

JAERI-Tech  
97-063



熱中性子減速材の固体メタン粒子  
及び容器内温度分布解析

1997年12月

麻生智一・石倉修一・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（〒319-11 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公済会資料センター（〒319-11 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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)高野高速印刷

熱中性子減速材の固体メタン粒子及び容器内温度分布解析

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・石倉 修一・勅使河原誠・日野竜太郎

(1997年11月10日受理)

原研では、大強度陽子加速器を用いた中性子科学研究計画のもとで、設計検討、R&Dなどを進めている。中性子科学研究計画では、最初に建設する施設として核破砕ターゲットによる中性子散乱施設を予定している。この計画に従い、核破砕ターゲット開発の一環として、減速材の設計検討に着手した。

本報告書は、大出力ターゲットシステムにおいて MW クラスの熱中性子減速材として有力視されている固液二相流型減速材を対象にして行った予備解析結果について記述したものである。固体メタン粒子及び多重構造減速材容器の温度分布は、数式処理プログラム MATHEMATICA を用いて解析を行った。その結果、固体メタン粒子径を 1mm 以下にすれば、固体メタンの発熱密度概算値  $20\text{W}/\text{cm}^3$  に対して粒子中心温度は 30K 以下に維持され、メタンの融点 (90.7K) には達しないことがわかった。一方、減速材容器内の流動安定化をはかるため、内側容器内壁面での液体水素の沸騰を防止するには、アルミ合金(A-6016)板厚 3mm、流速 4m/s の条件下で、真空断熱層を覆うヘリウムガス層の厚さが 3mm の場合は液体水素温度を 18K 以下、5mm の場合は 16K 以下にする必要があることがわかった。以上の解析結果から、今後、固体メタン粒子を一様に分散させる流動条件及び容器構造の実験的検討などが必要であることを示した。

Temperature Analysis of Solid Methane Particle and a Container  
for Thermal Neutron Moderator

Tomokazu ASO, Syuichi ISHIKURA, Makoto TESHIGAWARA and Ryutaro HINO

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

(Received November 10, 1997)

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) is progressing design and R&D activities under the neutron science project with a high-intensity proton accelerator. JAERI has a plan to construct a neutron scattering facility with a neutron spallation source as the first neutron science facility, and is developing a target system as the neutron spallation source.

This report presents preliminary estimation about a solid methane-liquefied hydrogen two-phase flow moderator that is the most promising thermal neutron moderator in a MW-class target. Temperature conditions in a solid methane particle and a moderator container, with a multiple structure were analyzed using a mathematical analysis software - MATHEMATICA. From the analytical results, it was found that, a center temperature of the particle less than 1mm in diameter could be maintained under 30K by far lower than the melting point of methane (90.7K) at about  $20\text{W}/\text{cm}^3$  of a heat generation density in the solid methane. In order to prevent nucleate boiling on the inner surface of the moderator container, it is necessary to control liquid hydrogen temperature around 18K under the conditions of 3mm in thickness, 4m/s flow velocity and 3mm in helium gap. As the future work to solve engineering problems, it was pointed out key problems such as an optimization of the container structure from viewpoints of thermal and hydraulic performance to realize a disperse flow of methane particles as well as structural integrity.

Keywords: Solid Methane Particle, Thermal Neutron Moderator,  
Neutron Science Project, High-Intensity Proton Accelerator,  
Neutron Scattering Facility, Neutron Spallation Source, Liquid Hydrogen,  
Two-Phase Flow, Moderator Container, Heat Generation Density,  
Melting Point of Methane, Nucleate Boiling

## 目 次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. 概 要 .....                      | 1  |
| 2. 固体メタン粒子の熱伝導計算 .....            | 2  |
| 2.1 形状と熱的条件 .....                 | 2  |
| 2.2 非定常熱伝導計算 .....                | 2  |
| 2.3 定常熱伝導計算 .....                 | 6  |
| 2.4 計算条件 .....                    | 7  |
| 2.5 計算結果 .....                    | 8  |
| 3. 減速材容器内の定常温度分布計算 .....          | 23 |
| 3.1 形状と熱的条件 .....                 | 23 |
| 3.2 容器壁発熱無しの場合 .....              | 23 |
| 3.3 容器壁発熱有りの場合 .....              | 24 |
| 3.4 計算条件 .....                    | 28 |
| 3.5 計算結果 .....                    | 31 |
| 4. 今後の検討課題 .....                  | 47 |
| 5. あとがき .....                     | 48 |
| 謝 辞 .....                         | 48 |
| 参考文献 .....                        | 49 |
| 付録-1 固体メタン・液体水素の物性値 .....         | 50 |
| 付録-2 固体メタン粒子-非定常温度分布計算の過程 .....   | 51 |
| 付録-3 固体メタン粒子-定常温度分布計算の過程 .....    | 57 |
| 付録-4 減速材容器内の定常温度分布計算に用いた物性値 ..... | 58 |

## Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. Abstract .....   | 1  |
| 2. Calculation of Heat Conduction in a Solid Methane Particle .....   | 2  |
| 2.1 Model and Thermal Condition .....   | 2  |
| 2.2 Formulation of Unsteady Heat Conduction .....   | 2  |
| 2.3 Formulation of Steady Heat Conduction .....   | 6  |
| 2.4 Calculation Conditions .....  | 7  |
| 2.5 Results and Discussion .....  | 8  |
| 3. Calculation of Steady Temperature Distribution in a Moderator Container .....  | 23 |
| 3.1 Model and Thermal Condition .....   | 23 |
| 3.2 Formulation in a Case without Heat Generation from Moderator Container .....  | 23 |
| 3.3 Formulation in a Case with Heat Generation from Moderator Container .....   | 24 |
| 3.4 Calculation Conditions .....  | 28 |
| 3.5 Results and Discussion .....  | 31 |
| 4. Future Works .....   | 47 |
| 5. Concluding Remarks .....   | 48 |
| Acknowledgment .....  | 48 |
| References .....  | 49 |
| Appendix-1 Properties of Solid Methane and Liquid Hydrogen .....  | 50 |
| Appendix-2 Calculation Process of Unsteady Temperature Distribution in a Solid<br>Methane Particle .....                      | 51 |
| Appendix-3 Calculation Process of Steady Temperature Distribution in a Solid Methane<br>Particle .....                        | 57 |
| Appendix-4 Properties at Calculation of Steady Temperature Distribution in a Dual<br>Structural Container for Moderator ..... | 58 |

## 1. 概 要

日本原子力研究所（原研）では、1.5GeV-5.3mA 級（出力 8MW）の大強度陽子加速器を用いた中性子科学研究計画の下で、最初に建設する施設として中性子散乱施設（5MW）を予定し、中性子源となる核破碎ターゲットシステムの開発を進めている。ターゲットシステムにおいて冷・熱中性子は減速材を通して利用者に供給する。このため、減速材はターゲットで発生した高速中性子を様々な実験に適したエネルギーへ変換するという重要な役目を果たし、近年の先端的な基礎科学分野における研究ニーズによってさらなる発展が望まれている。

核破碎中性子源では、これまで減速材には軽水、液体水素、液体メタン、固体メタン等が用いられ、各々の特性を活かして使用されてきた。特に最近では先端的な研究分野における冷熱中性子の利用が増加し、高い強度と狭いパルス幅という高性能化を目指した減速材システムの研究開発が行われている<sup>(1)</sup>。その中で MW 規模の大強度中性子源に適合する減速材として固体メタン粒子と液体水素による固液二相流型減速材システムが提案されている<sup>(2)</sup>。

この固液二相流型減速材の工学的成立性を調べるために、流動特性の基礎実験やモックアップ試験計画を立案した。これらの実験で必要とする運転流動条件を求めるため、固体メタン粒子の大きさと同重構造の減速材容器について温度計算に基づく検討を行った。固体メタン粒子の温度計算には、数式処理プログラム MATHEMATICA を使用した。粒子径をパラメータとした非定常な固体メタン粒子内温度変化と、パラメータに発熱密度を加えて熱平衡状態にあるときの固体メタン粒子温度に関する解析を行った。減速材容器については、容器壁面での熱伝達率を考慮し、発熱密度等をパラメータとして解析を行った。本報告書ではこれらの解析結果と今後の検討のために必要な項目等について述べた。

## 2. 固体メタン粒子の熱伝導計算

### 2.1 形状と熱的条件

固体メタン粒子の形状、寸法概念と熱的条件を Fig.2.1 に模式的に示す。固体メタン粒子は球形とし、20K の液体水素とともに減速材システム中を流動する。陽子ビームパルスがターゲットに入射した時、固体メタン粒子中に体積発熱を生じ、その熱は液体水素により冷却される。ここでは固体メタン粒子の直径や発熱密度、液体水素との熱伝達率等をパラメータにして固体メタン粒子の中心温度の変化を調べ、適切な固体メタン粒子の大きさ、必要冷却能力について検討した。

### 2.2 非定常熱伝導計算

陽子ビームパルスが入射した時に、固体メタン粒子は瞬時（約  $1\mu\text{s}$ ）に温度上昇し、その後液体水素により徐々に冷却される。陽子ビームパルスは 50Hz で入射するため、パルス間隔 20ms の間に十分な冷却が行われないと、パルス毎に熱が蓄積し固体メタン粒子の温度が上昇することになる。以下では 1 パルス当たりの固体メタン粒子の非定常温度変化を計算した。計算モデルには、球状の固体メタン粒子内の発熱密度分布は空間的に一様とする球対称モデルを用いた。このとき、 $1\mu\text{s}$  の陽子ビームパルスで、固体メタン粒子は瞬時に温度上昇し、その間の熱伝導は考慮しない。したがって、1 パルス当たりの発熱量に相当する温度上昇が生じた時点初期条件とし、パルス照射後の冷却過程では発熱がないものと仮定して温度変化を計算した。

球対称の非定常熱伝導方程式は次式で表すことができる<sup>(3,4)</sup>。

$$\frac{\partial\theta(r,t)}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial\theta(r,t)}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

ここで、 $r$  は半径方向座標、 $t$  は時間座標、 $\theta(r,t)$  は固体メタン粒子の温度分布  $T(r,t)$  と液体水素温度  $T_{\text{H}_2}$  との差であり、

$$\theta(r,t) = T(r,t) - T_{\text{H}_2}$$

である。 $\lambda$ 、 $c$ 、 $\rho$  はそれぞれ固体メタンの熱伝導率、比熱、密度を表す。式(2.1)の右辺を微分して展開すると、次式の熱伝導方程式が得られる。



$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta(r,t)}{\partial t} = \frac{2}{r} \frac{\partial \theta(r,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta(r,t)}{\partial r^2} \quad (2.2)$$

固体メタン粒子の熱的初期条件および境界条件は、

$$\frac{\partial \theta(0,t)}{\partial r} = 0 \quad -\lambda \frac{\partial \theta(R,t)}{\partial r} = h_{H_2} \theta(R,t) \quad (2.3)$$

である。ここで、 $R$  は固体メタン粒子の半径、 $T_{H_2}$ 、 $h_{H_2}$  はそれぞれ液体水素の温度と熱伝達率である。文献(3)を参考に、温度関数  $\theta(r, t)$  を変換して式(2.2)を直交座標系の熱伝導方程式に変換することにより式(2.2)の解を導いた。温度分布関数  $\theta(r, t)$  を以下のように変換する。

$$\theta(r,t) = \frac{\Theta(r,t)}{r} \quad (2.4)$$

式(2.4)を式(2.1)に代入すると、次式に示す変換された温度分布関数  $\Theta(r, t)$  に関する直交座標系の熱伝導方程式が導かれる。

$$\frac{\partial \Theta(r,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta(r,t)}{\partial r^2}, \quad \Theta(r,0) = r\theta_0 \quad (2.5)$$

ここで、 $\theta_0$  は固体メタン粒子の初期温度を  $T_0 = T(r, 0) = \text{一定}$  とした場合の液体水素温度との差  $\theta_0 = T_0 - T_{H_2}$  である。境界条件の式(2.3)についても同様の変換を施せば、次式となる。

$$\Theta(0,t) = 0, \quad -\lambda \frac{\partial \Theta(R,t)}{\partial r} = \left( h_{H_2} - \frac{\lambda}{R} \right) \Theta(R,t) \quad (2.6)$$

熱伝導方程式(2.5)を境界条件(2.6)のもとに変数分離法を用いて解いた。温度分布関数  $\Theta(r, t)$  を互いに独立な2つの関数で表すと

$$\Theta(r,t) = \psi(r)\tau(t)$$

となる。これを式(2.5)、(2.6)に代入すると、 $r$ 、 $t$  に関して分離された2つの常微分方程式と境界条件式となる。

$$\frac{d^2\psi(r)}{dr^2} + \xi^2\psi(r) = 0, \quad \psi(0) = 0, \quad \frac{d\psi(R)}{dr} + \left(\frac{h_{H_2}}{\lambda} - \frac{1}{R}\right)\psi(R) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d\tau(t)}{dt} + a\xi^2\tau(t) = 0 \quad (2.8)$$

ここで $\xi$ は $r$ と $t$ に関する2つの常微分方程式を関連づける固有値である。式(2.7)の解は以下の関数で表すことができる。

$$\psi(r) = A_n\varphi_n(r), \quad \varphi_n(r) = \sin \xi_n r, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.9)$$

ここで $\xi_n$ は下式から求まる固有値である。式(2.9)を式(2.7)の境界条件式に代入すると下式の特性方程式が得られる。固有値 $\xi_n$ は特性方程式を満足するとびとびの値となる。

$$(\xi_n R) \cos(\xi_n R) = (1 - Bi) \sin(\xi_n R) \quad (2.10)$$

$$Bi = h_{H_2} R / \lambda$$

式(2.8)の一般解は次式で表すことができる。

$$\tau_n(t) = C_n e^{-a\xi_n^2 t}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.11)$$

式(2.9)と式(2.10)とから温度分布の解 $\Theta(r, t)$ は以下の式で表すことができる。

$$\Theta(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-a\xi_n^2 t} \sin \xi_n r \quad (2.12)$$

ここで、 $a_n = A_n C_n$ である。式(2.12)を式(2.5)の初期条件式に代入すると、

$$r\theta_0 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \xi_n r \quad (2.13)$$

係数 $a_n$ は、以下に示す直交関数系による任意関数の展開手法により求めた。任意の関数 $f(x)$ が領域 $(a, b)$ の範囲で係数 $b_n$ を持つ直交関数列 $\psi_n(x)$ の展開形で表すこととすれば、

$$f(x) = b_0\varphi_0(x) + b_1\varphi_1(x) + b_2\varphi_2(x) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} b_n\varphi_n(x) \quad (2.14)$$

式(2.14)の両辺に重み関数  $w(x)$  と直交関数  $\varphi_m(x)$  の積  $w(x) \cdot \varphi_m(x)$  をかけて領域  $(a, b)$  で積分すると次式となる。

$$\int_a^b w(x)f(x)\varphi_m(x)dx = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \int_a^b w(x)\varphi_m(x)\varphi_n(x)dx \quad (2.15)$$

直交関数  $\varphi_m(x)$  の性質として、

$$\int_a^b \varphi_m(x)\varphi_n(x)dx = 0, \quad n \neq m \quad (2.16)$$

であるので式 (2.15) の右辺は、 $n=m$  の項のみとなるから、係数  $b_n$  は下式により求まることになる。

$$b_n = \frac{\int_a^b w(x)f(x)\varphi_m(x)dx}{\int_a^b w(x)\varphi_m^2(x)dx} \quad (2.17)$$

式(2.14)の直交展開式に対する係数の解である式(2.17)と同様に、式(2.13)の係数の解は任意関数が  $f(x)=r\theta_0$  であるから下式となる。

$$a_n = \frac{\int_0^R r\theta_0 \sin \xi_n r dr}{\int_0^R \sin^2 \xi_n r dr} \quad (2.18)$$

式(2.18)を積分すると係数  $a_n$  は下式となる。

$$a_n = \frac{2\theta_0 (\sin \xi_n R - \xi_n R \cos \xi_n R)}{\xi_n (\xi_n R - \sin \xi_n R \cos \xi_n R)} \quad (2.19)$$

したがって、式(2.4)、式(2.12)、式(2.19)から球状固体メタン粒子の非定常温度分布は下式となる。

$$\frac{T(r,t) - T_{H_2}}{T_0 - T_{H_2}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\sin \xi_n R - \xi_n R \cos \xi_n R}{\xi_n R - \sin \xi_n R \cos \xi_n R} \right) e^{-a \xi_n^2 t} \frac{\sin \xi_n r}{\xi_n r} \quad (2.20)$$

式(2.20)は、初期における固体メタン粒子温度  $T_0$  と液体水素温度  $T_{H_2}$  の温度差に対する、時刻  $t$  における固体メタン粒子温度  $T(r, t)$  と液体水素温度  $T_{H_2}$  の温度差の比率の変化を示すものである。右辺第 1 因子の ( ) 内は級数項の振幅 (重み) を表し、全項の和で 0.5 の値となる。また、第 2 因子は各級数項の時間減衰項を示し、第 3 因子は固体メタン粒子中の温度分布形状を示している。ここで問題にしているのは陽子ビーム入射時の固体メタン粒子の冷却状況であるから、固体メタン粒子の最大温度である中心温度がどのように冷却されるかを調べればよい。すなわち、 $r \rightarrow 0$  のとき  $\sin \xi_n r \doteq \xi_n r$  から、

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sin \xi_n r}{\xi_n r} = 1$$

となり、固体メタン粒子中心で式(2.20)は次式となる。

$$\frac{T(0,t) - T_{H_2}}{T_0 - T_{H_2}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\sin \xi_n R - \xi_n R \cos \xi_n R}{\xi_n R - \sin \xi_n R \cos \xi_n R} \right) e^{-a \xi_n^2 t} \quad (2.21)$$

### 2.3 定常熱伝導計算

前節では、陽子ビーム 1 パルス当たりに対して固体メタン粒子が十分に冷却されるのに必要な時間を把握するために非定常温度分布計算式を導出した。本節では、定常状態の観点から、陽子ビームによる核発熱が時間的に一定であるとして、その核発熱に対して熱平衡に達した状態の固体メタン粒子内部温度分布を計算する式を導出する。

固体メタン粒子の定常温度分布計算式は、式(2.2)の時間項を無視した球対称の常微分方程式に発熱項を加えた下式で表される<sup>(4)</sup>。

$$\frac{d^2 T(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dT(r)}{dr} + \frac{Q(r)}{\lambda} = 0 \quad (2.22)$$

ここで、 $T(r)$ は固体メタン粒子の温度分布で半径  $r$  の関数、 $Q(r)$ は発熱密度分布で、着目している固体メタン粒子内では  $Q$ =一定と仮定した。

固体メタン粒子の中心と外表面における液体水素との熱伝達境界における境界条件は下式で与えられる。

$$\frac{dT(0)}{dr} = 0, \quad \lambda \frac{dT(R)}{dr} = h_{H_2} (T_{H_2} - T(R)) \quad (2.23)$$

式(2.21)を積分すると一般解は次式となる。

$$T(r) = -\frac{C_1}{r} + C_2 - \frac{r^2 Q}{6\lambda} \quad (2.24)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$  は積分定数である。境界条件式(2.23)を用いて積分定数を求めると下式となる。

$$C_1 = 0, \quad C_2 = \frac{6h_{H_2} T_{H_2} \lambda + h_{H_2} R^2 Q + 2R\lambda Q}{6h_{H_2} \lambda} \quad (2.25)$$

積分定数(2.25)を一般解(2.24)に代入すると、固体メタン粒子中心温度  $T(0)$  と液体水素温度  $T_{H_2}$  との温度差は以下の式で表される。

$$T(0) - T_{H_2} = \frac{h_{H_2} R^2 Q + 2R\lambda Q}{6h_{H_2} \lambda} \quad (2.26)$$

## 2.4 計算条件

### (1) 物性値

解析に用いた固体メタン及び液体水素の物性値を付録-1に示す。

### (2) 熱伝達率 $h$ の計算

固体メタン粒子は球形(直径  $D$ )とし、その表面における熱伝達率  $h$  はヌセルト数  $Nu$  から求める。

$$Nu = \frac{hD}{\lambda}, \quad h = Nu \cdot \frac{\lambda}{D}$$

ヌセルト数  $Nu$  は球の強制対流熱伝達について、平均熱伝達率を与える以下の実験式<sup>(5)</sup>を用いた。

$$Nu = 2 + 0.34 \cdot Re^{0.566} \cdot Pr^{1/3} \quad (1.8 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^5)$$

ここで、Re、Pr はそれぞれレイノルズ数、プラントル数であり、レイノルズ数の評価には液体水素と固体メタン粒子の相対速度  $u$  (以後、流速とよぶ)、液体水素の粘性係数  $\mu_F$ 、密度  $\rho_F$ 、比熱  $Cp_F$  及び熱伝導率  $\lambda_F$  を用いて次式で定義した。

$$Re = \frac{D \cdot u \cdot \rho_F}{\mu_F}, \quad Pr = \frac{Cp_F \cdot \mu_F}{\lambda_F} = \frac{9.454 \times 0.04716}{0.42624} = 1.046$$

Pr については、上式に示すように約 1.05 になる。計算結果を Table 2.1 に示す。なお、固体メタンの粒子径を 0.7、1、3、5mm とし、流速を 0.5、1、5、10m/s とした。

## 2.5 計算結果

前節で検討した固体メタン粒子の非定常および定常温度分布計算式を、数式処理プログラム MATHEMATICA に導入して解析した結果を以下に示す。

### (1) 非定常温度分布計算結果

固体メタン粒子の直径を 1mm 及び 5mm とした 2 つのケースについて計算を実施した。計算は、先ず式(2.10)を使って固有値  $\xi_n$  を  $n=1$  から  $n=5$  程度まで求め、式(2.21)に代入し、今回は  $n=1$  から 5 項まで (級数和  $\sum_{n=1}^5 **$ ) を求めた。熱伝達率は固体メタンの粒子径及び流速によって異なり、本計算では粒子径 1mm 及び 5mm に対してそれぞれ流速 (液体水素と固体メタン粒子の相対速度) が 0.5、1、5、10m/s の時の Table 2.1 の値を用いた。Fig.2.2(a)に粒子径 1mm の場合、Fig.2.2(b)に粒子径 5mm の場合の計算結果を示す。両者の場合とも流速が大きくなれば冷却に要する時間も多少短くなる傾向にあるが、0.5m/s 及び 10m/s の曲線で最も差が大きくなる点は Fig.2.2(a)で約 0.1 秒、Fig.2.2(b)で約 1 秒となり、この条件の流速の間では全体的な冷却期間に比べて大きな差がないといえる。

なお、Fig.2.2(a)(b)における時間 0 秒付近にて規格値 1 に達しない不連続な曲線になっているのは、式(2.20)の第 1 因子が正負に振幅しながら減少する関数であり、級数  $n$  を 5 項までとしたことによりオーバースケールしているためで、 $n$  が無限大になれば収束し、規格値 1 から始まる連続な曲線となる。付録-2 に結果に至るまでの計算過程の例を示す。式(2.10)の固有値計算及び式(2.19)の  $n=1$  から 5 項までの計算を示し、式(2.21)の指数因子を項別にグラフにして、時間減衰の様子を参照できるようにまとめた。

Fig.2.2(a)の粒子径が 1mm の場合、1 秒の間に中心温度  $T_0$  はほとんど周囲の液体水

素温度  $T_{H_2}$  まで冷却されるが、Fig.2.2(b)の 5mm の場合は 10 秒経過しても 10%以上の熱が残留している。このことから、減速材容器を出た固体メタンが配管内、冷却器及びポンプ等を通して減速材容器に戻るまで、5mm の場合には 10 秒を大きく超える時間を与えて、十分な冷却が行えるようにすると良いことがわかる。また、前述したように陽子ビームのパルス間隔は 20ms であるため、1mm の固体メタン粒子でも 20ms の間ではほとんど冷却されず、減速材容器中に滞留する場合は温度が上昇し続けることとなる。

ちなみに、1パルスの陽子ビームによる発熱密度  $Q$  は約  $20\text{W/cm}^3$  である。1パルス照射中に固体メタンから周囲への放熱がないものと仮定すると（断熱条件）、固体メタンの温度上昇  $\Delta T$  は次式より 0.28K となる。

$$C_p \rho \left( \frac{4\pi r^3}{3} \right) \Delta T = Q \left( \frac{4\pi r^3}{3} \right) \Delta t \quad (\Delta t : 20\text{ms})$$

ここで、 $\Delta t$  は原研で検討しているビームパルスの周期である 20ms(50Hz)を与える。Fig.2.3 にビームパルスの照射回数と温度上昇の関係を示す。約 250 回のパルスを受けると融点を超える。原研で検討している陽子ビームは 50Hz なので、約 5 秒で融点を超えることになる。このため、固体メタン粒子の減速材容器滞留時間を 5 秒以下にする必要がある。

そこで、固液二相流の流動の見地から、固体メタン粒子を 1 秒間で減速材容器を通過させることを考えた。陽子ビームパルスは 50Hz なので温度は 1 秒間で約 14K 上昇するが、これはメタンの融点に対して十分低い温度なので許容できる想定である。固体メタン粒子は、Fig.2.4 に示す減速材容器の概略寸法（縦 10cm、横 10cm、幅 5cm）から単純に容器入口から出口まで 20cm の行程を移動すると仮定すると、上記で導いた滞在時間以下の 1 秒で移動するためには粒子の速度を 0.2m/s とすればよい。この粒子速度は液体水素(20K)と固体メタンの密度比 (=7.3) を考えれば、工学的に妥当な速度である。

固液二相流に関する文献調査の結果、幾つかの実験式がある水平管について流動様式の評価を行った。Fig.2.5(1)~(3)に水平管における固液二相流の流動様式を示す。Fig.2.5(1)、(2)、(3)は粒子濃度  $C_v$  をそれぞれ 15%、30%、50%とした時の流動様式である。堆積層流れとは管底に粒子の堆積が生じて停滞している粒子が存在する状態で、摺動層流れとは粒子が管底を摺動状態で輸送される流れである。完全浮遊流れとは管底に堆積層及び摺動層が存在せず、全粒子が浮遊して流動する状態であり、本減速材の流動様式としてはこれが理想的な状態であると考えられる。ここで各流動様式を区分している遷移速度である堆積速度  $V_d$  及び浮遊速度  $V_{su}$  は次式<sup>(6)</sup>を用いた。

$$V_d = \sqrt{\frac{40C_v g D (s-1)}{\sqrt{C_D}}}, \quad V_{su} = 17w_{sH}$$

ここで、 $C_v$ ：粒子濃度（15%、30%、50%とした）

$D$ ：管径

$s$ ： $\rho_s / \rho_w$ （ $\rho_s$ ：固体粒子密度、 $\rho_w$ ：液体密度）

$C_D$ ：固体粒子の抗力係数 = 0.44（ $500 < \text{Re} < 10^4$ より）

$w_{sH}$ ：干渉沈降速度

$$= (1 - C_v)^2 \left\{ 1 - \left( \frac{d_s}{D} \right)^2 \right\} w_s \quad d_s : \text{粒子径}$$

$$\text{ただし、} w_s \text{（沈降速度又は終端速度）} = \sqrt{\frac{4 g d_s}{3 C_D} (s-1)}$$

Fig.2.5(2)から粒子濃度30%で粒子径1mmの場合、完全浮遊流れとするには流速 $V_{su}$ は約3.6m/s以上とする必要がある。この流速 $V_{su}$ は粒子と液体の相対速度（前述の $u$ に相当）であるから、減速材容器を1秒で通過するのに必要な固体メタン粒子の速度0.2m/sに対して液体水素は約3.8m/s以上としなければならない。

## (2)定常温度分布計算結果

定常温度分布の計算は、連続的な発熱がある時に固体メタン粒子が周囲と熱的平衡状態に達した状態の温度分布を与える。このため、非定常温度分布計算で示した初期温度上昇 $\Delta T$ より低めの温度を与えることになるが、発熱密度の影響を見ることができ、粒子径の目安を与えることができる。

Fig.2.6(1)~(4)は、式(2.26)において固体メタン粒子径及び発熱密度をパラメータにし、各流速0.5、1、5、10m/sについて計算した結果である。粒子径 $D$ 及び発熱密度 $Q$ の増加に伴い、中心温度と周囲温度との差（ $T_0 - T_{H2}$ ）が高くなる。流速が増加すると温度差は減少する傾向にある。粒子径及び発熱密度が大きくなると流速の影響が大きくなり、図の粒子径及び発熱密度の最大値5mm、25W/cm<sup>3</sup>の点で流速0.5m/sと10m/sとの差は約9.5Kである。

Fig.2.7は、発熱密度を20W/cm<sup>3</sup>としたときの粒子径に対する温度変化をFig.2.6から投影したものである。Fig.2.7から、固体メタンの発熱密度概算値である20W/cm<sup>3</sup>という発熱量に対して粒子径を4mm以下にすれば、いずれの流速でもメタンの融点（90.7K）に達しないことがわかった。ちなみに流速1m/sの場合、粒子径4mmでの温度差は55.8K、1mmで3.8Kであり、中心温度はそれぞれ75.8K、23.8Kとなる。

Fig.2.8は、反対に粒子径が1mm及び5mmのときの発熱密度に対する温度変化を



Fig.2.6 から投影したものである。粒子径 1mm の場合はメタンの溶解は特に問題とならないが、粒子径 5mm の場合は固体メタンの発熱密度概算値である  $20\text{W}/\text{cm}^3$  で、いずれの流速についても温度差が 76K を超えてメタンの融点に達するため、粒子径を 5mm とするのは困難といえる。付録-3 に計算過程を示す。

以上のように、前節(1)項では固体メタン粒子径が 1mm であっても陽子ビームのパルス間での冷却は十分ではなく、数多くのパルスを受けると融点に達する。このため、粒子を適当な時間内で減速材容器を通過させる必要があり、1秒間で通過させようとする(通過距離を 20cm と仮定)、粒子濃度 30% の場合は流速を約 3.8m/s にする必要がある。また、(2)項では粒子径が 4mm 以下であれば溶解することはないという結果が得られた。したがって、ある程度熱が残留しても特に溶解の問題とならず、また、固体メタン粒子の流動等を考慮すると粒子径は 1mm が妥当と考えられる。ただし、流速については固液二相流の流動条件及び構造強度の検討などと合わせて今後検討を行うこととする。

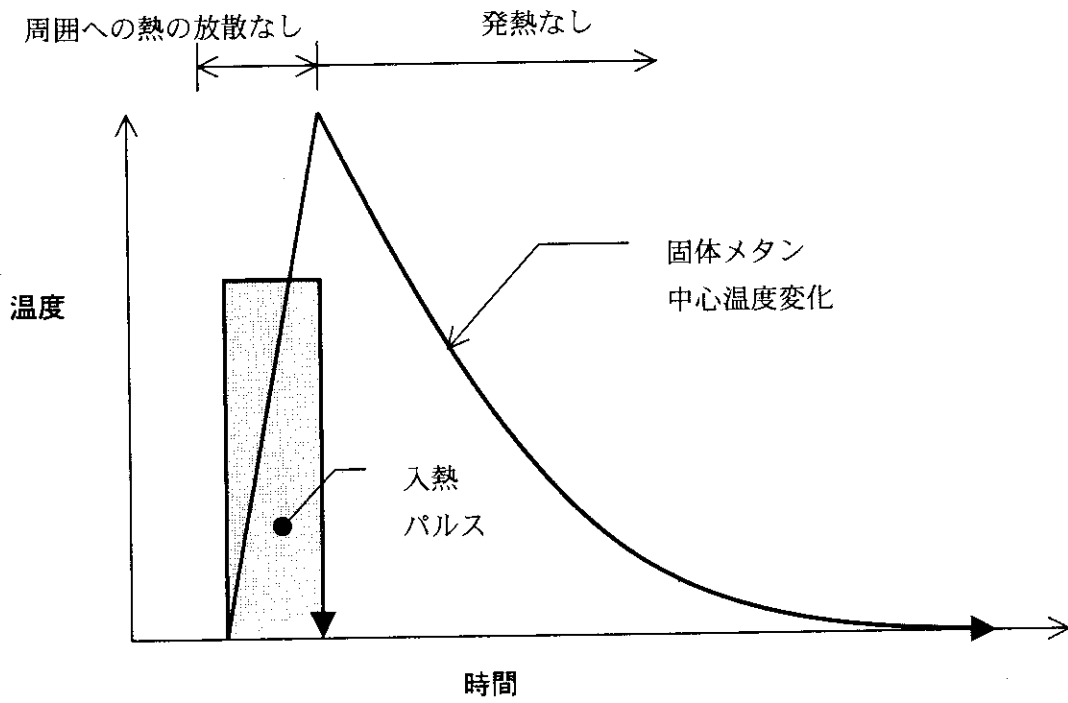
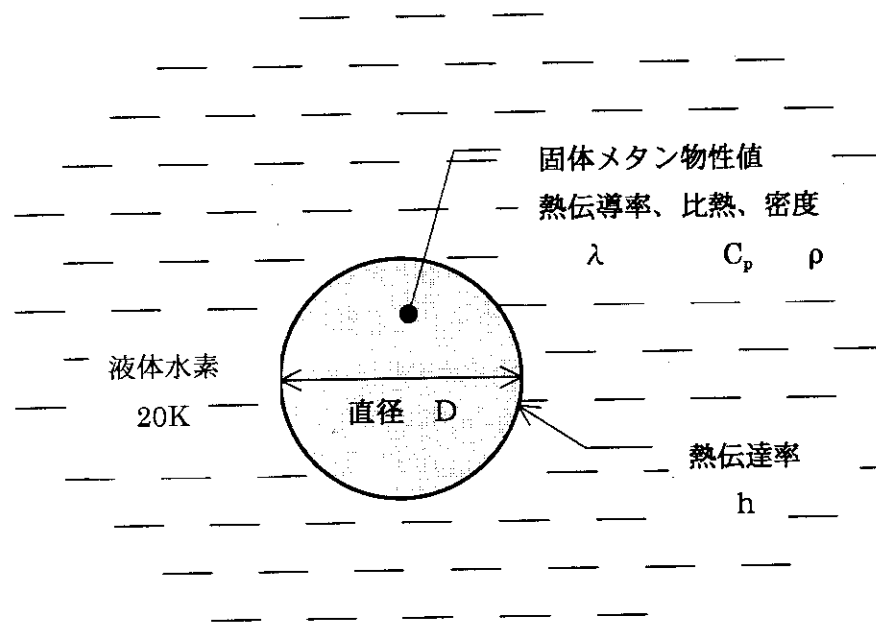
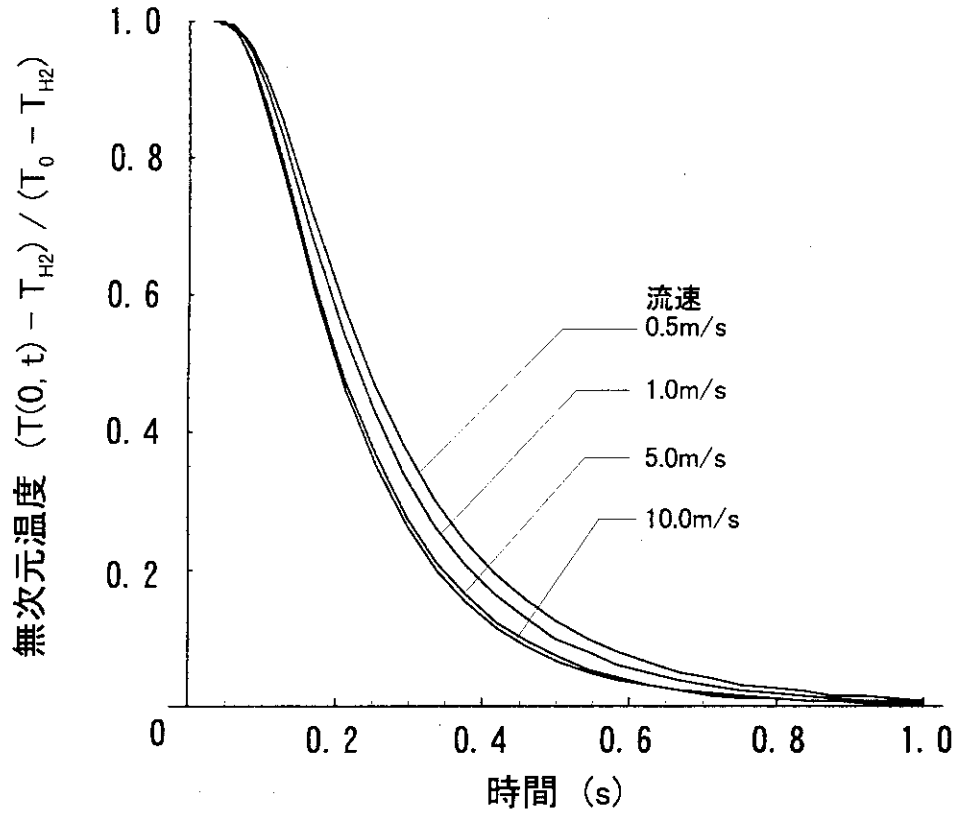
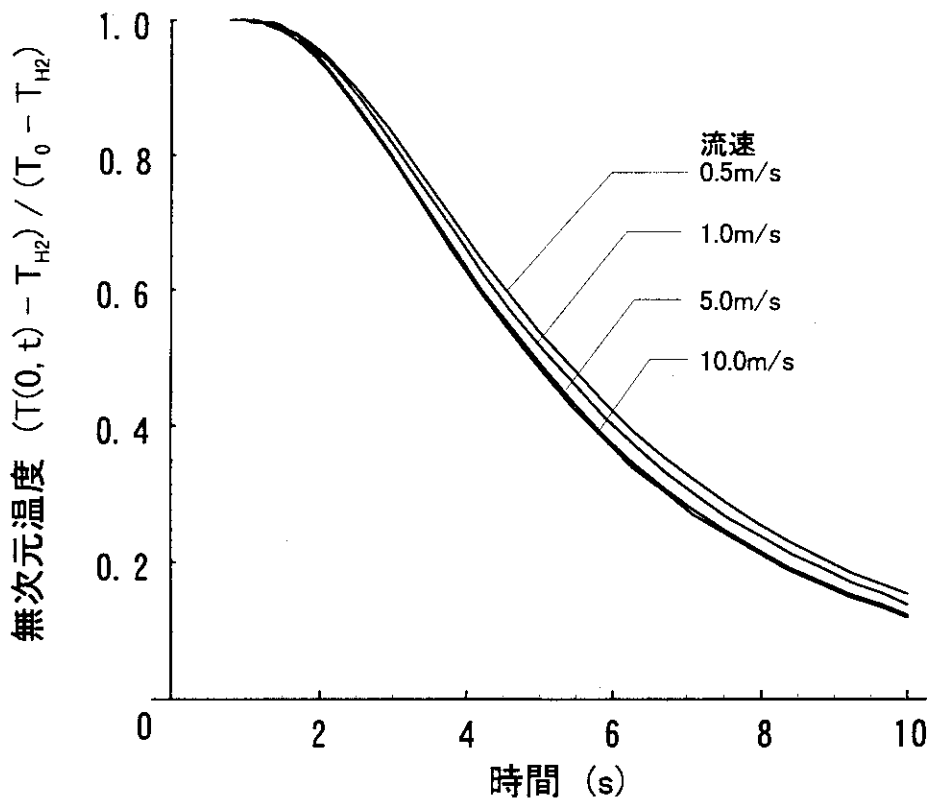


Fig.2.1 固体メタン粒子の非定常熱伝導概念図



(a)固体メタン粒子径 1mm の場合



(b)固体メタン粒子径 5mm の場合

Fig.2.2 固体メタン中心温度の非定常温度変化計算結果 (式(2.21)で第5項まで級数和を計算)

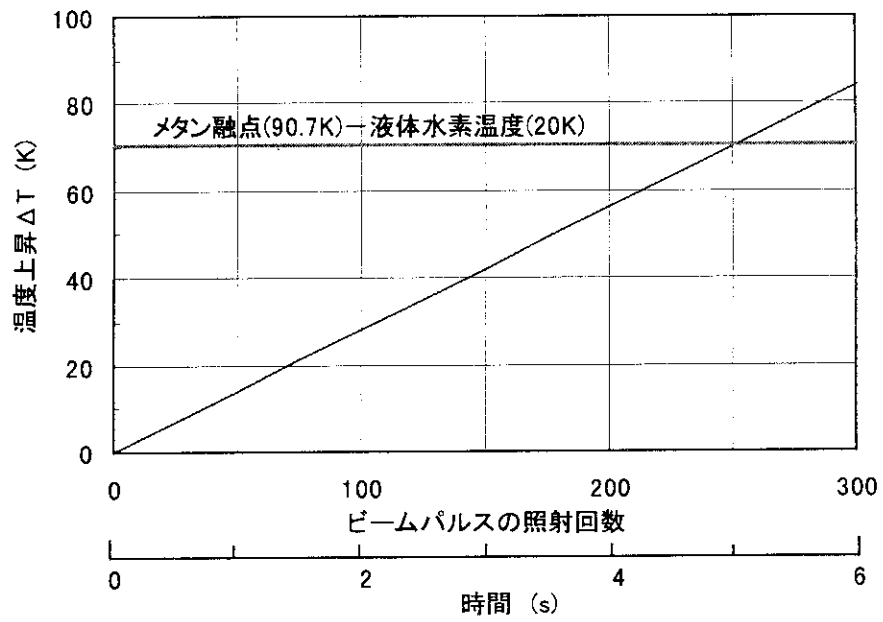


Fig.2.3 ビームパルスの照射回数と固体メタン粒子内の温度上昇の関係

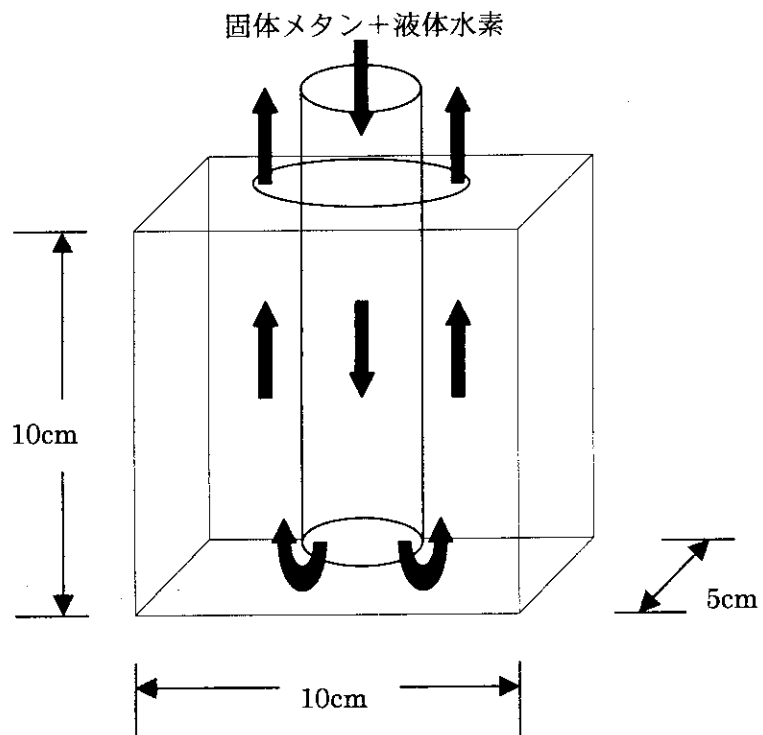


Fig.2.4 代表的な減速材容器の寸法

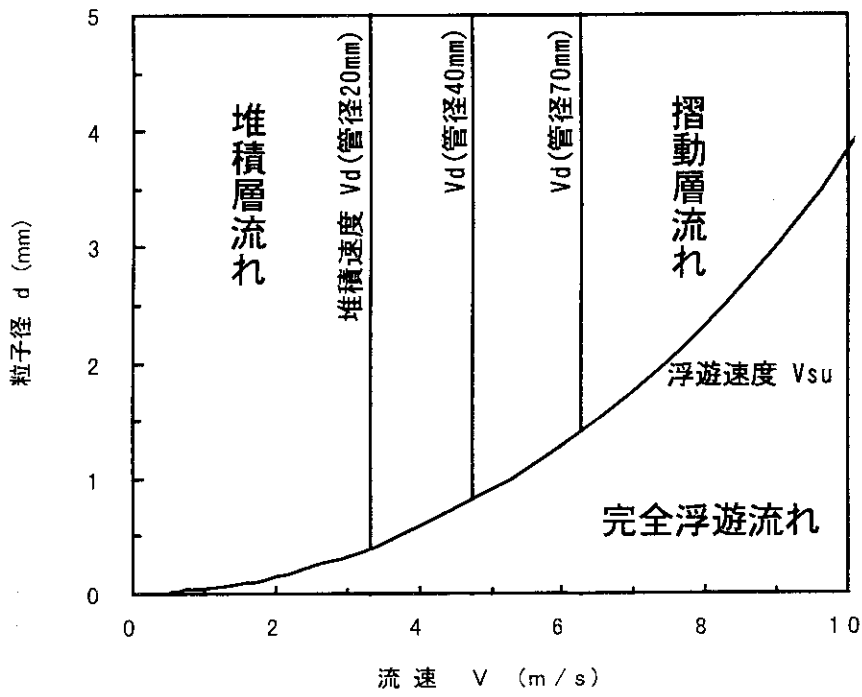


Fig.2.5(1) 水平管における固液二相流流動様式(粒子濃度15%)

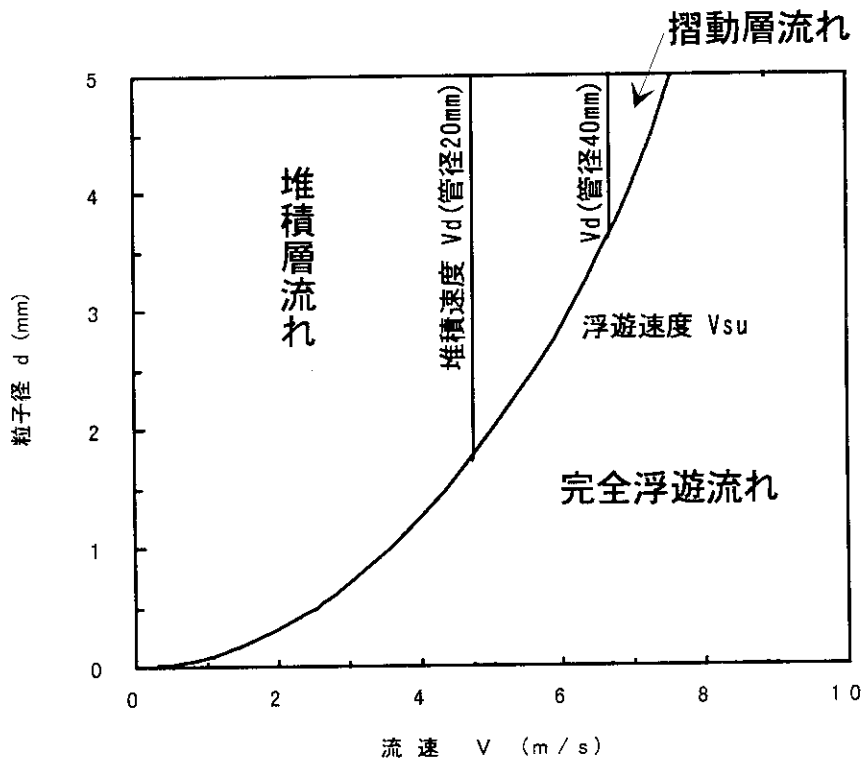


Fig.2.5(2) 水平管における固液二相流流動様式(粒子濃度30%)

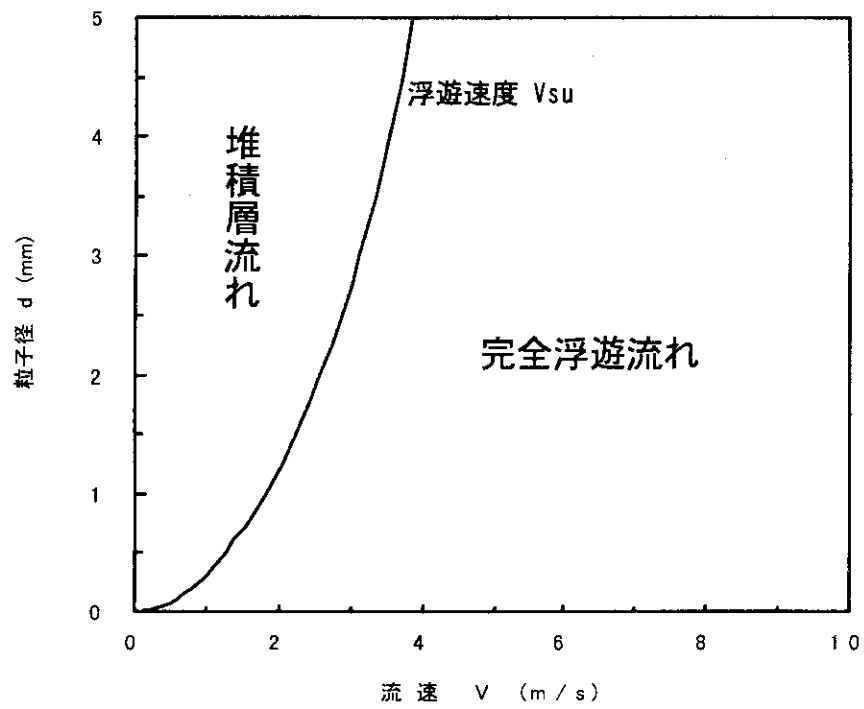


Fig.2.5(3) 水平管における固液二相流流動様式(粒子濃度50%)

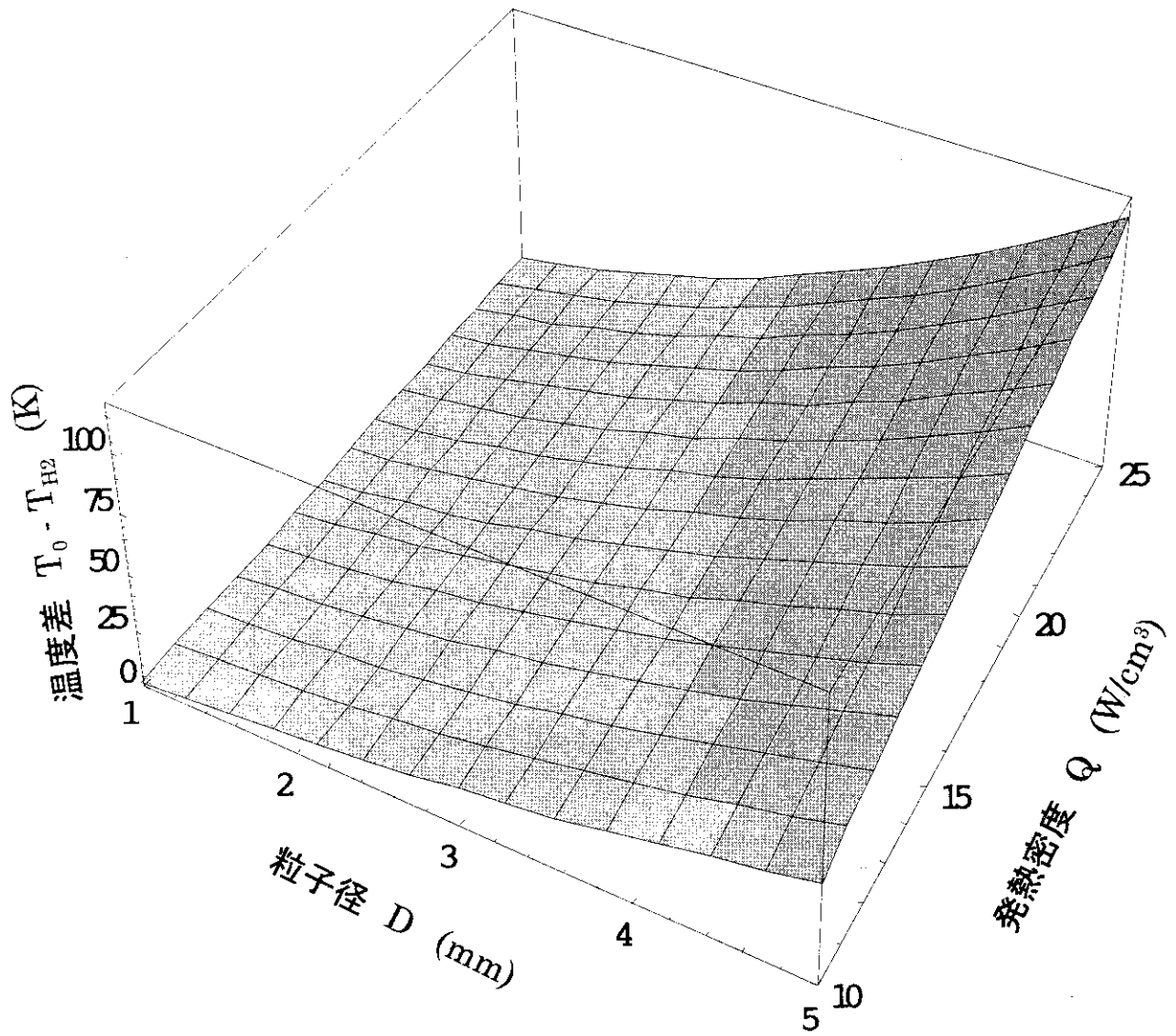


Fig.2.6(1) 定常温度分布計算結果 (流速  $u=0.5m/s$ の場合)

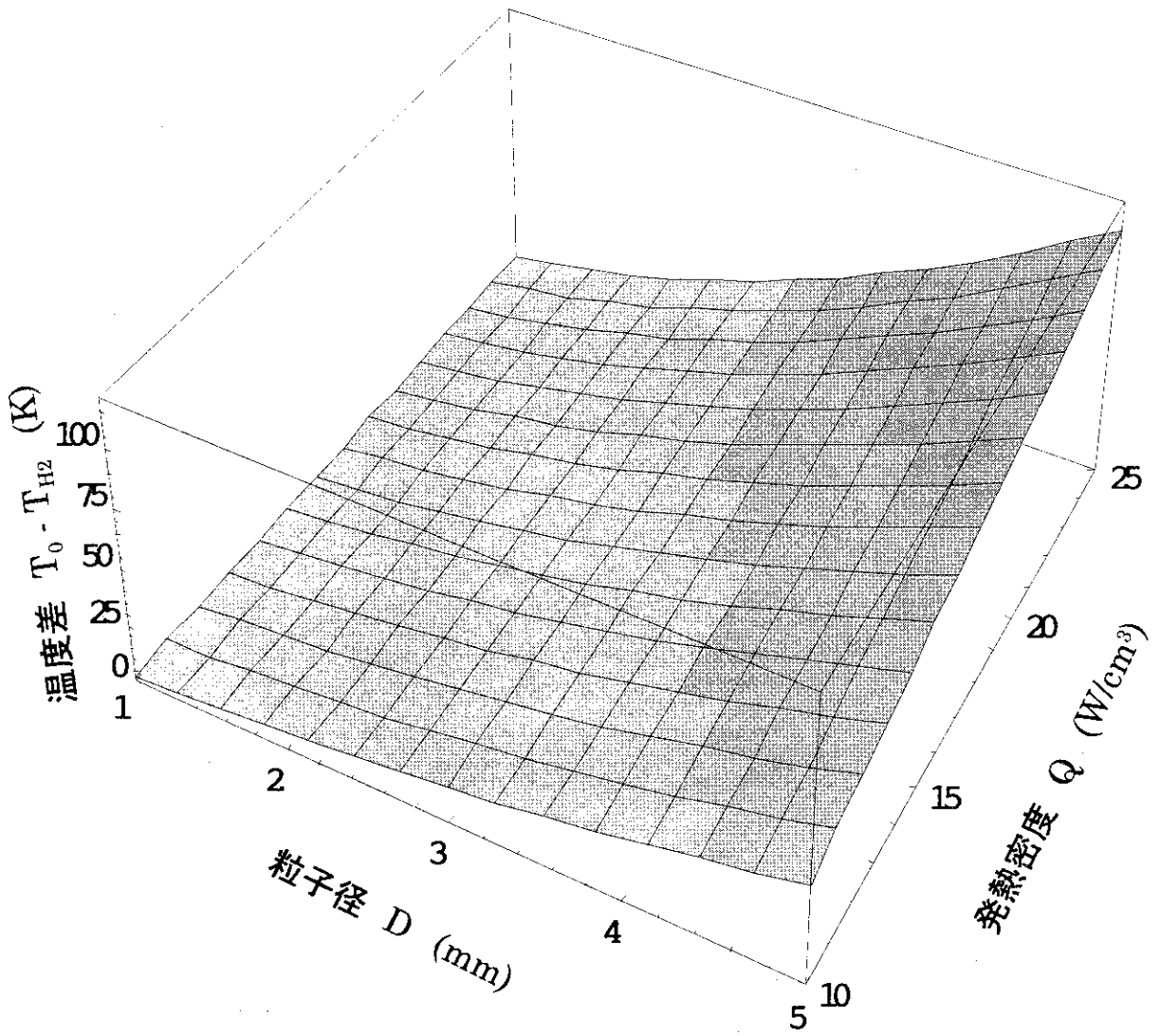


Fig.2.6(2) 定常温度分布計算結果 (流速  $u=1.0m/s$ の場合)



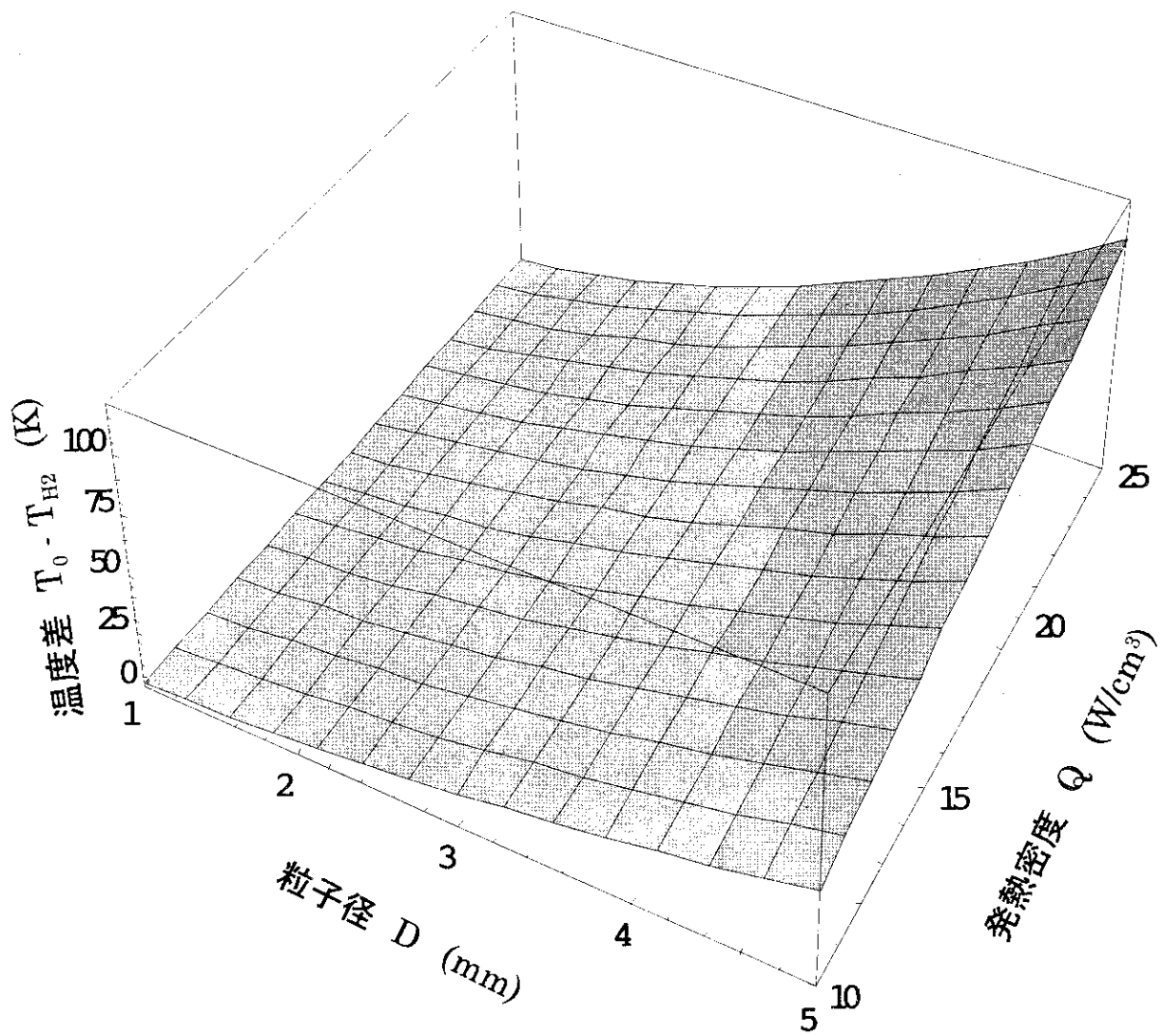


Fig.2.6(3) 定常温度分布計算結果 (流速  $u=5.0m/s$ の場合)

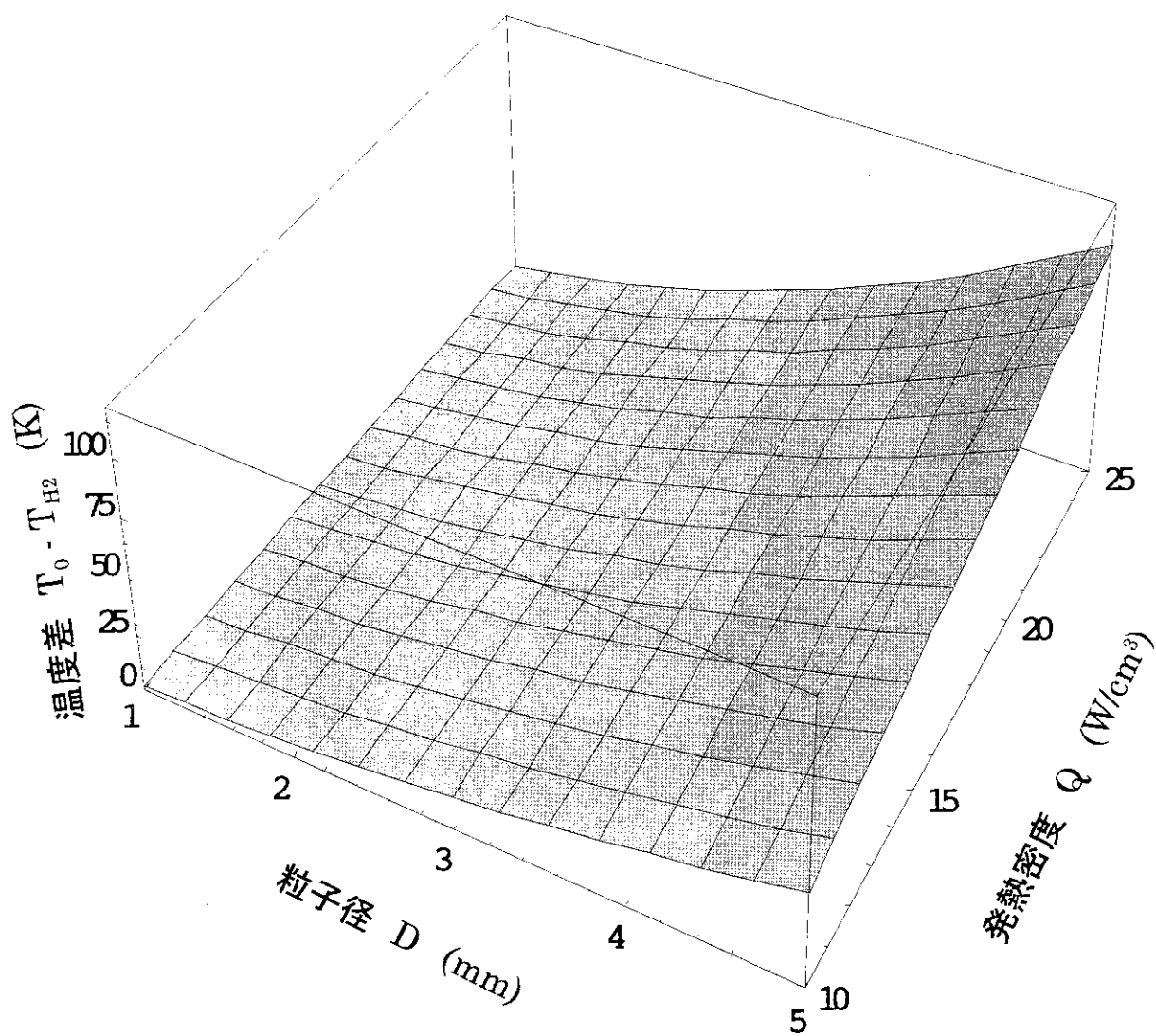


Fig.2.6(4) 定常温度分布計算結果 (流速  $u=10.0m/s$ の場合)

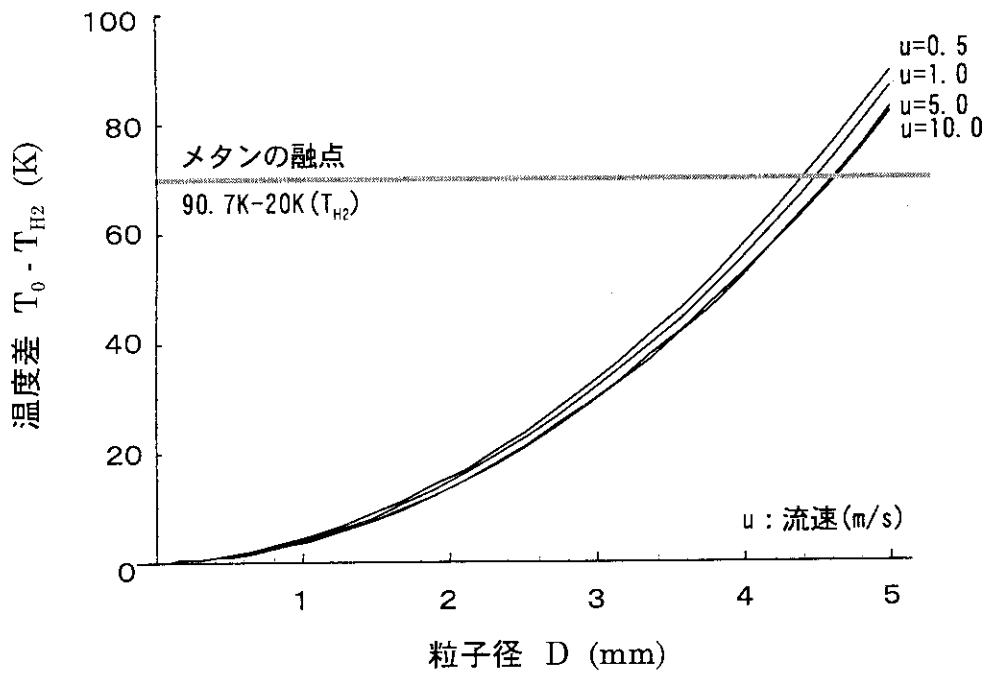
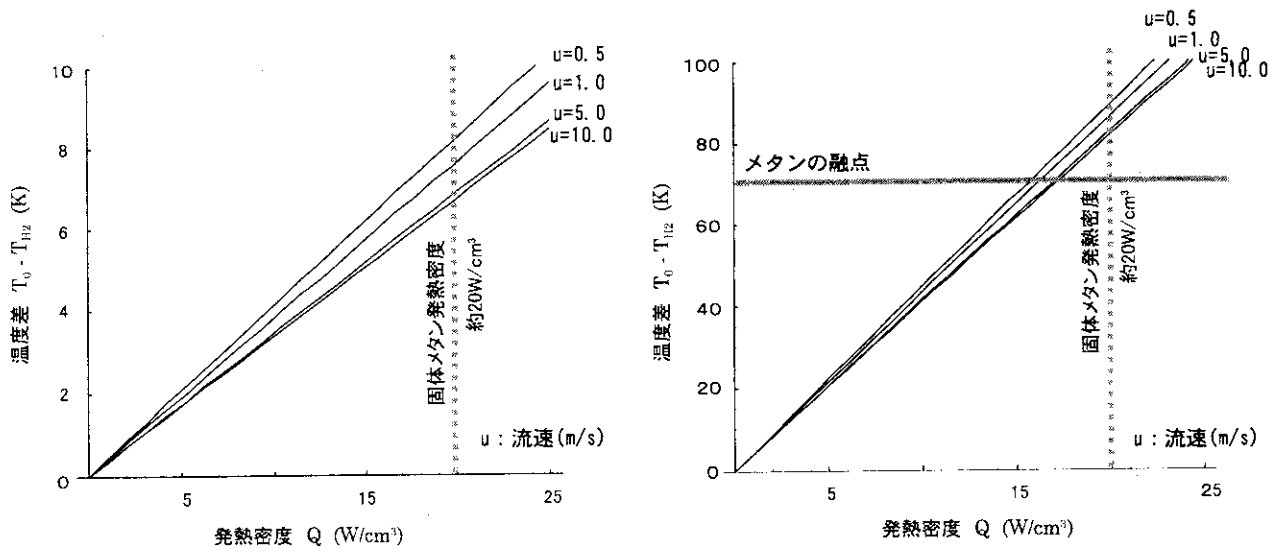


Fig.2.7 発熱密度 $Q=20(W/cm^3)$ における計算結果



(a) 粒子径  $D=1$  (mm) の場合

(b) 粒子径  $D=5$  (mm) の場合

Fig.2.8 粒子径 $D=1, 5$  (mm)における計算結果

Table 2.1 熱伝達率の計算結果

| 粒子径<br>D(mm) | 流速<br>u(m/s) | レイノルズ数<br>Re | 熱伝達率<br>h(kJ/m <sup>2</sup> hK) |
|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|
| 0.7          | 0.5          | 1910.038     | 16340.04                        |
| 1            | 0.5          | 2728.626     | 13806.01                        |
| 3            | 0.5          | 8185.878     | 8325.295                        |
| 5            | 0.5          | 13643.13     | 6612.708                        |
| 0.7          | 1.0          | 3820.076     | 23604.96                        |
| 1            | 1.0          | 5457.252     | 20029.05                        |
| 3            | 1.0          | 16371.76     | 12188.36                        |
| 5            | 1.0          | 27286.26     | 9707.632                        |
| 0.7          | 5.0          | 19100.38     | 56887.09                        |
| 1            | 5.0          | 27286.26     | 48538.16                        |
| 3            | 5.0          | 81858.78     | 29885.91                        |
| 5            | 5.0          | 136431.3     | 23886.14                        |
| 0.7          | 10.0         | 38200.76     | 83631.34                        |
| 1            | 10.0         | 54572.52     | 71447.00                        |
| 3            | 10.0         | 163717.6     | 44106.98                        |
| 5            | 10.0         | 272862.6     | 35279.46                        |

### 3. 減速材容器内の定常温度分布計算

2章では、減速材中の固体メタン粒子の粒径等を温度分布の観点から検討した。本章では、減速材容器の温度分布を計算し、特に液体水素の沸騰の観点から減速材容器の構造について検討する。

#### 3.1 形状と熱的条件

減速材容器の形状、寸法概念と熱的条件を模式的に Fig.3.1 に示す。現在、減速材容器は2重容器構造を検討している。内側容器には 20K の液体水素が固体メタン粒子とともに流動しており、外側容器の外側には 298K のヘリウムガスが流れ、内側容器と外側容器の間は真空層とした。ヘリウムガス層及び真空層は 3mm 及び 5mm とした。容器は内側、外側ともに材質はアルミ合金(A6061)、板厚は 3mm とした。板厚の設定根拠については後述する。容器壁は陽子ビーム照射による体積発熱がある。

以上の条件のもとに容器壁の定常温度分布を求めた。計算モデルには 1 次元モデルを用いた。

#### 3.2 容器壁発熱無しの場合

容器壁の発熱が無い場合には、各伝熱面における熱流束が一定となるから、それぞれの伝熱面での温度を未知数にして熱流束の計算式を導き、隣り合う伝熱面同士で熱流束の平衡式を立て、それらの代数連立方程式を解けばよい。以下に各伝熱面の熱流束平衡方程式を導く<sup>(7,8)</sup>。

まず、ヘリウム側温度  $T_{He}$  と外側容器外壁面温度  $T_1$  との熱伝達率  $h_{He}$  を介した熱流束の平衡方程式は次式で与えられる。

$$h_{He}(T_{He} - T_1) = \lambda_a \frac{(T_1 - T_2)}{l_a} \quad (3.1)$$

ここで、 $\lambda_a$ 、 $l_a$  は、それぞれ外側容器の熱伝導率、容器板厚を、 $T_2$  は外側容器の内表面温度を表す。

次に、外側容器板厚内の外壁面温度  $T_1$  と内壁面温度  $T_2$  の板厚内熱流束と、外側容器と内側容器の間にある真空層の熱流束の平衡方程式は次式となる。

$$\lambda_a \frac{(T_1 - T_2)}{l_a} = 4.88F_{ab} \left( \alpha_a \varepsilon_a \frac{T_2^4}{100} - \alpha_b \varepsilon_b \frac{T_3^4}{100} \right) \quad (3.2)$$

ここで、 $T_3$  は内側容器の外壁面温度、 $\alpha_a$ 、 $\varepsilon_a$  はそれぞれ外側容器の内壁面の熱放射率と吸収率を、 $\alpha_b$ 、 $\varepsilon_b$  はそれぞれ内側容器の外壁面の熱放射率と吸収率を表す。本計算では、熱放射による伝熱量を保守的に与えるために、 $\alpha_a \varepsilon_a = 1.0$ 、 $\alpha_b \varepsilon_b = 0.2$  と仮定した。 $F_{ab}$  は両面間の熱放射の幾何学的形状効果を表す形態係数であり、この場合は 1 次元であるから 1 対 1 の関係となり  $F_{ab} = 1.0$  である。

外側容器と内側容器の間にある真空層の放射による熱流束と、内側容器の外壁面温度を  $T_3$ 、内壁面温度を  $T_4$  とした場合の板厚内熱流束との平衡方程式は次式となる。

$$4.88F_{ab} \left( \alpha_a \varepsilon_a \frac{T_2^4}{100} - \alpha_b \varepsilon_b \frac{T_3^4}{100} \right) = \lambda_b \frac{(T_3 - T_4)}{l_b} \quad (3.3)$$

ここで、 $l_b$  は内側容器の板厚である。

最後に、液体水素側温度  $T_{H_2}$  (14(K)) と内側容器外壁面温度  $T_4$  との熱伝達  $h_{H_2}$  を介した、熱流束の平衡方程式は次式で与えられる。

$$\lambda_b \frac{T_3 - T_4}{l_b} = h_{H_2} (T_{H_2} - T_4) \quad (3.4)$$

以上で、各部の表面温度  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  を未知数とした 4 個の連立代数方程式となり、この連立代数方程式を解けば、各部の温度が求まる。ただし、式(3.2)、式(3.3)は絶対温度の 4 乗に比例した熱放射項を含むため非線型方程式となっており、厳密解を求めるのは一般的に難しく、通常は数値解を求めることになる。

### 3.3 容器壁発熱有りの場合

前節と同様に定常状態であるから、全ての断面で熱流束一定の条件のもとに、各部における温度を未知数として、容器壁発熱を考慮して断面前後の熱流束  $q$  に関する平衡式をたてる。これらを組み合わせて連立方程式を構成し、未知数について解けば各部の温度が求まる。この場合、容器壁発熱があることにより容器壁内で温度分布が一定にならないため、前節のように容器壁の内外表面温度差のみからなる熱流束平衡方程式とはならず、容器壁内の温度分布を考慮した熱流束平衡方程式をたてる必要がある。

最初に、熱伝導の一般論から検討を加える。内部発熱を考慮した 1 次元の非定常熱伝導方程式は、座標軸を  $x$  とすると次式で表すことができる。

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda} Q(x,t) \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$$

ここで、 $T(x, t)$ は温度分布、 $\lambda$ は熱伝導率、 $c$ は比熱、 $\rho$ は密度、 $Q(x, t)$ は発熱密度分布を表す。定常状態における熱伝導方程式は温度分布が時間変化せず一定となるから、式(3.5)の左辺はゼロとなり、1変数の常微分方程式となる。

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} + \frac{1}{\lambda}Q(x) = 0 \quad (3.6)$$

式(3.6)をもとに、以下に外側容器壁内に体積発熱密度分布  $Q_a(x)$  ( $=$ 一定)がある場合の温度分布  $T_a(x)$ を求める。

$$\begin{aligned} \frac{d^2T(x)}{dx^2} &= -\frac{1}{\lambda_a}Q_a(x) \\ Q_a(x) &= \text{const} \end{aligned} \quad (3.7)$$

式(3.7)の微分方程式を積分して温度分布  $T_a(x)$ を求めると、

$$T_a(x) = -\iint \frac{1}{\lambda_a}Q_a dx^2 = A_0 + A_1x - \frac{Q_a}{2\lambda_a}x^2 \quad (3.8)$$

となる。ここで、 $A_0$ 、 $A_1$ は積分定数である。境界条件(内・外表面温度)  $T_a(0)=T_1$ 、 $T_a(l)=T_2$ を未知数とする場合の  $A_0$ 、 $A_1$ との関係は、

$$\begin{aligned} T_1 &= T_a(0) = A_0 \\ T_2 &= T_a(l) = A_0 + A_1l - \frac{Q_a}{2\lambda_a}l^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

である。

同様に、内側容器壁についても体積発熱密度分布  $Q_b(x)$  ( $=$ 一定)を考慮して内・外表面温度  $T_3$ 、 $T_4$ を求めると、式(3.7)～式(3.9)から、

$$\begin{aligned}
 T_3 &= T_b(0) = B_0 \\
 T_4 &= T_b(l) = B_0 + B_1 l_b - \frac{Q_b}{2\lambda_b} l_b^2
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

となる。ここで、 $B_0$ 、 $B_1$ は積分定数である。

これらの内・外容器の温度分布と表面温度  $T_1 \sim T_4$  をもとに、最外層の He から最内層の液体水素までの各面における熱流束の平衡方程式を導く。

① He と外側容器外表面との熱伝達部

外側容器外表面の He との熱伝達による境界条件は、熱流束一定の条件から、境界面において、

$$\lambda_a \left. \frac{dT_a}{dx} \right|_{x=0} = -h_{He} (T_{He} - T_a(0))
 \tag{3.11}$$

であるから、

$$\lambda_a \left. \frac{dT_a}{dx} \right|_{x=0} - h_{He} T_a(0) = -h_{He} T_{He}
 \tag{3.12}$$

と表せる。式(3.12)に式(3.9)を代入すると、熱流束に関する平衡方程式は、

$$\lambda_a A_1 - h_{He} A_0 = -h_{He} T_{He}
 \tag{3.13}$$

となる。

② 外側容器内表面と真空層の熱放射部

外側容器外表面と同様、内表面の真空層との熱放射による境界条件は、熱流束一定の条件から、

$$\lambda_a \left. \frac{dT_a}{dx} \right|_{x=l_a} = -4.88F_{23} \left[ \alpha_2 \varepsilon_2 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \alpha_3 \varepsilon_3 \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right]
 \tag{3.14}$$

となる。ここで、 $\alpha_i$  と  $\varepsilon_i$  はそれぞれ両面の放射率、吸収率を表す。前節同様、 $\alpha_2 \varepsilon_2 = 1.0$ 、 $\alpha_3 \varepsilon_3 = 0.2$  と仮定した。また、 $F_{23}$  は両面の形態係数であり、この場合は平行面



であるため 1.0 とする。式(3.14)に式(3.8)を代入すると、熱流束に関する平衡方程式は、

$$\lambda_a A_1 - Q_a l_a = -4.88 \times C \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - 0.2 \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right] \quad (3.15)$$

となる。ここで、Cは単位の換算係数 (4.187J/cal) である。

### ③ 内側容器外表面と真空層の熱放射

外側容器内表面と同様、内側容器外表面と真空層との熱放射による境界条件は、熱流束一定の条件から、

$$\lambda_b \frac{dT_b}{dx} \Big|_{x=0} = -4.88 \times 4.187 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - 0.2 \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right] \quad (3.16)$$

であるから、

$$\lambda_b B_1 = -4.88 \times 4.187 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - 0.2 \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right] \quad (3.17)$$

となる。

### ④ 液体水素 H<sub>2</sub> と内側容器内表面との熱伝達部

内側容器内表面と H<sub>2</sub> との熱伝達による境界条件は、熱流束一定の条件から、境界面において、

$$\lambda_b \frac{dT_b}{dx} \Big|_{x=l_b} = h_{H_2} (T_{H_2} - T_b(l_b)) \quad (3.18)$$

であるから、

$$\lambda_b \frac{dT_b}{dx} \Big|_{x=l_b} + h_{H_2} T_b(l_b) = h_{H_2} T_{H_2} \quad (3.19)$$

と表せる。式(3.19)に式(3.10)を代入すると、熱流束に関する平衡方程式は次式となる。

$$\lambda_b B_1 - Q l_b + h_{H_2} (B_0 + B_1 l_b - \frac{Q_b}{2\lambda_b} l_b^2) = h_{H_2} T_{H_2} \quad (3.20)$$

したがって、内部発熱を伴う2重容器の定常熱伝導を支配する熱流束平衡方程式は、式(3.13)、(3.15)、(3.17)、(3.20)から成る連立方程式となる。式(3.15)、(3.17)の  $T_2$ 、 $T_3$  に式(3.9)、(3.10)を代入すると、連立方程式の未知数は  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  の4個となり、方程式の数も4個であるから解を求めることができる。これらの熱流束平衡方程式系は次式となる。

$$\begin{aligned} \lambda_a A_1 - h_{He} A_0 &= -h_{He} T_{He} \\ \lambda_a A_1 - Q_a l_a &= -4.88 \times 4.187 \left\{ \left( \frac{A_0 + A_1 l_a - \frac{Q_a}{2\lambda_a} l_a^2}{100} \right)^4 - 0.2 \left( \frac{B_0}{100} \right)^4 \right\} \\ \lambda_b B_1 &= -4.88 \times 4.187 \left\{ \left( \frac{A_0 + A_1 l_a - \frac{Q_a}{2\lambda_a} l_a^2}{100} \right)^4 - 0.2 \left( \frac{B_0}{100} \right)^4 \right\} \\ \lambda_b B_1 - Q_b l_b + h_{H_2} (B_0 + B_1 l_b - \frac{Q_b}{2\lambda_b} l_b^2) &= h_{H_2} T_{H_2} \end{aligned} \quad (3.21)$$

### 3.4 計算条件

#### (1)物性値

解析に用いたヘリウム及びアルミ合金(A-6061)の物性値を付録-4に示す。

#### (2)熱伝達率の計算

①ヘリウムガスと接する外側容器壁面における熱伝達率  $h_{He}$  はヌセルト数  $Nu$  から求める。

$$Nu = \frac{h_{He} De}{\lambda} \quad , \quad h_{He} = Nu \cdot \frac{\lambda}{De}$$

ここで、 $De$  : 等価直径 (≒流路高さ×2)

流路高さ（ヘリウムガス層厚さ）を 3mm 及び 5mm、すなわち、等価直径  $De$  を 6mm 及び 10mm、流速を約 10m/s（一般的な管路におけるガス流速の概略値）にした場合、ヘリウムガスのレイノルズ数  $Re$  は約 500 ( $De=6\text{mm}$ ) 及び約 830 ( $De=10\text{mm}$ ) となり、いずれも流れは層流である。したがって、壁面のヌセルト数  $Nu$  には次の平行平板に対する発達した層流の値を用いた<sup>9)</sup>。

$$Nu = 5.38$$

熱伝達率の計算結果を Table 3.1 に示す。

②液体水素と接する内側容器壁面における熱伝達率  $h_{H_2}$  も同様にヌセルト数  $Nu$  から求める。

$$Nu = \frac{h_{He} De}{\lambda}, \quad h_{He} = Nu \cdot \frac{\lambda}{De}$$

ここで、 $De$ : 等価直径 (=  $4 \times$  断面積 / 濡れ縁長さ)

ヌセルト数  $Nu$  は管内の発達した乱流熱伝達の式である次の Dittus-Boelter の式を用いた<sup>9)</sup>。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10^4 \leq Re \leq 10^5, 1 \leq Pr \leq 10)$$

ここで、 $Re$ 、 $Pr$  はそれぞれレイノルズ数、プラントル数であり、次式で与える。

$$Re = \frac{u \cdot De}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{a} = 1.045$$

ただし、内側容器壁面は温度及び流れの助走区間にあるものと考えられ、Dittus-Boelter の式による熱伝達率は極めて保守的な値を与える。

計算結果を Table 3.1 に示す。なお、等価直径  $De$  は減速材の概略寸法（縦 10cm、横 10cm、幅 5cm）から 0.067m とし、流速を 0.5、1、4、5、10m/s とした。さらに液体水素温度 18K、16K の場合で流速 4m/s のときの熱伝達率も求めた。

## (3)真空層の厚さ

内側容器と外側容器の間を 3mm 及び 5mm の真空層としたが、式(3.1)、(3.2)、(3.3)、(3.4)及び(3.21)の熱流束の平衡方程式から分かるように、温度分布計算は層の厚さに寄らない。

## (4)構造材板厚

Fig.2.3 の代表的な減速材容器の概略から、このようなボックス構造において最も大きな圧力を受けると考えられる底板にあたる部分について考える。荷重状態及び支持条件を等分布荷重、4辺支持とすると最大曲げ応力は次式で与えられる<sup>(10)</sup>。

$$\sigma_{\max} = \beta_1 \frac{pa^2}{h^2}$$

ここで、 $\sigma_{\max}$  は最大曲げ応力、 $\beta_1$  は長方形板の最大応力の係数、 $p$  は圧力、 $a$  は長方形板の1辺、 $h$  は長方形板の高さ(板厚)である。上式の最大曲げ応力にアルミ合金(A-6061)の許容引張応力<sup>(11)</sup>を代入し、板厚に対する許容圧力を求めた結果を Fig.3.2 に示す。この許容圧力は減速材容器の入口圧力を与える。

そこで、入口圧力に関する圧力損失について評価する。固液二相流の圧力損失は、管路における圧力損失 $\Delta p$  を液体のみを輸送することによって生じる圧力損失 $\Delta p_w$  と固体粒子を輸送することによって増加する付加圧力損失 $\Delta p_s$  との和とする方法が一般的に用いられている<sup>(6)</sup>。すなわち

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_w$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \gamma_w = i \cdot l \cdot \gamma_w$$

$$\Delta p_w = \lambda_w \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \gamma_w = i_w \cdot l \cdot \gamma_w$$

ここで、水平管路における  $i$  に関する式は擬均質流と非均質流とで異なるが、通常完全浮遊流れで非均質な流れになると考えられ、以下の Durand の実験式を用いる<sup>(6)</sup>。

$$\frac{i - i_w}{i_w C_v} = 150 \left[ \frac{v^2 \sqrt{C_D}}{gd(s-1)} \right]^{-1.5}$$

また、垂直管路においては、 $v/w_s > 6$  で次式が与えられる<sup>(6)</sup>。

$$i = i_w + C_v(s-1)$$

以上の式を用いて、水平管路の $l$ を25m、垂直管路の $l$ を5mとし、粒子濃度15、30、50%に対して求めた圧力損失 $\Delta p$ をTable 3.2に示した。上式は粒子濃度22%までの範囲の実験で得られたものであるが30、50%の高濃度でも適用できるとすると、50%で $\Delta p$ は最大となり、水平管路及び垂直管路の値を合計すると約 $0.5\text{kg/cm}^3$ となる。これらは直管での値なので、エルボ、容器出口及び容器内の圧力損失を考慮し、それぞれ上述の圧力損失と同等と過大評価すると全圧力損失は約 $2\text{kg/cm}^3$ となる。したがって、減速材容器入口圧力は裕度を考えて $3\text{kg/cm}^3$ 程度とする。ちなみに、アルゴン国立研究所で計画されたIPNS-Upgradeにおける液体メタン減速材の循環ポンプの出口圧力は300kPaであり<sup>(12)</sup>、ボックス構造では妥当な値と言える。ゆえに、減速材容器の板厚はFig.3.2より、余裕を見て3mmが妥当であると考えられる。参考までにヨーロッパのESS計画における液体水素減速材容器の板厚（ビームチューブに面したところ）は3mmであり<sup>(13)</sup>、強度を高めるために曲面構造を検討し15気圧まで耐えられるようにしている。ここでは、平板によるボックス構造について検討したが、今後は曲面構造の検討を行う予定である。

### 3.5 計算結果

3.2、3.3節で検討した減速材容器内の定常温度分布計算を容器発熱の有無に分け、数式処理プログラムMATHEMATICAを用いて行った計算結果を以下に示す。

#### (1) 容器壁発熱無しの場合

3.2節の式(3.1)、(3.2)、(3.3)、(3.4)を用いて連立方程式を解き、各部の表面温度 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ を求めた。液体水素は2章で固体メタン粒子群を浮遊流れとするには、粒子濃度30%の場合は流速を約3.8m/s以上の流速にする必要があることを述べたが、ここでは0.5、1、5、10m/sの場合を求めた。Table 3.3に結果を示す。

表から内側容器内表面温度 $T_4$ は著しく温度上昇することはない。しかし、液体水素の流速が0.5m/sの時、液体水素の沸点である20.39Kを超える。したがって、容器壁の発熱を考慮しない場合、ヘリウムガスが室温条件で液体水素の沸騰を防ぐためには、流速を1m/s以上とする必要がある。また、液体水素の流速を大きくすると内側容器の内外表面温度は僅かに低下するが、外側容器の内外表面温度は全く変化がない。外側容器で温度の変化がないのは、前節で述べたとおり、本計算ではヘリウムガスの流速が10.0m/sの近傍で熱伝達率 $h_{\text{He}}$ は一定となるためである。これに対し、液体水素の流速を大きくすると熱伝達率 $h_{\text{H}_2}$ は大きくなり、表面温度は20Kに近づく。ヘリウムガス層の厚さによる影響は内側容器ではほとんど無視でき、外側容器でも約2K程度で大きな差はない。

実際には、容器は大強度の中性子場にさらされるため、以下に検討するように構造材の体積発熱を考慮する必要がある。

## (2)容器壁発熱有りの場合

3.3 節の式(3.21)を用いて連立方程式を解き、式(3.9)、(3.10)から各部の表面温度  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  を求めた。計算は、液体水素温度を 20K、液体水素流速を 4m/s、ヘリウムガス流速を約 10m/s、減速材容器の板厚を 3mm として行った。液体水素は 2 章で述べたように粒子濃度 30% の場合は流速を 3.8m/s 以上にすることがあるとしたことから、ここでは 4m/s とした。Table 3.4 に結果を示す。

Fig.3.3(a)及び(b)は Table 3.4 についての結果を図にしたもので、Fig.3.3(a)はヘリウムガス層の厚さを 3mm、Fig.3.3(b)は 5mm とした結果である。両図とも発熱密度が高くなると各壁表面温度は高くなる。外側容器の壁表面温度の上昇率が内側容器のものより大きいのは、真空層による断熱効果で外側内側容器壁がほとんど相互の影響を受けずに発熱及び冷却されており、液体水素の熱伝達率に比べヘリウムガスの熱伝達率が低いためである。また、ヘリウムガス層の厚さを 3mm とした場合の各壁表面温度が 5mm の場合よりも低いのは、前者の場合の外側容器壁面における熱伝達率が後者に比べて約 1.7 倍と大きいためで(Table 3.1 参照)、発熱密度  $10\text{W}/\text{cm}^3$  における温度差は外側容器壁で約 90K、内側容器壁で約 1K である。

液体水素が沸騰すると減速材容器内の圧力が変動し、それに伴って流動が不安定になり容器自体の耐性のみならず、ループを構成する機器等にも影響を及ぼすと考えられる。そこで、この沸騰について検討する。核沸騰開始点の熱流束  $q_i$  と壁面過熱度  $\Delta T_s (= T_w - T_s)$  の関係は次式で与えられる<sup>(14)</sup>。

$$\left(\frac{q}{A}\right)_i = 15.60p^{1.156}(T_w - T_s)^{2.30/p^{0.0234}}$$

上式は水の場合の実験式であり、本検討の液体水素では表面張力が水の約  $1/36$ <sup>(15)</sup> であるため壁表面の気泡核の存在範囲が限定され、水の場合よりも  $\Delta T_s$  が高くなると考えられる。ここでは保守的な評価を行うこととして上式を使用する。なお上式で用いられている単位は、 $q_i$  は Btu/hr、 $A$  は  $\text{ft}^2$ 、 $p$  は  $\text{lb}/\text{in}^2$ 、 $(T_w - T_s)$  は  $^{\circ}\text{F}$  である。Fig.3.4 に  $p=1, 3, 5 \text{ kg}/\text{cm}^2$  としたときの  $q_i$  と  $\Delta T_s$  の関係を示す。単位は本書で用いているものに換算した。ここで、アルミ製の容器とした液体水素減速材をターゲット周りに配置したとき、体積発熱を核計算によって求めた結果、高い領域で約  $5.46\text{W}/\text{cm}^3$  となった。これは、アルミ合金 (A6061) の場合も同等であるとする。体積発熱密度  $Q$  が全て液体水素で除熱されると仮定し、容器板厚を  $t$  とすると、

$$q_i = Qt$$

と表すことができる。したがって、 $Q=5.46\text{W/cm}^3$ 、 $t=3\text{mm}$  のとき  $q_i$  は  $1.64 \times 10^4\text{W/m}^2$  となり、Fig.3.4 から  $p=3\text{kg/cm}^2$  のとき  $\Delta T_s$  は約 3.6K となる。Fig.3.3(a)及び(b)から内側容器壁の表面温度を拡大して Fig.3.5 に示す。沸騰開始温度を示している点線は、前述の  $q_i$  と  $\Delta T_s$  の関係から  $p=3\text{kg/cm}^2$  として  $Q$  に対する  $\Delta T_s$  を求め、 $T_s$  を液体水素の沸点である 20.39K とおいたときの  $T_w$  を表し、これを越えたところで沸騰が起こることを意味している。前述のように  $p=3\text{kg/cm}^2$ 、アルミ合金 (A6061) の体積発熱密度  $Q=5.46\text{W/cm}^3$  であれば  $\Delta T_s$  は約 3.6K となり、沸騰開始点は約 24.0K である。Fig.3.5 から分かるように  $Q=5.46\text{W/cm}^3$  で内側容器内表面温度  $T_4$  はヘリウムガス層厚さ 3mm のとき約 25.1K、5mm のとき約 25.4K であり、いずれも沸騰開始点を越えているため壁面で沸騰が起こっていることになる。しかし、前述したように沸騰開始点を求めた式は水の場合の実験式でかなり保守的な評価となっている。また、液体水素の沸点を 20.39K としているがこれは大気圧下の飽和温度であり、実際に  $p=3\text{kg/cm}^2$  程度の内圧がかかれば飽和温度は高くなり、その分沸騰開始温度も上がる。このように、液体水素の沸騰については今後詳細なデータを実験等により取得し検討していく必要がある。さらに液体水素は、空間的な配置関係やこれまでの液体減速材の実績等から、固体メタン粒子とともに容器内に二相噴流として流入させる方式が有力なため (Fig.2.4 参照)、固液二相噴流の熱伝達特性についても明らかにする必要がある。

以下にケーススタディとして液体水素の温度条件を下げた場合について調べた。

### (3) 容器壁発熱を考慮して液体水素の温度条件を変えた場合

Fig.3.6(a)、(b)及び Table 3.5、3.6 は、液体水素の温度条件を 20K から 18K 及び 16K とし、他は同条件 (板厚: 3mm、液体水素流速: 4m/s、ヘリウムガス流速: 約 10m/s) で計算した結果である。高い発熱密度になるほど温度条件の影響がなくなり、上昇カーブの間隔が狭まっている。液体水素の沸騰については、ヘリウムガス層厚さ 3mm では、Fig.3.6(a)より液体水素温度が 18K 及び 16K の場合は沸騰開始点未満であるので沸騰は起こらないことになる。一方、ヘリウムガス層厚さ 5mm では、Fig.3.6(b)より 18K の場合は沸騰開始点を越えているので沸騰が起こり、16K の場合は沸騰は起こらないことになる。

以上のように、液体水素の温度条件によって減速材容器の設計が異なる。また、減速材と接する内壁の板厚が大きくなるほど核発熱量が増大するので、液体水素の沸騰を防ぎつつ、強度維持が可能な板厚の検討を行う必要がある。さらに、最終的には液体水素流速を 4m/s と仮定して単相流の熱伝達式を用いて温度計算を行ったが、液体水素に固体メタン粒子を懸濁して流動させる固液二相流の伝熱特性については明らかでないため、今後実験データを蓄積して粒子濃度、流速等をパラメータとした相関式を開発する必要がある。(一般に、二相流動の熱伝達率は単相流の場合よりも大きくなる。)

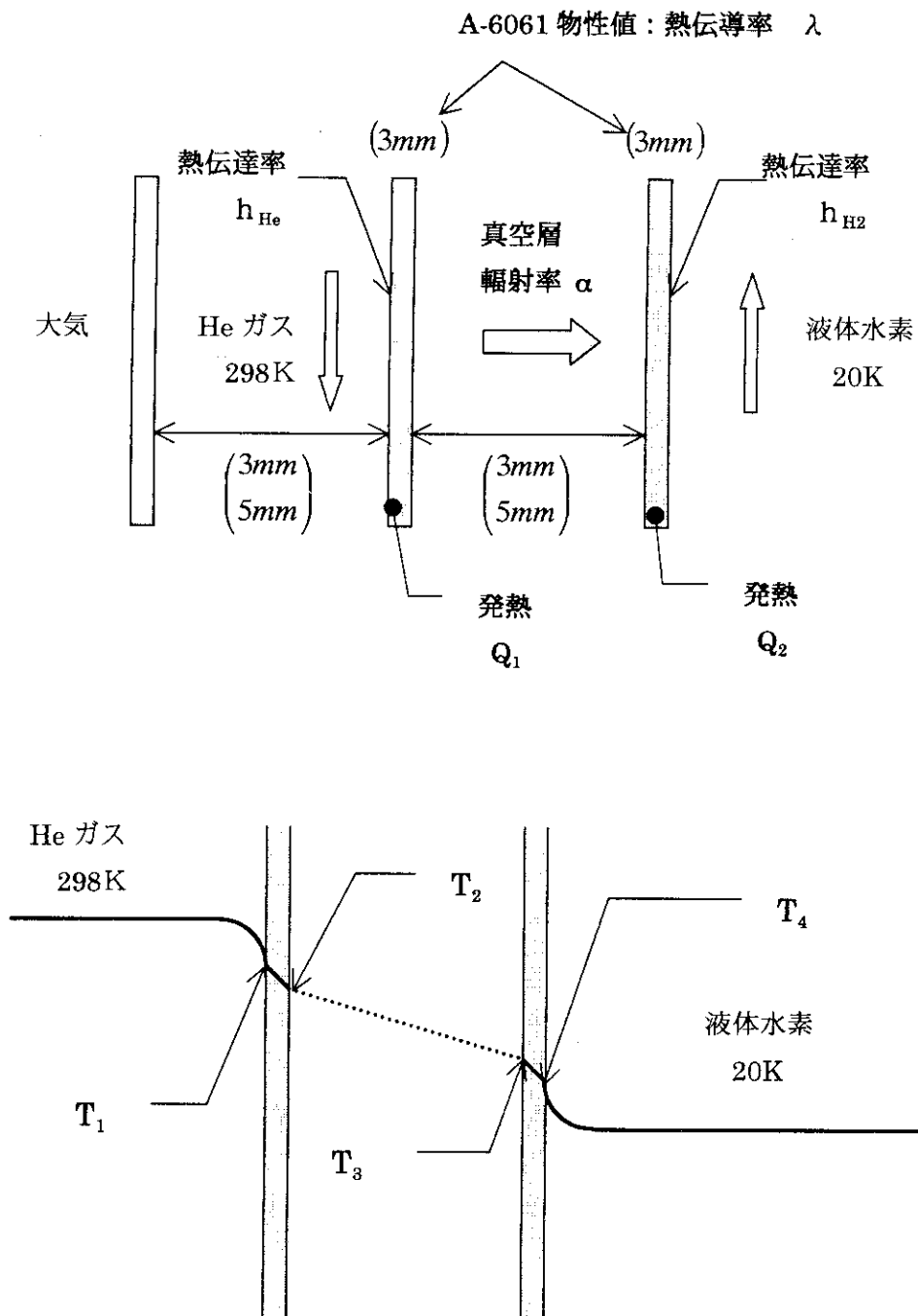


Fig.3.1 減速材容器内の定常熱伝導概念図



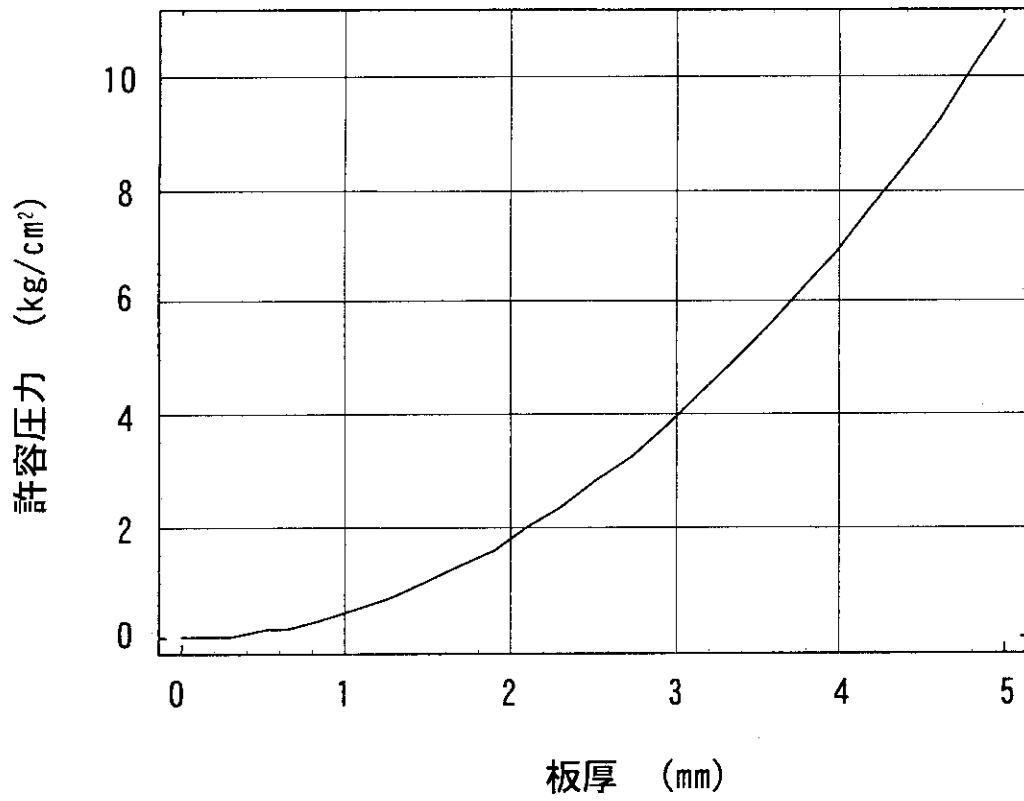


Fig. 3.2 減速材容器板厚と許容圧力の関係

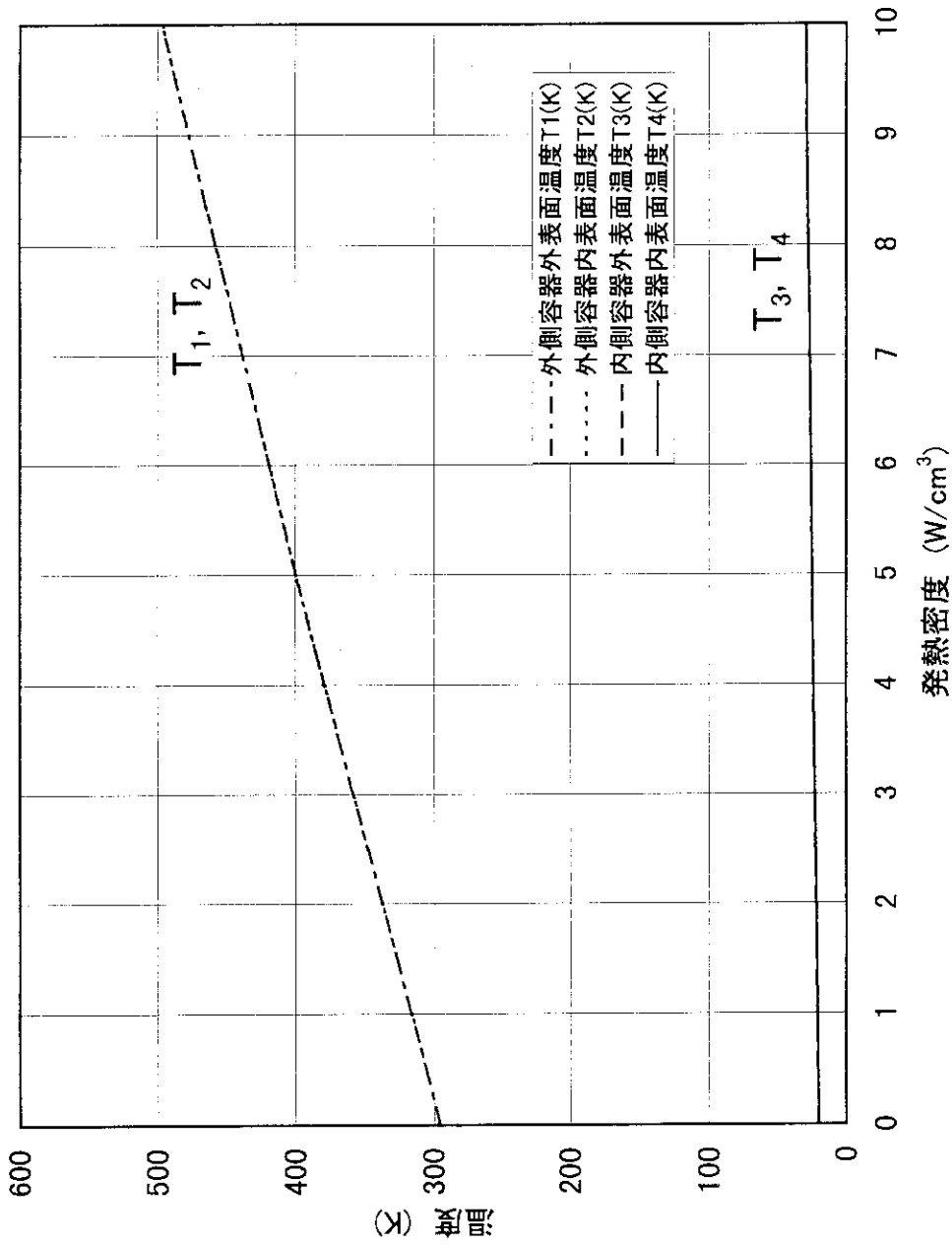


Fig.3.3(a) 発熱密度に対する各壁表面温度  
(ヘリウムガス層: 3mm)

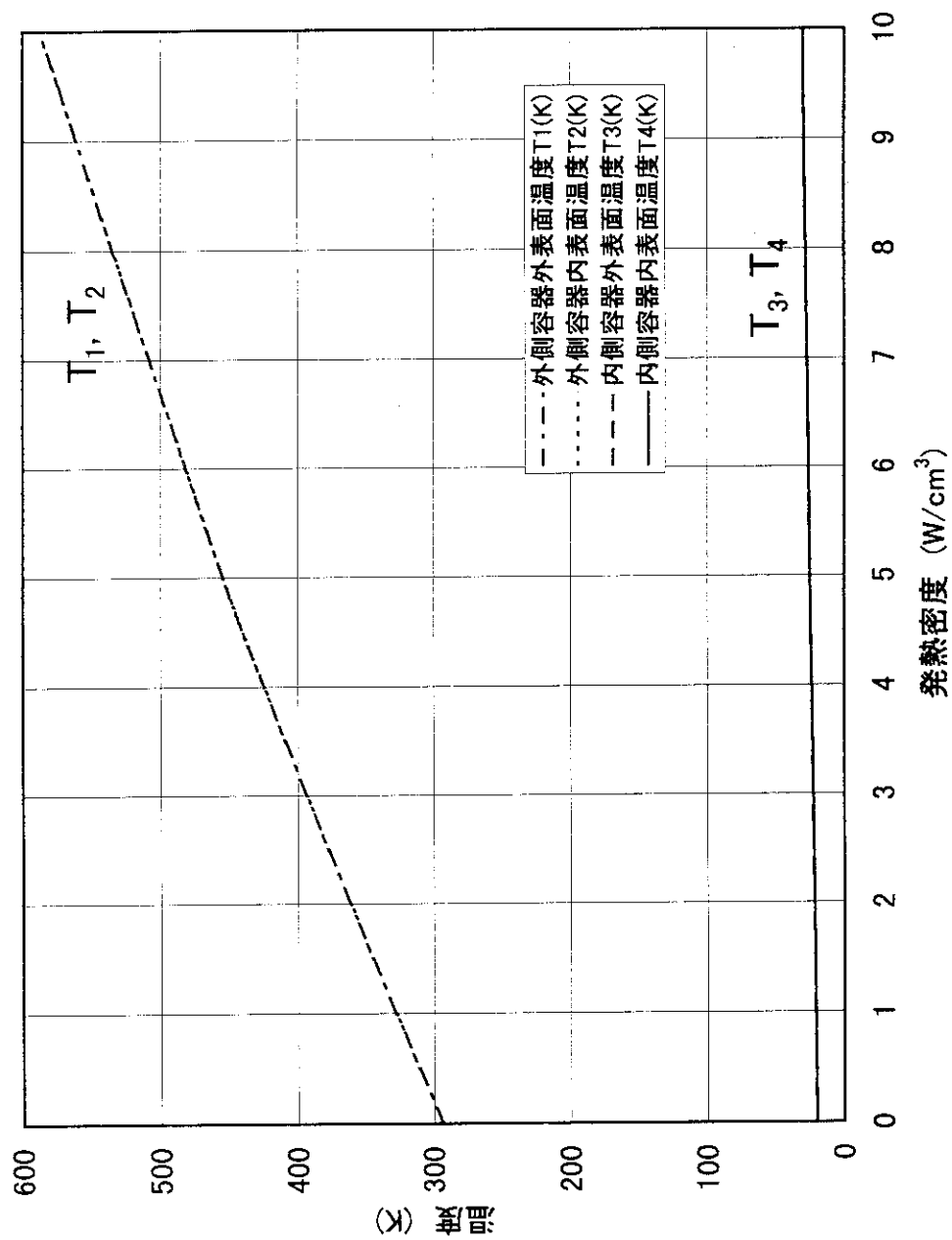


Fig.3.3(b) 発熱密度に対する各壁表面温度  
(ヘリウムガス層:5mm)

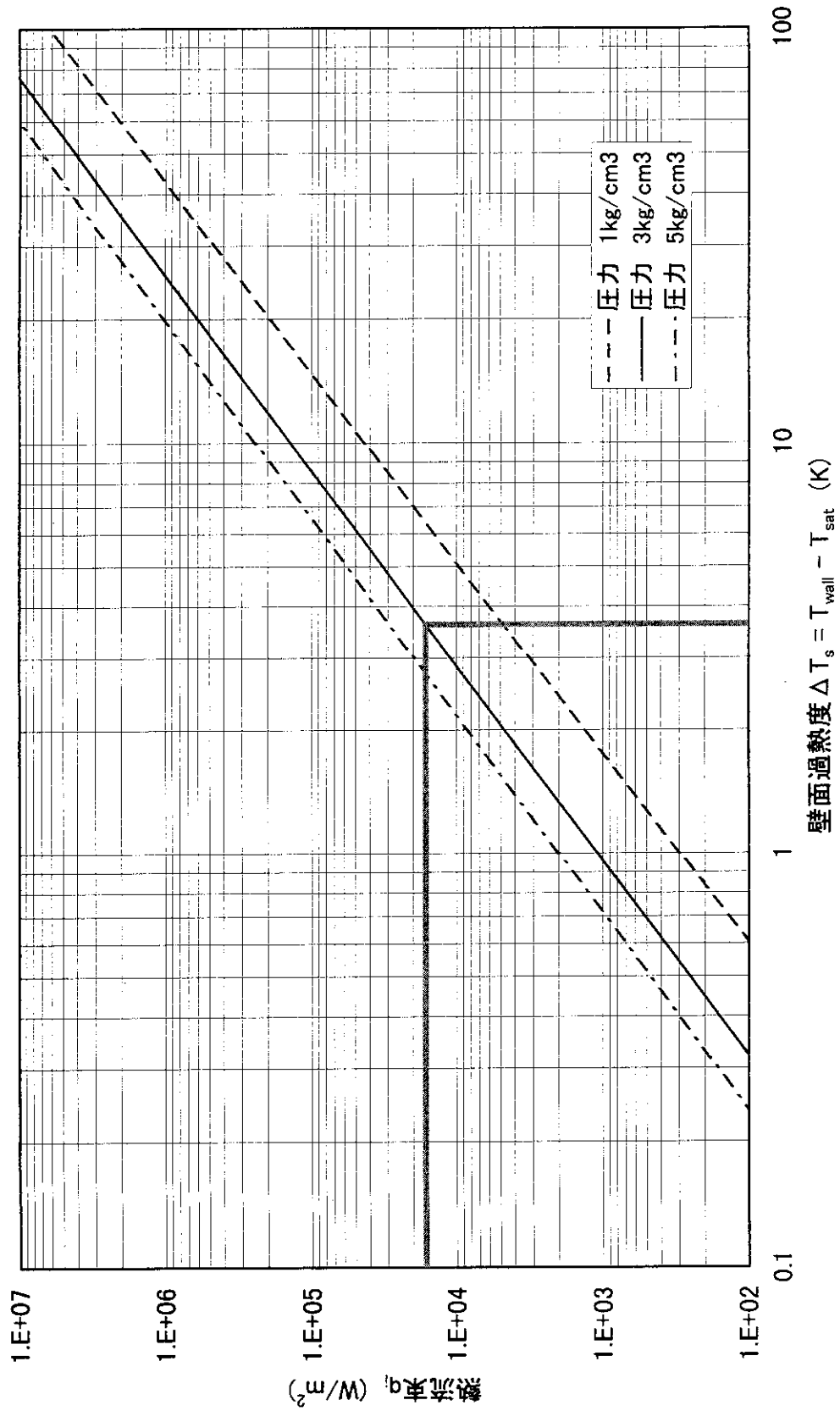


Fig.3.4 熱流束  $q_i$  と壁面過熱度  $\Delta T_s$  の関係

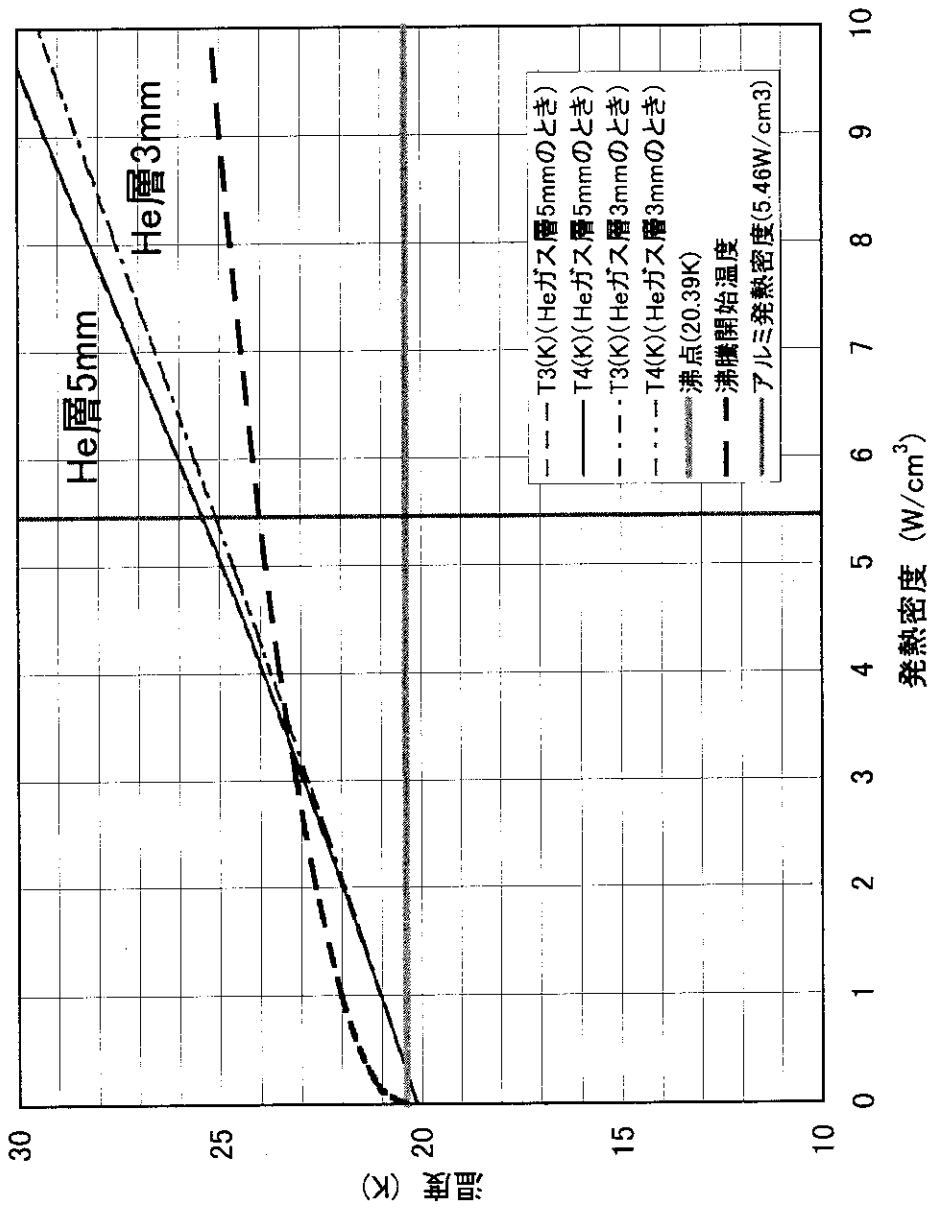


Fig.3.5 発熱密度に対する内側容器壁表面温度

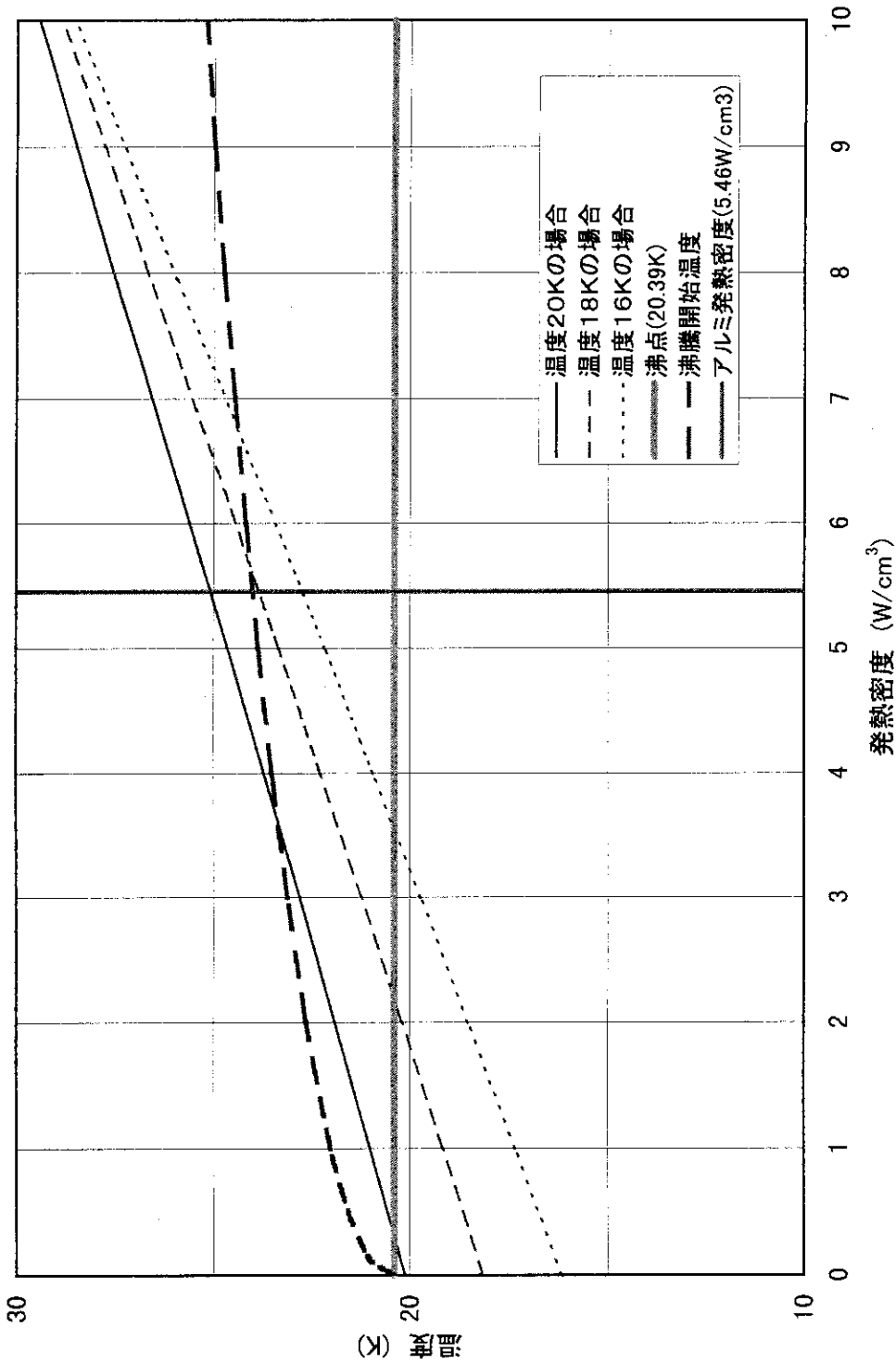


Fig.3.6(a) 液体水素温度を変えた時の内側容器壁  
内表面温度変化と沸騰開始温度の関係  
(ヘリウムガス層:3mm)

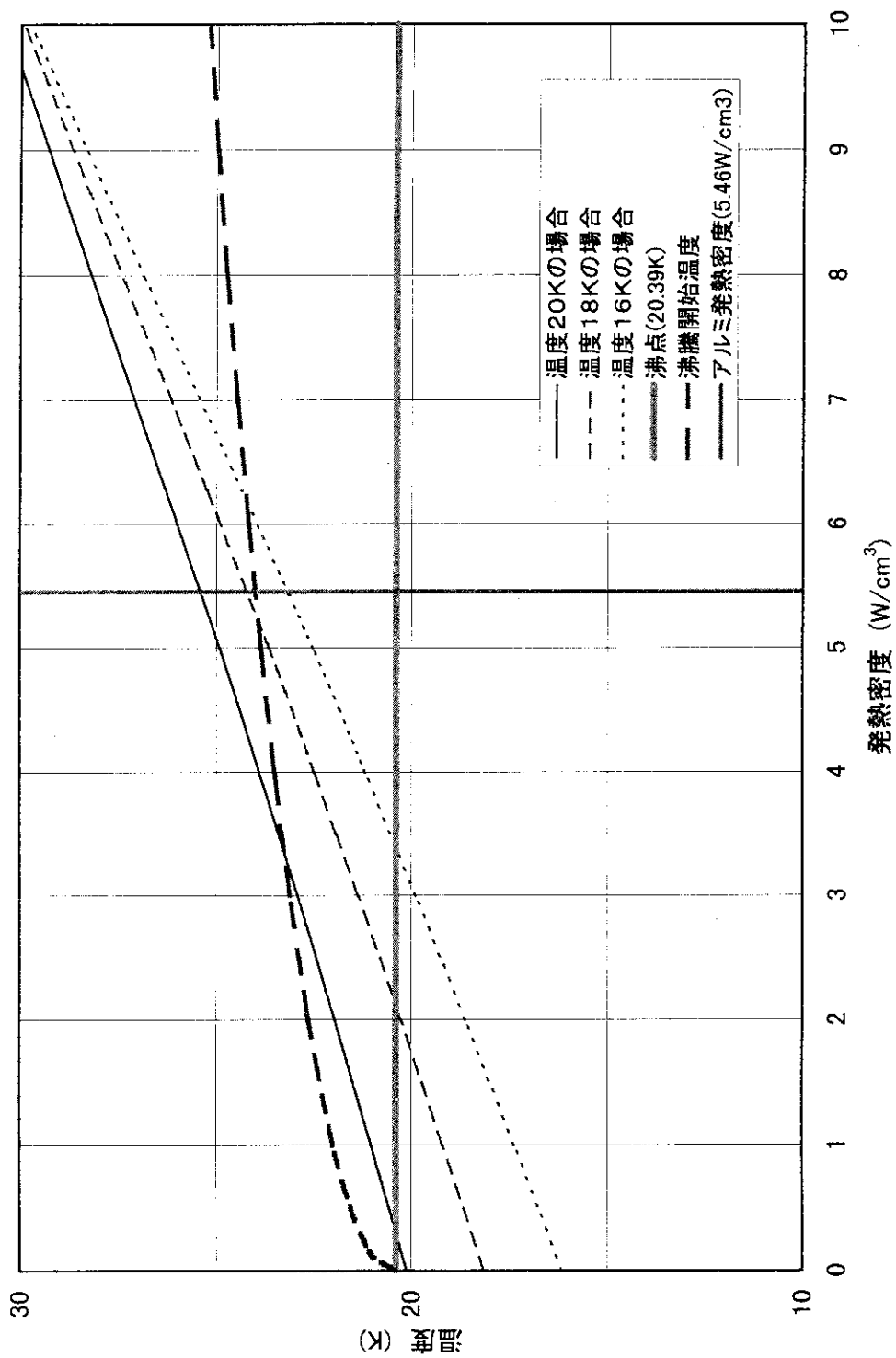


Fig.3.6(b) 液体水素温度を変えた時の内側容器壁  
内表面温度変化と沸騰開始温度の関係  
(ヘリウムガス層:5mm)

Table 3.1 熱伝達係数  $h_{\text{He}}$  及び  $h_{\text{H}_2}$  の計算結果

| ヘリウムガス       |                   |   |
|--------------|-------------------|---|
| 流速<br>u(m/s) | ガス層厚さ<br>De/2(mm) | 熱伝達係数<br>$h_{\text{He}}$ (kJ/m <sup>2</sup> hK) |
| 約10.0        | 3                 | 481.94  |
|              | 5                 | 289.16  |

| 液体水素 (20K)   |                    |  |
|--------------|--------------------|--|
| 流速<br>u(m/s) | レイノルズ数<br>Re       | 熱伝達係数<br>$h_{\text{H}_2}$ (kJ/m <sup>2</sup> hK) |
| 0.5          | $1.83 \times 10^5$ | 2415.2   |
| 1.0          | $3.66 \times 10^5$ | 4205.1   |
| 4.0          | $1.46 \times 10^6$ | 12747.4  |
| 5.0          | $1.83 \times 10^6$ | 15238.7  |
| 10.0         | $3.66 \times 10^6$ | 26532.2  |

| 液体水素 (18K)   |                    |  |
|--------------|--------------------|--|
| 流速<br>u(m/s) | レイノルズ数<br>Re       | 熱伝達係数<br>$h_{\text{H}_2}$ (kJ/m <sup>2</sup> hK) |
| 4.0          | $1.26 \times 10^6$ | 11100.9  |

| 液体水素 (16K)   |                    |  |
|--------------|--------------------|--|
| 流速<br>u(m/s) | レイノルズ数<br>Re       | 熱伝達係数<br>$h_{\text{H}_2}$ (kJ/m <sup>2</sup> hK) |
| 4.0          | $1.06 \times 10^6$ | 9615.6   |



Table 3.2 圧力損失の計算結果

| 水平管路 (25m)     |                                       |
|----------------|---------------------------------------|
| 粒子濃度 $C_v$ (%) | 圧力損失 $\Delta p$ (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 15             | 0.122                                 |
| 30             | 0.209                                 |
| 50             | 0.325                                 |

| 垂直管路 (5m)      |                                       |
|----------------|---------------------------------------|
| 粒子濃度 $C_v$ (%) | 圧力損失 $\Delta p$ (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 15             | 0.041                                 |
| 30             | 0.075                                 |
| 50             | 0.120                                 |

Table 3.3 減速材容器壁で発熱を考慮しないときの各壁表面温度

| ヘリウム<br>ガス層厚さ<br>(mm) | 液体水素<br>流速<br>(m/s) | 外側容器<br>外表面温度<br>$T_1$ (K) | 外側容器<br>内表面温度<br>$T_2$ (K) | 内側容器<br>外表面温度<br>$T_3$ (K) | 内側容器<br>内表面温度<br>$T_4$ (K) |
|-----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 3                     | 0.5                 | 294.798                    | 294.797                    | 20.6397                    | 20.6389                    |
|                       | 1                   | 294.798                    | 294.797                    | 20.3677                    | 20.3670                    |
|                       | 5                   | 294.798                    | 294.797                    | 20.1020                    | 20.1013                    |
|                       | 10                  | 294.798                    | 294.797                    | 20.0589                    | 20.0582                    |
| 5                     | 0.5                 | 292.806                    | 292.805                    | 20.6225                    | 20.6219                    |
|                       | 1                   | 292.806                    | 292.805                    | 20.3579                    | 20.3572                    |
|                       | 5                   | 292.806                    | 292.805                    | 20.0993                    | 20.0986                    |
|                       | 10                  | 292.806                    | 292.805                    | 20.0573                    | 20.0566                    |

(減速材容器板厚：3mm、ヘリウムガス流速：約10m/sで計算)

Table 3.4 減速材容器壁で発熱を考慮したときの各壁表面温度(液体水素 20K)

| 液体水素温度 20K            |                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ヘリウム<br>ガス層厚さ<br>(mm) | 発熱密度<br>Q<br>(W/cm <sup>3</sup> ) | 外側容器<br>外表面温度<br>T <sub>1</sub> (K) | 外側容器<br>内表面温度<br>T <sub>2</sub> (K) | 内側容器<br>外表面温度<br>T <sub>3</sub> (K) | 内側容器<br>内表面温度<br>T <sub>4</sub> (K) |
| 3                     | 0                                 | 294.798                             | 294.798                             | 20.1218                             | 20.1211                             |
|                       | 1                                 | 316.173                             | 316.175                             | 21.0109                             | 21.0075                             |
|                       | 2                                 | 337.329                             | 337.333                             | 21.9082                             | 21.9020                             |
|                       | 3                                 | 358.245                             | 358.251                             | 22.8148                             | 22.8057                             |
|                       | 4                                 | 378.899                             | 378.907                             | 23.7313                             | 23.7194                             |
|                       | 5                                 | 399.271                             | 399.281                             | 24.6585                             | 24.6436                             |
|                       | 10                                | 496.357                             | 496.376                             | 29.4761                             | 29.4454                             |
| 5                     | 0                                 | 292.806                             | 292.805                             | 20.1185                             | 20.1178                             |
|                       | 1                                 | 327.246                             | 327.247                             | 21.0346                             | 21.0310                             |
|                       | 2                                 | 360.733                             | 360.736                             | 21.9725                             | 21.9659                             |
|                       | 3                                 | 393.164                             | 393.169                             | 22.9345                             | 22.9247                             |
|                       | 4                                 | 424.460                             | 424.467                             | 23.9223                             | 23.9092                             |
|                       | 5                                 | 454.574                             | 454.582                             | 24.9372                             | 24.9207                             |
|                       | 10                                | 587.377                             | 587.391                             | 30.4167                             | 30.3804                             |

(減速材容器板厚:3mm、液体水素流速:4m/s、ヘリウムガス流速:約 10m/s で計算)

Table 3.5 減速材容器壁で発熱を考慮したときの各壁表面温度(液体水素 18K)

| 液体水素温度 18K            |                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ヘリウム<br>ガス層厚さ<br>(mm) | 発熱密度<br>Q<br>(W/cm <sup>3</sup> ) | 外側容器<br>外表面温度<br>T <sub>1</sub> (K) | 外側容器<br>内表面温度<br>T <sub>2</sub> (K) | 内側容器<br>外表面温度<br>T <sub>3</sub> (K) | 内側容器<br>内表面温度<br>T <sub>4</sub> (K) |
| 3                     | 0                                 | 294.798                             | 294.798                             | 18.1397                             | 18.1390                             |
|                       | 1                                 | 316.173                             | 316.175                             | 19.1603                             | 19.1569                             |
|                       | 2                                 | 337.329                             | 337.333                             | 20.1904                             | 20.1842                             |
|                       | 3                                 | 358.245                             | 358.251                             | 21.2309                             | 21.2218                             |
|                       | 4                                 | 378.899                             | 378.907                             | 22.2829                             | 22.2710                             |
|                       | 5                                 | 399.271                             | 399.281                             | 23.3472                             | 23.3323                             |
|                       | 10                                | 496.357                             | 496.376                             | 28.8771                             | 28.8464                             |
| 5                     | 0                                 | 292.806                             | 292.806                             | 18.1360                             | 18.1353                             |
|                       | 1                                 | 327.246                             | 327.247                             | 19.1876                             | 19.1840                             |
|                       | 2                                 | 360.733                             | 360.736                             | 20.2641                             | 20.2575                             |
|                       | 3                                 | 393.164                             | 393.169                             | 21.3683                             | 21.3585                             |
|                       | 4                                 | 424.460                             | 424.467                             | 22.5022                             | 22.4891                             |
|                       | 5                                 | 454.574                             | 454.582                             | 23.6670                             | 23.6505                             |
|                       | 10                                | 587.377                             | 587.391                             | 29.9564                             | 29.9201                             |

(減速材容器板厚:3mm、液体水素流速:4m/s、ヘリウムガス流速:約 10m/s で計算)

Table 3.6 減速材容器壁で発熱を考慮したときの各壁表面温度(液体水素 16K)

| 液体水素温度 16K            |                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ヘリウム<br>ガス層厚さ<br>(mm) | 発熱密度<br>Q<br>(W/cm <sup>3</sup> ) | 外側容器<br>外表面温度<br>T <sub>1</sub> (K) | 外側容器<br>内表面温度<br>T <sub>2</sub> (K) | 内側容器<br>外表面温度<br>T <sub>3</sub> (K) | 内側容器<br>内表面温度<br>T <sub>4</sub> (K) |
| 3                     | 0                                 | 294.798                             | 294.798                             | 16.1612                             | 16.1605                             |
|                       | 1                                 | 316.173                             | 316.175                             | 17.3390                             | 17.3356                             |
|                       | 2                                 | 337.329                             | 337.333                             | 18.5277                             | 18.5215                             |
|                       | 3                                 | 358.245                             | 358.251                             | 19.7286                             | 19.7195                             |
|                       | 4                                 | 378.899                             | 378.907                             | 20.9427                             | 20.9308                             |
|                       | 5                                 | 399.271                             | 399.281                             | 22.1709                             | 22.1560                             |
|                       | 10                                | 496.357                             | 496.376                             | 28.5525                             | 28.5218                             |
| 5                     | 0                                 | 292.806                             | 292.806                             | 16.1569                             | 16.1562                             |
|                       | 1                                 | 327.246                             | 327.247                             | 17.3705                             | 17.3669                             |
|                       | 2                                 | 360.733                             | 360.736                             | 18.6128                             | 18.6062                             |
|                       | 3                                 | 393.164                             | 393.169                             | 19.8871                             | 19.8773                             |
|                       | 4                                 | 424.460                             | 424.467                             | 21.1956                             | 21.1825                             |
|                       | 5                                 | 454.574                             | 454.582                             | 22.5398                             | 22.5233                             |
|                       | 10                                | 587.377                             | 587.391                             | 29.7976                             | 29.7613                             |

(減速材容器板厚:3mm、液体水素流速:4m/s、ヘリウムガス流速:約 10m/s で計算)

## 4. 今後の検討課題

### 4.1 固体メタン粒子径について

2章では固体メタン粒子の熱伝導計算に基づいて粒子径の検討を行った。以下に今後の検討課題を挙げる。

#### (1)他の解析手法との比較

構造解析コード ABAQUS などに組み込まれている熱伝導モデルを用いた解析についても比較検討の必要があると考える。

#### (2)熱流動特性の把握

固液二相流の熱伝達及び流動特性を実験及び解析によって把握することにより、運転流動条件である粒子径、濃度、流速等を詳細に検討する必要がある。

#### (3)減速材容器の構造強度評価

(2)に関連して、固体粒子が分散した固液二相流を成立させるために流速を上げていくと、液体だけでなく固体粒子も高速で流動するため、減速材容器の健全性を構造強度の面から検討する必要がある。

#### (4)固体メタンの発熱密度の評価

実際の減速材の設置位置における発熱密度を核計算から評価し、その成果を本結果に当てはめて比較検討する必要がある。

### 4.2 減速材容器内の温度分布について

3章では減速材容器内の定常温度分布計算から特に液体水素の沸騰について検討した。以下に今後の検討課題を挙げる。

#### (1)熱伝達特性の把握

減速材容器は多重構造となり、各層で流体及び流速等の条件が異なり、それによる流れの様相の変化、すなわち助走区間の影響が入るため、熱伝達率の流れ方向の変化を実験的に調べる必要がある。また、減速材としての固体メタンと液体水素は、容器内に二相噴流として流入させる方式が有力なため、固液二相噴流の熱伝達特性を明らかにする必要がある。

#### (2)減速材容器の構造強度評価

減速材と接する内壁の板厚が大きくなるほど核発熱量が増大するため、液体水素が沸騰しないように強度維持が可能な板厚や形状（曲面構造等）の検討を構造強度の検討と合わせて行う必要がある。

#### (3)減速材容器の発熱密度評価

今回入手したアルミ製減速材容器の体積発熱密度の核計算結果は、現在稼働中又は計画中の減速材の構造や配置等を参考にした暫定的な概算値である。実際の構造や配置等

については、上記(2)やターゲットシステム全体の設計などによって決定されるため適宜評価を進める必要がある。また、材質については最適な材料が開発されれば、適宜取り上げる。

#### (4)流動特性の把握

前節同様、固液二相流の熱流動特性（噴流を含む）を実験的に把握し、運転流動条件である流速等を検討する必要がある。

## 5. あとがき

固液二相流型減速材を開発するための流動特性に関する基礎実験やモックアップ試験に必要な運転流動条件を求めるため、固体メタン粒子の大きさと多重構造の減速材容器に関する温度解析を行い、予備的な検討を行った。

固体メタン粒子の大きさの検討では、1パルス当たりの陽子ビームによる粒子内の核発熱とその冷却過程及び、陽子ビームの入射を平均化して連続的に発熱があると仮定した時の熱平衡に達した後のメタン粒子の中心と表面の温度差について計算した。その結果、固体メタン粒子径を1mm以下にすれば、固体メタンの発熱密度概算値  $20\text{W}/\text{cm}^3$  に対して粒子中心温度は約30K以下に維持され、メタンの融点(90.7K)には達しないことがわかった。

減速材容器壁の温度解析の結果から、流動の安定化及び内圧上昇の防止をはかるために内側容器内壁面での液体水素の沸騰を抑制するには、アルミ合金(A-6016)板厚3mm、流速4m/sの条件下で、真空断熱層を覆うヘリウムガス層厚さが3mmの場合は液体水素温度を18K以下、5mmの場合は16K以下にする必要があることがわかった。特に固液二相流の流動特性については世界的にも実験例が少ないため、実験データの取得と整備が必要であり、本解析についても今後、解析精度のさらなる向上とともに実験的検証が必要である。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、渡辺昇特別研究員から減速材全般に関して貴重な助言をいただいた。また、核熱利用研究部の武田哲明氏には熱流動等に関して有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

については、上記(2)やターゲットシステム全体の設計などによって決定されるため適宜評価を進める必要がある。また、材質については最適な材料が開発されれば、適宜取り上げる。

#### (4)流動特性の把握

前節同様、固液二相流の熱流動特性（噴流を含む）を実験的に把握し、運転流動条件である流速等を検討する必要がある。

## 5. あとがき

固液二相流型減速材を開発するための流動特性に関する基礎実験やモックアップ試験に必要な運転流動条件を求めるため、固体メタン粒子の大きさと多重構造の減速材容器に関する温度解析を行い、予備的な検討を行った。

固体メタン粒子の大きさの検討では、1パルス当たりの陽子ビームによる粒子内の核発熱とその冷却過程及び、陽子ビームの入射を平均化して連続的に発熱があると仮定した時の熱平衡に達した後のメタン粒子の中心と表面の温度差について計算した。その結果、固体メタン粒子径を1mm以下にすれば、固体メタンの発熱密度概算値  $20\text{W}/\text{cm}^3$  に対して粒子中心温度は約30K以下に維持され、メタンの融点(90.7K)には達しないことがわかった。

減速材容器壁の温度解析の結果から、流動の安定化及び内圧上昇の防止をはかるために内側容器内壁面での液体水素の沸騰を抑制するには、アルミ合金(A-6016)板厚3mm、流速4m/sの条件下で、真空断熱層を覆うヘリウムガス層厚さが3mmの場合は液体水素温度を18K以下、5mmの場合は16K以下にする必要があることがわかった。特に固液二相流の流動特性については世界的にも実験例が少ないため、実験データの取得と整備が必要であり、本解析についても今後、解析精度のさらなる向上とともに実験的検証が必要である。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、渡辺昇特別研究員から減速材全般に関して貴重な助言をいただいた。また、核熱利用研究部の武田哲明氏には熱流動等に関して有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

については、上記(2)やターゲットシステム全体の設計などによって決定されるため適宜評価を進める必要がある。また、材質については最適な材料が開発されれば、適宜取り上げる。

#### (4)流動特性の把握

前節同様、固液二相流の熱流動特性（噴流を含む）を実験的に把握し、運転流動条件である流速等を検討する必要がある。

## 5. あとがき

固液二相流型減速材を開発するための流動特性に関する基礎実験やモックアップ試験に必要な運転流動条件を求めるため、固体メタン粒子の大きさと多重構造の減速材容器に関する温度解析を行い、予備的な検討を行った。

固体メタン粒子の大きさの検討では、1パルス当たりの陽子ビームによる粒子内の核発熱とその冷却過程及び、陽子ビームの入射を平均化して連続的に発熱があると仮定した時の熱平衡に達した後のメタン粒子の中心と表面の温度差について計算した。その結果、固体メタン粒子径を1mm以下にすれば、固体メタンの発熱密度概算値  $20\text{W}/\text{cm}^3$  に対して粒子中心温度は約30K以下に維持され、メタンの融点(90.7K)には達しないことがわかった。

減速材容器壁の温度解析の結果から、流動の安定化及び内圧上昇の防止をはかるために内側容器内壁面での液体水素の沸騰を抑制するには、アルミ合金(A-6016)板厚3mm、流速4m/sの条件下で、真空断熱層を覆うヘリウムガス層厚さが3mmの場合は液体水素温度を18K以下、5mmの場合は16K以下にする必要があることがわかった。特に固液二相流の流動特性については世界的にも実験例が少ないため、実験データの取得と整備が必要であり、本解析についても今後、解析精度のさらなる向上とともに実験的検証が必要である。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、渡辺昇特別研究員から減速材全般に関して貴重な助言をいただいた。また、核熱利用研究部の武田哲明氏には熱流動等に関して有益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)渡辺 昇, “原子核研究”, vol.40, No.1, p.71-91(1995)
- (2)A.T.Lucas, et al., "A PELLETTIZED SOLID METHANE MODERATOR FOR A MEDIUM-TO-HIGH POWER NEUTRON SOURCE", ICANS-XIII Vol. II, p.644-653 (1995)
- (3)Vedat S. Arpaci, "CONDUCTION HEAT TRANSFER", ADDISON-WESLEY, 1966
- (4)S. Kakac, Y. Yener, "HEAT CONDUCTION Second Edition", HEMISPHERE PUBLISHING CORPORATION, 1985
- (5)甲藤好郎, “伝熱概論”, 養賢堂, p164, 1976
- (6)日本機械学会, “技術資料 管路・ダクトの流体抵抗”, p177-180, 1979
- (7)槌田昭ほか, “改訂伝熱工学演習”, 学献社, p7-17, 1989
- (8)日本機械学会, “伝熱工学資料改訂第3版”, p1-5, p128-129, 1975
- (9)日本機械学会, “伝熱工学資料改訂第4版”, p51, p56, 1986
- (10)日本機械学会, “新版 機械工学便覧 A4 材料力学”, p60-61, 1984
- (11)高圧ガス保安協会, “通商産業省立地公害局保安課監修 高圧ガス取締法規集 第21次改訂版”, p536-537, 1993
- (12)ARGONNE NATIONAL LABORATORY, "IPNS Upgrade : A Feasibility Study", ANL-95/13, IV.3-30-32, 1995
- (13)NEXT GENERATION NEUTRON SOURCE FOR EUROPE, The ESS Target Station Concept, Ess-96-60-T, p44-46, 1996
- (14)W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Handbook of Heat Transfer, McGRAW-HILL, 13-7-9, 1973
- (15)日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集”, p12-13, p94, 1983

付録-1 固体メタン・液体水素の物性値<sup>(1,2)</sup>

| 材料    | 分子量    | 融点<br>K | 沸点<br>K | 密度 $\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | 粘性係数 $\mu$<br>$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | 動粘性係数 $\nu$<br>mm <sup>2</sup> /s |
|-------|--------|---------|---------|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| 液体水素  | 2.016  | 13.96   | 20.39   | 80.10(14K)                     | 24.5                                      | 0.306                             |
|       |        |         |         | 71.49(20K)                     | 13.1                                      | 0.183                             |
| 固体メタン | 16.043 | 90.7    | 111.63  | 522                            | —   | —                                 |

固体メタンの熱伝導率  $\lambda = 0.26(\text{W/mK}) = 936(\text{J/mhK})$

比熱  $C_p = 2737.6(\text{J/kgK})$

密度  $\rho = 522(\text{kg/m}^3)$

液体水素(20K)の熱伝導率  $\lambda_F = 118.4 \times 10^{-3}(\text{W/mK}) = 0.42624(\text{kJ/mhK})$

比熱  $C_{pF} = 9.454(\text{kJ/kgK})$

密度  $\rho_F = 71.49(\text{kg/m}^3)$

粘性係数  $\mu_F = 13.1(\mu\text{Pa}\cdot\text{s}) = 0.04716(\text{kg/mh})$

## 参考文献

(1)日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集”, 1983

(2)A.T.Lucas, et al., "A PELLETIZED SOLID METHANE MODERATOR FOR A MEDIUM-TO-HIGH POWER NEUTRON SOURCE", ICANS-X III Vol. II, p.644-653 (1995)

## 付録-2 固体メタン粒子-非定常温度分布計算の過程

ここでは固体メタン粒子の非定常温度分布について、数式処理プログラム MATHEMATICA を使用して行った計算の過程を簡単に示す。計算例は粒子径  $D$  が 1mm、流速  $u$  が 1m/s のときのものである。

1. 固有値  $\xi_n$  の計算

本文中にあるように、 $\xi_n$  は式(2.10)の固有方程式から求まる固有値である。

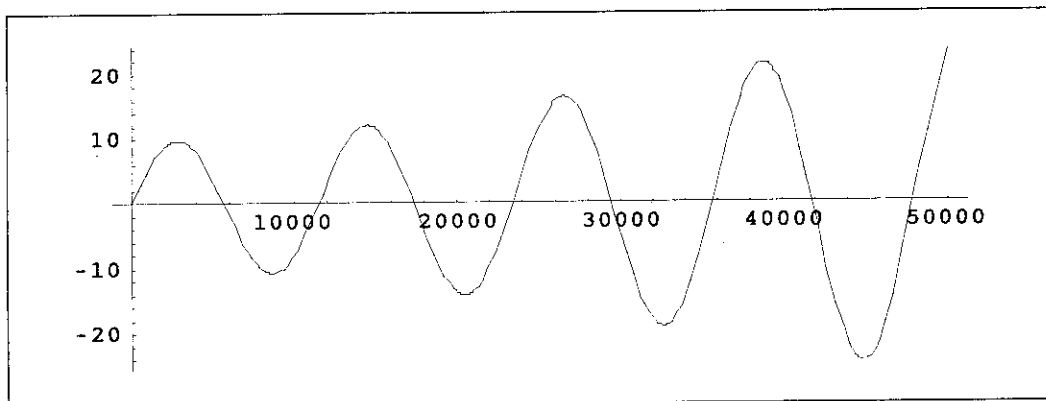
$$(\xi_n R) \cos(\xi_n R) = (1 - Bi) \sin(\xi_n R) \quad (2.10)$$

$$Bi = h_{H_2} R / \lambda$$

この関数をグラフに表してみる。入力を次に示す。

```
Plot[.0005 x Cos[.0005 x] - (1 - 20029050 * .0005 / 936) Sin[.0005 x], {x, 0, 50000}]
```

この結果、出力は以下のようになり、固有値  $\xi_n$  は特性方程式を満足するとびとびの値となる。



実際の  $\xi_n$  の値については次の入力により、

(入力)

```
FindRoot[
  .0005 x Cos[.0005 x] - (1 - 20029.05 * .0005 / .936) Sin[.0005 x] == 0,
  {x, 4000}]
```

(出力)

```
{x -> 5710.59501207221842`}
```

という  $\xi_1$  を得た。以下同様にして、

$$\xi_1 = 5710.6, \quad \xi_2 = 11496.4, \quad \xi_3 = 17388.0, \quad \xi_4 = 23376.5, \quad \xi_5 = 29439.6, \quad \dots$$

となる。

## 2. 式(2.21)の右辺第1因子の計算

粒子径  $D$  が 1mm のとき  $R$  は 0.0005m であるから、 $\xi_n R$  は、

$$\xi_1 R = 2.8553, \quad \xi_2 R = 5.7482, \quad \xi_3 R = 8.6940, \quad \xi_4 R = 11.6883, \quad \xi_5 R = 14.7198, \quad \dots$$

となる。

これらを式(2.21)の右辺第1因子である

$$\frac{\sin \xi_n R - \xi_n R \cos \xi_n R}{\xi_n R - \sin \xi_n R \cos \xi_n R}$$

に代入する。

(入力)

```
(Sin[2.86] - 2.86 Cos[2.86]) / (2.86 - Sin[2.86] Cos[2.86])
```

(出力)

```
0.967476542743683509`
```

$n=5$  まで計算すると、

n=1 のとき 0.967477, n=2 のとき -0.882414, n=3 のとき 0.774778,  
n=4 のとき -0.677191, n=5 のとき 0.588732

となり、符号が反転しながら小さくなる。

### 3. 式(2.21)の右辺第2因子の計算

式(2.21)の右辺第2因子は

$$e^{-a\xi_n^2 t}$$

であり、時間  $t$  で減衰する指数関数項である。

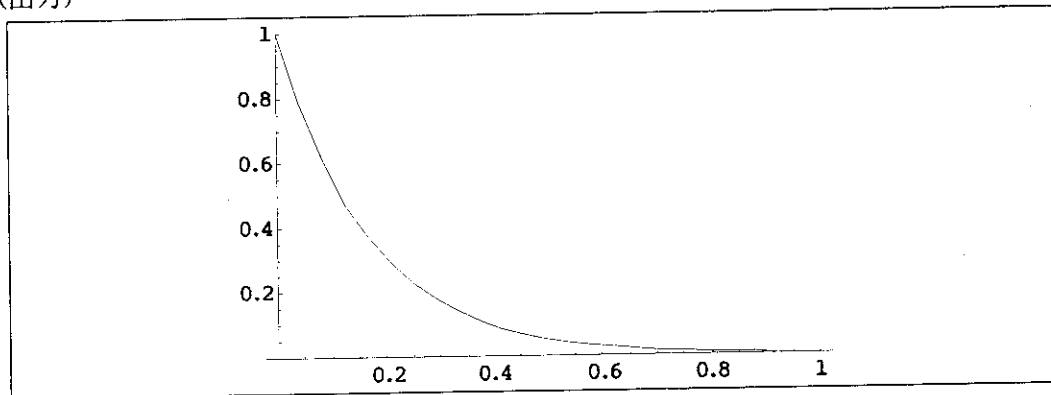
$\xi_n$  における  $n=1$  から  $n=5$  までの減衰曲線を表してみる。

#### ① $n=1$ のとき

(入力)

```
Plot[ Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 5710.6^2 * t / 3600], {t, 0, 1},
PlotRange -> {0, 1.0}]
```

(出力)

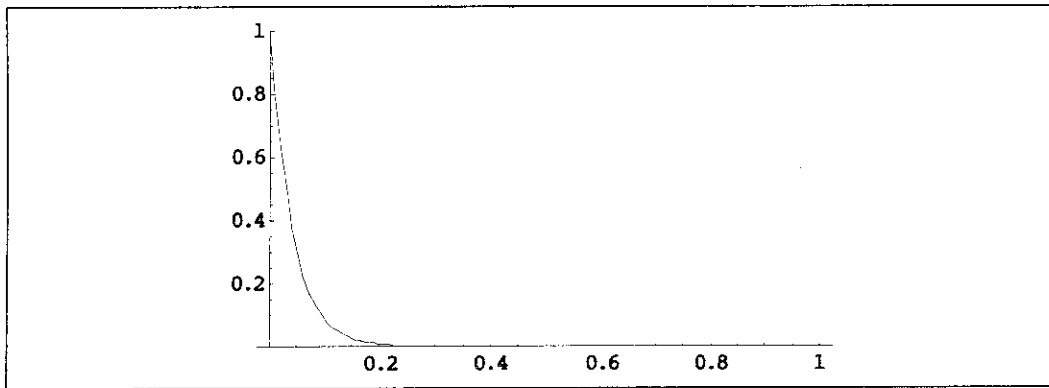


#### ② $n=2$ のとき

(入力)

```
Plot[ Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 11496.4^2 * t / 3600],
{t, 0, 1}, PlotRange -> {0, 1.0}]
```

(出力)

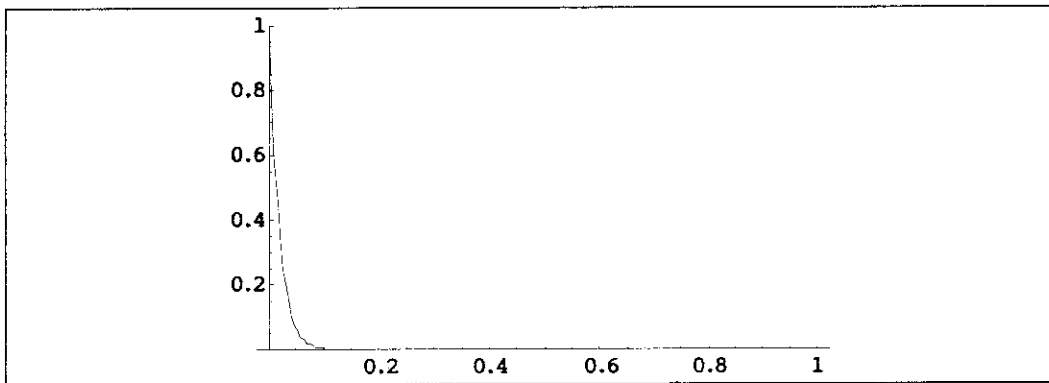


③n=3 のとき

(入力)

```
Plot[Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 17388^2 * t / 3600],
      {t, 0, 1}, PlotRange -> {0, 1.0}]
```

(出力)

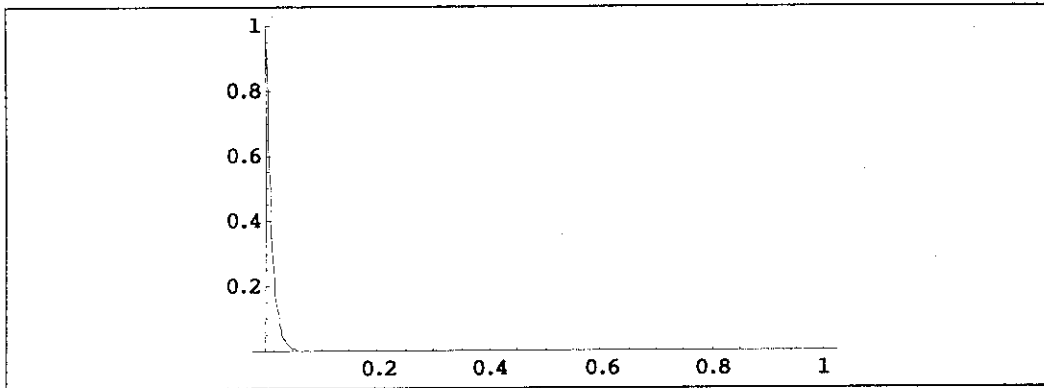


④n=4 のとき

(入力)

```
Plot[Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 23376.5^2 * t / 3600],
      {t, 0, 1}, PlotRange -> {0, 1.0}]
```

(出力)

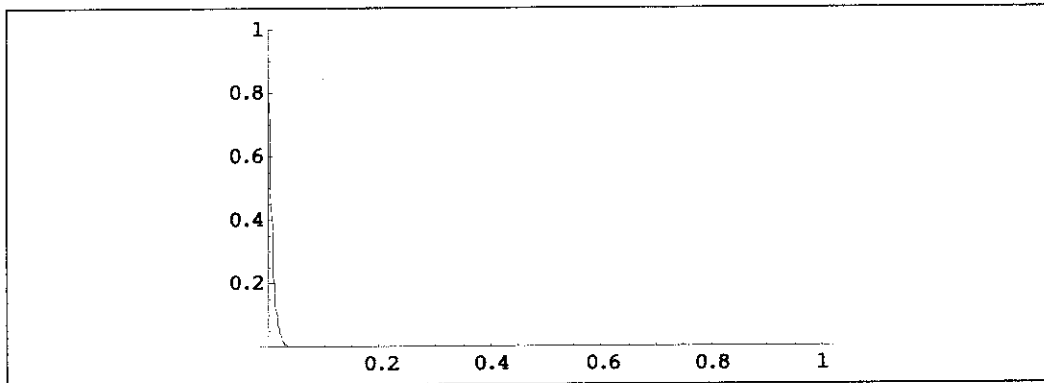


⑤n=5 のとき

(入力)

```
Plot[ Exp[- (936 / (2737.6 + 522)) + 29439.6^2 * t / 3600] ,
      {t, 0, 1} , PlotRange -> {0, 1.0} ]
```

(出力)



#### 4. 式級数和 ( $\sum_{n=1}^5 **$ ) の計算

これまで求めたそれぞれの値を代入し、最終的に本文中の Fig.2(a)の  $u=1\text{m/s}$  のカーブを得る。

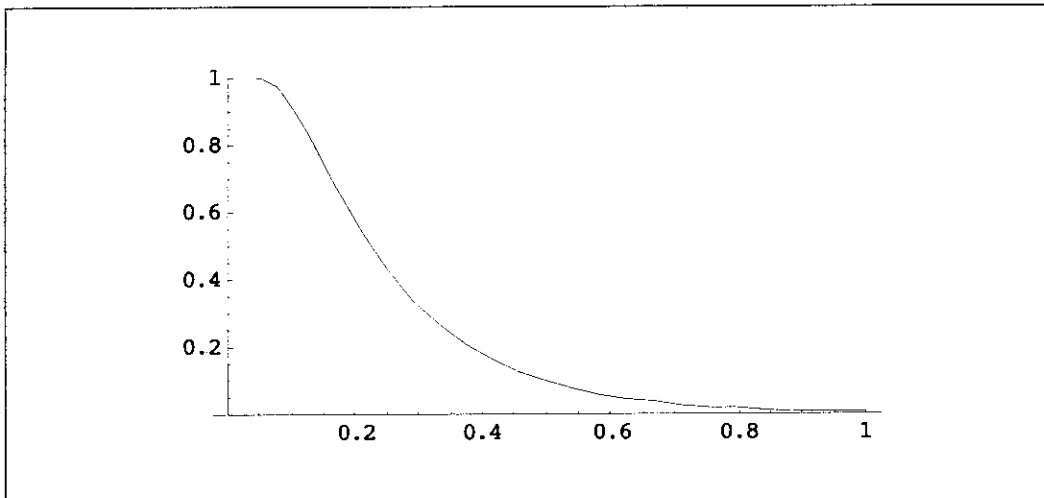
(入力)

```

Plot[2.0 (Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 5710.6^2 * t / 3600] *
(Sin[2.86] - 2.86 Cos[2.86]) / (2.86 - Sin[2.86] Cos[2.86])
+ Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 11496.4^2 * t / 3600] *
(Sin[5.75] - 5.75 Cos[5.75]) / (5.75 - Sin[5.75] Cos[5.75])
+ Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 17388^2 * t / 3600] *
(Sin[8.69] - 8.69 Cos[8.69]) / (8.69 - Sin[8.69] Cos[8.69])
+ Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 23376.5^2 * t / 3600] *
(Sin[11.67] - 11.67 Cos[11.67]) /
(11.67 - Sin[11.67] Cos[11.67])
+ Exp[-(936 / (2737.6 + 522)) + 29439.6^2 * t / 3600] *
(Sin[14.72] - 14.72 Cos[14.72]) /
(14.72 - Sin[14.72] Cos[14.72]),
{t, 0, 1},
PlotRange -> {0, 1.0}]

```

(出力)





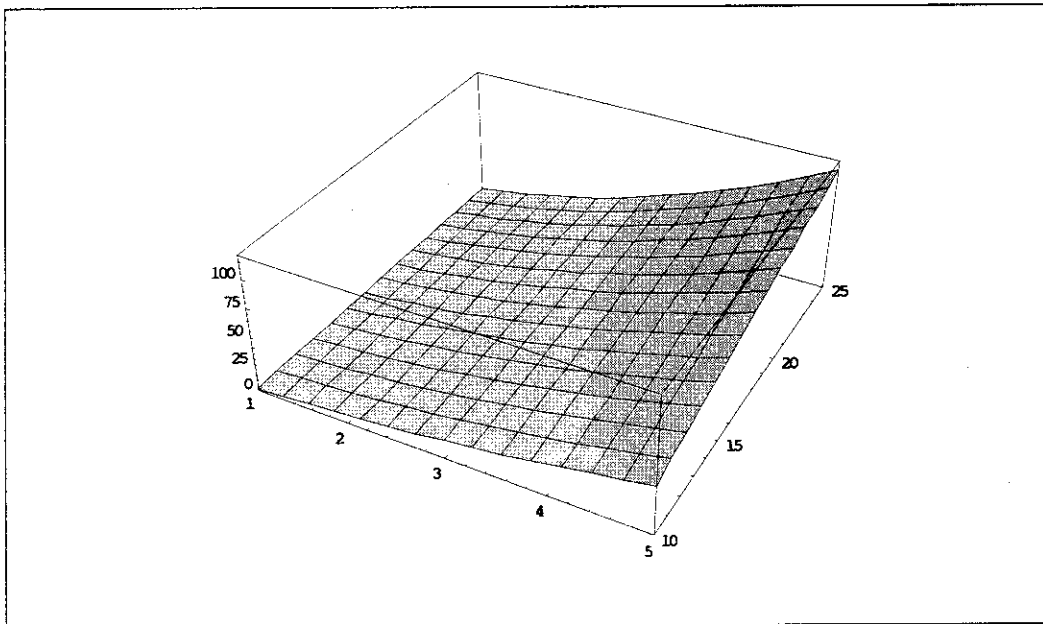
## 付録-3 固体メタン粒子一定常温度分布計算の過程

ここでは固体メタン粒子の定常温度分布について、数式処理プログラム MATHEMATICA を使用して行った計算の過程を簡単に示す。計算例は液体水素流速が 0.5m/s のときのもので、固体メタン粒子径  $D$  及びメタンの発熱密度  $Q$  をパラメータにして粒子中心と周囲との温度差を求めた。

## 入力例

```
Plot3D[
  - ( - ( 2 + 0.34 * ( ( d / 1000 * 0.5 * 3600 * 71.49 / 0.04716 ) ^ .566 *
    1.046^(1/3) ) * 0.42624 / ( d / 1000 ) ) *
    ( d / 2000 ) ^ 2 * q * 3600 * 10^3 -
    2 * ( d / 2000 ) * 0.936 * q * 3600 * 10^3 ) /
  ( 6 ( 2 + 0.34 *
    ( ( d / 1000 * 0.5 * 3600 * 71.49 / 0.04716 ) ^ .566 * 1.046^(1/3) ) *
    0.42624 / ( d / 1000 ) ) *
    0.936 )
  , { d, 1, 5} , { q, 10, 25} , PlotRange -> { 0, 120} ]
```

## 出力例



付録-4 減速材容器内の定常温度分布計算に用いた物性値<sup>(1,2)</sup>

## ①ヘリウム(298K)の物性値

|        |   |
|--------|---|
| 密度     | $\rho = 0.163(\text{kg/m}^3)$                 |
| 比熱     | $C_p = 5.197(\text{kJ/kgK})$                  |
| 比熱比    | $\kappa = 1.658$                              |
| 粘性係数   | $\eta = 19.80(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$     |
| 動粘性係数  | $\nu = 121(\text{mm}^2/\text{s})$             |
| 熱伝導率   | $\lambda = 149.3 \times 10^{-3}(\text{W/mK})$ |
| 温度伝導率  | $a = 176(\text{mm}^2/\text{s})$               |
| プラントル数 | $Pr = 0.688$                                  |

## ②液体水素(20K)の物性値 (付録-1 参照)

## ③液体水素(18K)の物性値

|       |   |
|-------|---|
| 密度    | $\rho = 73.58(\text{kg/m}^3)$                 |
| 比熱    | $C_p = 8.175(\text{kJ/kgK})$                  |
| 粘性係数  | $\eta = 15.60(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$     |
| 動粘性係数 | $\nu = 0.2120(\text{mm}^2/\text{s})$          |
| 熱伝導率  | $\lambda = 112.1 \times 10^{-3}(\text{W/mK})$ |
| 温度伝導率 | $a = 0.1864(\text{mm}^2/\text{s})$            |

## ④液体水素(16K)の物性値

|       |   |
|-------|---|
| 密度    | $\rho = 75.39(\text{kg/m}^3)$                 |
| 比熱    | $C_p = 7.341(\text{kJ/kgK})$                  |
| 粘性係数  | $\eta = 19.10(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$     |
| 動粘性係数 | $\nu = 0.2533(\text{mm}^2/\text{s})$          |
| 熱伝導率  | $\lambda = 105.2 \times 10^{-3}(\text{W/mK})$ |
| 温度伝導率 | $a = 0.1906(\text{mm}^2/\text{s})$            |

⑤アルミニウム合金 A-6061(300K)の物性値

密度  $\rho = 2700(\text{kg/m}^3)$

比熱  $C_p = 0.896(\text{kJ/kgK})$

熱伝導率  $\lambda = 180(\text{W/mK}) = 6.48 \times 10^3(\text{kJ/mhK})$

熱拡散率  $a = 74.4(\text{mm}^2/\text{s})$

熱膨張率  $\alpha = 23.6(\text{K}^{-1})$

電気抵抗率  $\rho_e = 3.7(\mu \Omega \cdot \text{cm})$

参考文献

- (1)日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集”, 1983
- (2)日本機械学会, “伝熱工学資料改訂第4版”, 1975