



JAEA-Data/Code
2012-030

SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算のための Code-B-2

Code-B-2 for Stress Calculation for SiC-TRISO Fuel Particle

相原 純 大橋 弘史 沢 和弘 橘 幸男

Jun AIHARA, Hirofumi OHASHI, Kazuhiro SAWA and Yukio TACHIBANA

原子力水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ユニット

Small-sized HTGR Research & Development Division
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

February 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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 研究技術情報部 研究技術情報課
〒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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算のための Code-B-2

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ユニット
相原 純、大橋 弘史、沢 和弘⁺、橘 幸男

(2012年12月17日 受理)

高温ガス炉(HTGR)の SiC-TRISO 被覆燃料粒子の運転時破損率予測のため、既存の Code-B-1 を改良し、Code-B-2 を開発した。Code-B-2 においては、Code-B-1 においては取り扱えなかった照射温度の変動を取り扱えるように内圧計算部を改良した。また、応力計算に重要な PyC の照射クリープ係数及び照射寸法変化速度を、米国において様々な PyC について照射データを纏めたレポートに基づいて求めるように改良した。本稿において、まずこの Code-B-2 の詳細について述べる。更に、著者らが過去において提案した方法で Code-B-2 を用いて日本製高品質 SiC-TRISO 被覆燃料粒子の破損率を計算する場合に用いるべき PyC のベーコン異方性因子 (BAF) を求める。

Code-B-2 for Stress Calculation for SiC-TRISO Fuel Particle

Jun AIHARA, Hirofumi OHASHI, Kazuhiro SAWA⁺ and Yukio TACHIBANA

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

(Received December 17, 2012)

We have developed Code-B-2 for the prediction of pressure vessel failure probabilities of SiC-tri-isotropic (TRISO) coated fuel particles for the high temperature gas-cooled reactors (HTGRs) under operation by modification of an existing code, Code-B-1. We have modified internal pressure calculation part of Code-B-1 to treat fluctuation of irradiation temperature for Code-B-2. In addition, we have added part of calculation of irradiation creep constants and irradiation swelling rates of PyC layers, which are very important for stress calculation. These properties of PyC layers are calculated in Code-B-2 based on the report by CEGA Corporation, in which irradiation data of various PyC are summarized. In this JAEA-Data/Code, we first describe details of Code-B-2. Next, we calculate a property of PyC (Bacon anisotropic factor (BAF)), to be used in failure probability calculation of Japanese high quality HTGR fuel with Code-B-2 by method already suggested by authors.

Keywords: Pressure Vessel Failure, Failure Probabilities, SiC-TRISO Coated Fuel Particles, High Temperature Gas-cooled Reactor, PyC, Fluctuation of Irradiation Temperature, Bacon Anisotropic Factor, Irradiation Creep, Irradiation Swelling

⁺ Department of HTTR

目 次

1. 序論	1
2. Code-B-2 の詳細	1
2.1 温度計算部	2
2.2 内圧計算部	2
2.3 応力/ひずみ計算部	5
3. 著者らがかつて提案した方法に準拠し、Code-B-2 を用いて日本製高品質 HTGR 燃料の内圧破損率評価を行う場合に用いるべき BAF	8
4. 結論	9
参考文献	9
付録 既存の FIGHT コードにおける破損率の算出法	12

Contents

1. Introduction	1
2. Details of Code-B-2	1
2.1 Temperature calculation part	2
2.2 Internal pressure calculation part	2
2.3 Stress/strain calculation part	5
3. BAF to be used in failure probability calculation of Japanese high quality HTGR fuel with Code-B-2 by method already suggested by authors	8
4. Conclusions	9
References	9
Appendix Failure probability calculation method in original FIGHT code	12

表リスト

Table 1 Irradiation conditions and specifications of fuel particle of preliminary irradiation test of HTTR fuel.	11
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

図リスト

Fig. 1 BAF dependence of failure probability of initially intact SiC-TRISO fuel particles. (Calculation condition: see Table 1.)	11
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

This is a blank page.

1. 序論

高温ガス炉の燃料である SiC-TRISO 被覆燃料粒子は、二酸化ウラン燃料核を 4 重のセラミックス被覆層（第 1 層:低密度熱分解炭素(Low-dense pyrocarbon; PyC)／第 2 層：内側高密度熱分解炭素(Inner high-dense PyC; IPyC)／第 3 層：炭化ケイ素(SiC)／第 4 層：外側高密度熱分解炭素(Outer high-dense PyC; OPyC)）で被覆した球状燃料であり、粒子内部に核分裂生成物 (FP) を閉じ込める役割を有する。

沢らは過去、原子炉の通常運転時における SiC-TRISO 被覆燃料粒子の照射健全性、ならびに追加破損挙動の解析評価を目的とした内圧破損用計算コード（既存の FIGHT コード）を開発した^{1,2)}。既存の FIGHT コードにおいては、健全粒子の被覆層の応力計算部に剛体 SiC モデル³⁾を採用していたため計算時間が短くて済んだが、この剛体 SiC モデルは近似的な計算法であった。そこで著者らは、応力/ひずみ計算に有限要素法(FEM)を適用し、PyC 層の粘弾性を考慮した被覆燃料粒子の内圧計算及び被覆層の応力計算のためのコードシステムである Code-B-1 を開発した⁴⁾。更に JAEA は、照射温度の変動を取り扱えるようにこの Code-B-1 を更に改良し、その改良したコードシステムを Code-B-2 と呼ぶこととした。Code-B-1 からの Code-B-2 の具体的な改良点は以下の 2 点である。

- 内圧計算に必要な、燃料核から放出されたガス分子量の計算の基礎式を、照射温度の変動を取り扱えるものに変更した。
- 応力/ひずみ計算に必要な PyC の照射クリープ係数及び照射寸法変化速度の温度変動を取り扱えるように、文献 5)に基づいてプログラム内部で計算することとした。

文献 5)は、様々な特性を持つ PyC の照射データを系統的に整理して纏めた現在のところ唯一のレポートである。具体的には、ベーコン異方性因子(BAF)が 1.00~約 1.33 である PyC について、照射温度 873, 1305 及び 1623 [K]における照射データを米国において纏めたものである。PyC の照射クリープ係数及び高速中性子束の関数である照射寸法変化速度は被覆燃料粒子の破損率に対して大きな影響を与え⁶⁾、又、照射温度及び、後者については PyC の異方性に強く依存する⁵⁾が、これらの値を実験によって新たに取得することは難しいため、文献 5)に基づいた値を用いることとした。

なお、Code-B-1 では取り扱っていた第 3 層の塑性変形、各被覆層境界における剥離及び IPyC 及び OPyC 層の単独破損は Code-B-2 では取り扱わず、PyC 層の粘弾性及び SiC 層の弾性のみに着目する。

本報告では、第 2 章においてまずこの Code-B-2 の詳細について述べる。更に第 3 章において、文献 6)において述べた、Code-B-1 を用いて日本製高品質 HTGR 燃料の破損率を計算する場合に用いるべき PyC の異方性因子を、Code-B-2 用に修正する。

2. Code-B-2 の詳細

Code-B-2 は (1)温度計算部、(2)内圧計算部、(3)応力/ひずみ計算部から成る。Code-B-1 と同様に破損率計算部は持たないが、破損率については既存の FIGHT コード^{1,2)}と同様の方法で表

計算ソフトウェアにより簡単に計算が可能であるため、特にこのコードシステムに組み込むことはしなかった。ただし、破損率の計算は Code-B-2 の範疇には含まれない。Code-B-2 は、被覆燃料粒子の内圧及び、健全粒子の被覆層応力の計算を行うコードである。

2.1 温度計算部

燃料粒子内の温度分布は、球対称系(1次元)定常熱伝導方程式を用い、以下のような条件で各タイムステップ毎に求める。

- OPyC 層の外表面温度は入力データとして各タイムステップ毎に与える。
- 燃料核中における発熱密度は一律とし、各タイムステップ毎に下記 a) または b) により設定する。a) と b) どちらを選ぶかはオプションで設定する。
 - a) 各タイムステップ毎に発熱密度を与える。
 - b) 入力データで核分裂速度と、それに対応する発熱密度を与え、各タイムステップにおける燃焼度増加分より計算する。

2.2 内圧計算部

内圧計算部は、(1)ガスのモル数を計算する部分及び(2)内圧を計算する部分から成る。

2.2.1 ガスのモル数計算

まず、時刻 τ [s] における核分裂数 $F(\tau)$ [mol] を以下の(1)式により計算する。

$$F(\tau) = \frac{0.01 \cdot B(\tau) \cdot V_f \cdot \rho_f}{W_f} \quad (1)$$

ただし、 $B(\tau)$: 時刻 τ [s] における燃焼度[%FIMA]、 V_f : 燃料核体積[m³]、 ρ_f : 燃料核密度[t/m³]、 W_f : 燃料核 1 モルあたり質量[t/mol]

次に、燃料核からバッファ層中へ放出されるガスのモル数を計算する。ガスは、安定希ガス核分裂生成物(FP)及び CO ガスから成り、時刻 τ [s] におけるガスの総モル数 $n(\tau)$ [mol] は、下記の(2)式で表されるとする。

$$n(\tau) = n_0(\tau) + n_{FP}(\tau) \quad (2)$$

ただし、 $n_0(\tau)$ [mol] : 時刻 τ におけるバッファ層へ放出された CO ガスのモル数、 $n_{FP}(\tau)$ [mol] : 時刻 τ におけるバッファ層へ放出された安定希ガス FP のモル数。

以下に、 $n_0(\tau)$ 及び $n_{FP}(\tau)$ の計算法を述べる。

(1) CO ガス

既存の FIGHT コード及び Code-B-1 と同様、文献 7) に基づく。ただし、温度変動に対応するため、下記のように仮定して修正した。

- そのタイムステップにおいて放出される CO のモル数の上限値は、そのタイムステップにおける温度で、時刻 τ まで照射された場合において、そのタイムステップで放出される CO のモル数である。

詳細は下記の通りである。

$$n_o(\tau) = \min[n_o(\tau - \Delta t_k) + \{n_{o1} - n_{o2}\}, F(\tau) \cdot (f_{OU} \cdot f_U + f_{OPu} \cdot f_{Pu})] \quad (3)$$

$$n_{o1} = F(\tau) \cdot \left(\frac{\tau}{24 \cdot 3600} \right)^2 \cdot 10^{-21 - \frac{8500}{T_f(\tau)}} \quad (4)$$

$$n_{o2} = F(\tau - \Delta t_k) \cdot \left\{ \frac{\tau - \Delta t_k}{24 \cdot 3600} \right\}^2 \cdot 10^{-21 - \frac{8500}{T_f(\tau)}} \quad (5)$$

ただし、 Δt_k : 第 k タイムステップの時間幅[s]、 f_{OU} : UO_2 からの遊離酸素生成率(=0.40)、 f_{OPu} : PuO_2 からの遊離酸素生成率(=0.85)、 f_U : ウラン核分裂割合(=0.60)、 f_{Pu} : プルトニウム核分裂割合(=1 - f_U = 0.40)、 $T_f(\tau)$: 時刻 τ [s] における燃料核の体積平均温度[K]。ただし、オプションにより燃料核の外表面温度も選定可能。

(2) 安定希ガス FP

時刻 τ におけるバッファ層へ放出された安定希ガス FP のモル数 $n_{FP}(\tau)$ は以下の(6)式により計算される

$$n_{FP}(\tau) = (\eta_U \cdot f_U + \eta_{Pu} \cdot f_{Pu}) \cdot F(\tau) \cdot F_R(\tau) \quad (6)$$

ただし、 η_U : ウラン核分裂による安定希ガスの収率(=0.31)、 η_{Pu} : プルトニウム核分裂による安定希ガスの収率(=0.31)、 $F_R(\tau)$: 時刻 τ における安定希ガス FP の燃料核からの放出割合。

$F_R(\tau)$ については、温度変動に対応するため、Code-B-1 とは異なり Booth モデル⁸⁾を用いて計算することとした。詳細は以下の通りである。

まず、安定希ガス FP の放出は燃料核からの反跳放出及び拡散放出から成るとする。即ち、

$$F_R(\tau) = F_r + (1 - F_r) \cdot F_d(\tau) \quad (7)$$

ただし、 F_r : 安定希ガス FP の反跳放出割合、 $F_d(\tau)$: 時刻 τ における安定希ガス FP の拡散放出割合。

まず、安定希ガス FP の反跳放出割合 F_r は下記の(8)式により求める。

$$F_r = 0.75 \cdot \frac{A}{a} - \left(\frac{A}{a}\right)^3 \cdot \frac{1}{16} \quad (8)$$

ただし、 A : 反跳距離[m] (=10⁻⁵)、 a : 燃料核半径[m]。

次に、タイムステップ k (時刻 τ_k)における安定希ガス FP の拡散放出割合 $F_d(\tau_k)$ は下記のよ
うに求める。(ただし、 $k \geq 2$)

$$F_d(\tau_k) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \left\{ \frac{b_i \cdot (S_i \cdot g_i - S_{i+1} \cdot g_{i+1})}{D'_i} \right\} + b_k \cdot \Delta t_k \cdot g_k}{\sum_{i=1}^k b_i \cdot \Delta t_i} \quad (9)$$

$$S_i = \sum_{j=i}^k D'_j \cdot \Delta t_j \quad (10)$$

$$g_i = 1 - 4 \cdot \left(\frac{S_i}{\pi}\right)^{0.5} + \frac{3 \cdot S_i}{2} \quad \text{for } S_i \leq 0.1 \quad (11-1)$$

$$g_i = \frac{1}{15 \cdot S_i} - \frac{6}{S_i} \cdot \sum_{j=1}^3 \left\{ \frac{\exp(-j^2 \cdot \pi^2 \cdot S_i)}{j^2 \cdot \pi^4} \right\} \quad \text{for } S_i > 0.1 \quad (11-2)$$

ここで、 D'_j は、第 j タイムステップにおける還元拡散係数[1/s]であり、既存の FIGHT コー
ド及び Code-B-1 と同様に、

$$D'_j = D'(\tau_j) = 2.1 \times 10^{-5} \cdot \exp[-15200/T_f(\tau_j)] \quad (12)$$

とする。また、 b_i [%FIMA/s] はタイムステップ i における核分裂速度であり、

$$b_i = \{B(\tau_i) - B(\tau_{i-1})\} / \Delta t_i \quad (13)$$

である。

2.2.2 内圧計算

まず、バッファ層に放出されたガスの自由体積 V は下記の(14)式で計算される。

$$V = (1 - \rho_b / \rho_b^{th}) \cdot V_b \quad (14)$$

ただし、 ρ_b : バッファ層の密度、 V_b : バッファ層体積、 ρ_b^{th} : バッファ層の理論密度(= 2.2
[g/cm³])

内圧 $P(\tau)$ は、理想気体方程式またはファン・デル・ワールス方程式より計算される。理想気体方程式を用いる場合には、バッファ層中の温度分布が考慮される。

2.3 応力/ひずみ計算部

応力/ひずみ計算部は、(1)PyC の照射クリープ係数及び照射寸法変化速度を計算する部分、及び(2)応力/ひずみを計算する部分より成る。

2.3.1 PyC の照射クリープ係数及び照射寸法変化速度の計算

まず、応力/ひずみ計算に必要な PyC の照射クリープ係数及び照射寸法変化速度を文献 5) に基づいて求める。

(1) 照射クリープ係数

タイムステップ k における IPyC/OPyC 層の照射クリープ係数 K_k [1/MPa/(10²⁵ n/m², E>0.18 [MeV])] は、以下の(15)式で求められる。

$$K_k = K_{1.9,k} \cdot \{1 + (1.9 - \rho_{PyC}) \cdot 2.38\} \quad (15)$$

$$K_{1.9,k} = 2.193 \cdot 10^{-4} - 4.85 \cdot 10^{-7} \cdot (T_{PyC,k} - 273.15) + 4.0147 \cdot 10^{-10} \cdot (T_{PyC,k} - 273.15)^2 \quad (16)$$

ただし、 ρ_{PyC} : IPyC/OPyC の密度[g/cm³]、 $T_{PyC,k}$ [K]: タイムステップ k における IPyC/OPyC 層の体積平均温度

(2) 照射寸法変化速度

後述のように、Code-B-2 においては Code-B-1 と同様に応力/ひずみ計算には汎用 FEM コードである ABAQUS コードを用いる。ABAQUS コードにおいては寸法変化ひずみ速度を体積ひずみ速度に換算して与える必要がある。そこで、ここでは体積ひずみ速度の算出方法について述べる。

また、IPyC/OPyC 層の照射寸法変化速度については、

- a) 入力データとして与える PyC の密度及び高速中性子束。
- b) 上記 2.1 で計算された IPyC/OPyC 層各々の平均温度。

に加え、

- c) BAF=1.0 かつ密度 1.96 [g/cm³] の場合の PyC の線照射寸法変化を高速中性子束の 4 次式で近似した係数の組の温度依存テーブルデータファイル。
- d) ユーザーが設定した BAF における、密度 1.96 [g/cm³] の場合の PyC の径方向照射寸法変化を高速中性子束の 4 次式で近似した係数の組の温度依存テーブルデータファイル。

- e) ユーザーが設定した BAF における、密度 1.96 [g/cm³] の場合の PyC の周方向照射寸法変化を高速中性子束の 4 次式で近似した係数の組の温度依存テーブルデータファイル。
- f) 密度補正用係数の組($\mu(\rho), \nu(\rho)$)のテーブルデータファイル。ただし、
- $\mu(\rho)$: 1373 [K]において高速中性子フルエンス 3.7×10^{25} [n/m²]まで照射した、BAF=1.0、密度 ρ [g/cm³]の PyC の照射寸法変化を、BAF=1.0、密度 1.96 [g/cm³]の場合における値で規格化した値。
 - $\nu(\rho)$: 1373 [K]において高速中性子フルエンス 3.7×10^{25} [n/m²]まで照射した密度 ρ [g/cm³]の PyC の、径方向照射寸法変化から周方向照射寸法変化を引いた値を、密度 1.96 [g/cm³]の場合における値で規格化した値。

を入力データとは別に与え、a)-f)に基づき、各タイムステップ毎に求めることとした。上記 c)-f)はプログラムには組み込んでおらず、各ユーザーが作成して外部データとして与えるものである。a)-f)は文献 5)に基づいて与えることを想定しているが、照射試験結果に基づき、文献 5)で与えられている上記 c)-f)のもとなるデータテーブルは極めて荒いため、その内挿及び外挿については、プログラム内部で行うよりも各ユーザーがグラフ等を確認しながら行う方が妥当と考えられるためである。

体積ひずみ速度は、具体的には各タイムステップ毎に以下のように求める。

1) 擬等方照射寸法変化、擬径方向照射寸法変化、擬周方向照射寸法変化の算出

上記 c)-e)で与えた係数の組 $a_{m,iso}(T)$ 、 $a_{m,r}(T)$ 、 $a_{m,t}(T)$ を用い、密度 1.96 [g/cm³]におけるタイムステップ k における擬等方照射寸法変化 $\epsilon_{sw,1.96,iso,k,p}$ 、擬径方向照射寸法変化 $\epsilon_{sw,1.96,r,k,p}$ 、擬周方向照射寸法変化 $\epsilon_{sw,1.96,t,k,p}$ は各々以下の(17)-(19)式により与えられる。

$$\epsilon_{sw,1.96,iso,k,p} = \sum_{m=1}^4 a_{m,iso}(T_{PyC,k}) \cdot \phi_k^m \quad (17)$$

$$\epsilon_{sw,1.96,r,k,p} = \sum_{m=1}^4 a_{m,r}(T_{PyC,k}) \cdot \phi_k^m \quad (18)$$

$$\epsilon_{sw,1.96,t,k,p} = \sum_{m=1}^4 a_{m,t}(T_{PyC,k}) \cdot \phi_k^m \quad (19)$$

ただし、 ϕ_k :タイムステップ k における高速中性子束[10^{25} n/m²]($E > 0.18$ [MeV])。

なお、照射温度変動を取り扱うため、実際の照射寸法変化は、密度 1.96 [g/cm³]の場合においてすら(17)-(19)で求める値とは異なる。そこで、(17)-(19)で求める値には「擬(pseudo)」をつけて呼ぶこととする。

2) 擬径方向照射寸法変化、擬周方向照射寸法変化の密度補正

更に、上記 f) で与えた密度補正用係数の組 $(\mu(\rho), \nu(\rho))$ 及び以下の(20)及び(21)式より、IPyC/OPyC の密度におけるタイムステップ k における擬径方向照射寸法変化 $\varepsilon_{sw,\rho,r,k,p}$ 、擬周方向照射寸法変化 $\varepsilon_{sw,\rho,t,k,p}$ が表される。

$$\varepsilon_{sw,\rho,r,k,p} = \mu(\rho_{PyC}) \cdot \varepsilon_{sw,1.96,iso,k,p} + \nu(\rho_{PyC}) \cdot (\varepsilon_{sw,1.96,r,k,p} - \varepsilon_{sw,1.96,iso,k,p}) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{sw,\rho,t,k,p} = \mu(\rho_{PyC}) \cdot \varepsilon_{sw,1.96,iso,k,p} + \nu(\rho_{PyC}) \cdot (\varepsilon_{sw,1.96,t,k,p} - \varepsilon_{sw,1.96,iso,k,p}) \quad (21)$$

3) 照射寸法変化体積ひずみ速度

まず、タイムステップ k における径方向及び周方向の照射寸法変化擬体積ひずみ $\varepsilon_{sw,\rho,r,k,V,p}$ 及び $\varepsilon_{sw,\rho,t,k,V,p}$ は、以下の(22)及び(23)式により表される。

$$\varepsilon_{sw,\rho,r,k,V,p} = (1 + \varepsilon_{sw,\rho,r,k,p})^3 - 1 \quad (22)$$

$$\varepsilon_{sw,\rho,t,k,V,p} = (1 + \varepsilon_{sw,\rho,t,k,p})^3 - 1 \quad (23)$$

従って、下記の(24)及び(25)式により、タイムステップ k における径方向及び周方向の照射寸法変化体積ひずみ速度 $\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_{sw,\rho,r,k,V}$ 及び $\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_{sw,\rho,t,k,V}$ が求められる。

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_{sw,\rho,r,k,V} = \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_{sw,\rho,r,k,V,p} = 3 \cdot (1 + \varepsilon_{sw,\rho,r,k,p})^2 \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \varepsilon_{sw,\rho,r,k,p} \cdot \frac{d\phi}{d\tau} \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_{sw,\rho,t,k,V} = \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon_{sw,\rho,t,k,V,p} = 3 \cdot (1 + \varepsilon_{sw,\rho,t,k,p})^2 \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \varepsilon_{sw,\rho,t,k,p} \cdot \frac{d\phi}{d\tau} \quad (25)$$

$$\frac{d\phi}{d\tau} = (\phi_k - \phi_{k-1}) / \Delta t_k \quad (26)$$

なお、 $\frac{\partial}{\partial \phi} \varepsilon_{sw,\rho,r,k,p}$ 及び $\frac{\partial}{\partial \phi} \varepsilon_{sw,\rho,t,k,p}$ は(17)・(21)式より容易に求めることができる。

2.3.2 応力/ひずみ計算

健全粒子の IPyC, SiC 層及び OPyC 層の応力/ひずみ計算は、汎用 FEM コードである ABAQUS コードを用いて行う。計算にあたっては、弾性変形・照射クリープ(IPyC 及び OPyC

層)・照射寸法変化(IPyC 及び OPyC 層)・熱膨張が考慮される。照射クリープひずみ速度は、既存の FIGHT コード及び Code-B-1 と同様、応力の 1 乗に比例すると仮定する。

3. 著者らがかつて提案した方法に準拠し、Code-B-2 を用いて日本製高品質 HTGR 燃料の内圧破損率評価を行う場合に用いるべき BAF

文献 6)において、著者らは HTTR 燃料の先行照射試験の照射後試験(PIE)結果⁹⁾に基づき、既存の破損率計算コード(既存の FIGHT コード^{1,2)})を改良して日本製の高品質 HTGR 燃料の破損率評価する方法を提案した。具体的には、まず、既存の FIGHT コードの内圧及び健全粒子の被覆層の応力計算に Code-B-1⁴⁾を用いることとした。また、ある時点における破損率を、照射開始からその時点までの破損率計算値の最大値とすることとした。次に、文献 5)に基づき、様々な PyC の BAF について内圧破損率を計算し、上記 PIE 結果より評価した破損率と合致する BAF を求めた。そして、PyC 層の物性値は文献 5)に基づき、その BAF を用いて設定することとした。

Code-B-2 においては、温度変動を取り扱うために Code-B-1 から安定希ガス FP 放出率の基礎式を変更したため、同じ照射条件を用いて計算しても異なる内圧が算出され、更に、異なる被覆層応力が算出される。従って、Code-B-1 ではなく Code-B-2 を用いて上記と同様の方法で日本製の高品質 HTGR 燃料の破損率評価する場合には、上記 PIE 結果より評価した破損率と合致する BAF を改めて求める必要がある。そこで本章では、Code-B-2 を用いた場合に上記 PIE 結果より評価した破損率と合致する BAF を求める。即ち、上記の Code-B-1 を用いて行ったと同様、Code-B-2 を用いて様々な BAF について内圧破損率を計算し、HTTR 燃料の先行照射試験の PIE 結果と合致する BAF を求める。具体的には、Table 1 に示した計算条件に基づき、以下のように行った。

①様々な BAF について、Code-B-2 を用いて内圧及び被覆層の応力を計算する。詳細は以下の 1)-4)の通り。

- 1) 2.1 節で述べた方法で温度分布を計算する。
- 2) 2.2 節で述べた方法で内圧を計算する。
- 3) 2.3.1 小節で述べた方法で PyC の照射クリープ係数を計算し、更に、仮定した BAF について PyC の照射寸法変化速度を計算する。
- 4) 2.3.2 小節で述べた方法で健全粒子の被覆層応力を計算する。

②様々な BAF について上記①で計算された内圧及び健全粒子の被覆層応力を用い、既存の FIGHT コードと同じ方法²⁾で内圧破損率を計算する。

③上記②で計算した健全粒子の破損率の照射開始から終了時までにおける最大値を、仮定した BAF に対してプロットする。

④上記③で作成したグラフより、文献 6)において上記の PIE 結果に基づく貫通破損率の範囲の上限値とした値(3.7×10^{-4})に対応する BAF を読み取る。

上記③においてプロットした健全粒子の内圧破損率の BAF 依存性を Fig. 1 に示す。上記④により読み取った BAF は 1.007980 である。

以上により、著者らが文献 6)で提案した方法に準拠し、Code-B-2 を用いて日本製高品質 HTTR 燃料の内圧破損率評価を行う場合に用いるべき PyC の BAF は 1.007980 である。

なお、照射前には母集団に属する燃料粒子はすべて健全粒子であったと仮定し、照射後の貫通破損粒子数(3 粒⁶⁾)より、貫通破損率範囲は以下のように評価した⁶⁾。

$$(3 \pm \sqrt{3}) \div \text{母集団数} = 1.0 \sim 3.7 \times 10^{-4} \quad (27)$$

4. 結論

- (1) 既存の Code-B-1 を下記のように改良し、Code-B-2 と呼ぶこととした。
 - 温度変動を取り扱えるように改良した。
 - また、PyC 層の照射クリープ係数及び照射寸法変化速度は米国において様々な異方性を持つ PyC について様々な照射温度における照射データを整理して纏めたレポートに基づいてプログラム内で計算することとした。
- (2) 文献 6)で提案した方法に準拠し、Code-B-2 を用いて日本製高品質 HTGR 燃料の内圧破損率評価を行う場合に用いるべき PyC の BAF は 1.007980 である。

参考文献

- 1) K. Sawa, S. Shiozawa, K. Minato and K. Fukuda, "Development of a Coated Fuel Particle Failure Model under High Burnup Irradiation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **33**, pp.712-720 (1996) .
- 2) K. Sawa, J. Sumita and T. Watanabe, *Fuel Failure and Fission Gas Release Analysis Code in HTGR*, JAERI-DATA/Code 99-034, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) (1999). [in Japanese]
- 3) K. Bongartz, *Status of the Fuel Stress and Failure Rate Calculations at KFA*, Juel-1686, Institut fuer Resktoerwerkstoffe (1980).
- 4) J. Aihara, S. Ueta, T. Shibata and K. Sawa, "Code-B-1 for Stress/Strain Calculation for TRISO Fuel Particle (Contract Research)", JAEA-Data/Code 2011-016, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), (2011).
- 5) *NP-MHTGR Material Models of Pyrocarbon and Pyrolytic Silicon Carbide*, CEGA-002820, Rev. 1, CEGA Corporation, (1993).
- 6) J. Aihara, S. Ueta, T. Shibata and K. Sawa, "Suggested Failure Probability Calculation Method for Japanese High-Quality High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Fuel", *Transac. of the Atom. Ener. Soc. Jap.*, 11, pp.158-163 (2012). [in Japanese]
- 7) E. Proksch, A. Strigl and H. Nabielek, "Production of carbon monoxide during burn-up of UO₂ kerneled HTR fuel particles", *J. Nucl. Mater.*, 107, pp.280-285 (1982).

- 8) *method for calculation the fractional release of volatile fission products from oxide fuel*, ANSI/ANS-5.4-1982, American Nuclear Society, (1982).
- 9) S. Ueta, M. Umeda, K. Sawa, S. Shiozawa, M. Shimizu, Y. Ishigaki and H. Obata, "Preliminary Test Results for Post Irradiation Examination on the HTTR Fuel", J. Nucl. Sci. Technol., 44, pp.1081-1088 (2007).
- 10) K. Sawa, T. Tobita, H. Mogi, S. Shiozawa, S. Yoshimuta, S. Suzuki and K. Deushi, "*Fabrication of the First-Loading Fuel of the High Temperature Engineering Test Reactor*", J. Nucl. Sci. Technol., 36, pp.638-690 (1999).

Table 1 Irradiation conditions and specifications of fuel particle of preliminary irradiation test of HTTR fuel.

Kernel diameter ¹⁰⁾	600 [μm]
Buffer thickness ¹⁰⁾	60 [μm]
IPyC thickness ¹⁰⁾	30 [μm]
SiC thickness ¹⁰⁾	25 [μm]
OPyC thickness ¹⁰⁾	45 [μm]
Irradiation duration (effective full power day) ⁹⁾	364 [day]
Burnup ^{*1 9)}	5.8 [%FIMA]
Fast Neutron fluence ^{*1 (E > 0.18MeV) 9)}	3.3×10^{25} [n/m ²]
Irradiation temperature ⁹⁾	1573 [K]

*1 averaged value of two compacts irradiated in lower capsule of 94F-9A irradiation capsule.

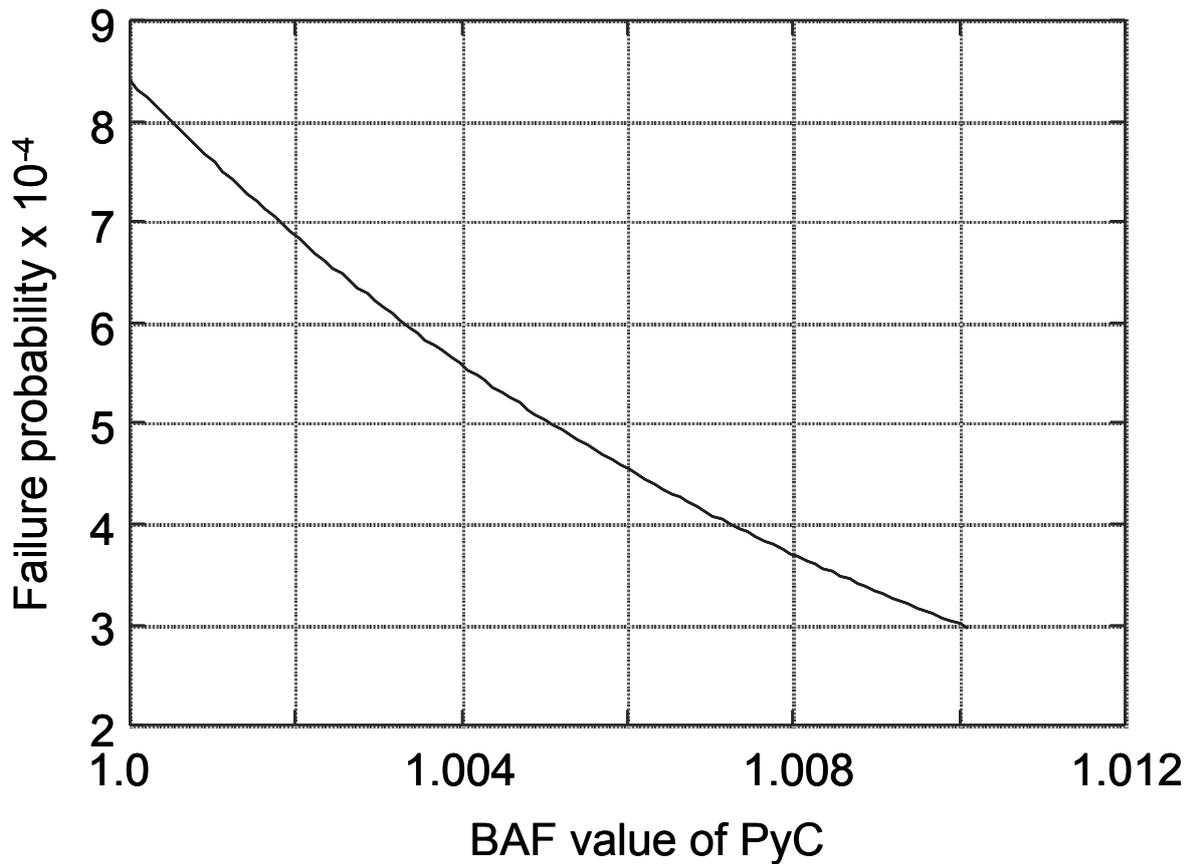


Fig. 1 BAF dependence of failure probability of initially intact SiC-TRISO fuel particles. (Calculation condition: see **Table 1.**)

付録 既存の FIGHT コードにおける破損率の算出法

ここでは、既存の FIGHT コードにおいて内圧及び健全粒子の SiC 層の応力を与えて燃料粒子の破損率を求める方法 A-1, A-2) を述べる。

(1) 仮定

被覆層の破損に関しては以下のような仮定をおく。

- 1) 照射前の被覆燃料粒子は、IPyC/SiC/OPyC 層がすべて健全な「初期健全粒子」と、IPyC 及び SiC 層が破損しているが OPyC 層は健全な「初期 SiC 破損粒子」及び、3 層とも破損した「初期貫通破損粒子」から成る。
- 2) SiC 層が健全であれば IPyC 層は破損しない。
- 3) IPyC 層が健全であれば OPyC 層は破損しない。
- 4) 各被覆層の破損は表面の欠陥から生じる。
- 5) 各被覆層の破損は引張り応力によって生じる。

(2) 初期健全粒子における SiC 層の破損率

健全粒子の SiC 層内面における周方向応力を σ_s [MPa] とすると、初期健全粒子における SiC 層の破損率 f_s は以下の(A-1)式で表される。

$$f_s = 1 - 0.5^{u_s} \quad (\text{A-1})$$

$$u_s = \{\max(0, \sigma_s) / \sigma_{os}\}^{m_s} \quad (\text{A-2})$$

ただし、 σ_{os} : SiC 層の強度 = 834 - 88 ϕ [MPa]、 ϕ : 高速中性子照射量 [$10^{25}/\text{m}^2$]、 m_s : SiC 層のワイブル係数 = 8

(3) 初期健全粒子だったが、照射により SiC 層が破損した粒子における IPyC 層の破損率

まず、もともと健全粒子だったが、照射により SiC 層が破損した粒子における IPyC 層の内面周方向応力 σ_i [MPa] は、薄肉球殻モデルで以下の(A-3)式で表される。

$$\sigma_i = \frac{t_i^3 + 3r_i t_i^2 + 3r_i^2 t_i + 3r_i^3}{2t_i(t_i^2 + 3r_i t_i + 3r_i^2)} \cdot P \quad (\text{A-3})$$

ただし、 t_i : IPyC 層厚さ[m]、 r_i : IPyC 層内面の半径[m]、 P : 内圧 [MPa]

この σ_i [MPa] を用いてもともと健全粒子だったが、照射により SiC 層が破損した粒子における IPyC 層の破損率 f_i は以下の(A-4)式で表される。

$$f_i = 1 - 0.5^{u_i} \quad (\text{A-4})$$

$$u_i = \{\max(0, \sigma_i) / \sigma_{op}\}^{m_p} \quad (\text{A-5})$$

ただし、 σ_{op} : PyC 層の強度 = 160 [MPa]、 m_p : PyC 層のワイブル係数 = 4

(4) IPyC 及び SiC 層が破損した粒子における OPyC 層の破損率

まず、IPyC 及び SiC 層が破損した粒子における OPyC 層の内面周方向応力 σ_o [MPa]は、薄肉球殻モデルで以下の(A-6)式で表される。

$$\sigma_o = \frac{t_o^3 + 3r_o t_o^2 + 3r_o^2 t_o + 3r_o^3}{2t_o(t_o^2 + 3r_o t_o + 3r_o^2)} \cdot P \quad (\text{A-6})$$

ただし、 t_o : OPyC 層厚さ[m]、 r_o : OPyC 層内面の半径[m]。

この σ_o [MPa]を用いて IPyC 及び SiC 層が破損した粒子における OPyC 層の破損率 f_o は以下の(A-7)式で表される。

$$f_o = 1 - 0.5^{u_o} \quad (\text{A-7})$$

$$u_o = \{\max(0, \sigma_o) / \sigma_{op}\}^{m_p} \quad (\text{A-8})$$

(5) 貫通破損率

初期健全粒子の貫通破損率 F_{in} は、以下の(A-9)により表される。

$$F_{in} = f_s \cdot f_i \cdot f_o \quad (\text{A-9})$$

また、初期 SiC 破損粒子の貫通破損率 F_s は以下の(A-10)式により表される。

$$F_s = f_o \quad (\text{A-10})$$

参考文献

- A-1) K. Sawa, J. Sumita and T. Watanabe, *Fuel Failure and Fission Gas Release Analysis Code in HTGR*, JAERI-DATA/Code 99-034, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) (1999). [in Japanese]
- A-2) K. Sawa, S. Shiozawa, K. Minato and K. Fukuda, "Development of a Coated Fuel Particle Failure Model under High Burnup Irradiation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **33**, 712-720 (1996).

This is a blank page.

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

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	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	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束	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
光照射度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CF-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
粘着力	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エントロピー	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
電表面積電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量	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 ³ 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	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	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=60s
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/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	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	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
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	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
ストルブ	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=1G cm ² =10 ⁸ 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=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

