JAEA-Data/Code
2017-002
DOI:10.11484/jaea-data-code-2017-002

JAEA-Data/Code

高温ガス炉用燃料温度計算コード FTCC の開発

Development of Fuel Temperature Calculation Code "FTCC" for High Temperature Gas-cooled Reactors

稲葉 良知　井坂 和義　柴田 大受

Yoshitomo INABA, Kazuyoshi ISAKA and Taiju SHIBATA

原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ディビジョン

Small-sized HTGR Research and Development Division
HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research

March 2017

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, 2017

JAEA-Data/Code 2017-002

高温ガス炉用燃料温度計算コード FTCC の開発

日本原子力研究開発機構　原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター　小型高温ガス炉研究開発ディビジョン
稲葉　良知、井坂　和義※、柴田　大受

（2017 年 1 月 4 日受理）

高温ガス炉燃料の熱的健全性を確保するために、通常運転時の燃料最高温度は設計目標値以下にする必要がある。ブロック型高温ガス炉の炉心熱流動設計において燃料最高温度は、炉心の形状や仕様、出力分布と照射量分布及び炉心冷却材流量配分を考慮して評価される。高温工学試験研究炉（HTTR）の設計段階で使用された燃料温度計算コードは、UNIX システム上での動作を前提としており、その操作と実行手順は複雑で、ユーザーフレンドリーではなかった。それゆえ、簡便な操作と実行手順のようなユーザーフレンドリーなシステムを持つ新しい燃料温度計算コード FTCC を開発した。本報告書では、FTCC の計算対象とモデル、基礎式、特長（HTTR 設計コードからの改良点）、コード構成、使用方法及び FTCC による検証計算の結果について示した。FTCC による計算結果は、HTTR 設計コードの結果と良く一致し、FTCC は今後、高温ガス炉用設計コードの 1 つとして使用される。また、FTCC を用いて、工学的安全係数及び燃料冷却形態の違いが燃料最高温度の低減化に与える効果について調べた。その結果、中空燃料コンパクトの中心孔冷却及び一体型燃料を用いたギャップレス冷却による効果が、非常に高いことがわかった。

大洗研究開発センター：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002
※技術開発協力員

JAEA-Data/Code 2017-002

Development of Fuel Temperature Calculation Code "FTCC" for High Temperature Gas-cooled Reactors

Yoshitomo INABA, Kazuyoshi ISAKA※ and Taiju SHIBATA

Small-sized HTGR Research and Development Division
HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2017)

In order to ensure the thermal integrity of fuel in High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGRs), it is necessary that the maximum fuel temperature in normal operation is to be lower than a thermal design target. In the core thermal-hydraulic design of block-type HTGRs, the maximum fuel temperature should be evaluated considering data such as core geometry and specifications, power density and neutron fluence distributions, and core coolant flow distribution. The fuel temperature calculation code used in the design stage of the High Temperature engineering Test Reactor (HTTR) presupposes to run on UNIX systems, and its operation and execution procedure are complicated and are not user-friendly. Therefore, a new fuel temperature calculation code, named FTCC, which has a user-friendly system such as a simple and easy operation and execution procedure, was developed. This report describes the calculation objects and models, the basic equations, the strong points (improvement points from the HTTR design code), the code structure, the using method of FTCC, and the result of a validation calculation with FTCC. The calculation result obtained by FTCC provides good agreement with that of the HTTR design code, and then FTCC will be used as one of the design codes for HTGRs. In addition, the effect of hot spot factors and fuel cooling forms on reducing the maximum fuel temperature is investigated with FTCC. As a result, it was found that the effect of center hole cooling for hollow fuel compacts and gapless cooling with monolithic type fuel rods on reducing the temperature is very high.

Keywords: HTGR, HTTR, Core Thermal-hydraulic Design, Maximum Fuel Temperature, Calculation Code, FTCC

※ Collaborating Engineer

目　次

１．緒　言…… 1
２．燃料温度の計算方法…… 5
　２．１　燃料温度の計算対象とモデル…… 5
　２．２　燃料温度の評価方法…… 6
　２．３　工学的安全係数及び非均質効果…… 8
　２．４　炉内冷却材流量配分…… 8
　２．５　出力分布及び照射量分布…… 9
　２．６　炉心の発熱割合…… 10
　２．７　物性値…… 10
　２．８　熱伝達率…… 12
３．FTCC の特長…… 20
４．開発・コンパイル環境とコード構成…… 21
　４．１　開発・コンパイル環境…… 21
　４．２　コード構成…… 21
　　４．２．１　コードツリー…… 21
　　４．２．２　ソースファイル一覧…… 24
　　４．２．３　メインプログラム及びサブルーチンの概要…… 24
５．計算の実行方法及び入出力ファイル…… 33
　５．１　フォルダ構成及び実行方法…… 33
　５．２　実行オプション…… 33
　５．３　入出力ファイルの種類…… 35
　５．４　入力データ…… 35
　５．５　入力パラメータファイル…… 38
　　５．５．１　入力パラメータファイルの例…… 38
　　５．５．２　入力パラメータファイルの詳細説明…… 41
　５．６　計算処理の流れ…… 49
６．検証計算…… 55
　６．１　計算条件及び計算ケース…… 55
　６．２　計算結果及び評価…… 55
７．工学的安全係数及び燃料冷却形態が燃料最高温度に与える効果…… 64
　７．１　工学的安全係数が燃料最高温度に与える効果…… 64
　７．２　燃料冷却形態が燃料最高温度に与える効果…… 65
８．結　言…… 72
謝　辞…… 72
参考文献…… 73

Contents

1. Introduction 1
2. Calculation Method of Fuel Temperature 5
2. 1 Calculation Object and Model of Fuel Temperature 5
2. 2 Evaluation Method of Fuel Temperature 6
2. 3 Hot Spot Factors and Material Heterogeneous Effect Factor 8
2. 4 Flow Distribution of Core Coolant 8
2. 5 Distributions of Power Density and Neutron Fluence 9
2. 6 Heat Generation Ratio in Core 10
2. 7 Thermal Properties 10
2. 8 Heat Transfer Coefficient 12
3. Strong Points of FTCC 20
4. Development and Compiling Environments and Code Structure 21
4. 1 Development and Compiling Environments 21
4. 2 Code Structure 21
4. 2. 1 Code Tree 21
4. 2. 2 List of Source Files 24
4. 2. 3 Outline of Main Program and Subroutines 24
5. Execution Procedure of Calculation and Input and Output Files 33
5. 1 Folder Structure and Execution Procedure 33
5. 2 Execution Options 33
5. 3 Input and Output File Types 35
5. 4 Input Data 35
5. 5 Input Parameter File 38
5. 5. 1 Example of Input Parameter File 38
5. 5. 2 Detailed Explanation of Input Parameter File 41
5. 6 Flow of Calculation Process 49
6. Validation Calculation 55
6. 1 Calculation Conditions and Calculation Case 55
6. 2 Calculation Results and their Evaluation 55
7. Effect of Hot Spot Factors and Fuel Cooling Forms on Maximum Fuel Temperature 64
7. 1 Effect of Hot Spot Factors on Maximum Fuel Temperature 64
7. 2 Effect of Fuel Cooling Forms on Maximum Fuel Temperature 65
8. Concluding Summary 72
Acknowledgements 72
References 73

1．緒　言

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、開発途上国等への世界展開を目指し、蒸気タービンによる発電、工業プロセスへの高温蒸気や地域暖房への低温蒸気供給を行う小型高温ガス炉システム HTR50S の概念設計を実施した[1-1][1-2][1-3][1-4][1-5]。HTR50S の主要設計仕様を Table 1.1 に、蒸気タービン発電と地域熱供給を組み合わせたコジェネレーションシステムを持つHTR50Sの系統構成例をFig. 1.1に示す。HTR50Sで採用する原子炉は、定格原子炉熱出力50 MW、原子炉入口冷却材温度 325°C、原子炉出口冷却材温度 750°C であり、減速材として黒鉛、冷却材として 4 MPa のヘリウムガスを用いるブロック型の小型高温ガス炉である。HTR50S の初期炉心で使用される燃料は、高温工学試験研究炉（High Temperature engineering Test Reactor：HTTR）[1-6]と同じであり、その燃料体構成を Fig. 1.2 に示す。図に示すように、中空シリンダー型の燃料コンパクト、黒鉛スリーブ及び端栓から成る燃料棒を燃料ブロックの冷却孔に挿入することで、燃料体が構成される。

Fig. 1.3 に、ブロック型高温ガス炉の炉心熱流動設計の流れを示す。HTR50S や HTTR のようなブロック型高温ガス炉の炉心熱流動設計では、核計算により得られた出力分布と照射量分布及び流路網計算により得られた炉内冷却材流量分布を用いて燃料温度計算を実施し、通常運転時における燃料最高温度が、運転時の異常な過渡変化時においても燃料の熱的健全性が維持される設計目標値以下となることを確認する。HTR50S や HTTR の炉心熱流動設計[1-3][1-7]では、流路網計算（炉内流量配分計算）に FLOWNET[1-8]が、燃料温度計算に TEMDIM[1-9]が使用された。25 年以上前に開発・作成されたこれら炉心熱流動設計コードは、UNIX システム上での利用が前提となっており、操作及び実行手順が複雑で、プログラムの改良を行うに際しても困難を伴った。そこで、近年その処理速度が急激に高まったパーソナルコンピュータ（PC）での利用を前提とし、できるだけ簡単な操作及び実行手順で計算を行える炉心熱流動設計コード（炉内流量配分計算コード及び燃料温度計算コード）を開発することにした。炉内流量配分計算コードに関しては現在開発中であるが、燃料温度計算コード（Fuel Temperature Calculation Code：FTCC）に関しては既に開発が終了した。FTCC は、TEMDIM に比べて使い勝手が向上しただけでなく、幾つかの新しい機能も有している。

本報告書では、FTCC の計算対象とモデル、基礎式、特長、コード構成、使用方法及び FTCC による検証計算の結果について述べる。加えて、FTCC を用いて、工学的安全係数及び燃料冷却形態の違いが燃料最高温度に与える効果について調べた結果について述べる。

Table 1.1　HTR50S の主要設計仕様

項　目	内　容
原子炉熱出力	50 MW
１次冷却材	ヘリウムガス
原子炉入口／出口冷却材温度	325ºC／750ºC
冷却材流量	22.4 kg/s
冷却材圧力	4 MPa
炉心構造材	Graphite
炉心タイプ	ブロック（プリズム）型
炉心有効高さ	3.48 m
炉心等価直径	2.30 m
燃料体数	180
平均出力密度	3.5 MW/m^3
燃料	低濃縮度UO_2 被覆燃料粒子（TRISO）
原子炉圧力容器材料	軽水炉用低合金鋼（Mn-Mo鋼）

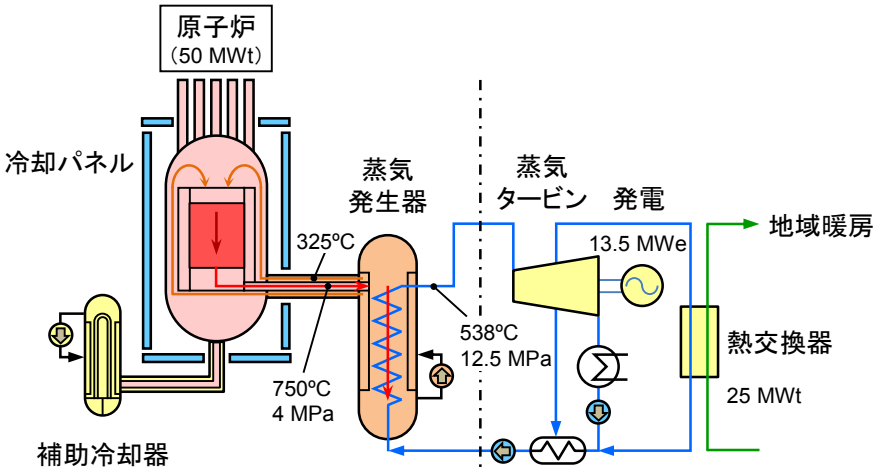


Fig. 1.1　発電・地域暖房コジェネレーションシステムを接続した HTR50S の系統構成

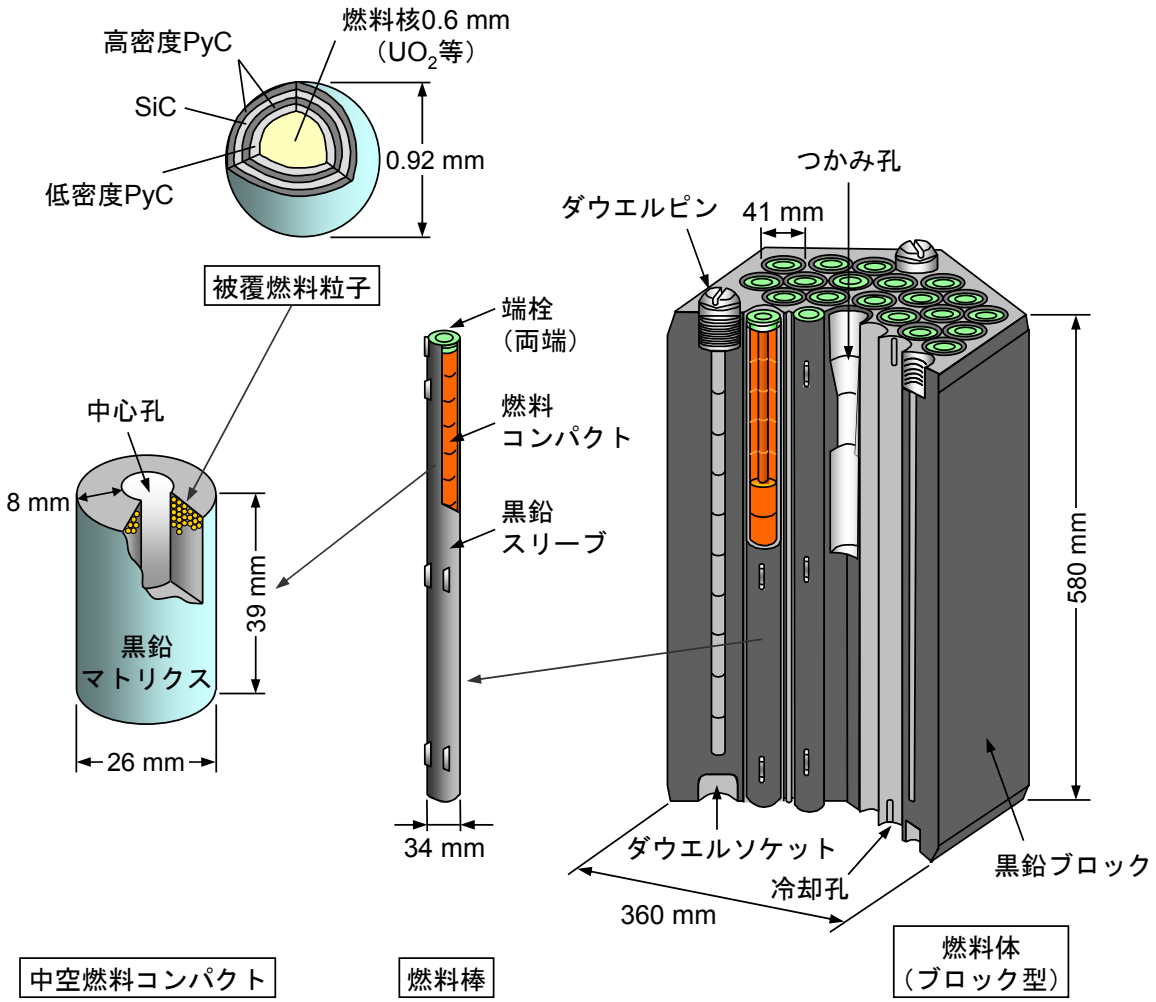


Fig. 1.2　HTR50S（初期炉心）で使用される燃料体の構成

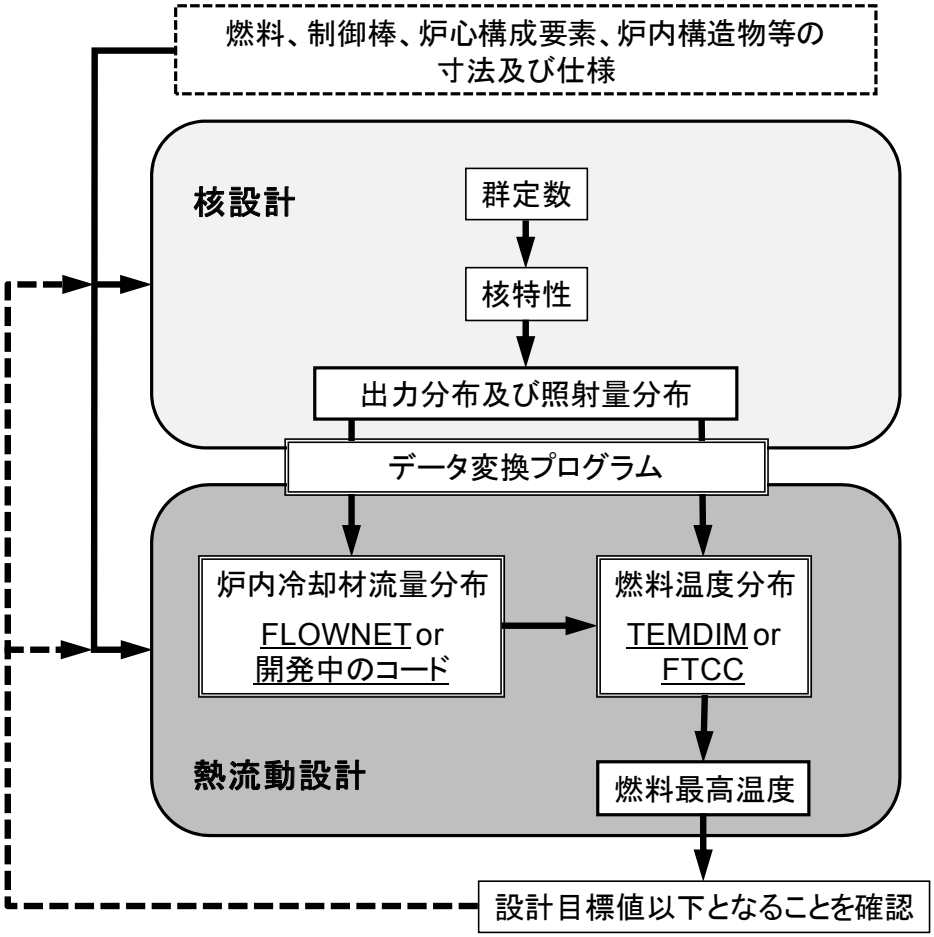


Fig. 1.3　ブロック型高温ガス炉の炉心熱流動設計の流れ

２．燃料温度の計算方法

本章では、燃料温度の計算対象、FTCC において使用される計算モデル、燃料温度の評価方法及び計算条件について述べる。

２．１　燃料温度の計算対象とモデル

（１）ブロック型高温ガス炉の炉心構成

HTR50S や HTTR の炉心型式は、ブロック型である。この型の炉心領域は、六角柱状の黒鉛ブロックを積み重ねたカラムの集合体であり、燃料カラムと制御棒案内カラムから成る燃料領域と、それを取り囲む可動反射体カラムと制御棒案内カラムから成る可動反射体領域により構成されている。また、炉心は、その外周を黒鉛製の固定反射体により取り囲まれている。Fig. 2.1 に、代表例として HTR50S の炉心垂直・水平断面と炉心構成を示す。燃料カラムを構成する燃料体は、Fig. 1.2 に示すように、高さ 580 mm、面間距離 360 mm の黒鉛ブロックに複数本（HTR50S の場合 33 本）の燃料棒を装荷し、冷却材流路を確保したものである。

（２）計算対象カラム

燃料温度の計算対象カラムは、燃料体を含むカラム（燃料カラム）のみとする。また、炉心の中心カラム（Fig. 2.1 の場合、制御棒案内カラム C-CR）から見て同じ位置関係にある燃料カラムを１つのグループとし（Fig. 2.1 の場合、F-1, F-2, F-3a, F-3b, F-4 の５グループ）、各燃料カラムグループの中から代表１チャンネルの出力分布及び照射量分布を選択し、計算を実行する。なお、ここで言うチャンネルとは、核計算で使用する最小メッシュ（代表例として、燃料カラム内を水平断面で 24 分割したメッシュ）から成る三角柱の領域を指す。また、代表１チャンネルの選択は、Fig. 1.3 に示すデータ変換プログラムにより、決められたルール（２．５節参照）に基づいて実行される。

（３）計算モデル

燃料温度の計算は、中空の燃料コンパクト、燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ、黒鉛スリーブ、冷却材流路及び黒鉛ブロックから成る同心状の多重円筒モデルを用いて、燃料棒を半径方向及び軸方向に分割して実行される。Fig. 2.2 に、燃料温度の計算モデルを示す。図中の寸法は、HTTR 燃料用いた HTR50S のものである。以下に、本モデルにおける計算条件を示す。

・燃料温度算出に用いる出力分布には、核計算で得られた結果を基に、燃料カラム内の局所的な出力分布の歪を考慮すると共に、各燃料カラムグループ内メッシュの軸方向積分出力が最大となるチャンネルのものを通常用いる。
・上記で選択したチャンネルの出力密度を、実際の１カラム当たりの燃料チャンネル数に基づいた発熱量に変換し、炉心の発熱割合（２．６節参照）を考慮して、燃料温度を計算する。
・別途 FLOWNET 等で実施される炉内冷却材流量配分計算では、１燃料カラムに複数ある冷却材流路を１流路にモデル化し、軸方向出力分布としてカラム内径方向メッシュの平均分布を用いている。

このため、燃料温度計算に用いる燃料カラム内の冷却材流量は、炉内流量配分計算で得られる燃料体段毎の流量を基に、燃料カラム内における局所的な出力分布の歪を考慮して算出した流量とする（２．４節参照）。

・燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間及び黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間ではふく射熱伝達を、黒鉛スリーブ・黒鉛ブロックと冷却材間では対流熱伝達を考慮する。
・燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ幅は、公称寸法の 0.0125 cm とするが、ギャップ熱伝達率の算出では、照射に伴う寸法変化を考慮したギャップ幅を用いる。
・中空燃料コンパクトの内面は、断熱または冷却材への対流熱伝達（中心孔冷却の場合）とする。
・黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の冷却材流路の照射による寸法変化は考慮せず、冷却材流路幅には一定値を用いる。
・黒鉛ブロックの温度は、黒鉛スリーブからのふく射熱伝達と冷却材への熱伝達及び黒鉛ブロック内の熱伝導のバランスによって決定される。
・黒鉛ブロックの外側及び上下の境界は、断熱条件とする。

２．２　燃料温度の評価方法

（１）燃料温度評価の考え方[1-7][2-1]

燃料温度は、核計算による出力分布と照射量分布及び炉内冷却材流量配分計算による燃料カラム毎の流量配分を用いて得られる公称燃料温度（ノミナル燃料温度）を基に、設計上の不確かさを考慮するための工学的安全係数を用いて算出される。工学的安全係数には、原子炉熱出力の測定誤差、出力分布や流量配分の不確かさ等の系統的要因によるシステマティック因子と、製作公差や物性値のばらつき等の統計的要因によるランダム因子がある。

任意の評価点における燃料温度は、Fig. 2.3 に示すように、炉心入口冷却材温度に各部の温度差を加算することにより得られる。従って、軸方向の任意の評価点における公称燃料温度（ノミナル燃料温度）T_f^Nは、次式により計算される。

$$T_f^N = T_{gin} + \sum_{i=1}^{5} \Delta T_i^N \tag{2.1}$$

ここで、T_{gin}：炉心入口冷却材温度、ΔT_i^N：公称温度差（i=1：冷却材温度差、i=2：膜温度差、i=3：黒鉛スリーブ（被覆部）温度差、i=4：ギャップ温度差、i=5：燃料コンパクト温度差）である。

燃料最高温度は、公称温度差ΔT_i^Nに基づき、工学的安全係数を用いて得られるシステマティックランダム燃料温度の最大値である。工学的安全係数を用いることで、燃料最高温度を十分保守的に評価することができる。システマティックランダム燃料温度 T_fは、次式により計算される。

$$T_f = T_{gin} + \sum_{i=1}^{5} \Delta T_i = T_{gin} + \sum_{i=1}^{5} \left(F_i \cdot \Delta T_i^N \right) \tag{2.2}$$

ここで、ΔT_i：工学的安全係数を考慮した温度差及びF_i ：ΔT_i^N に係る工学的安全係数である。 F_i を求めるためには、工学的安全係数を構成するシステマティック因子及びランダム因子をそれぞれ決定す

る必要がある。

ΔT_i^N に係る総システマティック因子 F_i^S （システマティック成分）は、ΔT_i^N に係るシステマティック因子 f_{ij}^S を用いて、

$$F_i^S = \prod_{j=1}^{n} f_{ij}^S \tag{2.3}$$

となる。ここで、n：ΔT_i^N に係るシステマティック因子の数である。また、ΔT_i^N に係る総ランダム因子 F_i^R （1＋ランダム成分）は、ΔT_i^N に係るランダム因子 f_{ik}^R を用いて、

$$F_i^R = 1 + \sqrt{\sum_{k=1}^{m} \left(f_{ik}^R \right)^2} \tag{2.4}$$

となる。ここで、m：ΔT_i^N に係るランダム因子の数である。F_i^S 及び F_i^R を用いると F_i は、

$$F_i = F_i^S \times F_i^R \tag{2.5}$$

として求められるので、式（2.2）は、式（2.3）及び式（2.4）より、次のようになる。

$$T_f = T_{gin} + \sum_{i=1}^{5} \left(F_i^S \times F_i^R \cdot \Delta T_i^N \right) = T_{gin} + \sum_{i=1}^{5} \left[\prod_{j=1}^{n} f_{ij}^S \cdot \left\{ 1 + \sqrt{\sum_{k=1}^{m} \left(f_{ik}^R \right)^2} \right\} \cdot \Delta T_i^N \right] \tag{2.6}$$

従って、任意の燃焼ステップ及び任意の対象領域における燃料最高温度 $T_f^{\max}$ は、次式から得られる。

$$T_f^{\max} = \max(T_f) \tag{2.7}$$

（2）各部温度を求めるための基礎式

炉心内の燃料チャンネル温度分布は、式（2.8）に示す固体領域での定常熱伝導方程式及び式（2.9）に示す冷却材領域での冷却材熱平衡式を、与えられた境界条件（冷却材入口温度及びチャンネル表面境界条件）に基づき連立させて解くことにより得ることができる。

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(rk\frac{dT}{dr} \right) + \ddot{q} = 0 \quad \text{（固体領域）} \tag{2.8}$$

$$dq = \dot{m}\, C_p\, dT \quad \text{（冷却材領域）} \tag{2.9}$$

ここで、r：半径方向位置、k：熱伝導率、T：温度、$\ddot{q}$ ：体積発熱率、dq：壁面から冷却材への流入熱量、$\dot{m}$ ：冷却材流量、C_p：冷却材の定圧比熱及び dT：冷却材の流れ方向温度差を示す。

式（2.8）を領域表面におけるふく射熱伝達及び冷却条件を考慮して差分化し、式（2.9）の差分式との連立方程式により解を求める。ふく射熱伝達、熱伝導率、熱伝達率等の温度依存性のため、収束計算により温度分布が決定される。なお、冷却材流量は、炉内流量配分計算により別途求められる量である。

２．３　工学的安全係数及び非均質効果

（１）工学的安全係数

高温ガス炉の炉心熱流動設計において燃料最高温度を評価する際、被覆燃料粒子の健全性の観点から、設計上の不確かさを考慮して十分な余裕を持たせるために、工学的安全係数を用いる（２．２節（１）参照）。FTCC の入力データとして既定されている工学的安全係数[2-2]を Table 2.1 に示す。

（２）軸方向出力分布依存性補正

工学的安全係数のランダム因子の内、燃料核直径、燃料核密度、濃縮度及びウラン量に係る冷却材温度差上昇因子に対して、次式で示す軸方向出力分布依存性補正係数 J による補正を実施する[2-3]。

$$J = \frac{\sqrt{\int_0^z \dddot{q}^2(\mathrm{z})dz}}{\int_0^z \dddot{q}(\mathrm{z})dz} \tag{2.10}$$

ここで、$\dddot{q}(\mathrm{z})$ ：z 点での出力密度及び z：軸方向位置である。

（３）非均質効果

核計算では、１カラムを水平断面で複数分割したメッシュ毎に、燃料（UO_2）、減速材（黒鉛）、反応度調整材（B_4C）等を均質化したモデルを用いている。従って、燃料、反応度調整材配置の非均質性及び燃料体外周部黒鉛リガメントの反射体効果によるカラム内出力分布の歪を、非均質効果として考慮する必要がある。ここでは、非均質効果として、制御棒レベルの不揃いによる出力分布の変化と合わせて 7%[1-7]を燃料温度計算時に考慮し、核計算で得られた出力密度を 1.07 倍して使用する。

２．４　炉内冷却材流量配分

燃料温度計算においては、別途 FLOWNET 等で実施される炉内冷却材流量配分計算により得られた燃料体段毎の冷却材流量に基づいて、燃料カラム内における局所的な出力分布の歪を考慮して算出した燃料体冷却材流路毎の冷却材流量を用いる。燃料カラム内における局所的な出力分布の歪の効果は、FLOWNET により、流路外周を断熱条件とした単チャンネルモデルを用い、流路出入口間の圧力損失を一定に保ち、軸方向積分出力をパラメータとした解析を行って定められた[1-9]。解析結果から、各流路の流量に関しては、炉内冷却材流量配分計算によって得られた燃料体段毎の平均冷却材流量に、次式から得られる係数 G（流量再配分割合）を乗じて得られる値を用いる。

① HTTR の定格運転及び高温試験運転に相当する場合

$$G = \frac{1}{1 + (P_2 - 1)\cdot\alpha} \tag{2.11}$$

ここで、係数 α は、原子炉出口冷却材温度 850℃ の場合：0.235、原子炉出口冷却材温度 950℃ の場合：0.342 となる。

② 上記以外の運転の場合

$$G = -0.5986 \times (P_1 \times P_2)^3 + 1.779 \times (P_1 \times P_2)^2 - 1.958 \times (P_1 \times P_2) + 1.778 \tag{2.12}$$

③ 流量の再配分を行わない場合

$$G = 1 \tag{2.13}$$

式（2.11）及び式（2.12）中の P_1 及び P_2 はピーキング係数と呼ばれ、炉心の径方向出力分布を特徴づける量であり、各カラム出力及び各チャンネル出力の軸方向積分値に基づいて、次式により計算される。

$$P_1 = \frac{\text{対象とするカラムの軸方向積分出力}}{\text{全カラムの軸方向積分出力の平均値}} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{\text{対象とするカラム内チャンネルの軸方向積分出力の最大値}}{\text{対象とするカラム内チャンネルの軸方向積分出力の平均値}} \\ &= \frac{\text{対象とするカラム内メッシュの軸方向積分出力の最大値}}{\text{対象とするカラム内メッシュの軸方向積分出力の平均値}} \end{aligned} \tag{2.15}$$

ここで、チャンネルとは、核計算で使用する最小メッシュから成る三角柱の領域を指す。なお、非均質効果を考慮する場合には、核計算で得られた P_2 に対し非均質効果分を割り増しして（$=P_2 \times 1.07$）、式（2.11）及び式（2.12）に適用する。

具体的な流量再配分の手順は、以下のとおりである。

ⓐ 炉内冷却材流量配分計算で得られた流量配分結果を、燃料温度計算の評価対象となる燃料カラムに割り当てる。

ⓑ 炉内冷却材流量配分計算では、１燃料カラム（１燃料体）当たり複数ある冷却材流路を１流路にモデル化しているので、各燃料カラムにおける１燃料体当たりの流量を実際の流路数（HTR50S の場合 33）で割り、燃料体の冷却材流路当たりの流量（チャンネル流量）を求める。

ⓒ ⓑで得られたチャンネル流量に、式（2.11）または式（2.12）から算出した流量再配分割合を乗じて、燃料温度計算用の流量に再配分する。

なお、燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間の主冷却材流路に加え、燃料コンパクト中心孔が冷却材流路となる場合は、再配分後の流量を両流路に任意の割合または冷却材流路の径方向断面積比で分配することができる。

２．５　出力分布及び照射量分布

燃料温度計算に用いる燃焼日数毎の出力分布及び照射量分布は、別途実施される核計算から得られる。核計算の結果は、データ変換プログラムによりデータが整理され、燃料温度計算で利用できるファイルとして出力される。出力されたファイルから、次の４パターンのデータから選択可能である。

① 対象とするカラムグループ内メッシュの軸方向積分出力が最大となるチャンネル（P_2 最大チャン

ネル）の軸方向出力分布及び照射量分布

② 対象とするカラムグループ内で最大出力密度が出現するチャンネルの軸方向出力分布及び照射量分布

③ 対象とするカラムグループ内で $P_1 \times P_2$ が最大となるチャンネルの軸方向出力分布及び照射量分布

④ 対象とするカラムグループの径方向メッシュ平均の軸方向出力分布及び照射量分布

通常は、燃料温度が最も高く計算される①を選択する。

２．６　炉心の発熱割合

炉心の発熱割合[1-3]は、燃料領域において 99%、可動反射体及び固定反射体において 1%とし、燃料領域における発熱の内訳は、燃料コンパクトにおいて 95%、黒鉛ブロックにおいて 5%とする。従って、炉心における燃料コンパクトの発熱割合は、0.99×0.95＝0.9405＝94.05%となる。

２．７　物性値

（１）冷却材（ヘリウムガス）の物性値[2-4]

冷却材としての主要な物性値は、密度、比熱、熱伝導率及び粘度であり、以下のように設定する。

① 密度 ρ（kg/m^3）

$$\rho = P / RT - \rho^2 \cdot B(T) - \rho^3 \cdot C(T) \tag{2.16}$$

$$B(T) = 4.5 \times 10^{-4} + 5.42 / (1{,}890 + T) \tag{2.17}$$

$$C(T) = 1.7 \times 10^{-7} + 4.2 \times 10^{-3} / (1{,}890 + T) + 25.3 / (1{,}890 + T)^2 \tag{2.18}$$

ただし、R：ヘリウムの気体定数（$R = 2.07723 \times 10^{-3}$ MPa･m^3/(kg･K)）、P：圧力（MPa）、T：温度（K）である。$C(T) = 0$ としても、相対誤差は以下のように小さいので省略する。

圧力 14 MPa、温度 400°C 以上・・・・・0.004%以下

圧力 10 MPa、温度 400°C 以上・・・・・0.03% 以下

従って、式（2.34）より密度 ρ は、次式となる。

$$\rho = \left(\sqrt{1 + \frac{4P \cdot B(T)}{RT}} - 1 \right) / 2B(T) \tag{2.19}$$

② 定圧比熱 C_p（J/(kg･K)）

・P ＜ 1.5 MPa　　：$C_p = 5{,}193$（J/(kg･K)）

・1.5 MPa ≦ P ＜ 4.5 MPa ：$C_p = 5{,}192$（J/(kg･K)）

・4.5 MPa ≦ P ＜ 6.5 MPa ：$C_p = 5{,}191$（J/(kg･K)）　(2.20)

・6.5 MPa ≦ P ＜ 8.5 MPa ：$C_p = 5{,}190$（J/(kg･K)）

・8.5 MPa ≦ P ≧ 8.5 MPa ：C_p = 5,189（J/(kg･K)）

③ 熱伝導率 λ（W/(m･K)）

$$P \leqq 0.1\ \mathrm{MPa}:\ \lambda_0 = 2.97\times10^{-3}\cdot T^{0.69} + \frac{9.23\times10^{9}\left(T-273.16\right)}{\left(T-273.16\right)^{5}+4.29\times10^{14}} \tag{2.21}$$

$$P > 0.1\ \mathrm{MPa}:\ \lambda = \lambda_0 + 2.33\times10^{-4}\cdot\rho + 2.39\times10^{-6}\cdot\rho^{2} \tag{2.22}$$

④ 粘度（粘性係数）μ（Pa･s）

$$P \leqq 0.1\ \mathrm{MPa}:\ \mu_0 = 3.78\times10^{-7}\cdot T^{0.69} + \frac{5\times10^{-7}}{0.52+T/569.6} \tag{2.23}$$

$$P > 0.1\ \mathrm{MPa}:\ \mu = \mu_0 + 2.67\times10^{-10}\cdot\rho^{2} \tag{2.24}$$

⑤ プラントル数 Pr

$$Pr = \frac{\mu\cdot C_p}{\lambda} \tag{2.25}$$

（２）IG-110 黒鉛の物性値（熱伝導率 k_{IG} （W/(cm･K)））[2-5]

IG-110 黒鉛の熱伝導率は、以下に示す平均値を用いる。

① 未照射材

$$\begin{aligned} k_{IG0}(t) = 4.1868\times0.30\Big(&1.02748 - 1.35887\times10^{-3}\cdot t + 1.11271\times10^{-6}\cdot t^{2} \\ &-4.76484\times10^{-10}\cdot t^{3} + 8.69490\times10^{-14}\cdot t^{4}\Big) \end{aligned} \tag{2.26}$$

ここで、

$k_{IG0}(t)$ ：温度 t 時の未照射材熱伝導率の平均値（W/(cm･K)）

t ：温度（℃）（20℃≦t≦1,800℃）

である。

② 照射材

$$k_{IG}(t,\phi) = k_{IG0}(t)\frac{k_{IG}(t_c, t_{i,}\ \phi)}{k_{IG}(t_c, t_{i,}\ \phi=0)} \tag{2.27}$$

$$k_{IG}(t_c, t_i, \phi) = \left\{ a\left[\frac{1}{k_{IGu}(t_c)} + \frac{b}{k_{IGb'}(t_c)} + \frac{d}{k_{IGd'}(t_c)}\right]\right\}^{-1} \tag{2.28}$$

ただし、

$$d = \frac{k_{IGd'}(rt)}{a}\left[\frac{1}{k_{IGi}(rt)} - \frac{1}{k_{IG0}(rt)}\right] \tag{2.29}$$

$$k_{IGi}(rt) = k_{IGsat}^{rt}(t_i) + \left[k_{IG0}(rt) - k_{IGsat}^{rt}(t_i)\right]\cdot\exp\left[-\varphi / \tau(t_i)\right] \tag{2.30}$$

$$k_{IGsat}^{rt}(t_i) = \exp\left(C + Dt_i\right) \tag{2.31}$$

$$k_{IG0}(rt) = \left\{ a\left[\frac{1}{k_{IGu}(rt)} + \frac{b}{k_{IGb'}(rt)}\right]\right\}^{-1} \tag{2.32}$$

$$\tau(t_i) = A + B\,t_i \tag{2.33}$$

である。ここで、

$k_{IG}(t,\phi)$	：温度 t、照射量ϕ時の熱伝導率の平均値（W/(cm･K)）
rt	：室温（27°C）
t_c	：計算温度（°C）（ 27°C～1,527°C）
t_i	：照射温度（°C）（350°C～1,527°C）
ϕ	：照射量（10^{21} n/cm^2、E＞29 fJ, ϕ≦30）
$k_{IGu}(t), k_{IGb'}(t), k_{IGd'}(t)$	：Table 2.2 に示す値
A, B, C, D, a, b	：Table 2.3 に示す定数

である。

（３）燃料コンパクトの物性値（熱伝導率 k_c（W/(cm･K)））[2-6]

燃料コンパクトの熱伝導率 k_c は、温度及び照射量によって変化する。従って、燃料温度計算では、燃料温度を高く評価するように実測値を包絡する下限の一定値

$$k_c = 0.03\ .\mathrm{cal/(cm\cdot s\cdot ^\circ C)} = 0.1256\ .\mathrm{W/(cm\cdot K)} \tag{2.34}$$

を用いる。

２．８　熱伝達率

（１）燃料体冷却材流路の対流熱伝達率[2-4]

燃料体冷却材流路（環状流路）の対流熱伝達率として、燃料温度を高く評価するように、実験データを保守的に評価した次式を用いる。

$$Nu = 0.020 Re^{0.8} Pr^{0.4}\left(\frac{D_i}{D_o}\right)^{-0.16}\left(\frac{T_W}{T_b}\right)^{-0.5} \quad (Re > 2{,}000) \tag{2.35}$$

ここで、Nu：ヌッセルト数、Re：レイノルズ数、Pr：プラントル数、D_i：流路内径（m）、D_o：流路外径（m）、T_W：伝熱面温度（K）及び T_b：冷却材バルク温度（K）である。Re 数が 2,000 以下の領域では、式（2.35）に Re=2,000 をを代入して得られる一定値を使用する。

（２）燃料棒表面（黒鉛スリーブ外面）－黒鉛ブロック間ふく射熱伝達率

燃料棒表面（黒鉛スリーブ外面）と黒鉛ブロック間のふく射熱伝達を考慮する。ふく射による熱流束は、同心円筒の場合、

$$\ddot{q}_r = \frac{\sigma\left(T_{so}{}^4 - T_{bs}{}^4\right)}{\dfrac{1}{\varepsilon_{so}} + \dfrac{A_{so}}{A_{bs}}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_{bs}} - 1\right)} = \frac{\sigma\left(T_{so}{}^2 + T_{bs}{}^2\right)\left(T_{so} + T_{bs}\right)}{\dfrac{1}{\varepsilon_{so}} + \dfrac{A_{so}}{A_{bs}}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_{bs}} - 1\right)}\left(T_{so} - T_{bs}\right) = h_r\left(T_{so} - T_{bs}\right) \tag{2.36}$$

となる。ここで、$\ddot{q}_r$：ふく射熱流束（W/m^2）、σ：ステファン・ボルツマン定数＝5.67×10^{-8}（W/(m^2･K^4)）、T_{so}, T_{bs}：黒鉛スリーブ外面と黒鉛ブロック表面の伝熱温度（K）、A_{so}, A_{bs}：黒鉛スリーブ外面と黒鉛ブロック表面の伝熱面積（m^2）、ε_{so}, ε_{bs}：黒鉛スリーブ外面と黒鉛ブロック表面のふく射率及び h_r：ふく射熱伝達率（W/(m^2･K)）である。ここで、ふく射率 ε は、HTTR の運転範囲において実験データの下限を包絡し、熱流束を小さく（燃料温度を高く）評価するように、

$$\varepsilon = \varepsilon_{so} = \varepsilon_{bs} = 0.8 \text{（一定）} \tag{2.37}$$

とする[2-4]。

（３）ギャップ熱伝達率

① ギャップ熱伝達率の評価式

燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ（ヘリウムガス層）を介しての半径方向への熱流束 $\ddot{q}_{fo}$（W/m^2）は、

$$\ddot{q}_{fo} = h_{gap}\left(T_{fo} - T_{si}\right) \tag{2.38}$$

となる。ここで、h_{gap}：ギャップ熱伝達率（ギャップコンダクタンス）（W/(m^2･K)）、T_{fo}, T_{si}：燃料コンパクト外面と黒鉛スリーブ内面の温度（K）である。上式の h_{gap} は、ヘリウムガス層での熱伝導及び燃料コンパクトと黒鉛スリーブ内面との間のふく射を考慮して、

$$h_{gap} = \frac{k_{He}}{\Delta_{gap}} + \sigma\left(T_{fo}{}^2 + T_{si}{}^2\right)\left(T_{fo} + T_{si}\right)\frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_{fo}} + \dfrac{r_{fo}}{r_{si}}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_{si}} - 1\right)} \tag{2.39}$$

により計算される。ここで、T_{fo}, T_{si}：燃料コンパクト外面温度と黒鉛スリーブ内面温度（K）、k_{He}：ヘリウムガスの熱伝導率（W/(m･K)）、$\Delta_{gap} = r_{si} - r_{fo}$：ギャップ幅（m）、$r_{fo}$, r_{si}：燃料コンパクト外半径と黒鉛スリーブ内半径（m）及び ε_{fo}, ε_{si}：燃料コンパクト外面と黒鉛スリーブ内面のふく射率である。式（2.39）の右辺第１項は熱伝導による項を、第２項はふく射による項を示している。なお、ふく射

率εは、（２）と同様に

$$\varepsilon = \varepsilon_{fo} = \varepsilon_{si} = 0.8 \quad \text{（一定）} \tag{2.40}$$

とする。

② ギャップ幅の評価式[2-4]

ギャップ熱伝達率の基礎となるギャップ幅は、燃料コンパクト及び黒鉛スリーブの熱膨張及び照射寸法変化を考慮して定めた評価式から得られる値を用いる。なお、平均熱膨張係数及び照射寸法変化率の物性値誤差によるギャップ幅の変化は、工学的不確定因子（工学的安全係数）として評価する。ギャップ幅の評価式を以下に示す。

$\phi \le 16\times10^4$ の場合：$\Delta_{gap} = 1.569\times10^{-4} + 2.047\times10^{-5}\phi - 1.430\times10^{-6}\phi^2 + 4.088\times10^{-8}\phi^3$ (2.41)

$\phi > 16\times10^4$ の場合：$\Delta_{gap} = 2.0752\times10^{-4} + 4.87\times10^{-6}\phi$ (2.42)

ここで、ϕ：高速中性子照射量（$\times10^{24}$ n/m^2）である。式（2.41）及び式（2.42）には、全燃焼日数を通して炉心で最大となる熱変形によるギャップ幅の増加分が含まれている。

（４）燃料コンパクト中心孔冷却流路の対流熱伝達率

中空燃料コンパクトの中心孔冷却計算を行う場合、燃料コンパクト中心孔冷却流路の対流熱伝達率として、次式を用いる。

$$Nu = 0.020 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (Re > 2{,}000) \tag{2.43}$$

Re 数が 2,000 以下の領域では、式（2.43）に Re=2,000 を代入して得られる一定値を使用する。

Table 2.1　FTCC で使用される工学的安全係数

(a) システマティック因子

項　目	冷却材 温度差 上昇因子	膜 温度差 上昇因子	スリーブ 温度差 上昇因子	ギャップ 温度差 上昇因子	コンパクト 温度差 上昇因子
熱出力	1.00	1.02	1.02	1.02	1.02
半径方向出力分布	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
軸方向出力分布	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
冷却材流量	1.01	1.008	1.0	1.0	1.0
流量配分	1.02	1.016	1.0	1.0	1.0
炉心入口冷却材温度	HTTR：＋14℃、HTTR 以外の炉：＋20℃				

(b) ランダム因子

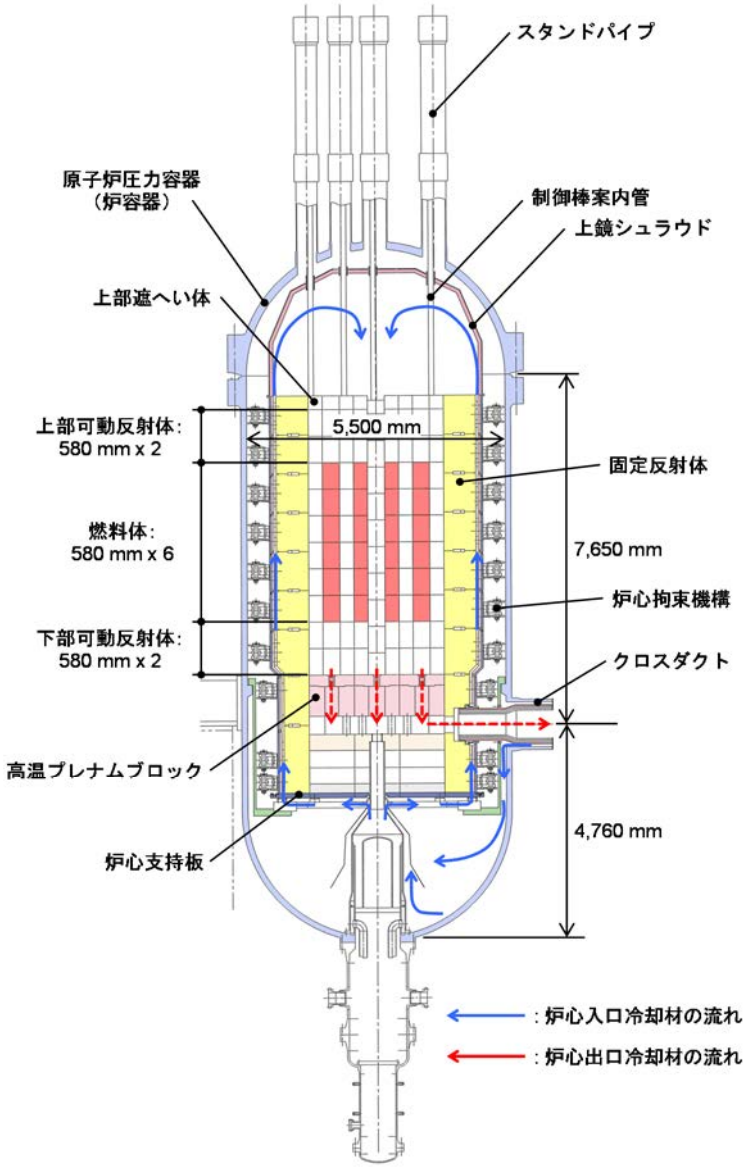
項　目	冷却材 温度差 上昇因子	膜 温度差 上昇因子	スリーブ 温度差 上昇因子	ギャップ 温度差 上昇因子	コンパクト 温度差 上昇因子
燃料コンパクト内径	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
燃料コンパクト外径	0.0	0.0	0.0	0.37	0.012
黒鉛スリーブ内径	0.0	0.0	0.015	0.37	0.0
黒鉛スリーブ外径	0.0	0.017	0.012	0.0	0.0
冷却孔径	0.0	0.014	0.0	0.0	0.0
燃料有効長	0.0	0.002	0.002	0.002	0.002
燃料核直径	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
燃料核密度	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
濃縮度	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
ウラン量	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
冷却材比熱	0.002	0.001	0.0	0.0	0.0
冷却材熱伝導率	0.0	0.018	0.0	0.03	0.0
冷却材粘性係数	0.0	0.012	0.0	0.0	0.0
照射変形	0.0	0.0	0.0	0.21	0.0
ギャップコンダクタンス	0.0	0.0	0.0	0.10	0.0
コンパクト偏心効果	0.0	0.041	0.041	0.041	0.041
出力分布	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
流量配分	0.04	0.032	0.0	0.0	0.0

Table 2.2　IG-110 黒鉛熱伝導率の照射による変化率計算に用いる関数値

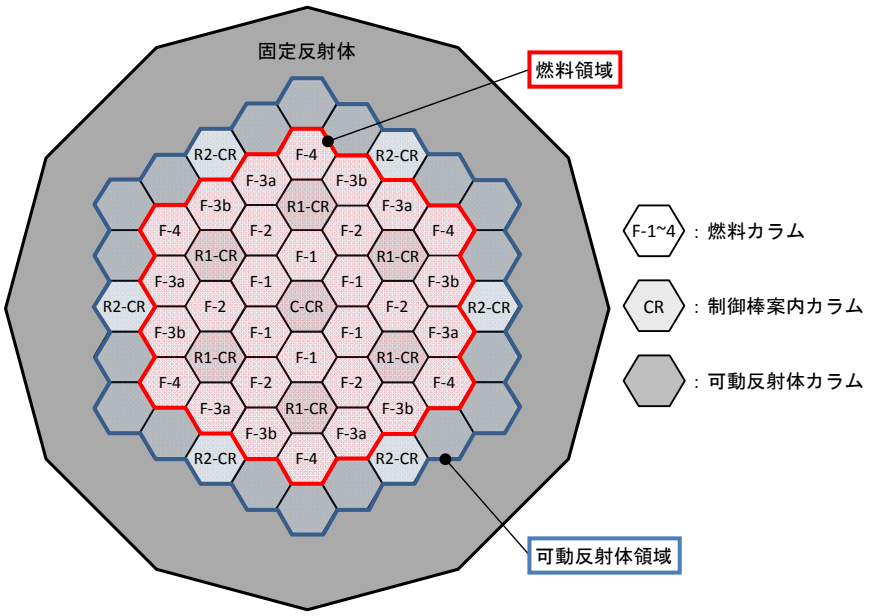
温　度 (°C)	$k_{IGu}(t)$ (cal/(cm･s･°C))	$k_{IGb'}(t)$ (cal/(cm･s･°C))	$k_{IGd'}(t)$ (cal/(cm･s･°C))
–173	93.5	2.88	4.46
–123	48.8	5.95	3.835
–73	12.8	9.60	3.21
–23	6.38	13.25	3.115
(*rt*) 27	4.79	16.65	3.02
77	3.56	19.58	3.13
127	2.90	22.5	3.24
177	2.56	24.75	3.375
227	2.22	27.0	3.51
277	2.065	28.65	3.585
327	1.91	30.3	3.66
377	1.775	31.5	3.72
427	1.64	32.7	3.78
477	1.56	33.7	3.83
527	1.48	34.7	3.88
577	1.41	35.1	3.895
627	1.34	35.5	3.91
677	1.285	35.75	3.925
727	1.23	36.0	3.94
777	1.165	36.0	3.94
827	1.10	36.0	3.94
877	1.055	36.0	3.94
927	1.01	36.0	3.94
977	0.975	36.0	3.94
1,027	0.94	36.0	3.94
1,077	0.91	36.0	3.94
1,127	0.88	36.0	3.94
1,177	0.86	36.0	3.94
1,227	0.84	36.0	3.94
1,277	0.82	36.0	3.94
1,327	0.80	36.0	3.94
1,377	0.783	36.0	3.94
1,427	0.765	36.0	3.94
1,477	0.753	36.0	3.94
1,527	0.74	36.0	3.94

Table 2.3　IG-110 黒鉛熱伝導率の照射による変化率計算に用いる定数値

記　号	値	単　位
A	–0.3059	10^{25} n/m^2
B	9.58×10^{-4}	10^{25} n/(m^2・°C)
C	–3.430	―
D	1.222×10^{-3}	°C^{-1}
a	5.707	―
b	6.165	10^4 cm^{-1}



(a) 垂直断面図



(b) 水平断面図

Fig. 2.1　HTR50S の炉心断面と炉心構成

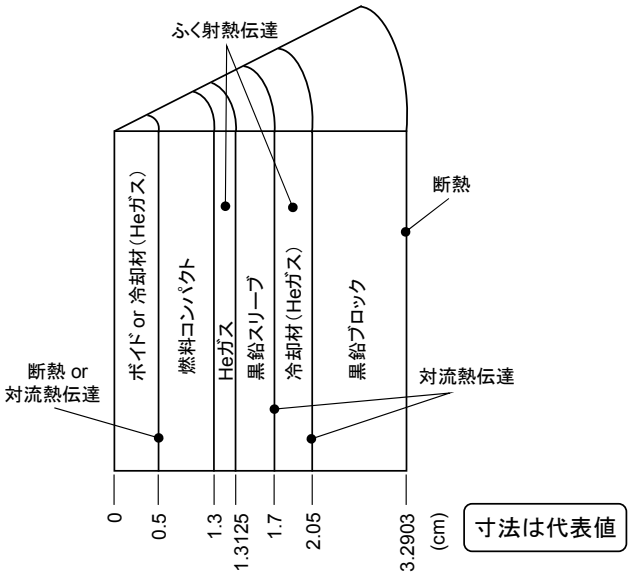


Fig. 2.2　燃料温度の計算モデル

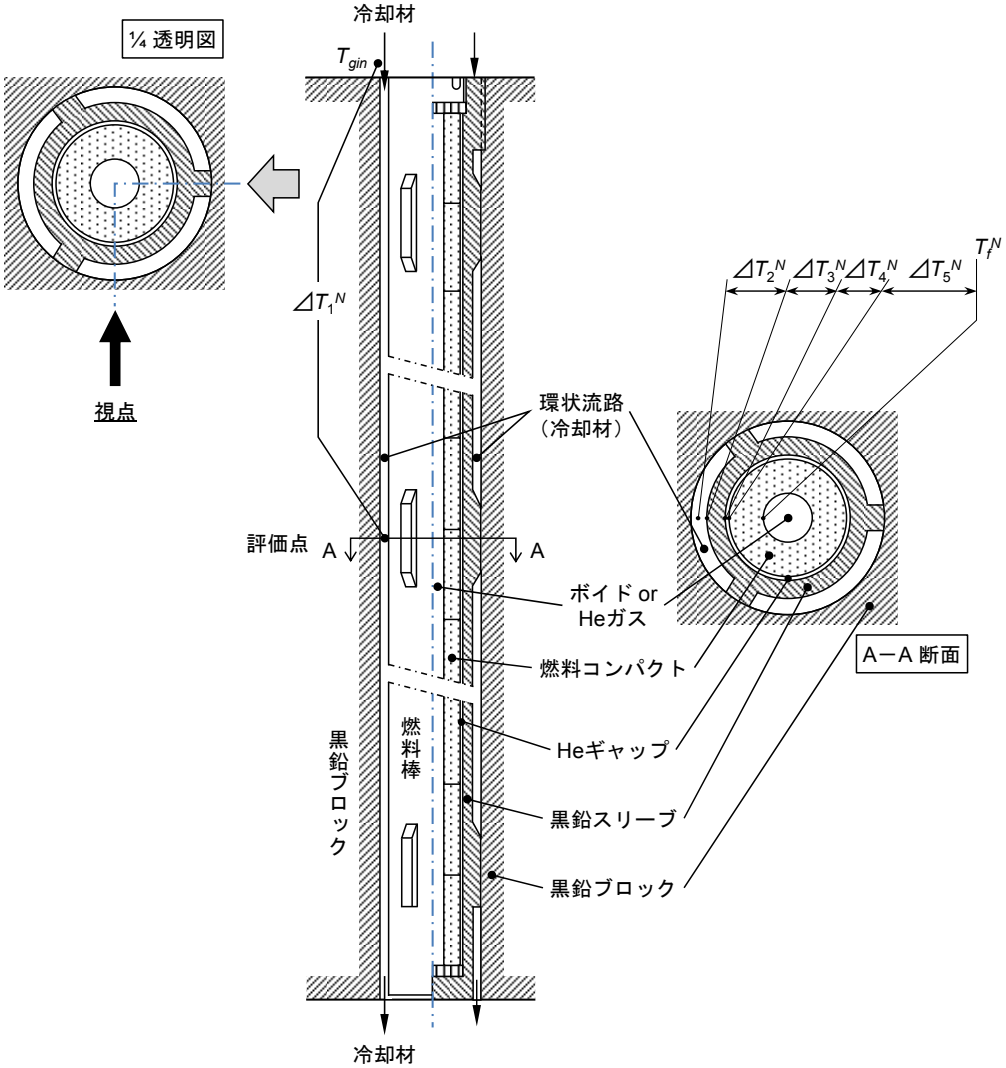


Fig. 2.3　燃料温度評価の考え方

３．FTCC の特長

本章では、FTCC の特長として、HTTR の設計コードである TEMDIM からの改良点を述べる。Table 3.1 に、FTCC と TEMDIM との違いを示す。

・FTCC は、Windows®システム及び UNIX システムの両方で動く。

・FTCC では、TEMDIM の単精度処理から倍精度処理へ変更すること及び TEMDIM で複数に分かれていたプログラムを統合し、データの受け渡しを全てメモリ上で処理することにより、計算精度の向上を図っている。

・FTCC におけるメッシュサイズは、核計算のメッシュサイズに一致するように自動的に設定される。TEMDIM におけるメッシュサイズは、手動で設定する必要がある。

・FTCC は、全ての燃料カラムから燃料最高温度を評価することができる。TEMDIM の計算対象は、炉心構成の対称性から、ある一定の３分の１炉心領域における燃料カラムのみである。

・FTCC は、中空燃料コンパクトの中心孔冷却を扱うことができる。

・FTCC は、燃料体のシャッフリング※を考慮した核計算に基づいた入力データを読むことができ、シャッフリングサイクル毎に全ての燃焼日数を同時に計算することができる。

※効率的な燃料の燃焼のため、燃料体を幾つかのバッチ（グループ）に分け、ある期間運転（燃焼）後に、一部の燃料体を取り除き、残った燃料体の配置変更を行うと共に、使用済燃料体に替わって新燃料体へ交換することをシャッフリングと呼ぶ。また、運転開始から燃料体の交換または配置変更を行うまでの運転期間をサイクルと呼ぶ。さらに、燃焼日数とは、換算全出力日数（Effective Full Power Day：EFPD）を指す。

・FTCC において、ユーザーが入力すべきデータは、最小限に設定されている。炉型の変更が無ければ、ユーザーは、出力分布や照射量分布、熱出力、原子炉出入口冷却材温度のデータを含むファイルの名前のような数種の基本データを入力すれば良い。

以上のように、FTCC のユーザビリティ及び計算機能は、TEMDIM に比べて改良されている。

Table 3.1　FTCCとTEMDIMの違い

項　目	FTCC	TEMDIM
プラットホームOS	Windows®及びUNIX	UNIX
計算精度	高	低
メッシュサイズの設定	自　動	手　動
燃料最高温度の評価	全燃料カラム対象	１／３燃料カラム対象
中空燃料コンパクトの中心孔冷却	可　能	不可能
燃料シャッフリングデータの取扱い	自　動	手　動
入力データ	簡　単	複　雑

４．開発・コンパイル環境とコード構成

本章では、FTCC の開発・コンパイル環境及びコード構成（コードツリー及びソースファイル一覧とその概要）について述べる。

４．１　開発・コンパイル環境

開発言語は Fortran 90 であり、動作環境である MS Windows®及び Linux®上での開発環境及びコンパイル環境は以下のとおりである。

（１）MS Windows®

開発環境：Intel Visual Fortran Composer XE 2013 SP1 for Windows

コンパイルオプション：初期値（特別なオプション指定無し）

リンカー　オプション：初期値（特別なオプション指定無し）

（２）Linux®

開発環境：gfortran

コンパイル方法：以下にコンパイル時のシェルを記載する。

```
f95 -c Module_Contents.f90 Module_Command.f90 Module_Initial.f90 Module_Prop.f90
Module_Calculate.f90 Module_Output_Data.f90 Module_Input_Data.f90 Main.f90
f95 -o ftcc.exe Main.o Module_Contents.o Module_Initial.o Module_Command.o Module_Prop.o
Module_Calculate.o Module_Output_Data.o Module_Input_Data.o
rm *.mod
rm *.o
```

４．２　コード構成

４．２．１　コードツリー

FTCC のコードツリーを以下に示す。

```
Program FTCC
    ├ Get_System_Clock  << 計算開始時刻の取得処理  >>
    ├ get_iofolder      << コマンドラインより入出力フォルダ及び入力ファイル取得処理 >>
    |     ├ get_command_line  << パラメータ読込処理 >>
    |     ├ get_parameter
    |     └ set_folder
    |
    ├ input_flie   <<< 入力データ読込制御処理 >>>
    |     ├ read_contrl                << [namelist:contrl]   読込処理 >>
    |     ├ read_safety_factor         << [namelist:safety_factor]   読込処理 >>
    |     ├ read_reactor               << [namelist:reactor]  読込処理 >>
```

```
|     ├ read_column_info           << [namelist:column_info]  読込処理 >>
|     ├ read_mesh_info             << [namelist:mesh_info] 読込制御処理 >>
|     |     └ read_mesh_info_data  << [namelist:mesh_info] 読込処理 >>
|     ├ read_factor_info           << [namelist:factor_info] 読込制御処理 >>
|     |     └ read_factor_data     << [namelist:factor_info] 読込処理 >>
|     ├ read_flow_coolant          << [namelist:flow_coolant]  読込処理 >>
|     ├ read_option                << [namelist:option]   読込処理 >>
|     |
|     ├ read_safety_factor_file    << [工学的安全係数] ファイル読込処理 >>
|     |     └ file_name            << ファイル名設定処理 >>
|     |
|     ├ read_corebn_file           << [corebn] ファイル読込処理 >>
|     |     ├ read_corebn
|     |     |     ├ file_name          << ファイル名設定処理 >>
|     |     |     ├ file_from_cycle    << File name から Cycle / Period 取得処理 >>
|     |     |     ├ get_value          << column_name / column_position 取得処理 >>
|     |     |     └ set_layer_no       << Layer 番号設定処理 >>
|     |     |           └ get_fuel_flg << 燃料領域有無判定処理 >>
|     |     ├ get_layer_no             << Layer array number 取得処理 >>
|     |     └ get_fuel_flg             << 燃料領域有無判定処理 >>
|     |
|     └ read_coolant_flow_file    << [冷却材流量] ファイル読込制御処理 >>
|           ├ read_gamma_flowrate_file  << [冷却材流量(Gamma Output)] ファイル読込処理 >>
|           |     └ file_name           << ファイル名設定処理 >>
|           ├ read_coolant_flowrate_file << [冷却材流量] ファイル読込処理 >>
|           |     └ file_name           << ファイル名設定処理 >>
|           ├ make_coolant_flowrate     << [冷却材流量] データ作成処理 >>
|           |     └ prop_hegas_cp       << ヘリウムガス定圧比熱計算処理 >>
|           └ flowrate_quicksort << [冷却材流量] 用配列 Cycle, Irr_period 順 Quick sort 処理 >>
|
├ initialize   <<< 初期設定制御処理 >>>
|     ├ allocate_array             << 温度計算データ用配列割当処理 >>
|     |     ├ period_quicksort     << 燃焼日数順 Quick sort 処理 >>
|     |     ├ get_column_no        << column array number 取得処理 >>
|     |     └ get_period_no        << 燃焼日数 array number 取得処理 >>
|     |
|     ├ flow_init                  << 冷却材流量情報初期化処理 >>
|     |     └ flow_index           << [冷却材流量] 初期化処理 >>
|     |         ├ set_flow_array   << [冷却材流量] Cycle 別 array 変換処理 >>
|     |         └ flow_period_no   << 燃焼日数 array number 取得処理 >>
|     |
|     ├ initialize_ftcc            << 出力分布、照射量分布及び流量分布設定処理 >>
|     |     └ set_flow_dist_factor << 流量再配分設定処理 >>
|     |
|     └ power_to_calori            << 発熱量設定処理 >>
|           └ mesh_division        << メッシュ分割処理 >>
|
├ calc_main    <<< 燃料温度計算メイン処理 >>>
|     ├  division_coef          << 熱伝導係数相関式用伝熱面積係数計算処理 >>
|     ├  prop_gap_width         << ギャップ幅計算処理 >>
|     |
|     ├ prop_main          << 物性値設定処理 >>
|     |     ├ prop_fuel_cond     << 燃料コンパクト熱伝導率計算処理 >>
|     |     ├ prop_coolant       << 冷却材物性値設定処理 >>
|     |     |   ├ prop_hegas_cp      << ヘリウムガス定圧比熱計算処理 >>
|     |     |   ├ prop_hegas_dens    << ヘリウムガス密度計算処理 >>
|     |     |   ├ prop_hegas_cond    << ヘリウムガス熱伝導率計算処理 >>
|     |     |   ├ prop_hegas_visc    << ヘリウムガス粘性係数計算処理 >>
|     |     |   ├ prop_coolant_re    << 冷却材レイノルズ数計算処理 >>
|     |     |   └ prop_coolant_pr    << 冷却材プラントル数計算処理 >>
|     |     ├ prop_coolant_tran  << 冷却材流路熱伝達率計算処理 >>
|     |     ├ prop_ig110_cond    << IG-110 熱伝導率計算処理 >>
```

```
|     |     |     └ irradiated_ig110_graphite << IG-110 照射量依存性を考慮した熱伝導率用係数計算処理 >>
|     |     ├ prop_pgx_cond        << PGX 熱伝導率計算処理 >>
|     |     |
|     |     ├ prop_radiation_tran  << ふく射熱伝達率計算処理 >>
|     |     ├ prop_hegas_dens      << ヘリウムガス密度計算処理 >>
|     |     ├ prop_hegas_cond      << ヘリウムガス熱伝導率計算処理 >>
|     |     └ prop_gap_tran        << ギャップ熱伝達率計算処理 >>
|     |
|     ├ calc_temp              << メッシュ単位燃料温度計算処理 >>
|     |     └ Solv_coolant     << 積分法による冷却材出入口温度計算処理 >>
|     |
|     └ calc_result_temp       << 温度計算最終処理 >>
|
├ output_flie  <<< 出力制御処理 >>>
|     ├ allocate_array                  << 出力用温度データ配列割当処理 >>
|     ├ group_column                    << カラムのグループ化処理 >>
|     ├ calc_column_height              << カラムの高さ計算処理 >>
|     ├ calc_safety_temp                << 工学的安全係数計算処理 >>
|     |     ├ calc_safety_factor        << 工学的安全係数補正値計算処理 >>
|     |     ├ correction_safety_temp    << 出力温度補正処理 >>
|     |     |     └ mesh_layer_to_factor << 補正位置の設定 >>
|     |     └ conv_temp                 << 出力用温度データ変換処理 >>
|     |
|     ├ out_plot_temp( nom_plot_temp )  << 径方向分割ノミナル温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_graph_temp( nom_temp )      << グラフ用ノミナル温度出力制御処理 >>
|     |     └ graph_temp_out            << グラフ用ノミナル温度出力処理 >>
|     |           └ space_cut           << Space cut 処理 >>
|     ├ out_safety_temp( nom_temp )     << ノミナル温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_plot_temp( sys_plot_temp )  << 径方向分割システマティック温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_graph_temp( sys_temp )      << グラフ用システマティック温度出力制御処理 >>
|     |     └ graph_temp_out            << グラフ用システマティック温度出力処理 >>
|     |           └ space_cut           << Space cut 処理 >>
|     ├ out_safety_temp( sys_temp )     << システマティック温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_plot_temp( rdm_plot_temp )  << 径方向分割ランダム温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_graph_temp( rdm_temp )      << グラフ用ランダム温度出力制御処理 >>
|     |     └ graph_temp_out            << グラフ用ランダム温度出力処理 >>
|     |           └ space_cut           << Space cut 処理 >>
|     ├ out_safety_temp( rdm_temp )     << ランダム温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_plot_temp( srm_plot_temp )  << 径方向分割システマティックランダム温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     ├ out_graph_temp( srm_temp )      << グラフ用システマティックランダム温度出力制御処理 >>
|     |     └ graph_temp_out            << グラフ用システマティックランダム温度出力処理 >>
|     |           └ space_cut           << Space cut 処理 >>
|     ├ out_safety_temp( srm_temp )     << システマティックランダム温度出力処理 >>
|     |     └ space_cut                 << Space cut 処理 >>
|     |
|     ├ out_maxtemp                     << 最高温度出力処理 >>
|     |     └ out_line_maxtemp          << Line 出力処理 >>
|     |         └ space_cut             << Space cut 処理 >>
|     |
|     ├ out_flowrate                    << 流量出力処理 >>
|     |     └ out_line_flowrate         << Line 出力処理 >>
|     |         └ space_cut             << Space cut 処理 >>
|     |
|     └ deallocate_array                << 出力用温度データ配列割当解放処理 >>
|
```

```
├ deallocate_array  << 温度計算データ用配列割当解放処理 >>
│
├ Get_System_Clock  << 計算終了時刻の取得処理  >>
│
└ TIME_DISP         << 計算時間の表示処理  >>
```

４．２．２　ソースファイル一覧

FTCC のソースファイル一覧を以下に示す。

Main.f90　　：メインルーチン
Module_Contents.f90　　：グローバル定数、変数定義関連モジュール
Module_Command.f90　　：コマンドラインパラメータ関連モジュール
Module_Input_Data.f90　：ファイル読込関連モジュール
Module_Initial.f90　　：計算に使用する配列の割当及び初期化処理モジュール
Module_Calculate.f90　　：温度計算関連モジュール
Module_Prop.f90　　：物性関連モジュール
Module_Output_Data.f90 ：ファイル出力関連モジュール

４．２．３　メインプログラム及びサブルーチンの概要

（１）Program ftcc
ファイル名：Main.f90
概要：FTCC のメインプログラム

（２）Module const
ファイル名：Module_Contents.f90
概要：計算で使用するグローバル定数を格納するモジュール

（３）Module default
ファイル名：Module_Contents.f90
概要：入力パラメータファイル（ftcc.inp）の初期値を格納するモジュール

（４）Module param
ファイル名：Module_Contents.f90
概要：入力データ関連のグローバル変数を格納するモジュール

（５）Module ftcc
ファイル名：Module_Contents.f90
概要：温度計算で使用するグローバル変数を格納するモジュール

（6）Module Command

ファイル名：Module_Command.f90

概要：コマンドラインパラメータの入力を行うサブルーチン郡を格納するモジュール

① get_iofolder

種類：subroutine、有効範囲：public

内容：コマンドラインパラメータの読込制御処理を行う。

② get_parameter

種類：function、有効範囲：get_iofolder 内 private

内容：コマンドラインパラメータより該当するキーの値を取得する。

③ set_folder

種類：function、有効範囲：get_iofolder 内 private

内容：フォルダ名の設定処理を行う。フォルダ名の最後に“/”が無い場合は“/”を追加する。

④ get_command_line

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：コマンドラインパラメータの読込を行う。

（7）Module Input_Data

ファイル名：Module_Input_Data.f90

概要：入力データの読込みを行うサブルーチン郡を格納するモジュール

① input_flie

種類：subroutine、有効範囲：public

内容：入力データの読込制御処理を行う。

② read_contrl

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：入力パラメータファイルより namelist:contrl の値を取得する。

③ read_safety_factor

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：入力パラメータファイルより namelist:safety_factor の値を取得する。

④ read_reactor

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：入力パラメータファイルより namelist:reactor の値を取得する。

⑤ read_column_info

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：入力パラメータファイルより namelist:column_info の値を取得する。

⑥ read_mesh_info

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：取得した入力パラメータファイルの namelist:mesh_info の値チェック及び入力データ用変数へのセットを行う。

⑦ read_mesh_info_data

種類：subroutine、有効範囲：read_mesh_info 内 private

内容：入力パラメータファイルより namelist:mesh_info_data の値を取得する。

⑧ read_factor_info

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：取得した入力パラメータファイルの namelist:factor_info の値チェック及び入力データ用変数へのセットを行う。

⑨ read_factor_data

種類：subroutine、有効範囲： read_factor_info 内 private

内容：入力パラメータファイルより namelist:factor_info の値を取得する。

⑩ read_flow_coolant

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：入力パラメータファイルより namelist:flow_coolant の値を取得する。

⑪ read_option

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：入力パラメータファイルより namelist:option の値を取得する。

⑫ read_safety_factor_file

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：工学的安全係数ファイルより各係数の値を取得する。

⑬ read_corebn_file

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：核計算情報ファイルより取得した各値から FTCC 用変数へのセットを行う。

⑭ read_corebn

種類：subroutine、有効範囲：read_corebn_file 内 private

内容：核計算情報ファイルよりカラム情報、出力分布及び照射量分布の値を取得する。

⑮ set_layer_no

種類：function、有効範囲：read_corebn_file 内 private

内容：配列引数用 Layer 番号の設定を行う。

⑯ get_fuel_flg

種類：subroutine、有効範囲：read_corebn_file 内 private

内容：燃料領域か否かの判定をする。

⑰ get_layer_no

種類：function、有効範囲：read_corebn_file 内 private

内容：配列引数用 Layer 番号を取得する。

⑱ get_value

種類：function、有効範囲：read_corebn_file 内 private

内容：column_name 及び column_position の値を取得する。

⑲ file_from_cycle

種類：subroutine、有効範囲：read_corebn_file 内 private

内容：核計算情報ファイル名よりサイクル及び燃焼日数を取得する。なお、核計算情報ファイルに値が記載されている場合は、そちらを優先する。

⑳ read_coolant_flow_file

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：冷却材流体情報ファイルの読込制御処理及び入力データ用変数へのセットを行う。

㉑ read_coolant_flowrate_file

種類：subroutine、有効範囲：read_coolant_flow_file 内 private

内容：「flow_model=1」の場合、冷却材流体情報ファイル（フォーマット１）より値を取得する。

㉒ make_coolant_flowrate

種類：subroutine、有効範囲：read_coolant_flow_file 内 private

内容：「flow_model=9」の場合、原子炉熱出力、流路数、原子炉出口温度、VCS（Vessel Cooling System）除熱量割合及び炉心有効流量割合より冷却材流量を自動で計算する。

㉓ read_gamma_flowrate_file

種類：subroutine、有効範囲：read_coolant_flow_file 内 private

内容：「flow_model=0」の場合、冷却材流体情報ファイル（フォーマット２）より値を取得する。冷却材流体情報ファイル（フォーマット１）と違い、圧力を段毎に入力できる。

㉔ flowrate_quicksort

種類：subroutine、有効範囲：read_coolant_flow_file 内 private

内容：取得した「冷却材流体情報」データの配列を、サイクル及び燃焼日数の昇順にソートする。

㉕ file_name

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：各入力ファイルのフォルダ名パス付ファイル名を設定する（入力パラメータファイルにフォルダ名が指定されていた場合は、そちらを優先する）。

（８）Module Initial

ファイル名：Module_Initial.f90

概要：温度計算用配列の初期設定を行うサブルーチン郡を格納するモジュール

① initialize

種類：subroutine、有効範囲：public

内容：温度計算用配列の初期設定制御処理を行う。

② allocate_array

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：温度計算用配列の配列割当を行う。

③ period_quicksort

種類：subroutine、有効範囲： allocate_array 内 private

内容：「核計算情報」データを、燃焼日数の昇順にソートする。

④ get_column_no

種類：subroutine、有効範囲： allocate_array 内 private

内容：「核計算情報」データより、カラム番号（配列引数）を取得する。

⑤ get_period_no

種類：subroutine、有効範囲： allocate_array 内 private

内容：「核計算情報」データより、燃焼日数番号（配列引数）を取得する。

⑥ deallocate_array

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：温度計算用配列の配列解放を行う（終了処理用）。

⑦ initialize_ftcc

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：温度計算用配列の値を設定する。

⑧ set_flow_dist_factor

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：冷却材流量の再配分を行う。

⑨ power_to_calori

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：出力分布より、発熱量を計算する。

⑩ mesh_division

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：メッシュを径方向に分割する。

⑪ flow_init

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：「冷却材流体情報」データを温度計算用配列に設定するための制御を行う。

⑫ flow_index

種類：subroutine、有効範囲： private

内容：「冷却材流体情報」データを、サイクル及び燃焼日数別配列に変換する。

⑬ set_flow_array

種類：subroutine、有効範囲：flow_index 内 private

内容：「冷却材流体情報」データを、温度計算用配列の各サイクルに割当てるためのインデックスを作成する。

⑭ flow_period_no

種類：subroutine、有効範囲：flow_index 内 private

内容：「冷却材流体情報」データを、温度計算用配列の各燃焼日数に割当てるためのインデックスを作成する。

（９）Module Calculate

ファイル名：Module_Calculate.f90

概要：温度計算（径方向中点の温度計算）を行うサブルーチン郡を格納するモジュール

① calc_main

種類：subroutine、有効範囲：public

内容：温度計算の制御を行う。

② calc_result_temp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：中点温度より、上下端温度を計算する。

③ division_coef

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：熱伝導係数相関式用伝熱面積係数を計算する。

④ calc_temp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：メッシュ単位に燃料温度を計算する。

⑤ Solv_coolant

種類：subroutine、有効範囲：calc_temp 内 private

内容：積分法により、冷却材出口温度を計算する。

（１０）Module Prop

ファイル名：Module_Prop.f90

概要：物性値を計算するサブルーチン郡を格納するモジュール

① prop_main

種類：subroutine、有効範囲：public

内容：物性値計算の制御を行う。

② prop_gap_tran

種類：function、有効範囲：private

内容：ギャップ熱伝達率を計算する。

③ prop_gap_width

種類：function、有効範囲：public

内容：ギャップ幅を計算する。

④ prop_hegas_cp

種類：function、有効範囲：public

内容：ヘリウムガス定圧比熱を計算する。

⑤ prop_hegas_dens

種類：function、有効範囲：private

内容：ヘリウムガス密度を計算する。

⑥ prop_hegas_cond

種類：function、有効範囲：private

内容：ヘリウムガス熱伝導率を計算する。

⑦ prop_hegas_visc

種類：function、有効範囲：private

内容：ヘリウムガス粘性係数を計算する。

⑧ prop_coolant_re

種類：function、有効範囲：private

内容：冷却材レイノルズ数を計算する。

⑨ prop_coolant_pr

種類：function、有効範囲：private

内容：冷却材プラントル数を計算する。

⑩ prop_coolant_tran

種類：function、有効範囲：private

内容：冷却材流路の熱伝達率を計算する。円環流路及び円管流路の２種類に対応している。

⑪ prop_radiation_tran

種類：function、有効範囲：private

内容：ふく射熱伝達率を計算する。

⑫ prop_fuel_cond

種類：function、有効範囲：private

内容：燃料コンパクト熱伝導率を計算する。

⑬ prop_pgx_cond

種類：function、有効範囲：private

内容：PGX 熱伝導率を計算する。

⑭ prop_ig110_cond

種類：function、有効範囲：private

内容：IG-110 熱伝導率を計算する。

⑮ irradiated_ig110_graphite

種類：function、有効範囲：prop_ig110_cond 内 private

内容：IG-110 の照射量依存性を考慮した熱伝導率用係数を計算する。

（１１）Module Output_Data

ファイル名：Module_Output_Data.f90

概要：計算結果のファイル出力に関するサブルーチン郡を格納するモジュール

① output_flie

種類：subroutine、有効範囲：public

内容：ファイル出力の制御を行う。

② allocate_array

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：出力用温度データ配列の割当を行う。

③ deallocate_array

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：出力用温度データ配列の割当解放を行う（終了処理用）。

④ group_column

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：グラフデータ用のカラムグループ化を行う。

⑤ calc_column_height

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：カラムの高さを計算する。

⑥ calc_safety_temp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：ノミナル温度（軸方向のメッシュ位置：上端、中点、下端）の計算、工学的安全係数に基づいたシステマティックランダム温度、システマティック温度及びランダム温度の計算を行い、システマティックランダム温度の最大値を選択する。

⑦ calc_safety_factor

種類：subroutine、有効範囲：calc_safety_temp 内 private

内容：工学的安全係数より補正値を計算する。

⑧ correction_safety_temp

種類：subroutine、有効範囲：calc_safety_temp 内 private

内容：補正値より（径方向分割メッシュの）温度を計算する。

⑨ mesh_layer_to_factor

種類：function、有効範囲：calc_safety_temp 内 private

内容：補正位置（径方向要素と工学的安全係数との対応）を設定する。

⑩ conv_temp

種類：subroutine、有効範囲：calc_safety_temp 内 private

内容：出力温度の変換（径方向分割メッシュ温度→径方向要素端点温度）を行う。

⑪ out_plot_temp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：径方向分割温度をファイルに出力する。

⑫ out_graph_temp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：グラフ用温度出力の制御を行う。

⑬ graph_temp_out

種類：subroutine、有効範囲：out_graph_temp 内 private

内容：グラフ用温度をファイルに出力する。

⑭ out_safety_temp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：ノミナル温度、システマティックランダム温度、システマティック温度、ランダム温度を

ファイルに出力する。

⑮ out_maxtemp

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：最高温度出力の制御を行う。

⑯ out_line_maxtemp

種類：subroutine、有効範囲：out_maxtemp 内 private

内容：最高温度をファイルに出力する。

⑰ out_flowrate

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：冷却材流量出力の制御を行う。

⑱ out_line_flowrate

種類：subroutine、有効範囲：out_flowrate 内 private

内容：冷却材流量をファイルに出力する。

⑲ space_cut

種類：subroutine、有効範囲：private

内容：csv ファイル用スペース文字の削除を行う。

５．計算の実行方法及び入出力ファイル

本章では、FTCC のフォルダ構成、実行方法、実行オプション及び入出力ファイルについて説明する。

５．１　フォルダ構成及び実行方法

（１）フォルダ構成

燃料温度計算において必要なフォルダは、入力データ格納用の Input フォルダ及び出力データ格納用の Output フォルダである。事前に、実行用プログラム（ftcc.exe）と同一フォルダの下位に、以下のように Input フォルダ及び Output フォルダを作成する。

ftcc.exe ファイル／Input フォルダ（入力データに関する全てのファイルを格納）
　　／Output フォルダ（出力用ファイルを格納）

（２）プログラム実行方法

プログラムを実行方法するには、次の２つの方法がある。

① 実行用プログラム（ftcc.exe）のダブルクリックによる実行

実行用プログラム（ftcc.exe）をダブルクリックすることでプログラムが実行され、計算が開始される。

② コマンドプロンプトからの実行

実行オプションを指定する場合には、Windows のコマンドプロンプトから実行する。以下に、画面表示内容をログファイルに出力する場合のコマンド例を示す。

.¥ftcc.exe > .¥log.txt

次節に、実行オプションの具体例を示す。

５．２　実行オプション

（１）実行オプション（コマンドラインパラメータ）

プログラム実行時に設定できるコマンドラインパラメータを以下に示す。

入力形式：ftcc.exe [-f -i -c -o]（実行プログラム［－オプション並び］）

-f = 入力関連：入力パラメータファイル（ftcc.inp）のファイル位置及び名前を指定
デフォルトとして、./Input/ftcc.inp（最大 256 文字）が設定されている。

-i = 入力関連：工学的安全係数及び冷却材流体情報のファイル格納先フォルダ名を指定
デフォルトとして、./Input（最大 256 文字）が設定されている。
注意：ftcc.inp の「safety_file=」または「flow_file(x)=」にフォルダ名も含めたファイル名を指定した場合、ftcc.inp の入力が優先（「-i」のパラメータは無視）される。

-c = 入力関連：核計算情報のファイル格納先フォルダ名を指定

デフォルトとして、「-i」と同一フォルダ（最大 256 文字）が設定されている。

注意：入力パラメータファイル（ftcc.inp）の「corebn_file(x)=」にフォルダ名も含めたファイル名を指定した場合、ftcc.inp の入力が優先（「-c」のパラメータは無視）される。

-o = 出力関連：計算結果等の出力先フォルダ名を指定

デフォルトとして、./Output（最大 256 文字）が設定されている。

フォルダ名の指定において、ftcc.exe と同一の格納ドライブに限り、ftcc.exe 格納フォルダから見た相対アドレスでの指定を可能とする。それ以外（別のドライブ）の場合は、絶対アドレス（フルパス）で指定する。なお、フォルダ名に関しては、半角文字及び半角スペースの使用が標準であり、全角文字が使用された場合の動作は保証されない。

（2）実行オプション（コマンドラインパラメータ）指定用バッチファイル

コマンドラインパラメータ（既定値）を指定した実行用バッチファイルの例を以下に示す。なお、作成したバッチファイルは、ダブルクリック等で起動する。

```
@echo off
set FTCC=".¥ftcc.exe"
set INP="./Input/ftcc.inp"
set INDIR="./Input/"
set CVDIR="./Input/"
set OUTDIR="./Output/"
set LOG=".¥log.txt"

echo 計算内容を画面に表示しますか？
echo   y:画面表示
echo   n:ログファイルに出力（デフォルト）
set /p Mode="(Y/N) > "
del .¥Output¥*.txt
del .¥Output¥*.csv
if "%Mode%" == "y" goto FTCC_display
goto FTCC_logfile
exit

:FTCC_display
%FTCC% -f=%INP% -i=%INDIR% -c=%CVDIR% -o=%OUTDIR%
echo *** 計算終了 ***
pause
exit

:FTCC_logfile
%FTCC% -f=%INP% -i=%INDIR% -c=%CVDIR% -o=%OUTDIR% > %LOG%
echo *** 計算終了 ***
exit
```

５．３　入出力ファイルの種類

（１）入力ファイルの種類

入力ファイルの種類を以下に示す。

種　類	概　要
入力パラメータファイル（ftcc.inp）	原子炉情報、燃料の形状、補正係数及び入力データファイルの指定を記載したファイル
核計算情報ファイル	データ変換プログラムにより、サイクル、燃焼日数及びカラム毎に出力されたファイルで、カラムのピーキング係数、段別メッシュ情報（出力密度、照射量、高さ等）を記載
冷却材流体情報ファイル	サイクル・燃焼日数毎に作成したカラム・段別の冷却材流量及び圧力を記載したファイル
工学的安全係数ファイル	工学的安全係数を記載したファイル

（２）出力ファイルの種類

出力ファイルの種類を以下に示す。

種　類	ファイル名	概　要
ノミナル温度	_Nominal.csv _Nominal.txt	工学的安全係数換算前の温度データ
	Graph_Nominal.csv	グラフ作成用ノミナル温度
	Plot_Nominal.csv Plot_Nominal.txt	径方向分割ノミナル温度
システマティックランダム温度	_SysRdm.csv _SysRdm.txt	工学的安全係数（システマティックランダム）を換算した温度データ
	Graph_SysRdm.csv	グラフ作成用システマティックランダム温度
	Plot_SysRdm.csv Plot_SysRdm.txt	径方向分割システマティックランダム温度
ランダム温度	_Rdm.csv _Rdm.txt	工学的安全係数（ランダム）を換算した温度データ
	Graph_Rdm.csv	グラフ作成用ランダム温度
	Plot_Rdm.csv Plot_Rdm.txt	径方向分割ランダム温度
システマティック温度	_Sys.csv _Sys.txt	工学的安全係数（システマティック）を換算した温度データ
	Graph_Sys.csv	グラフ作成用システマティック温度
	Plot_Sys.csv Plot_Sys.txt	径方向分割システマティック温度
最高温度	MaxTemp.csv MaxTemp.txt	燃料コンパクト内面のシステマティックランダム最高温度のメッシュ情報
冷却材流量関連	FlowRate.csv FlowRate.txt	計算に使用した「冷却材流量」

５．４　入力データ

本節では、前節で述べた入力データの内、核計算情報ファイル、冷却材流体情報ファイル及び工学的安全係数ファイルについて説明する。入力パラメータファイルについては、次節で説明する。

（1）核計算情報ファイル

核計算情報ファイルは、データ変換プログラムよりサイクル、燃焼日数及びカラム毎に出力されたファイル（ファイル名の形式：FTCC_カラム名_サイクル_燃焼日数.txt）を使用する。本ファイルの代表例を Table 5.1 に示すと共に、入力フォーマットの説明を以下に示す。本ファイルは、ファイル情報及びカラム情報の２種類で１つのファイルを構成する。なお、ファイル名は、自由に設定でき、入力パラメータファイル（ftcc.inp）の「核計算情報ファイル名：corebn_file=」で指定する。

① カラム情報

１行に「キー」と「値」を１文字以上の半角スペースまたはカンマ（区切りは Fortran read 命令準拠）で区切り、以下の６項目の行数分作成する。

行番号	キー	値の型	概　要
1	Cycle	整数型	サイクル
2	Burn-up_period	文字型（半角 40 文字）	燃焼日数
3	Column_name	文字型（半角 80 文字）	カラム名
4	Position	文字型（半角 80 文字）	カラムの位置情報
5	P1	倍精度実数型	ピーキング係数１
6	P2	倍精度実数型	ピーキング係数２

② メッシュ情報

１行目を「キー」、２行目以降にメッシュ情報の「値」を入力する。各項目との間は１文字以上の半角スペースまたはカンマ（区切りは Fortran read 命令準拠）で区切る（順番変更不可）。

列番号	キー	値の型	単位	概　要
1	Layer_name	文字型（半角 30 文字）	－	段名
2	Layer_number	整数型	－	段番号
3	Mesh_number	整数型	－	メッシュ番号
4	Mesh_height	倍精度実数型	m	メッシュの高さ
5	Z_coordinate	倍精度実数型	m	メッシュ幅
6	Power_1	倍精度実数型	W/m^3	出力密度 1
7	Fluence_1	倍精度実数型	n/m^2	照射量 1
8	Power_2	倍精度実数型	W/m^3	出力密度 2
9	Fluence_2	倍精度実数型	n/m^2	照射量 2
10	Power_3	倍精度実数型	W/m^3	出力密度 3
11	Fluence_3	倍精度実数型	n/m^2	照射量 3
12	Power_4	倍精度実数型	W/m^3	出力密度 4
13	Fluence_4	倍精度実数型	n/m^2	照射量 4

（2）冷却材流体情報ファイル

冷却材流体情報ファイルは、サイクル及び燃焼日数毎に作成する。フォーマットは、フォーマット１（燃料体段毎の圧力を一定とする場合）とフォーマット２（燃料体段毎の圧力を考慮する場合）の２種類に対応し、入力パラメータファイル（ftcc.inp）の「冷却材流体情報のモデル：flow_model=」で、どちらのフォーマットを使用するかを指定する。本ファイルの代表例を Table 5.2（フォーマット１）及び Table 5.3（フォーマット２）に示すと共に、入力フォーマットの説明を以下に示す。本ファイルは、ファイル情報及びカラム情報の２種類で１つのファイルを構成する。なお、ファイル名は自由に設定でき、「冷却材流体情報ファイル名：flow_file=」で指定する。

（ｉ）フォーマット１（燃料体段毎の圧力を一定とする場合）

① ファイル情報

１行に「キー」と「値」を１文字以上の半角スペースまたはカンマ（区切りは Fortran read 命令準拠）で区切り、以下の３項目の行数分作成する。

行番号	キー	値の型	概　要
1	－	未使用	コメント行
2	Cycle	整数型	サイクル
3	Burn-up_period	文字型（半角 40 文字）	燃焼日数

行番号は、順不同とすることができる。また、コメント行は、複数行にすることができる。ただし、上記キーと同じ文字から始まるコメントは、使用できない。コメント行には、行頭に#,！等を付け、キーと区別する。

② カラム情報

１行目を「キー」、２行目以降にカラム別冷却材流体情報の「値」を入力する。各項目との間は１文字以上の半角スペースまたはカンマ（区切りはFortran read命令準拠）で区切る（順番変更不可）。

列番号	キー	値の型	単位	概　要
1	Column_number	整数型	－	カラム番号
2	Pressure	倍精度実数型	Pa	冷却材圧力
3	Channel	整数型	－	チャンネル数
4	LF1	倍精度実数型	kg/s	燃料体１段目の冷却材流量
5	LF2	倍精度実数型	kg/s	燃料体２段目の冷却材流量
6	LF3	倍精度実数型	kg/s	燃料体３段目の冷却材流量
7	LF4	倍精度実数型	kg/s	燃料体４段目の冷却材流量
8	LF5	倍精度実数型	kg/s	燃料体５段目の冷却材流量

列番号 4 以降の冷却材流量段数は、入力パラメータファイル（ftcc.inp）の「段数：layer=」で指定した数となる（上記では、燃料体段数５段のモデル）。また、冷却材流量のキー（LF1～）は、重複しなければ任意の文字に変更することができる（核計算情報ファイルの段名と異なっていても可）。

（ⅱ）フォーマット２（燃料体段毎の圧力を考慮する場合）

① ファイル情報

１行に「キー」と「値」を１文字以上の半角スペースまたはカンマ（区切りは Fortran read 命令準拠）で区切り、以下の２項目の行数分作成する。

行番号	キー	値の型	概　要
1	Cycle	整数型	サイクル
2	Burn-up_period	文字型（半角 40 文字）	燃焼日数

② カラム情報

１行目を「キー」、２行目以降にカラム別冷却材流体情報の「値」を入力する。各項目との間は１文字以上の半角スペースまたはカンマ（区切りはFortran read命令準拠）で区切る（順番変更不可）。

列番号	キー	値の型	単位	概　要
1	Column	整数型	－	カラム番号
2	Layer	整数型	－	レイヤ番号
3	Channel	整数型	－	チャンネル数
4	Temp	未使用	℃	温度
5	Pressure	倍精度実数型	Pa	冷却材圧力

6	Flowrate	倍精度実数型	kg/s	冷却材流量
7	Flux	未使用	kg/(m^{2}s)	質量流束
8	Re	未使用	－	レイノルズ数
9	Pr	未使用	－	プラントル数
10	Deq	未使用	m	等価直径

（３）工学的安全係数ファイル

工学的安全係数ファイルは、工学的安全係数（システマティック因子及びランダム因子）を設定するファイルとして作成する。なお、ファイル名は自由に設定でき、入力パラメータファイル（ftcc.inp）の「工学的安全係数のファイル名：safety_file =」で指定する。既定の入力データは、Table 5.4（HTTR 試験結果によるシステマティック因子見直し後のデータ[2-2]）を参照のこと。

５．５　入力パラメータファイル

５．５．１　入力パラメータファイルの例

入力パラメータファイル（ftcc.inp）には、原子炉情報、燃料の形状、補正係数、各入力ファイルの指定等、FTCC を実行するための制御関連情報を入力する。以下に、HTTR 燃料を用いた HTR50S の ftcc.inp の例を示す。

（１）モデル概要

計算対象燃料カラム数	5
燃料体段数	6（燃料カラム当たりの燃料体段数）
冷却材圧力	4.02 MPa 固定
燃料チャンネル総数	33 チャンネル×10 カラム
燃料の形状	HTTR 燃料（ヘリウムギャップ有り）
スパイク効果	無し
非均質効果	1.0
運転状態	850˚C 運転

（２）燃料の形状

種　類	内半径(m)	外半径(m)	物性
ボイド	0	0.005	ヘリウムボイド
燃料コンパクト	0.005	0.013	燃料コンパクト
黒鉛スリーブ	0.013125	0.017	IG-110
冷却材	0.017	0.0205	ヘリウムガス
黒鉛ブロック	0.0205	0.032903	IG-110

（３）入力パラメータファイル ftcc.inp の例

```
!-----------------------------------------------------
 HTR50S 初期 HTTR 燃料 model (JAEA-Technology-2012-019)
!-----------------------------------------------------
&contrl
  solver = 0     ! 冷却材出口計算方法
&end
```

```
&safety_factor
  axial_power_dependency = 0          ! 冷却材ランダム因子軸方向補正
  safety_file  = 'HTR50S_factor.txt'  ! 工学的安全係数のファイル名（スパイク効果：無し）
&end
&reactor
  column         = 5              ! 計算対象燃料カラム数
  layer          = 6              ! 燃料体段数（燃料カラム当たりの燃料体段数）
  temp_in        = 325.0d+00      ! 炉心入口冷却材温度      [C]
  temp_add       = 20.0d+00       ! 炉心入口冷却材上昇温度 [C]
  pressure       = 4.0207265d+06  ! 冷却材圧力              [Pa]
  power_model    = 1              ! 計算で使用する出力分布の種類
  fluence_model  = 1              ! 計算で使用する照射量分布の種類
  corebn_file(1)  = 'FTCC_F-1_cycle1_0d.txt'    ! Corebn File Name (File count)
  corebn_file(2)  = 'FTCC_F-1_cycle1_100d.txt'
  corebn_file(3)  = 'FTCC_F-1_cycle1_10d.txt'
  corebn_file(4)  = 'FTCC_F-1_cycle1_1d.txt'
  corebn_file(5)  = 'FTCC_F-1_cycle1_200d.txt'
  corebn_file(6)  = 'FTCC_F-1_cycle1_300d.txt'
  corebn_file(7)  = 'FTCC_F-1_cycle1_30d.txt'
  corebn_file(8)  = 'FTCC_F-1_cycle1_400d.txt'
  corebn_file(9)  = 'FTCC_F-1_cycle1_500d.txt'
  corebn_file(10) = 'FTCC_F-1_cycle1_600d.txt'
  corebn_file(11) = 'FTCC_F-1_cycle1_60d.txt'
  corebn_file(12) = 'FTCC_F-1_cycle1_700d.txt'
  corebn_file(13) = 'FTCC_F-1_cycle1_800d.txt'
  corebn_file(14) = 'FTCC_F-2_cycle1_0d.txt'
  corebn_file(15) = 'FTCC_F-2_cycle1_100d.txt'
  corebn_file(16) = 'FTCC_F-2_cycle1_10d.txt'
  corebn_file(17) = 'FTCC_F-2_cycle1_1d.txt'
  corebn_file(18) = 'FTCC_F-2_cycle1_200d.txt'
  corebn_file(19) = 'FTCC_F-2_cycle1_300d.txt'
  corebn_file(20) = 'FTCC_F-2_cycle1_30d.txt'
  corebn_file(21) = 'FTCC_F-2_cycle1_400d.txt'
  corebn_file(22) = 'FTCC_F-2_cycle1_500d.txt'
  corebn_file(23) = 'FTCC_F-2_cycle1_600d.txt'
  corebn_file(24) = 'FTCC_F-2_cycle1_60d.txt'
  corebn_file(25) = 'FTCC_F-2_cycle1_700d.txt'
  corebn_file(26) = 'FTCC_F-2_cycle1_800d.txt'
  corebn_file(27) = 'FTCC_F-3a_cycle1_0d.txt'
  corebn_file(28) = 'FTCC_F-3a_cycle1_100d.txt'
  corebn_file(29) = 'FTCC_F-3a_cycle1_10d.txt'
  corebn_file(30) = 'FTCC_F-3a_cycle1_1d.txt'
  corebn_file(31) = 'FTCC_F-3a_cycle1_200d.txt'
  corebn_file(32) = 'FTCC_F-3a_cycle1_300d.txt'
  corebn_file(33) = 'FTCC_F-3a_cycle1_30d.txt'
  corebn_file(34) = 'FTCC_F-3a_cycle1_400d.txt'
  corebn_file(35) = 'FTCC_F-3a_cycle1_500d.txt'
  corebn_file(36) = 'FTCC_F-3a_cycle1_600d.txt'
  corebn_file(37) = 'FTCC_F-3a_cycle1_60d.txt'
  corebn_file(38) = 'FTCC_F-3a_cycle1_700d.txt'
  corebn_file(39) = 'FTCC_F-3a_cycle1_800d.txt'
  corebn_file(40) = 'FTCC_F-3b_cycle1_0d.txt'
  corebn_file(41) = 'FTCC_F-3b_cycle1_100d.txt'
  corebn_file(42) = 'FTCC_F-3b_cycle1_10d.txt'
  corebn_file(43) = 'FTCC_F-3b_cycle1_1d.txt'
  corebn_file(44) = 'FTCC_F-3b_cycle1_200d.txt'
  corebn_file(45) = 'FTCC_F-3b_cycle1_300d.txt'
  corebn_file(46) = 'FTCC_F-3b_cycle1_30d.txt'
  corebn_file(47) = 'FTCC_F-3b_cycle1_400d.txt'
  corebn_file(48) = 'FTCC_F-3b_cycle1_500d.txt'
  corebn_file(49) = 'FTCC_F-3b_cycle1_600d.txt'
  corebn_file(50) = 'FTCC_F-3b_cycle1_60d.txt'
  corebn_file(51) = 'FTCC_F-3b_cycle1_700d.txt'
  corebn_file(52) = 'FTCC_F-3b_cycle1_800d.txt'
  corebn_file(53) = 'FTCC_F-4_cycle1_0d.txt'
  corebn_file(54) = 'FTCC_F-4_cycle1_100d.txt'
  corebn_file(55) = 'FTCC_F-4_cycle1_10d.txt'
  corebn_file(56) = 'FTCC_F-4_cycle1_1d.txt'
```

```
  corebn_file(57) = 'FTCC_F-4_cycle1_200d.txt'
  corebn_file(58) = 'FTCC_F-4_cycle1_300d.txt'
  corebn_file(59) = 'FTCC_F-4_cycle1_30d.txt'
  corebn_file(60) = 'FTCC_F-4_cycle1_400d.txt'
  corebn_file(61) = 'FTCC_F-4_cycle1_500d.txt'
  corebn_file(62) = 'FTCC_F-4_cycle1_600d.txt'
  corebn_file(63) = 'FTCC_F-4_cycle1_60d.txt'
  corebn_file(64) = 'FTCC_F-4_cycle1_700d.txt'
  corebn_file(65) = 'FTCC_F-4_cycle1_800d.txt'
&end
&column_info
  column_name(1) = 'F-1'         ! Corebn data のカラム名 (Column)
  column_name(2) = 'F-2'
  column_name(3) = 'F-3a'
  column_name(4) = 'F-3b'
  column_name(5) = 'F-4'
  channel(1)     = 5*33          ! １燃料体当たりのチャンネル数 (Column)
  column_dis     = 0.362d0       ! カラム面間距離 [m]
  graphite_dout  = 3.35171d-02   ! 黒鉛部外半径   [m] (HTR50S: 33ch×12 本 + 31ch×18 本)
&end
&mesh_info
  ! mesh_size(Data_Type, Column, Layer, Mesh_Layer)
  !  [ Data_Type = 1:内半径 [m] / 2:外半径 [m] / 3:物性 ]
  ! ( 物性= 0:ヘリウムボイド / 1:燃料コンパクト / 2:ヘリウムガス / 3:IG-110 / 4:PGX )
  mesh_size(1,1,1,1) = 0.0000d-00,  0.5000d-02,  0  ! ボイド         情報
  mesh_size(1,1,1,2) = 0.5000d-02,  1.3000d-02,  1  ! 燃料コンパクト情報
  mesh_size(1,1,1,3) = 1.3125d-02,  1.7000d-02,  3  ! 黒鉛スリーブ  情報
  mesh_size(1,1,1,4) = 1.7000d-02,  2.0500d-02,  2  ! 冷却材         情報
  mesh_size(1,1,1,5) = 2.0500d-02,  3.2903d-02,  3  ! 黒鉛ブロック  情報
&end
&factor_info
  h_effect          = 1.0d0       ! 非均質効果
  axial_power       = 0.0d0       ! 軸方向発熱長補正 (補正なし)
  cond_fact(3)      = 0.8d0       ! 熱伝導率補正係数
  emissivity        = 0.8d0       ! ふく射率 [-]
  calori_ratio(1)   = 9.405d-01   ! 固体領域１番目 (燃料コンパクト) 発熱割合 [-]
  calori_ratio(2)   = 0.000d+00   ! 固体領域２番目 (黒鉛スリーブ)   発熱割合 [-]
  calori_ratio(3)   = 4.950d-02   ! 固体領域３番目 (黒鉛ブロック)   発熱割合 [-]
&end
&flow_coolant
  flow_model           = 1                     ! 冷却材流体情報のモデル
  redistribution_model = 0                     ! 流量再配分機能のモデル
  operating_coef       = 0.235d0               ! 運転状態時の係数 a
  flow_file(1)  = 'HTR50S_flowrate_0d.txt'     ! Cycle 別冷却材流体情報ファイル名 (File count)
  flow_file(2)  = 'HTR50S_flowrate_1d.txt'
  flow_file(3)  = 'HTR50S_flowrate_10d.txt'
  flow_file(4)  = 'HTR50S_flowrate_30d.txt'
  flow_file(5)  = 'HTR50S_flowrate_60d.txt'
  flow_file(6)  = 'HTR50S_flowrate_100d.txt'
  flow_file(7)  = 'HTR50S_flowrate_200d.txt'
  flow_file(8)  = 'HTR50S_flowrate_300d.txt'
  flow_file(9)  = 'HTR50S_flowrate_400d.txt'
  flow_file(10) = 'HTR50S_flowrate_500d.txt'
  flow_file(11) = 'HTR50S_flowrate_600d.txt'
  flow_file(12) = 'HTR50S_flowrate_700d.txt'
  flow_file(13) = 'HTR50S_flowrate_800d.txt'
&end
&option
  out_format         = 1    ! 出力形式 (Text 形式、Space 区切り)
  compact_cond       = 0    ! 燃料コンパクト熱伝導率可変フラグ (固定)
  period_lower_limit = 10   ! 最高温度計算時の対象燃焼日数下限 (  10 日以上を対象 )
  period_upper_limit = 730  ! 最高温度計算時の対象燃焼日数上限 ( 730 日以下を対象 )
  graph_column_group = 0    ! 出力用カラムグループ化 (グループ化しない)
  iteration   = 500         ! 収束計算最大反復回数
  tolerance   = 1.0d-10     ! 収束許容誤差
  format_temp = '0pf12.2'   ! 温度出力書式(整数 9 桁、小数点 2 桁)
&end
```

５．５．２　入力パラメータファイルの詳細説明

（１）入力フォーマット

入力フォーマットは、ネームリスト形式（Fortran name 命令準拠）で作成する。なお、ネームリスト開始宣言命令前または終了宣言命令から次の開始宣言命令間には、コメントを記載することができる。

（例）ネームリスト形式

```
***コメント***
&MODEL1        ← ネームリスト名［MODEL1］の開始宣言命令
変数名=数値
    ⋮
&END           ← ネームリスト名［MODEL1］の終了宣言命令
&MODEL2        ← ネームリスト名［MODEL2］の開始宣言命令
変数名=数値
    ⋮
&END           ← ネームリスト名［MODEL2］の終了宣言命令
```

（２）ネームリスト名

① namelist：&contrl（計算方法に関する設定）

・solver：冷却材出口計算フラグ（0 / 1）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：冷却材出口温度下端位置計算方法を設定する。

0：冷却材側面温度（黒鉛スリーブ外面温度と黒鉛ブロック表面温度）から積分

1：燃料領域の発熱量より計算

※0 または 1 以外を設定した場合、0 として計算される。

② namelist：&safety_factor（工学的安全係数に関する設定）

⒜axial_power_dependency：冷却材ランダム因子軸方向補正フラグ（0 / 1）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：冷却材出口温度下端位置計算方法を設定する。

0：補正する

1：補正しない

※0 または 1 以外を設定した場合、0 として計算される。

⒝safety_file：工学的安全係数ファイル名の設定

データタイプ：character (4096)、単位：無、既定値：無、必須入力

内容：工学的安全係数のファイル名を設定する。

③ namelist：&reactor（原子炉に関する設定（既定値は基本的に HTR50S モデル））

⒜column：燃料カラム数の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：5、上限：50

内容：計算対象となる燃料カラム総数を設定する。

(b)layer：燃料体段数の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：6、上限：50

内容：計算対象となる燃料体段総数を設定する。

(c)temp_in：炉心入口冷却材温度の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：℃、既定値：325

内容：炉心入口冷却材温度を設定する。炉別設定値は、以下を参照のこと。

HTR50S　：325

HTTR　　：395

(d)temp_add：炉心入口冷却材温度誤差の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：℃、既定値：＋20

内容：炉心入口冷却材温度の誤差分を設定する。炉別設定値は、以下を参照のこと。

HTR50S　：＋20

HTTR　　：＋14

(e)pressure：冷却材圧力の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：Pa

内容：冷却材圧力を一定値にする場合に設定する。flow_model=9（流量自動計算）の場合は必須入力となり、それ以外の場合は「冷却材流体情報ファイル」の冷却材圧力となる。炉別設定値は、以下を参照のこと。

HTR50S　：4 MPa

HTTR　　：4 MPa

(f)power_model：計算に使用する出力分布（1 / 2 / 3 / 4）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：1

内容：「核計算情報ファイル」から、計算で使用する出力分布を設定する。1～4 の番号は、「核計算情報ファイル」の Power_1, 2, 3, 4（下記参照）に対応している。

1：対象カラムグループ内で P_2 が最大となるチャンネルの軸方向出力分布

2：対象カラムグループ内で最大出力密度が出現するチャンネルの軸方向出力分布

3：対象カラムグループ内で $P_1 \times P_2$ が最大となるチャンネルの軸方向出力分布

4：対象カラムグループ内の平均軸方向出力分布

(g)fluence_model：計算に使用する照射量分布（1 / 2 / 3 / 4）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：1

内容：「核計算情報ファイル」から、計算に使用する照射量分布を設定する。1～4 の番号は、「核計算情報ファイル」の Fluence_1, 2, 3, 4（下記参照）に対応している。

1：対象カラムグループ内で P_2 が最大となるチャンネルの軸方向照射量分布

2：対象カラムグループ内で最大出力密度が出現するチャンネルの軸方向照射量分布

3：対象カラムグループ内で $P_1 \times P_2$ が最大となるチャンネルの軸方向照射量分布

4：対象カラムグループ内の平均軸方向照射量分布

(h)corebn_file：核計算情報ファイル名の設定

データタイプ：character (4096)、１次元配列、上限：1,000、単位：無、既定値：無、必須入力

内容：「核計算情報ファイル」のファイル名を設定する。設定の順番は、サイクル、燃焼日数及びカラム番号に無関係で順不同で良い。なお、燃料カラム以外を設定した場合は、読み飛ばされる。

④ namelist：&column_info（カラム情報に関する設定（既定値は基本的に HTR50S モデル））

(a)column_name：カラム名の設定

データタイプ：character (30)、１次元配列、上限：column、単位：無、既定値：無、必須入力

内容：カラム番号に対応する「核計算情報ファイル」のカラム名を設定する。

(b)channel：燃料チャンネル数の設定

データタイプ：integer、１次元配列、上限：column、単位：無、既定値：33

内容：１燃料体当たりのチャンネル数を燃料カラム単位で設定する。

(c)column_dis：カラム面間距離の設定

データタイプ：倍精度実数型、２次元配列、上限：column、layer、単位：m

内容：カラム（六角形黒鉛ブロック）の面間距離を設定する。column_dis (1, 1)の既定値は 0.36、カラム２以降の１段目省略時は、１つ前のカラム１段目の値が既定値となる。２段目以降を省略した場合は、同一カラムの１段目の値が既定値となる。

(d)graphite_dout：黒鉛ブロック外半径の設定

データタイプ：倍精度実数型、２次元配列、上限：column、layer、単位：m

内容：黒鉛ブロックの外半径を設定する。graphite_dout (1, 1)の既定値は以下のとおりであり、カラム２以降の１段目省略時は、１つ前のカラムの１段目の値が設定値となる。２段目以降を省略した場合は、同一カラムの１段目の値が設定値となる。

・33 / 31 チャンネル混在モデル（HTTR 等）：0.033518（m）

$$\rightarrow \sqrt{\left(\frac{\text{燃料体断面積}-\text{燃料体平均}^{\text{チャンネル}}\text{数}\times\text{チャンネル断面積}}{\text{燃料体平均}^{\text{チャンネル}}\text{数}}+\text{チャンネル断面積}\right)/\pi}$$

・33 チャンネル単独モデル（HTR50S 等）：0.033518（m）（HTTR と同じに設定）

⑤ namelist：&mesh_info（燃料（メッシュ）情報に関する設定（既定値は基本的 HTTR 燃料））

(a)mesh_layer：径方向要素数の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：5

内容：径方向の要素数を設定する。

(b)mesh_type：径方向要素の種類（0 / 1 / 2 / 3 / 4）の設定

データタイプ：integer、１次元配列、上限：mesh_layer、単位：無、既定値：下記参照

内容：径方向要素の種類（下記参照）を設定する。

種類　0：ボイド
　　1：燃料コンパクト
　　2：黒鉛スリーブ
　　3：冷却材
　　4：黒鉛ブロック

既定値　mesh_type(1) = 0　！ボイド
mesh_type(2) = 1　！燃料コンパクト
mesh_type(3) = 2　！黒鉛スリーブ
mesh_type(4) = 3　！冷却材
mesh_type(5) = 4　！黒鉛ブロック

(c)mesh_solid：固体有無フラグ（0 / 1）の設定

データタイプ：integer、１次元配列、上限：mesh_layer、単位：無、既定値：下記参照

内容：径方向要素の固体有無フラグ（下記参照）を設定する。

種類　0：固体以外（気体等）
1：固体

既定値　mesh_solid(1) = 0　！ボイド
mesh_solid(2) = 1　！燃料コンパクト
mesh_solid(3) = 1　！黒鉛スリーブ
mesh_solid(4) = 0　！冷却材
mesh_solid(5) = 1　！黒鉛ブロック

(d)mesh_div：径方向メッシュ分割数の設定

データタイプ：integer、１次元配列、上限：mesh_layer、単位：無、既定値：下記参照

内容：径方向温度分布計算用に、各要素の径方向メッシュ分割数を設定する。ただし、冷却材に関しては固定値“1”とする。

既定値　mesh_div(1) = 2　！ボイド
mesh_div(2) = 8　！燃料コンパクト
mesh_div(3) = 4　！黒鉛スリーブ
mesh_div(4) = 1　！冷却材
mesh_div(5) = 4　！黒鉛ブロック

(e)mesh_size：径方向要素のサイズ（1 / 2/ 3）及び物性（0 / 1 / 2 / 3 / 4）の設定

データタイプ：倍精度実数型、４次元配列、上限：3, column, layer, mesh_Layer、既定値：下記参照

内容：要素の径方向サイズ及び物質種類を設定する。カラム２以降の１段目省略時は、１つ前のカラム１段目の値が既定値となる。２段目以降を省略した場合は、同一カラムの１段目の値が既定値となる。

データ種類　引数=1：内半径（m）
引数=2：外半径（m）
引数=3：物質種類

物質種類　0：ヘリウムボイド
1：燃料コンパクト
2：ヘリウムガス
3：IG-110
4：PGX

既定値（径方向サイズ）mesh_size(1, 1, 1, 1) = 0.0d0,　　0.005d0　！ボイド
mesh_size(1, 1, 1, 2) = 0.005d0,　0.013d0　！燃料コンパクト
mesh_size(1, 1, 1, 3) = 0.013125d0, 0.017d0　！黒鉛スリーブ
mesh_size(1, 1, 1, 4) = 0.017d0,　0.0205d0　！冷却材
mesh_size(1, 1, 1, 5) = 0.0205d0,　0.032903d0！黒鉛ブロック
既定値（物質種類）　mesh_size(3, 1, 1, 1) = 0　！ボイド
mesh_size(3, 1, 1, 2) = 1　！燃料コンパクト
mesh_size(3, 1, 1, 3) = 3　！黒鉛スリーブ（IG-110）
mesh_size(3, 1, 1, 4) = 2　！冷却材（ヘリウムガス）
mesh_size(3, 1, 1, 3) = 3　！黒鉛ブロック（IG-110）

⑥ namelist：&factor_info（補正等の各係数に関する設定）

⒜h_effect：非均質効果の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：無、既定値：1.07

内容：非均質効果を設定する。

⒝axial_power：軸方向発熱長補正の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：無、既定値：0

内容：軸方向発熱長補正を設定する。

種類　0：補正無
その他：補正率を設定

⒞cond_fact：熱伝導率補正係数の設定

データタイプ：integer、１次元配列、上限：4（物質数）、単位：無、既定値：下記参照

内容：各物質に対する熱伝導率補正係数を設定する。

既定値　cond_fact(1) = 1.0　！燃料コンパクト
cond_fact(2) = 1.0　！ヘリウムガス
cond_fact(3) = 0.8　! IG110
cond_fact(4) = 1.0　! PGX

⒟emissivity：ふく射率の設定

データタイプ：倍精度実数型、２次元配列、上限：固体領域数, 2、単位：無、既定値：0.8

内容：固体表面のふく射率を設定する。

２番目引数の種類　引数=1：固体領域内面側ふく射率
引数=2：固体領域外面側ふく射率

例）emissivity(1, 2) = 0.8d0　！固体領域１番目外面（燃料コンパクト外面）
emissivity(2, 1) = 0.8d0　！固体領域２番目内面（黒鉛スリーブ内面）
emissivity(2, 2) = 0.8d0　！固体領域２番目外面（黒鉛スリーブ外面）
emissivity(3, 1) = 0.8d0　！固体領域３番目内面（黒鉛ブロック表面）

⒠calori_ratio：発熱割合の設定

データタイプ：倍精度実数型、１次元配列、上限：固体領域数、単位：%、既定値：下記参照

内容：固体領域に対する発熱割合を設定する。

既定値　calori_ratio(1) = 9.405d-01　！固体領域１番目（燃料コンパクト）
calori_ratio(2) = 0.000d+00　！固体領域２番目（黒鉛スリーブ）
calori_ratio(3) = 4.950d-02　！固体領域３番目（黒鉛ブロック）

(f)solid_cond：固体熱伝導率の設定

データタイプ：倍精度実数型、１次元配列、上限：固体領域数、単位：W/(m·K)、既定値：0

内容：固体領域に対する熱伝導率を設定する。通常は、物質に対する既定の熱伝導率を使用するため、設定は不要である。なお、熱伝導率を設定した場合は、設定値で計算する（「熱伝導率補正係数：cond_fact」及び「燃料コンパクト熱伝導率可変フラグ：compact_cond」の値は無視される）。

種類　0：材料に対する既定の熱伝導率を使用
その他：熱伝導率（0 以外の値）を設定

既定値　solid_cond(1) = 0.0d+00　！固体領域１番目（燃料コンパクト）
solid_cond(2) = 0.0d+00　！固体領域２番目（黒鉛スリーブ）
solid_cond(3) = 0.0d+00　！固体領域３番目（黒鉛ブロック）

⑦ namelist：&flow_coolant（冷却材流量に関する設定）

(a)flow_model：冷却材流体情報モデル（0 / 1 / 9）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：計算で使用する冷却材流体情報ファイルの種類を設定する。

種類　0：フォーマット２
1：フォーマット１
9：冷却材流量自動計算

(b)redistribution_model：流量再配分モデル（0 / 1 / 9）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：計算で使用する冷却材流体情報の種類を設定する。

種類　0：HTTR の定格運転及び高温試験運転に相当する場合
1：上記以外の運転の場合
9：再配分しない

(c)operating_coef：式（2.11）の係数 α（0.235 / 0.342）の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：無、既定値：0.235

内容：流量再配分モデルで運転状態（redistribution_model = 0）設定時の係数 α を入力する。

種類　850°C 運転（定格運転）　：0.235
950°C 運転（高温試験運転）　：0.342

(d)flow_file：冷却材流体情報ファイル名の設定

データタイプ：character (4096)、１次元配列、上限：1,000、単位：無、既定値：無

内容：flow_model = 0, 1 の場合は必須入力（9 の場合は不要）であり、冷却材流体情報ファイル名を設定する。設定の順番は、サイクル及び燃焼日数に関係なく順不同である。

(e)thermal_power：原子炉熱出力の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：MW、既定値：50

内容：原子炉熱出力を設定する。flow_model = 9 の場合のみ必須入力（それ以外は不要）である。

⑴all_channel：全流路数の設定

データタイプ：integer、単位：本、既定値：990

内容：全冷却流路数を設定する。flow_model = 9 の場合のみ必須入力（それ以外は不要）である。

⑵temp_out：炉心出口温度の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：℃、既定値：750

内容：炉心出口冷却材温度を設定する。flow_model = 9 の場合のみ必須入力（それ以外は不要）である。

⑶heat_removal：VCS（Vessel Cooling System：炉容器冷却設備）除熱量割合の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：無、既定値：0.99

内容：（1－VCS 除熱量割合）を設定する。flow_model = 9 の場合のみ必須入力（それ以外は不要）である。

⑷effective_ratio：炉心有効流量割合（0 / 1 / 9）の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：無、既定値：0.87

内容：炉心有効流量割合を設定する。

種類　flow_model = 0：1.0
flow_model = 1：1.0
flow_model = 9：0.87

⑧ namelist：&option（出力等のオプションに関する設定）

⑴out_format：出力形式（1 / 2）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：1

内容：拡張子（.txt）出力される各ファイルのフォーマット（区切り文字用フラグ）を設定する。

種類　1：テキスト形式、スペース区切り
2：テキスト形式、カンマ区切り

⑵temp_point：出力温度位置（0 / 1 / 2）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：出力する各ファイルの温度のメッシュ軸方向位置を設定する。

種類　0：メッシュ下端温度
1：メッシュ中点温度
2：メッシュ上端温度

⑶compact_cond：燃料コンパクト熱伝導率可変フラグ（0 / 1）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：燃料コンパクト熱伝導率を、固定値か、温度依存の可変にするかを設定する。

種類　0：固定（値：0.125604E+2（W/(m·K)）
1：可変（1,000℃ 未満：0.1465E+2（W/(m·K)）
1,000℃ 以上：0.1675E+2（W/(m·K)）

⑷period_lower_limit：燃料最高温度判定時の対象燃焼日数下限値の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：day、既定値：10

内容：燃料カラムの燃料最高温度判定の際、原子炉起動時の燃焼日数を判定から除外する機能で、判定対象の燃焼日数下限値を設定する。なお、判定から除外しない場合は 0 を指定する。

種類　　0：判定から除外しない

燃焼日数下限値：設定燃焼日数未満を判定から除外

(e)period_upper_limit：燃料最高温度判定時の対象燃焼日数上限値の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：day、既定値：730

内容：燃料カラムの燃料最高温度判定の際、原子炉停止時の燃焼日数を判定から除外する機能で、判定対象の燃焼日数上限値を設定する。なお、判定から除外しない場合は 0 を指定する。

種類　　0：判定から除外しない

燃焼日数上限値：設定燃焼日数を超える日数を判定から除外

(f)graph_column_group：カラムグループ化フラグ（0 / 1）の設定

データタイプ：integer、単位：無、既定値：0

内容：グラフ用出力ファイル（Graph_xxxx.csv）において、同じ位置関係にあるカラムをグループ化するか否かを設定する。

種類　　0：グループ化しない

1：グループ化する

仕様：グループ化の判定方法は、&column_info の column_name(x) = を基に、カラム名の最小文字数を超える文字数のカラム名に対し、最小文字数の文字が同一の場合は同位置関係カラムとする。ただし、全て同じ文字数の場合は、グループ化しない。以下にグループ化の判定例を記す。

例１）以下の場合、F-3a と F-3b がグループ化され、温度が平均化される。出力は F-1、F-2、F-3 及び F-4 の４カラムとなる。

column_name(1) = 'F-1'
column_name(2) = 'F-2'
column_name(3) = 'F-3a'
column_name(4) = 'F-3b'
column_name(5) = 'F-4'

例２）以下の場合、全て同じ文字数のため、グループ化されない。よって出力は、F-1、F-2、F-3、F-4 及び F-5 の５カラムとなる。

column_name(1) = 'F-1'
column_name(2) = 'F-2'
column_name(3) = 'F-3'
column_name(4) = 'F-4'
column_name(5) = 'F-5'

例３）以下の場合、最小文字数（3 文字）が全て異なる文字のため、グループ化されない。よって出力は F-1、F-2、F-3(F3a)、F-4(F3b)及び F-5 の５カラムとなる。

column_name(1) = 'F-1'
column_name(2) = 'F-2'
column_name(3) = 'F-3(F-3a)'
column_name(4) = 'F-4(F-3b)'
column_name(5) = 'F-5'

(g)iteration：収束計算最大反復回数の設定

データタイプ：integer、単位：回数、初期値：500

内容：温度収束計算の最大反復回数を設定する。収束しない場合、この値を増やす。

(h)tolerance：収束許容誤差の設定

データタイプ：倍精度実数型、単位：無、初期値：1.0d-10

内容：温度計算時の収束判定用許容誤差を設定する。

(i)format_temp：出力温度の書式

データタイプ：character(20)、単位：無、初期値：'0pf12.2'（整数 9 桁、小数点 2 桁）

内容：出力する温度の書式を Fortran の format 命令形式で設定する。

５．６　計算処理の流れ

Fig. 5.1 に、FTCC 実行時のプログラムの処理の流れを示す。各種入力データの設定を行った後、計算が開始される。物性値、ふく射熱伝達、熱伝達率等の温度依存性のため、収束計算により温度分布が決定される。この繰り返しを、必要なサイクル数、燃焼日数及び燃料カラム数分実施する。求められた温度に対して、工学的安全係数を適用した後、各種値が出力される。

Table 5.1　核計算情報ファイルの例

Cycle 1			サイクル									
Burn-up_period 30			燃焼日数									
Column_name F-1			カラム名									
Position 1A1 1B1 1C1 1D1			カラム位置情報									
P1 1.03733 1.03733 1.03733 1.03733			P_1									
P2 1.14668 1.14668 1.14668 1.14668			P_2									
Layer_name	Layer_number	Mesh_number	Mesh_height[m]	Z_coordinate[m]	Power_1[W/m3]	Fluence_1[n/m2]	Power_2[W/m3]	Fluence_2[n/m2]	Power_3[W/m3]	Fluence_3[n/m2]	Power_4[W/m3]	Fluence_4[n/m2]
US	1	1	3.000000E-01	6.850000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
UR1	2	2	1.450000E-01	6.627500E+00	0.000000E+00	2.514410E+19	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.931090E+20	0.000000E+00	2.931090E+20
UR2	3	6	7.250000E-02	6.083750E+00	0.000000E+00	3.487760E+21	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	6.415980E+22	0.000000E+00	6.415980E+22
LF1	4	14	2.000000E-02	5.530000E+00	0.000000E+00	3.507790E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	6.684970E+23	0.000000E+00	6.684970E+23
LF1	4	15	1.800000E-02	5.511000E+00	6.376630E+06	4.071740E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	6.376630E+06	6.684970E+23	6.376630E+06	6.684970E+23
LF1	4	16	5.000000E-02	5.477000E+00	6.326660E+06	4.952490E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	6.326660E+06	6.684970E+23	6.326660E+06	6.684970E+23
LF1	4	17	5.000000E-02	5.427000E+00	6.596350E+06	5.935100E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	6.596350E+06	6.684970E+23	6.596350E+06	6.684970E+23
LF1	4	18	5.000000E-02	5.377000E+00	6.997590E+06	6.726290E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	6.997590E+06	6.684970E+23	6.997590E+06	6.684970E+23
LF1	4	19	5.000000E-02	5.327000E+00	7.442790E+06	7.381880E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	7.442790E+06	6.684970E+23	7.442790E+06	6.684970E+23
LF1	4	20	5.000000E-02	5.277000E+00	7.887520E+06	7.927570E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	7.887520E+06	6.684970E+23	7.887520E+06	6.684970E+23
LF1	4	21	5.000000E-02	5.227000E+00	8.306760E+06	8.371900E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	8.306760E+06	9.486290E+23	8.306760E+06	9.486290E+23
LF1	4	22	5.000000E-02	5.177000E+00	8.686340E+06	8.712090E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	8.686340E+06	9.486290E+23	8.686340E+06	9.486290E+23
LF1	4	23	5.000000E-02	5.127000E+00	9.019470E+06	8.936210E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	9.019470E+06	9.486290E+23	9.019470E+06	9.486290E+23
LF1	4	24	5.000000E-02	5.077000E+00	9.306030E+06	9.022640E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	9.306030E+06	9.486290E+23	9.306030E+06	9.486290E+23
LF1	4	25	5.000000E-02	5.027000E+00	9.556770E+06	8.934590E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	9.556770E+06	9.486290E+23	9.556770E+06	9.486290E+23
LF1	4	26	2.800000E-02	4.988000E+00	9.760660E+06	8.672760E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	9.760660E+06	9.486290E+23	9.760660E+06	9.486290E+23
LF1	4	27	1.400000E-02	4.967000E+00	0.000000E+00	8.435730E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	9.486290E+23	0.000000E+00	9.486290E+23
LF2	5	28	2.000000E-02	4.950000E+00	0.000000E+00	8.383460E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	9.382340E+23	0.000000E+00	9.382340E+23
LF2	5	29	1.800000E-02	4.931000E+00	9.498550E+06	8.543610E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	9.498550E+06	9.382340E+23	9.498550E+06	9.382340E+23
LF2	5	30	5.000000E-02	4.897000E+00	9.059950E+06	8.732280E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	9.059950E+06	9.382340E+23	9.059950E+06	9.382340E+23
LF2	5	31	5.000000E-02	4.847000E+00	8.748190E+06	8.824870E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	8.748190E+06	9.382340E+23	8.748190E+06	9.382340E+23
LF2	5	32	5.000000E-02	4.797000E+00	8.560780E+06	8.829690E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	8.560780E+06	9.382340E+23	8.560780E+06	9.382340E+23
LF2	5	33	5.000000E-02	4.747000E+00	8.432730E+06	8.786350E+23	0.000000E+00	0.000000E+00	8.432730E+06	9.382340E+23	8.432730E+06	9.382340E+23
段　名	段番号	メッシュ番号	メッシュ高さ	メッシュ幅	出力密度 1	照射量 1	出力密度 2	照射量 2	出力密度 3	照射量 3	出力密度 4	照射量 4

※Power_1, 2, 3, 4（出力密度）及び Fluence_1, 2, 3, 4（照射量）の意味について、以下に示す。なお、計算に使用する値は、入力パラメータファイル(ftcc.inp)の「出力：power_model=」及び「照射量：fluence_model=」で設定（省略時は、出力密度 1 及び照射量 1 の値を使用）する。

1：対象カラムグループ内で P_2 が最大となるチャンネルの軸方向出力分布及び照射量分布

2：対象カラムグループ内で最大出力密度が出現するチャンネルの軸方向出力分布及び照射量分布

3：対象カラムグループ内で $P_1 \times P_2$ が最大となるチャンネルの軸方向出力分布及び照射量分布

4：対象カラムグループ内の平均軸方向出力分布及び照射量分布

Table 5.2　冷却材流体情報ファイル（フォーマット１）の例

File info : HTTR Model - FLOWNET output file [tf_ft06.d] -				コメント行			
Cycle 1				サイクル			
Burn-up_period 160				燃焼日数			
Column_number	Pressure[Pa]	Channel	LF1[kg/s]	LF2[kg/s]	LF3[kg/s]	LF4[kg/s]	LF5[kg/s]
1	4.02E+06	33	3.20E-01	3.18E-01	3.18E-01	3.18E-01	3.19E-01
2	4.02E+06	33	3.16E-01	3.14E-01	3.14E-01	3.14E-01	3.15E-01
3	4.02E+06	31	3.00E-01	2.99E-01	2.98E-01	2.98E-01	3.01E-01
4	4.02E+06	31	2.99E-01	2.98E-01	2.97E-01	2.98E-01	3.00E-01
5	4.02E+06	31	2.99E-01	2.98E-01	2.97E-01	2.98E-01	3.01E-01
カラム番号	冷却材圧力	チャンネル数	冷却材流量				
			燃料体１段目	燃料体２段目	燃料体３段目	燃料体４段目	燃料体５段目

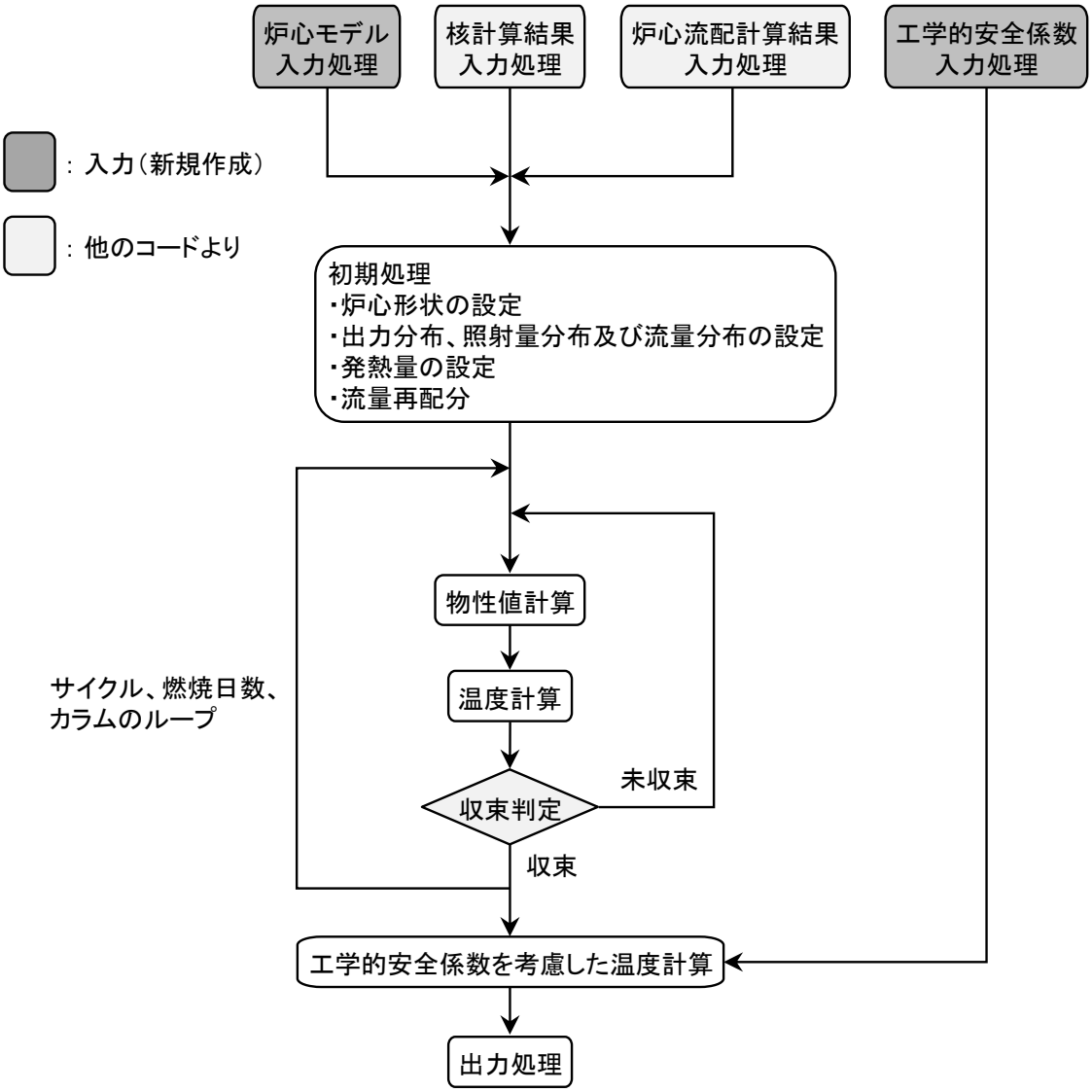
Table 5.3　冷却材流体情報ファイル（フォーマット２）の例

Cycle 1		サイクル							
Burn-up_period 30		燃焼日数							
Column	Layer	Channel	Temp[C]	Pressure[Pa]	Flowrate[kg/s]	Flux[kg/m2s]	Re[-]	Pr[-]	Deq[m]
1	1	33	388.3146316	4.034797E+06	6.391978E-01	4.696531E+01	9.585520E+03	6.449392E-01	7.000000E-03
1	2	33	497.8071881	4.033822E+06	6.392261E-01	4.696738E+01	8.638632E+03	6.423258E-01	7.000000E-03
1	3	33	587.5646310	4.032674E+06	6.392734E-01	4.697086E+01	8.072038E+03	6.416714E-01	7.000000E-03
1	4	33	650.1586667	4.031385E+06	6.393249E-01	4.697465E+01	7.722407E+03	6.421387E-01	7.000000E-03
1	5	33	692.4567587	4.029996E+06	6.393775E-01	4.697851E+01	7.511564E+03	6.428588E-01	7.000000E-03
1	6	33	718.8707563	4.028542E+06	6.394104E-01	4.698093E+01	7.388435E+03	6.434551E-01	7.000000E-03
2	1	33	378.5236837	4.034462E+06	7.022925E-01	5.160122E+01	1.066414E+04	6.452507E-01	7.000000E-03
2	2	33	472.3335076	4.033339E+06	7.024050E-01	5.160947E+01	9.730329E+03	6.427454E-01	7.000000E-03
2	3	33	549.7953478	4.032039E+06	7.025653E-01	5.162126E+01	9.156162E+03	6.417330E-01	7.000000E-03
2	4	33	604.3630608	4.030597E+06	7.027227E-01	5.163282E+01	8.792672E+03	6.417056E-01	7.000000E-03
2	5	33	642.5605852	4.029052E+06	7.028861E-01	5.164483E+01	8.563154E+03	6.420287E-01	7.000000E-03
2	6	33	667.5269653	4.027435E+06	7.029876E-01	5.165228E+01	8.422719E+03	6.423871E-01	7.000000E-03
3	1	33	387.5121092	4.034545E+06	6.866703E-01	5.045337E+01	1.030767E+04	6.449645E-01	7.000000E-03
3	2	33	496.9325223	4.033441E+06	6.869777E-01	5.047595E+01	9.290267E+03	6.423402E-01	7.000000E-03
3	3	33	587.1981669	4.032138E+06	6.875728E-01	5.051967E+01	8.683833E+03	6.416715E-01	7.000000E-03
3	4	33	649.4896775	4.030671E+06	6.884474E-01	5.058394E+01	8.320475E+03	6.421295E-01	7.000000E-03
3	5	33	685.3869648	4.029092E+06	6.896208E-01	5.067015E+01	8.151758E+03	6.427132E-01	7.000000E-03
3	6	33	704.3648089	4.027446E+06	6.906233E-01	5.074381E+01	8.066956E+03	6.431120E-01	7.000000E-03
4	1	33	386.4807089	4.034538E+06	6.880268E-01	5.055303E+01	1.034157E+04	6.449967E-01	7.000000E-03
4	2	33	495.1790987	4.033433E+06	6.882714E-01	5.057100E+01	9.322207E+03	6.423667E-01	7.000000E-03
4	3	33	585.4469032	4.032128E+06	6.887185E-01	5.060385E+01	8.710042E+03	6.416690E-01	7.000000E-03
4	4	33	647.9465936	4.030662E+06	6.893266E-01	5.064854E+01	8.340280E+03	6.421090E-01	7.000000E-03
4	5	33	684.0994713	4.029082E+06	6.900787E-01	5.070380E+01	8.164436E+03	6.426881E-01	7.000000E-03
4	6	33	703.3429832	4.027437E+06	6.906845E-01	5.074831E+01	8.073214E+03	6.430891E-01	7.000000E-03
5	1	33	389.3925515	4.034535E+06	6.883941E-01	5.058002E+01	1.030897E+04	6.449064E-01	7.000000E-03
5	2	33	498.4712847	4.033423E+06	6.887296E-01	5.060467E+01	9.304485E+03	6.423142E-01	7.000000E-03
5	3	33	586.2475984	4.032111E+06	6.893072E-01	5.064711E+01	8.715479E+03	6.416673E-01	7.000000E-03
5	4	33	646.0830757	4.030642E+06	6.900812E-01	5.070398E+01	8.363633E+03	6.420830E-01	7.000000E-03
5	5	33	680.3334784	4.029064E+06	6.911051E-01	5.077921E+01	8.200093E+03	6.426155E-01	7.000000E-03
5	6	33	698.1346253	4.027422E+06	6.919528E-01	5.084150E+01	8.118908E+03	6.429741E-01	7.000000E-03
カラム番号	レイヤ番号	チャンネル数	冷却材温度	冷却材圧力	冷却材流量	質量流束	レイノルズ数	プラントル数	等価直径

Table 5.4　工学的安全係数ファイルの既定値

行番号	ファイルの内容					
1	工学的安全係数（HTTR 試験結果によるシステマティック因子見直し後）					
2	上昇因子	冷却材 温度差	膜 温度差	スリーブ 温度差	ギャップ 温度差	コンパクト 温度差
3	ランダム因子					
4	コンパクト内径	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
5	コンパクト外径	0.000	0.000	0.000	0.370	0.012
6	スリーブ内径	0.000	0.000	0.015	0.370	0.000
7	スリーブ外径	0.000	0.017	0.012	0.000	0.000
8	挿入孔径	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000
9	燃料有効長	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002
10	燃料核直径	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
11	燃料核密度	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
12	濃縮度	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
13	ウラン量	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
14	冷却材比熱	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
15	冷却材熱伝導率	0.000	0.018	0.000	0.030	0.000
16	冷却材粘性係数	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000
17	照射変形	0.000	0.000	0.000	0.210	0.000
18	ギャップコンダクタンス	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000
19	コンパクト偏心効果	0.000	0.041	0.041	0.041	0.041
20	出力分布	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
21	流量配分(基準炉心)	0.040	0.032	0.000	0.000	0.000
22	システマティック因子					
23	出力	1.000	1.020	1.020	1.020	1.020
24	出力分布(半径方向)	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
25	出力分布(軸方向)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
26	冷却材流量	1.010	1.008	1.000	1.000	1.000
27	流量配分(基準炉心)	1.020	1.016	1.000	1.000	1.000

※太枠内が入力データ



※「炉心モデル入力処理」で読み込まれるファイルは、入力パラメータファイル（ftcc.inp）を指す。

Fig. 5.1　FTCC 実行時の処理の流れ

６．検証計算

本章では、FTCC の検証のため、FTCC による HTR50S を対象とした燃料温度計算を行い、HTTR 設計コードである TEMDIM による計算結果と比較する。

６．１　計算条件及び計算ケース

（１）計算条件

HTTR 燃料を用いた HTR50S の燃料コンパクト温度、黒鉛スリーブ温度及び冷却材温度に関して、FTCC による計算結果と TEMDIM による計算結果[1-3]を比較した。

FTCC による検証計算に当たっては、計算条件を TEMDIM の計算条件に基づき設定した。以下に、主な計算条件を示す。なお、これら以外の基本的な計算条件は、２．１節（３）参照と同様である。

・Table 6.1 に、燃料温度計算のための HTR50S の主要仕様を示す。
・計算で使用する出力分布、照射量分布及び炉心冷却材流量分布として、TEMDIM で使用されたものと同じとする場合（TEMDIM 同条件ケース）と、２．１節（２）で述べたように、全ての燃料カラムからデータ変換プログラムを通して選択されるものとする場合（FTCC 標準ケース）の２ケースを採用する。
・計算で使用する炉心冷却材流量分布は、TEMDIM で使用されたものと同じとする。
・非均質効果（２．３節（３）参照）は、考慮しない。
・黒鉛スリーブの熱伝導率は、燃料温度を安全側に見積もるため 0.8 倍した値を用いる。

なお、本計算における入力データは、出力分布及び照射量分布を除いて、５．５．１項（３）の入力パラメータファイルの内容に準ずる。また、Table 6.2 及び Table 6.3 に、TEMDIM 同条件ケース及び FTCC 標準ケースで使用した各種設定値を示す。TEMDIM 同条件の場合、照射量として、燃料体１段を上下に分け、各領域で平均化した値を用いている。

（２）計算ケース

FTCC による検証計算の対象は、TEMDIM による計算[1-3]で燃料最高温度が出現した燃焼日数 30 日におけるカラム内チャンネル（Fig. 2.1(b)の燃料カラムグループ F-3b に相当するカラム内の P_2 出現チャンネル）とする。また、（１）で述べたように、出力分布及び照射量分布に関して、TEMDIM 同条件ケースと FTCC 標準ケースの２ケースを実施し、比較する。

６．２　計算結果及び評価

（１）TEMDIM 同条件ケース

Table 6.4 に FTCC 及び TEMDIM から求めた燃料最高温度の比較を、Table 6.5 に FTCC 及び TEMDIM から求めた各部温度の差の範囲を示す。また、Fig. 6.1 に TEMDIM から求めた燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（ノミナル値及びシステマティックランダム値）を、Fig. 6.2 に FTCC から求

めた燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（ノミナル値及びシステマティックランダム値）を示す。

燃料最高温度の軸方向出現位置に関しては、FTCC 及び TEMDIM 共に同じ位置（上から２段目の燃料体下端メッシュ）となった。ノミナル燃料最高温度に関しては、FTCC の場合 1,273˚C、TEMDIM の場合 1,271˚C となり 2˚C の差、システマティックランダム燃料最高温度に関しては、FTCC の場合 1,466˚C、TEMDIM の場合 1,464˚C となり 2˚C の差であり、両者はほぼ一致した。全計算領域で両者から求めた温度の差を比較すると、ノミナル値の場合−4˚C～+2˚C、システマティックランダム値の場合−4˚C～+3˚C となった。燃料最高温度と比べると両者の差は拡大したものの、Fig. 6.1 及び Fig. 6.2 に示されるように、各部の温度分布は両者で非常に良く一致している。

（２）FTCC 標準ケース

Table 6.6 に FTCC 及び TEMDIM から求めた燃料最高温度の比較を、Table 6.7 に FTCC 及び TEMDIM から求めた各部温度の差の範囲を示す。また、Fig. 6.3 に FTCC から求めた燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（ノミナル値及びシステマティックランダム値）を示す。

燃料最高温度の軸方向出現位置に関しては、FTCC 及び TEMDIM 共に同じ位置（上から２段目の燃料体下端メッシュ）となった。ノミナル燃料最高温度に関しては、FTCC の場合 1,272˚C、TEMDIM の場合 1,271˚C となり 1˚C の差、システマティックランダム燃料最高温度に関しては、FTCC の場合 1,465˚C、TEMDIM の場合 1,464˚C となり 1˚C の差であり、両者はほぼ一致した。全計算領域で両者から求めた温度の差を比較すると、ノミナル値の場合−4˚C～+3˚C、システマティックランダム値の場合−6˚C～+4˚C となった。燃料最高温度と比べると両者の差は拡大したものの、Fig. 6.1 及び Fig. 6.3 に示されるように、各部の温度分布は両者で非常に良く一致している。両者の差の原因として、計算に使用している出力分布及び照射量分布が異なることが挙げられる。これは、第３章で述べたように、TEMDIM ではある一定の３分の１炉心領域における燃料カラムから各燃料カラムにおける代表燃料チャンネルの選定を行うが、FTCC では全ての燃料カラムから代表燃料チャンネルの選定を行っているためである。

（３）評価

TRMDIM 同条件ケース及び FTCC の標準ケース共に、FTCC による計算結果は TEMDIM による計算結果とほぼ一致した。開発した FTCC は燃料温度評価に対して充分な精度を持っており、TEMDIM を代替できると考えられる。従って、今後 FTCC は、高温ガス炉用熱流動設計コードの１つとして使用される。

Table 6.1 燃料温度計算のための HTR50S の主要仕様

項　目	値	単　位
原子炉入口冷却材温度	325	℃
原子炉出口冷却材圧力	4.0	MPa (abs)
原子炉出口冷却材温度	750	℃
冷却材流量（VCS 除熱量を 1%に設定）	22.4	kg/s
炉心流量配分割合	FLOWNET で計算	－
冷却材流路内径／外径	3.4／4.1	cm
原子炉熱出力	50	MW
炉心の発熱割合		
燃料領域	99	%
（燃料ｺﾝﾊﾟｸﾄ/黒鉛ｽﾘｰﾌﾞ/黒鉛ﾌﾞﾛｯｸ）	95/0/5	%
側部可動反射体及び固定反射体	1	%
（燃料棒諸元）		
スリーブ内径／外径	2.625／3.4	cm
燃料コンパクト内径／外径	1.0／2.6	cm
燃料体高さ	58	cm
燃料カラム当たりチャンネル数	33	ﾁｬﾝﾈﾙ
燃料カラム数	30	ｶﾗﾑ
燃料カラム当たりの燃料ピン数	33	本
軸方向燃料体段数	6	段

Table 6.2　TEMDIM 同条件ケースで使用した各種設定値

燃料体		出力密度	照射量	冷却材流量*	燃料体		出力密度	照射量	冷却材流量*
段番号	分割番号	(W/cm^3)	(n/cm^2)	(kg/s)	段番号	分割番号	(W/cm^3)	(n/cm^2)	(kg/s)
1	1	4.88	4.98E+19	0.0192	4	1	5.89	3.82E+19	0.0185
	2	4.87	4.98E+19	0.0192		2	5.61	3.82E+19	0.0185
	3	5.31	4.98E+19	0.0192		3	5.35	3.82E+19	0.0185
	4	5.96	4.98E+19	0.0192		4	5.14	3.82E+19	0.0185
	5	6.62	4.98E+19	0.0192		5	4.96	3.82E+19	0.0185
	6	7.26	4.98E+19	0.0192		6	4.79	3.82E+19	0.0185
	7	7.85	7.37E+19	0.0192		7	4.64	3.11E+19	0.0185
	8	8.40	7.37E+19	0.0192		8	4.50	3.11E+19	0.0185
	9	8.90	7.37E+19	0.0192		9	4.38	3.11E+19	0.0185
	10	9.37	7.37E+19	0.0192		10	4.29	3.11E+19	0.0185
	11	9.87	7.37E+19	0.0192		11	4.24	3.11E+19	0.0185
	12	10.37	7.37E+19	0.0192		12	4.27	3.11E+19	0.0185
2	1	10.47	7.62E+19	0.0189	5	1	2.82	2.13E+19	0.0189
	2	10.16	7.62E+19	0.0189		2	2.73	2.13E+19	0.0189
	3	10.03	7.62E+19	0.0189		3	2.62	2.13E+19	0.0189
	4	9.98	7.62E+19	0.0189		4	2.52	2.13E+19	0.0189
	5	9.95	7.62E+19	0.0189		5	2.42	2.13E+19	0.0189
	6	9.94	7.62E+19	0.0189		6	2.33	2.13E+19	0.0189
	7	9.92	7.13E+19	0.0189		7	2.24	1.65E+19	0.0189
	8	9.90	7.13E+19	0.0189		8	2.16	1.65E+19	0.0189
	9	9.90	7.13E+19	0.0189		9	2.08	1.65E+19	0.0189
	10	9.94	7.13E+19	0.0189		10	2.01	1.65E+19	0.0189
	11	10.09	7.13E+19	0.0189		11	1.95	1.65E+19	0.0189
	12	10.42	7.13E+19	0.0189		12	1.91	1.65E+19	0.0189
3	1	7.65	5.52E+19	0.0186	6	1	1.79	1.24E+19	0.0196
	2	7.42	5.52E+19	0.0186		2	1.70	1.24E+19	0.0196
	3	7.21	5.52E+19	0.0186		3	1.61	1.24E+19	0.0196
	4	7.03	5.52E+19	0.0186		4	1.52	1.24E+19	0.0196
	5	6.87	5.52E+19	0.0186		5	1.45	1.24E+19	0.0196
	6	6.71	5.52E+19	0.0186		6	1.38	1.24E+19	0.0196
	7	6.56	4.64E+19	0.0186		7	1.31	8.82E+18	0.0196
	8	6.41	4.64E+19	0.0186		8	1.26	8.82E+18	0.0196
	9	6.28	4.64E+19	0.0186		9	1.21	8.82E+18	0.0196
	10	6.18	4.64E+19	0.0186		10	1.18	8.82E+18	0.0196
	11	6.11	4.64E+19	0.0186		11	1.16	8.82E+18	0.0196
	12	6.13	4.64E+19	0.0186		12	1.18	8.82E+18	0.0196

*：チャンネル当たりの流量

Table 6.3　FTCC 標準ケースで使用した各種設定値

燃料体		出力密度	照射量	冷却材流量*	燃料体		出力密度	照射量	冷却材流量*
段番号	分割番号	(W/cm^3)	(n/cm^2)	(kg/s)	段番号	分割番号	(W/cm^3)	(n/cm^2)	(kg/s)
1	1	4.89	2.55E+19	0.0192	4	1	5.91	3.59E+19	0.0185
	2	4.89	3.19E+19	0.0192		2	5.63	3.66E+19	0.0185
	3	5.33	3.90E+19	0.0192		3	5.37	3.65E+19	0.0185
	4	5.98	4.50E+19	0.0192		4	5.16	3.59E+19	0.0185
	5	6.64	5.01E+19	0.0192		5	4.98	3.50E+19	0.0185
	6	7.28	5.47E+19	0.0192		6	4.81	3.40E+19	0.0185
	7	7.87	5.87E+19	0.0192		7	4.66	3.29E+19	0.0185
	8	8.42	6.21E+19	0.0192		8	4.52	3.17E+19	0.0185
	9	8.92	6.47E+19	0.0192		9	4.39	3.04E+19	0.0185
	10	9.40	6.62E+19	0.0192		10	4.30	2.87E+19	0.0185
	11	9.90	6.63E+19	0.0192		11	4.25	2.66E+19	0.0185
	12	10.41	6.44E+19	0.0192		12	4.28	2.40E+19	0.0185
2	1	10.50	6.45E+19	0.0189	5	1	2.83	2.10E+19	0.0189
	2	10.20	6.75E+19	0.0189		2	2.73	2.05E+19	0.0189
	3	10.06	6.96E+19	0.0189		3	2.63	1.98E+19	0.0189
	4	10.01	7.05E+19	0.0189		4	2.53	1.90E+19	0.0189
	5	9.98	7.08E+19	0.0189		5	2.43	1.83E+19	0.0189
	6	9.97	7.07E+19	0.0189		6	2.34	1.76E+19	0.0189
	7	9.95	7.02E+19	0.0189		7	2.25	1.69E+19	0.0189
	8	9.93	6.94E+19	0.0189		8	2.17	1.62E+19	0.0189
	9	9.93	6.81E+19	0.0189		9	2.09	1.54E+19	0.0189
	10	9.97	6.61E+19	0.0189		10	2.01	1.46E+19	0.0189
	11	10.12	6.26E+19	0.0189		11	1.95	1.36E+19	0.0189
	12	10.45	5.79E+19	0.0189		12	1.92	1.26E+19	0.0189
3	1	7.67	5.25E+19	0.0186	6	1	1.80	1.18E+19	0.0196
	2	7.44	5.25E+19	0.0186		2	1.71	1.18E+19	0.0196
	3	7.23	5.17E+19	0.0186		3	1.61	1.16E+19	0.0196
	4	7.05	5.07E+19	0.0186		4	1.53	1.13E+19	0.0196
	5	6.89	4.96E+19	0.0186		5	1.45	1.08E+19	0.0196
	6	6.73	4.83E+19	0.0186		6	1.38	1.03E+19	0.0196
	7	6.58	4.71E+19	0.0186		7	1.32	9.83E+18	0.0196
	8	6.43	4.58E+19	0.0186		8	1.26	9.26E+18	0.0196
	9	6.30	4.43E+19	0.0186		9	1.22	8.61E+18	0.0196
	10	6.20	4.26E+19	0.0186		10	1.18	7.79E+18	0.0196
	11	6.13	4.03E+19	0.0186		11	1.17	6.70E+18	0.0196
	12	6.15	3.78E+19	0.0186		12	1.18	5.42E+18	0.0196

*：チャンネル当たりの流量

Table 6.4　FTCC 及び TEMDIM から求めた燃料最高温度の比較（TEMDIM 同条件ケース）

項　目	燃料最高温度 出現位置	ノミナル 燃料最高温度（°C）	システマティックランダム 燃料最高温度（°C）
FTCC	2-12	1,273	1,466
TEMDIM	2-12	1,271	1,464
温度差	－	2	2

Table 6.5　FTCC 及び TEMDIM から求めた各部温度の差の範囲（TEMDIM 同条件ケース）

項　目	温度差の範囲（°C）				
各部温度	T_{cool}	T_{so}	T_{si}	T_{fo}	T_{fi}
ノミナル値	−3～ +2	−4～ +1	−4～ +1	−4～ +1	−4～ +1
システマティックランダム値	−3～ +3	−4～ +2	−4～ +2	−4～ +2	−4～ +2

T_{cool} ：冷却材

T_{so} ：黒鉛スリーブ外表面

T_{si} ：黒鉛スリーブ内表面

T_{fo} ：燃料コンパクト外表面

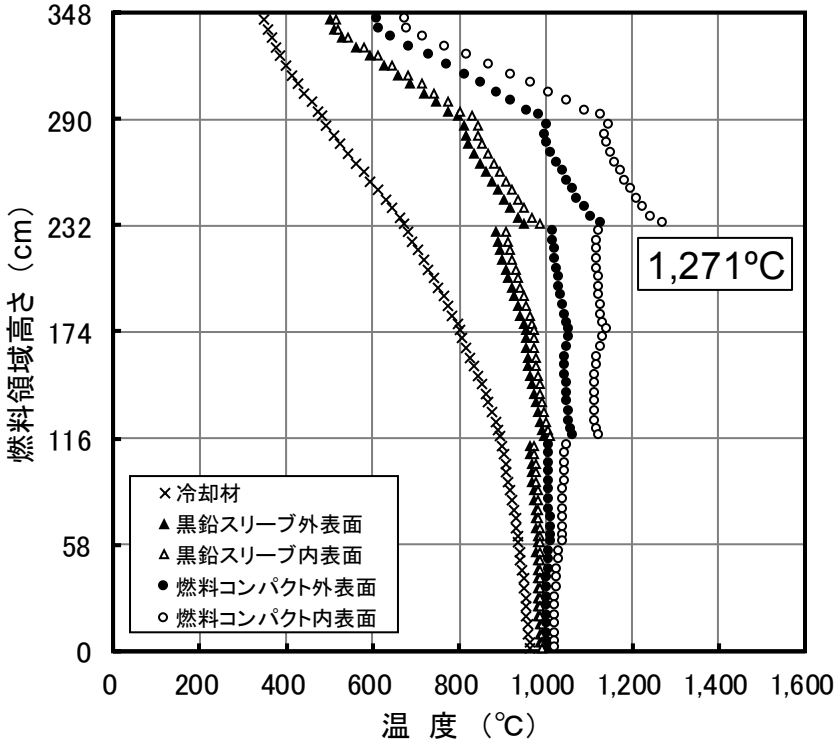
T_{fi} ：燃料コンパクト内表面

Table 6.6　燃料温度計算ファイル及び TEMDIM から求めた燃料最高温度の比較（FTCC 標準ケース）

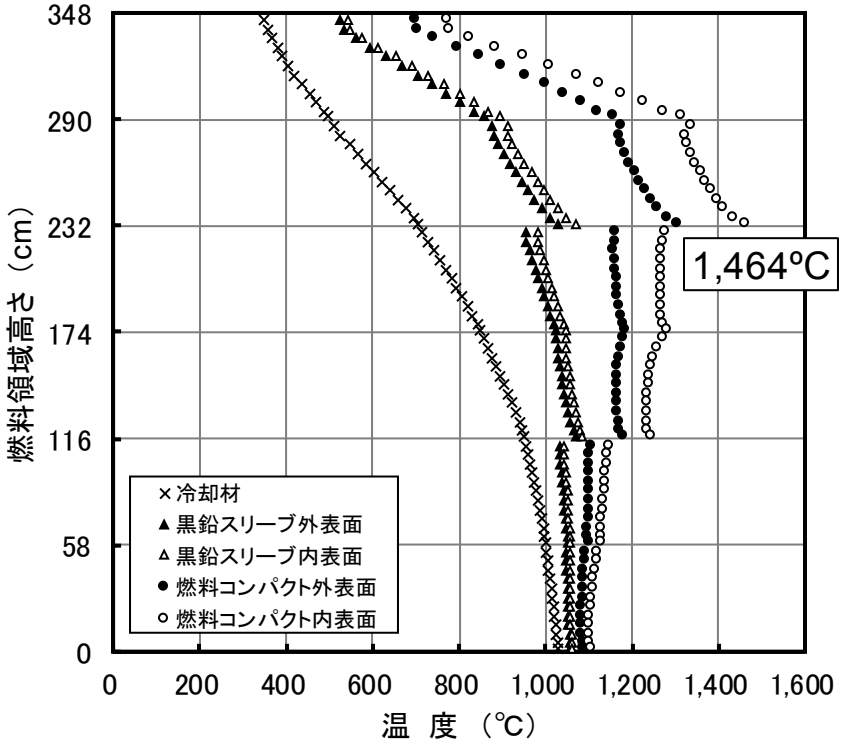
項　目	燃料最高温度 出現位置	ノミナル 燃料最高温度（°C）	システマティックランダム 燃料最高温度（°C）
FTCC	2-12	1,272	1,465
TEMDIM	2-12	1,271	1,464
温度差	－	1	1

Table 6.7　FTCC 及び TEMDIM から求めた各部温度の差の範囲（FTCC 標準ケース）

項　目	温度差の範囲（°C）				
各部温度	T_{cool}	T_{so}	T_{si}	T_{fo}	T_{fi}
ノミナル値	−3～ +3	−3～ +2	−3～ +2	−4～ +1	−4～ +1
システマティックランダム値	−3～ +4	−3～ +3	−3～ +3	−6～ +1	−6～ +1

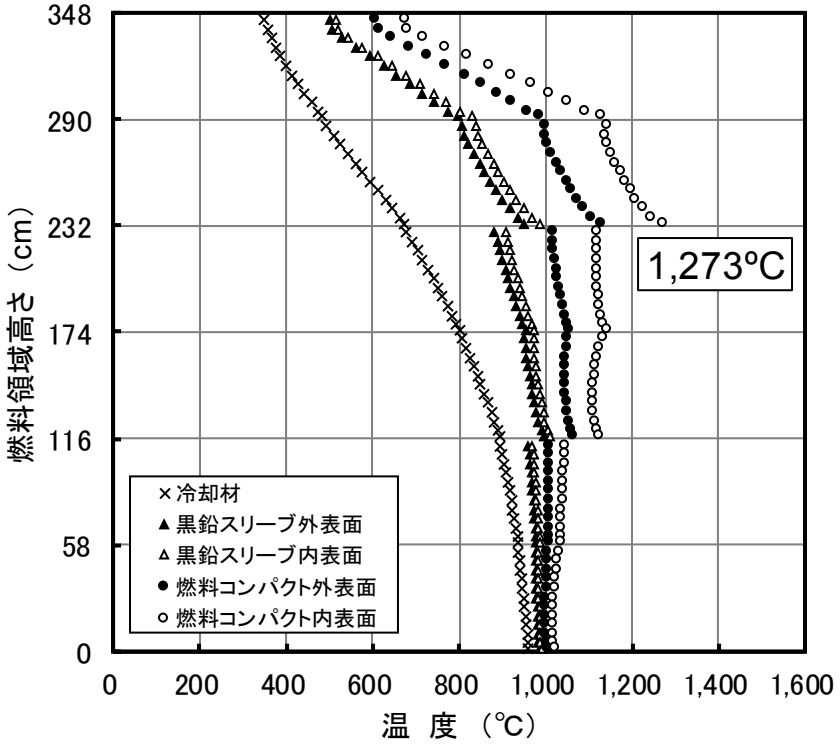


(a) ノミナル値

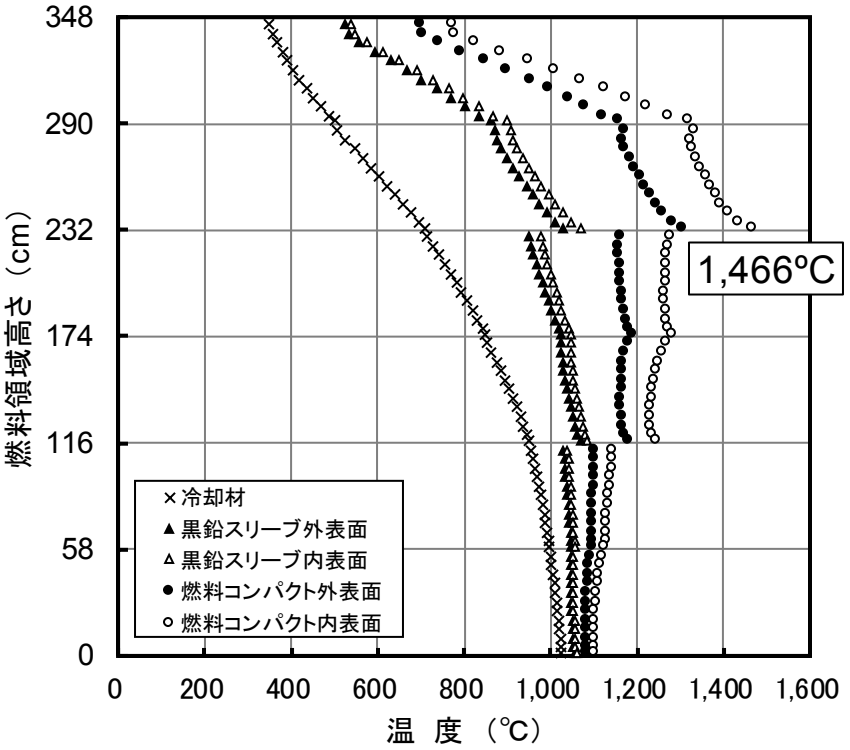


(b) システマティックランダム値

Fig. 6.1　TEMDIM による燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布

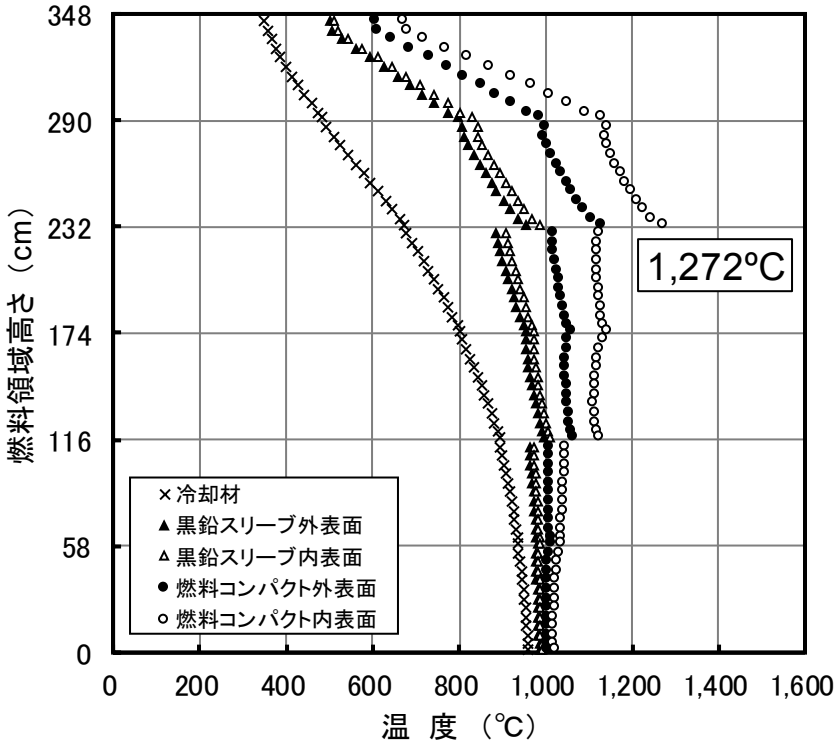


(a) ノミナル値

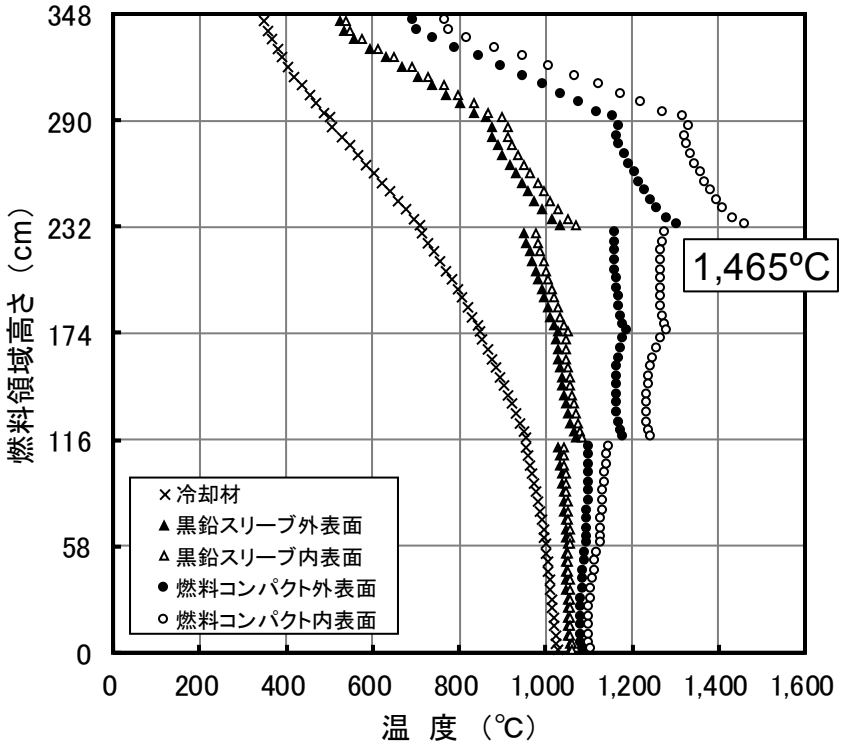


(b) システマティックランダム値

Fig. 6.2　FTCC による燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（TEMDIM 同条件ケース）



(a) ノミナル値



(b) システマティックランダム値

Fig. 6.3　FTCC による燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（FTCC 標準ケース）

７．工学的安全係数及び燃料冷却形態が燃料最高温度に与える効果

燃料最高温度の低減化を図ることは、燃料設計や核設計の熱的裕度を増加させると共に、燃料の健全性確保や原子炉出力の向上のために重要である。本章では、その低減化を達成するために、工学的安全係数の見直し及び燃料コンパクトの冷却形態の見直しを行い、それらの見直しが燃料最高温度に与える効果について FTCC により調べる。

７．１　工学的安全係数が燃料最高温度に与える効果

HTTR の設計時に設定された工学的安全係数は、過度の安全裕度を含んでいることから、燃料最高温度の評価値を低減するため、HTTR の試験データ等を用い、これまでに工学的安全係数の見直しが実施されてきた[(2-2)(7-1)]。HTR50S に対しては、システマティック因子見直し後の燃料最高温度 1,465˚C が既に求められている。そこで本節では、HTR50S に対するランダム因子見直し後の燃料最高温度を FTCC により求め、その効果について調べる。

（１）計算条件

計算条件は、工学的安全係数（ランダム因子）を除いて、第６章の検証計算（FTCC の標準ケース）で用いたものと同じとする。本計算で用いたランダム因子見直し後の工学的安全係数[(7-1)]を Table 7.1 に示す。表中の下線の値が、見直し後の値である。

（２）計算結果

Fig. 7.1 にランダム因子見直し後の燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（システマティックランダム値）を示す。工学的安全係数を見直した計算の結果、燃料最高温度の評価値は 1,465˚C（システマティック因子のみの見直し）から 1,455˚C（システマティック因子及びランダム因子の見直し）へと 10˚C 低下した。

（３）燃料最高温度低減化の効果

①燃料の健全性確保

燃料最高温度の低減化が燃料の健全性に与える影響を調べるため、HTR50S を対象とし、SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算用コード Code-B-2[(7-2)]を用いて、被覆燃料粒子 SiC 層（Fig. 1.2 参照）の破損率を試算した。燃料最高温度を 1,465˚C（参照ケース）及び 1,455˚C（ランダム因子見直し後の値）とした場合、燃焼度 51 GWd/t（HTR50S における燃料の燃焼度は 33 GWd/t を想定しているが、この燃焼度では両者共 SiC 層の破損が生じない結果となったことから、より燃焼が進んだ状態で比較）での SiC 層の破損率は、各々0.166%及び 0.134%（参照ケースに比べ 19%低下）となった。これらの結果から、燃料最高温度の低減化によって、燃料が高燃焼度化しても、その健全性維持に貢献できることがわかった。

②原子炉出力の向上

燃料最高温度を 10°C 低減化できた場合に、原子炉の熱出力をどの程度向上させられるかを試算した。HTR50S において、冷却材流量を 22.4 kg/s、原子炉入口冷却材温度を 325°C とし、原子炉出口冷却材温度を 750°C から 760°C に増加させた場合、熱出力を式（2.9）で評価すると、熱出力は 50 MW から 51.1 MW になり、約 2%の出力向上を図ることができる。

７．２　燃料冷却形態が燃料最高温度に与える効果

本節では、燃料コンパクトの冷却形態（方法）として、燃料棒の端栓に穴を空けることで中空燃料コンパクトの中心孔に冷却材を流し、燃料コンパクト内面を直接冷却する方法及び燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップを無くしたギャプレス燃料（一体型燃料）[7-3]を使う方法を取り上げる。２つの冷却方法を用いた場合の燃料最高温度を FTCC により求め、その効果について調べる。

（１）計算条件

Fig. 7.2 に、燃料棒の各冷却方法に対する計算モデルを示す。なお、第６章の検証計算結果を比較基準とするため、本計算では工学的安全係数にランダム因子見直し後の値を用いないこととする。

① 参照冷却法

参照冷却法において、燃料コンパクトは、Fig. 7.2(a)に示されるように、黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の環状流路を流れる冷却材によって間接的に冷却される。計算条件は、第６章の検証計算（FTCC の標準ケース）と同様である。

② 中空燃料コンパクトの中心孔冷却法

中空燃料コンパクトの中心孔冷却法において、燃料コンパクトは、Fig. 7.2(b)に示されるように、燃料コンパクトの中空部冷却流路及び黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の環状流路の両方を流れる冷却材によって直接的及び間接的に冷却される。中心孔流路及び環状流路の冷却材流量は、流量に対する燃料温度への影響を調べるため、Table 7.2 に示すように 12 段階に分けて配分した。その他の計算条件は、第６章の検証計算（FTCC の標準ケース）と同様である。

③ 一体型燃料によるギャップレス冷却法

一体型燃料によるギャップレス冷却法では、燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップが存在しない。燃料コンパクトは、Fig. 7.2(c)に示されるように、黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の環状流路を流れる冷却材によって間接的に冷却される。この場合、燃料コンパクト外面の直接冷却に近い効果が得られると考えられる。なお、黒鉛スリーブの厚さは、ギャップ幅分増加する条件とした。また、燃料コンパクトの中空部には、黒鉛製の支持棒が挿入される設計になっているが[7-3]、ここでは保守的に、参照冷却と同様にボイド（燃料コンパクト内面で断熱）とした。その他の計算条件は、第６章の検証計算（FTCC の標準ケース）と同様である。

（２）計算結果

各冷却方法に対する燃料最高温度の結果を Table 7.2 に、燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（システマティックランダム値）を Fig. 6.3(b)、Fig. 7.3 及び Fig. 7.4 に示す。①参照冷却法におけ

る燃料最高温度は 1,465˚C、②中空燃料コンパクトの中心孔冷却法における燃料最高温度は、中心孔流路への流量配分によって変化し、中心孔流路に 0%、環状流路に 100%流量配分した場合最大となり 1,465˚C（①と同じケース）、中心孔流路に 60%、環状流路に 40%流量配分した場合最小となり 1,119˚C、中心孔流路に 16%、環状流路に 84%流量配分した場合（各流路の断面積比で流量配分した場合）1,255˚C 及び③一体型燃料によるギャップレス冷却法における燃料最高温度は 1,269˚C となった。中空燃料コンパクトの中心孔冷却法（各流路の断面積比で流量配分した場合）は、一体型燃料によるギャップレス冷却法とほぼ同等の冷却性能を持っており、２つの燃料冷却法による燃料最高温度は、参照冷却法に比べて約 200˚C 低下した。

以上のまとめとして、各冷却方法による最高温度の比較を Fig. 7.5 に示す。

（３）燃料最高温度低減化の効果

①燃料の健全性確保

燃料最高温度の低減化が燃料の健全性に与える影響を調べるため、７．１節（３）①と同様に、被覆燃料粒子 SiC 層の破損率を試算した。燃料最高温度を 1,465˚C（参照ケース）及び 1,265˚C（中空燃料コンパクトの中心孔冷却及び一体型燃料によるギャップレス冷却の代表値）とした場合、燃焼度 51 GWd/t での SiC 層の破損率は、各々0.166%及び 0.00012%（参照ケースに比べ 1/1,000 以下）となった。これらの結果から、燃料最高温度の低減化によって、燃料が高燃焼度化しても、その健全性維持に、工学的安全係数の見直しに比べて大きく貢献できることがわかった。

②原子炉出力の向上

燃料最高温度を 200˚C 低減化できた場合に、原子炉の熱出力をどの程度向上させられるかを、７．１節（３）②と同様に試算した。HTR50S において、冷却材流量を 22.4 kg/s、原子炉入口冷却材温度を 325˚C とし、原子炉出口冷却材温度を 750˚C から 950˚C に増加させた場合、熱出力を式（2.9）で評価すると、熱出力は 50 MW から 73.4 MW になり、約 47%の出力向上を図ることができる。

（４）中空燃料コンパクトの中心孔冷却及び一体型燃料によるギャップレス冷却実現への課題

中空燃料コンパクトの中心孔冷却及び一体型燃料によるギャップレス冷却を実現するには、以下のような課題がある。

・中心孔冷却法実現のためには、冷却材流路を作るための燃料棒端栓の加工、流路の増加による流路ネットワークの複雑化、燃料コンパクト内面の直接冷却に関連した安全性（燃料の酸化等）といった課題がある。ただし、燃料の酸化に関しては、SiC 母材の燃料コンパクトを利用する等、耐酸化性のある材料を採用することによって解決可能である。また、層流化による熱伝達の低下が生じないか、確認する必要がある。

・ギャップレス冷却法の実現のためには、一体型燃料の成形方法、黒鉛スリーブの代わりに燃料コンパクトを保持する黒鉛バインダーの強度、黒鉛バインダーの照射特性といった課題がある。一体型燃料の開発は、原子力機構で現在行われている。

Table 7.1　ランダム因子見直し後の工学的安全係数

(a) システマティック因子

項　目	冷却材 温度差 上昇因子	膜 温度差 上昇因子	スリーブ 温度差 上昇因子	ギャップ 温度差 上昇因子	コンパクト 温度差 上昇因子
熱出力	1.00	1.02	1.02	1.02	1.02
半径方向出力分布	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
軸方向出力分布	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
冷却材流量	1.01	1.008	1.0	1.0	1.0
流量配分	1.02	1.016	1.0	1.0	1.0
炉心入口冷却材温度	HTTR：＋14℃、HTTR 以外の炉：＋20℃				

(b) ランダム因子

項　目	冷却材 温度差 上昇因子	膜 温度差 上昇因子	スリーブ 温度差 上昇因子	ギャップ 温度差 上昇因子	コンパクト 温度差 上昇因子
燃料コンパクト内径	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
燃料コンパクト外径	0.0	0.0	0.0	0.37	0.012
黒鉛スリーブ内径	0.0	0.0	0.012	0.30	0.0
黒鉛スリーブ外径	0.0	0.015	0.011	0.0	0.0
冷却孔径	0.0	0.008	0.0	0.0	0.0
燃料有効長	0.0	0.002	0.002	0.002	0.002
燃料核直径	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
燃料核密度	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
濃縮度	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
ウラン量	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
冷却材比熱	0.002	0.001	0.0	0.0	0.0
冷却材熱伝導率	0.0	0.018	0.0	0.03	0.0
冷却材粘性係数	0.0	0.012	0.0	0.0	0.0
照射変形	0.0	0.0	0.0	0.21	0.0
ギャップコンダクタンス	0.0	0.0	0.0	0.10	0.0
コンパクト偏心効果	0.0	0.041	0.041	0.041	0.041
出力分布	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
流量配分	0.04	0.032	0.0	0.0	0.0

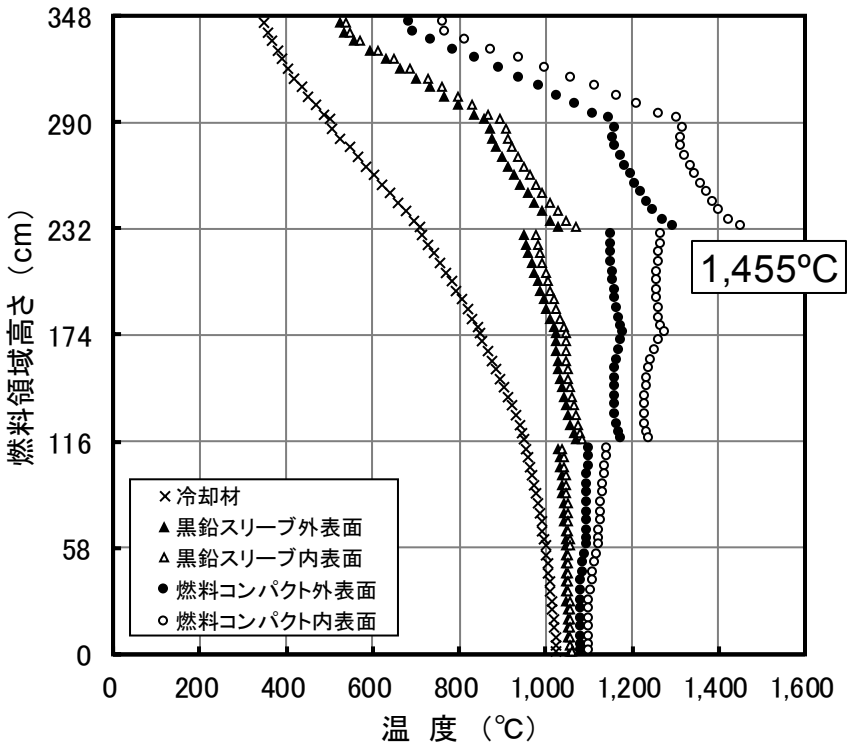


Fig. 7.1　ランダム因子見直し後の燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布
（システマティックランダム値）

Table 7.2　各冷却方法における燃料最高温度

冷却方法	冷却材流量配分(%)		燃料最高温度(℃)
	中心孔流路	環状流路	
① 参照冷却法	－	100	1,465
② 中空燃料コンパクトの中心孔冷却法	0	100	1,465
	10	90	1,308
（各流路の断面積比で流量配分した場合）	16	84	1,255
	20	80	1,228
	30	70	1,175
	40	60	1,142
	50	50	1,125
（燃料最高温度が最小となる場合）	60	40	1,119
	70	30	1,131
	80	20	1,146
	90	10	1,216
	100	0	1,361
③ 一体型燃料によるギャップレス冷却法	－	100	1,269

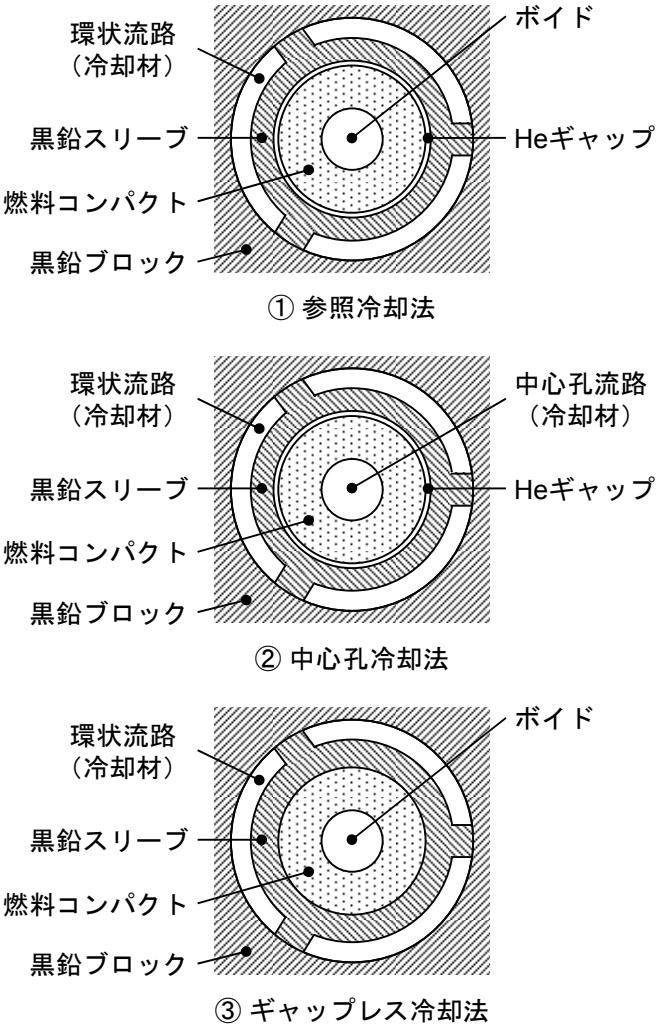
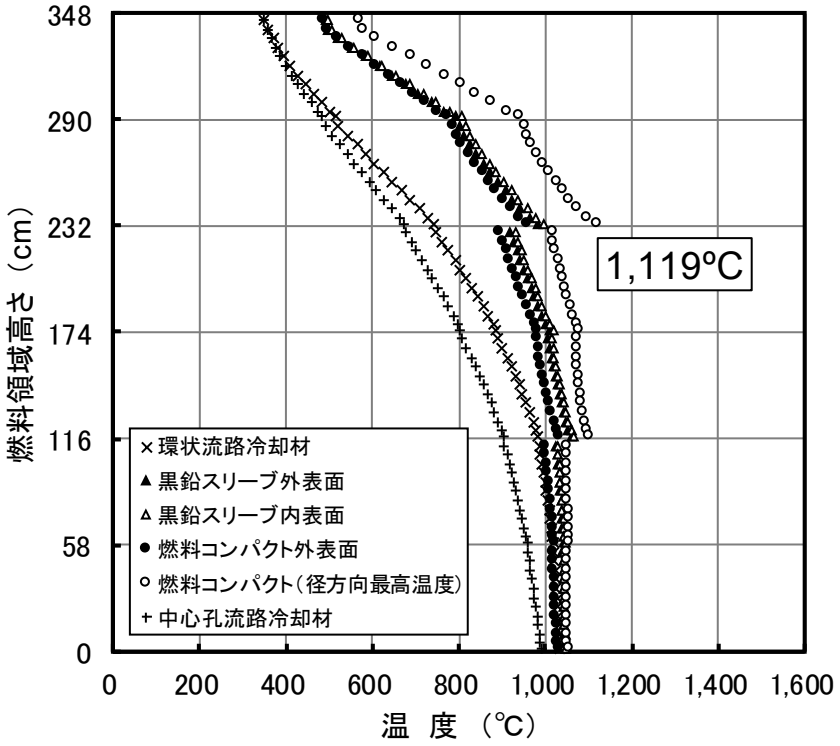
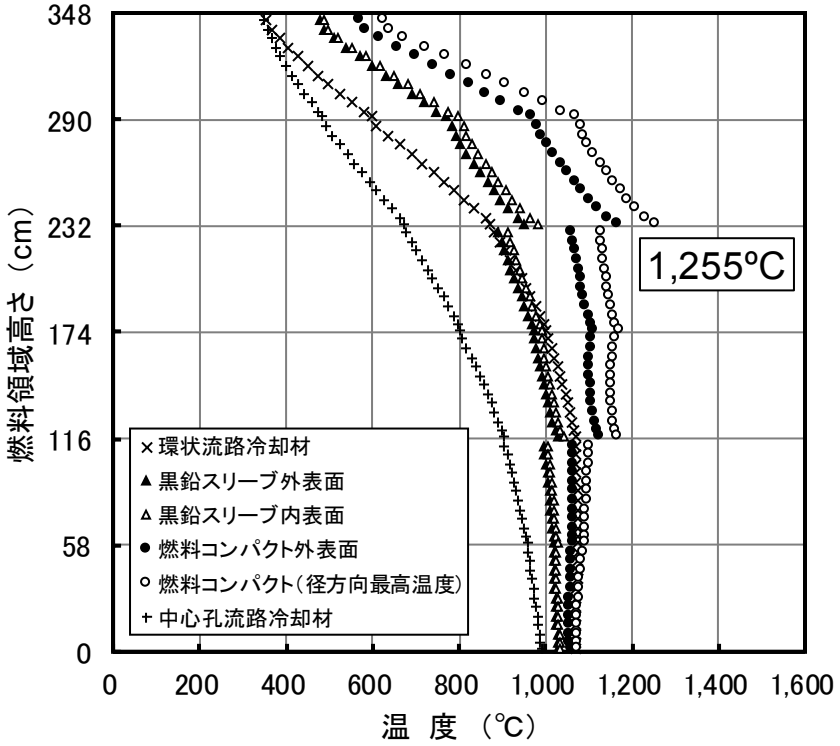


Fig. 7.2　各冷却方法の計算モデル比較（水平断面）



(a) 中心孔流路に 60%、環状流路に 40%で流量配分した場合；システマティックランダム値



(b) 中心孔流路と環状流路の断面積比（16%:84%）で流量配分した場合；システマティックランダム値

Fig. 7.3　中空燃料コンパクトの中心孔冷却法に対する燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布

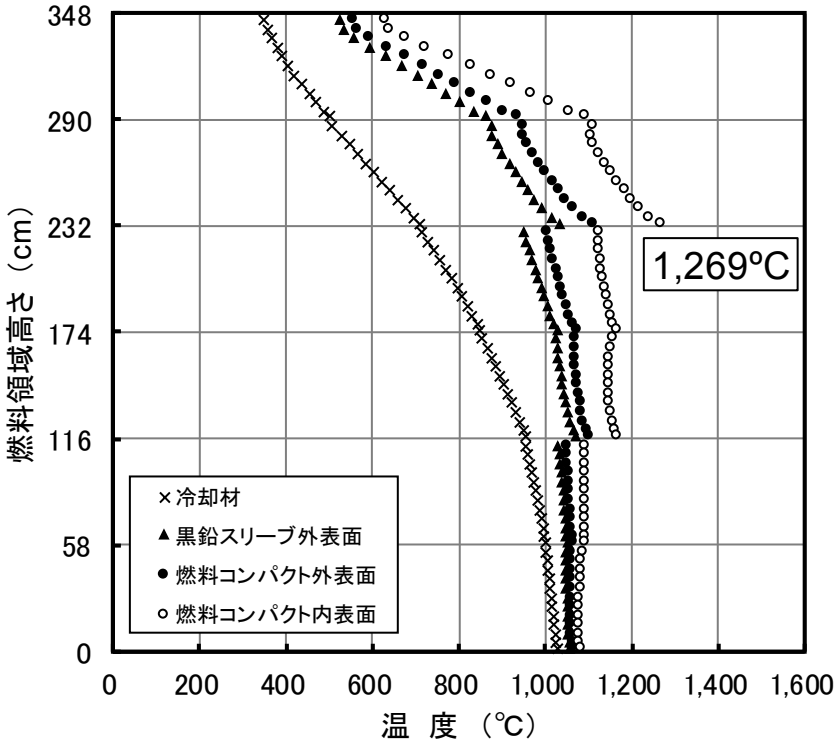


Fig. 7.4　一体型燃料によるギャップレス冷却法に対する燃料最高温度出現チャンネルの軸方向温度分布（システマティックランダム値）

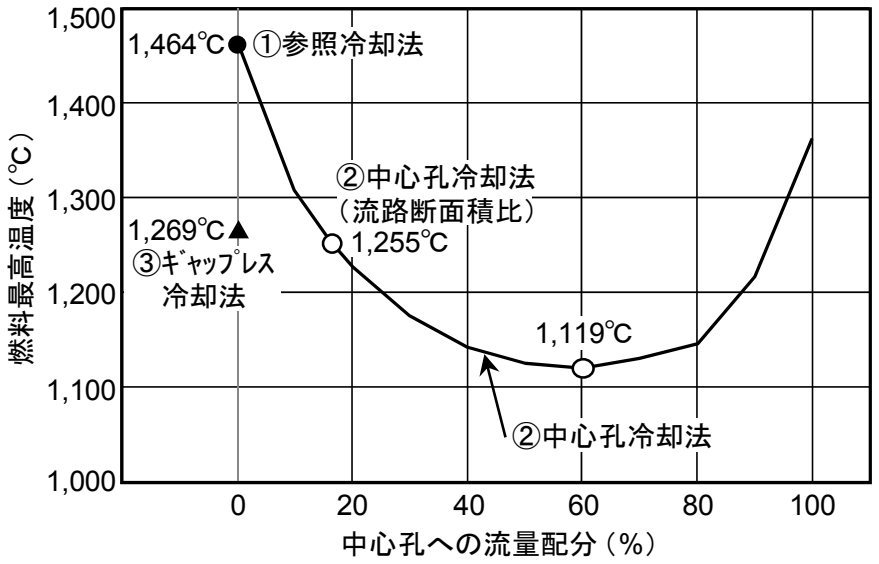


Fig. 7.5　各冷却方法による最高温度の比較

８．結　言

（１）FTCC の開発

燃料最高温度を評価するための HTTR 設計コードにおけるユーザビリティと機能を改良するために、新しい燃料温度計算コード FTCC を開発した。FTCC は、HTTR 設計コードと比較して、次のような特長を有している。

- 実行プラットホームの拡大（Windows 及び UNIX）
- 計算精度の向上
- 入力データを作成する上でのユーザー負担の軽減
- 計算対象カラムは、炉心の全燃料カラム
- 燃料コンパクト中心孔の冷却計算機能の追加

また、HTR50S を対象とした検証計算を行い、FTCC による燃料最高温度は、HTTR 設計コードと同等の計算結果になることを確認した。

今後、FTCC は、高温ガス炉用熱流動設計コードの１つとして使用される。

（２）工学的安全係数及び燃料冷却形態が燃料最高温度に与える効果

検証された FTCC を用い、工学的安全係数及び燃料冷却形態（方法）の見直しが燃料最高温度に与える効果について、HTR50S を対象に調べた。その結果、次のことがわかった。

- 工学的安全係数（ランダム因子）の見直しによって、燃料最高温度の評価値は 1,465˚C から 1,455˚C へ 10˚C 低下した。
- 燃料の冷却方法として、燃料コンパクトの中心孔冷却を用いた場合、燃料最高温度は 1,465˚C から 1,119˚C（中心孔流路 60%、環状流路 40%の割合で冷却材流量を配分した場合）へ 346˚C 及び 1,255˚C（各流路の断面積比で冷却材流量を配分した場合）へ 210˚C 低下した。
- 燃料の冷却方法として、一体型燃料によるギャップレス冷却を用いた場合、燃料最高温度は 1,465˚C から 1,269˚C へ 196˚C 低下した。

以上のように、工学的安全係数及び燃料冷却方法の見直しによって燃料最高温度の低減化が図れることがわかった。特に、燃料冷却方法の見直しによる低減効果は高く、燃料設計や核設計の熱的裕度を増加させると共に、燃料の健全性確保及び原子炉出力の向上に貢献できるが、実現には課題も残されている。

謝　辞

本報告書をまとめるにあたり、原子力機構高温ガス炉水素・熱利用研究センターの後藤実研究主幹及び相原純研究副主幹に御助言を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

参考文献

（1－1） 大橋弘史，佐藤博之，田澤勇次郎，他：「小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅰ）－基本仕様及び系統概念設計－」，JAEA-Technology 2011-013，2011，67p.

（1－2） 後藤実，関靖圭，稲葉良知，他：「小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅱ）－核設計－」，JAEA-Technology 2012-017，2012，29p.

（1－3） 稲葉良知，佐藤博之，後藤実，他：「小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅲ）－炉心熱流動設計－」，JAEA-Technology 2012-019，2012，142p.

（1－4） 大橋弘史，佐藤博之，Xing L. Yan，他：「小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅳ）－プラント設計及び技術的成立性評価－」，JAEA-Technology 2013-016，2013，176p.

（1－5） 大橋弘史，佐藤博之，田澤勇次郎，他：「小型高温ガス炉システムの概念設計（Ⅴ）－安全設計および安全予備評価－」，JAEA-Technology 2013-017，2014，71p.

（1－6） S. Saito，T. Tanaka，Y. Sudo，*et al.*：“Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”，JAERI 1332，1994，247p.

（1－7） 丸山創，藤本望，山下清信，他：「高温工学試験研究炉炉心熱流力設計」，JAERI-M 88-255，1988，133p.

（1－8） 丸山創，村上知行，木曽芳広，数土幸夫：「炉内流動解析コード FLOWNET の検証」，JAERI-M 88-138，1988，39p.

（1－9） 丸山創，藤本望，藤井貞夫，他：「燃料温度解析コード TEMDIM の検証」，JAERI-M 88-170，1988，72p.

（2－1） S. Maruyama，K. Yamashita，N. Fujimoto，*et al.*：“Evaluation of Hot Spot Factors for Thermal and Hydraulic Design of HTTR”，J. Nucl. Sci. Technol.，30 [11]，1993，pp. 1186-1194.

（2－2） 栃尾大輔，角田淳弥，高田英治，他：「高温ガス炉 HTTR の高温試験運転における燃料温度の評価」，日本原子力学会和文論文誌，Vol. 5，No. 1，2006，pp. 57-67.

（2－3） 宮本喜晟：「炉心熱設計における高温点係数と不確かさの研究」，日本原子力学会誌，Vol. 12，No. 4，1970，pp. 179-186.

（2－4） 独立行政法人 日本原子力研究開発機構：「独立行政法人 日本原子力研究開発機構　大洗研究開発センター（北地区）原子炉設置許可申請書（完本）［別冊３ HTTR］」，2006.

（2－5） 石原正博，伊与久達夫，豊田純二，他：「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説」，JAERI-M 91-153，1991，51p.

（2－6） 菊池輝男，岩本多実，井川勝市：「キャプセル照射による高温ガス炉用燃料棒の伝熱物性の測定（Ⅰ）」，JAERI-M 82-134，1982，25p.

（7－1） Y. Inaba，D. Tochio，S. Ueta and S. Nakagawa：“ Evaluation of Maximum Fuel Temperature in HTTR”，J. Nucl. Sci. Technol.，51 [11-12]，2014，pp. 1336-1344.

（7－2） 相原純、大橋弘史，沢和弘，橘幸男：「SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算のための Code-B-2」，JAEA-Data/Code 2012-030，2013，13p.

（7－3）　片西昌司，武井正信，中田哲夫，國富一彦：「高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）用高燃焼度燃料の成立性評価,（Ⅱ）」，日本原子力学会和文論文誌，Vol. 3, No. 1，2004，pp. 67-75.

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
物質量	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
速さ，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	1
比透磁率[b]	（数字の）　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。

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[c]	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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	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	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
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
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	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
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	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	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 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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=10^5Pa
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
バーン	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単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	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}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G 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 ≙ $(10^3/4\pi)$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		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
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）