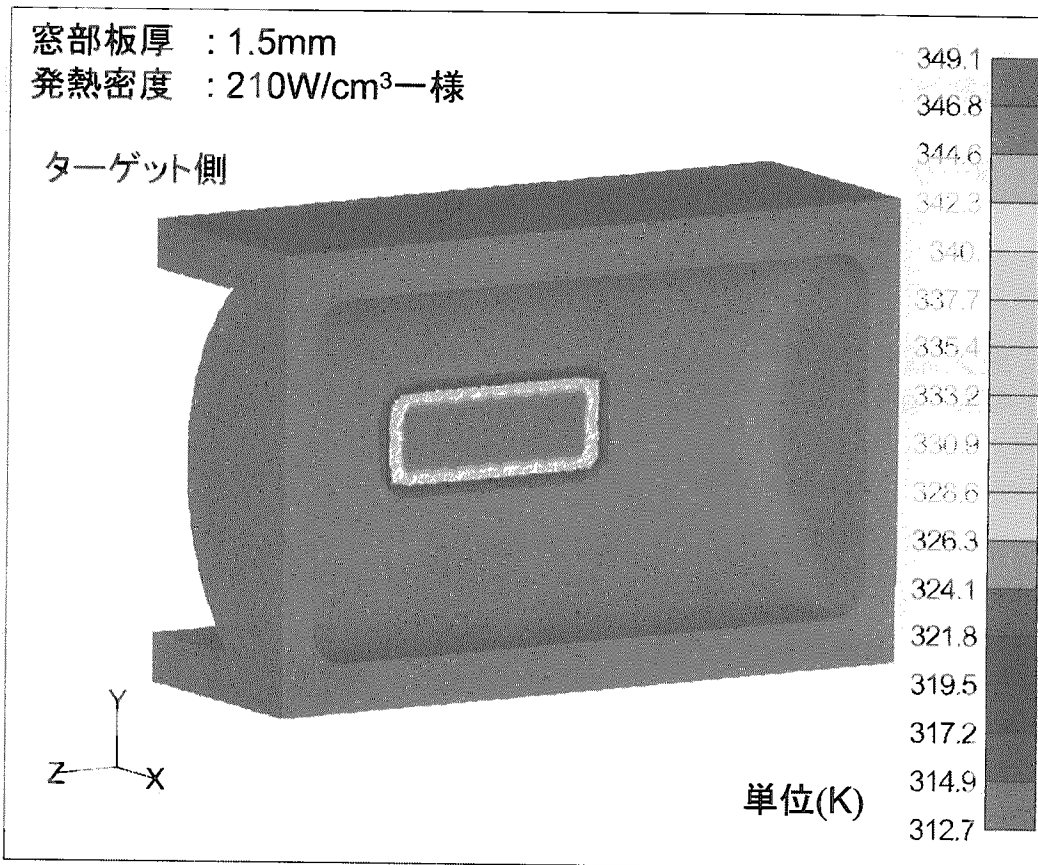


図4.2.2-7 分割モデルによる温度分布解析 (矩形一様分布)

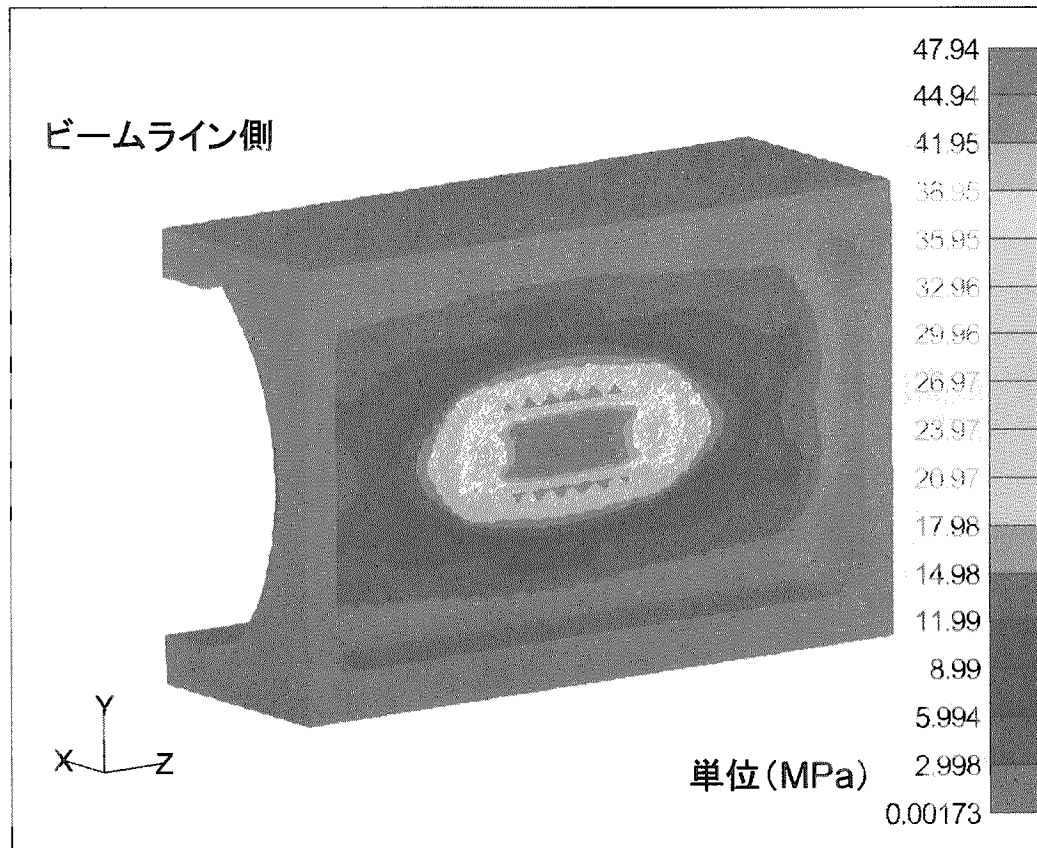
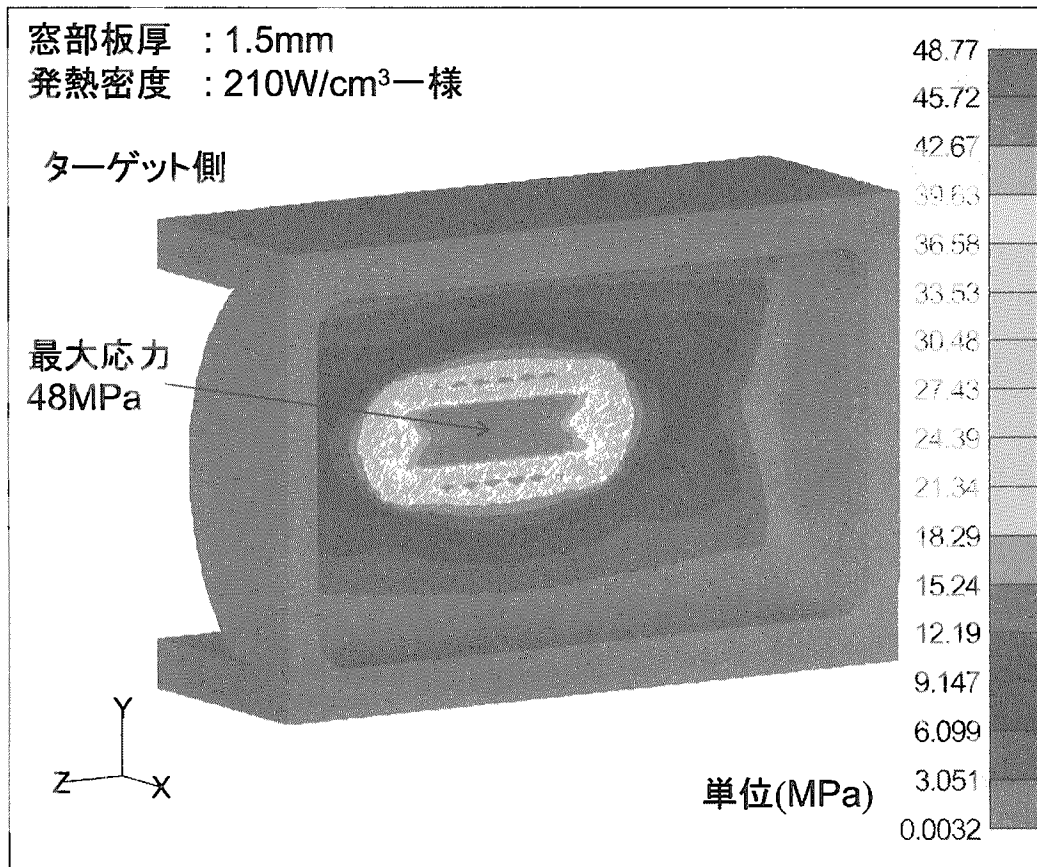


図4.2.2-8 分割モデルによる熱応力解析 (矩形一様分布)

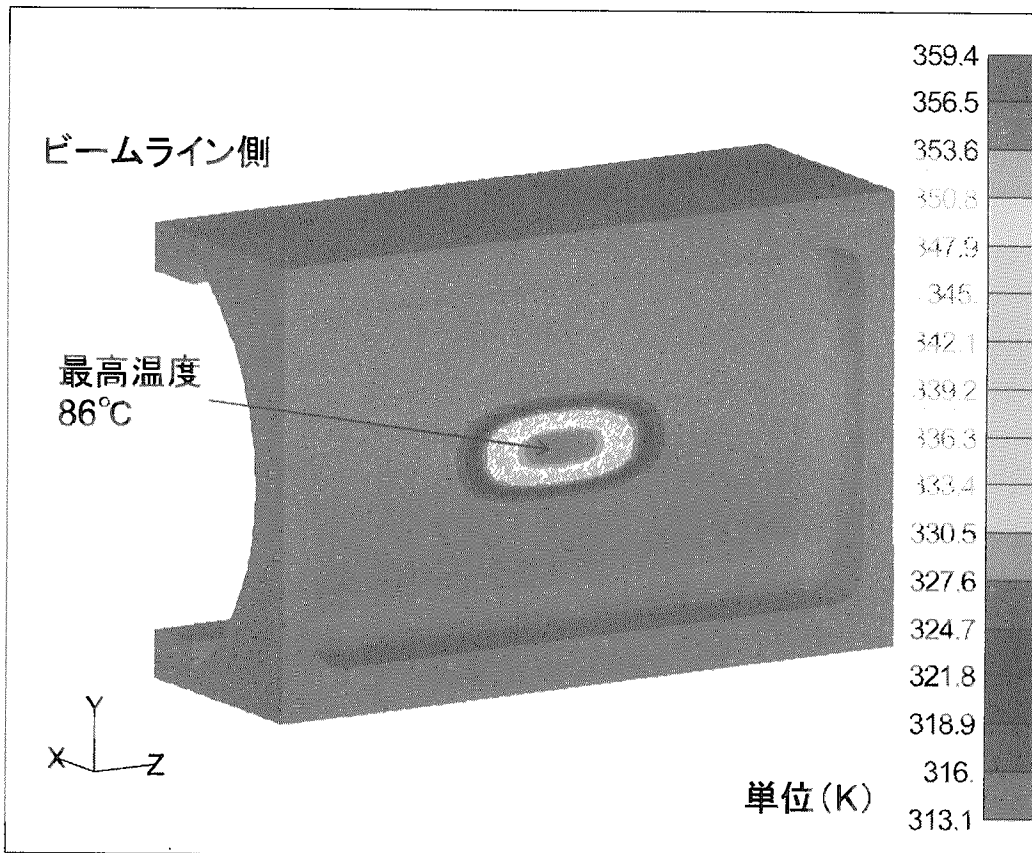
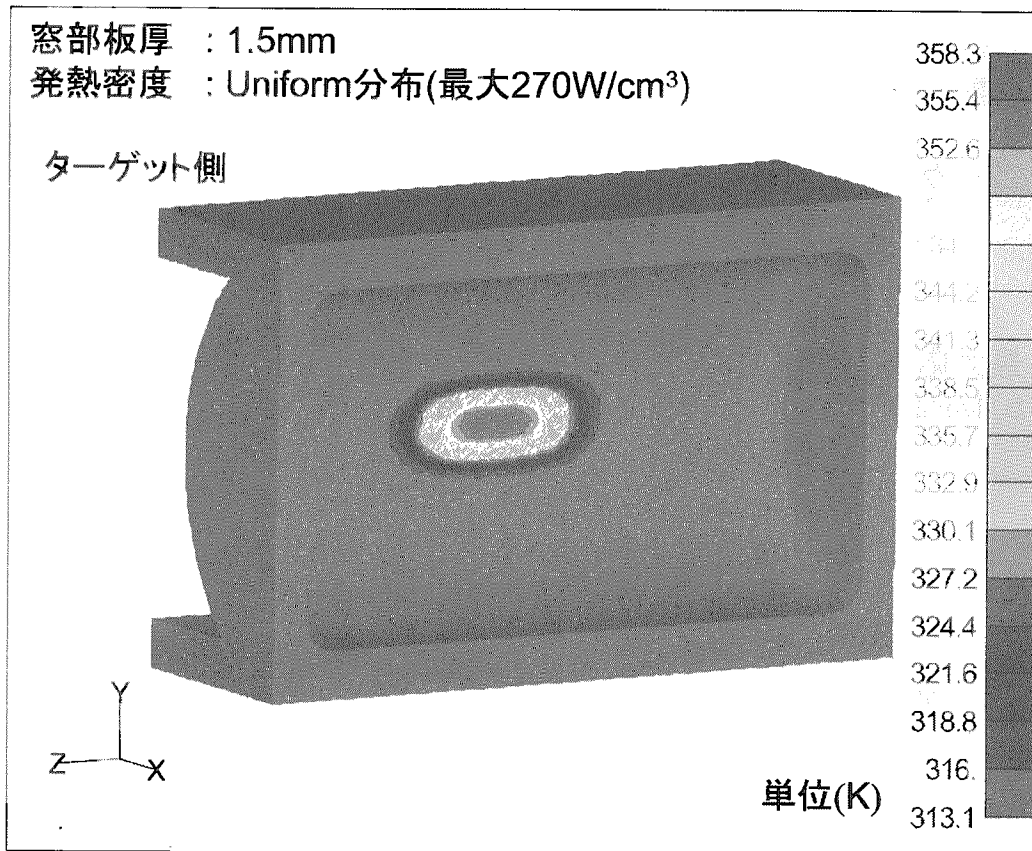


図4.2.2-9 分割モデルによる温度分布解析 (Uniform分布)

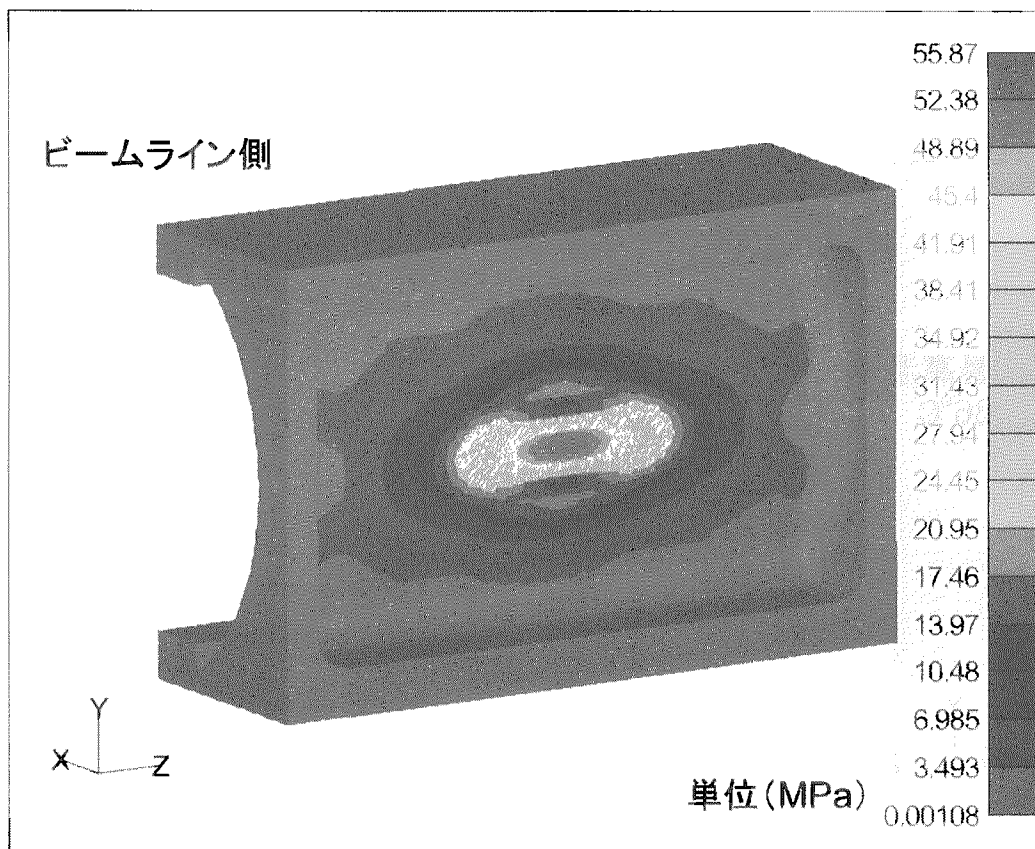
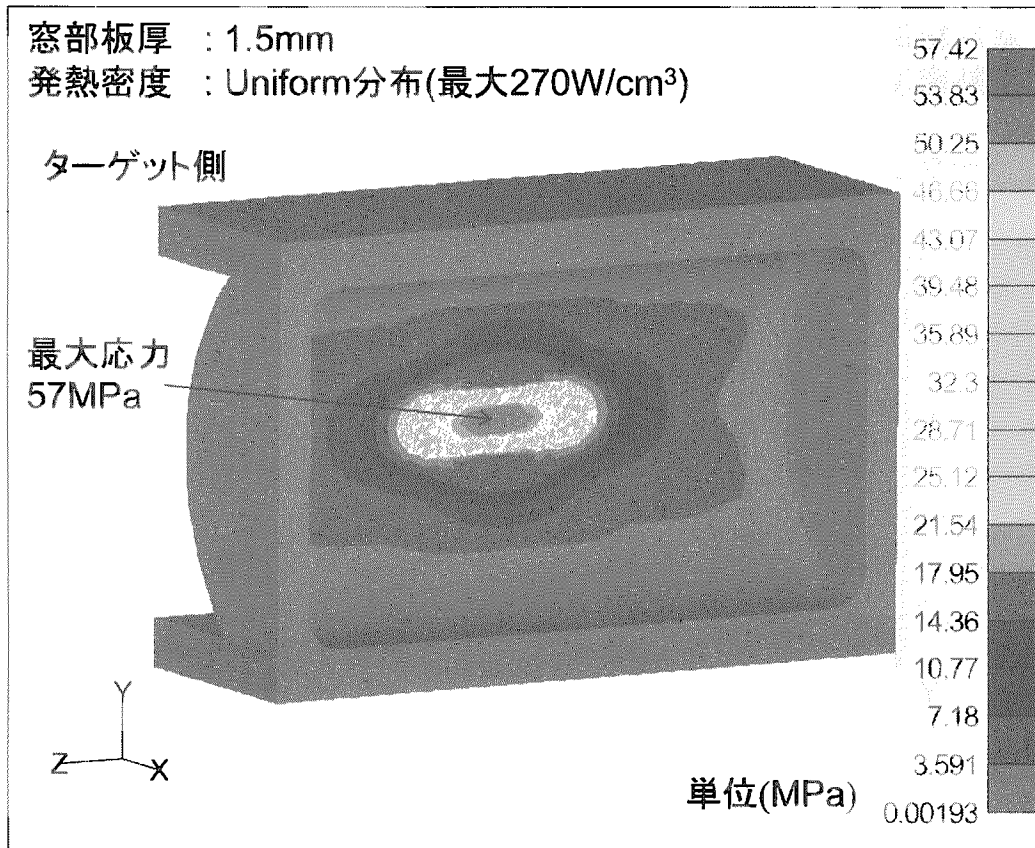


図4.2.2-10 分割モデルによる熱応力解析 (Uniform分布)



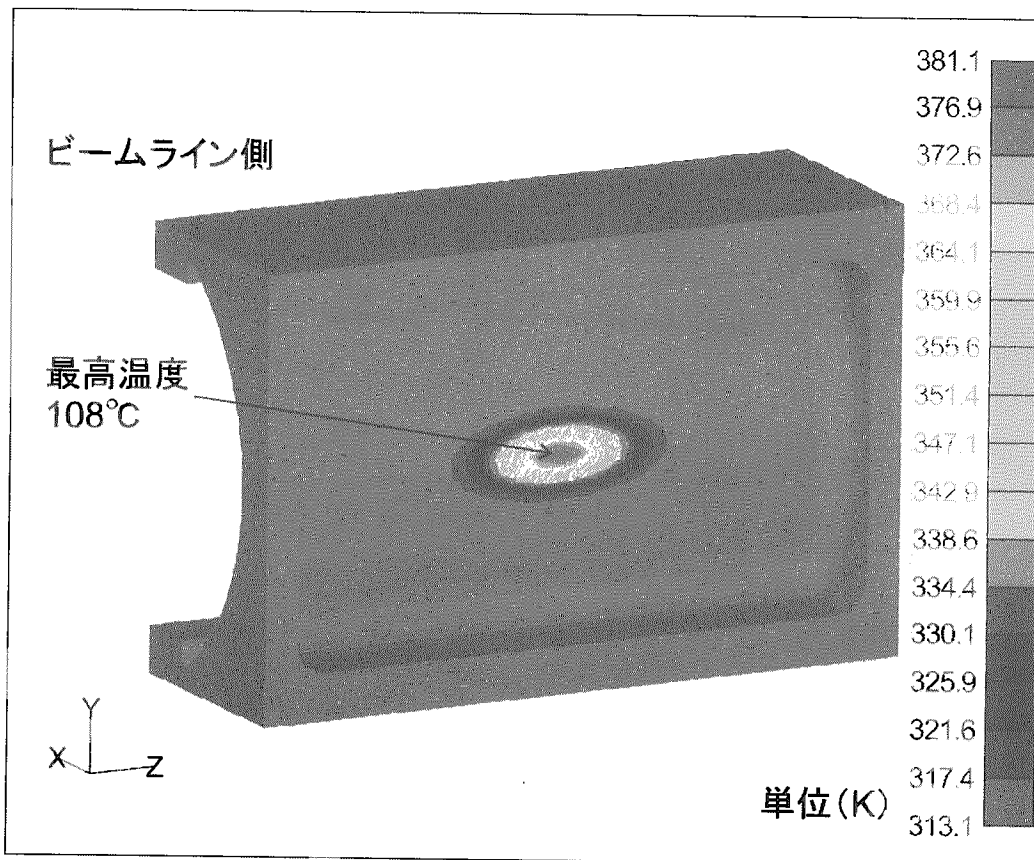
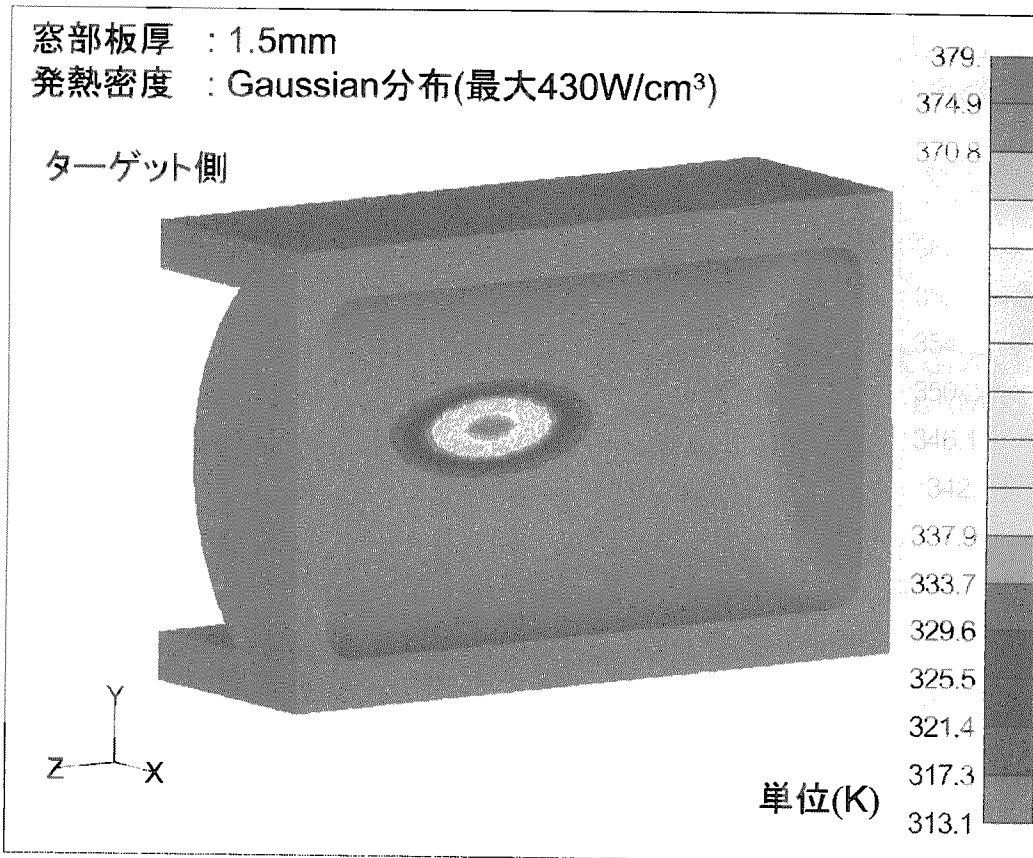


図4.2.2-11 分割モデルによる温度分布解析 (Gaussian分布)

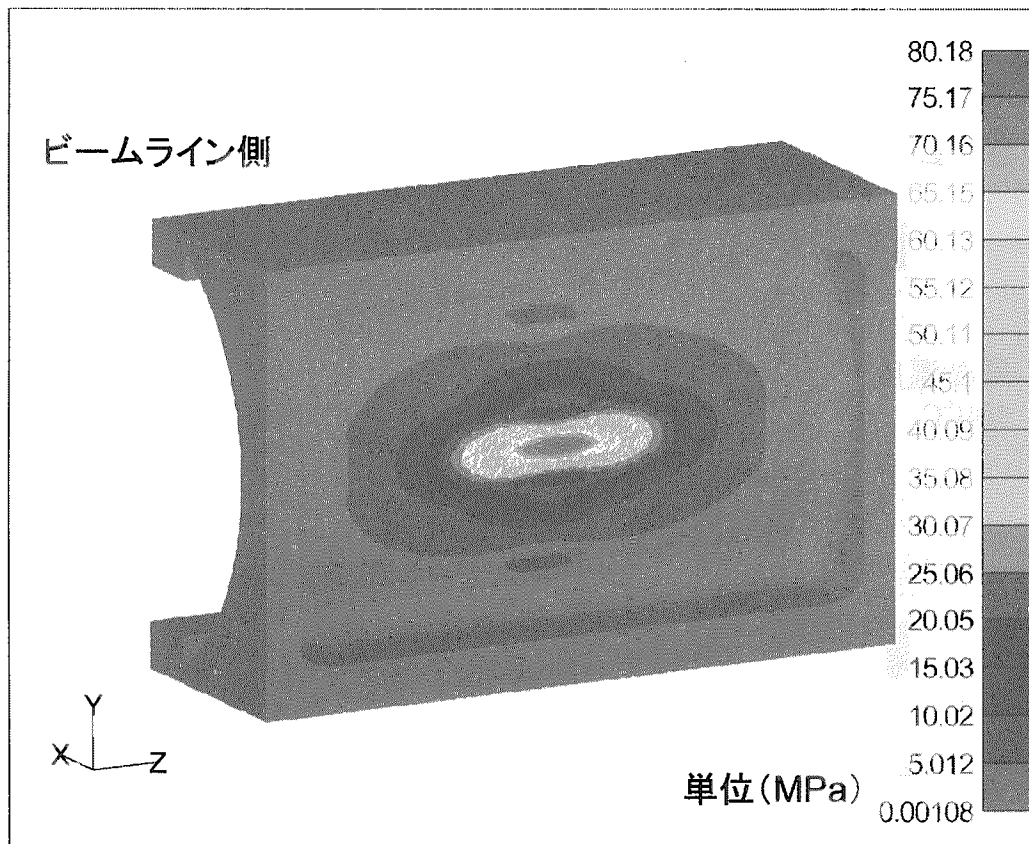
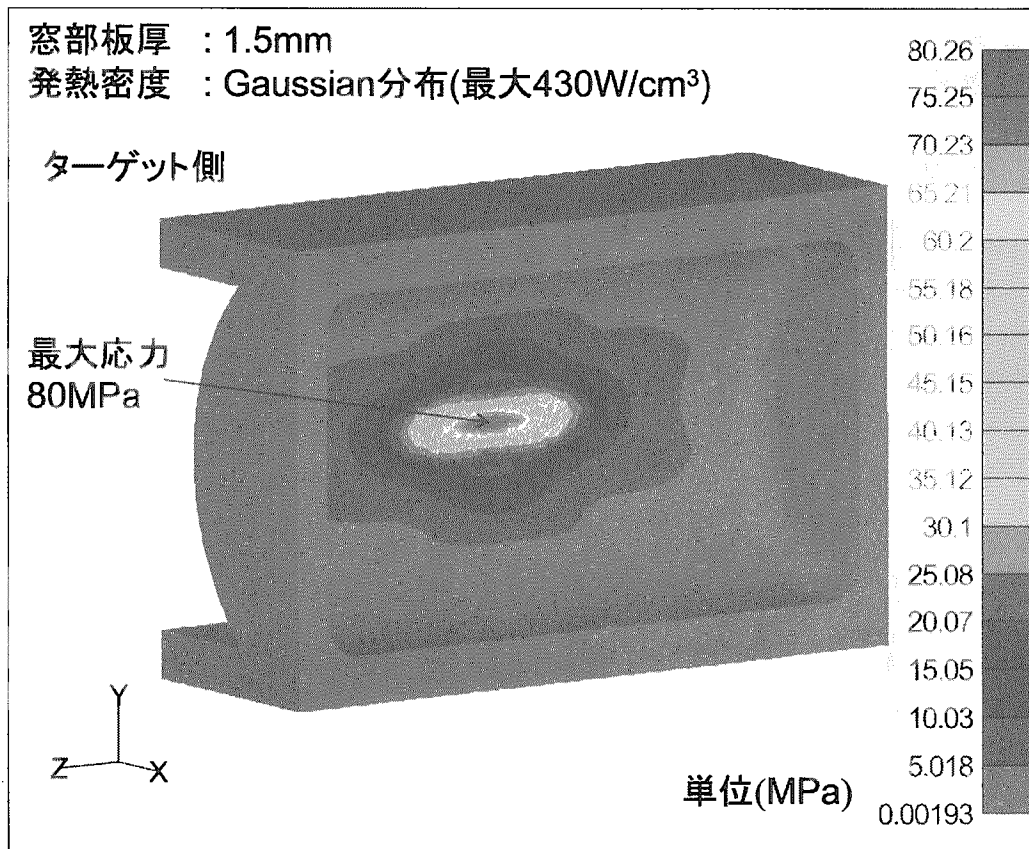
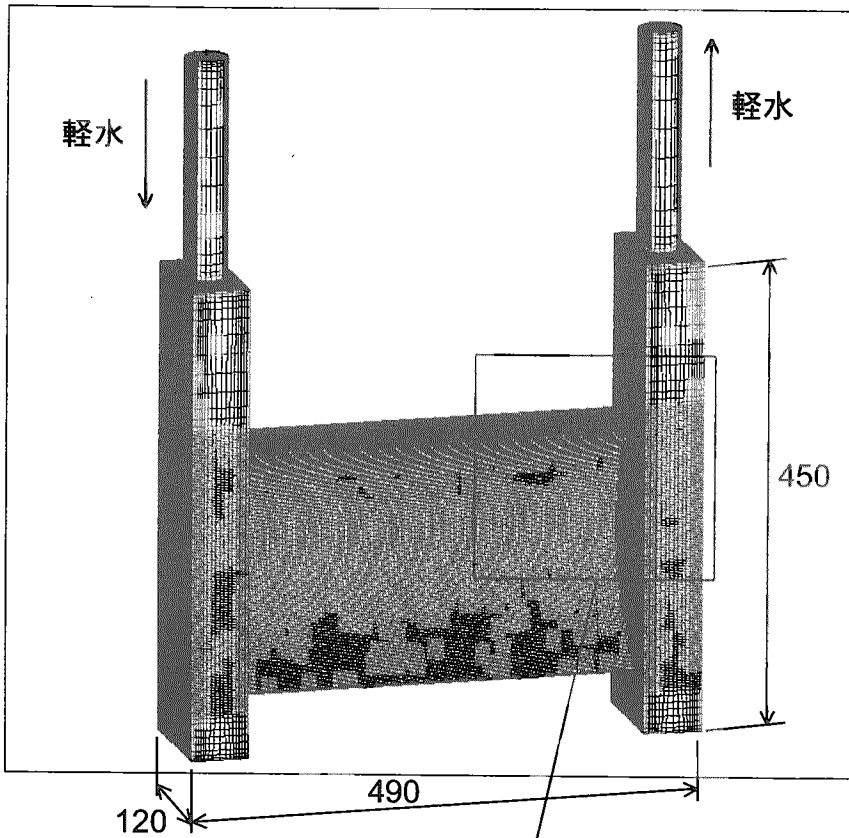


図4.2.2-12 分割モデルによる熱応力解析 (Gaussian分布)

要素数: 74万メッシュ



PROSTAR 3.10

30-JUL-01

VIEW

1.000

-0.268

0.277

ANGLE

-88.033

DISTANCE

0.396

CENTER

1.020

1.005

1.139

EHIDDEN PLOT

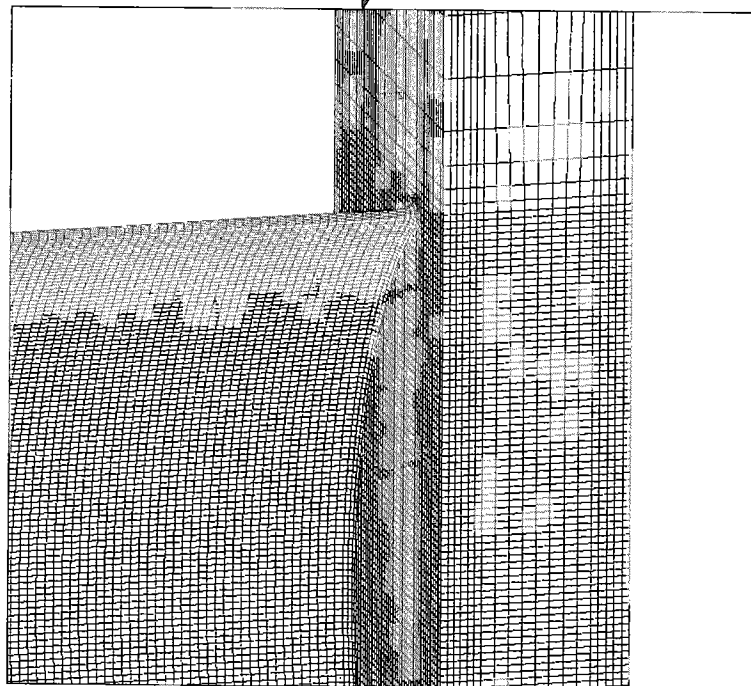
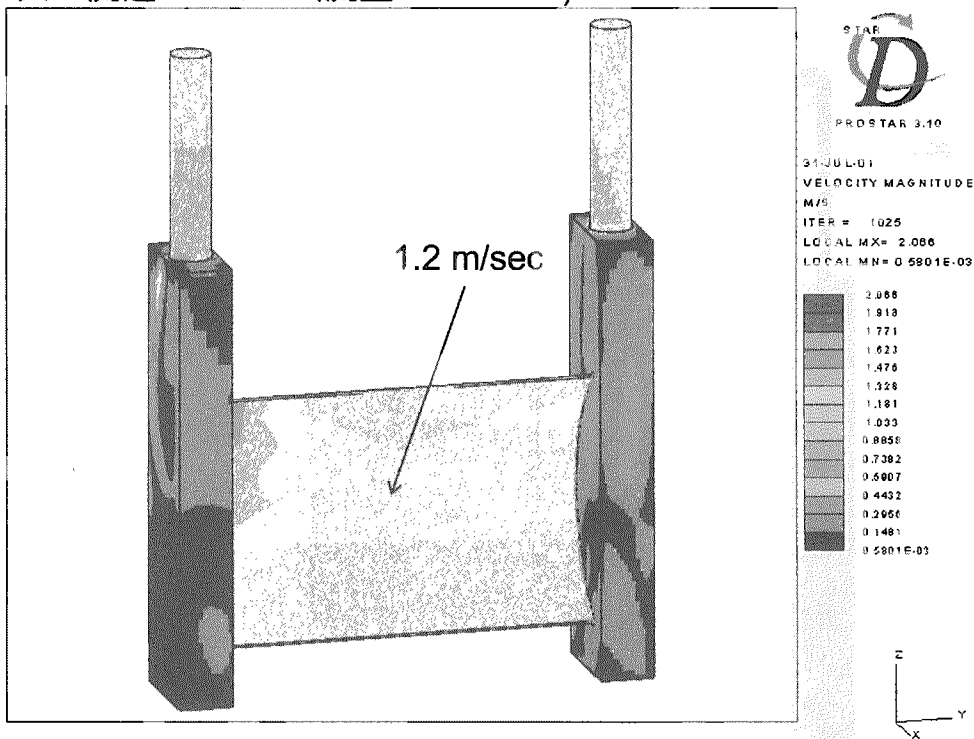


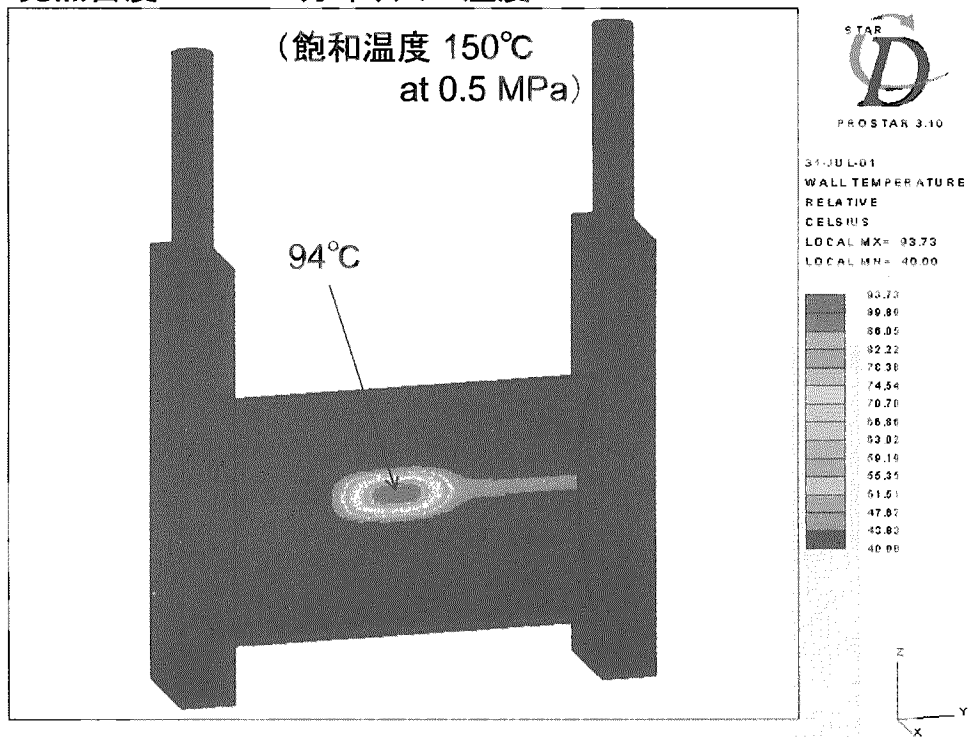
図4.2.2-13 熱流動解析モデル

入口流速: 1 m/sec(流量: 4.8 m<sup>3</sup>/hr)



曲面型モデル流速分布(流路幅3mm)

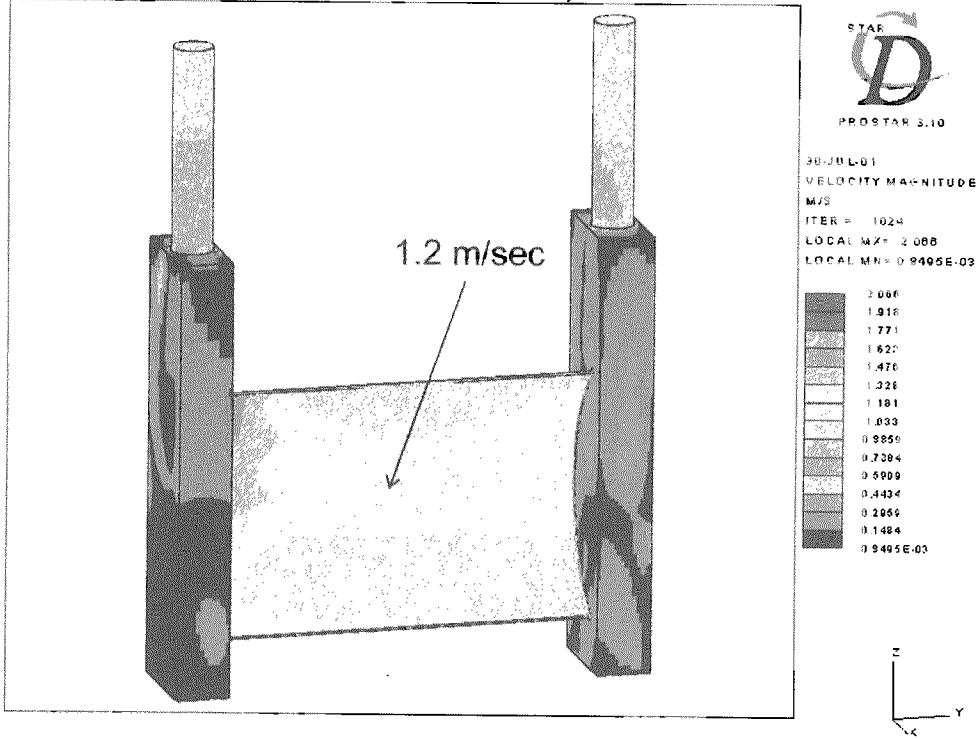
発熱密度: Uniform分布、入口温度: 40°C



曲面型モデル壁温分布(流路幅3mm)

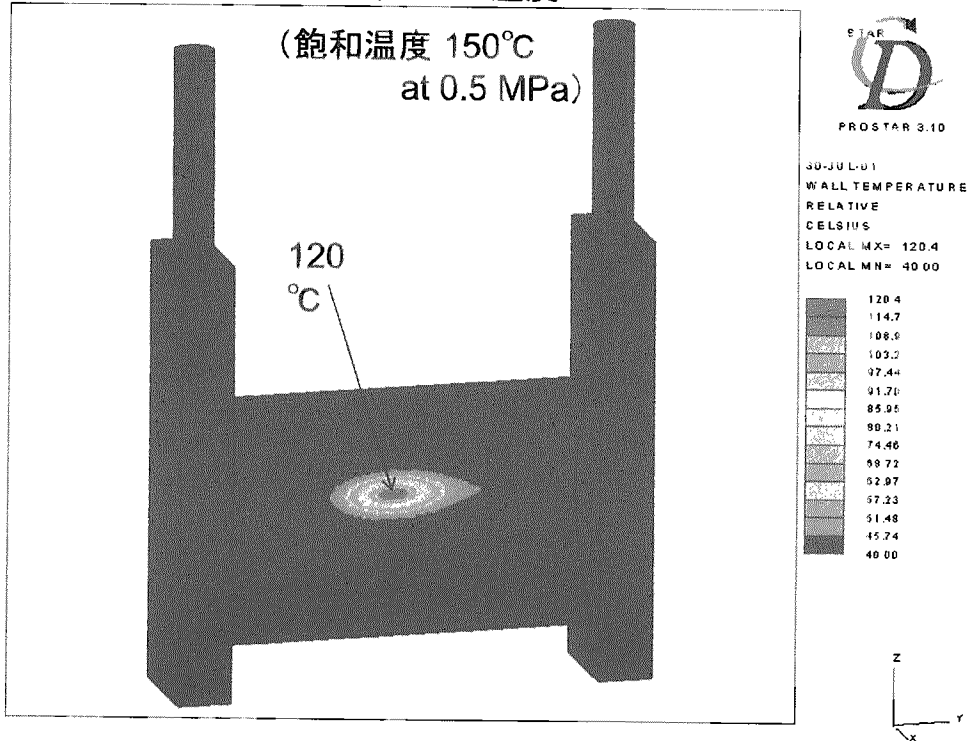
図4.2.2-14 熱流動解析による流速分布  
及び温度分布結果 (Uniform分布)

入口流速: 1 m/sec(流量: 4.8 m<sup>3</sup>/hr)



曲面型モデル流速分布(流路幅3mm)

発熱密度: Gaussian分布、入口温度: 40°C



曲面型モデル壁温分布(流路幅3mm)

図4.2.2-15 熱流動解析による流速分布  
及び温度分布結果 (Gaussian分布)

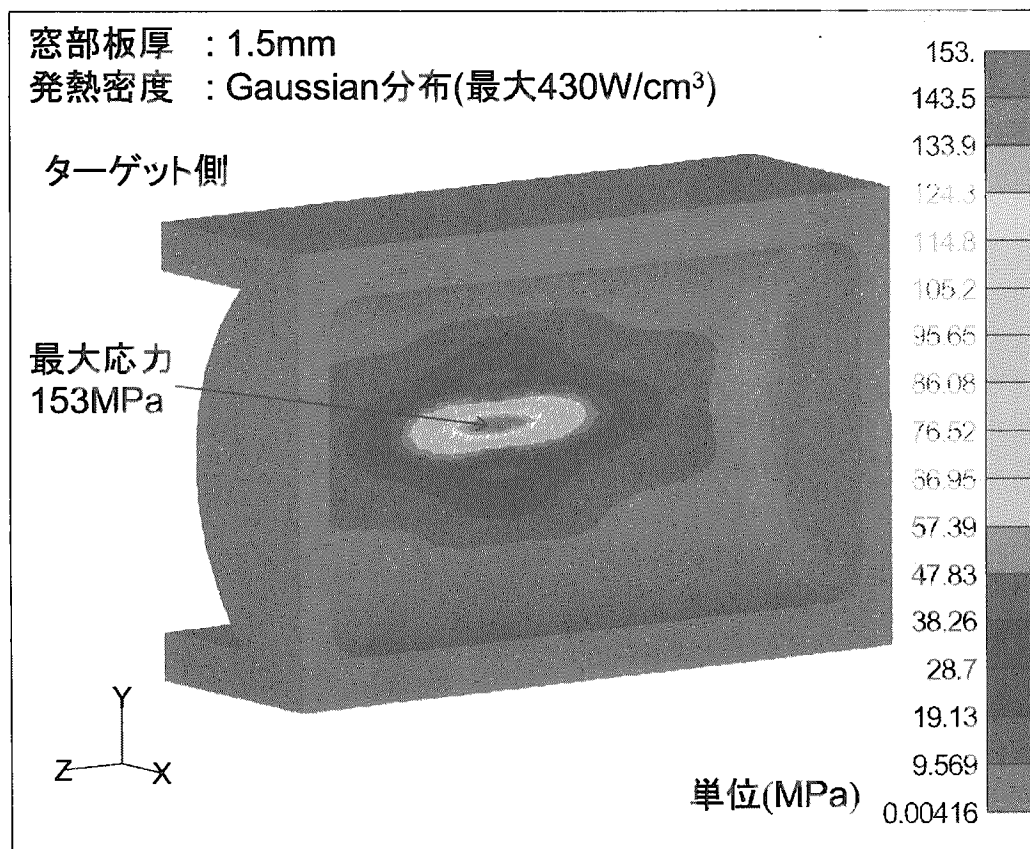
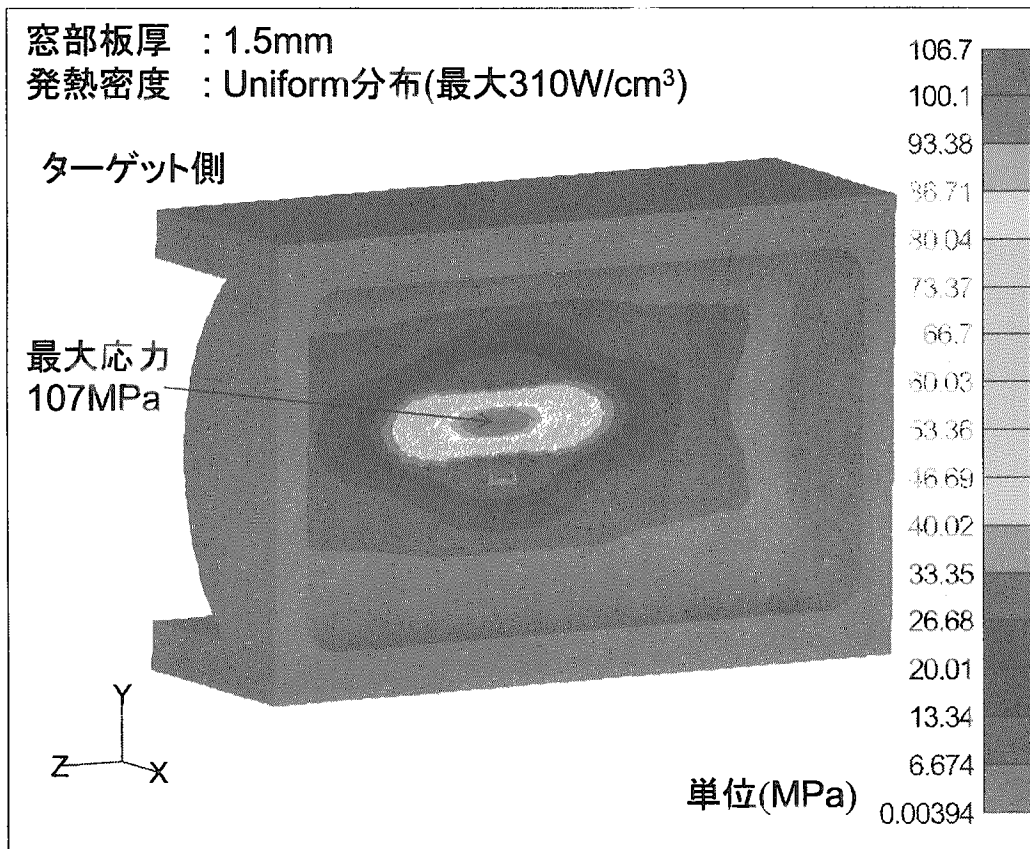


図4.2.2-16 分割モデルによる熱応力解析

## 5. その他の設計検討

### 5. 1 冷却系圧力損失の評価

陽子ビーム窓冷却系全体の圧力損失を計算する。圧力損失は冷却系配管部、陽子ビーム窓本体部及びポンプと本体のヘッド差圧の合計とする。計算結果を表 5-1 に示す。配管径を 41.2mm(1.5B×Sch40 内径)、配管長さを 200m とし、ポンプと本体のヘッド差を 30m、エルボの数を 50 個としエルボ部の形状損失係数を安全側に 1.0 とした。ケース 1 では、配管内流速を 1m/sec とし、ケース 2 では 2m/sec とする。圧力損失は流速が 2m/sec でも 0.6MPa 程度であることから、陽子ビーム窓の冷却水圧力を 1MPa と設定する。

### 5. 2 曲率と板厚の関係

陽子ビーム窓部を円筒形とする場合、陽子ビームにより照射される窓部は中心部と周辺部では板厚が異なるため、この板厚の差を計算した。図 5-1 に、板厚を 1.5mm、曲率を 150mm、200mm 及び 250mm とした場合の板厚変化を示す。曲率を 150mm とすると、中心部板厚との差は、陽子ビーム中心から 25mm のところで 2%、55mm のところで 8% 程度である。陽子ビーム損失の観点から、板厚の違いが 10% 程度であれば影響は少ないと考えられ、陽子ビーム窓の曲率は R150mm とする。

### 5. 3 陽子ビーム窓本体及び交換プラグの温度分布解析

陽子ビーム窓本体及び交換プラグ部の発熱による温度分布を解析により求めた。図 5-2 に陽子ビーム窓機器全体構造概念図を示す。陽子ビーム窓本体及び交換プラグの解析モデルを図 5-3 に示す。解析条件を以下に示す。

#### (1) 解析モデル (3次元ソリッド要素)

- 1) 陽子ビーム窓本体  
窓、プレナム及びピローシールドダクトをモデル化
- 2) 交換プラグ  
上部フランジ、鉄遮蔽体、本体サポート、  
陽子ビーム窓受台及びラフガイドをモデル化

#### (2) 固定方法

- ・プレナム側面の本体固定ピンを固定
- ・上部フランジ下面 4 点及び受台付根部を完全固定

#### (3) 解析条件

- 1) 発熱密度
  - a. 窓、プレナム                    ・・・ 0.3W/cc 一定
  - b. 上流側ダクト                    ・・・ 0.02~0.06W/cc
  - c. 下流側ダクト                    ・・・ 0.06~0.14W/cc
  - d. 交換プラグ                      ・・・ 0.0001~0.01W/cc

e. 受台、ラフガイド . . . 0.002~0.01W/cc

## 2) 熱伝達

a. 水冷部熱伝達率 (流体温度 40℃)

窓部 9000W/m<sup>2</sup>K、プレナム部 1000W/m<sup>2</sup>K

b. 空気雰囲気 (自然対流熱伝達)

ダクト、交換プラグ及び受台の外表面

5W/m<sup>2</sup>K、流体温度 40℃

c. 真空雰囲気

窓部外表面及びダクト内表面を断熱とする。

(下流側も安全側に断熱とする。)

本結果を図 5-4 に示す。陽子ビーム窓本体では、真空側のフランジ下部が最高温度 185℃、交換プラグでは、下部遮蔽体部が最高温度 68℃となり、材料の使用温度としては問題ないと考えられる。

実際には、解析に反映していない空冷による熱除去効果が期待できるので、本結果は非常に保守的な値と言える。

## 5. 4 陽子ビーム窓交換プラグの耐震解析

陽子ビーム窓交換プラグを三次元シェル要素でモデル化し、内部の鉄遮蔽体を考慮した耐震解析を実施した。解析モデル図及び解析結果を図 5-5 に示す。Case 1 では、自重による応力、Case 2 では、自重+水平荷重 (0.4G) による応力を求めた。最大変位量は 0.4mm、Mises 相当応力は最大 35MPa となり、構造強度的に問題ないことを確認した。

## 5. 5 SNS 陽子ビーム窓との比較

図 5-6 に SNS の陽子ビーム窓構造図、図 5-7 に日本と SNS の陽子ビーム窓構造を比較した図を示す。SNS のビーム窓部は日本のそれに比べ小さいことが分かる。そのため、周辺部遮蔽体が水冷構造となっていると考えられる。



表5-1 陽子ビーム窓冷却系圧力損失計算

			case01 注3	case02
軽水物性値				
密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	996.5	996.5
粘性係数	$\mu$	Ns/m <sup>2</sup>	8.65E-04	8.65E-04
動粘性係数	$\nu (= \mu / \rho)$	m <sup>2</sup> /s	8.68E-07	8.68E-07
重力加速度	$g$	m/s <sup>2</sup>	9.80665	9.80665
入力値				
配管径(1.5BXSch40)	Di	m	4.12E-02	4.12E-02
管内流速	$v$	m/s	1	2
配管長さ	L	m	200	200
エルボの数 注1	n	-	50	50
急縮小の数	n1	-	3	3
急拡大の数	n2	-	3	3
圧力損失係数の計算				
n1*0.5			1.5	1.5
n2*1.0			3	3
n*1.0			50	50
形状損失係数(n1*0.5+n2*1.0+n*1.0)			54.5	54.5
Re(=vDi/ $\nu$ )			4.75E+04	9.49E+04
$\lambda$ (Re<10 <sup>5</sup> or Re>10 <sup>5</sup> ) 注2			0.0214	0.0180
摩擦損失係数( $\lambda L/Di$ )			104.06	87.50
係数合計			158.56	142.00
$\rho v^2/2g$		kg/m <sup>2</sup>	50.81	203.23
冷却系配管部圧力損失		MPa	0.082	0.294
陽子ビーム窓本体部圧力損失		MPa	0.010	0.010
ポンプと本体のヘッド差圧		MPa	0.300	0.300
圧力損失合計		MPa	0.392	0.604

注1) エルボ部の形状損失係数は安全側に1.0(1ヶ所)とした。

注2) 管摩擦係数 $\lambda$ の算出式は以下とした。

$$\text{Re} < 10^5 \quad \lambda = 0.3164 / \text{Re}^{1/4} \quad (\text{ブラジウスの式})$$

$$\text{Re} > 10^5 \quad \lambda = 0.0032 + 0.221 \text{Re}^{-0.237} \quad (\text{ニコラツェの式})$$

注3) 計算内容は、case01をリファレンスとし、case02で黒枠の数値を変えた。

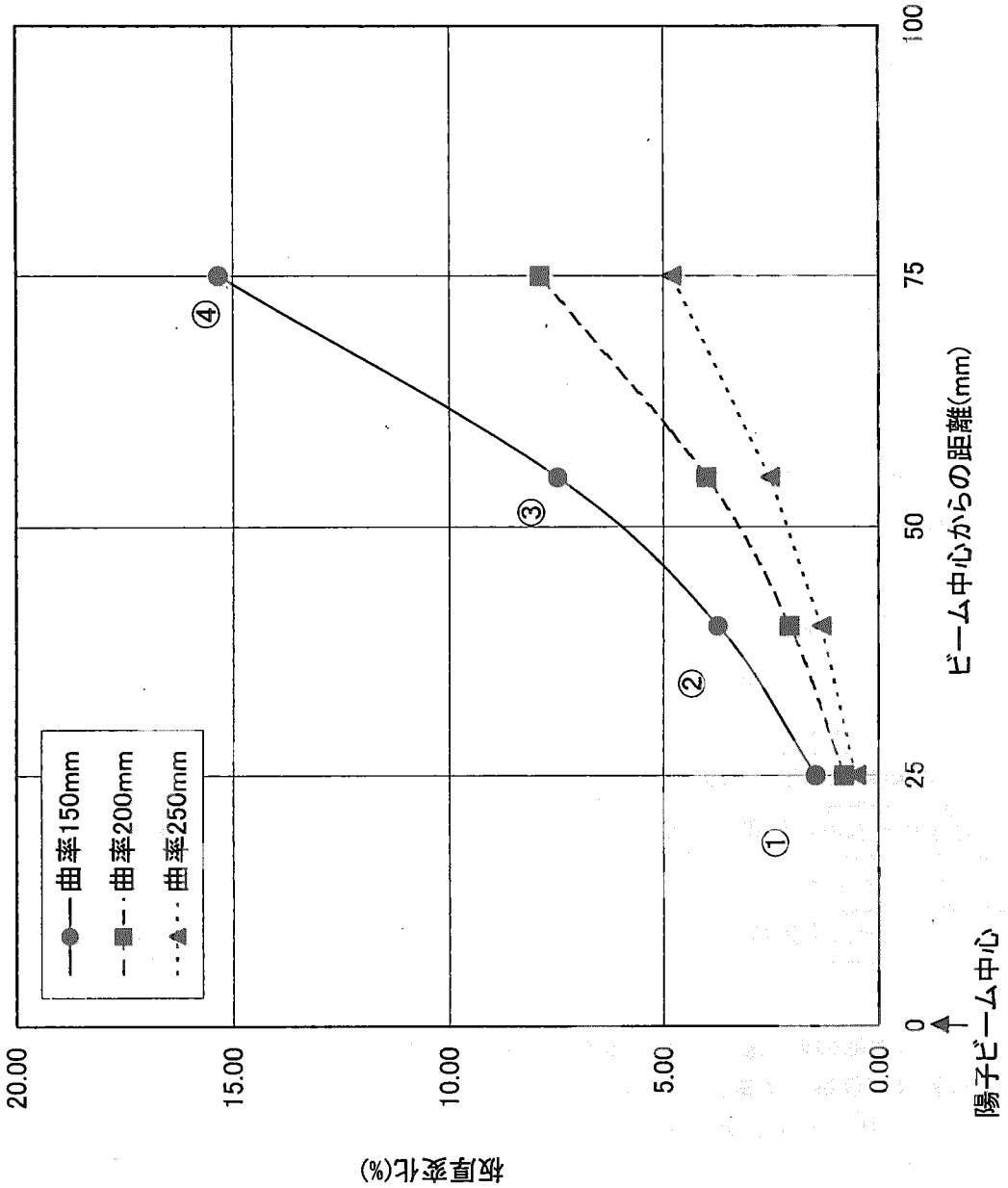
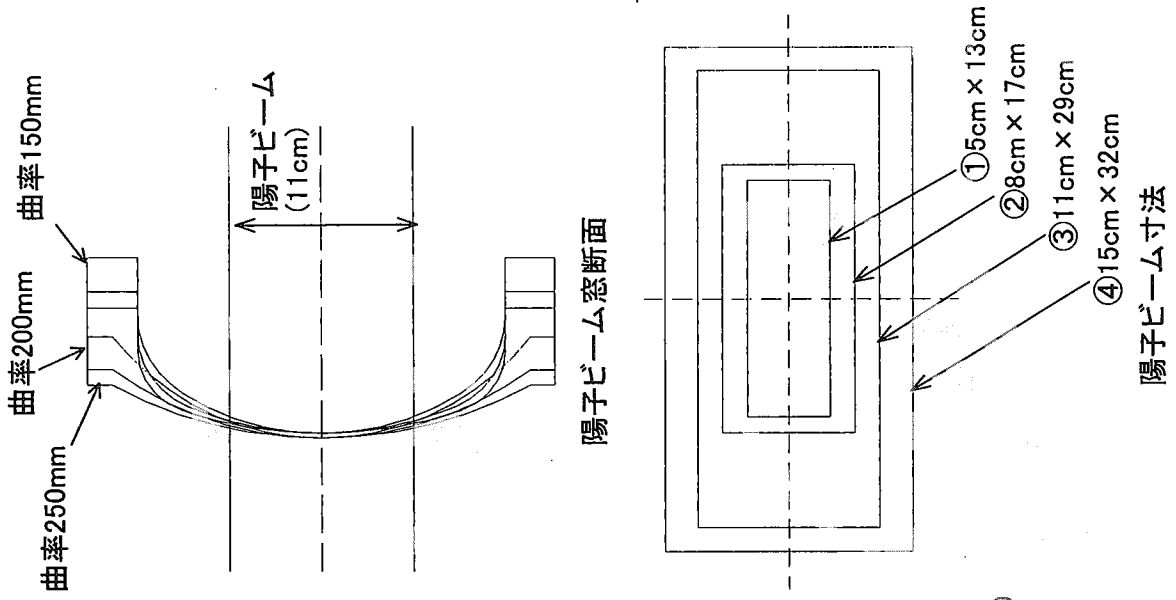


図5-1 曲率と板厚変化(板厚1.5mm)

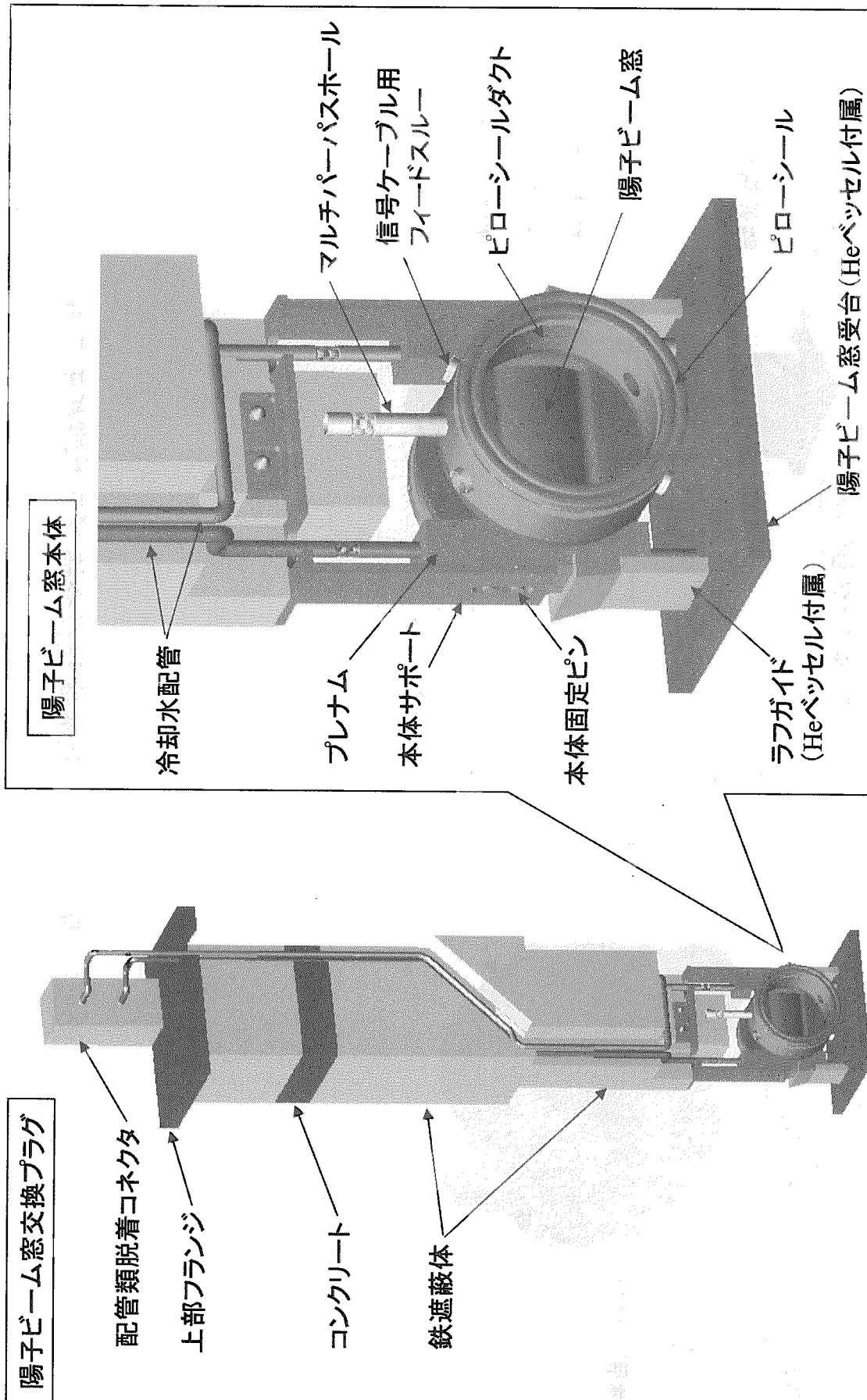


図5-2 陽子ビーム窓機器全体構造概念図

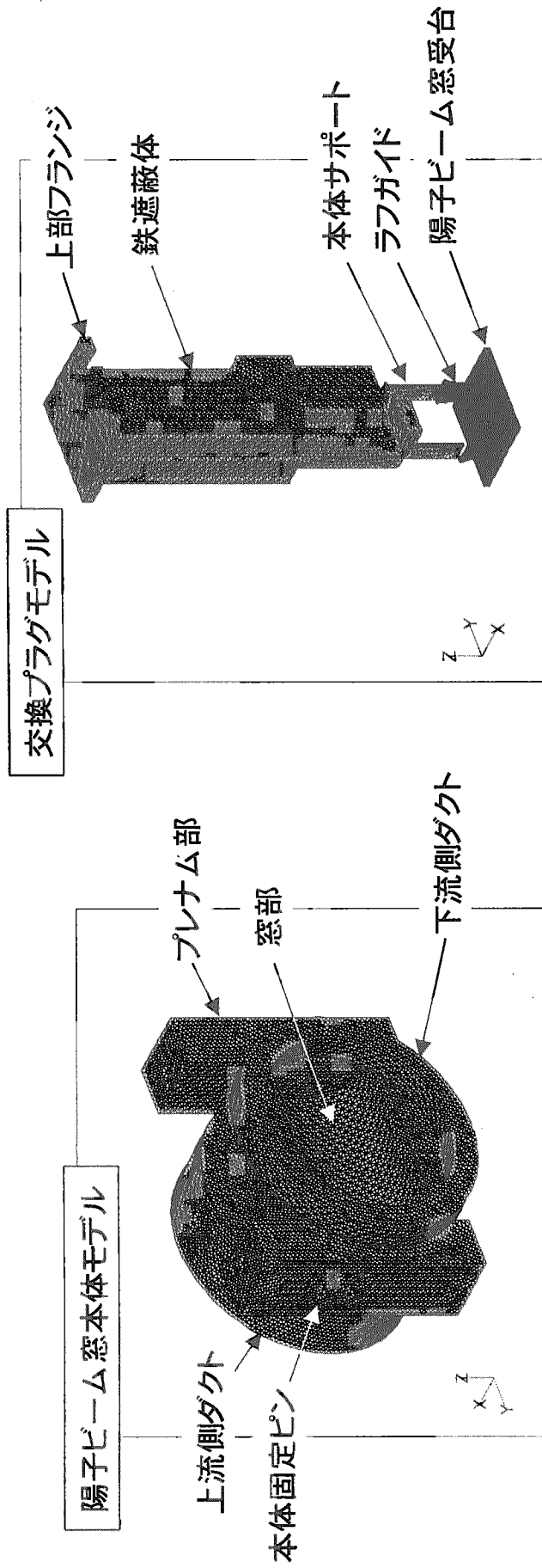


図5-3 陽子ビーム窓本体及び交換プラグ解析モデル

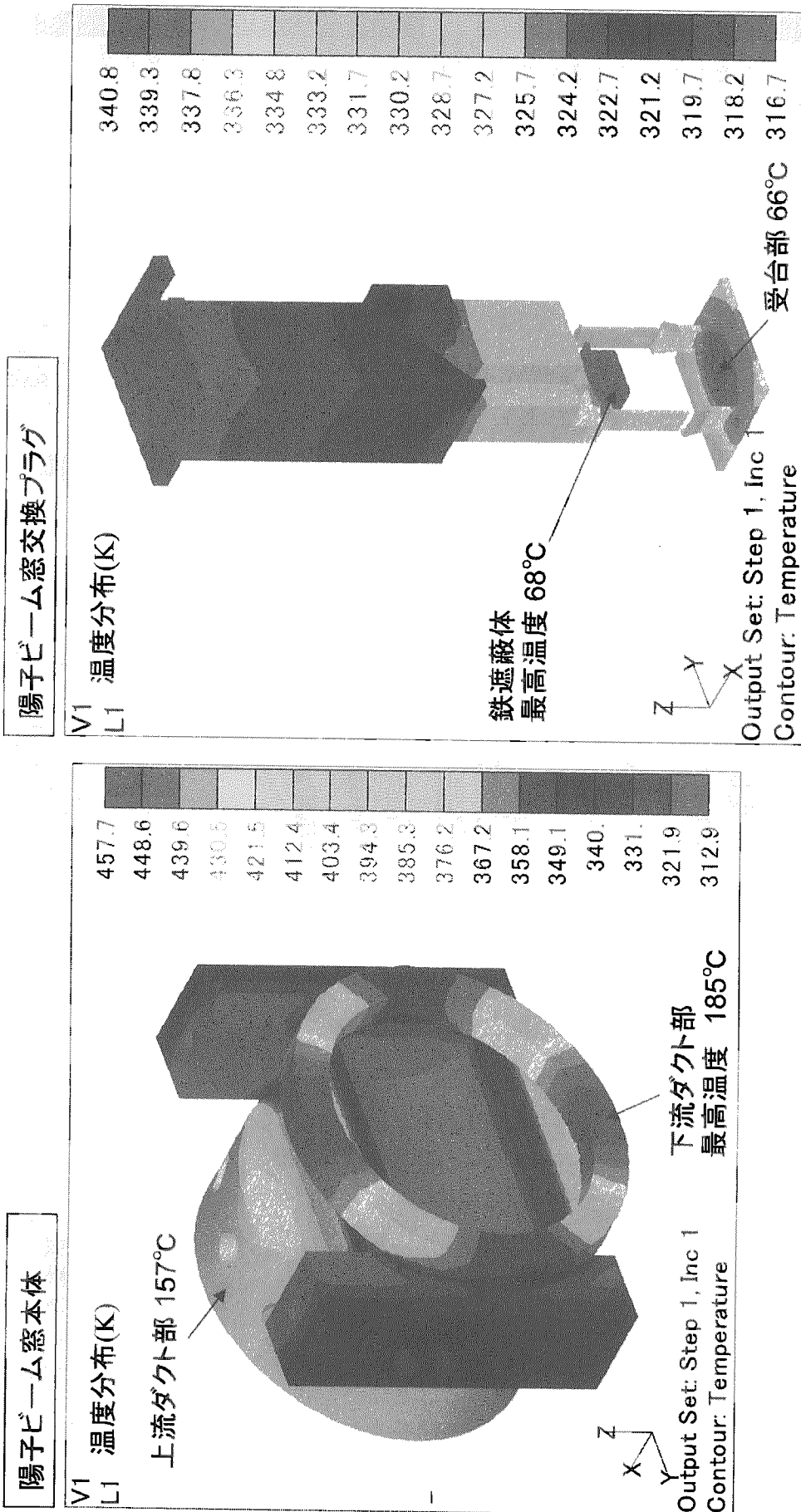


図5-4 陽子ビーム窓本体及び交換プラグ温度分布

- 解析結果 -

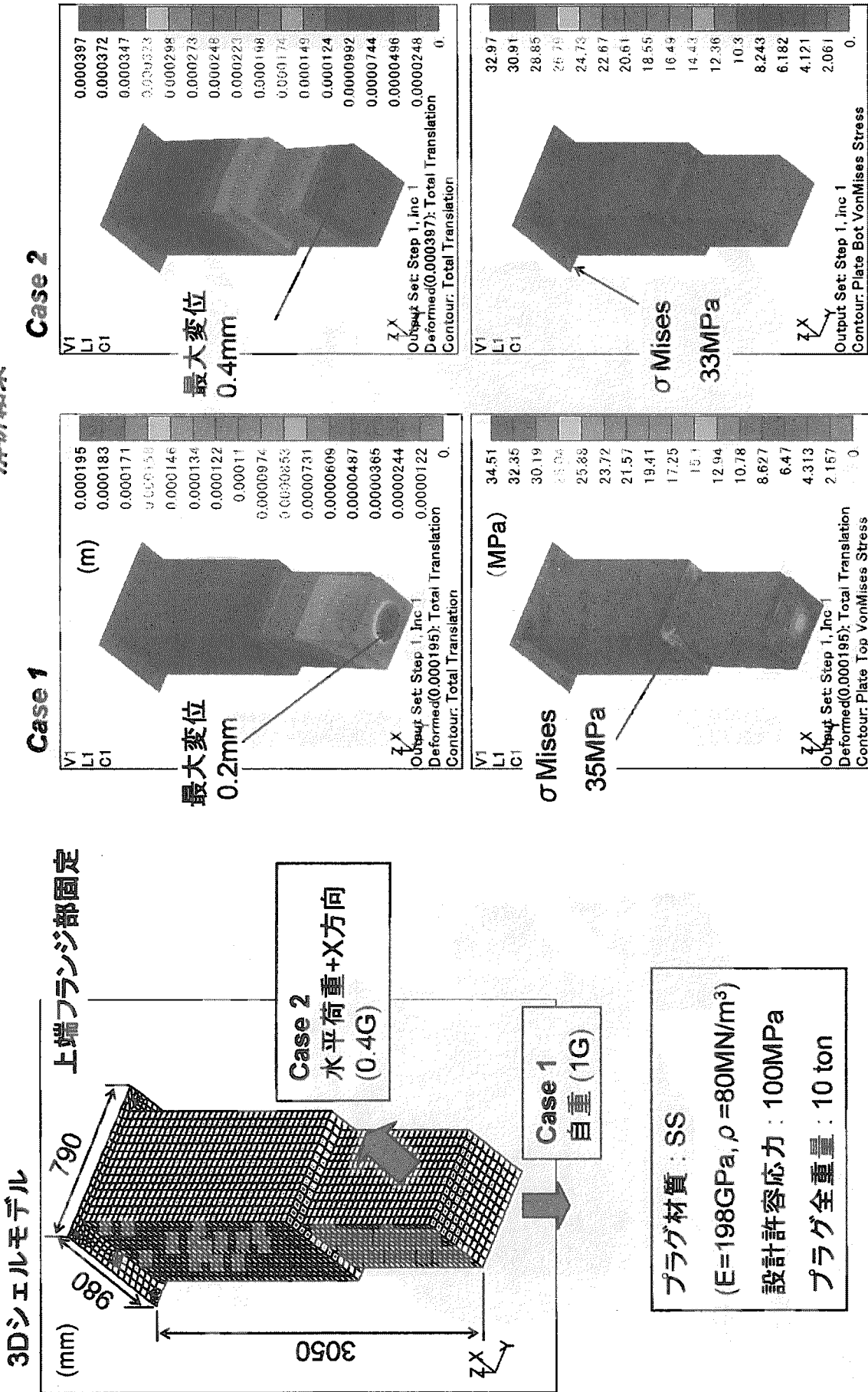


図5-5 陽子ビーム窓交換プラグ耐震解析結果

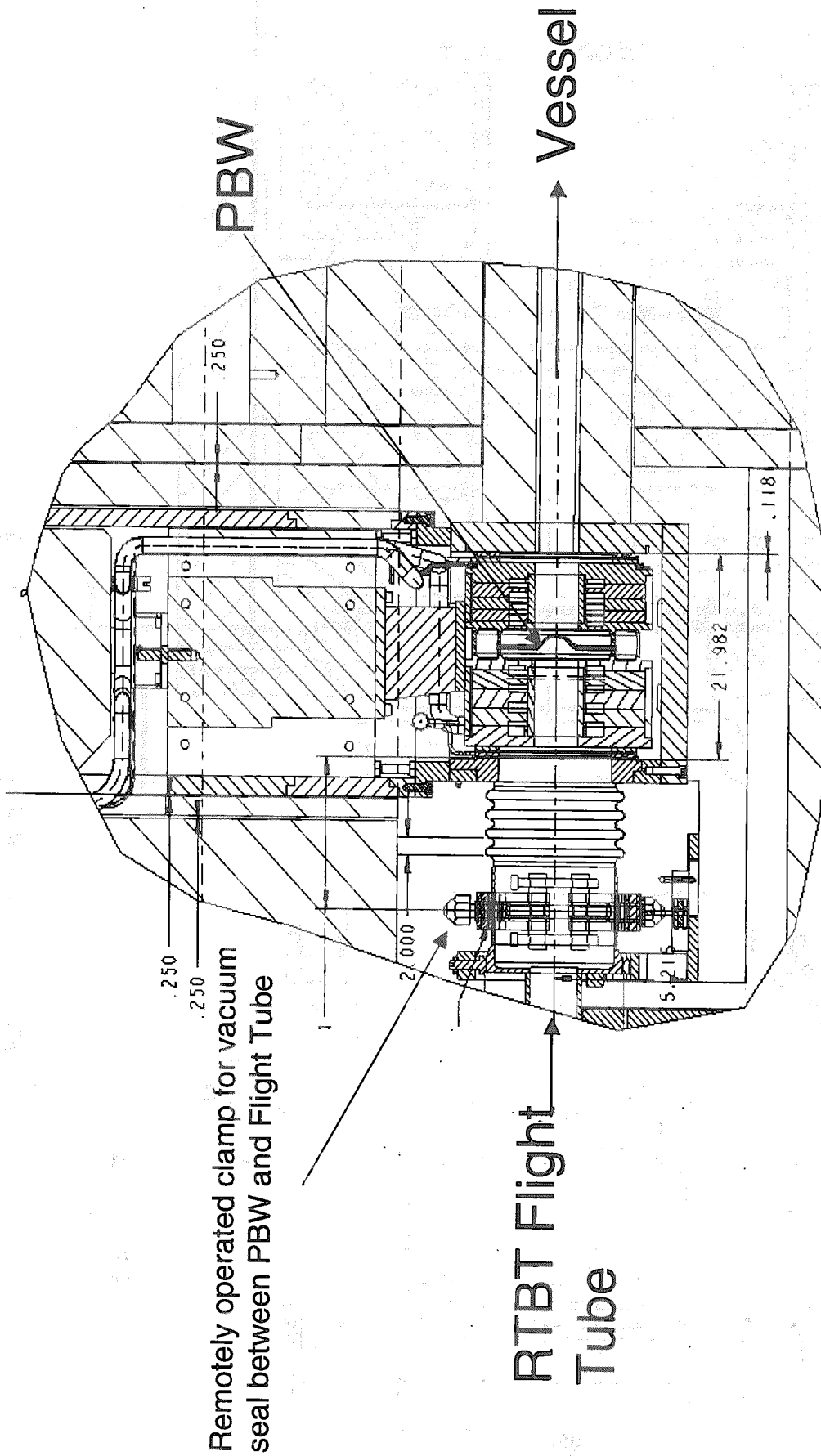


図5-6 SNS陽子ビーム窓構造図

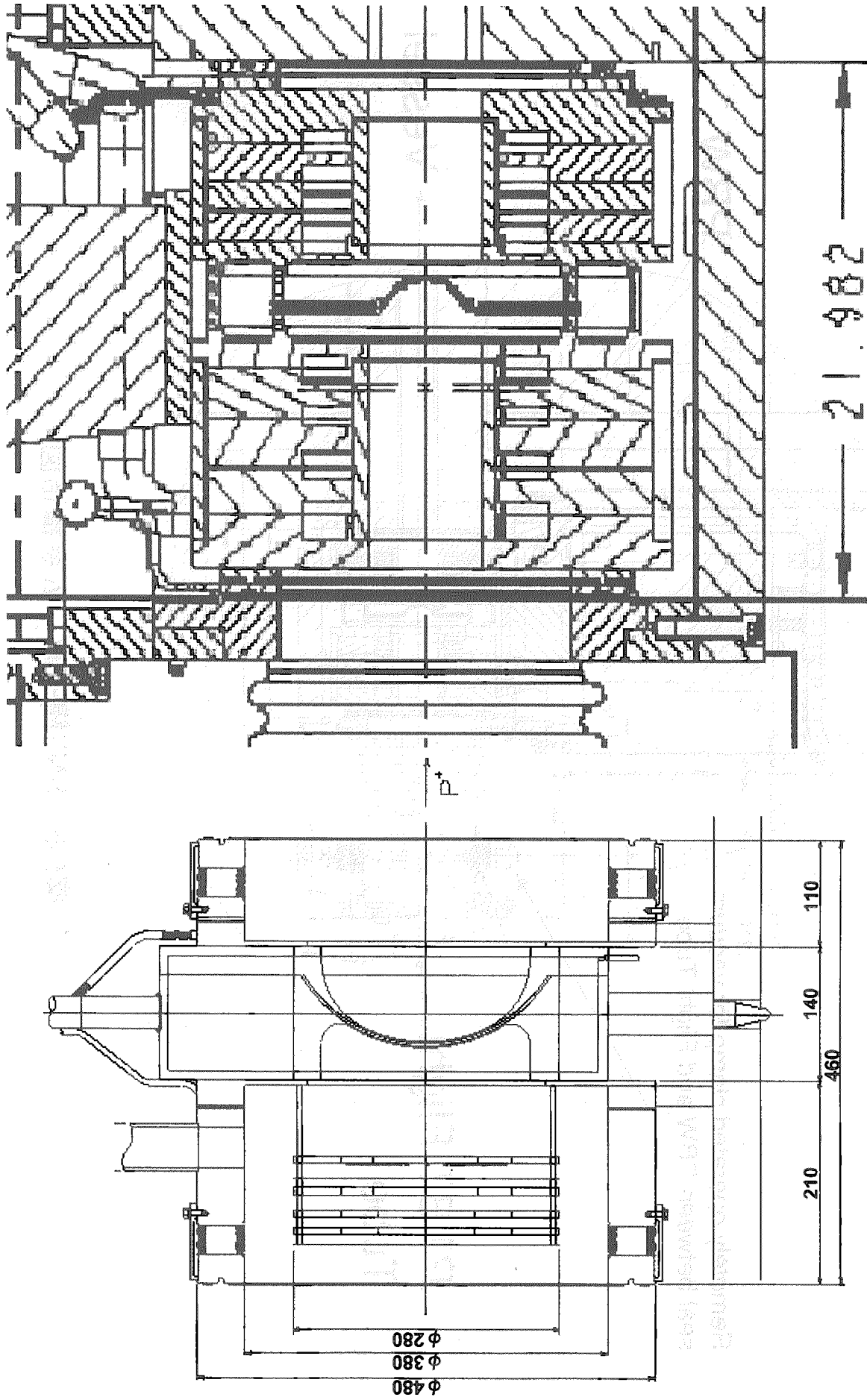


図5-7 SNS陽子ビーム窓との比較



## 6. おわりに

陽子ビーム窓構造の構造強度および熱流動に関する解析評価を実施した。その結果、軽水による内圧応力や発熱による熱応力に対して構造強度的に十分成立する見通しを得た。

また、窓部ではほぼ均一な流量配分が実現でき、冷却性能に問題のないことを明らかにした。

陽子ビーム仕様及び検討結果をまとめると、以下のとおりとなる。

構造図を図 6-1 に示す。

- ・陽子ビーム仕様

出力：1MW(3GeV リング出射時)、908.3 kW(陽子ビーム窓入射時)

陽子ビーム窓部発熱密度分布：

- ① Uniform 分布

(最大 270W/cm<sup>3</sup>、総発熱量 1.26kW/1.5mm、範囲：幅 300mm×高さ 120mm)

- ② Gaussian 分布

(最大 430W/cm<sup>3</sup>、総発熱量 1.26kW/1.5mm、範囲：幅 300mm×高さ 120mm)

- ・冷却水仕様

冷却材：軽水

窓部流路幅：3mm

圧力：最大 1MPa

配管入口温度：40℃

配管入口流速：最大 1m/sec(4.8m<sup>3</sup>/hr)

- ・陽子ビーム窓仕様

板厚：1.5mm×2枚

形状：幅 360mm×高さ 220mm、曲率 150mm の半円筒形

材質：インコネル 718

## 謝 辞

本検討に当たっては、石川島播磨重工業（株）高エネルギーシステム部小俣 一平部長及び土屋課長より多大な御支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

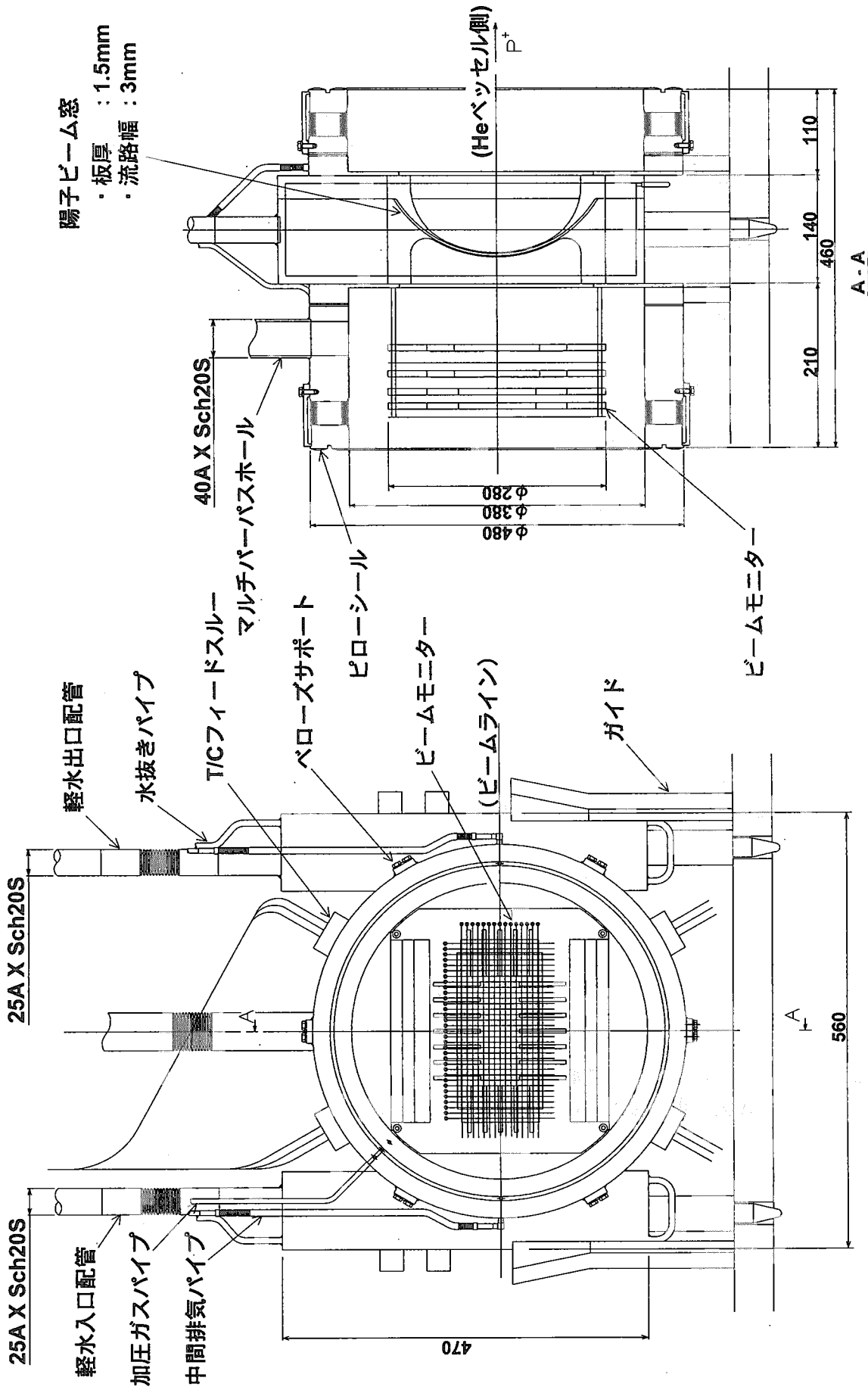


図6-1 曲面型陽子ビーム窓

## 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、“大強度陽子加速器計画”、JAERI-Tech 2000-003(2000)、KEK-Report99-5 JHF-99-4.
- (2) 大山幸夫、他、“中性子科学研究計画における研究施設（第1次案）”、JAERI-Tech 99-014(1999).
- (3) H. Lengeler, et al., “The ESS Technical Study Volume III”、ESS-96-53-M(1996).
- (4) G. Russell, et al., “Conceptual Design Report(CDR) for SNS”、SNS Interface Definition Document Rev.0 Draft#6(1997).
- (5) 日本機会学会編、技術資料、“流体の熱物性値集”
- (6) JIS 規格、JIS B8265
- (7) 日本熱物性学会編、“熱物性ハンドブック”、1990
- (8) 住友金属（株）、“アルミニウムハンドブック”
- (9) 平成7年通商産業省告示 501号、“発電用原子力設備に関する構造等の技術基準”
- (10) 核燃料サイクル開発機構、“別冊 100種材料強度基準（暫定）”
- (11) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., “ABAQUS User’s Manual Version5.2”
- (12) Computational Dynamics 社、“STAR-CD Version3.10 Methodology”
- (13) 勅使河原、他、“ターゲット内核発熱評価”：私信

# 付 録

## 添付資料 1-1

通商産業省告示 5 0 1 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」

(第 1 種容器の構造の規格) 注 1、注 2

### 第 1 2 条

第 1 種容器の構造の規格は、次条から第 1 9 条の 2 までの規定によらなければならない。

(材料の応力強さの限界及び許容応力)

### 第 1 3 条

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

容器(穴の周辺部、ボルト等、オメガシール及びキャノピシールを除く。)にあつては、次ぎによること。この場合において、容器に直接溶接されたラグ、ブラケット等の取付物(強め材、支持構造物及び炉心支持構造物を除く。)を取り付けるすみ肉溶接部にあつては、次の値の 2 分の 1 以下でなければならない。

イ 最高使用圧力及び機械的荷重により生ずる応力の応力解析による一次応力強さは、次の値を超えないこと。

(イ) 一次一般膜応力強さは、最高使用温度における別表第 2<sup>注 3</sup>に定める値

(ロ) 一次局部膜応力強さは、(イ)に定める値の 1.5 倍の値

(ハ) 一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さは、(イ)に定める値に応力解析による純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さい方の値を乗じた値

(中略)

ホ 運転状態Ⅰ及び運転状態Ⅱにおいて生ずる一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、別表第 2<sup>注 3</sup>に定める値の 3 倍の値を超えないこと。

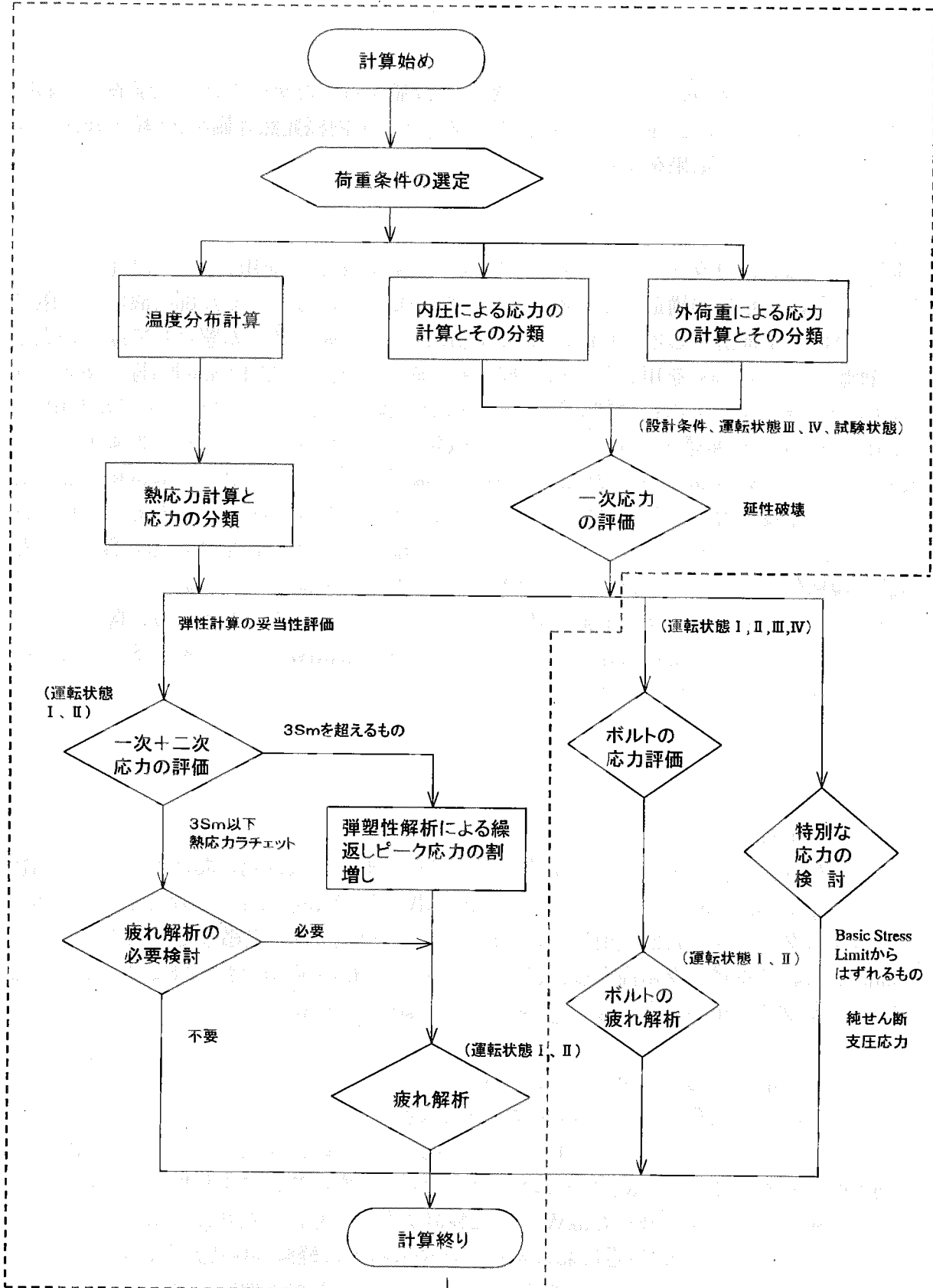
注 1) 第 3 種容器においても、第 1 種容器の規定に準ずることができる。

注 2) 第 1 種容器の応力解析のフローチャートを添付図に示す。

注 3) 別表第 2 に定める値とは、材料(ボルト材を除く。)の各温度における設計応力強さのこと。

添付資料1-2 第1種容器の応力解析のフローチャート

(点線内を陽子ビーム窓の強度計算に適用する。)



## BT粒子輸送プロファイルを用いた陽子ビーム窓及びターゲット内核発熱評価

2000. 12. 8

勅使河原、坂田

## はじめに

現実的な条件に基づいて核特性（核発熱等）評価を行ったデータは、工学設計において重要となる。ここでは、陽子ビーム窓及びターゲット内核発熱評価をBT粒子輸送プロファイルにて行った結果を報告する。

## 計算方法

陽子ビーム窓及びターゲット内核発熱評価には統合モデルを用いて行った(Fig. 1-2)。ターゲットは3重容器構造よりなる。また、陽子ビーム窓はベッセル部に設けた。陽子ビーム窓は2重構造をしており間に軽水層を配置した。陽子ビーム窓として厚さの異なる2種類のInconel 600を用いた。3mm厚（軽水層5mm厚）及び1.5mm厚（軽水層2.5mm厚）である。ターゲットの核発熱計算にはBT検討による陽子ビームプロファイルを用い、3mm厚のInconelを通過させターゲット内の核発熱を評価した。ベッセル内の陽子ビーム入射孔の大きさを $17 \times 8 \text{ cm}^2$ とした。計算に用いた陽子ビームプロファイルは位相空間において均一分布及びガウス分布（以下均一分布及びガウス分布と呼ぶ）である。各核発熱の値を3GeVシンクロトロン出口において1MWの陽子ビームが射出されると仮定し、その値で規格化した。シンクロトロン射出からベッセル部の陽子ビーム窓までに陽子ビーム出力はミューオンターゲット通過及びビームロス等により出力が下がり、陽子ビーム均一分布においては0.9083MW、ガウス分布では0.9084MWとなる。それぞれの核発熱計算にはNMTC-JAM及びMCNP4Aを用いた。

## 結果

## 1. 入射陽子ビームプロファイル

均一分布(phase space)及びガウス分布におけるベッセル窓入射前におけるピーク電流密度は約 $12 \mu \text{ A/cm}^2/0.9 \text{ MW}$ 及び $13.5 \mu \text{ A/cm}^2/0.9 \text{ MW}$ である(Fig. 3-4)。しかしながら、ベッセル窓からターゲット容器入射にかけて陽子ビームが収束から発散するためターゲット容器直前におけるピーク電流密度は減少する。均一分布の場合には約 $7.8 \mu \text{ A/cm}^2$ であるのに対しガウス分布の場合には $10 \mu \text{ A/cm}^2$ となる(Fig. 13, 15)。

## 2. ベッセル前面における陽子ビーム損失

$17 \times 8 \text{ cm}^2$ のビーム孔は、均一分布の場合には約3kW、ガウス分布の場合には約8.4kWの大きな陽子ビームロスとなる。ビームロスを減らすためには陽子ビーム孔を広げるのが効果的である。例えば、陽子ビーム孔を $26 \times 10 \text{ cm}^2$ とすることにより均一分布及びガウス分布の場合には0.2kW及び0.5kW以下に軽減することが出来る(Fig. 5-6)。ビームロスを減らすことは、この場所付近における核発熱や放射化の軽減の観点からは好ましい。一方で、ビーム孔を広げることは、モデレータの発熱につながる要因と考えられるがこれ

に関しては現在検討中である。

## 2. ベッセルビーム窓

陽子ビームのビーム窓の通過に伴い、ピーク強度が下がりビームが広がる。ビーム窓における核発熱は、3mm厚の場合に各陽子ビーム分布とも約5.6kW（2重窓及び軽水込み）となる（Table 1-2）。厚さが半減すれば核発熱もほぼそれに対応して半減する。ビーム窓の厚さにもよるが、3mm～1.5mm厚の2重のビーム窓で約5%～3%のビームロスとなる。ターゲットに達する粒子を可能な限り大きくするには（様々な観点から）やはりビーム窓の厚さは薄い方がよい。

## 3. ターゲット部（ターゲット(Hg)、ターゲット容器）での核発熱

ターゲット部に付与される核発熱は、陽子ビームプロファイルによらずターゲット部に投入されるエネルギーの約50%となる。ほとんどターゲット(Hg)に核発熱が付与され、約90%を占める。ターゲット(Hg)における核発熱の割合は高エネルギー粒子を起因としたものが85%以上を占め、次に $\pi^0$ 崩壊による $\gamma$ 線を含んだ $\gamma$ 線による発熱が約15%と続く（Table 3）。ターゲット(Hg)での核発熱密度としては、ほぼターゲット中心軸上且つ入射直近でピーク値をとる。そのピーク値は、均一分布、及びガウス分布の時に約360W/cm<sup>3</sup>/0.90MW及び450W/cm<sup>3</sup>/0.9MWとなる（Fig. 17-21）。ターゲット先端部における核発熱密度と陽子ビーム電流密度には対応関係があり、約48(kW/cm<sup>3</sup>)/( $\mu$ A/cm<sup>2</sup>)となる。ターゲット容器(SUS316)に関しては、陽子ビーム入射面で核発熱密度が100W/cm<sup>3</sup>を越えるがそれ以外では10～20W/cm<sup>3</sup>の値である。冷却水(D<sub>2</sub>O)に関しては、ターゲット容器と比較して約1/2～1/4程度である（Fig. 22-23）。

Table 1 Heat deposition in vessel beam window

Uniform case	Heat deposition (kW/908.3 kW)						
	Entrance of vessel	Window				Other	Total (Beam loss)
		1st Inconel	H2O	2nd Inconel	Window (total)		
Inconel 3mm <sup>t</sup>	2.97	2.57	0.59	2.64	5.80	42.33	51.10
	0.30 (%)	0.26 (%)	0.06 (%)	0.27 (%)	0.59 (%)	4.66 (%)	5.63 (%)
Inconel 1.5mm <sup>t</sup>		1.17	0.26	1.16	2.59	22.81	28.37
		0.12 (%)	0.03 (%)	0.12 (%)	0.26 (%)	2.51 (%)	3.12 (%)
Gaussian case	Heat deposition (kW/908.4 kW)						
	Entrance of vessel	Window				Other	Total (Beam loss)
		1st Inconel	H2O	2nd Inconel	Window (total)		
Inconel 3mm <sup>t</sup>	8.39	2.56	0.58	2.63	5.77	48.74	62.90
	0.92 (%)	0.26 (%)	0.06 (%)	0.27 (%)	0.59 (%)	5.37 (%)	6.92 (%)
Inconel 1.5mm <sup>t</sup>		1.16	0.26	1.16	2.58	29.47	40.45
		0.12 (%)	0.03 (%)	0.12 (%)	0.26 (%)	3.24 (%)	4.45 (%)

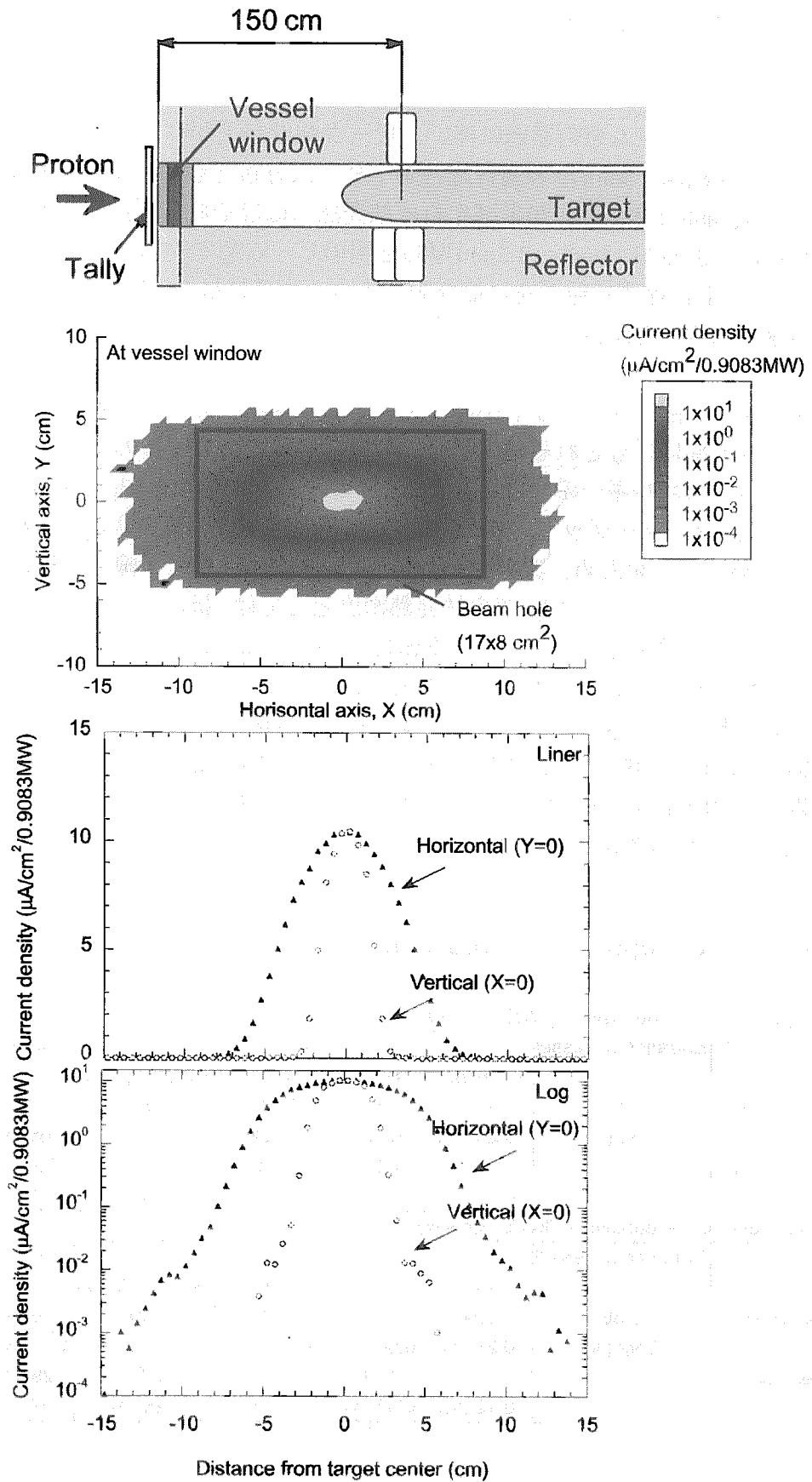


Fig. 3 Current density profile for uniform beam profile (phase space)



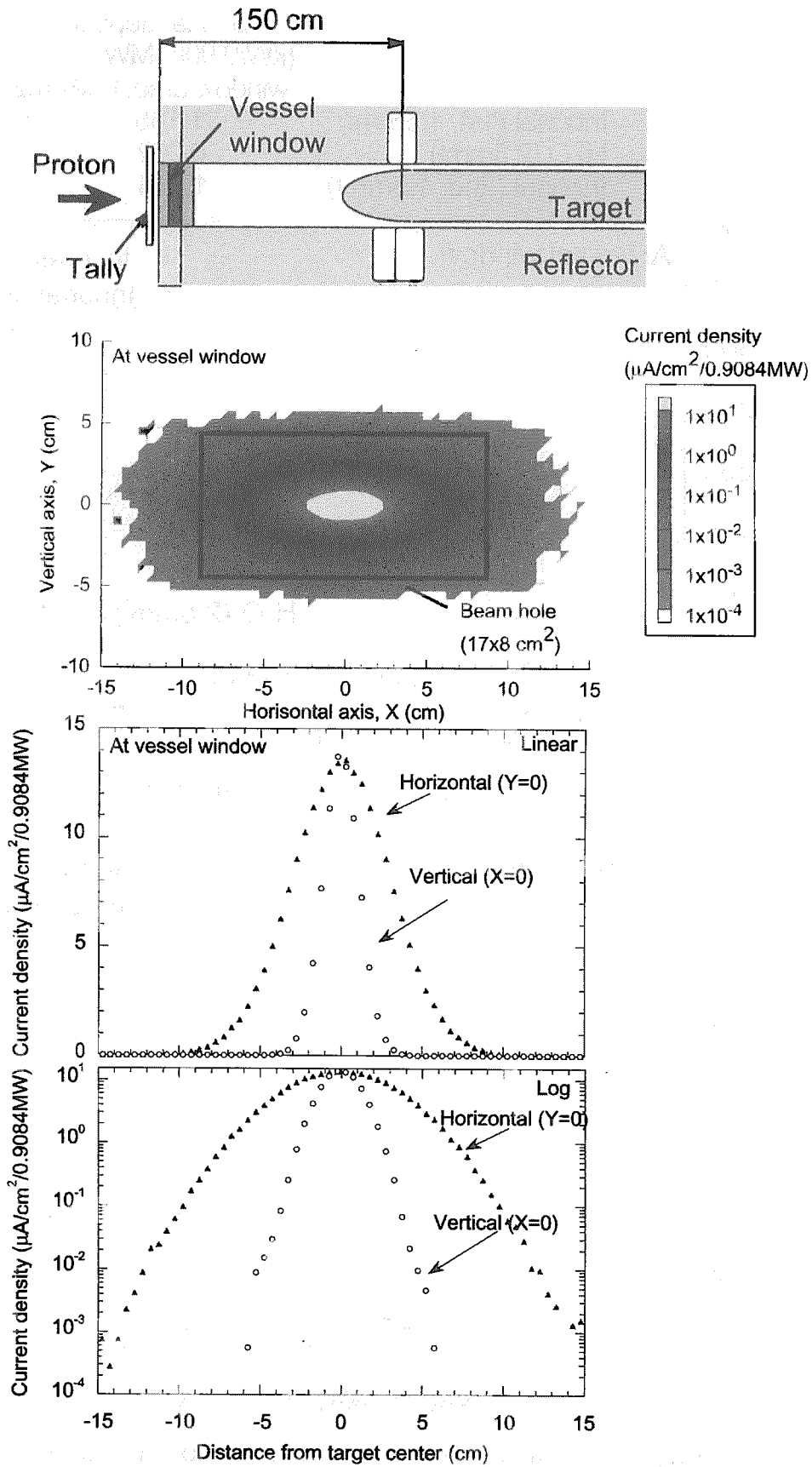


Fig. 4 Current density profile for gaussian beam profile (phase space)

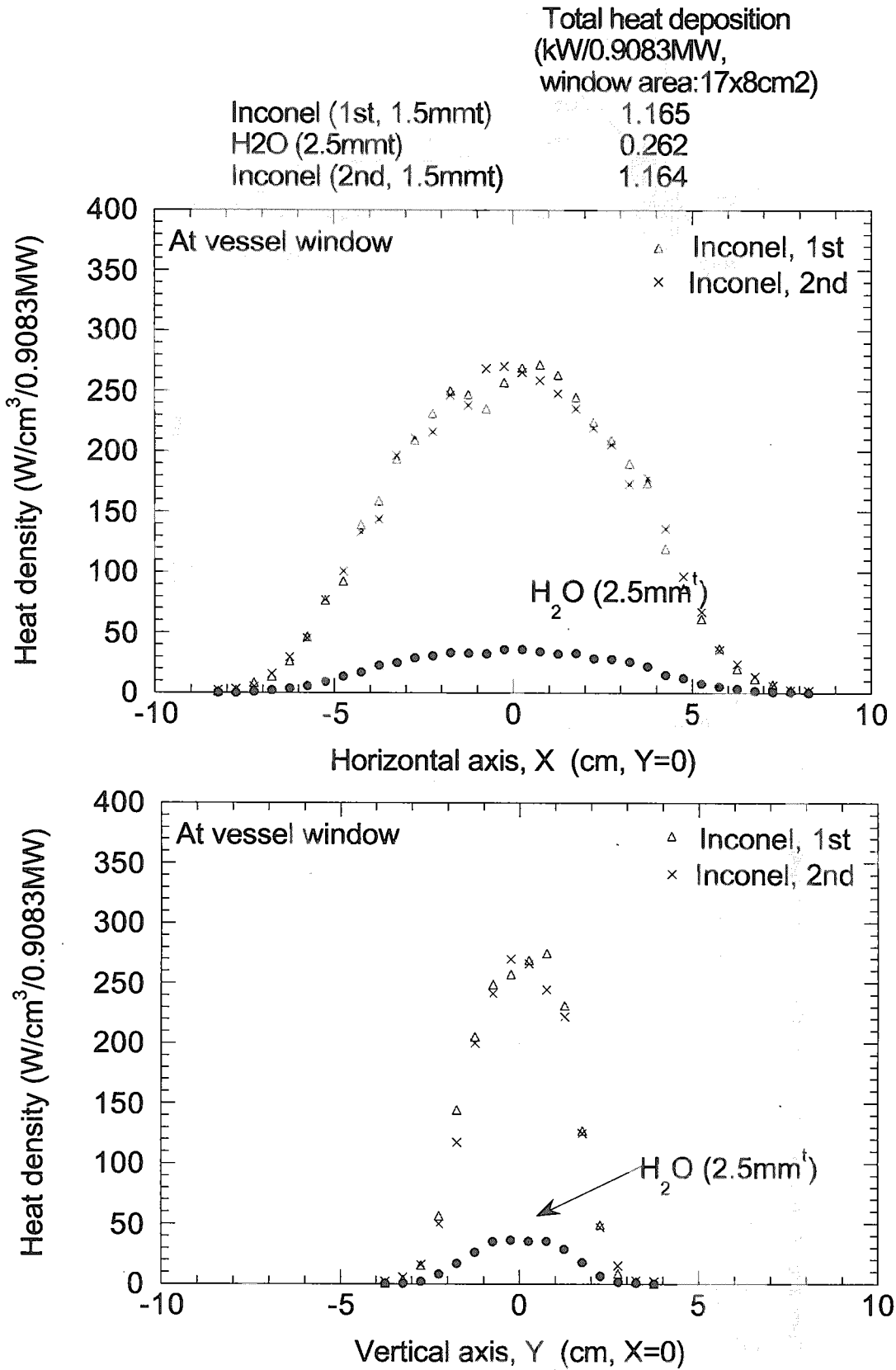


Fig. 9 Heat density profile in vessel window (Inconel, 1.5mm<sup>t</sup>) for uniform beam case (phase space)

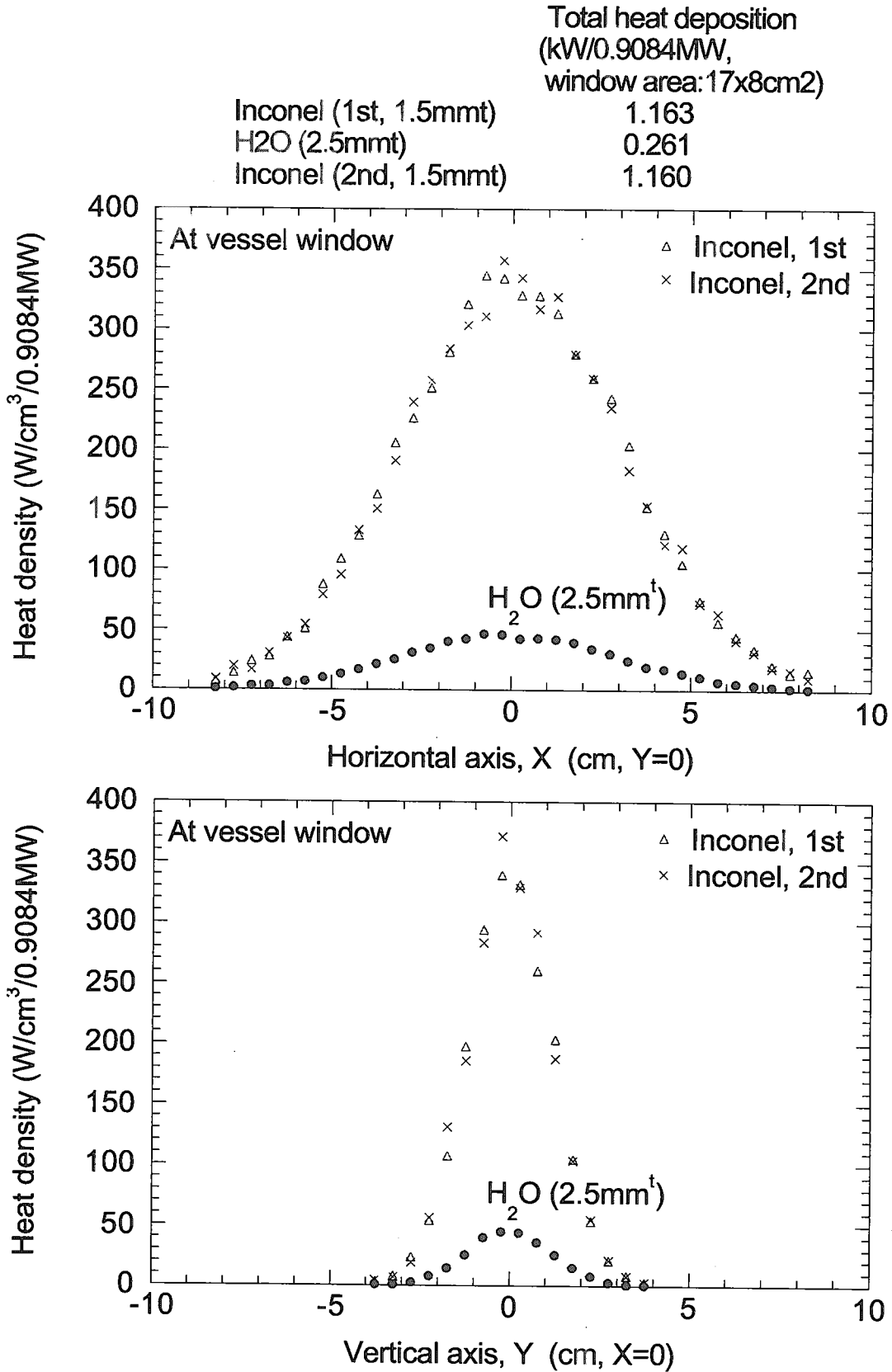


Fig. 11 Heat density profile in vessel window (Inconel, 1.5mm<sup>t</sup>) for gaussian beam case (phase space)

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	モル	mol
光	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

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<sup>-19</sup>J  
1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表5 SI接頭語

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
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 <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/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
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m  
1 b=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa  
1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq  
1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg  
1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy  
1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

(注)

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

## 換算表

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

粘 度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P (ポアズ)(g/(cm·s))  
動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>
	3.6×10 <sup>16</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>20</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>
	1.60218×10 <sup>-19</sup>	1.63377×10 <sup>-20</sup>	4.45050×10 <sup>-26</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1

1 cal= 4.18605J (計量法)  
= 4.184J (熱化学)  
= 4.1855J (15°C)  
= 4.1868J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS(仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 <sup>-11</sup>
	3.7×10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

1 MW 核破砕中性子源における陽子ビーム窓の構造設計検討