

JAERI-Tech  
2005-051



JP0550511



マイナーアクチノイド化合物熱拡散率測定装置の整備  
(受託研究)

2005年9月

西 剛史・高野 公秀・伊藤 昭憲・赤堀 光雄・湊 和生・木崎 實

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

マイナーアクチノイド化合物熱拡散率測定装置の整備  
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部  
西 剛史<sup>※</sup>・高野 公秀・伊藤 昭憲・赤堀 光雄・湊 和生・木崎 實<sup>+</sup>

(2005年8月9日受理)

マイナーアクチノイド (MA) 化合物の熱拡散率を測定するための装置を整備した。不活性雰囲気グローブボックス内に、レーザフラッシュ法熱拡散率測定装置を設置することにより、 $\alpha$ 崩壊核種である MA を含む化合物の熱拡散率測定を可能にした。また、試料の形状に最適化した試料ホルダーを用いることにより、40 mg 程度の微小試料の測定を可能にした。さらに、この装置の性能を確認するため、タンタル、ニッケル及びセリウム酸化物の測定を行った。その結果、本装置で得た熱拡散率の値は、文献値及び汎用の熱拡散率測定装置により測定した値とほぼ一致し、微小な MA 化合物の熱拡散率測定に本装置が有用であることを確認した。

---

本報告は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究所が実施した平成 14 年度、平成 15 年度及び平成 16 年度「窒化物燃料と乾式再処理に基づく核燃料サイクルに関する技術開発」の成果です。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※ 博士研究員

+ ホット試験室

Development and Installation of Thermal Diffusivity Measurement Apparatus  
for Minor Actinide Compounds  
(Contract Research)

Tsuyoshi NISHI\*, Masahide TAKANO, Akinori ITOH,  
Mitsuo AKABORI, Kazuo MINATO and Minoru KIZAKI+

Department of Materials Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 9, 2005)

An apparatus has been developed to measure the thermal diffusivities of minor actinide (MA) compounds. By installing the laser flash apparatus in a glove box with highly purified inert gas atmosphere, the thermal diffusivity measurements of compounds containing MA elements of  $\alpha$ -decay nuclides was enabled. A new sample holder has been also developed to measure the thermal diffusivities of very small samples. The performance of this new apparatus was confirmed by measuring the thermal diffusivities of small samples of tantalum, nickel and cerium oxides. The thermal diffusivity values obtained in this work agreed well with the literature values and the values measured by a conventional thermal diffusivity measurement apparatus. Accordingly, this apparatus was found to be useful for thermal diffusivity measurements of MA compounds.

Keywords: Thermal Diffusivity, Minor Actinide (MA) Compounds, Laser Flash Method, Small Sample, Inert Gas Atmosphere, Tantalum, Nickel, Cerium Oxides

---

The study was carried out within the task "Technological development of a nuclear fuel cycle based on nitride fuel and pyrochemical reprocessing" entrusted from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

※ Post-doctoral Fellow

+ Department of Hot Laboratories

## 目次

1. はじめに .....	1
2. 熱拡散率測定装置の基本仕様 .....	1
2. 1 熱拡散率測定装置 .....	1
2. 2 不活性雰囲気グローブボックス .....	2
3. 性能試験と結果 .....	3
3. 1 試料ホルダー .....	3
3. 2 熱拡散率の解析方法 .....	4
3. 3 金属試料による試験 .....	4
3. 3. 1 金属試料の準備 .....	4
3. 3. 2 金属試料による試験結果 .....	4
3. 4 酸化物試料による試験 .....	5
3. 4. 1 セリウム酸化物試料の準備 .....	5
3. 4. 2 セリウム酸化物試料による試験結果 .....	5
4. まとめ .....	6
謝辞 .....	6
参考文献 .....	6

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Basic Specifications of Thermal Diffusivity Measurement Apparatus .....	1
2. 1 Thermal Diffusivity Measurement Apparatus .....	1
2. 2 Glove Box with Highly Purified Inert Gas Atmosphere .....	2
3. Performance Tests of Thermal Diffusivity Measurement Apparatus .....	3
3. 1 Sample Holder .....	3
3. 2 Evaluations of Thermal Diffusivity .....	4
3. 3 Thermal Diffusivity Measurements of Metal Sample .....	4
3. 3. 1 Preparations of Metal Samples .....	4
3. 3. 2 Measurement Results of Metal Sample .....	4
3. 4 Thermal Diffusivity Measurements of Oxide Sample .....	5
3. 4. 1 Preparations of Cerium Oxide Sample .....	5
3. 4. 2 Measurement Results of Cerium Oxide Sample .....	5
4. Summary .....	6
Acknowledgements .....	6
References .....	6

This is a blank page.

## 1. はじめに

プルトニウムのマルチリサイクルやマイナーアクチノイド (MA) の分離変換に係る基盤研究として、Pu 及び MA を含有した窒化物燃料と乾式再処理に基づく核燃料サイクルに関する技術開発を進めている。そのため、燃料設計に不可欠なパラメータである熱膨張、比熱、熱伝導率等の基本的な熱物性を取得し、整備していくことは重要である。しかし、窒化物を含む MA 化合物の熱物性に関するデータは不足しており、特に超プルトニウム元素のアメリシウム、キュリウム等に関しては実測に基づくデータは殆ど存在しない。

現在までに MA 化合物の熱物性の実験値が不足している主な理由としては、

- ① MA 化合物の高温化学研究を目的とする実験設備が今日まで十分整備されていないこと
- ② 放射性毒性や被爆線量及び設備面において試料の取扱量に制限があること
- ③ 一般に MA 窒化物は酸素や水分との反応性が高く、不活性雰囲気での取扱いが必要なこと等が挙げられる。

熱拡散率は固体の基本的な熱物性の 1 つであり、燃料の物性として重要な熱伝導率は熱拡散率、比熱と密度から評価することができる。そこで、高温における熱拡散率測定で最も有力な手法であるレーザフラッシュ法を採用し、不活性雰囲気で微小な MA 化合物の測定が可能な熱拡散率測定装置を整備し、測定条件を確立した。装置の性能を確認するため、金属試料としてタンタル及びニッケル、酸化物試料としてセリウム酸化物の熱拡散率を測定した。

## 2. 熱拡散率測定装置の基本仕様

レーザフラッシュ法は、Fig. 1 に示すように、一定温度に保たれたディスク状試料の片面にパルス状のレーザ光を照射し、試料反対側表面の温度上昇を赤外線検出器により検知して、得られた温度応答曲線を解析することで、熱拡散率を得る測定法である。MA 化合物の熱拡散率を高精度に測定するためには、以下の要件を満足する必要がある。

- ①  $\alpha$  崩壊核種の MA 元素を取り扱うため、気密維持を図るためのグローブボックスが必要なこと
- ② 試料の重量が数十ミリグラム程度の微小試料の測定が可能なこと
- ③ 酸素、水分等に対し活性な窒化物の測定が可能なこと

以上の要件を満たすために、本装置の基本構造として、測定系は微小試料を簡便に設置可能な縦型とし、不活性雰囲気のグローブボックス内に加熱部分を設置した。整備した装置の主要な仕様は以下の通りである。

### 2. 1 熱拡散率測定装置

本装置 (アルバック理工 (株) TC-7000GB) は試料系 (架台、電気炉を含む)、レーザ発振系、非接触測定系、計測回路系、温度制御系、データ処理装置、真空排気系及び冷却水循環機から構成されている。熱拡散率測定装置の概略図を Fig. 2 に、また装置の外観写真を Fig. 3 に示す。

熱拡散率測定装置の主な仕様は以下の通りである。

- |             |   |
|-------------|---|
| 1) 測定温度範囲   | 室温～最高 1500 °C      常用 1350 °C   |
| 2) 試料形状     | 直径 3～5 mm×約 1 mm 厚のディスク状  |
| 3) 試料加熱部雰囲気 | 真空  |
| 4) 試料設置     | 試料ホルダーに固定し、試料を水平に保持   |
| 5) レーザ及び出力  | Nd ガラスレーザ (波長：1060nm、出力：10 J/pulse 以上)  |
| 6) 検出器      | 非接触式<br>測定センサー：InSb 赤外線検出器<br>タイプ：光起電力型<br>受光面：φ 1 mm (有効波長：1.2～5.5 μm)<br>冷媒：液体窒素 (保持時間：約 5 時間)<br>位置調節：X・Y・Z 方向に調節可能  |
| 7) 測定及び解析   | 測定増幅回路、高速記憶変換回路を用いたシーケンスによる自動測定とデータ処理装置による解析<br>測定レンジ：±10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 μV<br>高速信号記憶変換器<br>i) 記憶容量：8000 word<br>ii) サンプルング速度：1～5000 μsec/word の 12 段切換え可能<br>iii) プリトリガー：800 word 固定 |
| 8) 真空排気系    | ターボ分子ポンプ (試料加熱部に直結)<br>油回転ポンプ (グローブボックス外に設置)<br>到達圧力：室温にて 10 <sup>-3</sup> Pa 以下  |
| 9) 冷却水循環機   | 試料加熱部、レーザ系、及びアルゴン循環精製装置を冷却<br>(試料加熱部の表面温度：60°C 以下)<br>冷却能力：4 kW、最大流量：約 32 L/min   |

## 2. 2 不活性雰囲気グローブボックス

大気中で不安定な α 崩壊核種である MA を含む化合物の熱拡散率測定を可能とするため、不活性雰囲気のグローブボックス内に熱拡散率測定装置を設置した。本設備は、気密維持を図るためのグローブボックス本体、ボックス内を高純度なアルゴンガス不活性雰囲気に維持管理するためのアルゴンガス循環精製装置等から構成される。グローブボックス本体の外観写真を Fig. 4 (a) に、アルゴンガス循環精製装置の外観写真を Fig. 4 (b) にそれぞれ示す。また、熱拡散率測定装置を設置した状態の本設備の平面図を Fig. 5 に示す。本グローブボックスの主要な仕様は以下の通りである。

### ①グローブボックス本体

- ・概略寸法                      幅 2000 × 奥行 900 × 高さ 1278 mm、架台高さ：812 mm



- ・構造 箱型気密構造、鉄骨枠組
- ・主要材質 ボックス本体：ステンレス鋼（厚み：6 mm）  
支柱枠：炭素鋼  
窓：ポリカーボネイト（厚み：10 mm）
- ・雰囲気制御方式 高純度不活性雰囲気循環制御（空気雰囲気での運転も可能）
- ・負圧制御範囲 -98.1～-294 Pa
- ・耐圧 980.7～1471 Pa
- ・気密度 空気漏洩率：0.1 vol% / h 以下（-294 Pa 時）
- ・到達不純物濃度 酸素濃度：2 ppm 以下  
水分濃度：3 ppm 以下
- ・グローブ及びポート 8 インチブチルゴムグローブ：12 双  
8 インチ SUS 製グローブポート（PNC II 型相当）：24 個
- ・搬出入ポート 真空ポンプ付き置換ポート（内径：260 mm）：1 基
- ・バッグポート ステンレス鋼製：1 個
- ・照明 20 W 蛍光灯：4 灯
- ・フィルタ プレフィルタ及び HEPA フィルタ

## ②アルゴンガス循環精製装置

- ・精製方式 アルゴンガス循環精製方式（銅触媒及びモレキュラーシーブ）  
精製塔：2 基
- ・圧力制御機構 排気ポンプ：2 台（予備機を含む）、電磁弁
- ・循環流量 約 60 m<sup>3</sup>/h

グローブボックス内に、試料加熱部、ターボ分子ポンプを設置し、①及び②に記したグローブボックス本体及びアルゴンガス循環精製装置の運転により、以下の性能を満足することを確認した。

- ・気密度 漏洩率：0.045 vol% / h（-294 Pa 時）
- ・不純物濃度 酸素：1.5 ppm、水分：-71.4 °C（露点）

## 3. 性能試験と結果

整備した熱拡散率測定装置を用いて高温での微小試料の熱拡散率測定を行うには、試料からの熱損失を防ぐため、試料と試料ホルダーとの接触を極力少なくして試料を固定する必要がある。そこで、下記に示す試料ホルダーを作製した。装置の性能を確認するため、タンタル、ニッケルの金属試料と、それらに比べて熱拡散率が約 1 桁小さいセリウム酸化物の熱拡散率を測定した。

### 3. 1 試料ホルダー

作製した試料ホルダーの外観写真及び概略図を Fig. 6 に示す。なお、このホルダーの材質は

1500°Cまでの耐熱性を有し、試料との接触部で反応がなく、複雑且つ精密な機械加工が可能なタンタルである。試料の固定方法は試料を3本のタンタル製ピン上に置き、黒鉛製ネジの中心軸に埋込んだタングステン製ピン3本で試料側面を押込んで固定する。側面からの固定は、当初の段階ではモリブデン製ネジを用いたが、高温測定ではネジがホルダー本体と固着したため、黒鉛ネジにタングステン製ピンを埋込む構造に改良した。さらに、試料ホルダーの上面（赤外線検出器側）に直径2.5 mmの穴を開けたマスクを置くことで、レーザーの散乱光が赤外線検出器に入ることを防いだ。なお、一般に熱拡散率測定では直径10mm、厚さ1~2mm程度の試料を用いるが、MA化合物試料の測定では試料量が数十ミリグラムに限られるので、試料の直径を3、4及び5mmの3種類を想定してそれぞれの試料直径に寸法を最適化したホルダーを準備した。

### 3. 2 熱拡散率の解析方法

レーザーフラッシュ法を用いた一般的な解析法としては、Fig. 7に示すようなレーザー照射による試料裏面の温度上昇が最大値 $\Delta T_{\max}$ の1/2になるまでの時間 $t_{1/2}$ （ハーフタイム）を読み取り、次式から熱拡散率 $\alpha$ を求めるハーフタイム法 [1] が用いられる。

$$\alpha = 0.1388 \frac{l^2}{t_{1/2}} \quad (1)$$

ここで $l$ は試料厚さである。この手法は簡便で、今日まで多くの固体試料の熱拡散率解析に用いられてきた。しかし、高温になると共に、試料表面からの放射による熱損失の影響により、温度上昇の最大値 $\Delta T_{\max}$ の絶対値が見かけ上小さくなるため、 $t_{1/2}$ が小さくなり、実際より大きな熱拡散率の値を示す傾向にある [2]。そこで、このような影響を補正する機能を付加したカーブフィッティング法 [3,4] を用いて熱拡散率の値を求めた。カーブフィッティング法は、温度応答曲線の減衰部分から熱損失を評価し、実測により得られた曲線と熱損失を考慮した理論曲線とをフィッティングすることにより、熱拡散率を求める解析方法である。

### 3. 3 金属試料による試験

#### 3. 3. 1 金属試料の準備

装置の性能を確認するため、多くの報告例 [5] が存在するタンタル及びニッケルの測定を行った。各金属試料はニラコ製であり、純度はタンタルが99.95%、ニッケルが99.7%である。試料の寸法はマイクロメータにより測定し、タンタルが直径5.055 mm、厚さ2.106 mmと直径3.017 mm、厚さ1.063 mm、ニッケルが直径3.992 mm、厚さ0.934 mmであった。

#### 3. 3. 2 金属試料による試験結果

試料寸法による熱拡散率の測定値に相違がないことを確認するため、上記試料を用いて室温から1573 Kまでの温度範囲で熱拡散率測定を行った。なお、金属は一般的にレーザー光に対する吸収率が小さいため、レーザー光のエネルギーを効率良く熱に変換することができず、室温近傍の温

度では感度の高い温度応答曲線が得られない。そこで、効率良く熱に変換するため、これらの金属の熱拡散率測定では、試料の両面にグラファイトをスプレーで塗布して黒化処理した。カーブフィッティング法により解析したタンタルとニッケルの熱拡散率の解析結果を、それぞれの文献値 [5] と共に Fig. 8 に示す。

Fig. 8 より、タンタルの熱拡散率の測定値は文献値 [5] に対して $\pm 5\%$ の差の範囲内にあることが確認でき、寸法の異なる2種類の試料の測定値の差は、1073 K で最大6.7%であった。また、ニッケルの熱拡散率の測定値も文献値 [5] に対して $\pm 6\%$ の差の範囲内にあることが確認できた。これらの結果から、直径3 mm程度の小さな試料でも、文献値と5~6%程度の差の範囲内で測定可能であることがわかった。

なお、この測定では、試料とピン及びネジの接触部からの接触による熱損失の影響が考えられる。しかし、測定によって得られた温度応答曲線が熱放射による熱損失のみを考慮した場合の理論曲線と良い一致を示したことから、また、タンタル及びニッケルが文献値と5~6%程度の差の範囲内で測定できたことから、試料とホルダーの接触部からの熱損失の影響は無視できる程度と考えられる。

### 3. 4 酸化物試料による試験

#### 3. 4. 1 セリウム酸化物試料の準備

CeO<sub>2</sub>粉末をボールミルで粉砕した後、円板状に加圧成形し、大気中1800 Kで10時間加熱してCeO<sub>2</sub>焼結体を調製した。これをさらに窒素気流中1800 Kで7時間加熱してCeO<sub>1.88</sub>焼結体を、窒素気流中1800 Kで3時間加熱した後、窒素・4%水素気流中1800 Kで6時間加熱してCeO<sub>1.54</sub>焼結体を得た。なお、O/M比は酸素定量分析により決定した。試料の寸法はマイクロメータにより測定し、CeO<sub>1.88</sub>焼結体が直径3.848 mm、厚さ1.100 mm、CeO<sub>1.54</sub>焼結体が直径3.833 mm、厚さ1.098 mmであった。CeO<sub>2</sub>焼結体の密度は96~98%TD(理論密度:7.21 g/cm<sup>3</sup>)と高密度であった。これを還元して得たCeO<sub>1.88</sub>とCeO<sub>1.54</sub>焼結体の密度はそれぞれ6.74 g/cm<sup>3</sup>、6.53 g/cm<sup>3</sup>であった。

#### 3. 4. 2 セリウム酸化物試料による試験結果

CeO<sub>1.88</sub>とCeO<sub>1.54</sub>の熱拡散率測定は、室温から1273 Kまでの温度範囲で行った。この測定では、CeO<sub>1.54</sub>は黒色のためグラファイトの塗布は行わなかったが、CeO<sub>1.88</sub>は薄い黒色で、レーザーを透過するため、グラファイトを塗布して測定を行った。

カーブフィッティング法により解析したCeO<sub>1.88</sub>とCeO<sub>1.54</sub>の熱拡散率の解析結果をFig. 9に示す。Fig. 9には、汎用の熱拡散率測定装置(アルバック理工(株)TC7000)により測定したほぼ同じ密度(差1%以内)を有する直径5.5 mmの測定値も併せて示した。Fig. 9より、CeO<sub>1.88</sub>とCeO<sub>1.54</sub>の熱拡散率の実験値は、汎用の装置で測定した値に対してほぼ一致した値を示すことが確認された。また、昇温過程と降温過程の2通りの測定を行った結果、それぞれの測定値の差は十分小さく、測定値に影響を与える程度のO/M比の変化はなかったと考えられる。

#### 4. まとめ

不活性雰囲気グローブボックス内にレーザーフラッシュ法熱拡散率測定装置を設置した。この装置の性能を確認するため、タンタルとニッケルの2種類の金属試料とO/M比の異なる2種類のセリウム酸化物焼結体の熱拡散率測定を行った。その結果、タンタル及びニッケルの熱拡散率の測定値はいずれも文献値に対して5~6%程度の差の範囲内にあることを確認した。また、セリウム酸化物の熱拡散率は、汎用の装置により求めた値とほぼ一致した。

したがって、直径3~5 mmの微小試料で5%程度の誤差範囲で熱拡散率測定が可能であることから、 $\alpha$ 崩壊核種であるMAを含む化合物に対しても本装置が有用であることを確認した。

#### 謝辞

本報告は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究所が実施した平成14年度、平成15年度及び平成16年度「窒化物燃料と乾式再処理に基づく核燃料サイクルに関する技術開発」の成果です。本実験に御協力を頂いたホット試験室WASTEF課沼田正美氏、富田健氏、ならびに千代田メンテナンス鴨志田守氏に感謝致します。また、貴重なコメントを下さいました新型燃料燃焼研究グループ芹澤弘幸副主任研究員に感謝致します。

#### 参考文献

- [1] Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P. and Abbott G. L.: J. Appl. Phys., 32, 1679 (1961).
- [2] Nishi T., Ohta H., Shibata H. and Waseda Y.: Int. J. Thermophys., 24, 1735 (2003).
- [3] Cezairliyan A., Baba T. and Taylor R.: Int. J. Thermophys., 15, 317 (1994).
- [4] Josell D., Warren J. and Cezairliyan A.: J. Appl. Phys., 78, 6867 (1994).
- [5] Touloukin Y. S., Powell R. W., Ho C. Y. and Nicolaou M. C.: "Thermophysical Properties of Matter Vol. 10", ISI/PLENUM, New York, 120, 173 (1973).

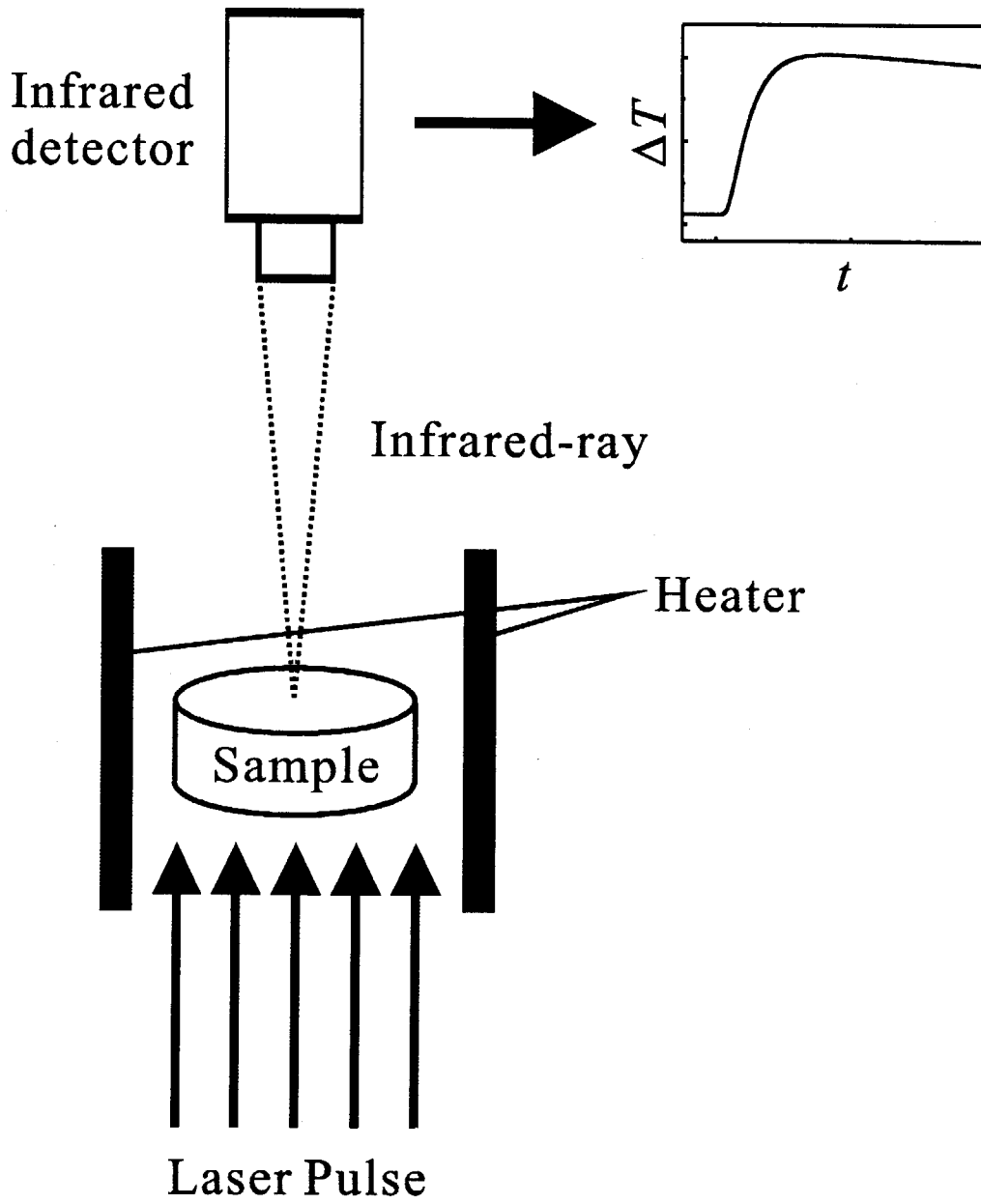


Fig. 1 レーザフラッシュ法の原理

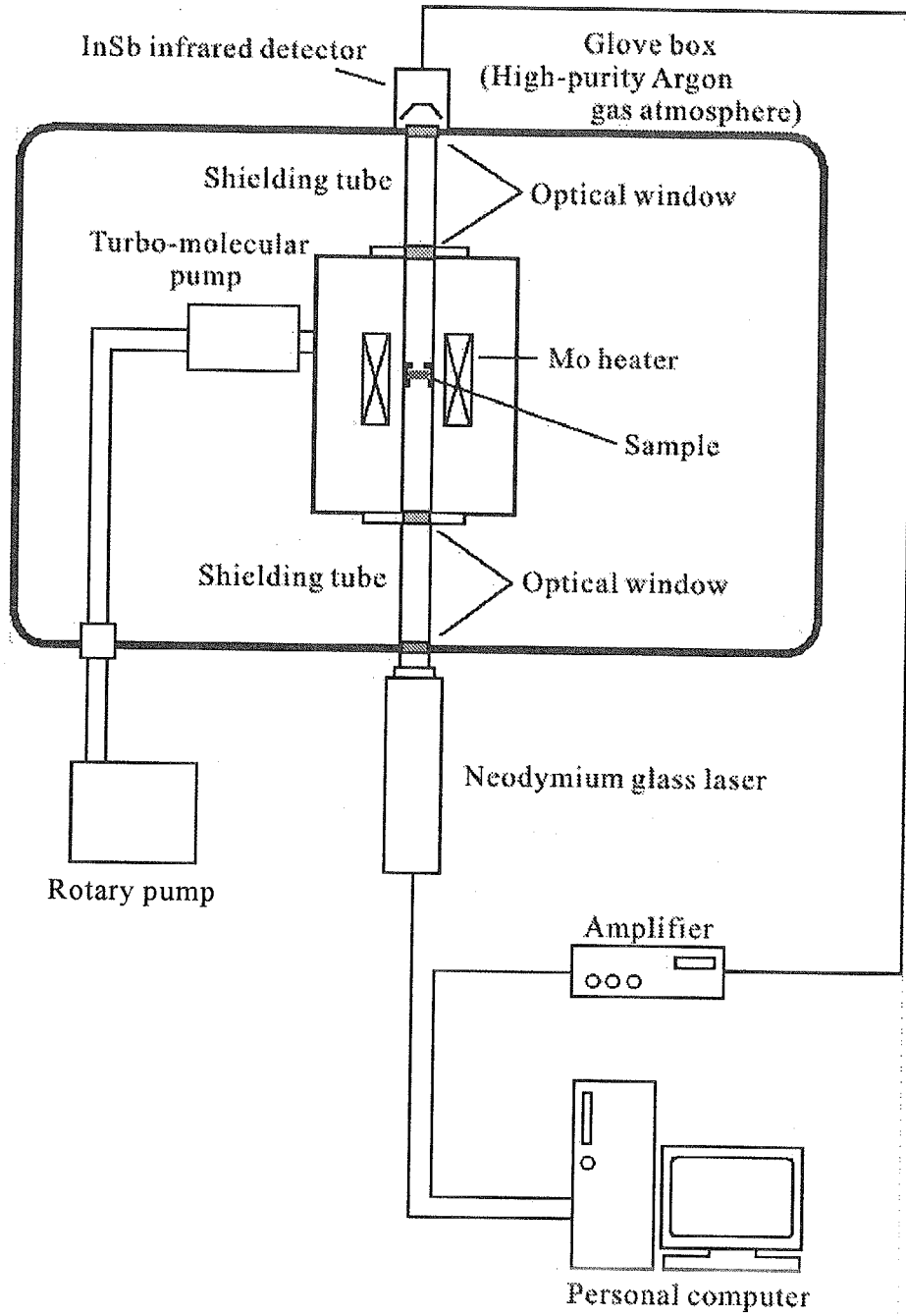


Fig. 2 整備した熱伝導率測定装置の概略図

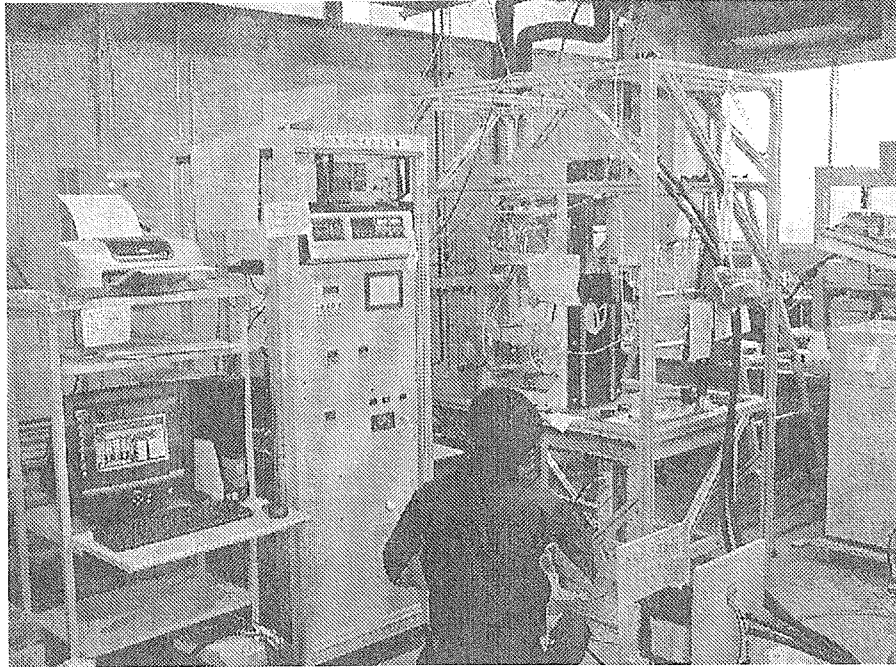
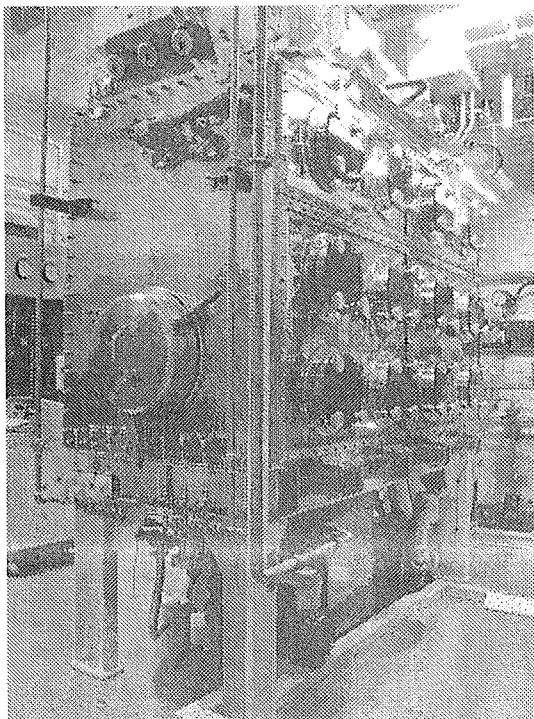
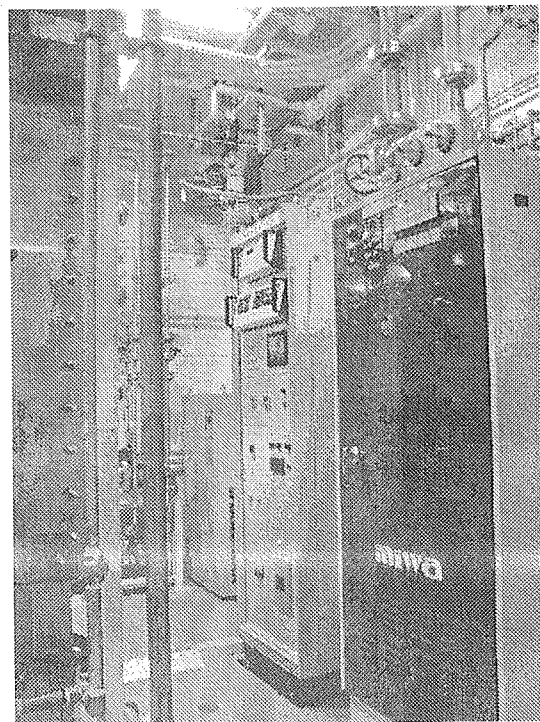


Fig. 3 熱拡散率測定装置の外観写真（グローブボックスへの設置前）



(a)



(b)

Fig. 4 不活性雰囲気グローブボックスの (a) グローブボックス本体  
及び (b) アルゴンガス循環精製装置（手前）の外観写真

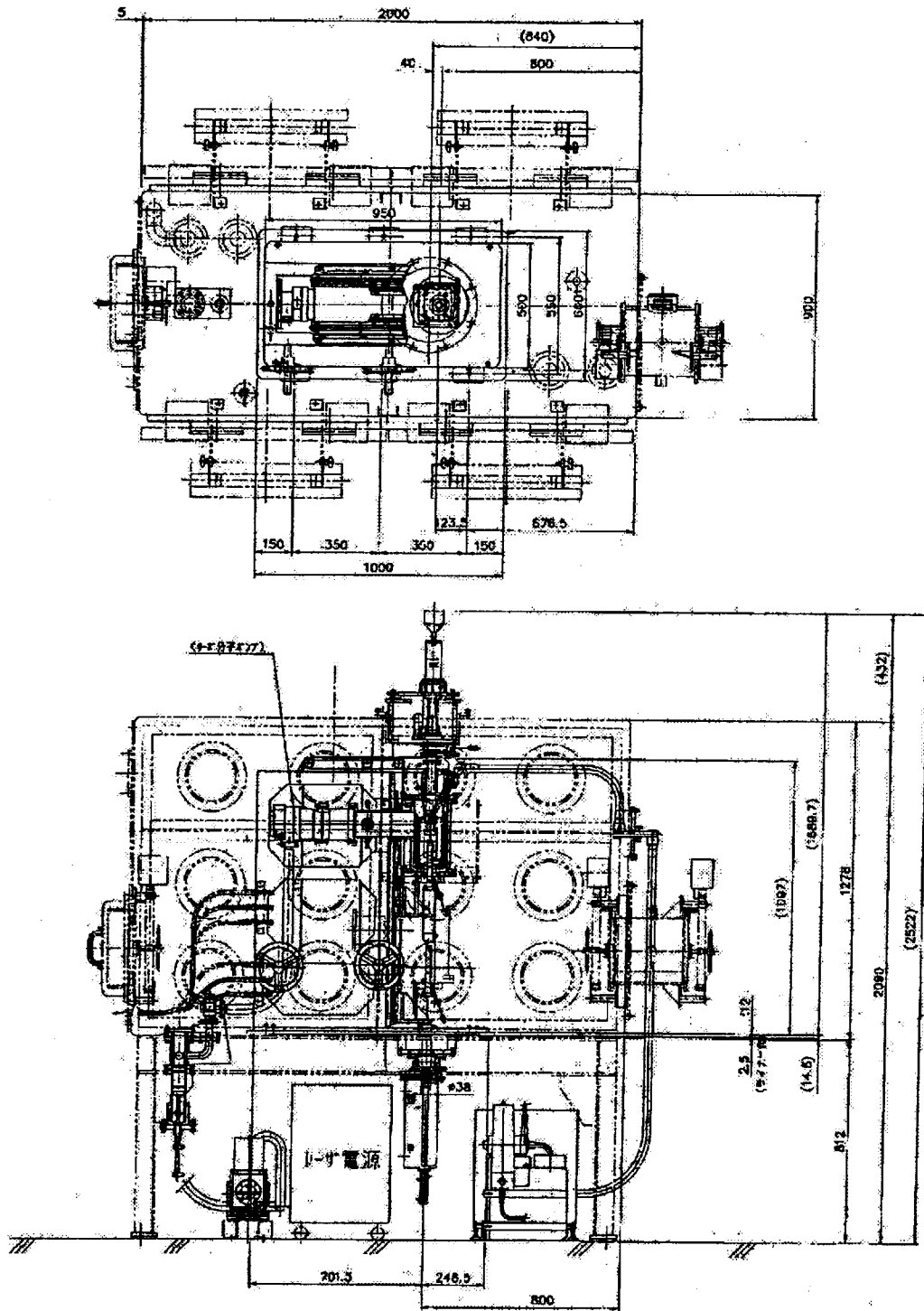


Fig. 5 不活性雰囲気グローブボックス及び熱拡散率測定装置の平面図



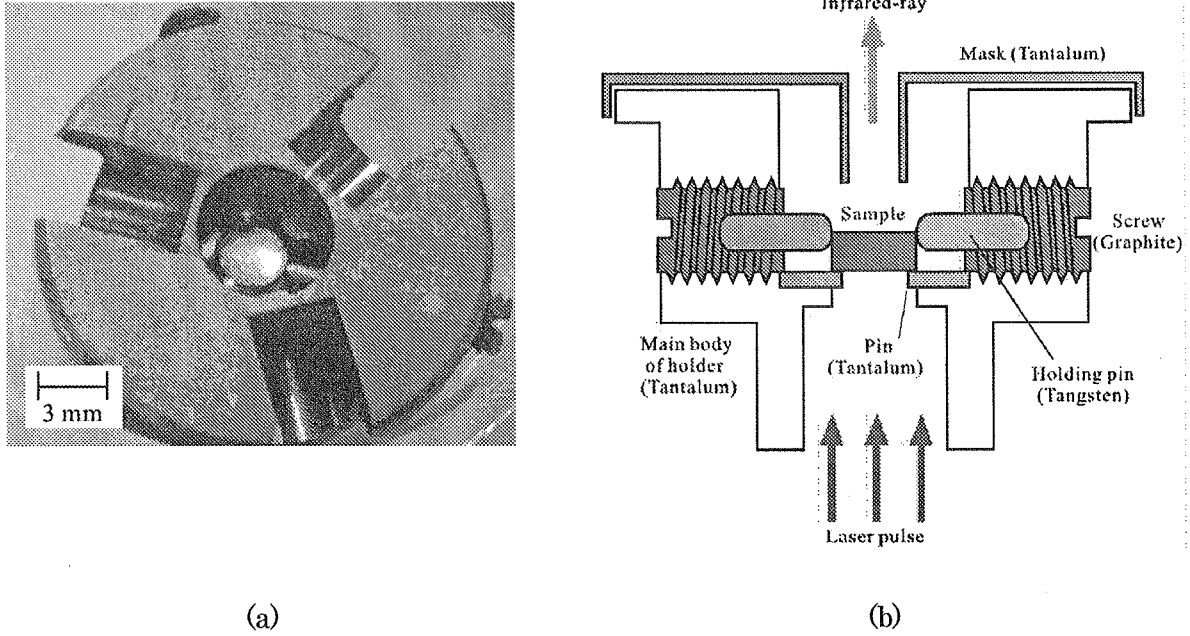


Fig. 6 試料ホルダーの (a) 外観写真及び (b) 概略図

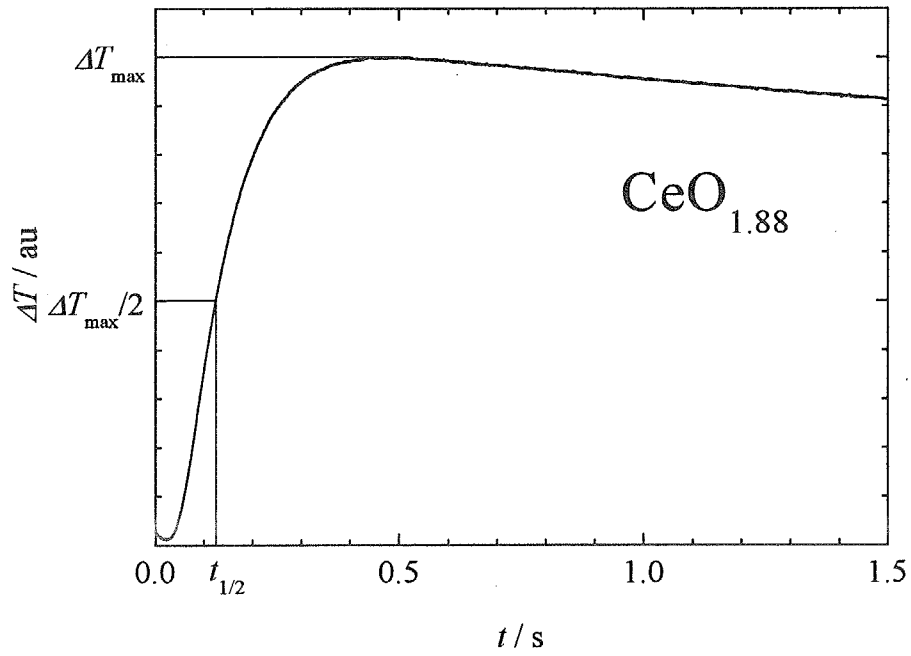


Fig. 7 温度応答曲線の例 (試料:  $CeO_{1.88}$ 、測定温度: 673 K)

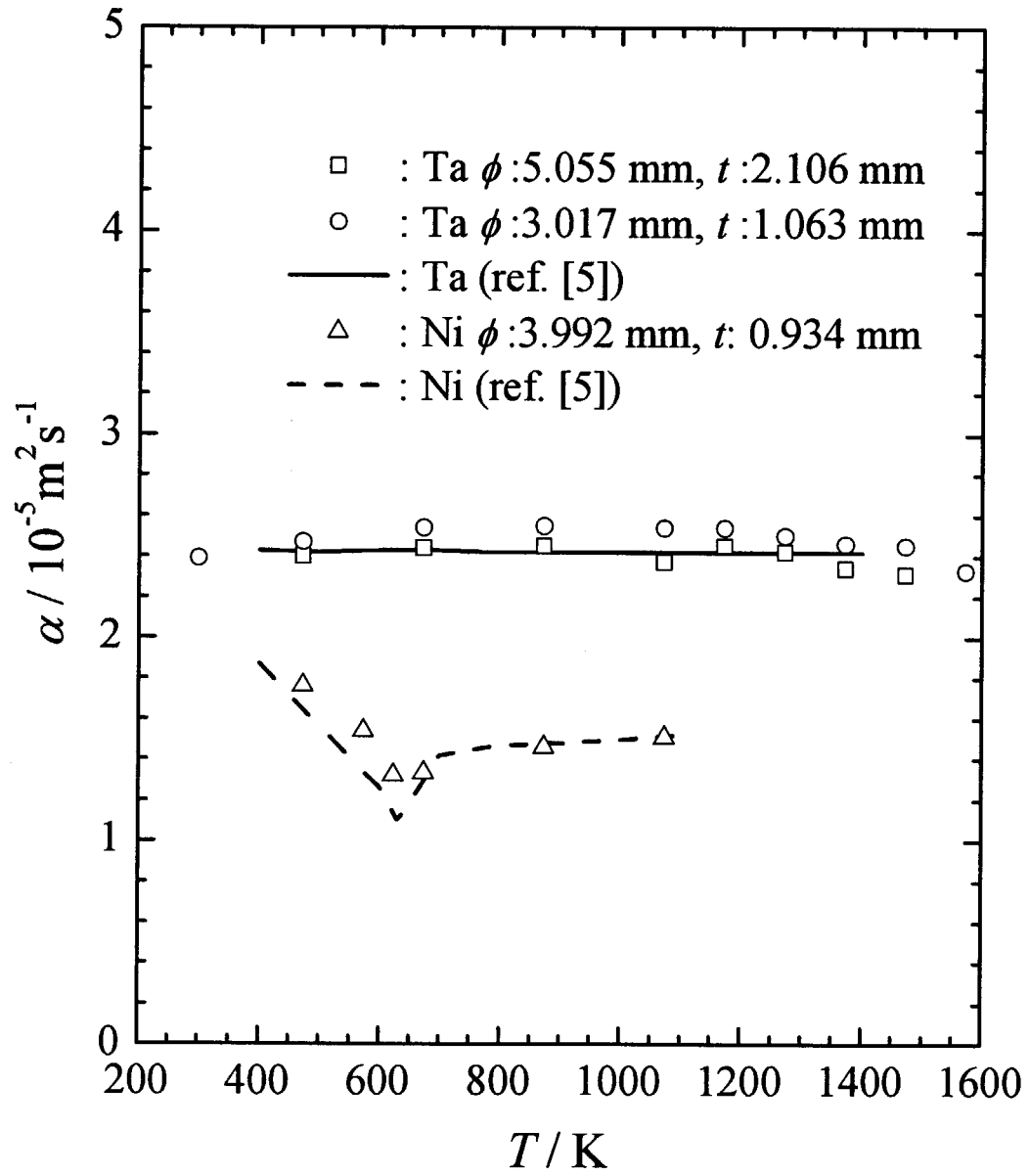


Fig. 8 タンタル及びニッケル試料の熱拡散率測定結果と文献値の比較

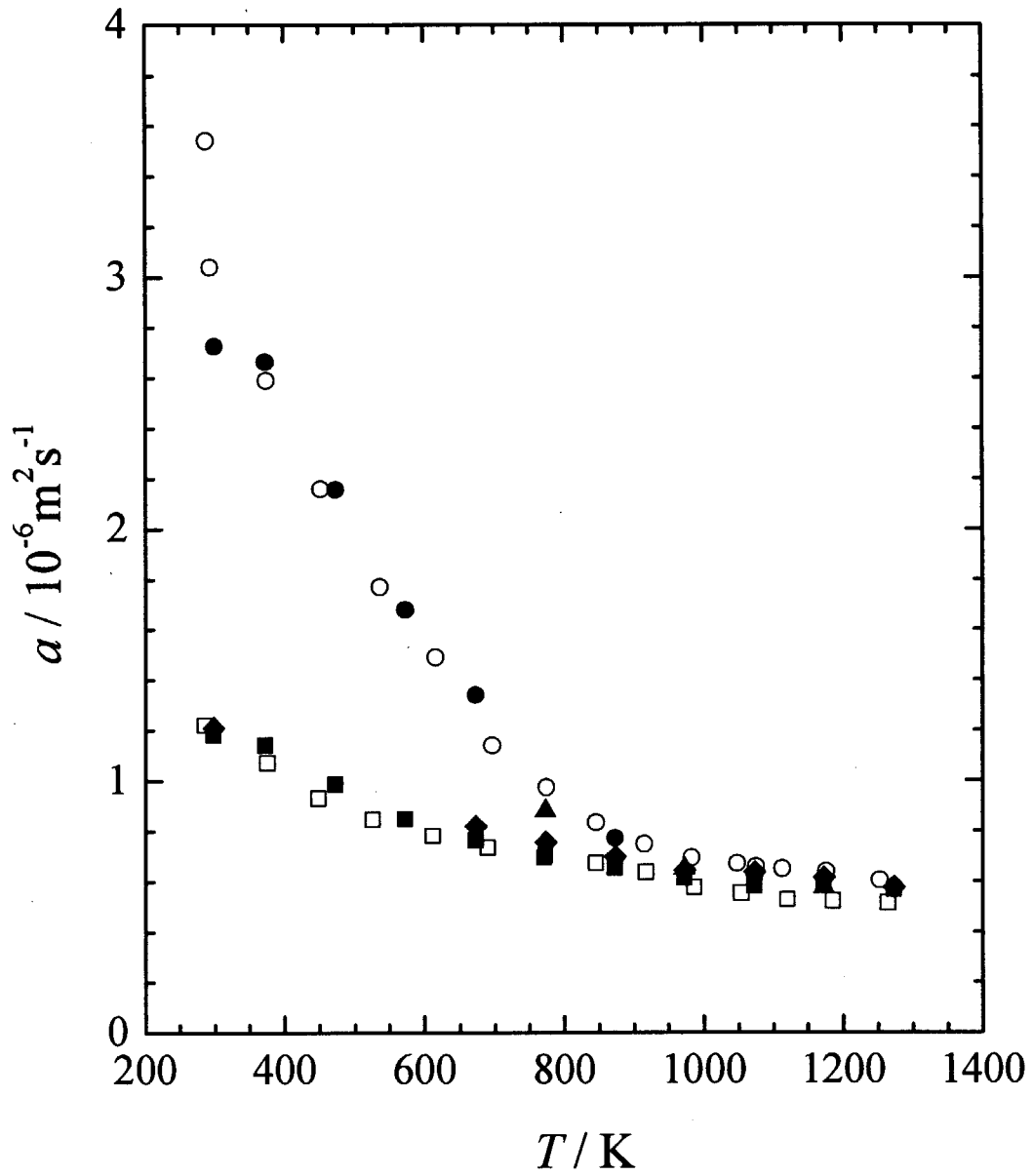


Fig. 9 セリウム酸化物焼結体の熱拡散率測定結果

- : 本測定 (昇温時) で得られた  $\text{CeO}_{1.88}$  の値
- ▲ : 本測定 (降温時) で得られた  $\text{CeO}_{1.88}$  の値
- : 汎用の装置による  $\text{CeO}_{1.88}$  の値
- : 本測定 (昇温時) で得られた  $\text{CeO}_{1.54}$  の値
- ◆ : 本測定 (降温時) で得られた  $\text{CeO}_{1.54}$  の値
- : 汎用の装置による  $\text{CeO}_{1.54}$  の値

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1--5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=1 N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.184 J (熱化学)
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1855 J (15 °C)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>16</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

マイナーアクチノイド化合物熱拡散率測定装置の整備(受託研究)

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています。