



テストブランケット側壁の冷却水流量配分特性

Characteristics of Water Flow Distribution in TBM Side Wall

吉河 朗 谷川 尚 関 洋治 廣瀬 貴規
鶴 大悟 江里 幸一郎 横山 堅二 西 宏
鈴木 哲 丹澤 貞光 本間 隆 榎枝 幹男

Akira YOSHIKAWA, Hisashi TANIGAWA, Yohji SEKI, Takanori HIROSE, Daigo TSURU
Koichiro EZATO, Kenji YOKOYAMA, Hiroshi NISHI, Satoshi SUZUKI, Sadamitsu TANZAWA
Takashi HONMA and Mikio ENOEDA

核融合研究開発部門
核融合エネルギー工学研究開発ユニット

Division of Fusion Energy Technology
Fusion Research and Development Directorate

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

テストプランケット側壁の冷却水流量配分特性

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

核融合エネルギー工学研究開発ユニット

吉河 朗※、谷川 尚、関 洋治、廣瀬 貴規、鶴 大悟、江里 幸一郎、横山 堅二、
西 宏、鈴木 哲、丹澤 貞光、本間 隆、榎枝 幹男

(2009年12月18日 受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)では、固体増殖水冷却方式のテストプランケットモジュール(TBM)の開発に取り組んでいる。TBMは低放射化フェライト鋼(F82H)製の箱型の筐体を持ち、箱を構成する6面の板には円形もしくは矩形の冷却管を内蔵する設計としている。側壁内の冷却流路は、2本の母管の間を複数の枝管で平行に接続する管路網(平行多流路)としているため、各枝管を流れる冷却水には流量の分布が生じると予想される。本研究では、平行多流路における流量分布を予測し、TBMの使用条件において構造材料を使用制限温度以下に保持するために必要となる管路網を設計することを目的とする。

はじめに、1次元熱計算により構造材の最高温度を算出し、必要となる冷却流量を評価した。次に、圧力損失計算に基づく簡易評価により平行多流路における流量の分布を予測し、必要な流量が得られるような管路網を設計した。塩化ビニル管を用いた試験体を用い、流量分布を測定し、設計の妥当性を確認した。この設計に基づき、F82H 製の実規模試験体を製作し、流量分布と圧力損失とを計測した。枝管における流量の低下は最大でも平均流量の12%であり、除熱の観点からは十分に余裕があることを確認した。また圧力損失についても、計算結果とよく一致することを確認した。

これらの結果から、TBMの側壁における冷却管路網について、除熱の観点から必要となる流量を確保するための設計を確立することができた。

Characteristics of Water Flow Distribution in TBM Side Wall

Akira YOSHIKAWA^{*}, Hisashi TANIGAWA, Yohji SEKI, Takanori HIROSE, Daigo TSURU,
Koichiro EZATO, Kenji YOKOYAMA, Hiroshi NISHI, Satoshi SUZUKI, Sadamitsu TANZAWA,
Takashi HONMA and Mikio ENOEDA

Division of Fusion Energy Technology,
Fusion Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received December 18, 2009)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been performing the development and design of Water-cooled ceramic/Be type test blanket module (TBM). The TBM has a box structure that consists of six plates, and circular or rectangular cooling flow channels are built in the plates. In the side wall, parallel flow channels are considered. Two parallel large channels that act as a manifold are connected by small parallel channels. In the cooling channels structure, the flow distribution probably arises from the pressure drop in the channels. The purpose in this study is to clarify the water flow distribution in the side wall and design the cooling channels structure so that structural material of the side wall can be kept under the allowable temperature.

The calculation of maximum temperature of the structural material is performed by a one dimensional thermal calculation, and the minimum flow rate of the coolant to keep the structural material under the allowable temperature is estimated. The flow distribution among parallel flow channels is estimated by the calculation of the pressure drop, and then the cooling channels structure is designed. The design is verified by the water flow experiment using the mockup made of the vinyl chloride pipe. For the verified design, the mockup made of F82H is manufactured, and the water flow distribution and the pressure drop are measured in the water flow experiments. The result shows that decrease rate of the water flow to the average is 12% in maximum. This is sufficient in the view of the heat removal capability. It is also confirmed that the calculated pressure drop corresponds to the measured one.

From these results, the design for the cooling channels structure in the side wall is established so that enough water flow to cool the structural material is kept.

Keywords: WCCB ITER-TBM, Side Wall, Water Distribution, F82H

^{*} Post-Doctoral Fellow

目 次

1. 序論-----	1
2. 計算方法-----	2
2.1 圧力損失の算出方法-----	2
2.2 構造材の最高温度の算出方法-----	2
3. 側壁内冷却流路の設計と確認試験-----	4
3.1 1次元熱計算による必要な冷却流量の評価-----	4
3.2 F82H 製実規模試験体における流量分布の検討-----	4
3.3 塩化ビニル製模擬試験体を用いた流量分布測定-----	5
4. F82H 製実規模試験体による流量分布測定-----	6
4.1 実験-----	6
4.2 結果と考察-----	6
5. 結論-----	7
参考文献-----	8
付録 1 側壁の冷却に関する冷却管からの距離と核発熱の影響-----	22

Contents

1. Introduction-----	1
2. Calculation method-----	2
2.1 Pressure drop-----	2
2.2 Maximum temperature of F82H as the structural material-----	2
3. Design of cooling flow channel in the side wall and verification test-----	4
3.1 Estimation of necessary cooling flow rate by one dimensional thermal calculation-----	4
3.2 Investigation of water flow distribution in the mockup made of F82H-----	4
3.3 Measurement of water flow distribution for the mockup made of vinil chloride pipe-----	5
4. Measurement of water flow distribution for the mockup made of F82H-----	6
4.1 Experiment-----	6
4.2 Results and discussion-----	6
5. Conclusion-----	7
References-----	8
Appendix 1 Effects of the distance from cooling tube and nuclear heating for the cooling in the side wall-----	22

図表リスト

- Fig. 1-1 TBM の概略図
Fig. 3-1 冷却水量を減らした場合の温度上昇
Fig. 3-2 F82H 製試験体の模式図
Fig. 3-3 試験体における圧力損失の計算体系
Fig. 3-4 仮定した流量の変化率
Fig. 3-5 仮定した流量分布に対して計算した各経路の圧力損失 (80 L/min)
Fig. 3-6 塩化ビニル製模擬試験体の模式図
Fig. 3-7 導入水量 60 L/min 時における各枝管の流量
Fig. 4-1 導入水量 80 L/min 時における各枝管の流量
Fig. 4-2 仮定した流量分布に対して計算した各経路の圧力損失 (50 L/min)
Fig. 4-3 仮定した流量分布に対して計算した各経路の圧力損失 (60 L/min)
Fig. 4-4 仮定した流量分布に対して計算した各経路の圧力損失 (65 L/min)
Fig. 4-5 仮定した流量分布に対して計算した各経路の圧力損失 (70L/min)
Fig. 4-6 導入水量 50 L/min 時における各枝管の流量
Fig. 4-7 導入水量 60 L/min 時における各枝管の流量
Fig. 4-8 導入水量 65 L/min 時における各枝管の流量
Fig. 4-9 導入水量 70 L/min 時における各枝管の流量
Fig. 4-10 圧力損失の計算値と実験値(50 L/min)
Fig. 4-11 圧力損失の計算値と実験値(60 L/min)
Fig. 4-12 圧力損失の計算値と実験値(65 L/min)
Fig. 4-13 圧力損失の計算値と実験値(70 L/min)
Fig. 4-14 圧力損失の計算値と実験値(80 L/min)
Fig. 4-15 300 °C・15 MPa の水導入時において仮定した流量分布に対して計算した各経路の
圧力損失

- Fig. A-1 冷却管からの距離に対する構造材の最高温度
Fig. A-2 核発熱に対し構造材の温度が 550°C となる流量の計算結果

Table 1 計算および実験から予想された流量分布のまとめ

List of Figures and tables

- Fig. 1-1 Schematic of TBM
- Fig. 3-1 Rise of temperature in the case of decreased cooling water
- Fig. 3-2 Schematic of cooling channel made of F82H
- Fig. 3-3 Calculation system of pressure drops in the cooling channel
- Fig. 3-4 Assumed changing rate of water flow rate
- Fig. 3-5 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (80 L/min)
- Fig. 3-6 Schematic of cooling channel made of polyvinyl pipes
- Fig. 3-7 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 60 L/min
- Fig. 4-1 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 80 L/min
- Fig. 4-2 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (50 L/min)
- Fig. 4-3 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (60 L/min)
- Fig. 4-4 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (65 L/min)
- Fig. 4-5 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (70 L/min)
- Fig. 4-6 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 50 L/min
- Fig. 4-7 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 60 L/min
- Fig. 4-8 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 65 L/min
- Fig. 4-9 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 70 L/min
- Fig. 4-10 Calculated and experimental values in the pressure drops (50 L/min)
- Fig. 4-11 Calculated and experimental values in the pressure drops (60 L/min)
- Fig. 4-12 Calculated and experimental values in the pressure drops (65 L/min)
- Fig. 4-13 Calculated and experimental values in the pressure drops (70 L/min)
- Fig. 4-14 Calculated and experimental values in the pressure drops (80 L/min)
- Fig. 4-15 Pressure drops of each flow channel for assumed flow distribution in water of 300 °C and 15 MPa
- Fig. A-1 Maximum temperature of structural material to the distance from the cooling channel
- Fig. A-2 Calculation results of the flow rate under 550 °C in the temperature of structural material for nuclear heating

Table 1 Summary of water flow distribution estimated from calculation and measurement

1. 序論

国際熱核融合実験炉(ITER)において、増殖ブランケットを用いた試験は主要な目的のひとつとなっており、各国が独自に開発したテストブランケットモジュール(TBM)を ITER に設置し、実験することが予定されている。日本においては、日本原子力研究開発機構 (JAEA) を中心に、TBM について様々な工学研究が進められている[1-5]。JAEA が開発する TBM は、固体増殖水冷却方式を採用しており、トリチウム増殖材として Li_2TiO_3 、中性子増倍材として Be を候補材料としている。運転中に発生する核発熱を加圧水型原子炉相当の冷却水 (15MPa, 280-320°C) で除熱し、発電できるよう設計している。

Fig. 1-1 に、JAEA が開発を進めている TBM の概略図を示す。TBM は ITER の水平ポートに設置するが、図ではプラズマに対向する面を下向きに示している。コの字型に整形した、底面、プラズマ対向面、天井面を構成する部材を第一壁と呼んでいる。TBM は第一壁と側壁、後壁からなる箱型の筐体を持ち、低放射化フェライト鋼(F82H)を用いて製作する。筐体の内部に増殖材および増倍材を層状に充填し、これらの層間に冷却管を設置し、増殖材および増倍材の温度を制限温度以下に保持できるように設計している[6-8]。筐体については、第一壁には矩形の、側壁と後壁には円形の冷却管を内蔵して冷却する。第一壁は最も熱負荷が高い領域であり、多数の矩形冷却管に均一な冷却水を流すことが求められる。そのために、十分な大きさのマニフォールドを第一壁の後方に設置する。一方、側壁は第一壁ほどの熱負荷を受けないこと、トリチウム増殖の観点からなるべく小さな冷却管路網が有利であることから、側壁の内部にマニフォールドを設置することを計画している。具体的には、上下に設置した 2 本の母管 (マニフォールド) に複数の枝管を平行に接続する管路網(平行多流路)を側壁内に設置し、運転中に生じる核発熱を除熱する。母管の直径は側壁の厚さによって制限され、このために、各枝管を流れる冷却水に流量の分布が生じることが予想される。そこで本研究では、平行多流路における流量分布を予測し、TBM の使用条件において、構造材料を制限温度以下に保持するために必要となる管路網を設計することを目的とする。

はじめに、1 次元熱計算により構造材の最高温度を算出し、必要となる冷却流量を評価する。次に、圧力損失計算に基づく簡易評価により平行多流路における流量の分布を予測し、必要な流量が得られるような管路網を設計する。設計の妥当性を確認するため、塩化ビニル管を用いて模擬試験体を作成し、流量分布測定を実施する。このように確認した設計に基づき、F82H 製の実規模側壁を製作する。この実規模試験体を用いて、流量の分布と圧力損失とを計測する。実験結果と計算による予測とを比較し、予測手法および設計の妥当性について議論する。

2. 計算方法

2.1 圧力損失の算出方法 [9, 10]

圧力損失は、以下の式により算出する。

$$\Delta p = \zeta \rho v^2 / 2 \quad \cdots(1)$$

(1)式は Darcy-Weisbach の式と呼ばれ、 Δp は圧力損失(Pa)、 ρ は流体の密度(kg/m³)、 v は流体の流速(m/s)である。また、 ζ は損失係数であり管の形状に応じて設定するが、直管の場合には以下の式により求められる。

$$\zeta = \lambda l / d \quad \cdots(2)$$

式(2)において、 λ は管摩擦係数、 l は流路長(m)、 d は管の内径(m)である。レイノルズ数(Re)が 10^5 以下の場合は、 λ を以下の式により導出することが出来る。

$$\lambda = 0.3164 / \text{Re}^{0.25} \quad \cdots(3)$$

式(3)はブラジウスの抵抗公式と呼ばれ、レイノルズ数については、以下の式から求められる。

$$\text{Re} = dv\rho / \xi \quad \cdots(4)$$

式(4)において、 ξ は粘性係数(kg/m s)である。

直管以外の形状、T 字管、広がり管、狭まり管、エルボに対応する損失係数については、文献値を用いた[9]。

2.2 構造材の最高温度の算出方法

均一な核発熱密度を持つ構造に冷却管を内蔵した構造を想定したとき、冷却管から距離 x (m)離れた点の最高温度は以下に示すように算出できる。

まず、冷却管の内壁の温度を求める。冷却管への熱流束 Q (W/m²)は以下のように求められる。

$$Q = A \times V / S \quad \cdots(5)$$

A は核発熱密度(W/m³)であり、 V は計算対象の体積(m³)、 S は除熱面積(m²)である。このとき、冷却管の内壁温度 T_w (K)は、以下の式により求められる。

$$Q = h(T_w - T_a) \quad \cdots(6)$$

h は熱伝達率(W/m²K)、 T_a は冷却水温(K)である。 h は、以下の 2 式によって求められる。

$$h = Nu \times k / l \quad \cdots(7)$$

$$Nu = 0.664 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad \cdots(8)$$

l は経路長(m)、 Nu はヌセルト数、 Re はレイノルズ数であり、上述の式(4)に従い、冷却管内における流速を与えることで算出できる。また、 Pr はプラントル数であり、次式で表すことができる。

$$Pr = \zeta \times Cp \times \rho / k \quad \cdots(9)$$

この時、 ζ は動粘性係数(m^2/s)、 Cp は比熱($J/Kg K$)、 ρ は流体の密度(kg/m^3)、 k は熱伝導度(W/mK)である。以上より、水温と流速とが与えられると、冷却管の内壁温度を求めることができる。

次に、核発熱をもつ物体内の温度について、一次元の熱伝導方程式を解くことにより以下の式が得られ、冷却管より距離 x (m)離れた点の温度 $T(^{\circ}C)$ を算出することができる。

$$T = -A / k \times x^2 / 2 + Ta \quad \cdots(10)$$

3. 側壁内冷却流路の設計と確認試験

3.1 1次元熱計算による必要な冷却流量の評価

側壁を冷却するために、最低限必要となる冷却流量を評価する。側壁における熱負荷は、ほとんどが側壁自身の核発熱であり、核発熱密度はプラズマから遠ざかるに伴って指数関数的に減少する。したがって、第一壁直後の側壁部分が最も高い核発熱を持ち、ITER の条件では 8.0 MW/m^3 である [11]。一方で、第一壁と側壁とを接続することを考慮すると、側壁の冷却管はある程度第一壁との接合部から離す必要があり、ここではその距離を 22 mm と設定する。この条件で、第一壁直後の部分を構造材料の使用制限温度である 550°C 以下に保つよう、冷却流量を設定する必要がある。

TBM 全体の総熱負荷に対して、入口温度を 280°C 、出口温度を 325°C とするために、冷却水の総流量を 6.15 kg/s としている[12]。TBM は 2 つのサブモジュールからなり、各サブモジュールに 2 つの側壁があるため、1 つの側壁内を流れる流量は 1.5 kg/s となる。ここで側壁に設置する枝管を 9 本として各枝管に均等に冷却水が流れるとすると、枝管 1 本あたりの流量は 0.17 kg/s (14.1 L/min) となる。枝管の直径を 10 mm とすると流速は 3.0 m/s である。第一壁に一番近い冷却管について、核発熱と流量の関係から水温の上昇を計算すると、最高温度は 336°C となる。これらの条件を用い、2.2 節で述べた一連の式を用いて構造材の温度を計算すると、最も温度が高いのは冷却管から 30 mm 離れた点で、 497°C となる。冷却水量を減らした場合の温度上昇について Fig. 3-1 に示す。図から示されるように、冷却水量が 50% 低下した場合には、構造材の最高温度が使用制限温度である 550°C を超えることがわかった。

したがって、側壁の冷却管路網の設計については、最も第一壁に近く熱負荷が高い部分の冷却管において、冷却水量が平均流量の 50% 以下とならないことが要求される。

3.2 F82H 製実規模試験体における流量分布の検討

実際の TBM は側壁の厚さが 45 mm であるが、試験体は準備できる材料の都合から厚さを 30 mm とする[13]。枝管における流量分布を小さくするためには、母管の直径をなるべく大きくすることが有効なため、構造強度および製作性の制限内で最も大きい 23 mm とした。枝管の直径とピッチは、実機において想定している通り、それぞれ、10 mm、50 mm とした。Fig. 3-2 に実規模試験体の冷却管路を示す。試験体の大きさの制限から、枝管は 7 本とした。出入口に差圧計を設置することで、冷却水入口および出口の圧力を測定した。この試験体に冷却水を導入し、4 章で述べるように圧力損失と流量分布の測定を行う。

実機において、冷却水の条件は 15 MPa 、約 300°C 、 3.0 m/s であるが、試験体を用いた流動試験では試験装置の制限により、室温、 $150\text{--}200 \text{ kPa}$ 、流速は最大で 2.4 m/s である。この時の総流量は 80 L/min である。この実験条件を対象として、生じうる流量分布を予測する。試験体の冷却流路を模擬した計算体系を Fig. 3-3 に示す。枝管に手前から 1, 2, ..., 7 と番号を付ける。実機では、7 番が最も第一壁に近い冷却管となる。2 章で述べた計算式を用いて、各枝管を通る流路について、圧力損失をそれぞれ計算する。例えば、枝管 1 の経路の圧力損失は冷却流路(A, 1, B)の総和、枝管 7 の経路の圧力損失は冷却流路(A, a, b, c, d, e, f, 7, g, h, i, j, k, l, B)の総和として算

出する。各枝管に流れる流量を仮定した計算の結果、各経路における圧力損失が等しければ、仮定した流量分布が定常状態での流量分布に相当すると考える。仮定する流量分布は簡単のために、中央の4番には平均流量が流れるとし、手前から奥に向かって線形に流量が増加する、もしくは減少する、という条件を考慮した。Fig. 3-4 に示すように、傾きの大きさを最大の流量差の平均値に対する割合として表すこととする。この割合は、第一壁に一番近い枝管における流量変化の平均流量に対する割合と対応している。

Fig. 3-5 に、仮定した流量分布に対して計算した各経路の圧力損失を示す。圧力損失は、1番の経路の計算結果で規格化して示す。均一に流れる場合(傾き 0%)には、奥の枝管の経路ほど圧力損失が大きくなる傾向があり、手前から奥になるにしたがって枝管の流量が減少することが予想される。奥になるにしたがって流量が減少する分布に対しては、傾きが-10 ~ -15%の場合には、全ての経路の圧力損失がほぼ等しくなることが分かった。また、流量の低下が一番大きい枝管においても、流量の低下率は平均流量の 15%であったことから、前節で述べた要求値である 50%に対して十分な余裕があると考えられる。

3.3 塩化ビニル製模擬試験体を用いた流量分布測定

F82H 製の実規模の側壁試験体を製作する前に、上述の設計の妥当性を確認するために塩化ビニル管を用いて模擬流路網を作成し、流量分布を測定した。

試験に用いた塩化ビニル製模擬試験体の模式図を Fig. 3-6 に示す。市販の塩化ビニル管の最小内径が 12 mm であるため、母管の内径を 30 mm とした。平行多流路を表現するパラメータとして、枝管の断面積の合計と母管の断面積との比が使われるが、この比は、塩化ビニル製模擬試験体において 0.89 であり、F82H 製実規模試験体において 0.75 である。また、接続部品を使用する制限から、枝管のピッチが 110 mm となる点も実規模試験体と異なっている。試験体を JAEA ブランケット工学研究グループ所有の温冷水循環装置に接続し、60 L/min の条件で室温の水を導入した。各枝管の流量については、日本パナメトリクス社製の超音波流量計(PT-868)を用いて、2回ずつ測定した。

Fig. 3-7 に2回の測定結果を平均値として示す。予想された通り、手前から奥にしたがって流量が低下する傾向が見られる。しかし、最も奥の冷却管(7番)については、全体の傾向から大きく外れ、流量が大きいことが示された。これは、接続部品の制限から7番の経路については、内径 12 mm の枝管の長さが他の枝管と比べて短くなっていることが原因と考えられる。これを無視すれば、全体の傾向はおよそ予測通りであり、流量の低下率も最大で 30%程度と予想されることから、側壁内の冷却流路設計は妥当であると判断し、実規模の試験体を製作することとした。

4. F82H 製実規模試験体による流量分布測定

4.1 実験

前章までの解析と予備試験により、側壁内冷却流路設計の妥当性が確認できたため、F82H 製の実規模試験体を実際に製作し[13]、流動試験を実施した。製作した試験体における冷却流路の模式図は Fig. 3-2 に示した通りである。塩化ビニル製試験体の実験と同様に、温冷水循環装置に試験体を接続し、冷却水を導入した。導入条件は、室温、流量を 50、60、65、70、80 L/min とした。各枝管の流量は、超音波流量計(上田日本無線株式会社製、UDZ-102)を用いて測定した。測定は各枝管について 2 回ずつを行い、結果は平均値として示す。さらに、出入口間の圧力損失を差圧計測定器(KEYENCE 社製、AP-13S)によって計測した。計測箇所は、Fig. 3-2 に示す通りである。

4.2 結果と考察

Fig. 4-1 に、流量が 80 L/min の場合の流量分布を示す。前章で予想したように、手前から奥にしたがって流量が減少する様子が確認された。線形近似によって流量分布の傾向を求めるときの傾きは -12% であり、3.2 節で述べた予想範囲である -10 ~ -15% とよく一致した。また、除熱の観点からの要求値である 50% の減少率に対して、十分に余裕があることが確認できた。

Fig. 4-2 から 4-5 に、他の流量条件に対して実施した各経路の圧力損失計算の結果を示す。Fig. 4-6 から Fig. 4-9 に、各流量条件における流量の測定結果を示す。実験結果については線形近似し、流量分布の傾きを評価した。圧力損失計算の結果から予想された流量分布の範囲と実験結果とを、Table 1 にまとめた。全ての流量条件において、予測と実験結果とが誤差の範囲内で一致した。次に、実験で計測した各枝管の流量をもとにして、圧力損失の計算を行った。結果を Fig. 4-10 から 4-14 に示す。全ての条件において、各経路の圧力損失は誤差の範囲で等しくなり、圧力損失が等しくなる流量分布が定常状態での流量分布に相当する、とした前提を裏付ける結果となった。また絶対値としても、圧力損失の実測値と計算値とは誤差範囲内で一致した。これらのことから、Darcy-Weisbach の式に基づく簡易計算を用いた評価方法により、平行多流路における流量分布を予測可能であることが示された。

今回の実験は装置の制約から、冷却水の条件が実機の条件と異なっている。そこで、圧力損失の計算に基づく評価手法によって、実機の条件における流量分布について予測する。条件は 3.1 節で述べたように、15 MPa、約 300°C であり、枝管の平均流量は 0.17 kg/s である。Fig. 4-15 に、流量分布を仮定した際の、各経路の圧力損失を示す。圧力損失は枝管 1 の経路の結果で規格化している。その結果、流量分布の傾きは -10 ~ -20% と予想され、除熱の観点からは十分に余裕があることが確認できた。しかしながら、圧力損失の計算に用いた形状損失係数については、15 MPa、約 300°C の水への適用性を確認しておらず、その点でこの評価の精度に問題がある点には注意が必要である。今後は、流体解析コードによる計算も実施し、より詳細な検討を進める必要がある。

5. 結論

本研究では、JAEA が開発を進める TBM の側壁について、平行多流路における流量分布を予測し、TBM の使用条件において構造材料を使用制限温度以下に保持するために必要となる冷却管路網を設計することを目的とし、以下の結論を得た。

1. 1 次元の熱計算による必要な冷却水量を評価した。TBM の条件では、平均流量に対して 50% 以下まで流量が低下した場合、構造材を使用制限温度である 550°C 以下に冷却できない。
2. Darcy-Weisbach の式に基づく圧力損失の簡易計算により、流量分布を予測し、冷却管路網を設計した。母管の直径が 23 mm、枝管の直径が 10 mm の条件で、冷却水量の低下率は最大で平均流量の 10 ~ 15% と予測した。
3. F82H 製の実機大試験体による流動試験を実施し、流量の分布および圧力損失を測定した。流量の分布は予測値とよく一致し、除熱の観点から十分な余裕があることを確認した。
4. 圧力損失の測定値は計算結果とよく一致し、本研究で用いた計算手法が流量分布、圧力損失をともに精度よく評価できることを明らかにした。

参考文献

- 1) M. Akiba, et al., Fus. Eng. Des., “Development of water-cooled solid breeder test blanket module in JAEA”, 84, p. 329 (2009).
- 2) D. Tsuru, et al., Nucl. Fus., “Achievements in the development of the Water Cooled Solid Breeder Test Blanket Module of Japan to the milestones for installation in ITER”, 49, p. 065024 (2009).
- 3) T. Hirose, et al., “Structural material properties and dimensional stability of components in first wall components of a breeding blanket module”, Fus. Eng. Des., 83, p. 1176 (2008).
- 4) H. Tanigawa, et al., “R&D of a Li₂TiO₃ pebble bed for a test blanket module in JAEA”, Nucl. Fus., 49, p. 055021 (2009).
- 5) 関 洋治ら: “核融合炉の除熱技術～実用から先進技術まで～ 2. 核融合炉における熱流体工学の基礎 2.2 ブランケットの伝熱流動”, J. Plasma Fusion Res., 85, p. 543 (2009).
- 6) M. Enoda, et al., “Design and technology development of solid breeder blanket cooled by supercritical water in Japan”, Nucl. Fus., 43, p. 1837 (2003).
- 7) S. Mori, et al., “Blanket and divertor design for the Steady State Tokamak Reactor (SSTR)”, Fus. Eng. Des., 18, p. 249 (1991).
- 8) L. Giancarli et al., “Test blanket modules in ITER: An overview on proposed designs and required DEMO-relevant materials”, J. Nucl. Mater., 367-370, p. 1271 (2007).
- 9) 日本機械学会 : “機械工学便覧 基礎編 A5 流体工学”, 日本機械学会, Japan, pp. A573-A588 (1986).
- 10) 下坂 賽 : “水力学演習”, 産業図書株式会社, Japan, pp. 90-93 (1975).
- 11) Yasuo KOSAKU et al., “Nuclear, thermo-mechanical and tritium release analysis of ITER breeding blanket”, JAERI-Tech 2003-058 (2003).
- 12) Y. Nomoto et al., “Structural concept of Japanese solid breeder test blanket modules for ITER”, Fus. Eng. Des., 81, p. 719 (2006).
- 13) T. Hirose et al., “Fabrication Routes of Sub-Components for Water Cooled Solid Breeder Blanket Module”, CBBI-15, Presented.

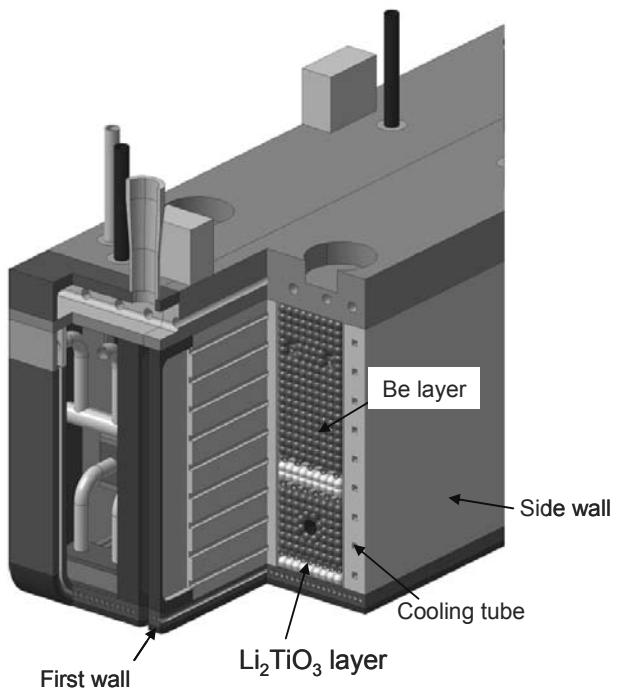


Fig. 1-1 Schematic of TBM

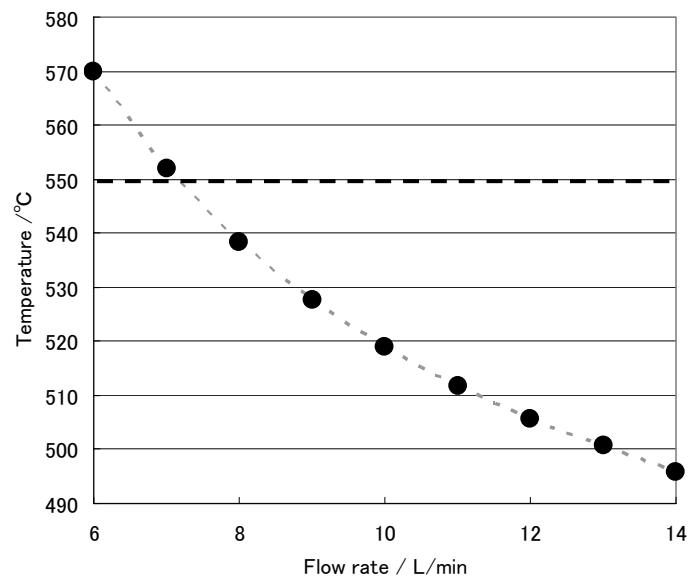


Fig. 3-1 Rise of temperature in the case of decreased cooling water

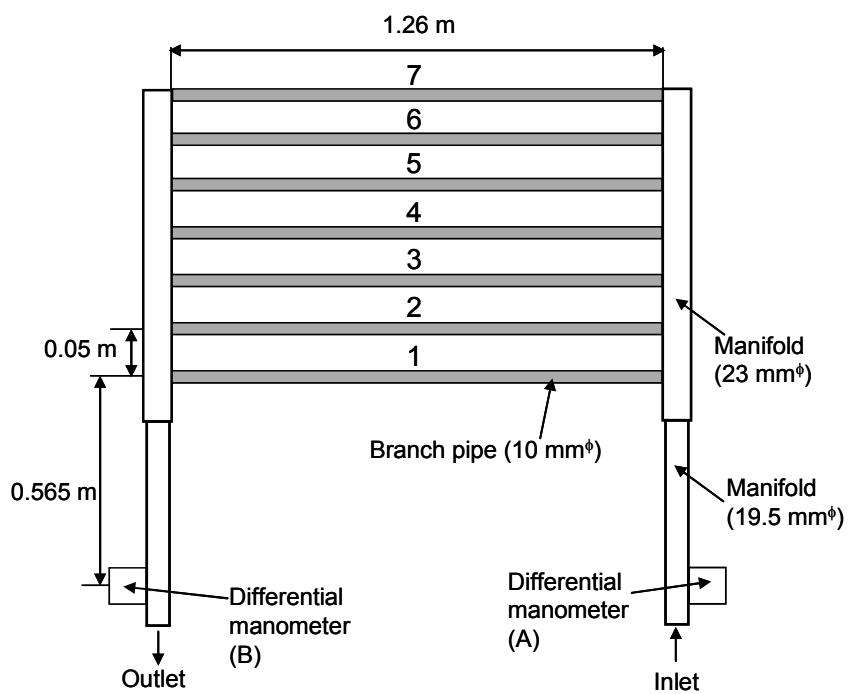


Fig. 3-2 Schematic of cooling channel made of F82H

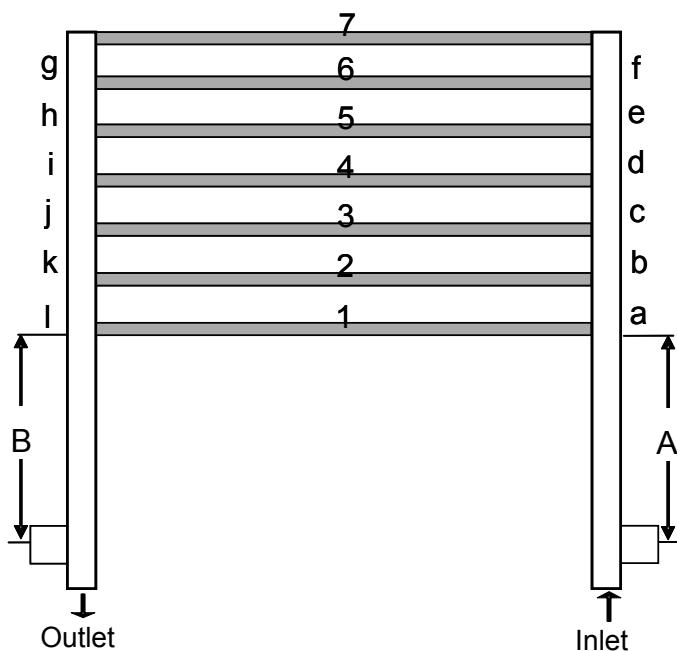


Fig. 3-3 Calculation system of pressure drops in the cooling channel

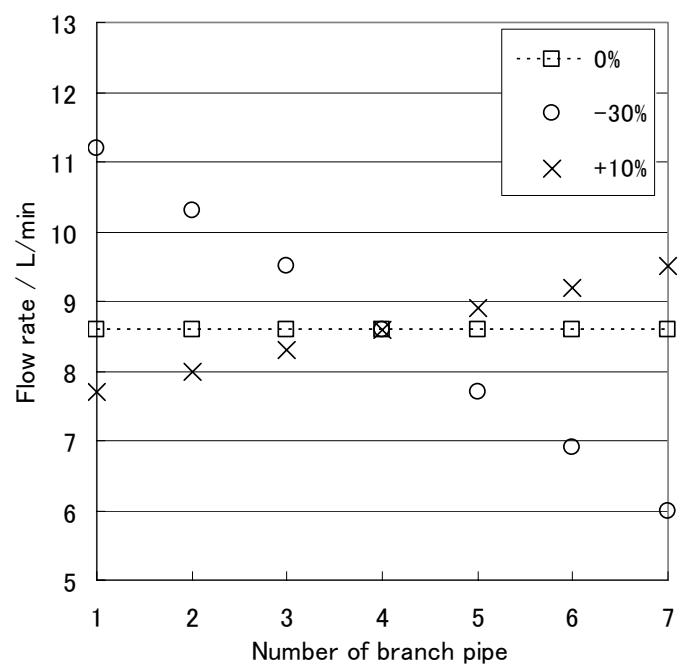


Fig. 3-4 Assumed changing rate of water flow rate

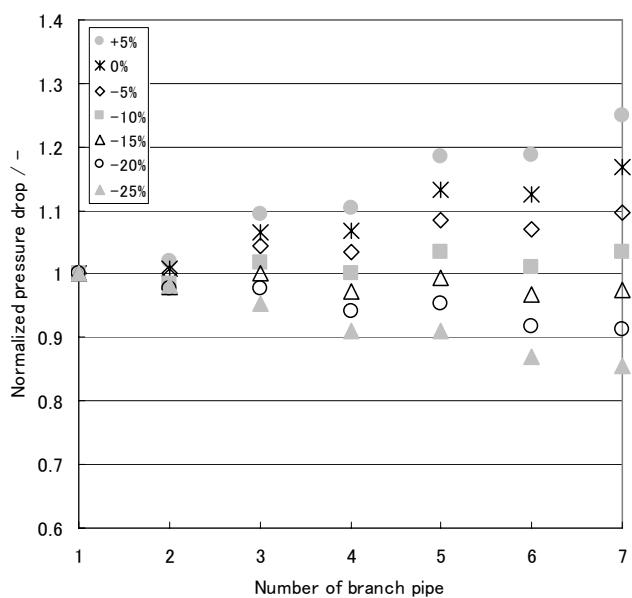


Fig. 3-5 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (80 L/min)

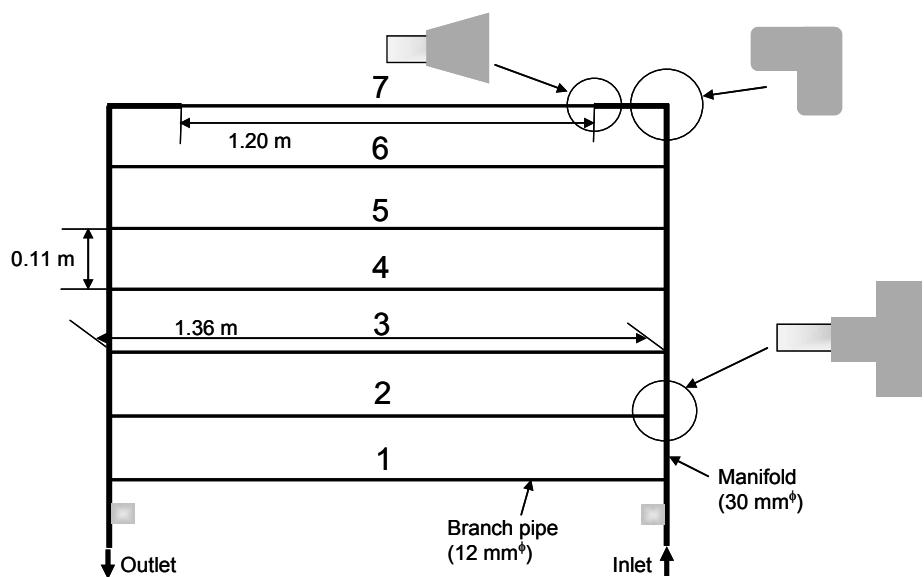


Fig. 3-6 Schematic of cooling channel made of polyvinyl pipes

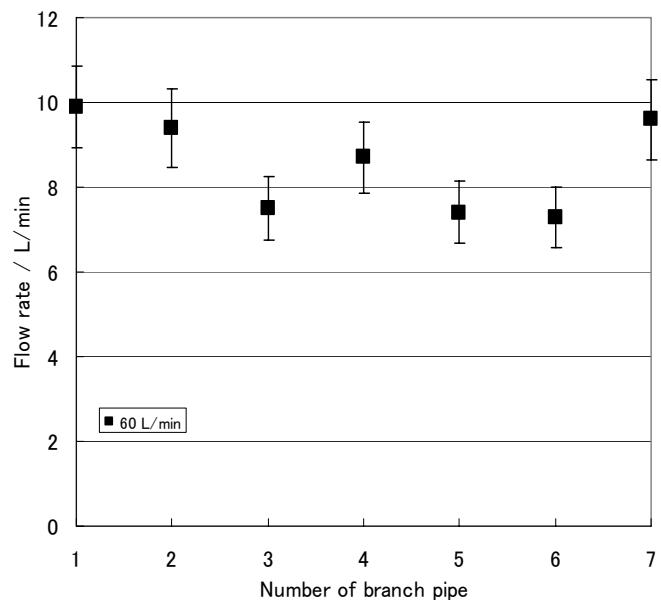


Fig. 3-7 Flow rates of branch pipes in introduced
water flow rate of 60 L/min

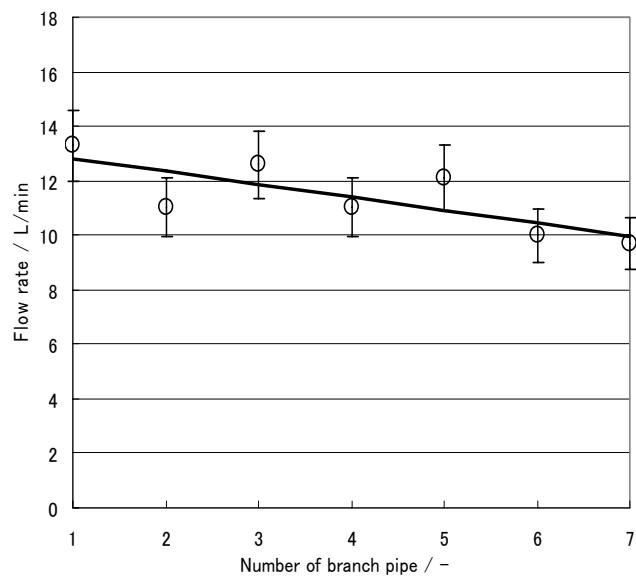


Fig. 4-1 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 80 L/min

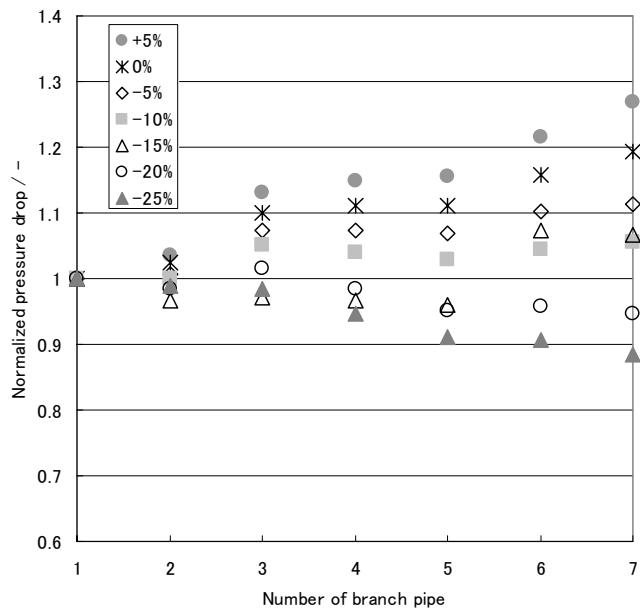


Fig. 4-2 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (50 L/min)

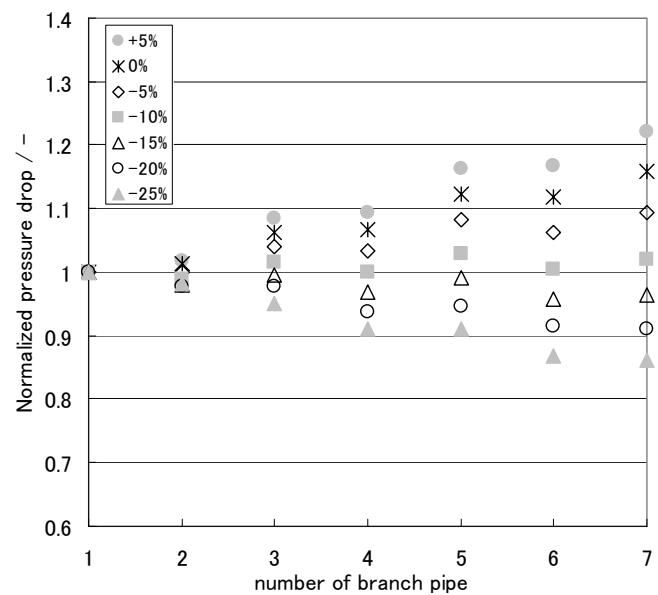


Fig. 4-3 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (60 L/min)

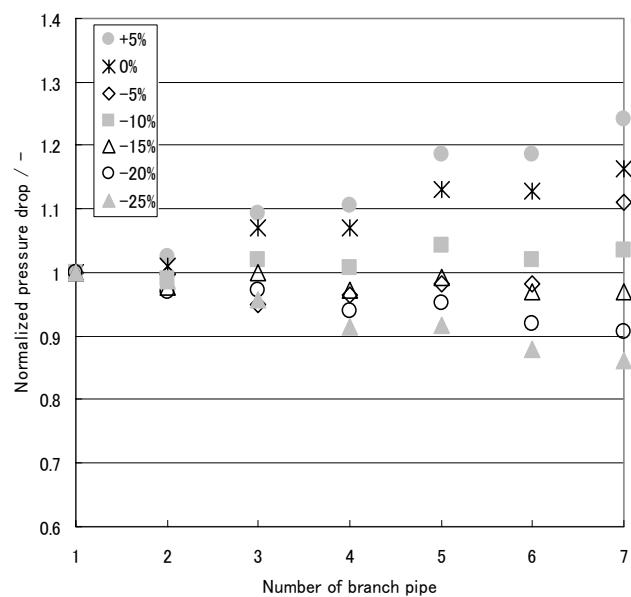


Fig. 4-4 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (65 L/min)

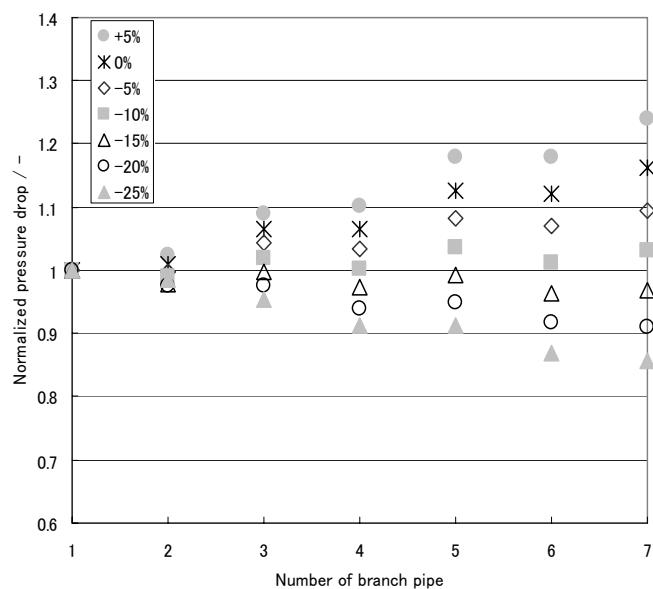


Fig. 4-5 Pressure drops of each flow channel for assumed water flow distribution (70 L/min)

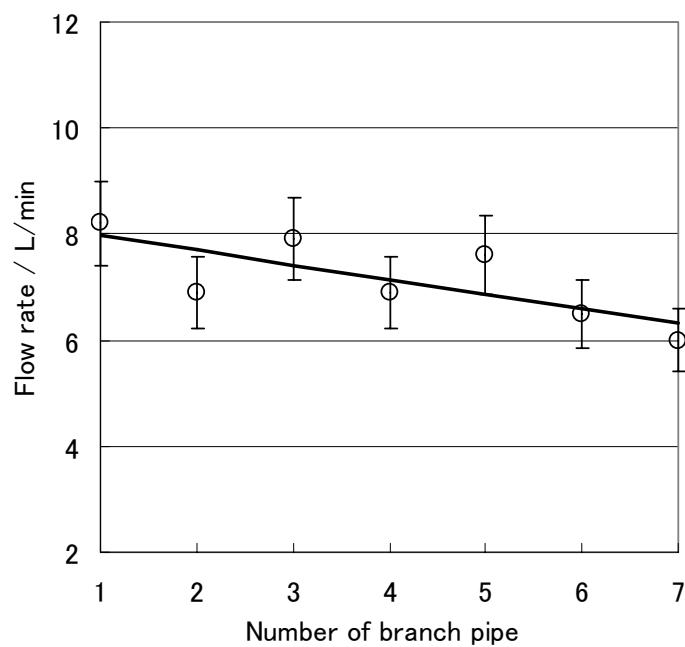


Fig. 4-6 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of 50 L/min

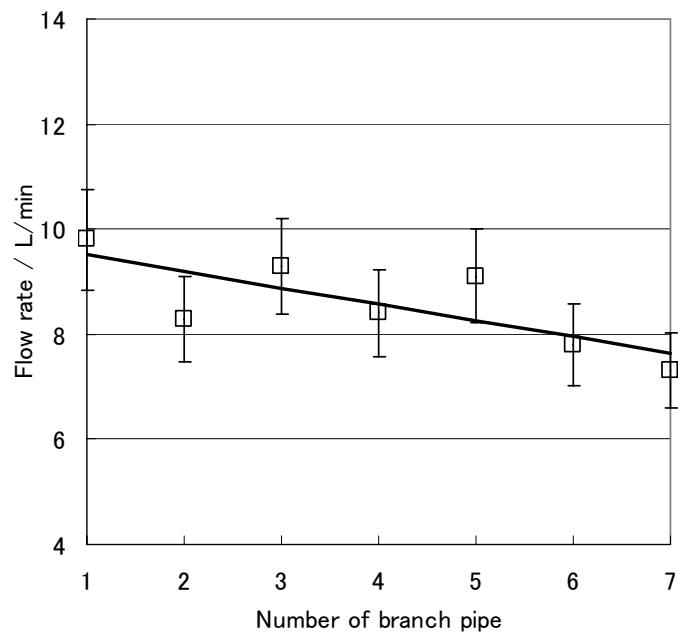


Fig. 4-7 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of
60 L/min

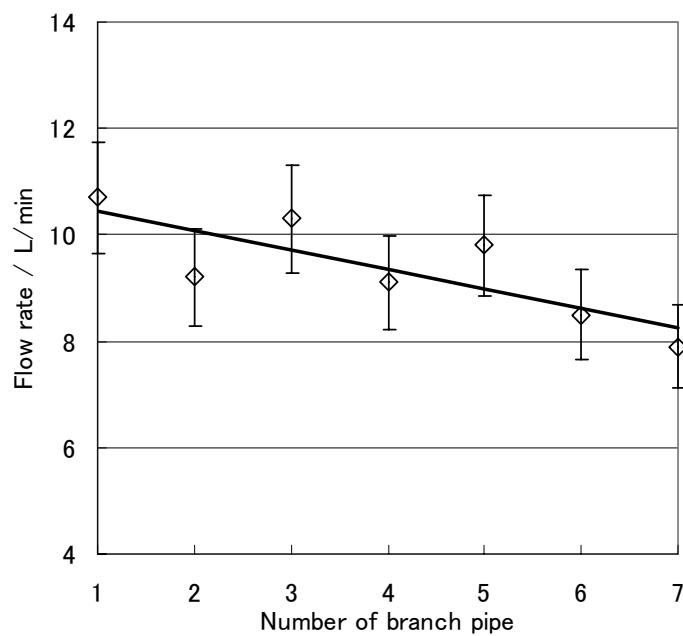


Fig. 4-8 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of
65 L/min

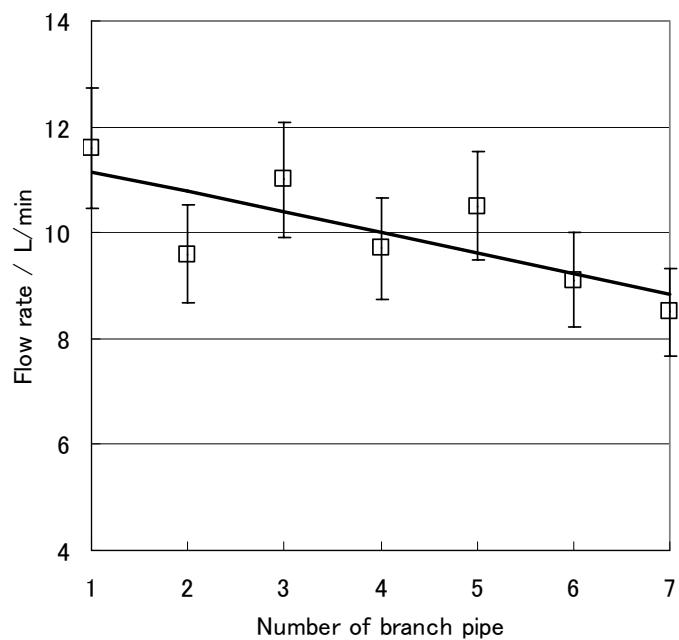


Fig. 4-9 Flow rates of branch pipes in introduced water flow rate of
70 L/min

Table 1 Summary of water flow distribution estimated from calculation and measurement

流量分布の傾き	50 L/min	60 L/min	65 L/min	70 L/min	80 L/min
実測 (%)	-12	-12	-12	-12	-12
計算 (%)	-10 ~ -15	-10 ~ -15	-10 ~ -15	-10 ~ -15	-10 ~ -15

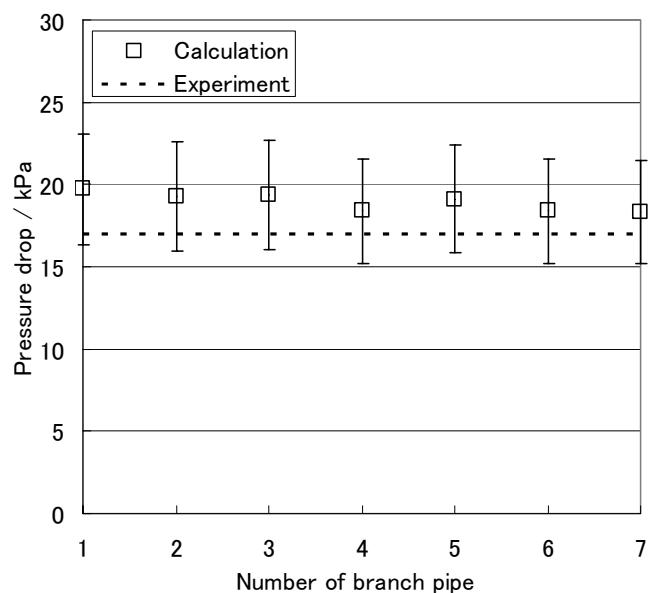


Fig. 4-10 Calculated and experimental values in the pressure drops
(50 L/min)

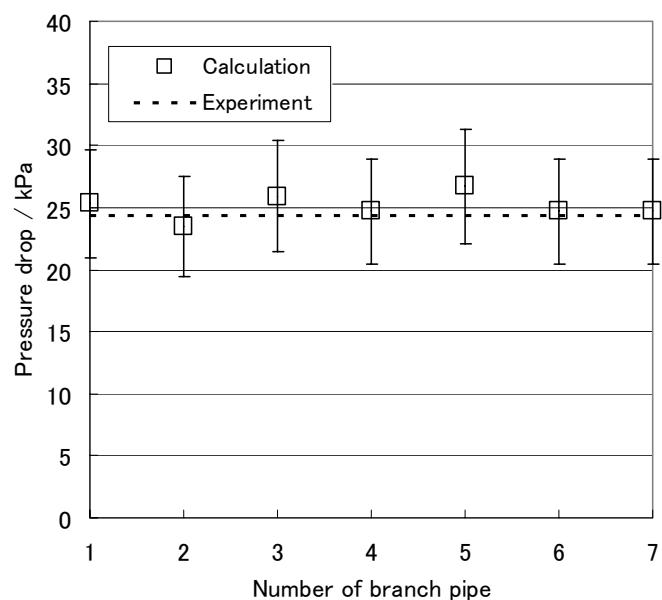


Fig. 4-11 Calculated and experimental values in the pressure drops
(60 L/min)

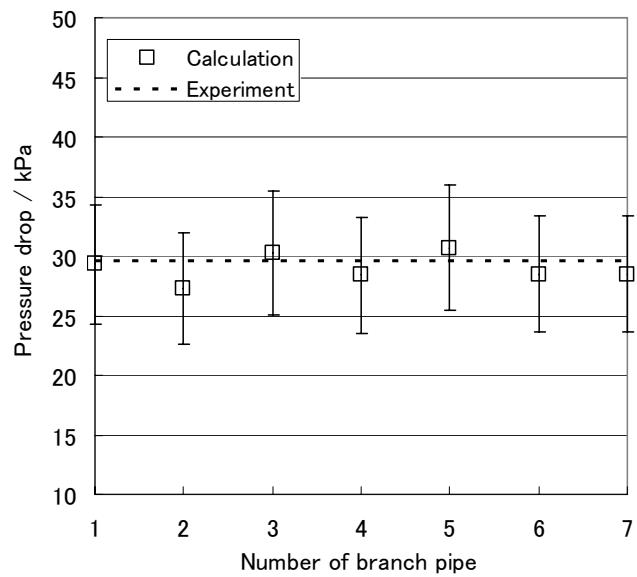


Fig. 4-12 Calculated and experimental values in the pressure drops
(65 L/min)

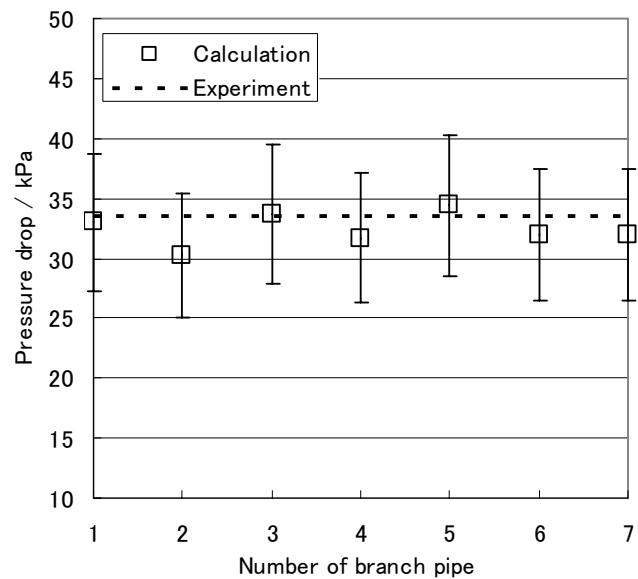


Fig. 4-13 Calculated and experimental values in the pressure drops
(70 L/min)

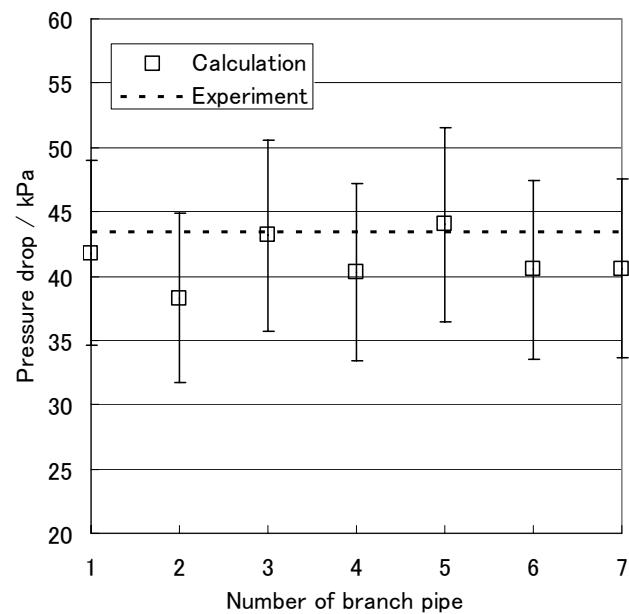


Fig. 4-14 Calculated and experimental values in the pressure drops
(80 L/min)

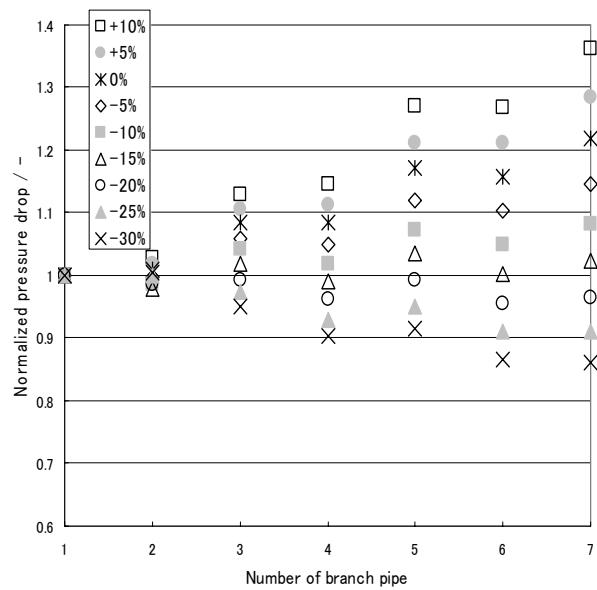


Fig. 4-15 Pressure drops of each flow channel for assumed
flow distribution in water of 300 °C and 15 MPa

付録 1 側壁の冷却に関する冷却管からの距離と核発熱の影響

3 章において、TBM 条件において最も熱負荷が大きい枝管について、最低限必要な冷却流量を評価した。核発熱密度を 8.0 MW/m^3 、冷却流量を 0.17 kg/s とした場合、冷却管から距離 30 mm 離れた構造材の温度が 497°C になること、冷却水量が 50% まで低下すると制限温度である 550°C になることを明らかにした。ここでは、3 章と同様に 1 次元の熱計算を実施し、冷却管からの距離および核発熱密度をそれぞれ変化させた際の影響について評価する。

Fig. A-1 に、冷却管からの距離に伴う増加する構造材の最高温度を示す。距離が 30 mm の場合に 497°C であった温度は、距離が 35 mm になった場合には使用制限温度である 550°C を越えてしまうことが分かる。溶接を伴う TBM の製作工程を考慮して、今の設計では距離にして 5 mm 分の余裕を持たせることにしている。

次に、核発熱が小さい場合に必要とされる冷却流量について評価する。TBM の側壁を考えた場合には、よりプラズマから遠い場所に位置する冷却管が対応する。距離を 30 mm に固定した場合に、核発熱に対して構造材の温度が 550°C となる流量を計算した。Fig. A-2 に結果を示す。横軸の核発熱密度に対して、図中の曲線が構造材を制限温度以下に保つための最小流量に対応しており、曲線より下方の流量では制限温度を超過し、上方では制限温度以下となることを示している。TBM の後方における核発熱密度は 1.0 MW/m^3 以下であるが、この場合、必要な流量は均一流量の $1/14$ であることが分かる。

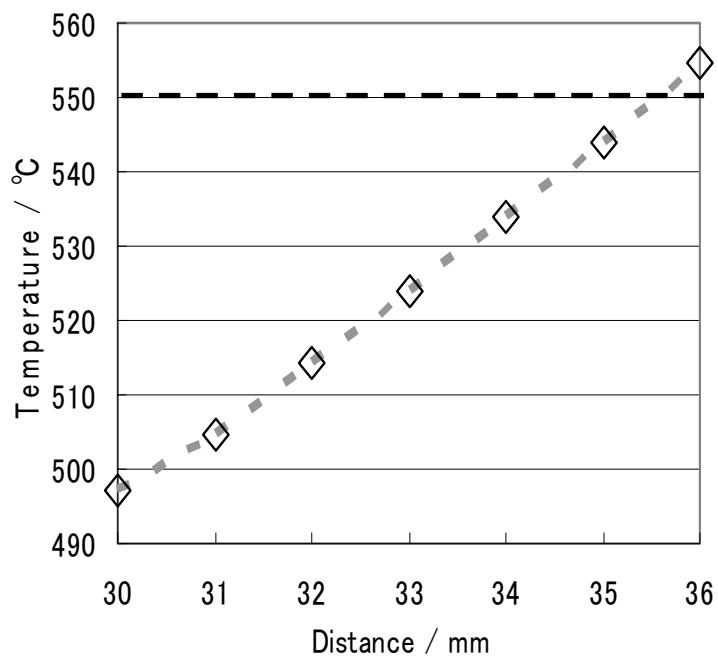


Fig. A-1 Maximum temperature of structural material to the distance from the cooling channel

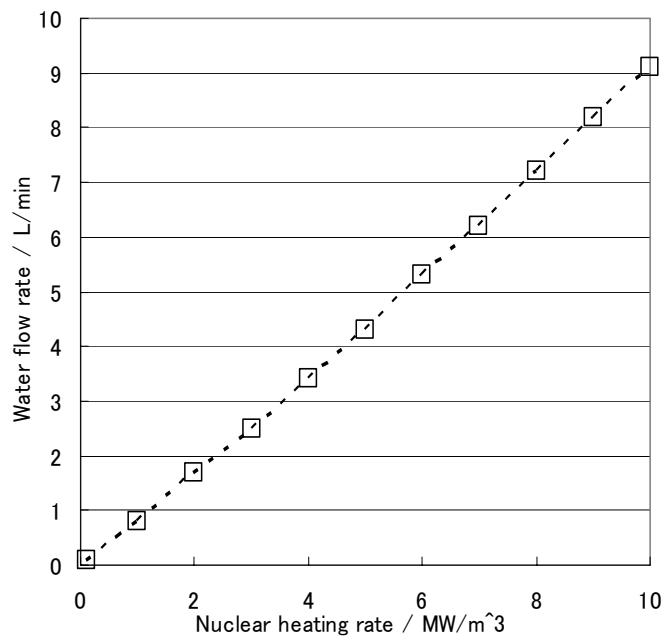


Fig. A-2 Calculation results of the flow rate under 550 °C in the temperature of structural material for nuclear heating

This is a blank page

国際単位系 (SI)

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比體積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度 ^(b)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
輝屈折率 ^(b)	(数字) 1	1
透磁率 ^(b)	(数字) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(b)	$\text{sr}^{(c)}$	$1^{(b)}$
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	m^2/m^2
力	ニュートン	N	s^{-1}
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	A/s
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光束密度	ルーメン	lm	$\text{cd sr}^{(c)}$
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m^2
吸収線量, 比エネルギー, カーマ	グレイ	Gy	cd
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	lm/s^2
酸素活性	カタール	kat	s^{-1}

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもやはヨーロピアンではない。
(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際にには、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は表示されない。
(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方に、そのまま維持している。
(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度範囲を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。
(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	バスカル秒	Pa s	$\text{m}^{-1}\text{kg s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$\text{m}^2\text{kg s}^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$\text{m}^{-1}\text{s}^{-2}=s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量, エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$\text{m}^2\text{kg s}^{-2}\text{K}^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	m^2s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$\text{W}/(\text{m K})$	$\text{m kg s}^{-3}\text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1}\text{kg s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m kg s}^{-3}\text{A}^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3}sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2}sA
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}\text{A}^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$\text{m}^2\text{kg s}^{-2}\text{A}^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$\text{m}^2\text{kg s}^{-2}\text{mol}^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol K)	$\text{m}^2\text{kg s}^{-2}\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1}sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$\text{m}^4\text{m}^2\text{kg s}^{-3}=\text{m}^2\text{kg s}^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$\text{m}^2\text{m}^2\text{kg s}^{-3}=\text{kg s}^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}\text{mol}$

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{-21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表5. SI接頭語

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180)\text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800)\text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000)\text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1\text{hm}^2=10^4\text{m}^2$
リットル	L	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^3\text{cm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^3\text{ kg}$

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180)\text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800)\text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000)\text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1\text{hm}^2=10^4\text{m}^2$
リットル	L	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^3\text{cm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^3\text{ kg}$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1\text{eV}=1.602 176 53(14)\times 10^{-19}\text{J}$
ダルトン	Da	$1\text{Da}=1.660 538 86(28)\times 10^{-27}\text{kg}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1\text{ Da}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.495 978 706 91(6)\times 10^{11}\text{m}$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\text{bar}=0.1\text{MPa}=100\text{kPa}=10^5\text{Pa}$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1\text{mmHg}=133.322\text{Pa}$
オングストローム	Å	$1\text{\AA}=0.1\text{nm}=100\text{pm}=10^{-10}\text{m}$
海里	M	$1\text{M}=1852\text{m}$
バーン	b	$1\text{b}=100\text{fm}^2=(10^{-12}\text{cm})^2=2\times 10^{-28}\text{m}^2$
ノット	kn	$1\text{kn}=(1852/3600)\text{m/s}$
ネーベル	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\text{erg}=10^{-7}\text{ J}$
ダイナ	dyn	$1\text{dyn}=10^{-5}\text{ N}$
ボアズ	P	$1\text{P}=1\text{dyn s cm}^{-2}=0.1\text{Pa s}$
ストークス	St	$1\text{St}=1\text{cm}^2\text{s}^{-1}=10^{-3}\text{m}^2\text{s}^{-1}$
スチール	sb	$1\text{sb}=1\text{cd cm}^{-2}=10^4\text{cd m}^{-2}$
フォン	ph	$1\text{ph}=1\text{cd sr cm}^{-2} 10^4\text{lx}$
ガル	Gal	$1\text{Gal}=1\text{cm s}^{-2}=10^{-2}\text{ms}^{-2}$
マックスウェル	Mx	$1\text{Mx}=1\text{G cm}^2=10^{-8}\text{Wb}$
ガウス	G	$1\text{G}=1\text{Mx cm}^{-2}=10^{-7}\text{P}$
エルステッド	Oe	$1\text{Oe} \triangleq (10^3/4\pi)\text{A m}^{-1}$

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	$1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$
レントゲン	R	$1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C/kg}$
ラド	rad	$1\text{rad}=1\text{cGy}=10^{-2}\text{Gy}$
レム	rem	$1\text{rem}=1\text{cSv}=10^{-2}\text{Sv}$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\text{nT}=10^{-9}\text{T}$
フェルミ	fm	$1\text{フェルミ}=1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$
メートル系カラット	Torr	$1\text{Torr}=(101 325/760)\text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1\text{atm}=101 325\text{ Pa}$
カリ	cal	$1\text{cal}=4.1858\text{J} ([15^\circ\text{C}] \text{カロリー})$
ミクロ	μ	$1\mu=1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$

