

TOSHIBA

加速ミュオンを用いたミュオンイメージング研究の可能性
ミュオン散乱法の産業利用

宮寺 晴夫
東芝エネルギーシステムズ株式会社
原子カシステム・量子応用技術開発部

01

ミュオン散乱法の原理とミュオン軌跡検出器

宇宙線ミュオンとは

一次宇宙線と大気との衝突でパイオン生成 (π^+ , π^-)

短寿命のパイオンが崩壊 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \Rightarrow$ ミュオン生成 (μ^+ , μ^-)

ミュオンは寿命 2.2×10^{-6} 秒で電子に崩壊 (それなりに地表に到達)

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 (10^9 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 (10^7 電子ボルト)
- 角度依存性：フラックスは天頂角の $\cos^{-2}\theta$ で減衰
→ 鉛直方向が高フラックス、水平方向では桁落ち

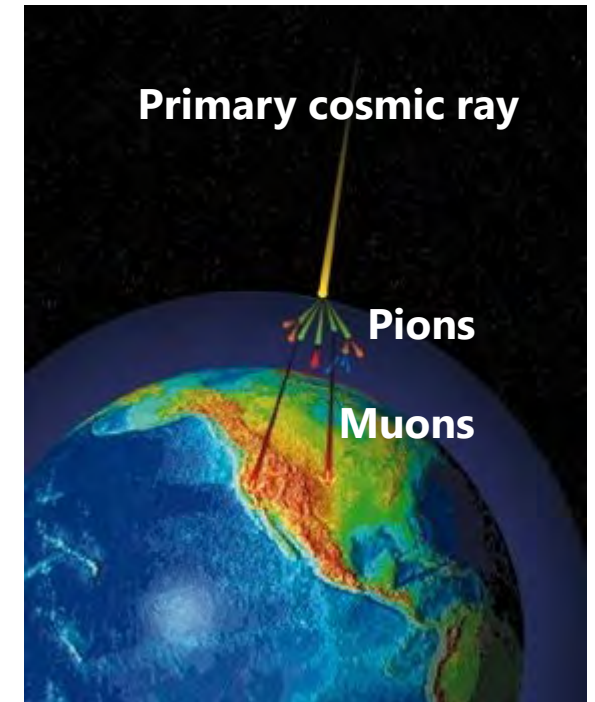
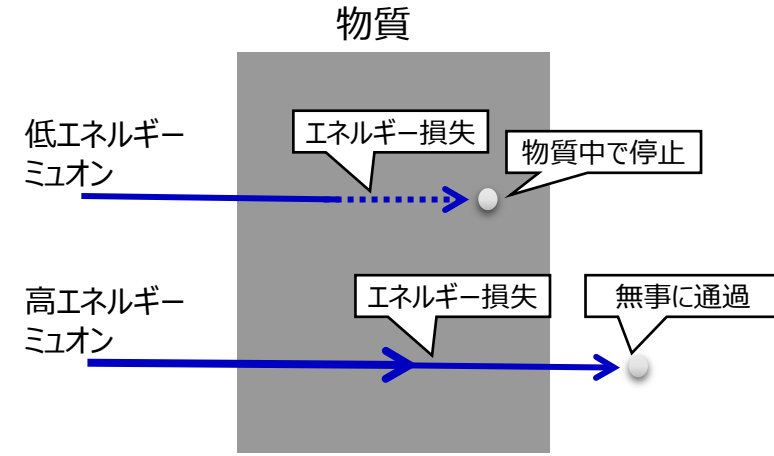


Image from cosmic.lbl.gov

高エネルギーの宇宙線ミュオン、鉛直方向のフラックスが高い

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

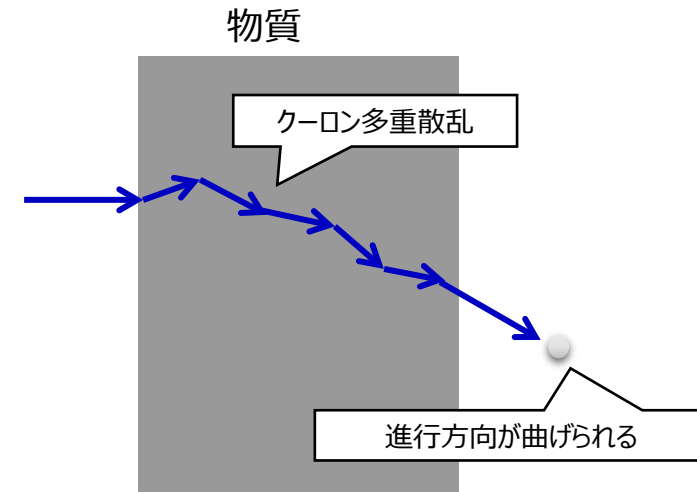


- クーロン多重散乱
 - 原子核の電荷との相互作用で時々散乱される
 - (物質通過後の) 散乱角

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

x = 物質長
 X_0 = 物質の放射長
 $\beta c p$ = ミュオンのエネルギー

- 原子番号の大きい物質ほど曲げ角が大きくなる
⇒ 物質の原子番号がおよそ分かる



イオン化損失とクーロン多重散乱が起きる

ミュオン透過法の歴史

1950s

E.P. George 坑道

ミュオン透過イメージング

1960s

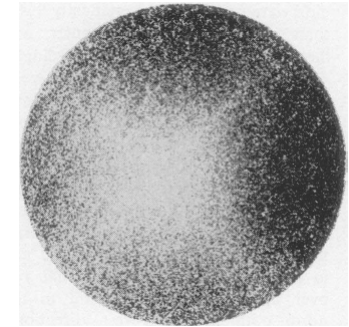
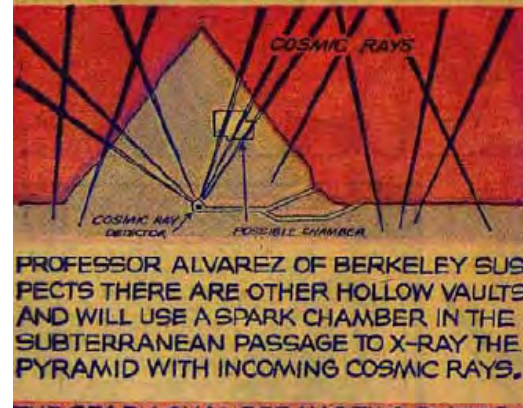
Alvarez ピラミッド

1995

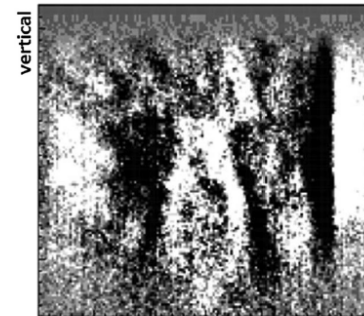
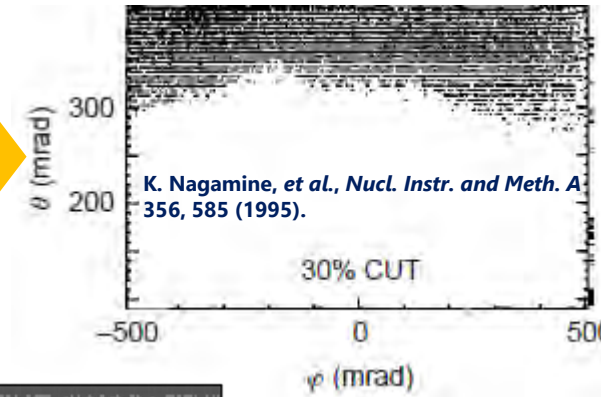
永嶺先生 筑波山

2011~

永嶺先生 et.al. 原子炉



L.W. Alvarez, et al., *Science* 167, 832 (1970).



H. Fujii, et al., *Prog. Theor. Exp. Phys.* 073C01 (2013).

- ・ミュオン散乱の影響
- ・フラックスの昼夜/季節変動

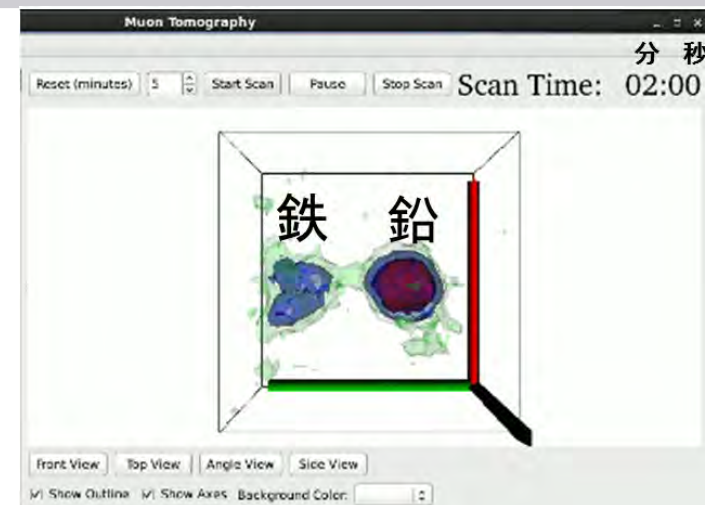
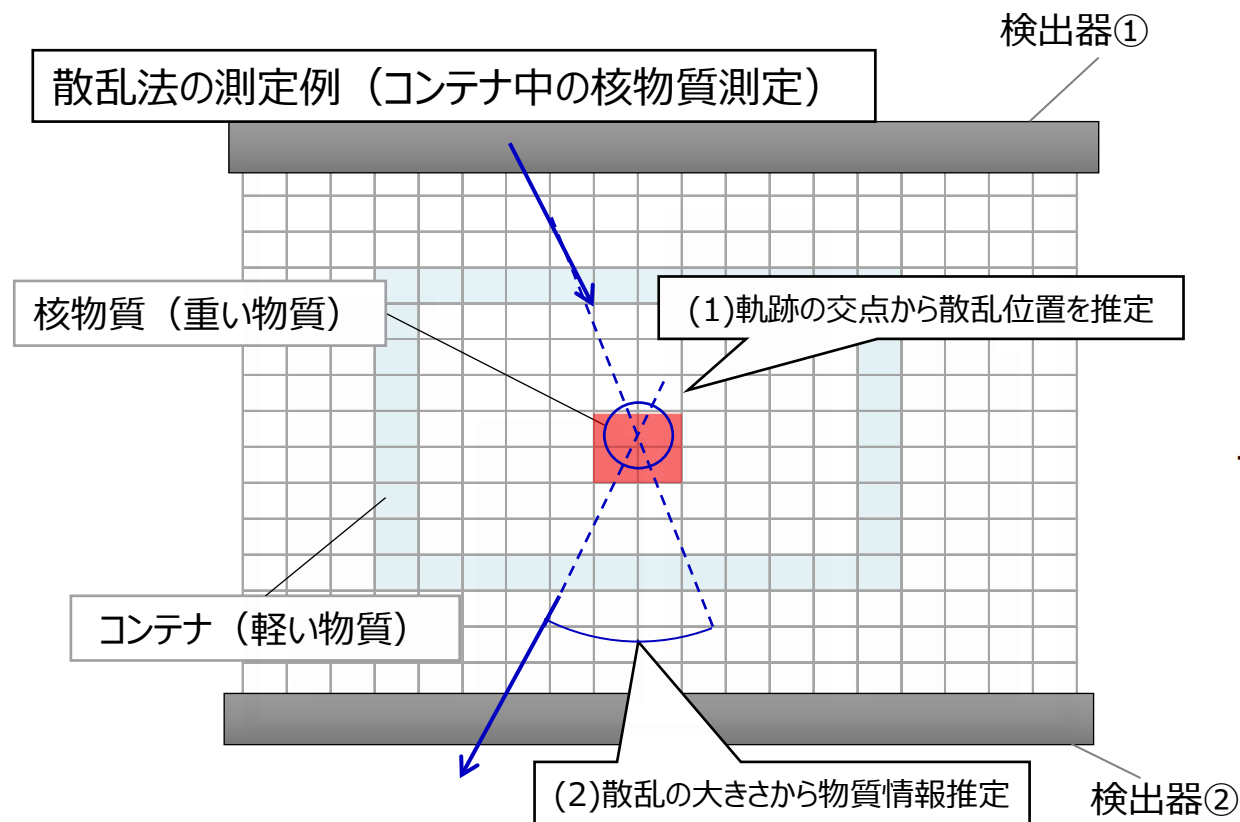
ミュオン散乱イメージングの原理

(1)ミュオンの「散乱した位置」から物質がある位置を推定

- ミュオンは物質を通過する際に散乱される
- 「散乱前の軌跡」と「散乱後の軌跡」から「散乱した位置」=「物質の位置」を推定

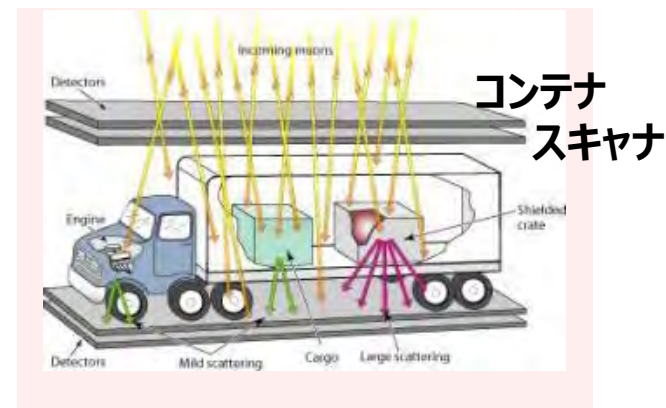
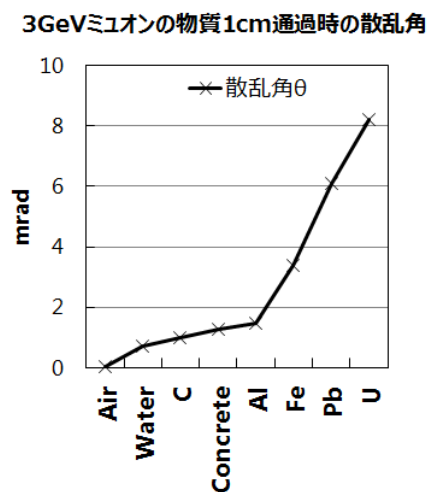
(2)ミュオンの「散乱の大きさ」から物質の情報を推定

- ミュオンの散乱角は通過する物質の原子番号が大きいほど散乱が大きい



Mini Muon Tracker (MMT)

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



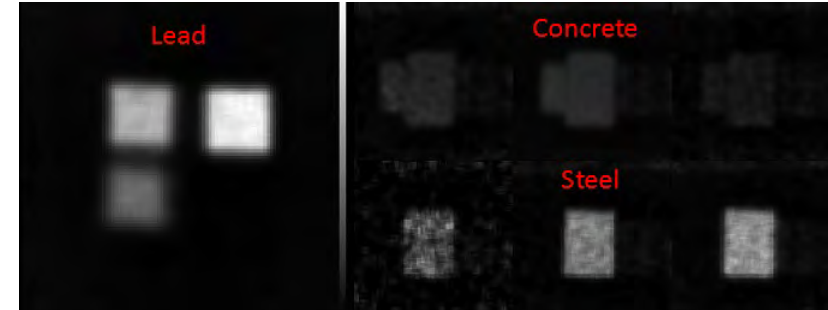
... Morris et al., Science & Global Security 16, 37 (2008).

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 を求める $\propto Z$

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



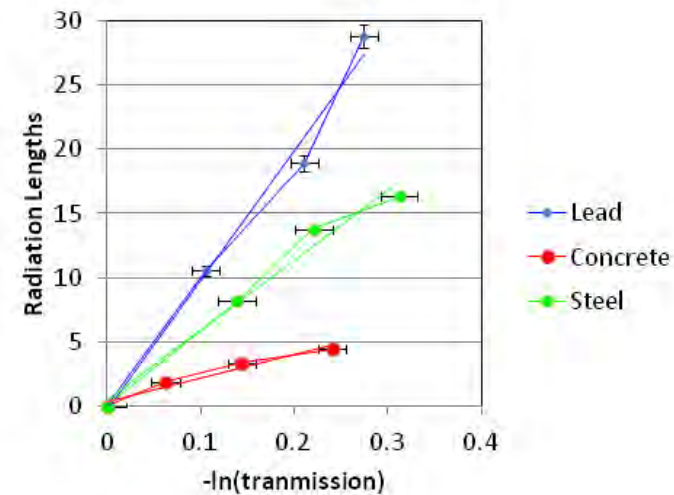
C. Morris et al., AIP Advances 3, 082128 (2013).

ミュオンの散乱角：放射長 $\propto Z^2$

$$\frac{dN}{d\theta} = \frac{1}{2\pi\theta_0^2} e^{-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}} d\Omega$$

$$\theta_0 = \frac{14.1}{p\beta} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

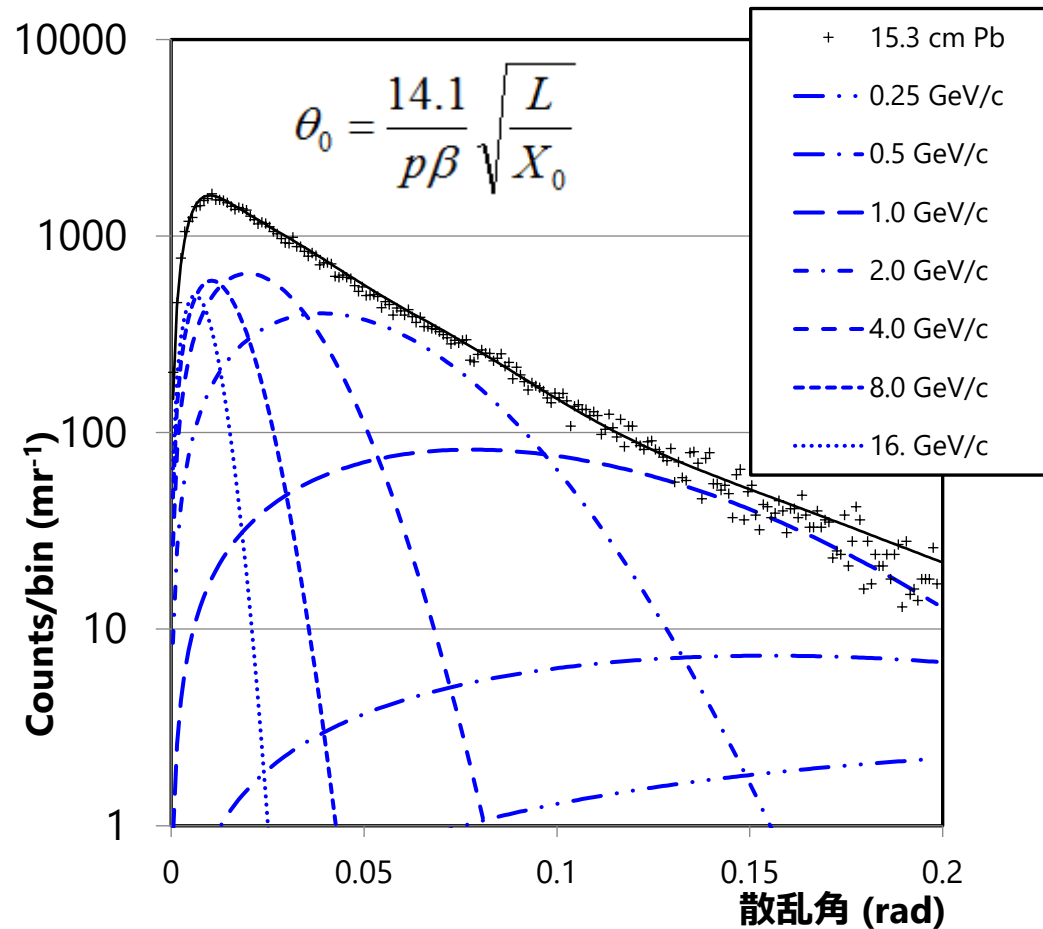
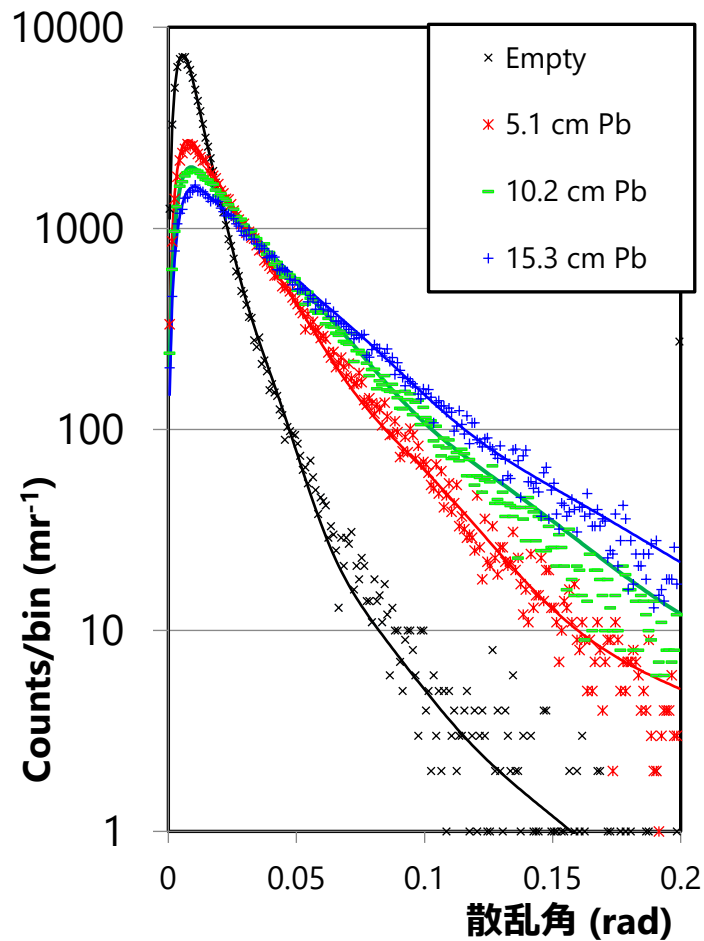
$$\frac{1}{X_0} = \frac{K}{A} \left\{ Z^2 [L_{\text{rad}} - f(Z)] + Z L'_{\text{rad}} \right\}$$



透過率と散乱角の同時測定で識別

ミュオンのエネルギー分布の較正

5cm、10cm、15cm厚の鉛でのミュオン散乱角分布をunfolding



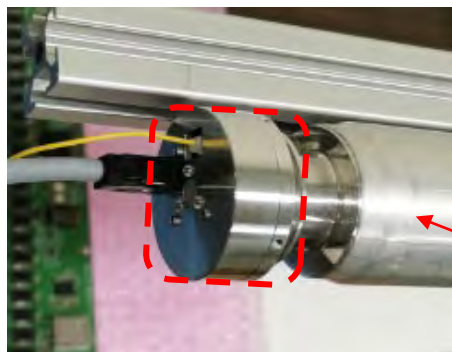
標高、緯度、季節変動による変化の較正

ミュオン軌跡検出器の構成例

高エネルギー物理実験 + 原子力原産技術 + 民生技術

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)



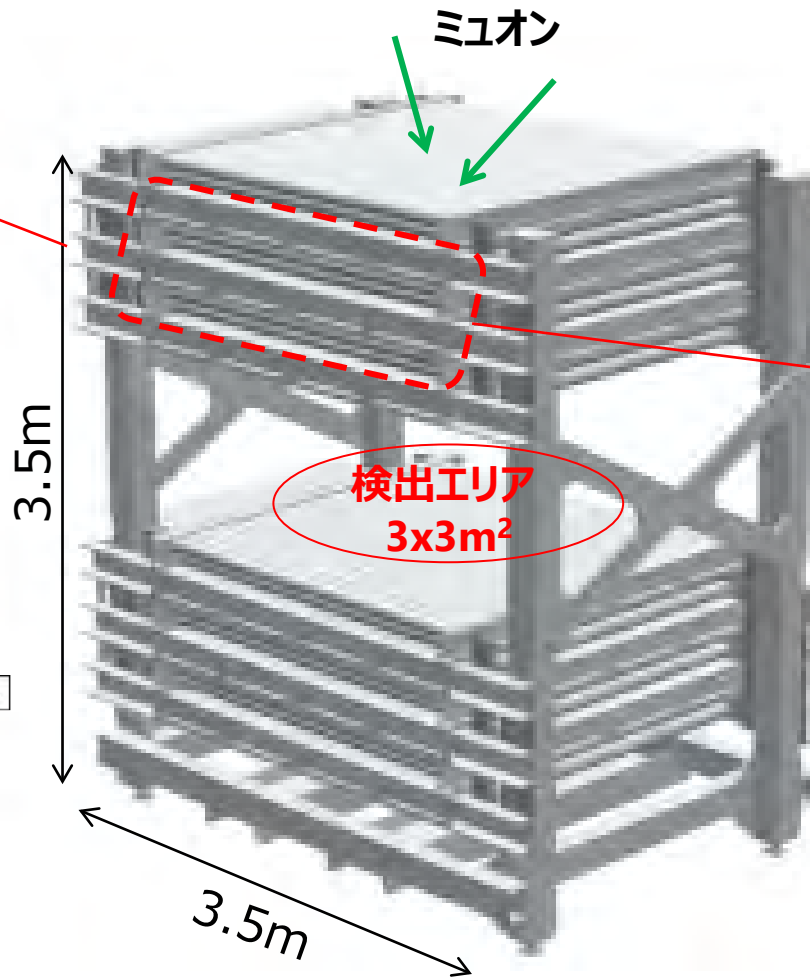
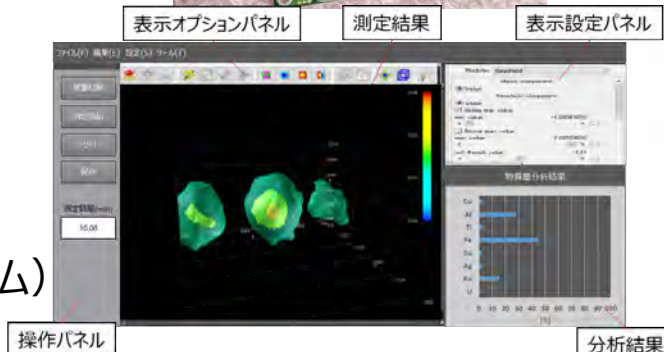
FPGA回路

時間情報に変換しEthernetで
コンピュータに転送
(民生技術)



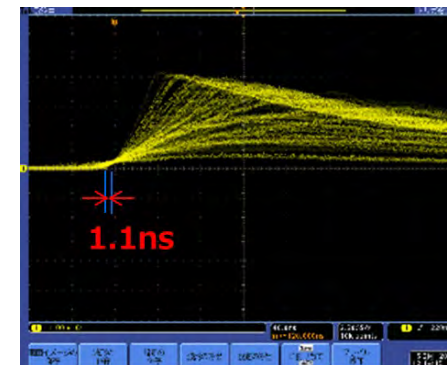
オンライン解析ソフト

- ミュオン軌跡を算出
- 散乱角を画像化
- 物質判定 (アルゴリズム)



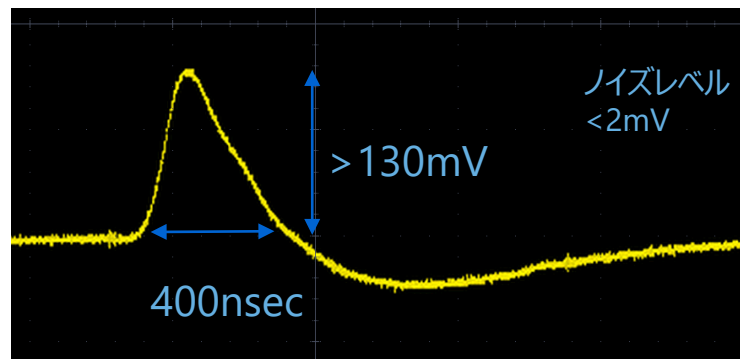
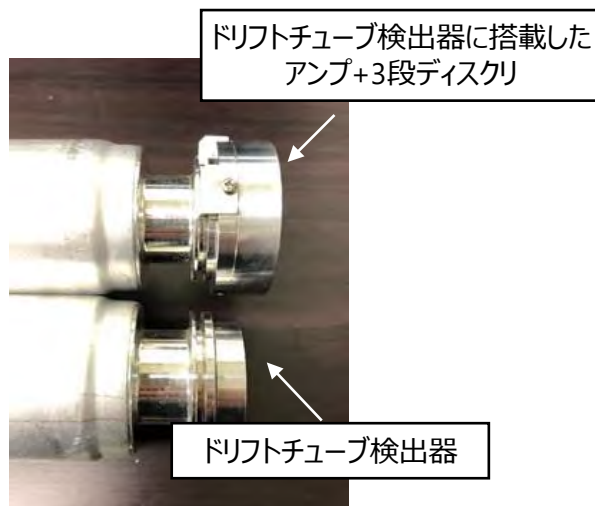
ドリフトチューブ検出器

ミュオン通過を電気信号で出力
(高エネルギー実験技術)

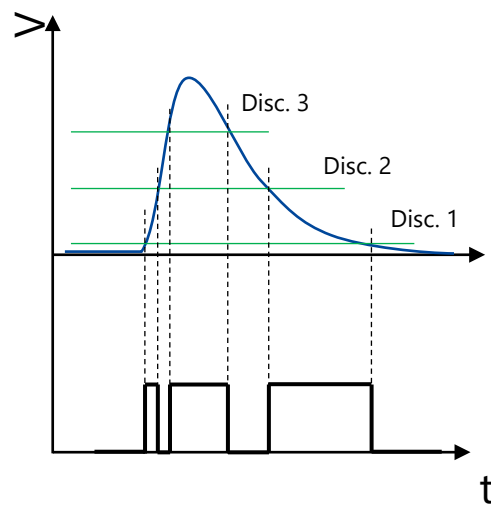


アンプ/ディスクリ回路の最近の開発

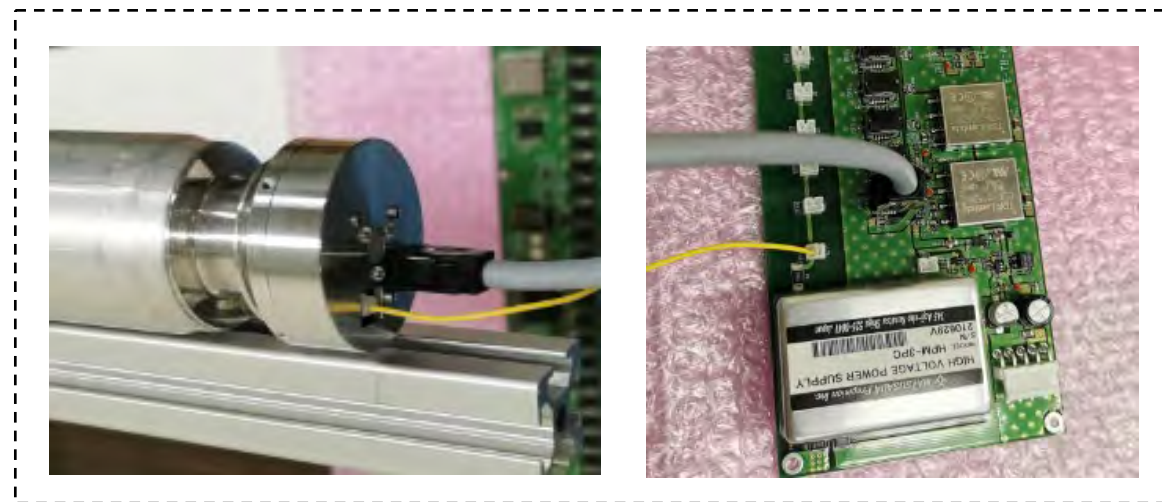
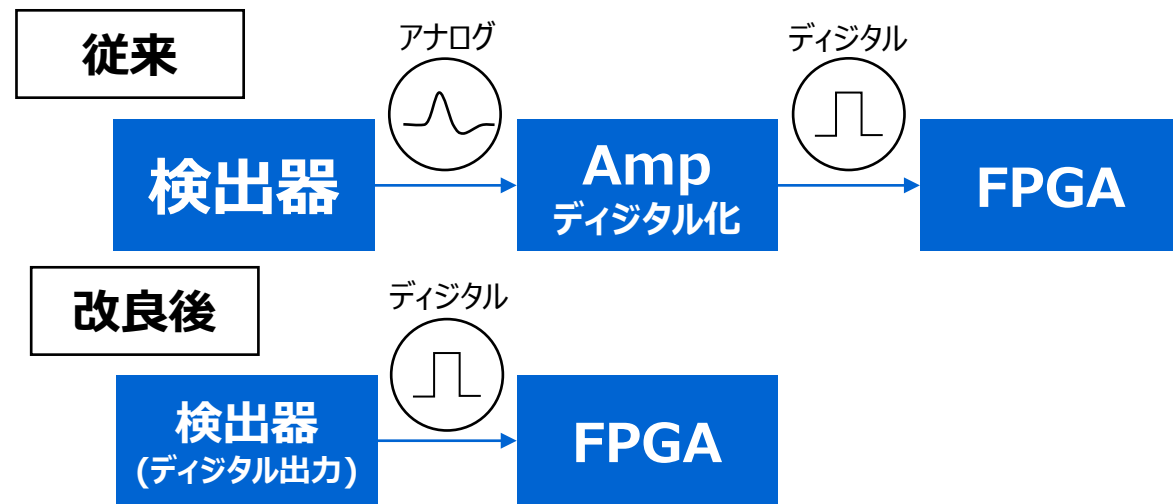
ミュオン軌跡検出器の性能を決めるのはアナログ部分
ドリフトチューブ直結型アンプ・3段ディスクリ回路を開発



ノイズレベル30mV以下が標準
10mV以下で「美しい」と言われるが
2mV以下を達成



単線出力3段ディスクリ
パルスの立ち上がり/下がりを読む



02

ミュオン散乱法の応用例



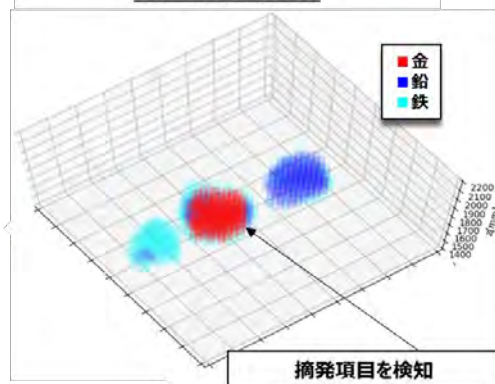
ミュオンコンテナスキャナ

物質判別による密輸摘発



コンテナ中の密輸検知試験

物質検知結果



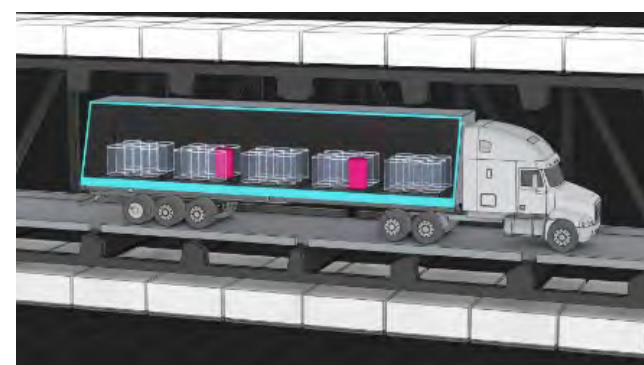
- コンテナ中に隠された金塊※を検知する条件を再現
- ※金と原子番号の近いタングステンを使用

- 鉄や鉛に隠された金を検知
- 将来的に爆発物や違法薬物の検知に応用

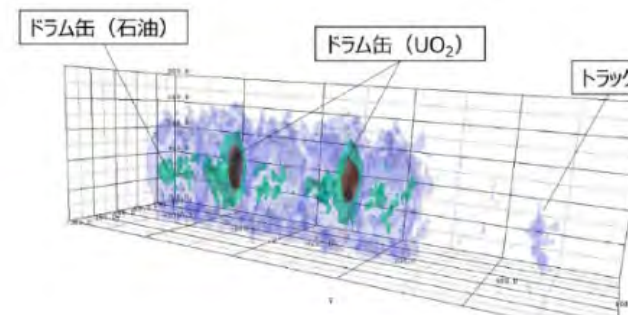
徐々に普及するミュオンコンテナスキャナ

- バハマ
- シンガポール、UAE
- アメリカ-メキシコ国境

コンテナ内の密輸物質を透視



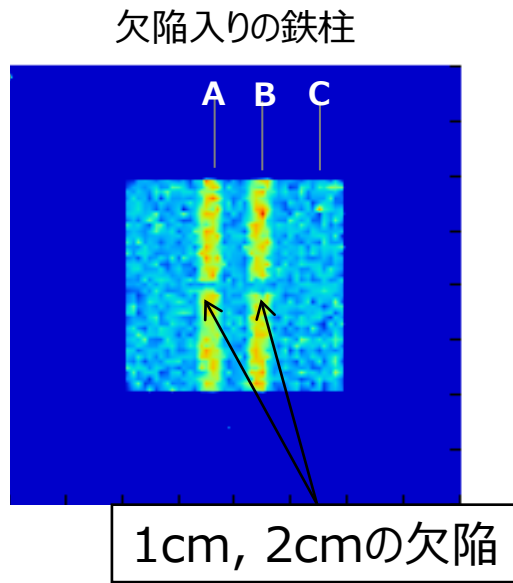
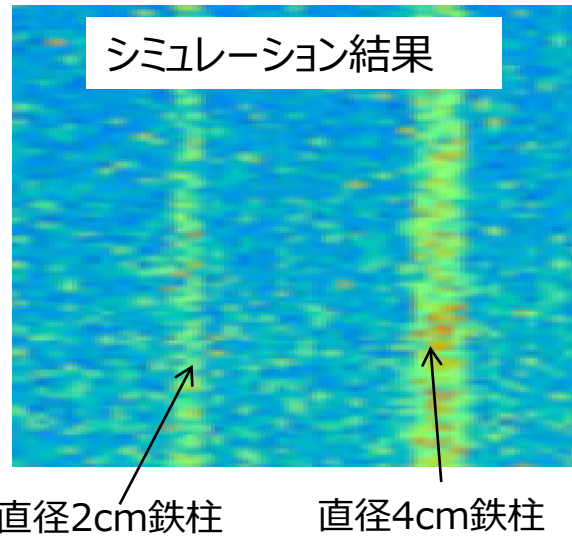
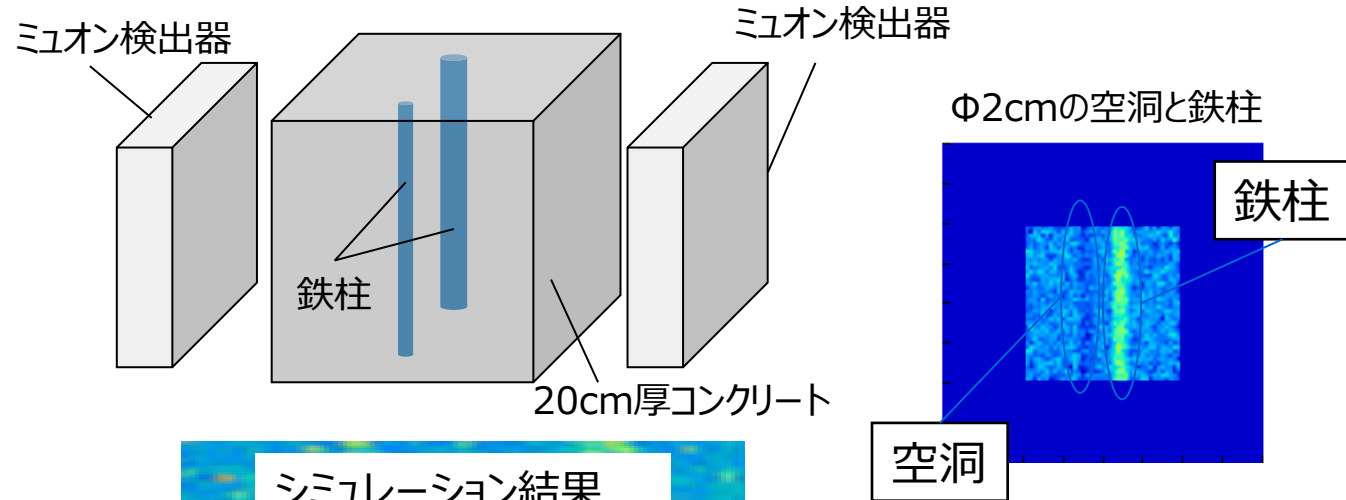
ミュオン散乱角→物質識別アルゴリズム



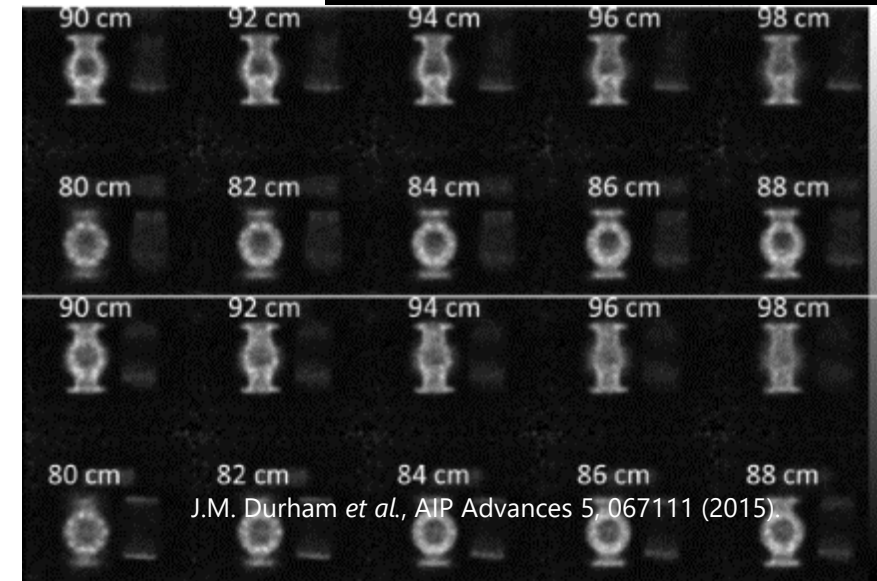
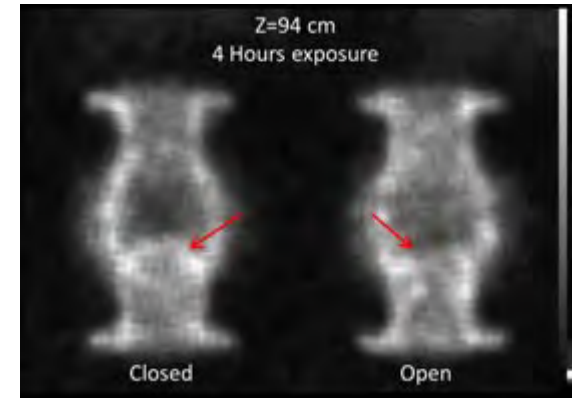
コンテナセキュリティスキャナ

ミュオン散乱法のインフラ応用

鉄筋コンクリートへの応用 (当社)



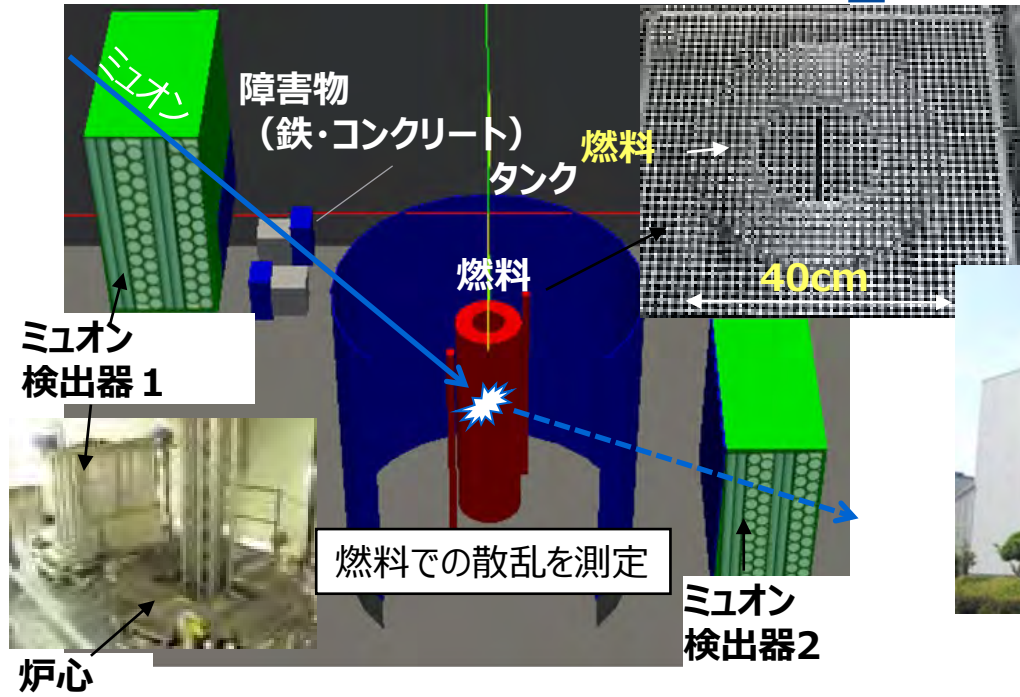
プラントのバルブ オンライン測定 (LANL)



J.M. Durham et al., AIP Advances 5, 067111 (2015).

ミュオン散乱法による原子炉透視

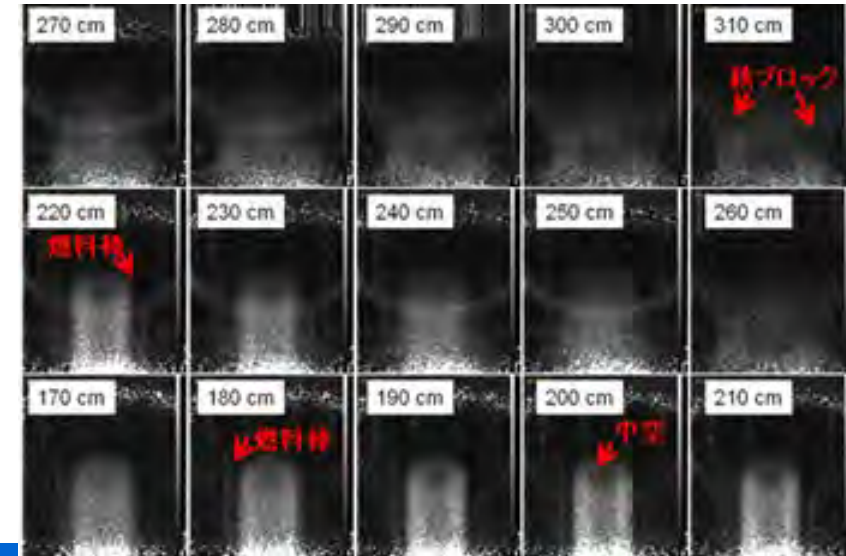
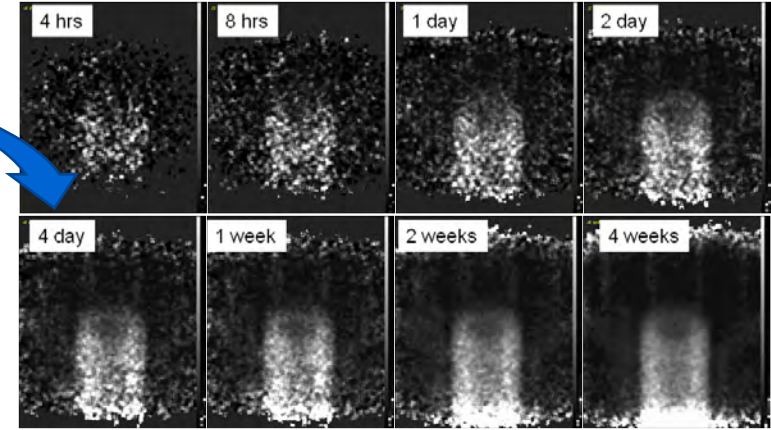
- ウラン燃料を用いたミュオン原子炉透視を実施
- 試験は福島第一の1/10の縮小実験
- 3cmの分解能で炉心透視に成功



東芝臨界実験装置 (NCA) を用い、ウラン炉心構築



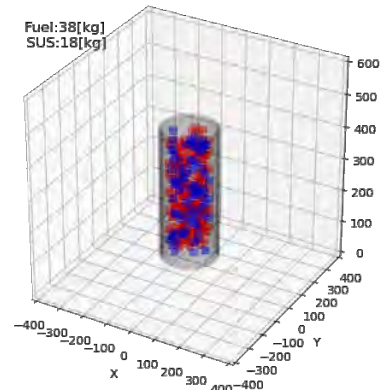
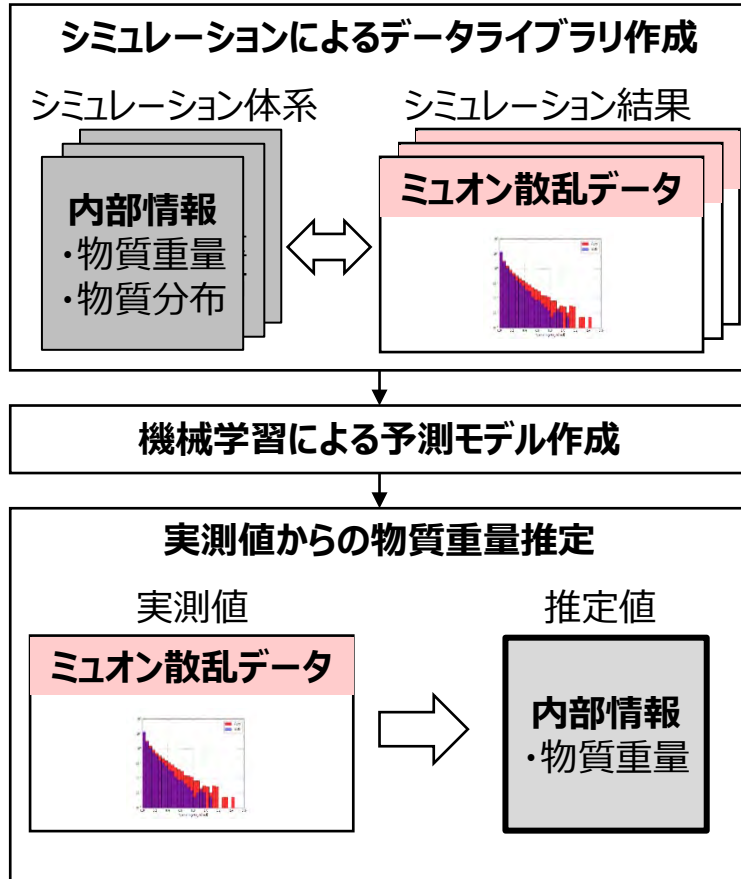
東芝臨界実験装置 (川崎市)



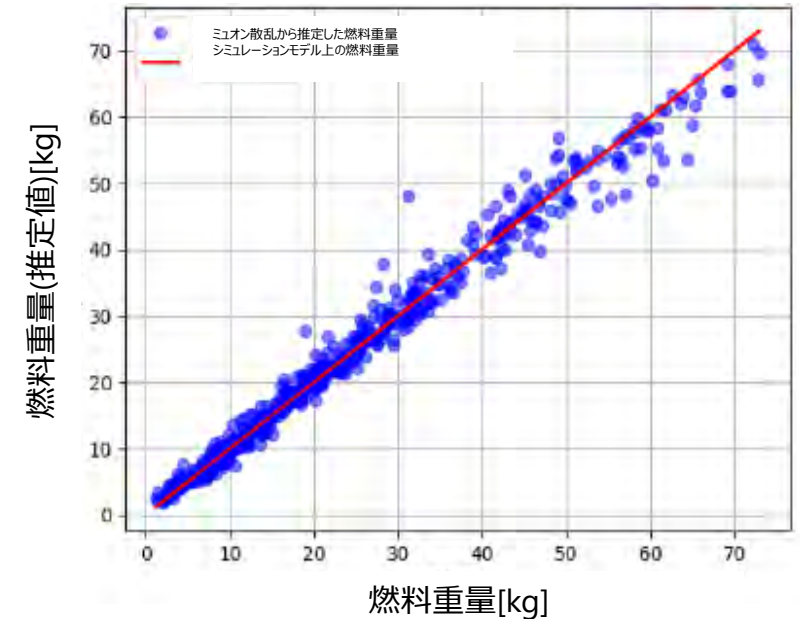
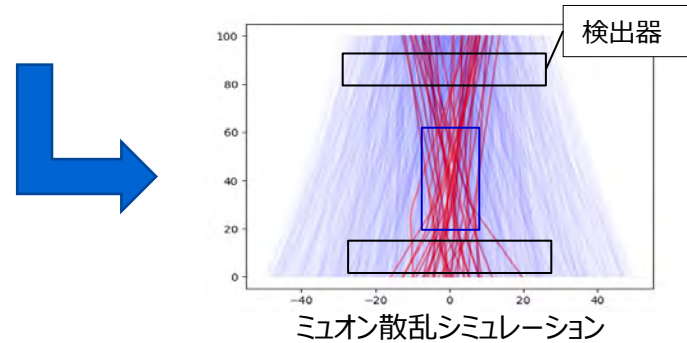
世界初の炉外からの炉心トモグラフィ

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



デブリ混合条件をランダム生成



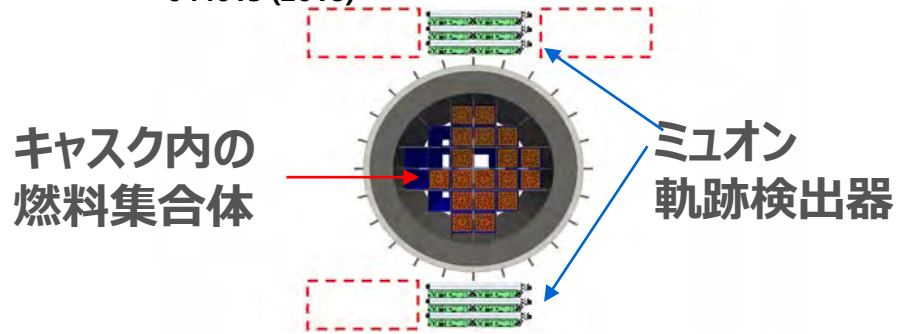
- ミュオン散乱値から燃料重量を推定
- 様々なデブリ混合条件下でも燃料重量を推定可能

- 様々なデブリの混合条件を作成
- シミュレーションによるミュオン散乱の再現解析

核セキュリティへの展開

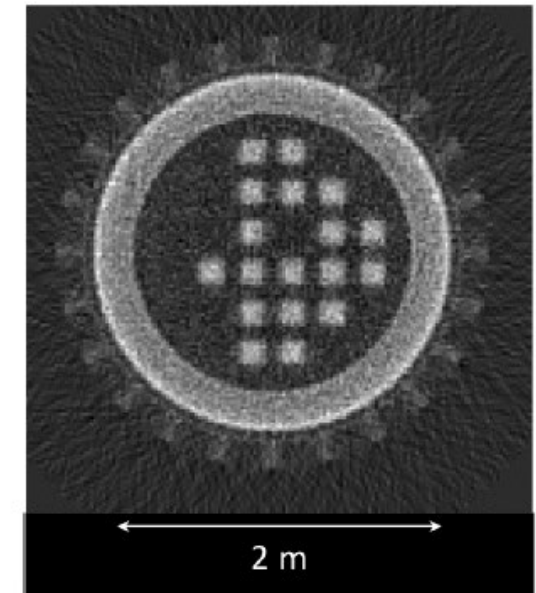
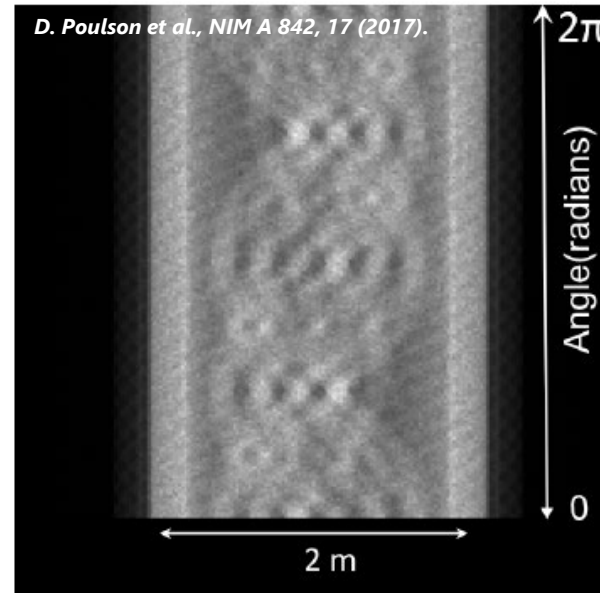


J.M Durham et al., *Physical Review Applied* 9, 044013 (2018)



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

全周測定のスミュレーション



乾式キャスク中の核燃料の検認

まとめ

- 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
→ 加速ミュオンビームで更なる高精度化
- 当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しており、今後、産業界での展開も期待されている

TOSHIBA