

## MA燃料遠隔取扱試験設備の製作及び試験結果

### (1) 燃料冷却試験装置

Fabrication and Test Results of Testing Equipment for Remote-handling of MA Fuel

(1) Testing Equipment for Fuel Cooling

西原 健司 田澤 勇次郎 井上 昭 菅原 隆徳  
辻本 和文 佐々 敏信 大林 寛生 山口 和司  
菊地 将司

Kenji NISHIHARA, Yujiro TAZAWA, Akira INOUE, Takanori SUGAWARA  
Kazufumi TSUJIMOTO, Toshinobu SASA, Hironari OHBAYASHI, Kazushi YAMAGUCHI  
and Masashi KIKUCHI

原子力科学研究部門  
原子力基礎工学研究センター  
分離変換技術開発ディビジョン

Partitioning and Transmutation Technology Division  
Nuclear Science and Engineering Center  
Sector of Nuclear Science Research

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

MA 燃料遠隔取扱試験設備の製作及び試験結果

(1) 燃料冷却試験装置

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン

西原 健司、田澤 勇次郎<sup>\*</sup>、井上 昭<sup>\*</sup>、菅原 隆徳、辻本 和文、  
佐々 敏信<sup>+</sup>、大林 寛生<sup>+</sup>、山口 和司<sup>\*</sup>、菊地 将司<sup>\*</sup>

(2015 年 12 月 17 日受理)

J-PARC に建設が計画されている核変換物理実験施設 (TEF-P) で用いる高線量の MA 含有燃料の取扱い設備の設計製作に必要なデータを取得する試験装置群 (MA 燃料遠隔取扱試験設備) の内、燃料冷却試験装置の製作及び試験結果についてとりまとめる。試験により TEF-P の設計に用いる圧力損失及び温度上昇の評価式が妥当であることが確認され、冷却概念の成立性が示された。

---

原子力科学研究所： 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

+ J-PARC センター 核変換ディビジョン

\*技術開発協力員

\*富士電機株式会社

Fabrication and Test Results of Testing Equipment for Remote-handling of MA Fuel  
(1) Testing Equipment for Fuel Cooling

Kenji NISHIHARA, Yujiro TAZAWA<sup>※</sup>, Akira INOUE<sup>※</sup>,  
Takanori SUGAWARA, Kazufumi TSUJIMOTO,  
Toshinobu SASA<sup>+</sup>, Hironari OHBAYASHI<sup>+</sup>,  
Kazushi YAMAGUCHI<sup>※</sup> and Masashi KIKUCHI<sup>\*</sup>

Partitioning and Transmutation Technology Division  
Nuclear Science and Engineering Center  
Sector of Nuclear Science Research  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2015)

This report summarizes fabrication and test results of a testing equipment for fuel cooling that is a component of the testing equipment for remote-handling of highly-radioactive MA fuels in the transmutation physics experimental facility (TEF-P) planned in the J-PARC. Evaluation formula of pressure drop and temperature increase used in the design of TEF-P was validated by the test, and, feasibility of cooling concept was confirmed.

Keywords: Transmutation Physics Experimental Facility, TEF-P, J-PARC, Minor Actinide Fuel, Testing Equipment for Fuel Cooling

---

<sup>+</sup> Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center

<sup>※</sup>Collaborating Engineer

<sup>\*</sup> Fuji Electric Co., LTD.

## 目次

1. 緒言	1
2. 設計・製作	2
2.1 TEF-Pにおける冷却設計	2
2.2 試験装置の冷却設計	5
2.3 試験装置の製作	6
3. 試験	19
3.1 試験方法	19
3.2 試験結果（ヒーター出力無し）	19
3.3 試験結果（ヒーター投入）	22
4. 解析	24
4.1 解析方法	24
4.2 解析結果（ヒーター出力無し）	27
4.2.1 流量	27
4.2.2 圧力損失	28
4.3 解析結果（ヒーター投入）	30
4.3.1 流量	30
4.3.2 圧力損失	31
4.3.3 空気温度上昇	32
4.3.4 燃料ピン温度のばらつき	33
4.3.5 燃料ピン表面熱伝達	35
4.3.6 燃料ピン表面温度	38
5. 考察	40
6. まとめ	42
参考文献	42
付録A ヒーター投入ケースの予備試験結果	43
付録B 圧力損失に対するピン偏心の影響評価	45

## Contents

1. Introduction	1
2. Design and fabrication	2
2.1 Cooling design in TEF-P	2
2.2 Cooling design of testing equipment	5
2.3 Fabrication of testing equipment	6
3. Test	19
3.1 Procedure	19
3.2 Results (heater-off)	19
3.3 Results (heater-on)	22
4. Analysis	24
4.1 Method	24
4.2 Analysis results (heater-off)	27
4.2.1 Flow amount	27
4.2.2 Pressure drop	28
4.3 Analysis results (heater-on)	30
4.3.1 Flow amount	30
4.3.2 Pressure drop	31
4.3.3 Temperature increase of fluid	32
4.3.4 Dispersion of pin temperature	33
4.3.5 Heat transfer at pin surface	35
4.3.6 Surface temperature of pin	38
5. Consideration	40
6. Summary	42
References	42
Appendix A Result of preliminary test (heater-on)	43
Appendix B Effect of eccentricity of pin center on pressure drop	45

## 1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、原子力利用によって発生する高レベル放射性廃棄物に含まれるマイナーアクチノイド(MA)、すなわち、ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)及びキュリウム(Cm)を回収し、原子炉で再び照射することで核変換を行う研究が行われている。核変換により、高レベル放射性廃棄物の潜在的な放射能毒性を大幅に低減することで、高レベル放射性廃棄物処分場の負担軽減が可能となる。核変換を行う原子炉として、高速炉と加速器駆動炉(ADS: Accelerator-Driven System)が検討されている。

核変換炉の研究開発を行うために、原子力科学研究所 J-PARC 施設において、核変換実験施設(TEF: Transmutation Experimental Facility)の建設が検討されている。TEFはADSターゲット試験施設(TEF-T)と核変換物理実験施設(TEF-P)から成る。前者では核燃料を用いず、核破碎ターゲットの試験や高エネルギー陽子による材料照射試験を行い、後者では臨界集合体を用いて MA 燃料の部分模擬及び、低出力陽子ビームを入射した炉物理試験を行う。

TEF-Pは現在原子力科学研究所にある高速炉臨界実験装置(FCA: Fast Critical Assembly)と類似の概念であり、陽子ビーム入射と MA 燃料取扱いの機能が追加されている。FCAの燃料は板状形状で、手作業でそれらを引き出しに充填する。TEF-Pでも同様の概念となるが、MA燃料については製作性の観点からピン形状とし、冷却材を模擬した穴あきブロック(カランドリアと呼ぶ)に充填する。このMA燃料を取り扱う際には、線量が大きいため、除熱および遮へいが重要な設計項目となる。参考文献 1)において、これらの概略が検討された。そのうち、MA燃料を臨界集合体に装荷した状態における崩壊熱の除熱は強制空冷で実施するとされており、概念設計が実施された。

本試験では、単一流路を対象とし、模擬ヒーターピンを用いて冷却性の模擬試験を実施し、TEF-Pの設計において用いている評価手法の検証を実施することで、冷却概念の成立性を確認することを目的とする。

## 2. 設計・製作

### 2.1 TEF-Pにおける冷却設計<sup>1)</sup>

図 2.1 に TEF-P の概念図を示す。本図は、運転前の炉心分離状態を示しており、運転時にはビーム下流側の移動側集合体が固定側集合体に向かって移動し、炉心密着状態となる。各々の集合体は、格子管と呼ばれる外寸 55.5mm の角管を 51 列、51 行組み合わせ構成される。

MA 燃料は移動側・固定側集合体の中央5x5格子管に装荷される。MA 燃料は、それぞれの集合体の背面にブロウを接続することで、運転時も停止時も常時強制空冷される。炉心分離時には空気は密着面側から流入し、ブロウによって背面側から排出される。炉心密着時には、移動側集合体のブロウは停止され、固定側集合体のブロウのみを稼働し、移動側集合体背面から空気を吸入する。従って、炉心密着時においてブロウへの負荷が大きい。

図 2.2 に示すように、一辺が 55.2mm のステンレス格子管に対して、12 個の案内管を有するカランドリアが装荷される。カランドリア内部には 12 本の MA ピンが装荷される。TEF-P では中央 5x5 の格子管に対してカランドリアを装荷するので、MA 燃料ピンの本数は、移動側、固定側炉心合計で 600 本となる。MA ピン一本あたりの発熱量は崩壊熱と運転中の核分裂による発熱を合計して、3.66W/ピンと評価される。600 本の MA による発熱量は 2.2kW 程度である。

MA ピンの全長は 300mm であり、MA ピンの後部には反射体領域が設けられる。反射体領域は図 2.3 と図 2.4 に示した二つの概念が選択可能である。前者の概念は、MA ピンと同直径の反射体ピンを繋ぎ合わせる物であり、格子管後部から流入した空気は、ピンと案内管の間隙を通り、そのまま、格子管端部から流出する。後者の概念は従来 FCA と同様の引き出しを接続する概念であり、格子管後部から流入した空気は引き出し反射体の上部を流れ、MA ピンと MA ピン案内管の間隙を通り、再び、引き出し反射体の上部を流れ、格子管端部から流出する。

両概念の冷却性を評価した条件および結果を表 2.1、及び、表 2.2 に、それぞれ示す。入口出口の空気温度差を 20°C程度にするためには、5.5m<sup>3</sup>/min(=220L/min/格子管)の流量が必要で、そのときの圧力差は 11.7 または 5.4kPa であった。

表 2.1 密着時空冷の評価条件

名称	形状 (mm)	材質
格子管	角管 外寸法 55.2 角 L1325 厚み 1.0	SUS304
引き出し	上部の空いた箱、外寸法 W52.7 H52.5 L1010 厚み 0.8	SUS304
12 穴カランドリア	外寸法 W52.7 H52.5 L305、 ステンレス被覆 t0.5、案内管 外径 φ11.29 L300 t0.5(12 本)	鉛 SUS304
板状反射体	W 50.8 H48.3 D50.8 のブロッ ク	ポリエチ レン等
MA ピン燃 料	被覆管 φ9.0 L300、 3.66W/ピン(500W 運転時)	SUS、 MA 燃料



表 2.2 密着時空冷の冷却評価結果

概念			ピン反射体	引出し反射体
出入口温度差		℃	20.3	20.3
流量		m <sup>3</sup> /min/炉心	5.5	5.5
		m <sup>3</sup> /min/格子管	0.22	0.22
圧力損失	MA 炉心部	kPa	3.9	3.9
	反射体部	kPa	7.7	1.5
	合計	kPa	11.7	5.4

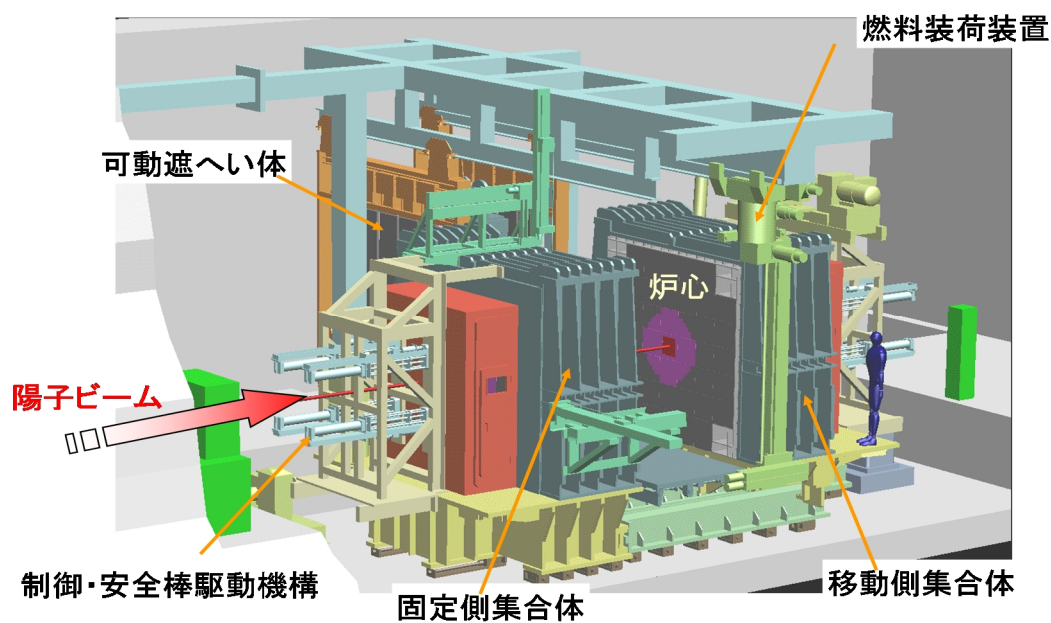


図 2.1 TEF-P 臨界集合体の概念図

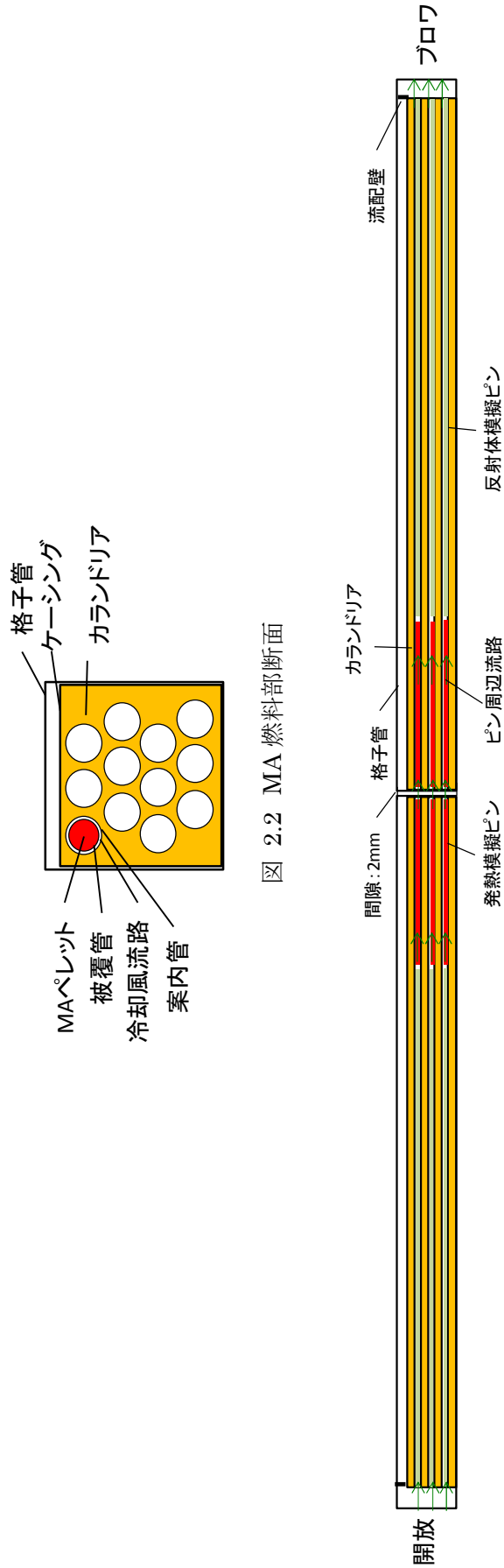


図 2.2 MA 燃料部断面

図 2.3 密着時空冷流路 (ピン反射体概念)

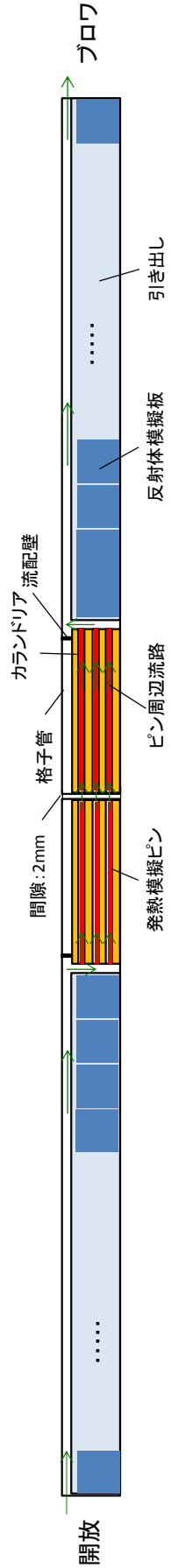


図 2.4 密着時空冷流路 (引き出し反射体概念)

## 2.2 試験装置の冷却設計

本試験装置では、前節で示した TEF-P 冷却設計に対して、単一流路を取り出し、模擬ヒーターピン及び小型ブロワによる模擬試験を実施する。そのために、装置仕様を以下の様に設定した。

(a) ヒーター： 0～10W/ピンで可変とする。TEF-P の評価値である 3.66W/ピンを十分に上回る値とし、将来の MA 燃料組成変更にも対応可能なように、広い範囲でデータを取得する。

(b) ブロワ： 300L/min、15kPa 以上とする(TEF-P の設計範囲)。流量調整弁を設け、広い範囲でデータを取得する。

(c) 流量測定： 出入口空気流量を計測する。

(d) 圧力測定： 出入口における圧力および、圧力差を計測する。

(e) 空気温度測定： 出入口空気温度を計測する。

(f) 燃料ピン温度測定： 代表ピン 8 本に対して、ピン表面に合計 12 カ所、熱電対を設置する(図 2.5)。上流側代表ピン 4 本に対しては中央(～150mm)付近、下流側代表ピン 4 本に対しては、中央(～150mm)付近と下流付近(～260mm)の 2 カ所とする(図 2.6)。下流付近は最もピン温度が高くなる部位である。各熱電対を A1～C4 等と呼ぶこととする。

(g) 断熱材： 格子管表面からの放熱を防ぐために 100mm 程度の断熱材を設置する。

(h) 装置の最高使用温度を 80℃とする。TEF-P 実機では、出入口温度差が 20℃の場合、ピン表面温度は 50℃程度と考えられるので、それを十分に上回る。

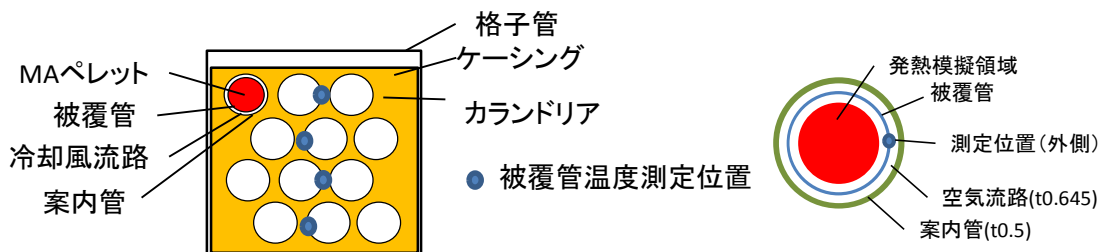


図 2.5 熱電対の設置位置

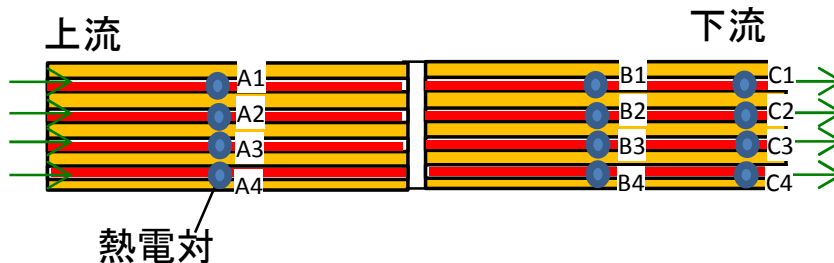


図 2.6 熱電対の軸方向設置位置 (実際は各位置に 4 個、合計 12 個)

### 2.3 試験装置の製作

図 2.7 に装置の全体図を示す。本試験装置はピン反射体概念と引き出し反射体概念の試験を実施できるが、格子管および架台については共通に用いることができる。左側が流入、右側が流出であり、上流、下流のいずれかにブロウを取り付け可能となっている。本図では上流側に取り付けられており装置内を正圧としているが、実際の試験では TEF-P と同様に下流側に取り付け、装置内を負圧とした。

図 2.8 にピン反射体概念の格子管内部図面を示す。格子管には表 2.3 に示した機器を接続するためのフランジ・ノズルが付加されている。格子管の内部には長さ 1.2m の中空カランドリア（図 2.9）が 2 個、置かれている。カランドリアが対面する部分には 2mm の隙間があるが、これは TEF-P 実機における移動側・固定側集合体間の隙間を再現したものである。

カランドリアの中に長さ 1.2m のヒーターピン（図 2.10～図 2.12）が、図 2.13 に示した配置で、片側 12 本、合計 24 本挿入されている。一部のヒーターピンの表面には溝が掘られており、内部に熱電対が設置されている。ヒーターピンの一部（255mm）が発熱しており、残りは中空管である。ヒーターは六個一組で、合計 4 つの調整器で出力制御されている。図 2.13 に示した H1～H6 が一つの組であり、以下、H7～H12、H13～18、そして、H19～24 が組となる。試験では全ての組が同じ出力になるように制御した。

図 2.14 に引き出し反射体概念の格子管内部図面を示す。カランドリアの長さが 300mm に短縮され（図 2.15）、15mm の隙間を空けて反射体を収納した引き出し（図 2.16）が設置されている。この隙間における圧力損失への影響を評価するために、間隔を 5、10、15、20、50、100mm で可変としている。反射体模擬体は TEF-P では板状物質が充填されるが、図 2.17 に示すように本装置では空洞とし、ケーブルを通してある。カランドリアの内部には、ピン反射体概念と同様に合計 24 本のヒーターピンが挿入されるが、ヒーターピンの長さは 300mm である。

ただし、この引き出し反射体概念用のヒーターピンは未製作であり、試験も未実施である。

本試験装置には、本体の他に、ヒーター制御及び測定値表示のための制御盤 1 台、ブロウ電源用の制御盤 1 台、及び、計測用ロガーが付属する。

表 2.3 使用機器

名称	仕様	メーカー・型
ブロワ	最大静圧 19kPa 最大流量 4,000L/min (圧力差 16kPa の時、風量 300L/min)	ミネベア(株) 60DCF-475
流量測定	30~300L/min (±2% F.S.)	東京計測(株) MA-921-1B-00
圧力測定	-100~100kPa (±1% F.S.)	長野計器(株) GC-31
差圧測定	0~20kPa (±1%F.S.)	長野計器(株) GC-62
空気温度測定	0~100℃ (±0.25℃)	林電工(株) CP-50P
ピン表面温度測定	熱電対(クラス1、±1.5℃) (ただし、ロットサンプル試験では±0.1℃)	



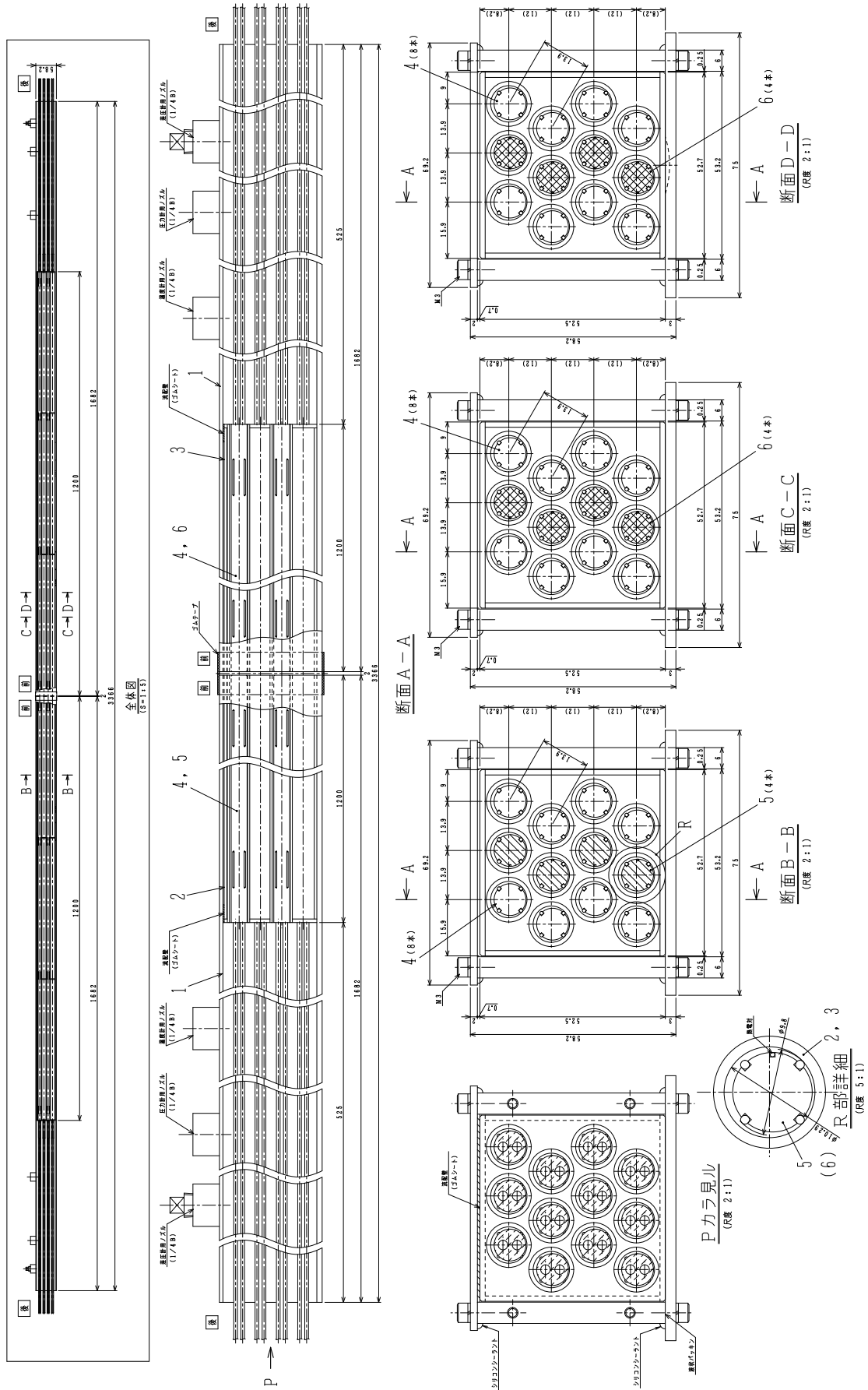
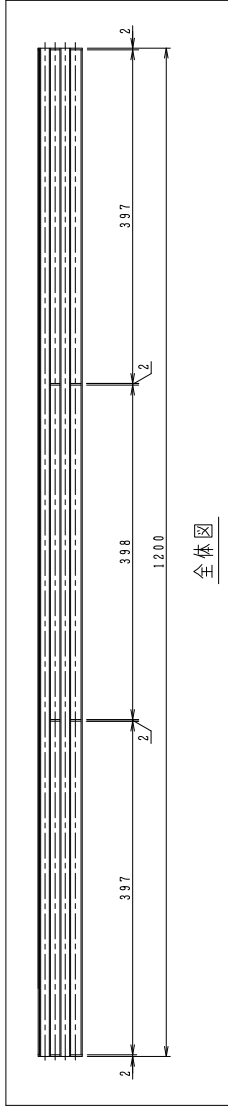
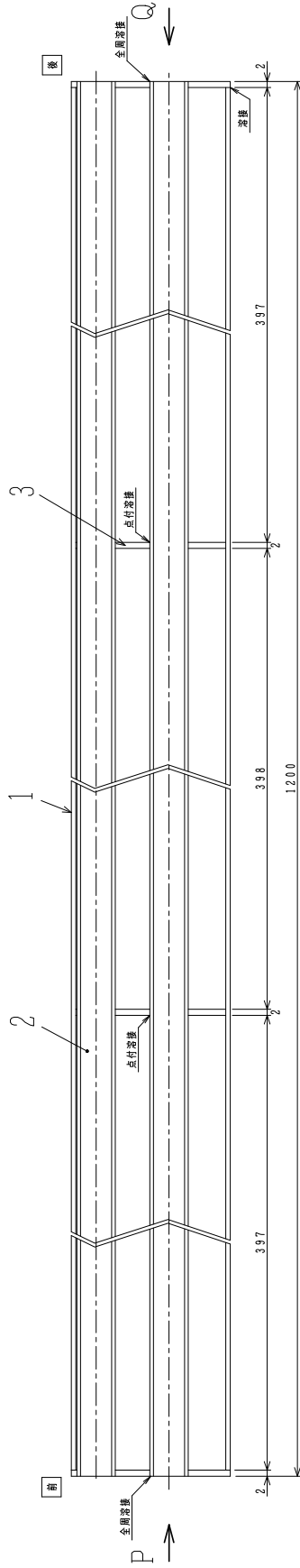


図 2.8 格子管部(ピン反射体概念)

部 名	種 類	材 料	備 考
1 ケーシング	1式	SUS304	
2 案内管	12	SUS304	
3 中間サポート	2	SUS304	



全体図



断面A-A

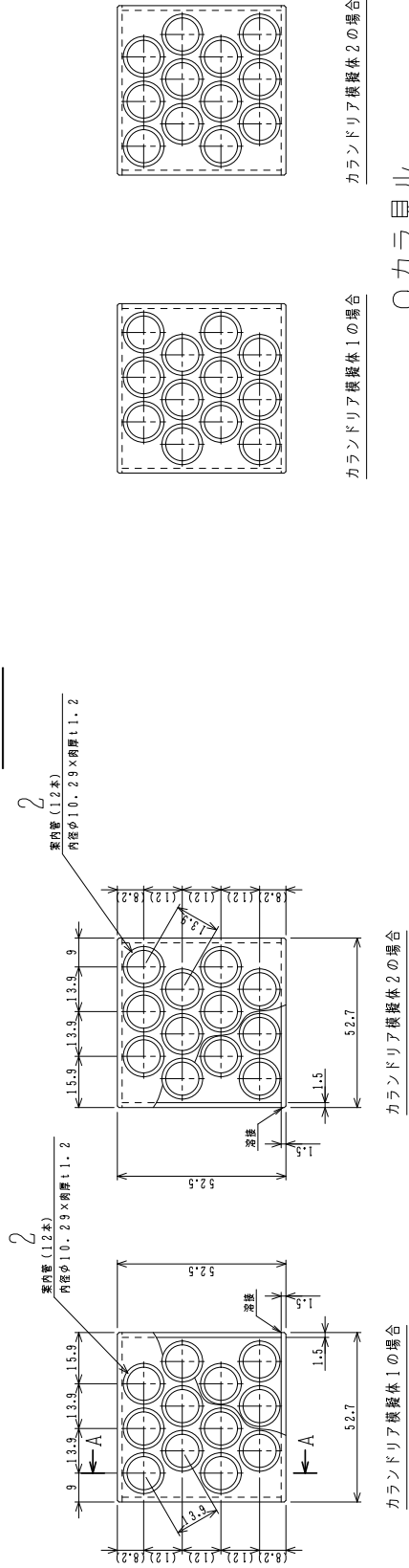
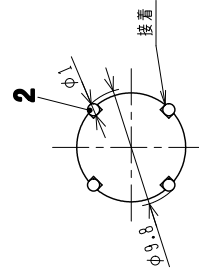
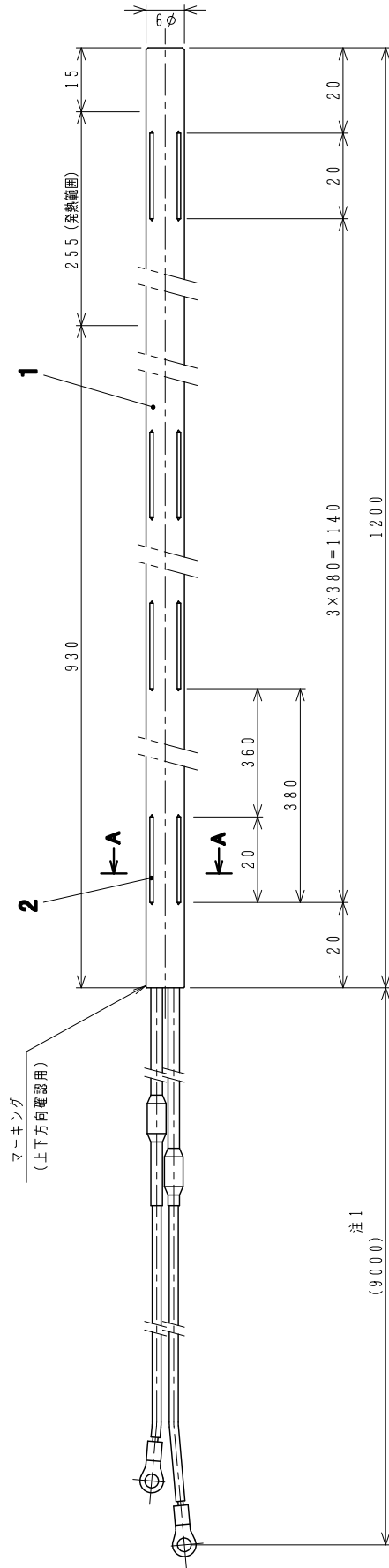


図 2.9 カランドリリア模擬体(ピン反射体概念)



部 名	個 数	材 料	備 考
1	1	SUS316等	0~10W
2	16	SUS316	

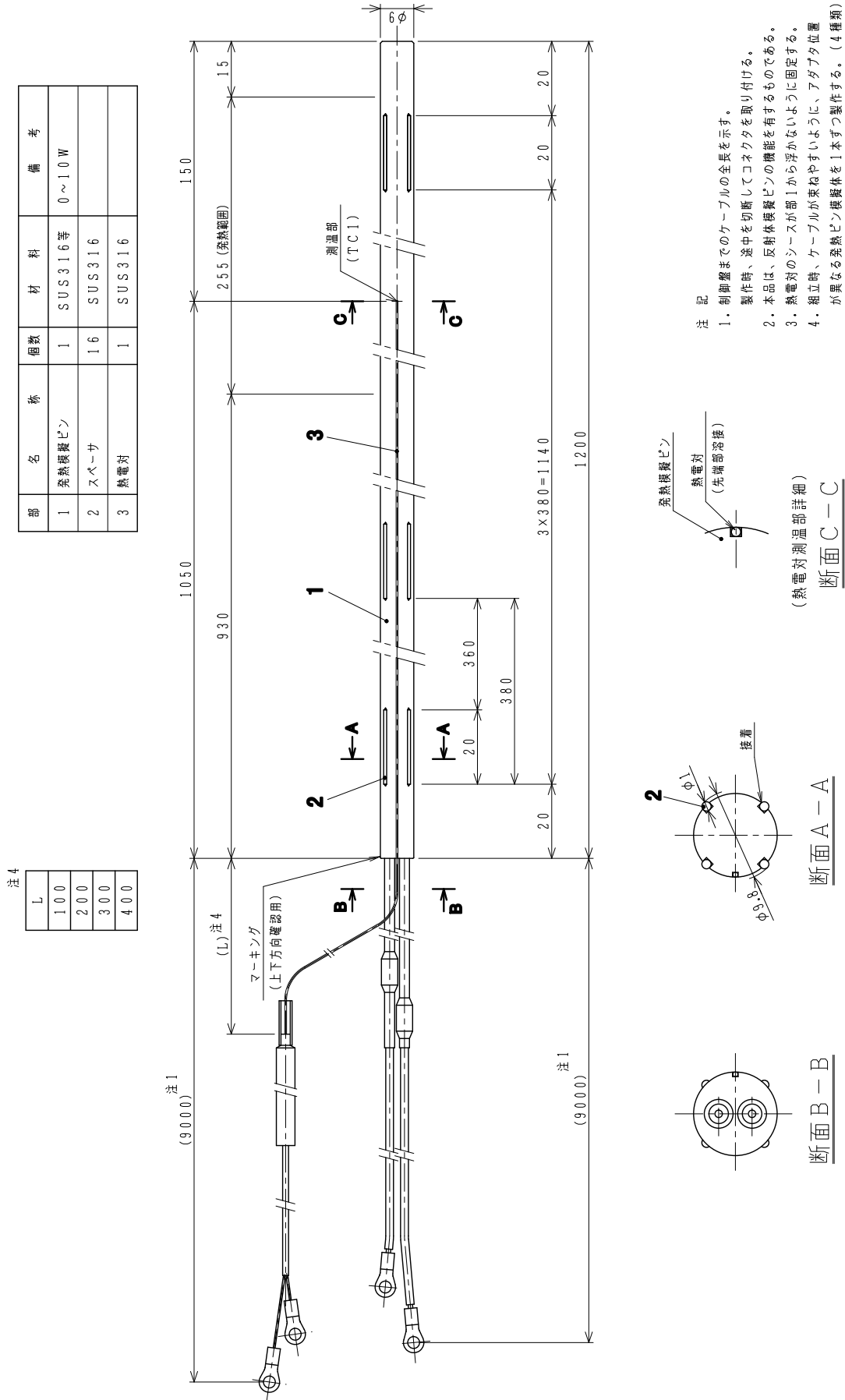


注 記

1. 制御盤までのケーブルの全長を示す。  
製作時、途中を切断してコネクタを取り付ける。
2. 本品は、反射体模擬ピンの機能を有するものである。

断面 A-A

図 2.10 ヒーターピン(ピン反射体概念、熱電対無し。H1~H4, H5~H8, H13~H16, H17~H20)



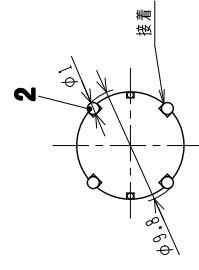
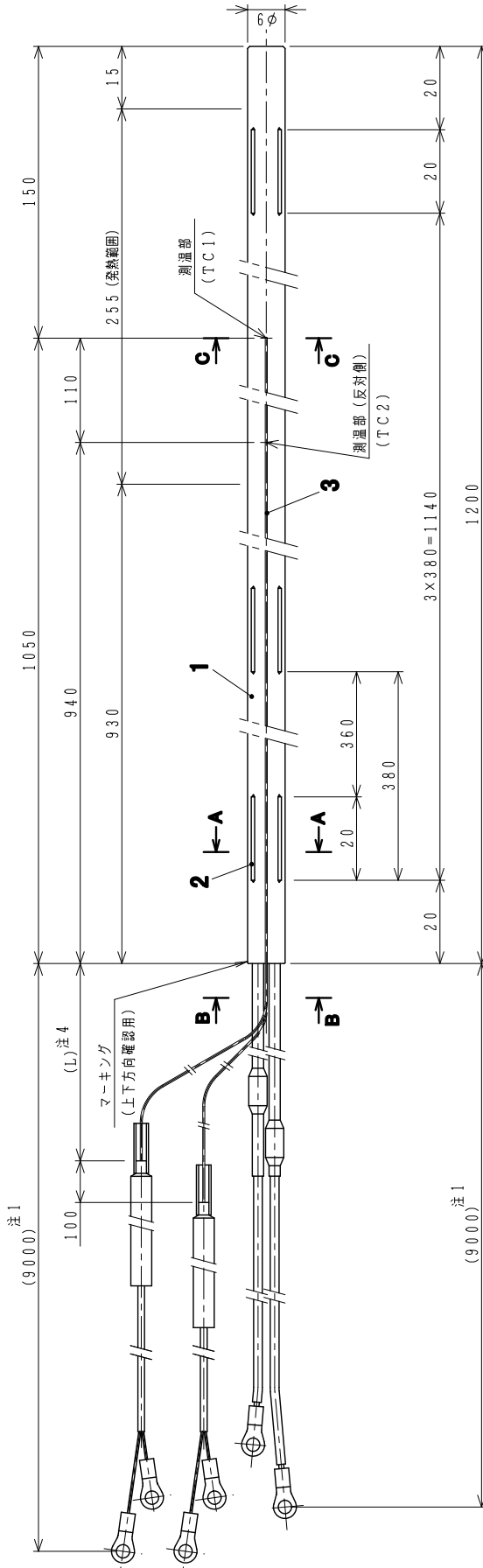
- 注記
1. 制御盤までのケーブルの全長を示す。
  2. 製作時、途中を切断してコネクタを取り付ける。
  3. 本品は、放射体模擬ピンの機能を有するものである。
  4. 熱電対のシースが部1から浮かないように固定する。
4. 組立時、ケーブルが重ねやすいように、アダプタ位置が異なる発熱ピン模擬体を1本ずつ製作する。(4種類)

図 2.11 ヒーターピン(ピン反射体概念、上流側、熱電対1個, H9~H12)

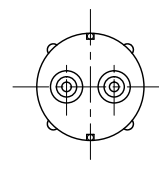
注4

L
100
300
500
700

部	名称	個数	材料	備考
1	発熱模擬ピン	1	SUS316等	0~10W
2	スプーサ	16	SUS316	
3	熱電対	2	SUS316	



断面 A-A

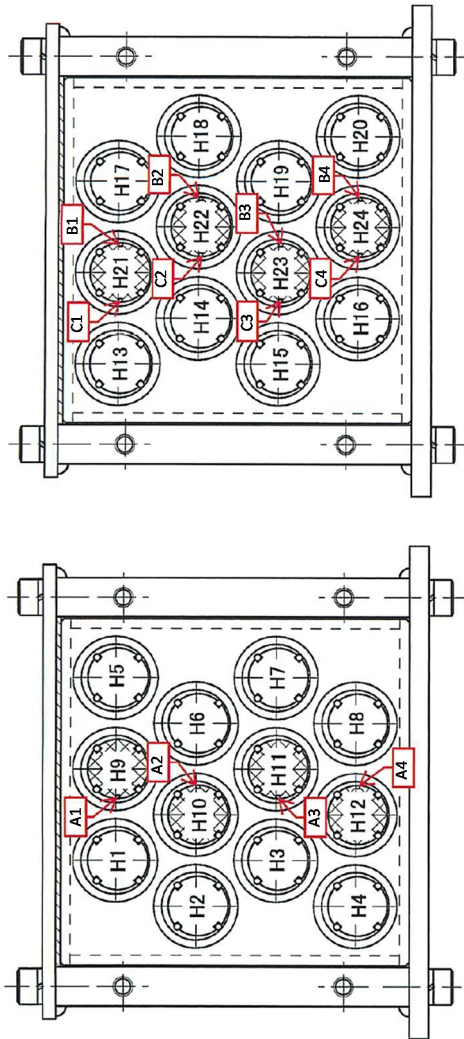


断面 B-B

- 注記
1. 制御盤までのケーブルの全長を示す。  
製作時、途中を切断してコネクタを取り付ける。
  2. 本品は、放射体模擬ピンの機能を有するものである。
  3. 熱電対のシースが部1から浮かないように固定する。
  4. 組立時、ケーブルが重ねやすいように、アダプタ位置が異なる発熱ピン模擬体を1本ずつ製作する。(4種類)

(熱電対測温部詳細)  
断面 C-C

図 2.12 ヒーターピン(ピン反射体概念、下流側、熱電対2個、H21~H24)



上流側

下流側

※いずれも、コネクタ側から見た配置

図 2.13 ヒーターピン配置 (ピン反射体概念)

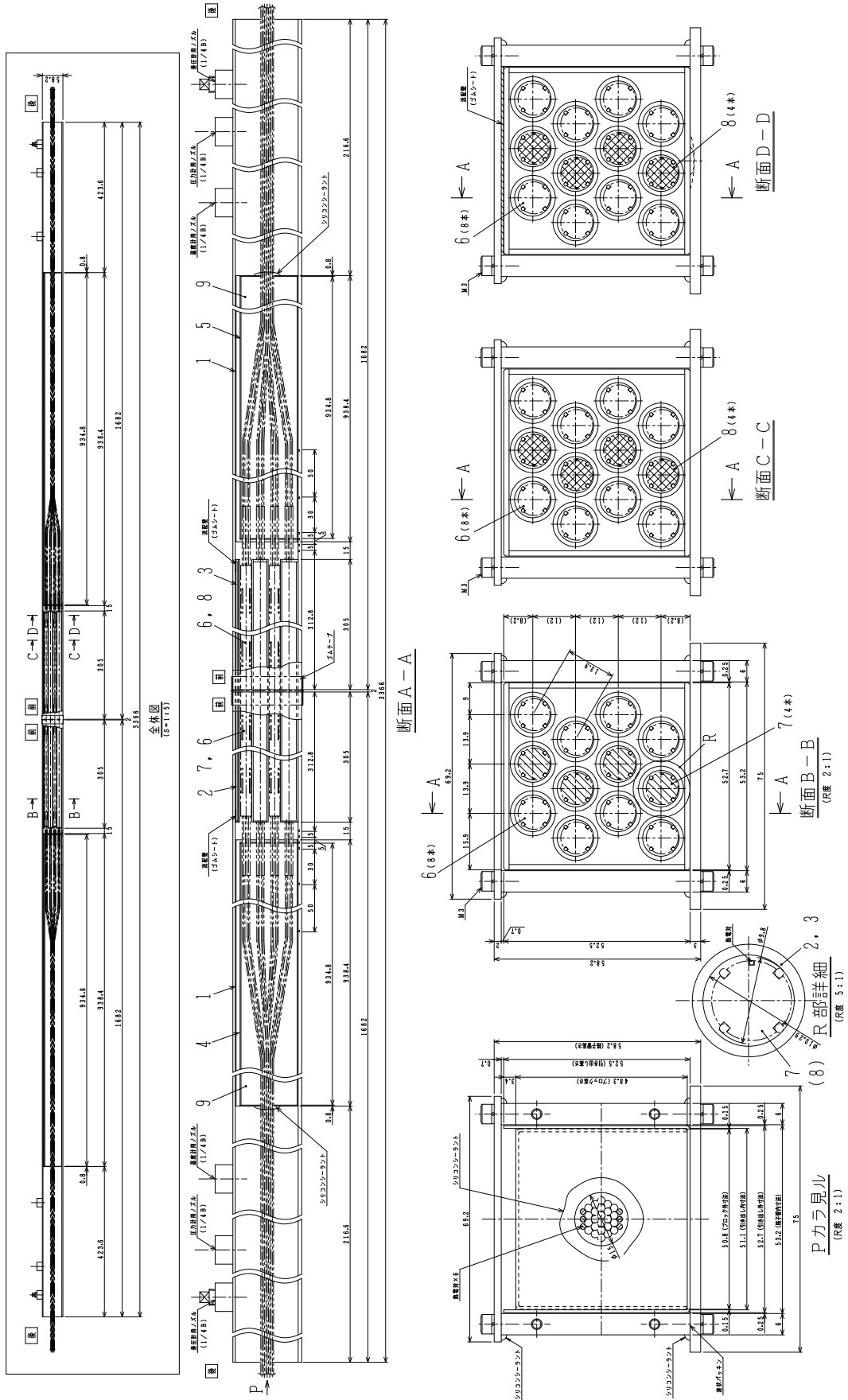


図 2.14 格子管内部(引き出し反射体概念)

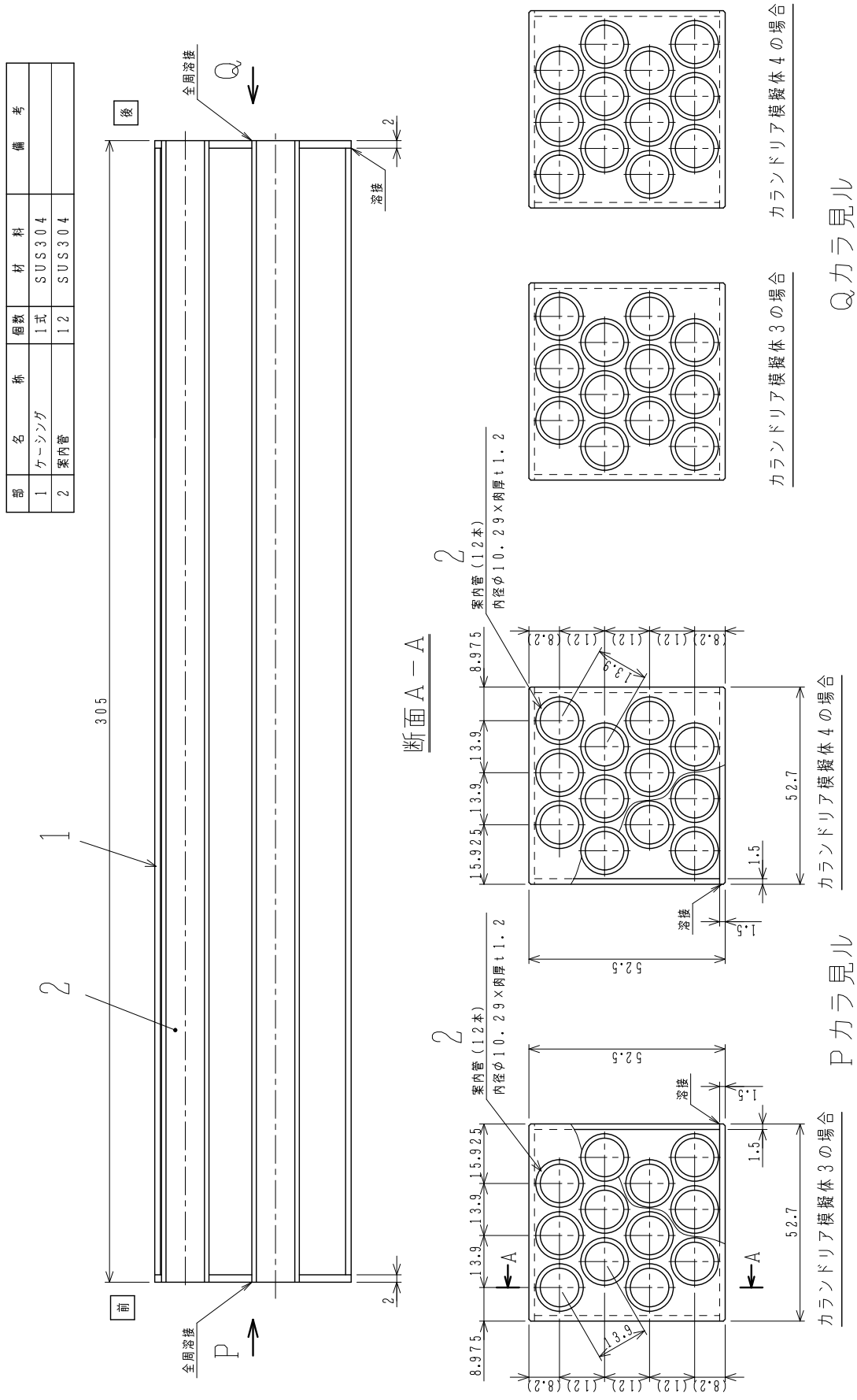


図 2.15 カランドリア模擬体(引き出し反射体概念)

部 名	材 質	備 考
1 本体	SUS304	
2 蓋1	SUS304	
3 蓋2	SUS304	

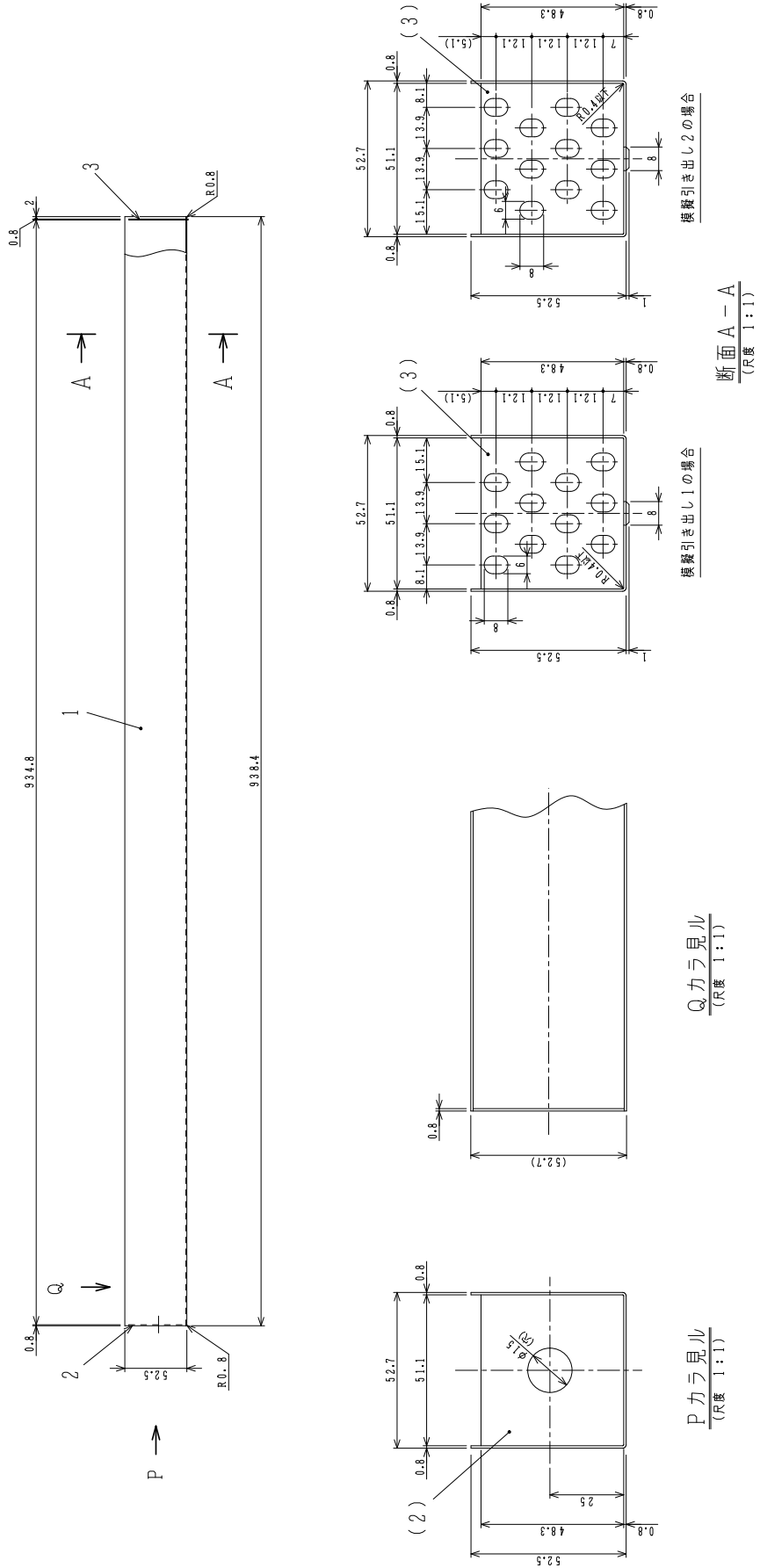
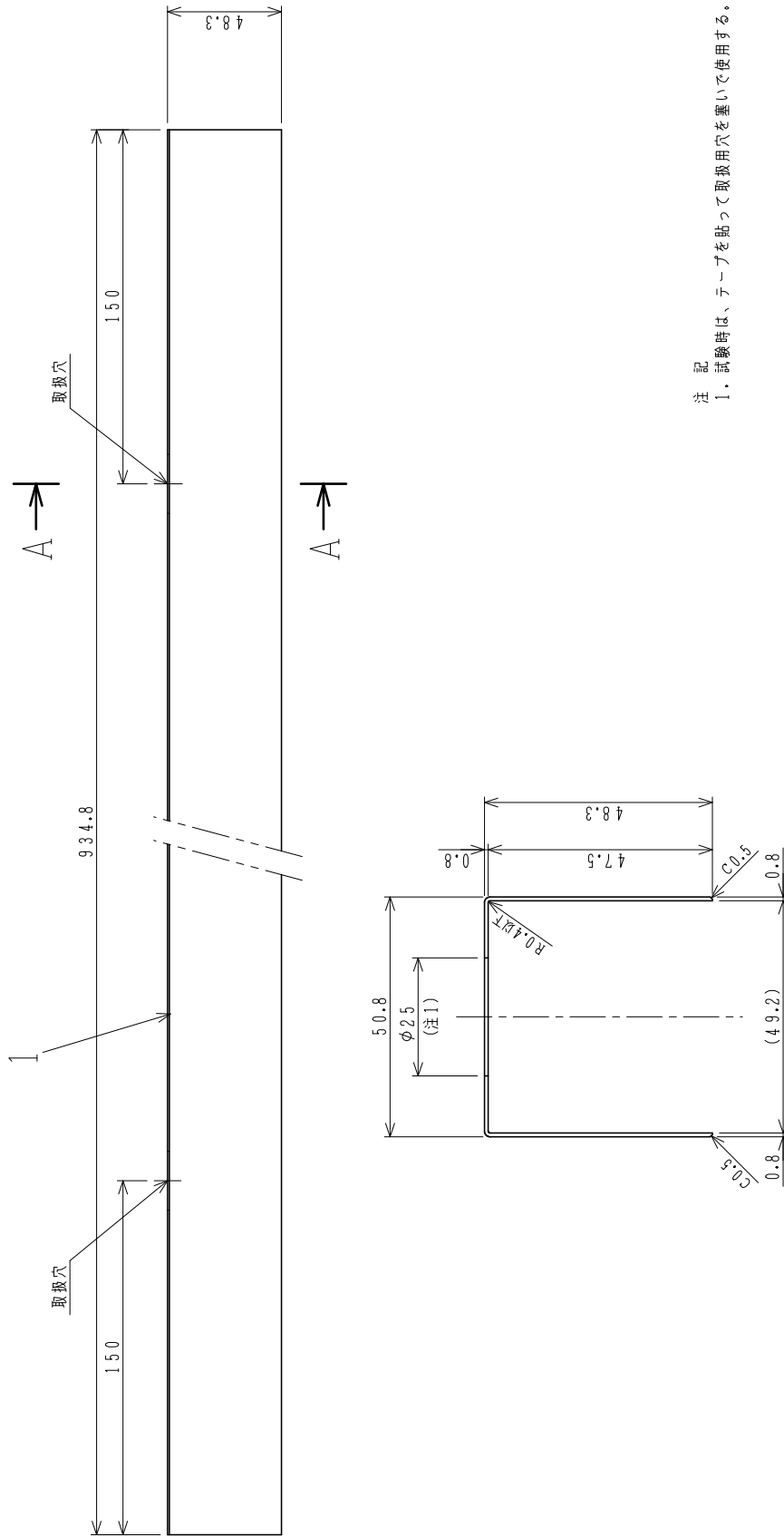


図 2.16 引き出し(引き出し反射体概念)

部名	称	個数	材	料	備	考
1	本体	1	SUS304			



断面 A - A

図 2.17 板状反射体模擬部 (引き出し反射体概念)



### 3. 試験

#### 3.1 試験方法

4組に分けられた24本のヒーターを等出力に設定し、一定のブロウ流量で各部温度が平衡状態になるまで待った後、一定時間保持した。表3.1に試験したケースを一覧する。

ヒーター出力をゼロとしたケースは、温度上昇がない場合の圧力損失を調べるための試験である。短時間で平衡状態に達するため、保持時間は10分程度とし後半5分間の平均値を取って平衡状態での測定値とした。

ヒーターを投入したケースでは、3種のヒーター出力に対して各々最大4つの空気流量で試験を実施した。ヒーター出力が7.5W/ピンの場合、ブロウ最高出力での流量は240L/minとなり、このときのピン表面の最高温度は装置制限温度である80℃近傍に達する。そのため、7.5W/ピン以上の出力で試験は実施することはできない。また、7.5W/ピンで空気流量を絞った試験も実施できない。ヒーターを投入したケースでは、平衡に達するのに4~8時間程度の時間がかかる。平衡に達した後、1時間保持し、後半30分間の平均値を取った。

表 3.1 試験したケース

ヒーター出力 (W/ピン)	入口空気流量 (L/min)	保持時間 (min)
0	17~263 (15点)	10
2.5	80、160、240	60
5	130、160、200、240	60
7.5	240	60

#### 3.2 試験結果(ヒーター出力無し)

表3.2にヒーターを投入しなかった場合の試験結果を示す。熱源が無いため入口温度と出口温度はほぼ等しい。入口側流量は最大で263L/min、そのときの差圧は12.7kPaであった。出口流量が入口流量よりも大きくなっているのは、出口側で負圧となっており体積が膨張しているからである。本流量計では、指示値を流体密度の平方根に比例する補正係数で補正する必要があるが、本表では入口・出口ともに、補正前の値を記載している。

表3.3、表3.4にピン表面温度の測定結果を示す。入口空気温度との差をみると、上流側熱電対A1~A4でピン表面の温度上昇が見られる。また、流量が大きいほど温度は高くなっている。

表 3.2 ヒーター出力無しケースの試験結果 (空気測定)

番号	空気温度		圧力			差圧	流量	
	℃		kPa			kPa	L/min	
	入口	出口	入口	出口	入口-出口	入口	出口	
1	22.83	22.65	-1.69	-15.03	13.34	12.72	263.0	305.3
2	22.87	22.64	-1.69	-13.98	12.28	11.65	249.1	281.6
3	23.04	22.68	-1.71	-12.87	11.16	10.68	232.2	261.5
4	23.13	22.69	-1.69	-11.76	10.07	9.79	218.0	239.9
5	23.19	22.72	-1.68	-11.78	10.10	9.03	205.7	222.7
6	23.29	22.77	-1.73	-10.66	8.93	8.13	190.3	200.9
7	23.30	22.83	-1.70	-9.62	7.92	7.47	174.9	182.7
8	23.36	22.88	-1.69	-8.41	6.71	6.50	150.6	161.5
9	23.52	22.94	-1.70	-7.29	5.60	5.55	132.0	141.3
10	23.59	22.96	-0.63	-6.19	5.57	4.62	110.8	120.9
11	23.63	23.01	-0.64	-5.10	4.47	3.73	90.4	100.2
12	23.76	23.09	-0.63	-5.12	4.49	2.90	70.0	80.7
13	23.82	23.15	-0.64	-4.04	3.40	2.13	49.8	60.4
14	23.87	23.20	-0.63	-4.04	3.41	1.71	35.5	44.7
15	23.99	23.24	-0.61	-2.98	2.37	0.82	16.9	18.9

表 3.3 ヒーター出力無しケースの試験結果（ピン表面温度）

番号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1	25.48	25.28	25.06	24.65	25.05	24.58	24.37	23.95	24.31	24.29	24.04	23.63
2	25.35	25.24	24.99	24.70	25.09	24.75	24.58	24.26	24.38	24.44	24.33	23.92
3	25.33	25.33	25.08	24.86	25.17	24.87	24.73	24.50	24.47	24.60	24.54	24.20
4	25.35	25.36	25.13	24.90	25.22	24.96	24.87	24.70	24.55	24.70	24.69	24.37
5	25.37	25.40	25.18	25.01	25.30	25.08	24.99	24.84	24.62	24.80	24.79	24.49
6	25.51	25.52	25.31	25.19	25.48	25.29	25.23	25.11	24.80	25.01	25.06	24.76
7	25.55	25.61	25.41	25.26	25.52	25.35	25.25	25.15	24.84	25.02	25.07	24.79
8	25.59	25.67	25.47	25.30	25.55	25.36	25.28	25.19	24.88	25.07	25.09	24.84
9	25.65	25.71	25.46	25.37	25.58	25.40	25.30	25.24	24.90	25.12	25.11	24.87
10	25.67	25.70	25.46	25.35	25.57	25.45	25.35	25.26	24.91	25.12	25.17	24.92
11	25.72	25.73	25.53	25.42	25.61	25.47	25.39	25.28	25.00	25.19	25.22	25.00
12	25.76	25.77	25.56	25.47	25.69	25.49	25.52	25.38	25.07	25.22	25.34	25.06
13	25.80	25.81	25.60	25.50	25.65	25.48	25.47	25.36	25.03	25.19	25.26	25.04
14	25.80	25.89	25.67	25.56	25.66	25.58	25.49	25.45	25.07	25.29	25.29	25.07
15	25.86	25.89	25.68	25.56	25.65	25.53	25.44	25.33	25.08	25.29	25.35	25.08

表 3.4 ヒーター出力無しケースの試験結果（ピン表面温度－空気入口温度）

番号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1	2.65	2.44	2.23	1.82	2.22	1.75	1.53	1.12	1.48	1.46	1.21	0.79
2	2.49	2.37	2.12	1.83	2.22	1.89	1.71	1.39	1.51	1.58	1.46	1.06
3	2.29	2.28	2.04	1.81	2.12	1.82	1.69	1.45	1.43	1.56	1.50	1.15
4	2.22	2.23	2.00	1.77	2.09	1.83	1.74	1.57	1.42	1.57	1.56	1.24
5	2.18	2.21	1.98	1.81	2.11	1.89	1.80	1.65	1.42	1.60	1.59	1.30
6	2.23	2.23	2.02	1.90	2.19	2.01	1.95	1.82	1.52	1.73	1.78	1.48
7	2.25	2.31	2.11	1.95	2.22	2.04	1.94	1.85	1.54	1.72	1.76	1.48
8	2.24	2.32	2.11	1.94	2.19	2.00	1.92	1.83	1.52	1.71	1.73	1.48
9	2.13	2.19	1.95	1.85	2.06	1.88	1.78	1.72	1.38	1.60	1.59	1.35
10	2.08	2.11	1.88	1.77	1.98	1.87	1.76	1.67	1.32	1.53	1.59	1.33
11	2.09	2.10	1.90	1.80	1.98	1.84	1.76	1.65	1.37	1.56	1.59	1.37
12	2.00	2.01	1.80	1.71	1.93	1.74	1.76	1.62	1.31	1.46	1.58	1.30
13	1.98	1.99	1.78	1.68	1.83	1.66	1.65	1.54	1.21	1.37	1.44	1.22
14	1.93	2.02	1.80	1.69	1.79	1.70	1.62	1.57	1.20	1.42	1.42	1.20
15	1.88	1.90	1.70	1.58	1.67	1.54	1.46	1.34	1.10	1.31	1.36	1.10

### 3.3 試験結果(ヒーター投入)

次にヒーターを表 3.5 のように制御し、表 3.6 に示すように流量調整した試験を実施した。H1、H6 などはヒーターピンの通し番号 (図 2.13) である。ヒーター出力無しのケースと同様に、流量については、入口出口共に流体密度補正前の値を示した。表 3.7、表 3.8 にピン表面温度の測定結果を示す。

ヒーター投入ケースに対しては、予備試験として 1、2、3、5、6、8 の 6 ケースを本試験と同様の方法で実施し、付録 A に示すように本試験と同様の結果を得た。

表 3.5 ヒーター投入ケースの試験結果 (ヒーター出力、W/ピン)

	H1-H6	H7-H12	H13-H18	H19-H24	平均値
	W/6ピン				W/ピン
1	44.980	45.031	44.804	44.813	7.485
2	30.182	30.159	30.226	30.135	5.029
3	15.169	15.199	15.198	15.181	2.531
4	30.081	30.114	30.062	30.053	5.013
5	29.995	30.140	30.115	30.113	5.015
6	15.193	15.191	15.144	15.150	2.528
7	29.935	30.083	30.070	30.074	5.007
8	15.212	15.130	15.163	15.166	2.528

表 3.6 ヒーター投入ケースの試験結果 (空気測定)

	空気温度		圧力			差圧	流量	
	℃		kPa			kPa	L/min	
	入口	出口	入口	出口	入口- 出口	入口	出口	
1	23.55	54.86	-1.74	-15.09	13.35	12.75	239.9	284.0
2	23.79	44.18	-1.72	-15.07	13.35	12.80	247.1	287.4
3	24.56	34.70	-1.69	-15.50	13.81	12.80	252.5	289.9
4	24.53	50.10	-1.68	-11.81	10.12	9.80	198.9	219.3
5	24.30	54.06	-1.71	-9.62	7.91	7.91	159.4	176.1
6	24.48	39.68	-1.71	-9.59	7.88	7.61	161.8	172.9
7	24.21	59.95	-1.68	-8.38	6.70	6.53	131.4	148.5
8	24.05	51.33	-0.63	-5.09	4.46	3.77	80.7	89.7

表 3.7 ヒーター投入ケースの試験結果（ピン表面温度）

番号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1	48.08	48.59	48.50	47.59	63.28	65.09	64.40	61.34	68.61	72.29	70.76	66.05
2	40.79	41.14	40.98	40.26	50.50	51.91	51.28	49.23	54.09	56.58	55.43	52.51
3	34.41	34.53	34.41	34.00	39.03	39.78	39.14	38.22	40.89	42.01	41.28	39.90
4	43.48	44.01	43.80	43.15	56.66	58.14	57.11	54.72	61.74	63.90	62.33	58.54
5	44.87	45.54	45.29	44.29	61.08	62.63	61.52	58.58	67.17	69.51	67.73	62.97
6	36.18	36.52	36.29	35.83	44.26	45.08	44.29	42.96	47.28	48.47	47.49	45.27
7	47.15	48.04	47.65	46.34	67.06	68.76	67.12	64.00	74.32	76.96	74.74	69.36
8	40.94	41.70	41.25	40.07	56.95	58.53	56.98	54.78	62.27	64.46	62.99	59.23

表 3.8 ヒーター投入ケースの試験結果（ピン表面温度－空気入口温度）

番号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1	24.53	25.04	24.95	24.04	39.73	41.55	40.85	37.79	45.07	48.74	47.21	42.50
2	17.01	17.35	17.19	16.47	26.71	28.13	27.50	25.44	30.30	32.79	31.64	28.73
3	9.86	9.98	9.85	9.44	14.47	15.22	14.58	13.66	16.33	17.46	16.72	15.34
4	18.95	19.48	19.27	18.62	32.13	33.60	32.58	30.19	37.21	39.37	37.80	34.00
5	20.57	21.25	21.00	19.99	36.78	38.34	37.23	34.29	42.87	45.21	43.43	38.68
6	11.69	12.03	11.80	11.35	19.78	20.59	19.80	18.48	22.80	23.98	23.01	20.79
7	22.95	23.83	23.45	22.13	42.85	44.55	42.91	39.80	50.11	52.75	50.53	45.16
8	16.90	17.65	17.20	16.02	32.90	34.49	32.93	30.73	38.23	40.41	38.94	35.18

## 4. 解析

### 4.1 解析方法

本節で用いる変数を表 4.1 に一覧する。

まず、入口流量計の指示値を補正し重量流量を求める。

$$w_{in} = f_{in} \tilde{F}_{in} \rho_{in} \quad (1)$$

入口側流量指示値に対する補正係数は、次式で与えられる。

$$f_{in} = \sqrt{\frac{\tilde{P}_{in}}{101325} \frac{293.15}{\tilde{T}_{in}}} \quad (2)$$

出口側重量流量および、出口側流量指示値に対する補正係数は、同様に次式で与えられる。

$$w_{out} = f_{out} \tilde{F}_{out} \rho_{out}$$

$$f_{out} = \sqrt{\frac{\tilde{P}_{out}}{101325} \frac{293.15}{\tilde{T}_{out}}} \quad (3)$$

解析で用いる質量流量評価値としては、温度・圧力変動が小さいことから入口側の重量流量を用いることとする。すなわち、

$$w = w_{in} \quad (4)$$

ある区間における空気の温度上昇 $\Delta T_1$ は次式で与えられる。

$$\Delta T_1 = \frac{\tilde{Q}}{(C_p + nR)w} \quad (5)$$

ある区間における空気の圧力損失は次式で表される。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \xi \rho v^2 \frac{l_1}{D_1} \quad (6)$$

ただし、代表長さを次式で求めた。

$$D_1 = \frac{D_g^2 - D_p^2}{D_p + D_g} \quad (7)$$

本試験ではレイノルズ数は最大でも 1400 程度であり、層流であるので摩擦損失係数は次式で与えられる。

$$\xi = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

上式では案内管中のピン位置に偏心が無いと仮定した。しかし、現実の体系では偏心があるため、その影響を付録 B に示した方法で評価した。

次に、空気温度と被覆管表面の温度差を評価する。ヌセルト数は次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$x^+ = \frac{x}{D_2} \frac{1}{Re Pr} \quad (9)$$

$$Nu = 5.364 \left( 1 + \left( \frac{220x^+}{\pi} \right)^{-\frac{10}{9}} \right)^{3/10} - 1.0 \quad (10)$$

ただし、代表長さを次式で求めた。

$$D_2 = \frac{D_g^2 - D_p^2}{D_p} \quad (11)$$

A1～A4 熱電対の位置 $x$ は加熱開始地点から 0.12m、B1～B4 は 0.39m、C1～C4 は 0.5m である。ヌセルト数から、熱伝達係数及び表面温度上昇 $\Delta T_2$ は次式で求まる。

$$h = \frac{Nu\lambda}{D_2} \quad (12)$$

$$\Delta T_2 = \frac{\tilde{q}}{h} \quad (13)$$

解析では、区間を上流側ヒーター手前、ヒーター部、下流側ヒーター部、ヒーター後、の 4 つに区切り、密度、熱伝導率などの温度・圧力に依存する物性値を変化させた。

表 4.1 変数表

記号	単位	物理量
$w_{in}/w_{out}$	kg/s	入口側/出口側質量流量
$w \equiv w_{in}$	kg/s	質量流量評価値
$\tilde{F}_{in}/\tilde{F}_{out}$	m <sup>3</sup> /s	入口側/出口側体積流量 (補正前)
$F_{in}/F_{out}$	m <sup>3</sup> /s	入口側/出口側体積流量 (補正後)
$f_{in}/f_{out}$		入口側/出口側流量指示値補正係数
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	空気密度
$\rho_{in}/\rho_{out}$	kg/m <sup>3</sup>	入口/出口空気密度
$\lambda$	W/mK	熱伝導率
$\tilde{P}_{in}/\tilde{P}_{out}$	Pa	入口/出口空気圧力
$\tilde{T}_{in}/\tilde{T}_{out}$	K	入口/出口空気温度
$\tilde{Q}$	W	ある区間におけるヒーター出力
$\tilde{q}$	W/m <sup>2</sup>	熱流束
$C_p$	J/kg/K	空気定圧比熱
$n$	mol/kg	空気 1kg あたりのモル量 (=1000/28.966)
$R$	J/K/mol	気体定数 (=8.3145)
$\xi$		管摩擦損失係数
$v$	m/s	流速
$l_1$	m	流路長さ
$D_p$	m	ピン外径 (9mm)
$D_g$	m	案内管内径 (10.29mm)
$D_1$	m	圧力評価時の代表長さ (1.29mm)
$D_2$	m	被覆管温度評価時の代表長さ (2.76mm)
$x$	m	加熱開始地点から熱電対までの 距離。0.12、0.39、0.5m
$x_{all}$	m	ヒーターの全長 0.51m
$Re$		レイノルズ数
$Pr$		プラントル数
$Nu$		ヌセルト数
$h$	W/m <sup>2</sup> /K	熱伝達係数

~記号は測定値であることを意味する。



4.2 解析結果(ヒーター出力無し)

4.2.1 流量

表 3.2 で示した空気流量は圧力及び温度の補正がなされていないものである。温度計、圧力計、及び差圧計からの測定値を用いて、流量補正を行った結果を表 4.2 に示す。同表に補正後の体積流量から算出した質量流量も示した。入口と出口の質量流量は一致するべきであるが、流量の大きいケースと小さいケースでは、出口流量が最大 10%程度大きい。(図 4.1)

出口側の流量計は負圧であり補正係数が大きくなることから、入口側流量の信頼性が高いと考えられる。そのため、以下の解析では入口流量を測定値として用いることとする。

表 4.2 流量補正

	体積流量(L/min)						質量流量(kg/min)		
	計器指示値		補正係数		補正後の流量		入口	出口	出口/入口
	入口	出口	入口	出口	入口	出口			
1	263.0	305.3	0.987	0.919	266.5	332.3	0.313	0.338	1.08
2	249.1	281.6	0.987	0.924	252.5	304.6	0.296	0.314	1.06
3	232.2	261.5	0.986	0.930	235.4	281.1	0.276	0.293	1.06
4	218.0	239.9	0.986	0.936	221.0	256.3	0.259	0.270	1.04
5	205.7	222.7	0.986	0.936	208.6	238.0	0.244	0.251	1.03
6	190.3	200.9	0.986	0.942	193.0	213.4	0.226	0.228	1.01
7	174.9	182.7	0.986	0.947	177.4	192.9	0.208	0.208	1.00
8	150.6	161.5	0.986	0.953	152.7	169.5	0.179	0.185	1.04
9	132.0	141.3	0.986	0.959	133.9	147.4	0.157	0.163	1.04
10	110.8	120.9	0.991	0.964	111.8	125.4	0.132	0.140	1.06
11	90.4	100.2	0.991	0.970	91.3	103.3	0.108	0.117	1.08
12	70.0	80.7	0.991	0.969	70.7	83.2	0.084	0.094	1.13
13	49.8	60.4	0.990	0.975	50.3	62.0	0.059	0.071	1.19
14	35.5	44.7	0.990	0.975	35.9	45.9	0.042	0.053	1.24
15	16.9	18.9	0.990	0.980	17.0	19.3	0.020	0.022	1.11

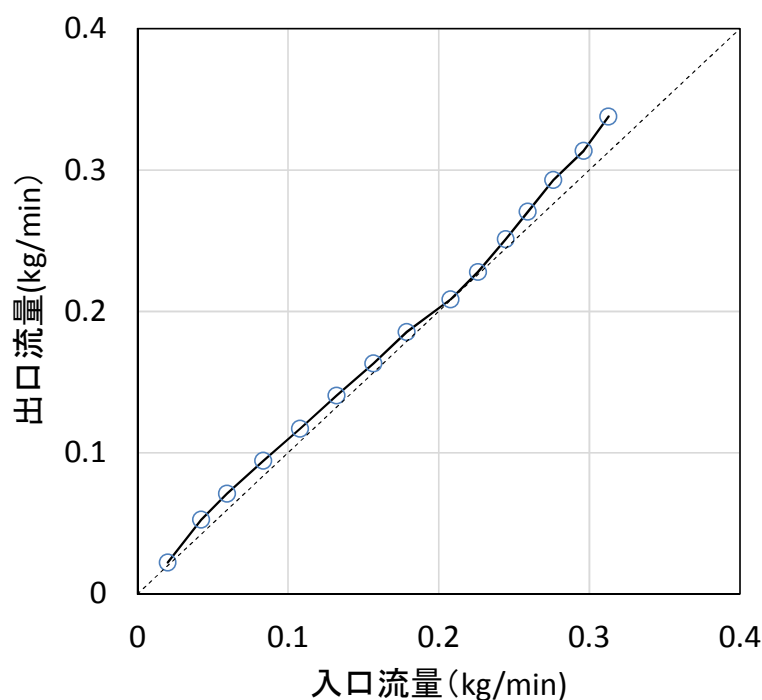


図 4.1 入口出口の質量流量の比較

#### 4.2.2 圧力損失

表 4.3 及び図 4.2 に入口出口間の差圧の測定値及び解析値を示す。測定値は、入口側と出口側にそれぞれ設置した圧力計の差と、入口・出口近傍のノズルをチューブで繋いで差圧計で測った差圧の二つが得られる。前者は流量に対してなめらかでは無く、流量が小さい場合に両者の差は大きくなっている。圧力計の精度が $\pm 1\text{kPa}$ であるのに対し、差圧計では $\pm 0.2\text{kPa}$ であるので、後者がより正確であると考えられる。

解析値として、偏心が無いものと仮定して式(6)によって評価される値と、偏心を考慮して付録 B の方法で評価される値を記載した。偏心を考慮する事によって 5%程度圧力損失が小さく評価され、測定値に近づくことが分かる。しかし、偏心を考慮した場合であっても測定値よりも 40~60%程度過大評価になっている。

表 4.3 圧力損失の解析結果 (kPa)

	測定値		解析値	
	(圧力計差)	(差圧計)	(偏心考慮無し)	(偏心考慮)
1	13.34	12.72	18.81	17.94
2	12.28	11.65	17.82	16.99
3	11.16	10.68	16.61	15.83
4	10.07	9.79	15.60	14.86
5	10.10	9.03	14.72	14.02
6	8.93	8.13	13.61	12.97
7	7.92	7.47	12.52	11.92
8	6.71	6.50	10.77	10.26
9	5.60	5.55	9.45	8.99
10	5.57	4.62	7.97	7.58
11	4.47	3.73	6.51	6.19
12	4.49	2.90	5.04	4.79
13	3.40	2.13	3.59	3.41
14	3.41	1.71	2.56	2.43
15	2.37	0.82	1.21	1.15

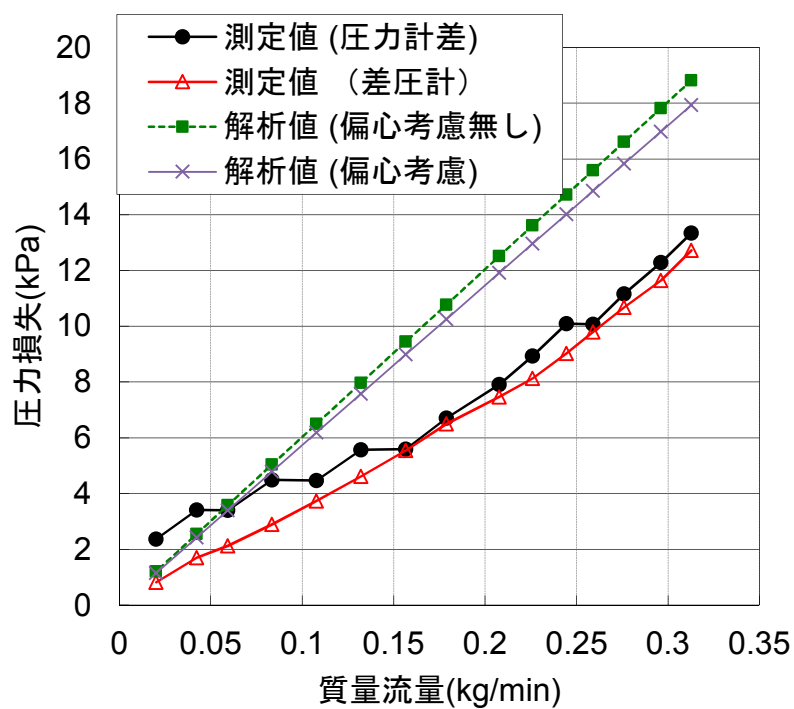


図 4.2 圧力損失の測定値と解析値の比較

4.3 解析結果(ヒーター投入)

4.3.1 流量

表 4.4 及び図 4.3 に、ヒーターを投入した場合の流量補正結果を示す。ヒーター出力無しの場合と同様に、出口の質量流量は入口よりも最大 5%程度大きくなっているが、以下の解析では入口流量を用いる。

表 4.4 流量補正

	体積流量(L/min)						質量流量(kg/min)		
	計器指示値		補正係数		補正後の流量		入口	出口	出口/入口
	入口	出口	入口	出口	入口	出口			
1	239.9	284.0	0.985	0.872	243.4	325.6	0.285	0.298	1.05
2	247.1	287.4	0.985	0.887	250.8	324.1	0.293	0.307	1.05
3	252.5	289.9	0.984	0.898	256.6	322.8	0.299	0.314	1.05
4	198.9	219.3	0.984	0.895	202.1	245.0	0.236	0.236	1.00
5	159.4	176.1	0.984	0.900	162.0	195.6	0.189	0.191	1.01
6	161.8	172.9	0.984	0.921	164.5	187.7	0.192	0.192	1.00
7	131.4	148.5	0.985	0.898	133.5	165.3	0.156	0.161	1.03
8	80.7	89.7	0.990	0.926	81.5	96.8	0.096	0.100	1.04

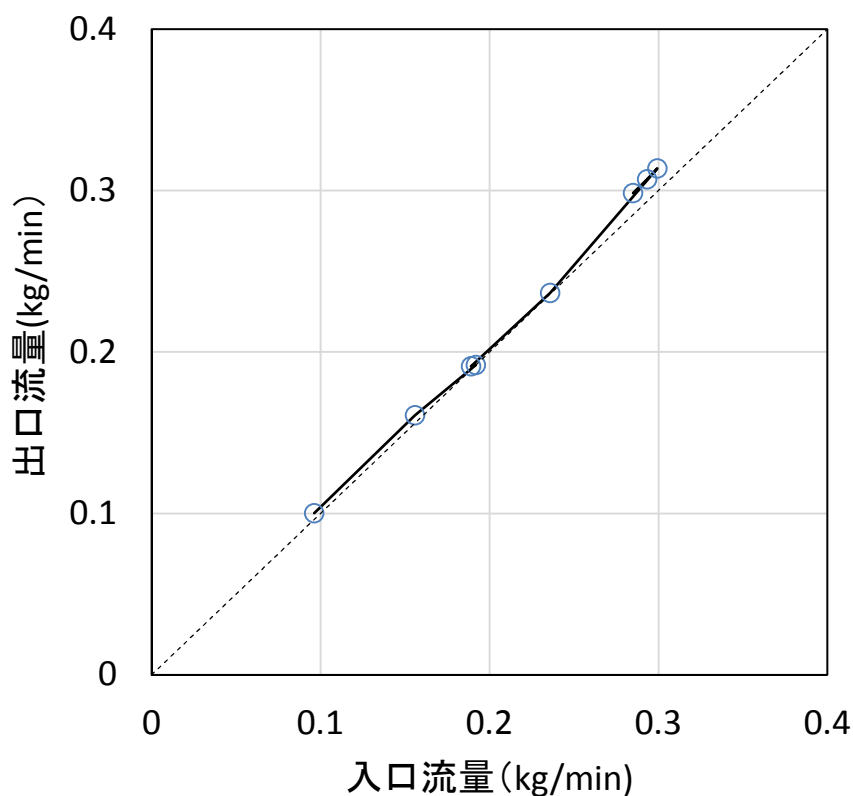


図 4.3 入口出口の質量流量の比較

4.3.2 圧力損失

表 4.5 及び図 4.4 に二つの差圧測定値と、二つの解析値を示す。ヒーター出力なしの場合と同様、測定値の内、差圧計によるものの信頼性が高いと考えられる。また、偏心を考慮した場合の解析値は 30~50%程度の過大評価となっている。

表 4.5 圧力損失の解析結果 (kPa)

	測定値		評価値	
	(圧力計差)	(差圧計)	(偏心考慮無し)	(偏心考慮)
1	13.35	12.75	17.85	16.94
2	13.35	12.80	18.15	17.23
3	13.81	12.80	18.33	17.40
4	10.12	9.80	14.71	13.96
5	7.91	7.91	11.88	11.27
6	7.88	7.61	11.83	11.23
7	6.70	6.53	9.87	9.37
8	4.46	3.77	6.04	5.73

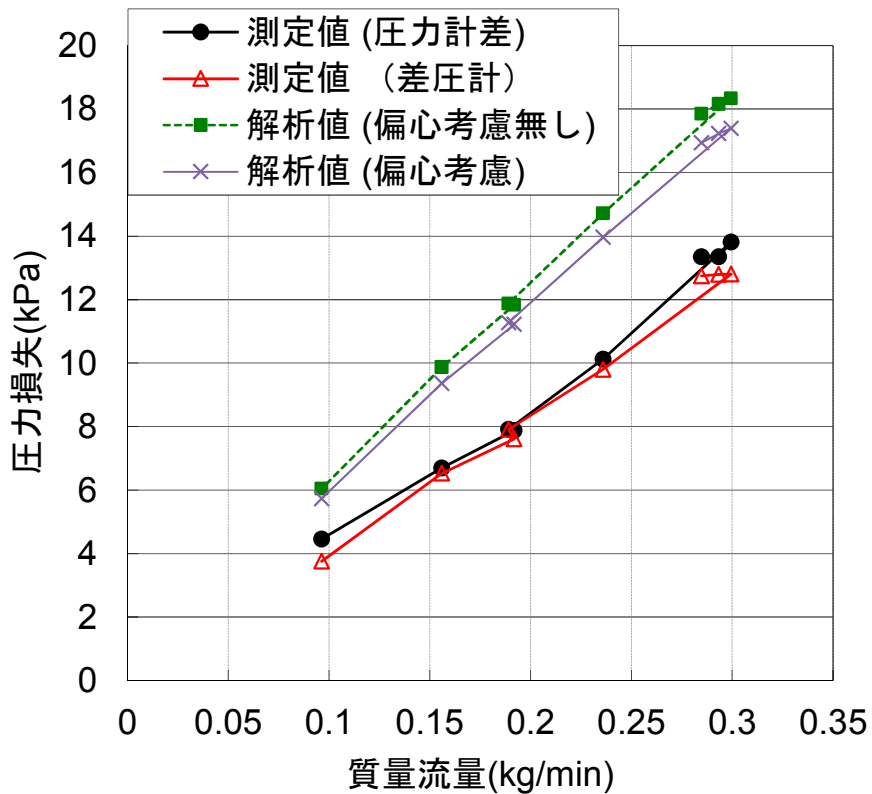


図 4.4 圧力損失の測定値と解析値の比較

4.3.3 空気温度上昇

表 4.6 及び図 4.5 に空気温度の入口出口温度差の測定値と解析値を示す。解析値は、測定されたヒーター出力を用いて式(5)から得た。解析値は最大 7%程度 of 過小評価となっている。

表 4.6 空気温度上昇の解析結果 (°C)

	測定値	解析値	解析値 / 測定値
1	31.3	29.2	0.93
2	20.4	19.0	0.93
3	10.1	9.4	0.93
4	25.6	23.6	0.92
5	29.8	29.4	0.99
6	15.2	14.6	0.96
7	35.7	35.6	1.00
8	27.3	29.1	1.07

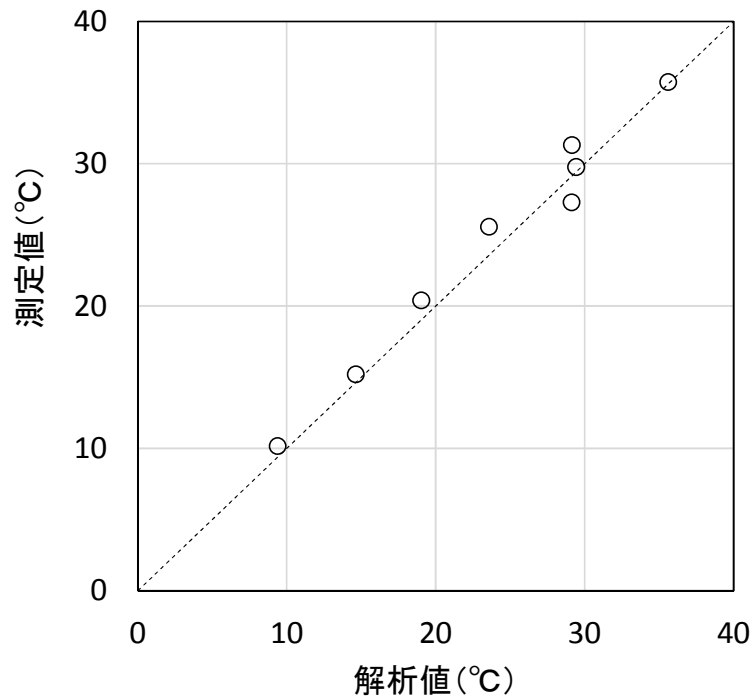


図 4.5 空気温度上昇の測定値と解析値の比較

#### 4.3.4 燃料ピン温度のばらつき

燃料ピンの表面温度測定は、上流側ピン中央、下流側ピン中央、及び下流側ピン末端において、各4つの熱電対で実施されている。4つの熱電対における温度は、解析上は同じ値となるが、実際の測定においては各位置で異なる値となる。熱電対*i*の測定値のばらつき $r_i$ を、次式で得た。

$$r_i = \frac{T_i - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (T_i)}{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (T_i) - T_{in}} \quad (14)$$

ただし、 $T_i$ は熱電対*i*の測定温度、 $T_{in}$ は入口空気温度である。例えば、A1熱電対のばらつきは、A1~A4熱電対の平均から得られる。

得られた結果を図4.6に示す。A1、B1、C1は重力方向に対して上部、A4、B4、C4は下部に位置している。全ての位置で同様の傾向が見られ、A2、B2、C2の熱電対位置の温度上昇は平均よりも4%程度大きく、A4、B4、C4は6%程度小さい。

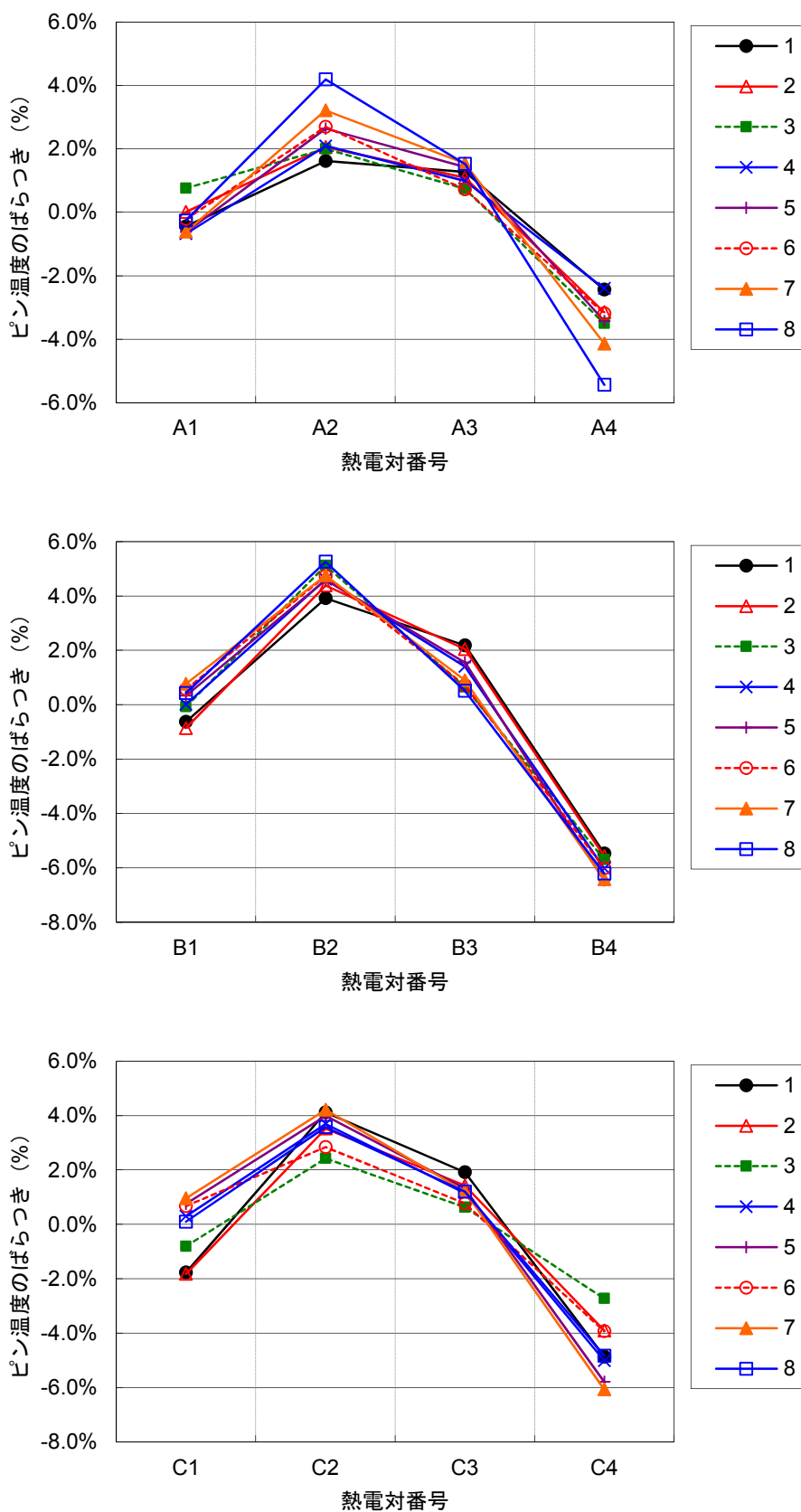


図 4.6 熱電対測定結果のばらつき



#### 4.3.5 燃料ピン表面熱伝達

前項で示したように4本の燃料ピン温度にはばらつきがあるため、平均値で表面熱伝達を評価する。

熱伝達測定値の評価方法を以下に述べる。熱電対位置での空気温度 $\tilde{T}_{air}$ を次式で求める。

$$\tilde{T}_{air} = \tilde{T}_{in} + (\tilde{T}_{out} - \tilde{T}_{in}) \frac{x}{x_{all}} \quad (15)$$

ここで、 $\tilde{T}_{in}$ 、 $\tilde{T}_{out}$ は入口、出口空気温度、 $x$ は加熱開始地点から熱電対までの距離、 $x_{all}$ はヒーターの全長(0.51m)である。熱伝達係数測定値 $\tilde{h}$ は次式で評価される。

$$\tilde{h} = \frac{1}{(\bar{T}_{TC} - \tilde{T}_{air}) \pi DL} \bar{P} \quad (16)$$

ここで、 $\bar{T}_{TC}$ は熱電対A1~A4、B1~B4、または、C1~C4の平均値、 $\bar{P}$ はピンあたりのヒーター出力測定値、 $D$ 、 $L$ はピン外径及びピンあたりの発熱部長さ(0.255m)である。

併せて、ヌセルト数の測定値 $\tilde{Nu}$ は次式で評価される。

$$\tilde{Nu} = \frac{\tilde{h}D_2}{\lambda} \quad (17)$$

これらの評価結果を表4.7と表4.8に示す。

一方、熱伝達係数の解析値は、4.1節の式(9)~式(12)で得られる。本節の解析では、Re数、Pr数等の流体物性値を評価するのに式(15)で得られる温度実測値を用いた。(空気温度を解析値とした場合は4.3.6に示す。)解析結果を表4.9、表4.10に示す。

熱伝達係数とヌセルト数について、測定値と解析値の比較を図4.7、図4.8に示す。ケース1,2では解析値が過小評価となっており、一方ケース6~8では解析値が過大評価となっていることが分かる。特に、流量・発熱量共に小さく設定したケース8では大きな差が見られる。

表 4.7 空気温度評価および、ピン表面温度測定結果

	空気温度, $T_{air}$ (°C)			空気圧力(kPa)			ピン表面温度, $\bar{T}_{TC}$ (°C)			表面温度上昇, $\bar{T}_{TC} - \tilde{T}_{air}$ (°C)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	31.4	47.0	52.8	94.23	92.64	92.04	48.2	63.5	69.4	16.8	16.5	16.7
2	28.9	39.1	42.8	94.16	92.56	91.97	40.8	50.7	54.7	11.9	11.7	11.8
3	27.1	32.2	34.0	94.13	92.53	91.94	34.3	39.0	41.0	7.2	6.9	7.0
4	30.9	43.7	48.4	95.49	94.27	93.81	43.6	56.7	61.6	12.7	13.0	13.2
5	31.7	46.6	52.1	96.29	95.30	94.93	45.0	61.0	66.8	13.3	14.3	14.8
6	28.3	35.9	38.7	96.36	95.40	95.05	36.2	44.1	47.1	7.9	8.3	8.5
7	33.1	51.0	57.6	96.92	96.10	95.79	47.3	66.7	73.8	14.2	15.7	16.3
8	30.9	44.5	49.5	99.11	98.64	98.46	41.0	56.8	62.2	10.1	12.3	12.7

表 4.8 熱伝達係数測定値 $\tilde{h}$ の評価結果

	熱流束, $\frac{\dot{P}}{\pi DL}$ (W/m <sup>2</sup> )			熱伝達係数 $\tilde{h}$ (W/m <sup>2</sup> K)			ヌセルト数 $\tilde{Nu}$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	884	880	880	52.6	53.4	52.9	5.50	5.36	5.23
2	593	593	593	49.8	50.9	50.1	5.25	5.22	5.09
3	298	298	298	41.2	43.4	42.7	4.36	4.53	4.43
4	591	591	591	46.6	45.6	44.6	4.88	4.62	4.46
5	591	592	592	44.6	41.3	40.1	4.66	4.14	3.97
6	299	298	298	37.7	36.0	35.2	3.98	3.72	3.61
7	590	591	591	41.7	37.6	36.3	4.34	3.73	3.55
8	298	298	298	29.5	24.2	23.4	3.09	2.45	2.33

表 4.9 熱伝達係数 $h$ の解析結果 (1/2)

	流速(m/s)			Re 数			Pr 数		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	18.77	20.07	20.56	1290	1324	1337	0.774	0.724	0.707
2	19.18	20.17	20.54	1327	1358	1370	0.779	0.742	0.728
3	19.47	20.14	20.39	1354	1381	1392	0.784	0.758	0.748
4	15.31	16.16	16.48	1054	1075	1084	0.785	0.745	0.730
5	12.21	12.93	13.21	838	854	860	0.790	0.746	0.731
6	12.24	12.67	12.83	848	860	865	0.799	0.772	0.763
7	10.05	10.72	10.97	687	700	705	0.791	0.742	0.726
8	6.02	6.32	6.43	414	420	422	0.815	0.777	0.764

表 4.10 熱伝達係数 $h$ の解析結果 (2/2)

	$x^+$ ((9)式)			熱伝達係数 $h$ (W/m <sup>2</sup> K)			ヌセルト数 $Nu$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	4.35E-2	1.47E-1	1.91E-1	45.8	44.7	45.0	4.79	4.48	4.45
2	4.20E-2	1.40E-1	1.81E-1	45.6	43.8	43.9	4.81	4.49	4.46
3	4.09E-2	1.35E-1	1.74E-1	45.5	43.0	43.0	4.82	4.49	4.46
4	5.25E-2	1.76E-1	2.28E-1	45.0	44.1	44.4	4.72	4.46	4.44
5	6.56E-2	2.21E-1	2.88E-1	44.4	44.2	44.6	4.64	4.44	4.42
6	6.41E-2	2.12E-1	2.74E-1	44.1	43.0	43.1	4.65	4.44	4.42
7	7.98E-2	2.71E-1	3.53E-1	44.1	44.6	45.1	4.59	4.42	4.41
8	1.29E-1	4.32E-1	5.61E-1	42.9	43.6	44.0	4.50	4.40	4.39

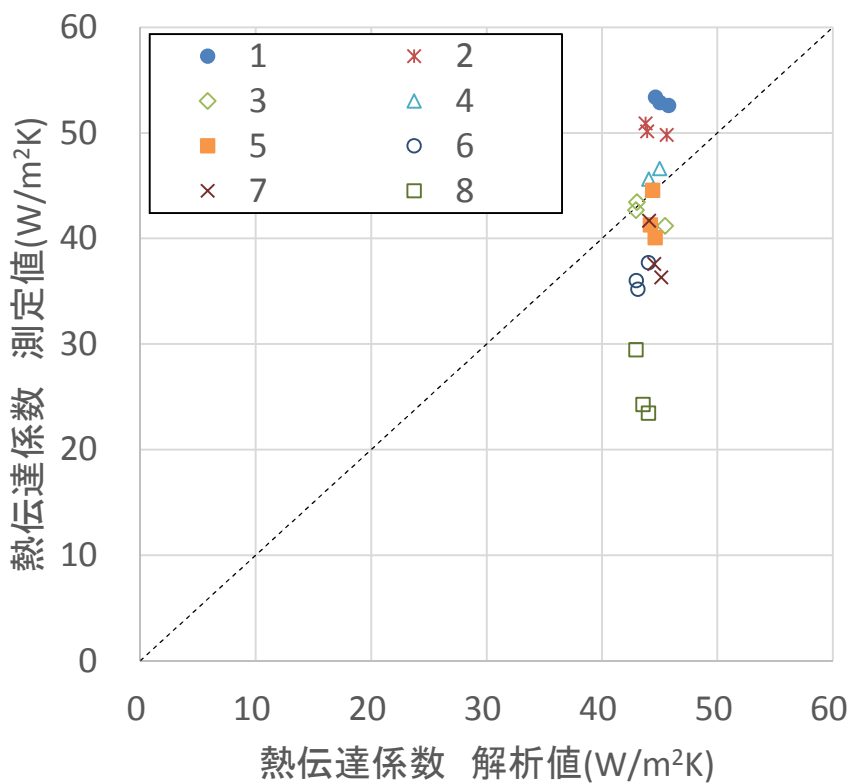


図 4.7 熱伝達係数の測定値と解析値の比較

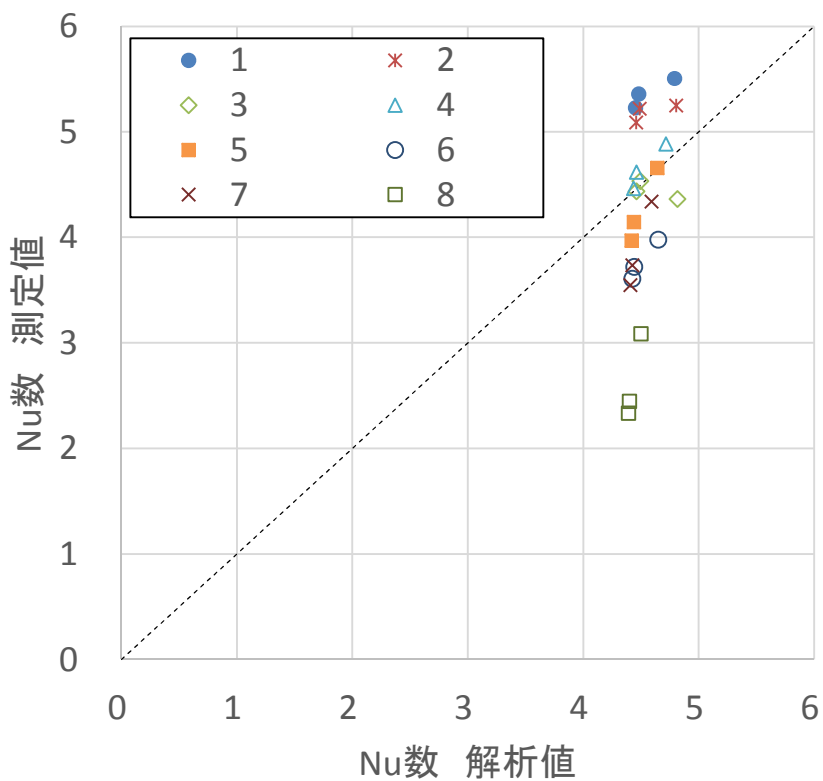


図 4.8 Nu 数の測定値と解析値の比較

#### 4.3.6 燃料ピン表面温度

前節の熱伝達の評価では空気温度として測定値を用いたが、本節では解析値を用いる。すなわち、以下の情報のみを用いて解析を行うことで、実機 TEF-P の解析手法の検証とする。

- ヒーター出力
- 入口空気温度
- 入口空気流速

4.1 節の解析手法を用いた結果を表 4.11 に示す。実際の測定結果である表 3.8 との比較を図 4.9 に示す。測定結果は A~C の熱電対位置に対して 4 つずつある。C/E 値（測定値を解析値で除した値）の平均値は、 $0.97 \pm 0.07$ （0.07 は標準偏差）であり、若干解析値が小さく評価されている。C/E 値の最大値は 1.13、最小値は 0.78 である。

表 4.11 燃料ピン表面温度の評価結果

	ピン表面温度(°C)			ピン表面温度-入口空気温度(°C)		
	A	B	C	A	B	C
1	49.8	65.6	71.7	26.2	42.1	48.1
2	41.3	51.9	55.9	17.5	28.1	32.2
3	33.3	38.7	40.7	8.8	14.1	16.1
4	43.2	56.0	61.0	18.7	31.5	36.4
5	44.5	60.2	66.4	20.2	35.9	42.1
6	34.7	42.6	45.7	10.2	18.1	21.2
7	46.0	64.7	72.2	21.8	40.5	47.9
8	37.8	53.1	59.3	13.8	29.1	35.3

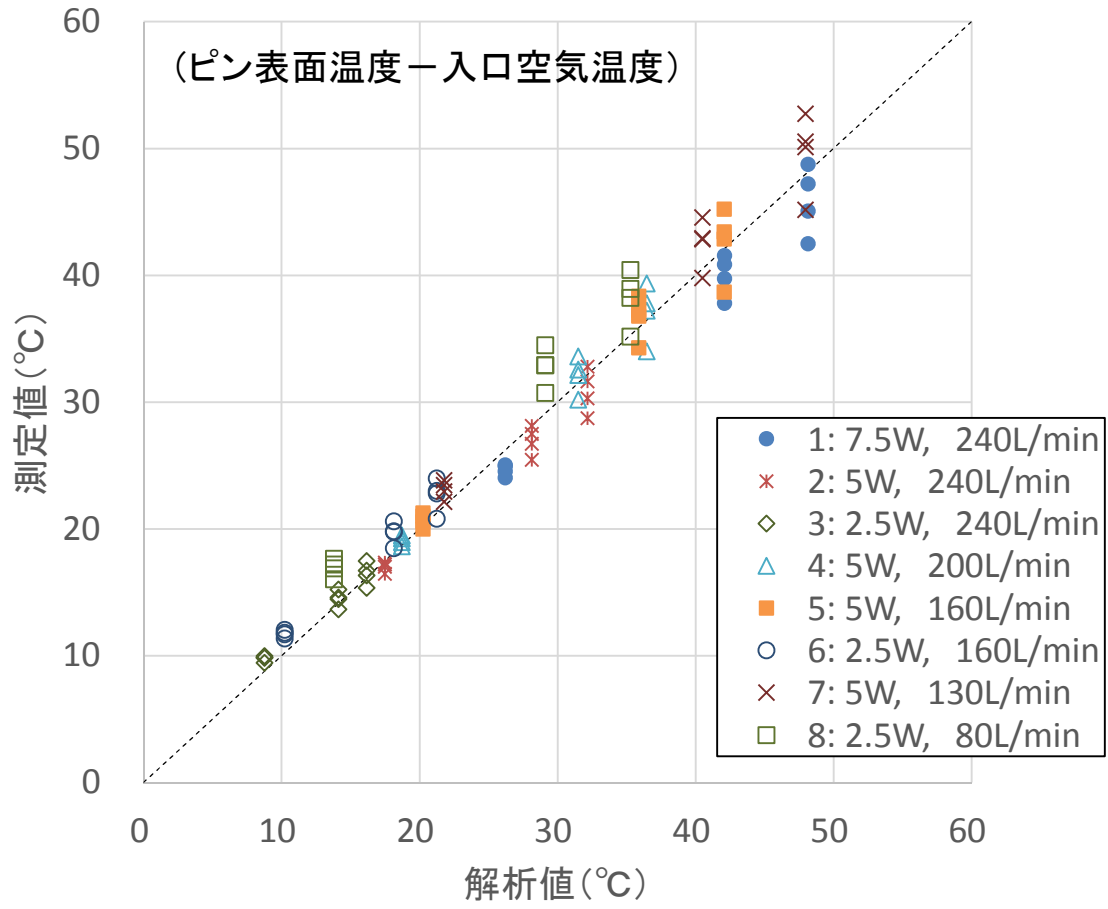


図 4.9 燃料ピン表面温度の測定値と解析値の比較

## 5. 考察

4.2.2 及び 4.3.2 項で示したように、ピン周辺を空気が流れることによって生じる圧力損失の解析値は、測定値よりも 40~60%程度過大評価になっている。実際の TEF-P 設計で用いると考えられる 200~300L/min の領域でも 50%程度の過大評価である。従って、現在用いている解析方法で実機ブロワを設計した場合オーバースペックになると予想される。しかしながら、冷却機能の重要性を考慮すると、十分に余裕を持ったブロワ性能とするべきで、現在の解析方法は保守側であり、設計において用いる事は妥当である。同様の観点から、偏心を考慮した評価手法よりも偏心を考慮しない手法の方が保守的であり、かつ、簡便であることから、4.1 節に示した偏心を考慮しない手法を用いることが妥当である。

燃料ピン表面温度の解析については、図 4.9 で示したように、C/E 値で  $0.97 \pm 0.07$  (0.07 は標準偏差) 程度の精度で予測できている。最も非保守側に評価している点では、C/E 値は 0.78 となっているが、これはケース 8 (2.5W/ピン、80L/min) であり、設計範囲よりも流量がかなり小さい。現実的な流量となるケース 2~3 などでは、C/E 値で 0.88~1.12 程度となっている。しかしながら、ここでも十分な裕度を取るべきであるから、実機設計においては温度上昇に対して 25%の裕度を見込むべきである。

表面温度の解析誤差には二つの要因が影響を及ぼしている。一つは、解析手法そのものの誤差であり、他方は各熱電対、すなわち、各流路間のばらつきである。前者は 4つの熱電対の平均値からの誤差で評価でき、後者は 4.3.4 節で示した熱電対の平均からのばらつきによって評価できる。表 5.1 に示すように、上流に位置し、温度上昇が小さい熱電対 A1~A4 では、解析手法の誤差 (平均値の誤差) が大きくなっているが、より重要である温度が高い熱電対 C1~C4 においては、両者が同程度の誤差を有していることが分かる。なお、温度測定誤差の影響は十分に小さい。

解析手法そのものの誤差の原因としては 2つ考えられる。一方は、4.3.3 に示した空気温度上昇の誤差であり、最大 7%程度が観測されている。他方は、4.3.5 で示したように、空気・燃料ピン表面の温度差を決定する熱伝達係数、つまりはヌセルト数の解析精度が悪いためである。図 4.8 に示すように、ケース 8 を除いても、 $\pm 20\%$ 程度の誤差がある。

流路間のばらつきについては、12 個の流路に分かれる上流部分で不均等が発生していることが原因と考えられる。その程度は流量で最大で 6%程度と考えられる。実機では格子管が 25 本積み上げられており、一つの入口から 25 本の格子管に枝分かれし、更に各々 12 本の燃料ピンに枝分かれする。本実験装置は 1 格子管のみであるため、実機では 25 本の格子管の間の流量のばらつきを更に考慮する必要がある。

以上を総括して、ブロワ設計に係わる圧力損失評価に関しては、4.1 節に示した手法を用いて良い。入口温度からの燃料ピン表面温度上昇に対しては、25%に 25 格子管間の流量のばらつきを加えて裕度とするべきである。

表 5.1 ピン表面温度と入口温度の差に対する C/E-1 の内訳

	温度測定誤差	平均値の誤差	各熱電対の誤差			
	A	A	A1	A2	A3	A4
1	1%	6%	0%	2%	1%	-2%
2	1%	3%	0%	2%	1%	-3%
3	3%	-10%	1%	2%	1%	-4%
4	1%	-2%	-1%	2%	1%	-2%
5	1%	-2%	-1%	3%	1%	-3%
6	2%	-13%	0%	3%	1%	-3%
7	1%	-6%	-1%	3%	2%	-4%
8	2%	-19%	0%	4%	2%	-5%

	温度測定誤差	平均値の誤差	各熱電対の誤差			
	B	B	B1	B2	B3	B4
1	1%	5%	-1%	4%	2%	-5%
2	1%	4%	-1%	4%	2%	-6%
3	2%	-2%	0%	5%	1%	-6%
4	1%	-2%	0%	5%	1%	-6%
5	1%	-2%	0%	5%	2%	-6%
6	1%	-8%	1%	5%	1%	-6%
7	1%	-5%	1%	5%	1%	-6%
8	1%	-11%	0%	5%	1%	-6%

	温度測定誤差	平均値の誤差	各熱電対の誤差			
	C	C	C1	C2	C3	C4
1	1%	5%	-2%	4%	2%	-5%
2	1%	4%	-2%	4%	1%	-4%
3	2%	-2%	-1%	2%	1%	-3%
4	1%	-2%	0%	4%	1%	-5%
5	1%	-1%	1%	4%	1%	-6%
6	1%	-6%	1%	3%	1%	-4%
7	1%	-3%	1%	4%	1%	-6%
8	1%	-8%	0%	4%	1%	-5%

## 6. まとめ

TEF-P で使用する MA 燃料を炉心に装荷した状態での冷却性を試験するために、燃料冷却試験装置を製作し、試験を実施した。製作では、単一の格子管に対してブロワ及び流量計等の計器を設置し、内部に 12 の流路を持つカランドリアを設置した。カランドリアには 24 本のヒーターピンを装荷し、そのうち 8 本のヒーターピンには合計 12 個の熱電対が埋め込まれた。

試験の結果、ブロワ設計に係わる圧力損失評価に関しては、現在の評価方法は 50%程度過大評価である事が分かった。ブロワには十分な裕度を持たせるべきであるため、この評価方法を用いる事が妥当である事が分かった。また、燃料ピン表面温度上昇に対しては 25%の裕度を取れば良いことがわかった。なお、実機においては 25 格子管間の流量のばらつきを更に加味するべきである。

今後、MA 燃料ピンに引き出し型の反射体が接続された概念についても、製作・試験を実施する必要がある。

## 参考文献

- 1) 菅原隆徳,西原健司,佐々敏信,辻本和文,田澤勇次郎,大井川宏之,核変換実験施設の概念検討,5: MA 燃料取扱いに関する検討, JAEA-Technology 2014-044, 2015, 59p.
- 2) 伝熱工学資料 改訂第 4 版,日本機械学会, p.52 (7)式.



付録 A ヒーター投入ケースの予備試験結果

予備試験では、本編で実施した試験と同様のヒーター出力・ブロウ出力とした。ケース 4、7 に相当する試験は実施していない。本編の試験に比較して、設定値・測定値に若干の差は見られるが、ほぼ同じ傾向を示している。

表 A.1 ヒーター投入ケースの予備試験結果（ヒーター出力、W/ピン）

番号	H1-H6	H7-H12	H13-H18	H19-H24	平均値
	W/6ピン				W/ピン
1	44.663	44.448	44.337	44.069	7.397
2	30.102	30.123	30.117	30.102	5.018
3	14.888	14.975	14.974	14.861	2.487
4					
5	29.903	29.904	29.885	29.856	4.981
6	15.053	15.048	15.169	15.042	2.513
7					
8	15.020	15.098	15.125	15.079	2.513

表 A.2 ヒーター投入ケースの予備試験結果（空気測定）

番号	空気温度		圧力			差圧	流量	
	℃		kPa			kPa	L/min	
	入口	出口	入口	出口	入口-出口		入口	出口
1	24.20	54.15	-1.71	-15.07	13.36	12.58	244.0	288.8
2	23.86	44.25	-1.70	-15.07	13.37	12.60	250.6	293.0
3	23.17	33.14	-1.69	-15.05	13.36	12.77	251.7	291.5
4								
5	23.48	53.96	-1.71	-9.60	7.89	7.46	155.5	170.2
6	23.43	38.85	-1.69	-9.59	7.91	7.44	158.0	170.9
7								
8	24.37	51.13	-0.58	-5.12	4.53	3.75	80.0	94.1

表 A.3 ヒーター投入ケースの予備試験結果（ピン表面温度）

番号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1	48.13	48.69	48.61	47.49	62.59	65.28	63.51	62.05	67.11	71.88	69.54	66.34
2	40.86	41.18	41.05	40.27	50.14	52.34	50.92	50.13	53.59	56.74	54.97	53.13
3	32.77	32.93	32.75	32.26	37.35	38.03	37.37	36.71	39.06	40.17	39.51	38.15
4												
5	44.19	44.97	44.65	43.55	60.07	63.01	61.48	59.36	65.64	69.56	67.68	63.82
6	35.04	35.42	35.15	34.62	42.95	44.21	43.26	42.26	45.87	47.58	46.45	44.54
7												
8	40.97	41.84	41.36	40.08	56.51	58.58	57.05	55.25	61.80	64.49	63.10	59.68

表 A.4 ヒーター投入ケースの試験結果（ピン表面温度－空気入口温度）

番号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1	23.93	24.49	24.42	23.29	38.39	41.08	39.31	37.85	42.91	47.68	45.34	42.14
2	17.00	17.33	17.20	16.41	26.28	28.48	27.06	26.27	29.74	32.88	31.11	29.27
3	9.60	9.75	9.58	9.09	14.18	14.85	14.20	13.53	15.89	17.00	16.34	14.98
4												
5	20.71	21.49	21.17	20.07	36.59	39.53	38.00	35.88	42.16	46.08	44.20	40.34
6	11.61	11.99	11.71	11.19	19.52	20.77	19.82	18.82	22.43	24.15	23.02	21.11
7												
8	16.60	17.47	16.99	15.71	32.14	34.21	32.68	30.89	37.43	40.12	38.73	35.31

付録 B 圧力損失に対するピン偏心の影響評価

図 B.1 に示すように、案内管の中心に対してピンは 0.1225mm 偏心している。その結果、ピン上部の空気流量が大きくなり、下部が小さくなることが予想される。スパーサーは 4 つあるが、管の一部に設置されているのみであるので、圧力損失への影響は小さいとして無視した。

圧力損失を評価するために、図 B.2 に示すように案内管の中心を基準として流路を N 分割し、反時計回りに番号を振る。各々の流路で圧力損失が等しくなると仮定する。

以下、表 B.1 の変数を用いて流路面積を導出する。図 B.2 中の長さ  $x(\theta)$  は次式で求まる。

$$x(\theta) = -d \sin(\theta) + \sqrt{R_2^2 - d^2 \cos^2 \theta} \quad (\text{B.1})$$

$\theta_{n-1} \sim \theta_n$  間の流路の面積  $S_n$  は次式を数値積分して得られる。

$$S_n = \frac{1}{2} \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} d\theta (R_0^2 - x^2(\theta)) \quad (\text{B.2})$$

次に、濡れぶち長さ  $L_n$  は、ピンの外側と案内管の内側の弧の合計長さである。図中  $\phi_n$  は次式である。

$$\phi_n = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{R_2^2 + d^2 - x^2(\theta_n)}{2dR_2}\right) \quad (\text{B.3})$$

濡れぶち長さは次式で表される。

$$L_n = R_0(\theta_n - \theta_{n-1}) + R_2(\phi_n - \phi_{n-1}) \quad (\text{B.4})$$

各領域において、圧力損失  $\Delta P$  と流速  $v_n$  には次式の関係がある。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \xi \rho v_n^2 \frac{l}{D_n} \quad (\text{B.5})$$

ここで、 $D_n$  は各領域の等価直径であり、流路面積  $S_n$  と濡れぶち長さ  $L_n$  から求まる。

$$v_n = \frac{w_n}{\rho S_n} \quad (\text{B.6})$$

を代入して、次式を得る。

$$\Delta P = \frac{\xi l}{2\rho S_n^2 D_n} w_n^2 = A_n^{-1} w_n^2 \quad (\text{B.7})$$

ただし、 $A_n = \frac{2\rho S_n^2 D_n}{\xi l}$

各領域の質量流量の和は既知の全流量  $w$  であるから、

$$w = \sum_{n=1}^N \sqrt{A_n \Delta P} = \sqrt{\Delta P} \sum_{n=1}^N \sqrt{A_n} \quad (\text{B.8})$$

より、次式のように圧力損失が求まった。

$$\Delta P = \left( \frac{w}{\sum \sqrt{A_n}} \right)^2 \quad (\text{B.9})$$

表 B.1 変数表

記号	単位	物理量
$R_0$	mm	案内管内半径
$R_1$	mm	ピンスペーサ内接円半径
$R_2$	mm	ピン外半径
$d$	mm	芯ずれの距離
$N$		流路分割数
$n$		領域番号
$S_n$	$m^2$	領域 $n$ の流路面積
$L_n$	m	領域 $n$ の濡れぶち長さ
$D_n = 4S_n/L_n$	m	領域 $n$ の等価直径
$w_n$	kg/s	領域 $n$ の質量流量
$w$	kg/s	全領域の質量流量合計

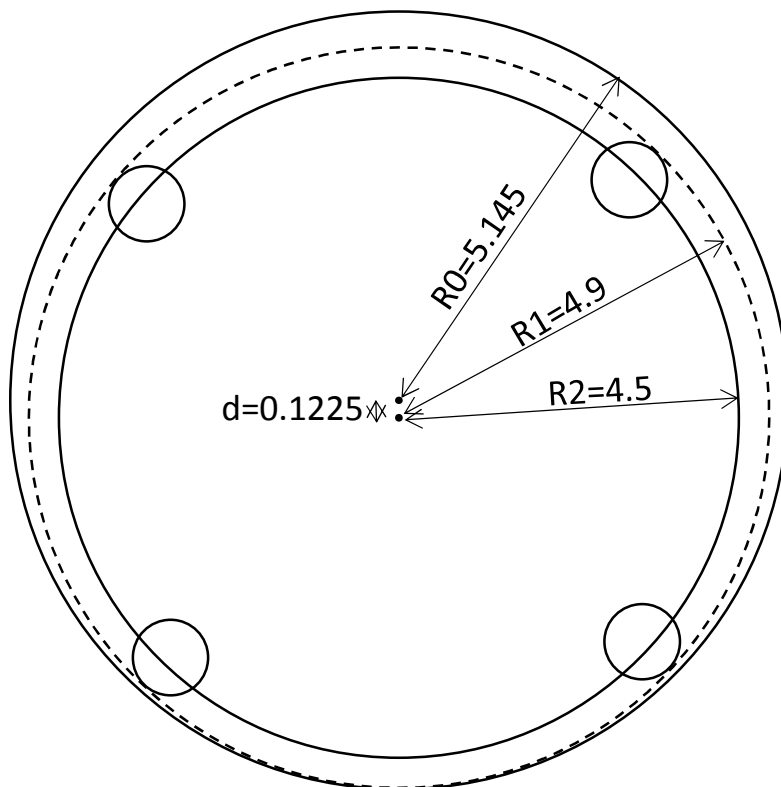


図 B.1 ピンの偏心 (mm)

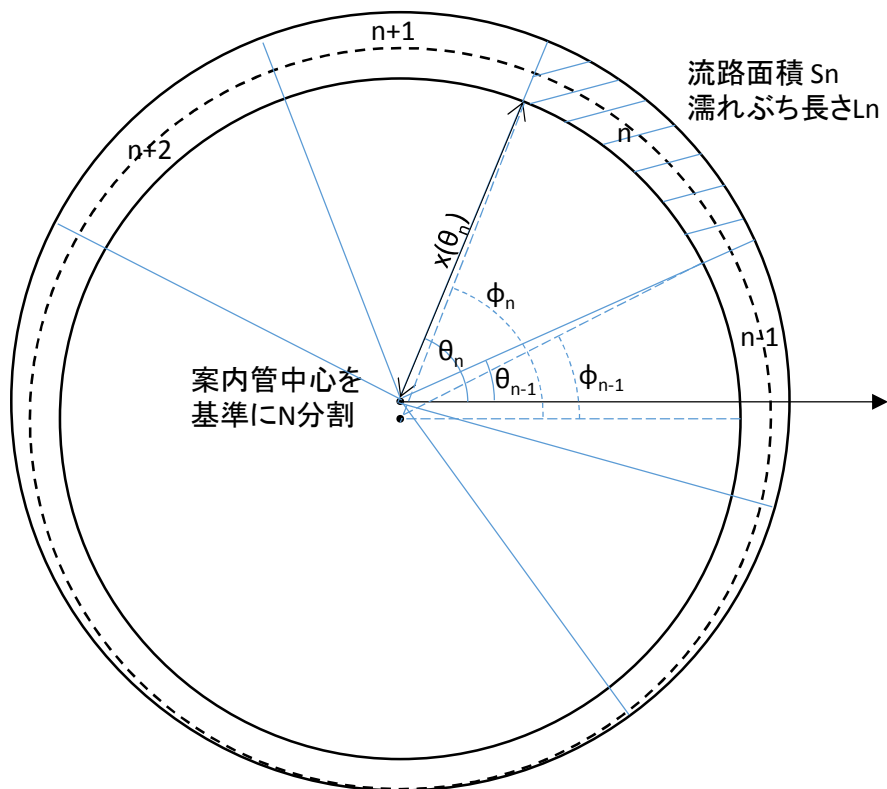


図 B.2 流路分割の方法

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(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はやコヒーレントではない。  
 (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は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、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間は同一である。したがって、温度差や温度間隔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。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

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°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

