JAEA-Data/Code 2019-018 DOI:10.11484/jaea-data-code-2019-018



被覆燃料粒子の応力計算のための Code-B-2.5.2

Code-B-2.5.2 for Stress Calculation for SiC-TRISO Fuel Particle

相原 純 後藤 実 植田 祥平 橘 幸男 Jun AIHARA, Minoru GOTO, Shohei UETA and Yukio TACHIBANA

> 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター 水素・熱利用研究開発部

Department of Hydrogen and Heat Application Research and Development HTGR Research and Development Center Oarai Research and Development Institute Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development 日本原子力研究開発機構

January 2020

Japan Atomic Energy Agency

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

被覆燃料粒子の応力計算のための Code-B-2.5.2

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター 水素・熱利用研究開発部

相原 純、後藤 実+、植田 祥平、橘 幸男

(2019年11月25日 受理)

Pu 燃焼高温ガス炉とは、再処理 Pu の量を安全に減らすための高温ガス炉である。Pu 燃焼 高温ガス炉では、PuO₂-イットリア安定化ジルコニア(PuO₂-YSZ)の微小球に ZrC 層を被覆し、 更に SiC-TRISO 被覆を施した、核拡散抵抗性の高い被覆燃料粒子(CFP)を用いる計画である。 ZrC 層の役割は、酸素ゲッターである。主に、この Pu 燃焼高温ガス炉の CFP にも適用するた めの現時点で可能な範囲での準備として、高温ガス炉の燃料である CFP の内圧破損確率評価 のための、健全 CFP の被覆層の応力計算用コードシステムである Code-B-2 を改良し、Code-B-2.5.2 とした。本報告では、Code-B-2.5.2 の基礎式を報告する。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+ 炉設計部

Code-B-2.5.2 for Stress Calculation for SiC-TRISO Fuel Particle

Jun AIHARA, Minoru GOTO, Shohei UETA and Yukio TACHIBANA

Department of Hydrogen and Heat Application Research and Development, HTGR Research and Development Center, Oarai Research and Development Institute, Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 25, 2019)

Concept of Pu-burner high temperature gas-cooled reactor (HTGR) was proposed for purpose of more safely reducing amount of recovered Pu. In Pu-burner HTGR concept, coated fuel particle (CFP), with ZrC coated yttria stabilized zirconia (YSZ) containing PuO₂ (PuO₂-YSZ) small particle and with tri-structural isotropic (TRISO) coating, is employed for very high burn-up and high nuclear proliferation resistance. ZrC layer is oxygen getter. On the other hand, we have developed Code-B-2.5.2 for prediction of pressure vessel failure probabilities of SiC-tri-isotropic (TRISO) coated fuel particles for HTGRs under operation by modification of an existing code, Code-B-2. The main purpose of modification is preparation of applying code for CFPs of Pu-burner HTGR. In this report, basic formulae are described.

Keywords: Pressure Vessel Failure, Failure Probabilities, SiC-TRISO Coated Fuel Particles, High Temperature Gas-cooled Reactor, Pu-burner High Temperature Gas-cooled Reactor, ZrC Coated PuO₂-YSZ

⁺ Research Systems Design Department

目 次

1. 序論	1
2. Code-B-2 からの改良	2
2.1 Pu 燃焼高温ガス炉の被覆燃料粒子に適用するための	
現時点で可能な範囲での準備	2
2.1.1 はじめに	2
2.1.2 行った改良	2
2.1.3 行っていない改良	4
2.1.4 Pu 燃焼高温ガス炉への適用	5
2.2 その他の改良	6
3. Code-B-2.5.2 の詳細	7
3.1 緒言	7
3.2 温度計算部	7
3.3 内圧計算部	7
3.3.1 緒言	7
3.3.2 バッファ層に放出されるガスのモル数の計算	7
3.3.3 内圧の計算	11
3.4 応力/歪計算部	12
3.4.1 はじめに	12
3.4.2 PyC の照射クリープ係数の計算	12
3.4.3 PyC の照射寸法変化速度の計算	13
4. まとめ	17
参考文献	17
付録 UO ₂ と組成が大きく異なる fissile 核を扱う場合に入力すべき fissile 核の密度	20

Contents

1. Introduction	1			
2. Modifications from Code B-2				
2.1 Preparation for application for coated fuel particles				
of Pu-burner high temperature gas-cooled reactors	2			
2.1.1 Forward	2			
2.1.2 Done Modifications	2			
2.1.3 Undone modifications	4			
2.1.4 Application for coated fuel particles				
of Pu-burner high temperature gas-cooled reactors	5			
2.2 Other modifications	6			
3. Formulae of Code-B-2.5.2	7			
3.1 Forward	7			
3.2 Temperature calculation part	7			
3.3 Internal pressure calculation part	7			
3.3.1 Forward	7			
3.3.2 Calculation of numbers of gases released from fuel kernel	7			
3.3.3 Calculation of internal pressure	11			
3.4 Stresses calculation part	12			
3.4.1 Forward	12			
3.4.2 Calculation of irradiation creep coefficient of PyC	12			
3.4.3 Calculation of irradiation swelling rates of PyC	13			
4. Summary	17			
References	17			
Appendix Density of fissile kernel to be input when composition				

of fissile kernel is remarkably different from UO_2 ----- 20

1. 序論

高温ガス炉の燃料である SiC-TRISO 被覆燃料粒子(CFP)は、Fig. 1(a)に示すように、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(バッファ)層)/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-CFP 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 CFP 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、健 全 CFP の被覆層の応力計算のためのコードシステムである Code-B-1⁴⁾を、更に Code-B-2⁵⁾を 開発した。

更に著者らは、Code-B-2を更に改良し、その改良したコードシステムを Code-B-2.5.2 と 呼ぶことにした。Code-B-2.5.2 は Code-B-2 と同様に、(i)温度計算部・(ii)内圧計算部・(iii)応 力/歪計算部から成る。(ii)においては(i)における計算結果に基づき、(iii)においては(i)及び(ii)に おける計算結果に基づき、各々計算が行われる。なお、第3章において述べるように、応力/歪 計算は健全 CFP の IPyC~OPyC 層についてのみ行われる。燃料核・バッファ層と、IPyC~ OPyC 層との間には機械的な相互作用は存在しないこととされる。

Code-B-2 からの改良の概要は下記(a)-(c)の通りである。詳細については次章にて述べる。

- (a) Pu 燃焼高温ガス炉 ^{6,7)}の被覆燃料粒子に適用するための現時点で可能な範囲での 準備。
- (b) 核分裂性物質(fissile materials)を含む領域の中における安定希ガス FP の還元拡 散係数の計算式の修正。この領域は、Code-B-1 及び Code-B-2 においては「燃料 核」と呼ばれていたものである。次章にて「fissile 核」と定義される。
- (c) PyCの照射クリープ係数に増倍係数をかけられるようにする。

本稿では、第2章においてまず Code-B-2 からの改良について具体的に述べる。次に第3 章において、Code-B-2.5.2の基礎式を示す。

なお、本報告では入力データとして与える値そのものについては触れない。入力データの 与え方、及び物性値等の計算式・計算方法にかかる変更を「コードの改良」とした。適切な物 性値を得ることは、コードの改良より遥かに重要である。計算コードをどのように改良しても、 適切な物性値なしに適切な計算を行うことは不可能である。

2. Code-B-2 からの改良

本章では、Code-B-2から Code-B-2.5.2 へ、どういう理由でどのような改良を行ったか述 べる。前章中(a)については多岐に渡るため、1つの小節を設けて述べる。(b)(c)については纏め て「その他の改良」として述べる。

2.1 Pu 燃焼高温ガス炉の被覆燃料粒子に適用するための現時点で可能な範囲での準備 2.1.1 はじめに

Pu 燃焼高温ガス炉とは、再処理 Pu の量を安全に減らすための高温ガス炉である $^{6,7)}$ 。Pu 燃焼高温ガス炉では、PuO₂を含むイットリア安定化ジルコニアの微小球(PuO₂-YSZ 核)に ZrC 層を被覆し、更に SiC-TRISO 被覆を施した CFP(Fig. 1(b)参照)を用いる計画である。ZrC 層 の役割は酸素ゲッターである。このような CFP の核拡散抵抗性は、以下のような理由により 高い。

- ▶ 燃料核から Pu を抽出することを非常に困難とすることが可能と考えられる。 Pu が固溶した YSZ から Pu を抽出することは非常に困難である可能性があるため、 組成によっては燃料核から Pu を抽出することを非常に困難とすることが可能と考 えられる [¬]。
- ▶ CFP から燃料核を取り出すためには SiC-TRISO 被覆層を破壊する工程が必要である。

SiC-TRISO 被覆層を破壊することは可能であり、UO2 燃料核を用いた SiC-TRISO 被覆 CFP の再処理は可能である⁸。しかし、SiC-TRISO 被覆層が核拡散抵抗性を高 めるとは言える。

本稿では以後、以下のように定義する。

- ▶ 燃料核: TRISO-CFP から TRISO 被覆層を除いた領域。
- ▶ fissile 核:燃料核から被覆層を除いた領域。

なお、HTTR で用いている CFP の場合、「燃料核」と「fissile 核」は同じものである。

本節ではまず、Code-B-2を改良して、Pu 燃焼高温ガス炉に適用するための準備として行った改良について述べる。次に、現時点ではできないため、もしくは敢えて、行っていない改良について述べる。最後に、行った改良・行っていない改良をふまえて、Pu 燃焼高温ガス炉の CFP への Code-B-2.5.2 の適用について述べる。

2.1.2 行った改良

2.1.2.1 ZrC 層の追加に伴う改良

- ▶ CFP 内の温度分布の計算は ZrC 層も含めて行えるようにした。
- ▶ 内圧の計算において、ガスの自由体積の計算に ZrC 層の追加を反映させた。即ち、バッファ 層の内外径が ZrC 層の厚さ分増加することとした。
- 応力/歪計算部において、IPyC、SiC、OPyC 各層の内外径が ZrC 層の厚さ分増加すること とした。

なお、ZrC 厚さを 0 と設定すれば、従来通りの燃料核を持った CFP を取り扱うことができる。

2.1.2.2 燃料核からのガス放出量に関する改良

2.1.2.2.1 はじめに

CFP の内圧計算のためには、燃料核からバッファ層に放出されたガス(CO の形で放出され るとする遊離酸素、及び、FP のうち安定希ガス)の量を計算する必要がある。そのためにはま ず、i) 核分裂数または核分裂速度を計算する。次に、ii) 核分裂によって生成する遊離酸素及び 安定希ガス FP の量を計算する。次に、iii) そのうちバッファ層に放出される割合を計算し、最 後に iv) 燃料核からバッファ層に放出されたガスの量を計算する。

Code-B-2.5.2 では、上記 ii)及び iii)について下記のように改良を行った。

2.1.2.2.2 ガスの原因となる原子の発生に関する改良

(1) 安定希ガス FP の収率

Code-B-2 では、核分裂性物質を U 及び Pu の 2 種類とし、安定希ガス FP の収率を U 及 び Pu の 2 種類に分けて設定していた。Code-B-2.5.2 においては Pu を Pu-239 と Pu-241 に分 け、核分裂性物質を 3 種類とした。即ち、安定希ガス FP の収率を U、Pu-239、Pu-241 の 3 種類の核分裂性物質各々について設定することとした。(「3.3.2.3 安定希ガス FP」中(1)参照)

(2) 核分裂割合

Code-B-2 では、U及び Pu の 2 種類の核分裂性物質の核分裂割合を一定値として入力して いたが、Code-B-2.5.2 では U、Pu-239、Pu-241 の 3 種類に分け、履歴を入力することとした。 (「3.3.2.2 遊離酸素」中(2)及び「3.3.2.3 安定希ガス FP」中(1)参照)

2.1.2.2.3 燃料核からのガスの放出割合に関する改良

(1) 遊離酸素

燃料核からの遊離酸素の放出割合は、下記 1)2)いずれかの方法オプションで選択し、計算 することとした。(「3.3.2.2 遊離酸素」参照)

- 1)100%とする。
- 2) 従来の方法で計算した放出割合に、入力データで設定した係数(常に一定値とする)を かけた値を遊離酸素の放出割合とする。

(2) 安定希ガス FP

従来の方法で計算した放出割合に、入力データで設定した係数(常に一定値とする)をかけ た値を安定希ガス FP の放出割合とする。ただし、還元拡散係数の計算には燃料核の半径とし て fissile 核の半径を用いる。上記(1)中の 2)に伴って行った改良である。(「3.3.2.3 安定希ガス FP」中(3)参照) 2.1.3 行っていない改良

現象をモデル化する際に簡易的な方法で考慮できるものや、現状では現象を把握しきれて いないものは、本小節で示すように、今回改良していない。

(1) 領域間の隙間

Code-B-2.5.2 での温度計算では、Code-B-2 と同様に CFP 中の各領域(fissile 核、ZrC 層、 TRISO 被覆層)の、隣の領域との隙間は考慮していない。

一方、過去に行われた実験⁹において、小球を基盤にして ZrC 層を被覆し、更にその上に PyC 層を被覆した試料を機械的に砕くと、ZrC 層上の PyC 層はきれいに分離した。即ち、ZrC 層と、その上に被覆された PyC 層は結合していなかった。

従って、ZrC層とバッファ層も結合せず、照射中に隙間が開く可能性がある。この隙間に より燃料核からバッファ層へ熱が伝わりにくくなり、CFP表面の温度が一定であっても CFP 内部の温度が上昇する可能性がある。

(2) 核分裂数

「2.1.1 はじめに」で述べたように、Pu 燃焼高温ガス炉の fissile 核は PuO₂-YSZ であり、 UO₂とは組成が大きく異なる。従って、単位質量の fissile 核中に含まれる核分裂性物質の量は UO₂とは異なる。従って、燃焼度等から UO₂燃料核中の核分裂数を計算するための式は適用で きない。

しかし、入力データ中の「fissile 核の密度 [t/mol]」の設定に簡単な補正を施すことにより、 この問題は解決可能である。(付録参照)

(3) 遊離酸素の収率

遊離酸素の収率については Code-B-2 からの改良は行っていない。即ち、U、Puの2種類 について各々一定(入力データ)としている。しかし、Pu 燃焼高温ガス炉は Pu を燃やし尽くす ことを目的としているため、fissile 核の組成が燃焼に伴い大きく変化すると考えられる。従っ て、化学的な過程で起こる遊離酸素の発生は、燃焼度及び時間に依存する、即ち、履歴を入力 できるようにすべきであると考えられる。

ただし、もしも遊離酸素がすべて ZrC 層に捕獲されてバッファ層に放出されないならば、 上記「2.1.2.2.3 燃料核からのガスの放出割合に関する改良」中(1)中の 2)で述べた係数を 0 と すれば良い。

(4) 安定希ガス FP の還元拡散係数

前小節で述べた安定希ガス FP の燃料核からの放出割合を従来の方法で計算する際に用い る還元拡散係数の計算方法は、従来の燃料核(剥き出しの UO₂ 球)を持つ通常の CFP について のものである。従って、Pu 燃焼高温ガス炉の燃料核(ZrC 層で被覆された PuO₂-YSZ 球)には適 用できない。次節では還元拡散係数の計算式の改良について述べるが、それはあくまでも通常 の CFP についての実験式の改良である。 なお、ZrC 層の存在の、安定希ガス FP の放出割合への影響は不明である。この影響は、 ZrC 層の健全性及び微細構造によって大きく異なることが予想される。

これらのことは、将来実験的に調べる必要がある。

(5) 遊離酸素の燃料核からの放出割合

前小節で述べた遊離酸素の燃料核からの放出割合を従来の方法で計算する際に用いる式は、 従来の燃料核を持つ通常の CFP についての実験式である。従って、Pu 燃焼高温ガス炉の燃料 核には適用できない。

ただし、もしも遊離酸素がすべて ZrC 層に捕獲されてバッファ層に放出されないならば、 上記(3)で述べたと同様に、上記「2.1.2.2.3 燃料核からのガスの放出割合に関する改良」中(1) 中の 2)で述べた係数を 0 とすれば良い。

2.1.4 Pu 燃焼高温ガス炉への適用

前小節で述べた通り、Code-B-2.5.2 において安定希ガス FP の燃料核からの放出割合については、現時点では適切な計算が不可能である。この問題は当面解決不能であり、将来実験的に解決する必要がある。ただし、現状では Pu 燃焼高温ガス炉においては U は使用せず、核分裂性物質は Pu-239 及び Pu-241 の 2 種類として扱えるため、以下のように、ある程度は現実的なガス放出量の評価は可能である。

まず、下記のような仮定をおく。

- ▶ 遊離酸素はすべて ZrC 層に捕獲され、バッファ層に放出されない。
- ▶ 安定希ガス FP は 100%バッファ層に放出される。(保守的な仮定)

そして、下記のように入力デーを作成する。

- ▶ 遊離酸素の放出割合について「100%とする」というオプションを選択する。 (「2.1.2.2.3 燃料核からのガスの放出割合に関する改良」中(1)参照)
- ▶ 安定希ガス FP の放出割合にかかる係数を 0 とする。(「2.1.2.2.3 燃料核からのガスの放出割合に関する改良」中(2)参照)
- ▶ Pu-239 及び Pu-241 の安定希ガス FP の収率を、各々「U の遊離酸素の収率」「Pu の遊離酸素の収率」として入力する。
- ▶ Pu-239 及び Pu-241 の核分裂割合の履歴を、各々「Uの核分裂割合」「Pu-241 の核 分裂割合」として入力する。なお、「Pu-239の核分裂割合」は常に0とする。((「2.1.2.2.2 ガスの原因となる原子の発生に関する改良」中(2)参照)
- 更に、
- ▶ 入力データのうち、「fissile 核の密度 [t/mol]」を、核分裂数が正しく計算されるように設定する。(「2.1.3 行っていない改良」中(2)及び付録参照)
- ▶ 入力データのうち、「核分裂速度と fissile 核発熱密度の関係」を修正する。(付録参照)

2.2 その他の改良

(1) fissile 核中における安定希ガス FP の還元拡散係数の計算式の修正

fissile 核中における安定希ガス FP の還元拡散係数が、fissile 核の半径に依存する¹⁰⁾よう に計算式を修正した。((16)式参照)

(2) PyC の照射クリープ係数の増倍係数の設定

Miller らは、PyC のクリープ係数は文献 11)に基づく値の 1.8 倍に設定する方が、CFP の 破損割合を適切に評価できると述べている ¹²⁾。そこで、Code-B-2.5.2 においては、Code-B-2 と同様に文献 11)に基づいて計算した値に、更に、入力データで設定した係数をかけた値を PyC の照射クリープ係数として用いることとした。((22)式参照)

3. Code-B-2.5.2 の詳細

3.1 緒言

Code-B-2.5.2 は、Code-B-2⁵と同様に、健全 CFP の IPyC、SiC、OPyC 層の応力の計算 を行うコードである。燃料核・バッファ層と IPyC~OPyC 層との間には機械的な相互作用は存 在しないこととされる。

Code-B-2.2.5 は、Code-B-2 と同様に(1)温度計算部、(2)内圧計算部、(3)応力/歪計算部から成る。(2)は(1)の結果に基づく。(3)は(1)及び(2)の結果に基づく。Code-B-2 と同様に破損確率の計算は行わない。破損確率については既存の FIGHT コード^{1,2)}と同様の方法であれば、表計 算ソフトウェアにより簡単に計算が可能である。

以下、各部の詳細を説明する。

3.2 温度計算部

CFP 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。
- ▶ fissile 核中における局所的な発熱密度は一様とし、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局所的な発熱密度[W/cm³]を与える。
 - b) 入力データで核分裂速度[%FIMA/s]と、それに対応する局所的な発熱密度 [W/cm³]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。 ただし、「2.1.4 Pu 燃焼高温ガス炉への適用」で述べたように、fissile 核の組 成が UO₂と大幅に異なる場合には補正が必要である。

3.3 内圧計算部

3.3.1 緒言

内圧計算部においては、バッファ層に放出されるガスのモル数を計算し、内圧を計算する。 以下、各部ごとに説明する。

3.3.2 バッファ層に放出されるガスのモル数の計算3.3.2.1 はじめに

Code-B-2.5.2 においては、Code-B-2⁵と同様に、燃料核からバッファ層中へ遊離酸素及び 安定希ガス FP が放出され、内圧が発生するとしている。従って、第 *k* タイムステップにおけ る内圧に寄与するガスの量 *n*,*k* [mol]は、下記(1)式で表される。

$$n_k = n_{O,k} + n_{FP,k} \tag{1}$$

ただし、 $n_{O,k}$:第 k タイムステップにおいてバッファ層内に放出されている遊離酸素の量 [mol]

 $n_{FP,k}$:第kタイムステップにおいてバッファ層内に放出されている安定希ガス FPの 量[mol]

次項以降に no.k 及び nFP.k の求め方を述べる。

後述のように、*n_{O,k}* 及び *n_{FP,k}* を求めるにあたっては、核分裂数もしくは核分裂速度が 重要な値になるが、前章で述べたように、UO₂と組成が大きく異なる fissile 核を用いる場合に は補正が必要になる。また、用いる実験式及び物性値の計算式は通常の CFP にのみ適用でき るものであることにも注意する必要がある。

3.3.2.2 遊離酸素

(1) はじめに

Code-B-2.5.2 においては遊離酸素の放出については、下記 a)または b)をオプションとして選ぶことができる。

- a) 100%放出される。
- b) Code-B-2 と同じような方法で計算した放出割合に、入力データで設定した係数(常に 一定値とする)をかけた値を遊離酸素の放出割合とする。

以下に、各オプションを選択した場合における no,kの求め方を各々述べる。

(2) 100%放出される場合

第 k タイムステップにおいて発生している遊離酸素の量 $n_{O0,k}$ [mol]は、下記(2)式に基づき計算される($k \ge 2$)。

$$n_{O0,k} = n_{O0,k-1} + [Y_{O,U} \cdot f_{U,k} + Y_{O,Pu} \{ f_{Pu239,k} + f_{Pu241,k} \}] \{F_k - F_{k-1}\}$$
(2)

$$F_k = B_k \cdot (0.01 \cdot V_f \cdot \rho_f / W_f) \tag{3}$$

ただし、 F_k 第kタイムステップにおける核分裂数 [mol]

 B_k : 第kタイムステップにおける燃焼度[%FIMA]

- V_f : fissile 核の体積[m³]
- ρ_f : fissile 核の密度[t/m³]
- W_f : fissile 核 1 モルあたりの質量[t/mol]

Code-B-2.5.2 では 270 [t/mol]で固定。

Yo.U: Uからの遊離酸素生成率

Yo.Pu: Pu からの遊離酸素生成率

fU,*k*: 第*k*タイムステップにおける U 核分裂割合

f_{Pu239,k}: 第 k タイムステップにおける Pu-239 の核分裂割合

fPu241,k: 第 k タイムステップにおける Pu-241 の核分裂割合

上記(1)中のオプション a)を選択した場合、時刻 τ [s]においてバッファ層内に放出されて いる遊離酸素の量 $n_{O,k}$ [mol]は、下記(4)式により計算される。

$$n_{O,k} = n_{OO,k} \tag{4}$$

(3) Code-B-2 に準拠する場合

上記(1)中のオプション b)を選択した場合、第 k タイムステップにおいてバッファ層内に 放出されている遊離酸素の量 $n_{0,k}$ [mol]は、下記(5)式により計算される($k \ge 2$)。なお、式(6)は 文献 13)に基づく通常の CFP についての実験式である。

$$n_{O,k} = S_o \cdot \min\{ n_{O,k-1} + (n_{O1,k} - n_{O1,k-1}), n_{O0,k} \}$$
(5)

$$n_{OI,k} = F_{,k} \cdot \{ \tau_k / (24 \cdot 3600) \}^2 \cdot 10^{Xk}$$
(6)

$$X_k = 0.21 - 8500 / T_{f,k} \tag{7}$$

ただし、 S_o :入力データによって指定する係数 [-] τ_k :第kタイムステップの時刻 [s] $T_{f,k}$:第kタイムステップにおける fissile 核の温度 [K]。 オプションにより体積平均と外表面温度のどちらかを選択。

3.3.2.3 安定希ガス FP

(1) 生成する安定希ガス FP の量の計算

まず、生成する安定希ガス FP の量を計算する。

第kタイムステップにおいて生成している安定希ガス FP の量 $_{nFP,0,k}$ [mol]は、下記(8)式に基づき計算される($k \ge 2$)。

 $n_{FP,0,k} = n_{FP,0,k-1}$

 $+ \{Y_{FP,U} \cdot f_{u,k} + Y_{FP,Pu239} \cdot f_{Pu239,k} + Y_{FP,Pu241} \cdot f_{Pu241,k}\} \cdot (F_k - F_{k-1})$ (8)

ただし、*Y_{FP.U}*: U の安定希ガス FP の収率 [·]

Y_{FP,Pu239}: Pu-239の安定希ガス FPの収率[-] *Y_{FP,Pu241}*: Pu-241の安定希ガス FPの収率[-]

(2) 放出割合の計算

次に、安定希ガス FP の燃料核からの放出割合を計算する。Code-B-2.5.2 においては fissile 核に ZrC 層が被覆されている場合も取り扱うが、ZrC 層は安定希ガス FP を全く閉じ込めない と仮定する。将来、もしも Pu 燃焼高温ガス炉 CFP について(主に ZrC 層について)の知見が得 られたら、改良を検討する。

第kタイムステップにおける安定希ガス FP の燃料核からの放出割合 $F_{R,k}$ は、Code-B-2⁵) と同様に下記の式(9)により計算する。ただし、fissile 核中における安定希ガス FP の還元拡散 係数の計算方法については前章で述べたように、fissile 核の寸法に依存するように改良した。

$$F_{R,k} = F_r + (1 - F_r) \cdot F_{d,k} \tag{9}$$

ただし、*F_r*: 安定希ガス FP の反跳放出割合(下記(10)式で計算) *F_{d,k}*: 第 *k* タイムステップにおける安定希ガス FP の拡散放出割合 (下記(11)式で計算)

安定希ガス FP の反跳放出割合 Frは下記の式(10)により計算される。

$$F_r = 0.75(A/a) - (A/a)^3/16 \tag{10}$$

ただし、A:安定希ガス FP の反跳距離 [m]

a: fissile 核の半径 [m]

 $F_{d,k}$ は、下記(11)式により求められる。(ただし $k \ge 2$)

$$F_{d,k} = (U_k + b_k \cdot \Delta t_k \cdot g_k) / (\sum_{i=1}^k b_i \cdot \Delta t_i)$$
(11)

$$U_{k} = \sum_{i=1}^{k-1} \{ b_{i} \cdot (S_{i} \cdot g_{i} - S_{i+1} \cdot g_{i+1}) / D'_{i} \}$$
(12)

$$S_i = \sum_{j=i}^k D'_j \cdot \Delta t_j \tag{13}$$

$$g_i = 1 - 4 \cdot \left(\frac{S_i}{\pi}\right)^{0.5} + \frac{3 \cdot S_i}{2} \quad \text{for } S_i \le 0.1$$
 (14)

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

ここで、D'j[1/s]は、第 jタイムステップにおける還元拡散係数であり、下記(16)式で表される。

$$D'_{j} = 1.89 \times 10^{-12} / (a^{2}) \cdot \exp\{-1.52 \times 10^{4} / T_{f,j}\}$$
 (16)

なお、 $a = 3 \times 10^{-4}$ [m] (=300 [µm])の時、 D'_{j} は Code-B-2 で用いる値と等しくなる。

また、b_i [%FIMA/s]は、タイムステップ i における燃焼速度であり、下記(17)式で表される。

$$b_i = \{ B_i - B_{i-1} \} / (\tau_i - \tau_{i-1})$$
(17)

(3) 放出された安定希ガス FP の量の計算

最後に、燃料核から放出された安定希ガス FP の量を計算する。

第 *k* タイムステップにおいてバッファ層に放出されている安定希ガス FP の量 *n_{FP,k}* [mol] は、下記(18)式で計算される。

$$n_{FP,k} = S_{FP} \cdot n_{FP,0,k} \cdot F_{R,k} \tag{18}$$

ただし、 S_{FP} :入力データによって指定する係数 [·]

3.3.3 内圧の計算

まず、バッファ層に放出されたガスの、バッファ層内の第i領域における自由体積 V_i [m³] は下記の(19)式で計算される。

$$V_i = (1 - \rho_b / \rho_{b,th}) \cdot V_{b,i} \tag{19}$$

ただし、 ρ_b : バッファ層の密度 [g/cm³]

V_{b,i}: バッファ層内の第*i*領域の体積 [m³] *ρ_{b,th}*: バッファ層の理論密度 [g/cm³]

内圧は、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。即ち、第 *k*タイムステップ における内圧 *P_{in,k}* [MPa]は、下記(20)及び(21)式より求められる。

$$P_{in,k} \times 10^{-6} = n_{k,1} \cdot R \cdot T_{b,k,1} / V_1 = n_{k,2} \cdot R \cdot T_{b,k,2} / V_2 = \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (20)$$

$$n_{k,1}(\tau) + n_{k,2}(\tau) + \cdot \cdot \cdot = n_k$$
(21)

ただし、 $n_{k,i}$: 第 k タイムステップにおいてバッファ層内の第 i 領域に存在するガス原子の量 [mol]

R: 気体定数 [J/K/mol]

 $T_{b.k,i}$: 第kタイムステップにおけるバッファ層内の第i領域の温度 [K]

3.4 応力/歪計算部

3.4.1 はじめに

本章では、Code-B-2.5.2における応力/歪計算の詳細を述べる。

Code-B-2.5.2 における応力/歪計算部では、Code-B-2 と同様に、健全 CFP の IPyC, SiC, OPyC 層に発生する応力/歪を、汎用有限要素法解析コード ABAQUS¹⁴⁾を用いて計算する。健 全 CFP は完全な球として扱う。Code-B-2 からの改良点はあまりない。

計算にあたっては下記の変形が考慮される。

- ▶ 弾性変形
- ▶ 照射クリープ(IPyC 及び OPyC 層) 照射クリープ歪速度は、既存の FIGHT コード及び Code-B-2 と同様、応力の1 乗 に比例すると仮定する。
- ▶ 照射寸法変化(IPyC 及び OPyC 層)
- ▶ 熱膨張

境界条件は下記の通りである。

- ▶ IPyC 層内面の径方向応力が内圧 Pin(前節参照)とつりあう。
- > OPyC 層外面の径方向応力が外圧(入力データ)とつりあう。

応力/歪計算においては、内圧と同様に PyC の照射特性(具体的には照射クリープ係数及び 照射寸法変化)が非常に重要である。Code-B-2.5.2 においては、Code-B-2 と同様に PyC の照射 クリープ係数及び照射寸法変化は文献 11)に基づいて求める。文献 11)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。

この、文献 11)に基づく IPyC/OPyC 層の照射クリープ係数及び照射寸法変化の求め方を、 以下に述べる。

3.4.2 PyC の照射クリープ係数の計算

第 kタイムステップにおける IPyC/OPyC 層の照射クリープ係数

 $K_k \left[\frac{1}{MPa} / (10^{25} \text{ n/m}^2, \text{ E} > 0.18 \text{ [MeV]}) \right]$

は、以下の(22)式で求められる。

$$K_k = S_K \cdot K_{1.9,k} \cdot \{ 1 + (1.9 - \rho_{PyC}) \cdot 2.38 \}$$
(22)

*K*_{1.9,k} [1/MPa/(10²⁵ n/m², E>0.18 [MeV])]は密度 1.9 [g/cm³]の PyC の照射クリープ係数 であり、次頁(23)式で表される。

 $K_{I.9,k} = 2.193 \times 10^{-4} - 4.85 \times 10^{-7} \cdot (T_{PyC,k} + 273.15) + 4.0147 \times 10^{-10} \cdot (T_{PyC,k} + 273.15)^2$ (23)

ただし、 S_K :入力データで定めた係数 [-]

P_{VC}: IPyC/OPyC の密度 [g/cm³]

 $T_{PyC,k}$: 第kタイムステップにおける IPyC/OPyC 層の体積平均温度 [K]

3.4.3 PyCの照射寸法変化速度の計算

(1) 緒言及び全体の流れ

ABAQUSにおいては寸法変化歪速度を体積歪速度に換算して与える必要がある。そこで、 ここでは体積歪速度の算出方法について述べる。

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「3.2 温度計算部」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、
 - μ(ρ): 1373 [K]において高速中性子フルエンス 3.7 x 10²⁵ [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。
 - ν(ρ): 1373 [K]において高速中性子フルエンス 3.7 x 10²⁵ [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 11)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 11)で与えられている上記 c)-f)のもとになるデータ点は極めて荒い。従って、その内 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。

各タイムステップ毎の体積歪速度は、下記 i)-iv)のようにして求める。

- i) 密度 1.96 [g/cm³]における擬等方照射寸法変化・擬径方向照射寸法変化・擬周方 向照射寸法変化を算出する。(下記(2)参照)
- ii) 上記 i)で得た、密度 1.96 [g/cm³]における擬径方向照射寸法変化・擬周方向照射 寸法変化を、実際の密度で補正する。(下記(3)参照)
- iii) 上記 ii)で得た、実際の密度における擬径方向照射寸法変化・擬周方向照射寸法 変化を、照射寸法変化体積歪速度に変換する。(下記(4)参照)
- 以下、i)・iii)各々の段階について具体的に述べる。
- (2) 密度 1.96 [g/cm³]における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「3.4.3 PyCの照射寸法変化速度の計算」中(1)中の c)・e)で与える係数の組

 $a_{m.iso}(T)$, $a_{m.r}(T)$, $a_{m.t}(T)$

を用い、密度 1.96 [g/cm³]における、第 *k* タイムステップにおける擬等方照射寸法変化 *E*_{sw,1.96,iso,p,k}、擬径方向照射寸法変化*E*_{sw,1.96,r,p,k}、擬周方向照射寸法変化*E*_{sw,1.96,t,p,k} は、各々 以下の(24)-(26)式により与えられる。

$$\mathcal{E}_{sw,1.96,iso,p,k} = \sum_{m=1}^{4} a_{m,iso} \left(T_{PyC,k} \right) \cdot \phi_{k}^{m}$$
(24)

$$\mathcal{E}_{sw,1.96,r,p,k} = \sum_{m=1}^{4} a_{m,r} (T_{PyC,k}) \cdot \phi_{k}^{m}$$
(25)

$$\mathcal{E}_{sw,1.96,t,p,k} = \sum_{m=1}^{4} a_{m,t} \left(T_{PyC,k} \right) \cdot \phi_{k}^{m}$$
(26)

ただし、 ϕ_k : 第 kタイムステップにおける高速中性子束[10²⁵n/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(24)-(26)で求める値とは異なる。そこで、(24)-(26)で求める値には「擬(pseudo)」を つけて呼ぶこととする。

(3) 密度 1.96 [g/cm³]における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「3.4.3 PyC の照射寸法変化速度の計算」中(1)中の f)で与える密度補正用係数の組($\mu(\rho)$, $\nu(\rho)$)及び以下の(27)及び(28)式より、IPyC/OPyC の密度における第 k タイム ステップにおける擬径方向照射寸法変化 $\mathcal{E}_{sw,\rho,t,p,k}$ 、擬周方向照射寸法変化 $\mathcal{E}_{sw,\rho,t,p,k}$ が表さ れる。

$$\mathcal{E}_{sw,\rho,r,p,k} = \mu(\rho_{PyC}) \cdot \mathcal{E}_{sw,1.96,iso,p,k} + \nu(\rho_{PyC}) \cdot \{\mathcal{E}_{sw,1.96,r,p,k} - \mathcal{E}_{sw,1.96,iso,p,k}\}$$
(27)

$$\mathcal{E}_{sw,\rho,t,p,k} = \mu(\rho_{PyC}) \cdot \mathcal{E}_{sw,1.96,iso,p,k} + \nu(\rho_{PyC}) \cdot \{\mathcal{E}_{sw,1.96,t,p,k} - \mathcal{E}_{sw,1.96,iso,p,k}\}$$
(28)

(4) 擬径方向照射寸法変化・擬周方向照射寸法変化の照射寸法変化体積歪速度への変換 第 *k* タイムステップにおける径方向及び周方向の照射寸法変化擬体積歪

*E*_{sw, p}, r, v, p, k 及び*E*_{sw, p}, t, v, p, k は、
以下の(29)及び(30)式により表される。

$$\mathcal{E}_{sw,\rho,r,v,p,k} = (1 + \mathcal{E}_{sw,\rho,r,p,k})^3 - 1$$
(29)

$$\mathcal{E}_{sw,\rho,t,v,p,k} = (1 + \mathcal{E}_{sw,\rho,t,p,k})^3 - 1$$
(30)

ここで、第kタイムステップにおける径方向及び周方向の照射寸法変化体積歪速度 $\Upsilon_{sw,\rho,r,v,k}$ [/s]及び $\Upsilon_{sw,\rho,t,v,k}$ [/s]は、 下記(31)及び(32)式により計算される。

$$\Upsilon_{sw,\rho,r,v,k} = (\nabla'_{\tau} \mathcal{E}_{sw,\rho,r,v})_k = (\nabla'_{\tau} \mathcal{E}_{sw,\rho,r,v,p})_k$$
(31)

$$\Upsilon_{sw,\rho,t,v,k} = (\nabla_{\tau}^{\prime} \mathcal{E}_{sw,\rho,t,v})_{k} = (\nabla_{\tau}^{\prime} \mathcal{E}_{sw,\rho,t,v,p})_{k}$$
(32)

ただし、 ∇'_{τ} : 演算子 $\partial / \partial \tau$ (時刻 τ についての偏微分)

 $\mathcal{E}_{sw,\rho,r,v}$: 径方向照射寸法変化体積歪。添字にpを含まないことに注意せよ。

 $\mathcal{E}_{sw,\rho,t,v}$:周方向照射寸法変化体積歪。添字にpを含まないことに注意せよ。

(31),(32)式に(29),(30)式を代入して、

$$\Upsilon_{sw,\rho,r,v,k} = (\nabla'_{\tau} \mathcal{E}_{sw,\rho,r,v,p})_{k} = 3 (1 + \mathcal{E}_{sw,\rho,r,p,k})^{2} \cdot (\nabla'_{\phi} \mathcal{E}_{sw,\rho,r,p})_{k} \cdot (\nabla_{\tau} \phi)_{k}$$
(33)

$$\Upsilon_{sw,\rho,t,v,k} = (\nabla'_{\tau} \mathcal{E}_{sw,\rho,t,v,p})_k = 3 (1 + \mathcal{E}_{sw,\rho,t,p,k})^2 \cdot (\nabla'_{\phi} \mathcal{E}_{sw,\rho,t,p})_k \cdot (\nabla_{\tau} \phi)_k$$
(34)

ただし、 $abla'_{\phi}$: 演算子 $\partial \not = \partial \phi$ (高速中性子束についての偏微分)

 $\nabla'_{\phi} \mathcal{E}_{sw,\rho,t,p}$ 及び $\nabla'_{\phi} \mathcal{E}_{sw,\rho,t,p}$ は、(24)-(28)式より容易に求めることができる。

4. まとめ

Pu 燃焼高温ガス炉とは、Pu を安全に燃やし尽くすための高温ガス炉である。Pu 燃焼高 温ガス炉では、PuO₂-YSZ の微小球に ZrC 層を被覆し、更に SiC-TRISO 被覆を施した、核拡 散抵抗性が高い CFP を用いる計画である。ZrC 層の役割は、酸素ゲッターである。主に、この Pu 燃焼高温ガス炉の CFP にも適用するための現時点で可能な範囲での準備として、高温ガス 炉の燃料である CFP の内圧破損確率評価のための、健全 CFP の被覆層の応力計算用コードシ ステムである Code-B-2 を改良し、Code-B-2.5.2 とした。ただし、計算コードをどのように改 良しても、適切な物性値なしに適切な計算結果を得ることは不可能である。

参考文献

- 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) 沢和弘、角田淳弥、渡辺隆、高温ガス炉運転中の被覆燃料粒子及び核分裂生成物ガス挙動解 析コード, JAERI-Data/Code 99-034, 115p. (1999).
- 3) K. Bongartz, "Status of the Fuel Stress and Failure Rate Calculations at KFA", Juel-1686, Institut fuer Resktorwerkstoffe (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, 10p. (2011).
- 5) 相原純、大橋弘史、沢和弘、橘幸男、SiC-TRISO燃料粒子の応力計算のためのCode-B-2, JAEA-Data/Code 2012-030, 13p. (2013).
- 6) M. Goto, K. Demachi, S. Ueta, et al., "Conceptual Study of a Plutonium Burner High Temperature Gas-cooled Reactor with High Nuclear Proliferation Resistance", Proc. GLOBAL 2015, paper 5426, Paris, France, 20-24 Sep. 2015.
- J. Aihara, S. Ueta, M. Honda, N. Mizuta, M. Goto, Y. Tachibana and K. Okamoto, "Microstructures of ZrC coated kernels for fuel of Pu-burner high temperature gas-cooled reactor in Japan", J. Nucl. Mater. 522, pp. 32-40 (2019).
- 8) 角田淳弥、植田祥平、相原純、柴田大受、沢和弘、高温ガス炉燃料サイクルの技術的成立性の検討(ケーススタディ), JAEA-Technology 2008-007, 23p. (2008).
- 9) J. Aihara, M. Maekawa, S. Ueta, A. Kawasuso and K. Sawa, "Microstructures and Positron Annihilation Spectroscopy of Nearly Stoichiometric ZrC Coating Layers for Advanced High-temperature Gas-Cooled Reactor Fuel", J. Am. Ceram. Soc. 94, pp. 4516-4522 (2011).
- 10) 福田幸朔、小川徹、鹿志村悟、他、高温ガス炉用燃料に関する試験研究, JAERI-M 89-007, 603p. (1989).
- 11) CEGA Corporation, NP-MHTGR Material Models of Pyrocarbon and Pyrolytic Silicon

Carbide, CEGA-002820, Rev. 1, (1993).

- 12) G. K. Miller, D. A. Petti, D. J. Varacalle Jr., J. T. Maki, "Statistical approach and benchmarking for modeling of multi-dimensional behavior in TRISO-coated fuel particles", J. Nucl. Mater. 317, pp. 69-82 (2003).
- 13) 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).
- 14) ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.7, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1999).



Fig. 1 Structure of coated fuel particles, (a) of HTTR, (b) of Pu-burner HTGR.

付録 UO2 と組成が大きく異なる fissile 核を扱う場合に入力すべき fissile 核の密度

一般に、時刻 τ [s]における核分裂数 $F(\tau)$ [mol]は、下記(付-1)式で表される。

$$F(\tau) = 0.01 \cdot B(\tau) \cdot (V_f \cdot \rho_f / W_f) \tag{(d-1)}$$

ただし、 $B(\tau)$:時刻 τ [s]における燃焼度[%FIMA]

 V_f : fissile 核の体積[m³] ρ_f : fissile 核の密度[t/m³] W_f : 単位モルの核分裂性物質あたりの fissile 核の質量[t/mol]

一方、Code-B-2.5.2 では、F(τ)は下記(付・2)式で計算される。(本編中(3)式参照)

$$F(\tau) = 0.01 \cdot B(\tau) \cdot (V_f \cdot \rho'_f / W_{f,UO2}) \tag{(d-2)}$$

ただし、 ρ_{f}^{2} : fissile 核の密度として入力した値 [t/m³] $W_{f,UO2}$: 単位モルの U あたりの UO₂の質量 = 270 [t/mol]

従って、

$$F(\tau) = 0.01 \cdot B(\tau) \cdot (V_f \cdot \rho'_f / W_{fUO2}) = 0.01 \cdot B(\tau) \cdot (V_f \cdot \rho_f / W_f)$$

$$(\ddagger 3)$$

よって、

$$\rho'_{f} = (W_{fUO2} \neq W_{f}) \cdot \rho_{f} \tag{(f-4)}$$

である。

次に、CFP 中の温度分布を求めるために、燃焼度増加速度 1 [%FIMA/s]に対する fissile 核の局所的な発熱密度 *H* [W/cm³]を求める。

まず、核分裂で発生するエネルギーのうち、fissile 核の局所的な発熱に寄与するのは、核 分裂生成物(FP)の運動エネルギーのみであると仮定する。

fissile 核中の核分裂性物質の数 Z[個]は、下記(付-5)式で求められる。

$$Z = V_f \cdot \rho_f \cdot N_A / W_f \tag{(d-5)}$$

ただし、 N_A : アボガドロ数 [個/mol]

- 20 -

従って、核分裂 1回あたり発生するエネルギーのうち、FPの運動エネルギーの平均値を E_{FP} [MeV]とすると、全部の核分裂性物質が核分裂した場合、fissile 核の局所的な発熱に寄与 するエネルギーは、

 $Z \cdot E_{FP} \cdot 1 \times 10^{6} \cdot C_{e} [J] = V_{f} \cdot \rho_{f} \cdot N_{A} / W_{f} \cdot E_{FP} \cdot 1 \times 10^{6} \cdot C_{e} [J]$

である。ただし、 C_e [C/e]は電荷素量。

よって、燃焼度1[%FIMA]あたり、fissile核の発熱に寄与するエネルギーは、fissile核単位体積あたり

$$0.01 \cdot \rho_f \cdot N_A \swarrow W_f \cdot E_{FP} \cdot 1 \times 10^6 \cdot C_e \, [\text{J/m}^3] \\= 0.01 \cdot \rho_f \cdot N_A \swarrow W_f \cdot E_{FP} \cdot C_e \, [\text{J/cm}^3]$$

である。従って、(付・4)式より、燃焼速度1[%FIMA/s]の場合の、fissile 核中の発熱 *H*[W/cm³] は、下記(付・6)式で表される。

$$H = 0.01 \cdot \rho_f \cdot N_A / W_f \cdot E_{FP} \cdot C_e$$

= 0.01 \cdot \rho'_f \cdot N_A / W_{fUO2} \cdot E_{FP} \cdot C_e (\(\phi\)-6)

なお、

- ▶ 核分裂数(及び発熱)が正しく計算されるように、fissile 核の密度ではなく体積、即ち fissile 核の半径として、実際と異なる値を入力する方法も考えられる。しかし、fissile 核の半径を含む CFP の寸法は、核分裂数(及び発熱)の計算のみならず、様々な事柄 の計算に関わる。従って、CFP の寸法としては実際と異なる値を入力してはならな い。
- ▶ Table 付-1 に、核分裂 1 回あたりに放出されるエネルギーを示す^{付-1, 付-2)}。

	Total energy [MeV]	Kinetic energy of fission products [MeV]
U-235	202.53	169.12
Pu-239	207.02	175.78
Pu-241	210.73	175.36

Table 付-1 Released energies per fission ^{付-1, 付-2)}

参考文献:

- 付-1) 深谷裕司、植田祥平、後藤実、島川聡司:"高温ガス炉設計のための核種生成消滅評価法の研究"、JAEA-Research 2013-035 (2013), 84p.
- 付·2) R. Sher, C. Beck: "Fission-Energy Release for 16 Fissioning Nuclides", EPRI-NP-1771 Standford Univ., (1981).

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本ì	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 是 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	t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 租立单位	
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	乗数	名称	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		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単位しの粉結的な間径は
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						
名称					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	/系	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	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
/3	Ц		9			(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$