



JAEA-Technology

2015-040

DOI:10.11484/jaea-technology-2015-040

FORNAX-Aの応用

Application of FORNAX-A

相原 純 植田 祥平 西原 哲夫

Jun AIHARA, Shohei UETA and Tetsuo NISHIHARA

高温ガス炉水素・熱利用研究センター

小型高温ガス炉研究開発ディビジョン

Small-sized HTGR Research and Development Division

HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center

February 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

FORNAX-A の応用

日本原子力研究開発機構 高温ガス炉水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ディビジョン
相原 純、植田 祥平、西原 哲夫

(2015 年 12 月 1 日 受理)

FORNAX-A は、ピン・イン・ブロック型の高温ガス炉燃料要素(円筒型)からの核分裂生成物(FP)放出量を計算するための計算コードである。本稿は、この FORNAX-A のプログラムにユーザーが軽微な変更を施すことによりどのような計算が可能になるか述べたものである。具体的には、取り扱える拡散係数の型の拡張、球状の燃料要素への適用、燃料要素中の被覆燃料粒子の温度分布考慮について述べる。

Application of FORNAX-A

Jun AIHARA, Shohei UETA and Tetsuo NISHIHARA

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

(Received December 1, 2015)

FORNAX-A is a calculation code for amount of fission product (FP) released from cylindrical fuel elements of pin-in-type high temperature gas-cooled reactors (HTGRs). This report is for explanation how to change FORNAX-A for enhancement of type of used diffusion coefficients, application to spherical fuel elements and calculation taking into consideration of temperature distribution of coated fuel particles in fuel element system.

Keywords: FORNAX-A, Fission Product Release, High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), Fuel, Fick's Laws of Diffusion

目 次

1. 序論	1
2. 拡散係数の取扱の拡張	2
2.1 はじめに	2
2.2 概要	2
2.3 動作確認の例	3
2.3.1 計算条件・計算方法	3
2.3.2 動作確認	4
3. 球状の燃料要素(燃料ペブル)への適用	6
3.1 はじめに	6
3.2 FORNAX-A を燃料ペブルに適用させるためのプログラム変更の方法	6
3.2.1 基礎式	6
3.2.2 プログラム変更の概要	7
3.2.3 燃料要素外表面/冷却材境界条件	7
3.3 動作確認	8
3.3.1 計算条件・計算方法	8
3.3.2 動作確認	8
4. 燃料要素中の被覆燃料粒子(CFP)の温度分布の取扱	9
4.1 はじめに	9
4.2 燃料要素中の被覆燃料粒子(CFP)の温度分布を取扱う方法	9
4.3 動作確認	10
4.3.1 はじめに	10
4.3.2 計算条件・計算方法	10
4.3.3 動作確認	10
5. まとめ	12
参考文献	12
付録 A 球状の燃料要素(燃料ペブル)における温度分布の計算方法	16
付録 B 円筒形状の燃料要素(燃料棒)における 工学的安全係数を考慮した温度分布の計算方法	20
付録 C 本編中第 4 章で述べた燃料要素中の CFP の温度分布の取扱方法の証明	25

Contents

1. Introduction	1
2. Expand of treatment of diffusion coefficients	2
2.1 Forward	2
2.2 Outline	2
2.3 Example of operation check	3
2.3.1 Calculation conditions and method	3
2.3.2 Operation check	4
3. Application to spherical fuel elements (fuel pebbles)	6
3.1 Forward	6
3.2 Method of change of program to apply FORNAX-A to fuel pebbles	6
3.2.1 Basic equations	6
3.2.2 Outline of change of program	7
3.2.3 Boundary condition between outer surface of fuel element and coolant	7
3.3 Operation check	8
3.3.1 Calculation conditions and method	8
3.3.2 Operation check	8
4. Treatment of distribution of temperatures of coated fuel particles (CFPs) in fuel element system	9
4.1 Forward	9
4.2 Method	9
4.3 Operation check	10
4.3.1 Proviso	10
4.3.2 Calculation conditions and method	10
4.3.3 Operation check	10
5. Summary	12
References	12
Appendix A Method for calculation of temperature distribution in spherical fuel element (fuel pebble)	16
Appendix B Method for calculation of temperature distribution with safety coefficient in cylindrical fuel element (fuel rod)	20
Appendix C Proof of method of treatment of distribution of temperatures of CFPs in fuel element system	25

1. 序論

FORNAX-A¹⁾は、通常運転時及び事故時におけるピン・イン・ブロック型の高温ガス炉燃料からの核分裂生成物(FP)放出量を計算するための計算コードである。取り扱い可能な計算条件には様々な制限がある。しかし、ユーザーがプログラムに軽微な変更を施すことによってFORNAX-Aの計算条件の制限を多少緩和することが可能である。本稿においては、FORNAX-Aのプログラムにどのような軽微な変更を施せば、どのような制限が緩和されるかを説明する。具体的には、下記のような3種類の制限の緩和について説明する。

- 拡散係数の取扱についての制限(第2章)
- 燃料要素の形状の制限(第3章)
- 燃料要素中のCFPの温度分布の制限(第4章)

本稿の目的は、FORNAX-Aを改良して何らかの新しい解析を行うことではなく、将来本計算コードを利用した解析評価を行う際の参考文献として活用してもらうことである。その解析評価結果を纏める論文等を簡潔にできるよう、本稿において基礎式の説明を丁寧に行い、動作確認まで行うこととした。

なお、本稿は「FORNAX-Aを用いた解析評価の参考文献」という位置付けであるため、本編を補足する内容を付録としてまとめた。具体的には、

- 付録A, B

将来FORNAX-Aを利用した解析評価で考慮する可能性が大きい温度分布の計算方法。

- 付録C

本編第4章で検討したCFP温度分布の取扱方法の妥当性確認。

である。

2. 拡散係数の取扱の拡張

2.1 はじめに

本来の FORNAX-A¹⁾において、被覆燃料粒子(CFP)及び燃料要素(本来の FORNAX-A においては燃料棒)における各領域における FP の拡散係数は、入力データである 1 組の頻度因子及び活性化エネルギーのセット、及び入力データである温度履歴から計算される。即ち、

$$D_{ai} = D_{0ai} \exp\left\{-Q_{ai} / R_g / (T + 273.15)\right\} \quad (1)$$

ただし、 D_{ai} : CFP または燃料要素体系における核種 i の拡散係数。

($a = p$ の時 CFP 体系、 $a = c$ の時燃料棒要素体系) [cm²/s]

p は「particle」、 c は「compact」を表す。

D_{0ai} : CFP または燃料要素体系における核種 i の拡散係数の頻度因子 [cm²/s]

($a = p$ の時 CFP 体系、 $a = c$ の時燃料要素体系) (入力データ)

時間テーブルでの入力可能。

Q_{ai} : CFP または燃料要素体系における核種 i の拡散係数の活性化エネルギー

($a = p$ の時 CFP 体系、 $a = c$ の時燃料要素体系) [J/mol] (入力データ)

時間テーブルでの入力可能。

R_g : ガス定数 [J/K/mol]

T : 温度 [°C](入力データ)

である。

本章では、FORNAX-A のプログラムに軽微な修正を施すことにより可能または容易になる拡散係数の取扱について述べる。まず 2.2 節で概要を述べ、2.3 節で動作確認の例を示す。

2.2 概要

FORNAX-A のプログラムに以下(1)(2)のような軽微な変更(本章の場合、拡散係数計算部の書き換え)を施すことにより、本来の FORNAX-A における拡散係数の取扱を拡張することができる。

以下(1)(2)のようなことが不可能な場合、何らかの近似を行った上で計算を行わなければならない(例: 計算条件の範囲において最も保守的な拡散係数を採用する)。近似を行った上で得た計算結果は、行わずに得た計算結果よりも精度が劣る。従って、拡散係数の取扱を拡張することにより、計算の精度を向上できる場合がある。なお、「向上できない場合」とは、拡散係数が本来の FORNAX-A で取扱可能な場合、または軽微な変更では取り扱えない場合(例: 拡散係数が FP 濃度の関数)である。

(1) 入力データに基づかずに拡散係数を計算する変更

頻度因子と活性化エネルギーの一部または全部をプログラム内で設定または計算する。こ

れによって、以下のようなことを取り扱えるようになる。

(a) 頻度因子 and/or 活性化エネルギーが時間の関数である場合

時間依存性を通して、頻度因子及び活性化エネルギーの以下のような変化を取り扱うことができる。

- (i) 拡散係数の高速中性子照射量依存性
- (ii) 拡散係数の燃焼度依存性
- (iii) 拡散係数の照射下・非照射下での切り替わり

なお、頻度因子及び活性化エネルギーのセットが1組であれば、上記のように本来の FORNAX-A においても、履歴が指定可能である。しかし、プログラム内で直接計算する方式の方がユーザーにとって遥かに容易である。

(b) 頻度因子 and/or 活性化エネルギーが温度の関数である場合（または温度による切り替わり）

(c) 拡散係数の頻度因子及び活性化エネルギーのセットが複数存在する場合

頻度因子と活性化エネルギーをプログラム内で設定し計算することにより、上記(1)式を下記(2)式のように拡張することができる。

$$D_{ai} = \sum_k D_{0ai,k} \exp\{-Q_{ai,k} / R_g / (T + 273.15)\} \quad (2)$$

ただし、 $D_{0ai,k}$: CFP または燃料要素体系における核種 i の拡散係数の k 番目の頻度因子

($a = p$ の時 CFP 体系、 $a = c$ の時燃料要素体系) [cm²/s]

$Q_{ai,k}$: CFP または燃料要素体系における核種 i の拡散係数の k 番目の活性化エネルギー ($a = p$ の時 CFP 体系、 $a = c$ の時燃料要素体系) [J/mol]

(2) 入力データに基づいて拡散係数を計算する変更

入力データである頻度因子 and/or 活性化エネルギーにプログラム内で変更を施し、それらを用いて拡散係数を計算する。このような変更によって、例えば下記「2.3.1 計算条件・計算方法」で述べるような計算が可能になる。

2.3 動作確認の例

2.3.1 計算条件・計算方法

計算条件を Table 1~4 に示す。なお、Table 1~4 の概要は下記の通りである。

- Table 1: 原子炉運転と CFP の温度履歴の概要
- Table 2: FP の生成に関する情報
- Table 3: CFP の仕様
- Table 4: CFP 中の FP の輸送に関する入力データ

この計算条件は実際の何らかの核種や実際の原子炉の運転条件・事故条件を想定したものではなく仮想的なものである。

Table 4 中の*1 に対応できるように、事故時、即ち時刻が 126144000 [s] より大きければ SiC 層中の核種 Y の拡散係数の頻度因子を入力データの 1000 倍とするように FORNAX-A のプログラムに変更を施した。これは、2.2 節(2)に相当する変更である。この変更したプログラムを用いて健全 CFP 内の FP の濃度分布の計算を行った。

2.3.2 動作確認

(1) はじめに

上記 2.3.1 で述べた計算条件及び計算方法で計算した健全 CFP 内の FP の濃度分布を用いて動作確認を行った。具体的には、健全 CFP 内の FP の濃度分布が時刻 126230400 [s] (事故時)において基礎式を満たしているかどうか調べた。

(2) 動作確認方法

本来の FORNAX-A においては、コントロールボリューム法及び陰解法が採用されている¹⁾。本稿で行うプログラムの軽微な変更は離散化及び数値解法には影響しないため、本稿においても FORMAX-A と同様に¹⁾動作確認を行うことができる。

この動作確認の方法は文献 1)の付録 B に詳細に述べてあるが、以下に概要を示す。健全 CFP における FP 輸送の方程式は下記(3)式のように離散化される¹⁾。

$$\begin{aligned} & (C_{pi,m^n} - C_{pi,m^{n-1}}) \Delta v_m / \Delta t^n \\ & = J_{pi,e,m^n} S_e - J_{pi,w,m^n} S_w + \left[\sum_k u_{ik} C_{pk,m^n} + \beta_{pi,m^n} - ha_{i,m^n} \right] \Delta v_m + Recoil_{i,m^n} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 C_{pi,m^n} : タイムステップ n 、節点 m (要素 m の中央の点)における CFP 体系における核種 i の濃度 [μ mol/cm³]

Δv_m : 要素 m の体積 [cm³]

Δt^n : タイムステップ n の幅 [s]

J_{pi,e,m^n} : タイムステップ n における要素 $m-1$ から要素 m への核種 i の CFP 体系における拡散による流入の流束 [μ mol/cm²/s]

S_e : 要素 $m-1$ と要素 m の境界面積 [cm²]

J_{pi,w,m^n} : タイムステップ n における要素 m から要素 $m+1$ への CFP 体系における核種 i の拡散による流出の流束 [μ mol/cm²/s]

S_w : 要素 m と要素 $m+1$ の境界面積 [cm²]

u_{ik} : FP 核種 k の崩壊による FP 核種 i の生成率 [-] ($k=i$ の場合は減少率)

$$u_{ii} = -\lambda_i$$

$$u_{ik} = \varepsilon_{ik} \lambda_k \text{ for } i \neq k$$

λ_i : FP 核種 i の崩壊定数 [1/s] (入力データ)

ε_{ik} : 核種 k が崩壊により核種 i になる分岐率 [-] (入力データ)

$\beta_{ai,m}^n$: タイムステップ n 、要素 m における核分裂による核種 i の単位体積当たり生成速度 [μ mol/cm³/s]

$ha_{i,m}^n$: タイムステップ n 、要素 m における核種 i の単位体積当たり反跳放出速度 [μ mol/cm³/sec]

$Recoil_{i,m}^n$: タイムステップ n 、要素 m に反対跳により流入する核種 i の流入速度 [μ mol/s]

上記(3)式の左辺と右辺を各々計算して比較することにより、動作確認を行った。具体的には下記①～③の通りである。

- ① タイムステップ n 及び $n-1$ における当該核種(ここでは核種 Y)の濃度分布から上記(3)式の左辺を計算する。
- ② 核種 i 及び核種 i と同じ崩壊系列に属する全核種のうち $u_{ik} \neq 0$ である全ての核種 k (ここでは核種 X)のタイムステップ n における濃度分布から上記(3)式の右辺を計算する。
- ③ 上記①②の値を比較し、よく一致していれば「健全 CFP または燃料要素体系における核種 i (ここでは核種 Y)の濃度分布がタイムステップ n において基礎式を満たしている。」と判定する。

(3) 動作確認結果

タイムステップ n (= 時刻 126230400 [s])における核種 X 及び Y の濃度分布 $C_{pX,m}^n$ 及び $C_{pY,m}^n$ を用いて上記(3)式の右辺を計算し、タイムステップ n 及び $n-1$ (時刻 126230370 [s])における核種 Y の濃度分布 $C_{pY,m}^n$ 及び $C_{pY,m}^{n-1}$ を用いて計算した上記(3)式の左辺と各要素ごとに比較した結果、よく一致した。具体的には、上記(2)①の値に対する①の値と②の値の差の比はごく小さかった(絶対値の最大値が約 3.85×10^{-5})。

従って、健全 CFP 内の核種 Y の濃度分布が時刻 126230400 [s] (事故時)において基礎式を満たしていると判定された。

3. 球状の燃料要素(燃料ペブル)への適用

3.1 はじめに

本来の FORNAX-A は、ピン・イン・ブロック型、即ち円筒形状の燃料要素(燃料棒)を対象とした計算コードであるが、世の中には球形状の燃料要素(燃料ペブル)も存在する。燃料ペブルは、燃料コンパクトと同様に CFP と母材の混合物である球形状の「燃料部」及び、燃料部に密着して覆う均一な厚さの「無燃料部」から成る。無燃料部の材質は通常黒鉛ではなく、燃料部の母材と同じである。燃料ペブルの FP 放出挙動が計算できれば、海外において取得される燃料ペブルの FP 放出データを拡散係数の検証等に活用することができる。

上記「2.3.2 動作確認(2) 動作確認方法」で述べたように、本来の FORNAX-A においてはコントロールボリューム法が採用されており、本稿で行うプログラムの軽微な変更はこのコントロールボリューム法には影響しない。従って、プログラムの軽微な変更により球形状の燃料要素への適用が可能である。(ただし、3.2 節で述べるように境界条件は限定される。)本章ではまず、3.2 節で軽微な変更により FORNAX-A を燃料ペブルへ適用させる方法について述べ、3.3 節で動作確認を行う。

3.2 FORNAX-A を燃料ペブルに適用させるためのプログラム変更の方法

3.2.1 基礎式

FORNAX-A においては、燃料要素体系における FP 輸送の方程式は下記(4)式のように離散化される¹⁾。

$$(C_{ci,m^n} - C_{ci,m^{n-1}}) \Delta v_m / \Delta t^n = J_{ci,e,m^n} S_e - J_{ci,w,m^n} S_w + \left[\sum_k u_{ik} C_{ci,m^n} + G_{i,m^n} \right] \Delta v_m \quad (4)$$

ただし、 C_{ci,m^n} : 節点 m 、タイムステップ n における燃料要素体系における核種 i の濃度
[$\mu \text{ mol/cm}^3$]

なお、FORNAX-A においては燃料要素体系における FP の量としては、CFP に保持されている FP 量は含まない¹⁾。この点はプログラムの軽微な変更を行っても影響されない。

J_{ci,e,m^n} : タイムステップ n における要素 $m-1$ から要素 m への燃料要素体系における核種 i の拡散による流入の流束 [$\mu \text{ mol/cm}^2/\text{s}$]

J_{ci,w,m^n} : タイムステップ n における要素 m から要素 $m+1$ への核種 i の拡散による流出の流束 [$\mu \text{ mol/cm}^2/\text{s}$]

G_{i,m^n} : タイムステップ n 、要素 m における核種 i の燃料要素系における単位体積当たり生成速度 [$\mu \text{ mol/cm}^3/\text{s}$]

本来の FORNAX-A において燃料要素は円筒形状なので、燃料要素体系において Δv_m , S_e , S_w は下記(5)~(7)式によって計算される。

$$\Delta v_m = \pi L (r_{m,out}^2 - r_{m,in}^2) \quad (5)$$

$$S_e = 2 \pi r_{m,in} L \quad (6)$$

$$S_w = 2 \pi r_{m,out} L \quad (7)$$

ただし、 L : 当該計算点における燃料要素(燃料棒)の長さ [cm] (入力データ)

$r_{m,out}$: 要素 m の外径 [cm]

$r_{m,in}$: 要素 m の内径 [cm]

3.2.2 プログラム変更の概要

球状の燃料要素を取り扱う場合には、プログラム内の上記(5)~(7)式に該当する箇所を下記(8)~(10)を表すように各々書き換える。

$$\Delta v_m = 4 \pi (r_{m,in}^3 - r_{m,out}^3) / 3 \quad (8)$$

$$S_e = 4 \pi r_{m,in}^2 \quad (9)$$

$$S_w = 4 \pi r_{m,out}^2 \quad (10)$$

なお、本来の FORNAX-A においては、上記のように入力データとして「当該計算点における燃料棒の長さ(L)」が存在するが、ペブル燃料に対応するよう上記のようにプログラムを変更すると、この L は計算に使用されない。

3.2.3 燃料要素外表面/冷却材境界条件

本来の FORNAX-A においては、黒鉛スリーブ外表面(燃料要素外表面)/冷却材における境界条件としては、下記(a)(b)のどちらかを選択する¹⁾。

(a) 燃料要素外表面において FP 濃度は 0

(b) 燃料要素の外表面において FP 濃度が 0 ではない

上記(b)を選択した場合、プログラム内で燃料要素外表面/冷却材境界における物質伝達係数が計算され、境界における FP 濃度の計算に用いられる¹⁾。FORNAX-A におけるこの計算方法は円環状の冷却材流路に対応している¹⁾。しかし、燃料要素が球形状である場合、冷却材流路は円環状ではない。

従って、上記 3.2.2 小節で述べたように FORNAX-A のプログラムを変更し、ペブル燃料

に適用する場合には、燃料要素外表面/冷却材境界条件としては(b)を選択することは理論的に適切ではない。

3.3 動作確認

3.3.1 計算条件・計算方法

計算条件を Table 1～7 に示す。なお、Table 5～7 の概要は下記の通りである。(Table 1～4 については上記第 2 章を参照のこと)

- ▶ Table 5: 燃料要素(本章においては燃料ペブル)についての温度履歴
- ▶ Table 6: 燃料要素(本章においては燃料ペブル)の仕様
- ▶ Table 7: 燃料要素(本章においては燃料ペブル)中の FP の輸送に関する入力データ

第 2 章における計算条件と同様、これらの計算条件は実際の何らかの核種や実際の原子炉の運転条件・事故条件を想定したものではなく仮想的なものである。

上記 3.2 節で述べたように FORNAX-A のプログラムに変更を施し、この変更したプログラムを用いて燃料要素体系における FP の濃度分布の計算を行った。

3.3.2 動作確認

上記 3.3.1 で述べた計算条件及び計算方法で計算した燃料要素体系における FP の濃度分布を用いて動作確認を行った。具体的には、上記(4)式の左辺と右辺を各々計算して比較することにより、燃料要素体系における FP の濃度分布が時刻 126230400 [s] (事故時)において基礎式を満たしているかどうか調べた。(詳細については参考文献 1)付録 C を参照すること。)

タイムステップ n (= 時刻 126230400 [s])における核種 X 及び Y の濃度分布 C_{cX,m^n} 及び C_{cY,m^n} を用いて上記(4)式の右辺を計算し、タイムステップ n 及び $n-1$ (時刻 126230370 [s])における核種 Y の濃度分布 C_{cY,m^n} 及び $C_{cY,m^{n-1}}$ を用いて計算した上記(4)式の左辺と要素ごとに比較した結果、よく一致した。具体的には、左辺に対する右辺と左辺の差の比はごく小さかった(絶対値の最大値が約 6.01×10^{-5})。

従って、燃料要素体系における核種 Y の濃度分布は時刻 126230400 [s] (事故時)において基礎式を満たしていると判定された。

4. 燃料要素中の被覆燃料粒子(CFP)の温度分布の取扱

4.1 はじめに

FORNAX-A においては、CFP 体系と燃料要素体系における FP 輸送の方程式(各々(3)式と(4)式)は、各タイムステップごとに以下のようにして解かれる¹⁾。

- ①(3)式を解く。
- ②①の結果より(4)式中 $G_{i,m}^n$ を計算する。
- ③ $G_{i,m}^n$ を用いて(4)式を計算する。

本来の FORNAX-A においては、計算時間節約のため CFP の温度は燃料要素中で一様であるとしている¹⁾。即ち、 $G_{i,m}^n$ は燃料要素中で一様であるとしている(一方、燃料要素体系における FP 輸送の式((4)式)を解く場合においては燃料要素の径方向温度分布が考慮される¹⁾。即ち、 D_{ci} ((1)式参照)は燃料要素中で一様とは限らない)。しかし、プログラムの軽微な変更によって CFP の温度の径方向分布を取り扱うことが可能である。燃料要素中の CFP の温度の取扱ができれば、それが均一であるとして計算するよりも計算の精度は理論的に良くなる。

本章では、4.2 節でプログラムの軽微な変更により FORNAX-A で燃料要素中の CFP の温度分布を取り扱う方法について述べ、4.3 節で動作確認を行う。

なお、本章で扱う「CFP の温度分布」とは、1 粒の CFP 中における温度分布ではない。本来の FORNAX-A においても、本章で述べるような変更を施した FORNAX-A においても、CFP 体系における FP 輸送の式は「CFP 中において温度は一様」という条件の下に解かれる。

4.2 燃料要素中の被覆燃料粒子(CFP)の温度分布を取扱う方法

以下のようにして CFP の温度の径方向温度分布を取り扱うことが可能である。ただし、下記③で述べるように境界条件が限られる。

- ① 燃料コンパクト(または燃料部)の要素を、径方向にいくつかの領域 R_1, R_2, \dots, R_m に分割する。(要素 1 つを 1 つの領域としても良い)
- ② 領域 $R_k(1 \leq k \leq m)$ 以外の FP の燃料要素体系における生成を 0 に書き換えるよう、本来の FORNAX-A のプログラムに変更を施した物(以下、FORNAX-A_k とする)を作る。(m 個の FORNAX-A_k を作る)
- ③ CFP の温度として領域 $R_k(1 \leq k \leq m)$ における温度(例：領域 R_k の内外面温度の平均値)を指定した入力データファイル(以下、INDAT_k とする)を作る。(m 個の INDAT_k を作る)

燃料要素外表面における境界条件としては下記(a)(b)のいずれかを選ぶ。すべての INDAT_k において同じ境界条件を選ぶこと。ただし、第 3 章で述べた通り、燃料ペブルについての計算を行う場合には(a)のみ選択すること(上記 3.2.2 小節参照)。

- (a) 燃料要素外表面において FP 濃度 = 0
 - (b) 「燃料要素の外表面において FP 濃度が 0 ではない」のうち「Hernian 型」(円柱または円筒状燃料要素の場合のみ)
- ④ INDAT_k(1 ≤ k ≤ m)を入力データファイルとして FORNAX-A_k(1 ≤ k ≤ m)により計算を行う。計算された核種 *i* の燃料要素体系における燃料要素中における位置(燃料要素中心からの距離) r_c [cm]、時刻 t [s]における核種 *i* の濃度を $C_{ci,k}(r_c, t)$ [μ mol/cm³] (1 ≤ k ≤ m)とする。
- ⑤ 下記(11)式で計算される $C_{ci}(r_c, t)$ [μ mol/cm³]が、燃料要素中における位置(燃料要素中心からの距離) r_c [cm]、時刻 t [s]における核種 *i* の濃度燃料要素体系における濃度である。

$$C_{ci}(r_c, t) = \sum_{k=1}^m C_{ci,k}(r_c, t) \quad (11)$$

なお、この方法が理論的に正しいことの証明は「付録 C. 本編中第 4 章で述べた燃料要素中の CFP の温度分布の取扱の方法が正しいことの証明」に収録している。

4.3 動作確認

4.3.1 はじめに

本節で行う動作確認とは、「CFP の温度分布を取り扱えること」の確認ではなく「ある領域以外での FP の燃料要素体系における生成が 0 という条件で計算できること」の確認である。

4.3.2 計算条件・計算方法

計算条件を Table 1~7 に示す。

燃料要素の中心からの距離が 0.85 [cm]以下または 0.9 [cm]以上であれば FP の燃料要素体系における生成を 0 に書き換えるよう(即ち、燃料要素の中心からの距離が 0.85 [cm]と 0.9 [cm]の間の領域でのみ、FP が生成されるよう)、本来の FORNAX-A のプログラムに変更を施し、この変更したプログラムを用いて燃料要素体系における FP 濃度分布の計算を行った。

4.3.3 動作確認

上記 4.4.2 で述べた計算条件及び計算方法で計算した燃料要素体系における FP の濃度分布を用いて動作確認を行った。具体的には、第 3 章と同様に上記(4)式の左辺と右辺を各々計算して比較することにより、燃料要素体系における FP の濃度分布が時刻 126230400 [s] (事故時)において基礎式を満たしているかどうか調べた。(詳細については参考文献 1)付録 C を参照す

ること。)

タイムステップ n (= 時刻 126230400 [s])における核種 X 及び Y の濃度分布 $C_{cX,m}^n$ 及び $C_{cY,m}^n$ を用いて上記(4)式の右辺を計算し、タイムステップ n 及び $n-1$ (時刻 126230370 [s])における核種 Y の濃度分布 $C_{cY,m}^n$ 及び $C_{cY,m}^{n-1}$ を用いて計算した(4)式の左辺と要素ごとに比較した結果、よく一致した。具体的には、左辺に対する右辺と左辺の差の比はごく小さかった(絶対値の最大値が約 6.23×10^{-5})。

従って、燃料要素体系における核種 Y の濃度分布は時刻 126230400 [s] (事故時)において基礎式を満たしていると判定された。

5. まとめ

プログラムの軽微な変更による、通常運転時及び事故時におけるピン・イン・ブロック型の高温ガス炉燃料からの核分裂生成物(FP)放出量を計算するための計算コード FORNAX-A の応用(機能拡張の方法)について述べた。

- 本来の FORNAX-A においては、FP の拡散係数は、入力データである 1 組の頻度因子及び活性化エネルギーのセット、及び入力データである温度履歴から計算されるが、プログラムの軽微な変更により、頻度因子 and/or 活性化エネルギーの温度依存性等を取り扱うことが可能である。
- 本来の FORNAX-A は、ピン・イン・ブロック型、即ち円柱形状または円筒形状の燃料要素(燃料棒)を対象とした計算コードであるが、プログラムの軽微な変更により、球状の燃料要素を取り扱うことが可能である。
- 本来の FORNAX-A においては、計算時間節約のため計算点 1 点について CFP の温度は均一であるとしているが、プログラムの軽微な変更により、燃料要素中における CFP の温度分布を取り扱うことが可能である。

参考文献

- 1) 相原純他, ピン・イン・ブロック型高温ガス炉の燃料棒からの核分裂生成物放出量計算コード FORNAX-A, JAEA-Data/Code 2013-025, 2014, 64p.
- 2) S. Mitake et al.: “An Analytical Study of Volatile Metallic Fission Product Release from Very High Temperature Gas-cooled Reactor Fuel and Core”, Nucl. Technol. 81, pp. 7-12 (1988).

Table 1 Calculation condition: outline of operation and temperature history

Outline of normal operation and accident	Stop of fission by scram and increase in temperature, after normal operation for 126144000 [s].
Temperature during normal operation	constant at 1500 [°C]
Temperature during accident	constant at 1600 [°C]

Table 2 Calculation condition: information related to FP generation

	Nuclide X	Nuclide Y
Outline of FP chain	consists of nuclides X and Y. 100 % of decayed nuclide X becomes nuclide Y.	
Rate of generation by fission*1 [μmol/cm ³ /s]	0.1	0.1
Decay constant [1/s]	7.30×10^{-7}	7.30×10^{-10}

*1 only during normal operation, only in fuel kernel

Table 3 Calculation condition: specifications of CFP

Radius of fuel kernel [cm]	3.00×10^{-2}
Thickness of buffer layer [cm]	6.00×10^{-3}
Thickness of IPyC layer [cm]	3.00×10^{-3}
Thickness of SiC layer [cm]	2.50×10^{-3}
Thickness of OPyC layer [cm]	4.50×10^{-3}
Contamination uranium	fissile exists only in fuel kernel

Table 4 Calculation condition: input data related to transportation of FPs

	Nuclide X			Nuclide Y		
	Pre-exponential factor [cm ² /s]	Activation energy [J/mol]	Recoil distance [cm]	Pre-exponential factor [cm ² /s]	Activation energy [J/mol]	Recoil distance [cm]
in fuel kernel	6.75×10^{-6}	1.77×10^5	7.70×10^{-4}	6.75×10^{-6}	1.77×10^5	7.70×10^{-4}
in buffer layer	1.00×10^{-1}	1.00×10^3	—	1.00×10^{-1}	1.00×10^3	—
in IPyC layer	6.69×10^{-5}	1.98×10^5	—	6.69×10^{-5}	1.98×10^5	—
in SiC layer	1.77×10^{-3}	1.76×10^5	—	1.77×10^{-4} *1	1.76×10^5	—
in OPyC layer	6.69×10^{-5}	1.98×10^5	—	6.69×10^{-5}	1.98×10^5	—
Barrier factors	1 for all boundaries					
Boundary condition	concentration = 0 at surface of CFPs					

*1 set to 1000 times during accident in program in calculation in chap.2

Table 5 Calculation condition in addition to Tables 1~4: temperature history

Temperature during normal operation	Constant and uniform at 1500 [°C] in fuel rod (or fuel pebble), in addition to CFPs
Temperature during accident	Constant and uniform at 1600 [°C] in fuel rod (or fuel pebble), in addition to CFPs

Table 6 Calculation condition in addition to Tables 1~4:
Specifications of fuel rod or fuel pebble

Inner diameter of fuel compact (or fuel region of fuel pebble) [cm]	5.00×10^{-1}
Outer diameter of fuel compact (or fuel region of fuel pebble) [cm]	1.30
Length of fuel rod [cm]	54.6*1
Number of CFPs in fuel compact (or fuel region of fuel pebble) per unit volume [1/cm ³]	611.7
Profile of rate of FP from CFPs per unit volume in fuel compact (or fuel region of fuel pebble)	uniform*2
Through coating failure CFP fraction	0 (constant)
SiC layer failure CFP fraction	0 (constant)
Outer diameter of graphite sleeve (or non-fuel region of fuel pebble) [cm]	1.70E+00
Contamination uranium	fissile exists only in fuel kernel
Type of boundary condition between sleeve (or non-fuel region of fuel pebble)/coolant	FP concentration is 0 at outer surface of sleeve (or non-fuel region of fuel pebble)

*1 not used in program in calculation in chap. 3.

*2 FP release rate from CFPs in fuel rod system is changed into 0, in elements other than the one which distance from center of fuel rod is between 0.85 and 0.90 [cm], in program in chap. 4.

Table 7 Calculation condition in addition to Tables 1~4:
Information related to transportation of FPs in fuel rod (or fuel pebble)

	Nuclide X		Nuclide Y	
	Pre-exponential factor [cm ² /s]	Activation energy [J/mol]	Pre-exponential factor [cm ² /s]	Activation energy [J/mol]
in fuel compact (or fuel region fuel pebble)	1.00×10^{-11}	1.00×10^6	9.00×10^1	1.57×10^5
in sleeve (or non-fuel region of fuel pebble)	1.00×10^{-1}	1.00×10^3	9.00×10^{-2}	1.57×10^5
Barrier factors	1 for all boundary			

付録 A 球状の燃料要素(燃料ペブル)における温度分布の計算方法

目次

A-1 はじめに	16
A-2 入力値と仮定	16
A-3 計算方法	16

A-1 はじめに

本付録は、球形状の燃料要素(燃料ペブル)における、ある時刻における温度分布の計算方法を述べるものである。まず、A-2 章において計算の前提となる「入力値(何が given なのか)」と計算における「仮定」を述べ、A-3 章において計算方法を述べる。

A-2 入力値と仮定

(1) 入力値は以下の通りである。

- 燃料ペブルの寸法
 - 燃料部直径
 - 無燃料部厚さ
- その時刻における燃料ペブルの
 - 中心温度
 - 外面温度

(2) 計算における仮定は以下の通りである。

- 系は球対称
- 温度変化は非常にゆっくり。定常状態で近似可能。
- 熱伝導率・熱容量は燃料ペブル中で一様
 - 燃料部・無燃料部含む全域で。
 - 燃料部の熱物性とは、CFP もマトリックスもこみの平均的なものとする。
- 発熱密度は
 - 燃料部で一様。
 - 無燃料部で 0。

A-3 計算方法

ある時刻における燃料要素の燃料要素中心からの距離が r [cm]における温度 $T_{cn}(r)$ [°C]は、定常熱伝導方程式(A-1)式を満たすとする。

$$\begin{aligned}
 C_v \frac{\partial(T_{cn} + 273.15)}{\partial t} &= C_v \frac{\partial T_{cn}}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla (T_{cn} + 273.15)) + Q \\
 &= -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T_{cn}) + Q = 0 \quad (A-1)
 \end{aligned}$$

ただし、 C_v ：単位体積あたり熱容量 [J/cm³/K]

λ ：熱伝導率 [W/(cmK)]

Q ：発熱密度 [W/cm³]

また、 r_1 ：燃料部の半径 [cm]

r_2 ：燃料要素の半径 [cm]

T_i ：燃料要素の中心温度 [°C]

T_o ：燃料要素の表面温度 [°C]

とする。

➤ $0 \leq r \leq r_1$ において(燃料部)

燃料部において λ が一様であるとする、(A-1)式は(A-2)式に書きかえられる。

$$\nabla^2 T_{cn} = -Q/\lambda \quad (\text{A-2})$$

球座標系においては、

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \cot \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) \quad (\text{A-3})$$

球対称である場合、 $\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ なので、

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (\text{A-4})$$

従って、(A-2)式は、

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) T_{cn} = -Q/\lambda \quad (\text{A-5})$$

となる。

ここで、

$$T_{cn} = T_p + T_g \quad (\text{A-6})$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) T_p = -Q/\lambda \quad (\text{A-7})$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) T_g = 0 \quad (\text{A-8})$$

とする。

また、 Q は燃料部で一様であるとする、

$$T_p = Ar^2 \quad (\text{A-9})$$

$$T_g = Br^{-1} + C \quad (\text{A-10})$$

ただし、A, B, C : 定数

従って、

$$T_{cn} = Ar^2 + Br^{-1} + C \quad (\text{A-11})$$

である。

なお、本付録においては Q 及び λ は入力値(=既知の値)ではないが、

$$A = -Q/(6\lambda) \quad (\text{A-12})$$

である。

ここで、 T_{cn} は $r=0$ で有限の値を取る、

$$B = 0 \quad (\text{A-13})$$

また、

$$T_{cn}(0) = C = T_i \quad (\text{A-14})$$

である。

以上により、 $0 \leq r \leq r_1$ において

$$T_{cn}(r) = Ar^2 + T_i \quad (\text{A-15})$$

➤ $r_1 \leq r \leq r_2$ において(無燃料部)

発熱が0であることから、上記(A-8)(A-10)式を参考に、

$$T_{cn}(r) = Dr^{-1} + E \quad (\text{A-16})$$

である。また、

$$T_{cn}(r_2) = Dr_2^{-1} + E = T_o \quad (\text{A-17})$$

より、

$$D = r_2 (T_o - E) \quad (\text{A-18})$$

以上により、 $r_1 \leq r \leq r_2$ において

$$T_{cn}(r) = r_2 (T_o - E)r^{-1} + E \quad (\text{A-19})$$

➤ 更に、

- 燃料部と無燃料部は密着しているため T_{cn} は $r=r_1$ で連続である。従って、(A-15) (A-19)式より、

$$Ar_1^2 + T_i = r_2 (T_o - E)r_1^{-1} + E \quad (\text{A-20})$$

- 燃料部と無燃料部における熱伝導率及び熱容量は等しいと仮定すると、 dT_{cn}/dr も $r=r_1$ で連続である。従って、(A-15) (A-19)式より、

$$2Ar_1 = -r_2(T_o - E)r_1^{-2} \quad (\text{A-21})$$

である。

(A-20)(A-21)式より、

$$\begin{bmatrix} A \\ E \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha\delta - \beta\chi} \begin{bmatrix} \delta & -\beta \\ -\chi & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o r_2 - T_i r_1 \\ -T_o r_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A-22})$$

$$\alpha = r_1^3 \quad (\text{A-23})$$

$$\beta = r_2 - r_1 \quad (\text{A-24})$$

$$\chi = 2r_1^3 \quad (\text{A-25})$$

$$\delta = -r_2 \quad (\text{A-26})$$

付録 B 円筒形状の燃料要素(燃料棒)における工学的安全係数を考慮した温度分布の計算方法

目次

B-1 はじめに	20
B-2 入力値と仮定	20
B-3 計算方法	20
B-3.1 はじめに	20
B-3.2 ノミナル温度の分布の計算	21
B-3.3 工学的安全係数を考慮するための補正係数の計算	23
B-3.4 工学的安全係数を考慮した温度の計算	24

B-1 はじめに

本付録は、円筒形状の燃料要素(燃料棒)における、ある時刻における工学的安全係数を考慮した温度分布の計算方法を述べるものである。まず、B-2 章において計算の前提となる「入力値(何が given なのか)」と計算における「仮定」を述べ、B-3 章において計算方法を述べる。

B-2 入力値と仮定

(1) 入力値は以下の通りである。

- 燃料棒の寸法
 - 燃料コンパクト内外径
 - 黒鉛スリーブ内外径
- その時刻における
 - 燃料コンパクトの内外面温度(ノミナル温度・工学的安全係数を考慮した温度)
 - 黒鉛スリーブの内外面温度(ノミナル温度・工学的安全係数を考慮した温度)

(2) 計算における仮定は以下の通りである。

- 系は軸対称。軸方向への熱伝導は無視。
- 温度変化は非常にゆっくり。定常状態で近似可能。
- 熱伝導率・熱容量は燃料コンパクト・黒鉛スリーブ各々において一様。
- 発熱密度は
 - 燃料部で一様。
 - 無燃料部で 0。

B-3 計算方法

B-3.1 はじめに

照射中の燃料棒中の温度分布を次のように計算する。(1)まずノミナル温度の分布を計算し(B-3.2 節)、(2)工学的安全係数を計算し(B-3.3 節)、(3)ノミナル温度と工学的安全係数より、工学的安全係数を考慮した温度を計算する(B-3.4 節)。以下に(1)~(3)の詳細を述べる。

B-3.2 ノミナル温度の分布の計算

ある時刻における燃料棒の燃料棒中心からの距離が r [cm]におけるノミナル温度 $T_n(r)$ [°C]は、定常熱伝導方程式(B-1)式を満たすとする。

$$\begin{aligned} C_v \frac{\partial(T_n+273.15)}{\partial t} &= C_v \frac{\partial T_n}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla(T_n+273.15)) + Q \\ &= -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T_n) + Q = 0 \end{aligned} \quad (\text{B-1})$$

ただし、 C_v : 単位体積あたり熱容量 [J/cm³/K]

λ : 熱伝導率 [W/(cmK)]

Q : 発熱密度 [W/cm³]

(1) 燃料コンパクト中

燃料コンパクト中において λ が一様であるとする、(B-1)式は(B-2)式に書きかえられる。

$$\nabla^2 T_{cn} = -Q/\lambda \quad (\text{B-2})$$

ただし、 T_{cn} : 燃料コンパクト中のノミナル温度 [°C]

円筒座標系においては、

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{B-3})$$

軸対称である場合、 $\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$ なので、

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) \quad (\text{B-4})$$

従って(B-2)式は、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) T_{cn} = -Q/\lambda \quad (\text{B-5})$$

ここで、 Q は燃料コンパクト中で一様とする。

(B-5)式の解は、

$$T_{cn}(r) = Ar^2 + B \ln(r) + C \quad (\text{B-6})$$

ただし、A, B, C : 境界条件で決まる定数
 なお、

$$A = -Q/(4\lambda) \quad (\text{B-7})$$

である。
 ここで、コンパクト内外面の温度条件より、

$$T_{cn}(r_{ci}) = Ar_{ci}^2 + B \ln(r_{ci}) + C = T_{cni} \quad (\text{B-8})$$

$$T_{cn}(r_{co}) = Ar_{co}^2 + B \ln(r_{co}) + C = T_{cno} \quad (\text{B-9})$$

ただし、 r_{ci} : 燃料コンパクト内径 [cm]
 T_{cni} : 燃料コンパクト内面のノミナル温度 [°C]
 r_{co} : 燃料コンパクト外径 [cm]
 T_{cno} : 燃料コンパクト外面のノミナル温度 [°C]

また、コンパクト内面において $\frac{\partial T_{cn}}{\partial r} = 0$ なので、

$$2Ar_{ci} + B/r_{ci} = 0 \quad (\text{B-10})$$

従って、

$$B = -2Ar_{ci}^2 \quad (\text{B-11})$$

(B-11)を(B-8)(B-9)に代入すると、

$$\begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha\delta - \beta\chi} \begin{bmatrix} \delta & -\beta \\ -\chi & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{cni} \\ T_{cno} \end{bmatrix} \quad (\text{B-12})$$

$$\alpha = r_{ci}^{-2} \{1 - 2\ln(r_{ci})\} \quad (\text{B-13})$$

$$\beta = 1 \quad (\text{B-14})$$

$$\chi = r_{co}^2 - 2r_{ci}^2 \ln(r_{co}) \quad (\text{B-15})$$

$$\delta = 1 \quad (\text{B-16})$$

(2) 黒鉛スリーブ中

黒鉛スリーブ中においても λ は一様であるとし、更に、黒鉛スリーブ中においては発熱がないとして、(B-5)式を参考に、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) T_{sn} = 0 \quad (\text{B-17})$$

ただし、 T_{sn} : 黒鉛スリーブ中のノミナル温度 [°C]

(B-17)式を解いて、

$$T_{sn}(r) = D \ln(r) + E \quad (\text{B-18})$$

ただし、 D, E : 境界条件で決まる定数

ここで、黒鉛スリーブ内外面の温度条件より、

$$T_{sn}(r_{si}) = D \ln(r_{si}) + E = T_{sni} \quad (\text{B-19})$$

$$T_{sn}(r_{so}) = D \ln(r_{so}) + E = T_{sno} \quad (\text{B-20})$$

ただし、 r_{si} : 黒鉛スリーブ内径 [cm]

T_{sni} : 黒鉛スリーブ内面におけるノミナル温度 [°C]

r_{so} : 黒鉛スリーブ外径 [cm]

T_{sno} : 黒鉛スリーブ外面におけるノミナル温度 [°C]

(B-19)(B-20)式を解いて、

$$D = (T_{sni} - T_{sno}) / \ln(r_{si} / r_{so}) \quad (\text{B-21})$$

$$E = T_{sni} - D \ln(r_{si}) \quad (\text{B-22})$$

B-3.3 工学的安全係数を考慮するための補正係数の計算

燃料コンパクト及び黒鉛スリーブ中における工学的安全係数を考慮するための補正係数 f_c 及び f_s は、下記(B-23)(B-24)式で表わされるとする。

$$f_c = (T_{cfi} - T_{cfo}) / (T_{cni} - T_{cno}) \quad (\text{B-23})$$

$$f_s = (T_{sfi} - T_{sfo}) / (T_{sni} - T_{sno}) \quad (\text{B-24})$$

ただし、 T_{cfo} [K] : 工学的安全係数を考慮した燃料コンパクト外面温度

- T_{cfi} [K] : 工学的安全係数を考慮した燃料コンパクト内面温度
 T_{sfo} [K] : 工学的安全係数を考慮した黒鉛スリーブ外面温度
 T_{sfi} [K] : 工学的安全係数を考慮した黒鉛スリーブ内面温度

B-3.4 工学的安全係数を考慮した温度の計算

そして、燃料棒中の径方向位置が r [m]である位置における工学的安全係数を考慮した温度コンパクト及び黒鉛スリーブ温度 $T_{cf}(r)$ [K]、 $T_{sf}(r)$ [K]は以下の(B-25)(B-26)式で表されるとする。

$$T_{cf}(r) = T_{cfo} + f_c (T_{cn}(r) - T_{cno}) \quad (\text{B-25})$$

$$T_{sf}(r) = T_{sfo} + f_s (T_{sn}(r) - T_{cso}) \quad (\text{B-26})$$

付録 C 本編中第 4 章で述べた燃料要素中の CFP の温度分布の取扱方法の証明

目 次

C-1 はじめに	25
C-2 燃料要素体系における FORNAX-A の基礎式	25
C-2.1 はじめに	25
C-2.2 共通部分	25
C-2.3 非共通部分(燃料要素外表面における境界条件)	27
C-3 FP 発生項の分割	28
C-3.1 はじめに	28
C-3.2 共通部分	28
C-3.3 非共通部分	29
C-3.3.1 燃料要素外表面における境界条件(a)を選択する場合	29
C-3.3.2 燃料要素外表面における境界条件(b)を選択する場合	30
C-4 まとめ	31
C-5 付記	32

C-1 はじめに

本付録は、本編中 4.2 節で述べた燃料要素中の CFP の温度分布の取扱の方法が正しいことを証明するものである。

C-2 燃料要素体系における FORNAX-A の基礎式

C-2.1 はじめに

本小節では、燃料要素体系における FORNAX-A の基礎式^{C-1)}について説明する。この基礎式(のセット)は大きく 2 種類あり、どちらかを選択することになっている。

本小節ではまず、この 2 種類のセットの共通部分について述べ(C-2.2 節)、その後、非共通部分である燃料要素外表面における境界条件について述べる(C-2.3 節)。

C-2.2 共通部分

【1】 燃料要素内における FP 輸送の基礎式は以下の通りである^{C-1)}。

$$\frac{\partial C_{ci}(r_c, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{ci}(r_c, t) + \sum_l (u_{il} \cdot C_{cl}(r_c, t)) + G_i(r_c, t) \quad (C-1)$$

ただし、 r_c ：燃料要素体系における位置(燃料要素中心からの距離) [cm]

t ：時刻 [s]

C_{ci} ：核種 i の燃料要素体系における濃度 [μ mol/cm³]

CFP 中に含まれる核種 i の量は含まない。

J_{ci} ：核種 i の燃料要素体系における拡散流束 [μ mol/cm²/s]

なお、

$$J_{ci}(r_c, t) = -D_{ci}(r_c, t) \nabla C_{ci}(r_c, t) \quad (C-2)$$

ただし、 D_{ci} ：燃料要素体系における核種 i の拡散係数 [cm²/s] (頻度因子、活性化エネルギー、温度が入力データ)

燃料要素体系における FP 輸送の計算においては、燃料要素中の温度分布が考慮される^(c-1)ので、 D_{ci} は r_c にも依存する。

u_{il} ：FP 核種 l の崩壊による FP 核種 i の生成率 [-] ($l=i$ の場合は減少率)

$$u_{ii} = -\lambda_i$$

$$u_{il} = \varepsilon_{il} \lambda_l \text{ for } i \neq l$$

λ_i ：FP 核種 i の崩壊定数 [1/s] (入力データ)

ε_{il} ：核種 l が崩壊により核種 i になる分岐率 [-] (入力データ)

G_i ：核種 i の燃料要素体系における生成速度 [μ mol/cm³/s]。

CFP 体系における FP 輸送計算結果、及び CFP 破損割合(入力データ)から計算される。

燃料要素が中実形状の場合は燃料要素中心で、燃料要素が中空状の場合は燃料要素内表面において、

$$\left. \frac{\partial C_{ci}}{\partial r_c} \right|_{r=r_{c0}} = 0 \quad (C-3)$$

ただし、 r_{c0} ：燃料要素内表面の位置 [cm]

燃料要素が中実状である場合、 $r_{c0} = 0$

燃料コンパクト(または燃料部)/黒鉛スリーブ(または無燃料部)境界において

$$\lim_{h \rightarrow 0} C_{ci}(r_{c1} + h, t) = \phi_c \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci}(r_{c1} - h, t) \quad (C-4)$$

ただし、 r_{c1} ：燃料コンパクト(または燃料部)/黒鉛スリーブ(または無燃料部)境界の位置 [cm]

ϕ_c ：燃料コンパクト(または燃料部)/黒鉛スリーブ(または無燃料部)境界の障壁係数 [-]。(入力データ)

C-2.3 非共通部分(燃料要素外表面における境界条件)

【2】燃料要素外表面における境界条件はオプションにより下記(a)(b)いずれかを選択する。

(a) 燃料要素外表面において

$$C_{ci}(r_{c2}, t) = 0 \quad (C-5)$$

ただし、 r_{c2} : 燃料要素外表面の位置 [cm]

(b) 燃料要素外表面において FP 濃度が 0 ではない。(FORNAX-A の前身である FORNAX コード C-2)に準拠)

この場合、下記(C-6)式が成立するように計算が行われる C-1)。

$$\begin{aligned} R_g(T_{out}+273) \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci}(r_{c2}+h, t) \\ = \omega \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci}(r_{c2} - h, t) + \Theta \{ \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci}(r_{c2} - h, t) \}^\gamma \end{aligned} \quad (C-6)$$

ただし、 ω , Θ , γ : 燃料要素外表面温度及び、入力データであるいくつかのパラメータから計算される値 C-1)。

(b)を選択した場合、更に以下のオプション(i)~(iv)から 1 つ選択する C-1)。

(i) Herinian 型

この場合、 $\omega \neq 0$ かつ $\Theta=0$ 。

(ii) Freundlich 型

この場合、 $\omega=0$ かつ $\Theta \neq 0$ 。

(iii) $C_{ci,in}$ の値がある値より小さければ Herinian 型、大きければ Freundlich 型

この場合、 $C_{ci,in}$ の値がある値より小さければ

$$\omega \neq 0 \text{ かつ } \Theta=0。$$

$C_{ci,in}$ の値がある値より大きければ

$$\omega=0 \text{ かつ } \Theta \neq 0。$$

(iv) Herinian 型と Freundlich 型の合計

この場合、 $\omega \neq 0$ かつ $\Theta \neq 0$ 。

C-3 FP 発生項の分割

C-3.1 はじめに

本編中 4.2 節で述べた「CFP の温度の径方向温度分布を取り扱う方法」とは、上記(C-1)式中の核種 i の燃料要素体系における生成速度項 G_i を分割し、分割した各々の生成速度項について基礎式(のセット)を解き、その解をすべて合計することである。

本小節では、この「解をすべて合計した物」がもとの基礎式(のセット)の解と一致することを示す。また、何らかの条件付きで一致するのなら、その条件を示す。

まず、上記「C-2.2 共通部分」に相当する部分について示す (C-3.2 節)。次に、上記「C-2.3 非共通部分(燃料要素外表面における境界条件)」について示す(C-3.3 節)。

C-3.2 共通部分

【3】以下の(C-7)～(C-11)式が成立するとする。

$$G_i(r_c, t) = \sum_k G_{i,k}(r_c, t) \quad (C-7)$$

$$\frac{\partial C_{ci,k}(r_c, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{ci,k}(r_c, t) + \sum_l (u_{il} \cdot C_{cl,k}(r_c, t)) + G_{i,k}(r_c, t) \quad (C-8)$$

$$J_{ci,k}(r_c, t) = -D_{ci}(r_c, t) \nabla C_{ci,k}(r_c, t) \quad (C-9)$$

$$\frac{\partial C_{ci,k}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0 \quad (C-10)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} C_{ci,k}(r_{c1} + h, t) = \phi_c \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci,k}(r_{c1} - h, t) \quad (C-11)$$

ただし、 $k = 1, 2, \dots, m$ (m は 2 以上の整数)

【4】(C-8)式の両辺を k について和をとると、

$$\sum_k \frac{\partial C_{ci,k}(r_c, t)}{\partial t} = \sum_k \{ -\nabla \cdot J_{ci,k}(r_c, t) + \sum_l (u_{il} \cdot C_{cl,k}(r_c, t)) + G_{i,k}(r_c, t) \} \quad (C-12)$$

(C-7)(C-9)式を代入すると、

$$\begin{aligned} & \sum_k \frac{\partial C_{ci,k}(r_c, t)}{\partial t} \\ &= \sum_k [-\nabla \cdot (-D_{ci}(r_c, t) \nabla C_{ci,k}(r_c, t)) + \sum_l \sum_l u_{il} C_{cl,k}(r_c, t)] + G_i(r_c, t) \end{aligned}$$

(C-13)

\sum_k の位置を調節すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_k C_{ci,k}(r_c, t) \\ = -\nabla \cdot \{ -D_{ci}(r_c, t) (\nabla \sum_k C_{ci,k}(r_c, t)) \} \\ + \sum_l u_{il} \sum_k C_{cl,k}(r_c, t) + G_i(r_c, t) \end{aligned} \quad (C-14)$$

また、(C-10)(C-11)式についても両辺を k について和をとると、

$$\frac{\partial}{\partial r} \sum_k C_{ci,k}(r_c, t) = 0 \quad (C-15)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c1} + h, t) = \phi_c \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c1} - h, t) \quad (C-16)$$

従って、(C-7)~(C-11)式が成立するならば、

$$\sum_k C_{ci,k} = C_{ci} \quad (C-17)$$

として、 C_{ci} は(C-1)~(C-4)式を満たす。

C-3.3 非共通部分

C-3.3.1 燃料要素外表面における境界条件(a)を選択する場合

【5】 ここでは、**【2】** 中の境界条件(a)を選択する場合について述べる。

(C-7)~(C-11)式に加えて、

$$C_{ci,k}(r_{c2}, t) = 0 \quad (C-18)$$

が成立するとする。

この(28)式の両辺を k について和をとると、燃料要素外表面において

$$\sum_k C_{ci,k} = 0 \quad (C-19)$$

が成立する。

【6】 上記【4】【5】より、

(C-7)～(C-11)式に加えて(C-18)式も成立するならば、(C-17)式を満たす $C_{ci} (= \sum_k C_{ci,k})$ は(C-1)～(C-4)式に加えて(C-5)式も満たす。

C-3.3.2 燃料要素外表面における境界条件(b)を選択する場合

【7】 ここでは、【2】中の境界条件(b)選択する場合について述べる。

(C-7)～(C-11)式に加えて、燃料要素外表面において(C-19)式ではなく、下記(C-20)式が成立するとする。

$$\begin{aligned} R_g (T_{out+273}) \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci,k}(r_{c2}+h,t) \\ = \omega \lim_{h \rightarrow 0} C_{ci,k}(r_{c2}-h,t) + \Theta \lim_{h \rightarrow 0} \{C_{ci,k}(r_{c2}-h,t)\}^\gamma \end{aligned} \quad (C-20)$$

(C-20)式の両辺を k について和をとると、

$$\begin{aligned} R_g (T_{out+273}) \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c2}+h,t) \\ = \omega \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c2}-h,t) + \Theta \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k \{C_{ci,k}(r_{c2}-h,t)\}^\gamma \end{aligned} \quad (C-21)$$

ここで、パラメータ g_{press} [Pa]を下記(32)式で定義する。

$$\begin{aligned} g_{press} = R_g (T_{out+273}) \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c2}+h,t) \\ - [\omega \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c2}-h,t) + \Theta \lim_{h \rightarrow 0} \{ \sum_k C_{ci,k}(r_{c2}-h,t) \}^\gamma] \end{aligned} \quad (C-22)$$

(C-22)式に(C-21)式を代入すると、

$$g_{press} = \omega \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c2}-h,t) + \Theta \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k \{C_{ci,k}(r_{c2}-h,t)\}^\gamma$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[\omega \lim_{h \rightarrow 0} \sum_k C_{ci,k}(r_{c2} - h, t) + \Theta \lim_{h \rightarrow 0} \left\{ \sum_k C_{ci,k}(r_{c2} - h, t) \right\}^\gamma \right] \\
 & = \Theta \left[\lim_{h \rightarrow 0} \sum_k \{C_{ci,k}(r_{c2} - h, t)\}^\gamma - \lim_{h \rightarrow 0} \left\{ \sum_k C_{ci,k}(r_{c2} - h, t) \right\}^\gamma \right]
 \end{aligned}
 \tag{C-23}$$

上記(C-18)式で表わされる境界条件を課さずに計算した場合、

一般に $\lim_{h \rightarrow 0} C_{ci,k}(r_{c2} - h, t) \neq 0$ である。また、【3】で設定したように k は 1 のみで

はない。従って、

- $\Theta \neq 0$ の場合、 $g_{press} \neq 0$
- $\Theta = 0$ の場合、 $g_{press} = 0$

【8】 上記【4】【7】より、(C-7)～(C-11)に加えて(C-20)式が成立するならば、

- 上記(C-17)式を満たす $C_{ci} (= \sum_k C_{ci,k})$ は(C-1)～(C-4)式を満たす。
- $\Theta = 0$ の場合のみ、上記(27)式を満たす $C_{ci} (= \sum_k C_{ci,k})$ は (C-6)式も満たす。

上記【2】で述べたように、燃料要素外表面における境界条件として「FORNAX-A の前身である FORNAX コード C-2)に準拠」を選択した場合、更に「Hernian 型」を選択した場合にのみ常に $\Theta = 0$ である。

【9】 従って、(C-7)～(C-11)に加えて(C-20)式が成立する場合、

燃料要素外表面における境界条件として「FORNAX-A の前身である FORNAX コード C-2)に準拠」を選択し、更に「Hernian 型」を選択した場合にのみ、(C-17)式を満たす $C_{ci} (= \sum_k C_{ci,k})$ は(C-1)～(C-4)式に加えて(C-6)式も満たす。

ただし、第3章で述べた通り、燃料要素が円柱状でも円筒状でもない場合、別の理由により燃料要素外表面における境界条件として「FORNAX-A の前身である FORNAX コード C-2)に準拠」を選択することは理論的に正しくない。

C-4 まとめ

(C-7)式に示すように G_i を分割することは本編中 4.2 節①②に相当する。(C-8)～(C-11)及び(C-18)式、または、(C-8)～(C-11)及び(C-20)式を解いて $C_{ci,k}$ を計算することは本編中 4.2 節③④に相当する。従って、本編中 4.2 節で述べた方法により燃料要素体系における FP 濃度分布を計算することは理論的に正しい。

C-5 付記

なお、燃料コンパクト(または燃料部)の径方向領域による空間的分割は、 G_i の $G_{i,k}$ への分割方法の1つでしかない。これ以外の方法で G_i を分割しても、適切な境界条件を選定し、各々の $G_{i,k}$ に対して $C_{ci,k}$ を計算し、足しあわせれば正しい C_{ci} を得られる。以下に分割方法の例を示す。

- 例1：時間的分割

$$G_i = G_{i,1} + G_{i,2}$$

$$t \leq t_1 \text{ において } G_{i,1} = G_i, G_{i,2} = 0$$

$$t > t_1 \text{ において } G_{i,1} = 0, G_{i,2} = G_i$$

- 例2：FP発生源による分割

$$G_i = G_{i,1} + G_{i,2}$$

$G_{i,1}$: 健全CFPからの核種 i の燃料要素体系における生成

$G_{i,2}$: 破損CFPからの核種 i の燃料要素体系における生成

- 例3：単純な分割

$$G_i = G_{i,1} + G_{i,2}$$

$$G_{i,1} = G_{i,2} = 0.5 G_i$$

参考文献

- C-1) 相原純他, ピン・イン・ブロック型高温ガス炉の燃料棒からの核分裂生成物放出量計算コードFORNAX-A, JAEA-Data/Code 2013-025, 2014, 64p.
- C-2) S. Mitake et al.: "An Analytical Study of Volatile Metallic Fission Product Release from Very High Temperature Gas-cooled Reactor Fuel and Core", Nucl. Technol. 81, pp. 7-12 (1988).

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

