

JAERI-Tech

94-028



未照射試料によるペレット熱伝導率
測定装置の特性試験

1994年11月

大和田功・西野泰治・串田輝雄・中村仁一・松田哲志*

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

未照射試料によるペレット熱伝導率測定装置の特性試験

日本原子研究所東海研究所ホット試験室

大和田 功・西野 泰治・串田 輝雄

中村 仁一⁺・松田 哲志*

(1994年10月17日受理)

軽水炉技術の高度化計画の一環として、核燃料の高燃焼度化が進められている。高燃焼度燃料の照射挙動において、核燃料ペレットの高温熱定数の一つである熱伝導率は、重要な熱物性値として注目されている。高燃焼度下で生じる核燃料ペレット内のFP蓄積等に起因した熱伝導率の低下を解明するため、レーザフラッシュ法により熱拡散率を測定し、熱伝導率を算出する遮蔽型ペレット熱伝導率測定装置を開発し、装置の特性試験を行った。

特性試験に用いた試料は、未照射の二酸化ウラン試料、ガドリニア入り二酸化ウラン試料及び熱拡散率の小さいジルコニア試料で、室温から1700°Cの温度範囲で熱拡散率を測定した。二酸化ウラン試料の測定値は、米国TPRCのデータと良い一致を示した。又、試料調製技術の確証試験については、ジルコニア塊より加工・調製した試料の熱拡散率を測定することにより行った。その結果、妥当な熱拡散率測定値が得られた。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+ 原子炉安全工学部

* 原子燃料工業(株)

Characterization Test of the Pellet Thermal Conductivity
Measurement Apparatus using Unirradiated Samples

Isao OWADA, Yasuharu NISHINO, Teruo KUSHIDA
Jinichi NAKAMURA⁺ and Tetsushi MATSUDA*

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

(Received October 17, 1994)

High burnup program of LWR fuel is now being put into practice in Japan. The thermal conductivity of high burnup fuel is regarded as the most important thermophysical properties. The shielded pellet thermal conductivity measurement apparatus based on the laser flash technique was developed for the study on high burnup fuel behavior. The thermal conductivity is calculated from the value of thermal diffusivity, heat capacity and density.

Unirradiated Uranium dioxide(UO_2) pellets, gadolinia doped $\text{UO}_2(\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3)$ pellets and zirconia(ZrO_2) samples were used for the characterization tests of the apparatus. Measured temperature range of thermal diffusivity was from the room temperature to 1700°C. The measured value of the thermal diffusivity of the UO_2 agreed well with the data of TPRC data series published by the Purdue University in USA. ZrO_2 samples were prepared from a lump of ZrO_2 using a newly developed devices. The thermal diffusivity of the ZrO_2 samples were also agreed with another data.

Keywords : Laser Flash Technique, Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, Uranium Dioxide Pellet, Gadolinia Doped UO_2 pellet, Zirconia

⁺ Department of Reactor Safety Research

* Nuclear Fuel Industries, Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 測定装置の概要.....	1
3. 特性試験試料.....	8
3.1 未照射ウラン試料.....	8
3.2 ジルコニアの試料作製と試料.....	8
4. 特性試験と結果.....	17
4.1 未照射ウラン試料による特性試験.....	17
4.1.1 測定条件	17
4.1.2 測定結果	17
4.1.3 測定試料の表面観察	22
4.2 ジルコニア試料による特性試験	22
4.2.1 測定条件	22
4.2.2 測定結果	22
5. 考察および結論.....	98
5.1 未照射ウラン試料.....	98
5.2 ジルコニア試料	99
6. あとがき	100
謝辞	100
参考文献.....	101
付録1 未照射ウラン試料のハーフタイム法温度履歴曲線と 対数法プロット曲線の代表例.....	102
付録2 ジルコニア試料のハーフタイム法温度履歴曲線と 対数法プロット曲線の代表例.....	130

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Measurement Apparatus	1
3. Samples for Characterization Test	8
3.1 Unirradiated Uranium Dioxide Samples	8
3.2 Preparation of Zirconia Samples	8
4. Characterization and Results	17
4.1 Characterization of Unirradiated Uranium Dioxide Samples	17
4.1.1 Measurement Conditions	17
4.1.2 Measurement Results	17
4.1.3 Surface of Measurement Samples	22
4.2 Characterization of Zirconia Samples	22
4.2.1 Measurement Conditions	22
4.2.2 Measurement Results	22
5. Discussion	98
5.1 Unirradiated Uranium Dioxide Samples	98
5.2 Zirconia Samples	99
6. Conclusion	100
Acknowledgment	100
References	101
Appendix 1 Illustration of Rear-surface Temperature History and Calculated Logarithmic Plot on Unirradiated Uranium Dioxide Samples	102
Appendix 2 Illustration of Rear-surface Temperature History and Calculated Logarithmic Plot on Zirconia Samples	130

Table Contents

Table 2.1 Specification of Pellet Thermal Conductivity Measurement Apparatus	2
Table 3.1 Samples for Thermal Diffusivity Measurement of Unirradiated UO ₂ and UO ₂ -Gd ₂ O ₃ Pellet	10
Table 3.2 Samples for Thermal Diffusivity Measurement of ZrO ₂	11
Table 4.1 Measurement Conditions for Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ and UO ₂ -Gd ₂ O ₃ Pellet	24
Table 4.2 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ Pellet at Room Temperature	25
Table 4.3 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ (Sample Shape No.1) at High Temperature	26
Table 4.4 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ (Sample Shape No.2) at High Temperature	26
Table 4.5 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ (Sample Shape No.3) at High Temperature	27
Table 4.6 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ (Sample Shape No.4) at High Temperature on 1st Heating	27
Table 4.7 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ (Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating	28
Table 4.8 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ (Sample Shape No.4) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$) on 2nd Heating	32
Table 4.9 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Carbon Spread UO ₂ (Sample Shape No.4) at High Temperature	32
Table 4.10 Thermal Conductivity of Unirradiated UO ₂ Pellet	33
Table 4.11 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ Pellet at Room Temperature	35
Table 4.12 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No.1) at High Temperature on 1st Heating	36
Table 4.13 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No.1) at High Temperature on 2nd Heating	36
Table 4.14 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No.2) at High Temperature on 1st Heating	37
Table 4.15 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No.2) at High Temperature on 2nd Heating	37
Table 4.16 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No.3) at High Temperature on 1st Heating	38

Table 4.17 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 3) at High Temperature on 2nd Heating	38
Table 4.18 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at High Temperature on 1st Heating	39
Table 4.19 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at High Temperature on 2nd Heating	40
Table 4.20 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$) on 2nd Heating	44
Table 4.21 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ at Room Temperature	45
Table 4.22 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 1) at High Temperature on 1st Heating	46
Table 4.23 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2) at High Temperature on 1st Heating	46
Table 4.24 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2) at High Temperature on 2nd Heating	47
Table 4.25 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 3) at High Temperature on 1st Heating	47
Table 4.26 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 3) at High Temperature on 2nd Heating	48
Table 4.27 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at High Temperature on 1st Heating	48
Table 4.28 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at High Temperature on 2nd Heating	49
Table 4.29 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$) on 2nd Heating	53
Table 4.30 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ at Room Temperature	54
Table 4.31 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 1) at High Temperature on 1st Heating	55
Table 4.32 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.1) at High Temperature on 1st Heating	55
Table 4.33 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.1) at High Temperature on 2nd Heating	56
Table 4.34 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at High Temperature on 1st Heating	56

Table 4.35 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2. 2) at High Temperature on 2nd Heating	57
Table 4.36 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2. 2) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$) on 2nd Heating	61
Table 4.37 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2. 2) at High Temperature on 3rd Heating	61
Table 4.38 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2. 3) at Maxmam Temperature 1600°C	62
Table 4.39 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 3) at High Temperature on 1st Heating	62
Table 4.40 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 3) at High Temperature on 2nd Heating	63
Table 4.41 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at High Temperature on 1st Heating	63
Table 4.42 Measurement Conditions for Thermal Diffusivity of ZrO ₂ Sample	64
Table 4.43 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample A (ZrO ₂ -3%CaO)	65
Table 4.44 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample B (ZrO ₂ -20%Y ₂ O ₃)	67
Table 4.45 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample C (ZrO ₂ -13. 7%Y ₂ O ₃)	69
Table 4.46 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Triangle Shape Sample TC(ZrO ₂ -13. 7%Y ₂ O ₃)	71

Figure Contents

Fig. 2. 1 Block Diagram of Pellet Thermal Conductivity Measurement	
Apparatus	3
Fig. 2. 2 Structure of Heating Furnace	4
Fig. 2. 3 Holder for Sample of 5mm Diameter	5
Fig. 2. 4 Holder for Sample of 9.5mm Diameter	6
Fig. 2. 5 Holder for Sample of 3mm Diameter	7
Fig. 3. 1 Sample Preparation for Thermal Diffusivity Measurement	12
Fig. 3. 2 Structure of Diamond Core Drill	13
Fig. 3. 3 Structure of Core Drill	14
Fig. 3. 4 Picture of Diamond Core Drill	14
Fig. 3. 5 Structure of Precise Cutting Device	15
Fig. 3. 6 Picture of Precise Cutting Device	16
Fig. 3. 7 Picture of ZrO ₂ Samples (After Measurement)	16
Fig. 4. 1 Dependences of Thermal Diffusivity of Unirradiated Fuel Pellet (Diameter:5mm) on Sample Thickness at Room Temperature	73
Fig. 4. 2 Dependences of Thermal Diffusivity of Unirradiated Fuel Pellet (Diameter:9.5mm) on Sample Thickness at Room Temperature	74
Fig. 4. 3 Dependences of Thermal Diffusivity of Unirradiated Fuel Pellet by Logarithmic Method on Sample Thickness at Room Temperature	75
Fig. 4. 4 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ Pellet(Diameter:5mm) at High Temperature by Logarithmic Method	76
Fig. 4. 5 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ Pellet(Diameter:9.5mm) at High Temperature	77
Fig. 4. 6 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ Pellet (Diameter:9.5mm) Calculated by Logarithmic Method	78
Fig. 4. 7 Thermal Conductivity of Unirradiated UO ₂ Pellet	79
Fig. 4. 8 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Diameter:5mm) at High Temperature by Logarithmic Method	80
Fig. 4. 9 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ (Diameter:5mm) at High Temperature by Logarithmic Method	81
Fig. 4. 10 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Diameter:5mm) at High Temperature by Logarithmic Method	82
Fig. 4. 11 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ -Gd ₂ O ₃ Pellet by Logarithmic Method	83
Fig. 4. 12 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO ₂ -Gd ₂ O ₃ Pellet by Half Time Method	84

Fig. 4.13 Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Pellet by Half Time and Logarithmic Method	85
Fig. 4.14 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Pellet Calculated by Logarithmic Method($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$)	86
Fig. 4.15 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet Calculated by Logarithmic Method	87
Fig. 4.16 Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ ($\phi 5\text{mm}, t=1\text{mm}$) at Maxmam Temperature 1600°C by Logarithmic Method	88
Fig. 4.17 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Pellet (Diameter:5mm and 9.5mm) Calculated by Logarithmic Method	89
Fig. 4.18 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Pellet Calculated by Logarithmic Method	90
Fig. 4.19 Micrograph of UO_2 Pellet surface	91
Fig. 4.20 Micrograph of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet surface	92
Fig. 4.21 Micrograph of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet surface	93
Fig. 4.22 Micrograph of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet surface	94
Fig. 4.23 Micrograph of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet surface at Maxmam Temperature 1600°C	95
Fig. 4.24 Thermal Diffusivity of ZrO_2 Samples by Half Time and Logarithmic Method	96
Fig. 4.25 Thermal Diffusivity of $\text{ZrO}_2\text{-}13.7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ Samples(C, TC) by Half Time and Logarithmic Method	97

1. まえがき

軽水炉技術の高度化計画の一環として核燃料の高燃焼度化が進められている。このような背景のもとに、ホット試験室では、高燃焼度燃料の照射挙動を解明するため各種照射後試験装置の開発を行っている。高燃焼度燃料の照射挙動の中でも、燃料ペレットの熱伝導率等の高温熱定数が重要な熱物性値として注目されている。そこで、高燃焼度下で生じる核燃料ペレット内のFP蓄積等に起因した熱伝導率の低下を解明するためのペレット熱伝導率測定装置¹⁾を開発した。

本装置はレーザフラッシュ法により試料の熱拡散率を測定し、他の測定機器又は文献等から得られた試料の比熱容量と密度より熱伝導率を算出する遮蔽型のペレット熱伝導率測定装置である。本報告書は、未照射二酸化ウラン (UO_2)、ガドリニア入り二酸化ウラン ($UO_2-Gd_2O_3$) 及びジルコニア (ZrO_2) 試料を用いて行った本装置の特性試験の結果、並びに試料調製技術についてまとめたものである。

なお、本装置は「高燃焼度燃料照射後試験設備整備」として、電源開発促進対策特別会計予算により、科学技術庁からの委託研究として開発したものである。

2. 測定装置の概要

(1) 热拡散率測定の原理と熱伝導率の求め方

ペレット熱伝導率測定装置は、レーザフラッシュ法により試料の熱拡散率を測定し、比熱容量と密度より熱伝導率を算出する装置で、熱拡散率の解析法には、ハーフタイム法と対数法の選択が可能である。ハーフタイム法及び対数法による熱拡散率測定の原理と、熱伝導率求め方を下記に述べる。

ハーフタイム法 ($t_{1/2}$ 法)²⁾ による熱拡散率の測定は、平板試料の上面（表面）にレーザ光を1パルス照射した後に、熱が試料の厚さ方向に一次元的に伝わると仮定して、下面（裏面）における温度上昇幅の最大値の半分に達する時間より求める。試料の下面（裏面）の温度上昇幅 (θ) が、温度上昇幅の最大値 (θ_m) の半分に達する時間を $t_{1/2}$ とすると、熱拡散率 α は、下記の式(1)で求めることができる。

$$\alpha = 0.1388L^2/t_{1/2} \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで、試料の比熱容量 C_p 及び密度 ρ が既知であれば、熱伝導率 λ は下記の式(2)により求められる。

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho \quad \dots \dots \quad (2)$$

一方対数法³⁾ では、レーザ光を1パルス照射した時の熱が試料中を一次元的に伝わる場合の熱拡散方程式をラプラス変換して解を導き、その第一項近似式の両辺の対数をとる。そのときの試料下面の温度上昇幅を θ' 、経過時間を t とすれば、 $\theta' \sqrt{t}$ の対数と $1/t$ とは直線関係になり、その直線の傾きを t_L とすれば、その関係は式(3)となる。

$$t_L = L^2 / 4\alpha \quad \dots \dots \quad (3)$$

1. まえがき

軽水炉技術の高度化計画の一環として核燃料の高燃焼度化が進められている。このような背景のもとに、ホット試験室では、高燃焼度燃料の照射挙動を解明するため各種照射後試験装置の開発を行っている。高燃焼度燃料の照射挙動の中でも、燃料ペレットの熱伝導率等の高温熱定数が重要な熱物性値として注目されている。そこで、高燃焼度下で生じる核燃料ペレット内のFP蓄積等に起因した熱伝導率の低下を解明するためのペレット熱伝導率測定装置¹⁾を開発した。

本装置はレーザフラッシュ法により試料の熱拡散率を測定し、他の測定機器又は文献等から得られた試料の比熱容量と密度より熱伝導率を算出する遮蔽型のペレット熱伝導率測定装置である。本報告書は、未照射二酸化ウラン(UO_2)、ガドリニア入り二酸化ウラン($UO_2-Gd_2O_3$)及びジルコニア(ZrO_2)試料を用いて行った本装置の特性試験の結果、並びに試料調製技術についてまとめたものである。

なお、本装置は「高燃焼度燃料照射後試験設備整備」として、電源開発促進対策特別会計予算により、科学技術庁からの委託研究として開発したものである。

2. 測定装置の概要

(1) 热拡散率測定の原理と熱伝導率の求め方

ペレット熱伝導率測定装置は、レーザフラッシュ法により試料の熱拡散率を測定し、比熱容量と密度より熱伝導率を算出する装置で、熱拡散率の解析法には、ハーフタイム法と対数法の選択が可能である。ハーフタイム法及び対数法による熱拡散率測定の原理と、熱伝導率求め方を下記に述べる。

ハーフタイム法($t_{1/2}$ 法)²⁾による熱拡散率の測定は、平板試料の上面(表面)にレーザ光を1パルス照射した後に、熱が試料の厚さ方向に一次元的に伝わると仮定して、下面(裏面)における温度上昇幅の最大値の半分に達する時間より求める。試料の下面(裏面)の温度上昇幅(θ)が、温度上昇幅の最大値(θ_m)の半分に達する時間を $t_{1/2}$ とすると、熱拡散率 α は、下記の式(1)で求めることができる。

$$\alpha = 0.1388L^2/t_{1/2} \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで、試料の比熱容量 C_p 及び密度 ρ が既知であれば、熱伝導率 λ は下記の式(2)により求められる。

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho \quad \dots \dots \quad (2)$$

一方対数法³⁾では、レーザ光を1パルス照射した時の熱が試料中を一次元的に伝わる場合の熱拡散方程式をラプラス変換して解を導き、その第一項近似式の両辺の対数をとる。そのときの試料下面の温度上昇幅を θ' 、経過時間を t とすれば、 $\theta' \sqrt{t}$ の対数と $1/t$ とは直線関係になり、その直線の傾きを t_1 とすれば、その関係は式(3)となる。

$$t_1 = L^2 / 4\alpha \quad \dots \dots \quad (3)$$

式(3)により試料の熱拡散率 α は、式(4)で表される。

$$\alpha = L^2 / 4 t_L \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

なお、熱伝導率の計算はハーフタイム法と同様に式(2)を用いる。

(2) ペレット熱伝導率測定装置の概要

ペレット熱伝導率測定装置の概要をFig. 2.1に、主な仕様性能をTable 2.1に示す。装置は試料保持部、レーザ発振器部、赤外線センサー部、ヒータ・温度制御部、真空排気部、データ処理部、生体遮蔽体、フード及び試料移送容器で構成されている。測定試料は放射性物質であるため、試料保持部及びヒータ部は、鋼製の生体遮蔽体で覆っている。ヒータ部は試料による放射性汚染の付着を防止するため、試料を保持する部分とヒータ部とを、タンタル管で仕切り、それぞれ独立に真空排気している。測定操作盤及びデータ処理部を除く装置全体は、装置メンテナンス時に実験室への放射性物質の汚染拡大を防止するため、フードで覆っている。試料保持部及びヒータ部の概略図をFig. 2.2に示す。

試料保持部への試料のセットには、試料の大きさ（直径、厚さ）に合わせた専用のタンタル製の試料ホルダーに試料を固定した試料ホルダーを用いる。本報告書で述べる特性試験に用いた試料ホルダーを、Fig. 2.3、2.4及び2.5に示す。

Table 2.1 Specification of Pellet Thermal Conductivity Measurement Apparatus

1. Measurement Technique	: Laser Flash Technique
2. Laser Oscillator	: Ruby Laser (6 J/pulse)
3. Measurement Temperature	: Room Temperature to 1800°C
4. Measurement Atmosphere	: Vacuum (1.3×10^{-3} Pa)
5. Measurement of Rear-surface Temperature Response	: In-Sb Infrared Detector
6. Measurement Reproducibility	: $\pm 5\%$ (Sample of Pure Ta)
7. Maximum Radioactivity of Sample	: 42.6 GBq

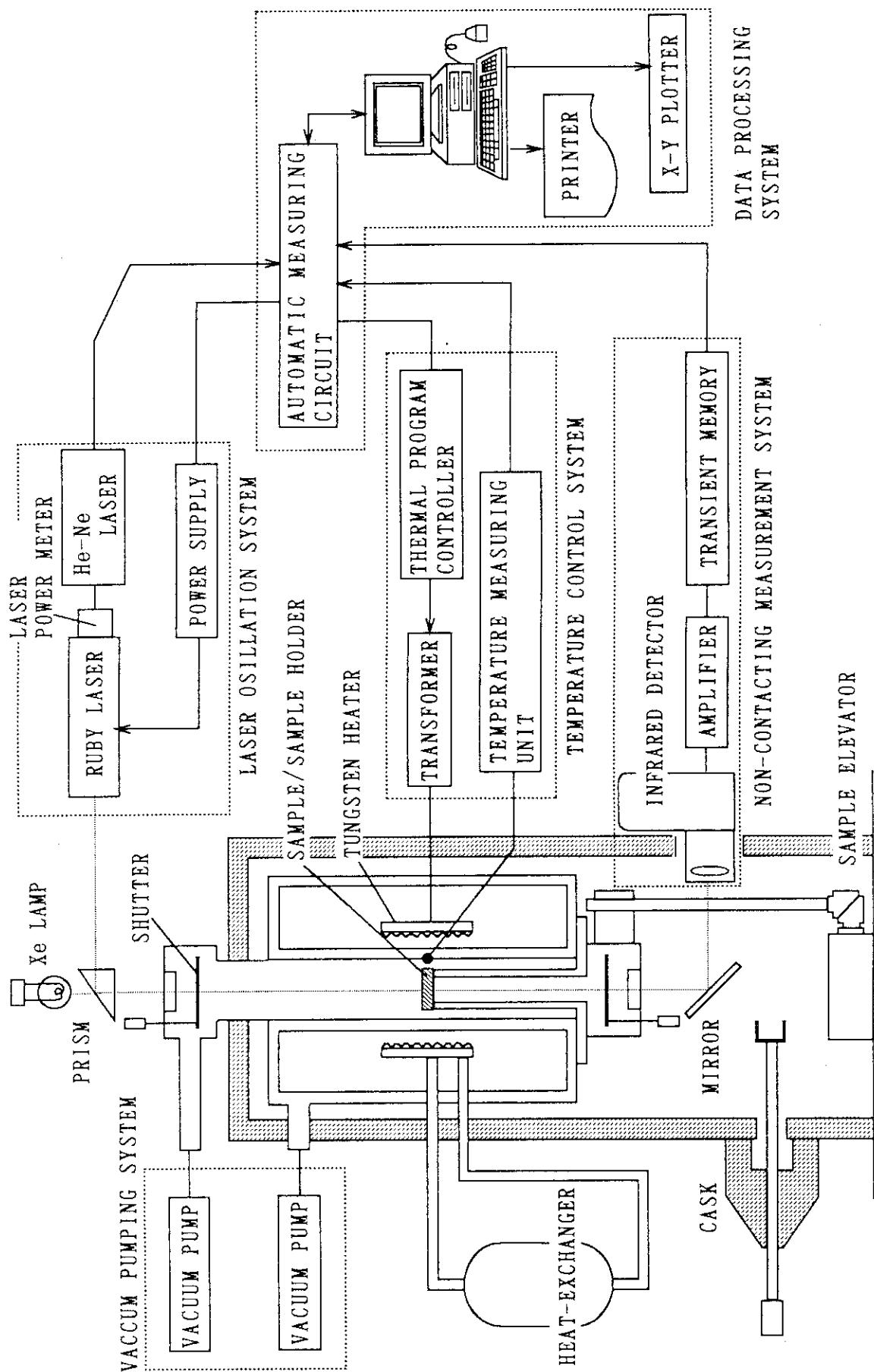


Fig. 2.1 Block Diagram of Pellet Thermal Conductivity Measurement Apparatus

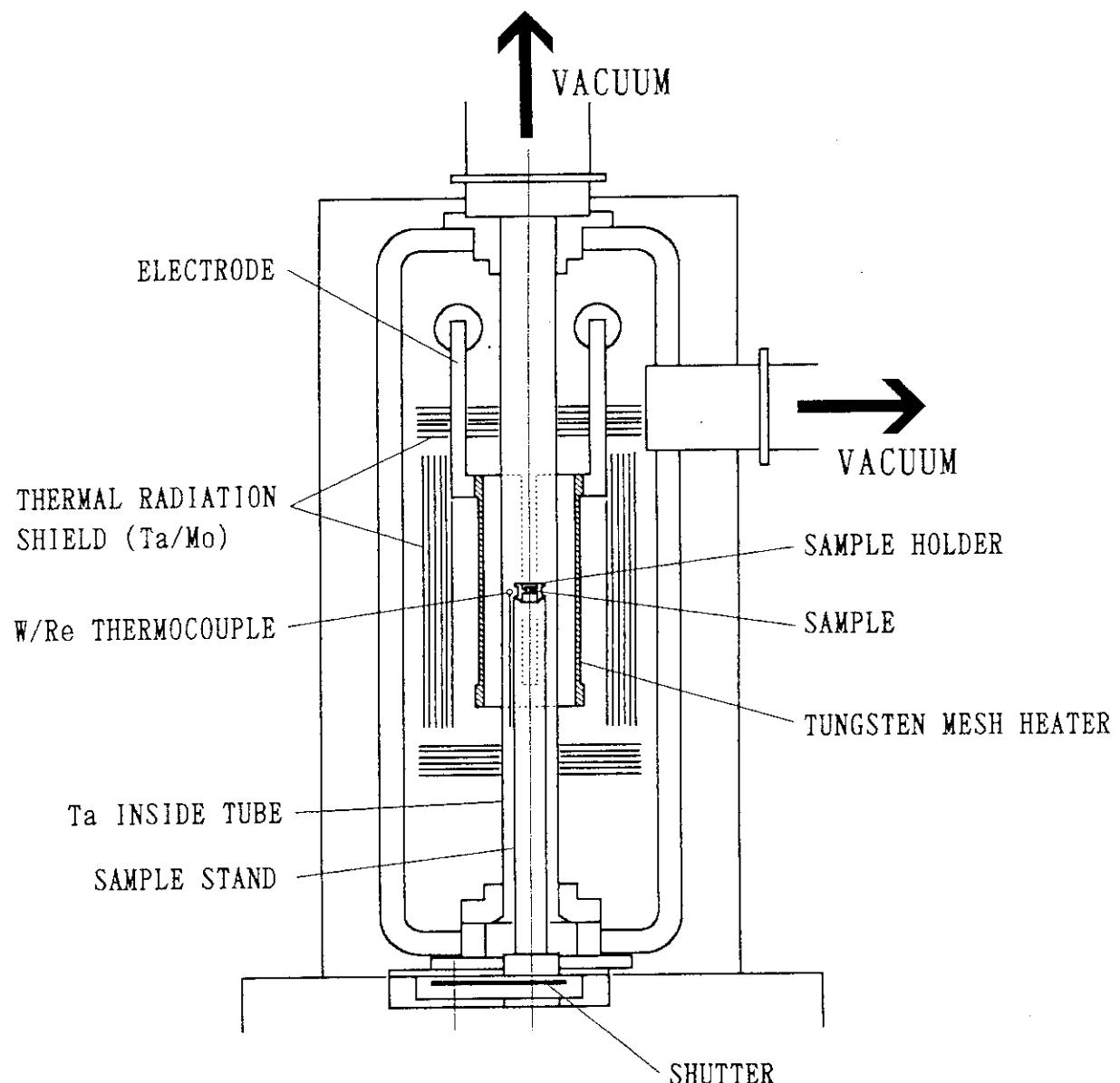


Fig.2.2 Structure of Heating Furnace

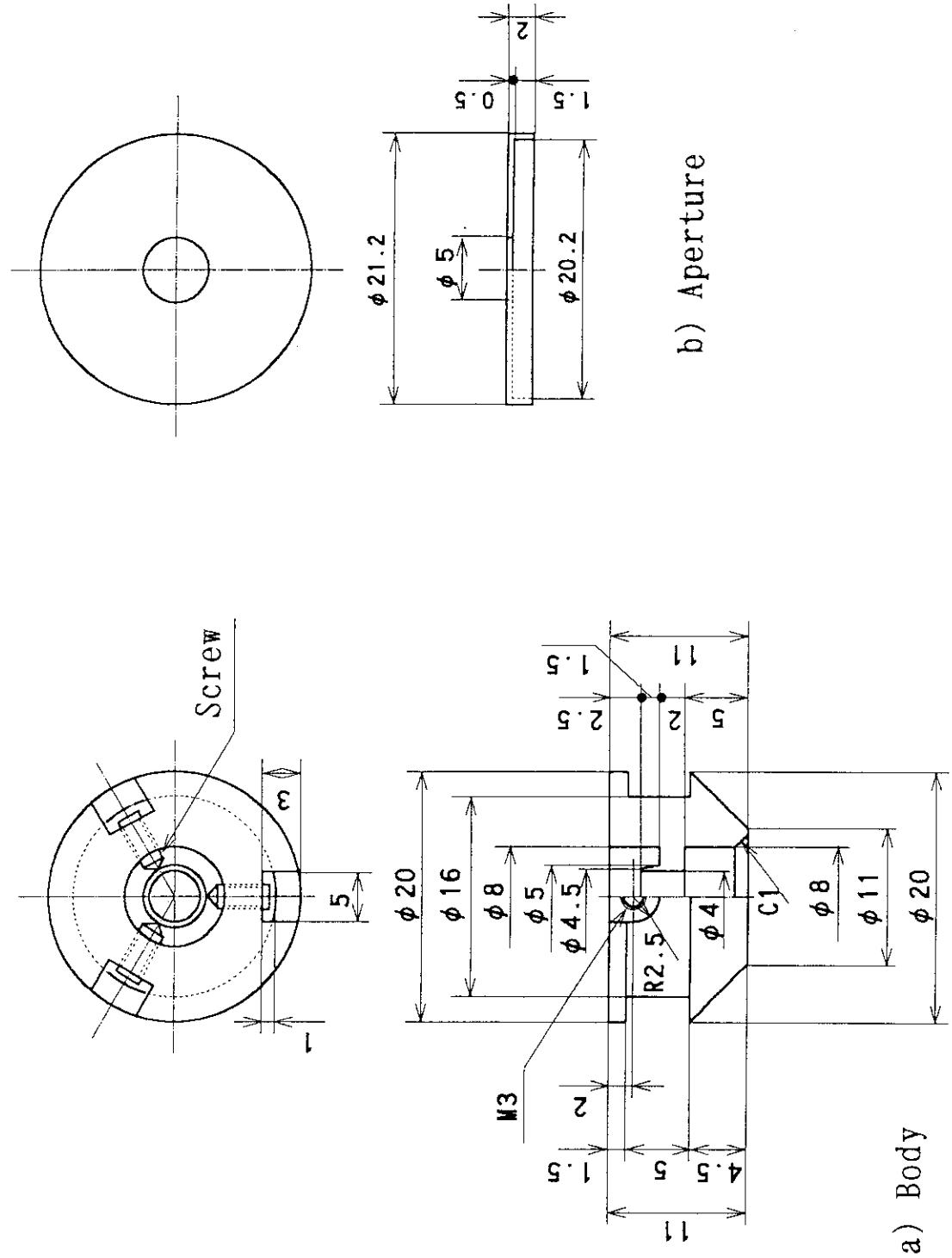


Fig. 2.3 Holder for Sample of 5mm Diameter

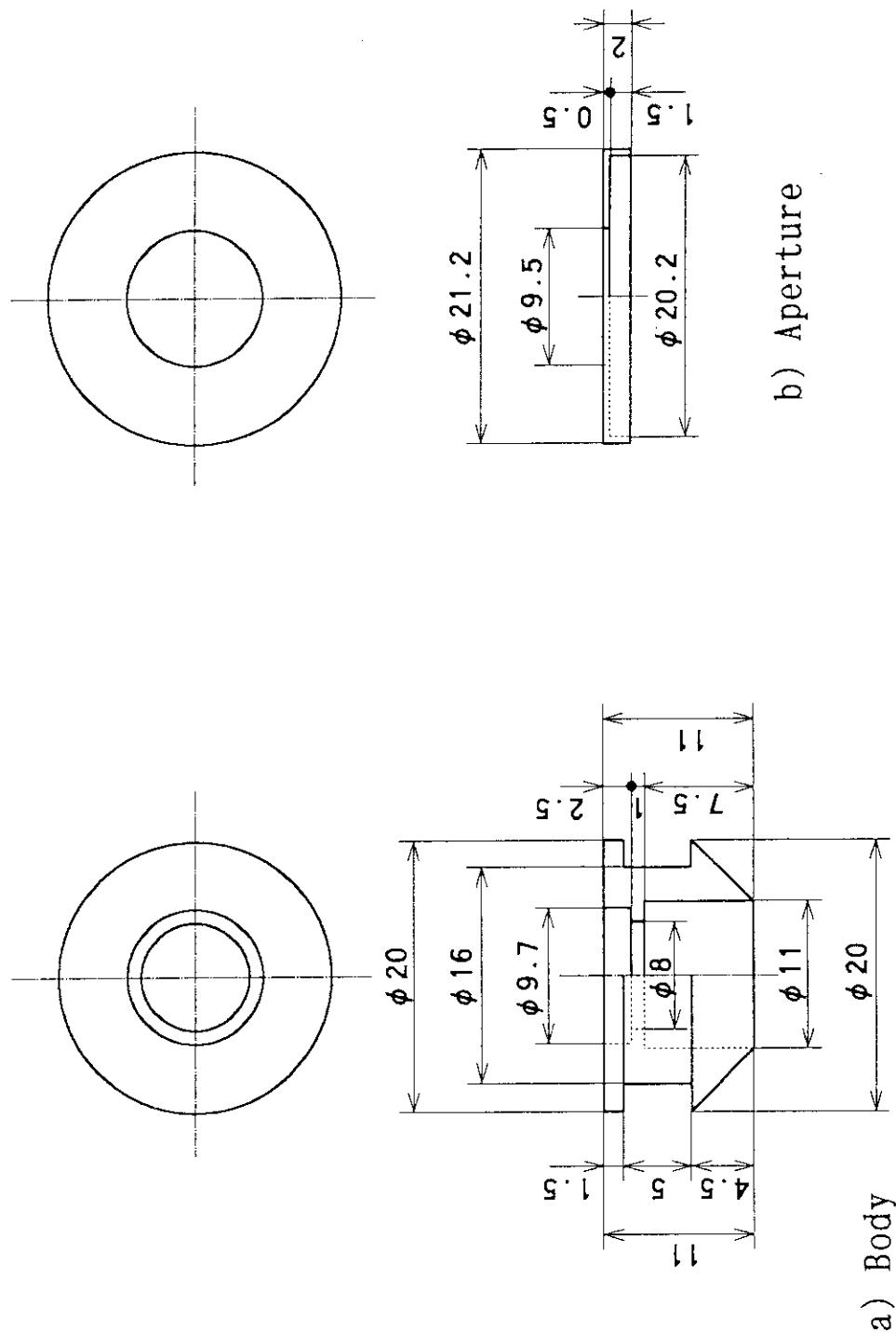


Fig. 2.4 Holder for Sample of 9.5mm Diameter

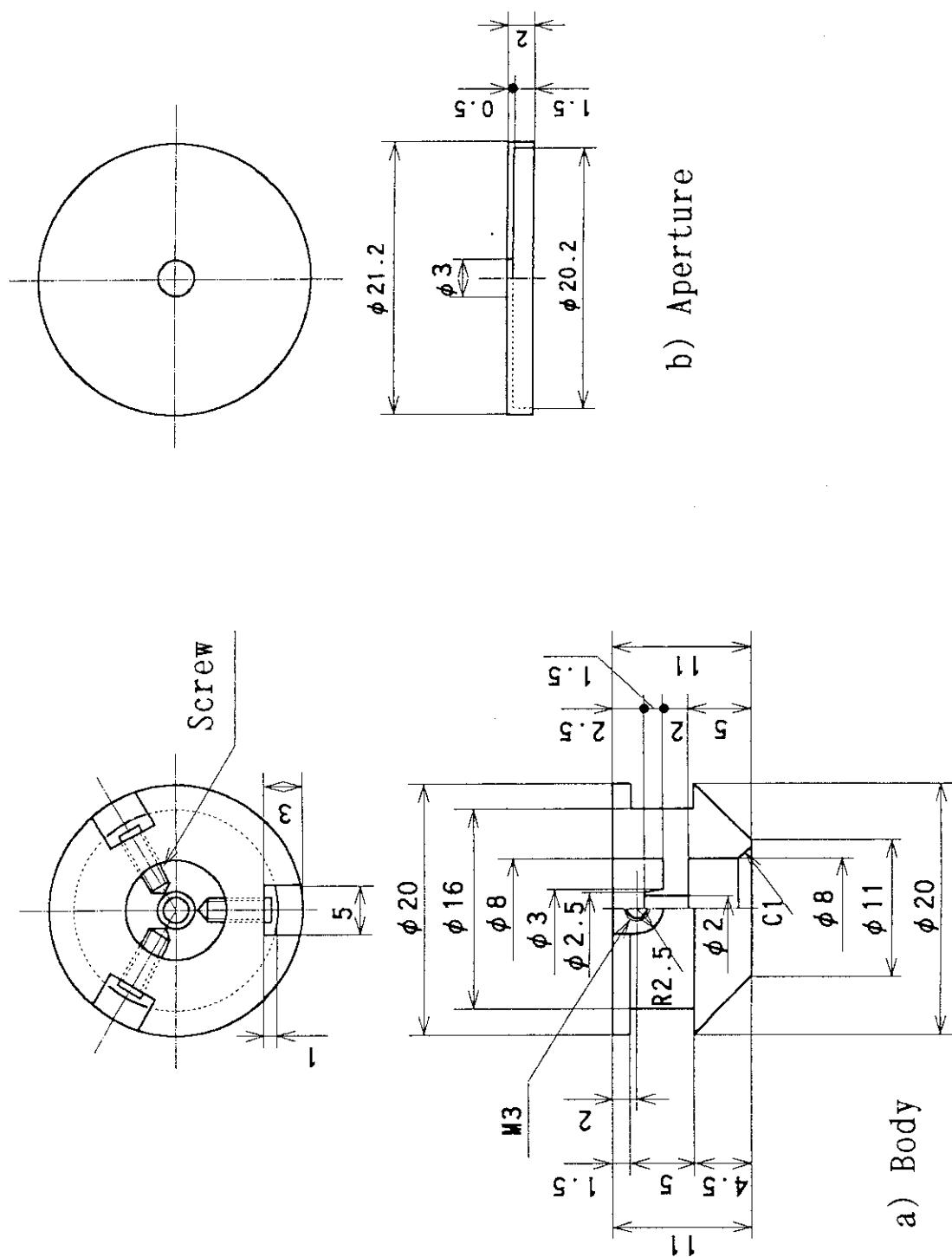


Fig. 2.5 Holder for Sample of 3mm Diameter

3. 特性試験試料

3.1 未照射ウラン試料

装置の特性試験に用いた未照射ウラン試料は、原子燃料工業（株）にて調製・整形したもので、 UO_2 試料及び $UO_2-Gd_2O_3$ 試料である。 Gd_2O_3 の添加量は、3wt%、6wt%及び10wt%である。 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料は、マスターブレンド法により調製されたものである。特性試験に用いた未照射ウラン試料の仕様をTable 3.1に示す。表中の $UO_2-10\text{wt\%}Gd_2O_3$ の試料形状2.1～2.3（直径5mm、厚さ1mm）の3種類は、異なった試験温度条件において熱拡散率を測定したものである。 UO_2 試料には、劣化ウラン（約0.4%²³⁵U）を用いた。

3.2 ジルコニアの試料作製と試料

ZrO_2 （ジルコニア）試料は、 ZrO_2 塊より加工・調製したものである。 ZrO_2 塊は、 CaO （カルシア）又は Y_2O_3 （イットリア）を加えて安定化させたものを用いた。 ZrO_2 塊の $ZrO_2-3\text{wt\%}CaO$ （試料A）及び $ZrO_2-13.7\text{wt\%}Y_2O_3$ （試料C、TC）試料は焼結法で、 $ZrO_2-20\text{wt\%}Y_2O_3$ （試料B）試料はプラズマスプレー法で成形されたものである。

ZrO_2 試料の加工・調製手順をFig. 3.1に示す。試料加工・調製の手順は、初めに ZrO_2 塊をダイヤモンドコアードリルにて穿孔し、コアー状 ZrO_2 を作製する。 ZrO_2 塊が小さく、ダイヤモンドコアードリル装置に固定できない場合は、 ZrO_2 塊を樹脂で固定し、塊のつかみしろを大きくする。ダイヤモンドコアードリルにより加工したコアー状 ZrO_2 は、ダイヤモンドコアードリル内に残る場合と水槽内に落ちてしまう場合があり、ダイヤモンドコアードリル内にコアー状 ZrO_2 が残った場合は、押し棒により押し出す。コアー状 ZrO_2 の押し出しは、ダイヤモンドコアードリルの先端側より行う。次に、コアー状になった ZrO_2 を、半割アクリル管で挟み込んで固定し、ダイヤモンドホイールで2箇所を切断して所定の試料厚さ（約1mm）にする。コアー状 ZrO_2 を固定するアクリル管は、半割にすることによりコアー状 ZrO_2 とアクリル管を密着させ、コアー状 ZrO_2 を確実に固定すると共に、ダイヤモンドホイールで切断するときの刃の案内の役割をする。切断した ZrO_2 は熱拡散率測定用試料とするが、切断によって ZrO_2 試料にバリ等が生じた場合は、研磨することによってバリ等を取り除く。

コアー状 ZrO_2 を作製するダイヤモンドコアードリル装置をFig. 3.2に、装置の外観写真をFig. 3.4に示す。ダイヤモンドコアードリル装置は、 ZrO_2 塊を固定治具のネジ機構で抑えつけ、塊を固定する。固定治具の上下には、テープ付き円形溝が設けてあり、異形の塊を固定することができる。また、 ZrO_2 塊を固定するときには、冷却水槽の底部より約1/3の所に設けたフランジ部より上部を切り離して、固定治具を露出した状態にして試料の取付操作が行える。 ZrO_2 塊の加工は、冷却水槽の中に冷却水を満たして行うため、中間に仕切りコックを設けたビニールホースを用いて、連結した補助水槽から冷却水槽に注水する。冷却水の移動は、補助水槽を冷却水槽より高い位置に上げることにより行う。加工したコアー状 ZrO_2 塊を取り出すときは、試料の加工時とは逆に冷却水槽のある装置本体を、補助水槽より高い位置に上げ、冷却水を移してから操作を行う。 ZrO_2 塊の加工は、ドリルチャックで固定されたダイヤモンドコアードリルによって行う。加工に用いたダイヤモンドコアードリルをFig. 3.3に示す。ダ

イヤモンドコアードリルは、ドリルチャックと連結されたコアードリル回転用の電動モータにより回転させ、回転数は約1000rpmとした。又、ダイヤモンドコアードリルは、上下送りネジにより上下動させている。上下送りネジの回転は、歯車で連結された上下駆動用電動モータで行い、ダイヤモンドコアードリルの送り速度は、ZrO₂塊への加工時の押し付け力を小さくするため約0.5mm/minの低速とした。加工作業以外にダイヤモンドコアードリルを上下に移動させる場合は、上下駆動用電動モータの歯車部を切り替えハンドルで切り放して、上下送りハンドルにより手動操作で行うことができる。加工したコアー状ZrO₂が、ZrO₂塊の下に落ちた場合は、コアー状ZrO₂を取り出し易くするために、コアー状試料の受け容器が水槽内に設けてある。

ダイヤモンドコアードリル装置により、加工されたコアー状ZrO₂を板状に切断するダイヤモンド小型精密切断機をFig. 3.5、外観写真をFig. 3.6に示す。ダイヤモンド小型精密切断機では、半割アクリル管で挟み込んだコアー状ZrO₂を、バイスハンドルを回転させてバイスで固定する。コアー状ZrO₂の切断位置は、バイスを切断位置決めマイクロメータにより所定の寸法に設定する。バイス及び切断位置決め用マイクロメータは、試料固定ベースに取り付けられており、コアー状ZrO₂の切断は、上下送りネジを上下駆動モータで回転させ、試料固定ベースを下方向へ移動させて行う。そのときの送り速度は約0.5mm/minとした。コアー状ZrO₂の切断には、ダイヤモンドホイールを用いている。固定ハンドルで固定したダイヤモンドホイールは、電動モータにより連結ギヤーを介して回転させ、回転速度は約250rpmとした。切断のときの潤滑は、ダイヤモンドホイールの下部に設けた水槽内に満たした水により行う。水槽内には、切断されたZrO₂試料を受け取るためのバスケットを設けている。ダイヤモンドホイールの交換、及びバスケットの取り出しあは、水槽の下部に設けた水槽昇降機構により水槽を下げて行う。

加工・調製したZrO₂試料をTable 3.2に示す。又、熱拡散率測定終了後のZrO₂試料の外観写真をFig. 3.7に示す。試料A(ZrO₂-3wt%CaO)及び試料B(ZrO₂-20wt%Y₂O₃)は、塊より前記した手順により加工・調製したものである。加工・調製した試料厚さは、デジタルダイヤルゲージで5ヶ所測定したところ、試料Aが1.375~1.397mm、試料Bが0.982~0.999mmの値であった。試料Aはもろい材質であったため、試料Bより厚さの平行度がわるくなった。試料C(ZrO₂-13.7wt%Y₂O₃)は、厚さ2mmの板状塊より加工したもので、ダイヤモンド小型精密切断機は使用していない。試料TC(ZrO₂-13.7wt%Y₂O₃)は、試料Cと同じ厚さ2mmの板状塊より、三角形に切り出したもので、前記したダイヤモンドコアードリル装置及びダイヤモンド小型精密切断機は使用していない。

Table 3.1 Samples for Thermal Diffusivity Measurement of Unirradiated
 UO_2 and $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Pellet

Sample	Shape	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Weight (mg)	Density (g/cm ³)
UO_2	1 ($t0.5/\phi 5.0$)	5.29	0.560	129.2	10.52
	2 ($t1.0/\phi 5.0$)	5.28	1.040	239.5	10.52
	3 ($t1.8/\phi 5.0$)	5.28	1.725	396.8	10.50
	4 ($t1.0/\phi 9.5$)	9.50	0.995	742.1	10.52
	5 ($t1.8/\phi 9.5$)	9.45	1.770	1312.5	10.58
$\text{UO}_2\text{-}$ 3wt%	1 ($t0.5/\phi 5.0$)	5.30	0.560	126.7	10.26
	2 ($t1.0/\phi 5.0$)	5.30	1.010	231.2	10.38
	3 ($t1.8/\phi 5.0$)	5.30	1.800	410.8	10.35
	4 ($t1.0/\phi 9.5$)	9.51	1.000	730.7	10.30
	5 ($t1.8/\phi 9.5$)	9.51	1.790	1308.3	10.30
$\text{UO}_2\text{-}$ 6wt%	1 ($t0.5/\phi 5.0$)	5.28	0.495	112.3	10.36
	2 ($t1.0/\phi 5.0$)	5.29	0.980	222.3	10.34
	3 ($t1.8/\phi 5.0$)	5.29	1.815	414.6	10.41
	4 ($t1.0/\phi 9.5$)	9.52	0.950	702.6	10.40
	5 ($t1.8/\phi 9.5$)	9.50	1.805	1328.7	10.38
$\text{UO}_2\text{-}$ 10wt%	1 ($t0.5/\phi 5.0$)	5.28	0.505	113.9	10.30
	2.1 ($t1.0/\phi 5.0$)	5.28	1.030	232.0	10.29
	2.2 "	5.28	1.020	230.7	10.33
	2.3 "	5.29	1.015	229.8	10.32
	3 ($t1.8/\phi 5.0$)	5.29	1.820	412.3	10.33
	4 ($t1.0/\phi 9.5$)	9.51	0.910	664.0	10.29
	5 ($t1.8/\phi 9.5$)	9.50	1.845	1351.0	10.33

Table 3.2 Samples for Thermal Diffusivity Measurement of ZrO₂

Sample	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Weight (mg)	Density (g/cm ³)
A:ZrO ₂ -3%CaO (Circle)	4.35	1.375	59.9	2.93
B:ZrO ₂ -20%Y ₂ O ₃ (Circle)	4.74	0.993	87.0	4.98
C:ZrO ₂ -13.7%Y ₂ O ₃ (Circle)	4.87 (18.62mm ²)	1.959	186.6	5.11
TC:ZrO ₂ -13.7%Y ₂ O ₃ (Triangle)	— (12.06mm ²)	1.965	121.1	5.11

* Parenthesis is sample area.

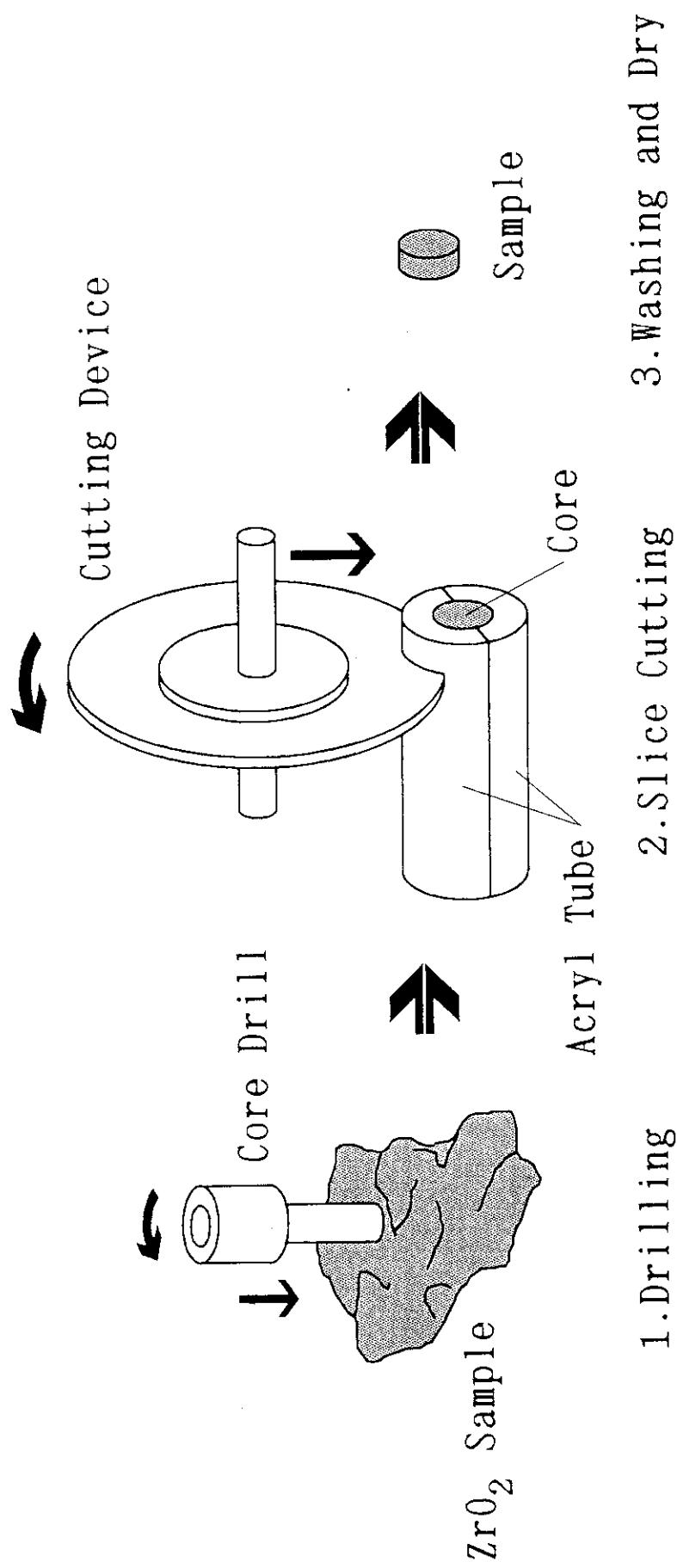


Fig. 3.1 Sample preparation for Thermal Diffusivity Measurement

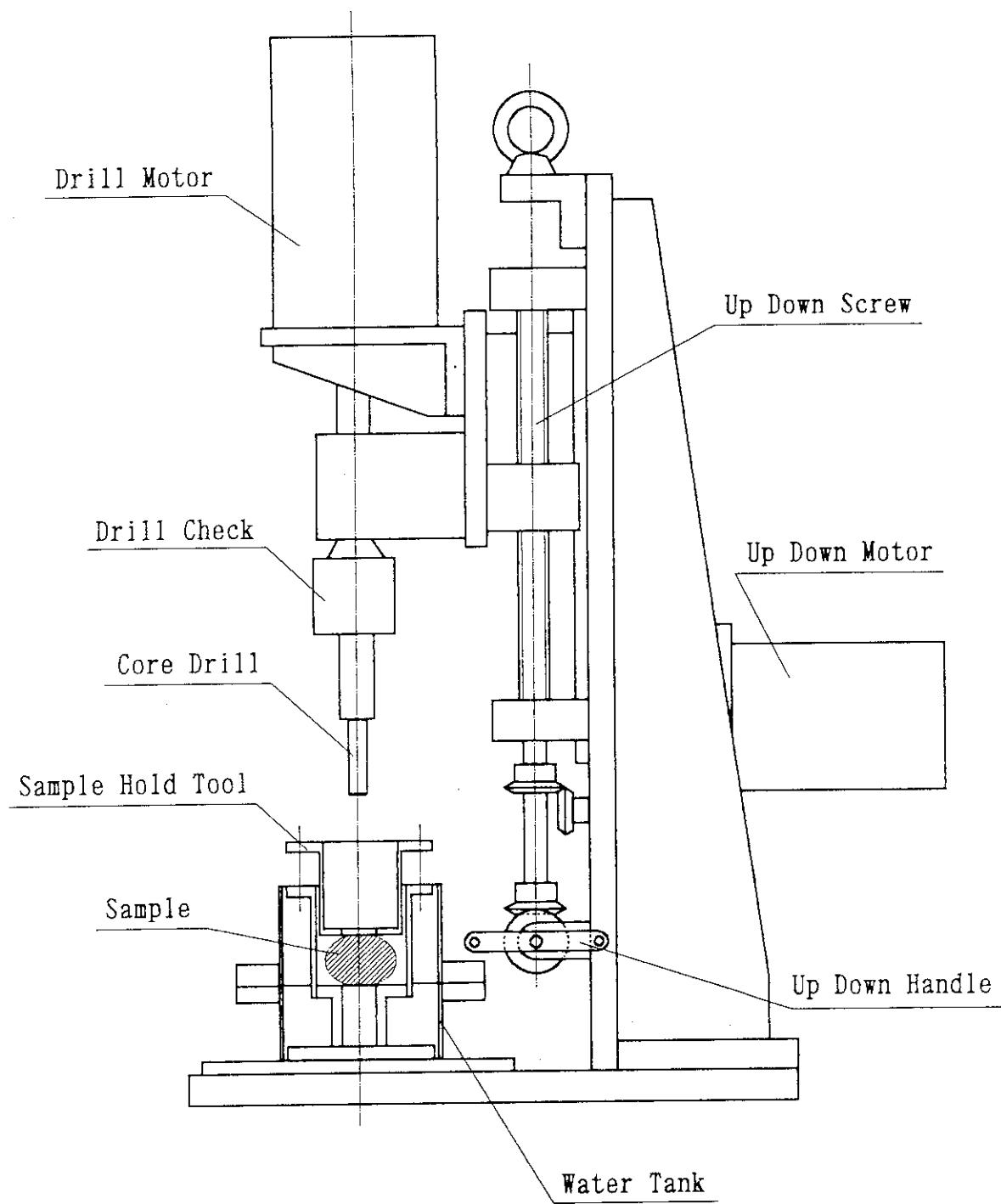


Fig.3.2 Structure of Diamond Core Drill

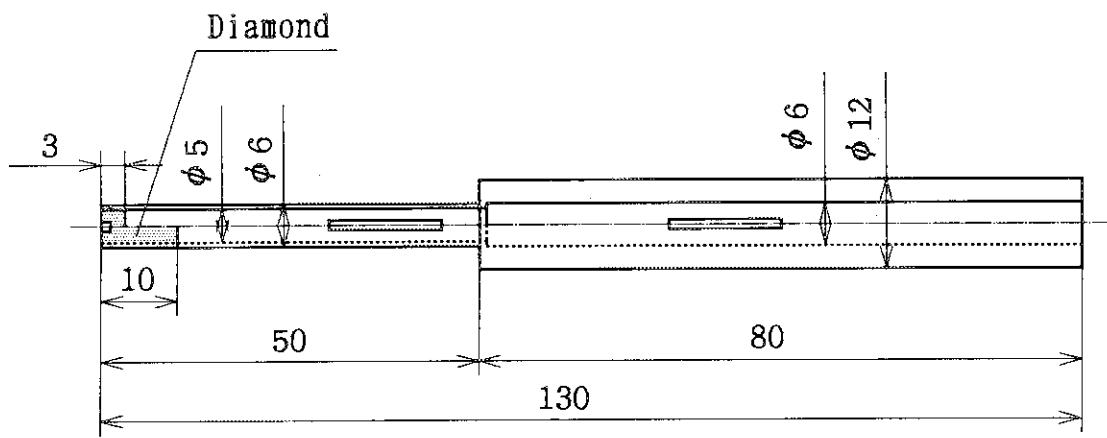


Fig.3.3 Structure of Core Drill

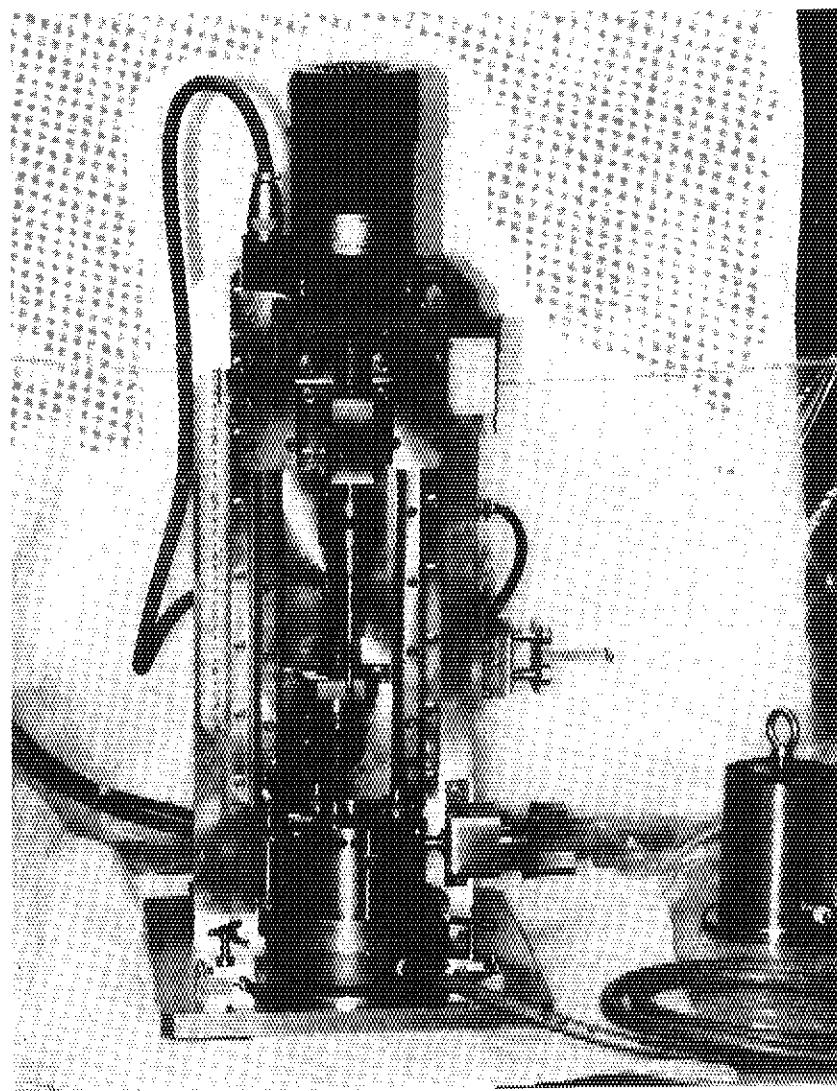


Fig.3.4 Picture of Diamond Core Drill

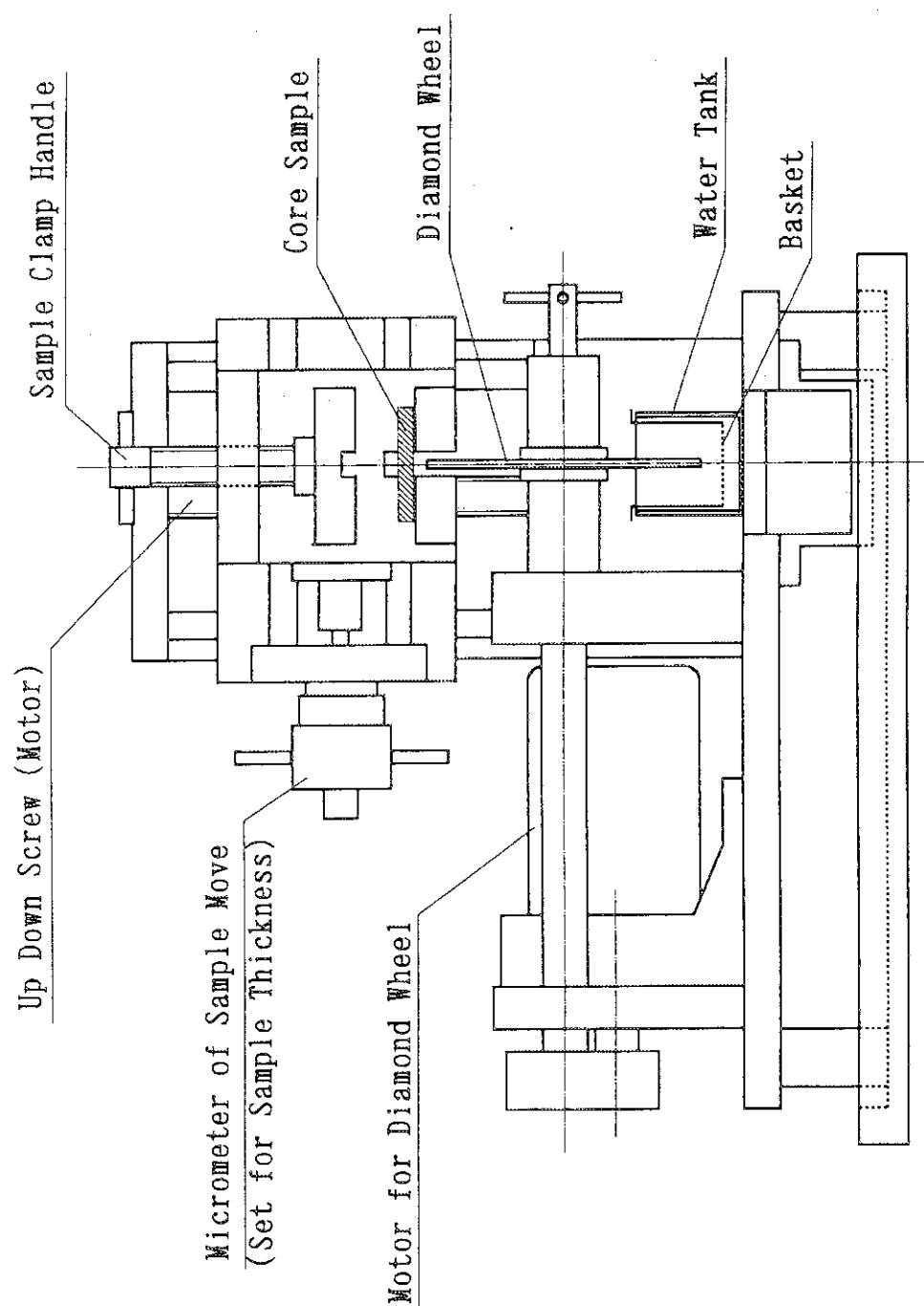


Fig.3.5 Structure of Precise Cutting Device

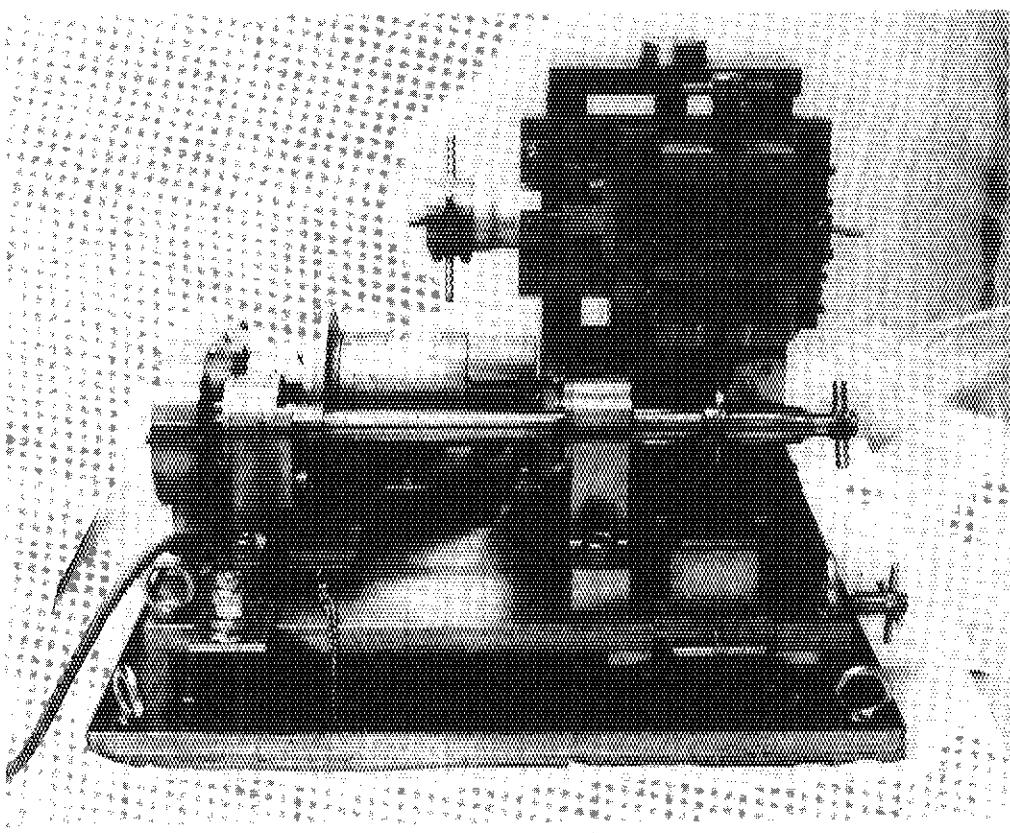
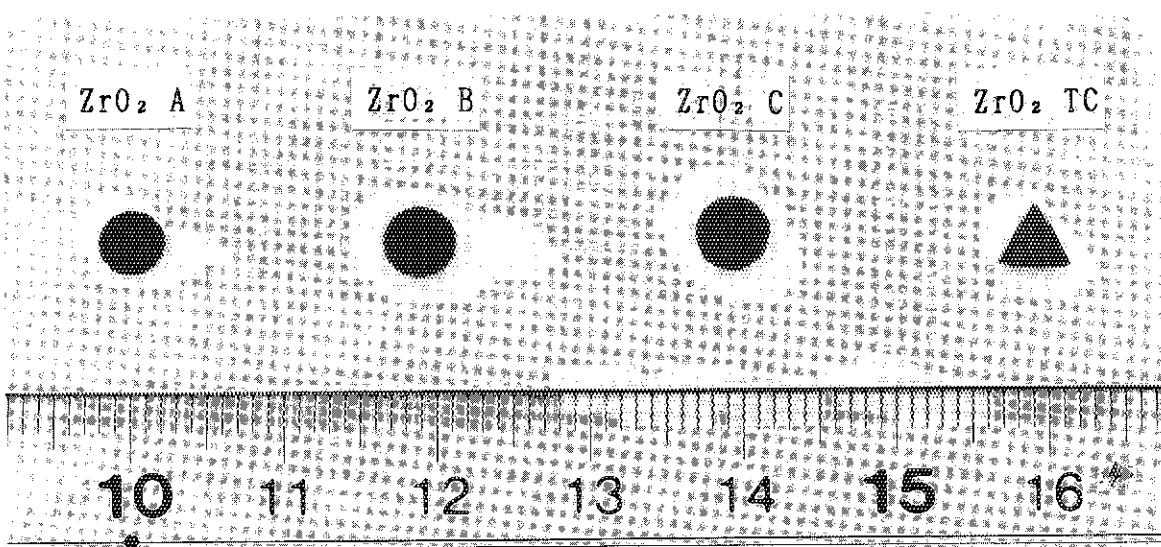


Fig.3.6 Picture of Precise Cutting Device

Fig.3.7 Picture of ZrO_2 Samples (After Measurement)

4. 特性試験と結果

4.1 未照射ウラン試料による特性試験

4.1.1 測定条件

未照射ウラン試料の熱拡散率測定条件をTable 4.1に示す。

室温では、未照射ウラン試料 (UO_2 、 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料) の全ての形状の試料について熱拡散率を測定した。

高温では、直径5mm厚さ0.5、1及び1.8mmと直径9.5mm厚さ1mmについて約100~1700°Cの温度範囲で、200又は100°C毎に熱拡散率測定を行った。その内、直径5mmの試料については、熱拡散率測定値に対する昇温時と降温時の影響を確認するための測定を行った。 UO_2 -10wt% Gd_2O_3 の試料形状4の熱拡散率測定において、1回目の昇温測定で試料が割れてしまい、2回目の測定ができなかったため、試料形状2.2を用いて同条件にて測定した。

対数法により熱拡散率を求めるための解析範囲は、試料裏面温度履歴曲線において初期の温度上昇時のノイズ等の影響を除くため、試料裏面温度の最大値の0.3~0.9を用いた。

試料ホルダーは、直径9.5mmの試料にFig. 2.3の試料ホルダーを、直径5mmの試料にFig. 2.4の試料ホルダーを使用した。

4.1.2 測定結果

(1) UO_2 試料

室温における各試料の熱拡散率測定結果をTable 4.2に示す。又、試料直径5mmの場合の試料厚さと熱拡散率の関係をFig. 4.1に、試料直径9.5mmの場合の試料厚さと熱拡散率の関係をFig. 4.2に、 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料の室温の測定結果と共に示す。

UO_2 試料の室温における試料厚さに対するハーフタイム法による熱拡散率の測定値は、試料直径5mmの場合で、厚さ0.5、1及び1.8mmの3点の測定値を最小自乗法により近似線を引くと、試料厚さが薄くなるほど測定値が高くなる傾向がある。この傾向は、試料厚さ0.5mmの測定値がない直径9.5mmの試料の場合と同様であった。対数法による熱拡散率の解析結果では、試料直径5mm厚さ0.5mmの測定値が非常に高くなかった。しかし、Fig. 4.1中に示したように対数法において解析範囲を0.5~0.9の後半をとると、厚さ0.5mmの測定値は低くなり、ハーフタイム法の結果と同様な傾向が得られた。

試料厚さ0.5mmの測定結果が異常に高いため、試料表面においてレーザエネルギーの熱への変換を大きくするために、試料表面にカーボンを塗布して室温における熱拡散率を測定した。カーボンを塗布して熱拡散率を測定する方法は、レーザ光が透過、又は反射して試料の表面でレーザが熱に変換されない試料の測定に用いられる。 UO_2 試料で、カーボン塗布によるレーザの熱の変換効果を検討した。その結果測定された熱拡散率は、ハーフタイム法で0.0294 cm^2/s 、対数法で0.0296 cm^2/s の値が得られた。カーボンを塗布しない場合の測定値に対して、ハーフタイム法で約19%、対数法で約30%低い値となった。

直径5mmと直径9.5mmの試料の対数法で解析した熱拡散率の関係をFig. 4.3に示す。図より、直径5mmの試料の方が直径9.5mmの値より大きくなる傾向は認められるが、試料厚さとの関係

は認められなかった。

高温における各形状試料の熱拡散率測定結果を、各試料寸法（直径、厚さ）毎にTable 4.3～4.7に示す。Table 4.3～4.5において、測定温度が約1500、1100、700及び300°Cの測定値は、約1700°Cからの降温時に測定したものである。Table 4.3中の測定温度78°Cにおけるハーフタイム法の熱拡散率測定値は、試料裏面温度履歴データのサンプリング時間が長すぎたため計算できなかった。試料下面（裏面）における温度上昇幅の最大値の決定は、最大値1点の選択ではなく、温度履歴データに乗ったノイズの有無及び大きさをソフト上で判断して最大値を決定している。このため、サンプリングタイムを長く取ると、温度上昇幅の最大値が温度履歴データの最初のところに現れ、正しく最大値が決定できないことがあり、適切なサンプリングタイムの選定が必要となる。Table 4.6及び4.7は、同一試料について2回昇温を繰り返した場合の熱拡散率の測定結果である。Table 4.7は、各温度における対数法の測定値のばらつきを把握するため全測定値を示した。

Fig. 4.4は、直径5mmの試料の室温から約1700°Cまでの熱拡散率を、対数法で解析した場合のデータと測定温度との関係を示したものである。図には、試料直径9.5mm厚さ1mmの測定値を比較のため併せて示した。図において、測定温度が約1500、1100、700及び300°Cの測定値は、約1700°Cからの降温時に測定した値である。試料直径5mmの熱拡散率測定結果では、試料厚さ0.5mmの室温と約100°Cの測定値が、試料厚さ1と1.8mmの測定値より高くなっている他は、大差が認められなかった。また、試料直径9.5mm厚さ1mmの測定値との差も認められなかった。

直径9.5mm厚さ1mmの試料について、昇温を2回繰り返したときの熱拡散率の測定値をハーフタイム法と対数法で解析した値を、米国TPRC (Thermophysical Properties Research Center, Purdue University) のデータ⁴⁾と共にFig. 4.5に示す。昇温を2回繰り返した場合についても熱拡散率の測定結果に差は見られなかった。ハーフタイム法と対数法による熱拡散率の値の差は、測定温度が1100°C以上になると認められ、温度が高くなるに従がい大きくなつた。その差は、ハーフタイム法の値に対して、対数法の値が1700°Cで14%低くなつた。

直径9.5mm厚さ1mmの試料の熱拡散率の2回目の昇温測定値において、対数法における計算範囲を0.2～0.5にしたときの結果をTable 4.8に示す。同試料について、試料表面にカーボンを塗布して熱拡散率を測定した結果をTable 4.9に示す。これらの対数法による熱拡散率測定値を2回目の昇温測定値と比較するために、平井⁵⁾及び福島ら⁶⁾の測定データと共にFig. 4.6に示す。対数法における計算範囲を0.2～0.5としたときの値は、計算範囲が0.3～0.9の場合と比較して、測定温度が室温から約300°Cの範囲で、熱拡散率が最大で6%高くなつた。レーザエネルギーを試料表面で熱に効率良く変換させるため、試料表面にカーボンを塗布したときの熱拡散率測定では、測定温度が700°Cまで、塗布しない場合の値より低い測定値が得られた。2回目の昇温測定値と、平井⁵⁾及び福島ら⁶⁾の測定データとの比較では、約10%高い値となつた。

昇温測定（最大温度約1700°C）によるUO₂試料の重量変化（測定精度±0.5mg）は、1回目及び2回目の昇温共に認められなかった。

直径9.5mm厚さ1mmの試料の対数法による2回目昇温の熱拡散率の測定結果より、米国TPRC⁴⁾、及び日本熱測定学会編の熱力学データベース⁸⁾の比熱容量を用いて熱伝導率を計算した結果

をTable 4.10に示す。なお、計算に用いた比熱容量は、熱拡散率の測定温度に相当する文献値の前後2点のデータより比例換算で求めた。熱伝導率の計算におけるバルク密度は、Table 3.1に示した試料の重量と寸法から求めた値に、各温度における体積膨張⁷⁾を換算して求めた。計算により得られた熱伝導率を、熱伝導率の一般計算式⁸⁾及び福島ら⁶⁾の報告値と共にFig. 4.7に示す。一般計算式の結果及び福島らの報告値よりは高めではあるが同様な傾向が得られた。

(2) $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 試料

$\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 試料の室温における各試料の熱拡散率測定結果を、 Gd_2O_3 の添加量毎に $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ をTable 4.11、 $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ をTable 4.21及び $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ をTable 4.30に示す。又、試料直径5mmの場合の試料厚さと熱拡散率の関係をFig. 4.1に、試料直径9.5mmの場合の試料厚さと熱拡散率の関係をFig. 4.2に、 UO_2 試料の室温の熱拡散率測定値と共に示す。

$\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 試料の室温における試料厚さに対する熱拡散率は、ハーフタイム法の解析結果で、試料直径5mmで厚さ0.5、1及び1.8mmの3点の測定値を最小自乗法により近似線を引くと、試料厚さが薄くなるほど測定値が低くなる傾向が認められた。この傾向は、試料厚さ0.5mmの測定結果が無い、直径9.5mmの測定結果でも認められた。対数法においても、ハーフタイム法で得られたほど大きくはないが、試料厚さが薄くなるほど測定値が低くなる傾向があった。試料厚さを0に外挿したときのハーフタイム法と対数法との熱拡散率の値はほぼ一致した。

直径5mm及び直径9.5mmの試料について、対数法で解析した場合の熱拡散率の関係をFig. 4.3に示す。試料直径5mmの熱拡散率測定結果に対して直径9.5mmの測定値は、試料厚さが厚くなるほど熱拡散率の差が大きくなる傾向が認められた。

高温における $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ 試料の熱拡散率測定結果を、Table 4.12～4.19に示す。Table 4.12、4.14及び4.16の中で測定温度が約1500、1100、700及び300°Cの測定値は、約1700°Cからの降温時に測定したときの値である。Table 4.19は、各測定値のばらつきを把握するために全測定値を示した。

$\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ 試料の直径5mmで厚さ0.5、1及び1.8mmの試料について、昇温を2回繰り返して測定した結果をFig. 4.8に示す。1回目の高温測定は、約1700°Cまでの昇温時の測定に引き続き降温時において熱拡散率を測定した。図中では測定結果の試料形状を分類するため、昇温時と降温時を区別しないで測定値を直線で結んである。試料厚さ0.5mmの熱拡散率測定結果は、1回目の昇温時と降温時の測定値に差が見られた。2回目の昇温時の測定値は、1回目の降温時の測定値と一致した。試料厚さ1及び1.8mmの測定結果では、0.5mmの測定結果で見られた傾向は認められなかった。

高温における $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ 試料の熱拡散率測定結果を、Table 4.22～4.28に示す。Table 4.22、4.23及び4.25の中で測定温度が約1500、1100、700及び300°Cの熱拡散率の測定値は、 $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\% Gd}_2\text{O}_3$ 試料の場合と同様に約1700°Cから降温時に測定した値である。厚さ0.5mmの試料は、1回目の昇温測定で試料が割れてしまい、2回目の昇温測定ができなかった。Table 4.28は、各測定温度における熱拡散率測定値のばらつき把握するために全測定値を示した。

$\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の直径5mmで、厚さ0.5、1及び1.8mmの試料について、昇温を2回繰り返して測定した結果をFig. 4.9に示す。1回目の高温測定は、昇温測定に引き続き約1700°Cからの降温時においても測定した。図中では試料形状を区分するため、 $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の場合と同様に、昇温時と降温時の測定値を直線で結んである。試料厚さが3種類共に、1回目の昇温時と降温時の熱拡散率測定値に差が見られた。その測定値の差は試料厚さ0.5mmが大きく、1と1.8mmでは小さくなる傾向を示した。

高温時における $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の熱拡散率測定結果を、Table 4.31～4.33、及びTable 4.39～4.41に示す。 $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ の形状4の試料の熱拡散率測定において、1回目の昇温測定時に試料が割れたため、2回目の昇温測定ができなかった。そのため同条件において、形状2.2の試料を用いて熱拡散率を測定した。その測定結果をTable 4.34及び4.35に示す。

Table 4.31、4.32及び4.39の中で測定温度が約1500、1100、700及び300°Cの測定値は、 $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料及び $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の測定値の場合と同様に、約1700°Cからの降温時に測定した。厚さ0.5mmの試料は、1回目の高温測定で試料が割れたため、2回目の昇温測定ができなかった。Table 4.35は、各測定値のばらつきを把握するために全測定値を示した。

$\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の直径5mmで厚さ0.5、1及び1.8mmについて、昇温を2回繰り返して熱拡散率測定した結果をFig. 4.10に示す。厚さ1mmの試料は試料形状2.1のものである。1回目の高温測定は、約1700°Cまでの昇温測定に引き続き降温時においても熱拡散率を測定した。図中では各試料を区分するため、 $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料と $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の測定値の場合と同様に、昇温時と降温時の測定値を区別せずに直線で結んである。試料厚さが3種類共に、1回目の高温測定の昇温時と降温時とで熱拡散率測定値に差が見られた。その差は試料厚さ0.5と1mmで大きく、1.8mmでは小さかった。厚さ1mmの試料において、2回目の昇温測定値は、1回目の降温測定結果と一致した。

$\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 及び $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ （試料形状2.2）試料の1回目と2回目の昇温による熱拡散率測定値の対数法で解析した結果をFig. 4.11に示す。 $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の直径9.5mmは、1回目の昇温測定で試料が割れたため、2回目の測定ができず、試料直径5mmの測定値をプロットした。2回目の測定値は、1回目の測定値に対して $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料が最大で3%、 $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料が最大で2%及び $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料が最大で7%低い値となった。

$\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 及び $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ （試料形状2.2）試料の1回目と2回目の昇温による測定値のハーフタイム法で解析した結果をFig. 4.12に示す。 $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料の直径9.5mmは、Fig. 4.11と同様な理由により試料直径5mmの測定値をプロットした。2回目の測定値は、1回目の測定値に対して $\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料が最大で3%、 $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料が最大で3%及び $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 試料が最大で6%低い値となった。

$\text{UO}_2\text{-}3\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{UO}_2\text{-}6\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ 及び $\text{UO}_2\text{-}10\text{wt\%Gd}_2\text{O}_3$ （試料形状2.2）試料の2回目の昇温測定値の対数法とハーフタイム法の測定結果の比較をFig. 4.13に示す。対数法による解析結果は、ハーフタイム法の値に対して全測定温度範囲で熱拡散率が低い値を示し、測定温度が1000°Cを越えると、その差は測定温度が高くなるほど大きくなり、約1700°Cで15%低い値を示した。

2回目の昇温測定値の対数法による解析を0.2～0.5としたときの解析結果を、 $UO_2-3\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料をTable 4.20に、 $UO_2-6\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料をTable 4.29に、及び $UO_2-10\text{wt\%}$ Gd_2O_3 （試料形状2.2）試料をTable 4.36に示す。又、各試料の対数法の解析結果をFig. 4.14に示す。対数法の範囲を0.2～0.5とした場合は、熱拡散率の測定温度が1100°C以上では、範囲を0.3～0.9とした場合に対して、測定温度が高くなるにしたがって熱拡散率が低い値となり、約1700°Cで8%低くなった。

1回目と2回目の昇温測定で熱拡散率の測定値に差が現れたが、3回目の昇温での変化を調べた測定結果をTable 4.37に示す。3回目の昇温測定値を1回目と2回目の測定値と比較した図をFig. 4.15に示す。3回目の昇温測定値は、2回目の昇温測定値と大差が認められなかった。同図には、試料直径9.5mmの1回目の昇温測定値もプロットし比較した。試料直径の差による熱拡散率の変化は、試料直径5mmの1回目の昇温測定値と大差は見られなかった。

1回目と2回目の昇温測定値に差が現れる原因を調べるために、試料形状2.3を用いて、昇温最大温度を初めに約1500°Cとして測定し、次に約1600°Cとして昇温と最大温度からの降温の熱拡散率測定を行った。測定温度が約1500と1600°Cではほとんど同じ熱拡散率の測定値が得られた。昇温最大温度を約1600°Cとしたときの測定値をTable 4.38に示す。表中において1514、1111、716及び332°Cの測定は、1611°Cからの降温時の測定値である。又、試料形状2.1において1回目約1700°Cまで昇降温測定し、2回目を昇温測定した結果と共にFig. 4.16に示す。昇温の最大温度を約1600°Cとしたときには、昇温と降温の測定値に約1700°Cまで昇温して熱拡散率を測定したとき見られた様な測定値の差は認められなかった。

$UO_2-10\text{wt\%}$ Gd_2O_3 で直径5mm厚さ0.5mmの試料（本試料については、Table 3.1に記述していない。）について、レーザ光の照射エネルギーを通常測定時の2.8kVから2.2kVに下げて、約1700°Cまでの昇降温の熱拡散率測定を行った。測定結果は昇温時と降温時で測定値に差が現れ、試料は割れてしまった。レーザ光の照射エネルギーの2.2kVは、試料厚さ0.5mmの室温における測定が可能な最小値である。

試料直径5mmと9.5mmとの熱拡散率測定値の差を比較するため、 $UO_2-3\text{wt\%}$ Gd_2O_3 及び $UO_2-6\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料の2回目の昇温測定値についてFig. 4.17に示す。 $UO_2-10\text{wt\%}$ Gd_2O_3 で試料直径9.5mmの熱拡散率測定は、1回目の昇温測定で試料が割れたため測定できなかった。試料直径5mmの測定値が室温から500°Cの範囲では、試料直径9.5mmの測定値に対して、 $UO_2-3\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料で最大5%、 $UO_2-6\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料で最大7%低くなかった。しかし、測定温度が700°C以上になると差が認められなくなった。

$UO_2-3\text{wt\%}$ Gd_2O_3 、 $UO_2-6\text{wt\%}$ Gd_2O_3 及び $UO_2-10\text{wt\%}$ Gd_2O_3 （試料形状2.2）試料の2回目の昇温測定値を、平井⁶⁾と福島ら⁶⁾の測定値と共にプロットした結果をFig. 4.18に示す。 $UO_2-10\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料の測定値は、平井の測定値とは一致したが、福島らの測定値よりも高い値を示した。

昇温測定（最大温度約1700°C）による $UO_2-3\text{wt\%}$ Gd_2O_3 、 $UO_2-6\text{wt\%}$ Gd_2O_3 及び $UO_2-10\text{wt\%}$ Gd_2O_3 試料の重量変化（測定精度±0.5mg）は、1回目及び2回目の昇温共に認められなかった。

4.1.3 測定試料の表面観察

各未照射ウラン試料について、昇温を2回繰り返して熱拡散率を測定したが、 UO_2 試料では2回の昇温の測定値に差は認められなかった。しかし、 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料については、1回目の昇温時の測定値に対して2回目の測定値が小さくなかった。その原因を調べるために、測定前の試料と熱拡散率測定後の試料の表面を観察した。未照射ウラン試料表面の観察写真は、 UO_2 試料をFig. 4. 19、 $UO_2-3\text{wt\%}Gd_2O_3$ 試料をFig. 4. 20、 $UO_2-6\text{wt\%}Gd_2O_3$ 試料をFig. 4. 21及び $UO_2-10\text{wt\%}Gd_2O_3$ 試料をFig. 4. 22に示す。

熱拡散率測定後の UO_2 試料表面には、測定前に見られなかったすじ状の模様が、レーザの照射面側にわずかに認められた。レーザ照射面側と反対の面は、熱拡散率測定前と変化が見られなかった。 $UO_2-Gd_2O_3$ の各試料表面は、熱拡散率測定前に見られなかった微細な割れが測定後に見られた。この微細な割れが見られたのは、レーザの照射面側であった。レーザ照射面側と反対の面は、 UO_2 試料と同様に熱拡散率測定前と変化が見られなかった。

昇温時の最大温度が 1600°C の場合のレーザ照射した試料表面の観察写真をFig. 4. 23に示す。昇温時の最大温度が 1500°C の場合には、熱拡散率測定前後で試料表面に微細な割れが認められなかつたが、 1600°C の場合には、微細な割れがレーザ照射面にわずかに見られた。ただし、Fig. 4. 23に見られるように割れの様子は、 1700°C の場合に見られたような粒界に発生したと思われる割れとは異なっていた。

4.2 ジルコニア試料による特性試験

4.2.1 測定条件

ZrO_2 試料の熱拡散率測定条件をTable 4. 42に示す。

ZrO_2 試料については、室温～ 1700°C の温度範囲で熱拡散率の温度依存性を測定した。

対数法による熱拡散率の解析範囲は、高温における熱リークが未照射ウラン試料で確認されたため、熱リークの現れる試料裏面履歴温度の最大値付近を除いた0.2～0.6とした。

試料ホルダーは、円形の試料にFig. 2. 4の試料ホルダーを、三角形の試料にFig. 2. 5の試料ホルダーを使用した。

4.2.2 測定結果

ZrO_2 試料の熱拡散率測定結果を、各試料毎（試料A： $ZrO_2-3\text{wt\%}CaO$ 、試料B： $ZrO_2-20\text{wt\%}Y_2O_3$ 、試料C： $ZrO_2-13.7\text{wt\%}Y_2O_3$ 、試料TC： $ZrO_2-13.7\text{wt\%}Y_2O_3$ ）にTable 4. 43～4. 46に示す。Table 4. 44中の測定温度 $340\sim 927^{\circ}\text{C}$ の温度範囲のハーフタイム法の解析値は、サンプリングタイムが短かかったため計算できなかった。サンプリングタイムが短かいと、温度上昇幅の最大値が温度履歴測定時間内に現れないことがあるため、適切なサンプリングタイムの設定が必要となる。

試料Aと試料Bの測定値を、ハーフタイム法と対数法でそれぞれ解析した結果をFig. 4. 24に示す。図中には米国TPRCの ZrO_2 のデータ、 $ZrO_2-5\text{wt\%}Y_2O_3$ を対数法で解析した熱拡散率¹⁾、及び試料Cの対数法で解析した値も併せてプロットした。図に示すように、添加物量に応じた妥当な測定結果が得られていると考えられる。

試料Cと試料TCの測定値を、ハーフタイム法と対数法でそれぞれ解析した結果をFig. 4.25に示す。室温～100°C及び1500～1700°Cの温度範囲では、2つの試料の熱拡散率測定値に差が現れているが、その他の温度範囲では良い一致が認められた。

Table 4.1 Measurement Conditions for Thermal Diffusivity of
Unirradiated UO_2 and $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Pellet

Setup Item	Setup Value
1. Temperature	Room Temp. : 20°C High Temp. : 1st; $100 \sim 1700^\circ\text{C}$ (200°C intervals) 2nd; $100 \sim 1700^\circ\text{C}$ (100°C intervals) or 1st; $100 \sim 1700^\circ\text{C}$ (400°C intervals) 2nd; $100 \sim 1700^\circ\text{C}$ (200°C intervals)
2. Atmosphere	Room & High Temp. : $1.3 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ Vacuous
3. Sensitivity	Room Temp. : $\pm 50 \mu\text{V}$ (Sample Thic. 1 & 1.8mm) $\pm 100 \mu\text{V}$ (Sample Thic. 0.5mm) High Temp. : Automatically
4. Data Add Number of Times	Room Temp. : 5 High Temp. : 1
5. Sampling Speed	Room Temp. : 0.05 sec (UO_2 & 3% Gd_2O_3 · Shape1) 0.1 sec (UO_2 & 3% Gd_2O_3 · Shape2, 4, 6% Gd_2O_3 & 10% Gd_2O_3 · Shape1) 0.2 sec (UO_2 & 3% Gd_2O_3 · Shape3, 5, 6% Gd_2O_3 & 10% Gd_2O_3 · Shape2, 3, 4, 5) High Temp. : 0.1 sec (UO_2 , 3% Gd_2O_3 & 6% Gd_2O_3 · Shape1) 0.2 sec (UO_2 , 3% Gd_2O_3 & 6% Gd_2O_3 · Shape2, 4, 10% Gd_2O_3 · Shape1, 2, 4) 0.5 sec (UO_2 , 3% Gd_2O_3 , 6% Gd_2O_3 & 10% Gd_2O_3 · Shape3)
6. Measurement Number of Times	Room & High Temp. : 5

Table 4.2 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂ Pellet at Room Temperature

Sample Shape	Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
			Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	1	21	0.0366	11.89	0.0426
	2	21	0.0365	11.94	0.0421
	3	21	0.0364	11.97	0.0421
	4	21	0.0363	11.98	0.0417
	5	21	0.0367	11.88	0.0413
	Average	21	0.0365	11.93	0.0420
2	1	21	0.0349	43.03	0.0345
	2	21	0.0351	42.82	0.0343
	3	21	0.0349	43.01	0.0347
	4	21	0.0345	43.54	0.0347
	5	21	0.0339	44.25	0.0341
	Average	21	0.0347	43.33	0.0345
3	1	21	0.0365	113.11	0.0340
	2	21	0.0347	119.01	0.0337
	3	21	0.0366	112.76	0.0334
	4	21	0.0348	118.75	0.0344
	5	21	0.0353	116.98	0.0342
	Average	21	0.0356	116.12	0.0339
4	1	21	0.0322	42.63	0.0328
	2	21	0.0324	42.37	0.0328
	3	21	0.0326	42.16	0.0331
	4	21	0.0325	42.26	0.0330
	5	21	0.0324	42.39	0.0329
	Average	21	0.0324	42.36	0.0329
5	1	20	0.0316	137.71	0.0317
	2	20	0.0315	137.86	0.0315
	3	20	0.0319	136.48	0.0317
	4	20	0.0318	136.66	0.0315
	5	20	0.0316	137.66	0.0315
	Average	20	0.0317	137.27	0.0316

Table 4.3 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂(Sample Shape No.1) at High Temperature

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	Diffusivity (cm ² /s)
21	0.0365	11.93	0.0420
78	—	—	0.0354
521	0.0158	27.62	0.0160
902	0.0109	39.97	0.0107
1299	0.0083	52.42	0.0078
1722	0.0068	64.09	0.0061
1509	0.0074	58.92	0.0068
1093	0.0095	45.62	0.0092
696	0.0123	32.90	0.0134
306	0.0203	21.43	0.0212

Table 4.4 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂(Sample Shape No.2) at High Temperature

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	Diffusivity (cm ² /s)
21	0.0347	43.33	0.0345
78	0.0305	49.28	0.0301
513	0.0161	93.31	0.0155
896	0.0113	132.76	0.0107
1298	0.0088	169.73	0.0080
1721	0.0074	203.92	0.0064
1507	0.0080	187.99	0.0070
1093	0.0099	151.80	0.0092
701	0.0134	112.45	0.0128
312	0.0201	74.76	0.0196

Table 4.5 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO_2 (Sample Shape No.3) at High Temperature

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
21	0.0356	116.12	0.0339
83	0.0301	137.17	0.0291
500	0.0164	252.29	0.0158
901	0.0117	353.15	0.0109
1307	0.0095	434.32	0.0082
1728	0.0082	502.89	0.0067
1516	0.0088	467.89	0.0073
1100	0.0105	392.67	0.0094
704	0.0138	299.83	0.0129
306	0.0204	201.97	0.0197

Table 4.6 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO_2 (Sample Shape No.4) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
21	0.0324	42.36	0.0329
100	0.0301	45.67	0.0304
308	0.0217	63.30	0.0218
509	0.0164	83.82	0.0163
689	0.0135	101.45	0.0133
885	0.0115	119.77	0.0111
1095	0.0099	138.22	0.0094
1304	0.0089	154.95	0.0082
1510	0.0080	171.34	0.0072
1725	0.0074	185.50	0.0065

Table 4.7 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (1/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	19	0.0324	42.40	0.0330
2	19	0.0324	42.39	0.0325
3	19	0.0320	42.93	0.0329
4	19	0.0321	42.79	0.0324
5	19	0.0323	42.50	0.0331
Average	19	0.0323	42.60	0.0328
1	77			0.0308
2	77			0.0304
3	78	0.0293	46.87	0.0301
4	78			0.0305
5	78			0.0304
Average	78			0.0304
1	161			0.0267
2	162			0.0266
3	163	0.0263	52.23	0.0267
4	163			0.0266
5	164			0.0265
Average	163			0.0266
1	281			0.0225
2	282			0.0224
3	283	0.0222	61.83	0.0223
4	284			0.0223
5	285			0.0222
Average	283			0.0223
1	394			0.0191
2	395			0.0191
3	395	0.0191	72.03	0.0190
4	396			0.0191
5	397			0.0190
Average	395			0.0191

Table 4.7 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (2/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	502			0.0166
2	502			0.0166
3	503	0.0168	81.96	0.0166
4	503			0.0166
5	503			0.0166
Average	503			0.0166
1	599			0.0148
2	599			0.0148
3	599	0.0150	91.56	0.0148
4	599			0.0148
5	600			0.0148
Average	599			0.0148
1	687			0.0134
2	687			0.0134
3	687	0.0137	100.35	0.0134
4	687			0.0134
5	686			0.0134
Average	687			0.0134
1	786			0.0121
2	786			0.0122
3	786	0.0125	109.68	0.0122
4	786			0.0121
5	786			0.0122
Average	786			0.0122
1	887			0.0111
2	887			0.0111
3	887	0.0115	119.42	0.0111
4	887			0.0111
5	887			0.0111
Average	887			0.0111

Table 4.7 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (3/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	998			0.0102
2	999			0.0102
3	999	0.0106	129.14	0.0101
4	999			0.0101
5	999			0.0101
Average	999			0.0102
1	1099			0.0094
2	1099			0.0094
3	1099	0.0100	138.08	0.0094
4	1099			0.0094
5	1099			0.0094
Average	1099			0.0094
1	1203			0.0088
2	1203			0.0088
3	1202	0.0094	146.53	0.0087
4	1202			0.0088
5	1202			0.0087
Average	1202			0.0088
1	1305			0.0082
2	1305			0.0082
3	1305	0.0089	154.85	0.0082
4	1305			0.0082
5	1305			0.0082
Average	1305			0.0082
1	1407			0.0077
2	1406			0.0077
3	1406	0.0084	163.31	0.0077
4	1406			0.0077
5	1406			0.0076
Average	1406			0.0077

Table 4.7 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO₂(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (4/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	1508			0.0072
2	1508			0.0072
3	1508	0.0080	171.14	0.0072
4	1507			0.0072
5	1508			0.0072
Average	1508			0.0072
1	1614			0.0068
2	1614			0.0068
3	1614	0.0077	178.48	0.0068
4	1614			0.0068
5	1613			0.0068
Average	1614			0.0068
1	1715			0.0065
2	1715			0.0064
3	1715	0.0074	185.75	0.0065
4	1715			0.0065
5	1714			0.0064
Average	1715			0.0064

Table 4.8 Results of Thermal Diffusivity Measurement of UO_2 (Sample Shape No.4) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$) on 2nd Heating

Temperature (°C)	Diffusivity (cm²/s)
19	0.0349
78	0.0322
283	0.0230
503	0.0168
687	0.0135
887	0.0110
1098	0.0092
1305	0.0078
1508	0.0068
1715	0.0060

Table 4.9 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Carbon Spread UO_2 (Sample Shape No.4) at High Temperature

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
18	0.0304	45.21	0.0298
88	0.0276	49.79	0.0274
279	0.0213	64.56	0.0208
508	0.0160	85.77	0.0156
709	0.0131	104.79	0.0127
907	0.0112	123.07	0.0107
1104	0.0098	139.63	0.0092
1306	0.0088	156.93	0.0081
1505	0.0079	173.07	0.0071
1705	0.0070	195.89	0.0061

Table 4.10 Thermal Conductivity of Unirradiated UO₂ Pellet (1/2)

Temperature (K)	Diffusivity (cm ² /s)	Cubical Expansion ¹⁾	Specific Heat ²⁾ (cal/g·K)	Conductivity (A) (W/cm·K)
292	0.0328	3.22 × 10 ⁻³		
351	0.0304	4.03 × 10 ⁻³	0.0605	0.0810
436	0.0266	5.31 × 10 ⁻³	0.0657	0.0770
556	0.0223	7.10 × 10 ⁻³	0.0696	0.0683
668	0.0191	9.58 × 10 ⁻³	0.0718	0.0604
776	0.0166	1.20 × 10 ⁻²	0.0733	0.0536
872	0.0148	1.44 × 10 ⁻²	0.0744	0.0485
960	0.0134	1.68 × 10 ⁻²	0.0753	0.0444
1059	0.0122	1.98 × 10 ⁻²	0.0761	0.0409
1160	0.0111	2.32 × 10 ⁻²	0.0770	0.0376
1272	0.0102	2.73 × 10 ⁻²	0.0778	0.0349
1372	0.0094	3.14 × 10 ⁻²	0.0785	0.0325
1475	0.0088	3.60 × 10 ⁻²	0.0793	0.0307
1578	0.0082	4.06 × 10 ⁻²		
1679	0.0077	4.62 × 10 ⁻²		
1781	0.0072	5.19 × 10 ⁻²		
1887	0.0068	5.86 × 10 ⁻²		
1988	0.0064	6.52 × 10 ⁻²		

1) Ref. 7

2) Ref. 4 (Fig. 77: Curve No. 1)

Table 4.10 Thermal Conductivity of Unirradiated UO₂ Pellet (2/2)

Temperature (K)	Diffusivity (cm ² /s)	Density (g/cm ³)	Specific Heat ³⁾ (J/K·mol)	Conductivity (B) (W/cm·K)
292	0.0328	10.49	68.753	0.0814
351	0.0304	10.48	74.821	0.0775
436	0.0266	10.46	78.323	0.0681
556	0.0223	10.45	79.850	0.0594
668	0.0191	10.42	80.796	0.0522
776	0.0166	10.40	81.560	0.0470
872	0.0148	10.37	82.319	0.0430
960	0.0134	10.35	83.337	0.0396
1059	0.0122	10.32	84.635	0.0366
1160	0.0111	10.28	86.357	0.0343
1272	0.0102	10.24	88.201	0.0323
1372	0.0094	10.20	90.409	0.0310
1475	0.0088	10.15	92.951	0.0297
1578	0.0082	10.11	95.769	0.0287
1679	0.0077	10.06	98.948	0.0278
1781	0.0072	10.00	102.607	0.0272
1887	0.0068	9.96	106.442	0.0265
1988	0.0064	9.88		

3) Ref. 8

Table 4.11 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
Pellet at Room Temperature

Sample Shape	Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
			Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	1	20	0.0232	18.74	0.0229
	2	20	0.0232	18.74	0.0229
	3	20	0.0229	18.99	0.0232
	4	20	0.0232	18.76	0.0232
	5	20	0.0237	18.38	0.0232
	Average	20	0.0233	18.72	0.0231
2	1	19	0.0248	57.04	0.0232
	2	19	0.0243	58.26	0.0232
	3	19	0.0241	58.73	0.0234
	4	19	0.0241	58.67	0.0232
	5	19	0.0237	59.73	0.0234
	Average	19	0.0242	58.49	0.0233
3	1	19	0.0244	184.10	0.0237
	2	19	0.0258	174.00	0.0249
	3	19	0.0255	176.22	0.0247
	4	19	0.0256	175.73	0.0251
	5	19	0.0251	179.06	0.0250
	Average	19	0.0253	177.82	0.0247
4	1	16	0.0229	60.68	0.0225
	2	16	0.0231	60.12	0.0226
	3	16	0.0231	60.12	0.0228
	4	16	0.0229	60.73	0.0225
	5	16	0.0229	60.63	0.0225
	Average	16	0.0230	60.46	0.0226
5	1	19	0.0243	183.39	0.0234
	2	19	0.0241	184.69	0.0233
	3	19	0.0237	187.41	0.0231
	4	19	0.0237	187.48	0.0229
	5	19	0.0239	186.37	0.0234
	Average	19	0.0239	185.87	0.0232

Table 4.12 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.1) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
20	0.0233	18.72	0.0231
82	0.0210	20.78	0.0207
517	0.0133	32.71	0.0131
905	0.0099	43.84	0.0096
1303	0.0080	54.30	0.0075
1725	0.0066	65.95	0.0059
1513	0.0070	62.43	0.0064
1097	0.0083	52.38	0.0079
701	0.0105	41.30	0.0103
306	0.0146	29.78	0.0145

Table 4.13 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.1) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
19	0.0223	19.56	0.0233
86	0.0198	21.99	0.0195
295	0.0150	29.05	0.0146
505	0.0125	34.93	0.0121
705	0.0106	41.04	0.0104
899	0.0094	46.52	0.0091
1103	0.0084	52.10	0.0080
1305	0.0076	57.44	0.0071
1516	0.0070	62.44	0.0064
1727	0.0065	67.13	0.0058

Table 4.14 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
19	0.0242	58.49	0.0233
81	0.0214	66.12	0.0207
516	0.0135	104.82	0.0128
896	0.0102	138.51	0.0096
1302	0.0083	169.80	0.0075
1724	0.0073	194.90	0.0061
1510	0.0077	185.02	0.0067
1093	0.0091	155.99	0.0083
700	0.0115	122.80	0.0109
304	0.0160	88.27	0.0153

Table 4.15 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
18	0.0239	59.12	0.0233
81	0.0216	65.70	0.0207
291	0.0162	87.41	0.0154
503	0.0133	106.41	0.0127
703	0.0114	124.08	0.0108
894	0.0101	140.64	0.0094
1097	0.0090	156.77	0.0083
1300	0.0082	171.77	0.0074
1511	0.0076	185.81	0.0067
1723	0.0070	201.99	0.0059

Table 4.16 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.3) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
19	0.0253	177.82	0.0247
84	0.0227	198.44	0.0217
503	0.0140	320.16	0.0134
896	0.0108	415.52	0.0099
1301	0.0091	429.08	0.0078
1724	0.0082	550.18	0.0065
1511	0.0084	532.57	0.0070
1096	0.0097	461.55	0.0086
700	0.0121	372.87	0.0112
303	0.0165	272.34	0.0158

Table 4.17 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.3) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
18	0.0252	178.51	0.0235
84	0.0215	208.83	0.0214
292	0.0166	271.49	0.0159
502	0.0137	327.49	0.0131
703	0.0119	376.90	0.0112
896	0.0107	420.99	0.0097
1099	0.0097	464.77	0.0086
1302	0.0090	501.68	0.0077
1512	0.0085	528.78	0.0070
1724	0.0079	565.84	0.0064

Table 4.18 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
16	0.0230	60.46	0.0226
104	0.0211	65.63	0.0210
289	0.0172	80.61	0.0168
482	0.0140	99.10	0.0137
686	0.0118	118.03	0.0114
893	0.0102	135.70	0.0097
1093	0.0091	151.96	0.0086
1297	0.0083	167.00	0.0076
1498	0.0077	180.70	0.0068
1689	0.0072	192.59	0.0062

Table 4.19 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (1/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	18	0.0225	61.71	0.0222
2	18	0.0224	62.07	0.0219
3	18	0.0225	61.60	0.0220
4	18	0.0225	61.81	0.0219
5	18	0.0226	61.53	0.0218
Average	18	0.0225	61.74	0.0220
1	103			0.0204
2	104			0.0202
3	104	0.0206	76.39	0.0203
4	105			0.0201
5	105			0.0203
Average	104			0.0203
1	180			0.0188
2	181			0.0187
3	181	0.0190	73.24	0.0186
4	181			0.0187
5	181			0.0187
Average	181			0.0187
1	295			0.0163
2	296			0.0163
3	296	0.0166	83.84	0.0162
4	296			0.0162
5	297			0.0162
Average	296			0.0162
1	389			0.0147
2	390			0.0147
3	390	0.0149	93.07	0.0146
4	392			0.0146
5	392			0.0146
Average	391			0.0146

Table 4.19 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (2/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm/s)
		Diffusivity (cm/s)	Half Time (msec)	
1	499			0.0131
2	500			0.0131
3	500	0.0134	103.36	0.0131
4	501			0.0131
5	501			0.0131
Average	500			0.0131
1	599			0.0119
2	600			0.0119
3	600	0.0123	112.96	0.0119
4	600			0.0119
5	600			0.0119
Average	600			0.0119
1	702			0.0109
2	702			0.0110
3	702	0.0113	122.83	0.0109
4	702			0.0110
5	702			0.0109
Average	702			0.0110
1	800			0.0101
2	800			0.0101
3	800	0.0106	131.55	0.0101
4	799			0.0101
5	799			0.0101
Average	800			0.0101
1	898			0.0094
2	898			0.0094
3	898	0.0099	139.99	0.0094
4	898			0.0094
5	898			0.0094
Average	898			0.0094

Table 4.19 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (3/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm/s)	Half Time (msec)	
1	999			0.0089
2	999			0.0089
3	999	0.0094	148.10	0.0089
4	999			0.0088
5	999			0.0088
Average	999			0.0089
1	1098			0.0083
2	1098			0.0084
3	1098	0.0089	155.98	0.0083
4	1098			0.0083
5	1098			0.0084
Average	1098			0.0084
1	1199			0.0079
2	1199			0.0079
3	1198	0.0085	163.10	0.0079
4	1198			0.0079
5	1198			0.0079
Average	1198			0.0079
1	1300			0.0075
2	1300			0.0075
3	1299	0.0081	170.95	0.0075
4	1299			0.0074
5	1299			0.0075
Average	1299			0.0075
1	1398			0.0071
2	1398			0.0071
3	1397	0.0078	176.94	0.0071
4	1397			0.0071
5	1397			0.0071
Average	1397			0.0071

Table 4.19 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (4/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm²/s)
		Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
1	1496			0.0068
2	1496			0.0068
3	1495	0.0076	183.30	0.0068
4	1495			0.0068
5	1495			0.0067
Average	1495			0.0068
<hr/>				
1	1591			0.0065
2	1590			0.0065
3	1590	0.0074	188.37	0.0065
4	1590			0.0065
5	1589			0.0065
Average	1590			0.0065
<hr/>				
1	1681			0.0062
2	1680			0.0062
3	1679	0.0072	193.40	0.0062
4	1679			0.0062
5	1678			0.0062
Average	1679			0.0062

Table 4.20 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
 (Sample Shape No.4) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$)
 on 2nd Heating

Temperature (°C)	Diffusivity (cm/s)
18	0.0225
104	0.0203
296	0.0162
500	0.0130
702	0.0107
898	0.0092
1098	0.0080
1299	0.0071
1495	0.0063
1679	0.0057

Table 4.21 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ at Room Temperature

Sample Shape	Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
			Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
1	1	21	0.0185	18.37	0.0188
	2	21	0.0189	18.03	0.0187
	3	21	0.0189	18.02	0.0187
	4	21	0.0189	17.96	0.0186
	5	21	0.0186	18.24	0.0186
	Average	21	0.0188	18.12	0.0187
2	1	20	0.0210	63.50	0.0196
	2	20	0.0206	64.83	0.0197
	3	20	0.0205	65.08	0.0201
	4	20	0.0207	64.52	0.0194
	5	20	0.0204	65.50	0.0197
	Average	20	0.0206	64.69	0.0197
3	1	20	0.0217	211.04	0.0209
	2	20	0.0212	215.25	0.0206
	3	20	0.0213	214.85	0.0205
	4	20	0.0214	213.67	0.0204
	5	20	0.0217	210.91	0.0201
	Average	20	0.0215	213.14	0.0205
4	1	18	0.0195	64.13	0.0190
	2	18	0.0193	64.95	0.0189
	3	18	0.0192	65.22	0.0188
	4	18	0.0193	64.80	0.0191
	5	18	0.0195	64.19	0.0190
	Average	18	0.0194	64.66	0.0190
5	1	20	0.0195	231.33	0.0194
	2	20	0.0203	223.02	0.0195
	3	20	0.0198	228.15	0.0193
	4	20	0.0200	226.36	0.0197
	5	20	0.0199	227.75	0.0195
	Average	20	0.0199	227.32	0.0195

Table 4.22 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.1) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
21	0.0188	18.12	0.0187
156	0.0175	19.39	0.0175
526	0.0118	28.90	0.0116
911	0.0092	36.98	0.0089
1312	0.0077	44.42	0.0072
1721	0.0061	55.97	0.0054
1511	0.0063	54.20	0.0057
1106	0.0072	47.27	0.0068
726	0.0088	38.55	0.0085
367	0.0119	28.53	0.0119

Table 4.23 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.2) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
20	0.0206	64.69	0.0197
83	0.0183	72.95	0.0176
514	0.0122	109.26	0.0117
905	0.0098	136.64	0.0091
1304	0.0083	160.12	0.0075
1727	0.0073	182.98	0.0062
1515	0.0076	175.12	0.0067
1099	0.0087	153.98	0.0080
704	0.0105	126.67	0.0099
307	0.0139	96.21	0.0132

Table 4.24 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
19	0.0197	67.53	0.0188
86	0.0172	77.64	0.0165
292	0.0139	96.04	0.0133
502	0.0120	110.70	0.0114
705	0.0106	125.35	0.0101
900	0.0097	138.14	0.0090
1103	0.0088	151.94	0.0080
1306	0.0081	163.79	0.0073
1516	0.0076	174.87	0.0067
1728	0.0072	184.90	0.0061

Table 4.25 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.3) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
20	0.0215	213.14	0.0205
167	0.0183	249.82	0.0192
542	0.0127	359.67	0.0121
912	0.0104	441.24	0.0094
1312	0.0090	508.09	0.0077
1721	0.0081	565.56	0.0066
1510	0.0085	537.76	0.0070
1108	0.0094	488.28	0.0082
724	0.0110	414.90	0.0103
378	0.0141	323.28	0.0135

Table 4.26 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.3) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
20	0.0208	219.52	0.0188
166	0.0183	249.19	0.0165
362	0.0146	313.39	0.0133
540	0.0124	369.92	0.0114
723	0.0110	416.72	0.0101
913	0.0100	455.32	0.0090
1112	0.0093	490.82	0.0080
1313	0.0088	520.95	0.0073
1513	0.0084	541.22	0.0067
1722	0.0081	564.90	0.0061

Table 4.27 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
18	0.0194	64.66	0.0190
108	0.0180	69.57	0.0177
302	0.0149	84.09	0.0146
498	0.0126	99.80	0.0123
697	0.0110	114.17	0.0106
897	0.0099	127.03	0.0094
1094	0.0089	140.17	0.0084
1294	0.0082	152.10	0.0076
1485	0.0077	161.64	0.0069
1667	0.0073	170.77	0.0064

Table 4.28 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (1/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm²/s)
		Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
1	18	0.0189	66.19	0.0187
2	18	0.0190	65.98	0.0186
3	18	0.0189	66.36	0.0186
4	18	0.0190	65.97	0.0187
5	18	0.0188	66.59	0.0186
Average	18	0.0189	66.22	0.0186
1	107			0.0175
2	107			0.0175
3	108	0.0175	71.77	0.0173
4	108			0.0173
5	108			0.0174
Average	108			0.0174
1	194			0.0161
2	194			0.0160
3	194	0.0163	76.90	0.0160
4	194			0.0159
5	194			0.0160
Average	194			0.0160
1	302			0.0143
2	302			0.0144
3	303	0.0145	86.16	0.0143
4	303			0.0143
5	304			0.0143
Average	303			0.0143
1	391			0.0132
2	392			0.0132
3	393	0.0134	93.68	0.0131
4	394			0.0131
5	394			0.0131
Average	393			0.0131

Table 4.28 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (2/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	492			0.0121
2	493			0.0120
3	493	0.0124	101.39	0.0121
4	494			0.0120
5	494			0.0120
Average	493			0.0120
1	588			0.0112
2	588			0.0111
3	588	0.0115	109.00	0.0112
4	589			0.0111
5	589			0.0112
Average	588			0.0112
1	691			0.0104
2	691			0.0104
3	691	0.0107	116.64	0.0104
4	691			0.0104
5	691			0.0104
Average	691			0.0104
1	795			0.0097
2	795			0.0097
3	795	0.0101	123.98	0.0097
4	795			0.0097
5	795			0.0097
Average	795			0.0097
1	900			0.0091
2	900			0.0091
3	900	0.0096	130.99	0.0091
4	900			0.0091
5	900			0.0091
Average	900			0.0091

Table 4.28 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (3/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	999			0.0086
2	999			0.0086
3	999	0.0091	137.33	0.0086
4	999			0.0086
5	999			0.0086
Average	999			0.0086
1	1095			0.0081
2	1095			0.0082
3	1095	0.0087	143.57	0.0082
4	1095			0.0081
5	1095			0.0082
Average	1095			0.0082
1	1192			0.0078
2	1192			0.0078
3	1192	0.0084	149.21	0.0078
4	1192			0.0078
5	1192			0.0078
Average	1192			0.0078
1	1292			0.0074
2	1292			0.0074
3	1291	0.0081	154.52	0.0074
4	1291			0.0074
5	1291			0.0074
Average	1291			0.0074
1	1386			0.0071
2	1385			0.0071
3	1385	0.0078	159.64	0.0071
4	1384			0.0071
5	1384			0.0071
Average	1385			0.0071

Table 4.28 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 2nd Heating (4/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm/s)	Half Time (msec)	
1	1478			0.0068
2	1477			0.0068
3	1477	0.0076	164.30	0.0068
4	1477			0.0068
5	1476			0.0068
Average	1477			0.0068
1	1566			0.0066
2	1566			0.0065
3	1566	0.0074	168.24	0.0065
4	1565			0.0066
5	1565			0.0066
Average	1566			0.0065
1	1651			0.0063
2	1650			0.0063
3	1649	0.0073	171.88	0.0063
4	1648			0.0063
5	1647			0.0063
Average	1649			0.0063

Table 4.29 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
 (Sample Shape No.4) by Logarithmic Method ($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$)
 on 2nd Heating

Temperature (°C)	Diffusivity (cm²/s)
18	0.0187
108	0.0175
303	0.0142
493	0.0120
691	0.0102
900	0.0089
1095	0.0079
1291	0.0071
1477	0.0064
1649	0.0059

Table 4.30 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ at Room Temperature

Sample Shape	Measure- ment Number	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
			Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
1	1	19	0.0161	21.94	0.0160
	2	19	0.0162	21.81	0.0160
	3	19	0.0161	22.03	0.0158
	4	19	0.0161	22.05	0.0158
	5	19	0.0162	21.81	0.0157
	Average	19	0.0161	21.93	0.0159
2.2	1	18	0.0171	84.59	0.0161
	2	18	0.0171	84.32	0.0166
	3	18	0.0172	84.20	0.0166
	4	18	0.0169	85.35	0.0164
	5	18	0.0173	83.41	0.0165
	Average	18	0.0171	84.37	0.0164
3	1	20	0.0187	246.49	0.0176
	2	20	0.0184	249.86	0.0174
	3	20	0.0185	248.41	0.0176
	4	20	0.0182	252.28	0.0169
	5	20	0.0178	258.21	0.0170
	Average	20	0.0183	251.05	0.0173
4	1	19	0.0163	70.60	0.0159
	2	19	0.0163	70.73	0.0161
	3	19	0.0163	70.67	0.0161
	4	19	0.0165	69.51	0.0160
	5	19	0.0165	69.59	0.0162
	Average	19	0.0164	70.22	0.0161
5	1	19	0.0170	277.92	0.0166
	2	19	0.0170	277.27	0.0165
	3	19	0.0169	279.58	0.0164
	4	19	0.0170	278.36	0.0163
	5	19	0.0170	278.39	0.0164

Table 4.31 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.1) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
19	0.0161	21.93	0.0159
171	0.0151	23.45	0.0149
540	0.0107	33.19	0.0105
912	0.0089	39.97	0.0086
1312	0.0077	46.27	0.0072
1721	0.0064	55.59	0.0057
1511	0.0063	55.79	0.0058
1106	0.0070	50.69	0.0066
723	0.0081	43.93	0.0079
376	0.0101	34.91	0.0101

Table 4.32 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2.1) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
19	0.0174	84.87	0.0166
94	0.0152	97.14	0.0145
517	0.0111	132.57	0.0106
902	0.0093	157.52	0.0087
1308	0.0082	179.39	0.0074
1719	0.0073	200.43	0.0062
1507	0.0071	208.44	0.0061
1102	0.0076	194.16	0.0068
704	0.0085	172.83	0.0080
320	0.0108	135.89	0.0103

Table 4.33 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2.1) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
19	0.0153	96.49	0.0147
102	0.0130	113.53	0.0123
311	0.0108	136.54	0.0103
522	0.0095	155.69	0.0090
720	0.0086	170.40	0.0081
904	0.0081	182.34	0.0075
1106	0.0076	193.18	0.0070
1309	0.0074	199.59	0.0066
1510	0.0071	206.70	0.0062
1720	0.0069	212.25	0.0059

Table 4.34 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2.2) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
18	0.0171	84.37	0.0164
81	0.0159	90.62	0.0154
308	0.0125	115.53	0.0120
514	0.0111	130.58	0.0106
709	0.0100	144.01	0.0095
893	0.0093	155.60	0.0087
1092	0.0086	167.13	0.0080
1293	0.0082	176.54	0.0073
1503	0.0077	187.56	0.0067
1717	0.0072	199.92	0.0061

Table 4.35 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2.2) at High Temperature on 2nd Heating(1/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	17	0.0164	88.12	0.0156
2	17	0.0165	87.35	0.0154
3	17	0.0163	88.50	0.0158
4	17	0.0163	88.33	0.0154
5	17	0.0164	88.09	0.0157
Average	17	0.0164	88.08	0.0156
1	98			0.0146
2	99			0.0146
3	100	0.0151	95.79	0.0143
4	101			0.0144
5	101			0.0144
Average	100			0.0145
1	187			0.0129
2	188			0.0130
3	187	0.0135	107.20	0.0129
4	175			0.0129
5	164			0.0129
Average	180			0.0129
1	319			0.0114
2	320			0.0113
3	320	0.0119	121.67	0.0114
4	321			0.0114
5	320			0.0113
Average	320			0.0114
1	421			0.0106
2	422			0.0106
3	423	0.0110	130.88	0.0105
4	424			0.0105
5	425			0.0105
Average	423			0.0105

Table 4.35 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.2.2) at High Temperature on 2nd Heating(2/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	520			0.0099
2	521			0.0099
3	521	0.0104	139.23	0.0099
4	522			0.0099
5	522			0.0099
Average	521			0.0099
1	612			0.0093
2	612			0.0093
3	612	0.0099	146.59	0.0093
4	612			0.0093
5	612			0.0093
Average	612			0.0093
1	708			0.0089
2	708			0.0089
3	708	0.0094	153.60	0.0089
4	708			0.0089
5	708			0.0089
Average	708			0.0089
1	803			0.0085
2	803			0.0085
3	803	0.0091	159.56	0.0085
4	803			0.0085
5	803			0.0085
Average	803			0.0085
1	899			0.0081
2	899			0.0081
3	899	0.0087	165.92	0.0081
4	899			0.0081
5	900			0.0081
Average	899			0.0081

Table 4.35 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.2.2) at High Temperature on 2nd Heating(3/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm²/s)
		Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
1	1002			0.0078
2	1003			0.0077
3	1003	0.0084	172.07	0.0077
4	1003			0.0077
5	1003			0.0077
Average	1003			0.0077
1	1097			0.0075
2	1097			0.0075
3	1097	0.0082	176.66	0.0075
4	1097			0.0075
5	1097			0.0075
Average	1097			0.0075
1	1196			0.0072
2	1195			0.0072
3	1195	0.0080	181.07	0.0072
4	1195			0.0072
5	1195			0.0072
Average	1195			0.0072
1	1296			0.0069
2	1296			0.0069
3	1296	0.0078	185.64	0.0070
4	1296			0.0070
5	1295			0.0069
Average	1296			0.0069
1	1394			0.0067
2	1394			0.0067
3	1393	0.0076	190.10	0.0067
4	1393			0.0067
5	1393			0.0067
Average	1393			0.0067

Table 4.35 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.2.2) at High Temperature on 2nd Heating(4/4)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm/s)
		Diffusivity (cm/s)	Half Time (msec)	
1	1504			0.0065
2	1504			0.0065
3	1504	0.0074	194.04	0.0065
4	1504			0.0065
5	1504			0.0065
Average	1504			0.0065
<hr/>				
1	1613			0.0063
2	1613			0.0062
3	1612	0.0073	198.03	0.0063
4	1613			0.0063
5	1612			0.0063
Average	1613			0.0063
<hr/>				
1	1717			0.0061
2	1717			0.0061
3	1717	0.0072	201.42	0.0061
4	1717			0.0061
5	1717			0.0061
Average	1717			0.0061

Table 4.36 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
 (Sample Shape No.2.2) by Logarithmic Method($0.2 < \theta / \theta_m < 0.5$)
 on 2nd Heating

Temperature (°C)	Diffusivity (cm/s)
17	0.0156
100	0.0146
320	0.0113
521	0.0097
708	0.0087
899	0.0079
1097	0.0072
1296	0.0067
1504	0.0061
1717	0.0056

Table 4.37 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
 (Sample Shape No.2.2) at High Temperature on 3rd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm/s)	Half Time (msec)	
19	0.0162	89.79	0.0155
86	0.0146	98.62	0.0140
293	0.0117	123.90	0.0111
501	0.0102	141.61	0.0097
701	0.0093	155.09	0.0087
896	0.0086	167.95	0.0080
1100	0.0081	178.41	0.0074
1303	0.0077	187.75	0.0069
1514	0.0074	195.47	0.0064
1725	0.0071	203.14	0.0060

Table 4.38 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.2.3) at Maxmam Temperature 1600°C

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
19	0.0170	84.15	0.0161
136	0.0164	87.40	0.0155
524	0.0110	130.35	0.0105
915	0.0091	156.88	0.0085
1316	0.0080	178.11	0.0072
1611	0.0074	192.14	0.0064
1514	0.0076	188.38	0.0066
1111	0.0084	171.17	0.0077
716	0.0097	146.96	0.0092
332	0.0126	113.85	0.0119

Table 4.39 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$,
(Sample Shape No.3) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
20	0.0183	251.05	0.0173
91	0.0157	293.58	0.0155
506	0.0116	397.91	0.0109
903	0.0099	462.43	0.0090
1309	0.0090	512.83	0.0077
1720	0.0083	554.40	0.0066
1508	0.0085	541.55	0.0070
1100	0.0090	510.75	0.0079
703	0.0101	452.37	0.0094
311	0.0123	371.60	0.0117

Table 4.40 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.3) at High Temperature on 2nd Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
19	0.0173	265.22	0.0164
183	0.0151	304.28	0.0149
361	0.0125	366.52	0.0123
540	0.0110	419.83	0.0104
723	0.0101	457.11	0.0093
911	0.0094	486.82	0.0086
1111	0.0090	511.47	0.0079
1312	0.0087	529.66	0.0073
1512	0.0084	544.48	0.0069
1721	0.0081	570.41	0.0064

Table 4.41 Results of Thermal Diffusivity Measurement of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$
(Sample Shape No.4) at High Temperature on 1st Heating

Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
	Diffusivity (cm²/s)	Half Time (msec)	
19	0.0164	70.22	0.0161
108	0.0153	75.34	0.0151
303	0.0130	88.72	0.0127
490	0.0113	101.71	0.0110
688	0.0102	113.16	0.0098
889	0.0093	123.46	0.0089
1085	0.0087	132.24	0.0081
1283	0.0082	140.43	0.0075
1474	0.0077	148.57	0.0070
1636	0.0074	155.07	0.0065

Table 4.42 Measurement Conditions for Thermal Diffusivity of ZrO₂ Sample

Setup Item	Setup Value
1. Temperature	Room Temp. : 20°C High Temp. : 100~1700°C (200°C intervals)
2. Atmosphere	Room & High Temp. : 1.3×10 ⁻³ Pa Vacuous
3. Sensitivity	Room Temp. : ± 50 μV High Temp. : Automatically
4. Data Add Number of Times	Room Temp. : 5 High Temp. : 1
5. Sampling Speed	Room Temp. : 0.5 msec (A; ZrO ₂ -3%CaO & B; ZrO ₂ -20%Y ₂ O ₃) 1 msec (C; ZrO ₂ -13.7%Y ₂ O ₃ & TC) High Temp. : 1 msec
6. Measurement Number of Times	Room & High Temp. : 5

Table 4.43 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) (1/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	18	0.0060		0.0059
2	18	0.0059		0.0061
3	18	0.0059	446.34	0.0060
4	18	0.0059		0.0060
5	18	0.0059		0.0060
Average	18	0.0059		0.0060
1	64			0.0047
2	65			0.0046
3	67	0.0045	586.44	0.0046
4	68			0.0046
5	69			0.0046
Average	67			0.0046
1	278			0.0038
2	280			0.0038
3	281	0.0038	693.25	0.0038
4	282			0.0037
5	282			0.0037
Average	281			0.0038
1	506			0.0033
2	506			0.0034
3	506	0.0035	745.02	0.0034
4	506			0.0033
5	507			0.0034
Average	506			0.0034
1	710			0.0032
2	711			0.0032
3	712	0.0035	746.24	0.0032
4	712			0.0032
5	713			0.0032
Average	712			0.0032

Table 4.43 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample
A(ZrO_2 -3%CaO) (2/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	897			0.0033
2	896			0.0033
3	896	0.0037	712.10	0.0033
4	895			0.0033
5	895			0.0033
Average	896			0.0033
1	1084			0.0037
2	1084			0.0037
3	1084	0.0041	638.35	0.0037
4	1084			0.0037
5	1084			0.0037
Average	1084			0.0037
1	1286			0.0042
2	1286			0.0042
3	1286	0.0045	588.87	0.0041
4	1286			0.0040
5	1286			0.0040
Average	1286			0.0041
1	1500			0.0040
2	1499			0.0038
3	1500	0.0037	705.57	0.0040
4	1500			0.0041
5	1500			0.0042
Average	1500			0.0040

Table 4.44 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample
 $B(\text{ZrO}_2\text{-}20\%\text{Y}_2\text{O}_3)$ (1/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	18	0.0026		0.0027
2	18	0.0026		0.0026
3	18	0.0026	521.98	0.0026
4	18	0.0026		0.0027
5	18	0.0025		0.0027
Average	18	0.0026		0.0027
1	128			0.0026
2	129			0.0026
3	129	0.0025	546.13	0.0026
4	130			0.0025
5	130			0.0026
Average	129			0.0026
1	338			0.0023
2	339			0.0023
3	340	—	—	0.0023
4	341			0.0022
5	342			0.0022
Average	340			0.0023
1	535			0.0018
2	536	—	—	0.0018
3	537	—	—	0.0018
4	538			0.0018
5	538			0.0018
Average	537			0.0018
1	735			0.0018
2	735	—	—	0.0018
3	736	—	—	0.0018
4	736			0.0018
5	736			0.0018
Average	736			0.0018

Table 4.44 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample
B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) (2/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	927			0.0019
2	927			0.0019
3	927	—	—	0.0019
4	928			0.0019
5	928			0.0019
Average	927			0.0019
1	1118			0.0021
2	1117			0.0021
3	1117	0.0023	592.09	0.0021
4	1117			0.0021
5	1117			0.0021
Average	1117			0.0021
1	1316			0.0023
2	1315			0.0023
3	1314	0.0028	490.82	0.0024
4	1314			0.0024
5	1314			0.0024
Average	1315			0.0024
1	1515			0.0028
2	1514			0.0028
3	1514	0.0036	383.02	0.0029
4	1513			0.0029
5	1513			0.0029
Average	1514			0.0029
1	1723			0.0038
2	1722			0.0038
3	1722	0.0049	281.12	0.0039
4	1722			0.0039
5	1722			0.0039
Average	1722			0.0039

Table 4.45 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample
C(ZrO₂-13.7%Y₂O₃) (1/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	18	0.0070		0.0088
2	18	0.0068		0.0088
3	18	0.0070	760.36	0.0083
4	18	0.0065		0.0081
5	18	0.0066		0.0085
Average	18	0.0068		0.0085
1	116			0.0080
2	116			0.0084
3	116	0.0073	728.95	0.0083
4	116			0.0076
5	116			0.0082
Average	116			0.0081
1	316			0.0075
2	320			0.0075
3	321	0.0069	775.05	0.0075
4	322			0.0074
5	323			0.0073
Average	320			0.0074
1	520			0.0067
2	521			0.0067
3	522	0.0066	808.32	0.0067
4	523			0.0067
5	524			0.0067
Average	522			0.0067
1	714			0.0066
2	714			0.0066
3	715	0.0066	812.11	0.0066
4	716			0.0066
5	717			0.0066
Average	715			0.0066

Table 4.45 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) (2/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm ² /s)
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	902			0.0068
2	902			0.0068
3	902	0.0067	789.65	0.0068
4	902			0.0069
5	902			0.0068
Average	902			0.0068
1	1089			0.0074
2	1089			0.0074
3	1089	0.0071	748.75	0.0075
4	1089			0.0075
5	1089			0.0075
Average	1089			0.0075
1	1288			0.0074
2	1288			0.0073
3	1288	0.0075	711.53	0.0072
4	1288			0.0071
5	1287			0.0071
Average	1288			0.0072
1	1500			0.0071
2	1500			0.0072
3	1499	0.0078	678.79	0.0072
4	1500			0.0070
5	1500			0.0071
Average	1500			0.0071
1	1715			0.0073
2	1715			0.0074
3	1715	0.0083	641.02	0.0075
4	1715			0.0079
5	1714			0.0075
Average	1715			0.0075

Table 4.46 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Triangle Shape
Sample TC(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) (1/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm ² /s)
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	19	0.0095		0.0070
2	19	0.0095		0.0069
3	19	0.0083	648.83	0.0084
4	19	0.0087		0.0094
5	19	0.0077		0.0095
Average	19	0.0087		0.0082
1	65			0.0081
2	66			0.0089
3	68	0.0076	709.85	0.0081
4	69			0.0094
5	70			0.0100
Average	68			0.0089
1	293			0.0071
2	293			0.0072
3	293	0.0075	714.65	0.0072
4	293			0.0072
5	293			0.0072
Average	293			0.0072
1	500			0.0070
2	501			0.0070
3	502	0.0072	744.64	0.0069
4	502			0.0069
5	503			0.0069
Average	502			0.0069
1	708			0.0068
2	708			0.0068
3	709	0.0071	753.60	0.0068
4	709			0.0068
5	710			0.0068
Average	709			0.0068

Table 4.46 Results of Thermal Diffusivity Measurement of Triangle Shape
Sample TC(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) (2/2)

Measure- ment Number of Times	Tempera- ture (°C)	Half Time Method		Logarithmic Method Diffusivity (cm ² /s)
		Diffusivity (cm ² /s)	Half Time (msec)	
1	894			0.0068
2	893			0.0068
3	893	0.0072	742.80	0.0068
4	893			0.0068
5	893			0.0068
Average	893			0.0068
1	1085			0.0073
2	1084			0.0072
3	1084	0.0073	730.17	0.0070
4	1084			0.0076
5	1084			0.0075
Average	1084			0.0073
1	1286			0.0073
2	1285			0.0071
3	1285	0.0077	693.10	0.0068
4	1285			0.0070
5	1285			0.0072
Average	1285			0.0071
1	1498			0.0068
2	1498			0.0062
3	1498	0.0084	637.70	0.0072
4	1498			0.0077
5	1498			0.0064
Average	1498			0.0069
1	1710			0.0056
2	1710			0.0057
3	1710	0.0083	648.24	0.0068
4	1710			0.0066
5	1710			0.0076
Average	1710			0.0064

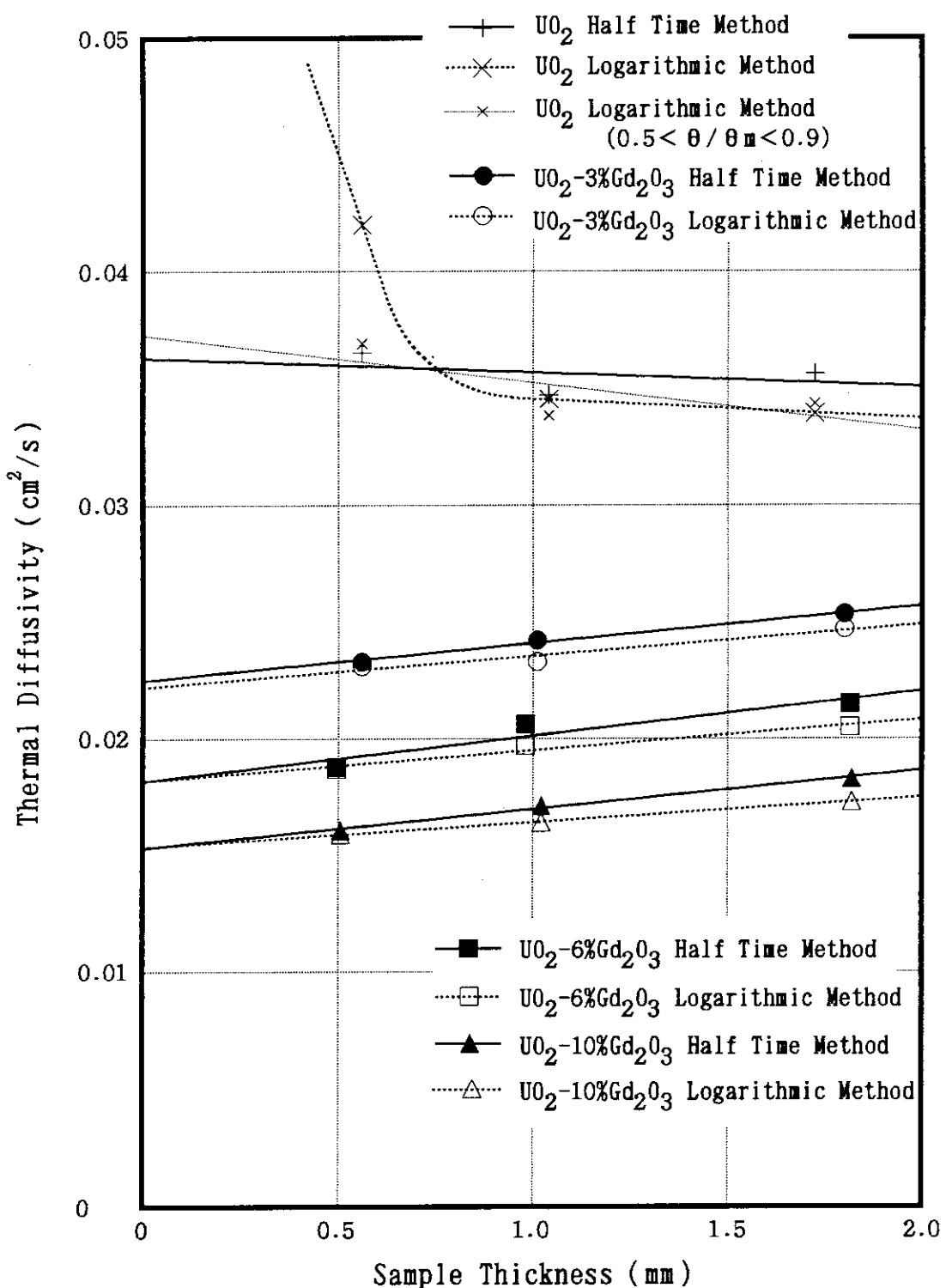


Fig. 4.1 Dependences of Thermal Diffusivity of Unirradiated Fuel Pellet (Diameter: 5mm) on Sample Thickness at Room Temperature

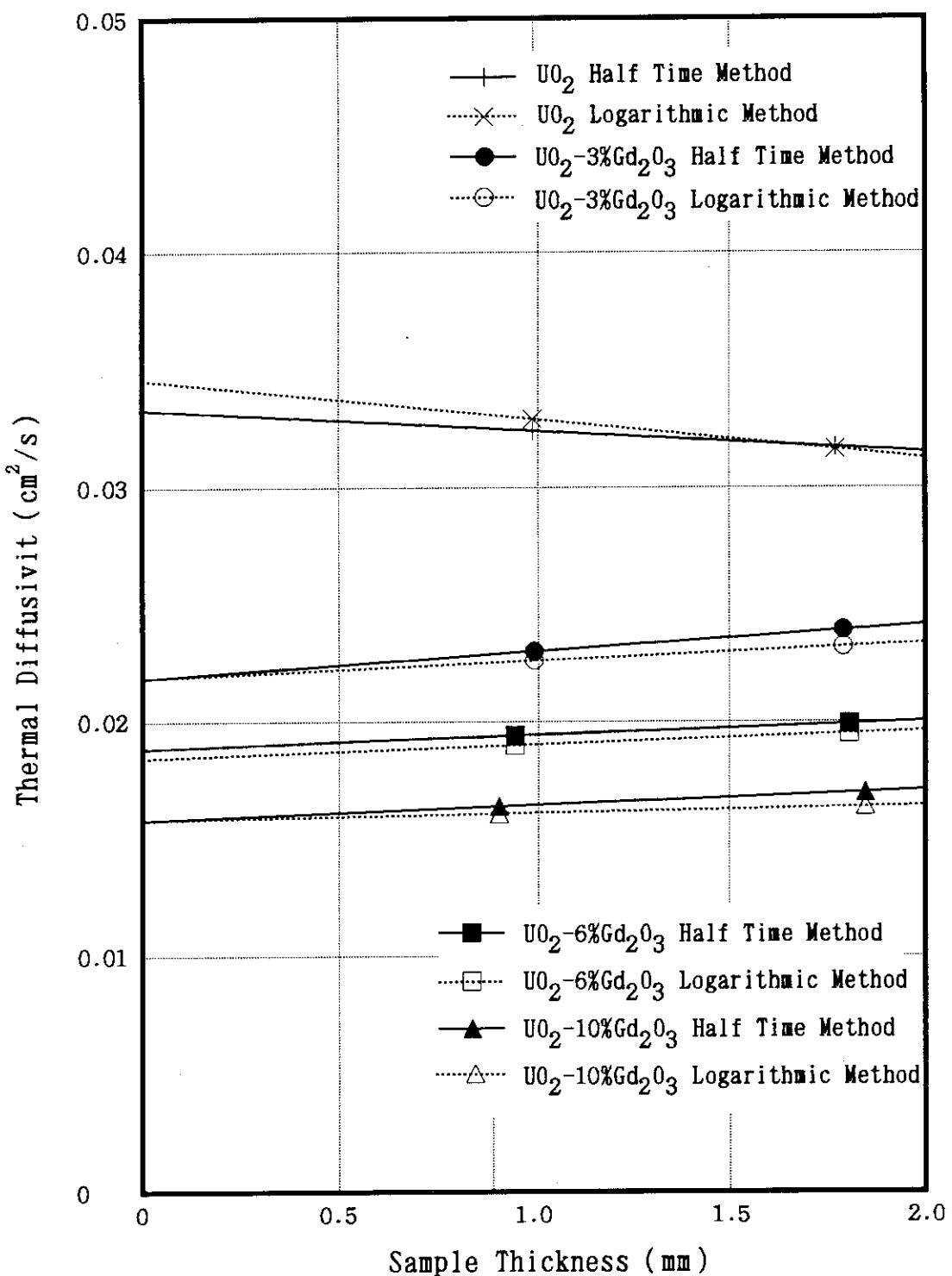


Fig.4.2 Dependences of Thermal Diffusivity of Unirradiated Fuel Pellet (Diameter:9.5mm) on Sample Thickness at Room Temperature

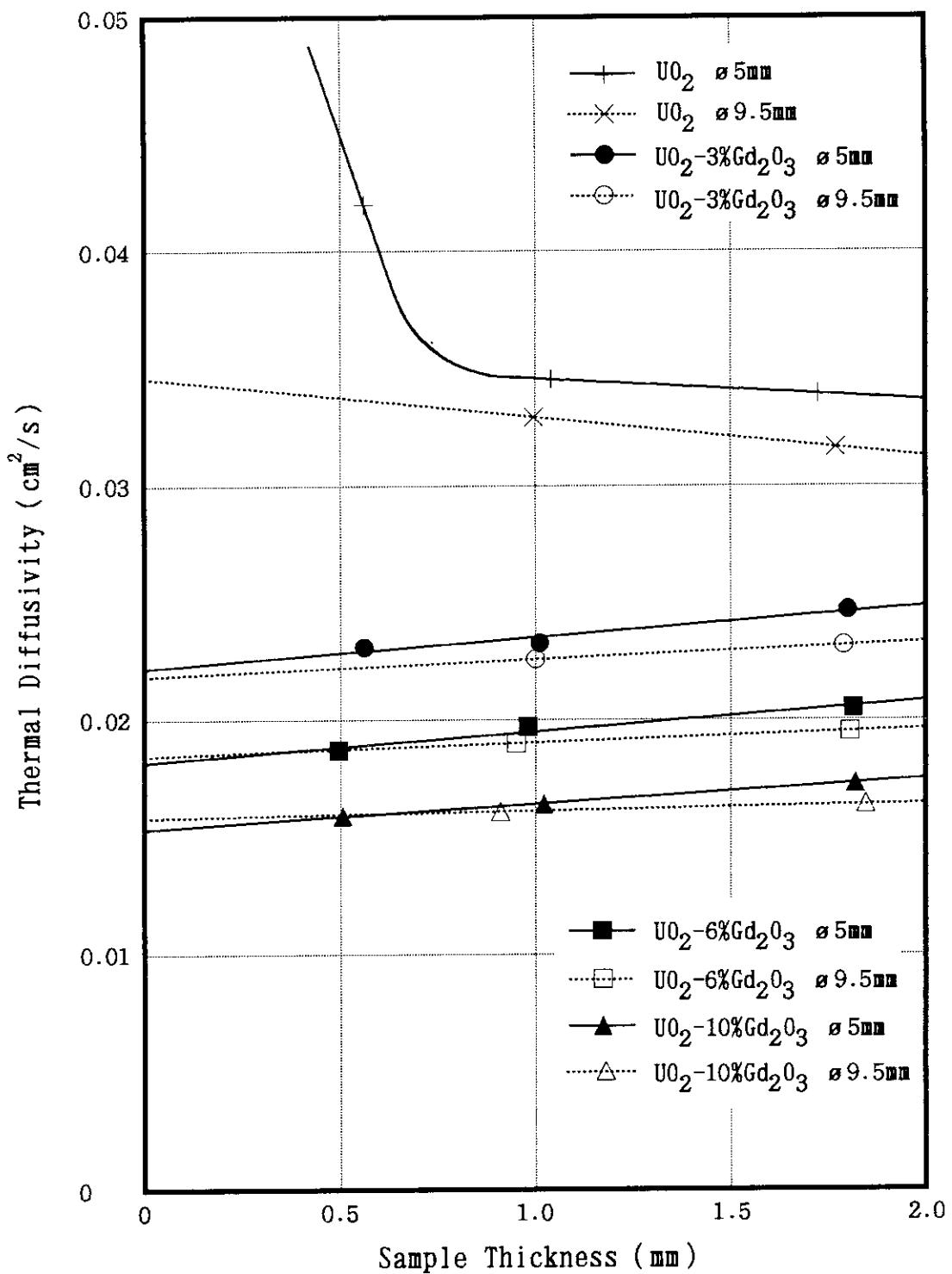


Fig.4.3 Dependences of Thermal Diffusivity of Unirradiated Fuel Pellet by Logarithmic Method on Sample Thickness at Room Temperature

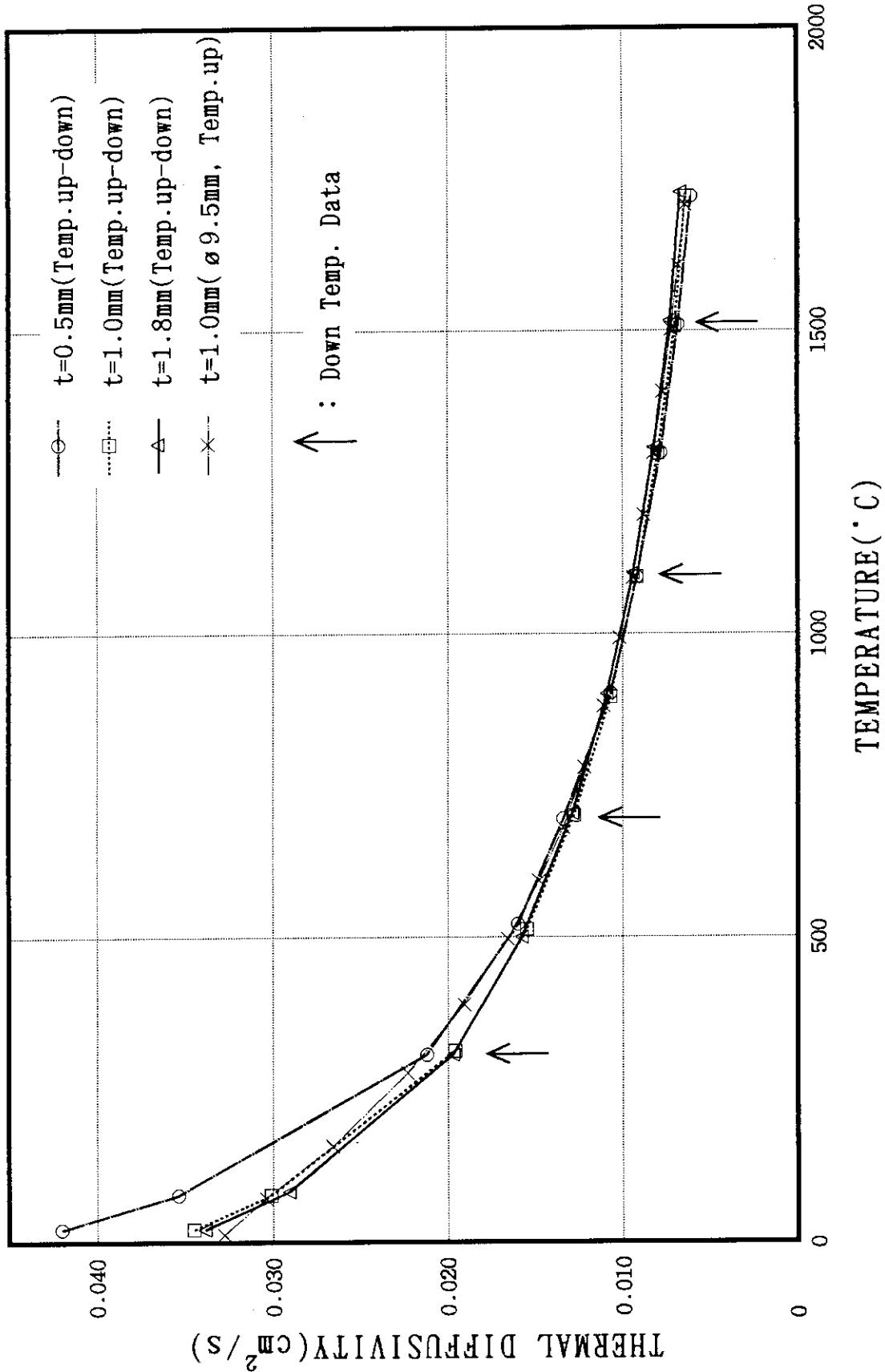
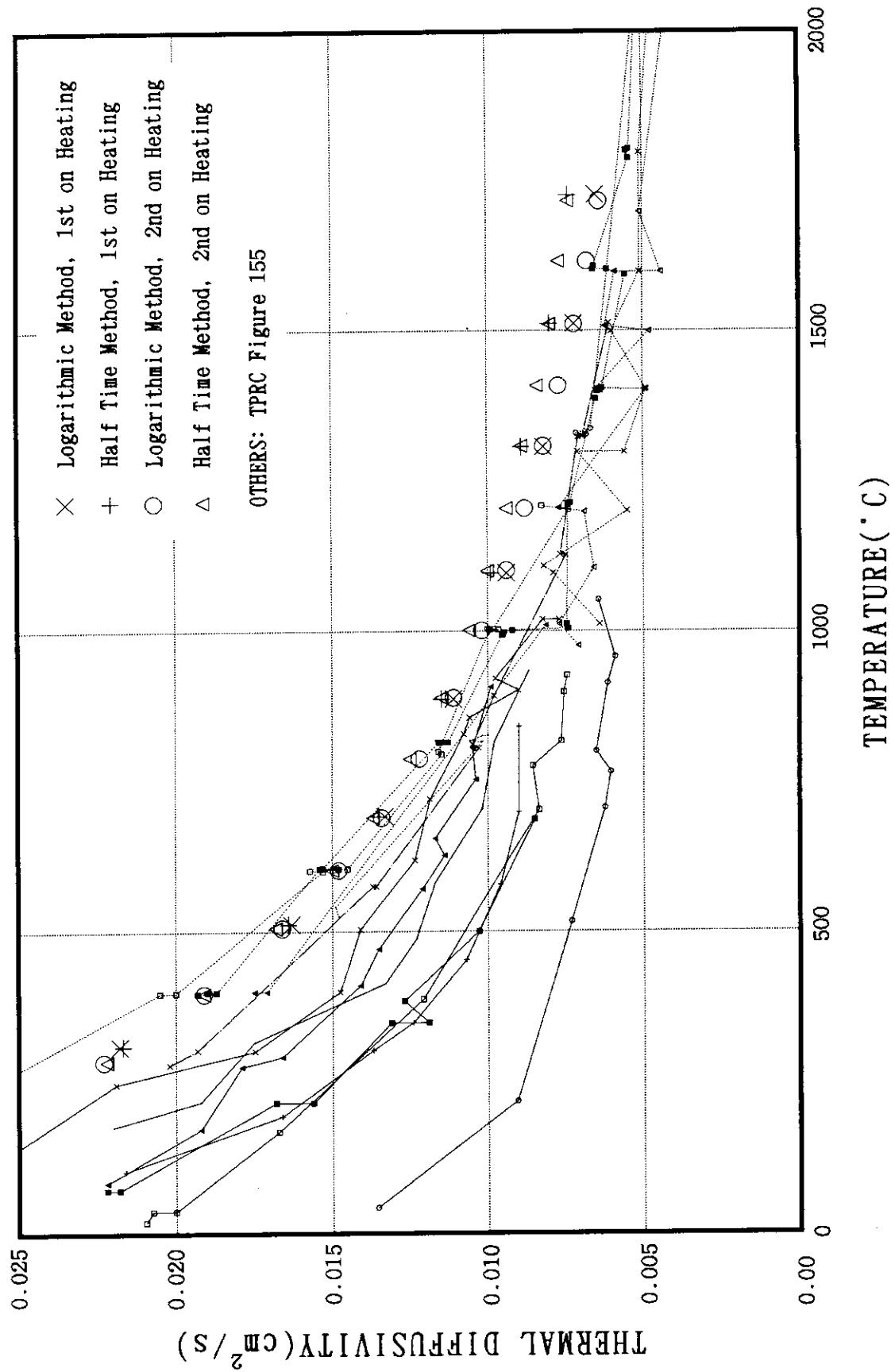


Fig. 4.4 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO_2 Pellet(Diameter:5mm) at High Temperature by Logarithmic Method

Fig. 4.5 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO_2 Pellet(Diameter:9.5mm) at High Temperature

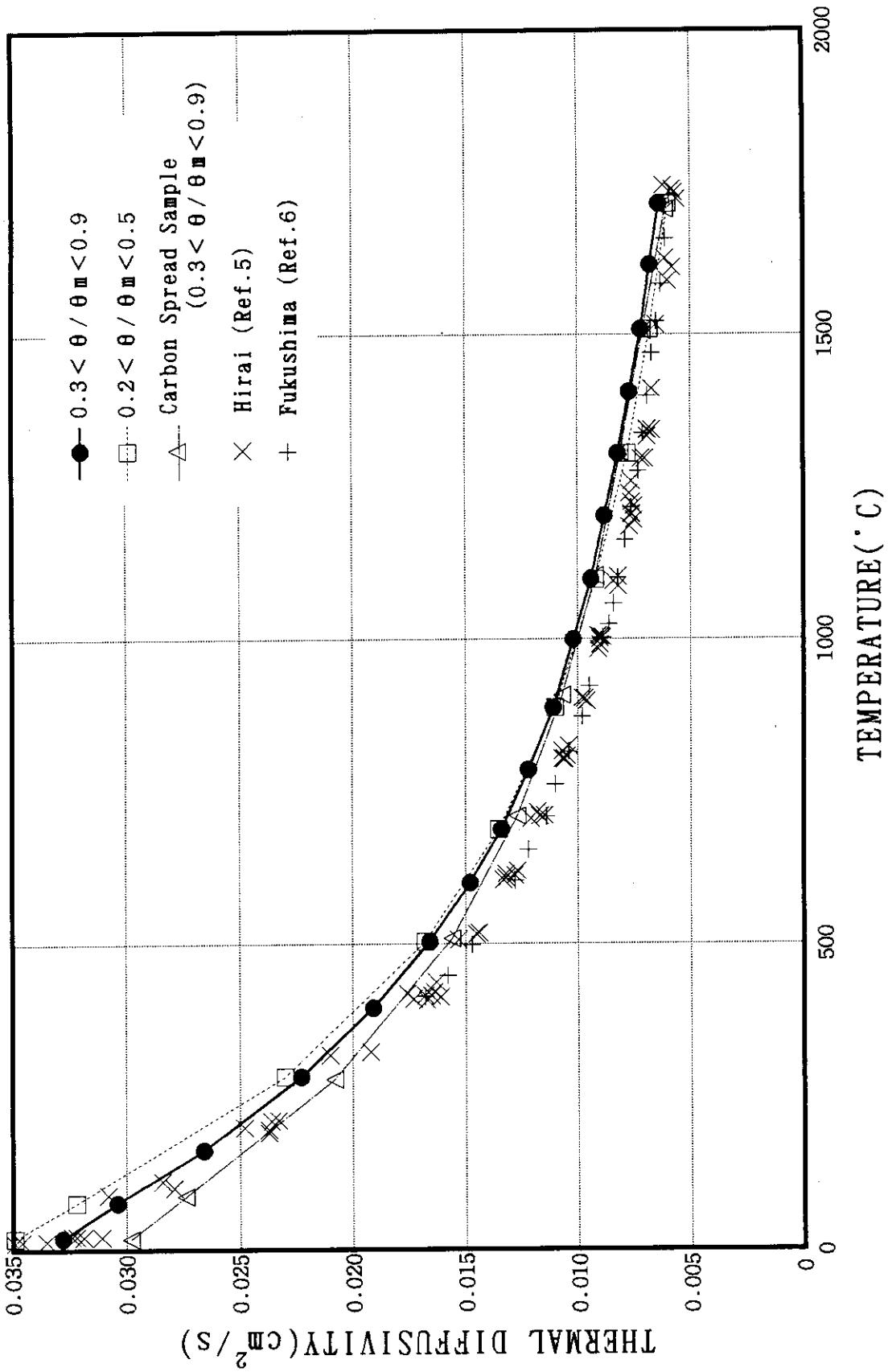
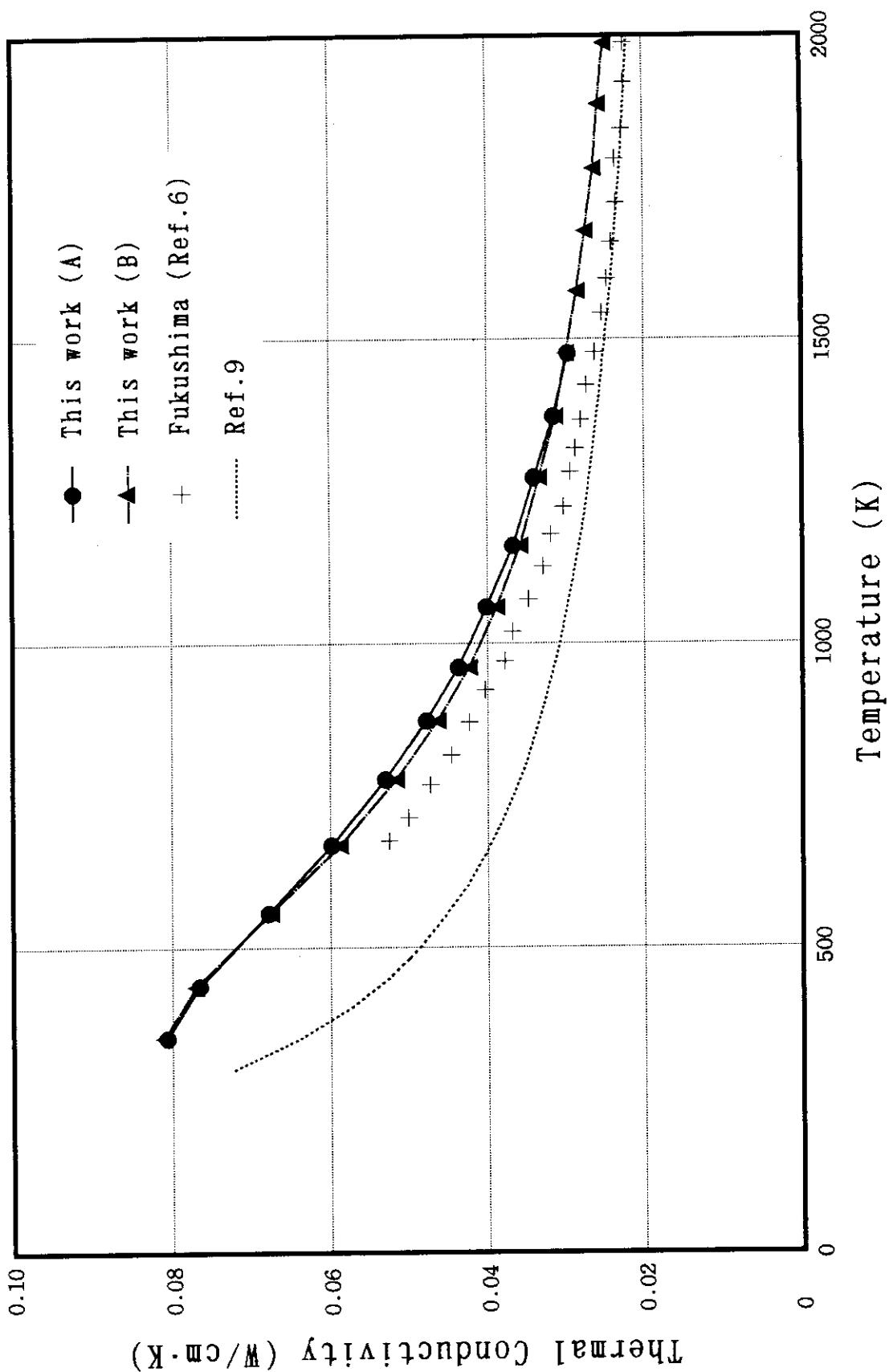


Fig. 4.6 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated UO_2 Pellet (Diameter: 9.5mm) Calculated by Logarithmic Method

Fig. 4.7 Thermal Conductivity of Unirradiated UO_2 Pellet

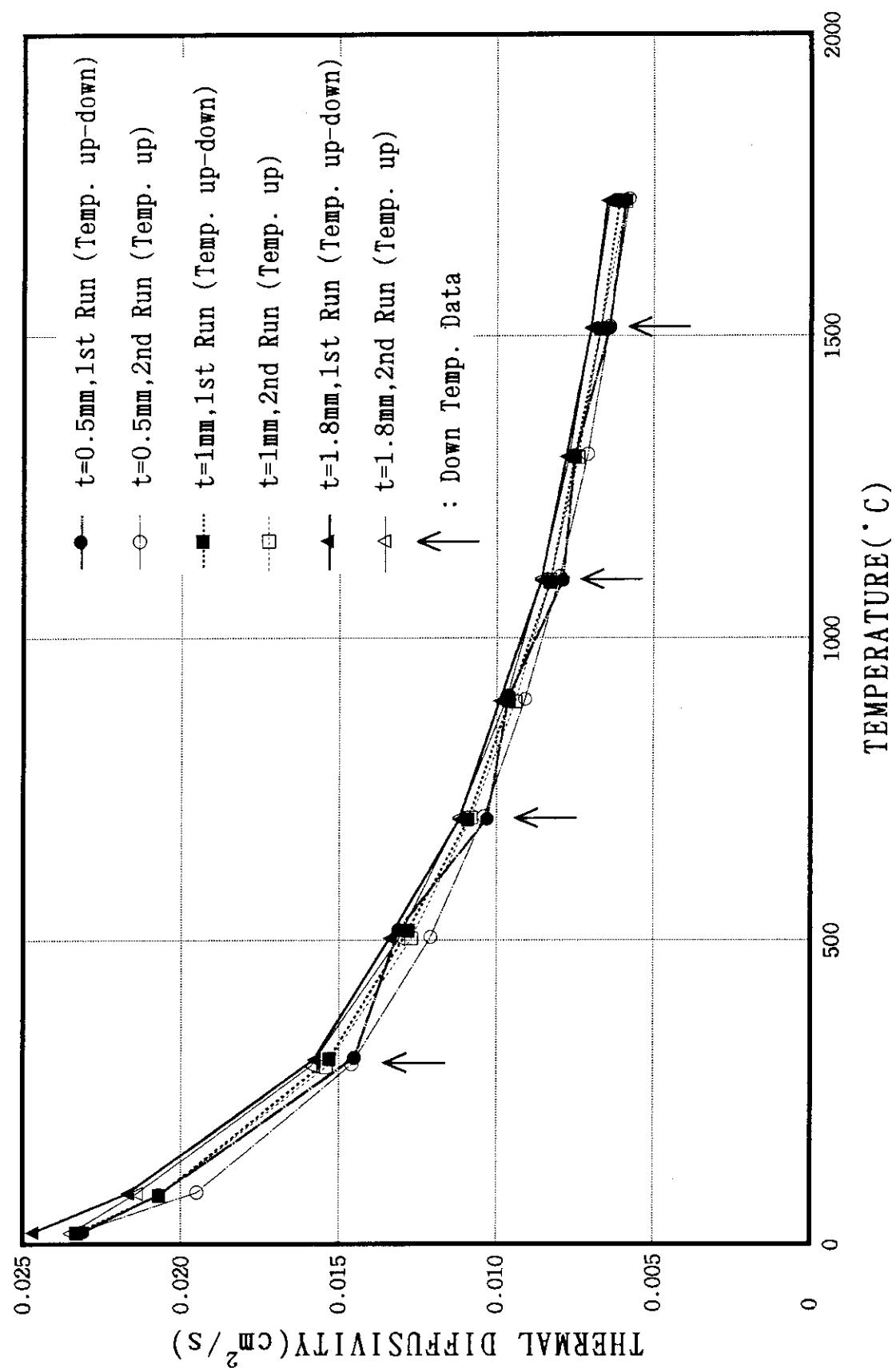


Fig. 4.8 Thermal Diffusivity of Unirradiated UO_2 -3% Gd_2O_3 (Diameter: 5mm) at High Temperature by Logarithmic Method

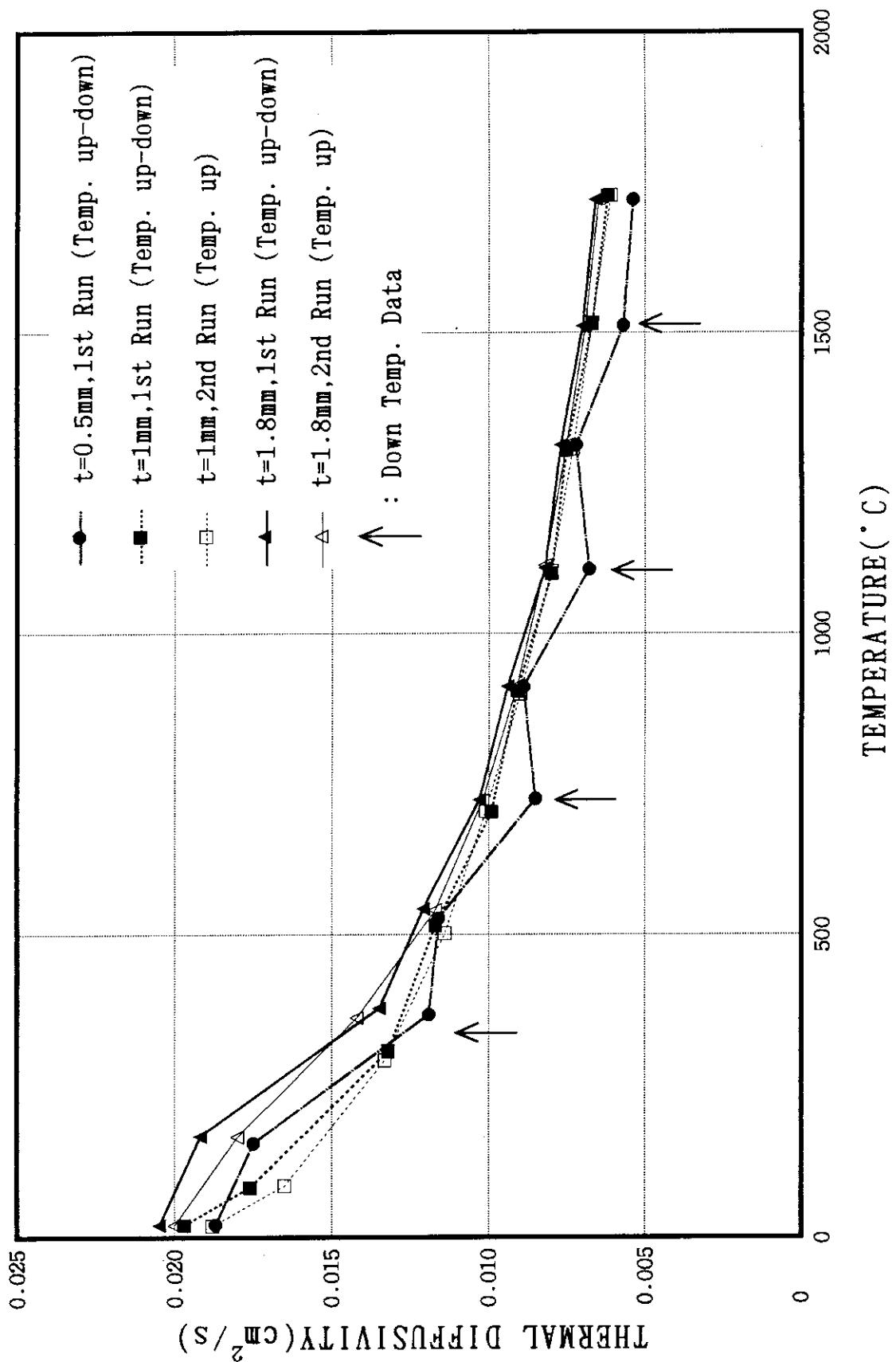


Fig. 4.9 Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Diameter: 5mm) at High Temperature by Logarithmic Method

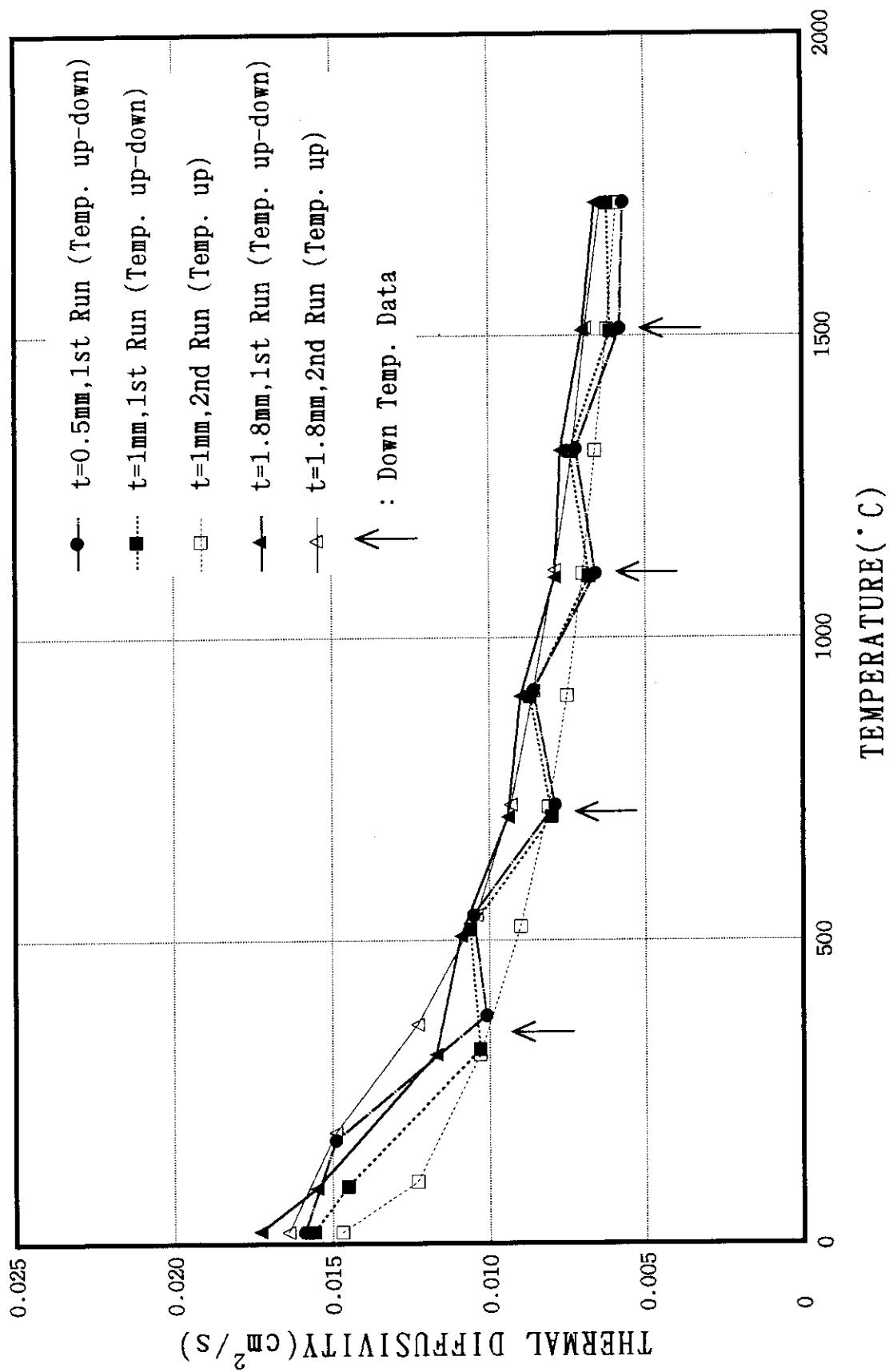


Fig. 4.10 Thermal Diffusivity of unirradiated $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Diameter: 5mm) at High Temperature by Logarithmic Method

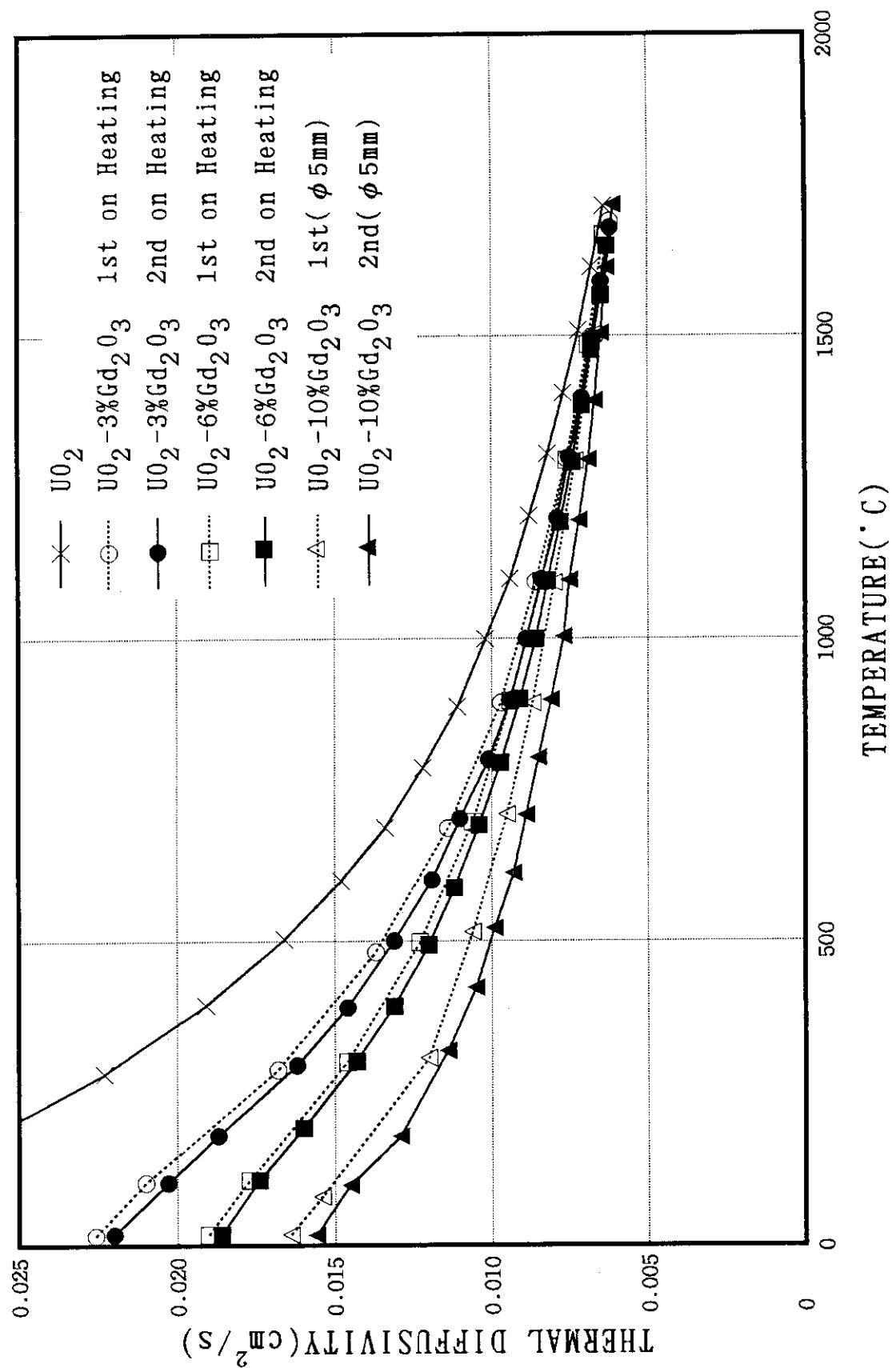
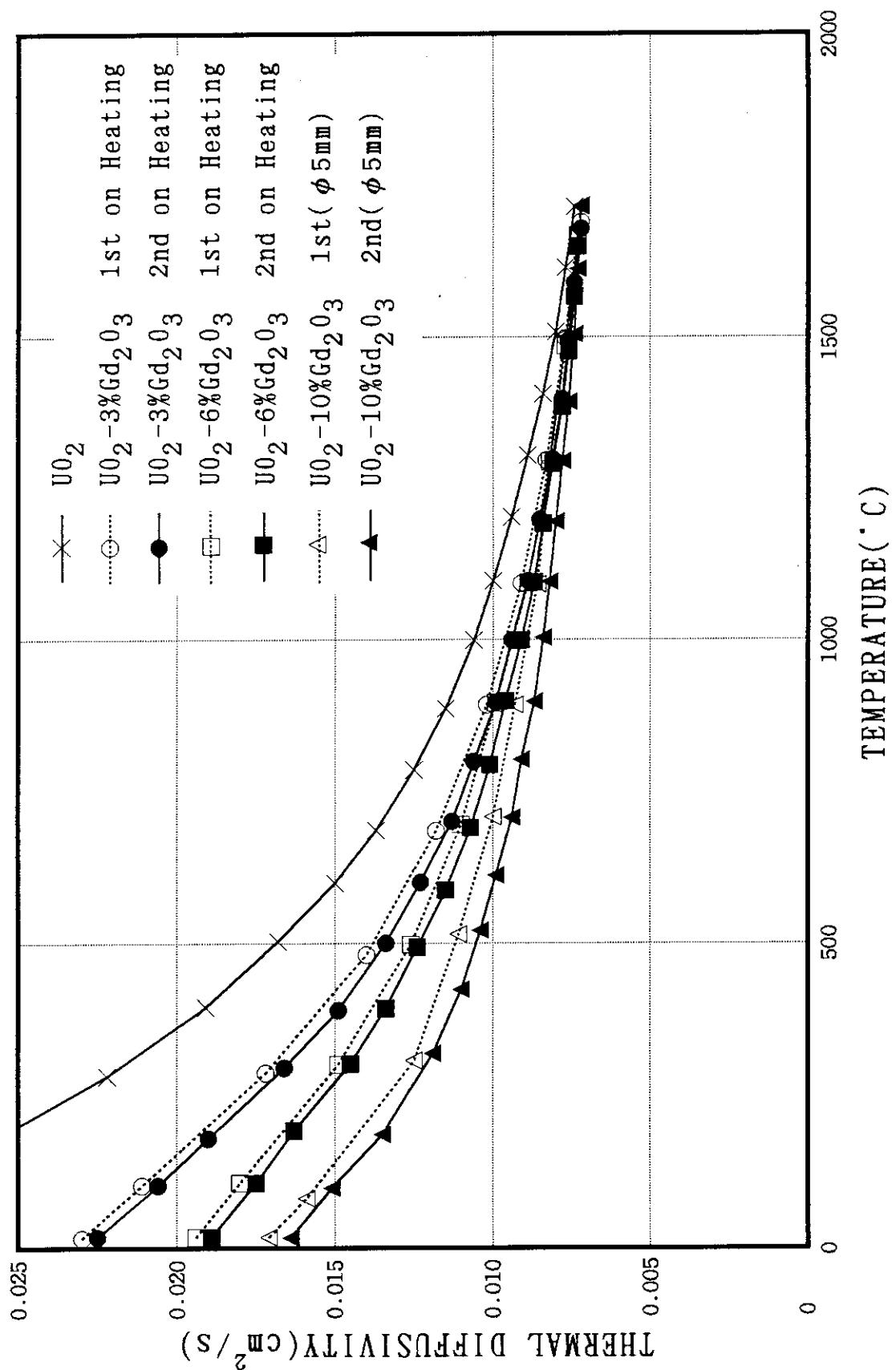


Fig. 4.11 Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet by Logarithmic Method

Fig. 4.12 Thermal Diffusivity of unirradiated UO_2 - Gd_2O_3 Pellet by Half Time Method

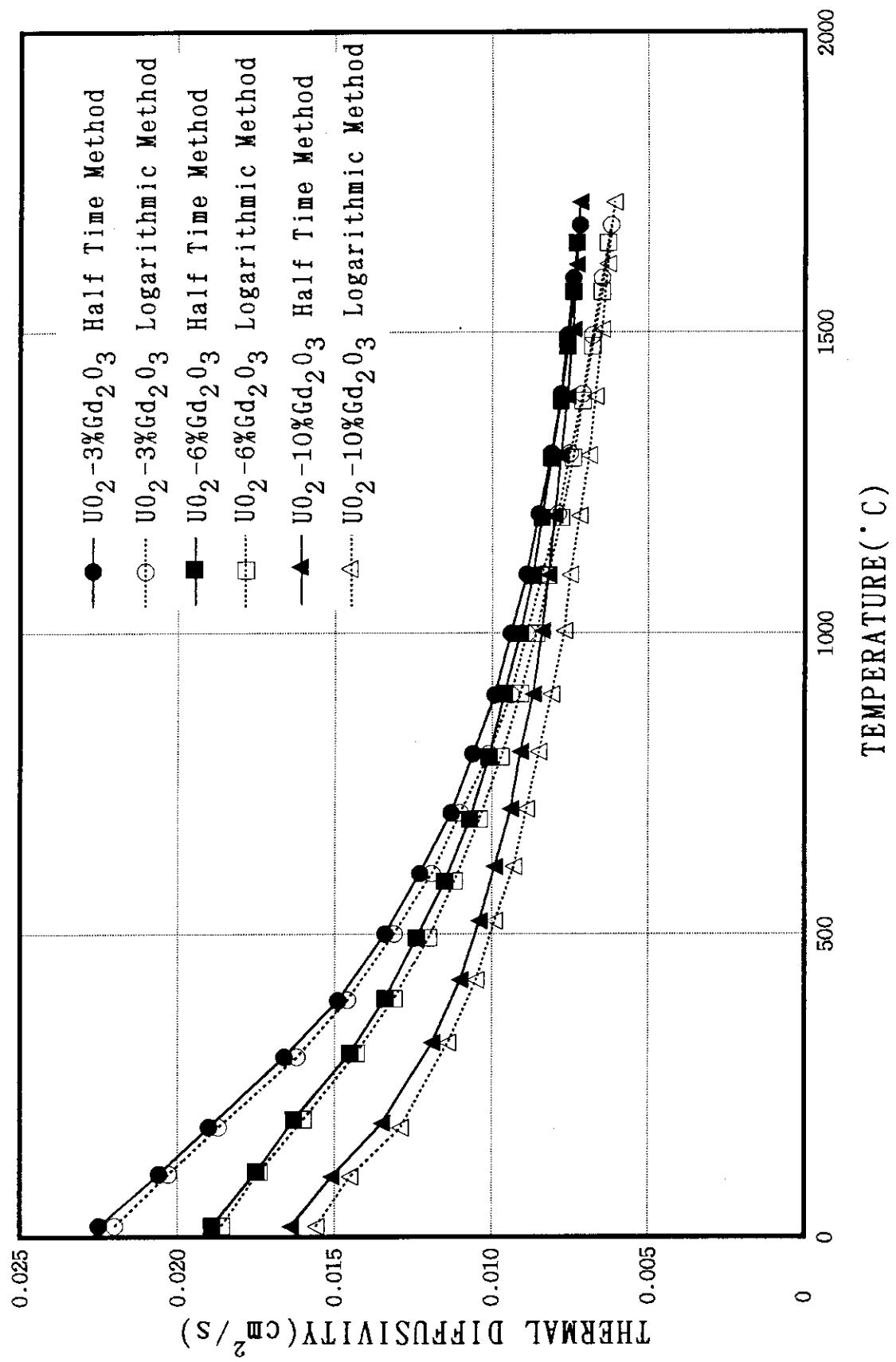


Fig. 4.13 Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet by Half Time and Logarithmic Method

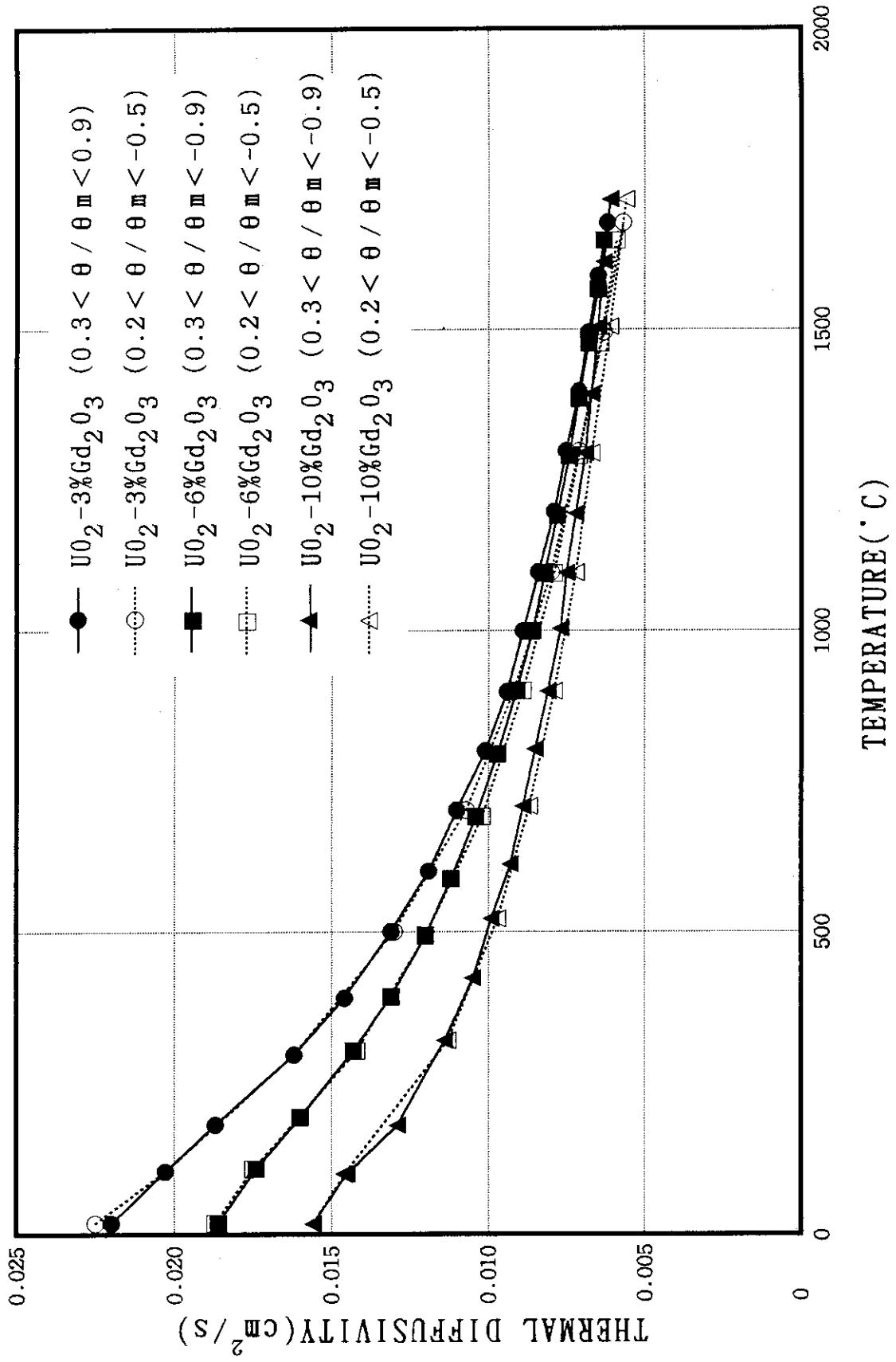


Fig. 4.14 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet Calculated by Logarithmic Method
 $(0.2 < \theta / \theta_m < 0.5)$

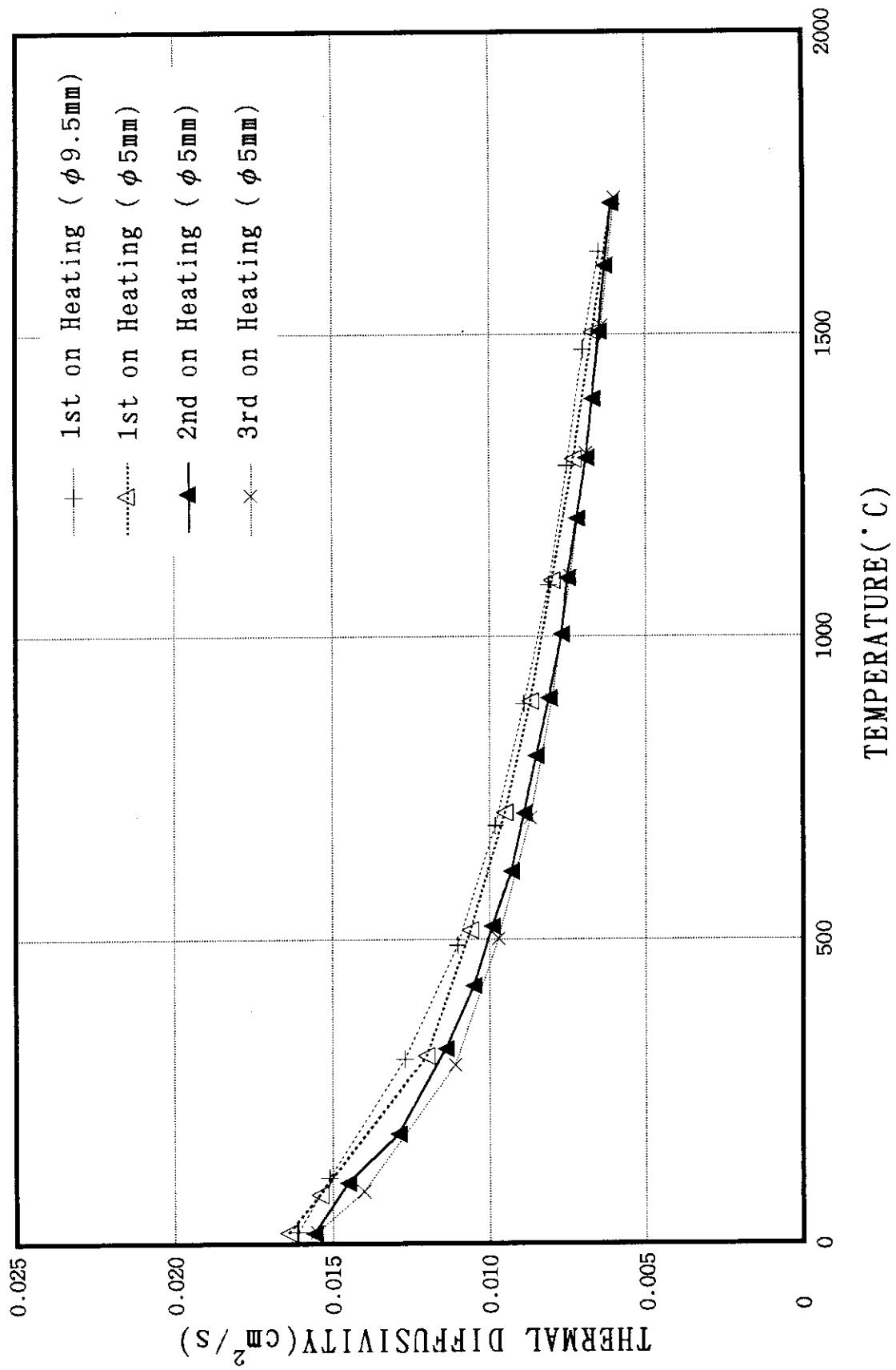


Fig. 4.15 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated UO_2 -10% Gd_2O_3 Pellet Calculated by Logarithmic Method

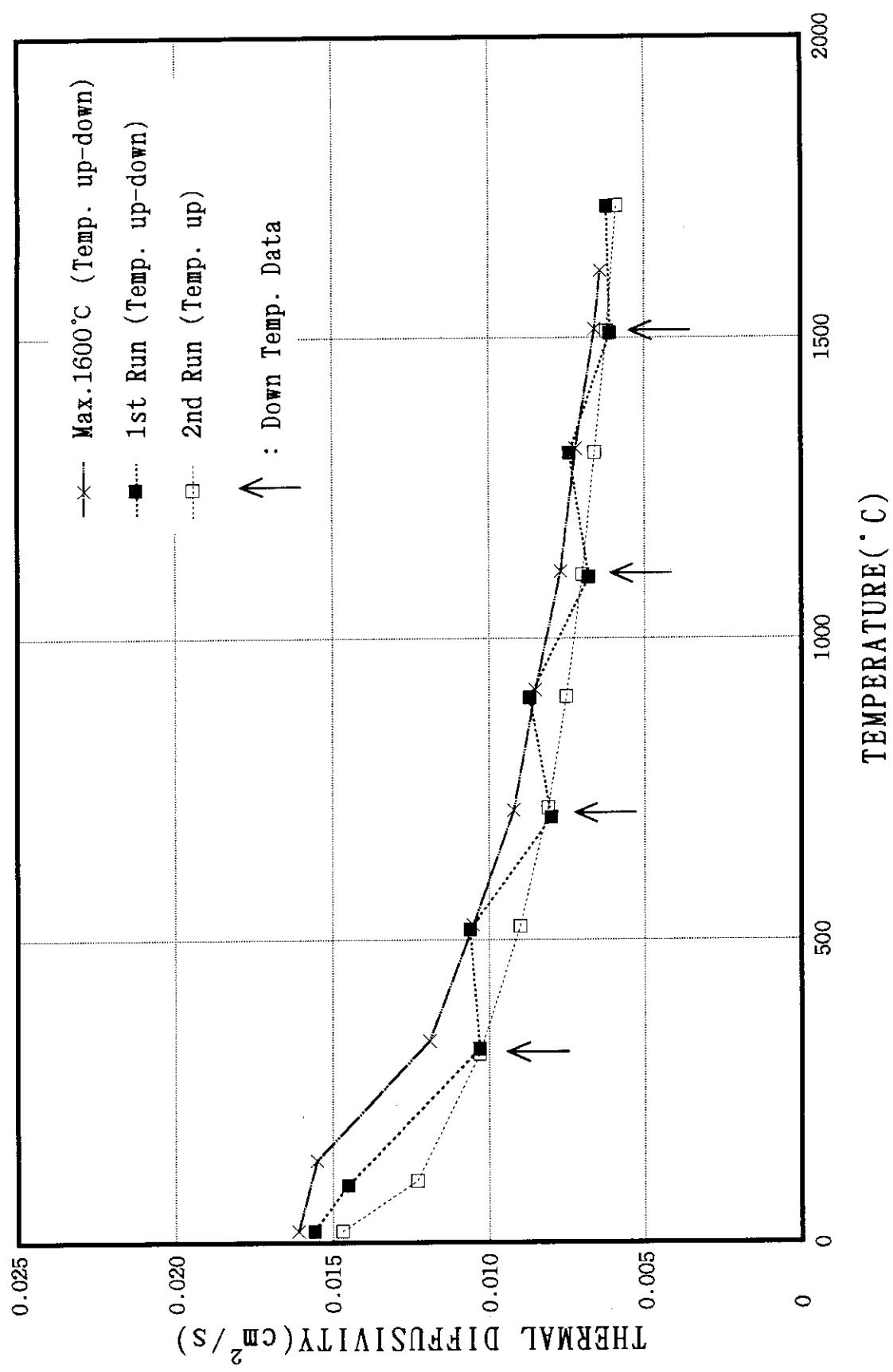
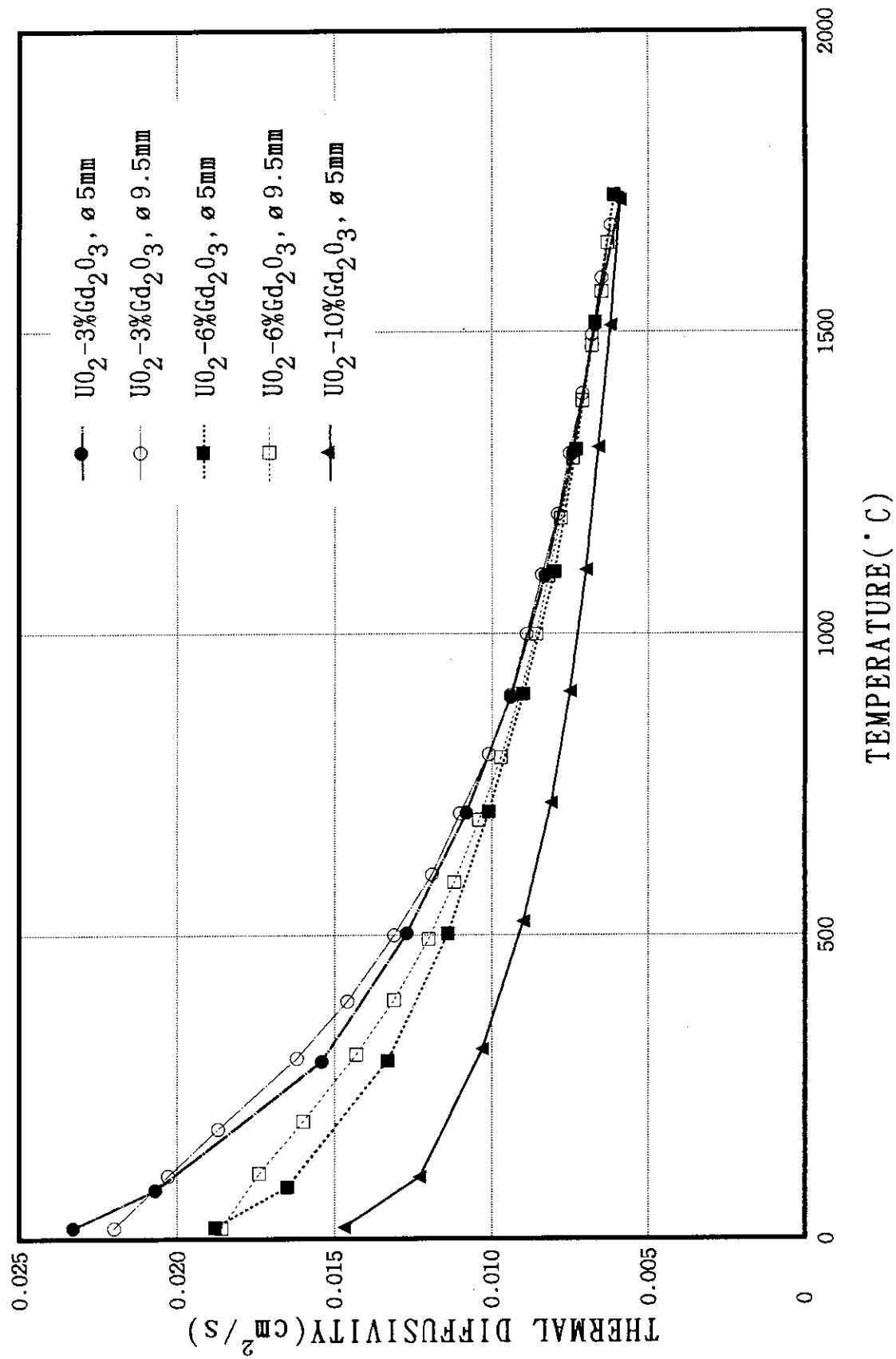


Fig. 4.16 Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ ($\varnothing 5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$) at Maximum Temperature 1600°C by Logarithmic Method



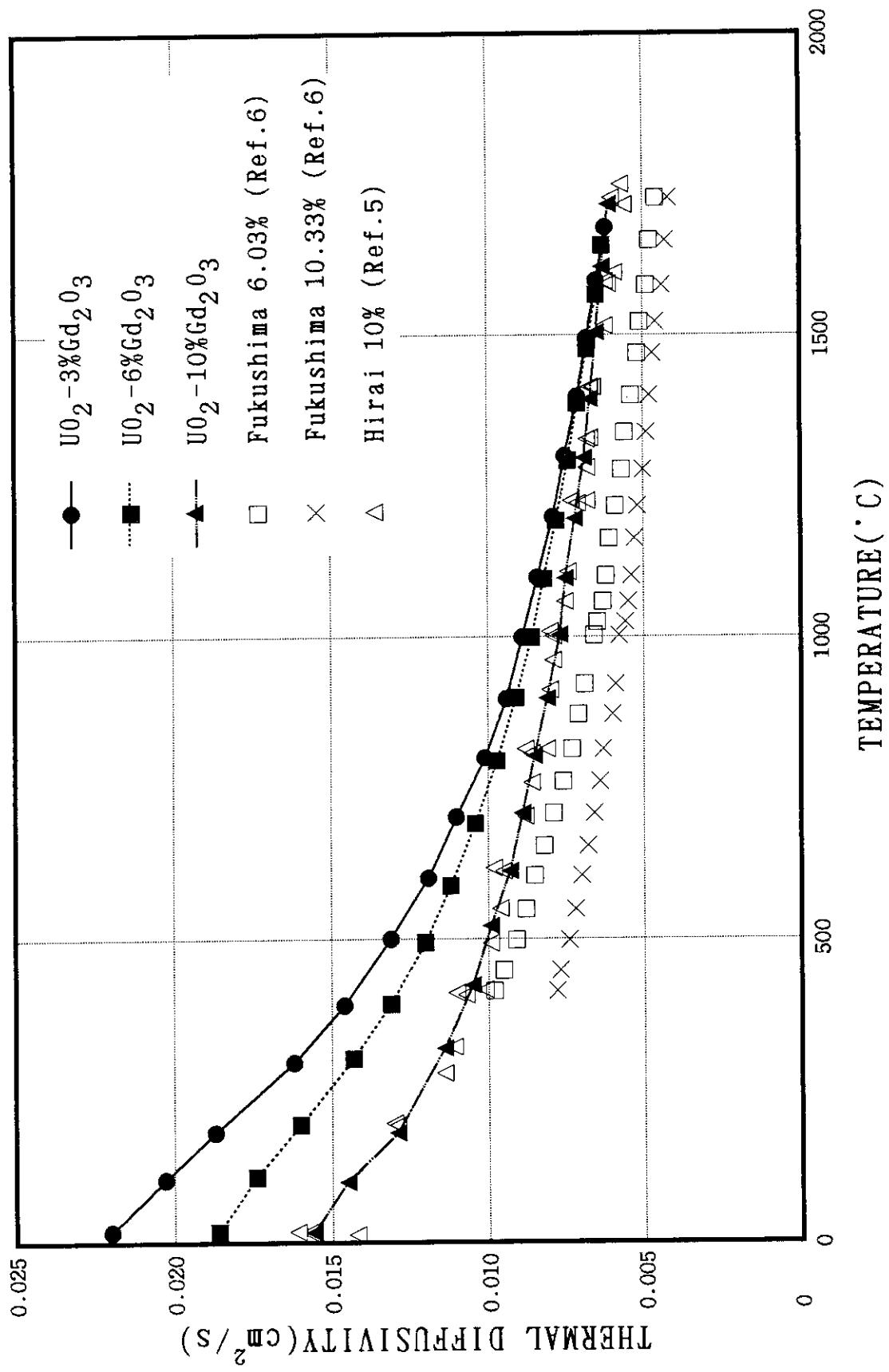
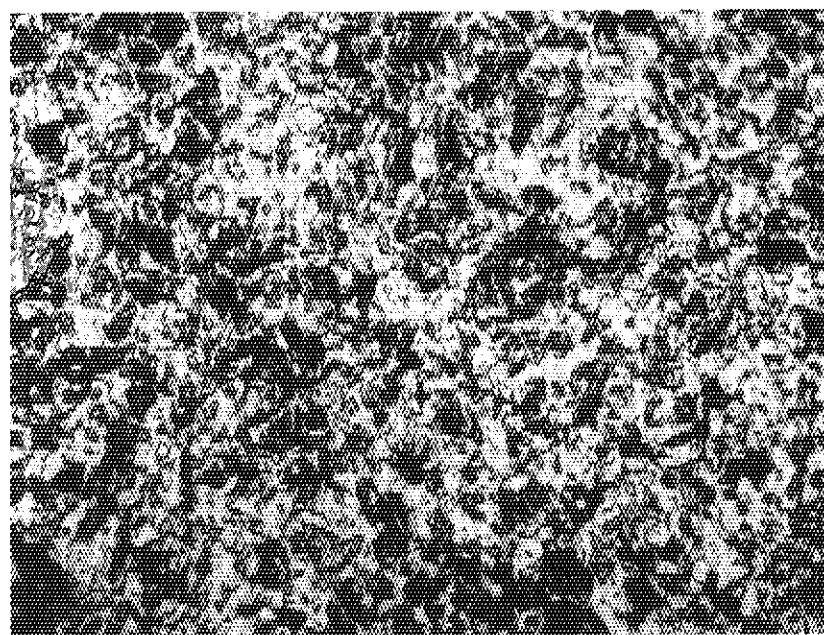
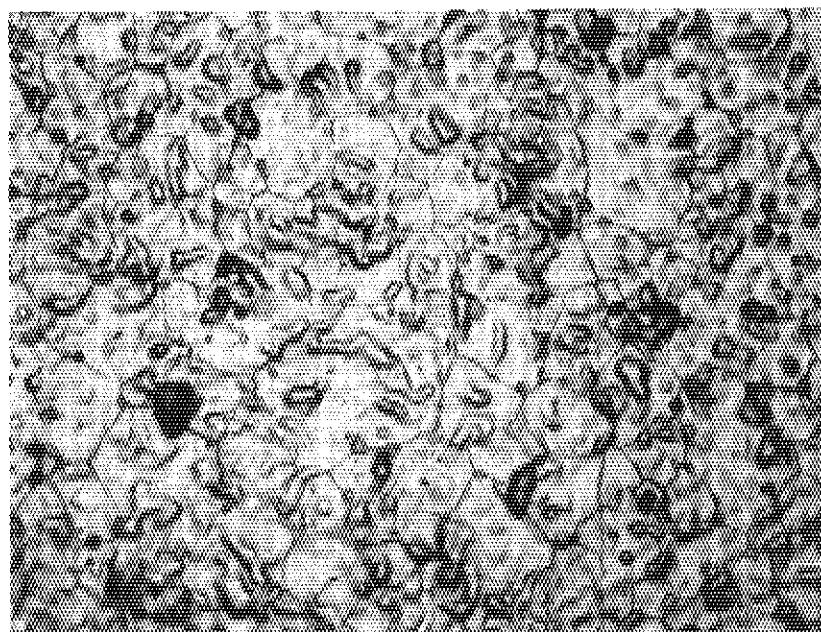


Fig. 4.18 Comparison of Thermal Diffusivity of Unirradiated $\text{UO}_2\text{-}\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet Calculated by Logarithmic Method



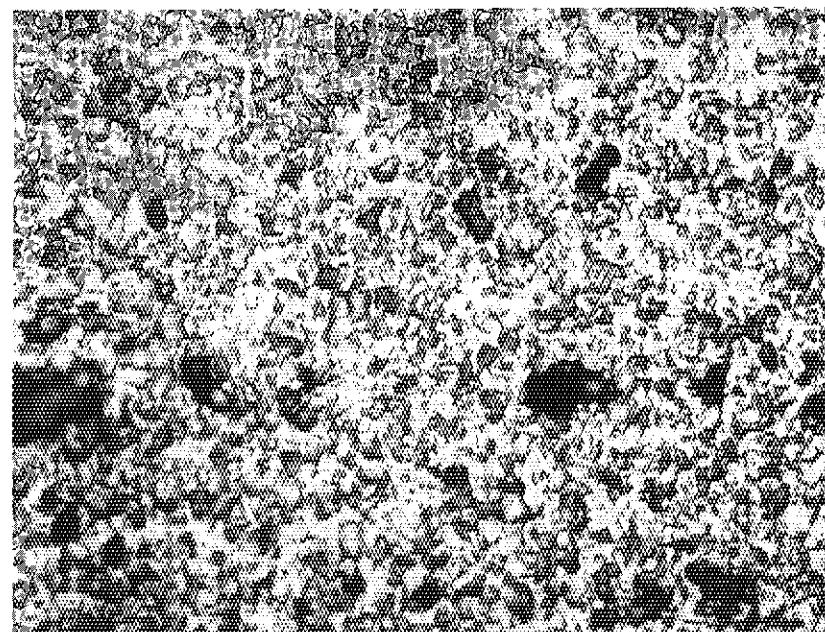
a) Before Heating



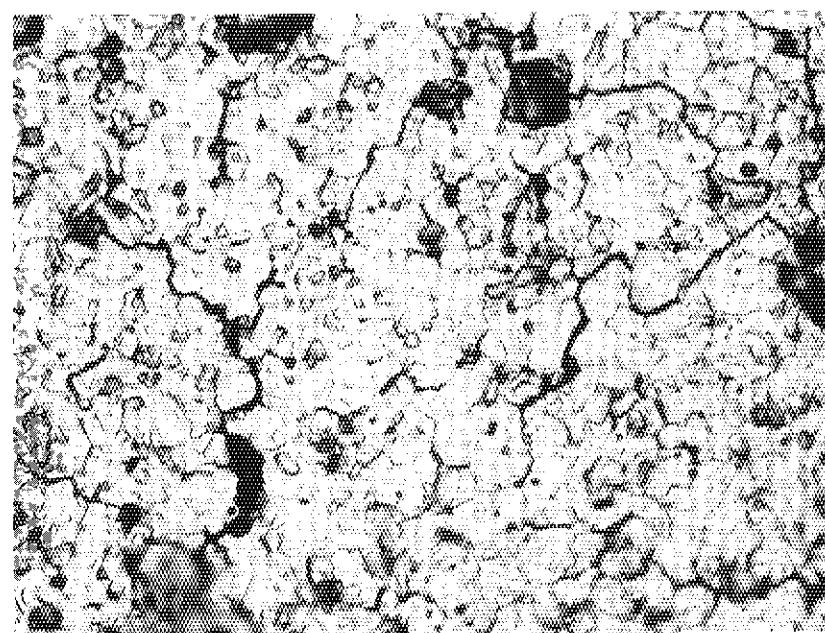
b) After Measurement

20 μ m

Fig.4.19 Micrograph of UO₂ Pellet surface



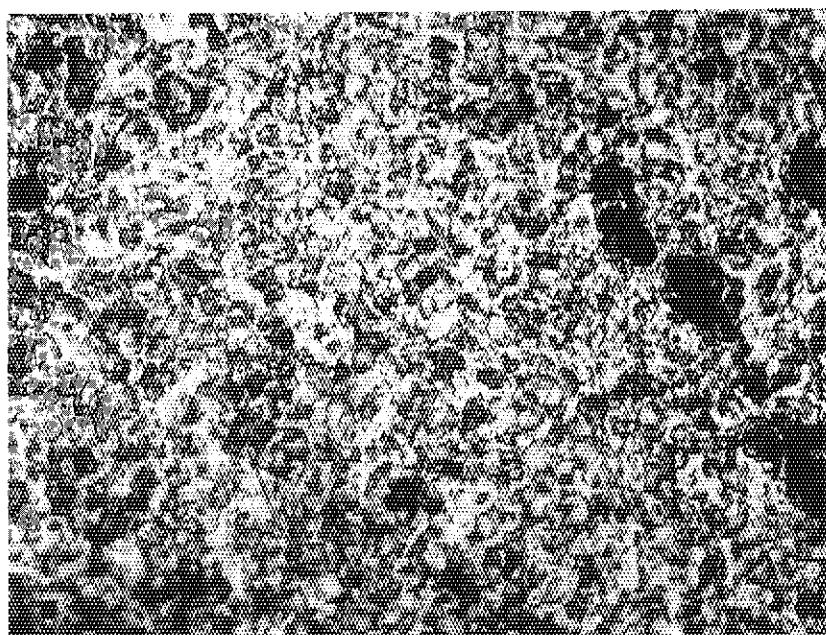
a) Before Heating



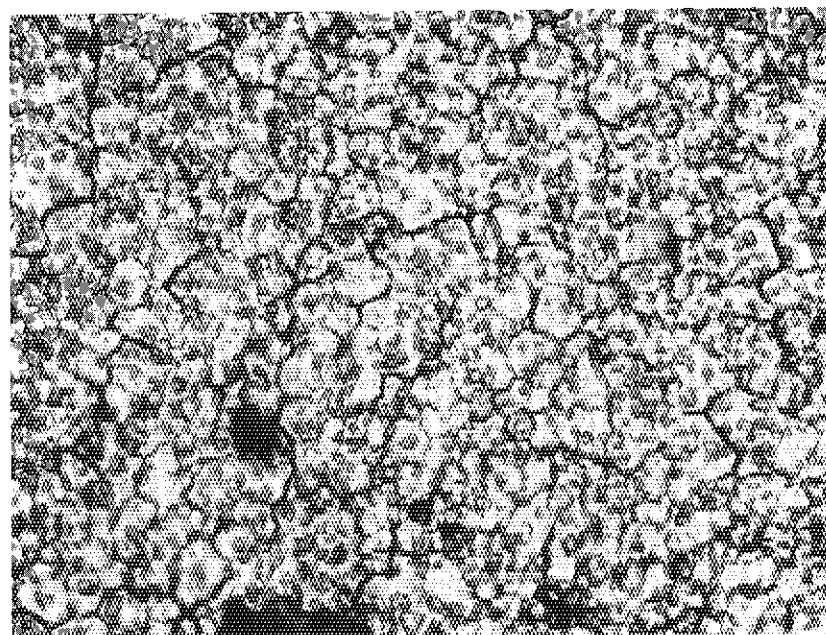
b) After Measurement

20 μ m

Fig.4.20 Micrograph of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet surface



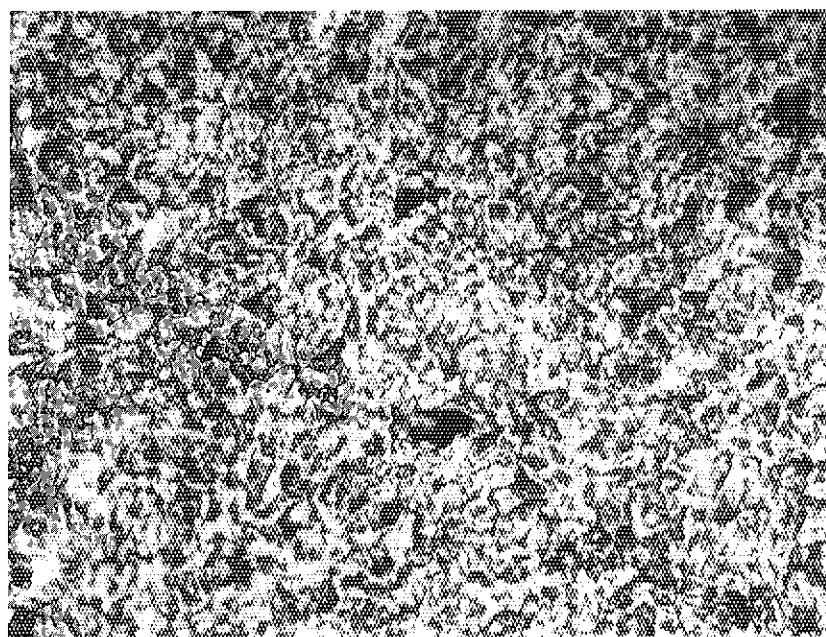
a) Before Heating



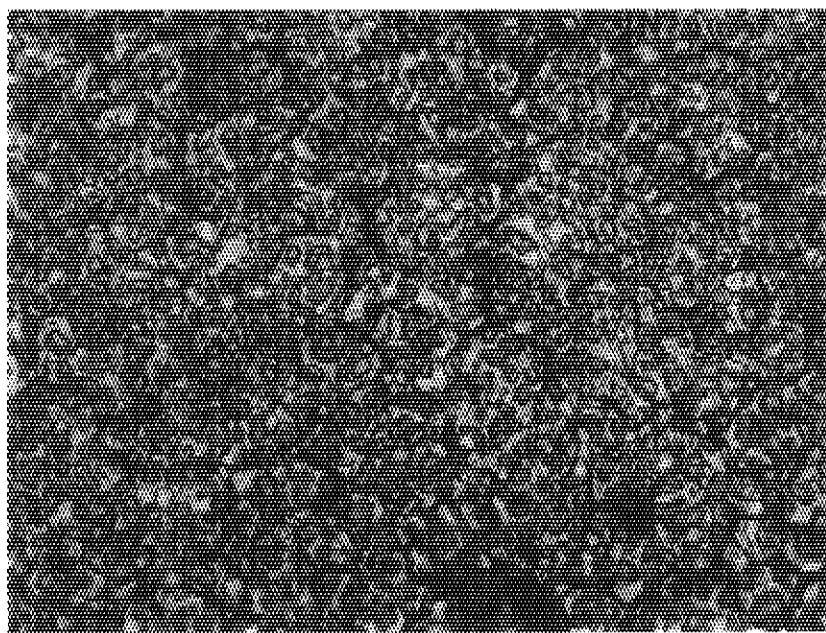
b) After Measurement

20 μ m

Fig.4.21 Micrograph of UO₂-6%Gd₂O₃ Pellet surface



a) Before Heating



b) After Measurement

20 μ m

Fig. 4.22 Micrograph of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ Pellet surface

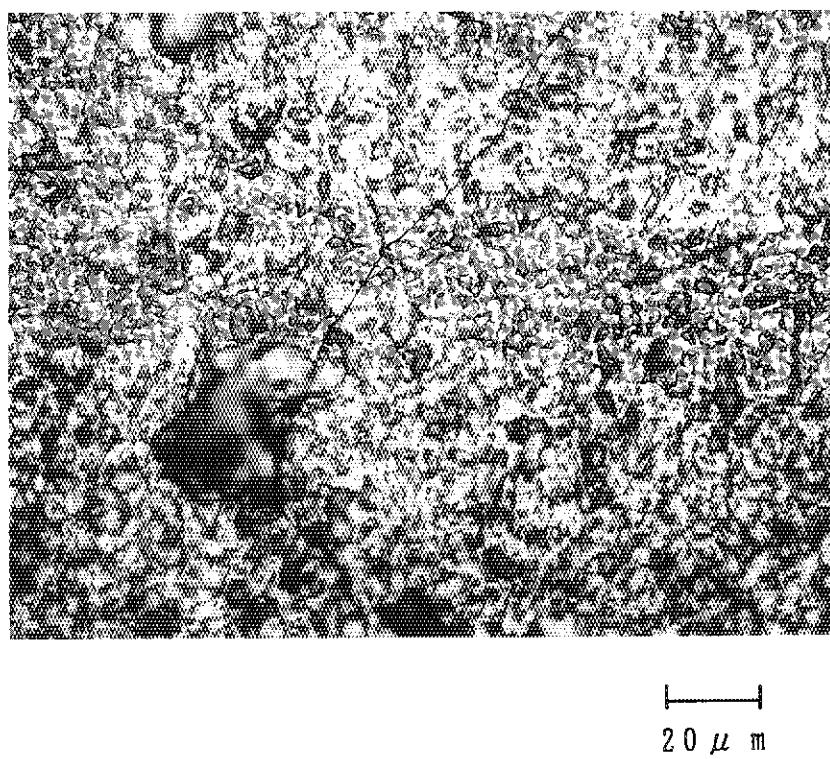
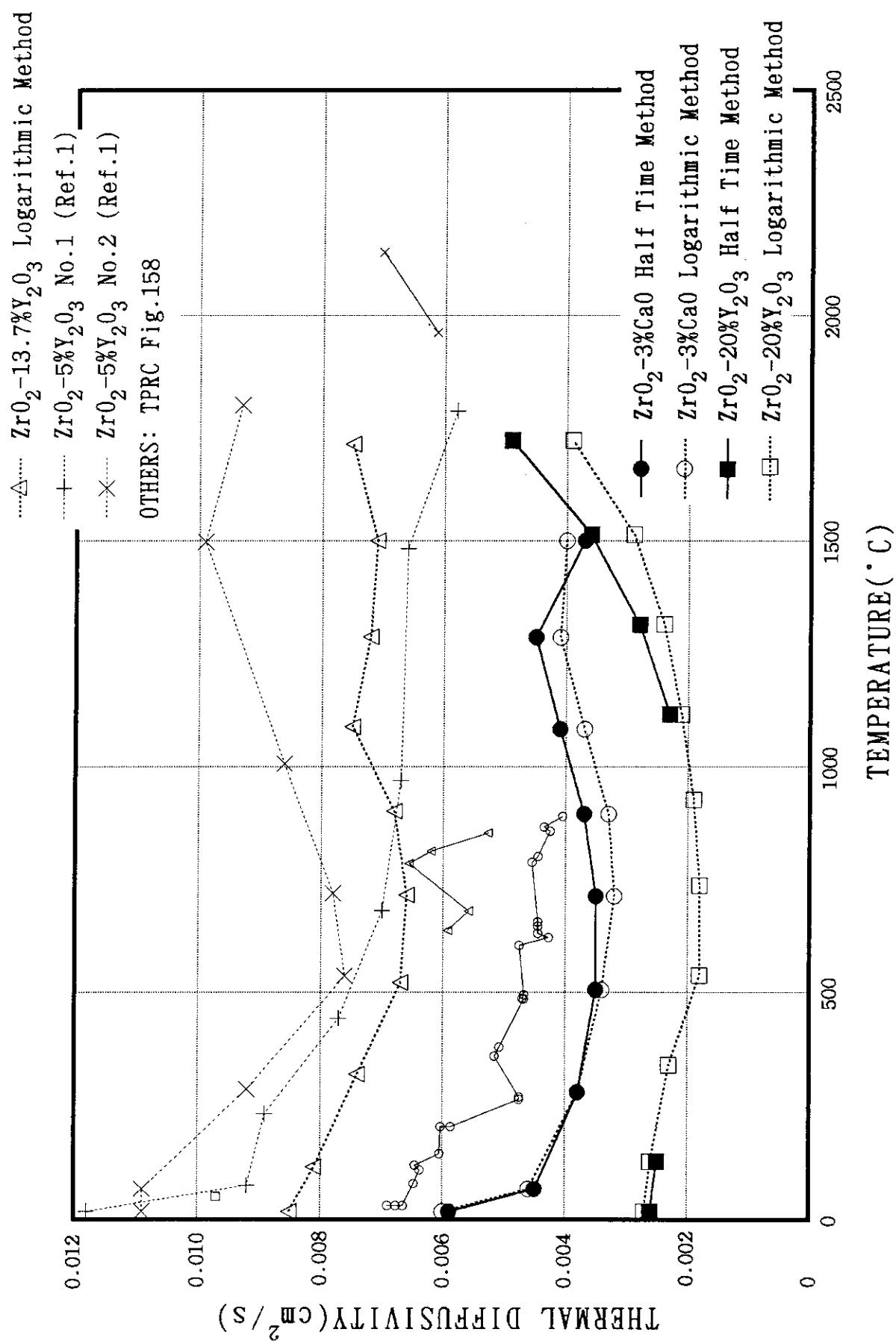


Fig.4.23 Micrograph of UO₂-10%Gd₂O₃ Pellet surface at Maximum Temperature
1600°C

Fig.4.24 Thermal Diffusivity of ZrO_2 Samples by Half Time and Logarithmic Method

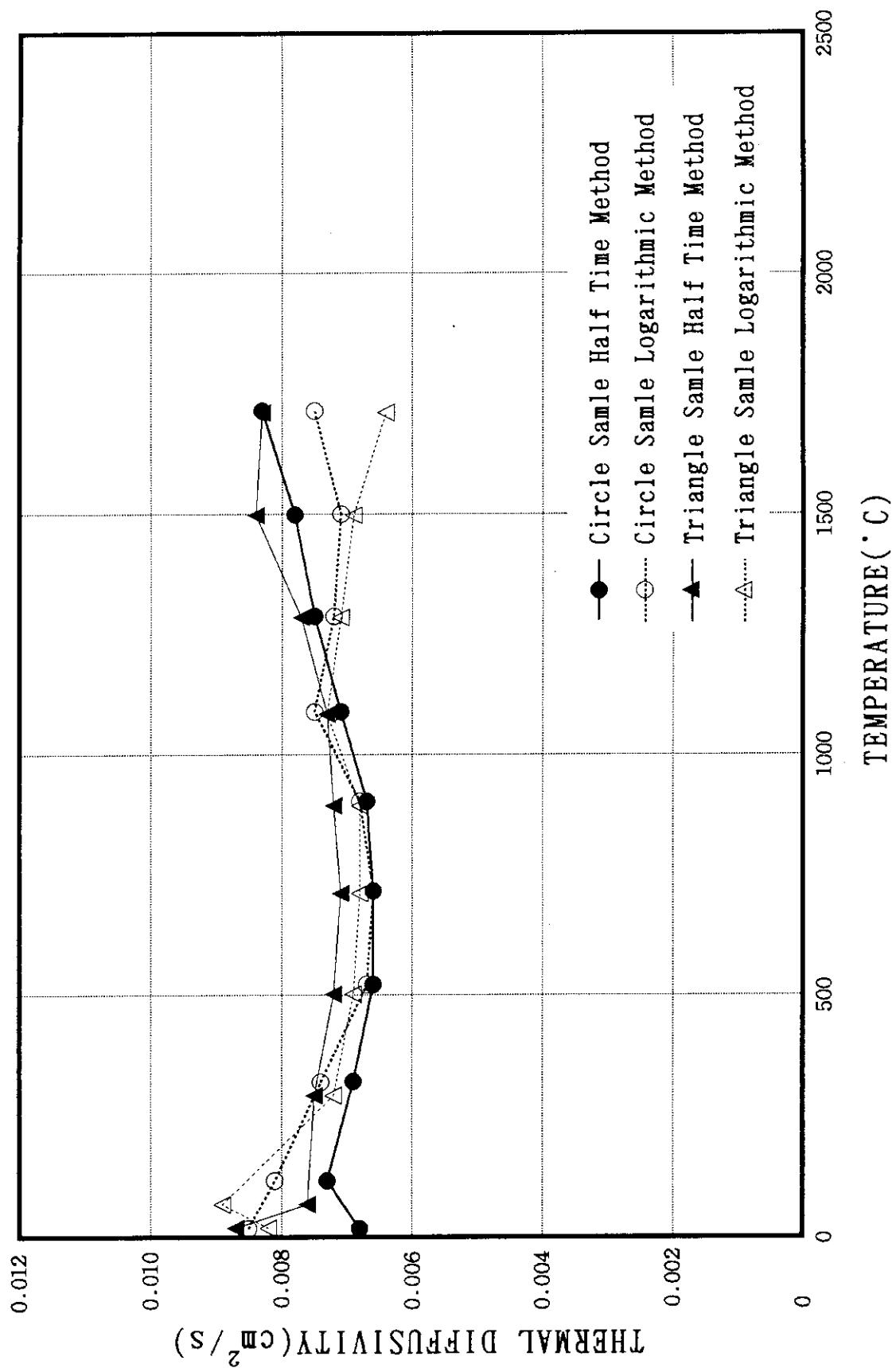


Fig. 4.25 Thermal Diffusivity of $\text{zrO}_2\text{-}13.7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ Samples(C, TC) by Half Time and Logarithmic Method

5. 考察および結論

5.1 未照射ウラン試料

(1) UO_2 試料

UO_2 試料の室温における熱拡散率の測定結果でハーフタイム法による解析では、試料厚さに対する熱拡散率の依存性は明確には認められなかった。対数法による解析結果では、試料厚さ0.5mmの測定値が異常に高くなかった。しかし、対数法の解析範囲を後半部分にすると測定値が低くなることから、レーザ照射時のレーザ光の外乱が赤外線センサーの試料裏面温度測定に影響を与え、計算結果に現れたと思われる。一方、ハーフタイム法では、試料裏面温度履歴の最大値より計算しているため、影響が現れにくいと思われる。試料直径が異なった場合の熱拡散率測定への影響は、直径5mm厚さ0.5mmの測定結果を除くと、直径5mmと直径9.5mmの試料では差が認められなかった。熱拡散率の測定試料としては、試料厚さを約1mmとした方が望ましい。

カーボンを塗布して熱拡散率を測定した結果では、カーボンが無い場合に対して測定値が低い値になった。試料にカーボンを塗布したことにより、レーザ光の熱変換が十分に行われていると思われるが、カーボンの塗布厚さを考慮しないで熱拡散率を計算しているため、過小評価されたと思われる。高温においてカーボンを塗布した試料が、塗布しない試料と同様な熱拡散率の値になっているのは、塗布したカーボンが揮発したためである。 UO_2 試料にカーボンを塗布して熱拡散率を測定する必要はないが、カーボンを塗布する必要が生じた場合は、カーボンの性質を考慮し厚さの均一性等を十分検討しなければならない。

UO_2 試料の高温における熱拡散率の測定値は、直径5mmで厚さ0.5、1及び1.8mmの試料において、又試料直径9.5mm厚さ1mmの測定値と比べて大差がなかったため、形状依存性が無いと思われる。

UO_2 試料の昇温を2回繰り返して熱拡散率を測定した結果では、良い再現性が得られた。したがって、 UO_2 試料では、測定前後の試料表面状態にわずかな変化が確認されたにもかかわらず、約1700°Cまで昇温して熱拡散率を測定しても安定した測定結果が得られた。ハーフタイム法と対数法との解析値の差は、試料測定温度が約1100°C以上になると、対数法の値に対してハーフタイム法の値が高くなってくるが、これは高温における試料からの輻射熱により、レーザ光によって与えられた熱リークが大きくなり、試料裏面における温度上昇幅の最大に達する時間が長くなるためと思われる。よって、高温における熱拡散率の測定では、対数法の方が有効である。測定した UO_2 試料の熱拡散率を米国TPRCのデータと比較すると、やや高めではあるがほぼ一致していた。又、平井及び福島らの測定データとも同様な傾向が得られた。

UO_2 試料の熱伝導率は、文献^{4), 5)}に示されている比熱容量を用いて計算した結果、福島らの報告値より、熱拡散率の測定値と同様にやや高いものの傾向は一致していた。

(2) $UO_2-Gd_2O_3$ 試料

$UO_2-3wt\%Gd_2O_3$ 、 $UO_2-6wt\%Gd_2O_3$ 及び $UO_2-10wt\%Gd_2O_3$ 試料の室温における熱拡散率の測定結果では、直径5mm及び9.5mmの試料ともハーフタイム法では試料厚さの依存性が認められた。

この傾向は、対数法の結果においても、ハーフタイム法の結果ほど大きくはないが認められた。ハーフタイム法による解析では、試料厚さによる熱拡散率測定誤差が無くなると考えられる試料厚さ0への外挿値が、直径5mm及び9.5mmの試料とも対数法による外挿値と良い一致を示した。

$UO_2-3\text{wt\%Gd}_2O_3$ 、 $UO_2-6\text{wt\%Gd}_2O_3$ 及び $UO_2-10\text{wt\%Gd}_2O_3$ 試料の高温における形状依存性は、直径5mmで厚さ0.5、1及び1.8mmの試料では認められなかった。しかし、直径5mmと9.5mmの試料では、測定温度が室温から500°C以下の温度範囲で差が生た。この直径5mmと9.5mmの試料の測定値の比較は、2回目の昇温測定値であるため、1回目の昇温によって発生した微細な割れの大きさの違いによるものと思われる。なお、1回目の昇温の測定値での比較では、大差は認められなかった。

$UO_2-3\text{wt\%Gd}_2O_3$ 、 $UO_2-6\text{wt\%Gd}_2O_3$ 及び $UO_2-10\text{wt\%Gd}_2O_3$ 試料の熱拡散率の測定において、昇温を2回繰り返すと、1回目の測定値に対して2回目の測定値が低くなつた。これは試料の熱拡散率測定温度が約1700°Cにおいて、レーザ光の照射により試料表面に微細な割れが生じたため、1回目の昇温測定値に対して2回目の測定値が低くなつたと思われる。 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料は、 Gd_2O_3 の添加量が多いほど1回目昇温の熱拡散率測定後に試料が割れる傾向が多くなることから、この微細な割れは、 Gd_2O_3 の添加量が多いほど試料表面より深い位置まで進んでいると思われる。2回の昇温における熱拡散率の測定値は、 Gd_2O_3 の添加量が同じであれば試料厚さが薄いものほど測定値の差が大きくなつてゐる。これは、同一の Gd_2O_3 添加量であれば微細な割れの深さが同じであるため、試料厚さが薄いほど割れの深さの影響を大きく受けるためと思われる。昇温を3回繰り返した場合、3回目の熱拡散率の値は2回目の昇温測定値と同等の値が得られている。したがつて、初めの昇温測定時に発生した微細な割れは、2回目以後の昇温では拡大しないと推定される。

昇温時の最高温度が1500°Cの場合は、熱拡散率の昇降温時の測定値に差が無く、又測定後の試料表面に変化は認められなかつた。昇温時の最高温度が1600°Cの場合は昇降温の測定値に差がなかつたが、測定後の試料表面にはわずかな微細な割れが発生していた。しかしこの程度の微細な割れでは、熱拡散率の測定値に影響は現れなかつた。微細な割れが発生する熱拡散率測定温度は、1500と1600°Cの間であった。 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料の熱拡散率の測定においては、レーザのエネルギーを小さくするか、又は昇温最高温度を1500°Cまでとする必要がある。

5.2 ジルコニア試料

ZrO_2 塊から加工・調製した試料の熱拡散率測定結果については、別途整形した ZrO_2 試料の熱拡散率と同程度の測定結果が得られ、試料の加工・調製技術が確立できた。このときの加工・調製された試料厚さの平行度の精度は、約±0.01mmであった。しかし、試料がもろい場合には、約±0.02mmになつた。この試料加工・調製技術は、核燃料塊からの試料調製に十分応用できるものである。

円盤状の ZrO_2 塊から、円形と三角形の試料を加工・調製し、熱拡散率を測定した結果を比較したところ、その2つの試料に大差が見られなかつた。したがつて、円形以外の形状においても精度良く熱拡散率が測定できることが確認できた。

6. あとがき

未照射ウラン試料を用いた本装置の特性試験によって、未照射 UO_2 試料（二酸化ウランペレット）の熱拡散率・熱伝導率、及び未照射 $UO_2-Gd_2O_3$ 試料（ガドリニア入り二酸化ウランペレット）の熱拡散率のデータを得ると共に、本装置の特性が把握できた。これらのデータは、今後核燃料の研究・開発を進めるにあたり十分活用できるものと思われる。なお、ウラン試料を1700°C程度まで加熱すると性質が変化していることも考えられるが、試料の熱拡散率値との関係については、今後調査・研究を進めて行きたい。

熱拡散率の小さな ZrO_2 （ジルコニア）を用いた熱拡散率測定試料作製技術の確証試験において、熱拡散率を精度良く測定できる試料が作製でき、核燃料の試料作製に十分活用できることが確認できた。

核燃料の高燃焼度化を進めるに当たり、熱特性データの一つである熱伝導率（熱拡散率）の実測値を蓄積することは重要である。未照射核燃料の熱拡散率（熱伝導率）を、本装置で精度良く測定できることにより、今後は本装置を照射後試験に十分適用できると期待できる。

謝　　辞

本稿をまとめるにあたり多くの御助言を与え、ご指導して下さった石本ホット試験室長、山原ホット試験技術課長、及び古田燃料挙動安全研究室長を始め関係者諸氏に対して、又 Zr_2O_3 塊（試料A、B）を貸与して下さった燃料挙動安全研究室・上塚博士の好意に対して深く感謝の意を表します。

6. あとがき

未照射ウラン試料を用いた本装置の特性試験によって、未照射 UO_2 試料（二酸化ウランペレット）の熱拡散率・熱伝導率、及び未照射 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 試料（ガドリニア入り二酸化ウランペレット）の熱拡散率のデータを得ると共に、本装置の特性が把握できた。これらのデータは、今後核燃料の研究・開発を進めるにあたり十分活用できるものと思われる。なお、ウラン試料を1700°C程度まで加熱すると性質が変化していることも考えられるが、試料の熱拡散率値との関係については、今後調査・研究を進めて行きたい。

熱拡散率の小さな ZrO_2 （ジルコニア）を用いた熱拡散率測定試料作製技術の確証試験において、熱拡散率を精度良く測定できる試料が作製でき、核燃料の試料作製に十分活用できることが確認できた。

核燃料の高燃焼度化を進めるに当たり、熱特性データの一つである熱伝導率（熱拡散率）の実測値を蓄積することは重要である。未照射核燃料の熱拡散率（熱伝導率）を、本装置で精度良く測定できることにより、今後は本装置を照射後試験に十分適用できると期待できる。

謝　　辞

本稿をまとめるにあたり多くの御助言を与え、ご指導して下さった石本ホット試験室長、山原ホット試験技術課長、及び古田燃料挙動安全研究室長を始め関係者諸氏に対して、又 Zr_2O_5 塊（試料A、B）を貸与して下さった燃料挙動安全研究室・上塚博士の好意に対して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大和田, 西野, 串田: 「遮蔽型ペレット熱伝導率測定装置の開発」, JAERI-M 93-244
(1994年1月)
- 2) 日本工業規格: 「ファインセラミックスのレーザ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 1611-1991
- 3) 高橋, 山本, 大里: 「レーザーフラッシュ法熱拡散率測定における新しい解析法—対数法一の優位性」, 热測定 15(3) 1988
- 4) A Comprehensive Compilation of Data by the Thermophysical Properties Research Center (TPRC) : 「Purdue University Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series」, Volume 10
- 5) M.Hirai: 「Thermal diffusivity of $UO_2-Gd_2O_3$ pellets」, Journal of Nuclear Materials 173 (1990) 247-254
- 6) F.Fukushima, T.Ohmichi, A.Maeda and H.Watanabe: 「THE EFFECT OF GADOLINIUM CONTENT ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NEAR-STOICHIOMETRIC $(U,Gd)O_2$ SOLID SOLUTIONS」, Journal of Nuclear Materials 105 (1982) 201-210
- 7) 大橋: 「燃料工学基礎 (2.1 燃料物質の物性)」、核燃料工学 (日本原子力学会)
1993年11月
- 8) 日本熱測定学会編: 「熱力学データベース MALT2」、(株)科学技術社 (1992)
- 9) R.R.Asamoto, F.L.Anselin, A.E.Conti: 「THE EFFECT OF DENSITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF URANIUM DIOXIDE」, AEC Research and Development Report, GEAP-5493, April 1968

付 錄

付録 1

未照射ウラン試料のハーフタイム法温度履歴曲線と対数法プロット曲線の代表例

Figure Contents

Fig. A1.1 Rear-surface Temperature History of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at Room Temperature	106
Fig. A1.2 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at Room Temperature	106
Fig. A1.3 Rear-surface Temperature History of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 100°C	107
Fig. A1.4 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 100°C	107
Fig. A1.5 Rear-surface Temperature History of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 500°C	108
Fig. A1.6 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 500°C	108
Fig. A1.7 Rear-surface Temperature History of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 900°C	109
Fig. A1.8 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 900°C	109
Fig. A1.9 Rear-surface Temperature History of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 1300°C	110
Fig. A1.10 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 1300°C	110
Fig. A1.11 Rear-surface Temperature History of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 1700°C	111
Fig. A1.12 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ (Sample Shape No. 4) at 1700°C	111
Fig. A1.13 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at Room Temperature	112
Fig. A1.14 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at Room Temperature	112
Fig. A1.15 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at 100°C	113
Fig. A1.16 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at 100°C	113
Fig. A1.17 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at 500°C	114
Fig. A1.18 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at 500°C	114
Fig. A1.19 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -3%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 4) at 900°C	115

Fig. A1. 20 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 900°C	115
Fig. A1. 21 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1300°C	116
Fig. A1. 22 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1300°C	116
Fig. A1. 23 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1700°C	117
Fig. A1. 24 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1700°C	117
Fig. A1. 25 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at Room Temperature	118
Fig. A1. 26 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at Room Temperature	118
Fig. A1. 27 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 100°C	119
Fig. A1. 28 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 100°C	119
Fig. A1. 29 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 500°C	120
Fig. A1. 30 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 500°C	120
Fig. A1. 31 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 900°C	121
Fig. A1. 32 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 900°C	121
Fig. A1. 33 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1300°C	122
Fig. A1. 34 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1300°C	122
Fig. A1. 35 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1700°C	123
Fig. A1. 36 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1700°C	123
Fig. A1. 37 Rear-surface Temperature History of UO_2 -10% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 2.2) at Room Temperature	124
Fig. A1. 38 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -10% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 2.2) at Room Temperature	124

Fig. A1.39 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 100°C	125
Fig. A1.40 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 100°C	125
Fig. A1.41 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 500°C	126
Fig. A1.42 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 500°C	126
Fig. A1.43 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 900°C	127
Fig. A1.44 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 900°C	127
Fig. A1.45 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 1300°C	128
Fig. A1.46 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 1300°C	128
Fig. A1.47 Rear-surface Temperature History of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 1700°C	129
Fig. A1.48 Calculated Logarithmic Plot of UO ₂ -10%Gd ₂ O ₃ (Sample Shape No. 2.2) at 1700°C	129

Measurement of Thermal Diffusivity

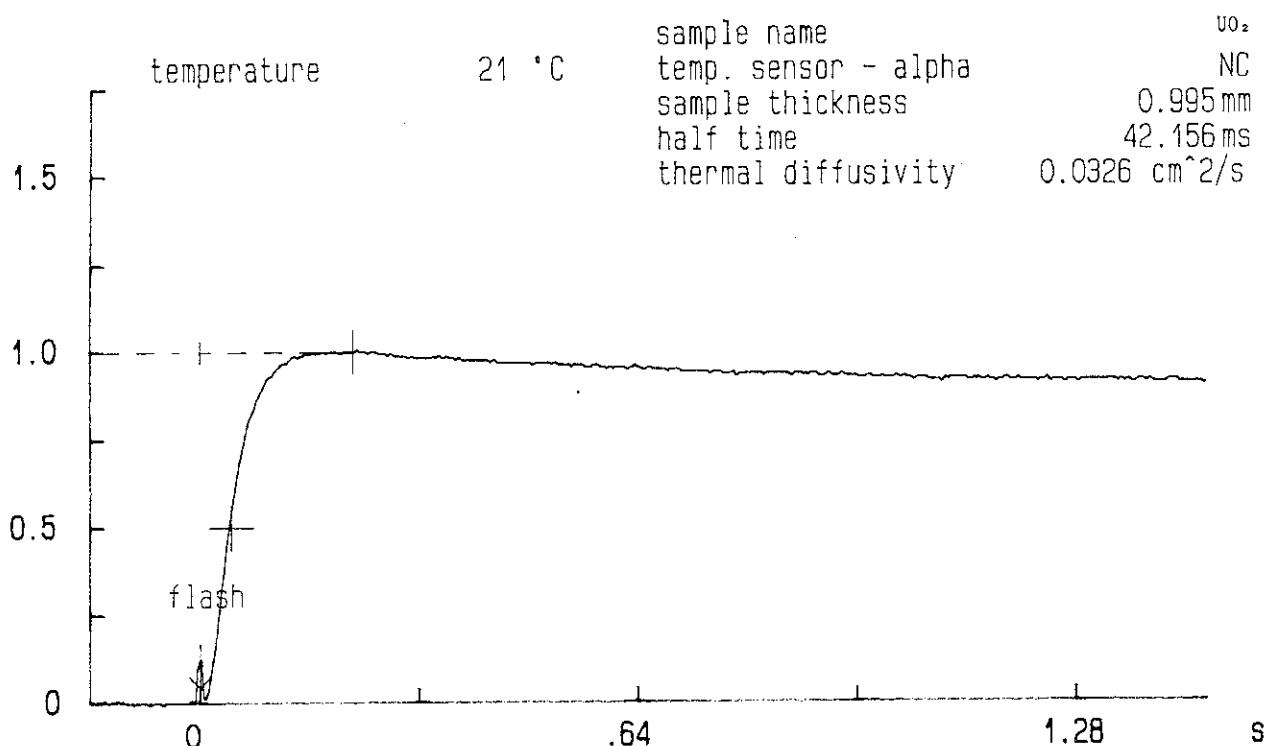


Fig.A1.1 Rear-surface Temperature History of UO_2 (Sample Shape No.4) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

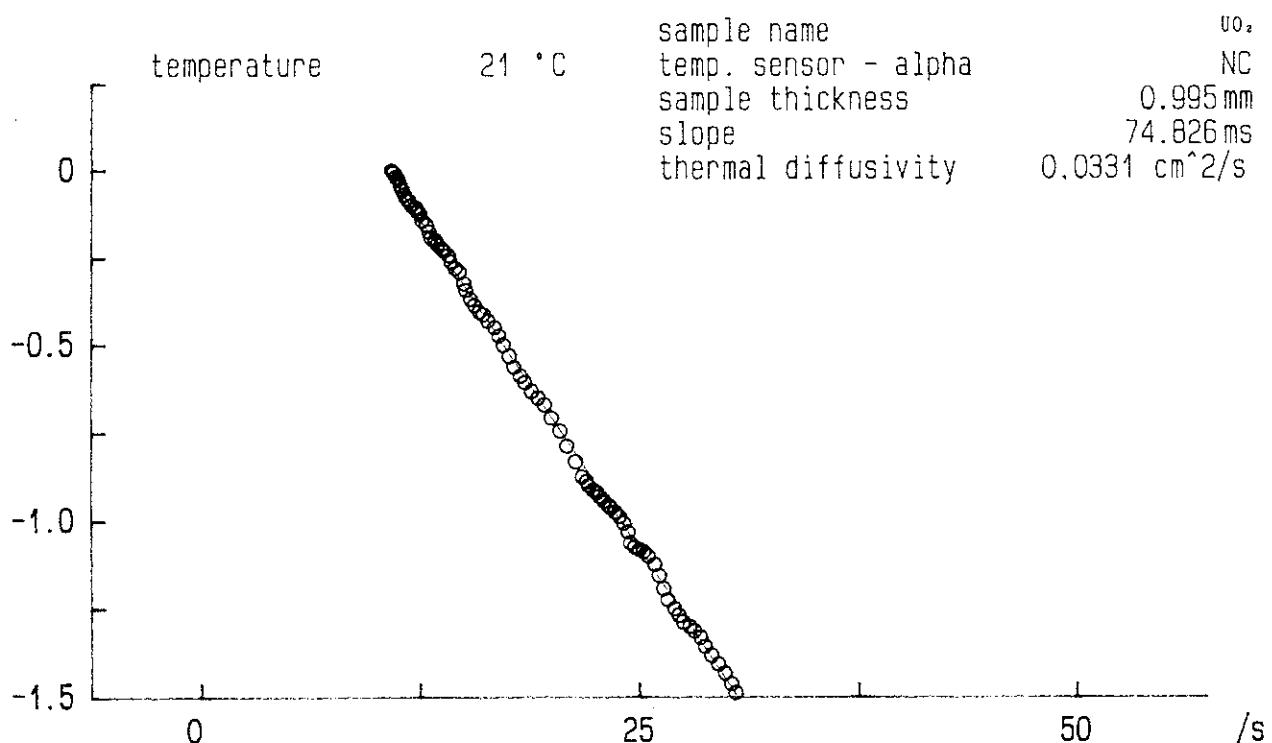


Fig.A1.2 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 (Sample Shape No.4) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

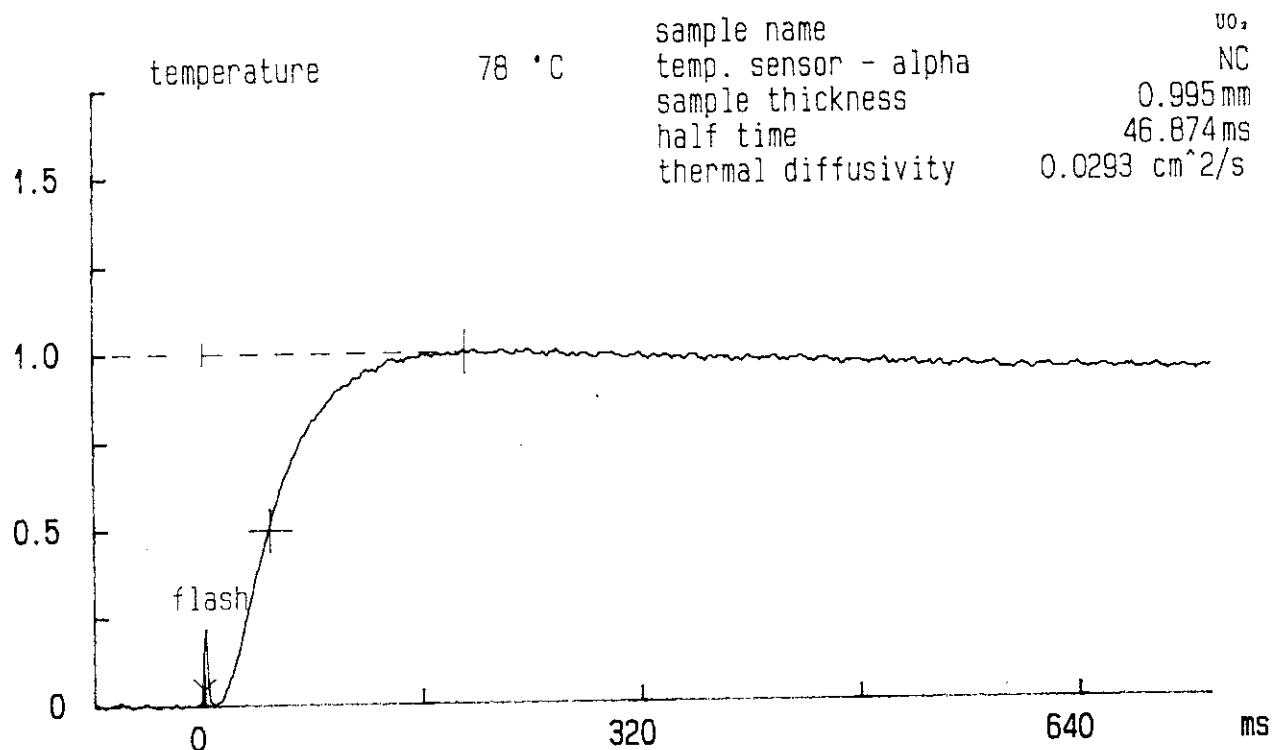


Fig.A1.3 Rear-surface Temperature History of UO₂(Sample Shape No.4)
at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

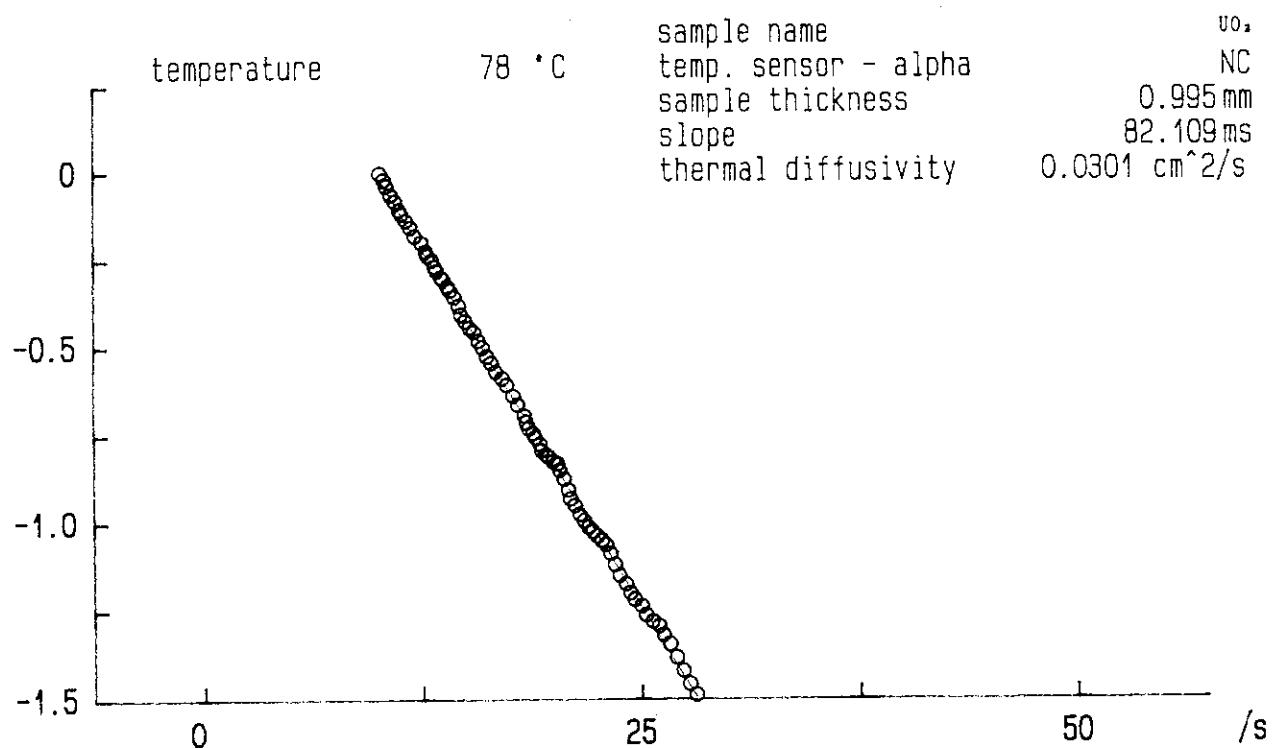


Fig.A1.4 Calculated Logarithmic Plot of UO₂(Sample Shape No.4) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

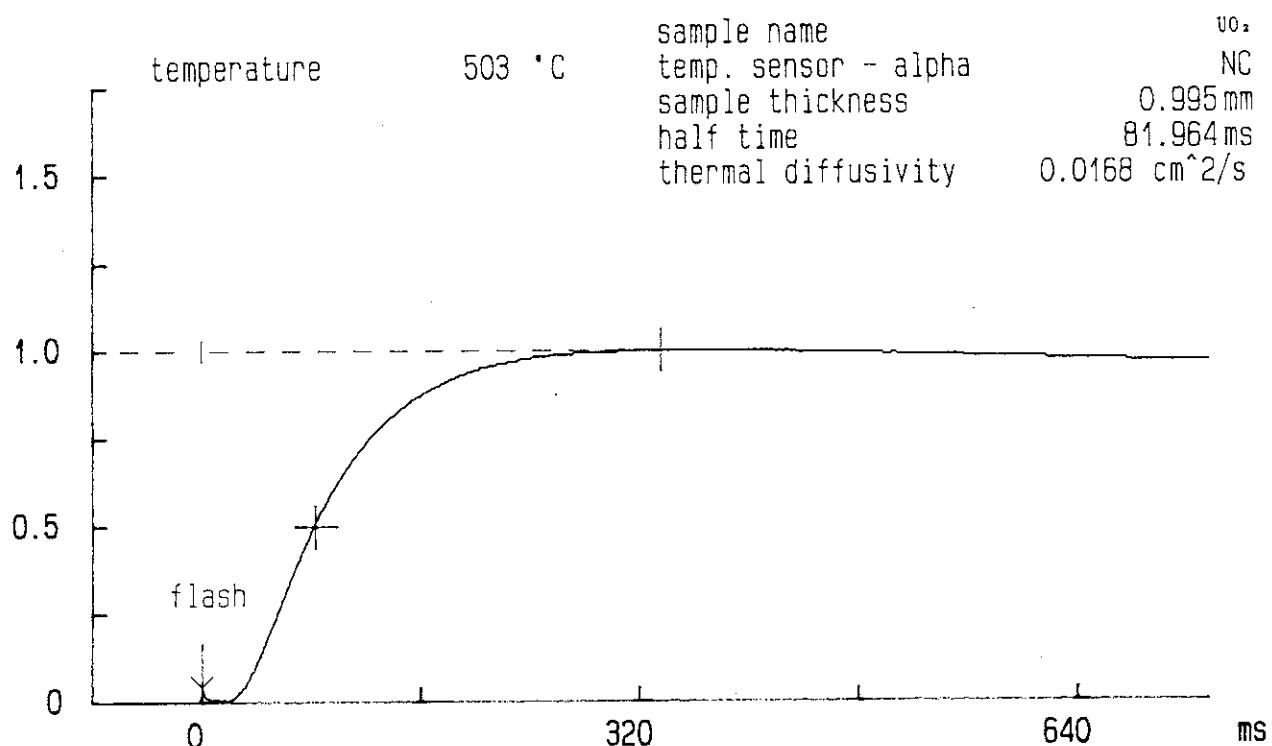


Fig.A1.5 Rear-surface Temperature History of UO_2 (Sample Shape No.4)
at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

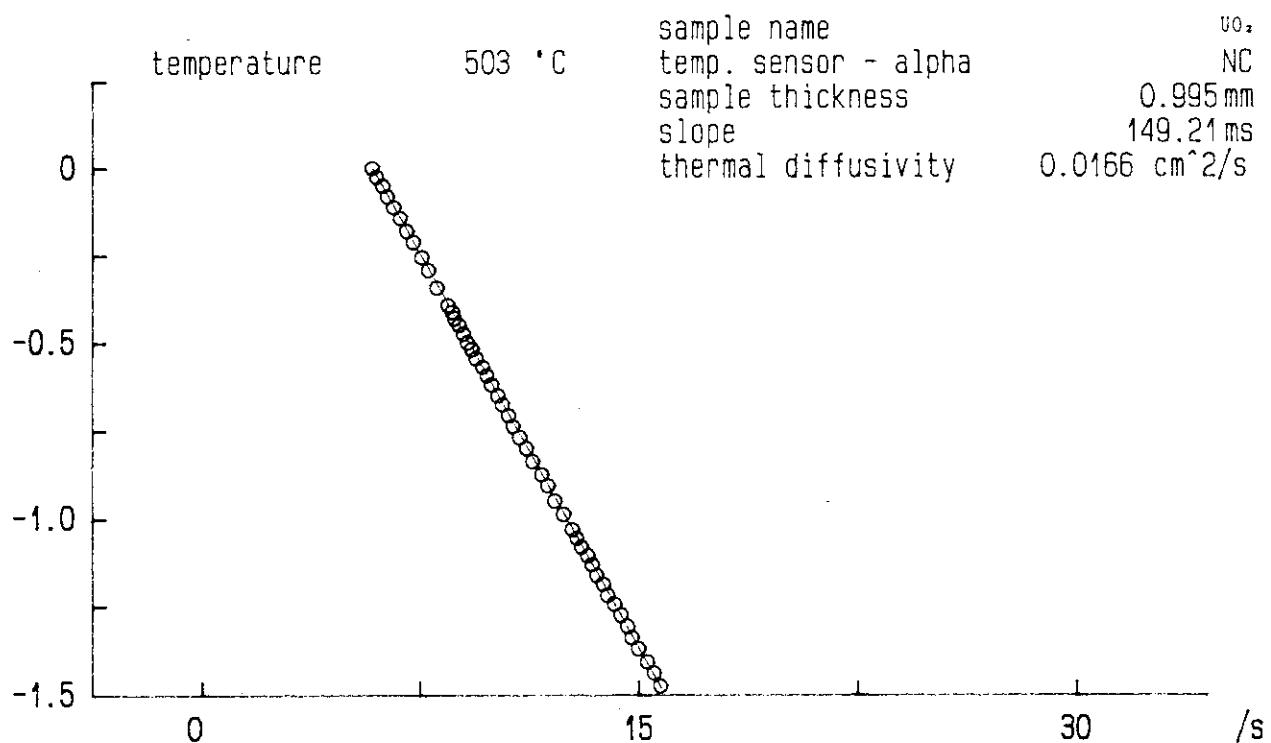


Fig.A1.6 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 (Sample Shape No.4) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

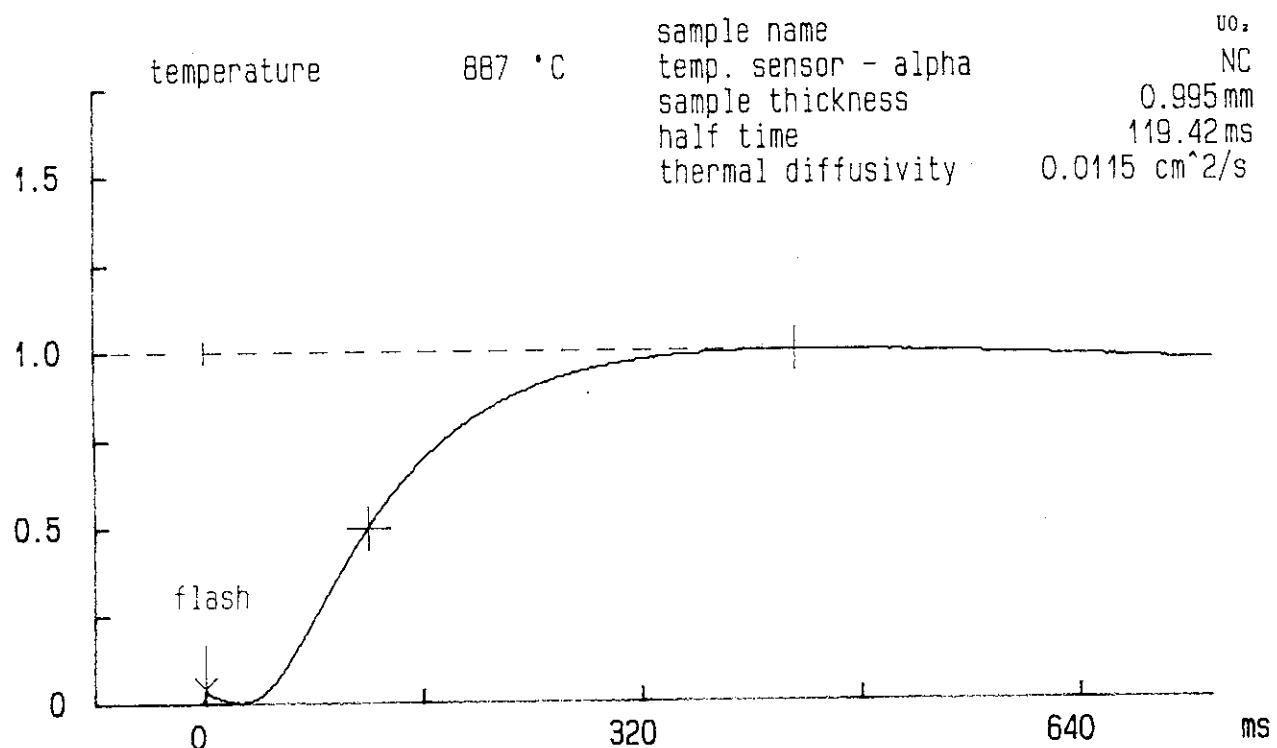


Fig.A1.7 Rear-surface Temperature History of UO₂(Sample Shape No.4) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

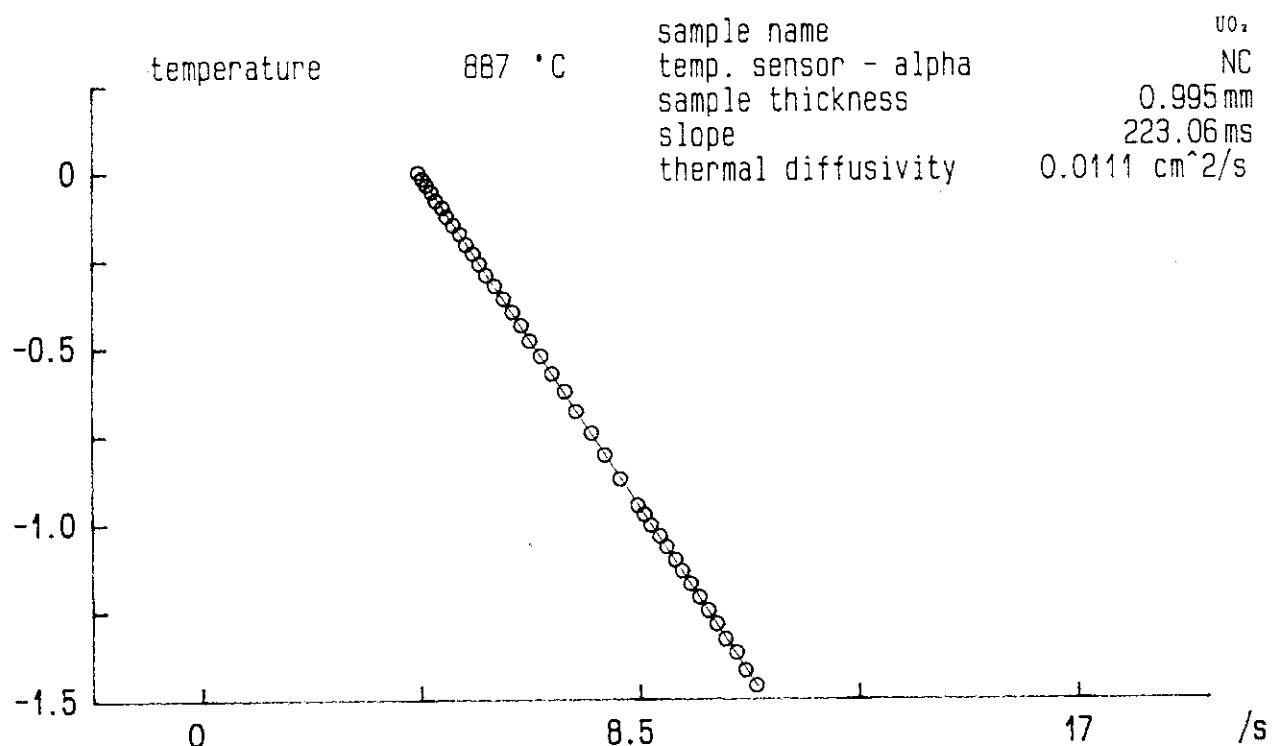


Fig.A1.8 Calculated Logarithmic Plot of UO₂(Sample Shape No.4) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

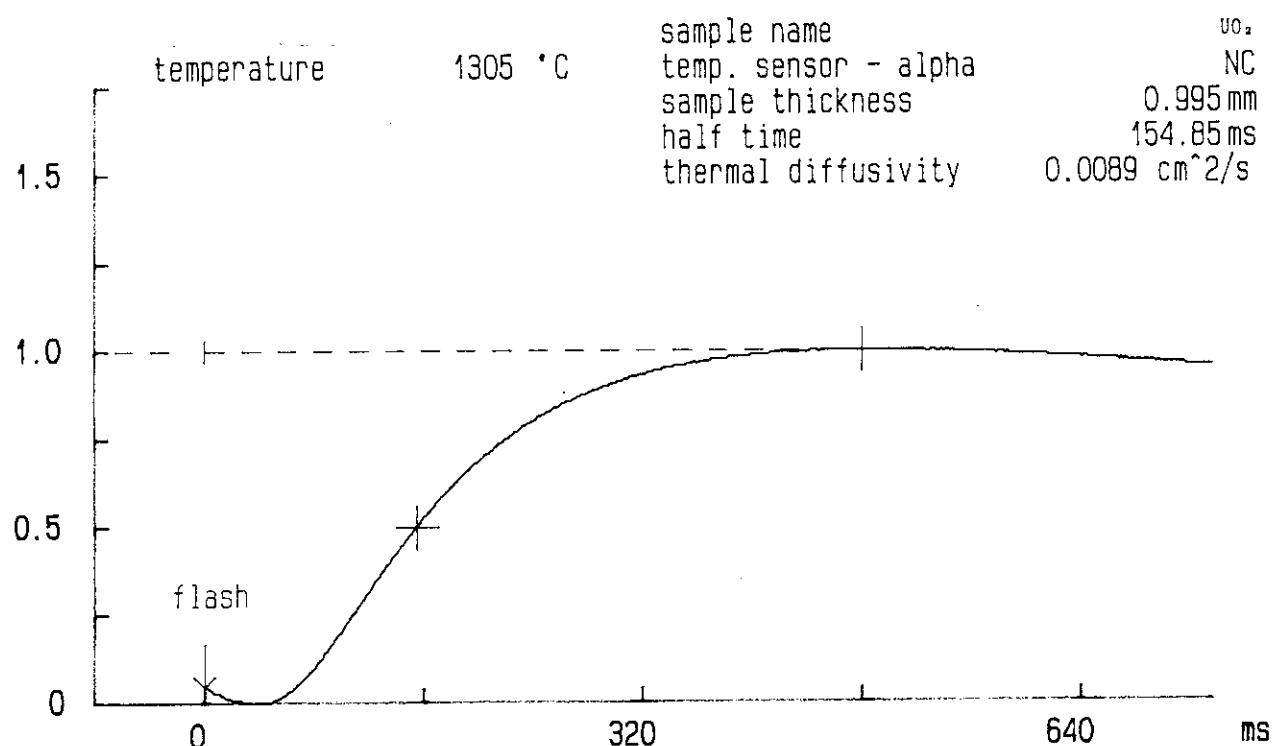


Fig.A1.9 Rear-surface Temperature History of UO_2 (Sample Shape No.4)
at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

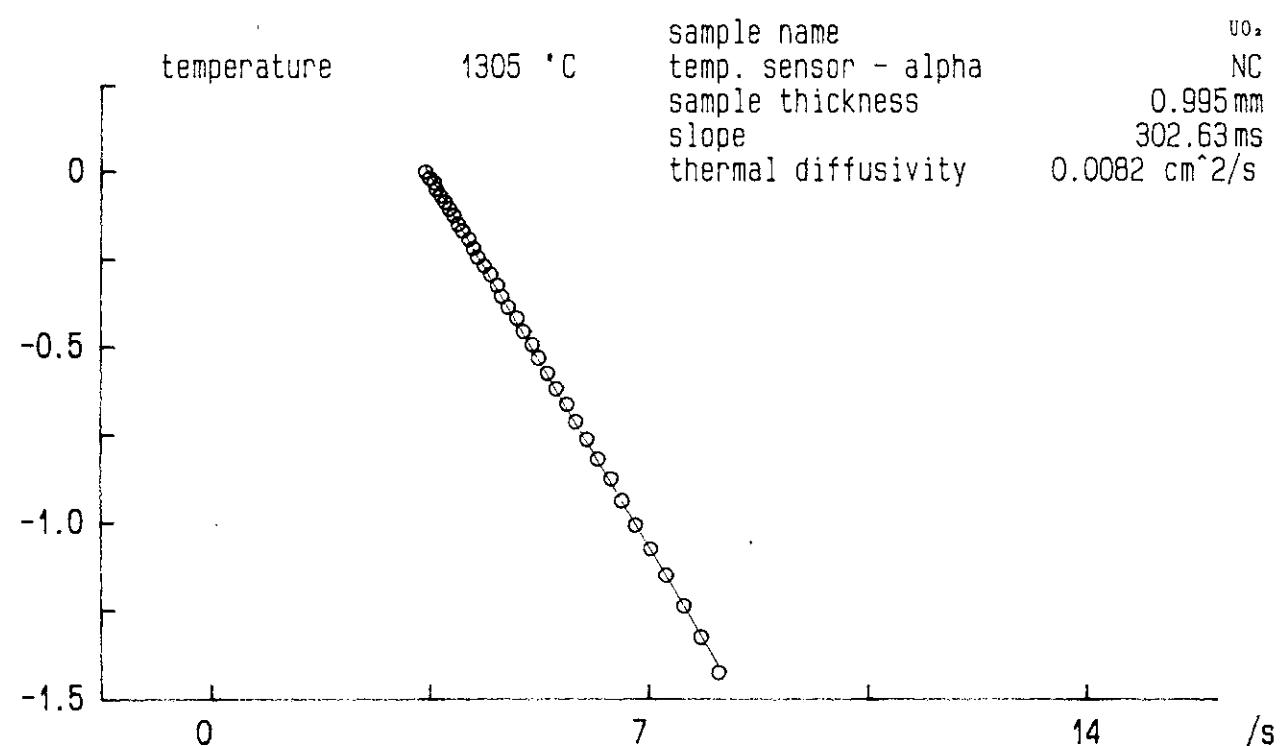


Fig.A1.10 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 (Sample Shape No.4)
at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

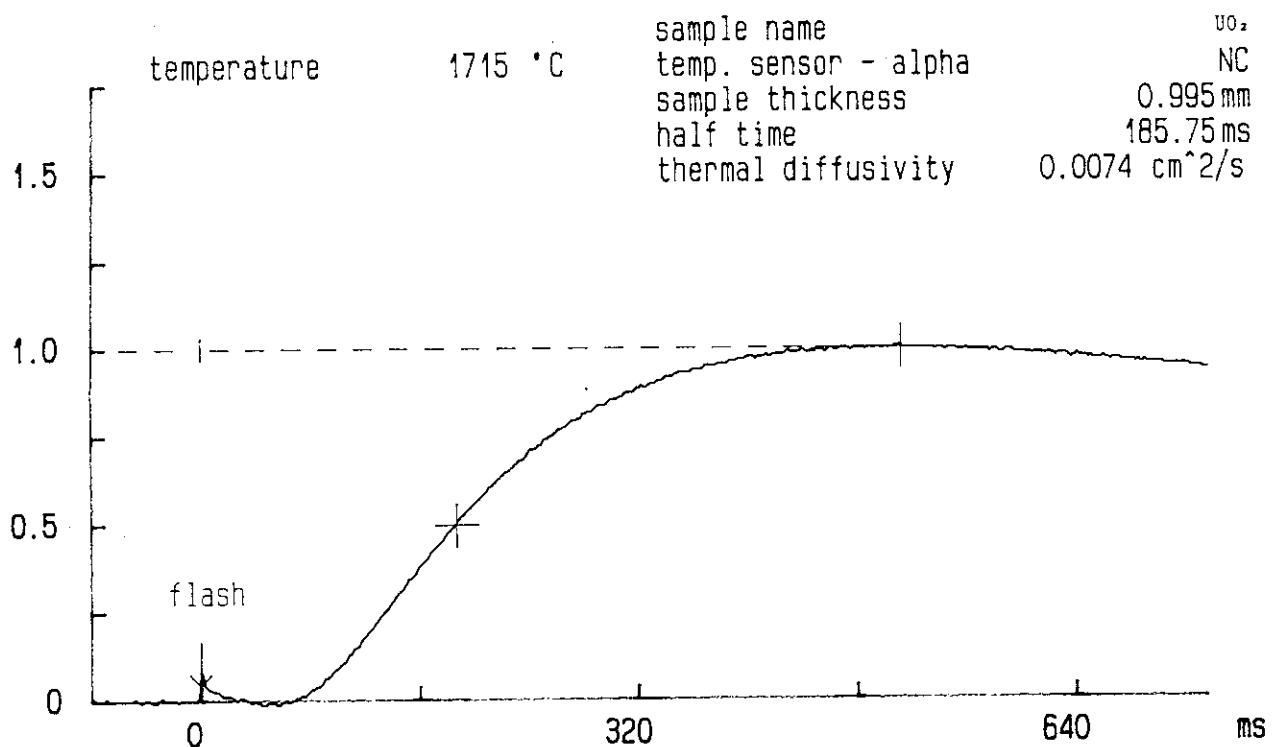


Fig.A1.11 Rear-surface Temperature History of UO_2 (Sample Shape No.4) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

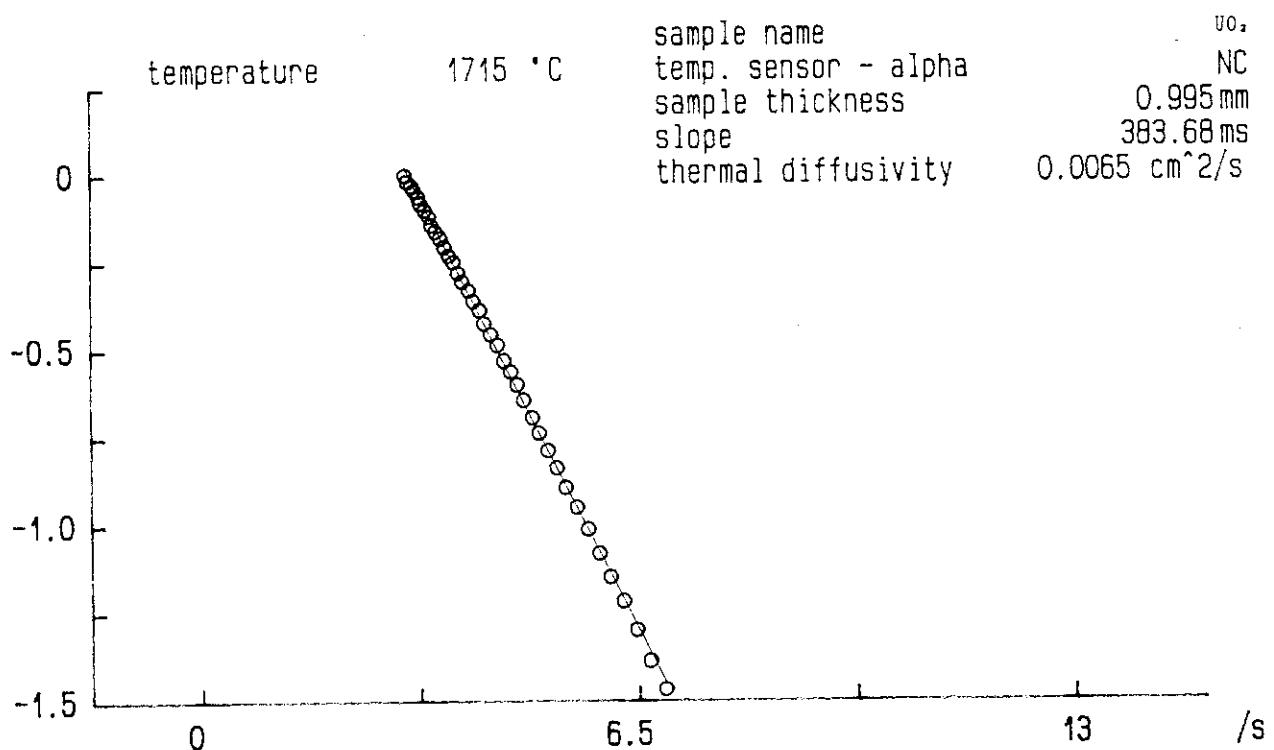


Fig.A1.12 Calculated Logarithmic Plot of UO₂(Sample Shape No.4) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

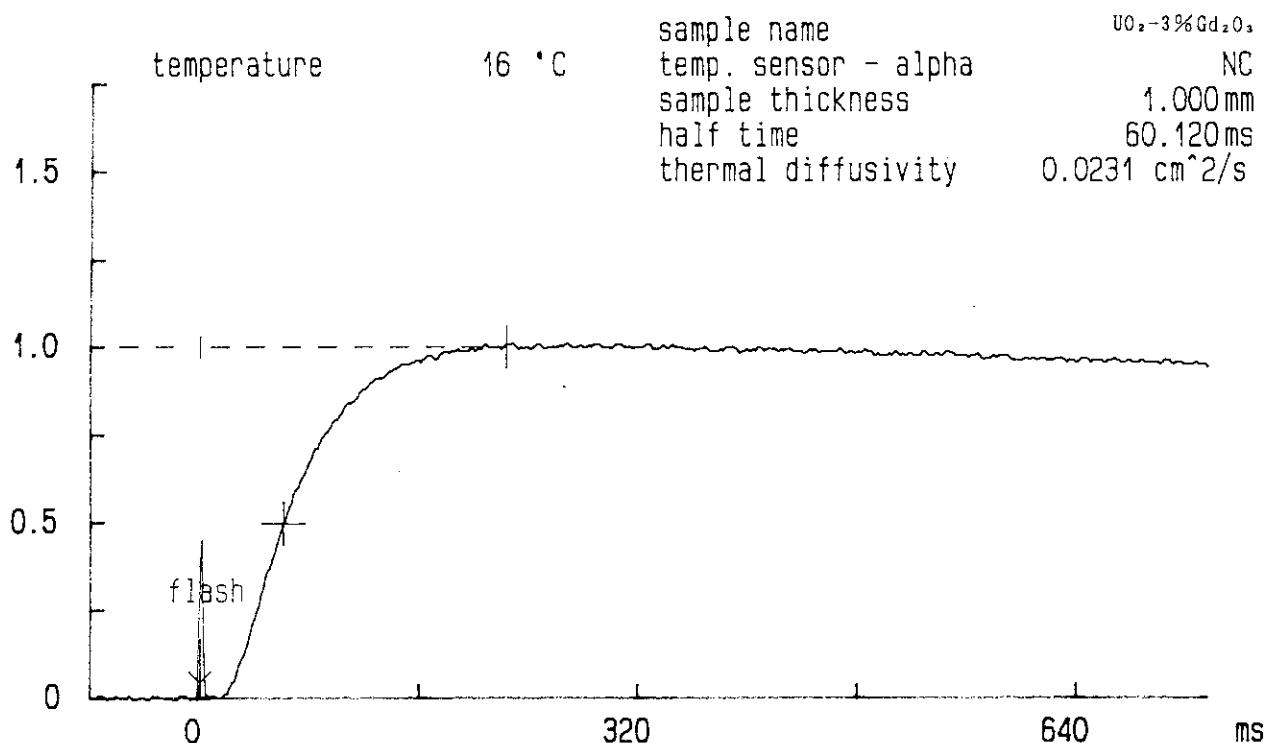


Fig.A1.13 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

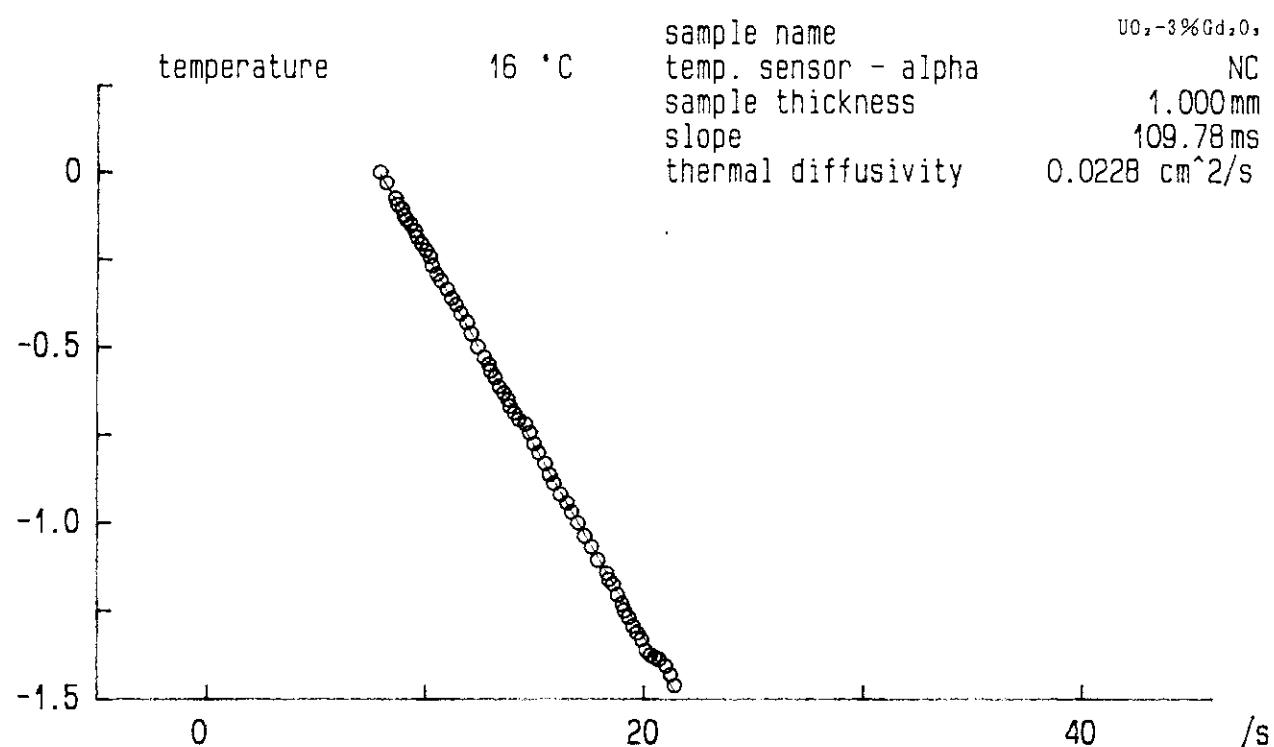


Fig.A1.14 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.4) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

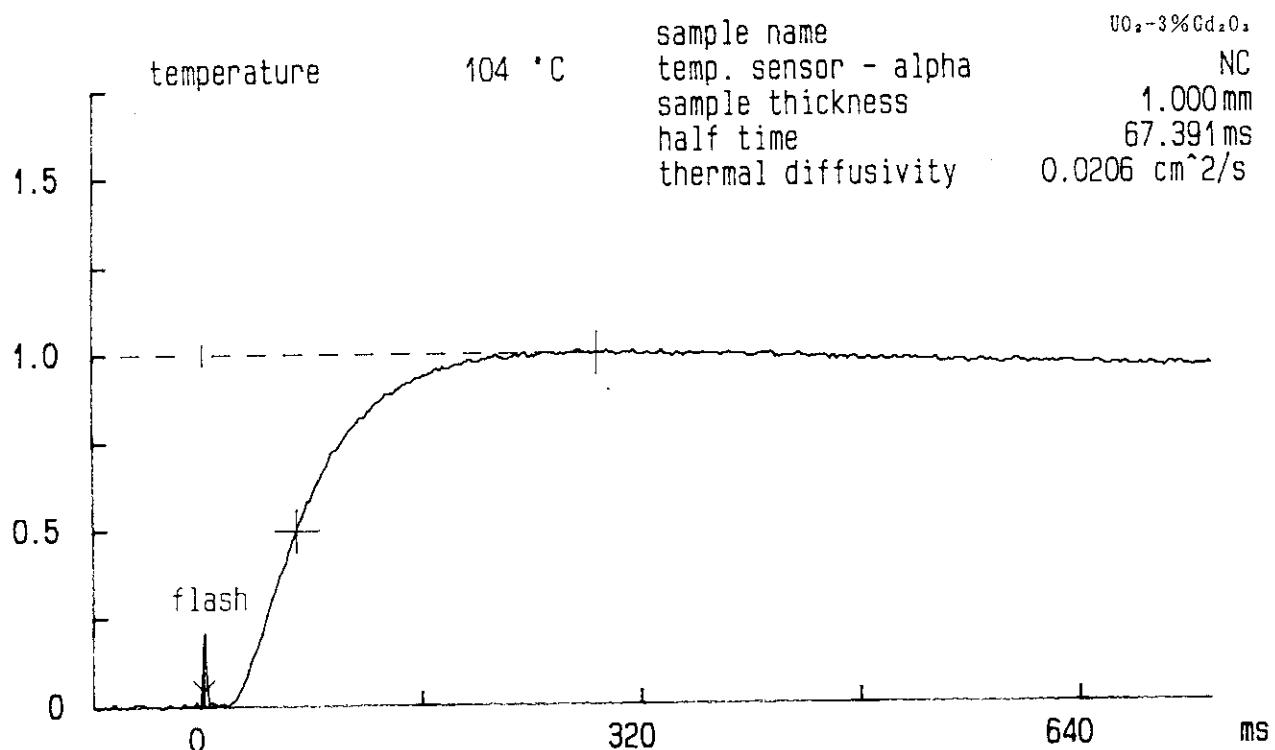


Fig.A1.15 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

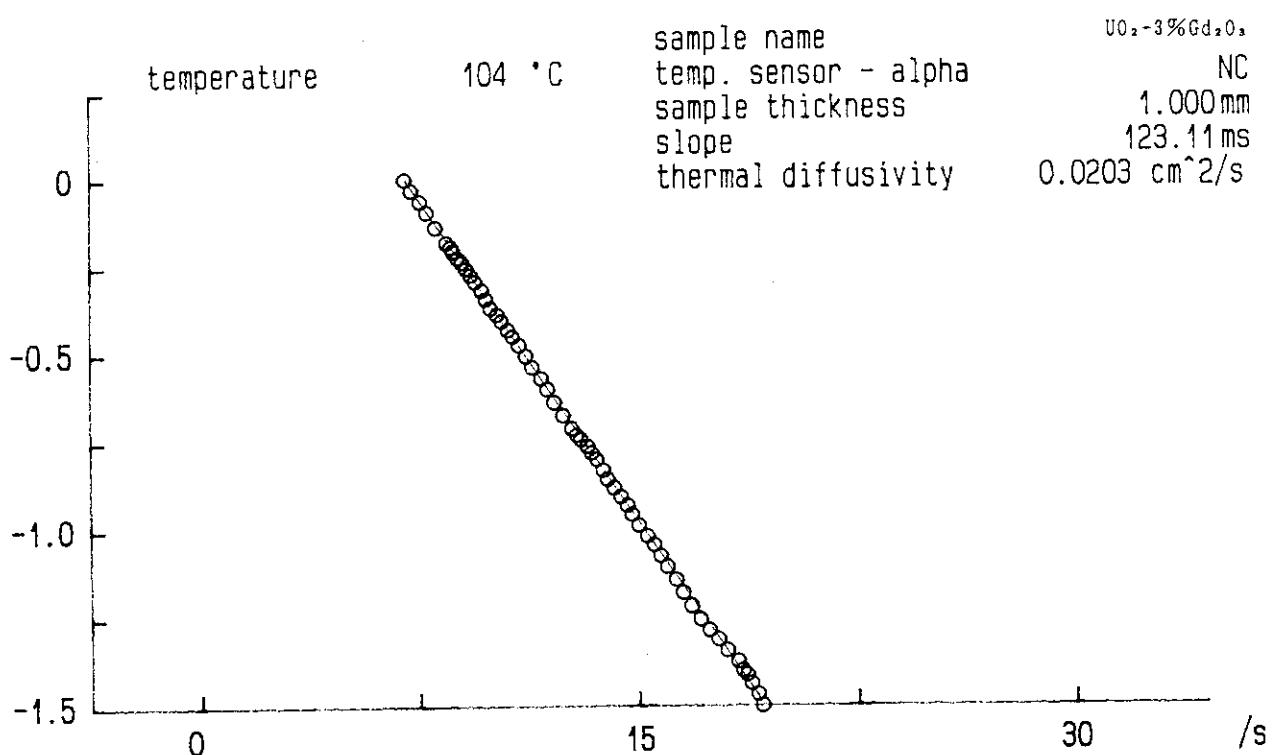


Fig.A1.16 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.4) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

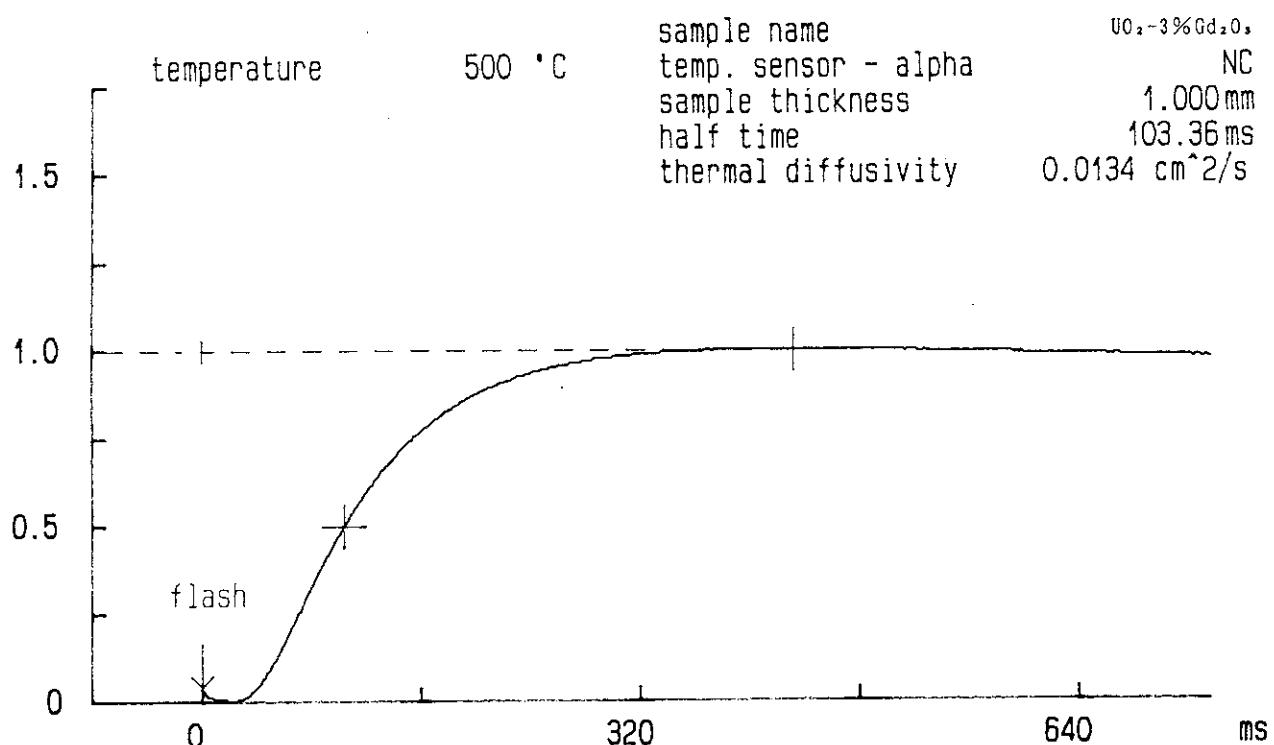


Fig.A1.17 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

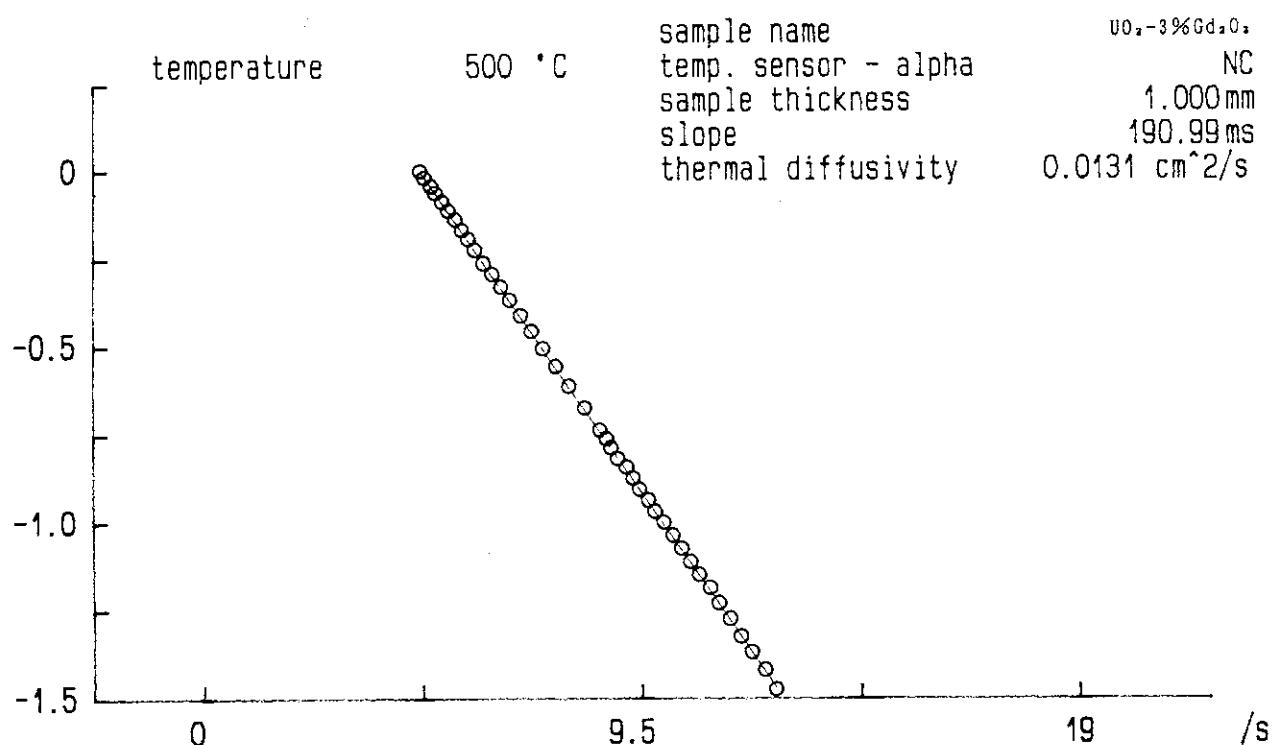


Fig.A1.18 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

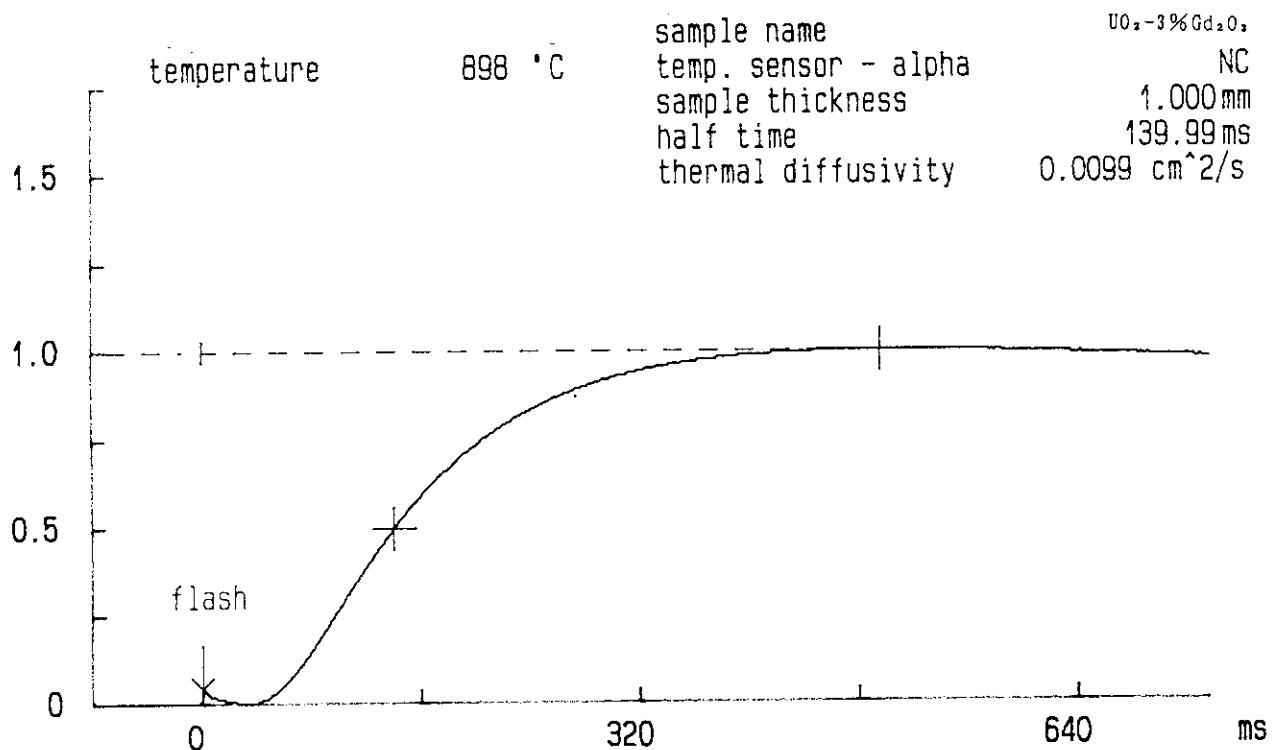


Fig.A1.19 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

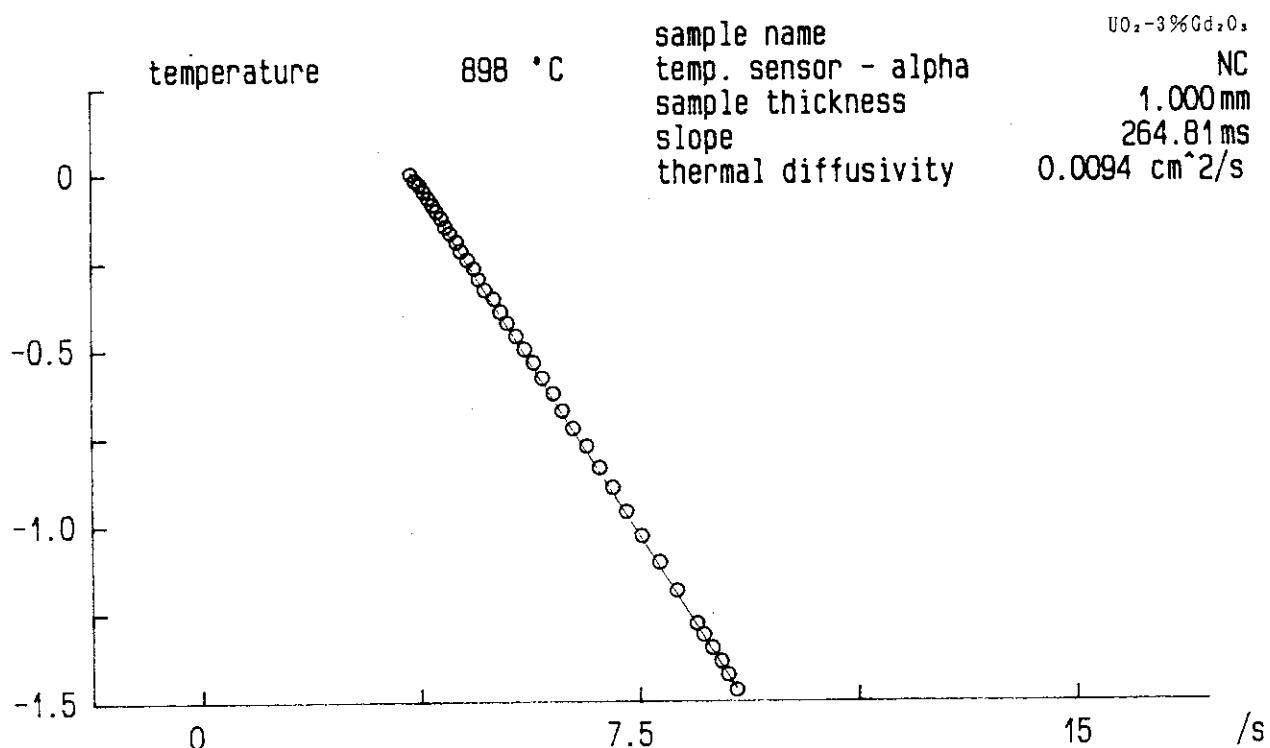


Fig.A1.20 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}3\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.4) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

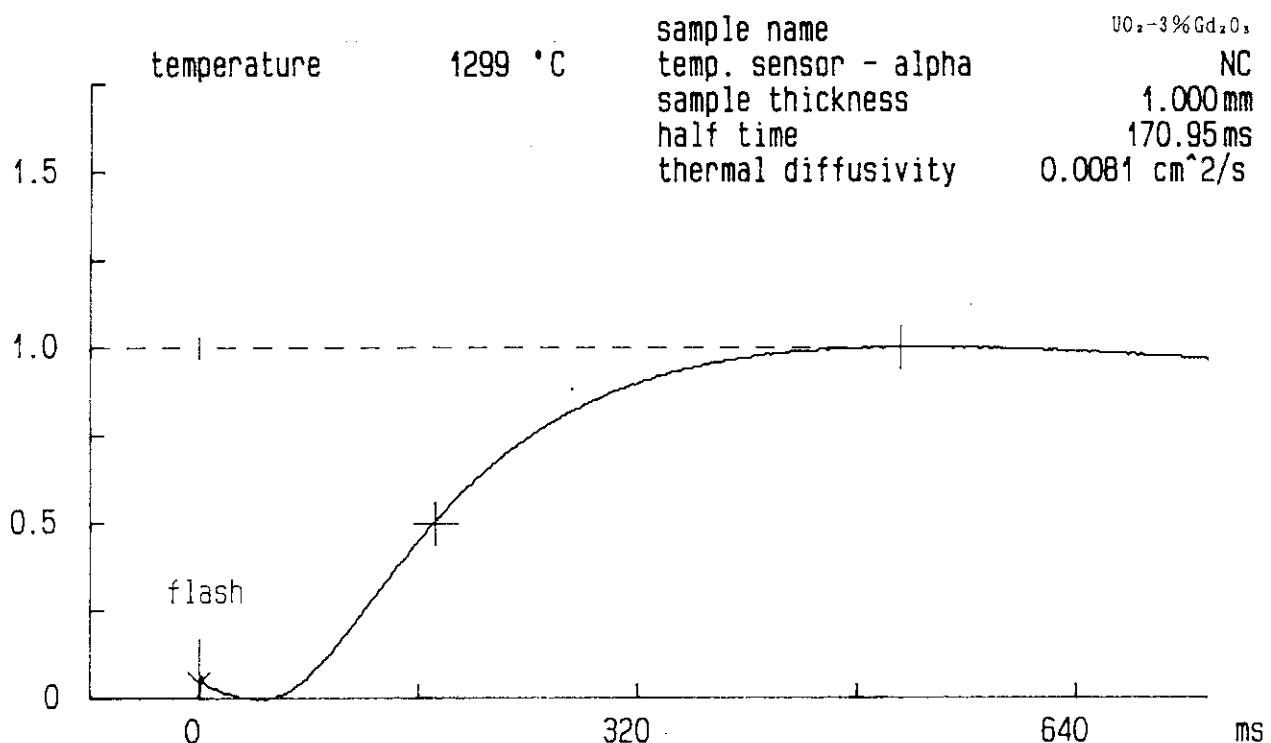


Fig.A1.21 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

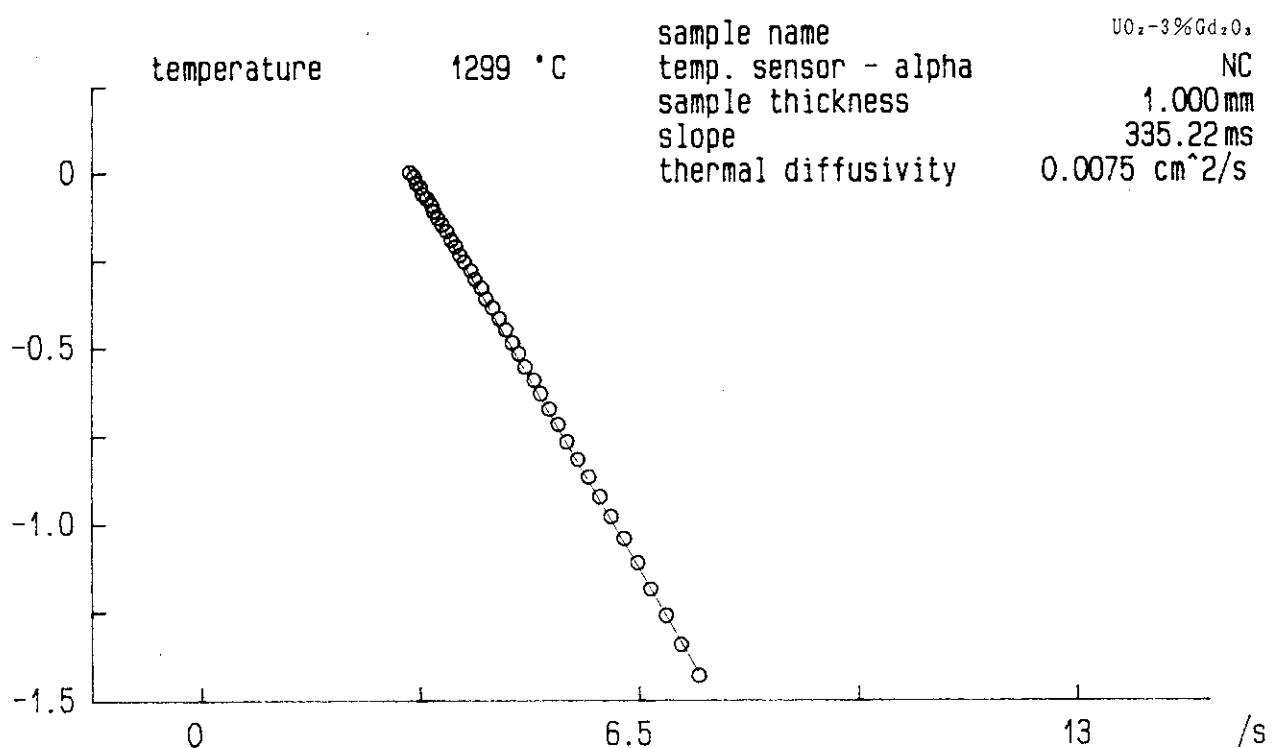


Fig.A1.22 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

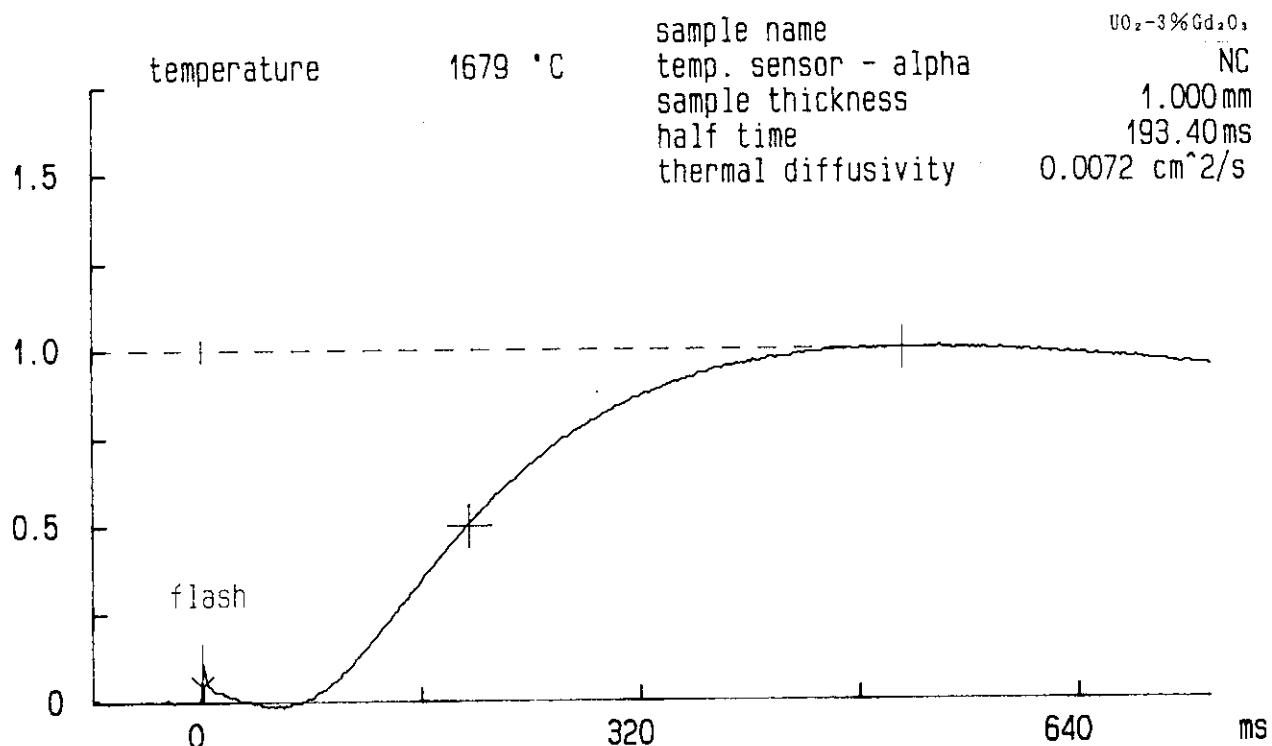


Fig.A1.23 Rear-surface Temperature History of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

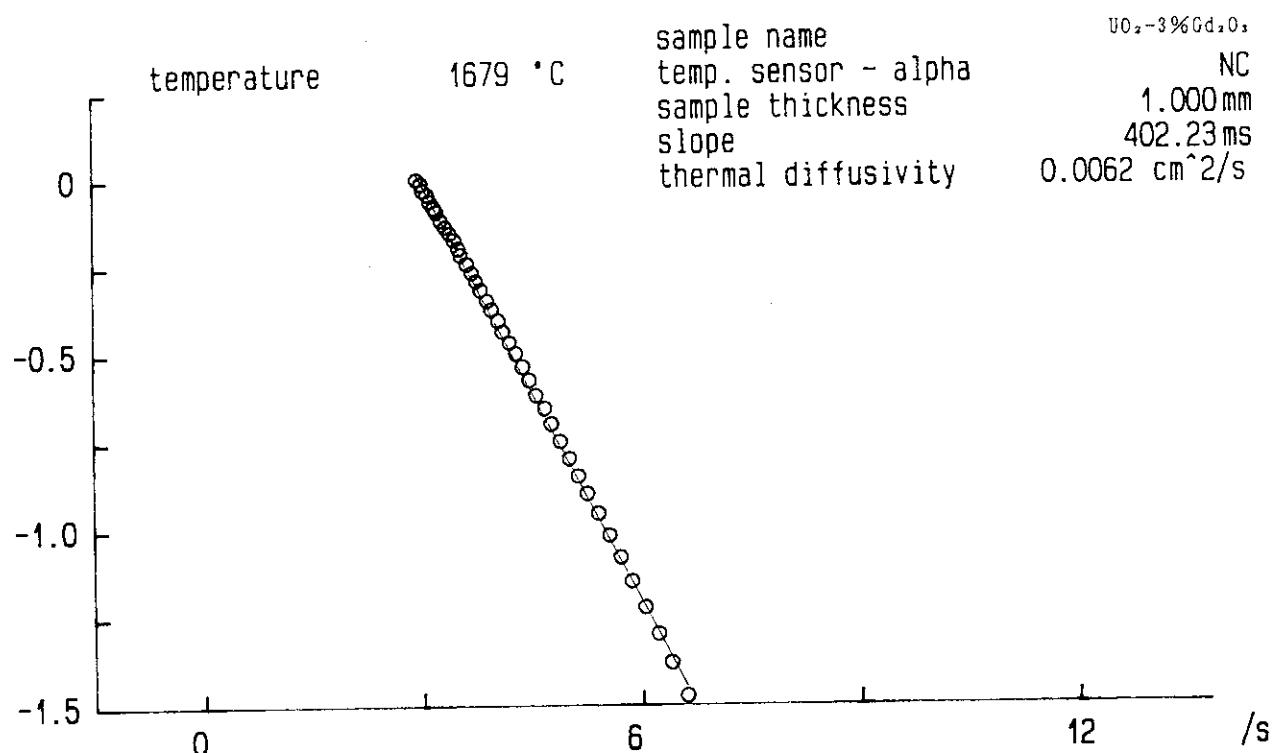


Fig.A1.24 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -3% Gd_2O_3 (Sample Shape No. 4) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

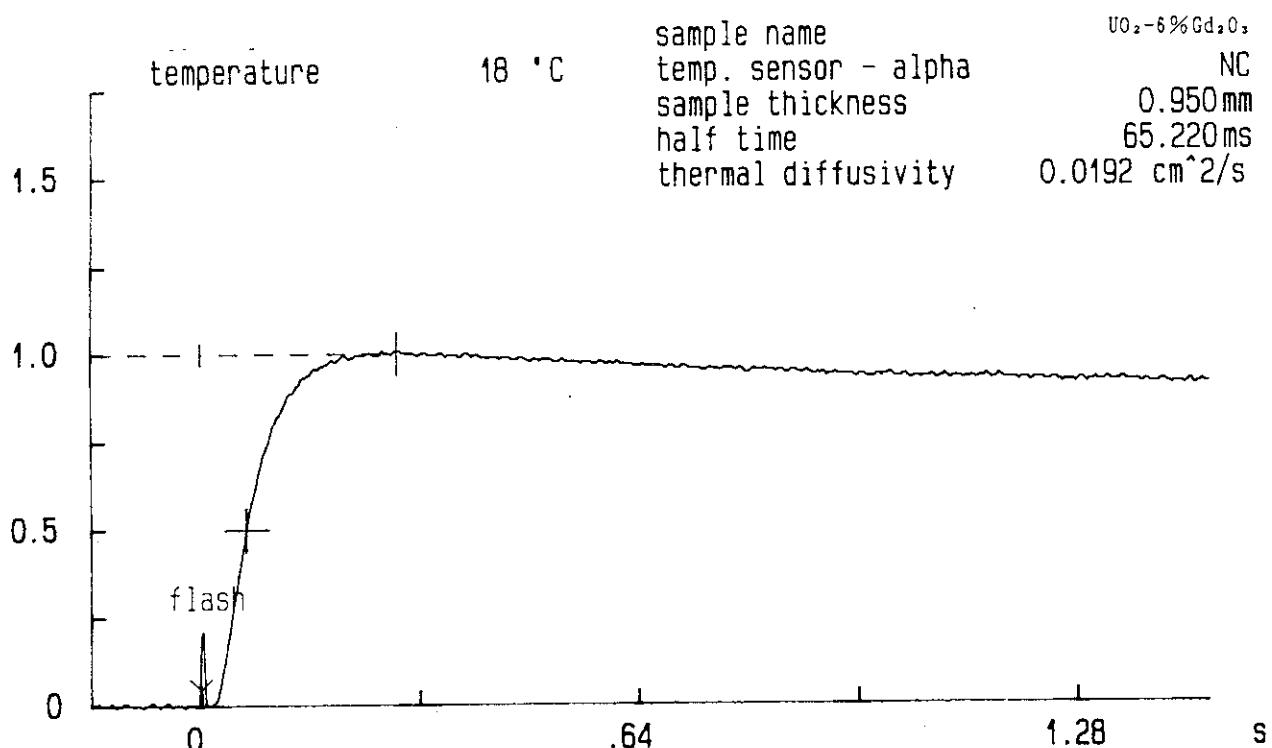


Fig.A1.25 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

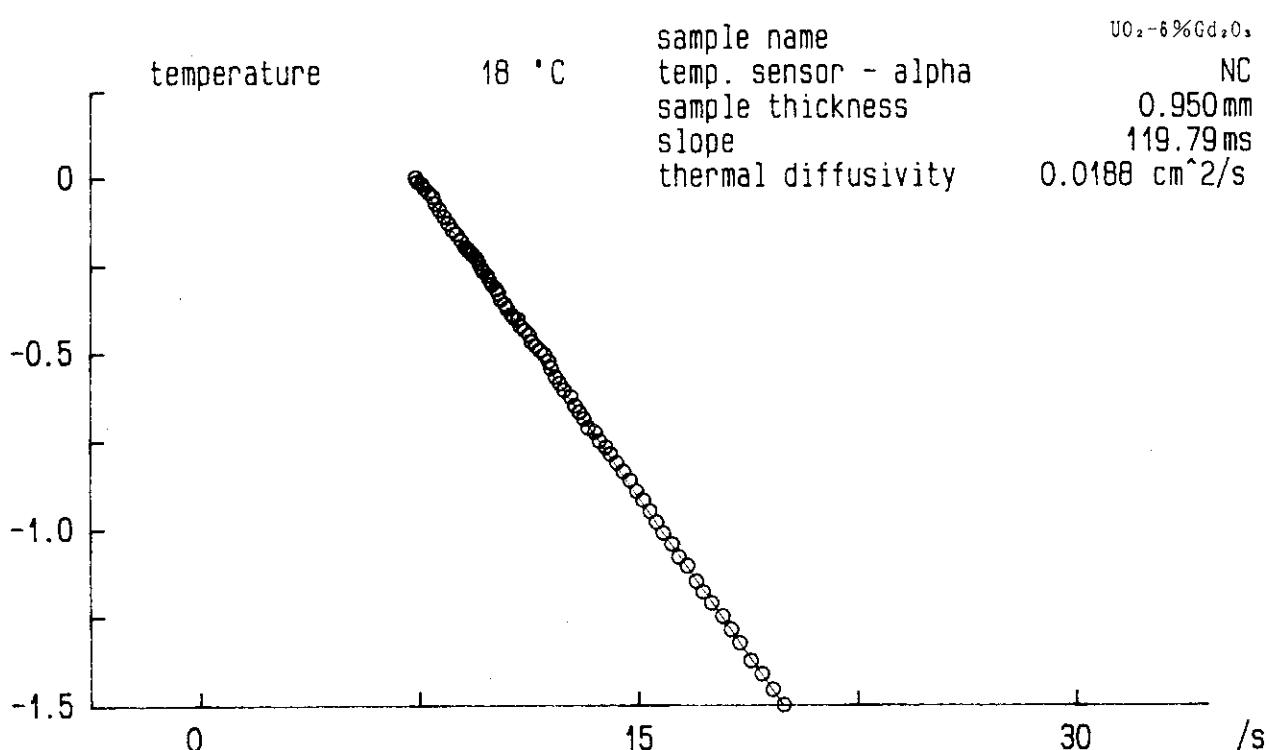


Fig.A1.26 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

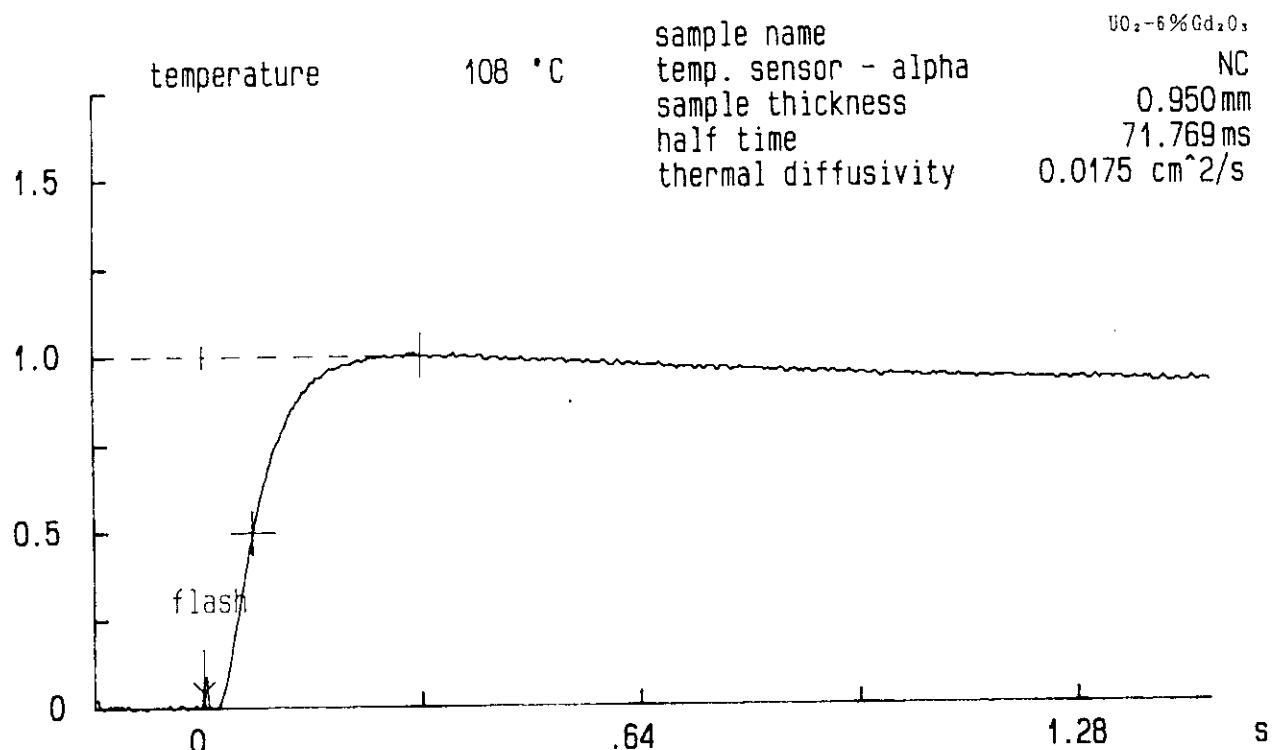


Fig.A1.27 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

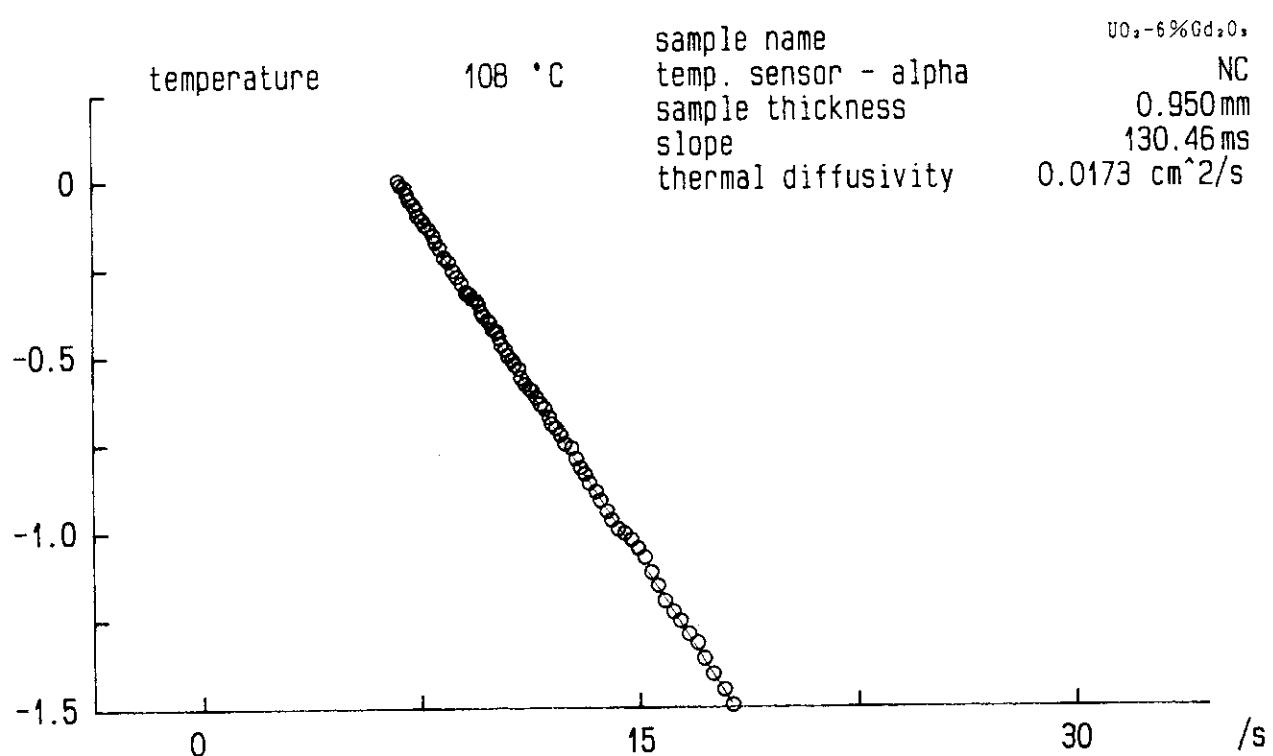


Fig.A1.28 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}6\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.4) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

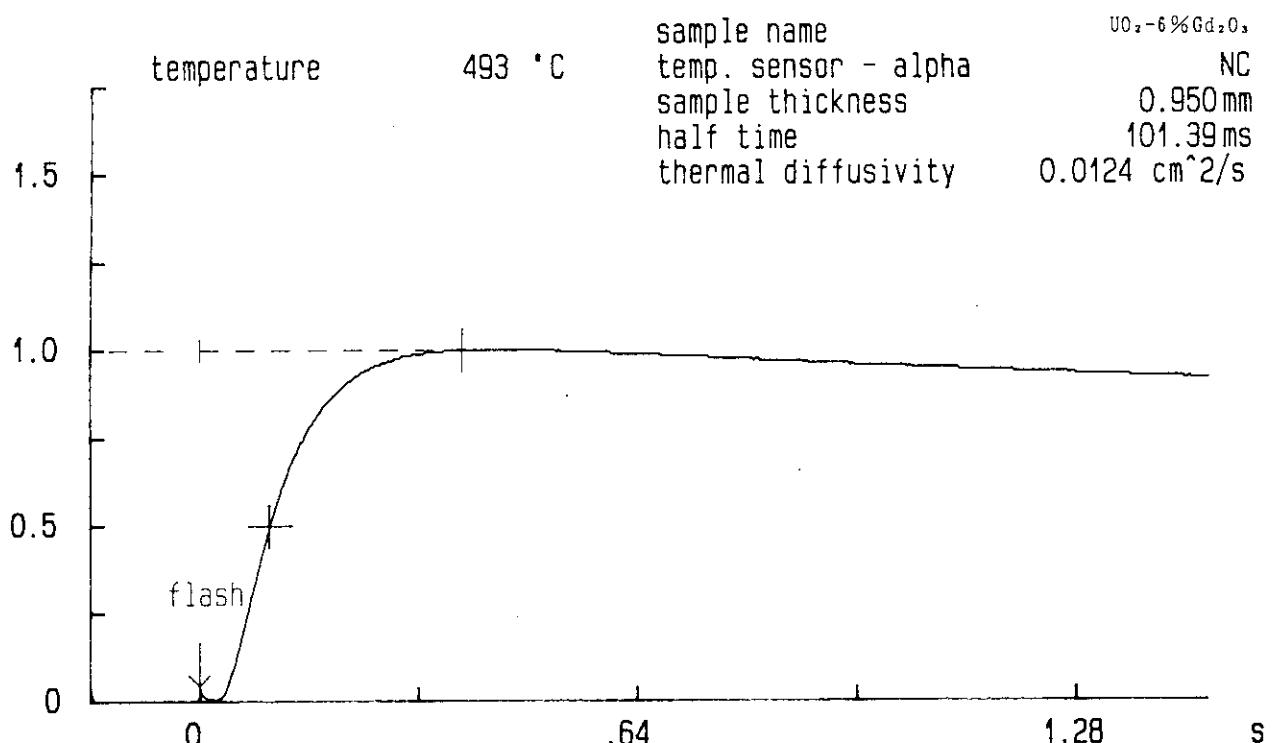


Fig.A1.29 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

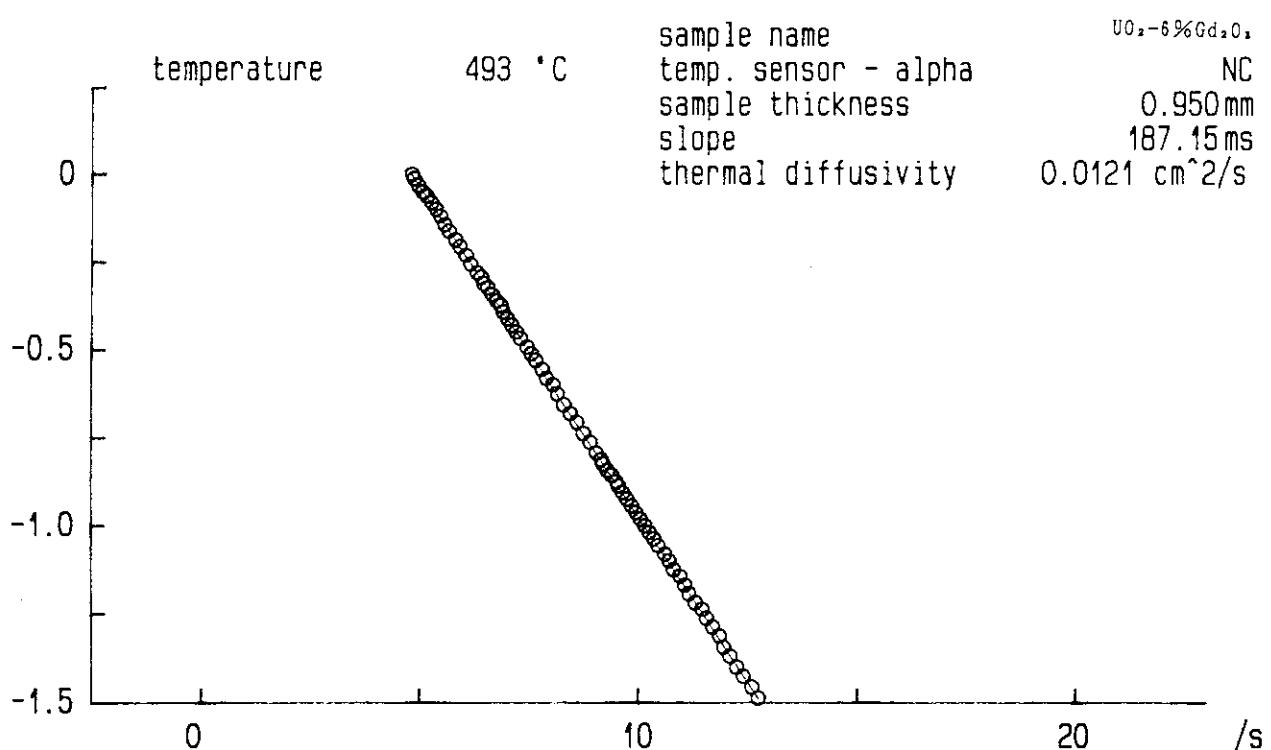


Fig.A1.30 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

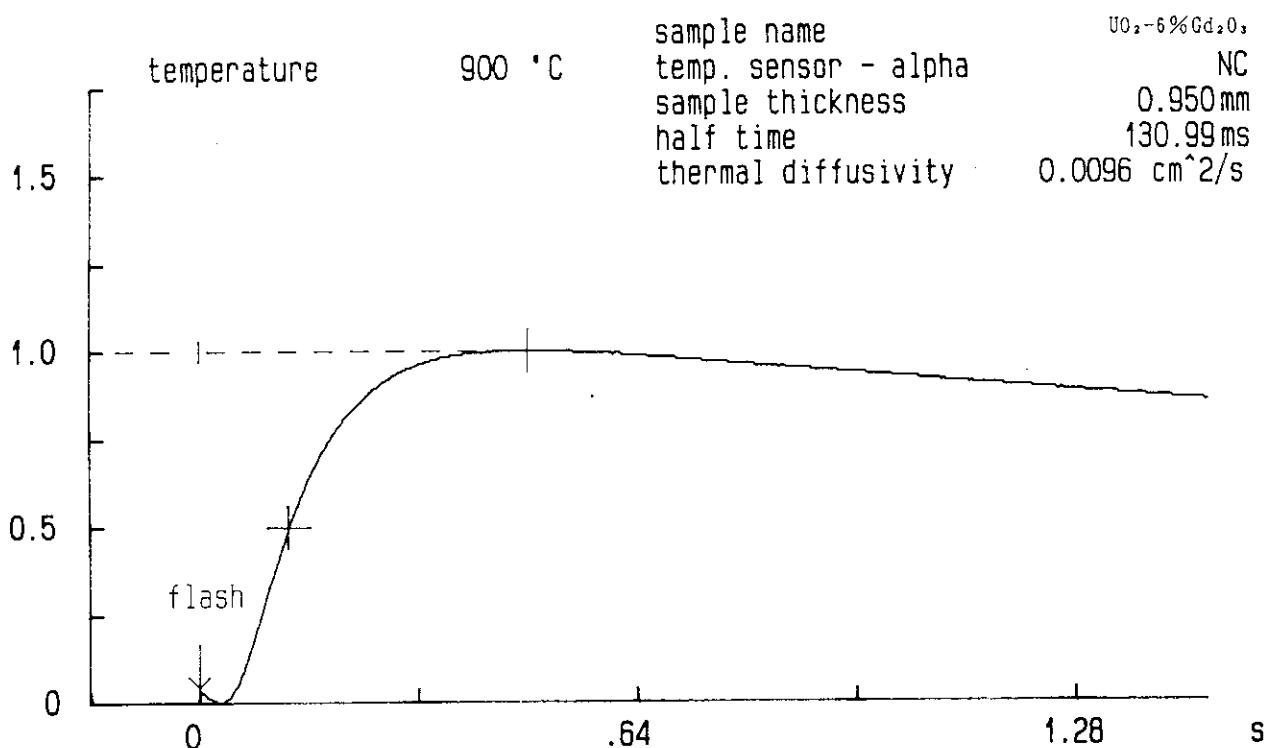


Fig.A1.31 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

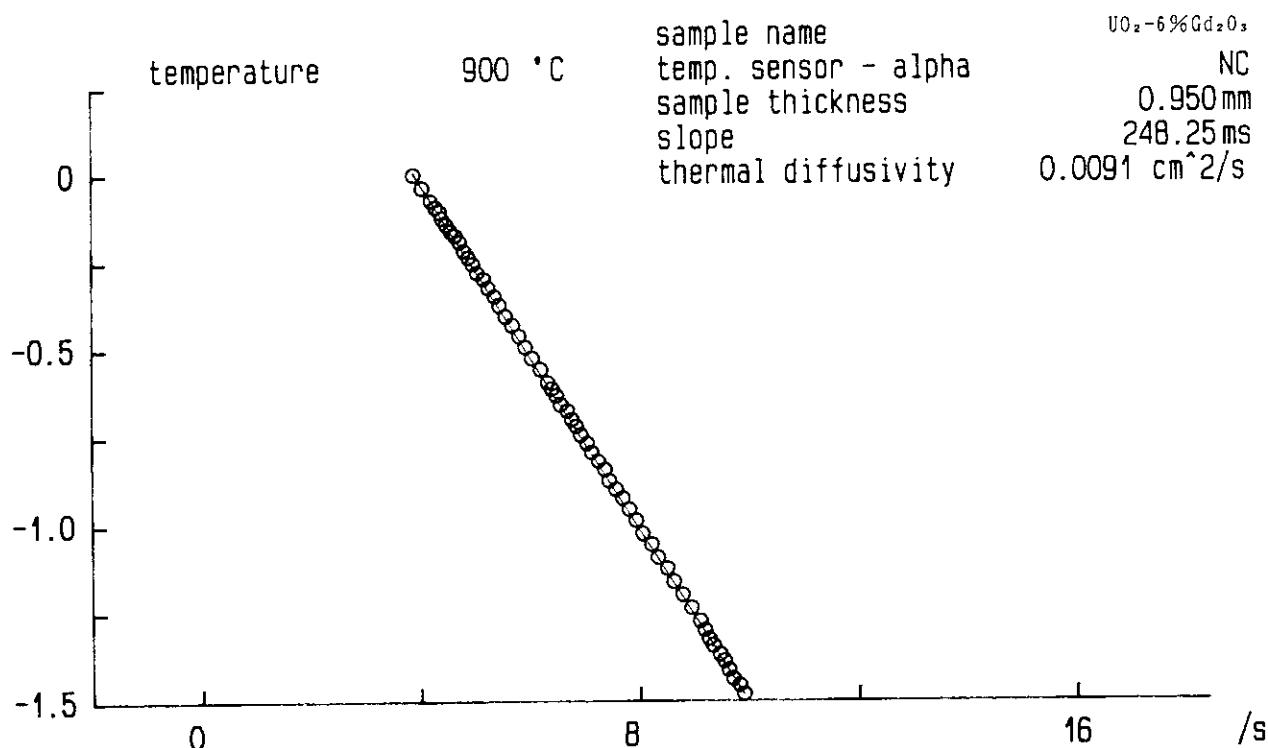


Fig.A1.32 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

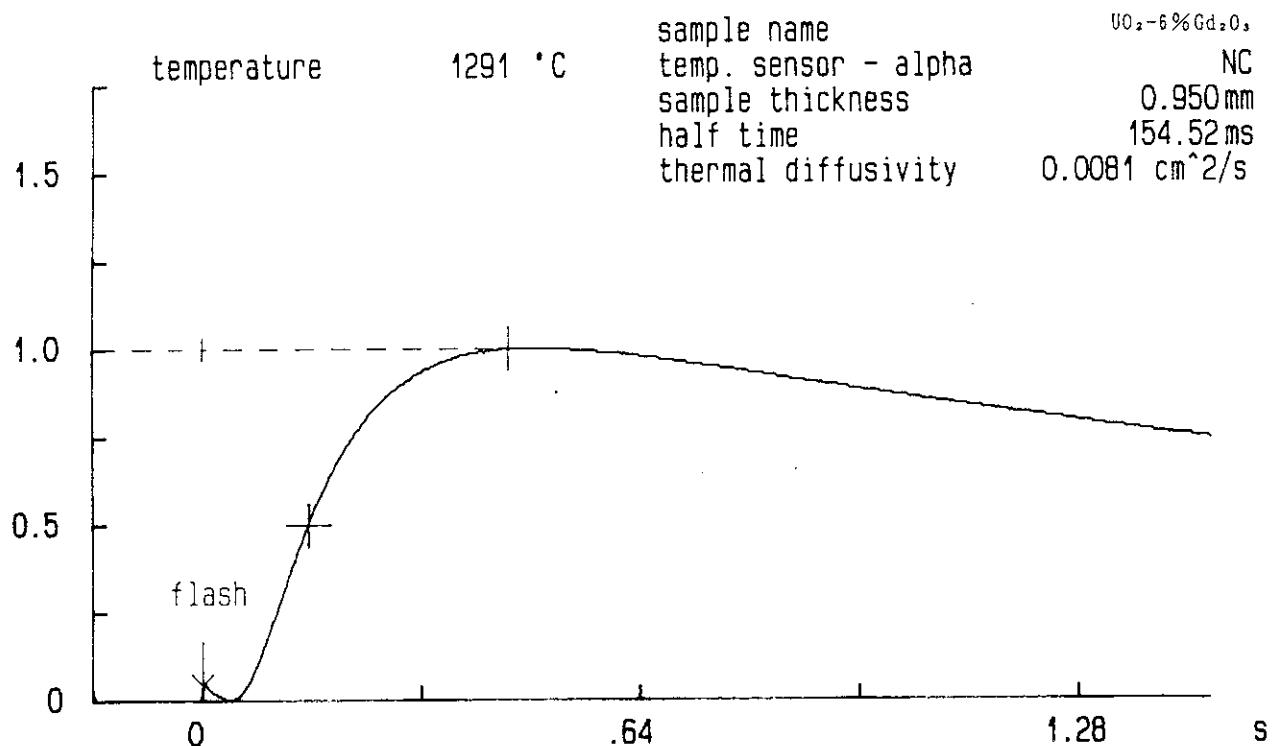


Fig.A1.33 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

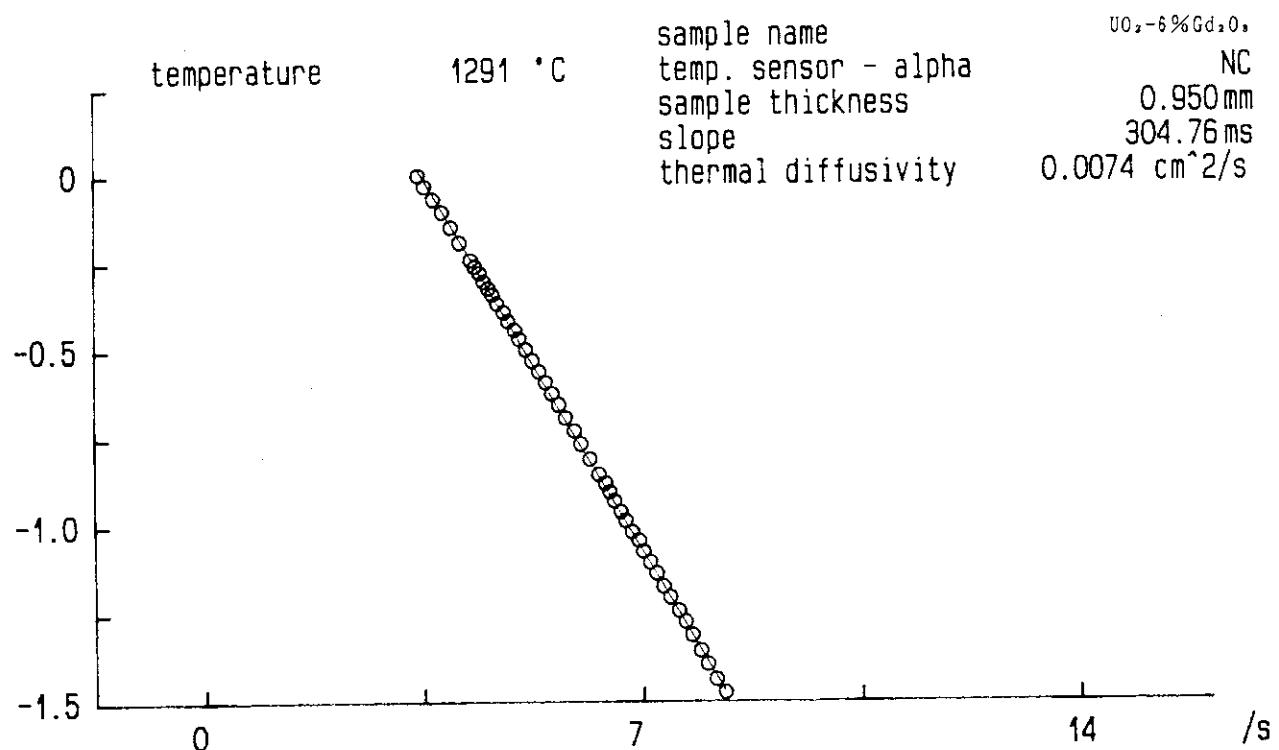


Fig.A1.34 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

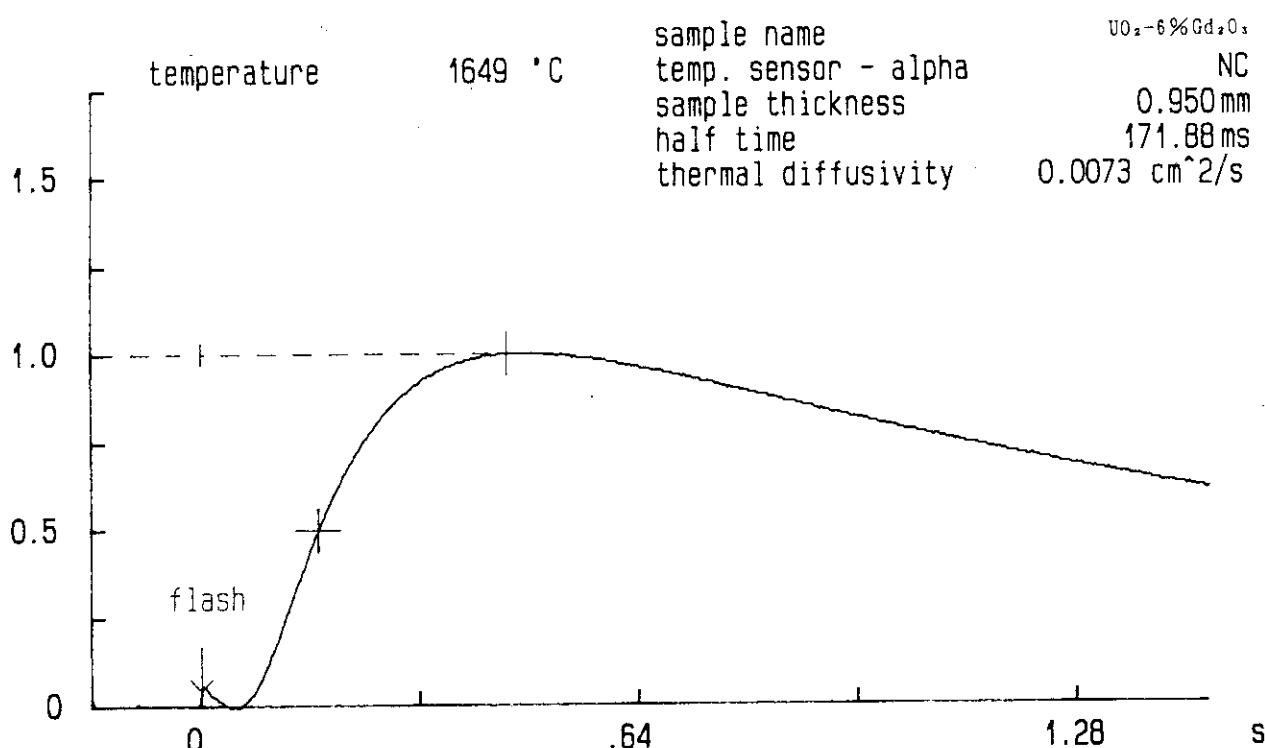


Fig.A1.35 Rear-surface Temperature History of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

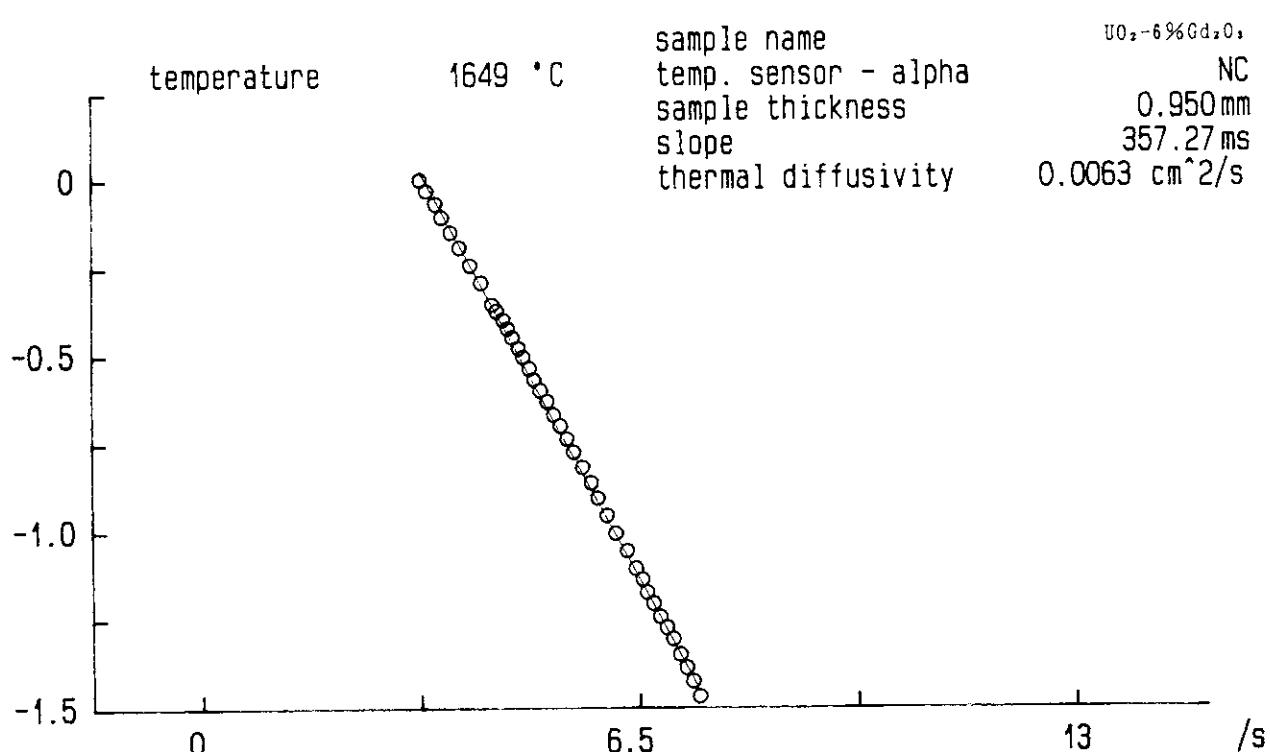


Fig.A1.36 Calculated Logarithmic Plot of UO_2 -6% Gd_2O_3 (Sample Shape No.4) at 1700°C.

Measurement of Thermal Diffusivity

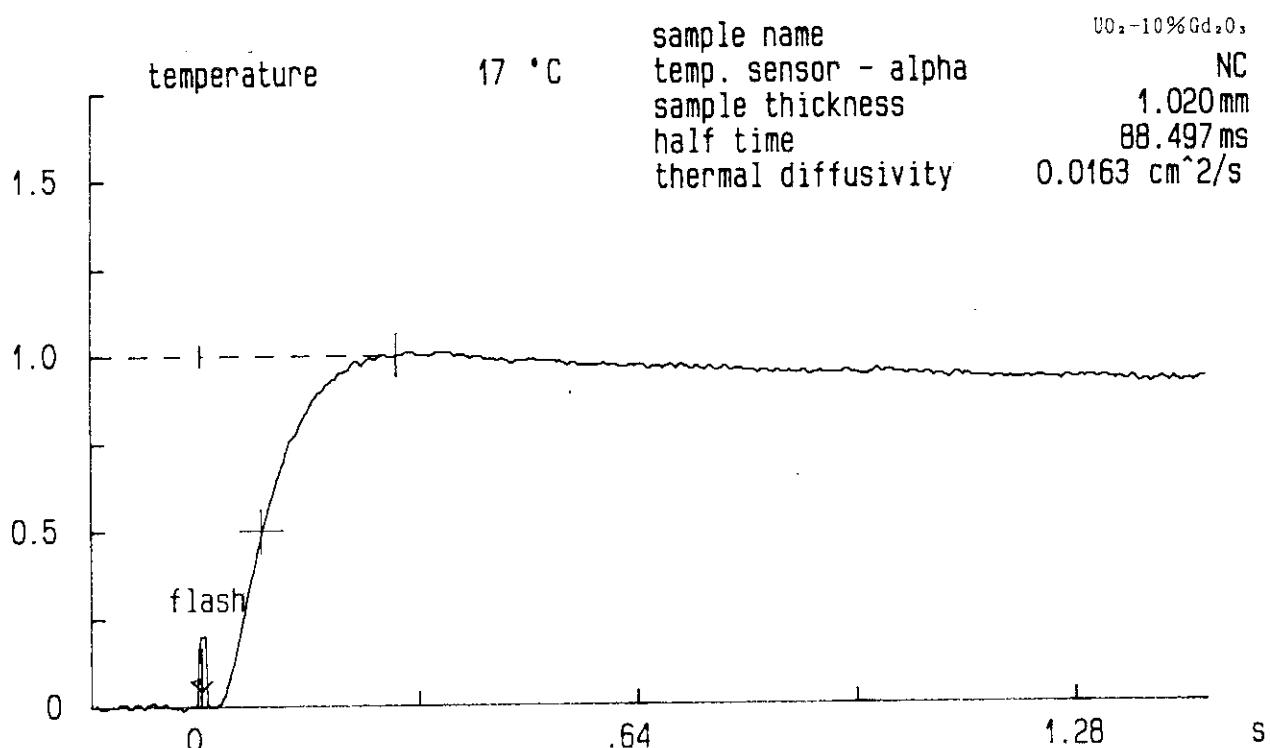


Fig.A1.37 Rear-surface Temperature History of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.2.2) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

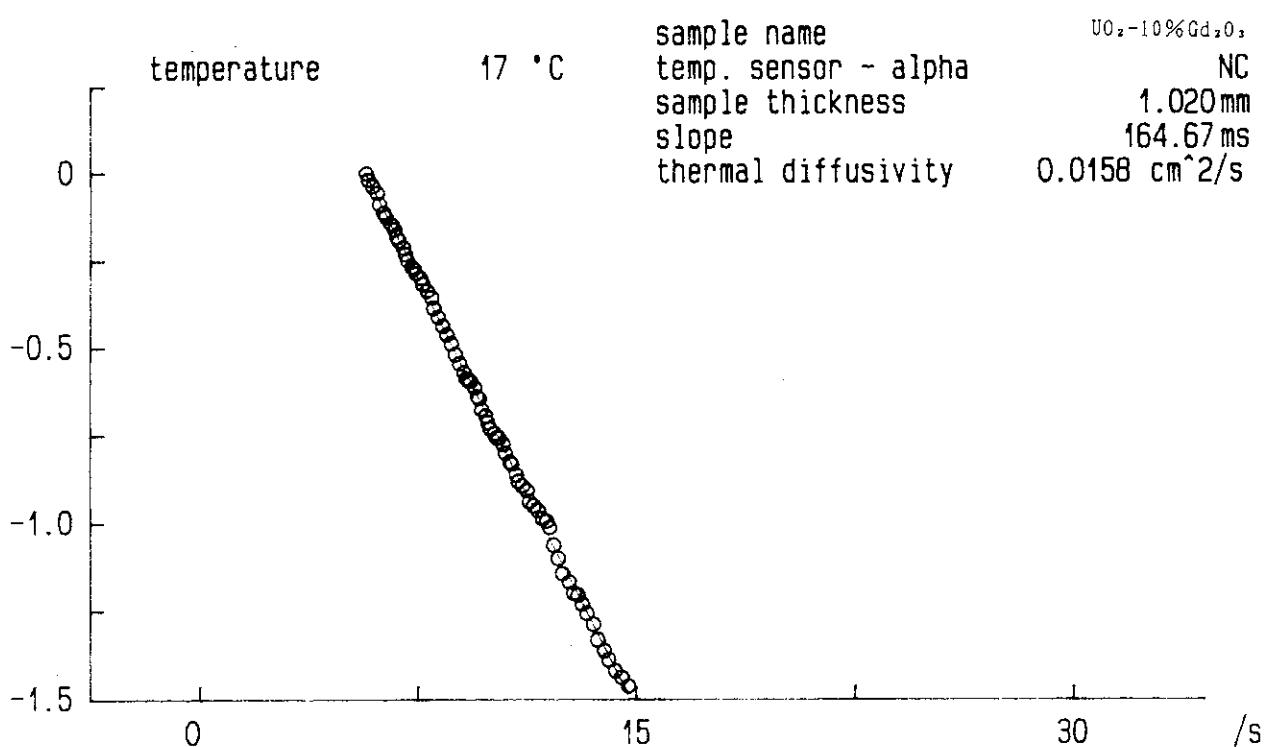


Fig.A1.38 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.2.2) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

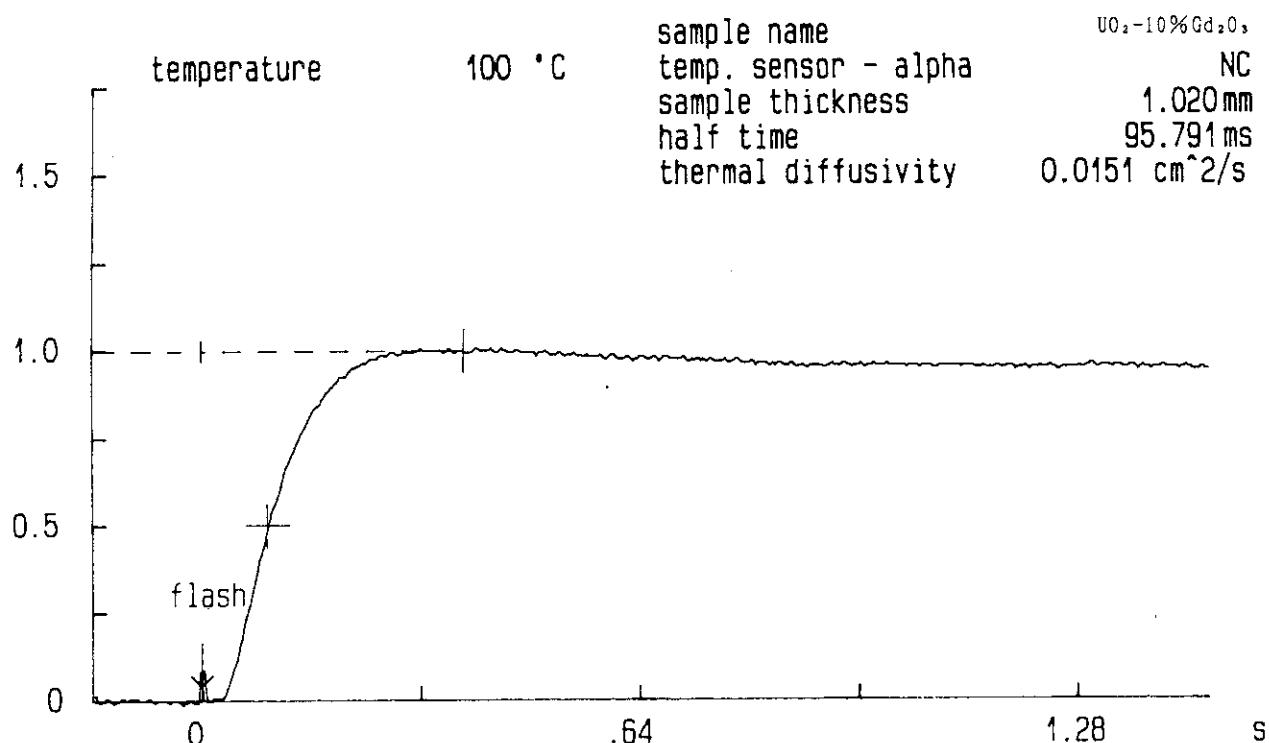


Fig.A1.39 Rear-surface Temperature History of UO₂-10%Gd₂O₃ (Sample Shape No.2.2) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

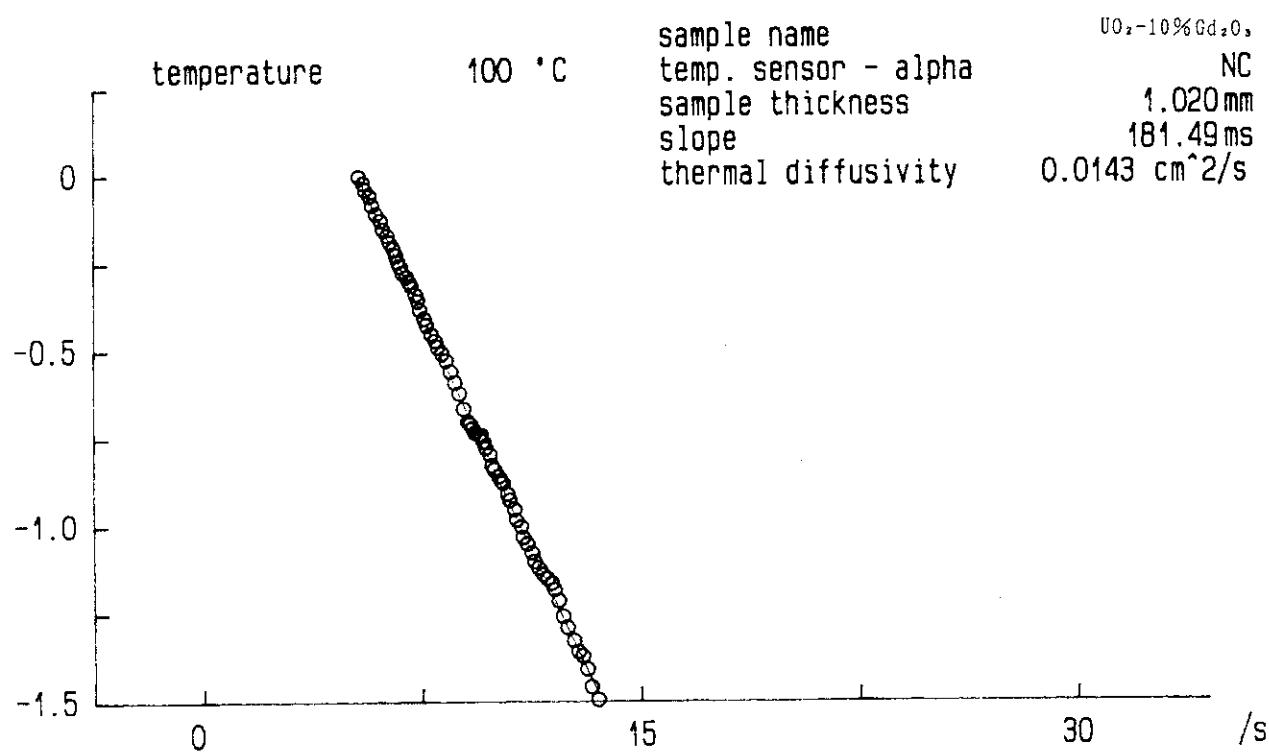


Fig.A1.40 Calculated Logarithmic Plot of UO₂-10%Gd₂O₃ (Sample Shape No.2.2) at 100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

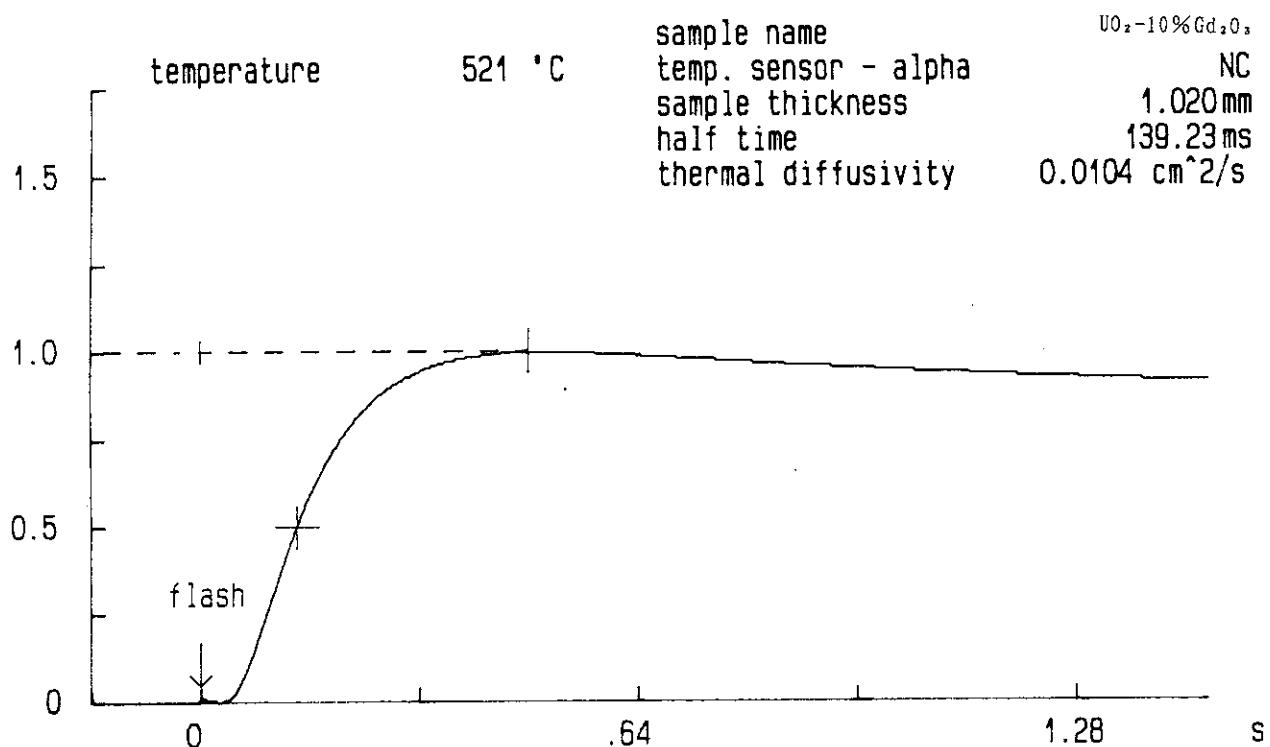


Fig.A1.41 Rear-surface Temperature History of UO_2 -10% Gd_2O_3 (Sample Shape No.2.2) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

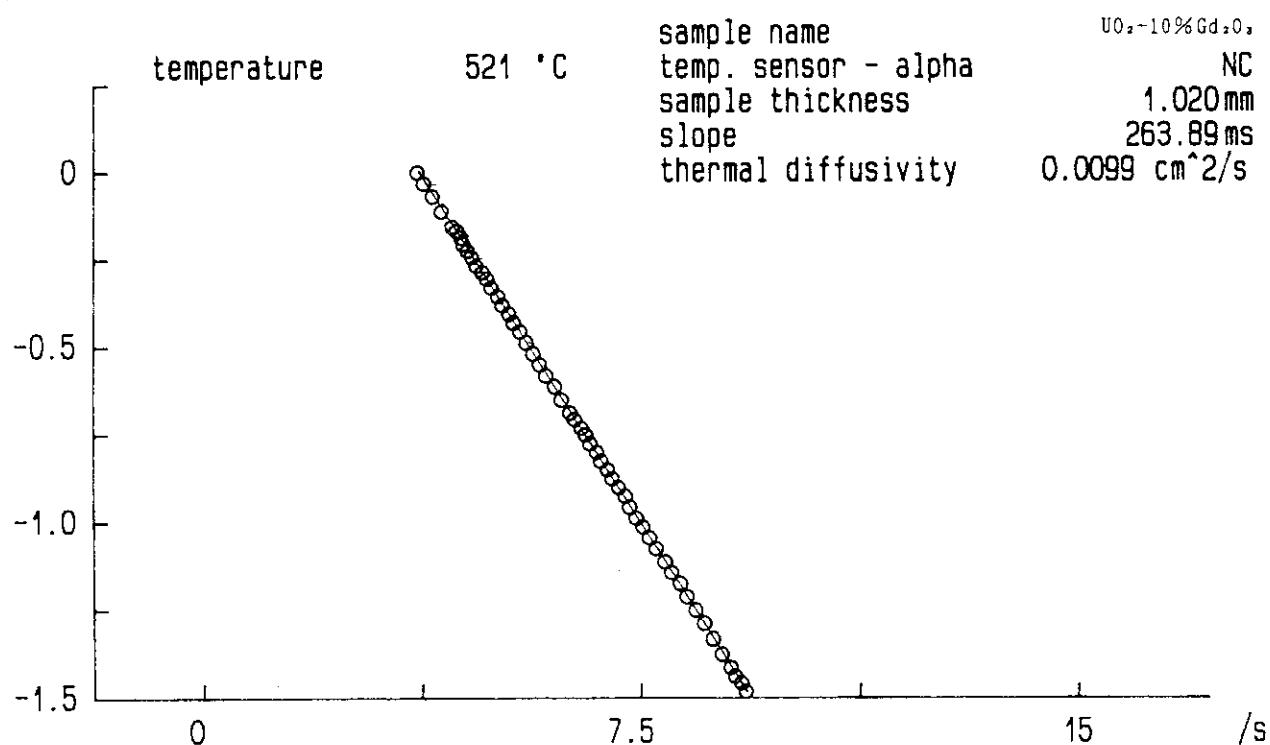


Fig.A1.42 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.2.2) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

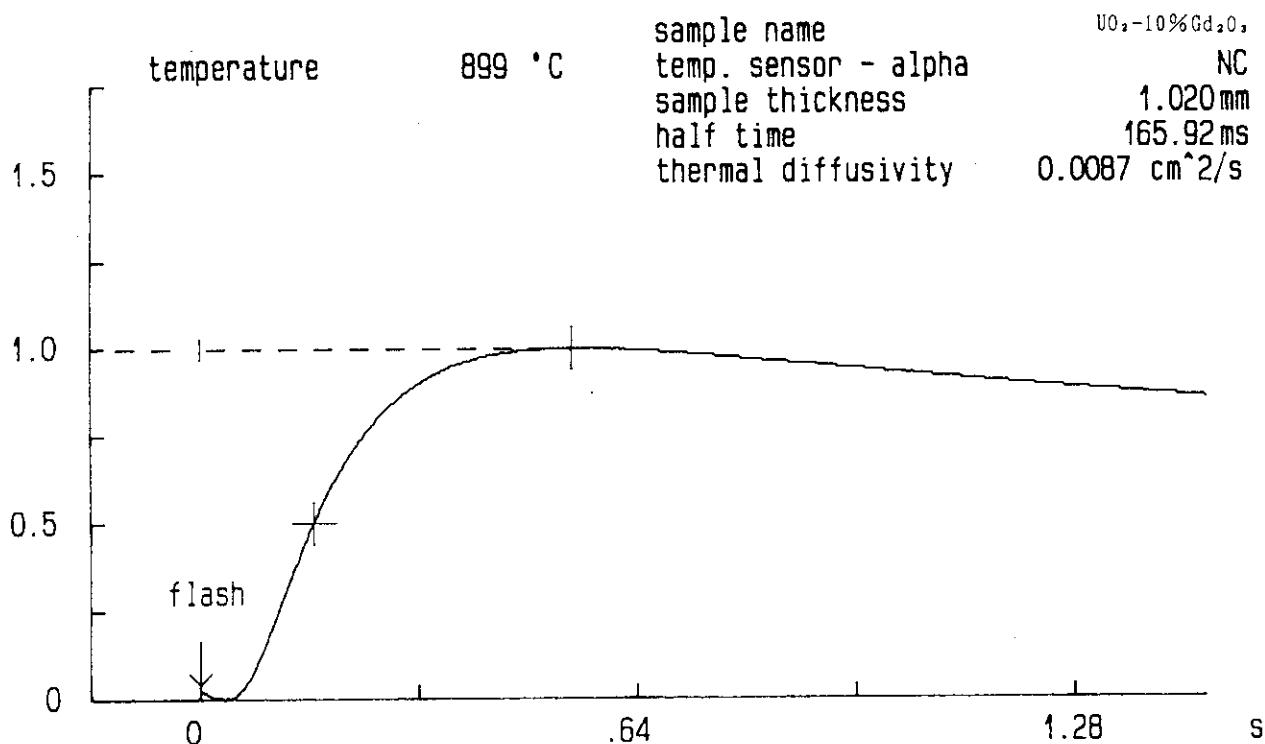


Fig.A1.43 Rear-surface Temperature History of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.2.2) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

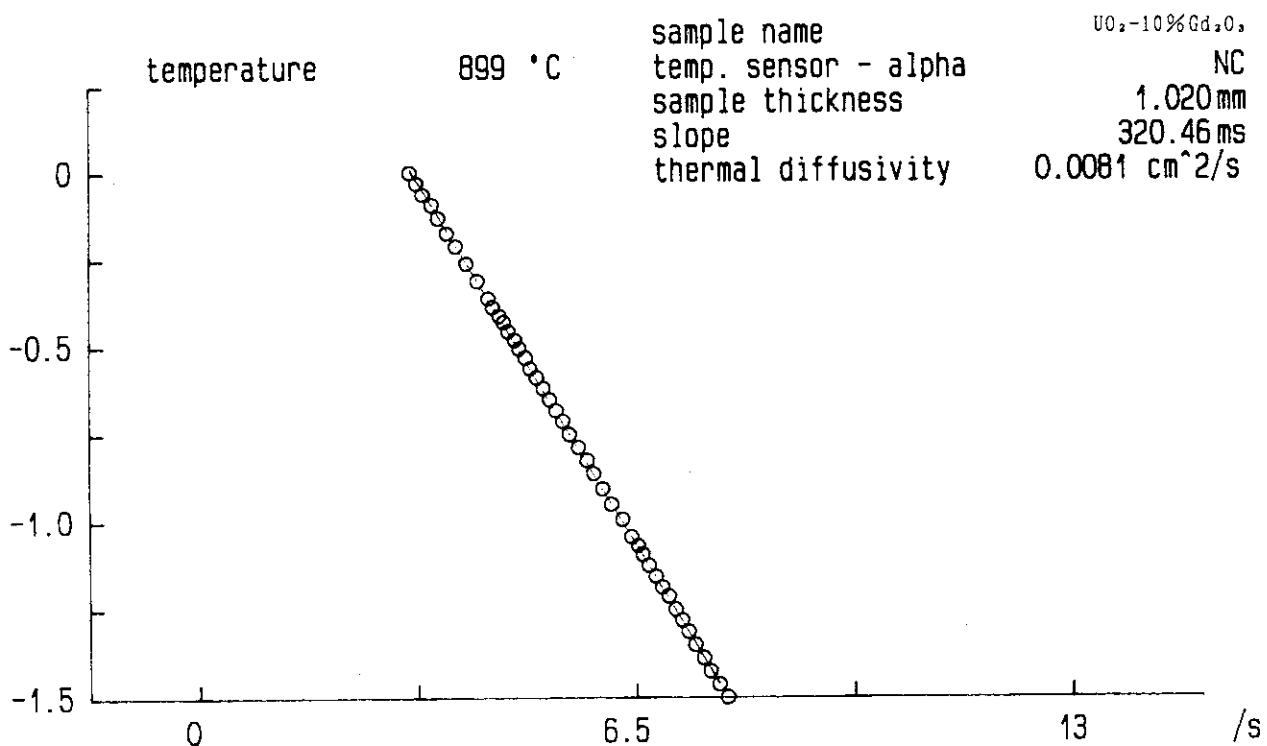


Fig.A1.44 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.2.2) at 900°C

Measurement of Thermal Diffusivity

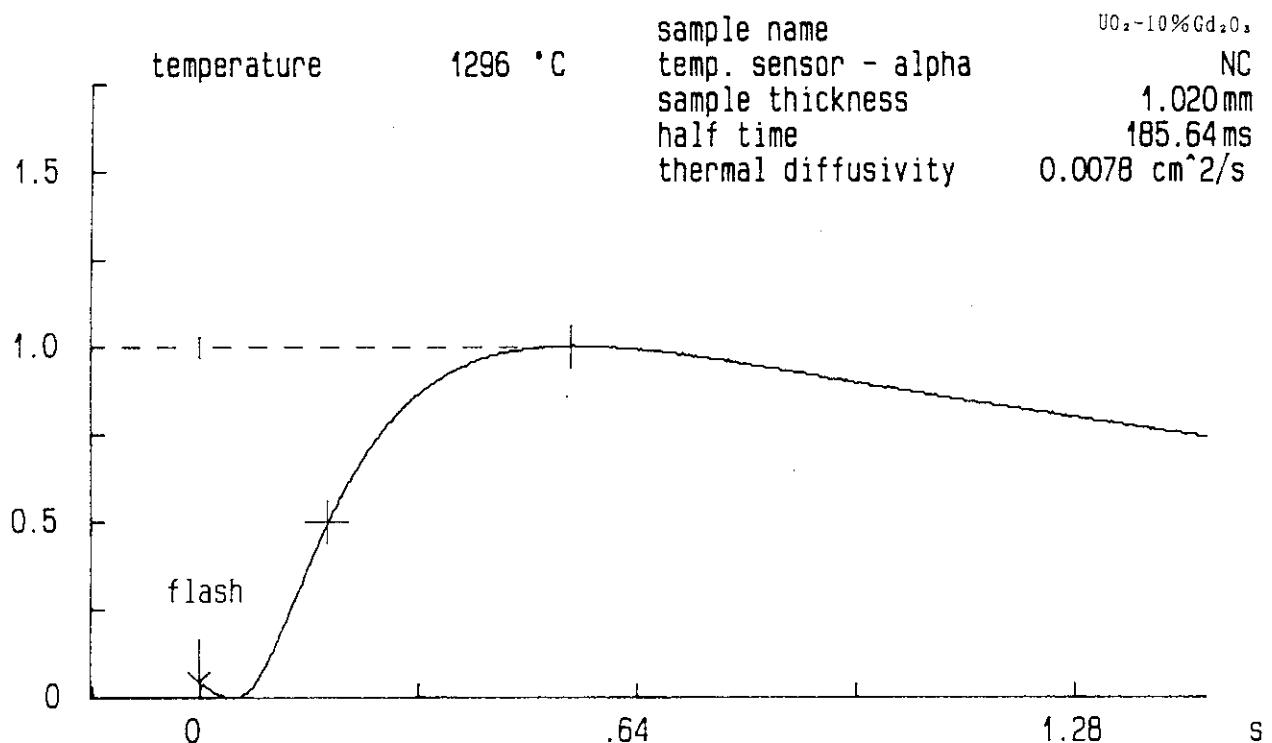


Fig.A1.45 Rear-surface Temperature History of UO_2 -10% Gd_2O_3 (Sample Shape No.2.2) at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

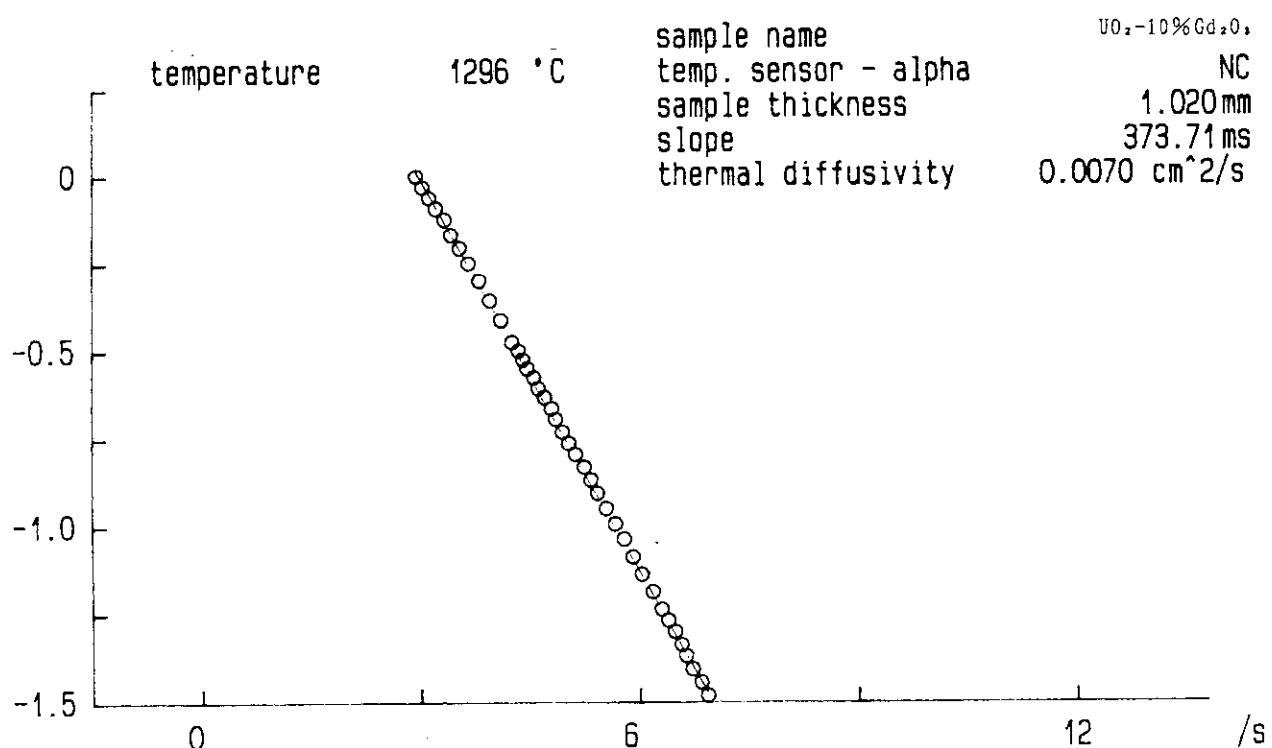


Fig.A1.46 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No.2.2) at 1300°C

Measurement of Thermal Diffusivity

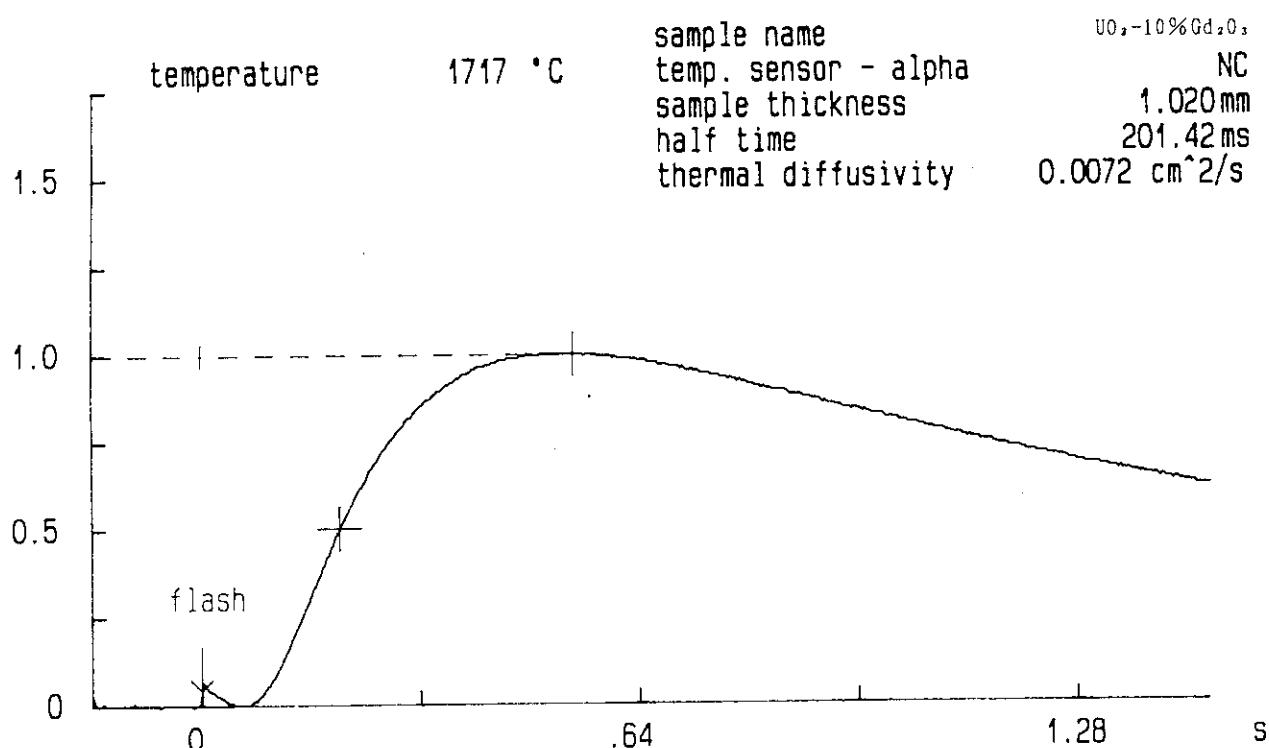


Fig.A1.47 Rear-surface Temperature History of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No. 2.2) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

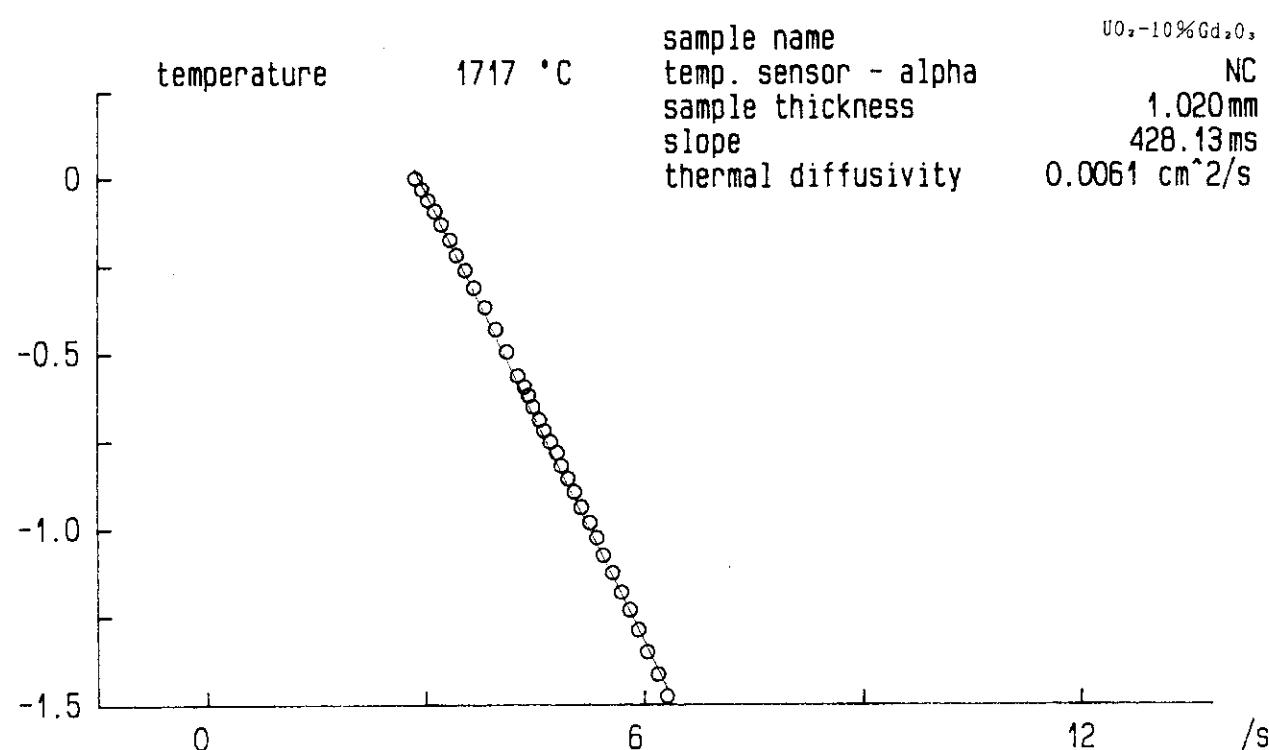


Fig.A1.48 Calculated Logarithmic Plot of $\text{UO}_2\text{-}10\%\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Sample Shape No. 2.2) at 1700°C

付録 2

ジルコニア試料のハーフタイム法温度履歴曲線と対数法プロット曲線の代表例

Figure Contents

Fig. A2.1 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at Room Temperature	132
Fig. A2.2 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at Room Temperature	132
Fig. A2.3 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 500°C	133
Fig. A2.4 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 500°C	133
Fig. A2.5 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1100°C	134
Fig. A2.6 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1100°C	134
Fig. A2.7 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1500°C	135
Fig. A2.8 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1500°C	135
Fig. A2.9 Rear-surface Temperature History of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at Room Temperature	136
Fig. A2.10 Calculated Logarithmic Plot of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at Room Temperature	136
Fig. A2.11 Rear-surface Temperature History of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 500°C	137
Fig. A2.12 Calculated Logarithmic Plot of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 500°C	137
Fig. A2.13 Rear-surface Temperature History of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1100°C	138
Fig. A2.14 Calculated Logarithmic Plot of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1100°C	138
Fig. A2.15 Rear-surface Temperature History of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1500°C	139
Fig. A2.16 Calculated Logarithmic Plot of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1500°C	139
Fig. A2.17 Rear-surface Temperature History of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at Room Temperature	140
Fig. A2.18 Calculated Logarithmic Plot of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at Room Temperature	140
Fig. A2.19 Rear-surface Temperature History of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 500°C	141
Fig. A2.20 Calculated Logarithmic Plot of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 500°C	141

Fig. A2.21 Rear-surface Temperature History of Sample C($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1100°C	142
Fig. A2.22 Calculated Logarithmic Plot of Sample C($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1100°C	142
Fig. A2.23 Rear-surface Temperature History of Sample C($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1700°C	143
Fig. A2.24 Calculated Logarithmic Plot of Sample C($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1700°C	143
Fig. A2.25 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at Room Temperature	144
Fig. A2.26 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at Room Temperature	144
Fig. A2.27 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 500°C	145
Fig. A2.28 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 500°C	145
Fig. A2.29 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1100°C	146
Fig. A2.30 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1100°C	146
Fig. A2.31 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1700°C	147
Fig. A2.32 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample TC ($ZrO_2-13.7\%Y_2O_3$) at 1700°C	147

Measurement of Thermal Diffusivity

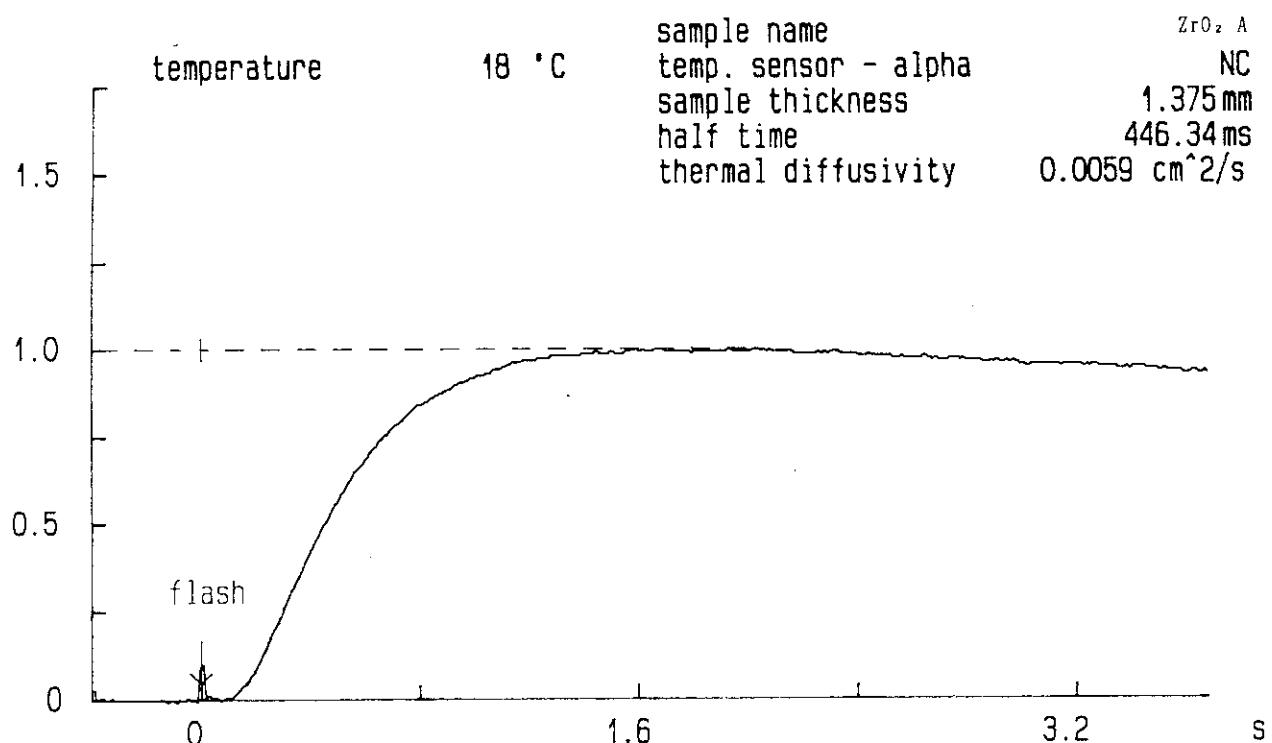


Fig.A2.1 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO₂-3%CaO)
at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

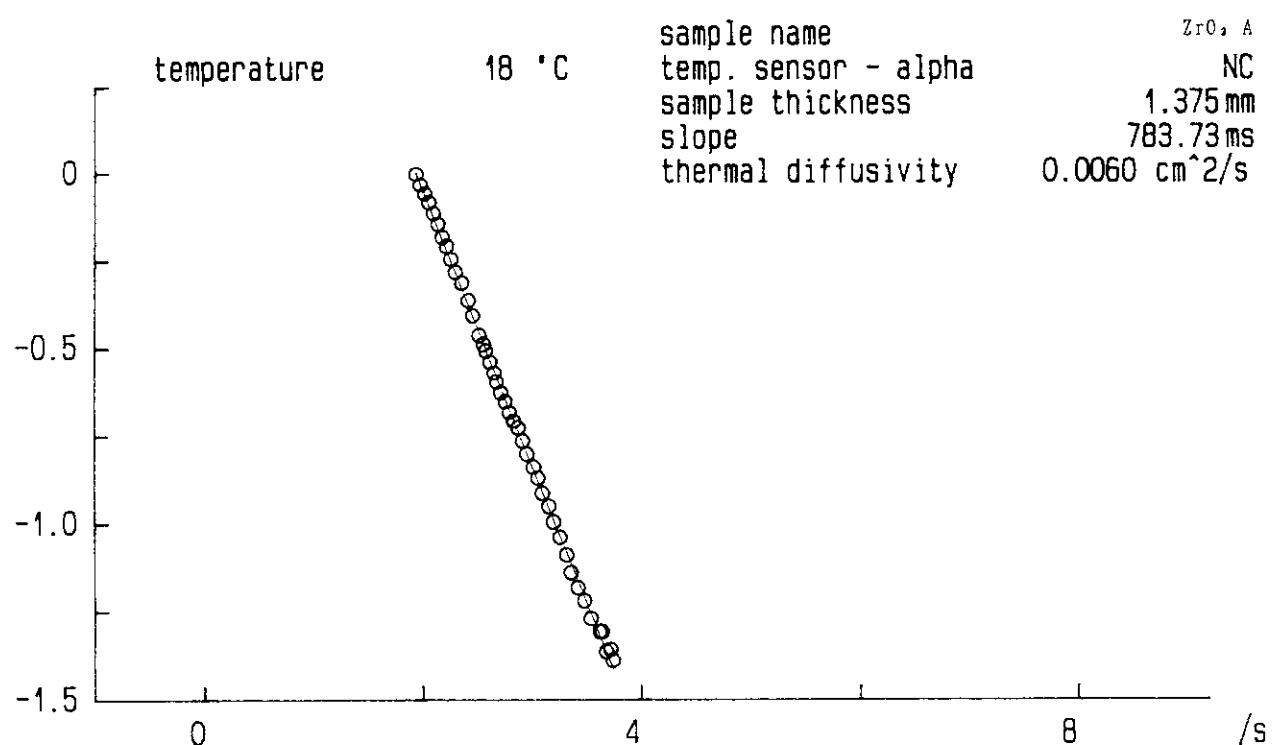


Fig.A2.2 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO₂-3%CaO)
at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

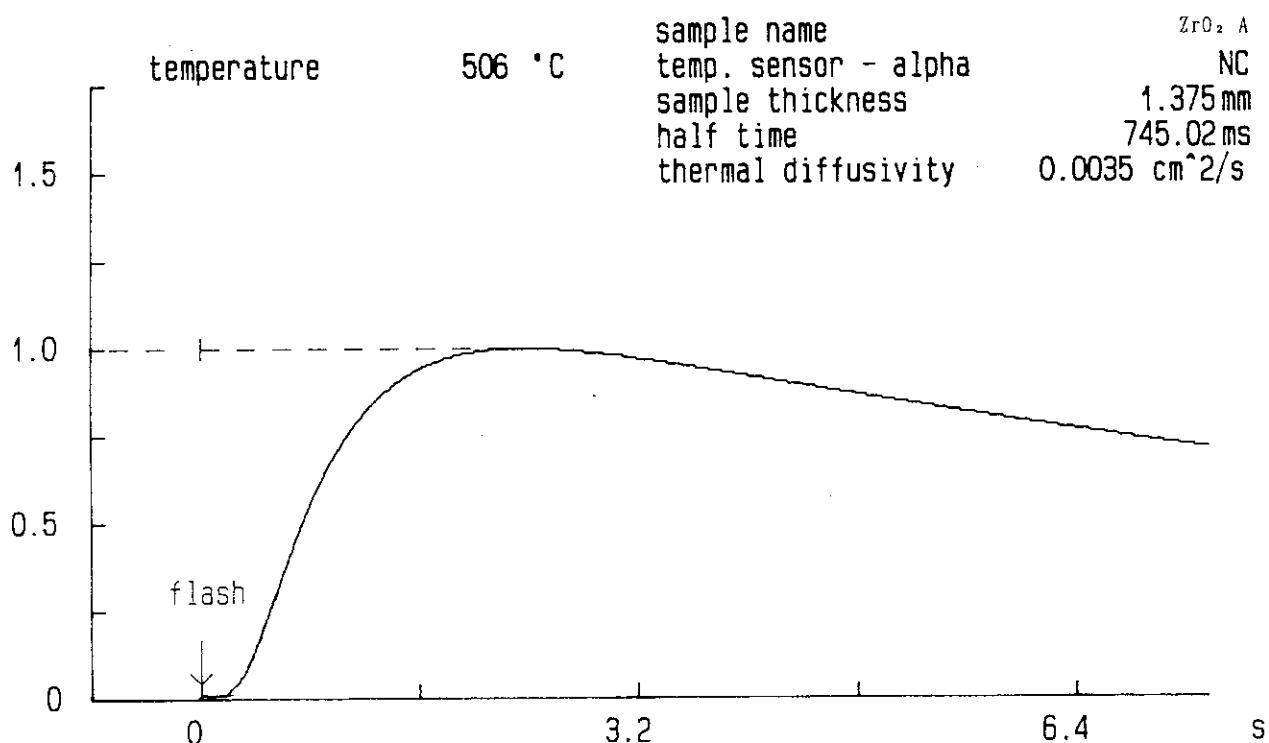


Fig.A2.3 Rear-surface Temperature History of Sample A (ZrO_2 -3%CaO) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

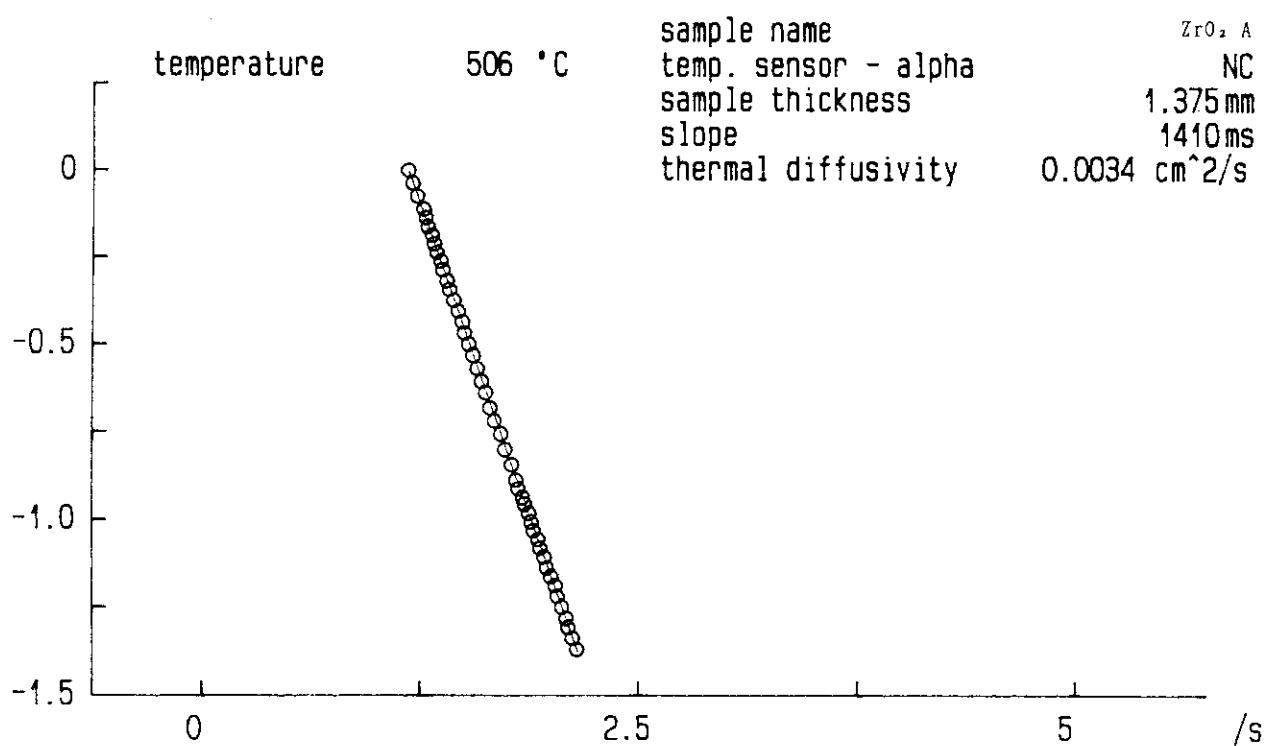


Fig.A2.4 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

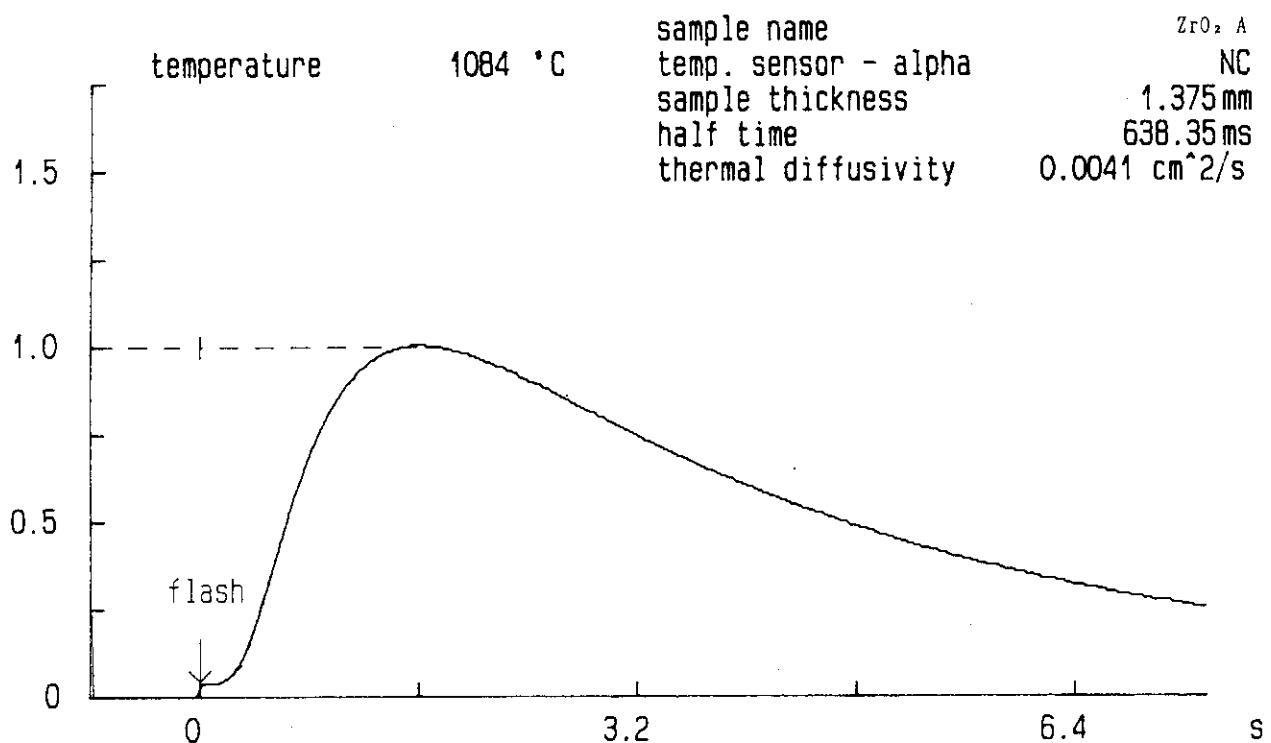


Fig.A2.5 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

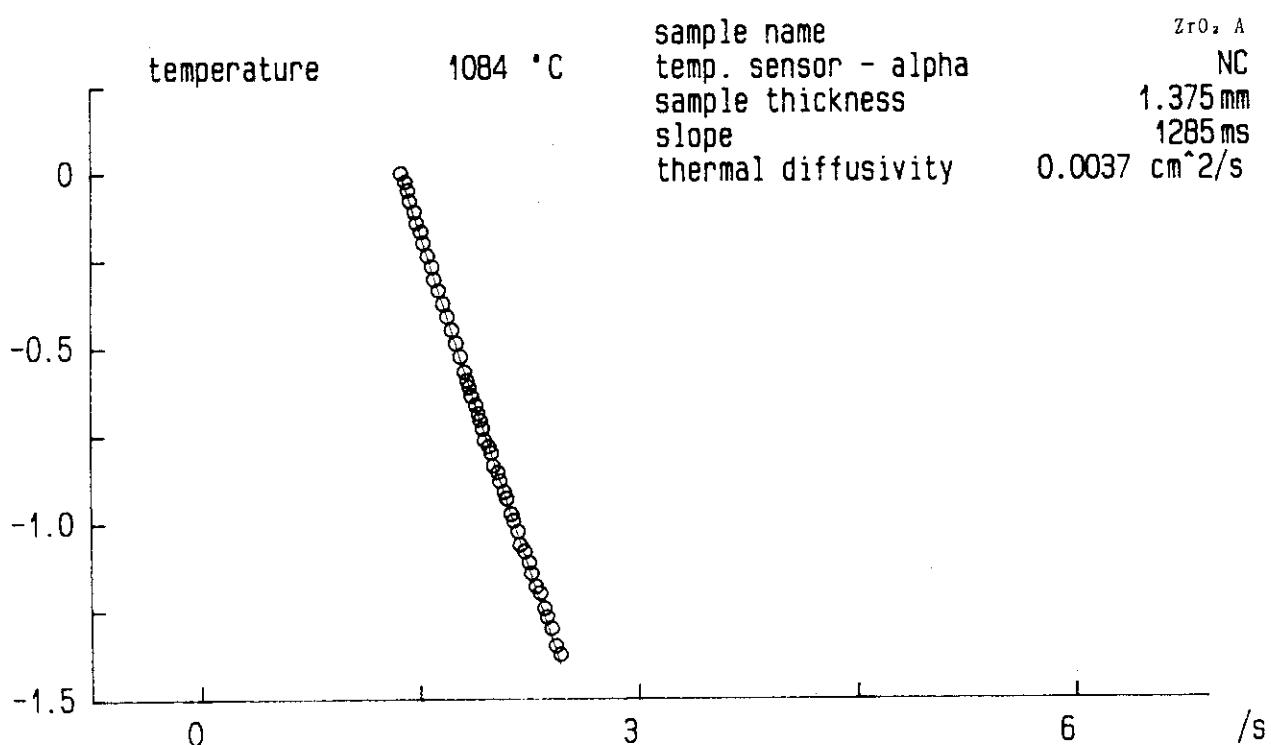


Fig.A2.6 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

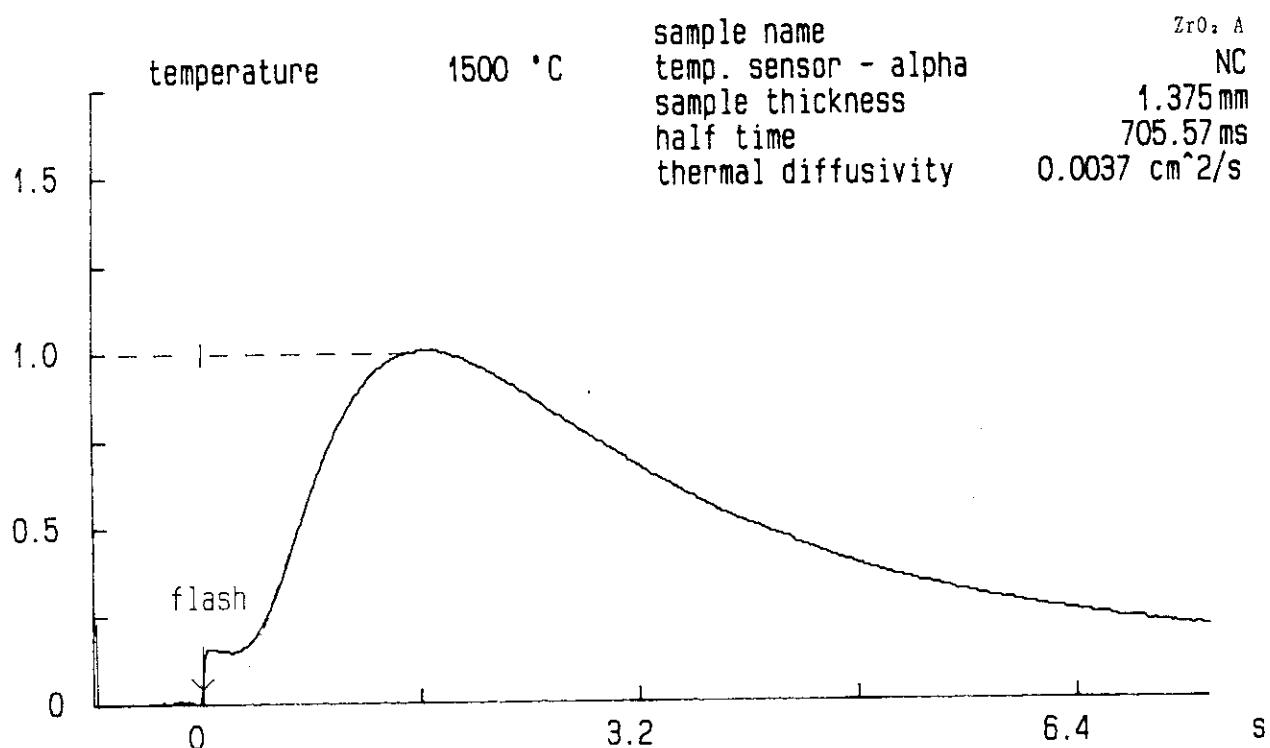


Fig.A2.7 Rear-surface Temperature History of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

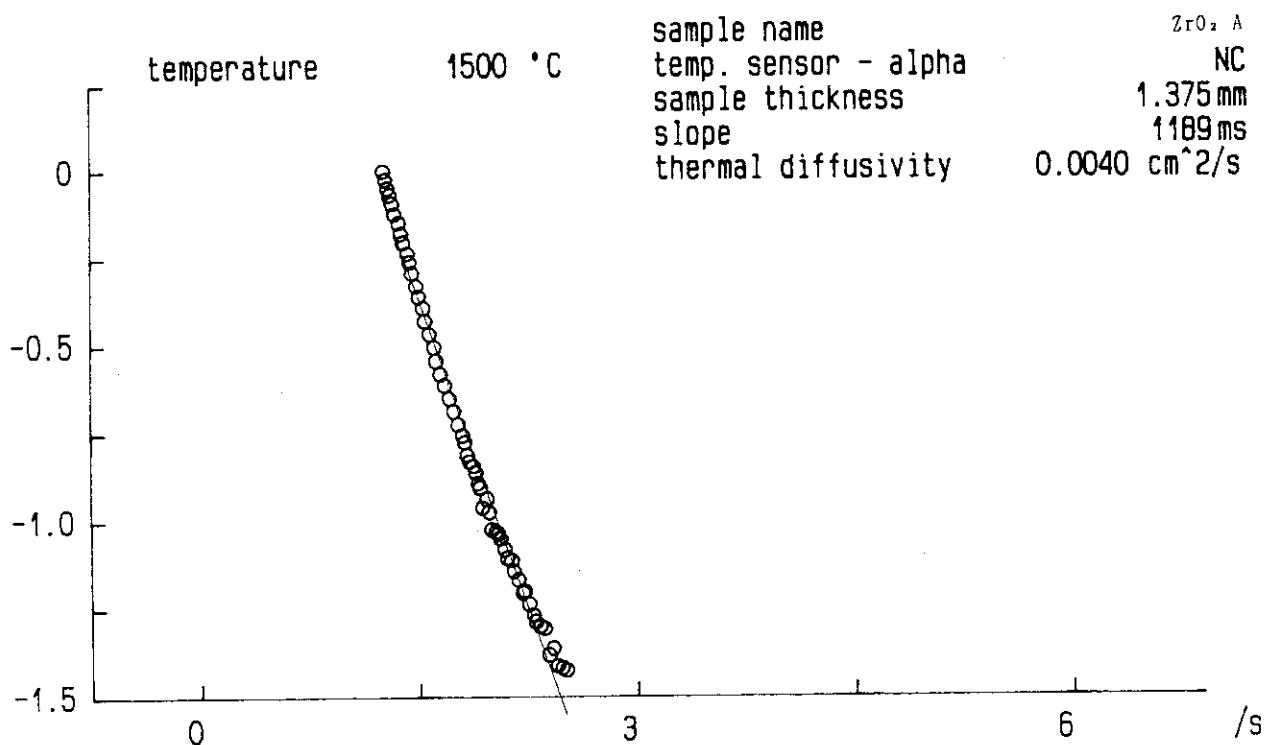
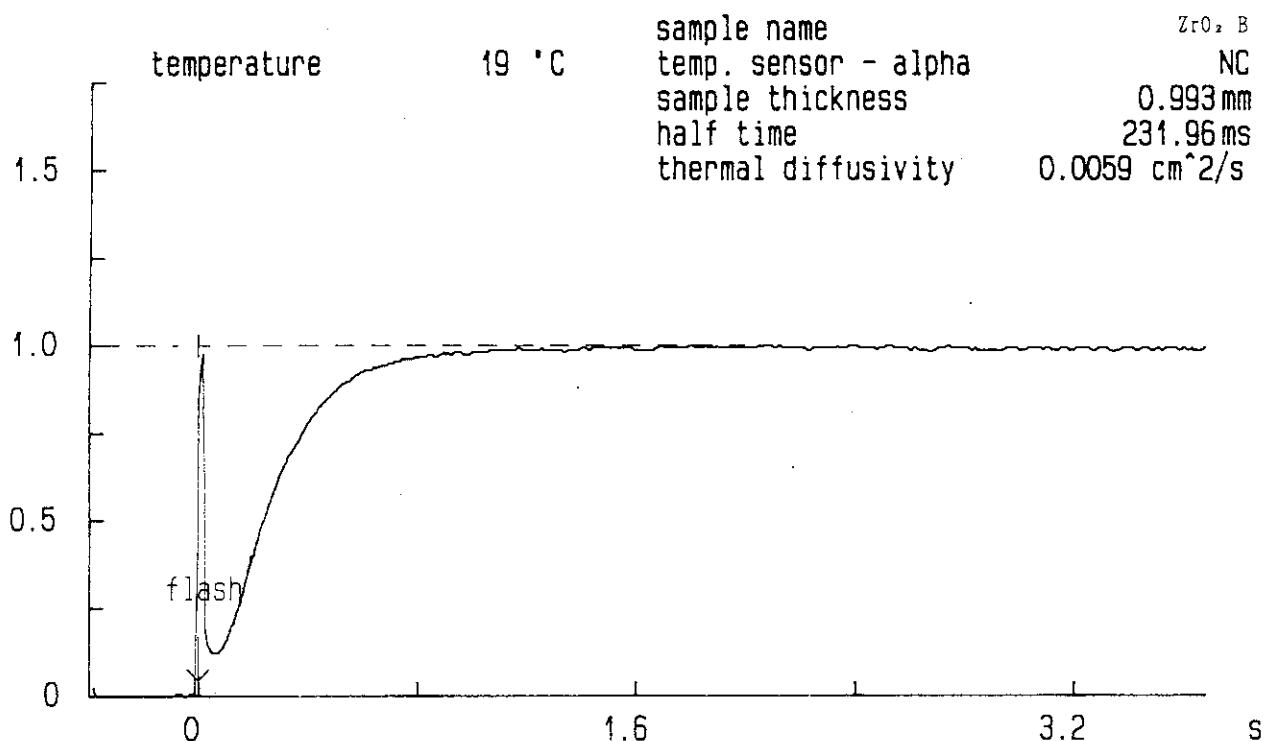
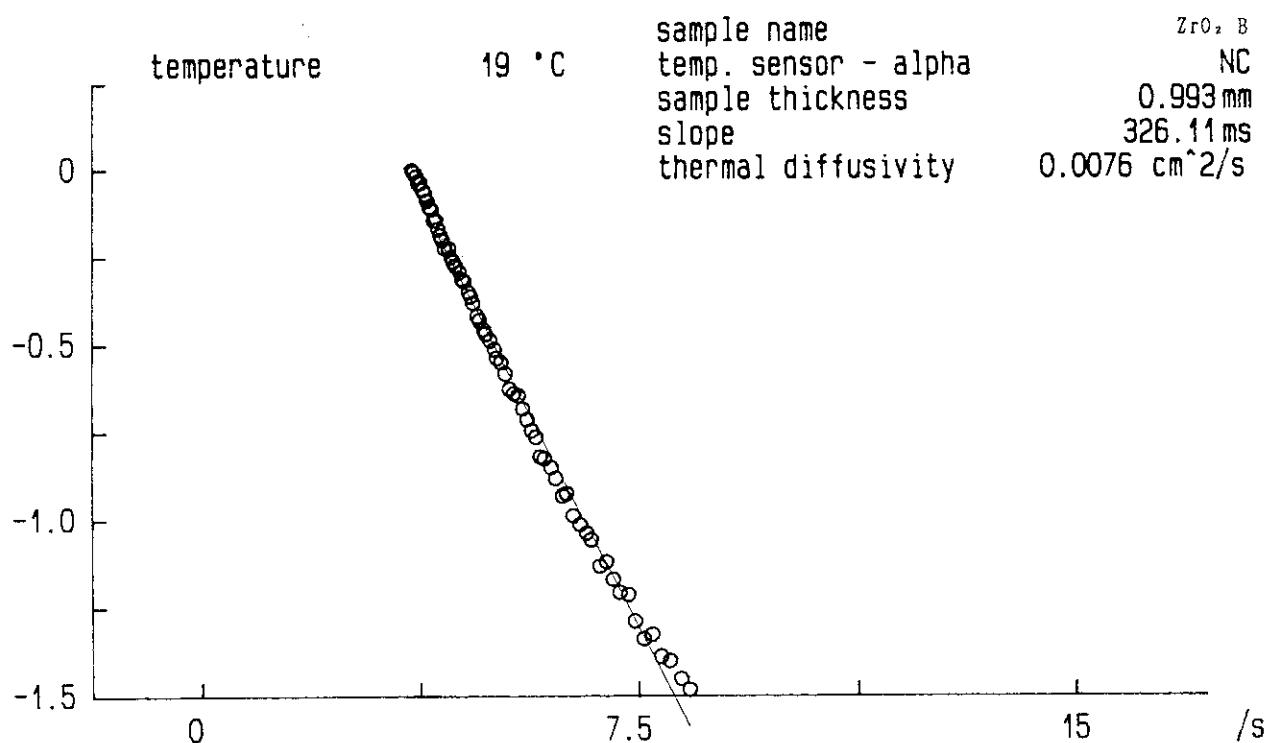


Fig.A2.8 Calculated Logarithmic Plot of Sample A(ZrO_2 -3%CaO) at 1500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

Fig.A2.9 Rear-surface Temperature History of Sample B(ZrO₂-20%Y₂O₃) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

Fig.A2.10 Calculated Logarithmic Plot of Sample B(ZrO₂-20%Y₂O₃) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

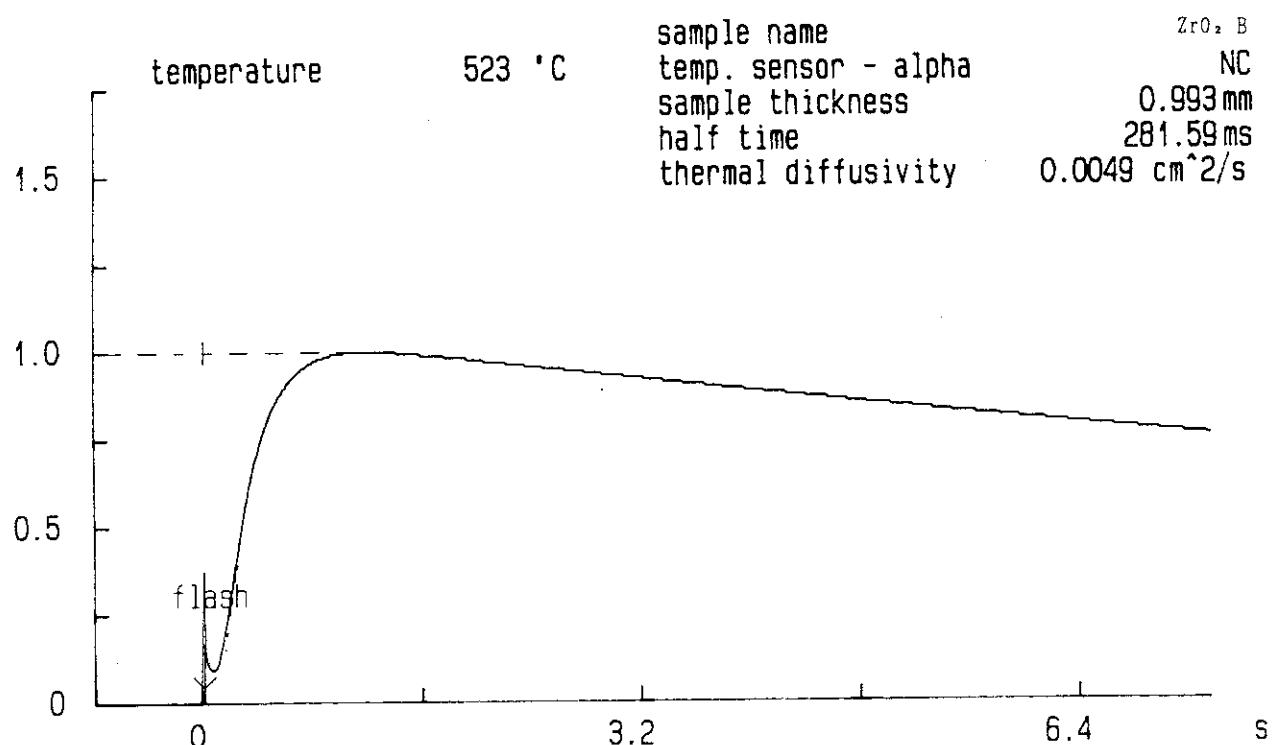


Fig.A2.11 Rear-surface Temperature History of Sample B (ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

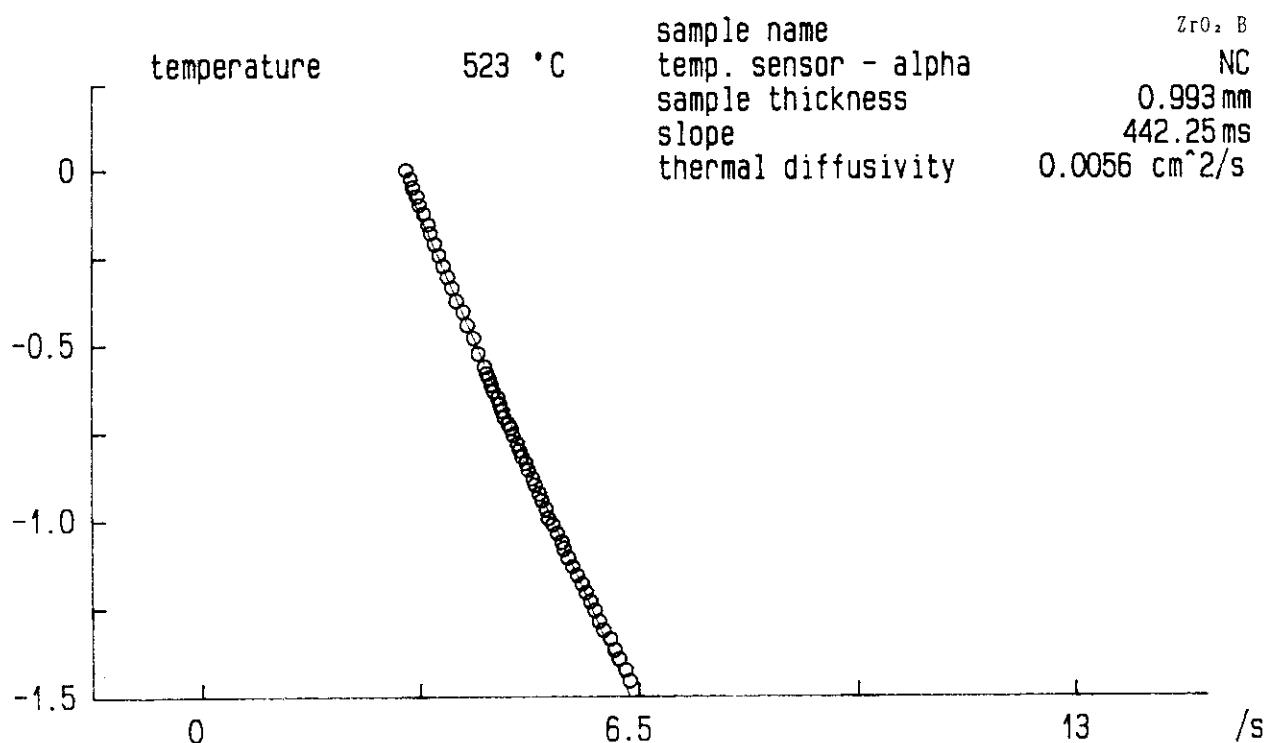


Fig.A2.12 Calculated Logarithmic Plot of Sample B (ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

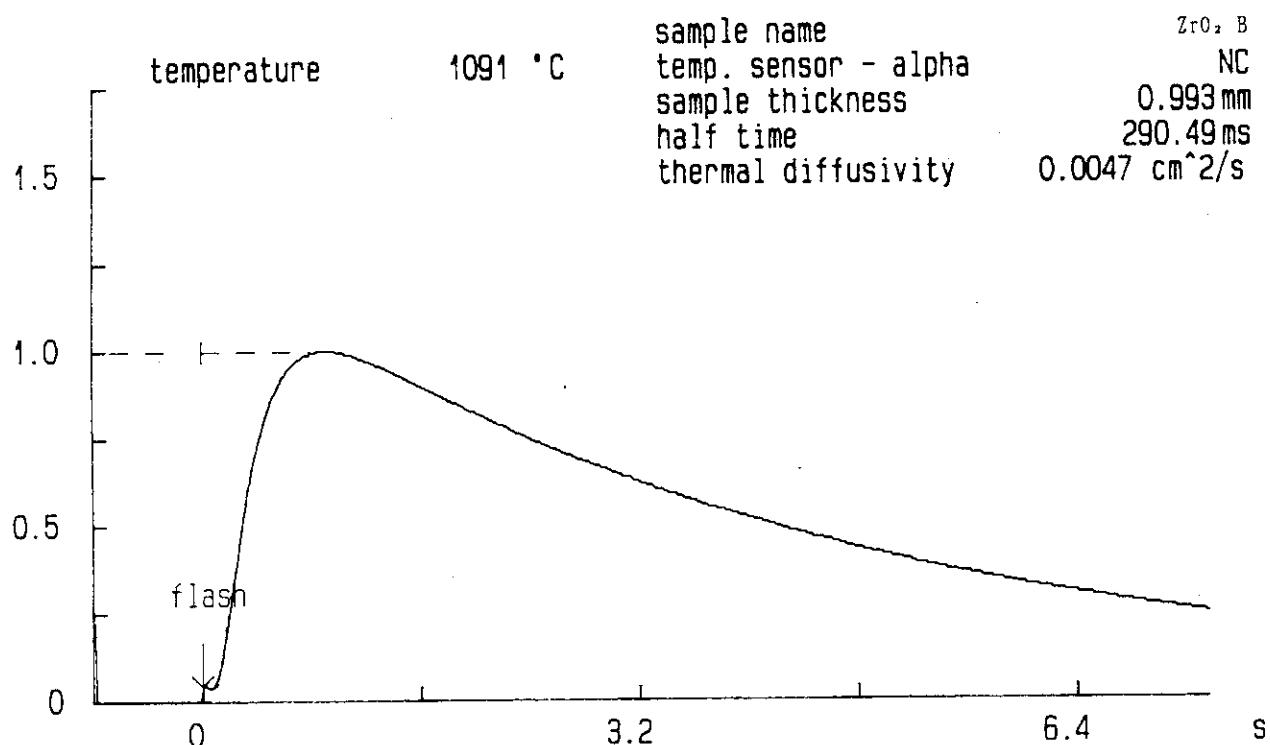


Fig.A2.13 Rear-surface Temperature History of Sample B(ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

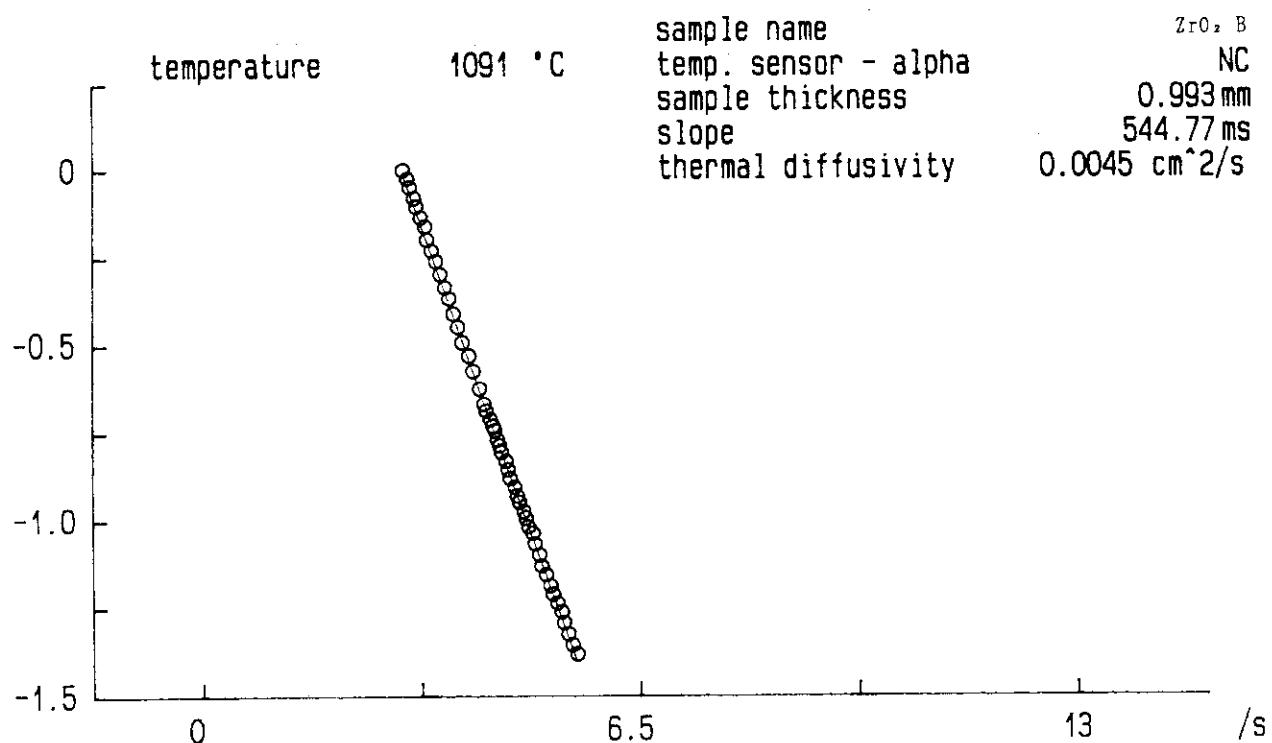


Fig.A2.14 Calculated Logarithmic Plot of Sample B (ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

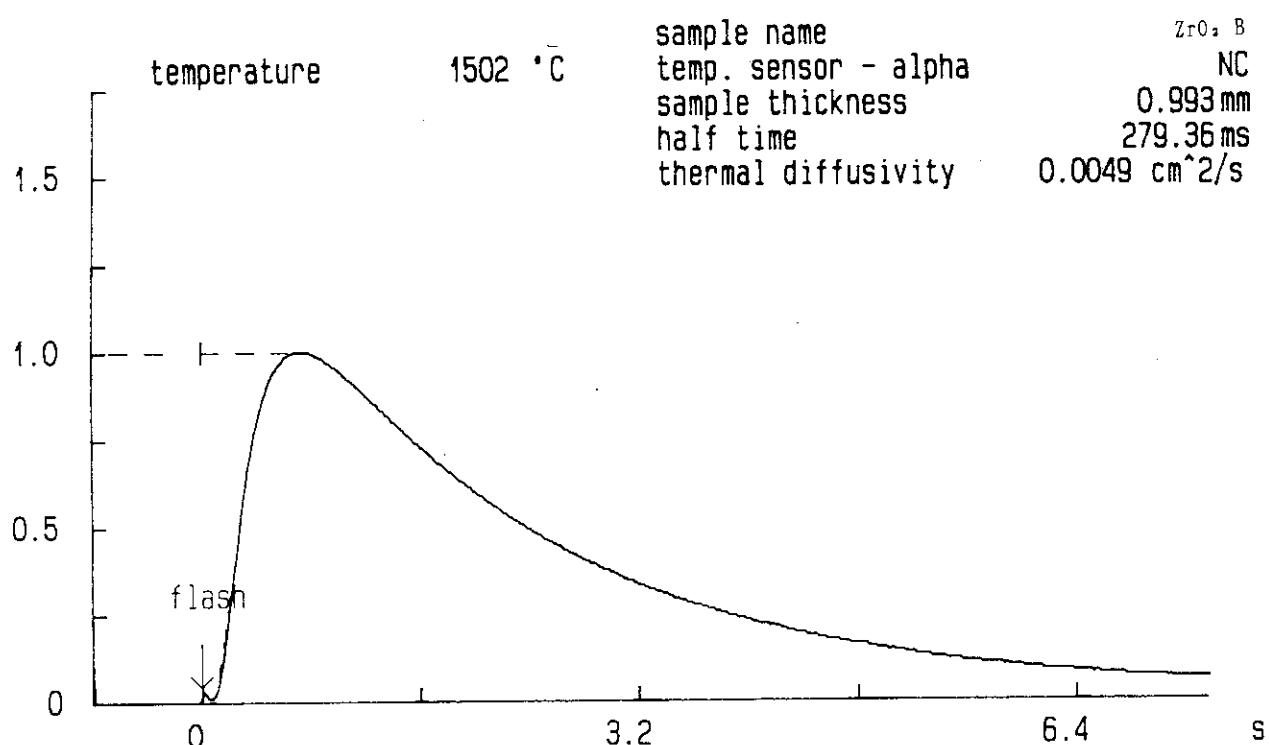


Fig.A2.15 Rear-surface Temperature History of Sample B (ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

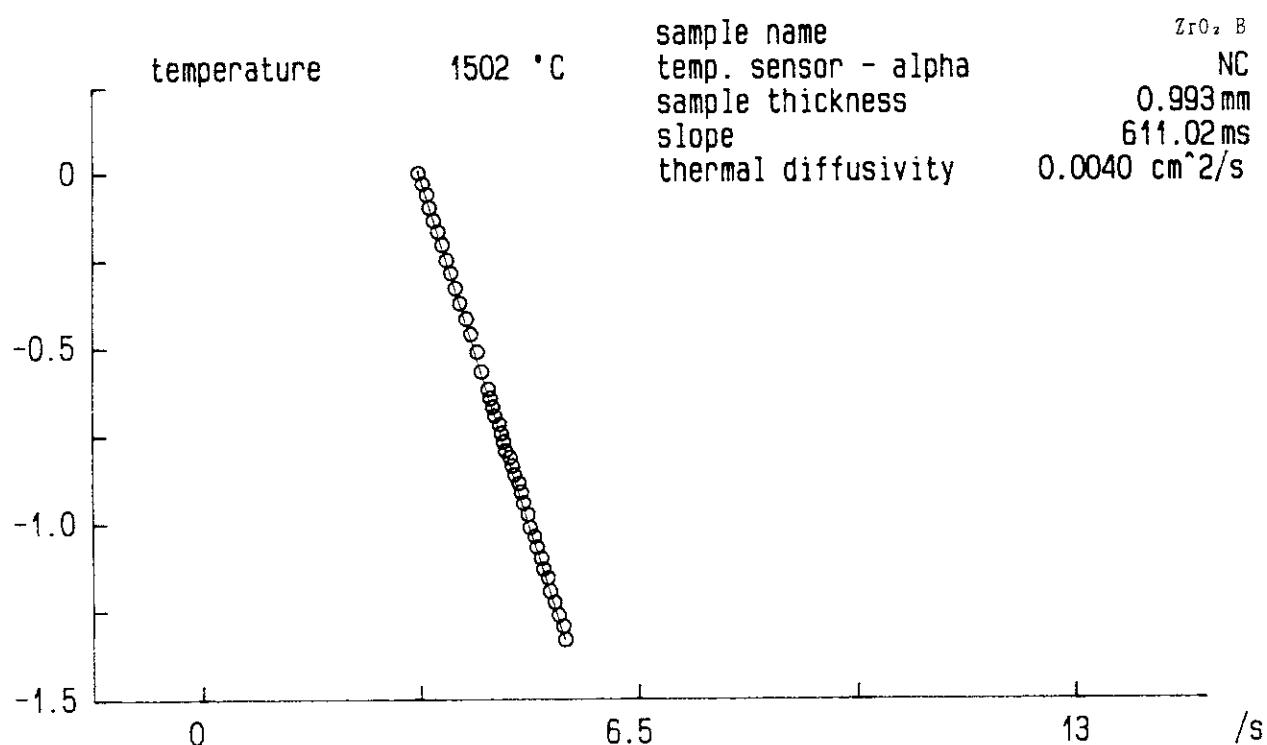


Fig.A2.16 Calculated Logarithmic Plot of Sample B (ZrO_2 -20% Y_2O_3) at 1500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

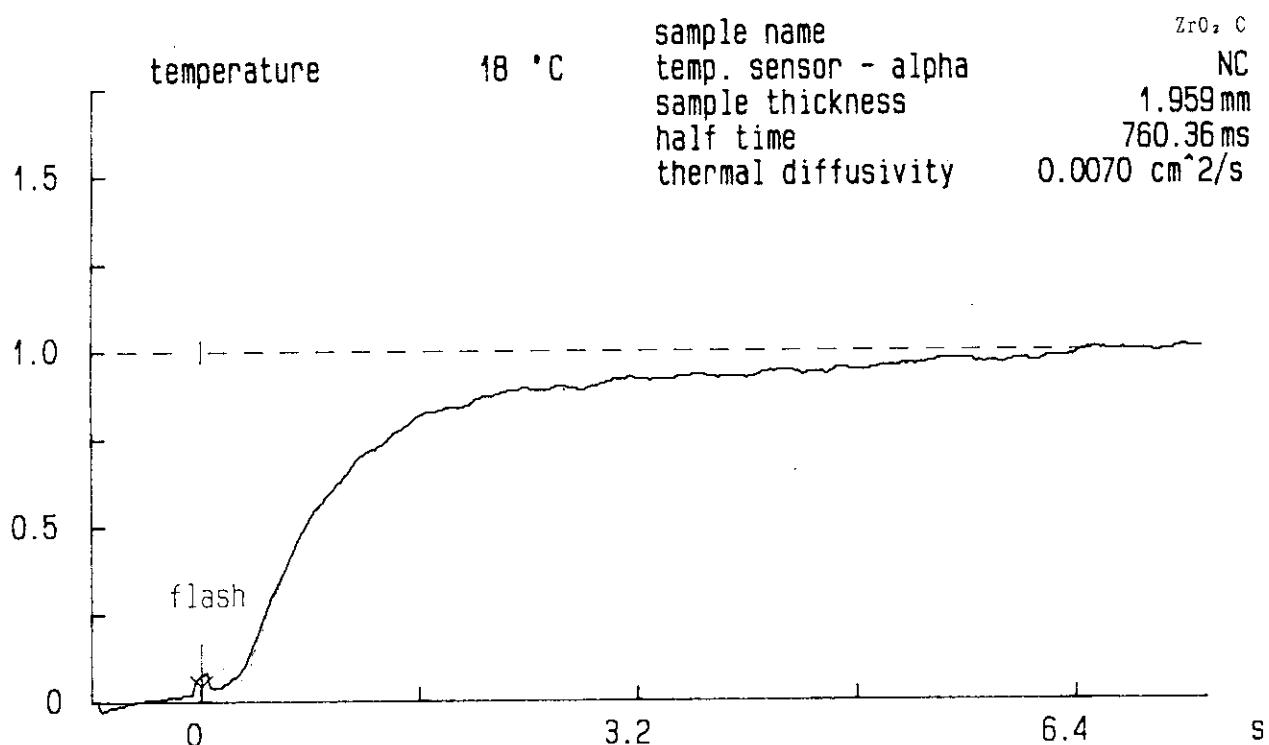


Fig.A2.17 Rear-surface Temperature History of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

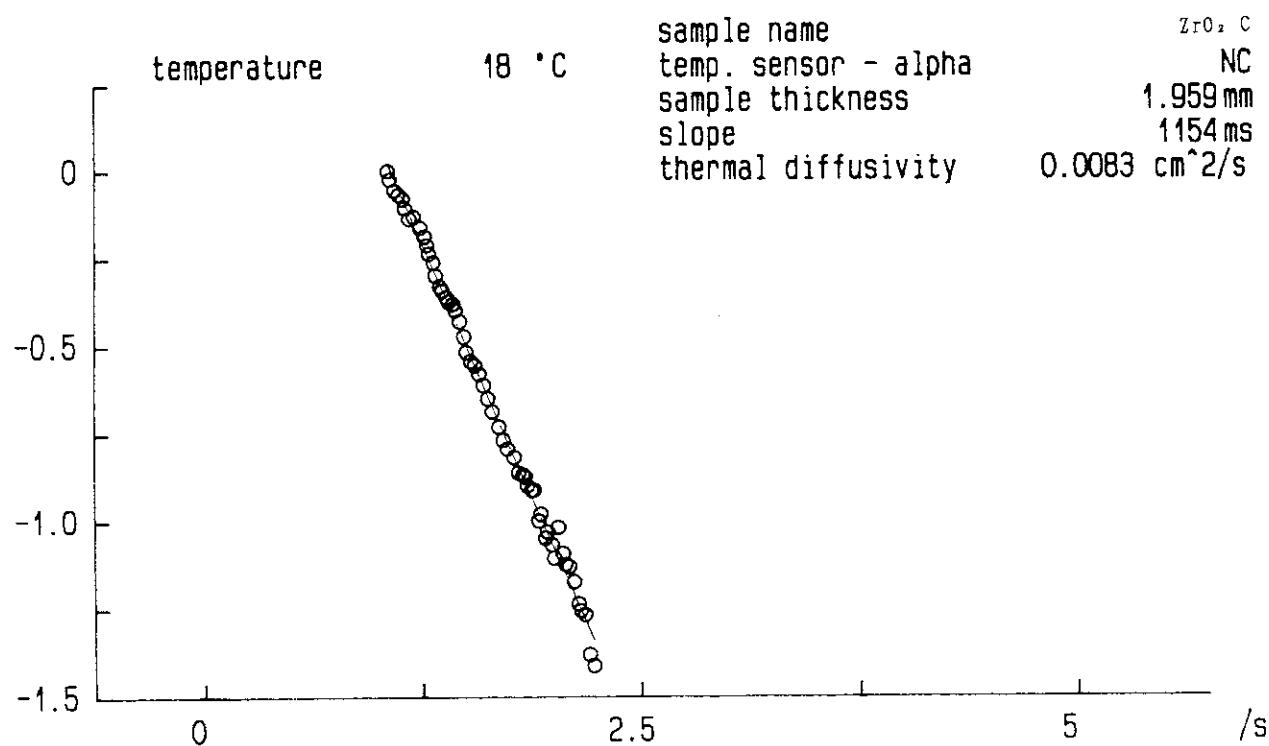


Fig.A2.18 Calculated Logarithmic Plot of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

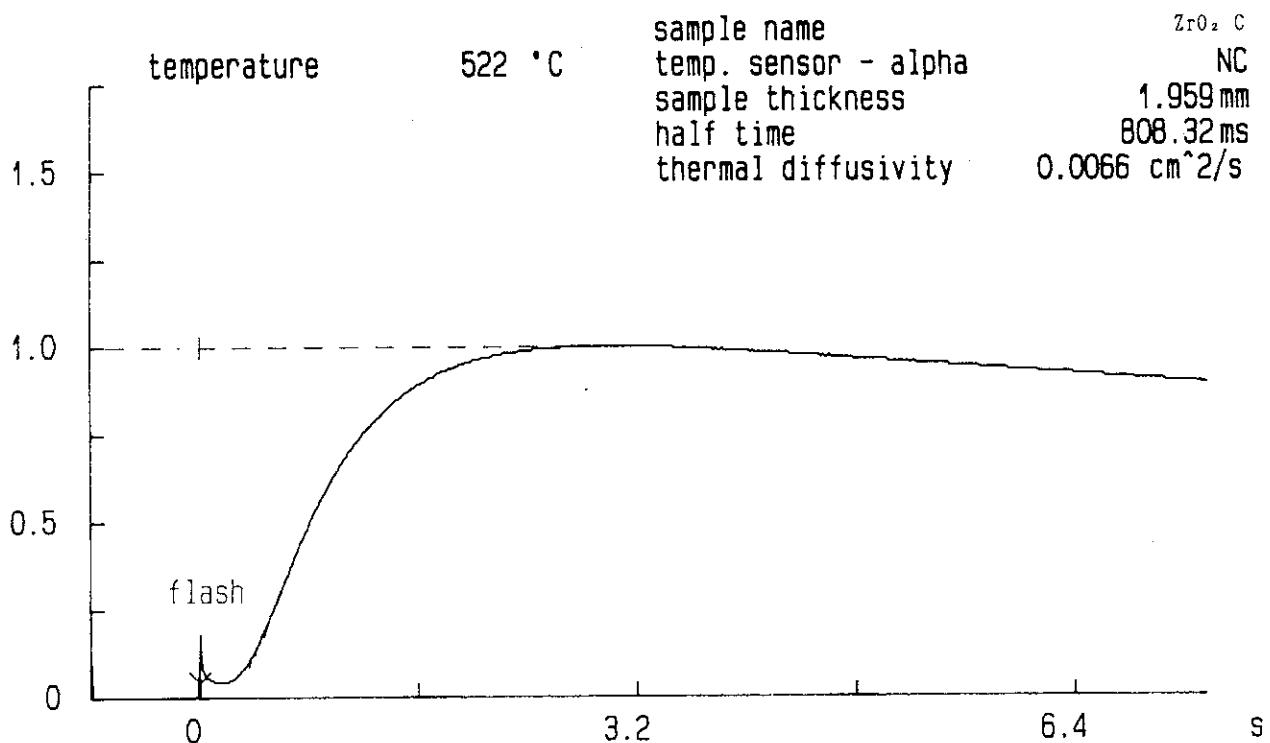


Fig.A2.19 Rear-surface Temperature History of Sample C (ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

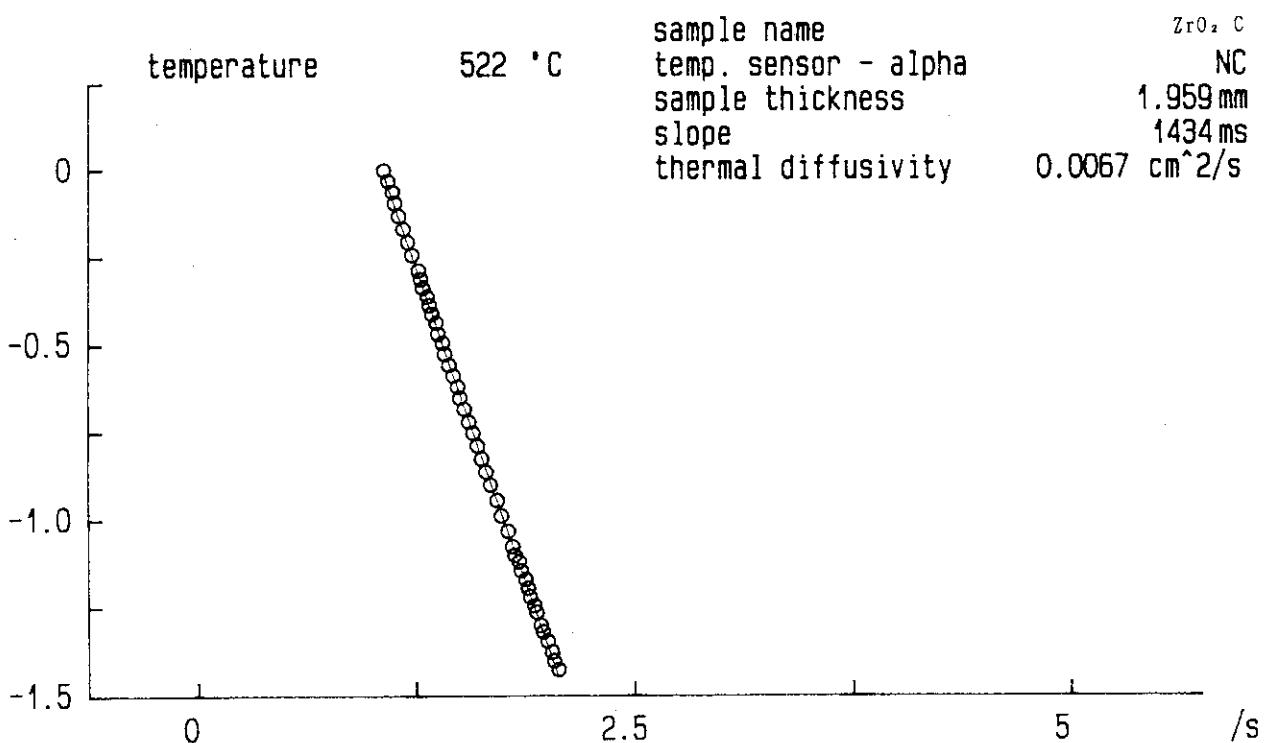


Fig.A2.20 Calculated Logarithmic Plot of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

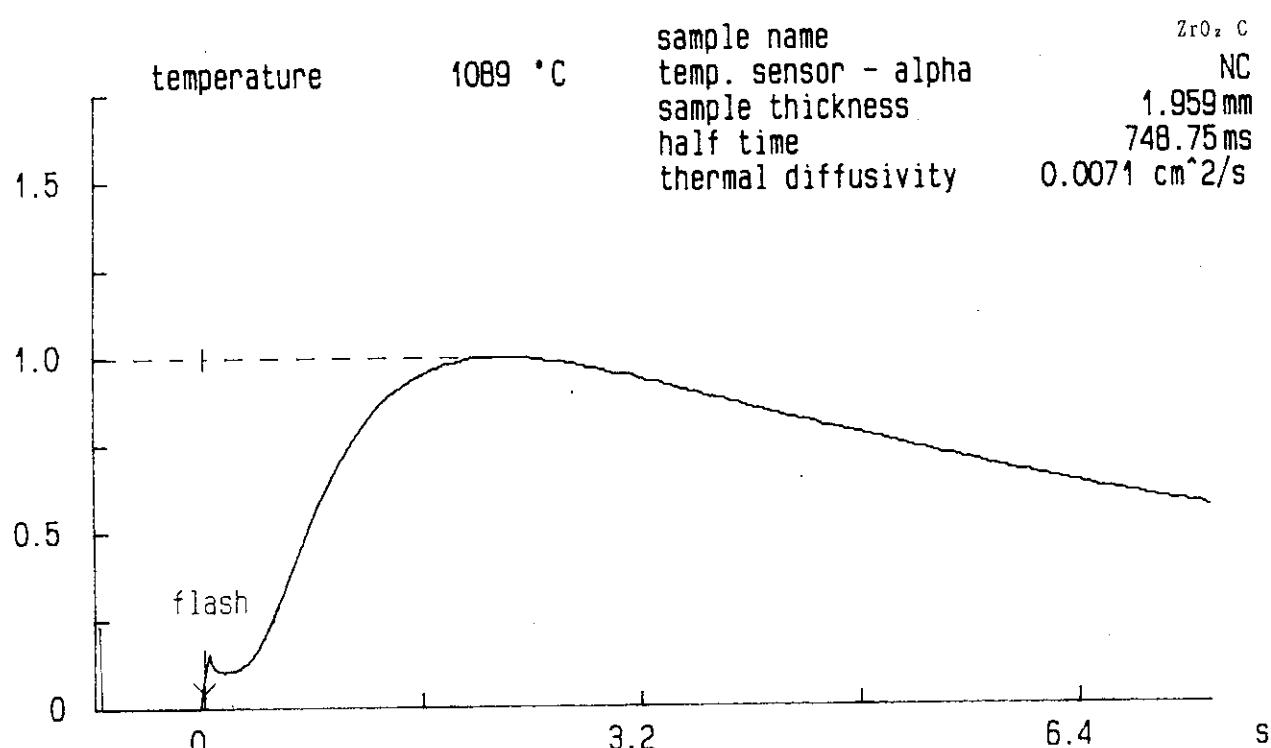


Fig.A2.21 Rear-surface Temperature History of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3)
at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

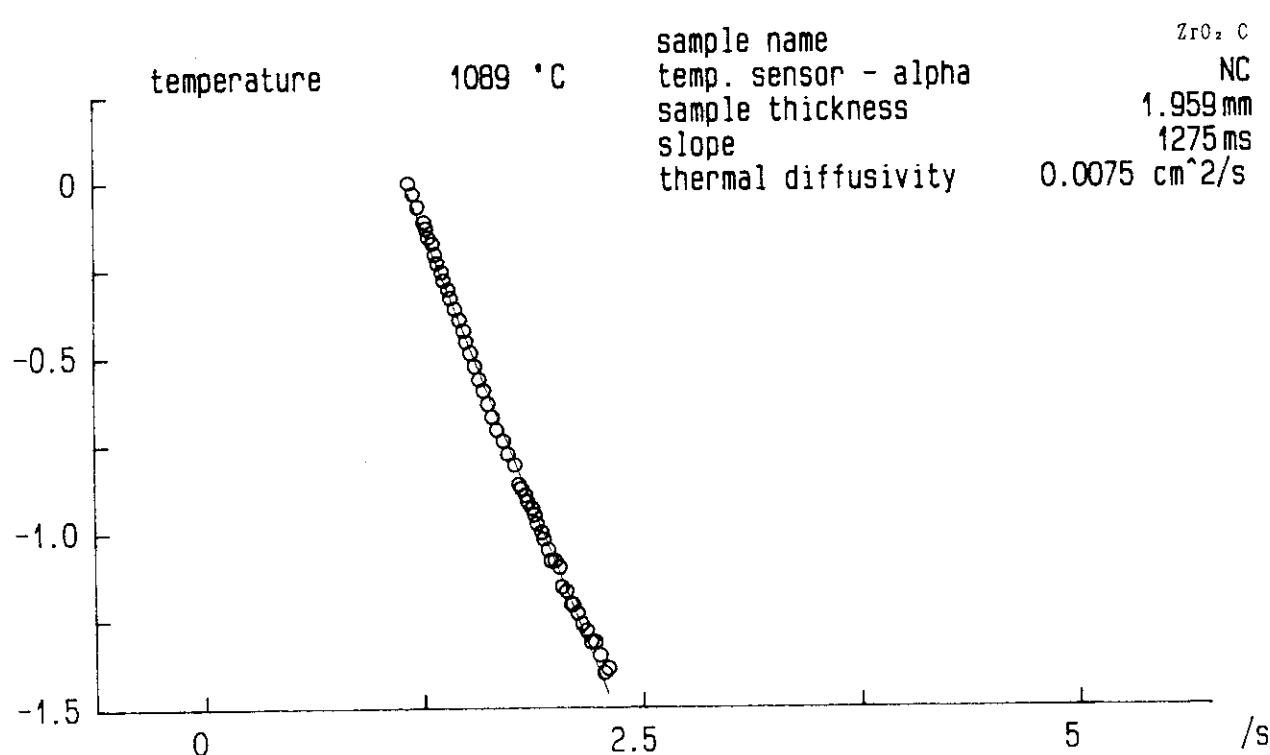


Fig.A2.22 Calculated Logarithmic Plot of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3)
at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

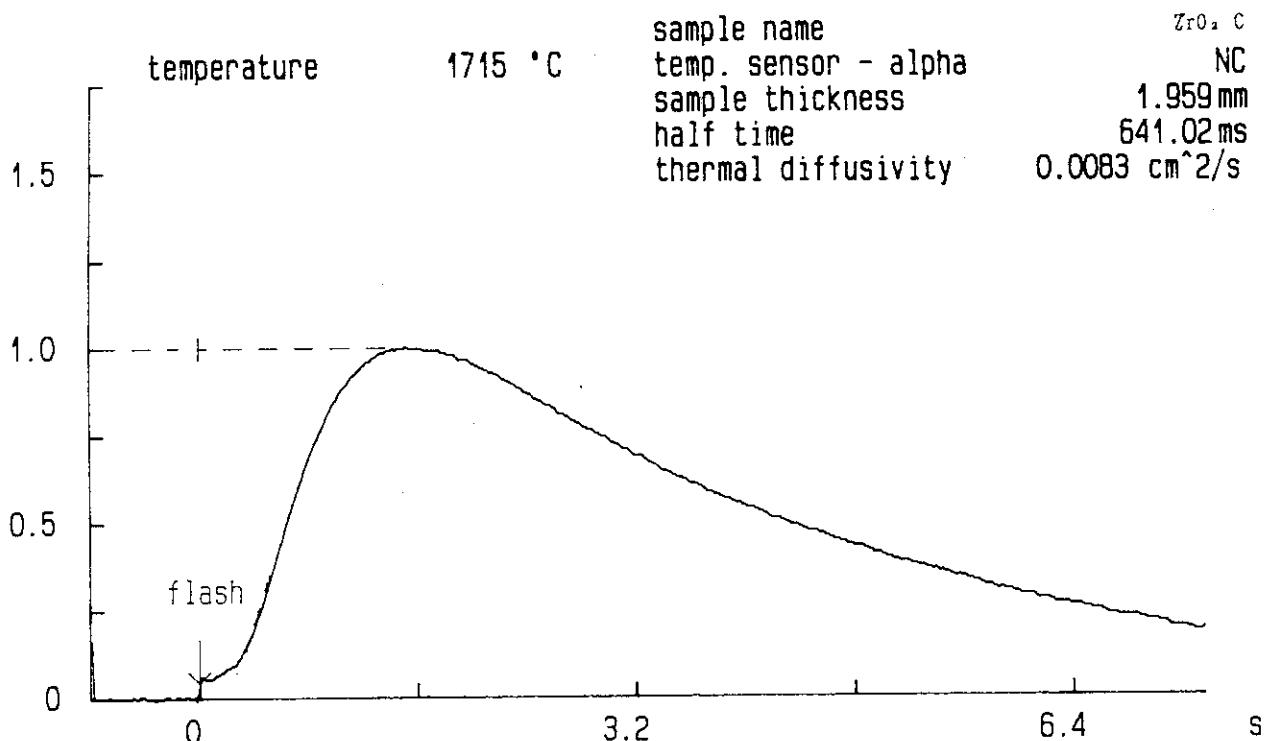


Fig.A2.23 Rear-surface Temperature History of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

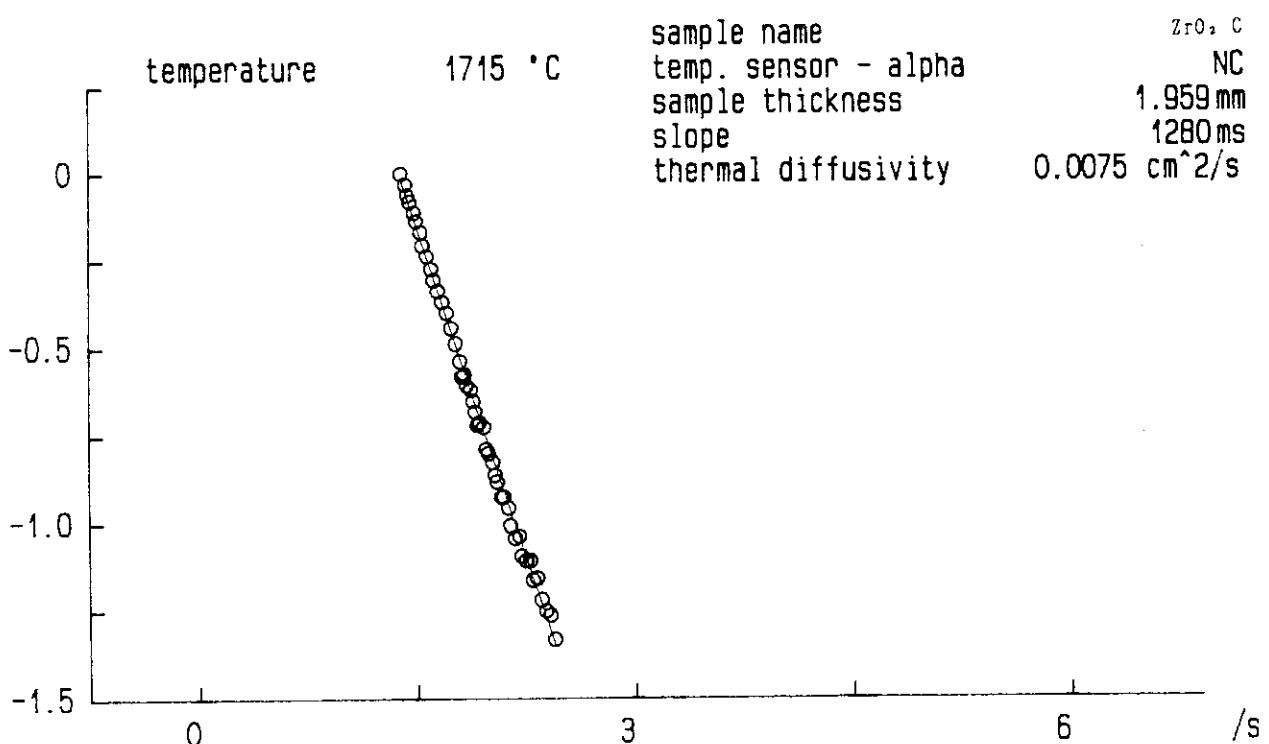


Fig.A2.24 Calculated Logarithmic Plot of Sample C(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

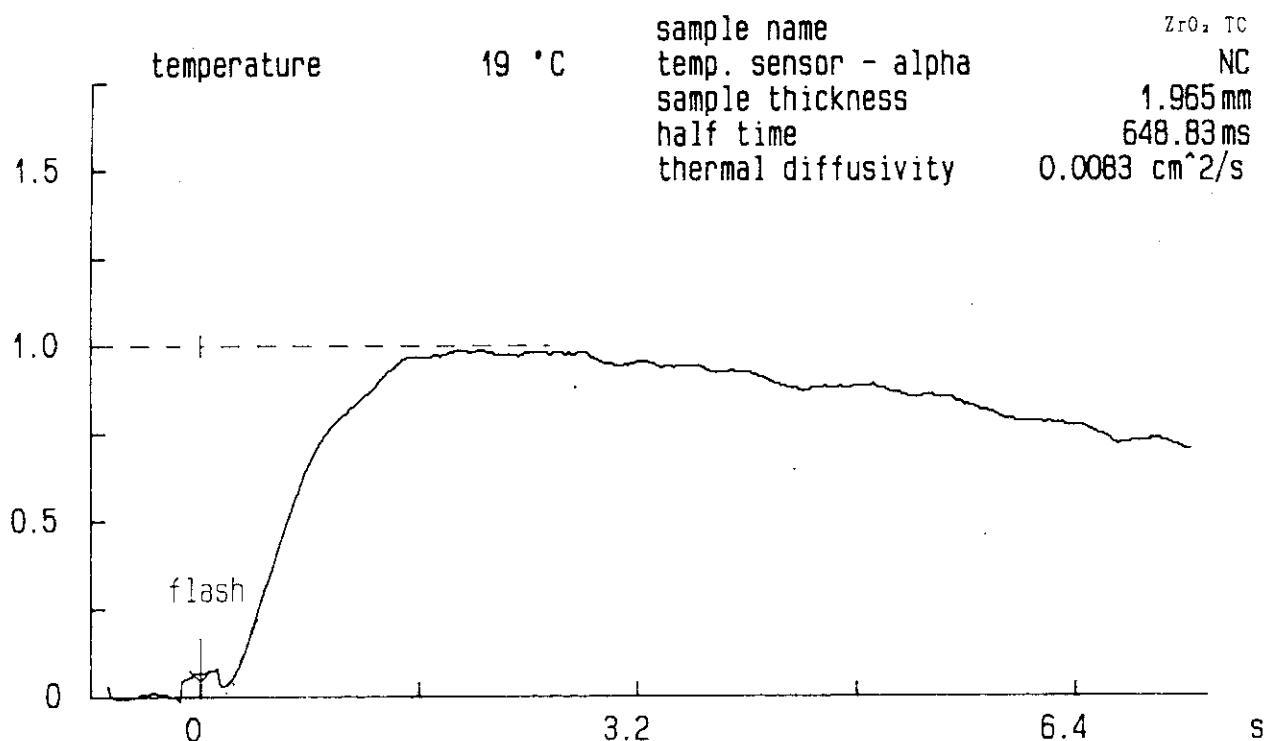


Fig.A2.25 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample
 TC(ZrO₂-13.7%Y₂O₃) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

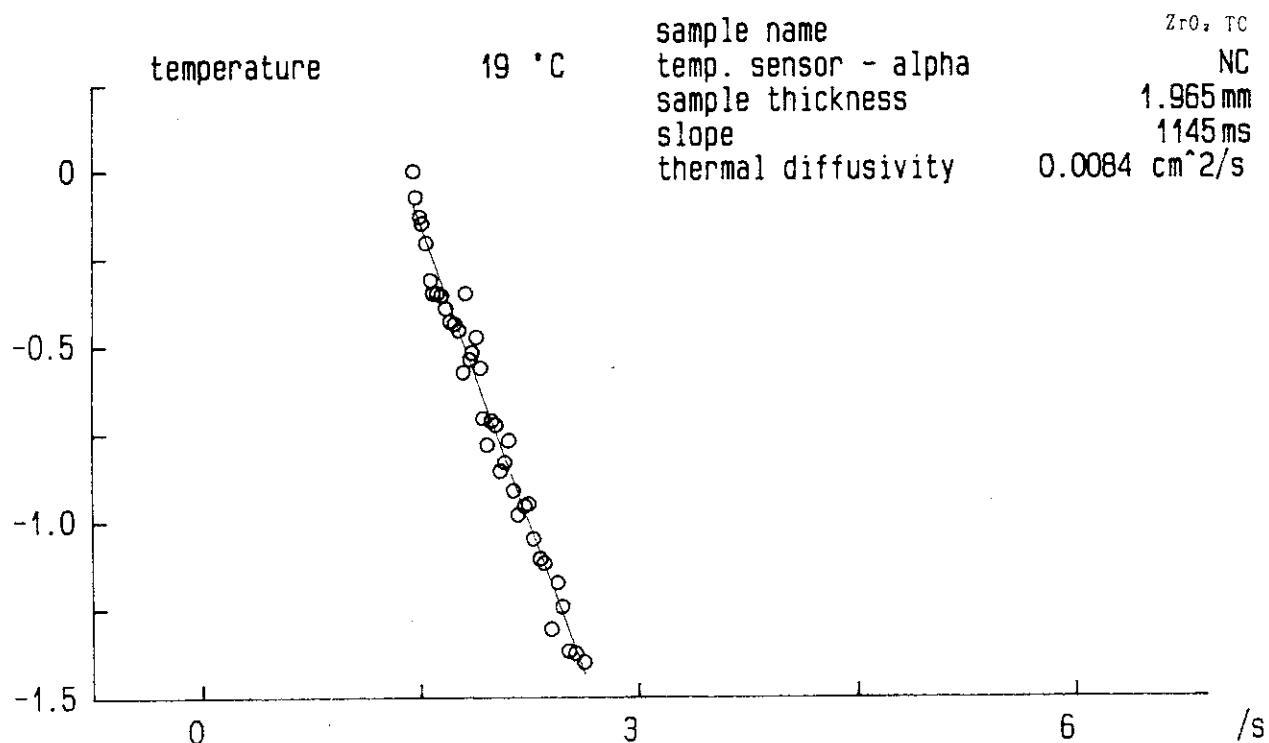


Fig.A2.26 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample
 TC(ZrO₂-13.7%Y₂O₃) at Room Temperature

Measurement of Thermal Diffusivity

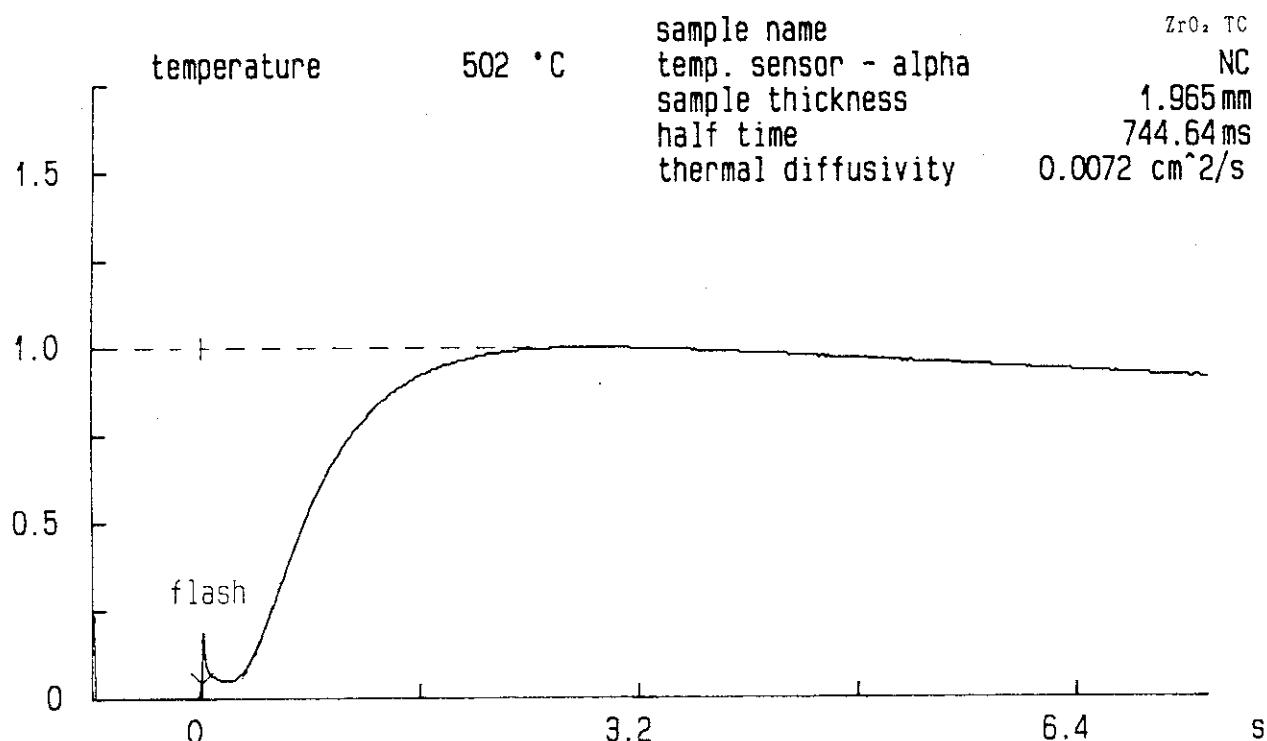


Fig.A2.27 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample
 TC(ZrO₂-13.7%Y₂O₃) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

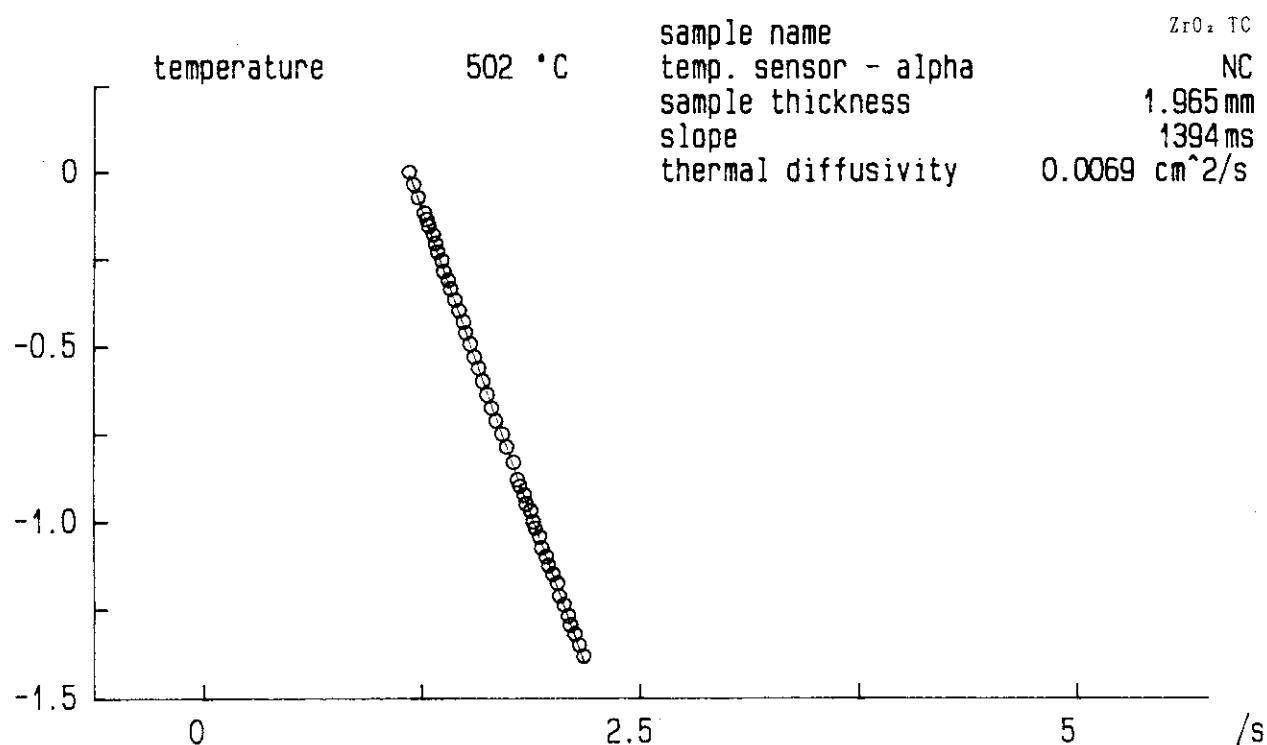
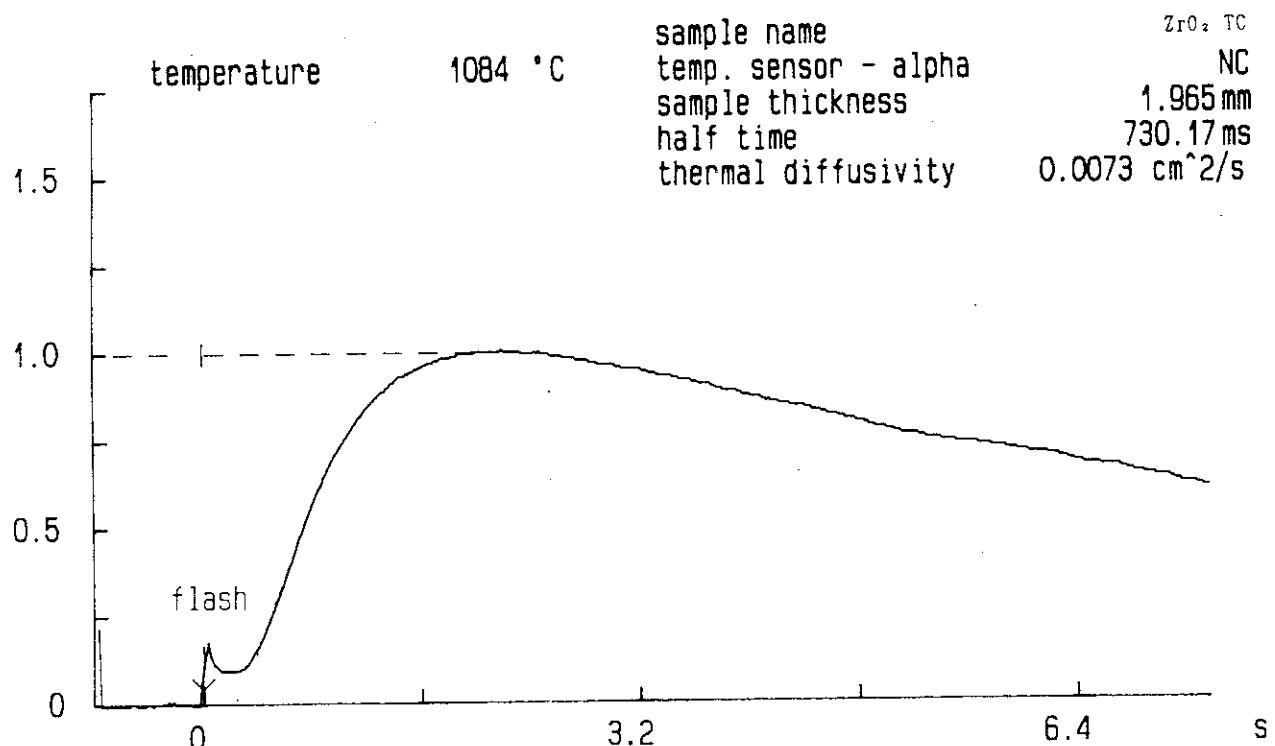
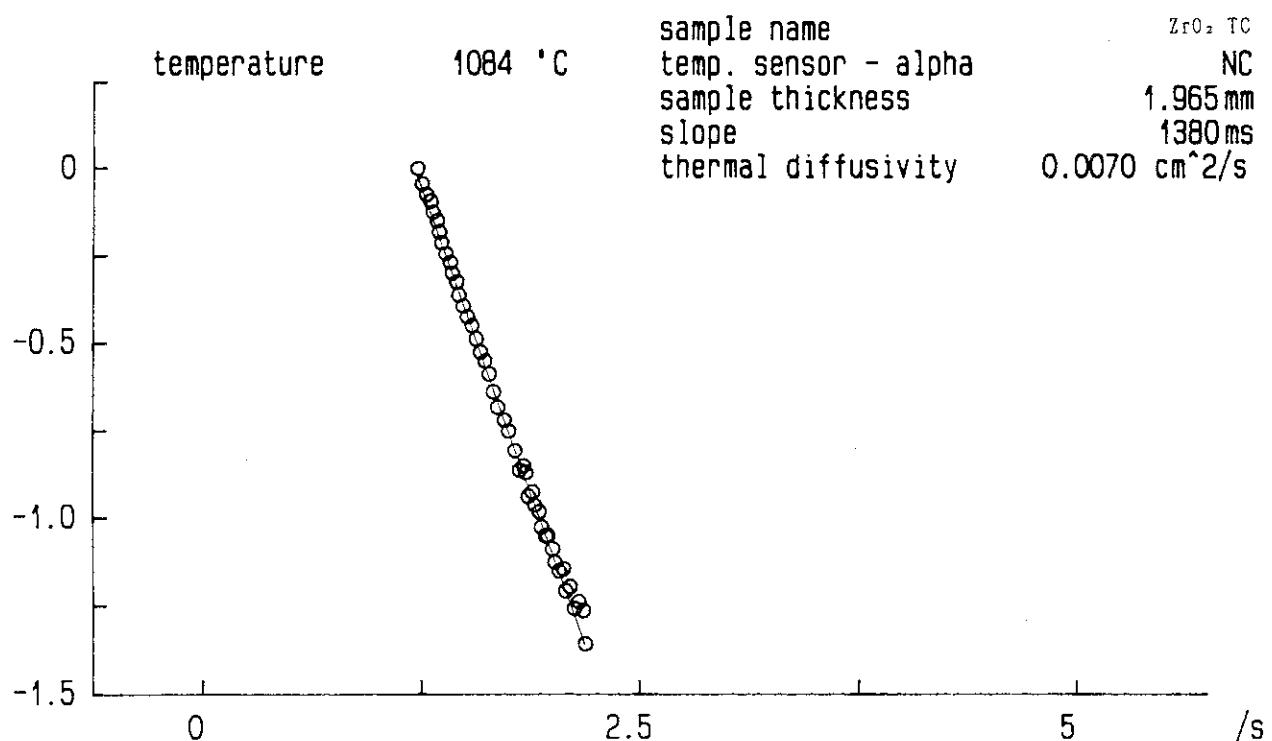


Fig.A2.28 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample
 TC(ZrO₂-13.7%Y₂O₃) at 500°C

Measurement of Thermal Diffusivity

Fig.A2.29 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample
TC(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

Fig.A2.30 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample
TC(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 1100°C

Measurement of Thermal Diffusivity

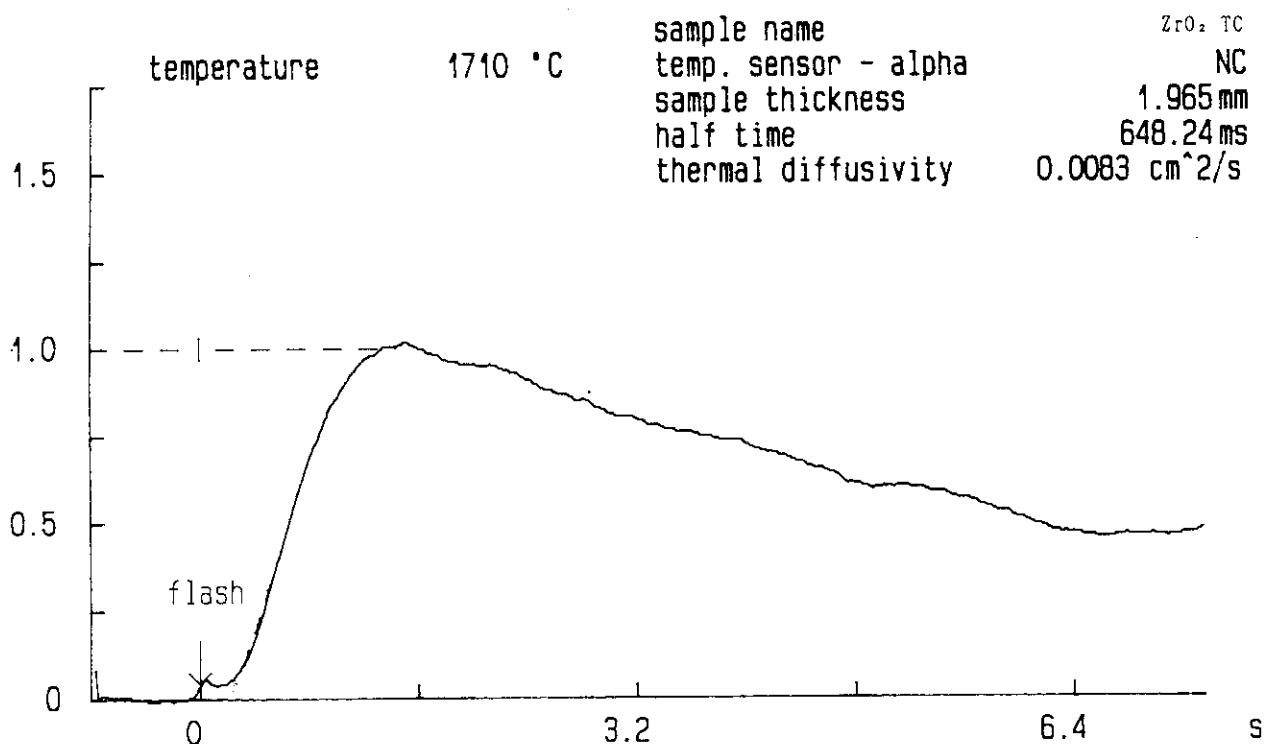


Fig.A2.31 Rear-surface Temperature History of Triangle Shape Sample
 TC(ZrO_2 -13.7% Y_2O_3) at 1700°C

Measurement of Thermal Diffusivity

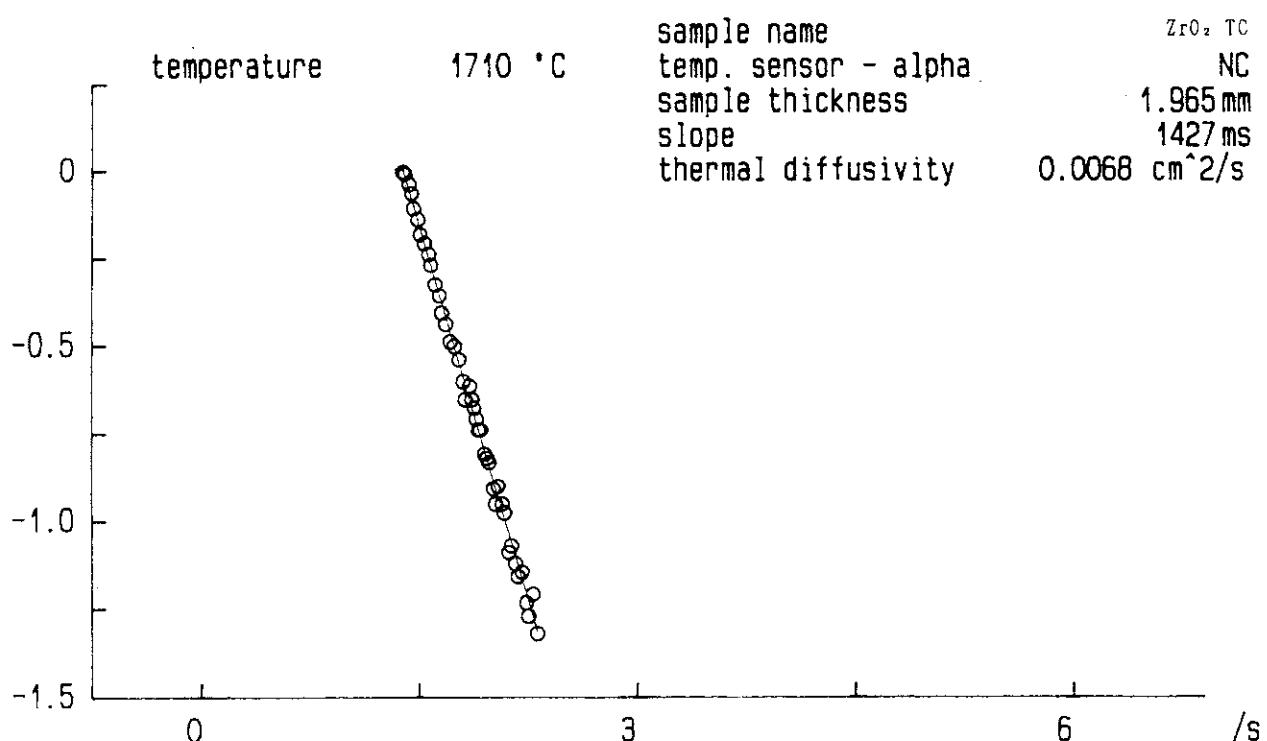


Fig.A2.32 Calculated Logarithmic Plot of Triangle Shape Sample
 TC(ZrO₂-13.7%Y₂O₃) at 1700°C