JAEA-Technology 2014-043



「もんじゅ」炉心管理に用いる 3次元拡散燃焼計算コードHIZERの整備

Development of Three-dimensional Diffusion and Burn-up Code HIZER for Monju Core Management

加藤 慎也 下本 善彦 加藤 優子 北野 彰洋

Shinya KATO, Yoshihiko SHIMOMOTO, Yuko KATO and Akihiro KITANO

高速炉研究開発部門 高速増殖原型炉もんじゅ プラント管理部

Plant Operation Department Prototype Fast Breeder Reactor Monju Section of Fast Reactor Research and Development

Fabruary 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構研究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白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

 $\underline{\mathbb{C} \text{ Japan Atomic Energy Agency, } 2015}$

「もんじゅ」炉心管理に用いる 3次元拡散燃焼計算コード HIZER の整備

日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門 高速増殖原型炉もんじゅ プラント管理部 加藤 慎也、下本 善彦*1、加藤 優子、北野 彰洋

(2014年12月5日 受理)

炉心管理運用コードシステム(以下、「炉心管理システム」という)は、原子炉の管理・運用 に必要なデータ管理、解析実行、編集作業を一元的に制御することで業務の効率化を図ること を目的としたシステムである。炉心管理システムは、入力定数作成、核熱特性解析、放射線解 析、炉心健全評価、炉心運用解析の5つのモジュールシステムから構成される。これらのうち、 核熱特性解析モジュールシステムには、専用に開発した3次元拡散燃焼計算コード HIZER(以 下、「HIZER」という)が組み込まれている。HIZER により、「もんじゅ」の設計仕様、運用 計画に特化した核特性解析が可能となり、「もんじゅ」炉心に対して高精度かつ高効率な核特性 評価を実施することが可能となっている。本レポートでは HIZER の計算方法及び HIZER の 計算値の妥当性確認について述べる。

高速増殖原型炉もんじゅ:〒919-1279 福井県敦賀市白木 2-1 ※1技術開発協力員

JAEA-Technology 2014-043

Development of Three-dimensional Diffusion and Burn-up Code HIZER for Monju Core Management

Shinya KATO, Yoshihiko SHIMOMOTO^{**1}, Yuko KATO and Akihiro KITANO

Plant Operation Department, Prototype Fast Breeder Reactor Monju, Section of Fast Reactor Research and Development, Japan Atomic Energy Agency Tsuruga-shi, Fukui-ken

(Received December 5, 2014)

The core management and operation code system aims to perform core management task efficiently by systematic management of data, analyses and edits, which are needed in the reactor core management and operation. The system consists of the five calculation modules: the reactor constant generation module, the neutronic-thermal calculation module, the radiation analysis module, the core structural integrity estimation module, and the core operation analysis module. In these modules, the neutronic-thermal calculation module is based on the dedicated three-dimensional diffusion and burn-up code HIZER. HIZER can execute core calculations easily for specific design specification and operation patterns of Monju, enabling efficient and accurate evaluation of the Monju core characteristics. This report describes its calculation method and validation results.

Keywords: Monju, FBR, Core Management, HIZER, Diffusion and Burn-up Calculation

目 次

1. はじめ	りに 1
2. 3 次元	Б拡散燃焼計算コード HIZER の概要 2
2.1.	機能
2.2.	特徴
2.3.	コードシステムにおける位置付け6
2.4.	計算フロー
3. 計算7	方法
3.1.	概要9
3.2.	燃焼計算9
3.3.	出力分布計算14
3.4.	集合体内径方向出力ピーキング係数計算15
3.5.	增殖比計算15
3.6.	燃料ピン出力計算16
3.7.	ピン最大線出力計算20
4. 妥当t	生確認
4.1.	概要
4.2.	「もんじゅ」性能試験結果に基づく妥当性確認22
4.2.1.	概要
4.2.2	過剰反応度
4.2.3	制御棒価値
4.2.4.	燃焼係数
5. 結論.	
5.1.	概要
5.2.	今後の課題
謝辞	
参考文献	
付録A	実効断面積作成方法

Contents

1.	Intro	luction	1
2.	Brief	overview of the three-dimensional diffusion and burn-up code HIZER	2
2	.1.	Functions	2
2	.2.	Features	2
2	.3.	Role of HIZER in the code system	6
2	.4.	Calculation flow	6
3.	Calcu	lation method	9
3	.1.	Outline	9
3	.2.	Burn-up calculation	9
3	.3.	Power distribution calculation	4
3	.4.	Calculation of power peaking coefficient in assemblies 1	5
3	.5.	Breeding ratio calculation	5
3	.6.	Pin power distribution calculation1	6
3	.7.	Maximum linear heat generation rate calculation2	0
4.	Valida	ations2	2
4	.1.	General discription	2
4	.2.	Validations based on the system start-up test of Monju	2
	4.2.1.	Outline	2
	4.2.2.	Excess reactivity2	4
	4.2.3.	Control rod worth2	4
	4.2.4.	Burn-up coefficient	8
5.	Concl	usion	0
5	.1.	Summary	0
5	.2.	Future tasks	0
Ack	nowle	dgments	1
Ref	erence	s	2
App	pendix	A Calculation method of effective cross-sections	3

1. はじめに

高速増殖原型炉もんじゅ(以下、「もんじゅ」という)は、設計、製作、建設、運転の経験を 通して、高速増殖炉(FBR)に関する技術的性能の把握や運転信頼性及び安全性の実証を行う とともに、将来の FBR 実用化に向けた技術的課題の解明のための技術開発を行うプラントで ある。「もんじゅ」の運転管理業務の高度化を通して将来の FBR 実用炉に向けて運転管理技術 の高度化を図り、その運用コストを低減させるとともに解析システムの一元化などによる運転 管理業務の省力化によってヒューマンエラーの防止などの運転信頼性の向上を図ることは重要 な開発要素である。

「もんじゅ」には、原子炉運転中に中央計算機で簡易的に炉心状態を計算し、運転管理に反映する機能が備わっているが、一方でより詳細に炉心状態を把握するために中央計算機で得られたデータを炉心管理運用コードシステム(以下、「炉心管理システム」という)に受け渡し、詳細計算を行うこととしている。炉心管理システムには、大きく分けて入力定数作成、核熱特性解析、放射線解析、炉心健全評価、炉心運用解析の機能がある。これらのうち、核熱特性解析機能は、主として中性子拡散燃焼計算及びその結果を用いた炉心熱特性の解析を担っており、そのために3次元拡散燃焼計算コード HIZER(以下、「HIZER」という)を整備している。

HIZER は 1980 年に初期バージョンが開発され、それ以来、多くの改良がなされて現在の仕様となっており、今後もさらなる解析精度の向上に向けた改良が予定されている。本報告書では、2014 年現在「もんじゅ」で運用されている HIZER の概要及び性能試験に基づく HIZER の検証について述べる。

2. 3次元拡散燃焼計算コード HIZER の概要

本章では、HIZERの概要について述べる。以下、2.1節で HIZER の機能、2.2節で HIZER の特徴、2.3節で炉心管理システムにおける HIZER の位置づけ、2.4節で HIZER の計算フローについてそれぞれ説明する。

2.1. 機能

HIZER は、「もんじゅ」の炉心管理システムにおいて、3次元拡散燃焼計算を行うものである。HIZER は以下の計算機能を有する。

- A) 中性子束分布計算
 - ・3角メッシュ計算
- B) 中性子源(外部中性子源) 問題計算
 - ・3 角メッシュ計算
- C) 反応度価値、反応率、増殖比、出力分布計算
 - ・反応度価値、反応率、増殖比の計算機能(但し、中性子源計算問題には適用しない。)
 - ・燃焼ピン毎の出力分布、最大線出力分布、要素及びペレット燃焼度分布の計算機能
- D) 燃焼計算
 - ・燃焼方程式を有限差分法で解く機能
 - ・指定した燃料集合体を対象に集合体断面を細分化(6点)した領域で燃焼計算する機能
 - ・制御棒の B-10 燃焼計算機能

2.2. 特徴

(1) 制御棒の連続操作解析モデル

通常の拡散計算コードでは、制御棒の挿入量を変更する場合、炉心を構成する幾何形状の変 更が必要であると同時に、挿入量は拡散計算の軸方向計算メッシュもしくは軸方向ゾーンの境 界に合わせる必要がある。従って、いろいろな制御棒引抜きパターンの炉心特性を評価する核 特性解析では、入力データ作成に時間を要する。また、挿入量が微小な計算(例えば、制御棒 挿入の不揃いによる核特性への影響評価など)ができない。しかしながら、HIZER は、「もん じゅ」の炉心管理を目的として使用されるコードであり、実機プラントで行われる制御棒操作 に対応した核特性解析が要求されるため、上記のような問題は許容できない。そこで、HIZER には、上記の問題を解決するために次のような機能を持たせた。

A) メッシュ内の体積比を用いて原子数密度を平均化することで、制御棒の挿入量は連続的 に扱えるようにした。これにより、軸方向の計算メッシュや軸方向ゾーンに無関係に挿 入量を指定することができる。

- B) 炉心を構成する幾何形状を変更することなく制御棒の挿入量を入力で指定することがで きる。
- C)制御棒の挿入量が制御棒の機能(種類)によって一様な場合(バンク操作など)は、制 御棒の種類ごとにグループを構築し、そのグループ単位で挿入量を入力で指定すること ができる。また、逆に各制御棒が独立に駆動するような場合でも入力指定できる。
- D) 本機能は制御棒のみならず、一般の炉心構成要素(炉心燃料集合体、ブランケット燃料 集合体及び中性子遮へい体など)にも適用できる。
- E) 制御棒のように、計算体系外に引き抜いた後の処理についても、本モジュールは厳密に 取り扱うことができる。つまり、各集合体の軸方向情報(幾何形状、寸法、物質、核反 応断面積など)は、計算体系とは無関係に定義する(例えば、計算体系下端より下側の 下部ガスプレナム、エントランスノズル部、Na フォロアなどの領域をあらかじめ定義し ておく)ことができる。
- (2) 燃料交換機能

本コードは、あらかじめ設定した長期の燃料交換パターンを入力データで指定することがで きる。この燃料交換機能は、炉心内の集合体(炉心を構成する全ての要素を含む)を装荷する ための情報と、炉内の集合体を取り出すための情報並びに燃料交換間隔(日数)からなるデー タから構成されており、実際の燃料交換操作は、どの燃料交換パターン番号を適用するかの指 示のみで起動するように作られている。従って、平衡炉心のように交換パターンが繰り返され るものに対しては燃料交換パターン番号のみの指定で、長期燃料交換計算が可能になる。

以下では、燃料交換機能の特徴について説明する。

- A) 最大 10 種類の燃料交換パターン、交換条件(炉内装荷もしくは取り出し)、交換間隔デ ータを作成して、入力することができる。
- B) A)で指定した燃料交換パターン番号のみの指定で燃料管理モジュールが起動される。
- C) 1 回の燃料交換間隔内で任意の計算ステップ(拡散計算・燃焼計算)を実行することがで きる。従って、燃焼サイクル内で制御棒パターンを変更しながら数ステップ繰り返し計 算が可能である。
- D) 燃料交換パターンのデータは、どのような種類の集合体(例えば、内側炉心燃料集合体、 ブランケット燃料集合体、制御棒集合体などグループ化された集合体種類)を炉心のど

の位置に装荷もしくは取り出すのかの指定だけでよく、データの作成が容易である。

E) 燃料交換される燃料集合体の燃料組成は、炉心及び径方向ブランケット領域について集 合体1体ずつ指定できる。

(3) 燃料管理機能

本計算コードの燃料管理は、炉内に集合体が装荷された時の情報(燃料交換本数、燃料組成、 重量、交換パターン、炉内滞在サイクル数、滞在日数など)と炉内から取り出された集合体の 情報(取り出し本数、燃料組成、Pu 生成量、重量、燃焼度、滞在日数)を編集出力する機能 並びにこれらの情報をデータベースに記録する機能を有する。この燃料管理は、(2)の燃料交換 に関するデータに基づいて記録、編集出力する機能が主である。この概要図を Fig. 2-2-1 に示 す。



Fig. 2-2-1 燃料交換機能の概要図

[プログラム仕様]

HIZER のプログラム仕様を Table 2-2-1 に示す。

仕様項目	内容
プログラム名称	HIZER
言語	FORTRAN77
エネルギー群数	6
最大断面積セット数	60
最大集合体数	722
最大軸方向メッシュ数	21
最大核種数	35
最大燃料核種数	23
最大炊焼チェーン数	5
	60
具十兴如燃 <u><u></u> 是十兴如燃<u></u> </u>	200
取八讦柳於焼司 昇朱百 件数	40
東大集合体クルーク <u>級</u>	15
最大混合グループ数	15
最大流量ゾーン数	50
最大物質タイプ数	60
炉定数ライブラリ	JFS-3-J4.0[1]

Table 2-2-1 プログラム仕様

Table 2-2-1 に示したように、HIZER のエネルギー群数は6群となっている。一般的に軽水 炉の炉心計算では、計算時間を短縮するために3群以下の拡散計算を行う[2]が、「もんじゅ」 炉心では、ナトリウムの共鳴捕獲をより厳密に扱うことが必要となるため、経験的にエネルギ 一群数を6群としている。

2.3. コードシステムにおける位置付け

「もんじゅ」の炉心管理システムにおける、HIZERの位置づけを Fig. 2-3-1 に示す。



Fig. 2-3-1 炉心管理システムにおける HIZER の位置づけ

Fig. 2-3-1 に示すように、HIZER は、JOINT システムで作成された断面積と運転履歴を反 映した入力ファイルを読み込み、過剰反応度や制御棒価値などの炉心核特性、燃焼組成変化、 炉心及び集合体の発熱分布などを計算する。HIZER の計算結果は DATABASE に格納され後 段の計算コード、例えば集合体内熱流力特性計算コード DIANA や炉心ラッパ管温度計算コー ド HITETRAS に利用される。なお、DIANA は HIZER で計算された出力密度分布に基づいて 集合体内温度分布及び炉心内温度分布を評価するコード、HITETRAS は HIZER で得られた出 力密度分布や中性子束分布に基づきラッパ管温度分布やラッパ管高速中性子束分布などを評価 するコード、HIBEACON は HITETRAS の計算結果を引継ぎ、ラッパ管のスエリング歪度や クリープ歪度などを評価するコードである。

2.4. 計算フロー

断面積処理コードシステム JOINT システム[3]及び3次元拡散燃焼計算コード HIZER のプ ログラム構成について説明する。HIZER は、JOINT システムによって作成された実効ミクロ 断面積を入力パラメータとして利用して、定常状態の炉心特性並びに燃焼による燃料組成の変 化を計算する(Fig. 2-3-1)。その詳細な計算フローを Fig. 2-4-1 及び Fig. 2-4-2 に示す。



Fig. 2-4-1 JOINT システムと HIZER の計算フロー



Fig. 2-4-2 JOINT システムと HIZER の計算フロー

Fig. 2-4-1 及び Fig. 2-4-2 に示されるように、「もんじゅ」の炉心解析においては、「もんじゅ」炉心を簡易的に模擬した 2 次元 RZ 体系で少数群実効ミクロ断面積を作成し、これを入力 値として HIZER で詳細な 3 次元拡散燃焼計算を行う。なお、JOINT システムを用いた実効断 面積作成方法については Appendix A で説明する。

3. 計算方法

本章では HIZER における炉心核熱特性の計算方法について説明する。なお、3.1 節では HIZER の計算方法の概要について述べ、3.2 節から 3.7 節で以下の炉心核熱特性の計算方法に ついて説明する。

- ・燃焼特性
- ・炉心出力分布
- ・出力ピーキング係数
- ・増殖比
- ・燃料ピン出力
- ・ピン最大線出力

3.1. 概要

前述のように、HIZERは、「もんじゅ」の炉心管理システムの3次元中性子拡散燃焼計算を 司る計算コードである。HIZERは、拡散計算、燃焼計算、燃料管理の3つのモジュールから 構成される。HIZERの拡散計算モジュールでは、3次元3角メッシュ(Tri-Z)拡散計算によ り中性子束分布及び実効増倍率を評価するが、当該モジュールは3次元炉心設計解析コード MOSES[4]で適用しているものと同一の"DIF3D"[5]を solver として利用しており、DIF3Dの 計算結果に基づいて上述の炉心核特性を評価する。また、燃焼計算モジュールでは、上述の DIF3Dによる拡散計算で得られた中性子束を利用して燃焼計算を行う。なお、燃料管理モジュ ールは、入力された燃料集合体情報をベータベース化することにより、コード内で統一的に扱 うためのものであり、データの記録・編集・出力が主な機能である。

3.2. 燃焼計算

HIZER の燃焼計算では、燃焼ステップごとに集合体毎の3次元燃焼計算を行うことで燃料 組成の変化を計算する。本節では、HIZERの燃焼計算機能について説明する。 燃焼計算における基本方程式は、以下の式で表される。

{核種 A の増加量} = {核種 A の崩壊による変化量}

- + {核種 A の中性子吸収(捕獲 + 核分裂)による変化量}
- + {核分裂による生成量}
- + {他の核種の中性子捕獲による生成量}
- + {他の核種の崩壊による生成量}

(3-2-1)

次に、上記のそれぞれの項について考える。まず、(3-2-1)式の左辺は次のように表せる。

$$\{核種 A \mathcal{O} 增加量\} = \frac{dN_A}{dt}$$
(3-2-2)

また、(3-2-1)式の右辺第一項は次式で表せる。

$$\{ 核種 A の崩壊による減少量 \} = -\lambda_A N_A$$
 (3-2-3)

次に、核種Aの中性子吸収による減少量は多群形式において次のように表される。

{核種Aの中性子吸収(捕獲+核分裂)による減少量} =
$$-[\sum_{g} \sigma_{a,g,A} \phi_{g}] N_{A}$$
 (3-2-4)

また、核分裂による生成量は fissionable 核種 fis の核種 A への独立収率Γ_{fis,A}を用いて、次のように表せる。

$$\{ 核 分裂による生成量 \} = \sum_{\text{fis}} \left[\sum_{g} \sigma_{f,g,\text{fis}} \phi_{g} \right] N_{\text{fis}} \Gamma_{\text{fis},A}$$
(3-2-5)

ただし、HIZER では計算コスト低減のため核分裂後の FP 核種を厳密に取り扱うことはせず、 fissionable 核種毎に核分裂後の FP 核種群を 1 つの FP 核種(ランプ化 FP)として取り扱い、 それ以降の燃焼(FP 燃焼)を考慮しない。また、HIZER はランプ化 FP の断面積データが 22 核種(Th-232、Pa-231、U-233、U-234、U-235、U-236、U-237、U-238、Np-237、Np-238、 Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Pu-242、Am-241、Am-243、Cm-242、Cm-243、Cm-244、 Cm-246、Cm-248)について定義されている JENDL-4.0[6]に基づく高速炉用核定数セット JFS-3-J4.0[1]を利用しているが、最大核種数が 35 に制限されているため、JENDL-3.3[7]で整 備された 4 核種(U-235、U-238、Pu-239、Pu-241)のランプ化 FP を使用している。その他の fissionable 核種に対しては、核分裂後の核種取り扱いを近似的に上記の 4 核種のランプ化 FP も割り当てていることに留意が必要である。

残るは{他の核種の中性子捕獲による生成量}と{他の核種の崩壊による生成量}による寄与であるが、これの定式化には燃焼チェーンが強く関連する。そこで、これらの定式化に先立ちHIZERの燃焼計算で使用する燃焼チェーンを Fig. 3-2-1 に示す。



Fig. 3-2-1 HIZER の燃焼チェーン

Fig. 3-2-1 に示される燃焼チェーンから、HIZER で使用される燃焼チェーンが簡易なもので あり、核異性体を厳密に考慮しないことが分かる。また、a 崩壊も考慮しない。故に、他の核 種の中性子捕獲と崩壊による効果は単一核種のみ考慮することとなり、それぞれ次式で表され る。

なお、添字 B 及び C はそれぞれ、核種 A に対する(n, y)反応及び B 崩壊の親核種であることを 表す。

(3-2-2)式から(3-2-7)式の定義を(3-2-1)式に代入することで、次式が得られる。

$$\frac{\mathrm{d}N_A}{\mathrm{d}t} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{a,g,A} \phi_g\right] N_A + \sum_{\mathrm{fis}} \left[\sum_g \sigma_{f,g,\mathrm{fis}} \phi_g\right] N_{\mathrm{fis}} \Gamma_{\mathrm{fis},A} + \left[\sum_g \sigma_{c,g,B} \phi_g\right] N_B + \lambda_C N_C$$

$$(3-2-8)$$

(3-2-8)式が HIZER で解く燃焼方程式である。なお、(3-2-8)式において時間依存の物理量は、 各核種の原子数密度 N_A 、 $N_{\rm fis}$ 、 $N_{\rm B}$ 及び $N_{\rm C}$ 、ならびに中性子束 ϕ_g である。しかし、HIZER では、 他の一般的な燃焼計算コードと同様に、燃焼ステップとは別で定められる中性子束ステップ間 において中性子束 ϕ_g は変化しないと仮定する。Fig. 3-2-2 には中性子束ステップと燃焼ステッ プの概要図を示す。



Fig. 3-2-2 中性子束ステップと燃焼ステップの概要図

この仮定のもとでは、燃焼ステップ間の核種組成変化を考える際に、中性子束 ϕ_g を定数として扱う。以下では、この仮定のもとで燃焼ステップ間における核種組成の変化について考えることとする。

今、再度(3-2-8)式に着目し、微小時間 dt の間に着目する核種 A 以外の核種数は一定である と仮定すればN_{fis}、N_B及びN_cを定数として扱えるため、(3-2-8)式は次式のように表わせる。

$$\frac{\mathrm{dN}_A}{\mathrm{d}t} = -\alpha N_A + \beta \tag{3-2-9}$$

ただし、

$$\alpha = \lambda_A + \sum_g \sigma_{a,g,A} \phi_g \tag{3-2-10}$$

$$\beta = \sum_{\text{fis}} \left[\sum_{g} \sigma_{f,g,\text{fis}} \phi_g \right] N_{\text{fis}} \Gamma_{\text{fis},\text{A}} + \left[\sum_{g} \sigma_{c,g,\text{B}} \phi_g \right] N_B + \lambda_C N_C$$
(3-2-11)

とした。この非斉次1階微分方程式の解は斉次方程式の一般解と非斉次方程式の特殊解との線 形結合によって表現されるため、次の解が得られる。

$$N_A = C \cdot exp(-\alpha t) + \frac{\beta}{\alpha}$$
 (C は積分定数) (3-2-12)

ここで、t→∞の極限をN_A[∞]と表すとすれば、(3-2-12)式より

$$N_A^{\infty} = \frac{\beta}{\alpha} \tag{3-2-13}$$

が得られ、一方で t=0 のときの核種 A の原子数密度をN⁰_Aで表すと、(3-2-12)式から次の関係式 が得られる。

$$C = N_A^0 - \frac{\beta}{\alpha} = N_A^0 - N_A^\infty$$
(3-2-14)

従って、着目する核種以外の核種の原子数密度を一定とする仮定のもとでは時刻 t における 核種 A の原子数密度は次式によって表される。

$$N_{A} = (N_{A}^{0} - N_{A}^{\infty}) \cdot exp(-\alpha t) + N_{A}^{\infty}$$
(3-2-15)

また、時刻 t=0 から微小時間 Δt 間の核種 A の平均原子数密度NAは次式により定義される。

$$\overline{\mathbf{N}_{\mathrm{A}}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{0}^{\Delta t} N_{\mathrm{A}} dt \tag{3-2-16}$$

すなわち、

$$\overline{\mathbf{N}_{A}} = (N_{A}^{0} - N_{A}^{\infty}) \frac{1 - exp(-\alpha\Delta t)}{\alpha\Delta t} + N_{A}^{\infty}$$
(3-2-17)

である。ここで、次の2つの近似式(1次の Pade 近似等)を導入する。

$$\exp(-\alpha\Delta t) \approx \frac{2-\alpha\Delta t}{2+\alpha\Delta t} \tag{3-2-18}$$

$$\frac{1 - \exp(-\alpha \Delta t)}{\alpha \Delta t} \approx \frac{2 - \frac{\alpha^2 \Delta t^2}{6}}{2 + \alpha \Delta t}$$
(3-2-19)

これにより、(3-2-15)式及び(3-2-17)式は、それぞれ(3-2-20)式及び(3-2-21)式のように変形される。

$$N_A = (N_A^0 - N_A^\infty) \frac{2-\alpha \Delta t}{2+\alpha \Delta t} + N_A^\infty$$
(3-2-20)

$$\overline{\mathbf{N}_{\mathrm{A}}} = (N_{A}^{0} - N_{A}^{\infty}) \frac{2 - \frac{\alpha^{2} \Delta t^{2}}{6}}{2 + \alpha \Delta t} + N_{A}^{\infty}$$
(3-2-21)

なお、

$$N_A^{\infty} = \frac{\sum_{\text{fis}} [\sum_g \sigma_{f,g,\text{fis}} \phi_g] N_{\text{fis}} \Gamma_{\text{fis},\text{A}} + [\sum_g \sigma_{c,g,\text{B}} \phi_g] N_B + \lambda_C N_C}{\lambda_A + \sum_g \sigma_{a,g,A} \phi_g}$$
(3-2-22)

である。これらの式を用いることで、連立微分方程式を直接的に解くことなく燃焼計算を行う ことができる。なお、HIZERの計算では、特定の短半減期核種に対して 8 崩壊を無視し、特 定核種の生成時は直ちに娘核種へ遷移する仕様となっている。具体的には、Fig. 3-2-1 におい て、丸枠で囲われる核種については、8 崩壊を陽的に取り扱っていない。例えば、²³⁹Pu につい ては、8 崩壊の親核種である²³⁹U及び²³⁹Npの8崩壊が生成と同時に起こると仮定されるため、 (3-2-22)式の代わりに次式が用いられる。

$$N_{239Pu}^{\infty} = \frac{\left[\sum_{g} \sigma_{c,g,^{238}Pu} \phi_{g} \right] N_{238Pu} + \left[\sum_{g} \sigma_{c,g,^{238}U} \phi_{g} \right] N_{238U}}{\lambda_{239Pu} + \sum_{g} \sigma_{a,g,^{239}Pu} \phi_{g}}$$
(3-2-23)

このような近似的な処理の理由として、(3・2・22)式で解く核種 A 以外の核種の燃焼ステップ 内の個数密度変化を無視する仮定を用いることが挙げられる。この仮定のため、燃焼ステップ に対して極端に半減期が短い核種と吸収断面積が大きい核種を厳密に扱う場合には、燃焼ステ ップを十分に短くしなければ、数値計算上の不安定性が発現する可能性がある。一方で、炉心 管理の観点からは、燃焼計算において核特性に大きな影響を与える核種あるいは核物質防護上 重要な核種の原子炉起動から停止までのインベントリ変化を把握することが重要であり、それ 以外の核種について厳密に評価する必要はない。従って、HIZER では炉心管理上重要でない 核種を取り扱うことによる計算時間の増大を回避するために、短半減期核種の8崩壊を近似的 に取り扱う。

3.3. 出力分布計算

HIZER では、拡散計算で得られた相対中性子束分布と全発熱断面積から炉心熱出力に規格 化して出力分布を求める。具体的には、炉心全熱出力Pは次式により表される。

$$\overline{\mathbf{P}} = \sum_{g=1} \sum_{i=1} \sum_{h,i}^{g} \phi_i^g V_i \tag{3-3-1}$$

ここで、

g	:エネルギー群
i	:空間メッシュ
P	:炉心全熱出力
$\Sigma^g_{h,i}$:エネルギー群g、空間メッシュiにおける巨視的全発熱断面積
$\phi^{ m g}_{ m i}$:エネルギー群g、空間メッシュiにおける全中性子束
Vi	: 空間メッシュiの体積

なお、HIZER においては、微視的全発熱断面積と核種の原子数密度を用いて巨視的全発熱断 面積を定義するが、ここで用いられる微視的全発熱断面積は次式により定義される。

$$\sigma_{H} = \{ (E_{f} + EM) \cdot \sigma_{f} + (E_{c} + EM) \cdot \sigma_{c} + HSD \} \cdot e$$
(3-3-2)
ただし、
$$\sigma_{H} : 微視的全発熱断面積$$
$$\sigma_{f} : 核分裂断面積$$
$$e : 単位換算係数(W \cdot sec/MeV)$$

E_f:核種毎核分裂あたりの発熱

 σ_c : 捕獲断面積

HSD:下方散乱による発熱

 $E_c: 核種毎捕獲あたりの発熱$

EM:各エネルギー群のレサジー平均

である。なお、上式における発熱量は参考文献[8]に基づいている。

3.4. 集合体内径方向出力ピーキング係数計算

HIZER では、拡散計算モジュール DIF3D を利用して、集合体を6つに分割する3角メッシュで拡散計算を行うが、さらに拡散計算により得られたメッシュ点の中性子束を用いて集合体内径方向出力ピーキング係数を評価することができる。なお、集合体内径方向出力ピーキング係数は冷却材沸騰防止に対する管理値として定められる。

集合体内6点のg群の中性子束を $\phi_1^g \sim \phi_6^g$ 、着目する集合体のg群の巨視的全発熱断面積を Σ_h^g と表せば、各点の単位面積当たりの出力 P_i が得られる。

$$P_{i} = \sum_{g} \Sigma_{h}^{g} \phi_{i}^{g} \qquad (i=1\sim6)$$
(3-4-1)

また、集合体平均の出力Pとの関係は

$$\overline{\mathbf{P}} = \frac{1}{6}(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6)$$
(3-4-2)

を満たす。

集合体内径方向出力ピーキング係数 RPF(Radial Peaking Factor)P_{RPF}は次式によって評価される。

$$P_{\text{RPF}} = \max_{i} \left\{ \frac{P_{i}}{\overline{p}} \right\}$$
(3-4-3)

3.5. 増殖比計算

増殖比は、原子炉における種々の核反応により消滅する核分裂性核種1個当りの核分裂性核 種生成数として定義される。

HIZER では、以下の式によって炉心の増殖比 BR を評価する。

$$BR = \frac{\sum_{i} v_{i} \sum_{l_{1}} N_{i}^{l_{1}} \sum_{g} \sigma_{c,i}^{l_{1},g} \cdot \phi_{i}^{g}}{\sum_{i} v_{i} \sum_{l_{2}} N_{i}^{l_{2}} \sum_{g} \sigma_{a,i}^{l_{2},g} \cdot \phi_{i}^{g} + \sum_{i} \sum_{l_{2}} \lambda^{l_{2}} A_{i}^{l_{2}}}$$
(3-5-1)
ここで、
i : 空間に対する添字
 l_{1} : fertile 核種 (²³⁸U、²⁴⁰Pu)
 l_{2} : fissile 核種 (²³⁵U、²³⁹Pu、²⁴¹Pu)
g : エネルギー群
 V_{i} : 空間 i の体積

$N_i^{l_x}$: 核種l _x の原子数密度
$\sigma^{l_1,g}_{c,i}$: fertile 核種 l_1 の捕獲微視的断面積
$\sigma^{l_2,g}_{a,i}$: fissile 核種 l_2 の吸収微視的断面積
ϕ^{g}_i	:空間i、エネルギー群gの中性子束
λ^{l_2}	: fissile 核種l ₂ における崩壊定数
$A_i^{l_2}$: 空間 i に存在する fissile 核種l ₂ の原子量

である。また、(3-5-1)式を反応率で表せば、

$$BR = \frac{\sum_{i} R_c^{l_1}}{\sum_{i} R_a^{l_2} + \sum_{i} \sum_{l_2} \lambda^{l_2} \cdot A_i^{l_2}}$$

(3-5-2)

となる。

3.6. 燃料ピン出力計算

炉心設計において、集合体ごとの出力の最大値(集合体出力ピーキング)と同様に重要な物 理量として、燃料ピン出力に対するピーキングがある。前者は冷却材の沸騰を防止するための 管理値として定められるものであるが、後者は燃料被ふく管の機械的健全性を担保するための 管理値として定められる。HIZER では、出力分布計算で得られた計算結果から燃料ピン出力 を算出する。

HIZER では、3 角メッシュ拡散計算により炉心内の中性子束挙動を評価する。この際、6 つ の正三角形メッシュを用いて1 つの燃料集合体の形状を表現するため、燃料集合体あたり6 点 の中性子束計算点が存在する。HIZER は、着目する燃料集合体とその周囲の燃料集合体の中 性子束から1 燃料集合体あたり25 点の出力分布を評価し、それを4 次の多項式で近似するこ とで燃料ピン出力を計算する機能を持つ。

集合体内の燃料ピン出力を算出するにあたり、まず Fig. 3-6-1 示される集合体内 25 点の出 力を算出する。



Fig. 3-6-1 集合体内出力計算点

なお、上述のように HIZER では 3 角メッシュ拡散計算を行うので、燃料ピン出力計算を行う 時点で 2~7 番の点の計算点の出力は既知である。

まず、集合体中心の出力を既知の 6 点の出力の平均値として計算する。HIZER では集合体 内の断面積は一定として計算を行うので、着目する燃料集合体 i 内の出力評価点 x の出力をP_{i,x} と表すとすれば、着目する燃料集合体の中心点の出力P_{i,1}は次式により評価できる。

$$P_{i,1} = \sum_{n=2}^{7} P_{i,n} / 6 \tag{3-6-1}$$

また、8~13 番の点における出力は両側の三角メッシュの計算点での出力の平均として評価される。例えば、8番の点の出力P_{i.8}は次式により評価される。

$$P_{i,8} = \frac{P_{i,2} + P_{i,7}}{2} \tag{3-6-2}$$

9~13番の点に関しても同じ要領で計算する。

次に、燃料集合体を模す正六角形の頂点、すなわち、14~19番の点の出力を求める。これに 際して、着目する燃料集合体の周囲 1 層の燃料集合体の計算点における中性子束を利用する。 例として、Fig. 3-6-1の14番の点の中性子束を計算することを考える。この時の14番の点に おける周囲の計算点を Fig. 3-6-2 に示す。



Fig. 3-6-2 燃料集合体iの14番の出力評価点における周囲の計算点との位置関係

このとき、燃料集合体iの14番の点の中性子束φ_{i,14}は次式により評価される。

$$\Phi_{i,14} = \frac{D_i(\Phi_{i,2} + \Phi_{i,7}) + D_j(\Phi_{i,5} + \Phi_{i,6}) + D_k(\Phi_{i,3} + \Phi_{i,4})}{2(D_i + D_j + D_k)}$$
(3-6-3)

ただし、 D_i は燃料集合体 i の拡散係数を表す。さらに、(3-6-3)式で得られた中性子束に燃料集合体 i の発熱断面積 $\Sigma_{h,i}$ を利用し、次式の計算を行うことで当該位置における出力 $P_{i,14}$ を評価する。

$$\mathbf{P}_{i,14} = \Sigma_{\mathbf{h},i} \cdot \mathbf{\phi}_{i,14} \tag{3-6-4}$$

上記の方法と同様の方法を用いて、15~19番の点における出力を評価する。

最後に、20~25番の点における出力を考える。この際には、着目する出力評価点が隣接する 2つの燃料集合体の計算点から着目する出力評価点の中性子束を計算する。ここで、Fig. 3-6-1 における 20番の出力評価点における周囲の燃料集合体との位置関係を Fig. 3-6-3 に示す。



Fig. 3-6-3 燃料集合体 iの 20 番の出力評価点における周囲の計算点との位置関係

このとき、燃料集合体iの20番の点の中性子束 φ_{i.20}は次式により評価される。

$$\phi_{i,20} = \frac{D_i \phi_{i,2} + D_j \phi_{j,5}}{D_i + D_j}$$
(3-6-5)

さらに、(3-6-4)式と同様に得られた中性子束 $\phi_{i,20}$ と燃料集合体 i の発熱断面積 $\Sigma_{h,i}$ を乗ずること で着目する点での出力 $P_{i,20}$ を計算することができる。また、上記の方法と同様に 21~25 番の点 の出力を評価する。

以上の計算により、燃料集合体内の25点の出力を評価することができる。HIZERでは、これにより得られた25点の集合体内出力分布を4次の多項式でフィッティングを行うことにより、集合体内の連続的な出力分布を計算する。以下では、その方法について説明する。

集合体内の出力分布 p を次式のように多項式で展開する。

$$p = \sum_{m} a_{m} \cdot f_{m} \qquad m = 0, \dots, M$$
$$= a_{0} \cdot f_{0} + a_{1} \cdot f_{1} + \dots + a_{M} \cdot f_{M} \qquad (3-6-6)$$

ここで、 f_m は Table 3-6-1 に示す x と y の関係とする。

								<i>) m</i>	<i>,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,						
$f_{\rm m}$	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}
x,y	1	х	У	\mathbf{x}^2	xy	y^2	\mathbf{x}^3	x^2y	xy^2	y^3	\mathbf{x}^4	x^3y	x^2y^2	xy^3	y^4

Table 3-6-1 fmと x,y の関係

上表の多項式の係数a_mを25点の集合体内出力分布の最小二乗フィッティングにより求める。 最小二乗法における多項式フィッティングを行う際には、次式の正規方程式を満足する係数a を求める。

 $\mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{a} = \mathbf{G}^T \mathbf{y} \tag{3-6-7}$

ただし、行列Gは(3-6-6)式において要素 G_{ij} にi番目の標本(i < 25)の f_j 成分を持つ行列、aは(3-6-6) 式の展開係数 a_m を用いて $a = (a_0, a_1, \dots, a_M)^T$ により定義されるベクトル、yは 25 点の集合体 内出力分布 P_i を用いて $y = (P_0, P_1, \dots, P_{25})^T$ により定義されるベクトルである。従って、(3-6-7) 式では係数ベクトルa以外は既知であり、(3-6-7)式の逆問題を解くことで係数ベクトルaを求め ることができる。このとき、Moore-Penrose 型逆行列を利用するなどの手法を用いることで任 意の行列に対して安定的に数値計算を行うことができるが、HIZER では(3-6-7)式の逆問題を 解くために掃き出し法 (ガウスの消去法)を用いる。従って、HIZER の計算においては行列 $G^T G$ が正則であることを保証する必要がある。ただし、行列Gは 25 点の集合体内出力分布の計算点 の座標によって一意に定まる行列であるため、事前に正則性が担保される計算点を選んでおく ことで、逆問題の数値解法に起因する問題は回避される。

3.7. ピン最大線出力計算

HIZER には、ピン最大線出力を計算する機能が実装されている。本節では、本機能について A)計算集合体の選定及び B)計算方法について説明する。

A) 計算集合体の選定

ピン最大線出力を燃料ピン単位に計算するには、膨大な計算時間が必要となるため、HIZER では計算オプションに従って、炉心内でピン最大線出力が最大となる集合体を事前に判別し、 計算する燃料集合体を限定している。この選定に際しては、3.6 節で説明した燃料ピン出力計 算において算出された 25 点の集合体内出力の値から最大値を持つ集合体を求める。なお、選 定に際しては、以下に示す 2 通りのオプションを持つ。 i. 流量分配領域毎最大出力集合体を選定する方法

前節で示した集合体内 25 点の出力 $P_{n,pl,i}$ に対して、流量分配領域毎に次式を満たす集合体 n を選定する。

(3-7-1)

$$\max_n(\sum_{pl}\sum_i P_{n.pl.i})$$

ただし、

である。

i.と同様に集合体内 25 点の出力 $P_{n,pl,i}$ に対して、流量分配領域毎プレーン毎に次式を満たす 集合体 n を選定する。

$$\max_{n,pl}(\sum_{i} P_{n,pl,i}) \tag{3-7-2}$$

B) 計算方法

A)で選定した集合体内の 25 点の出力分布から、前節に示した方法に基づいて計算された燃料ピン毎の出力分布に対して、下式によりピン最大線出力を計算する。

$$MLHR_{m,pl}^n = P_{m,pl}^n \cdot A/N^n \tag{3-7-3}$$

ただし、

$MLHR_{m,pl}^{n}$: 燃料集合体 n における、燃料ピン m、軸プレーン pl 毎最大線
	出力[W/cm]
$P_{m,pl}^n$: 燃料集合体 n における、燃料ピン m、軸プレーン pl 毎出力
	[W/cm ³]
Α	:燃料集合体における軸プレーンあたりの燃料ピンの表面積[cm2]
N^n	: 燃料集合体の燃料ピン本数

である。

4. 妥当性確認

本章では HIZER の妥当性確認について説明する。なお、以下では 4.1 節で妥当性確認の概要、4.2 節で「もんじゅ」性能試験結果に基づく妥当性確認についてそれぞれ説明する。

4.1. 概要

HIZER を整備するにあたって、平成6年及び平成7年に行われた「もんじゅ」性能試験に おいて測定された以下の物理量を利用した妥当性確認を実施した[9][10]。

- 過剰反応度
- 制御棒価値
- 燃焼係数

これらを利用した検証結果について、4.2節で説明を行う。なお、HIZERで計算される中性 子束分布及び実効増倍率は炉心管理上極めて重要であると言える。しかしながら、HIZER で は、アルゴンヌ国立研究所において開発された3次元拡散計算コードDIF3Dを拡散計算 solver として利用しているため、本コードの検証では「DIF3Dの実装確認」のみに留め、中性子束分 布及び実効増倍率単体としての妥当性確認は省略することとした。一方で、それら計算機能の 適応範囲の妥当性は、過剰反応度と制御棒価値の「もんじゅ」炉心における測定値との比較に よって担保する。

4.2. 「もんじゅ」性能試験結果に基づく妥当性確認

4.2.1. 概要

本節では「もんじゅ」性能試験結果に基づく HIZER の妥当性確認について説明を行うが、 それに先立ち本項で HIZER の検証に利用した性能試験について説明する。

HIZER の検証では、平成6年及び平成7年に行われた「もんじゅ」性能試験の結果を用いた。これは、平成22年に行われた炉心確認試験は、ゼロ出力運転において実施されたため、 燃焼係数や出力分布などの出力運転を行うことにより測定が可能となる物理量が測定されていないためである。ここで、平成6年及び平成7年の性能試験時における炉心(初期構成炉心)の構成図をFig. 4-2-1-1 に示す。



Fig. 4-2-1-1 平成6年及び平成7年性能試験時の炉心構成図

本章では、Fig. 4-2-1-1 に示した初期構成炉心における平成6及び平成7年に行われた性能 試験のうち、「制御棒価値確認」、「燃焼係数評価」の試験結果を用いた HIZER の検証について 説明する[9][10]。なお、本章で説明する検証について、下記の点に留意する必要がある。

HIZER を用いて過剰反応度を計算する際、核特性が類似していると推測される炉心の解析 予測値と測定値の差を用いて計算値を補正する、いわゆる、バイアス補正が行われる。これは 高速炉炉心解析において、核データの不確かさやモデリングなどに起因する解析誤差により臨 界固有値の絶対値に大きな不確かさが伝搬するという問題に対して、モックアップ実験で得ら れたデータを反映し、その不確かさを低減するものである。すなわち、炉心管理業務において は、炉心特性予測解析の高精度化に限らず、高精度な補正バイアス量の評価からも炉心特性解 析値の不確かさ低減を図ることができる。本検証においては、モックアップの模擬性及び実験 における測定精度の観点から、平成 22 年炉心確認試験の解析予測値と測定値を利用して補正 を行うこととした[11]。一方で、反応度価値は基準状態の炉心の反応度に対する、ある状態の 炉心の反応度の変化量として定義されるため、臨界固有値の絶対値の不確かさに対する感度は 十分に小さい。従って、本検証では反応度価値に対するバイアス補正は行わないこととした。

また、以降で示す平成6年及び平成7年性能試験の測定値は、参考文献[9]及び[10]に基づく ものであるが、参考文献[9]及び[10]における反応度の計算にはそれぞれ JENDL-3.3[7]及び JENDL-2[12]に基づいて評価されたパラメータ(動特性パラメータなど)を使用している。一 方で、HIZER コードでは、JENDL-4.0[6]に基づく高速炉用核定数セット JFS-3-J4.0[1]を使 用しているため、これらの検証においては異なる核データを利用することによる差異(核デー タ起因差異)が生じる可能性がある。しかしながら、本検証ではその核データ起因差異は無視 する。

4.2.2. 過剰反応度

過剰反応度は、全制御棒全引抜きにより炉心に与えられる反応度を意味する。なお、この過剰 反応度は、「もんじゅ」の温度フィードバック係数が負であることから明らかなように、炉心温 度の低温時に大きくなる。「もんじゅ」の仕様としては、1 次ナトリウム温度は 180℃以上であ るが、「もんじゅ」におけるゼロ出力試験時には、1 次ナトリウム温度は 200℃となるように制 御されているため、「もんじゅ」における過剰反応度の測定値は炉心温度 200℃での全制御棒全 引抜きによって炉心に加わる反応度を意味する。本検証では、「もんじゅ」炉心の過剰反応度に ついて測定値と HIZER 解析値の比較を行った。部分出力運転を行った過去の試験のうち、測 定精度が良好であった平成 6 年 9 月 20 日の試験での「もんじゅ」炉心の過剰反応度測定値を 次に示す[11]。

$2.87[\%\Delta k/k]$

一方、当該炉心の制御棒全引抜き状態における炉心反応度(炉心温度:200℃)は HIZER によって次のように求められた。

2.91 [%Δk/k]

なお、本評価値には、HIZER 計算値に対して、平成 22 年炉心確認試験において測定された過 剰反応度と HIZER 解析値の差を利用した補正 (E-C 補正) を行っている。具体的には、HIZER による体系計算から得られた過剰反応度 2.62[%Δk/k]に対して、平成 22 年度炉心確認試験の 結果から得られたバイアス補正量 0.29[%Δk/k]を加えた。上記の結果から、HIZER による解 析では、「もんじゅ」炉心の過剰反応度をよく再現していることが分かる。

4.2.3. 制御棒価値

制御棒価値は中性子束の空間分布に強く依存することから、制御棒価値の精度良い一致は中性子束の空間分布の妥当性を担保することにつながる。

Fig. 4-2-1-1 に示されるように、「もんじゅ」 炉心には 19 本の制御棒が存在する。ここで、 中性子遮へい体を除いた炉心構成図を **Fig. 4-2-3-1** に示す。



Fig. 4-2-3-1 比較対象の制御棒

本検証においては、炉心の回転対称性を考慮して、Fig. 4-2-3-1 に示される 19 本の制御棒のう ち、C1、C4、C10 及び F1 の 4 本の制御棒について制御棒価値の測定値と HIZER 解析値の比 較を行った。ただし、平成 6 年性能試験では、C1 制御棒に対してペリオド法による制御棒価 値測定を実施し、C4、C10 及び F1 の各制御棒に対しては、C1 制御棒を基準制御棒とした置 換法による制御棒価値測定を行っている。それ故、C4、C10 及び F1 制御棒の制御棒価値の絶 対値は C1 制御棒の制御棒価値に依存する。また、ペリオド法による制御棒価値測定に対して は、対象制御棒引抜き前と対象制御棒引抜き後の反応度解析値から、測定値と比較できる形で 制御棒価値を評価することができるが、置換法に基づく制御棒価値測定に対しては、測定側で 制御棒干渉効果の補正を行うため純粋な測定値と解析値の比較ができない。加えて、置換法に 基づく制御棒価値測定では、絶対的な制御棒価値を直接評価することができない。以上のよう な背景から、本検証では、C1 制御棒に対してのみ制御棒価値を直接的に利用した検証計算を 実施し、C4、C10 及び F1 制御棒に対しては置換法における臨界調整時の制御棒位置から臨界 性に着目した検証計算を実施した。 A) C1 制御棒

HIZER を用いて、ペリオド法に基づく C1 制御棒価値測定の解析を実施した。なお、本検証 においては、各ステップでの制御棒操作に対して制御棒価値の解析を行っているため制御棒干 渉効果に対する補正については、解析値、測定値のいずれにおいても考慮していない。

Fig. 4-2-3-2 にペリオド法による制御棒価値測定試験(平成6年9月17日実施)により得ら れたC1制御棒の積分反応度曲線とHIZERの解析により得られたC1制御棒の積分反応度曲線 の比較を示す。



 Fig. 4-2-3-2
 測定(H6.9.17の制御棒価値確認)及び HIZER 解析により得られた

 C1 制御棒の積分反応度曲線

なお、C1 制御棒単体価値については、測定及び HIZER 解析により Table 4-2-3-1 のように 評価されている。

Table 4-2-3-1 測定及び HIZER 解析による C1 制御棒単体価値の比較

	C1 制御棒単体価値[%Δk/k]
HIZER 解析值(A)	0.981
測定値(B)*	0.969
差異 (A-B)	0.012
誤差(1σ)**	± 0.015

*平成6年9月17日の制御棒価値確認での測定値[9]

**臨界調整の誤差、制御棒位置表示の誤差、動特性パラメータの誤差など

Fig. 4-2-3-2 に示した結果から、引抜位置約 400mm から 600mm の部分において、約 100mm の引抜距離の周期で解析値が測定値よりもわずかに過大評価となる傾向が見られる。この原因 については、「拡散計算による効果」に起因する過大評価と「HIZER の制御棒連続操作解析モ デルのメッシュ内組成混ぜ合わせ効果」に起因する周期性の複合的なものと推測される。

まず、前者について、拡散計算コード CITATION を用いた試験後解析においても、C1 制御 棒の引抜位置200mmから600mmの範囲で反応度を過大評価する傾向が認められたことから、 拡散計算の影響と推測される。

後者については、Fig. 4-2-3-2 に示した制御棒反応度曲線が HIZER のメッシュ間隔に相当す る約 100mm の周期で周期的に揺らいでいることから、HIZER の制御棒連続操作解析モデル の影響と推測される。HIZER では、制御棒下端が拡散計算のメッシュ境界と一致しない場合 に、制御棒の組成密度と Na フォロアの組成密度を平均化した仮想的な領域を作る。これによ り、空間的な自己遮蔽効果が過小評価されるため、周期的に制御棒引抜の反応度効果が過小評 価され、積分反応度曲線の解析値が揺らいだと思われる。

以上、2点の効果の複合的な影響のため、引抜位置約400mmから600mmの範囲において、 約100mmの引抜距離の周期で解析値が測定値よりもわずかに過大評価となる傾向が生じたと 推測される。一方で、Table 4-2-3-1から制御棒単体価値解析については不確かさの範囲で一致 しており、測定値をよく再現している。

B) C4、C10及びF1制御棒

上述のように、平成6年性能試験では、C4、C10及びF1制御棒に対してはC1制御棒を基準制御棒とした置換法により制御棒価値の測定を行っている。そのため、C4、C10及びF1制 御棒の制御棒価値の絶対値はC1制御棒の制御棒価値に依存する。そこで、本検証ではC4、 C10及びF1制御棒に対しては制御棒操作前後における臨界性に着目して検証を行った。

平成6年性能試験において、C4、C10及びF1制御棒の制御棒価値測定のために実施された 置換法では、各測定対象の制御棒と基準制御棒であるC1制御棒以外の制御棒はバンク位置

(BCR は全引抜位置)と設定され、測定対象制御棒の引抜きと C1 制御棒の挿入、あるいは測 定対象制御棒の挿入と C1 制御棒の引抜きを繰り返しながら、すなわち投入された反応度を補 償しながら測定対象制御棒1体分の価値と等価な基準制御棒の位置を求めることで測定対象制 御棒の単体価値及び反応度曲線を測定している。そこで、本検証では、各試験の試験開始時(臨 界状態)における制御棒位置と試験終了時(臨界状態)における制御棒位置での正味の臨界性 の変化を測定及び HIZER 解析により評価し、これを比較した。なお、測定において試験開始 時ならびに試験終了時は臨界状態であり、いずれも反応度は0のため制御棒操作による正味の 反応度変化量も必然的に0となる。また、C4、C10及び F1 制御棒には、平成6年9月17日 から18日の測定値を用いた。Table 4-2-3-2 に本検証での HIZER 解析値と測定値の比較結果 を示す。

	制御棒名	C4	C10	F1
測定対象制御棒	置換前制御棒位置[mm]	0	0	1000
	置換後制御棒位置[mm]	1000	1000	0
	制御棒名	C1	C1	C1
基準制御棒	置換前制御棒位置[mm]	900	571	179
	置換後制御棒位置[mm]	151	193	628
	反応度変化量[%∆k/k]	-5.9E-03	-1.2E-03	-4.2E-04
「ロムヒビビリキャル」」但	反応度変化量[¢]	-1.7	-0.4	-0.1
理論値	反応度変化量[%∆k/k]	0.0.E+00	0.0.E+00	0.0.E+00

Table 4-2-3-2 測定及び HIZER 解析における正味の臨界性変化量の比較結果[9]

Table 4-2-3-2 に示した比較から、正味の反応度変化量の HIZER 解析値と測定値が 1.7 ¢ 以下の範囲内で一致しており、HIZER 解析により得られた反応度変化量は妥当であると判断できる。

4.2.4. 燃焼係数

「もんじゅ」では、平成7年2月17日から平成7年12月1日までの期間で7回の起動試 験を実施し、部分出力運転での運転データを取得している。この際に、出力運転での燃焼によ る反応度低下、すなわち燃焼係数の評価がなされている。そこで、本検証では、平成7年性能 試験での7回の起動試験で測定された燃焼係数を用いて HIZER の検証を実施した。なお、「も んじゅ」炉心においては、燃料中に含まれる Pu-241 が 8 崩壊により Am-241 に変化すること による反応度低下効果が無視できない。平成7年性能試験では、部分出力運転と停止を繰り返 していたため、燃料の燃焼に伴う反応度低下効果に比べて、Pu-241 の崩壊効果の方が大きい と評価されている。一方で、本試験では燃焼係数の測定を目的としていたため、試験では BOC と EOC の反応度差から予め評価した Pu-241 崩壊効果を引くことで正味の燃焼係数を算出し ている。また、解析の観点では Pu-241 の崩壊効果は単純な計算により厳密に考慮できること から、Pu-241 崩壊効果を除いた正味の燃焼係数に対して解析と測定の比較を行う場合の方が 価値のある妥当性確認であると言える。そのため、本妥当性確認では、Pu-241 の崩壊効果を 除いた燃焼係数を利用して HIZER の検証を行うこととした。Table 4-2-4-1 と Fig. 4-2-4-1 に は HIZER を利用して算出した各起動試験での燃焼係数と測定で得られた燃焼係数の比較を示 す。

ᅿᆎ락딵			做体由	解析値		測定値		
些到武歌 来早	試験開始日	試験終了日	※洗皮 「MWA]	燃焼係数(C)	燃焼係数(E)	誤差[%∆Ⅰ	⟨/k/MWd]	C/E
田夕				$[\%\Delta k/k/MWd]$	$[\%\Delta k/k/MWd]$	正側	負側	
1	1995/2/17	1995/3/14	604.4	-1.65.E-05	-1.81E-05	2.79E-05	2.67E-05	0.91
2	1995/5/8	1995/5/22	781.4	-1.86.E-05	-2.12E-05	1.54E-05	1.62E-05	0.88
3	1995/6/12	1995/7/14	7033.5	-1.98.E-05	-1.93E-05	2.55E-06	2.66E-06	1.03
4	1995/7/24	1995/8/7	3566.5	-1.93.E-05	-1.84E-05	3.74E-06	4.09E-06	1.05
5	1995/8/23	1995/9/5	3209.4	-1.90.E-05	-2.10E-05	4.63E-06	4.84E-06	0.91
6	1995/10/7	1995/10/26	5696.5	-1.92.E-05	-1.88E-05	2.72E-06	2.94E-06	1.02
7	1995/11/7	1995/12/1	7325.6	-1.91.E-05	-1.89E-05	2.29E-06	2.46E-06	1.01

Table 4-2-4-1 測定及び HIZER 解析における燃焼係数の比較結果[10]



Fig. 4-2-4-1 測定及び HIZER 解析における燃焼係数の比較結果

燃焼係数における測定値の誤差としては、臨界調整における臨界判断の誤差や制御棒位置の 表示誤差、炉心温度の測定誤差などが主要な誤差である。Table 4・2・4・1 に示した結果より、全 ての起動試験に対して C/E 値が概ね 0.9~1.1 の範囲で Pu-241 崩壊効果を除いた燃焼係数が一 致していることがわかる。また、Fig. 4・2・4・1 に示した結果より、起動試験 1 及び 2 での測定 誤差が非常に大きいことが認められるが、これは起動試験 1 及び 2 では低出力運転で試験を行 ったために燃焼度が約 1EFPD と小さく、反応度変化量測定時の測定誤差が燃焼係数の誤差に 大きく影響したためである。一方で、起動試験 3~7 では、解析値が誤差の範囲で測定値を再現 していることが分かる。これにより HIZER の燃焼計算モジュールの妥当性が確認できた。

5. 結論

5.1. 概要

将来のFBR 実用化に向けた技術的課題の解明のための技術開発において、FBR の運転管理 業務の高度化を通した業務の合理化によりFBR の運用コストを低減させるとともに、運転管 理業務の省力化によるヒューマンエラーの防止などの運転信頼性の向上を図ることは重要な開 発要素である。このため、「もんじゅ」では、運転管理に必要不可欠な核熱特性解析、炉心健全 性解析などを高精度かつ一元的に行うため、炉心管理システムの整備に取り組んできた。この 炉心管理システムに含まれる計算モジュールのうち、定常炉心核特性及び燃焼特性を解析する ための HIZER の妥当性確認を実施した。

本報告書で示した HIZER の妥当性確認では、出力運転の実績がある平成6年及び平成7年 に行われた性能試験の結果を使用した。具体的には、平成6年及び平成7年の炉心の過剰反応 度、制御棒価値、燃焼係数に着目し、測定値と HIZER 解析値の比較を行い、HIZER 解析値の 妥当性を確認した。

5.2. 今後の課題

本報告書で示した HIZER の妥当性確認では、平成6年から平成7年の炉心の過剰反応度、 制御棒価値、燃焼係数の測定値を使用した。これらの測定値に基づく妥当性確認は、中性子束 分布・実効増倍率・反応率比・燃焼特性などについて積分的な妥当性を確認するものであり、 その計算機能の一定の妥当性を保証するものである。一方で、例えば燃焼係数を利用した妥当 性確認は、HIZER 燃焼計算における各核種の原子数密度変化の妥当性を保証するものではな い。加えて、燃料ピン出力のように測定が困難な物理量については測定値に基づく妥当性確認 がおよそ不可能である。HIZER に利用された計算理論の実用炉心への適用性を網羅的に評価 するためには、他の性能試験の測定値あるいは他コードを利用した妥当性確認が必要である。

また、本報告書で示した妥当性確認では平成 6 及び平成 7 年の性能試験のうち、「制御棒価 値確認」及び「燃焼係数評価」の試験結果を利用しているが、これらの性能試験ではそれぞれ JENDL-3.3 及び JENDL-2 に基づいて評価されたパラメータ(動特性パラメータなど)を用 いて測定値を求めている。一方で、HIZER は JENDL-4.0 に基づき評価された断面積を用いて 核計算を行っている。本報告書の妥当性確認では、この違いを無視して計算値と測定値の比較 を行ったが、厳密にはコードの検証を行う際には使用する核データを整合させる必要があるた め、使用する核データライブラリを整合させた検証も今後の課題とする。

謝辞

本報告書の執筆にあたり、ご協力頂いた関係各位に深く感謝いたします。

特に、原子力機構改革室 大川内靖氏には、本報告書の執筆にあたり多くの助言を頂きました。㈱NESI 飯田将来氏には、試験解析にご協力いただきました。その他、ご協力頂きました多くの方に深謝いたします。

参考文献

- [1] 杉野 和輝,神 智之,羽様 平,沼田 一幸, "JENDL-4.0 に基づく高速炉用炉定数 UFLIB.J40及びJFS-3-J4.0の作成," JAEA-Data/Code 2011-017, 2012, 44p.
- [2] 山野 直樹, 牛尾 直史, 山本 章夫, 奥村 啓介, 谷口 洋, 松村 和彦, 宇根崎 博信, 島津 洋一郎, "第 36 回 炉物理夏期セミナー『-基礎から学ぶ炉心解析-』," 日本原子力学会, 2004.
 53p.
- [3] 核設計データベース WG, "核設計基本データベースの整備(IV) ·核特性解析コードシステムの整備,"動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN9440 94-004, 1994.
- [4] 角田 弘和, 薮田 尚宏, 畠山 弘美, "3次元拡散計算コード「MOSES」の詳細メッシュ (Tri-Z)計算機能の整備," PNC TJ8222 97-002, 1997.
- [5] K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems," ANL-82-64, 1984.
- [6] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 2011, pp. 1-30.
- [7] K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, O. Iwamoto, J. Katakura, T. Fukahori, S. Chiba, A. Hasegawa, T. Murata, H. Matsunobu, T. Ohsawa, Y. Nakajima, T. Yoshida, A. Zukeran, M. Kawai, M. Baba, M. Ishikawa, T. Asami, T. Watanabe, Y. Watanabe, M. Igashira, N. Yamamuro, H. Kitazawa, N. Yamano and H. Takano, "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol., 39(11), 2002, pp.1125-1136.
- [8] R.Sher, C. Beck, "Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides," Proc. Specialist Myg. on Nucl. Data Evaluations and Procedures, BNL, 1980.
- [9] Kazuya Takano, Masahiro Fukushima, Taira Hazama, Takayuki Suzuki, "Control Rod Worth Evaluation for the Monju Restart Core," Nucl. Technol., 179[2], 2012, pp.266-285.
- [10] 鈴木 隆之, 沖元 豊, 澤田 周作, 佐々木 研治, "高速増殖原型炉もんじゅの建設(その78) 初期炉心における燃焼係数の測定," 1996 年秋の大会予稿集, 日本原子力学会, 1996.
- [11] Yuko Kato, Kentaro Yabuki, Yasushi Ohkawachi, "Monju System Startup Test Report Control Rod Reactivity Worth Measurement," JAEA-Technology 2013-018, 2013, 118p.
- [12] Yasuyuki Kikuchi, Tsuneo Nakagawa, Tetsuo Asami, et al., "Second Version of Japanese Evaluated Nuclear Data Library (JENDL-2)," J. Nucl. Sci. Technol., 22[8], 1985, pp. 593-603.

Appendix A 実効断面積作成方法

2.4 節で述べたように、HIZER 計算の入力パラメータとなる実効断面積は JOINT システム を用いて作成する。本 Appendix では具体的な実効断面積の作成方法について説明する。ここ で、2 章で示した Fig. 2-4-1 の処理にナンバリングを施した実効断面積作成の計算フローを Fig. A-1 に示す。



Fig. A-1 実効断面積作成フロー

JOINT システムを利用した HIZER 用実効断面積作成は、Fig. A-1 に示されるフローに基づい て行われる。以下では、上記フローにおける①~④の処理について、それぞれ詳細に説明する。

①. セル計算

JOINT システムの入力となる JFS-3-J4.0 は、核種ごとの 70 群無限希釈断面積をデータ化 したものであり、実用上の共鳴あるいは空間的な自己遮蔽効果などは考慮されていない。そこ で、まず燃料集合体単位の核種の原子数密度を入力パラメータとして、実効的な断面積を作成 する。なお、高速炉のスペクトルは硬く中性子の飛程が長いことから、燃料領域及び中性子遮 へい体領域のセル計算は均質モデルを用いる。一方で、制御棒領域は中性子束の空間変化が大 きいと考えられることからリングモデルを用いる。以下では、それぞれについて説明する。

A)燃料領域・中性子遮へい体領域

上述のように、燃料領域及び中性子遮へい体領域においては、無限均質モデルを用いて 70 群実効ミクロ及びマクロ断面積を評価する。具体的には、内側燃料、外側燃料及びブランケッ ト燃料を集合体単位で均質化し、均質化された原子数密度から ftable を用いて共鳴自己遮蔽を 考慮した実効断面積を作成する。

B)制御棒領域

制御棒領域では中性子束の空間変化が大きいと考えられることから、リングモデルを用いた 1次元 R 体系の衝突確率法に基づく中性子束分布計算を行う。Fig. A-2 にリングモデルの体系 図を示す。



Fig. A-2 制御棒領域セル計算で用いるリングモデル

制御棒領域の実効断面積の作成においては、Fig. A-2 に示したリングモデルにおける固有値 計算で得られた中性子のうち、領域 1~6 にあたる部分の領域平均中性子束を体積重みで平均化 した集合体平均中性子束を利用し、実効断面積を作成する。これにより、空間自己遮蔽を考慮 した実効断面積が得られる。

②. RZ 体系全炉心 70 群計算

①で説明したセル計算を行うことにより、燃料及び中性子遮へい体領域での共鳴自己遮蔽効 果並び、制御棒領域での共鳴及び空間自己遮蔽効果を考慮した断面積が評価される。しかし、 実際の炉心では炉外への中性子漏洩があることや炉内の組成が非均質であることから、炉心全 体として空間的な中性子束分布の変化がある。従って、核種の実効断面積にも炉内中性子束の 空間分布を反映する必要がある。そこで、JOINT システムによる実効断面積作成では、①で作 成された断面積を用いて炉心全体の中性子束分布(領域ごとの中性子束)を評価し、得られた 中性子束分布を利用して 70 群から 6 群への断面積の縮約を行う。この際、CITATION による 2 次元 RZ 体系での 70 群拡散計算が行われる。

CITATIONによる RZ2 次元拡散計算は、次の4通りの体系において行われる。

- 全制御棒全引抜体系
- 炉中心に FCR1 本を全挿入した体系
- 炉中心に CCR1 本を全挿入した体系
- 炉中心に BCR1 本を全挿入した体系

上記の計算のうち、全制御棒全引抜体系の拡散計算で得られた中性子束は制御棒以外の領域、 すなわち、内側燃料、外側燃料、ブランケット燃料及び中性子遮へい体の各領域における実効 断面積の群縮約に利用される。一方で、それ以外の各種制御棒を全挿入した体系で計算された 中性子束は、各制御棒の実効断面積の計算のみに使用される。ここで、各制御棒の挿入位置を 炉中心としている点については、CITATIONの計算で RZ 体系を使用していることから、炉中 心以外では筒状を表現できないためである。

③. 群縮約

②で得られた領域ごとの中性子束を利用して、反応率を保存するように実効断面積の群縮約 を行う。これにより、6群の実効ミクロ及びマクロ断面積が得られる。

④. 発熱断面積付加

上記①~③までの処理により、各領域の6群実効ミクロ及びマクロ断面積が得られた。しか しながら、原子炉で生じる熱量は全量が核分裂反応から生じるのではなく、中性子捕獲や崩壊 から生じる熱量も小さくない。従って、原子炉の出力分布を評価する際には、核分裂以外に起 因する発熱も考慮しなければならない。そこで、HIZERの出力分布計算には、以下に再掲す る発熱断面積を用いて熱出力を計算することで、核分裂以外に起因する発熱を考慮する。

$$\sigma_{\rm H} = \{ (E_f + EM) \cdot \sigma_f + (E_c + EM) \cdot \sigma_c + HSD \} \cdot e$$

(3-3-2)(再掲)

ただし、

- σ_H : 微視的全発熱断面積
- σ_f :核分裂断面積
- e: 単位換算係数(W·sec/MeV)
- E_f:核種毎核分裂あたりの発熱
- σ_c :捕獲断面積
- HSD:下方散乱による発熱
- $E_c: 核種毎捕獲あたりの発熱$
- EM:各エネルギー群のレサジー平均

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本ì	単位				
盔半里	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	Α				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
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						
SI 基本単位						
名称	記号					
面 積平方メートル	m ²					
体 積 立法メートル	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 ⁸					
質量濃度 キログラム毎立法メートル	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 トげれる						

(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

	SI 旭立里位				
組立量	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 負	自 ラジアン ^(b)	rad	1 (в)	m/m	
立 体 自	コステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	$m^{2/}m^2$	
周 波 数	なヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹	
力 力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
压力,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,	ミワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電荷、電気量	と クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ゴボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$	
静電容量	コアラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	1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 身	E ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁束密厚	E テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$	
インダクタンス	ペーンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$	
セルシウス温厚	モ セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光 剪	ミ ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照月	E 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	も カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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 ュ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。
 (a)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。
 (a)へルツは周頻現象についてのみ、ペラ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。
 (a)やレ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。やレシウス度とケルビンの
 (b)からさは同一である。したがって、温度差や理慮問摘を決す数値はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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動音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

	S	I 組立単位	
組立量	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
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	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 sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ペンリー毎メートル	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 sA
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
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	ヨ タ	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピ コ	р	
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	٥	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される奴値が実験的に待られるもの					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	ベル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=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=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉信的な間径け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デジベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\rm sb}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{m}^{\cdot 2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx		
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹		
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」				

は対応関係を示すものである。

	表10. SIに属さないその他の単位の例					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$			L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T	
フ	T.	ル	"		1フェルミ=1 fm=10-15m	
メー	ートル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg	
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力		IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$	