JAEA-Research 2013-032



オンサイト非破壊検査技術の開発

-HTTRの内部構造可視化予備試験-

Development of Non-destructive Inspection Method for On-site Observation -Preliminary Examination for Internal Visualization of HTTR-

竹上 弘彰	寺田 敦彦	野口 弘喜	上地 優
小野 正人	高松 邦吉	伊藤 主税	日野 竜太郎
鈴木 敬一	大沼 寛 勇	图村 忠彦	

Hiroaki TAKEGAMI, Atsuhiko TERADA, Hiroki NOGUCHI, Yu KAMIJI Masato ONO, Kuniyoshi TAKAMATSU, Chikara ITO, Ryutaro HINO Keiichi SUZUKI, Hiroshi OHNUMA and Tadahiko OKUMURA

> 大洗研究開発センター 大洗研福島技術開発特別チーム

Fukushima Project Team Oarai Research and Development Center

December 2013

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, 2013

JAEA-Research 2013-032

オンサイト非破壊検査技術の開発 -HTTRの内部構造可視化予備試験-

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 大洗研福島技術開発特別チーム

竹上 弘彰⁺¹、寺田 敦彦⁺¹、野口 弘喜⁺¹、上地 優、小野 正人⁺²、高松 邦吉、 伊藤 主税、日野 竜太郎⁺³、鈴木 敬一^{*1}、大沼 寬^{*1}、奥村 忠彦^{*2}

(2013年8月23日 受理)

福島第一原子力発電所事故では、燃料デブリの取り出しが廃止措置の早期実現に向けて 重要な課題の1つであり、燃料デブリ取り出しの準備作業として、燃料デブリの位置等の 把握、炉内の損傷・汚染機器の状況確認のための格納容器及び圧力容器の調査が計画され ている。このために、極めて高線量の格納容器及び圧力容器内に立ち入らずに調査を可能 とする、オンサイト遠隔検知技術の開発が不可欠であり、遠隔操作による炉内観察技術等 の研究開発が精力的に進められている。本研究では、原子炉建屋外から非破壊で燃料デブ リの位置情報を取得可能な技術の候補として、宇宙線ミューオンを用いた非破壊検査技術 に着目した。この技術は地盤探査を目的として開発された技術であることから、原子炉内 部調査への適用性を検証するため、既存のミューオン受光システムを用いて、大洗研究開 発センターに設置されている高温工学試験研究炉(HTTR)の内部構造可視化予備試験を実 施した。可視化予備試験の結果、同時計数法を用いたミューオン非破壊検査技術により、 HTTR 内部の炉心、コンクリートのような高密度の構造物が判別可能であることを示した。 また、オンサイト測定における課題を検討した結果、既存装置の改良により対応可能であ ることを示した。

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

+1 原子力水素・熱利用研究センター 水素利用研究開発ユニット

+2 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

+3 原子力水素・熱利用研究センター

*1 川崎地質(株)

*2 (一財) エンジニアリング協会

i

JAEA-Research 2013-032

Development of Non-destructive Inspection Method for On-site Observation -Preliminary Examination for Internal Visualization of HTTR-

Hiroaki TAKEGAMI⁺¹, Atsuhiko TERADA⁺¹, Hiroki NOGUCHI⁺¹, Yu KAMIJI, Masato ONO⁺², Kuniyoshi TAKAMATSU, Chikara ITO, Ryutaro HINO⁺³, Keiichi SUZUKI^{*1}, Hiroshi OHNUMA^{*1} and Tadahiko OKUMURA^{*2}

> Fukushima Project Team, Oarai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

> > (Received August 23, 2013)

In the TEPCO's Fukushima Daiichi NPS, one of the important problems in controlling the accident is removing of fuel debris. As this preparation, investigation of the internal reactors is planned for searching the fuel debris. Because of the high dose around the reactors, development of remote sensing method is required to observe from the outside of the reactor. We focused on a non-destructive inspection method using cosmic-ray muons as a candidate method for observation of internal the reactor from the outside of a reactor building. In this study, the applicability of this method for the reactor investigation was confirmed by a preliminary examination with High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). From the results of this examination, it appears that high density structures, such as the core and concrete walls, were able to observe by using muon telescope with coincidence method from the outside of the pressure vessel. Furthermore, we proposed some improvements of this muon inspection system for on-site investigation at the Fukushima Daiichi NPS.

Keywords: HTTR, Cosmic-ray Muons, Fuel Debris, Non-destructive Inspection, Density

⁺¹ Hydrogen Application Research & Development Division, Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

⁺² Department of HTTR, Oarai Research and Development Center

⁺³ Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

^{*1} Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.

^{*2} Engineering Advancement Association of Japan

目次

1. 緒言	1
 宇宙線ミューオンを用いた非破壊検査技術の概要 	2
2.1 宇宙線ミューオンの概要	2
2.2 宇宙線ミューオンを用いた非破壊検査	2
3. 高温工学試験研究炉(HTTR)の内部構造可視化予備試験方法	5
3.1 ミューオン受光システム	5
3.2 測定方法	6
4. HTTR 可視化予備試験結果	8
4.1 測定結果	8
4.2 面密度による評価	8
5. 原子炉内部調査への適用性	10
6. まとめ	12
謝辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Nondestructive Inspection Method Using Cosmic Ray Muons	2
2.1 Outline of Cosmic Ray Muons	2
2.2 Nondestructive inspection method using cosmic ray muons	2
3. Experimental Procedure of Preliminary Examination for Internal Visualization of HTTR	5
3.1 Muon Telescope	5
3.2 Measurement Procedure	6
4. Results of Preliminary Examination for Internal Visualization of HTTR	8
4.1 Measurement Results	8
4.2 Evaluation by Surface Density	8
5. Applicability to Inspection of Internal Reactor	10
6. Concluding Remarks	12
Acknowledgements	12
References	13

表リスト

Table 1 代表的な素粒子の透過距離	14
Table 2 物質ごとの素粒子透過距離	14

図リスト

Fig.1 日本の海抜 0m におけるミューオン強度	15
Fig.2 ミューオンを用いた地下下水管の3次元可視化	16
Fig.3 HTTR 可視化予備試験に用いたミューオン受光システム	17
Fig.4 同時計数法の原理	18
Fig.5 ミューオン受光システムの設置位置(測定地点)	19
Fig.6 測定方向(方位角)	20
Fig.7 測定方向(天頂角)の一例	21
Fig.8 面密度と1日あたりの同時計数の関係	22
Fig.9 各測定地点の同時計数	23
Fig.10 原子炉の有無による同時計数の比較	24
Fig.11 各測定地点の面密度分布	25

1. 緒言

福島第一原子力発電所事故では、燃料デブリの取り出しが廃止措置の早期実現に向けて 重要な課題の1つであり、「東京電力(株)福島第一原子力発電所1~4号機の廃止措置等 に向けた中長期ロードマップ(平成23年12月21日、政府・東京電力中長期対策会議決定)」 ¹⁾においても、燃料デブリの取り出し等を進めていくことが示されている。

燃料デブリ取り出しの準備作業として、燃料デブリの位置等の把握、炉内の損傷・汚染 機器の状況確認のための格納容器及び圧力容器の調査が計画されている。このために、極 めて高線量の格納容器及び圧力容器内に立ち入らずに調査を可能とする、オンサイト遠隔 検知技術の開発が不可欠である。

(独)日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)においても、ファイバプローブ等 を用いた遠隔操作による炉内観察技術等の研究開発が精力的に進められており²⁾、燃料デブ リの詳細な位置情報及び状況の把握が期待される。ただし、線量の高い原子炉建屋内での 作業は避けられず、短時間での効率的な調査が求められる。また、このような観察技術は 広範囲を調査するには時間を要することから、事前にある程度調査範囲を限定できること が望まれる。そこで、非破壊検査技術を用いた、原子炉建屋の外部からの燃料デブリ位置 情報の調査を検討した。これにより、燃料デブリの概況を把握した後に、ピンポイントで ファイバプローブ等による詳細調査を行うことにより、効率的な燃料デブリ調査が可能と なると考えられる。

しかしながら、現在実用化されている X 線等を用いた非破壊検査手法では、透過距離が 短く測定可能なサイズが小さいことや、線源及び装置の遮へいが必要である等の制限があ り、屋外の大型構造物の内部調査を行うことはできないため、原子炉全体の観察には適用 できない。そこで、本研究では非常に高い物質透過能力を有する宇宙線ミューオンに着目 し、これを利用した非破壊検査手法による原子炉内部の調査を検討した。

ミューオンを用いた非破壊検査手法は、火山³⁾や地盤⁴⁾等の測定実績がある。しかしなが ら、原子炉のような複雑構造物に適用された実績に乏しく、その適用性は未知数である。 そこで本研究では、原子炉への適用性を検討するため、地盤調査に用いられた既存のミュ ーオン測定装置を用いて、原子力機構の大洗研究開発センターに設置されている高温工学 試験研究炉(HTTR)の内部構造可視化予備試験を行った。 2. 宇宙線ミューオンを用いた非破壊検査技術の概要

2.1 宇宙線ミューオンの概要

宇宙線ミューオン(muon)は、素粒子の一つで宇宙から降り注ぐ自然放射線(宇宙線) に含まれている。宇宙空間には、α粒子(ヘリウム原子核)や陽子からなる一次宇宙線が 飛び交っている。これが大気に入射すると、大気中の分子と衝突して様々な素粒子を発生 させる。この中の1つがミューオンである。

ミューオンはエネルギーが高いうえ、光速に近い速度で移動することにより寿命が延び ることから、地表あるいは地中にまで到達する。ミューオンは、上空になるほどその数が 増え、また、電子と同等の大きさの電荷を持つ荷電粒子(正と負の両方が存在)であるた め地球磁場に引き寄せられる。従って、高緯度ほど、あるいは高地ほどその量が増加する。

Table 1 に、代表的な素粒子(粒子線)の物質中の透過距離を示す⁵⁾。電子やX線の透過 距離は最大でも数 m であり、非破壊検査や医療用に利用されている。物質有の陽子・中性 子・π中間子は数 m 程度の距離を透過するが、不安定で検出も困難である。一方、ミュー オンは 100m 以上の透過距離があり検出も容易である。Table 2 に、鉄、炭素、水に対するミ ューオン及び陽子・電子の透過距離をそれぞれ示す。ここからも、ミューオンの透過能力 が格段に優れていることがわかる。

ミューオンは、宇宙から常に飛来する放射線で人体には全く無害である。このため、放 射線取り扱いのための法規制を受けることなく、安定した線源として利用することが可能 である。また、ミューオンは地表付近での強度が既知であり、日本の海抜0メートルでは、 Fig.1 に示す通りである⁶。さらに、ミューオンは物質中でも直進性に優れ、屈折や反射等 を考慮する必要が無い。これらの特徴を利用して、ミューオンを用いた非破壊検査手法の 研究開発が行われている。なお、ミューオンは密度の高い物質中では極めて微少な散乱を 生じる場合があり、これを利用した検査方法も検討されている⁷。

次節では、これまで研究開発が行われてきたミューオンを用いた非破壊検査手法について、主な手法と適用事例について説明する。

2.2 宇宙線ミューオンを用いた非破壊検査

(a) 火山体用ラジオグラフィ

火山体を透過したミューオンを検出して火山帯内部を透視する試みが行われている³⁾。火 山体ラジオグラフィは、直交する2方向に配置されたシンチレーションカウンタを使用し、 交わったところで検出されたミューオンの位置から火山体内部を透視する方法であり、ミ ューオンを用いた一種の巨大レントゲンである。

2 枚の検出器の間に、ノイズ成分である電子を遮へいするための鉄板が設置され、重量は 10.5t、寸法は 6×2.5×2.5m と大型である。消費電力は 5kW、分解能は約 250m、密度決定 精度は約 10%であるとされている。装置の改良も進められ、電力供給のためソーラーパネ ルを利用する方法が試みられている。さらに、この手法を用いて溶鉱炉内部の探査も検討 されている⁸⁾。 (b) 原子核乾版を用いたラジオグラフィ

飛来した素粒子の軌跡を記録可能な原子核乾版を用いたラジオグラフィが行われている。 この方法では、測定対象を透過したミューオンを、設置した原子核乾版に記録する。原子 核乾版は A5 用紙程度の大きさであり、数枚から十数枚並べて測定を行う。乾版そのものが ミューオン軌跡を記録するため、測定時に電源が不要である。

測定後の原子核乾版は、現像して定着させることによりミューオンによる感光を停止さ せる。解析には専用の読み取り装置を用いる必要があるため、測定結果をリアルタイムに モニタリングすることはできない。実際の測定では、2枚の原子核乾版を重ね、それらを通 過したミューオンを読み取る。

適用例として、原子力機構の大洗研究開発センターにある高速実験炉「常陽」における 基礎実験の結果が報告されており、データ分解能(画素)が40cm×40cmで、燃料周辺の高 密度のナトリウムが検出されている⁹。

(c) 3 次元トモグラフィ

地盤の空洞化を調査するために、ミューオンを利用した 3 次元トモグラフィ技術が開発 されている⁴⁾。これは、複数のミューオン透過データを用いて測定対象内部を 3 次元的に可 視化する技術である。Fig.2 に、3 次元トモグラフィ技術の適用事例を示す。この事例では、 深さ約 11m の地下通路から、その上部にある別の地下通路と埋設管を 3 次元トモグラフィ 解析により明瞭に検出している。この事例に使用した装置は、直径 24.5cm のシンチレーシ ョンカウンタを複数台用いて作業効率を向上させている。高温工学試験研究炉(HTTR)の 内部構造可視化予備試験においては、本技術で開発された計測装置を用いて実施した。装 置の詳細は第 3 章で説明する。

(d) マルチ散乱を利用した技術

(a) ~ (c) の技術はいずれも物体中を透過するミューオンを測定することにより内部の 密度構造を調査する方法である。一方、ミューオンは、物質中では屈折や反射を生じない が、原子質量の大きい物質中ではわずかに散乱(コンプトン散乱)を生じる。これを利用 した方法がマルチ散乱計測技術である。

マルチ散乱計測技術は、測定対象を挟むように検出器を設置して行い、測定対象により 散乱したミューオンの散乱角を測定する。例えば、水に対する散乱角は0.11°の散乱角であ るが、原子質量の大きい鉛では1.1°、ウランでは1.7°、プロトニウムでは1.8°である。

当初は、テロ対策としてトレーラー等による核兵器の搬送を察知するために考案された。 現在は、この技術を福島第一原子力発電所に提供するためにシミュレーション評価が行わ れている¹⁰⁾。

以上がミューオンを用いた主な非破壊検査技術であり、いずれも原子炉内部の非破壊検 査に適用できる可能性を有していると考えられる。しかしながら、原子炉のように様々な 密度の複合体である構造物の調査に用いられた実績はほとんどないため、燃料デブリの調 査に用いるためには実際に原子炉を対象とした予備試験を実施し、適用性の検証及び改良 点の抽出が必要である。

3. 高温工学試験研究炉(HTTR)の内部構造可視化予備試験方法

宇宙線ミューオンを用いた非破壊検査技術の原子炉への適用性を検証するため、原子力 機構の大洗研究開発センターに設置されている高温工学試験研究炉(HTTR)の内部構造可 視化予備試験を実施した。測定には既存のミューオン測定装置を用い、平成24年10月~ 平成25年度2月にかけて行った。

HTTR は炉心構造物が黒鉛で構成されており、ウランを主とした軽水炉の燃料体に比べ周 囲のコンクリート等との密度差が小さい。従って、HTTR において密度情報を基に炉心等の 炉内構造物を判別することができれば、水中にある燃料デブリを判別できる可能性を見い だせる。また、HTTR の格納容器の全周に、ほぼ等間隔にミューオン測定装置の設置が可能 なスペースがあり、異なる角度からの炉心観察が可能であった。以上から、HTTR を本可視 化予備試験の対象とした。

ここでは、HTTR の内部構造可視化予備試験に用いたミューオン測定装置及び測定方法について説明する。

3.1 ミューオン受光システム

本試験では、地盤探査用に開発された既存の3台のミューオン測定装置(ミューオン受 光システム)を用いた。1方向を測定可能なシングル受光システムが2台、5方向を同時測 定可能なマルチ受光システムが1台である。それぞれの受光システムの外観をFig.3に示す。

これらの受光システムのミューオン検出部は、プラスチックシンチレータ、光電子増倍 管、増幅器、ディスクリミネータで構成され、ミューオンがシンチレータに入射した際の 発光を光電子増倍管及び増幅器で電気信号に変換、増幅し、ディスクリミネータでミュー オンのみを選別する。

いずれの受光システムも、Fig.4 に示す同時計数法を用いてミューオンを測定する。これは、2つの検出器を同時に通過したミューオンを測定することにより、測定方向から飛来したミューオンのみを測定する方法である。

シングル受光システムは、1 組の検出器で構成され、1 方向のみの測定が可能である。本 試験で用いた 2 台のシングル受光システムは、検出器の直径が異なるが、同等の測定性能 を有する。便宜上、小型の検出器を備えたシングル受光システムをシングルA、大型の検出 器を備えたシングル受光システムをシングル B とする。一方、マルチ受光システムは、計 測効率向上のため、上部に1 つの球形検出器、下部に15°間隔で配置された5 つの副検出 器を備え、同時に5 方向の測定を可能としている。それぞれの副検出器の検出器断面はシ ングルA と同一である。

本試験で用いたミューオン受光システムの空間分解能は、2つの検出器で形成される立体 角に相当する。断面が円形の検出器の半径をr、検出器間の距離をLとすれば、立体角Ωは 次式であらわされる。

$$\Omega = \frac{S}{(L/2)^2} = \frac{4\pi r^2}{L^2}$$
(1)

本試験で用いたミューオン受光システムの立体角は全て同一であり、空間分解能は約 1m で ある。

3.2 測定方法

本試験の測定方法を説明する。測定準備として、測定方向に向けミューオン受光システムの角度を調整した後、PC上で測定条件を設定し、測定を開始する。このとき、測定時間は後述するように23時間、また、γ線の影響等を除去するためディスクリミネータでのエネルギー弁別値を3MeV に設定し、これ以下のエネルギーの信号は除外した。測定開始後は、検知したミューオン数及び同時に検知したミューオン数(同時計数)が、PC に自動的に記録される。測定の状況は、PC モニタで随時確認できる。測定完了後は、次の測定方向に向けミューオン受光システムの角度を調整し、同様の手順で測定を繰り返す。次に、測定方向及び測定時間について説明する。

まず、測定位置及び測定方向(測線)を説明する。Fig.5 に HTTR の水平断面及び垂直断 面を示し、本試験におけるミューオン受光システムの設置位置(測定地点)及び測定方向 をそれぞれ示した。HTTR の原子炉は地下に設置されており、ミューオン受光システムも地 下に設置して測定した。シングル及びマルチ受光システムはいずれも分解・組み立て式で あり、地下の測定地点までは分解して搬入し、現場で組み立てた。原子炉内への設置であ ることから、地震等により受光装置が移動・転倒して原子炉内の機器等に損傷を与えない よう、ミューオン受光システムの固定には十分配慮した。設置スペース等を考慮して、同 ーフロアの格納容器外側5 地点(A~E 地点)を設置箇所とし、各地点で水平方向の角度(方 位角)を変えて測定を実施した。方位角は、各地点から格納容器中心方向となる測線を0° とし、時計回りでプラスとして±15°、±30°とした。ただし、D 地点は測定スケジュール の制約により、0°及び-30°のみの測定とした。Fig.6 に格納容器周辺を示し、それぞれの 地点に設置した受光システム及び方位角を示す。また、各測線に対し、垂直方向の角度(天 頂角)を設定した。天頂角は、真上を0°とし、70°まで5°刻み、15方向とした。天頂角 の一例をFig.7 に示す。

次に、測定時間について説明する。ミューオンを用いた測定では、測定精度を確保する ため、ある程度のミューオン数が必要である。ミューオンは、放射線と同様にポアソン過 程であると考えられ、その場合の計数値の標準偏差は同時計数の平方根になることが知ら れている。従って、同時計数をNとすれば、変動係数は $\sqrt{N} / N \times 100\%$ で定義され、同時 計数を 1000 とすると、変動係数が 3%程度となる。計測誤差を 3%以下とするには、同時計 数を増やす必要があるが、測定時間の長期化等により測定効率が著しく低下する。同時計 数 1000 は、実用上必要な精度を確保するための目標値となる。

HTTR の測定において同時計数 1000 を得るために必要な測定時間を検討するため、面密

度(物体密度とミューオン透過距離の積)が 20~30hg/cm²の場合の同時計数を計算した。 面密度の計算方法については、第4章にて説明する。Fig.8 に、それぞれの面密度における 1日あたりの同時計数を示す。また、HTTR は構造が複雑なため、測定方向(ミューオン透 過経路)によって大きく面密度が異なる可能性がある。そこで、炉心方向を通過する代表 的な経路について原子炉を構成する黒鉛、コンクリート、鉄等の材料の密度及びそれぞれ の厚さから面密度を概算した結果、面密度は約 20~30hg/cm²と推定されるため、Fig.8 を参 考に、1日の測定で必要な同時計数が得られると判断した。ただし、受光システムの角度変 更等の調整作業に必要な時間を考慮し、測定時間を 23 時間、作業時間を 1 時間として合計 24 時間となるようにした。

以上から、本試験における測定方向は、1地点あたり方位角 5×天頂角 15=75 方向であり、 測定期間は、シングル受光システムの場合で 75 日/地点となる。一方、マルチ受光システム では 15 日/地点となり、1/5 に短縮される。なお、実際の測定では HTTR の作業状況等によ り測定方向の変更作業が行えない日があり、測定期間は 75 日あるいは 15 日よりも長くな った。

4. HTTR 可視化予備試験結果

4.1 測定結果

各測定地点における測定結果を Fig.9 に示す。図は、各地点における天頂角と 23 時間の 同時計数の関係を示している。なお、シングル A のシンチレータ面積が他の受光システム の約 1/2 であることから、他の地点との比較を考慮して、シングル A で測定した A 地点 15°、 30°及び D 地点の同時計数を 2 倍した。全地点で、天頂角により動じ計数が変化しており、 測定結果全体で、約 300~約 5000 の同時計数が得られた。HTTR 内部の主要構造物が含ま れる天頂角が 50°以下の範囲では、概ね目標値である 1000以上の同時計数が得られており、 内部構造可視化の可能性を議論するために十分な測定時間であったと考えられる。

ミューオンは、高密度の物質ほど、あるいは厚さが大きいほど透過しにくいことから、 同時計数が少ないほど高密度の物体の存在あるいは多くの物体を透過したことを示してい る。また、図中の実線は、各地点の測定結果を基に、後述する面密度への換算式を用いて 各地点の測定結果全体の平均密度を求め、この平均密度から再計算した同時計数を示して いる。つまり、測定した同時計数がこの実線より上にある場合はその地点における平均よ り低密度な部分であり、下にある部分は高密度であることを示している。

各地点の全体的な傾向として、天頂角が 15°~30°以下では面密度が小さく、面密度が 大きくなるにつれて平均面密度より大きくなり、天頂角が 70°付近では平均面密度に近づ く。ただし、測定地点ごとに同時計数変化の様子は異なっており、また、同一地点でも方 位角によって同時計数の変化は異なっている。これらの変化は、原子炉内部の構造を反映 していると考えられる。

さらに、参考として、Fig.10 に A 地点において方位角-30° に設置したまま原子炉と反対 方向(天頂角が負)を測定した結果を示す。原子炉が存在しない方向を測定した場合、天 頂角が大きくなってもほぼ平均密度で推移しており高密度領域が存在しない。この結果か らも、本試験で得られた密度の大きい領域が、HTTR 内の密度情報を反映していることを示 唆している。

4.2 面密度による評価

測定結果を基に密度情報を評価するため、同時計数の値から三宅の式¹¹⁾を用いて面密度 *h* を計算した。三宅の式は、式(2)で表される実験式である。

$$I_{\mu}(h,\theta) = \frac{A_{M}}{h+H} (h \sec \theta + a)^{-\alpha} \cdot \exp(-\beta h \sec \theta)$$
⁽²⁾

ここで、 $I_{\mu}(h, \theta)$ は単位時間、単位面積、単位立体角あたりのミューオンフラックスであ り、式中の係数はAm=174、H=400、a=11、 $\alpha=1.53$ 、 $\beta=8\times10^{-4}$ で表される定数である。 また、同時計数 Ccoin は、 $I_{\mu}(h, \theta)$ に測定時間 t、検出器の断面積 A 及び 2 つの検出器が形 成する張る立体角 Ω を掛け合わせたものであり、式(3)で表される。

$$C_{coin} = I_{\mu}(h,\theta) \cdot tA\Omega \tag{3}$$

式(2)、(3)を用いて測定した同時計数に対応する面密度を計算した。

Fig.11 に、各測定地点における面密度の計算結果を示す。面密度は、横軸を方位角、縦軸 を天頂角としたコンター図として示した。また、図中に破線で囲んだ部分は、炉心方向を 測定した領域を示している。得られた面密度分布を、HTTRの内部構造と比較し、測定結果 を検証した。

4.1 で示したように、B 地点を除き、天頂角が 0°~10°の領域で方位角に関わらず面密 度が小さく、天頂角が大きくなるにつれて面密度が大きい領域が存在する。この面密度が 大きい領域は、天頂角及び方位角の違いにより変化しており、原子炉内部の構造を反映し ていると考えられる。

HTTR の図面と比較すると、面密度が大きい領域は、原子炉(炉心)及びその周囲の生体 遮へい(コンクリート壁)であると考えられる。本試験では、HTTR 内部の構造体の中でも 密度、体積の大きい生体遮へい等のコンクリート壁が面密度分布に影響したと考えられる。 例えば、B地点の天頂角0°で面密度が大きくなっているが、図面と比較すると、B地点上 方には地上付近までコンクリート壁が存在していることが確認できた。また、炉心方向に は必ず生体遮へいのコンクリートが存在しており、測定方向によりコンクリートの透過距 離が変化するため、炉心に相当する領域の面密度が各測定地点により異なっている。一方、 HTTR 格納容器内には、中間熱交換器等の比較的大型の金属製機器も設置されているが、本 試験結果からは明確に判別することができなかった。

以上のように、原子炉のように様々な密度、形状の構造体が存在する場合、面密度の値 だけでは構造体を明確に区別することが困難であり、図面と比較して評価する必要があっ た。これは、本予備試験では、測定方向(方位角)が限られており、十分な面密度データ が得られなかったことが一因であると考えられる。十分な測定データが得られれば、2.2 で 示した3次元トモグラフィ技術を適用することにより、3次元密度情報として評価できると 考えられる。また、3次元密度評価に必要な測定位置等の検討及び測定結果の評価には、3 次元モデルを用いたミューオン透過シミュレーションが有効であると考えられる。これら の対策により、ミューオンを用いた非破壊検査手法を用いて、原子炉内部の密度情報を得 ることが可能であると考えられる。

5. 原子炉内部調査への適用性

本試験により、調査対象である燃料デブリと周囲の構造物の密度に十分な差があれば、 現在のミューオン受光システムを用いて燃料デブリの有無を判断できる可能性を示した。 ただし、燃料デブリの状態は不明であり、密度差が小さい場合やより詳細な状況観察が必 要な場合には、ミューオン受光システムの空間分解能の向上が必要であると考えられる。

また、ミューオン受光システムを福島第一原発の敷地内に設置して測定を実施するため には、現場の状況に対応させるために解決すべき課題もある。本章では、本試験の結果及 び福島第一原発の状況からミューオンを用いた非破壊検査手法を福島第一原子力発電所の 調査に適用するための課題及び解決策の例を示す。

(1) 受光システムの設計最適化

効率的かつ効果的な原子炉内部の調査には、計測時間の短縮と空間分解能の向上が必要 であると考えられる。ミューオン受光システムの計測時間と空間分解能を決定する要因は、 検出器の面積及び検出器間距離で決定される立体角である。

受光システムの設計において、例えば、検出器の面積を大きくすれば、単位時間あたり に検出できるミューオン数が増加し、計測時間の短縮となるが、検出器間距離が一定の場 合、立体角の増加により空間分解能は低下する。逆に、検出器の面積を減少させ立体角が 小さくなると、空間分解能は向上するが計測時間は増加する。従って、計測時間の短縮と 空間分解能の向上の両立には、検出器の面積及び検出器間距離の最適化、すなわち立体角 の最適化が重要な課題となる。しかしながら、装置サイズや実用的な計測時間の制限から、 立体角は自ずと限定されるため、立体角の最適化のみで計測時間の短縮と空間分解能の向 上を両立させることは困難である。

そこで、マルチ受光システムの改良が有効な手段となる。空間分解能の向上を優先させ た立体角となるように検出器のサイズ及び配置を決定し、同時に測定する方向を増やすた め全体の検出器数を増やす。これにより、空間分解能を向上させ1 方向あたりの測定時間 が増加させつつ、全体の測定期間を現在の受光システムよりも短縮することが可能である と考えられる。

(2) 高線量への対策

福島第一原子力発電所の敷地内で測定する場合、周囲の放射性物質及び空間線量が装置 及び測定品質に及ぼす影響が問題となる。本試験で用いたようなシンチレータ方式のミュ ーオン受光システムでは、放射性物質から放出される γ線はディスクリミネータによりカ ット可能である。しかしながら、中性子等による空気中の窒素等の放射化など予期しない 放射線も想定する必要がある。また、高線量下では、シンチレータの常時発光等の問題も 考えられる。

このような問題に対しては、シンチレータの遮へい、光電子増倍管の感度調整といっ た対策が考えられる。さらに、測定環境の安定性確保、放射性物質による汚染防止のため、 受光システム全体をコンテナに収納することも考えられる。コンテナに収納することによ り周辺環境による受光システムへのダメージを軽減しつつ、放射性物質の付着による汚染 を防止する。また、エアコン等によりコンテナ内部の温度を一定に保つことにより、測定 品質の安定性を確保できる。

また、作業員の被ばく量を低減するため、可能な限り作業員が設置場所に行かなくても 測定を行えるように、ロボット技術の導入等による測定自動化も有効であると考えられる。 この場合、データ転送にも無線を使用することにより、現場作業をさらに低減可能である。

(3) ミューオン透過の解析評価

本稿で示した計測時間や立体角に関する計算は、三宅らによる実験式¹¹⁾を用いている。 一方、測定対象に関するミューオン透過特性が事前に推定できれば、適切な計測時間の設 定が可能になるとともに、ミューオン受光システムの設計最適化に大きく貢献する。これ には、原子炉内部のミューオン透過の解析が有効である。

本試験においても、HTTR の CAD モデルを基にモンテカルロ計算モデルを作成し、モン テカルロシミュレーションによる解析評価を行った。しかしながら、面密度の値及び分布 が実測値で得られた面密度と整合しない部分があり、解析精度の向上対策が必要であるこ とがわかった。

ミューオンの解析においては、CERNで開発されたGEANT4が世界的に用いられている。 また、ミューオンの計算に関してはいくつかの機能追加が必要であるものの、原子力機構 で開発された粒子・重イオン輸送計算コード PHITS も候補となる。

以上のように、装置や評価技術の改良を検討する必要があるものの、ミューオンを用い た非破壊検査手法は、福島第一原子力発電所の原子炉内部調査に適用可能であると考えら れる。

6. まとめ

福島第一原子力発電所の燃料デブリの状況把握に対し、ミューオンを用いたオンサイト 非破壊検査技術の適用性を検証するため、原子力機構の高温工学試験研究炉(HTTR)を対 象にして内部構造の可視化予備試験を実施した。さらに、試験結果の評価を基に、福島第 一原子力発電所でのオンサイト測定に必要な技術課題及びその対策を検討した。

可視化予備試験の結果、同時計数法を用いたミューオン非破壊検査技術により、HTTR内部の炉心、コンクリートのような高密度の構造物が判別可能であることを示した。また、オンサイト測定における課題と対策を検討した結果、既存装置の改良により空間分解能の向上、測定期間の短縮が可能であり、現場の高線量にも対応可能であることを示した。

以上から、ミューオンを用いたオンサイト非破壊検査技術を用いて福島第一原子力発電 所における燃料デブリの状況調査を行うことは技術的に十分可能であると考えられる。た だし、測定環境及び必要な情報に応じてミューオン受光システムあるいは解析を含めた評 価手法の改良を進める必要がある。

謝辞

本研究で使用したミューオン受光システム及び評価プログラムは、財団法人JKAから競輪の補助金を受けて実施し、一般財団法人機械システム振興協会による成果を利用したものである。また、一般財団法人エンジニアリング協会「高温工学試験研究炉(HTTR)の内部構造可視化予備試験委員会」においては、委員長の徳永朋祥東大教授他、委員の皆様から有益なご意見をいただきました。HTTR内での測定作業においては、大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部 HTTR技術課及びHTTR運転管理課の皆様にご指導、ご協力いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 東京電力(株)福島第一原子力発電所1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ),東京電力プレス発表資料(2011.12.21).
 http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11 j/images/111221d.pdf
- 2) 伊藤 主税、西村 昭彦、大場 弘則、若井田 育夫、内藤 裕之、杉山 僚、茶谷 恵治: 「遠隔観察・分光技術を用いた炉内検査技術の開発:(1) 水中観察とレーザー分光が 可能な新型光ファイバプローブ」,日本原子力学会「2013 年春の年会」,G44 (2013).
- H.K.M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, K. Niwa, "Development of an emulsion imaging system for cosmic-ray muon radiography to explore the internal structure of a volcano, Mt. Asama", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 575, Issue 3, 1, pp. 489-497, (2007).
- K. Suzuki, H. Ohnuma, R. Kubota and H. Asanuma, "Feasibility study of multi-channel cosmic ray muon telescope and 3D tomography", Proc. 10th SEGJ Int. Symp., Kyoto, Japan, Nov. 20-23, (2011).
- K. Nagamine, Introductory Muon Science, Cambridge University Press, ISBN 1139439219 (2003).
- 6) 湊 進、高森 和英、池辺 幸正:「3" φ球型シンチレーション・カウンターによる屋内 宇宙線線量測定法」、名古屋工業技術試験所報告, 32, pp.14-25, (1983).
- K. Borozdin, S. Greene, Z. Lukie, E. Milner, H. Miyadera, C. Morris and J. Perry, "Cosmic ray radiography of the damaged cores of the Fukushima reactor", Phys.Rev. Lett., 109, 152501, (2012).
- 8) 松崎 眞六、篠竹 昭彦、国友 和也、内藤 誠章、橋本 操、圃中 朝夫、長根 利弘、永 嶺 謙忠、田中 宏幸:「宇宙線ミュオンを用いた高炉の炉内観察技術の開発」,鉄鋼協 会発表会予稿集(平成 19 年秋), p.152, (2007).
- 9) K. Morishima, N. Naganawa, T. Nakano, M. Nakamura, J. Kawarabayashi, H. Tomita, T. Iguchi, S. Maeda, "First demonstration of cosmic ray muon radiography of reactor cores with nuclear emulsion based on an automated high-speed scanning technology", Proc. 26th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Tsukuba, Japan, Jan. 24-26, (2012).
- K. Borozdin, S. Greene, Z. Lukie, E. Milner, H. Miyadera, C. Morris and J. Perry, "Cosmic ray radiography of the damaged cores of the Fukushima reactor", Phys.Rev. Lett., 109, 152501, (2012).
- 11) 三宅 三郎: 「地下深部における宇宙線研究」,日本物理学会誌,34,4, pp.292-301, (1979).

Table 1 代表的な素粒子の透過距離

素粒子	透過距離(m)	
ミューオン	100~1000m(検出容易)	
電子·X線	数mあるいはそれ以下	
陽子·中性子	10m以下(不安定、検出困難)	
ニュートリノ	地球規模(検出困難)	

Table 2 物質ごとの素粒子透過距離

临时夕	透過距離(m)		
初貝口	ミューオン	陽子·電子	
鉄	>100	0.1	
炭素	>1000	0.5	
水	>5000	1	



Fig.1 日本の海抜 0m におけるミューオン強度



Fig.2 ミューオンを用いた地下下水管の3次元可視化



マルチ受光システム

Fig.3 HTTR 可視化予備試験に用いたミューオン受光システム



Fig.4 同時計数法の原理





Fig.5ミューオン受光システムの設置位置(測定地点)



Fig.6 測定方向(方位角)



Fig.7 測定方向(天頂角)の一例



Fig.8 面密度と1日あたりの同時計数の関係





Fig.10 原子炉の有無による同時計数の比較



Fig.11 各測定地点の面密度分布

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
盔半里	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				
和辛雪	SI 基本単位			
和立里	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	ートル毎秒毎秒	m/s^2		
波 数每	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 度力	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) とも上げれる				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元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租业单位			
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	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
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	$kg s^{2} A^{1}$
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
光東	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				
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²
線量当量,周辺線量当量,方向	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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 ュ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。
 (a)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)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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	
粘度	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 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透磁 率	ペンリー毎メートル	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	
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻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	E	10 ⁻³	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	+ 1	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	v

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	٥	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

衣される剱値が実験的に待られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	单位	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	-	N	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	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 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	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$		
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	禹さないその他の単位の例
	名称				SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim	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	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	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)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m

この印刷物は再生紙を使用しています