

### 福島第一原子力発電所事故を契機に 進展する分析化学

#### 1 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故から2021年で10年を迎えようとしている。1F事故直後は、日本分析化学会にも多くの課題が投げかけられ、多くの会員がそれぞれの専門分野や様々な立場で活動を行った経緯がある。これらの課題は、汚染水対策のような事故直後の喫緊の課題やトリチウム分離や高放射線環境下での分析のように10年を経た今でも中々解決に至らない中長期的な課題などに大別されるが、分析化学を始めとする多くの技術者・専門家がこの課題に今なお奮闘している。このミニファイルでは、分析化学の観点からこの10年間に構築されてきた計測技術をごく一部ではあるが紹介したい。

#### 2 放射線計測器の進展

低線量の $\gamma$ 線を簡便に計測することができるNaI(Tl)シンチレーションカウンターは、計測器を容易に小型化できるためハンディ計測器として利用されてきた。一方

で、1F事故は人々の身近な生活や環境を巻きこむ大規模事故であったため、規模の大きなモノや環境の測定が必要となった。特に、出荷する農作物、居住環境、避難住民に対する測定には大型の装置で素早く簡単に測定する必要があった。また、外部からの放射線を防ぐための遮へい体も必然的に大きくなり、重量も増えるため、その装置開発の難易度が高くなったが、様々な進展が見られた。例えば、コメ全袋検査の自動測定器やホールボディカウンタ（WBC）車もその一例である。現在でもコメ出荷前検査が実施されており、年間検査数950万点（検査期間：2019年8月26日～2020年8月31日）で基準値を超えるものはなかった<sup>1)</sup>。また、WBC車（図1A）はNaI(Tl)シンチレーションカウンターと自動体表面測定器（ $\alpha/\beta$ プラスチックシンチレータ）を搭載し、互いの遮蔽体を背面に並べることによってシールド厚を多くしてバックグラウンドを減らす工夫がなされたものである。このWBC車による内部被ばく検査は、延べ34万人以上を測定してきた<sup>2)</sup>。

さらに、空からの広域環境モニタリング技術も大きく進展した（図1B）。1F事故前より航空機サーベイはあったが、300 m以下の低高度からの測定、例えば森林や丘

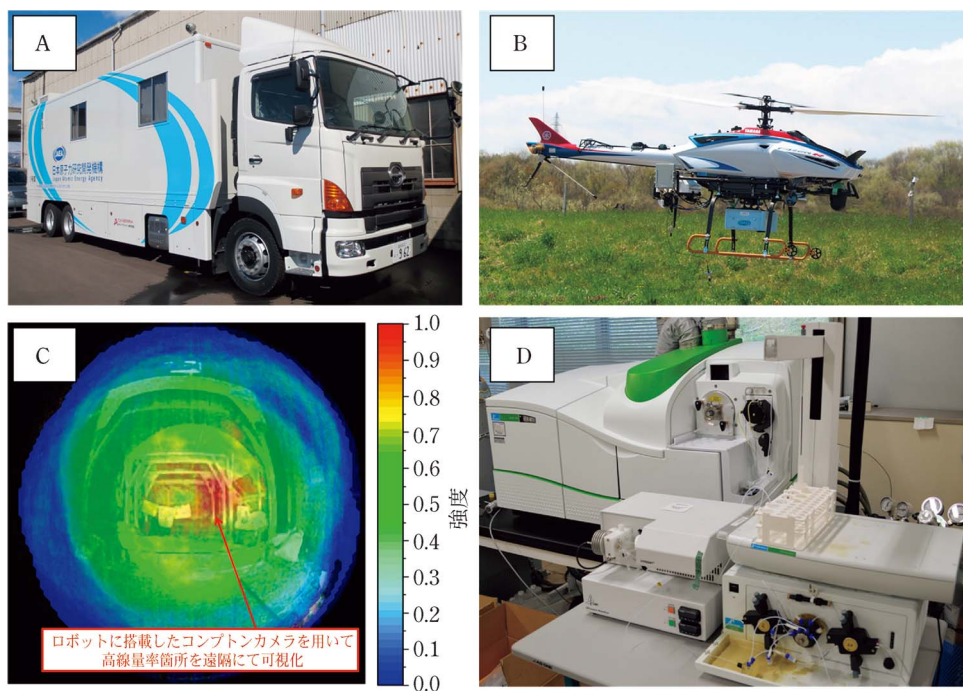


図1 1F事故後に発展した分析技術の一例

写真A：ホールボディカウンタ車の外観，B：無人ヘリコプターサーベイの様子，C：コンプトンカメラによる取得画像，D：誘導結合プラズマ質量分析装置による放射性ストロンチウム90分析システムの外観。（写真A～Cは日本原子力研究開発機構提供）

陵地など無人ヘリコプターやドローンで計測する例はほとんどなかった<sup>3)4)</sup>。森林や谷や崖では四方からの $\gamma$ 線を検出器が検出し、正確な放射線マップを作成することが難しかったが、現在では高い精度で作成できるようになっている。

廃炉作業において作業員の被ばく低減や除染計画の効率化のために、放射性物質の分布を遠隔で可視化するコンプトンカメラによる研究も盛んに実施されている(図1C)。散乱体と吸収体の2層の $\gamma$ 線センサで構成されるこのカメラは、各々のセンサで検知した位置とエネルギーから $\gamma$ 線の飛来方向を特定して放射性物質の分布を可視化する。従来の装置は数十kgと持ち運びが容易ではなかったが、近年可搬型となり作業員が携行できるようになった<sup>5)</sup>。現在では、小型ロボットに搭載して1F原子炉建屋内の遠隔測定として高線量率のエリアでの活用が期待されている<sup>6)</sup>。また、巨大な原子炉を測定するために、ミュオンイメージングも実際に活用された。素粒子であるミュオンは、物質との相互作用がほとんど無く高い透過力を有している。他方、ミュオンの散乱角は原子番号に比例しているため、ウランのような重元素で大きくなることを利用して、1Fの炉心状態を解明する手法として利用された<sup>7)</sup>。

### 3 質量分析技術の進展

1F事故以前より、質量分析は有用な放射性核種の分析法として利用されてきた。しかし、放射能を分析するという観点では、半減期と物質量の関係から原理的に半減期1000年以下の核種は、放射線計測による分析の方が有利になる<sup>8)</sup>。 $\beta$ 線放出核種の放射線計測では、 $\beta$ 線スペクトルが重なり合うため、多くの場合、化学分離などの前処理に時間がかかり迅速分析ができる質量分析に大きな期待が寄せられていた。その一方、1F事故直後の緊迫した現状を回避した数年間で、新たな課題として1F汚染水対策における核種分析の課題が生じた。その中でも純 $\beta$ 線放出核種(\* $\beta$ 線のみを放出する放射性核種のこと)である $^{90}\text{Sr}$ (半減期28.79年)の放射能分析は1か月程度の期間を必要とするため、それに代わる緊急時の分析手法の開発が国家的急務として位置づけられ、誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)を用いた $^{90}\text{Sr}$ 迅速手法(図1D)が開発された<sup>9)</sup>。この方法は、Sr選択樹脂による固相抽出とICP-MSに内蔵されたり

アクションセルで干渉除去をフロー系で行う自動分析装置である。 $^{90}\text{Sr}$ に対して $10^8\sim 10^{12}$ 程度共存する同重体( $^{90}\text{Zr}$ )を自動で分離して、放射線計測と同等程度の $^{90}\text{Sr}$ を定量できるようになった。このICP-MSによる半減期1000年以下の核種の分析は、他の核種分析への波及効果も大きく、今後、様々な核種が質量分析へと応用されることが期待される。その一例として、微量の試料を直接分析する手法として表面電離型質量分析装置(TIMMS)を用いた新しい分析手法の開発も盛んである<sup>10)~12)</sup>。試料量を確保するのが難しい試料への適用に適した分析法として今後さらに発展するであろう。その他、 $^{129}\text{I}$ や $^{14}\text{C}$ の分析において加速器質量分析計(AMS)の分析需要も増加し、放射性核種の質量分析が進展することが期待される。

### 文 献

- 1) Fukushimaの恵み安全対策協議会：放射性物質検査情報 玄米， <https://fukumegu.org/ok/contentsV2/index.html> (2020年9月20日，最終確認)。
- 2) 福島県：ふくしま復興ステーション ホールボディ・カウンタによる内部被ばく検査 検査の結果について (令和2年7月分掲載)， <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-wbc-kensa-kekka.html> (2020年9月20日，最終確認)。
- 3) 米谷雅之， 眞田幸尚：日本原子力学会誌， **57**， 21 (2015)。
- 4) 宮原 要， 飯島和毅， 斎藤公明：地盤工学会誌， **63**， 62 (2015)。
- 5) J. Kataoka, A. Kishimoto, T. Nishiyama, T. Fujita, K. Takeuchi, T. Kato, T. Nakamori, S. Ohsuka, S. Nakamura, M. Hirayanagi, S. Adachi, T. Uchiyama, K. Yamamoto : *Nucl. Instrum. and Meth. A*, **732**, 403 (2013)。
- 6) Y. Sato, Y. Terasaka, W. Utsugi, H. Kikuchi, H. Kiyooka, T. Torii : *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**, 801 (2019)。
- 7) H. Miyadera, K. N. Borozdin, S. J. Greene, Z. Lukić, K. Masuda, E. C. Milner, C. L. Morris, J. O. Perry : *AIP Adv.*, **3**, 052133 (2013)。
- 8) 大塚良仁： *RADIOISOTOPES*, **55**, 651 (2006)。
- 9) Y. Takagai, M. Furukawa, Y. Kameo, K. Suzuki : *Anal. Methods*, **6**, 355 (2014)。
- 10) N. Kavasi, S. K. Sahoo : *Anal. Chem.*, **91**, 2964 (2019)。
- 11) N. Kavasi, S. K. Sahoo, H. Arae, T. Aono, Z. Palacz : *Sci. Rep.*, **9**, 4 (2019)。
- 12) C. Ito, R. Shimode, T. Miyazaki, S. Wakaki, K. Suzuki, Y. Takagai : *Anal. Chem.*, **92**, 16058 (2020)。

福島大学共生システム理工学研究科，  
日本原子力研究開発機構 松枝 誠  
福島大学共生システム理工学類 高貝慶隆