

JAERI-Tech
2004-034



JP0450396



高燃焼度燃料ペレット融点測定技術の開発
—微小試料の融点測定技術—

2004年 3月

原田 克也・仲田 祐仁・原田 晃男・二瓶 康夫
安田 良・西野 泰治

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

高燃焼度燃料ペレット融点測定技術の開発
—微小試料の融点測定技術—

日本原子力研究所東海研究所ホット試験室
原田 克也・仲田 祐仁・原田 晃男・二瓶 康夫
安田 良・西野 泰治

(2004年1月30日受理)

燃料ペレットの微小領域における融点測定を目指し、既存のペレット融点測定装置を使用して少量の燃料ペレットで測定を可能とするために、燃料ペレットを封入するタングステンカプセルの改良及び試料の少量化に起因する不明瞭なサーマルアレストから融点を決定する方法の確立を行った。その結果、サーマルアレスト法による微小試料の融点測定が可能となり、照射済燃料ペレットの微小領域での融点測定に有効であることを確認した。

本報は、ペレット融点測定装置を用いた微小試料の融点測定技術開発の概要を報告するとともに、タンタル[Ta]、モリブデン[Mo]、酸化ハフニウム[HfO₂]及び未照射UO₂ペレットを用いて実施した測定結果をまとめたものである。

Development of Pellet Melting Temperature Measuring Technique
- Melting Temperature Measuring Technique for Small Sample -

Katsuya HARADA, Masahito NAKATA, Akio HARADA, Yasuo NIHEI,
Ryo YASUDA and Yasuharu NISHINO

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

(Received January 30, 2004)

The Department of Hot Laboratories has been aiming the establishment of the melting temperature measuring technique for small samples obtained from the micro-region of irradiated fuel pellet. Due to the modification of the shape of tungsten capsule contained sample and the improvement of the detection method for melting temperature from indistinct thermal arrest point owing to small sample, it is possible to determine the melting temperature of small sample and to utilize effectively for the irradiated fuel pellet by using the existing apparatus.

This paper describes the technique of the melting temperature measurement for small sample and the experimental results by using tantalum, molybdenum, hafnium oxide and un-irradiated UO_2 pellet.

Keywords : LWR Fuel, Post Irradiation Examination, High Burn-up, Melting Temperature, Irradiation Behavior, Thermophysical Properties

目 次

1. まえがき	1
2. 微小試料の融点測定技術の開発	1
2.1 タングステンカプセルの改良	1
2.2 サーマルアレスト検出方法	2
3. 微小試料の融点測定	3
3.1 金属試料及び酸化物試料による特性試験	3
3.2 未照射 UO_2 ペレットの微小試料融点測定	3
4. 結果と考察	4
5. まとめ	4
謝辞	5
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Development of Melting Temperature Measuring Technique for Small Sample	1
2.1 Improvement of Tungsten Capsule	1
2.2 Detection Method of Thermal Arrest	2
3. Measurement of Melting Temperature for Small Sample	3
3.1 Characteristic Test by using Metal and Oxide Sample	3
3.2 Un-irradiated UO_2 Pellet	3
4. Results and Discussion	4
5. Summary	4
Acknowledgments	5
References	5

This is a blank page.

1. まえがき

軽水炉燃料の高燃焼度化にともなうペレット外周部のリム形成等により、ペレット径方向における微小領域での熱物性測定のニーズが高まっている。また、燃料ペレットの融点は、通常時及び事故時の燃料の健全性評価の観点から重要な熱物性値の一つである。

そのため、ホット試験室では、燃料ペレットの微小領域における融点測定を可能とするため、旧科学技術省より電源開発特別会計予算に基づく委託研究において整備したペレット融点測定装置により、これまで実施してきた未照射・照射 UO_2 の融点測定の経験^{1,2)}をベースに同装置を用いての微小試料の融点測定技術の確立を目指して技術開発を進めてきた。既存のペレット融点測定装置の主な仕様を Table 1 に示す。融点測定は、サンプリングした試料をタングステンカプセルに溶接封入したものを加熱炉にセット後、系内真空引きを行い、高周波誘導加熱炉で等速加熱した時に得られる加熱曲線から融解潜熱による温度停滞（サーマルアレスト）を検出し、その後サーマルアレスト検出温度を、同一手法により得られた温度補正用の標準試料の融点測定結果で補正して、融点を決定する。しかし、従来測定技術では、測定に使用するペレットの量が約 15g（PWR 燃料ペレットで 3 個程度）必要としたため、径方向微小領域から採取した微小ペレットでの測定に適用するのは困難であった。融点測定の原理は、タングステンカプセル封入型サーマルアレスト法を採用しているため、サーマルアレストを検出するために、ある程度の試料量が必要とされていた。今回、微小試料の融点分布測定技術の確立に向けて、装置本体の改良を行わずに、燃料ペレットを封入するタングステンカプセルの改良及び試料の少量化に起因する不明瞭なサーマルアレストを検出し、融点を決定する方法を見出し、融点測定技術を確立することを目的として、本技術開発を行った。

本報は、ペレット融点測定装置を用いた微小試料の融点測定技術の概要について報告するとともに、特性試験として実施した金属試料（タンタル[Ta]、モリブデン[Mo]）、酸化物試料（酸化ハフニウム[HfO_2]）及び未照射 UO_2 ペレットの測定結果をまとめたものである。

2. 微小試料の融点測定技術の開発

既存のペレット融点測定装置を用いての微小試料による融点測定を可能にするためには、測定試料の温度変化を的確に検出することが重要であるため、試料を装填するタングステンカプセルの改良を行った。さらに、試料の微小化に伴う不明瞭なサーマルアレストから融点を決定する方法を確立した。

2.1 タングステンカプセルの改良

測定試料の少量化を目的として、以前から試料容器（タングステンカプセル）の改良が検討されてきたが、試料を減らすことにより明瞭なサーマルアレストが検出できないことが懸念され、課題となっていた。融点測定で用いているタングステンカプセルは、外径 17mm、高さ 37mm の大きさであり、カプセルの温度をより精度良く測定するために、黒体を模擬した内径 4mm、高さ 20mm の測温孔が設けられた構造である。測定試料は、カプセル内の空間に充填するため、ペレット片

約 15g を必要としていた。この従来カプセルで微小試料を測定した場合には、試料が測温孔上部（温度測定点）から外れてしまう可能性が非常に高いため、サーマルアレストの検出をより困難にするとの判断から、微小試料の測定を可能とするための手段として、測温孔上部に、10mm の立ち上げを設けた構造にタングステンカプセルを改良した。この改良により、試料を確実に測温孔上部に装填できるため、微小試料の融解における僅かな温度変化を検出できるものと考えた。Fig. 1 に改良前後のタングステンカプセル概略図を示す。

従来のカプセルは、黒体を模擬するためにカプセル全体の温度を均一にする目的で試料を空間全体に充填し測定を行ってきた。しかし、今回の改良型カプセルでは、温度測定位置近傍の温度変化を測定する構造となるため、これまで試料が充填されていた部分が空間となることによってカプセル内の温度分布が変化して、測温孔側壁の輻射による放射温度計での温度測定に誤差が生じる可能性が考えられたが、放射温度計の焦点位置は変えておらず、温度補正用試料も同条件で測定するため、懸念される誤差は十分補正できるものと考えた。

2.2 サーマルアレスト検出方法

サーマルアレスト法による融点決定については、これまでにいくつかの検出手法の検討を試みってきたが、従来測定においては、得られた「時間-温度曲線」を最小自乗法により直線近似し、その直線から最初の変化点（傾きが小さくなる位置）を融点とする方法を採用してきた。この方法は、サーマルアレストが不明瞭な場合には融点を決定するのが困難であった。サーマルアレストは、試料の融解熱量に影響し、微小試料の融点測定では、さらにサーマルアレストが不明瞭となることが予想されるため、熱分析技法で用いられている加熱速度曲線法³⁾の適用可能性を検討した。加熱速度曲線法は、時間-温度曲線の時間に関する 1 次微分 dT/dt を時間に対してプロットし、加熱速度曲線を求める。この曲線は、時間に対する試料の温度変化を表すので一様な速度で加熱する場合には、一定値となり、サーマルアレストが起こることで dT/dt が急変しピークを得ることができるため、微小試料のような僅かなサーマルアレストの検出に最適と考えた。

加熱速度曲線法の実際の測定データへの適用については、測定データの平均化処理後、加熱速度曲線を得る手法を試みた。測定温度データは、0.4 秒毎にサンプリングされている。融点測定で取得した温度データを見ると、測定温度のふらつきが見られるため、サンプリングされた温度データを移動平均法で平均化処理した。平均化処理をすることによって加熱速度曲線が安定し、サーマルアレスト部の変化が強調できた。Fig. 2 に従来カプセルで測定した Mo 試料の加熱速度曲線法の適用例を示す。

Fig. 2 より平均化処理後の加熱速度曲線は、サーマルアレスト挙動前は、ある程度一定の幅で振れている状態（グラフ上に下限を示す青色点線を示す）だが、サーマルアレストが起こる直前からは大きく低下し、この変化の最下点位置を融点とした。ここで、微小試料の場合のサーマルアレストが僅かであることと、放射温度計による測定は試料直接ではなく試料容器であるタングステンカプセルを測定しているため（Fig. 1 参照）、タングステンカプセルの温度上昇速度を 0 まで停滞できない状況が考えられる。そのため、これまでの測定データより、加熱速度を約 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ （約 $23^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）の一定速度で加熱した時に、サーマルアレストの変化がない区間の変化率の振幅を確認し、変化率がそれ以下になるピークをサーマルアレスト位置とした。この方法の適用によ

って、微小試料による僅かなサーマルアレストを検出することが可能となり、サーマルアレスト検出方法として、加熱速度曲線法がより有効であると考えた。

3. 微小試料の融点測定

改良型タングステンカプセルを用いて金属試料、酸化物試料及び未照射 UO_2 の融点測定を行い、加熱速度曲線法によるサーマルアレスト決定手法を適用して各微小試料の融点を測定した。使用するサンプル量については、燃料ペレットの外周部及び中心部の融点分布測定を考慮して、0.5g以下を目安とし、試料の融解熱量を参考に各試料の重量を決定した。Table 2 に各試料の融解熱及び融解熱量を示す。

3.1 金属試料及び酸化物試料による特性試験

金属試料として放射温度計の温度補正に用いている Mo 及び Ta の測定を行った。試料は、4mm ϕ の丸棒からダイヤモンドカッターで必要量切り出したものを使用した。試料重量は、Mo が約 0.3g 及び 0.7g 並びに Ta が約 0.4g 及び約 1.0g のそれぞれ 2 試料作製した。また、融点が UO_2 に比較的近い酸化物試料として、試料重量 0.23g の HfO_2 の測定も行った。試料は、ペレット状のものからダイヤモンドカッターで約 3mm 厚さにスライスし、その後短冊状に切り出したものを使用した。

各試料は、タングステンカプセルの測温孔上部に設けた立ち上げ内に装填し、He 雰囲気中で溶接封入した。溶接封入した試料を高周波加熱炉で約 $23^{\circ}C/min$ の一定速度で加熱溶解し、二色温度計で温度計測を行い、時間-温度曲線を得た。その測定データを平均化処理後、加熱速度曲線法によりサーマルアレストを検出した。各試料の測定結果を Fig. 3, 4, 5, 6 及び 7 に示す。

従来型カプセルを用いての測定では、Mo, Ta に対してそれぞれ 25g, 36g を使用していたことから、試料重量比で約 1/50 の試料での融点測定を可能とした。Fig. 7 に示す HfO_2 については加熱曲線上では明瞭なサーマルアレストが確認されなかったが、前述の様に、加熱速度曲線法を適用することで、変化率のピークをサーマルアレストとして検出できた。この酸化物試料についても、従来型カプセルでは、約 14g 使用していたので、約 1/60 の重量でも測定が可能となった。

3.2 未照射 UO_2 ペレットの微小試料融点測定

照射済み UO_2 ペレットの融点測定へ向けたモックアップとして未照射 UO_2 ペレットの測定を行った。未照射 UO_2 ペレットの試料は、まずペレットをダイヤモンドカッターで約 5mm 厚にスライスし、それを約 3mm 角の短冊状に切り出したものを使用した。今回の測定に用いた未照射 UO_2 ペレット片の試料重量は 0.47g である。

測定は、金属試料及び酸化物試料と同様に行い、時間-温度曲線を得た。その測定データを平均化処理後、加熱速度曲線法によりサーマルアレストを検出した。未照射 UO_2 の測定結果を Fig. 8 に示す。

未照射 UO_2 においても HfO_2 と同様に明瞭なサーマルアレストは確認されなかったが、加熱速度曲線法によるサーマルアレストを決定した。従来型カプセルでは、約 15g 使用していたこ

とから、試料重量を約 1/30 に減少させた試料での融点測定を可能とした。

4. 結果と考察

タングステンカプセルの改良と加熱速度曲線法によるサーマルアレスト決定法の適用によって得られた、金属試料、酸化物試料及び未照射 UO_2 試料での微小試料融点測定結果をもとに、従来カプセルでの測定データとの比較及び測定精度について検討を行った。

従来カプセルとの測定データの比較は、Mo 試料を用いて行った。改良型カプセルでは約 0.3g と 0.7g、従来型カプセルでは、25.2g の試料を測定して、融点がほぼ一致することを確認し、試料重量の少量化及びカプセルの構造の変更に伴う温度測定が、融点測定に影響しないことを確認した。各測定結果を Fig. 9 に示す。

カプセル改良による測定の繰り返し精度については、今後さらにデータの蓄積は必要であるが、今回測定した Mo 及び Ta 各 2 試料の結果から、温度補正に用いるこれらの金属試料に対しては、融点の差が $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内と高精度で測定することができた。

測定データの信頼性を確認するために、Fig. 10 に Mo, Ta, HfO_2 及び未照射 UO_2 の温度補正前のサーマルアレスト検出温度と融点の文献値^{5,6,7)}の関係を示す。Fig. 10 より文献値と測定値がほぼ直線関係にあることが確認できる。今回測定した Mo 及び Ta 試料の測定結果より、2 色温度計の温度補正を行い、 HfO_2 と未照射 UO_2 の融点を決定し、それぞれ HfO_2 : 2813°C 及び UO_2 : 2871°C となり、文献値との比較で、装置の測定誤差が $\pm 1\%$ 以内であることを確認した。

今回測定に用いた未照射 UO_2 試料は、約 3mm 角で、試料重量は 0.47g である。このサイズは、ペレット径方向の細かい融点分布を得るためにはまだ不十分であるが、今回の測定結果は、少なくともペレット外周部及び中心部の融点分布測定が可能な試料量に減少することができたことを示し、本測定技術が、照射済 UO_2 ペレットの径方向分布測定として有効な手段となり得ることが確認できた。

今回の測定結果から、本測定技術における試料の最小必要重量について検討する。サーマルアレストの変化量は、試料の融解熱量に大きく影響するため、今回測定した試料の中で最も融解熱量が小さい Ta 試料 0.4g の融解熱量約 50J から UO_2 の重量に換算すると約 0.2g となる。よって、今回実施した一連の測定結果は、約 0.2g の UO_2 試料においてもサーマルアレストを検出できる可能性があることを示唆している。

今後の課題は、本測定手法における最小必要重量を把握し、これに対応して必要な微小試料を照射済燃料ペレットから採取する試料調製技術を確立して、照射済試料における融点の径方向分布測定を可能とすることにある。

5. まとめ

- (1) 高燃焼度燃料ペレットの微小試料の融点測定を可能とするために、融点測定装置のタングステンカプセルの改良とサーマルアレスト検出方法の確立を行った。
- (2) タングステンカプセルの改良では、測温孔上部に立ち上げを設けることで、微小試料を確

実に測温孔上部に装填することができる構造とした。

- (3) サーマルアレスト検出方法については、加熱速度曲線法を採用することとし、微小試料による僅かな温度変化を読み取ることを可能とした。
- (4) 未照射 UO_2 試料において、従来の測定方法に比べ約 1/30 に減少した試料 0.47g を用いて融点を求めることができ、本開発が、ペレットの外周部及び中心部の融点分布を得るために有効な手段となり得ることが確認できた。
- (5) ペレット径方向のより微小な領域での融点分布測定については、さらなる検討が必要となる。今後は、より小さな試料での融点測定の実施、照射済試料における試料調製技術の確立及び測定を行っていく予定である。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり多くのご助言を与え、ご指導して下さったホット試験室長 新藤雅美氏、ホット試験室次長 天野 英俊氏、実用燃料試験課長 関田 憲昭氏をはじめ、関係者諸氏に対して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原田、西野、三田、天野 JAERI-Tech 2000-031
- 2) 原田、仲田、西野、三田、天野 日本原子力学会 2000 年秋の大会 P796
- 3) 齋藤著 物質科学のための 熱分析の基礎 PP. 11-15 共立出版(株)
- 4) 日本化学会編 化学便覧
- 5) 超高融点材料便覧
- 6) T.Yamada, et, al. Redetermination of the solidification points of Al_2O_3 , Y_2O_3 , and HfO_2 by digital pyrometry with an arc-imaging furnace, "High Temp.-High Press., vol18, pp377-388 (1986)
- 7) M.H.Rand, et, al. Rev. Int. Hautes Temp. Refract. 15, p355 (1978)

Table 1 Main Specification of Pellet Melting Temperature Measurement Apparatus

Method	Thermal Arrest Method (Enclosed Tungsten Capsule)
Heating Furnace	High Frequency Induction Heating
Temp. Range	1,500°C ~ 3,100°C
Temp. Measurement	Two-Color Pyrometer with Fiberglass
Atmosphere	Furnace: Vacuum Tungsten Capsule: He gas
Standard Sample	Mo, Ta

Table 2 Sample Weight and Heat of Fusion

Sample	Weight (g)	Heat of fusion (J/g) ⁴⁾	Heat of Fusion by Sample (J)
Mo	0.31	292	90
Mo	0.67	"	196
Ta	0.36	137	49
Ta	1.00	"	138
HfO ₂	0.23	500	115
UO ₂ (Un-irradiated)	0.47	274	129

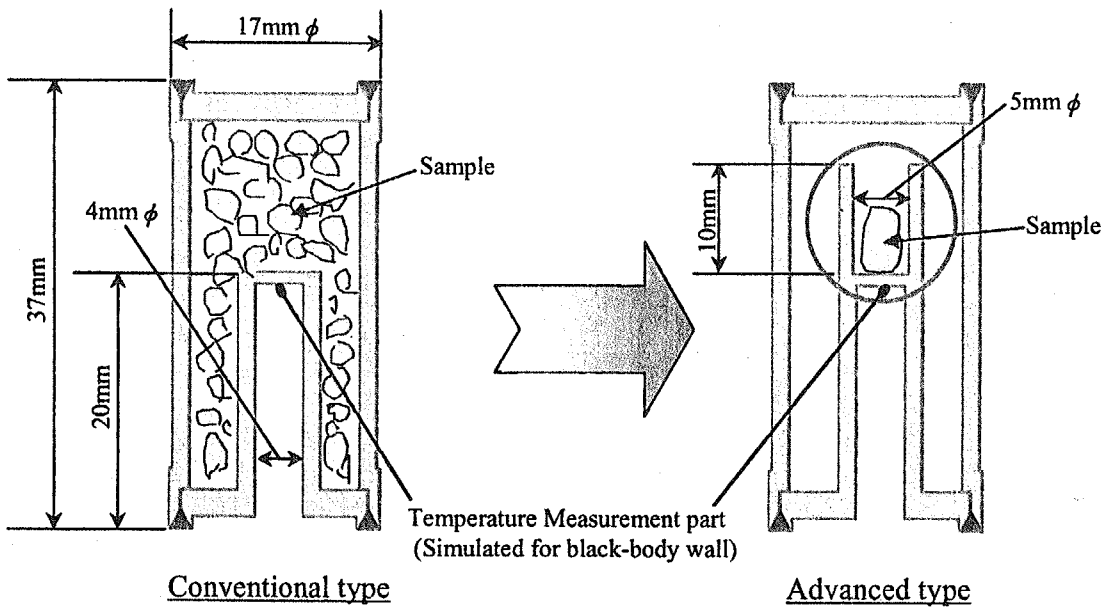


Fig.1 Schematic Drawing of Tungsten Capsule

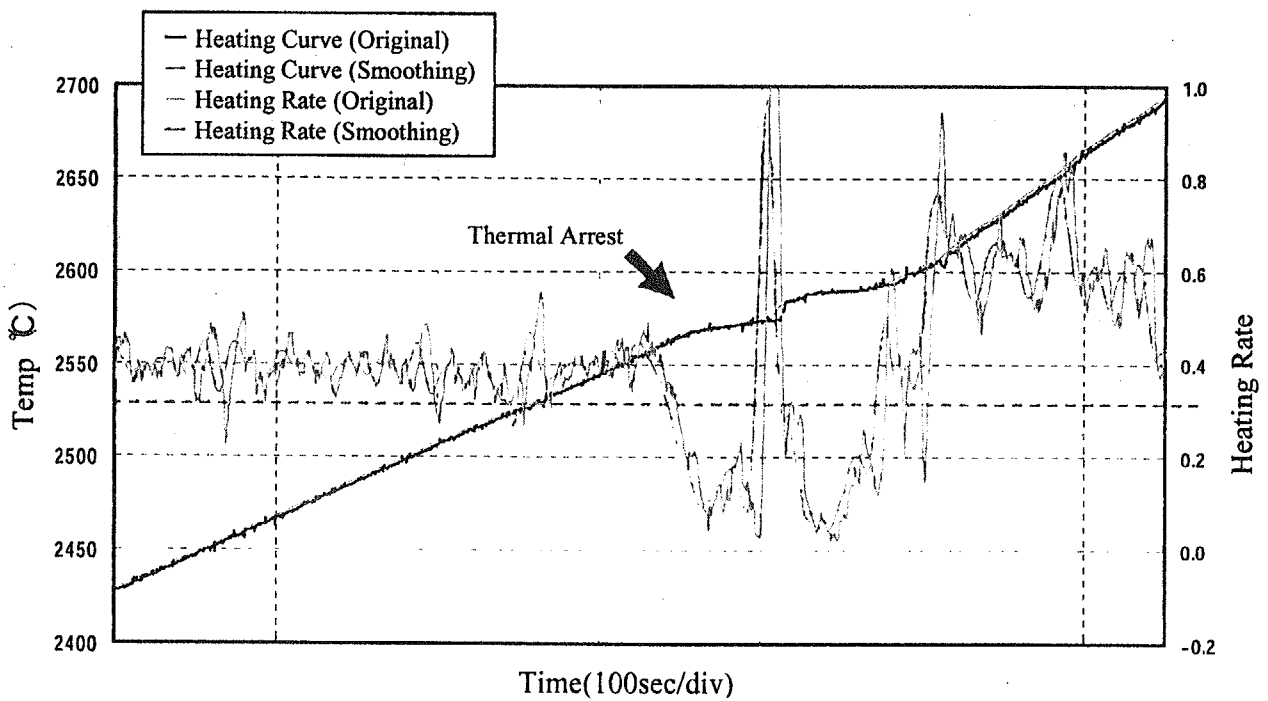


Fig.2 Heating Curve and Heating Rate of Mo Sample (25.2g)

This is a blank page.

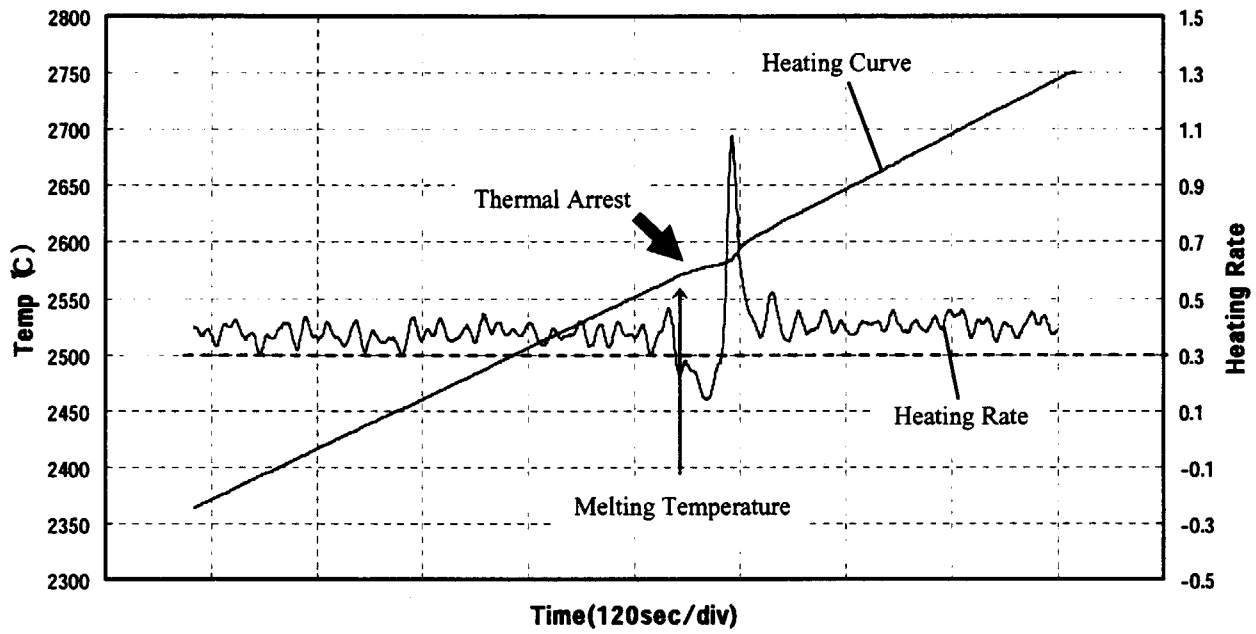


Fig.3 Heating Curve and Heating Rate of Mo Sample (0.67g)

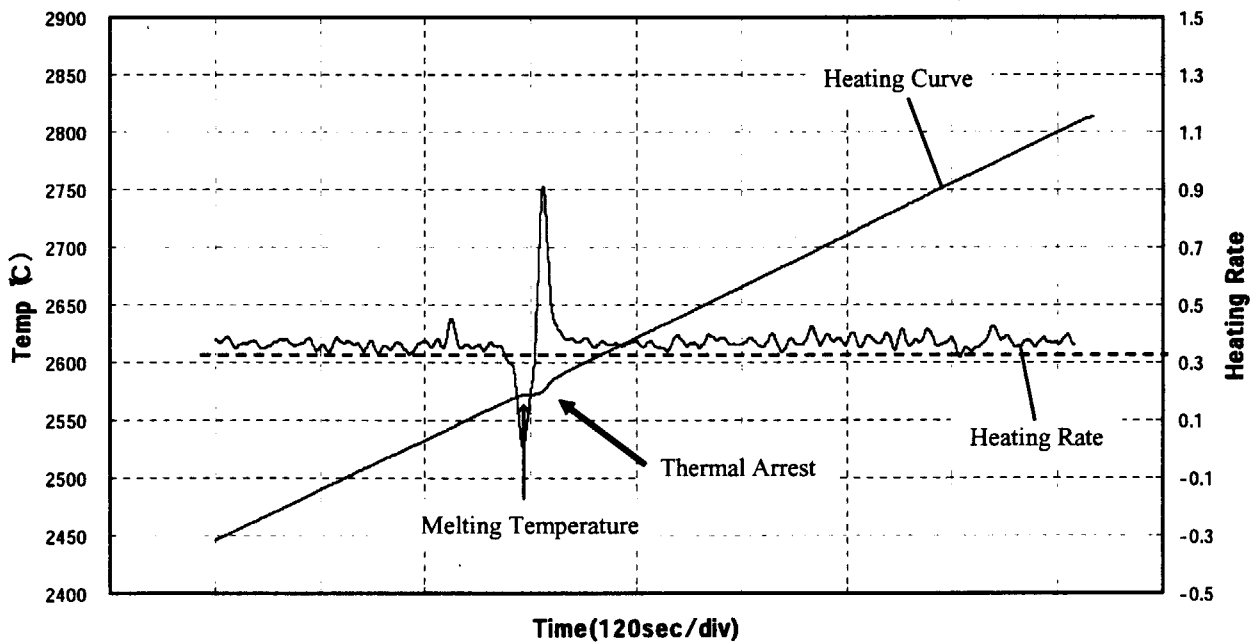


Fig.4 Heating Curve and Heating Rate of Mo Sample (0.31g)

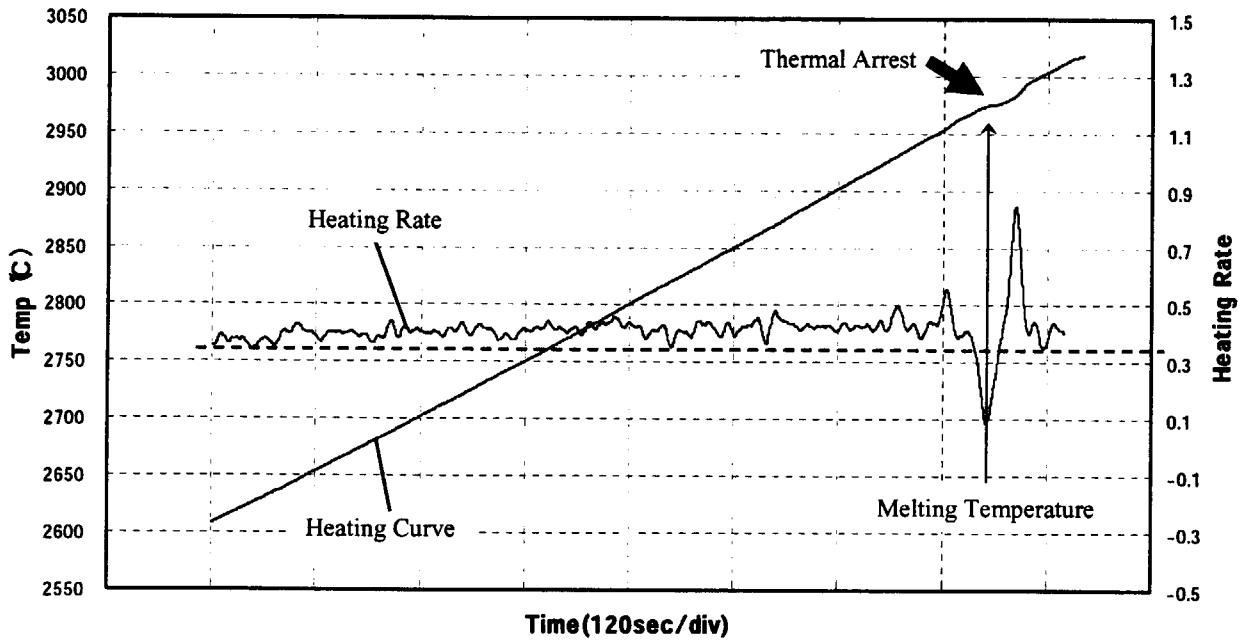


Fig.5 Heating Curve and Heating Rate of Ta Sample (1.00g)

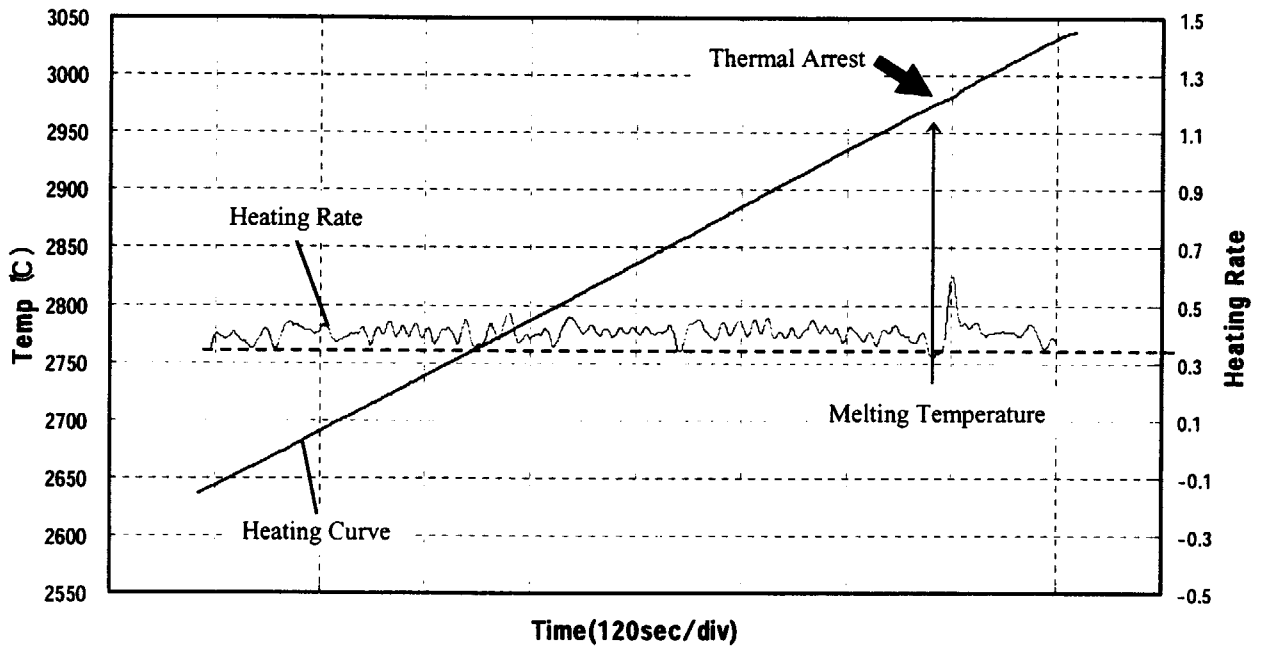


Fig.6 Heating Curve and Heating Rate of Ta Sample (0.36g)

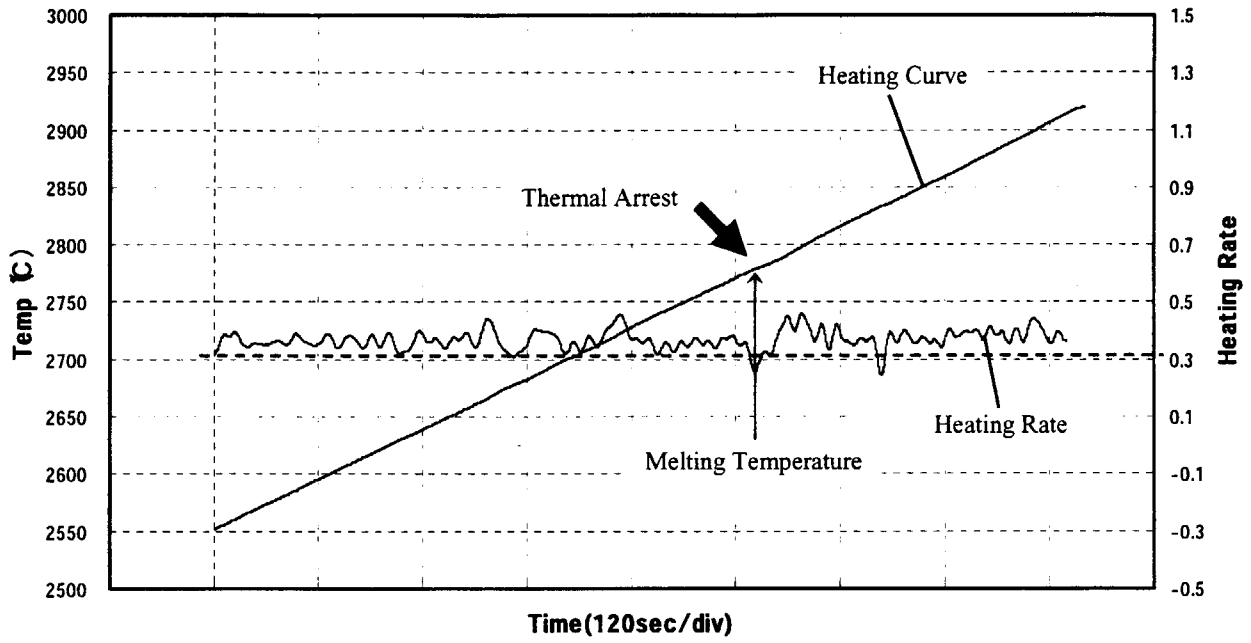


Fig.7 Heating Curve and Heating Rate of HfO₂ Sample (0.23g)

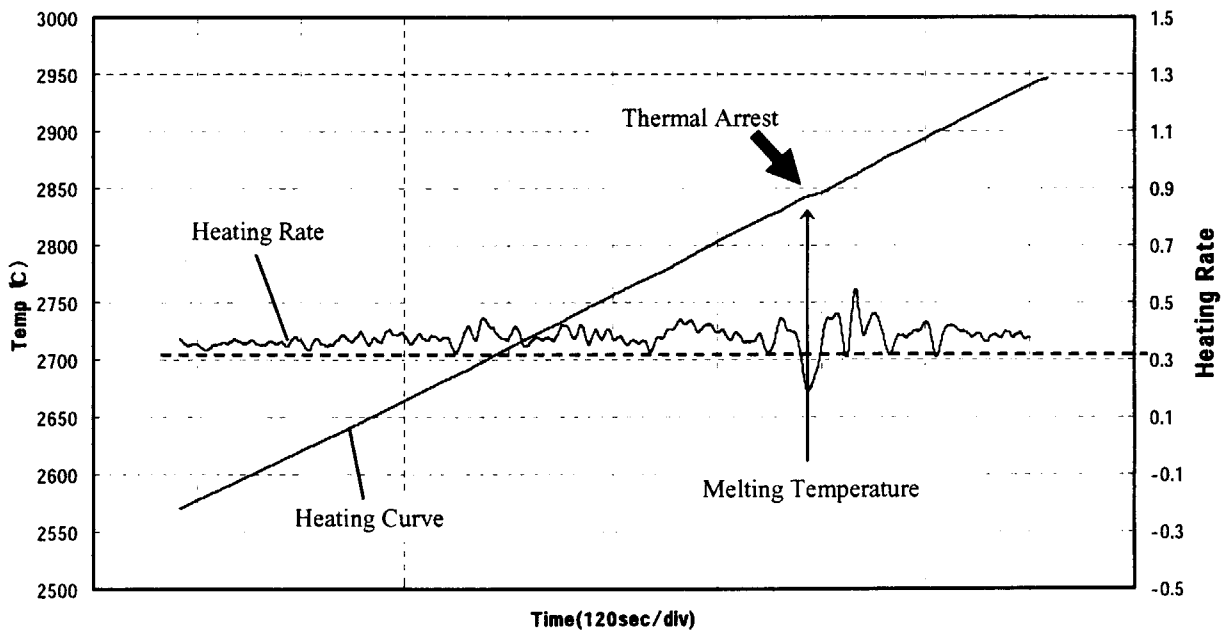
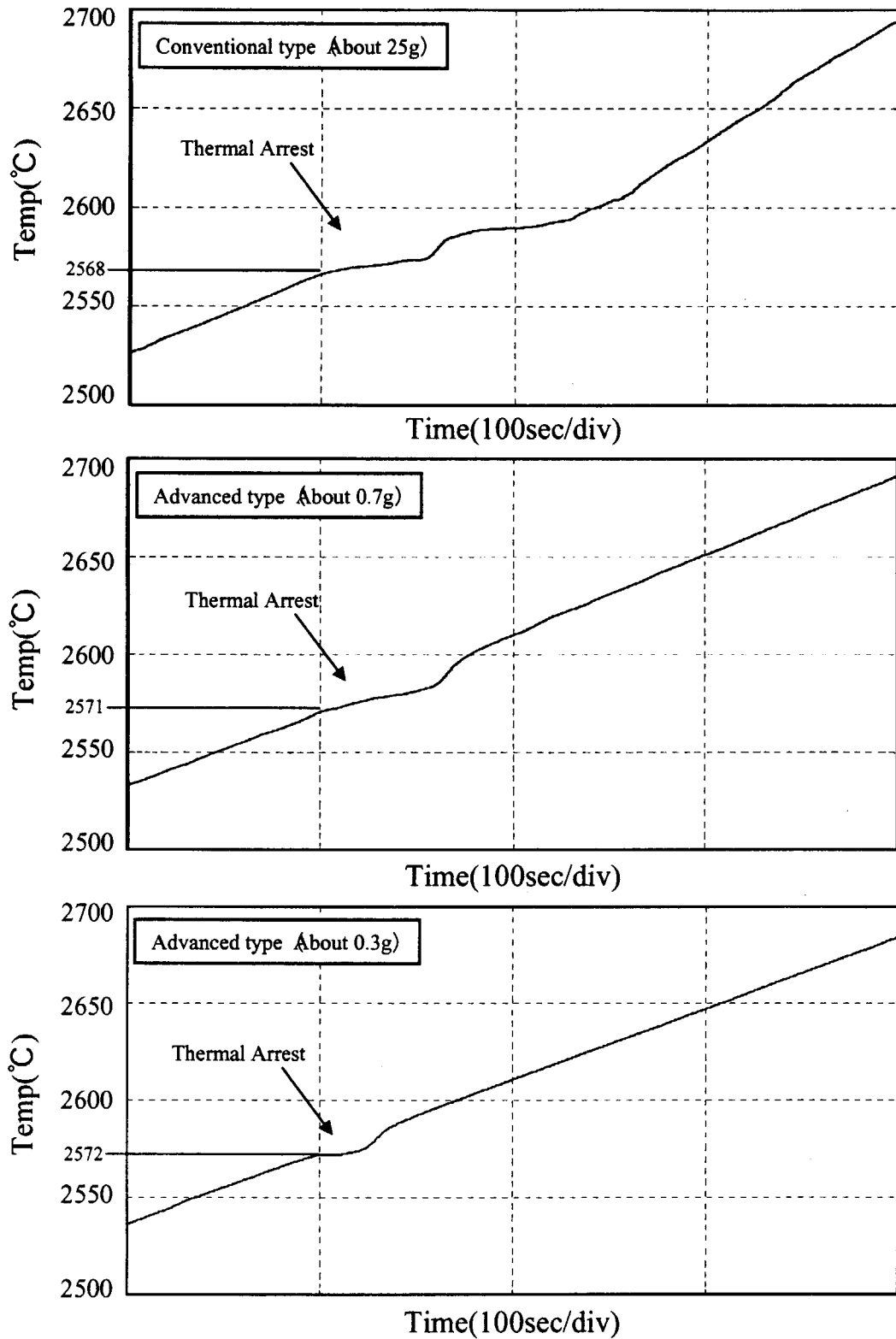


Fig.8 Heating Curve and Heating Rate of Un-irradiated UO₂ Sample (0.47g)



Heating Curve of Mo Samples

Fig.9 Comparison of the Melting Temperature Before and After Improvement of Tungsten Capsule

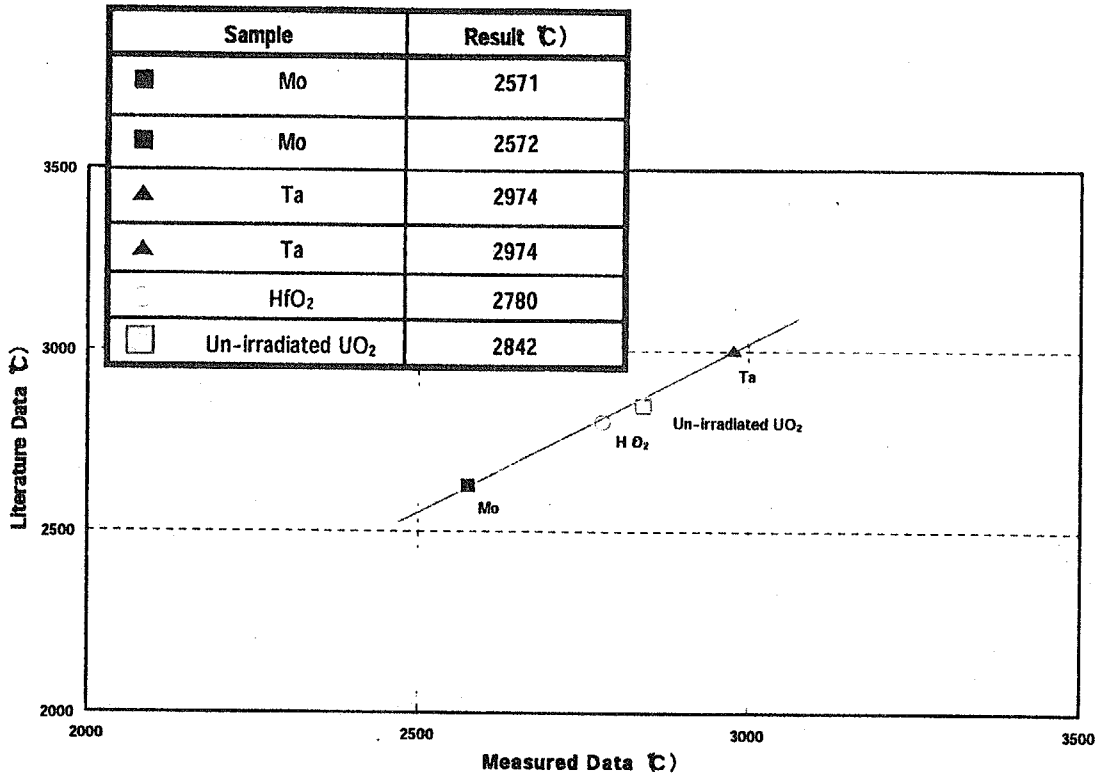


Fig.10 Relation between Measured Data and Literature Data

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

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

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 bar = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

高燃焼度燃料ペレット融点測定技術の開発
— 微小試料の融点測定技術 —

R100

古紙配合率100%
再生度70%再生紙を使用しています