

## 過酷環境における「その場」 $\alpha$ エアロゾルモニタリング

坪田 陽一  
Tsubota Youichi

### 1. はじめに

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(以下、「1F」)の廃炉作業においては、損傷した炉心からの燃料デブリの取出しが今後本格化します。格納容器(PCV)内は人が立ち入ることのできない高線量環境であるため、遠隔操作にて加工機械やレーザー等による燃料デブリの切断が実施されます。その過程でPCV内の空气中に微細な切断片(微粒子)が飛散することが予想されます<sup>1)</sup>。核燃料物質由来の放射性微粒子を評価するうえでは、その内部被ばく影響に着目する必要があります。図1に事故後10年経過時の2号機核燃料の放射能インベントリ計算値<sup>2)</sup>の割合を示します。放射能インベントリとしては<sup>137</sup>Cs(Ba)や<sup>90</sup>Sr(Y)の割合が非常に大きいことが分かります。しかし、内部被ば

く影響に着目し、前出のインベントリ計算値にICRP Pub.68の吸入時の実効線量係数を乗じると、図2のように $\beta/\gamma$ 核種よりも、 $\alpha$ 核種の寄与が非常に大きいことが分かります。したがって、燃料デブリ取出しにおいては $\alpha$ 核種を含む微粒子( $\alpha$ エアロゾル)をPCV外に出さない(閉じ込め)対策に加え、フィルタ等の除染係数を基にPCV内の濃度の基準を設定し、それを超えないようにモニタリングすることが重要です。

しかしながら、1F-PCV内において $\alpha$ エアロゾル濃度をモニタリングする手法に関してはこれまで検討が十分ではありませんでした。例えば、カメラに関しては近年耐放射線性に優れたものが開発されていますが、燃料デブリの切断時に $\alpha$ エアロゾルが大量に発生した場合は粉塵により映像が不鮮明となることが予想され、画像による濃度推定も困難です。

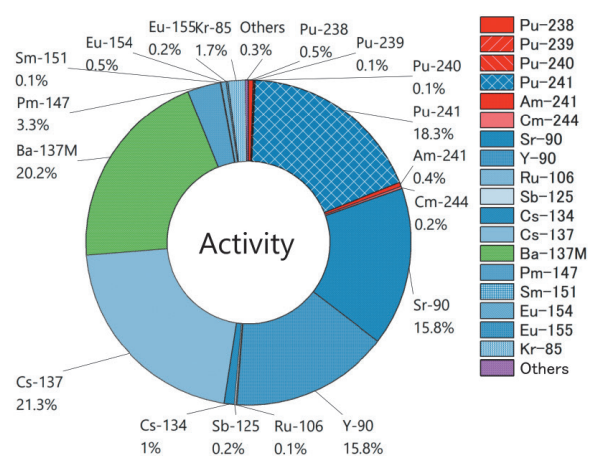


図1 1F(2号機)の事故後10年後の放射能インベントリ割合

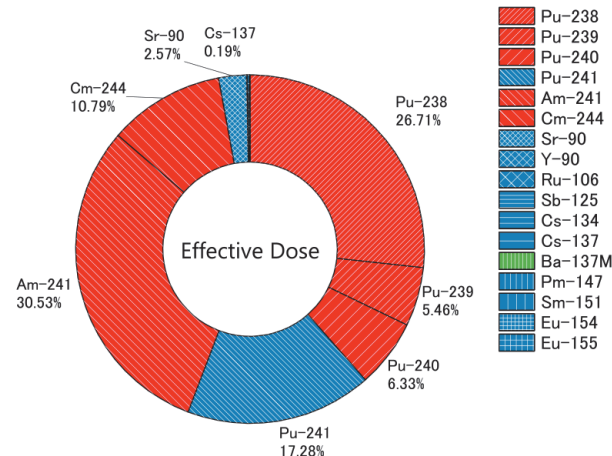


図2 1F(2号機)の放射能インベントリを基に計算した、核燃料由来のエアロゾル吸入時の実効線量の割合

1F-PCVの排気装置に設置する排気モニタで測定する方法も考えられますが、 $\alpha$ エアロゾルが切断箇所近傍から輸送され、排気装置に到達し、検出されるまでのタイムラグがあります。したがって作業中に排気モニタで異常な濃度上昇を感知した時には、切断箇所近傍において高濃度の $\alpha$ エアロゾルが継続的に発生している可能性があり、現場作業者の内部被ばくの防護にはつながりません。切断箇所付近で発生する $\alpha$ エアロゾルを連続的に測定する方法としては原子力施設で広く使われている $\alpha$ 線用ダストモニタの適用が考えられます。同モニタは、サンプリングした微粒子をろ紙上に集塵し、微粒子から放出される $\alpha$ 線を半導体検出器等で連続的に測定します。検出器はある瞬間にサンプリングされた微粒子からだけでなく、ろ紙上に既に集塵された微粒子からの $\alpha$ 線も測定するため、ある瞬間の空气中放射性物質濃度を得るためには、測定値の時間微分（又は差分）を計算する必要があります。そのため濃度情報のリアルタイム性が損なわれます。また、燃料デブリの取出しにより大量の微粒子が発生すると、ろ紙はすぐに目詰まりしますが、高線量率環境では定期的なろ紙交換も現実的ではありません。

そこで日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と言う）の研究グループは1F-PCV内で発生する $\alpha$ エアロゾル測定には従来とは異なる、ろ紙を使用しない測定手法が必要と考えました。

本記事においては、空気加熱、扁平型流路、 $\alpha$ エアロゾルの直接測定、多チャンネル光電子増倍管、シンチレータ厚の最適化等を組み合わせた「その場」 $\alpha$ エアロゾル測定装置であるIn-situ Alpha Air Monitor（以下、「IAAM」）について解説いたします。

## 2. 「その場」測定装置の設計と開発

図3(a)に示すとおり、燃料デブリの切断作業は非常に過酷な環境（高湿度、高 $\beta/\gamma$ 放射線環境）で行われ、切断時に発生する $\alpha$ エアロゾル濃度も非常に高いことが想定されます。1F-PCV内の燃料デブリ切断箇所近傍で $\alpha$ エアロゾルをモニタリングするうえでの機器に対する要求事項及びその理由を、以下のように4つに整理し、それらを満たす測定装置を設計・試作し、性能評価を行いました<sup>3)</sup>。

- ①「高湿度環境での確実な動作」：注水により、1F-PCV内は100%に近い高湿度環境となっています。また、水分が $\alpha$ エアロゾルに付着すると、 $\alpha$ 線が遮蔽され、測定が困難になります。
- ②「ろ紙を使わない $\alpha$ エアロゾル測定」：ある瞬間の空气中放射性物質濃度をリアルタイムで測る必要がありますが、ろ紙の交換自体が困難であるためです。
- ③「高濃度の $\alpha$ エアロゾル測定」：燃料デブリ切断作業中は高濃度の $\alpha$ エアロゾルの発生が想定さ

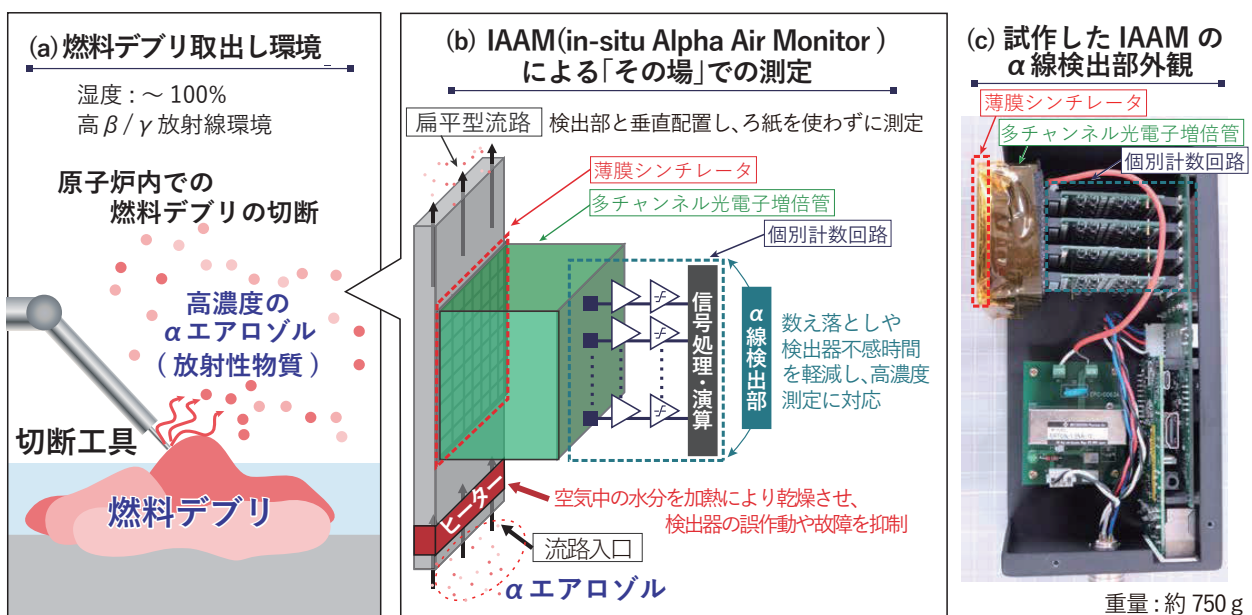


図3 燃料デブリ取出し環境におけるIAAMによる $\alpha$ エアロゾル測定のご概念図と試作した検出部の外観

れるためです。例えば  $^{238}\text{Pu}$  の空気中濃度限度 ( $7 \times 10^{-7} \text{Bq/cm}^3$ ) に HEPA フィルタ 2 段の DF として  $10^5$ 、粒子飛散防止法の一つであるシャワースクラビングの DF として  $10^2$  を乗じて、1F-PCV 内の燃料デブリ切断発生箇所近傍で許容される濃度を推定すると、 $7 \text{Bq/cm}^3$  となります。少し余裕をもって、 $10 \text{Bq/cm}^3$  程度の濃度を測定できる機器が必要となります。これは有人作業環境で用いられる  $\alpha$  線用ダストモニタの測定可能な上限をはるかに超えるものです。

- ④ 「 $\alpha$  エアロゾルの選択的測定」：高線量環境では周辺から入射する放射線を誤検出する可能性があります。かつ、高濃度の  $\beta/\gamma$  エアロゾルも共存する 1F-PCV 内でも、 $\alpha$  エアロゾルのみを測定する必要があるためです。

### 3. 開発のポイントと性能の実証

前項で示した事項を満足する機器として、IAAM を開発しました。図 3 (b) にその概念図と、図 3 (c) に試作機の外観写真を示します。以下では要求事項に対応する開発のポイントと、その効果の検証結果を示します。

- ①測定対象の空気を流路入口のヒーターで乾燥させることで、湿度 90% 以上の空気を導入しても検出器部を乾燥状態に保持することに成功し、湿度による検出器の誤作動や故障を抑制しました。また、エアロゾル自体の乾燥も同時に行うため、水滴の吸い込みや水分による  $\alpha$  線の遮蔽の懸念を除外できます。

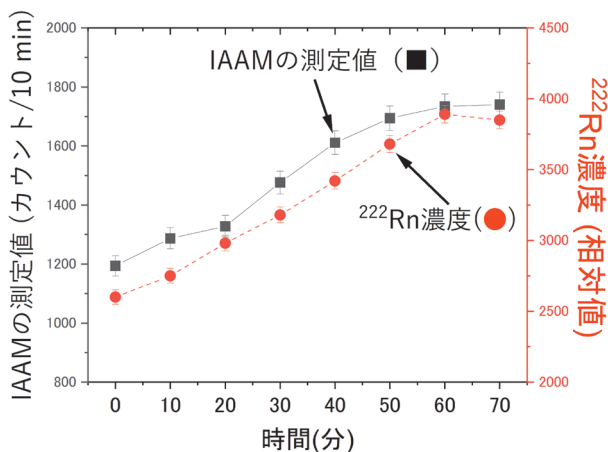


図 4 IAAM を用いた  $\alpha$  エアロゾルの測定結果

- ②流路幅が  $\alpha$  線の飛程より十分短い「扁平型」の流路を採用し、流路に対して  $\alpha$  線検出器を垂直配置することで、検出器前方の空気(体積)中の  $\alpha$  エアロゾル濃度をろ紙を使わずに直接測定する仕組みにしました。弘前大学が所有する「放射性エアロゾル製造システム」内に  $\alpha$  線放出核種である  $^{222}\text{Rn}$  を発生させ、システムの応答性能を評価した結果を図 4 に示します。空気中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度に対し、本システムの測定値はリアルタイムかつスムーズに応答することから、空気中の  $\alpha$  エアロゾル濃度のろ紙を使わずにリアルタイムで測定可能であることが実証されました。また、流路を縦に配置し、加熱による煙突効果を用いることで、機械式ポンプを使わずに測定対象の空気を導入できます。これにより測定システムの機械的故障の可能性を低減できるだけでなく、システム重量も軽量化できます。試作機の検出部重量は約 750 g ですので、運搬や設置が比較的容易です。

- ③薄膜シンチレータに対し、通常的光電子増倍管ではなく、多チャンネル光電子増倍管を組み合わせました。 $\alpha$  線が検出部に入射した際、多チャンネル光電子増倍管の全 64 チャンネルのうち、数チャンネルのみが増倍動作しており、ほかのチャンネルは動作していない状態となります。 $\alpha$  線が連続的に入射する場合、その計数動作を全 64 チャンネルで分担可能なので、通常的光電子増倍管と比較して信号の数え落としや検出器不感状態の影響を軽減できます。本手法により、図 5 に示すとおり、最大  $3.2 \times 10^2 \text{Bq/cm}^3$  (1F-PCV 内の想定値の 30 倍以上) の測定が可能であることを確認し

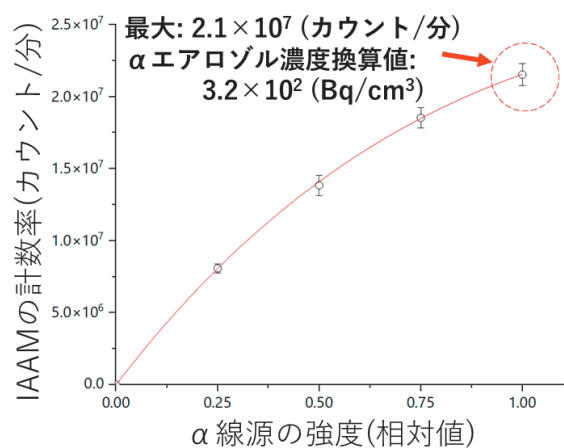


図 5 IAAM の高強度  $\alpha$  線源に対する計数応答試験結果

ました。

- ④放射線の種類による物質の透過力の違いに着目し、薄膜シンチレータの厚さを、 $\alpha$ 線のみに感度を有する厚さに設定し、 $\beta/\gamma$ 線の影響を低減しました。更に信号処理時の「閾値」を $\alpha$ 線の選択的測定に最適化することで、100 mSv/hの高 $\gamma$ 線環境においても、 $\gamma$ 線の影響なしに $\alpha$ 線( $\alpha$ エアロゾル)のみを選択的に測定できることを実証しました。

#### 4. 研究開発の意義と廃炉・廃止措置への貢献

今回開発したIAAMは、高湿度かつ高線量環境で $\alpha$ エアロゾル濃度を「その場」でモニタリング可能です。また、測定可能濃度の上限値は1F-PCV内で想定されるものよりも十分に高く、想定を超える高濃度 $\alpha$ エアロゾルが発生した場合でも、計数が飽和することなく、燃料デブリ切断箇所近傍の $\alpha$ エアロゾル濃度の継続的モニタリングが可能です。これにより、万が一の際でも現場作業者が迅速に内部被ばく防護対策をとることができ、周辺住民等への迅速な情報提供も可能となります。

燃料デブリの本格的取出しに先立ち、PCV内部の詳細な調査や、試験的取出しがまさに始まろうとしております。これらの作業ではPCVの開口部付近で作業が行われ、回収した燃料デブリをグローブボックス等で取り扱うことが想定されています。これらの作業においても $\alpha$ エアロゾル発生の可能性があるため、「その場」モニタリングが有効です。また、建屋内の放射線状況を測定・収集するロボット用として、光学カメラ、LIDAR、コンプトンカメラ等の機器搭載の検討が進んでいますが、今後 $\alpha$ エアロゾルの情報収集が必要となった場合、本システムのリアルタイム応答性や高線量環境下での可

用性、軽量の機器重量(検出部：約750g)は大きなメリットとなりえます。

また、日本国内においては、今後、核燃料施設の廃止措置も本格化します。Puを含む核燃料物質が付着した機器の解体においても、1F燃料デブリ切断作業同様、 $\alpha$ エアロゾルが飛散しますが、当該作業は遠隔操作の機械ではなく、厳重な防護装備を着用したうえで手作業にて実施されています。IAAMの高濃度 $\alpha$ エアロゾルのリアルタイム測定能力は、そのような1F以外の廃止措置現場の安全性向上にも多大な貢献が期待できます。令和4年の後半から、原子力機構の核燃料物質が付着したグローブボックスの解体現場でIAAMを用いた $\alpha$ エアロゾル測定試験を開始したところです。これまでは測定原理や手法の実証を中心に研究を進めてきましたが、今後は様々な現場における $\alpha$ エアロゾル濃度測定の実証を進め、現場への適用を目指します。

#### 謝辞

本研究は原子力機構「萌芽研究制度」並びに1F廃炉研究開発推進費「基盤型廃炉研究開発プログラム(一般研究)」の助成を受けたものです。また、原著論文執筆に当たっては池田篤史博士(JAEA)や床次眞司教授(弘前大学)をはじめとする皆様のご助言とご協力に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) E. Porcheron, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **1**,13 (2020)
- 2) K. Nishihara, *et al.*, *JAEA-Data-Code-2012-018* (2012)
- 3) Y. Tsubota, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. A.*, **1030**, 166475 (2022)

((国研)日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部)