

高速炉燃料の熱物性評価

—融点と熱伝導率—

Evaluation of Thermal Physical Properties for Fast Reactor Fuels
- Melting Point and Thermal Conductivities -

加藤 正人 森本 恭一 米野 憲 中道 晋哉
鹿志村 元明 安部 智之 宇野 弘樹* 小笠原 誠洋*
田村 哲也* 菅田 博正* 砂押 剛雄* 柴田 和哉*

Masato KATO, Kyoichi MORIMOTO, Akira KOMENO, Shinya NAKAMICHI
Motoaki KASHIMURA, Tomoyuki ABE, Hiroki UNO*, Masahiro OGASAWARA*
Tetsuya TAMURA*, Hirotada SUGATA*, Takeo SUNAOSHI* and Kazuya SHIBATA*

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター
燃料技術部

Fuel Technology Department
Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

October 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っておりま

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

高速炉燃料の熱物性評価

— 融点と熱伝導率 —

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター燃料技術部

加藤 正人、森本 恭一、米野 憲、中道 晋哉、鹿志村 元明、安部 智之
宇野 弘樹^{*1}、小笠原 誠洋^{*1}、田村 哲也^{*1}、菅田 博正^{*1}、砂押 剛雄^{*1}、柴田 和哉^{*1}

(2006年10月2日受理)

高速増殖原型炉「もんじゅ」では、Pu富化度約20～30%の低密度MOX 燃料が用いられる。炉内の使用中燃料及び製造済の取替用燃料には、ナトリウム漏洩事故に伴う長期運転停止期間中のPu-241の崩壊により、Am が最大約2%(Am/HM)蓄積しており、運転再開に当たっては、このAm 蓄積による燃料性能への影響を評価することが必要となっている。本研究は、燃料の熱設計上重要な燃料物性値である融点と熱伝導率に関するAm蓄積の影響を評価することを目的としており、Amを含む広範囲の組成のMOX について、融点と熱伝導率を系統的に測定し、O/M比、Pu富化度等の主要因子及びAm含有率と融点、熱伝導度との関係を評価した。

融点の測定は、MOX試料をタンクスチンカプセル中に真空封入し、サーマルアレスト法によつて行った。Pu 富化度、O/M 及びAm 含有率を試験パラメータとした。その結果、30%Pu 以上のMOX の測定では、カプセル材のタンクスチンが試料と反応し、融点測定値に影響を与えていたことがわかった。このため、30%Pu 以上のMOX の測定では、試料との反応性の低いレニウム製の内容器を用いた融点測定を行い、試料とカプセルとの反応が無視できる程度に抑制されたことを確認するとともに、従来の測定に比べ高い融点を得た。新たに得られた融点は、Pu 含有率の増加とともに連続的に低下し、O/M の低下でわずかに上昇する傾向を示した。Am含有率3%までの範囲では、Am の融点に及ぼす影響は、わずかであることを確認した。

熱伝導率評価については、レーザーフラッシュ法による熱拡散率測定とドロップカロリメータ法による比熱測定を行った。密度、O/M及びAm 含有率をパラメータとした。測定の結果、3%までのAm含有によって、熱伝導率は低温側でわずかに低下するが、もんじゅ燃料の熱設計の対象である1173K以上の温度領域ではその影響は無視できる程度である。

核燃料サイクル工学研究所 : 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*¹ 検査開発(株)

Evaluation of Thermal Physical Properties for Fast Reactor Fuels

—Melting Point and Thermal Conductivities —

Masato KATO, Kyoichi MORIMOTO, Akira KOMENO, Shinya NAKAMICHI

Motoaki KASHIMURA, Tomoyuki ABE,

Hiroki UNO^{*1}, Masahiro OGASAWARA^{*1}, Tetsuya TAMURA^{*1}, Hirotada SUGATA^{*1},

Takeo SUNAOSHI^{*1} and Kazuya SHIBATA^{*1}

Fuel Technology Department, Plutonium Fuel Development Center,

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

Tokai Research and Development Center

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 2, 2006)

Japan Atomic Energy Agency has developed a fast breeder reactor(FBR), and plutonium and uranium mixed oxide (MOX) having low density and 20-30%Pu content has used as a fuel of the FBR, *Monju*. In plutonium, Americium has been accumulated during long-term storage, and Am content will be increasing up to 2-3% in the MOX. It is essential to evaluate the influence of Am content on physical properties of MOX on the development of FBR in the future. In this study melting points and thermal conductivities which are important data on the fuel design were measured systematically in wide range of composition, and the effects of Am accumulated were evaluated.

The solidus temperatures of MOX were measured as a function of Pu content, oxygen to metal ratio(O/M) and Am content using thermal arrest technique. The sample was sealed in a tungsten capsule in vacuum for measuring solidus temperature. In the measurements of MOX with Pu content of more than 30%, a rhenium inner capsule was used to prevent the reaction between MOX and tungsten. In the results, it was confirmed that the melting points of MOX decrease with as an increase of Pu content and increase slightly with a decrease of O/M ratio. The effect of Am content on the fuel design was negligible small in the range of Am content up to 3%.

Thermal conductivities of MOX were evaluated from thermal diffusivity measured by laser flash method and heat capacity calculated by Nuemann- Kopp's law. The thermal conductivity of MOX decreased slightly in the temperature of less than 1173K with increasing Am content.

The effect of Am accumulated in long-term storage fuel was evaluated from melting points and thermal conductivities measured in this study. It is concluded that the increase of Am in the fuel barely affect the fuel design in the range of less than 3%Am content.

Keywords : Melting Point, Thermal Conductivity, MOX, Fast Reactor, Americium

^{*1} Inspection Development Company Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 融点測定	2
2.1 試験方法	2
2.1.1 試料調製	2
2.1.2 試験方法	2
2.2 結果及び考察	3
2.2.1 W カプセルを用いた測定	3
2.2.2 カプセル材と MOX の反応に関する評価	3
2.2.3 UO ₂ -PuO ₂ 系の固相線及び液相線	5
2.2.4 MOX の融点に及ぼす O/M と Am の影響	6
2.3 まとめ	6
3. 熱伝導率測定	7
3.1 試験方法	7
3.1.1 装置	7
3.1.2 試料調製及び測定手順	7
3.2 結果及び考察	8
3.2.1 比熱の評価	8
3.2.2 密度依存性	9
3.2.3 UO ₂ 及び MOX の測定結果	10
3.3 まとめ	11
謝辞	12
参考文献	13

Contents

図、表リスト

- Fig. 2.1 Schematic diagram of cell for measuring melting temperature
Fig. 2.2 Heating temperature curves in the measurement of melting temperatures
Fig. 2.3 Microstructures of MOX after melting temperature measurement
Fig. 2.4 Solidus temperature of MOX with 0 -40%Pu
Fig. 2.5 Comparison of heating curves measured by using a tungsten capsule(W-4) and a rhenium inner (Re-4)
Fig. 2.6 Microstructure of MOX after melting temperature measurement
Fig. 2.7 Mapping images on the section of W-2 sample analyzed by EPMA
Fig. 2.8 Line analyses of U-L α , Pu-M β and W-L α on the section of W-2 sample
Fig. 2.9 Microstructure of W-2 sample after melting temperature measurement
Fig. 2.10 Mapping images on the section of Re-3 and Re-5 analyzed by EPMA
Fig. 2.11 Comparison of melting temperature of UO₂ between this work and other works
Fig. 2.12 Solidus and liquidus temperatures in the UO₂-PuO₂ system.
Fig. 2.13 Effect of O/M ratio on solidus temperature of MOX
Fig. 2.14 Phase diagram in Pu-U-O ternary system
Fig. 2.15 Effect of Am content on solidus temperature of MOX with 40%Pu
Fig. 3.1 Schematic illustrations of apparatus for measuring laser flash thermal diffusivity and drop calorimetry
Fig. 3.2 Flow sheet of sample preparation
Fig. 3.3 Microstructure on the section of MOX pellet with 93%T.D. and 85%T.D.
Fig. 3.4 Results of enthalpy measurements
Fig. 3.5 Effect of porosity on thermal conductivity
Fig. 3.6 Thermal Conductivity of UO_{2.00}
Fig. 3.7 Effect of Am content on thermal conductivity
Fig. 3.8 Effect of O/M on thermal conductivity
Fig. 3.9 Thermal conductivity in the range of temperatures up to 2300K
Fig. 3.10 Evaluation of oxygen potential of samples during the measurement

Table 2.1 Samples and results in melting temperature measurements

Table 2.2 Ceramographic examination results of 40%Pu-MOX

Table 3.1 List of samples of thermal diffusivity

1. はじめに

核燃料の熱設計を行う上で、融点及び熱伝導率は燃料の熱的制限値や、照射中の燃料挙動を評価する上で重要な物性データである。そのため、それらの熱物性に関する研究は核燃料の開発が開始されて以来、精力的に進められてきた。しかし、高速炉燃料として用いられるプルトニウム－ウラン混合酸化物(MOX)についての研究を行うためには、試料調製設備や測定装置などすべてをグローブボックス内で取り扱う必要があるため、研究を実施できる機関は限られている。また、測定データについても十分な精度、信頼性をもったデータは数少ない。

MOXは萤石型構造を有しており、酸素/金属比(O/M)が広い範囲でも安定に存在できる酸素不定比性化合物である。30%Puを含むMOXでは、酸素原子の7.5%が欠損しても萤石型構造を維持している。このような酸素不定比性はMOX燃料の大きな特徴であり、燃料の物性研究を難しくしている要因のひとつでもある。MOX燃料のO/Mの変化は、物性データに影響を与え、融点及び熱伝導率も大きく変化することが知られている。そのため、試料調製では高精度なO/M調製を実施する必要がある。著者らは、これまでにO/Mを高精度に調製するために、酸素ポテンシャルや酸素相互拡散係数のデータを測定・整備し、熱処理技術を確立してきた。その結果、高速炉燃料に用いられる30%Pu-MOXについて、O/M = 1.90～2.00の広範囲で高精度に調製できる技術を得ている。

MOX燃料の構成元素のひとつであるプルトニウムは原子炉内で生成され、再処理工程で抽出されて燃料として用いられる。Puは複数の同位体を持っており、特にPu-241は、半減期14.4年でAm-241に変わる。そのため、プルトニウム原料または燃料の長期保管によって、Amの含有率が増加する。現在、原子力機構で開発を進めているもんじゅ燃料では、燃料中のAmは最大で2%まで上昇することが見積もられている。このAmの増加もまた、燃料の物性データに影響することと考えられるが、その影響についてはこれまでほとんど評価されていない。もんじゅの再起動に向けて、Amの影響を評価することが重要な課題となっている。

本研究では、燃料の開発に必要な融点及び熱伝導率について、これまでの測定技術を高度化し、信頼性の高いデータを整備することを目的とし、特に高精度にO/Mを調製したAm含有MOXについて、系統的なデータ取得を実施した。

2. 融点測定

高速炉燃料としてプルトニウム－ウラン混合酸化物(MOX)が用いられている。高速炉では、燃料ペレットの中心部は2300K以上に達する。照射中の燃料の健全性を保つため、燃料の最高温度は燃料の融点によって制限されている。そのため、融点測定が古くから行われてきた¹⁻⁹⁾。MOX燃料の融点は、グローブボックス内においてO/Mを高精度に調製したMOX試料を調製することや、2800Kを超える高温領域での測定に起因した試験の難しさのため、測定データは限られている。

酸化物燃料の融点測定に関する初期の研究では、Vフィラメント法により行われた¹⁻³⁾。しかし、この方法は、測定中に試料の組成が変化するため信頼性がないことが報告されている^{4,5)}。その後、試料をWカプセル中に封入して測定するサーマルアレスト法が適用された。この方法は試料を一定速度で昇温または降温し、試料が溶融するときの潜熱による温度変化を測定する方法である。この方法により、UO₂及びMOXの融点が系統的に測定された⁴⁻⁶⁾。

MOX燃料の融点は、Lyon and Baily⁴⁾とAitken and Evance⁶⁾により系統的に測定評価された。Lyon and Baily⁴⁾は、PuO₂-UO₂系の融点測定を行い、PuO₂-UO₂系の融点を理想溶液モデルにより評価した。Aitken and Evance⁶⁾は、融点に及ぼすO/Mの影響を評価し、MOXの融点はO/Mに依存して大きく変化することを示した。他にもいくつかの測定結果が報告されているが、これらのデータは、高温の温度測定の難しさに起因した大きなバラツキを持っている⁷⁻⁹⁾。

本研究では、MOXの融点についてPu富化度、O/M及びAm含有率をパラメータとしてサーマルアレスト法により融点測定を行った。その結果、30%Pu以上の高Pu富化MOXの測定では、試料とWが反応し融点を低く見積もっていることを見出した。そのため、30%以上のPuを含むMOXについて、試料とWとの反応を防ぐためにRe内容器を用いた新しい測定技術を開発し、固相線及び液相線の評価を行った。

2.1 試験方法

2.1.1 試料調製

試料のリストはTable 2.1に示した。12%、20%、30%及び46%Pu-MOXの試料は、硝酸溶液中で金属比を調製し、マイクロ波加熱脱硝によって原料を調製した。他のMOX試料はUO₂及びPuO₂粉末から6時間のボールミル混合によって調製した。また、Amは、Pu中のPu-241の崩壊によって生成したものである。約40%のPuを含むMOXは、Am含有率の異なるPuを原料として用い、3種類のAm含有率の異なる試料を調製した。各粉末は成型、焼結し、焼結体を得た。焼結は加湿したAr-5%H₂混合ガス中で1973K、3時間行った。続いて、O/Mを2.00に調製するために1123Kにおいて5時間の熱処理を水分添加Ar-5%H₂混合ガス中($P_{O_2} = 2 \times 10^{-20}$ atm)の雰囲気中で行った。得られた焼結体は、EPMA測定及びX線回折を行い、均質なfcc単相であることを確認した。また、熱重量測定によりO/Mは2.00であることを確認した。Am含有率は、放射能分析によって測定した。

2.1.2 試験方法

試験に用いた装置は、高周波炉によって3300Kまで加熱することができ、温度測定は、CHINO

製の2色温度計を用いた。試料はWカプセル中に真空封入した。試験は、Fig. 2.1に示す5種類のセルを用い、Type C、D、Eは、Wカプセル内にレニウム製の内容器を入れた。標準試料としてTa、Mo、Nb、Al₂O₃の融点を測定し温度校正を行った。Type Cの温度校正はRe内容器の代わりにW内容器を用いて標準試料の融点を測定し温度校正を実施した。試験後の試料は、組織観察、EPMA分析(JEOL JXA-8800)、X線回折(Rigaku RINT1100)を実施した。

試験は、サーマルアレスト法によって融点を評価するための試験と、一定温度に昇温後、組織を観察する試験を実施した。Table 2.1は、融点を測定するために行った試料リストを示す。また、Table 2.2は、組織観察のための試験条件を示す。この試験では、O/M=2.00に調整された0.7%Am-40%Pu-MOXの試料を用いて実施した。

2.2 結果及び考察

2.2.1 Wカプセルを用いた測定

Table 2.1に、各試料の測定中の温度変化で観察された変曲点を示す。Fig. 2.2にタイプAのタンクステンカプセルで測定した0~40%PuのMOXの加熱温度曲線を示す。いずれの測定においても液相の出現に起因する温度変化が観察される。Fig. 2.3に測定後の微細組織を示す。30%及び40%PuのMOXには、多くの白色相が観察される。X線回折の結果、白色相は金属タンクステンであることが確認された。また、X線回折を用いた外部標準法による定量分析の結果、20%Pu以下のMOXでは、金属の量は1%未満であるが、30及び40%Pu-MOXでは、5%以上のWが観察された。このようなWは、融点測定中に試料中に溶け込んだと考えられる。

Fig. 2.4に温度変化の開始点と終了点をプロットした図を示す。各点は、それぞれ固相線及び液相線に相当すると考えられる。また、図中には、Lyon and Baily⁴⁾及びAitken and Evance⁶⁾によって報告された融点のデータも示す。これらの報告されたデータは、本報告と同様にWカプセル中に試料を真空封入し、サーマルアレスト法によって得られた値である。本試験で得られたデータと文献値を比較すると、Lyon and Baily⁴⁾のデータとよく一致することがわかる。これらのデータを用いて評価した固相線温度を図中に実線で示す。固相線温度は、Puの増加で単調に減少するが、30%Pu以上で大きく低下し、20%と30%Puの間で不連続となり、固相+液相の2相領域が広がることがわかる。30%Pu以上の試料では、測定後に多くの金属Wが観察されており、30%Pu以上のMOXの固相線温度測定ではMOXとWカプセルとの間で反応が起こるためMOXの固相線温度を正しく評価できていないと考えられる。

2.2.2 カプセル材とMOXの反応に関する評価

カプセル材とMOXの反応性を評価するためにTable 2.2に示す条件で試験を行った。これまで報告されたMOX燃料の融点測定は、Wカプセル内に封入して行われてきた。それらは、W-4の試験方法とほぼ同じ手法で行われている。Fig. 2.5にタイプAとCのセルによって測定した加熱曲線を比較する。温度変化の開始点は固相線温度、終了点は液相線温度に相当する。Wカプセルで試験したW-4は、40K/minの昇温速度では、液相の出現に伴う温度変化が検出できなかった。そのため、昇温速度を80K/minで試験を行った。図中に固相線温度を矢印で示す。Re-4のレニウム内容器を用いた固相線温度の方が、W-4の試料に比べ約100K高い温度で観察された。

Fig. 2.6 に各試験後の微細組織を示す。W カプセルを用いて試験した W シリーズの組織には、いずれにも白色の相が観察され、それは、EPMA 及び X 線回折の結果、金属Wであることが確認できた。固相線より低い温度で保持した W-1 は、試験後もペレット形状を維持していた。他の試料はいずれもカプセルの下部に塊状に存在しており、固相線より高い温度に昇温されたことを示唆している。W-2 の微細組織は結晶粒径の成長が観察されるが、W-4 では組織が微細化し、液相線より高い温度から冷却されたことを示唆している。Fig. 2.7 に W-2 の試料断面の EPMA 分析の結果を示す。W-2 は、固相線温度より高い 2963K まで昇温した試料である。成長した等軸粒の組織が観察され、結晶粒界には、Pu-rich の相とタングステンが存在することが観察できる。Fig. 2.8 に、ライン分析の結果を、Fig. 2.9 は、W-2 の W-rich の領域の金相写真を示すが、結晶粒界の Pu-rich の領域には、ウランは存在せず、Pu 酸化物で存在しており、タングステンは MOX と混在して存在している。金属タングステン及び Pu 酸化物は、固相線温度より低い 2868K まで昇温した W-1 でも観察されている。これらの観察の結果より、W カプセル中で試験した試験後の試料には Pu 酸化物+W 金属+MOX の 3 相が存在することがわかった。また、析出の形態から、結晶粒界で観察される Pu 酸化物とタングステンは、試験温度では液相で存在したと考えられる。

Re-1 の試料は、タイプ E のセルによって Mo と一緒にカプセル中に封入され、Mo の融点が観察された後、冷却した。Mo の融点は 2895K である。試験後の試料は、ペレットの状態で観察され、Fig. 2.6 に示した微細組織では、結晶粒の成長は観察されるが、製造時の等軸粒と良く似ており、溶融した形跡はない。そのため、40%Pu-MOX は、Mo の融点である 2895K では固相領域と考えられる。約 2930K まで昇温した Re-2 も結晶粒径の成長が観察されるが、試験後もペレットの状態で観察され溶融したような形跡は観察できなかった。Re-3 は温度変化の開始点以上に昇温しており、成長した結晶粒と部分的に溶融したような組織が観察できる。また、試験後の試料は、塊状に変形して観察された。液相線温度より高い温度を経験した Re-5 は結晶粒が微細化しており、溶融状態から冷却されたことを示している。これらの温度による組織変化から、Re-3 は、固相線より高い温度に達したと考えられ、Re-4 及び Re-5 の測定で観察された固相線温度と良く一致する。Fig. 2.10 に Re-3 及び-5 の EPMA 分析結果を示す。いずれもわずかな Re が観察されるが、Pu 及び U は、均一に分布しており、W シリーズの試験で観察された Pu 酸化物は観察されない。

Fig.2.4 にタングステンカプセルで測定した固相線温度の変化は、W との反応が起こる 30%Pu 以上の温度で固相線温度が急に低下した。40%Pu を含む MOX の固相線温度が、Re-4 及び Re-5 でされた 3009-3029K とすると、0-20%Pu を含む MOX の固相線温度の延長線上に位置し、 $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ 系の固相線温度は、 PuO_2 の含有率に依存して連続的な固相線を描くことができる。タングステンカプセルの組織観察試験結果は、固相線温度でタングステンと Pu 酸化物が溶融状態であったことを示している。タングステンカプセルで測定された 30%Pu 以上の高 Pu 含有 MOX の固相線温度は、タングステンと Pu 酸化物の液相が出現することによって観察され、Re 内容器を用いて測定した固相線温度が MOX の固相線温度を示していると考えられる。

Latta and Fryxell⁵⁾は、 UO_{2+x} の融点測定を W カプセル及び Re カプセルで行い、測定結果は同じであることを報告した。Re 及び W カプセルによる測定のいずれにおいても、O/U が 2.1 以上の試料において数%の Re 及び W が試料中に溶け込むことを報告した。また、タングステンは U_xWO_3 のペロブスカイト相で析出している。 UO_2 の測定では、W カプセル及び Re カプセルの測定にお

いて、いずれも O/U が高くなると反応を起こした。O/M=2.00 の 40%Pu-MOX の酸素ポテンシャルは、 $\text{UO}_{2.1}$ の酸素ポテンシャルに比べ低く、MOX の場合は、酸素ポテンシャルが低い条件でも反応が起り、Pu 酸化物と金属タンクスチルが観察される。MOX とタンクスチルカプセルとの反応は、Latta and Fryxell⁵⁾が報告した UO_2 の測定で観察された UO_2 と W の反応とは異なるメカニズムである。酸化物と金属の反応に関する研究は、多くの報告がされている。核燃料酸化物については、Yamanaka *et al.*¹⁹⁾が、 UO_2 と Ti の反応の研究を行い、1573K の低い温度でも液相が現れ、共晶反応が起こることを示している。MOX とタンクスチルの反応の場合、金属 W は、高温では酸化物として存在し、降温中に金属に変化することも考えられる。Pu 酸化物の析出は、W が還元剤として働くことによって析出する可能性もある。いずれにしても、MOX と W の反応によって Pu 酸化物が析出する現象を理解するためには、Pu-O 系や $\text{PuO}_2\text{-W}$ 系の状態図に関する実験が必要と考える。

2.2.3 $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ 系の固相線及び液相線

Fig. 2.11 に UO_2 の融点を文献値と比較する。文献値は、様々な方法で測定された結果を示す。本試験では、3 回測定の平均をとり 3128K を得た。文献値と比較すると、Ronchi¹¹⁾が測定した結果を除いた測定値の平均値と良く一致することがわかる。Fig. 2.12 に $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ 系の固相線と液相線温度を示す。20%Pu 以下の MOX は、W カプセルで測定した結果である。30%以上は、Re 内カプセルで測定を行った。固相線、液相線は、Pu 富化度の増加により単調に減少する。図中には、文献値も示すが、本測定結果は文献値と比べると 20%Pu 以下の MOX は良く一致するが、30%Pu 以上では高い値である。40% の Pu を含む MOX の固相線温度は、Lyon and Baily⁴⁾の報告した固相線温度に比べ約 100K 高い温度となっている。また、46%Pu 以上の MOX の測定結果は(●)(○)で表したが、これらの試料は、現在、測定後の試料の分析を行っている最中であり、測定中に O/M などの組成変化や Re との反応が起こっている可能性があるため、現時点では参考値として扱いである。

Epstein は、 $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ 系の固相線及び液相線を理想溶液モデルで評価し、 UO_2 及び PuO_2 の融解熱を報告した。最近、Carbajo *et al.*¹³⁾は、MOX の物性データをレビューし、 $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ 系の融点として、実験結果を多項式で近似して表した Adamson *et al.*¹⁴⁾の報告した式を推奨した。また、Konno *et al.*⁷⁾は、 UO_2 の融点として Latta and Fryxell⁴⁾の報告した融点を採用し、Adamson *et al.*¹⁴⁾の式を改良して報告している。これらの計算結果を Fig. 2.13 に示す。いずれの計算式も、30%Pu 以上の MOX の実験結果と一致するように記述されている。本研究では、20%Pu 以下の MOX の融点は、W カプセルを用いた測定結果を用い、それ以上の MOX は、Re を用いて測定した結果で評価する。本試験で得られたデータを用いて、固相線(T(S))、液相線(T(L))を Adamson *et al.*¹⁴⁾の手法に基づき評価し、0 から 40%Pu の MOX の融点として次の式を得た。

$$\left. \begin{array}{l} T(L) = 3128 - 224y - 35y^2 \\ T(S) = 3128 - 397y + 213y^2 - 78y^3 \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、y は PuO_2 のモルフラクションである。

これらの式で得られた固相線、液相線を Fig. 2.12 に実線で示す。本試験で得られた液相線及び

固相線の式は、実験結果を良く再現し、40%-MOX では、他の評価式に比べ約 100 K 高い融点である。

2.2.4 MOX の融点に及ぼす O/M と Am の影響

Fig. 2.13 に $(\text{Pu}_{0.12}\text{U}_{0.88})\text{O}_{2-x}$ 、 $(\text{Pu}_{0.2}\text{U}_{0.8})\text{O}_{2-x}$ 及び $(\text{Pu}_{0.4}\text{U}_{0.6})\text{O}_{2-x}$ の融点を O/M に対して示した。いずれの試料も O/M の低下によってわずかに融点が上昇する。Aitken and Evans⁶⁾は、O/M と Pu 富化度をパラメータとして MOX の融点を測定した。その後、Adamson *et.al.*^{14, 21)}によって融点が見直され、約 25K 低い値に修正された。Fig. 2.13 には修正された融点を示す。本研究のデータとよくあっており、 $(\text{Pu}_{0.2}\text{U}_{0.8})\text{O}_{2-x}$ の融点は O/M が 1.94 より低い組成では、Aitken and Evans⁶⁾のデータと合わせて評価すると、O/M の低下により融点が低下すると予想される。

不定比組成領域の融点を評価するためには、U-O系及びPu-O系の状態図を合わせて評価する必要がある。U-O系の状態図は、これまで多くの研究が行われ、熱力学的な評価もされている^{5, 11, 22-24)}。 $\text{UO}_{2\pm x}$ の融点は、 UO_2 の定比組成で最も高い融点をとり、ハイパー及びハイポ側にずれるに従い融点は低下することが知られている。一方、Pu-O系の状態図に関する報告は、限られており十分ではない。Boivineau²⁵⁾はPu-O系の状態図を評価し PuO_{2-x} の融点は $\text{O}/\text{Pu} = 1.7$ 程度で最小をとるとしている。Wriedt^{26, 27)}は、 $\text{PuO}_{1.61} + \text{PuO}_{1.52}$ の共存領域を証明できないため最小値はとらないとし、 $\text{O}/\text{M} = 1.8$ 程度で固相線温度が最大値をとる状態図を報告した。Fig. 2.14 に Pu-U-O系の液相を評価した図を示す。Pu-Oの状態図は、Wriedt^{26, 27)}の報告したもの用いて評価すると、 $\text{MO}_{2\pm x}$ において固相線温度が最大値をとる組成は、図中の破線で示した UO_2 と $\text{PuO}_{1.8}$ を結ぶ線と予想される。

$(\text{Pu}_{0.12}\text{U}_{0.88})\text{O}_{2-x}$ 及び $(\text{Pu}_{0.2}\text{U}_{0.8})\text{O}_{2-x}$ では、それぞれ、 $\text{O}/\text{M} = 1.976$ 及び 1.96 で融点が高くなると推定され、本試験で測定した融点の O/M 依存性を説明することができる。Pu-U-O系3元系の状態図を評価するためには、Pu-O系の融点の精度良い測定が必要である。

Fig. 2.15 に $(\text{Pu}_{0.4}\text{U}_{0.6})\text{O}_{2.00}$ の固相線温度に及ぼす Am の影響を示す。固相線は、Am の含有によりわずかに低くなる傾向があるが、3%の Am 含有で大きな変化は無い。図中には、式(1)で、Am 含有率を Pu に置き換えた場合の固相線温度を示した。40%Pu と 43%Pu の固相線温度違いは、約 8K であり、Fig. 2.15 から Am の含有による効果も同じ程度である。

2.3 まとめ

MOX 燃料の融点は、燃料開発を進める上で大変重要な物性値であるが、これまで十分な信頼性で測定・評価することができなかった。本研究において Pu 富化度及び O/M をパラメータとして取得した結果、W カプセルを用いた従来の測定では、30%以上の Pu を含む MOX の測定の場合、W カプセルとの間に大きな反応が起こり、MOX の正しい融点を測定できていないと考えられる。本研究では、反応を抑制するために Re 製の内容器を用いて測定を行い、従来の UO_2 - PuO_2 系の状態図を見直した。その結果、40%Pu-MOX では、従来のデータより約 100K 高い値であることが明らかとなった。また、O/M の依存性を評価した結果、O/M の低下により融点はわずかに高くなることがわかった。さらに、Am の影響を評価し、3%程度の Am 含有率であれば固相線に大きな影響を及ぼさないことを確認できた。

3. 熱伝導率測定

MOX 燃料の熱伝導率に関する初期の研究では、中心加熱法によって、試料中の径方向の温度分布から熱伝導率を評価する測定が行われた^{28,29)}。この方法は、直接、熱伝導率を測定することが可能であるが、測定中に組織や組成が変化するため、測定データを評価する上で注意する必要がある。その後、熱拡散率測定と比熱測定の結果から熱伝導率を評価することが試みられた³⁰⁾。熱拡散率測定は、レーザーフラッシュ法によって測定され、比熱は、走査熱量計やドロップカロリーメータにより測定されている。本研究では、レーザーフラッシュによる熱拡散率測定とドロップカロリーメータによる比熱測定によって熱伝導率の評価を進めた。しかし、比熱測定は、現時点での十分なデータは取得されておらず、本報告では一部のデータについて Nuemann-Kopp 則との比較にとどめる。熱伝導率の評価に用いた比熱は、Carbajo *et al.*³¹⁾ 及び Cordfunke and Konings³²⁾ が報告したデータを用いて Nuemann-Kopp 則から得たデータを用いた。

MOX の熱伝導率は、密度、Pu 富化度、O/M をパラメータとして多くの研究が行われている³³⁻⁴²⁾。しかし、測定範囲は、97~90%TD、O/M = 2.00~1.96 の狭い範囲に限られており、Am の影響を評価した報告はない。熱伝導率の評価式も各研究機関から報告されているが、それぞれ異なった依存性を持っている。本研究では、30%Pu を含む MOX について、85~95%TD、O/M = 1.90~2.00、0.7~3%Am の範囲で測定を行い、熱伝導率評価式を作成した。

3.1 試験方法

3.1.1 装置

Fig. 3.1 に、測定に用いたレーザーフラッシュ熱拡散率測定装置とドロップカロリーメータの概略図を示す。本装置はアルバック理工株式会社製 TC-7000 を改良した TC-7000UVH 型であり、グローブボックスでの操作を考慮して設計されている。熱拡散率測定装置の構成としては高温加熱炉、レーザー発振器、放射温度計からなる。高温加熱炉は W メッシュヒーターの抵抗加熱式 (Electric Resistance Heating furnace) のヒーターで加熱を行っており、試料温度は W-Re 热電対にて測定した。レーザー発振器には最大出力 17J/Pulse の Nd-ガラスレーザー発振器を使用した。また、赤外線検出器としては室温から 1473K までの温度領域では浜松ホトニクス株式会社製 InSb 検出器を、1473K を超える温度領域では東京精工株式会社製 Si 検出器を使用した。

試料裏面の温度応答から熱拡散率を求める解析方法としてはカーブフィッティング法⁴³⁾ を採用した。また、カーブフィッティング法解析ツールとして産業技術総合研究所で開発された CFP32 ver2.6 を用いた。

ドロップカロリーメータは、試料を W 容器中に真空封入し試験に供した。試料は、Ar 中または N₂ 中で任意の温度まで昇温し、装置下部の銅製のカロリーメータ内に落下させ、エンタルピー変化を測定する。エンタルピー変化を温度に対して測定し、温度に対して微分することによって比熱を評価する。測定データは、試料、ブランクカプセル及び標準試料の測定結果から算出した。

3.1.2 試料調製及び測定手順

測定に用いた試料は UO₂ 及び Am 含有量の異なる 3 種類の MOX 試料であり、Pu 含有率は約 30%、Am 含有率は約 0.7、2.2、3.1% である。(それぞれ 0.7%Am-MOX、2%Am-MOX、3%Am-MOX と

称する。）また、2%Am30%Pu-MOX の試料については熱伝導率の密度（気孔率）の影響を評価するために密度を 85～95%TD の範囲で調製した試料を準備した。測定に用いた試料のリストを Table 3.1 に示す。Am は、Pu-241 の崩壊によって生成されたもので、試料調製後に放射線分析によって測定した。

試料調製のフローを Fig. 3.2 に示す。また、測定した試料の組成を Table 3.1 に示す。試料調製は Am 含有率の高い PuO₂ 原料粉、UO₂ 原料粉、密度調製用としてステアリン酸亜鉛もしくはアビセル添加し、機械混合によって調製した。MOX ペレット中の Am 含有量は保管期間の異なる 3 種類の PuO₂ 原料を用いることによって調製した。3%Am-MOX は Am 含有率 10.7wt% の PuO₂ 原料粉、2%Am-MOX には Am 含有率 7.9% の PuO₂ 原料粉、0.7%Am-MOX には Am 含有率 2.1% の PuO₂ 原料粉を用いた。混合粉末は成型後、1923K で 3 時間の焼結を水分を添加した Ar-5%H₂ ガス気流中で行った。Fig. 3.3 に焼結ペレットの断面の微細組織を示す。95～90%TD のペレットは、ステアリン酸亜鉛の添加により調製した図中(a)に示すようなポア分布である。90-85%TD のペレットは球状アビセルを添加して調製したため、(b)に示すように約 100μm のポアが分散している。

熱拡散率測定用の試料は、焼結後の試験用ペレットを厚さ約 1 mm 程度にスライスし、O/M = 2.00 への調製のための熱処理を行った。密度測定は、液浸法を用いて行った。さらに様々な条件に熱処理を行い O/M = 1.90～2.00 の試料を調製し、試験に供した。測定は、5 × 10⁻⁴Pa の真空中で行い、一部の試料については、試験終了後に熱分析による O/M の測定と水浸法による密度測定を実施した。O/M と密度の測定結果は、Table 3.1 に示す。また、密度は温度によって変化するため、その補正是式(2)、(3)³⁵⁾ に示す密度補正式を用いて行った。式(2)は 273～923K で、式(3)は 923K 以上の温度領域で使用した。

$$\rho(T) = \rho(273K) \times (9.9734 \times 10^{-1} + 9.802 \times 10^{-6}T - 2.705 \times 10^{-10}T^2 + 4.391 \times 10^{-13}T^3)^{-3} \quad \dots \quad (2)$$

$$\rho(T) = \rho(273K) \times (9.9672 \times 10^{-1} + 1.179 \times 10^{-5}T - 2.429 \times 10^{-9}T^2 + 1.219 \times 10^{-12}T^3)^{-3} \quad \dots \quad (3)$$

エンタルピーの測定は、試料をタンクステンカプセル中に真空封入し、任意の温度に昇温後、銅製のカロリーメータ内の落下させ、測定を行った。測定は、ブランクカプセル及びサファイヤの標準試料を同じ条件で交互に行い、測定結果を校正した。

3.2 結果及び考察

3.2.1 比熱の評価

Fig. 3.4 に 0.7%Am-MOX と 2%Am-MOX のエンタルピーの測定結果を示す。図中には、Nuemann-Kopp 則から計算した結果も示す。測定結果は、いずれも計算結果と良く一致し、現在のところ Am の影響は観察されない。本試験で得られた測定データは、測定結果から比熱を評価するには、まだ不十分であり、測定データの取得を進めているところである。

本報告における比熱は、UO₂、PuO₂ 及び AmO₂ の報告値をもとに Nuemann-Kopp 則によって算出した。UO₂、PuO₂ の比熱を以下に示す。UO₂、PuO₂ の比熱 (J/mol/K) は(4)を用いて算出した³¹⁾。

$$C_p(T) = \frac{C_1 \theta^2 e^{\theta/T}}{T^2 (e^{\theta/T} - 1)^2} + 2C_2 T + \frac{C_3 E_a e^{-E_a/T}}{T^2} \quad \dots \quad (4)$$

Constant	UO ₂	PuO ₂	Units
C ₁	81.613	87.394	J/mol/K
C ₂	2.285E-3	3.978E-3	J/mol/K ²
C ₃	2.36E7	0	J/mol
θ	548.68	587.41	K
E _a	18531.7	-	K

AmO₂ の比熱 (J/mol/K) は(5)式を用いた³²⁾。

$$C_p(T) = 84.379 + 1.072 \times 10^{-3} T + 0.81519 \times 10^{-6} T^2 - 19.28 \times 10^5 T^{-2} \quad \dots \quad (5)$$

3.2.2 密度依存性

Fig. 3.5 に横軸に気孔率 (Fractional porosity) 、縦軸にそれぞれの温度における熱伝導率をプロットした図を示す。気孔率 (*p*) は理論密度比 (ρ_{Th}) より式(6)によって表すことができる。

$$p = 1 - \rho_{Th} \quad \dots \quad (6)$$

図中のシンボルは測定値であり、実線は式(7)に示すように気孔率がゼロの熱伝導率と後述する種々の気孔率補正式 *F* との積によって得られる各気孔率の熱伝導率を示している。各温度の熱伝導率は気孔率の増加 (密度の低下) とともにほぼ直線的に低下している。アビセルを添加した気孔率 : 0.113 の試料 (密度 88.7%TD) については直線から外れており、やや大きい熱伝導率を示した。

熱伝導率の評価を行うためには得られた熱伝導率に対して試料の気孔率を考慮した補正を行い、一定の気孔率における熱伝導率を用いて評価を行う方法が一般的である。気孔率効果を補正する方法としては試験から得られる気孔率 (*p*) の熱伝導率 (λ) 、気孔率ゼロ (100%TD) の試料の熱伝導率 (λ_0) 、補正式 (*F*) において式(7)の関係で定義されている。補正式 (*F*) については気孔率 (*p*) の関数として定義されており、Martin³³⁾ は密度補正式として Loeb 式、Maxwell-Eucken 式、Shultz 式を挙げている。式(8)(9)(10)にそれぞれの補正式の定義を示す。

$$k = F \times k_0 \quad \dots \quad (7)$$

k : 気孔率 (*p*) 試料の熱伝導率、*k*₀ : 気孔率ゼロ (100%TD) の試料の熱伝導率、*F* : 補正式

$$\text{Loeb 式} \quad : F = 1 - \alpha \times p \quad \dots \quad (8)$$

$$\text{Maxwell-Eucken 式} : F = \frac{1-p}{1+\beta \times p} \quad \dots \quad (9)$$

$$\text{Shultz 式} \quad : F = (1-p)^\gamma \quad \cdots (10)$$

p : 気孔率 (Fractional porosity)、

α, β, γ : それぞれの補正式の補正係数

実験データから得られたそれぞれの補正式に対する補正係数は、Loeb 式では $\alpha = 1.37$ 、Maxwell-Eucken 式では $\beta = 0.52$ 、Shultz 式では $\gamma = 1.44$ を得た。補正係数 α については IAEA が $\alpha = 2.5 \pm 1.5$ を推奨している。一方、補正係数 β, γ に関しては真球気孔がランダムに分布している理想的な状態での評価がされており、それぞれ $\beta = 0.5^{44)}$ 、 $\gamma = 1.5^{45})$ とされている。Fig. 3.5において実験で得られた熱伝導率とそれぞれの補正式から得られた計算値を比較すると、それぞれの補正式による計算値は本試験の範囲ではほとんど変わらず、グラフの両端（気孔率 0 と 0.2 の周辺）でわずかに差が現れる程度であった。また、熱伝導率の気孔率依存性がそれぞれの補正式によつて良く表現できている。理論的に求められる補正係数の値と、実験データから最適化を行つて得られた補正係数の値が同程度であること、また、比較的に単純な形式をしていることから、本試験における気孔率補正是 Maxwell-Eucken 式にて補正係数 $\beta = 0.5$ を採用した。以降の熱伝導率は(9)式により 100%TD の熱伝導率に換算して熱伝導率を評価した。

3.2.3 UO₂ 及び MOX の測定結果

実験より得られた熱拡散率から、比熱及び密度と合わせて熱伝導率を算出した。さらに、熱伝導率を Maxwell-Eucken 式にて理論密度 100%TD に規格化し評価した。Fig. 3.6 に UO₂ の測定結果を示す。図中には、文献値も示すが、本研究で得られたデータは、文献値と良く一致している。Fig. 3.7 に MOX の測定結果を示す。Pu 含有率は約 30%、Am 含有率はそれぞれ 0.7、2、3% である。

(それぞれの試料を 0.7%Am-MOX、2%Am-MOX、3%Am-MOX と称する。) 密度は約 90～95%TD である。Am 含有による熱伝導率への影響は、『もんじゅ』燃料の燃料最高温度評価において適用する約 1173K 以上では Am の増加による明確な差は観察されず、1173K 以下で熱伝導率をわずかに低下する傾向がある。Fig. 3.8 に熱伝導率の O/M 依存性を示す。熱伝導率は、O/M の低下により大きく低下することが確認できる。MOX 燃料の熱伝導率は、1773K 以下の温度領域では、フォノン伝導が支配的であることが知られている。Am の増加や O/M の低下は、不純物の増加としてフォノン振動の散乱因子として振舞うため、熱伝導率が低下すると考えられる。Am は、萤石型構造に置換型固溶し、不純物として振る舞うことによって熱伝導率に影響すると考えられる。しかし、MOX 中に蓄積される Am-241 は Pu-241 の核反応によって生成されるため、質量数は同じであり不純物としての影響もわずかと考えられる。一方、O/M の低下は、酸素空孔を生成するため、フォノン散乱因子として大きな影響を与えると考えられる。

Fig. 3.9 に昇温及び降温中の約 2300K までの測定結果を示す。O/M = 2.00 の試料を約 2300K まで測定し、その後、降温中に測定すると、熱伝導率は大きく低下し、O/M は 1.95 まで低下した。1773K までの測定では、昇降温においてほぼ同じデータを示したため、1773K 以上で O/M が低下したと考えられる。図中には、O/M が 1.95 以下のデータも示すが、O/M が 1.95 以下のデータは、昇降温においてほぼ同じ熱伝導率である。この様な変化は、測定中の酸素ポテンシャルの変化に

よって次のように説明できる。Fig. 3.10 に $O/M = 2.00$ と 1.95 の酸素ポテンシャルの温度依存性を示す。測定は、 5×10^{-4} Pa の高真空中で行っており、この雰囲気中の酸素ポテンシャルは図中に赤の線で示した。雰囲気中の酸素ポテンシャルは、約 1773K で $O/M = 2.00$ の酸素ポテンシャル、約 2300K で $O/M = 1.95$ の酸素ポテンシャルと交差する。これは、 $O/M = 2.00$ の試料は、1773K 以上で還元雰囲気になり、約 2300K で O/M は 1.95 になることを示している。このように、酸素ポテンシャルの変化によって $O/M = 2.00$ の試料の測定結果を矛盾無く説明することができる。

3.3 まとめ

MOX 燃料の熱伝導率について 85~95%TD、 $O/M = 1.90 \sim 2.00$ 、0.7~3%Am の範囲で熱伝導率を測定した。熱伝導率は、密度、 O/M の低下で大きく低下し、Am の含有による影響は、もんじゅ燃料の燃料最高温度評価において適用する約 1173K 以上ではほとんど影響がない。また、1173K 以下の温度領域では、わずかに低下する傾向が観察された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、もんじゅプロジェクト燃料班のメンバーである水野研究主席をはじめとする関係者各位に試験計画、測定結果について熱心に議論いただいた。また、測定方法及び測定データの妥当性について、中央安全審査品質保証委員会の第一専門部会、次世代原子力システム研究部門で設置する「燃料物性・挙動評価 WG」において議論いただいた。さらに、海外の研究機関においては、非公式な技術会議として Koning 氏をはじめとするドイツ ITU の研究者の方々、Sudreau 氏らフランス CEA の研究者の方々及びアメリカの Kennedy 氏 (INL)、McCellan 氏 (LANL) に熱心に議論いただいた。

本研究は、高速増殖炉研究開発センターから予算を配賦頂き実施した。予算確保にあたり大川氏及び竹内氏にご尽力頂いた。熱拡散係数のデータ処理は、NESI の富樫氏に協力いただいた。試験実施にあたり、小幡課長代理、菅谷 TL、皆川 TL 及び燃料技術開発課員の方々に、多くのご協力をいただいた。また、検査開発の品田氏、篠原氏、木幡氏、桑名氏、佐藤氏の本研究の試料調製及び分析での協力が無くては、約半年の短期間で本研究を実施することはできなかつた。著者らは、本研究を実施するにあたりご協力いただいた上記の方々に、深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) S. W. Pijanowski, L. S. DeLuca, Melting points in the system $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$, KAPL-1957, (1960)
- 2) T.D. Chikalla, The liquidus for the system $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$, HW-69831, (1961)
- 3) T.D. Chikalla, Melting behavior in the system $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$, J. Am. Ceram. Soc., 46 (1963) 323
- 4) W. L. Lyon, W. E. Baily , THE SOLID-LIQUID PHASE DIAGRAM FOR THE $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ SYSTEM, JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS 22 (1967) 332-339.
- 5) R. E. Latta, R. E. Fryxell, Determination of solidus – liquidus temperatures I the UO_{2+x} system ($-0.50 < x < 0.20$), J. Nuclear Materials, 35(1970)195
- 6) E. A. Aitken, S.K. Evans, A thermodynamic data program involving Plutonium and Uranium at high temperature, GEAP-5672, (1968)
- 7) K. Konno, T. Hirosawa, Melting Temperature of Mixed Oxide Fuels for Fast Reactors, Journal of Nuclear Science and Technology, 39, 7 (2002)771-777
- 8) K. Yamamoto, T. Hirosawa, Y. Yoshikawa, K. Morozumi, S. Nomura, Melting temperature and thermal conductivity of irradiated mixed oxide fuel, J. Nuclear Materials, 204(1993)85
- 9) K. Morimoto, M. Kato, U. Uno, A. Hanari, T. Tamura, H. Sugata, T. Sunaoshi, S. Kono, Preparation and characterization of (Pu, U, Np, Am, simulated FP) O_{2-x} , J. Chemistry of Solids, 66(2005)634
- 10)R. E. Bedford, G. Bonnier, H. Maas, F. Pavese : “Recommended values of temperature on the International Temperature Scale of 1990 for a selected set of secondary reference points” Metrologia, vol.33 p133 (1996)
- 11)M. Baichi, C. Chatillon, G. Ducros, K. Froment , Thermodynamics of the O–U system: III – Critical assessment of phase diagram data in the $\text{U}-\text{UO}_{2+x}$ composition range J. Nuclear Materials , 349 (2006) 57–82
- 12)L. F. Epstein, Ideal solid solution behavior and heats of fusion from the $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ phase diagram J. Nuclear Materials, 22 (1967)340-349
- 13)J. J. Carbajo, G. L. Yoder, S. G. Popv, V. K. Ivanov, A review of the thermophysical properties of MOX and UO_2 fuels, J. Nuclear Materials, 299(2001)181
- 14)M.G. Adamson, E.A. Aitken AND R.W. Caputi, EXPERIMENTAL AND THERMODYNAMIC EVALUATION OF THE MELTING BEHAVIOR OF IRRADIATED OXIDE FUELS, J. Nuclear Materials, 130 (1985) 349365
- 15)R. E. Woodley, “Oxygen Potentials of Plutonia and Urania Solid Solutions”, J. Nuclear Materials, 96, 5, (1981).
- 16)P. E. Blackburn and C. E. Johnson, “Chemical Modelling of Uranium, Plutonium and Oxygen Redistribution in Oxide Fuels by Vapour transport and Diffusion”, IAEA-SM-190/50, (1974) p17.
- 17)T. M. Besmann and T. B. Lindemer, “Chemical Thermodynamic Representations of (PuO_{2-x}) and $(\text{U}_{1-x}\text{Pu}_x\text{O}_w)$ ”, J. Nuclear Materials. 96, 5, (1981).
- 18)T. Fujino, T. Shiratori, N. Sato, K. Fukuda, K. Yamada, H. Serizawa, Post-irradiation examination of high burnup Mg doped UO_2 in comparison with undoped UO_2 and Ti doped UO_2 , J. Nuclear Materials, 297(2001)176
- 19)S. Yamanaka, J. Sbmiiizu and M. Miyake, Thermodynamic study of the compatibility of oxide fuel with

- metals, J. Nuclear Materials , 20(1993) 27-34
- 20)J.B. Ainscough, F. Rigby and S. C. Oscorn, THE EFFECT OF TITANIA ON GRAIN GROWTH AND DENSIFICATION OF SINTERED UO₂, J. Nuclear Materials , 52 (1974) 191-203
- 21)E. Aitken, Letter to K. Uematsu, (1976)
- 22)D. Manara, C. Ronchi, M. Sheindlin, M. Lewis, M. Brykin Melting of stoichiometric and hyperstoichiometric uranium dioxide, J. Nuclear Materials , 342 (2005) 148–163
- 23)C. Guéneau, M. Baichi, D. Labroche, C. Chatillon, B. Sundman, Thermodynamic assessment of the uraniuMOXygen system, J. Nuclear Materials, 304(2002)161
- 24)P. -Y. Chevalier, E. Fisher, B. Cheynet, Progress in the thermodynamic modelling of the O–U binary system, J. Nuclear Materials, 303(2002)1
- 25)J. -C. Boivineau, ETUDE PAR RAYONS X DU DIAGRAMME PLUTONIUMOXIGENE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE JUSQU'A 1100°C J. Nuclear Materials, 60 (1976) 31-38
- 26)H. A. Wriedt, The O-Pu (Oxygen-Plutonium) System, Bulletin of Alloy Phase Diagram, 11, 2, (1990)184
- 27)H. A. Wriedt, T. B. Massalski Ed. O-Pu(Oxygen-Plutonium), Binary Alloy Phase Diagrams, ASM International (1990)2907
- 28)山口俊弘, 畠山二三男, 金子洋光, 古屋廣高, 横内洋二, 小泉益通, 本田裕 :“熱伝導率測定(I) — 酸化物燃料(UO₂)—” PNC TN841-77-62 (1977)
- 29)山口俊弘, 小無健司, 上村勝一郎, 金子洋光 :“(U_{0.7},Pu_{0.3})O_{2-x} 燃料の熱伝導度測定(II)” PNC TN841-83-36 (1983)
- 30)“ファインセラミックスのレーザーフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率試験方法” JIS R 1611, (1997)
- 31)J.J.Carbajo, G.L.Yoder, S.G.Popov and V.K.Ivanov : " A review of the thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels ", J. Nucl. Mater., vol.299, p181, (2001)
- 32)E.H.P.Cordfunke and R.J.M.Konings, : " Thermochemical Data for Reactor Materials and Fission Products ", North-Holland, (1990)
- 33)D. G. Martin : " A re-appraisal of the thermal conductivity of UO₂ and mixed (U, Pu) oxide fuels ", J. Nucl. Mater., vol.110, p73, (1982)
- 34)Susumu Fukushima, Toshihiko Ohmichi, Atsushi Maeda and Muneo Handa : " Thermal conductivity of near-stoichiometric (U, Pu, Nd)O₂ and (U, Pu, Eu)O₂ solid solutions ", J. Nuclear Materials., vol.116, p287, (1983)
- 35)Y. Philipponneau : " Thermal conductivity of (U, Pu)O_{2-x} mixed oxide fuel ", J. Nuclear Materials , vol.188, p194, (1992)
- 36)Christian Duriez, Jean-Pierre Alessandri, Thierry Gervais and Yannick Philipponneau : " Thermal conductivity of hypostoichiometric low Pu content (U,Pu)O_{2-x} mixed oxide ", J. Nuclear Materials., vol.277, p143, (2000)
- 37)P.R. Vasudeva Rao, S. Anthonyam, M.V. Krishnaiah and V. Chandramouli : " Oxygen potential and thermal conductivity of (U, Pu) mixed oxides ", J. Nuclear Materials., vol.348, p329, (2006)
- 38)H.Elbel and D.Vollath, : " Experimental correlations between pore structure and thermal conductivity ", J.

- Nuclear Materials., vol.153, p50, (1988)
- 39)H.Elbel and H.E.Schmidt, : " Characterization of mixed oxide fuel pellets with respect to their thermal conductivity ", in Proceedings of BNES conference, March 25-29, 1985, Stratford-upon-Avon, UK, Vol.1, P.357-361 (1985)
- 40)J.C.VanCraeynest *et al.*, : " Etude De La Conductibilite Thermique Des Oxydes Mixtes D'Uranium Et De Plutonium ", J. Nuclear Materials , vol.26, p132, (1968)
- 41)J.M.Bonnerot, : " Proprietes Thermiques Des Oxydes Mixtes D'Uranium Et De Plutonium ", Rapport CEA-R-5450 (1988)
- 42)M.Inoue, K.Abe and I.Sato, : " A method for determining an effective porosity correction factor for thermal conductivity in fast reactor uranium-plutoniMOXide fuel pellets ", J. Nuclear Materials , vol.281, Isuuue2-3, P.117, (1968)
- 43)T.Baba and A.Cezairliyan : " Thermal Diffusivity of POCO AXM-5Q1 Graphite in the Range 1500 to 2500 K Measured by a Laser-Pulse Technique ", International Journal of Thermophysics, vol.15, No.2 p343, (1994)
- 44)金城克彦, 小沢丈夫, : " 充てん材配合エボキシ樹脂の熱伝導率 ", 热物性, vol.3, No.2,P106, (1989)
- 45)B. Shultz, : " Thermo Conductivity of Porous and Highly porous Material ", High Temperature – High Pressure, vol.13, P649, (1981)

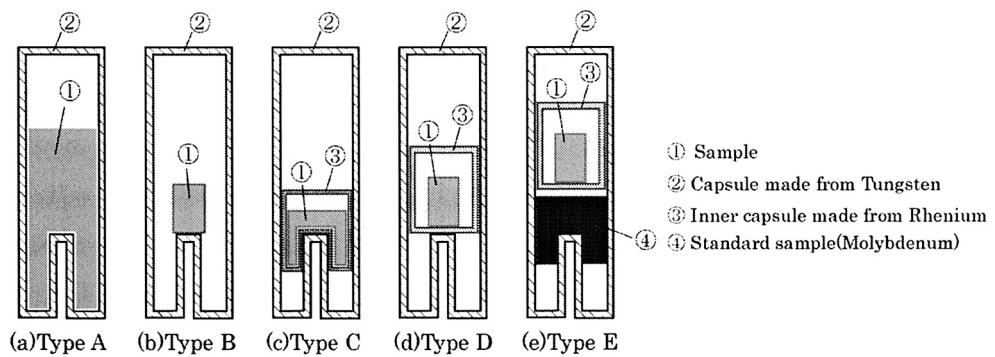


Fig. 2.1 Schematic diagram of cell for measuring melting temperature : (a) Vacuum enclosure of clumpy MOX in Tungsten capsule, (b) Vacuum enclosure of MOX pellet in Tungsten capsule, (c) Crushed MOX in inner capsule made from Rhenium and Vacuum enclosure of inner capsule in Tungsten capsule, (d) MOX pellet in inner capsule made from Rhenium and Vacuum enclosure of inner capsule in Tungsten capsule and (e) MOX pellet in inner capsule made from Rhenium and Vacuum enclosure of inner capsule with standard sample in Tungsten capsule

Table 2.1 Samples and results in melting temperature measurements

Sample Name	Composition			Type of Cell	Inflection point of heating temperature curve		
	U (%)	Pu (%)	Am (%)		O/M	Starting point (K)	Ending point (K)
UO _{2.00}	100			2.000	A	3140	3145
				2.000	A	3111	3130
				2.000	A	3134	3173
12%Pu-MOX	87.9	11.8	0.3	2.000	A	3077	3117
				1.989	A	3093	3135
				1.983	A	3084	3105
				1.975	A	3085	3107
				1.974	A	3054	3069
				1.971	A	3100	3124
				2.000	A	3052	3090
20%Pu-MOX	79.7	19.9	0.4	1.982	A	3059	3089
				1.967	A	3066	3079
				1.954	A	3074	3109
				1.950	A	3079	3097
				1.942	A	3092	3118
				2.000	A	2967	3047
30%Pu-MOX	69.6	29.8	0.6	2.000	A	3030	3074
				2.000	C	2910	3024
0.7%Am-40%Pu-MOX	59.6	39.7	0.7	2.000	C	2997	3029
				2.000	C	3001	3049
				1.925	C	3073	3102
				1.949	C	30094	3063
				1.959	C	3025	3037
				1.972	C	3054	3071
				2.000	C	3000	3052
1.9%Am-40%Pu-MOX	58.5	39.6	1.9	2.000	C	3006	3043
				1.961	C	3021	3071
				2.000	C	2988	2771
3.3%Am-40%Pu-MOX	58.4	38.3	3.3	2.000	C	2998	2777
				2.000	C	2940	
46%Pu-MOX	51.4	46.3	2.4	2.000	C	2939	2974
60%Pu-MOX	37.7	60.0	2.3	2.000	C	2852	2952
80%Pu-MOX	17.8	80.0	2.2	2.000	C	2822	
PuO ₂	97.9	2.1	2.000	C	2908		

Table 2.2 Ceramographic examination results of 40%Pu-MOX

Sample No.	Type of cell	Shape of sample	Test condition	Inflection point of heating temperature curve	
				Starting point	Ending point
W-1	Type B	Pellet	2868 K × 5min	—	—
W-2	Type B	Pellet	2963 K × 5min	—	—
W-3	Type B	Pellet	3023 K × 5min	—	—
W-4	Type A	Crushed pellet	heating up to 3090 K, 80K/min	2906 K	3024 K
Re-1	Type E	Pellet	2895 K × 1 min	—	—
Re -2	Type D	Pellet	2903-2927 K × 2min	—	—
Re -3	Type C	Crushed pellet	heating up to 3031 K	—	—
Re -4	Type C	Crushed pellet	heating up to 3070 K, 40K/min	3009 K	3020 K
Re -5	Type C	2nd test of No. Re-4	heating up to 3090 K, 40K/min	3029 K	3039 K

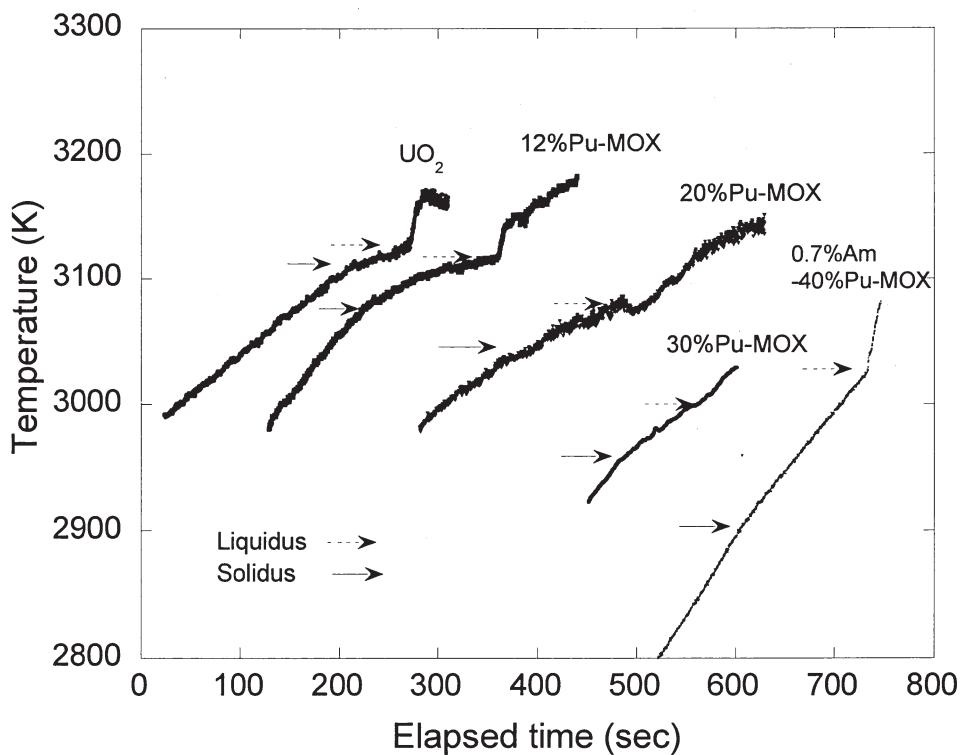


Fig. 2.2 Heating temperature curves in the measurement of melting temperatures

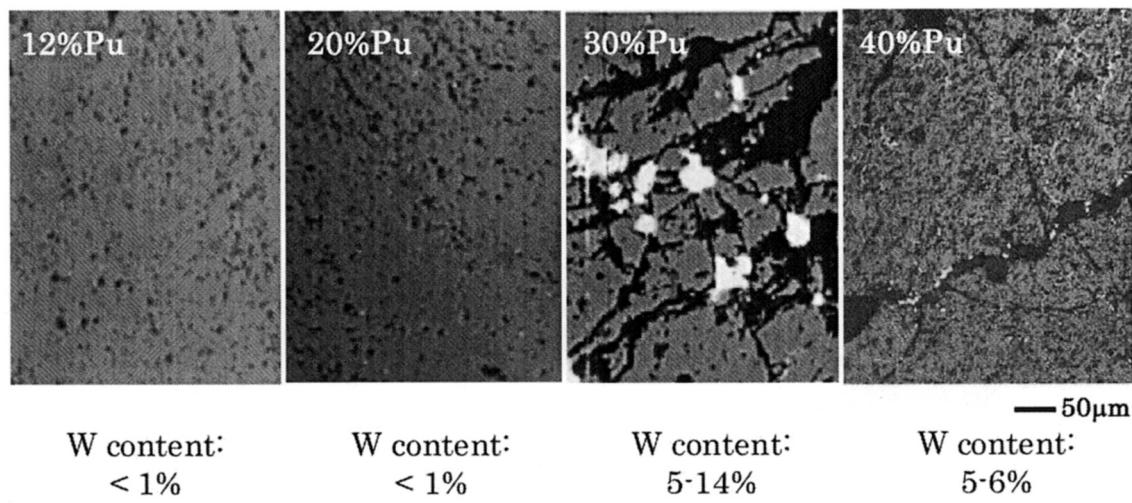


Fig.2.3 Microstructures of MOX after melting temperature measurement

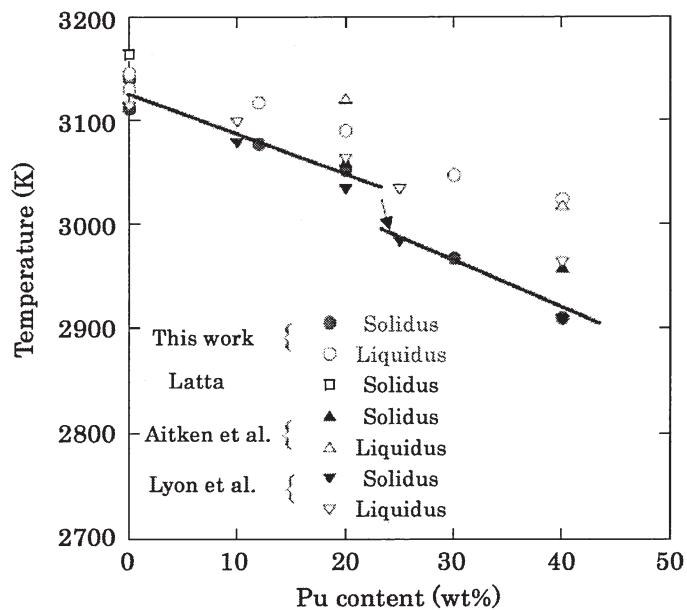


Fig.2.4 Solidus temperature of MOX with 0 - 40%Pu

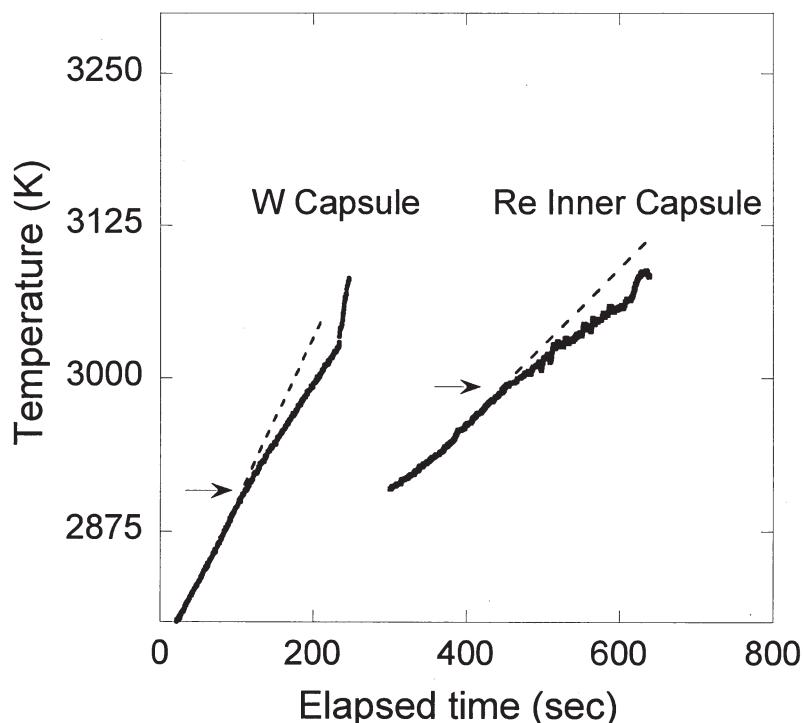


Fig.2.5 Comparison of heating curves measured by using a tungsten capsule(W-4) and a rhenium inner (Re-4)

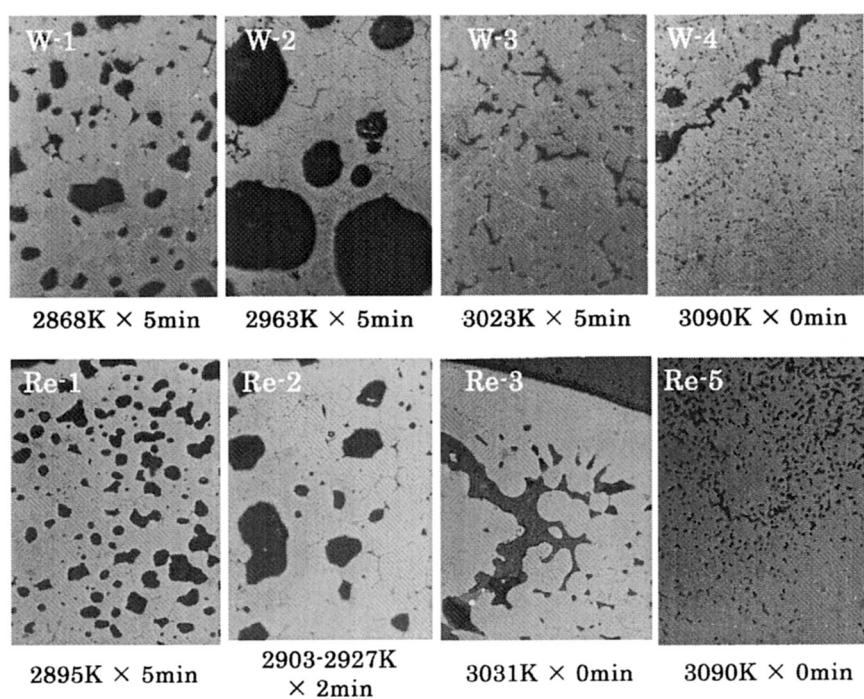


Fig.2.6 Microstructure of MOX after melting temperature measurement

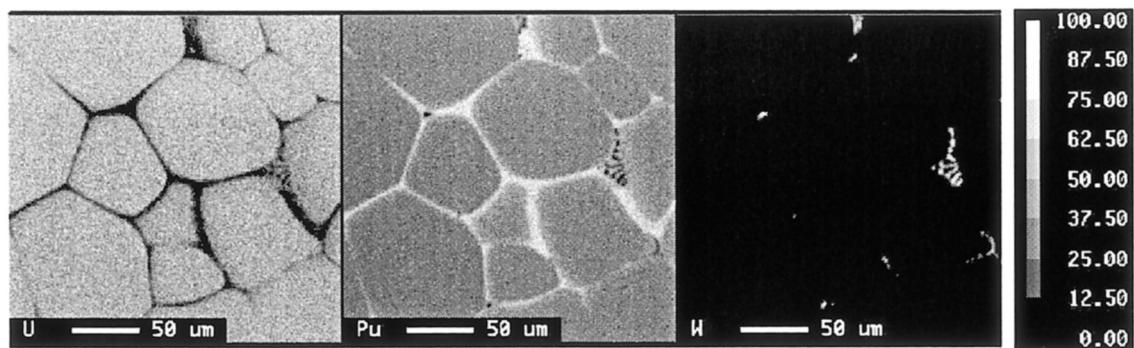


Fig.2.7 Mapping images on the section of W-2 sample analyzed by EPMA

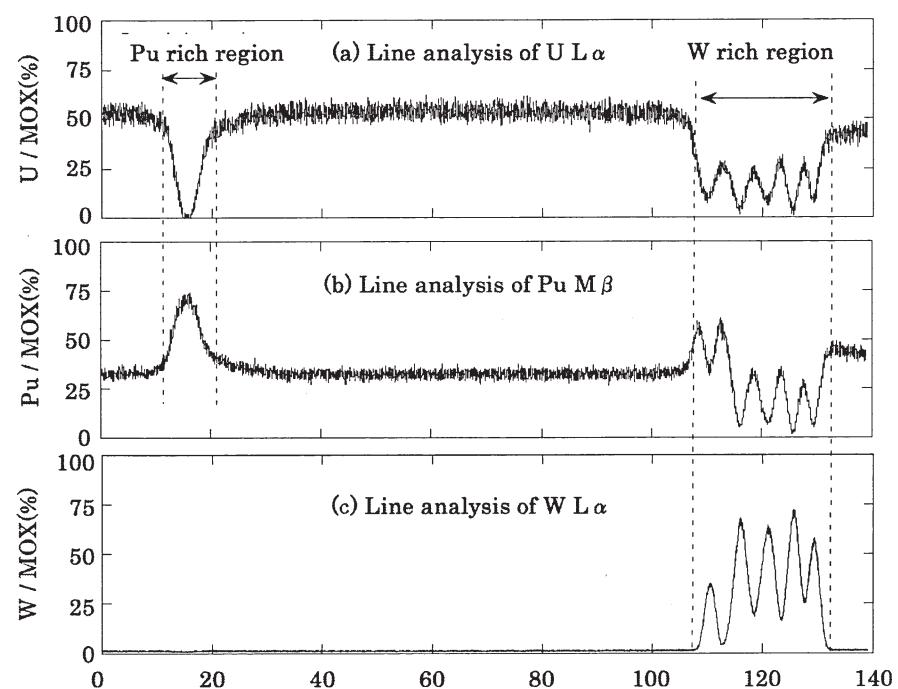


Fig.2.8 Line analyses of U-L α , Pu M β and W-L α on the section of W-2 sample

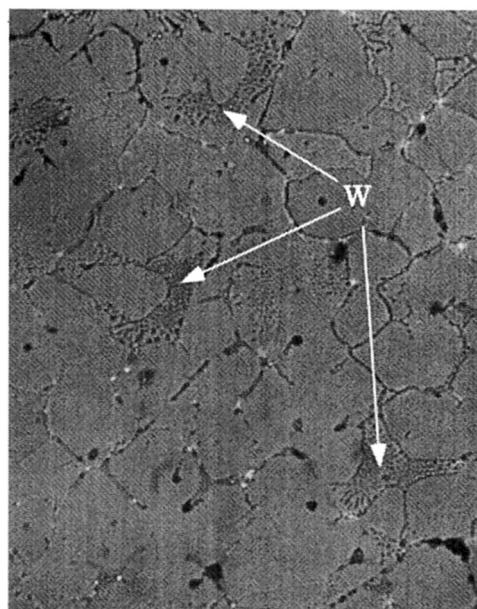
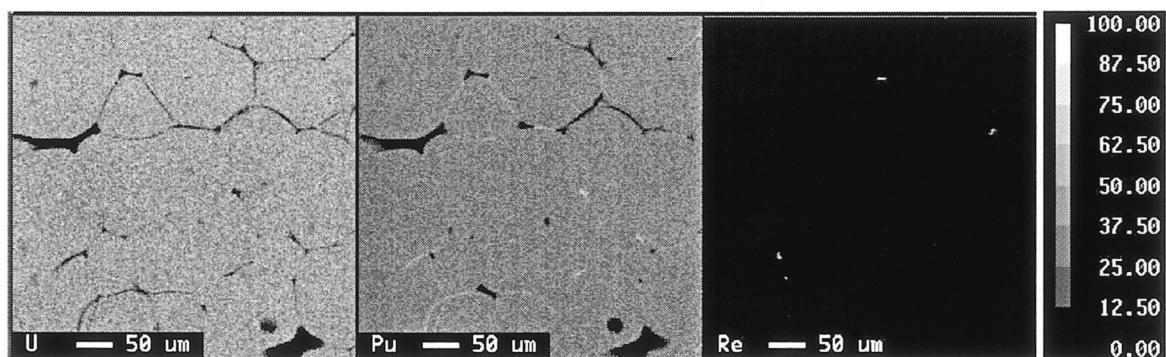
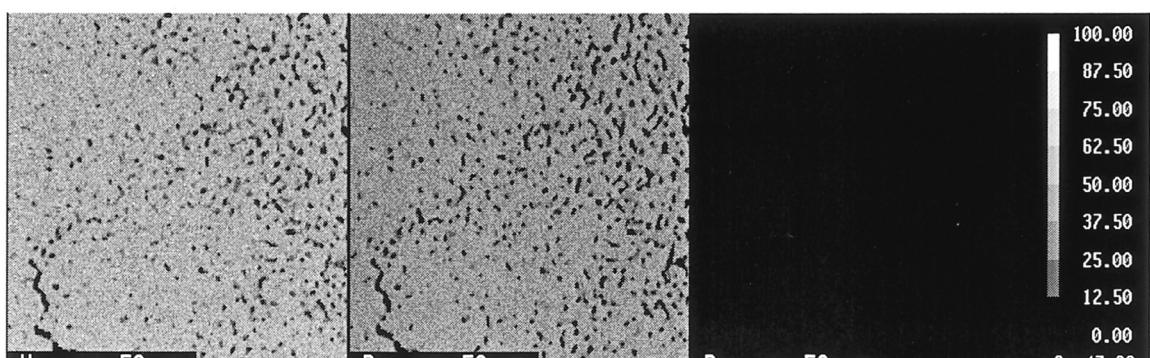


Fig.2.9 Microstructure of W-2 sample after melting temperature measurement

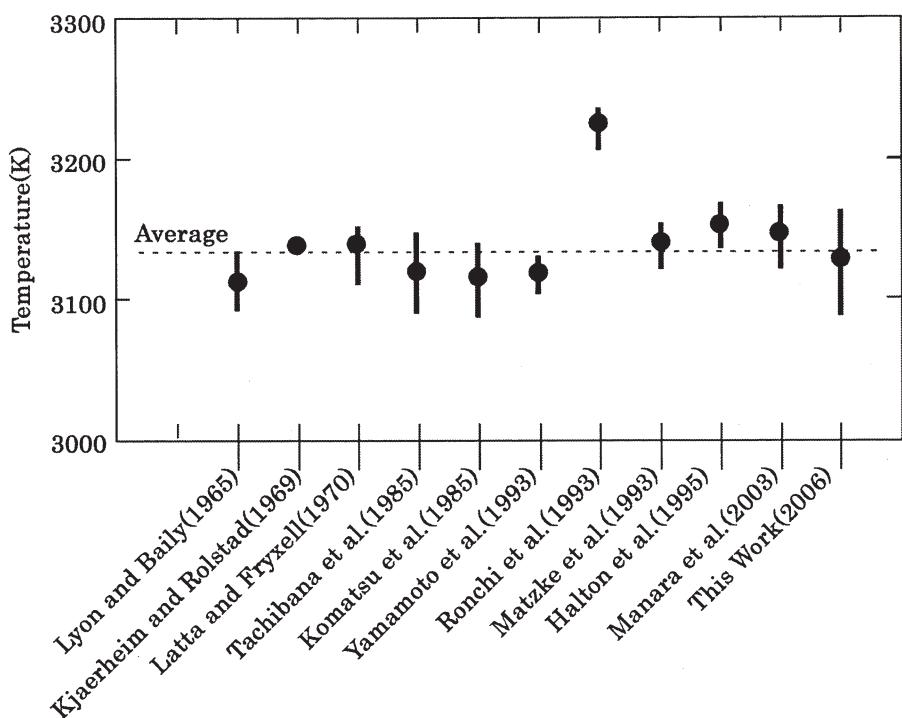
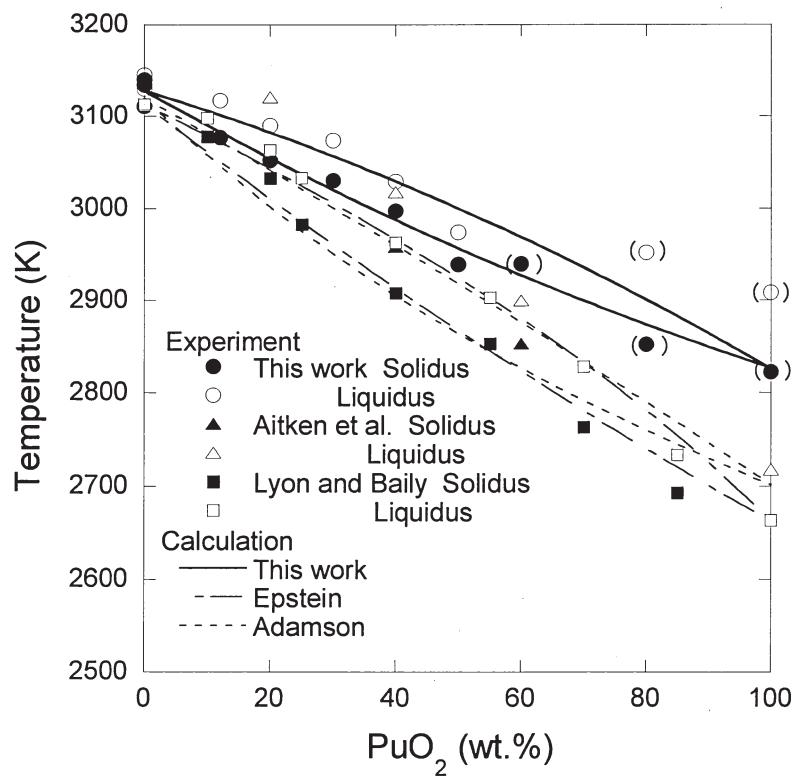


(a) Re-3



(b) Re-5

Fig.2.10 Mapping images on the section of Re-3 and Re-5 analyzed by EPMA

Fig.2.11 Comparison of melting temperature of UO_2 between this work and other worksFig.2.12 Solidus and liquidus temperatures in the $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ system.

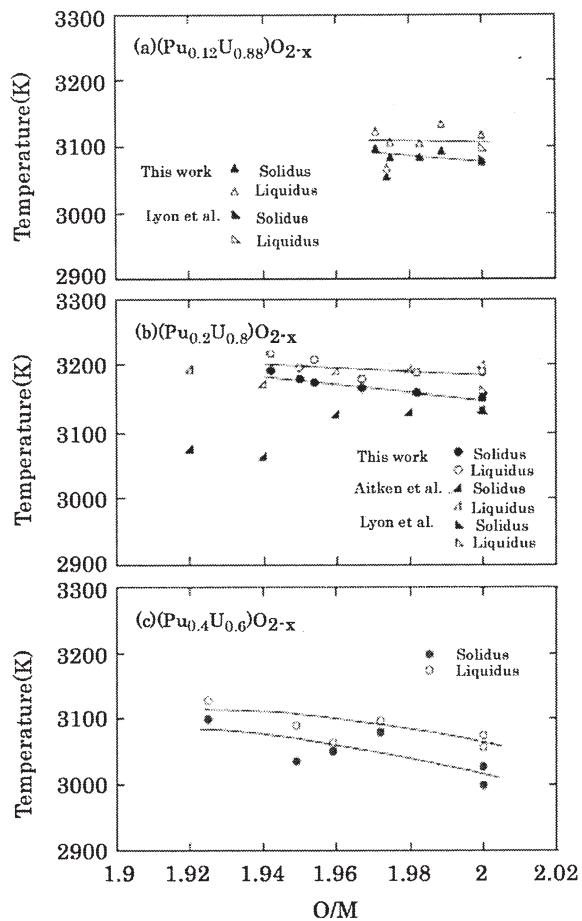


Fig.2.13 Effect of O/M ratio on solidus temperature of MOX

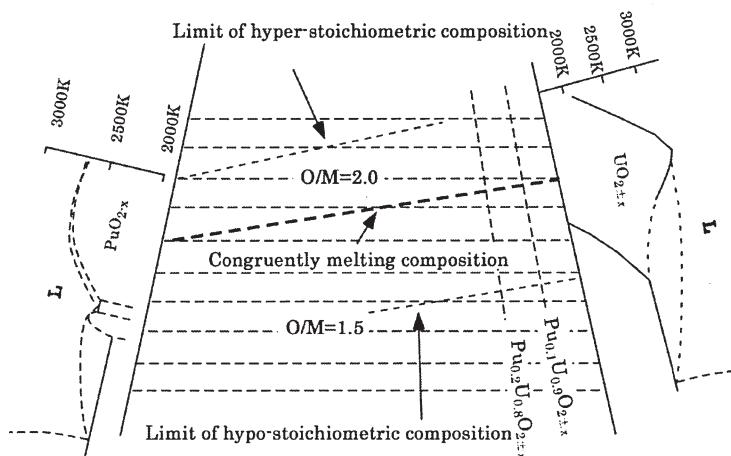


Fig.2.14 Phase diagram in Pu-U-O ternary system

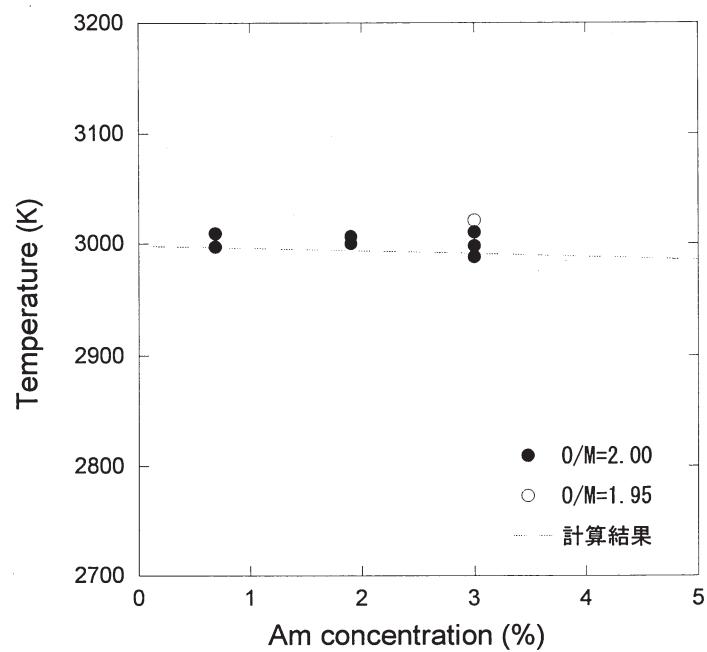


Fig.2.15 Effect of Am content on solidus temperature of MOX with 40%Pu

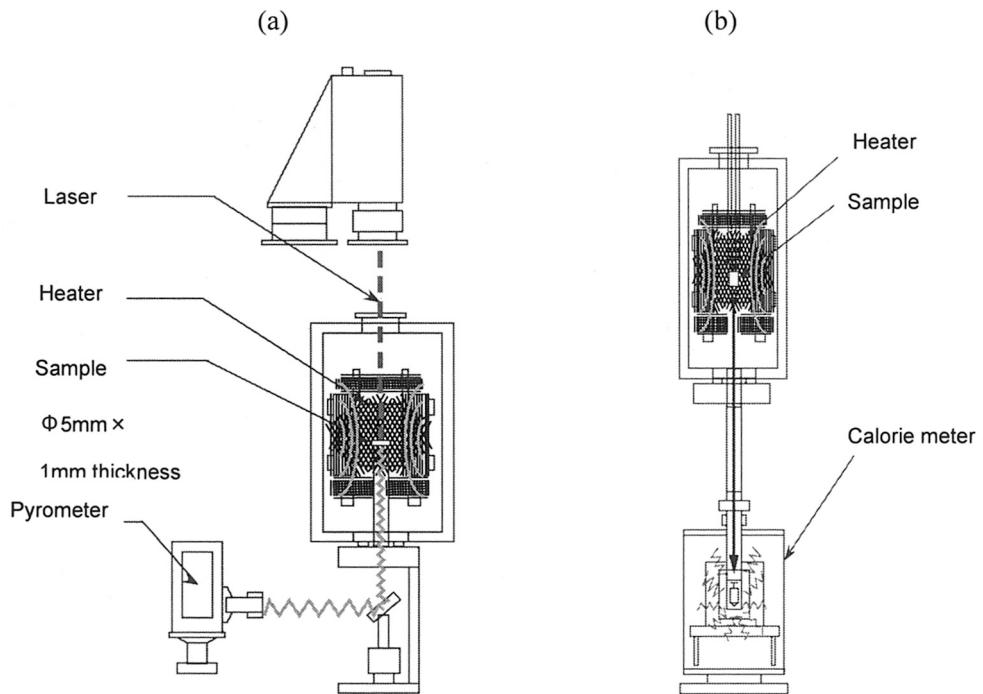


Fig.3.1 Schematic illustrations of apparatus for measuring laser flash thermal diffusivity and drop calorimetry

(a) laser flash thermal diffusivity measuring equipment and (b) drop calorimeter

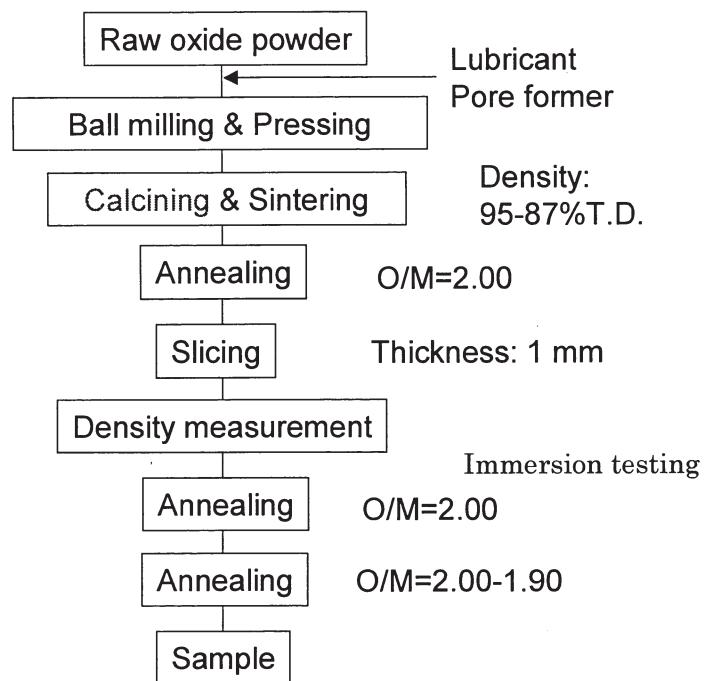


Fig. 3.2 Flow sheet of sample preparation

Table 3.1 List of samples of thermal diffusivity

No.	Pu/Metal	Am/Metal	O/M		Density (%TD)		Temperature	Comment
			Before	After	Before	After		
S02-MOX-04	29.4%	2.3%	2.00	2.00	93.56	93.58	873~1773K	Porosity
S02-MOX-05	29.5%	2.2%	2.00		94.76	93.85	873~1773K	
S02-MOX-06	29.5%	2.2%	2.00		91.99	92.04	873~1773K	
S02-MOX-07	29.5%	2.2%	2.00		92.58	91.58	873~1773K	
S02-MOX-08	29.5%	2.2%	2.00		95.17	95.23	873~1773K	
S02-MOX-09	29.5%	2.2%	2.00		89.97	90.42	873~1773K	
S02-MOX-20	29.5%	2.2%	2.00		87.16	90.14	873~1773K	
S02-MOX-21	29.5%	2.2%	2.00		84.28	87.16	873~1773K	
S02-MOX-01	29.8%	0.7%	2.00		91.52		873~1773K	Am content
S02-MOX-02	29.8%	0.7%	2.00		91.52	91.48	873~1773K	
S02-MOX-02	29.8%	0.7%	2.00		91.52		873~1773K	
S02-MOX-03	29.5%	3.1%	2.00	2.00	92.88	92.88	873~1773K	
S02-MOX-04	29.5%	2.2%	2.00	2.00	93.56	93.58	873~1773K	
S02-MOX-05	29.5%	2.2%	2.00		94.76	93.85	873~1773K	
S02-MOX-06	29.5%	2.2%	2.00		91.99	92.04	873~1773K	
S02-MOX-07	29.5%	2.2%	2.00		92.58	91.58	873~1773K	
S02-MOX-08	29.5%	2.2%	2.00		95.17	95.23	873~1773K	
S02-MOX-09	29.5%	2.2%	2.00		89.97	90.42	873~1773K	
S02-MOX-16	29.8%	0.7%	2.00		91.24	91.19	873~1773K	
S02-MOX-17	29.5%	3.1%	2.00		91.71	91.71	873~1773K	
S02-MOX-25	29.4%	3.1%	2.00		91.41	92.27	873~1773K	
S02-MOX-04	29.4%	2.3%	2.00	2.00	93.56	93.58	873~1773K	O/M ratio
S02-MOX-05	29.5%	2.2%	2.00		94.76	93.85	873~1773K	
S02-MOX-06	29.5%	2.2%	2.00		91.99	92.04	873~1773K	
S02-MOX-07	29.5%	2.2%	2.00		92.58	91.58	873~1773K	
S02-MOX-08	29.5%	2.2%	2.00		95.17	95.23	873~1773K	
S02-MOX-09	29.5%	2.2%	2.00		89.97	90.42	873~1773K	
S02-MOX-10	29.5%	2.2%	1.98	1.98	94.23	94.25	873~1773K	
S02-MOX-11	29.5%	2.2%	1.96	1.96	93.89	95.04	873~1773K	
S02-MOX-12	29.5%	2.2%	1.94	1.95	94.19	95.08	873~1773K	
S02-MOX-13	29.5%	2.2%	1.92	1.92	93.44	94.54	873~1773K	
S02-MOX-14	29.5%	2.2%	1.90	1.93	93.08	95.32	873~1773K	
S02-MOX-61	29.8%	0.7%	2.00	2.00	91.53	91.31	873~1773K	High Temp.
S02-MOX-62	29.8%	0.7%	1.97	1.97		94.38	873~1773K	
S02-MOX-32	29.4%	2.3%	1.91	1.92	92.85	94.96	873~2273K	
S02-MOX-50	29.8%	0.7%	1.91	1.93	91.13	92.58	873~2273K	
S02-MOX-51	29.4%	2.3%	1.92	1.93	93.37	95.19	873~2273K	
S02-MOX-54	29.8%	0.7%	1.93	1.95	91.34	92.42	873~2273K	UO ₂
S02-MOX-56	29.5%	2.2%	1.95	1.95	93.00	93.23	873~2273K	
S02-MOX-57	29.5%	2.2%	1.94	1.93	92.91	94.63	873~2273K	
S01-UO2-06	0.0%	0.0%	2.00		92.83	93.03	873~1773K	
S01-UO2-07	0.0%	0.0%	2.00		91.98		873~2273K	

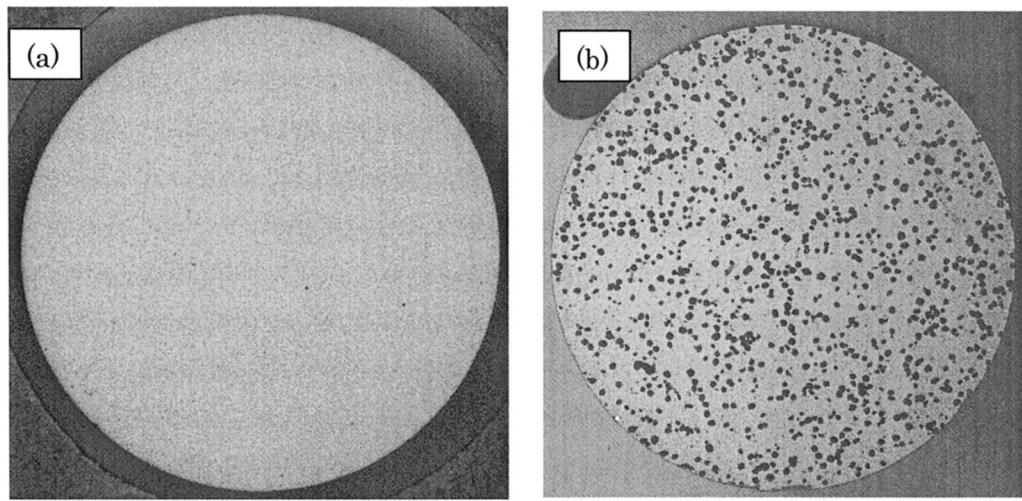


Fig. 3.3 Microstructure on the section of MOX pellet with 93%T.D. and 85%T.D.

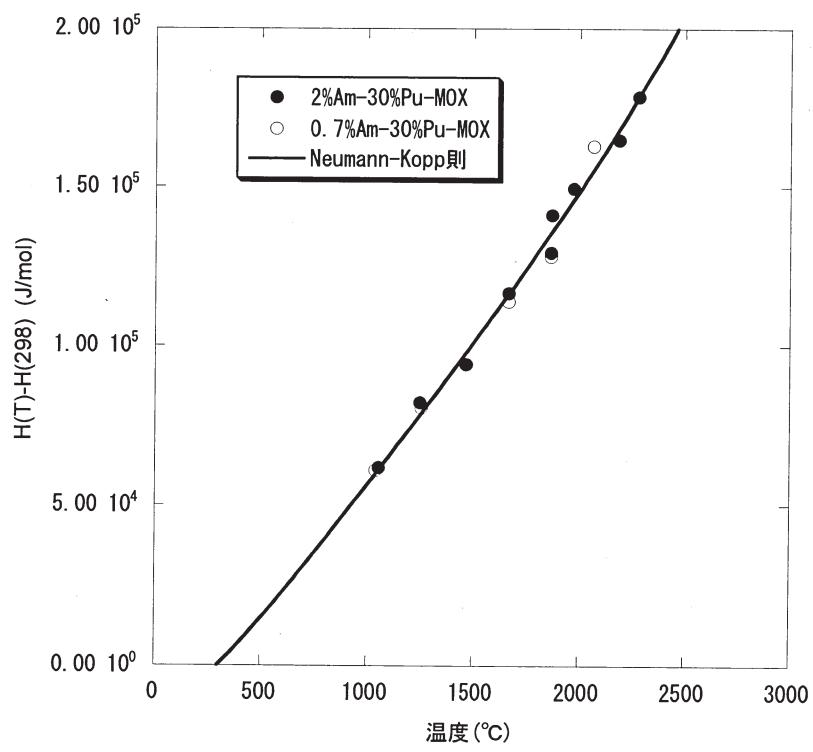


Fig. 3.4 Results of enthalpy measurements

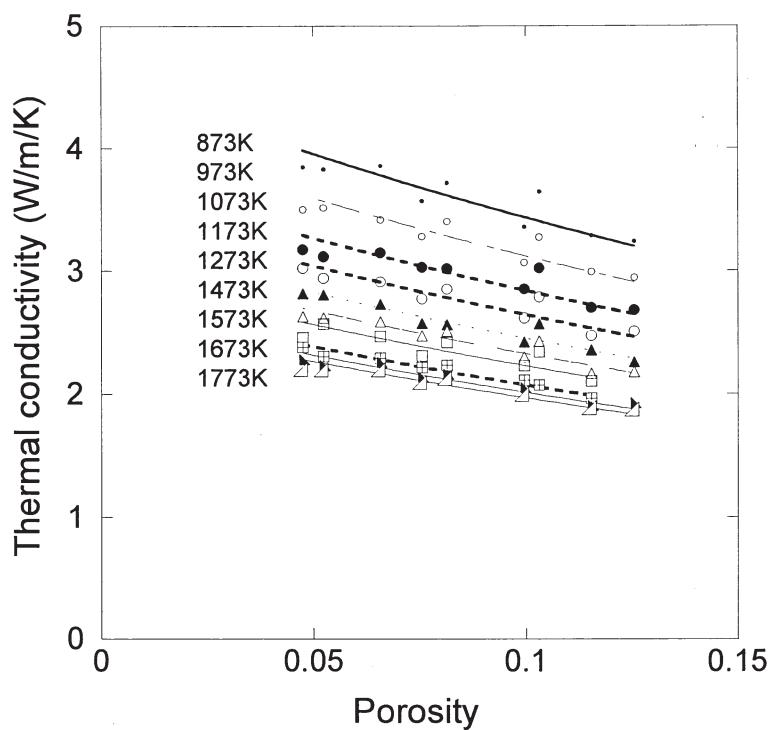


Fig. 3.5 Effect of porosity on thermal conductivity

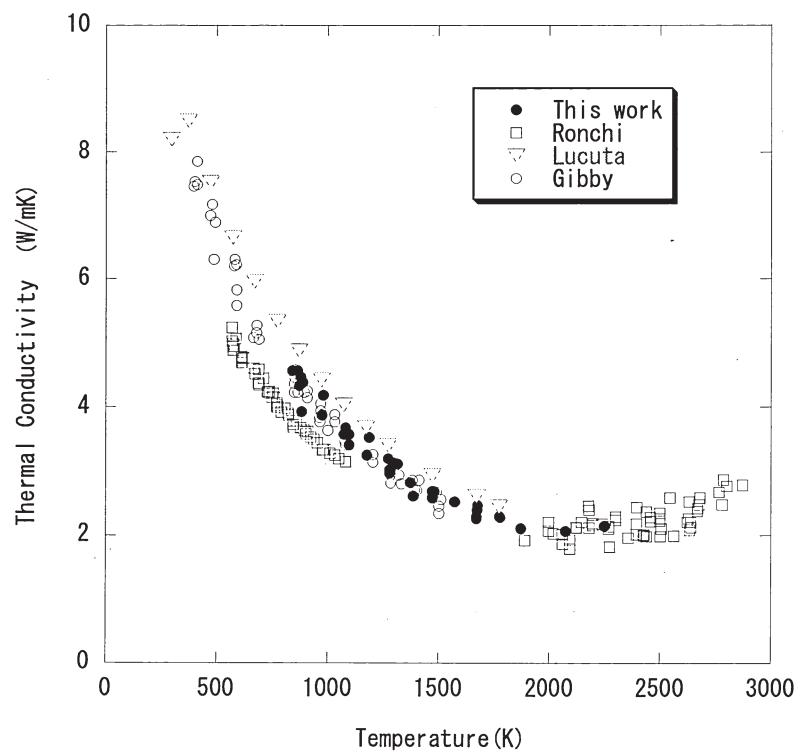


Fig. 3.6 Thermal Conductivity of $\text{UO}_{2.00}$

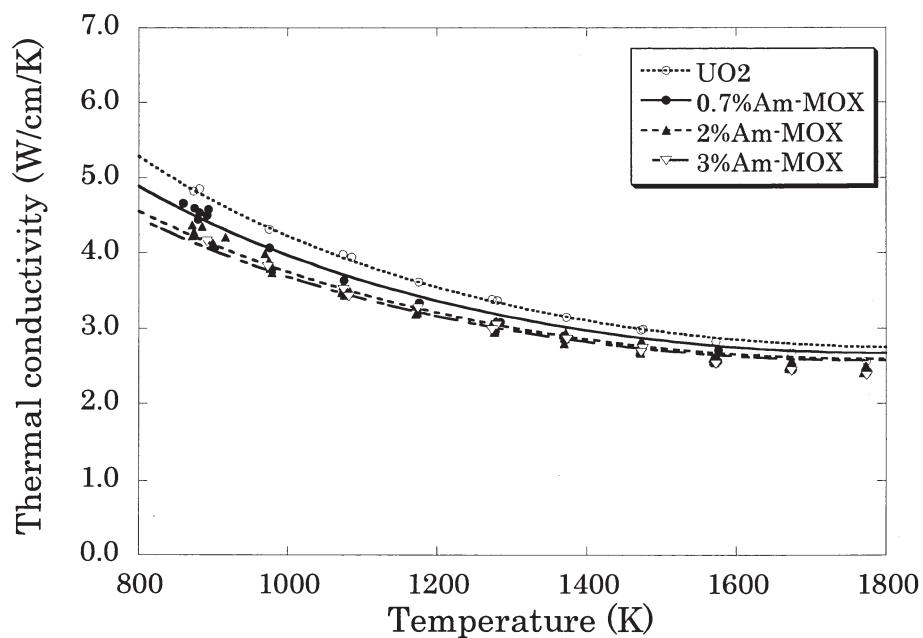


Fig. 3.7 Effect of Am content on thermal conductivity

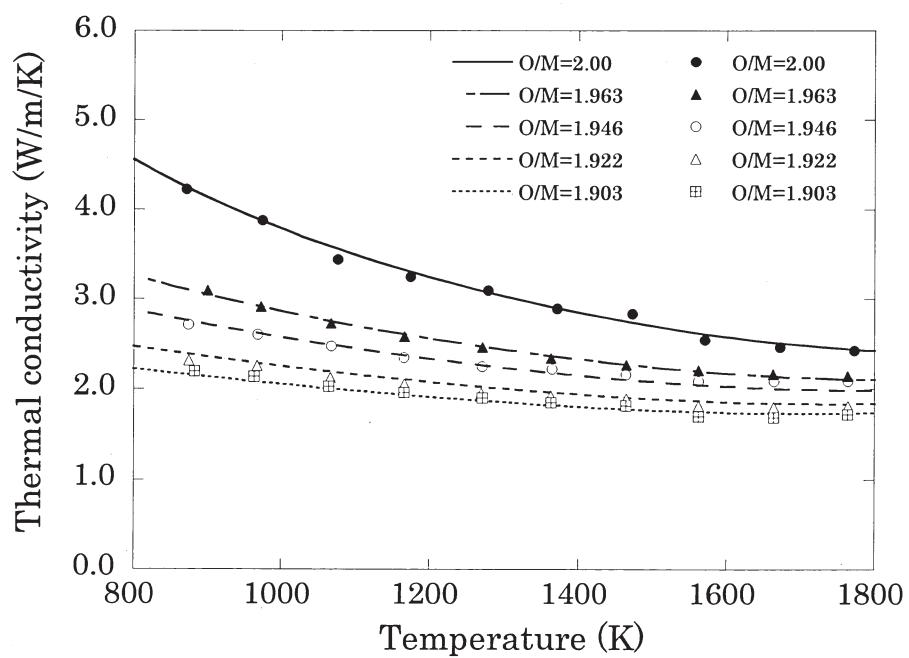


Fig. 3.8 Effect of O/M on thermal conductivity

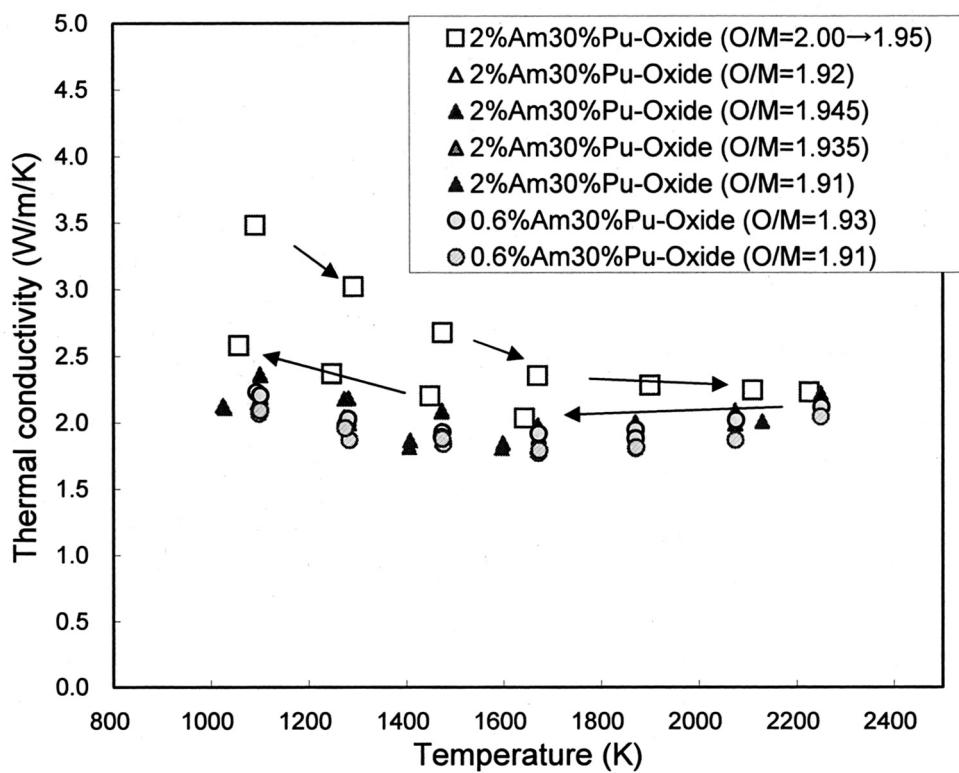


Fig. 3.9 Thermal conductivity in the range of temperatures up to 2300K

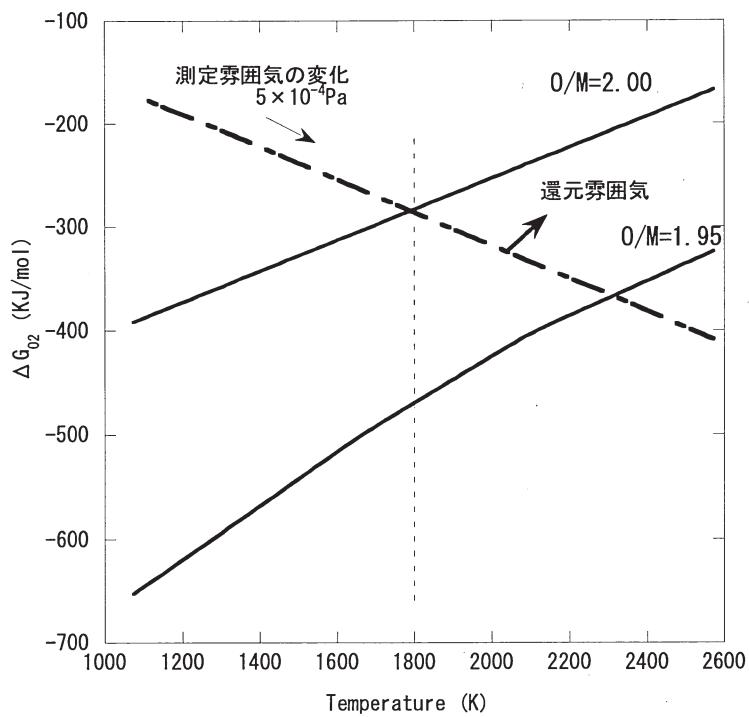


Fig. 3.10 Evaluation of oxygen potential of samples during the measurement

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	m ⁻¹ l ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	m ² ·m ⁻² =l ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg·s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	s ³ ·A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	S	A/V
磁束密度	ウエーバー	Wb	V·s
インダクタンス	ヘルツリード	H	Wb/m ²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/A
光束	ルーメン	lm	cd·sr ^(c)
照度	ルクス	lx	lm/m ²
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

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

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

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

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

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	m ⁻¹ ·kg·s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N·m	m ² ·kg·s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	kg·s ⁻²
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m·m ⁻¹ ·s ⁻² =s ⁻¹
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg·s ⁻³
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
質量エネルギー	モルケルビン	J/kg	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m·K)	m ⁻¹ ·kg·s ⁻³ ·K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ·s·A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ·s·A
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	m ⁻³ ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ⁻¹ ·kg·s ⁻² ·A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ·kg·s ⁻² ·mol ⁻¹
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ·s·A
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	Gy	m ² ·s ⁻³
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ⁴ ·s ⁻³
放射強度	ワット毎平方メートル	W/sr	m ⁴ ·s ⁻² ·kg·s ⁻³ =m ² ·kg·s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ·sr)	m ² ·m ⁻² ·kg·s ⁻³ =kg·s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	'	1' =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	"	1" =(1/60)' =(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) 1n10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	mi	1 海里=1852m
ノット	kn	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘルツ	Hz	1 Hz=1 m ² ·s ⁻¹
バルス	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オンストローク	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
パン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn·s/cm ² =0.1Pa·s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G =10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe =(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx =10 ⁻⁸ Wb
スチール	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホルト	ph	1 ph=10 ¹ lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻³ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャニスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W·m ⁻² ·Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気	atm	1 atm = 101 325 Pa
力口リ	cal	1 cal = 1J
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

