

# ミュオンを利用した核セキュリティ技術

## Nuclear Security Applications of Cosmic-ray Muon

(株)東芝	杉田 幸	Tsukasa SUGITA	Non-Member
(株)東芝	宮寺 晴夫	Haruo MIYADERA	Non-Member
(株)東芝	吉岡 研一	Kenichi YOSHIOKA	Non-Member
(株)東芝	久米 直人	Naoto KUME	Non-Member
(株)東芝	中山 幸一	Kohichi NAKAYAMA	Non-Member
(株)東芝	高倉 啓	Kei TAKAKURA	Non-Member

Cosmic-ray muon is high energy leptons generated in the earth's atmospheres as results of cosmic-ray proton/electron bombardment. Muon scattering method has been developed for nuclear security applications using its highly penetrative feature and sensitivity for high Z-materials. This study introduced the measurement of small nuclear reactor which consists of  $UO_2$  fuels and simulation study of container scanning system by muon scattering method. These results showed effectiveness of muon scattering method to identify nuclear materials such as uranium and plutonium even when the nuclear materials are covered by thick concrete or steel shielding.

**Keywords:** Muon, Cosmic-ray, Nuclear Security, Radiography, Tomography, Imaging

### 1. ミュオン散乱法

宇宙線ミュオンは陽子などの一次宇宙線が地球の大気中の原子核と反応することによる生成するパイ中間子の崩壊により生成される二次宇宙線である。宇宙線ミュオンは GeV オーダーの高いエネルギーを持ち、数メートルのコンクリートを容易に透過する特徴から、火山やピラミッド等の大型建造物のイメージングに利用されてきた。これらの測定は物質中でのミュオンフラックスの減衰を利用する手法で透過法と呼ばれる。

一方、ミュオンが物質を通過する際の原子核との相互作用によるクーロン多重散乱を利用する手法が散乱法である。散乱法では Fig.1 に示すように対となる2台の軌跡検出器を用いて、入射ミュオンと出射ミュオンの軌跡を測定し、両方の軌跡から散乱体の位置を求めることで、透過法よりも高精度な透過画像を得ることが可能である。さらに、ミュオンの散乱角は物質の原子番号に比例して大きくなる特徴を利用して、散乱角の大きさから物質の種類を推定することが出来るため、特に容器中に格納されたウランなどの核物質を検知する技術として有効である。国内では福島第一原子力発電所内部の溶融燃料デブリの詳細分布測定に向けての開発が進められている[1]。

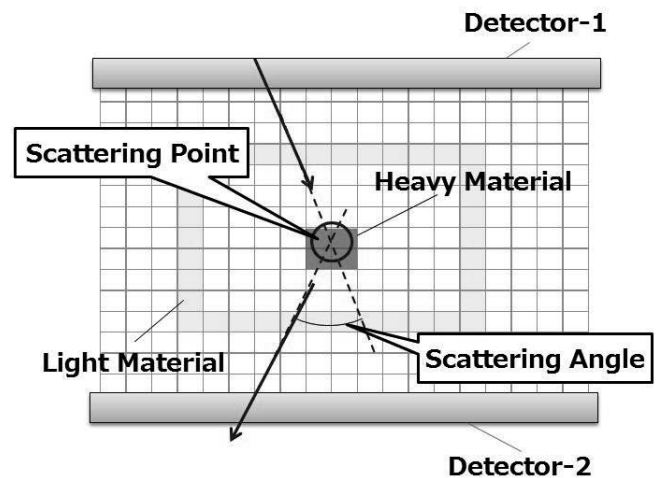


Fig.1 vervie of muon scattering method

### 2. ウラン燃料測定試験

散乱法による核燃料検知の有効性を確認するため、東芝はロスアラモス国立研究所と共同で小型の研究用原子炉 (NCA : 東芝臨界実験装置) を用いた核燃料の測定試験を行った[2]。NCA は原子力発電所で使用される燃料と同様に  $UO_2$  燃料で炉心が構成されている。実験は直径 2m のアルミ製炉心タンク内部に直径約 20cm の円筒形  $UO_2$  燃料を配置し、タンクの外側に2台のミュオン軌跡検出器を設置した体系で行われ、ミュオンが燃料を通過する際の散乱を測定することによ

り、中心部が空洞となった円筒形の燃料の画像を得ることに成功した (Fig.2)。測定された燃料画像の空間分解能は約 3cm であり、散乱角の小さい成分を除去することにより、障害物として設置したステンレスおよびコンクリートブロックの影響を分離できることが確認された。

### 3. 核セキュリティへの応用

ミュオン散乱法の核セキュリティへの応用について評価を行うために、宇宙線ミュオンの分布およびミュオン軌跡検出器をシミュレーションモデル上に再現し、コンテナ中の核物質を検知するシステムについての検討を行った。Fig.3 は天井と床にミュオン軌跡検出器を設置し、間を通過するトラックをミュオン散乱法により測定するモデルである。トラックの荷台には、厚さ 1cm のステンレス製容器の内部に、1 辺 10cm の  $UO_2$  燃料の立方体が配置されている。シミュレーションの結果、ウラン燃料測定試験で使用した検出器と同等の性能を持つ検出器を使用した場合に、核燃料の位置が三次元的に検知できる結果が得られた。

### 4. まとめ

ミュオン散乱法を利用したイメージング技術は、他の手法では測定が困難な遮蔽容器内部の核物質検知に有効である。また、人工的な放射線源を用いない宇宙線は、測定の際の被ばくを考慮する必要がないことに加えて、装置周辺の遮蔽も不要であるため、これらの特徴を活用した核セキュリティ技術は、今後、核燃料取扱施設や、輸出中を管理する港湾に設置可能な現実的な測定システムとしての幅広い応用が期待される。

### 参考文献

- [1] Miyadera, H., et al., "Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons." AIP Advances, 3(5): p.052133, 2013
- [2] Tsukasa, S., et al., "Cosmic-ray muon radiography of  $UO_2$  fuel assembly." Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.51, Issue 7-8, pp 1024-1031, 2014

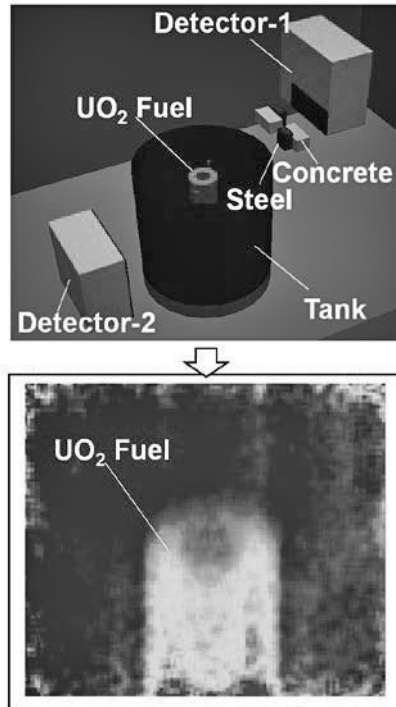


Fig.2 eometry of  $UO_2$  fuel measurement top and the result bottom

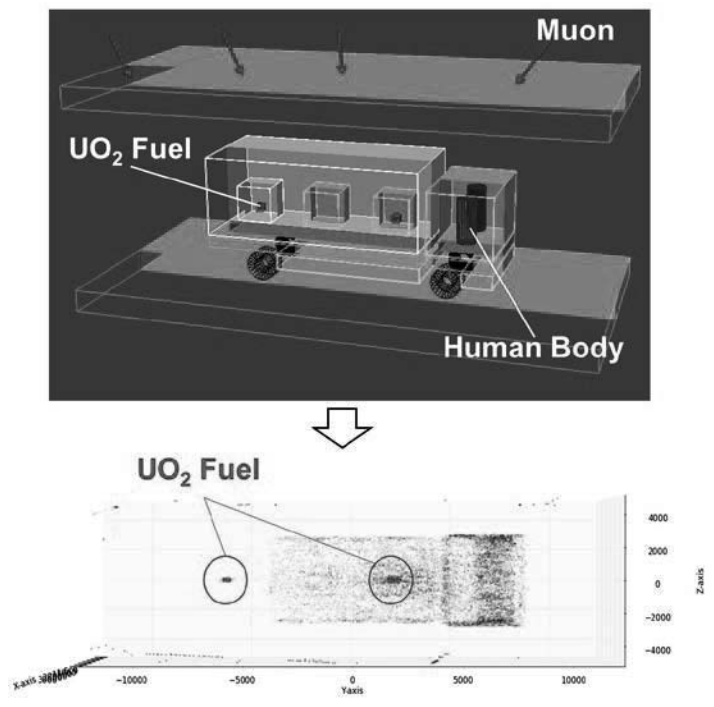


Fig.3 eometry of container scanner top and simulation result bottom