

放射線工学部会セッション「ミュオン工学の可能性」

(4) 宇宙線ミュオンによる原子炉非破壊検査

(4) Non-destructive inspection for nuclear power plant by cosmic-ray muon

高松 邦吉¹¹日本原子力研究開発機構

1. はじめに

1-1. 東京電力福島第一原子力発電所の事故前

高温工学試験研究炉（HTTR）は運転時に炉内温度が 1,000℃以上の高温であるため、炉心部に計測機器を設置できず、燃料部を直接測定して試験データを取得することは困難である。そこで、運転中の原子炉において、原子炉圧力容器の外側、または原子炉格納容器の外側から、燃料等を取り出すことなく炉心の状態をモニタリングできないか研究を進めた。

東京電力福島第一原子力発電所の事故（以下「福島第一事故」という）前の 2008 年から非接触・非破壊で原子炉の内部構造をモニタリングできれば、原子炉工学に非常に大きなインパクトを与えると考え、宇宙線ミュオンを使って原子炉の内部構造のモニタリングを試みた。ミュオンは、大きな構造物を非破壊で透過することができる。その当時、宇宙線ミュオンを使って原子炉の内部構造のモニタリングを試みる人は誰もおらず、新規性を確認した。また、東京大学地震研究所が主催したシンポジウムにおいて、「原子炉を視る」というタイトルで、(1)ミュオンで密度の違いを区別できるならば、炉内温度をモニタリングできる可能性がある。(2)ミュオンで原子番号の違いを区別できるならば、原子炉の内部構造物をモニタリングできる可能性がある、とミュオンによる原子炉工学への応用について発表した¹⁾。さらに、J-PARC センターにおいても同様に発表した。

1-2. 多重クーロン散乱を利用して原子番号が異なる物質を識別

福島第一事故前、ミュオンを用いて密度ではなく原子番号の違いを検出できないか検討した。HTTR の構造物は減速材である黒鉛ブロック、原子炉圧力容器、燃料体であるウランであり、他の空間にはヘリウムが充填されている。それらの原子番号の違いを検出できないかと考えた。また、予め炉心を透過した試験データを取得し、大規模地震で炉内構造物が破損した場合の試験データと比較することで、両者の差から破損具合を検出できるのではと考えた。大規模地震で炉内構造物が破損した場合、燃料交換機で燃料等を取り出すことは不可能であるため、原子炉圧力容器の外側から炉心を検査できれば有用である。そこで、黒鉛ブロックの黒鉛、原子炉圧力容器を模擬する鉄、ウランを模擬する鉛を購入し、原子番号が異なる物質を識別する実験を開始した。

その結果、新規性として、福島第一事故前に、ミュオンを使った非接触・非破壊のモニタリング手法を考案し、黒鉛、鉄、鉛の原子番号 Z の異なる物質を識別する実験を成功させた。反応の前後で密度長 x が変化しない物質においても、原子番号 Z が変化すれば、地上に飛来するミュオンのクーロン散乱を利用し、モニタリングができることを確認した。この方法を発展させると、原子炉の内部構造の可視化ができると予想された。以上から、多重クーロン散乱を利用して原子番号の違いを検出できる手法を開発し、ミュオンのクーロン散乱を利用した原子炉の内部構造の可視化が、新しい原子炉計測設備として可能であることを明らかにした²⁾。

1-3. 福島第一事故後

東京電力株式会社は、元の位置に存在する炉心が喪失し、その溶融物が原子炉格納容器の底に溜まって

いと予想した。福島事故前、既に原子番号の違いを検出できる手法を開発していたので²⁾、原子炉建屋外から形状を喪失した炉心及び原子炉格納容器の底に溜まっている溶融物を検出できると提案した結果、HTTRを用いて原子炉格納容器の外側から炉心の状態を確認する「オンサイト非破壊検査技術の開発」プロジェクトを立ち上げることができた。以下、燃料デブリの状況を把握するための原子炉内可視化に対するミュオンの適用性を検証する。

2. HTTR 内部構造を可視化³⁾

2-1. 測定装置

図1に、可視化試験に用いた測定装置の概要を示す。ミュ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により自然 γ 線とミュオンを選別する。検出部は2つで一組とし、これらを同時に通過したミュオンをカウントする。

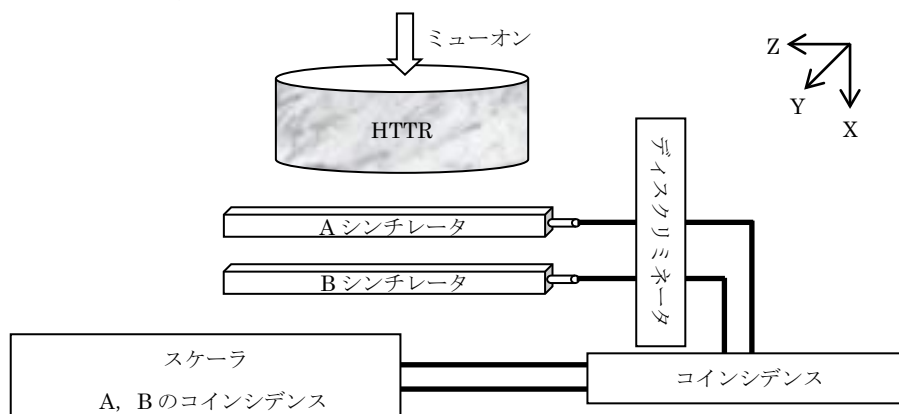
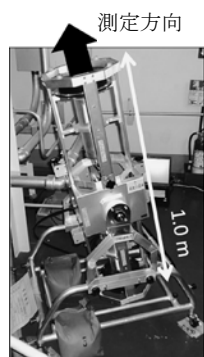


図1 HTTR 内部構造を可視化する測定装置

HTTR 可視化試験には、一般財団法人エンジニアリング協会及び川崎地質株式会社が製作した2種類、計3台の測定装置を用いた。図2に示す2台はシングルチャンネル(a), (b)と呼称する装置で、一組の検出器を有し、1方向の測定が可能である。一方、図3に示す1台はマルチチャンネルと呼称する装置で、1つの主検出器に対し、5個の副検出器を備える。マルチチャンネルの場合は、主検出器とそれぞれの副検出器を同時に通過したミュオンをカウントする。副検出器は15°間隔で配置され、同時に5方向の測定が可能であり、測定時間をシングルチャンネルの1/5の時間に短縮可能である。なお、本装置は、厚さ約11mの地盤を地下から計測し、地中に存在する直径1.3mの埋設管を判別可能な分解能を有する。

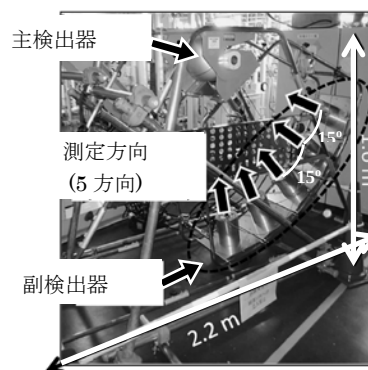


シングルチャンネル(a)



シングルチャンネル(b)

図2 シングルチャンネルのミュオン検出器
検出器の測定点と方位角



マルチチャンネル

図3 マルチチャンネルのミュオン検出器
検出器の測定点と方位角

これらの装置を用いた測定方法を簡単に説明する。測定準備として、測定方向に向け装置を固定した後、

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しきい値を 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、図 1 の A シンチレータで検知したミュオン数、A 及び B の両シンチレータで同時に検知したミュオン数（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。設定した測定時間になると、自動的に測定を終了する。

2-2. HTTR

HTTR は、黒鉛及びコンクリート製の構造物が大きな体積を占めており、次いで鋼製の容器、機器・配管が占める。黒鉛及びコンクリートの密度は鋼の半分以下であるが、透過距離は鋼製構造物の数倍になるため、測定結果に大きく影響すると考えられる。なお、構造物として厳密には密度の異なる様々な材料が用いられているが、測定精度等を考慮して、以降の評価では材料密度を黒鉛： 1.8g/cm^3 、コンクリート： 2.5g/cm^3 、鋼： 7.8g/cm^3 、地盤： 1.8g/cm^3 に統一して計算等を行った。また、複数の材料で構成される構造物については、体積比等から密度を算出して用いた。

図 4、図 5 に、HTTR の水平断面の概略を示し、可視化試験の測定点及び水平方向の測定方向（測線）を図中に示した。測定装置（シングルチャンネル×2、マルチチャンネル×1）は、HTTR 地下の原子炉格納容器周り 5 つの測定点に設置した。測定点は全て図 6 に示した HTTR 地下 3 階の同一フロアであり、それぞれの測定点を A～E とした。また、図には示していないが、原子炉の有無による比較を行うため、原子炉と逆方向（建屋方向）も測定した。

図 4、図 5 に示すように、各測定点の測線の角度（方位角）は、原子炉格納容器中心方向を基準として $\pm 30^\circ$ の範囲を 15° 間隔で変化させた 5 方向とした。なお、測定点 D のみは試験工程の都合により 2 方向（ -30° 、 0° ）のみの測定とした。また測線ごとに、真上を 0° として 70° まで 5° ごとに角度（天頂角）を変化させ、15 方向を測定した。図 6 に、例として測定点 B における測定方向の天頂角を示す。

測定時間は 1 天頂角あたり 23 時間とし、測定準備の時間を考慮して 1 日ごとに角度を変更した。なお、測定時間は、ミュオンの日中の平均的な個数と HTTR 内部構造物の密度情報を基に、HTTR を透過するミュオンの個数が平均 1,000 またはそれ以上になるように決定した。これは、後述する計数誤差（変動係数）が 3%程度になるように想定した値であり、ミュオンによる地盤探査における実績値である。なお、変動係数を 3%以下にするためには計測時間をさらに長くする必要があるが、増加した計測時間に対する精度向上の度合いが小さいため、実用上この数値を用いることにした。測定結果は各測定方向の同時計数として得られ、これを面密度（鉛直方向の厚さと平均密度を掛け合わせた量）に換算して評価した。

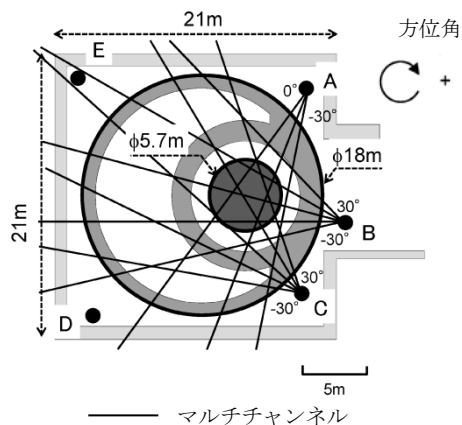
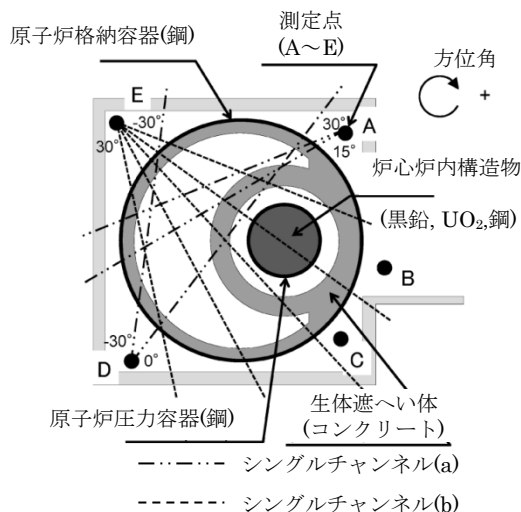


図 4 シングルチャンネル検出器の測定点と方位角

図 5 マルチチャンネル検出器の測定点と方位角

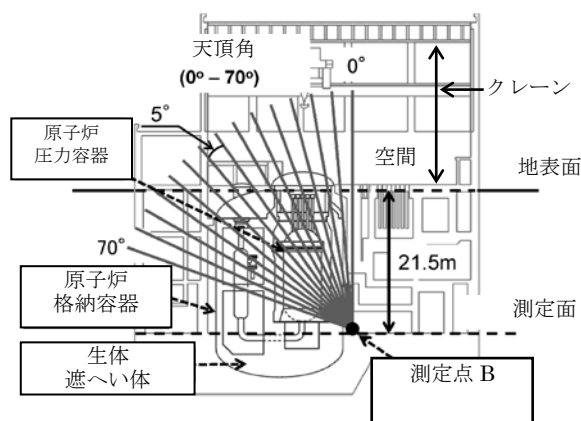


図6 測定点Bにおけるマルチチャンネル検出器の
測定方向の天頂角

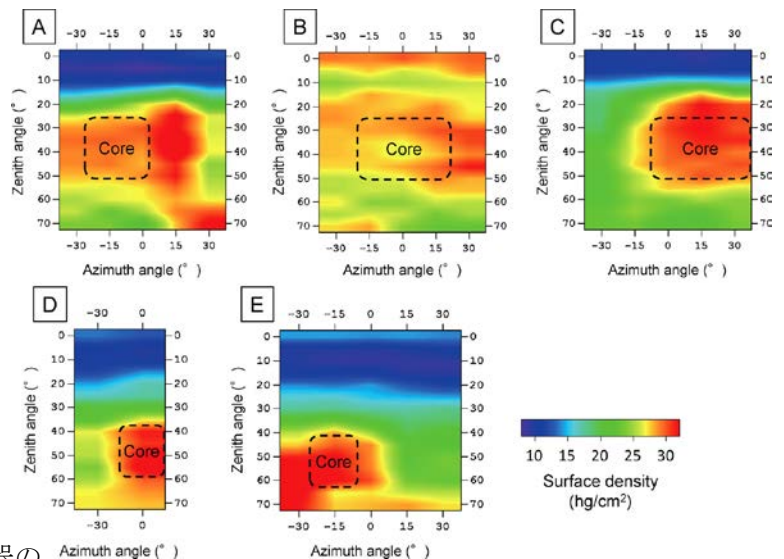


図7 各測定点における面密度の測定結果

2-3. 試験結果

本試験における同時計数の値は、最低で約 300、最高で約 5,000 であった。ミュオン計数には統計的誤差が含まれ、ポアソン分布に従うことが知られている。従って、同時計数 N に対する標準偏差 σ は $\sigma = \sqrt{N}$ で表され、これを基に変動係数（誤差）は $\sqrt{N}/N \times 100\%$ で定義される。同時計数が 1,000 の場合、変動係数は約 3.2% であり、300 の場合は約 5.8% である。なお、主要構造物が含まれる天頂角が 50° 以下の測定範囲で、概ね目標値である 1,000 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のに十分な測定時間であったと考えられる。

図7に面密度の分布の結果を示した。各測定点の間、あるいは方位角ごとに変化が異なっており、HTTRの内部構造を反映した結果が得られていると推察される。図7には炉心方向に相当する領域を破線で示してある。図7より、面密度の全体的な傾向として、天頂角が小さい真上の方向の面密度が平均値に比べて小さく、天頂角が大きくなるにつれて高い面密度となった。これは、図6に示したようにHTTRの天井方向は、建屋1階床面から天井まで空間であり、天頂角が大きくなるにつれて原子炉格納容器の内部構造物が存在することと一致する。

面密度が大きい領域に着目すると、炉心を通過する領域で面密度が大きく、約 $30 \sim 32 \text{ hg/cm}^2$ であった。なお、h はヘクト (10^2 倍) を意味する。HTTRの図面を参照して炉心及び生体遮蔽のコンクリートの透過距離及びそれぞれの材料密度を用いて面密度を計算すると約 30 hg/cm^2 となり、測定値が妥当であることを確認した。また、図7における測定点Cの方位角 15° における面密度変化を、HTTRの縦断面図と対応させると、原子炉圧力容器内部の炉心が存在する天頂角 $25^\circ \sim 50^\circ$ の範囲で面密度が最も大きく、原子炉圧力容器から外れる $0^\circ \sim 10^\circ$ 及び $60^\circ \sim 70^\circ$ では面密度が小さいことがわかる。

一方、炉心方向以外にも面密度が大きい領域が確認された。この領域は、主に生体遮蔽のコンクリート壁を示していると推定される。原子炉格納容器内部のコンクリート壁の厚さは約 1m、密度は約 2.7 g/cm^3 である。HTTR炉心の黒鉛製の燃料体の平均密度よりも約 1.8 倍密度が高い。このため、コンクリート壁を斜めに透過するような場合には、透過距離が長くなるため、面密度が大きくなったと考えられる。これは、例えば、測定点Aの方位角 15° 及び測定点Bの方位角 30° において見られる。また、測定点Bのみで天頂角 0° 方向が高い面密度となっているが、測定点Bの上方にのみ地上付近まで建屋のコンクリート壁が存在

しているためである。

以上から、同時計数法を用いたミュオン可視化技術により、HTTRの原子炉格納容器の内部を可視化することができ、特徴的な構造として炉心及び生体遮蔽等のコンクリート壁を判別できることを示した。

2-4. 結論

HTTRを対象とした炉内構造物の可視化試験を実施し、福島第一原発敷地内での測定における課題と対策を検討した結果、炉心が溶融して空洞になっているかどうかを確認できることを示した。また、新たな技術開発を行うことなく、検出器の数を増やすことで分解能を増加させることも可能であることを示した。

3. まとめ

2008年当時、ミュオンを使って原子炉の内部構造をモニタリングする試みを開始したが、研究を進める上で少なからず困難に直面した。しかしながら、HTTRの原子炉格納容器の外側にミュオン検出器を設置し検証試験を行った結果、稼働中の炉心の場所を検出することができた。また、「世界で初めて実機の原子炉を用いた」試験についてマスコミ等への反響があり、日本テレビによる取材が実施され⁴⁾、原子力産業新聞でも紹介された⁵⁾。さらに、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID) から燃料デブリ取出し代替工法の情報提供依頼 (RIF) があり、A-2:PCV/RPV 内部調査に必要とされる技術として、「宇宙線ミュオン粒子を利用した燃料デブリの位置及び形状の三次元可視化技術」の情報を提供した結果、国内唯一の情報提供者として IRID のホームページに掲載された⁶⁾。

－ 参 考 資 料 －

- 1) 東京大学地震研究所, 高エネルギー地球科学シンポジウム, “素粒子で見る”, 帝国ホテル, 2009年8月11日.
- 2) D. Shoji, H.K.M. Tanaka, K. Takamatsu, "Development of a simple-material discrimination method with three plastic scintillator strips: For easy inspection of mass-conserved system", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 654, No. 1, pp. 608-612, (2011).
- 3) K. Takamatsu, H. Takegami, C. Ito, K. Suzuki, H. Ohnuma, R. Hino, T. Okumura, “Cosmic-ray muon radiography for reactor core observation”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 78, pp. 166-175, (2015).
- 4) “廃炉”, 日本テレビ, NEWS ZERO 及び NEWS EVERY 2013年3月12日.
- 5) (一財) エンジニアリング協会, 川崎地質(株), (独) 日本原子力研究開発機構, “ミュオンで炉内可視化”, 原子力産業新聞, 朝刊, 2014年6月5日.
- 6) 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID), “ご提供いただいた情報 (公開情報) の一覧の公開について”, 「燃料デブリ取出し代替工法の情報提供依頼 (RIF)」, http://irid.or.jp/fd/public/index_jp.html, 2014年2月19日.

Kuniyoshi Takamatsu¹

¹Japan Atomic Energy Agency