2023年5月10日 第8回ANFURD全体会



福島現状報告と 放射線・放射能可視化の技術開発

(国研)日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター 研究員 寺阪祐太 (所属学会:日本原子力学会)





<u>所属</u>

日本原子力研究開発機構(JAEA) 福島研究開発部門 廃炉環境国際共同研究センター 研究員

専門

放射線計測、特に光ファイバを用いた放射線計測法の研究

<u>経歴</u> 2021年9月 名古屋大学大学院工学研究科 博士後期課程 修了 2016年4月~現在 JAEA廃炉環境国際共同研究センター

廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)







本日の報告内容

1. 1Fオフサイト環境に関する情報提供

汚染・避難・富岡町の様子など

2. 1Fオンサイトにおける最新の放射線計測技術について

2.1. コンプトンカメラを用いたガンマ線イメージング

2.2. 光ファイバを用いた新しい放射線分布測定法の開発

本日の報告内容

1. 1Fオフサイト環境に関する情報提供

汚染・避難・富岡町の様子など

1Fオンサイトにおける最新の放射線計測技術について
 1. コンプトンカメラを用いたガンマ線イメージング
 2.2. 光ファイバを用いた新しい放射線分布測定法の開発

福島第一原発80km圏内の汚染の現状



✓ 航空機モニタリングにより空間線量率の面的分布の確認が行われている
 ✓ 1F周辺および北西の線量率の高い地域、その他低い地域も、年々減少傾向





✓ 駐在先の駐車場 0.06 µSv/h ほぼ自然バックグラウンドレベル
 ✓ ¹³⁷Cs (662 keV) ピークもほぼ観測されず

避難指示区域の推移











福島県富岡町は、今もなお居住可能な区域と避難指示区域が混在する

福島県富岡町の様子 (居住区域)





福島県富岡町の様子(居住区域)



震災で流された富岡駅も数年前に再開 常磐線も全線開通

福島県富岡町の様子(居住区域)



地元の商業施設には子連れの姿も

福島県富岡町の様子 (4/1避難指示解除)



一方で、6号線沿いを北上すると震災当時のままの姿も

福島県富岡町の様子 (4/1避難指示解除)



12年間手つかず 駐車場に草が生い茂る

福島県富岡町の様子 (4/1避難指示解除)



震災により窓ガラスが割れ、店内に瓦礫が散乱





整備された居住環境とつい最近まで帰還困難区域であった場所が隣接 着実に復興は進んでいるが、12年前のままの姿の地域も存在

オフサイトの現状 まとめ

✓事故から12年が経過し、福島県内の空間線量率および避難者数は減少傾向
 ✓居住区域では新興住宅街や商業施設、交通インフラの整備も進んでいる
 ✓一方で、隣接する避難指示区域には震災当時の姿が残る地域も存在

本日の報告内容

1. 1Fオフサイト環境に関する情報提供

汚染・避難・富岡町の様子など

2. 1Fオンサイトにおける最新の放射線計測技術について

2.1. コンプトンカメラを用いたガンマ線イメージング

2.2. 光ファイバを用いた新しい放射線分布測定法の開発

1F廃炉のための放射線計測研究

JAEA廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)





1F廃炉のための放射線計測研究

JAEA廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)









Y. Sato et al., Reactor Dosimetry: 16th International Symposium, ASTM STP1608, 2019. https://www.astm.org/stp160820170060.html





Y. Morishita et al., Scientific Reports, Volume 9, 2019.

光ファイバ検出器



1Fオンサイトでは何が求められているか

- ✓ 事故から12年が経過した現在も、原子炉建屋内およびその周辺の線量率は 依然として高レベル
- ✓ オフサイト環境と比較して人の被ばくが桁違いに多い 被ばく低減対策が必須
- ✓ 放射性物質がどこに・どれだけ存在するかを正確に把握する必要あり
- ✓ しかし、高い放射線量に阻まれ、これを1F原子炉建屋内で実施することは困難

1F原子炉建屋内に特化した新しい放射線検出器・ 検出法の開発を行う必要がある

本日の報告内容

1. 1Fオフサイト環境に関する情報提供

汚染・避難・富岡町の様子など

2. 1Fオンサイトにおける最新の放射線計測技術について

2.1. コンプトンカメラを用いたガンマ線イメージング

2.2. 光ファイバを用いた新しい放射線分布測定法の開発

コンプトンカメラ





https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_03-06-03-06-06.html

ガンマ線とセンサーの相互作用の一つである「コンプトン効果」を利用 エネルギーの一部を前方の散乱体に付与 後方の吸収体で残りのエネルギーを落とす

コンプトンカメラ



散乱体・吸収体それぞれで 「付与エネルギー」と「位置」を測定

散乱角(コンプトンコーン)を推定

$$\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_a} - \frac{m_e c^2}{E_s + E_a}$$

複数のガンマ線を計測することで、視野内のコンプトンコーンの 交差点に放射性物質が存在すると予想できる

コンプトンカメラ



ピンホールカメラとは異なり、遮蔽が原則不要 小型・軽量化に有利

2次元可視化 点線源





Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 56, 9-10, 2019, pp.801-808.

ガンマ線の入射方向を2次元で可視化 しかし・・・奥行き情報はなし

2D → **3D**への拡張

統合型放射線イメージングシステムの可視化原理



3D-LiDAR:自己位置・姿勢および周辺環境の3次元地図を生成
 コンプトンカメラ:汚染分布のイメージを生成
 サーベイメータ:歩行ルート上の線量率データを取得

移動しながら対象物を取り囲むように測定し、3D-LiDAR等のSLAM デバイス(自己位置推定・環境地図作成)と組み合わせることで、 放射性物質の3次元可視化を行うシステムを構築可能

統合型放射線イメージングシステム

Integrated radiation imaging system (iRIS)

¹³⁷Cs線源(公称値10 MBq)が入った箱





Y. Sato et al., Physics Open, Volume 7, 2021, 100070

1号機測定 2018年

Example of measurement on 1F Unit1 R/B

Signal processing Si photomultiplie Reactor building of Unit 1 Optical camera board Ce-doped Absorber GAGG scintillator 15 × 15 pixels 1.5 mm × 1.5 mm Carry-in entrance × 10 mm/pixel 7 m Shield Moving path Scatterer (JAEA) 15×15 pixels 1.5 mm × 1.5 mm ふくしまから はじめよう ×5 mm/pixel Compton camera FCS(B DHC Gamma-ray Radiation source Compton cone 18000 Gamma-ray sensor • Total weight: 680 g • Power supply: USB bus power Operate with USB bus power of Shield laptop (5V, 0.5A) (b) (a) (C) **Compton camera** Front view Side view Signal LED light processing unit LED ligh Digital camera Optical camera Optical camera Laptop Gammaray sensor Lead shield Crawler type robot 51 cm (Thickness: 27 mm)

Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 56, 9-10, 2019, pp.801-808

1号機測定 2018年



Shield

1/2号機間排気塔測定 2021年(2次元)



1/2号機間排気塔の根本付近に高濃度の汚染を検知

1/2号機間排気塔測定 2021年(3次元)



Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 59, 6, 2022, pp.677-687.

本日の報告内容

1. 1Fオフサイト環境に関する情報提供

汚染・避難・富岡町の様子など

2. 1Fオンサイトにおける最新の放射線計測技術について

2.1. コンプトンカメラを用いたガンマ線イメージング

2.2. 光ファイバを用いた新しい放射線分布測定法の開発

光ファイバ型放射線検出器

<u> 光ファイバ型放射線検出器</u>

✓ 光ファイバの先端に発光素子を配する(0次元タイプ)
 ✓ 光ファイバそれ自体を放射線のセンサとする(1次元タイプ)

<u>特徴</u>

✓ 狭隘空間に挿入して放射線を測定可能(0次元タイプ)
 ✓ 光ファイバに沿って放射線分布を測定可能(1次元タイプ)

<u>福島第一原子力発電所(1F)での応用例とニーズ</u>

- ✓ PCV内の線量測定(2017年、日立製作所)
 ✓ PCV外の線量測定(2021年、東北大学)
- ✓ その他、1F原子炉建屋内外では高汚染配管内・ベータ線測定等のニーズあり

超高線量率・狭隘空間・ガンマ+ベータ線計測が可能な 光ファイバ型放射線検出器を開発する!





光ファイバ型放射線位置検出器の課題

 光ファイバに沿って放射線の入射位置を測るには、多くの場合 ファイバ両端にPMTが必要(波高比、時間差の測定)。
 →狭隘配管等への挿入が困難

2. 高線量率環境下でパイルアップ、偶然同時計数が発生 →数十~数百mSv/h以上の線量率への対応が困難



両端にPMTが不要で、超高線量率に適用できる手法が必要

新方式波長分解分析法(JAEA&名古屋大学)



光ファイバ内での光減衰量には主にレイリー散乱の影響により波長依存性が存在する。 →ファイバ端から出力される光の「色」に放射線入射位置情報が含まれる!

新方式波長分解分析法(JAEA&名古屋大学)



✓ ファイバの片側のみからの光読み出し 狭隘配管へ挿入可
 ✓ 光の積分値から位置を逆推定 超高線量率対応可(~数+Gy/h)

検出器構成

<u>検出器成立要件</u>

- センサ部の発光量大・光減衰量の波長依存性大 PSF (Kuraray SCSF-81、 *φ*1.0 mm、 *L* =10 m)
 ポータブル性及び感度が優れた分光系 Ocean Insight QEPro、スリット幅200 μm、 ペルチェ冷却CCD採用
- 3. 低線量率場から高線量率場を測定可能 石英光ファイバ(φ0.4 mm、L = 30 m)を用いて伝送





アンフォールディング法による放射線分布逆推定



各発光位置毎に分光器で得られる応答スペクトルを UVコリメート照射により取得

アンフォールディング法による放射線分布逆推定

観測値を最も良く再現する応答関数の組み合わせを最適化計算処理により決定



χ²が最小となる放射線強度分布X₁~X_jを環境放射線波高分布解析の研究で 応用実績のあるGRG(Generalized Reduced Gradient)法により最適化^{1,2}

[1] Terasaka et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2016. [2] Moriizumi et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2020.

まとめ

- ✓ コンプトンカメラと3次元空間認識技術を融合させた統合型放射線イメージングシステムを開発し、
 1F原子炉建屋内外にて放射性物質の3次元可視化に成功
- ✓ 光ファイバ発光の「色」情報に着目した新しい放射線位置検出法を開発し、最近1F2号機にて 実証試験に成功
- ✓ 全ての計測ニーズに応えられる放射線検出器は存在しない。少しずつ異なるニーズに対応可能
 - な様々な放射線検出器を随時開発中

本日ご参加の学協会様にメッセージ

✓オフサイト、オンサイト共に課題は山積も、着実に復興および廃炉に向けた 研究開発は進展しています。

 ✓原子力分野の研究者のみでは太刀打ちできない課題が数多く存在します。
 ✓今後もANFURD等をインターフェースとし、福島の課題への興味を引き続き お持ちいただき、情報の相互共有にご協力をお願いします。