

解体廃棄物の処理処分に向けた取り組み（研究炉）

坂本義昭*1

我が国においていくつかの試験研究炉では既に廃止措置に着手、または廃止措置計画書の申請・認可が行われており、試験研究炉の廃止措置への対応が必要となってきた。この際、解体廃棄物の合理的な処理処分は廃止措置の適切な遂行に必要不可欠な事項であるため、解体廃棄物の性状についての具体的な事例の紹介および処理処分に向けた原子力機構での取り組みについて概説した。

Keywords: 試験研究炉, 解体廃棄物, JPDR, 処理処分, 研究施設等廃棄物

はじめに

我が国では、エネルギー利用、学術利用、産業利用、医学・治療利用、放射線科学・技術、人材育成の目的のため、試験研究炉の設置、操業がなされている[1]。これらの試験研究炉には、熱出力が極めて小さなものから大きなもの、装荷燃料も低濃縮から高濃縮のもの、減速材も軽水や重水を用いるものと幅広い種類の炉型が存在している[1]。一方、これらの試験研究炉では既に廃止措置に着手、または廃止措置計画書の申請・認可がなされており、今後、多くの試験研究炉の廃止措置がなされる状況となってきた。

試験研究炉の廃止措置に際しては、原子炉の解体とともに、発生する解体廃棄物の処理処分に向けた対応も重要である。このため、本報では、国立研究開発法人日本原子力機構（原子力機構）の Japan Power Demonstration Reactor（動力試験炉、JPDR）解体実地試験において発生した実際の解体廃棄物の発生物量や放射能レベルなどの性状の概略を示すとともに、原子力機構における試験研究炉の解体廃棄物を含む放射性廃棄物の処理処分に向けた取り組みについて紹介する。

1 JPDR の事例に基づく原子炉の解体廃棄物の特性

1.1 JPDR の解体実地試験および解体廃棄物の概要

JPDR は我が国における原子力発電の早期実現を期して茨城県東海村にある原子力機構原子力科学研究所（当時の日本原子力研究所東海研究所、原科研）に建設され、1963 年 10 月 26 日に日本最初の原子力発電に成功した研究用沸騰水型軽水炉（9,000kW、当初は 4,500kW）であり、1976 年に運転を終了した[2]。

1981 年からは廃止措置プロジェクトとして原子力発電所の解体技術開発が開始された。これらにより開発された廃止措置技術開発の結果の有用性の検証および解体作業データの体系的な収集を目的として 1986 年より JPDR を用いた解体実地試験が開始され、1995 年に解体を終了して更地化がなされたものである[2]。

解体実地試験では、原子炉の炉内構造物から周辺機器ま

Approach for the treatment and disposal of dismantling waste (Research Reactor) by Yoshiaki SAKAMOTO (sakamoto.yoshiaki@jaea.go.jp)

*1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 埋設事業センター

Japan Atomic Energy Agency, Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management, Radioactive Wastes Disposal Project Center

〒319-1112 茨城県那珂郡東海村松 4 番地 49

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 33 回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容を加筆・修正したものである。

で解体撤去され、約 24,400t の解体廃棄物が発生した[2]。

このうち、非管理区域から発生した廃棄物が約 3,190t、管理区域から発生した廃棄物のうち「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱った廃棄物が約 17,480t、残りの約 3,770t が放射性廃棄物として取り扱われた[3]。また、放射性廃棄物のうち約 1,670t のコンクリート等廃棄物は、原科研の敷地内に設置したトレーンチ埋設施設において極低レベル放射性廃棄物の埋設実地試験に供しており、残りの約 2,100t が現在でも原科研敷地内で安全に保管されている。極低レベル放射性廃棄物の埋設実地試験については阿部らによってその詳細が記載されているので参照願いたい[4]。

なお、JPDR の解体実地試験が実施された当時はまだ現在のような原子炉の解体などに伴い発生する資材のクリアランス制度の法令が整備されていなかったため、クリアランスは実施されなかった。また、「放射性廃棄物でない廃棄物」は、平成 4 年に原子力安全委員会で示された考え方に基づき区分された[5]。

1.2 JPDR の解体廃棄物の性状

JPDR の解体廃棄物の性状データは、白石らによって発生物量、放射能レベル区分、付随廃棄物の種類や保管容器の種類などの詳細なデータが取りまとめられている[3]。本報では、これらのデータの中から試験研究炉の解体廃棄物としていくつかの特徴的な性状について示した。

まず、JPDR の解体廃棄物としての性状別の内訳を図 1 に示す。解体廃棄物として発生した放射性廃棄物は、コンクリート廃棄物が約 57%、金属廃棄物が約 30% であり、付随廃棄物が約 11% であった。したがって、現行の「核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律」に基づく「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」（第二種埋設事業規則）で定義されているコンクリート等廃棄物となる廃棄物が約 87% を占めていた。また、付随廃棄物の主なものは、可燃物やフィルター類、樹脂やスラッジ類などであった。

これらの解体廃棄物の放射能レベル区分に基づく放射能濃度分布と主な発生場所についてまとめた結果を図 2 に示す。なお、JPDR の解体実地試験が行われた当時は、現在の第二種埋設事業規則の放射能濃度などに応じた放射性廃棄物の処分区分の全ては策定されていなかった。このため、将来的なクリアランスレベルおよび極低レベル放射性廃棄物の埋設処分に係る放射能レベル区分を想定して放射能レベル区分を設定し、解体廃棄物データが取りまとめられた。

図 2 からコンクリート廃棄物の多くは、原子炉の生体遮蔽の解体で発生したものであることがわかる。放射能レベ

ル区分（図2参照）をみると、約80%は放射能濃度が一番低いレベルIVであり、生体遮蔽以外のコンクリート廃棄物は全てレベルIVであった。

一方、金属廃棄物はその発生場所により放射能レベル区分が異なっていた。すなわち、放射能濃度が高いレベルIに区分される金属廃棄物は炉内構造物および圧力容器の解体物であり、レベルIIに区分される金属廃棄物は圧力容器の一部や生体遮蔽の配筋から発生していた。さらにレベルIIIでは生体遮蔽の鉄筋、レベルIVとしてはその他の一般機器から発生していた。

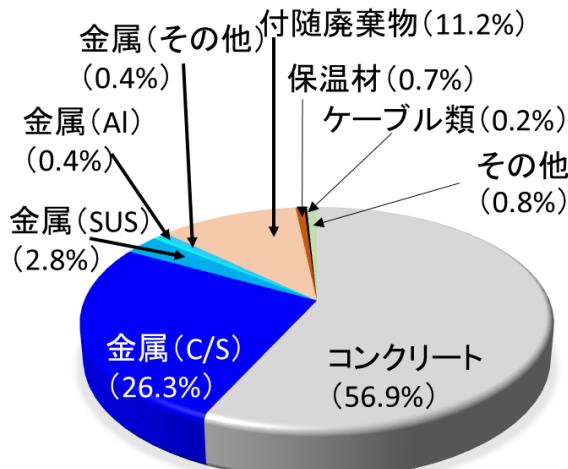


図1 JPDRの解体放射性廃棄物の性状内訳

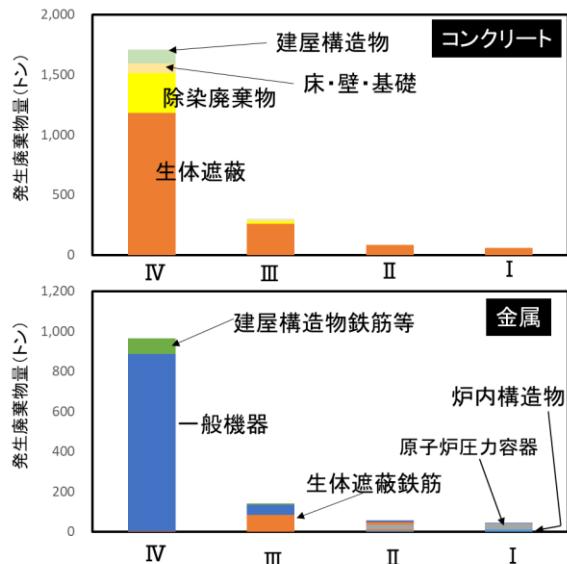
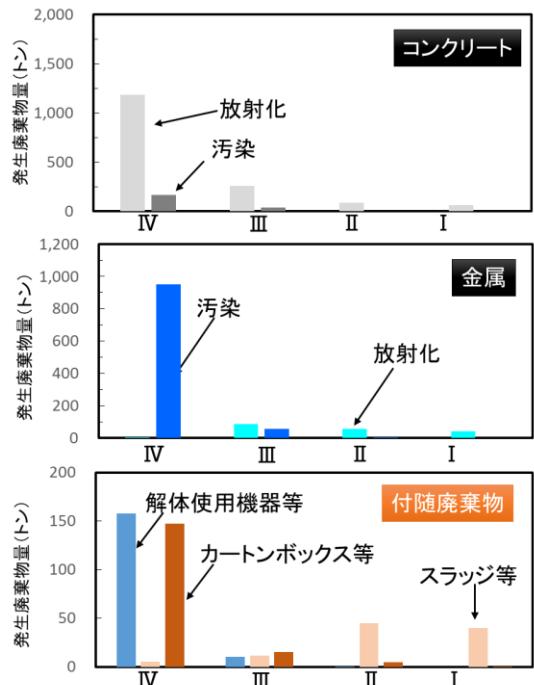


図2 JPDRの解体放射性廃棄物のレベル区分

放射能濃度レベル区分	
(汚染金属)	(放射化金属など)
レベルI : 400,000Bq/cm ² 以上	4,000Bq/g以上
レベルII : 4,000~400,000Bq/cm ²	40~4,000Bq/g
レベルIII : 40~4,000Bq/cm ²	0.4~40Bq/g
レベルIV : 40Bq/cm ² 未満	0.4Bq/g未満

図3に放射性廃棄物を放射化または汚染のいずれに起因するかを放射能レベル区分とともに示した。図3からわかるように、コンクリート廃棄物は全てのレベル区分において



ほとんどが放射化廃棄物であり、汚染廃棄物としてはわずかな量のみがレベルIIIおよびIVとして発生していた。金属廃棄物は少量の放射化廃棄物がレベルI、レベルII及びレベルIIIとして発生するが、大半は汚染廃棄物であった。これらの結果は、図2に示す各放射性廃棄物の発生場所とそのレベル区分の結果と整合している。すなわち、コンクリート廃棄物は生体遮蔽の解体廃棄物としてその多くが発生していたことから放射化廃棄物が多く、汚染廃棄物は放射能レベル区分の低い放射性廃棄物がわずかに発生した結果となっている。一方、金属廃棄物は、大半が一般機器の放射能レベル区分の低い汚染廃棄物として発生するが、炉心近傍の構造物の放射化に起因して放射能レベル区分の高い放射性廃棄物が少量発生していた。

なお、付随廃棄物は全て汚染廃棄物として発生した。その内訳としては、スラッジのような放射性物質を多く含む廃棄物の放射能レベル区分が高く、解体で使用した機器類やカートンボックスに詰められて発生する可燃物や小規模な不燃物類は放射能レベル区分が低い放射性廃棄物として発生していた。

以上のJPDRの解体廃棄物の性状を踏まえると、試験研究炉の解体廃棄物は主に放射化コンクリート廃棄物と汚染した金属廃棄物および放射化により少量発生する放射能濃度の高い放射化金属などであり、このような特徴を踏まえた処理処分への取り組みが必要である。

2 試験研究炉解体廃棄物の処理処分に向けた取り組み

2.1 埋設処分に向けた取り組み概要

上述したような解体廃棄物の処理処分への取り組みとしては、最終的な埋設処分を見据えた上で放射性廃棄物の処理や必要なデータの取得が必要であることから、まず埋設

処分について概説する。

我が国では、試験研究炉の放射性廃棄物は研究施設等廃棄物として扱われ、原子力機構が埋設処分の実施主体として対応を進めている。研究施設等廃棄物の埋設事業では、当面、浅地中処分として、トレンチ処分およびコンクリートピット処分をそれぞれ約38万本および約22万本（いずれも200Lドラム缶本数換算）を埋設処分する能力の埋設施設の設置を予定している[6]。この中で上記に示した試験研究炉の解体廃棄物のうち大半を占める極低レベルのコンクリート廃棄物および金属廃棄物は、図4に示すようにフレキシブルコンテナや金属容器に入れて安定型トレンチでの埋設処分を予定している。具体的には、コンクリート廃棄物は飛散防止のためフレキシブルコンテナへの封入、金属廃棄物は1m³程度の金属角形容器に入れて空堀を砂などの充填措置を行った後にトレンチ埋設施設へ定置することを予定している。なお、解体で発生する塔槽類のような大型の有姿廃棄物については内部を充填措置した上で埋設処分することも想定している。

放射能濃度が極めて低い充填固化体などの廃棄体は、いわゆる産業廃棄物での安定5品目以外の廃棄物となることから、「廃棄物の処理および清掃に関する法律」での管理型最終処分場の構造も参考として図4の下図に示すような遮水工などを設置した付加機能型トレンチ埋設施設での埋設処分を予定している。埋設施設の詳細については、原子力機構で取りまとめた埋設施設の概念設計を参照されたい[7]。なお、原子力規制委員会が設置している「廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム」では原子炉施設の解体廃棄物などの処分に係る規制制度についての議論がなされており、第二種埋設事業規則の改正に係る骨子案としてトレンチ処分での廃棄体の埋設処分を可能とする検討がなされている[8]。

これらの低レベル放射性廃棄物の処理から埋設処分に至るまでには、主に以下の項目への対応が必要となる。

中間処理：中間処理設備の整備および運用、廃棄物の保管、廃棄物の分別・分類など

廃棄体化処理：廃棄体化処理設備の整備および運用、廃

棄体の保管、廃棄体の放射能評価および廃棄体性能評価手法の構築、廃棄体輸送など

埋設処分：埋設施設の立地推進、環境調査、埋設施設設計、廃棄体受入基準設定、重要核種選定、埋設事業計画の策定、関連規制法の法令整備支援など

これらの項目のうち、各放射性廃棄物の発生者においては、埋設処分に向けて廃棄物の中間処理や廃棄体化処理および廃棄体輸送が必要であるが、その際にはコンクリート等廃棄物および廃棄体は埋設施設への受入基準に合致するよう廃棄体化処理が必要である。

埋設施設への受入基準は、第二種埋設事業規則などの技術基準や埋設施設の設計に基づき設定されることとなる。この際、廃棄体確認に必要な重要核種および最大放射能濃度などについては埋設施設の地下水流速などの環境条件にも依存して設定されるが、固型化要件などの廃棄体性能に係る基準については埋設施設の環境条件には大きくは依存しない。現状では、具体的な埋設施設の設置には至っていないことから、原子力機構では、環境条件に依存する重要核種の選定や最大放射能濃度のような廃棄体（コンクリート等廃棄物含む）受入基準については一般的な条件を設定して予備的な検討を進めるとともに、それ以外の受入基準についても技術的な検討評価により、各発生者へ共通的な廃棄体の製作・評価方法の提示を目指した検討を進めている[9][10][11][12]。

本報では、このうち試験研究炉の解体廃棄物の埋設処分にも対応する項目の取り組み状況について以下に紹介する。

2.2 試験研究炉解体廃棄物中の放射能評価手法の検討

試験研究炉の解体廃棄物の放射能評価手法の検討に必要な試験研究炉の各部材の材料組成の実測評価を進めている。原子力機構のふげんでは既に材料組成の測定事例があるが[13]、このような先行事例との比較検討も含めた放射能評価手法の確立を行うため、廃止措置中の立教大学 TRIGA-II 型炉を対象として、研究炉構造材である炭素鋼、アルミニウム合金、重コンクリート、黒鉛の元素組成分析および一部試料の放射能濃度の分析を進めている。

また、廃棄体確認に向けては、原子力機構で保管されている放射性廃棄物の発生場所が明確なJPDRの解体金属廃棄物中の放射能濃度の分析を行い、発電所廃棄物を対象として既に実用化されているSF法などの放射能濃度の評価手法の適用性について検討した。これまでに、重要核種を一定の仮定の下に予備的に選定して、各重要核種の放射能濃度を分析した。例えば、冷却水系やタービン系などの発生場所の異なる廃棄物中の⁶³Niの放射能濃度と⁶⁰Coの放射能濃度との関係については統計的な相関関係が認められSF法の適用が可能であることを確認した（図5）。このような評価検討を他の核種についても実施し、表1に示すようなJPDRの解体金属廃棄物を対象とした廃棄体確認手法を取りまとめた[14]。

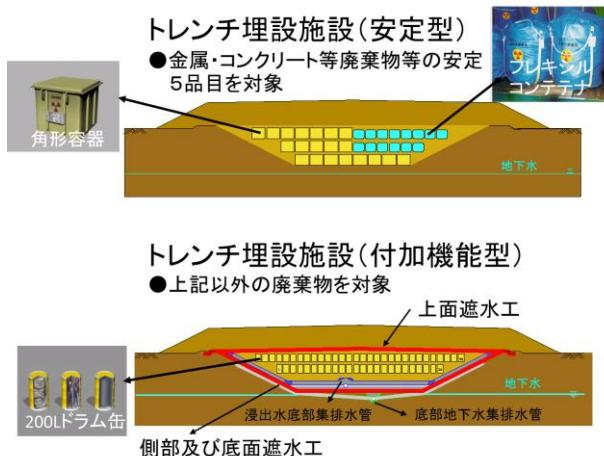


図4 研究施設等廃棄物の埋設処分において設定している安定型および付加機能型トレンチ埋設施設とそれぞれの対象廃棄物

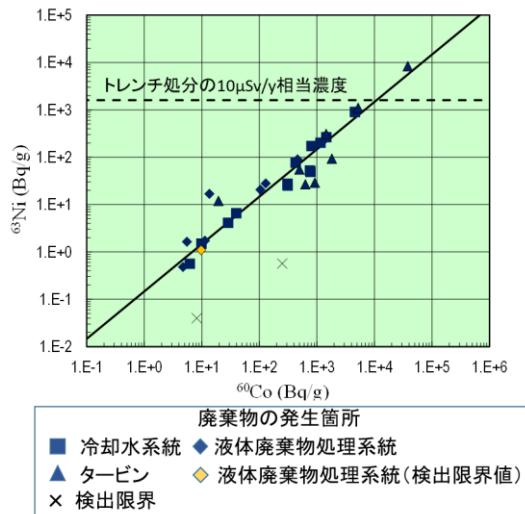


図 5 JPDR 解体金属廃棄物中の ^{60}Co と ^{63}Ni の放射能濃度の分析結果

表 1 JPDR 解体金属廃棄物の各重要核種の放射能評価手法の検討結果

重要核種		評価方法		重要核種		評価方法	
1	H-3	平均法 ^{*1*5}	9	Nb-94	SF法		
2	C-14	平均法 ^{*1*5}	10	Tc-99	平均法 ^{*1*5}		
3	Cl-36	平均法 ^{*2*5}	11	Ag-108m	非破壊 ^{*4}		
4	Ni-59	理論法 ^{*3}	12	Cs-137	非破壊		
5	Co-60	非破壊	13	Eu-152	平均法 ^{*1*5}		
6	Ni-63	SF法	14	Eu-154	平均法 ^{*2*5}		
7	Sr-90	平均法 ^{*1*5}	15	Ho-166m	平均法 ^{*2*5}		
8	Mo-93	平均法 ^{*2*5}	16	全α	平均法 ^{*2*5}		

*1: H-3, C-14, Sr-90, Tc-99, Eu-152は、key核種との相関が見られず、平均放射能濃度法を適用

*2: Cl-36、Mo-93、Eu-154、Ho-166m、全αは、検出値が得られず、検出限界による平均放射能濃度法を適用

*3: Ni-59は、Ni-63の放射能濃度から計算(放射化断面積の比による)による理論計算法を適用

*4: Ag-108mはCo-60との相関が見られず平均放射能濃度法の適用が考えられるが、比較的測定が容易なエネルギーのγ線を放出することから、非破壊測定法を適用

*5: 平均放射能濃度法について、今後分別する保管体では確認分析を実施

また、原子力機構の他の試験研究炉である JRR-2 および JRR-3 の廃棄物中の放射能濃度の分析も実施しており、これらの試験研究炉から発生した金属廃棄物と上記の JPDR の金属廃棄物との間で共通的な SF 法の適用性の検討評価が可能であることを示した[11]。このような結果を他の試験研究炉廃棄物へも適用し、試験研究炉から発生する放射性廃棄物において共通的な放射能濃度評価手法の確立を目指している。

2.3 廃棄体性能に係る受入基準の検討

廃棄体性能に係る基準の検討では、耐埋設荷重の確認や空げきの充填などへの対応について実際にデータを取得した上で廃棄体性能に係る受入基準として提示できるよう検討を進めている。

例えば、図 6 に示すようにトレンチ埋設施設に 200ℓ ドラム缶を縦置きで 4 段積みを想定した場合の荷重を模擬廃棄物へかけ、ドラム缶の変位、ひずみを計測とともに、試験後にドラム缶を掘り起して外観検査を実施した。このような試験結果から第二種埋設事業規則にある「埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有

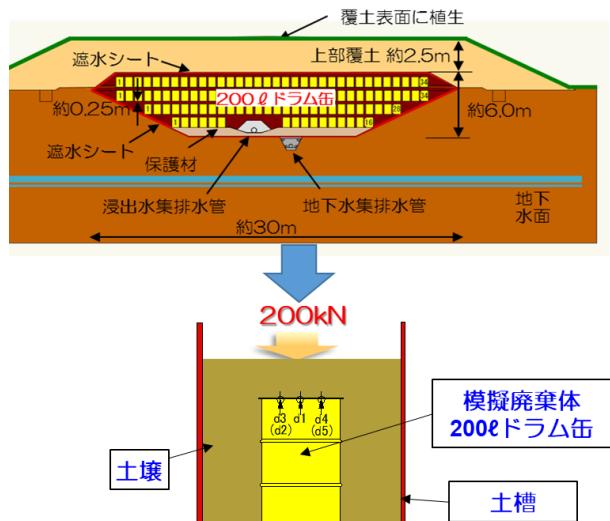


図 6 トレンチ処分に対する耐埋設荷重の確認の概要
上図のようなトレンチ埋設施設を設定し、模擬廃棄物への荷重をかけた際の変位、ひずみを計測。
試験後にドラム缶を掘り起し外観検査を実施。

図 6 トレンチ処分に対する耐埋設荷重の確認の概要

すること」に対するトレンチ処分での廃棄体の耐埋設荷重の設定を行った[15][16]。

また、金属を入れた廃棄物容器への砂の充填性試験として、想定される放射性廃棄物の形状に基づき作成した模擬廃棄物を用いて種々の加振条件により試験を実施し、砂の充填方法とその課題について検討している[12]。さらには、充填固化体に対して、セメント系充填剤による充填を想定して、水セメント比を変えて P ロート流下時間をパラメーターとした充填性の確認試験を実施し、有害な空げきのないことの確認、および一体となるような充填の確認に対応する廃棄体製作方法について取りまとめている[17]。

今後、これらの結果に基づき、廃棄体性能に係る受入基準の提示を進める予定である。

3 クリアランスへの対応

試験研究炉の合理的な廃止措置に向けては、放射性廃棄物の発生量を減らすために、解体で発生する資材のクリアランスを進めることも重要である。

試験研究炉の解体で発生する資材については、金属くず、コンクリート破片又はガラスくず（ロックウール及びグラスウールに限る）を対象に既にクリアランスの制度整備がなされている。原子力機構では本制度を活用して、JRR-3 の改造で発生したコンクリートのクリアランスを実施して、原科研内での路盤材としての再利用を行った[18]。また、ふげんでは解体金属のクリアランスを進めるための対応も進めている[19]。

現在のところ、クリアランスは原子力事業者内での再利用が実施されているところであるが、クリアランスの実績を積み重ねて最終的にはフリーリリースとなるよう対応を進めることが重要である。また、クリアランスの対象物の拡大も試験研究炉の廃止措置を進める上で重要であり[20]、将来的には安全規制整備での対応も必要だと思われる。

4 最後に

試験研究炉の廃止措置を進めるためには解体廃棄物の処理処分を合理的に実施することが重要である。試験研究炉の解体廃棄物は JPDR の解体実地試験で発生した放射性廃棄物の性状から主に極低レベルのコンクリート廃棄物および金属廃棄物が主体である。このため、原子力機構ではトレーニングに必要な放射能評価手法の検討や廃棄体性能に係る受入基準の検討・整備を行っている。

また、原子力機構の原子力施設および原子力機構以外の試験研究炉をはじめとした種々の原子力施設や放射性同位元素使用施設などから発生する低レベル放射性廃棄物の処理処分についてはその多くが未着手な状況である。このため、原子力機構では、試験研究炉の解体廃棄物も含めた研究施設等廃棄物の全体の埋設事業として、浅地中処分（コンクリートピット処分及びトレーニング）が着実に実施されるよう技術的な検討[21]も含め、種々の対応を進めているところである。

謝辞

本講演と報告のまとめに当たり、原子力機構バックエンド研究開発部門埋設事業センター埋設事業推進室の坂井章浩氏、天澤弘也氏、仲田久和氏、林宏一氏、出雲沙理氏のご協力を得たことに感謝します。

参考文献

- [1] 日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会：研究用原子炉のあり方について。 (2013).
- [2] 宮坂靖彦 他：JPDR 解体実地試験の概要と成果。日本原子力学会誌, Vol.38, No.7, pp.553-576 (1996).
- [3] 白石邦生, 助川武則, 柳原敏：動力試験炉（JPDR）の解体廃棄物データの分析（受託研究）。JAERI-Data/Code 99-050 (1999).
- [4] 阿部昌義, 大越実, 吉森道郎：極低レベルコンクリート廃棄物の埋設実地試験。デコミッショニング技法第 15 号, pp.50-58 (1996).
- [5] 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会報告：『放射性廃棄物でない廃棄物』（放射性物質により汚染された可能性が全くないもの等）の範囲に関する基本的考え方。平成 4 年 2 月 (1992).
- [6] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：埋設処分業務の実施に関する計画。平成 21 年 11 月 13 日認可, 平成 28 年 3 月 25 日変更認可 (2016).
- [7] 天澤弘也 他：研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計。JAEA-Tech.2012-031 (2012).
- [8] 原子力規制庁：第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案。第 24 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム 資料 24-1, 平成 29 年 7 月 24 日 (2017).
- [9] 出雲沙理 他：研究施設等廃棄物の廃棄体確認方法の開発(1)浅地中処分に向けた廃棄体確認方法の開発方針。日本原子力学会 2017 秋の大会予稿集 1H04 (2017).
- [10] 下村祐介 他：研究施設等廃棄物の廃棄体確認方法の開発(2)金属試料に対する放射化学分析スキームの構築。日本原子力学会 2017 秋の大会予稿集 1H05 (2017).
- [11] 林宏一 他：研究施設等廃棄物の廃棄体確認方法の開発(3)共通的な放射能濃度評価方法の検討。日本原子力学会 2017 秋の大会予稿集 1H06 (2017).
- [12] 仲田久和 他：研究施設等廃棄物の廃棄体確認方法の開発(4)廃棄容器内の空げきへの砂の充填に関する検討。日本原子力学会 2017 秋の大会予稿集 1H07 (2017).
- [13] 川太徳夫 他：「ふげん」発電所の主要構造材元素組成分析。日本原子力学会和文論文誌, Vol.9, No.4, pp.405-418 (2010).
- [14] 辻智之 他：JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討。2. JAEA-Tech. 2015-009 (2015).
- [15] 岡田翔太 他：研究施設等廃棄物浅地中処分施設における廃棄体の受入基準の設定；充填固化体の耐埋設荷重。JAEA-Tech. 2016-023 (2016).
- [16] 仲田久和 他：研究施設等廃棄物浅地中埋設処分対象廃棄体等にかかる荷重変形特性の検討。JAEA-Tech. 2016-036 (2016).
- [17] 仲田久和 他：研究施設等廃棄物浅地中処分施設における廃棄体の受入基準の設定；有害な空げきが残らないこと及び一体となるような充填。JAEA-Tech. 2016-001 (2016).
- [18] 小越友里恵 他：JRR-3 改造工事に伴って発生したコンクリートのクリアランス放射能濃度の測定および評価の結果－。JAEA-Tech. 2017-017 (2017).
- [19] Hayashi H., et.al.: Application of measurement and evaluation method on the clearance system of the Fugen NPP for dismantled equipment of turbine system. Proceedings of 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-23) (DVD-ROM) (2015).
- [20] 独立行政法人日本原子力研究開発機構バックエンド研究開発部門：日本原子力研究開発機構から発生する低レベル放射性廃棄物等について。第 2 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム 資料 2-2, 平成 27 年 2 月 12 日 (2015).
- [21] 坂本義昭：研究施設等廃棄物の処分の概要について。原環セントラルピックス, No.115, pp.2-12 (2015).

