高線量環境下における小型 半導体を用いたバーチャル ピンホールカメラの開発

令和3年3月1日

受託:原子力機構(研究代表者:鳥居建男) 再委託:東北大学(代表者:人見啓太朗) 東京大学(代表者:高橋浩之)

研究の背景

- 福島第一原子力発電所の建屋内作業環境では、空間線量率が高い場所が多数あり、
 手つかずの環境が少なからずある。高線量率なエリアでは散乱線成分も多く除染の
 効果が表れないことも多々ある。
- このため、廃炉を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の位置 を特定するためエネルギー情報とともに位置分布を詳細に把握する必要がある。
- ・現状の放射線分布を計測するガンマカメラ;
 ピンホールカメラ:大型、遮蔽体の多用による高重量
 コンプトンカメラ:高線量率では測定が困難、画像の再構成時にゴースト発生
 電子飛跡追跡型CC(ETCC):大型、低線量率用
 →高線量環境下での放射線イメージングを行うためには小型軽量かつ
 迅速性に欠けるものとなっている。
- 原子力機構では、これまでコンプトンカメラにより1F建屋内の放射線イメージングを試 みてきたが、作業環境は狭隘な場所が多く、計数率特性が悪いことから高線量率場 での汚染源の特定が困難であった。
- 散乱線が多い環境で線源分布を求めるには¹³⁷Csの分布のように対象核種のピークを 測定して、線源分布を求める必要がある。このため、高エネルギー分解能を有する小 型軽量の測定器の開発が強く求められている。

本研究の目標

福島第一原子力発電所内およびその周辺 環境には、ガンマ線(主に¹³⁷Cs)のバック グランドが高い場所があり、廃炉作業推 進の妨げになっている。 島第一原子力発電所1~4号機の被害状況 2011年3月19日



出典:東京電力HP URL:http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2_11-j.html

福島第一原子力発電所の廃炉を円滑に進めるためには・・・
 福島第一原子力発電所内、もしくはその周辺環境において、どこに、どのくらいの量、
 どのような核種のガンマ線源が存在しているかを把握することが必要。
 ⇒効率的な除染作業につながり、作業員の被ばく量を低減することができる

現場から求められているガンマ線イメージャー

- 主な対象核種は¹³⁷Csとする
- ② 数 mSv/h以上の高線量場において動作が可能
- ③ 核種同定が可能(エネルギー分解能が2% FWHM)
- ④ オンサイトで使用するための軽重量化
- 5 10 m先で2 m程度の分解能(角度分解能が11.4°)をもつ

新たに提案するガンマ線イメージング手法 バーチャルピンホールカメラ(Virtual Pinhole camera : VPC)



<u>VPCを実現するためには、指向性検出器の開発が必要</u>

コリメータから指向性検出器へ ガンマ線イメージングの新原理



臭化タリウム(TIBr)の特徴

ガンマ線吸収効率 → 高原子番号、高密度

																	He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 0	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 TI	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Du	105 Jo	106 Rf	107 Bh	108 Ha	109 Mt	http://www.op.titech.ac.jp/lab/Take-Ishi/html/ki/hg/chem04/								

nttp://www.op.titech.ac.jp/lab/Take-Ishi/html/ki/hg/chem04/0203/0203.html







1.5 mm x 1.5 mm x 0.65 mm



0.5 mm x 0.5 mm x 0.1 mm

CdTe検出器とTIBr検出器の耐放射線性の比較



垂直ブリッジマン法によるTIBr結晶の育成



1.13 インチ TIBr 単結晶

帯溶融法によるTIBr結晶の育成







TIBr検出器の製作工程



結晶の切り出し



結晶表面研磨

電極用マスク







高線量率(数mSv/h)用TIBr検出器の特性



高線量率用TIBr検出器 有感領域サイズ 0.5 × 0.5 × 2.0 mm³

中線量率 (~100 μSv/h) 用TIBr検出器の特性



中線量率用TIBr検出器 有感領域サイズ 2×2×4.6 mm³





線量率: <u>50 mSv/h</u> バイアス電圧:-200 V 線量率: <u>150 µSv/h</u> バイアス電圧:-500 V





高線量率(数mSv/h)用指向性検出器 TIBr検出器サイズ: 0.5 × 0.5 × 1.6 mm³ 鉛サイズ: 1.0 × 5.0 × 20 mm³



【1F試験用】中線量率(100µSv/h)用指向性検出器 TIBr検出器サイズ: 2.0 × 2.0 × 4.6 mm³ 鉛サイズ: 2.0 × 2.0 × 20 mm³ _2

指向性検出器の単体試験@原子力機構FRS

・線源、線量率:¹³⁷Cs、150 µSv/h

- ・検出器と線源の距離:約3.4 m
- ・測定時間:各5分

・ガンマ線入射角度:0°,±3°,±5°,±7°,±10°,±20°,±30°



VPCの製作(東北大)



中線量率用指向性検出器を3組組み合わせたVPCを製作。 検出器の向きは6.8度(=平行ガンマ線に対する角度分解能) ずつずれている。



中線量率用指向性検出器の応答特性をGeant4を使って解析し角度分解能を計算 検出器と線源の距離 3 m の場合: 7.29°(FWHM) 無限遠(平行ガンマ線)の場合: 6.88°(FWHM)



シミュレーションで得た分解能や指向性 $(N_F - N_B) / (N_F + N_b)$ の値を、 対象物までの距離が不明な測定現場に適用して良いのかを検証

推定される線源方向と真の線源方向は 0.7°以内で一致 相対強度 相対強度 6% 以内で一致

十分な精度であり、現場適用可能と判断

バーチャルピンホールカメラの開発(東京大学)

- ASICを用いて指向性検出器アレイ用の信号取得システムを開発
- まずToT方式(信号の時間幅からエネルギー情報を得る)を検討
- 電荷収集時間の長いTIBrにはToTが不向きと判断



電荷積分型ASICの開発(東京大学)

- ToT方式のASIC開発と並行し、電荷積分型のASICを開発
- 積分時間を長くとることで電荷収集に時間のかかるTIBrでも高エネルギー分解 能が期待
- TIBr検出器アレイと組み合わせ放射線測定試験を行い、スペクトルの取得が可能であることを確認した



TIBr検出器アレイ信号取得システム

¹³⁷Cs線源を用いて測定したスペクトル



<H30年度まで>

- ・フォトグラメトリー技術で作業環境の 3次元モデルを作成
- ・ガンマ線イメージャで得た放射線源分布
 を重ねて表示
- ・スマートフォンと段ボールVRゴーグル

〇安価

×没入感に劣る、VR空間内の移動が面倒

<H31(R1)年度> 専用のHMDを導入、VR空間内を自由に移動可能











位置認識・作業環境データ収集技術の開発(原子力機構)

- H30年度までに設計・開発した、遠隔で位置認識・ 作業環境データを収集するセンサー系の統合化、シ ステム化をH31(R1)年度に実施
 - 移動しながら画像データ・3次元点群データを 送信
 - 同時に点群地図生成および自己位置・姿勢推定
 - オペレータがこれらを参照しながら遠隔操作
- 遠隔計測システムの実証試験を実施
 ② JAEA楢葉遠隔技術開発センター









1. 画像&3次元点群データの収集
 2. 3次元点群地図の生成
 3. 自己位置・姿勢の推定(移動軌跡計算)
 がオンラインで実現できていることを確認

遠隔操作型移動ロボット

1Fにおける実証試験(原子力機構、東北大)

試験日:2020年 3月 30日 試験場所:1F 1号機西側高台(70 µSv/h) 参加者:原子力機構 5名、東北大学 2名







1Fに持ち込んだVPC機材

1Fにおける実証試験(原子力機構、東北大)



1Fにおける実証試験(原子力機構、東北大)

a)1号機原子炉建屋



イメージンク結果
(上)相対強度(下)誤差に対する比

- 1回8分の測定を4回実施 し12の視野を測定
- 屋上周辺がやや強い
- 視野8, 10, 11では誤差の2倍を超えており、実際に高線量と推定される
- その他の視野では誤差が 大きく確たることは言え ない(測定時間が不足)



人材育成と研究の効果

- JAEA/CLADS主催の国際会議 福島リサーチカンファレンス(FRC)「廃炉 遠隔技術のための耐放射線化、運用技術及び計測技術の高度化の展 望」(2018年11月26,27日、富岡町「学びの森」)で本研究グループ の野上光博氏(東北大)がStudent Poster Awardを受賞した。
- 第13回放射線計測フォーラム福島(2020年12月11日、東京&オンラインでハイブリッド開催)において、「高感度小型半導体を用いたバーチャルピンホールカメラの開発とその応用」で人見啓太朗氏(東北大)が本研究について講演した。参加者(東電、メーカー、大学、JAEA等の専門家36名が参加)から多数の質問があり、東電より1Fでの課題を踏まえて、利用について問い合わせがあった。

まとめ

- 新しい半導体検出器であるTIBrを用いて、全く新しいコンセプトの放射線測定システムを開発した。
- 製作したTIBr検出器を用い実験室において目標の2%を上回るエネルギー分解能
 1.1% FWHM で¹³⁷Csからの662 keVのガンマ線ピークを捉えられることを確認した。
- さらに、0.5 × 0.5 × 2.0 mm³ のTIBr検出器が高線量率(50 mSv/h)環境下で良好 に動作し、662 keVに対し、4.5% FWHM のエネルギー分解能でスペクトルが得ら れることを確認した。

⇒数mSv/h以上の高線量場で動作可能なガンマ線検出器の開発に成功した。

- ・ 目標の11.4°を上回る角度分解能約8°FWHMの高指向性検出器を開発した。
- 高指向性検出器を複数組み合わせたVPCシステムを構築し1F構内において実証試験を行った。
- VPCのイメージング結果から1号機原子炉建屋のオペレーティングフロア付近に強い放射線源の存在が示唆された(コロナ禍での作業安全や防護資材の供給事情により1F建物内での測定はできなかった)。
- ・ 位置認識・作業環境データ収集技術の開発により、
 か射線源分布を作成する上で

 重要となる移動測定や環境認識が可能となった。