JAEA-Technology 2008-083



ZrC 被覆粒子の製造技術開発 (その2) (受託研究)

Development of Production Technology of ZrC-coated Particle (No.2) (Contract Research)

安田 淳 植田 祥平 相原 純 石橋 英春* 沢 和弘

Atsushi YASUDA, Shohei UETA, Jun AIHARA, Hideharu ISHIBASHI* 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

January 2009

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, 2009

JAEA-Technology 2008-083

ZrC 被覆粒子の製造技術開発(その2) (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*、植田 祥平、相原 純、石橋 英春*、沢 和弘

(2008年11月25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 19 年度は原料粒子として模擬燃料核を用いて ZrC-外側熱分解炭素(OPyC)連続被覆試験 を行った。最終的に、粒子装荷量 100g において、厚さ約 27μm までの ZrC 層と、厚さ約 48 μm までの OPyC を連続被覆することができた。

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19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

* 原子燃料工学株式会社

Development of Production Technology of ZrC-coated Particle (No.2) (Contract Research)

Atsushi YASUDA^{**}, Shohei UETA, Jun AIHARA, Hideharu ISHIBASHI^{*} and Kazuhiro SAWA

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

(Received November 25, 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 2007 to March 2008, ZrC-outer pyrolytic carbon (OPyC) continuous coating tests were carried out with the nonnuclear particles. We finally succeeded to coat continuously the ZrC layer and the OPyC layer with the thicknesses up to about 27μ m and about 48μ m, respectively, in the batch scale of 100 g.

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

* Special Topic Engineer

* Nuclear Fuel Industries, Ltd.

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).

目 次

1.	序論		1
2.	方法		2
	2.1	被覆層蒸着法	2
	2.2	原料粒子 •••••••	2
	2.3	被覆試験の手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
	2.4	被覆層の検査方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
3.	結果		4
	3.1	OPyC 単独被覆試験 ······	4
	3.2	ZrC-OPyC 連続被覆試験 ······	5
4.	結論		10
謝話	辛 ••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	10
参考	与文献		11

Contents

1.]	ntrod	luction ·····	1			
2.	2. Methods ·····					
	2.1	Coating layer deposition	2			
	2.2	Material particles	2			
	2.3	The coating tests process	2			
	2.4	Inspection methods for the coating layers	3			
3.	Resi	ılts	4			
	3.1	OPyC single coating tests	4			
	3.2	ZrC-OPyC continuous coating tests	5			
4.	Cone	clusions ·····	10			
Acl	knowl	edgement ·····	10			
Rei	ferenc	ces ·····	11			

表リスト

- Table 3.1 ZrC Coating temperature dependence of distribution of pores in OPyC layer, ZrC-OPyC continuous coating test, particle inventory: 100 g, CH₄/ZrBr₄ ratio: about 1.0, ZrC coating duration: 90 min, C/Zr evaluation: ICP-AES+ infrared light absorption during combustion in oxygen, OPyC coating temperature : 1433 °C, C₃H₆ concentration: 14.3 %, coating duration: 8 min.

8

図リスト

Fig. 2.1 ZrC coating equipment	2
Fig. 3.1 Upper heater with a particle fluidizing bed	4
Fig. 3.2 Coating temperature dependence of density and coating rate of OPyC, OPyC	
single coating test, particle inventory: 75 g, C_3H_6 concentration:	
14.3 %. ····	5
Fig. 3.3 ZrC Coating temperature dependence of C/Zr and coating rate of ZrC,	
ZrC-OPyC continuous coating test, particle inventory: 100 g, $CH_4/ZrBr_4$	
ratio: about 1.0, ZrC coating duration: 90 min, C/Zr evaluation: burn weight	
method, OPyC coating temperature: 1433 $^\circ$ C, C ₃ H ₆ concentration: 14.3 %,	
coating duration: 8 min.	6
Fig. 3.4 ZrC Coating temperature dependence of averaged fracture load of mono-axial	
compressive fracture test of the coated particle, ZrC-OPyC continuous coating	
test, particle inventory: 100 g, $CH_4/ZrBr_4$ ratio: about 1.0, ZrC coating	
duration: 90 min, OPyC coating temperature: 1433 $^{\circ}$ C, C ₃ H ₆ concentration:	
14.3 %, coating duration: 8 min.	7

1. 序論

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¹⁾。 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²⁾。

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^{1),3)}。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) 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-外側熱分解炭素(OPyC) 被覆条件の取得 ZrC 層のハンドリング時の破損を避けるためには、ZrC 層被覆後に被覆装置か ら取り出すことなく ZrC 層のクッションである OPyC 層を被覆する必要がある。
- (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、200g 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。なお、FP 閉じ込め性能や熱伝導性の良い C/Zr 比 1.0 の定比 ZrC を被 覆することが重要である¹⁾。

文献 1)は上記(1)及び(3)についての、本報告は上記(2)についての中間報告である。本報告では上記(2)について H19 年度までに得られた成果について述べる。

2. 方法

2.1 被覆層蒸着法

ZrC層は臭化物法で蒸着される¹⁾。また、OPyC層はプロピレン($C_{3}H_{6}$)を熱分解させることにより被覆される。

2.2 原料粒子

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 ¹⁾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¹⁾。

2.3 被覆試験の手順

被覆粒子は、**Fig. 2.1** に示す原子力機構の ZrC 被覆装置 ¹⁾内の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 や PyC が粒子表面に均一に蒸着される。



Fig. 2.1 ZrC coating equipment¹).

ZrC-OPyC 連続被覆試験の手順は以下の通りである。OPyC 単独被覆試験の手順は、下記から(3)~(7)を省略したものである。なお、ZrBr4のガス流量は、被覆試験後前後のZrの重量差を秤量し、減少したすべてのZrがZrBr4になったと仮定し、かつ理想気体の状態方程式(PV=nRT)

を用いて算出する 1)。

- (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 H₂ガスと CH₄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) Br2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) Br₂ガス、H₂ガス、CH₄ガスを止める。
- (7) 上部ヒーターの高周波出力を変更し、所定の出力で保持する。
- (8) C₃H₆ガスを供給する。
- (9) 所定の時間保持し、OPyC 被覆を行う。
- (10) 室温まで降温する。
- (11) 被覆粒子を取り出す。
- (12) Ar ガスを止める。
- 2.4 被覆層の検査方法
- (1) ZrC 層の密度

定容積気体圧縮法 1)にて測定した。

(2) ZrC 層の定比性

ICP-AES+酸化燃焼赤外吸収法¹⁾または焙焼重量法にて評価した。ICP-AES+酸化燃焼赤 外吸収法での値を正とするが、比較したいバッチの全部について ICP-AES+酸化燃焼赤 外吸収法での評価を行っていない場合については焙焼重量法の値を比較に用いる。 焙焼重量法の手順は以下の通りである。

- 1) 物理研摩法 1)にて ZrC 砕片を取り出す。
- 2) ZrC 砕片の重量(W1)を測定する。
- 3) 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。

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

- 4) 焙焼後の砕片の重量(W2)を測定する。
- 5) W1, W2 より C/Zr 比を評価する。
- (3) **OPyC** 層の密度測定法

従来の TRISO 燃料粒子の IPyC 層の密度測定法として適用してきた浮遊沈降法 4にて測定した。

3. 結果

Fig. 3.1 に流動床付近の模式図を示す。本試験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 bed¹⁾.

3.1 OPyC 単独被覆試験

ZrC-OPyC 連続被覆試験に先立ち、適切な OPyC 被覆温度を推測するため OPyC 単独被覆試 験を行った。原料粒子装荷量 75g, C₃H₆ガス濃度 14.3%に固定し、OPyC 単独被覆試験における OPyC 層密度及び被覆速度の被覆温度依存性を調べた結果を Fig. 3.2 に示す。被覆温度が高いほ ど被覆速度は増加し、OPyC 層の密度は低下する。



Fig. 3.2 Coating temperature dependence of density and coating rate of OPyC, OPyC single coating test, particle inventory: 75 g, C₃H₆ concentration: 14.3 %.

被覆温度 1433℃の場合、OPyC 層の密度は 1.77g/cm³であったが、同じ被覆温度で原料粒子 装荷量を 100g として被覆した場合、OPyC 層の密度は 1.82g/cm³にやや増加した。ZrC 層と連 続被覆する場合においては、OPyC 層を被覆する時点で ZrC 層が被覆された分、被覆粒子の重量 は装荷原料粒子よりも重くなっている。従って、原料粒子装荷量を 100g として ZrC-OPyC 連続 被覆を行う場合には、OPyC 被覆温度を約 1430℃とすると、OPyC 密度は 1.82g/cm³から更に増 加して HTTR 燃料の仕様 (1.85±0.1g/cm³) 程度になると推測された。

3.2 ZrC-OPyC 連続被覆試験

3.2.1 ZrC 被覆温度依存性

上記 3.1 において、100g バッチ規模における OPyC 層の被覆温度は約 1430℃が適当である と推測された。そこで、OPyC 層被覆温度を約 1430℃とし、100g バッチ規模で様々な ZrC 被覆 温度で ZrC-OPyC 連続被覆を行い、被覆層の品質や被覆速度の ZrC 被覆温度依存性を調べた。 (1) ZrC 被覆温度依存性

原料粒子装荷量 100g、OPyC 被覆温度 1433℃、C₃H₆ガス濃度 14.3%, OPyC 被覆時間 8min, CH₄/ZrBr₄ = 約 1.0, ZrC 被覆時間 90min に固定して ZrC-OPyC 連続被覆試験を行った結果を Fig. 3.3 に示す。なお、ICP-AES+酸化燃焼赤外吸収法による C/Zr 比評価はこの図に示した 6 バ ッチ全部については行っていないため(2.4(2)参照)、Fig. 3.3 の C/Zr は焙焼重量法での値である。



Fig. 3.3 ZrC Coating temperature dependence of C/Zr and coating rate of ZrC, ZrC-OPyC continuous coating test, particle inventory: 100 g, CH₄/ZrBr₄ ratio: about 1.0, ZrC coating duration: 90 min, C/Zr evaluation: burn weight method, OPyC coating temperature: 1433 $^{\circ}$ C, C₃H₆ concentration: 14.3 %, coating duration: 8 min.

ZrC 被覆速度は ZrC 被覆温度が高いほど大きくなった。C/Zr 比は、ZrC 被覆温度約 1310~ 1380℃の範囲で約 1.0 とあまり変化はなく、ZrC 被覆温度約 1410℃の点でのみ約 1.2 であった。 なお、OPyC 層の密度及び被覆速度は各々1.86~1.93[g/cm³]及び 172.5~217.5[µm/h]とばらつい ていたが、上記 3.1 で推測された通り、密度は HTTR 燃料の仕様程度になった。なお、ZrC 被覆 温度との相関は見出せなかった。また、OPyC 層の密度と被覆速度の間にも相関を見出せなかっ (2) ZrC 被覆層の品質の OPyC 層への影響

Fig. 3.3 に示される 6 バッチのうち 4 バッチについて粒子一軸圧縮破壊試験を行った。その 50 粒子の破壊荷重の平均値の ZrC 被覆温度依存性を **Fig. 3.4** に示す。



Fig. 3.4 ZrC Coating temperature dependence of averaged fracture load of mono-axial compressive fracture test of the coated particle, ZrC-OPyC continuous coating test, particle inventory: 100 g, CH₄/ZrBr₄ ratio: about 1.0, ZrC coating duration: 90 min, OPyC coating temperature: 1433 °C, C₃H₆ concentration: 14.3 %, coating duration: 8 min.

ZrC 被覆温度約 1410℃以外のバッチについては、ZrC 層の厚さが異なるにも関わらず平均破 壊荷重は約 35[N]でほぼ同じであるが、ZrC 被覆温度約 1410℃のバッチのみ約 20[N]であり、他 のバッチより明らかに小さい。この ZrC 被覆温度約 1410℃のバッチと他の場合の代表的なバッ チのデータを Table 3.1 に示す。断面金相観察を行うと、Table 3.1 に示すように、このバッチの み OPyC 層の ZrC 層との境界付近に大きなポアが存在し、また、ZrC 層表面が凸凹していた。 このバッチのみ ZrC 層の品質も大きく異なるため断言はできないが、このポアの存在が他のバッ チと比べて小さな荷重で破損してしまった原因である可能性は大きい。また、ポアは ZrC 層との 境界付近に存在することから、ZrC 層表面の凹凸がポア形成の原因であると思われる。

粒子一軸圧縮破壊強度が小さい粒子は、ハンドリングやコンパクト形成時などに外力が加わった際に破損しやすいと考えられるため、望ましくない。従って、平滑な表面を持つZrC層を被覆することは実用上重要であることがわかった。

なお、この ZrC 被覆温度 1410℃のバッチの OPyC 層の密度は 1.90g/cm³であり、他のバッチ と同程度である理由は、浮遊沈降法においては ZrC 層との境界付近の OPyC 層中のポアには重液 が浸透するためであると考えられる。 **Table 3.1** ZrC Coating temperature dependence of distribution of pores in OPyC layer, ZrC-OPyC continuous coating test, particle inventory: 100 g, CH₄/ZrBr₄ ratio: about 1.0, ZrC coating duration: 90 min, C/Zr evaluation: ICP-AES+ infrared light absorption during combustion in oxygen, OPyC coating temperature : 1433 °C, C₃H₆ concentration: 14.3 %, coating duration: 8 min.



3.2.2 被覆時間依存性

上記 3.2.1 において、OPyC 被覆温度約 1430℃にて HTTR 仕様の密度を持った OPyC 層を被 覆できることが確認された。また、ZrC 被覆温度約 1310℃~約 1370℃の範囲で定比性の良い ZrC 層を被覆できることがわかった。そこで、OPyC 層被覆温度を約 1430℃とし、ZrC 被覆温度を 1350℃程度として様々な時間で被覆を行った。なお、ZrC 被覆温度を 1350℃程度とした理由は、 被覆温度が多少前後しても定比性の良い ZrC 層を被覆可能であるからである。

その結果、**Table 3.2** に示すように、被覆時間を調整することにより、**Zr**C 厚さ約 27μ m まで、 OPyC 層厚さ約 48μ m までの均一な被覆層を連続被覆することができた。 **Table 3.2** Coating duration dependence of layer thickness, ZrC-OPyC continuous coating test, particle inventory: 100 g, CH₄/ZrBr₄ ratio: around 1, ZrC coating temperature: around 1350 °C, C/Zr evaluation: ICP-AES+ (infrared light absorption during combustion in oxygen), OPyC coating temperature: 1433 °C, C₃H₆ concentration: 14.3 %.

		OPyC coating duration: 8 min	OPyC coating duration: 12 min	OPyC coating duration: 16 min	
	\setminus	OPyC thickness: about 24μ m	OPyC thickness: about 36μ m	OPyC thickness: about 48μ m	
g duration: 90 min	ess: about 21 μ m	SZR IPyC ZrC	E		
ZrC coating	ZrC thickne	Batch No. : ZrC-07-3002 ZrC coating temperature: 1359°C $CH_4/ZrBr_4$ ratio : 0.95 C/Zr ratio: 1.03 ZrC density : 6.52 g/cm ³ OPyC density : 1.90 g/cm ³	Batch No.: ZrC-07-3004 ZrC coating temperature: 1347°C $CH_4/ZrBr_4$ ratio : 0.97 C/Zr ratio: 1.03 ZrC density : 6.55 g/cm ³ OPyC density : 1.93 g/cm ³	Batch No. : ZrC-07-3005 ZrC coating temperature: 1358°C $CH_4/ZrBr_4$ ratio : 0.99 C/Zr ratio: 1.03 ZrC density : 6.52 g/cm ³ OPyC density : 1.94 g/cm ³	
ZrC coating duration: 120 min	ZrC thickness: about 27μ m	Batch No. : ZrC-07-3010 ZrC coating temperature: 1354°C $CH_4/ZrBr_4$ ratio : 0.97 C/Zr ratio: 1.03 ZrC density : 6.52 g/cm ³ OPyC density : 1.92 g/cm ³	Batch No. : ZrC-07-3011 ZrC coating temperature: 1365°C $CH_4/ZrBr_4$ ratio : 1.03 C/Zr ratio: 1.07 ZrC density : 6.44 g/cm ³ OPyC density : 1.92 g/cm ³	Batch No. : ZrC-07-3012 ZrC coating temperature: 1351° C CH ₄ /ZrBr ₄ ratio : 1.15 C/Zr ratio: 1.06 ZrC density : 6.43 g/cm ³ OPyC density : 1.96 g/cm ³	

4. 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。ZrC-OPyC 連続被覆に関して H19 年度までに得られた成果は以下の通りである。

- (1) ZrC 層表面が凸凹な場合、OPyC 層中に大きなポアが形成され、粒子一軸圧縮破壊強度 が低下することが明らかになった。
- (2) 被覆温度等の被覆条件を調整することにより、粒子装荷量 100g において、厚さ約 $27 \mu m \pm con ZrC$ 層と、厚さ約 $48 \mu m \pm con OPyC$ を連続被覆することができた。

以上により、我々は本委託研究の ZrC 被覆粒子の製造技術開発の具体的項目のうち、適切な ZrC-OPyC 被覆条件の取得に資した。

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・海老 沢隆氏、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) 安田淳, 植田祥平, 相原純, 竹内均, 沢和弘:"ZrC 被覆粒子の製造技術開発(その1)", JAEA-Technology 2008-073 (2008).

2) The U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV

3) 沢和弘, 植田祥平, 柴田大受, 角田淳弥, 大橋準平, 栃尾大輔: "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).

4) 高山智生, 植田祥平, 相原純, 安田淳, 石橋英春, 沢和弘: "ZrC 被覆燃料粒子検査手法の検討 – SiC 被覆燃料粒子に対する検査手法の適用性評価 –", JAEA-Research 2007-061 (2007).

This is a blank page.

表1. SI 基本単位				
甘木昌	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	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

和午春	SI 基本単位	
和卫星	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	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	m³/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	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数字の) 1	1
比透磁率) (数字の) 1	1

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度 (a) 重要な (and tone internation) 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 組立単位	
組立量	名称 記号	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
		表し方	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	Ν		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	$m^2 kg s^{\cdot 3}$
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	\mathbf{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,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²
カーマ		c, j	0,116	in 5
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
性線量当量,個人線量当量	2 - 7 F I	~.		
<u>酸素活性</u>	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

(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ベ 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)潤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言れる。
 (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。
 (b)セルジク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。
 (b)定数についである。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。

	W/ / Is a state tests		$\Delta = \alpha \pi 4 \alpha + \omega 2 (1) - 1 \alpha$
表4.	単位の中に固っ	自の名称と記号を	含むSI組立里位の例

	SI 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 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 sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
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 sA
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	接頭調	語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	Э	Þ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼ	9	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エク	サ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	~	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}	キ		k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘク	ŀ	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ	力	da	10^{-24}	ヨクト	у

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	1h=60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, l	$1L=11=1dm^{3}=10^{3}cm^{3}=10^{-3}m^{3}$			
トン	t	1t=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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 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	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np ~	SI単位しの粉値的な間接け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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	$^{\rm sb}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{\cdot 2}$				
フォト	$_{\rm ph}$	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx				
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	$1 \text{ Oe} \triangleq (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$				

(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					
	3	名利	Б		記号	SI 単位で表される数値
+	ユ		IJ	ĺ	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
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.		N	1		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク		П	\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$