JAEA-Research 2008-096



高温ガス炉燃料温度計測用温度モニターの 照射特性試験

Irradiation Performance Test of the Temperature Monitor for the HTGR Fuel

植田 祥平 飛田 勉* 沢 和弘 富本 浩 小澤 太教 猪井 宏幸 梅田 政幸

Shohei UETA, Tsutomu TOBITA*, Kazuhiro SAWA, Hiroshi TOMIMOTO Takayuki KOZAWA, Hiroyuki INOI and Masayuki UMEDA

> 原子力基礎工学研究部門 耐熱燃料・材料開発グループ

High Temperature Fuel and Material Group Nuclear Science and Enginieering Directorate R B S

January 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319–1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

高温ガス炉燃料温度計測用温度モニターの照射特性試験

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット 植田 祥平・飛田 勉*・沢 和弘 富本 浩^{**}・小澤 太教⁺・猪井 宏幸⁺・梅田 政幸⁺

(2008年10月20日受理)

高温ガス炉運転中における燃料体の温度測定を目的として温度モニターの開発を行っている。 温度モニターは、融点の異なる合金製ワイヤーを石英管に封入したもので、22 種類の温度モニタ ーにより温度 600℃から 1400℃を測定範囲としている。温度モニターの照射特性を調べるため、 JMTR でキャプセル照射を実施し、照射後試験として X 線ラジオグラフ、EMPA 観察を行った。 照射後試験の結果、開発した温度モニターは、照射温度が 1100℃以下なら 90 日程度、50 日以下 であれば照射温度 1300~1350℃までは使用可能と推定された。

大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

- ※ 出向職員
- + 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

^{*} 原子力エンジニアリング株式会社

Irradiation Performance Test of the Temperature Monitor for the HTGR Fuel

Shohei UETA, Tsutomu TOBITA*, Kazuhiro SAWA, Hiroshi TOMIMOTO^{**}, Takayuki KOZAWA⁺, Hiroyuki INOI⁺ and Masayuki UMEDA⁺

Nuclear Applied Heat Technology Division Nuclear Science and Enginieering Directorate, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 20, 2008)

The temperature monitors for fuel blocks in high temperature gas reactors during operation are being developed. The temperature monitors consist of alloy wires, with various melting points, sealed in quarts capsules. The temperature can be evaluated in the range from 600 to 1400°C with 22 types of the temperature monitors. The temperature monitors have been irradiated by the capsule in JMTR, and then, PIEs such as X-ray radiograph and EPMA have been carried out. As the results of the PIE, it was estimated that the temperature monitors can be used up to 90 days at 1100 °C, or up to 50 days at 1300 - 1350 °C.

Keywords: High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), Fuel, Temperature, Temperature Monitor

^{*} Nuclear Engineering Cooperation, Ltd.

ℜ Research Staff on Loan

⁺ Department of HTTR, Oarai Research and Development Center

目 次

1. はじめに
2. 温度モニター
2.1 温度モニターの概要
2.2 温度モニターの確証試験
3. 照射キャプセル
4. 照射試験
4.1 照射条件
4.2 照射履歴
5. 照射後試験
5.1 内筒外観検査
5.2 X線検査
5.3 温度モニター外観検査
5.4 EPMA 観察
6. 考察
7. まとめ
謝辞
参考文献

Contents

1. Introduction	1
2. Temperature monitor	2
2.1 Overview of temperature monitor	2
2.2 Performance confirmation test before irradiation	2
3. Irradiation capsule ·····	3
4. Irradiation performance test	4
4.1 Irradiation condition	4
4.2 Irradiation history	4
5. Post irradiation test	6
5.1 Visual inspection for inner tube	6
5.2 X-ray inspection	6
5.3 Visual inspection for temperature monitor	6
5.4 Electron prove micro analysis (EPMA) inspection	7
6. Discussion ·····	8
7. Concluding remarks · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	9
Acknowledgements 1	0
References 1	0

1. はじめに

高温のガスを炉外に取出せる高温ガス炉は固有の安全性に優れた原子炉であり、特に 900℃以上の高温のガスを取り出すことを目標とした超高温ガス炉(VHTR)は、第四世代原子炉システム(GEN-IV)の一つとして、国際的にも精力的な研究開発が展開されている。我が国では、日本原子力研究開発機構(原子力機構)大洗研究開発センターの高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor: HTTR)を用いて、高温ガス炉の研究開発を進めている¹⁻⁴⁾。

高温ガス炉の燃料は耐高温性を有する被覆燃料粒子であり、二酸化ウラン(UO₂)の燃料核を熱 分解炭素(PyC)、炭化珪素(SiC)で多重に被覆したSiC-TRISO型が主流である。高温ガス炉の燃 料の寿命は燃焼度、使用条件により変わるが、被覆燃料粒子の損傷は温度により影響を受ける。 SiC-TRISO燃料の場合、温度1700℃を超えると最も強力な被覆層であるSiC層がβ相からα相へ 変化しはじめ⁵⁰、核分裂生成物(Fission Product;FP)の保持機能を著しく低下させる原因とな る。そのため、SiC-TRISO燃料を採用するHTTRでは、設計限界温度を保守的に1600℃に制限して いる。しかしながら、高温ガス炉は炉心が高温になるため、熱電対による燃料温度計測は保護管 と構造材との共存性が問題となるとともに、HTTRのようなブロック型炉心においては、その大き さや複雑な構造により、従来の温度計測技術の適応が困難である。このため、HTTRの場合、燃料 温度は冷却ガスの温度や原子炉の運転出力から工学的因子を考慮した解析により間接的に求めて おり、原子炉出口冷却材温度950℃の高温試験運転時においては、燃料最高温度を約1435℃と予 測している⁶⁾。このように、燃料温度を設計限界温度に対して保守的に低く制限することは、高 温ガス炉の性能を制限する要因となる。また、ブロック型炉心では²³⁵U濃縮度、運転出力密度、 制御棒位置、燃焼度の進行などにより燃料温度が部分的に異なるため、炉心各部の詳細な温度デ ータを取得することができれば炉心設計の高度化に貴重なデータとなる。

そこで、高温ガス炉の燃料集合体の温度測定を目的とした温度モニター⁷⁾を開発した。温度モ ニターは、温度検出素子を燃料棒や黒鉛ブロック等の被測温体に挿入して計測する。このため、 被測温体の構造や形状に制約を受けることなく測定が出来る特徴を有している。温度モニターの 基本は独国の蒸気タービン発電高温ガス実験炉(AVR)のペブル型燃料に用いられたメルトワイヤー方 式⁸⁾であり、これをブロック型燃料向けに改良したものである。おもな改良点は、合金の組成を 考慮して測定精度を高めた点と、使用、取扱いなどを考慮して機械的な衝撃を緩和する構造とし た点である。温度モニターは、炉内で使用する際の温度を炉外試験において模擬し、その適用性 を確認しているが、高エネルギーの放射線下で使用するため、温度モニターの照射特性を把握す る必要があった。本報告は、材料試験炉(JMTR)での照射試験及び照射後試験により得られた温度 モニターの照射特性についてまとめたものである。

2. 温度モニター

2.1 温度モニターの概要

温度モニターの概略を Fig. 2.1 に示す。照射試験に供した温度モニターは融点の異なる合金 製ワイヤーを石英管に封入した直径 1.5mm、長さ 10mmのもので、22 種類の温度モニターに より温度 600~1400℃を測定範囲としている。

温度履歴の評価は照射試験後として、JMTRのホットラボでキャプセルから取り出し、目視ま たは X 線撮影により合金ワイヤーの溶融状態を観察して燃料が経験した最高の温度を決定する。 合金ワイヤーは照射試験により溶融温度に達し、溶融すると線状のものが球状に形状を変える ので識別が容易である。

2.2 温度モニターの確証試験⁷⁾

温度モニターの合金ワイヤーについては、使用条件を考慮して耐放射線性、耐熱性を有する 材料を選択した上で合金組成を調整し、ワイヤーに加工した素線で融点の確認試験を行なって いるが、素線を石英管に封入して温度モニターに加工する際、高温で加熱封入するため熱的影 響を受ける。この時、素線に酸化や溶融が起こると組成変化による融点の変化が生じる。この ため、実験に使用した試料(温度モニター)は同一の条件で製作したものの一部を電気炉で加 熱し、素線で試験した同じ温度で溶融することを確かめて、加工による熱影響の無いことを確 認している。耐熱性及び共存性については使用環境(温度、還元性雰囲気)を模擬した炉外試験 を行ない、健全性確認をしている。

3. 照射キャプセル

温度モニターの照射健全性を調べるため、JMTRの照射キャプセル 99M-38A と 99M-39A による照 射試験を行った。構造は2体とも同じで、内筒に温度モニターを20素子封入し、その外側をモリ ブデン製の熱媒体、外筒が直径40mmのステンレス製である。照射中の試料温度は熱媒体とした モリブデンのッ発熱を熱源とし、温度調節は外筒と内筒間に封入したヘリウムガス濃度を調節し て制御している。温度計測はキャプセルの軸方向3箇所、周方向3箇所に配したN型熱電対で計 測している。このほか、中性子照射量を評価するフルエンスモニター(熱中性子、高速中性子) を試料近傍に挿入してある。1体のキャプセルには3本の内筒が入っており、各々3本の内筒は、 各々20個のアルミナホルダーに入れた温度モニターが挿入されていて、温度モニターの種類は3 本とも同一のものを装荷している。ただし、その中の1本は温度モニターを逆の配列として、計 測温度、実験の確実性を図った。

発熱体の γ 発熱率分布及び封入試料の照射位置関係を Fig. 3.1 に示す。99M-38A キャプセルの 概略を Fig. 3.2 に示す。照射試験に供した温度モニターの仕様を Table3.1 に示す。温度モニター の計測範囲は 99M-38A で 601℃~1322℃、99M-39A で 715℃~1392℃である。温度モニターを内筒 に組み込んだ外観写真及び X 線透過写真を Photo. 3.1 と Photo. 3.2 に示す。

4. 照射試験

温度モニターの照射健全性を調べるため照射試験を JMTR で行なった。試験では製作した全種類の温度モニターを試験するため 2 体の照射キャプセル (99M-38A 及び 99M-39A) を低温(約 650~1100℃)及び高温(950~1400℃)で照射し、高速中性子照射量 1.6×10²⁵m⁻²~6.9×10²⁴m⁻² (E>0.18MeV)の実績を得た。この際、温度モニターの融点は JMTR 照射孔の中性子束分布を考慮 した配置とした。

4.1 照射条件

99M-38A、99M-39A キャプセルの照射試験条件を **Table4.1**に示す。99M-38A キャプセルは JMTR の J-11 照射孔で5サイクル、照射温度~1100℃、この間の中性子照射量はフルエンスモニター の分析から 1.6×10²⁵ (E>0.18MeV)、99M-39A キャプセルは G-10 照射孔で2サイクル照射温度~ 1400℃、で中性子照射量 1.3×10²⁵ (E>0.18MeV) である。

4.2 照射履歴

(1) 99M-38A キャプセル

平成12年10月4日JMTRの第135サイクル運転から試験が開始された99M-38Aキャプセルの 照射温度履歴をFig.4.1に示す。原子炉の運転出力上昇中、キャプセルはヘリウムダンプ状態 (熱伝導の媒体となるヘリウムガスを照射キャプセル内外筒間へ充填し照射試料が除熱される 状態。温度480~510℃)で運転し、原子炉出力が50MW(全出力)に到達後、温度制御装置を操 作して昇温を開始し、約1時間で1100℃の目標の照射温度にした。また、運転サイクル終了の ときも、原子炉の運転停止前に1時間をかけて照射温度からヘリウムダンプ状態に徐冷してキ ャプセル構造に掛かる熱応力の軽減を図った。第135~139サイクルで、試料温度を制御する熱 電対(No.5)はFig.4.1に示すように1100~1080℃で、一定な温度で試験が行なわれている。 照射試験139サイクル終了近くになってNo.6の熱電対指示に乱れが生じその後温度指示が無く なったが、これと同位置の周方向に配した熱電対No.5が正常な温度指示であることから熱電対 のトラブルによるものと判断して、キャプセルの試験は予定通りの温度で行なった。

キャプセル上部と下部は直接の温度制御はなく、照射時間が増すにつれて温度上昇が生じている。

(2) 99M-39A キャプセル

99M-39A キャプセルは平成 13 年 1 月 12 日 JMTR G-10 照射孔で第 137 サイクルから 2 サイク ルの予定で試験を開始した。キャプセルの照射温度は最高が 1400℃で、制御は 99M-38A キャプ セルと同じ要領である。Fig. 4.2 に 99M-39A キャプセルの照射温度履歴を示す。

各サイクル共一定な温度で試験が行なわれている。照射温度は Fig. 3.2 に示したキャプセル 縦方向中央部に配した熱電対 TC5 で制御を行っていたが、137 サイクル運転の中頃に同位置に 配した熱電対 TC6 がやや高い温度を指示したので熱電対 TC6 に切り替えて行った。また、137 サイクル運転の終了近くになってキャプセル上側に配した 3 対の熱電対と下側 1 対の熱電対が 正常な温度を示さなくなった。

138 サイクル運転は前サイクルの熱電対の損傷、温度指示状況から試験温度を100℃低く設定 して、1300℃として行なった。試験開始まもなくしてキャプセル下部に配した熱電対 TC9 に異 常が見られた。しかし、キャプセル中央部の高温部に配した熱電対に異常な指示が見られなか ったため、照射試験は予定通りに行なった。

5. 照射後試験

99M-38A および 99M-39A キャプセルの照射試験が終了した後、両キャプセルを JMTR ホットラボ に移し、照射後試験を行った。照射後試験では、温度モニターを装荷した内筒の外観検査および 温度モニターの溶融状況の把握のためのX線検査の他、内筒から取り出した温度モニターを詳細 に観察するため、外観検査および EPMA (Electron Prove Micro Analysis) 観察を行なった。

5.1 内筒外観検査

照射試験が健全に行われたことを確認するため、キャプセルの解体後に取り出した内筒の外 観検査をおこなった。外観はペリースコープにより内筒の全周を拡大して観察した。99M-38A キャプセル内筒は Photo. 5.1 に示すようにいずれも照射前と変わりなく、反り等の形状の異常 は見られなかった。次に 99M-39A キャプセル内筒の外観写真を Photo. 5.2 に示す。いずれの内 筒についても反り等の形状の異常は見られなかった。なお、39A-1 内筒が下端から約 1/3 の付 近で折損しているのは、キャプセル解体時に生じたものである。

5.2 X線検査

温度モニターの溶融を確認するためキャプセル内筒のX線透過検査を行った。99M-38A 試料、 99M-39A 試料のX線ラジオグラフ検査結果を Photo. 5.3 と Photo. 5.4 に示す。

Photo. 5.3 において、38A-1、2 内筒はキャプセル軸方向の照射温度分布と同じになるよう温度モニター融点の試料配置をしたもので、照射温度より融点の低い温度モニターとその近傍の温度モニターは全て溶けている。38A-3 内筒は上記試料(38A-1、2)と温度モニターの試料配列を逆にしたもので、X線検査で溶融の状況は同じ傾向が見られるが、試料の融点が照射温度より高いにもかかわらず溶けているもの(Q)と、試料が喪失しているもの(A)が観察される。試験温度より融点の高い温度モニターで溶けているものは、その温度差が169℃(38A-3:M)~135℃(38A-1、2:P)になる。Fig. 5.2 に示す照射温度分布はキャプセル上部、中央部、下部に配した3箇所の熱電対測定から中間を推測したもので、ある程度の誤差や、試験中の変動なども考えられる。

Photo. 5.4 において、99M-39A についてはすべての温度モニターに溶融またはワイヤーの喪 失が観察されたが、これは照射温度を温度モニターの融点より高めに設定したためと考えられ る。

5.3 温度モニター外観検査

X線透過検査後、内筒を解体し、温度モニターを取り出しペリースコープによる外観検査を 行った。アルミナのホルダーは外観に変化なく、全て健全であった。照射温度 920℃以下で試 験した温度モニターは石英が透明で内部の溶融したワイヤーの形状を観察できるが、この温度 を超えると石英が失透している。このような試料には石英の表面にアルミナウールの付着、割 れ等の損傷が見られる。99M-38A キャプセルで照射した温度モニターの外観写真を Photo. 5.5 に示す。照射温度 (955℃) より融点が約 284℃高い温度モニターQ (試料番号 38A-3-7) は Photo. 5.6 に示すように石英の内部が黒くなっており、X線検査でも異常が検出された。

また、ワイヤーの喪失の見られた温度モニターの外観検査の結果、いずれのキャプセルでも 石英管の劣化及び割れが観察された。

5.4 EPMA 観察

破損した温度モニターからの合金の分布や内筒外部への漏洩の有無を調べるため、全ての温 度モニターの溶融又は一部ワイヤーの喪失が観察された 39A 内筒について温度モニター及び黒 鉛保持棒の EPMA 観察を行った。

99M-39A の 3 本の内筒は、温度モニターの種類が 3 本とも同一のものを装荷している。装荷 された全ての合金成分及びアルミナ、石英の成分元素を EPMA の対象とした。測定は黒鉛保持 棒の内表面及び断面とし、外部へ漏洩する可能性が高い端栓部についても測定した。測定対象 を Table 5.1 にまとめる。

観察の結果、いずれの試料でもアルミナ及び石英のものとみられる Al 及び Si が観察された。 合金が喪失した 39A-3-18 については、黒鉛保持棒内側表面においてその成分である Cu が顕著 に観察された。また、39A-3 黒鉛保持棒の上側端栓のネジ部表面では、堆積物と混在して Cu が 顕著に観察された。Cu は主にアルミナ(Al)や石英(Si)の堆積物と共に検出されていることから、 堆積物に付着したものが移動したものとみている。Cu については、39A-3-18 周辺の黒鉛保持棒 の半径方向断面では Cu が観察されなかったことから、黒鉛内部への拡散は起こっておらず保持 棒内に保持されているものと考えられる。また、Pd 及び Au は、X 線ラジオグラフ結果よりア ルミナホルダー中に有効に保持されており、39A-1-10, 11 間でアルミナ同士が癒着した部分に おいて観察された。

6. 考察

(1) 照射下の温度モニターの溶融特性に関する考察

照射条件が同じで試験した 99M-38A キャプセル 1、2 内筒の X 線検査で、温度モニターの溶融 状況は全く同じで両者に差がなかった。この結果は温度モニターの溶融温度にばらつきが少な く、温度範囲も隣接する温度モニター融点の差 46℃(R-P)~104℃(M-Q)以内にあったも のと思われる。従って、温度モニター融点差の小さいものを用いることにより、より正確な温 度計測が可能となる。80℃~175℃照射温度より融点の高い温度モニターが溶けていることが観 察された点について、キャプセルの照射温度は最も高温となるキャプセル軸方向中央部の熱電 対で制御しており、一定な温度で制御されている。しかし、照射温度履歴は Fig. 4.1 に示すよ うにキャプセル下段と上段に配した熱電対指示温度が照射時間の増加と共に上昇している。こ の上昇は下段の場合、最初の1サイクルで約50℃で、以降上昇巾の減少は見られるものの5サ イクルで 175℃上昇し、上段温度についても 87℃の上昇がある。この温度上昇は熱電対の中性 子照射による起電力変化の減少(熱電対のドリフト)によることがこれまでの試験から知られ ている。このため、制御温度(起電力)は一定でも実質的には熱起電力の減少に相当する分高 くなっていることになる。従って、温度モニターが照射された温度は熱電対が指示した温度よ りもさらに高い温度で試験されたことになり、この結果が Table6.1 に示す照射温度と温度モニ ター溶融の差になるものと解される。高速中性子照射による熱電対のドリフト効果を中性子照 射量の分布と対比して温度の補正をしてみると Fig. 6.1 示すようになり、温度モニターの溶融 結果と良い一致が見られる。

99M-39A キャプセルについては照射温度が高かったため、ほとんどの試料が溶けてしまい、 石英管にも損傷が生じており、高温、高放射線下では使用制限が必要である。

(2) 合金の拡散に関する考察

破損した温度モニターの合金は、黒鉛やアルミナ微粉末等に付着して移動した可能性が高い ことが分かった。また、融点以上の温度においてもアルミナホルダーの内側に概ね保持された と考えられる。温度モニターの合金は蒸気圧が低いものを選定しているが、1400℃の照射温度 においても Cu の蒸気圧で 10⁻²Pa、Ag で 100Pa のオーダーと考えられ、一部は蒸発分が含まれ ると考えられる。

(3) 温度モニターの破損原因に関する考察

温度モニターの破損原因について、温度による内圧の変化は照射温度における蒸気圧の上昇 分程度と考えられるため、内圧破損とは考えにくい。一方、照射後試験において温度1000℃よ り上では石英の失透及び粒界中への合金の浸透が観察されており、粒界の析出により石英の著 しい強度低下が破損の直接の原因と考えられる。

(4) 温度モニター材質の両立性に関する考察

石英(SiO₂)の融点は1400℃より高いが、少量のアルミナ(Al₂O₃)と反応すると液相生成温

度が急激に低下してしまう特性があり、Si0₂と 3A1₂0₃・2Si0₂(ムライト)が混ざったような組 成となる。本試験の結果においては、高温で照射された一部の温度モニターにおいて石英とア ルミナの接触部で材質の劣化が確認された。しかしながら、本試験の結果から、温度モニター は温度 1100℃以下なら 90 日程度、50 日以下であれば温度 1300~1350℃程度までは使用可能で あると考えられる。以上のことから、本温度モニターを用いた高温ガス炉燃料体の温度測定試 験を検討するにあたっては、原子炉出力や運転サイクル数を調整することを含め、温度モニタ ーを装荷する燃料体部位の温度を考慮して用いるか、万一モニターが破損した場合でも問題の ない部位に使用する、または黒鉛保持棒等を併用して使用することが望ましい。

7. まとめ

温度モニターの照射特性を調べるため、JMTR でキャプセル照射を実施し、照射後試験として X 線ラジオグラフや外観検査を実施した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 照射条件が同じで試験した 99M-38A キャプセル 1、2 内筒の X 線検査で、温度モニターの 溶融状況は全く同じで両者に差がなかった。高速中性子照射による熱電対のドリフト効果 を中性子照射量の分布と対比して温度を補正すると、温度モニターの溶融結果は補正した 熱電対の値と良く一致した。
- (2)本温度モニターは、照射温度が1100℃以下なら90日程度、50日以下であれば照射温度1300 ~1350℃までは使用可能と考えられる。高温ガス炉燃料体の温度測定試験への応用を検討 するにあたっては、温度モニターを装荷する燃料体部位の温度を考慮して用いるか、万一 モニターが破損した場合でも問題のない部位への装荷や黒鉛保持棒等を併用した使用が 望ましい。

謝辞

本検討を行うに当たり、伊与久達夫研究主席に貴重なコメントを頂いた。また、温度モニター の照射後試験において材料試験炉部ホットラボ課相沢静男氏にご支援頂いた。ここに深く感謝致 します。

参考文献

- 1) S.Saito, et. al., "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332(1994).
- 2) 中川繁昭他,「高温工学試験研究炉の出力上昇試験―試験経過及び結果の概要―」, JAERI-Tech 2002-069(2002).
- 3) 藤川正剛他,「HTTR(高温工学試験研究炉)の出力上昇試験」,日本原子力学会和文論文誌, Vol.1,No.4, pp.361-372 (2002).
- S.Fujikawa,et.al., "Achievement of Reactor Outlet Coolant Temperature of 950 C in HTTR", J.Nucl.Sci.Technol., Vol.41, No.12, pp.1245-1254(2004).
- 5) Y. Kurata, et al., "The effect of heat treatment on density and structure of SiC", J. Nucl. Mater. 92, p.351(1980).
- 6) 栃尾大輔他,「高温ガス炉 HTTR の高温試験運転における燃料温度の評価」、日本原子力学会 和文論文誌, Vol.5, No.1, pp.57-67 (2006).
- 7) 沢和弘, 私信.
- 8) The Society for Energy Technologies, "AVR-Experimental High-Temperature Reactor ", VDI-Verlag Gmbh(1990).

JAEA-Research 2008-096

	- 40	10011(1)	, 00112 00110	apo di o irradia	dioir sampros.	
Distance from JMTR core	Sample	Sample	O	composition ratio	99M-38A	A capsule
(mm)	No.	ID	Composition	(%)	38A-1,2	38A-3*
					(melting point:°C)	(melting point: $^{\circ}C$)
-185	1	А	Bi/Sb	23/77	601	1161
-165	2	В	Ag/Ge	81.5/18.5	670	1212
-145	3	С	Ag/Ge	86/14	715	1222
-125	4	D	Ag/Cu	72/28	789	1268
-105	5	E	Ag/Cu	87.5/12.5	844	1282
-85	6	F	Ag/Cu	95/5	910	1322
-65	7	G	Ag	99.99	967	1239
-45	8	Н	Ag∕Au	66/34	988	1135
-25	9	Ι	Ag/Au	39/61	1037	1111
-5	10	J	Au	99.99	1064	1084
15	11	К	Cu	99.99	1084	1064
35	12	L	Pd/Au	2/98	1111	1037
55	13	М	Pd/Au	3/97	1135	988
75	17	Q	Pd/Au	9/91	1239	967
95	20	Т	Pd∕Au	16/84	1322	910
115	19	S	Pd∕Au	13/87	1282	844
135	18	R	Pd/Au	11/89	1268	789
155	16	Р	Pd/Au	7.5/92.5	1222	715
175	15	0	Pd/Au	6/94	1212	670
195	14	Ν	Pd/Au	4/96	1161	601

Table3.1(1/2) 99M-38A capsule irradiation samples.

* : The line of the sample in 38A-3 was reversed to that in 38A-1/2.

Distance from JMTR core	Sample	Sample	Composition	composition ratio	99M-38A	v capsule					
(mm)	No.	ID	Composition	(%)	38A−1,2 (melting_point·°C)	$38A-3^*$					
-165	3	С	Ag/Ge	86/14	715	1239					
-145	4	D	Ag/Cu	72/28	789	1268					
-125	5	E	Ag/Cu	87.5/12.5	844	1282					
-105	6	F	Ag/Cu	95/5	910	1356					
-85	7	G	Ag	99.99	967	1392					
-65	8	Н	Ag∕Au	66/34	988	1322					
-45	9	Ι	Ag∕Au	39/61	1037	1222					
-25	10	J	Au	99.99	1064	1212					
-5	11	К	Cu	99.99	1084	1161					
15	12	L	Pd∕Au	2/98	1111	1135					
35	13	М	Pd∕Au	3/97	1135	1111					
55	14	Ν	Pd/Au	4/96	1161	1084					
75	15	0	Pd/Au	6/94	1212	1064					
95	16	Р	Pd/Au	7.5/92.5	1222	1037					
115	20	Т	Pd/Au	16/84	1322	988					
135	22	V	Pd/Au	25/75	1392	967					
155	21	U	Pd/Au	20/80	1356	910					
175	19	S	Pd/Au	13/87	1282	844					
195	18	R	Pd/Au	11/89	1268	789					
215	17	Q	Pd/Au	9/91	1239	715					

Table3.1(2/2) 99M-39A capsule irradiation samples.

* : The line of the sample in 39A-3 was reversed to that in 39A-1/2.

capsules.	
and 99M-39A	
of 99M-38A	
n conditions	
Irradiatio	
Table4.1	

Capsules No.				99M-38A			99M-39A	
Graphite Sleeve	No.		38–1	38–2	38–3	39–1	39–2	39–3
Irradiation hole			ر ا	MTR J-1		ר	ATR G-1	0
Operation cycle			135	∼ 139 (5cycl	le)	137	∼ 138 (2cyc	le)
Irradiation temp (Maximum value	eratı e)	ure(°C)		~1100			~ 1400	
		-185~-165	8.80E+24	6.86E+24	6.99E+24	8.32E+24	8.26E+24	7.27E+24
	(ա	-145~-125	9.69E+24	8.22E+24	8.76E+24	9.37E+24	9.21E+24	8.44E+24
	iw):	-105~-85	1.23E+25	9.67E+24	9.44E+24	1.04E+25	1.07E+25	9.49E+24
Fast neutron	core	$-65 \sim -45$	1.29E+25	1.05E+25	1.03E+25	1.12E+25	1.10E+25	9.88E+24
fluences	ə əya	-25~-5	1.41E+25	1.08E+25	1.10E+25	1.17E+25	1.19E+25	1.05E+25
(E >0.18MeV)	ի աօ	15~35	1.48E+25	1.15E+25	1.20E+25	1.23E+25	1.19E+25	1.09E+25
(1/m ⁻)	e fد	$55 \sim 75$	1.55E+25	1.21E+25	1.21E+25	1.27E+25	1.22E+25	1.13E+25
	րուե	95~115	1.55E+25	1.23E+25	1.26E+25	1.29E+25	1.28E+25	1.11E+25
	Dis	$135 \sim 155$	1.50E+25	1.21E+25	1.23E+25	1.23E+25	1.25E+25	1.09E+25
		$175 \sim 195$	1.49E+25	1.16E+25	1.15E+25	1.19E+25	1.17E+25	1.05E+25

		Temperature		
samples	Graphite	monitor	Floments	Remarks
samples	sleeve No.	samples	Elements	Kemarks
		(Irrad. Temp.)		
	39A-2	39A-2-10	Al (Alumina)	Region in maxim tempretur
		(1420°C)	Si (Quarts)	(1420°C)
			Pd	39A-2-10(Pd/Au=2/98),39A-2-9 (Cu)
			Au	39A-2-5(Ag) was failed and the wire
			Cu melting	(Ag) was lost.
eve	39A-1	39-A-1-14	Ag wire	39A-1-14(Pd/Au=7.5/92.5)
e sle		(1400°C)	Ge	No monitor without melting was
phit)	observed.
Gra	39A-3	39A-3-18		The metal was disappeared in
		(1380°C)		39A-3-18
				(Ag/Cu=87.5/12.5)
	39A-3	39A-3top		The metal was disappeared in
		top-end pin		39A-3-18
		(1260°C)		(Ag/Cu=87.5/12.5)
	39A-1	39A-1-10,11	Al (Alumina)	39A-1-10(Pd/Au=2/98) and
der			Si (Quarts)	39A-1-11(Pd/Au=3/97) was observed
loh 1		(1420°C)	Pd 7	
mine			Au > melting	
Aluı			Cu J wire	

 Table5.1
 EPMA observations of temperature monitor samples irradiated in 99M-39A capsule.

1

Г

Agreement of melting point with irradiation temperature	38A-3	0	0	0	0	0	0	∇	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
X-ray radiograph	38A-3	0	0	0	0	0	0	∇	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	
A-3	irradiation point	823	845	867	889	911	933	955	977	966	1020	1042	1064	1086	1108	1103	1098	1093	1088	1083	1078	
38	melting point	1161	1212	1222	1268	1282	1322	1239	1135	1111	1084	1064	1037	988	967	910	844	789	715	670	601	
Graphite sleeve No., monitor ID	38A-3	Ν	0	Ч	Я	S	T	ð	Μ	Ţ	У	ſ	1	Н	5	Ŀ	Ш	D	C	В	A	
Agreement of melting point with irradiation temperature	38A-1, 2	0	0	0	0	0	0	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	0	0	0	0	Х	Х	Х	
X-ray radiograph	38A-1, 2	Х	×	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	0	0	0	0	Х	Х	Х	
A-1,2	irradiation point	823	845	867	889	911	933	955	977	998	1020	1042	1064	1086	1108	1103	1098	1093	1088	1083	1078	
38,	melting point	601	670	715	789	844	910	967	988	1037	1064	1084	1111	1135	1239	1322	1282	1268	1222	1212	1161	tor melts
Graphite sleeve No., monitor ID	38A-1, 2	A	В	C	D	Э	ц	5	Н	Ι	٦	¥	Γ	Μ	Ø	T	S	Я	Ч	0	Ν	of the moni
Distance from JMTR core	(mm)	-185	-165	-145	-125	-105	-85	-65	-45	-25	<u> </u>	15	35	22	15	<u> </u>	115	135	155	175	195	X': Wire c

Table 6.1(1/2) Results on the X-ray radiograph with corrected irradiated temperatures for 99M-38A samples.

Agreement of melting point with irradiation temperature	38A-3	0	0	0	0	0	0	∇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
X-ray radiograph	38A-3	0	0	0	0	0	0	∇	Х	Х	Х	Х	X	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	
A-3	irradiation point	941	970	966	1027	1055	1082	1108	1134	1159	1184	1208	1231	1254	1276	1272	1268	1263	1257	1251	1243	
38	melting point	1161	1212	1222	1268	1282	1322	1239	1135	1111	1084	1064	1037	988	967	910	844	789	715	670	601	
Graphite sleeve No., Monitor	88A-3	Z	0	Ч	Я	S	T	ð	Μ	Γ	К	ſ	Ι	Н	5	4	Э	D	Э	В	A	
Agreement of melting point with irradiation temperature	38A-1, 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Х	0	0	0	0	0	0	
X-ray radiograph	38A-1, 2	×	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	0	0	0	0	Х	Х	×	
A-1,2	irradiation point	941	970	966	1027	1055	1082	1108	1134	1159	1184	1208	1231	1254	1276	1272	1268	1263	1257	1251	1243	
38	melting point	601	670	715	789	844	910	967	988	1037	1064	1084	1111	1135	1239	1322	1282	1268	1222	1212	1161	tor melts
Graphite sleeve No., ID	38A-1, 2	A	В	Ö	D	Ш	L	ŋ	Н	Ι	J	А		Σ	Ø	Т	S	Я	Р	0	N	of the moni
Distance from JMTR core	(աա)	-185	-165	-145	-125	-105	-85	-65	-45	-25	-2	15	35	55	75	95	115	135	155	175	195	X': Wire c

Table 6.1(2/2) Results on the X-ray radiograph with corrected irradiated temperatures for 99M-38A samples.





Fig.3.1 γ -heat distribution and positions of irradiation samples of 99M-38A and 99M-39A in the JMTR core.

JAEA-Research 2008-096





Fig.4.1 Irradiation temperatures of 99M-38A capsule.









Fig.6.1 relationship between melting points and corrected irradiation temperatures of temperature monitor in 99M-38A capsule.



38A-3





39A-3





Photo 3.2 (1/2) X-ray radiograph of temperature monitors in 99M-38A(before irradiation).

JAEA-Research 2008-096









Photo.5.2 Appearance of graphite sleeve loaded in 99M-39A (after irradiation).











99M-38A



Photo.5.5 (1/2) Appearance of temperature monitor in 99M-38A (after irradiation).

99M-38A



Sample ID	38A-3-12
Magnification	imes 7.2
	Quarts

Sample ID	38A-3-12
Magnification	imes 5.8
Alun	nina fiber

 $\times 4.1$

Sample ID

Magnification

Photo.5.5	(2/2)	Appearance of temperature monitor in 99M-38A	(after irradiation).
-----------	-------	--	----------------------

	99M-38A		
	337		
A DAMAGE CONTRACTOR	E CARLE		

1

Sample ID	38A-3-7
Magnification	imes 7
	Quarts



Sample ID	38A-3-7
Magnification	imes 5.2
Alur	nina fiber

11	Π	Π	Щ	Π		Π

Sample ID	38A-3-7
Magnification	$\times 4.1$
Alun	nina holder



表 1. SI 基本单位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	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	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例					
_{知力} 是 SI 表	基本単位				
和立重 名称	記号				
面 積 平方メートル	m ²				
体 積 立法メートル	m ³				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加速度メートル毎秒毎	₿ m/s ²				
波 数 毎メートル	m ⁻¹				
密度, 質量密度キログラム毎立方	メートル kg/m ³				
面 積 密 度キログラム毎平方	メートル kg/m ²				
比体積 立方メートル毎キ	ログラム m ³ /kg				
電流密度アンペア毎平方	メートル A/m^2				
磁界の強さアンペア毎メー	トル A/m				
量濃度(a),濃度モル毎立方メー	トル mol/m ³				
質量濃度 キログラム毎立法	メートル kg/m ³				
輝 度 カンデラ毎平方	メートル cd/m^2				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは電気元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
亚 面 鱼	ラジア、(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
	フテラジア、(b)	(c)	1 (b)	m ² /m ²	
		sr Ha	1	-1 -1	
山 议 效		N		s 1 -2	
	-1-1-	IN	0	m kg s	
上 力 , 応 力	バスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²	
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光束	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与,	HILL	G	тл	2 -2	
カーマ	221	Gy	J/Kg	m s	
線量当量,周辺線量当量,方向		a	7.0	9 -9	
性線量当量,個人線量当量	シーベルト (g)	Sv	J/kg	m″s″	
酸素活性	カタール	kat		s ^{'1} mol	

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SE接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位変種の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位		
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘质	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語					
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メガ	Μ	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される数値が美敏的に待られるもの					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原子質量単位	u	1u=1 Da			
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値			
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	М	1 M=1852m			
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²			
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np				
ベ		N	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.			
デ	ジベ	N	dB -				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\rm sb}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹				

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 🏠 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\boldsymbol{\nu}$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\boldsymbol{\nu}$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I		N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	1	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク		П	\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています