

## 福島第一原子力発電所廃棄物分析の現況

駒 義和\*1,\*2

福島第一原子力発電所では廃炉工程の進展に伴い廃棄物が発生している。廃棄物管理技術の研究開発のために実施している分析の概要を報告する。

**Keywords:** 福島第一原子力発電所, 廃棄物管理, 分析, 難測定核種, インベントリ

At Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, radioactive waste has been generated due to progress of decommissioning. This review outlines analysis of the waste at the site for R&D concerning waste management technologies.

**Keywords:** Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, waste management, analysis, difficult-to-measure nuclide, inventory

### 1 廃棄物の分析

東京電力ホールディングス株式会社（以下、東京電力）は福島第一原子力発電所の廃止措置を進めており、その過程で放射性廃棄物が継続的に発生している。廃棄物管理は保管に重点を置いて計画的に進めている[1]。発電所の廃止措置は、中長期ロードマップに基づいて、設定されたマイルストーン（主要な目標工程）を目指して実施され[2]、廃棄物管理に関する当面のマイルストーンは2021年度頃に「処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見直し」を示すことにある。このために、廃炉・汚染水対策の事業として、廃棄物管理の全般を対象として研究開発が推進され、国際廃炉研究開発機構（IRID）は研究開発の一環として事故に伴って汚染された物質の分析を実施してきている。

### 2 分析の方法

汚染物の分析は、茨城県に所在する分析施設（日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所、核燃料サイクル工学研究所および大洗研究所、ニュークリア・デベロップメント株式会社、日本核燃料開発株式会社）において発電所から試料を輸送し行っている。分析の目的は、廃棄物管理の方策を検討するために必要な廃棄物の性状に関する情報の提供であり、保管、処理および処分の研究開発に資するよう放射能を中心に分析している。

廃棄物の保管と処理のためには、放射線や熱源として寄与する主要な核種が重要である。処分については、その安全評価のために、長半減期の核種の分析が求められる。それら核種には主にアルファ線やベータ線を放出するいわゆる「難測定」核種を含む。

放射能の分析は、研究施設の廃棄物を対象として整えられた方法[3]を基礎として、分析の試料や核種に応じて適宜変更して適用している。また、 $^{93}\text{Mo}$  や  $^{126}\text{Sn}$  など新たに分析法を開発して利用している[4]。

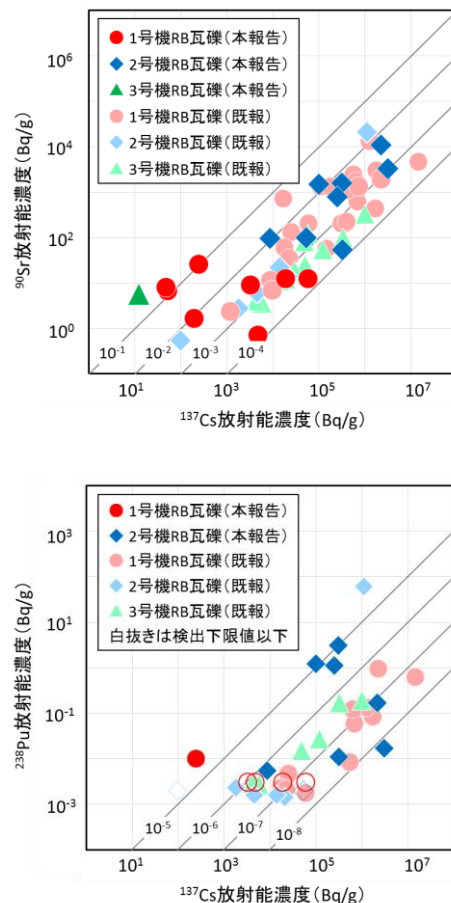
試料は、東京電力から提供を受けるとともに、IRIDが汚

染水処理設備の水および二次廃棄物、土壌や植物を採取して分析に供した。これまでに瓦礫類、汚染水とその処理に伴う二次廃棄物、焼却灰、土壌、植物を分析した。得られたデータは、廃炉汚染水対策会議事務局会議において順次報告、公開している。また、分析データを検索、閲覧するためのデータベースを作成し[5]、利用に供している[6]。

### 3 分析により得られたデータ

#### 3.1 瓦礫

「瓦礫」と分類される廃棄物には、コンクリートや金属類のみならず種々雑多な物質が分類され、その線量に応じて保管場所が定められている。瓦礫の分析試料は当初1か



**Fig.1**  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{238}\text{Pu}$  concentration in the rubble, which was collected in the reactor buildings of units1–3, plotted against  $^{137}\text{Cs}$  concentration [7]

The Current Status on Analysis of Radioactive waste at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station by Yoshikazu KOMA (koma.yoshikazu@jaea.go.jp)

\*1 日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

\*2 国際廃炉研究開発機構

International Research Institute for Nuclear Decommissioning

〒105-0003 東京都港区西新橋 2-23-1

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第35回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

ら4号機原子炉建屋の周辺、覆土式一時保管施設から採取したものから着手し、徐々に原子炉建屋内での工事等で採取されたものへと移行してきた。また、材料としては、コンクリートと金属を主たる対象とした。

1から4号機原子炉建屋にて採取された瓦礫について、 $^{137}\text{Cs}$ と $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ の濃度の相関をFig. 1に示す[7]。 $^{90}\text{Sr}$ と $^{238}\text{Pu}$ のいずれも $^{137}\text{Cs}$ に対する濃度比がおおよそ2桁のばらつきをもって相関する傾向を示す。高い濃度比のデータもあり、 $^{238}\text{Pu}$ については、1号機貫通孔(X6)近傍、2号機の5階(オペレーションフロア)において特異的であった。

これまで、空気を媒体として汚染したと思われる瓦礫を主に分析し、汚染の傾向を調べてきた。現在、後述する汚染水の影響を受けた可能性がある試料を含めて分析を進めている。

### 3.2 汚染水

汚染水はそれ自身が廃棄物ではないが、汚染水処理二次廃棄物のソースタームであり、原子炉建屋等の地下に滞留して構造物や装置の汚染をもたらすので、重要な分析対象である。汚染水としては、建屋の地下に滞留している水、汚染水処理設備に係わる水を分析している。瓦礫についてと同様に、 $^{90}\text{Sr}$ と $^{238}\text{Pu}$ の濃度を $^{137}\text{Cs}$ に対してプロットし

た図をFig. 2に示す[8]。2および3号機の格納容器(PCV)内部の水、1から3号機の原子炉建屋(R/B)およびタービン建屋(T/B)、集中廃棄物処理建屋(集中RW)の地下滞留水のデータである。 $^{90}\text{Sr}$ は $^{137}\text{Cs}$ に対する濃度比が2桁の幅におおよそ収まり、PCVの水で高めである。一方、 $^{238}\text{Pu}$ は、2および3号機PCVの水が下流の水に対して2桁以上も高い。

汚染水の放射性核種組成は、除染処理のみならず、号機や汚染水の流れによって変化することがわかってきており、固体廃棄物の汚染を推定するために利用している。

### 3.3 汚染水処理二次廃棄物

汚染水の除染、再利用のために、セシウム吸着装置や多核種除去設備が運転されている。処理に伴う二次廃棄物には沈殿反応によるものがあり、多核種除去設備スラリーと除染装置スラッジは保管におけるリスクの低減が求められる[9]。炭酸塩スラリーは保管容器から水が溢れる事象が発生し、対策が講じられている。保管中のリスクの評価やリスク低減の処理方法の検討に当たっては、廃棄物の性状を知る必要があり、放射能濃度とともに、元素組成や物性に係る分析を行った。

炭酸塩スラリーの放射能は、 $^{90}\text{Sr}$ が主要な核種であり、 $^{60}\text{Co}$ やPu同位体も含むことを明らかにした[10]。また、元

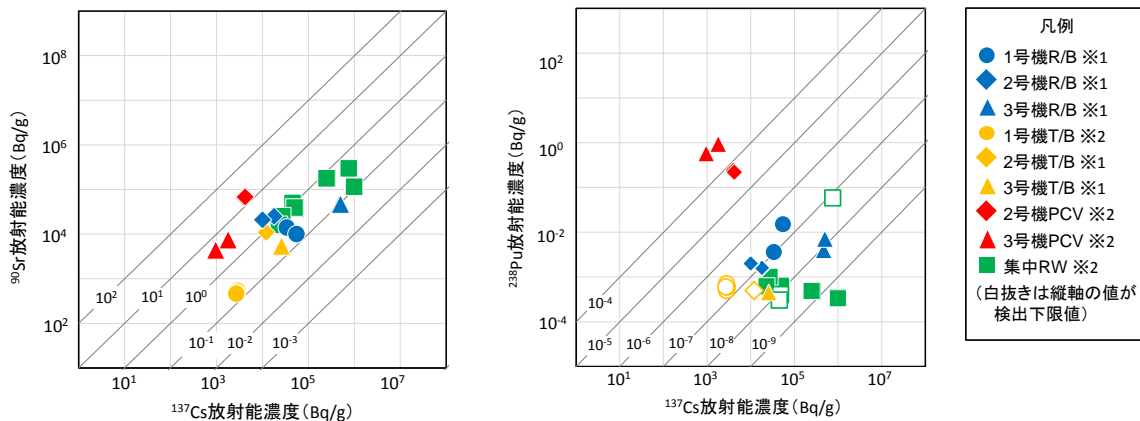


Fig. 2  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{238}\text{Pu}$  concentration of the water, which was collected under the several buildings, plotted against  $^{137}\text{Cs}$  concentration[8]

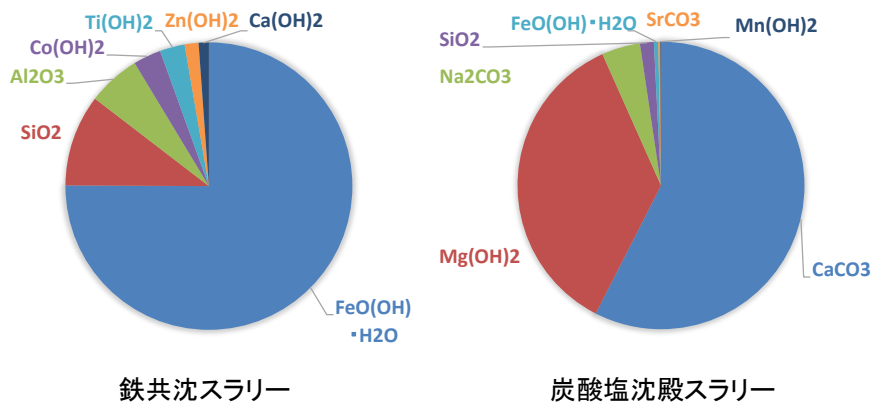


Fig. 3 Supposed chemical composition of slurry of carbonate and iron hydroxide generated from the Multi-radionuclide removal system (ALPS), based on elemental analysis[10]

素分析によるデータを Fig. 3 に示すように、アルカリ土類金属である Mg や Ca の塩を主成分とし ( $Mg(OH)_2$  や  $CaCO_3$  を推定している)、Na や Fe 等を含むものであった。他に、粒径分布や発生水素などを分析した。スラリーやスラッジの分析データは、東京電力が対策を講ずるうえで役立てられている。

### 3.4 土壌、植物

東京電力は事故発生後間もなくから、土壌の採取、分析を実施した[11]。これが、採取場所を定めて長期的に行われたのに対し、発電所内の汚染分布を調べるべく、土壌と植物の試料を採取して分析した。土壌は 5 cm の深さまでの表層から、 $^{137}Cs$  の他に、 $^{90}Sr$  やウラン同位体、 $^{238}Pu$  が検出された[12]。ここで、ウラン同位体は天然由来が支配的であり、Pu 同位体は環境のフォールアウト相当であった。

植物は、マツの枝葉や落葉を分析し、 $^{137}Cs$  と  $^{90}Sr$  の他に原子炉建屋近傍において  $^3H$ 、 $^{14}C$  や  $^{79}Se$  が検出された。

発電所構内は、被ばく管理などのためにフェーシングの処理がなされ、汚染土壌が露出した領域が減っている。また、植物は、設備や施設を設置するために多くが伐採された。汚染した土壌と植物の試料は今後得られにくいと思われる。将来廃棄物管理方策を検討するうえですでに得た試料とデータが重要である。

## 4 インベントリの推定

廃棄物の処分方策を検討するうえでインベントリ情報は不可欠であり、とくに被ばく線量に影響を与える長半減期核種の汚染を知る必要がある。一方で、長半減期の核種には、測定に適したガンマ線を放出しない難測定核種が多く、その検出、定量は難しい。そこで、限られた分析データを利用しつつ、インベントリを推定する手法の開発を進めている[13]。

推定のモデルは、Fig. 4 に示すように[14]、損傷した燃料や原子炉の運転に伴い生ずる放射化生成物をソースタームとして、これを種々の廃棄物に分配するものである。核種の移行挙動を表すパラメータとして、空気や水への移行率を設定する。当初は過去の事故に係わる報告を参考に値を設定したが、分析データに基づいて見直してきている。また、移行率の分布を確率論的に表現する方法の導入を試みている。

## 5 今後の展望

燃料デブリの取り出しに向けての工事など、廃炉の作業が進展するに伴って、放射性廃棄物の発生は継続する。原子炉に近い領域からの試料が得られるものと予想され、分析の役割は重要である。発電所において放射性物質分析・研究施設(第1棟)の建設が進められており、2021年度に廃棄物の分析を開始する予定である[15]。これまでに得た分析データと廃炉工程の進展を考慮して、効率的な分析計画の立案と着実な実施が期待される。

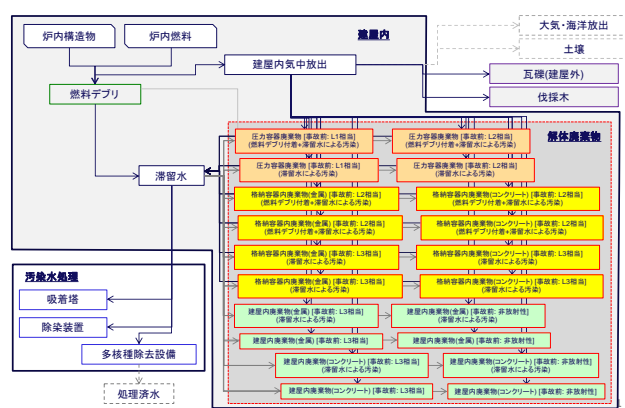


Fig. 4 Model of inventory estimation for radioactive waste [14]

## 謝辞

本稿は、経済産業省「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」で得られた成果の一部を含みます。

## 参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス株式会社: 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画, 2019年6月版, 2019年6月27日(2019).
- [2] 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議: 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ, 平成29年9月26日(2017).
- [3] 亀尾 裕 他: 研究施設等廃棄物に含まれる放射性核種の簡易・迅速分析法(分析指針), JAEA-Technology 2009-051 (2009).
- [4] 青野 竜士: 福島事故廃棄物を対象とした  $^{93}Zr$ ,  $^{93}Mo$ ,  $^{107}Pd$  及び  $^{126}Sn$  分析法の開発, JAEA-Technology 2017-025 (2017).
- [5] 二田 郁子 他: 福島第一原子力発電所事故で発生した放射性廃棄物の分析データベースの構築, 日本原子力学会「2018年秋の大会」, 2G06 (2018).
- [6] 日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター: 福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集 (FRAnDLi) (online). <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/> (accessed 2019-10-31).
- [7] 国際廃炉研究開発機構, 日本原子力研究開発機構: 廃棄物試料の分析結果(1~3号機原子炉建屋内瓦礫), 第65回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議, 2019年4月25日(2019).
- [8] 国際廃炉研究開発機構, 日本原子力研究開発機構: 廃棄物試料の分析結果(水処理設備処理二次廃棄物・滞留水), 第52回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議, 2018年3月29日(2018).

- [9] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構: 東京電力ホールディングス(株) 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2019 (2019).
- [10] 国際廃炉研究開発機構, 日本原子力研究開発機構: 汚染水処理二次廃棄物の放射能評価のための多核種除去設備スラリー試料分析, 第 21 回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議, 2015 年 8 月 27 日 (2015).
- [11] 東京電力株式会社: 福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の検出状況について, プレスリリース, 平成 23 年 3 月 28 日 (2011) (online). <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11032806-j.html> (accessed 2019-10-31).
- [12] 国際廃炉研究開発機構, 日本原子力研究開発機構: 福島第一原子力発電所の固体廃棄物試料分析 (現状までの成果報告), 第 42 回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議, 2017 年 5 月 20 日 (2017).
- [13] Sugiyama, D. et al.: Development of calculation methodology for estimation of radionuclide composition in wastes generated at Fukushima Daiichi nuclear power station, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 56(9-10) pp.881-890 (2019).
- [14] 国際廃炉研究開発機構: 平成 28 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」, 平成 29 年度成果報告, 2019 年 2 月 (2019).
- [15] 東京電力ホールディングス株式会社: 福島第一原子力発電所 中期的リスクの低減目標マップを踏まえた検討指示事項に対する工程表, 第 72 回特定原子力施設監視・評価検討会, 2019 年 6 月 17 日 (2019).