

ミュオン散乱法による原子炉透視



宮寺 晴夫
Miyadera Haruo
(株)東芝

1 はじめに

高エネルギーの宇宙線は、大気上層で大気の原子核と反応を起こし、パイオン等の二次粒子を生成し、荷電パイオンは26ナノ秒の寿命でミュオンに崩壊し、運動量保存則のため、宇宙線ミュオンの運動方向は一次宇宙線の飛来方向が保たれている。ミュオンは二次宇宙線の主成分で、地表には1m²当たり毎分1万個が降り注いでいる。

平均的な4 GeVのミュオン粒子の飛程はコンクリート中で約8mであり、高エネルギーのミュオンは高速道路やビルなどの大型構造物を通過でき、その際にクーロン多重散乱を受け進行方向が曲げられる。過去に行われたミュオンイメージングはミュオンフラックスの減衰を画像化する透過法で行われており、L.W. Alvarezらのピラミッド測定や、永嶺謙忠らの火山密度推定などが知られている。

一方、ミュオン散乱法は9.11アメリカ同時多発テロ事件を受け、核テロ対策・核セキュリティ目的で米国ロスアラモス国立研究所で開発が行われた。ミュオン散乱法では、図1のように測定対象を挟む配置でミュオン検出器を設置し、測定対象を通過前後のミュオン軌跡を測定する。両軌跡の最近接点から散乱体の位置を特定し、ミュオンの平均散乱角が次式に示したように原

子番号に比例するため、物質識別も可能となった。

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

ここで θ_0 は散乱角（ガウス分布）、 βc 、 p はそれぞれミュオンの速度、運動量、 x 、 X_0 はそれぞれ物質の厚さ、放射長である。放射長は軽元素では大きく、重元素になるほど小さい。水、コンクリート、鉄、ウランの放射長はそれぞれ39.3、11.6、1.76、0.317 cmである。

ミュオン散乱法で物質判別するには、典型的には数10 mradの角度分解能が必要となる。ミュオン散乱法ではドリフトチューブ検出器が広く使われている。ミュオンがドリフトチューブ

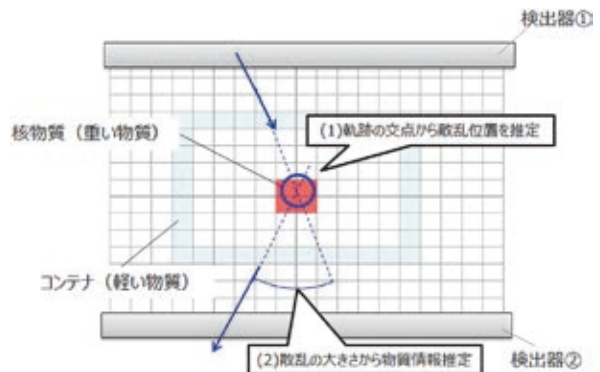


図1 散乱法の原理

を通過すると、ガスが電離され生じた電子が高電圧の掛かった中心の芯線（アノードワイヤー）に向かって移動し、芯線に到達した電子の時間情報から、芯線-ミュオン軌跡間距離を算出しミュオン軌跡を決定できる。ドリフトチューブ検出器では、角度分解能 10 mrad、位置分解能 1 mm 程度の精度でミュオン軌跡を決定できる。従来のドリフトチューブ検出器はガスを流しつつ使用され、かつミュオン粒子の通過時間 t_0 をプラスチックシンチレータ等で別途測定する必要があり、屋外での使用や検出器の大型化が困難であった。ロスアラモスで Morris らが封じ切り式ドリフトチューブ検出器（ガス検出器）を開発し、また、多層のドリフトチューブから得られる時間情報からミュオン通過時間を数学的に求める手法が考案され、これらの課題は解決された。

前記の技術進展の結果、米国の Decision Sciences 社はロスアラモスの技術供与を受け、コンテナスキャナの商品化に成功した。バハマに初号機としてインストールされた測定装置ではコンテナ 1 個当たり 1 分程度で内容物のスキャンが可能となっている。米国コンテナ全量検査法を受け、今後、ミュオン散乱法を用いたコンテナスキャナが世界中の港湾施設に導入されていくことも考えられる。

2 散乱法原子炉透視プロジェクト

2011 年、3.11 に発生した東日本大震災直後、ロスアラモスで散乱法を用いた炉心イメージングの検討を筆者が行った。机上計算ではあるが、原子炉建屋の外側に検出器を設置した場合、散乱法では UO_2 燃料の有無で 30% のコントラストが得られ、炉心位置で 0.3~0.5 m の分解能が得られるとの結果であった。同年 5 月にロスアラモスで Z. Lukić, K. Borozdin がスーパーコンピュータでモンテカルロ・シミュレーションを行い前記予測を裏付け¹⁾、8 月には筆

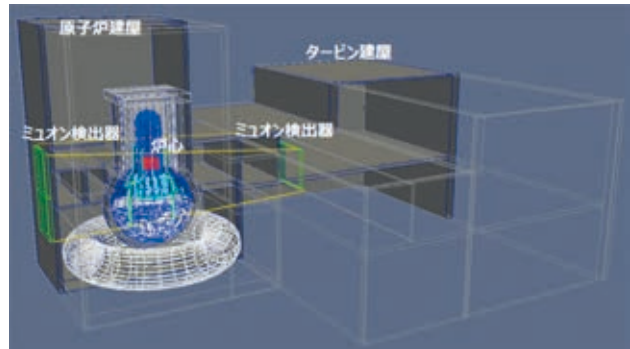


図2 原子炉測定でのミュオン散乱法の検出器設置イメージ
原子炉建屋前と、タービン建屋2階（オペフロ）に検出器を1基ずつ設置

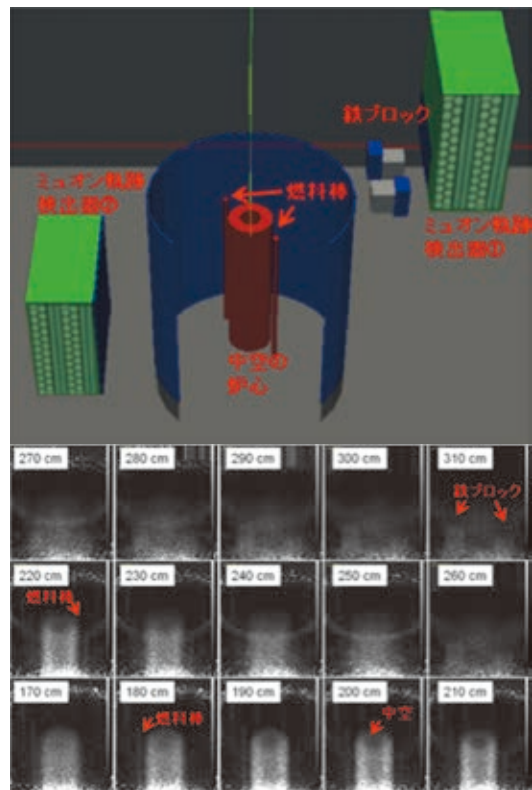


図3 東芝 NCA での技術実証試験
試験体系（上）、測定結果（下）

者、C.L. Morris, E.C. Milner で TMI 熔融炉心を模した鉛製コアを用いたモックアップ試験を実施し、商用原発と同程度の 6 m 厚コンクリー

ト越しの炉心画像化に成功した²⁾。

2012年には、ロスアラモスの原子炉散乱法イメージングに(株)東芝が興味を持ち研究者の相互訪問が開始され、福島第一原発への適用を目指し(株)東芝とロスアラモスのコラボレーションが立ち上がった。2013年夏には、筆者、Morris、吉岡研一が中心となりロスアラモスの小型ミュオン軌跡検出器を研究炉(東芝臨界集合体)に設置し、商用原発の約1/10スケールながら原子炉イメージング実証試験を実施した。測定結果を図3に示したが、 UO_2 燃料など炉内構造物を30mmの分解能で画像化することに成功した³⁾。ミュオン散乱法は3次元情報であり、図3は検出器面に垂直な様々な位置での断面図を示したものである。

2014年7月に国家プロジェクトとしてミュオン散乱法も含めミュオンによる原子炉透視が採択された。ミュオンイメージングでは統計量を稼ぐため検出器の大型化が重要で、福島第一原発への適用を考えた場合は7m×7mのミュオン軌跡検出器を原子炉建屋前とタービン建屋オペフロに設置することを検討している。原子炉建屋前の線量は事故直後から低下しているものの、1mSv/h近い線量が見込まれていることから、検出器を鋼鉄製遮蔽体内に組み込み、検出器動作に影響しないレベルまで線量を低減させる。ミュオン軌跡検出器は直径50mm、7m長のドリフトチューブ検出器を縦横に12層並べたもので、1基当たり1,680本使用している。

プロジェクトの中核となる、合計3,360本のドリフトチューブ検出器の信号を読み出す電子回路とデータ収集システムは、(株)東芝で久米直人が開発した。高エネルギー実験に匹敵する規模の検出器システムを高放射線環境下で常時動作させるのは世界的にも例がなく、メンテナンスが困難な測定のため高いシステム信頼性が要求される。特に γ 線バックグラウンドはコンプトン散乱によりドリフトチューブのノイズとなる。福島第一原発向けシ

ステムでは早い段階でのハードウェア除去を行い、処理効率の向上を実現している。原理的には、貫通力の高いミュオンは複数層のドリフトチューブを貫通するため、直線的なミュオン軌跡に沿った複数のドリフトチューブで信号を発生させるため、ドリフトチューブを単体でしかトリガーしない γ 線ノイズとは区別できる。



図4 東芝生産技術センターで組み立てたミュオン軌跡検出器

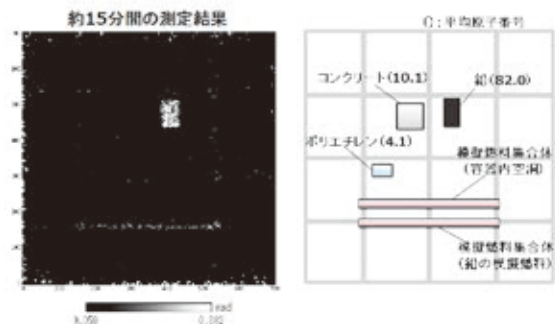
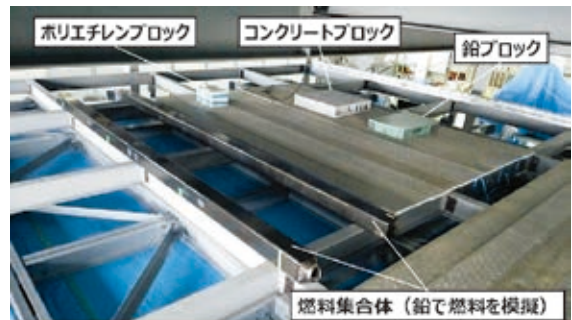


図5 東芝生産技術センターで組み立てたミュオン軌跡検出器の技術デモンストレーション

具体的には、ミュオンイベントと γ 線イベントは、ドリフトチューブの配列をFPGA内でパターン認識処理することで区別している。

筆者が中心となり、2015年1~2月に(株)東芝でミュオン軌跡検出器システムの組立を行った(図4)。フラックスの高い鉛直方向の宇宙線ミュオンを使い効率的に性能試験を行うため、(株)東芝では2基のミュオン検出器を水平に配置しているが、原子炉に設置する際は図2のように垂直に起こした配置となる。

(株)東芝で組み立てたミュオン検出器を用い、鉛ブロックや模擬燃料棒集合体を用いた散乱法測定を行った。15分間の測定結果を図5に示したが、1分に満たないミュオン測定データでも鉛ブロックや燃料棒集合体の存在有無を画像化できた。散乱法では、散乱角しきいの閾値を選ぶことで、鉛ブロックや鉄製のフレームなど特

定の物体を選択的に描画することが可能であり、図5では鉛のみを描画する閾値を選んでいる。

本内容の一部には、「平成25年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助事業(原子炉内燃料デブリ検知技術の開発)」により得られた成果が含まれています。

参考文献

- 1) Borozdin, K., *et al.*, Cosmic ray radiography of the damaged cores of the Fukushima reactors, *Phys. Rev. Lett.*, **109**(15), 152501 (2012)
- 2) Miyadera, H., *et al.*, Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons, *AIP Advances*, **3**(5), 052133 (2013)
- 3) Morris, C., *et al.*, Analysis of muon radiography of the Toshiba nuclear critical assembly reactor, *Applied Physics Letters*, **104**(2), 024110 (2014)