

JAERI-Tech

JP0150743

2001-051



## 冷減速材用プレモデレータの熱流動及び 構造強度予備解析

2001年8月

本研究は、冷却材用プレモデレータの熱流動特性と構造強度を予備解析する目的で実施された。主な目的は、冷却材用プレモデレータの熱流動特性を把握し、構造強度を予測するためのデータを収集することである。

麻生 智一・神永 雅紀・寺田 敦彦・日野 竜太郎

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

## REFERENCES

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。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

## 冷減速材用プレモデレータの熱流動及び構造強度予備解析

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

麻生 智一・神永 雅紀・寺田 敦彦・日野 竜太郎

(2001年7月2日受理)

原研で開発を進めている MW 規模の核破碎ターゲットシステムでは、中性子性能の向上を目指して、液体水素冷減速材の周りには薄肉構造のアルミ合金製の軽水冷却型プレモデレータを設置する。このプレモデレータは、核破碎中性子源となるターゲット間近に設置する必要があり、核発熱を効果的に除去するために流れの停滯等のない平滑な軽水循環が不可欠である。また、軽水内圧に対して薄肉構造の健全性を確保する必要がある。そこで、予備的な熱流動解析を行った結果、円滑な流動を実現して、内部での軽水温度上昇を 1 °C 以下に抑制できる見通しを得た。これにより、所定の中性子性能を確保できるものと考えられる。また、構造健全性については、構造強度解析結果を基にして、アルミ合金の許容応力条件を満たすための方策を提案した。

Preliminary Thermal-Hydraulic and Structural Strength Analyses  
for Pre-moderator of Cold Moderator

Tomokazu ASO, Masanori KAMINAGA, Atsuhiko TERADA and Ryutaro HINO

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

(Received July 2, 2001)

A light-water cooled pre-moderator with a thin-walled structure made of aluminum alloy is installed around a liquid hydrogen moderator in order to enhance the neutron performance of a MW-scale spallation target system which is being developed in the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Since the pre-moderator is needed to be located close to a target working as a neutron source, it is indispensable to remove nuclear heat deposition in the pre-moderator effectively by means of smooth water flow without flow stagnation. Also, the structural integrity of the thin-walled structure should be kept against the water pressure. Preliminary thermal-hydraulic analytical results showed that the water temperature rise could be suppressed less than 1°C while keeping the smooth water flow, which would assure the expected neutron performance. As for the structural integrity, several measures to meet allowable stress conditions of aluminum alloy were proposed on the basis of the preliminary structural strength analyses.

**Keywords:** Pre-moderator, Thin-walled Structure, Liquid Hydrogen Moderator, Spallation Target System, Flow Stagnation, Thermal-Hydraulic Analysis, Structural Strength Analysis

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 拡張型プレモデレータの概要 .....	2
3. 熱流動解析 .....	3
3.1 解析条件 .....	3
3.2 解析結果 .....	4
4. 構造強度解析 .....	5
4.1 解析条件 .....	5
4.2 解析結果 .....	5
5. あとがき .....	7
謝 辞 .....	7
参考文献 .....	8

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of the Extended Pre-moderator .....	2
3. Thermal-Hydraulic Analyses .....	3
3.1 Analytical Conditions .....	3
3.2 Analytical Results .....	4
4. Structural Strength Analyses .....	5
4.1 Analytical Conditions .....	5
4.2 Analytical Results .....	5
5. Concluding Remarks .....	7
Acknowledgment .....	7
References .....	8

This is a blank page.

## 1. まえがき

日本原子力研究所（以下、原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で進めている大強度陽子加速器計画では、MW規模の陽子加速器から極短パルス陽子ビームを重金属製のターゲットに入射して核破碎反応により大強度中性子ビームを発生させ、生命科学、物性物理、核物理等の広範囲な分野で先端的研究を行う中性子散乱施設を最も早期に建設する予定である<sup>(1)</sup>。本施設の中性子源となる核破碎ターゲットシステムについては、その概念を構築するための設計研究及びR&Dを原研が主体となって実施している<sup>(2)</sup>。Fig.1に核破碎ターゲットシステムの概要を示す。ターゲットにはクロスフロー型と呼ぶ原研が独自に開発した構造の水銀ターゲットを用い、その上下に超臨界水素又は液体水素の冷中性子用減速材（以下、冷減速材）及び熱中性子用減速材、軽水の熱外中性子減速材を配置する。これらの周りを取り囲むように反射体を設置する。これまでの設計及びR&Dの成果から、水銀ターゲットに関しては、初期の目標出力である1MW運転条件において十分工学的に成立する見通しが得られている<sup>(3,4)</sup>。同様に、冷減速材に関しても、水素温度の上昇を3K以内に抑制する条件を、初期目標出力の2倍の2MWまでの陽子ビームに対してクリア一できる見通しを得た<sup>(5)</sup>。

一方、冷減速材をはじめとする3つの減速材にはプレモデレータをそれぞれに設置する予定である。原研ではプレモデレータの機能から見直しを図り、中性子強度等の性能が従来のものよりも格段に優れた拡張型プレモデレータを考案した<sup>(6,7)</sup>。このプレモデレータは中性子吸収を抑制するためにアルミ合金を用い、できるだけ薄肉化することが不可欠である。その一方で、拡張型プレモデレータの構造は非常に複雑であり、ターゲットの間近に位置するために核発熱による構造材や軽水の温度上昇が予想されるので、軽水が滞留しないように流動させる必要がある。また、プレモデレータ内部に軽水を安定循環させるには軽水ループ系統の圧力損失等を考慮して加圧するため、その圧力に耐えるように構造強度をもたせる。

そこで第一段階として、ニュートロニクス解析に用いられた基本的な拡張型プレモデレータ（補強用のリブ等を設置しない構造）の熱流動及び構造強度特性を解析評価し、内包する問題点の摘出を行った。本報はこれらの解析結果及び問題点に対する対策について述べる。

## 2. 拡張型プレモデレータの概要

前述したように、冷減速材をはじめとする3つの減速材にはプレモデレータをそれぞれに設置する予定である。プレモデレータは、中性子が減速材に入る前に含水素密度の高い物質で予め中性子を減速させて、中性子特性（主に強度）を向上させる働きを有する。また、このプレモデレータにより減速材での核発熱を軽減することができる。一般にプレモデレータには軽水を用い、減速材の周囲をアルミ合金製の容器で覆い、内部に軽水を流す単純な構造が用いられている。原研ではプレモデレータの機能・構造の見直しを行い、中性子強度等の性能が従来のものよりも格段に優れた拡張型プレモデレータを考案した<sup>(6,7)</sup>。拡張型プレモデレータは減速材の周りを軽水で囲むだけでなく、中性子取り出しラインに向けてラッパのように軽水の層を延ばした構造である<sup>(5)</sup>。Fig.2に冷減速材用の拡張型プレモデレータの概要を示す。

図のように拡張型プレモデレータの構造は非常に複雑となり、また、ターゲットの間近に位置するために核発熱による構造材や軽水の温度上昇が予想されるので、軽水が滞留しないように流動させる必要がある。一方、プレモデレータの軽水ループは生体遮蔽体上部から配管を敷設するために高低差が大きくなり、また、配管等での圧力損失を考慮するある程度の圧力を与えて運転する必要があり、その圧力に耐えるように構造強度を確保する必要がある。

そこで、プレモデレータ設計の第一段階として、特別な流路等を考慮しない軽水の層だけの基本的な拡張型プレモデレータの構造をモデル化し、内包する工学的課題を明確にするために予備的な熱流動及び構造強度解析を行った。熱流動解析では、温度分布の目処を得るために底面に一定の熱流束を与えた。構造強度解析では、応力集中の目処を得るために保守的な圧力を与え、構造強度における課題を検討した。本結果を踏まえて、次段階からは、プレモデレータの構造、内部流路の設定、配管の引き回し、交換シナリオの検討など詳細設計を進めていく予定である。

### 3. 热流动解析

#### 3.1 解析条件

流动解析には非構造格子・有限体積法による汎用3次元热流体解析コードであるSTAR-CDを使用し、定常非圧縮性流れとして計算した。圧力補正アルゴリズムはSIMPLE法、乱流モデルは標準k-εモデル、境界層内部の流动解析には壁関数を用いた。流体を軽水とし、解析モデルは拡張型プレモデレータの流体部を3次元モデル化して作成し、約60万のテトラメッシュでメッシュ分割した。

##### (1) 解析モデル

Fig.3に热流动解析に用いた解析モデルを示す。拡張型プレモデレータの流体部をモデル化したもので、基本的に25mmの軽水の層で冷减速材容器側面及び中性子ビーム取り出しひラインを囲っている。図の手前の面は対称境界面であり、反対側に同じ形状のモデルを想定している。軽水の配管は、製作性に課題はあるが場所をとらないように中空円筒管を分割し、流入と流出の2つのチャネルに分けた構造とした。多少軽水が流れ易いように配管を分割している板を延長するように、容器上部も流入側と流出側に分割している。従って、今回のモデルでは特別な流路等を考慮しておらず、プレモデレータに流入した軽水は最終的に流出するまで容器内を自由に流动することとなる。途中、軽水の流速は非常に遅くなることが予想されるので、入口流速は5.0m/s(流量2.6L/s)と大きくした。

##### (2) 軽水(25°C、0.1MPa)の物性値<sup>(8)</sup>

以下の値を使用した。

- ・密度       $\rho$  : 997.1 kg/m<sup>3</sup>
- ・粘性係数     $\eta$  : 891  $\mu$ Pa·s
- ・比熱      Cp : 4174 J/kg·K
- ・熱伝導率     $\lambda$  : 0.61 W/m·K

##### (3) 発熱密度

Fig.4に冷减速材位置における液体水素及びアルミ合金の発熱密度分布を示す<sup>(9)</sup>。これは冷减速材の熱流动解析に用いたものだが、今回は概略値を得るために容器の構造材として予定しているアルミ合金の発熱密度を使用した。また、今回は予備解析ということで、プレモデレータ容器の底板(4mm厚)の発熱のみを考えた。図の発熱密度は2MW陽子ビーム運転時の解析結果で、底板4mm厚分の発熱を積分して30%の裕度を与えた。この結果、熱流束で30kW/m<sup>2</sup>となり、モデルの底面全体にこれを与えた。

### 3.2 解析結果

#### (1) 流速分布

Fig.5 に流速ベクトル分布を示す。配管の流入チャネルから 5m/s で流入した軽水は、プレモデレータ容器内に流入した後、様々な方向、流速で複雑に容器内部へ広がっていく。例えば、図の左肩に見られるように、軽水が容器壁に衝突しながら出来た再循環流の渦が 2つ確認できる。容器内部でも、設計上コーナーが多いために同様な渦が多く見られる。また、拡張型プレモデレータの最大の特徴である拡張部への軽水の広がりも確認できる。図の手前の対称境界面では、軽水が流出チャネルに向かって流れている様子がよく分かる。最終的に拡張部へ広がった軽水も流出チャネルに向うが、流速が遅いためにベクトルの向きが見えにくい。今回の結果では、流速の最小値は  $0.27 \times 10^{-3}$ m/s であった。拡張部の壁付近やコーナー部の停滞域等でこのように流速が小さくなると考えられる。全体的に見ると、流入チャネルからプレモデレータ容器内に流入すると直ぐに流速が低下して、容器内の大部分は 1m/s 以下の流速となった。

Fig.5 では容器壁近傍の流速分布しかわからないので、Fig.6 に 3つの断面における流速コンター分布を示す。軽水が流入した容器上部には、入口管から離れた拡張部にも流速が 2m/s 近い領域が存在するが、上記のように他の領域はほとんど 1m/s 以下で非常に遅い流動を示している。

参考として Fig.7 に流線図を示す。プリモデレータ容器が複雑な形状であるため、流線も複雑な行程を示している。

#### (2) 温度分布

Fig.8 に温度分布を示す。前節で述べたように、底板に  $30\text{ kW/m}^2$  の熱流束を与えたので、底板での温度上昇が顕著に見られる。最高温度は底板の(図における)右隅の部分で約 32°C となり、軽水の沸点を大幅に下回っている。入口と出口の温度差はほとんどなく、0.5°C にも満たなかった。従って、前述のように軽水の流速が非常に遅くても、軽水の密度を大きく変化させるような温度上昇は生じないので、ニュートロニクス的にも工学的にも問題のない設計といえる。ただし、発熱を考慮したのは底板だけなので、今後、容器全体と軽水の発熱を考慮して解析する必要がある。仮に大幅な温度上昇が生じる場合は、軽水流速を低下させないように流路を設ける等の工夫が必要であるが、流路設定用の仕切板を入れるとその分の体積発熱によって温度が上昇するため、最適な設計を行うことが重要である。

Fig.8 では容器壁近傍の温度分布しかわからないので、Fig.9 に 3つの断面における温度コンター分布を示す。底面のみの発熱を仮定しているので、Fig.8 と同様に底部で出口に近くにつれて温度が上昇しており、コンターの明るい(温度上昇の)範囲が拡がるが、前述のように数°Cの温度上昇である。

## 4. 構造強度解析

2節で述べたように、プレモデレータは、中性子を減速材に入る前に予め減速させたり、反射体からの中性子を減速させて中性子強度に寄与するなど中性子性能を向上させるために設置する。このようにプレモデレータと減速材との間で中性子の行き来があるために、プレモデレータ容器の構造材には、減速材容器と同様、中性子吸収能の低いアルミ合金を使用し、中性子透過性を高めるために薄肉構造とする必要がある。一方、生体遮蔽体上部からプレモデレータ用の軽水配管を敷設するために6m以上の高低差があり、また、配管及び軽水ループ機器（熱交換器、サージタンク、他）での圧力損失を考慮すると、プレモデレータ内に軽水を循環させるには、冷減速材のように高圧ではないが、ある程度の圧力が必要で、プレモデレータ容器にはその圧力に耐える構造強度が不可欠である。そこで、今後のプレモデレータ容器の構造検討を進める上での予備的な解析評価として、保守的に内圧0.5MPaを与えて強度解析評価を行った。

### 4.1 解析条件

構造強度解析には汎用有限要素プログラムABAQUSを使用した。その他の条件は以下の通りである。

使用要素：一般シェル要素S4R（4節点、曲面シェル、低減積分）

プレモデレータ容器形状：Fig.10（Fig.2を1/4モデル化したもの）

拘束条件：配管入口部固定

荷重条件：内圧0.5MPa

アルミ合金物性値：ヤング率 68.65 GPa

ボアソン比 0.35

密度 2700 g/cm<sup>3</sup>

容器板厚：4～10 mm

### 4.2 解析結果

Fig.11に板厚4mmの時のプレモデレータ容器の変形を10倍にして示す。最大変位点は底面の中心部に生じ、変形量は約2.7mmである。板厚に対する最大変形量を求めた結果をFig.12に示す。図からわかるように、板厚の増加とともに最大変形量は減少し、板厚を10mmとすると変形量は約0.4mmにまで減少する。

応力分布の解析結果については、Fig.13及びFig.14に板厚が4mmの時のプレモデレータ容器内表面及び外表面のMises応力分布解析結果を示す。図のようにいずれも応力の集中している箇所はプレモデレータのコーナー部であり、最大値は内表面で549MPa、外表面で390MPaである。Fig.15は容器板厚を変化させた時の最大応力の変化を表したもので、板厚の増加とともに最大応力値は減少し、10mm厚では110MPa（外表面）まで減少する。

ここで容器構造材として検討しているアルミ合金は、減速材容器と同様に A6061、A5083 及び A2000 系を候補材としており、それぞれの許容応力は 63MPa、68MPa 及び 110MPa (A2014) である。従って、図からも分かるように最も許容応力の高い A2014 でも板厚を 10mm 以上にする必要がある。しかし、前述したように中性子透過性を高めるためには可能な限り薄肉構造としなければならない。そこで、以下の方策について、今後検討することにした。

- (1) 各コーナー部の丸み (R : ラウンド) 構造
- (2) 軽水の流路設定を兼ねた支持板 (リブ) の設置
- (3) 容器の分割構造

(1)は、Fig.10 のように板を張り合わせた構造になっており、解析結果ではコーナー部に応力集中が見られたので、各コーナー部に丸み (R) をつけて応力の緩和を図るというものである。R の大きさについては検討する必要があるが、板厚程度の R をつけると曲げモーメントの集中が大きく緩和され、平板部の応力に近い値まで低減させることが可能である。(2)は平板部の応力を低減する方策であり、前章で述べた流路設定用の仕切板を強度支持を兼ねて支持板 (リブ) として設置する。支持板についてはその部分での発熱や中性子吸収があるため、薄肉にして設置数も最小限にすることが要件である。このためには、最適な流路及び支持位置を決定するために解析評価を行い、実験的に検証する必要がある。上記の(1)及び(2)については単独で行うものではなく、それぞれを組み合わせて発生応力を許容応力以下にすることを目的としている。一方、(3)は応力が集中するプレモデレータの拡張部と冷減速材容器を取り巻く長方体と分割して、3 つの容器の組み合わせとするものである。これは(2)の支持板を省きつつ、冷減速材容器と合わせた製作性やリモートハンドリングによる分解を考慮したものである。Fig.16 にその概要を示す。この構造は配管敷設スペースを最小化するために 1 本の配管を 3 分割して流量を配分するようにしてあり、その部分の製作性や流量配分特性をさらに検討する必要がある。

このように、プレモデレータ容器について予備的な構造強度解析を行った結果、応力が集中する箇所を確認し、最大応力はアルミ合金の許容応力を越えることが分かった。この結果を基に、先に述べた構造強度を維持するための方策をさらに検討して、熱流動と併せた設計検討を進めていく予定である。

## 5. あとがき

原研で開発を進めている MW 規模の核破碎ターゲットシステムにおいて、冷減速材の周りには中性子性能の向上を目指して、原研で考案した拡張型のプレモデレータを設置する予定である。このプレモデレータは構造が複雑で、ターゲット直近に位置するために核発熱による温度上昇を抑えるような流動のスムーズ化、他のコンポーネントが集中することによる配管等の省スペース化などの技術的な課題がある。そこで、予備的な熱流動解析を行い、中を流れる軽水の流動状況を確認した。温度計算の結果、容器出口における温度上昇は 1°C 以下で、最も発熱の大きい容器底面においても軽水が沸騰することはないことが分かった。また、構造強度解析の結果、アルミ合金の許容応力を越えることが分かり、応力集中の箇所を確認して構造強度を維持するための方策を挙げた。これらの結果を基に、今後、製作性等を考慮したプレモデレータ容器構造の詳細設計を検討していく。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、核熱利用研究部熱利用システム研究室の西原哲夫氏に懇切丁寧な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1)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, KEK Report 99-5, JHF-99-4 (2000).
- (2) R. Hino, et al., "Present Status of Target R&D at JAERI – JAER/KEK Joint Project – ", 6<sup>th</sup> ESS General Meeting, Portonuovo near Ancona, Italy, Sep. 20-22 (1999).
- (3)神永雅紀, 他, “クロスフロー型水銀ターゲットの熱流動解析(3)”, 日本原子力学会「2000春の年会」Q31 (2000).
- (4)石倉修一, 他, “液体金属ターゲットの熱衝撃解析”, 日本原子力学会「1999 秋の大会」B44 (1999).
- (5)麻生智一, 他, “冷減速材の流動に関する研究”, 日本原子力学会「2000 春の年会」Q45 (2000).
- (6) T. Kai, et al., "Optimization Study of Coupled Hydrogen Moderator with Extended Premoderator", ICANS-XV, Tsukuba, Japan, Nov. 6-9 (2000).
- (7)原田正英, 他, "非結合型水素モデレータにおけるプレモデレータの拡張効果", JAERI-Research 2000-014 (2000).
- (8)日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集” (1983).
- (9)勅使河原誠 (原研 中性子工学グループ) 私信.

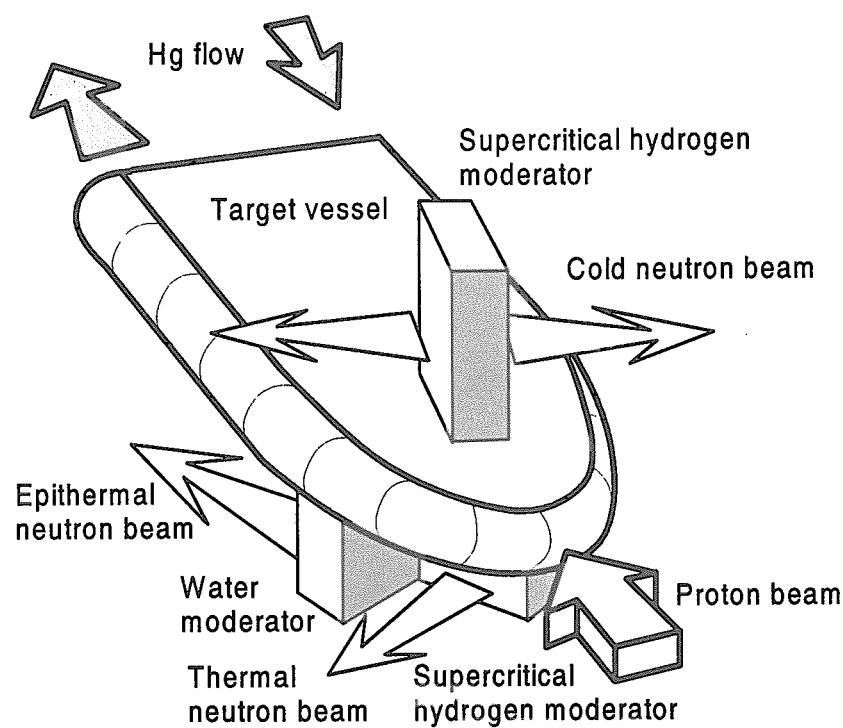


Fig.1 Layout of Target and Moderators

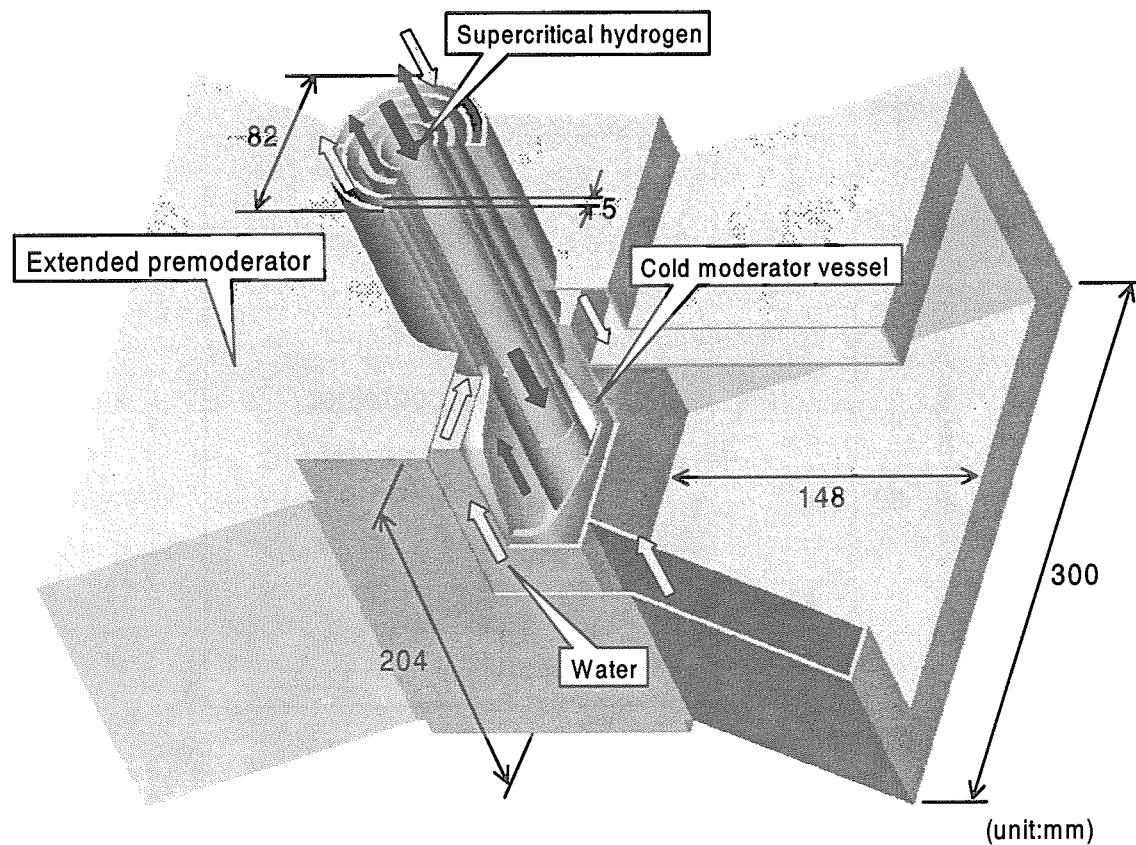


Fig.2 Extended Premoderator and Cold Moderator

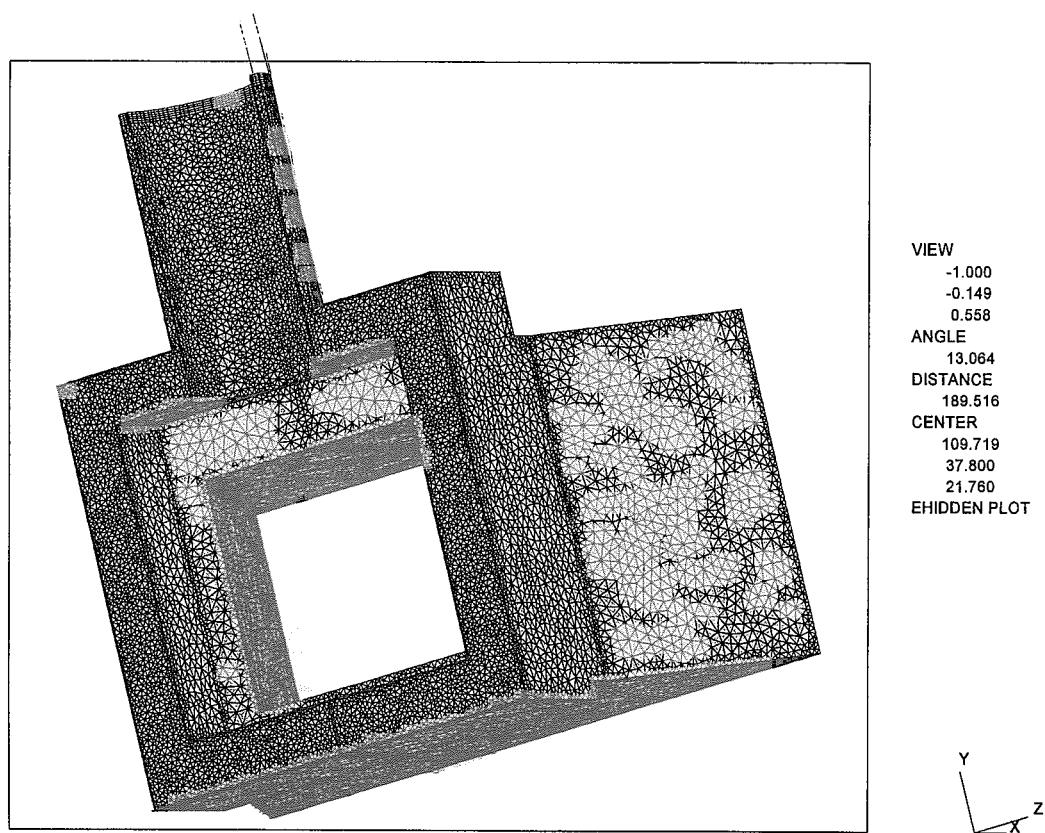


Fig.3 Analytical Model of Extended Premoderator

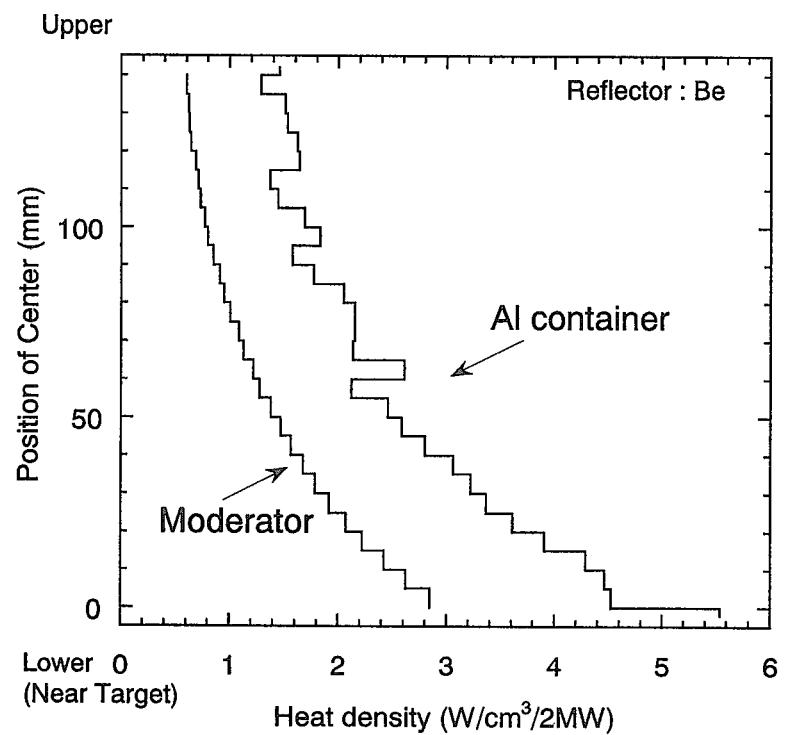


Fig.4 Heat Density Distribution in the Cold Moderator under the 2MW Proton Beam Operation

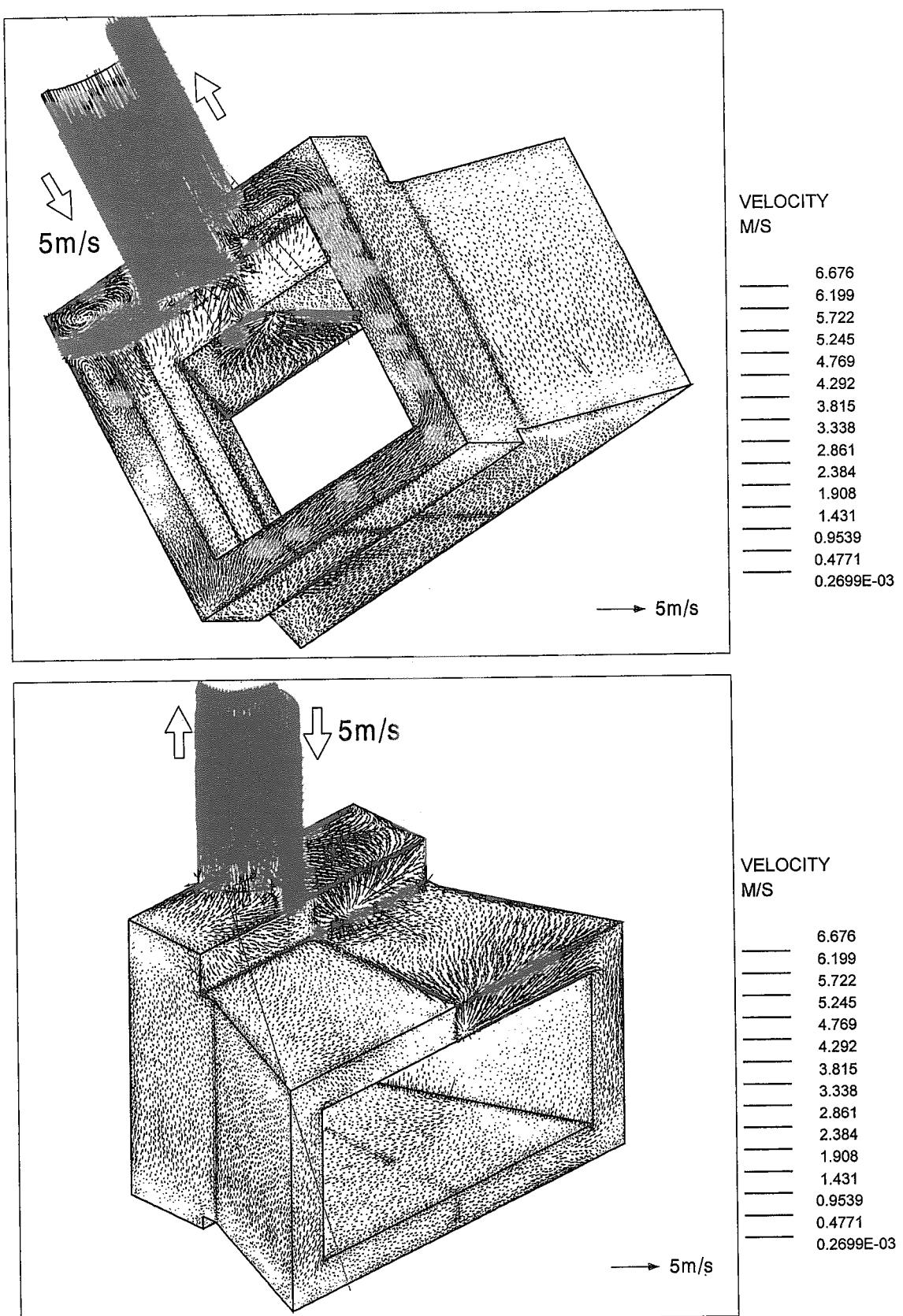


Fig.5 Analytical Results of the Velocity Distribution

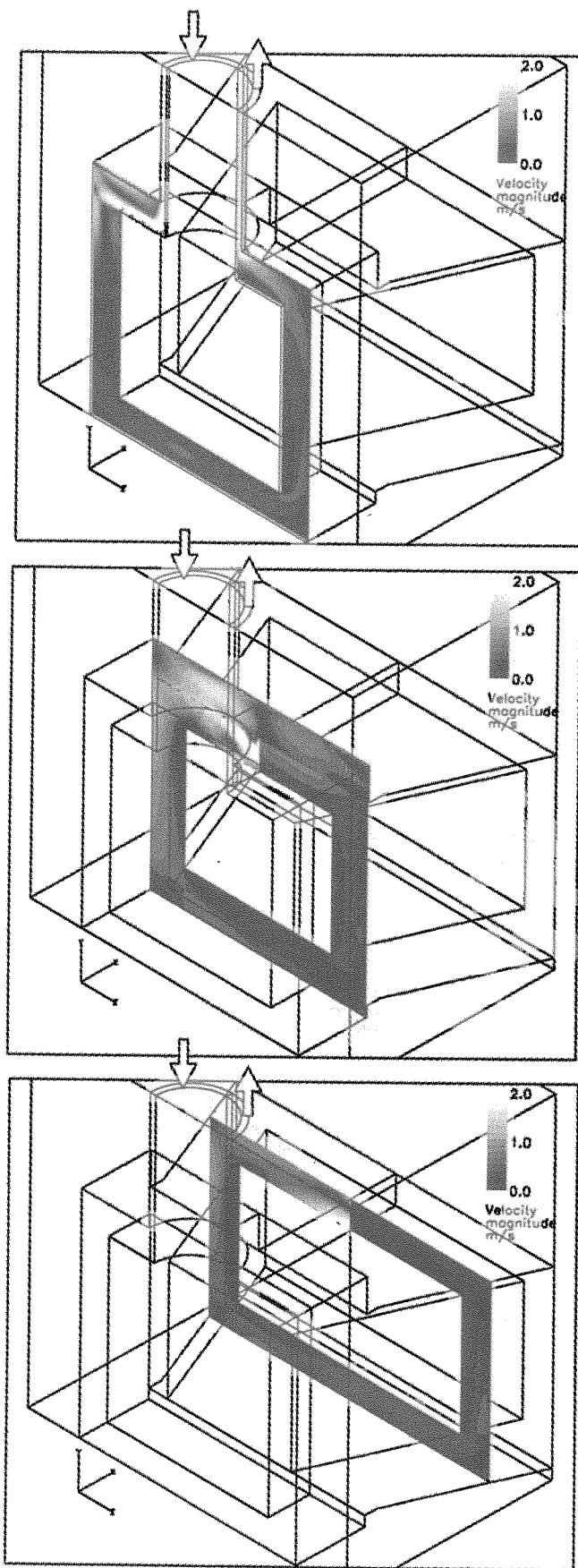


Fig.6 Analytical Results of the Velocity Contours at three Cut-Sections

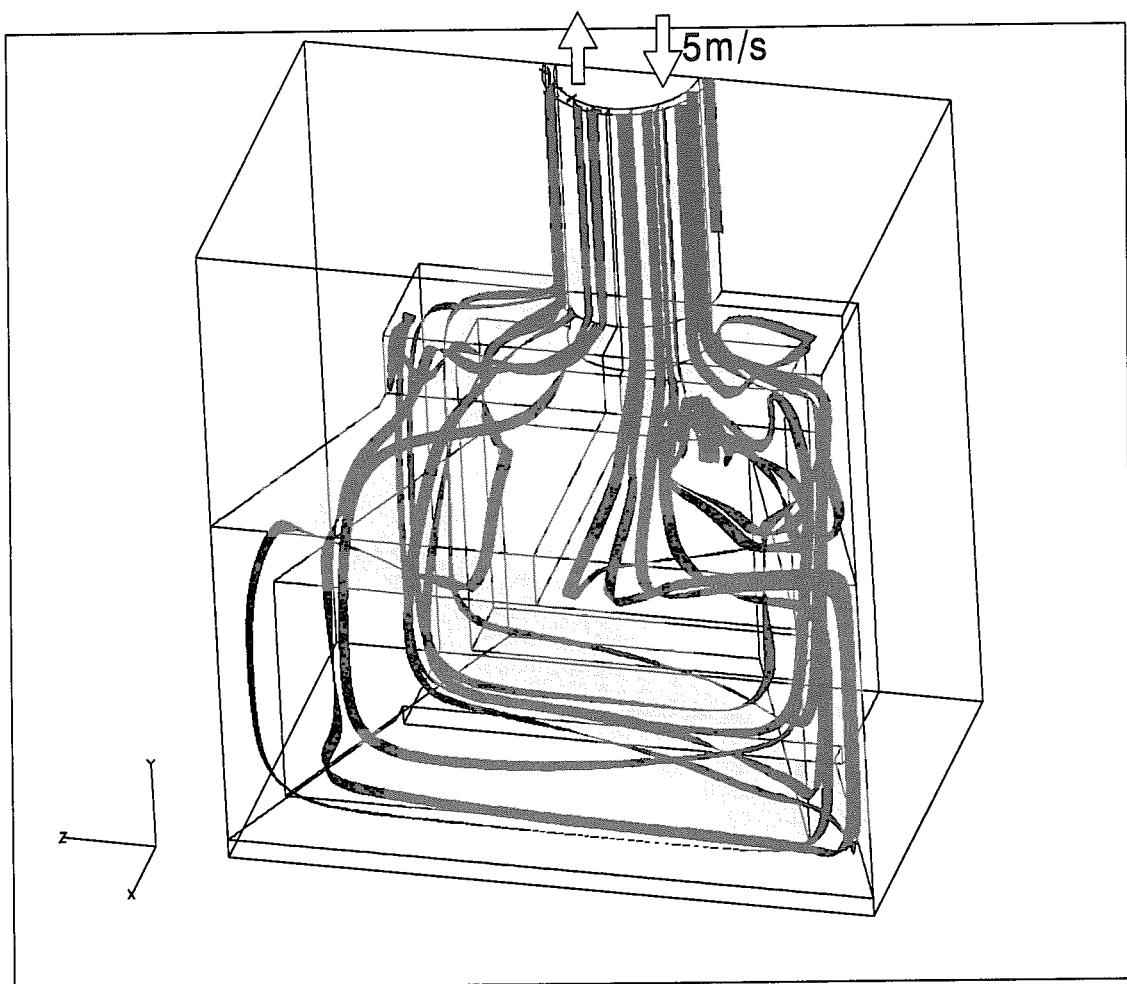


Fig.7 Streamlines of Water Flow in the Premoderator

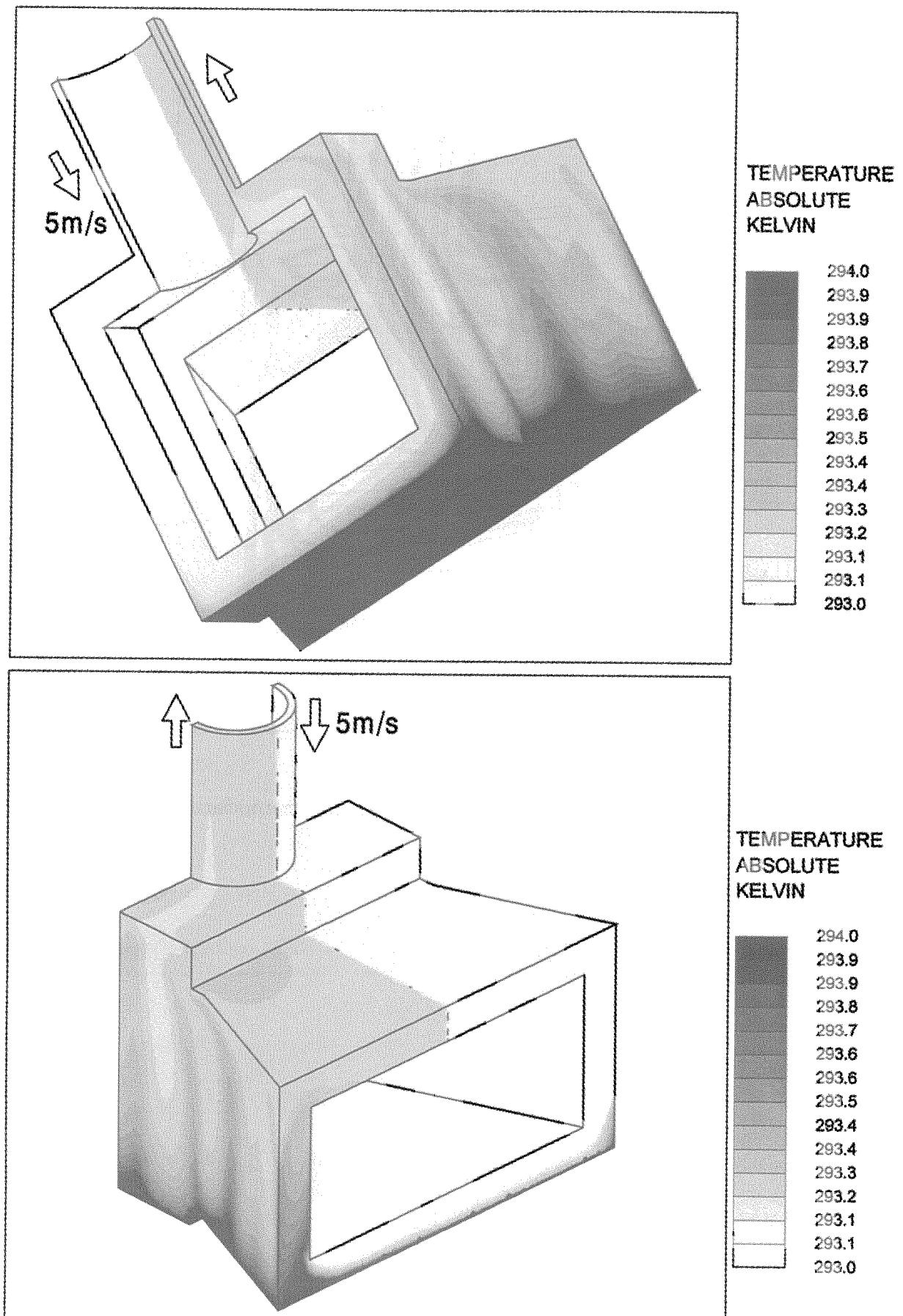


Fig.8 Analytical Results of the Temperature Distribution

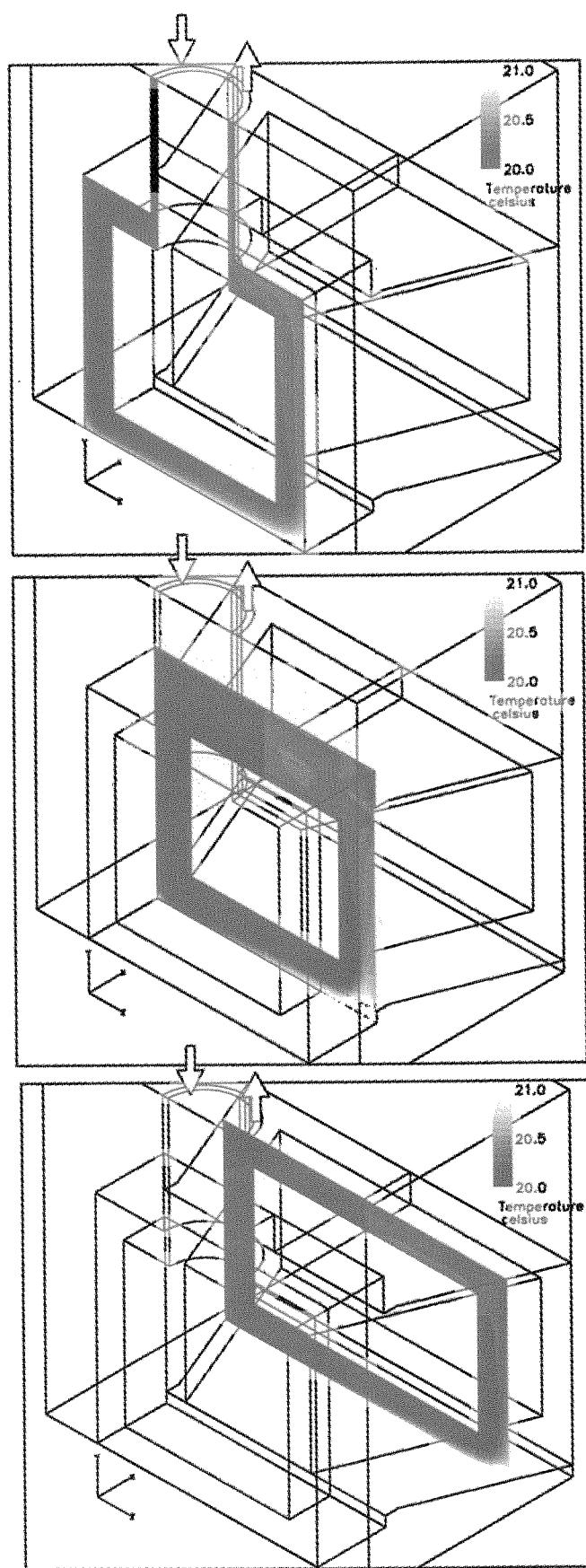


Fig.9 Analytical Results of the Temperature Contours at three Cut-Sections

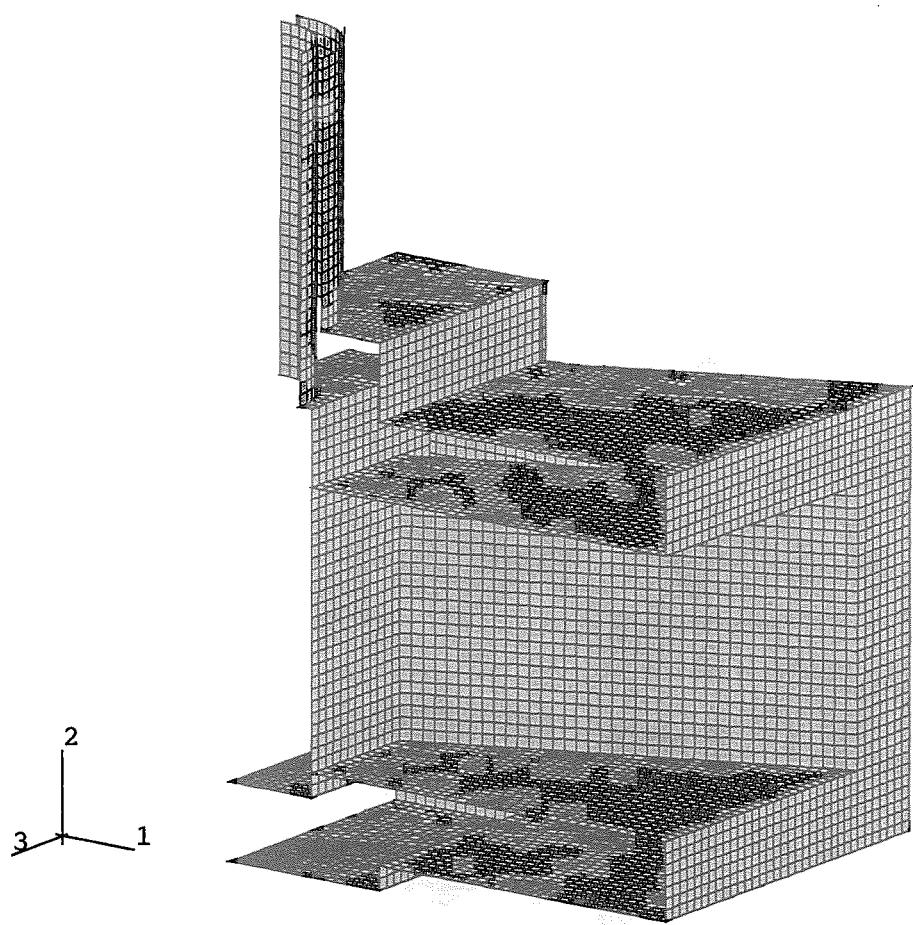


Fig.10 Analysis Model of the Premoderator Vessel

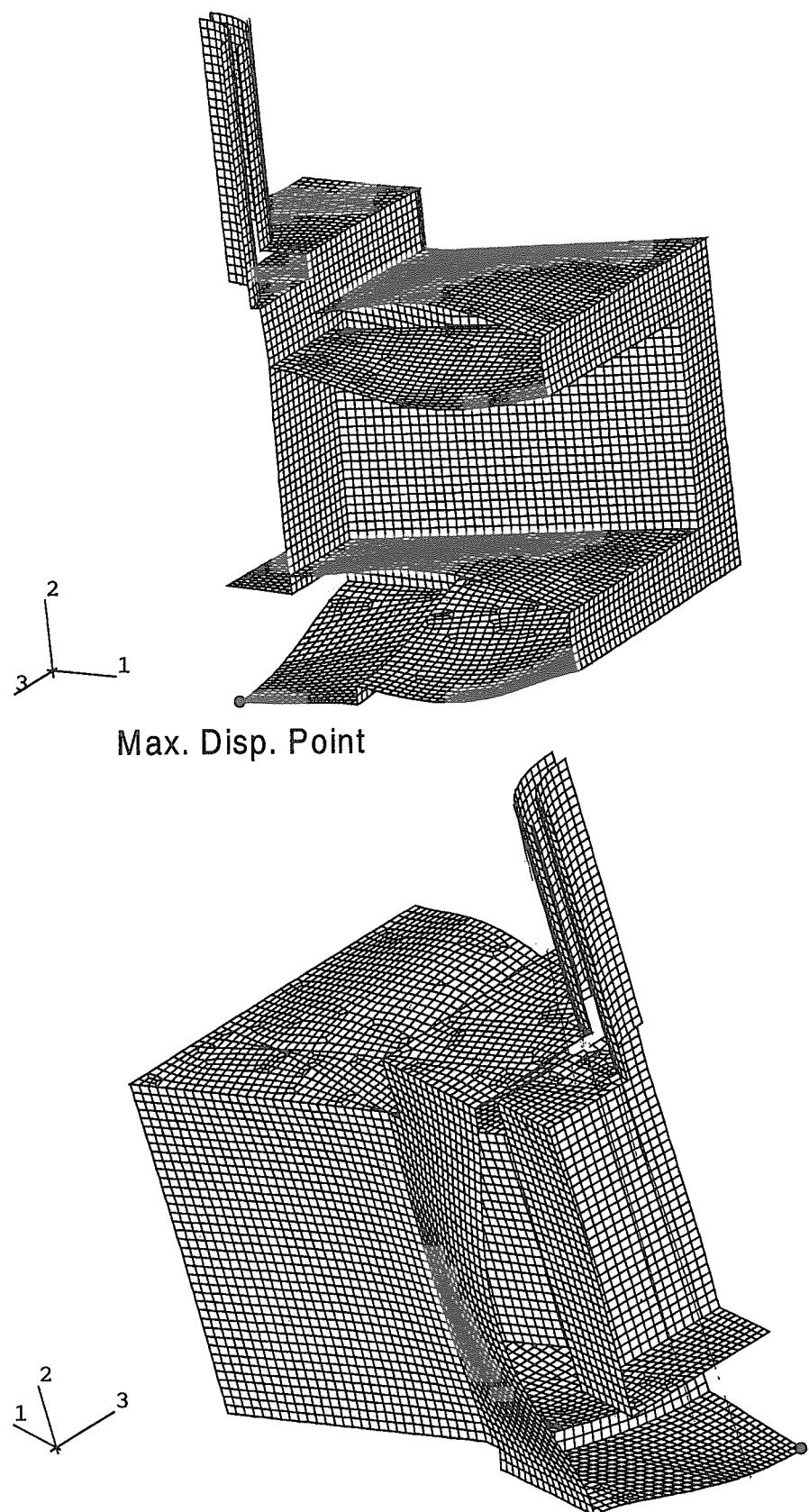


Fig.11 Analytical Results of the Deformations ( t:4mm )

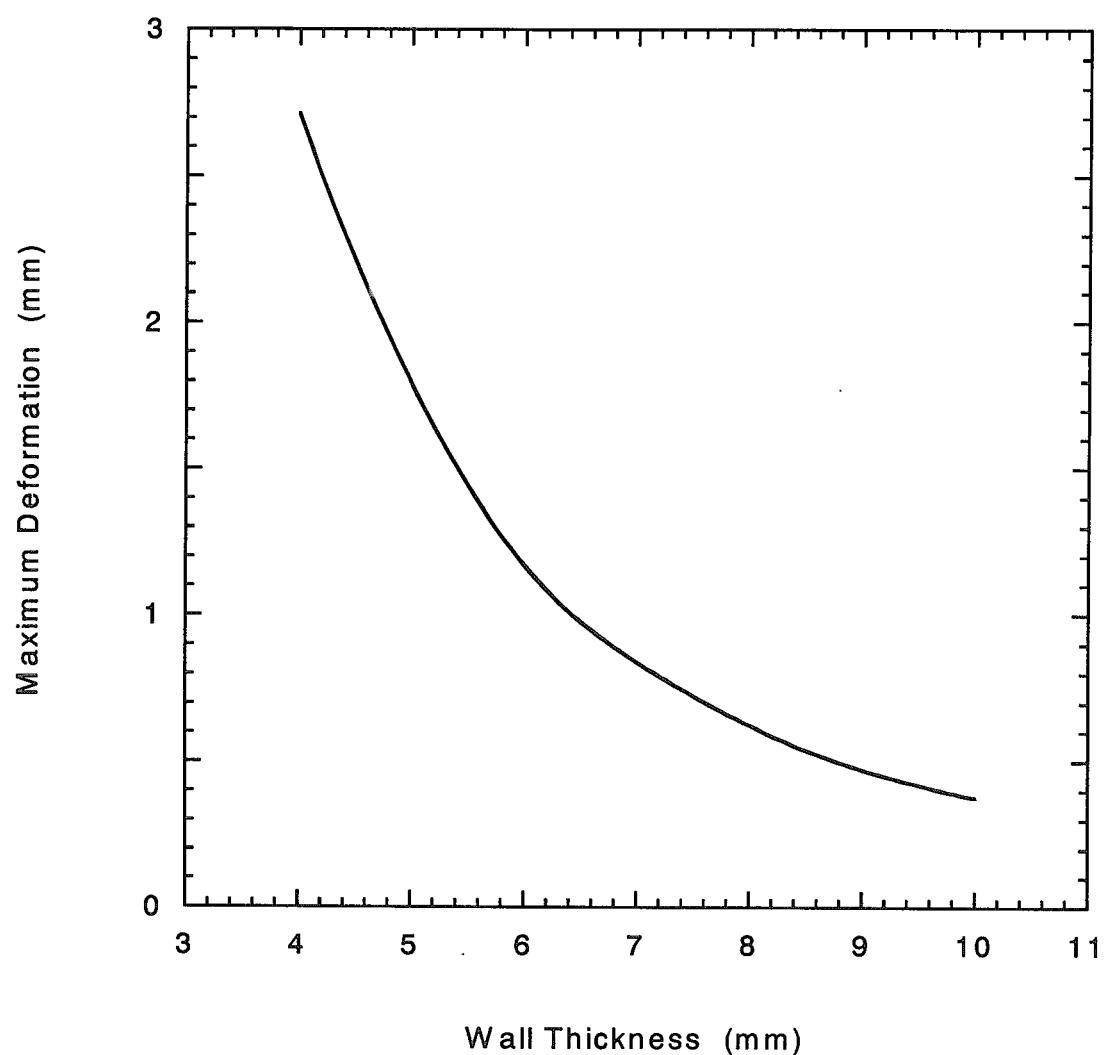


Fig.12 Relationship between Wall Thickness and Maximum Deformation at 0.5MPa

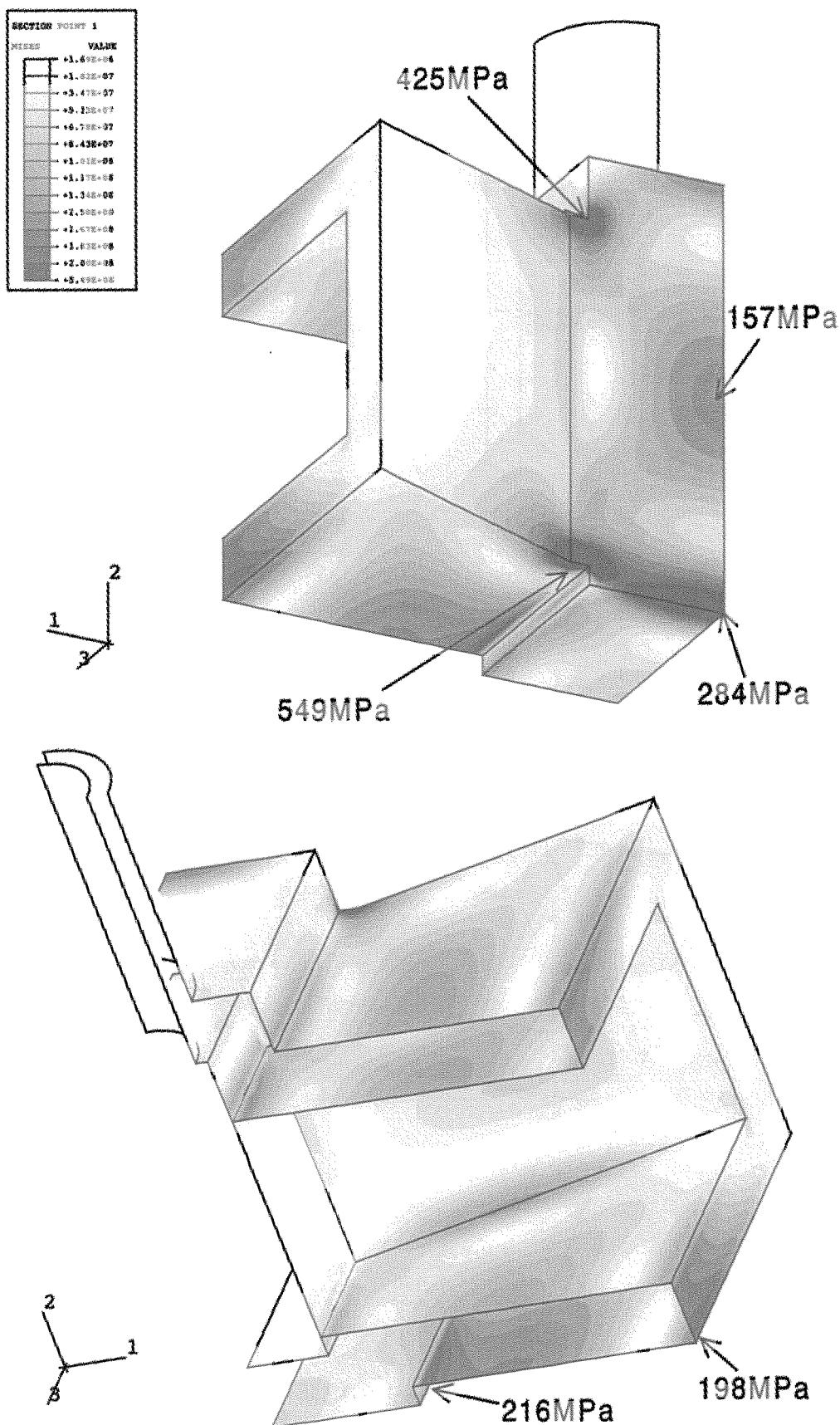


Fig.13 Analytical Results of the Mises Stress Distributions  
at Inner Surface ( t:4mm )

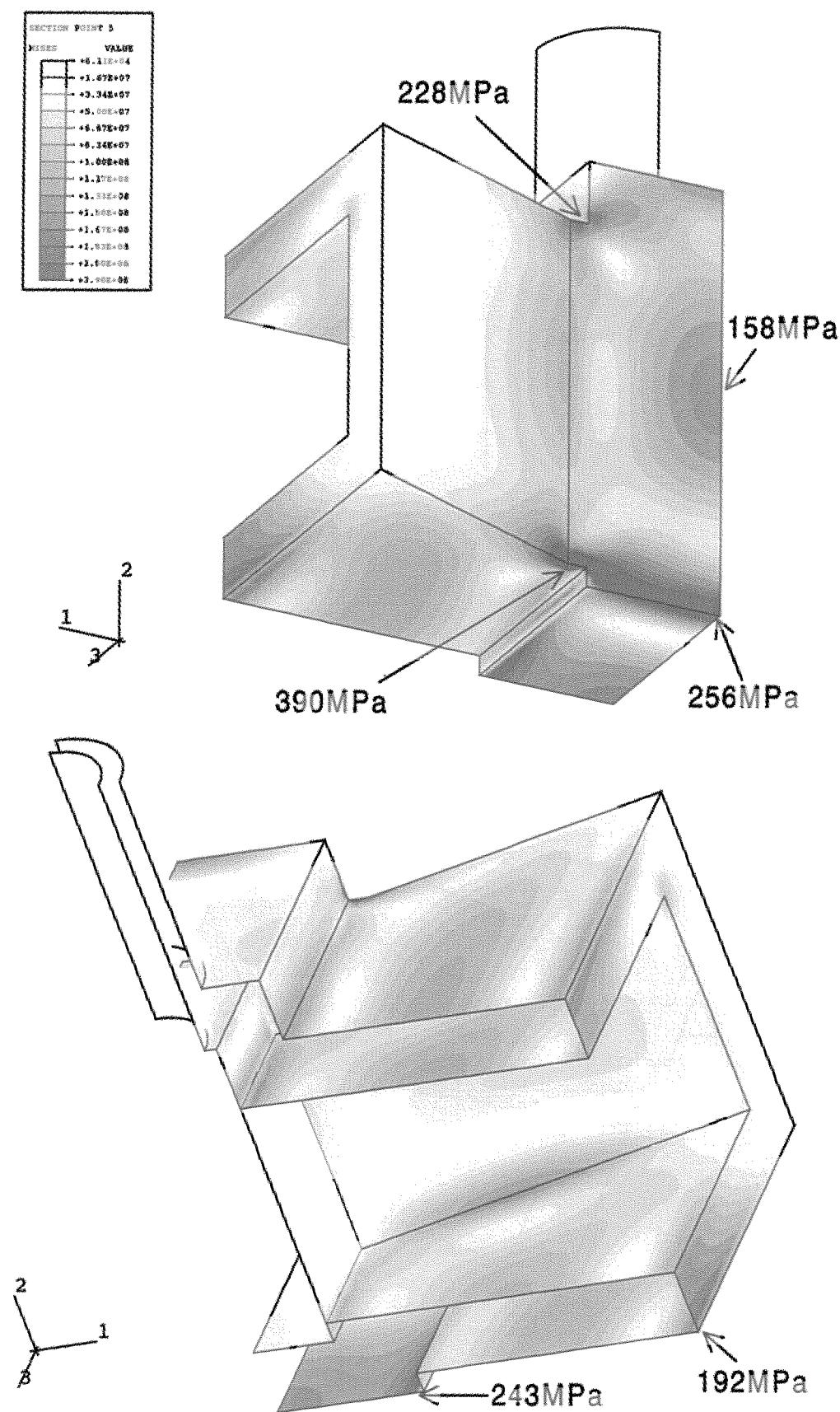


Fig.14 Analytical Results of the Mises Stress Distributions at Outer Surface ( t:4mm )

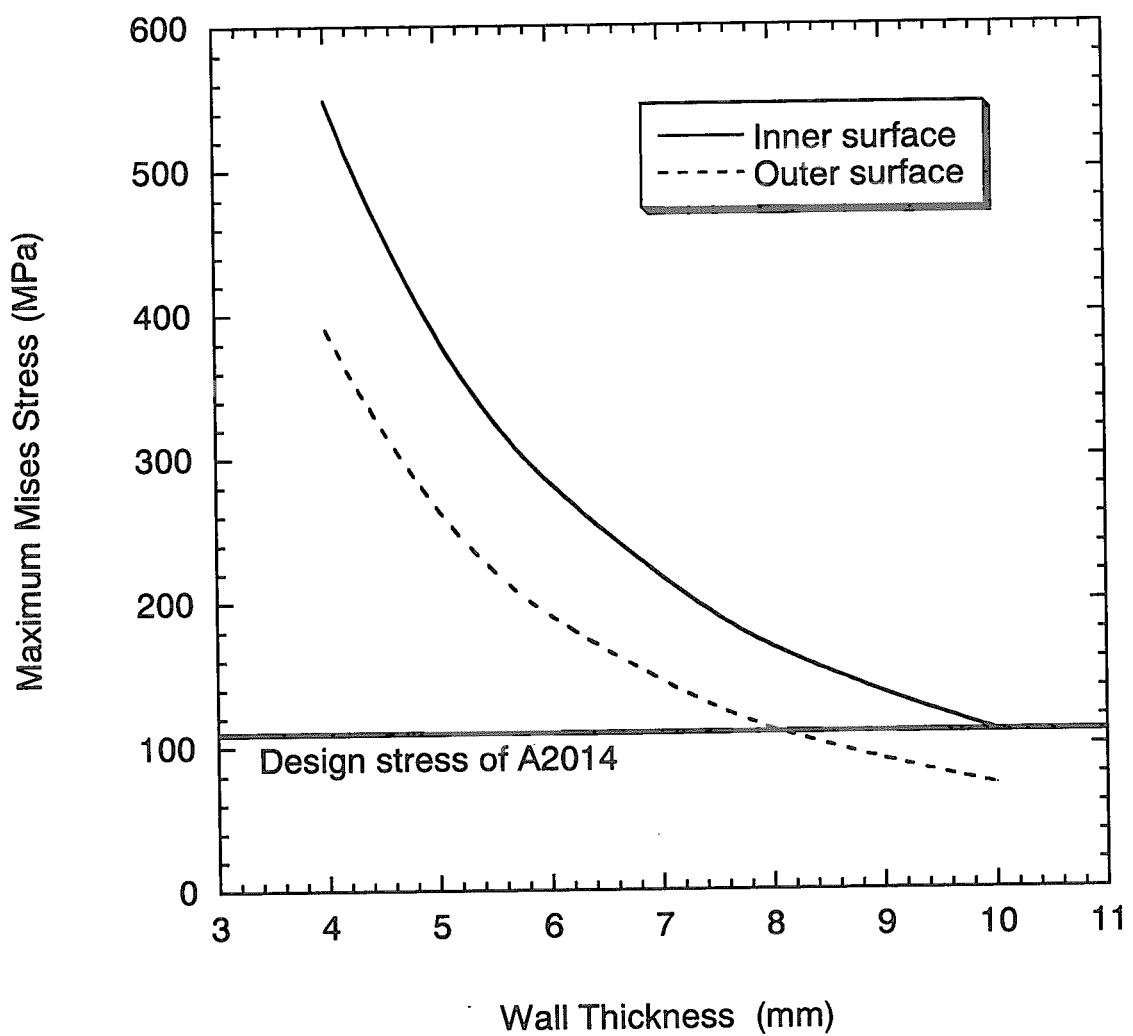


Fig.15 Relationship between Wall Thickness and Maximum Mises Stress at 0.5MPa

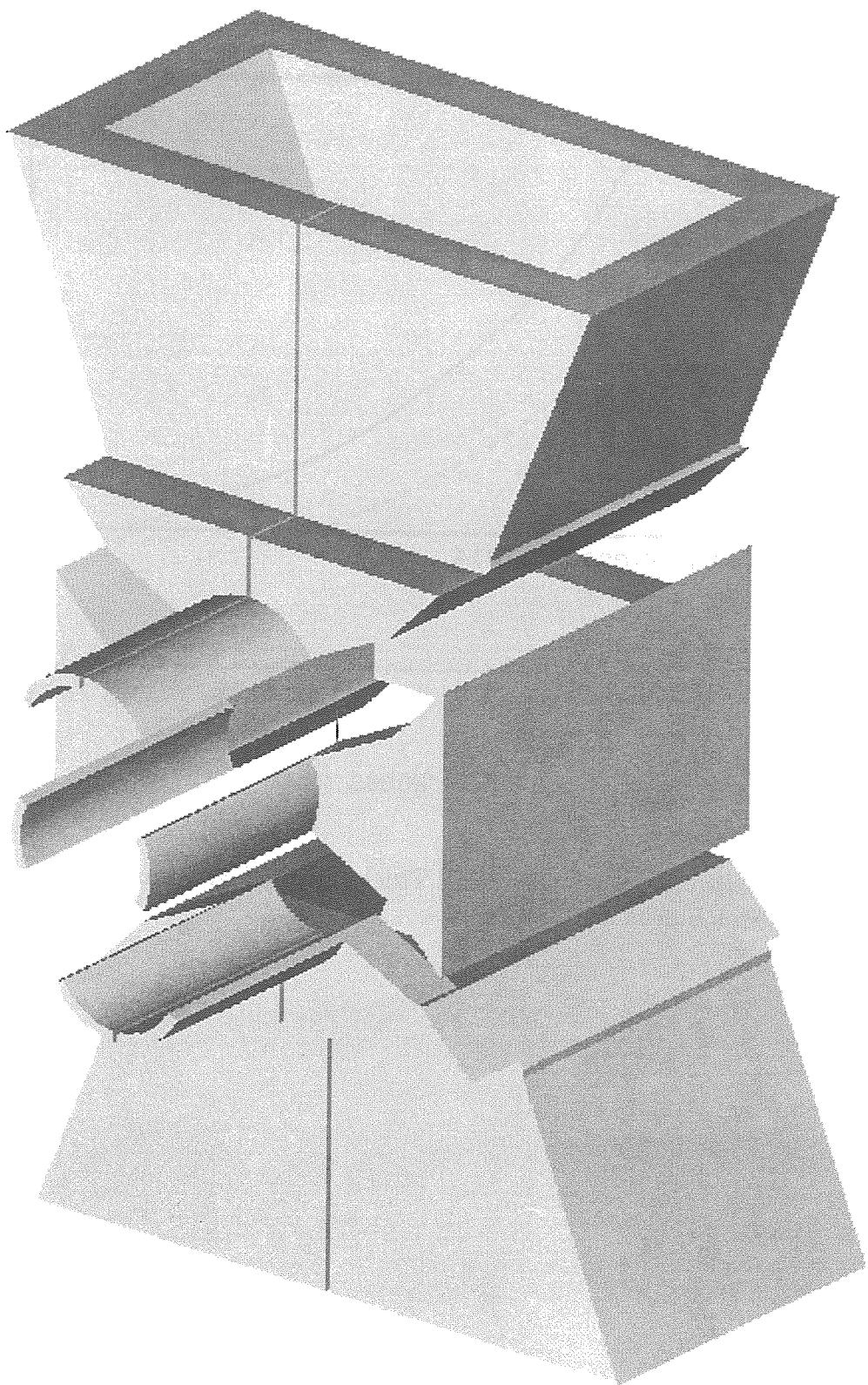


Fig.16 An Idea of Premoderator Structure Devided Three Parts

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

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

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

表5 SI接頭語

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

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版  
度量衡局 1985年刊行による。ただし  
および1uの値はCODATAの1986  
値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、  
ールも含まれているが日常の単位な  
どでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表  
合に限り表2のカテゴリーに分類さ  
る。
- EC閣僚理事会指令ではbar, ba  
び「血圧の単位」mmHgを表2の方  
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

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストーカス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (ps)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	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 cal = 4.18605 J(計量)
	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>	= 4.184 J(熱)
	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>	= 4.1855 J(15°)
	3.6 × 10 <sup>6</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>	= 4.1868 J(国際)
	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>	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	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>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	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

