JAEA-Technology
2018-002
DOI:10.11484/jaea-technology-2018-002

軽微なプログラム変更を施した FORNAX-AコードとHTFPコードの比較

Comparison between HTFP Code and Minory Changed FORNAX-A Code

相原 純　植田 祥平　後藤 実　稲葉 良知
柴田 大受　大橋 弘史

Jun AIHARA, Shohei UETA, Minoru GOTO, Yoshitomo INABA
Taiju SHIBATA and Hirofumi OHASHI

原子力科学研究部門
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
Sector of Nuclear Science Research

June 2018
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, 2018

JAEA-Technology 2018-002

軽微なプログラム変更を施した FORNAX-A コードと HTFP コードの比較

日本原子力研究開発機構　原子力科学研究部門
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、後藤　実、稲葉　良知、柴田　大受、大橋　弘史

（2018 年 3 月 28 日　受理）

HTFP コードは、高温ガス炉(HTGR)の核分裂停止後の核分裂生成物(FP)の燃料棒からの追加放出量を計算するコードである。基礎式は異なるが、ピン・イン・ブロック型高温ガス炉の燃料棒からの FP 放出量計算コード FORNAX-A コードも HTFP コードと同様の計算が可能である。そこで、本報告において、この FORNAX-A コードに必要に応じて軽微な変更を施した物を用い、HTFP コードとの Cs の放出挙動に関する結果の比較を行った。軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算結果から評価した被覆燃料粒子(CFP)からの Cs-134 の放出定数は、HTFP コードにおけるデフォルト値とはかなり異なることがわかった。

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

JAEA-Technology 2018-002

Comparison between HTFP Code and Minory Changed FORNAX-A Code

Jun AIHARA, Shohei UETA, Minoru GOTO, Yoshitomo INABA, Taiju SHIBATA
and Hirofumi OHASHI

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

(Received March 28, 2018)

HTFP code is code for calculation of additional release amount of fission product (FP) from fuel rod in high temperature gas-cooled reactor (HTGR) after stop of fission. Minory changed FORNAX-A code also can calculate that, however, basic equations are different from those of HTFP code. Therefore, release behavior of Cs in HTFP code was compared with that calculated with minory changed FORNAX-A code in this report. From comparison, it was found that release constants of Cs evaluated with minory modified FORNAX-A code are rather different from default values for HTFP code.

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

目　次

1 序論 ---------- 1
1.1 はじめに ---------- 1
1.2 HTFP コードの概要 ---------- 1
1.3 軽微な変更を施した FORNAX-A コードの概要 ---------- 2
1.4 本研究の目的 ---------- 2
2 軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算の条件及び方法 ---------- 4
2.1 はじめに ---------- 4
2.2 計算条件 ---------- 4
2.2.1 崩壊系列データ ---------- 4
2.2.2 照射条件・照射後加熱条件 ---------- 4
2.2.3 温度分布の取扱 ---------- 4
2.2.4 燃料の仕様 ---------- 5
2.2.5 破損被覆燃料粒子の取扱 ---------- 5
2.2.6 拡散係数 ---------- 5
2.2.7 その他 ---------- 5
2.3 計算方法 ---------- 6
3 燃料領域からの Cs の放出 ---------- 7
3.1 はじめに ---------- 7
3.2 計算結果の解析法 ---------- 7
3.2.1 はじめに ---------- 7
3.2.2 HTFP コードにおける基礎式 ---------- 7
3.2.3 計算結果の解析法 ---------- 8
3.3 解析結果 ---------- 9
4 被覆燃料粒子からの Cs の放出(その 1):健全 100%及び貫通破損 100%の場合 ---------- 10
4.1 はじめに ---------- 10
4.2 計算結果の解析法 ---------- 10
4.3 解析結果 ---------- 11
4.3.1 放出挙動 ---------- 11
4.3.2 放出定数 ---------- 11
5 被覆燃料粒子からの Cs の放出(その 2):CFP の一部が貫通破損している場合 ---------- 13
5.1 はじめに ---------- 13
5.2 解析結果 ---------- 13
5.2.1 放出挙動 ---------- 13
5.2.2 被覆燃料粒子から放出され燃料コンパクト中に存在する Cs-134 の割合 ---------- 13
5.2.3 放出定数 ---------- 14

6 まとめ ---------- 15
7 結論 ---------- 16

謝辞 ---------- 16

参考文献 ---------- 17

付録 A 計算例(1) ---------- 30
付録 B 計算例(2) ---------- 51

Contents

1 Introduction ---------- 1
1.1 Forward ---------- 1
1.2 Outline of HTFP code ---------- 1
1.3 Outline of minory changed FORNAX-A code ---------- 2
1.4 Objective ---------- 2
2 Conditions and method of calculation with minory changed FORNAX-A code ---------- 4
2.1 Forward ---------- 4
2.2 Calculation conditions ---------- 4
2.2.1 Data on decay chain ---------- 4
2.2.2 Conditions of irradiation and post-irradiation heating ---------- 4
2.2.3 Treatment of temperature distribution ---------- 4
2.2.4 Specifications of fuel ---------- 5
2.2.5 Treatment of failed coated fuel particles ---------- 5
2.2.6 Diffusion coefficients ---------- 5
2.2.7 Others on calculation conditions ---------- 5
2.3 Calculation method ---------- 6
3 Release of Cs from fuel region ---------- 7
3.1 Forward ---------- 7
3.2 Method of analysis of calculation results ---------- 7
3.2.1 Forward ---------- 7
3.2.2 Basic equations of HTFP code ---------- 7
3.2.3 Method of analysis of calculation results ---------- 8
3.3 Results ---------- 9
4 Release of Cs from coated fuel particles (1): Failure fraction is 0 or 100 % ---------- 10
4.1 Forward ---------- 10
4.2 Method of analysis of calculation results ---------- 10
4.3 Results ---------- 11
4.3.1 Release behavior ---------- 11
4.3.2 Release constants ---------- 11
5 Release of Cs from coated fuel particles (2): Failure fraction is neither 0 nor 100 % ---------- 13
5.1 Forward ---------- 13
5.2 Results ---------- 13
5.2.1 Release behavior ---------- 13
5.2.2 Fraction of Cs-134 released from coated fuel particles and existing in fuel compact ---------- 13

5.2.3 Release constants ---------- 14
6 Summary ---------- 15
7 Conclusions ---------- 16

Acknowledgement ---------- 16

References ---------- 17

Appendix A Examples of calculation (1) ---------- 30
Appendix B Examples of calculation (2) ---------- 51

1 序論

1.1 はじめに

高温ガス炉(High Temperature Gas-cooled Reactor: HTGR)は、燃料にセラミックスを被覆材とした高耐熱性の被覆燃料粒子(Coated Fuel Particle: CFP)、炉内構造物に黒鉛、冷却材にヘリウムガスを用い、1000℃近い高温の熱を炉外に取り出すことが可能な原子炉である。1000℃近い高温により、高効率発電、水素製造等の熱の多目的利用が可能である。また、炉心の熱容量が大きく、かつ出力密度が低いため、冷却能力の喪失等の事故に対しても炉心の温度上昇が緩慢であり、強制冷却なしで炉心を冷却できる[1)]ことから安全性が高い。日本原子力研究開発機構(Japan Atomic Energy Agency: JAEA)は我が国唯一の HTGR である高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor: HTTR)[2)]を有しており、2004 年に世界で初めて 950℃の高温の冷却材を原子炉圧力容器の外に取り出すことに成功した[3)]。

HTGR の CFP においては、核分裂生成物(FP)の閉じ込め機能を担う被覆層が破損した CFP から 1 次冷却材に FP が放出されるが、健全な CFP からも被覆層中を拡散した FP が極微量放出される。これら(健全 CFP 及び破損した CFP 両方からの FP 放出)は、通常運転時にも起こり得るものある。なお、炉心全体からみると、装荷されている CFP のうち極わずかではあるが製造初期から破損している物があり、かつ、運転が進むにつれて通常運転時にも追加破損が起こり得る。

HTGR の安全評価のためには FP の放出量の計算が必要である。HTFP コード[4)]は、HTGR の核分裂停止後の FP の燃料棒からの追加放出量(通常運転時に既に放出されていた FP の量は含まない、核分裂停止後に放出される FP のみの量)を計算するための計算コードである。一方、著者らは、解析上の制約があるが、実際の FP 輸送の物理現象をより良く近似するために FORNAX-A コード[5)]を開発した。本稿において、軽微な変更を施した FORNAX-A コードの計算結果と HTFP コードの計算結果を比較評価する。

以下、HTFP コード及び軽微な変更を施した FORNAX-A コードの概要を述べ、それらを踏まえて本研究の目的を具体的に述べる。

1.2 HTFP コードの概要

HTFP コード[4)]は、FP の燃料棒からの HTGR の核分裂停止後の追加放出量を計算するコードである。核分裂停止前の FP 放出量の計算は行えない。

HTFP コードにおいては、FP の放出量計算の基礎式は「燃料領域(=CFP を含む燃料コンパクト)からの FP の放出速度は燃料領域中に存在する FP 量に比例する」という仮定に基づいており、この比例定数(温度依存)を計算するためのパラメータを、健全 CFP 及び破損 CFP 各々について、各元素ごとに入力データとして設定する。このパラメータのデフォルト値としては過去に行われた照射後加熱試験に基づく値が使用されるが、この値は CFP の仕様及び照射条件には依存しない。また、代表的な FP である Cs については、健全 CFP でも破損 CFP でも上記のデフォルト値として同じ値を用いている。

1.3 軽微な変更を施した FORNAX-A コードの概要

FORNAX-A コード[5]は通常運転時及び核分裂停止後の燃料棒中の FP の輸送計算を行うコードであり、HTFP コードと同様、HTGR の核分裂停止後の核分裂生 FP の燃料棒からの追加放出量の計算が可能である。

FORNAX-A コードにおける FP 輸送の基礎式は Fick の法則に基づいており、拡散係数(温度依存)を計算するためのパラメータを各領域(燃料核、バッファ層、IPyC/OPyC 層、SiC 層、燃料コンパクト、黒鉛スリーブ)中の各元素ごとに入力データとして設定する。CFP の仕様や照射条件の影響を反映可能である。CFP が健全か、あるいは破損しているかも考慮することができる(Fig. 1 参照)。ただし、各領域において信頼できる拡散係数がすべて存在する、もしくは、実用的に問題ない値を設定することが可能な元素についてにしか計算することができない。

また、FORNAX-A コード[5]においては、FP 輸送の方程式は「CFP 系」と「燃料棒系」の 2 つの系に分けて解かれる。CFP 系の計算結果は燃料棒系の計算結果に対して独立である。CFP から放出された FP は、燃料棒系において FP の生成源の一部として取り扱われる。(なお、燃料棒系におけるその他の FP の生成源としては、母材中の汚染ウランの核分裂が存在する。) 燃料棒系において「燃料コンパクト中の FP 濃度」には CFP 内に保持されている FP の量は考慮されない。

この FORNAX-A コードに以下に示す軽微な変更を施すことにより、従来の FORNAX-A コードでは取り扱えない以下のような場合を取り扱うことができるようになった[6]。

- 拡散係数が 1 組の定数である活性化エネルギーと頻度因子で表わせない場合。
  例：活性化エネルギーand/or 頻度因子が時間や温度の関数である場合。
- 球状の燃料要素(燃料ペブル)
- CFP の温度が燃料要素の中で分布を持つ場合。
  ただし、1 つの CFP の中の温度分布は取り扱えない。1 つの CFP 中の温度は一様である。

ただし、軽微な変更を施した FORNAX-A[6] コードの基礎式及び数値解法は本来の FORNAX-A コードと全く同じである。本報告においては、解析の対象が本来の FORNAX-A コードでは対応不可能なため、軽微な変更を施した FORNAX-A コードを用いて計算を行った。

1.4 本研究の目的

CFP の被覆層は FP の閉じ込め機能を担うものであるため、FP の閉じ込め性能は被覆層の厚さ、健全性に依存する。そこで、本報告においては、具体的な燃料仕様・照射条件等を仮定し、軽微な変更を施した FORNAX-A コードを用いて照射中・照射後加熱中における Cs の放出量を計算する。その結果に基づき、以下(1)及び(2)を行う。

(1) まず、HTFP コードにおける「(核分裂停止後の)燃料領域からの核種 i の放出速度は、燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という仮定[4]の妥当性について確認する。

(2) 上記(1)で「妥当である」とされた場合、次に、軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算結果に基づき、以下 1)及び 2)を行う。

1) HTFP コードにおける「放出定数」に相当する具体的な値を評価し、それを HTFP コードにおけるデフォルト値[4]と比較評価する。
2) CFP の一部が破損している場合の HTFP コードにおける「放出定数」の取り扱い[4]の妥当性について確認する。

軽微な変更を施した FORNAX-A[6] コードにおいては、上述のように、信頼できる拡散係数が存在、または妥当な値を設定可能である元素についてしか計算できないが、Cs については参考文献 7)中の計算に使用された拡散係数を採用する。参考文献 7)において FORNAX-A コードと同様、Fick の法則に基づき計算した放出量が実験値と良く一致したと報告されている。

2 軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算の条件及び方法

2.1 はじめに

本章では、軽微な変更を施した FORNAX-A コード[6]による Cs の放出量の計算の条件及び方法について述べる。

HTFP コードとの比較のためには、FORNAX-A コードの計算結果を適宜解析する必要があるが、その方法については次章以下で必要が生じた時点で述べる。

2.2 計算条件

2.2.1 崩壊系列データ

Table 1 に計算条件として選択した崩壊系列のデータを示す。計算結果の解析を容易にするため、HTFP コードのデフォルトとして設定されている Cs を含む崩壊系列データ[4]の中から Cs-134 のみから成る崩壊系列を選択した。

2.2.2 照射条件・照射後加熱条件

(1) 概要

730 日(63072000 [s])連続運転後、一定温度で 4000 [h](1.44×10^7 [s])まで照射後加熱を行うケースを設定した。なお、ここで求める値は「Cs の事故時放出量」ではなく「様々な温度における Cs の放出定数」である。

(2) Cs-134 発生速度履歴

Fig. 2 に設定した Cs-134 の発生速度(規格化した値)の履歴を示す。後述のように、燃料棒の表面における境界条件として「濃度=0」と設定したため、Cs-134 の発生速度の絶対値は、本報告における計算結果には影響しない(参考文献 6)付録 C 中 C-5 章参照)。なお、この Cs-134 発生速度履歴は仮想的なものである。

(3) 温度履歴

下記 1)及び 2)の通りとした。これら照射条件・照射後加熱条件に基づき、計算に用いる温度をどのように設定したかについては下記 2.2.3 小節で述べる。

1) 照射中

Fig. 3 に燃料コンパクト及び黒鉛スリーブの内外面のノミナル及び工学的不確定性を考慮した温度の履歴を示す。この温度履歴は上記「(2) Cs-134 発生速度履歴」と同様に仮想的なものであるが、HTGR 燃料のシステマティックランダム温度の炉心内最高値及びそれに対応するノミナル温度の履歴を想定したものである。

2) 照射後加熱中

照射後加熱中の燃料棒の温度は一定かつ一様であるとした。

2.2.3 温度分布の取扱

本報告における CFP 及び燃料棒中の温度分布の取扱を Table 2 に示す。本報告においては、燃料棒の温度分布及び CFP の燃料棒中の温度分布を考慮した。具体的な温度分布の計算方法

については参考文献 6)付録 B を参照のこと。

2.2.4 燃料の仕様

計算に用いた燃料の仕様を Table 3 に示す。これは、小型高温ガス炉システム HTR50S の第 I 期第 1 段階炉心における CFP 及び燃料棒の仕様 [8]に基づいている。

2.2.5 破損被覆燃料粒子の取扱

FORNAX-A コードにおいては、「破損 CFP」として「SiC 層破損 CFP」と「貫通破損 CFP(=裸の燃料核)」の 2 種類が設定されている [5]。一方、HTFP コードにおいて想定されている CFP の破損形態は不明である [4]。そこで、本報告においては「破損 CFP」=「貫通破損 CFP」であると仮定する。

2.2.6 拡散係数

計算に使用した拡散係数計算用の因子を Table 4 に示す。拡散係数としては極力 HTFP コードにおけるデフォルト値を用いることとした。しかしながら、以下に述べるように、軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算に必要な拡散係数計算用の因子のほとんどが HTFP コードでは使用されない。

- 黒鉛スリーブ中
  HTFP コードにおけるデフォルト値 [4]を用いた。
- 黒鉛スリーブ中以外
  HTFP コード [4]においては黒鉛スリーブ以外における拡散係数は用いられない。
  そこで、参考文献 7)で使用されている値を用いることとした。

2.2.7 その他

計算に使用したその他の因子・条件を Table 5 に示す。拡散係数と同様、その他の計算条件についても極力 HTFP コードにおけるデフォルト値を用いることとした。

(1) 反跳距離

核分裂により生成するエネルギーの一部は運動エネルギーとして FP に与えられる。燃料核の表面付近において核分裂が起こった場合、その核分裂により生成した直後の FP は、運動エネルギーを熱エネルギー及び原子の弾き出しのエネルギーに変換しつつ燃料核中を移動する。このような FP の輸送のモードを反跳と呼ぶ。それらの FP の一部は燃料核表面に達しても完全には止まることはなく、バッファ層中に飛び出す(=放出される)。このような FP の放出モードを反跳放出と呼ぶ。

FORNAX-A コードにおいては「反跳距離」というパラメータを入力データとして設定し、「燃料核表面から反跳距離より近い領域での核分裂により生成した FP は、すべてバッファ層に反跳放出される」と仮定している [5]。

本報告において反跳距離は 0 μm とする。なお、HTFP コードにおいては反跳距離は使用されない [4]。

(2) 障壁定数

障壁定数とは、ある境界面の外側(冷却材に近い側)の FP 濃度の、内側(冷却材から遠い側)のそれに対する比である。

1) CFP の各領域境界

本報告においては 1 とする。なお、HTFP コードにおいては使用されない [4)]。

2) 燃料コンパクト/黒鉛スリーブ境界

本章においては HTFP コードにおけるデフォルト値 [4)]に準ずるとした。即ち、

黒鉛スリーブ内表面における FP 濃度／燃料コンパクト外表面における FP 濃度= 0.1

とした。

ただし、上記「1.2 HTFP コードの概要」で述べたように、HTFP コードにおいては「燃料領域」とは「CFP を含む燃料コンパクト」であり、「燃料コンパクトにおける FP 濃度」とは、「CFP 内に保持されたままの FP」と「CFP から放出され、燃料コンパクト母材中に存在する FP」との両方を併せた濃度である。一方、上記「1.3 軽微な変更を施した FORNAX-A コードの概要」で述べたように、(軽微な変更を施した)FORNAX-A コードの場合、燃料棒系において「燃料コンパクト中の FP」には「CFP 中に保持されている FP」は含まれない。従って、FORNAX-A コードにおいては HTFP コードと同じ意味を持つ「燃料コンパクト/黒鉛スリーブ境界における障壁定数」を設定することは不可能である。なお、実際の黒鉛スリーブ内表面の FP 濃度と燃料コンパクト外表面における FP 濃度の関係は、HTFP コードにおける取り扱いよりも(軽微な変更を施した)FORNAX-A コードにおけるそれの方が近いものと考えられる。

(3) 境界条件

1) CFP 表面

本報告においては「CFP 表面において濃度 = 0」とした。なお、HTFP コードにおいては使用されない [4)]。

2) 黒鉛スリーブ外表面

本報告においては HTFP コードにおける境界条件 [4)]を使用した。即ち、「黒鉛スリーブ外表面において濃度 = 0」である。

2.3 計算方法

FORNAX-A コードに燃料コンパクト中における CFP の温度分布を取り扱えるように軽微な変更を施した(参考文献 6)中 4.2 節参照)。この軽微な変更を施した FOTNAX-A を用い、健全 CFP100%の場合と貫通破損 CFP100%の場合について、様々な照射温度における燃料棒中の各領域(CFP, CFP を含まない燃料コンパクト, 黒鉛スリーブ, 冷却材)における Cs-134 の存在量の履歴を得た。

本報告においては、Table 4 に示したように「黒鉛スリーブ外表面において FP 濃度 = 0」という境界条件を採用したため、一部の CFP が貫通破損している場合の Cs-134 の存在量は、健全 CFP100%の場合と(貫通)破損 CFP100%の場合の存在量の荷重平均である。(参考文献 6)付録 C 中 C-5 章参照)

3 燃料領域からの Cs の放出

3.1 はじめに

本節では、軽微な変更を施した FORNAX-A コードを用いた計算結果より「燃料領域(=CFP を含む燃料コンパクト)」からの Cs-134 の放出挙動を調べる。そして、「(核分裂停止後の)燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)からの核種 i の放出速度は、燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という HTFP コードにおける仮定[4)]の妥当性について調べる。

なお、上記の検討は健全 CFP が 100%または貫通破損 CFP が 100%の場合に分けて行う。第 1 章で述べたように、HTFP コードにおいては FP の放出定数を計算するためのパラメータを「健全」と「破損」各々について設定するからである。(ただし、第 1 章で述べたように、Cs についてのパラメータのデフォルト値は「健全」でも「破損」でも同じ値である。)

3.2 計算結果の解析法

3.2.1 はじめに

本小節ではまず、HTFP コードにおける「燃料領域」からの FP の放出の基礎式について簡単に説明する。次に、その基礎式に基づき、Cs-134 の放出挙動を調べるために軽微な変更を施した FORNAX-A コードの計算結果についての解析方法を述べる。

3.2.2 HTFP コードにおける基礎式

HTFP コードにおいては、燃料棒は「燃料領域(=CFP を含む燃料コンパクト)」「黒鉛領域(=黒鉛スリーブ)」「冷却材」の 3 領域に分かれる[4)]。

そして、「燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)からの核種 i の放出速度は、燃料領域における核種 i の存在量に比例する」と仮定されている。即ち、照射後加熱時間 t [s]における燃料領域における核種 i の存在量 $N_{fi}(t)$ [個]は、核種 i が親核種を持たない場合、下記(1)式で表わされる[4)]。

$$\mathrm{d}N_{fi}(t)/\mathrm{d}t = -\{\lambda_{id} + \lambda_{fire}(T(t)+273.15)\}N_{fi}(t) \tag{1}$$

ただし、λ_{id} [/s]：核種 i の崩壊定数

T [℃]：温度

λ_{fire} [/s]：燃料領域からの核種 i の放出定数。

また、λ_{fire} [/s]は下記(2)式で表わされる。

$$\lambda_{fire}(T(t)) = (1-FF)\lambda_{pire,IN}(T(t)+273.15)+FF\lambda_{pire,FA}(T(t)+273.15) \tag{2}$$

ただし、FF: 破損割合

$\lambda_{pire,IN}$ [/s]：健全 CFP からの核種 i の放出定数

$\lambda_{pire,FA}$ [/s]：破損 CFP からの核種 i の放出定数

3.2.3 計算結果の解析法

燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)からの核種 i の放出速度がその時点での燃料領域における核種 i の存在量に比例し、核種 i が親核種を持たず、照射後加熱温度 T が一定の場合、(1)式を解いて、$N_{fi}(t)$は下記(3)(4)式で表わされる。

$$N_{fi}(t) = N_{fi0} \exp\{-(\lambda_{id} + \lambda_{fire,T})t\} \tag{3}$$

$$\lambda_{fire,T} = \lambda_{fire}(T+273.15) \tag{4}$$

ただし、N_{i0} [個]：照射後加熱開始時の燃料領域における核種 i の存在量

ここで、パラメータ $Nd_{fi,T}(t)$を下記(5)式で定義する。

$$Nd_{fi,T}(t) = \ln\{N_{fi}(t) \exp(\lambda_{id} \cdot t)\} \tag{5}$$

$N_{fi}(t)$が上記(3)式で表わされるならば、

$$Nd_{fi,T}(t) = \ln(N_{fi0}) - \lambda_{fire,T}\, t \tag{6}$$

である。

従って、核種 i が親核種を持たず、照射後加熱温度 T が一定の場合、燃料領域内の核種 i の存在量から上記(5)式で定義されるパラメータ $Nd_{fi,T}(t)$を計算し、t に対してプロットした物が直線に近ければ、$N_{fi}(t)$は上記(3)式でよく近似できる、即ち、HTFP コードにおける「燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)からの核種 i の放出速度は、燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という仮定は妥当である。

なお、様々な温度におけるパラメータ $Nd_{fi,T}(t)$の直線性を比較しやすいように、燃料領域からの放出挙動についての議論においては $Nd_{fi,T}(t)$ではなく下記(7)式で定義されるパラメータ $Ndd_{fi,T}(t)$を t に対してプロットした物を用いることとする。

$$Ndd_{fi,T}(t) = \{Nd_{fi}(0) - Nd_{fi,T}(t)\} / \{Nd_{fi,T}(1.44\times10^7) - Nd_{fi}(0)\} \tag{7}$$

3.3 解析結果

健全 CFP100%の場合と貫通破損 CFP100%の場合各々について、パラメータ $Ndd_{fCs\text{-}134,T}$ の履歴を Fig. 4 に示す。照射後加熱温度が非常に高い場合、パラメータ $Ndd_{fCs\text{-}134,T}$ は直線に近いが、照射後加熱温度約 1400℃では直線で近似できるとは言い難い。

従って、Cs-134 の燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)からの放出挙動においては、「核種 i の放出速度は燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という HTFP コードにおける仮定[4)]は妥当ではない。

4 被覆燃料粒子からの Cs の放出(その 1)：健全 100%及び貫通破損 100%の場合

4.1 はじめに

前章において Cs-134 の放出については「核種 i の放出速度は燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という HTFP コードにおける仮定 [4]は「妥当ではない」という結論を得た。本節では、前章において検討した燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)についてではなく、CFP からの放出について調べる。もし「CFP からの核種 i の放出速度は CFP における核種 i の存在量に比例する」と言えるなら、CFP から放出されて燃料コンパクト中に存在する核種 i は既に燃料領域から放出されて「黒鉛領域(黒鉛スリーブ)」に存在するとみなせば、保守的な評価を行うことができる。なぜなら、FP が燃料コンパクト中に存在するよりも黒鉛スリーブに存在する方が保守的な(冷却材に放出されやすい)状態だからである。

もし「CFP からの Cs-134 の放出速度は CFP における Cs-134 の存在量に比例する」と言えるなら、次に、HTFP コードにおいてデフォルト [4]として設定されている Cs の放出定数の妥当性について調べる。(2)式で述べたように、HTFP コードにおいて「燃料領域からの放出定数」のデフォルト値として使用している値は、CFP からの放出定数である。

上記の検討は、前章と同様に健全 CFP が 100%または貫通破損 CFP が 100%の場合に分けて行う。なお、本章における「CFP からの放出量」とは、1 個の CFP からの放出量ではなく、燃料コンパクトに存在する様々な照射温度履歴を持つすべての CFP からの放出量を指す。

4.2 計算結果の解析法

CFP からの核種 i の放出速度が CFP 中における核種 i の存在量に比例し、核種 i が親核種を持たず、照射後加熱温度 T が一定の場合、CFP 中の核種 i の存在量 $N_{pi}(t)$は下記(8)式で表わされる。

$$N_{pi}(t) = N_{pi0} \exp\{-(\lambda_{id} + \lambda_{pire,T}))t\} \tag{8}$$

ただし、N_{pi0} [個]：照射後加熱開始時の CFP 中の核種 i の存在量

$\lambda_{pire,T}$ [/s]：温度 T [℃]における CFP からの放出定数。

ここで、パラメータ $Nd_{pi,T}(t)$を下記(9)式で定義する。

$$Nd_{pi,T}(t) = \ln\{N_{pi}(t) \exp(\lambda_{id} \cdot t)\} \tag{9}$$

$N_{pi}(t)$が上記(8)式で表わされるならば、

$$Nd_{pi,T}(t) = \ln(N_{pi0}) - \lambda_{pire,T}\, t \tag{10}$$

である。

従って、CFP 中の核種 i の存在量から上記(10)式で定義されるパラメータ $Nd_{pi,T}(t)$を計算し、t に対してプロットした物が直線に近ければ、$N_{pi}(t)$は上記(8)式でよく近似できる、即ち、「CFP からの核種 i の放出速度は、CFP 中における核種 i の存在量に比例する」と仮定すれば、その仮定は妥当である。

なお、様々な温度におけるパラメータ $Nd_{pi,T}(t)$の直線性を比較しやすいように、CFP からの放出挙動についての議論においては $Nd_{pi,T}(t)$ではなく下記(11)式で定義されるパラメータ $Ndd_{pi,T}(t)$を t に対してプロットした物を用いることとする。

$$Ndd_{pi,T}(t) = \{ Nd_{pi}(0) - Nd_{pi,T}(t) \} / \{ Nd_{pi,T}(1.44\times10^{7}) - Nd_{pi}(0) \} \qquad (11)$$

もし「CFP からの核種 i の放出速度は、CFP 中における核種 i の存在量に比例する」と仮定し、その仮定が妥当である場合、核種 i が親核種を持たず、照射後一定の温度 T [℃]に保たれるならば、以下のようにして温度 T [℃]における核種 i の CFP からの放出定数 $\lambda_{pire,T}$[/s]を求めることができる。

①CFP 中の核種 i の存在量から上記(9)式で定義されるパラメータ $Nd_{pi,T}(t)$を計算する。

②$Nd_{pi,T}(t)$を t に対してプロットする。

③このプロットを直線で近似し、その傾きを求める。

④この傾きが－ $\lambda_{pire,T}$である。

4.3 解析結果

4.3.1 放出挙動

健全 CFP100%の場合と貫通破損 CFP100%の場合各々について、パラメータ $Ndd_{pCs\text{-}134,T}$ の履歴を Fig. 5 に示す。いずれの場合においても $Ndd_{pCs\text{-}134,T}$は直線に近い。

従って、ここで計算した範囲では、健全 CFP100%または貫通破損 CFP100%の場合、「Cs-134 の CFP からの放出速度は CFP における Cs-134 の存在量に比例する」と仮定すれば、その仮定は妥当である。

従って、健全 CFP100%または貫通破損 CFP100%の場合、照射後加熱開始時に CFP から放出されていて燃料コンパクト中に存在していた Cs-134 は「黒鉛領域(黒鉛スリーブ)」に存在するとみなせば、HTFP コードを用いて保守的な評価を行うことができる。

4.3.2 放出定数

健全 CFP100%の場合と貫通破損 CFP100%の場合各々について評価した CFP からの放出定数 $\lambda_{pCs\text{-}134re,T}$ を絶対温度の逆数に対してプロットしたものを、HTFP コードにおけるデフォルト値[4)]とともに Fig. 6 に示す。

Fig. 6 に示すように、CFP からの放出定数は、HTFP コードにおけるデフォルト値[4)]と本章において評価したもので以下のように大きく異なる。

- プロットの形状
  - ✓ HTFP コードにおけるデフォルト値は、同じ温度に対して健全 CFP でも破損 CFP でも同じ値であるが、本章で評価したものは健全 CFP と貫通破損 CFP で同じ温度において 1 桁以上異なる。
  - ✓ HTFP コードにおけるデフォルト値のプロットは、傾きが異なりかつ接続していない 2 本の直線から成るが、本章で評価したものは健全 CFP100%と貫通破損 CFP100%の場合各々について 1 本の直線でよく近似される。
- 値
  - ✓ 破損 CFP の場合については HTFP コードにおけるデフォルト値は、本章で評価を行った範囲(1000～約 1850℃)において本章で評価した貫通破損 100%の場合の値より小さな値である。
    なお、実際よりも小さな放出定数を用いて FP の放出量を評価すると、放出量は過小評価となる。即ち、放出定数に関して「小さな値」とは「非保守的な値」である。
  - ✓ 健全 CFP100%の場合については HTFP コードにおけるデフォルト値は、本章で評価を行った範囲(1000～約 1850℃)の一部において本章で評価した値よりも非保守的な(小さな値)である。

5. 被覆燃料粒子からの Cs の放出(その 2)：CFP の一部が貫通破損している場合

5.1 はじめに

前章において「健全 CFP100%または貫通破損 CFP100%の場合、CFP から放出されて燃料コンパクト中に存在する Cs-134 を、既に燃料領域から放出されて「黒鉛領域(黒鉛スリーブ)」に存在するとみなせば、HTFP コードを用いて保守的な評価を行うことができる」という結論を得た。しかし、CFP のすべてが健全である、または破損しているという条件での計算結果が実用上必要になることはまずない。そこで本章では、まず、

- CFP の一部が貫通破損している場合においても Cs-134 の放出挙動は「核種 i の放出速度は CFP における核種 i の存在量に比例する」と仮定すれば、その仮定は妥当であるか。

を調べる。もし妥当であれば更に、

- 燃料領域に存在する Cs-134 の量のうち、どの程度の割合を「既に黒鉛領域(黒鉛スリーブ)に放出されている」とみなす必要があるのか。
- HTFP コードにおける CFP の一部が破損している場合の放出定数の算出法(2)式は妥当なのか。

を調べる。

5.2 解析結果

5.2.1 放出挙動

様々な CFP 破損割合についてパラメータ $Ndd_{pCs\text{-}134,T}$ の履歴を Fig. 7 に照射後加熱温度ごとに示す。いずれの照射後加熱温度においても貫通破損割合 10%までであれば $Ndd_{pCs\text{-}134,T}$ は直線に近いと言える。

従って、ここで調べた範囲では、貫通破損割合 10%程度までであれば「Cs-134 の CFP からの放出速度は、CFP における Cs-134 の存在量に比例する」と仮定すれば、その仮定は妥当である。従って、貫通破損 CFP の割合が 10%程度までならば、照射後加熱開始時に CFP から放出されていて燃料コンパクト中に存在する Cs-134 は「黒鉛領域(黒鉛スリーブ)」に存在するとみなせば、HTFP コード[4)]を用いて保守的な評価を行うことができる。

5.2.2 被覆燃料粒子から放出され燃料コンパクト中に存在する Cs-134 の割合

ここでは、照射後加熱開始時に、「燃料領域」に保持されている Cs-134 のうちどの程度の割合を「既に黒鉛領域に放出されている」とみなす必要があるのかについて調べる。

具体的には、まず、様々な CFP の貫通破損割合を設定し、「(CFP から放出されて)燃料コンパクト中に存在する Cs-134 の量の履歴」と「燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)中に存在する Cs-134 の量の履歴」を計算した。次に、前者の後者に対する比の履歴を計算し、前者の後者に対する比の照射中の最大値を調べた。その最大値、即ち、照射後加熱開始時に、「燃料領域」に保持されている Cs-134 のうち「既に黒鉛領域に放出されている」とみなす必要がある割合の最大値を、CFP の貫通破損割合に対してプロットしたものが Fig. 8 である。Fig. 8 に示

すように、CFP の貫通破損割合に対してこの割合は単調増加し、CFP の貫通破損割合 0%において約 1.7%、CFP の貫通破損割合 10%において約 4.6%である。

従って、貫通破損割合 10%程度までの場合、ここで調べた範囲では、照射後加熱前に「燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)」に保持されている Cs-134 のうち、2～5%程度を「既に黒鉛領域に放出されている」とみなす必要がある。

5.2.3 放出定数

最後に、CFP の一部が破損している場合の HTFP コード [4]における放出定数の算出法(具体的には(2)式)の妥当性について調べる。 (2)式が数学的に成立しない、即ち正確ではないことは明らかなので、具体的には、良い近似になっているか調べる。

そのため、下記 a)b)の方法で CFP の一部が破損している場合の $\lambda_{pire,T}$を各々評価する。

a) 「4.3.1 放出定数」において FORNAX-A コードの計算結果に基づき評価した健全 CFP100%の場合の $\lambda_{pire,T}$を $\lambda_{pire,IN,T}$とし、貫通破損 CFP100%の場合の $\lambda_{pire,T}$を $\lambda_{fire,FA,T}$として(2)式により計算。

b) FORNAX-A コードの計算結果に基づき、「4.2 計算結果の解析法」中の①～④に従って評価。

方法 b)で評価した $\lambda_{pire,T}$と方法 a)で評価した $\lambda_{pire,T}$の差が小さければ、(2)式は妥当と言える。

照射後加熱温度 1000℃及び 1600℃について上記の 2 つの方法で評価した $\lambda_{pire,T}$の CFP の貫通破損割合依存性を、Fig. 9 に示す。

どちらの照射後加熱温度においても、貫通破損割合 1%を超えると、上記 a)で計算した $\lambda_{pire,T}$は b)で計算したそれより明らかに大きくなる。従って、妥当ではない。しかし、b)で計算したそれより小さくなることはない。即ち、保守的である。

以上により、HTFP コードにおける放出定数の算出法 [4]は、妥当ではないが保守的である。即ち、当該方法で算出した放出定数を用いて計算した Cs の放出量は過小評価になることはない。

6 まとめ

Table 1～5 及び Fig. 2, 3 に示した計算条件で、軽微な変更を施した FORNAX-A コードで、照射中・照射後加熱中における Cs-134 の放出量を計算した。その計算結果に基づき、以下のような知見を得た。

- HTFP コードにおける「(核分裂停止後の)燃料領域(CFP を含む燃料コンパクト)からの核種 i の放出速度は、燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という仮定 [4] の妥当性について
  - ✓ 低温(～1400℃程度)においては妥当ではない。
  - ✓ しかし、貫通破損割合 10%程度までであれば、「Cs-134 の CFP からの放出速度はその時点での CFP における Cs-134 の存在量に比例する」と仮定すれば、その仮定は妥当である。
    - 従って、貫通破損 CFP の割合が 10%程度までならば、照射後加熱開始時に CFP から放出されていて燃料コンパクト中に存在する Cs-134 は「黒鉛領域(黒鉛スリーブ)」に存在するとみなせば、HTFP コード [4]を用いて保守的な評価を行うことができると考えられる。
    - その場合、ここで照射後加熱前に「燃料領域」に保持されている Cs-134 のうち、2～5%程度を「既に黒鉛領域に放出されている」とみなす必要がある。
- 健全 CFP100%の場合または貫通破損 CFP100%の場合の CFP からの Cs-134 の放出定数を 1000～約 1850℃における照射後加熱温度において評価し、HTFP コードにおけるデフォルト値と比較した。
  - ✓ HTFP コードにけるデフォルト値 [4]と同様に、放出定数のアレニウスプロットは各々直線でよく近似される。
  - ✓ 健全 CFP と破損 CFP で同じ照射後加熱温度において 1 桁以上異なっており、健全燃料でも破損燃料でも同じとされている HTFP コードにおけるデフォルト値とはかなり異なる。
  - ✓ 破損 CFP については広い温度範囲において HTFP コードにおけるデフォルト値の方が非保守的である。
    - ただし、HTFP コードにおける「破損」とは具体的にはどういう状態か不明であり、本解析における「破損燃料=裸の燃料核」という仮定が保守的すぎる可能性はある。
- HTFP コードにおける「一部の CFP が破損している場合の放出定数の計算法」は、妥当ではないが保守的である。

7 結論

(1) HTFP コードにおける「(核分裂停止後の)燃料領域からの核種 i の放出速度は、燃料領域における核種 i の存在量に比例する」という仮定の妥当性を、Cs について確認したところ、

1) (核分裂停止後の)燃料領域からの Cs の放出速度は、燃料領域における Cs の存在量に比例する、もしくは概ね比例するとは言えない。
   即ち、妥当ではない。
2) ただし、(核分裂停止後の)CFP からの Cs の放出速度は、CFP における Cs の存在量に概ね比例する。
   即ち、「(核分裂停止後の)CFP からの Cs の放出速度は、CFP における Cs の存在量に比例する」と仮定すれば、その仮定は妥当である。

(2) 上記(1)中の 2)により、軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算結果に基づき、下記のような知見を得た。

1) 軽微な変更を施した FORNAX-A コードによる計算結果から HTFP コードにおける Cs の「放出定数」に相当する具体的な値を評価し、それを HTFP コードにおけるデフォルト値[4]と比較評価したところ、大きく異なった。
2) CFP の一部が破損している場合の HTFP コードにおける「放出定数」の取扱は妥当ではないが Table 1～5 及び Fig. 2, 3 に示した条件を用い、軽微な変更を施した FORNAX-A コードを用いて計算した限りでは保守的である。

謝辞

本稿を作成するにあたり 懇篤なるご指導とご高閲を賜った高温ガス炉水素・熱利用研究センターの中川繁昭氏に心より御礼申し上げます。

参考文献

1) S. Katanishi and K. Kunitomi: “Safety evaluation on the depressurization accident in the gas turbine high temperature reactor (GTHTR300)”, Nucl. Eng. Des., 237, pp.1372-1380 (2007).

2) S. Saito, T. Tanaka, Y. Sudo, et al.: “Design of high temperature engineering test reactor (HTTR)”, JAERI-1332, 1994, 247p.

3) S. Fujikawa, H. Hayashi, T. Nakazawa, et al.: “Achievment of reactor-outlet coolant temperature of 950℃ in HTTR”, J. Nucl. Sci. Technol., 41, pp.1245-1254 (2004).

4) 野本恭信他, ピン・イン・ブロック型高温ガス炉の燃料棒からの事故時核分裂生成物追加放出量計算コード HTFP, JAEA-Data/Code 2015-008, 2015, 39p.

5) 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.

6) 相原純他, FORNAX-A の応用, JAEA-Technology 2015-040, 2016, 32p.

7) K. Sawa, et al.: “Verification of Fission Product Release Model from High Temperature Engineering Test Reactor Fuel”, J. Nucl. Sci. Technol., 29, pp.842-850 (1992).

8) H. Ohashi, et al.: “A Small-Sized HTGR System Design for Multiple Heat Applications for Developing Countries”, Int. J. Nucl. Energy, 2013, Article ID 918567 (2013).

Table 1 Information on objected nuclide.

Nuclide	Generation	Decay constant
Cs-134	No parent nuclide[4].	1.06694×10^{-8} [/s] [4]

Table 2 Treatment of temperature distribution.

Fuel rod	During irradiation	◆ Distributions of temperatures with consideration of engineering uncertainty are used. (See Fig. 3.)
	Post-irradiation heating	Heating temperatures are used.
CFP	During irradiation	◆ Temperature distribution in each CFP is not considered. ◆ Temperature distribution in fuel rod is considered. Fuel compact is divided into 10 regions, and CFP temperaute in each region is assumed to be average of temperatures at inner and outer surfaces of each region at each time step.
	Post-irradiation heating	Heating temperatures are used.

Table 3 Specifications of fuel

Fuel kernel diameter [μm]	600
Buffer thickness [μm]	60
IPyC thickness [μm]	30
SiC thickness [μm]	25
OPyC thickness [μm]	45
Inner diameter of fuel compact [mm]	10
Outer diameter of fuel compact [mm]	26
Inner diameter of graphite sleeve [mm]	26
Outer diameter of graphite sleeve [mm]	34

Table 4 Factors for diffusion coefficients

	Fuel kernel [7]	Buffer [7]	PyC [7]	SiC [7]	Fuel compact [7]	Graphite sleeve [4]
D_0 [m²/s]	6.75×10^{-10}	6.69×10^{-3}	6.69×10^{-9}	6.75×10^{-12}	9.00×10^{-3}	9.00×10^{-5}
Q [kJ/mol]	1.77×10^{2}	1.98×10^{2}	1.98×10^{2}	1.77×10^{2}	1.57×10^{2}	1.57×10^{2}

Diffusion coefficient D [m²/s] at temperature T [℃] is calculated as

$D = D_0 \exp(-Q/R/(T+273.15))$, R: gas constant

Table 5 Other calculation conditions

	in CFP	in fuel rod
Recoil distance	0	-
Barrier factor	1	Cs-134 concentration at inner surface of graphite sleeve／outer surface of fuel compact is 0.1.
Boundary condition	Cs-134 concentration is 0 at surface of CFP.	Cs-134 concentration is 0 at outer surface of graphite sleeve [4].

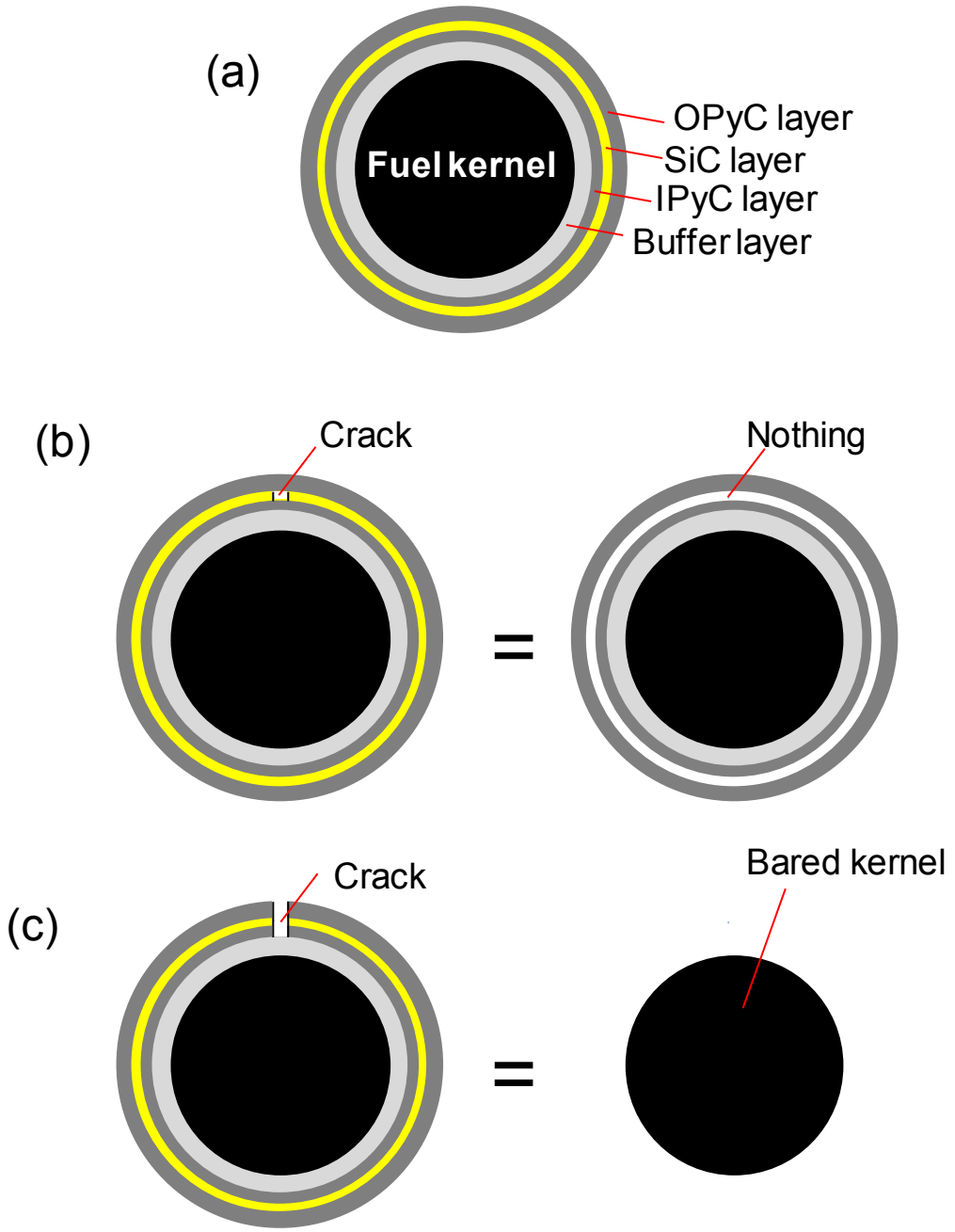


Fig. 1 Modes of coated fuel particle (CFP) in FORNAX-A code, (a) intact CFP, (b) SiC failed CFP, (c) through coating failed CFP.

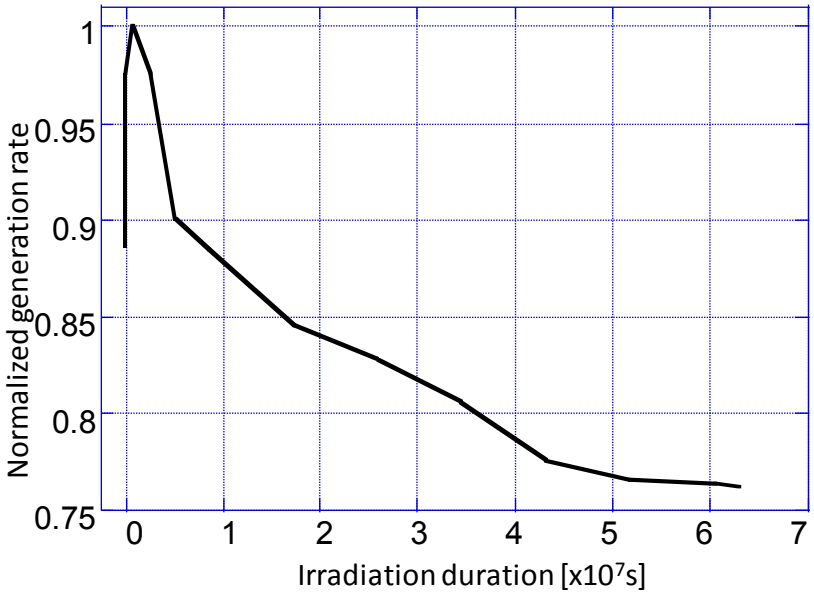


Fig. 2 Histories of normalized generation rate of Cs-134.

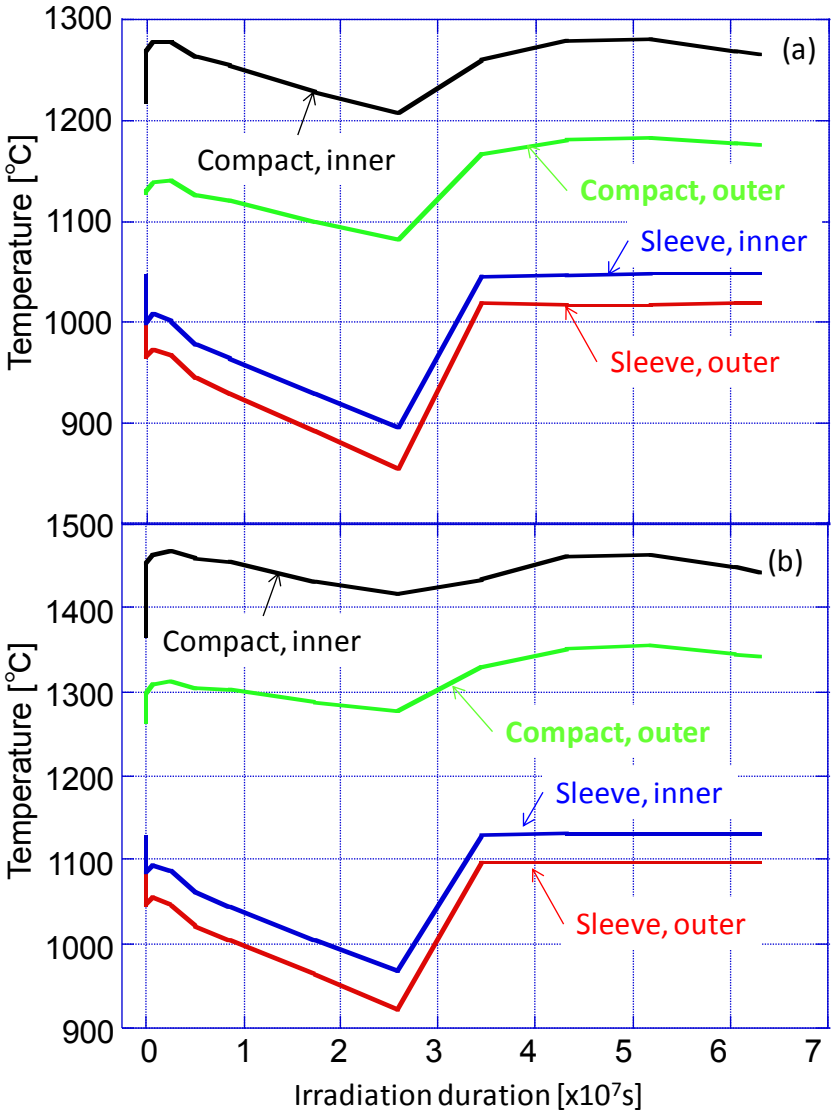


Fig. 3 Histories of surface temperatures during irradiation,
(a) nominal temperatures, (b) temperatures with consideration of engineering uncertainty.
Note: These histories are not “calculation condition”, but “irradiation condition”.
(See Table 2.)

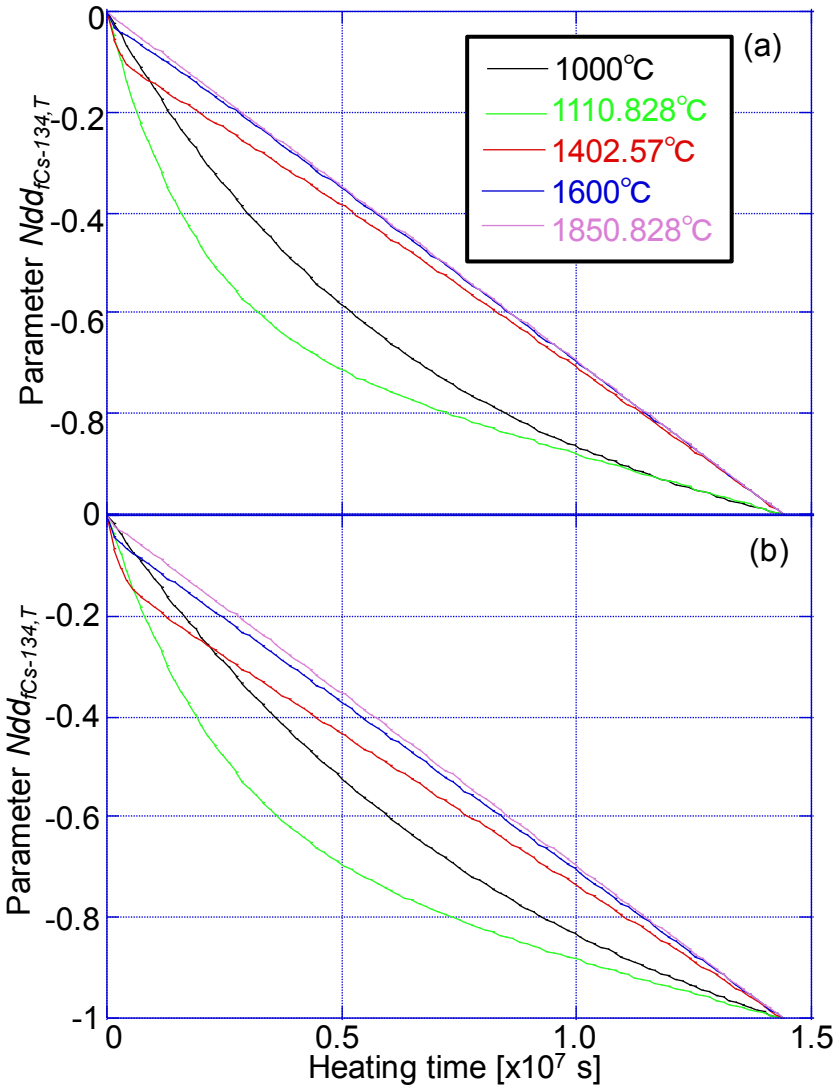


Fig. 4 Histories of parameter $Ndd_{fCs\text{-}134,T}$,
(a) 100% intact CFP, (b) 100% through coating failed CFP.

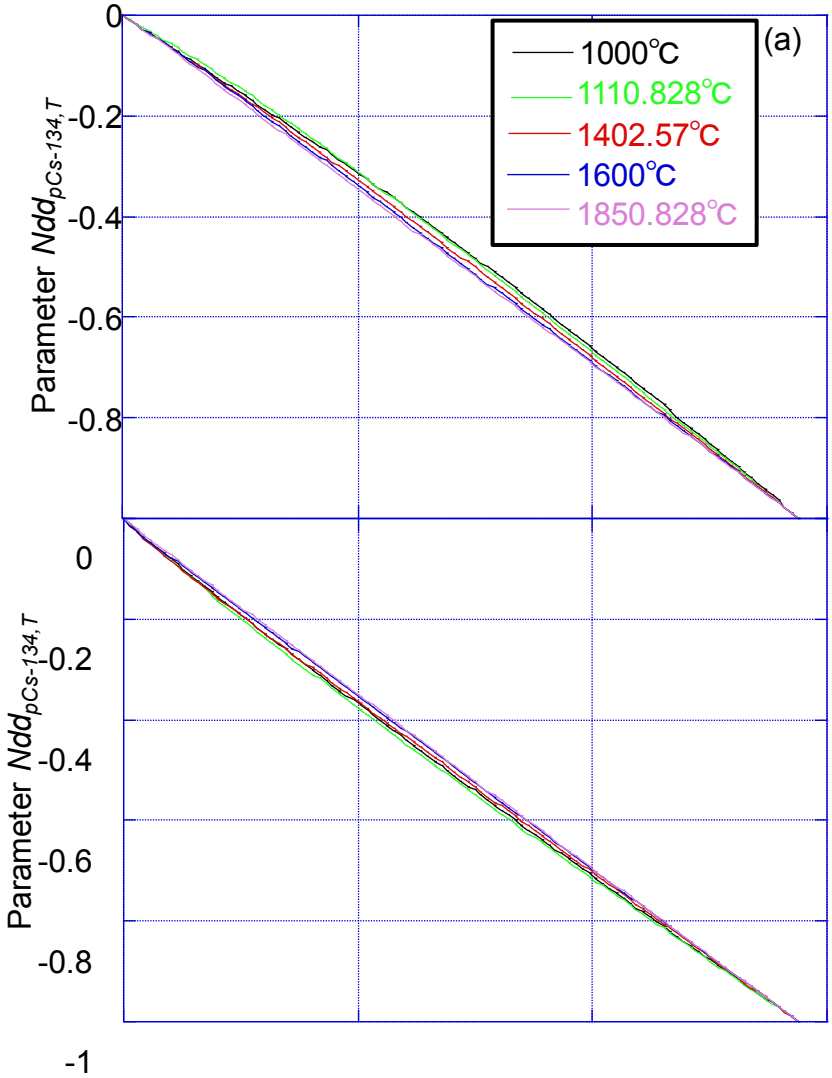


Fig. 5 Histories of parameter $Ndd_{pCs-134,T}$,
(a) 100% intact CFP, (b) 100% through coating failed CFP.

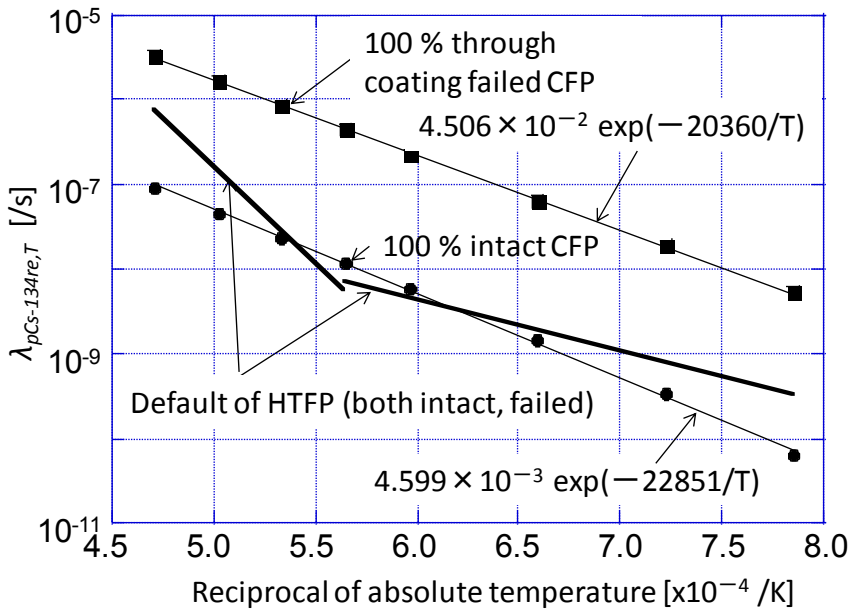


Fig. 6 Estimated release constants of Cs from CFPs, $\lambda_{pCs\text{-}134re,T}$, with defaut in HTFP code[4].

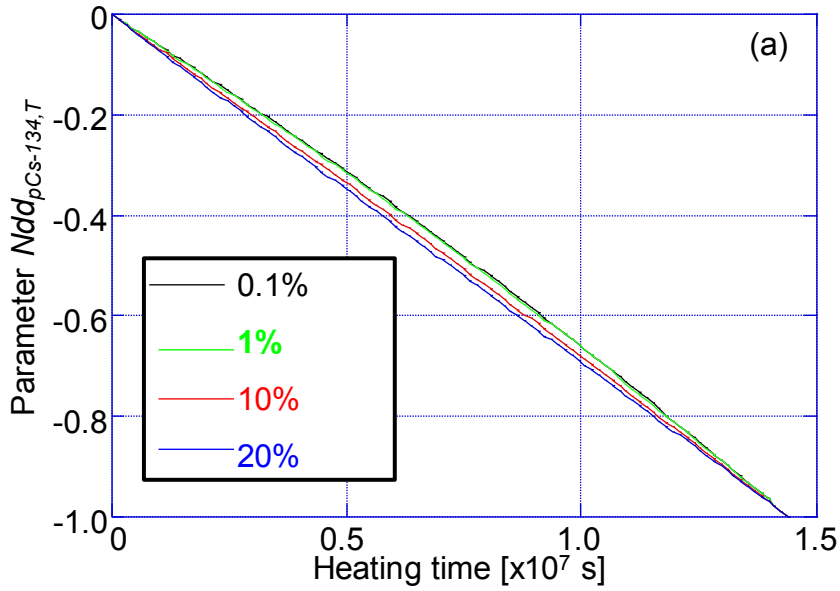


Fig. 7(1/3) Histories of parameter $Ndd_{pCs\text{-}134,T}$, with various failure fractions, (a) heating temperature = 1000℃.

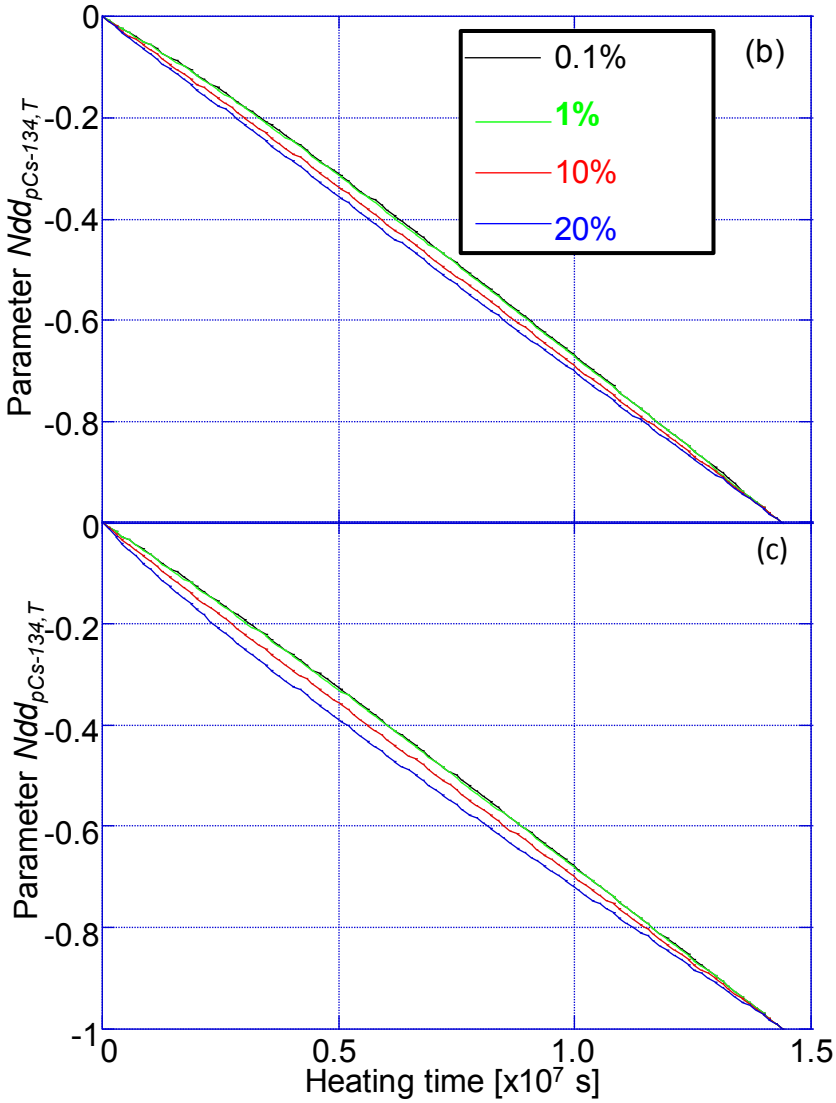


Fig. 7(2/3) Histories of parameter $Ndd_{pCs-134,T}$, with various failure fractions, (b) heating temperature = 1110.828℃, (c) heating temperature = 1402.57℃.

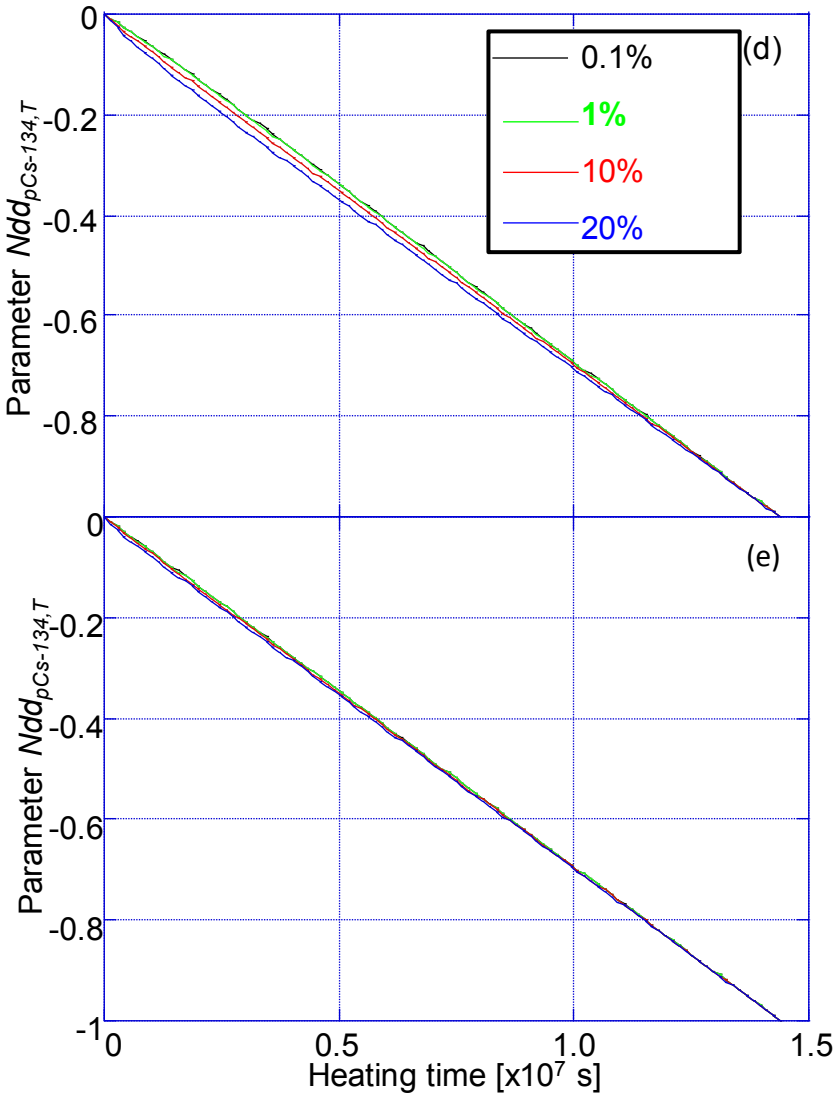


Fig. 7(3/3) Histories of parameter $Ndd_{pCs-134,T}$, with various failure fractions, (d) heating temperature = 1600℃, (e) heating temperature = 1850.165℃.

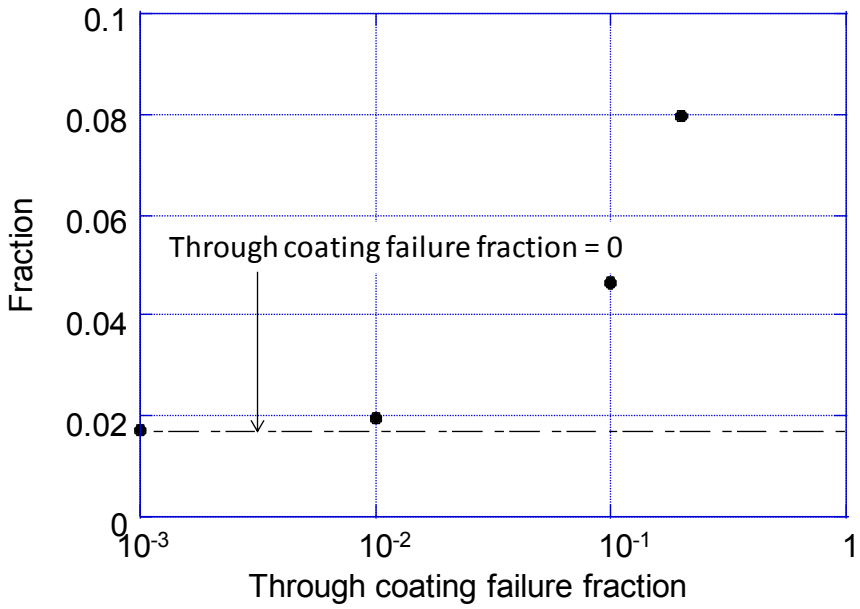


Fig. 8 Through coating failure fraction dependence of maximum value of (amount of Cs-134 released from CFP and exist in fuel compact)/(amount of Cs-134 in "fuel region") during irradiation.

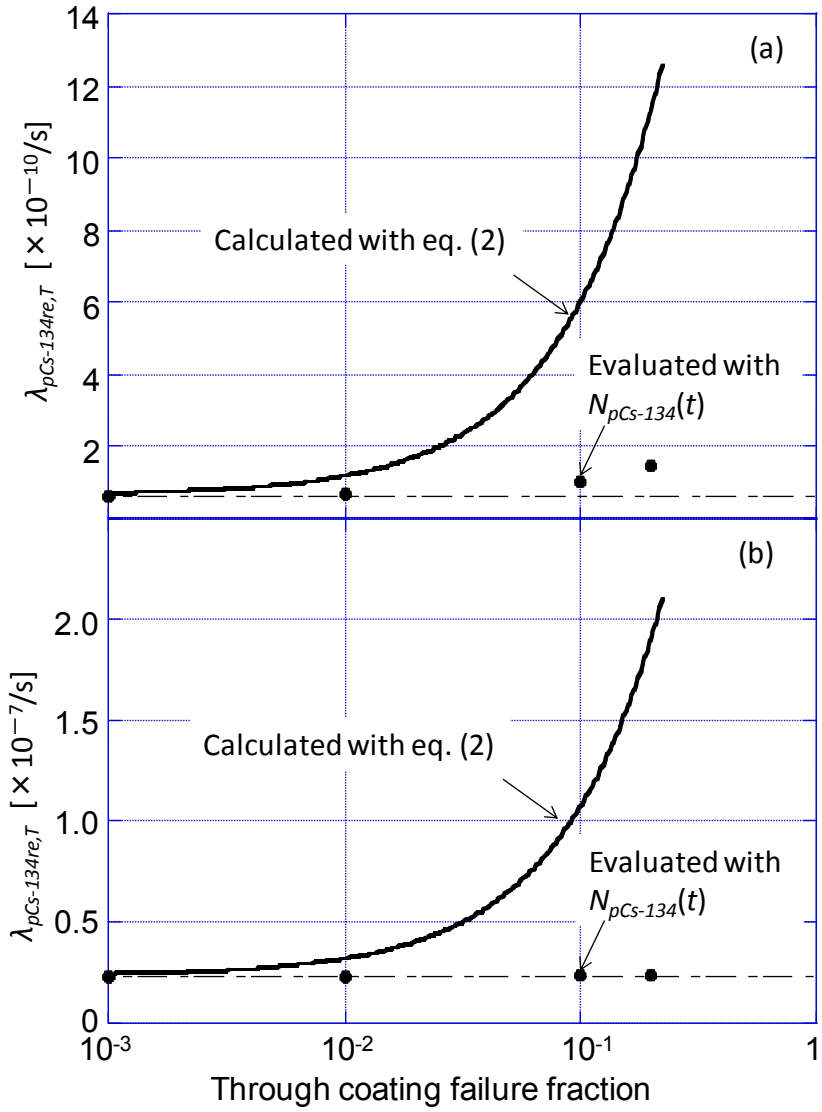


Fig. 9 Through coating failure fraction dependence of $\lambda_{pCs\text{-}134re,T}$, (a) heating temperature = 1000℃, (b) heating temperature = 1600℃

付録 A 計算例(1)

目　次

A-1 はじめに ---------- 30
A-2「その 1」「その 2」において共通な計算条件 ---------- 30
A-3 その 1 ---------- 31
A-3.1 上記 A-2 章で述べた以外の計算条件 ---------- 31
A-3.2 計算 ---------- 31
A-3.2.1 Code-B-2 を用いた計算 ---------- 31
A-3.2.2 軽微な変更を施した FORNAX-A を用いた計算 ---------- 31
A-4 その 2 ---------- 31
A-4.1 上記 A-2 章で述べた以外の計算条件 ---------- 31
A-4.2 計算 ---------- 31
A-4.2.1 Code-B-2 を用いた計算 ---------- 31
A-4.2.2 軽微な変更を施した FORNAX-A を用いた計算 ---------- 32
参考文献 ---------- 32

A-1 はじめに

本付録は、軽微なプログラム変更を施した FORNAX-A による計算例について纏めたものである。計算例は「その 1」(第 3 章)及び「その 2」(第 4 章)に大別される。

「その 1」においては、下記 A-2 章及び A-3.1 節に示す計算条件を用い、

- Code-B-2[A-1)]の計算に基づく初期健全被覆燃料粒子(CFP)の破損確率等の計算
- 軽微な変更を施した FORNAX-A[A-2)]を用いた健全 CFP からの核分裂生成物(FP)放出割合の計算

を行う。

「その 2」においては、下記 A-2 章及び A-4.1 節に示す計算条件を用い、

- Code-B-2[A-1)]を用いた初期健全 CFP の破損確率等の計算
- 軽微な変更を施した FORNAX-A[A-2)]を用いた燃料ペブルからの FP 放出割合の計算

を行う。

なお、本付録における計算条件は文献[A-3)]に基づいて設定されたものである。

A-2 「その 1」「その 2」において共通な計算条件

本章では「その 1」「その 2」において共通な計算条件を纏める。ただし、「その 1」においては使用しない計算条件も一部含まれる。

- FP の各領域における拡散係数計算用の因子を Table A-1 に示す。
- FP の反跳距離等を Table A-2 に示す。
- CFP 及び燃料ペブル内の温度分布の取扱について Table A-3 に示す。

A-3 その 1

A-3.1 上記 A-2 章で述べた以外の計算条件

CFP の仕様、照射条件及び照射後加熱条件を、各々Table A-4～6 に示す。

A-3.2 計算

A-3.2.1 Code-B-2 を用いた計算

- Code-B-2[A-1)]を用い、初期健全 CFP 内の下記の値の計算を行った。
  - ✓ バッファ層に放出された内圧上昇の原因となる FP の CFP1 個あたりインベントリ(Fig. A-1)
  - ✓ バッファ層内の CO の CFP1 個あたりインベントリ(Fig. A-1)
  - ✓ CFP の内圧（Fig. A-1）
  - ✓ SiC 層内面周方向応力（Fig. A-2）
- 計算した SiC 層内面周方向応力を用い、FIGHT コードと同等の方法[A-1)]で健全 CFP の破損確率を計算した。Fig. A-2 に示すように、初期健全 CFP の SiC 層内面周方向応力は常に負であるため、初期健全 CFP の破損確率は 0 である。

A-3.2.2 軽微な変更を施した FORNAX-A を用いた計算

Table A-1 に示すような因子を用いて計算した拡散係数を用いて計算できるように軽微な変更を施した FORNAX-A を用いて計算した Ag, Cs, Kr, Sr の CFP からの放出割合を Fig. A-3 に示す。

A-4 その 2

A-4.1 上記 A-2 章で述べた以外の計算条件

燃料の仕様及び照射条件を、各々Table A-7, 8 に示す。照射後加熱条件を Fig. A-5 に示す。なお、燃料ペブル内の温度分布(Table A-3 参照)を考慮した。燃料ペブル内の温度分布の計算法については参考文献 A-4)中の付録 A 参照のこと。

A-4.2 計算

A-4.2.1 Code-B-2 を用いた計算

- Code-B-2[A-1)]を用い、初期健全 CFP 内の下記の値の計算を行った。
  - ✓ バッファ層に放出された内圧上昇の原因となる FP の CFP1 個あたりインベントリ(Fig. A-6)
  - ✓ バッファ層内の CO の CFP1 個あたりインベントリ(Fig. A-7)
  - ✓ CFP の内圧（Fig. A-8）
  - ✓ SiC 層内面周方向応力（Fig. A-9）
- 計算した SiC 層内面周方向応力を用い、FIGHT コードと同等の方法[A-1)]で健全 CFP の破損確率を計算した。
  - ✓ Fig. A-9 に示すように、初期健全 CFP の SiC 層内面周方向応力はペブル 5 以外で

は常に負であるため、初期健全 CFP の破損確率は 0 である。

- ✓ Fig. A-9 に示すように、ペブル 5 においては照射後加熱試験終了時の初期健全 CFP の SiC 層内面周方向応力は約 7.9 [MPa]であり、初期健全 CFP の貫通破損確率は約 4.07×10^{-16} である。

A-4.2.2 軽微な変更を施した FORNAX-A を用いた計算

FORNAX-A のプログラムに軽微な変更を施し、Table A-1 に示すような因子を用いて計算した拡散係数を用い、また、燃料ペブルからの FP 輸送を計算できるようにした。この軽微な変更を施した FORNAX-A を用いて計算した Ag, Cs, Kr, Sr の燃料ペブルまたは CFP からの放出割合を各々Fig. A-10～A-13 に示す。ただし、

- ➢ 上記「A-4.2.1 Code-B-2 を用いた計算」で述べたように、ペブル 5 においては照射後加熱終了後の初期健全 CFP の貫通破損確率は 0 ではない。しかし、その確率は初期貫通破損割合(Table A-7 参照)より充分小さいため、軽微な変更を施した FORNAX-A を用いた計算においては貫通破損割合の変化は無視することとした。即ち、貫通破損割合は 7.8×10^{-6} のまま一定とした。
- ➢ Kr については燃料ペブル体系での計算ができなかった。そこで、Kr については、CFP からの放出量(健全 CFP 及び貫通破損 CFP から両方の荷重平均)を計算した。
  - ✓ 計算できなかった原因は、燃料ペブル中における Kr の拡散係数が大きすぎたことと考えられる。
  - ✓ Kr については燃料ペブル中の拡散係数が非常に大きいため、CFP からの放出量は燃料ペブルからの放出量で近似可能と考えられる。

参考文献

A-1) 相原純他, SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算のための Code-B-2, JAEA-Data/Code 2012-030, 2013, 13p.

A-2) 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.

A-3) B. P. Collin, Generation IV Benchmarking of TRISO Fuel Performance Models under Accident Conditions – Modeling Input Data, INL/EXT-14-33117, 2014, 12p.

A-4) 相原純他, FORNAX-A の応用, JAEA-Technology 2015-040, 2016, 32p.

Table A-1 Factors for diffusion coefficients[A-3)]

Element of FP	Factors for diffusion coefficients					
		Fuel kernel	Buffer	PyC	SiC	Fuel Pebble
Ag	D_{01} [m²/s]	6.7×10^{-9}	1×10^{-8}	5.3×10^{-9}	3.6×10^{-9}	1.6
	Q_{01} [kJ/mol]	165	0	154	215	258
	D_{02} [m²/s]	-	-	-	-	-
	Q_{02} [kJ/mol]					
Cs	D_{01} [m²/s]	5.6×10^{-8}	1×10^{-8}	6.3×10^{-8}	$5.5\times10^{-14}\exp(\Gamma/4.5)$ (b)	3.6×10^{-4}
	Q_{01} [kJ/mol]	209	0	222	125	189
	D_{02} [m²/s]	5.2×10^{-4}	-	-	1.6×10^{-2}	-
	Q_{02} [kJ/mol]	362			514	
Kr	D_{01} [m²/s]	$1.3\times10^{-12}/8.8\times10^{-15}$ (a)	1×10^{-8}	2.9×10^{-8}	$37/8.6\times10^{-10}$ (c)	6×10^{6}
	Q_{01} [kJ/mol]	126/54(a)	0	291	657/326(c)	0
	D_{02} [m²/s]	$0/6.0\times10^{-1}$ (a)	-	2.0×10^{5}	-	-
	Q_{02} [kJ/mol]	0/480 (a)		923		
Sr	D_{01} [m²/s]	2.2×10^{-3}	1×10^{-8}	2.3×10^{-6}	1.2×10^{-9}	1×10^{-2}
	Q_{01} [kJ/mol]	488	0	197	205	303
	D_{02} [m²/s]	-	-	-	1.8×10^{6}	-
	Q_{02} [kJ/mol]				791	

Diffusion coefficient D [m²/s] at temperature T [℃] is calculated as

$D = D_{01}\exp(-Q_{01}/R/(T+273.15)) + D_{02}\exp(-Q_{02}/R/(T+273.15))$, R: gas constant

(a) First values used in irradiation conditions / Second values used in accidental conditions.

(b) Γ: fast neutron fluence (1×10^{25} /m², E > 0.18 MeV).

(c) First values used above 1626 K / Second values used below 1626 K.

Table A-2 Factors for calculation with minory changed FORNAX-A

Element of FP	Recoil distance	Generation	Decay constant	boundary conditions at surfaces of CFP and fuel pebble	barrier factor at each boundary
Ag	7.7 [μm]	Generated only directly by fission at constant rate during irradiation.	very small (7.3×10^{-10} [/s])	concentration is 0	1
Cs					
Kr					
Sr					

Table A-3 Treatment of temperature distribution in fuel pebble

<table>
<tr><th></th><th></th><th>Code B-2 calculation</th><th>Calculation with minory changed FORNAX-A</th></tr>
<tr><td rowspan="2">CFP</td><td>During irradiation</td><td colspan="2">Temperature distribution in fuel pebble is not considered.
Temperatures at center of pebble are used.</td></tr>
<tr><td>Post-irradiation heating</td><td colspan="2">Heating temperatures are used.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fuel pebble</td><td>During irradiation</td><td rowspan="2">-</td><td>Temperature distributions are solutions of equations of heat conduction at each time step under following conditions;
- steady state.
- spherically symmetric.
- thermophysical properties are same in fuel and non-fuel regions.
- boundary condition: center and surface temperatures of fuel pebble.</td></tr>
<tr><td>Post-irradiation heating</td><td>Heating temperatures are used.</td></tr>
</table>

Table A-4 Specifications of CFP (Case 1) A-3)

Fuel kernel diameter [μm]	350
Buffer thickness [μm]	100
IPyC thickness [μm]	40
SiC thickness [μm]	35
OPyC thickness [μm]	40
Fuel kernel density [g/cc]	10.8
Buffer density [g/cc]	0.95
Buffer theoretical density [g/cc]	2.25
IPyC/OPyC density [g/cc]	1.9
BAF of IPyC/OPyC	1.03
CFP failure fraction	0

Table A-5 Irradiation condition (Case 1) A-3)

Burnup [%FIMA] (propotial to irradiation time)	10
Fast neutron fluence [$10^{25}/m^2$] E > 0.18 [MeV] (propotial to irradiation time)	2
Irradiation duration [day]	1000
Irradiation temperature	10 repeats of linear ramp from 600 to 1000 [℃] during irradiation length of 100 [day]
Ambient pressure [MPa]	0.1

Table A-6 Temperature history during post-irradiation heating test (Case 1) A-3)

time from end of irradiation [s]	Temperature [℃]
0	1000
60	1600
720060	1600

Table A-7 Specifications of fuel (Case 2)

Fuel kernel diameter [μm]	502.2
Buffer thickness [μm]	94.3
IPyC thickness [μm]	40.6
SiC thickness [μm]	35.9
OPyC thickness [μm]	39.8
Fuel kernel density [g/cc]	10.86
Buffer density [g/cc]	1.012
Buffer theoretical density [g/cc]	2.2
IPyC/OPyC density [g/cc]	1.87
BAF of IPyC/OPyC	1.02
Trough coating failure fraction	7.8×10^{-6}
Fuel pebble diameter [mm]	60
Fuel zone diameter [mm]	50

Based on ref. A-3).

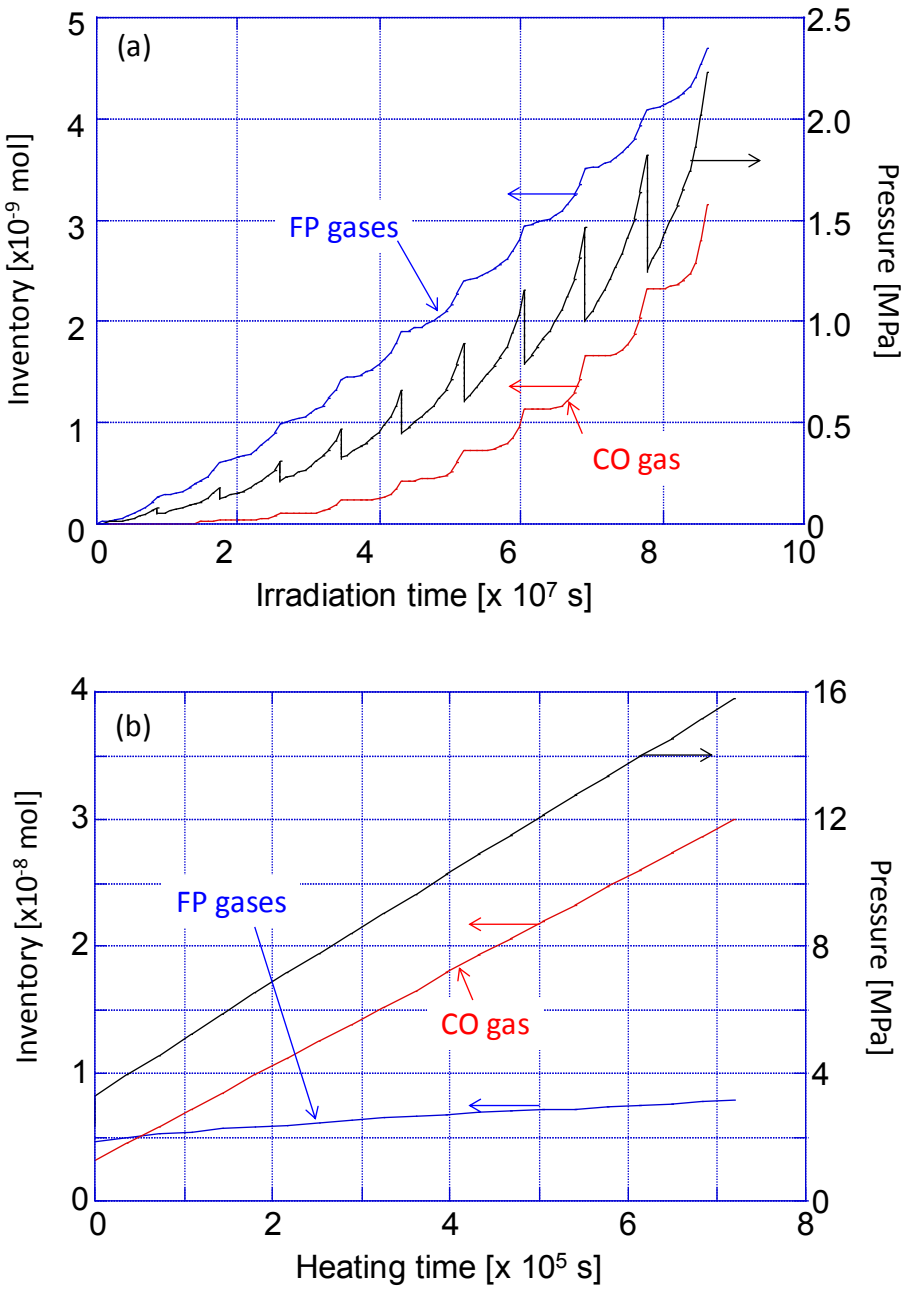
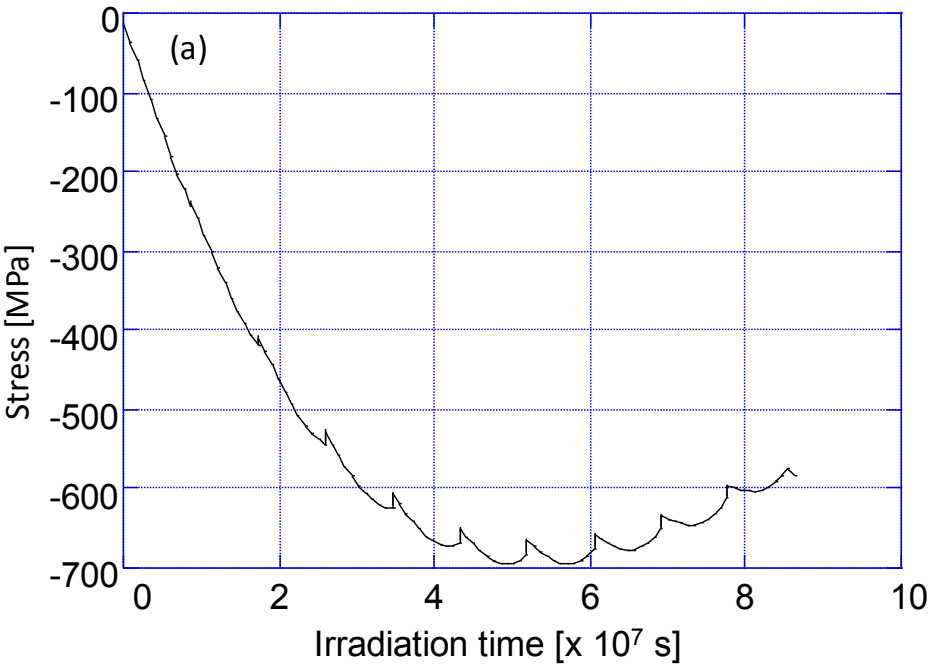


Fig. A-1 Histories of inventories of FP gases, which released in buffer layer and cause internal pressure, CO gas and internal pressure in CFP (case 1), (a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.



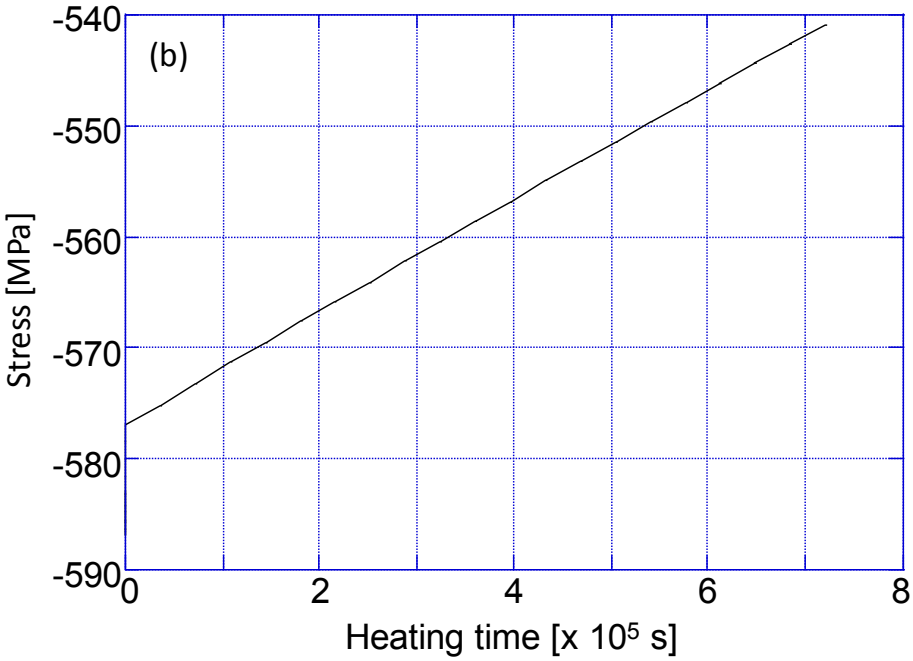


Fig. A-2 History of tangential stress on inner surface of SiC layer (case 1), (a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.

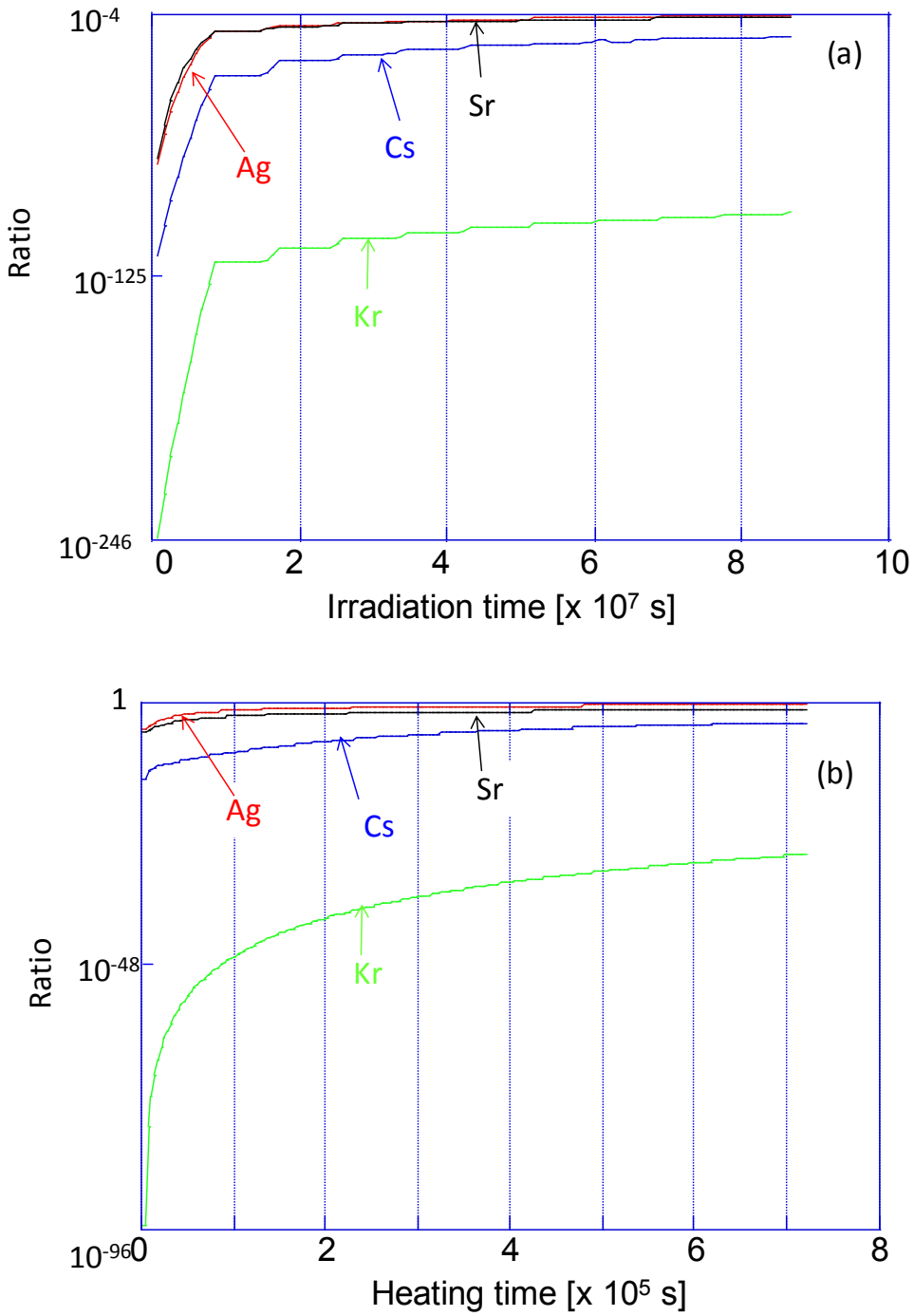


Fig. A-3 Histories of ratio of amount of FP released from CFP to amount of FP generated in CFP until each time step (case 1),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.

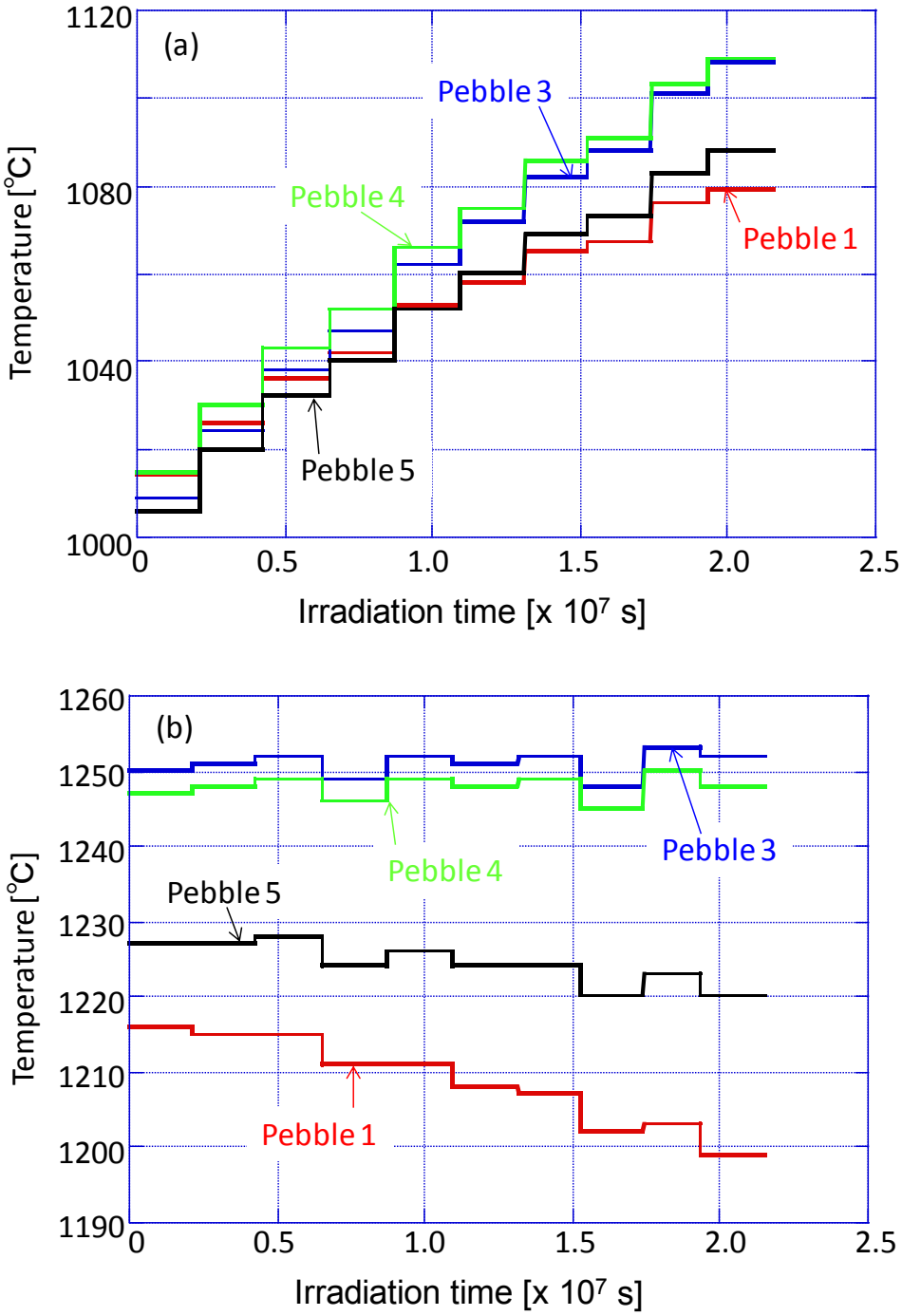


Fig. A-4 Histories of temperatures of fuel pebbles during irradiation (case 2) [A-3], (a) surface, (b) center.

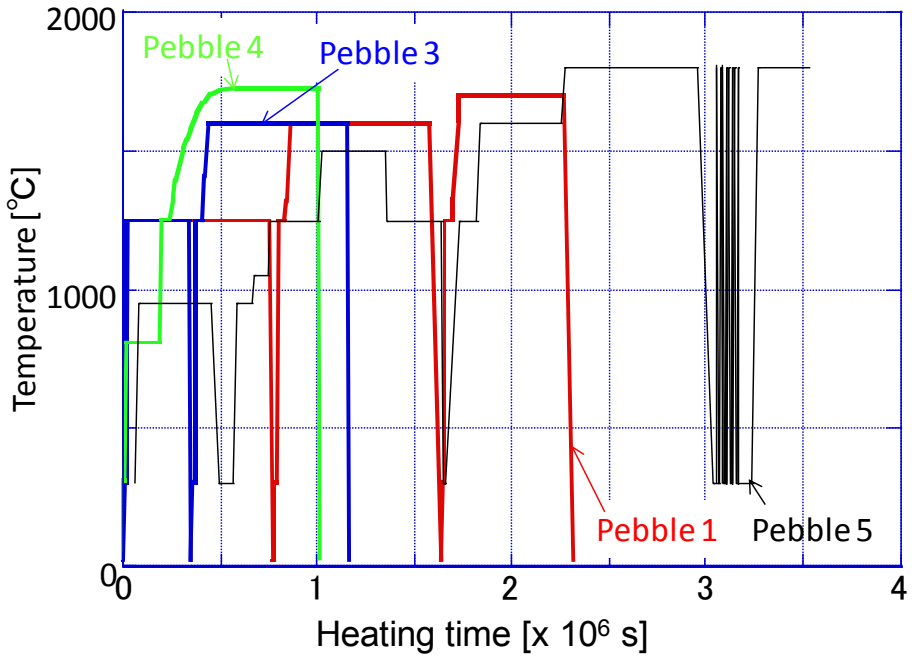


Fig. A-5 Histories of heating temperatures of fuel pebbles during post-irradiation heating test (case 2) A-3).

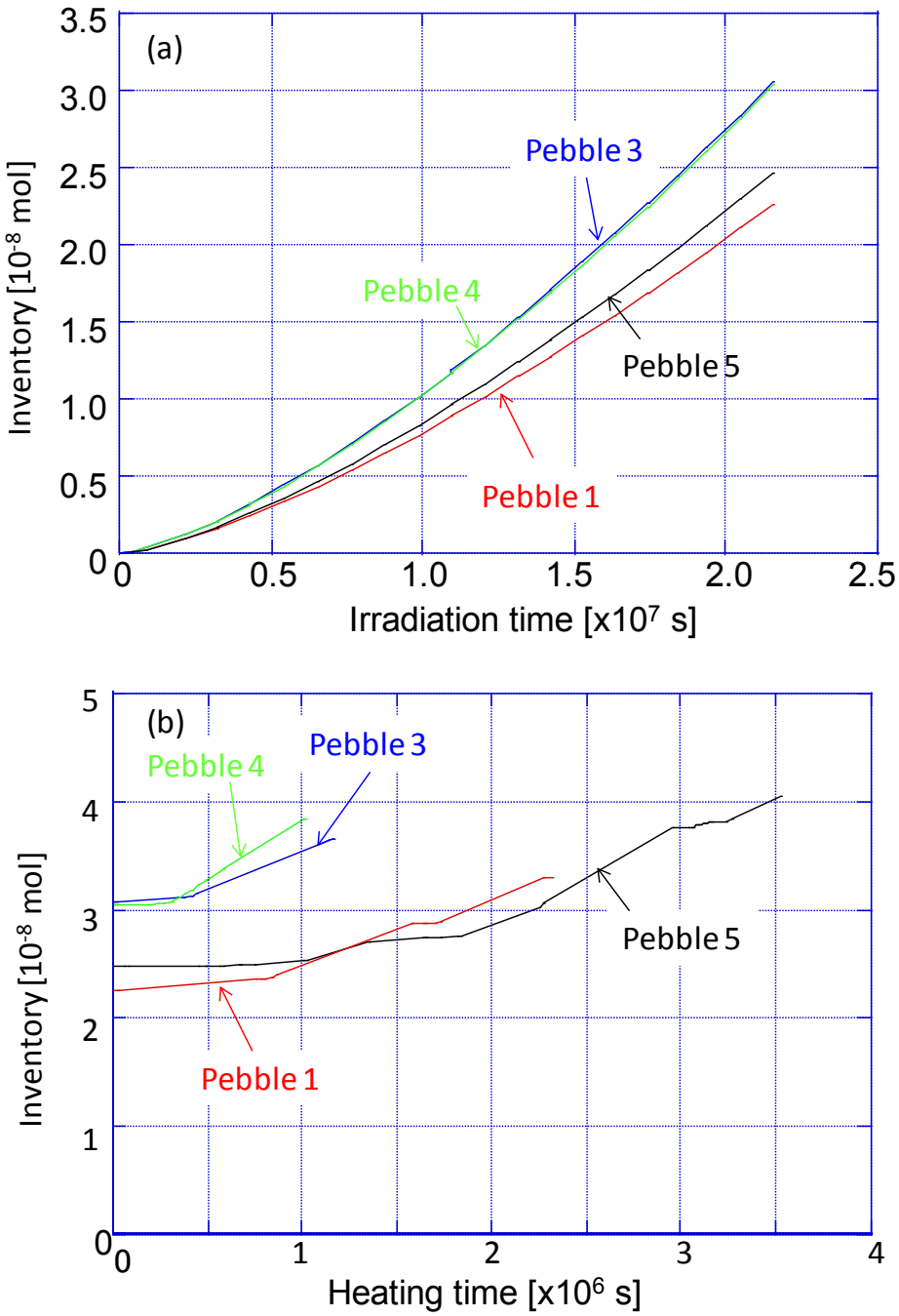


Fig. A-6 History of inventories of FP gases, which released in buffer layer and cause internal pressure in CFP (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.

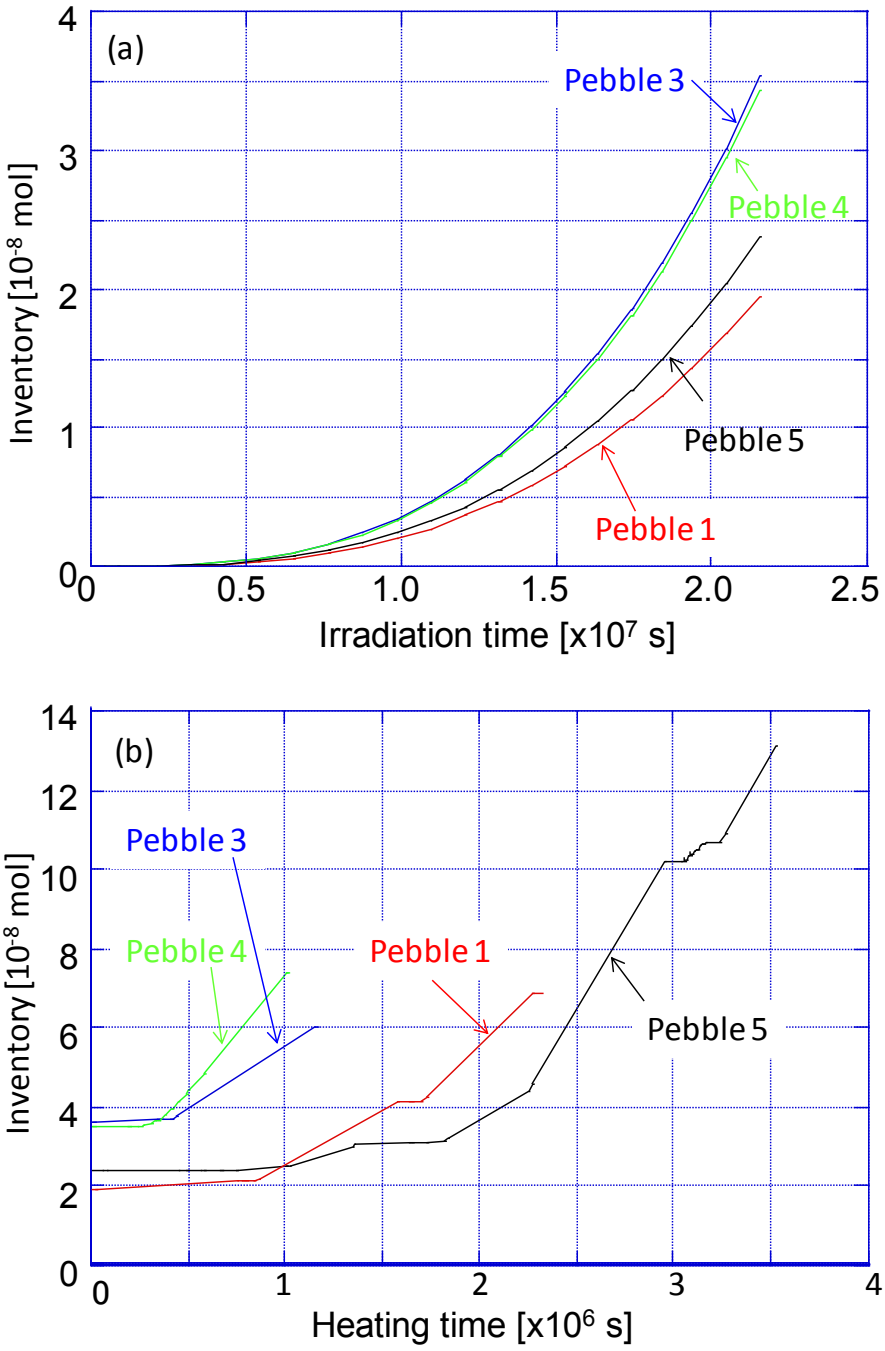


Fig. A-7 Histories of inventories of CO gas (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.

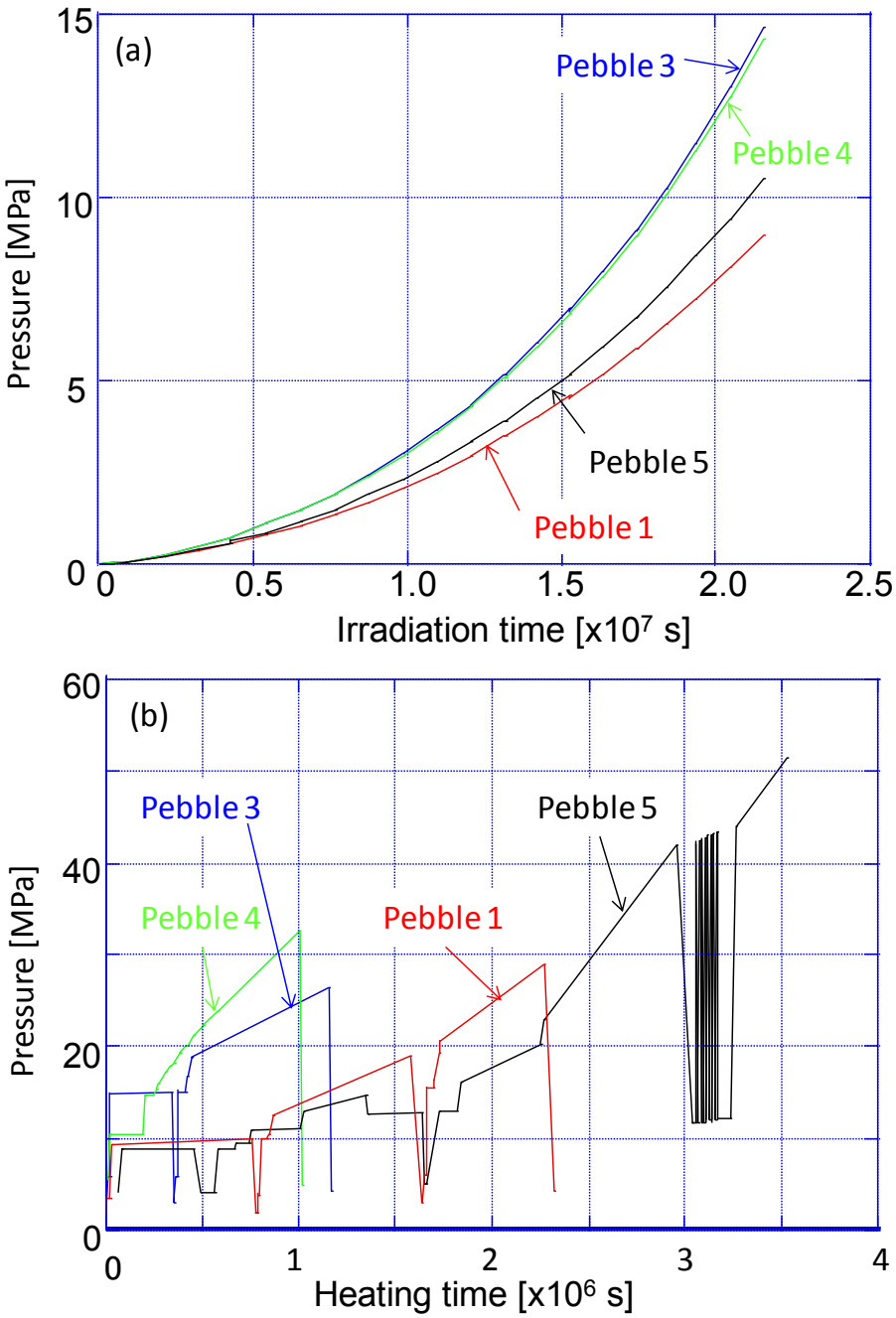


Fig. A-8 Histories of internal pressure in CFP (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.

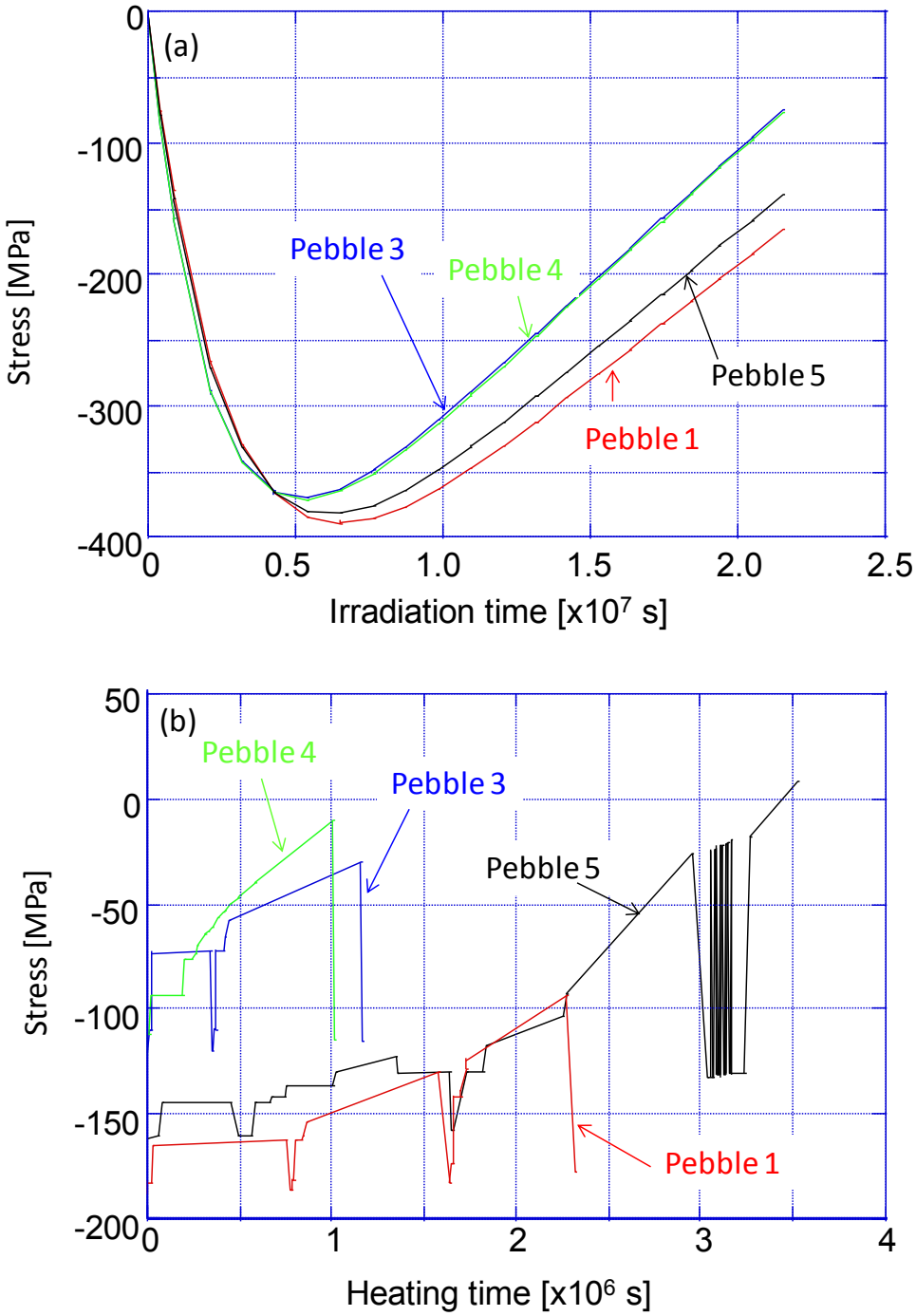


Fig. A-9 Histories of tangential stress on inner surface of SiC layer (case 2), (a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test.

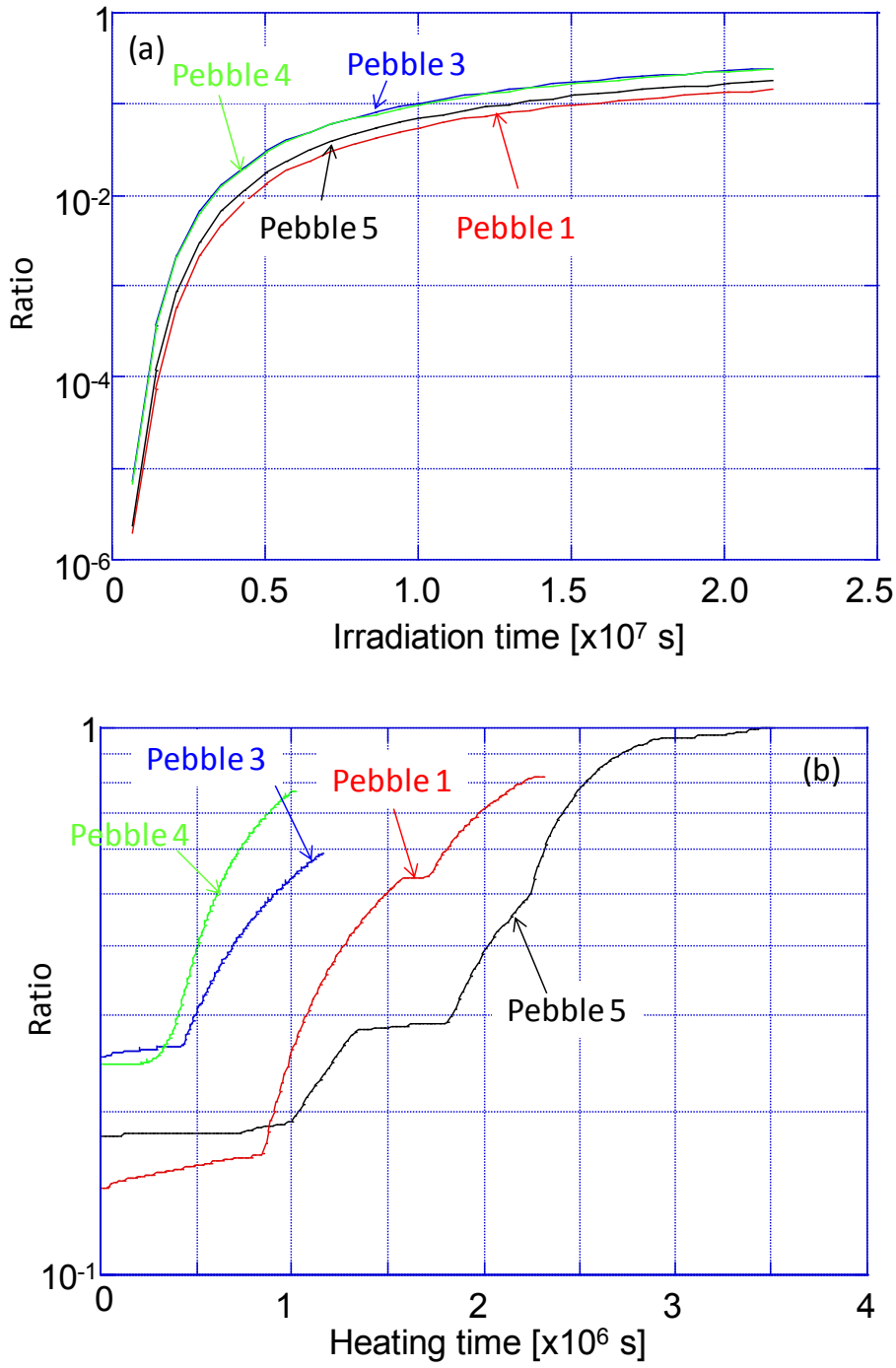


Fig. A-10 Histories of ratio of amounts of Ag released from fuel pebbles to amounts of Ag generated in CFPs until each time step (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test,
Note: through coating failure fraction of CFPs is assumed to be constant also in pebble 5, because through coating failure probability in pebble 5 is much smaller than initial through coating failure fraction.

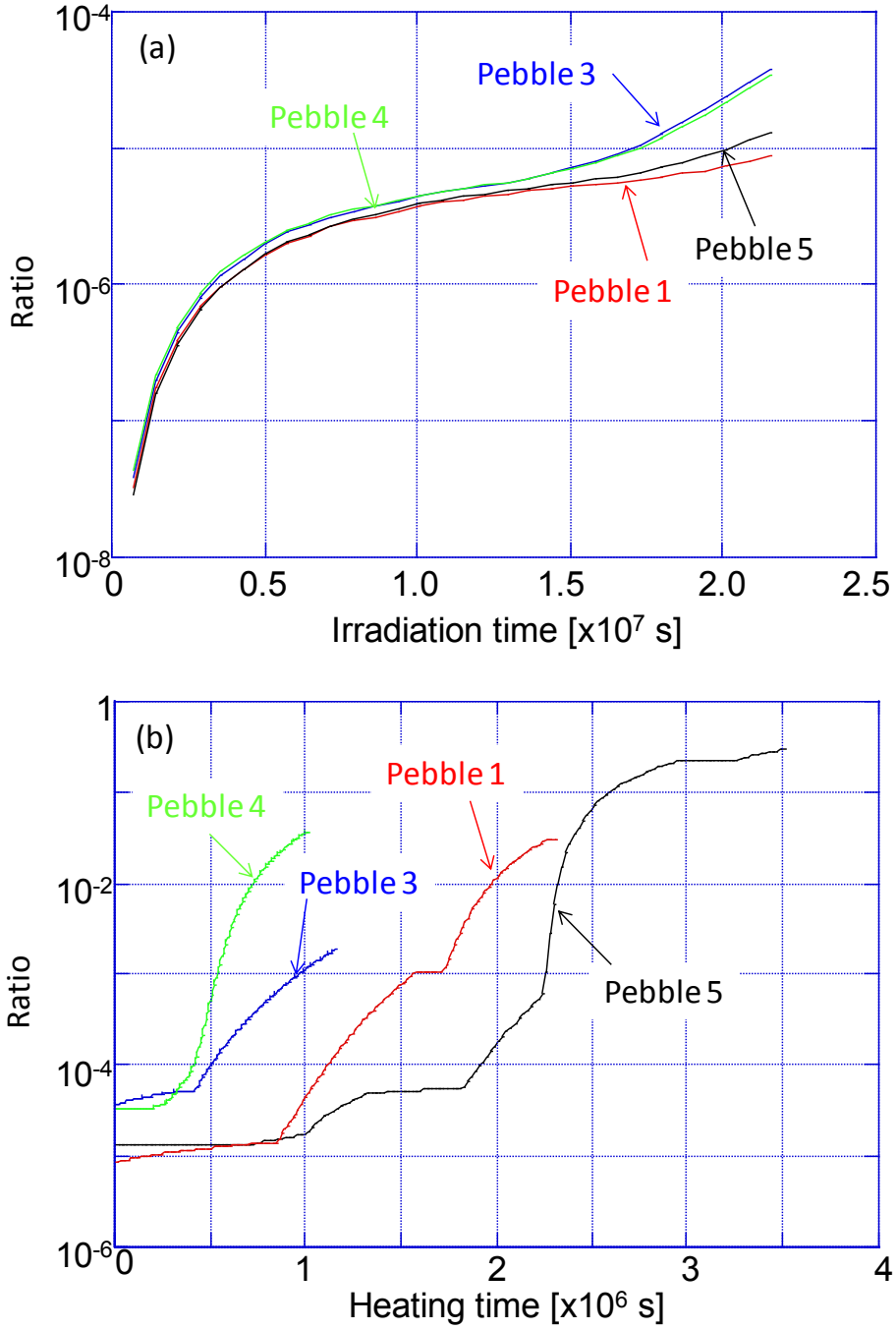


Fig. A-11 Histories of ratio of amounts of Cs released from fuel pebbles to amounts of Cs generated in CFPs until each time step (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test,
Note: through coating failure fraction of CFPs is assumed to be constant also in pebble 5, because through coating failure probability in pebble 5 is much smaller than initial through coating failure fraction.

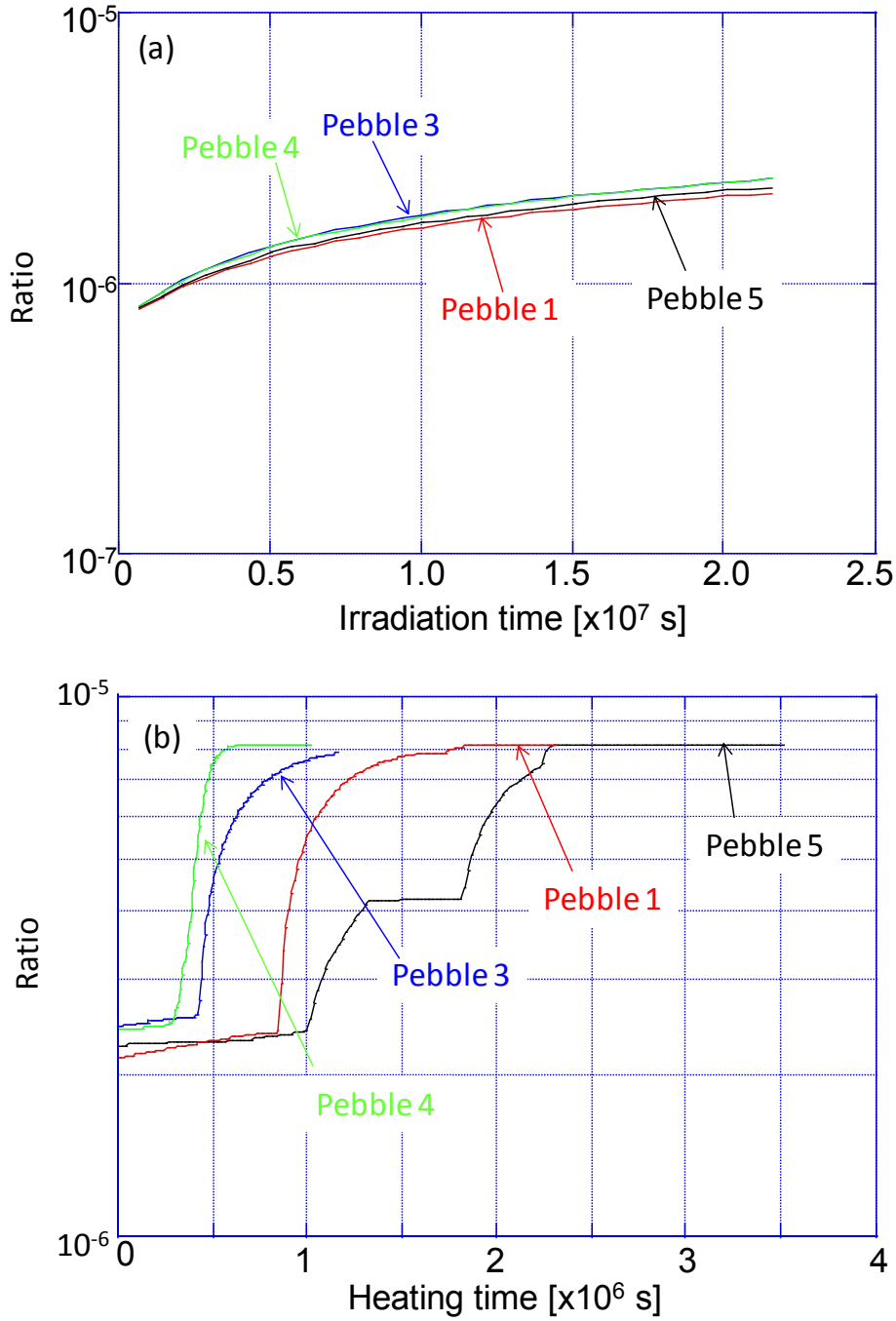
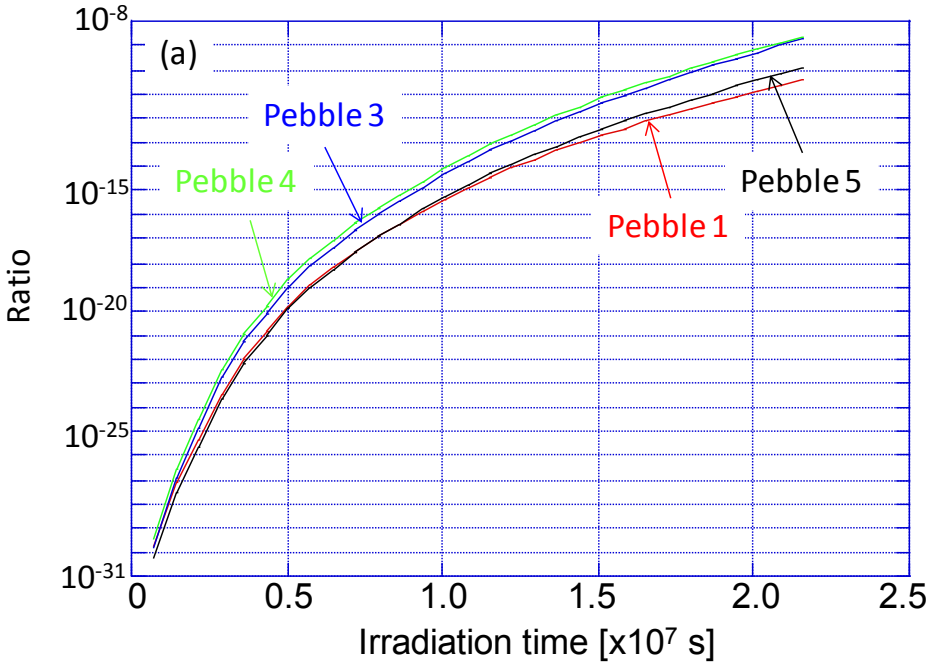


Fig. A-12 Histories of ratio of amounts of Kr released from CFPs to amounts of Kr generated in CFPs until each time step (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test,

Note1: Calculations of transportation of Kr in fuel pebble were failed.

Note2: Through coating failure fraction of CFPs is assumed to be constant also in pebble 5, because through coating failure probability in pebble 5 is much smaller than initial through coating failure fraction.



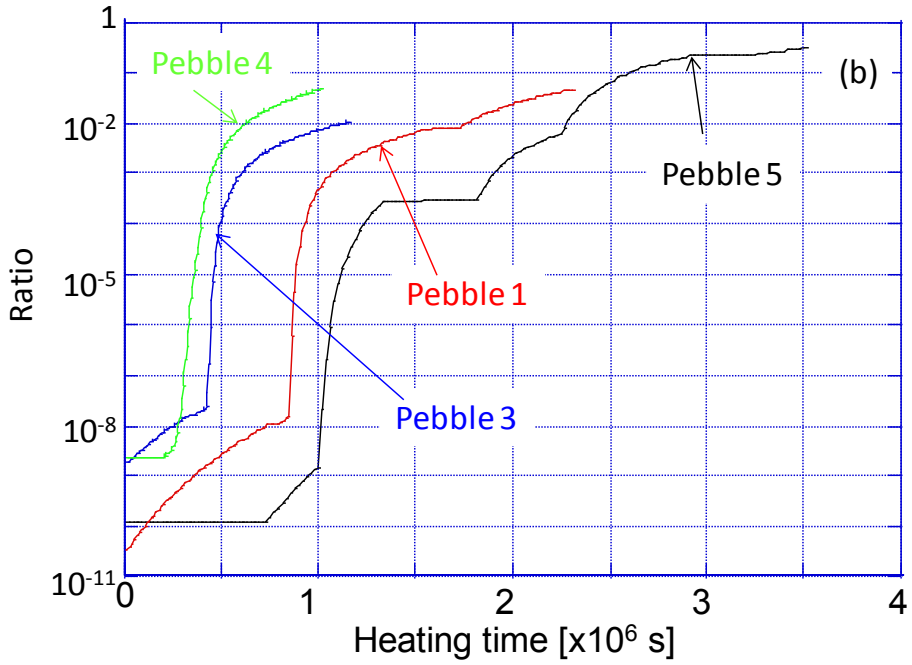


Fig. A-13 Histories of ratio of amounts of Sr released from fuel pebbles to amounts of Sr generated in CFPs until each time step (case 2),
(a) during irradiation, (b) during post-irradiation heating test,
Note: through coating failure fraction of CFPs is assumed to be constant also in pebble 5, because through coating failure probability in pebble 5 is much smaller than initial through coating failure fraction.

付録 B 計算例(2)

B-1 はじめに

本付録は、Code-B-2[B-1)]及び軽微なプログラム変更を施した FORNAX-A による計算例について纏めたものである。本付録における計算条件は文献[B-3)]に基づいて設定されたものである。

B-2 計算条件

- FP の各領域における拡散係数計算用の因子を Table B-1 に示す。
- FP の反跳距離等を Table B-2 に示す。
- CFP 及び燃料コンパクト内の温度分布の取扱について Table B-3 に示す。
- CFP 及び燃料コンパクトの仕様を Table B-4 及び B-5 に各々示す。
- 照射条件を Table B-6 に示す。
- 照射後加熱中の温度履歴を Fig. B-1 に示す。

B-3 Code-B-2 を用いた計算の結果

- Code-B-2[B-1)]を用い、初期健全 CFP 内の下記の値の計算を行った。
  - ✓ バッファ層に放出された内圧上昇の原因となる FP の CFP1 個あたりインベントリ(Fig. B-2, B-3)
  - ✓ バッファ層内の CO の CFP1 個あたりインベントリ(Fig. B-2, B-3)
  - ✓ CFP の内圧（Fig. B-2, B-3）
  - ✓ SiC 層内面周方向応力（Fig. B-4, B-5）
- 計算した SiC 層内面周方向応力を用い、FIGHT コードと同等の方法[B-1)]で健全 CFP の内圧破損確率を計算した。Fig. B-4, B-5 に示すように、初期健全 CFP の SiC 層内面周方向応力は常に負であるため、初期健全 CFP の内圧破損確率は 0 である。

B-4 軽微な変更を施した FORNAX-A を用いた計算

FORNAX-A のプログラムに軽微な変更を施し、Table B-1 に示すような因子を用いて計算した拡散係数を用いて FP 輸送を計算できるようにした。この軽微な変更を施した FORNAX-A を用いて計算した Ag, Cs, Kr, Sr の燃料コンパクトからの放出割合を各々Fig. B-6～B-13 に示す。

ただし、Kr については燃料コンパクト体系での計算ができなかった。原因は、母材中における Kr の拡散係数が大きすぎたことと考えられる。そこで、Kr については「CFP から放出された瞬間に燃料コンパクトから放出される」とした。また、図には示さなかったが、「母材中に均一に分散する U(汚染 U)の核分裂により生成した瞬間に燃料コンパクトから放出される」とした。即ち、すべての U が母材中に均一に分散する場合、Kr の放出割合は常に 1 である。

なお、Fig. B-6～B-13 に示したように、FP の放出割合は「すべての U が健全 CFP 中にある場合」「すべての U が貫通破損 CFP 中にある場合」「すべての U が母材中に均一に分布する場合」に分けて計算した。一方、Table B-2 に示したように、燃料コンパクト表面における境

界条件は「FP の濃度が 0」である。従って、一部の CFP が照射前から(貫通)破損しており、一部の U が母材中に均一に分布する場合における燃料コンパクトからの FP 放出割合は、上記の 3 ケースの加重平均となる[B-4)]。

なお、コンパクト ID332 からの照射後加熱中の Cs の追加放出割合については、Fig. B-14 に示すように実験値[B-5)]と計算値はよく一致した。なお、「計算値」は下記のように求めた。

① Fig. B-9, B-10, B-11 に示した照射後加熱中の Cs の放出割合の加重平均(Cs の総放出割合)を各タイムステップ毎に求める。
   - ✓ その際、破損 CFP 割合 0、母材中に均一に分布している U の割合は 9.66×10^{-7} とする。

② 上記①で求めた「各タイムステップにおける Cs の総放出割合」から、「照射終了時における Cs の総放出割合」を引く。

参考文献

B-1) 相原純他, SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算のための Code-B-2, JAEA-Data/Code 2012-030, 2013, 13p.

B-2) 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.

B-3) B. P. Collin, Generation IV Benchmarking of TRISO Fuel Performance Models under Accident Conditions – Modeling Input Data, INL/EXT-14-33117, 2014, 12p.

B-4) 相原純他, FORNAX-A の応用, JAEA-Technology 2015-040, 2016, 32p.

B-5) R.N. Morris, J.D. Hunn, C.A. Baldwin, F.C. Montgomery, T.J. Gerczak, and P.A. Demkowicz, “Initial results from safety testing of US AGR-2 irradiation test fuel”, Nuclear Engineering and Design, 329, pp.124-133, 2018.

Table B-1 Factors for diffusion coefficients[B-3)]

Element of FP	Factors for diffusion coefficients					
		Fuel kernel	Buffer	PyC	SiC	Fuel compact
Ag	D_{01} [m²/s]	6.7×10^{-9}	1×10^{-8}	5.3×10^{-9}	3.6×10^{-9}	1.6
	Q_{01} [kJ/mol]	165	0	154	215	258
	D_{02} [m²/s]	-	-	-	-	-
	Q_{02} [kJ/mol]					
Cs	D_{01} [m²/s]	5.6×10^{-8}	1×10^{-8}	6.3×10^{-8}	$5.5\times10^{-14}\exp(\Gamma/4.5)$ (b)	3.6×10^{-4}
	Q_{01} [kJ/mol]	209	0	222	125	189
	D_{02} [m²/s]	5.2×10^{-4}	-	-	1.6×10^{-2}	-
	Q_{02} [kJ/mol]	362			514	
Kr	D_{01} [m²/s]	$1.3\times10^{-12}/8.8\times10^{-15}$ (a)	1×10^{-8}	2.9×10^{-8}	$37/8.6\times10^{-10}$ (c)	6×10^{6}
	Q_{01} [kJ/mol]	126/54(a)	0	291	657/326(c)	0
	D_{02} [m²/s]	$0/6.0\times10^{-1}$ (a)	-	2.0×10^{5}	-	-
	Q_{02} [kJ/mol]	0/480 (a)		923		
Sr	D_{01} [m²/s]	2.2×10^{-3}	1×10^{-8}	2.3×10^{-6}	1.2×10^{-9}	1×10^{-2}
	Q_{01} [kJ/mol]	488	0	197	205	303
	D_{02} [m²/s]	-	-	-	1.8×10^{6}	-
	Q_{02} [kJ/mol]				791	

Diffusion coefficient D [m²/s] at temperature T [K] is calculated as

$D = D_{01}\exp(-Q_{01}/R/T) + D_{02}\exp(-Q_{02}/R/T)$, R: gas constant

(a) First values used in irradiation conditions / Second values used in accidental conditions.

(b) Γ: fast neutron fluence (1×10^{25} /m², E > 0.18 MeV).

(c) First values used above 1626 K / Second values used below 1626 K.

Table B-2 Factors for calculation with minory changed FORNAX-A

Element of FP	Recoil distance	Generation	Decay constant	boundary conditions at surfaces of CFP and fuel compact	barrier factor at each boundary
Ag	7.7 [μm]	Generated only directly by fission at constant rate during irradiation.	very small (7.3×10^{-10} [/s])	concentration is 0	1
Cs					
Kr					
Sr					

Table B-3 Treatment of temperature distribution in fuel compact

<table>
<tr><th></th><th></th><th>Code B-2 calculation</th><th>Calculation with minory changed FORNAX-A</th></tr>
<tr><td rowspan="2">CFP</td><td>During irradiation</td><td colspan="2">Temperature distribution in fuel compact is not considered.</td></tr>
<tr><td>Post-irradiation heating</td><td colspan="2">Heating temperatures are used.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fuel compact</td><td>During irradiation</td><td rowspan="2">-</td><td>Temperature distribution in fuel compact is not considered.</td></tr>
<tr><td>Post-irradiation heating</td><td>Heating temperatures are used.</td></tr>
</table>

Table B-4 Specifications of CFP [B-3)]

Fuel kernel diameter [μm]	507.7
Buffer thickness [μm]	97.7
IPyC thickness [μm]	41.9
SiC thickness [μm]	37.5
OPyC thickness [μm]	45.6
Fuel kernel density [g/cc]	10.858
Buffer density [g/cc]	0.99
Buffer theoretical density [g/cc]	2.25
IPyC/OPyC density [g/cc]	1.892
BAF of IPyC/OPyC	1.0418

Table B-5 Specifications of fuel compact [B-3)]

Shape	columnar
Rarius [mm]	6.1345
Thickness of virtual non-fuel region*1 [mm]	0.01

*1 FORNAX-A cannot treat bare vuel compact. Therefore, very thin non-fuel region is assumed to cover fuel compact.

Table B-6 Irradiation condition [B-3)]

	Compact ID: 332	Compact ID: 341
Burnup [%FIMA] (propotial to irradiation time)	10.54	10.62
Fast neutron fluence [$10^{25}/m^2$] E > 0.18 [MeV] (propotial to irradiation time)	3.53	3.47
Irradiation duration [s]	48314880	
Irradiation temperature [K]	1335.15	1286.15
Ambient pressure [MPa]	0.1	

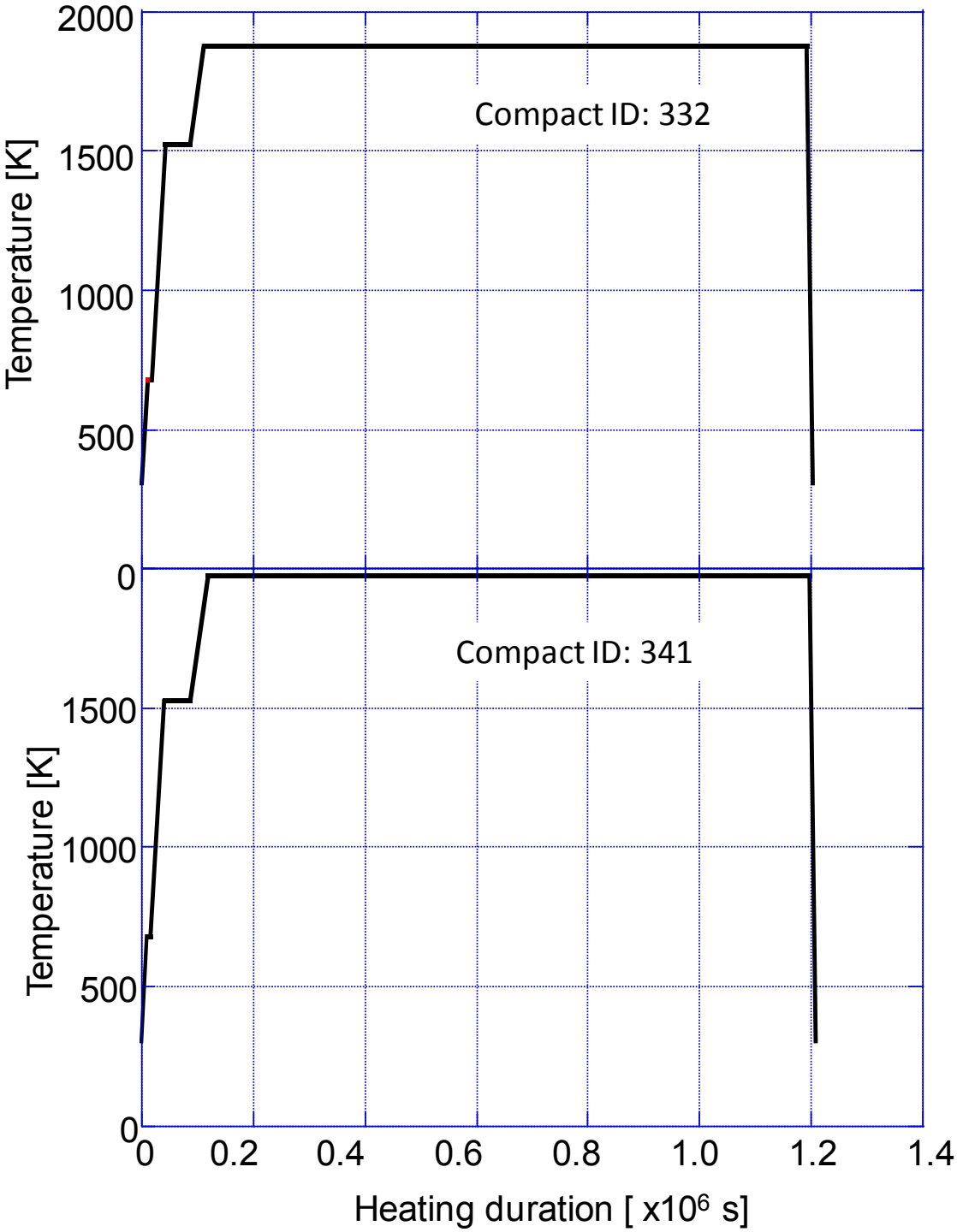


Fig. B-1 Temperature histories during post-irradiation heating test.

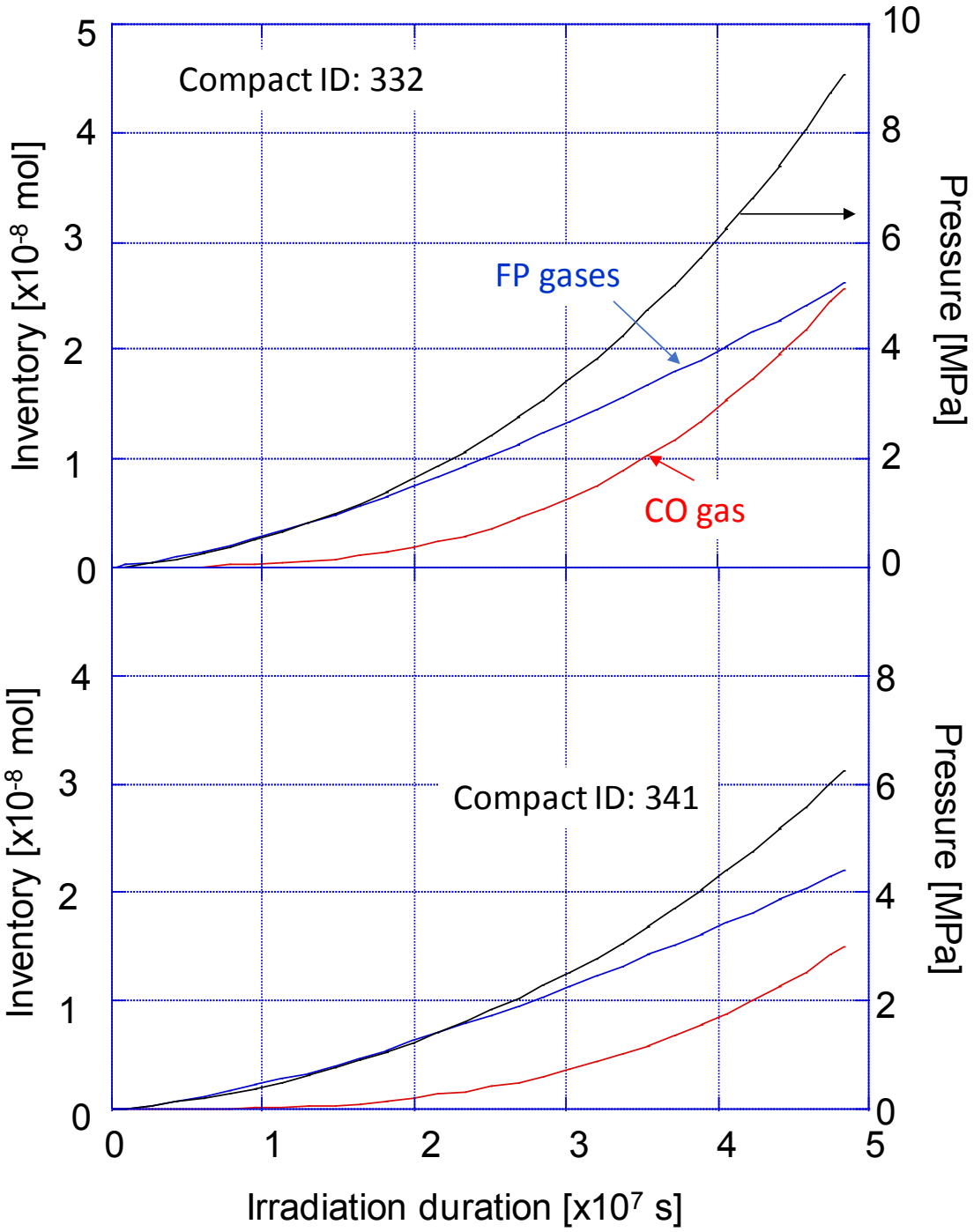


Fig. B-2 Histories of inventories of FP gases, which released in buffer layer and cause internal pressure, CO gas and internal pressure in CFP (during irradiation).

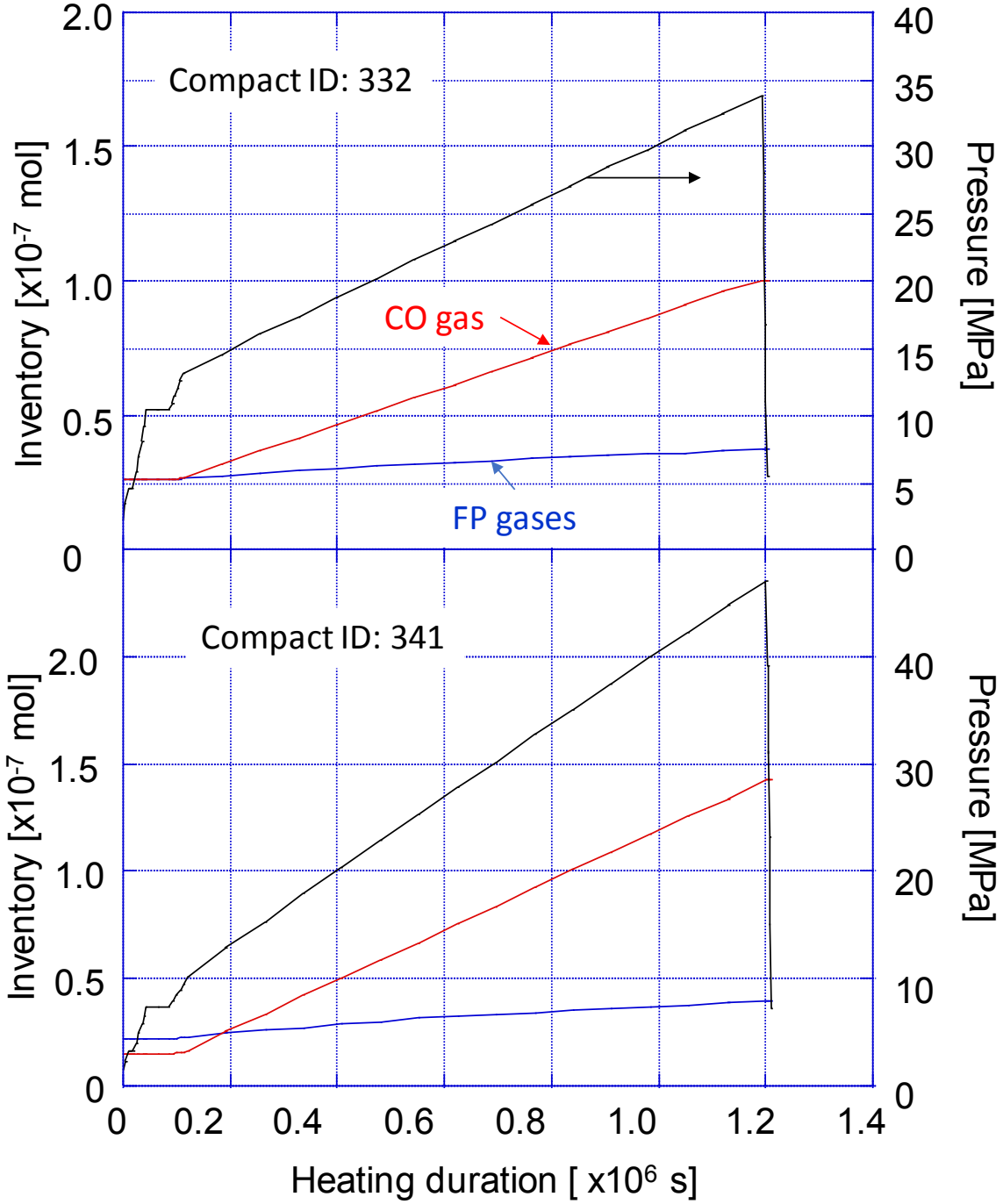


Fig. B-3 Histories of inventories of FP gases, which released in buffer layer and cause internal pressure, CO gas and internal pressure in CFP (during post-irradiation heating test).

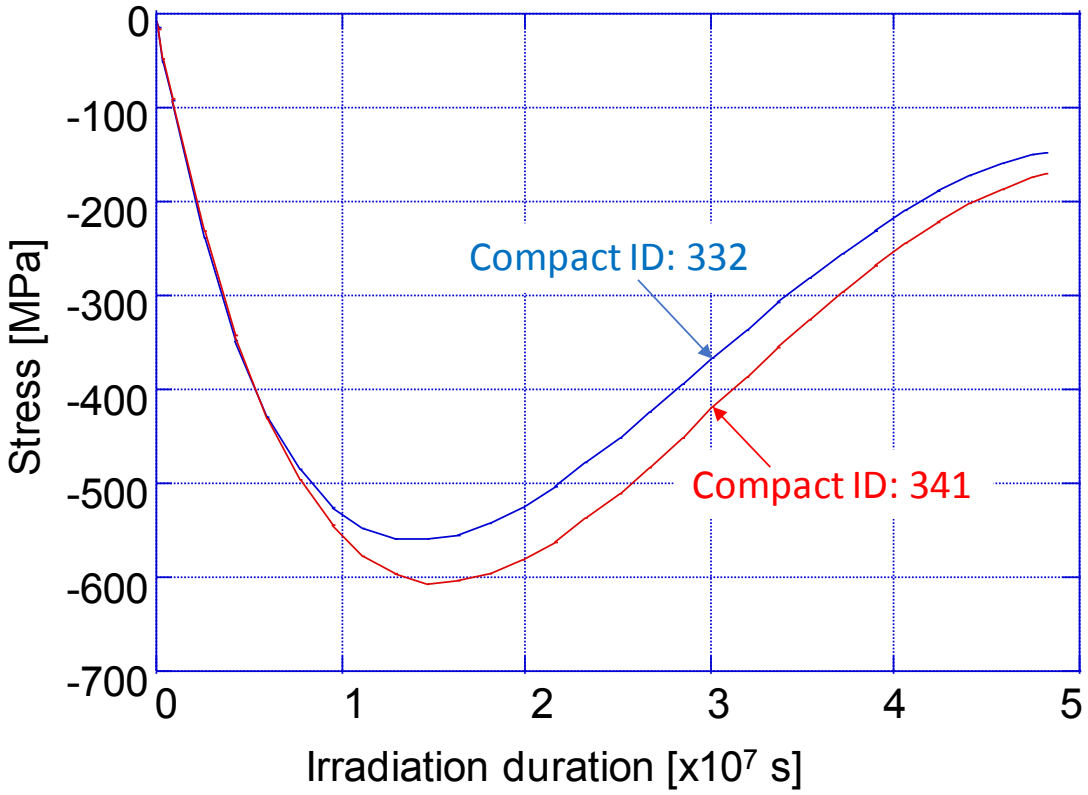


Fig. B-4 Histories of tangential stress at inner surface of SiC layer (during irradiation).

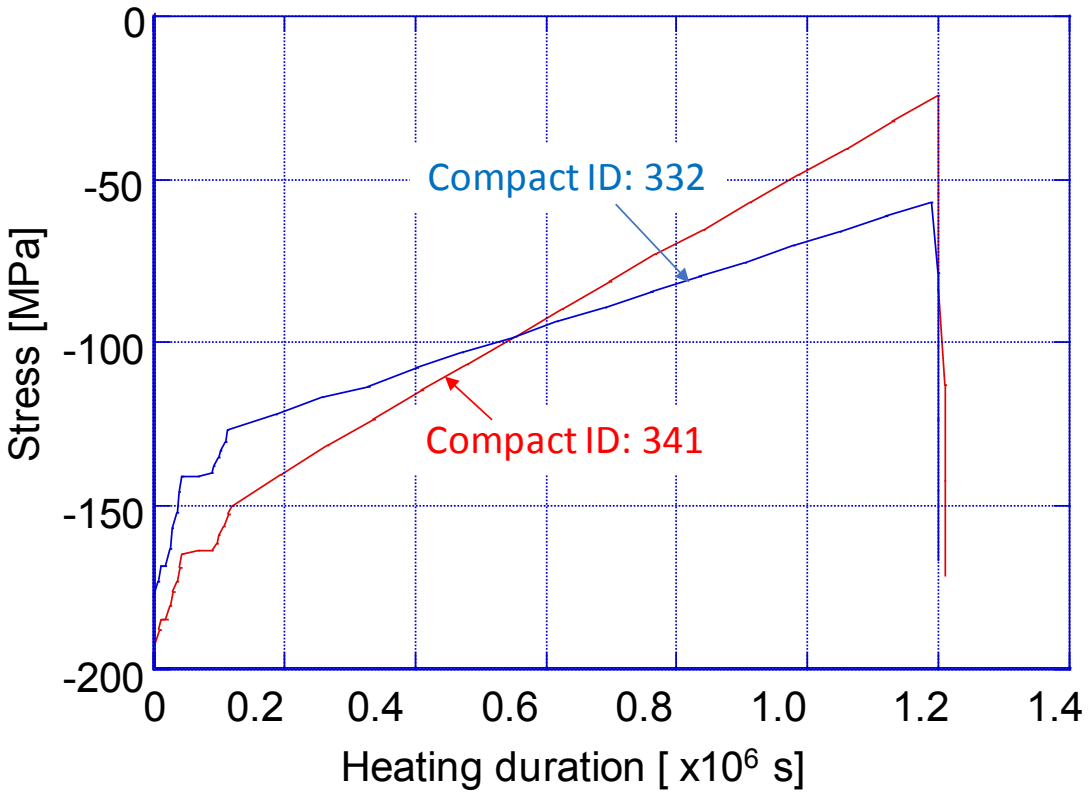


Fig. B-5 Histories of tangential stress at inner surface of SiC layer (during post-irradiation heating test).

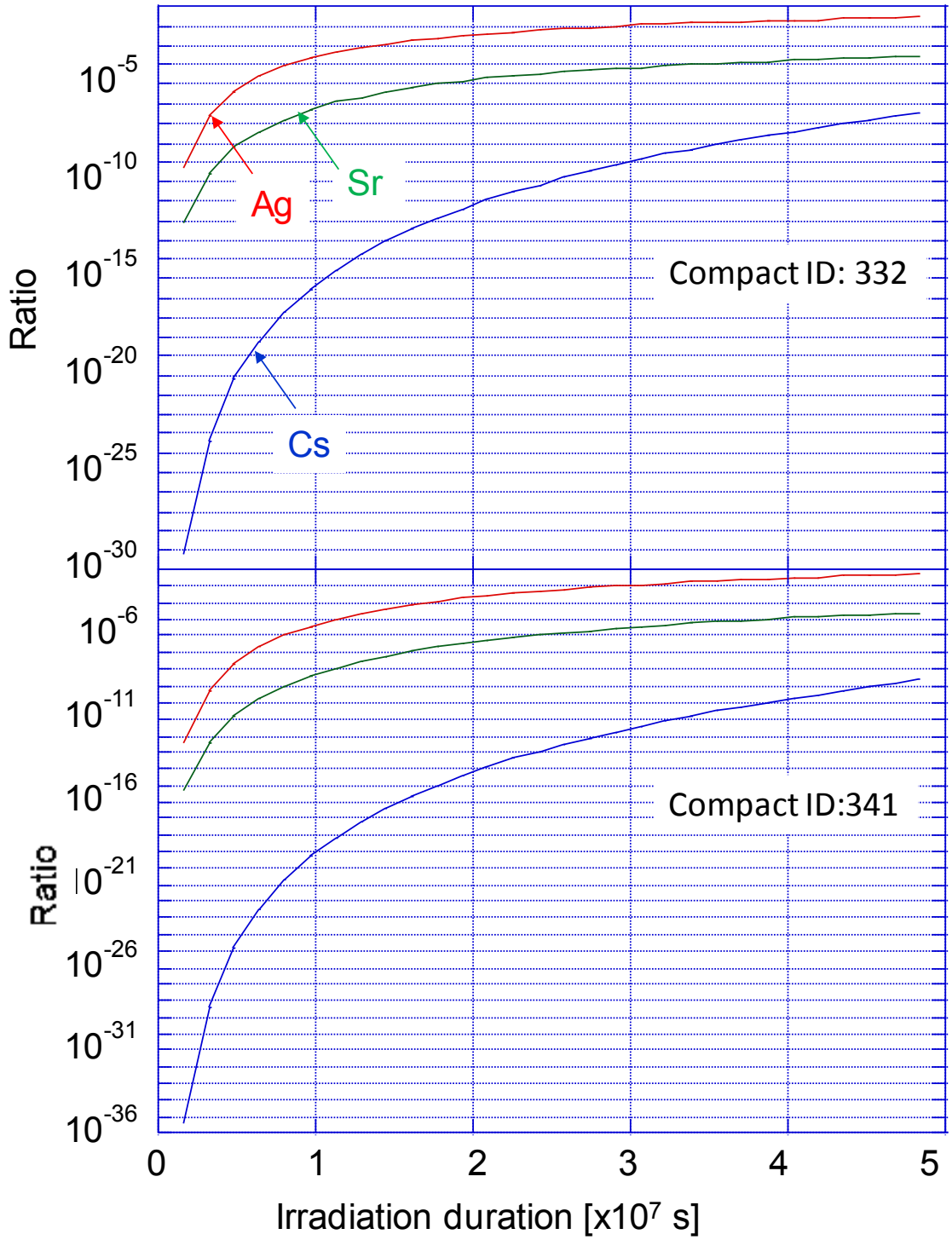


Fig. B-6 Histories of ration of amount of Ag, Cs and Sr released from fuel compact to generated amount until each time step, during irradiation (all U is assumed to be contained in fuel kernels of intact CFPs).

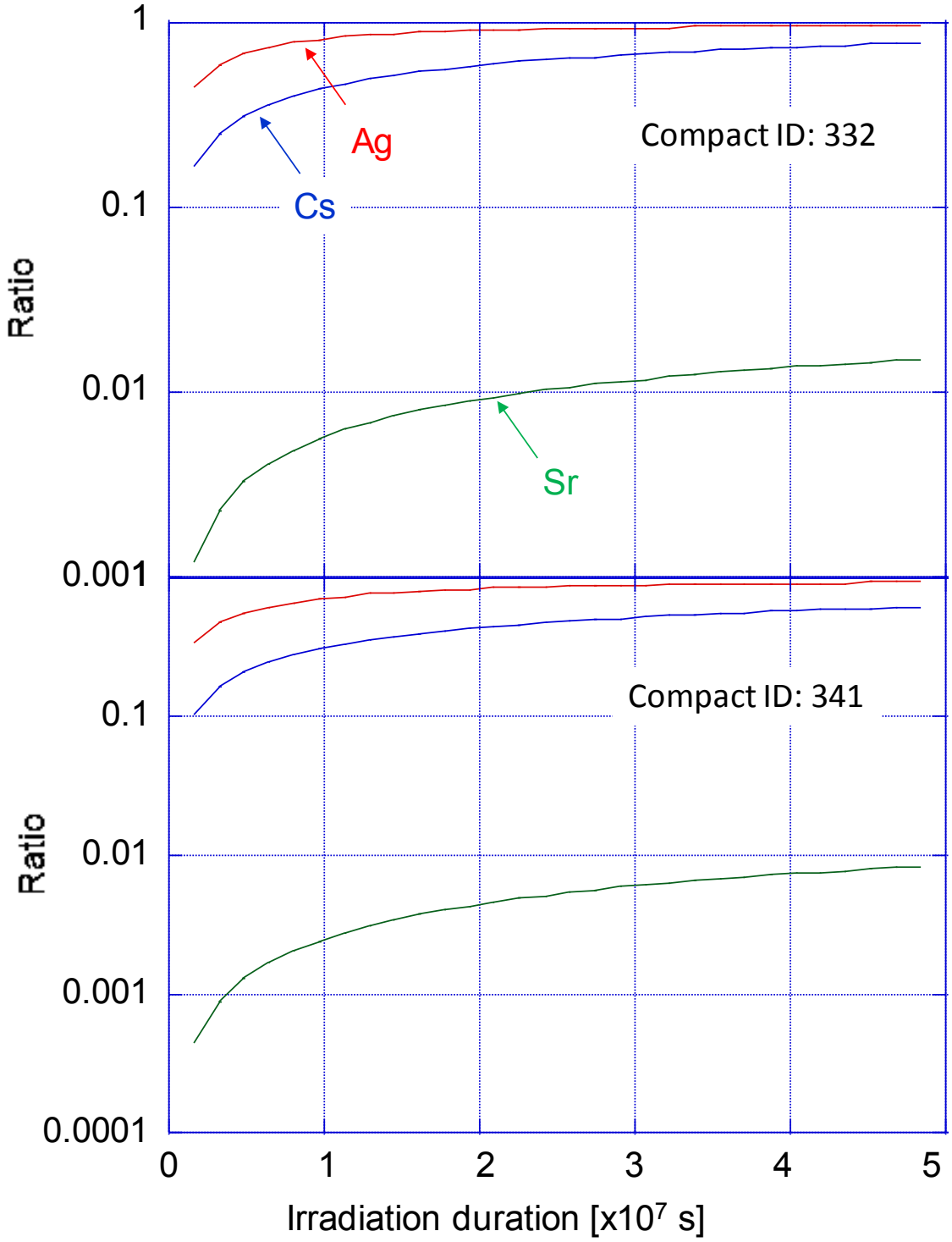


Fig. B-7 Histories of ration of amount of Ag, Cs and Sr released from fuel compact to generated amount until each time step, during irradiation (all U is assumed to be contained in fuel kernels of through-coating failed CFPs).

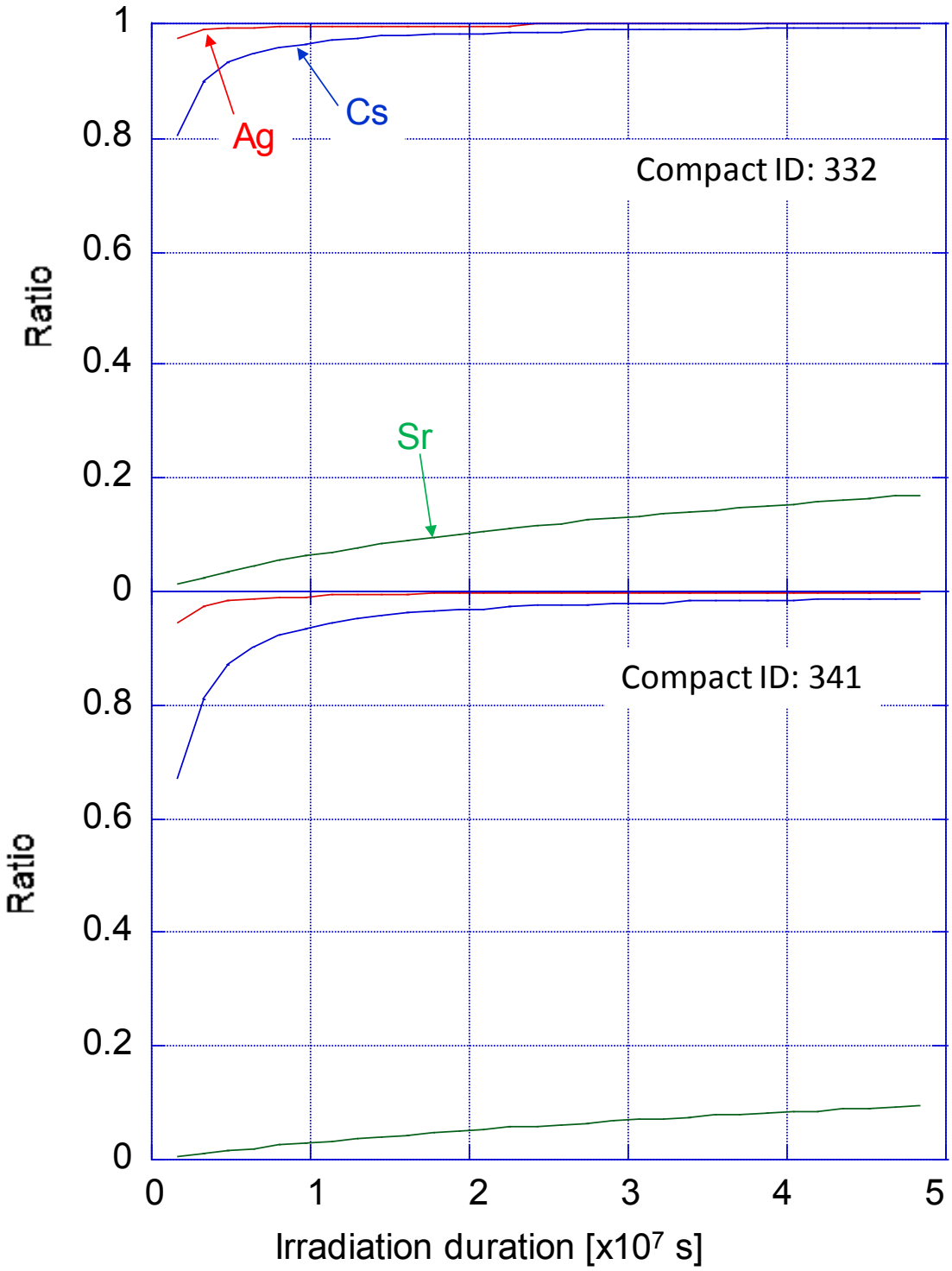


Fig. B-8 Histories of ration of amount of Ag, Cs and Sr released from fuel compact to generated amount until each time step, during irradiation (all U is assumed to be distributed uniformly in matrix).

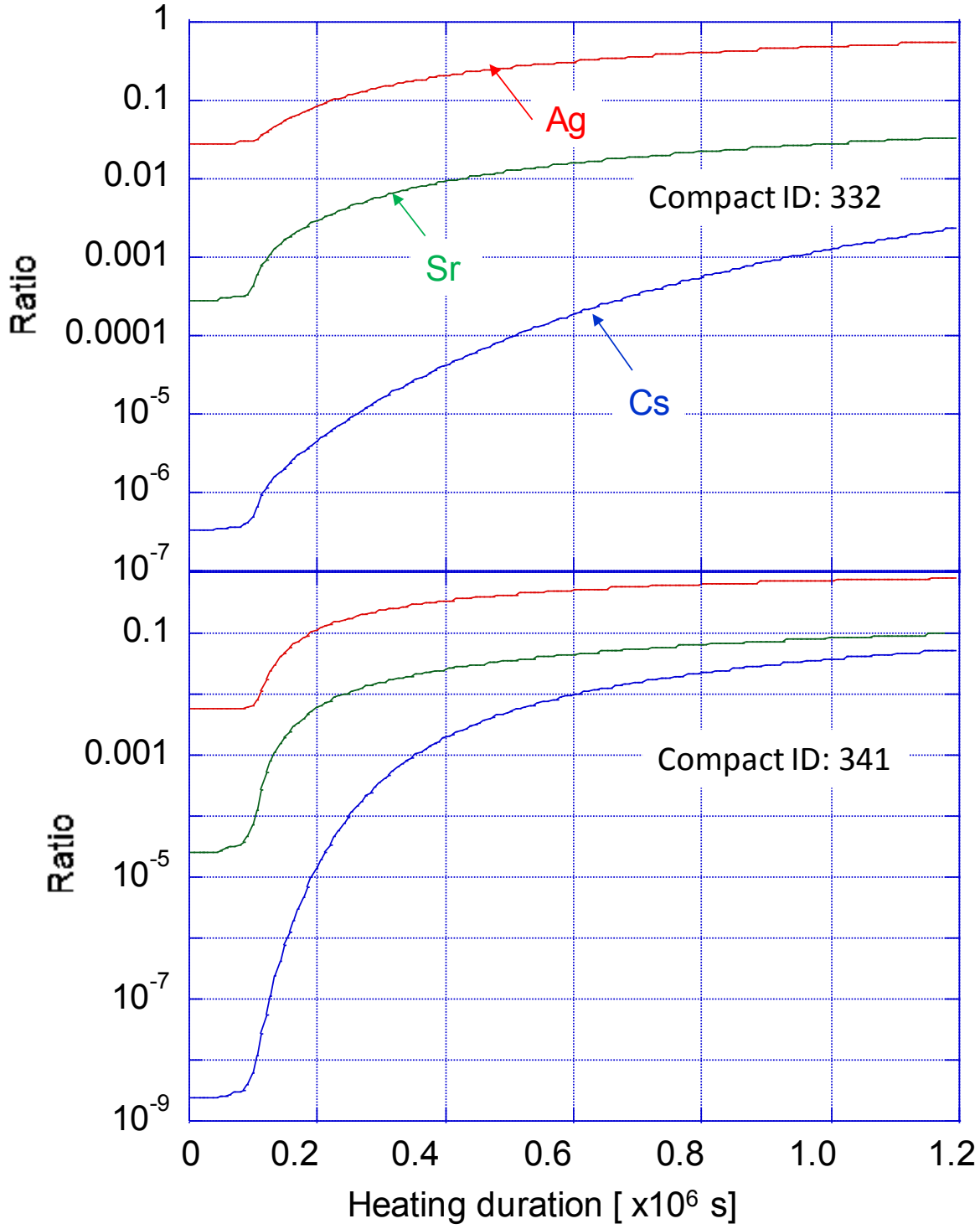


Fig. B-9 Histories of ration of amount of Ag, Cs and Sr released from fuel compact to generated amount until each time step, during post-irradiation heating test (all U is assumed to be contained in fuel kernels of intact CFPs).

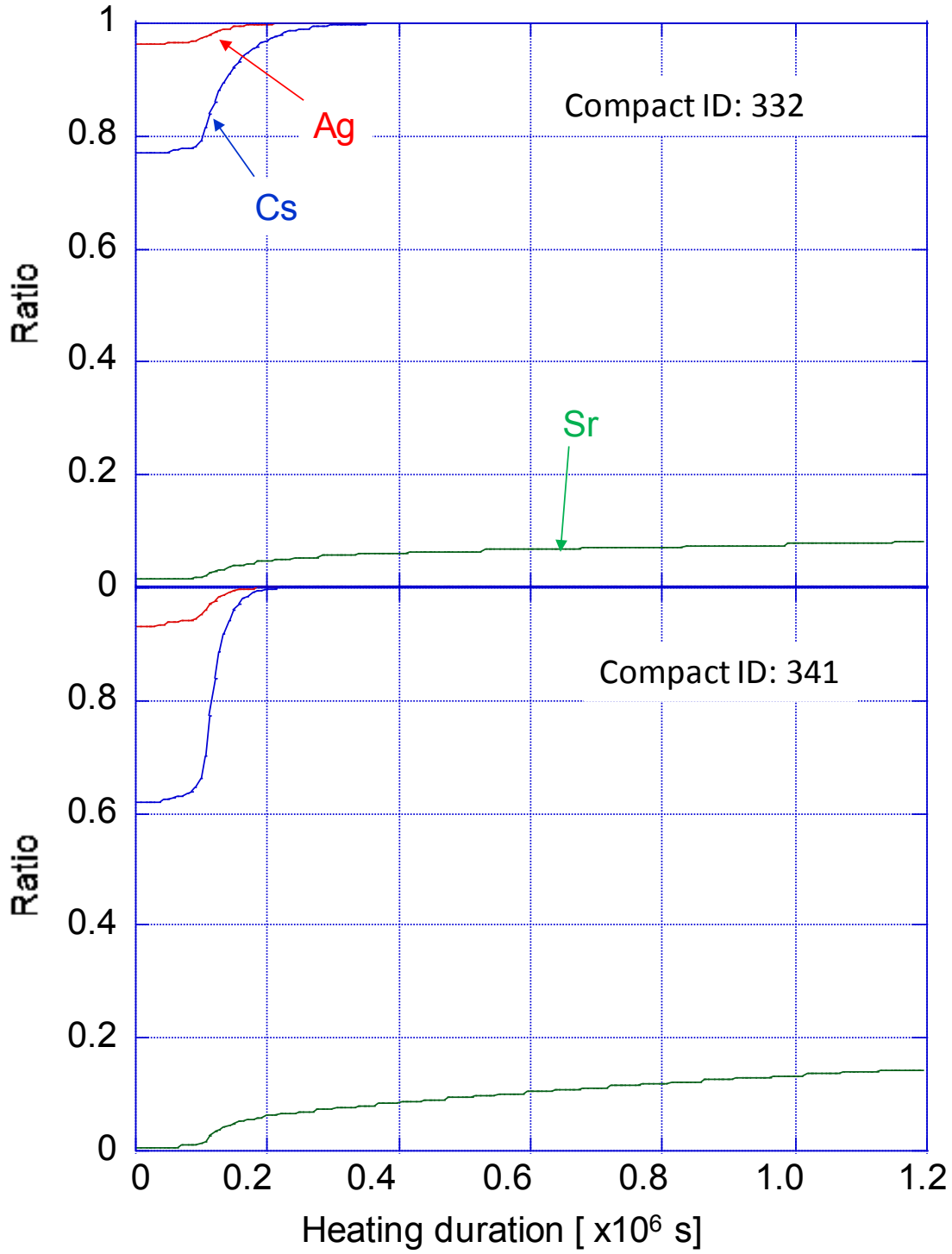


Fig. B-10 Histories of ration of amount of Ag, Cs and Sr released from fuel compact to generated amount until each time step, during post-irradiation heating test (all U is assumed to be contained in fuel kernels of through-coating failed CFPs).

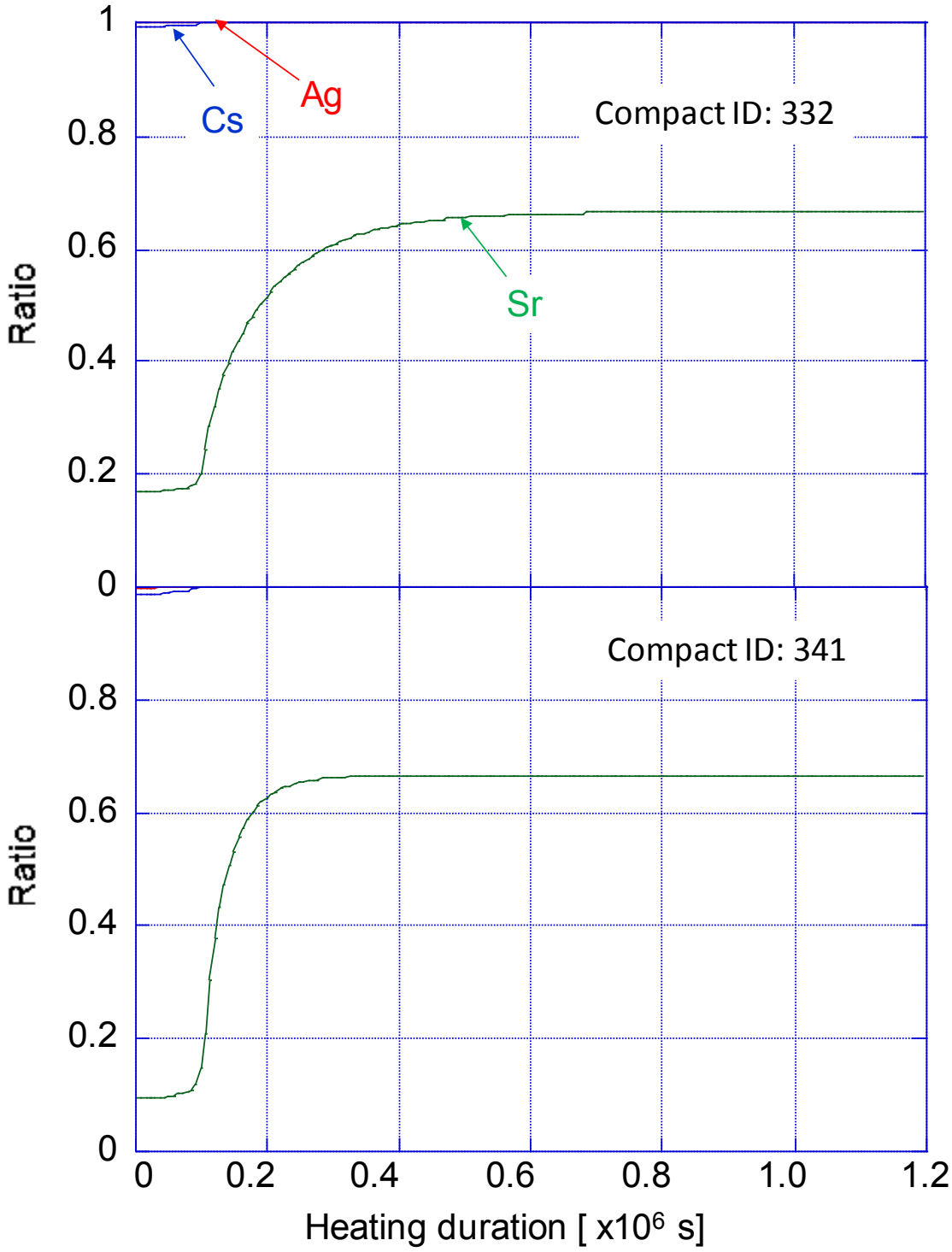


Fig. B-11 Histories of ration of amount of Ag, Cs and Sr released from fuel compact to generated amount until each time step, during post-irradiation heating test (all U is assumed to be distributed uniformly in matrix).

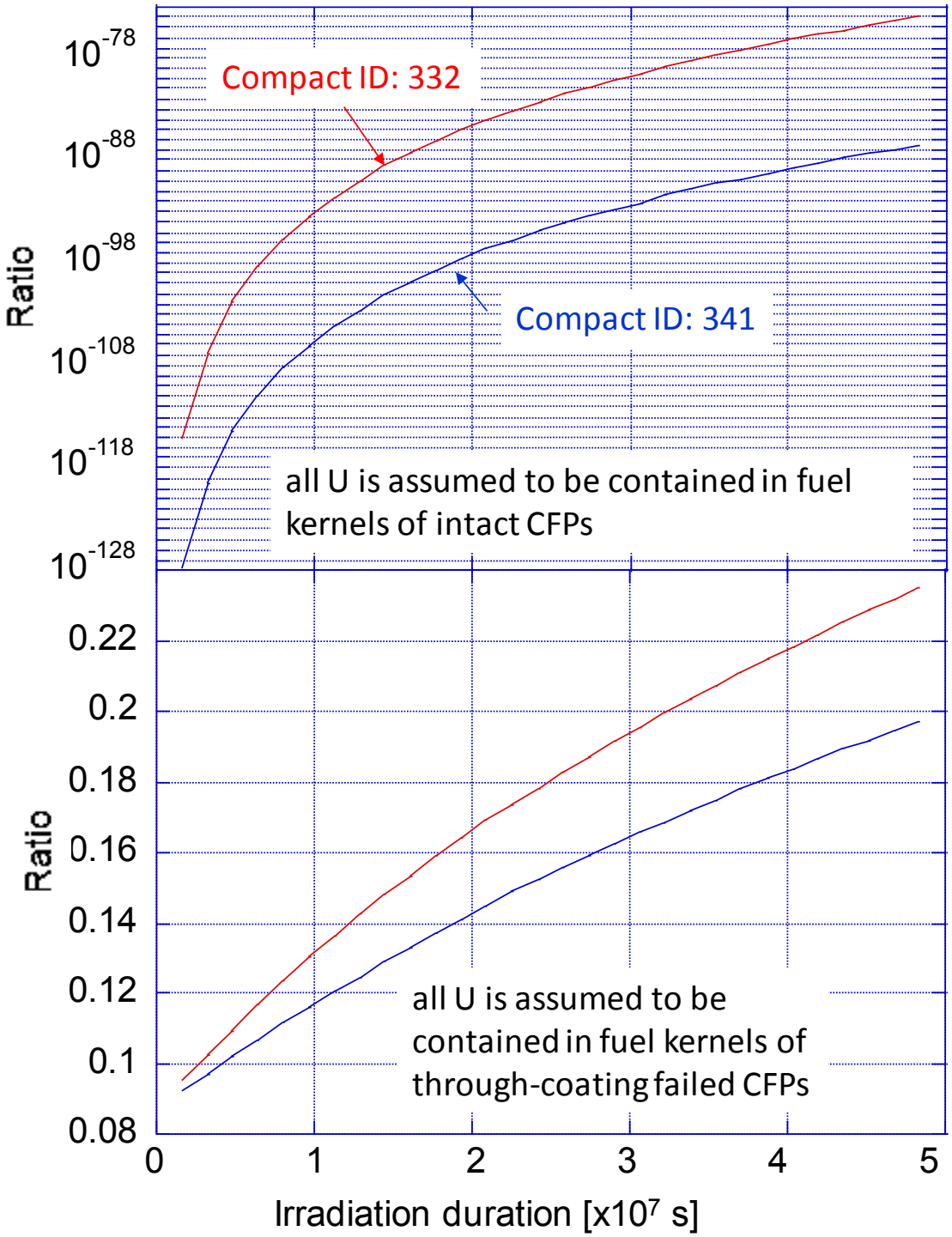


Fig. B-12 Histories of ratio of released amount of Kr from fuel compact to generated amount until each time step, during irradiation. It is assumed that all Kr released from CFPs are immediately released from fuel compact. Calculation of Kr diffusion in fuel compact system was impossible because of too large diffusion coefficient in fuel compact.

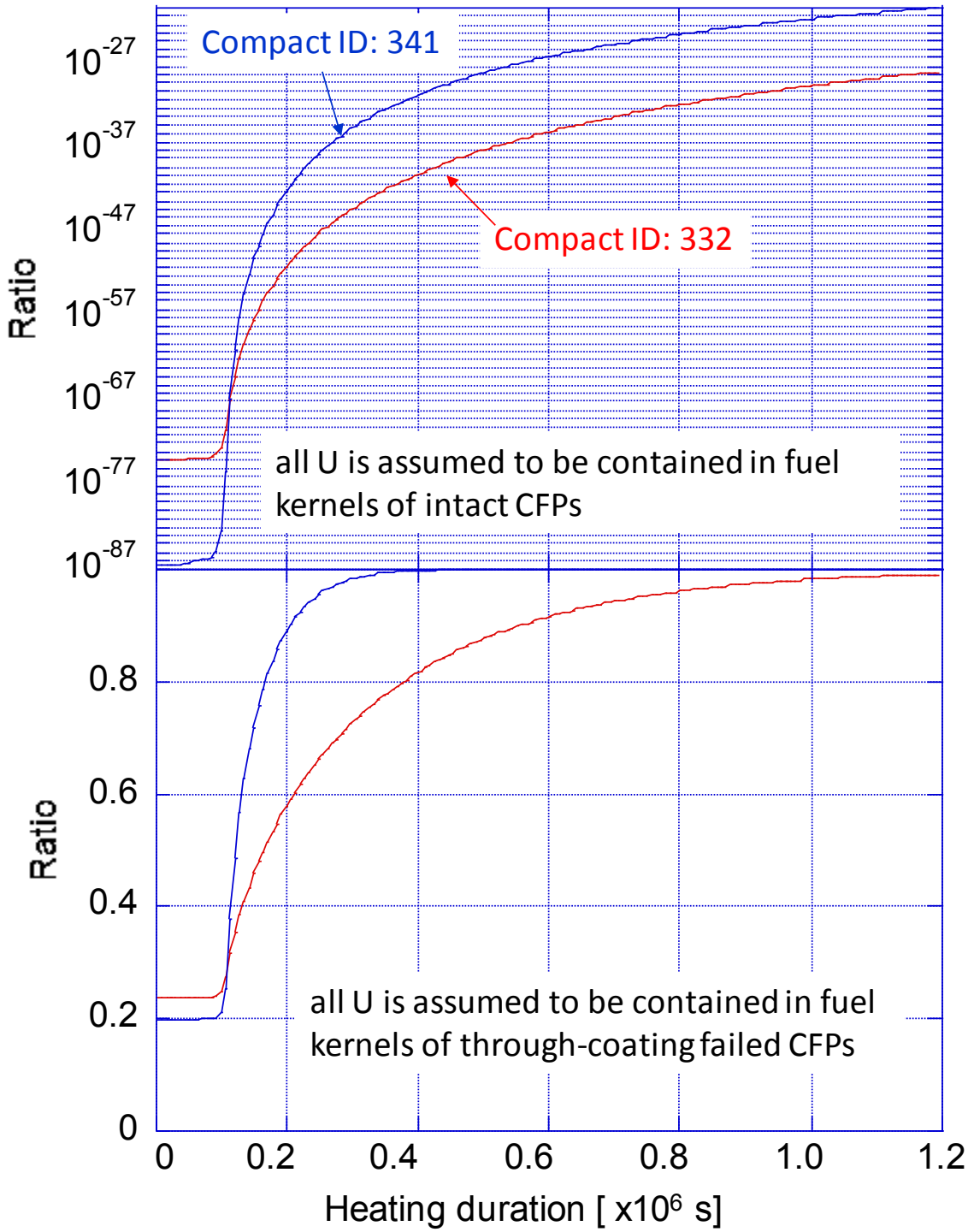


Fig. B-13 Histories of ratio of released amount of Kr from fuel compact to generated amount until each time step, during post-irradiation heating test. It is assumed that all Kr released from CFPs are immediately released from fuel compact. Calculation of Kr diffusion in fuel compact system was impossible because of too large diffusion coefficient in fuel compact.

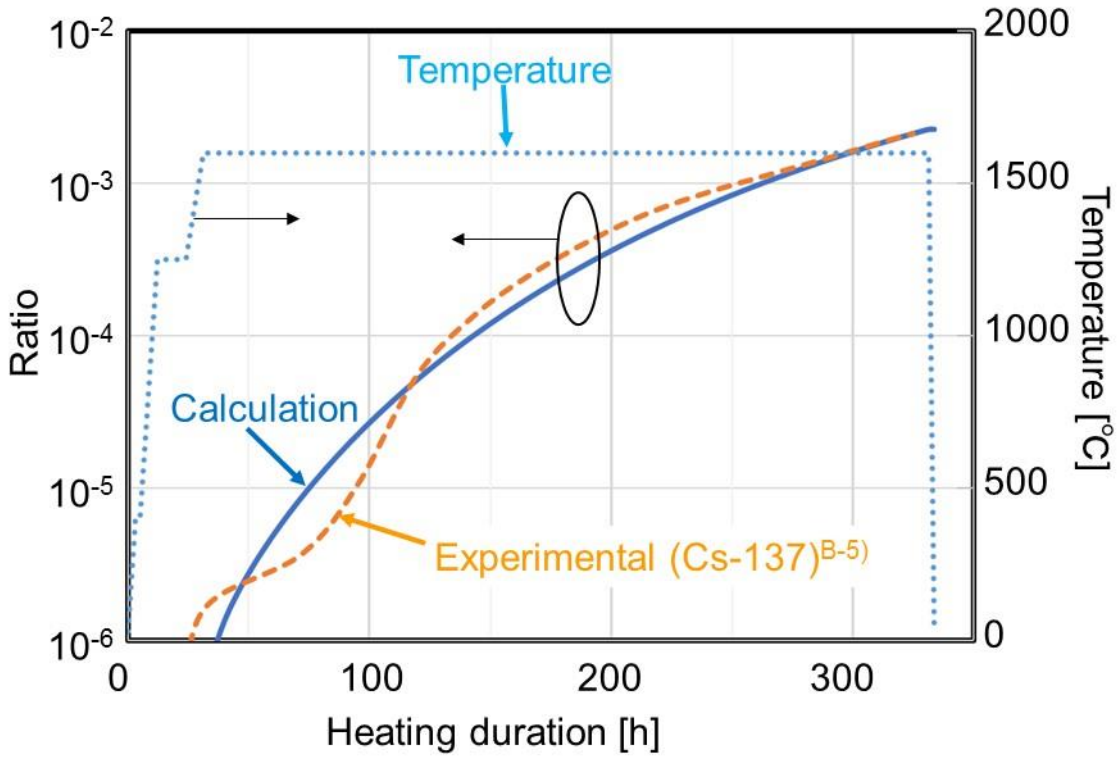


Fig. B-14 Histories of additional release ratio of Cs from fuel compact during post-irradiation heating. (Compact ID: 332)

Note;

- ✓ "Additional release ratio (calculation)" means ratio of "additional release amount (calculation)" from fuel compact to "generated amount until each time step (calculation)".
- ✓ "Additional release ratio (calculation)" means difference between "release rario (calculation)" and "release ratio at end of irradiation (calculation)".
- ✓ Calculated values are under assumption that no CFP are failed and fraction of U distributed uniformly in matrix is 9.66 x 10^{-7}.

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

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^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		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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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]	℃		K
光束	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		$s^{-1}\ mol$

(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（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
粘度	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	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
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	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
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}	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 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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=10^5Pa
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
バーン	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
エルグ	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}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	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[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$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		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
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）