JAEA-Technology 2017-004 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-004



被覆燃料粒子の充填率を高めた高温ガス炉用 燃料コンパクトの製作性確認と性能評価

Confirmation of Feasibility of Fabrication Technology and Characterization of High-packing Fraction Fuel Compact for HTGR

水田 直紀 植田 祥平 相原 純 柴田 大受

Naoki MIZUTA, Shohei UETA, Jun AIHARA and Taiju SHIBATA

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

|
日本原子力研究開発機構

March 2017

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>http://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, 2017

被覆燃料粒子の充填率を高めた高温ガス炉用燃料コンパクトの製作性確認と性能評価

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

水田 直紀、植田 祥平、相原 純、柴田 大受

(2017年1月18日受理)

日本原子力研究開発機構の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTTR)の燃料にはセラミ ックスで多重被覆した被覆燃料粒子を用いており、燃料コンパクトにおける被覆燃料粒子の充填 率(被覆粒子充填率)は30%である。実用高温ガス炉においては、燃料の出力密度向上ならびに 長期利用のため被覆粒子充填率を高める必要がある。本報は、被覆粒子充填率を高めた燃料コン パクトについて、製作技術の成立性(製作性)確認と性能評価を行った結果をまとめたものであ る。被覆粒子充填率 33%を目標として、HTTR 燃料コンパクトと同様の条件で高充填率の燃料コ ンパクトを製作し、燃料の健全性を確保する上で重要な検査項目である、被覆燃料粒子の SiC 層 破損率、燃料コンパクトの圧縮破壊荷重および燃料コンパクト内の被覆燃料粒子の均一性を測定 した。その結果、被覆燃料粒子の SiC 層破損率は HTTR 初装荷燃料の製造レベルである 8×10⁻⁵ と同程度あるいはそれ以下となり、圧縮破壊荷重は HTTR 規格の 4,900 N を上回った。また、燃 料コンパクト内において被覆燃料粒子が均一に分布していることを確認した。以上の評価結果よ り、高充填率燃料コンパクトの製作性を確認した。また、製作条件の差異が被覆燃料粒子の性能 に及ぼす影響を明らかにするため、HTTR 燃料コンパクトの製作条件からオーバーコート (OC) 条件やプレス条件を変更した高充填率燃料コンパクトを製作し、SiC 層破損率および圧縮破壊荷 重の測定と評価を行った。その結果、オーバーコートを2段階に分ける2重OC法と、従来より も高温で OC 後の予熱処理や燃料コンパクト成型を行う高温プレス法を併用すれば、母材密度が 高くなり、SiC 層破損率の低減につながる傾向が得られた。

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

Confirmation of Feasibility of Fabrication Technology and Characterization of High-packing Fraction Fuel Compact for HTGR

Naoki MIZUTA, Shohei UETA, Jun AIHARA and Taiju SHIBATA

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 January 18, 2017)

High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) of Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is a High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) and uses coated fuel particle (CFP) by multi coatings of ceramic layers. Packing fraction of coated fuel particles (CFP) in a fuel compact is about 30 percent. It is necessary to increase the packing fraction for commercial HTGR to extend power density and lifetime of the fuel. This report describes the result on confirmation of feasibility of fabrication technology and characterization of the high-packing fraction fuel compact. In this study, fuel compacts were fabricated with CFP packing fraction targeted at 33 percent by the same manufacturing condition of HTTR fuel compact. SiCdefective fraction, compressive strength and internal CFP distribution of the compact, important parameters to guarantee its integrity, were evaluated. As a result, the fuel compacts showed as same level of SiC-defective fraction as that of HTTR first loading fuel, 8×10⁻⁵, and larger compressive strength than the HTTR fuel criteria, 4,900 N. In addition, a uniformity of internal CFP distribution of the fuel compact was confirmed by ceramography. By the above results, the feasibility of fabrication technology for the high-packing fraction fuel compact was confirmed. Moreover, various high-packing fraction fuel compacts were fabricated by different conditions with regards to overcoating (OC) and/or compact pressing from those of HTTR, and they were characterized to reveal the influence of fabrication conditions. Consequently, it was revealed that the compact fabricated by double-OC method and high temperature press method tended to have high-dense matrix and low SiC-defective fraction.

Keywords: HTGR, Fuel Compact, Coated Fuel Particle, SiC Failure Fraction

目	次

1.	緒	클 	1
2.	高	充填率燃料コンパクトの製作方法と性能評価方法	4
	2.1	概要	4
	2.2	HTTR 燃料コンパクトの製作プロセス	4
	2.3	高充填率燃料コンパクトの製作方法	5
	2.4	高充填率燃料コンパクトの性能評価方法	5
3.	結	果と考察1	.1
	3.1	高充填率燃料コンパクトの製作性確認1	.1
	3.2	製作条件の差異が高充填率燃料コンパクトの性能に及ぼす影響1	.1
4.	ま	とめ2	20
謝	辞…		20
参	考文	献2	21
付	録	初期健全被覆燃料粒子の内圧破損率2	22

Contents

1. Introdu	uction1
2. Fabrica	ation and Characterization Methods of High-packing Fraction Fuel Compact $\dots 4$
2.1 Ov	verview
2.2 Fa	brication Process of Fuel Compact for HTTR 4
2.3 Fa	brication Method of High-packing Fraction Fuel Compact
2.4 Ch	aracterization Method of High-packing Fraction Fuel Compact
3. Results	s and Discussions
3.1 Co	nfirmation of Feasibility of Fabrication Technology of High-packing Fraction
Fu	el Compact
3.2 Eff	fect of Difference of Fabrication Condition on Characteristic of High-packing
Fra	action Fuel Compact11
4. Summa	ary
Acknowle	edgements
Reference	es21
Appendix	Pressure Vessel Failure Probability of Initially Intact Coated Fuel Particles 22

1. 緒言

高温ガス炉は、燃料に UO₂等の燃料核をセラミックス材で被覆した燃料粒子、冷却材に不活性 ガスであるヘリウムガス、減速材や原子炉内の主な構造材に熱容量が大きい等方性黒鉛を用いた 原子炉である。高温ガス炉は、これらの特性を活用することで、優れた安全性の実現のみならず、 900℃を超える高温のヘリウムガスを供給できることから、ガスタービンを用いた高効率発電や 水素製造をはじめとした多目的で高効率な核熱利用が可能である¹⁾。

日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、高温ガス炉の実用化に向け、大洗研究開発センターにおいて高温工学試験研究炉(HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor)を中心とした研究開発を進めている²⁰。HTTR は 1998年の初臨界以降、2004年には原子炉出口冷却材温度 950℃、50日間の高温連続運転を達成した。HTTR の燃料には、UO2の燃料核を熱分解炭素や炭化ケイ素で4重にコーティングした被覆燃料粒子(Fig. 1-1)を黒鉛母材と共に焼き固めた燃料コンパクト(Fig. 1-2)が使用される。燃料コンパクトは黒鉛スリーブ内に装荷され(Fig. 1-3)、燃料コンパクトが装荷された黒鉛スリーブは六角柱状の黒鉛ブロック(Fig.1-4)に挿入される。これまでに、原子燃料工業株式会社の燃料製造施設において HTTR 初装荷燃料および第2次燃料が合計約2t製造され^{3),4)}、燃料コンパクトの製造時品質は、貫通破損率(被覆燃料粒子の4重被覆層全てが破損した割合)が約2×10⁻⁶、SiC 層破損率(被覆燃料粒子のSiC 層のみが破損した割合)が約8×10⁻⁵であり、世界最高レベルの製造品質を達成している^{3),4)}。

原子力機構は HTTR の設計や運転で培った知見に基づき、熱出力 600MW のピン・イン・ブロ ック型高温ガス炉と発電効率 45%を超える閉サイクルガスタービンを組み合わせた実用高温ガ ス炉システムである GTHTR300 (Gas Turbine High Temperature Reactor 300)の設計研究⁵、 さらに水素電力併産システムとして GTHTR300 に水素製造設備を組み合わせた GTHTR300C (GTHTR300-Cogeneration)の設計研究を行ってきた⁶。

本報は、実用高温ガス炉における燃料の出力密度向上ならびに長期利用のため、高充填率燃料 コンパクトの製作性を確認することを目的に、HTTR 燃料コンパクトと同様の方法で、HTTR の 被覆粒子充填率である 30%より高い 33%を目標値として高充填率燃料コンパクトを製作し、性能 評価を行った結果をまとめたものである。その際、製作条件の差異が燃料コンパクトの性能に与 える影響を明らかにするため、HTTR 燃料コンパクトの製作条件からオーバーコート(OC)条件 やプレス条件を変更した高充填率燃料コンパクトを製作し、性能評価を行った。



Fig. 1-1 Coated fuel particle (CFP) for HTTR



Fig. 1-2 Fuel compact for HTTR



Fig. 1-3 Graphite sleeve for HTTR



Fig. 1-4 Graphite block for HTTR

2. 高充填率燃料コンパクトの製作方法と性能評価方法

2.1 概要

HTTR 燃料コンパクトの製作プロセスおよび製作条件に従い、被覆粒子充填率 33%を目標値と して高充填率燃料コンパクトを製作した。製作した高充填率燃料コンパクトの性能として、燃料 の健全性を確保する上で重要な検査項目である、燃料コンパクトが内包する被覆燃料粒子の SiC 層破損率、燃料コンパクトの圧縮破壊荷重、燃料コンパクト内の被覆燃料粒子の分布の測定を行 った。測定結果が以下の事項を満足するかを判断基準とし、高充填率燃料コンパクトの製作性を 確認する評価を行った。

- (1) 製作時の初期 SiC 層破損率について、HTTR 初装荷燃料製造レベルである 8×10⁻⁵ と同程度 あるいはそれ以下であること。
- (2) 圧縮破壊荷重について、HTTR 燃料の規格である 4,900 N を上回ること。
- (3) 被覆燃料粒子が燃料コンパクト内において均一に分布していること。

また、製作条件の差異が高充填率燃料コンパクトの性能に与える影響を明らかにするため、 HTTR 燃料コンパクトの製作条件から OC 条件やプレス条件を変更した高充填率燃料コンパクト を製作し、SiC 層破損率、圧縮破壊荷重の測定および評価を行った。

2.2 HTTR 燃料コンパクトの製作プロセス

HTTR 燃料コンパクトの製作プロセスを Fig. 2-14に示す。HTTR 燃料コンパクトの母材原料 である調整黒鉛粉末は、天然黒鉛粉末、人造黒鉛粉末およびバインダーであるフェノール樹脂を 混錬器および粉砕機にて混合したものである。調整黒鉛粉末中の人造黒鉛粉末、天然黒鉛粉末お よびフェノール樹脂の配合重量比はそれぞれ 16%、64%および 20%である。回転機内で被覆燃料 粒子を転がし、エタノールの噴霧と調整黒鉛粉末の散布を行い、エタノールにより湿った被覆燃 料粒子表面に調整黒鉛粉末を付着させることで OC を行う。OC 粒子を乾燥後に予熱処理し、そ の後温間プレス機によりコンパクト状に成型する。成型後、予備焼成および焼成を実施し、母材 原料に含まれているバインダーの除去と炭化を行うことで HTTR 燃料コンパクトとする。予備焼 成は窒素ガス雰囲気下、数百度で行い、焼成は真空下、千数百度の条件で行う。HTTR 燃料コン パクトの母材密度は 1.70±0.05 g/cm³、圧縮破壊荷重は 4,900 N 以上と規定されている 4 。 2.3 高充填燃料コンパクトの製作方法

本試験にて製作した高充填率燃料コンパクトの仕様を Table 2-1 に示す。充填した被覆燃料粒 子の検査記録概要を Table 2-2 に示す。高充填率燃料コンパクトの母材原料である調整黒鉛粉末 は、HTTR 燃料と同様の人造黒鉛粉末、天然黒鉛粉末およびフェノール樹脂を混合したものを用 いた。人造黒鉛粉末、天然黒鉛粉末およびフェノール樹脂の配合重量比は 2.2 節に示した HTTR 燃料の製作条件と同一とした ^{3),4)}。

本試験における高充填率燃料コンパクトの製作プロセスは、HTTR 燃料と同一とした。その際、 製作条件の差異が高充填率燃料コンパクトの性能に与える影響を明らかにするため、製作条件は、 OC 条件およびプレス条件をそれぞれ、HTTR 燃料と同一条件またはこれらを変更した条件とし た。各高充填率燃料コンパクトの製作条件を Table 2·3 に示す。OC 条件は通常 OC と、より均一 に OC を被覆するため通常 OC を 2 段階に分けて実施する 2 重 OC の 2 条件とした。プレス条件 は、HTTR 燃料製作条件と同様の温度で OC 粒子予熱および温間成型を行う通常プレスと、温間 成型時の OC 材の流動性を高めるため通常プレスより OC 粒子予熱温度を 10℃、温間プレス成型 温度を 20℃高くした高温プレスの 2 条件とした。通常 OC・通常プレス条件では 10 個、通常 OC-高温プレス条件と 2 重 OC・通常プレス条件および 2 重 OC・高温プレス条件では 9 個の高充填率燃 料コンパクトを製作した。

2.4 高充填率燃料コンパクトの性能評価方法

製作した全ての高充填率燃料コンパクトについて、寸法および重量を測定し、被覆粒子充填率 と母材密度を算出した。粒子充填率は、充填した被覆燃料粒子の体積を燃料コンパクト体積で除 すことで求めた。また、高充填率燃料コンパクトを製作条件ごとにそれぞれ1個ずつ選定し、切 断および研磨を行った後、断面の被覆燃料粒子の金相写真を撮影することで、焼結後の被覆燃料 粒子および周辺母材の状態を確認した。撮影倍率は37.5倍および400倍とした。

(1) SiC 層破損率

SiC 層の破損率は、燃料コンパクト中の全ウラン量に対して SiC 層が破損している被覆燃料粒 子中のウラン量の割合として考えられる。SiC 層破損率は、以下に記す焙焼硝酸浸出法により測 定され、HTTR 燃料では 1.5×10³ 以下と規定されている ^{3),4)}。まず、製作した燃料コンパクトを 空気中で焙焼し、燃料コンパクトの母材および被覆燃料粒子第4層を除去する。SiC 層に破損が ある被覆燃料粒子は、外側から酸化し第2層および第1層の黒鉛被覆層が除去されると同時に、 UO₂燃料核が酸化され U₃O₈ となる。この際、加熱された燃料核は体積膨張するため、SiC 層の 破損部が拡大する。焙焼後の被覆燃料粒子を硝酸水溶液で煮沸してウランを浸出させ、吸光光度 法により浸出ウラン量を得ることで、SiC 層破損率を測定する。

各製作条件にて製作した高充填率燃料コンパクトについて、母材密度が規定値(1.70 g/cm³)に 近い高充填率燃料コンパクトをそれぞれ2個ずつ選定し、焙焼硝酸浸出法を用いてSiC層破損率 を測定して評価を行なった。 (2) 圧縮破壊荷重

各製作条件にて製作した高充填率燃料コンパクトの中から、母材密度が規定値(1.70 g/cm³)に 近い高充填率燃料コンパクトをそれぞれ 2 個ずつ選定し、圧縮試験を行って各製作条件における 高充填率燃料コンパクトの圧縮破壊荷重を測定し、評価を行った。圧縮試験のクロスヘッドスピ ードは 1 mm/min とした。

(3) 被覆燃料粒子分布

燃料コンパクトの製作プロセス上の異常が無いことを確認するため、HTTR 燃料コンパクトと 同様の製作条件である通常 OC-通常プレス条件で製作した高充填率燃料コンパクトを代表として、 内包する被覆燃料粒子の分布を測定して評価を行った。製作した高充填率燃料コンパクトを Fig. 2・2 のように切断した後に研磨し、縦断面の金相写真を撮影した。高充填率燃料コンパクトの上下 部断面片側を Fig.2・3 のようにそれぞれ 7 つのセグメントに分け、各セグメントにおける被覆燃 料粒子の個数をカウントした。セグメント境界にある被覆燃料粒子は0.5 個としてカウントした。 欠落した被覆燃料粒子や小さく見える被覆燃料粒子についても1 個としてカウントを行った。

項目	住 様		
材質	被覆燃料粒子・黒鉛と炭素混合材		
形状	中空円筒		
外観	有害な傷、割れ、欠け、付着物等のないこと		
	外径 26.0±0.1(目標)		
寸法 [mm]	内径 10.0±0.1(目標)		
	高さ 37.0±0.5(目標)		
UO₂燃料核濃縮度 [%]	7.2		
	人造黒鉛 Ringsdorff 社製 KR-316 相当品		
原料黒鉛粉末	天然黒鉛 Kropfmuehl 社製 FP99.98 相当品		
	組成 人造 20%、天然 80% (P2N8)		
いノング	種類 フェノール樹脂		
	添加率 約 20wt%(黒鉛粉末に対する割合)		
被覆粒子充填率 [vol%]	33 (目標)		
OC 冬件	①通常 OC(従来法)		
	②2 重 OC		
プレフ冬州	①通常プレス(従来法)		
	②高温プレス		
母材密度 [g/cm ³]	1.70±0.05(目標)		
SiC 層破損率	≦8×10 ⁻⁵ (目標)		
圧縮破壞荷重 [N]	≧4,900(目標)		

Table 2-1 Specification of fuel compact with high CFP packing fraction

燃料核		
密度(水銀置換)(1サンプル)[g/cm ³]	10.8	
直径(50 サンプル平均)[μm]	505	
真球度(100 サンプル平均)	1.07	
被覆燃料粒子		
バッファ層厚さ(50 サンプル平均)[µm]	91.8	
IPyC 層厚さ(50 サンプル平均)[µm]	42.7	
SiC 層厚さ(50 サンプル平均)[µm]	32.3	
OPyC 層外装厚さ(50 サンプル平均)[µm]	43.1	
被覆燃料粒子直径(100 サンプル平均)[μm]	925	
被覆燃料粒子真球度(100 サンプル平均)	1.09	
SiC層破損率	$9.6 imes 10^{-7}$	

Table 2-2 Inspection results of fuel kernel and CFP

Table 2-3 Fabrication conditions of fuel compact

	00 冬州	通常 OC	0	0		
製作	の未住	2 重 OC			0	0
条 件	プレス条件	通常プレス	0		0	
		高温プレス		0		0
製作個数		10	9	9	9	



Fig. 2-1 Fabrication process of fuel compact for HTTR⁴⁾



Fig. 2-2 Schematic illustration of cutting flow of fuel compact



Fig. 2-3 Schematic illustration of CFP count segment of fuel compact

3. 結果と考察

3.1 高充填率燃料コンパクトの製作性確認

2章で示した4種類の製作条件のうち、HTTR 燃料と同様の製作条件である通常 OC-通常プレ ス条件で製作した高充填率燃料コンパクトに関して行った評価を以下に示す。

(1) SiC 層破損率

測定した2つのコンパクトについて、被覆燃料粒子のSiC層破損率は約7.3×10⁻⁵(燃料コンパクト中の破損粒子数が1粒子に相当するレベル)および約2.6×10⁻⁶(燃料コンパクト中の破損粒子数がゼロで、ウランによる表面汚染に相当するレベル)となり、HTTR初装荷燃料の製造レベルである8×10⁻⁵(HTTR燃料コンパクト中の被覆燃料粒子約13,000粒のうち、破損粒子数が1 粒子に相当するレベル)と同程度またはそれ以下であると分かった。

(2) 圧縮破壊荷重

圧縮破壊荷重は 7,700 N および 8,450 N となり、圧縮破壊荷重が HTTR 燃料の受入基準である 4,900 N を上回った。なお、HTTR 燃料の実績値は約 6,000 N である。

(3) 被覆燃料粒子分布

燃料コンパクト上部および下部の金相写真、被覆燃料粒子のカウントのセグメントと対象領域、 それらのカウント結果を Fig. 3-1 および Fig. 3-2 に示す。また、各セグメントでの被覆燃料粒子 数を、全セグメントの被覆燃料粒子数で規格化した分布グラフを Fig. 3-3 に示す。その結果、規 格化した被覆燃料粒子の標準偏差は 4.81×10⁻³ であった。これはセグメント毎にカウントされた 被覆燃料粒子個数に換算すると約1個であることから、HTTR 燃料と条件で製作した高充填率燃 料コンパクト内においても被覆燃料粒子は均一に分布していると判断した。

以上の評価結果より、HTTR 燃料と同様の製作条件を適用した結果、HTTR 燃料と同等の品質 を有する、粒子充填率 33%の高充填率燃料コンパクトの製作性を確認できた。

3.2 製作条件の差異が高充填率燃料コンパクトの性能に及ぼす影響

焼結工程における母材の焼結挙動を各製作条件で比較するため、各製作条件において得られた 高充填率燃料コンパクトの被覆粒子充填率と、焼結挙動を反映する母材密度の関係を Fig. 3-4 に 示す。被覆粒子充填率は各製作条件でばらついたものの、製作した全ての高充填率燃料コンパク トにおいて、被覆粒子充填率は目標値の 33%を上回った。高充填率燃料コンパクト断面における 被覆燃料粒子の金相写真(37.5 倍および 400 倍)について、通常 OC-通常プレス条件のものを Fig. 3-5 および Fig. 3-6 に、通常 OC-高温プレス条件のものを Fig. 3-7 および Fig. 3-8 に、2 重 OC-通常プレス条件のものを Fig. 3-9 および Fig. 3-10 に、2 重 OC-高温プレス条件のものを Fig. 3-11 および Fig. 3-12 に示す。各条件で製作した高充填率燃料コンパクトについて、被覆粒子充 填率と SiC 層破損率ならびに圧縮破壊荷重の関係を Fig. 3-13 ならびに Fig. 3-14 にそれぞれ示 す。全ての製作条件において、SiC 層破損率は HTTR 初装荷燃料の製造レベルと同程度以下、かつ、圧縮破壊荷重は HTTR 燃料受入基準を上回る結果となった。

(1) OC 条件による影響

通常 OC・通常プレス条件および通常 OC・高温プレス条件にて高充填率燃料コンパクトを製作した場合の SiC 層破損率は、燃料コンパクト中の破損粒子数が1粒子からゼロ粒子に相当するレベルであった一方、2重 OC・通常プレス条件および2重 OC・高温プレス条件にて高充填率燃料コンパクトを製作した場合、SiC 層破損率は約2.5×10⁻⁶となり、燃料コンパクト中の破損粒子数がゼロ粒子レベルに抑制される傾向にあることが分かった。これは、2重 OC 法を適用して製作した場合、成型時に被覆燃料粒子周辺にて OC 材が十分に満たされ、被覆燃料粒子同士の接触が防がれたことで、破損率の抑制につながったものと考えられる。今回製作した全ての高充填率燃料コンパクトにおいて、被覆燃料粒子の SiC 層破損率は HTTR 燃料受入れ基準の1.5×10⁻³を大幅に下回っているが、実用高温ガス炉燃料の受入れ基準については、今後装荷する燃料を開発する段階において、充分なデータを蓄積した上で適切な値を設定する必要があると考えられる。

(2) プレス温度条件による影響

Fig.3-4より、高充填率燃料コンパクトを高温プレス条件にて製作した場合、通常プレス条件よりも母材密度が高くなる傾向が見られた。これは高温により成型時において、フェノール樹脂が配合された OC 材の流動性が高まることで、プレス後の焼結の際に被覆燃料粒子間において緻密な母材が形成されたためと考えられる。

なお、実際の高温ガス炉の炉心内では、初期健全被覆燃料粒子についても燃焼度の増加に伴っ て破損率が増加する。この破損率の増加は被覆燃料粒子の性能を評価する上で重要な項目である。 GTHTR300(最大燃焼度155 GWd/t)の初期健全被覆燃料粒子が燃焼に伴い生じる内圧破損の解 析評価の結果(最大でも約4.05×10⁻⁴未満。詳細は付録を参照のこと)に比べて、今回製作した 充填率約33%のコンパクトのSiC層破損率(7.3×10⁻⁵)は1桁低い。従って、燃焼期間中の被覆 燃料粒子の破損割合(初期破損粒子割合と初期健全粒子の燃焼中の破損割合の和)は、減圧事故 時においても、敷地境界外における一般公衆の被ばく量は充分小さく抑えることが可能な破損割 合である5×10⁻⁴未満っに抑えることが可能であると予測される。



1 cm

Fig. 3-1 Numbers of measured CFP at cut surface in upper region (normal OC & normal Press)



1 cm

Fig. 3-2 Numbers of measured CFP at cut surface in bottom region (normal OC & normal Press)



Fig. 3-3 Normalized CFP ratio in Figs. 3-1 and 3-2 $\,$



Fig. 3-4 Relation of CFP packing fraction and matrix density of fuel compact



Fig. 3-5 Cross section of fuel compact (normal OC & normal press, ×37.5)



Fig. 3-6 Cross section of fuel compact (normal OC & normal Press, ×400)



Fig. 3-7 Cross section of fuel compact (normal OC & high temperature press, ×37.5)



Fig. 3-8 Cross section of fuel compact (normal OC & high temperature press, ×400)



Fig. 3-9 Cross section of fuel compact (double OC & normal press, ×37.5)



Fig. 3-10 Cross section of fuel compact (double OC & normal press, $\times 400)$



Fig. 3-11 Cross section of fuel compact (double OC & high temperature press, ×37.5)



Fig. 3-12 Cross section of fuel compact (double OC & high temperature press, ×400)



Fig. 3-13 Relation of CPF packing fraction and SiC failure fraction



Fig. 3-14 Relation of CPF packing fraction and compressive load at break of fuel compact

4. まとめ

高充填率燃料コンパクトについて、製作性の確認と性能評価を行った。HTTR 燃料コンパクト と同様の母材原料および燃料製作方法を用いて、被覆粒子充填率 33%を目標とした高充填率燃料 コンパクトを製作し、被覆燃料粒子の SiC 層破損率、高充填率燃料コンパクトの圧縮破壊荷重、 高充填率燃料コンパクト内の被覆燃料粒子分布について調べ、以下の事項を確認した。

- (1) 製作時の初期 SiC 層破損率については 10⁻⁶から 10⁻⁵オーダーとなり、HTTR 初装荷燃料の 製造レベルと同程度あるいはそれ以下となった。また、原子炉内での燃焼に伴い破損率が増 加するが、燃焼期間中において破損率は 5×10⁻⁴以下とすることが可能であり、事故時の周 辺公衆の被ばくを十分低く抑えることができる。
- (2) 圧縮破壊荷重については 7,700 N および 8,450 N となり、HTTR 燃料規格である 4,900 N を上回った。
- (3) 被覆燃料粒子が燃料コンパクト内に均一に分布していた。

さらに、HTTR 燃料コンパクトの2重OC法に高温プレス法を併用すれば、母材密度が高くなり、SiC層破損率の低減にもつながる傾向がみられた。今後は、2重OC法および高温プレス法による、燃料コンパクトの更なる高充填率化について検討を進める予定である。

謝辞

本報告書を作成するにあたり、高温ガス炉水素・熱利用研究センター 安全設計グループの後 藤実研究主幹及び原子燃料工業株式会社の皆様にご助言をいただきました。ここに深く感謝の意 を表します。

参考文献

- 1) 大橋弘史, 佐藤博之, 田澤勇次郎他, 小型高温ガス炉システムの概念設計(I) -基本設計及び 系統概念設計-, JAEA-Technology 2011-013, (2011), 67p.
- 2) S. Saito, T. Tanaka, Y. Sudo, et al., Design of high temperature engineering test reactor (HTTR), JAERI 1332, (1994), 247p.
- 3) K. Sawa, T. Tobita, H. Mogi, et al., Fabrication of the first-Loading Fuel of the High temperature Engineering Test Reactor, J. Nucl. Sci. Technol. 36, (1999), pp.683-690.
- 4) 植田祥平,泉谷徹,梅田政幸他,高温工学試験研究炉の第2次燃料製造データベース(その1), JAEA-Data/Code 2006-009, (2006), 129p.
- 5) 中田哲夫, 片西昌司, 高田昌二他, 高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の核設計, JAERI-Tech 2002-066, (2002), 51p.
- 6) 西原哲夫,武田哲明,高温ガス炉電力水素併産システム(GTHTR300C)の導入シナリオに関す る検討(その I), JAERI-Tech 2005-049, (2005), 19p.
- S. Katanishi, K. Kunitomi, Safety evaluation on the depressurization accident in the Gas Turbine High Temperature Reactor (GTHTR300), Nucl. Eng. Des., 237, (2007), pp.1372-1380.

付録 初期健全被覆燃料粒子の内圧破損率

照射下における被覆燃料粒子の主要な破損機構の一つに、FP ガスの蓄積が引き起こす内圧破損がある。本付録は、材料試験炉 JMTR (Japan Materials Testing Reactor) において公称 7%FIMA

(約 70 GWd/t) まで照射された HTTR 燃料の予備的照射後試験(PIE)の結果 ¹⁾を用い、 GTHTR300²⁾における初期健全被覆燃料粒子について、外挿的に評価した内圧破損率の推移を報 告するものである。

GTHTR300の被覆燃料粒子の内圧破損率の外挿的な計算および評価は、JMTR での PIE 結果 を用いて相原らにより行われている³⁾。外挿的に評価した GTHTR300の初期健全被覆燃料粒子 の内圧破損率(貫通破損およびSiC層破損両方)の履歴をFig.A-1に示す。計算条件は、GTHTR300 の条件に基づき保守的に設定した。具体的な計算条件および計算方法については文献 2)を参照す ること。内圧破損率は燃料交換からの時間に伴いほぼゼロから増加し、実効全出力日数(EFPD)に して 730 日毎の燃料交換時には約 4.05×10⁻⁴未満となった。



Fig. A-1 History of evaluated maximum failure probability (through coating failure and SiC failure) about initially intact coated fuel particle

参考文献

- 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.
- 2) Yan, X. et al., Cost and performance design approach for GTHTR300 power conversion system, Nucl. Eng. Des., vol.226, (2003), pp.351-373.
- 3) 相原純, 植田祥平, 大橋弘史, 橘幸男, 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, JAEA-Technology 2012-044, (2013), 9p.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
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	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 旭立単位				
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								
3	名称		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	ci単位しの粉結的な間接け
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	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J		
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		