



JAEA-Testing

2024-008

DOI:10.11484/jaea-testing-2024-008

JAEA-Testing

## 1次元熱計算コード GENGTC の計算手法の改良

Calculation Method Improvement of the Original One-dimensional Code GENGTC

冬島 拓実 佐谷戸 夏紀 大塚 薫 遠藤 泰一  
飛田 正浩 竹本 紀之

Takumi FUYUSHIMA, Natsuki SAYATO, Kaoru OTSUKA, Yasuichi ENDO  
Masahiro TOBITA and Noriyuki TAKEMOTO

大洗原子力工学研究所  
環境技術開発部

Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development  
Oarai Nuclear Engineering Institute

March 2025

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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).  
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.  
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

## 1 次元熱計算コード GENGTC の計算手法の改良

日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所 環境技術開発部

冬島 拓実、佐谷戸 夏紀、大塚 薫、遠藤 泰一、飛田 正浩\*、竹本 紀之

(2024 年 12 月 5 日受理)

材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor : JMTR）では燃料試料及び材料試料を照射するため、キャプセルに試料を装荷して照射試験を行ってきた。照射試験では、多種多様な照射試料を目標とする温度で照射するため、キャプセルの熱計算が重要である。令和 3 年 3 月に JMTR は廃止措置計画が認可され、環境技術開発部では現在、JMTR の代替としての海外の試験研究炉を用いた照射試験を実施している。海外の試験研究炉を用いた照射試験に向けてキャプセルの設計・検討に必要な熱計算を行う際、米国のオークリッジ国立研究所で開発された 1 次元熱計算コード GENGTC を用いている。GENGTC はこれまでパソコン性能の向上に伴って改良・拡張が繰り返されてきたが、従来の GENGTC を用いたプログラムには機能の一部に不良事象箇所が確認されていた。そこで、その原因を究明してプログラムを修正するとともに、FORTRAN77 言語のプログラムから Excel のマクロ計算機能を使用した Visual Basic 言語のプログラムに変更した。また、当該コードをさらに利用しやすくするためのプログラムの整備を行った。本稿はそれらの改良箇所について報告を行うものである。

## Calculation Method Improvement of the Original One-dimensional Code GENGTC

Takumi FUYUSHIMA, Natsuki SAYATO, Kaoru OTSUKA, Yasuichi ENDO, Masahiro TOBITA\*  
and Noriyuki TAKEMOTO

Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development,  
Oarai Nuclear Engineering Institute,  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 5, 2024)

In Japan Materials Testing Reactor (JMTR), irradiation tests had been conducted by loading specimens into capsules for irradiating fuels and materials. The thermal design calculation of capsules is significant to irradiate various types of specimens at the target temperature. The decommissioning plan of JMTR was approved in March 2021, and the Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development is currently working on irradiation plans by foreign testing reactors as an alternative for JMTR.

A one-dimensional thermal calculation code “GENGTC”, which was developed at the Oak Ridge National Laboratory in U.S., is used for capsule design and irradiation tests. GENGTC has been repeatedly improved as improvements of computer performance, but there were some defects in calculation function.

Therefore, we investigated the cause of the problem and changed the program from the currently used FORTRAN77 language program to a Visual Basic language program that uses the macro calculation function of Excel. In addition, the program was improved to make it easier to use the calculation code.

Keywords: JMTR, Irradiation Test, One-dimensional Thermal Calculation, GENGTC

---

\* Nuclear Engineering Co.,Ltd.

目 次

1. 序論	1
2. GENGTC について	2
2.1 キャプセル設計における GENGTC	2
2.2 GENGTC の概要	2
2.3 GENGTC の改良の背景	3
3. GENGTC-K への更新	4
3.1 単位系の統一	4
3.2 GENGTC-PC と GENGTC-K の互換性	4
3.3 入力方法の改良	4
3.4 出力方法の改良	4
3.5 計算条件設定シートの追加	5
3.6 マクロ実行ボタンの追加	5
3.7 材料特性データシートの改良	6
4. 不具合の修正及び機能拡張	7
4.1 熱膨張干渉への対応	7
4.1.1 熱膨張干渉の原因	7
4.1.2 収束演算判定結果の表示	8
4.2 燃料試料計算の不具合	9
4.2.1 燃料中心温度計算式	9
4.2.2 ペレット内出力密度の分割領域計算機能の追加	10
4.2.3 ペレット内の温度による密度変化を考慮した計算機能の追加	10
4.3 収束演算結果のグラフ表示機能の追加	11
4.4 目標照射温度の寸法算出機能の追加	11
5. まとめ	13
謝辞	14
参考文献	14
付録 GENGTC と NISA の計算結果の比較	32

Contents

1. Introduction	1
2. About GENGTC	2
2.1 GENGTC for the capsule design	2
2.2 Outline of GENGTC	2
2.3 Background of GENGTC improvement	3
3. Update to GENGTC-K	4
3.1 Unification of units	4
3.2 Compatibility between GENGTC-PC and GENGTC-K	4
3.3 Improvement of the input method	4
3.4 Improvement of the output method	4
3.5 Add the calculation condition setting sheet	5
3.6 Add the macro execute button	5
3.7 Improvement of the material properties data sheet	6
4. Trouble shootings and enhancements	7
4.1 Dealing with the thermal expansion interference	7
4.1.1 Causes of the thermal expansion interference	7
4.1.2 Display of the convergence calculation judgement	8
4.2 Defects of the fuel capsule calculation	9
4.2.1 Fuel center temperature formulas	9
4.2.2 Add the region dividing calculation function for output density in pellets	10
4.2.3 Add the function considering density change due to temperature in pellets	10
4.3 Graphical display of the convergence calculation result	11
4.4 Add the dimension calculation function at target irradiation temperature	11
5. Summary	13
Acknowledgements	14
References	14
Appendix Comparison of calculation results between GENGTC and NISA	32

## 1. 序論

環境技術開発部では、これまで多様な照射ニーズに応えるため数多くの照射キャプセル（以下「キャプセル」という。）を設計・開発してきた。令和3年3月にJMTRは廃止措置計画が認可され、環境技術開発部では現在、材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor: JMTR）の代替としての海外の試験研究炉を用いた照射試験を計画している。

照射中はキャプセルの構成材がガンマ線により発熱するが、原子炉一次冷却水がキャプセル外筒表面を絶えず流れることでキャプセルを冷却する。この発熱と冷却の熱バランスによって照射中のキャプセル内温度が成り立っている。この熱バランスの計算（照射試料温度計算）には、従来から試料の径方向の1次元熱計算のため GENGTC（Generalized Gap Temperature Calculation）<sup>1)</sup>が用いられてきた。このキャプセルの熱計算について、有限要素法を用いた3次元熱計算コード NISA<sup>2)</sup>により最終的な詳細分布を算出するようになってからも、キャプセル構成材の種類及び寸法の見当を付ける際には、計算が簡易で結果を早く出すことができる GENGTC を用いてきた。GENGTC は米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された1次元熱計算コードであるが、開発当時のプログラムをベースに現在でも改良・拡張が繰り返されている<sup>3),4)</sup>。

GENGTC はかつて BASIC 言語で記述された大型計算機を用いる計算コードであったが、パソコン機能の向上に伴い、パソコンでも使用できるように FORTRAN77 言語に変換されてきており、環境技術開発部においては DOS（Disk Operation System）と呼ばれるシステムを用いた「GENGTC-PC」が使用されてきた。しかし、DOS は CUI（Character User Interface）環境であるため、全ての命令をキーボードにより入力する必要があり、操作が煩雑であった。そこで、FORTRAN77 言語システムの「GENGTC-PC」のプログラムを Visual Basic 言語システムに移植することでマクロ計算機能を用いて Excel で実行できるようにし、このプログラムを「GENGTC-K」と呼ぶこととした。このプログラムの変更に伴い、計算コードの利便性を高めるプログラムの改良や不具合の修正も実施した。

## 2. GENGTC について

### 2.1 キャプセル設計における GENGTC

照射試験では、キャプセルと呼ばれる容器（外径 40～65 mm×長さ約 800 mm）に試料を格納して原子炉内で照射する。キャプセルはそれぞれの照射試験の目的に合わせた照射条件を達成するため、照射中の試料の温度制御等ができる機構を有している。特に燃料及び材料キャプセルにおいては照射中の試料温度が重要なパラメータであり、現在では目標照射温度の±5℃以内のような高精度な照射温度制御が主流となっている。そのような高精度な照射温度制御を実現するためには、キャプセル設計段階で詳細な熱計算が重要である。

GENGTC は試料の径方向の 1 次元熱計算コードであることから、キャプセル軸方向に熱が移動しない断熱条件での計算となる。また、中心軸対称の円形モデルしか扱うことができないことから、照射試料が四角形の場合やキャプセル中心以外に配置された場合には、中心軸対称の円形モデルへの計算モデルの補正を行っている。以上のような GENGTC 特有の制約があるため、キャプセル設計の熱計算の最終的な確認には、3 次元有限要素解析コード NISA を用いて計算結果の検算を行っている（GENGTC の計算モデルの補正の妥当性については付録を参照）。キャプセル設計の寸法・材質の決定においては、簡便で計算の早い GENGTC と計算は遅いが精度の高い NISA の 2 つの計算コードを組み合わせ使用することが多い。

### 2.2 GENGTC の概要

GENGTC では、以下の計算条件を入力して計算を実行することで、キャプセル構成材の熱膨張を考慮した各部材の温度や寸法が求められる。

- ① 冷却水温度
- ② 冷却水側の外筒表面の熱伝達率
- ③ キャプセル構成材の半径寸法
- ④ 構成材及びガス層の材料  
(密度、熱伝導率、線膨張率、輻射率、核発熱率に係る材料依存係数)
- ⑤ ガンマ発熱率
- ⑥ ヒータ線出力

熱膨張を考慮した計算では、まず構成材の初期寸法に対して計算条件のガンマ発熱、ヒータ発熱による熱計算を実行して各構成材の温度分布を算出する。その計算結果の温度分布における各構成材の熱膨張変化を考慮した寸法を算出する。このような熱計算と熱膨張による寸法変化を考慮した計算を繰返し、計算結果を収束させることで熱膨張を考慮した温度や寸法の計算を行っている。この GENGTC-PC の計算フローチャートを Fig. 2.1 に示す。初期の GENGTC においては 12 回の繰返し計算で計算結果がほとんど収束するとされていたが、GENGTC-PC 以降の計算では計算機器の性能向上により 100 回までの繰返し計算を行う設定となっている。現在ではこの 100 回の繰返し計算を終了した計算結果が最終寸法及び計算温度として表示される。



### 2.3 GENGTC の改良の背景

従来の GENGTC-PC は DOS と呼ばれるシステム上で計算が行われていた。DOS は CUI 環境であるため、全ての命令をキーボードにより入力する必要があり、操作が煩雑であった。また、計算条件を入力する際は、コマンドに対応する順に各計算条件を入力する必要があること及び各データ間に空白を設ける必要があることから、計算条件の設定にも時間を要した。これらのことから、これまでの GENGTC-PC は数値入力の範囲が不明瞭であり、入力ミスによる計算エラーが度々発生していた。そこで、これまでの DOS 版の FORTRAN77 言語システムのプログラムを Visual Basic 言語システムに移植するするとともに、Excel のマクロ計算機能を利用した新たな機能の追加や以前より見つけていたプログラムの不具合の修正等を行った。GENGTC-PC から GENGTC-K への更新について第 3 章、以前より見つけていた不具合の修正及びその修正に伴う機能の追加について第 4 章で述べる。

### 3. GENGTC-K への更新

GENGTC-PC から GENGTC-K への更新にあたって、変更した点や特筆すべき点について第 3.1～3.7 節に示す。

#### 3.1 単位系の統一

GENGTC-PC では、寸法等の単位を“cm”に統一してプログラムされていた。しかし、「SI 単位系」への統一以降、設計図面や他の計算コード等において一般的に使用される単位は“mm”である。そのため、GENGTC-PC で熱計算を行う際は“mm”で記載された図面の寸法を“cm”に換算して入力する手間があった。そこで、GENGTC-K では寸法等の単位を全て“mm”に統一した。これにより、単位を“mm”から“cm”に換算する手間を省くこととなり、その結果、単位換算による入力ミス及び評価ミスを無くすことができた。

#### 3.2 GENGTC-PC と GENGTC-K の互換性

GENGTC-PC の入力・出力ファイルは txt 形式であり、GENGTC-K の入力・出力ファイルは xlsx 形式であるため、ファイル形式が異なる。しかし、GENGTC-PC の txt 形式の入力ファイルを csv 形式に変換することで、GENGTC-K で読み込むことができるようにした。また、GENGTC-K で入力した入力ファイルを csv 形式で書き出すことにより、GENGTC-PC の入力ファイルを作成することができるようにした。このように GENGTC-PC 及び GENGTC-K の互換性をとり、利便性を向上させた。ただし、第 3.1 節で述べたように、GENGTC-PC 及び GENGTC-K では寸法等の単位が異なるため、変換の際には注意が必要である。

#### 3.3 入力方法の改良

GENGTC-PC の入力ファイルを Fig. 3.1 に示す。第 2.3 節で述べたとおり、GENGTC-PC の計算条件の設定は煩雑で入力ミスが度々発生していた。そこで、GENGTC-K では Fig. 3.2 のように計算条件の入力を Excel シート上で行えるようにした。入力項目は従来の GENGTC-PC と変わらないが、Excel は GUI (Graphical User Interface) 環境であることからマウスを用いて計算条件の入力等ができるため操作が直感的になったほか、各パラメータを水色のセルに入力するようにしたことで数値入力の範囲が明確になった。また、Fig. 3.3 のように各パラメータに関する簡単なコメントが表示されるようにした。

#### 3.4 出力方法の改良

GENGTC-PC の出力ファイルを Fig. 3.4 に、GENGTC-K の出力シートを Fig. 3.5 に示す。出力する項目は GENGTC-PC と GENGTC-K に違いはないが、GENGTC-K では計算条件や計算結果のセルを水色で表示することで計算結果の確認を容易にした。また、第 3.1 節のとおり、GENGTC-PC の出力ファイルでは各種単位系が“cm”表記であるが、GENGTC-K の出力シートでは“mm”に統一し、キャプセル設計で使用される単位に合わせたことにより、単位換算の手間を無くすことができた。

### 3.5 計算条件設定シートの追加

GENGTC ではガンマ発熱による発熱と原子炉一次冷却水の冷却による熱バランスの熱計算と熱膨張による寸法変化の熱膨張補正により計算結果を収束させている。GENGTC-PC において、繰返し計算の収束演算回数等の計算条件は計算を実行する BAT ファイル（コマンドプロンプトで実行できるコマンドが書き込まれたファイル）に書き込まれている。そのため、従来の GENGTC-PC では収束演算回数が 100 回に設定されているが、これを変更する場合には BAT ファイルを直接書き換える必要があった。そこで、GENGTC-K では計算条件設定シートを設け、計算条件を容易に変更することができるようにした。Fig. 3.6 に GENGTC-K の計算条件設定シートを示す。計算条件シートでは以下の 5 項目を設定する。

① 収束演算回数

収束演算を行う回数を設定する。

② 接触回数

外側構造材の内半径と内側構造材の外半径が重なる回数を設定する。接触回数が設定値を超えた時点で計算は終了する。

③ 収束結果判定値（温度差）

④ 収束結果判定値（回数）

得られた計算結果が「④ 設定した回数」連続で「③ 設定した温度差」以内に収まった時点で、計算が収束したとみなす。

⑤ GAP 変更値の上限

目標照射温度での寸法計算をする際に指定ノードの半径を調整するために使用される。収束演算の 1 回のループで変更できる GAP の上限値を設定する。

### 3.6 マクロ実行ボタンの追加

GENGTC-PC は DOS 上で操作するため、計算を実行するにはコマンドを打ち込む必要があり、操作が煩雑であった。しかし、Excel 版の GENGTC-K に更新する際の改良において、いくつかのマクロ実行ボタンを追加したことにより、マクロ実行ボタンを押下するだけで操作を実行できるようした。追加したマクロ実行ボタンとその機能は以下のとおりである。

	(マクロ実行ボタン)	(実行するマクロの機能)
・ 入力シート	計算開始	計算を実行する
	ファイル読込	入力データを読み込む
	ファイル書込	入力データを書き出す
	計算条件設定	計算条件設定シートに移動する
・ 出力シート	グラフ	グラフシートに移動する
	入力シート	入力シートに移動する
	PDF 出力	出力シートを PDF 形式に出力する
・ 計算条件設定シート	入力シート	入力シートに移動する
・ グラフシート	グラフ表示	グラフシートに移動する
	入力シート	入力シートに移動する
	計算結果	出力シートに移動する

Fig. 3.7~3.10 の赤枠で囲まれた箇所がそれぞれ入力シート、出力シート、計算条件設定シート、グラフシートのマクロ実行ボタンである。

### 3.7 材料特性データファイルの改良

GENGTC-PC の材料特性データファイルを Fig. 3.11 に示す。このデータファイルには各材料の密度、熱伝導率、線膨張率に係る係数が記載されており、この材料特性に基づいて熱解析及び構造解析が行われる。当該データファイルは DAT 形式で記述されており、編集には専用のソフトウェアからプログラムを書き換える必要があるため、材料特性データの追加や編集が容易ではなかった。

そこで、GENGTC-K では計算ファイルと材料特性データファイルを 1 つの Excel ファイルに統合させた。GENGTC-K の材料特性データシートを Fig.3.12(a)に示す。これにより、材料特性データの編集が容易になり、計算コードの利便性が向上した。また、Fig. 3.12(b)のとおり各材料定数のセルにコメントを追加したことで、各セルの数値が何を意味するものであるかを分かるようにした。

#### 4. 不具合の修正及び機能拡張

従来の GENGTC-PC には 2 つの不具合が確認されていた。GENGTC-PC から GENGTC-K への更新に当たって、それらの不具合への対応を行うとともに、GENGTC-K の利便性を向上させるための機能拡張を行った。

##### 4.1 熱膨張干渉への対応

ある計算条件において従来の GENGTC-PC による熱計算を行っていたところ、ある不具合が確認された。その計算条件を Table 4.1 に示す。この計算条件では、ガンマ発熱率 (1.5 W/g) を 0.1 W/g ずつ増加させ、2.4 W/g までの計算 (合計 10 回) を行った。その結果、5 回目の計算 (ガンマ発熱率: 1.9 W/g) において直前の計算のガンマ発熱率 (1.8 W/g) よりも発熱量が大きくなっているにもかかわらず、温度が低くなっていた。その計算結果を Table 4.2 に示す。ガンマ発熱率が大きくなると構成材から発生する熱の総量も大きくなるため、よりガンマ発熱率の大きい計算結果の温度の方が低くなることは無く、計算結果が誤っていることは明らかであったことから、その原因を特定するためにプログラムの解析を行った。その結果、キャプセルを構成する中心軸対称の 2 つの構成材が熱膨張によって構成材間のギャップを埋め、構成材同士が干渉してしまう現象 (以下「熱膨張干渉」という。) 及び繰り返し計算が収束しないまま計算を終了する「ループ現象」が原因であると特定された。この「熱膨張干渉」は目標照射温度を逸脱させるだけでなく、キャプセルを破損する危険性があるほか、構成材同士の焼き付き等が発生し、キャプセルの解体及び試料の取り出しを困難にさせる可能性があるため、キャプセル設計においては避けなければならない問題である。

##### 4.1.1 熱膨張干渉の原因

GENGTC-PC において「熱膨張干渉」が発生した場合、一度内側構造材の外半径を外側構造材の内半径より 0.01 mm 小さくして (内側構造材と外側構造材のギャップを 0.01 mm に設定する)、再度計算を実行するようにプログラムされている。この処理によってギャップ寸法を 0.01 mm に設定して再度計算すると、「熱膨張干渉」が発生する際に使用したギャップ寸法よりもギャップが小さくなる。ギャップが小さくなると内側構造材と外側構造材の熱交換の総量が大きくなることから、構成材の計算温度が下がり、結果的に熱膨張量も小さくなる。次にこの計算結果で得られた寸法で熱計算を行うと、ギャップ寸法が 0.01 mm よりも大きいことから、外部構造材と内部構造材間の熱交換の総量が小さくなり、構造材の温度が上昇する。これによる熱膨張でギャップ寸法が小さくなり、再び「熱膨張干渉」を起こす、という「ループ現象」が発生する可能性がある。この「ループ現象」が発生すると、現状の計算プログラムでは収束しない計算を繰り返し、収束していない 100 回目の計算結果を最終計算結果として表示してしまうことになる。

以上のように、GENGTC-PC における計算結果の不具合は「熱膨張干渉」及び「熱膨張干渉に起因するループ現象」が原因であることを特定した。GENGTC の繰り返し計算では最後である 100 回目の計算が偶数回目である。そのため、「ループ現象」が発生すると「熱膨張干渉」によ

り再設定されたギャップ寸法 0.01 mm で計算された低い算出温度とその算出温度による小さい熱膨張量での計算結果が最終計算結果として表示される。計算結果が「ループ現象」を伴うものであった場合、外側構造材と内側構造材が干渉していることに気付かず、誤った寸法で設計することになりかねないため、この不具合への対応を行った。

#### 4.1.2 収束演算判定結果の表示

従来の GENGTC-PC において確認された「熱膨張干渉」は、本来はキャプセル構成材同士が熱膨張により干渉してしまうにも関わらず、構成材が重なった際のプログラムの処理により最終的な計算結果が誤っていると判断できないことが問題であった。そのため、この不良事象への対応として以下の 3 項目についてプログラムに追加・改良した。

- ① 内部構造材が外部構造材と重なった場合、重なった高い方の計算結果を表示すること。
- ② 重なった際の内側構造材の外半径は外側構造材の内半径より 0.01mm 小さい寸法を表示すること。
- ③ 熱膨張で外側構造材の内半径に内側構造材の外半径が重なった回数があらかじめ設定した一定回数を超えた場合に警告表示すること。

ここで、「③ 熱膨張で外側構造材の内半径に内側構造材の外半径が重なった回数があらかじめ設定した一定回数を超えた場合の警告表示」について説明する。GENGTC-K の計算フローチャートを Fig. 4.1 に示す。GENGTC-K では計算結果を① 計算が正常に収束した場合、② 計算結果が収束演算回数以内に収束しなかった場合、③ 接触回数上限に達して計算が終了した場合の 3 パターンに分類し、その判定結果毎に計算結果欄の表示が変わるようなプログラムを追加した。それぞれの計算結果パターンの詳細は以下のとおりである。

- ① 計算が正常に収束した場合 (計算結果欄：水色)  
収束演算回数が 99 回に達する前に、収束結果判定値で設定した温度差を満足した場合、「計算が正常に収束した」と判断し、計算結果欄を水色に表示する。
- ② 計算が収束しなかった場合 (計算結果欄：紫色)  
収束演算回数が 99 回に達した場合、「計算が収束しなかった」と判定し、計算結果欄を紫色に表示する。
- ③ 計算が異常終了した場合 (計算結果欄：赤色)  
収束演算の途中で接触回数上限に達し、計算が収束演算回数の前に終了した場合、「計算が異常終了した」と判定し、計算結果欄を赤色に表示する。

これら 3 つの判定結果に応じて、①は水色、②は紫色、③は赤色に計算結果欄が表示される。Fig. 4.2 においては、上から 1、2、3 番目の計算結果がそれぞれ①計算が正常に収束した場合、②計算が収束演算回数以内に収束しなかった場合、③計算が異常終了した場合であることが分

かる。③「計算が異常終了」して計算結果欄が赤色に表示された場合は「熱膨張干渉」が発生したと判断できる。

なお、判定結果が② 計算が収束しなかった場合または③ 計算が異常終了した場合は、いずれも計算結果が正しくないことに注意しなければならない。

#### 4.2 燃料試料計算の不具合

GENGTC-PC には燃料試料の種類に合わせた 3 つの燃料中心温度計算式が燃料計算モジュールに組み込まれていた。しかし、プログラムの不具合により一部の計算式を使うことができなかった。そこで GENGTC-K では、全ての燃料中心温度計算式を使えるようにプログラムを修正した。また、燃料ペレット内の詳細な計算を取り扱えるように燃料計算モジュール (CETUS) を追加した。

##### 4.2.1 燃料中心温度計算式

燃料の組成やペレット内の詳細な温度を求める場合には、燃料試料の組成に適した燃料中心温度計算式 (NFUEL) を選択する。以下の(3)(4)の計算式は、プログラムの修正によって使用可能となったものである。【】内は燃料試料の組成を示している。

(1) 平均温度法 (NFUEL = 0)

以下(2)(3)(4)以外の計算式を用いる場合に選択する。ペレット表面は熱伝導率で計算する。

(2) Lyons 式 【UO<sub>2</sub>】 (NFUEL = 1)

$$k = \frac{3.824}{(T + 129)} + 4.788 \times 10^{-14} T^3$$

(3) Baily-Asamoto 式 [(Pu, U) O<sub>2</sub>] (NFUEL = -1)

$$k = 0.0011 + \frac{1}{T (4.848 - 4.465D)}$$

(4) Asamoto 式 【UO<sub>2</sub>】 (NFUEL = -2)

$$k = 0.0013 + \frac{1}{T (4.848 - 4.465D)}$$

k : 熱伝導率 (W/mm・K)

T : 温度 (°C)

D : 密度 (%)

燃料中心温度計算が可能になったため、GENGTC-K 内で材料キャプセルのみならず燃料キャプセルの熱計算もできるようになった。



#### 4.2.2 ペレット内出力密度の分割領域計算機能の追加

燃料内では中性子束低下（flux depression）の影響により、ペレット中心部で凹となる出力分布となる。そこで、ペレットを出力密度領域毎に分割して、燃料内の出力分布を考慮した温度計算ができる機能を追加した。計算に必要な設定項目を以下に示す。

- ① ペレット内出力密度の分割領域数（NP）  
燃料ペレットに出力密度分布がある場合に分割領域数を入力する。  
入力値の範囲：1～20
- ② 出力密度領域の半径（RP）  
ペレット中心から分割領域の境界までの長さを入力する。  
単位：mm
- ③ 出力密度比（CP）  
②で入力した領域における出力密度比を入力する。ただし、ペレット中心を 1.0 とする。

ペレット内出力密度の分割領域計算の入力シートと計算結果の例をそれぞれ Fig. 4.3、Fig. 4.4 に示す。Fig. 4.3 に示すとおり、「① ペレット内出力密度の分割領域数（NP）」のセルに数値を入力することで、「② 出力密度領域の半径（RP）」「③ 出力密度比（CP）」のセルが表示される。分割領域の最大数は 20 であり、分割数は任意に設定できる。Fig. 4.4 の赤枠に示すとおり、計算結果には燃料ペレット内の分割領域毎の計算結果が表示される。

#### 4.2.3 ペレット内の温度による密度変化を考慮した計算機能の追加

燃料試料は照射により 1000℃を超えるような高温となるため、温度による密度変化の影響が無視できない。そこで、ペレット内での温度による密度変化を考慮して詳細な温度計算ができる機能を追加した。ペレットの温度が 1400～1900℃、1900℃～の 2 通りに領域を分割し、燃料密度をそれぞれ 97 %TD、99 %TD として温度評価を行う。ここで、TD とは理論密度を意味しており、97 %TD は理論密度の 97 %の密度を、99 %TD は理論密度の 99 %の密度を指す。計算結果には、それぞれの半径と温度が出力される。計算に必要な設定項目を以下に示す。

- ① ペレット内出力密度の分割領域数（NP）  
燃料ペレットに出力密度分布がある場合に分割領域数を入力する。  
入力値の範囲：1～20
- ② 温度による密度変化の有無（MOD）  
ペレット内での温度による密度変化を考慮した温度計算をする場合に 1 を入力する。  
入力値の範囲：0 もしくは 1
- ③ 出力密度領域の半径（RP）  
ペレット中心から分割領域の境界までの長さを入力する。  
単位：mm



④ 出力密度比 (CP)

③で入力した領域における出力密度比を入力する。ただし、ペレット中心を 1.0 とする。

ペレットの温度による密度変化を考慮した計算の入力シートと計算結果の例をそれぞれ Fig. 4.5、Fig. 4.6 に示す。Fig. 4.5 に示すとおり、「② 温度による密度変化の有無 (MOD)」のセルに 1 を入力することで、温度による密度変化を考慮した計算が行われる。次に、「① ペレット内出力密度の分割領域数(NP)」のセルに数値を入力することで、「③ 出力密度領域の半径(RP)」 「④ 出力密度比 (CP)」のセルが表示される。領域分割の最大数は 20 であり、分割数は任意に設定できる。Fig. 4.6 の赤枠に示すとおり、計算結果には燃料ペレット内の分割領域毎の半径と温度が表示される。

#### 4.3 収束演算結果のグラフ表示機能の追加

第 4.1.2 項の収束演算判定毎の計算結果欄の表示機能の追加に伴い、演算回数毎の半径・温度・熱伝導率を表示するグラフが描画される機能を追加した。例として、Fig. 4.7 のような計算条件におけるプログラムの挙動について説明する。Fig. 4.7 の計算は 3 通りのガンマ発熱率の計算を行い、3 つの計算結果が算出される。計算結果は上から順に① 計算が正常に収束した、② 計算が収束演算回数以内に収束しなかった、③ 計算が異常終了した場合の結果となっている。以上のとおり、3 つの判定結果に応じて計算結果欄が水色、紫色、赤色に表示されているため、それぞれがどの判定結果であるかを一目で確認することができる。次にそれぞれの計算における演算回数毎の最終半径・温度・熱伝導率のグラフを Fig. 4.8、Fig. 4.9、Fig. 4.10 に示す。

- ① 計算が正常に収束した場合の計算結果は Fig. 4.8 に示すとおり、半径・温度・熱伝導率が収束演算を重ねるにつれて収束していることが分かる。
- ② 計算が収束しなかった場合の計算結果は Fig. 4.9 に示すとおり、収束演算回数が 100 回に達しても収束していない。そこで、収束演算の最後の 2 つの半径の平均値を最終半径とし、その最終半径値での径方向温度分布を求めることで、収束しない計算結果を決定する。
- ③ 計算が異常終了した場合の計算結果は Fig. 4.10 に示すとおり、半径・温度・熱伝導率が収束せず、「熱膨張干渉」による外側構造材の内半径と内側構造材の外半径が重なる回数が設定した接触回数を超え、計算が途中で終了している。この場合は OUTPUT シートの計算結果欄に計算結果が表示されるが、「熱膨張干渉」が発生する計算条件であるため、この材質・寸法でキャプセルを設計することはできない。

#### 4.4 目標照射温度の寸法算出機能の追加

GENGTC-PC では、材料の寸法や熱伝導率等の計算条件を与えて計算を実行することで、ノード毎の温度や熱膨張を考慮した最終寸法が算出される。GENGTC-K への更新にあたっては、目標照射温度での寸法算出機能を追加した。この機能の追加により、目標とする照射温度を与

えることで、その温度を達成することができる各ノードの寸法を逆算できるようにした。目標照射温度の寸法算出機能を追加した入力シートを Fig. 4.11 に示す。寸法算出計算の際に入力する項目は以下のとおりである。

① TTEMP (目標照射温度)

対象ノードの目標照射温度を設定する。対象ノードが 0 または 1 の場合、設定したノードの温度を、それ以外の場合は 2 点のノードの平均温度を目標照射温度に近づける。

② NTEMP1 (目標照射温度を設定するノード番号)

ノード 0 の場合は 0 を、ノード 1 の場合は 1 を設定し、それ以外の場合は任意のノード番号を設定する。

③ NTEMP2

ノード 0 及びノード 1 の場合は空欄とし、それ以外の場合は (NTEMP1+1) のノード番号を設定する。NTEMP1、NTEMP2 で TTEMP の目標照射温度を設定するノードを指定する。また、既存の入力項目を流用し、NGET に GAP を変更するノード点を、GDELT に初期の GAP 変更量を設定する。

目標照射温度での寸法算出計算では、目標照射温度に近づけるように任意のノードの GAP を変更しながら繰返し計算を行う。なお、繰返し計算回数は最大 20 回、GAP 変更量の最小値は 0.01 mm である。目標照射温度に一致しない場合、連続する繰返し計算結果が目標照射温度を挟む形となった時点で計算を終了する。目標照射温度での寸法計算の例として、ノード 1 (試料外側) の目標温度を 300℃とし、ノード 2 の GAP を変更する計算結果を Fig. 4.12 に示す。RUN NUMBER (5, 1, 1)において、NTEMP1 (ノード 1) の計算温度が TTEMP (目標照射温度) で設定した 300℃を超えていることから、RUN NUMBER (6, 1, 1)では NGET (GAP を変更するノード点) の寸法を GDELT (初期の GAP 変更量) で設定した変更量分だけ変更され、RUN NUMBER (5, 1, 1)では 28.09 mm であったノード 1 の入力寸法が RUN NUMBER (6, 1, 1)では 28.08 mm になっている。RUN NUMBER (5, 1, 1)におけるノード 1 の計算結果は TTEMP (目標照射温度) の 300℃を超えているが、RUN NUMBER (6, 1, 1)ではギャップ層の寸法を小さくして熱伝導率を大きくすることで NTEMP1 の温度が低くなり、300℃よりも低くなっている。この時点で連続する繰返し計算結果が目標照射温度を挟んでいることから、繰返し計算が終了する。これにより、目標照射温度を達成することができる寸法を算出することができる。

以上のとおり、GENGTC-PC で見つかった 2 つの不具合の修正を行うとともに、「ペレット内出力密度の分割領域計算機能の追加」、「ペレット内の温度による密度変化を考慮した計算機能の追加」、「収束演算結果のグラフ表示機能の追加」、「目標照射温度の寸法算出機能の追加」の 4 つの機能拡張を行い、利便性をより向上させた。

## 5. まとめ

DOS 版の「GENGTC-PC」を Excel 版の「GENGTC-K」に更新するにあたって、不具合の修正及び機能拡張を行った。「GENGTC-K」では Excel のマクロ機能を活かした入力シート、出力シート等の改良、計算条件設定シートの追加、材料特性データシートの改良を行い、計算コードの利便性を向上させた。

「GENGTC-PC」にて確認されていた 2 つの不具合への対応も行った。そのうちの 1 つである繰り返し計算が収束しないまま計算を終了してしまう「ループ現象」による不具合については、計算コードの改修により「熱膨張干渉」が発生して非安全側の計算結果が算出された場合に計算結果セルの表示から「熱膨張干渉」の発生を確認できるようにしたことで、誤った寸法でキャプセルを設計してしまうことを避けることができるようになった。また、燃料中心温度計算式の一部が使用不可となっていた不具合については、全ての燃料中心温度計算式を使用できるようにプログラムを修正した。それに併せ、「ペレット内出力密度の分割領域計算機能」、「ペレット内の温度による密度変化を考慮した計算機能」、「収束演算結果のグラフ表示機能」及び「目標照射温度の寸法算出機能」を追加し、計算コードを高度化した。

今回改良した GENGTC-K を用いて、海外炉を利用した照射試験におけるキャプセル設計や海外炉の核発熱率等の炉特性の熱計算を行っていく予定である。

謝 辞

本稿及び計算コードの改良に際して貴重なご意見を頂きました松井義典氏、山本圭一氏、土谷邦彦環境技術開発部長には深く感謝するとともに、関わられた皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) Hall C. Roland, GENGTC, A one dimensional CEIR Computer Program for Capsule Temperature Calculation in Cylindrical Geometry, ORNL-TM-1942, (1967).
- 2) Engineering Mechanics Research Corporation, User's manual for NISA II: numerically integrated elements for system analysis version 93.0, (1993).
- 3) 染谷博之, 小林敏樹, 新見素二, 星屋泰二, 原山泰雄, GENGTC-JB: 照射用キャプセル内温度評価プログラム, JAERI-M 87-148, (1987), 25p.
- 4) 野村靖, 染谷博之, 伊藤治彦, 照射キャプセル熱計算コード GENGTC の機能整備と 2 次元計算への改良, JAERI-M 92-163, (1992), 66p.

Table 4.1 構成材及び寸法

	外半径 (mm)	内半径 (mm)	厚さ (mm)	材料
試料	27.8	0	—	SUS316
ギャップ	—	—	—	1/5He*
外筒管	30.0	28.0	2.0	SUS316

\* : 1/5He : 真空 He ガス雰囲気熱伝導率 (He ガスの熱伝導率の 1/5 と仮定)

Table 4.2 正常時の計算結果及び不良事象時の計算結果

	ノード	温度 (°C)	線出力 (W/cm)	熱伝導率 (W/cm・°C)	材質	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
ガンマ発熱率 : 1.8 W/g	0	444.3	-	-	-	-	-
	1	303.1	340.88	0.0	SUS316	27.800	27.928
	2	84.6	340.88	8.124E-04	1/5He	28.000	28.022
	3	57.9	392.05	1.508E-01	SUS316	30.000	30.024
ガンマ発熱率 : 1.9 W/g	0	284.7	-	-	-	-	-
	1	115.8	359.82	0.0	SUS316	27.800	27.842
	2	86.5	359.82	7.004E-04	1/5He	28.000	28.023
	3	58.4	413.83	1.509E-01	SUS316	30.000	30.024

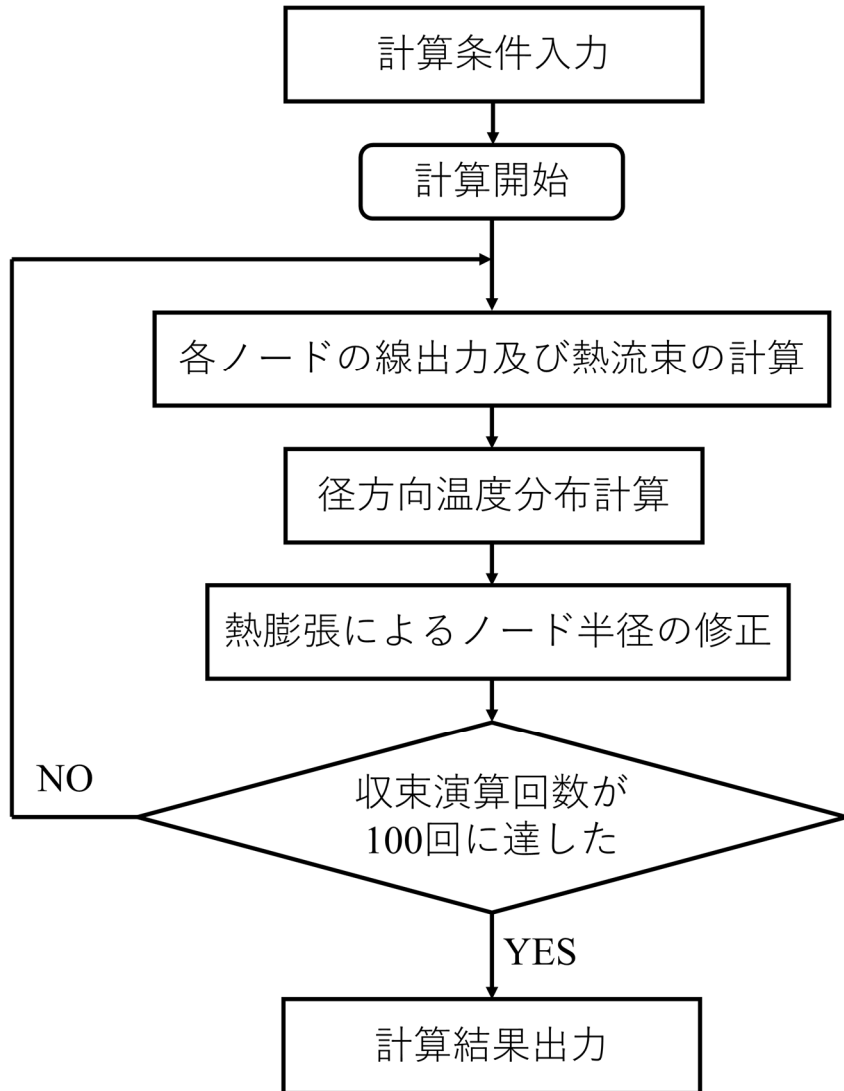


Fig. 2.1 GENGTC-PC の計算フローチャート

```

*          *****
*          * GENGTC-PC  INPUT DATA LIST *
*          *****
* -----
* A.  --- TITLE CARD ---
* INPUT
* -----
* B.  --- CONTROL ---
* ND9  NFUEL  NTG  NP  NOPT  MOD
*   3    0    -1  0   0    0
*
* C.1  IF NP GREATER THAN ZERO RP & CP REQUIRED
*
* -----
* D.  --- BASIC CONSTANT ---
* H11   T11     R11     DENS     GAP
* 2.79   42.0    0       1.00     1
* -----
* E.  --- NODE POINT PARAMETER ---
* <1> R (I),I=1,ND9 : RADIAL CM
* <2> PG(I),I=1,ND9 : GAMMA HEATING PERCENTAGE BY MATERIAL
* <3> E (I),I=1,ND9
*
* 2.78  2.80  3.00
* 1.0   0.0   1.0
* 0.0   0.0   0.0
* -----
* F.  --- ANALYTICAL PARAMETER ---
* NGE0  NGAM  NPOWER
* 1     3     1
* <1> GEOMETRICAL PARAMETER (NODE & DELT GAP)
* NGET      GDELT
* 1         0.01
* <2> GAMMA HEATING
* G11(I),I=1,NGAM  WATT/GRAM ; NODE DATA DEFINE BY MULTIPLY %
* 1.00  1.50  2.00
* <3> LINEAR POWER GENERATION  WATT/CM
* F11(I),I=1,NPOWER  WATT/CM
* 0
* <4> IFGA IFG1 : IFGB IFG2 : IFGC IFG3
* THREE LINE REQUIRED
* 1  2  2  2
* 1  2  2  2
* 1  2  2  2
* -----
* G.  --- PHYSICAL PARAMETER BY MATERIAL
* <1> MX(I),I=1,ND9
* <2> NW(I),I=1,ND9
* 1  0  1
* 7 23 6
* <3> USER COEFFICIENT
* D   C1   C2   C3   C4   C5   S1   S2

```

Fig. 3.1 GENGTC-PC の入力ファイル

TITLE	JAEA-Data/Code						TEST1									
CONTROL	ND9	NFUEL	NTG	NP	NOPT	MOD										
	5	0	0	0	0	0										
BASIC CONSTANT	H11	T11	R11	DENS	GAP											
	0.02791	42.0	0.00	1.00	0.0											
NODE POINT PARAMETER																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
R	11.29	11.39	25.68	26.000	27.500											
PG	1.000	0.000	0.800	0.000	1.000											
E	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000											
ANALYTICAL PARAMETER	NGEO	NGAM	NPOWER													
	1	1	1													
	NGET	GDELTA	TTEMP	NTEMP1	NTEMP2											
	3	0.1														
	G11															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	1.97															
	F11															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	0.00															
PHYSICAL PARAMETER BY MATERIAL	MX															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	1	0	1	0	1											
	NW															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	0	3	20	3	6											
	USER COEFFICIENT															
	D	C1	C2	C3	C4	C5	S1	S2								
	1	7.82E-03	5.20E-02	-5.55E-07	-1.3E-07	2.39E-10	-1.57E-13	1.09E+01	1.27E-02							
	2															
	3															
	4															

Fig. 3.2 GENGTC-Kの入力シート

TITLE	JAEA-Data/Code						INPUTシートの改修
CONTROL	ND9	NTG	NP	NOPT	MOD		
	3	0	-1	0	0		
BASIC CONSTANT	H11	T11	R11	DENS	GAP		
	0.0279	42.0	0	1.0	1.0		

Fig. 3.3 パラメータに対するコメントの例



```

IMPROVEMENT
IM
*** 入力データ ***
ND9 : 最大ノード数 = 3 NPOWER : 線出力のパラメータ数 = 2
NGAM : ガンダ熱率のパラメータ数 = 2 NCEO : キャップ寸法のパラメータ数 = 1
T11 : 冷却水温度 = 42.00°C
H11 : 外筒表面熱伝達率 = 2.79W/cm²・°C
GAP : キャップユガクス = 1.00W/cm²・°C
R11 : 中心孔の半径 = 0.00 cm
NFUEL : 中心温度計算式の選択 = 0

CETUS
NP : ノード内の出力分布領域数 = 0
DENS : ノードの初期密度 = 1.0000

半径 (cm)      輻射率      MAT. TYPE      材質 No.
1      2.7800      0.0000      1      7
2      2.8000      0.0000      0      23
3      3.0000      0.0000      1      6

各ノードの物性値
ノード 密度      熱伝導率      熱膨張率
      ρ      C0      C1      C2      C3      C4      A0      A1
      g/cc      W/cm・°C      *E-06/°C
1      7.800 0.149E+00 0.128E-03 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 17.040 0.272E-02
2      0.000 0.572E-03 0.130E-05-0.307E-09 0.000E+00 0.000E+00 0.000 0.000E+00
3      7.800 0.141E+00 0.137E-03 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 15.564 0.270E-02

--- 計算結果 ---
RUN NUMBER      : 1 1 1
1. キャップ (mm) : 0.200
2. ガンダ熱率 (W/g) : 0.25
3. 線出力 (W/cm) : 100.00

ノード 温度      線出力      熱伝導率      材質No.      入力半径      最終半径
      (°C)      (W/cm)      (W/cm・°C)      (mm)      (mm)
0      140.7
1      117.9      47.35      0.000E+00      7      27.800      27.847
2      52.3      47.35      6.804E-04      23      28.000      28.012
3      44.9      154.45      1.477E-01      6      30.000      30.013

--- 計算結果 ---
RUN NUMBER      : 1 1 2
1. キャップ (mm) : 0.200
2. ガンダ熱率 (W/g) : 0.25
3. 線出力 (W/cm) : 200.00

ノード 温度      線出力      熱伝導率      材質No.      入力半径      最終半径
      (°C)      (W/cm)      (W/cm・°C)      (mm)      (mm)
0      145.2
1      122.6      47.35      0.000E+00      7      27.800      27.849
2      57.8      47.35      6.868E-04      23      28.000      28.014
3      46.8      254.45      1.482E-01      6      30.000      30.015

--- 計算結果 ---
RUN NUMBER      : 1 2 1
1. キャップ (mm) : 0.200
2. ガンダ熱率 (W/g) : 0.50
3. 線出力 (W/cm) : 100.00

ノード 温度      線出力      熱伝導率      材質No.      入力半径      最終半径
      (°C)      (W/cm)      (W/cm・°C)      (mm)      (mm)
0      209.3
1      165.7      94.69      0.000E+00      7      27.800      27.870
2      57.1      94.69      7.130E-04      23      28.000      28.013
3      46.0      208.90      1.481E-01      6      30.000      30.014

--- 計算結果 ---
RUN NUMBER      : 1 2 2
1. キャップ (mm) : 0.200
2. ガンダ熱率 (W/g) : 0.50
3. 線出力 (W/cm) : 200.00

ノード 温度      線出力      熱伝導率      材質No.      入力半径      最終半径
      (°C)      (W/cm)      (W/cm・°C)      (mm)      (mm)
0      213.2
1      169.8      94.69      0.000E+00      7      27.800      27.872
2      62.6      94.69      7.189E-04      23      28.000      28.015
3      47.9      308.90      1.486E-01      6      30.000      30.016
    
```

Fig. 3.4 GENGTC-PC の出力ファイル

\*\*\* 入力データ \*\*\*

JAEA-Data/Code			
ND9	: 最大ノード数	=	3
NGEO	: ギャップ寸法のパラメータ数	=	1
NGAM	: ガンマ発熱率のパラメータ数	=	2
NPOWER	: 線出力のパラメータ数	=	2
T11	: 冷却水温度	=	42.00 °C
H11	: 外筒表面熱伝達率	=	2.79E-02 W/mm2・°C
GAP	: ギャップギャップ	=	1.00E-02 W/mm2・°C
R11	: 中心孔の半径	=	0.00 mm
NFUEL	: 中心温度計算式の選択	=	0
NP	: ヘリックス内の出力分布領域数	=	0
DENS	: ノード"0"の初期密度	=	1.0000

グラフ    入力シート    PDF出力

	半径(mm)	輻射率	MAT TYPE	材質No.
1	27.80	0.000	1	7
2	28.00	0.000	0	23
3	30.00	0.000	1	6

各ノードの物性値

ノード	密度		熱伝導率					熱膨張率	
	$\rho$	C0	C1	C2	C3	C4	A0	A1	
1	7.800E-03	1.490E-02	1.280E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	17.040	2.720E-03	
2	0.000E+00	5.720E-05	1.300E-07	-3.070E-11	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000E+00	
3	7.800E-03	1.410E-02	1.370E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	15.564	2.700E-03	

--- 計算結果 ---

RUN NUMBER	: 1 1 1	計算結果の背景色
1. ギャップ (mm)	: 0.200	正常
2. ガンマ発熱率(W/g)	: 0.25	収束しなかった
3. 線出力 (W/mm)	: 10.00	外壁に接触して計算できない

ノード	温度 (°C)	線出力 (W/mm)	熱伝導率 (W/mm・°C)	材質No.	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
0	140.7					
1	117.9	4.73	0.000E+00	7	27.800	27.847
2	52.3	4.73	6.804E-05	23	28.000	28.012
3	44.9	15.45	1.477E-02	6	30.000	30.013

Fig. 3.5 GENGTC-K の出力シート

収束演算回数	100	
接触回数	20	接触回数がこの値を超えたら計算終了
収束結果判定値(温度差)	0.10	温度差が設定した値以内なら収束演算が完了したと判断する
収束結果判定値(回数)	30	収束判定の結果が連続N回OKならば収束完了と判断する
GAP変更値の上限	0.01	0.1mm

Fig. 3.6 GENGTC-K の計算条件設定シート

TITLE	JAEA-Data/Code							Dimensioning																	
CONTROL	ND9	NFUEL	NTG	NP	NOPT	MOD		3	0	-1	3	3	1												
	BASIC CONSTANT							H11	T11	R11	DENS	GAP													
NP > 0	RP	CP						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
								20.00	25.00	27.80															
NODE POINT PARAMETER	R	27.80		28.00	30.00																				
	PG	1.000	0.000	1.000																					
	E	0.000	0.000	0.000																					
								0.98	0.99	1.00															
ANALYTICAL PARAMETER	NGEO			NGAM	NPOWER																				
	1			1	1																				
	NGET			GDELT	TTEMP	NTEMP1	NTEMP2																		
	2			0.01																					
	G11							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
	1.10																								
PHYSICAL PARAMETER BY MATERIAL	F11							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
	0.00																								
	MX							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
	1							0	1																
	NW							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
	7							23	6																
USER COEFFICIENT							D	C1	C2	C3	C4	C5	S1	S2											
1																									

計算開始    ファイル読み込み    ファイル書き込み    計算条件設定

Fig. 3.7 入力シートのマクロ実行ボタン

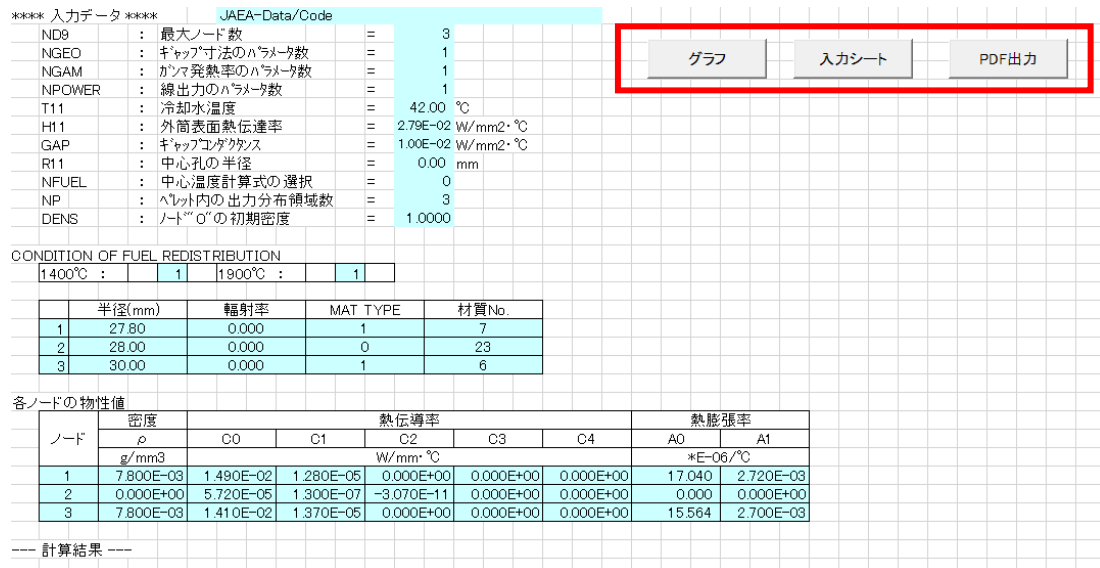


Fig. 3.8 出力シートのマクロ実行ボタン

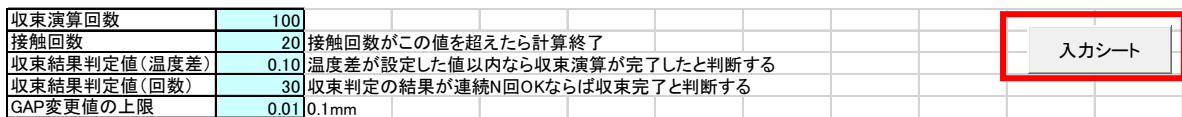


Fig. 3.9 計算条件設定シートのマクロ実行ボタン

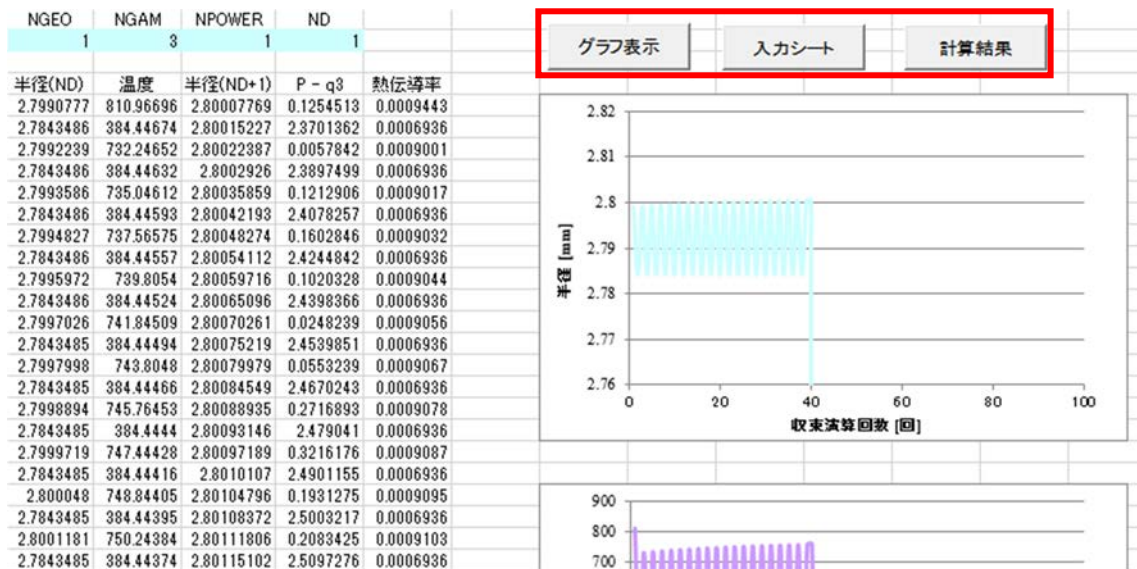


Fig. 3.10 グラフシートのマクロ実行ボタン

0.866E+01	0.453E+00	0.156E-03	0.0	0.0	0.0	0.739E+01	0.687E-03	1	Nb-1%Zr
0.823E+01	0.967E-01	0.182E-03	0.0	0.0	0.0	12.407	0.431E-02	2	Hastelloy-X
0.0	0.143E-02	0.325E-05	0.768E-09	0.0	0.0	0.0	0.0	3	Helium
0.800E+00	0.247E+00	0.107E-03	0.856E-07	0.252E-10	0.0	0.0	0.0	4	NaK-44
0.0	0.463E-03	0.101E-05	0.267E-09	0.783E-13	0.974E-17	0.0	0.0	5	Neon
0.780E+01	0.141E+00	0.137E-03	0.0	0.0	0.0	15.564	0.270E-02	6	SUS-316
0.780E+01	0.149E+00	0.128E-03	0.0	0.0	0.0	17.04	0.272E-02	7	SUS-304
16.73	0.413E+00	0.227E-03	0.0	0.0	0.0	6.013	0.109E-02	8	T-111
0.143E+02	0.100E+00	0.200E-03	0.774E-07	0.948E-11	0.0	7.415	0.194E-02	9	UN
10.96	0.102E+00	0.208E-03	0.279E-06	0.198E-09	0.545E-13	0.961E+01	0.157E-02	10	UO2
0.197E+02	0.137E+01	0.914E-03	0.765E-06	0.266E-09	0.325E-13	5.098	0.230E-03	11	W-26%Re
0.647E+01	0.110E+00	0.154E-03	0.509E-06	0.156E-08	0.121E-11	6.584	0.781E-03	12	Zry-2
0.0	0.149E-03	0.592E-06	0.217E-09	0.265E-12	0.234E-15	0.0	0.0	13	Argon
0.180E+01	0.140E+01	0.130E-02	0.518E-06	0.269E-10	0.249E-13	0.0	0.0	14	Graphite
0.473E+00	0.326E+00	0.580E-04	0.117E-05	0.166E-08	0.554E-12	0.0	0.0	15	Lithium
0.102E+02	0.129E+01	0.614E-03	0.491E-06	0.239E-09	0.505E-13	5.143	0.752E-03	16	Molybdenum
0.193E+02	0.161E+01	0.912E-03	0.630E-06	0.215E-09	0.356E-13	4.423	0.752E-03	17	Tungsten
0.927E+01	0.200E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18	Sol-Gel
0.321E+01	0.602E+00	0.531E-03	0.141E-06	0.358E-11	0.398E-14	33.326	0.116E-01	19	SiC
0.270E+01	0.203E+01	0.136E-03	0.133E-05	0.744E-08	0.108E-10	22.818	0.978E-02	20	Aluminium
0.0	0.248E-03	0.739E-06	0.230E-09	0.0	0.0	0.0	0.0	21	Nitrogen
0.441E+01	0.745E-01	0.105E-03	0.344E-06	0.118E-08	0.821E-12	6.584	0.781E-03	22	Titanium
0.0	0.572E-03	0.130E-05	0.307E-09	0.0	0.0	0.0	0.0	23	Helium x.4
0.166E+02	0.534E+00	0.125E-03	0.0	0.0	0.0	5.437	0.207E-02	24	Tantalum
0.182E+01	0.148E+01	0.785E-03	0.0	0.0	0.0	10.717	0.748E-02	25	Beryllium

Fig. 3.11 GENGTC-PC の材料特性データファイル

D	C1	C2	C3	C4	C5	S1	S2		
8.66E-03	4.53E-02	1.56E-05	0	0	0	7.39E+00	6.87E-04	1	Nb-1%Zr
8.23E-03	9.67E-03	1.82E-05	0	0	0	12.407	4.31E-03	2	Hastelloy-X
0	1.43E-04	3.25E-07	-7.68E-11	0	0	0	0	3	Helium
8.00E-04	2.47E-02	1.07E-05	-8.56E-09	2.52E-12	0	0	0	4	NaK-44
0	4.63E-05	1.01E-07	-2.67E-11	7.83E-15	-9.74E-19	0	0	5	Neon
7.80E-03	1.41E-02	1.37E-05	0	0	0	15.564	2.70E-03	6	SUS-316
7.80E-03	1.49E-02	1.28E-05	0	0	0	17.04	2.72E-03	7	SUS-304
0.01673	4.13E-02	2.27E-05	0	0	0	6.013	1.09E-03	8	T-111
1.43E-02	1.00E-02	2.00E-05	-7.74E-09	9.48E-13	0	7.415	1.94E-03	9	UN
0.01096	1.02E-02	-2.08E-05	2.79E-08	-1.98E-11	5.45E-15	9.61E+00	1.57E-03	10	UO2
1.97E-02	1.37E-01	-9.14E-05	7.65E-08	-2.66E-11	3.25E-15	5.098	2.30E-04	11	W-26%Re
6.47E-03	1.10E-02	1.54E-05	-5.09E-08	1.56E-10	-1.21E-13	6.584	7.81E-04	12	Zry-2
0	1.49E-05	5.92E-08	-2.17E-11	-2.65E-14	2.34E-17	0	0	13	Argon
1.80E-03	1.40E-01	-1.30E-04	5.18E-08	-2.69E-12	-2.49E-15	0	0	14	Graphite
4.73E-04	3.26E-02	-5.80E-06	1.17E-07	-1.66E-10	5.54E-14	0	0	15	Lithium
1.02E-02	1.29E-01	-6.14E-05	4.91E-08	-2.39E-11	5.05E-15	5.143	7.52E-04	16	Molybdenum
1.93E-02	1.61E-01	-9.12E-05	6.30E-08	-2.15E-11	3.56E-15	4.423	7.52E-04	17	Tungsten
9.27E-03	2.00E-03	0	0	0	0	0	0	18	Sol-Gel
3.21E-03	6.02E-02	-5.31E-05	1.41E-08	3.58E-13	-3.98E-16	33.326	1.16E-02	19	SiC
2.70E-03	2.03E-01	1.36E-05	1.33E-07	7.44E-10	-1.08E-12	22.818	9.78E-03	20	Aluminium
0	2.48E-05	7.39E-08	2.30E-11	0	0	0	0	21	Nitrogen
4.41E-03	7.45E-03	1.05E-05	-3.44E-08	1.18E-10	8.21E-14	6.584	7.81E-04	22	Titanium
0	5.72E-05	1.30E-07	-3.07E-11	0	0	0	0	23	Helium x.4
1.66E-02	5.34E-02	1.25E-05	0	0	0	5.437	2.07E-03	24	Tantalum
1.82E-03	1.48E-01	-7.85E-05	0	0	0	10.717	7.48E-03	25	Beryllium
7.80E-03	8.34E-02	-1.19E-04	1.17E-07	-6.85E-11	0	1.22E+01	6.82E-03	26	Fe
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	27	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	28	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	29	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	30	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	31	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	32	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	33	Spare
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0	0	0.00E+00	34	Spare

(a) GENGTC-K の材料特性データシート

D	C1	熱伝導率 (W/mm・℃)	C3	C4	C5	S1	S2		
8.66E-03	4.53E-02		0	0	0	7.39E+00	6.87E-04	1	Nb-1%Zr
8.23E-03	9.67E-03	1.82E-05	0	0	0	12.407	4.31E-03	2	Hastelloy-X
0	1.43E-04	3.25E-07	-7.68E-11	0	0	0	0	3	Helium

(b) GENGTC-K の材料特性データシートのコメント

Fig. 3.12 GENGTC-K の材料特性データシート

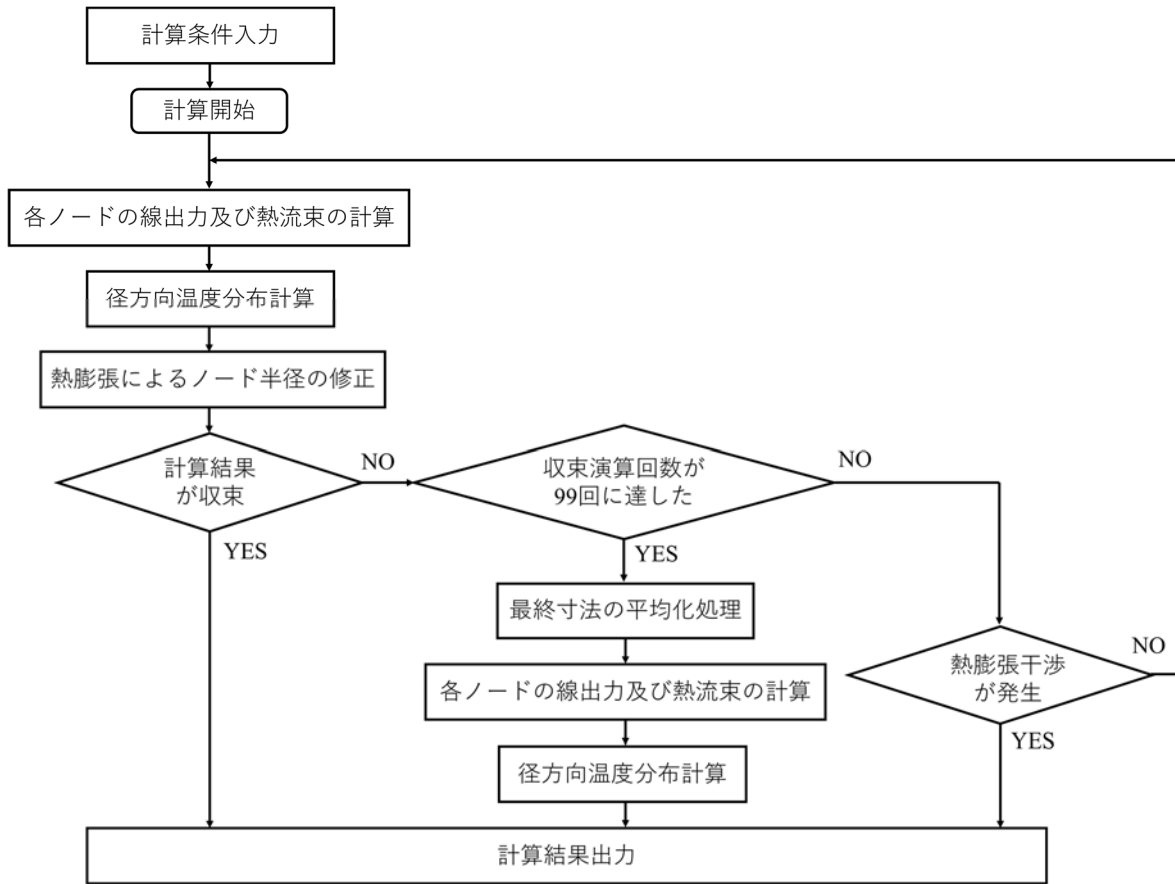


Fig. 4.1 GENGTC-K の計算フローチャート

--- 計算結果 ---

RUN NUMBER	:	1 1 1	計算結果の背景色
1. ギャップ (mm)	:	0.200	正常
2. ガンマ発熱率(W/g)	:	1.50	収束しなかった
3. 線出力 (W/mm)	:	0.00	外壁に接触して計算できない

ノード	温度 (°C)	線出力 (W/mm)	熱伝導率 (W/mm・°C)	材質No.	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
0	386.7					
1	267.3	28.41	0.000E+00	7	27.800	27.922
2	70.7	28.41	7.829E-05	23	28.000	28.017
3	48.2	32.67	1.491E-02	6	30.000	30.018

RUN NUMBER	:	1 2 1	計算結果の背景色
1. ギャップ (mm)	:	0.200	正常
2. ガンマ発熱率(W/g)	:	1.60	収束しなかった
3. 線出力 (W/mm)	:	0.00	外壁に接触して計算できない

ノード	温度 (°C)	線出力 (W/mm)	熱伝導率 (W/mm・°C)	材質No.	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
0	401.3					
1	274.7	30.30	0.000E+00	7	27.800	27.925
2	72.5	30.30	7.885E-05	23	28.000	28.017
3	48.6	34.85	1.493E-02	6	30.000	30.018

RUN NUMBER	:	1 3 1	計算結果の背景色
1. ギャップ (mm)	:	0.200	正常
2. ガンマ発熱率(W/g)	:	2.00	収束しなかった
3. 線出力 (W/mm)	:	0.00	外壁に接触して計算できない

ノード	温度 (°C)	線出力 (W/mm)	熱伝導率 (W/mm・°C)	材質No.	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
0	625.0					
1	486.1	37.88	0.000E+00	7	27.800	28.006
2	80.1	37.88	9.154E-05	23	28.000	28.016
3	50.3	43.56	1.499E-02	6	30.000	30.017

Fig. 4.2 判定結果毎の計算結果欄の表示

① NP : ペレット内出力密度の分割領域数

TITLE	JAEA-Data/Code				Density distribution in pellets	
CONTROL	ND9	NFUEL	NTG	① NP	NOPT	MOD
	3	0	-1	3	2	0
BASIC CONST.	H11	T11	R11	DENS	GAP	
	0.0233	49.0	0	1.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6
NP > 0	② RP	23.00	25.00	27.80		
	③ CP	1.00	0.80	0.60		
	1	2	3	4	5	6
NODE POINT	27.80	28.00	30.00			
PAR	③ CP	1.000	0.000	1.000		
	E	0.000	0.000	0.000		

② RP : 出力密度領域の半径

③ CP : 出力密度比

Fig. 4.3 ペレット内出力密度の分割領域計算の入力シート



\*\*\*\* 入力データ \*\*\*\* JAEA-Data/Code

ND9	: 最大ノード数	=	3
NGEO	: キャップ寸法のパラメータ数	=	1
NGAM	: ガンマ発熱率のパラメータ数	=	10
NPOWER	: 線出力のパラメータ数	=	3
T11	: 冷却水温度	=	49.00 °C
H11	: 外筒表面熱伝達率	=	2.33E-02 W/mm <sup>2</sup> ·°C
GAP	: キャップコンタクト	=	0.00E+00 W/mm <sup>2</sup> ·°C
R11	: 中心孔の半径	=	0.00 mm
NFUEL	: 中心温度計算式の選択	=	0
NP	: ペレット内の出力分布領域数	=	3
DENS	: ノードの初期密度	=	1.0000

グラフ      入力シート      PDF出力

半径(mm)	輻射率	MAT TYPE	材質No.	
1	27.80	0.000	1	6
2	28.00	0.000	0	23
3	30.00	0.000	1	6

各ノードの物性値

ノード	密度		熱伝導率					熱膨張率	
	$\rho$ g/mm <sup>3</sup>	C0	C1	C2	C3	C4	A0	A1	
1	7.800E-03	1.410E-02	1.370E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	15.564	2.700E-03	
2	0.000E+00	5.720E-05	1.300E-07	-3.070E-11	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000E+00	
3	7.800E-03	1.410E-02	1.370E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	15.564	2.700E-03	

燃料の温度分布  
NPで指定した分割領域数分の温度分布が表示される。

ノード	熱伝導率 (W/mm)	物性No.	半径 (mm)	最終半径 (mm)		
0						
1	28.7	28.41	0.000E+00	6	27.800	27.921
2	79.7	29.41	8.005E-05	23	28.000	28.020
3	56.7	33.67	1.503E-02	6	30.000	30.022

燃料の温度分布(CETUS)

NO	半径(mm)	係数	温度(°C)
1	23.0	1.0	2743.3
2	25.0	0.8	1925.2
3	27.8	0.6	287.7

温度 0.0

Fig. 4.4 ペレット内出力密度の分割領域計算結果の例

① NP: ペレット内出力密度の分割領域数      ② MOD: ペレット内での温度による密度変化を考慮した計算の有無

TITLE	JAEA-Data/Code						Density change w temp.
CONTROL	ND9	NFUEL	NTG	① NP	NOPT	② MOD	
	3	0	-1	3	2	1	
BASIC COND	H11	T11	R11	DENS	GAP		
	0.0233	49.0	0	1.0	0.0		
NP > 0	③ RP	④ CP					
	1	2	3	4	5	6	
	23.00	25.00	27.80				
	1.00	0.80	0.60				
NOPE POINT							
	1	2	3	4	5	6	
	27.80	28.00	30.00				
PAR	④ CP: 出力密度比						
	1.000	0.000	1.000				
E							
	0.000	0.000	0.000				

③ RP: 出力密度領域の半径

④ CP: 出力密度比

Fig. 4.5 ペレットの温度による密度変化を考慮した計算の入力シート

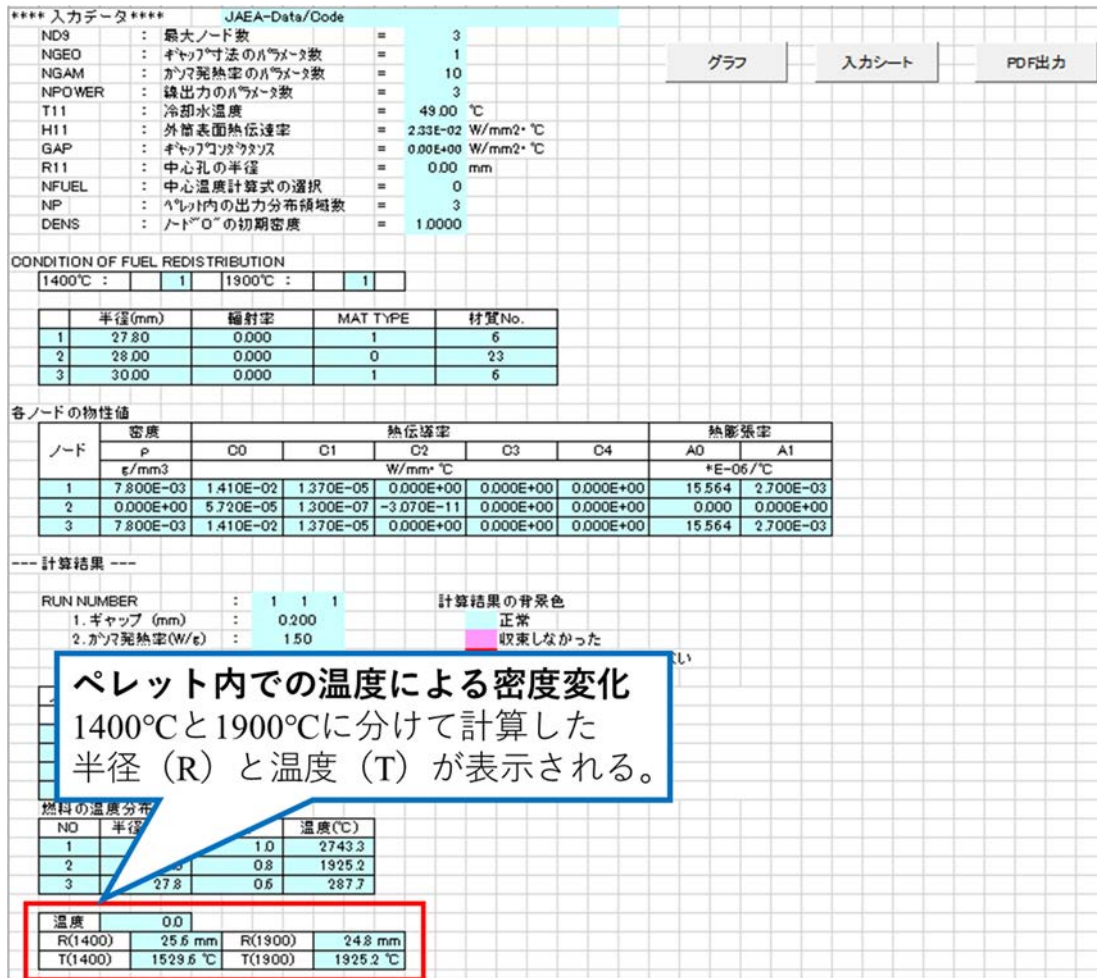
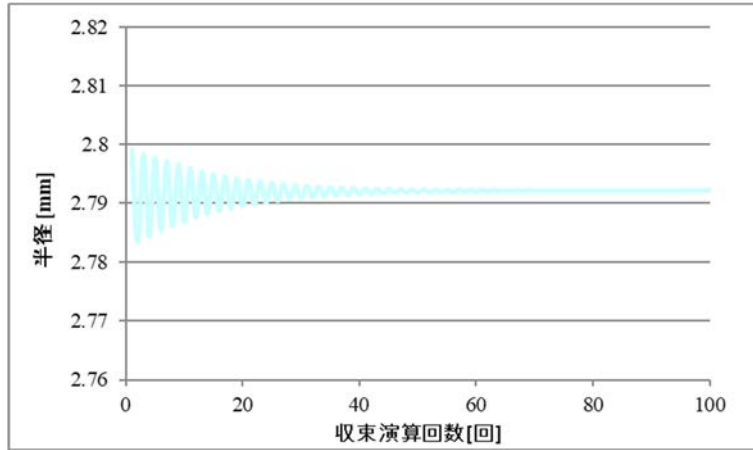


Fig. 4.6 燃料ペレットの温度による密度変化を考慮した計算結果の例

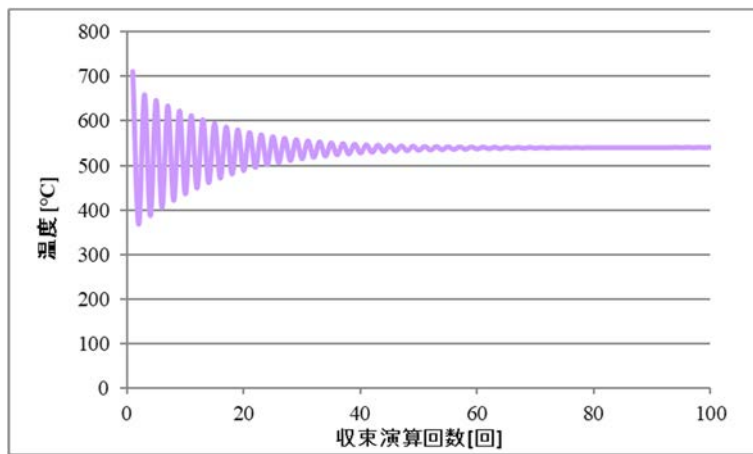


TITLE		JAEA-Data/Code				判定毎のグラフ		
CONTROL		ND9	NFUEL	NTG	NP	NOPT	MOD	
		3	0	-1		3		
BASIC CONSTANT		H11	T11	R11	DENS	GAP		
		0.0279	42.0		1.0	0.0		
NODE POINT PARAMETER			1	2	3	4	5	
		R	27.80	28.00	30.00			
		PG	1.000	0.000	1.000			
		E	0.000	0.000	0.000			
ANALYTICAL PARAMETER		NGEO	NGAM	NPOWER				
		1	3	1				
		NGET	GDEL	TTEMP	NTEMP1	NTEMP2		
		2	0.01					
		G11						
		1	2	3	4	5	6	
		1.50	1.60	2.00				
		F11						
		1	2	3	4	5	6	
		0.00						
PHYSICAL PARAMETER BY MATERIAL		MX						
		1	2	3	4	5	6	
		1	0	1				
		NW						
		1	2	3	4	5	6	
	7	23	6					

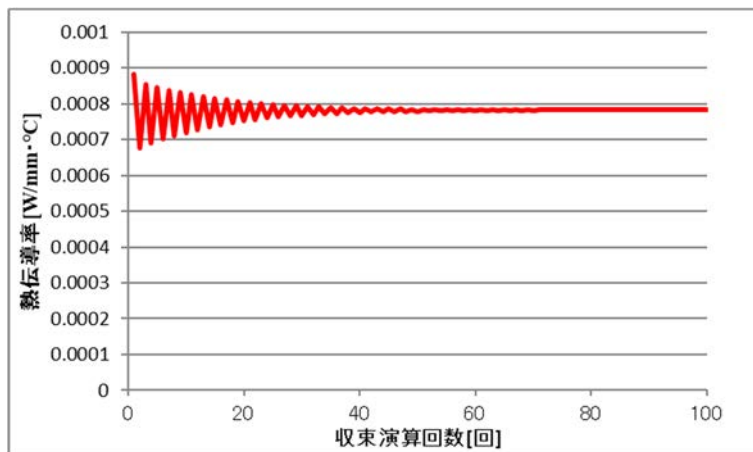
Fig. 4.7 3通りの収束演算判定結果が得られる計算条件



(a) 計算が正常に収束した場合の半径

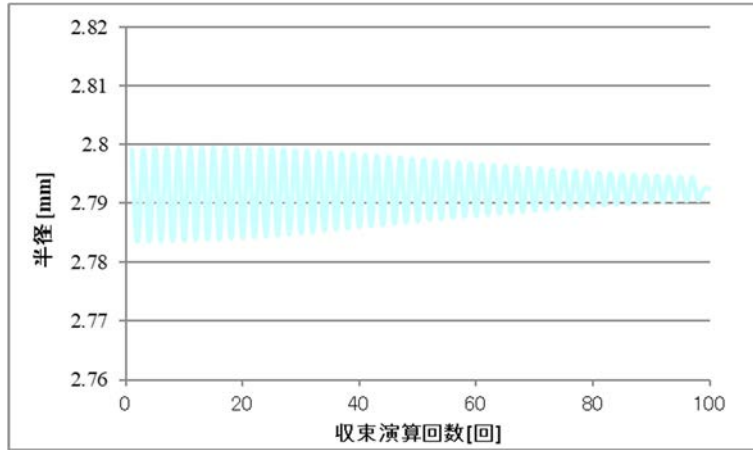


(b) 計算が正常に収束した場合の温度

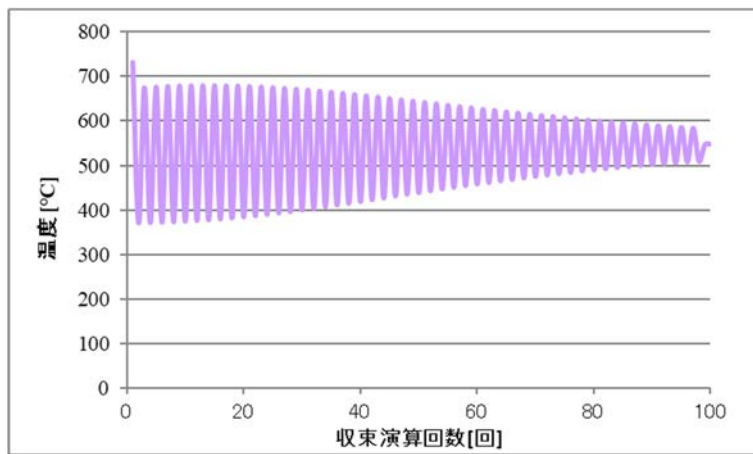


(c) 計算が正常に収束した場合の熱伝導率

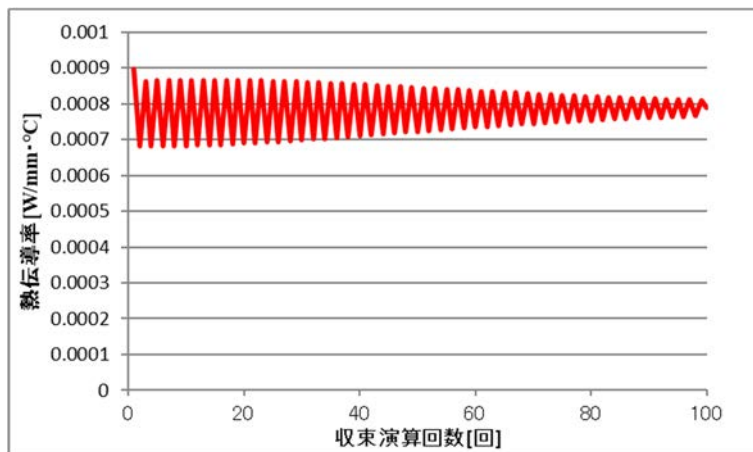
Fig. 4.8 計算が正常に終了した場合の収束演算回数毎の半径・温度・熱伝導率



(a) 計算が収束しなかった場合の半径

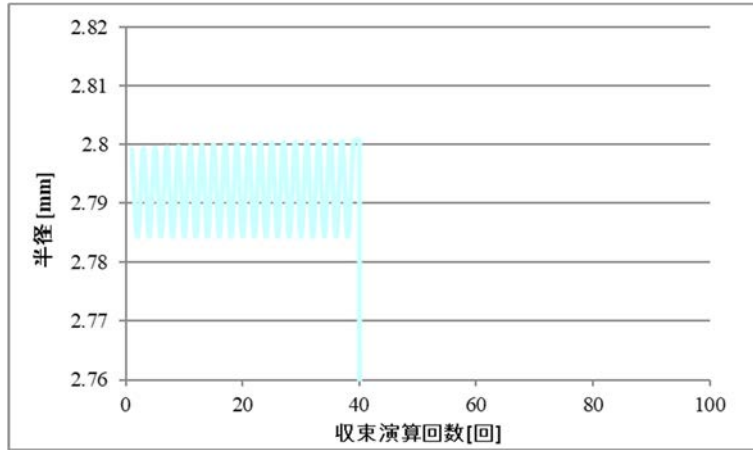


(b) 計算が収束しなかった場合の温度

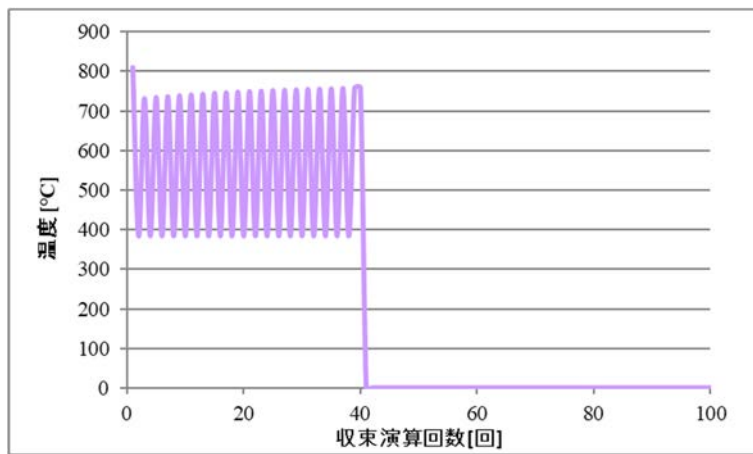


(c) 計算が収束しなかった場合の熱伝導率

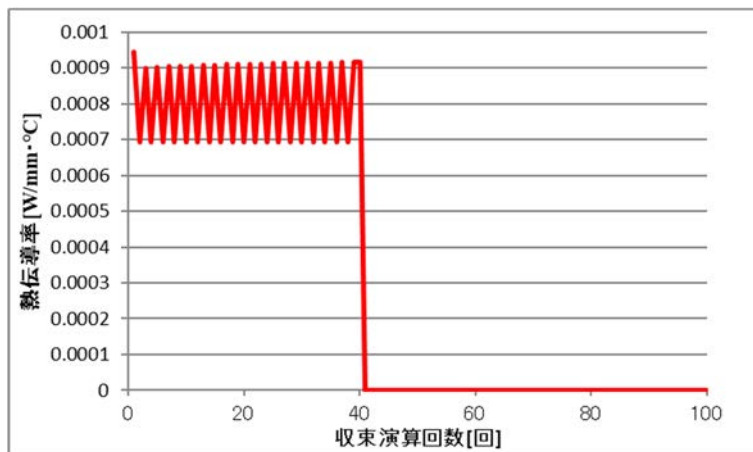
Fig. 4.9 計算が収束しなかった場合の収束演算回数毎の半径・温度・熱伝導率



(a) 計算が異常終了した場合の半径



(b) 計算が異常終了した場合の温度



(c) 計算が異常終了した場合の熱伝導率

Fig. 4.10 計算が異常終了した場合の収束演算回数毎の半径・温度・熱伝導率

NGEO	NGAM	NPOWER		
1	1	1		
NGET	GDELTA	TTEMP	NTEMP1	NTEMP2
1	0.1			

Fig. 4.11 目標照射温度での寸法計算セル

RUN NUMBER	:	5	1	1	計算結果の背景色
1. ギャップ (mm)	:	0.290			正常
2. ガンマ発熱率(W/g)	:	1.10			収束しなかった
3. 線出力 (W/mm)	:	0.00			外壁に接触して計算できない

ノード	温度 (°C)	線出力 (W/mm)	熱伝導率 (W/mm·°C)	材質No.	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
0	390.9					
1	304.4	20.83	0.000E+00			
2	62.3	20.83	8.000E-05			
			1.485E-02		6	30.015

理想は GAP 差が 0.01 mm、  
計算上不可能な場合は可能な  
限り小さくなるようにする

目標温度を挟んでいる

RUN NUMBER	:	6	1	1	計算結果の背景色
1. ギャップ (mm)	:	0.280			正常
2. ガンマ発熱率(W/g)	:	1.10			収束しなかった
3. 線出力 (W/mm)	:	0.00			外壁に接触して計算できない

ノード	温度 (°C)	線出力 (W/mm)	熱伝導率 (W/mm·°C)	材質No.	入力半径 (mm)	最終半径 (mm)
0	383.8					
1	296.9	20.83	0.000E+00	7	27.800	27.937
2	62.3	20.83	7.956E-05	23	28.080	28.094
3	46.5	23.84	1.485E-02	6	30.000	30.015

Fig. 4.12 目標照射温度での寸法計算結果の例

付録 GENGTC と NISA の計算結果の比較

GENGTC はキャプセル設計の熱計算に用いられる 1 次元熱計算コードであり、この計算コードは簡便で、かつ、計算結果を早く求めることができる。そのため、キャプセル構造材料の種類及び寸法の当たりを付ける際には GENGTC が便利である。GENGTC による計算結果からキャプセル構造材の大まかな寸法及び材質を決定し、その後 3 次元の有限要素解析コード NISA を用いて詳細な熱計算を行い、キャプセル構造材の寸法を決定している。

GENGTC は 1 次元計算コードであることから、中心軸対称の円形モデルしか扱うことができない。キャプセルは中心部に照射試料が配置され、その外側にガスもしくは液体の層、その外側に熱媒体や外筒等の固体の層を交互に重ねた構造となっているため、円形モデルを扱う場合には GENGTC でも問題なく計算ができる。しかし、照射試料が四角形である場合やキャプセル中心以外に配置された場合、円形モデルしか扱うことのできない GENGTC では計算モデルに補正を行っている。本章では、円形モデル及び四角形モデルにおける GENGTC と NISA の計算結果をそれぞれ比較することで、キャプセル設計で材質や寸法の当たりを付けるにあたって GENGTC を使用することの妥当性を検証する。

A. GENGTC-K における計算モデルの補正方法

GENGTC は中心軸対称の円形モデルしか扱うことができないが、特に材料キャプセルの場合には照射試料の断面はむしろ四角形であることが多い。そのため、GENGTC を用いて四角形の照射試料の温度計算を行う場合、円形モデルへの補正が必要となる。

計算モデルの補正において、補正の前後の熱流束及びガンマ発熱量が等価であることが求められる。そのため、GENGTC で四角形の照射試料を扱う場合には以下の 2 つの補正を行う。

- ① 熱流束（熱交換の表面積）を等価にするため、照射試料の周長が等価な円形に補正する。
- ② ガンマ線による発熱量を等価にするため、照射試料の密度に「照射試料の断面積比の逆数」を乗じる。

計算モデルの補正の例を Fig. A-1 に示す。Fig. A-1 はキャプセルの断面図を表しており、照射試料が四角形である NISA 計算モデルを中心軸対称の GENGTC モデルに置き換えている。NISA モデルの照射試料は周囲長  $2A_1+2B_1$  の長方形であり、GENGTC モデルは円周  $\pi D$  の円形であり、GENGTC モデルの照射試料直径  $D_1$  は次式で決定される。

$$D_1 = (2A_1 + 2B_1)/\pi$$

NISA モデルと GENGTC モデルの試料の密度をそれぞれ  $\rho$ 、 $\rho'$  とすると、GENGTC モデルの試料密度は NISA モデルの密度に断面積比の逆数を乗じた次式で補正する。

$$\rho' = \frac{A_1 B_1}{\frac{\pi}{4} D^2} \rho$$

## B. GENGTC における計算モデルの補正による計算結果の差

前述のとおり、GENGTC は円形モデルしか扱うことができないため、四角形試験片の熱計算を行う場合には Fig. A-1 のようなモデルの補正が必要となる。そこで、このモデルの補正が計算結果に与える差を評価するため、Fig. B-1 のモデル①、②の GENGTC-K 及び NISA の計算結果を比較した。計算条件と計算結果をそれぞれ Table B-1、Table B-2 に示す。ここで、各モデルのノード番号は Fig. B-2 のとおりとする。ノード 1 は照射試料ギャップの内側、ノード 2 は照射試料ギャップの外側の位置であるが、計算モデルの補正によってノード 1, 2 は NISA モデルと GENGTC モデルで試料中心（ノード 0）からの長さが異なる。そのため、ノード 0 からノード 1 までの長さは NISA モデルで 10.00 mm、GENGTC モデルで 12.73 mm であり、ノード 0 からノード 2 までの長さは 10.05 mm、GENGTC モデルで 12.78 mm であり、同じノード番号であっても NISA モデルの方が GENGTC モデルよりも照射試料中心に近いため、ノード 1, 2 の計算結果については単純に比較することはできない。

Table B-2 の(2)と(3)の差は同一モデル（円形モデルへの補正後）について GENGTC と NISA の計算結果の差を示しているが、その差は約 0.1%程度と無視できる程度に小さい。それに対し Table B-2 の(1)と(3)の差は計算モデルの四角形から円形への補正による計算結果の差を示しているが、NISA でのモデル①の計算結果(1)と GENGTC-K でのモデル②の計算結果(3)の差はノード 1, 2 で特に大きくなり、その差は最大で約 3 %であった。これは、ノード 1 とノード 2 は NISA モデルの方が GENGTC モデルよりも照射試料中心に近いことが原因であると考えられる。また、ノード 1, 2 を除いたノード 0, 3, 4, 5, 6, 7 の計算結果を比較すると、照射試料中心に近いほど NISA モデルと GENGTC モデルとの計算結果の差が大きくなった。

次に、Table B-1 の計算条件からガンマ発熱率のみを変更し、モデル①の NISA とモデル②の GENGTC の計算結果を比較した。ガンマ発熱率は GENGTC で試料中心温度が 100, 200, 300, 400, 500°Cとなるガンマ発熱率（0.45, 1.45, 2.78, 4.48, 6.61 W/g）とした。この 5 通りのガンマ発熱率における NISA と GENGTC の計算結果を Table B-3 に示す。また、Table B-2 と Table B-3 の計算結果における、GENGTC での試料中心温度と NISA と GENGTC の計算結果の比（(NISA - GENGTC) / GENGTC）を Fig. B-3 に示す。Fig. B-3 が示すとおり、NISA モデルの方が GENGTC モデルよりも照射試料中心に近いノード 1, 2 は他に比べて計算結果の差が大きくなり、その差と照射温度との明確な相関は見られなかった。また、照射温度が高くなるにつれて外筒の内径及び外径（ノード 6, 7）の計算結果の差は大きくなる一方、試料中心（ノード 0）、熱媒体外径（ノード 3）の計算結果の差は小さくなる傾向が見られた。さらに、それ以外の構成材（ノード 4, 5）について、照射温度と計算結果の差の相関は見られなかった。

## C. まとめ

1 次元熱計算コード GENGTC-K と 3 次元熱計算コード NISA の計算結果の比較を行った。同一モデルでの GENGTC と NISA の計算結果を比較した結果、その差は約 0.1%程度と無視できる程度に小さいことが分かった。一方、四角形から円形への計算モデルの補正により計算結果に最大約 3 %の差が生まれることが分かった。しかし、その差はキャプセルの温度制御装置<sup>A)</sup>の制御範囲内であることから、キャプセル設計で材質や寸法の当たりを付けるにあたって

GENGTC を使用することに問題はなく、妥当であることを確認した。ただし、計算モデルの補正をした照射試料周りのギャップのノードにおける GENGTC の計算結果は、照射試料中心位置からの距離の違いにより NISA の計算結果よりも低くなる傾向があることに留意する必要がある。

#### 参考文献

- A) 小沼勇一, 井上修一, 岡田祐次, 作田善幸, 菅野勝, 改良型キャプセル温度制御装置の設計, JAEA-Technology 2011-016, (2011), 13p.



Table B-1 計算条件及び物性値

ガンマ発熱率 [W/g]		1.74
冷却水温度 [°C]		42.0
キャプセル外表面熱伝達率 [W/mm <sup>2</sup> /°C]		0.02791
ギャップ層の材質		He
照射試料	材料	A533B
	密度 [g/mm <sup>3</sup> ]	$7.83 \times 10^{-3}$
	熱伝導率 [W/mm/°C]	$(3.86 \times 10^{-2}) + (3.16 \times 10^{-2})T - (2.22 \times 10^{-7})T^2 + (0.448)T^3 - (3.31 \times 10^{-13})T^4$
	線膨張係数 [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	$12.5 + 5.03 \times 10^{-3}T$
熱媒体	材料	Al
	密度 [g/mm <sup>3</sup> ]	$2.7 \times 10^{-3}$
	熱伝導率 [W/mm/°C]	$(0.203) + (1.36 \times 10^{-5})T + (1.33 \times 10^{-7})T^2 + (7.44 \times 10)T^3 - (1.08 \times 10^{-12})T^4$
	線膨張係数 [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	$22.818 + 9.78 \times 10^{-3}T$
内筒、外筒	材料	SUS316
	密度 [g/mm <sup>3</sup> ]	$7.8 \times 10^{-3}$
	熱伝導率 [W/mm/°C]	$(1.41 \times 10^{-2}) + (1.37 \times 10^{-5})T$
	線膨張係数 [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	$15.564 + 2.70 \times 10^{-3}T$

Table B-2 計算モデル①、②の GENGTC-K と NISA の計算結果

ノード 番号	温度 [°C]			(1)と(3)の 差 [%]	(2)と(3)の 差 [%]
	モデル①	モデル②			
	(1) NISA	(2) NISA	(3) GENGTC-K		
0	228.67	223.65	223.89	2.137%	0.108%
1	219.01	212.49	212.67	2.983%	0.080%
2	194.81	190.01	189.83	2.629%	0.099%
3	190.29	186.68	186.47	2.044%	0.112%
4	170.40	167.20	167.07	1.991%	0.075%
5	160.50	157.65	157.47	1.924%	0.110%
6	55.71	55.33	55.35	0.651%	0.037%
7	45.78	45.69	45.68	0.219%	0.004%

Table B-3 照射温度の異なる GENGTC-K と NISA の計算結果の比較

ノード番号		0	1	2	3	4	5	6	7
0.45 [W/g]	GENGTC	99.8	97.0	91.0	90.1	81.3	78.7	45.5	43.0
	NISA	101.9	99.5	93.2	92.0	82.7	80.0	45.6	43.0
結果の差 [%]		2.18	2.66	2.42	2.09	1.68	1.63	0.21	0.06
1.45 [W/g]	GENGTC	199.6	190.3	171.2	168.4	150.1	142.0	53.1	45.1
	NISA	203.9	196.0	175.7	171.9	153.2	144.9	53.4	45.2
結果の差 [%]		2.16	2.94	2.60	2.06	2.06	2.00	0.57	0.18
2.78 [W/g]	GENGTC	299.8	281.3	245.0	239.8	218.9	204.2	63.3	47.9
	NISA	305.6	289.6	251.6	244.6	223.5	208.4	63.8	48.0
結果の差 [%]		1.94	2.96	2.70	2.00	2.11	2.05	0.90	0.33
4.48 [W/g]	GENGTC	399.9	368.7	311.4	303.4	285.7	263.1	76.1	51.5
	NISA	405.0	378.0	318.7	308.0	290.6	267.4	77.0	51.7
結果の差 [%]		1.28	2.51	2.37	1.51	1.74	1.63	1.19	0.50
6.61 [W/g]	GENGTC	499.9	451.8	369.6	358.4	349.6	317.7	91.9	56.0
	NISA	503.8	461.9	378.6	363.4	355.3	322.5	93.2	56.4
結果の差 [%]		0.78	2.24	2.43	1.39	1.62	1.50	1.42	0.67

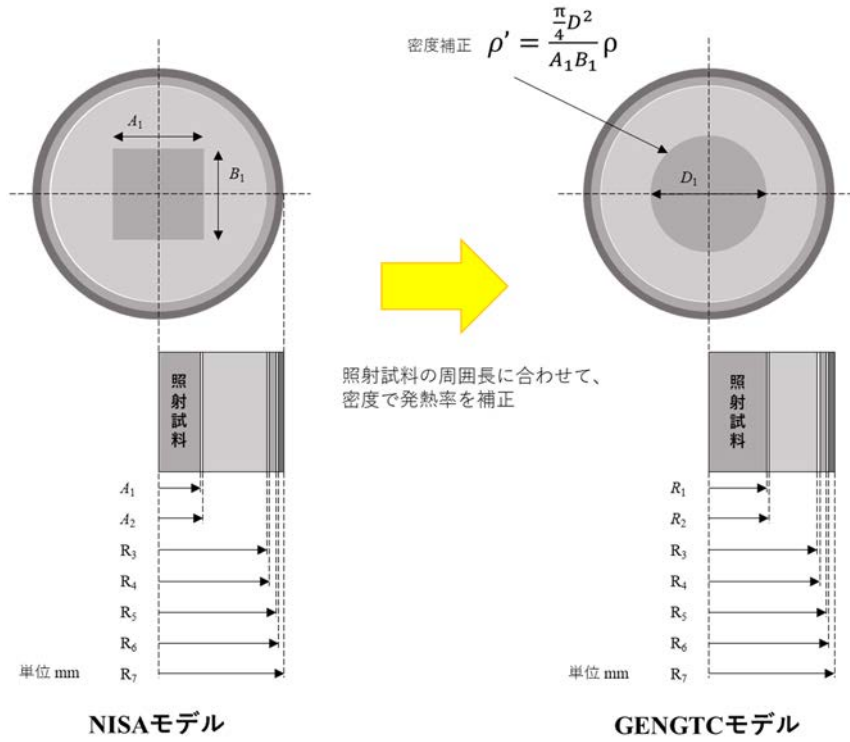


Fig. A-1 GENGTC を用いて四角形試験片の熱計算を行う場合の計算モデルの補正

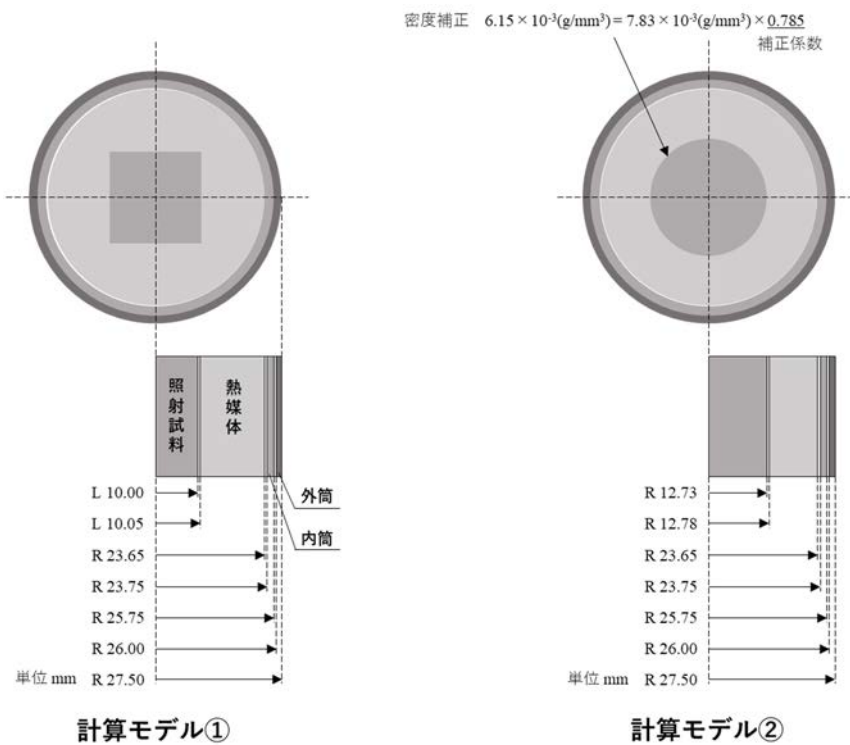


Fig. B-1 計算モデルの補正

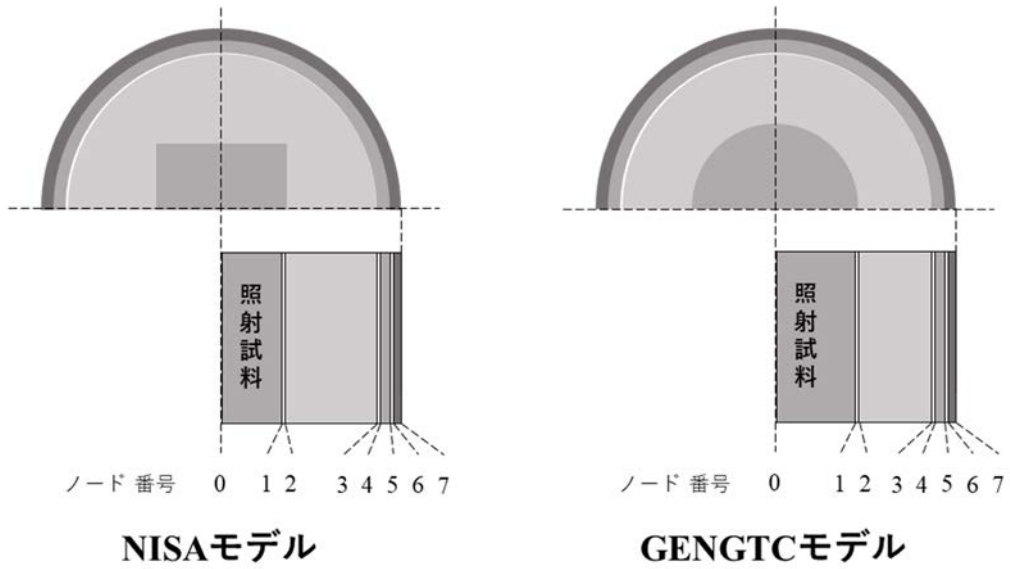


Fig. B-2 各モデルのノード番号

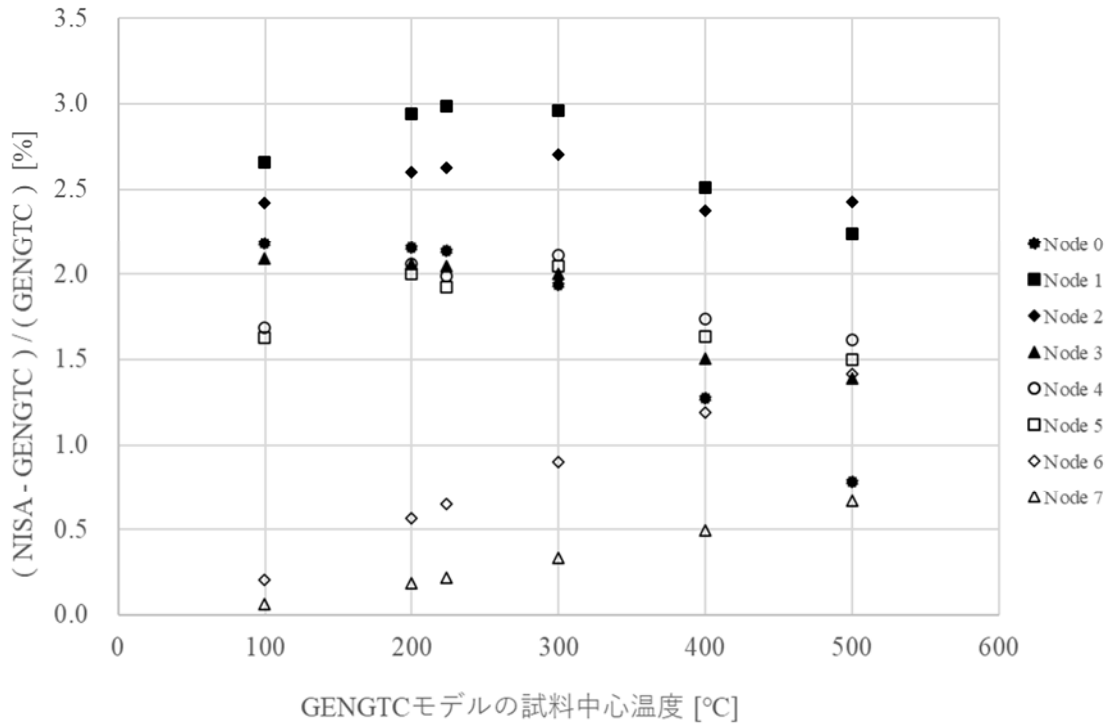


Fig. B-3 照射温度毎の NISA と GENGTC の計算結果の差



