

福島第一原子力発電所事故廃棄物の処理・処分に係る研究開発について

宮本泰明*1*2

福島第一原子力発電所の事故により発生した廃棄物は、(1)炉心燃料に由来した放射性核種を含んでいること、(2)津波や事故直後の炉心冷却に起因する海水成分を含む可能性があること、(3)高線量であり処理・処分の実績が無いゼオライトやスラッジを含むこと、(4)汚染のレベルが多岐にわたりその発生物量も大きいこと等、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物と異なる特徴がある。これらの放射性廃棄物の処理・処分に係る安全性の見通しを得るため、従来の放射性廃棄物とは異なる特徴等を考慮した研究開発を実施している。

Keywords: 福島第一原子力発電所, 放射性廃棄物処理・処分

The radioactive waste generated by the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (NPS) has characteristics which differ from those of waste from other normal operating stations in that: (1) It contains radionuclides deriving from accident-generated core fuels; (2) It may contain seawater ingredients resulting from the reactor-core cooldown immediately after the tsunamis and the accident; (3) It contains zeolite and sludge which have high radiation doses and the treatment and disposal of which has never been carried out by anyone; and (4) Contamination levels vary from place to place and the amount of contamination is large. In order to secure safety in the treatment and disposal of the radioactive waste at the Fukushima Daiichi NPS, we, IRID and JAEA, have been conducting research and development that takes into account the characteristics of the waste different from those of waste produced from normal operation.

Keywords: Fukushima Daiichi NPS, treatment and disposal of radioactive waste

1 緒言

福島第一原子力発電所（1F）で発生する放射性廃棄物の処理・処分に係る「東京電力（株）福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」（平成27年6月12日改訂）において全体概要が示されており、2017年度内に「固体廃棄物の処理・処分に係る基本的な考え方」を取りまとめ、2021年度頃までを目途に処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通しを得ることが示されている。

2 研究開発の進め方

研究開発の実施にあたっては、「廃炉等の適正かつ着実な実施の確保」を図ることを目的として昨年8月に改組された原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下、NDF）が、戦略立案、研究開発企画、重要課題の進捗管理支援を行うCOEとしての役割を果たすこととなっている。そして、政府およびNDFの戦略の下、廃炉のオペレーション、安全管理等の廃炉実施を東京電力廃炉推進カンパニーが、中長期的にクリティカルな廃炉技術開発を国際廃炉研究開発機構（以下、IRID）が担う体制となっている。

IRIDでは、政府の「廃炉・汚染水対策チーム」およびNDFの示す計画に基づいた研究開発を実施しており、放射性廃棄物処理・処分に係る研究開発は、IRIDの組合員のうち日本原子力研究開発機構、東京電力、東芝、日立GEニュークリア・エナジー、三菱重工業、アトックスが参画して実施している。国内外の大学、メーカ、関係機関等と

協力関係を確立して、情報共有や共同研究を実施するとともに、日本原子力学会に設置された「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会、OECD/NEAに設置された「福島第一事故後廃棄物専門家会合」における議論に参画するなどして協力していくことにより国内外の叡知を結集している。

Fig. 1に放射性廃棄物の処理・処分に係る研究開発項目を示す。放射性廃棄物処理・処分に係る研究開発の実施にあたっては、廃棄物を安全に処理・処分するための廃棄物ストリームの策定を目的として取り組んでいる。廃棄物ストリームは、事故廃棄物の発生・保管から処理・処分までの一連の放射性廃棄物の取扱いを示すものである。廃棄物の性状把握、処理検討、長期保管方策検討、処分検討といった個別研究開発項目と相互に関連させることにより、廃棄物ストリームの成立性を高めていく。

性状把握においては、処理・処分の安全評価および廃棄物管理に必要な情報の整備、さらには、建設を計画している分析施設で適用する難測定核種の分析法の開発・整備を目標として、核種分析の実施、難測定核種の分析技術の開発ならびにインベントリの評価手法を開発する。

廃棄物の処理に関する検討では、処理・技術カタログの整備と適用可能な廃棄体化技術候補の絞り込みを目標として、廃棄体化に係る処理技術の基礎的検討を実施する。長期保

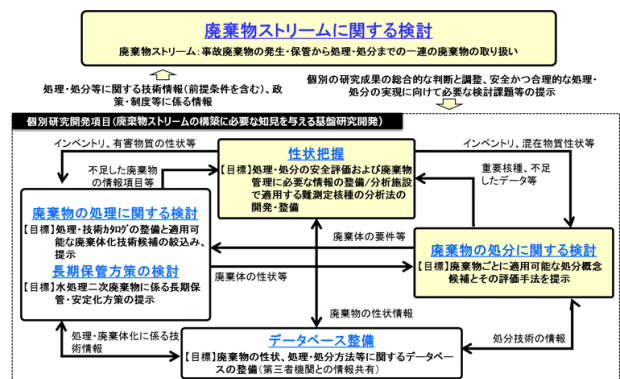


Fig. 1 The R&D items which affect treatment and disposal of radioactive waste.

Research and development on treatment and disposal of radioactive waste resulting from the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant by Yasuaki MIYAMOTO (miyamoto.yasuaki@jaea.go.jp)

*1 国際廃炉研究開発機構

International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID)
〒105-0003 東京都港区西新橋 2-23-1 3 東洋海事ビル 5階

*2 日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第31回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

管方策の検討では、水処理二次廃棄物に係る長期保管・安定化方策を示すことを目標として、水素発生、発熱および腐食等、長期保管に向けた対策を検討する。

廃棄物の処分に関する検討は、廃棄物ごとに適用可能な処分概念候補とその評価手法を示すことを目標として、既存の処分概念および安全評価手法の適用性の確認、また、これが困難な廃棄物について、新たな処理・処分技術を検討する。

3 研究開発の取組成果

3.1 廃棄物ストリーム

事故の影響により廃棄物の性状に関する情報が少ないという特徴を踏まえ、全体を俯瞰するとともに各研究開発と相互にフィードバックすることで研究開発を合理的、効率的に進めるため、全体の安全性および合理性を確保しながら、発生から保管、前処理・処理（分別・減容・安定化）を経て、長期保管あるいは処分にいたる流れ（廃棄物ストリーム）を整備する。

廃棄物ストリームを作成するためには、発生時期と発生場所により 1F 内すべての廃棄物を抽出し、抽出した廃棄物に対して、発生理由、発生場所、廃棄物名称、汚染区分、発生量、放射能濃度、線量率、化学組成（含水率、有害物質等）、保管場所について整理を行う。この際に、放射性廃棄物の分類として、汚染形態や材質を考慮し、運転中に発生した廃棄物や、解体に伴い発生する廃棄物もリスト化する。また、廃止措置に向けた作業の進捗や、性状把握での分析結果など研究成果を適宜反映できるようにしている。

3.2 性状把握に関する研究開発

多核種除去設備（ALPS）から発生する鉄共沈スラリーおよび炭酸塩スラリーを採取して、固液比、固形成分の粒子の形状を測定した結果、鉄共沈スラリーの固液比は、重量比で 10:90、体積比で 3:97 であり、炭酸塩スラリーの固液比は、重量比で 14:86、体積比で 6:94 であった。

炭酸塩スラリーの粒径分布を Fig. 2 に示す。炭酸塩スラリーの固形成分の円相当径に対する平均粒子径は 3.62 μm であり、最大粒子径は 23.2 μm であった。炭酸塩スラリーの固形成分の粒径は非常に小さい。

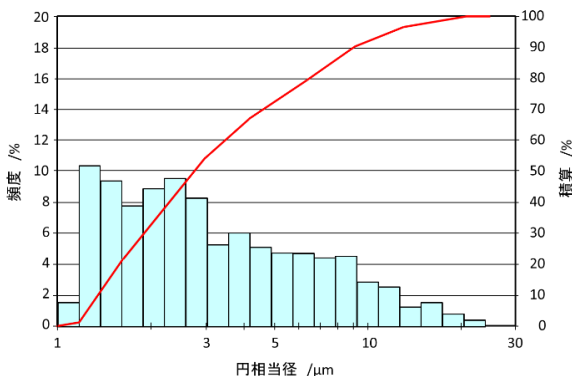


Fig.2 Particle-size distribution of the ALPS carbonate slurry.

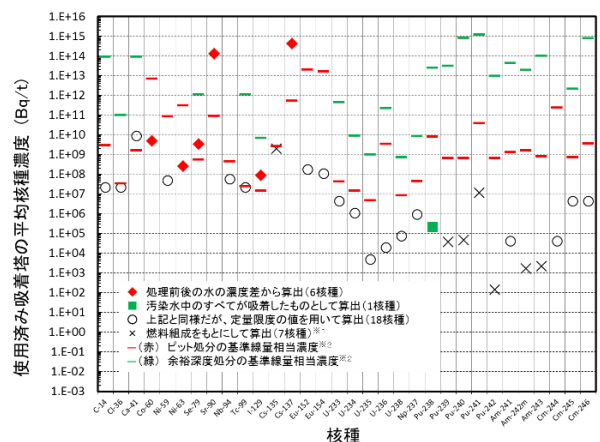
鉄共沈スラリーと炭酸塩スラリーの主要核種の放射能濃度を Table1 に示す。濃度を支配する核種は Sr-90 であり、Cs-137 や遷移金属核種の濃度は Sr-90 に比べて 4~5 桁程度低い。また、炭酸塩スラリーの Sr-90 濃度は、鉄共沈スラリーに比べて 1 桁ほど高くなっており、遷移金属核種に関しては鉄共沈スラリーの方が高い。

実廃棄物の分析評価が困難である汚染水処理二次廃棄物について、処理設備の前後の汚染水の分析データを用いてインベントリを評価した。汚染水および処理水中に検出されない重要核種の保守的な評価をセシウム吸着装置（KURION）廃吸着塔について行った結果を Fig. 3 に示す。

汚染水分析で装置入口水濃度が非検出となる核種については、入口水の検出下限値を入口濃度とし、これに総処理水量をかけることで総核種量を求めた。結果として、水分析で検出された Cs-137 等 8 核種に加え、非検出の Ca-41, Pu-241 等 24 核種についても保守的な総核種量を推定できた。同様に第二セシウム吸着装置（SARRY）廃吸着塔および除染装置（AREVA）のスラッジの評価も進めている。その他に多核種除去設備から発生する二次廃棄物のインベントリ評価、およびガレキ等のインベントリの推定を進めている。この推算結果は、汚染水分析により不検出であった核種が分析下限値で全量吸着するという非常に保守的な

Table 1 Radioactive concentration of the ALPS iron coprecipitation and carbonate slurry.

核種	放射能濃度 (Bq/mL)	
	鉄共沈	炭酸塩沈殿
Co-60	$(8.4 \pm 0.1) \times 10^2$	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^2$
Nb-94	$< 8 \times 10^0$	$< 6 \times 10^1$
Cs-137	$(3.1 \pm 0.1) \times 10^2$	$(2.4 \pm 0.3) \times 10^2$
Eu-152	$< 2 \times 10^1$	$< 2 \times 10^2$
Eu-154	$< 2 \times 10^1$	$< 2 \times 10^2$
Mn-54	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^2$	-
Sb-125	$(9.0 \pm 0.2) \times 10^2$	-
H-3	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^2$	$(3.3 \pm 0.3) \times 10^2$
Sr-90	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^6$	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^7$



※1 燃料中核種組成 (IAEA-Data/Code 2012-018) の比から算出した値
 ※2 原子力安全委員会、低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について、平成19年5月21日

Fig. 3 Radioactivity amount of the cesium adsorption vessel estimated by using the contaminated water analysis data.

評価となっており、Ca-41, I-129, Sr-90 については、今後より現実的な補正を行う必要がある。ただし、非常に保守的な評価結果ではあるが、処分区分の検討において、処分概念の基準線量相当濃度と比較することが可能となる。

3.3 放射性廃棄物の処理に関する検討

多核種除去設備から発生するスラリーの安定化処理物や廃吸着材（酸化チタン、チタン酸ナトリウム）のセメントおよびジオポリマー固化試験を実施した。

作製した固化体はいずれも1日で硬化し、ひび割れ等が生じない固化体を作製できた。また、40%充填固化体ではほとんどの条件で5 MPaを上回る良好な強度が得られた。

固化体の水浸漬試験から、セメント系固化体は放射性元素の閉じ込め性が若干悪く、ジオポリマー固化体は放射性元素の閉じ込め性には優れるが主要成分が浸出しやすいことが観察された。

ガンマ線照射試験の結果を Fig. 4 に示す。それぞれの固化体での水素ガス発生量の G 値は固型化材や模擬廃棄物の違いによる影響が大きいことが分かった。

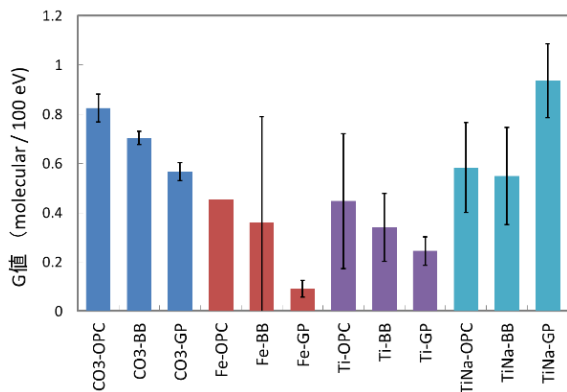


Fig. 4 G-value of the hydrogen generation for the free water.

3.4 放射性廃棄物の処分に係る検討

処分の評価においては、既存の処分概念およびその検討例等を参照し、安全評価手法（シナリオ、モデル、パラメータ）を暫定的に設定した。これらの結果を用いて、想定した処分概念ごとに基準線量相当濃度と同じ意味を持つ濃度の成立条件（C：基準を満足するために求められる条件）を暫定的に算出した。この濃度の成立条件（C）を用いて、廃棄物に含まれる核種の濃度（D）との比較（暫定的な D/C の評価）を処分概念ごとに実施した。

Fig. 5 にガレキをトレンチ処分する場合の Cs-137 の結果を例として示す。グラフの縦軸は核種濃度 (Bq/t) であり、各解析ケースに対する濃度の成立条件 (C) を棒グラフで表している。この棒グラフの位置は解析ケースごとに与えられる基準線量に相当し、それよりも高い濃度は、基準線量以上の影響を与えることを意味している。横軸は解析ケース、グラフ中の3本の横線はインベントリの推算値から求められる廃棄物中の核種濃度 (D) (レファレンス, 最大値, 最小値) である。ガレキの場合、トレンチ処分において、Cs-137 の廃棄物中の濃度 (D) が濃度の成立条件 (C)

を表す棒グラフを超え、安全性を確保できない可能性があることがわかる。ガレキをトレンチ処分することを考える場合は、少なくとも Cs-137 の濃度を精度よく把握すること、さらには、長期保管、または、除染による廃棄物濃度の低減をオプションとして考慮するなどの検討が必要となる。今後は、解析ケースの設定の妥当性を詳細に考慮するとともに、インベントリのバラツキが大きく、区分評価への影響が大きい核種を重点的に検討するなどにより、インベントリ評価の精度を上げる必要がある。

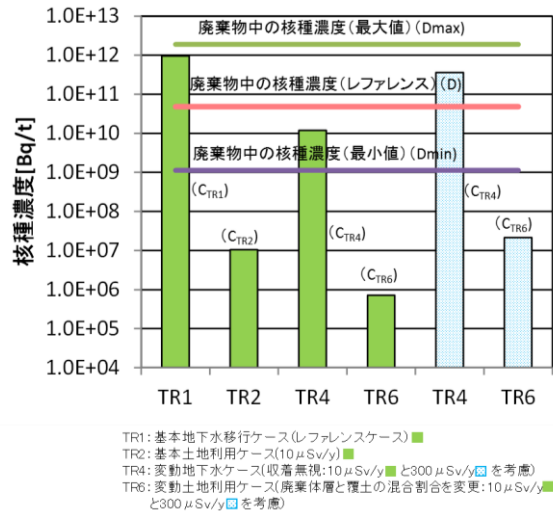


Fig. 5 Comparison between the calculated nuclide concentration to comply with the safety regulatory value for disposal (C) and the nuclide concentration in the radioactive waste (D).

4 まとめ

福島第一原子力発電所事故廃棄物の処理・処分に係る技術開発を進める上では、個別研究開発項目の検討に基づく廃棄物ストリームに関する総合的な検討が重要となる。そのために、廃棄物中のインベントリや共存物質に関する情報を整備し、汚染水処理廃棄物の処理・長期保管対策を明確化し、個々の廃棄物の処分区分の見通しと処分概念の選定論拠を示していく。

本発表内容は、経済産業省受託事業「平成 25 年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備（事故廃棄物処理・処分概念構築に係る技術検討調査）」および経済産業省／平成 25 年度「廃炉・汚染水対策事業費補助金（事故廃棄物処理・処分技術の開発）」の成果を含む。

