

MA燃料遠隔取扱試験設備の製作及び試験結果 (2) 格子管の熱通過パラメータの評価

Fabrication and Test Results of Testing Equipment for Remote-handling of MA Fuel
(2) Evaluation of Heat Transfer Parameter Crossing Rectangular Lattice Matrix

江口 悠太 菅原 隆徳 西原 健司 田澤 勇次郎
井上 昭 辻本 和文

Yuta EGUCHI, Takanori SUGAWARA, Kenji NISHIHARA, Yujiro TAZAWA
Akira INOUE and Kazufumi TSUJIMOTO

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 (2) 格子管の熱通過パラメータの評価

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

江口 悠太⁺、菅原 隆徳、西原 健司、田澤 勇次郎[※]、井上 昭[※]、辻本 和文

(2015 年 12 月 17 日 受理)

大強度陽子加速器施設 J-PARC 計画で建設が予定されている核変換物理実験施設 (TEF-P: Transmutation Physics Experimental Facility) では、Am-241 等の MA を含む崩壊熱の大きな燃料を大量に取り扱うため、異常発生による炉心冷却ブロワ停止時の炉心温度評価が必要となる。冷却ブロワ停止時の TEF-P 炉心温度変化は全炉心熱伝導解析によって評価されるが、燃料及びブランケット領域の外側の何も装荷されていない空格子管領域における断熱効果が大きく、この領域に適用されている熱通過パラメータの確度及び精度の検証が必要である。

本報告書では、空格子管内部における伝熱量の算出モデルである、鉛直等温平面の上下を断熱材で囲った密閉流体層の自由対流モデルの精度検証のため、TEF-P 炉心の格子管形状を模擬した試験装置を製作し、試験装置の格子管内部を通過する一次元熱流と温度分布を測定した。これにより、実際の空格子管内部の等価熱伝導率は密閉流体層の自由対流モデルよりも大きいことが明らかになった。また、空格子管内部にアルミニウムブロックを充填することで空格子管体系よりも高い等価熱伝導率となることを確認した。

本実験により、TEF-P 炉心の温度評価に供することが出来る熱通過パラメータを実験的に取得した。

Fabrication and Test Results of Testing Equipment for Remote-handling of MA Fuel
(2) Evaluation of Heat Transfer Parameter Crossing Rectangular Lattice Matrix

Yuta EGUCHI, Takanori SUGAWARA, Kenji NISHIHARA, Yujiro TAZAWA*,
Akira INOUE* and Kazufumi TSUJIMOTO

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)

Transmutation Physics Experimental Facility (TEF-P) planned in the J-PARC project uses minor actinide (MA) fuel which has large decay heat. So it is necessary to consider the increase of the core temperature when the core cooling system stopped. The change of the core temperature at this situation was evaluated by thermal conduction analysis for the whole core geometry. It was found that the impact of thermal insulation in the empty rectangular lattice matrix area was large. So it is necessary to verify reliability and accuracy of heat transfer effect used in this area.

To verify the accuracy of calculation model for the empty rectangular lattice matrix which was the free convection model of sealed fluid covered by insulator, testing equipment which could simulate the rectangular lattice matrix of TEF-P core was fabricated. By using this equipment, thermal distribution and one dimensional heat flow through the rectangular lattice were measured. It was observed that the actual equivalent thermal conductivity in the rectangular lattice was larger than the free convection model. It was also confirmed that the insertion of the aluminum block into the empty rectangular lattice could achieve the higher equivalent thermal conductivity. These results could be the useful data for the thermal conduction analysis for the whole core geometry.

Keywords: TEF-P, Heat Transfer, Rectangular Lattice, Equivalent Thermal Conductivity

+ Department of Fukushima Technology Development,
Nuclear Criticality Engineering Section II

※ Collaborating Engineer

目 次

1.	はじめに	1
2.	TEF-P の概要	2
2.1.	核変換物理実験施設 (TEF-P) の概略.....	2
2.2.	空冷停止時の炉心冷却性	3
2.2.1.	解析条件	3
2.2.2.	解析結果	5
3.	格子管の伝熱評価	9
3.1.	目的.....	9
3.1.1.	等価熱伝導率 λ_{eq} の評価方法.....	9
3.2.	試験装置概要	11
3.2.1.	ステンレス格子管及びステンレスブロックの熱伝導率 λ_s の温度依存性.....	17
3.3.	試験方法	17
3.3.1.	予備加熱	17
3.3.2.	試験.....	17
3.4.	試験結果	18
3.4.1.	空格子管内部の等価熱伝導率評価.....	18
3.4.2.	アルミニウムブロック充填格子管内部の等価熱伝導率評価	18
3.5.	評価.....	24
3.5.1.	空格子管	24
3.5.2.	アルミニウムブロック充填格子管	25
3.5.3.	接触熱抵抗の効果	29
4.	まとめ.....	30
	参考文献	31
	付録 A 本試験体系における格子管部通過熱流束評価	32

Contents

1. Introduction	1
2. TEF-P overview	2
2.1 Outline of TEF-P	2
2.2 Core cooling characteristics when cooling system stopped	3
2.2.1 Analysis condition	3
2.2.1 Analysis result	5
3. Evaluation of heat transfer crossing rectangular lattice	9
3.1 Purpose	9
3.1.1 Evaluation method of equivalent thermal conductivity	9
3.2 Overview of testing device	11
3.2.1 Temperature dependency of stainless steel	17
3.3 Testing method	17
3.3.1 Preheating procedure	17
3.3.2 Testing procedure	17
3.4 Testing result	18
3.4.1 Equivalent thermal conductivity of empty rectangular lattice	18
3.4.2 Equivalent thermal conductivity of rectangular lattice with aluminum block ..	18
3.5 Evaluation	24
3.5.1 Empty rectangular lattice	24
3.5.2 Rectangular lattice with aluminum block	25
3.5.3 Effect of thermal contact resistance	29
4. Summary	30
References	31
Appendix A Evaluation of heat flux crossing outer flame of rectangular lattice	32

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC 計画では、使用済核燃料から分離する長寿命放射性核種の核変換に関する技術開発研究を実施する「核変換実験施設 (TEF: Transmutation Experimental Facility)」の建設が予定されている。TEF は線形陽子加速器の終端部において最大で 400MeV・200kW の陽子ビームの供給を受ける施設であり、加速器駆動核変換システム (ADS: Accelerator-driven System) の核破砕ターゲットに関する試験研究を行う ADS ターゲット試験施設 (TEF-T: ADS Target Test Facility) ¹⁾と未臨界炉心や核変換性能に関する炉物理実験を行う核変換物理実験施設 (TEF-P: Transmutation Physics Experimental Facility) ^{2),3),4),5)}の 2 施設から構成される。

TEF-P では、日本原子力研究開発機構の高速炉臨界集合体 (FCA: Fast Critical Assembly) で使用している燃料を継承し、高速炉に関する試験研究を継続するとともに、ADS の研究開発に資する実験を行う予定である。具体例を挙げると、未臨界炉心における陽子ビーム運転、ADS 燃料の主成分となるマイナーアクチノイド (MA: Minor Actinides) を装荷した体系における炉物理実験等を実施する予定である。しかしながら、Am-241 等の MA を含む崩壊熱の大きな燃料を大量に取り扱うため、異常発生による炉心冷却ブロー停止時の炉心温度上昇が安全上無視できない可能性があり、その評価が求められる。冷却ブロー停止時の TEF-P 炉心温度変化は全炉心熱伝導解析によって評価されるが、燃料及びブランケット領域の外側の何も装荷されていない空格子管領域における断熱効果が大きく、本試験に先立って実施した三次元定常解析において、冷却ブロー停止時の TEF-P 炉心中心温度は 400℃ 近くにまで上昇する結果となった。解析における空格子管内部の伝熱量は、空格子管内部における伝熱量の算出モデルである、鉛直等温平面の上下を断熱材で囲った密閉流体層の自由対流モデル ⁶⁾を元に算出されているが、適用性の確認が十分でなく、精度検証が必要である。

本報告では、炉心温度評価の一環として、TEF-P 炉心の強制冷却機能喪失時における炉心の空格子管内部の径方向等価熱伝導率評価を行った。評価は、TEF-P 炉心の格子管形状を模擬した試験装置を製作し、試験装置の格子管内部を一次元方向に通過する熱流と温度分布を測定する方法で実施した。本試験で得られた実際の等価熱伝導率と解析にて適用されているモデルとの比較を行うとともに、空格子管の内部にアルミニウムブロックを充填した体系でも同様の測定を行い、空格子管と比較した熱の伝わりやすさの検証を行った。

2. TEF-P の概要

2.1. 核変換物理実験施設 (TEF-P) の概略

J-PARC に建設を予定している核変換物理実験施設 (TEF-P) は、日本原子力研究開発機構の FCA を基にした臨界集合体装置を備えた施設である。この施設では、FCA で使用している燃料及びその形状と同様の燃料を使用継承し、高速炉及び ADS の研究開発に資する実験を行う予定である。特に ADS に関連する実験としては、未臨界炉心の中心に核破碎ターゲットを設置し、そこに J-PARC の線形加速器で加速された陽子ビームを当てることで生じる核破碎中性子で未臨界炉心を運転し、未臨界炉の運転制御に関する実験を行う。また、ADS 燃料の主成分となる MA を装荷した体系を構築し、MA 装荷炉心に関する炉物理実験を実施する予定である。

Fig. 2-1 に TEF-P 臨界集合体の概念図を示す。この臨界集合体は、基本的に FCA と同様の水平二分型型の臨界集合体であり、固定側と移動側の集合体を密着させることで体系を臨界にする。また固定側に、陽子ビーム導入管を設置することが可能であり、これを用いて J-PARC の線形加速器で加速された陽子ビームを炉心内に導入する。

Fig. 2-2 に、MA 装荷炉心の概念図を示す。MA は発熱が大きく、また放射線量も多いことから大量に装荷することは難しい。そのため MA を部分装荷し、周りをドライバー燃料で覆って臨界状態にし、実験を行う。また十分な除熱を行うため、MA 燃料はピン形状として扱う。この場合、冷却材模擬ブロック (Fig. 2-2 中、冷却材模擬) を設け、ADS の冷却材として想定されている Pb や Na を充填し、その燃料ピン装荷孔に MA 燃料ピンを装荷する。MA 燃料ピンと冷却材模擬ブロックの装荷孔の間には空隙を設け、空気の強制循環により燃料ピンを空冷する。

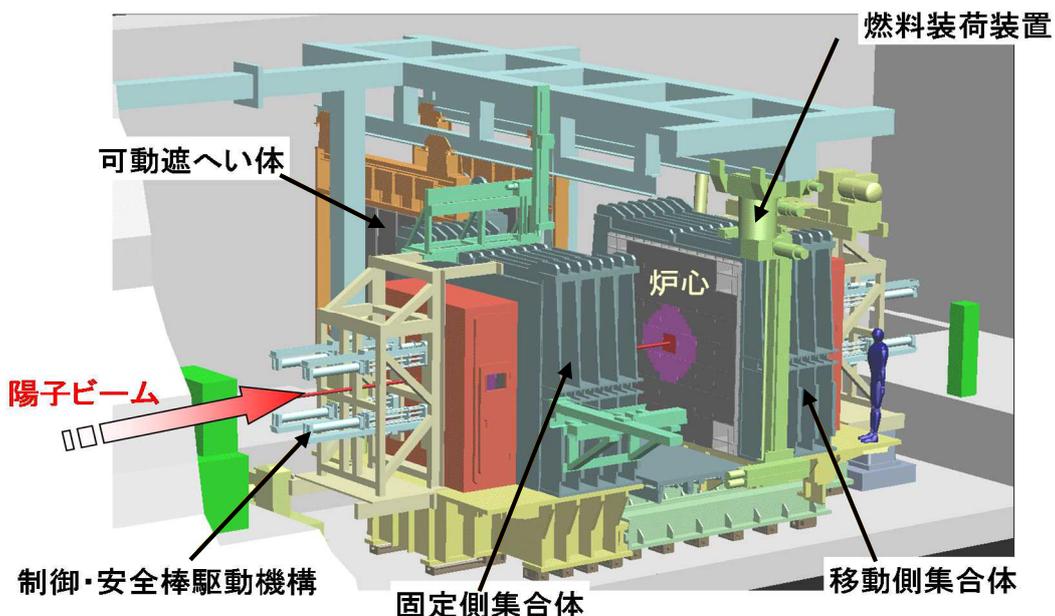


Fig. 2-1 TEF-P 臨界集合体の概念図

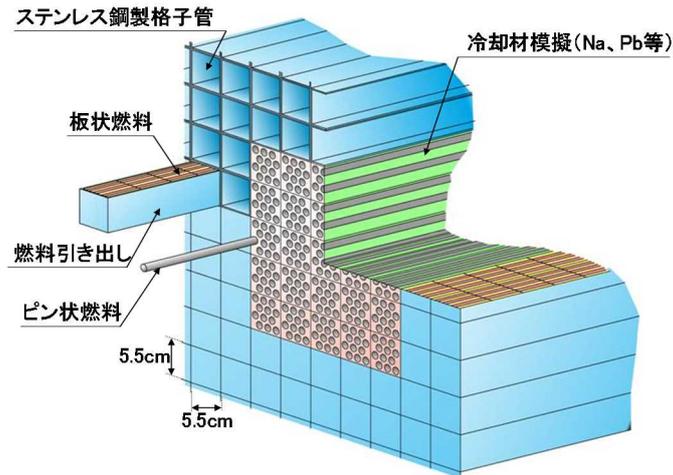


Fig. 2-2 MA 装荷炉心の概念図

2.2. 空冷停止時の炉心冷却性

前節で説明した通り、MA 燃料を装荷した実験を行う場合には、実験準備中及び実験中、間断なく空気を強制循環させて MA 燃料を冷却しておく必要がある。仮に何らかの事故などにより空冷が停止した場合、MA 燃料ピンの温度が上昇し、被覆管の破損につながる可能性がある。

過去の検討例として、TEF-P において MA 装荷炉心を構築した際に、空気の循環が停止し、冷却機能喪失時の炉心温度変化解析を実施した。この解析では奥行方向（Z 方向）の引出し装荷も反映した三次元体系モデルを用い、熱伝導と熱放射による伝熱を計算した。解析コードは汎用有限要素法解析コード ANSYS v15.0⁷⁾を使用した。

2.2.1. 解析条件

(1) 解析モデル

Fig. 2-3 に 51×51 格子 1/2 対称三次元モデル、及びこの奥行き断面図を示す。MA 燃料は中央の 5×5MA 燃料カランドリア領域に、燃料ペレットと被覆管からなる MA 燃料ピン、案内管、カランドリア内物質及び燃料カランドリア管より構成されるが、すべての形状をモデル化している。Fig. 2-4 に燃料カランドリア領域のモデル図を示す。

引出し領域は引き出しと板状燃料をモデル化している。なお、実際の板状燃料は数種類の薄板を組み合わせて引き出しに装荷するが、モデル上は均質物質として扱った。また、格子管同士及び格子管－引き出し底面間の接触熱抵抗は考慮していない。また、外側の空格子管領域については、管内の空気の対流による熱伝達を等価な熱伝導率に置き換えモデル化している。

(2) 発熱条件

燃料ピンに一様発熱密度を設定した。燃料ピン 1 本当たり 5W の発熱量を仮定することから、燃料ピンの発熱密度（燃料ピンの外径 8.46mm，長さ 300mm）は以下となる。

$$5 \div (\pi / 4 \times (8.46 \times 10^{-3})^2 \times 0.305) = 2.965 \times 10^5 \text{ (W/m}^3\text{)}$$

炉心全体の発熱量は、600 本の MA 燃料ピンが装荷されるため 3000W となる。

(3) 物性値

解析モデル体系内には格子管－引き出し間に 0.15mm～1.6mm 程度の隙間が複数存在しており、そこには大気空気を充満させているが、空気による熱伝導に加え、対面間の放射伝熱を考慮した。隙間の放射伝熱量 q_r [W/m²] は、式(2.1)に示すように対面間の温度差を 20℃一定と仮定した場合に流れる熱流束を求め、フーリエの法則から熱放射に等価な熱伝導率を算出して計算上熱伝導として扱った。他の各物質については、それぞれの熱伝導率を設定した。

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - (T_1 - 5)^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.1)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数 5.67×10^{-8} W/m²/K⁴

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 放射率 1

空の格子管領域の等価熱伝導率については、Fig. 2-5 に示すような密閉鉛直平板間空間をモデルとして、自然対流伝熱する場合の等価熱伝導率で代表した。空格子管内空気の等価熱伝導率 λ_{eq} [W/m/K] は、 $\lambda_{eq} = Nu_d \times \lambda_a$ と下式(2.2)の関係から求めた。密閉鉛直平板間空間の自然対流伝熱式^{6),8)}は、 $10^2 \leq Ra_d(d/h) \leq 10^9$ において、

$$Nu_d = \left(\left\{ \left[1 + \left(\frac{Ra_d}{4472} \right)^2 \frac{d}{h} \right]^{-8} + \left[\frac{Ra_d \langle d/h \rangle f \langle Pr \rangle}{57 \phi \langle Ra_h, h/d \rangle} \right]^{-2} \right\}^{-\frac{3}{8}} + \frac{Ra_d f \langle Pr \rangle}{8000} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.2)$$

ただし、

$$Ra_d = Gr_d \times Pr, \quad Gr_d = \frac{g \rho_a^2 \zeta (T_1 - T_2) d^3}{\eta^2}, \quad Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda_a}$$

$$f \langle Pr \rangle = \left[1 + \left(\frac{0.5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}, \quad \phi \langle Ra_h, h/d \rangle = \left\{ 1 + \frac{0.231}{\left[Ra_h \left(\frac{h}{d} \right)^4 \right]^{1/4}} \right\}^2$$

d : 格子管内幅 0.0532 m

h : 格子管内高さ 0.0532 m

g : 重力加速度 9.8m/s²

ζ : 体積膨張率 $1/(273+20)$

c_p : 空気の比熱 (J/kgK)

η : 空気の粘性係数 (Pa・s)

λ_a : 空気の熱伝導率 (W/m/K)

ρ_a : 空気の密度 (kg/m³)

また、 T_1 は格子管内側 (中央) 側面温度、 T_2 は雰囲気 (格子管外側) 温度 20℃一定とした。

(4) 境界条件

体系外面の境界条件は、以下の通りとした。

- ・縦半割にした 1/2 対称面は断熱とする。
- ・集合体密着面は、断熱（集合体密着状態）と熱伝達境界（集合体分離状態）の 2 通り設定する。
- ・その他の外面（最外層空格子管の外面）は熱伝達境界とする。

熱伝達境界は雰囲気温度 20℃、熱伝達率は自然対流相当の 4W/m²/K と設定した。

2.2.2. 解析結果

三次元定常解析の結果として、集合体密着面が断熱条件（集合体密着状態）の場合の温度分布コンターを Fig. 2-6 に示す。また、このときの密着面における炉心中心から半径方向の温度分布を Fig. 2-7 に示す。この図では、集合体密着面が自然対流熱伝達境界の場合、すなわち炉心分離に成功した場合の結果もあわせて示している。炉心分離に成功した場合には、最高温度は 280℃程度であるが、炉心分離に失敗した場合は最高温度 366℃に達した。現在の TEF-P における燃料の許容設計限界温度は 400℃を想定しているため、この結果は制限を満足するものの、裕度が 10%以下と低い。

Fig. 2-7 において、半径方向の Unit13 から 26 は空格子管領域であり、この領域の熱伝達が炉心中央の温度評価に大きな影響を与えていると考えられる。今回の解析では、式(2.2)を元に空格子管内の等価熱伝導率を設定して計算を行ったが、式(2.2)のグラスホフ数算出の過程で必要な Fig. 2-5 の外側温度 (T_2) を雰囲気温度 20℃と固定している。

式(2.2)による熱伝達パラメータは、物性値の代表温度とその温度差で算出される二次元マトリックス表になるが、解析の都合上、 T_2 を定数とし、物性値の代表温度は T_1 と T_2 の平均値としたため、式(2.2)で評価される値は熱伝導率を実際よりも低く評価していると考えられる。そのため、実験的に空格子管の熱伝導率を測定し、その結果を熱伝導解析に反映することで、より現実的な解析結果を得ることが求められている。

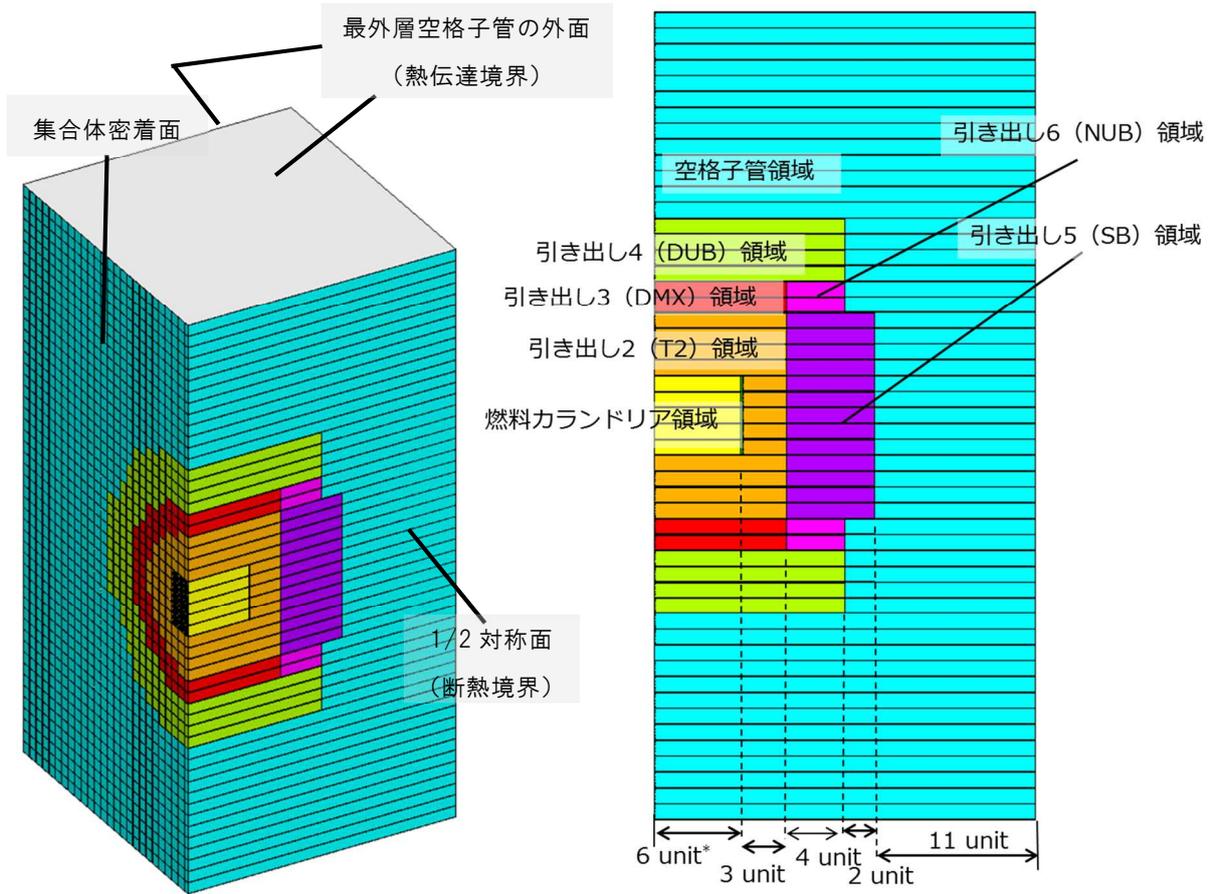


Fig. 2-3 51×51 格子 1/2 対称三次元モデル (右：奥行き断面図。* : 1 unit は 50.8mm)

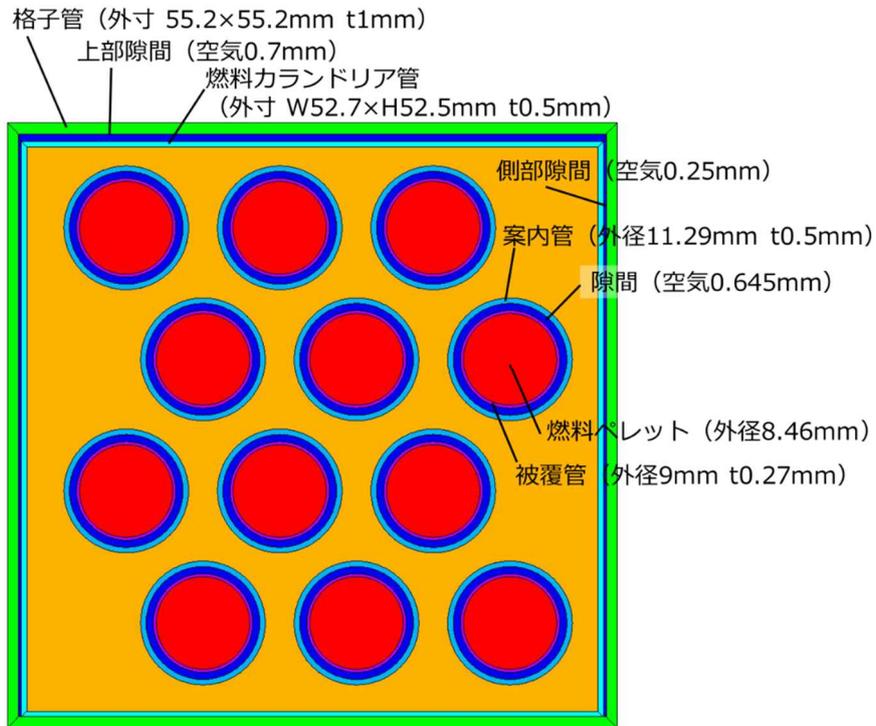


Fig. 2-4 燃料カランドリア領域のモデル図

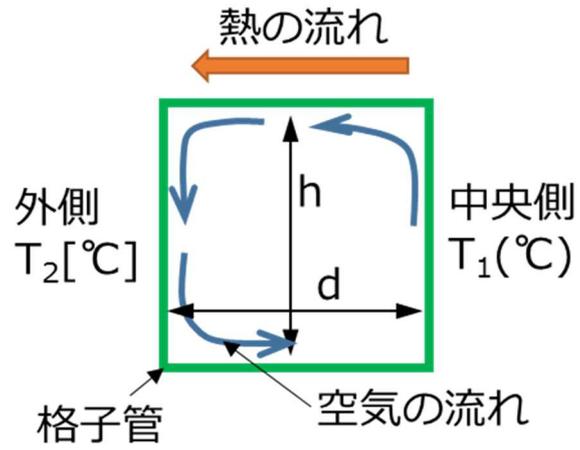


Fig. 2-5 密閉鉛直平板間空間のモデル

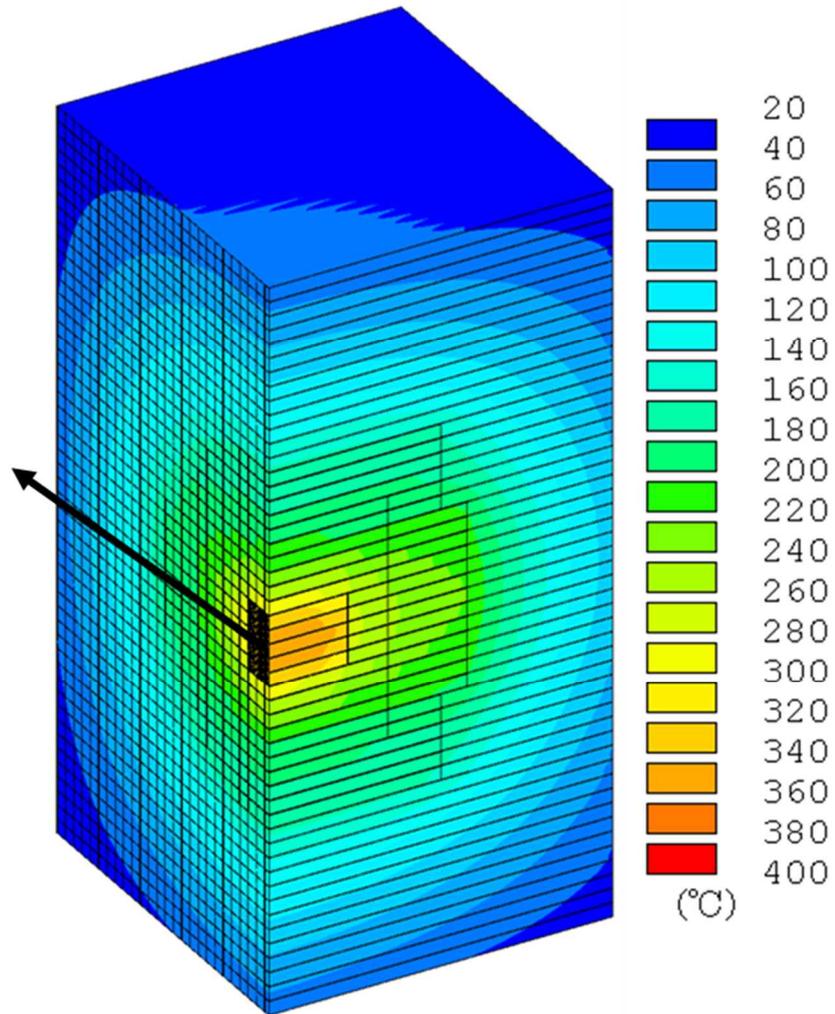


Fig. 2-6 定常解析温度分布 密着面：断熱境界

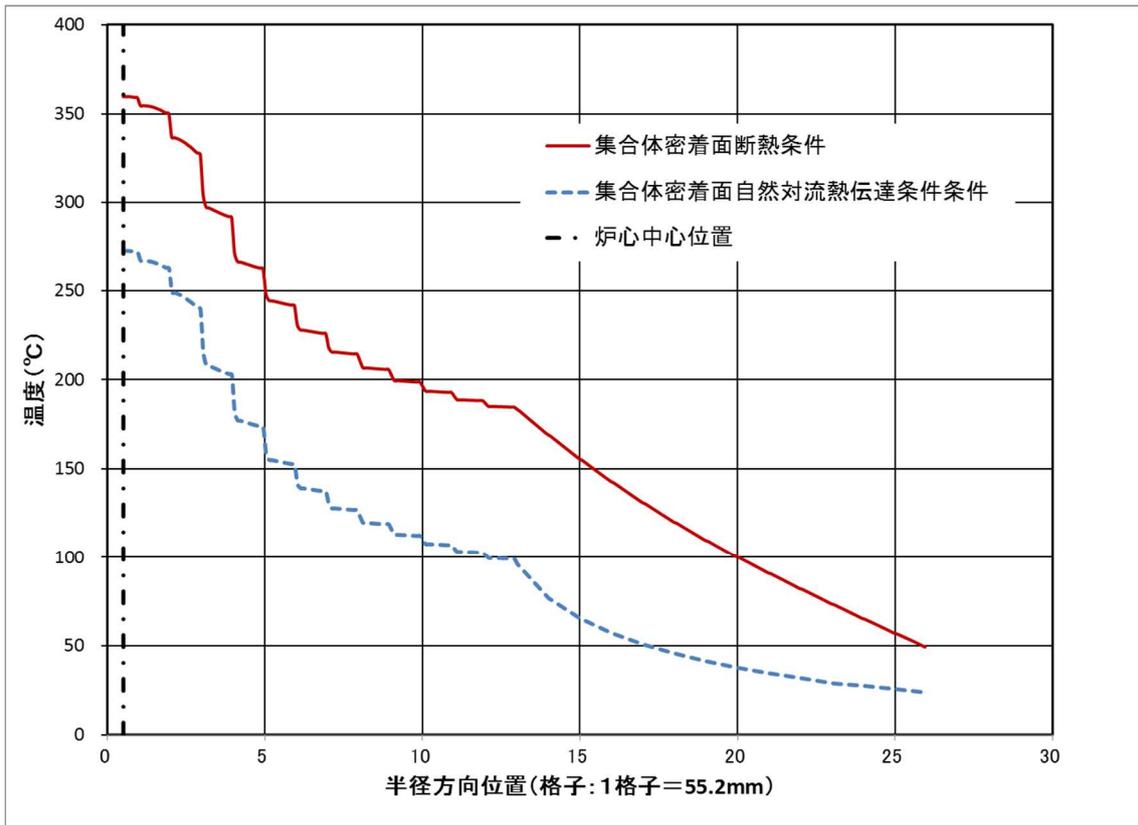


Fig. 2-7 定常解析温度分布 密着面中心半径方向 (Fig. 2-6 矢印方向に相当)

3. 格子管の伝熱評価

3.1. 目的

TEF-P 格子管の内部における水平径方向への熱の移動は、格子管のステンレス部の熱伝導によるものと、格子管内部流体の熱伝達によるものの複合伝熱である。本試験は、後者における実質的な熱伝達パラメータを知るため、格子管一次元方向のみに熱流を与え、定常状態における格子管内部温度を測定し、その温度分布から格子管内空気による熱伝達係数(等価熱伝導率)を評価することを目的とする。

また、空格子管内部を空気から模擬物質(アルミニウムブロック)に置き換えた試験も実施し、両体系における等価熱伝導率の比較も行う。

3.1.1. 等価熱伝導率 λ_{eq} の評価方法

Fig. 3-1 に示すような、単位格子管での一次元熱移動を考える。熱源からの熱 Q_h [W]は、格子管部 (Q_1 [W], Q_3 [W])、空気部 (Q_2 [W]) をそれぞれの熱抵抗値に反比例した熱量比で伝わっていく。各熱抵抗値は、熱通過長さや熱通過断面積、熱伝達係数(熱伝導率、熱伝達率)のパラメータで表すことが出来、Fig. 3-1 下の等価電気回路に示す並列熱抵抗の総和「総括熱抵抗 R_t [K/W]」として次式(3.1)で定義⁹⁾される。

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_s} = \frac{A_a}{L_a} + \frac{A_s}{L_s} \quad (3.1)$$

R_a : 格子管内部熱抵抗 (K/W)	R_s : 格子管部熱抵抗 (K/W)
A_a : 格子管内部熱通過断面積 (m ²)	A_s : 格子管部熱通過断面積 (m ²)
L_a : 格子管内部熱通過長さ (m)	L_s : 格子管部熱通過長さ (m)
λ_{eq} : 格子管内部熱伝導率 (W/m/K)	λ_s : 格子管部熱伝導率 (W/m/K)

つまり、Fig. 3-1 の点 P_1 から P_2 へ移動する伝熱量 Q_h [W]は、次式(3.2)のように表せる。

$$Q_h = \frac{\Delta T}{R_t} = \left(\frac{A_a}{L_a} + \frac{A_s}{L_s} \right) \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

ΔT : 格子管内部における P_1 - P_2 間の温度差 (K)

ここで、熱伝達率の定義式⁶⁾から熱通過率 K [W/(m² · K)]を定義すれば、伝熱量 Q_h は次式(3.3)の形で表せる。

$$Q_h = K \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

式(3.2)、式(3.3)から、総括熱抵抗 R_t と熱通過率 K の関係は次式(3.4)で表すことが出来、伝熱

量 Q_h は、各領域の熱伝導率 λ_{eq} , λ_s 、伝熱面積 A_a , A_s 、熱通過長さ L_a , L_s のパラメータを用い、式(3.5)の熱流束 q_h [W/m²] の形に整理することが出来る。

$$K = \frac{1}{R_t \cdot A} \tag{3.4}$$

$$q_h = K \cdot \Delta T = \left\{ \frac{\lambda_{eq}}{L_a} \frac{A_a}{(A_a + A_s)} + \frac{\lambda_s}{L_s} \frac{A_s}{(A_a + A_s)} \right\} \Delta T \tag{3.5}$$

更に λ_{eq} で整理すると次式(3.6)となり、格子管を通過する熱流束 q_h と P_1 - P_2 間の温度差 ΔT が分かれば、格子管内部流体による熱伝達係数を評価することが可能となる。

$$\lambda_{eq} = \frac{q_h}{\Delta T} \left(\frac{A_a + A_s}{A_a} \right) L_a - \lambda_s \frac{A_s L_a}{A_a L_s} \tag{3.6}$$

この λ_{eq} をこれ以降、等価熱伝導率と呼ぶ。

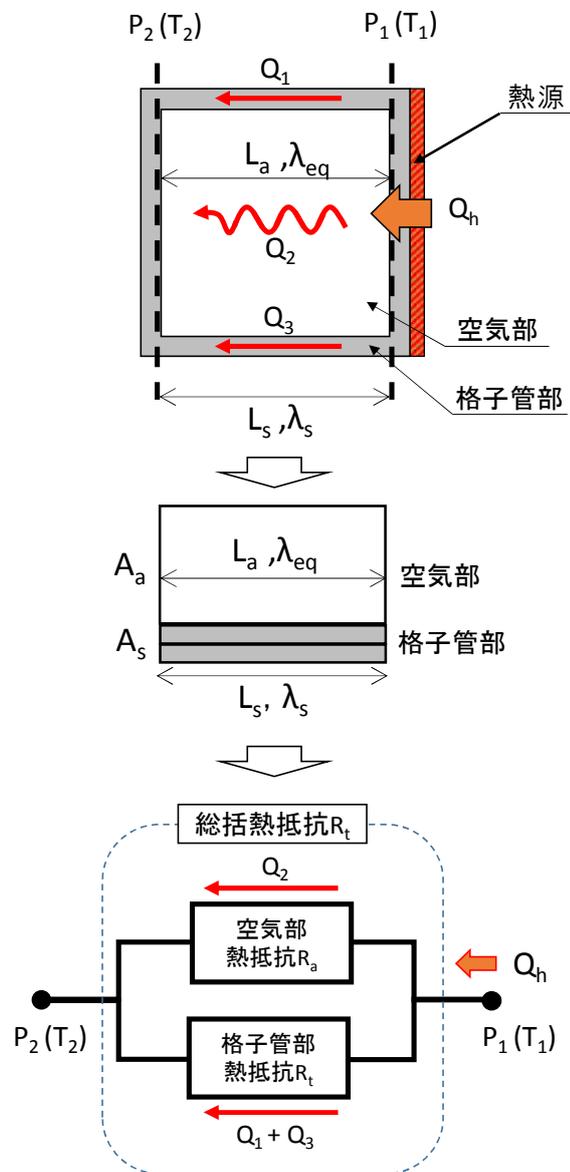


Fig. 3-1 単位格子管における一次元方向の熱移動モデル

3.2. 試験装置概要

試験装置は Table 3.1 に示す部品・機器で構成され、その概形は Fig. 3-2～Fig. 3-5 に示す通りで、単格子管を 2 つ繋げた体系の一面のみを露出させ、それ以外の面は熱漏洩の影響がなるべく出ないように断熱材で覆われている。加えて、断熱材の外側に補償ヒータを設置することで、断熱材内外の温度差を出来るだけ小さくし、更に次元方向（熱源→放熱面）以外への熱漏洩の影響を低減する。

装置背面からカートリッジヒータにより入熱する際、ステンレスブロックのバッファを介して格子管に入熱する。ステンレスブロックをヒータと試験領域（格子管）の間に設置することにより、格子管への入熱を均質化するとともに、ステンレスブロックの温度分布を測定することで、通過する熱流束を算出する。ステンレスブロックを介して格子管に伝わった熱流は、放熱面（格子管露出面）を通して大気へと放熱される。放熱面は自然対流による除熱とし、格子管内部温度 50～300℃程度における熱通過率の測定を実施する。

測定に際して、ステンレスブロックと格子管及びアルミニウムブロックにそれぞれ熱電対を設置した。その位置を Fig. 3-7 に、設置方法を Fig. 3-8 に示す。

試験結果として熱通過率算出に用いる値は Fig. 3-2 中の「格子管 1」のみの温度データとする。格子管 2 は放熱面の影響を受け揺らぎやすく、また放熱面側の断熱も不十分なため、あくまで参考値としてのみ利用する。

Table 3.1 空冷停止時 MA 燃料冷却性試験装置 構成部品及び機器一覧

名称	形状[mm]又は仕様	材質
中空格子管	直方体(中空) 50×50 長さ 160 板厚 1.56	SUS304
充填模擬物質	直方体(中実) 46×46 長さ 160	Al
ステンレスブロック	直方体(中実) 幅 150 高さ 50 長さ 160 ※端部から 15mm の箇所に、ヒータを埋め込む。	SUS304
断熱材	ニチアス製 ロスリムボード GH TOMBO No.4350-GH 熱伝導率(at 400℃) 0.030 W/(m・K)	
熱源	カートリッジヒータ Φ10×50 100W×4 本	
補償ヒータ (プレートヒータ)	① 200×100 400W/枚 4 枚 ② 100×100 250W/枚 4 枚	
熱電対 (K 型シース)	シース径 Φ1.0 シース長さ 750 ① シース径 Φ0.5 シース長さ 750 それぞれの熱電対設置位置は、Fig. 3-6 の通り	
温度調節器	5 系統の独立温度制御機能を備えた調節器で、カートリッジヒータ 1 系統 (4 本/系統) 及び補償ヒータ 4 系統 (2 枚/系統) の温度制御を PID 制御により行う。	
データロガー	HIOKI 製 LR8410 測定間隔 1 測定/10min	

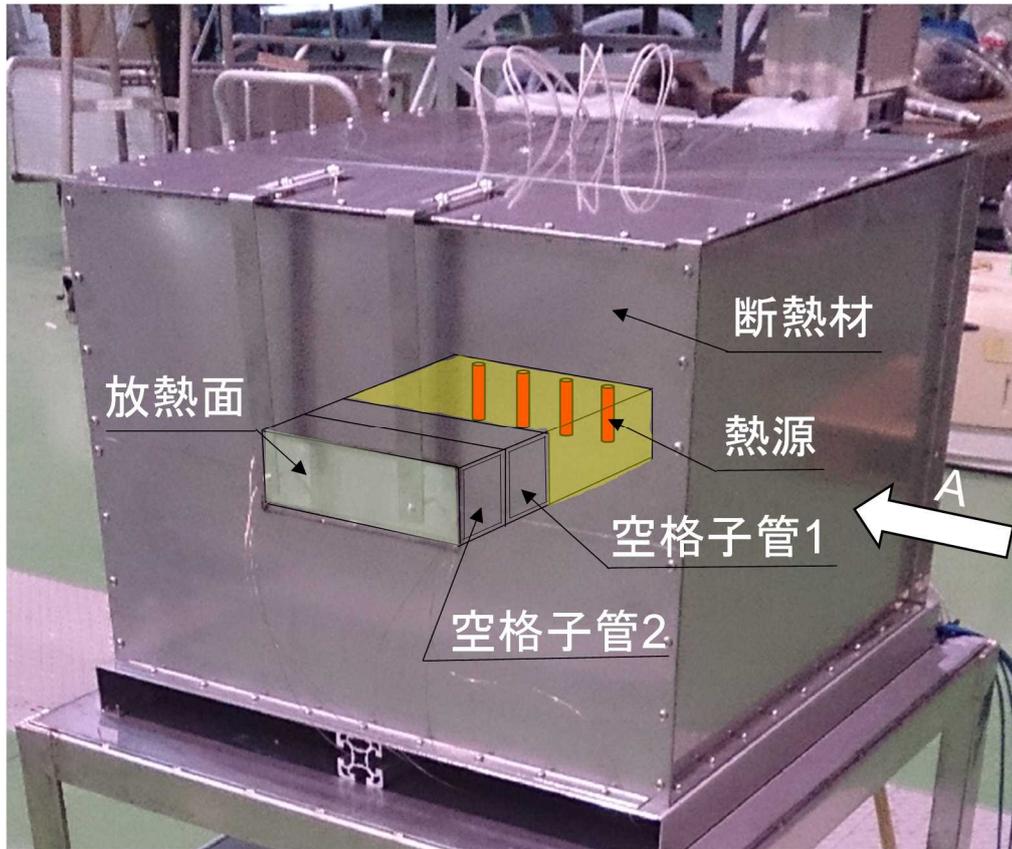


Fig. 3-2 試験装置俯瞰写真と内部の構成

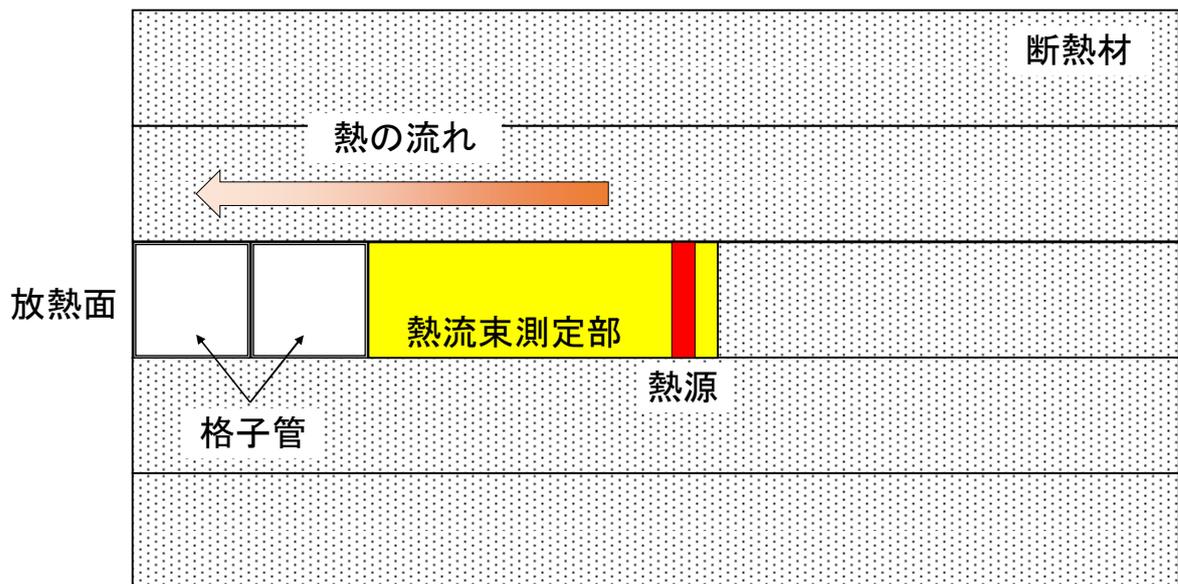
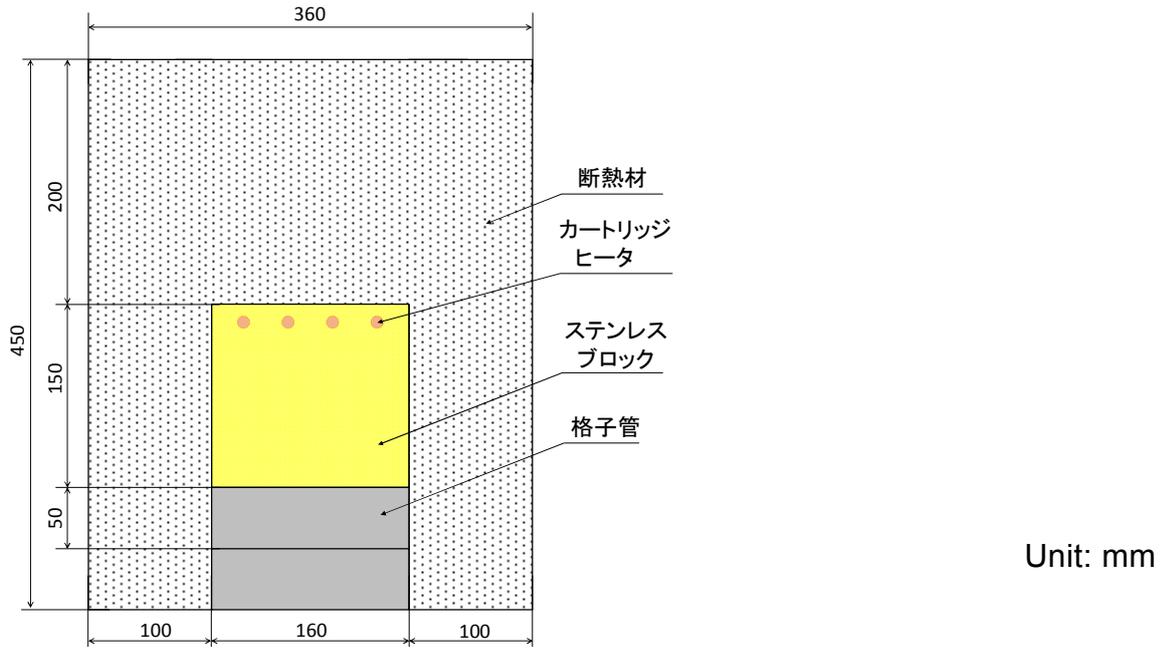
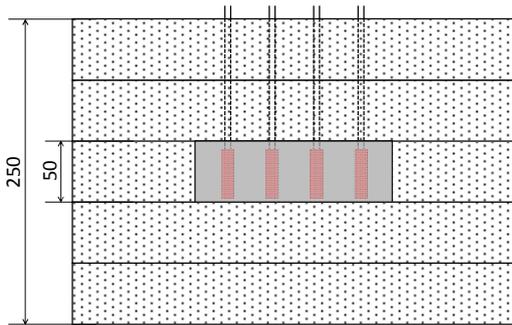


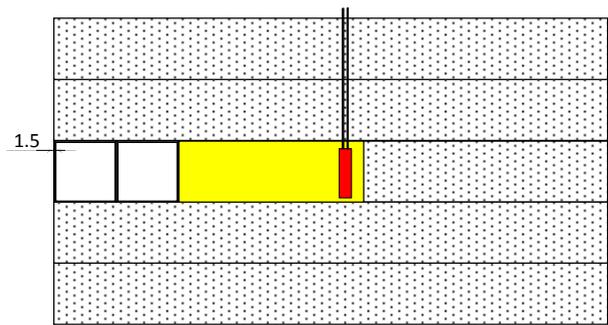
Fig. 3-3 Fig. 3-2 中 A から見た断面図と熱の流れ



平面図



正面図



側面図

Fig. 3-4 試験装置概形詳細図 1 (補償ヒータ無)

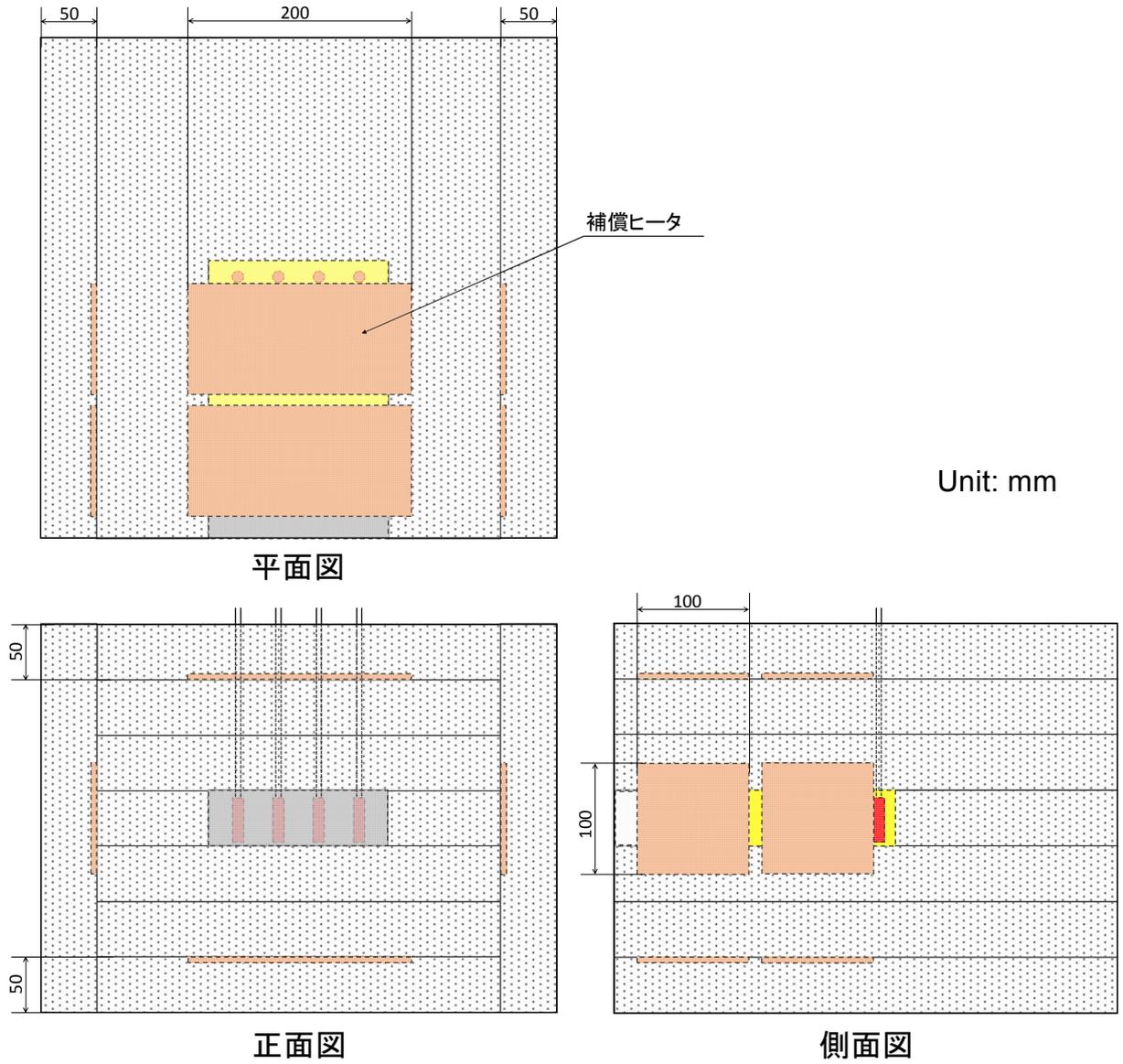


Fig. 3-5 試験装置概形詳細図 (Fig. 3-4 に補償ヒータ及び外側断熱材装着)

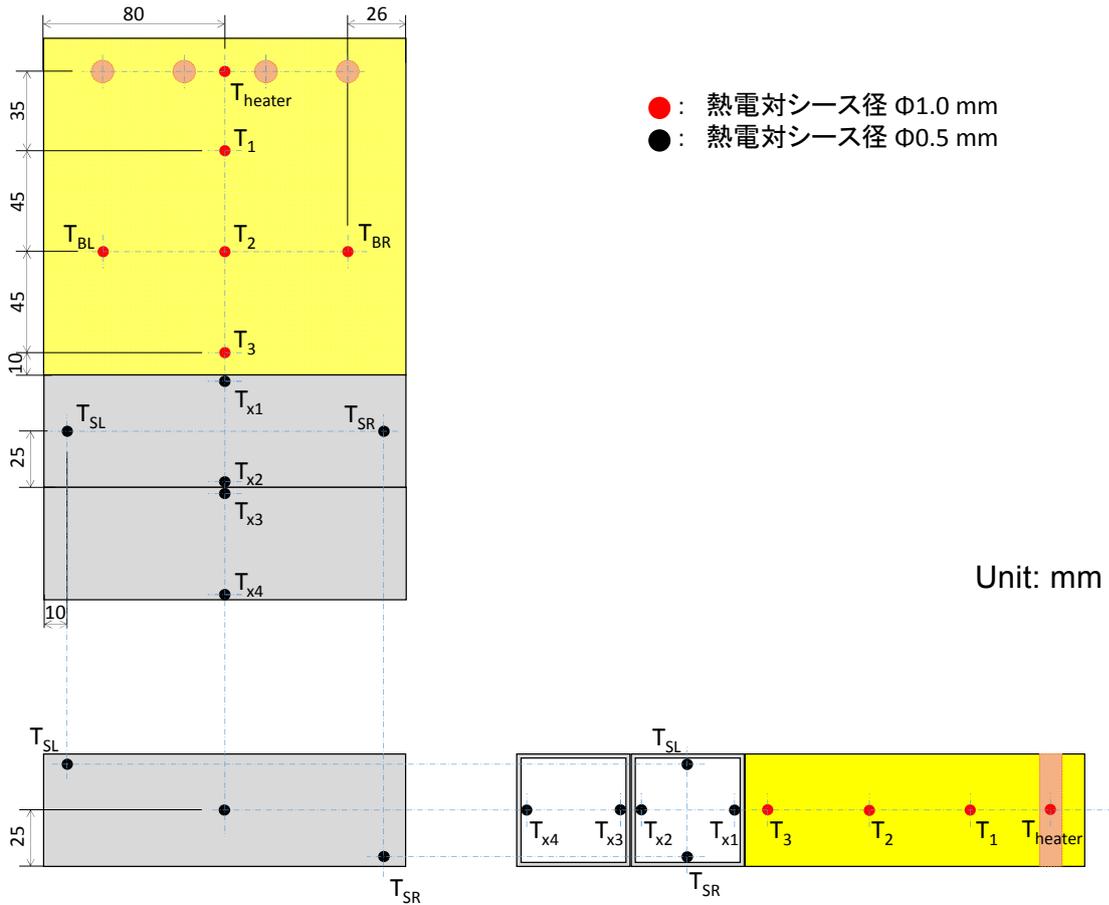


Fig. 3-6 試験装置熱電対設置位置

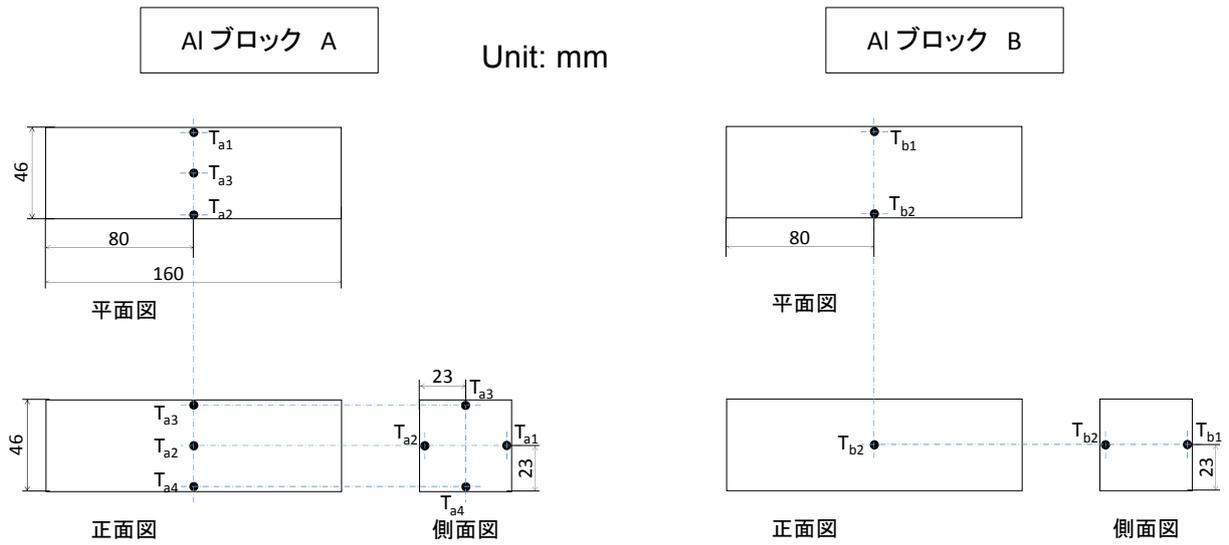
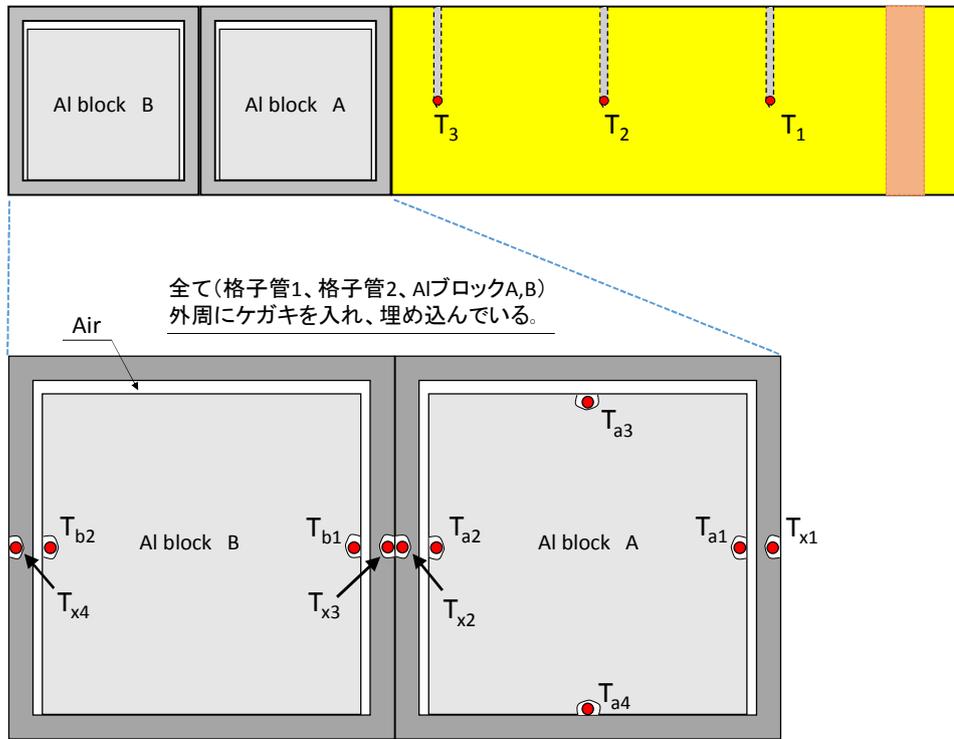
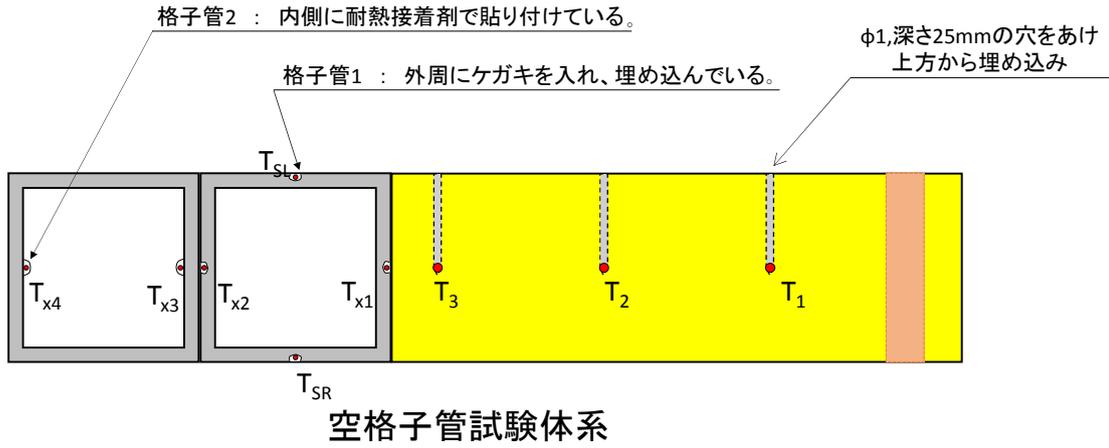


Fig. 3-7 充填模擬物質（アルミニウムブロック）熱電対設置位置



充填模擬物質(アルミニウムブロック)装荷試験体系

Fig. 3-8 熱電対設置方法詳細図

3.2.1. ステンレス格子管及びステンレスブロックの熱伝導率 λ_s の温度依存性

式(3.6)の熱流束 q_h は、Fig. 3-6 中のステンレスブロック内の温度分布 ($T_1 \sim T_3$) を測定することにより求まり、熱流束の評価式は式(3.7)で示す通りである。式(3.6)のステンレス格子管及びステンレスブロックの熱伝導率 λ_s は温度依存性を持ち、本報告では文献¹⁰⁾のデータに基づく式(3.8)の補正式を用いる。ここで、ステンレスブロック代表温度 (T_{s1}) 及び格子管代表温度 (T_{s2}) は、評価点間距離の平均温度とした。よって、本試験体系において式(3.6)は、下記式(3.9)の通り書き換えることが出来る。

$$q_h = \lambda_s \frac{\Delta T_b}{d_m} \quad (3.7)$$

$$\lambda_{s1} = 0.0165T_{s1} + 9.5049 \quad (3.8)$$

$$\lambda_{s2} = 0.0165T_{s2} + 9.5049$$

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_{s1} \Delta T_{s1}}{d_m \Delta T_{s2}} \left(\frac{A_a + A_s}{A_a} \right) L_a - \lambda_{s2} \frac{A_s L_a}{A_a L_s} \quad (3.9)$$

- d_m : ステンレスブロックの評価点間距離 (m)
- T_{s1} : ステンレスブロックの代表温度 ($(T_1 + T_3)/2$) (K)
- T_{s2} : 格子管の代表温度 ($(T_{x1} + T_{x2})/2$) (K)
- λ_{s1} : ステンレスブロックの評価温度におけるステンレスの熱伝導率 (W/m/K)
- λ_{s2} : ステンレス格子管の評価温度におけるステンレスの熱伝導率 (W/m/K)
- ΔT_{s1} : ステンレスブロック評価点間の温度差 (K)
- ΔT_{s2} : 格子管評価点間の温度差 (K)

3.3. 試験方法

試験の大まかな流れは、「予備加熱」～「試験 (300℃から 50℃まで 25℃刻みで温度降下)」となる。各工程の詳細について、次項から説明する。

3.3.1. 予備加熱

熱源、及び補償ヒータの温度を全て 300℃に設定し、48 時間程度の予備加熱を行う。主要測定点 (Fig. 3-6 中 $T_1, T_2, T_3, T_{BL}, T_{BR}, T_{x1}, T_{x2}, T_{SL}, T_{SR}$ 、以下同じ) の温度変化率が 1 時間当たり 0.05℃を下回った場合定常状態に達したと判断し、測定を開始する。

3.3.2. 試験

予備加熱完了後、熱源の温度を 300℃～50℃まで 25℃刻みで降下させていき、計 11 の温度条件における定常時の装置内部各点温度を測定する。その際、装置内部には熱源から露出面に向かって温度勾配が存在しているので、各温度条件において補償ヒータの温度を適切な値に変更する。各補償ヒータの温度設定方法は、下記の通りである。

- ・ステンレスブロック周りの補償ヒータ : Fig. 3-6 中 T_2 の温度 (0.5℃刻みで繰上げ)
- ・格子管周りの補償ヒータ : Fig. 3-6 中 T_{x2} の温度 (0.5℃刻みで繰上げ)

主要測定点の温度変化率が、1 時間当たり 0.05℃を下回った場合、定常状態に達したと判断し、その後 1 時間の測定時間を設けた後、次の温度条件に移る。

3.4. 試験結果

3.4.1. 空格子管内部の等価熱伝導率評価

空格子管を設置した時の、各温度ケースにおける測定温度を Table 3.2 にまとめる。測定温度は、各ケースで定常状態と判断された後の 1 時間におけるデータの平均値としている。 T_1 から T_{x4} は熱電対を設置した位置であり、Fig. 3-9 に示す各位置に対応する。Table 3.2 の温度分布を図示したものを Fig. 3-10 及び Fig. 3-11 に示す。

この測定結果から計算した、熱流束、熱通過率、格子管内部の等価熱伝導率を Table 3.3 に示す。熱通過率及び内部の等価熱伝導率については、格子管 1 の測定結果を基にしている。この表から、基本的にヒータ温度の上昇（代表温度及び格子管内部の温度差の上昇）に対して、熱通過率及び内部の等価熱伝導率ともに値が上昇する傾向にあることがわかる。

3.4.2. アルミニウムブロック充填格子管内部の等価熱伝導率評価

アルミニウムブロックを格子管内に充填した時の、各温度ケースにおける測定温度を Table 3.4 にまとめる。測定温度の扱いは空格子管のケースと同様、各ケースで定常状態と判断された後の 1 時間におけるデータの平均値としている。 T_1 から T_{x4} の熱電対設置位置は Fig. 3-12 に示す通りで、この試験では、格子管に加えアルミニウムブロック自体にも熱電対を設置している。また、格子管とアルミニウムブロックは底面以外に直接接触する構造になっておらず、左右と上部に薄い空気の層（0.44mm 程度）が存在する。Table 3.4 の温度分布を図示したものを Fig. 3-13 と Fig. 3-14 に示す。

この測定結果から計算した、熱流束、熱通過率、内部の等価熱伝導率を Table 3.5 に示す。熱通過率及び内部の等価熱伝導率については、空格子管のケースと同様に、格子管 1 の測定結果を基にしている。この表と Table 3.4 の結果から、アルミニウムブロックを充填することで熱通過率及び格子管内部の等価熱伝導率が増加することが確認され、その効果はほぼ空気層の厚さに依存していることがわかった。それぞれのケースの等価熱伝導率を Fig. 3-15 に示す。代表温度が異なるため直接的な比較は出来ないが、アルミニウムブロックを空格子管に装荷することで、空格子体系に比べ等価熱伝導率について 10 倍ほど値が向上する結果となった。

また、空格子管体系とアルミニウムブロック充填格子管体系におけるそれぞれの格子管 1 と格子管 2 の境界で、温度差が生じていることが確認された。ヒータ温度が低い場合には数℃の差、ヒータ温度が高い場合にはアルミニウム充填格子管で 10℃以上の差が生じている。これは、格子管同士の接触熱抵抗によるものと考えられ、格子管の溶接（接触）状態によって熱通過パラメータに大きな差異が発生することが確認された。

Table 3.2 空格子管試験時の測定温度 (単位: °C)

ヒータ温度	T_1	T_2	T_3	T_{x1}	T_{x2}	T_{x3}	T_{x4}
50	49.72	49.24	48.77	48.25	41.59	41.39	35.69
75	74.55	73.55	72.65	71.59	58.40	57.93	46.58
100	99.38	97.99	96.66	91.81	72.47	71.73	55.44
125	124.16	122.30	120.46	114.96	88.95	87.96	65.85
150	148.89	146.51	144.28	138.54	106.10	104.76	76.84
174	173.64	170.79	168.01	162.53	123.48	121.79	87.43
200	198.35	194.90	191.65	187.01	141.70	139.55	98.48
225	223.20	219.29	215.60	208.56	157.34	154.85	108.76
250	247.87	243.42	239.19	232.80	175.42	172.47	119.95
275	272.57	267.69	262.96	253.35	189.73	186.35	128.64
300	297.44	291.89	286.62	278.85	209.56	205.71	141.46

Table 3.3 測定結果に基づく熱通過率及び内部の等価熱伝導率 (空格子管)

ヒータ温度 [°C]	熱流束 q_h [W/m ²]	代表温度 T_{s2} [°C]	熱通過率 K [W/m ² /K]	等価熱伝導率(空気) λ_{eq} [W/m/K]
50	156.6	44.9	23.53	0.189
75	321.9	65.0	24.40	0.205
100	473.6	82.1	24.49	0.182
125	659.6	102.0	25.36	0.198
150	845.3	122.3	26.05	0.205
174	1056.9	143.0	27.06	0.229
200	1288.8	164.4	28.44	0.270
225	1496.7	183.0	29.22	0.282
250	1748.9	204.1	30.48	0.317
275	1981.5	221.5	31.15	0.323
300	2278.4	244.2	32.88	0.382

Table 3.4 アルミニウムブロック充填試験時の測定温度（単位：℃）

ヒータ温度	T_1	T_2	T_3	T_{x1}	T_{a1}	T_{a2}	T_{x2}	T_{x3}	T_{b1}	T_{b2}	T_{x4}
50	49.62	49.05	48.49	46.49	45.30	45.24	43.49	41.89	40.71	40.64	39.16
75	74.35	73.21	72.14	68.96	66.81	66.66	63.11	60.10	57.94	57.71	54.72
100	99.05	97.34	95.73	91.99	88.79	88.64	83.31	78.93	75.50	75.16	70.67
125	123.95	121.90	119.94	112.99	109.25	109.04	102.71	95.60	91.31	90.91	85.92
150	148.60	146.00	143.50	135.95	131.37	131.07	123.10	114.36	108.91	108.37	101.94
175	173.33	170.19	167.17	159.38	154.13	153.81	144.16	134.16	127.60	126.98	119.08
200	197.98	194.25	190.67	182.81	176.87	176.46	165.17	154.17	146.51	145.80	136.42
225	222.73	218.35	214.16	206.24	199.55	199.06	185.98	174.26	165.53	164.66	153.71
250	247.35	242.30	237.55	229.89	222.59	221.95	207.31	194.79	185.11	184.05	171.62
275	271.96	266.31	260.83	253.62	245.72	244.91	228.68	215.31	204.79	203.45	189.17
300	296.64	290.22	284.05	277.05	268.45	267.56	249.66	235.70	224.40	222.59	206.60

Table 3.5 測定結果に基づく熱通過率及び内部の等価熱伝導率
（アルミニウムブロック充填）

ヒータ温度 [℃]	熱流束 q_h [W/m ²]	代表温度 T_{s2} [℃]	熱通過率 K [W/m ² /K]	等価熱伝導率 (Al+空気) λ_{eq} [W/m/K]
50	187.2	45.0	62.41	2.13
75	374.0	66.0	63.93	2.18
100	578.0	87.7	66.60	2.29
125	715.7	107.9	69.63	2.41
150	934.3	129.5	72.70	2.54
175	1156.1	151.8	75.95	2.67
200	1405.6	174.0	79.67	2.83
225	1688.0	196.1	83.30	2.99
250	1974.9	218.6	87.50	3.17
275	2295.1	241.2	92.02	3.37
300	2651.7	263.4	96.83	3.58

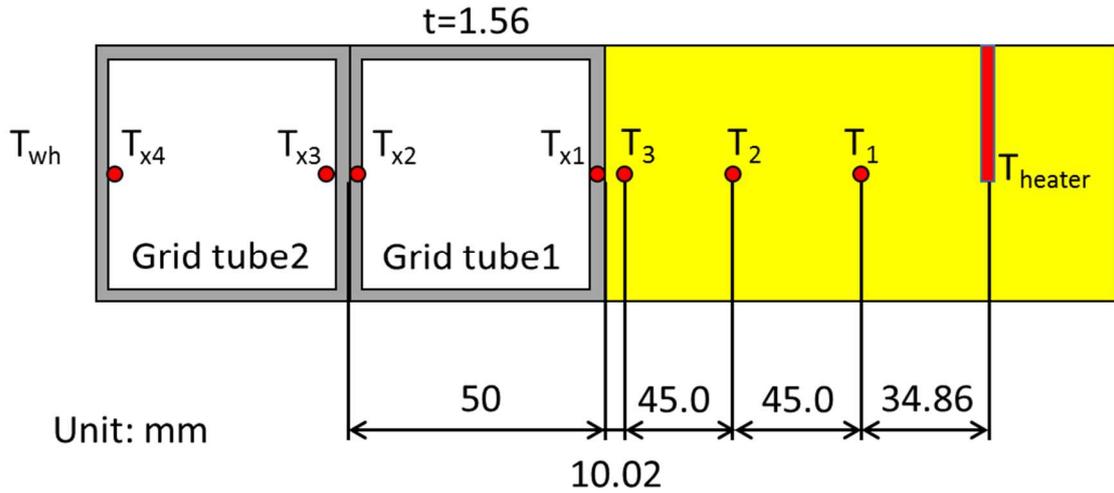


Fig. 3-9 温度測定位置（空格子管体系）
 （黄色部分が熱流束測定部、灰色部分が格子管）

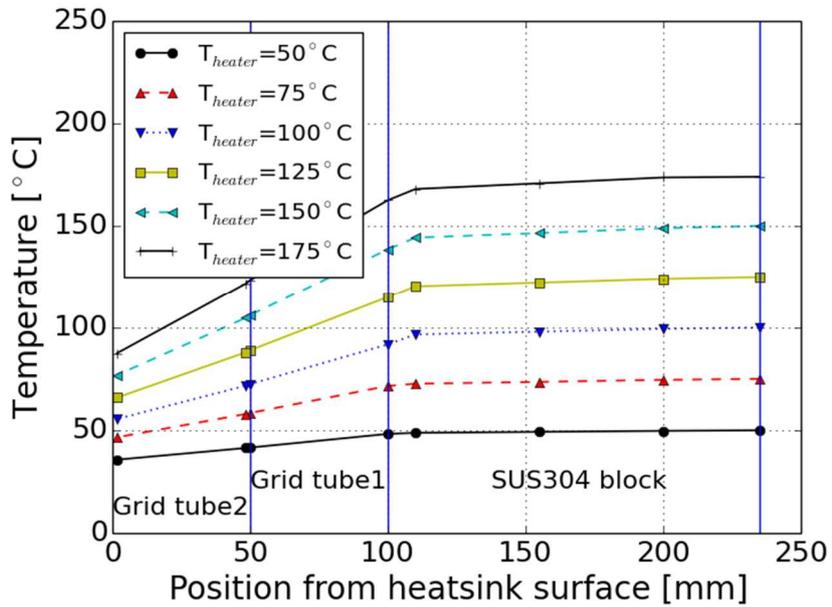


Fig. 3-10 測定された温度分布（空格子管：ヒータ温度 50°C ～ 175°C まで）

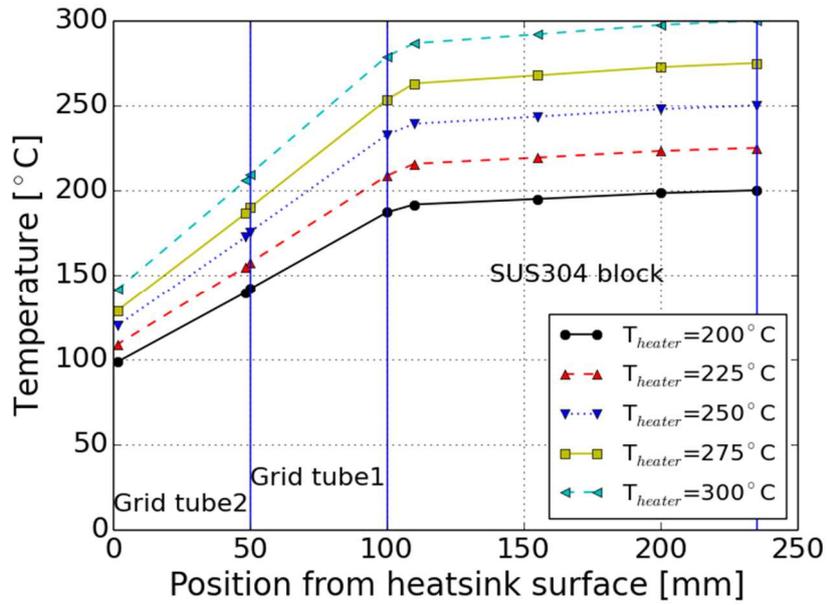


Fig. 3-11 測定された温度分布（空格子管：ヒータ温度 200°C～300°Cまで）

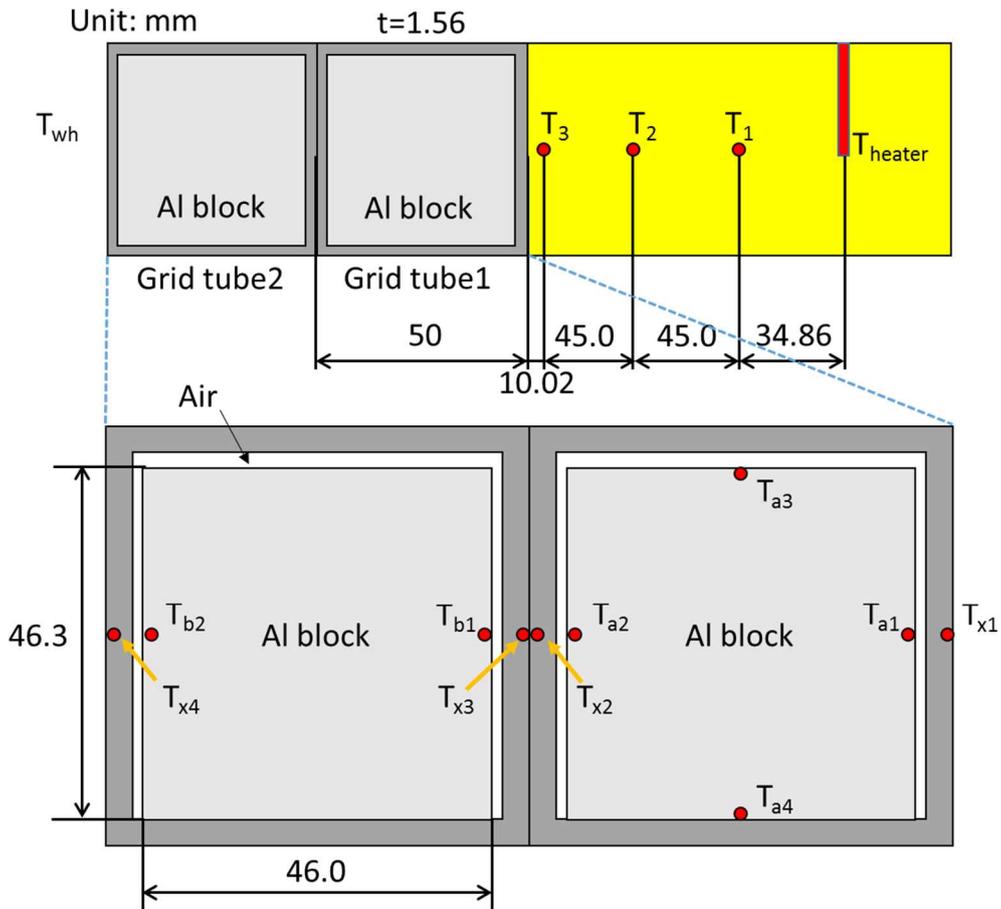


Fig. 3-12 温度測定位置（アルミニウムブロック充填格子管体系）

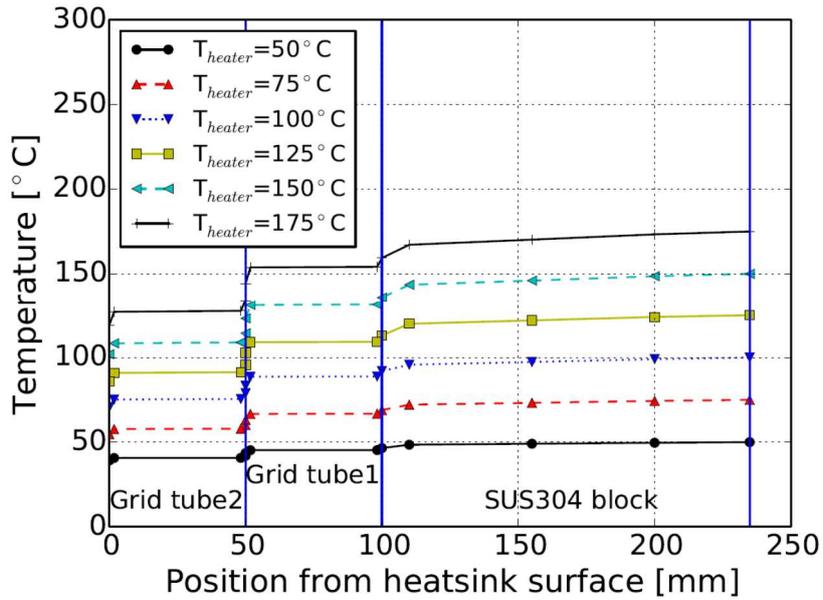


Fig. 3-13 測定された温度分布

(アルミニウムブロック充填格子管：ヒータ温度 50°C～175°Cまで)

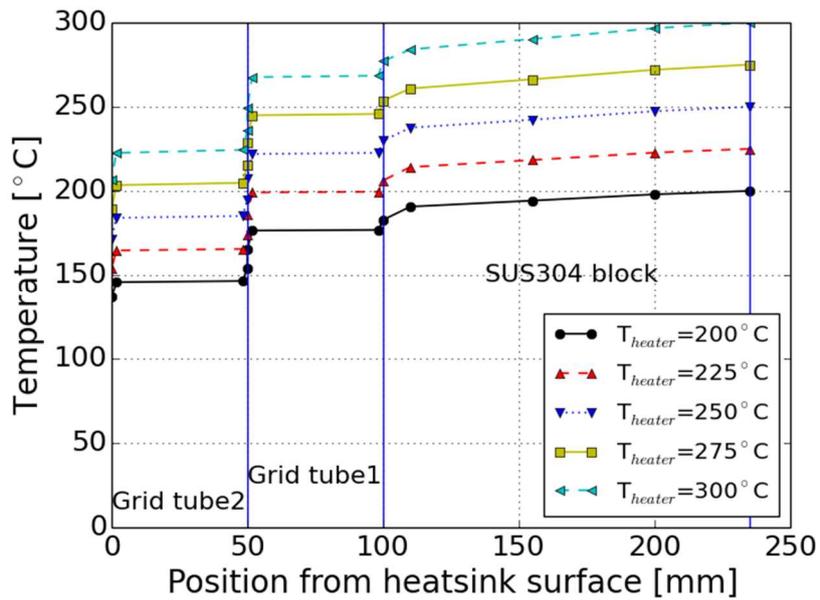


Fig. 3-14 測定された温度分布

(アルミニウムブロック充填格子管：ヒータ温度 200°C～300°Cまで)

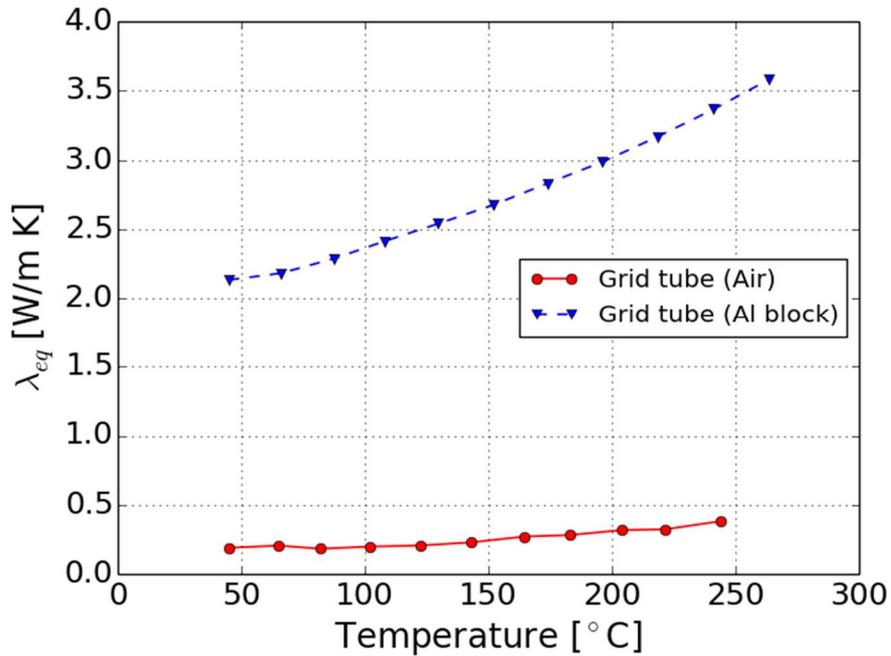


Fig. 3-15 測定結果に基づく等価熱伝導率 λ_{eq}

3.5. 評価

3.5.1. 空格子管

空格子管の実験結果に対して、式(2.2)により評価した等価熱伝導率と測定結果を比較したものを Fig. 3-16 に示す。ここで計算値は、ヒータ位置での温度を測定条件と一致させるため、熱流束などの条件が異なっており、各ケースの代表温度も測定結果と異なっている。式(2.2)による計算値に対して、実験値から得られた等価熱伝導率の方が 2 倍以上大きい結果となった。すなわち、これまでの式(2.2)に基づく TEF-P 炉心温度解析結果における空格子管領域の熱伝導評価は、保守側の評価になっていることが確認された。

代表温度の上昇に伴う等価熱伝導率の変化量が計算値よりも実測値のほうが大きい要因は、熱放射による伝熱効果であると考えられる。放射伝熱による伝熱量は、次式(3.10)に示すように、Fig. 3-9 の T_{x1} 及び T_{x2} における伝熱面温度の 4 乗の差で指数的に増加¹⁾していく。Fig. 3-16 から熱放射の効果を差し引いたグラフを Fig. 3-17 に示す。熱放射の効果を差し引くと測定値と計算値は同様の傾向となった。計算値（解析）では熱放射の効果を無視していたが、冷却ブロワ停止時の炉心温度評価の中心となるおよそ 150~400°C の温度域については、放射伝熱を適切に取り扱うことも必要であると考えられる。

$$q_h = \sigma(T_{x1}^4 - T_{x2}^4)f_{1,2} \quad (3.10)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

$f_{1,2}$: 放射係数 $\frac{1}{(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)}$ (密閉格子管のため灰色体無限平行平面を仮定)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 放射率 1

3.5.2. アルミニウムブロック充填格子管

アルミニウムブロックを充填したケースについては、基本的に Fig. 3-1 及び式(3.1)、式(3.4)の考え方に基づいて、以下のように拡張した式に基づいて計算値を求めた。まず Fig. 3-18 に示すように体系をモデル化し、アルミニウムブロックと空気のギャップ部分を通過熱流量 q_3 が通過するものとする。3.1.1 節のパラメータに対し、更にアルミニウムブロックについての熱伝導率 λ_{al} [W/m/K]、伝熱面積 A_{al} [m²]、伝熱長さ L_{al} [m]、またアルミニウムブロックと格子管間のギャップ間距離 L_{gap} [m]（左右の合計）を考えた場合、通過熱流量 q_3 が通過する部分の熱抵抗 R_{al} は次式(3.11)で表される。ここで各温度におけるアルミニウムの熱伝導率 λ_{al} は、Table 3.6 の値を使用する¹²⁾。アルミニウムの熱伝導率はおよそ 100°C を極大として上に凸のような温度依存性を持つため、本報告書では評価温度におけるアルミニウムの熱伝導率をテーブル化したものを使用した。

$$R_{al} = \frac{L_{al}}{\lambda_{al}} + \frac{L_{gap}}{\lambda_a} \quad (3.11)$$

よって総括熱抵抗 R_t は

$$\frac{1}{R_t} = \frac{A_s}{L_s} + \frac{A_a}{L_a} + \frac{A_{al}}{R_{al}} \quad (3.12)$$

式(3.12)と式(3.4)の関係から、アルミニウムブロック充填時の熱通過率 K は、次式(3.13)となる。

$$K = \frac{\lambda_s A_s}{L_s A} + \frac{\lambda_a A_a}{L_a A} + \frac{A_{al}}{R_{al} A} \quad (3.13)$$

また式(3.11)において、格子管内部（アルミニウムブロック＋空気）の等価熱伝導率を λ_{eq} と置き、 $L_s = L_a = L_{al} + L_{gap}$ の関係から

$$R_{al} = \frac{L_s}{\lambda_{eq}} \quad (3.14)$$

として、 λ_{eq} について整理すると、次式の関係を得る。

$$\lambda_{eq} = \frac{L_s \lambda_{al} \lambda_a}{L_{al} \lambda_a + L_{gap} \lambda_{al}} \quad (3.15)$$

式(3.15)に基づき計算された等価熱伝導率と実験で得られた値を Fig. 3-19 に示す。アルミニウムブロック充填体系の等価熱伝導率の計算値については、アルミニウムブロックと格子管間のギャップ間距離の僅かな差で大きく値を変えることから、 L_{gap} を 0.3~0.7mm の条件でそれぞれ算出した。ギャップ間距離が小さいほど等価熱伝導率が大きく、距離が増えるにつれ、等価熱伝導率が低下していくことがわかる。この図から、実験値による等価熱伝導率は、 L_{gap} が 0.5~0.7mm のケースの間にあることがわかる。設計上の L_{gap} は 0.44mm であったが、製作誤差や装荷位置のずれ、歪みなどの因子によって計算値と差が生まれたものと思われる。

Table 3.6 アルミニウムブロックの熱伝導率

ヒータ温度[°C]	熱伝導率 λ_{al} [W/m/K]
50	239.00
75	240.00
100	240.00
125	240.00
150	239.00
174	238.00
200	237.00
225	236.00
250	235.00
275	234.00
300	233.00

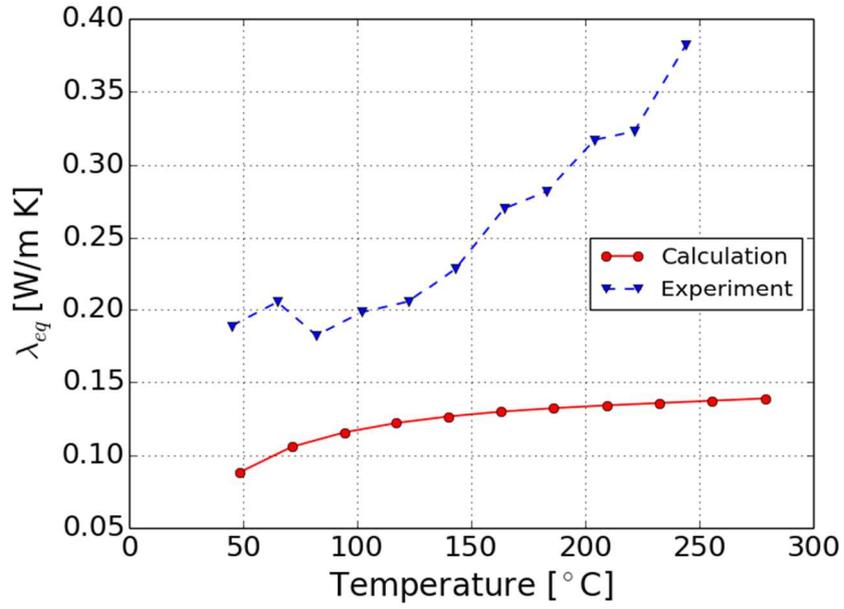


Fig. 3-16 等価熱伝導率 λ_{eq} の計算値と実験値の比較 (空格子管)

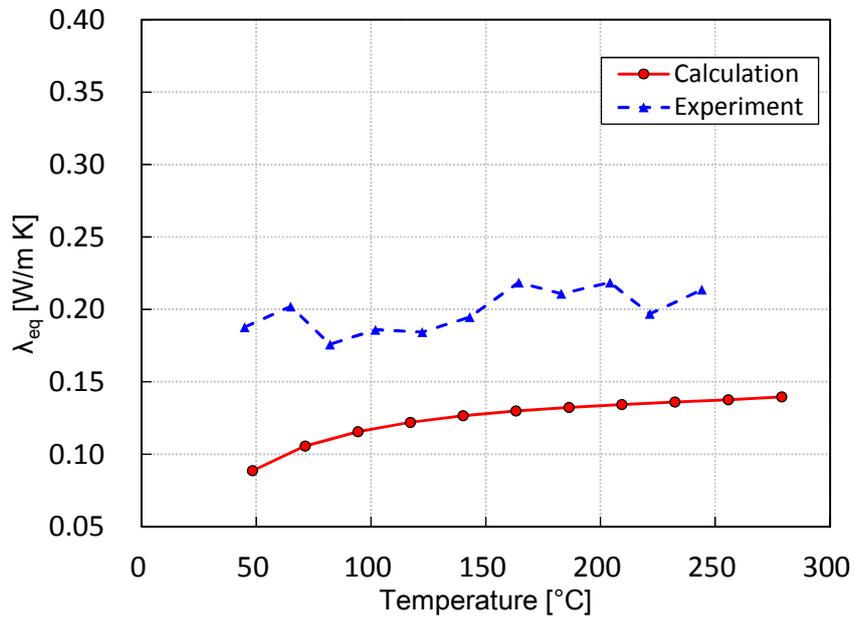


Fig. 3-17 等価熱伝導率 λ_{eq} の計算値と熱放射の影響を除いた実験値の比較 (空格子管)

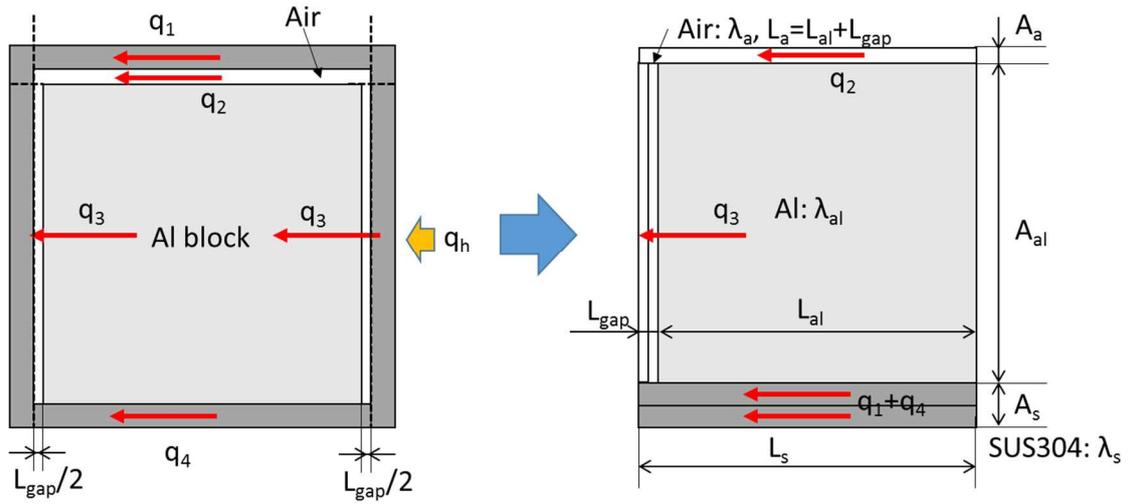


Fig. 3-18 アルミニウムブロック入り格子管の熱移動のモデル化

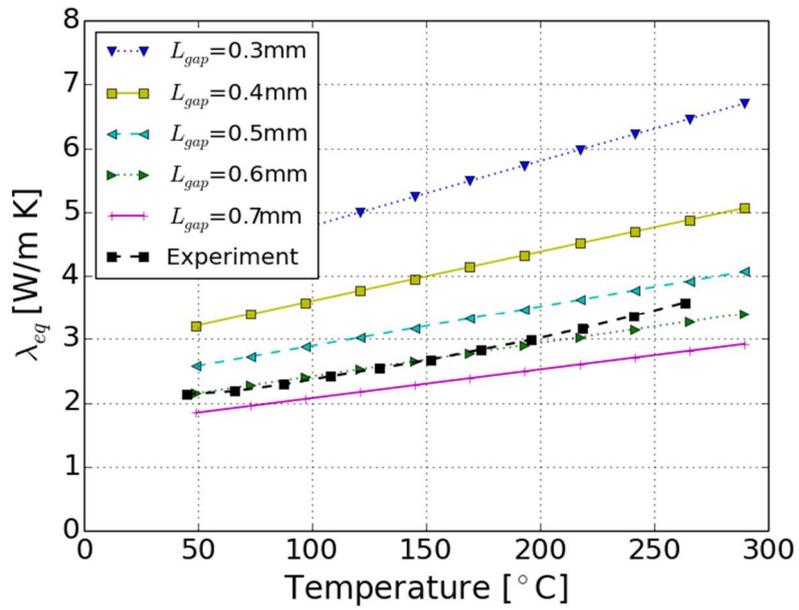


Fig. 3-19 アルミニウムブロック充填格子管の等価熱伝導率 λ_{eq}

3.5.3. 接触熱抵抗の効果

Fig. 3-10, Fig. 3-11, Fig. 3-13, Fig. 3-14 に示される実測値には、ステンレスブロックと格子管の接触面及び格子管同士の接触面による接触熱抵抗の影響から急激な温度降下が見られ、更に装置組み換え等に伴う各接触面のわずかな状態の変化で、その温度変化の大小も大きく異なった。本試験装置では、接触面の仕上げ、接触面の接触圧力等を数値化することは出来ないため定量的な評価は避けるが、次式(3.15)より評価される接触熱抵抗 R_c [K/W]と格子管部の式(3.1)より評価される総括熱抵抗 R_t [K/W]の比を、式(3.16)の式を用いて空格子管体系及びアルミニウムブロック充填試験体系でそれぞれ計算すると、Table 3.7 となった。

両体系における格子管接触状態や熱電対設置位置による誤差影響はあるが、空格子管体系のような系全体として熱が伝わりにくい場合は接触熱抵抗による影響が小さく、アルミニウムブロック充填体系のような伝熱性能が向上した体系では、体系の全熱抵抗に対する接触熱抵抗の割合が相対的に大きくなることが確認された。

$$R_c = \frac{\Delta T_c}{q_h(A_a + A_s)} \quad (3.15)$$

$$\frac{R_c}{R_t} = \frac{\Delta T_c}{q_h L} \left(\frac{A_a}{(A_a + A_s)} \lambda_{eq} + \frac{A_s}{(A_a + A_s)} \lambda_s \right) \quad (3.16)$$

ΔT_c : 接触面の温度差 (K)

Table 3.7 接触熱抵抗 R_c と格子管部熱抵抗 R_t の比

ヒータ 温度 [°C]	空格子管体系		アルミニウムブロック充填体系	
	ステンレスブロック —格子管 1 接触面	格子管 1— 格子管 2 接触面	ステンレスブロック —格子管 1 接触面	格子管 1 —格子管 2 接触面
50	6.3%	3.0%	62.5%	53.3%
75	6.5%	3.6%	50.4%	51.4%
100	23.5%	3.8%	38.9%	50.5%
125	19.6%	3.8%	63.4%	69.2%
150	16.1%	4.1%	54.4%	68.0%
174	12.5%	4.3%	46.8%	65.7%
200	8.6%	4.7%	40.0%	62.3%
225	12.1%	4.9%	34.4%	57.8%
250	9.5%	5.1%	29.3%	55.5%
275	13.4%	5.3%	24.0%	53.6%
300	9.5%	5.5%	20.5%	51.0%

4. まとめ

本報告書では、炉心温度評価の一環として、TEF-Pの炉心強制冷却機能喪失時における炉心の空格子管内部の径方向等価熱伝導率について、試験装置を製作して温度と熱流束を実測し、現在TEF-P炉心温度解析に適用されている等価熱伝導率評価モデルとの比較を行った。また、空格子管の内部にアルミニウムブロックを充填した体系でも同様の測定を行い、空格子管と比較した熱の伝わりやすさの検証を行った。

空格子管内部における等価熱伝導率は、文献の実験式による評価よりも、約2倍高い値を示しており、TEF-Pの炉心温度解析にフィードバックすることで、より適切な炉心温度の評価が行えると考えられる。

模擬物質としてアルミニウムブロックを充填した体系の等価熱伝導率については、格子管内部が空（空気）の時と比べて10倍程度上昇しており、TEF-P炉心構築の際、空格子管部分にアルミニウムブロックを充填することで、強制冷却機能喪失時に重要な除熱機能を果たすと考えられる。

一方、本試験を通して以下の課題も発見された。これらについては今後の課題として、追加の解析やその他装置改良等で解決していく必要がある。

- ・本報告書における評価では、熱漏洩は全く無い「断熱条件」として評価を行ったが、今後、等価熱伝導率評価のさらなる精度向上のために、各測定誤差に加え、熱漏洩も加味した誤差評価を行うことが求められる。
- ・格子管内部代表温度が150℃以上の高温時における伝熱評価に関して、放射伝熱の効果が有意にあることを確認した。現状熱放射を考慮しない保守側の解析としているが、熱放射を適切に考慮することでTEF-P炉心の適切な温度評価に繋がると思われる。
- ・非保守側の影響となる接触熱抵抗について、有意な影響を確認した。アルミニウムブロック充填など、除熱特性を高める措置を行った場合その影響割合は更に大きくなるため、その値の定量化が求められる。

今後、これらの結果を炉心温度解析に適用し従前の結果と比較を行うとともに、様々な代表温度 T_{s2} 、温度差 ΔT における試験を行いデータベース化し、実験相関式等汎用性のある形へと整理を行う予定である。

参考文献

- 1) 佐々 敏信、梅野 誠、水野 博 他、`核変換実験施設の概念検討 (2) ADS ターゲット試験施設の概念検討", JAERI-Tech 2005-021, (2005), 114p.
- 2) 大井川 宏之、池田 裕二郎、佐々 敏信 他、`核変換実験施設の概念検討 (1) 核変換物理実験施設の概要", JAERI-Tech 2000-062, (2000), 64p.
- 3) 大井川 宏之、前川 藤夫、明午 伸一郎 他、`核変換実験施設の概念検討 (3) 核変換物理実験施設の検討", JAERI-Tech 2002-037, (2002), 220p.
- 4) 辻本 和文、田澤 勇次郎、大井川 宏之 他、`核変換実験施設の概念検討 (4) 核変換物理実験施設の安全性検討", JAERI-Tech 2003-085, (2003), 158p.
- 5) 菅原 隆徳、西原 健司、佐々 敏信 他、`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.
- 6) 伝熱工学資料 改訂 4 版, 日本機械学会, 1986, 2.3 節.
- 7) ANSYS homepage, <https://ansys.jp> (参照 2015-12-16)
- 8) Heat Exchanger Design Handbook 1998, Begell House, 1998.
- 9) 相原利雄, 機械工学選書 伝熱工学第 13 版, 裳華房, 2006, 2.2.3 節.
- 10) Network Database System for Thermophysical Property Data,
<http://tpds.db.aist.go.jp/tpds-web/index.aspx?MaterialID=538> (参照 2015-12-16)
- 11) 相原利雄, 機械工学選書 伝熱工学第 13 版, 裳華房, 2006, 6.2.1 節.
- 12) Network Database System for Thermophysical Property Data,
<http://tpds.db.aist.go.jp/tpds-web/index.aspx?MaterialID=455> (参照 2015-12-16)
- 13) ニチアス 製品案内, <http://www.nichias.co.jp/products/index.html> (参照 2015-12-16)

付録 A 本試験体系における格子管部通過熱流束評価

本試験において格子管内部の等価熱伝導率 λ_{eq} を評価するに当たり、Fig. 3-1 で示す通り、全体の熱通過量から格子管部を伝わる熱通過量を計算で切り離して評価する手法を用いた。ここでは、格子管部を伝わる熱通過量の計算が適切であることを確認するため、空格子管内部に断熱材を充填した体系で同様の試験を行い、実験結果から求まる λ_s と、式(3.8)から求まる λ_s の計算値を比較する。

試験体系は下図 Fig. A-1 に示す通りで、式(3.6)は λ_s で整理した次式(A.1)で置き換わり、実験結果から求まる λ_s の実験値と、式(3.8)から求まる文献値 λ_s の計算値を比較する。

結果を Table A.1 及び Fig. A-2 に示す。計算値（文献値）と実験値の相対差はおおよそ 4～5%程度となっており、温度の上昇に伴う傾向も一致していることが確認できた。

しかしながら、測定結果から式(3.5)を用いて格子管部と格子管内部を通過する熱流束の比を算出すると、空格子管の場合測定熱流束のおよそ 90%が格子管部を通過しており、小さな差でも格子管内部の等価熱伝導率評価への影響は大きくなる。参考までに、Fig. A-3 に式(3.9)の λ_{s2} に、実験値 λ_s を適用して算出した空格子管体系における等価熱伝導率 λ_{eq} のグラフを示す。文献値 λ_s を用いて算出した結果と比較して 30%以上の差が発生している。実験値 λ_s には、「試験装置による誤差（熱流束測定誤差、温度測定誤差）」に加え、定量化が難しい「断熱材の品質（熱伝導率）の誤差」「格子管製作精度による誤差」「格子管の品質による SUS304 理論値との誤差」などの影響があるため、一概に実験値 λ_s の値を適用することは望ましくないが、格子管の板厚を薄くする改良などによって格子管部通過熱流束を下げ、 λ_s の誤差による λ_{eq} の測定結果への影響をなるべく小さくすることが求められる。

$$\lambda_s = \frac{q_h (A_a + A_s)}{\Delta T} \left(\frac{A_a + A_s}{A_s} \right) L_s - \lambda_{in} \frac{A_a L_s}{A_s L_a} \quad (A.1)$$

λ_{in} : 断熱材の熱伝導率 0.03 (W/m/K) ¹³⁾

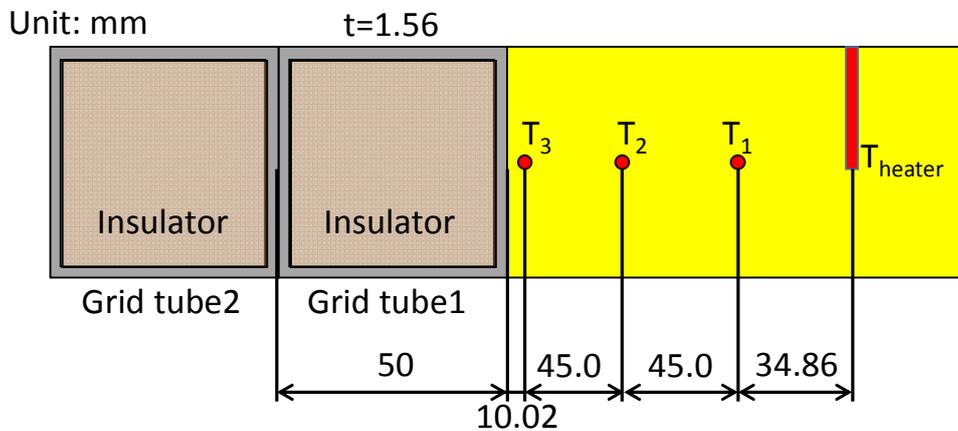


Fig. A-1 断熱材充填体系図

Table A.1 格子管部熱伝導率の計算値と実験値の比較 (格子管内断熱材充填)

ヒータ温度 [°C]	熱流束 q_h [W/m ²]	代表温度 T [°C]	熱伝導率(実験値) λ_s [W/m/K]	熱伝導率(計算値) λ_s [W/m/K]	相対差
50	144.8	45.2	15.60	14.84	5.15%
75	295.3	65.8	16.16	15.25	5.96%
100	426.4	86.8	16.38	15.66	4.56%
125	580.5	107.4	16.80	16.07	4.49%
150	732.8	128.1	17.27	16.49	4.73%
174	881.2	149.0	17.54	16.90	3.78%
200	1051.1	169.8	18.05	17.31	4.26%
225	1225.2	190.5	18.43	17.72	4.00%
250	1420.7	210.9	18.92	18.14	4.34%
275	1606.1	231.7	19.30	18.55	4.06%
300	1813.4	252.6	19.83	18.96	4.60%

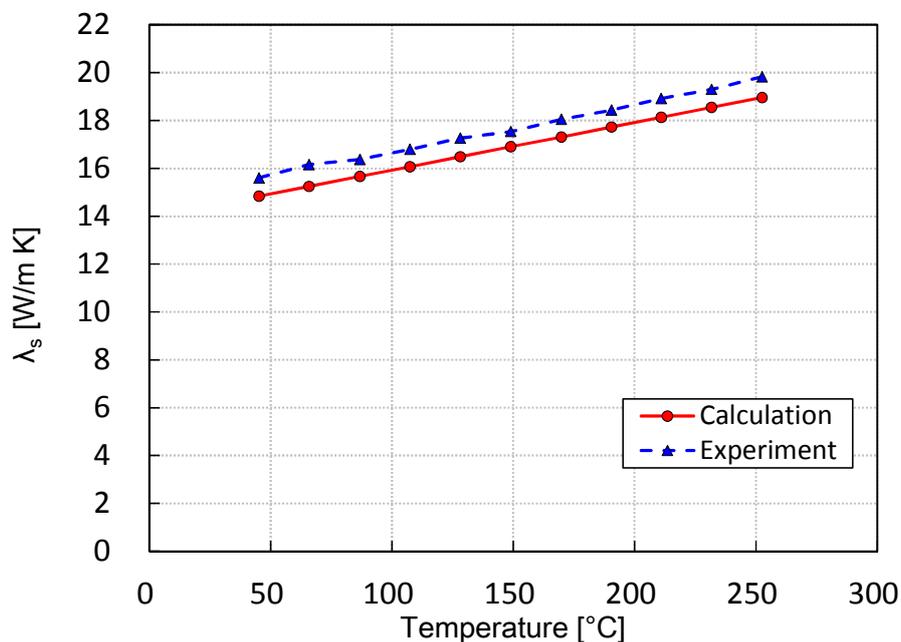


Fig. A-2 格子管部熱伝導率 λ_s の計算値と実験値の比較 (格子管内断熱材充填)

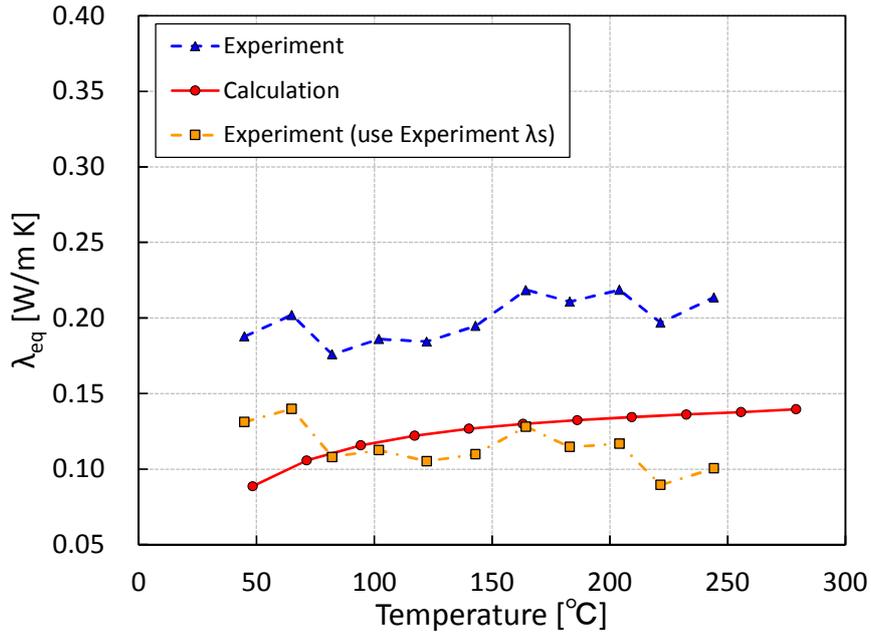


Fig. A-3 Fig.A-2 で求められた実験値 λ_s を使用して算出した等価熱伝導率 λ_{eq}
 (空格子管体系 熱放射の影響を排除)

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 ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	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
比体積	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
磁界の強さ	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	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
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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 ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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大きさは同一である。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 ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
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 ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
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 ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
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 ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
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 ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	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 ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ 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 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
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
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ 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 ⁻⁴ 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 ⁻⁶ m

