

JAERI-Tech  
2004-018



JP0450285



ポイズン付き冷減速材容器の熱流動解析  
第1報：ポイズン板配置の検討

2004年 3月

佐藤 博・麻生 智一・粉川 広行・勅使河原 誠・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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

ポイズン付き冷減速材容器の熱流動解析

第1報：ポイズン板配置の検討

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  
佐藤 博・麻生 智一・粉川 広行・勅使河原 誠・日野 竜太郎

(2004年1月23日受理)

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設を進めている MW 級核破碎中性子源において、液体水素を用いる冷減速材は中性子強度やパルス特性などの中性子性能を直接的に与える重要な機器である。減速材容器内における水素温度の上昇が中性子性能に影響するため、ホットスポットの原因となる容器内の再循環流域や流れの停滞域を抑制することが重要となる。設置される3台の冷減速材のうちポイズン付き冷減速材は、容器内にポイズン板を置くため最も停滞域を生じやすい。そこで、基本となる容器内構造を提案し、汎用3次元熱流体解析コード STAR-CD を用いて熱流動解析を行った。その結果、容器底部において、ポイズン板との間に隙間を設けることで再循環流域や流れの停滞域を抑制して、局所的な温度上昇を設計要求値以下に抑えられることを確認した。

Thermal-hydraulic Analyses of Poisoned Cold Moderator Vessel  
Part 1 : Study on Poison Plate Layout

Hiroshi SATO, Tomokazu ASO, Hiroyuki KOGAWA,  
Makoto TESHIGAWARA and Ryutaro HINO

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

(Received January 23, 2004)

The Japan Atomic Energy Research Institute is constructing a mega-watt class spallation neutron source in cooperation with the High Energy Accelerator Research Organization. A cold moderator using liquid hydrogen is one of the key components in the system, which directly affects the neutronic performance both in intensity and pulse time structure. Since a hydrogen temperature rise in the moderator vessel affects the neutronic performance, it is necessary to suppress the recirculation and stagnant regions which would cause hot spots. A cold moderator with a poison plate (poisoned decoupled moderator) has a high possibility to generate the stagnant region on and near the poison plate. Thermal-hydraulic analyses were carried out with proposed inner structure of the poisoned cold moderator. The stagnant and recirculation regions could be reduced by making a gap between the poison plate end and the vessel bottom surface, and the local temperature rise also could be kept under the required design value.

Keywords: Spallation Target System, Cold Moderator, Liquid Hydrogen,  
Thermal-hydraulic Analysis, Poison Plate

## 目 次

1. 概 要 .....	1
2. ポイズン付き冷減速材容器の熱流動解析 .....	2
2.1 容器及びポイズン板の形状 .....	2
2.2 ポイズン板の配置 .....	2
2.3 解析手法 .....	3
2.4 解析結果 .....	4
3. あとがき .....	6
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	7

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Thermal-hydraulic Analyses of Poisoned Moderator Vessel .....	2
2.1 Shape of Moderator Vessel and Poison .....	2
2.2 Layout of Poison Plate .....	2
2.3 Numerical Method .....	3
2.4 Analytical Results .....	4
3. Concluding Remarks .....	6
Acknowledgment .....	6
References .....	7

This is a blank page.

## 1. 概要

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構との共同プロジェクトである大強度陽子加速器計画 (J-PARC) <sup>(1)</sup> では、MW 級核破砕中性子源から発生する大強度中性子ビームを利用して生命科学や物質科学等の広範囲な分野で先端的な研究を行う物質・生命科学実験施設機器の製作を始めている。核破砕中性子源となるターゲットシステム<sup>(2)</sup>は、大強度陽子ビーム (3GeV、0.33mA、出力 1MW) による核破砕反応で効率的に中性子を発生する水銀ターゲット、その発生した中性子を減速材に集める反射体、中性子を研究用途に合うエネルギーに減速する液体水素冷減速材等から構成される<sup>(3)</sup>。これらの機器のうち液体水素 (1.5Mpa 以下、20K) を用いる冷減速材は、核破砕中性子源の中性子性能を決定する上で特に重要である<sup>(4)</sup>。Fig.1.1 に水銀ターゲットと冷減速材の配置を示す。冷減速材は、高分解能の中性子ビームを取り出す非結合型冷減速材と、高積分強度の中性子ビームを取り出す結合型冷減速材の2種類である。ターゲット上部に設置する2台の非結合型冷減速材は扁平型容器構造で、そのうち1台は、パルスをよりシャープにするため容器内にカドミウム製のポイズン板を設置する(ポイズン付き冷減速材)。ターゲット下部には円筒型容器構造の結合型冷減速材を設置する。減速材容器での中性子吸収損失等を抑制するため、容器構造材には中性子吸収率の低いアルミニウム合金を用い、かつ耐圧薄肉構造とする。また、冷減速材内の液体水素と容器は厳しい核発熱条件下にあり、特に水銀ターゲットに隣接する減速材容器底面で発熱密度が最も高くなる。そこで、衝突噴流により効率的に冷却することとし、液体水素は容器内に挿入された流入配管から噴出し、容器底面に衝突した後、壁面に沿って流出する構造とした<sup>(5)</sup>。衝突噴流は容器の冷却には有効であるが、噴流の随伴流<sup>(6)</sup>により再循環流域や流れの停滞域を伴うため局所的な温度上昇を生じやすい。そのため、結合型及び非結合型冷減速材については、アクリル製模擬容器を用いた水による可視化実験で流動パターンの解明が行われてきた。さらに、実験結果を基に実機設計用の汎用3次元熱流体解析コード STAR-CD の検証を行い、流動パターンをよく再現できることを明らかにした<sup>(7,8)</sup>。一方、ポイズン付き冷減速材については内部のポイズン板の形状等を中性子性能の観点から最適化する検討が進められてきた。これを受けて、ポイズン板による流れの停滞域を抑制するため、ポイズン板の配置等を変えた2種類の容器構造を提案し、それらの成立性を検討した。本報告書ではその結果について述べる。

## 2. ポイズン付き冷減速材容器の熱流動解析

### 2.1 容器及びポイズン板の形状

ポイズン付き冷減速材容器の構造を Fig.2.1 に示す。この減速材容器構造は非結合型冷減速材容器と同一である。容器内に置かれるポイズン板の寸法と位置を Fig.2.2 に示す。このポイズン板はニュートロニクス解析を基に寸法と位置が決定された<sup>9)</sup>。ポイズン板の主材料であるカドミウムの厚さは1.8mm、縦横の寸法は100mm以上×100mm以上、設置位置は容器中心からカドミウム中心までの距離が6mm離れた非対称位置である。カドミウム表面にはアルミニウム合金の薄膜をコーティングする予定であり、膜厚は最大で0.5mmである。なお、本解析では膜厚を0.5mmとして解析評価した。

### 2.2 ポイズン板の配置

ポイズン板の配置については内部流路構造が非対称な場合と対称な場合の2つのモデルを考案して解析評価を行った。以下に各モデルの概要と特徴及び解析モデルを示す。

#### (1) モデル1 (非対称流路モデル)

Fig.2.3 にモデル1の容器内構造を示す。ポイズン板が容器中心からオフセットされて設置されるため液体水素の流路は非対称構造となる。ポイズン板により2分割された容器内の各領域について、狭い方を領域1、広い方を領域2とそれぞれ呼ぶこととする。ポイズン板の寸法は縦110mm、横120mmとし、ポイズン板の四角で容器内壁と接触させて板の振れ止めとなるようにし、容器底面及び側面との間には最大で5mmとなる隙間を設けた。隙間を介して領域1と領域2の流体を混合させるようにして、流れの停滞域や再循環流域を抑制する効果を与える。液体水素流入配管は領域1側を上部からの吹き出しとし、領域2側を衝突噴流とした。流入配管の内径は21.4mm、肉厚は1mmで、噴出口はそれぞれ容器底面から65mmと10mmである。衝突噴流の噴出口高さ10mmは実験結果<sup>10)</sup>から定めた。

Fig.2.4 にモデル1の解析格子を示す。解析格子は、Tetra 及び Prismo (高さ:0.35mm、2層)メッシュで作成し、総格子数は、1,129,344 (流体:774,645、容器及び配管:251,425、ポイズン板:103,274)である。

#### (2) モデル2 (対称流路モデル)

Fig.2.5 にモデル2の容器内構造を示す。ポイズン板のオフセットを相殺して流量の偏りを防止するため、厚さ1mmの仕切板をポイズン板と対称な位置に設置した。ポイズン板及び仕切板の形状は容器内壁面に密着するように設置する。これにより、容器内は3分割されるが、容器-ポイズン板間を領域1、ポイズン板-仕切板間を領域2、仕切板-容器間を領域3と呼ぶこととする。液体水素流入配管はポイズン板及び仕切板により3分割され、各領域とも容器底面から10mmの位置を噴出口とした。流入配管内径は流量の偏りを防止するため容器入口で21.4mmから30mmまで拡大することとした。配管肉厚は0.5mmとして解析評価した。

Fig.2.6 にモデル2の解析格子を示す。解析格子は、Tetra 及び Prismo (高さ:0.35mm、2層)メッシュで作成し、総格子数は、1,334,529 (流体:963,846、容器及び配管:244,120、ポイズン及び仕切板:126,563)である。



## 2.3 解析手法

### (1) 解析コード及び解法

非構造格子・有限体積法による汎用 3 次元熱流体解析コード STAR-CD を使用し、定常・非圧縮性流れとして解析を行った。圧力解法は SIMPLE 法、対流項の差分法には 1 次精度風上差分を用いた。

### (2) 物性値

(a) 液体水素 1.4MPa、20K における下記の液体水素の物性値<sup>(11)</sup>を使用した。

- ・密度 : 72.74kg/m<sup>3</sup>
- ・粘性係数 : 14.0 μPa·s
- ・比熱 : 8977J/(kg·K)
- ・熱伝導率 : 0.103W/(m·K)

(b) 容器及び配管 300K における下記のアルミニウム合金 (A6061) の物性値<sup>(12)</sup>を使用した。

- ・密度 : 2700kg/m<sup>3</sup>
- ・比熱 : 896J/(kg·K)
- ・熱伝導率 : 180W/(m·K)

(c) ポイズン板 150K における下記のカドミウムの物性値<sup>(13)</sup>を使用した。

- ・密度 : 8760kg/m<sup>3</sup>
- ・比熱 : 214J/(kg·K)
- ・熱伝導率 : 101W/(m·K)

### (3) 乱流モデル

乱流モデルは、速度場に高レイノルズ数型線形  $k-\varepsilon 2$  方程式モデル、温度場に 0 方程式モデル (乱流プラントル数が一定) をそれぞれ用いた。乱流プラントル数  $Pr_t$  については、下記の笠木らにより提案された整理式<sup>(14)</sup>から 0.993 とした。

$$Pr_t = 0.75 + \frac{1.63}{\ln\{1 + (Pr/0.0015)\}} \quad (2.1)$$

ここで、 $Pr$  は分子プラントル数である。

### (4) 境界条件

境界条件を以下に示す。

- ・流入境界条件 : 流入配管内平均流速 1.5m/s  
液体水素温度 18K
- ・流出境界条件 : 流出方向の 1 階微分がゼロ
- ・壁面条件 : 壁関数

## (5) 発熱密度

Fig.2.7 に、1MW 陽子ビーム条件における液体水素、容器及びポイズン板のターゲットから垂直方向の発熱密度分布を示す。解析では発熱密度を下記のフィッティング関数で表し、水平方向にはその発熱密度が一様に分布するものとして与えた。この条件で解析モデルに与えられる総発熱量は約 1.2kW である。なお、配管及びモデル 2 の仕切板は、同じアルミニウム合金製である容器の発熱密度を与えている。

$$\begin{aligned} \text{Heat density of hydrogen (W/cm}^3\text{)} \\ =0.61912-5.7744Y+52.115Y^2-349.79Y^3+1104.9Y^4-1247.2Y^5 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Heat density of vessel (W/cm}^3\text{)} \\ =1.2047-5.1731Y+75.932Y^2-706.83Y^3-2320.0Y^4+2488.1Y^5 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Heat density of poison (W/cm}^3\text{)} \\ =3.7152-21.47Y-146.38Y^2+8941.5Y^3-26439Y^4-1516600Y^5 \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、Y は減速材容器中心からの距離 (m) である。

## 2.4 解析結果

Fig.2.8 にモデル 1 及びモデル 2 の各領域を通過する流量を示す。モデル 1 では 0.48L/s が衝突噴流、残りの 0.06L/s が上部からの吹き出しとなっており、液体水素のほぼ全てが衝突噴流に使われていることがわかる。衝突噴流に使われる 0.48L/s のうち 0.17L/s が領域 1 に流れており、上部からの吹き出しを合わせて領域 1 には 0.23L/s が流れ込む。一方、ポイズン板と容器の隙間から 0.05L/s が領域 2 へ流れるため、領域 1 上部から流出配管に流入する流量は 0.18L/s となっている。すなわち、領域 1 と 2 から流出配管に流入する流量は 0.18L/s と 0.36L/s である。領域 1 と領域 2 の体積比は 37 : 63 であり、領域 1 を通過する流量はこの体積比に近い値であり、流量が良好に配分されていると言える。モデル 2 は上部からの吹き出しを設けていないため全ての液体水素が衝突噴流に使われる。領域別の流量は領域 1 に 0.15L/s、領域 2 に 0.19L/s、領域 3 に 0.20L/s となっている。モデル 1 に較べると領域 1 に流入する流量が少ない。また、各領域の体積を比で表すと、37 (領域 1) : 21 (領域 2) : 42 (領域 3) であり、領域 2 に流入する流量は体積に較べ多いと考えられる。容器出入り口での圧力損失は、モデル 1 が 0.17kPa、モデル 2 が 0.1kPa でありモデル 2 のほうが低い。

Fig.2.9 に中性子取り出し側の壁面近傍ベクトル線図、Fig.2.10 に容器内壁面温度分布を示す。モデル 2 では領域 2 に流入する流量が多いため側面での流れはモデル 2 のほうが速く、側面の温度も低くなっている。中性子取り出し面付近ではモデル 1、モデル 2 とともに複雑な循環流が形成されるため流速が遅くなっている。その結果、流れのほとんどない停滞域が存在している。発熱密度は容器底面で最大となるが底面は衝突噴流による冷却としているためほとんど温度上昇は見られず、停滞域が存在する中性子取り出し面で最高温度となっている。最高温度はモデル 1 で 30.0K、モデル 2 で 30.2K とほぼ同じ値である。これらの最高温度における飽和圧力は 0.8MPa であり、最大 1.5MPa としている

運転圧力を 1.0MPa 程度まで下げることができる。

Fig.2.11 に中性子取り出し面側から見た中心軸垂直断面のベクトル線図、Fig.2.12 に容器及び液体水素温度分布を示す。壁面に沿った流れを比較するとモデル 2 のほうが速い。そのため容器の温度が低くなっている。流れのパターンを見ると再循環流域が形成されている点では同様であるが、モデル 2 のほうが大きな再循環流域となっている。また、再循環流域での温度はモデル 2 のほうが高い。Fig.2.13～Fig.2.15 に各断面における容器及び液体水素の温度分布を示す。モデル 2 の領域 2 ではポイズン板と仕切板をつなぐように温度の高い領域が存在することがわかる。これは再循環流中心領域がポイズン板から仕切板にまで及びたためである。

Fig.2.16 に側面から見た中心軸垂直断面のベクトル線図、Fig.2.17 に容器及び液体水素温度分布を示す。モデル 1、モデル 2 とともに底面に衝突した流れは壁面に沿って発達するが途中で複雑な循環流となり、壁面近傍には停滞域が形成される。停滞域で温度が高いといった温度分布のパターンは同じであるが、全体に温度分布はモデル 2 のほうが高い。これはモデル 2 では領域 1、3 に分配される流量が少ないためである。

Fig.2.18 に各温度範囲の液体水素の割合を示す。モデル 1 では 22K 未満の液体水素の割合が約 97% であり、入口温度に対する温度上昇はほぼ 4K 以内となっている。モデル 2 では 22K 未満の液体水素の割合が約 71% でありモデル 1 よりも低くなっている。これは領域 2 の再循環流中心領域で温度が上昇しているためであり、仕切板を設置したことで流体の混合が妨げられ局所的な温度上昇が生じたと考えられる。

### 3. あとがき

ポイズン付き冷減速材の容器内はポイズン板を設置するため流れが停滞しやすく、容器内構造を工夫しない場合には液体水素の局所的な温度上昇が大きくなる。そこで、容器内にポイズン板のみを設置した非対称流路のモデル（モデル 1）と、ポイズン板の他に仕切板を設置し容器内流路を対称構造としたモデル（モデル 2）について実機条件下での熱流動解析を行った。モデル 1、モデル 2 とも壁面近傍では液体水素温度が 30K 近くまで上昇しているが、この層は非常に薄いため供給する中性子ビームの特性に与える影響は少ないものと考えられる。容器内壁面での最高温度はモデル 1、2 ともに約 30K であり、これらの最高温度における飽和圧力は 0.8MPa であることから、運転圧力を 1.0MPa 程度とすることができる。壁面近傍を除いた液体水素温度はモデル 2 では約 71%が 22K 未満なのに対して、モデル 1 では約 97%が 22K 未満でありモデル 1 のほうが低い。モデル 2 ではポイズン板と仕切板の間に生じる再循環流域で温度上昇が著しいため、容器内を小さな領域に分ける方式は局所的な温度上昇を生じやすいと言える。これらの結果から、ポイズン付き冷減速材の容器内構造はモデル 1 を基本構造とすることとし、今後さらに製作性等を考慮した最適化を行っていく。

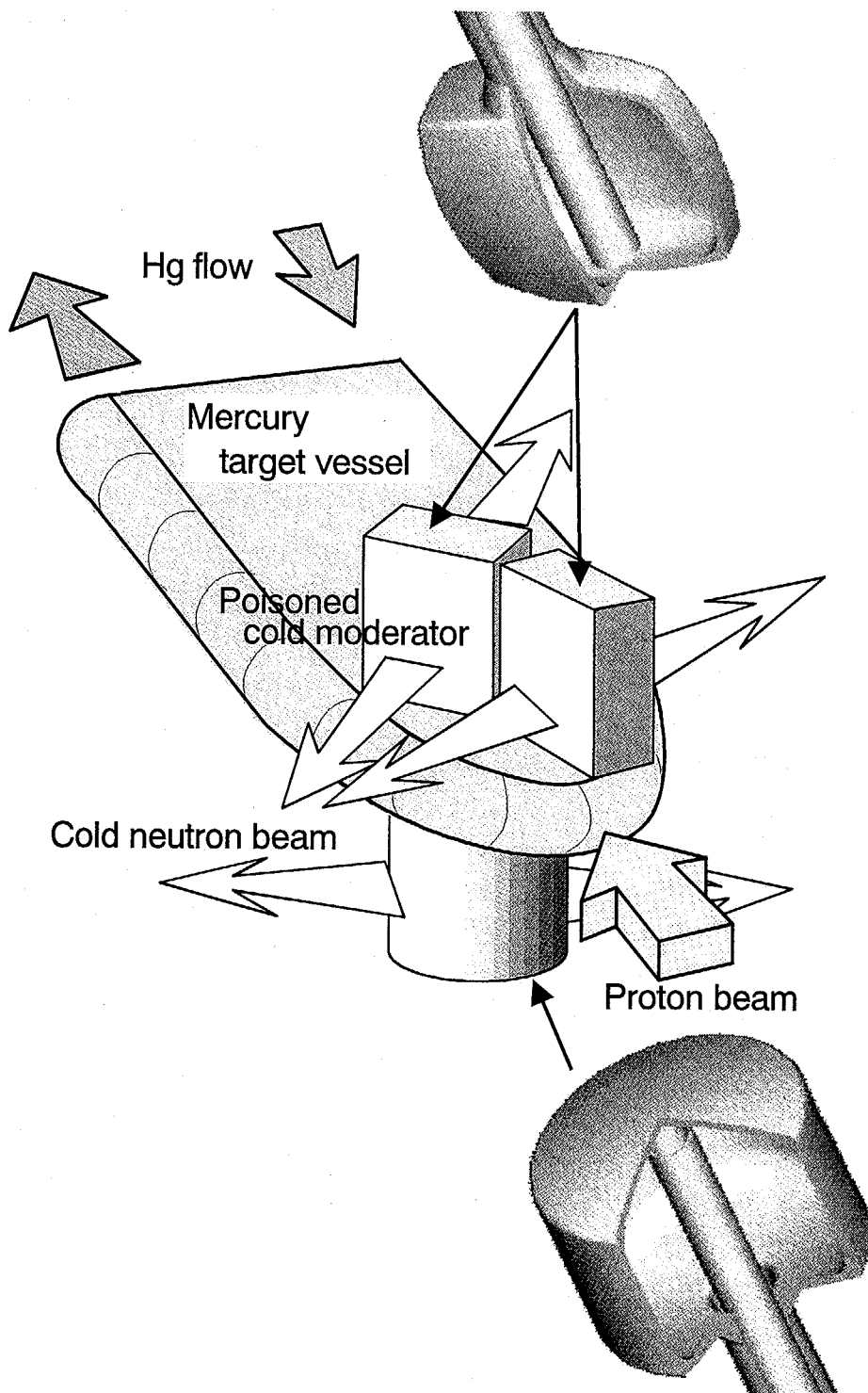
### 謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、中性子施設開発グループの神永雅紀氏に懇切丁寧な助言を賜りました。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 (2000).
- (2) R. Hino, M. Kaminaga, K. Haga, T. Aso, H. Kinoshita, H. Kogawa, S. Ishikura, A. Terada, K. Kobayashi, J. Adachi, T. Teraoku, T. Takahashi, S. Honmura, S. Sasaki and N. Watanabe, “Present Status of Spallation Target Development –JAERI/KEK Joint Project–”, Proc. 15<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, November 6-9, 2000, p.1175-1187, Tsukuba, Japan (2000).
- (3) 日本中性子学会，“波紋”，日本中性子学会設立記念号，Vol.11 No.2, April 2001, p.56-63 (2001).
- (4) 渡辺昇，“核破碎中性子工学概論”，JAERI-Review 2000-031, p173-206 (2001).
- (5) T. Aso, et al., “Structural and Hydraulic Study on Cold Source Moderator”, 14<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, Utica (1998).
- (6) 麻生智一, 神永雅紀, 寺田敦彦, 日野竜太郎, “冷減速材内流動特性の研究 第2報 流動パターン測定・解析と冷減速材容器内熱流動解析”, JAERI-Tech 99-049 (1999).
- (7) 麻生智一, 佐藤博, 神永雅紀, 日野竜太郎, 門出政則, “核破碎中性子源用結合型減速材容器の熱流動実験及び解析評価”, 茨城講演会講演論文集, 2003年9月19日, 206, p45-46 (2003).
- (8) 佐藤博, 麻生智一, 粉川広行, 日野竜太郎, “核破碎中性子源用非結合型減速材容器の熱流動解析”, 茨城講演会講演論文集, 2003年9月19日, 207, p47-48 (2003).
- (9) M. Harada, M. Teshigawara, N. Watanabe, T. Kai and Y. Ikeda, “Optimization of poisoned and unpoisoned decoupled moderators in JSNS”, Proc. 16<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources, May 12-15, 2003, p697-706, Düsseldorf – Neuss, Germany (2003).
- (10) 麻生智一, 神永雅紀, 寺田敦彦, 日野竜太郎, “冷減速材内流動特性の研究 第3報 扁平モデルの流動パターン測定と解析”, JAERI-Tech 2000-018 (2000).
- (11) N. B. Vargaftik, Y. K. Vinogradov and V. S. Yargin, “Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases – Pure Substances and Mixtures – Third Augmented and Revised Edition”, begell house, (1996).
- (12) 日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集”, (1983).
- (13) 日本機械学会, “伝熱工学資料 改訂第4版”, (1986).
- (14) H. K. Myong, N. Kasagi and M. Hirata, “Numerical prediction of turbulent pipe flow heat Transfer for various Prandtl number fluids with the improved  $k-\varepsilon$  turbulence model”, JSME Int. J., Ser. II, 32, p613-622 (1989).

Decoupled cold moderator vessel (Flat type)



Coupled cold moderator vessel (Cylindrical typ

Fig.1.1 Layout of target and cold moderators

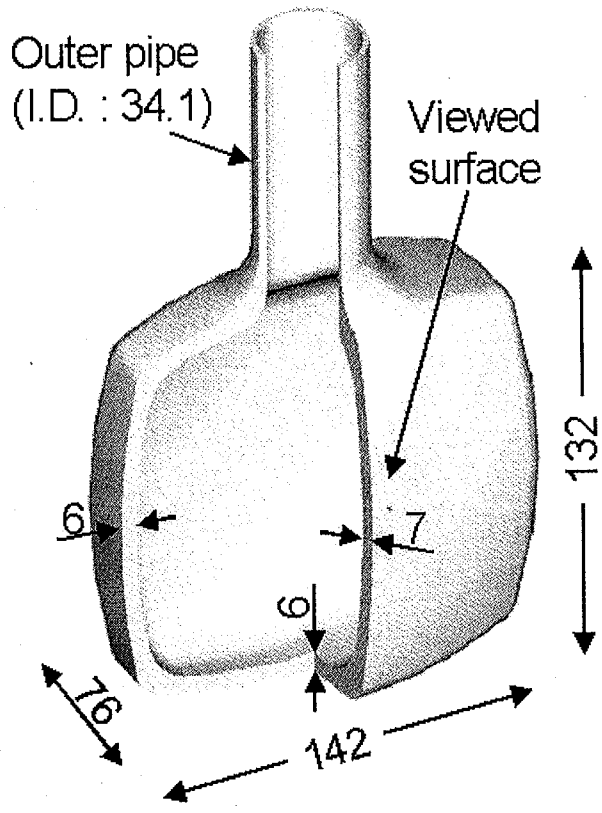


Fig.2.1 Flat type moderator vessel

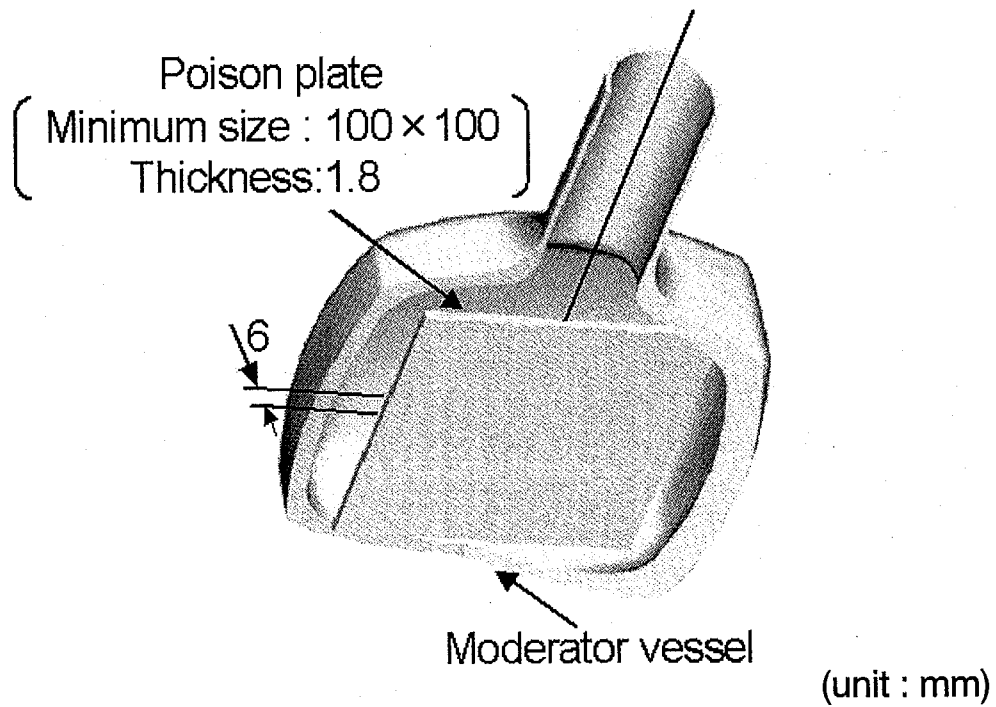


Fig.2.2 Poison plate and moderator vessel

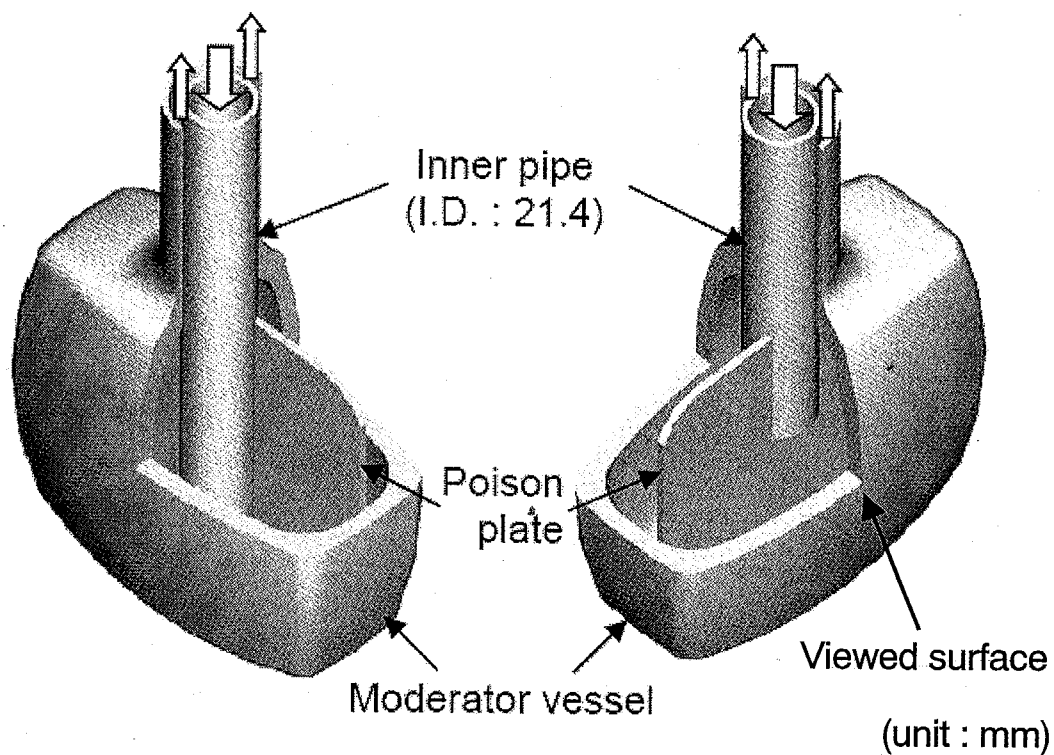


Fig.2.3 Layout of poison plate (Model 1)

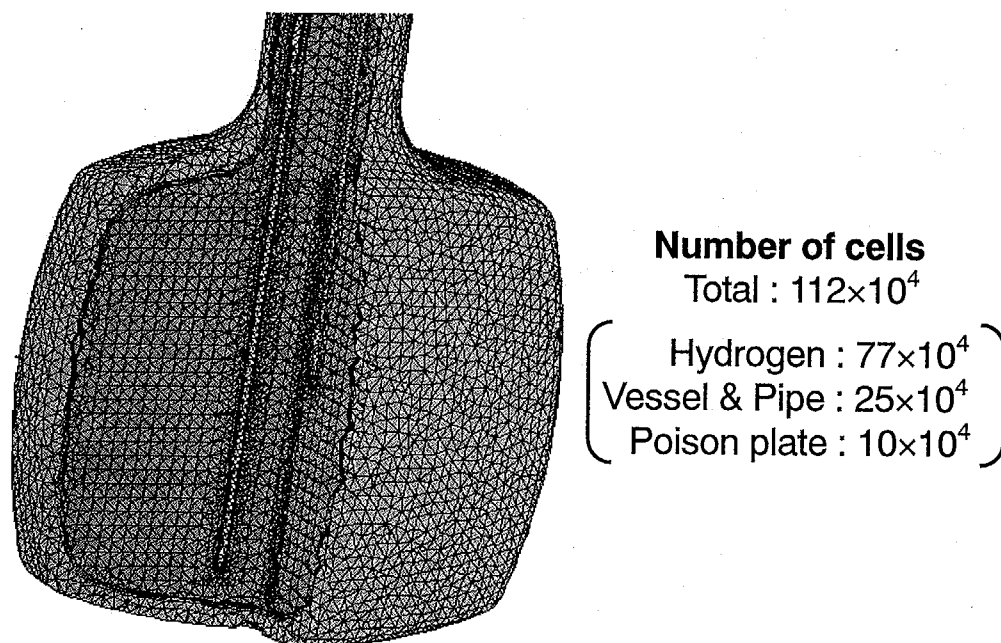


Fig.2.4 Cutaway view of analytical grids (Model 1)



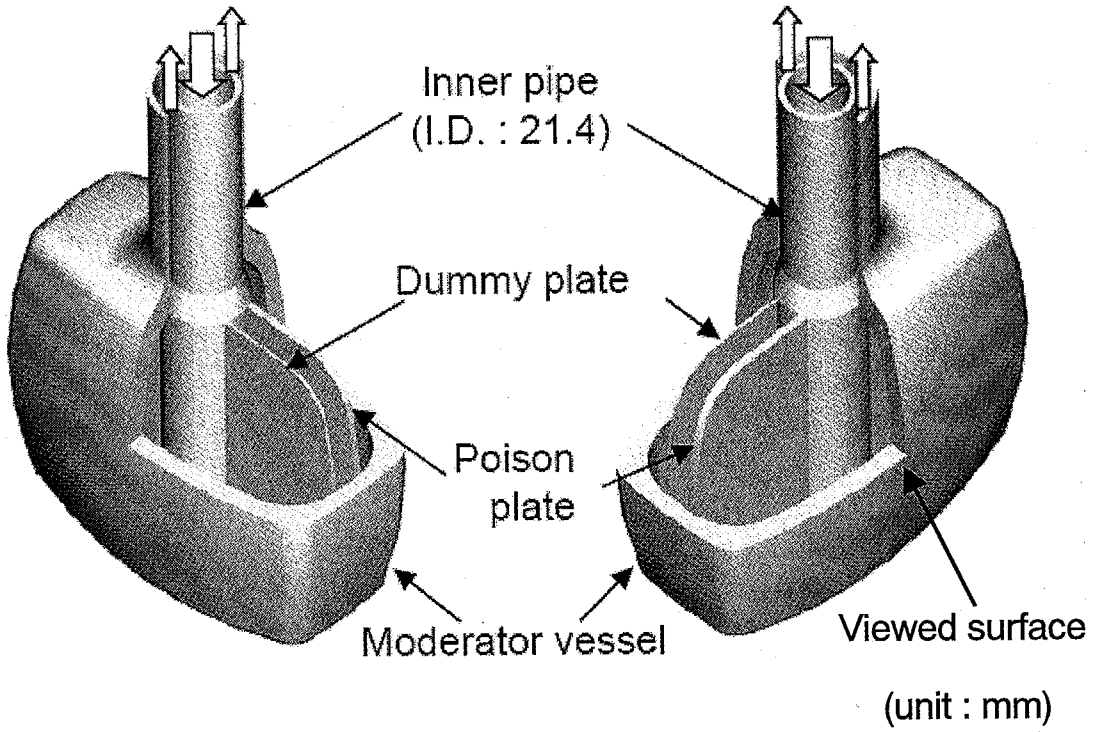


Fig.2.5 Layout of poison plate (Model 2)

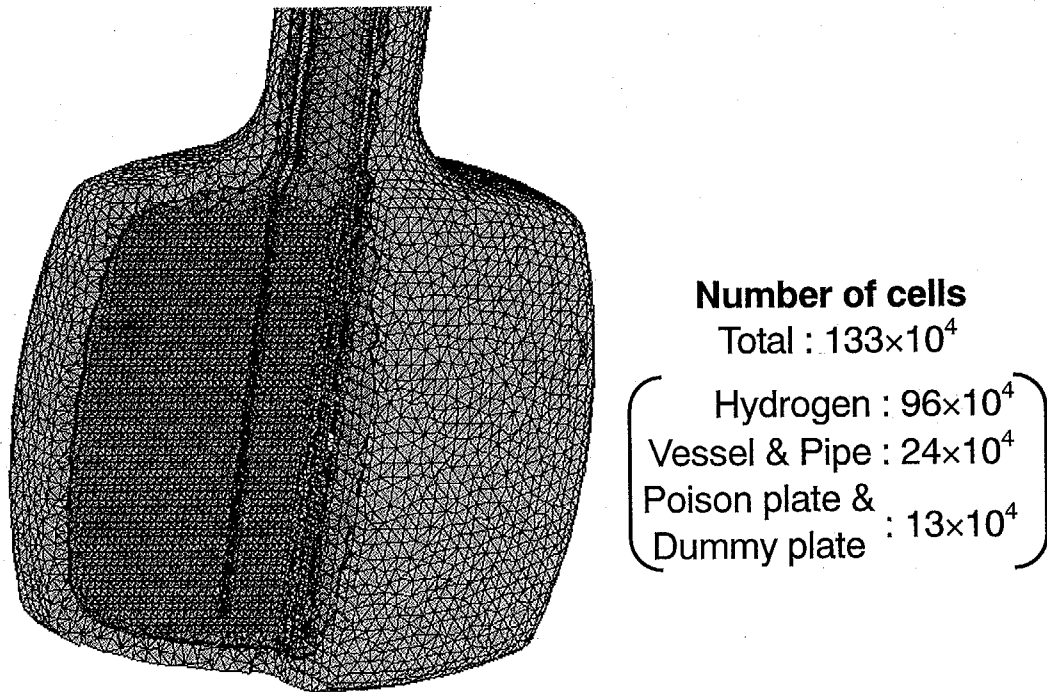


Fig.2.6 Cutaway view of analytical grids (Model 2)

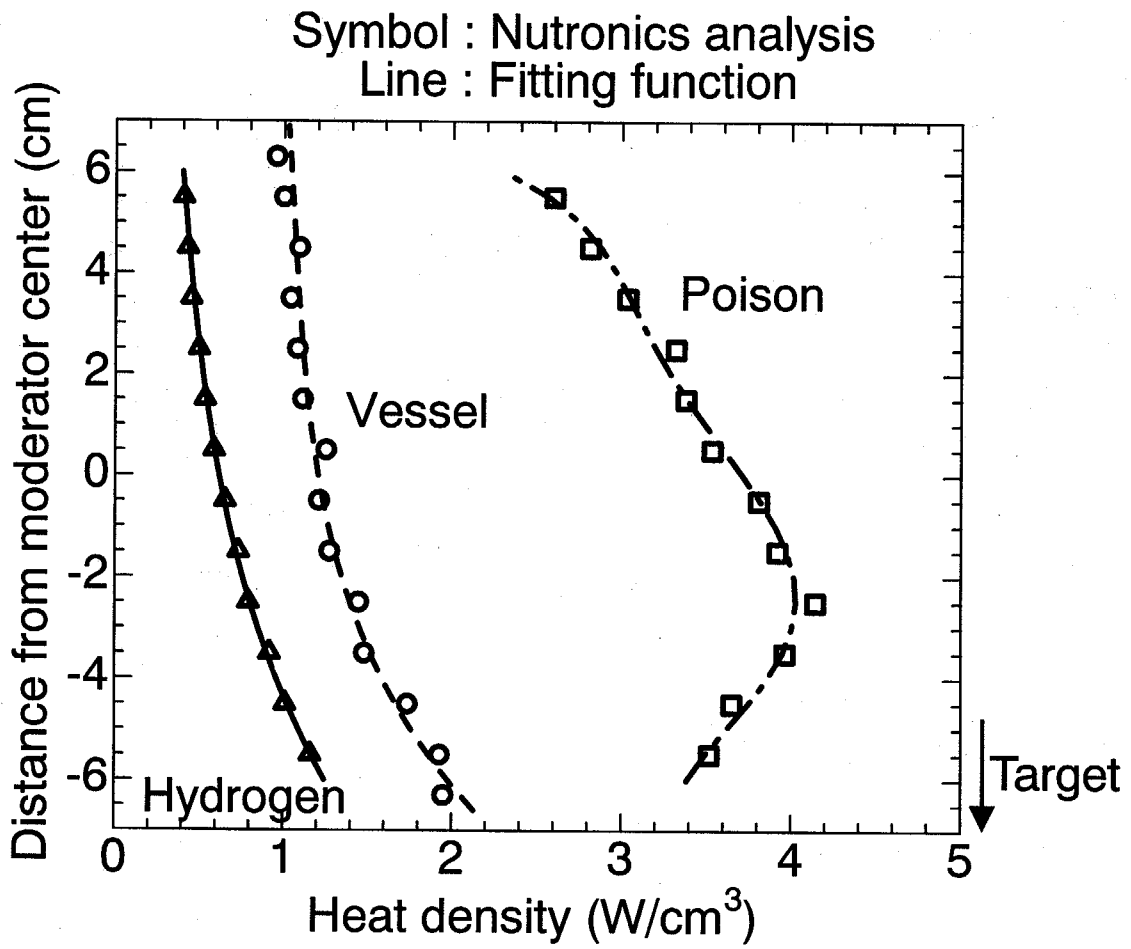


Fig.2.7 Heat density distribution of poisoned moderator

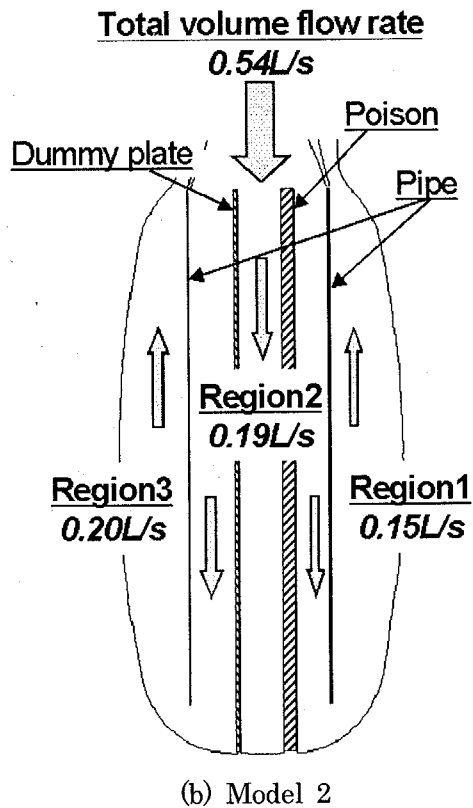
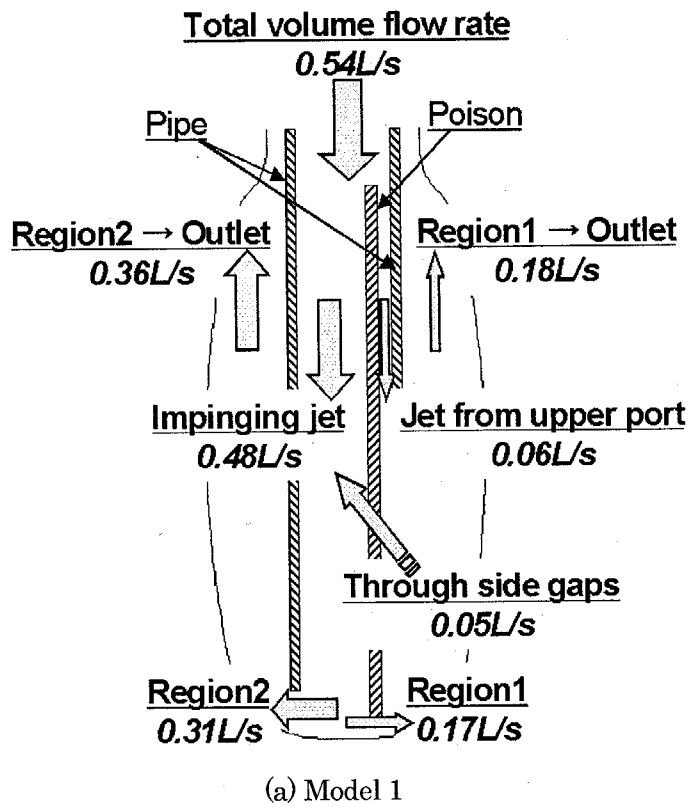


Fig.2.8 Average volume flow rate in moderator vessel

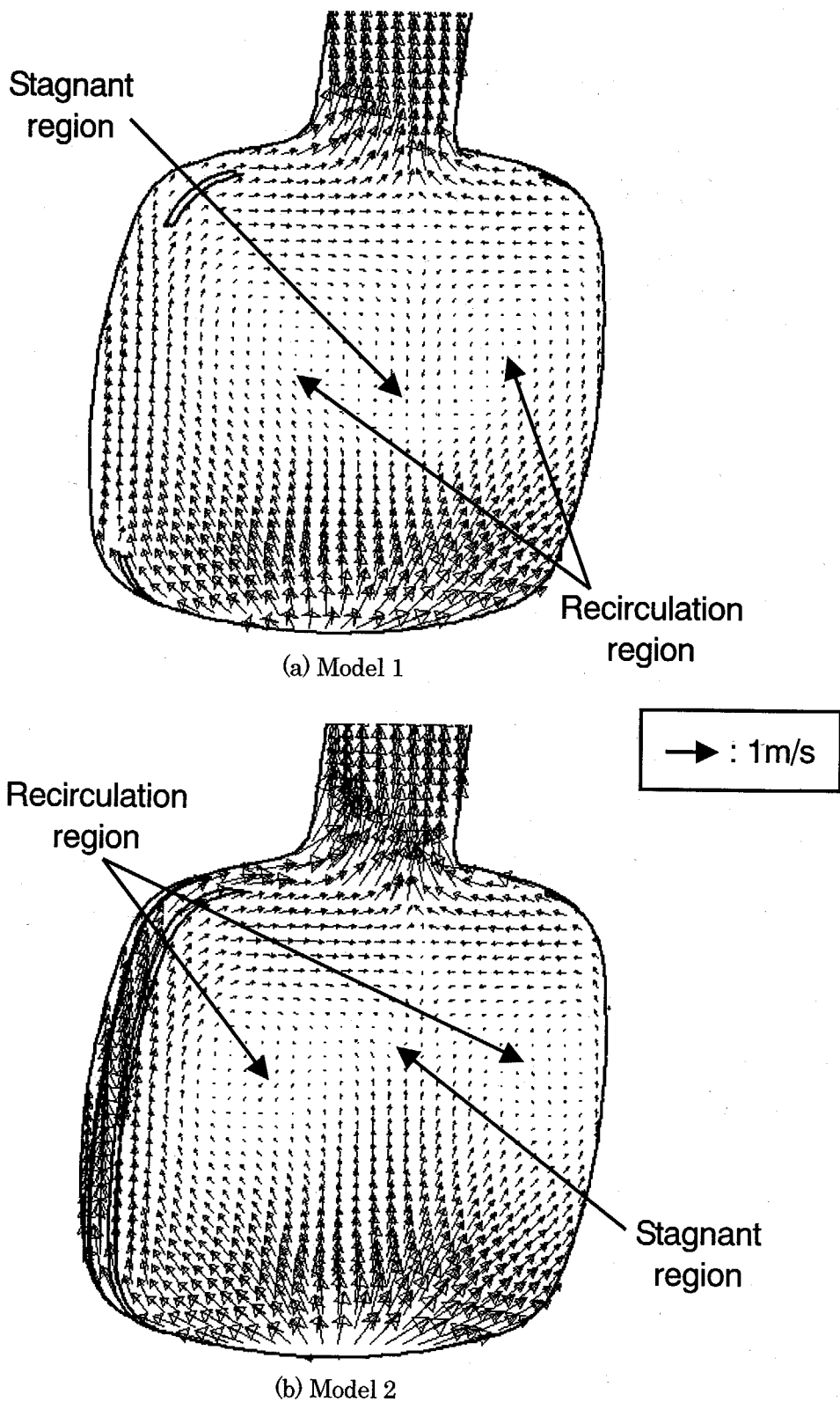


Fig.2.9 Velocity vector distributions adjacent to inner wall

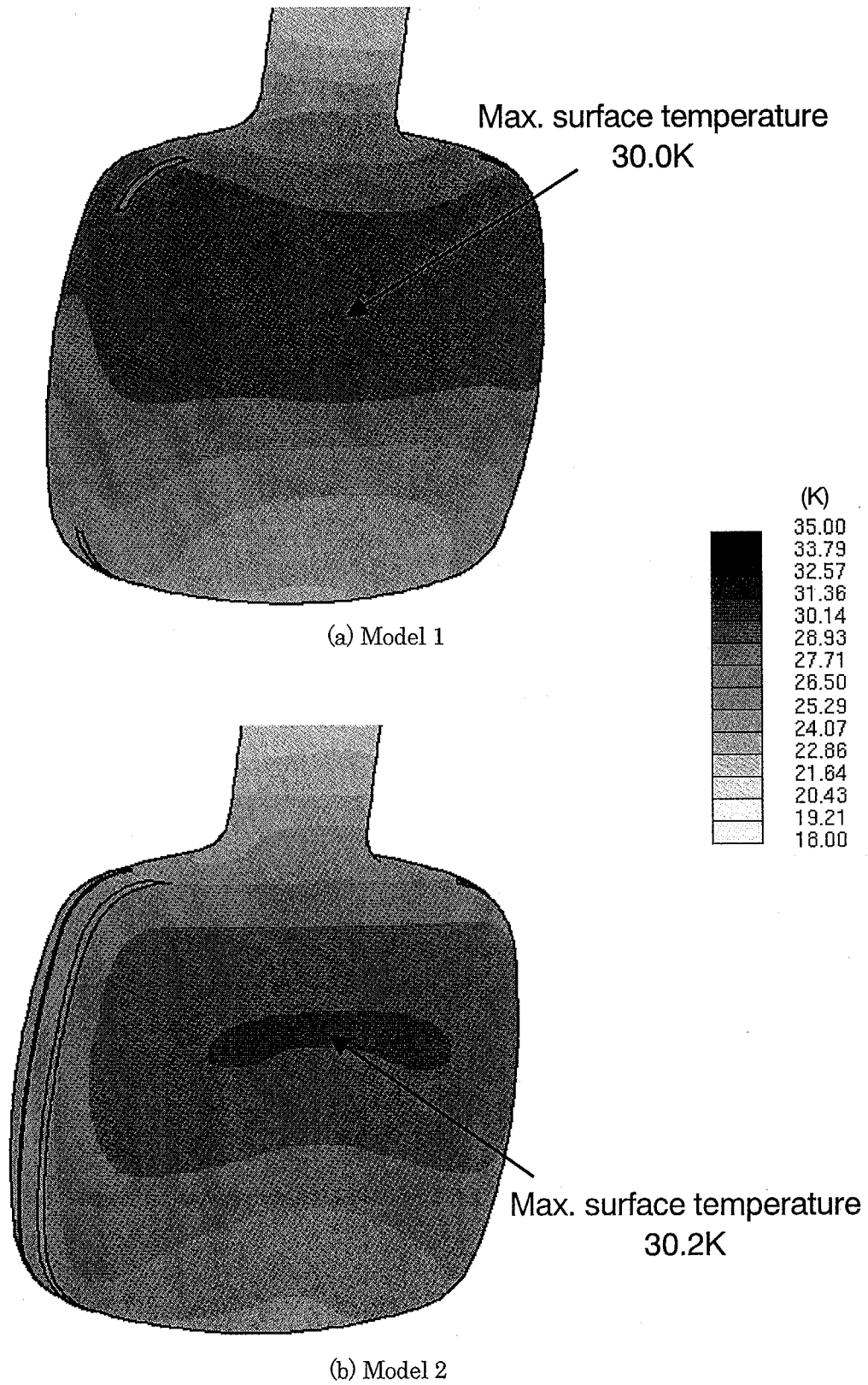


Fig.2.10 Temperature distributions on inner wall surface

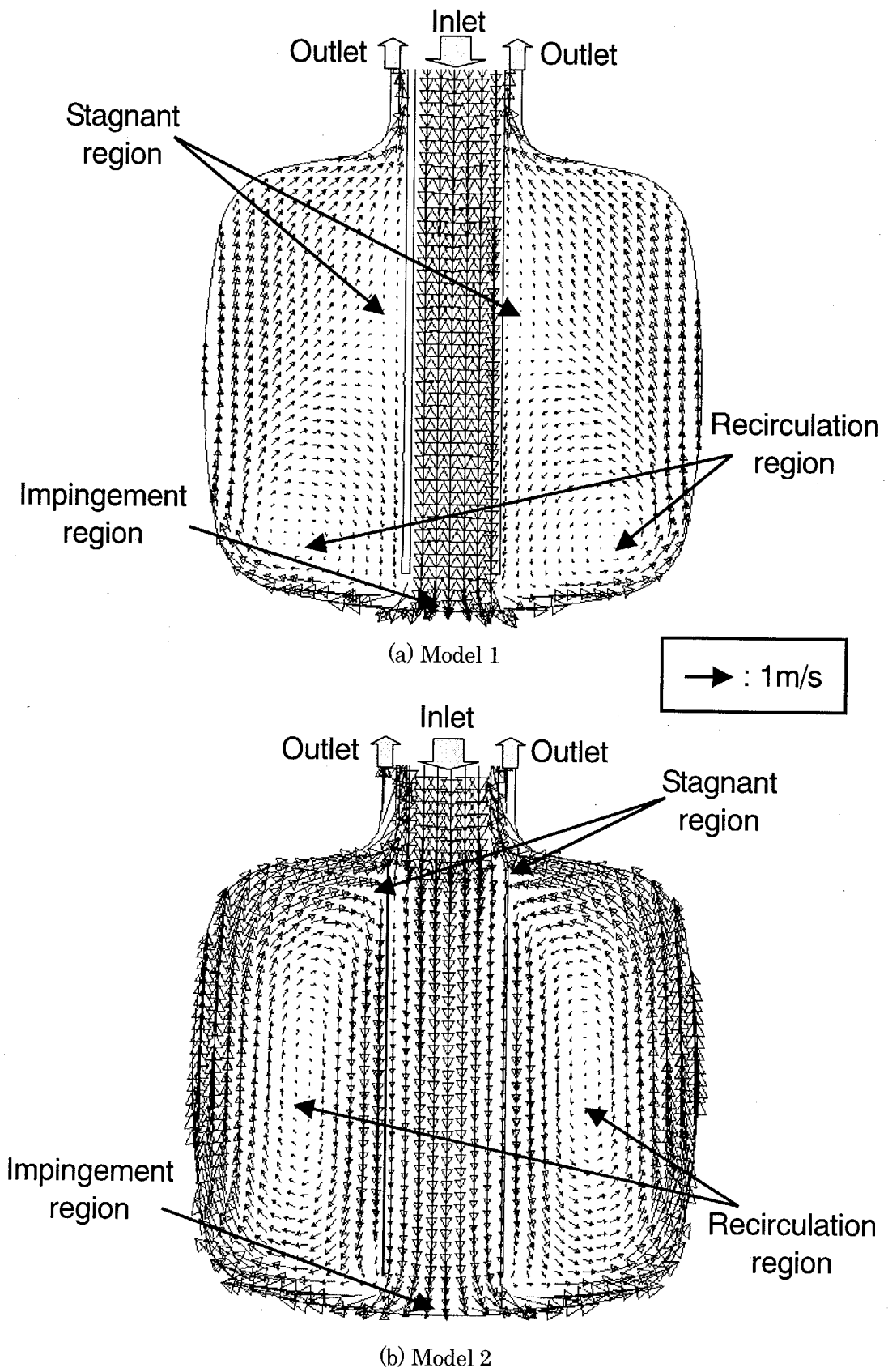


Fig.2.11 Velocity vector distributions in cross section

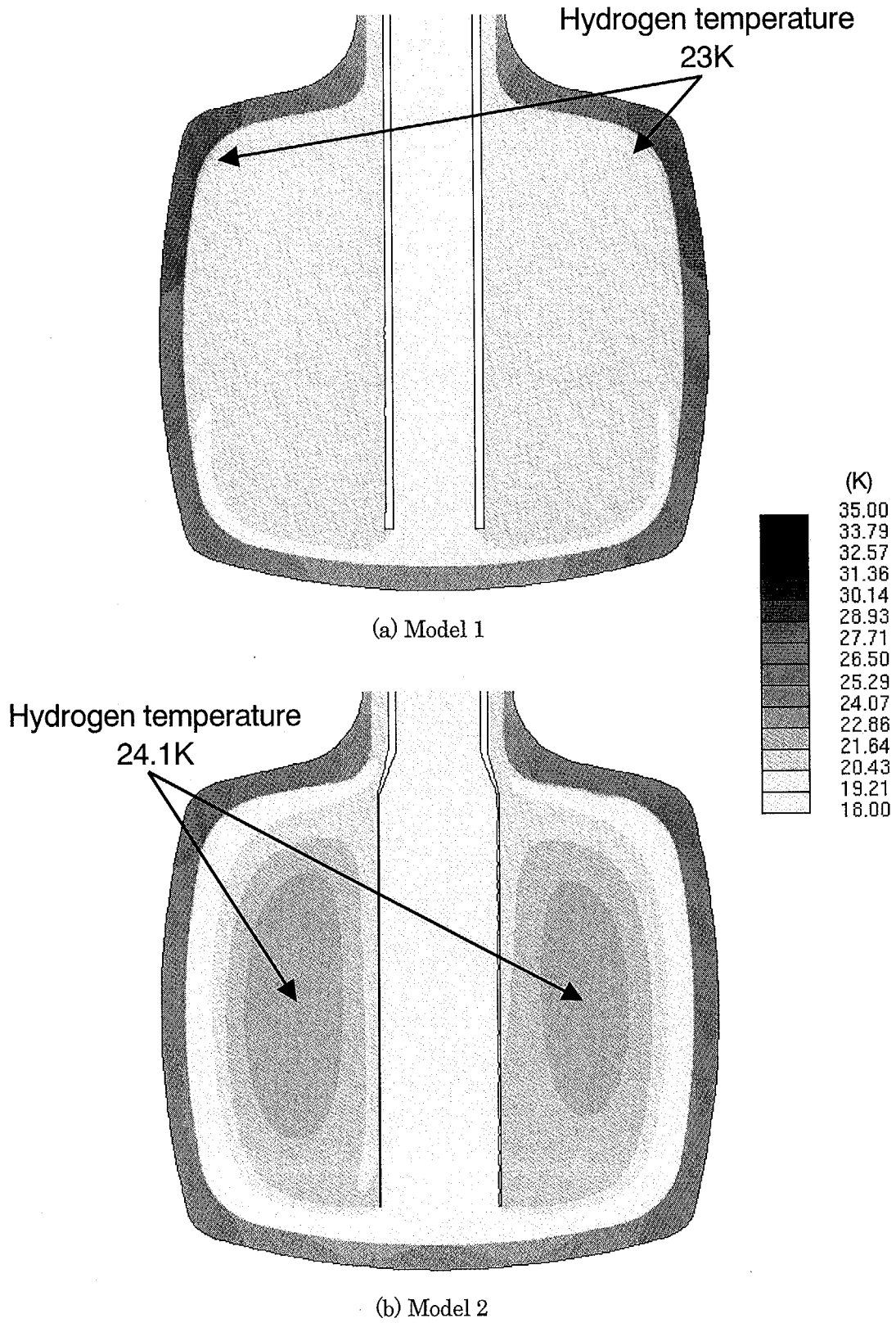


Fig.2.12 Temperature distributions of hydrogen and moderator vessel in cross section

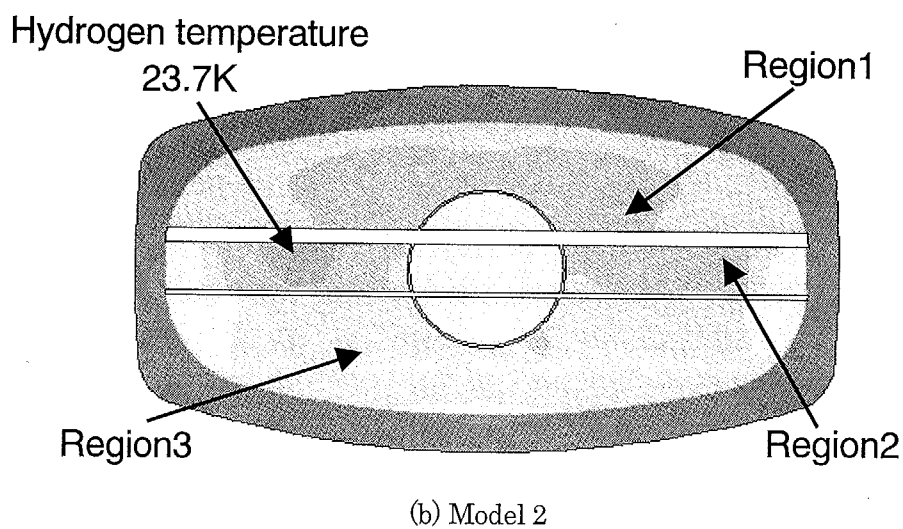
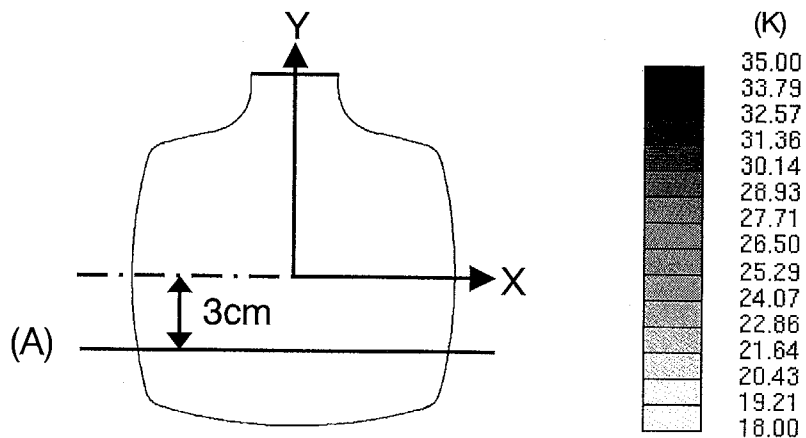
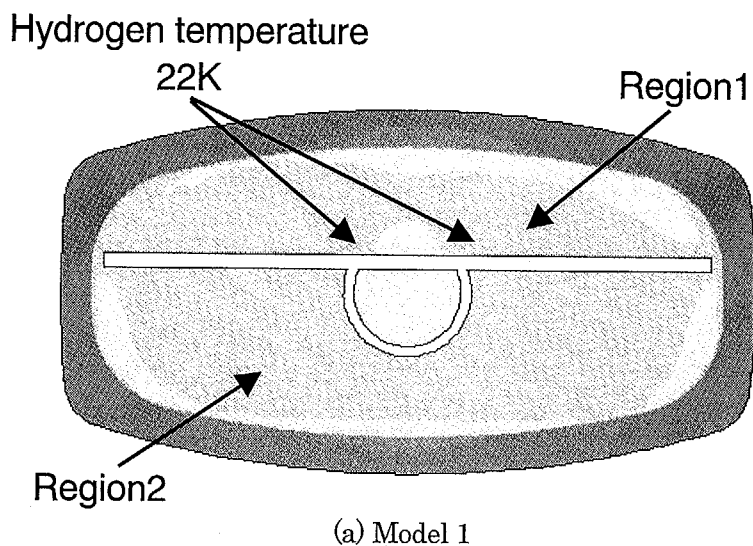


Fig.2.13 Temperature distributions of hydrogen and moderator vessel in cross section (A)



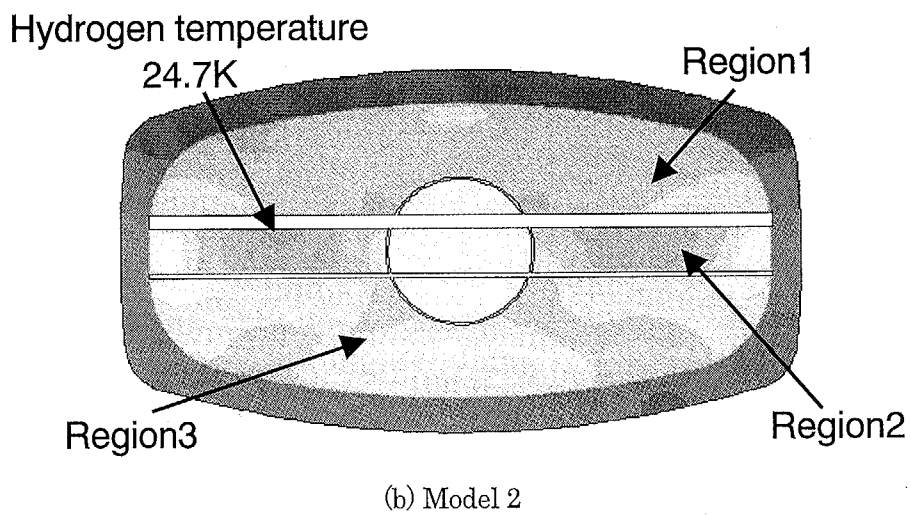
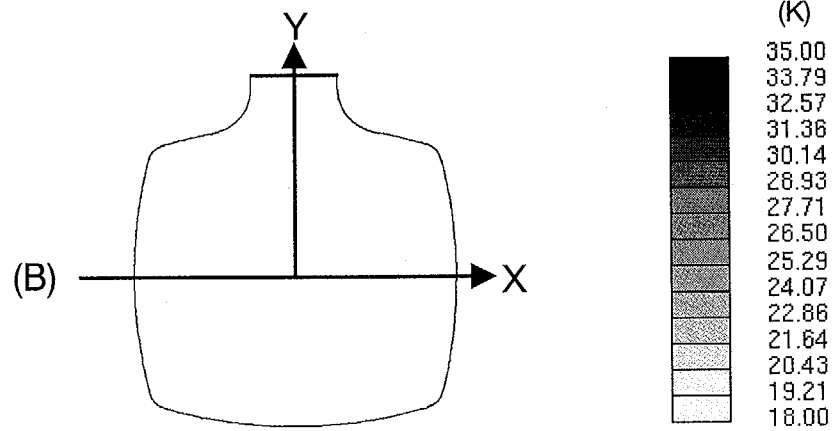
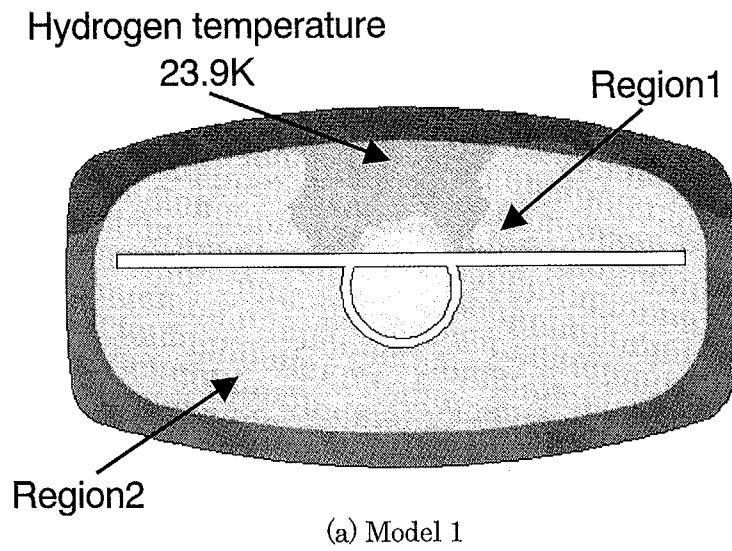


Fig.2.14 Temperature distributions of hydrogen and moderator vessel in cross section (B)

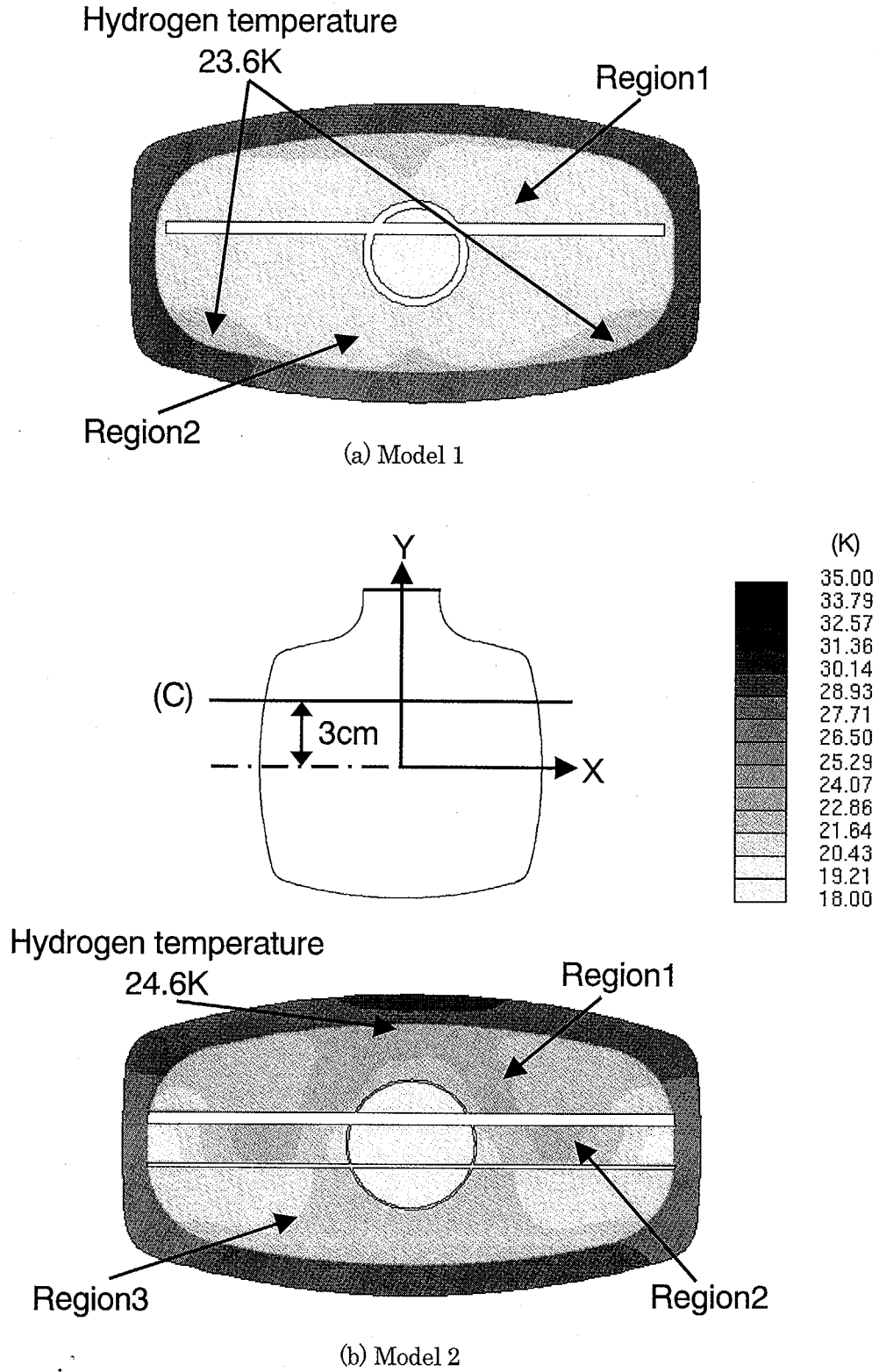


Fig.2.15 Temperature distributions of hydrogen and moderator vessel in cross section(C)

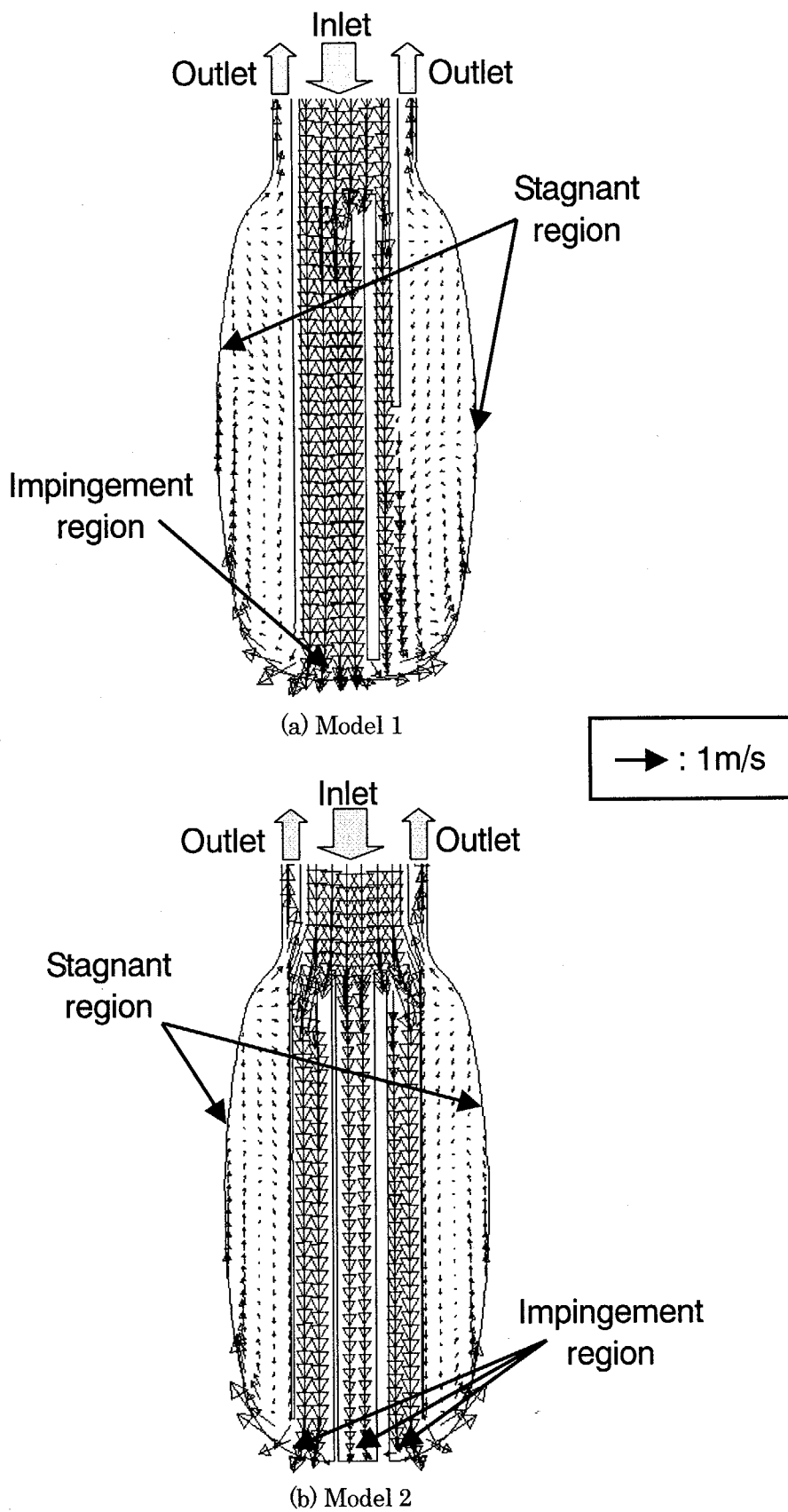


Fig.2.16 Velocity vector distributions in cross section

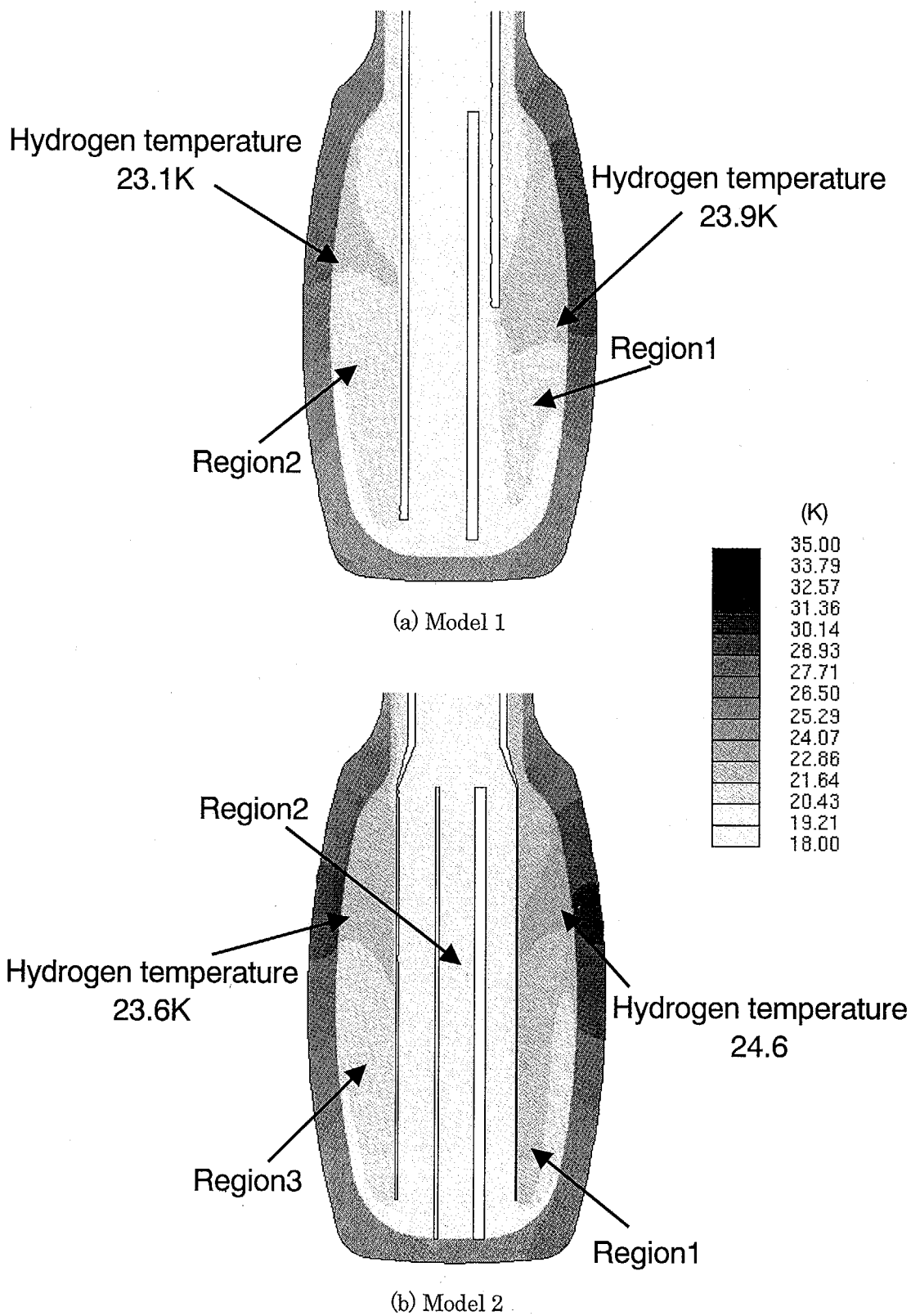


Fig.2.17 Temperature distributions of hydrogen and moderator vessel in cross section

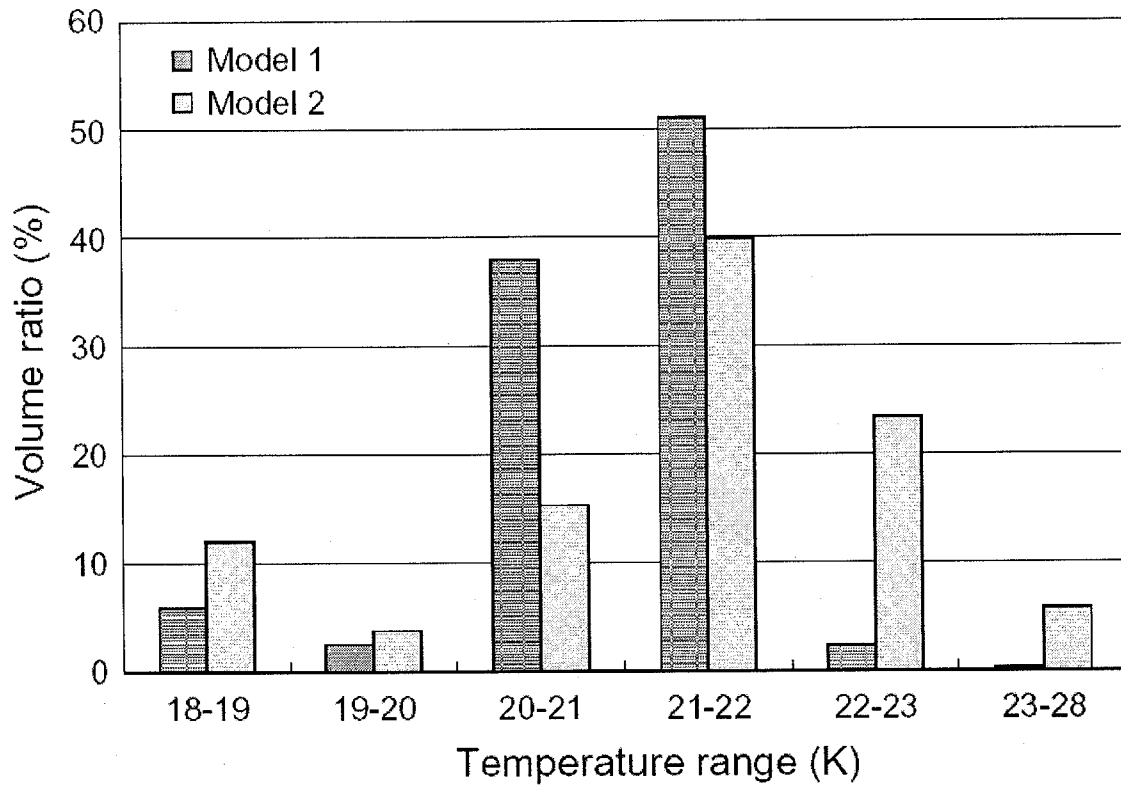


Fig.2.18 Hydrogen volume ratio for each temperature range occupied in poisoned moderator vessel

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <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	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 = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/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 = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

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, 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 <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 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
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>-2</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 (計量法)
	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 (熱化学)
	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 °C)
	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 (国際蒸気表)
	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

ボイズン付き冷減速材容器の熱流動解析 第1報：ボイズン板配置の検討

R100

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています