

福島第一原子炉作業に資する α 線検出器を開発

森下 祐樹
Morishita Yuki

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故により放射性物質による汚染が原子炉建屋内外に存在する。その中には、 α 線を放出する放射性物質による汚染も含まれる。これら α 核種による放射性物質の汚染分布を把握することは、放射線防護の観点から極めて重要であることから、現場検出は必要な技術である。

α 核種の種類によって被ばく線量への寄与がことなることから、現場でのリアルタイム識別測定ができることが望ましい。この目的のため、新しい α 線検出器の開発や様々な α 核種との比較測定による検証が必要である。

また、原子力施設の廃止措置現場で配管を撤去する際には、配管内部の汚染を事前に把握することが極めて重要である。もし配管撤去中に内部の放射性物質が放出されれば、作業員の汚染リスクが高まる。更に、 α 汚染が体内に取り込まれた場合、 α 核種が沈着した部位が強い内部被ばくを受けることになる¹⁾。したがって、配管内部の α 核種を検出できる検出器の開発が重要である。

配管内部の α 核種を測定するために、従来は主に配管外側から γ 線や中性子を利用する方法が用いられてきた²⁾。しかし、少量の α 核種を γ 線や中性子で測定するのは困難であった。 α 線は空気中での飛程が約4 cmと極めて短いため、直接測定は難しい。そのため、 α 粒子の電離によって生じたイオンを検出する方法が開発されてきた。代表的なものとして、Long-range alpha detector (LRAD) と呼ばれ

る方式があり、配管汚染の検査に利用されている³⁾。

しかし、この方法ではイオンを間接的に測定するため感度が低く、放射能の検出限界が高いという課題がある⁴⁾。このため、配管内部に直接挿入でき、 α 汚染を直接測定できる小型検出器が求められている。

本研究では、現場でリアルタイムに α 核種を特定するため、 ^{239}Pu 及び ^{237}Np の現場測定を目的とした α 線イメージング検出器を開発した。本研究で開発した α 線イメージング検出器を米国サバンナリバー国立研究所 (SRNL) に持ち込み、実際の ^{239}Pu 及び ^{237}Np 酸化物試料の測定を行った。これらの測定により、 ^{239}Pu 及び ^{237}Np のその場検出の有効性を確認した。

また、配管内部の α 汚染を直接測定できる検出器を開発した。本検出器によって α 線と β 線の識別性能を確認し、その基本特性を評価した。

2. 方法

2.1 α 線イメージング検出器

2.1.1 α 線イメージング検出器の構成

^{239}Pu 及び ^{237}Np の検出を目的として、 α 線イメージング検出器を開発した。検出器は、厚さ0.1 mm・直径50 mmのセリウム添加イットリウムアルミニウムペロブスカイト (YAP:Ce) シンチレータ、厚さ3 mm・50×50 mmのアクリル製ライトガイド、及び多チャンネル光電子増倍管 (HI12700A: 浜松ホトニクス(株)製) で構成している。類似構成の α 線検出器は近年いくつか開発されている。

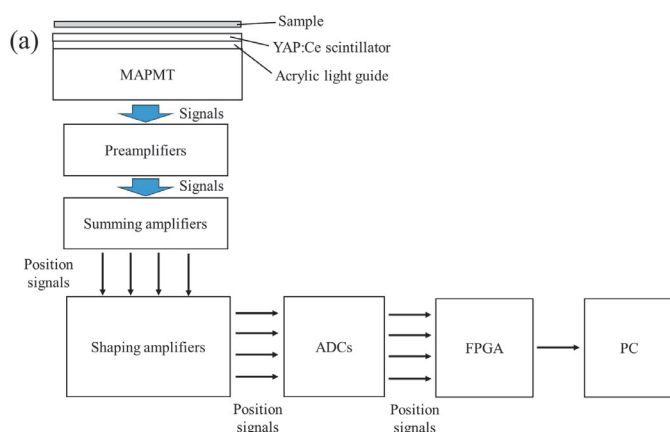


図1 検出器のブロック図（参考文献5）より引用

位置検出型光電子増倍管からの信号は、プリアンプ及び加算アンプを介して X^+ , X^- , Y^+ , Y^- の4つのアナログ信号として出力される。これらの信号を増幅後、A/D変換を行い、FPGA（Field Programmable Gate Array）に送信して、信号比から α 線の入射位置及びエネルギーを算出する。図1に検出器のブロック図を示す。

2.1.2 検出器性能評価

開発した検出器の性能を、 ^{241}Am α 線源、多核種線源、及び ^{239}Pu α 線源を用いて評価した。線源は金属上に電着され作製された。各線源を検出器上に配置して測定を行った。試料を封入する汚染防止用のフィルムによる減衰を補正した。各線源のエネルギースペクトルを測定してエネルギー校正を行い、あわせて検出器のエネルギー分解能も評価した。更に、 ^{241}Am 線源を直径0.6 mmのピンホールで覆った α 線源を用いて点拡がり関数（PSF）を評価した。空間分解能は、ピンホール線源の2次元分布から強度プロファイルの評価し、その半値幅を求めて評価した。

2.1.3 実試料への適用

^{239}Pu 及び ^{237}Np の酸化物粒子をSRNLの放射線管理区域内で測定した。各酸化物粒子は光学顕微鏡下で観察しながら支持体上に配置した。試料作製には粘着シート、ポリエチレンフィルムを使用した。光学顕微鏡下でピンセットを用いて粒子をBytac粘着フィルム上に移し、その台紙を粘着シートに貼り付け、更に厚さ約4 μm のポリエチレンフィルムで覆った。これにより α 粒子が透過可能でありながら、

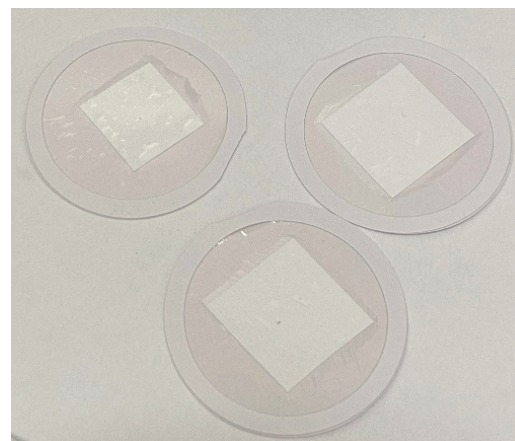


図2 作製した試料の写真（参考文献5）より引用

装置の汚染を防止した。図2に作製した試料の写真を示す。

2.2 小型 α 線検出器

2.2.1 小型 α 線検出器の構成

図3に小型 α 線検出器の概念図と写真を示す。本検出器は、 α 線用の厚さ10 mg/cm^2 の $\text{ZnS}(\text{Ag})$ シンチレータと、 β (γ) 線用の厚さ50 μm のプラスチックシンチレータで構成されている。これらのシンチレータは有効直径8 mmの小型光電子増倍管（PMT：浜松ホトニクス H10723-110）に光学的に結合されている。PMTの外径は25 mm \times 47 mm、厚さは24 mmであり、1層目に $\text{ZnS}(\text{Ag})$ シンチレータ、2層目にプラスチックシンチレータを配置した。プラスチックシンチレータの厚さは8～50 μm まで選択可能であり、厚さを変えることで β 線感度を調整できる。 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ /プラスチックの組み合わせにより、 α 線と β 線を同時に測定し、 β 線信号を α 線信号から分離できる。シンチレータ表面は厚さ2 μm のアルミ蒸着マイラーで覆われている。光電面が側面にあるため、配管内壁の α 汚染を直接測定できる。検出器本体を配管内に挿入する構造である。PMTにはプリアンプが内蔵されており、電流信号を電圧信号に変換する。PMTの信号はデジタルイザ（DT5730S：CAEN社製）に入力し、波形データとして収集した。取得した信号波形はPC上にバイナリ形式で保存し、自作のソフトウェアを用いて解析した。開発した検出器は内径50 mm程度の配管に直接挿入可能である。一方、市販のアルファサーベイメータはサイズの制約により内径50 mm程度

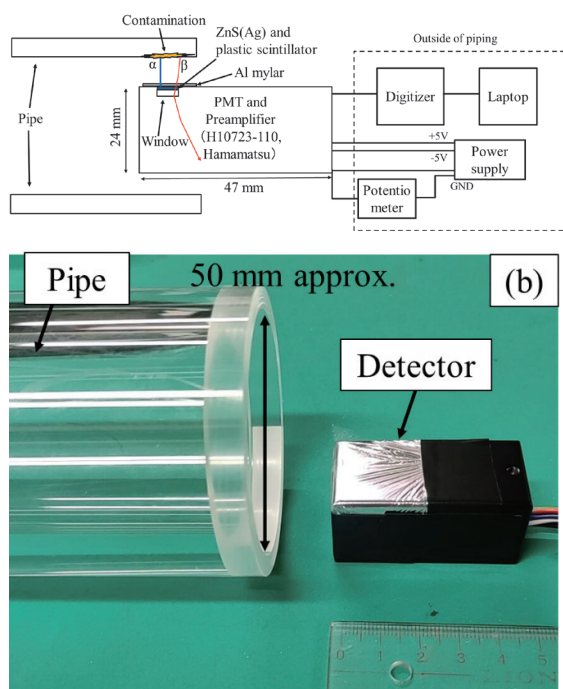


図3 小型 α 線検出器の概念図と写真(参考文献6)より引用)

の配管内への直接の挿入はできなかった。

2.2.2 放射線源の測定

開発した小型 α 線検出器を用いて放射線源の測定を行った。放射線源はシンチレータ上に設置した。 α 線源の表面放出率(2π 方向)は $1.75 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ であり、これを基にカウント効率を評価した。 β 線及び γ 線の感度もそれぞれ評価した。 ^{137}Cs γ 線源(20 MBq)の照射位置での線量率は約2.0 mSv/hであった。 α 線・ β 線源の測定時間はいずれも30分とした。

3. 結果

3.1 α 線イメージング検出器

今回YAP:Ceシンチレータを採用した理由は、従来のZnS(Ag)シンチレータ等と比較してエネルギー分解能及び空間分解能に優れ、核種識別性能が高いためである。

α 線エネルギースペクトルのピークをガウス関数でフィッティングしてエネルギー分解能を算出した。図4に ^{241}Am のエネルギースペクトルを示す。エネルギー分解能は7.19% FWHMであった。更に、ピンホール線源による結果は5.27% FWHMを示した。 ^{241}Am ピンホール線源による測定では、半値幅

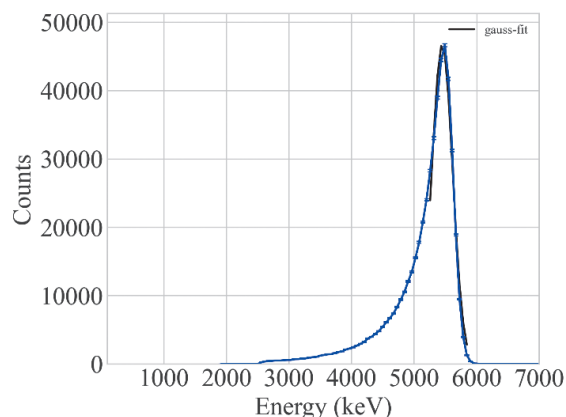


図4 ^{241}Am のエネルギースペクトル(参考文献5)より引用)

195.4 μm が得られ、空間分解能は約195 μm と評価された。これらは従来のシンチレータを用いた検出器のエネルギー分解能13% FWHM、空間分解能0.6mm FWHMを大幅に上回る。

また、検出効率は、検出方向(2π)に放出される α 線に対して88.5%であった。

SRNLにおいて、 ^{239}Pu 粒子及び ^{237}Np 粒子それぞれの α 線イメージ像を取得した。図5に ^{239}Pu 粒子の光学顕微鏡像と α 線イメージ像を示す。赤丸は粒子位置を示している。 α 線分布は粒子分布とよく一致しており、放射能が高い部分ほど α 線強度も高くなっていることが確認された。

各粒子に対して円形の関心領域(ROI)を設定し、直径は498 μm で統一した。隣接する粒子間では重なりを避けるようにROIを境界位置に設定した。エネルギースペクトルは、粒子中心に直径86 μm の小さなROIを設定して取得した。

開発した α 線イメージング検出器の利点の1つは、個々の粒子のエネルギースペクトルを測定できる点である。 α 線エネルギースペクトルを確認したところ、スペクトルの最大エネルギーは5.2 MeV付近にあり、線源のエネルギーと一致した。各粒子のスペクトルを比較しても、下降端の位置はすべて一致していた。更に、スペクトルの高さ(カウント)の違いは粒子の放射能の差を反映した。

3.2 小型 α 線検出器

波形の違いにより、ZnS(Ag)では立ち上がりと減衰が遅く、プラスチックでは速い応答が得られた。これにより、パルス形状弁別(PSD)を適用して α 線と β 線を明確に区別できた(図6)。

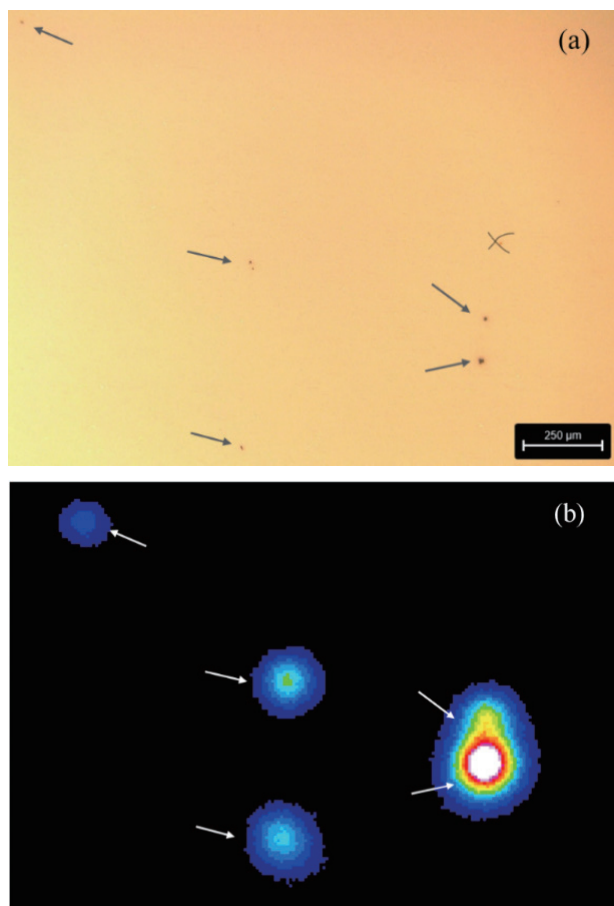


図5 (a) ^{239}Pu 粒子の光学顕微鏡像, (b) α 線イメージ
矢印は粒子位置を示す (参考文献5)より引用)

α 線の検出効率は約51.3%, β 線及び γ 線の感度はほぼゼロであった。過去の1Fの試料の測定結果では, α 線の計数率に比べ β 線の計数率は18~1200倍高い結果となっていた⁷⁾。この検出器により、福島第一原発のような高い β ・ γ バックグラウンド環境でも α 線を選択的に測定できることが示された。

4. 結論

本研究では, ^{239}Pu 及び ^{237}Np の現場測定を目的とした α 線イメージング検出器を開発した。

開発した検出器を用いて,SRNLにおいて ^{239}Pu 及び ^{237}Np 酸化物試料の測定に成功し,個々の粒子の放射能とエネルギースペクトルを同時に取得できることを実証した。この能力は,現場で ^{239}Pu 及び ^{237}Np を識別するうえで極めて重要である。 2π 検出効率は88.5%と算出され,市販のZnS(Ag)シンチ

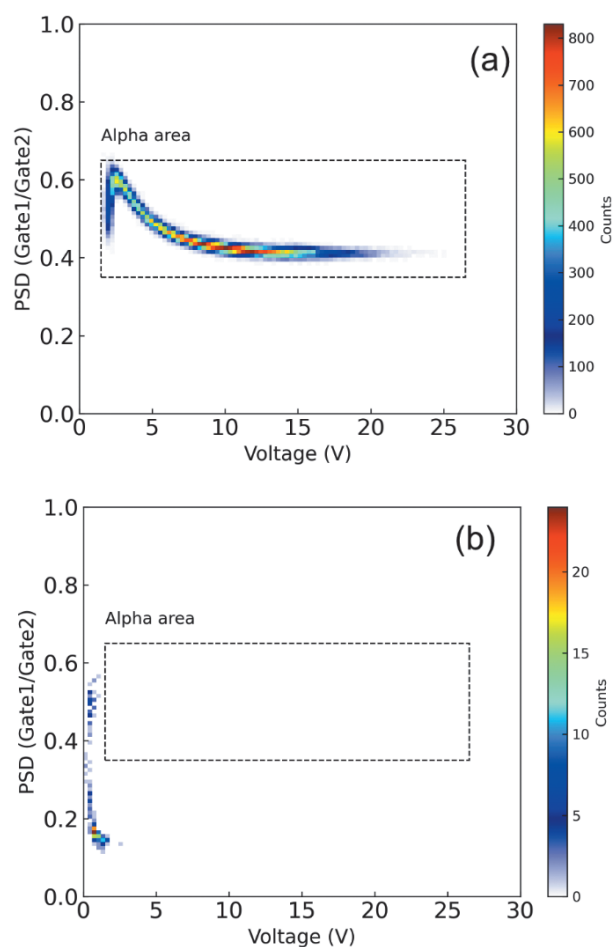


図6 パルス形状弁別 (PSD) による (a) α 線と (b) β 線の識別 (参考文献6)より引用)

レータを用いたサーベイメータと同等であった。本 α 線イメージング検出器は,除染作業現場での α 核種の現場検出や環境モニタリングへの応用が期待される。

加えて,本研究では,汚染現場の配管内部における α 汚染を直接測定するための小型 α 線検出器を開発した。 α 線の検出効率は約51%, β 線及び γ 線には感度を示さなかった。PSD処理を適用することで,更に β ・ γ 線(バックグラウンド)感度を低減できる。本検出器は,廃止措置現場など高 β ・ γ 線環境下での α 汚染測定に有用である。

参考文献

- 1) Paviet-H., et al., *Nuclear Engineering Handbook* 315-366 (2009)
- 2) MacArthur, D., et al., *Monitoring pipes for residual alpha contamination*, CONF-960767-64. Los Alamos

-
- National Lab. (LANL) , Los Alamos, NM (United States), (1996)
- 3) MacArthur, D. W., *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. sci.* **39**, (4), 952-957 (1992)
- 4) Johnson, J. D., *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. sci.* **41**, (4), 755-757 (1994)
- 5) Morishita, Y., *et al.*, *Radiat. Meas*, **181**, 107366 (2025)
- 6) Morishita, Y., *et al.*, *Radiat. Meas*, **183**, 107414 (2025)
- 7) Morishita, Yuki, *et al.*, *Sci. Rep.*, **9**, (1) 581 (2019)
- (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)