

# **TOSHIBA**

Leading Innovation >>>

## **宇宙線ミュオン散乱による 原子炉イメージング**

**(株)東芝**

**宮寺 晴夫**

2014年12月3日 放射線計測フォーラム福島

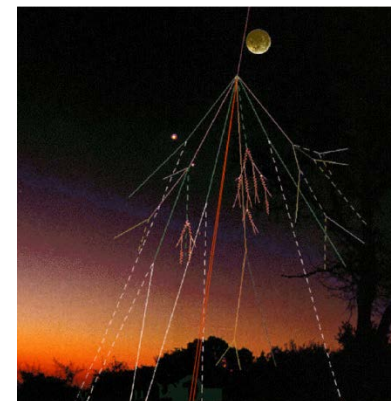
# 内容

- **イントロダクション**

- 宇宙線ミュオンとは
- ミュオン・イメージング法の歴史
- 透過法、散乱法の違い

- **福島第一ミュオン透視プロジェクト**

- 米国ロスアラモス国立研究所にて行った基礎試験
  - 原子炉模型を用いたデモンストレーション
  - シミュレーション計算
  - ミュオン検出器の放射性耐性試験
- 東芝ーロスアラモスコラボレーション
  - 東芝研究炉における技術実証試験
  - 耐放射線ミュオン検出器システムの開発



# 宇宙線

- 1912年、Victor Hessが熱気球で飛行中に宇宙線を発見
- 宇宙からは高エネルギーの粒子が飛来
- 地球の大気と衝突し、原子核反応によりパイオンなどの二次粒子を生成
- 短寿命のパイオン ( $\pi^+$ 、 $\pi^-$ ) は、ミュオン ( $\mu^+$ 、 $\mu^-$ ) に崩壊
- ミュオンは  $2.2 \times 10^{-6}$  秒と比較的長寿命
  - 宇宙線ミュオンは高エネルギーで、相対論的な効果で寿命が延び、地上まで生きている粒子も多い
  - 宇宙線ミュオン、大気ミュオン
- 地表に到達する宇宙線の7割がミュオン
  - 地表では10,000 ミュオン/m<sup>2</sup>/分



Victor Hess - 1912

# ミュオン

- 質量106 メガ電子ボルト ( $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$ )

- 電子の約200倍、陽子の1/9

- 電子の仲間

- 重く、強い相互作用がないため、  
高い透過力

	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク	u アップ 電荷 2/3	s ストレンジ 電荷 2/3	t トップ 電荷 2/3
	d ダウン 電荷 -1/3	c チャーム 電荷 -1/3	b ボトム 電荷 -1/3
レプトン	e 電子 電荷 -1	$\mu$ ミュー 電荷 -1	$\tau$ タウ粒子 電荷 -1
	$\nu_e$ 電子ニュートリノ 電荷 0	$\nu_\mu$ ミューニュートリノ 電荷 0	$\nu_\tau$ タウニュートリノ 電荷 0

- 高エネルギー加速器を用いて人工的に大量生成

- J-PARC ミュオン科学実験施設、大阪大学 MuSIC

- RAL(英)、TRIUMF(カナダ)、PSI(スイス)

- 加速器で得られるミュオンビームはエネルギーが数100 MeV ( $10^6 \text{ eV}$ )

⇔ 宇宙線はGeV領域 ( $10^9 \text{ eV}$ ) が中心

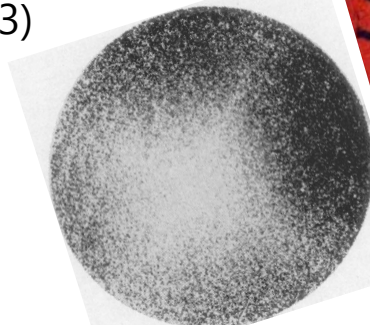
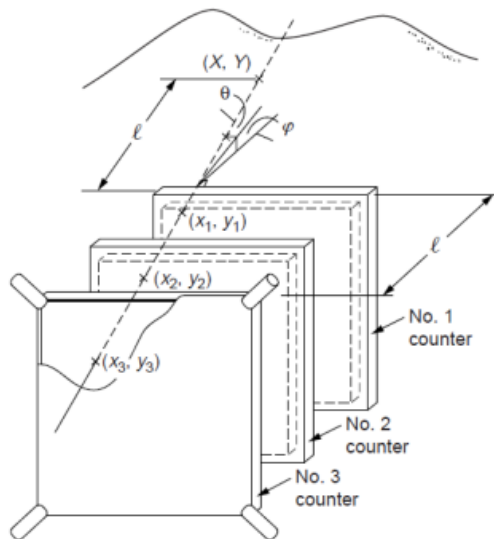
宇宙線は高い透過力: 4 GeVのミュオンで~7mのコンクリート  
透過する際、クーロン多重散乱を受ける

# ミュオンイメージング - 透過法

- 宇宙線ミュオンを用いたレントゲン撮影による、2次元密度マップ

- 透過法: 影を撮影

- 1950年代にE.P. Georgeが坑道の荷重測定に利用
- L.W. Alvarez、ピラミッドの隠れ部屋探査(1970)
- 火山への応用 (永嶺:1995 田中:2003)
- 溶鉱炉 (永嶺:2005)



Commonwealth Engineer, July 1, 1955

455

## Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel

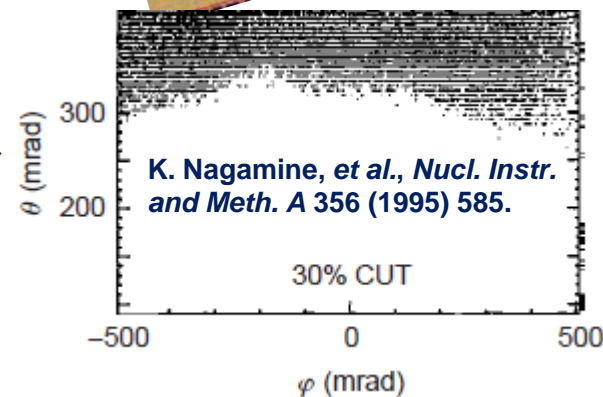


• Fig. 1—Geiger counter "telescope" in operation in the Guthega-Munyang tunnel. From left are Dr. George and his assistants, Mr. Lebane and Mr. O'Neill.

Geiger counter telescope Guthega project



Dr. E. P. George University of Sydney, N.S.W.





# ミュオンイメージング – 散乱法

## • 散乱法：物質の3次元特定

- 9.11後、核爆弾の米国への持ち込みの阻止のため、ロスアラモス国立研究所で開発

K. Borozdin *et al.*, Nature 422, 277 (2003).

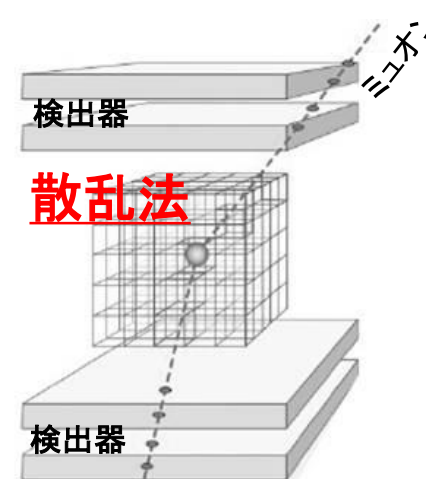
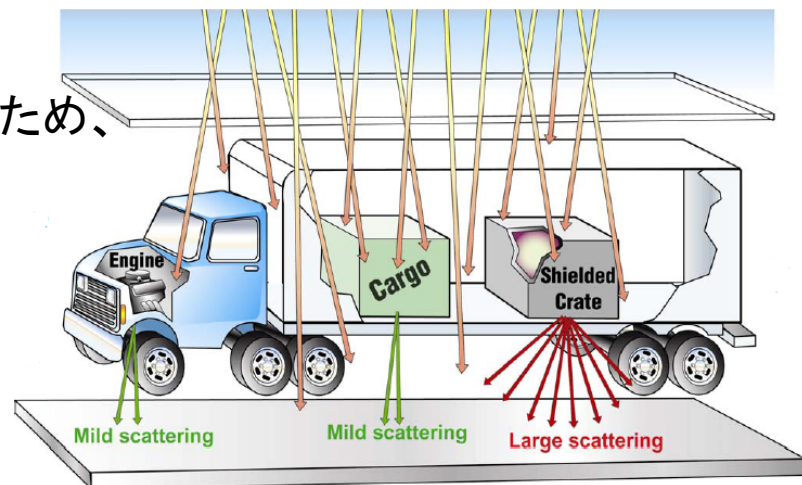
C. Morris *et al.*, Science & Global Security 16, 37 (2008).

## • ミュオンの散乱角は、原子番号に比例

- ウランのような重元素に高感度
- 散乱の前後にミュオン軌跡検出器を置き、散乱場所と散乱角を求める
- 透過法と比べ一桁良い分解能

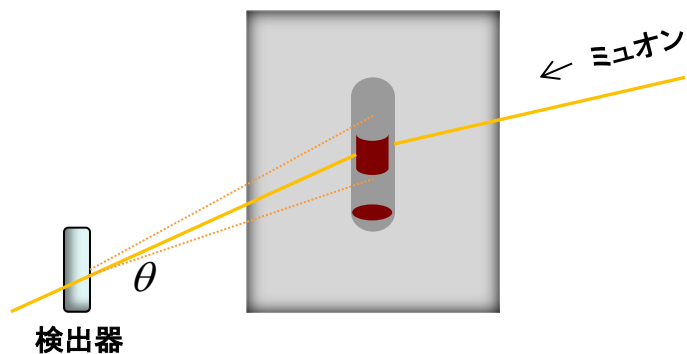
$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right]$$

放射長 (物質固有値)



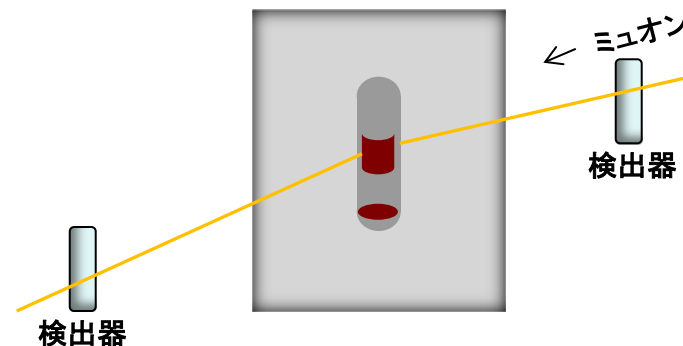
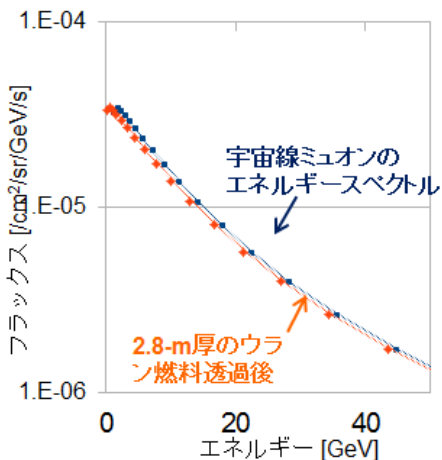
ミュオン多重散乱

# 透過法と散乱法の比較



## 透過法: 影を撮影

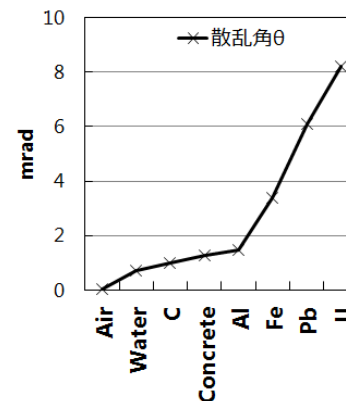
- ミュオンの高い透過性を利用
- フラックスの減衰を測定
- 散乱による分解能の劣化



## 散乱法: 物質の3次元特定

- ミュオンの散乱角を測定
- 物質ごとに固有の散乱角
- 散乱点推定による物質位置特定

3GeVミュオンの物質1cm通過時の散乱角



# 物質識別

- 1組のミュオン軌跡検出器で、散乱角 ( $\propto$ 放射長<sup>2</sup>)と透過率 ( $\propto$ エネルギー損失)を測定  $\Rightarrow$  両者の組合せで物質識別

$$\frac{dN}{dx} = \frac{dN}{dE} \frac{dE}{dx}$$

透過率

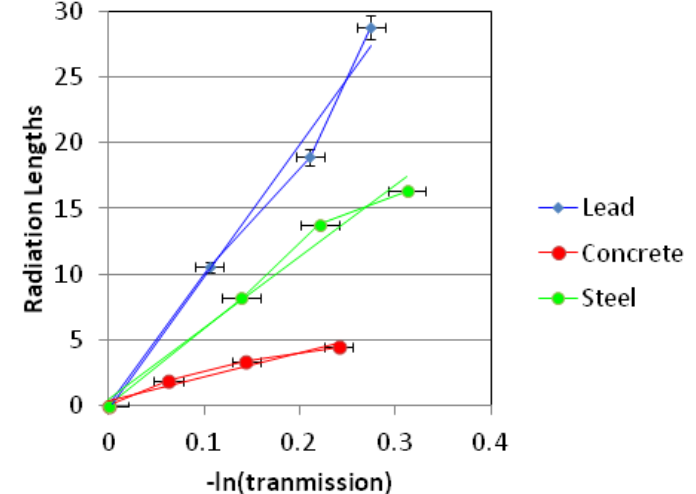
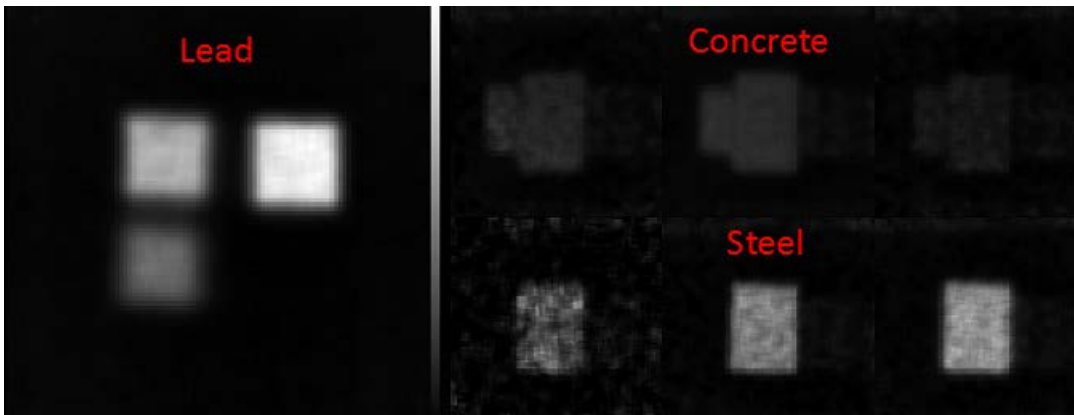
$$\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{1}{A \beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right) \right]$$

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

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

散乱角

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



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



# 核テロのリスク

世界には158万kgの高濃縮ウラン、22万kgの兵器級プルトニウム  
核テロによる主要都市への攻撃は、世界にとって最大のリスク



**The biggest threat facing this country is weapons of mass destruction in the hand of terrorist network.**

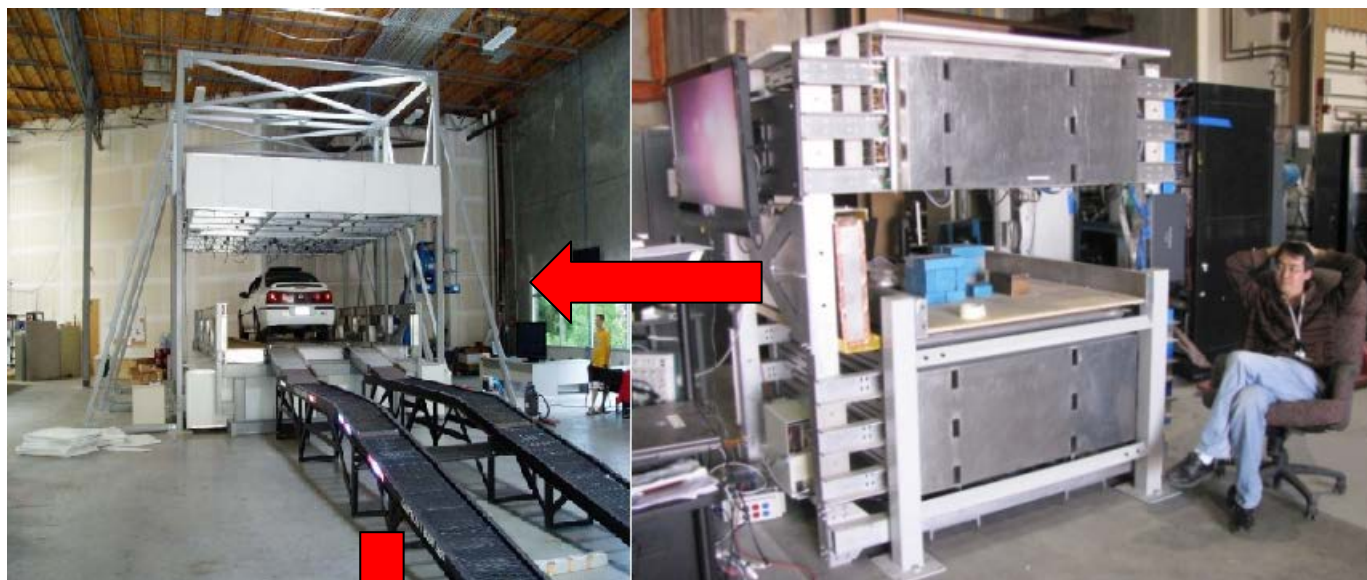
**A potential game changer would be a nuclear weapon in the hands of terrorists blowing up a major American city.**



## 米国コンテナ全量検査法

- テロ対策強化のため、米国向けの全ての海上コンテナと航空貨物を対象、核物質について積み地港で非破壊検査を義務付け
- **宇宙線ミュオンを用いたミュオン散乱法は現実的なソリューション**

# ミュオン散乱法によるコンテナスキャナ



ロスアラモスと共同で、Decision Sciences社が  
バハマにミュオンコンテナスキャナをインストール

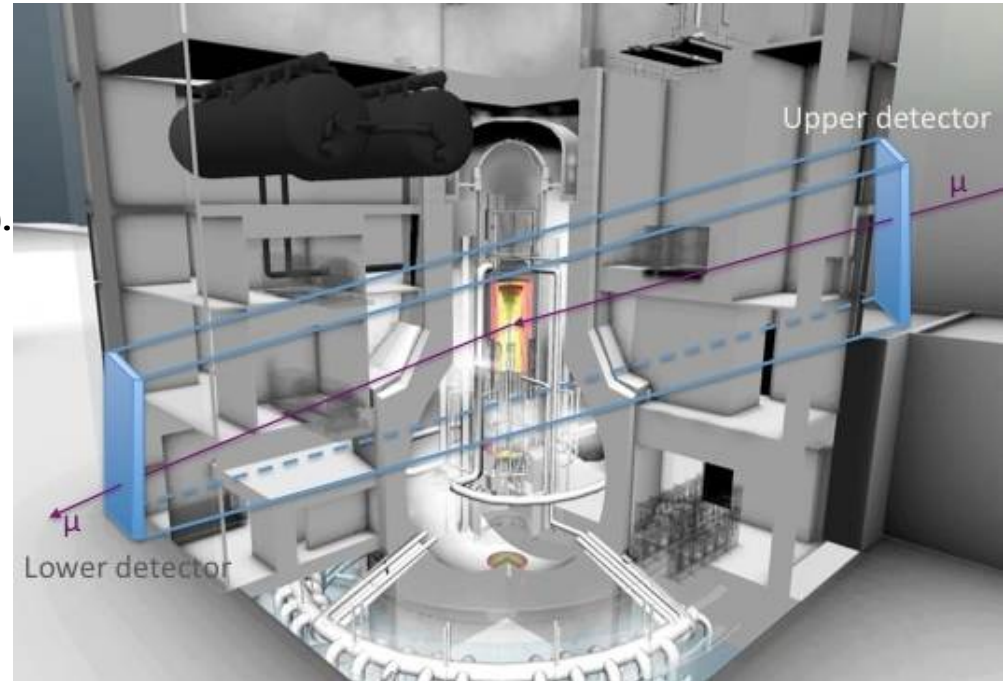
コンテナあたり30～60秒でスキャン

世界で唯一、製品レベルのミュオン透視技術

# 福島第一ミュオン透視プロジェクト

## ロスアラモス国立研究所での立上げ

- **ミュオン散乱法で福島第一原発の炉心状況を解明できないか**
- 3.11翌週に机上検討を行い、4月に日本政府に提案
- 原子炉模型を用いた技術デモ (2011年8月)
- シミュレーション検討 (2011 ~ 2012)  
K. Borozdin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 152501 (2012).  
H. Miyadera *et al.*, AIP Advances 3, 052133 (2013).
- 検出器の放射線耐性試験.  
(2011 ~ 2012)



## 東芝ーロスアラモス

- 2012年共同研究開始、日米で提案
- 耐放射線検出器開発
- 東芝 研究炉におけるウラン燃料を用いた技術実証試験(2013年夏)
- **2014年7月、国プロ「原子炉内燃料デブリ検知技術の開発」スタート**

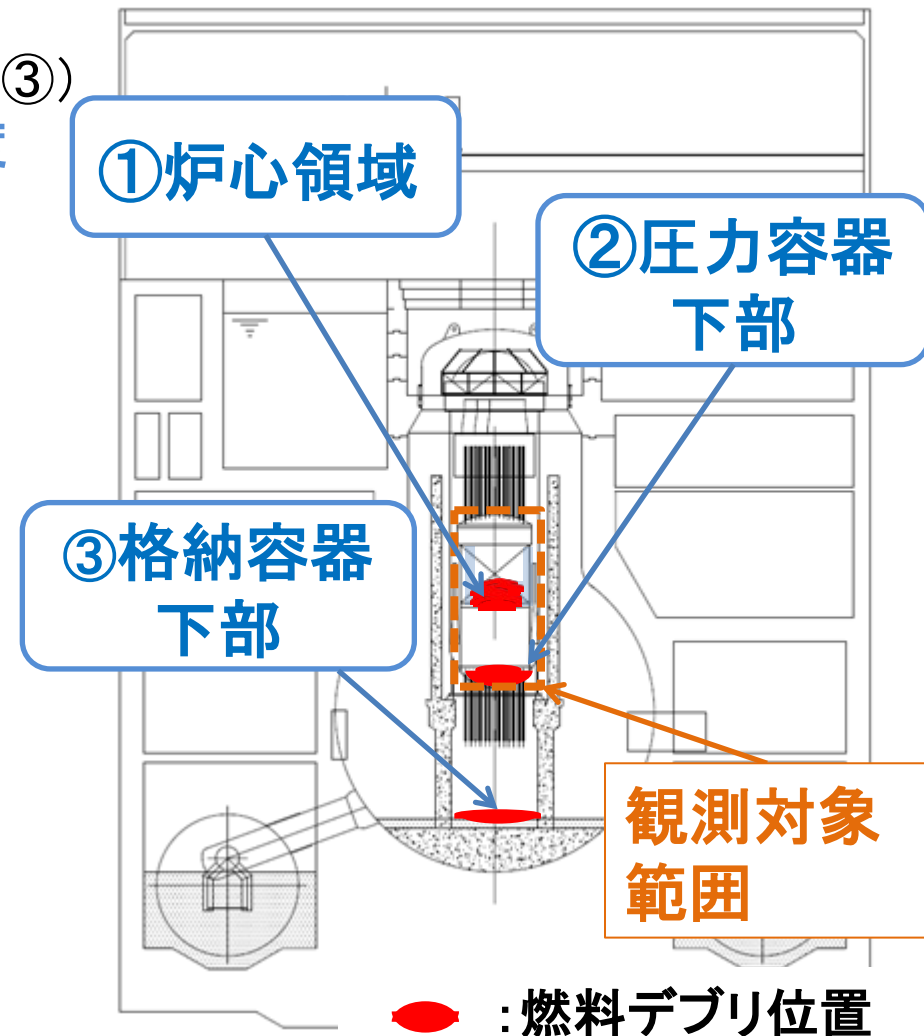
# 1Fミュオン透視PJの目的

## 燃料デブリの位置、量を把握が重要

- 圧力容器内(①、②)と格納容器下部(③)  
⇒ 格納容器側部からの取り出し優先度
- 燃料集合体の損傷状態
- 狭隘部状態
- 燃料デブリの密度等の詳細分布  
⇒ 取り出し手順や工法の実体化

圧力容器内部：高放射線場

宇宙線ミュオン観測技術により早期に  
燃料デブリ分布を把握

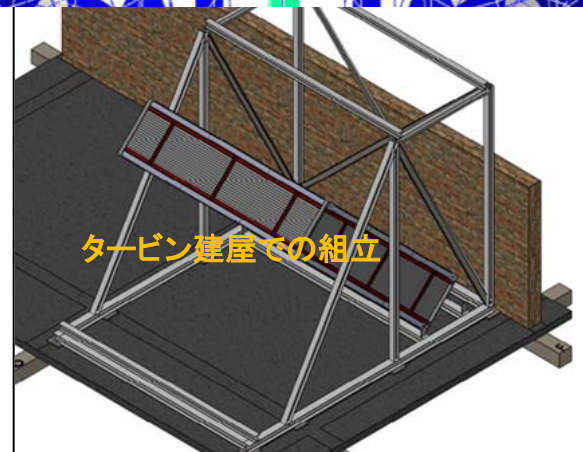
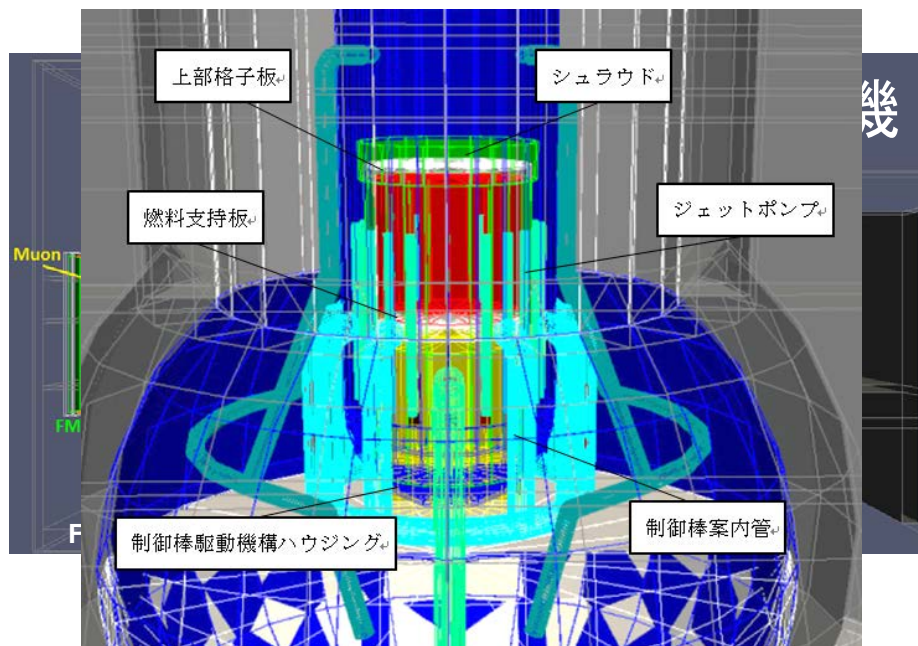




# 福島第一2号機シミュレーション

- GEANT4モンテカルロシミュレーションによる実現性検討
  - GEANT4シミュレーションは業界標準のモンテカルロ
  - 炉心、建屋、圧力容器、コンクリート壁など原子炉の主要構造をモデル化
- 宇宙線ミュオン発生コードを作成
- 検出器は、建屋前とタービン建屋2Fへの設置を想定
  - 建屋前検出器は10cm厚鉄板で遮蔽
  - タービン建屋2Fは線量が低く、遮蔽体なしでも大丈夫の見込み
  - 検出器のインストール方法など、東芝にて検討を行っている

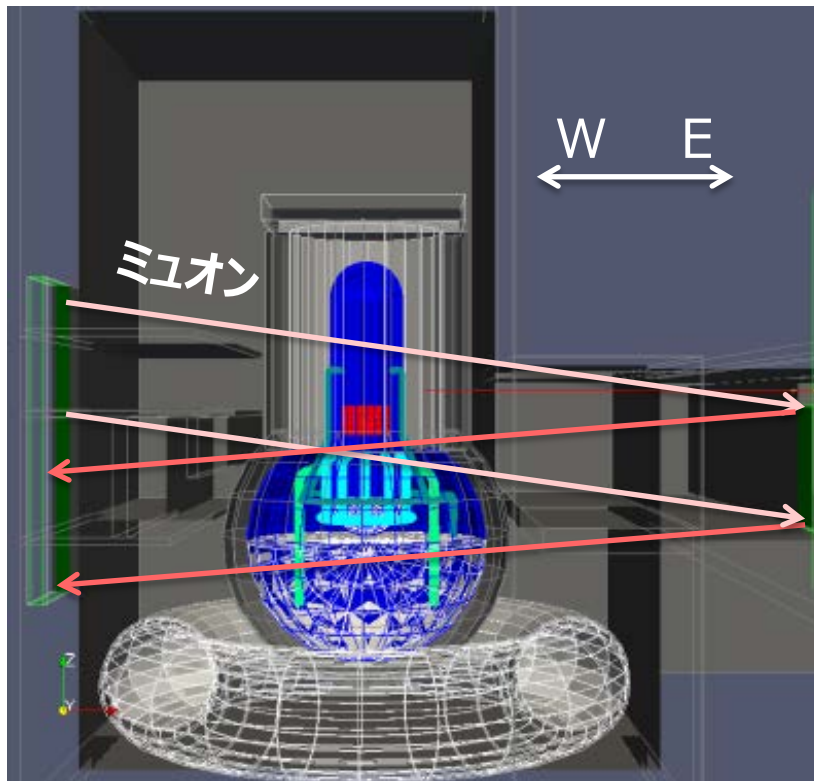
H. Miyadera *et al.*, AIP Advances 3, 052133 (2013).





# 福島第一原発2号機の測定計画

## 1Fでの測定範囲



炉心部分

西から東へ通過するミュオンを測定

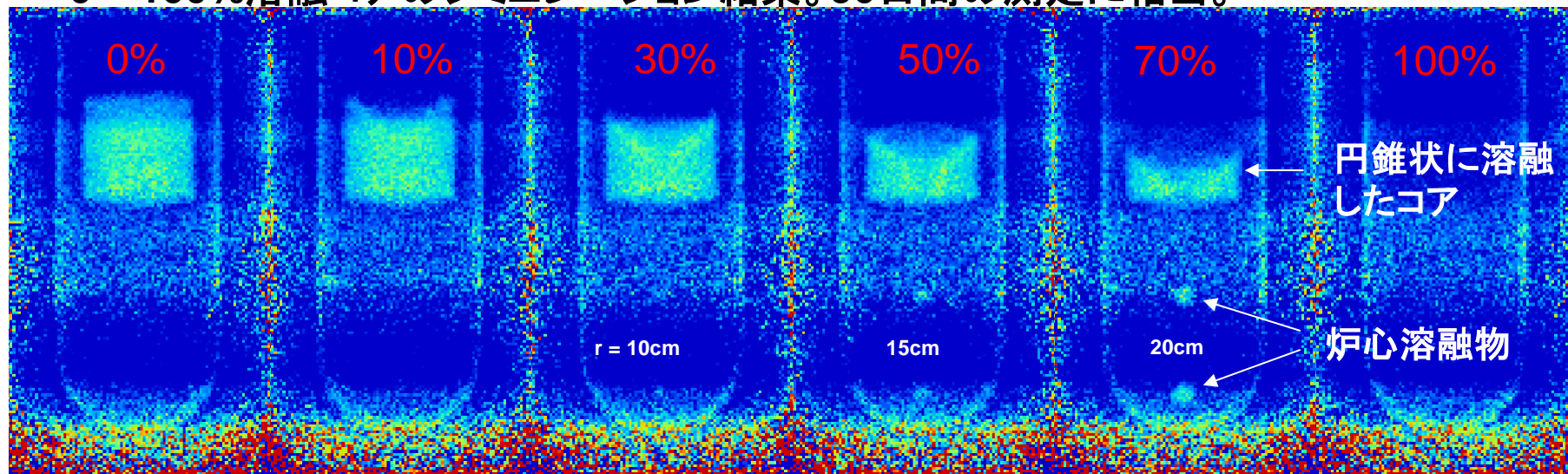
RPV底部分

東から西へ通過するミュオンを測定

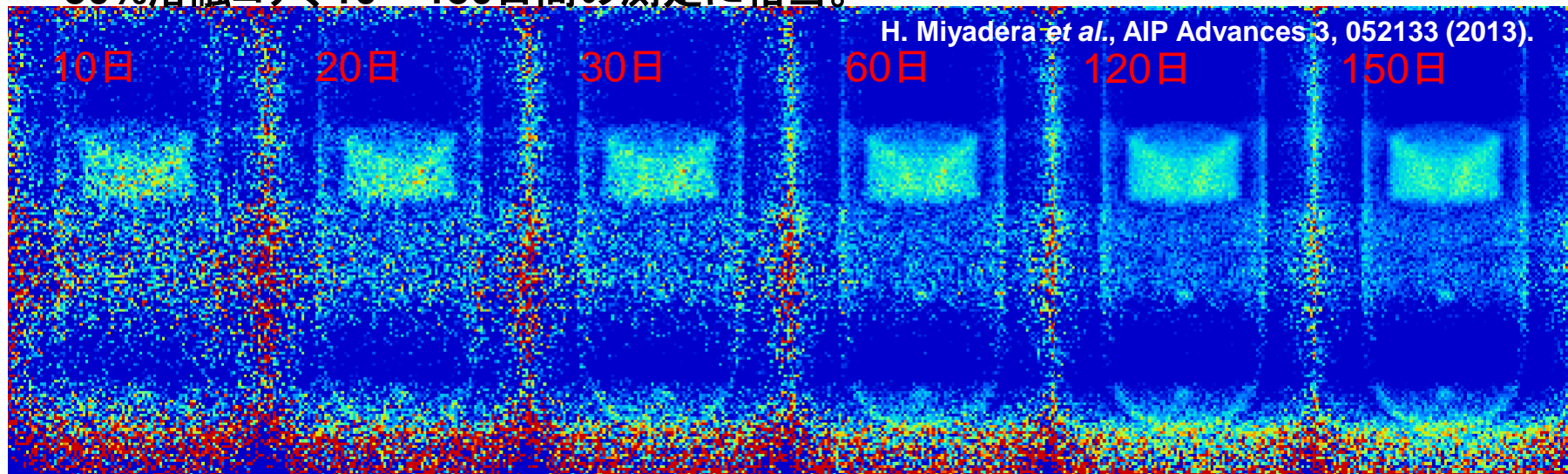
2方向のミュオンを検出することにより炉心部分からRPV底部までを測定

# GEANT4シミュレーション結果

0 - 100%溶融コアのシミュレーション結果。90日間の測定に相当。

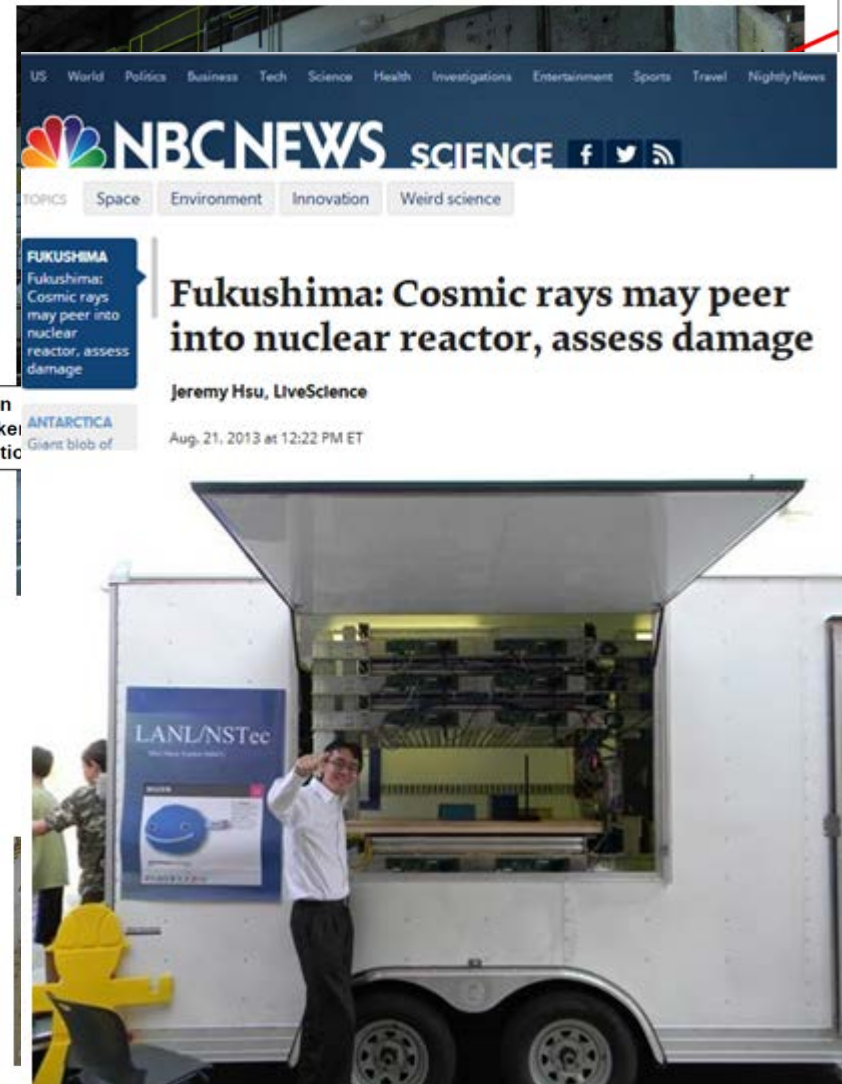


50%溶融コア、10 - 150日間の測定に相当。



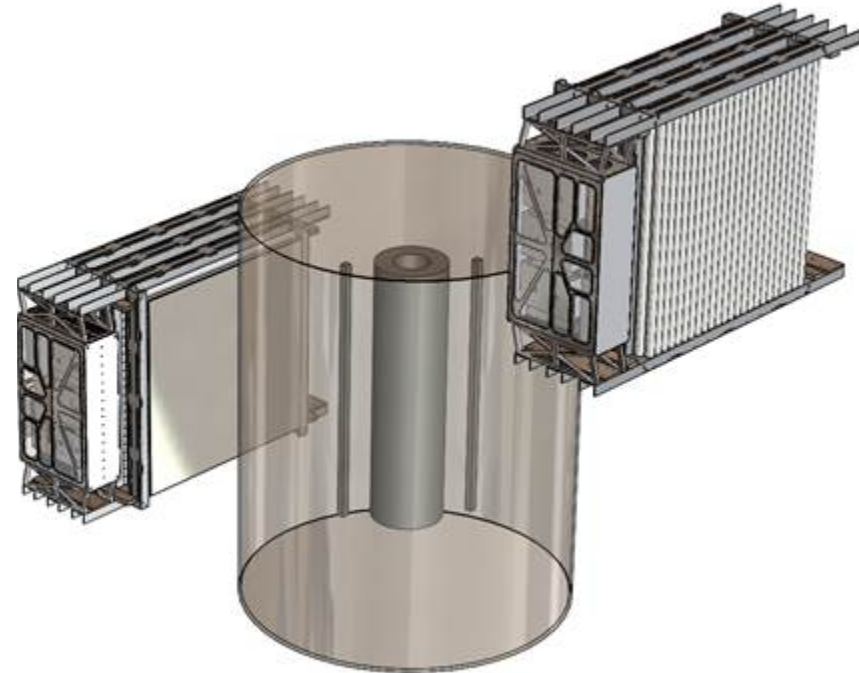
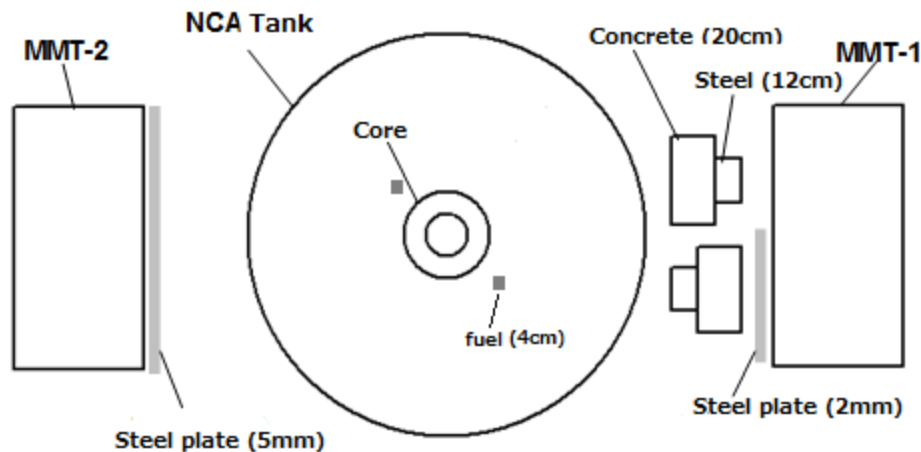
# ロスアラモスにおける技術デモンストレーション

- 福島第一の原子炉とほぼ同程度の分厚い遮蔽体越しに重元素を検出できることを示した
  - コンクリート 6m厚
  - 鉛 0.8m厚燃料棒集合体と同程度の散乱。
- ミニミュオン軌跡検出器を使用
  - 検出エリア:  $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$
- スリーマイル島事故の炉心を模し円錐状の空隙のある炉心を鉛で構築
- 20日間の測定で炉心の空隙の観測に成功
- H. Miyadera et al., AIP Advances 3, 052133 (2013).



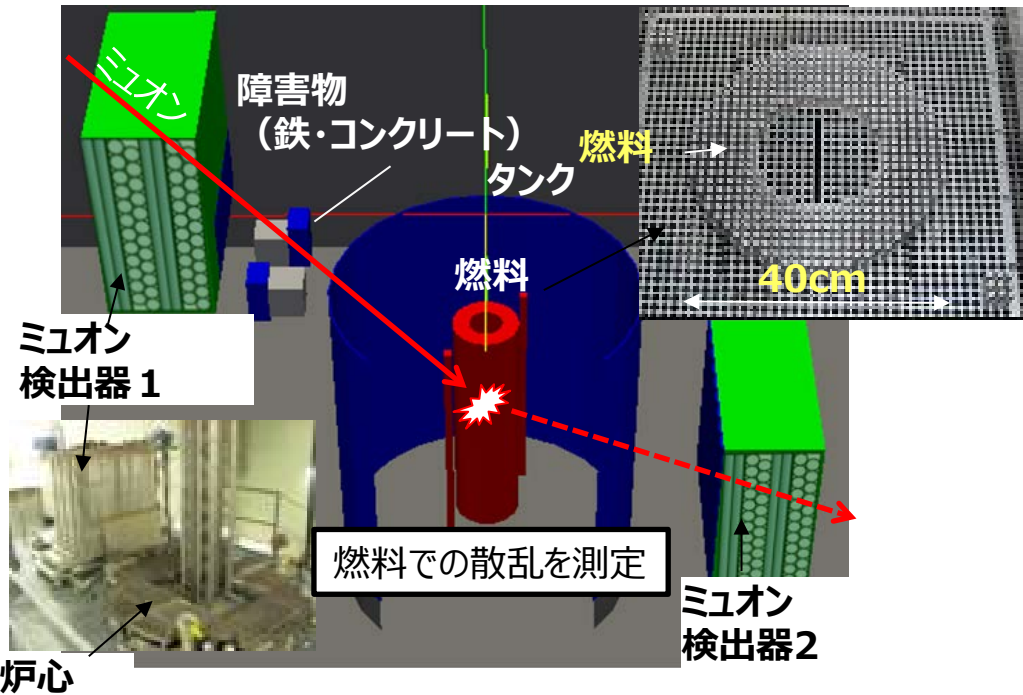
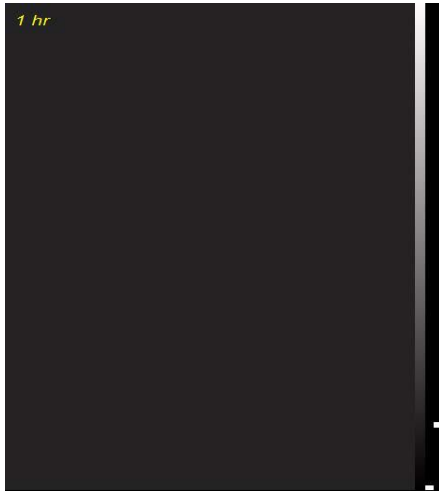
# 東芝研究炉における技術実証試験

- 東芝臨界集合体(川崎市)は、燃料試験に用いられる研究炉。
- ウラン燃料を用いたミュオン原子炉透視を行った。
- 試験は福島第一の1/10の縮小実験。
- ロスアラモスよりミニミュオン軌跡検出器を空輸、1ヶ月の測定を行った。

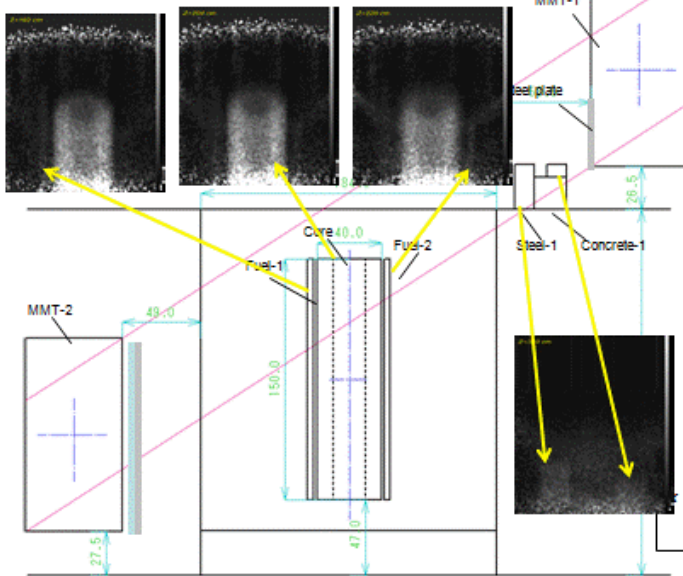




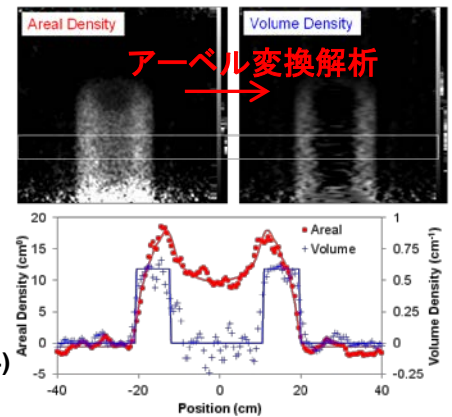
# 実証試験結果



NCA Geometry(x-z)



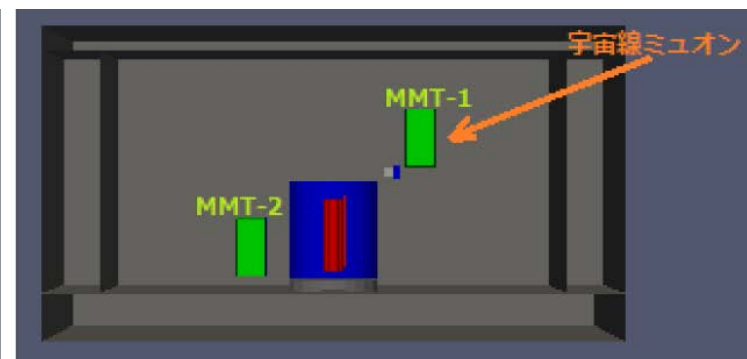
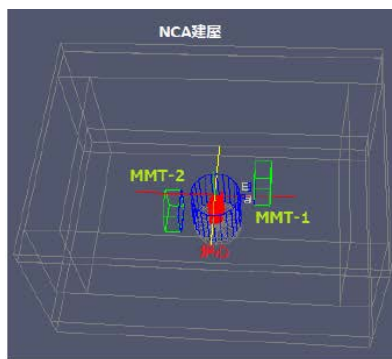
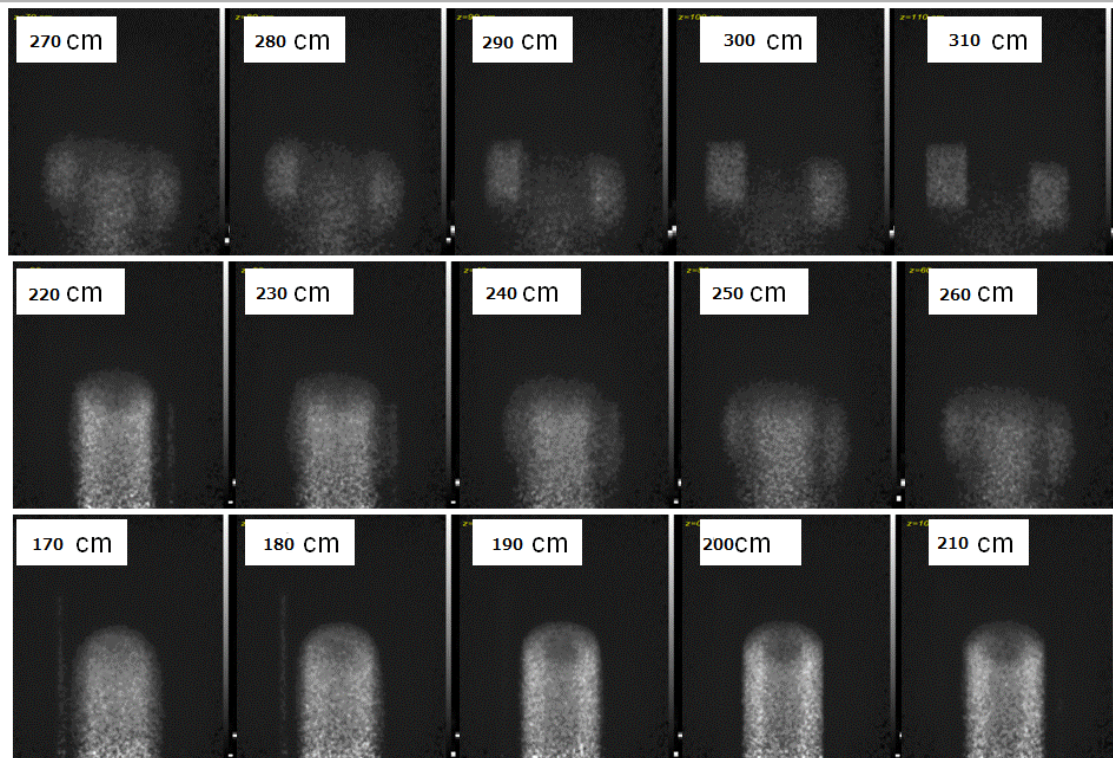
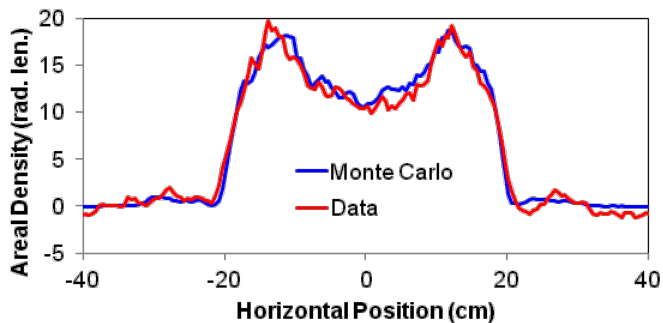
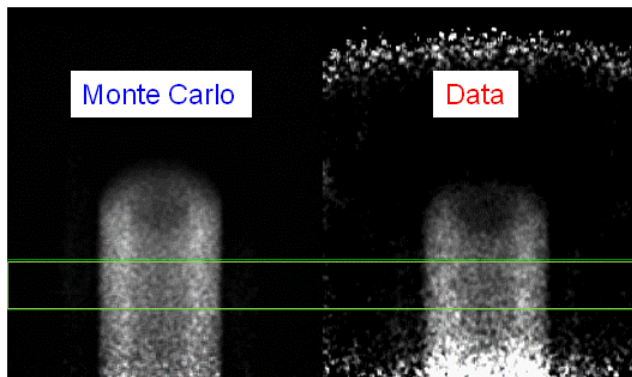
C. Morris et al., Appl. Phys. Lett. 104, 024110 (2014)





# 実証試験のシミュレーション結果

GEANT4 シミュレーションは  
測定結果と3%以内で一致！



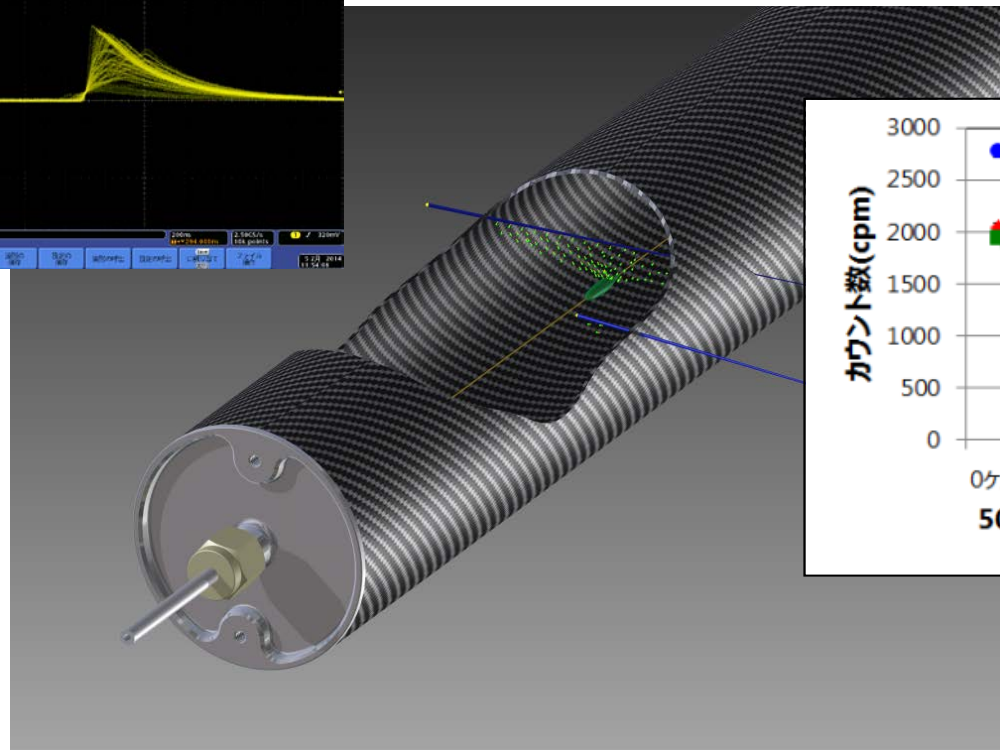
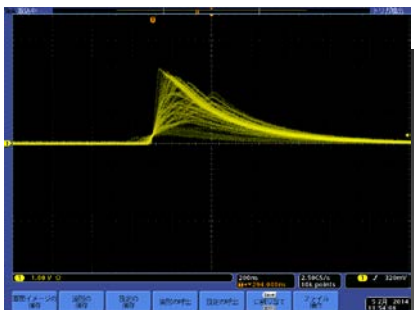
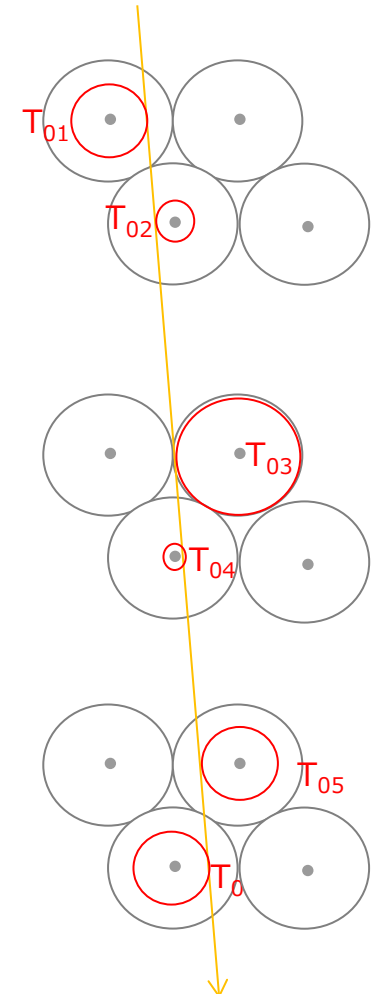
# ドリフトチューブ検出器

- ドリフトチューブ: アルミ筒でできたガス検出器

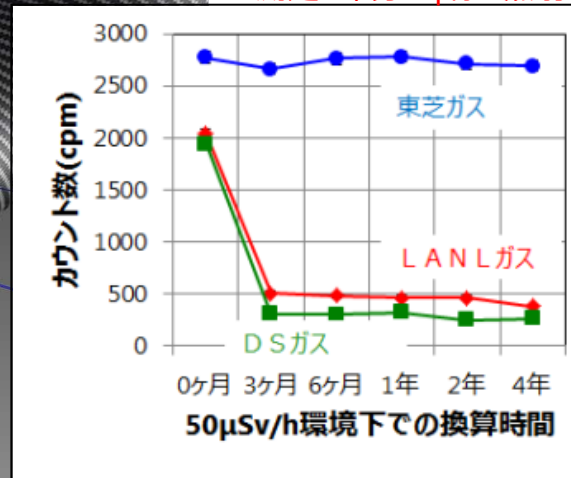
ミュオンがガス中を通過する際電離した電子を芯線で電気信号として検出

高い位置分解能(0.4mm)、安価、頑丈

多層ドリフトチューブの情報からミュオン軌跡を求める



1F測定4年分の $\gamma$ 線を照射





# 放射線環境下でのドリフトチューブ試験

- 福島第一放射線環境でのミュオン検出器の安定動作が鍵
- LANL内の福島第一に近い放射線環境の施設で検出器試験



- 福島第一での検出器試験を実施



# 今後の課題

- システム試験
  - 小型システムを用いた $\gamma$ 線照射試験
  - $\gamma$ 線除去アルゴリズムの改良
- 福島ミュオン検出器の試験組立
  - 7m $\times$ 7m検出器 2基
- 福島第一2号機への設置工事計画
  - 2015年度に測定実施
- 解析アルゴリズムの改良
  - ロスアラモス国立研究所との共同開発



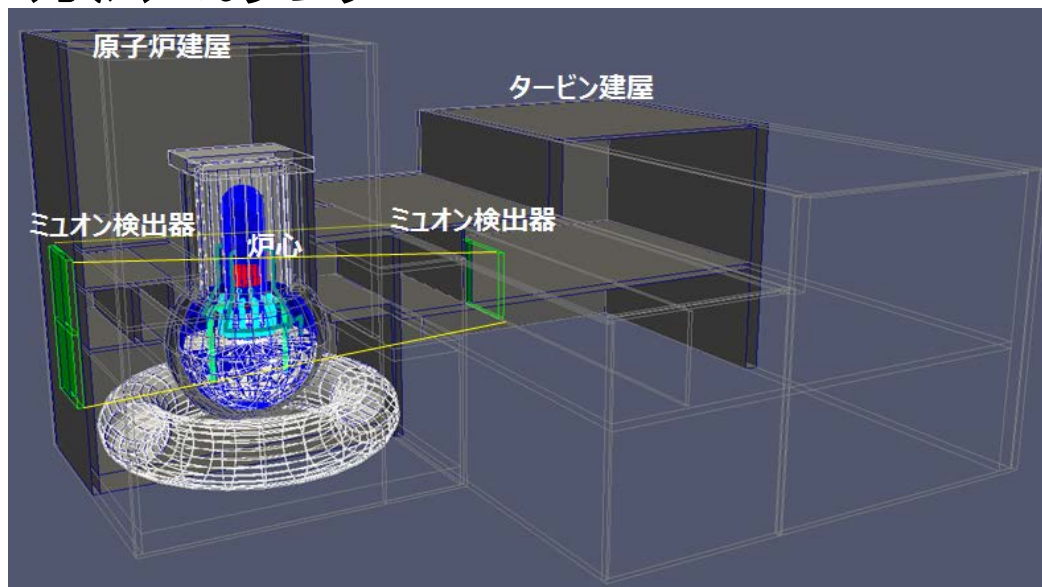
# プロジェクトのスケジュール

開発項目	2014				2015				2016			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
<b>ミュオン検出器システムの開発</b>	<b>Year 1: 検出器開発</b> 				<b>Year 2: 検出器設置・測定</b> 				<b>Year 3</b> 			
ドリフトチューブ検出器												
電子回路												
アルゴリズム												
検出器・回路組合せ試験												
システム試験												
<b>福島第一原発2号機の測定</b>	<b>Year 3</b> 				<b>Year 3</b> 							
工法検討・計画												
設置工事												
測定												
解析												
デブリ分布（最終結果）												
検出器撤去												



# 結論

- シミュレーション計算によると、ミュオン散乱法の数か月の測定で、福島第一原発の炉心を~30cm程度の分解能で透視できる
- 東芝研究炉にてウラン燃料集合体を用いた実証試験を行い、遮蔽体や燃料棒束など、原子炉の細部までイメージングすることに成功した
- ミュオン散乱法は、近いうちに福島第一の損傷状況を明らかにする唯一の方法であろう



**TOSHIBA**

**Leading Innovation >>>**