



Fuel Temperature Analyses at Overpower of Metallic Fuel Pin for Sodium-cooled Fast Reactors

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

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

Fuel Temperature Analyses at Overpower of Metallic Fuel Pin for Sodium-cooled Fast Reactors

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)

Metallic fuel, U-Pu(TRU)-Zr, is a fuel candidate for Sodium-cooled fast reactor (SFR) selected as a possible promising future nuclear reactor system in Generation-IV international forum (GIF). Design studies were performed in the Japanese feasibility study on commercialized fast reactor cycle system, and the irradiation behavior of metallic fuel is under investigation through analytical fuel performance code calculations with preliminary analytical models.

As fuel temperature at overpower events is a major interest, some calculations of U-Pu(TRU)-Zr fuel irradiation performance were conducted by a simplified calculation program developed in JAEA. The calculated fuel temperature at the maximum power of overpower events, 110%-120% of steady state power, was around 1100K in maxim. It is clear that this temperature was low enough to avoid fuel melting in the event.

Keywords : Fast Reactor, Metallic Fuel, Overpower, Fuel Temperature, Calculation Code

ナトリウム冷却高速炉金属燃料の過出力時における燃料温度解析

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)

U-Pu(TRU)-Zrを成分とする金属燃料は、第4世代原子力システム国際フォーラム (GIF)において有望な原子炉として選定されたナトリウム冷却炉(SFR)の候補燃料である。金属燃料の設計研究は日本における高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究で実施され、照射挙動に関して挙動解析コードを用いた予備評価を実施中である。

過出力事象時の温度解析は燃料健全性評価上重要であるため、U-Pu(TRU)-Zr 燃料の照射挙動評価を JAEA で開発した簡易計算プログラムを用いて実施した。過出力事象時の最大出力、すなわち定常運転時の 110–120%の出力条件において、燃料温度は最高で 1100K と評価され、燃料溶融が回避できることが示された。

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of calculation program	1
3. Calculation conditions	2
3.1 Fuel pin specifications and irradiation conditions	2
3.2 Effective thermal conductivity models of metallic fuel	2
4. Results and discussions	3
5. Conclusion	3
References	3

目 次

1. 序論	1
2. 計算プログラムの概要	1
3. 計算条件	2
3.1 燃料ピン仕様および照射条件	2
3.2 金属燃料の実効熱伝導度	2
4. 結果と考察	3
5. 結論	3
参考文献	3

List of table

Table 1	Behaviors evaluated by the calculation program.....	5
Table 2	Designed fuel specifications and irradiation conditions	6

List of figure

Fig.1	Geometrical model of the calculation program	7
Fig.2	Flow chart of the calculation program.....	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	Profile condition of cladding midwall temperature	9
Fig.7	History of fuel centerline temperature at $X/L=0.5$ and 0.7 , effective thermal conductivity model without sodium ingress into the fuel	10
Fig.8	History of fuel centerline temperature at $X/L=0.5$ and 0.7 , effective thermal conductivity model with sodium ingress into the fuel	10
Fig.9	Axial distributions of U-Pu-Zr fuel centerline temperatures at the maximum power in steady state irradiation (8856h)	11
Fig.10	Axial distributions of U-Pu-Zr fuel centerline temperatures at 110, 116, 120% overpower conditions, effective thermal conductivity model without sodium ingress into the fuel	11
Fig.11	Axial distributions of U-Pu-Zr fuel centerline temperatures at 110, 116, 120% overpower conditions, effective thermal conductivity model with sodium ingress into the fuel	12

1. Introduction

Sodium-cooled fast reactors (SFR) were selected in Generation-IV international forum (GIF) as a possible promising future nuclear reactor system with superior safety, sustainability and economic competitiveness.¹⁾ Fuel candidates for SFR in GIF collaborative program include U-Pu(TRU)-Zr metallic fuel as well as oxide fuel.²⁾

Design studies of metallic fuel core for SFR were performed in the Japanese feasibility study on commercialized fast reactor cycle systems. The significant outcome of the studies is an attractive core and fuel concept which achieves high burnup and high outlet temperature of reactor vessel.³⁾ The irradiation behavior of metallic fuel of the design studies is under investigation through analytical fuel performance code calculations with preliminary analytical models of metallic fuel.

In the present work, analytical code calculations of metallic fuel pin irradiation performance are conducted with major interest on fuel temperatures during overpower events.

The irradiation behavior models and fuel properties for the analytical code were selected based on the information of metallic fuel characteristics including fuel properties and irradiation behavior obtained from open literatures and collaborative research activities with the Central Research Institute of Electric Power Industry.

2. Outline of calculation program

A simplified calculation program for U-Pu(TRU)-Zr metallic fuel pin performance analysis has been developed. This program is an R-Z system and models the thermal 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. Mass transports in the direction are not taken into account, except for FP gases released into the gas plenum of the fuel pin. The program is limited to analyses of fuel pins having a smear density not over around 75%TD. Table 1 shows the evaluated behaviors. Some conservative and simplified models as follows were incorporated into the program;

1) for the FP gas release, the fractional release rate under irradiation was taken as the constant value of 90 %,

2) for the fuel and cladding mechanical analyses, the fuel-cladding contact pressure under irradiation was taken as the constant value of zero, because it was reported that no considerable contacts between fuel and cladding were obtained in the case of fuels having a smear density of less or equal to 75%TD.⁴⁾ Only the stress-strain analysis of cladding due to the plenum gas pressure were conducted,

3) for the fuel restructuring and fuel constituents migrations, they were not taken into account,

4) for the fuel thermal conductivity, metallic fuel slug effective thermal conductivity is considered. The effective thermal conductivity model consists of solid fuel slug thermal conductivity with 100% TD and contribution of porous fuel microstructure filled with gas and liquid sodium due to gas swelling and sodium ingress under irradiation. The correlations of solid fuel thermal conductivity and contribution of porous fuel

microstructure are found elsewhere.⁵⁾⁶⁾⁷⁾ The volume fractions of gas-filled porosity and sodium-infiltrated porosity are treated as variants in the present work. The specific conditions in the calculation are described later.

The finite difference analysis procedure is applied to the thermal analysis, and the stress-strain analysis procedure based on the generalized plane strain is applied to the mechanical analysis of cladding. Figures 1 and 2 show the geometrical model and flow chart of the program, respectively.

3. Calculation conditions

3.1 Fuel pin specifications and irradiation conditions

Table 2 shows fuel specifications and irradiation conditions for this investigation. A fuel pin having a metallic U-Pu-Zr slug with the ODS cladding was taken for this investigation. The bonding material filling the fuel-cladding gap was sodium. The level of bonding sodium was up to the top of the fuel column. The time of overpower events were selected as the time when the fuel temperature was maximum during the steady state irradiation. Aiming at the selection of time of overpower event, fuel pin behavior calculation of steady state irradiation was made. The irradiation time was taken as 2205 days (3 cycles). The maximum neutron fluence was taken as $5.50 \times 10^{23} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$, then the maximum local burnup was evaluated to be as 140 GWd/t. The coolant inlet temperature was taken as 668K. 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 Figs. 3 and 4, respectively. Profile conditions of LHR and cladding midwall temperature at each axial position of the calculations are shown in Figs. 5 and 6, respectively.

These conditions are based on the current results of feasibility studies on a commercialized fast reactor cycle system in Japan.³⁾

After selecting the time of overpower events, fuel temperature calculation of the events was made. Maximum power during the overpower events were selected as 110%, 116% and 120% of steady state power. The value of 116% was based on the typical overpower factor of an existing fast reactor design and other values were selected for the sensitivity study. Fuel temperature calculation was made assuming equilibrium heat transfer condition which gives the highest fuel centerline temperature.

3.2 Effective thermal conductivity models of metallic fuel

As described above, the effective thermal conductivity model consists of solid fuel slug thermal conductivity with 100% TD and contribution of porous fuel microstructure filled with gas and liquid sodium. The fraction of swelled volume filled with sodium was reported to be from 0.25 to 0.28 in some case of U-Pu-Zr fuel. In the present study, following two cases are selected aiming at a sensitivity study. One is 0.25 of the fraction as a case of sodium ingress and the other is no sodium ingress as conservative case.

4. Results and discussions

The fuel temperature is irradiation performance of most interest in the present study. Figure 7 and 8 show the fuel centerline temperatures during steady state irradiation, calculated using effective thermal conductivity models without sodium ingress into the swelled metallic fuel and with sodium ingress, respectively. The axial positions of these temperatures are $X/L = 0.5$ and 0.7 of the fuel column. These positions are axial positions where the calculated fuel temperatures are maximum. Axial distributions of fuel centerline temperature are indicated in Fig.9, which shows the position of maximum temperature is around $X/L = 0.5$ and 0.7 of the fuel column.

The time of maximum fuel temperature was calculated to be 8856 hr of irradiation time as indicated in Figs. 7 and 8. Therefore, overpower fuel temperature calculations were made at this time. Figures 10 and 11 show the calculated fuel centerline temperatures for 110%, 116% and 120% of steady state power. Fuel temperatures become high in comparison with those of steady state irradiation, but they are about 1100K in maximum for the case of no sodium ingress into the swelled metallic fuel and about 1000K in maximum for the case of sodium ingress. They are well below the melting point of U-Pu-Zr metallic fuel.

5. Conclusion

Some calculations of metallic fuel irradiation performance were conducted by a simplified calculation program developed in JAEA to understand the behavior of a U-Pu(TRU)-Zr fuel pin. The major interest of the investigation is calculated fuel temperatures in typical overpower events with 110%-120% of steady state power.

Calculated fuel temperature at the maximum power of overpower event was around 1100K in maximum and low enough to avoid fuel melting in the event.

References

- 1) Y. Sagayama, "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems (1) Current Status of the Phase-II Study", Global 2005, No.380, Tsukuba, Japan (2005).
- 2) S. Kotake, et al., "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems / Current Status of the FR System Design", Global 2005, No.435, Tsukuba, Japan (2005).
- 3) K.Sugino et al., "Advanced Metal Fuel Core Design Study for SFR in the "Feasibility Study" in Japan", Global 2005, No.399, Tsukuba, Japan (2005).
- 4) G. L. Hofman, R. G. Pahl, C.E. Lahm, and D. L. Porter, "Swelling behavior of U-Pu-Zr fuel", Metall Trans. A, vol. 21A, p.517(1990)
- 5) T.Ogata, J.Nucl. Scie. Technol., Supplement 3, p. 675 (2002)
- 6) T.H.Bauer and J.W.Holland, "in-pile Measurement of the Thermal Conductivity of Irradiated Metallic Fuel", Nucl. Technol., Vol.110, pp.407-421 (1995).

- 7) T.H.Bauer, "A General Analytical Approach toward the Thermal Conductivity of Porous Media", Int. J. Heat Mass transfer, Vol.36, p.4181 (1993).

Table 1 Behaviors evaluated by the calculation program

Evaluated fuel behaviors
Temperature distribution
Thermal expansion
Fission gas release
Swelling
Evaluated cladding behaviors
Temperature distribution
Thermal expansion
Void swelling
Creep deformation due to plenum gas pressure
Cladding corrosion due to FPs
Cladding liquid phase penetration
Creep damage

Table 2 Designed fuel specifications and irradiation conditions

Item		Unit	Value
Fuel	Type		Slug
	Outer diameter	mm	6.496
	Density	%TD	100
	Pu cont.(including MA)	wt.%	11.47
	Zr cont.	wt.%	6.0
Fuel colum length		mm	750
Plenum	upper	mm	1350
Cladding	Material		ODS
	Inner diameter	mm	7.5
	Outer diameter	mm	8.5
	Thickness	mm	0.5
Bonding	Material		Sodium
	Filling level	mm	up to fuel column
Irradiation duration		day	2205 (1cycle : 735)
Max. LHR		W/cm	347
Max. Cladding midwall temperature		K	878
Max. Neutron fluence(>0.1MeV)		n/cm ²	5.50E23
Max. Burnup (local position)		GWD/t	140
Coolant	Material		Sodium
	Inlet temperature	K	668

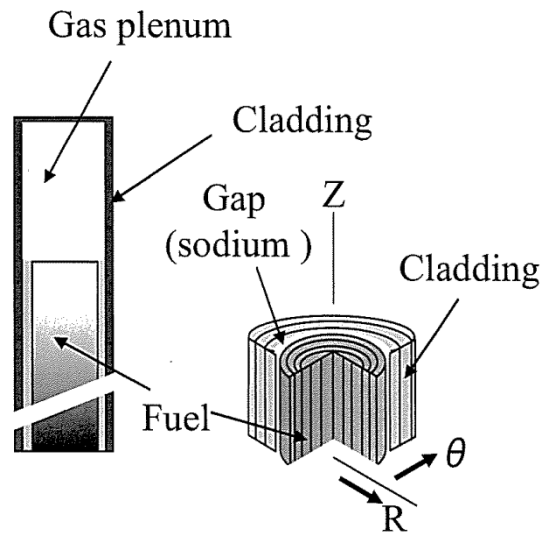


Fig.1 Geometrical model of the calculation program

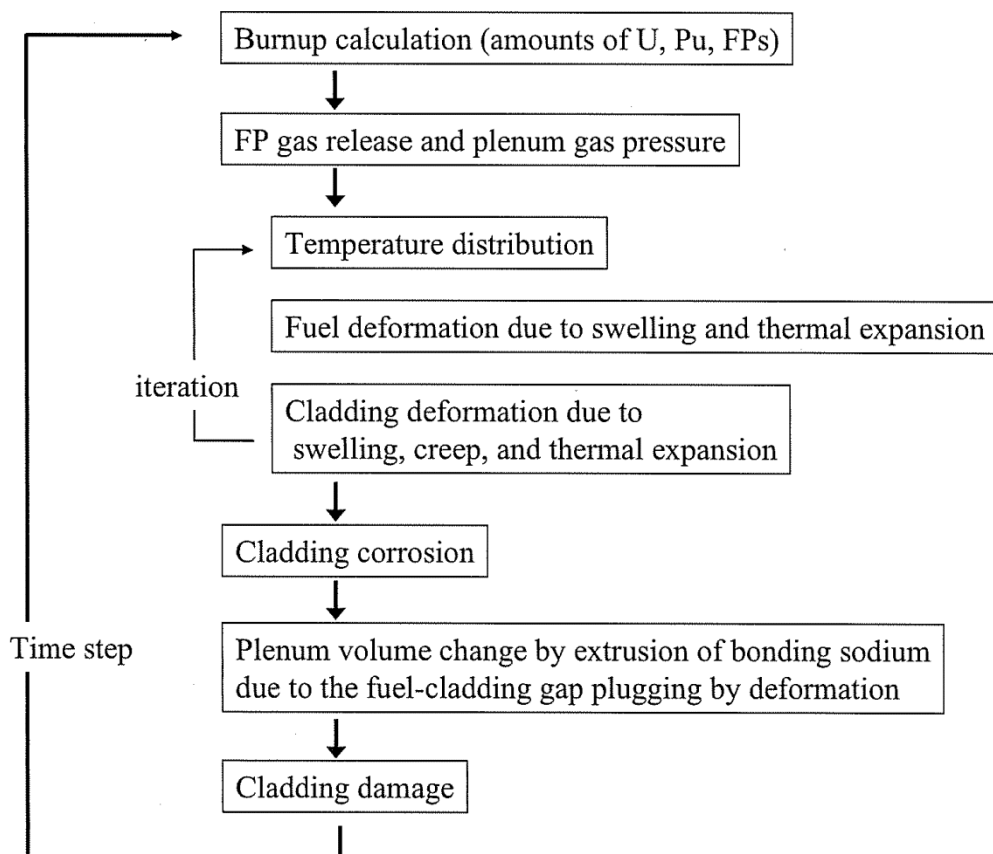


Fig.2 Flow chart of the calculation program

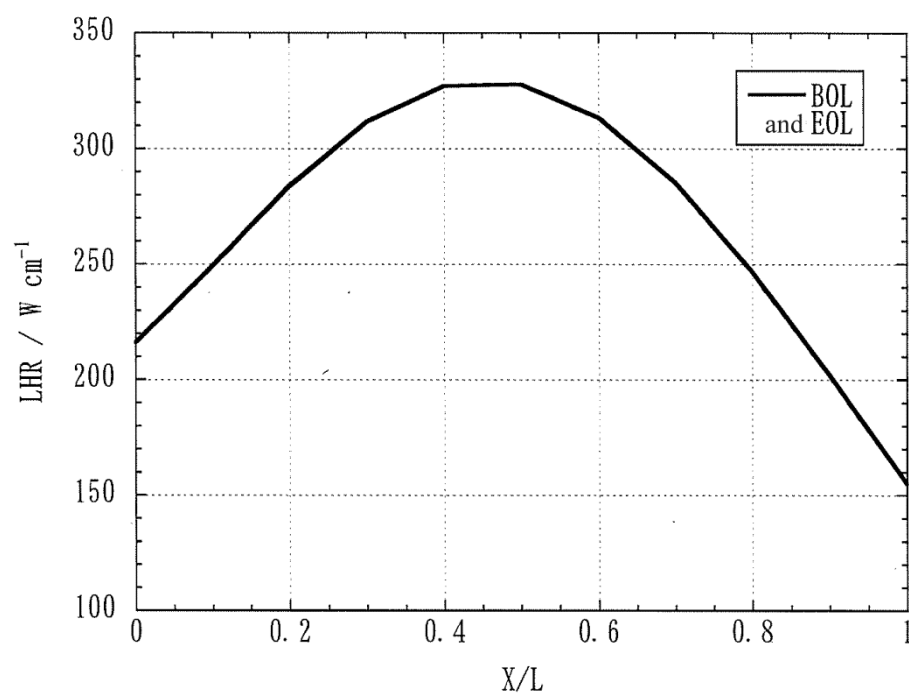


Fig.3 Axial distribution condition of LHR

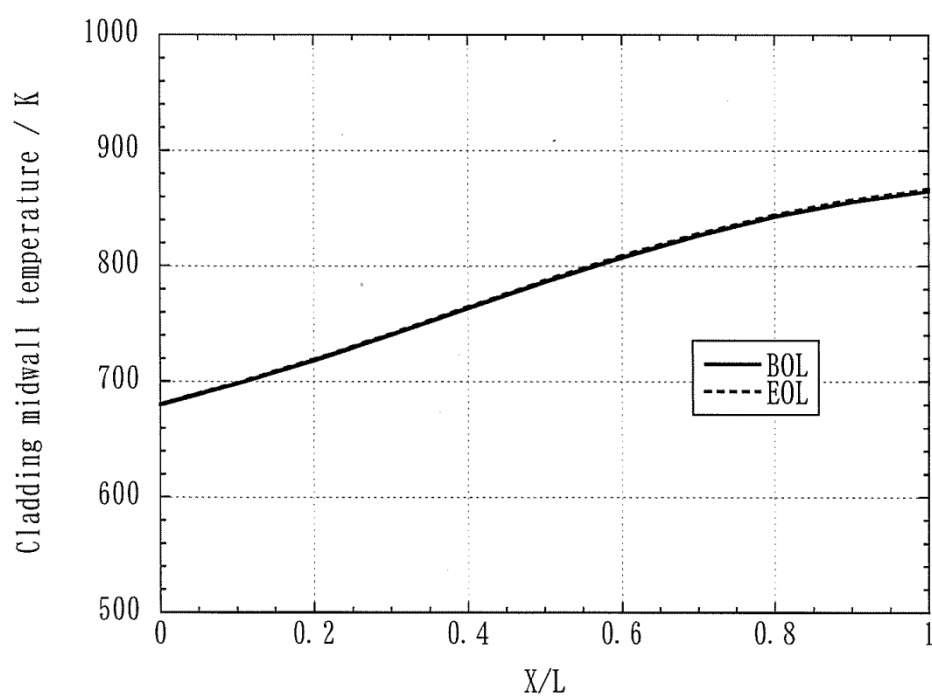


Fig.4 Axial distribution condition of cladding midwall temperature

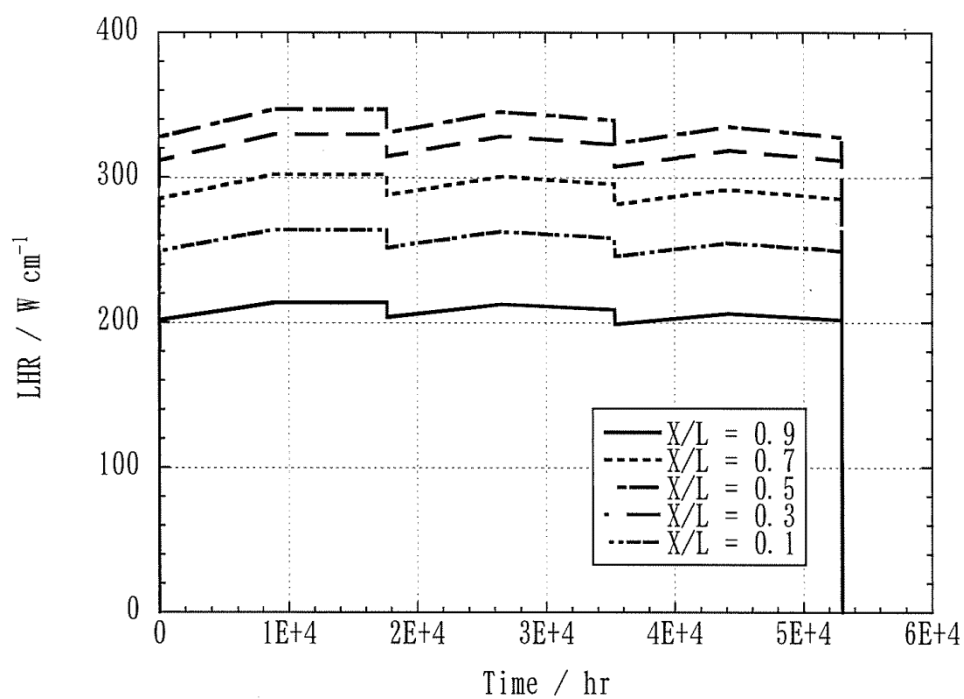


Fig.5 Profile condition of LHR

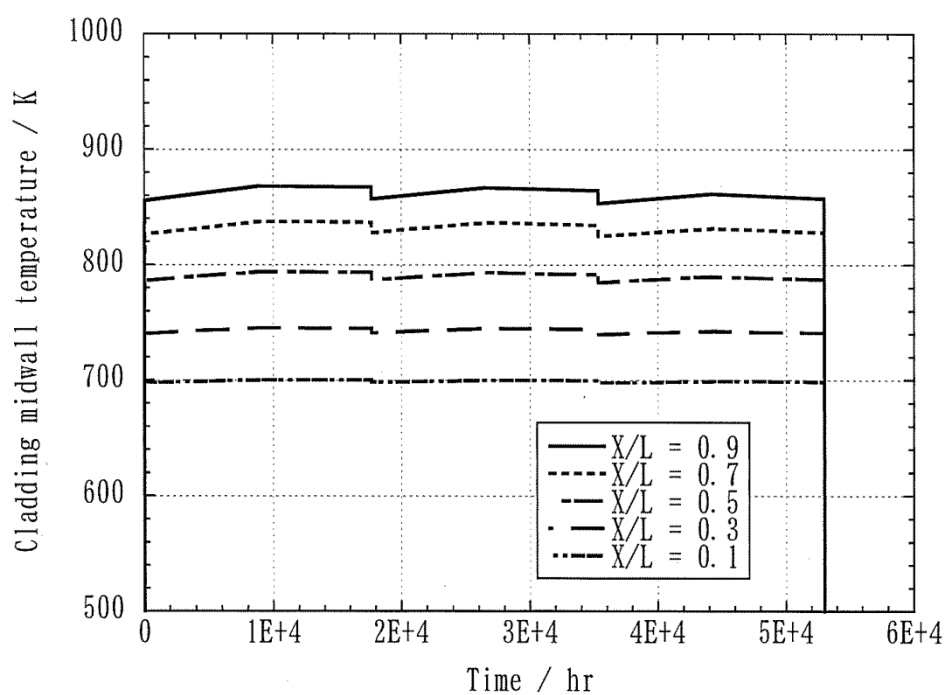


Fig.6 Profile condition of cladding midwall temperature

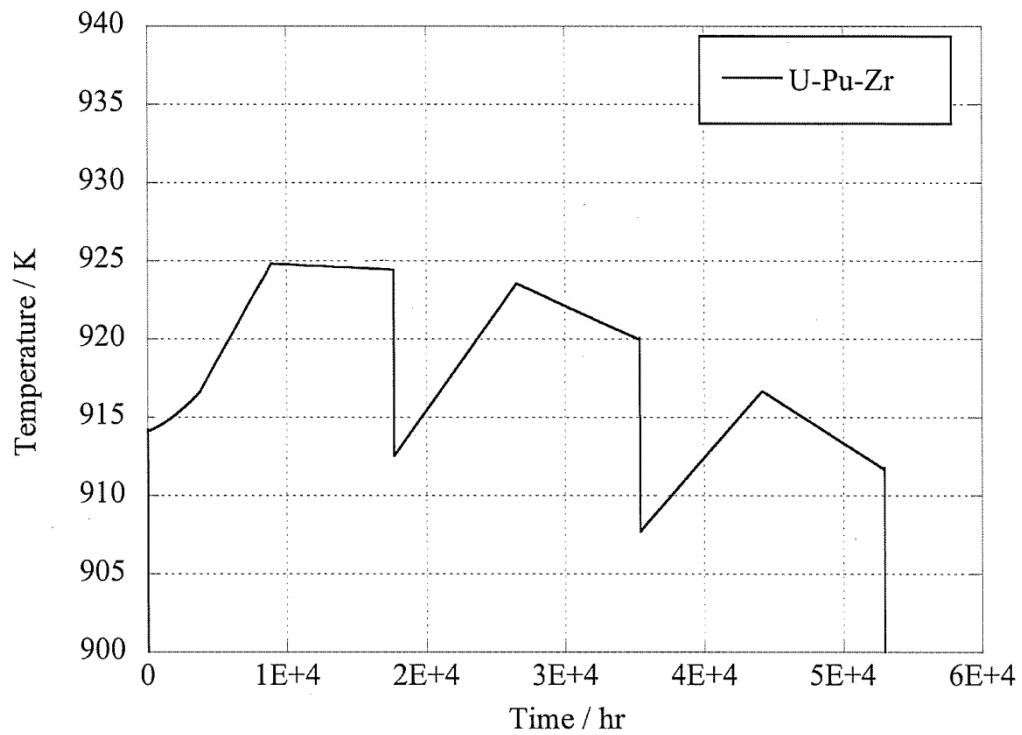


Fig.7 History of fuel centerline temperature at X/L=0.5 and 0.7, effective thermal conductivity model without sodium ingress into the fuel

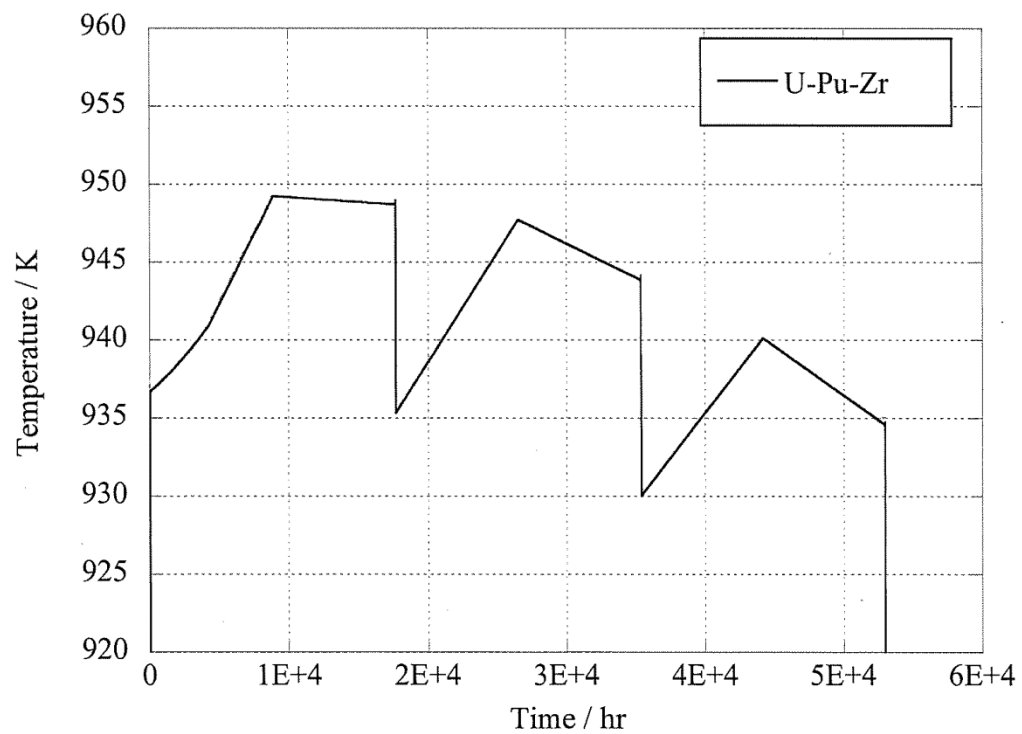


Fig.8 History of fuel centerline temperature at X/L=0.5 and 0.7, effective thermal conductivity model with sodium ingress into the fuel

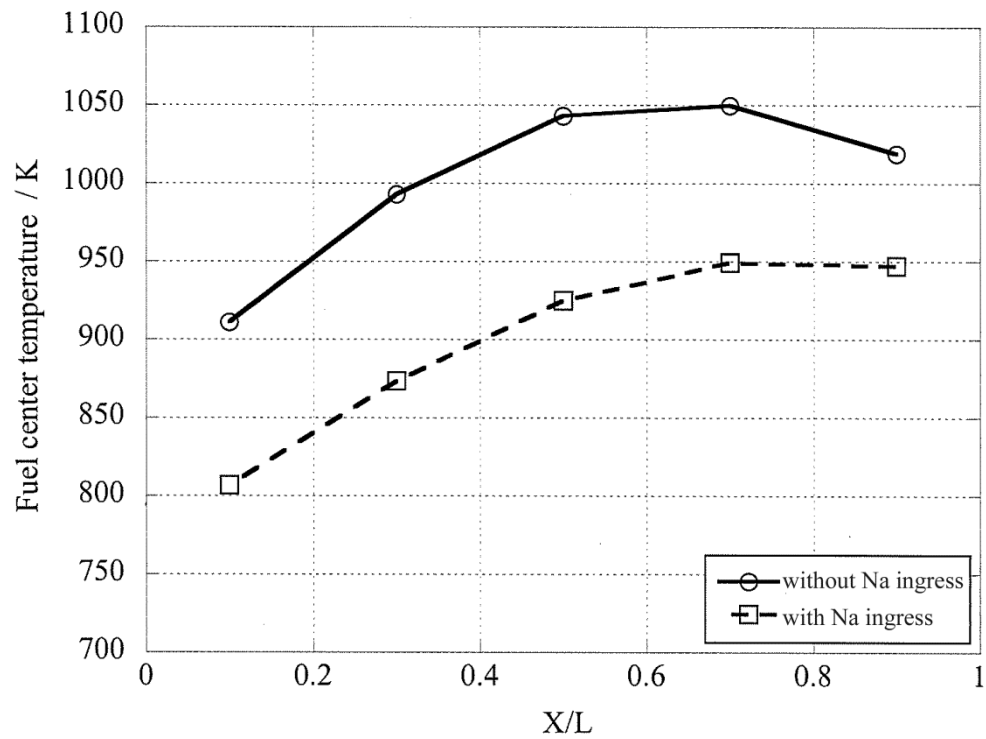


Fig.9 Axial distributions of U-Pu-Zr fuel centerline temperatures at the maximum power in steady state irradiation (8856h)

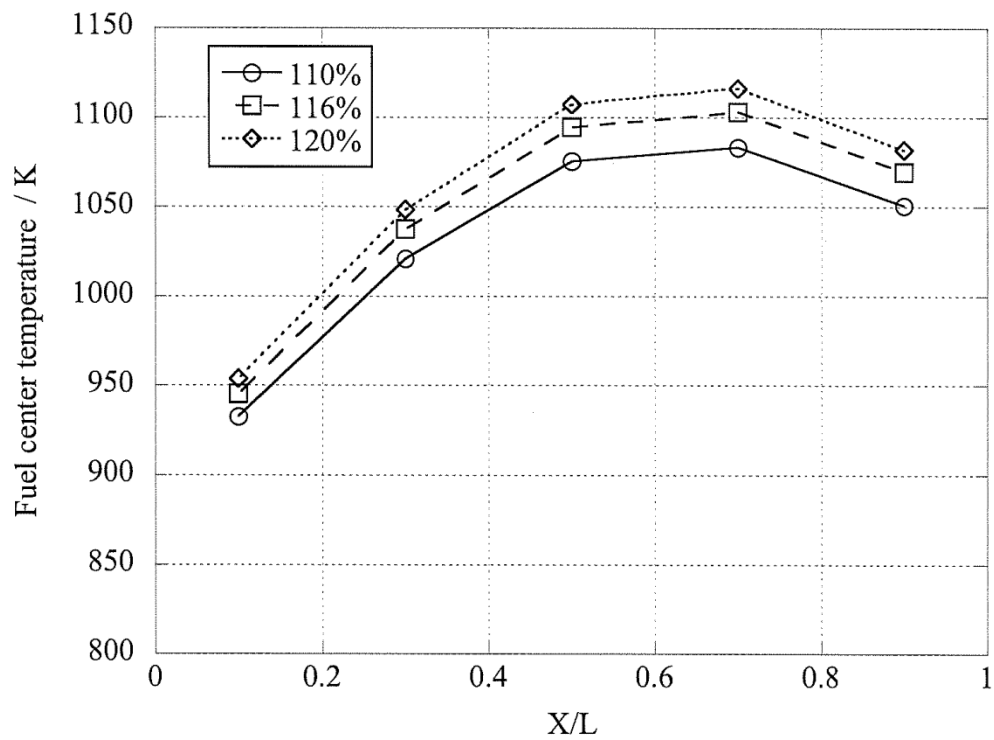


Fig.10 Axial distributions of U-Pu-Zr fuel centerline temperatures at 110, 116, 120% overpower conditions, effective thermal conductivity model without sodium ingress into the fuel

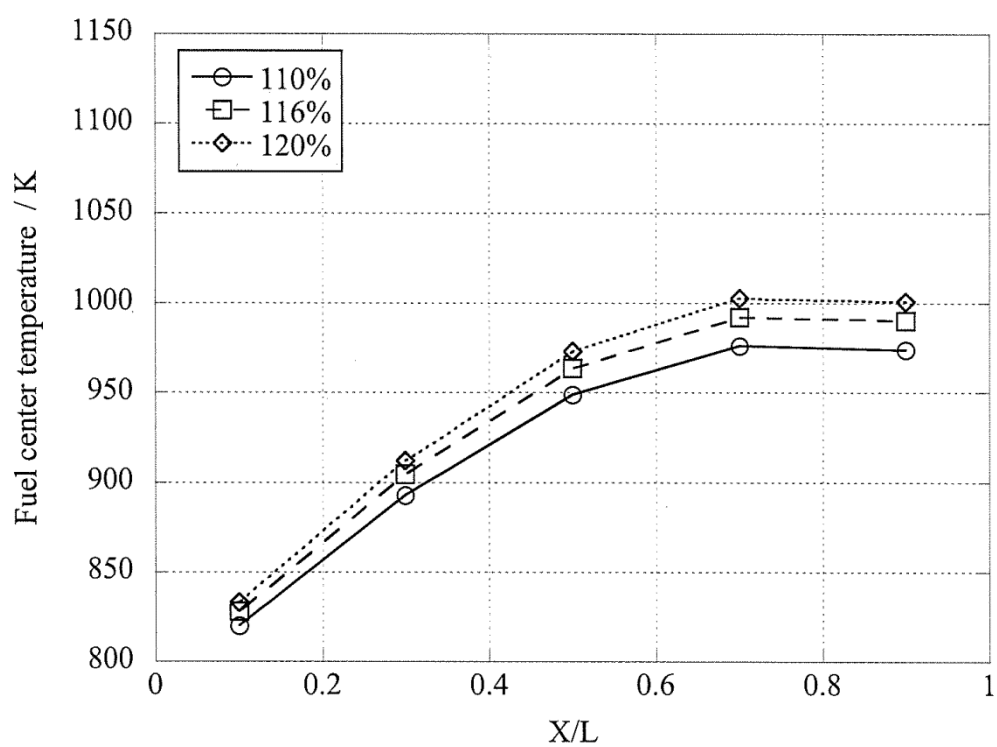


Fig.11 Axial distributions of U-Pu-Zr fuel centerline temperatures at 110, 116, 120% overpower conditions, effective thermal conductivity model with sodium ingress into the fuel

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m 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, ビエネルギー当分, 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 ² 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

