

JAERI-Tech

97-009



大強度陽子加速器ターゲット試験用
大型水銀ループの検討

1997年3月

日野竜太郎・羽賀勝洋・会田秀樹・関田健司
小磯浩司*・神永雅紀・数土幸夫・高橋浩道**

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弘済会資料センター（〒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 日立高速印刷株式会社

大強度陽子加速器ターゲット試験用
大型水銀ループの検討

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
日野竜太郎・羽賀 勝洋・会田 秀樹・関田 健司
小磯 浩司*・神永 雅紀*・数土 幸夫・高橋 浩道**

(1997年1月30日受理)

大強度陽子加速器システムによる5MW規模の中性子散乱用ターゲットとして、液体金属ターゲットが提案されている。本検討では、液体金属ターゲットとして世界的に注目されている水銀について、今後のターゲット設計のために物性値を整理し、水銀の取り扱い方法等の調査、除熱特性等の検討を行い、これらを基にしてターゲット設計データを取得するための大型水銀ループの概念検討を行った。ループは中性子科学研究計画の第I期に相当する1.5MW規模のもので、流速を1m/s以下にするための配管径、電磁ポンプ、冷却器等の概念仕様を定めた。また、検討を通して、耐食性材料や構造の最適化などターゲット及びループの課題を抽出した。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607

+ 東海研究所研究炉部

* 石川島播磨重工業(株)

** 三菱重工業(株)

Design Study on Large-scale Mercury Loop for Engineering Test
of Target of High-intensity Proton Accelerator

Ryutaro HINO, Katsuhiro HAGA, Hideki AITA
Kenji SEKITA, Kohji KOISO*, Masanori KAMINAGA+
Yukio SUDO and Hiromichi TAKAHASHI**

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 1997)

A heavy liquid-metal target has been proposed as a representative target of a 5MW-scale neutron source for a neutron scattering facility coupled with a high-intensity proton accelerator. In the report, about mercury considered to be the best material of the heavy liquid-metal target, its properties needed for the design were formulated, and results of research on mercury treatment and of evaluation of heat removal performance on the basis of generating heat obtained by a numerical calculation of a spallation reaction were presented. From these results, a 1.5MW-scale mercury loop which equals to that for the first stage operation of the neutron science program of JAERI was designed conceptually for obtaining design data of the mercury target, and basic flow diagram of the loop and specifications of components were decided: diameter of pipelines flowing mercury at the velocity below 1m/s, power of an electro-magnet pump and structure of a cooler. Through the design, engineering problems were made clear such as selection and development of mercury-resistant materials and optimization of the loop and components for decreasing mercury inventory.

Keywords: Target, Neutron Scattering Facility, Mercury, Properties, Treatment, Heat Removal Performance, 1.5MW-scale Mercury Loop, Conceptual Design, Specifications, Engineering Problems

+Department of Research Reactor, Tokai Research Establishment

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Ltd.

** Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

目 次

| | |
|-----------------------------|----|
| 1. まえがき | 1 |
| 2. 水銀の物性 | 2 |
| 2.1 液体金属の一般特性 | 2 |
| 2.2 水銀物性値の整理式 | 2 |
| 2.3 水銀物性値の圧力依存性 | 4 |
| 3. 水銀の各種特性 | 14 |
| 3.1 材料との共存性及び取扱い上の留意点 | 14 |
| 3.2 液体金属の熱伝達及び圧力損失特性 | 16 |
| 3.3 熱流束をパラメータにした除熱特性 | 17 |
| 3.4 今後の主要検討課題 | 19 |
| 4. 水銀ループの概念検討 | 33 |
| 4.1 検討方針 | 33 |
| 4.2 系統・機器の仕様の検討 | 34 |
| 5. 結言 | 49 |
| 謝 辞 | 49 |
| 参考文献 | 50 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Properties of Mercury | 2 |
| 2.1 General Characteristics of Heavy Liquid Metal | 2 |
| 2.2 Correlation of Mercury Properties | 2 |
| 2.3 Pressure Dependency of Mercury Properties | 4 |
| 3. Characteristics of Mercury | 14 |
| 3.1 Compatibility with Materials and Attention in Treatment | 14 |
| 3.2 Heat Transfer and Pressure Loss | 16 |
| 3.3 Heat Removal Performance in Relation with Heat Flux | 17 |
| 3.4 Research Items in Future | 19 |
| 4. Conceptual Design of Mercury Loop | 33 |
| 4.1 Design Conditions | 33 |
| 4.2 Loop Composition and Specifications of Components | 34 |
| 5. Concluding Remarks | 49 |
| Acknowledgment | 49 |
| References | 50 |

1. まえがき

原研では、核物理、材料物性などの分野のさらなる発展を目指す中性子科学研究計画の下で、1.5GeV-5.33mA級（出力8MW）の大強度陽子加速器要素技術の開発と加速器による中性子利用施設の概要検討を進めている。ただし、8MW級の大強度陽子加速器を最初から建設するには技術的な課題が多いので、まず、第I期に1.5GeV、1mA（1.5MW級）の技術を確立して、この経験及び知見を基にして8MWに増力化（第II期）する計画である。このとき、中性子利用施設では加速器からの陽子ビームをターゲットに入射して核破碎反応により高エネルギーの中性子を発生させるが、同時にターゲットでは既存の固体ターゲットよりも1桁以上大きい超高密度の熱が発生する。このため、高密度の熱を除去する観点から、液体金属ターゲットが世界的に注目されている。

液体金属は一般にプラントル数が極めて小さい、すなわち、粘性に比して熱伝導率が極めて大きいため、高い熱除去性能を持つ優れた原子炉冷却材として重用されてきた。液体金属の物性値データは、「熱物性ハンドブック」⁽¹⁾にLi、Na、K、Rb、Na-K、Hg、Al、Pbなどが記載され、「流体の熱物性値集」⁽²⁾にはHgのデータが示されている。また、「Reactor Handbook Engineering」⁽³⁾の Properties of Liquid Metal Coolants の章には、上記のほかに、Sb、Cd、Ga、In、Tlの物性値がグラフ化されている。ただし、広い温度、圧力範囲に適用できる物性値整理式は提示されていない。構造材との共存性については上記の文献[3]、「FAST REACTOR TECHNOLOGY」⁽⁴⁾等に記載されているが、おおまかな傾向を述べているにとどまり、寿命予測という観点からのデータはないとあってよい。

陽子ビーム照射の標的となる液体金属ターゲットのその他の条件として、

- ・大気中で燃焼しないこと
- ・核破碎に優れていること
- ・取扱い上の安全性に優れていること

が挙げられる。これに該当する液体金属として鉛、水銀がある。本報告では、とくに、ショートパルス陽子ビームのターゲット材として世界的に注目されている水銀⁽⁵⁾について、今後の設計検討に使用できるように物性値の整理式を導出した。また、ターゲット及びループ構造材との共存性、取扱い上の留意点についてまとめ、整理した。さらに、熱流束（又は体積発熱量）をパラメータにして除熱特性を検討し、液体金属ターゲット試験用ループの構成と概念仕様を検討した。

2. 水銀の物性

2. 1 液体金属の一般特性

原子炉冷却材としての利用では、中性子吸収断面積が小さいこと、放射化しないこと、融点が高いこと、沸点が高いこと、取扱性が容易で構造材との共存性が良いこと等が選定の条件となる。中性子吸収断面積と放射化については、

中性子吸収断面積 : Bi (0.032)、Pb (0.17)、Na (0.49) → 小
Ce (29)、Li (69)、Hg (360)、Cd (3100) → 大
(barns)

放射化 : ^{210}Bi からの 猛毒性の ^{210}Po が発生

である。水銀(Hg)は中性子吸収断面積が大きいものの、ショートパルス陽子ビームではその影響が極めて小さくなり、水銀中の酸素を除去して(純度99.99999%以下)、酸素が放射化して猛毒の ^{7}Be に変換されるのを防ぐことに注意すればよい。

また、アルカリ金属(Li、Na、K、Rb、Cs及びNaK)は、酸素に対する反応性が高く、大気中で燃焼しやすい欠点を有しているが、水銀は燃焼せず、大気中での蒸発のみに注意すれば取り扱いやすい物質である。取扱いについては3.4節で述べる。

物性値のうち、融点及び沸点は冷却システムの温度条件を設定するのに重要な因子である。加熱用ヒータの表面温度や配管/構造材料の使用温度の制限条件を考慮して、冷却材の最高温度を600℃とした場合の融点からの温度余裕を、アルカリ金属を除く単体の液体金属について融点及び沸点とともにTable 2.1に示す。同表には価格を参考として記載しておいた。表にみられるように水銀は常温では液体であり、また、沸点が低いので600℃では完全に沸騰・蒸発する。水銀をターゲットに使用する場合は、沸騰による圧力変動、チョーキング等に起因する流量変動やバーンアウトを防ぐために液単相流で使用する必要がある。このため、水銀ターゲットの構造材は沸点以下、すなわち、余裕をみて300℃以下で使用されることになる。このような低温では薄肉材料で強度を維持できるため構造的に極めて好都合である。その他の液体金属では、鉛(Pb)は600℃で沸騰は生じないものの融点が328℃と高いため、凝固しないように保温ヒータを各部に設けて低温部分が発生しないようにするなどループ構成を工夫し、かつ、構造材の熱的余裕及び耐腐食性に留意する必要がある。Sb、Mg、Alは融点が600℃を越えるため、使用に際しては700℃を越える高温設計を採用する必要がある。Gaは物性的には優れているが、高価である。構造材との共存性については3.1節で述べる。

2. 2 水銀物性値の整理式

水銀の詳しいデータが記載されていた「熱物性ハンドブック」⁽¹⁾と「流体の熱物性値集」⁽²⁾を基にして、水銀の主要な物性値(大気圧下)と温度との関係を整理する近似式(以後、整理式と呼ぶ。)を最小二乗法で求めた。以下にこれらの式を示す。今回は、整

理式の適用温度範囲は、後述の構造材との共存性を考慮して263～573K (-10～300℃) の範囲にとどめた。今後、限界熱流束等の試験及び評価のために、1000℃以上の範囲まで拡大した物性値の整理を行う予定である。参考のため、Table 2.2に水銀に加えて鉛、ナトリウムの平均的な物性値を併記しておいた。また、導出した近似式と物性値データとの一致状況をFig. 2.1～Fig. 2.16に示す。

(1) 密度(kg/m³)

$$\rho = -5.30021718E-7 \cdot T^3 + 8.01360966E-4 \cdot T^2 - 2.78664121 \cdot T + 1.43072131E4$$

ここで、上式を含めて以下の整理式で用いているTは絶対温度[K]を表す。また、密度に関連して、水銀の膨張率は大きく、かつ広い温度範囲でほぼ一定である。0～100℃の範囲の体膨張率は 1.82×10^{-4} である⁽⁶⁾。

(2) 粘性係数(mPa·s)

$$\eta = -3.93413944E-13 \cdot T^5 + 9.29119111E-10 \cdot T^4 - 8.85280652E-7 \cdot T^3 + 4.29857727E-4 \cdot T^2 - 1.08710212E-1 \cdot T + 1.27792598E1$$

(3) 動粘性係数(m²/s)

$$\nu = -2.74932750E-6 \cdot T^5 + 6.49494552E-3 \cdot T^4 - 6.19458591 \cdot T^3 + 3.01343929E3 \cdot T^2 - 7.63569120E5 \cdot T + 9.04285985E7$$

(4) 比熱(kJ/kg/K)

$$C_p = -3.61116233E-11 \cdot T^3 + 1.21708282E-7 \cdot T^2 - 9.98695811E-5 \cdot T + 1.59318703E-1$$

(5) 熱伝導率(W/mK)

$$\lambda = 1.01661467E-11 \cdot T^4 - 1.52155439E-8 \cdot T^3 + 1.87517692E-6 \cdot T^2 + 1.51703934E-2 \cdot T + 4.14683603$$

(6) 温度伝導率(m²/s)

$$a = -3.18841131E-8 \cdot T^5 + 6.90000488E-5 \cdot T^4 - 6.26047682E-2 \cdot T^3 + 2.51565714E1 \cdot T^2 + 4.70581140E3 \cdot T + 2.06230099E6$$

(7) プラントル数

$$Pr \cdot 10^4 = -1.06040942E-10 \cdot T^5 + 2.49797451E-7 \cdot T^4 - 2.37111437E-4 \cdot T^3 + 1.14509620E-1 \cdot T^2 - 2.87074595E1 \cdot T + 3.19086010E3$$

(8) 蒸気圧

$$P_{s1} = 1.30930000E-10 \cdot T^2 - 6.84633590E-8 \cdot T + 8.95923843E-6$$

(263.15K ≤ T < 283.15K、-10℃ ≤ T < 10℃)

$$P_{s2} = 1.99816428E-11 \cdot T^3 - 1.69628054E-8 \cdot T^2 + 4.80810148E-6 \cdot T - 4.54976471E-4$$

(283.15K ≤ T < 313.15K、10℃ ≤ T < 40℃)

$$P_{s3} = 1.01900326E-10 \cdot T^3 - 9.46542762E-8 \cdot T^2 + 2.93754320E-5 \cdot T - 3.04517537E-3$$

(313.15K ≤ T < 343.15K、40℃ ≤ T < 70℃)

$$Ps4 = 3.70999851E-10 \cdot T^3 - 3.73535789E-7 \cdot T^2 + 1.25738375E-4 \cdot T - 1.41466743E-2$$

(343.15K ≤ T < 373.15K、70°C ≤ T < 100°C)

$$Ps5 = 1.04333380E-9 \cdot T^3 - 1.12921005E-6 \cdot T^2 + 4.08915341E-4 \cdot T - 4.95263388E-2$$

(373.15K ≤ T < 403.15K、100°C ≤ T < 130°C)

$$Ps6 = 2.85000706E-9 \cdot T^3 - 3.33515574E-6 \cdot T^2 + 1.30696037E-3 \cdot T - 1.71421418E-1$$

(403.15K ≤ T < 443.15K、130°C ≤ T < 170°C)

$$Ps7 = 6.88340275E-9 \cdot T^3 - 8.72571547E-6 \cdot T^2 + 3.70915858E-3 \cdot T - 5.28360059E-1$$

(443.15K ≤ T < 483.15K、170°C ≤ T < 210°C)

$$Ps8 = 1.34999486E-8 \cdot T^3 - 1.83503547E-5 \cdot T^2 + 8.37717406E-3 \cdot T - 1.28323230$$

(483.15K ≤ T < 523.15K、210°C ≤ T < 250°C)

$$Ps9 = 2.42132157E-8 \cdot T^3 - 3.52704586E-5 \cdot T^2 + 1.72870701E-2 \cdot T - 2.84756393$$

(523.15K ≤ T < 573.15K、250°C ≤ T < 300°C)

2. 3 水銀物性値の圧力依存性

上述したように密度、比熱、熱伝導率、動粘性係数等の大気圧条件下でのデータを基にして温度をパラメータにした近似式を導出した。物性値の圧力依存性については、機械工学便覧⁽⁷⁾に次式で表される体積弾性係数 K

$$K = -V \cdot dp/dV$$

が示されており、0.1~10MPaまでの圧力範囲で $K=25.0\text{GPa}$ である。この逆数が圧縮率 β であり、 β は0.04となる。水銀の圧縮率 β は他の液体よりはるかに小さく、水の κ と比べても約1/10という値である。このことから、水銀は圧力に対して体積の変化が極めて少ないという特徴があげられる。

圧縮率が小さいことから、圧力変化に対する物性値変化も小さいと推測される。ちなみに、同便覧に記載されている粘性係数と圧力のグラフでは、圧力変化に対して粘性係数の変化は極めて小さく、50MPaまでの粘性係数は大気圧条件下での値とほぼ一致している。また、文献 [4] には圧力を変化させたときの密度変化のデータ表が示されているが、50MPaにおける密度は大気圧条件での密度よりも0.2%増大するのみで、ターゲットの運転圧力域 (約20気圧以下) では、密度の圧力依存性は無視して良いと考えられる。

なお、流体中を圧力波が伝わる速さ (音速) a は、

$$a = (dp/d\rho)^{0.5} = (K/\rho)^{0.5}$$

で与えられ、50°Cで約1440m/s⁽⁶⁾ である。この値は水とほぼ等しい。

Table 2.1 Melting point and boiling point of heavy liquid metals
except alkali metal

| | 融点 (°C) | 沸点 (°C) | 600°Cまでの液相 の温度範囲(°C) | 単価(1991.9) \$/lb |
|-----|------------|------------|-------------------------|---------------------|
| H g | -38.87 | 357 | (397) | 2.56 |
| G a | 29.92 | 1,983 | 570 | 5500 (2.50/g) |
| I n | 156.4 | 2,087 | 444 | 32.8 |
| S n | 232 | 2,270 | 368 | 1.03 |
| B i | 271 | 1,477 | 329 | 2.25 |
| T l | 303 | 1,475 | 297 | 12.50 |
| C d | 321 | 765 | 279 | 2.55 |
| P b | 327.4 | 1,737 | 272 | 0.17 |
| Z n | 419.5 | 906 | 180 | 0.18 |
| S b | 631 | 1,440 | — | 0.44 |
| M g | 651 | 1,103 | — | 0.245 |
| A l | 660.2 | 2,450 | — | 0.22 Na 0.16 |

Table 2.2 Mercury properties under atmospheric pressure

| | H g (-39~358°C) | P b (400~1000°C) | N a (100~700°C) |
|----------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 密度 (g/cc) | 13.6~12.9 | 10.5~9.8 | 0.9~0.8 |
| 粘性係数 (mPa·s) | 1.9~1.0 | 2.6~1.7 | 0.6~0.2 |
| 動粘性係数 (mm ² /s) | ~0.1 | ~0.2 | 0.7~0.2 |
| 定圧比熱 (kJ/kg·K) | ~0.1 | ~0.2 | 1.4~1.3 |
| 熱伝導率 (W/(m·K)) | 16~15 | 8~13 | 86~51 |
| 融点/沸点 (°C) | -38.87/357 | 327.4/1737 | 97.8/883 |

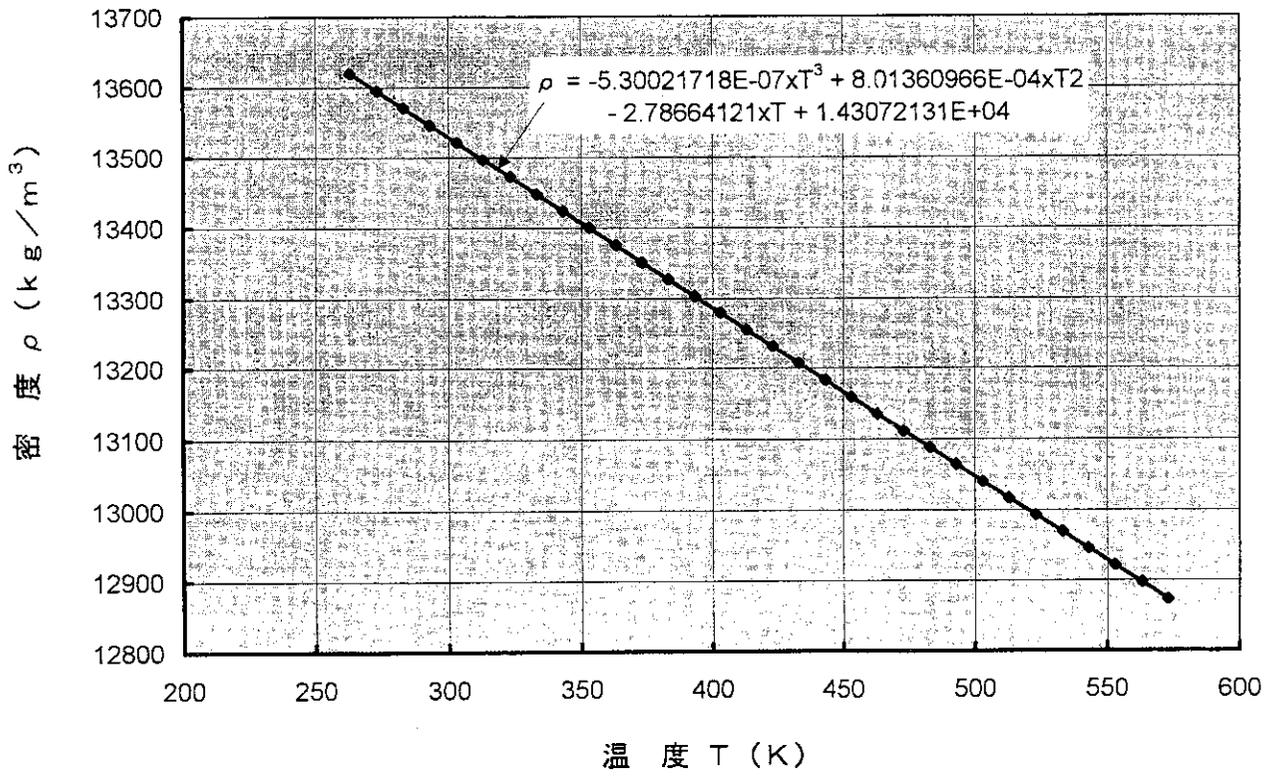


Fig. 2.1 Density of mercury

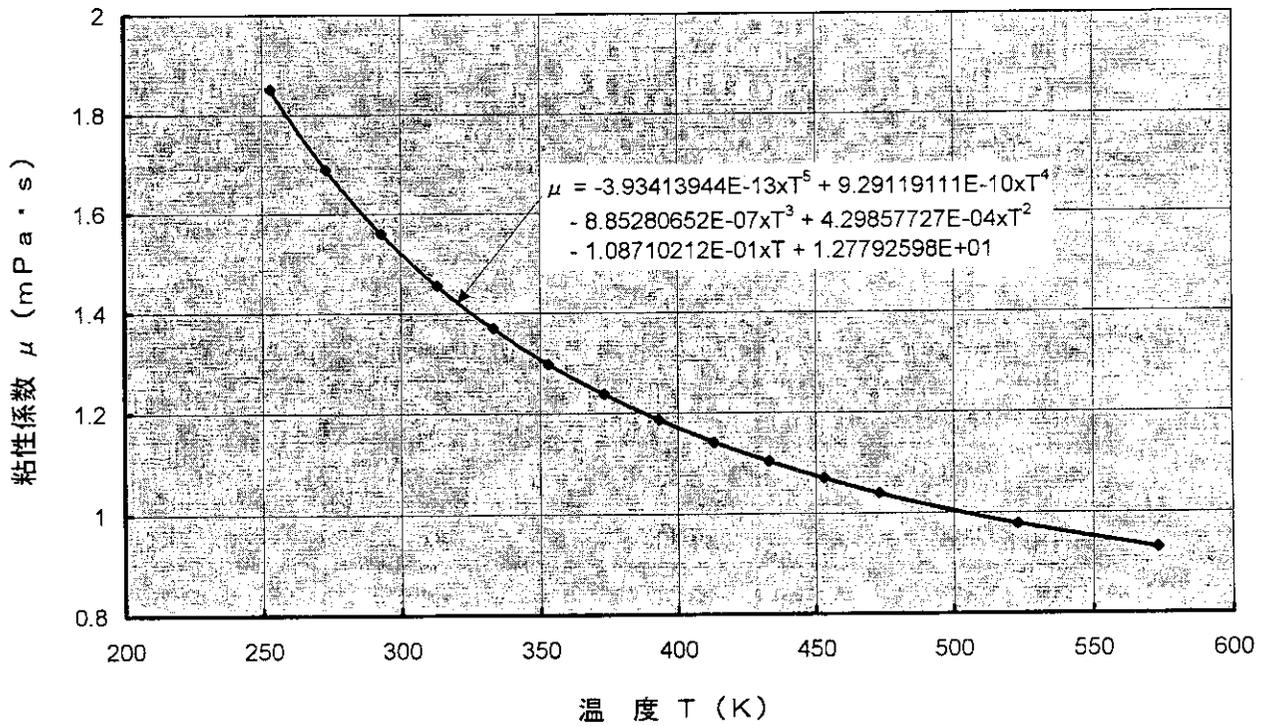


Fig. 2.2 Viscosity of mercury

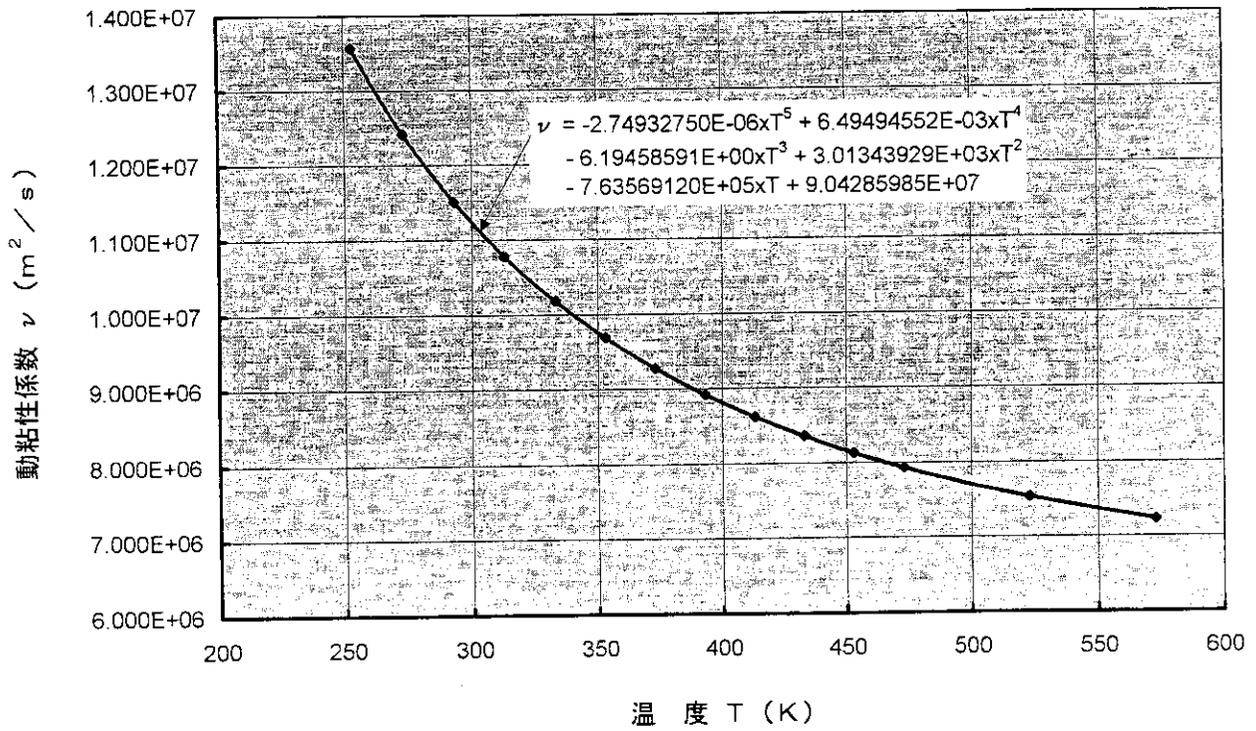


Fig. 2.3 Kinematic viscosity of mercury

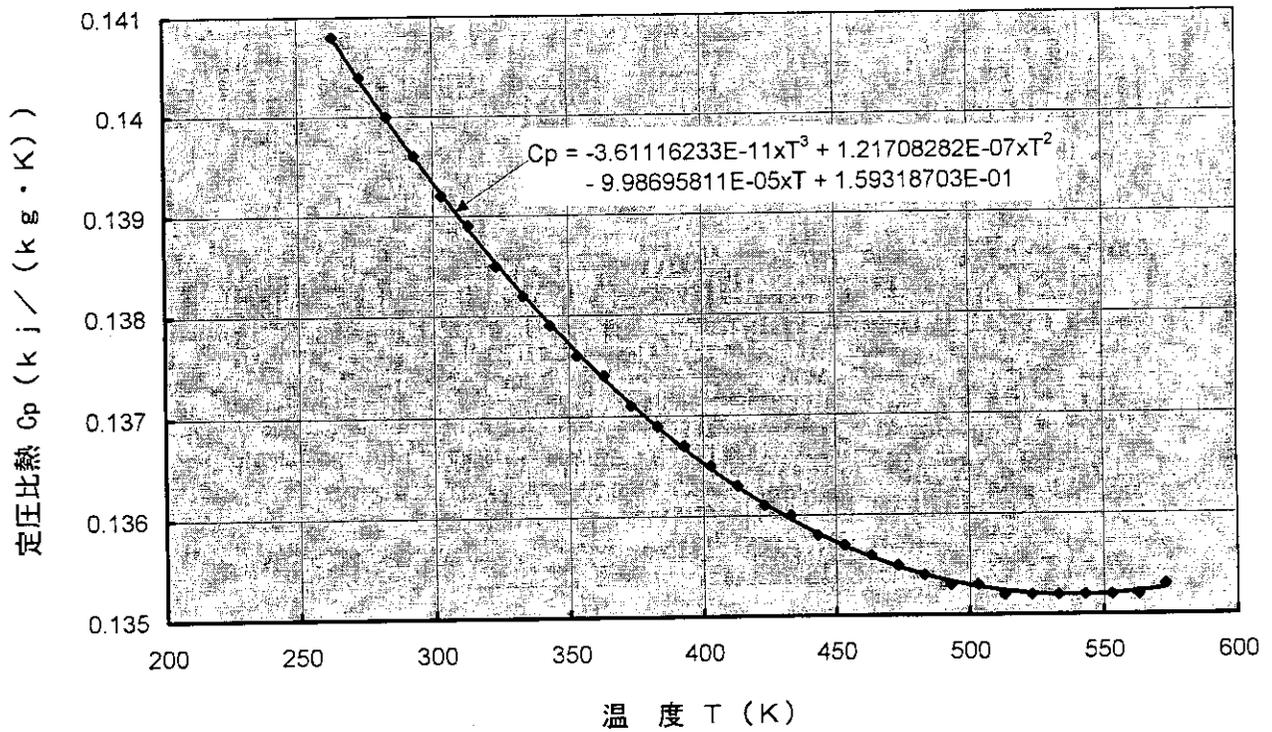


Fig. 2.4 Specific heat of mercury

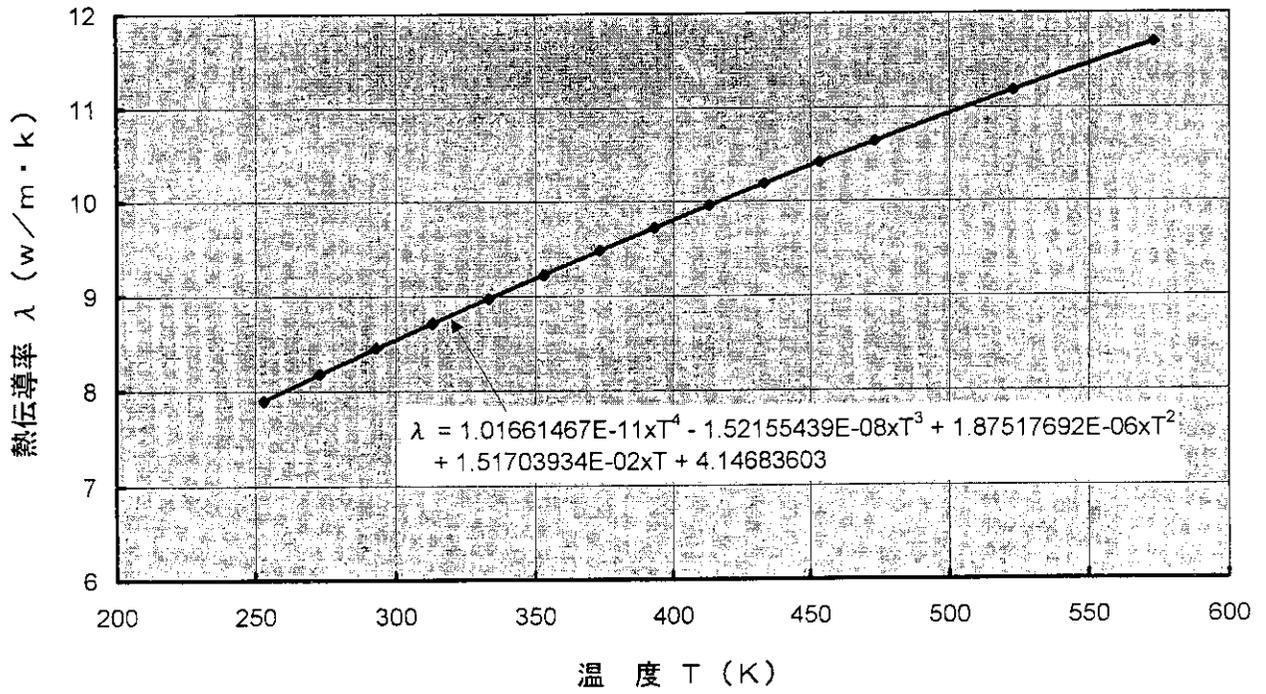


Fig. 2.5 Thermal conductivity of mercury

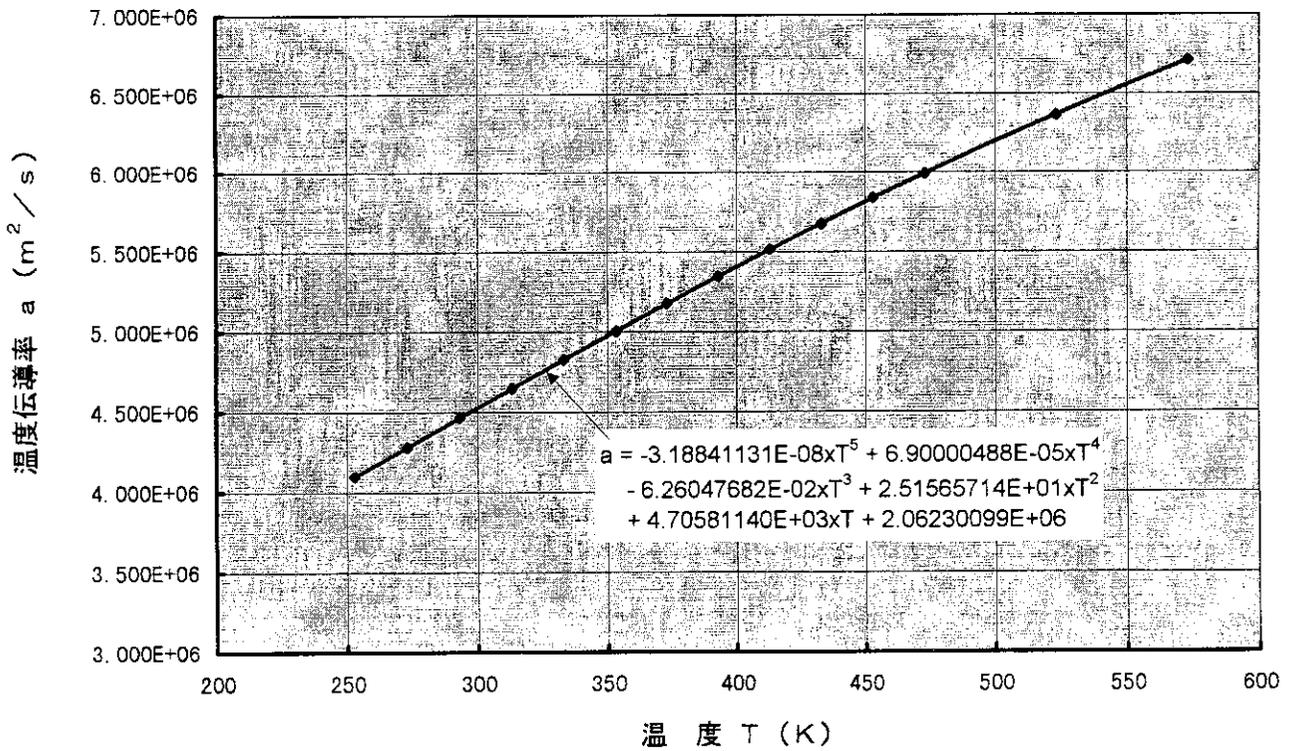


Fig. 2.6 Thermal diffusivity of mercury

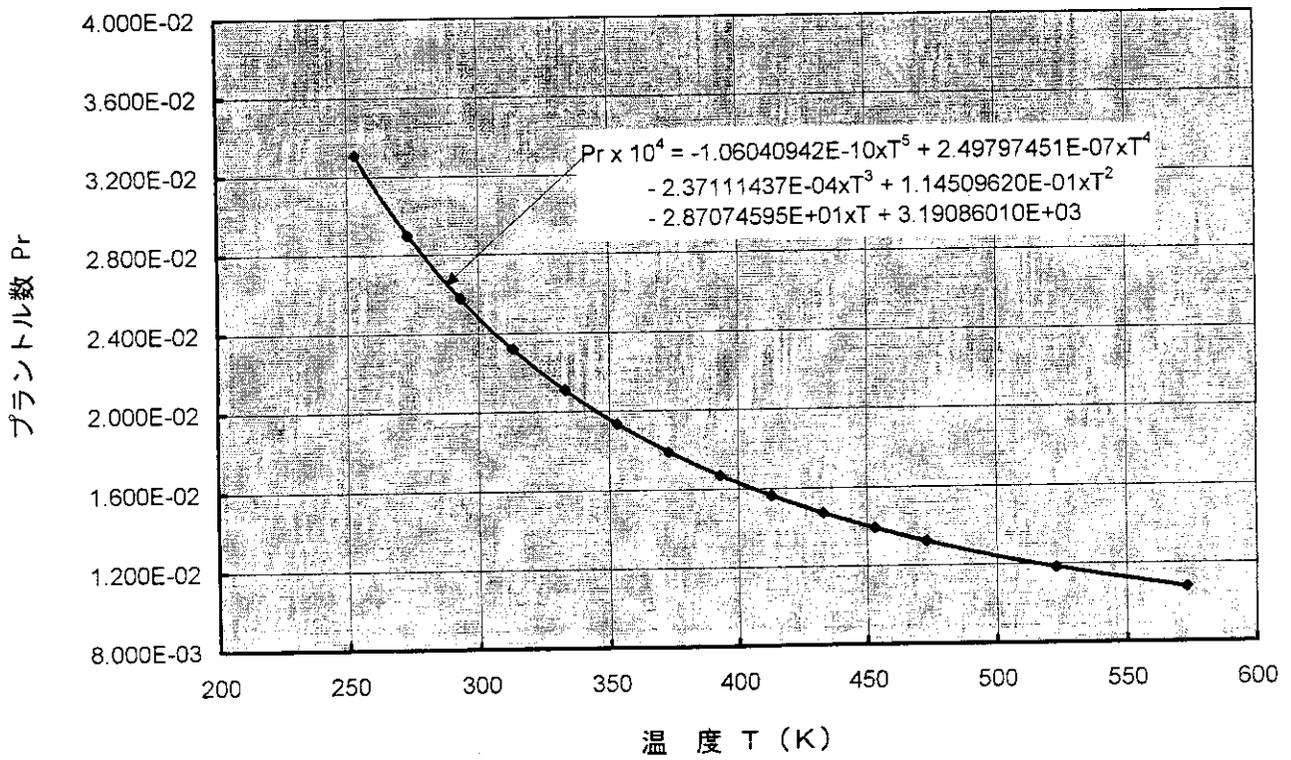


Fig. 2.7 Prandtl number of mercury

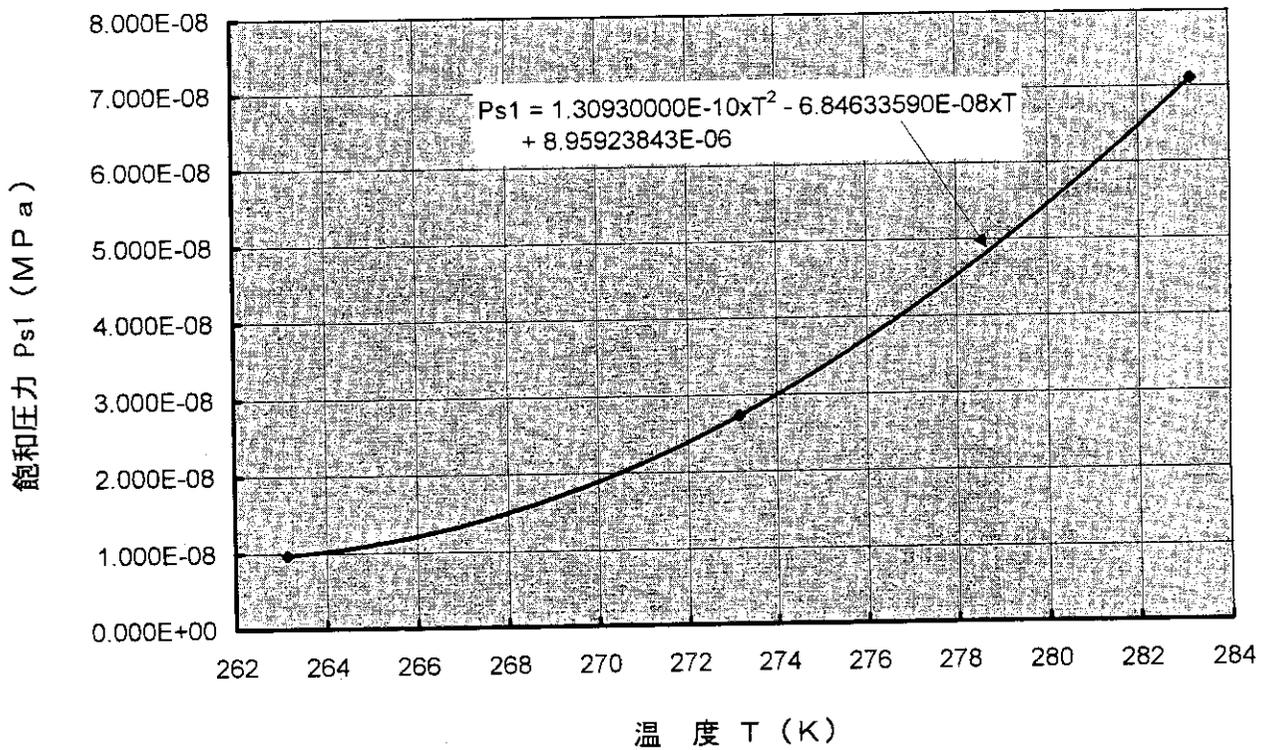


Fig. 2.8 Vapor pressure of mercury (263.15K ≤ T < 283.15K, -10°C ≤ T < 10°C)

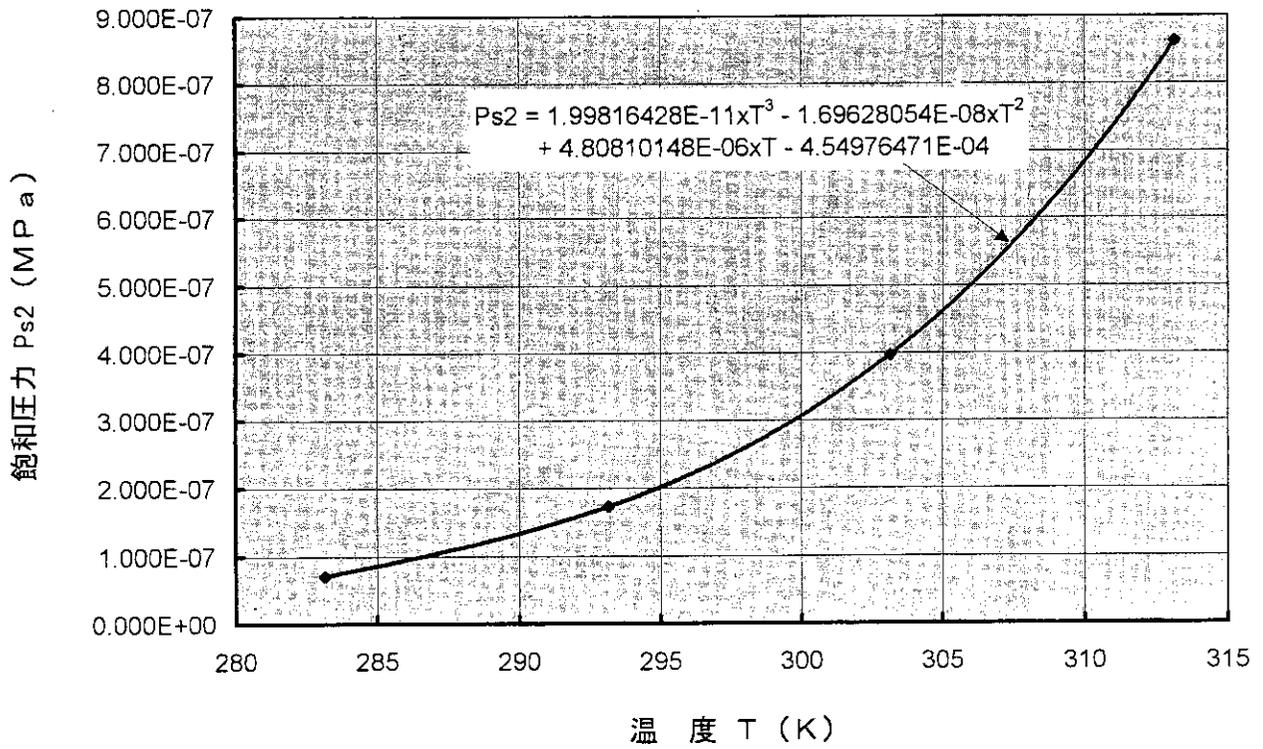


Fig. 2.9 Vapor pressure of mercury (283.15K ≤ T < 313.15K、10°C ≤ T < 40°C)

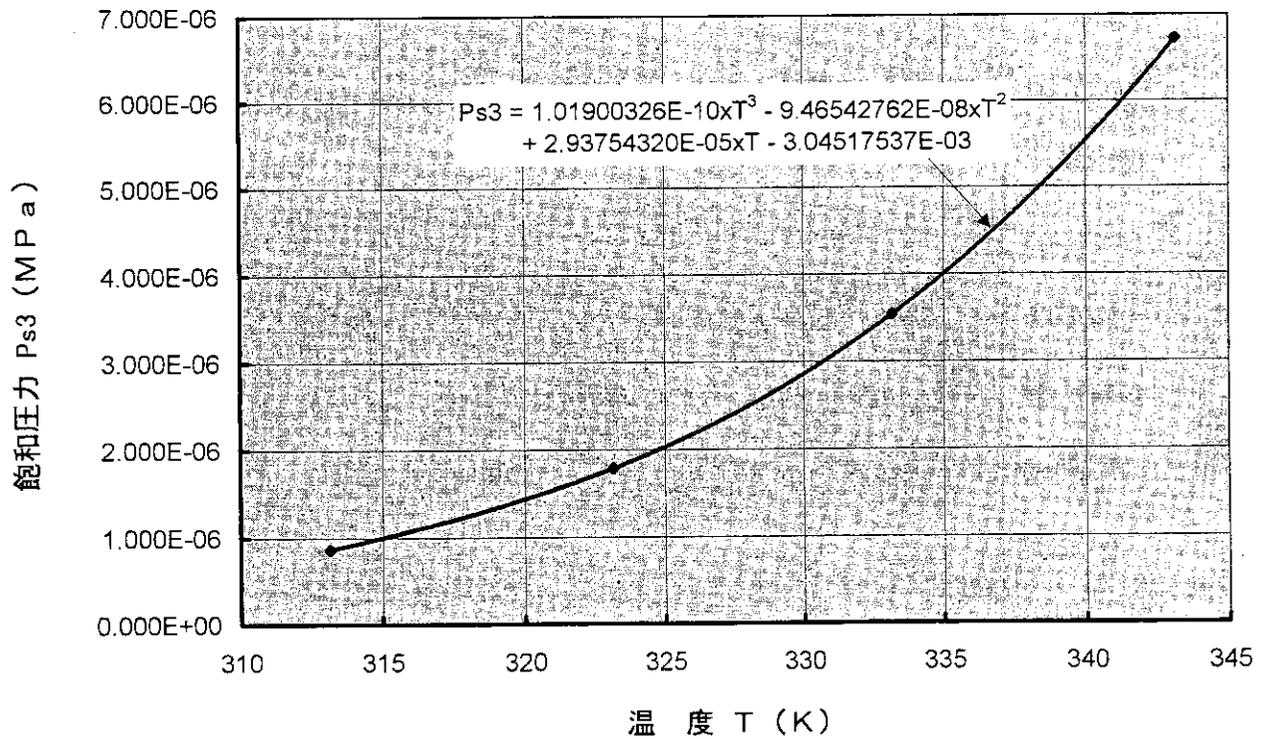


Fig. 2.10 Vapor pressure of mercury (313.15K ≤ T < 343.15K、40°C ≤ T < 70°C)

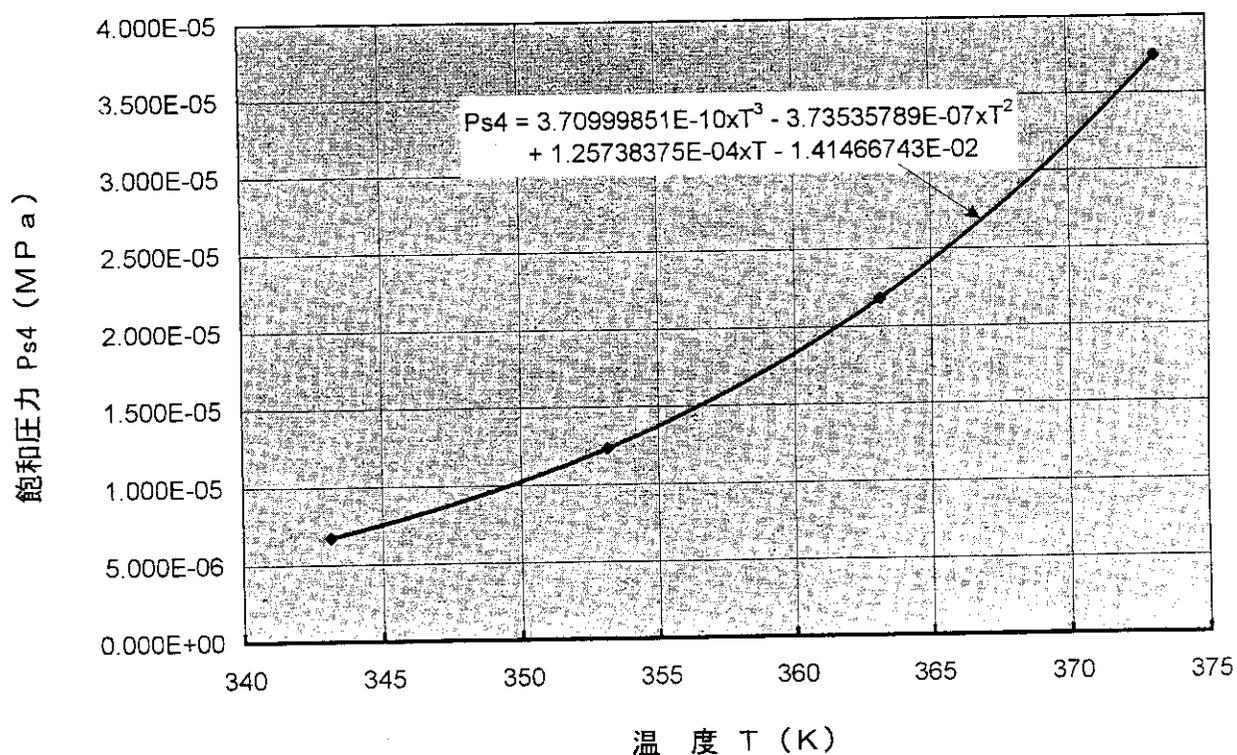


Fig. 2.11 Vapor pressure of mercury ($343.15K \leq T < 373.15K$, $70^\circ C \leq T < 100^\circ C$)

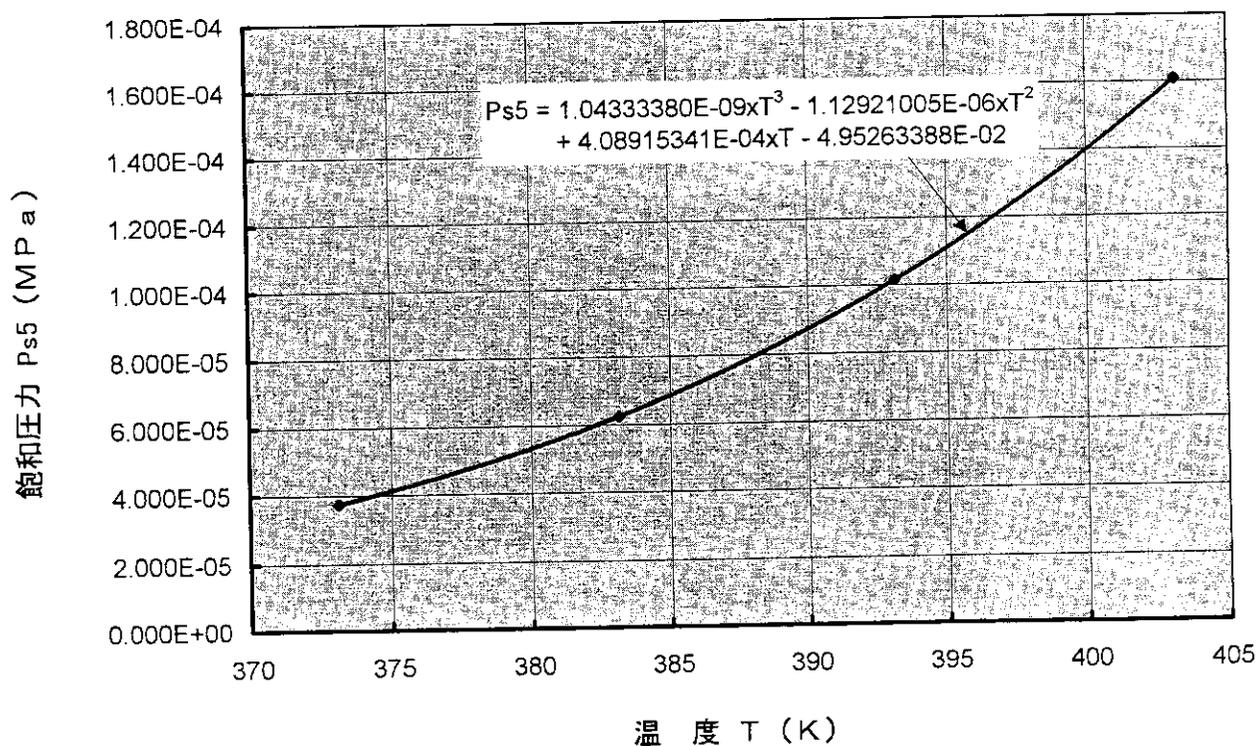


Fig. 2.12 Vapor pressure of mercury ($373.15K \leq T < 403.15K$, $100^\circ C \leq T < 130^\circ C$)

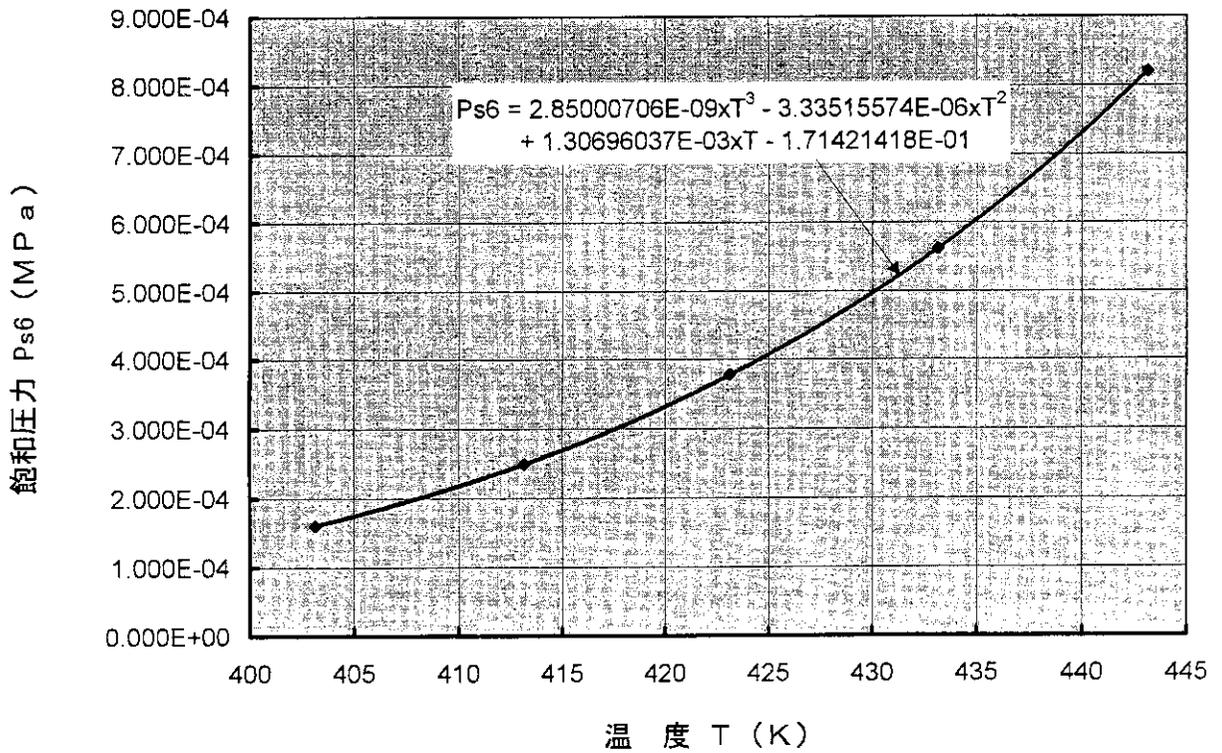


Fig. 2.13 Vapor pressure of mercury ($403.15\text{K} \leq T < 443.15\text{K}$, $130^\circ\text{C} \leq T < 170^\circ\text{C}$)

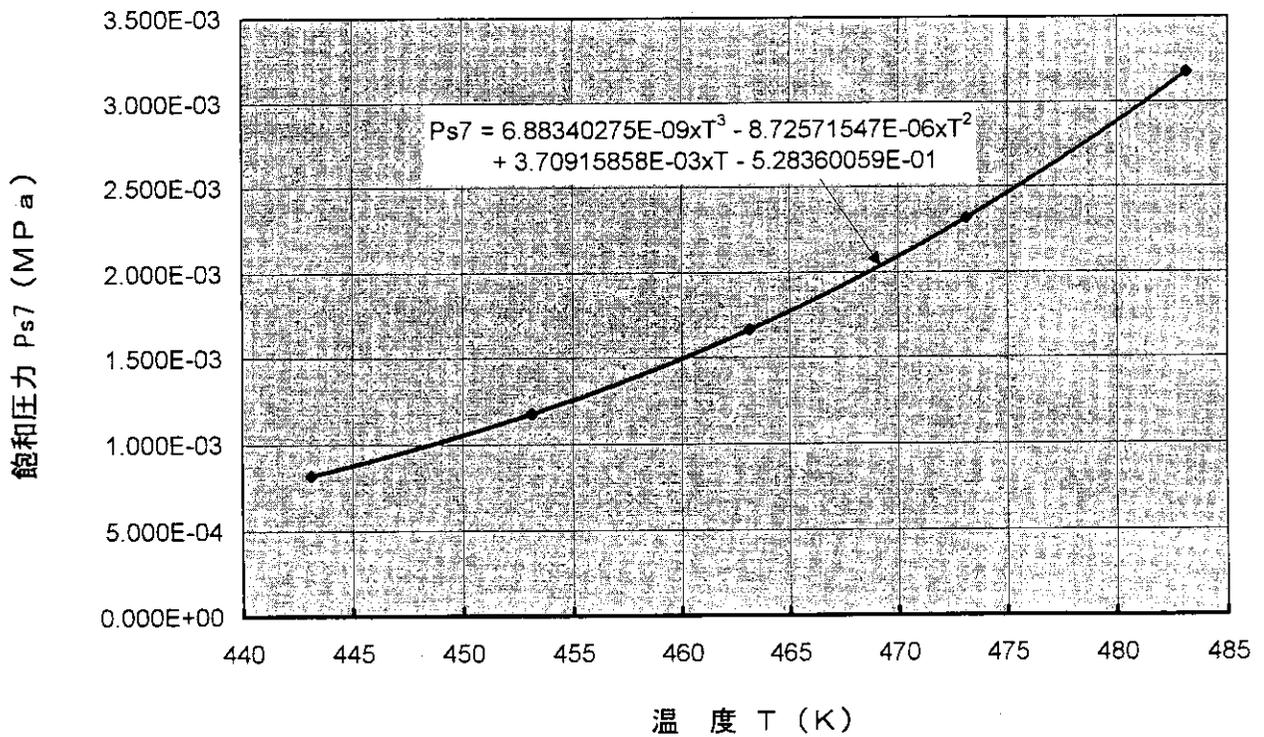


Fig. 2.14 Vapor pressure of mercury ($443.15\text{K} \leq T < 483.15\text{K}$, $170^\circ\text{C} \leq T < 210^\circ\text{C}$)

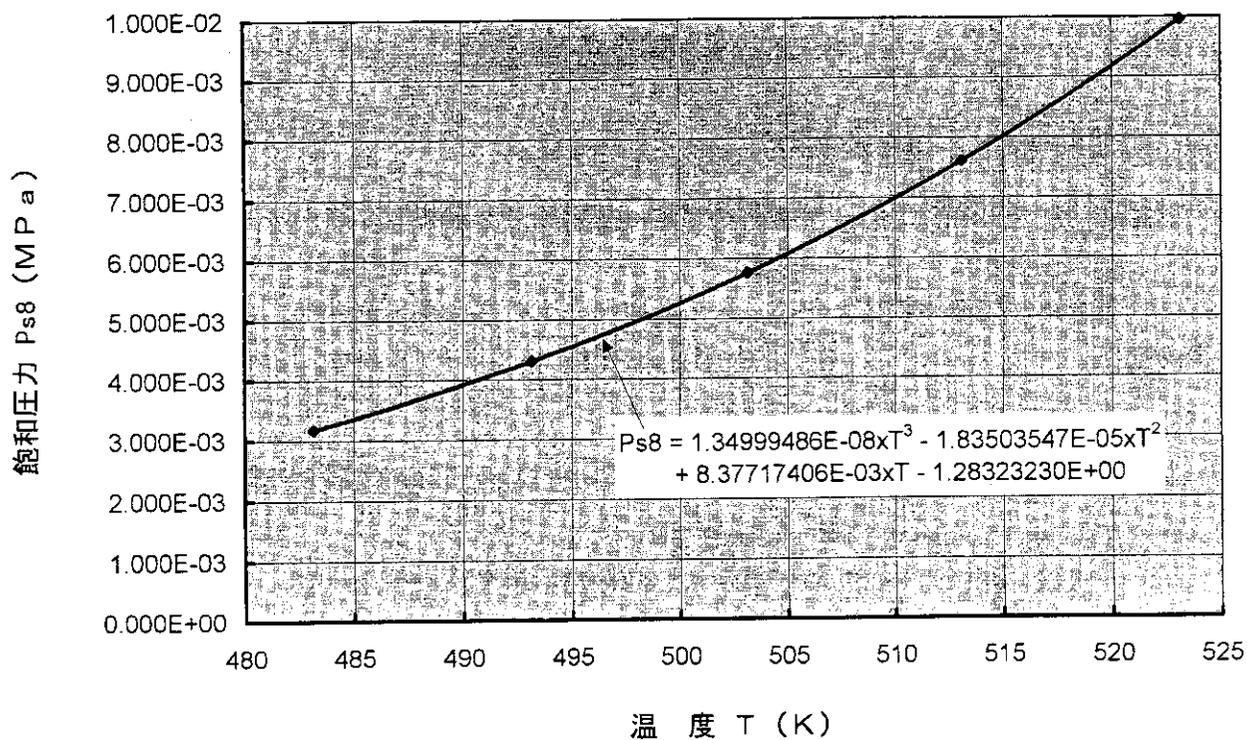


Fig. 2.15 Vapor pressure of mercury (483.15K ≤ T < 523.15K, 210°C ≤ T < 250°C)

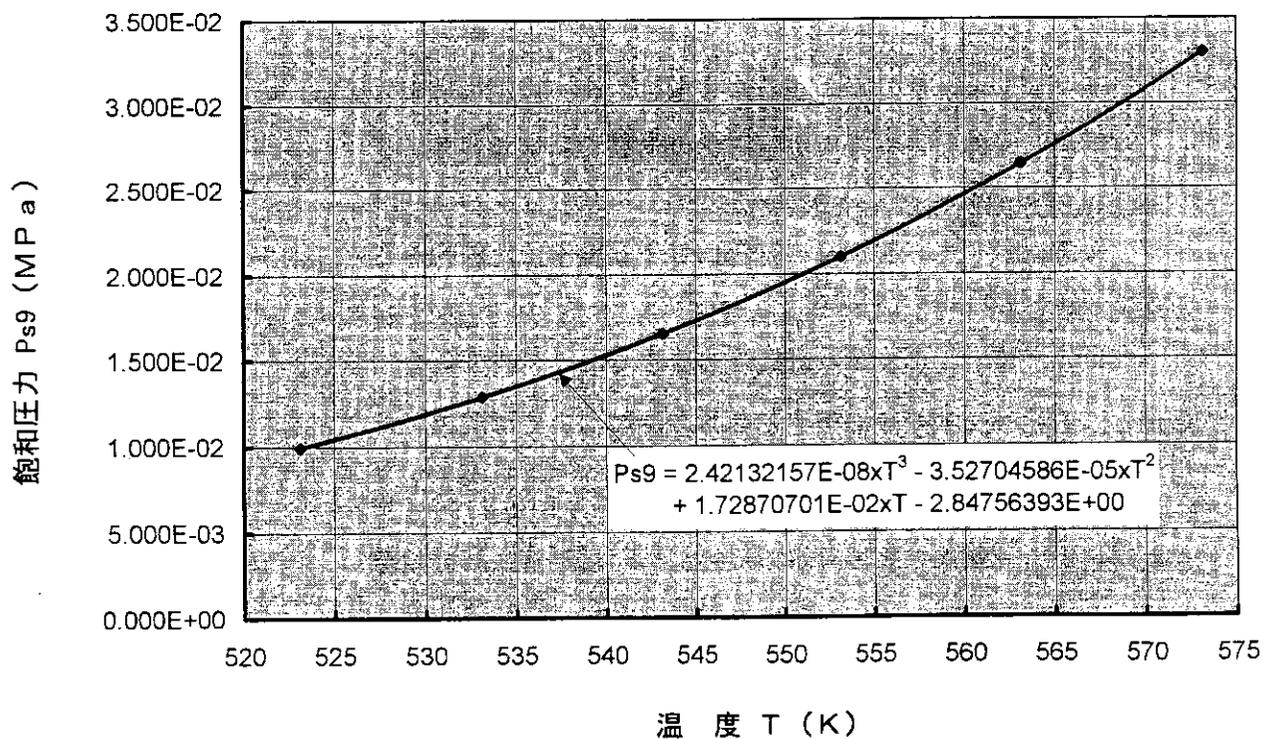


Fig. 2.16 Vapor pressure of mercury (523.15K ≤ T < 573.15K, 250°C ≤ T < 300°C)

3. 水銀の各種特性

3. 1 材料との共存性及び取扱い上の留意点

水銀については従来から金属材料を腐蝕（金属成分を溶解してアマルガムを形成）させることが指摘されている。水銀の腐食性、すなわち材料との共存性について文献調査と水銀取扱業者への聞き取り調査を行い、さらに取扱い上の留意点を調べた。以下にそれらの結果を記す。

(1) 文献調査

水銀を含む液体金属材料と材料との共存性について行った文献調査の概要を以下に記す。

- ・「Reactor Handbook Engineering」⁽³⁾
水銀、鉛に対して、鉄鋼系がよい共存性を示す。
- ・「FAST REACTOR TECHNOLOGY」⁽⁴⁾
水銀、鉛に対して、上の文献と同じく鉄鋼系がよい共存性を示すことが報告されている。とくに水銀については、400℃までは純鉄、低炭素鋼、クロモリ鋼（2～9%Cr、V、Mo、orSi含有）、フェライト系ステンレス鋼（Crを12～27%含有）が耐食性に優れている。
- ・「化学大辞典」⁽⁵⁾
－水銀は、Au, Ag, Cu, Zn, Cd, Sn, Pb, Mg, Al, Na, Kなど多くの元素とアマルガムをつくるが、Fe, Ni, Co, Mnとはをつくらない。
－酸素や水素とも、基本的に化合物をつくらないとみられるが、湿った空気中では常温でも酸化され表面が暗灰色の皮膜でおおわれる。
- ・「CORROSION DATA SURVEY」⁽⁶⁾
水銀に対して、鉄鋼系の材料に対する腐食は比較的小さいことが示されている。
- ・「水 銀」⁽⁹⁾
－Fe, Ni, Coとは弱酸性溶液中ではアマルガムをつくる。

ただし、上記の文献では溶接部との共存性については明確ではない。

(2) 聞き取り調査

文献調査により使用できる材料の目処がしたが、これを確認し、かつ、実際に使用する上での留意点を明確にするため、水銀取扱業者（野村興産㈱、日本で唯一の水銀製造業者）に聞き取り調査を行った。以下に主要な調査結果を記す。

- ・水銀製造に使用している材料
－水銀はほとんど全ての金属とアマルガムを作り、水銀に対して恒久的に安定な金属材料は現在のところ見あたらない。そのなかでも、SUS材が比較的適している。

(同業者のループはSUS316ではなく、より低価格のSUS材を使用している。)

・水銀製造システムの運転保守

－水銀製造システムでは水銀に接する材料の腐蝕の問題の他に、流動部分でのエロージョンの問題がある。流速が大きいとエロージョンが顕著になって減肉が著しくなる。これを防ぐためには、流速は 1m/s以内にする必要がある。同業者の配管内の流速はさらに小さいが、それでも配管の取替えを適宜行っている。

(注) 使用材料の寿命はこれまでの運転経験から評価しており、流量、温度等をパラメータにした寿命評価の基準はない。

・水銀製造システムにおける水銀の純度維持

－水銀を高純度(99.9999%程度)に維持するには、成分の溶解が極めて小さい純粋な石英ガラスでシステム構築するのがよい。しかし、コストが非常に高くなり(約1000万円/m)、現実的ではない。

－内面にテフロン等の高分子膜をコーティングする方法は、コーティング材の付着力よりもエロージョンの方が大きくなり、ループ運転開始後直ぐにコーティング材は削り取られて不純物となる。

(注) 最近、プラズマ溶射で管内面に強固なセラミックス膜を形成する技術が発達しているが、ピンホールのないセラミックスの緻密膜を形成することが難しく、ピンホールから腐蝕が発生する。また、セラミックスの熱膨張率は金属のそれよりも一般的に小さいので、温度が高くなるとセラミックス膜の剥離を生じやすい。仮に剥離を生じなくても、温度が高いと熱膨張差により膜の付着力が低減するので、エロージョンにより剥離しやすくなる。

－同業者のシステムの水銀純度は最高99.99%であり、純度をこれ以上にするには極めて難しい。SUS材を使用したシステムでは配管、機器等のSUS中の成分が溶解するため、この値を限界純度と考えている。

(注) 水銀の純度は、不純物中の酸素の⁷Beへの転換やNiなどの成分の放射化などの課題をできるだけ低減することを主要目的としており、これら放射化物質の除去を純度と合わせて今後検討していく必要がある。

－水銀の純化装置については企業秘密とのことであるが、必要純度が 99.9999%までなら技術的に可能である。

(注) 水銀の純化は、一般的に真空蒸留法により行う。蒸留装置を多段にして超高純度は達成できるものと考えられる。

・水銀製造システムに使用する機器

－装置には特殊な計測機器は使用していない。圧力計は通常のダイヤフラム式(SUS製)で十分である。流量計は設置しておらず、製造体積で把握している。また、装置には水銀の漏洩検出器は設置していない。

－フランジ構造等のシール材は、テフロン及びバイトン(ゴム)で十分である。これまでの経験では、特殊なシール材は必要なく、バイトンが最も良い。

－装置を設置している工場建家には、水銀蒸気を補集するために水銀キレート材を使

った水銀蒸気の補集装置（一般品）を使用している。

—装置に設置する機器のうちでバルブについては、特殊仕様のものではなく、一般品（SUS製）を使用している。

・水銀の漏えい対策

—水銀の漏えいに備えて、アマルガムを作りやすい亜鉛又はすずの箔を用意しておき、これを漏えいした水銀に振り撒いて固定化する。最も合理的な方法は床をロンリウム貼りにして、漏えいした水銀がピットに集まる対策を施すことである。

(3) 水銀の取扱い上の注意点

取扱い上の注意点をまとめてTable 3.1に示す。水銀は毒性のある物質であるが、その取扱いに注意し、かつ、安全対策を施せば取扱いやすい物質である。今後、取扱い経験を蓄積することによってより身近な物質になっていくものと考えられる。

3. 2 液体金属の熱伝達及び圧力損失特性

(1) 圧力損失評価式

一般の非圧縮性流体の計算式を適用することができる。

$$\Delta P = \zeta \gamma V^2 / 2g$$

ここで、 ΔP : 圧力損失 (kg/m^2)
 V : 流速 (m/s)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 ζ : 損失係数 (—)
 γ : 比重量 (kg/m^3)

なお、損失係数には一般管路系の値（ブラジウスの式等）を適用する。4章で上式を用いた計算を行っている。

(2) 熱伝達式

外管側に水銀を流す熱交換器に有効な液体金属の熱伝達式として次のSubbotionの式⁽¹⁰⁾がある。

$$\text{Nu} = 0.58 (\text{De}/d)^{0.55} \text{Pe}^{0.45}$$

ここで、 Nu : ヌセルト数 ($=h \text{De}/\lambda$)
 h : 熱伝達率
 De : 等価直径 ($=4 \times \text{流路面積}/\text{濡縁長さ}$)
 d : 伝熱管外径
 Pe : ペクレ数 ($=\text{Pr} \times \text{Re}$)
 Pr : プラントル数 ($=\nu/a$)
 Re : レイノルズ数 ($=u \text{De}/\nu$)

- a : 水銀の温度伝導率
 λ : 水銀の熱伝導率
 ν : 水銀の動粘性係数

一方、管内に水銀を流す場合の熱伝達式として、青木⁽¹¹⁾は次式を提示している。

$$Nu = 6 + 0.025(\sigma Pe)^{0.8}$$

$$\sigma = 0.014 Re^{0.45} Pr^{0.2} \{1 - \exp(-71.8 Re^{-0.45} Pr^{-0.2})\}$$

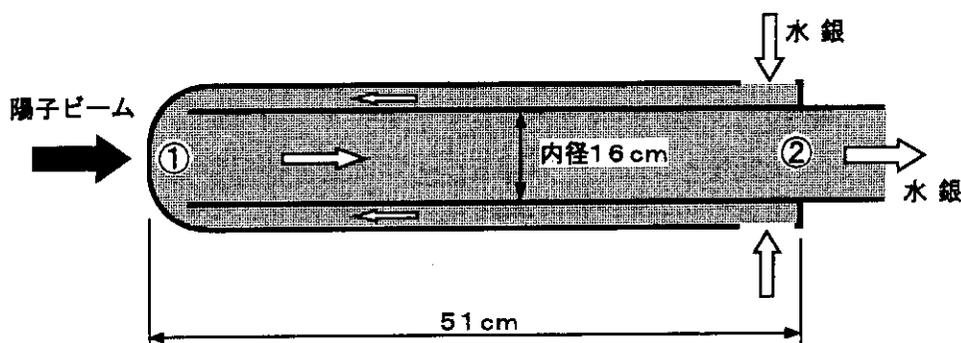
ただし、水銀のような液体金属の熱伝達式は、高速増殖炉用のNaを除けば整備されているとは言い難い。今後、摩擦損失係数を含めて熱流動実験式の整備が必要である。

3. 3 熱流束をパラメータにした除熱特性

水銀ターゲットに陽子ビームが照射されると、内部で核発熱を生じてターゲット温度が上昇する。ターゲット温度の上昇は構造材の腐蝕を促進させるため構造材の寿命が低下する。また、温度が沸点をはるかに超える値になると核沸騰を生じ、急速な気泡成長により流路が閉塞してビーム窓等の冷却が不十分となり、バーンアウトを引き起こす。そこで、陽子ビーム入射時に発生する熱量によるターゲット温度の上昇について、ターゲット材の流速をパラメータにして評価した。以下に結果を記す。

(1) 評価モデル

評価に用いたモデルを下図に示す。陽子ビーム入射部の内径は16 cm、全長は約51 cmである。ターゲット材（水銀）の温度上昇は、ビーム窓（図中①）から始まり、陽子ビームによる発熱がほぼ無視できる位置（図中②）まで続く。このため、②が水銀の最高温度に到達する位置である。



(2) 計算条件及び計算式

陽子ビームによるターゲット内部での体積発熱密度の分布⁽¹²⁾をTable 3.2に示す。表には半径1 cm単位で出力密度の軸方向分布を示してある。温度上昇の計算に当たっては、体積発熱量が最も大きいA領域（中心から半径1 cm以内の領域）を対象にして、周囲領域との乱流熱交換がない、すなわち、A領域で発生した熱はA領域を流れる水銀の温度上

昇にのみ使われるという断熱条件の仮定を与える。

計算はA領域の入口温度と流量を初期条件として与え、ターゲット軸方向にn分割した各位置での発熱量を計算し、それを基にして温度上昇を計算する。このとき、各位置での温度を基に前述の式を用いて比熱を計算した。ターゲットの軸方向のn番目のメッシュの発熱量 Q_n (kcal/h)は次式で表される。

$$Q_n = \pi r^2 \times \Delta X_n \times W_n \times I \times 0.86$$

ここで、 r : ビーム入射半径 (= 1 cm)
 ΔX_n : n番目のメッシュ長さ (均等に1.06cm)
 W_n : n番目のメッシュでの体積発熱密度 (W/cm³/mA)
 I : 入射電流 (mA)

n番目のメッシュの温度 T_n (°C)は、次式に示すようにn-1番目までの温度上昇 T_{n-1} に上記の発熱量による温度上昇を加えて求める。

$$T_n = T_{n-1} + Q_n / G / c_p$$

ここで、 G : 流量 (kg/h)
 c_p : 水銀の定圧比熱 (kcal/kg/°C)

(3) 結果

上記の式を用いてターゲット材の入射電流を1mA、5mA、10mAと変え、かつ、流量を変化させて温度変化を計算した。入射電流が1mAの場合の結果をTable 3.3に、グラフ化したものをFig. 3.1に示す。同じく、5mAの場合についてはTable 3.4とFig. 3.2に、10mAについてはTable 3.5とFig. 3.3にそれぞれ示す。上限温度の目安を水銀の沸点(約356°C、大気圧下)よりも約60°C低い300°Cにすると、1mAでは1.3m/s以上の流速が必要であり、5mAでは6.6m/s以上、10mAでは13m/s以上の流速を要する。これらの流速は中心から半径1cmの領域の平均流速である。乱流の速度分布は中心付近では変化が小さいので、上記の流速を中心での最高流速 U と仮定して乱流の速度分布から平均流速 u を求めてみる。このとき、入射する陽子ビームの断面分布は放物線状の分布をしており、陽子ビームによる発熱量の断面平均値はピーク値の約70%である。ターゲットの平均温度は発熱量に比例することから本モデル内の平均流体温度を約200°Cとすると、平均流速が1m/sのときレイノルズ数 Re は約 2×10^6 に達する。乱流速度分布を表す指数法則は1/7乗則 ($Re < 10^8$ で有効)が有名であるが、文献[13]によれば指数は Re 数によって変化する。同文献を参考にして Re 数が 2×10^6 を越える領域での指数として1/12を選択する。この場合、平均流速 u は次式で与えられる。

$$\frac{u}{U} = \frac{2 \left(\frac{1}{n} \right)^2}{\left(\frac{1}{n} + 1 \right) \left(\frac{2}{n} + 1 \right)}$$

$$= 0.886$$

上式より、1mAのときの平均流速は約1.2 m/s以上、5mAでは約5.8 m/s以上、10mAでは約12 m/s以上の流速を要する。本モデルに採用した軸方向流れ（ビームに沿った流れ）では1 m/s以上の流速は避けられず、前述した水銀取扱業者のコメントにあったように1 m/s以下の流速を実現するには軸と垂直な方向の流れ（ビームに対して素直方向の流れ、横断流れ）など別の流動構造を考える必要がある。横断流れの場合には、陽子ビームが入射する直径16 cmの領域について、そこでの温度上昇を考えればよい。この場合、半径1 cmの領域の陽子ビームのピーク部分を含めて、直径16 cmの領域の体積発熱密度の平均値はピーク値の約70%であることから、軸方向流れに比べてビーム通過距離が16/51(=0.31)であることを考慮すると、流速を上記の22%程度まで低減することができる。それでも、5mA及び10mAの陽子電流の場合には流速は1 m/sを越えるため、材料の探索・選定を含めて耐久性等を考慮したさらなる検討が必要である。

3. 4 今後の主要検討課題

上述の材料の健全性、除熱特性の計算結果等から今後の主要検討課題として、次の項目があげられる。Table 3.6に主要検討項目をまとめて示してある。

- ・水銀流速を1m/s以下にするターゲット構造の検討
 - ターゲット内部での熱流動特性、とくに、流量及び温度分布に加え、ビーム窓の冷却、死水域とホットスポットの発生等を実験及び乱流解析コードを用いて検討する。
 - 構造材料の中性子損傷等のデータベースを整備する。
- ・水銀流速が1m/sを越える場合にも適用できる長寿命構造の検討
 - 使用可能な材料及び溶接部を実験的に評価し、寿命を推定する。
 - 強固なコーティング膜を形成する方法を探索・検討し、実験的に評価する。
 - 長寿命化構造を検討
 - 溶接部をできるだけ少なくし、かつ、ビーム窓を十分に冷却して、死水域の発生のない流量分布を実現する構造を中性子損傷等による健全性、製作精度を含めて検討する。
- ・上述の計算の初期条件である体積発熱密度の計算の高度化
 - 計算精度を向上させるため、国際協力実験等によりデータベースの整備に努めるとともに、解析モデル等を改良する。
 - 乱流解析コードに適用できるように、径方向及び軸方向の計算メッシュをさらに細かくした体積発熱密度の計算が可能な解析コードに改造する。
- ・水銀の物性データベースの整備
 - 乱流解析、熱流動実験等の評価に必要な水銀の物性データベースを文献調査し、誤差等の評価を行う。並行して、不足している物性値の測定実験を行う。

Table 3.1-1 Main items to be paid attention in treating mercury

| | |
|--------------|---|
| 化学物質等の名称 | 水銀 |
| 物質の特定 | 化学名 水銀 構造式 Hg 管報公示整理番号 安衛法：特定化学物質 第2類 (22) 毒劇法：毒物 別表1 (15) CAS番号 No.7439-97-6 国連分類及び国連番号 2809 |
| 危険有害性の種類 | 急性及び慢性毒性 |
| 種類 | 水銀自体には爆発性がない。アセチレンやアンモニアと反応して爆発性のある水銀アセチリドや水銀と窒素の化合物を生ずる。 |
| 危険性 | 水銀蒸気を大量に吸入した場合は、気管支炎、肺炎、尿毒症を引き起こすことが多い。水銀蒸気を継続的に吸入する場合は、食欲不振、手足の振せん、歯肉炎、全身倦怠、頭痛、不眠その他神経症等を起こす。また皮膚からも吸収する。 |
| 有害性 | |
| 応急措置 | |
| 皮膚に付着した場合 | ：直ちに水道水で流す。 |
| 吸収した場合 | ：大量に吸収する状況に置かれた場合は、直ちに清浄な吸気ができるところに避難する。何らかの症状が生じたときは直ちに医師の診断を受ける。慢性的な中毒症状が見られたときは、医師の診断を受けるとともに、職場の転換をはかる。 |
| 飲み込んだ場合 | ：直ちに吐き出させるとともに医師の診断を受ける。 |
| 火災時の措置 | |
| 応急措置 | ：燃えないが蒸発するので速やかに水銀の入った容器を安全な場所に移す。 |
| 消火方法 | ：移動不可能な場合は、容器等に散水し冷却に努めるとともに散水、消火は風上から行う。 |
| 消火剤 | ：泡、炭酸ガス、ドライケミカルの各消火器。 |
| 漏洩時の措置 | 水銀がこぼれた場合は、スポイトで吸い取る。微粒子状に飛散したものは、羽ぼうきで又はゴム板等で静かにかき集めて取り除く。かき集められない状態の時は、スズ箔や亜鉛粉等、水銀とアマルガムを作る物質を散布して水銀と十分接触させた後、回収する。土等にこぼし、回収が困難な場合は、汚染のある土等とともに取り除き容器に入れて、水銀専門の廃棄物処理許可業者に処理を委託する。 |
| 取り扱い及び貯蔵上の注意 | |
| 取り扱い | <ul style="list-style-type: none"> ・ 取り扱い作業場には水銀蒸気の発生源を密閉する設備又は局所排気装置を設けること。 ・ 容器から出し入れするときは、丁寧に扱い、床面にこぼさないように受け皿の上で取り扱うこと。 ・ 取扱中は、水銀ガス用防毒マスクやエアライン（送気）マスクを着用すること。 ・ 作業服、作業帽子、ゴム手袋、安全靴やゴム長靴を着用すること。 ・ 作業場での喫煙、飲食を禁止すること。 ・ 作業場の気温は出来るだけ下げしておくこと。 ・ 取扱中も、水銀は出来るだけ開放の状態にしないこと。 ・ 取り扱い後は手洗い、うがいを十分行うこと。 ・ 作業衣は毎日洗濯をしたものを使用すること。 |
| 貯蔵 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 保管容器は水銀に腐蝕されない鉄、ガラス、プラスチック製の容器で栓により密閉可能なものを用いること。 ・ 保管するときは、冷所に貯蔵すること。 ・ 床はコンクリート造りとし、入口等には鍵のかかるようにすること。 |

Table 3.1-2 Main items to be paid attention in treating mercury

| | |
|----------|---|
| 暴露防止措置 | <p>管理濃度：0.05 mg/m³</p> <p>許容濃度 日本産業衛生学会勧告値：0.05 mg/m³ ACGIH (TLV-TWA)：0.05 mg/m³</p> <p>設備・局所排気装置、洗面所、洗顔設備、うがい設備、更衣設備、洗濯設備、風呂。</p> <p>保護具・防毒（水銀ガス用）マスク、送気マスク、ゴム手袋、ゴム長靴又は安全靴、保護眼鏡、帽子。</p> |
| 物理/化学的性質 | <p>外観 銀白色で金属光沢を持ち、常温で唯一の液体金属 臭気 なし</p> <p>比重 13.60 (0℃) 沸点 356.58℃ 融点 -38.87℃</p> <p>蒸気圧 0.1596 Pa (20℃)</p> <p>各種の金属とアマルガムを作りやすい。（しかし鉄、ニッケル、コバルト、砒素、アンチモン、白金は例外）</p> |
| 危険性 | 爆発性、引火性はない。誘導体には爆発しやすい化合物がある。 |
| 有害性情報 | <p>重症中毒を発生する大気中の水銀量は数 mg/m³ 十数 mg/m³ の場合、中等度中毒の場合は同じように0.3 mg/m³ ~0.5 mg/m³、軽症中毒では0.2 mg/m³ 以下で発生しているとの報告がある。</p> <p>中毒の認定基準のつうちょうとして</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 水銀、そのアマルガム又は化合物（有機水銀を除く）を取り扱い、あるいはそれらの蒸気中もしくは粉塵等にさらされる業務に従事しているか、又はその業務を離れて3ヶ月未満のものであって次の各号のいずれかに該当する症状を呈し、医学上の療養が認められるものであること。 <ol style="list-style-type: none"> (1) 振せん又は失行病状等の神経症状が認められ、かつそれらが振せん麻痺、アルコール中毒、マンガン中毒等によるものでないこと。 (2) 頑固な不眠、頭痛、いらだち等もしくは流涎、口内炎、歯肉炎等の水銀中毒を疑わしめる症状が認められるものであって、尿中水銀量が尿1L中におおむね300 μg以上検出される場合。 2) 業務により大量もしくは濃厚な水銀、そのアマルガム又は化合物の蒸気もしくは粉塵等にさらされ、激しい下痢又は蛋白尿等の腎症状その他の急性中毒症状を示したものであること。 |
| 環境影響情報 | 環境中に排出された無機水銀は、自然界において一部メチル水銀化されるとの報告がなされている。 |
| 輸送上の注意 | <ul style="list-style-type: none"> ・輸送上漏洩がないように容器の栓は確実に閉めること。 ・ガラス瓶を用いるときは、ビニール袋で包むとともに外装保護をすること。 ・ガラス瓶、ポリ瓶等で輸送するときは、転倒、落下等の衝撃に耐えられるように、パッキン等を十分用いた梱包とするとともに梱包単位毎の重量を出来るだけ少なくすること。 ・容器、梱包には、水銀の名称、毒物、並びに取り扱い上の注意事項を表示する。 |
| 廃棄上の注意 | ・廃棄するような不要の状態となったとき、水銀専門の廃棄物処理許可業者に処理を委託する。 |
| 適用法令 | <p>労働安全衛生法 施行令 別表3 特定化学物質等（第2類物質）</p> <p>特定化学物質等障害予防規則</p> <p>毒物及び劇物取締法 第2条 毒物</p> <p>危険物の規制に関する政令 第1条の10</p> <p>廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令 第2条の2の5（特別管理産業廃棄物）</p> |
| その他引用文献 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 日本化学編 “化学防災指針6” 丸善（1980） 2) 中央労働災害防止協会 “化学物質・有害便覧”（1992） 3) 喜田村他共著 “水銀” 講談社（1976） 4) 監訳鈴木継美 “無機水銀”（財）日本公衆衛生協会（1992） |

Table 3.2 Distribution of heat density generated in mercury target

| 軸方向 距離 (cm) | 半徑方向距離 | | | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | A 0-1(cm) | B 1-2(cm) | C 2-3(cm) | D 3-4(cm) | E 4-5(cm) | F 5-6(cm) | G 6-7(cm) | H 7-8(cm) |
| 0.28 | 2924 | 884.9 | 84.6 | 6.384 | 2.861 | 0.4236 | 0.1652 | 0.3614 |
| 1.34 | 3048 | 990.6 | 117.1 | 11.85 | 3.14 | 1.316 | 0.2634 | 0.3337 |
| 2.4 | 3044 | 980.5 | 145.4 | 22.08 | 4.509 | 3.097 | 0.7629 | 0.6665 |
| 3.46 | 2965 | 983 | 147.4 | 30.45 | 12.03 | 5.242 | 2.956 | 0.8145 |
| 4.52 | 2817 | 930.2 | 160.7 | 31.96 | 11.92 | 5.82 | 2.817 | 1.82 |
| 5.58 | 2599 | 928.7 | 169 | 41.66 | 15.24 | 7.803 | 4.993 | 2.233 |
| 6.64 | 2442 | 889.1 | 156 | 45.54 | 18.87 | 9.251 | 4.605 | 1.762 |
| 7.7 | 2223 | 789 | 165.9 | 43.62 | 18.73 | 10.56 | 5.281 | 3.387 |
| 8.76 | 2124 | 776.2 | 160.5 | 54 | 19.18 | 12.93 | 6.367 | 2.832 |
| 9.82 | 1970 | 694.8 | 161.1 | 50.04 | 23.01 | 9.504 | 6.819 | 3.966 |
| 10.88 | 1884 | 667.7 | 156.3 | 51.17 | 23.04 | 12.38 | 6.607 | 5.324 |
| 11.94 | 1756 | 633 | 139.6 | 48.38 | 18.65 | 11.1 | 7.081 | 5.118 |
| 13 | 1693 | 615.5 | 129.6 | 47.4 | 28.17 | 12.08 | 6.08 | 3.816 |
| 14.06 | 1560 | 604.1 | 127.2 | 49.24 | 23.13 | 15.34 | 7.77 | 3.531 |
| 15.12 | 1451 | 523.6 | 120.5 | 50.13 | 20.61 | 12.14 | 8.596 | 4.393 |
| 16.18 | 1412 | 476 | 119.6 | 41.81 | 24.75 | 12.84 | 8.165 | 5.426 |
| 17.24 | 1259 | 464.9 | 99.47 | 42.92 | 24.51 | 13.4 | 6.895 | 4.717 |
| 18.3 | 1176 | 444.4 | 102 | 39.14 | 21.14 | 11.68 | 7.648 | 3.88 |
| 19.36 | 1182 | 418.3 | 99.73 | 43.3 | 19.32 | 11.47 | 6.67 | 4.716 |
| 20.42 | 1117 | 384.9 | 90.27 | 31.85 | 21.12 | 11.06 | 5.332 | 4.322 |
| 21.48 | 1013 | 365.5 | 86.39 | 35.55 | 23.29 | 11.53 | 6.766 | 3.988 |
| 22.54 | 924.1 | 339.5 | 83.37 | 28.5 | 22.2 | 11.18 | 7.389 | 5.296 |
| 23.6 | 838.2 | 309.5 | 75.07 | 29.5 | 21.49 | 11.3 | 7.473 | 5.736 |
| 24.66 | 748.4 | 301.2 | 65.99 | 29.97 | 14.48 | 11.53 | 5.85 | 4.717 |
| 25.72 | 723.7 | 273 | 69.04 | 25.24 | 16.41 | 10.21 | 6.514 | 4.612 |
| 26.78 | 711.4 | 254.6 | 66.8 | 24.59 | 12.68 | 9.811 | 5.833 | 3.904 |
| 27.84 | 660.4 | 252 | 50.55 | 26.67 | 10.84 | 9.295 | 4.879 | 4.25 |
| 28.9 | 618.9 | 224.3 | 50.41 | 22.93 | 12.4 | 8.275 | 5.018 | 3.75 |
| 29.96 | 553.5 | 211.5 | 47.39 | 20.5 | 10.32 | 5.657 | 5.709 | 2.804 |
| 31.02 | 510.2 | 205.8 | 39.29 | 19.5 | 13.93 | 6.825 | 4.998 | 2.271 |
| 32.08 | 496.2 | 171.5 | 41.57 | 14.68 | 10.55 | 7.663 | 4.563 | 3.243 |
| 33.14 | 474.1 | 182.3 | 43.78 | 16.08 | 9.757 | 6.811 | 4.489 | 2.698 |
| 34.2 | 417.6 | 163.4 | 38.51 | 18.01 | 8.522 | 4.791 | 4.569 | 3.271 |
| 35.26 | 381.1 | 148.8 | 36.39 | 16.26 | 8.822 | 4.899 | 4.335 | 2.73 |
| 36.32 | 382.2 | 145.5 | 30.25 | 13.64 | 7.967 | 4.087 | 4.516 | 2.356 |
| 37.38 | 306.5 | 133.2 | 29.45 | 15.15 | 8.14 | 5.61 | 3.762 | 3.032 |
| 38.44 | 287.8 | 127.8 | 29.63 | 12.24 | 7.989 | 5.301 | 3.817 | 3.12 |
| 39.5 | 297.6 | 118.9 | 26.99 | 9.735 | 7.262 | 4.308 | 3 | 2.816 |
| 40.56 | 267.8 | 106.2 | 32.05 | 9.461 | 6.093 | 4.897 | 2.142 | 1.483 |
| 41.62 | 242.1 | 104.4 | 25.24 | 10.54 | 7.571 | 4.804 | 2.749 | 1.374 |
| 42.68 | 241.1 | 91.73 | 18.75 | 7.288 | 5.321 | 4.153 | 3.685 | 1.35 |
| 43.74 | 196.1 | 90.63 | 19.6 | 8.513 | 4.616 | 3.509 | 2.888 | 1.263 |
| 44.8 | 194.2 | 79.21 | 19.19 | 7.967 | 4.84 | 2.528 | 2.137 | 1.936 |
| 45.86 | 188 | 70.41 | 14.84 | 6.2 | 3.852 | 2.927 | 2.018 | 1.164 |
| 46.92 | 166.7 | 64.23 | 14.3 | 6.484 | 2.918 | 3.951 | 2.18 | 1.189 |
| 47.98 | 154.5 | 63.3 | 14.44 | 6.035 | 4.195 | 3.181 | 1.922 | 1.382 |
| 49.04 | 144.9 | 62.97 | 12.76 | 3.662 | 3.537 | 2.034 | 1.74 | 1.635 |
| 50.1 | 132.7 | 54.57 | 12.33 | 3.59 | 2.44 | 1.945 | 1.29 | 1.553 |
| 51.16 | 130.2 | 51.94 | 10.45 | 4.561 | 2.062 | 2.43 | 1.619 | 1.12 |

体積発熱密度 (W/cm³/mA)

Table 3.3 Temperature distribution under 1mA-irradiation of proton beam

$$Q = 0.86\pi^2 \cdot \Delta x_n \cdot W_n \cdot I$$

$$T_n = T_{n-1} + \frac{Q}{G \cdot c}$$

| n | x _n (cm) | Δx _n (cm) | W _n (W/cc/mA) | Q (kcal/h) (I=1mA) | G=5t/h | | G=10t/h | | G=15t/h | | G=20t/h | | G=25t/h | | G=30t/h | | G=35t/h | | G=40t/h | | G=45t/h | | |
|----|---------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| | | | | | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | T _n (°C) |
| 0 | 0.00 | | | | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 |
| 1 | 0.28 | 0.28 | 2924 | 2212.0 | 83.4 | 0.03298 | 76.7 | 0.03298 | 76.7 | 0.03298 | 73.4 | 0.03299 | 72.7 | 0.03300 | 72.2 | 0.03300 | 71.9 | 0.03300 | 71.7 | 0.03300 | 71.5 | 0.03300 | 71.3 |
| 2 | 1.34 | 1.06 | 3048 | 8729.1 | 136.4 | 0.03284 | 103.2 | 0.03290 | 92.1 | 0.03292 | 86.6 | 0.03289 | 83.3 | 0.03295 | 81.1 | 0.03296 | 79.5 | 0.03296 | 78.3 | 0.03296 | 77.4 | 0.03297 | 76.6 |
| 3 | 2.40 | 1.06 | 3044 | 8717.6 | 189.7 | 0.03272 | 129.7 | 0.03281 | 109.8 | 0.03286 | 99.8 | 0.03284 | 93.8 | 0.03291 | 89.9 | 0.03292 | 87.0 | 0.03293 | 84.9 | 0.03294 | 83.2 | 0.03295 | 81.9 |
| 4 | 3.46 | 1.06 | 2965 | 8491.4 | 242.0 | 0.03258 | 155.7 | 0.03266 | 127.0 | 0.03273 | 112.7 | 0.03280 | 104.2 | 0.03286 | 98.5 | 0.03288 | 94.4 | 0.03290 | 91.3 | 0.03291 | 89.0 | 0.03292 | 87.1 |
| 5 | 4.52 | 1.06 | 2817 | 8067.5 | 292.0 | 0.03251 | 180.4 | 0.03260 | 143.5 | 0.03267 | 125.0 | 0.03274 | 114.0 | 0.03280 | 106.7 | 0.03285 | 101.4 | 0.03287 | 97.5 | 0.03288 | 94.4 | 0.03290 | 92.0 |
| 6 | 5.58 | 1.06 | 2599 | 7443.2 | 338.4 | 0.03242 | 203.3 | 0.03254 | 173.0 | 0.03261 | 147.1 | 0.03269 | 131.6 | 0.03276 | 121.3 | 0.03282 | 114.0 | 0.03284 | 103.1 | 0.03284 | 104.2 | 0.03285 | 100.8 |
| 7 | 6.64 | 1.06 | 2442 | 6993.6 | 382.1 | 0.03234 | 224.9 | 0.03249 | 186.0 | 0.03256 | 156.9 | 0.03264 | 139.4 | 0.03271 | 127.8 | 0.03277 | 119.5 | 0.03282 | 108.5 | 0.03282 | 108.5 | 0.03284 | 104.6 |
| 8 | 7.70 | 1.06 | 2223 | 6366.4 | 422.1 | 0.03228 | 244.6 | 0.03244 | 198.5 | 0.03251 | 166.2 | 0.03259 | 146.9 | 0.03265 | 134.0 | 0.03270 | 119.5 | 0.03275 | 117.3 | 0.03276 | 116.4 | 0.03277 | 111.8 |
| 9 | 8.76 | 1.06 | 2124 | 6082.9 | 460.4 | 0.03221 | 263.4 | 0.03236 | 210.1 | 0.03243 | 174.8 | 0.03250 | 153.8 | 0.03256 | 140.4 | 0.03261 | 124.8 | 0.03266 | 122.3 | 0.03267 | 120.1 | 0.03268 | 115.1 |
| 10 | 9.82 | 1.06 | 1970 | 5641.8 | 496.0 | 0.03216 | 280.9 | 0.03231 | 221.2 | 0.03238 | 183.1 | 0.03245 | 160.4 | 0.03251 | 145.3 | 0.03256 | 134.5 | 0.03261 | 130.2 | 0.03262 | 128.8 | 0.03263 | 121.1 |
| 11 | 10.88 | 1.06 | 1884 | 5395.5 | 530.2 | 0.03210 | 297.7 | 0.03225 | 231.5 | 0.03232 | 196.7 | 0.03239 | 166.6 | 0.03245 | 150.4 | 0.03250 | 138.9 | 0.03255 | 133.9 | 0.03256 | 132.5 | 0.03257 | 126.8 |
| 12 | 11.94 | 1.06 | 1756 | 5029.0 | 562.1 | 0.03206 | 313.4 | 0.03221 | 241.5 | 0.03228 | 205.2 | 0.03235 | 172.5 | 0.03241 | 155.3 | 0.03246 | 143.1 | 0.03251 | 137.3 | 0.03252 | 136.0 | 0.03253 | 129.8 |
| 13 | 13.00 | 1.06 | 1693 | 4848.5 | 592.9 | 0.03201 | 328.5 | 0.03216 | 250.8 | 0.03223 | 211.6 | 0.03230 | 183.1 | 0.03236 | 164.2 | 0.03241 | 150.6 | 0.03246 | 143.6 | 0.03247 | 142.6 | 0.03248 | 136.4 |
| 14 | 14.06 | 1.06 | 1560 | 4467.6 | 621.4 | 0.03193 | 355.4 | 0.03208 | 259.4 | 0.03215 | 221.9 | 0.03222 | 188.1 | 0.03228 | 168.3 | 0.03233 | 154.2 | 0.03238 | 146.4 | 0.03239 | 145.4 | 0.03240 | 138.8 |
| 15 | 15.12 | 1.06 | 1451 | 4155.5 | 647.9 | 0.03187 | 379.4 | 0.03202 | 275.2 | 0.03209 | 233.9 | 0.03216 | 196.7 | 0.03222 | 172.0 | 0.03227 | 157.3 | 0.03232 | 148.9 | 0.03233 | 147.1 | 0.03234 | 140.6 |
| 16 | 16.18 | 1.06 | 1412 | 4043.8 | 673.8 | 0.03181 | 390.0 | 0.03196 | 282.2 | 0.03199 | 247.4 | 0.03206 | 204.8 | 0.03212 | 182.2 | 0.03217 | 166.1 | 0.03222 | 154.5 | 0.03223 | 152.8 | 0.03224 | 145.8 |
| 17 | 17.24 | 1.06 | 1259 | 3605.6 | 696.9 | 0.03179 | 410.7 | 0.03191 | 295.8 | 0.03194 | 258.8 | 0.03201 | 208.4 | 0.03207 | 185.2 | 0.03212 | 170.9 | 0.03217 | 161.5 | 0.03218 | 160.2 | 0.03219 | 152.8 |
| 18 | 18.30 | 1.06 | 1176 | 3367.9 | 718.5 | 0.03174 | 428.1 | 0.03184 | 301.8 | 0.03187 | 271.3 | 0.03194 | 211.7 | 0.03199 | 189.3 | 0.03204 | 174.9 | 0.03209 | 166.1 | 0.03210 | 164.8 | 0.03211 | 157.1 |
| 19 | 19.36 | 1.06 | 1182 | 3385.1 | 740.2 | 0.03168 | 455.4 | 0.03179 | 325.3 | 0.03182 | 287.6 | 0.03189 | 223.4 | 0.03194 | 196.8 | 0.03199 | 180.2 | 0.03204 | 171.1 | 0.03209 | 166.3 | 0.03210 | 159.3 |
| 20 | 20.42 | 1.06 | 1117 | 3198.9 | 760.8 | 0.03166 | 461.4 | 0.03174 | 329.3 | 0.03178 | 293.4 | 0.03185 | 228.7 | 0.03190 | 198.7 | 0.03195 | 182.2 | 0.03200 | 173.1 | 0.03205 | 168.4 | 0.03206 | 161.1 |
| 21 | 21.48 | 1.06 | 1013 | 2901.1 | 779.4 | 0.03161 | 485.4 | 0.03171 | 345.1 | 0.03175 | 303.6 | 0.03182 | 232.4 | 0.03187 | 205.1 | 0.03192 | 186.9 | 0.03197 | 176.1 | 0.03202 | 171.1 | 0.03203 | 164.6 |
| 22 | 22.54 | 1.06 | 924.1 | 2646.5 | 796.5 | 0.03157 | 492.2 | 0.03166 | 347.6 | 0.03170 | 311.7 | 0.03177 | 235.6 | 0.03182 | 207.7 | 0.03187 | 188.9 | 0.03192 | 178.9 | 0.03197 | 173.1 | 0.03198 | 167.0 |
| 23 | 23.60 | 1.06 | 838.2 | 2400.5 | 812.0 | 0.03152 | 496.1 | 0.03161 | 349.9 | 0.03165 | 316.8 | 0.03172 | 239.4 | 0.03177 | 210.5 | 0.03182 | 192.5 | 0.03187 | 184.4 | 0.03192 | 179.2 | 0.03193 | 171.5 |
| 24 | 24.66 | 1.06 | 748.4 | 2143.3 | 825.8 | 0.03147 | 492.2 | 0.03156 | 339.3 | 0.03160 | 321.1 | 0.03167 | 232.4 | 0.03172 | 205.1 | 0.03177 | 186.9 | 0.03182 | 178.5 | 0.03187 | 173.1 | 0.03188 | 165.8 |
| 25 | 25.72 | 1.06 | 723.7 | 2072.6 | 839.6 | 0.03142 | 489.2 | 0.03151 | 325.3 | 0.03155 | 316.8 | 0.03162 | 232.4 | 0.03167 | 205.1 | 0.03172 | 186.9 | 0.03177 | 178.5 | 0.03182 | 173.1 | 0.03183 | 165.8 |
| 26 | 26.78 | 1.06 | 660.4 | 2037.4 | 852.3 | 0.03137 | 485.4 | 0.03146 | 329.3 | 0.03150 | 311.7 | 0.03157 | 232.4 | 0.03162 | 205.1 | 0.03167 | 186.9 | 0.03172 | 178.5 | 0.03177 | 173.1 | 0.03178 | 165.8 |
| 27 | 27.84 | 1.06 | 618.9 | 1772.5 | 876.0 | 0.03132 | 482.2 | 0.03141 | 333.0 | 0.03145 | 303.6 | 0.03152 | 232.4 | 0.03157 | 205.1 | 0.03162 | 186.9 | 0.03167 | 178.5 | 0.03172 | 173.1 | 0.03173 | 165.8 |
| 28 | 28.90 | 1.06 | 553.5 | 1585.2 | 886.3 | 0.03127 | 478.1 | 0.03136 | 336.3 | 0.03140 | 293.4 | 0.03147 | 232.4 | 0.03152 | 205.1 | 0.03157 | 186.9 | 0.03162 | 178.5 | 0.03167 | 173.1 | 0.03168 | 165.8 |
| 29 | 30.02 | 1.06 | 510.2 | 1461.1 | 895.8 | 0.03122 | 474.1 | 0.03131 | 339.3 | 0.03135 | 287.6 | 0.03142 | 232.4 | 0.03147 | 205.1 | 0.03152 | 186.9 | 0.03157 | 178.5 | 0.03162 | 173.1 | 0.03163 | 165.8 |
| 30 | 31.08 | 1.06 | 496.2 | 1421.1 | 905.0 | 0.03117 | 470.1 | 0.03126 | 342.3 | 0.03130 | 277.4 | 0.03137 | 232.4 | 0.03142 | 205.1 | 0.03147 | 186.9 | 0.03152 | 178.5 | 0.03157 | 173.1 | 0.03158 | 165.8 |
| 31 | 32.08 | 1.06 | 474.1 | 1357.8 | 913.8 | 0.03112 | 466.1 | 0.03121 | 345.1 | 0.03125 | 271.3 | 0.03132 | 232.4 | 0.03137 | 205.1 | 0.03142 | 186.9 | 0.03147 | 178.5 | 0.03152 | 173.1 | 0.03153 | 165.8 |
| 32 | 33.14 | 1.06 | 417.6 | 1196.0 | 921.5 | 0.03107 | 462.0 | 0.03116 | 347.6 | 0.03120 | 266.5 | 0.03127 | 232.4 | 0.03132 | 205.1 | 0.03137 | 186.9 | 0.03142 | 178.5 | 0.03147 | 173.1 | 0.03148 | 165.8 |
| 33 | 34.20 | 1.06 | 382.2 | 1094.6 | 928.6 | 0.03102 | 458.2 | 0.03111 | 349.9 | 0.03115 | 258.8 | 0.03122 | 232.4 | 0.03127 | 205.1 | 0.03132 | 186.9 | 0.03137 | 178.5 | 0.03142 | 173.1 | 0.03143 | 165.8 |
| 34 | 35.26 | 1.06 | 306.5 | 877.8 | 935.7 | 0.03097 | 454.1 | 0.03106 | 352.2 | 0.03110 | 247.4 | 0.03117 | 232.4 | 0.03122 | 205.1 | 0.03127 | 186.9 | 0.03132 | 178.5 | 0.03137 | 173.1 | 0.03138 | 165.8 |
| 35 | 36.32 | 1.06 | 287.8 | 824.2 | 941.4 | 0.03092 | 449.2 | 0.03101 | 354.0 | 0.03105 | 240.4 | 0.03112 | 232.4 | 0.03117 | 205.1 | 0.03122 | 186.9 | 0.03127 | 178.5 | 0.03132 | 173.1 | 0.03133 | 165.8 |
| 36 | 37.38 | 1.06 | 297.6 | 852.3 | 946.7 | 0.03087 | 445.1 | 0.03096 | 355.7 | 0.03100 | 233.9 | 0.03107 | 232.4 | 0.03112 | 205.1 | 0.03117 | 186.9 | 0.03122 | 178.5 | 0.03127 | 173.1 | 0.03128 | 165.8 |
| 37 | 38.44 | 1.06 | 242.1 | 690.5 | 950.5 | 0.03082 | 441.1 | 0.03091 | 357.7 | 0.03095 | 228.7 | 0.03102 | 232.4 | 0.03107 | 205.1 | 0.03112 | 186.9 | 0.03117 | 178.5 | 0.03122 | 173.1 | 0.03123 | 165.8 |
| 38 | 39.50 | 1.06 | 267.8 | 766.9 | 957.3 | 0.03077 | 437.1 | 0.03086 | 359.1 | 0.03090 | 224.8 | 0.03097 | 232.4 | 0.03102 | 205.1 | 0.03107 | 186.9 | 0.03112 | 178.5 | 0.03117 | 173.1 | 0.03118 | 165.8 |
| 39 | 40.56 | 1.06 | 242.1 | 690.5 | 963.3 | 0.03072 | 433.1 | 0.03081 | 362.2 | 0.03085 | 221.2 | 0.03092 | 232.4 | 0.03097 | 205.1 | 0.03102 | 186.9 | 0.03107 | 178.5 | 0.03112 | 173.1 | 0.03113 | 165.8 |
| 40 | 41.62 | 1.06 | 219.1 | 651.6 | 968.3 | 0.03067 | 429.1 | 0.03076 | 365.0 | 0.03080 | 218.7 | 0.03087 | 232.4 | 0.03092 | 205.1 | 0.03097 | 186.9 | 0.03102 | 178.5 | 0.03107 | 173.1 | 0.03108 | 165.8 |
| 41 | 42.68 | 1.06 | 196.1 | 611.1 | 973.3 | 0.03062 | 425.1 | 0.03071 | 367.9 | 0.03075 | 216.6 | 0.03082 | 232.4 | 0.03087 | 205.1 | 0.03092 | 186.9 | 0.03097 | 178.5 | 0.03102 | 173.1 | 0.03103 | 165.8 |
| 42 | 43.74 | 1.06 | 188 | 584.4 | 977.0 | 0.03057 | 421.1 | 0.03066 | 370.8 | 0.03070 | 214.5 | 0.03077 | 232.4 | 0.03082 | 205.1 | 0.03087 | 186.9 | 0.03092 | 178.5 | 0.03097 | 173.1 | 0.03098 | 165.8 |
| 43 | 44.80 | 1.06 | 166.7 | 477.4 | 980.1 | 0.03052 | 417.1 | 0.03061 | 373.5 | 0.03065 | 212.4 | 0.03072 | 232.4 | 0.03077 | 205.1 | 0.03082 | 186.9 | 0.03087 | 178.5 | 0.03092 | 173.1 | 0.03093 | 165.8 |
| 44 | 45.86 | 1.06 | 154.5 | 442.5 | 983.0 | 0.03047 | 413.1 | 0.03056 | 376.4 | 0.03060 | 210.3 | 0.03067 | 232.4 | 0.03072 | 205.1 | 0.03077 | 186.9 | 0.03082 | 178.5 | 0.03087 | 173.1 | 0.03088 | 165.8 |
| 45 | 46.92 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Table 3.4 Temperature distribution under 5mA-irradiation of proton beam

$$Q = 0.86\pi^2 \cdot \Delta x_n \cdot W_n \cdot I$$

$$T_n = T_{n-1} + \frac{Q}{G \cdot c}$$

| n | x _n (cm) | Δx _n (cm) | W _n (W/cc/mA) | Q (kcal/h) (I=5mA) | G=80t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=90t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=95t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=100t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=105t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=110t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=115t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | G=120t/h | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | | |
|----|---------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|---------|---------------------|----------------|---------|---------------------|----------------|---------|---------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|-------|---------|
| 0 | 0.00 | | | | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 |
| 1 | 0.28 | 0.28 | 2924 | 11060.0 | 74.2 | 0.03299 | 73.7 | 0.03299 | 73.5 | 0.03299 | 73.4 | 0.03299 | 73.2 | 0.03299 | 73.0 | 0.03299 | 72.8 | 0.03299 | 72.7 | 0.03299 | 72.6 | 0.03299 | 72.5 | 0.03299 | 72.4 | 0.03299 | 72.3 | 0.03299 | 72.2 | 0.03299 |
| 2 | 1.34 | 1.06 | 3048 | 43645.5 | 90.7 | 0.03291 | 89.5 | 0.03291 | 88.4 | 0.03292 | 87.5 | 0.03292 | 85.8 | 0.03293 | 85.1 | 0.03293 | 84.4 | 0.03294 | 83.8 | 0.03294 | 83.3 | 0.03294 | 82.8 | 0.03294 | 82.3 | 0.03294 | 81.8 | 0.03294 | 81.3 | 0.03294 |
| 3 | 2.40 | 1.06 | 3044 | 43588.2 | 107.3 | 0.03282 | 105.1 | 0.03283 | 103.1 | 0.03285 | 101.4 | 0.03286 | 99.8 | 0.03287 | 97.1 | 0.03287 | 95.4 | 0.03288 | 94.8 | 0.03288 | 94.3 | 0.03288 | 93.8 | 0.03288 | 93.3 | 0.03288 | 92.8 | 0.03288 | 92.3 | 0.03288 |
| 4 | 3.46 | 1.06 | 2965 | 42457.0 | 123.5 | 0.03276 | 120.3 | 0.03278 | 117.5 | 0.03279 | 115.0 | 0.03280 | 112.7 | 0.03281 | 110.7 | 0.03282 | 108.8 | 0.03283 | 107.2 | 0.03284 | 105.6 | 0.03285 | 104.2 | 0.03286 | 102.8 | 0.03287 | 101.4 | 0.03288 | 100.0 | 0.03289 |
| 5 | 4.52 | 1.06 | 2817 | 40337.7 | 134.8 | 0.03270 | 131.2 | 0.03271 | 128.9 | 0.03273 | 127.9 | 0.03274 | 125.0 | 0.03275 | 122.4 | 0.03276 | 120.0 | 0.03277 | 117.8 | 0.03278 | 115.8 | 0.03279 | 114.0 | 0.03280 | 112.6 | 0.03281 | 111.2 | 0.03282 | 109.8 | 0.03283 |
| 6 | 5.58 | 1.06 | 2599 | 37216.1 | 153.1 | 0.03262 | 148.2 | 0.03264 | 143.8 | 0.03268 | 139.9 | 0.03269 | 136.4 | 0.03270 | 133.2 | 0.03272 | 130.3 | 0.03274 | 127.7 | 0.03276 | 125.3 | 0.03278 | 123.1 | 0.03280 | 121.7 | 0.03281 | 120.3 | 0.03282 | 118.9 | 0.03283 |
| 7 | 6.64 | 1.06 | 2442 | 34967.9 | 166.5 | 0.03256 | 160.8 | 0.03261 | 155.7 | 0.03263 | 151.2 | 0.03264 | 147.1 | 0.03266 | 143.4 | 0.03267 | 140.1 | 0.03269 | 137.0 | 0.03271 | 134.2 | 0.03273 | 131.6 | 0.03275 | 129.1 | 0.03277 | 126.6 | 0.03279 | 124.1 | 0.03281 |
| 8 | 7.70 | 1.06 | 2223 | 31832.0 | 178.7 | 0.03252 | 172.3 | 0.03254 | 166.6 | 0.03258 | 161.5 | 0.03260 | 156.9 | 0.03262 | 152.7 | 0.03264 | 148.9 | 0.03266 | 145.5 | 0.03268 | 142.3 | 0.03270 | 139.4 | 0.03272 | 136.5 | 0.03274 | 133.6 | 0.03276 | 130.7 | 0.03278 |
| 9 | 8.76 | 1.06 | 2124 | 30414.4 | 190.4 | 0.03247 | 183.3 | 0.03252 | 176.9 | 0.03255 | 171.3 | 0.03257 | 166.2 | 0.03258 | 161.6 | 0.03260 | 157.4 | 0.03262 | 153.6 | 0.03264 | 149.9 | 0.03266 | 146.9 | 0.03268 | 143.9 | 0.03270 | 141.0 | 0.03272 | 138.1 | 0.03274 |
| 10 | 9.82 | 1.06 | 1970 | 28209.2 | 201.3 | 0.03243 | 193.5 | 0.03246 | 186.6 | 0.03251 | 180.4 | 0.03253 | 174.8 | 0.03255 | 169.8 | 0.03257 | 165.3 | 0.03259 | 161.1 | 0.03261 | 157.1 | 0.03263 | 153.1 | 0.03265 | 149.1 | 0.03267 | 145.1 | 0.03269 | 141.1 | 0.03271 |
| 11 | 10.88 | 1.06 | 1884 | 26977.7 | 211.7 | 0.03242 | 203.3 | 0.03245 | 195.8 | 0.03248 | 189.1 | 0.03250 | 183.1 | 0.03252 | 177.7 | 0.03254 | 172.8 | 0.03256 | 168.3 | 0.03258 | 164.2 | 0.03260 | 160.4 | 0.03262 | 156.6 | 0.03264 | 152.8 | 0.03266 | 149.0 | 0.03268 |
| 12 | 11.94 | 1.06 | 1756 | 25144.8 | 221.4 | 0.03236 | 212.4 | 0.03241 | 204.4 | 0.03244 | 197.3 | 0.03247 | 190.9 | 0.03249 | 185.1 | 0.03251 | 179.8 | 0.03253 | 175.0 | 0.03255 | 170.6 | 0.03257 | 166.6 | 0.03259 | 162.6 | 0.03261 | 158.6 | 0.03263 | 154.6 | 0.03265 |
| 13 | 13.00 | 1.06 | 1693 | 24242.7 | 230.7 | 0.03232 | 221.2 | 0.03236 | 212.7 | 0.03241 | 205.2 | 0.03244 | 198.3 | 0.03246 | 192.2 | 0.03248 | 186.6 | 0.03250 | 181.5 | 0.03252 | 176.8 | 0.03254 | 172.5 | 0.03256 | 168.2 | 0.03258 | 163.9 | 0.03260 | 159.6 | 0.03262 |
| 14 | 14.06 | 1.06 | 1560 | 22338.2 | 239.4 | 0.03229 | 229.3 | 0.03233 | 220.4 | 0.03239 | 212.4 | 0.03241 | 205.2 | 0.03244 | 198.7 | 0.03246 | 192.8 | 0.03248 | 187.5 | 0.03250 | 182.5 | 0.03252 | 178.0 | 0.03254 | 173.5 | 0.03256 | 169.0 | 0.03258 | 164.5 | 0.03260 |
| 15 | 15.12 | 1.06 | 1451 | 20777.4 | 247.4 | 0.03227 | 236.9 | 0.03231 | 227.5 | 0.03236 | 219.2 | 0.03239 | 211.6 | 0.03241 | 204.8 | 0.03244 | 198.7 | 0.03246 | 193.0 | 0.03248 | 187.5 | 0.03250 | 182.5 | 0.03252 | 178.0 | 0.03254 | 173.5 | 0.03256 | 169.0 | 0.03258 |
| 16 | 16.18 | 1.06 | 1412 | 20219.0 | 255.2 | 0.03224 | 244.2 | 0.03228 | 234.5 | 0.03233 | 225.7 | 0.03237 | 217.9 | 0.03239 | 210.8 | 0.03242 | 204.3 | 0.03244 | 198.4 | 0.03246 | 193.1 | 0.03248 | 188.1 | 0.03250 | 183.1 | 0.03252 | 178.1 | 0.03254 | 173.1 | 0.03256 |
| 17 | 17.24 | 1.06 | 1259 | 18026.1 | 262.2 | 0.03222 | 250.8 | 0.03226 | 240.7 | 0.03231 | 231.6 | 0.03235 | 223.4 | 0.03237 | 216.1 | 0.03240 | 209.4 | 0.03242 | 203.3 | 0.03244 | 197.7 | 0.03246 | 192.5 | 0.03248 | 187.3 | 0.03250 | 182.1 | 0.03252 | 176.9 | 0.03254 |
| 18 | 18.30 | 1.06 | 1176 | 16839.6 | 268.8 | 0.03219 | 257.0 | 0.03223 | 246.5 | 0.03228 | 237.1 | 0.03232 | 228.7 | 0.03234 | 221.0 | 0.03236 | 214.1 | 0.03238 | 207.8 | 0.03240 | 201.4 | 0.03242 | 195.5 | 0.03244 | 189.5 | 0.03246 | 183.5 | 0.03248 | 177.5 | 0.03250 |
| 19 | 19.36 | 1.06 | 1182 | 16925.5 | 275.3 | 0.03217 | 263.1 | 0.03221 | 252.3 | 0.03226 | 242.6 | 0.03230 | 233.9 | 0.03232 | 226.0 | 0.03234 | 218.9 | 0.03236 | 212.3 | 0.03238 | 205.4 | 0.03240 | 199.7 | 0.03242 | 193.7 | 0.03244 | 187.7 | 0.03246 | 181.7 | 0.03248 |
| 20 | 20.42 | 1.06 | 1117 | 15994.7 | 281.6 | 0.03215 | 269.0 | 0.03219 | 269.0 | 0.03223 | 257.8 | 0.03226 | 247.8 | 0.03229 | 240.5 | 0.03231 | 233.0 | 0.03233 | 226.1 | 0.03235 | 219.2 | 0.03237 | 212.3 | 0.03239 | 205.4 | 0.03241 | 198.5 | 0.03243 | 191.6 | 0.03245 |
| 21 | 21.48 | 1.06 | 1013 | 14505.5 | 287.2 | 0.03214 | 274.3 | 0.03218 | 274.3 | 0.03222 | 262.8 | 0.03225 | 252.6 | 0.03228 | 243.3 | 0.03231 | 235.0 | 0.03233 | 227.4 | 0.03235 | 220.5 | 0.03237 | 213.6 | 0.03239 | 206.7 | 0.03241 | 199.8 | 0.03243 | 192.9 | 0.03245 |
| 22 | 22.54 | 1.06 | 924 | 13232.5 | 292.3 | 0.03212 | 279.1 | 0.03216 | 279.1 | 0.03220 | 267.4 | 0.03223 | 256.9 | 0.03226 | 247.4 | 0.03229 | 238.9 | 0.03232 | 231.2 | 0.03234 | 224.1 | 0.03236 | 217.0 | 0.03238 | 210.1 | 0.03240 | 203.2 | 0.03242 | 196.3 | 0.03244 |
| 23 | 23.60 | 1.06 | 838 | 12002.5 | 297.0 | 0.03211 | 283.5 | 0.03215 | 283.5 | 0.03219 | 271.5 | 0.03222 | 260.8 | 0.03225 | 251.2 | 0.03228 | 242.4 | 0.03231 | 234.5 | 0.03233 | 227.3 | 0.03235 | 220.2 | 0.03237 | 213.1 | 0.03239 | 206.0 | 0.03241 | 198.9 | 0.03243 |
| 24 | 24.66 | 1.06 | 748 | 10716.6 | 297.0 | 0.03210 | 287.4 | 0.03214 | 287.4 | 0.03218 | 275.2 | 0.03221 | 264.3 | 0.03224 | 254.5 | 0.03227 | 245.6 | 0.03229 | 237.5 | 0.03231 | 230.2 | 0.03233 | 223.5 | 0.03235 | 216.4 | 0.03237 | 209.3 | 0.03239 | 202.2 | 0.03241 |
| 25 | 25.72 | 1.06 | 723 | 10362.9 | 305.2 | 0.03208 | 291.2 | 0.03212 | 291.2 | 0.03216 | 279.6 | 0.03219 | 269.0 | 0.03222 | 259.4 | 0.03225 | 250.7 | 0.03227 | 242.8 | 0.03229 | 235.7 | 0.03231 | 228.6 | 0.03233 | 221.5 | 0.03235 | 214.4 | 0.03237 | 207.3 | 0.03239 |
| 26 | 26.78 | 1.06 | 711 | 10186.8 | 309.2 | 0.03207 | 294.9 | 0.03211 | 294.9 | 0.03215 | 283.3 | 0.03218 | 273.5 | 0.03221 | 263.7 | 0.03224 | 254.8 | 0.03227 | 246.7 | 0.03229 | 239.2 | 0.03231 | 232.1 | 0.03233 | 225.0 | 0.03235 | 217.9 | 0.03237 | 210.8 | 0.03239 |
| 27 | 27.84 | 1.06 | 660 | 9456.5 | 312.9 | 0.03206 | 298.4 | 0.03210 | 298.4 | 0.03214 | 286.5 | 0.03217 | 275.6 | 0.03220 | 265.7 | 0.03223 | 256.7 | 0.03226 | 248.5 | 0.03228 | 241.0 | 0.03230 | 233.9 | 0.03232 | 226.8 | 0.03234 | 219.7 | 0.03236 | 212.6 | 0.03238 |
| 28 | 28.90 | 1.06 | 618 | 8862.3 | 316.3 | 0.03205 | 301.7 | 0.03209 | 301.7 | 0.03213 | 288.5 | 0.03216 | 277.4 | 0.03219 | 267.5 | 0.03222 | 258.4 | 0.03225 | 250.1 | 0.03228 | 242.4 | 0.03230 | 235.3 | 0.03232 | 228.2 | 0.03234 | 221.1 | 0.03236 | 214.0 | 0.03238 |
| 29 | 29.96 | 1.06 | 553 | 7925.8 | 319.4 | 0.03204 | 319.4 | 0.03208 | 319.4 | 0.03212 | 299.8 | 0.03215 | 288.7 | 0.03218 | 278.6 | 0.03221 | 270.7 | 0.03224 | 262.6 | 0.03227 | 254.5 | 0.03229 | 247.4 | 0.03231 | 240.3 | 0.03233 | 233.2 | 0.03235 | 226.1 | 0.03237 |
| 30 | 31.02 | 1.06 | 510 | 7305.7 | 327.3 | 0.03203 | 327.3 | 0.03207 | 327.3 | 0.03211 | 307.2 | 0.03214 | 296.1 | 0.03217 | 286.0 | 0.03220 | 277.9 | 0.03223 | 269.8 | 0.03226 | 261.7 | 0.03228 | 254.6 | 0.03230 | 247.5 | 0.03232 | 240.4 | 0.03234 | 233.3 | 0.03236 |
| 31 | 32.08 | 1.06 | 496 | 7105.3 | 325.0 | 0.03202 | 325.0 | 0.03206 | 325.0 | 0.03210 | 304.9 | 0.03213 | 293.8 | 0.03216 | 283.7 | 0.03219 | 275.6 | 0.03222 | 267.5 | 0.03225 | 259.4 | 0.03227 | 252.3 | 0.03229 | 245.2 | 0.03231 | 238.1 | 0.03233 | 231.0 | 0.03235 |
| 32 | 33.14 | 1.06 | 474 | 6788.8 | 327.7 | 0.03201 | 327.7 | 0.03205 | 327.7 | 0.03209 | 307.6 | 0.03212 | 296.5 | 0.03215 | 286.4 | 0.03218 | 278.3 | 0.03221 | 270.2 | 0.03224 | 262.1 | 0.03226 | 255.0 | 0.03228 | 247.9 | 0.03230 | 240.8 | 0.03232 | 233.7 | 0.03234 |
| 33 | 34.20 | 1.06 | 417 | 5979.8 | 330.0 | 0.03201 | 330.0 | 0.03205 | 330.0 | 0.03209 | 309.9 | 0.03212 | 298.8 | 0.03215 | 288.7 | 0.03218 | 280.6 | 0.03221 | 272.5 | 0.03224 | 264.4 | 0.03226 | 257.3 | 0.03228 | 250.2 | 0.03230 | 243.1 | 0.03232 | 236.0 | 0.03234 |
| 34 | 35.26 | 1.06 | 381 | 5457.1 | 332.2 | 0.03200 | 332.2 | 0.03204 | 332.2 | 0.03208 | 311.8 | 0.03211 | 300.7 | 0.03214 | 290.6 | 0.03217 | 282.5 | 0.03220 | 274.4 | 0.03223 | 266.3 | 0.03225 | 259.2 | 0.03227 | 252.1 | 0.03229 | 245.0 | 0.03231 | 237.9 | 0.03233 |
| 35 | 36.32 | 1.06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Table 3.5 Temperature distribution under 10mA-irradiation of proton beam

$$Q = 0.86\pi r^2 \cdot \Delta x_n \cdot W_n \cdot I$$

$$T_n = T_{n-1} + \frac{Q}{G \cdot c}$$

| n | x _n (cm) | Δx _n (cm) | W _n (W/cc/mA) | Q (kcal/h) (I=10mA) | G=180t/h | | G=195t/h | | G=200t/h | | G=205t/h | | G=210t/h | | G=215t/h | | G=220t/h | | |
|----|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| | | | | | T _n (°C) | Cp (kcal/kg°C) | T _n (°C) |
| 0 | 0.00 | | | | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 | 0.03301 | 70.0 |
| 1 | 0.28 | 0.28 | 2924 | 22119.9 | 73.7 | 0.03299 | 73.4 | 0.03299 | 73.4 | 0.03299 | 73.3 | 0.03299 | 73.2 | 0.03299 | 73.1 | 0.03299 | 73.0 | 0.03299 | 73.0 |
| 2 | 1.34 | 1.06 | 3048 | 87290.9 | 88.4 | 0.03291 | 87.9 | 0.03292 | 87.5 | 0.03292 | 86.2 | 0.03293 | 85.8 | 0.03293 | 85.4 | 0.03293 | 85.1 | 0.03293 | 84.7 |
| 3 | 2.40 | 1.06 | 3044 | 87176.4 | 103.1 | 0.03284 | 102.2 | 0.03285 | 101.4 | 0.03285 | 99.8 | 0.03286 | 99.1 | 0.03287 | 97.7 | 0.03287 | 97.1 | 0.03287 | 96.5 |
| 4 | 3.46 | 1.06 | 2965 | 84913.9 | 117.5 | 0.03278 | 116.2 | 0.03279 | 115.0 | 0.03279 | 113.8 | 0.03280 | 111.7 | 0.03281 | 109.8 | 0.03282 | 108.8 | 0.03282 | 108.0 |
| 5 | 4.52 | 1.06 | 2817 | 80675.4 | 131.2 | 0.03271 | 129.5 | 0.03273 | 127.9 | 0.03273 | 126.5 | 0.03274 | 123.7 | 0.03275 | 121.2 | 0.03276 | 120.0 | 0.03277 | 118.9 |
| 6 | 5.58 | 1.06 | 2599 | 74432.1 | 143.8 | 0.03266 | 141.8 | 0.03268 | 139.9 | 0.03268 | 138.1 | 0.03270 | 134.8 | 0.03271 | 131.8 | 0.03272 | 130.3 | 0.03273 | 128.5 |
| 7 | 6.64 | 1.06 | 2442 | 69935.8 | 155.7 | 0.03261 | 154.4 | 0.03263 | 152.7 | 0.03263 | 151.1 | 0.03265 | 147.1 | 0.03266 | 144.7 | 0.03267 | 141.7 | 0.03268 | 138.5 |
| 8 | 7.70 | 1.06 | 2223 | 63664.0 | 166.6 | 0.03257 | 163.9 | 0.03259 | 161.5 | 0.03259 | 159.1 | 0.03261 | 154.7 | 0.03262 | 152.7 | 0.03263 | 150.8 | 0.03264 | 147.2 |
| 9 | 8.76 | 1.06 | 2124 | 60828.7 | 176.9 | 0.03252 | 174.0 | 0.03254 | 171.3 | 0.03254 | 168.7 | 0.03256 | 163.8 | 0.03257 | 161.6 | 0.03258 | 159.4 | 0.03259 | 155.4 |
| 10 | 9.82 | 1.06 | 1970 | 56418.4 | 186.6 | 0.03249 | 183.4 | 0.03251 | 180.4 | 0.03251 | 177.6 | 0.03253 | 172.3 | 0.03254 | 169.8 | 0.03255 | 167.5 | 0.03256 | 163.1 |
| 11 | 10.88 | 1.06 | 1884 | 53955.4 | 195.8 | 0.03244 | 192.4 | 0.03246 | 189.1 | 0.03246 | 186.1 | 0.03248 | 181.1 | 0.03249 | 177.7 | 0.03250 | 175.2 | 0.03251 | 170.5 |
| 12 | 11.94 | 1.06 | 1756 | 50289.7 | 204.4 | 0.03240 | 200.8 | 0.03242 | 197.3 | 0.03242 | 194.0 | 0.03244 | 189.3 | 0.03245 | 185.1 | 0.03246 | 182.4 | 0.03247 | 179.8 |
| 13 | 13.00 | 1.06 | 1693 | 48485.4 | 212.7 | 0.03236 | 208.8 | 0.03238 | 205.2 | 0.03238 | 201.9 | 0.03240 | 197.2 | 0.03241 | 192.2 | 0.03242 | 189.3 | 0.03243 | 186.6 |
| 14 | 14.06 | 1.06 | 1560 | 44676.5 | 220.4 | 0.03233 | 216.3 | 0.03235 | 212.4 | 0.03235 | 208.2 | 0.03237 | 203.2 | 0.03238 | 198.7 | 0.03239 | 195.7 | 0.03240 | 192.8 |
| 15 | 15.12 | 1.06 | 1451 | 41554.8 | 227.5 | 0.03230 | 223.2 | 0.03232 | 219.2 | 0.03232 | 215.3 | 0.03234 | 210.2 | 0.03235 | 205.2 | 0.03236 | 202.4 | 0.03237 | 199.1 |
| 16 | 16.18 | 1.06 | 1331 | 38351.0 | 234.5 | 0.03227 | 230.0 | 0.03229 | 225.7 | 0.03229 | 221.3 | 0.03231 | 216.1 | 0.03232 | 211.8 | 0.03233 | 208.3 | 0.03234 | 204.3 |
| 17 | 17.24 | 1.06 | 1259 | 36056.2 | 240.7 | 0.03224 | 236.0 | 0.03226 | 231.6 | 0.03226 | 227.4 | 0.03228 | 222.8 | 0.03229 | 218.5 | 0.03230 | 215.1 | 0.03231 | 211.9 |
| 18 | 18.30 | 1.06 | 1182 | 33851.0 | 246.5 | 0.03221 | 241.6 | 0.03223 | 237.1 | 0.03223 | 232.8 | 0.03225 | 228.4 | 0.03226 | 224.1 | 0.03227 | 220.8 | 0.03228 | 217.5 |
| 19 | 19.36 | 1.06 | 1117 | 31989.5 | 252.3 | 0.03218 | 247.3 | 0.03220 | 242.6 | 0.03220 | 238.2 | 0.03222 | 233.9 | 0.03223 | 229.6 | 0.03224 | 226.3 | 0.03225 | 223.0 |
| 20 | 20.42 | 1.06 | 1013 | 29011.1 | 258.8 | 0.03215 | 252.7 | 0.03217 | 247.8 | 0.03217 | 243.5 | 0.03219 | 239.2 | 0.03220 | 235.0 | 0.03221 | 231.7 | 0.03222 | 228.4 |
| 21 | 21.48 | 1.06 | 924.1 | 26465.1 | 267.4 | 0.03212 | 258.0 | 0.03214 | 252.6 | 0.03214 | 248.3 | 0.03216 | 244.0 | 0.03217 | 240.7 | 0.03218 | 237.4 | 0.03219 | 234.1 |
| 22 | 22.54 | 1.06 | 838.2 | 24005.0 | 271.5 | 0.03209 | 263.6 | 0.03211 | 257.6 | 0.03211 | 253.3 | 0.03213 | 249.0 | 0.03214 | 245.7 | 0.03215 | 242.4 | 0.03216 | 239.1 |
| 23 | 23.60 | 1.06 | 748.4 | 21433.2 | 275.2 | 0.03206 | 268.3 | 0.03208 | 262.6 | 0.03208 | 258.3 | 0.03210 | 253.6 | 0.03211 | 250.0 | 0.03212 | 246.3 | 0.03213 | 243.0 |
| 24 | 24.66 | 1.06 | 723.7 | 20725.9 | 278.8 | 0.03203 | 273.1 | 0.03205 | 267.0 | 0.03205 | 262.6 | 0.03207 | 257.9 | 0.03208 | 254.1 | 0.03209 | 250.4 | 0.03210 | 247.1 |
| 25 | 25.72 | 1.06 | 660.4 | 18913.0 | 285.6 | 0.03200 | 277.6 | 0.03202 | 271.0 | 0.03202 | 266.5 | 0.03204 | 261.8 | 0.03205 | 258.0 | 0.03206 | 254.2 | 0.03207 | 250.5 |
| 26 | 26.78 | 1.06 | 611.4 | 17724.5 | 288.6 | 0.03197 | 282.7 | 0.03199 | 276.1 | 0.03199 | 271.3 | 0.03201 | 266.6 | 0.03202 | 262.8 | 0.03203 | 258.9 | 0.03204 | 255.2 |
| 27 | 27.84 | 1.06 | 563.5 | 16611.5 | 291.4 | 0.03194 | 287.8 | 0.03196 | 281.2 | 0.03196 | 276.3 | 0.03200 | 271.5 | 0.03201 | 267.7 | 0.03202 | 263.8 | 0.03203 | 260.0 |
| 28 | 28.90 | 1.06 | 510.2 | 14611.5 | 293.9 | 0.03191 | 292.9 | 0.03193 | 286.3 | 0.03193 | 281.4 | 0.03200 | 276.6 | 0.03201 | 272.8 | 0.03202 | 268.9 | 0.03203 | 265.1 |
| 29 | 29.96 | 1.06 | 461.6 | 13577.6 | 296.4 | 0.03188 | 297.5 | 0.03190 | 290.9 | 0.03190 | 286.0 | 0.03200 | 281.2 | 0.03201 | 277.4 | 0.03202 | 273.5 | 0.03203 | 269.6 |
| 30 | 31.02 | 1.06 | 381.1 | 10914.2 | 298.7 | 0.03185 | 299.5 | 0.03187 | 292.9 | 0.03187 | 288.0 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 31 | 32.08 | 1.06 | 311.1 | 8242.2 | 299.6 | 0.03182 | 299.6 | 0.03184 | 293.0 | 0.03184 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 32 | 33.14 | 1.06 | 287.8 | 6242.2 | 299.6 | 0.03179 | 299.6 | 0.03181 | 293.0 | 0.03181 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 33 | 34.20 | 1.06 | 242.1 | 4424.7 | 299.6 | 0.03176 | 299.6 | 0.03178 | 293.0 | 0.03178 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 34 | 35.26 | 1.06 | 217.6 | 3111.1 | 299.6 | 0.03173 | 299.6 | 0.03175 | 293.0 | 0.03175 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 35 | 36.32 | 1.06 | 194.2 | 188 | 299.6 | 0.03170 | 299.6 | 0.03172 | 293.0 | 0.03172 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 36 | 37.38 | 1.06 | 166.7 | 4774.1 | 299.6 | 0.03167 | 299.6 | 0.03169 | 293.0 | 0.03169 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 37 | 38.44 | 1.06 | 144.9 | 3111.1 | 299.6 | 0.03164 | 299.6 | 0.03166 | 293.0 | 0.03166 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 38 | 39.50 | 1.06 | 132.7 | 1880.4 | 299.6 | 0.03161 | 299.6 | 0.03163 | 293.0 | 0.03163 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 39 | 40.56 | 1.06 | 120.4 | 130.2 | 299.6 | 0.03158 | 299.6 | 0.03160 | 293.0 | 0.03160 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 40 | 41.62 | 1.06 | 108.1 | 3728.8 | 299.6 | 0.03155 | 299.6 | 0.03157 | 293.0 | 0.03157 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 41 | 42.68 | 1.06 | 95.8 | 311.1 | 299.6 | 0.03152 | 299.6 | 0.03154 | 293.0 | 0.03154 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 42 | 43.74 | 1.06 | 83.5 | 188 | 299.6 | 0.03149 | 299.6 | 0.03151 | 293.0 | 0.03151 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 43 | 44.80 | 1.06 | 71.2 | 4774.1 | 299.6 | 0.03146 | 299.6 | 0.03148 | 293.0 | 0.03148 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 44 | 45.86 | 1.06 | 58.9 | 3111.1 | 299.6 | 0.03143 | 299.6 | 0.03145 | 293.0 | 0.03145 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 45 | 46.92 | 1.06 | 46.6 | 188 | 299.6 | 0.03140 | 299.6 | 0.03142 | 293.0 | 0.03142 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 46 | 47.98 | 1.06 | 34.3 | 4774.1 | 299.6 | 0.03137 | 299.6 | 0.03139 | 293.0 | 0.03139 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 47 | 49.04 | 1.06 | 22.0 | 3111.1 | 299.6 | 0.03134 | 299.6 | 0.03136 | 293.0 | 0.03136 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 48 | 50.10 | 1.06 | 9.7 | 1880.4 | 299.6 | 0.03131 | 299.6 | 0.03133 | 293.0 | 0.03133 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 49 | 51.16 | 1.06 | | 3728.8 | 299.6 | 0.03128 | 299.6 | 0.03130 | 293.0 | 0.03130 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 50 | | | | | 299.6 | 0.03125 | 299.6 | 0.03127 | 293.0 | 0.03127 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |
| 51 | | | | | 299.6 | 0.03122 | 299.6 | 0.03124 | 293.0 | 0.03124 | 288.1 | 0.03200 | 283.2 | 0.03201 | 279.3 | 0.03202 | 275.4 | 0.03203 | 271.5 |

Table 3.6 Inspection items for developing target structure

| 目 的 | 内 容 | 手 法 |
|-------------------------------------|---|-------------------|
| 水銀流速の低減 (1m/s以下) と 構造概念の構築 | <ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット構造の検討 <ul style="list-style-type: none"> －熱流動特性の最適化 流量分布及び温度分布 ビーム窓の冷却 死水域とホットスポットの発生等 ・少ない溶接部 ・ビーム窓の冷却 ・死水域のない流量分布 ・構造材の中性子損傷等のデータベース | 実 験 解析評価 |
| ターゲットの 長寿命化 | <ul style="list-style-type: none"> ・材料の探索・選定 <ul style="list-style-type: none"> －新規に開発されている材料の適用 －コーティング手法 ・溶接部の健全性評価 ・構造健全性 ・製作精度 | 実 験 解析評価 |
| 核計算コードの 高度化 | <ul style="list-style-type: none"> ・精度の向上 <ul style="list-style-type: none"> －中性子測定実験によるデータベース の整備 －解析モデルの改良 ・計算メッシュの細密化 | 実 験 解析評価 |
| 水銀物性データ の整備 | <ul style="list-style-type: none"> ・水銀物性値データベースの整備 <ul style="list-style-type: none"> －文献調査と評価 －測定実験 | 調 査 評 価 実 験 |

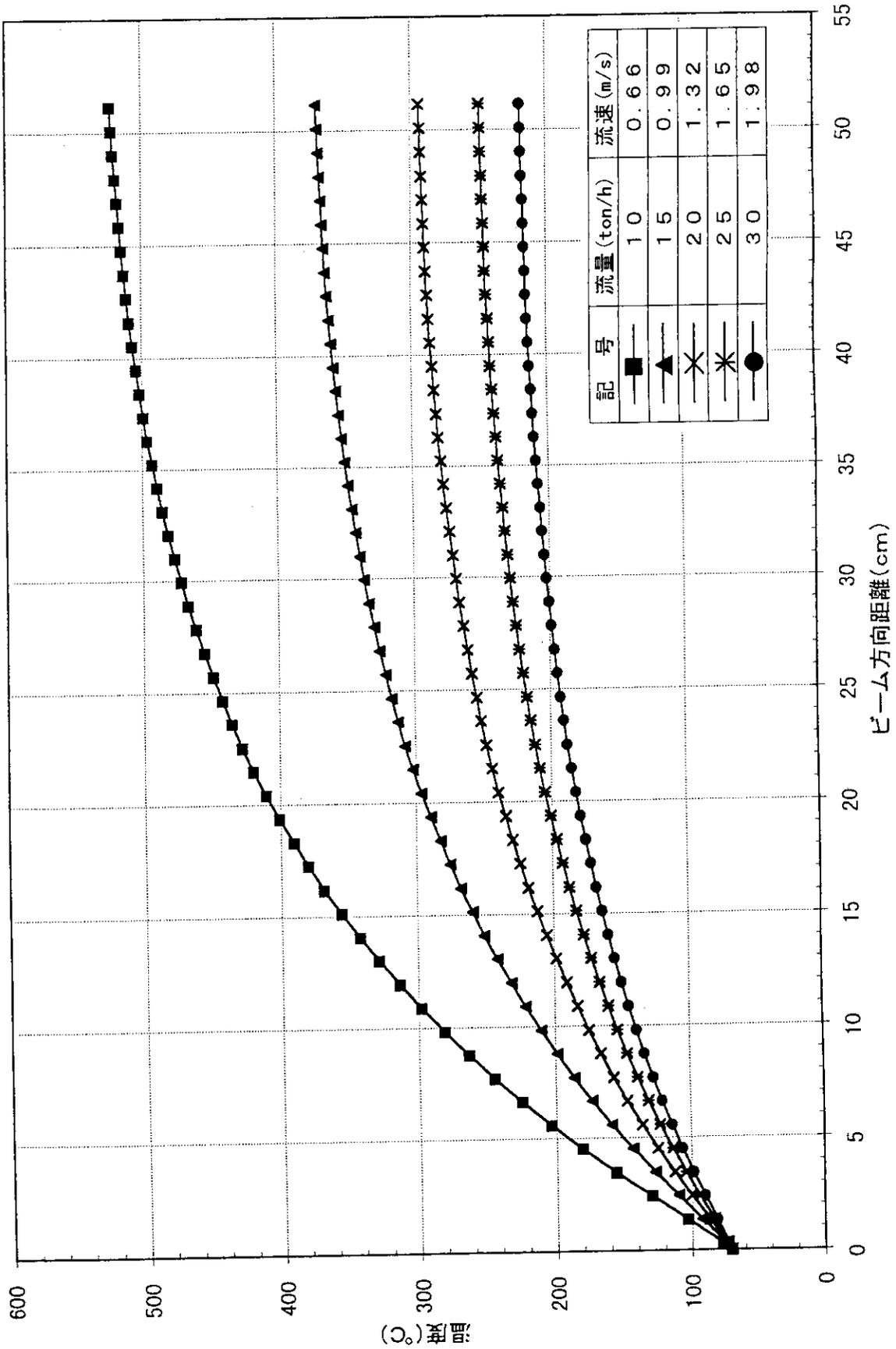


Fig. 3.1 Temperature distribution under 1mA-irradiation of proton beam

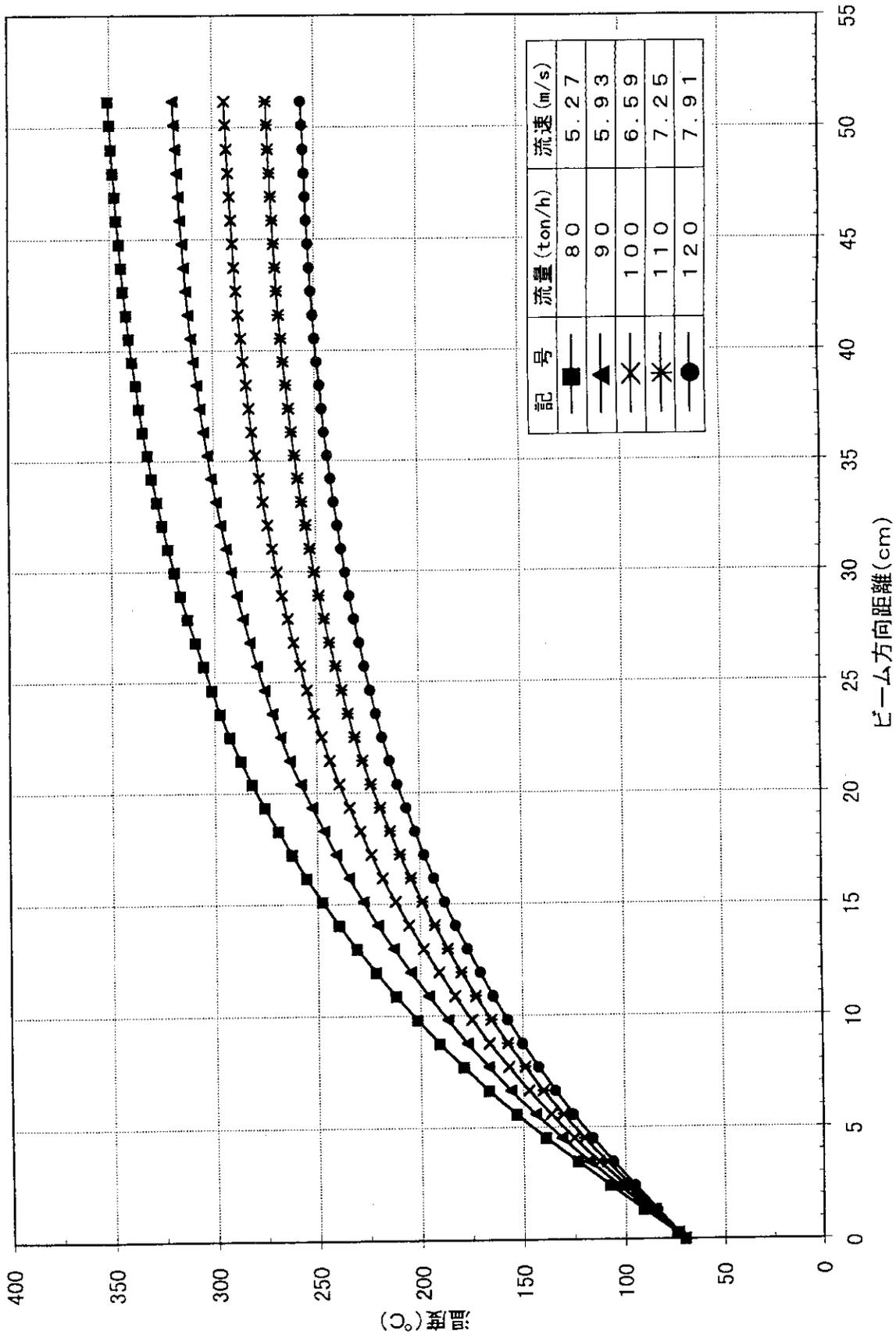


Fig. 3.2 Temperature distribution under 5mA-irradiation of proton beam

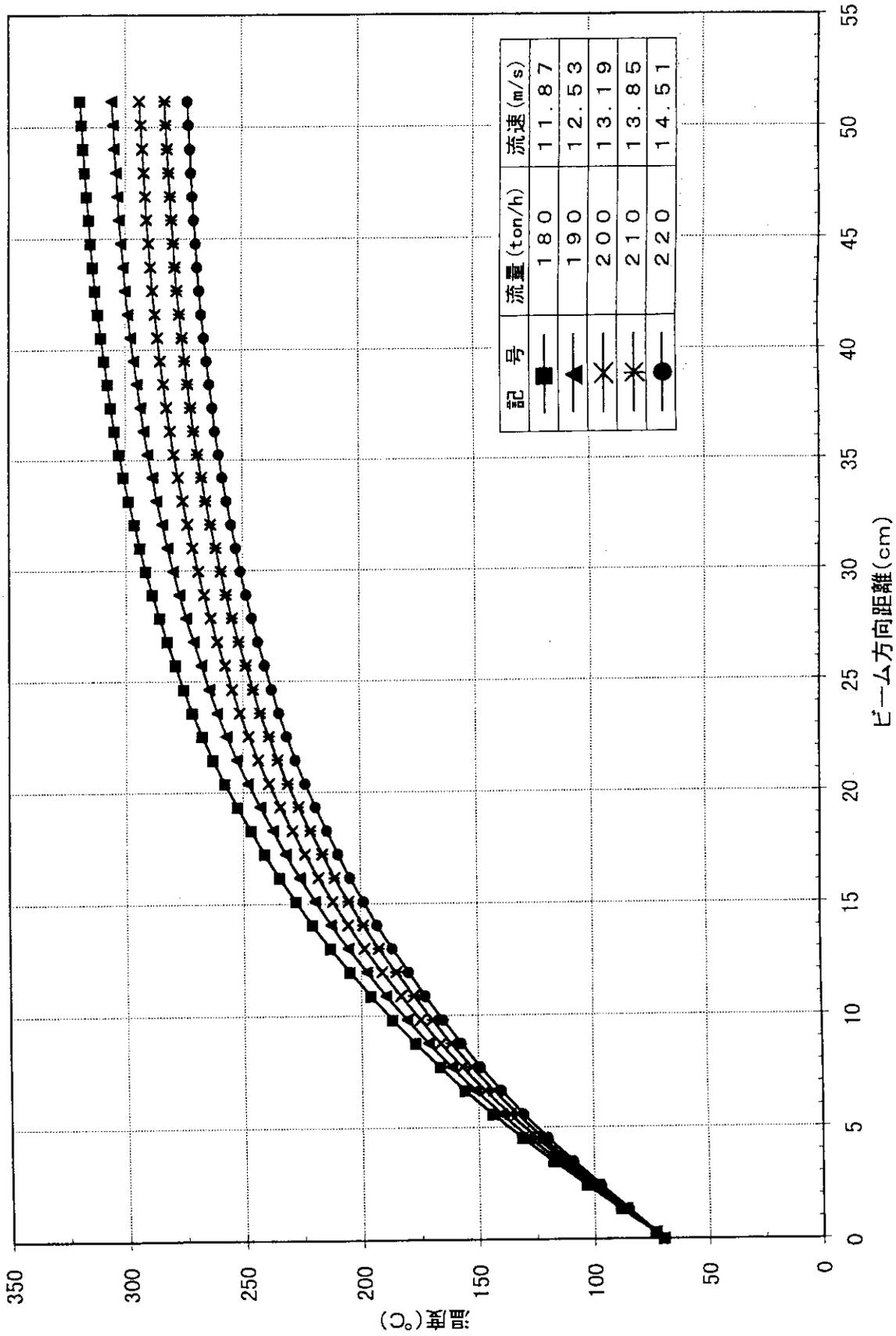


Fig. 3.3 Temperature distribution under 10mA-irradiation of proton beam

4. 水銀ループの概念検討

本章では、液体金属ターゲットの有力候補である水銀ターゲットの熱流動特性などを把握する工学試験を実施するための大型試験ループについて、その概念仕様を検討した。以下に検討方針、結果等について述べる。

4. 1 検討方針

本水銀ループは、水銀ターゲットの熱流動特性試験のためにターゲット部に水銀を供給するためのものである。水銀ターゲットを開発する上で、水銀ループを保有して試験・運転を行うことは、設計データを効率的に取得できるのみならず、運転・保守の経験者を育成し、かつ、それらに係わるノウハウを蓄積して、実機の運転に備えることができるという利点を有している。熱流動試験が可能な規模の水銀ループはRiga（ラトビア）、Ben-Gurion大学（イスラエル）を含めて数カ所に存在するのみで、日米欧は保有していない。このため、ループ機器特性、運転及び保守に関する注意点など水銀ターゲットシステムの設計、製作、運転、保守において重要な情報の入手が容易ではない。この観点からも水銀ループを保有することは極めて重要である。

そこで、水銀ループの検討に当たっては、ループそのものが試験体であることを前提にして次の方針で検討を行うこととした。

- ・水銀ループそのものが試験体である。このため、
 - －各種ループ機器開発が円滑にできるようように機器の取付け・交換を容易にし、供用後検査のために機器の洗浄装置をループに併設する。
 - －データは、ループ運転・停止中を問わずコンピュータを利用して定期的に自動記録・保存する。
- ・水銀ループにはターゲット模擬試験部を設置するが、ターゲット模擬試験部は各種材料及び溶接部の材料試験を行うことができるようにしておく。
- ・水銀ループの規模は、中性子科学計画の第I期計画である陽子ビーム電流1mAに対するターゲットの開発が可能なように、ターゲット模擬試験部で最高1.5MWの熱入力を与えることとする（案）。
- ・水銀ループは、
 - －小型で運転・制御が容易なこと（運転員一名で試験運転が可能なこと）
 - －連続運転が可能なこと（機器安全保護対策を行うこと）
 にし、また、
 - －配管内の流速は材料試験部を除いて1m/s以下にする。
 - －試験部の入口温度を一定に調節する予熱器を設置する。
- ・漏えい防止対策、水銀蒸気除去対策等を施す。

この方針の下で水銀ループを検討することとした。ループは基本的に、ターゲット模擬試験部、循環ポンプ、冷却器（熱交換器）、膨張ポット（サージタンク）、水ドレンタンク

ク、水銀純化装置に加えて、流量計、圧力計、熱電対等の計測機器、試験部入口温度制御用の予熱器等から構成され、これらは配管及びバルブを介して接続される。循環ポンプは水銀との接触部が遠心ポンプよりもはるかに少なく、密封性に優れる電磁ポンプを採用し、流量計は電磁流量計を用いることとする。付帯設備として、熱交換器用冷却水設備、運転制御装置、データ収録装置、電源設備等を接続する。ループの基本構成は、水銀を流体とすることを除けば、水、ガスループとほぼ同じである。

基本構成から具体的な寸法を検討するには、ターゲット模擬試験部での入熱量を定めておく必要がある。ターゲット模擬試験部での入熱量は上述したように最高1.5MWとする。また、予熱器での入熱量は余裕をみて0.3MWとした。予熱器での入熱量については今後さらに検討する計画である。

4. 2 系統・機器の仕様の検討

4. 2. 1 1次側水銀ループの基本仕様

本検討では、1次側のコールドレグ温度を70℃とし、ホットレグ温度は水銀の沸点（357℃）に対して相当な余裕を見込んで100℃に設定する。

(1) 水銀ループ配管の基本仕様

① 水銀流量

$$\begin{aligned} \text{流量 } W &= Q / C_p / \Delta t \\ &= 1.8 \times 10^3 \times 860 / 0.0329 / (100-70) \\ &= 1568 \text{ ton/h} = 117.1 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\gamma = 13.39 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \text{ at } 85^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

1.8MWの除熱量に対して、必要流量は1568ton/h(117.1m³/h)となる。

② 流速及び配管口径

上記の水銀流量で管内流速を1m/sにするのに必要な配管の内径 d_i は、

$$d_i = \left((117.1 / 3600 / 1) \times 4 / \pi \right)^{1/2} = 0.204 \text{ m}$$

となり、流速を1m/s以下にするには配管内径を204mm以上にする必要がある。

そこで、標準の配管口径をパラメータにして管内流速を計算した。

(a) 10B-sch40 (外径 267.4mm、内径 248.8mm、肉厚 9.3mm)

$$\begin{aligned} V &= W / 3600 / (\pi d_i^2 / 4) \\ &= 117.1 / (900 \times \pi (248.8 \times 10^{-3})^2) \\ &= 0.67 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(b) 8B-sch40 (外径 216.3mm、内径 199.9mm、肉厚 8.2mm)

$$\begin{aligned} V &= W / 3600 / (\pi d_i^2 / 4) \\ &= 117.1 / (900 \times \pi (199.9 \times 10^{-3})^2) \end{aligned}$$

$$=1.04 \text{ m/s}$$

③ 圧力損失

配管材質をステンレス鋼として、各部の配管抵抗を等価配管長150mとして計算する。このとき、管内面の表面粗さ ϵ を一般的な引抜き管の値である $15 \mu\text{m}$ とし、また、10%の余裕を見込むこととする。

(b) 10B-sch40 の場合

- $\epsilon / d = 15 \times 10^{-6} / (248.8 \times 10^{-3}) = 6.0 \times 10^{-5}$
- $\nu = 9.72 \times 10^{-8} \text{ (m}^2/\text{s at } 85 \text{ }^\circ\text{C)}$
- $Re = Vd / \nu = 0.67 \times 248.8 \times 10^{-3} / 9.72 \times 10^{-8} = 1.7 \times 10^6$
- 摩擦損失係数 $\lambda = 0.0125$ (ムーディ線図より)

$$\begin{aligned} \Delta P &= \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V^2 \times 1.1 \\ &= 0.0125 \times (150/248.8 \times 10^{-3}) \times (13.39 \times 10^3 / 2 \times 9.8) \times 0.67^2 \times 1.1 \\ &= 0.25 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(a) 8B-sch40 の場合

- $\epsilon / d = 15 \times 10^{-6} / (199.9 \times 10^{-3}) = 7.5 \times 10^{-5}$
- $\nu = 9.72 \times 10^{-8} \text{ (m}^2/\text{s at } 85 \text{ }^\circ\text{C)}$
- $Re = Vd / \nu = 1.04 \times 199.9 \times 10^{-3} / 9.72 \times 10^{-8} = 2.1 \times 10^6$
- 摩擦損失係数 $\lambda = 0.0125$ (ムーディ線図より)

$$\begin{aligned} \Delta P &= \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V^2 \times 1.1 \\ &= 0.0125 \times (150/199.9 \times 10^{-3}) \times (13.39 \times 10^3 / 2 \times 9.8) \times 1.04^2 \times 1.1 \\ &= 0.76 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 循環ポンプの検討

液体金属の循環ポンプは、機械式ポンプと電磁ポンプが考えられるが、密封性に優れる電磁ポンプについて技術的成立性の検討を行った。以下に検討の概要を記す。

(a) 検討条件

水銀ループの配管径を10Bとして、以下の基本仕様で電磁ポンプの仕様を検討した。

- 流体温度 : 70 ~ 100°C
- 運転温度 : 85 °C
- 流量 : 117.1 m³/h
- 吐出圧力 : 0.25 kg/cm²
- 使用雰囲気 : 大気 (ポンプ周囲雰囲気)

(b) 検討結果

電磁ポンプの特性曲線をFig. 4.1に、外形図をFig. 4.2に示す。仕様は以下のとおりである。なお、電磁ポンプは力率が悪いので、3相進相コンデンサを接続する。

| | |
|-----------|---------------------------------|
| 型式 | : 環状流路型リニア誘導電磁ポンプ |
| 電磁ポンプダクト | : 10B |
| ダクト予熱 | : 設置しない |
| 電源 | : 三相、220V 又は 440V (50Hz)、130kVA |
| ポンプ駆動電力 | : 95 kW |
| 進相コンデンサ容量 | : 5000 μ F (3相) |
| 水銀への入熱量 | : 60 kW |
| 最大印加電圧 | : 320V |

水銀流量は、スライド式電圧調節器やIVRにより電磁ポンプへの印加電圧を調節することによって流量を容易に調節することができる。

(c) 特記事項

- ・バルブによる締切り運転或いは極低流量運転では水銀の温度が大きく上昇するため、沸点に達する可能性がある。バルブ締切り運転を防ぐために、吐出し圧の上昇を検知して電磁ポンプ、予熱器等の電源を遮断するインターロックを設けるが、その他に逃し弁等から成るバイパスラインを設置することを合理化と併せて検討する必要がある。
- ・材料は、オークリッジ国立研究所等で使用を検討しているSUS316を第一候補とする。

(3) その他機器の検討

(a) 機器高低差

水銀の比重量は室温(at 20°C)で13545kg/m³に達する。これは水や金属ナトリウムの10倍以上になり、水銀の水頭圧はループ設計上の重要な因子となる。

水銀ループへの水銀の充填を金属ナトリウムループと同じ真空引きによる方法で行うとすると、完全真空でも約76cm上方までしか充填できない。そこで、本検討においては、ドレンタンクの水銀を膨張ポットまで真空引きで充填することを想定して機器仕様を設定する。このとき、ドレンタンク内面下端から膨張ポット液位までを70cmの高低差で構成することとする。機器高低差の概略を以下に示す。

| | | | |
|------------|---|---|-------|
| ① 膨張ポット液位 | } | } | 10 cm |
| ② 膨張ポット下端 | | | |
| ③ 配管上端 | } | } | 27 cm |
| ④ 配管下端 | | | |
| ⑤ ドレンタンク上端 | } | } | 20 cm |
| ⑥ ドレンタンク下端 | | | |

} ギャップ 5 cm
 } ギャップ 8 cm

(b) ドレンタンク

① ドレン容量

- ・配管 : 配管長を 70 m として、 $V_1 = \pi/4 \times 0.24882 \times 70 = 3.4 \text{ m}^3$
 - ・冷却器 : 別途検討のとおり、 $V_2 = 0.12 \text{ m}^3$
 - ・その他機器：温度制御用加熱器、純化装置、膨張ポット等 $V_3 = 0.4 \text{ m}^3$
- 上記の容量の合計は約 4 m^3 となる。ドレンタンクにはこれらをすべて収納するため、最低限 4 m^3 のタンク容量が必要である。

② タンク形状

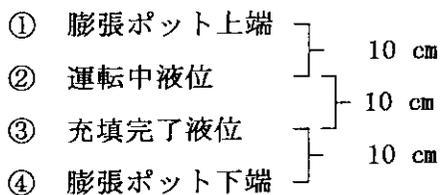
4 m^3 のタンク容量と、機器高低差の条件からタンクから吸い上げる水銀高さを20cm程度にするとすると、ドレンタンクは幅5m、奥行き5m、深さ0.25m程度の扁平な構造になる。

(c) 膨張ポット

ループの全インベントリの水銀が室温 (20°C) から100°Cになったと仮定すると、水銀の体膨張率 $0.181 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ (理科年表) から、体積膨張分は

$$0.181 \times 10^{-3} \times (100 - 20) \times 4 \text{ m}^3 = 0.06 \text{ m}^3$$

となる。このとき、膨張ポット内液位をナトリウム等の液体金属ループの経験を基にして以下のように想定する。



これを基にして、ポットは、内径が $\phi 90\text{cm}$ 、高さが30cmとする (案)。

ただし、急激に熱が投入される場合は、局所的に急激に熱膨張を生じ、これにより圧力波が発生する可能性がある。圧力波の発生及び伝播挙動を解析してポットの容量及び配置条件を決定する必要がある。

(d) 予熱器

試験体入口部の温度を一定に制御するため、電気加熱方式の予熱器を設ける。水銀の加熱を効率良く行うため、冷却材侵漬型の予熱器とする。

電気ヒータの出力密度は一般的に数 W/cm^2 以下であるが、原子炉の模擬燃料要素等には100~200 W/cm^2 の高出力密度ヒータが使用されており、なかには335 W/cm^2 というのものもある。そこで、ヒータの外径を一般的な径である10mm程度とし、300 kWの発熱を得るための総発熱長さを試算する。発熱密度を100 W/cm^2 とすると、必要有効発熱長さは約10mとなる。1本のヒータの発熱長を50cmとした場合には20本、発熱長が1mの場合には10本のヒータが必要となる。

容器の寸法を決めるに当たっては、発熱密度、ヒータ間の冷却材流路ギャップ、有効発熱長さ及び容器直径の制限を考慮して決定する。水銀の比重量による水頭圧を抑

えるために、横置型の円筒容器に加熱ヒータを組み込む方式とする。発熱長が1 mの場合、ヒータ間の冷却材流路ギャップをヒータ直径と同じにすると、ヒータ挿入部分の容器内径は10数cm程度に抑えることができる。

(e) 水銀純化装置

水銀の純化は真空蒸留法を第一候補とする。99.9999%までの純度は、蒸留装置を多段に設けること、技術的に可能である。ただし、ループをSUS材で構成する場合、99.9999%まで純化してもループに充填した時点でSUS材の成分が水銀中に溶解し、純度は99.99%まで低下する。ループ中の水銀純度を99.9999%に維持するためには、水銀接触部には石英ガラスやセラミックスを使用する必要がある。水銀純化装置については、超高純度の達成とともに、低コスト、操作及びメンテナンスの容易性を考慮してさらに検討していく。

(f) 計測機器等

- ・温度計 : シース熱電対 (シース材質: SUS316 又は相当品)
- ・流量計 : Naループで実績のある電磁流量計を使用する。
- ・圧力計 : ダイヤフラム式(SUS製) 又はセラミックス圧電式
- ・漏洩検出器 : Naループで実績のある接触通電式を使用する。

(g) シール材

フランジ等のパッキンにバイトンゴムを使用する。

(h) 水銀蒸気の補集

水銀の補修装置は水銀キレート材を使ったフィルターと、さらなる安全確保のためにプール式の水銀補修器を設ける。

(i) バルブ

バルブは、SUS鍛造品又は高Cr鋼の鍛造品を用いる。

(j) 水銀漏えい対策設備

床はロンリウム貼りにして漏えいした水銀がピットに集まるようにし、ピットからの漏洩水銀はタンクに集める。タンク内には、アマルガムを作りやすい亜鉛又はすずの箔を散布しておく。

4. 2. 2 水銀冷却器の基本仕様の検討

試験部で昇温した水銀を冷却する冷却器についての検討結果を以下に記す。

(1) 冷却方法の検討

水銀冷却器については、空気冷却と水冷却のケースが考えられる。以下にこれらの特質について評価する。

- ・水銀は比重量が大きいいため、系統の水頭圧差を小さくして電磁ポンプの吐出圧を低

減する（小型化する）ことが望ましい。このため、系統は出来るだけ水平方向に引回し、垂直方向の引回しは高さを抑えることが重要である。この観点から、冷却器への出入口のノズルの高低差を小さくできる水冷却器が有利である。（水冷却器は500mm程度、空気冷却器は2500mm程度）

- ・空気冷却器では伝熱管が破損した場合、漏洩した水銀が冷却空气中に放散されて、水銀液滴や蒸気を含む空気が屋外に排気されるため、厳重な防護対策が必要となる。水冷却器の場合も水中に放出された水銀がクーリングタワーで放散する可能性があるため、防護対策は必要である。
- ・空気冷却器は設置面積を比較的コンパクトにできる利点はあるものの、水冷却器に設置スペースに厳しい要求がなければ、水冷却器であっても設計上問題はない。

これらのことから、水冷却器の方が適用性が高いと考えられ、以下の検討は水冷却器で行う。

(2) 水銀冷却器の基本概念の検討

水銀冷却器は、水銀の水頭圧を押さえるために横置型のU字管型熱交換器とし、胴側に水銀を流し、管側に冷却水を流す構造とする。設計に当たっては、1次水銀側のホットレグ/コールドレグの温度条件を100°C/70°Cとし、管側の冷却水の温度条件は、入口/出口温度を35°C/50°Cとする。

Fig. 4.3に、伝熱管本数に伴う熱交換器の胴部外形をパラメータとして、必要伝熱管長さが必要伝熱面積のサーベイ計算から整理した熱交換器内の水銀容量と伝熱管内水側流速の関係を示す。水銀容量を低減する観点からは熱交換器胴径は小さいほど良いが、伝熱管内を流れる水の最大流速は経験的に3.5m/s（熱交換器便覧）とする必要がある。この条件を満たす冷却器の主要仕様及び構造概念図をTable 4.1及びFig. 4.4に示す。冷却器は、伝熱管の外形は25.4mm、管束部の有効伝熱長さ45,000mmのU字管34本（有効伝熱面積24.6m²）を直径が0.4m、長さが約5.7mの容器に収納し、これに長さ約0.5mの水側のプレナム部を接続した構造である。

4. 2. 3 系統の構成概念及び基本インターロックの検討

上記の検討結果を基にして作成した系統の構成概念をFig. 4.5に示す。系統内の水銀は電磁ポンプにより循環し、ターゲット模擬試験部で昇温した水銀の体積膨張は膨張ポットで吸収する。また、運転停止中はドレンタンクに水銀を収納し、運転に際しては膨張ポットから真空引きをして系統内に水銀を充填する。膨張ポット及びドレンタンクには不活性ガスをカバーガスとして充填し、圧力の調整を行う。昇温した水銀は冷却器で冷却する。冷却器への冷却水は、クーリングタワーに設けた貯水槽（水タンク）から冷却器へポンプで送られ、冷却器からの温水はクーリングタワーで冷却されて貯水槽に戻す。水の循環流量は約1×10⁵kg/hである。

また、系統の主要部分には温度、圧力、液位計測の計測装置を設置し、制御装置及びデータ収録装置に接続して系統の運転制御及び監視、データを取得・記録する。なお、重要な場所には、水銀の漏洩検知のためにリーク検知器を設置し、漏洩を常時監視する。各機器の主要仕様をTable 4.2に示す。

この構成のループの基本保護動作（インターロック）は、財産保護の観点から、以下に記す冷却系機器の制御不良等を中心にし、加熱源であるヒータを自動的に停止して、ループ温度を室温まで低下させる。

- ・予熱器ヒータの制御不良
- ・水銀流量制御不良（電磁ポンプトリップ）
- ・冷却水流量制御不良（冷却水ポンプトリップ）
- ・クーリングタワー異常（冷却水ポンプトリップ）
- ・電磁ポンプ異常（バルブ締切り運転等）
- ・電源系不良（常用電源電圧低）他

これに基づき、主要な保護動作をまとめたインターロック表をTable 4.3に示す。なお、本表には各機器の補機インターロックは含めていない。今後、系統設計、制御計画、補機インターロック等の詳細化を進めつつ、インターロックを詳細化する。

4. 2. 4 今後の検討課題

水銀ループの最適化と合理化を図るため、以下の検討を一層進める。

・水銀ループの配置・構成

水銀インベントリーを最小化、すなわち、ループ体積を最小化する。このため、
 ー電磁ポンプを小型化するため、ループの高低差をできるだけ小さくして水銀の水頭圧を抑制する。

ー冷却器、予熱器等をより小型化する。

また、保守点検が容易で、かつ、漏洩した水銀が周囲に放散しない構造とする。

- ・ループ機器の長寿命化を目指して、耐食性のある低コストな材料を探索する。
- ・機器構造の詳細化、とくに、膨張ポットへの要求条件の具体化（衝撃は吸収の要否を含む）と仕様の検討をさらに進める。また、電磁ポンプについては水銀の濡れ性がポンプ流量に大きく影響するので、濡れ性を考慮した仕様を検討する。
- ・水銀中の不純物の放射化計算を行い、必要な水銀の純度管理要求条件を明確にする。それによって、純化装置の構成及び運転シーケンスを具体化する。
- ・水銀インベントリーを低減するため、水銀冷却器等の機器の小型化をはかる。
- ・水銀ループの運転シーケンス（昇温速度等）を具体化し、必要な制御システムを構築する。
- ・水銀ループの事故事象（電磁ポンプのバルブ締切り運転等）を選定して安全対策を明確にし、ループの検討に反映する。

Table 4.1 Specification of water cooler

| 項 目 | 仕 様 | 単 位 |
|-------------------------|---------------|--------------------|
| 型 式 | 横置U字管型 | — |
| 基 数 | 1 | 基 |
| 設 計 条 件 | | |
| 交 換 熱 量 | 1. 8 | MW t |
| 使 用 流 体 | | |
| 胴 側 | 水 銀 | — |
| 管 側 | 淡 水 | — |
| 運 転 条 件 | | |
| 運 転 流 量 水 銀 側 | 1. 5 7 | $\times 10^6$ kg/h |
| 淡 水 側 | 1. 0 3 | $\times 10^6$ kg/h |
| 運 転 温 度 水 銀 側 入 口 / 出 口 | 1 0 0 / 7 0 | °C |
| 淡 水 側 入 口 / 出 口 | 3 5 / 5 0 | °C |
| 設 計 結 果 | | |
| 有 効 伝 熱 面 積 | 2 4. 6 | m ² |
| 管 束 部 長 さ | 4. 5 | m |
| 伝 熱 管 寸 法 | | |
| 伝 熱 管 外 径 / 肉 厚 | 2 5. 4 / 2. 0 | mm |
| 伝 熱 管 本 数 | 3 4 | 本 |
| 伝 熱 管 配 列 ピ ッ チ | 4 0 | mm |
| 概 略 寸 法 | | |
| 全 長 | 5. 7 | m |
| 胴 径 | 0. 4 | m |
| 材 質 伝 熱 管 | SUS 3 1 6 | — |
| 胴 | SUS 3 1 6 | — |

Table 4.2 Specification of mercury test loop

| 項 目 | 数 量 | 仕 様 | |
|----------|------------------|--------------------|--------|
| | | 様 式 | 材 質 |
| 水 銀 | 4 m ³ | 99.9999 % | ---- |
| 配 管 系 | 70m | 10B sch40 | SUS316 |
| 循環ポンプ | 1 台 | 環状流路型リア誘導電磁ポンプ | SUS316 |
| 膨張ポット | 1 基 | φ 50 cm × 高さ 30 cm | SUS316 |
| ドレンタンク | 1 基 | 5 m × 5 m × 0.2m | SUS316 |
| 温度計 | 一式 | 熱伝対型 (一般仕様) | ---- |
| 圧力計 | 一式 | ダイヤフラム式 (一般仕様) | SUS316 |
| 漏えい検出器 | 一式 | 接触通電式 | ---- |
| 流量計 | 1 基 | 電磁流量計 | SUS316 |
| バルブ | 一式 | 一般仕様 | SUS316 |
| 水銀蒸気補集装置 | 一式 | 一般仕様 (規格品有り) | ---- |
| 床貼り | 一式 | ロンリウム貼り | ---- |
| シール材 | 一式 | バイトン | ---- |

Table 4.3 Main interlock of mercury test loop

| 項 目 | トリップ条件 | | 動 作 |
|--------------|--|------------------|---|
| 予熱器ヒータの制御不良 | 予熱器出口温度 | 高 | ・予熱器ヒータ電源 off ・ターゲット模擬試験部加熱電源off |
| 水銀流量制御不能 | 水銀流量 水銀流量 | 低 高 | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| 冷却水流量制御不良 | 冷却水流量 冷却器入口水温度 冷却器出口水温度 冷却器出口水銀温度 | 低 高 高 高 | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| クーリングタワー異常 | 冷却水ポンプトリップ | | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| 循環ポンプ異常 | ポンプ印加電圧 ポンプ印加電圧 吐出し圧 (バルブ締切り運転) | 低 高 高 | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| 膨張ポットの水銀液位異常 | 液位 液位 | 高 低 | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| ドレンタンクの液位異常 | 液位 | 高 | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| 水銀ループの漏洩 | 漏洩検知 | | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |
| 電源系等不良 | 常用電源電圧 | 低 | ・予熱器ヒータ電源 off ・模擬試験部電源 off ・循環ポンプ電源 off |

Hg温度: 70~100°C

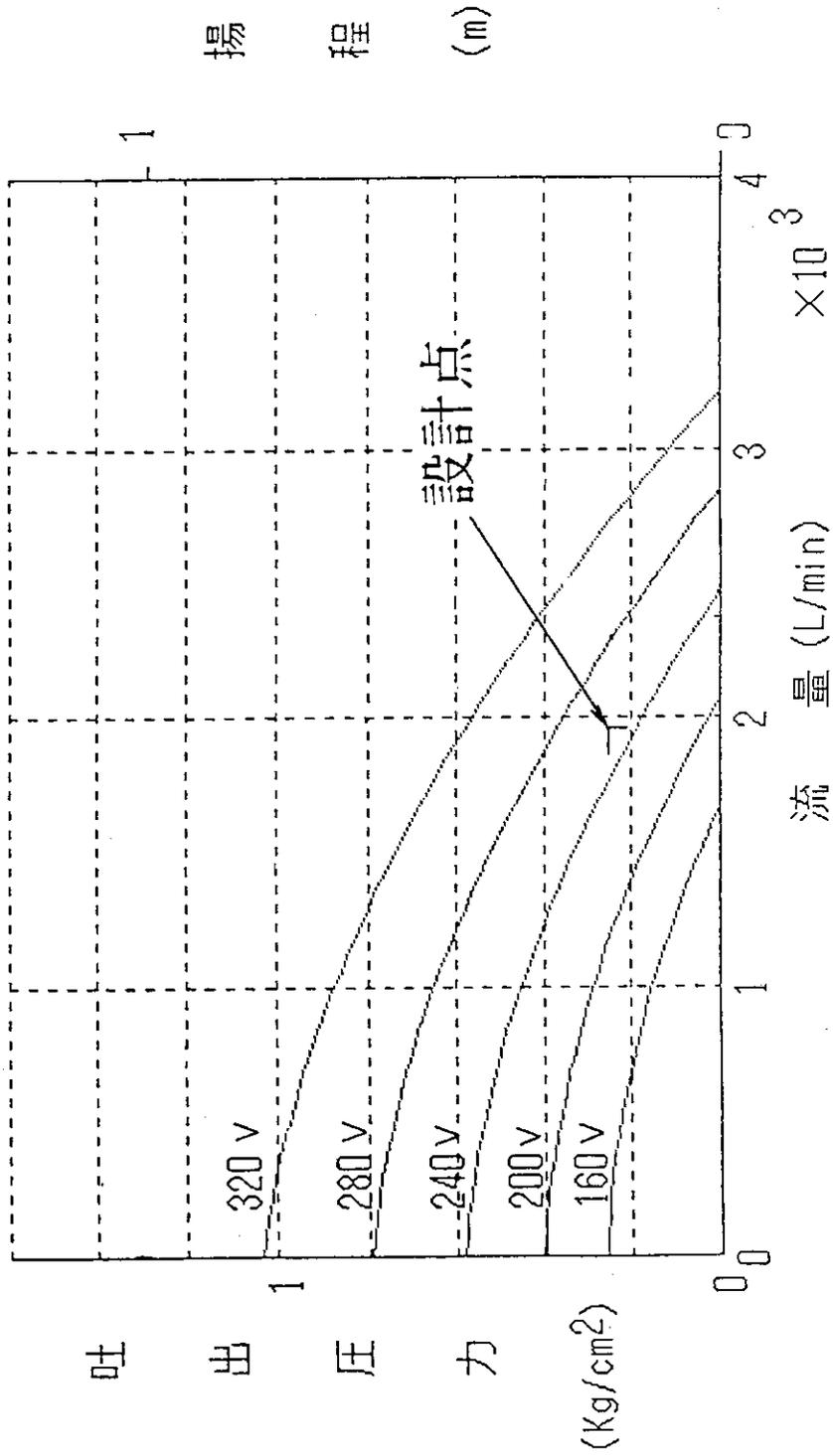
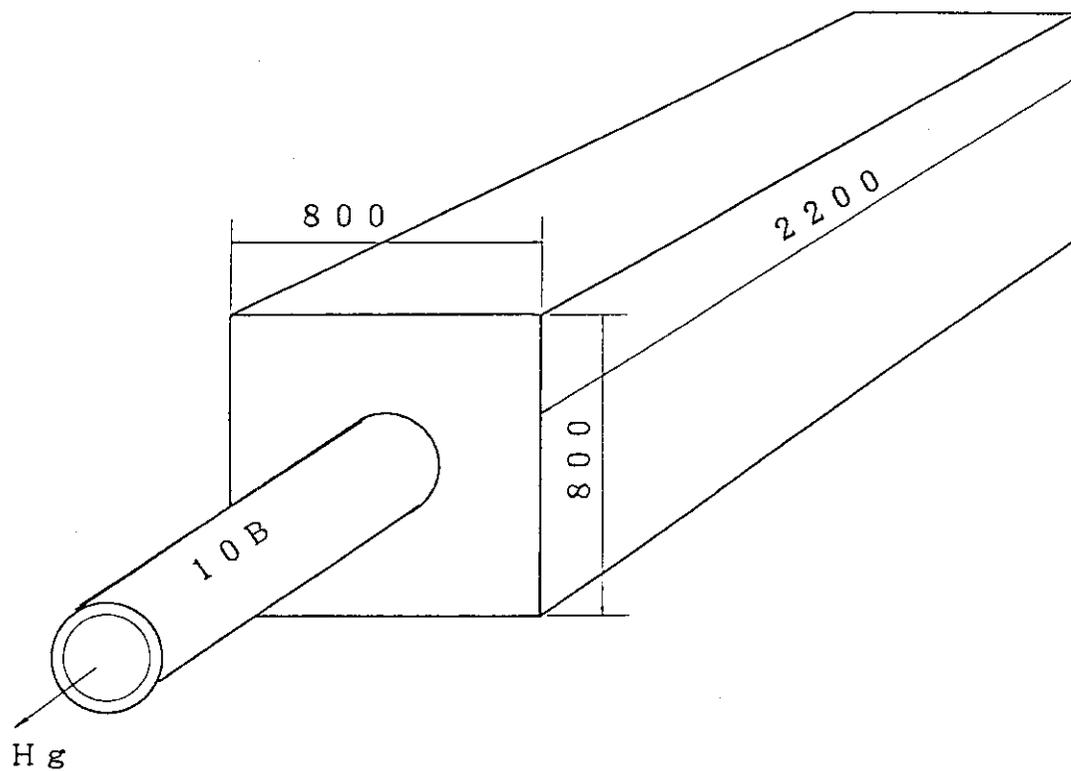


Fig. 4.1 Relationship between flow rate and discharge pressure of electromagnetic pump



ポンプ型式：環状流路型リニア誘導電磁ポンプ

Hg温度：70～100℃

Fig. 4.2 Configuration of electromagnetic pump

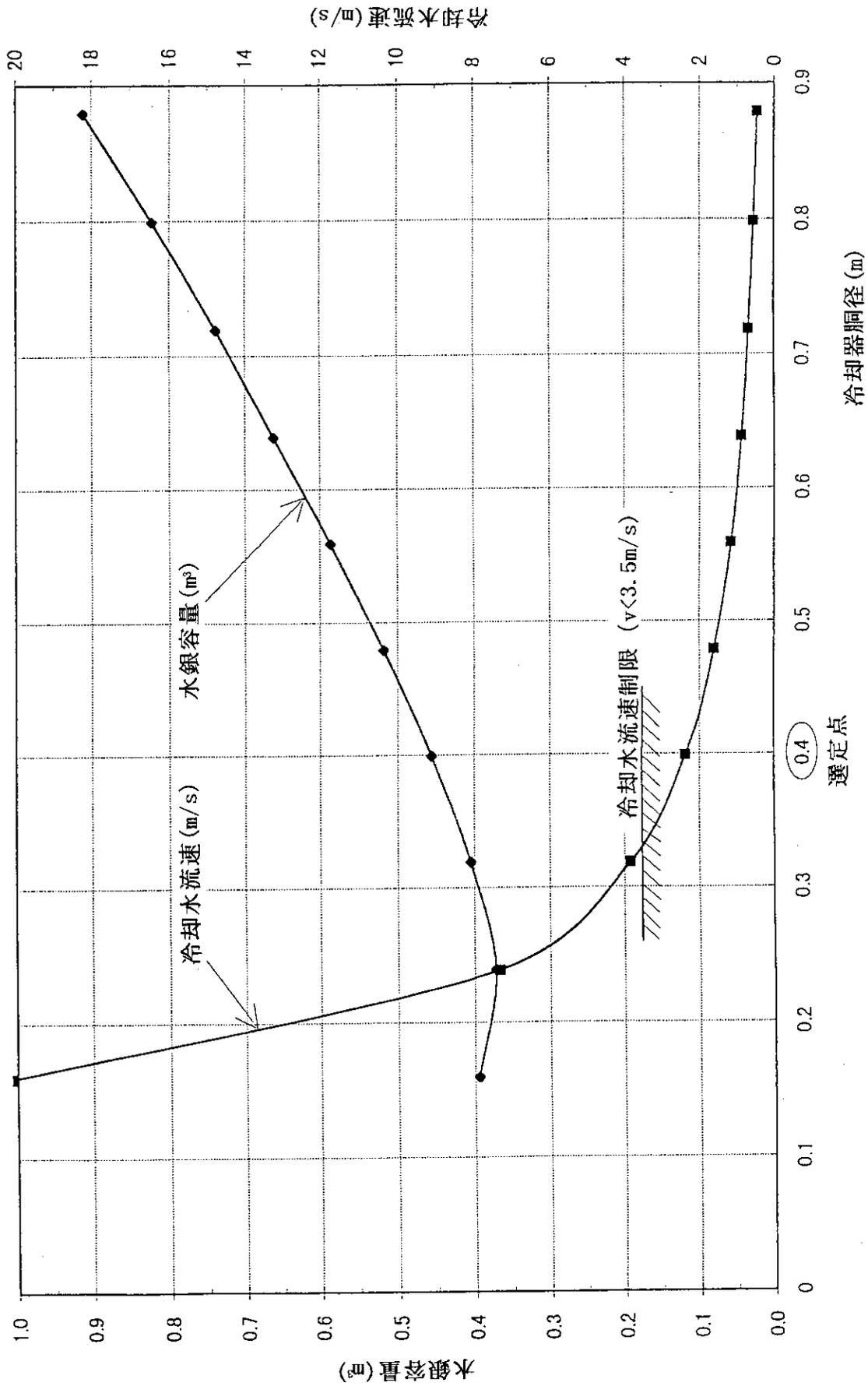


Fig. 4.3 Cooling performance of water cooler

| 部品表 | | | | |
|------------|-------------|-----------|----------------|--------------|
| 符号 ITEM | 名称 TITLE | 数量 No. | 材質 MATERIAL | 備考 REMARK |
| 1 | 淡水銅 | 1 | SUS316 | |
| 2 | 水銀銅 | 1 | SUS316 | |
| 3 | 管板 | 1 | SUS316 | |
| 4 | 伝熱管 | 34 | SUS316 | U字管式 |
| 5 | バツフル板 | 一式 | SUS316 | |

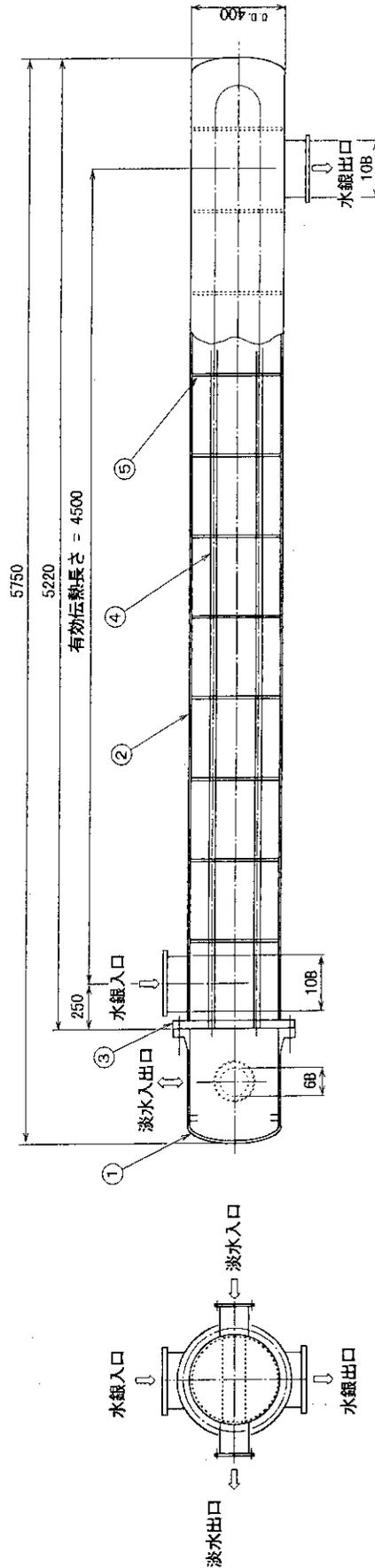


Fig. 4.4 Schematic drawing of water cooler

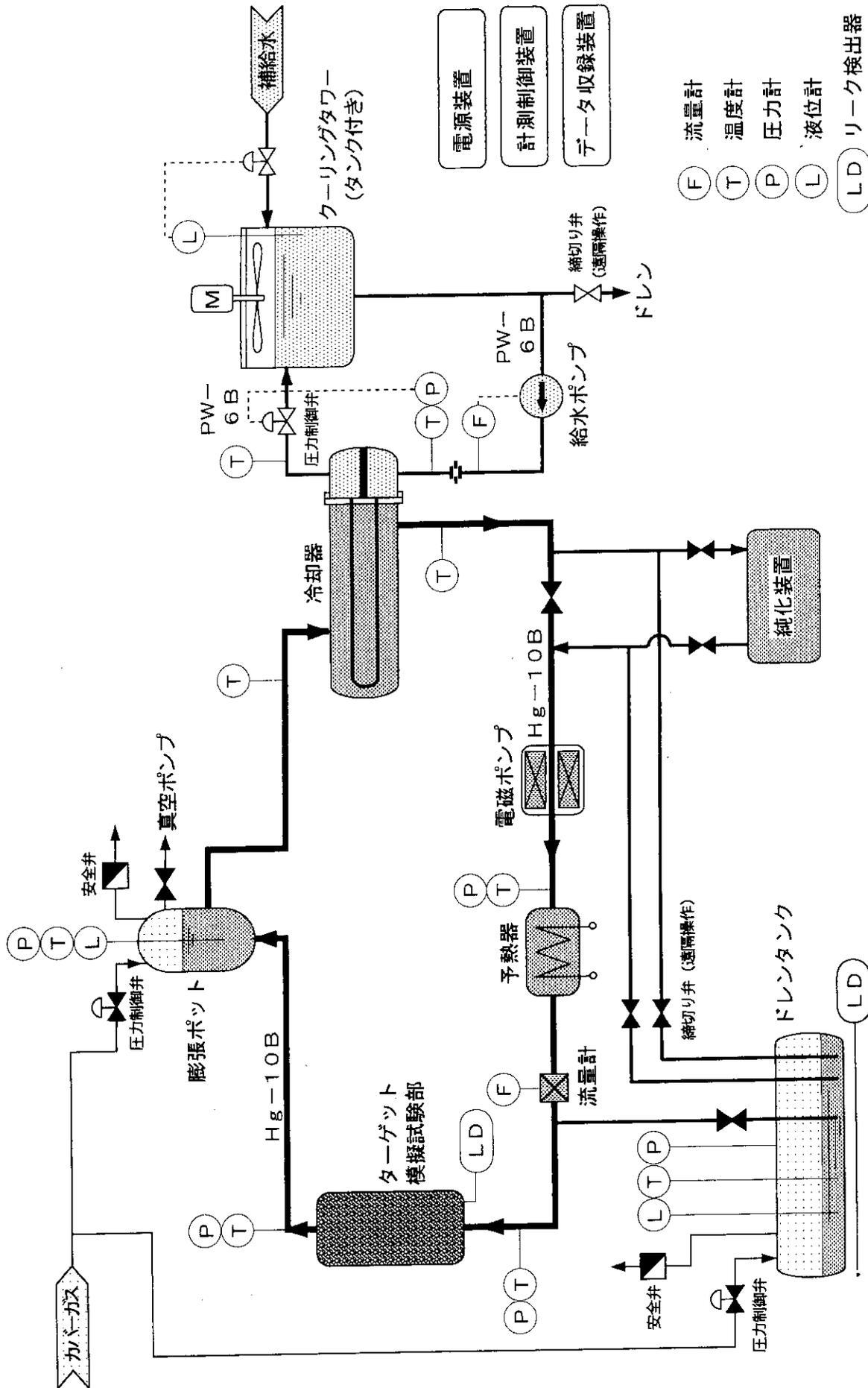


Fig. 4.5 Schematic diagram of mercury test loop

5. 結 言

大強度陽子加速器システムによる5MW規模の中性子散乱用ターゲットとして、液体金属ターゲットが提案されている。本検討では、液体金属ターゲットとして世界的に注目されている水銀について、今後のターゲット設計のために物性値を整理し、水銀の取り扱い方法等の調査、除熱特性等の検討を行い、これらを基にしてターゲット設計データを取得するための大型水銀ループの概念検討を行った。ループは中性子科学研究計画の第I期に相当する1.5MW規模のもので、試験体部分から1.5MWの入熱があり、また、温度制御用予熱器発熱から0.3MWの入熱があるものとして、ターゲット部での温度上昇、配管流速等について評価し、系統構成、流速を1m/s以下にするための配管径、電磁ポンプ、冷却器等の概念仕様を定めた。また、本検討を通して、耐食性材料や構造の最適化などターゲット及びループの課題を抽出した。今後、抽出した課題の解決を図りつつ、ループの最適化と合理化を図っていく予定である。

謝 辞

本検討を実施するに当たり、粒子線利用研究室長安田秀志氏から多大な支援を受けた。また、本報告をまとめるに当たっては、核熱利用研究部付・次長武藤 康氏から多くの助言を得た。ここに記して謝意を表します。

5. 結 言

大強度陽子加速器システムによる5MW規模の中性子散乱用ターゲットとして、液体金属ターゲットが提案されている。本検討では、液体金属ターゲットとして世界的に注目されている水銀について、今後のターゲット設計のために物性値を整理し、水銀の取り扱い方法等の調査、除熱特性等の検討を行い、これらを基にしてターゲット設計データを取得するための大型水銀ループの概念検討を行った。ループは中性子科学研究計画の第I期に相当する1.5MW規模のもので、試験体部分から1.5MWの入熱があり、また、温度制御用予熱器発熱から0.3MWの入熱があるものとして、ターゲット部での温度上昇、配管流速等について評価し、系統構成、流速を1m/s以下にするための配管径、電磁ポンプ、冷却器等の概念仕様を定めた。また、本検討を通して、耐食性材料や構造の最適化などターゲット及びループの課題を抽出した。今後、抽出した課題の解決を図りつつ、ループの最適化と合理化を図っていく予定である。

謝 辞

本検討を実施するに当たり、粒子線利用研究室長安田秀志氏から多大な支援を受けた。また、本報告をまとめるに当たっては、核熱利用研究部付・次長武藤 康氏から多くの助言を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 日本物性学会編：「熱物性ハンドブック」、養賢堂、pp. 96-104(1990).
- (2) 日本機械学会編：「技術資料 流体の熱物性値集」、日本機械学会、pp. 193-194 (1983).
- (3) United States Atomic Energy Commission: "Reactor Handbook Engineering", McGRAW-HILL, pp. 253-276 (1955).
- (4) Edited by J. G. Yevick: "FAST REACTOR TECHNOLOGY: Plant Design", M. I. T. Press, pp. 16-84.
- (5) G. S. Bauer: "MERCURY AS A TARGET MATERIAL FOR PULSED (FAST) SPALLATION NEUTRON SOURCES SYSTEMS", 13th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XIII), pp. 547-558(1995).
- (6) 「化学大辞典」、共立出版、A-5~7(1980).
- (7) 日本機械学会編：「機械工学便覧」、日本機械学会、基礎編A5-5~8(1993).
- (8) "CORROSION DATA SURVEY", SHELL Dev. Co., (1960).
- (9) 喜多村正久、近藤雅臣、瀧澤行雄、藤井正美、藤木素士：「水銀」、講談社、pp. 42 (1977).
- (10) "MANUSCRIPT FOR CHAPTER 5 OF THE 1970 EDITION OF THE SODIUM AND NaK SUPPLEMENT TO THE LIQUID METALS HANDBOOK", BNL-11936R, pp. 71(1969).
- (11) 青木成文：「原子炉熱工学」、養賢堂、pp. 107-111(1969).
- (12) 高田 弘：私信
- (13) 「管路・ダクトの流体抵抗」、日本機械学会、pp. 25(1980).