令和6年第15回原子力委員会 資料第1号

技術ご紹介

ミュオンイメージングの原子力への展開

TOSHIBA

株式会社東芝 2024.5.21



技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

この資料では廃炉・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)の成果を一部使用しております



Contents

01 ミュオン散乱法の原理

02 ミュオン散乱法の応用例

03 原子力分野への展開

04 人工ミュオンビームへの期待



01 ミュオン散乱法の原理



一次宇宙線と大気との衝突:パイオン(π^+ , π^-)を生成 短寿命のパイオンが崩壊: $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \Rightarrow \Xi = \lambda \to (\mu^+, \mu^-)$ 生成 ミュオンは比較的"長"寿命(2.2×10⁻⁶秒で電子に崩壊):多くが地表に到達

宇宙線ミュオンの特徴

- 自然放射線の約2割がミュオン
- 宇宙線はGeV領域(10⁹電子ボルト)が中心
 ⇒ 4 GeV のミュオンで、7m厚コンクリートを透過
 ⇒ 加速器で生成されるミュオンはエネルギーが数10 MeV(10⁷電子ボルト)
- 角度依存性: フラックスは天頂角の cos² θ で減衰
 ⇒ 鉛直方向が高フラックス、水平方向では桁落ち



Image from cosmic.lbl.gov

高エネルギーで透過力の高い自然放射線「宇宙線ミュオン」

物質を通過する際のミュオンの物理

イオン化損失

- 電子との相互作用でエネルギーを徐々に失う
 - -dE/dx 電子密度に依存



クーロン多重散乱



イオン化損失とクーロン多重散乱が同時に起きる

イオン化損失を利用した「ミュオン透過法」の歴史



クーロン多重散乱を利用した「ミュオン散乱法」の原理



ミュオン散乱法による物質識別の原理

散乱角だけでは分厚いコンクリートと薄い鉄を区別できない ミュオンの透過率:dE/dx ∝ Z (or 密度)

$$\frac{dN}{dx} = \frac{dN}{dE}\frac{dE}{dx}$$
$$\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{\boxed{Z}}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2}\ln(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right]$$

ミュオンの散乱角:放射長 ∝ Z²



			C Mo	
Material	Density	X_0		
	$[g/cm^3]$	[cm]		
Air	0.0012	3.04×10^4		
H ₂ O	1.00	36.08		
B ₄ C	2.52	19.89	+v - +	
Concrete	2.30	11.55	「軽兀素	
Al	2.70	8.90		
ZrO ₂	5.68	2.20		
SS304	7.93	1.76	中間元素	
Gd_2O_3	7.41	1.24		
UO ₂	10.96	0.61	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	
Pb	11.35	0.56	里儿糸	

H. Miyadera *et al.*, Applied Optics 63, A52 (2024).



C. Morris et al., AIP Advances 3, 082128 (2013).



ミュオン透過率と散乱角の同時測定で物質識別

ミュオン軌跡検出器の構成例

アナログ回路 ドリフトチューブの信号を増幅 デジタル化 (原子力原産技術)

FPGA回路

時間情報に変換しEthernetで コンピュータに転送 (民生技術)

オンライン解析ソフト

- ・ ミュオン軌跡を算出
- 散乱角を画像化
 物質判定 (アルゴル)
- 物質判定(アルゴリズム)



高エネルギー物理実験 + 原子力原産技術 + 民生技術

ミュオン散乱法の応用例

宇宙線ミュオン・電子を用いた物質判別

ミュオン+電子の散乱+透過率の組合せによる軽元素化合物の判別 ٠

75

50

25

-25 -50 -75 -100

機械学習など最新の解析技術との融合 ۲

弊社開発の中型ミュオン軌跡検出器 (1,680本のドリフトチューブ検出器を使用)

シミュレーション(ミュオンのみ) [QN開]-23026 HN-2024-0868

ミュオンコンテナスキャナ

ウラン検知

自然放射線による密輸摘発

米DSIC社 メキシコ国境でのマリファナ摘発

APRIL 2019

- A tractor and flatbed trailer arrived at the Mariposa Port of Entry carrying three rolls of coiled steel
- The CBP Officer at primary inspection referred the tractortrailer for secondary inspection

米国のマリファナ市場は720億ドル(約10兆円) 250億ドルが合法、470億ドルが違法市場

APPROX. \$20M OF MARIJUANA

- Each of the total of 48 metal boxes extracted, contained approximately 85.5 pounds of marijuana totaling approximately 4,150 pounds
- Based on the level of sophistication it is suspected this is a methodology to smuggle all contraband

2019 Decision Sciences International Corporation W ENFORCEMENT SENSITIVE ared with the permission of U.S. Customs and Border Protection for official use only

https://decisionsciences.com/wp-content/uploads/2022/05/DS-Brochures-Website-Download.pdf

数分の測定で 異常検知

X線では見つけられなかった20億円相当のマリファナを摘発

ミュオン散乱法のインフラ応用

03 原子カ分野への展開

3.11翌週にロスアラモスにて福島第一原子力発電所ミュオンイメージングを立上げ

[QN開]-23026 HN-2024-0868

052133 (2013).

ミュオン散乱法による原子炉透視

- ウラン燃料を用いたミュオン原子炉透視を実施
- ・ 試験は福島第一の1/10の縮小実験
- 3cmの分解能で炉心透視に成功

東芝臨界実験装置(NCA)を用い、ウラン炉心構築

C. Morris, H. Miyadera et al., Appl. Phys. Let. 104, 024110 (2014).

1 day

2 day

4 hrs

2013年夏に世界初の炉外からの炉心トモグラフィに成功

福島第一原子力発電所向けに開発したミュオン軌跡検出器

耐放射線性ドリフトチューブ検出器と回路を開発

福島第一原子力発電所のイメージングを目指し開発

- ・ 6,720本のドリフトチューブを使用
- ・コインシデンスによるガンマ線ノイズ除去により50 μSv/h環境で運転可

福島第一へのミュオン散乱法シミュレーション検討

0 – 100% 溶融炉心 90日間の測定に相当 GEANT4モンテカルロシミュレーション 炉心、建屋、圧力容器、コンクリート壁 0% 10% -30% 50% 100% 70% など原子炉の主要構造をモデル化 日錐形に溶融 宇宙線ミュオンのスペクトルを再現 した炉心 原子炉建屋 タービン建屋 H. Miyadera et al., AIP Advances 3, 052133 (2013). ミュオン検出器 ミュオン検出器 デブリ r = 10cm 15cm 20cm 30H 10H 60H 120**H** 150日

50%溶融コア、10-150日間の測定に相当。

福島第一原子力発電所におけるデブリ取り出し

デブリ取り出しの進展により、大量の取り出したデブリの管理が課題に

現状では全てのデブリに対して厳重な管理が必要となる

- ▶ デブリ中に含まれる核物質を測定により検知
- ▶ 核燃料の含有量に合わせた適切な管理の実現

• 全てに核物質が含まれると仮定した管理

デブリ中の核燃料検知の課題

非破壊検査による収納容器内の核燃料検知

核燃料から放出される放射線(ガンマ線、中性子等)を測定

▶ デブリ測定固有の課題への対応が必要

<u>デブリ中の核物質量を検知する上での課題</u>

機械学習によるデブリ中のウラン量推定

ミュオン測定データの分析による燃料割合の推定

- シミュレーションにより大量のミュオン散乱データを蓄積
 ミュオン散乱からデブリ情報を推定する予測モデルを作成
- ・ シミュレーションによるミュオン散乱の再現解析

H. Miyadera *et al.*, Applied Optics 63 (2024) A52.

最新の開発状況:

核セキュリティへの展開

医療用CTで使われるフィルタ補正逆投影法で キャスク内の燃料集合体を撮影

乾式キャスク中の使用済み核燃料の検認

04

人工ミュオンビームへの期待

人工ミュオンビーム 加速器生成ミュオンの冷却と再加速

- 人工ミュオンビームが高精度化と短時間測定
 への道を拓く
- J-PARCにて単色でビーム品質の良いミュオン 加速器が開発されている
 - 加速器(陽子/電子)によるミュオン生成
 - ミュオンを一度停止させ再加速

M. Otani, H. Miyadera, T. Shiba, OSA Imaging and Applied Optics Congress 2021.

人工ミュオンビーム レーザー航跡場加速ミュオン源

■ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)と欧州ELI: 10 PWレーザー航跡場加速による10-100 GeVミュオンビームを開発中(DARPA: 2023~)

Muons for Science and Security (MuS2)

Bobbili Sanyasi Rao *et al* 2018 *Plasma Phys. Control. Fusion* **60** 095002

- UT Austinとロスアラモス国立研究所: 10 GeV電子加速に成功、 同様の研究を提案
- ●大阪大学:1.3 GeV電子加速に成功(ラボスケール 2J級レーザーによる多段加速で高エネルギー化)

ミュオン技術応用概観

人工ミュオン源により技術適用範囲を広げることができる

- ミュオン散乱法は入射軌跡と出射軌跡の最近接点から散乱体の位置を特定
 ミュオンの平均散乱角が原子番号に比例するため、物質識別できるミュオン散乱法は 測定時間・測定精度を「桁」で改善し、コンテナスキャナ(密輸摘発)など実用化が 進んでいる
- 弊社ではミュオン検出器の開発、新たな適用先検討を行っており、セキュリティスキャナ 以外の応用として
 - 乾式キャスク内に収納された使用済み核燃料の検認
 - 構造物非破壊検査

を検討。産業界での展開も期待されている

• 今後、人工ミュオンビームで更なる高精度化が望める

宇宙線と人工ミュオンの相補的な利用が今後重要になる

東芝グループ経営理念

人と、地球の、明日のために。

Committed to People, Committed to the Future.