



Irradiation Behavior Analyses of Oxide Fuel Pins for SFR High Breeding Cores

Tomoyasu MIZUNO, Shin-ichi KOYAMA, Takeji KAITO
Tomoyuki UWABA and Kenya TANAKA

Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

June 2013

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

Irradiation Behavior Analyses of Oxide Fuel Pins for SFR High Breeding Cores

Tomoyasu MIZUNO, Shin-ichi KOYAMA, Takeji KAITO, Tomoyuki UWABA and Kenya TANAKA

Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit,
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 11, 2013)

As a possible concept for commercialized Sodium-cooled fast reactor (SFR) core fuel, annular mixed oxide (MOX) fuel with oxide dispersion strengthened ferritic steel (ODS) cladding was considered with low breeding ratio as a standard, break-even breeding cores, and cores with high breeding ratio (high breeding cores). Some calculations of fuel pin irradiation performance of (U,Pu) oxide fuel and minor actinides bearing oxide fuel were conducted by a fuel performance analysis code CEDAR developed in JAEA to understand the steady state irradiation behavior of fuel pins for the cores with high breeding ratio.

The fuel temperature profiles, fuel and cladding deformation profiles, and radial temperature distribution at end of life (EOL) were evaluated. Those results show that the MOX fuel pin having the specifications and irradiation conditions used in this investigation would be irradiated moderately up to approximately 250GWd/t with well integrity. The difference toward to 10.4 mm fuel pins, critical behavior will not be estimated. The temperature of MA bearing oxide fuel was tended to be higher than that of (U, Pu) oxide fuel. However, it is concluded that the effect of MA or difference toward to fuel behavior is restrictive considering its obtained results.

Keywords : Fast Reactor, Mixed Oxide Fuel, High Breeding Ratio, CEDAR, Fuel Performance

高増殖比 SFR における酸化物燃料ピンの照射挙動解析

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門
燃料材料技術開発ユニット

水野 朋保、小山 真一、皆藤 威二、上羽 智之、田中 健哉

(2013 年 3 月 11 日 受理)

実用化段階のナトリウム冷却高速炉の燃料概念として、中空の混合酸化物 (MOX) 燃料と酸化物分散強化型フェライト鋼被覆管による燃料ピンを、標準の低増殖炉心、break-even 炉心 ((高速炉)平衡期炉心)、高増殖炉心に適用することが検討されている。高増殖炉心における燃料ピンの定常運転時の照射挙動を理解するため、U,Pu 酸化物燃料とマイナーアクチニド含有燃料の照射挙動計算を、JAEA で開発した燃料ピン挙動解析コード"CEDAR"を用いて実施した。

燃料温度履歴、燃料と被覆管の変形履歴、照射末期における径方向温度分布を評価した結果、本研究で検討した燃料仕様と照射条件において、MOX 燃料ピンは 250GWd/t まで健全に照射できる見通しが得られた。また、 $\phi 10.4\text{mm}$ の太径ピンでは、問題となるような挙動は解析されなかった。MA 含有燃料の温度は、U,Pu 酸化物燃料よりも高くなる傾向が示されたが、MA による燃料挙動への影響は限定的であるという評価結果となった。

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of CEDAR	1
3. Calculation conditions	1
4. Results and discussions	2
4.1 (U,Pu) oxide fuel	2
4.2 MA bearing oxide fuel (3% Am)	2
5. Conclusion	3
References	3

目 次

1. 序章	1
2. CEDAR の概要	1
3. 計算条件	1
4. 結果と考察	2
4.1 (U,Pu) 酸化物燃料	2
4.2 MA 含有酸化物燃料 (3% Am)	2
5. 結論	3
参考文献	3

List of table

Table 1	Behaviors evaluated by CEDAR	4
Table 2	Designed oxide fuel specifications and irradiation conditions (High breeding core)	5
Table 3	Designed MA bearing fuel specifications and irradiation conditions (High breeding core)	6

List of figure

Fig.1	Geometrical model of CEDAR	7
Fig.2	Flow chart of CEDAR	7
Fig.3	Axial distribution condition of LHR	8
Fig.4	Axial distribution condition of cladding midwall temperature	8
Fig.5	Profile condition of LHR	9
Fig.6	Temperature profiles at $X/L=0.5$ for oxide fuel	9
Fig.7	Deformation profiles of fuel and cladding at $X/L=0.5$ for oxide fuel	10
Fig.8	Cladding deformation after the irradiation for oxide fuel	10
Fig.9	Thermal conductivity for Am bearing oxide fuel	11
Fig.10	Temperature profiles at $X/L=0.5$ for Am bearing oxide fuel	11
Fig.11	Deformation profiles of fuel and cladding at $X/L=0.5$ for Am bearing oxide fuel	12
Fig.12	Cladding deformation after the irradiation for Am bearing oxide fuel	12
Fig.13	Histories of fuel center temperatures	13

1. Introduction

The Fast Reactor Cycle Technology Development (FaCT) project has been being conducted in Japan. In the FaCT project, fuel pin concepts consisting of MOX annular fuels and oxide dispersion strengthened martensitic steel (ODS) cladding have been being considered to be one of possible concepts for the sodium cooled reactor cores, which include standard cores with low breeding ratio, break-even breeding cores, and cores with high breeding ratio (high breeding cores). The high breeding cores in the FaCT project have thick axial blanket with shorter core fuel column length and smaller diameter driver fuel pins than those of standard cores.

In this work, to understand the steady state irradiation behavior of the small diameter annular MOX fuel pin, some calculations of fuel pin irradiation performance of (U,Pu) oxide fuel and minor actinides bearing oxide fuel were conducted by a fuel performance analysis code CEDAR developed in JAEA.

2. Outline of CEDAR

A pellet type MOX fuel performance analysis code "CEDAR" (Code for Thermal and Deformation Analysis of Reactor fuel pin) was used¹⁾. This code has been developed by JAEA. CEDAR is an R-Z system code that has been verified by results obtained from irradiation tests in experimental reactors such as Joyo; the range of burnup is $\sim 130 \text{ GWd/t}$, of LHR is $\sim 440 \text{ W/cm}$, and of cladding inner surface temperature is $\sim 923 \text{ K}$. CEDAR models the thermochemical and mechanical behaviors of a fuel pin during irradiation using 10 axial nodes, each having 26 radial nodes, 20 of which are for the fuel region and 6 for the cladding region. Fuel property correlations in CEDAR code include (U,Pu) oxide fuel and minor actinides bearing oxide fuel. Mass transports in the axial direction are not taken into consideration, except for FP gases released into the plenum space and fuel-cladding gap. The stress-strain analysis procedure based on the generalized plane strain is applied to the mechanical analysis, and the finite difference analysis procedure is applied to the thermochemical analysis. Table 1 shows the evaluated behaviors. Fig.1 and Fig.2 show the geometrical model and flow chart of CEDAR, respectively.

3. Calculation conditions

Table 2 shows designed fuel specifications and irradiation conditions in the case of high breeding core. A fuel pin having annular type MOX pellets with the ODS cladding was taken for this investigation. This fuel pin had lower and upper plenum regions. And the outer diameter is relatively small, 9.3 mm, compared with previous evaluation condition (10.4 mm in diameter)²⁾. The irradiation time was taken as 2557 days (4 cycles). The maximum neutron fluence was taken as $5.02 \times 10^{23} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$, then the maximum local burnup was evaluated to be as 227 GWd/t. The condition of coolant inlet temperature was taken as 668 K.

Calculations were conducted at the following 5 axial positions; $X/L = 0.9, 0.7, 0.5, 0.3$, and 0.1 . Axial distribution conditions at BOL and EOL of LHR and cladding midwall temperature are shown in Fig. 3 and Fig. 4, respectively. Profile conditions of LHR and cladding midwall temperature at each axial position of the calculations are shown in Fig. 5 and Fig. 6, respectively.

Fuels considered in the present study are MA bearing oxide fuel with 3% of Am content and (U,Pu) oxide fuel.

These conditions are based on the current results of feasibility studies on a commercialized fast reactor cycle system in Japan²⁾.

4. Results and discussions

4.1 (U,Pu) oxide fuel

Deformation profiles of fuel outer radius and cladding inner radius during irradiation at $X/L = 0.5$ are shown in Fig.7. It was cleared that the fuel was contacted to cladding in the early stage of irradiation. Figure 8 shows the cladding deformation by swelling or swelling with creep after irradiation. The swelling defined as a ratio of diameter change. As shown in Fig. 8, maximum swelling was seen at $X/L = 0.1$, and then no swelling was estimated at $X/L = 0.5, 0.7, 0.9$. On the other hand, the deformation by creep was evaluated all the calculated position, the effect was depended on neutron fluence. Therefore, maximum deformation of cladding with swelling and creep was expected at $X/L = 0.3$. The fuel-cladding mechanical interaction (FCMI) was considered based on these results, it is expected that the contact pressure was not strong to cause the considerable cladding deformation. Therefore, it is concluded that the MOX fuel pin having the specifications and irradiation conditions used in this investigation would be irradiated moderately up to approximately 250GWd/t with well integrity.

4.2 MA bearing oxide fuel (3% Am)

For calculation of MA bearing oxide fuel, 3% of Am content is newly applied as a calculation parameter on the specification and irradiation condition of (U, Pu) oxide fuel shown in Table 3. Thermal effect would be considered for the use of Am by using the thermal conductivity correlation that considered the effect of Am contents³⁾. As is shown in Fig. 9, thermal conductivity is apt to be decreased with increasing Am content. Figure 10 shows temperature profile for fuel inner, outer and cladding inner surface at $X/L = 0.5$ during irradiation. Figure 11 also shows deformation profiles of fuel outer and cladding inner radius at $X/L = 0.5$ during irradiation. It was cleared that the fuel was contacted to cladding in the early stage of irradiation, and therefore, good correlation was seen in the behavior between gap closure and temperature change at fuel outer surface position. It is the same tendency as (U, Pu) oxide fuel for the axial position at $X/L = 0.5$. The cladding deformation after irradiation is shown in Fig. 12. Similarly, it was seen that the cladding

deformation by swelling or swelling with creep were almost the same as (U, Pu) oxide fuel calculation results shown in Fig. 8. In the meantime, fuel inner surface temperature of MA bearing oxide fuel (3% Am) and (U, Pu) oxide fuel were compared and shown in Fig. 13. The temperature of MA bearing oxide fuel was tended to be higher than that of (U, Pu) oxide fuel. However, it can be said that the effect toward to fuel behavior is restrictive considering its Am content.

5. Conclusion

Some calculations of fuel pin irradiation performance of (U,Pu) oxide fuel and minor actinides bearing oxide fuel were conducted by a fuel performance analysis code CEDAR developed in JAEA to understand the steady state irradiation behavior of fuel pins for the cores with high breeding ratio.

The fuel temperature profiles, fuel and cladding deformation profiles, and radial temperature distribution at EOL were evaluated. Those results show that the MOX fuel pin having the specifications and irradiation conditions used in this investigation would be irradiated moderately up to approximately 250GWd/t with well integrity. The difference toward to 10.4mm fuel pins, critical behavior will not being estimated. The temperature of MA bearing oxide fuel was tended to be higher than that of (U, Pu) oxide fuel. However, it is concluded that the effect of MA or difference toward to fuel behavior is restrictive considering its obtained results.

References

- 1) T. Mizuno, et al., "Fuel Pin Performance and reliability Analysis Code in PNC", Int. Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal reactors, Tucson, AZ, p.5(1986).
- 2) T.Mizuno, T.Ogawa, M.Naganuma, T.Aida, "Advanced oxide fuel core design study for SFR in the "Feasibility Study" in Japan", Proc. of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct.9-13, No.434 (2005).
- 3) K. Morimoto, M.Kato, M.Ogasawara, M.Kashimura, "Thermal conductivity of (U,Pu,Np)O₂ solid solutions" , Journal of Nuclear Materials 389, pp.179–185 (2009).

Table 1 Behaviors evaluated by CEDAR

Evaluated fuel behaviors
<ul style="list-style-type: none"> Temperature distribution Stress-strain state Restructuring (pore migration) Fission gas release Pu migration Oxygen migration (O/M ratio distribution) Chemical reaction between fuel components and FPs in the fuel-cladding gap (JOG formation and its effect on gap conductance) Swelling Hot-pressing Creep deformation Cracking
Evaluated cladding behaviors
<ul style="list-style-type: none"> Temperature distribution Stress-strain state Void swelling Creep deformation Cladding wastage Creep damage

Table 2 Designed oxide fuel specifications and irradiation conditions (High breeding core)

Item		Unit	Value
Fuel	Type	Annular pellet	
	Inner diameter	mm	2.32
	Outer diameter	mm	7.81
	Density	%TD	95
	Pu cont.	wt.%	23.1
	O to M ratio	-	1.95
Fuel column length		mm	750
Plenum	upper	mm	100
	lower	mm	1100
Cladding	Material	ODS	
	Inner diameter	mm	8.02
	Outer diameter	mm	9.3
	Thickness	mm	0.64
Irradiation duration		day	2556.8 (1cycle:639.2)
Max. LHR		W/cm	419
Max. Cladding midwall temperature		K	942
Max. Neutron fluence (>0.1MeV)		n/cm ²	5.02E23
Max. Burnup (local position)		GWD/t	227
Coolant	Material	Sodium	
	Inlet temperature	K	668

Table 3 Designed MA bearing fuel specifications and irradiation conditions (High breeding core)

Item		Unit	Value
Fuel	Type		Annular pellet
	Inner diameter	mm	2.32
	Outer diameter	mm	7.81
	Density	%TD	95
	Am cont.	wt.%	3
	O to M ratio	-	1.95
Fuel column length		mm	750
Plenum	upper	mm	100
	lower	mm	1100
Cladding	Material		ODS
	Inner diameter	mm	8.02
	Outer diameter	mm	9.3
	Thickness	mm	0.64
Irradiation duration		day	2556.8 (1cycle:639.2)
Max. LHR		W/cm	419
Max. Cladding midwall temperature		K	942
Max. Neutron fluence (>0.1MeV)		n/cm ²	5.02E23
Max. Burnup (local position)		GWD/t	227
Coolant	Material		Sodium
	Inlet temperature	K	668

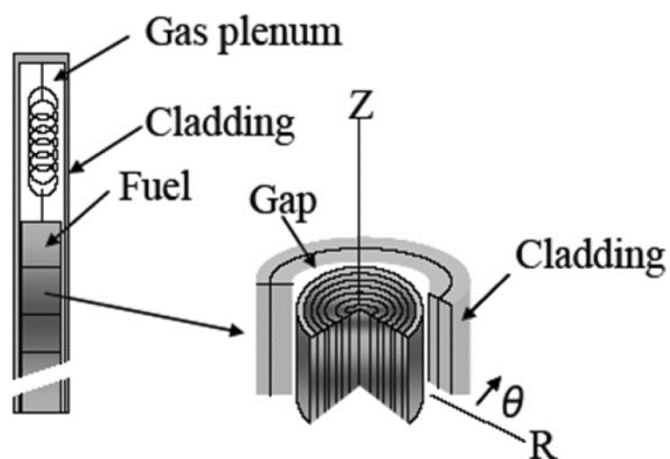


Fig.1 Geometrical model of CEDAR

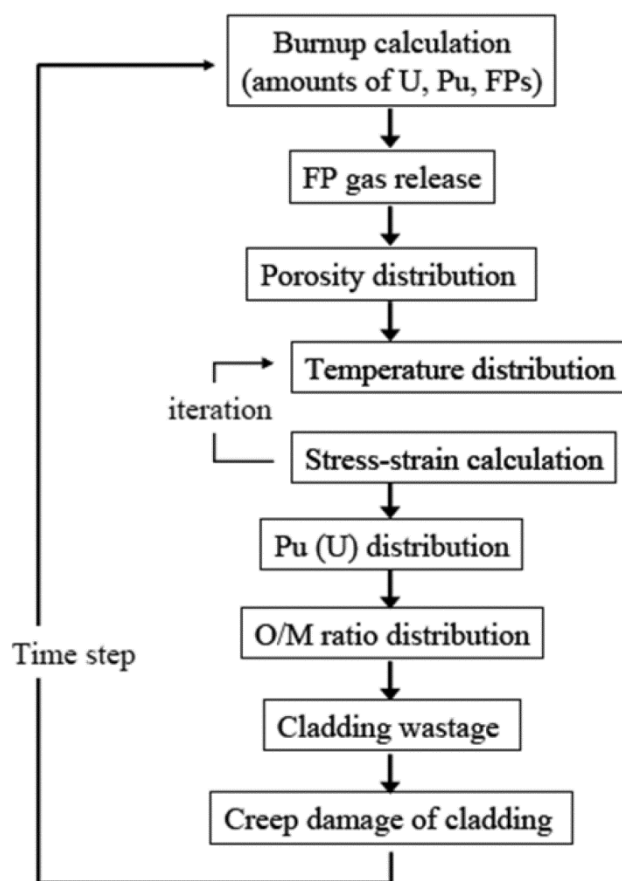


Fig.2 Flow chart of CEDAR

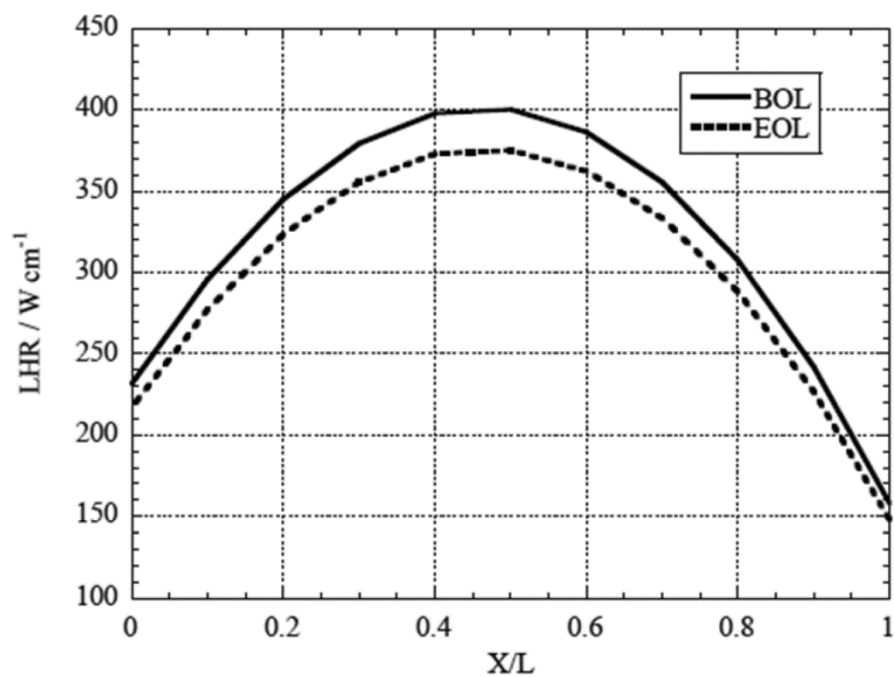


Fig.3 Axial distribution condition of LHR

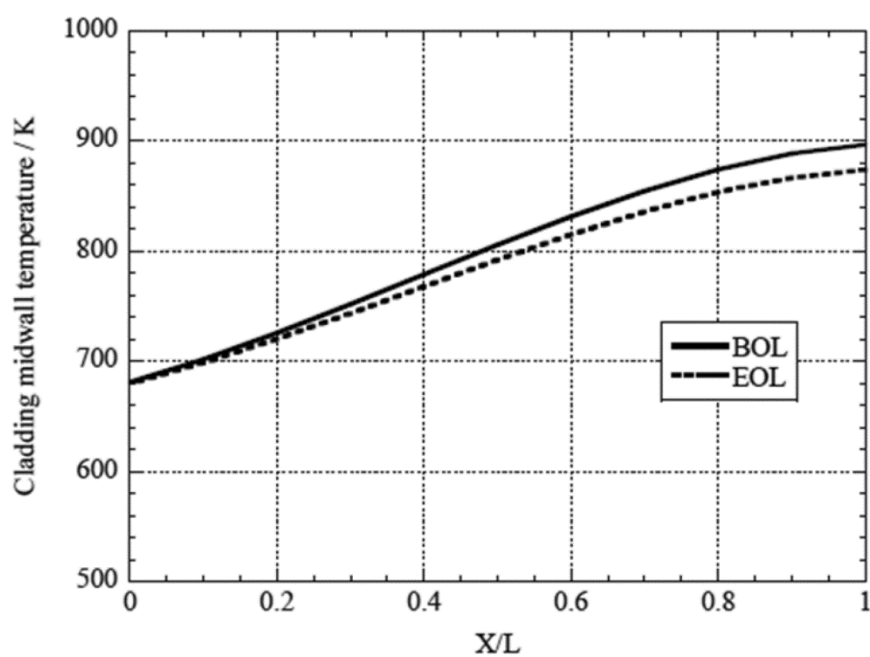


Fig.4 Axial distribution condition of cladding midwall temperature

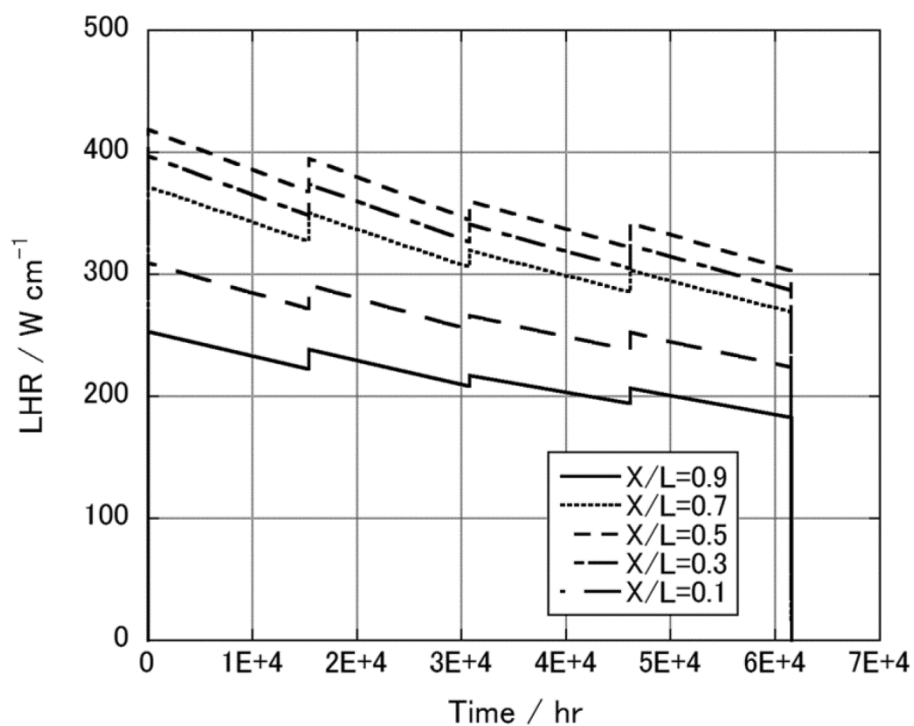


Fig.5 Profile condition of LHR

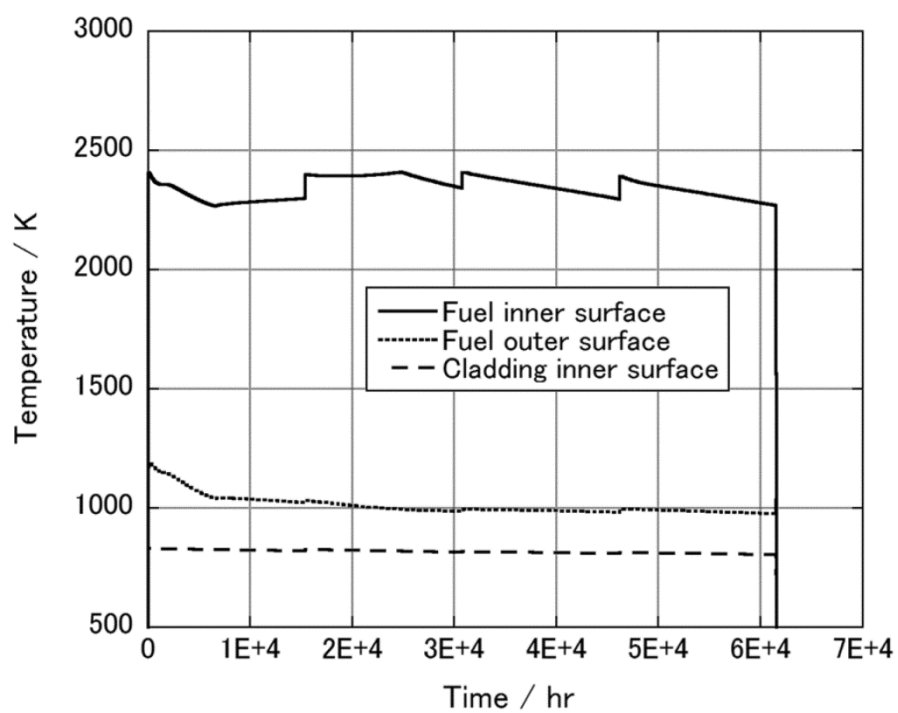


Fig.6 Temperature profiles at $X/L=0.5$ for oxide fuel

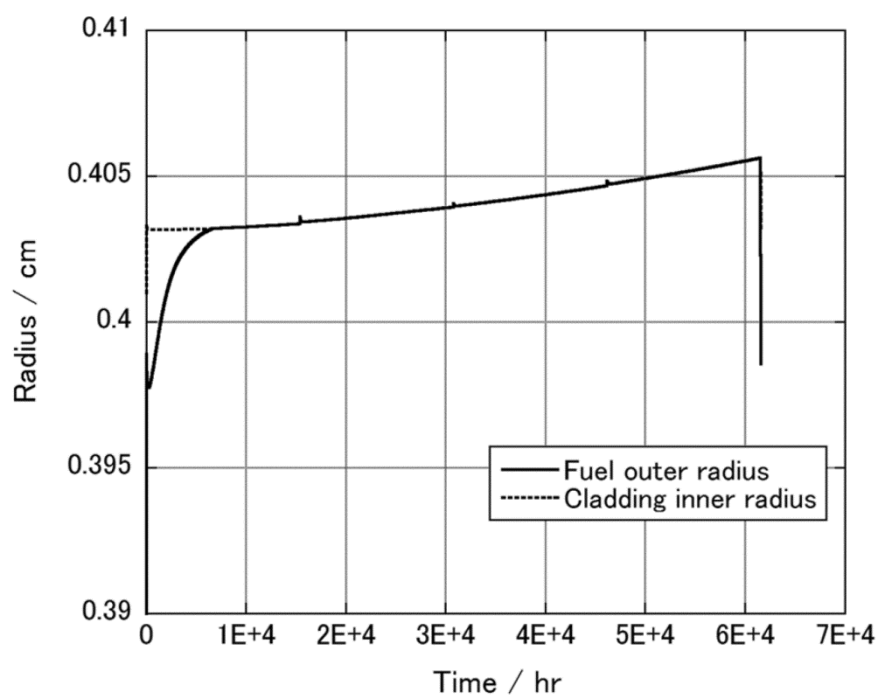


Fig.7 Deformation profiles of fuel and cladding at X/L=0.5 for oxide fuel

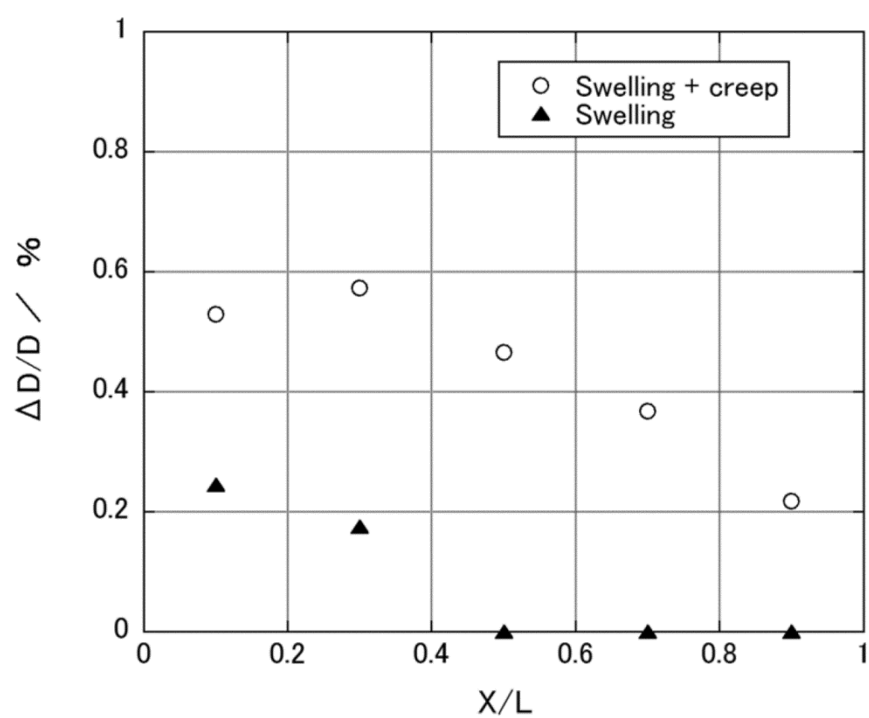


Fig.8 Cladding deformation after the irradiation for oxide fuel

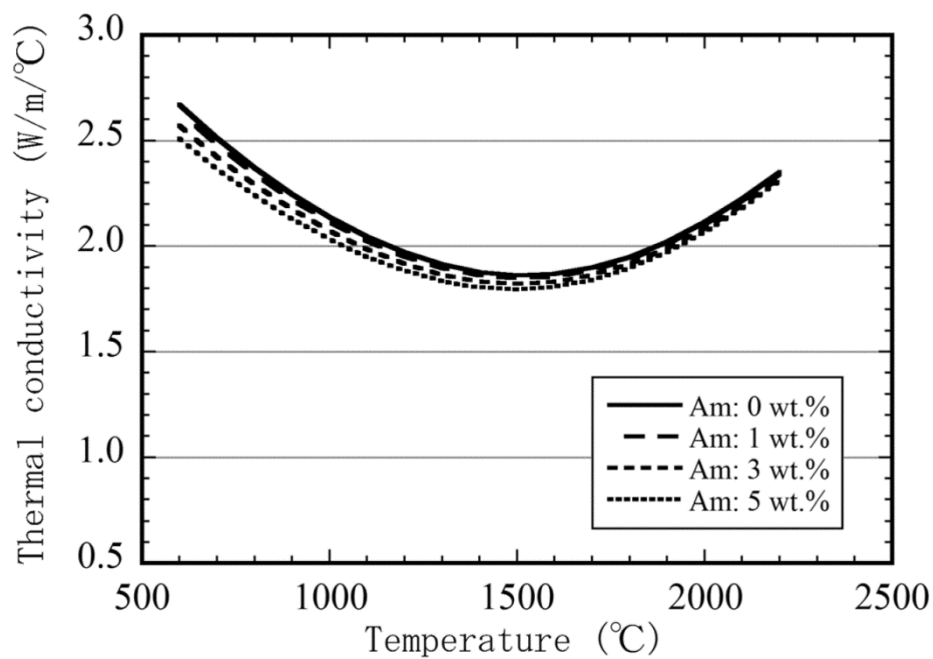


Fig.9 Thermal conductivity for Am bearing oxide fuel

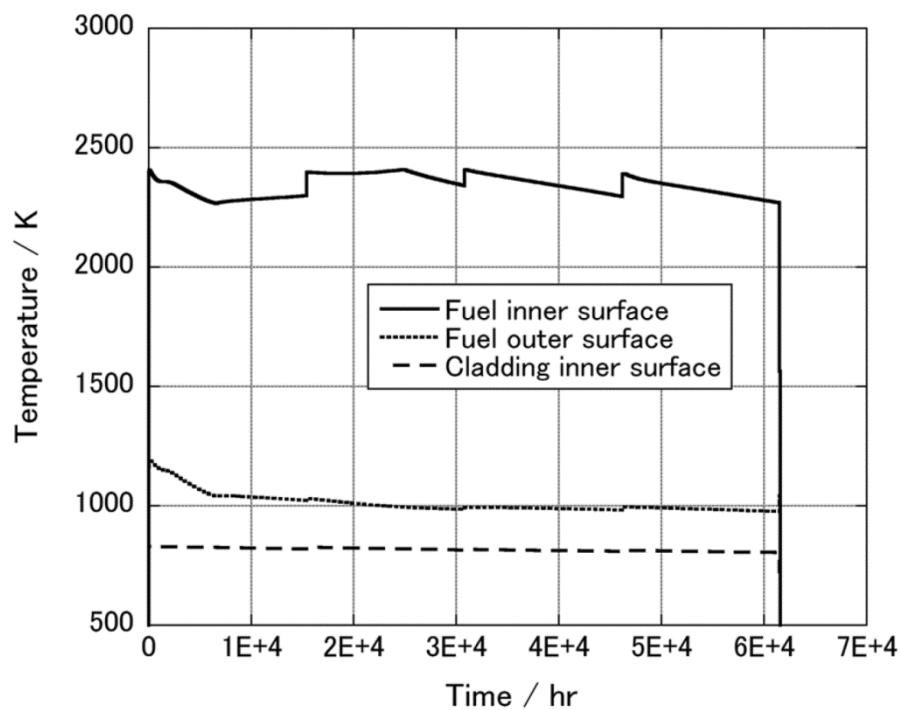


Fig.10 Temperature profiles at $X/L=0.5$ for Am bearing oxide fuel

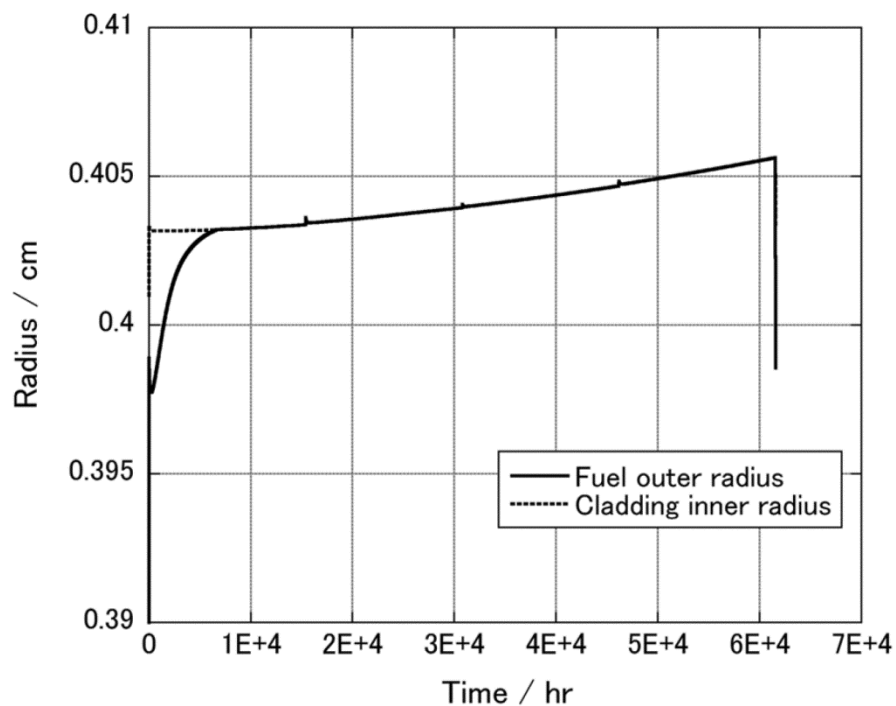


Fig.11 Deformation profiles of fuel and cladding at X/L=0.5 for Am bearing oxide fuel

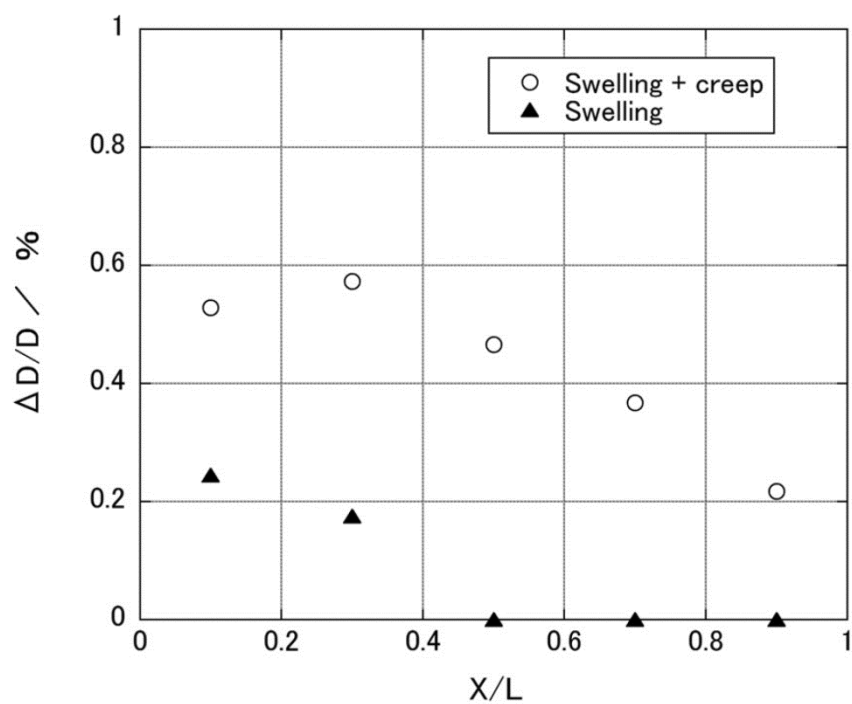


Fig.12 Cladding deformation after the irradiation for Am bearing oxide fuel

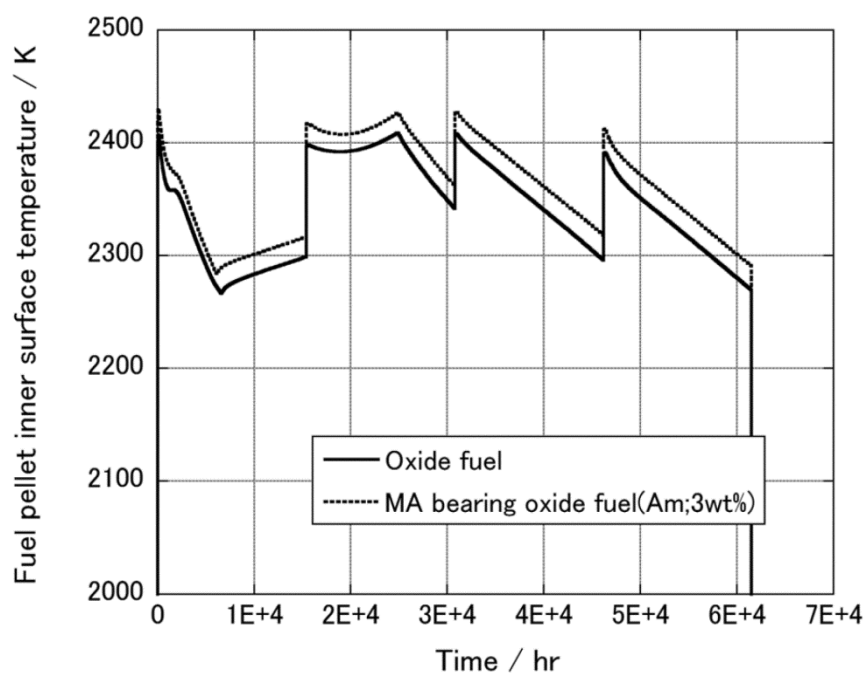


Fig.13 Histories of fuel center temperatures

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	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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 ³ 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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SI に属さないが、SI と併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	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

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

表 8. SI に属さないが、SI と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	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
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) 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

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

