

TRU混入燃料の基本特性評価

1991年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

TRU燃料の基本特性評価

菰田成一*、若林利男*

要 旨

(目的) 本研究の目的は、TRU(超ウラン元素)消滅用FBRの燃料設計を行う上で必要になると考えられる、TRU混入酸化物燃料の基本物性式を作成することである。

(方法) 公開文献に基づき、TRU混入酸化物燃料の物性データを調査するとともに、理論的な検討を加えることで、燃料設計用物性式を作成した。

(成果) 本研究の成果を以下に示す。

- (1) 必要最小限のデータが揃っていた融点、熱伝導度、熱膨張率、比熱、および密度に関しては、燃料設計用物性式を作成することができた。
- (2) TRUを混入させると、燃料の融点および熱伝導度はいずれも低下する傾向にあることが分かった。それ故、TRU消滅用FBRでは最大線出力は下げる必要があると考えられる。
- (3) ヤング率、ポアッソン比、クリープ速度、およびスエリング速度に関しては、公開データが無く、今後、データ収集、評価が必要である。

* 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室

Feb., 1991

Evaluation of basic properties of TRU-loaded fuel

Seiichi Komoda* and Toshio Wakabayashi*

Abstract

The aim of this work is to prepare the formulas of basic properties of TRU (transuranic nuclides)-loaded mixed-oxide fuel for the fuel design in FBRs used as TRU transmutation devices.

The properties data of TRU-loaded mixed-oxide fuel are investigated by referring to the open literatures, and the formulas of basic properties of TRU fuel are made by adding the theoretical examination to the results of the investigation.

The main conclusions drawn in this study are as follows.

- (1) The properties formulas for the fuel design can be made on a melting point, thermal conductivity, thermal expansion, specific heat and density whose data were barely enough to make the formulas.
- (2) It was found that the melting point and the thermal conductivity of mixed-oxide fuel have a tendency to decrease with the load of TRU. Hence the maximum linear heat rate should be lowered in FBRs used as TRU transmutation devices.
- (3) It was found that there were no open data on the Young's modulus, the Poisson's ratio, a creep rate and a swelling rate. The data collection and evaluation must be continued on these properties.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, Oarai Engineering Center

目 次

	頁
1. 序	1
2. TRU燃料物性データの調査・検討	2
3. TRU混入燃料物性の評価	15
3.1 物性評価方法の検討	15
3.2 TRU混入燃料物性の検討	20
3.3 TRU混入燃料の設計評価式の検討	30
4. 今後の検討課題	46
4.1 物性データの取得	46
4.2 La系元素混入時の検討	47
4.3 多元系状態図予測手法の検討	49
5. まとめ	50
謝 辞	51
引用文献	52

Appendix 燃料物性データシート

A. 融点	A1~ A4
B. 熱伝導度	B1~B21
C. 熱膨張率	C1~C19
D. 比熱	D1~ D7
E. 密度	E1~ E6
F. 状態図	F1~F13

1. 序

使用済燃料の再処理の際に発生する廃棄物中には、核分裂により発生するF、Pと共に、UやPuの核変換により生成される超ウラン元素（TRU）が含まれている。これらの超ウラン元素のなかには、半減期が数百年～数百万年というTRU核種が含まれ、廃棄物の貯蔵・管理の上で大きな問題となっている。

そこで、これらのTRU核種を原子炉中にリサイクルする事により燃焼させ、半減期の短い核種に変換できれば、廃棄物管理期間の大幅な短縮となり、原子力利用のコンセンサス形成に大きく寄与できる。

TRUの消滅処理については、原子炉や加速器を用いた方法が検討されているが、FBRはプラントに大きな改造を加えなくてもTRUを消滅できる可能性を持っている。本研究は、FBRプラントによる消滅処理を検討する上で必要となるTRU燃料の基礎的物性値について調査し、TRU消滅処理のための評価用データとして整理する事を目的とし、実施するものである。

2. TRU燃料物性データの調査・検討

TRU酸化物の基礎物性について、7種類のデータベース検索を中心とした調査を実施し、データを収集した。収集したデータをデータシートにまとめ、Appendixとして記載した。また、表2.1に、検索を行ったデータベースの一覧表を示す。

各物性項目毎の調査・検討結果を、以下に示す。

(1) 融点

各TRU酸化物の融点データは次の通りである^{(1)~(7)}。U, Puも含めた5種類のアクチナイド酸化物のうち、最も融点が高いのは UO_2 (2840℃)、最も低いものは AmO_2 (2120℃)である。 UO_2 と AmO_2 の融点の温度差は700℃以上あり、(U, Pu) O_2 燃料にTRU酸化物を混入した場合、融点は下がる方向に向かうと推測される。また、Cmの2酸化物は熱力学的に不安定であり、加熱中に酸素が解離し Cm_2O_3 になるため、融点のデータは Cm_2O_3 のものである。

NpO_2 . . . 2560℃, 2820±60K, 2830K

AmO_2 . . . 2120℃

Cm_2O_3 . . . 2265±20℃, 2260±25℃, 2275±25℃

UO_2 . . . 2840℃

PuO_2 . . . 2390℃

従って融点が低い方から、Am, Cm, Pu, Np, U各酸化物の順となっている。

(2) 熱伝導度

図2.1, 2.2に、U-Am酸化物, U-Np酸化物, U-Am-Np酸化物の熱伝導度データを示す⁽⁸⁾。また、TRU酸化物単体のデータとして、 AmO_2 ⁽⁹⁾ (図2.3), Cm_2O_3 ⁽¹⁰⁾ (図2.4)のデータを収集した。これらのデータから、以下の事がわかる。

- ① (U, Am) O_{2-x} の熱伝導度は、(U, Pu) $O_{1.93}$ よりも低い。一方、(U, Np) O_2 は UO_2 の熱伝導度より高く、 ThO_2 とほぼ同程度である。(U, Np, Am) O_{2-x} の熱伝導度は、(U, Pu) $O_{1.93}$ にほぼ等しい。

- ②熱伝導度の温度依存性に関しては、 $(U, Am) O_{2-x}$ は1800K以上で上昇に転じる傾向を示すが、 $(U, Np) O_2$ は温度と共に減少する。
- ③Am及びCm酸化物単体の熱伝導度は、UやPu酸化物の熱伝導度に較べて悪く60℃では約1/5~1/10程度である。AmとCmの熱伝導度を比べると、Cm酸化物の方がやや高い熱伝導度をもっている。
- ④ $Cm_2 O_3$ 単体の熱伝導度は、 $(U, Am) O_{2-x}$ の熱伝導度温度よりもやや良好である。

約2000K以下では、TRU混合酸化物の熱伝導度は高い順に、U-Np酸化物、U-Am-Np酸化物、U-Am酸化物となっている。しかし、さらに高温領域(約2500K以上)では、U-Np酸化物の熱伝導は、他の2つの酸化物に比べて低くなっている。これは、U-Np酸化物がU-Am, U-Am-Np酸化物とは異なり、高温領域で電子による熱伝導への寄与がないためと考えられる。

(3)熱膨張率

図2.5に、U, Np, Pu, Am, Cmの2酸化物の格子定数の温度依存データ(傾きが熱膨張率に相当)、表2.2に25℃に対する熱膨張率(%)を示す⁽¹⁾。いずれの酸化物も螢石型結晶構造を持ち、格子定数は原子番号順に小さくなっている。また熱膨張率は、各酸化物ともほぼ同程度であり、例えば1000℃では約1%となっている。

(4)比熱

TRU混合酸化物の比熱データを表2.3に示す^(a)。U-Am酸化物よりもU-Np酸化物の方が比熱は大きく、U-Am-Np酸化物はその中間の値をとっている。また、Np酸化物単体の比熱データを表2.4に示すが⁽¹¹⁾、U-Np酸化物の比熱よりもやや大きい値となっている。

(5) 密度

TRU混合酸化物の密度データを表2.3に示す^(*)。TRU2酸化物の密度データは収集できなかつたが、格子定数の温度依存性データと結晶構造がわかっているため、100%理論密度は次式より求める事ができる。

$$d = 4M / a^3 / N$$

d : 理論密度 (g/cm³)

M : 分子量 (g/mol)

a : 各温度での格子定数 (cm)

N : アボガドロ数

(= 6.02 × 10²³ / mol)

U, Puを含めたTRU酸化物の100%理論密度の計算結果を表2.5に示す。理論密度は、U, Np, Pu, Am, Cm酸化物の順に大きくなる。

(6) 機械的特性

ヤング率、ポアソン比、クリープ速度、降伏応力、引張り強さ、の計5項目の機械的特性について検索を行ったが、該当するものが1件もなく、現状では公開されている測定データはない。機械的特性については、測定データ無で物性を推定する事は困難なため、(U, Pu)O₂の物性値で当面で代用するしかないと考える。

また、ヤング率、ポアソン比、クリープ速度はPCMI評価の面から重要であり、データを取得する必要がある。

(7) 化学的特性

TRU酸化物と被覆管材との共存性について判断するためには、NpO₂-Fe, NpO₂-Cr, AmO₂-Ni等の状態図が必要であるが、これらのデータについては公開データがなく、収集出来なかつた。しかし、Np, Am, Cm酸化物は化学

的に非常に活性な物質ではなく、特に NpO_2 は UO_2 と化学的性質が良く似かよっている事から、現行の被覆管材を用いても問題ないと推測される。

(8)酸化物の安定性

TRU酸化物とベースとなる UO_2 、 PuO_2 との熱力学的安定性に関しては、TRU酸化物- UO_2 、TRU酸化物- PuO_2 間の状態図データが必要であるが、現状これらのデータはない。しかし、前述したU-Am酸化物、U-Np酸化物、U-Am-Np酸化物は、 UO_2 とTRU酸化物を等量含む混合酸化物であり、高温($\sim 2000\text{K}$)での熱伝導を測定している事から、少なくとも3元系混合酸化物(UO_2 、 AmO_2 、 NpO_2)までは、室温から高温までの安定性に関して、おそらく問題ないと考えられる。ただし、これ以上の多元系混合酸化物(PuO_2 、 CmO_2 も加わる場合)になると、実際に試料を作製し、高温安定性を確認する必要がある。

表 2. 1 検索したデータベース一覧表

1.	INIS
2.	INSPEC
3.	NTIS
4.	DOE ENERGY
5.	NSA
6.	CA
7.	COMPENDIX PLUS

表 2. 2 UO_2 , NpO_2 , PuO_2 , AmO_2 , CmO_2
25°C に対する熱膨張率

Table 2--Percentage Expansions Relative to 25°C for Dioxides with the
Fluorite and Antifluorite Structures
(The figures in bold are within the range of the observed
temperatures, those in normal type are outside the range)

°C	AmO_2	BtO_2	CeO_2	CmO_2	Li_2O	NpO_2	PrO_2	PuO_2	ThO_2	UO_2
-200			-0.18			-0.12	-0.25	-0.12	-0.12	-0.15
-100			-0.12			-0.08	-0.14	-0.08	-0.08	-0.10
0	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
100	0.06	0.06	0.04	0.04	0.14	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07
200	0.15	0.16	0.14	0.14	0.35	0.16	0.15	0.16	0.14	0.16
300	0.24	0.25	0.29	0.24	0.59	0.25	0.24	0.26	0.23	0.26
400	0.34	0.35	0.40	0.38	0.87	0.34	0.34	0.36	0.31	0.36
500	0.44	0.46	0.52		1.17	0.44	0.43	0.46	0.41	0.46
600	0.55	0.57	0.64		1.51	0.54	0.53	0.57	0.50	0.56
700	0.66	0.69	0.77		1.88	0.64	1.10	0.64	0.60	0.67
800	0.78	0.81	0.90		2.28	0.75	1.38	0.80	0.71	0.78
900	0.90	0.94	1.03		2.71	0.86	1.69	0.92	0.81	0.89
1000	1.03	1.07	1.17		3.17	0.97	2.04	1.04	0.91	1.00
1100	1.17	1.21	1.32		3.66	1.09	2.41	1.17	1.02	1.12
1200	1.31	1.35	1.46		4.15	1.20		1.30	1.13	1.24
1300	1.46	1.50	1.62		4.74	1.32		1.44	1.24	1.36
1400	1.61	1.65	1.78		5.33	1.45		1.58	1.35	1.49
1500	1.77	1.81	1.94			1.57		1.72	1.46	1.65
1750			2.16			1.90		2.09	1.74	2.05
2000			2.51			2.24		2.49	2.04	2.50
2250			3.29			2.60		2.91	2.35	3.01
2500						2.98		2.64	2.59	3.59

表 2. 3 TRU混合酸化物の比熱, 密度 熱伝導度データ

TABLE 2
Measured diffusivity α at temperature T , specific heat capacity C_p , density d and calculated thermal conductivity λ together with high-temperature mean conductivities $\bar{\lambda}$ measured between T_1 and T_2 for several uranium-neptunium-amerium oxides

Sample Designation	T (K)	α ($10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	C_p (10^3 W/gK^{-1})	d (g cm^{-3})	λ (W mK^{-1})	T_1 (K)	T_2 (K)	$\bar{\lambda}$ (W mK^{-1})		
Am 124	1093	4.13	298	9.79	1.20	1840	2690	1.32		
	1183	4.03	298		1.16					
	1198	3.94	298		1.14					
	1323	3.95	298		1.14					
	1448	3.75	301		1.09					
	1383	3.82	299		1.11					
	1583	3.79	300		1.12					
	1498	3.73	302		1.09					
	1713	3.52	312		1.07					
	1113	4.64	298		9.70				1.34	
	1313	4.05	298	1.17						
	1193	4.56	298	1.31						
	1273	4.22	298	1.22						
	1323	4.09	298	1.18						
	1383	4.12	299	1.20						
	1523	3.57	303	1.06						
	1623	3.45	307	1.03						
	Am 13	1133	3.92	298		10.50	1.23	1500	2600	1.87
		1213	3.69	298			1.15			
		1313	3.81	298	1.19					
1398		3.66	300	1.15						
1493		3.66	302	1.13						
1593		3.69	306	1.18						
1693		3.75	311	1.22						
1498		4.17	302	1.33						
1593		3.88	306	1.25						
1673		3.77	310	1.23						
1643	3.89	308	1.26							
1513	3.32	303	1.22							
1413	4.19	300	1.32							
1373	4.32	299	1.36							
1303	4.32	298	1.35							
1303	4.58	298	1.43							
1198	4.75	298	1.48							
1153	4.82	298	1.45							
1073	4.93	299	1.55							
AmNp 1	1103	5.29	350	10.10	1.84	1560	2770	1.7		
	1208	4.93	348		1.73					
	1448	4.49	349		1.58					
	1568	4.41	353		1.57					
	1608	4.35	357		1.57					
	1698	4.23	358		1.53					
	1832	4.04	366		1.50					
	1673	4.32	357		1.56					
	1623	4.40	355		1.58					
	1573	4.55	353		1.62					
	1438	4.89	349		1.69					
	1442	4.65	349		1.64					
	1373	4.54	348		1.70					
	1313	4.93	348		1.75					
	1203	5.31	348		1.87					
1048	5.37	351	1.90							
1113	5.53	349	1.92							
1193	5.23	348	1.84							
Np 2.3.4	1763	5.39	373	10.50	2.08	1640	2870	1.74		
	1623	5.96	365		2.28					
	1513	6.37	360		2.41					
	1413	6.70	357		2.51					
	1353	7.31	356		2.74					
	1218	8.32	356		3.11					
	1148	9.24	357		3.46					
	1098	9.28	358		3.49					
Np 2.3.5	1123	10.27	357	10.45	3.83	-	-	-		
	1193	9.41	356		3.50					
	1253	9.35	356		3.37					
	1333	9.02	356		3.36					
	1413	8.53	357		3.18					
	1473	8.45	359		3.17					
	1573	7.96	363		3.07					
	1613	7.70	364		2.93					
	1698	6.98	369		2.69					
Np 3	1423	7.94	358	10.50	2.98	1600	2870	1.53		
	1553	7.19	362		2.73					
	1773	6.79	374		2.97					
	1553	7.66	362		2.91					
	1378	8.62	357		3.23					
	1243	9.33	356		3.49					
	1248	9.50	356		3.55					
	1133	10.65	357		3.99					
	1563	5.96	362		2.37					
	1773	5.47	368		2.11					
	1723	5.53	365		2.24					
	1623	6.35	361		2.41					
	1443	6.55	353		2.58					

表 2. 4 NpO_2 の比熱温度依存性

Энтальпия и теплоемкость двуокиси нептуния

Темпера- тура T	Энтальпия $H_{298.15}^T$		Теплоемкость C_p	
	(в дж/моль)	(в кал./г)	$\frac{J}{mol \cdot K}$ (в дж/моль· град.)	$\frac{cal}{g \cdot K}$ (в кал./г· град.)
300			80.07	0.0711
350	3029	2.69	81.99	0.0728
400	7162	6.36	83.56	0.0742
450	11374	10.10	84.91	0.0754
500	15654	13.90	86.04	0.0764
550	19978	17.74	87.17	0.0774
600	24359	21.63	88.18	0.0783
650	28796	25.57	89.19	0.0792
700	33278	29.55	90.09	0.0800
750	37805	33.57	90.99	0.0808
800	42378	37.63	91.90	0.0816
850	46995	41.73	92.80	0.0824
900	51657	45.87	93.70	0.0832
950	56365	50.05	94.60	0.0840
1000	61128	54.28	95.50	0.0848
1050	65915	58.53	96.29	0.0855
1100	70757	62.83	97.19	0.0863

表 2. 5 TRU 酸化物 密度計算結果*

物 質	室 溫 (2 5 ° C)	5 0 0 ° C
U O ₂	1 0 . 9 7	1 0 . 8 2
N p O ₂	1 1 . 1 5	1 1 . 0 0
P u O ₂	1 1 . 4 7	1 1 . 3 1
A m O ₂	1 1 . 6 8	1 1 . 5 3
C m O ₂	1 1 . 9 2	—

* 1 0 0 % 理 論 密 度

— 適 用 範 圍 外

混合酸化物の組成

Designation	Composition	Density		Origin	O/M	
		(g cm ⁻³)	(%TD)		Initial	Final
Am 12.4	Am _{0.5} U _{0.5} O _{2-x}	10.16	88	GSP	1.83	1.81
Am 13	Am _{0.5} U _{0.5} O _{2-x}	10.60	95	coprecipitation	1.83	1.92
AmNp1	Am _{0.33} Np _{0.33} U _{0.33} O _{2-x}	10.65	95.6	coprecipitation	—	—
Np 2.3.4	Np _{1.0} U _{0.5} O ₂	10.60	95	GSP	2.00	2.00
Np 2.3.6	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.60	96	ex-GSP	2.00	2.00
Np 3	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.60	95	coprecipitation	2.00	2.00

GSP, Material produced by the GSP method.
 O/M: Initial, final; O/M ratio after fabrication and after measurements.

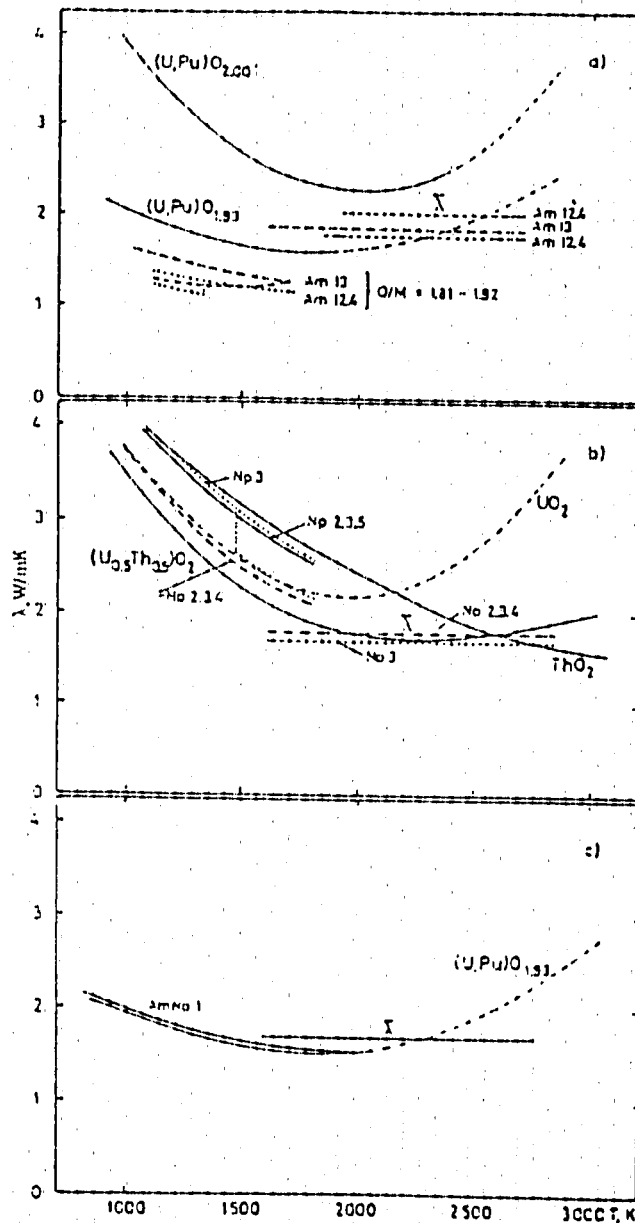


Fig. 1. Smoothed thermal conductivities of (a) (U, Am) oxides compared with conductivities of stoichiometric (U, Pu) oxides, (b) (U, Np) oxides compared with ThO₂, (c) (U, Np, Am) oxide compared with substoichiometric (U, Pu) oxide.

図 2. 1 TRU 混合酸化物の熱伝導度データ (実測値)

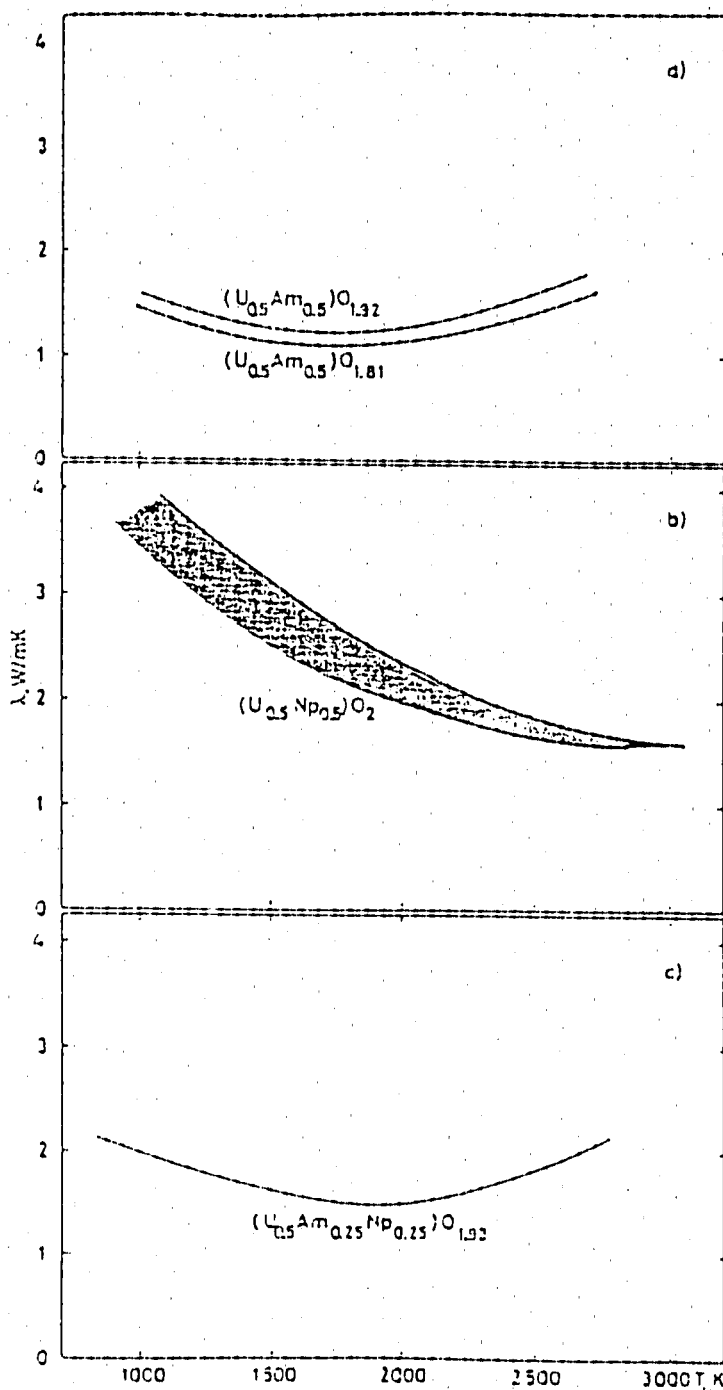


Fig. 2. Recommended data for the thermal conductivities (a) (U, Am) oxide, (b) (U, Np) oxide, (c) (U, Am, Np) oxide.

図 2. 2 TRU 混合酸化物の熱伝導度データ (推奨値)

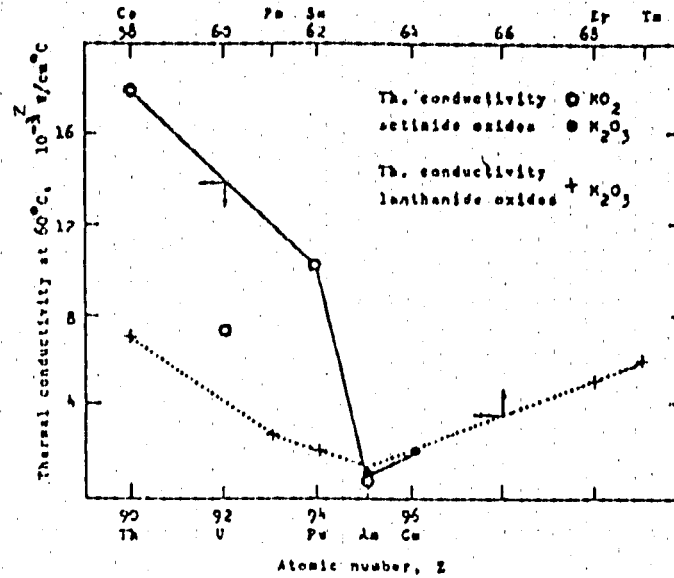


Fig.1 The thermal conductivity at 60°C of some actinide and lanthanide oxides as a function of atomic number

図2. 3 AmO₂ の熱伝導度データ (60°C)

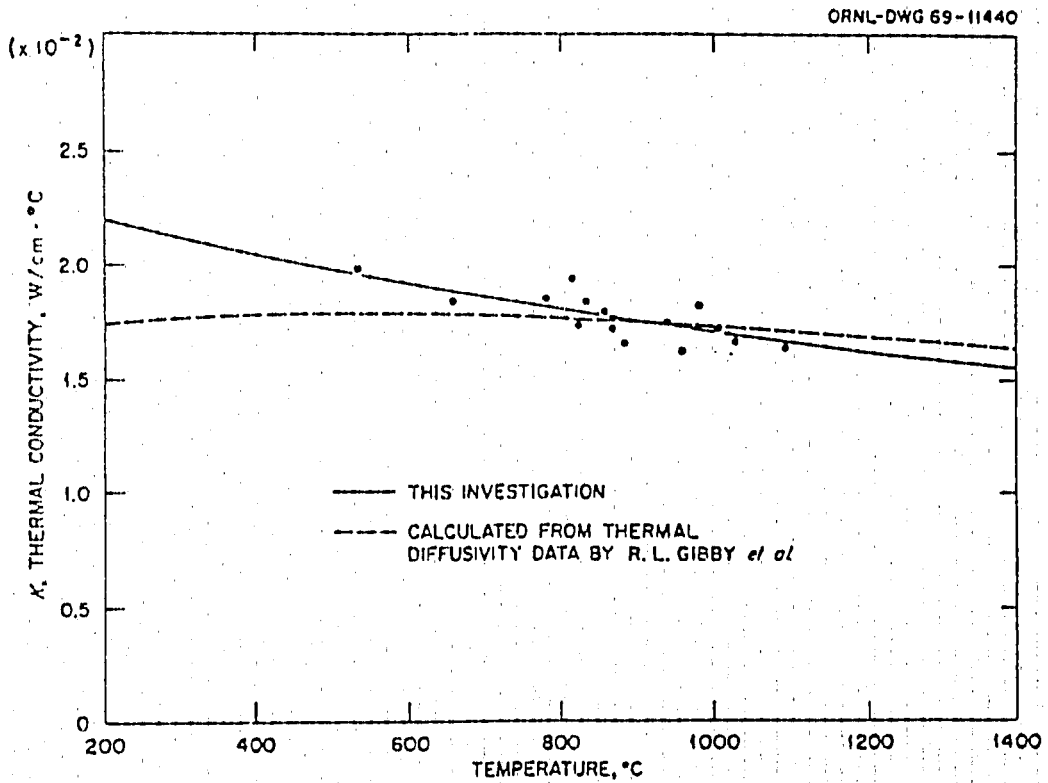


Fig. 4. Comparison of Thermal Conductivity Work for Cm₂O₃.

図2. 4 Cm₂O₃ の熱伝導度温度依存性

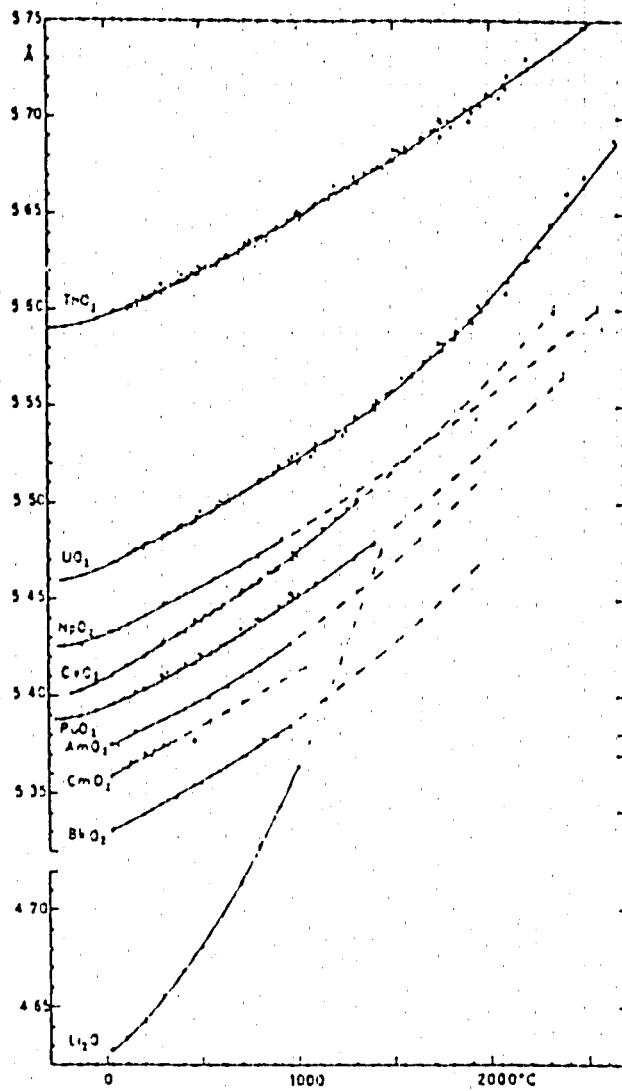


FIGURE 1—Thermal expansion curves for dioxides with the fluorite and antiferite structures.

図2. 5 UO_2 , NpO_2 , PuO_2 , AmO_2 , CmO_2
格子定数の温度依存性

3. TRU混入燃料物性の評価

3.1 物性評価方法の検討

TRU混入燃料は、(U, Pu) 酸化物とTRU酸化物との混合燃料であり、各燃料成分の物性値に成分比(モル%)を掛けて評価する方法、すなわちモル混合平均による方法が考えられる。U-Pu混合酸化物と UO_2 、 PuO_2 単体のデータを比較する事により、この手法を用いる事の妥当性について、各燃料物性毎に検討を行う。

(1) 融点

図3.1-1に、U-Pu酸化物の液相・固相線を示す⁽¹²⁾。 UO_2 と PuO_2 はほとんど理想的に固溶するため、融点の高い UO_2 から融点の低い PuO_2 まで、固相線はほぼ直線的に変化している。従って、(U, Pu) O_2 の場合の融点は、 UO_2 と PuO_2 各成分のモル混合で計算できる。

(2) 熱伝導度

表3.1-1に示す(U, Pu) O_2 の燃料熱伝導度のPu量依存性データ⁽¹³⁾に基づいて、Pu量依存実測値と UO_2 、 PuO_2 単体のモル比による計算値の比較を行なった。実測データと計算結果の比較を表3.1-2に示す。

表の結果より、全般的にモル比による計算値の方が実測データよりも高めになっている。また計算値と実測値の誤差は、Pu量5%で約3%、Pu量12及び20%で約10%、Pu量30%で約15%となった。

以上の検討より、(U, Pu) O_2 燃料熱伝導に関して、Pu量の増加に対してモル平均による推定誤差も増加するが、Pu量が20%でも計算結果と実測値の誤差は約10%程度であり、推定方法として実用的であると考えられる。

(3) 熱膨張率

図3.1-2に、 UO_2 と PuO_2 の固溶体の格子定数を示す⁽¹¹⁾。前述したように、 UO_2 と PuO_2 はほぼ完全固溶するため、Pu量0~100%まで直線的に格子定数は変化する。すなわち、格子定数は UO_2 と PuO_2 のモル比合により計算できる。従って熱膨張率は、格子定数の温度変化率であるから、 UO_2 と PuO_2 単体の熱膨張率のモル混合平均で表す事ができる。

(4) 比熱

比熱に関しては、U-Pu 混合酸化物と酸化物単体を直接比較できるデータは見あ
らなかった。しかし2章(4)で述べたように、比熱が大きいもの(U-Np 酸化物)
と小さいもの(U-Am 酸化物)の混合物(U-Am-Np 酸化物)は、その中間の
値を持っている事から、モル混合の考え方が適用できると考えられる。

(5) 密度

2章(5)で述べたように、理論密度は、格子定数と結晶構造から計算できる。この
うち、(U, Pu)O₂ の格子定数については、(3)で述べたように、UO₂ と
PuO₂ のモル比により求める事ができる。また、(U, Pu)O₂ の結晶構造も
UO₂ , PuO₂ 単体と同じ螢石型結晶構造を持つため、理論密度は格子定数をモル
比から求め、単体と同じ式で計算できる。

表 3. 1 - 1 (U, Pu) O₂ 熱伝導度の Pu 量依存性

** Table 10.3 Values of A and B Determined from a Least-Squares Fit of (U,Pu)O₂ Thermal Conductivity Data to the Relationship: $1/k_c = A + BT^{\dagger}$

% Pu	A, cm ² ·K/W	B, cm/W	
		Exp.	Theory
0	3.08	0.0229	(0.0229) [‡]
5	3.04	0.0239	0.0232
12	2.20	0.0271	0.0235
20	3.09	0.0261	0.0240
25	3.13	0.0260	0.0242
30	5.30	0.0253	0.0245
100	0.46	0.0283	0.0281

*From R. L. Gibby, *J. Nucl. Mater.*, 38: 163 (1971).

[†]Specimens 96 to 98% of theoretical density or corrected to this value.

[‡]Theory matched to experiment for pure UO₂.

表 3. 1 - 2 (U, Pu) O₂ 燃料熱伝導度 計算値と実測データの比較

% P u		熱 伝 導 度 (w / c m / K)			
		400 °C	600 °C	800 °C	1000°C
5	モル比による計算値	0.0540	0.0431	0.0360	0.0308
	実 測 デ ー タ	0.0523	0.0418	0.0348	0.0299
1 2	モル比による計算値	0.0538	0.0429	0.0357	0.0306
	実 測 デ ー タ	0.0489	0.0387	0.0320	0.0272
2 0	モル比による計算値	0.0535	0.0426	0.0354	0.0303
	実 測 デ ー タ	0.0484	0.0386	0.0322	0.0275
3 0	モル比による計算値	0.0533	0.0422	0.0351	0.0299
	実 測 デ ー タ	0.0448	0.0365	0.0308	0.0267

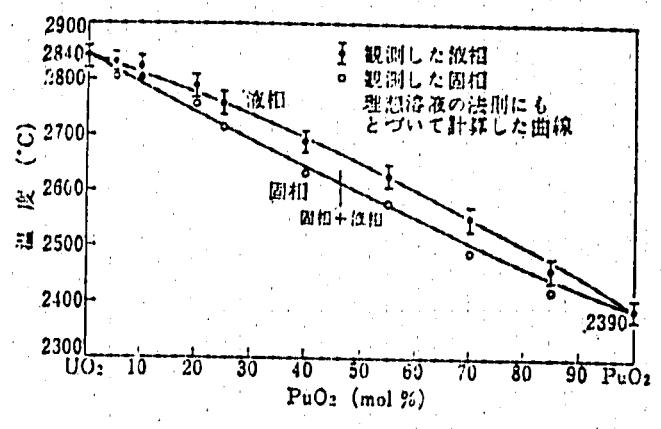


図3. 1-1 $UO_2 - PuO_2$ の液相・固相線

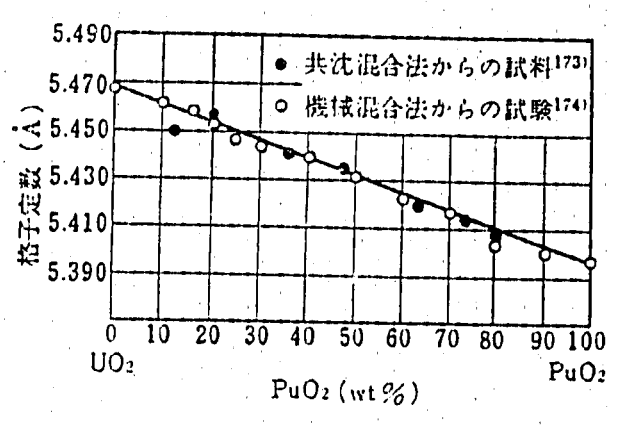


図3. 1-2 $UO_2 - PuO_2$ 固溶体の格子定数

3. 2 TRU混入燃料物性の検討

調査データに基づき、TRU混入燃料の物性値について検討する。前項で示したように、混合酸化物燃料の熱特性については、酸化物単体の物性値に成分比（モル％）で重みをつけて平均する方法が適用可能と考えられる。そこで、TRU酸化物（Puを除く）と $U_{0.8}Pu_{0.2}O_2$ が完全固溶すると仮定し、これらのモル混合平均により、TRU混入燃料物性を推定する。

尚、TRU酸化物の組成として次の2種類のものを考える。

①PWR取出し、冷却一年の組成（ORIGEN計算結果）

②Npのみ（Np100％）

以後、①をTRU1、②をTRU2と称する。表3.2-1に、TRU1について規格化したNp, Am, Cmの組成比を示す。

(1)融点

表3.2-1に示した組成より、TRU1成分の融点をモル混合平均で計算すると2400℃となる。一方、 $U_{0.8}Pu_{0.2}O_2$ の融点を同様の方法で計算すると、2750℃である。TRU1酸化物の融点が低くなるのは、 PuO_2 よりも融点が高い AmO_2 , CmO_2 が合計30%以上含まれているためである。特に、 AmO_2 の影響が大きい。

TRU2の場合、 NpO_2 の融点は2560℃であり、TRU1よりも約160℃高い。

表3.2-2に、TRU混入量を0, 5, 10, 50, 100%とした時のモル混合平均による計算結果を示す。TRUを混入する事により、TRU1, TRU2とも融点は低下する。TRU1の場合、TRU混入量0%に対して10%では35℃（約1%）、100%で350℃（約12%）の低下となる。TRU2の場合、TRU混入量0%に対して10%では19℃（約0.6%）、100%で190℃（約6%）の低下となる。

(2)熱伝導度

図2.1より、U-Am酸化物（ $U_{0.5}Am_{0.5}O_{2-x}$ ）の熱伝導度は、 $(U, Pu)O_{1.93}$ よりも20%程度低く、U-Np酸化物（ $U_{0.5}Np_{0.5}O_2$ ）

は、 UO_2 より高く、 $U-Np-Am$ 酸化物 ($U_{0.5} Np_{0.25} Am_{0.25} O_{2-x}$) は、その間をとり、 $(U, Pu) O_{1.93}$ とほとんど等しくなっている。すなわち、熱伝導度が高い Np 酸化物と低い Am 酸化物を混ぜあわせる事により、熱伝導度は中間的な値となっており、モル混合的考え方に近いものとなっている。

表 3. 2-1 に示した TRU 組成を見ると、 Np 酸化物約 60%、 $(Am+Cm)$ 酸化物約 40% である。このうち、 Cm 酸化物の熱伝導度を図 2. 4 に示しているが、 $U-Am$ 酸化物よりもやや良好である。 Np, Am, Cm 酸化物を混合した場合、熱伝導度がどうなるかは定量的にはいえないが、上で述べた様に、混合酸化物にした場合、モル混合的考え方が適用できそうなので、 Cm 酸化物を安全側に見て Am 酸化物の熱伝導度に近いとし、熱伝導度からみた TRU 1 組成を、 $Np_{0.6} Am_{0.4} O_2$ と見なす。

一方、図 2. 1 に示した $U-Np-Am$ 酸化物 ($U_{0.5} Np_{0.25} Am_{0.25} O_{2-x}$) は、 UO_2 成分 50%、TRU 成分 50% の混合酸化物と見ることが出来る。先ほどの仮定から、評価すべき TRU 1 組成に較べて、熱伝導度が良好な Np 酸化物の割合が少ないが、 UO_2 燃料に、TRU 1 を 50% 混入した場合に相当すると考える事ができる。

さらに、 UO_2 と $(U, Pu) O_2$ の熱伝導度はあまり大きな差がない

(~10% 以内) 事から、概略でみて $(U, Pu) O_2$ に TRU 1 を 50% 混入したケースにほぼ相当すると考えられる。 $U_{0.5} Np_{0.25} Am_{0.25} O_{2-x}$ は、 $(U, Pu) O_{1.93}$ の熱伝導度とほとんど等しいことから、 $(U, Pu) O_2$ に TRU 1 を 50% 混入する事により、熱伝導度の面からみると、 O/M が 1.93 に下がる事に対応すると考えられる。

$(U, Pu) O_{1.93}$ の熱伝導度、すなわち TRU 1 を 50% 混入した場合の熱伝導度は、 $(U, Pu) O_2$ に比べて 1000K で約 50%、1500K で約 65%、2000K で約 70% の値となっている。

次に、TRU 組成を Np 酸化物のみと仮定した場合、すなわち TRU 2 の熱伝導度について検討する。 Np 酸化物の熱伝導度はかなり良好と考えられ、2000K 以下で、 $U_{0.5} Np_{0.5} O_2$ (TRU 2 を 50% 混入に相当) の熱伝導度は、 UO_2 の熱伝導度よりも高く、 ThO_2 の熱伝導度よりやや低い程度である。しかし、 $U-Np$ 酸化物の場合、 $U-Am$ や $U-Am-Np$ 酸化物と異なり、高温領域で電子

による熱伝導への寄与がないため、温度と共に熱伝導度は低下し、約2000K以上になるとUO₂より低くなり、約2500K以上ではTRU1より低くなると推定される。

TRU混入量に比例して熱伝導度が低下すると仮定して、TRU1, TRU2について推定した結果を、表3.2-3に示す。

(3)熱膨張率

収集したUO₂ ~ CmO₂の熱膨張率データ⁽¹⁾は、次の通り。

UO₂ ;

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{UO}_2} &= 8.96 \times 10^{-6} + 2.54 \times 10^{-9}T \\ &\quad (20 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 1400) \\ &= 9.64 \times 10^{-9}T \\ &\quad (1400 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 2640)\end{aligned}$$

NpO₂ ;

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{NpO}_2} &= 8.55 \times 10^{-6} + 2.8 \times 10^{-9}T \\ &\quad (20 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 920)\end{aligned}$$

PuO₂

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{PuO}_2} &= 8.77 \times 10^{-6} + 3.78 \times 10^{-9}T \\ &\quad (20 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 1400)\end{aligned}$$

AmO₂

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{AmO}_2} &= 7.77 \times 10^{-6} + 5.54 \times 10^{-9}T \\ &\quad (25 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 955)\end{aligned}$$

CmO₂

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{CmO}_2} &= 9.88 \times 10^{-6} \\ &\quad (25 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 340)\end{aligned}$$

以上のデータにより、UO₂, PuO₂, O₂にTRU1, TRU2をそれぞれ混入した場合の熱膨張率の推定結果を、表3.2-4に示す。表からわかるように、熱膨張率に関しては、TRUを混入しても、殆ど影響を受けない。これは、各TRU酸化物

とも同程度の熱膨張率をもつためである。

(4)比熱

TRU混合酸化物の比熱データは、表2.3に示したように、U-Am酸化物、U-Np酸化物、U-Am-Np酸化物のデータがある。いずれのデータも、 UO_2 にTRU酸化物が50%混入している場合のデータであり、比熱の大きい順に、U-Np酸化物、U-Am-Np酸化物、U-Am酸化物となっている事から、モル混合比（重み付き掛算）の適用が可能だと考えられる。そこで、熱伝導度と同様に、U-Am-Np酸化物をTRU1、U-Np酸化物をTRU2がそれぞれ50%混入した場合に相当すると見なす事ができる。 $U_{0.8}Pu_{0.2}O_2$ の比熱データ⁽¹⁵⁾とTRU1とTRU2（すなわち、U-Am-Np酸化物とU-Np酸化物）を混入した場合の温度依存性に関して、相対比較を行った。結果を表3.2-5に示す。表より、比熱はTRUを混入しても殆ど影響を受けない。また、TRU50%混入時のTRU1とTRU2の相対値を比較すると、1200~1500℃の範囲で、TRU1の比熱はTRU2に比べて、約3%程度小さくなっている。

(5)密度

(U, Pu) O_2 とTRU酸化物が完全固溶し、結晶構造も変化しない（蛍石型）と仮定すると、TRU混入酸化物の理論密度は次式で表される。

$$d_{TRU} = 4 M_{AVE} / a_{AVE}^3 / N$$

d_{TRU} : TRU混入燃料理論密度 (g/cm³)

M_{AVE} : TRU混入燃料平均分子量 (g/mol)

a_{AVE} : TRU混入燃料格子定数 (cm)

N : アボガドロ数

図2.5に示した格子定数データから a_{AVE} を求め、 $U_{0.8}Pu_{0.2}O_2$ にTRU1とTRU2をそれぞれ混入した場合の密度推定結果を、表3.2-6に示す。表から見られるように、TRUを混入する事により密度は増加するが、変化量は小さい。TRU1を50%混入した場合で、約1.4%密度が増加する。

表3. 2-1 TRU1の組成

元 素	核 種	モ ル %	合計モル%
Np	Np ²³⁷	61.48	61.48
Am	Am ²⁴¹	11.53	30.62
	Am ^{242m}	0.10	
	Am ²⁴³	18.99	
Cm	Cm ²⁴²	0.42	7.90
	Cm ²⁴³	0.07	
	Cm ²⁴⁴	7.06	
	Cm ²⁴⁵	0.29	
	Cm ²⁴⁶	0.06	

* : PWR燃料 冷却一年
 10^{-4} 以上の成分で規格化

表 3. 2 - 2 TRU混入燃料 融点推定結果

TRU量 (%)	TRU1融点 (°C)	TRU2融点 (°C)
0	2750	2750
5	2733	2741
10	2715	2731
50	2575	2655
100	2400	2560

* TRU1 : PWR取出し冷却1年での組成
 (Np 61.48%, Am 30.62%, Cm 7.9%)
 TRU2 : Np 100%

表 3. 2 - 3 TRU混入燃料 熱伝導度推定結果

TRU量 (%)	TRU 2 熱伝導度 (相対値*)			
	1000K	1500K	2000K	2500K
0	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)
5	1.00 (0.95)	1.01 (0.96)	1.00 (0.97)	0.97 (0.97)
10	1.01 (0.90)	1.03 (0.93)	1.01 (0.94)	0.94 (0.95)
50	1.04 (0.50)	1.13 (0.65)	1.04 (0.70)	0.68 (0.74)

*各温度ともTRU0%の場合を1.0とした
()内の値は、TRU1組成の場合

表 3. 2 - 4 TRU混入燃料 熱膨張率推定結果

TRU量 (%)	25℃		800℃	
	TRU1	TRU2	TRU1	TRU2
0	1.0	1.0	1.0	1.0
5	0.997	0.998	1.00	0.998
10	0.995	0.996	1.00	0.997
50	0.973	0.979	1.00	0.984

*各温度ともTRU0%の場合を1.0とした

表 3. 2 - 5 TRU混入燃料 比熱推定結果

TRU 量 (%)	TRU 2 比熱 (相対値*)			
	1200 °C	1300 °C	1400 °C	1500 °C
0	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)
5	1.00 (1.00)	1.00 (0.999)	1.00 (0.998)	1.00 (0.997)
10	1.01 (1.00)	1.00 (0.999)	1.00 (0.996)	0.999 (0.994)
50	1.03 (1.01)	1.02 (0.994)	1.01 (0.981)	0.997 (0.968)

*各温度とも TRU 0% の場合を 1.0 とした
 () 内の値は、TRU 1 組成の場合

表 3. 2 - 6 TRU混入燃料 密度推定結果

TRU量 (%)	TRU1 密度*	TRU2 密度*
0	11.07	11.07
5	11.08	11.07
10	11.10	11.08
50	11.22	11.11

* 単位 g/cm^3

3.3 TRU混入燃料の設計評価式の検討

3.2節では、TRU酸化物及び(U, Pu)酸化物の実測データ(最確値)を用いて、TRU酸化物が(U, Pu)O₂燃料に混入した場合の影響について検討を行った。本節では、保守側の値を取込んだ燃料設計のための評価式を暫定する。ただし、前述したように、TRU混入燃料についての各物性の測定データは非常に少なく、現状では、精度の良い評価式を作成する事は難しい。しかし、今後検討を進めていく上での第一ステップとして、前節まで検討した現状での知見に基づき、熱的特性に関するTRU混入燃料の設計用評価式を設定する。

尚、混入燃料のベースとなる(U, Pu)O₂燃料評価式は、「もんじゅ」の設計用物性値⁽¹⁴⁾を用い、保守側の値を見込むが、TRU酸化物成分については、最確値データをそのまま用いた。また、(U, Pu)O₂燃料に関するO/M依存性、ポロシティの影響はそのまま適用するが、TRU酸化物成分については、これらの影響が不明であるため、考慮しないものとする。

3. 3. 1. 融 点

(U, Pu) O₂ と TRU 酸化物のモル混合平均 (重み付き平均) で評価した。
TRU1, TRU2 の融点の値として、それぞれ表 3. 2-2 に示した 2400℃,
2560℃を用いた。

融 点

TRU1 + (U, Pu) O₂

3.3.1 (1/2)

$$MP = 2650 \cdot (1 - Z) + 2400 \cdot Z$$

$$MP_{MOX} = 2650$$

$$MP_{TRU1} = 2400$$

ここで、

MP : TRU1 混入燃料融点 (°C)

MP_{MOX} : (U, Pu) O₂ 融点 (°C)

MP_{TRU1} : TRU1 融点 (°C)

Z : TRU1 混入量 (fraction)

ただし、MOX部についての適用範囲は以下の通り

$$P_{Pu} / (U + P_{Pu}) = 0.2 \sim 0.4$$

$$O/M = 1.90 \sim 2.00$$

融 点

TRU2 + (U, Pu) O₂

3.3.1 (2/2)

$$MP = 2650 \cdot (1 - Z) + 2560 \cdot Z$$

$$MP_{MOX} = 2650$$

$$MP_{TRU2} = 2560$$

ここで、

MP : TRU2 混入燃料融点 (°C)

MP_{MOX} : (U, Pu) O₂ 融点 (°C)

MP_{TRU2} : TRU2 融点 (°C)

Z : TRU2 混入量 (fraction)

ただし、MOX部についての適用範囲は以下の通り

$$P_{U} / (U + P_{U}) = 0.2 \sim 0.4$$

$$O/M = 1.90 \sim 2.00$$

3.3.2 熱伝導度

3.2(2)での検討から、TRU1及びTRU2を50%含むTRU混入燃料の熱伝導度は、それぞれ、 $U_{0.5}Am_{0.25}Np_{0.25}O_{2-x}$ 、 $U_{0.5}Np_{0.5}O_2$ のデータで近似できると考えられる。

まずTRU1の場合であるが、 $U_{0.5}Am_{0.25}Np_{0.25}O_{2-x}$ の熱伝導度は、図2.1中の $(U, Pu)O_{1.93}$ の熱伝導度と殆ど一致している。そこで、TRU1を50%混入した場合の熱伝導度として、 $(U, Pu)O_{1.93}$ のデータ⁽¹⁵⁾を用いる事とした。TRU混入量を変化させた場合の評価法としては、TRU混入0% (もんじゅ評価式)とTRU混入50% ($(U, Pu)O_{1.93}$ 評価式⁽¹⁵⁾)の間の内挿により行うものとした。

次にTRU2の場合、図2.1, 2.2より、 $U_{0.5}Np_{0.5}O_2$ の熱伝導度は、 ThO_2 の熱伝導度とほぼ同程度からやや低めで、ある幅を持ち、温度依存性の傾きは ThO_2 と良く似ている。そこで、TRU2を50%混入した場合の熱伝導度として、 ThO_2 データ⁽¹⁶⁾に係数 ($U_{0.5}Np_{0.5}O_2$ のバンド幅の中央値にほぼ相当するような) を乗じた値を用いる事とする。TRU混入量を変化させた場合の評価は、TRU2と $(U, Pu)O_2$ の熱伝導度の絶対値が温度により逆転するため、これらの絶対値を比較した後、TRU1の場合と同様の方法で、内挿を行うものとする。

熱 伝 導 度

TRU1 + (U, Pu) O₂

3.3.2 (1/2)

$$K = K_{\text{MOX}} \frac{Z}{0.5} (K_{\text{MOX}} - K_{\text{TRU1.50}})$$

$$K_{\text{MOX}} = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.02226 \times (1-\rho)}{O/M-1.90}\right] \cdot T} + 7.214 \times 10^{-13} \cdot T^3$$

$$K_{\text{TRU1.50}} = \frac{1}{36 + 0.0218\theta} (1 - 1.4 \times 10^{-8} T^2 + 1.923 \times 10^{-14} T^4)$$

K : TRU1 混入燃料熱伝導度 (W/cm°C)

K_{MOX} : (U, Pu) O₂熱伝導度 (W/cm°C)

K_{TRU1.50} : TRU1 50%混入時の熱伝導度 (W/cm°C)

ρ : 対理論密度比

T : 温度 (°C)

O/M : 化学量論比

θ : T < 1600°C θ = T

T ≥ 1600°C θ = 1600°C

Z : TRU1 混入量 (fraction)

0 ≤ Z ≤ 0.5

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

ρ : 0.84 ~ 0.99

T : 800 ~ 2800

O/M : 1.83 ~ 2.00

熱 伝 導 度

TRU2 + (U, Pu) O₂

3.3.2 (2/2)

 $K_{MOX} \geq K_{TRU2.50}$ の場合

$$K = K_{MOX} - \frac{Z}{0.5} (K_{MOX} - K_{TRU2.50})$$

 $K_{MOX} \leq K_{TRU2.50}$ の場合

$$K = K_{MOX} + \frac{Z}{0.5} (K_{TRU2.50} - K_{MOX})$$

$$K_{MOX} = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.02226 \times (1 - \rho)}{O/M - 1.90}\right] \cdot T} + 7.214 \times 10^{-13} \cdot T^3$$

$$K_{TRU2.50} = \frac{1}{0.861 + 1.9 \times 10^{-14} T} \cdot F \cdot \beta$$

- K : TRU2 混入燃料熱伝導度 (W/cm°C)
 K_{MOX} : (U, Pu) O₂ 熱伝導度 (W/cm°C)
 K_{TRU2.50} : TRU2 50%混入時の熱伝導度 (W/cm°C)
 ρ : 対理論密度比
 T : 温度 (°C)
 O/M : 化学量論比
 F : F=0.92
 β : 補正係数 (β=0.95)
 Z : TRU2 混入量 (fraction)
 0 ≤ Z ≤ 0.5

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

- ρ : 0.84 ~ 0.99
 T : 800 ~ 2800
 O/M : 1.83 ~ 2.00

3. 3. 3 熱膨張率

3. 2(3)に示したデータを用いて、モル混合平均によりTRU1, TRU2の平均熱膨張率を求めた。さらに、(U, Pu)O₂とTRU酸化物が全ての組成範囲で完全固溶する、という前提の基で、同様にモル混合平均により評価する。

熱 膨 張 率

TRU1 + (U, Pu) O₂

3.3.3 (1/2)

$$\alpha = (1 - Z) \cdot \alpha_{\text{MOX}} + Z \cdot \alpha_{\text{TRU1}}$$

$$\alpha_{\text{MOX}} = \{X \cdot \alpha_{\text{PuO}_2} + (1.0 - X) \cdot \alpha_{\text{UO}_2}\} \cdot \beta$$

ここで、

$$\alpha_{\text{TRU1}} : \text{TRU1の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$= 8.42 \times 10^{-6} + 3.42 \times 10^{-9} T$$

$$\alpha_{\text{MOX}} : (\text{Pu, U}) \text{O}_2 \text{の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_{\text{PuO}_2} : \text{PuO}_2 \text{の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$= 8.496 \times 10^{-6} + 4.302 \times 10^{-9} T + 11.14 \times 10^{-16} T^2$$

$$\alpha_{\text{UO}_2} : \text{UO}_2 \text{の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$= 7.107 \times 10^{-6} + 5.162 \times 10^{-9} T + 3.42 \times 10^{-13} T^2$$

$$X : \text{PuO}_2 \text{富化度} \quad (\text{fraction})$$

$$T : \text{温 度} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\beta : 1 - 5.1 (O/M - 2.00)$$

$$Z : \text{TRU1混入量} \quad (\text{fraction})$$

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

温 度 : 室温 ~ 融点

PuO₂富化度 : 0 ~ 100wt%

O/M : 1.94 ~ 2.01

熱 膨 張 率

TRU2 + (U, Pu) O₂

3.3.3 (2/2)

$$\alpha = (1 - Z) \cdot \alpha_{MOX} + Z \cdot \alpha_{TRU2}$$

$$\alpha_{MOX} = \{X \cdot \alpha_{PuO_2} + (1.0 - X) \cdot \alpha_{UO_2}\} \cdot \beta$$

ここで、

$$\alpha_{TRU2} : \text{TRU2の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$= 8.55 \times 10^{-6} + 2.8 \times 10^{-9} T$$

$$\alpha_{MOX} : (Pu, U) O_2\text{の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_{PuO_2} : PuO_2\text{の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$= 8.496 \times 10^{-6} + 4.302 \times 10^{-9} T + 11.14 \times 10^{-16} T^2$$

$$\alpha_{UO_2} : UO_2\text{の熱膨張率} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$= 7.107 \times 10^{-6} + 5.162 \times 10^{-9} T + 3.42 \times 10^{-13} T^2$$

$$X : PuO_2\text{富化度} \quad (\text{fraction})$$

$$T : \text{温 度} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\beta : 1 - 5.1 (O/M - 2.00)$$

$$Z : \text{TRU2混入量} \quad (\text{fraction})$$

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

温 度 : 室温 ~ 融点

PuO₂富化度 : 0 ~ 100wt%

O/M : 1.94 ~ 2.01

3.3.4 比熱

3.2(4)での検討から、比熱についてもモル混合平均の適用が可能であると考えられる。

まず、表2.4に示したNp酸化物単体のデータと(U, Pu)O₂評価式により、TRU2を混入した場合の比熱評価式を設定した。

次に、3.2(4)で行ったTRU1とTRU2の比熱の相対比較結果から、TRU2を混入した場合よりもTRU1を混入した方が、比熱がやや小さい。TRU1, TRU2をそれぞれ50%混入した場合の実測データの相対比に基づき、TRU2の評価式に係数を乗ずる事により、TRU1混入の場合の評価式とした。

比 熱

TRU1 + (U, Pu) O₂

3.3.4 (1/2)

$$C_P = \{ (1 - Z) \cdot C_{P,MOX} + Z \cdot C_{P,TRU2} \} \cdot \beta$$

$$C_{P,MOX} = 12.54 + 0.0170 \cdot T - 0.117 \times 10^{-4} \cdot T^2 + 0.307 \times 10^{-8} \cdot T^3$$

$$C_{P,TRU2} = 18.91 + 3.99 \times 10^{-2} \cdot T - 8.77 \times 10^{-4} T^{-2}$$

C_P : TRU1 混入燃料比熱 (cal/mol · °C)

$C_{P,MOX}$: (U, Pu) O₂ 比熱 (cal/mol · °C)

$C_{P,TRU2}$: TRU2 比熱 (cal/mol · °C)

T : 温 度 (°C)

Z : TRU1 混入量 (fraction)

β : 補正係数 ($\beta = 0.97$)

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

温 度 : 25 ~ 2727°C (298 ~ 3000K)

PuO₂ 富化度 : 20 ~ 30wt%

O/M : 1.97 ~ 1.98

比 熱

TRU2 + (U, Pu) O₂

3.3.4 (2/2)

$$C_P = (1 - Z) \cdot C_{P,MOX} + Z \cdot C_{P,TRU2}$$

$$C_{P,MOX} = 12.54 + 0.0170 \cdot T - 0.117 \times 10^{-4} \cdot T^2 + 0.307 \times 10^{-8} \cdot T^3$$

$$C_{P,TRU2} = 18.91 + 3.99 \times 10^{-2} \cdot T - 8.77 \times 10^{-4} T^{-2}$$

C_P : TRU2 混入燃料比熱 (cal/mol · °C)

$C_{P,MOX}$: (U, Pu) O₂ 比熱 (cal/mol · °C)

$C_{P,TRU2}$: TRU2 比熱 (cal/mol · °C)

T : 温度 (°C)

Z : TRU2 混入量 (fraction)

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

温度 : 25 ~ 2727°C (298 ~ 3000°C)

PuO₂ 富化度 : 20 ~ 30wt%

O/M : 1.97 ~ 1.98

3. 3. 5 密度

3. 2(5)で検討した式を用いて、TRU1及びTRU2の25℃での理論密度を計算し、(U, Pu)O₂の25℃の密度とのモル混合平均により評価する。

理 論 密 度

TRU1 + (U, Pu) O₂

3.3.5 (1/2)

$$\rho = (1 - Z) \cdot \rho_{\text{MOX}} + Z \cdot \rho_{\text{TRU1}}$$

$$\rho_{\text{MOX}} = 0.48 \cdot Y + 10.96 - 2.5 (2.00 - X)$$

ρ : TRU1 混入燃料の理論密度 (g/cm³)

ρ_{MOX} : (U, Pu) O₂ の理論密度 (g/cm³)

ρ_{TRU1} : TRU1 の理論密度 (g/cm³)
= 11.366 (25°C)

X : O/M 比

Y : PuO₂ 濃度 PuO₂ / (Pu, U) O₂ (fraction)

Z : TRU1 混入量 (fraction)

ただし、MOX 部の適用範囲は以下の通り

PuO₂ 富化度 : 0 ~ 30wt%

O/M : 1.90 ~ 2.00

温 度 : 25°C

理論密度

TRU2 + (U, Pu) O₂

3.3.5 (2/2)

$$\rho = (1 - Z) \cdot \rho_{\text{MOX}} + Z \cdot \rho_{\text{TRU2}}$$

$$\rho_{\text{MOX}} = 0.48 \cdot Y + 10.96 - 2.5 (2.00 - X)$$

ρ : TRU2 混入燃料の理論密度 (g/cm³)

ρ_{MOX} : (U, Pu) O₂ の理論密度 (g/cm³)

ρ_{TRU2} : TRU2 の理論密度 (g/cm³)
= 11.142 (25°C)

X : O/M 比

Y : PuO₂ 濃度 PuO₂ / (Pu, U) O₂ (fraction)

Z : TRU2 混入量 (fraction)

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

PuO₂ 富化度 : 0 ~ 30wt%

O/M : 1.90 ~ 2.00

温度 : 25°C

4. 今後の検討課題

4. 1 物性データの取得

TRU混合酸化物、TRU酸化物単体の物性データについて調査を行ったが、2章で述べたように、データが少なく、TRU混入燃料設計のためには、不十分である。現状ではまだデータが取得されておらず、今後TRU混入燃料実用化へ向けて、データの取得が本格的に開始されるものと思われる。燃料の熱的（物理的）特性に関する5つの物性（融点、熱伝導度、熱膨張率、比熱、密度）については、評価に必要な最小限のデータは収集する事ができ、TRUが混入した場合の暫定評価式を設定したが、これも大きな仮定に基づいたものである。すなわち、U-Pu酸化物とTRU酸化物が、 UO_2 と PuO_2 の場合と同様に、全組成領域にわたって完全固溶するものと仮定している。しかし、TRU1組成の酸化物を混入する場合、アクチナイド5元系の酸化物燃料となり、固溶性が悪くなる可能性もある。3.3で設定した評価式、特に、熱膨張率と密度は、固溶範囲以外では結晶構造が変化すると考えられるため、適用範囲外となる。また、融点や熱伝導度も影響を受け、評価式の見直しが必要となってくる。従って、どの組成範囲まで固溶するか試料を作製し、評価式の適用範囲を、確認する必要がある。

次に、機械的特性（ヤング率、ポアソン比、クリープ速度）データは全く収集できなかったが、TRU混入燃料実用化のためにはPCMI評価をする必要があり、基本的なものとして、ヤング率の温度依存性と熱クリープ速度データを取得しておく必要がある。熱特性及び機械的特性の炉外データを把握した上で、TRU混入燃料を炉心に装荷し、照射クリープ、スエリング、FPガス放出率データを取得し、燃料設計にフィードバックする。また、各基礎物性に対して（特に融点）、燃焼度が与える影響についても、データを取得しておく必要がある。

4.2 La系元素混入時の検討

使用済み燃料再処理時の高レベル廃液中には、Ac系元素と共にLa系元素が含まれている。表4.2-1に、ORIGEN2での計算結果を示す。表中に示したように、廃液中にLa系元素はAc系元素よりも多く含まれ、重量比で約35倍、モル比で約20倍となっている。再処理でLa系元素を取りきれない場合、Ac系元素(Np, Am, Cm)と共に、燃料中に混入する事になる。この場合に、TRU混入燃料の融点及び熱伝導度が、どのような影響を受けるかについて検討する。

まず、熱力学データ⁽¹⁷⁾から、Nd, Ce, La等は燃料中で酸化物(Nd_2O_3 , CeO_2 , La_2O_3)として存在すると考えられる。 Nd_2O_3 , CeO_2 , La_2O_3 の融点は、それぞれ、2173K, 3000K, 2586Kである。表4.2-1より、 Nd_2O_3 が量的に多く含まれる事から、融点は低下する方向に向かうと推定される。

次に、熱伝導について検討する。La系酸化物の熱伝導度データは、あまり測定されておらず、収集できたデータは、 CeO_2 ⁽¹⁸⁾のみである。 CeO_2 の熱伝導度は、800℃で3.38, 1000℃で2.95, 1200℃で2.73W/m/Kと報告されている。これは、(U, Pu)O₂の約1.3倍程度高い熱伝導度である。3章で検討したように、モル混合平均的考え方が適用できるとすると、 CeO_2 が混入する事により、熱伝導度は良くなる方向に向かう。しかし、La系酸化物はAc系酸化物との質量差が大きい為、フォノンの散乱が起こり、熱伝導度が低下する可能性もある。 Nd_2O_3 や La_2O_3 のデータが報告されていない事もあり、現状では、La系酸化物混入による熱伝導度の傾向について、言及する事は難しい。融点やその他の特性も含めて、今後の詳細な検討が必要である。

表4. 2-1 アクチノイド元素とランタノイド元素の高レベル廃液中の量

○計算条件

コード : ORIGIN 2

燃焼度 : 3.5 %

比出力 : 30MW/MTU

燃焼度 : 33,000MWD/MT

U残存率 : 0.15 %

Pu残存率 : 0.71 %

Act : 100%

アクチノイド元素	
元素	量 (g/MTU)
Np	809
Pu	108
Am	481
Cm	29
計 (Am+Cm)	1427 (510)

ランタノイド元素	
元素	量 (g/MTU)
La	2,227
Ce	4,320
Pr	2,053
Nd	7,400
Pm	68
Sm	1,413
Eu	244
Gd	181
Tb	4
計	17,910

$Ln/Am+Cm = \text{約}35$

4. 3 多元系状態図予測手法の検討

TRU 混入燃料は、3 元系以上の元素 (U-Pu-Np-Am-Cm-O) から構成され、状態図は非常に複雑になる。状態図を予測する手法として、熱力学の種々の関数 (エンタルピー、ギブス自由エネルギー、エントロピー等) を温度及び濃度の関数として展開する方法がある⁽¹⁹⁾。この方法は 2 元系状態図から、ギブス自由エネルギーの関数形を最小自乗法により決定し、これを 3 元系に拡張するものである。3 元系の状態図上のギブス自由エネルギーが求めれば、状態図を予測する事は理論的には可能である。状態図が予測できれば、各組成での融点及び固溶限度も推定できる事になる。しかし、3 元系のギブス自由エネルギーを求める際には、未知の項 (3 元系のエクセス項) を適当に仮定する必要がある、この仮定により関数形は変化してしまう。すなわち、未知の項の仮定により計算は行えるが、結果の信頼性は殆ど無い事になる。結果の信頼性を上げるためには、実験で得られた 3 元系状態図のデータより、未知の項を評価する必要がある。本手法による 3 元合金の状態図予測については、電中研や原研で現在実施されているもようであるが、予測精度については不明である。4 元系以上の予測は、おそらくどこも行っていないと思われる。

さて、現状 TRU 酸化物に関しては、2 元系状態図も揃っておらず、この理論的な推定が適用できる段階ではない。しかし、少なくとも 3 元系 (例: U-Np-O 系) については、今後、2 元系や 3 元状態図データが整備されれば、理論的推定法が適用できると考えられるため、将来的に検討する必要がある。

5. まとめ

TRU酸化物単体、TRU混合酸化物燃料の基礎物性データについて調査を実施したが、当初の予想通り、現状のデータでは、TRU混入燃料を設計するためにはまだ不十分である。しかし、TRU酸化物の熱的（物理的）特性の5項目（融点、熱伝導度、熱膨張率、比熱、密度）に関しては、必要最小限のデータが揃ったため、TRU混入時の評価式を暫定した。これらの評価式の適用性については、今後のデータ取得により、随時見直して行く必要がある。また、データが全くなかった機械的特性データについては、特にPCMI評価の面から、ヤング率及びクリープ速度に関して積極的にデータを取得していくべきだと考える。

燃料の許容線出力に関連する物性のうち、融点は、TRU混入量が増加するにつれて低下する方向に向かう。一方、熱伝導度は、TRU1組成（ N_p , A_m , C_m の混合酸化物）の場合、混入量とともに低下する。TRU2組成（ N_p 酸化物のみ）の場合、2000K以下の範囲では、混入により熱伝導度は上昇するが、2000K以上の高温領域では逆に低下する、という挙動を示す。全般的に見て、TRUの混入により、燃料設計する上で熱特性は悪くなる方向に向かうと推定される。

また、TRU混入燃料実用化へ向けて、物性データの取得、La系元素混入の影響評価、多元系状態図予測手法の整備、という3項目について、今後さらに検討を行う必要があると考える。

謝 辞

本報告書の作成にあたっては、三菱原子力工業株式会社 東海研究所(現ニュークリア・デベ
ロップメント株式会社) 池田一生氏および石井武氏に多大なご協力を頂きました。ここに厚く
感謝の意を表します。

引 用 文 献

- (1) D.Taylor, "Thermal Expansion Data: 2 Binary Oxides with the Fluorite and Rutile Structures, MO_2 , and the Antifluorite Structure, M_2O ", Trans. J. Br. Ceram. Soc. 83(1984)32
- (2) K.Richter et al, "Phase Relationships in the Neptunium-Oxygen System", J. Nucl. Mat. 148(1987)266
- (3) T.D.Chikalla et al, Int. Coll. on Study of Crystal Transformation at High Temp. above 2000K, Odeillo, France, 1971
- (4) R.E.Mchenry, "Melting Points of Curium and Americium Oxides", Trans. Am. Nucl. Soc. 8(1965)75
- (5) P.K.Smith, "Melting Point of Cm_2O_3 ", J. Inorg. Nucl. Chem. 31(1969)241
- (6) R.D.Baybarz, "High-Temperature Phases Crystal Structures and the Melting Points for Several of the Transplutonium Sesquioxides", J. Inorg. Nucl. Chem. 35(1973)4149
- (7) R.L.Gibby et al, "Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity and Transformation Temperatures of Curium Sesquioxide", J. Nucl. Mat. 34(1970)299
- (8) H.E.Schmidt et al, "The Thermal Conductivity of Oxides of Uranium, Neptunium and Americium at Elevated Temperatures", J. Less-Comm. Met. 121(1986)621
- (9) H.E.Schmidt, "Some Remarks Concerning the Thermal Conductivity of Plutonium and Americium Oxides", AERE-R-7961

- (10) E.E.Ketchen, "Thermal Conductivity of Cm_2O_3 ", ORNL-TM-2815(1970)
- (11) U.A.ARKHIPOV, "Enthalpy and Heat Capacity of Neptunium Dioxide at 350-1100K", RADIOKHIMIYA 16(1974)123
- (12) 長谷川 正義他, 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1977)
- (13) D.R.Olander, "Fundamental Aspects of Nuclear reactor Fuel Elements", Technical Information Center Energy Research and Development Administration(1976)
- (14) PNC SN241 85-23(1) 高速原型炉燃料集合体及び炉心構成要素
— 設計用物性値集 — 動力炉・核燃料開発事業団 (1985)
- (15) H.E.Schmidt, "Die Wärmeleitfähigkeit von Uran und Uran-Plutonium Dioxid bei hohen Temperaturen", High Temp.- High Press. 3(1971)345
- (16) D.A.Himes, "Thermal Conductivity Model for $(Th,U)O_2$ to Melting", Trans.Am.Nucl.Soc. 30(1978)174
- (17) パソコン用熱力学データベース「MALT」 日本熱測定学会 (1985)
- (18) Gmelin Handbuch der Anorganischen Chemie, Sys39, Teil C1, Springer-Verlag(1974)
- (19) H.L.Lukas et al, "Optimization of Phase Diagrams by a Least Squares Method using Simultaneously Different Types of Data", CALPHAD vol.1 No.3 225-236, Pergamon Press(1977)

Appendix 燃料物性データシート

A. 融点

B. 熱伝導度

C. 熱膨張率

D. 比熱

E. 密度

F. 状態図

融 点

材質	物性
M O ₂	熱膨張率、融点

データ

Table 1—Regression Data for Dioxides with the Fluorite and Antifluorite Structures

Oxide	Temperature range (°C)	N	α_0	$10\alpha_1$	$10^4\alpha_2$	R	SE	T _m , °C
Al ₂ O ₃	25 to 933	10	5.3733	9.77(91)	2.77(93)	0.9942	0.0013	dec.
BaO	25 to 953	9	5.3296	8.33(26)	2.37(23)	0.9999	0.0003	dec.
CeO ₂	-173 to 26	20	5.4093	10.59(5)	13.8(4)	0.9999	0.00003	2341
	20 to 1310	78	5.4101	9.73(23)	2.23(19)	0.9989	0.0011	
CmO ₂	25 to 340	13	5.3576	9.88(45)		0.9887	0.0010	dec.
HfO ₂	monoclinic							
a	25 to 1720	33	5.1101	5.91(63)	1.86(38)	0.9936	0.0029	2344
b	25 to 1720	33	5.1697	1.76(23)		0.7943	0.0018	
c	25 to 1720	33	5.2846	10.03(57)	2.11(33)	0.9978	0.0027	
	25 to 1720	33	99.15	-2.83(94)	-1.14(53)	0.9350	0.082	
V	25 to 1720	33	137.82	11.9(13)	4.2(9)	0.9957	0.19	
	tetragonal							
a	1760 to 1925	7	5.0975		3.21(37)	0.9285	0.0015	
c	1760 to 1925	7	5.2298		3.93(61)	0.9449	0.0017	
V	1760 to 1925	7	135.84		10.6(16)	0.9467	0.11	
Li ₂ O	25 to 1000	11	4.6238	16.3(8)	15.6(6)	0.9999	0.0008	1433
Nb ₂ O ₅	-247 to 70	14	5.4317	7.09(46)	8.6(22)	0.9943	0.0034	2160
	20 to 920	11	5.4317	8.53(62)	1.4(7)	0.9990	0.0009	
Pr ₂ O ₃	22 to 250	9	5.3927	11.5(41)	34(13)	0.9927	0.0015	dec.
PuO ₂	-269 to 100	26	5.3944	7.40(26)	11.0(15)	0.9944	0.0004	2390
	20 to 1400	76	5.3937	8.77(15)	1.89(12)	0.9994	0.0007	
ThO ₂	-273 to 95	43	5.3963	7.29(18)	12.3(9)	0.9958	0.0001	3220
	20 to 1000	197	5.3961	7.59(20)	1.84(21)	0.9964	0.0013	
	1000 to 2480	67	5.3960	8.53(91)	0.89(29)	0.9969	0.0018	
	20 to 2460	262	5.3954	8.46(9)	0.96(3)	0.9988	0.0015	
UO ₂	-242 to 90	40	5.4668	8.90(20)	13.0(10)	0.9989	0.0002	2540
	20 to 1400	153	5.4669	8.96(17)	1.27(12)	0.9985	0.0013	
	1400 to 2640	35	5.4988		4.82(6)	0.9971	0.0022	
ZrO ₂	monoclinic							
a	20 to 1200	52	5.1443	8.96(23)		0.9808	0.0036	2764
b	20 to 1200	52	5.2063	1.22(21)		0.6344	0.0031	
c	20 to 1200	50	5.3114	10.8(13)	2.4(11)	0.9870	0.0048	
	20 to 1200	52	99.26	-1.98(32)		0.9095	0.089	
V	20 to 1200	52	140.64	20.6(22)	3.8(18)	0.9890	0.21	
	tetragonal							
a	1150 to 2290	30	5.6011	8.1(26)	1.3(8)	0.9948	0.0016	
c	1150 to 2290	30	5.1924	14.26(22)		0.9968	0.0019	
V	1150 to 2290	30	67.327	20.4(36)	3.4(17)	0.9977	0.063	

Regression data are for the modified equation $y = \alpha_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2)$. N is the number of data points used, R the multiple correlation coefficient, SE the standard error of the estimate and T_m the melting point. The figures in parentheses are one standard deviation and refer to the least significant digit; a, c and V refer to the a-axis, c-axis and volume respectively, and dec. = decomposes. Melting points taken from references 120, 121 and 122.

引用文献

D. Taylor, Trans. J. Br. Ceram. Soc. 83(1984)32

材質 AmO_2 , CmO_2	物性 融点
-----------------------------	--------------

データ

TABLE I
Melting points of CmO_2 , AmO_2 , and mixtures of CmO_2 - AmO_2

Sample composition starting		Furnace atmosphere	Melting point, °C				
% CmO_2	% AmO_2		Rate of temperature increase, °C/min				
			150	30	20	3	0.3
100	100	Helium		1930			1950
		Helium	2120	2050	2060	1780	1750
		Air		2050			
70	30	Helium		2150			2200
48	52	Helium		2200			2200
30	70	Helium		2000			2050

注： CmO_2 は加熱中に分解し、 Cm_2O_3 になっているため
実測値は Cm_2O_3 の融点に対応

引用文献

R.E. McHenry, Trans. Am. Nucl. Soc. 8(1965)75

材質 Cm_2O_3	物性 融点		
データ			
Table 2. Melting points of Cm_2O_3 , Al_2O_3 and Tm_2O_3			
Oxide	Observed melting point, °C		Reported melting point, °C
	25°C/sec	2.5°C/sec	
$^{244}Cm_2O_3$ (Process)	2186*	2173*	
$^{244}Cm_2O_3$ (Vapor deposit)	2186	2180	
$^{244}Cm_2O_3$ (Oxidized metal)	2237	2253	
$^{244}Cm_2O_3$ (Process, low Pu)	2255	2277	
Al_2O_3 †	For calibration of the m.p. equipment		2049 ± 5(8)
Tm_2O_3 ‡			2053, 2036
	2385	2370	2375 ± 25(9)
* Evidence of some premelting or softening. † 99.87% Al_2O_3 , 0.06% Na_2O , 0.02% SiO_2 , 0.04% CaO . ‡ 99.8% Tm_2O_3 .			
* Cm_2O_3 融点推奨値 2265 ± 20 °C			
引用文献 P.K.Smith, J. Inorg. Nucl.Chem. 31(1969)241			

材質 Cm_2O_3 , Am_2O_3	物性 融点
-----------------------------	----------

データ

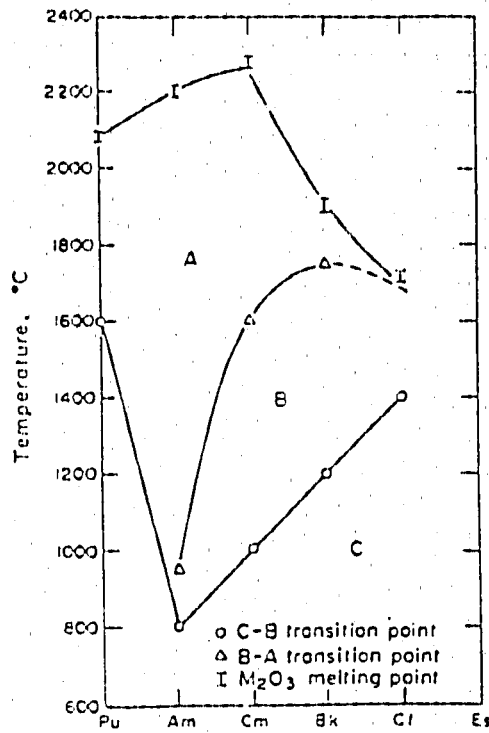


Fig. 4. Stability diagram for several of the actinide sesquioxides.

引用文献

R.L. Baybar, J. Inorg. Nucl. Chem. 35(1973)4149

熱伝導度

材質 Am - Np - U - O	物性 組成、密度					
データ						
TABLE 1 Sample characterization						
Designation	Composition	Density (g cm ⁻³) (%TD)		Origin	O/M Initial Final	
Am 12.4	Am _{0.5} U _{0.5} O _{2-x}	10.15	88	GSP	1.83	1.81
Am 13	Am _{0.5} U _{0.5} O _{2-x}	10.50	95	coprecipitation	1.83	1.92
AmNp1	Am _{0.25} Np _{0.25} U _{0.5} O _{2-x}	10.55	95.5	coprecipitation	—	—
Np 2.3.4	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.50	95	GSP	2.00	2.00
Np 2.3.5	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.60	95	ex-GSP	2.00	2.00
Np 3	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.50	95	coprecipitation	2.00	2.00
GSP, Material produced by the GSP method.						
O/M: initial, final; O/M ratio after fabrication and after measurements.						
引用文献 H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621						

材質	物性 熱容量，密度，熱伝導度 (1/3)									
データ										
TABLE 2 Measured diffusivity σ at temperature T , specific heat capacity C_p , density d and calculated thermal conductivity λ together with high-temperature mean conductivities $\bar{\lambda}$ measured between T_1 and T_2 for several uranium-neptunium-amerium oxides										
Sample Designation	T (K)	σ ($10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	C_p ($10^3 \text{ W s g K}^{-1}$)	d (g cm^{-3})	λ (W m K^{-1})	T_1 (K)	T_2 (K)	$\bar{\lambda}$ (W m K^{-1})		
Am 12A	1093	4.13	298	9.79	1.20	1840	2690	1.32		
	1163	4.03	298		1.16	1920	2690	2.1		
	1198	3.94	298		1.14	1970	2690	2		
	1323	3.95	298		1.14					
	1448	3.75	301		1.09					
	1383	3.82	299		1.11					
	1583	3.79	306		1.12					
	1498	3.73	302		1.09					
	1713	3.52	312		1.07					
	1113	4.64	298		9.70	1.34				
	1313	4.05	298	1.17						
	1193	4.55	298	1.31						
	1273	4.22	298	1.22						
	1323	4.09	298	1.18						
	1383	4.12	299	1.20						
	1523	3.57	303	1.05						
	1623	3.45	307	1.03						
	Am 13	1133	3.92	298		10.50	1.23	1590	2690	1.87
		1213	3.69	298			1.15			
		1313	3.81	298	1.19					
1398		3.66	300	1.15						
1493		3.65	302	1.13						
1593		3.69	306	1.18						
1693		2.75	311	1.22						
1498		4.17	302	1.33						
1593		3.88	306	1.25						
1673		3.77	310	1.23						
1643	3.89	308	1.26							
引用文献										
H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621										

材質 Am - Np - U - O			物性 熱容量, 密度, 熱伝導度 (2/3)					
データ								
	1513	3.82	303		1.22			
	1413	4.19	300		1.32			
	1273	4.32	299		1.36			
	1303	4.32	298		1.36			
	1203	4.58	298		1.43			
	1198	4.75	298		1.48			
	1153	4.62	298		1.45			
	1073	4.93	299		1.55			
AmNp1	1103	5.20	350	10.10	1.84	1560	2770	1.7
	1208	4.93	348		1.73			
	1448	4.49	349		1.58			
	1568	4.41	353		1.57			
	1608	4.35	357		1.57			
	1698	4.23	358		1.53			
	1832	4.04	366		1.50			
	1673	4.32	357		1.56			
	1623	4.40	355		1.58			
	1573	4.55	353		1.62			
	1438	4.90	349		1.69			
	1442	4.65	349		1.64			
	1373	4.84	348		1.70			
	1313	4.98	348		1.75			
	1203	5.31	348		1.87			
	1048	5.37	351		1.90			
	1115	3.53	349		1.92			
	1193	5.23	348		1.84			
Np234	1763	5.30	373	10.50	2.08	1640	2870	1.74
	1623	5.96	365		2.28			
	1513	6.37	360		2.41			
	1413	6.70	357		2.51			
	1333	7.31	356		2.74			
	1218	8.32	356		3.11			
	1118	9.24	357		3.46			
	1098	9.28	358		3.49			
引用文献								
H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621								

材質

Am - Np - U - O

物性

熱容、密度、熱伝導度 (3/3)

子一タ

TABLE 2 (continued)

Sample Designation	T (K)	a ($10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	C_p (10^3 W s gK^{-1})	d ($\mu \text{ cm}^{-1}$)	λ (W mK^{-1})	T_1 (K)	T_2 (K)	λ (W mK^{-1})
Np 2.3.5	1123	10.27	357	10.45	3.83	--	--	--
	1193	9.41	356		3.50			
	1233	9.06	356		3.37			
	1333	9.02	356		3.36			
	1413	8.53	357		3.18			
	1473	8.46	359		3.17			
	1573	7.96	363		3.07			
	1613	7.70	364		2.93			
	1698	6.98	360		2.69			
	Np 3	1423	7.94		358			
1553		7.19	362	2.73				
1773		6.79	374	2.67				
1553		7.66	362	2.91				
1378		8.62	357	3.23				
1243		9.33	356	3.40				
1248		9.50	356	3.55				
1133		10.66	357	3.90				
1563		5.96	362	2.27				
1773		5.47	368	2.11				
1723		5.83	365	2.24				
1623		6.36	361	2.41				
1443		6.85	358	2.58				

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質	物性
Am - Np - U - O	熱伝導度

データ

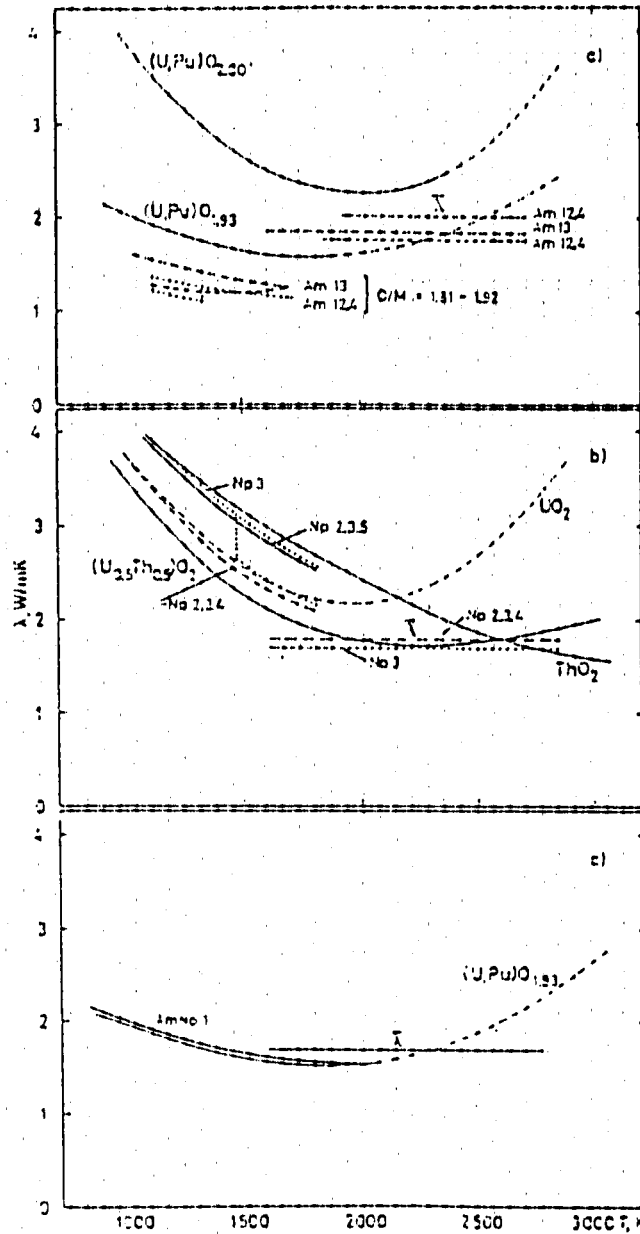


Fig. 1. Smoothed thermal conductivities of (a) (U, Am) oxides compared with conductivities of stoichiometric (U, Pu) oxides, (b) (U, Np) oxides compared with ThO_2 , (c) (U, Np, Am) oxide compared with substoichiometric (U, Pu) oxide.

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質 Am - Np - U - O	物性 熱伝導度 (推奨値)
---------------------------	----------------------

データ

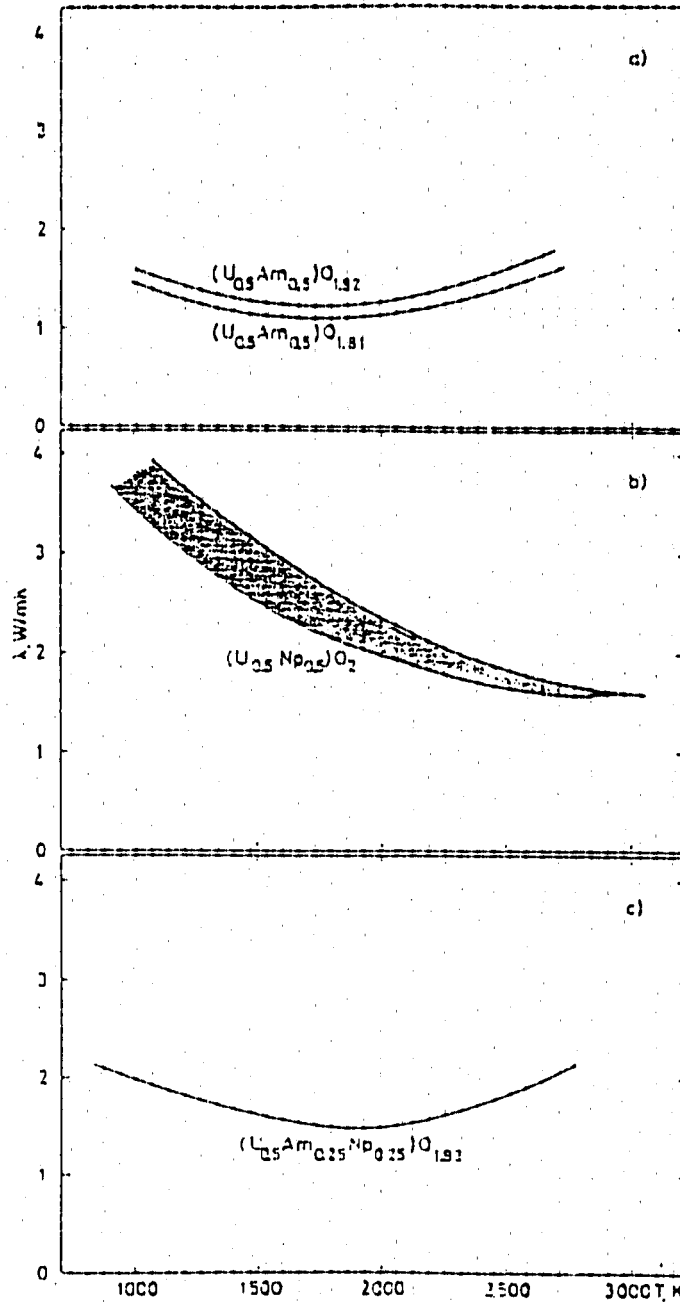


Fig. 2. Recommended data for the thermal conductivities (a) (U, Am) oxide, (b) (U, Np) oxide, (c) (U, Am, Np) oxide.

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質 (U, Pu)O ₂	物性 熱伝導度																																			
<p>子一タ</p> <p>Table 10.3 Values of A and B Determined from a Least-Squares Fit of (U,Pu)O₂ Thermal Conductivity Data to the Relationship: $1/k_s = A + BT^{*†}$</p> <table border="1" data-bbox="502 712 1241 1086"> <thead> <tr> <th rowspan="2">% Pu</th> <th rowspan="2">A, cm^o·K/W</th> <th colspan="2">B, cm/W</th> </tr> <tr> <th>Exp.</th> <th>Theory</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>3.08</td> <td>0.0229</td> <td>(0.0229)‡</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3.04</td> <td>0.0239</td> <td>0.0232</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>2.20</td> <td>0.0271</td> <td>0.0235</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>3.09</td> <td>0.0261</td> <td>0.0240</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>3.13</td> <td>0.0260</td> <td>0.0242</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>5.30</td> <td>0.0253</td> <td>0.0245</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>0.46</td> <td>0.0283</td> <td>0.0281</td> </tr> </tbody> </table> <p>*From R. L. Gibby, <i>J. Nucl. Mater.</i>, 38: 163 (1971).</p> <p>†Specimens 96 to 98% of theoretical density or corrected to this value.</p> <p>‡Theory matched to experiment for pure UO₂.</p>			% Pu	A, cm ^o ·K/W	B, cm/W		Exp.	Theory	0	3.08	0.0229	(0.0229)‡	5	3.04	0.0239	0.0232	12	2.20	0.0271	0.0235	20	3.09	0.0261	0.0240	25	3.13	0.0260	0.0242	30	5.30	0.0253	0.0245	100	0.46	0.0283	0.0281
% Pu	A, cm ^o ·K/W	B, cm/W																																		
		Exp.	Theory																																	
0	3.08	0.0229	(0.0229)‡																																	
5	3.04	0.0239	0.0232																																	
12	2.20	0.0271	0.0235																																	
20	3.09	0.0261	0.0240																																	
25	3.13	0.0260	0.0242																																	
30	5.30	0.0253	0.0245																																	
100	0.46	0.0283	0.0281																																	
<p>引用文献</p> <p>D.R.Olandar, "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements", Technical Information Center Energy Research and Development Administration (1976)</p>																																				

材質

 $(U, Pu)O_2$

物性

熱伝導度

データ

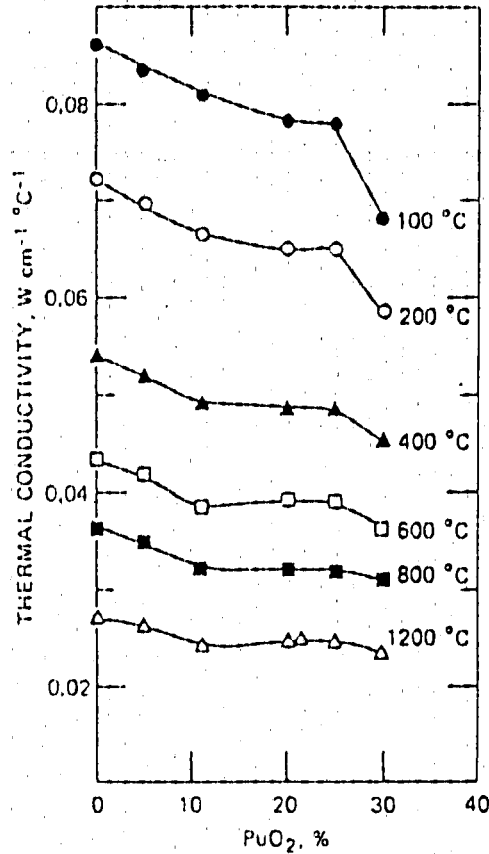


Fig. 10.14 Thermal conductivity of $(U,Pu)O_2$ solid solutions as a function of PuO_2 content. [From R. L. Gibby, *J. Nucl. Mater.*, 38: 163 (1971).]

引用文献

D.R.Olandar, "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements", Technical Information Center Energy Research and Development Administration (1976)

材質 Cm_2O_3	物性 熱伝導度，熱拡散速度 他
-----------------	--------------------

データ

TABLE 1
Thermal diffusivity and calculated thermal
conductivity of $^{244}Cm_2O_3$

T (°C)	C_p (cal/g°C)	α (cm ² /sec)	ρ (g/cm ³)	λ (watt/cm°C)
100	0.635	0.00516	11.05	0.0151
200	0.0680	0.00505	11.02	0.0158
300	0.0708	0.00495	11.00	0.0161
400	0.0730	0.00485	10.97	0.0162
500	0.0747	0.00476	10.94	0.0162
600	0.0762	0.00467	10.91	0.0162
700	0.0776	0.00458	10.88	0.0161
800	0.0789	0.00450	10.85	0.0161
900	0.0801	0.00442	10.81	0.0160
1000	0.0811	0.00434	10.77	0.0159
1100	0.0819	0.00427	10.73	0.0157
1200	0.0827	0.00419	10.68	0.0155
1300	0.0834	0.00412	10.62	0.0153
1400	0.0840	0.00406	10.56	0.0150

注： C_p は Pu_2O_3 からの推定， ρ は熱膨張からの推定

引用文献

R.L.Gibby et al, J.Nucl. Mat. 34(1970)299

材質 Cm_2O_3	物性 熱伝導度
-----------------	------------

データ

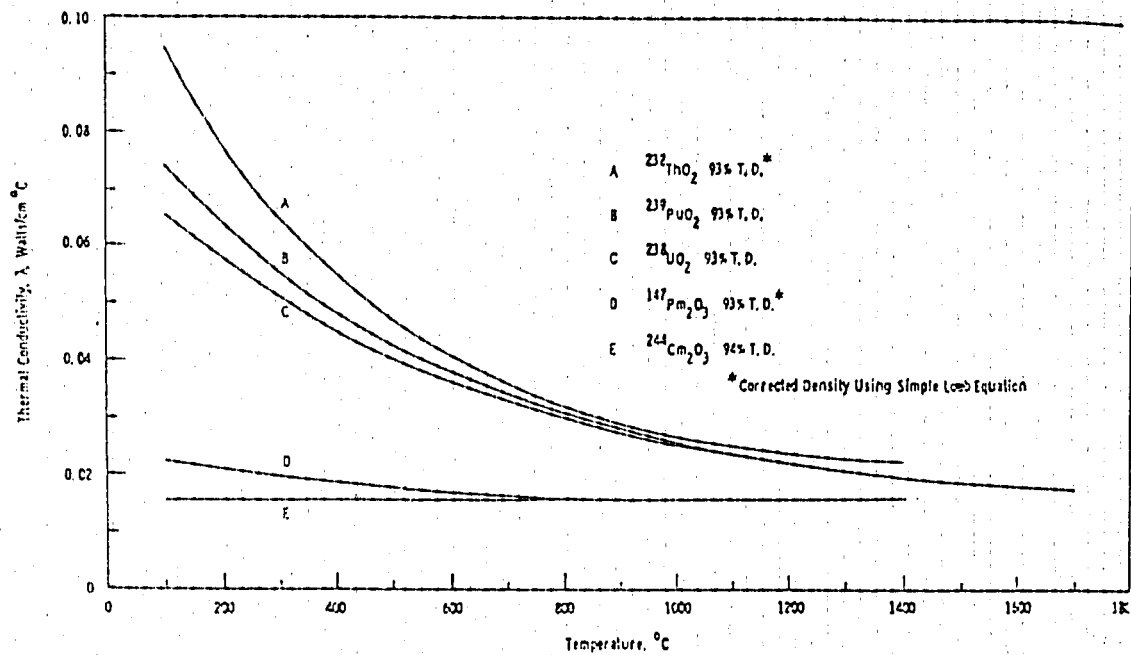


Fig. 4. The calculated thermal conductivity of $^{244}\text{Cm}_2\text{O}_3$ as a function of temperature. Data for other actinide and lanthanide oxides shown for comparison.

引用文献

R.L.Gibby et al, J.Nucl. Mat. 34(1970)299

材質 Cm_2O_3	物性 サンプル諸元, 不純物組成																																																							
データ <p style="text-align: center;">Table 1. Description of Thermal Conductivity Samples</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>Power, W</th> <th>Height, in.</th> <th>Weight, g</th> <th>Density, g/cm³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>33.85</td> <td>0.115</td> <td>15.00</td> <td>10.14</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>51.15</td> <td>0.173</td> <td>22.00</td> <td>10.05</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>51.24</td> <td>0.176</td> <td>22.30</td> <td>9.99</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Table 2. Analyses of $^{244}\text{Cm}_2\text{O}_3$ Samples</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Element</th> <th colspan="2">Impurity, wt %</th> </tr> <tr> <th>Batch 1</th> <th>Batch 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>^{243}Am</td> <td>0.43</td> <td>0.90</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>0.75</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>0.002</td> <td>0.003</td> </tr> <tr> <td>Mg</td> <td>0.001</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>Na</td> <td>0.023</td> <td>0.050</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>0.028</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.04</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.02</td> <td>0.02</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.005</td> <td>0.0075</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td><0.13</td> <td><0.11</td> </tr> </tbody> </table>		Sample No.	Power, W	Height, in.	Weight, g	Density, g/cm ³	1	33.85	0.115	15.00	10.14	2	51.15	0.173	22.00	10.05	3	51.24	0.176	22.30	9.99	Element	Impurity, wt %		Batch 1	Batch 2	^{243}Am	0.43	0.90	Zr	0.75	0.45	Ca	0.002	0.003	Mg	0.001	0.005	Na	0.023	0.050	K	0.028	0.005	Fe	0.04	0.06	Cr	0.02	0.02	Ni	0.005	0.0075	Other	<0.13	<0.11
Sample No.	Power, W	Height, in.	Weight, g	Density, g/cm ³																																																				
1	33.85	0.115	15.00	10.14																																																				
2	51.15	0.173	22.00	10.05																																																				
3	51.24	0.176	22.30	9.99																																																				
Element	Impurity, wt %																																																							
	Batch 1	Batch 2																																																						
^{243}Am	0.43	0.90																																																						
Zr	0.75	0.45																																																						
Ca	0.002	0.003																																																						
Mg	0.001	0.005																																																						
Na	0.023	0.050																																																						
K	0.028	0.005																																																						
Fe	0.04	0.06																																																						
Cr	0.02	0.02																																																						
Ni	0.005	0.0075																																																						
Other	<0.13	<0.11																																																						
引用文献 <p style="text-align: center;">E.E.Ketchen, ORNL-TM-2915 (1970)</p>																																																								

材質 Cm ₂ O ₃	物性 熱伝導度	
データ		
Table 3. Thermal Conductivity of ²⁴⁴ Cm ₂ O ₃ at Theoretical Density		
Pellet No.	Temperature, °C	Thermal Conductivity, W/cm·°C
1	536	0.0198
1	659	0.0184
1	824	0.0173
1	941	0.0174
1	1007	0.0172
2	814	0.0193
2	832	0.0184
2	861	0.0178
2	985	0.0181
3	779	0.0185
3	849	0.0179
3	869	0.0171
3	887	0.0166
3	961	0.0162
3	1030	0.0166
3	1095	0.0164
引用文献 E.E.Ketchen , ORNL-TM-2915 (1970)		

材質 Cm_2O_3	物性 熱伝導度
-----------------	------------

データ

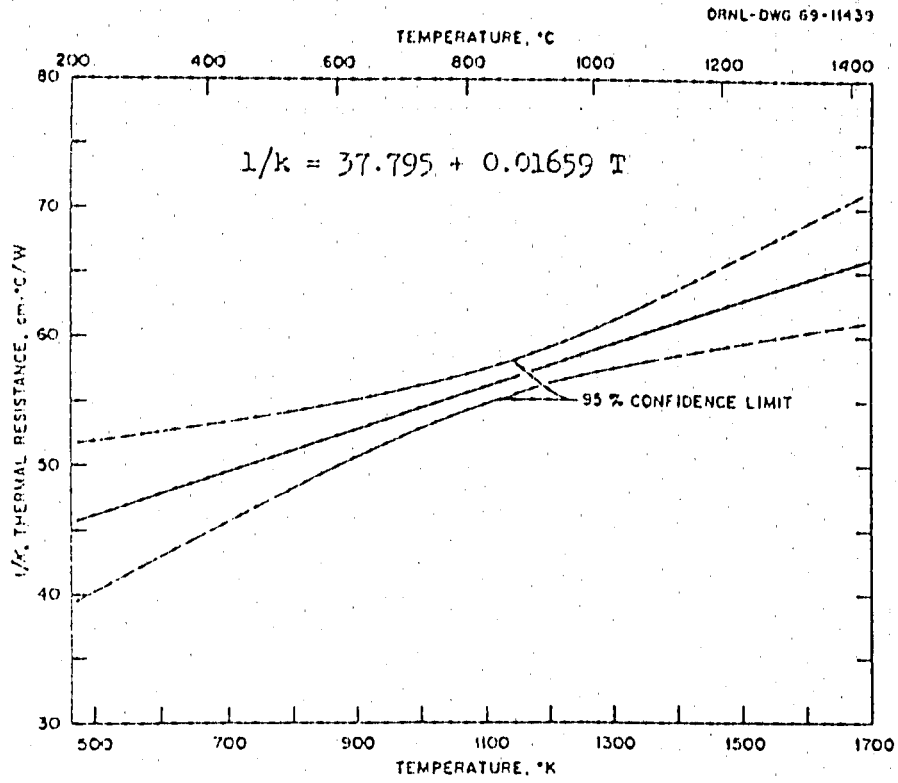


Fig. 3. Correlation of Thermal Conductivity Data for 100% Dense $^{244}Cm_2O_3$.

引用文献

E.E.Ketchen , ORNL-TM-2915 (1970)

材質 Cm_2O_3	物性 熱伝導度
---------------------	----------------

データ

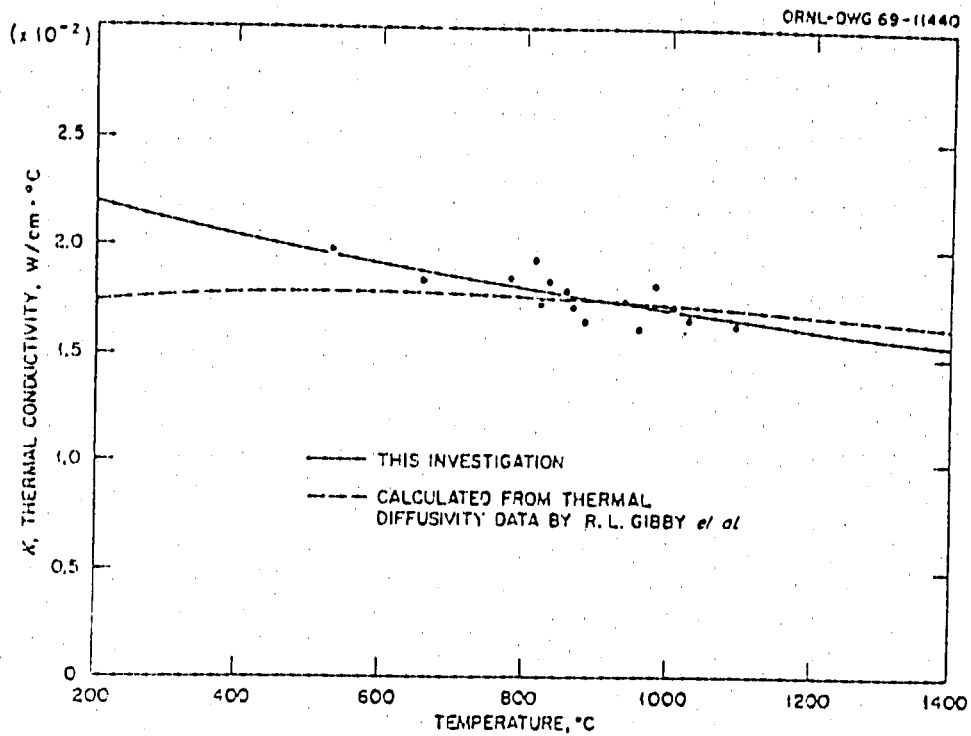


Fig. 4. Comparison of Thermal Conductivity Work for Cm_2O_3 .

引用文献

E.E.Ketchen , ORNL-TM-2915 (1970)

材質 Cm_2O_3, PuO_2	物性 熱伝導度
------------------------	------------

データ

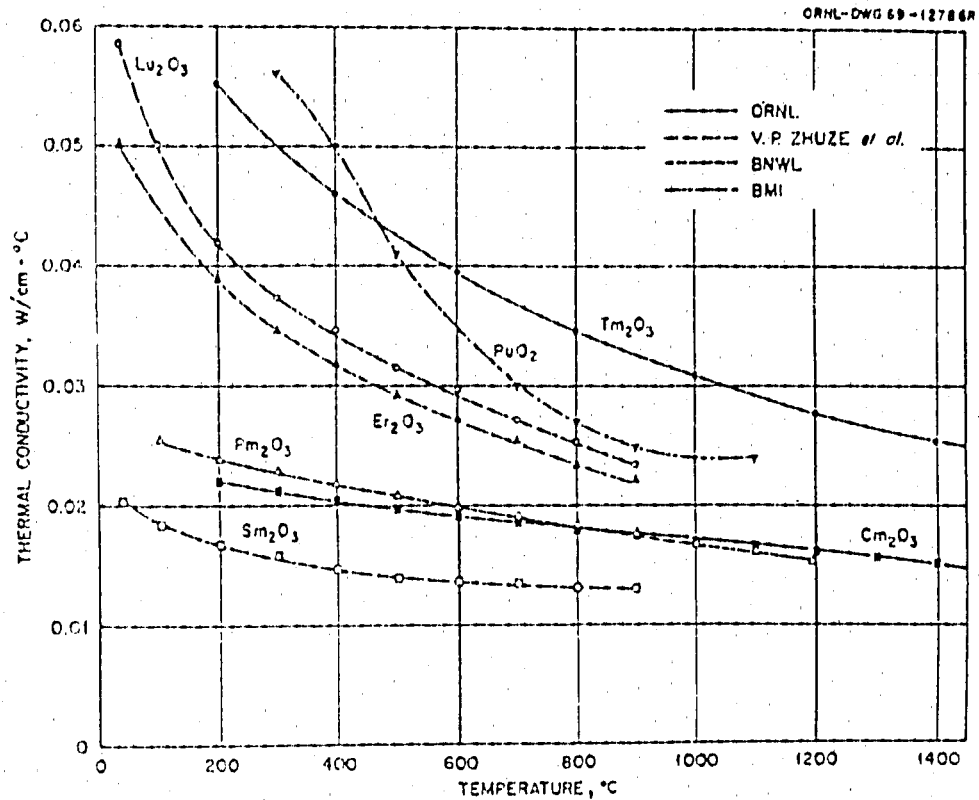


Fig. 5. Plot of Thermal Conductivity as a Function of Temperature for Several Lanthanide and Actinide Oxides.

引用文献

E.E.Ketchen , ORNL-TM-2915 (1970)

材質 Cm_2O_3, PuO_2	物性 熱伝導度
------------------------	------------

データ

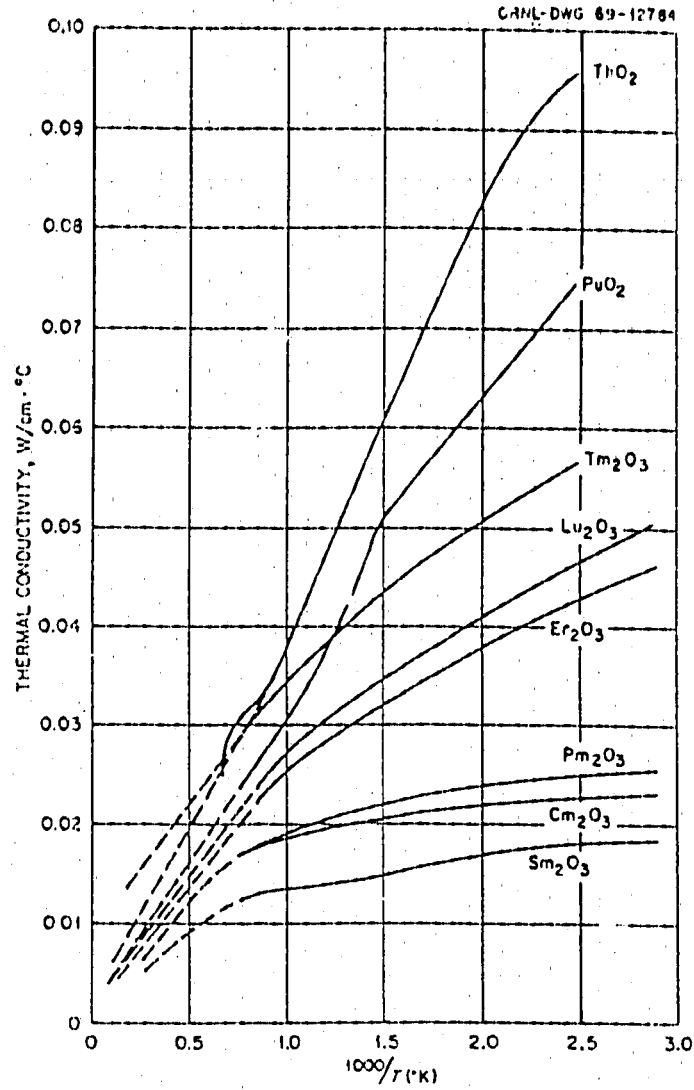


Fig. 6. Correlation of Thermal Conductivity as a Function of $1000/T(^{\circ}K)$ for Several Lanthanide and Actinide Oxides.

引用文献

E.E.Ketchen, ORNL-TM-2915 (1970)

材質 PuO_2, AmO_2	物性 熱伝導度
--------------------------	----------------

データ

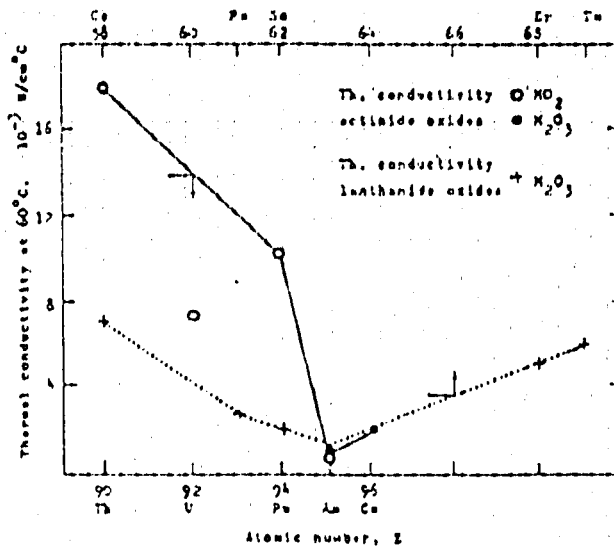


Fig.1 The thermal conductivity at 60°C of some actinide and lanthanide oxides as a function of atomic number

The results obtained with freshly annealed samples (in W/cm°C) were $1.0 \cdot 10^{-1}$ for PuO_2 , $6.9 \cdot 10^{-3}$ for AmO_2 and $8.2 \cdot 10^{-3}$ for Am_2O_3 .

引用文献

H.E.Schmidt, AERE-R--7961

材質 PuO ₂ , AmO ₂	物性 熱伝導度
---	------------

データ

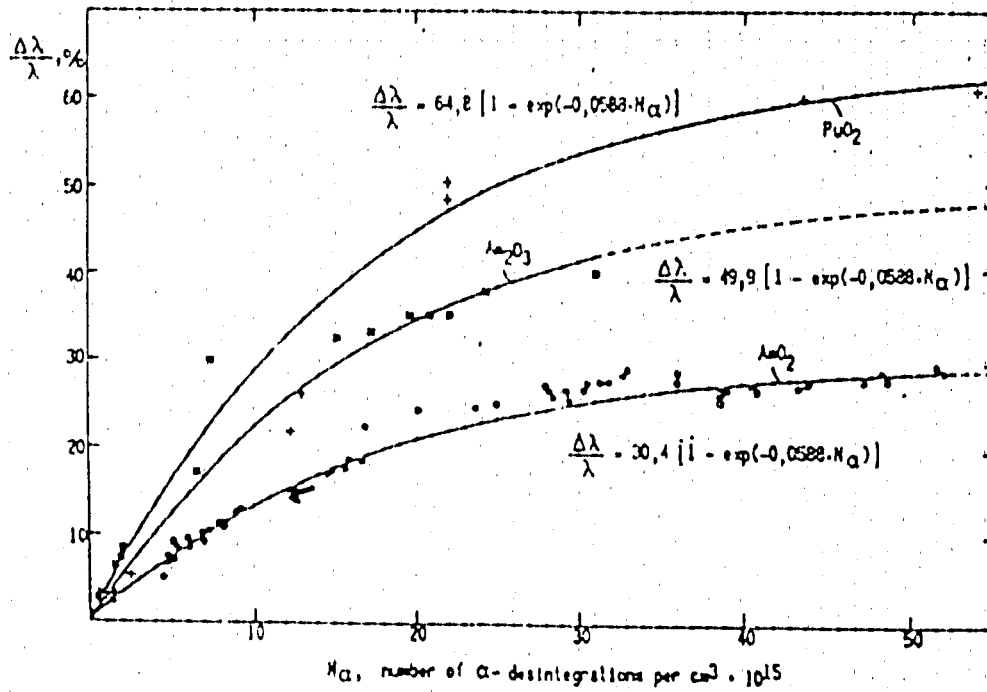


Fig. 2 Self irradiation induced relative change in thermal conductivity at 60°C for PuO₂, AmO₂ and Am₂O₃ as a function of irradiation dose

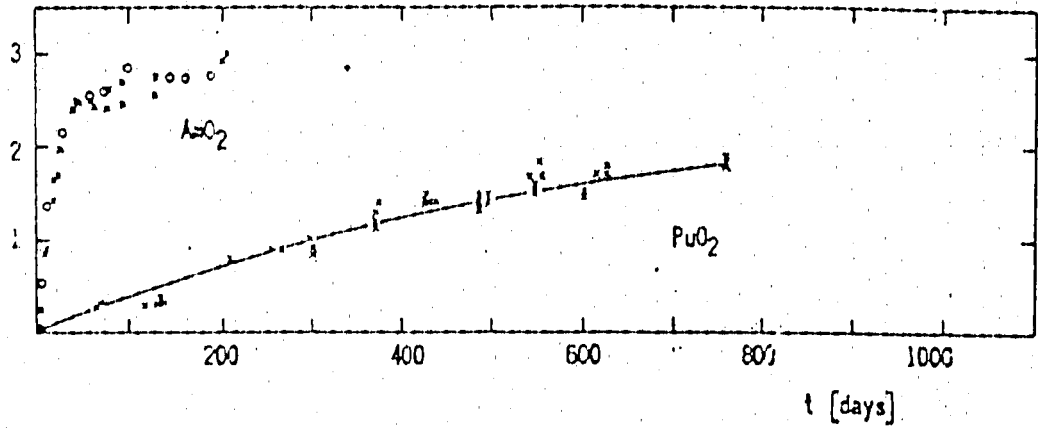
引用文献

H.E.Schmidt, AERE-R--7961

<p>材質</p> <p>PuO₂, AmO₂</p>	<p>物性</p> <p>格子定数, 熱伝導度</p>
---	-----------------------------

データ

$$\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^3$$



$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 10^2$$

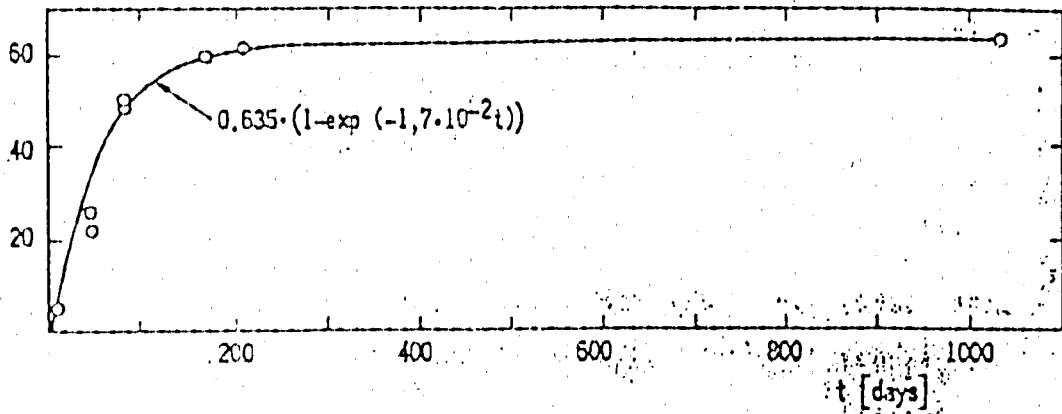


Fig. 3 Relative increase in lattice parameter of AmO₂ and PuO₂ (A) and in room temperature thermal conductivity of PuO₂ (B) due to self irradiation as a function of storage times.

引用文献

H.E.Schmidt, AERE-R--7961

材質 $U_{1-y}Pu_yO_{2-x}$	物性 熱伝導度
<p>データ</p> <p>Table 1 Thermal conductivity λ ($W\ cm^{-1}\ K^{-1}$) of $(U_{1-y}Pu_y)O_{2-x}$ [13]</p> <hr/> <p><u>Serizawa (1970)</u> $\lambda = (5.075 + 0.0158T)^{-1}$ $1000 < T < 2000\ K$ $0.1 < y < 0.2$</p> <p><u>Schmidt (1969)</u> $\lambda = (0.5 + 440x + 0.0267T)^{-1} + 7.25 \times 10^{-13} - 3.64 \times 10^{-12}T^3$ $T < 1600\ K$</p> <p><u>Schmidt-Caligara (1970)</u> $\lambda = (2.7 + 350x + 0.0267T)^{-1} + 7.25 \times 10^{-13} - 3.64 \times 10^{-12}T^3$</p> <p><u>Gibby (1971)</u> $\lambda = [(4.4 \times 10^{-9} a_0^2 T_m^{3/2})T + (5 \times 10^{-16} [\gamma(1-y)]) /$ $[0.94y + 0.97(1-y)]^2 + R_0]^{-1}$, where a_0 = lattice parameter (\AA), T_m = melting point (K), R_0 = thermal resistance point defect</p> <p><u>Weilbacher (1972)</u> $\lambda = \frac{1}{A + BT} + CT_e^{-E_s/kT} - D_e^{-E_i/kT}$, where $A, B, C, E_s, D = f(x, y)$</p> <p><u>Martin-Washington (1982)</u> $\lambda = (0.037 + 3.33x + 2.37 \times 10^{-4}T)^{-1} + 78.9 \times 10^{-12}T^3$, $0.12 < y < 0.30$</p> <p><u>Matpro-Hagman (1980)</u> P = fractional porosity $10^{-2}\lambda = [(1-P)\{1 + (6.5 - 0.00459T')P\}^{-1}]$ $(C_e(A + BT^4)^{-1}(1 + 3.4y)^{-1}) + 5.2997 \times 10^3 T$ $\exp(-1335S/T)(1 + 0.169(1335S/T) + 2)^2$ $C_e = 296.7(A^2 T^{-2}(\exp A/T - 1)^{-2} \exp A/T(1-y))$ $+ 237.4(B^2 T^{-2}(\exp B/T - 1)^{-2} \exp B/Ty)$ $A = 535.285; B = 571$</p>	
<p>引用文献</p> <p>M. Beauvy et al, J. Nucl. Mat. 166(1989)83</p>	

材質 $U_{0.8}Pu_{0.2}O_{1.98}$	物性 熱伝導度
---------------------------------	------------

データ

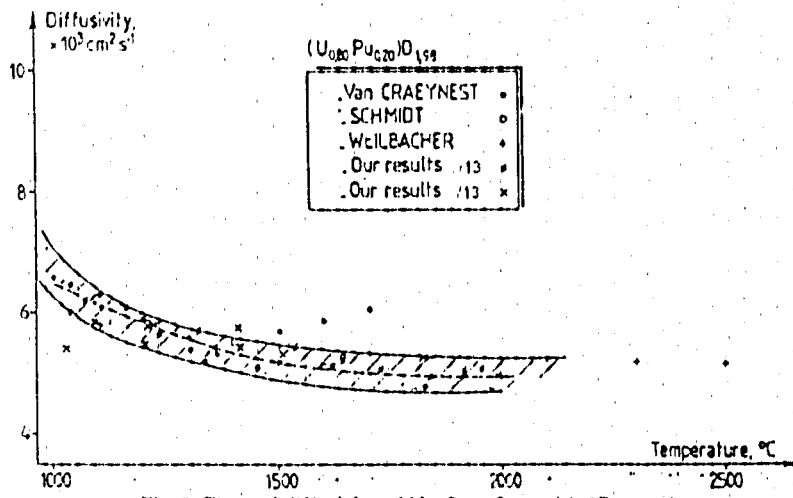


Fig. 3. Thermal diffusivity of $U_{0.8}Pu_{0.2}O_{1.98}$ with 5% porosity.

引用文献

M.Beauvy et al, J. Nucl.Mat. 166(1989)83

熱膨張

材質	物性
MO ₂	熱膨張率、融点

データ

Table 1—Regression Data for Dioxides with the Fluorite and Antifluorite Structures

Oxide	Temperature range (°C)	N	\bar{x}	$10^3 \bar{x}$	$10^3 \bar{x}_1$	R	SE	T _m °C	
AmO ₂	25 to 955	10	5-3735	7-77(91)	2-37(93)	0-9882	0-0013	dec.	
BaO ₂	25 to 955	9	5-3296	8-33(76)	2-37(25)	0-9999	0-0001	dec.	
CeO ₂	-173 to 26	20	5-4095	10-19(5)	14-8(4)	0-9999	0-0000	2341	
	20 to 1310	18	5-4101	9-73(23)	7-23(19)	0-9989	0-0011		
CaO ₂	25 to 340	13	5-3376	9-88(43)		0-9887	0-0010	dec.	
HfO ₂	monoclinic								
	a 25 to 1720	35	5-1101	5-91(65)	1-86(38)	0-9936	0-0029	2844	
	b 25 to 1720	35	5-1697	1-76(23)		0-7945	0-0025		
	c 25 to 1720	35	5-2846	10-03(37)	2-11(33)	0-9978	0-0027		
	V 25 to 1720	35	99-15	-2-83(94)	-1-14(35)	0-9350	0-082		
	V 25 to 1720	35	137-82	18-9(15)	4-2(8)	0-9957	0-19		
	tetragonal								
	a 1760 to 1925	7	5-0975		3-21(57)	0-9288	0-0015		
	c 1760 to 1925	7	5-2298		3-93(61)	0-9419	0-0017		
	V 1760 to 1925	7	135-84		10-6(16)	0-9467	0-11		
LiO ₂	25 to 1000	11	4-6258	16-5(8)	15-6(6)	0-9999	0-0008	1438	
NbO ₂	-247 to 70	11	5-4317	7-09(46)	8-6(22)	0-9945	0-0034	2560	
	20 to 920	11	5-4317	8-55(62)	1-4(7)	0-9990	0-0009		
PrO ₂	25 to 230	9	5-3927	11-5(41)	3-4(15)	0-9927	0-0013	dec.	
PuO ₂	-269 to 100	26	5-3944	7-40(26)	11-0(15)	0-9948	0-0004	2390	
	20 to 1400	76	5-3927	8-77(15)	1-89(12)	0-9994	0-0007		
ThO ₂	-273 to 95	45	5-3963	7-29(18)	12-5(9)	0-9958	0-0003	3220	
	20 to 1000	197	5-3961	7-39(20)	1-84(21)	0-9964	0-0013		
	1000 to 2430	67	5-3960	8-53(91)	0-89(29)	0-9969	0-0018		
	20 to 1460	262	5-3934	8-46(9)	0-96(3)	0-9988	0-0013		
UO ₂	-243 to 90	40	5-4668	8-90(20)	13-0(10)	0-9989	0-0002	2840	
	20 to 1400	153	5-4669	8-96(17)	1-27(12)	0-9955	0-0013		
	1400 to 2640	35	5-4988		4-82(6)	0-9971	0-0022		
ZrO ₂	monoclinic								
	a 20 to 1200	52	5-1443	8-96(25)		0-9808	0-0036	2764	
	b 20 to 1200	52	5-2065	1-22(21)		0-6744	0-0011		
	c 20 to 1200	50	5-3114	10-3(13)	2-4(11)	0-9870	0-0048		
	V 20 to 1200	52	99-26	-4-98(32)		0-9095	0-089		
	V 20 to 1200	52	140-44	20-6(22)	3-8(18)	0-9890	0-21		
	tetragonal								
	a 1150 to 2290	30	5-6011	8-1(26)	1-5(8)	0-9948	0-0016		
	c 1150 to 2290	30	5-1924	14-26(22)		0-9964	0-0019		
	V 1150 to 2290	30	67-327	30-4(56)	3-4(17)	0-9977	0-063		

Regression data are for the modified equation $y = A(1 + \alpha T + \beta T^2)$. N is the number of data points used, R the multiple correlation coefficient, SE the standard error of the estimate and T_m the melting point. The figures in parentheses are one standard deviation and refer to the least significant digits; a, c and V refer to the a-axis, c-axis and volume respectively, and dec. decomposes. Melting points taken from references 120, 121 and 122.

引用文献

D. Taylor, Trans. J. Br. Ceram. Soc. 83(1984)32

材質

M O ₂

物性

熱膨張率

データ

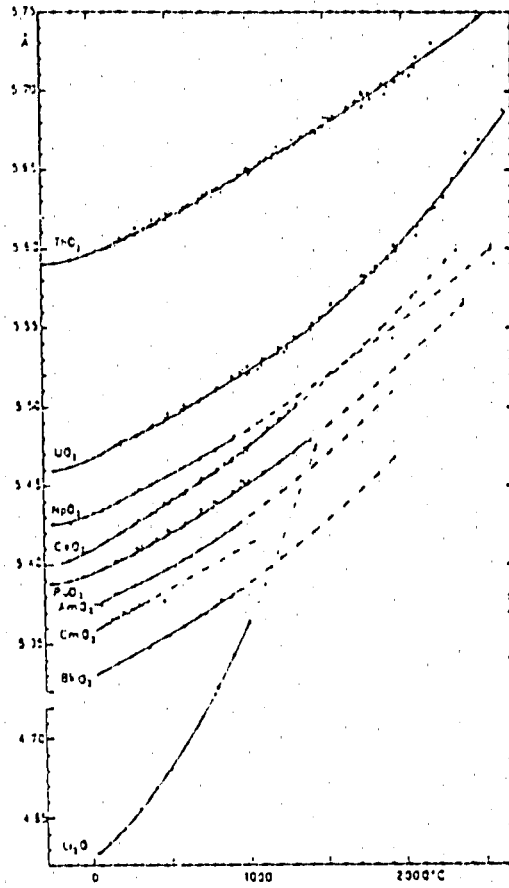


FIGURE 1—Thermal expansion curves for dioxides with the fluorite and antiferrofluorite structures.

引用文献

D.Tailor, Trans.J.Br.Ceram.Soc. 83(1984)32

材質	物性
MO ₂	熱膨張率

データ

Table 2--Percentage Expansions Relative to 25°C for Dioxides with the Fluorite and Antifluorite Structures
(The figures in bold are within the range of the observed temperatures, those in normal type are outside the range)

T/C	AmO ₂	BaO ₂	CrO ₂	CmO ₂	Li ₂ O	NpO ₂	PbO ₂	PuO ₂	TiO ₂	UO ₂
-200			-0.18			-0.12	-0.25	-0.12	-0.12	-0.15
-100			-0.17			-0.08	-0.14	-0.08	-0.08	-0.10
0	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
100	0.05	0.06	0.04	0.08	0.14	0.07	0.05	0.07	0.04	0.07
200	0.15	0.16	0.18	0.18	0.35	0.16	0.15	0.16	0.14	0.16
300	0.24	0.25	0.29	0.24	0.59	0.25	0.24	0.26	0.23	0.26
400	0.34	0.35	0.40	0.38	0.87	0.34	0.44	0.36	0.31	0.36
500	0.44	0.46	0.52		1.17	0.44	0.63	0.46	0.41	0.46
600	0.55	0.57	0.64		1.51	0.54	0.85	0.57	0.50	0.56
700	0.64	0.69	0.77		1.88	0.64	1.10	0.64	0.60	0.67
800	0.74	0.81	0.90		2.28	0.75	1.34	0.80	0.71	0.78
900	0.80	0.94	1.03		2.71	0.86	1.69	0.92	0.81	0.89
1000	1.03	1.07	1.17		3.17	0.97	2.04	1.04	0.92	1.00
1100	1.17	1.21	1.32		3.66	1.09	2.41	1.17	1.02	1.13
1200	1.31	1.35	1.46		4.19	1.20		1.30	1.13	1.24
1300	1.46	1.50	1.62		4.74	1.32		1.44	1.24	1.36
1400	1.61	1.65	1.78		5.33	1.45		1.58	1.35	1.49
1500	1.77	1.81	1.94			1.57		1.72	1.46	1.65
1750			2.36			1.90		2.09	1.74	2.05
2000			2.81			2.24		2.49	2.04	2.50
2250			3.29			2.60		2.91	2.35	3.01
2500						2.98			2.66	3.59

引用文献

D.Taylor, Trans.J.Br.Ceram.Soc. 83(1984)32

材質 $M O_2$	物性 熱膨張率
-------------------	----------------

データ

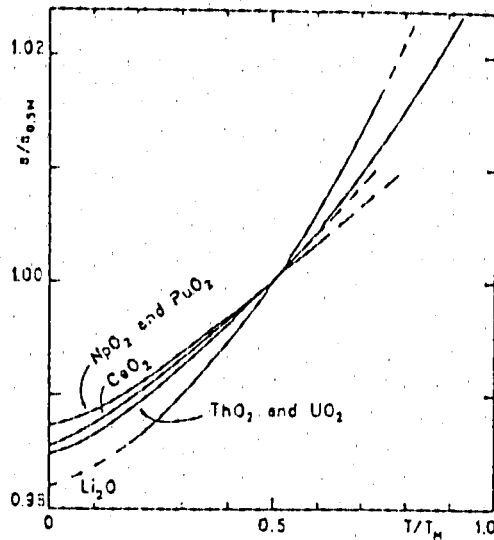


FIGURE 3--Reduced thermal expansion curves for cubic fluorite and antiferite structures (above) and

引用文献

D.Tailor, Trans.J.Br.Ceram.Soc. 83(1984)32

材質 M O ₂	物性 熱膨張率							
データ								
Table 4—Regression Data for the Composite Reduced Data Curves of Figure 3								
Oxide	T/T _m	N	a	10 ³ b	10 ³ c	R	SE	a ₁₁ (Å)
CeO ₂	< 0.2	16	0.98555	13.9(23)	56.0(97)	0.9946	0.00013	5.4774
	> 0.2	69	0.98620	17.3(20)	20.7(26)	0.9975	0.00024	
HfO ₂ , ZrO ₂								
	a > 0.09	87	0.98735	20.1(21)	11.0(32)	0.9874	0.0007	
	b > 0.09	87	0.99779	4.50(49)		0.7082	0.0007	
	c > 0.09	87	0.98100	26.3(29)	22.9(43)	0.9896	0.0009	
	V > 0.09	87	0.96461	52.2(44)	37.2(66)	0.9931	0.0014	
Li ₂ O	> 0.15	11	0.98200	13.5(17)	44.9(19)	0.9999	0.00018	5.6948
NpO ₂ , PuO ₂	< 0.2	52	0.98728	8.0(24)	57(12)	0.9761	0.00025	NpO ₂ : 5.4962
	> 0.2	70	0.98598	23.5(20)	9.4(26)	0.9966	0.00026	PuO ₂ : 5.4552
ThO ₂ , UO ₂	< 0.15	131	0.98495	5.5(26)	100(17)	0.9377	0.00032	ThO ₂ : 5.6771
	> 0.15	371	0.98524	16.4(8)	26.5(9)	0.9964	0.00058	UO ₂ : 5.5412
Regression data are for the equation $y = a + b(T/T_m) + c(T/T_m)^2$ where y is the reduced cell parameter a/a ₁₁ . *Cell parameters at one half the melting point for ZrO ₂ are: a = 5.2017, b = 5.2144, c = 5.4020 Å and V = 144.87 Å ³ and for HfO ₂ : a = 5.1647, b = 5.1814, c = 5.3712 Å and V = 142.12 Å ³ .								
引用文献 D.Taylor, Trans.J.Br.Ceram.Soc. 83(1984)32								

材質

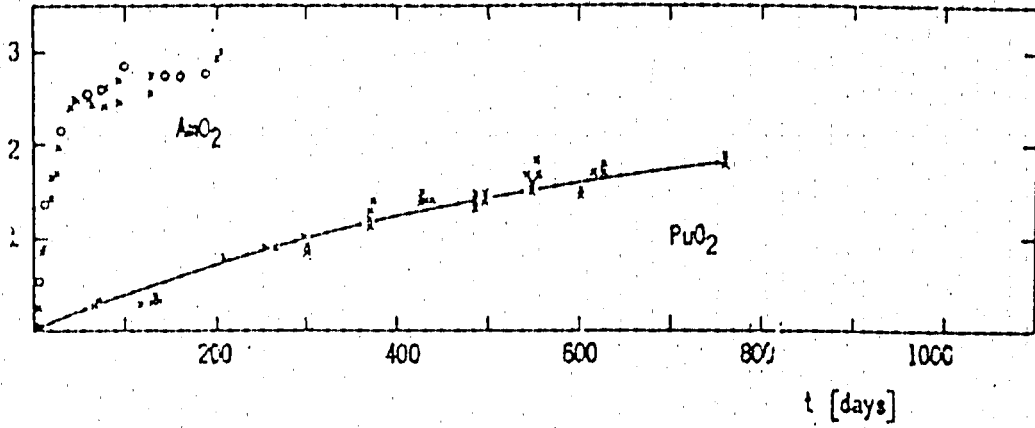
$\text{PuO}_2, \text{AmO}_2$

物性

格子定数, 熱伝導度

データ

$\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^3$



$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 10^2$

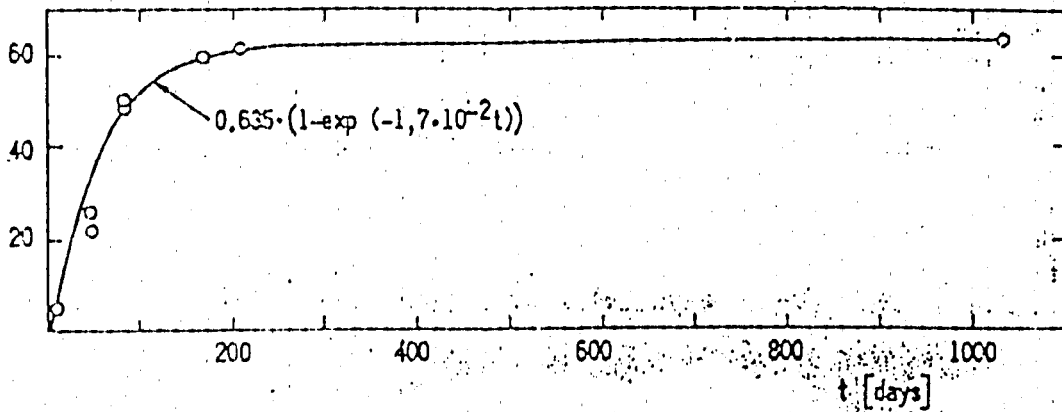
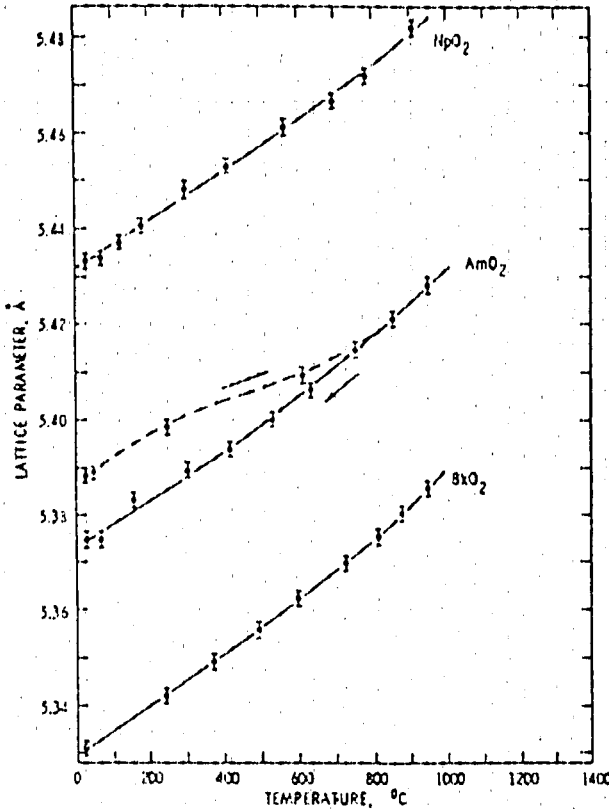


Fig. 3 Relative increase in lattice parameter of AmO_2 and PuO_2 (A) and in room-temperature thermal conductivity of PuO_2 (B) due to self-irradiation as a function of storage time.

引用文献

H.E.Schmidt, AERE-R--7961

材質 $\text{NpO}_2, \text{AmO}_2$	物性 熱膨張率 (格子定数)
<p data-bbox="311 414 406 448">データ</p>  <p data-bbox="766 1473 885 1505">FIG. 1.</p> <p data-bbox="462 1518 1308 1601">Thermal expansion of some actinide dioxides plotted as lattice constant versus temperature.</p>	
<p data-bbox="295 1787 422 1821">引用文献</p> <p data-bbox="406 1865 1268 1904">J.A.Fahey, Inorg.Nucl.Chem.Lett. 10(1974)459</p>	

材質

MO₂

物性

熱膨張率 (格子定数)

データ

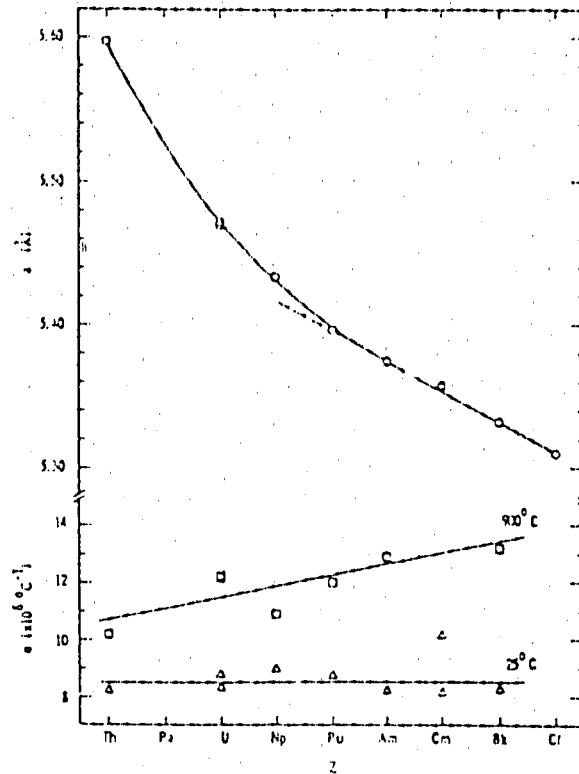


FIG. 2

Room temperature lattice parameters and expansion coefficients at 25 and 900°C plotted versus atomic number.

引用文献

J.A.Fahey, Inorg.Nucl.Chem.Lett. 10(1974)459

材質 M O ₂	物性 熱膨張率 (格子定数)						
データ							
TABLE I EXPANSION CURVES FOR $a_T = B_0 + B_1T + B_2T^2$							
	B_0	$B_1 \times 10^5$	$B_2 \times 10^9$	$a_{25^\circ\text{C}} (\text{\AA})$	$\alpha_{25^\circ\text{C}} \times 10^6$	$\alpha_{900^\circ\text{C}} \times 10^6$	Ref.
ThO ₂	5.5959	4.57	6.27	5.5970	8.22	10.2	1
UO ₂	5.4675	4.51	12.10	5.4685	8.36	12.2	2
UO ₂	5.4701	4.72	11.00	5.4713	8.73	12.2	3
NpO ₂	5.4316	4.82	6.21	5.4328	8.93	10.9	This work
PuO ₂	5.3948	4.66	10.20	5.3960	8.73	12.0	4
AmO ₂	5.3733	4.34	14.30	5.3743	8.21	12.9	This work
CmO ₂	5.3569	5.44	--	5.3583	10.20	--	6
CmO ₂	5.3559	4.34	--	5.3570	8.10	--	7
BkO ₂	5.3304	4.32	15.00	5.3315	8.25	13.2	This work
CfO ₂	--	--	--	5.3100	--	--	8

引用文献

J.A.Fahey, Inorg.Nucl.Chem.Lett. 10(1974)459

材質	物性			
Np - O	格子定数			
データ				
Table 1 Composition, phases and evidence of melting observed in specimens after heat treatment and rapid cooling (less than 60 s) to room temperature				
Temperature (K)	O/Np	Phases	Lattice parameter of the oxide phases (pm)	Melting
570	2.0	NpO ₂	543.39 ± 5	
670	2.0	NpO ₂	543.38 ± 5	
770	2.0	NpO ₂	543.40 ± 5	
1470	2.0	NpO ₂	543.39 ± 5	
1470	1.995	NpO _{2-x} + Np	543.48 ± 6	
1570	1.985	NpO _{2-x} + Np	543.57 ± 5	
1570	1.994	NpO _{2-x}	543.53 ± 6	
1670	1.99	NpO _{2-x}	543.61 ± 5	
1670	1.99	NpO _{2-x} + Np	543.40 ± 5	
1670	1.975	NpO _{2-x} + Np	543.69 ± 6	
1770	1.96	NpO _{2-x} + Np	543.39 ± 5	
1870	1.982	NpO _{2-x}	543.80 ± 6	
1870	1.963	NpO _{2-x} + Np	-	
1870	1.95	NpO _{2-x} + Np	543.98 ± 5	
1870	1.945	NpO _{2-x} + Np	544.10 ± 6	
1970	1.98	NpO _{2-x}	543.78 ± 5	
1970	1.97	NpO _{2-x}	544.04 ± 5	
1970	1.941	NpO _{2-x} + Np	544.38 ± 5	
2010	1.92	NpO _{2-x} + Np	-	
2070	1.76	NpO _{2-x} + Np	544.04 ± 6	
2170	1.93	NpO _{2-x} + Np	544.06 ± 5	
2270	1.84	NpO _{2-x} + Np	-	
2420	1.638	NpO _{2-x} + Np	-	no
2420	1.725	-	-	no
2470	1.725	-	-	yes
2470	1.847	-	-	no
2400	1.79	-	-	no
2470	1.79	-	-	yes
2530	1.746	-	-	yes
2573	1.847	-	-	yes
2570	1.638	-	-	yes
2670	1.93	-	-	no
2670	1.994	NpO _{2-x}	543.50 ± 5	no
2740	1.928	-	-	yes
2820	2.0	NpO ₂	543.40	yes

* Specimens slowly cooled (about 3 h).

引用文献

K.Richter et al, J.Nucl. Mat. 148(1987)266

材質 Np - O	物性 格子定数														
<p data-bbox="284 365 384 405">データ</p> <div data-bbox="507 638 1082 1220"> <table border="1"> <caption>Data points estimated from Figure 2</caption> <thead> <tr> <th>O/Np ratio</th> <th>Lattice parameter (pm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.00</td> <td>543.40</td> </tr> <tr> <td>1.99</td> <td>543.55</td> </tr> <tr> <td>1.985</td> <td>543.62</td> </tr> <tr> <td>1.98</td> <td>543.78</td> </tr> <tr> <td>1.975</td> <td>543.75</td> </tr> <tr> <td>1.97</td> <td>544.02</td> </tr> </tbody> </table> </div> <p data-bbox="507 1220 1082 1288">Fig. 2. Variation of the lattice parameter of the NpO_{2-x} phase as a function of the O/Np ratio.</p>		O/Np ratio	Lattice parameter (pm)	2.00	543.40	1.99	543.55	1.985	543.62	1.98	543.78	1.975	543.75	1.97	544.02
O/Np ratio	Lattice parameter (pm)														
2.00	543.40														
1.99	543.55														
1.985	543.62														
1.98	543.78														
1.975	543.75														
1.97	544.02														
<p data-bbox="252 1742 384 1783">引用文献</p> <p data-bbox="347 1805 1150 1845">K.Richter et al, J.Nucl. Mat. 148(1987)266</p>															

材質

NpO₂

物性

熱膨張率

データ

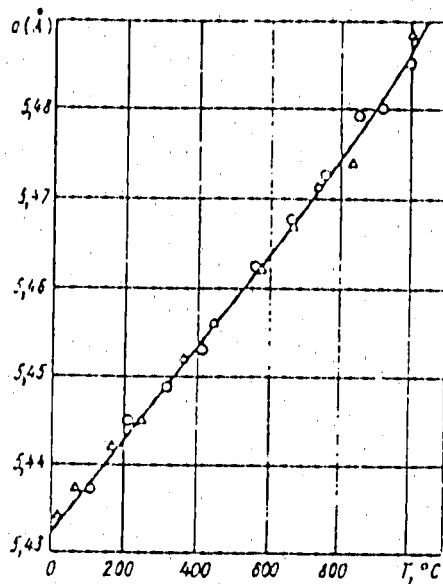
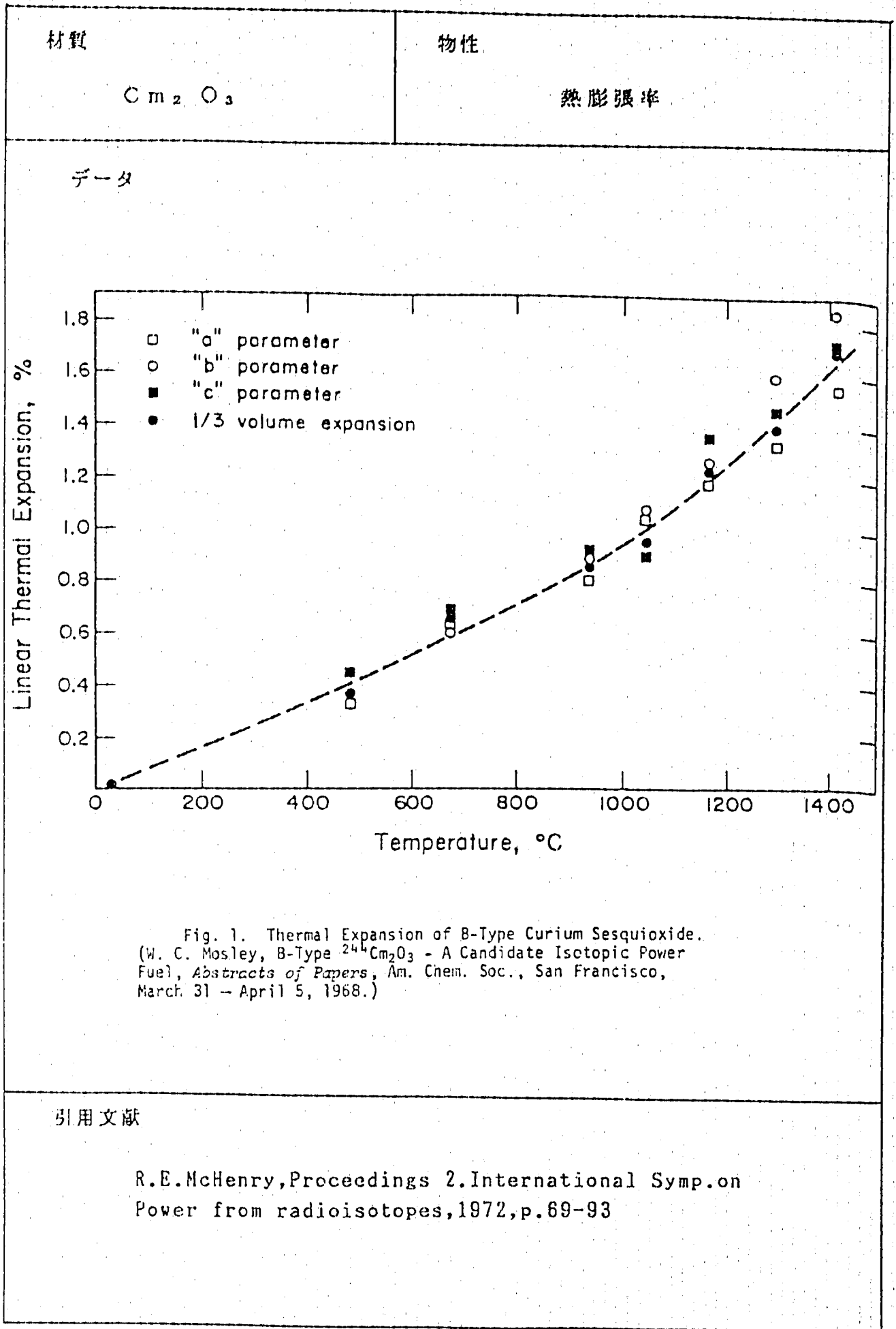


Fig. 1. Variation of the crystal lattice parameter of NpO₂: Δ) on heating; O) on cooling.

The diagram (Fig. 1) shows how the lattice constant of NpO₂ varies as a function of the temperature (mean error $\Delta a = \pm 0.001 \text{ \AA}$). Over the temperature range from room temperature to 700°C, the thermal expansion coefficient of neptunium dioxide remains constant at $9.5 \pm 0.15 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$; as the temperature rises, the linear expansion coefficient follows suit, to attain a value of $11.0 \pm 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$ at 1000°C.

引用文献

L.V.Sudakovt, At.Ehnerg. 35(1973)128



材質 Cm_2O_3	物性 結晶構造 (格子定数他)
<p>データ</p> <p style="text-align: center;">Table VI. Structure of Cm_2O_3^a</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Composition: $CmO_{1.50} \pm 0.01$</p> <p>C-type, body-centered cubic structure $a = 10.997 \pm 0.003 \text{ \AA}$ Density: 10.7 g/cm^3</p> <p>C-B transformation: $800\text{--}1300^\circ\text{C}$ (depends on crystallinity of C-type Cm_2O_3)</p> <p>B-type, monoclinic structure: $a = 14.276 \pm 0.008 \text{ \AA}$ $b = 3.656 \pm 0.001 \text{ \AA}$ $c = 8.913 \pm 0.004 \text{ \AA}$ $\beta = 100.39 \pm 0.03^\circ$</p> <p>Density: 11.7 g/cm^3 Six Cm_2O_3 molecules per unit cell Space group C_{2h}^2 (C2/m) Coefficient of linear thermal expansion $9.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (25-1000°C) $12.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (25-1400°C), slightly anisotropic</p> <p>B-A transformation: 1600°C (reversible)</p> <p>A-type, hexagonal structure (1650°C): $a = 3.845 \pm 0.005 \text{ \AA}$ $c = 6.092 \pm 0.005 \text{ \AA}$</p> <p style="text-align: center;">Density: 11.4 g/cm^3 (1650°C)</p> <hr/> <p>^aSee reference 14.</p>	
<p>引用文献</p> <p style="text-align: center;">R.E.McHenry, Proceedings 2. International Symp. on Power from radioisotopes, 1972, p.69-93</p>	

材質 NpO ₂	物性 熱膨張																																
<p>データ</p> <p>Table 2 Expansion coefficients at 300K for the actinide dioxides ($\times 10^{-6}$)</p> <table border="1" data-bbox="513 734 1193 981"> <thead> <tr> <th>Oxide</th> <th>This Work</th> <th colspan="2">White and Sheard (12)</th> <th>Fahey et al. (28)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ThO₂</td> <td>7.3</td> <td colspan="2">7.2</td> <td>8.2</td> </tr> <tr> <td>UO₂</td> <td>9.3</td> <td>Powder</td> <td>9.1</td> <td>8.7</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Single Crystal</td> <td>8.3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>NpO₂</td> <td>9.0</td> <td colspan="2"></td> <td>8.9</td> </tr> <tr> <td>PuO₂</td> <td>8.4</td> <td colspan="2"></td> <td>8.7</td> </tr> </tbody> </table>				Oxide	This Work	White and Sheard (12)		Fahey et al. (28)	ThO ₂	7.3	7.2		8.2	UO ₂	9.3	Powder	9.1	8.7			Single Crystal	8.3		NpO ₂	9.0			8.9	PuO ₂	8.4			8.7
Oxide	This Work	White and Sheard (12)		Fahey et al. (28)																													
ThO ₂	7.3	7.2		8.2																													
UO ₂	9.3	Powder	9.1	8.7																													
		Single Crystal	8.3																														
NpO ₂	9.0			8.9																													
PuO ₂	8.4			8.7																													
<p>引用文献</p> <p>H.Blank et al, "Plutonium 1975 and Other Actinides", North-Holland Publishing Company(1976), p353-359</p>																																	

材質

NpO_2

物性

格子定数

データ

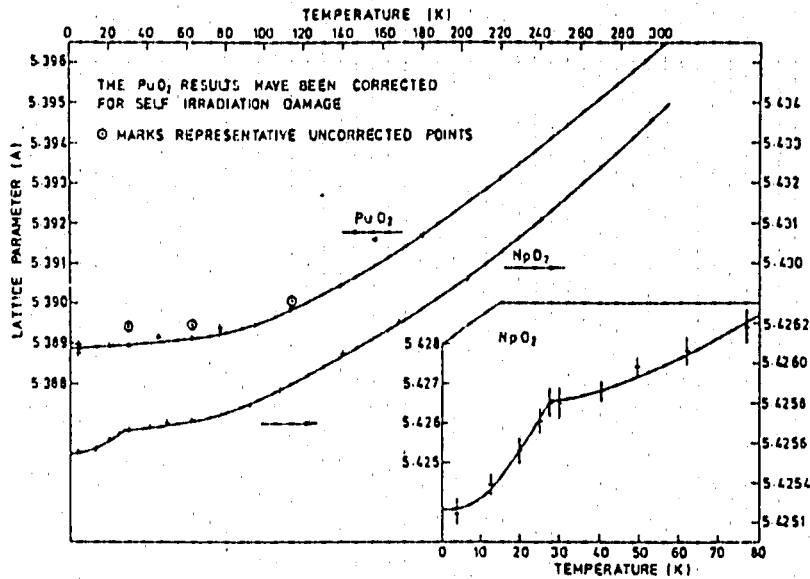


Fig.2
Lattice parameters versus temperature for NpO_2 and PuO_2

引用文献

H.Blank et al, "Plutonium 1975 and Other Actinides",
North-Holland Publishing Company(1976),p353-359

<p>材質</p> <p style="text-align: center;">NpO_2</p>	<p>物性</p> <p style="text-align: center;">格子定数</p>
--	---

データ

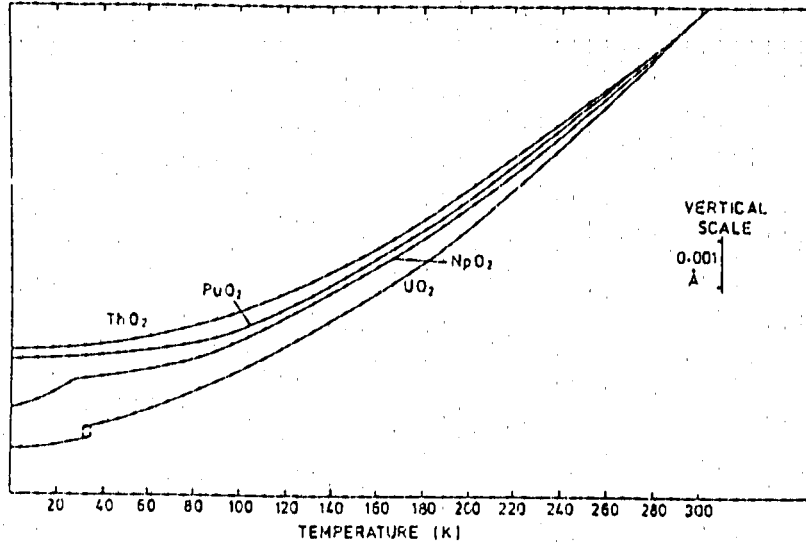


Fig. 3
A comparison of the lattice parameter-temperature curves
for the actinide dioxides

引用文献

H. Blank et al, "Plutonium 1975 and Other Actinides",
North-Holland Publishing Company (1976), p353-359

材質 Cm_2O_3, Am_2O_3	物性 格子定数
--------------------------	------------

データ

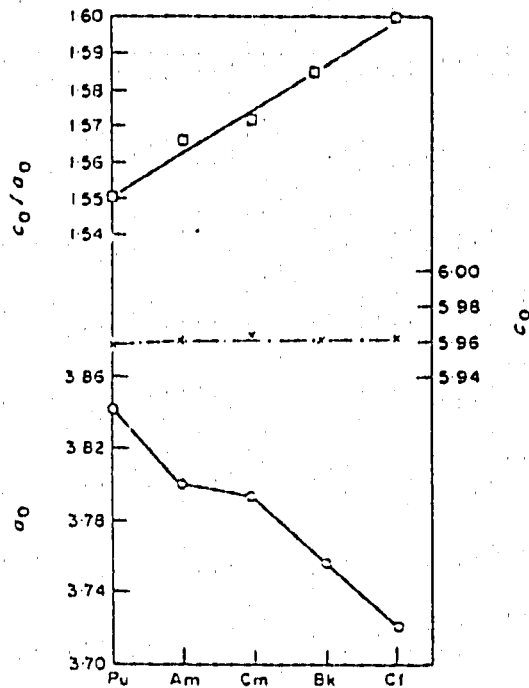


Fig. 2. Lattice parameters for the hexagonal Pu-Cf sesquioxides.

引用文献

R.L.Baybar, J. Inorg. Nucl.Chem. 35(1973)4149

材質 Cm_2O_3 , Am_2O_3	物性 格子定数																																						
<p>データ</p> <p>Table 3. Lattice parameters for hexagonal actinide sesquioxides</p> <table border="1" data-bbox="427 739 1292 1041"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>a_0</th> <th>c_0</th> <th>c_0/a_0</th> <th>Molecular volume (\AA^3)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$^{239}\text{Pu}^*$</td> <td>3.841</td> <td>5.958</td> <td>1.551</td> <td>76.1</td> </tr> <tr> <td>$^{241}\text{Am}^\dagger$</td> <td>3.805</td> <td>5.960</td> <td>1.566</td> <td>74.7</td> </tr> <tr> <td>$^{244}\text{Cm}^\ddagger$</td> <td>3.799§</td> <td>5.991§</td> <td>1.577</td> <td>74.8</td> </tr> <tr> <td>^{248}Cm</td> <td>3.791</td> <td>5.961</td> <td>1.572</td> <td>74.2</td> </tr> <tr> <td>^{249}Bk</td> <td>3.754</td> <td>5.958</td> <td>1.587</td> <td>72.7</td> </tr> <tr> <td>^{249}Cf</td> <td>3.72</td> <td>5.96</td> <td>1.602</td> <td>71.4</td> </tr> </tbody> </table> <p>* See [17]. † See [18]. ‡ See [5]. § Irradiation-induced transformation, C → A. This work.</p>					Element	a_0	c_0	c_0/a_0	Molecular volume (\AA^3)	$^{239}\text{Pu}^*$	3.841	5.958	1.551	76.1	$^{241}\text{Am}^\dagger$	3.805	5.960	1.566	74.7	$^{244}\text{Cm}^\ddagger$	3.799§	5.991§	1.577	74.8	$^{248}\text{Cm} $	3.791	5.961	1.572	74.2	$^{249}\text{Bk} $	3.754	5.958	1.587	72.7	$^{249}\text{Cf} $	3.72	5.96	1.602	71.4
Element	a_0	c_0	c_0/a_0	Molecular volume (\AA^3)																																			
$^{239}\text{Pu}^*$	3.841	5.958	1.551	76.1																																			
$^{241}\text{Am}^\dagger$	3.805	5.960	1.566	74.7																																			
$^{244}\text{Cm}^\ddagger$	3.799§	5.991§	1.577	74.8																																			
$^{248}\text{Cm} $	3.791	5.961	1.572	74.2																																			
$^{249}\text{Bk} $	3.754	5.958	1.587	72.7																																			
$^{249}\text{Cf} $	3.72	5.96	1.602	71.4																																			
<p>引用文献</p> <p>R.L.Baybar, J. Inorg. Nucl.Chem. 35(1973)4149</p>																																							

比 熱

材質 Am - Np - U - O	物性 熱容量，密度，熱伝導度 (1/3)
---------------------------	-----------------------------

データ

TABLE 2

Measured diffusivity σ at temperature T , specific heat capacity C_p , density d and calculated thermal conductivity λ together with high-temperature mean conductivities $\bar{\lambda}$ measured between T_1 and T_2 for several uranium-neptunium-amerium oxides

Sample Designation	T (K)	σ ($10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	C_p ($10^3 \text{ W s g K}^{-1}$)	d (g cm^{-3})	λ (W m K^{-1})	T_1 (K)	T_2 (K)	$\bar{\lambda}$ (W m K^{-1})	
Am 12.4	1033	4.13	298	9.79	1.20	1840	2690	1.32	
	1163	4.03	298		1.16				
	1198	3.94	298		1.14				
	1323	3.95	298		1.14				
	1448	3.75	301		1.09				
	1383	3.82	299		1.11				
	1583	3.79	300		1.12				
	1498	3.73	302		1.09				
	1713	3.52	312		1.07				
	1113	4.64	298		9.70				1.34
	1313	4.05	298						1.17
	1193	4.55	298						1.31
	1273	4.22	298						1.22
	1323	4.09	298						1.18
	1383	4.12	299						1.20
	1523	3.57	303						1.05
	1623	3.45	307						1.03
Am 13	1133	3.92	298	10.50		1.23	1500	2690	1.87
	1213	3.69	298						
	1313	3.81	298		1.19				
	1398	3.66	300		1.15				
	1493	3.65	302		1.13				
	1593	3.69	306		1.18				
	1693	3.75	311		1.22				
	1498	4.17	302		1.33				
	1593	3.88	306		1.25				
	1673	3.77	310		1.23				
	1643	3.89	308		1.26				

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質		物性						
Am - Np - U - O		熱容量, 密度, 熱伝導度 (2/3)						
データ								
	1513	3.82	303		1.22			
	1413	4.19	300		1.32			
	1373	4.32	299		1.36			
	1303	4.32	298		1.35			
	1303	4.58	298		1.43			
	1198	4.75	298		1.48			
	1153	4.62	298		1.45			
	1073	4.93	299		1.55			
AmNp 1	1103	5.20	350	10.10	1.84	1560	2770	1.7
	1208	4.93	348		1.73			
	1448	4.49	319		1.58			
	1568	4.41	353		1.57			
	1668	4.35	357		1.57			
	1698	4.23	358		1.53			
	1832	4.04	306		1.50			
	1673	4.32	357		1.56			
	1623	4.40	355		1.58			
	1573	4.55	353		1.62			
	1438	4.80	349		1.69			
	1442	4.65	349		1.64			
	1373	4.84	348		1.70			
	1313	4.98	348		1.75			
	1203	5.31	348		1.87			
	1048	5.37	351		1.90			
	1113	3.53	349		1.92			
	1193	5.23	348		1.84			
Np 2.3.4	1763	5.30	373	10.50	2.08	1640	2870	1.74
	1623	5.96	365		2.28			
	1513	6.37	360		2.41			
	1413	6.70	357		2.51			
	1333	7.31	356		2.74			
	1218	8.32	356		3.11			
	1148	9.24	357		3.46			
	1098	9.28	358		3.40			
引用文献								
H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621								

材質		物性						
Am - Np - U - O		熱容量, 密度, 熱伝導度 (3/3)						
データ								
TABLE 2 (continued)								
Sample Designation	T (K)	n ($10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	C_p ($10^3 \text{ W s g K}^{-1}$)	d (g cm^{-3})	λ (W m K^{-1})	T_1 (K)	T_2 (K)	λ (W m K^{-1})
Np 2.3.5	1123	10.27	357	10.45	3.83	—	—	—
	1193	9.41	356		3.50			
	1253	9.06	356		3.37			
	1333	9.02	356		3.36			
	1413	8.53	357		3.18			
	1473	8.45	359		3.17			
	1573	7.96	363		3.07			
	1613	7.70	364		2.93			
	1698	6.98	360		2.69			
	Np 3	1423	7.94		358			
1553		7.19	362	2.73				
1773		6.79	374	2.67				
1553		7.66	362	2.91				
1378		8.62	357	3.23				
1243		9.33	356	3.49				
1218		9.50	356	3.55				
1133		10.66	357	3.99				
1563		5.96	362	2.27				
1773		5.47	368	2.11				
1723		5.83	365	2.24				
1623		6.36	361	2.41				
1443		6.85	358	2.68				

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質 Cm_2O_3	物性 熱伝導度, 熱拡散速度 他			
データ				
TABLE 1 Thermal diffusivity and calculated thermal conductivity of $^{244}Cm_2O_3$				
T (°C)	C_p (cal/g°C)	α (cm ² /sec)	ρ (g/cm ³)	λ (watt/cm°C)
100	0.635	0.00516	11.05	0.0151
200	0.0680	0.00505	11.02	0.0158
300	0.0708	0.00495	11.00	0.0161
400	0.0730	0.00485	10.97	0.0162
500	0.0747	0.00476	10.94	0.0162
600	0.0762	0.00467	10.91	0.0162
700	0.0776	0.00458	10.88	0.0161
800	0.0789	0.00450	10.85	0.0161
900	0.0801	0.00442	10.81	0.0160
1000	0.0811	0.00434	10.77	0.0159
1100	0.0819	0.00427	10.73	0.0157
1200	0.0827	0.00419	10.68	0.0155
1300	0.0834	0.00412	10.62	0.0153
1400	0.0840	0.00406	10.56	0.0150

注: C_p は Pu_2O_3 からの推定, ρ は熱膨張からの推定

| 引用文献 R.L.Gibby et al, J.Nucl. Mat. 34(1970)299 | | | | |

材質 N p O ₂	物性 熱容量, エンタルピー				
データ					
$H_{298}^T = -25902 + 79.16T + 0.835 \cdot 10^{-2}T^2 + 3.67 \cdot 10^5 T^{-1} \quad (\text{в дж/моль}) \quad (3)$					
$C_p = 79.16 + 1.67 \cdot 10^{-2}T - 3.67 \cdot 10^5 T^{-2} \quad (\text{в дж/моль} \cdot \text{град.}) \quad (4)$					
Энтальпия и теплоемкость двуокиси азота					
Температура T (в K)	Энтальпия $H_{298.15}^T$		Теплоемкость C_p		
	(в дж/моль)	(в кал./г)	(в дж/моль·град.)	(в кал./г·град.)	
300		2.69	80.07	0.0711	
350	3029	6.36	81.99	0.0728	
400	7162	10.10	83.56	0.0742	
450	11374	13.90	84.91	0.0754	
500	15654	17.74	86.04	0.0764	
550	19978	21.63	87.17	0.0774	
600	24359	25.57	88.18	0.0783	
650	28796	29.55	89.19	0.0792	
700	33278	33.57	90.09	0.0800	
750	37805	37.63	90.99	0.0808	
800	42378	41.73	91.90	0.0816	
850	46995	45.87	92.80	0.0824	
900	51657	50.05	93.70	0.0832	
950	56365	54.28	94.60	0.0840	
1000	61128	58.53	95.50	0.0848	
1050	65915	62.83	96.29	0.0855	
1100	70757		97.19	0.0863	
引用文献					
V.A.ARKHIPOV, RADIOKHIMIYA 16(1974)123					

材質

N p O₂

物性

熱容量

データ

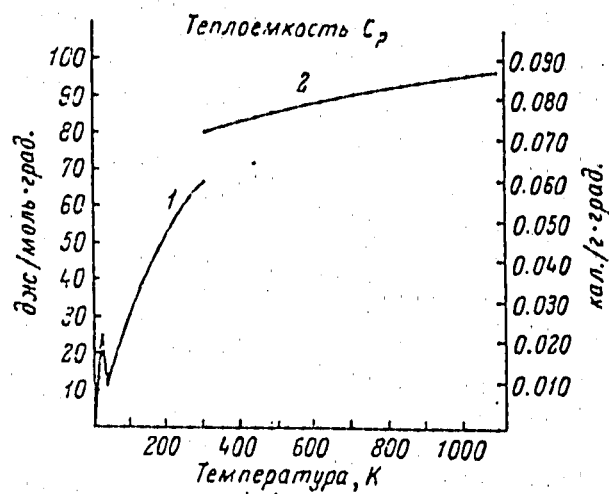


Рис. 2. Теплоемкость двуокиси нептуния.
1 — данные работы [9], 2 — полученные значения.

引用文献

V.A. ARKHIPOV, RADIOKHIMIYA 16(1974)123

<p>材質</p> <p style="text-align: center;">$U_{0.8}Pu_{0.2}O_{1.98}$</p>	<p>物性</p> <p style="text-align: center;">熱容量</p>
---	--

データ

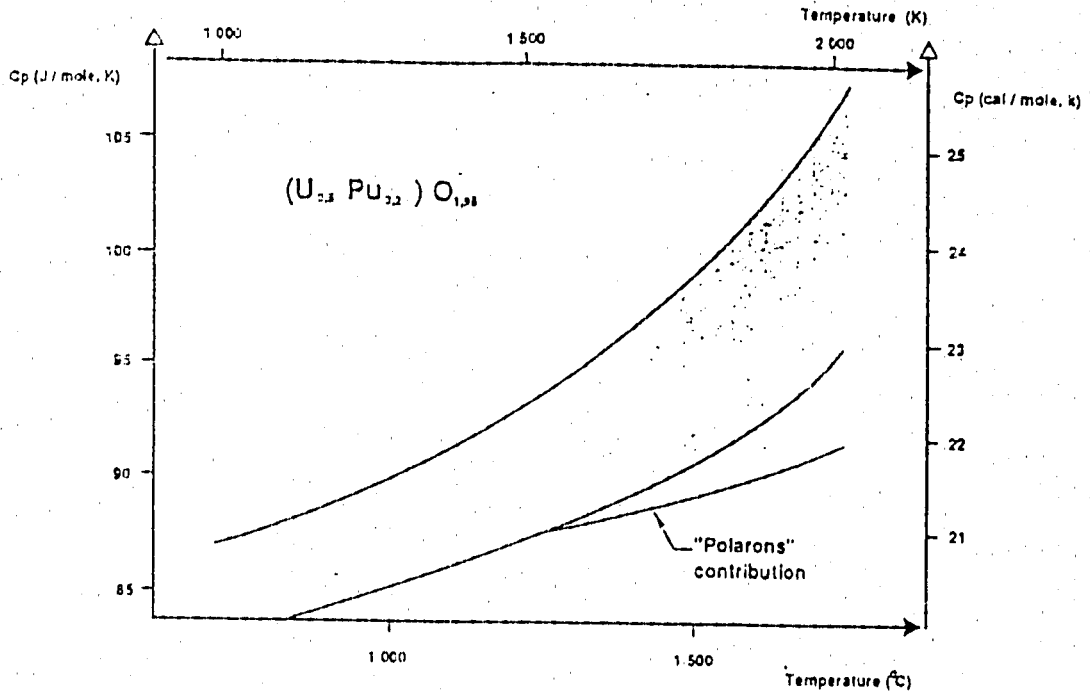


Fig. 2. Heat capacity of $U_{0.8}Pu_{0.2}O_{1.98}$

引用文献

M.Beauvy et al, J. Nucl.Mat. 166(1989)83

密 度

材質 Am - Np - U - O	物性 組成、密度					
データ						
TABLE I Sample characterization						
Designation	Composition	Density (g cm ⁻³) (%TD)		Origin	O/M	
					Initial	Final
Am 12.4	Am _{0.5} U _{0.5} O _{2-x}	10.15	88	GSP	1.83	1.81
Am 13	Am _{0.5} U _{0.5} O _{2-x}	10.50	95	coprecipitation	1.83	1.92
AmNp1	Am _{0.15} Np _{0.35} U _{0.5} O _{2-x}	10.55	95.5	coprecipitation	—	—
Np 2.3.4	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.50	95	GSP	2.00	2.00
Np 2.3.5	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.60	98	ex-GSP	2.00	2.00
Np 3	Np _{0.5} U _{0.5} O ₂	10.50	95	coprecipitation	2.00	2.00
GSP, Material produced by the GSP method. O/M: initial, final; O/M ratio after fabrication and after measurements.						
引用文献						
H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621						

材質

Am - Np - U - O

物性

熱容量, 密度, 熱伝導度 (1/3)

データ

TABLE 2

Measured diffusivity a at temperature T , specific heat capacity C_p , density d and calculated thermal conductivity λ together with high-temperature mean conductivities $\bar{\lambda}$ measured between T_1 and T_2 for several uranium-neptunium-amerium oxides

Sample Designation	T (K)	a ($10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	C_p ($10^3 \text{ W s g K}^{-1}$)	d (g cm^{-3})	λ (W m K^{-1})	T_1 (K)	T_2 (K)	$\bar{\lambda}$ (W m K^{-1})		
Am 12.4	1093	4.13	298	9.79	1.20	1840	2690	1.32		
	1163	4.03	298		1.16					
	1198	3.94	298		1.14					
	1323	3.95	298		1.14					
	1448	3.75	301		1.09					
	1383	3.82	299		1.11					
	1683	3.79	306		1.12					
	1498	3.73	302		1.09					
	1713	3.52	312		1.07					
	1113	4.64	298		9.70	1.34				
	1313	4.05	298	1.17						
	1193	4.55	208	1.31						
	1273	4.22	208	1.22						
	1323	4.09	298	1.18						
	1383	4.12	299	1.20						
	1523	3.57	303	1.05						
	1623	3.45	307	1.03						
	Am 13	1133	3.92	298		10.50	1.23	1590	2690	1.87
		1213	3.69	298			1.15			
		1313	3.81	298	1.19					
1398		3.66	300	1.15						
1493		3.65	302	1.13						
1593		3.69	306	1.18						
1693		3.75	311	1.22						
1498		4.17	302	10.50	1.33					
1593		3.88	306		1.25					
1673		3.77	310		1.23					
1643		3.89	308		1.26					

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質 Am - Np - U - O	物性 熱容量, 密度, 熱伝導度 (2/3)							
データ								
	1513	3.82	303		1.22			
	1413	4.19	300		1.32			
	1373	4.32	299		1.36			
	1303	4.32	298		1.35			
	1303	4.58	298		1.43			
	1198	4.75	298		1.48			
	1153	4.82	298		1.45			
	1073	4.93	299		1.55			
AmNp 1	1103	5.20	350	10.10	1.84	1580	2770	1.7
	1208	4.93	348		1.73			
	1448	4.49	349		1.58			
	1568	4.41	353		1.57			
	1669	4.35	357		1.57			
	1698	4.23	358		1.53			
	1832	4.04	306		1.50			
	1673	4.32	357		1.56			
	1623	4.40	355		1.58			
	1573	4.55	353		1.62			
	1438	4.86	349		1.69			
	1442	4.65	349		1.64			
	1373	4.84	348		1.70			
	1313	4.98	348		1.75			
	1203	5.31	348		1.87			
	1048	5.37	351		1.90			
	1113	3.53	349		1.92			
	1193	5.23	348		1.84			
Np 2,3,4	1763	5.30	373	10.50	2.08	1640	2870	1.74
	1623	5.96	365		2.28			
	1513	6.37	360		2.41			
	1413	6.70	357		2.51			
	1333	7.31	356		2.74			
	1218	8.32	356		3.11			
	1148	9.24	357		3.46			
	1098	9.28	358		3.49			
引用文献								
H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621								

材質

Am - Np - U - O

物性

熱容量，密度，熱伝導度 (3/3)

データ

TABLE 2 (continued)

Sample Designation	T (K)	a (10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹)	C _p (10 ³ Ws gK ⁻¹)	d (g cm ⁻³)	λ (W mK ⁻¹)	T ₁ (K)	T ₂ (K)	λ̄ (W mK ⁻¹)
Np 2.3.5	1123	10.27	357	10.45	3.83	--	--	--
	1193	9.41	356		3.50			
	1253	9.06	356		3.37			
	1333	9.02	356		3.36			
	1413	8.53	357		3.18			
	1473	8.45	350		3.17			
	1573	7.96	363		3.07			
	1613	7.70	364		2.93			
	1698	6.98	369		2.69			
	Np 3	1423	7.94		358			
1553		7.19	362	2.73				
1773		6.79	374	2.67				
1553		7.66	362	2.91				
1378		8.62	357	3.23				
1243		9.33	356	3.49				
1248		9.50	356	3.55				
1133		10.66	357	3.99				
1563		5.96	362	2.27				
1773		5.47	368	2.11				
1723		5.83	365	2.24				
1623		6.36	361	2.41				
1443		6.85	358	2.58				

引用文献

H.E.Schmidt et al, J. Less-Com. Met. 121(1986)621

材質 Cm_2O_3	物性 熱伝導度，熱拡散速度 他
-----------------	--------------------

データ

TABLE 1
Thermal diffusivity and calculated thermal
conductivity of $^{244}Cm_2O_3$

T (°C)	C_p (cal/g°C)	α (cm ² /sec)	ρ (g/cm ³)	λ (watt/cm°C)
100	0.635	0.00516	11.05	0.0151
200	0.0680	0.00505	11.02	0.0158
300	0.0708	0.00495	11.00	0.0161
400	0.0730	0.00485	10.97	0.0162
500	0.0747	0.00476	10.94	0.0162
600	0.0762	0.00467	10.91	0.0162
700	0.0776	0.00458	10.88	0.0161
800	0.0789	0.00450	10.85	0.0161
900	0.0801	0.00442	10.81	0.0160
1000	0.0811	0.00434	10.77	0.0159
1100	0.0819	0.00427	10.73	0.0157
1200	0.0827	0.00419	10.68	0.0155
1300	0.0834	0.00412	10.62	0.0153
1400	0.0840	0.00406	10.56	0.0150

注： C_p は Pu_2O_3 からの推定， ρ は熱膨張からの推定

引用文献

R.L.Gibby et al, J.Nucl. Mat. 34(1970)299

材質 Cm_2O_3	物性 結晶構造 (格子定数他)
<p data-bbox="236 405 331 439">データ</p> <p data-bbox="624 557 995 591" style="text-align: center;">Table VI. Structure of Cm_2O_3^a</p> <hr/> <p data-bbox="635 622 983 656" style="text-align: center;">Composition: $\text{CmO}_{1.50} \pm 0.01$</p> <p data-bbox="347 680 1257 714">C-type, body-centered cubic structure a = $10.997 \pm 0.003 \text{ \AA}$</p> <p data-bbox="395 730 651 763" style="padding-left: 2em;">Density: 10.7 g/cm^3</p> <p data-bbox="347 781 1257 815">C-B transformation: $800\text{--}1300^\circ\text{C}$ (depends on crystallinity of C-type Cm_2O_3)</p> <p data-bbox="347 831 1257 943">B-type, monoclinic structure: a = $14.276 \pm 0.008 \text{ \AA}$ b = $3.656 \pm 0.001 \text{ \AA}$ c = $8.913 \pm 0.004 \text{ \AA}$ β = $100.39 \pm 0.03^\circ$</p> <p data-bbox="395 958 1046 1115" style="padding-left: 2em;">Density: 11.7 g/cm^3 Six Cm_2O_3 molecules per unit cell Space group C_{2h}^3 (C2/m) Coefficient of linear thermal expansion $9.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ($25\text{--}1000^\circ\text{C}$) $12.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ($25\text{--}1400^\circ\text{C}$), slightly anisotropic</p> <p data-bbox="347 1133 842 1167">B-A transformation: 1600°C (reversible)</p> <p data-bbox="347 1182 1257 1238">A-type, hexagonal structure (1650°C): a = $3.845 \pm 0.005 \text{ \AA}$ c = $6.092 \pm 0.005 \text{ \AA}$</p> <p data-bbox="395 1256 759 1290" style="padding-left: 2em;">Density: 11.4 g/cm^3 (1650°C)</p> <hr/> <p data-bbox="347 1305 571 1339">^aSee reference 14.</p>	
<p data-bbox="220 1783 347 1816">引用文献</p> <p data-bbox="331 1861 1230 1939" style="text-align: center;">R.E. McHenry, Proceedings 2. International Symp. on Power from radioisotopes, 1972, p. 69-93</p>	

状態図

<p>材質</p> <p>Np - O</p>	<p>物性</p> <p>状態図</p>
-------------------------	----------------------

データ

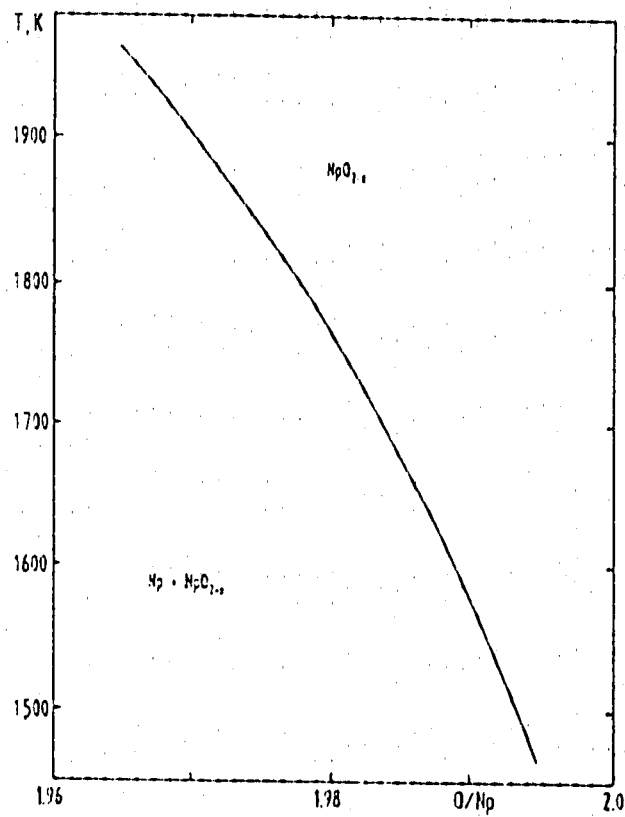


Fig. 2. Part of the neptunium-oxygen phase diagram.

引用文献

W. Bartscher et al, J. Nucl. Mat. 140(1986)91

材質

Cm - O

物性

状態図

データ

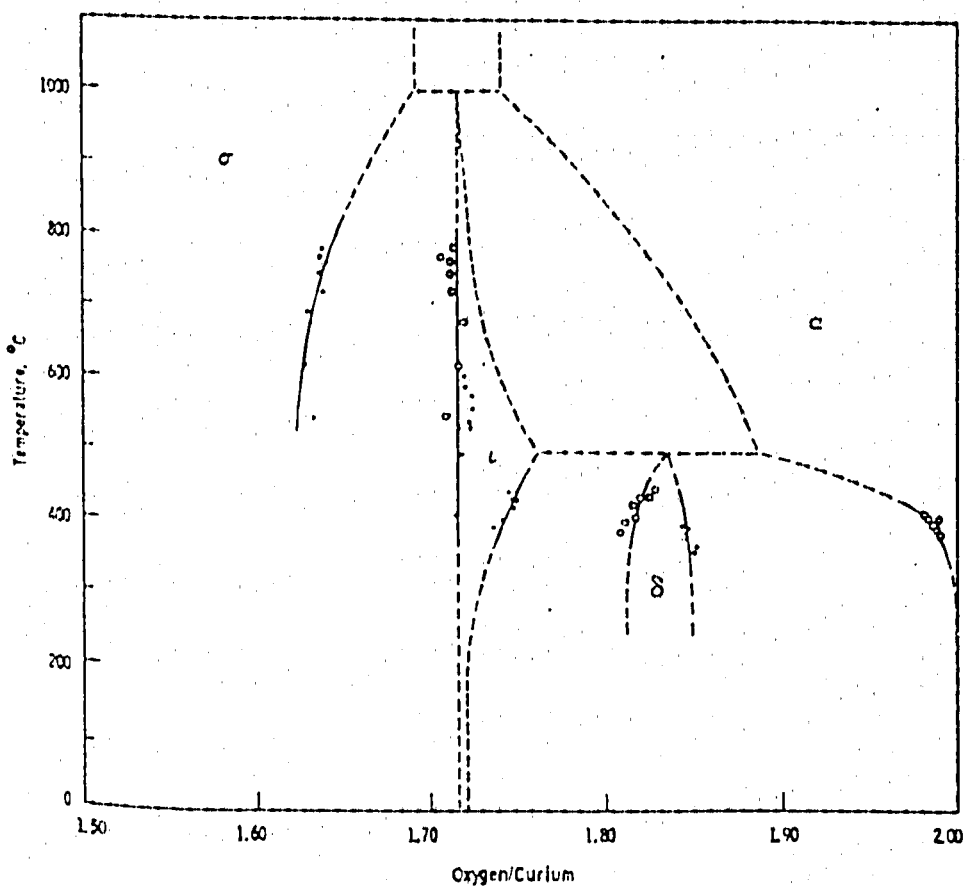


Fig. 3. Phase diagram for the curium-oxygen system derived from the isobaric temperature-composition data. \circ and \bullet represent phase transitions on heating and cooling, respectively. Dashed lines and peritectoid reaction temperatures are uncertain and included for completeness.

引用文献

T.D.Chikalla et al, J.Inorg.Nucl.Chem. 31(1969)85

材質 Cm - O	物性 状態図
------------------	---------------

データ

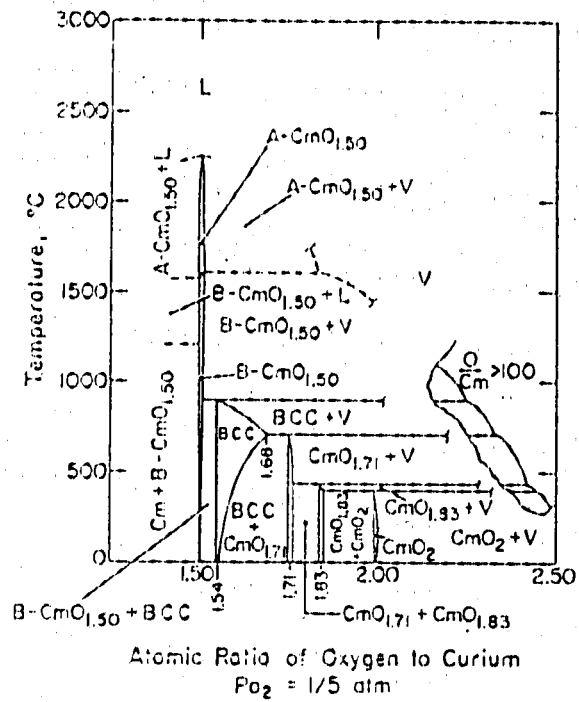


Fig. 1. Curium-oxygen system.

引用文献

P.K.Smith et al, J.Chem.Phys. 52(1970)4983

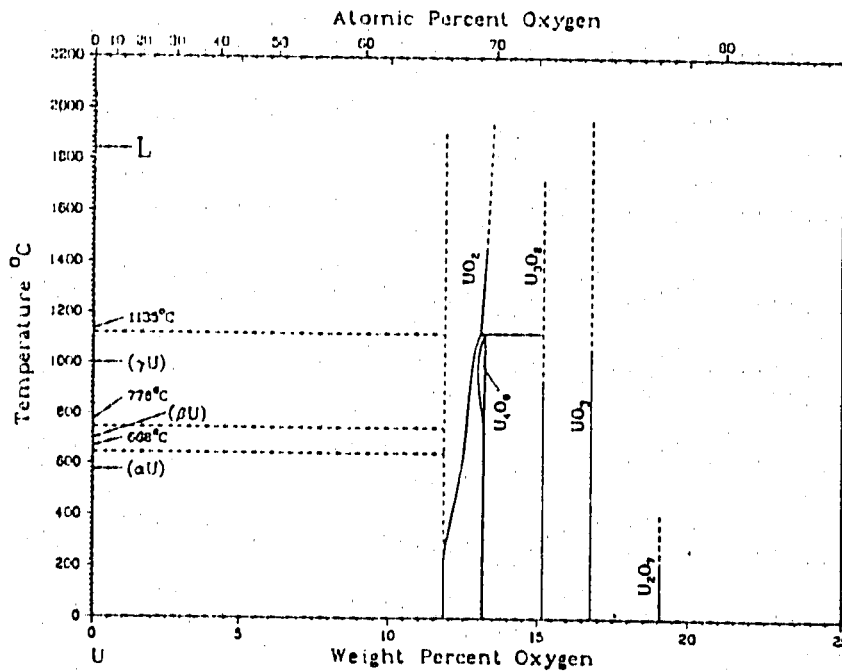
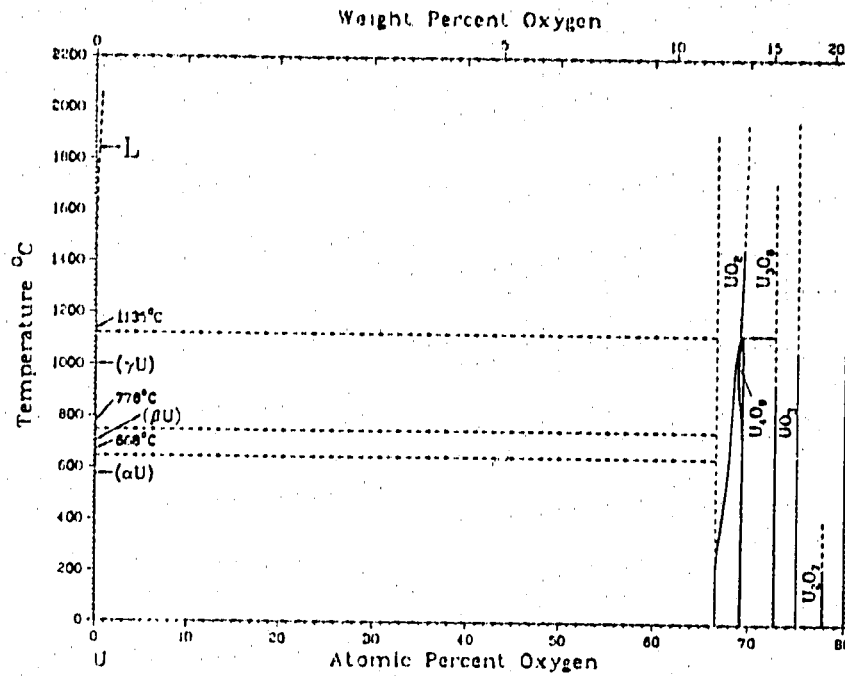
材質

U - O

物性

状態図

データ

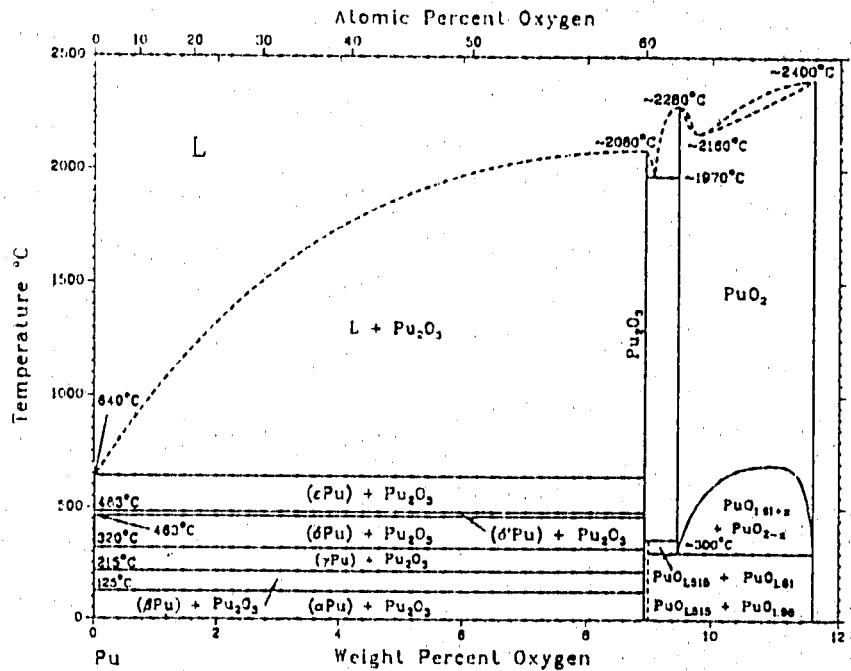
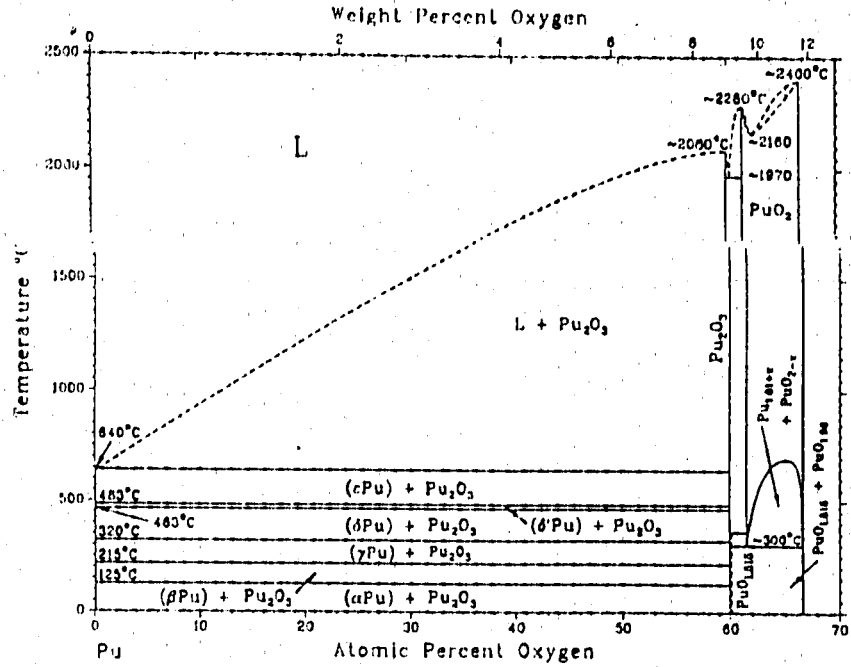


引用文献

T.B.Massalski et al, Binary Alloy Phase Diagrams, American Society for Metals(1986)

材質 Pu - O	物性 状態図
--------------	-----------

データ



引用文献

T.B.Massalski et al, Binary Alloy Phase Diagrams, American Society for Metals(1986)

材質 $UO_2 - UO_3$	物性 状態図
---------------------	-----------

データ

U-O (concl.)

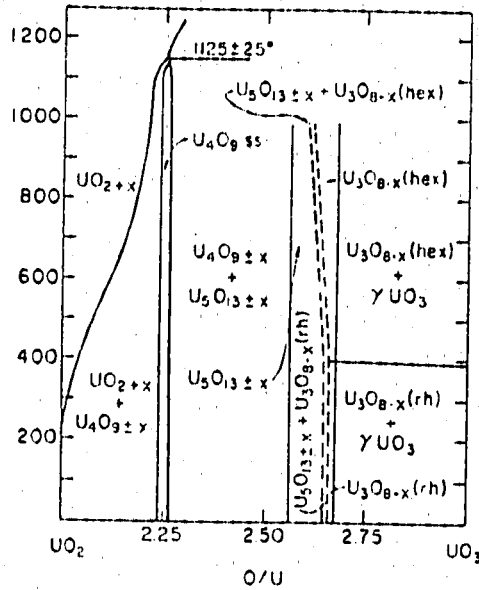


Fig. 4167.—System UO_2-UO_3 , subsolidus. Dotted lines represent assumed boundaries of the 2-phase region. Hex = hexagonal symmetry, Rh = orthorhombic.

V. V. Rachev, L. M. Kovba, and E. A. Ippolitova, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 159 [6] 1373 (1964); *Dokl. Phys. Chem.*, 159 [6] 1150 (1964).

引用文献

E.M. Levin et al, Phase Diagrams for Ceramists
 1975 Supplement, The American Ceramic Society
 (1975)

材質 U - U ₂ O ₃	物性 状態図
---	-----------

データ

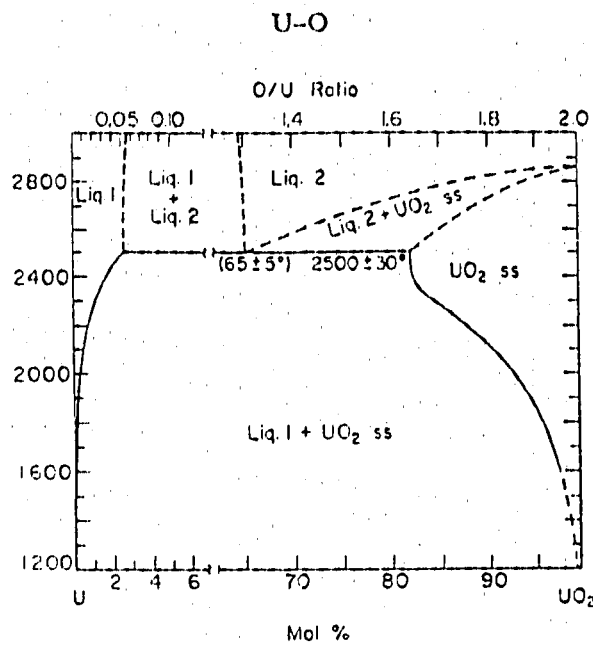


FIG. 4166.—System U-UO₂ at high temperature.
 A. E. Martin and R. K. Edwards, *J. Phys. Chem.*, 69 [5] 1788 (1965).

引用文献

E.M. Levin et al, Phase Diagrams for Ceramists
 1975 Supplement, The American Ceramic Society
 (1975)

材質

U - P u - O

物性

状態図

データ

Pu-U-O

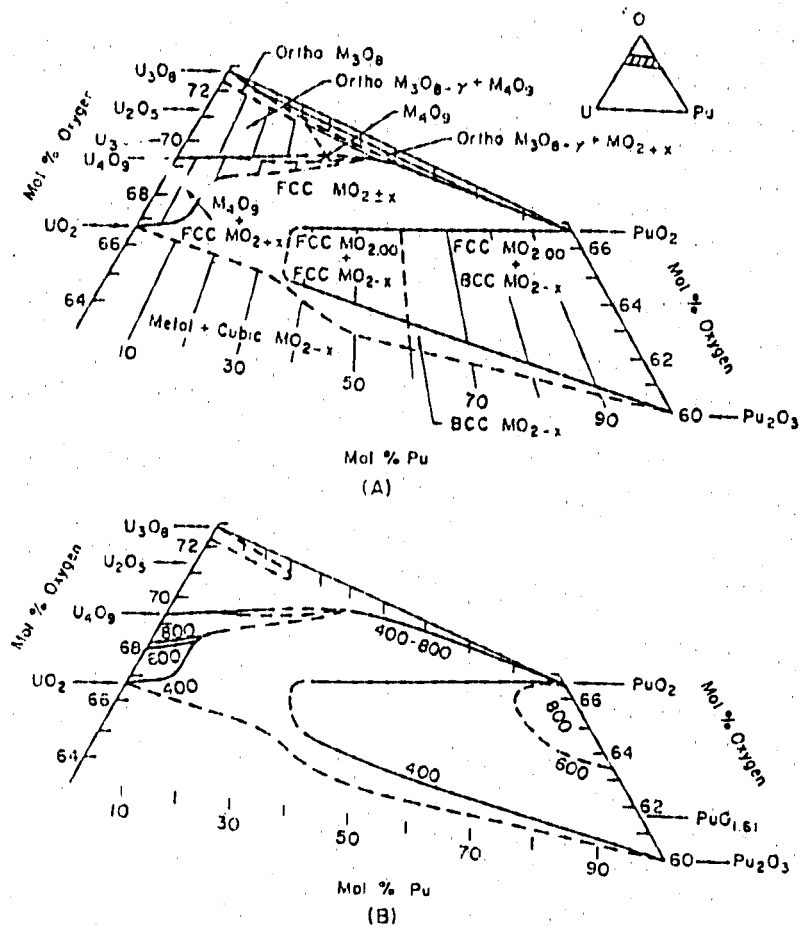


FIG. 4230.—Portion of the system U-Pu-O bounded by $UO_{1.8}$ - U_3O_8 - PuO_2 - Pu_2O_3 . BCC = body-centered cubic symmetry, FCC = face-centered cubic, Ortho = orthorhombic symmetry, M = U + Pu. (A) 25° isotherm; (B) 400°, 600°, 800° isotherms. T. L. Markin and R. S. Street, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 29 [9] 2273 (1967).

引用文献

E.M. Levin et al, Phase Diagrams for Ceramists 1975 Supplement, The American Ceramic Society (1975)

材質 UO_{2-x}	物性 状態図
------------------	-----------

データ

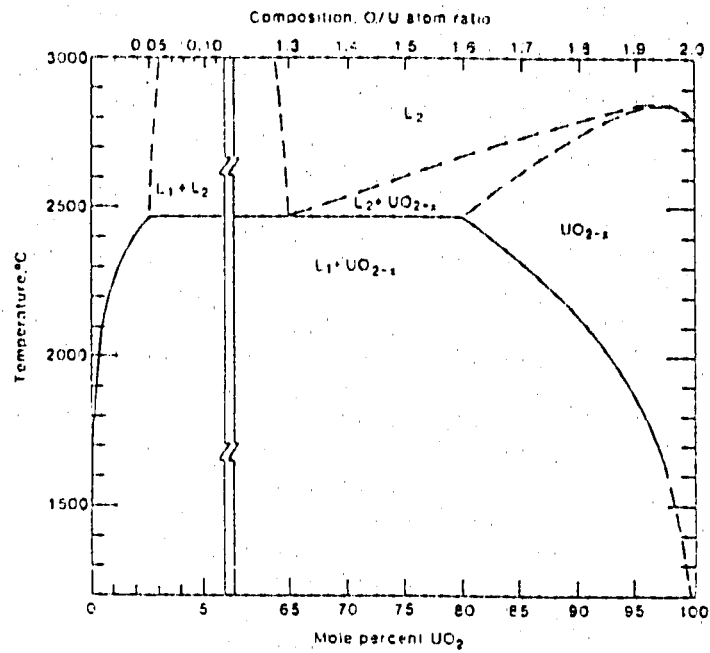


Fig. 1. Partial phase diagram of the U-O system, region UO_{2-x} .

引用文献

J.M.Gittus et al, J. Nucl.Mat. 166(1989)132

材質 UO_{2+x}	物性 状態図
------------------	-----------

データ

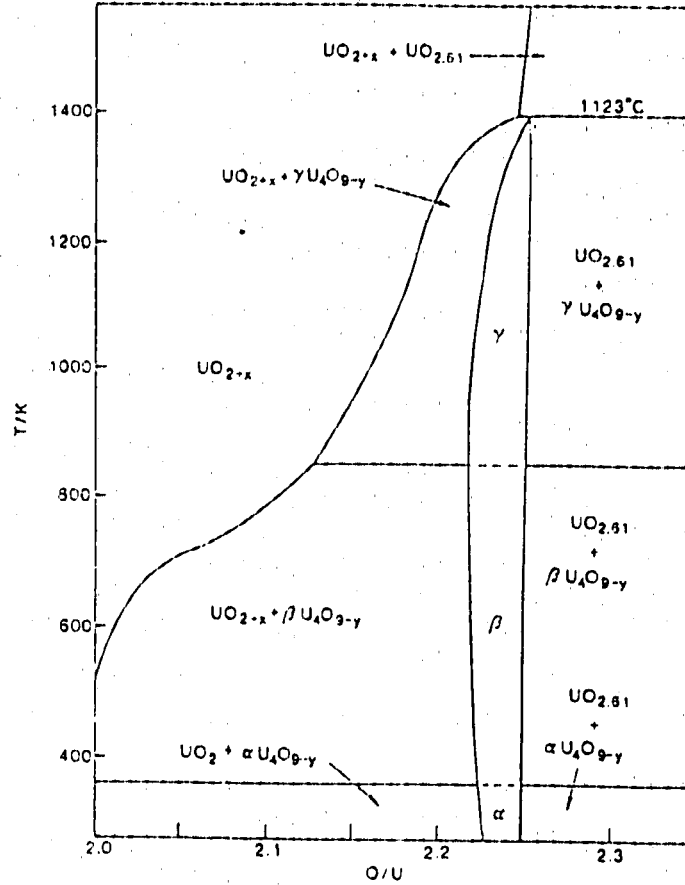


Fig. 2. Partial phase diagram of the U-O system, region UO_{2-x} .

引用文献

J.H.Gittus et al, J. Nucl.Mat. 166(1989)132

<p>材質</p> <p>U - Z r - O</p>	<p>物性</p> <p>状態図</p>
------------------------------	----------------------

データ

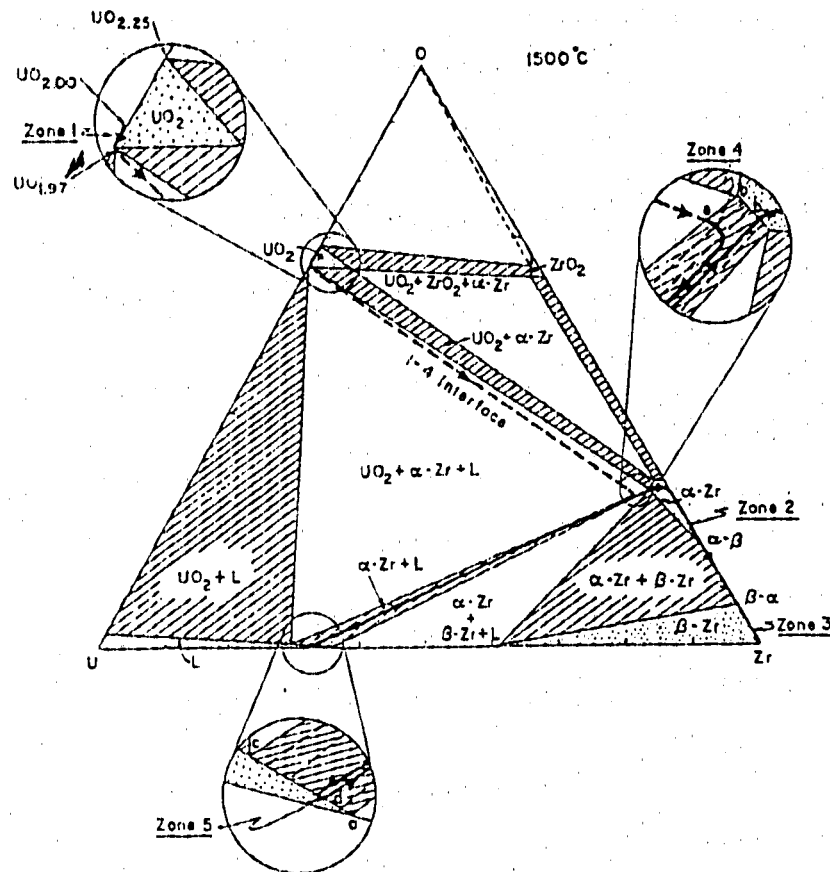


Fig. 10. U-Zr-O phase diagram at 1500 ° C, after Olander [95].

引用文献

J.H.Gittus et al, J. Nucl.Mat. 166(1989)132

材質

Np - O

物性

状態図

データ

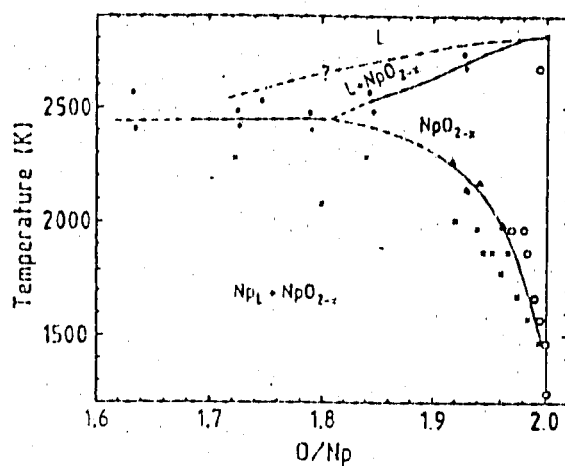


Fig. 3. Phase relationship in the hypostoichiometric region of the Np-O system. Experimental points: ○ single phase, × two phases, • melting and + no melting observed, Δ from DTA.

引用文献

K.Richter et al, J.Nucl. Mat. 148(1987)266

材質 Np - O	物性 状態図
--------------	-----------

データ

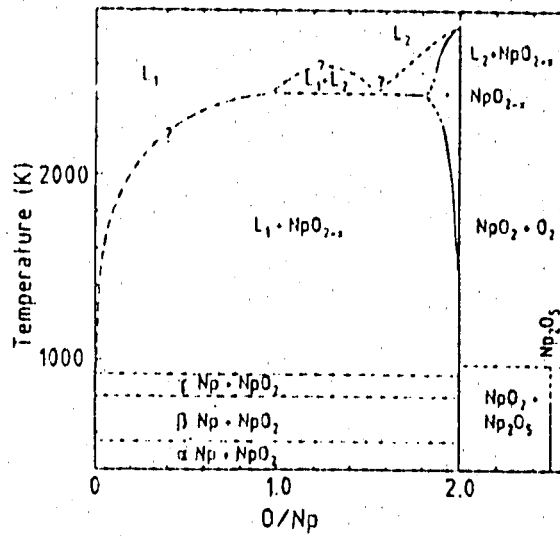


Fig. 4. Phase relation of the neptunium-oxygen system.

引用文献

K.Richter et al, J.Nucl. Mat. 148(1987)266