

## 実用高温ガス炉システムにおける被覆燃料粒子の 健全性評価

Evaluation of Integrity of Coated Fuel Particles of Practical High Temperature  
Gas-cooled Reactor System

相原 純 植田 祥平 大橋 弘史 橘 幸男

Jun AIHARA, Shohei UETA, Hirofumi OHASHI and Yukio TACHIBANA

原子力水素・熱利用研究センター  
小型高温ガス炉研究開発ユニット

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

February 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

実用高温ガス炉システムにおける被覆燃料粒子の健全性評価

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター

小型高温ガス炉研究開発ユニット

相原 純、植田 祥平、大橋 弘史、橘 幸男

(2012年12月7日 受理)

高温ガス炉(HTGR)は、冷却材にヘリウム、炉心構造物に黒鉛、燃料として直径1 [mm]弱の球状の被覆燃料粒子を用いる原子炉である。HTGRは、炉心の熱容量が大きく温度が急激に上昇しないこと、冷却材が相変態せず安定なことなどから安全性に優れた原子炉と考えられている。(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)の高温工学試験研究炉(HTR)は我が国最初のHTGRである。JAEAは更に、電気出力300 [MW]程度である実用高温ガス炉システムであるGas Turbine High Temperature Reactor 300 (GTHTR300)の設計を行っている。GTHTR300の設計においては、受動的かつ固有の安全性に基づいた安全設備の簡素化、冷却用及び給水用水系設備の簡素化、モジュール化による工期の短縮等の効果により経済性の点で有利なプラントとすることを目指している。GTHTR300の被覆燃料粒子の健全性については既に解析的評価が行われているが、その後、材料試験炉(JMTR)において公称7 [%FIMA]まで照射されたHTR燃料の予備的な照射後試験(PIE)により、被覆燃料粒子の破損原因の1つである内圧破損については新たな知見が加わった。そこで、既に発表した方法により、この先行照射試験結果よりGTHTR300の被覆燃料粒子の内圧破損率を外挿評価した。その評価結果、及び過去に行われた他の原因による被覆燃料粒子の破損についての解析結果を考慮すると、初期破損率がHTR初装荷燃料と同様である場合、事故時の一般公衆の被ばくの観点からGTHTR300の燃料交換時における炉心体積平均の被覆燃料粒子の破損率は十分に小さいと言える。

Evaluation of Integrity of Coated Fuel Particles of Practical High Temperature  
Gas-cooled Reactor System

Jun AIHARA, Shohei UETA, Hirofumi OHASHI and Yukio TACHIBANA

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

(Received December 7, 2012)

High temperature gas-cooled reactor (HTGR) is a type of fission reactor. Coated fuel particles are used in HTGR. Safety of HTGR is considered to be good, because large heat capacity of core of HTGR cause slow change in temperature and phase transformation of coolant does not occur. High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) in Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is the first HTGR in Japan. JAEA has designed Gas Turbine High Temperature Reactor 300 (GTHTR300), a practical HGTR system with electric power of about 300 [MW]. Target of GTHTR300 design is economy in expenditures. Evaluation of integrity of coated fuel particles of GTHTR300 has already been carried out. On the other hand, new knowledge on pressure vessel failure, one of the causes of failure of coated fuel particles under irradiation, was obtained by preliminary post irradiation examination (PIE) for HTTR fuel irradiated in Japan Materials Testing Reactor (JMTR) up to official burnup of 7 [%FIMA]. Then in this report, extrapolative evaluation of volume averaged pressure vessel failure probability was carried out based on method which is already published. Considering evaluated pressure vessel failure probability, in addition to corrosion behavior of SiC layer and fuel kernel migration of GTHTR300 coated fuel particles, already analyzed in past paper, volume averaged failure probability of coated fuel particles of GTHTR300 at refueling is small in view of public dose by accident, if initial failure probabilities of coated fuel particles are the same as those of the HTTR first loading fuel.

Keywords: High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), Gas Turbine High Temperature Reactor 300 (GTHTR300), Coated Fuel Particles, Preliminary Post Irradiation Examination, Pressure Vessel Failure

## 目次

1. 序論	1
2. 方法	2
2.1 内外挿評価	2
2.2 GTHTR300 の被覆燃料粒子の体積平均内圧破損率の外挿評価のための外挿計算条件	5
3. 結果と考察	6
4. 結論	6
謝辞	6
参考文献	7

## Contents

1. Introduction	1
2. Method	2
2.1 Inter/extrapolation evaluation method	2
2.2 Calculation conditions for evaluation of volume averaged pressure vessel failure fraction of coated fuel particles of GTHTR300	5
3. Result and discussion	6
4. Conclusion	6
Acknowledgement	6
References	7

## Table list

- Table 1 Specifications of coated fuel particles and irradiation conditions of calculation for comparison between irradiation result of HTTR and calculation result of failure probability of coated fuel particles.
- Table 2 Specifications of coated fuel particles of GTHTR300.
- Table 3 Irradiation conditions of calculation for evaluation of failure probability of coated fuel particles of GTHTR300.
- Table 4 Evaluation results of failure probability of coated fuel particles of GTHTR300.

## Figure list

- Fig. 1 Irradiation temperature distribution of calculation for comparison between irradiation result of HTTR and calculation result of failure probability of coated fuel particles.
- Fig. 2 Irradiation temperature histories of calculation for estimation of failure probability of fuel of GTHTR300.

This is a blank page.

## 1. 序論

高温ガス炉(HTGR)は、冷却材にヘリウム、炉心構造物に黒鉛、燃料としてセラミックス被覆燃料粒子を用いた原子炉である。HTGR は、炉心の熱容量が大きく温度が急激に上昇しないこと、冷却材が相変態せず安定なことなどから安全性に優れた原子炉と考えられている。高温ガス炉においては直径 1 [mm] 程度の球状の被覆燃料粒子を用いている。この被覆燃料粒子は、 $\text{UO}_2$  燃料核を、内側から以下の 4 層で被覆したものである。

- 低密度熱分解炭素層(バッファ層)  
 $\text{UO}_2$  燃料核から放出される核分裂生成物(FP)ガスや遊離酸素を溜める。
- 内側高密度熱分解炭素(IPyC)層  
 下記の炭化珪素(SiC)層蒸着時に原料ガスから  $\text{UO}_2$  核を保護する。
- SiC 層  
 主な強度部材。また、金属 FP の拡散障壁でもある。
- 外側高密度熱分解炭素(OPyC)層  
 SiC 層のクッションの役割を果たす。

(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)の大洗研究開発センターに建設された高温工学試験研究炉(HTR)は我が国最初の HTGR である。2004 年に行った出力上昇試験(5)(PT-5)において世界で初めて 1223 [K]の高温ヘリウムガスが原子炉から取り出され<sup>1)</sup>、2010 年には高温試験運転(冷却材出口温度が約 1223 [K])での 50 日間の連続運転(高温連続運転(HP-11))が行われた。この運転の終了時において、HTR の実効全出力日数(EFPD)は約 370 日、累積積算出力は約 11.1 [GWd]となった<sup>2)</sup>。この高温連続運転(HP-11)において、 $^{88}\text{Kr}$  の放出率は過去に実施した短期間の高温試験運転における値に比べ若干上昇したが、運転に伴う被覆燃料粒子の破損を考慮しない場合の評価値とよく一致していることが確認された<sup>2)</sup>。即ち、被覆燃料粒子の有意な追加破損はなかったと考えられる。

更に、JAEA は 2001(平成 13)年度から、電気出力 300 [MW]程度<sup>3)</sup>である、高温ガス炉を用いたガスタービン発電システム(Gas Turbine High Temperature Reactor 300: GTHTR300)の設計を行っている。GTHTR300 の設計においては、受動的かつ固有の安全性に基づいた安全設備の簡素化、冷却用及び給水用水系設備の簡素化、モジュール化による工期の短縮等の効果により経済性の点で有利なプラントとすることを目指している<sup>4)</sup>。GTHTR300 の被覆燃料粒子の健全性については、片西ら<sup>4)</sup>により既に評価が行われている。即ち、内圧破損、Pd による SiC 層の腐食挙動及び被覆燃料粒子内での燃料核移動について解析的評価が行われ、被覆燃料粒子の健全性は燃料取り出し時(平均燃焼度約 120 [GWd/t]<sup>3)</sup>まで保たれるとの結論が得られている。特に、Pd による SiC 層の腐食及び被覆燃料粒子内での燃料核移動による被覆燃料粒子の破損は起こらないとされた<sup>4)</sup>。一方その後、材料試験炉(JMTR)において公称 7 [%FIMA] (約 70 [GWd/t])まで照射された HTR 燃料の予備的な照射後試験(PIE)<sup>5)</sup>により、内圧破損については新たな知見が加わった。

そこで、本稿において、この PIE の結果<sup>5)</sup>より外挿評価した GTHTR300 の炉心平均の被覆燃料粒子の内圧破損率を報告する。なお、本稿においては、照射温度及び被覆燃料粒子

の仕様に関わらず、上記の JMTR における照射での燃焼度よりも小さい燃焼度における内圧破損率を計算/評価することを「内挿計算/評価」、大きい燃焼度における内圧破損率を計算/評価することを「外挿計算/評価」と各々定義する。

## 2. 方法

### 2.1 内外挿評価

#### 2.1.1 内外挿評価法

内圧破損率の内外挿評価を行うためには、まず、次項で述べる方法で内圧破損率の内外挿計算を行う。

実際に想定される照射条件に対し、保守的に設定した照射条件を用いて内外挿計算を行い、内圧破損率は  $X$  という結果を得たとして、

- $X > 0$  の場合：内圧破損率は  $X$  未満と内外挿評価される。
- $X = 0$  の場合：内圧破損率は  $0$  と内外挿評価される。

また、実際に想定される照射条件に対し、非保守的に設定した照射条件を用いて内外挿計算を行い、内圧破損率は  $Y$  という結果を得たとして、

- $Y > 0$  の場合：内圧破損率は  $Y$  より大きいと内外挿評価される。
- $Y = 0$  の場合：内圧破損率は内外挿評価できない。

#### 2.1.2 内外挿計算方法

内圧破損率の内外挿計算は、既存の内圧破損率計算コード(FIGHT コード)<sup>6)</sup>を改良して行う。改良は、日本製高品質 HTGR 被覆燃料粒子の内圧破損率計算法について述べた文献 7)に準拠して行う。

##### (1) FIGHT コードの概要

FIGHT コードは以下の 3 つの部分より成る。

##### ①内圧計算部

照射条件に基づき、バッファ層内に発生する内圧を計算する。

##### ②被覆層の応力計算部

上記①により計算した内圧より被覆燃料粒子の被覆層の応力を計算する。

##### ③内圧破損率計算部

上記②により計算した被覆層の応力より内圧破損率を計算する。内圧破損率は、照射開始時には被覆層がすべて健全であった被覆燃料粒子(初期健全粒子)と、貫通破損には至っていないが SiC 層が破損していた被覆燃料粒子(初期 SiC 破損粒子)各々について計算される。

##### (2) FIGHT コードの改良(1)：内圧及び健全粒子の被覆層応力計算に用いる計算コード

文献 7)においては被覆燃料粒子の内圧及び健全粒子の被覆層応力計算のために Code-B-1<sup>8)</sup>を用いていたが、本稿では温度変動を取り扱えるように Code-B-1 を更に改良したもの(Code-B-2<sup>9)</sup>)を用いる。

##### (3) FIGHT コードの改良(2)：高密度熱分解炭素(PyC)の照射クリープ定数等

上記の Code-B-2 による健全粒子の被覆層応力計算を行うためには、Code-B-1 と同様に高密度熱分解炭素(PyC)の照射クリープ定数及び高速中性子束の関数である照射寸法変化率を設定する必要がある。これらは被覆燃料粒子の内圧破損率に対して大きな影響を与え、又、照射温度、及び後者については PyC の異方性に強く依存する<sup>10)</sup>。しかし、これらの値を実験によって新たに取得することは難しい。そこで、PyC の照射クリープ定数及び照射寸法変化率を文献 10)に基づいて設定することとした<sup>7)</sup>。文献 10)は、米国において様々な異方性を持つ PyC について様々な照射温度における照射データを整理して纏めたものである。

(4) FIGHT コードの改良(3) : PyC のベーコン異方性因子(BAF)

上記の文献 10)を用いて PyC の照射寸法変化率を設定するためには PyC の BAF が必要であるが、日本製の被覆燃料粒子の PyC の異方性は十分な精度で評価されているとは言えない<sup>7)</sup>。また、HTTR 用の被覆燃料粒子は日本製 HTGR 被覆燃料粒子の到達点と言えるものであり、将来の日本製実用 HTGR 被覆燃料粒子の被覆層の特性は HTTR 用の被覆燃料粒子に非常に近いものになると仮定する<sup>7)</sup>。そこで、序論で述べた JMTR において公称 7 [%FIMA](約 70 [GWd/t])まで照射された HTTR 燃料の予備的な PIE 結果<sup>5)</sup>に基づき、日本製実用 HTGR の被覆燃料粒子の PyC の照射寸法変化率を設定するための BAF を定めることとした<sup>7)</sup>。具体的には以下の通りである<sup>9)</sup>。

- ① 様々な BAF について文献 10)に基づいて設定した照射クリープ定数及び照射寸法変化率を用い、Code-B-2 で内圧、更に被覆層の応力を計算する。
- ② 上記①で計算した応力を用い、FIGHT コードで内圧破損率を計算し、BAF に対してプロットする。
- ③ 上記②で作成したプロットより、PIE で得た破損割合から評価した内圧破損率と合致する BAF を読み取る。
- ④ 上記③で読み取った値(1.007980)を、文献 10)に基づいて Code-B-2 での計算における日本製実用 HTGR の被覆燃料粒子の PyC の照射寸法変化率を設定するための BAF とする。

(5) FIGHT コードの改良(4) : その他の改良

一般に、PyC の照射寸法変化率によっては燃焼が進むにつれて被覆層の応力が低下することもあり得る。その場合、被覆層の応力に依存する FIGHT コードによる内圧破損率の計算値が低下する可能性がある。そのような実際の現象との矛盾を避けるため、ある時点における内圧破損率として、照射開始からその時点までの内圧破損率計算値の最大値を採用することとする<sup>7)</sup>。

(6) まとめ

以上により、本稿においては下記のように改良した FIGHT コードを用いて内圧破損率の内外挿計算を行うこととする。

- 被覆燃料粒子の内圧及び健全粒子の被覆層の応力計算には Code-B-2 を用いることとする。

- ▶ PyC の照射寸法変化率(高速中性子束の関数)と照射クリープ定数は文献 10)に基づいて設定する。
- ▶ 文献 10)に基づいて PyC の照射寸法変化率(高速中性子束の関数)を設定するにあたって必要な PyC の BAF は 1.007980 とする。
- ▶ ある時点における内圧破損率を、照射開始からその時点までの内圧破損率計算値の最大値とする。

### 2.1.3 HTTR の照射結果との比較

本項では、2.1.1 項で述べた方法での内外挿評価の妥当性を評価するため、序論で述べた HTTR の高温連続運転(HP-11)終了時までの照射条件に基づいて設定した計算条件を用いて前節で述べた方法で内圧破損率を内挿計算・更に内挿評価し、序論で述べた「有意な追加破損なし」という照射結果と比較する。本節の目的は被覆燃料粒子の健全性評価ではなく実験結果と評価結果の比較であるため、照射温度としてはノミナル値を用いる。

#### (1) 内挿計算条件

まず、内挿評価のための内挿計算の条件を定める。

序論で述べた通り、高温連続運転(HP-11)終了時における累積積算出力は約 11.1 [Gwd]<sup>2)</sup>である。HTTR 炉心の燃料棒は 4770 本であり、各々の燃料棒に含まれるウラン量は  $188.58 \pm 5.66$  [g]<sup>11)</sup>である。従って、HTTR 炉心には約 0.873 [t]以上のウランが存在する。従って、この高温連続運転(HP-11)終了時における平均の燃焼度は約 12.7 [Gwd/t]以下である。HTTR の被覆燃料粒子の取り出し時の平均燃焼度は 22 [Gwd/t]、最大燃焼度はその 1.5 倍の 33 [Gwd/t]<sup>12)</sup>であることから、高温連続運転(HP-11)終了時における最大燃焼度は約 19.1 [Gwd/t]以下と考えられる。

そこで、Table 1 及び Fig. 1 に示す被覆燃料粒子仕様及び照射条件における被覆燃料粒子の内圧破損率を前節で述べた方法で内挿計算することとした。高温試験運転時における燃料温度のノミナル値の解析値の各軸方向位置における最高値の分布が文献 13)に示されているが、燃料コンパクトと黒鉛スリーブの照射収縮量の差により、高温連続運転(HP-11)までに燃料温度が 40 [K]程度上昇したと考えられる<sup>14)</sup>。そこで、計算に用いる温度は、文献 13)に示された高温試験運転時における各軸方向位置におけるノミナル最高値を各々 40 [K]上昇させた(Fig. 1)。また、照射温度は各軸方向位置で一定とした。

#### (2) 内挿評価の結果

次に、上記(1)で設定した条件での内挿計算の結果を示し、更に内挿評価を行う。

上記の Table 1 及び Fig. 1 に示す被覆燃料粒子仕様及び照射条件における被覆燃料粒子の内圧破損率の内挿計算の結果、初期健全粒子及び初期 SiC 破損粒子の内圧破損率は各々 0 及び約  $2.0 \times 10^{-2}$ であった。

実際には、温度のみならず燃焼度にも分布が存在し、また、高温試験運転は運転時間の一部においてのみ行った。従って、実際の炉内の温度及び燃焼度の分布及び温度履歴を考慮して計算すると内圧破損率は上記の値より確実に小さくなる。従

って、初期健全粒子及び初期 SiC 破損粒子の内圧破損率は各々0及び約  $2.0 \times 10^{-2}$  未満と内挿評価される。現在装荷されている HTTR 初装荷燃料における初期 SiC 破損率は  $8 \times 10^{-5}$  である<sup>1)</sup>ことから、追加破損率は約  $1.6 \times 10^{-6}$  未満と内挿評価される。

### (3) 内外挿評価法の妥当性の評価

最後に、上記(2)の内挿評価結果と実験結果を比較し、2.1.1 項で述べた方法で GTHTR300 を含む将来の日本製実用 HTGR 被覆燃料粒子の内圧破損率を内外挿評価することの妥当性を評価する。

上記(2)で述べた内挿評価結果は高温連続運転(HP-11)終了時において「有意な追加破損なし」という実験結果と矛盾しない。従って、高温連続運転(HP-11)終了時までの照射結果から、2.1.1 項で述べた方法で HTTR 用の被覆燃料粒子の内圧破損率を内外挿計算することは概ね妥当と考えられる。

従って、2.1.2 項で述べたように将来の日本製実用 HTGR 被覆燃料粒子の被覆層の特性は HTTR 用の被覆燃料粒子に非常に近いものになると仮定すると、高温連続運転(HP-11)終了時までの照射結果から 2.1.1 項で述べた方法で GTHTR300 を含む将来の日本製実用 HTGR 被覆燃料粒子の内圧破損率を内外挿計算することは概ね妥当と考えられる。

## 2.2 GTHTR300 の被覆燃料粒子の体積平均内圧破損率の外挿評価のための外挿計算条件

GTHTR300 の燃料領域は 8 層の燃料ブロックから成る。燃料交換は EFPD にして 730 日毎に行うが、全ての燃料ブロックを新燃料ブロックと交換せず、半分は次のサイクルで使用する。具体的には以下の通りである<sup>3)</sup>。

- ① 第 2, 4, 6, 8 層目の燃料ブロックを取り出す。
- ② 第 1, 3, 5, 7 層目の燃料ブロックは真下の位置（各々、第 2, 4, 6, 8 層目の同じ径方向位置）に移動させる。
- ③ 空いた第 1, 3, 5, 7 層目には新燃料ブロックを装荷する。

GTHTR300 の体積平均被覆燃料粒子内圧破損率の外挿評価のための外挿計算に用いた被覆燃料粒子仕様及び各領域の照射条件を Table 2, 3 及び Fig. 2 に示す。第 6 層目のみ 2 つの領域に分割して照射条件を設定したが、その他の炉心層は各々 1 つの領域とした。また上記の通り、燃料交換は 730 日おきに半分ずつ行うため、照射期間が 730 日の炉心層と 1460 日の炉心層が混在する。外挿計算に用いた各領域の燃焼度としては、その領域での最大値を採用した。なお、序論で述べたように、被覆燃料粒子の取り出し時の平均燃焼度は約 120 [GWd/t]<sup>3)</sup>であるが、Table 3 に示す燃焼度の平均と一致するわけではないことに注意が必要である。Table 3 に示した燃焼度は、第 1, 3, 5 及び 7 層目については取り出し時のものではなく、また、第 2, 4, 6 及び 8 層目については取り出し時のものではあるが、各領域における平均値ではなく最大値である。また、ここでの目的は健全性評価なので、燃料温度としてはシステムティックランダム温度を用いた。序論で述べた片西らによって過去に行われた GTHTR300 の被覆燃料粒子の健全性評価<sup>4)</sup>に用いられた 10 個のチャンネルのシステムティックランダム温度から、各タイムステップ毎、各炉心層毎に最も高い温度を採用した。燃料交換を上記の

ように行うことから、偶数番号の炉心層の履歴の前半は、すぐ上の炉心層のものと同一である(Fig. 2)。

### 3. 結果と考察

Table 2, 3 及び Fig. 2 に示す条件で外挿計算した 730 日毎の燃料交換時における炉心体積平均の初期健全粒子及び初期 SiC 破損粒子の内圧破損率は各々約  $4.05 \times 10^{-4}$  及び約  $9.26 \times 10^{-1}$  であった。上記のように、用いた計算条件は各領域毎に最も保守的なものであるため、更に領域を細かく区切って外挿計算すれば、上記の値より確実に小さくなる。従って、燃料交換時における炉心体積平均の初期健全粒子及び初期 SiC 破損粒子の内圧破損率は、Table 4 に示すように各々約  $4.05 \times 10^{-4}$  未満及び約  $9.26 \times 10^{-1}$  未満と外挿評価される。なお、初期貫通破損率及び初期 SiC 破損率が HTTR 初装荷燃料<sup>14)</sup>と同様に各々  $2 \times 10^{-6}$  及び  $8 \times 10^{-5}$  である場合、燃料交換時における炉心体積平均の被覆燃料粒子の内圧破損率は  $4.82 \times 10^{-4}$  未満と外挿評価される。

序論で述べたように、内圧破損以外の被覆燃料粒子の破損原因である Pd による SiC 層の腐食及び被覆燃料粒子内での燃料核移動による被覆燃料粒子の破損については、過去に行われた解析的評価により起こらないとされ、その後新たな知見は加わっていない。従って、燃料交換時における体積平均の被覆燃料粒子の破損率は  $4.82 \times 10^{-4}$  未満と評価される。

GTHTR300 について、減圧事故のような重大な事故においても、事故直前の被覆燃料粒子の貫通破損率が  $5 \times 10^{-4}$  である場合、原子炉格納容器を持たないにも関わらず環境への大量の FP 放出が起こらず、事故時の敷地境界外における一般公衆の被ばく量が判断の目安を満足することが示されている<sup>15)</sup>。従って、上記の被覆燃料粒子の破損率は十分に小さいと言える。

### 4. 結論

既に発表した方法により、JMTR において公称 7 [%FIMA] (約 70 [GWd/t])まで照射された HTTR 燃料の予備的な PIE から GTHTR300 の燃料交換時の体積平均の被覆燃料粒子の内圧破損率を外挿評価した。更に、既に行われている Pd による SiC 層の腐食及び被覆燃料粒子内での燃料核移動による被覆燃料粒子の破損についての解析結果を考慮すると、初期貫通破損率及び初期 SiC 破損率が HTTR 初装荷燃料と同様である場合、GTHTR300 の燃料交換時における炉心体積平均の被覆燃料粒子の破損率は十分に小さいと言える。

### 謝辞

著者らは、GTHTR300 の燃料温度等について調査して下さった JAEA の佐藤博之氏並びに田澤勇次郎氏、HTTR の高温試験運転時の燃料温度について親切に教示して下さいました JAEA の梶尾大輔氏、及び本稿の構成についての議論に貴重な時間を割いて下さった JAEA の沢和弘氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 高松邦吉ほか、高温工学試験研究炉の出力上昇試験（高温試験運転）－試験方法及び結果の概要－, JAERI-Tech 2004-063, 2004, 61p.
- 2) 高温工学試験研究炉部, HTTR(高温工学試験研究炉)の試験・運転と技術開発; 2009年度, JAEA-Review 2010-055, 2010, 114p.
- 3) Yan, X. et al., Cost and performance design approach for GTHTR300 power conversion system, Nucl. Eng. Des., vol.226, 2003, pp.351-373.
- 4) 片西昌司ほか、高温ガス炉タービン発電システム(GTHTR300)用高燃焼度燃料の成立性評価, (I), 日本原子力学会和文論文誌, vol.1, 2002, pp.373-383.
- 5) Ueta, S. et al., Preliminary Test Results for Post Irradiation Examination on the HTTR Fuel, J. Nucl. Sci. Technol., vol.44, 2007, pp.1081-1088.
- 6) Sawa, K. et al., Development of a Coated Fuel Particle Failure Model under High Burnup Irradiation, J. Nucl. Sci. Technol., vol.33, 1996, pp.712-720.
- 7) 相原純ほか、日本製高品質高温ガス炉燃料の破損率計算法の提案, 日本原子力学会和文論文誌, vol.11, 2012, pp.158-163 (2012).
- 8) Aihara, J., et al., Code-B-1 for stress/strain calculation for TRISO fuel particle (Contract research), JAEA-Data/Code 2011-016, 2011, 10p.
- 9) 相原純ほか、SiC-TRISO 燃料粒子の応力計算のための Code-B-2, JAEA-Data/Code, to be published.
- 10) NP-MHTGR Material Models of Pyrocarbon and Pyrolytic Silicon Carbide, CEGA-002820, Rev. 1, CEGA Corporation, 1993.
- 11) Sawa, K. et al., Fabrication of the First-Loading Fuel of the High Temperature Engineering Test Reactor, J. Nucl. Sci. Technol., vol.36, 1999, pp. 683-690.
- 12) 栃尾 大輔ほか、HTTR の燃焼を通じた燃料温度の評価; 850C 運転の場合, JAEA-Technology 2008-080, 2009, 56p.
- 13) 栃尾 大輔ほか、高温ガス炉 HTTR の高温試験運転における燃料温度の評価, 日本原子力学会和文論文誌, vol.5, 2006, pp.57-67.
- 14) 高松邦吉ほか、HTTR における高温連続運転（HP-11）－試験結果の概要－, JAEA-Technology 2010-038, 2010, 57p.
- 15) Katanishi, S., et al., Safety evaluation on the depressurization accident in the gas turbine high temperature reactor (GTHTR300), Nucl. Eng. Des., vol.237, 2007, pp1372-1380.

Table 1 Specifications of coated fuel particles and irradiation conditions of calculation for comparison between irradiation result of HTTR and calculation result of failure probability of coated fuel particles.

UO <sub>2</sub> Kernel diameter [um] <sup>11)</sup>	600
Buffer thickness [um] <sup>11)</sup>	60
IPyC thickness [um] <sup>11)</sup>	30
SiC thickness [um] <sup>11)</sup>	25
OPyC thickness [um] <sup>11)</sup>	45
Irradiation duration (effective full power day) [day]	370
Burnup [GWd/t]	19.1
Irradiation temperature	See Fig. 1

Table 2 Specifications of coated fuel particles of GTHTR300.

UO <sub>2</sub> Kernel diameter [um] <sup>4)</sup>	550
Buffer thickness [um] <sup>4)</sup>	140
IPyC thickness [um] <sup>4)</sup>	25
SiC thickness [um] <sup>4)</sup>	40
OPyC thickness [um] <sup>4)</sup>	25

Table 3 Irradiation conditions of calculation for evaluation of failure probability of coated fuel particles of GTHTR300.

region	Irradiation duration (effective full power day) [day]	Burnup [GWd/t]	Irradiation temperature
Layer 1	730	80.6	see Fig. 2
Layer 3		89.9	
Layer 5		83.1	
Layer 7		83.6	
Layer 2	1460	147.1	
Layer 4		155.0	
Layer 6 (1)		148.9	
Layer 6 (2)		126.3	
Layer 8		138.6	

Table 4 Evaluation results of failure probability of coated fuel particles of GTHTR300.

Initially intact particles	Less than $4.05 \times 10^{-4}$
Initially SiC layer failure particles	Less than $9.26 \times 10^{-1}$

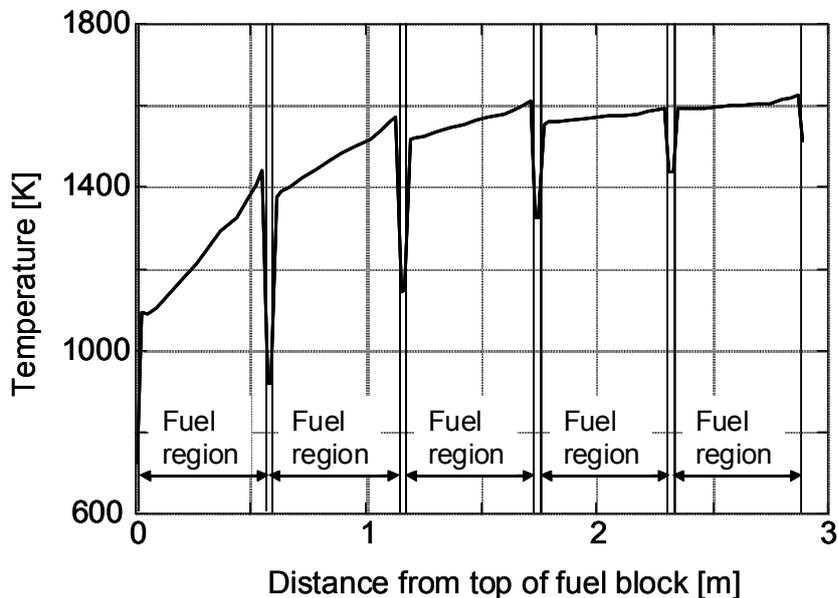


Fig. 1 Irradiation temperature distribution of calculation for comparison between irradiation result of HTTR and calculation result of failure probability of coated fuel particles.

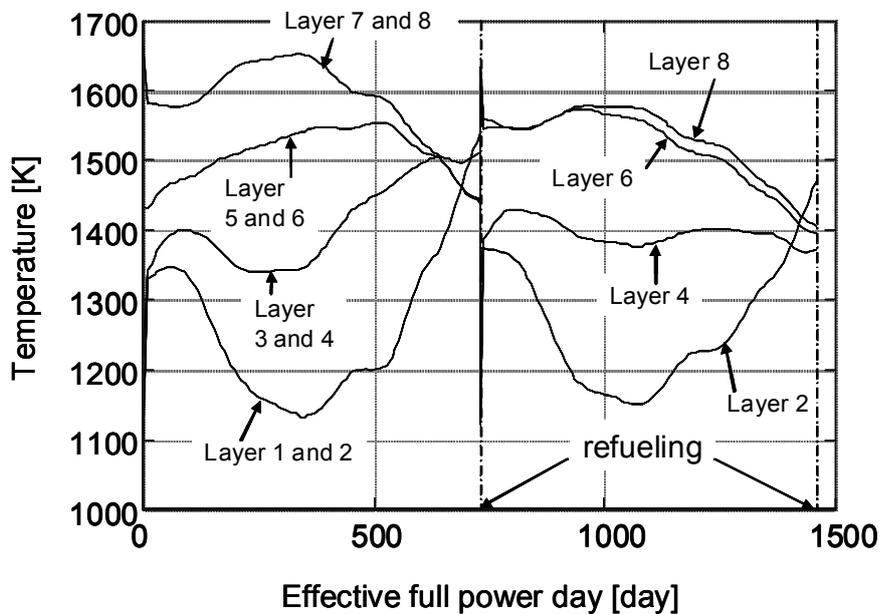


Fig. 2 Irradiation temperature histories of calculation for estimation of failure probability of fuel of GTHTR300.

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm		cd sr <sup>(c)</sup>
放射線核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CF-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

