JAEA-Technology 2008-073



# ZrC 被覆粒子の製造技術開発(その1) (受託研究)

Development of Production Technology of ZrC-coated Particle (No.1) (Contract Research)

安田 淳 植田 祥平 相原 純 竹内 均 沢 和弘

Atsushi YASUDA, Shohei UETA, Jun AIHARA, Hitoshi TAKEUCHI and Kazuhiro SAWA

原子力基礎工学研究部門 耐熱燃料・材料開発グループ

High Temperature Fuel and Material Group Nuclear Science and Engineering Directorate 日本原子力研究開発機構

November 2008

Japan Atomic Energy Agency

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2008

# **ZrC** 被覆粒子の製造技術開発(その1) (受託研究)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット 安田 淳<sup>\*\*</sup>、植田 祥平、相原 純、竹内 均<sup>\*\*</sup>、沢 和弘

(2008年9月9日 受理)

ZrC 被覆燃料粒子は、第四世代原子炉の候補の一つである超高温ガス炉(VHTR)の更なる高 性能化を可能にすると期待されており、原子力機構では ZrC 被覆粒子の製造技術開発を行ってい る。

平成 18 年度は原料粒子として 100g までの模擬燃料核を用いて ZrC 層被覆のパラメータ試験 (被覆ガス流量、被覆温度等)を行った。その結果、ZrC 層の品質(C/Zr 及び密度)は、共に被覆 温度と密接な関係があり、被覆温度を最適化することで高品質な ZrC 層を得られることを明らか にした。そして、粒子装荷量 100g において高品質の約 30 µ m の ZrC 層を持つ ZrC 被覆粒子を 製作できるところまで到達した。また、装置大型化や ZrC 層厚肉化に伴う問題点を抽出し、対策 を施した。

大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002 本報告は、旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子 力研究開発機構が実施した平成18年度「革新的高温ガス炉燃料・黒鉛に関する技術開発」の成 果です。

\*特定課題推進員

# Development of Production Technology of ZrC-coated Particle (No.1) (Contract Research)

# Atsushi YASUDA<sup>\*\*</sup>, Shohei UETA, Jun AIHARA Hitoshi TAKEUCHI<sup>\*\*</sup> and Kazuhiro SAWA

Nuclear Applied Heat Technology Division Nuclear Science and Engineering Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September9, 2008)

The Very-High-Temperature Reactor (VHTR) is one of the candidates for the Generation IV nuclear energy system. ZrC coated fuel particles are expected to make the performance of the VHTR higher. Therefore, we are investigating the ZrC-coating process.

From April 2006 to March 2007, the parametric ZrC coating tests were carried out with the nonnuclear particles up to 100 g batch scale, and it was clarified that the quality of the ZrC coating layer (stoichiometry and the density) strongly depended on the coating temperature. As a result, we succeeded to fabricate the ZrC coating layer with high quality and with the thickness of about  $30 \,\mu$  m. In addition, the problems accompanied with the batch up or with the fabrication of the thick ZrC layers were clarified and the measures were investigated.

Keywords: Very High Temperature Reactor (VHTR), ZrC-coated Fuel Particle, ZrC-coating Equipment, ZrC Stoichiometry

Present study is the result of "Research and development for advanced high temperature gas cooled reactor and graphite components" entrusted to the Japan atomic Energy Agency by the Ministry of Education, Culture, Science, and technology of Japan (MEXT).

\* Special Topic Engineer

# 目 次

1.	序論		1
2.	方法		3
	2.1	臭化物法による <b>Zr</b> C 層蒸着法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	2.2	原料粒子 ••••••••••	3
	2.3	被覆装置の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
	2.4	ZrC 層被覆試験の手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
	2.5	<b>ZrC</b> 層の検査方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
3.	ZrC i	波覆試験結果 •••••••	7
	3.1	原料粒子装荷量50gにおけるZrC被覆パラメータ試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
	3.2	原料粒子装荷量 100g までのバッチアップ試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
	3.3	原料粒子装荷量100gにおける ZrC 被覆試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
4.	バッ	チアップ及び被覆層厚肉化のための問題点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
	4.1	スパウトヘッドのノズル内での ZrC 堆積 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
	4.2	排気配管の目詰まり ・・・・・・	14
5.	結論		17
謝話	辛		17
参₹	考文献		18

## Contents

1.	Intro	oduction ·····	1			
2.	2. Methods ·····					
	2.1	ZrC deposition by bromide method ·····	3			
	2.2	Material particles ·····	3			
	2.3	Outline of the coater •••••••	4			
	2.4	The ZrC coating tests process	5			
	2.5	Inspection methods for ZrC layers	5			
3.	ZrC	coating tests results	7			
	3.1	Parametric ZrC coating tests (particle inventory: 50 g)·····	7			
	3.2	Batch up tests up to particle inventory of 100 g	10			
	3.3	ZrC coating tests (particle inventory: 100 g)	11			
4.	The	e problems accompanied with the batch up or with the fabrication of thick ZrC				
	lay	ers ·····	14			
	4.1	ZrC deposition in the nozzle of spout bed •••••••••••••••••••••••••••••••••••	14			
	4.2	Clogging up of the exhaust pipes	14			
5.	Cone	clusions ·····	17			
Acl	know	edgement ·····	17			
Rei	ferend	ces	18			

# 表リスト

Table 2.1 Basic data of the material particles    ······	3
Table 3.1 CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> dependence of C/Zr, ZrC layer density and ZrC layer coating	
ratio , the particle inventory: 50g , material particle: surrogated particle	10
Table 3.2 CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> dependence of C/Zr, ZrC layer density and ZrC layer coating	
ratio , the particle inventory: 100g , material particle: surrogated particle,	
CH4 gas flow rate: 0.003 mol/min ·····	11
Table 3.3 Coating condition and the quality of the ZrC layer (batch number:	
ZrC-06-2048)	13

# 図リスト

Fig. 1.1 Coated fuel particle.	1
Fig. 2.1 ZrC coating equipment.	4
Fig. 3.1 Upper heater with a particle fluidizing bed	7
Fig. 3.2 ZrC-coating temperature dependence of C/Zr ratio, the particle inventory :	
50g, material particle: SZR kernel, CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> ratio: about 1.4 ······	8
Fig. 3.3 ZrC-coating temperature dependence of ZrC layer density, the particle	
inventory : 50g, material particle: surrogated particle, CH4/ZrBr4 ratio:	
about 1.4 ·····	8
Fig. 3.4 ZrC-coating temperature dependence of ZrC coating ratio, the particle	
inventory: 50g, material particle: surrogated particle, CH4/ZrBr4 ratio:	
about 1.4. ·····	9
Fig. 3.5 Particle inventory dependence of C/Zr ratio, CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> ratio: about 1.4.	10
Fig. 3.6 Hydrogen gas flow rate dependence of ZrC coating ratio at the deposition	
temperature around 1350°C, the particle inventory: 100g, material particle:	
surrogated particle, CH4/ZrBr4 ratio: about 1.1. ·····	12
Fig. 4.1 Nozzle temperature dependence of the deposition rate on the nozzle	14
Fig. 4.2 Exhaust pipes, (a) initial state, (b) with larger pile, (c) with a space for the	
trapping of the "white powder".	15
Fig. 4.3 System for the depressurization in an emergency.	16

This is a blank page.

#### 1. 序論

高温ガス炉は黒鉛減速ヘリウム冷却型の原子炉であり、原子炉出口ガス温度は 850~950℃の 高温である。炉心温度が高くなるため、金属材料の代わりにセラミックス材料で炉心を構成する ことが最大の特徴である。炉心構成材料に黒鉛を用いているため、出力密度に対する熱容量が大 きく、反応度の変化や冷却能力低下などが生じても、炉心温度の変化が極めて緩慢である。また、 炉心が高温になっても燃料の被覆や炉心構成物の健全性は損なわれ難い。冷却材のヘリウムガス は化学的に不活性であり、それ自体は燃料や構造材との化学的相互作用は無い。このように、高 温ガス炉は炉心の構成及び冷却材の特性に基づく固有の安全性が高い。



Fig. 1.1 Coated fuel particle.

高温ガス炉の燃料としては、耐熱性を有するウラン酸化物等の微小球を熱分解炭素(PyC)、炭 化珪素(SiC)で多重に被覆した直径 1mm 以下の TRISO(tri isotropic:三重被覆)被覆燃料粒 子が用いられる(Fig. 1.1)。TRISO 被覆燃料粒子では 4 つの被覆層が相補って、全体としてクリ プトン、キセノンなどの核分裂生成ガス(FP ガス)に対する圧力容器、また、パラジウムなどの遷 移元素、ウランの中性子吸収により生成する希土類元素などの FP に対する拡散障壁として機能 する <sup>1</sup>。

SiC 被覆燃料粒子に用いられている SiC 層は被覆層の中で最も機械的強度が高く、その健全性 が被覆燃料粒子全体の健全性を決定している <sup>2</sup>)。SiC 層の照射健全性は、燃料核移動、パラジウ ム (Pd) による SiC 層腐食、内圧、高温腐食といった破損機構に対する耐性で決まる <sup>3)</sup>。これら の破損機構の現れ方は、照射中の温度に強く依存するが、温度 1700℃を超えると FP の放出及び 強度低下をもたらす <sup>4)</sup>とともに、温度 2200℃を超えると SiC 層は短時間で β 相から α 相へ相変化 する <sup>5)</sup>。そのため、SiC 被覆燃料粒子の許容設計限界はこれらに余裕をみて 1600℃とされている。

高温ガス炉燃料をさらに高温まで使用するためには、従来の被覆燃料粒子の被覆層として使用 されている SiC よりもさらに耐熱性の高い被覆層を用いることが有効であり、その候補として炭 化ジルコニウム (Zirconium Carbide; ZrC)を被覆層とする被覆燃料粒子が期待されている。SiC 層の寿命制約因子として重要なパラジウム腐食については、ZrC 層では起こらないことは炉外模 擬試験及び照射試験により実験的に確認されている。また、核的性質については、Zr の熱中性子 吸収断面積は Si のそれとほぼ等しい。これらの優れた特徴から、ZrC 被覆燃料粒子は、第4世 代原子力システム国際フォーラム(GIF)において第4世代炉として採択されている超高温ガス 炉(Very High Temperature Reactor; VHTR)の燃料としても提案されている<sup>6</sup>。

ZrC 中に遊離炭素を含む(ZrC+C)場合、金属の FP であるストロンチウムやセシウムが遊離 炭素層を通過して拡散し保持能が低下する可能性がある <sup>7</sup>。また、ZrC 中の炭素の不足割合が大 きいほど気体の FP であるキセノンの拡散係数が増大するとともに、結晶中に炭素の空孔が増加 することにより熱伝導率が低下するとの報告もある <sup>8</sup>。そのため、ZrC 被覆燃料粒子としては、 C/Zr 比 1.0 の定比 ZrC を被覆することが重要である。

1970~80年代に日本原子力研究所(現・日本原子力研究開発機構)にて行われた先行研究では、数10gバッチ規模でZrC被覆燃料粒子を製造したが、商用規模(3kgバッチ規模程度)での製造に至るまでには更に数段階の装置大型化が必要と考えられる。原子力機構においては平成16年度より文部科学省からの委託研究としてZrC被覆粒子の製造技術開発及び検査技術開発を実施している<sup>9</sup>。このうち、ZrC被覆粒子の製造技術開発としては、上記数10gバッチ規模の次の段階として、200gバッチ規模へ拡大したZrC被覆実験装置を用いて、実際の燃料核を使わずにZrC被覆実験を実施している。具体的項目は以下の通りである。

- (1) 約 200g バッチ規模までの適切な ZrC 被覆条件の取得
- (2) 適切な ZrC-OPyC 被覆条件の取得
- (3) 装置大型化のための問題点の摘出及び解決策の検討

以上により、200 バッチ規模の次の段階(1kg バッチ規模程度と考えられる)のための基礎技 術確立を目指している。

本報告は上記 ZrC 被覆粒子の製造技術開発の中間報告であり、以下の2点について述べる。

- 上記(1)を達成するための中間段階として、100g バッチまでの適切な ZrC 被覆条件の 取得
- 2) 上記(3)について H18 年度までに得られた成果

## 2. 方法

2.1 臭化物法による ZrC 層蒸着法 <sup>11)</sup>

被覆粒子は、流動床で原料ガス及びキャリアガスにより安定に流動させた状態で加熱され、 ZrC が粒子表面に均一に蒸着される。

**ZrC**の CVD 法としては、日本では塩化物法<sup>12)</sup>、二塩化メチレン法<sup>13)</sup>、ヨウ化物法<sup>14)</sup>、臭化物法<sup>15),16)</sup>が検討され、このうち臭化物法においてのみ、定比 **ZrC** を蒸着することに成功している。

臭化物法においては、水素ガス(H2)雰囲気下において、下記の反応により原料粒子表面に ZrC を被覆する<sup>15)</sup>。

$[CH_4] \rightarrow (C) + 2[H_2]$	(1)
$[\mathrm{ZrBr}_4] + [\mathrm{H}_2] \rightarrow [\mathrm{ZrBr}_3], [\mathrm{ZrBr}_2] + [\mathrm{HBr}]$	(2)
$[\text{ZrBr}_x] + (\text{C}) \rightarrow (\text{ZrC}) + x[\text{Br}] \text{ (x=2,3,or 4)}$	(3)
$[\mathrm{Br}]$ + 0.5 $[\mathrm{H_2}]$ $\rightarrow$ $[\mathrm{HBr}]$	(4)
$0.25 \text{ (C)} + [\text{HBr}] \rightarrow 0.25 [\text{CH}_4] + [\text{Br}]$	(5)

2.2 原料粒子 11)

$\square$	schematics	Specifications	Appearance
SZR particles	SZR:stabilzed zirconia	Diameter: about 0.72mm Density: about 6.07g/cm <sup>3</sup>	
Surrogated p	Pyrolytic carbon (PyC)layer	Diameter: about 0.8mm Density: about 5.1g/cm <sup>3</sup> PyC layer thickness:	
article	SZR particle* *SZR:stabillized zirconia	PyC layer density: About 1.9g/cm <sup>3</sup>	

Table 2.1 Basic data of the material particles.

本技術開発においては原料粒子として、安定化ジルコニア(SZR)模擬核もしくは SZR 模擬 核を内側高密度熱分解炭素(IPyC)層で被覆した、直径約 0.8mm の模擬被覆粒子を用いた。模擬 被覆粒子は、直径・粒子密度及び表面状態が、実際の UO2燃料核+バッファ層+IPyC 層とほぼ同 等となるように製作したものを用いた。Table 2.1 に SZR 模擬核および模擬被覆粒子の基礎デー タを示す。

なお、SZR 核に直接 ZrC を被覆する場合がある理由は 2.5 節で述べる。

## **2.3** 被覆装置の概要

原子力機構の ZrC 被覆装置を Fig. 2.1 に示す。本装置は原料ガス供給系 (gas supplying system)、流動床を有するヒーター (CVD coater)及び廃ガス処理系 (Off gas combustion system) により構成される<sup>11)</sup>。被覆プロセスとして ZrC 被覆、PyC 被覆又は ZrC-OPyC 連続被覆をバッ チ方式で行うことが可能である<sup>11)</sup>。



Fig. 2.1 ZrC coating equipment<sup>11</sup>).

ZrC 被覆プロセスにおいては、原料ガス供給系から C 供給源としてメタンガスが用いられる <sup>11)</sup> 。また、Zr 供給源として、Ar により気化した Br<sub>2</sub>ガスを下部ヒーターに装荷した金属 Zr へ 導入し、温度約 600℃で気体のジルコニウム臭化物を生成する <sup>11)</sup> 。各々の原料ガスは、最大約 200g までの原料粒子を装荷した上部ヒーター内の流動床へ導入され、安定した流動状態を保持し 温度 1300℃以上にて反応式(3)により ZrC を粒子表面に蒸着する <sup>11)</sup>。なお、ZrBr<sub>4</sub>のガス流量は、 ZrC 化学蒸着反応前後の Zr の重量減少量を秤量し、減少したすべての Zr が ZrBr<sub>4</sub>になったと仮 定し、且つ理想気体の状態方程式(PV=nRT)を用いて算出する。

また、PyC 被覆プロセスでは、温度約 1400℃にてプロピレンガスとアルゴンガスの混合ガスを 流動床へ投入し PyC を被覆する <sup>11)</sup>。

なお、下部ヒーターと上部ヒーターは各々電気炉と高周波コイルで加熱される。

廃ガス処理系は、被覆過程から発生した副生成物質であるスス、臭化水素(HBr)、水素ガス等 を各々取り除くバグフィルター、HBr 吸収塔、廃ガス燃焼装置で構成されている。 2.4 ZrC 層被覆試験の手順

試験の手順は以下の通りである。

- (1) 流動床に室温で Ar ガスを流し、秤量した原料粒子を投入する。
- (2) 上部ヒーターの高周波出力を上昇させていき、所定の出力で保持する。
- (3) 流動床に更に H<sub>2</sub>ガスと CH<sub>4</sub>ガスを供給する。
- (4) ジルコニウムを装荷した流動床下部ヒーターを約 600℃に加熱し、Br2ガスを供給する。下部 ヒーター内でジルコニウム臭素化物が発生し、流動床に導入される。なお、Br2ガスを供給す る手順は以下の通り。
  - 1) Br<sub>2</sub>ガス発生槽内の液体臭素を0℃に保つ。
  - 2) Br2 ガス発生槽にAr ガスを流し、下部ヒーターに導入する。
- (5) 所定の時間保持し、ZrC 被覆を行う。
- (6) Br<sub>2</sub>ガス、H<sub>2</sub>ガス、CH<sub>4</sub>ガスを止める。
- (7) 室温まで降温する。
- (8) 被覆粒子を取り出す。
- (9) Ar ガスを止める。

#### 2.5 ZrC 層の検査方法

ZrC 層の密度や定比性(C/Zr 比)は、機械的・熱的特性や FP 閉じ込め性能に影響するため、被 覆層の品質を判断するための重要な検査項目である。従って、この検査方法を確立することは ZrC 被覆燃料粒子の実用化のための重要な開発項目である。ここでは、本報告における検査法につい て述べる。

なお、定容積気体圧縮法(後述)による ZrC 層密度測定や、ICP-AES+酸化燃焼-赤外吸収法 (後述)による定比性評価には時間がかかるため、簡易的な方法として、SZR 模擬核に直接 ZrC 層を被覆した粒子を用いた検査方法も併用した。

2.5.1 物理研摩法による ZrC 層の取り出し

模擬被覆粒子に被覆した ZrC 層を定容積気体圧縮法(後述)によって密度測定及び ICP-AES+酸化燃焼・赤外吸収法(後述)によって定比性評価を行うためには、前処理として ZrC 層を IPyC 層から分離して取り出す必要がある。本報告においては物理研摩法にて ZrC 層を取り出した。手順は以下の通りである。

1) 被覆粒子を荒く砕いて SZR 模擬核を除去する。

- 2)被覆層に石英粉末を混ぜてよく砕き、ZrCに付着した PyC を除去する。
- 3)よく砕いた ZrC と PyC と石英の混合粉末をテトラブロモエタンで比重分離し、ZrC 砕片 を取り出す。

4) 取り出した ZrC 砕片を洗浄・乾燥する。

2.5.2 模擬被覆粒子に被覆した ZrC 層の密度測定・定比性評価

上記の物理研摩法により取り出した ZrC 砕片を試料とする。 (1) 定容積気体圧縮法による密度測定 ZrC 砕片を重量測定し、ガスピクノメータで密度を測定する。 (2) ICP-AES+酸化燃焼赤外吸収法による定比性評価法

以下の手順で Zr 及び C 含有量を各々測定し、C/Zr 比を算出する。 (a)Zr 分析

以下の手順で行う。

- 1) ZrC 砕片の重量測定
- 2) 硝酸+硫酸で ZrC 砕片を酸分解する。
- 3) ICP-AES 法で Zr 含有量を測定する。

(b)C 分析

以下の手順で行う。

- 1) ZrC 砕片の重量測定
- 2) 酸化燃焼-赤外吸収法でC含有量を測定する。
- 2.5.3 SZR 模擬核に直接被覆した ZrC 層の密度・定比性評価

以下の手順で行う。

- 1) 被覆粒子の重量(w1)及び体積(v1)を測定する。
- 2) 大気中で焙焼する。この時、以下の反応により、ZrC 層は完全に ZrO2 に置き換わったと仮定 する。

 $(\operatorname{ZrC}_{x}) + (x+1)[O_{2}] \rightarrow (\operatorname{ZrO}_{2}) + x[\operatorname{CO}_{2}]$ (2-1)

- 3) 焙焼した被覆粒子の重量(w2)を測定する。
- 4)酸化した被覆層を分離する。
- 5) 残った SZR 模擬核の重量(w3)及び体積(v3)を測定する。
- 6) w1, w2, w3, v1, v3 より ZrC 層密度及び C/Zr 比を評価する。

#### 3. ZrC 被覆試験結果

3.1 原料粒子装荷量 50g における ZrC 被覆パラメータ試験

ZrC 被覆粒子の製造技術開発の第一段階として、原料粒子装荷量を 50g として ZrC 層被覆試験を行った。

Fig. 3.1 に流動床付近の模式図を示す。本章において使用した黒鉛反応管等の仕様は以下の通りである。

- ✓ 黒鉛反応管:内径 34mm
- ✓ スパウトヘッド(黒鉛のノズル):開き角 60°、ノズル内径 4mm



Fig. 3.1 Upper heater with a particle fluidizing bed.

## 3.1.1 被覆温度依存性

CH4/ZrBr4ガス流量比 = 約1.4 (モル比)に固定し、被覆温度と、被覆された ZrC 層の C/Zr 比、密度及び被覆速度の関係を調べた。

なお、ZrBr<sub>4</sub>のガス流量は、ZrC 化学蒸着反応前後の Zr の重量減少量を秤量し、減少したす べての Zr が ZrBr<sub>4</sub>になったと仮定し、且つ理想気体の状態方程式(PV=nRT)を用いて算出し た。

-7 -

## (1) ZrC 層定比性

**Fig. 3.2** に C/Zr 比の被覆温度依存性を示す。被覆温度が 1550 から 1350℃へ低くなるにつ れて、ZrC 層の C/Zr 比は 1.4 から 1.0 程度へ緩やかな曲線を描きながら低下する傾向がみら れた。



Fig. 3.2 ZrC-coating temperature dependence of C/Zr ratio, the particle inventory : 50g, material particle: SZR kernel, CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub> ratio: about 1.4.

(2) ZrC 層密度

Fig. 3.3 に ZrC 層密度の被覆温度依存性を示す。被覆温度が 1550℃から 1350℃と低くなる につれて、ZrC 層密度は約 6.0g/cm<sup>3</sup>から約 6.5g/cm<sup>3</sup>へ増大した。ZrC の理論密度は 6.73g/cm<sup>3</sup> である <sup>17)</sup>ことから、得られた ZrC 層密度は、被覆温度 1350℃では理論密度の約 95%程度と なった。



Fig. 3.3 ZrC-coating temperature dependence of ZrC layer density, the particle inventory : 50g, material particle: surrogated particle, CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub> ratio: about 1.4.

(3) ZrC 層被覆速度

Fig. 3.4 に ZrC 層被覆速度の被覆温度依存性を示す。被覆速度には、被覆温度に依存して 2 つの大きな変化が見られた。1つは被覆温度 1550 から 1400℃へ低くなるにつれて生じる緩 やかな被覆速度の低下、もう1つは被覆温度 1400℃から 1330℃と低くなるにつれて生じる急 激な被覆速度の低下である。



Fig. 3.4 ZrC-coating temperature dependence of ZrC coating ratio, the particle inventory: 50g, material particle: surrogated particle, CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub> ratio: about 1.4.

(4) まとめ

CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub>ガス流量比 = 約 1.4 (モル比)、被覆温度 1350℃程度での被覆で、定比に近く、 理論密度の 95%程度の ZrC 被覆層を得られる見通しを得た。また、被覆温度 1350℃程度の ZrC 層の被覆速度は、10~17 $\mu$  m/h であることから、高燃焼度 VHTR 用燃料の設計で要求さ れる ZrC 層厚さ(推定値: 30 $\mu$ m 程度)を得るために必要な ZrC 被覆時間は 2~3 時間程度 になると考えられる。

3.1.2 CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub>ガス流量比依存性

模擬被覆粒子を原料粒子とし、被覆温度 1350℃程度で CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub>比を約 1.4 及び約 2.8 とし て被覆試験を行った結果を Table 3.1 に示す。CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub>比は ZrC 層の定比性と密度には大きく 影響しないが、被覆速度には大きな効果があった。すなわち、CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub>比を大きくすると被覆 速度が大幅に減少した。

	CH₄/ZrBr₄ = 1.35	CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> = 2.64
coating temperature [°C]	1359	1356
C/Zr	1.11	1.05
ZrC layer density [g/cm³]	6.45	6.61
ZrC layer coating ratio $[\mu m/h]$	14.7	7.0

Table 3.1 CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub> dependence of C/Zr, ZrC layer density and ZrC layer coating ratio, the particle inventory: 50g , material particle: surrogated particle.

3.2 原料粒子装荷量 100g までのバッチアップ試験

ZrC 被覆粒子の製造技術開発の第二段階として、原料粒子装荷量 50g から 100g までのバッチ アップを行った。試験条件は以下の通りである。

✓ CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub>ガス流量比:約1.4

✓ 原料粒子装荷量:50、75及び100g

✓ 被覆温度:約1330℃(原料粒子:SZR 模擬核)及び約1380℃(原料粒子:模擬被覆粒子)なお、原料粒子装荷量75及び100gにおいては、被覆装置に流す各種ガス(Zr,水素、メタン、ZrBr4)の流量を各々1.5倍とした。



Fig. 3.5 Prticle inventory dependence of C/Zr ratio, CH4/ZrBr4 ratio: about 1.4.

得られた ZrC 層の C/Zr 比を Fig. 3.5 に示す。どちらの被覆温度でも、ZrC 層の C/Zr 比は原料粒子装荷量にほとんど依存しなかった。従って原料粒子装荷量 50g における最適被覆温度 1350℃の前後では、原料粒子装荷量 100g までにおいて、ZrC 層の定比性は原料粒子装荷量にほ

とんど依存しないことがわかった。

3.3 原料粒子装荷量 100g における ZrC 被覆試験

ZrC 被覆粒子の製造技術開発の第三段階として、原料粒子装荷量 100g で ZrC 層の適切な被 覆条件を調べた。適切な被覆条件とは、下記の条件を満たすものである。

- 品質の良い ZrC 層を被覆できること。
   C/Zr 比が1に近く、かつ高密度である ZrC 層が高品質であるとされている。
- 被覆速度が適切であること。
   被覆速度が大きいと被覆が短時間で済んで望ましい。ただし、あまりに大きすぎると被覆
   層厚さのばらつきが大きくなって悪い。
- 厚い被覆層も被覆可能であること。
   これについては第4章で述べる。

3.3.1 ZrBr4 流量

Table 3.2 に ZrC 層の定比性、密度及び堆積速度と CH4/ZrBr4 流量比の関係を示す。 CH4/ZrBr4=1.05 の場合の方が被覆温度が高いにも関わらず、CH4/ZrBr4=1.41 の場合と比べて C/Zr 比はほとんど変わらず、被覆速度は大きかった。そこで、原料粒子装荷量 100g においては ZrBr4の流量を増やし、CH4/ZrBr4=1.0~1.1 程度を標準的な条件にすることとした。

Table 3.2 CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub> dependence of C/Zr, ZrC layer density and ZrC layer coating ratio, the particle inventory: 100g , material particle: surrogated particle,

	CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> = 1.05	CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> = 1.41
coating temperature [°C]	1395	1367
C/Zr	1.09	1.11
ZrC layer density [g/cm <sup>3</sup> ]	6.45	6.62
ZrC layer coating ratio $[\mu m/h]$	14.0	11.3

 $\rm CH_4$  gas flow rate: 0.003 mol/min.

3.3.2 水素流量

Fig. 3.6 に CH₄/ZrBr₄=1.0~1.1 程度、被覆温度 1350℃程度における ZrC 被覆速度の H₂/CH₄ ガス流量比依存性を示す。

H2/CH4 = 45 で ZrC 被覆速度が最大となった。しかも、ZrC 層の C/Zr 比は1に近く、密度も

高かった。更に、2時間の被覆で約28 $\mu$ mのZrC層を被覆することができた。Table 3.3 にこの バッチの被覆粒子の被覆条件及びC/Zr,密度及び外観・金相エッチング写真を示す。

一方、 $H_2/CH_4 = 50$  及び 55 の場合、被覆中に炉内圧力が急激に上昇して被覆を途中で中止し なくてはならなかったため、各々11 及び  $6\mu$  m 厚さの ZrC 層しか得られなかった。この炉内圧 力上昇の問題については第4章に述べる。



Fig. 3.6 Hydroge gas flow rate dependence of ZrC coating ratio at the deposition temperature around 1350°C, the particle inventory: 100g, material particle:surrogated particle, CH<sub>4</sub>/ZrBr<sub>4</sub> ratio: about 1.1.

Particle inventory <sup>11)</sup>	100 g (surrogated particle)		
coating temperature	1364 °C		
CH <sub>4</sub> /ZrBr <sub>4</sub> gas flow ratio	1.0		
H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> gas flow ratio	45		
Coating time <sup>11)</sup>	120 min		
C/Zr ratio <sup>11)</sup>	1.03		
ZrC layer density <sup>11)</sup>	6.50 [g/cm <sup>3</sup> ]		
ZrC layer thickness <sup>11)</sup>	28 [ <i>µ</i> m]		
Appearance of the coated particle <sup>11)</sup>			
Optical image of the etched cross section of the coated particle <sup>11)</sup>	SZR IPyC ZrC		

Table 3.3 Coating condition and the quality of the ZrC layer (batch number: ZrC-06-2048)

4. バッチアップ及び被覆層厚肉化のための問題点

原料粒子装荷量 100g までにおける ZrC 被覆試験により、バッチアップや被覆層厚肉化のための以下のような 2 つの問題点が抽出された。

✓ スパウトヘッドのノズル内での ZrC 堆積

✓ 排気配管の目詰まり

以下に各々の問題点について述べる。

4.1 スパウトヘッドのノズル内での ZrC 堆積

ZrC 被覆時は、模擬粒子のみならずスパウトヘッドのノズル部分にも ZrC が付着するため、 ノズル内径が徐々に小さくなる。ノズルが閉塞すると被覆ガスの導入が妨げられ、ついには粒子 が正常に流動しなくなる。



Fig. 4.1 Nozzle temperature dependence of the deposition rate on the nozzle.

Fig. 4.1 に原料粒子装荷量 50g でのノズル温度とノズル部での ZrC 堆積速度の関係を示す。 ノズル温度が 1350℃を超えると ZrC 堆積速度が急激に増す。例えば、ノズル温度約 1350℃にお いては 120 分の被覆でノズル内径が約 1.2mm 小さくなる。即ち、内径 4mm のノズルの断面積 が約半分になってしまう。従って、長時間被覆により厚い ZrC 層を被覆するためには、ノズル部 分の温度が高くならないようにする必要がある。

4.2 排気配管の目詰まり

ZrC 被覆中に発生する排ガスには常に白色粉末が含まれ、排気配管内壁に付着する。特に、 炉に近い排気配管での付着量が多く、排気配管の目詰まりによる炉内圧力の上昇や部分的な閉塞 を引き起こし、充分な時間被覆する前に炉内圧上昇により被覆を打ち切らざるを得なくなる。初期の排気配管と白色粉末による目詰まり具合の例を Fig. 4.2(a)に示す。





3.3.2 で述べたように、水素の流量が多い場合には炉内圧上昇のため、充分な厚さの ZrC 層を 被覆することができなかった。このことから、白色粉末の発生量は水素流量に依存すると思われ る。しかし、白色粉末は ZrC 被覆に伴って必ず発生する。更に、バッチアップや ZrC 層の厚肉 化に伴って白色粉末の発生量は増加するため、目詰まり防止の対策が特に必要である。

なお、この白色粉末は常温で固体であり、空気中の水分とさえ反応して発熱しながら強酸性の 白煙を発生させる。この性質は、反応前後の物質から推測できる臭素化合物の中では ZrBr<sub>4</sub>と一 致する。従って、この白色粉末は未反応の ZrBr<sub>4</sub>と思われる。

H18年度までに実施した対策は以下の3点である。

(1) 排気配管を太くする。

太くした排気配管の概念図と白色粉末による目詰まり具合の例を Fig. 4.2(b)に示す。

(2) 粉末トラップ容器の設置+配管配置変更

排気配管を太くし、更に、白色粉末のトラップ容器を取り付けた。更に、トラップ容器から先の排気配管を垂直にすることにより、白色粉末がトラップ容器に溜まりやすいようにした。ト ラップ容器を取り付け、配置変更した排気配管の概念図とトラップ容器に溜まった白色粉末の 例を Fig. 4.2(c)に示す。 (3) 圧力逃し機構の設置(安全対策)

目詰まり防止ではなく、安全対策として行った。炉内圧力への安全対策としては、目詰まりが 生じる部分より下流側に圧力逃し機構を1系統取り付けてあったが、Fig. 4.3 に示すように、 新たにガス導入側に1系統取り付けた。被覆ガスは高濃度の強酸性の臭素化合物を含むこと を考慮し、Fig. 4.3 に示すように、圧力逃し時には被覆ガスがアルカリ中和溶液を通って中和 されるようにした。



Fig. 4.3 System for the depressurization in an emergency

## 5. 結論

文部科学省からの委託研究として原料粒子として模擬燃料核を用いて ZrC 被覆粒子の製造技術 開発を行っている。H18 年度までに得られた結果は以下の通りである。

- (1) 被覆温度等の被覆条件を最適化することにより、粒子装荷量 100g において被覆温度約 1360℃で高品質の約 30 μ m の ZrC 層の被覆に成功した。
- (2) バッチアップ及び ZrC 層厚肉化のための以下のような問題点を抽出した。
  - ✓ スパウトヘッドのノズル内での ZrC 堆積
  - ✓ 白色粉末による排気配管の目詰まり
- (3) 上記の排気配管の目詰まりに対しては、以下のような対策を施した。
  - ✓ 粉末トラップ容器の設置+配管配置変更
  - ✔ 圧力逃し機構の設置

以上により、本委託研究における最終目標のうち、約 200g バッチ規模での適切な ZrC 被覆条件 の取得及び装置大型化のための問題点の摘出及び検討に資した。

謝辞

本報をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂きました原子燃料工業株式会社関田武典氏、株式会社化研根本忠洋氏、原子力エンジニアリング株式会社飛田勉氏に深く感謝いたします。

#### 参考文献

1) K. Sawa, S. Suzuki, S. Shiozawa : "Safety criteria and quality control of HTTR fuel", Nucl. Eng. Des., <u>208</u>, p.305(2001)

2) 林君夫, 沢和弘, 塩沢周策, 福田幸朔: "高温工学試験研究炉用燃料の健全性の評価と許容設計限界", JAERI-M 89-162 (1989).

3) 福田幸朔,小川徹, 鹿志村悟, 林君夫, 飛田勉, 小林紀昭, 湊和生, 菊池啓修, 村上裕彦, 菊池 輝男, 井川勝市, 岩本多實: "高温ガス炉用燃料に関する試験研究", JAERI-M 89-007 (1989).

4) H. Nabielek, W. Schenk, W. Heit, A.-W. Mehner and D. T. Goodin : "The performance of high-temperature reactor fuel particles at extreme temperatures", Nucl. Technol., <u>84</u> p.62(1989)

5) Y. Kurata, K. Ikawa and K. Iwamoto : "The effect of heat treatment on density and structure of SiC", J. Nucl. Mater. <u>92</u>, p.351(1980).

6) The U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum : "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", GIF-002-00 (2002).

7) K. Fukuda, K. Ikawa and K. Iwamoto : "Fission Product Diffusion in ZrC-Coated Fuel Particles", J. Nucl. Mater., <u>87</u>, p.367(1979).

8)A. Auskern : "Rare Gas Diffusion in Non-stoichiometric Zirconium Carbide", J. Nucl. Mater., <u>22</u>, p.257(1967).

9) 沢和弘 他:"革新的高温ガス炉燃料・黒鉛に関する技術開発計画", JAERI-Tech 2005-024 (2005).

10) 小林紀昭, 塩沢周策, 林君夫, 沢和弘, 佐藤貞夫, 福田幸朔, 金子光信, 佐藤努: "高温工学試験研究炉の燃料検査基準", JAERI-M 92-079 (1992).

11) 植田祥平,相原純,安田淳,石橋英春,茂住泰寛,沢和弘,湊和生:"革新的高温ガス炉燃料としての ZrC 被覆燃料粒子の製造及び検査技術開発",表面,<u>46</u>, p.222(2008).

12) K. Ikawa : "Vapor deposition of zirconium carbide-carbon composites by the chloride process", J. Less-Common Metals, <u>29</u>, p.233 (1972).

13) K. Ikawa, K. Iwamoto<sup>:</sup> "Coating microspares with zirconium carbide-carbon composite by the methylene dichloride process", Yogyo-Kyokai-Shi, <u>81</u>, p.403 (1973).

14) K. Ikawa: "Vapor deposition of zirconium carbide-carbon composites by the iodide process", J. Less-Common Metals, <u>27</u>, p.325 (1972).

15) T. Ogawa, K. Ikawa and K. Iwamoto : "Chemical Vapor Deposition of ZrC within a Spouted Bed by Bromide Process", J. Nucl. Mater., <u>97</u>, p.104 (1981).

16) T. Ogawa and K. Fukuda : "Developing ZrC Coating for Nuclear Fuel Particles", Proc. the Third International Conference on Surface Modification Technologies, Neuchatel, Swizerland, 28 Aug.-1 Sept. 1989, p.309 (1990).

17) 化学大辞典編集委員会編:"化学大辞典第5卷", 共立出版, p.696 (1963).

表1. SI 基本単位						
甘土目			SI 基本単位			
<b>本</b> 平 5	E.		名	称		記号
長	Лt	メ	ĺ	Γ	イ	m
質	量	キ	ロク	ブラ	$\mathcal{L}$	kg
時	間		形	l)		s
電	流	7	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	$\sim$	7	А
熱力学》	且度	ケ	$\mathcal{N}$	ビ	ン	Κ
物質	量	モ			ル	mol
光	度	力	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	デ	ラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
an SI 基本単位						
名称	記号					
面 積平 方 メ ー ト ル	m <sup>2</sup>					
体 積立法メートル	m <sup>3</sup>					
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)キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>					
質量体積(比体積) 立法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	$A/m^2$					
磁 界 の 強 さアンペア毎メートル	A/m					
(物質量の)濃度 モル毎立方メートル	$mo1/m^3$					
輝 度カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$					
屈折率(数の)1	1					

÷ c oT 埣丽垚

衣 5. 51 接與證								
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号			
$10^{24}$	э 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d			
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с			
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	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	M	$10^{-15}$	フェムト	f			
$10^{3}$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	а			
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	Z			
10 <sup>1</sup>	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	у			

#### 表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

	51 租立車位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表した	SI基本単位による 表し方	
<b>= - /</b>		1		-1 (h)	
半 面 角	フジアン ニ	rad		m • m *=1 (5)	
立 体 角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	$sr^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$	
周 波 券	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>	
力	ニュートン	Ν		m•kg•s <sup>-2</sup>	
圧力,応力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
工 率 , 放射 束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	
磁東	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K	
光 束	ルーメン	1m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$	
照度	ルクス	1 x	$1 \text{m/m}^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$	
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>	
吸収線量, 質量エネル	H L I	Cu	T/lea	22	
ギー分与, カーマ		чy	J/ Kg	m•s	
線量当量,周辺線量当					
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$	
人線重当重,組織線量当					

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区 別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの 用例は表4に示されている。

(b)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"1"は明示されない。
 (c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

和立量	SI 組立単位			
和工工里	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘度	パスカル秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	
力のモーメント	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
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	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 速 度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg • s <sup>-3</sup>	
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質量熱容量(比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	J/(kg $\cdot$ K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケ ルビン	W/(m•K)	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{K}^{-1}$	
体積エネルギー	ジュール毎立方メート ル	$J/m^3$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$	
体 積 電 荷	クーロン毎立方メート ル	$C/m^3$	$m^{-3} \cdot s \cdot A$	
電 気 変 位	クーロン毎平方メート ル	$C/m^2$	$m^{-2} \cdot s \cdot A$	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mo1	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mo1^{-1}$	
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∕(mo1 ⋅ K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mo1^{-1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} \cdot s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル 毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

\_

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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 単位であらわされる数値		
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19}J$		
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg		
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m		

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と

併用されるその他の単位				
名利	F.	記号	SI 単位であらわされる数値	
海	里		1 海里=1852m	
ノッ	F		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s	
7 –	ル	а	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$	
ヘクタ	- <i>i</i> V	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$	
バー	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa	
オングスト	ローム	Å	1 Å=0. 1nm=10 <sup>-10</sup> m	
バー	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$	

固有の名称を含むCGS組立単位 表 9 記号 SI 単位であらわされる数値 名称 I 1 erg=10<sup>-7</sup> J 1 dyn=10<sup>-5</sup>N N ト erg ダ 1 ン dyn メポ 7 ズ Р 1 P=1 dyn • s/cm<sup>2</sup>=0.1Pa • s ス ス ŀ \_ ク St 1 St  $=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ガ ウ ス G 1 G ≙10<sup>-4</sup>T ステ ド エ ル ッ 0e1 Oe ≙(1000/4π)A/m ウ  $\overrightarrow{}$ ク ス ル Mx 1 Mx ≙10<sup>-8</sup>Wb I ス チ ル ブ sb  $1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$ 朩 ŀ ph 1 ph=10<sup>4</sup>1x <u>Gal =1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup></u> ガ ル Ga]

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例					
名称 記号				記号	SI 単位であらわされる数値	
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq	
$\scriptstyle  u$	ンコ	、ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy	
$\scriptstyle  u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv	
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm	
ガ	2	/	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$	
ジ	ャン	スキ	1	Jу	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$	
フ	工	ル	111		1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m	
メートル系カラット			ット		1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg	
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	進す	く気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力	П	IJ	1	cal		
3	カ	17	~		$1 \dots -1 \dots -1 \dots -1 0^{-6} \dots$	