

JAEA-Data/Code 2020-014 DOI:10.11484/jaea-data-code-2020-014

簡易燃料デブリ臨界性解析ツール HAND の開発

HAND: A Handy Criticality Analysis Tool for Fuel Debris

多田 健一

Kenichi TADA

原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 軽水炉工学・核工学ディビジョン

Nuclear and LWR Engineering Division Nuclear Science and Engineering Center Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research October 2020

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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2020

簡易燃料デブリ臨界性解析ツール HAND の開発

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門 原子力科学研究所

原子力基礎工学研究センター 軽水炉工学・核工学ディビジョン

多田 健一

(2020年9月4日受理)

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉は、我が国の最も重要な課題の一つである。この廃炉作業において重要な項目が、燃料デブリの取り出しである。この燃料デブリ取り出し時には、作業者の被ばく等を防ぐ観点から、燃料デブリの臨界防止が求められている。この燃料デブリの臨界防止の方法としては、燃料取り出し作業を模擬して燃料デブリの臨界性を解析する臨界解析や、検出器等を用いた臨界管理などがある。本研究では、これらのうち、燃料デブリの臨界解析に着目した。燃料デブリの臨界解析では様々な組成や幾何形状の燃料デブリを考慮する必要があることから、多くの計算時間が必要となる。この燃料デブリの臨界計算に係る計算時間の短縮を目的に、簡易に燃料デブリの臨界性を解析することができる、簡易燃料デブリ臨界性解析ツール HAND (Handy Criticality ANalysis tool for fuel Debris)を開発した。予備解析として HAND を用いて詳細解析で解析すべき解析範囲を絞ることで、詳細解析の試行数の削減に貢献することが期待できる。

HAND は Excel のマクロで動作するデータベースである。HAND の入力には GUI が利用で き、また作図も自動で行うことができる。このように HAND は誰でも簡単に利用することが可 能であり、臨界性を直感的に理解しやすいという特長を持っている。そのため、本ツールは原 子炉物理学の初学者等に対し、臨界について理解するための教育ツールとしての利用も期待で きる。

本報告書では、HANDの概要と、利用方法について説明する。

i

HAND: A Handy Criticality Analysis Tool for Fuel Debris

Kenichi TADA

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

(Received September 4, 2020)

The decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power plant accident is one of the most important issues in Japan. In the process of the decommissioning, preventing radiation exposure of workers is imperative originating in nuclear criticality of fuel debris. Among several criticality assessment methods, the criticality analysis based on computer calculations and the criticality measurement using detectors are expected to be effective tools. This study provides the handy tool enabling the analysis on nuclear criticality of fuel debris in short time. Without this tool, the criticality analysis of fuel debris requires extremely long calculation time, since various conditions such as composition and geometry need to be considered in calculations. The developed analysis tool named as HAND (Handy Criticality ANalysis tool for fuel Debris) enables estimation of the criticality of fuel debris in short time. HAND deduces the range of parameters such as the size and composition parameters characterizing fuel debris, in which the criticality of fuel debris is specified. By selecting the range of the parameters using HAND in advance, total calculation time of the detail analysis will be reduced. Since the input data of HAND is designed to be simple and the output of HAND is to be user friendly, this tool is expected to be also an intuitive tool to study the criticality of fuel debris. This report explains the outline of the HAND and input instructions for HAND.

Keywords: HAND, Criticality Analysis, Criticality Management, Fuel Debris, Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident

目 次

1.	序論	1
2.	HAND の概要	2
3.	核種組成の計算条件	4
4.	HAND で取り扱う体系とその計算条件	8
4	.1 無限均質体系における無限増倍率計算	8
4	.2 球及び無限円柱体系の臨界半径計算	-9
5.	HAND の使用方法	10
5	.1 無限均質体系における無限増倍率計算	10
5	.2 球及び無限円柱体系の臨界半径計算	23
6.	まとめ	29
謝郡	辛	30
参	与文献	30

Contents

1.	Introduction1
2.	Overview of HAND2
3.	Calculation condition of nuclide composition4
4.	Calculation condition and geometry of HAND8
4	4.1 k-infinity calculation using infinite homogeneous geometry8
4	4.2 Critical radius calculation using spherical and cylindrical geometry9
5.	How to use HAND10
-	5.1 k-infinity calculation using infinite homogeneous geometry 10
-	5.2 Critical radius calculation using spherical and cylindrical geometry 23
6.	Conclusion29
Ac	knowledgements 30
Re	ferences 30

表リスト

表 3.1	燃料集合体の核種組成の解析条件	-5
表 3.2	臨界計算で考慮する核種一覧	-5
表 3.3	SWAT4.0 の解析条件	-6
表 3.4	HAND で取り扱い可能な含水率	-6
表 3.5	HAND の無限均質体系で取り扱い可能な構造材混合率	-7
表 3.6	典型的なステンレス鋼(SUS304)及びコンクリートの原子個数密度	-7

図リスト

図 2.1	無限均質体系の例	3
図 2.2	球体系および無限円柱体系の例	3
図 5.1 ;	燃料と水のみの無限増倍率計算における GUI 画面と各入力項目の説明	- 11
図 5.2	無限増倍率図を作図する時のデータフロー	- 12
図 5.3	各ボイド率に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例	- 13
図 5.4	各燃焼度に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例	- 14
図 5.5	各冷却期間に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例	- 15
図 5.6	FP 考慮の有無に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例	- 16
図 5.7	各含水率に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例	- 17
図 5.8	各 H/U 比に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例	- 18
図 5.9	臨界閾値線図計算における GUI 画面と各入力項目の説明	- 19
図 5.10	臨界閾値線図の計算例	- 20
図 5.11	構造材を考慮した無限増倍率計算における GUI 画面と各入力項目の説明	- 22
図 5.12	構造材を考慮した無限増倍率の計算例	- 22
図 5.13	構造材を考慮した無限増倍率図の例	- 23
図 5.14	球体系の臨界半径計算における GUI 画面と各入力項目の説明	- 24
図 5.15	球体系の臨界半径図を作図する時のデータフロー	- 25
図 5.16	球体系の臨界半径計算の例	- 26
図 5.17	無限円柱体系の臨界半径計算における GUI 画面と各入力項目の説明	- 27
図 5.18	無限円柱体系の臨界半径計算の例	- 28

This is a blank page.

1. 序論

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉作業を進めるにあたって重要な項目となるのが、燃料デブリの臨界防止である。燃料デブリの臨界防止策の中で、本研究では燃料取り出し作業を模擬して燃料デブリの臨界性を解析する臨界解析に注目した。

燃料デブリは様々な濃縮度、燃焼度の燃料が構造材と複雑に混ざりあっていると考えられる ことから、燃料デブリの臨界解析では様々な組成、幾何形状の燃料デブリを考慮する必要があ る。このように様々な条件を考慮した燃料デブリの臨界解析には長い計算時間が必要となる。 そこで本研究では、燃料デブリの臨界解析の計算時間短縮を目的とし、簡易燃料デブリ臨界性 解析ツール HAND (Handy Criticality ANalysis tool for fuel Debris)を開発した。HAND は詳細な臨 界計算コードを用いて核種組成や含水率の異なる燃料デブリの臨界性を計算した結果をまとめ たデータベースと、そのデータベースからユーザーが設定した核種組成、含水率の燃料デブリ の臨界性を表及びグラフとして出力するアプリケーションで構成されている。HAND ではあら かじめ決められた計算条件での解析結果が用意されていることから、計算時間がかからないと いう点が一つの特長である。HANDを用いて臨界が起こりやすい条件を広範囲に渡って探索し、 計算時間の長い詳細計算で解析する範囲を絞ることで、詳細解析の試行回数の削減、すなわち 臨界計算の計算時間の削減に貢献することが期待できる。

また、HAND は廃炉以外への応用も可能である。HAND を用いることで、どのような条件だ と臨界になりやすいかを直感的に理解することができる。そのため、HAND は原子炉物理学の 初学者等に対して臨界について理解するための教育ツールとしての利用も期待できる。

本報告書では、HAND の概要と、HAND の利用方法について説明する。

2. HAND の概要

HAND は核種組成や含水率等の異なる様々な条件下で燃料デブリの臨界性、すなわち実効増 倍率を計算し、データベース化している。この実効増倍率の計算には、日本原子力研究開発機 構(JAEA)が開発・公開している連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP¹⁾を用いている。 MVP は炉心解析コードの Verification に利用されている詳細中性子輸送計算コードであり、実 効増倍率の計算に長い計算時間が必要となるものの、高い計算精度を有している。HAND では MVP の解析で得られたデータベースを用いて、ユーザーが入力した条件における燃料デブリの 臨界性を Excel のマクロを用いて出力・作図する。

HANDでは下記の2つの計算を実施することができる。

1) 無限均質体系の無限増倍率の計算

2) 球体系および無限円柱体系における臨界半径の計算

まず、無限均質体系の無限増倍率の計算について説明する。無限均質体系とは、図 2.1 に示 すように、同じ組成の物質が無限に存在している状態を意味し、HAND では燃料デブリと水、 SUS やコンクリートが均一に混合した体系を仮定している。また、無限増倍率とはこの無限均 質体系での実効増倍率を意味する。無限均質体系の無限増倍率が未臨界の場合、対象とする組 成のデブリがどれだけ集まったとしても未臨界となることを意味している。本計算により、燃 料デブリ取り出し作業時の水の流入などで臨界性にどのような影響があるのかといった定性的 な評価が可能となる。

次に、球体系および軸方向長さが無限大の無限円体系における臨界半径の計算について説明 する。この計算では、図 2.2 に示すように燃料デブリが球状もしくは円柱状であると仮定し、 燃料デブリの周囲を水で覆った体系を計算体系としている。これは、取り出し時の燃料デブリ (球状)と原子炉内及び保管時の燃料デブリ(円柱状)を模擬している。本計算では、これらの体系 において、臨界安全にとって重要な実効増倍率が 1.00 (臨界)、0.98、0.95 以上となる球及び円 柱の半径(臨界半径)を出力する。本計算により、指定した組成における燃料デブリの取り出し 時や保管時の上限量を計算することが可能となる。

JAEA-Data/Code 2020-014





図 2.1 無限均質体系の例





3. 核種組成の計算条件

臨界計算を行うためには、原子炉内に装荷されている燃料の核種組成を計算する必要がある。 原子炉内には濃縮度や燃料棒本数、燃焼履歴の異なる様々な燃料集合体が混在しているが、こ れらの詳細な情報は公開されていない。そこで HAND では OECD/NEA/NSC/WPNCS/EGBUC が 実施した 9×9 B型 BWR 燃料集合体に対する燃焼ベンチマーク問題²⁾(Phase-3C ベンチマーク) で提示された集合体の初期燃料組成及び幾何形状を、BWR 燃料集合体の代表的なものとして 採用した。

表3.1に燃料集合体の核種組成の計算条件を示す。表3.1に示すように、3つのボイド率(0%、40%、70%)で核種組成を計算した。なお、ボイド率については、空隙を直接取り扱うのではなく、水密度を低減することで考慮している。また、集合体平均の出力(25.3MW/t)についてはボイド率によらず、一定とした。燃焼計算には中性子輸送計算コード MVP と燃焼計算コード ORIGEN-2³⁾を組み合わせた SWAT4.0⁴⁾を用い、燃焼度 5GWd/t、10GWd/t、14GWd/t、20GWd/t、30GWd/t、40GWd/t、50GWd/t に対し、各々0年、5年、10年、15年、20年、30年、50年の冷却後における燃料集合体の核種組成を算出し、臨界計算に用いるデータセットとした。データセットに格納した同位体は、表 3.2 に示すように燃焼度クレジット導入ガイド原案 ⁵⁾で考慮してよいとされた同位体アクチニド9 核種と核分裂生成物(FP)12 核種である。なお、FP には、Gd-155 など、中性子を吸収し、実効増倍率を低下させる働きをする可燃性毒物が含まれている。そこで、保守的な解析条件として、FP を考慮していない場合に比べて実効増倍率が低くなる。そこで、保守的な解析条件として、FP を考慮していない場合も解析できるようにしている。なお、Gd 入り燃料棒中に含まれる Gd-155 についても、FP を入れていない場合は削除される。Gd 入り燃料棒中の Gd は 14GWd/t 付近で燃え尽きることから、燃焼度が 14GWd/t 以下の場合には、FP の考慮の有無で、実効増倍率が大きく変化する。

表 3.3 に SWAT4.0 の解析条件を示した。表 3.3 に示すように、評価済み核データライブラリーには JENDL-4.0 を用い、各燃焼ステップでの総ヒストリー数は 1,000 万ヒストリー(1,100 バッチ×10,000 ヒストリー、捨てバッチ 100)である。

HAND では、含水率を重量割合(Wt%)または、体積割合(Vol%)で表示させることができる。 ただし、計算上は重量割合を用いており、体積割合の含水率表示は重量含水率を換算したもの となっている。重量割合の含水率 u の定義は、次式で与えられる。

$u(\%)=Ww/(Ws+Ww)\times 100$

(1)

ここで、Wwは水の重量、Wsはデブリ燃料の重量である。

HAND では、表 3.4 に示すように、無限均質体系における無限増倍率の計算と球体系および 無限円柱体系における実効増倍率の計算で取り扱い可能な含水率が異なっており、無限均質体 系では 14 種類、球及び無限円柱体系では 11 種類の含水率が取り扱い可能である。

無限均質体系の無限増倍率の計算では燃料と水の混合だけでなく、原子炉内の SUS や格納容 器中のコンクリートとの混合による無限増倍率の変化も取り扱うことができる。なお、燃料デ ブリは Zr とも混合していることが考えられるが、Zr については中性子吸収が小さく、SUS や コンクリートに比べて無限増倍率への影響が小さいことから、本解析では除外している。 計算可能な体系は、以下の3通りである。なお、3)については、SUS とコンクリートの混合 割合を可変にすると計算ケースが莫大な数になってしまうため、SUS とコンクリートが同体積 で混合した場合のみを対象としている。また、SUS およびコンクリートの割合については、体 積割合(Vol%)で表記している。

- 1) 燃料+水+SUS
- 2) 燃料+水+コンクリート
- 3) 燃料+水+SUS+コンクリート ※SUS とコンクリートは同体積

HAND で取り扱い可能な構造材(SUS およびコンクリート)の体積割合は表 3.5 に示す通り、 11 種類である。また、SUS およびコンクリートの組成は表 3.6 に示す通り、臨界安全ハンドブ ック・データ集第2版^のに記載されているものを用いた。

集合体平均出力 [MW/t]		25.3	
4444.17日	ボイド率 [%]	0、40、70	
無限 均質	燃焼度 [GWd/t]	5, 10, 14, 20, 30, 40, 50	
均貢 体系	冷却期間 [year]	0, 5, 10, 15, 20, 30, 50	
14.212	核分裂生成物	有、無	
球•	ボイド率 [%]	0、40、70	
無限	燃焼度 [GWd/t]	10、14、20、30、40	
円柱	冷却期間 [year]	0, 5, 10, 15, 20, 30, 50	
体糸	核分裂生成物	有、無	

表 3.1 燃料集合体の核種組成の解析条件

表 3.2 臨界計算で考慮する核種一覧

同位体アクチニド	U-234, 235, 238, Pu-238, 239, 240, 241, 242, Am-241
拉八列中市咖	Mo-95, Tc-99, Rh-103, Cs-133, Nd-143, 145,
核万表生成物	Sm-147, 149, 150, 152, Eu-153, Gd-155

中性子輸送計算コード	MVP
燃焼計算コード	ORIGEN2
1バッチ当たりのヒストリー数	10,000
捨てバッチを含めたバッチ数	1,100
捨てバッチ数	100
テラルゼニ府は	1.0×10^{-5}
エイルキー領域	2.0×10^{7}
評価済み核データライブラリ	JENDL-4.0
ゆ 佐子 、 、 二、 ク	ENSDF
燃焼り エーンリータ	JENDL/FPD-2000
予測子·修正子法	適用
はたフランプ	15GWd/t以下:約0.5GWd/t
燃焼ヘナツノ	15GWd/t以上:約2.5GWd/t
	UO2燃料棒:1領域
燃料棒の領域分割数	Gd入り燃料棒:12領域
	(等体積になるように分割)

表 3.3 SWAT4.0 の解析条件

表 3.4 HAND で取り扱い可能な含水率

無限均質体系		球/無限円柱体系	
wt%	wt% vol%		vol%
0	0.0	5	44.1
1	13.1	10	62.4
2	23.4	15	72.5
3	31.6	20	78.9
5	44.1	25	83.3
10	62.4	30	86.5
15 72.5		35	89.0
20	78.9	40	90.9
25	83.3	45	92.4
30	86.5	50	93.7
40	90.9	60	95.7
50 93.7			
60	95.7		
70	97.2		

燃料+水+SUS		燃料+水+コンクリート		燃料+水+SUS+コンクリート		ンクリート
デブリ中の	デブリ中の	デブリ中の	デブリ中の	デブリ中の	デブリ中の	デブリ中の
燃料割合	SUS割合	燃料割合	コンクリ割合	燃料割合	SUS割合	コンクリ割合
[vol%]	[vol%]	[vol%]	[vol%]	[vol%]	[vol%]	[vol%]
5	95	5	95	5	47.5	47.5
10	90	10	90	10	45	45
20	80	20	80	20	40	40
30	70	30	70	30	35	35
40	60	40	60	40	30	30
50	50	50	50	50	25	25
60	40	60	40	60	20	20
70	30	70	30	70	15	15
80	20	80	20	80	10	10
90	10	90	10	90	5	5
100	0	100	0	100	0	0

表 3.5 HAND の無限均質体系で取り扱い可能な構造材混合率

表 3.6 典型的なステンレス鋼(SUS304)及びコンクリートの原子個数密度 [10²⁴/cm³]

SUS304		コンクリート	
密度:7.93 [g/cm ³]		密度:2.30 [g/cm ³]	
С	3.18E-04	Η	1.37E-02
Si	1.70E-03	0	4.59E-02
Mn	1.74E-03	С	1.15E-04
Р	6.94E-05	Na	9.64E-04
S	4.47E-05	Mg	1.24E-04
Ni	7.53E-03	Al	1.74E-03
Cr	1.75E-02	Si	1.66E-02
Fe	5.87E-02	Κ	4.61E-04
		Ca	1.50E-03
		Fe	3.45E-04

4. HAND で取り扱う体系とその計算条件

前章の計算条件で作成した核種組成を用い、MVPを用いて無限均質体系における無限増倍率の計算と、球および無限円柱体系における臨界半径の計算を行った。各計算ケースの総ヒストリー数は 500 万ヒストリー(600 バッチ×10,000 ヒストリー、捨てバッチ 100)である。

MVPでは、高温ガス炉などで使用される被覆粒子燃料の不規則配列球状燃料の非均質効果を 精度よく取り扱うために、確率論的幾何形状モデル(STGM: Statistical Geometry Model)が用意さ れている。燃料デブリの臨界解析では燃料デブリの空孔を考慮するために STGM を適用する場 合もあるが、軽水体系で STGM を適用すると実効増倍率を過大評価する傾向がある⁷ことから、 本計算では STGM は適用していない。このように HAND では燃料デブリの空孔などの非均質 性が実効増倍率に与える影響、すなわち非均質効果を考慮していない。そのため、燃料デブリ がスポンジ状で多くの空孔があるなど、非均質性が大きい体系では、HAND の解析結果と詳細 解析の解析結果の差異が大きくなる可能性がある。

4.1 無限均質体系における無限増倍率計算

無限均質体系における無限増倍率の計算では、

- 1) 燃料と水のみの無限増倍率(Kinf)
- 2) 臨界閾値線図(Isolines)
- 3) 構造材(SUS およびコンクリート)を考慮した無限増倍率(Structure)

の3種類の計算を実施可能である。なお、括弧内のキーワード(Kinf、Isolines、Structure)はHAND での機能選択タブのインデックス名を示している。以降ではこれらの計算の概要について説明 する。

(1) 燃料と水のみの無限増倍率(Kinf)

燃料と水のみの無限増倍率の計算では、データセットの数は表 3.1、3.4 に示した通り、

ボイド率3種類×燃焼度7種類×冷却期間7種類×FP2種類×含水率14種類

の計 4,116 ケースである。この 4,116 ケースについて MVP を用いて無限増倍率の計算を実施 し、計算結果を Excel の『KinfData』シートに格納している。なお、本計算には構造材の含有は 考慮していない。作画用の『KinfGraph』シートでは、『KinfData』シートに格納されたデータか ら、ユーザーが入力した条件に一致するデータ項目を拾い上げて表を出力するとともに、出力 されたデータを用いてグラフを描画する。

(2) 臨界閾値線図(Isolines)

臨界閾値線図は、無限増倍率の計算で求められた計算結果から、含水率と燃焼度による無限 増倍率が、1.00、0.98、0.95 となる点を結んだ線図を描画する。なお、本計算にも構造材の含有 は考慮していない。 データセットの数は、

ボイド率 3 種類×無限増倍率 3 種類(1.00、0.98、0.95)×冷却期間 7 種類(0、5、10、15、20、 30、50 年)×FP2 種類

の計 126 セットである。これらの計 126 セットの計算結果から、無限増倍率が 1.00、0.98、0.95 となる点を、線形補間で求め、Excel の『IsolinesData』シートに格納している。作画用の 『IsoLinesMap』シートでは、『IsolinesData』シートに格納されているデータから、ユーザーが 入力した条件に一致するデータ項目を拾い上げ、臨界閾値線図を描画する。

(3) 構造材を考慮した無限増倍率(Structure)

構造材を考慮した無限増倍率は、

Kinfの計算ケース数×デブリ割合11種類(5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100vol%)×

構造材混合3種類(デブリ+コンクリート、デブリ+SUS、デブリ+コンクリート+SUS) を組み合わせた計135,828ケースの計算結果をExcelの『StructureData』シートに格納している。 作画用の『StructureGraph』シートでは、『StructureData』シートに格納されているデータから、 ユーザーが入力した条件に一致するデータ項目を拾い上げて表を出力するとともに、出力され たデータを用いてグラフを描画する。

4.2 球及び無限円柱体系の臨界半径計算

本計算では、球体系と無限円柱体系の実効増倍率が 1.00、0.98、0.95 となる臨界半径を出力 する。本計算に必要なデータを得るために、1cm 又は 0.5cm 単位で半径を変化させて実効増倍 率を計算し、実効増倍率が 1.00、0.98、0.95 となる範囲を絞り込んだ。最終的には、線形補間 で臨界半径を計算している。

臨界半径の計算では、データセットの数は表 2.1、2.4 に示した通り、

ボイド率3種類×燃焼度5種類×冷却期間7種類×FP2種類×含水率11種類×実効増倍率3種類 (1.00、0.98、0.95)

の計 6,930 ケースとなる。この 6,930 ケースについて MVP を用いて臨界半径の計算を実施し、 計算結果を Excel の『SphData』シートおよび『CylData』シートに格納している。なお、実際に は臨界量に達しない(臨界半径が 1,000cm 以上となる)組み合わせもあるので、『SphData』シー トおよび『CylData』シートには 5,100 ケースが格納されている。作画用の『KeffGraph』シート では、『SphData』シートまたは『CylData』シートに格納されたデータ、ユーザーが入力した条 件に一致するデータ項目を拾い上げ、グラフを描画する。

5. HAND の使用方法

HAND は Excel のマクロを用いた GUI で操作する。通常この GUI は HAND の Excel ファイルを開くことで表示されるが、表示されない場合は以下の対策を行うと表示されるようになる可能性がある。

- 『KeffGraph』シート、『IsolinesMap』シート、『StructureGraph』シート、『KeffGraph』シ ートの B27 セル付近にある「Setting」ボタンをクリックする。
- ① ①の「Setting」ボタンを押しても反応しない場合、マクロが無効化されているので、Excel 上部に表示されている「コンテンツの有効化」ボタンをクリックし、マクロを有効化す る。
- ③ ②の「コンテンツの有効化」ボタンが表示されない場合、Excelのマクロが全て無効化されている可能性がある。その場合は「ファイル」→「オプション」で『Excelのオプション』ウィンドウを表示する。このウィンドウ中で「セキュリティ センター」タブをクリックし、「セキュリティ センターの設定」ボタンをクリックする。『セキュリティ センター』のウィンドウが表示されるので、「マクロの設定」タブをクリックし、「警告を表示してすべてのマクロを無効にする」にチェックを入れる。

以降では無限均質体系における無限増倍率計算と球及び無限円柱体系の臨界半径計算における HANDの入力について説明する。

5.1 無限均質体系における無限増倍率計算

4.1節で説明した通り、無限均質体系における無限増倍率計算には、燃料と水のみの無限増倍率(Kinf)、臨界閾値線図(Isolines)、構造材(SUS およびコンクリート)を考慮した無限増倍率(Structure)の3種類の計算が用意されている。本節ではこれらの計算について、個々に説明する。

まず、燃料と水のみの無限増倍率(Kinf)の計算について説明する。図 5.1 に燃料と水のみの無限増倍率計算における GUI 画面と各入力項目の説明を示す。GUI の操作は次の通りである。なお、HAND は日本語(Japanese)と英語(English)に対応しており、日本語に変更したい場合は、右上の「表示言語選択ボタン」で Japanese に変更すればよい。

- 1) 「グラフ種類選択タブ」で描画したい図の種類(Kinf)を選択する。
- 2) 「X 軸項目選択ボタン」で X 軸に設定したい項目を選択する。なお、含水率については右上の「含水率選択ボタン」で重量割合(Wt%)と体積割合(Vol%)の変更が可能である。また、右下の「H/U」ボタンを押すと、X 軸を水素元素(H=H-1)とウラン元素(U=U-234+U-235+U-238)の原子個数比である H/U 比で出力することが可能である。
- 「X 軸項目選択ボタン」でX 軸に設定した項目以外について、「設定パラメータ選択 テーブル」で燃料デブリの条件(Void ratio:ボイド率、Exposure:燃焼度、Cooling time: 冷却期間、FP:FPの有無、Water content ratio:含水率)を選択する。なお、選択した

パラメータは青くハイライトされる。

- 「グラフ再表示ボタン」をクリックし、設定した条件のグラフを描画する。なお青く ハイライトされた各項目をダブルクリックしても再描画する。
- 5) 入力設定を終了する場合は、「設定画面クローズボタン」をクリックし、GUI 画面を 閉じる。
- 6) GUI 画面を再度表示させるためには、B27 セル付近にある「Setting」ボタンをクリッ クする。

図 5.2 に HAND 内部での無限増倍率図を作図する時のデータフローを示す。図 5.2 に 示すように、HAND では、GUI 画面で指定した条件に一致するデータを『KinfData』シ ートから探し出し、『KinfData』シートに記載されている値を表及びグラフとして出力す る。



図 5.1 燃料と水のみの無限増倍率計算における GUI 画面と各入力項目の説明



図 5.2 無限増倍率図を作図する時のデータフロー

燃料と水のみの無限増倍率計算の例として、図 5.3 に各ボイド率に対する無限増倍率、図 5.4 に各燃焼度に対する無限増倍率、図 5.5 に各冷却期間に対する無限増倍率、図 5.6 に FP 考慮の 有無に対する無限増倍率、図 5.7 に各含水率に対する無限増倍率、図 5.8 に各 H/U 比に対する 無限増倍率の変化をそれぞれ示す。図 5.3~5.8 に示すように、計算条件が一目でわかるように、 GUI 画面で指定した解析条件は A1 セルに出力される。また、HAND では作図だけでなく、図 の右側にその元データとなる表データを出力する。なお、表中で最大となる実効増倍率とその 項目について表中に赤字で表示するとともに、J26 セル付近に出力する。また、表では MVP の 解析による統計誤差も表示される。 なお、図 5.6 に示すように、FP の考慮の有無に対する無限増倍率ついては、X 軸ラベルには FP の有無とは表示されずに、10:FP 考慮、20:FP 非考慮として表示される。HAND ではグラ フの種別を散布図で表示している。他のデータと整合させようとすると、ラベルに文字表記が できないことから、FP の考慮項目を数値で置き換えている。





図 5.4 各燃焼度に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例



図 5.5 各冷却期間に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例





図 5.6 FP 考慮の有無に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例



図 5.7 各含水率に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例

JAEA-Data/Code 2020-014



図 5.8 各 H/U 比に対する燃料と水のみの無限増倍率の計算例

次に、臨界閾値線図(Isolines)の計算について説明する。図 5.9 に臨界閾値線図計算における GUI 画面と各入力項目の説明を示す。GUI の操作は次の通りである。なお、HAND は日本語 (Japanese)と英語(English)に対応しており、日本語に変更したい場合は、右上の「表示言語選択 ボタン」で Japanese に変更すればよい。

- 1) 「グラフ種類選択タブ」で描画したい図の種類(Isolines)を選択する。
- 「設定パラメータ選択テーブル」で燃料デブリの条件(Void ratio:ボイド率、Cooling time:冷却期間、FP:FPの有無)を選択する。なお、選択したパラメータは青くハイ ライトされる。
- 3)「表示データチェックボックス」で表示したい無限増倍率の値を選択する。なお、本 計算では、1.00、0.98、0.95に対応する3種類の計算結果を出力できる。初期設定で は全ての値を表示するので、一部の計算結果のみを出力させたい場合は不必要なチ ェックボックスのチェックを外せばよい。
- 「Draw」ボタンをクリックし、設定した条件のグラフを描画する。なお青くハイラ イトされた各項目をダブルクリックしても再描画する。
- 5) 入力設定を終了する場合は、「Close」ボタンをクリックし、GUI 画面を閉じる。
- 6) GUI 画面を再度表示させるためには、B27 セル付近にある「Setting」ボタンをクリ ックする。



図 5.9 臨界閾値線図計算における GUI 画面と各入力項目の説明

図 5.10 に臨界閾値線図の計算例を示す。HAND では、GUI 画面で指定した条件に一致するデ ータを『IsolinesMap』シートから探し出し、『IsolinesMap』シートに記載されている値を表及び グラフとして出力する。図 5.10 に示すように、計算条件が一目でわかるように、GUI 画面で指 定した解析条件は A1 セルに出力される。また、HAND では作図だけでなく、図の右側にその 元データとなる表データを出力する。



図 5.10 臨界閾値線図の計算例

最後に、構造材(SUS およびコンクリート)を考慮した無限増倍率(Structure)の計算について説明する。図 5.11 に構造材を考慮した無限増倍率計算における GUI 画面と各入力項目の説明を示す。GUI の操作は次の通りである。なお、HAND は日本語(Japanese)と英語(English)に対応しており、日本語に変更したい場合は、右上の「表示言語選択ボタン」で Japanese に変更すればよい。

- 1) 「グラフ種類選択タブ」で描画したい図の種類(Structure)を選択する。
- 2) 「X 軸項目選択ボタン」で X 軸に設定したい項目を選択する。なお、含水率については「含水率選択ボタン」で重量割合(Wt%)と体積割合(Vol%)の変更が可能である。
- 3) 「X 軸項目選択ボタン」でX 軸に設定した項目以外について、「設定パラメータ選択

テーブル」で燃料デブリの条件(Void ratio:ボイド率、Exposure:燃焼度、Cooling time: 冷却期間、FP:FPの有無、Water content ratio:含水率、Debris:デブリ割合)を選択す る。なお、選択したパラメータは青くハイライトされる。また、デブリ割合について は、体積割合(Vol%)しか選択することができない。

- 4)「表示データチェックボックス」で表示したい燃料デブリの状態を選択する。なお、本計算では、デブリ+コンクリート、デブリ+SUS、デブリ+コンクリート+SUSに対応する3種類の計算結果を出力できる。初期設定では全ての値を表示するので、一部の計算結果のみを出力させたい場合は不必要なチェックボックスのチェックを外せばよい。
- 5) 「Draw」ボタンをクリックし、設定した条件のグラフを描画する。なお青くハイラ イトされた各項目をダブルクリックしても再描画する。
- 6) 入力設定を終了する場合は、「Close」ボタンをクリックし、GUI 画面を閉じる。
- 7) GUI 画面を再度表示させるためには、B27 セル付近にある「Setting」ボタンをクリ ックする。

図 5.12 に構造材を考慮した無限増倍率の計算例を示す。HAND では、GUI 画面で指定した条件に一致するデータを『StructureData』シートから探し出し、『StructureData』シートに記載されている値を表及びグラフとして出力する。図 5.12 に示すように、計算条件が一目でわかるように、GUI 画面で指定した解析条件は A1 セルに出力される。また、HAND では作図だけでなく、図の右側にその元データとなる表データを出力する。なお、表中で最大となる無限増倍率とその項目について表中に赤字で表示するとともに、J26 セル付近に出力する。

構造材混合を考慮した無限増倍率図の例として、X 軸を含水率とし、デブリ率を 10%とした 場合の図を図 5.13 の上図に示す。図 5.13 の上図では、

① デブリ 10%+コンクリート 90%

- ② デブリ 10%+SUS90%
- ③ デブリ 10%+コンクリート 45%+SUS45%

の3本のグラフが表示される。なお、上記の値は含水率を含まないデブリを100%とした場合の値である。またX軸をデブリ率とし、含水率を25%とした場合の図を図5.13の下図に示す。 図5.13の下図のデブリ割合は、デブリ中の燃料の割合であり、デブリ割合が100%の場合、コンクリートもSUSも含まれない。また、図5.13の青丸で囲った値(上図の含水率25%の値と、下図のデブリ割合10%)は同じデータを示している。



図 5.11 構造材を考慮した無限増倍率計算における GUI 画面と各入力項目の説明



図 5.12 構造材を考慮した無限増倍率の計算例



5.2 球及び無限円柱体系の臨界半径計算

4.2節で述べたように、本計算では、球体系(Spherical)と無限円柱体系(Cylindrical)の実効増倍率が 1.00、0.98、0.95 となる臨界半径を出力する。本節では球体系および無限円柱体系の計算 について、個々に説明する。

まず、球体系(Spherical)の計算について説明する。図 5.14 に球体系の臨界半径計算における GUI 画面と各入力項目の説明を示す。GUI の操作は次の通りである。なお、HAND は日本語 (Japanese)と英語(English)に対応しており、日本語に変更したい場合は、右上の「表示言語選択 ボタン」で Japanese に変更すればよい。

- 1) 「グラフ種類選択タブ」で解析したい体系(Spherical)を選択する。
- 2) 「X 軸項目選択ボタン」で X 軸に設定したい項目を選択する。なお、含水率について

は右上の「含水率選択ボタン」で重量割合(Wt%)と体積割合(Vol%)の変更が可能である。 また、右下の「H/U」ボタンを押すと、X軸を水素元素(H=H-1)とウラン元素(U=U-234+U-235+U-238)の原子個数比である H/U 比で出力することが可能である。

- 「X 軸項目選択ボタン」で X 軸に設定した項目以外について、「設定パラメータ選択テ ーブル」で燃料デブリの条件(Void ratio:ボイド率、Exposure:燃焼度、Cooling time: 冷却期間、FP:FPの有無、Water content ratio:含水率)を選択する。なお、選択したパ ラメータは青くハイライトされる。
- 4)「表示データチェックボックス」で表示したい無限増倍率の値を選択する。なお、本計算では、1.00、0.98、0.95に対応する3種類の計算結果を出力できる。初期設定では全ての値を表示するので、一部の計算結果のみを出力させたい場合は不必要なチェックボックスのチェックを外せばよい。
- 5) 「グラフ再表示ボタン」をクリックし、設定した条件のグラフを描画する。なお青くハ イライトされた各項目をダブルクリックしても再描画する。
- 6) 入力設定を終了する場合は、「設定画面クローズボタン」をクリックし、GUI 画面を閉 じる。
- 7) GUI 画面を再度表示させるためには、B27 セル付近にある「Setting」ボタンをクリッ クする。



図 5.14 球体系の臨界半径計算における GUI 画面と各入力項目の説明

図 5.15 に HAND 内部での最小臨界半径を作図する時のデータフローを示す。図 5.15 に示すように、HAND では、GUI 画面で指定した条件に一致するデータを『SphData』シートから探し出し、『SphData』シートに記載されている値を表及びグラフとして出力する。

球体系の臨界半径計算の例を図 5.16 に示す。図 5.16 に示すように、計算条件が一目で分か るように、GUI 画面で指定した解析条件は A1 セルに出力される。また、HAND では作図だけ でなく、図の右側にその元データとなる表データを出力する。なお、表中で最小となる臨界半 径とその項目について表中に赤字で表示するとともに、J22 セル付近に出力する。



図 5.15 球体系の臨界半径図を作図する時のデータフロー



図 5.16 球体系の臨界半径計算の例

次に、無限円柱体系(Cylindrical)の計算について説明する。図 5.17 に球体系の臨界半径計算に おける GUI 画面と各入力項目の説明を示す。GUI の操作は球体系と同じく次の通りである。な お、HAND は日本語(Japanese)と英語(English)に対応しており、日本語に変更したい場合は、右 上の「表示言語選択ボタン」で Japanese に変更すればよい。

- 1) 「グラフ種類選択タブ」で解析したい体系(Cylindrical)を選択する。
- 2) 「X 軸項目選択ボタン」で X 軸に設定したい項目を選択する。なお、含水率について は右上の「含水率選択ボタン」で重量割合(Wt%)と体積割合(Vol%)の変更が可能である。 また、右下の「H/U」ボタンを押すと、X 軸を水素元素(H=H-1)とウラン元素(U=U-234+U-235+U-238)の原子個数比である H/U 比で出力することが可能である。
- 「X 軸項目選択ボタン」で X 軸に設定した項目以外について、「設定パラメータ選択テ ーブル」で燃料デブリの条件(Void ratio:ボイド率、Exposure:燃焼度、Cooling time: 冷却期間、FP:FPの有無、Water content ratio:含水率)を選択する。なお、選択したパ ラメータは青くハイライトされる。
- 4)「表示データチェックボックス」で表示したい無限増倍率の値を選択する。なお、本計算では、1.00、0.98、0.95に対応する3種類の計算結果を出力できる。初期設定では全ての値を表示するので、一部の計算結果のみを出力させたい場合は不必要なチェックボックスのチェックを外せばよい。
- 5) 「グラフ再表示ボタン」をクリックし、設定した条件のグラフを描画する。なお青くハ

イライトされた各項目をダブルクリックしても再描画する。

- 6) 入力設定を終了する場合は、「設定画面クローズボタン」をクリックし、GUI 画面を閉 じる。
- 7) GUI 画面を再度表示させるためには、B27 セル付近にある「Setting」ボタンをクリッ クする。

図 5.18 に無限円柱体系の最小臨界半径の計算例を示す。HAND では、GUI 画面で指定した条件に一致するデータを『CylData』シートから探し出し、『CylData』シートに記載されている値を表及びグラフとして出力する。図 5.18 に示すように、計算条件が一目でわかるように、GUI 画面で指定した解析条件は A1 セルに出力される。また、HAND では作図だけでなく、図の右側にその元データとなる表データを出力する。なお、表中で最小となる臨界半径とその項目について表中に赤字で表示するとともに、J22 セル付近に出力する。



図 5.17 無限円柱体系の臨界半径計算における GUI 画面と各入力項目の説明



図 5.18 無限円柱体系の臨界半径計算の例

6. まとめ

燃料デブリの臨界性を高速に計算するため、簡易燃料デブリ臨界性解析ツール HAND を開発 した。HAND は Excel で整備されており、様々な核種組成、含水率における無限増倍体系、球・ 無限円柱体系について、MVP を用いて解析した結果をまとめたデータベースと、そのデータベ ースから GUI でユーザーが指定した条件に沿った結果を表およびグラフ形式で出力するマク ロから構築されている。

HAND を用いて広範囲な条件で燃料デブリの臨界性解析を行い、臨界となる可能性の高い条件を探索することで、長い計算時間のかかる詳細計算の試行回数が削減され、全体の計算時間の低減が期待できる。また、HAND は GUI の操作で簡単に臨界計算が行えるため、どのような状態になると臨界になりやすいのかを直感的に理解することができる。そのため、HAND は原子炉物理学の初学者及び原子炉物理学を学んでいない人に対し、臨界について理解するための教育ツールとしての活用も期待できる。

謝辞

HANDで用いている燃料デブリの臨界計算のデータベース構築は元炉物理標準コード研究グ ループリーダーで現 NEA/Data-Bank 課長の須山賢也氏が始めたものである。このデータベース は HAND の開発の基礎であり、本データベースの整備を進められた須山賢也氏に深く感謝しま す。また、HAND のデータベースおよび Excel のマクロの整備に多大なる協力をしていただい た(株)コンピューター総合研究所の崎野孝夫氏に深く感謝します。

参考文献

- Y. Nagaya et al., "MVP/GMVP Version 3 : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations Based on Continuous Energy and Multigroup Methods", JAEA-Data/Code 2016-018 (2017), 421p.
- K. Suyama et al., "Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C", NEA/NSC/R/(2015)6 (2016), 253p.
- 3) A. G. Croff, "A User's Manual for ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175 (1980), 185p.
- 鹿島陽夫,須山賢也,高田友幸,"連続エネルギーモンテカルロコード MVP、MCNP 及び核 計算コード SRAC を使用する統合化燃焼計算コードシステム-SWAT4.0", JAEA-Data/Code 2014-028 (2015), 152p.
- 5) 燃料サイクル安全研究委員会, "燃焼度クレジット導入ガイド原案(受託研究)", JAERI-Tech 2001-055 (2001), 92p.
- H. Okuno, "Second Version of Data Collection Part of Nuclear Criticality Safety Handbook (Contact Research)", JAEA-Data/Code 2009-010 (2009), 175p.
- 7) 森貴正,小嶋健介,須山賢也,"確率論的幾何形状モデルの軽水体系への適用について", JAEA-Research 2018-010 (2019), 57p.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	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					
AI 立長 SI 組立単位	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 ⁸				
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

	SI 旭立単位				
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 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立体鱼	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	Ν		m kg s ⁻²	
E 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	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	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	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備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物告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

	S	[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	リ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
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	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 s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	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	記号 乗数		記号	
10^{24}	э 9	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	М	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=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称			記号	SI 単位で表される数値	
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
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	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	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	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 ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)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					
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$