

委員会報告 有害廃棄物・放射性廃棄物処分へのセメント・コンクリート技術の適用研究委員会

山田 一夫*1・芳賀 和子*2・蔵重 勲*3・乾 徹*4・半井 健一郎*5・庭瀬 一仁*6

要旨： 廃棄物の安全かつ合理的な処理・処分は、持続可能な経済活動を支える重要な社会的問題の一つである。従来、この課題領域とセメント・コンクリート分野の連携はそれほど活発ではなかったが、近年、これらの分野の横断のみならず、関連する多くの学際領域の知見や技術を結集・統合化し、上記課題に対処する必要性と重要性が認識され始めている。このような背景から、重金属等を含んだ有害廃棄物や原子力発電等によって発生する放射性廃棄物を対象に、それらの処理・処分とセメント・コンクリート分野における知見と技術の関連を整理するとともに、今後必要となる研究や技術について議論を重ねた。

キーワード： 有害廃棄物, 放射性廃棄物, セメント固型化, 処分施設, セメント系人工バリア, 長期耐久性

1. はじめに

1.1 委員会の趣旨

近年、様々な課題に対して研究領域をまたいだ学際的な研究が盛んに行われている。コンクリート工学を中心に考えると、建設分野だけではなく、有害廃棄物・放射性廃棄物の処分にも深く関わっている。例えば、海外では Nanocem と呼ばれる大規模な研究グループが 2004 年から活動をしており、物理化学的、あるいは材料科学的な種々の知見と手法が取り入れられ、従来の研究領域が広がることで研究レベルが飛躍的に高まり、放射性廃棄物処分への応用もなされてきている。しかしながら、日本ではセメント化学やコンクリート工学に関する技術や知見については、当該分野において最新の知見が十分に反映されていないのも事実である。

そこで、この背景を踏まえて、廃棄物処分为念頭に、セメント化学やコンクリート工学の分野の基盤知識をもとに、日本コンクリート工学会の会員の枠を超えて、有害廃棄物・放射性廃棄物の処分に深く関わる様々な分野、すなわち地盤工学・原子力工学・環境工学・材料科学などと連携し、JCI-TC-181A 有害廃棄物・放射性廃棄物処分へのセメント・コンクリート技術の適用研究委員会(委員長：国立環境研究所福島支部・山田一夫)を提案・設置した。

本研究委員会には上記のような分野の有識者の参画により、当該分野におけるニーズとセメント化学・コンクリート工学が有する技術や知見の照合、ならびに将来的に当該分野で適用が見込まれる技術や知見の抽出を目的

として活動を行った。放射性廃棄物処分に関しては、複数の機関が関与しており、それぞれに膨大な研究を長年にわたり実施してきたが、外部からは簡単に知りえなかったその構造や内容をまとめた。さらに、海外での放射性廃棄物に関する研究動向や、今後は標準的ツールになるであろう相平衡物質移動モデル (Reaction Transport Model) の相平衡モデルによる代表的放射性核種の取り扱いも総括した。

本稿では、廃棄物とセメント・コンクリートのかかわりという観点から、2017 年度の FS 委員会を経て、2018 年度から 2 年間にわたる本研究委員会の活動成果の概要を紹介する。COVID-19 の影響から、本来、報告会は 2019 年度に行う予定が 2020 年 12 月に延期となり、本報告も 2020 年のコンクリート工学年次大会において活動成果報告を提示すべきであったが、1 年遅れての報告となった。

1.2 委員会の活動体制と本報告の構成

表-1 に示すとおり、本委員会は 17 名の有識者からなり、有害廃棄物のセメント固型化処理技術を対象とした WG1 と、放射性廃棄物の処分技術を対象とした WG2 を組織し、それぞれ活動を行った (図-1)。

また、本委員会報告では、2 章にて有害廃棄物および放射性廃棄物の処分について概括した後、3 章は WG1 の活動テーマである有害廃棄物のセメント固型化処理について、4 章は WG2 の放射性廃棄物処分について、それぞれの活動成果をまとめる形で構成し、最後に今後の展望や期待を加えた。

*1 国立環境研究所 福島支部汚染廃棄物管理研究室 博士(工学) (正会員)

*2 太平洋コンサルタント ソリューション営業部 博士(工学) (正会員)

*3 電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 博士(工学) (正会員)

*4 大阪大学 大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学)

*5 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

*6 八戸工業高等専門学校 産業システム工学科環境都市・建築デザインコース 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 委員会の活動体制

委員長：	山田 一夫	(国立環境研究所)
副委員長：	芳賀 和子	(太平洋コンサルタント)
幹事長：	蔵重 勲	(電力中央研究所)
【WG1：セメント固型化 WG】		
主 査：	乾 徹	(大阪大学)
委 員：	高橋 史武	(東京工業大学)
	高橋 佑弥	(東京大学)
	野崎 隆人	(太平洋セメント)
【WG2：放射性廃棄物処分 WG】		
主 査：	半井健一郎	(広島大学)
	庭瀬 一仁	(八戸工業高等専門学校)
委 員：	五十嵐 豪	(東京大学)
	遠藤 和人	(国立環境研究所)
	大脇 英司	(大成建設)
	澤口 拓磨	(日本原子力研究開発機構)
	千々松正和	(安藤・間)
	浜本 貴史	(原子力発電環境整備機構)
	林 大介	(原子力環境整備促進・ 資金管理センター)
	宮本慎太郎	(東北大学)

2. 廃棄物処分の概要

2.1 有害廃棄物の処分

廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下、廃棄物処理法）には「有害廃棄物」という用語は無いが、特別管理一般廃棄物や特別管理産業廃棄物などは、総じて「有害廃棄物」という概念で括られる。「特別管理」がつくかどうかに対しては判定基準が定められており、この基準値を超える有害物質の溶出が確認されるものを特別管理産業もしくは一般廃棄物としている。処理を行い、一定の基準を満たした特別管理産業廃棄物は産業廃棄物となり、管理型処分場に埋立処分できる。処理をしても基準を満たさなかったものは遮断型最終処分場に埋立処分されることになり、この廃棄物が埋立処分における有害廃棄物である。埋立処分に着目した有害廃棄物の考え方を図-2に示す。「廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令の一部改正等について（平成10年7月16日 環水企299号）」において、「遮断型最終処分場への埋立処分に当たっては、環境保全上適正な技術により無害化処理が可能な廃棄物については、無害化処理を行うことにより、遮断型最終処分場への埋立処分を回避することが望ましい」と記載されており、判定基準を超過する場合にも判定基準適合のための無害化処理を行うことが大半である。有害廃棄物の処分において適用されるセメント・コンクリート技術は、セメント固型化や固化・不溶化処理、

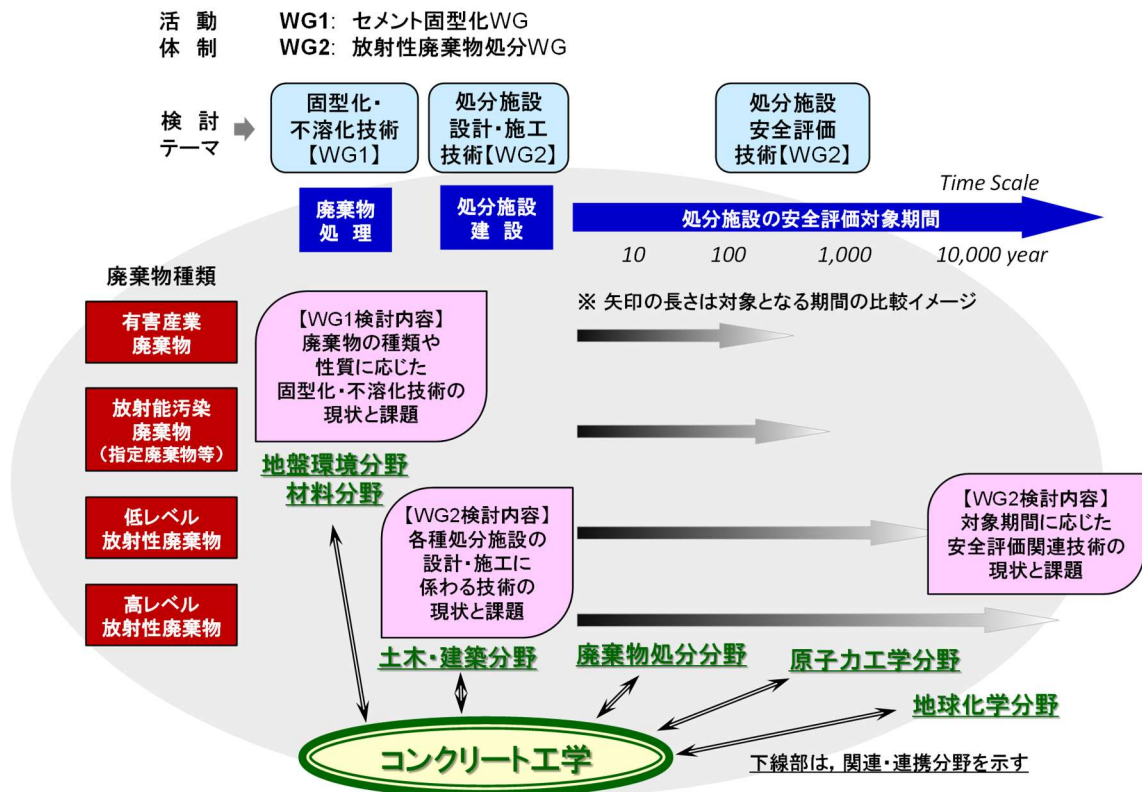
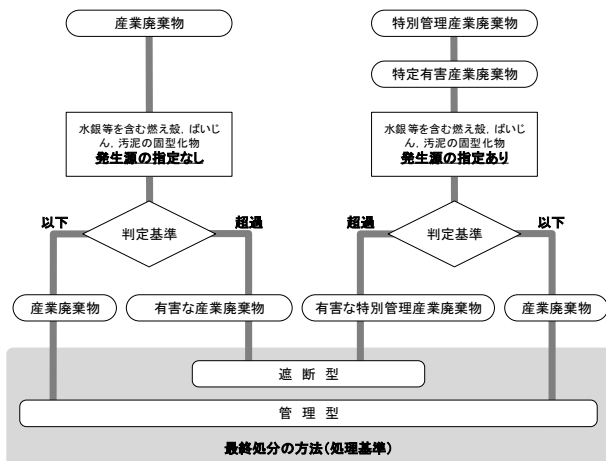


図-1 本研究委員会における活動体制と検討テーマの概要



図一 我が国における有害廃棄物の最終処分体系

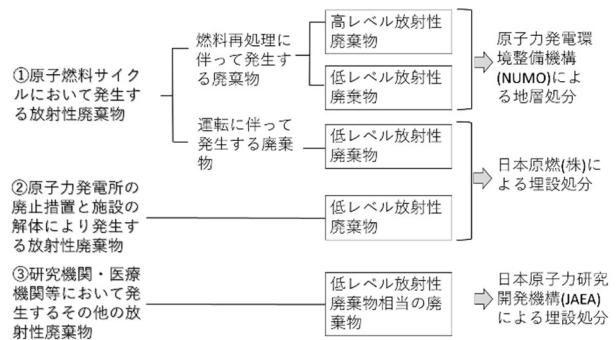
および遮断型処分場におけるコンクリートを用いた封じ込めに大分できる。セメント固化化による溶出抑制は有害廃棄物の無害化という観点から重要な要素技術であることから、本研究委員会において固型化や固化・不溶化処理について調査した。詳細は3章で述べる。

遮断型処分場について、1977年に総理府と厚生省から遮断の概念、および遮断のための仕切設備等について要点や設計例が示され、仕切設備の材料としては鉄筋コンクリートが最も適切であるとされた。1977年当初の基準における外周仕切設備の鉄筋コンクリートに求められる一軸圧縮強度は250 kg/cm²となっており、現在のレディミクストコンクリートに関するJIS A 5308を参照しても、十分に対応が可能である。また、水密性の観点からは、温度ひび割れや乾燥収縮、アルカリ骨材反応によるひび割れが懸念されることから、これらに配慮した適切な配合設計が必要となる。さらに、遠藤・山田²⁾は、これらのコンクリート材料に起因するひび割れに加えて、遮断型最終処分場に埋立処分されるばいじんの塩濃度が高いことに起因する内部鉄筋の腐食が大きな問題となることを指摘している。

また、東京電力福島第一原子力発電所事故において発生した特定廃棄物のうち、放射性Cs濃度が10万Bq/kg以上の埋立処分に際しては、仕切設備の基準が遮断型処分場と同等のものが必要とされている。その技術的要件については、国立環境研究所から技術資料が提示されている³⁾⁴⁾。

2.2 放射性廃棄物の処分

放射性廃棄物には、①原子燃料サイクルにおいて発生する放射性廃棄物、②原子力発電所の廃止措置と解体により発生する放射性廃棄物、③研究機関・医療機関等において発生するその他の放射性廃棄物がある。原子燃料サイクルとは燃料加工、発電、燃料の再処理を一つのループとするシステムであり、①原子燃料サイクルにおい



図一 3 我が国における放射性廃棄物の処分体系

て発生する放射性廃棄物には高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物がある。高レベル放射性廃棄物と一部の低レベル放射性廃棄物は原子力発電環境整備機構 (NUMO) による地層処分が検討されており、低レベル放射性廃棄物と②原子力発電所の廃止措置と解体により発生する低レベル放射性廃棄物は日本原燃 (株) により比較的浅い地中への埋設処分が検討され、一部の事業が実施されている。③研究機関・医療機関等において発生するその他の放射性廃棄物は日本原子力研究開発機構 (JAEC) による埋設処分が検討されている。放射性廃棄物の発生源、廃棄物種類、処分の実施主体をまとめて図一3に示す。

放射性廃棄物処分の研究は、原子力工学の専門家を中心に、地質学・地球化学・材料科学・土木工学などの数多くの分野の研究者や技術者が関わり、セメント・コンクリートにかかわる分野だけでも膨大な量の研究が実施されている。本研究委員会では、技術開発の推移を年表形式で整理して時間軸上での知見の体系化を図り、関連技術を理解するための「索引」の役割を与えることとした。詳細は4章で述べる。

3. 有害廃棄物を対象としたセメント固型化技術

「WG1:セメント固型化」は、セメントや石灰、セメント系固化材、中性固化材などの無機鉱物系の結合材(以下、セメント等)を用いた有害廃棄物等の処理に関わる分野(コンクリート工学、セメント化学、環境工学、地盤工学)の研究者で組織化し、有害廃棄物の最終処分や再資源化に先立って行われるセメントを用いた中間処理の現状と課題について文献調査を行うとともに、抽出された主な課題に関する近年の研究状況を報告書第2章としてとりまとめた。その構成を図一4に示す。

一口に有害廃棄物といっても、その性状や有害性によって処理の考え方、設計や施工のベースとなる関連法令や基準の内容は大きく異なる。このことは、廃棄物からの有害物質の移動抑制を目的として対象廃棄物とセメントを混合する処理を、「セメント固型化」「セメント固化」

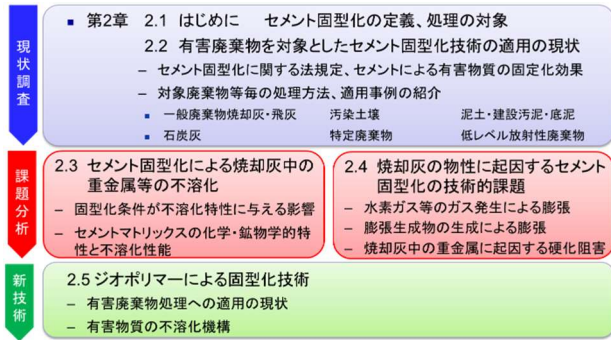


図-4 報告書第2章の構成

「固化・不溶化」など様々な呼び方をすることからも伺える。はじめに、現状調査として「セメント固型化」「セメント固化」等の処理の基本概念を改めて定義し、対象となる廃棄物毎に、処理の基本的な考え方、関連法令や基準、処理の事例、技術的課題をそれぞれ文献調査によってとりまとめた。次に、主たる処理対象となる焼却灰特有の複雑な化学・鉱物学的特性による 1) 重金属等の固定・不溶化効果や硬化特性に及ぼす影響、2) 固化体の膨張に起因する健全性への影響、の2点を主たる技術的課題として抽出し、影響要因や影響の度合いを定量的に明らかにする観点から近年の研究状況をレビューしている。最後に、有害廃棄物処理に関係する新たな技術動向として、適用が拡大しつつあるジオポリマー固型化技術について、有害物質の固定化機構、ならびに固定化効果と配合の関連性に着目して最新の知見を整理した。以下に各項目の報告内容の概要を示す。

3.1 セメント・コンクリート技術を用いた有害廃棄物処理の定義と適用範囲

セメント固型化は、2.1 で述べたように、廃棄物の処理

及び清掃に関する法律施行令において判定基準に適合しない焼却灰や汚泥を管理型処分場に埋立処分する際に必要な処理として位置付けられる。有害物質溶出抑制の機構は、半固体状廃棄物や比表面積が大きい細粒分主体の飛灰等の有効間隙率を小さくすることで、透水性を低下させて有害物質の溶出を拡散律速によって遅延させることである。よって、金属等を含む廃棄物の固型化に関する基準（昭和52年3月14日環境庁告示5号）においても、一軸圧縮強さや固型化物の形状（比表面積）が処理基準として設定されている。したがって、放射性物質のように不溶化効果が期待できない有害物質に対しても一定の溶出抑制効果が期待できる⁹⁾。対して、「セメント固型化」は、「重金属が溶出しにくい化学的に安定した状態にするために十分な量のセメントと均質に練り混ぜるとともに、適切に造粒し、又は成形したものを養生して固型化する方法」を「セメント固化」として平成4年7月3日厚生省告示第194号において定義されている。よって、基本的には重金属を化学的に不溶化することに重きがおかれる。

「セメント固型化」「セメント固化」は、燃え殻、煤じん、石炭灰、汚泥・底質、指定廃棄物、低レベル放射性廃棄物といった様々な廃棄物の有効利用や最終処分のための中間処理として適用されている。本稿では詳細の説明は割愛するが、報告書内では図-5 に示す廃棄物について、セメント・コンクリート技術を用いた処理の基本的な目的と原理、関連法令や基準、処理の事例と技術的課題を概観している。

図-5 中の廃棄物のうち、特定廃棄物は、東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い環境中に放出された放射性物質によって汚染された廃棄物のうち、放射能が8,000



図-5 セメント固型化処理の対象となる廃棄物と関連法令等

Bq/kg を超える、特定の地域から排出された特定品目の廃棄物である「指定廃棄物」と、汚染廃棄物対策地域（楢葉町、富岡町、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村及び飯館村の全域並びに田村市、南相馬市、川俣町及び川内村の区域のうち旧警戒区域及び計画的避難区域であった区域）内から排出された「対策地域内廃棄物」を指す。このうち、

- 1) 対策地域内廃棄物の可燃物を焼却する際に発生する焼却灰のうち、放射性 Cs 濃度が 10 万 Bq/kg 以下であり、Cs-137 の溶出量が 150 Bq/L 以上のものを埋立処分する場合
- 2) 放射性 Cs 濃度が 10 万 Bq/kg 以下の指定廃棄物を管理型産業廃棄物処分場もしくは一般廃棄物処分場に埋立処分する場合

にセメント固型化処理を行うことが求められる⁹⁾。

3.2 焼却灰をセメント固型化する際の技術的課題

(1) 焼却灰の鉱物学的特性が固定・不溶化効果や硬化特性に及ぼす影響

焼却灰のセメント固型化物からの重金属の溶出は、概ね以下の 3 点に強く支配される。

- ・固型化物の表面積や構造的強度
- ・溶出試験の条件、特に pH
- ・セメント相に取り込まれた重金属の性状ないし状態

重金属のセメント相への取り込みはセメント成分の水和反応と並行して行われるが、水和反応およびそれに伴う固型化（硬化ないし凝結）の進展に及ぼす要因は図-6 のようにまとめられる。

例えば飛灰から溶出する成分は、灰の種類や（主灰、飛灰）や焼却炉の種類（ストーカー、流動床）に拠らず、カルシウム、ナトリウム、塩素などであるが、これらの溶出成分はセメントの硬化を促進させる。一方、Zn や Pb などの重金属は、セメントの硬化を遅延させる⁷⁾。特に Zn は、 C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) の水合反応を遅延すると報告されている⁸⁾。その際、特に硫酸イオン存在下では無水水和アルミネート C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) と二水石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) の反応に伴うエトリンガイトの生成を相対的に促し、セメント固型化物の構造的強度（圧縮強度など）を

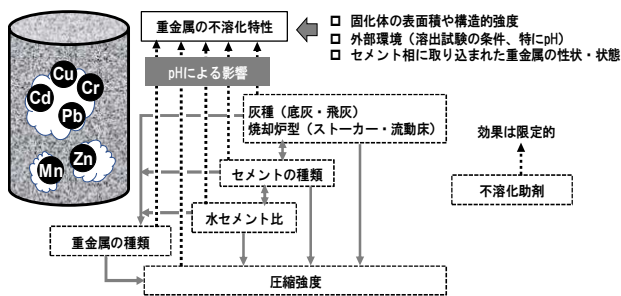


図-6 重金属の不溶化特性に影響を及ぼす要因

減少させる⁹⁾。このように、焼却灰や飛灰中には硬化に対して相反する効果（硬化の促進および遅延）を示す成分を含んでおり、どちらが卓越するかは灰種に強く依存する。他にも、セメントの種類、水セメント比、不溶化助剤の添加、水和物の種類により不溶化効果が大きく異なるため、体系的な配合設計手法を確立することが困難であることを文献調査に基づいて指摘している。

(2) 固型化物の体積変化による健全性への影響

焼却灰にセメント固型化を適用する場合、焼却灰の化学組成に由来する固型化物の体積膨張とそれに伴うひび割れや崩壊の発生に留意する必要がある。

膨張機構は 2 つに大分される。ひとつは、焼却灰中の金属 Al や金属 Zn がアルカリ溶液中で還元されることによる水素ガス発生であり¹⁰⁾、膨張や多孔化が練混ぜ後、数時間程度で発生する。もうひとつは、(1) にも示した膨張性鉱物や膨張性ゲルの生成であり、数十日以上長期に渡って進展する膨張である。特に、前者は焼却灰の処理特有の現象であり、金属 Al 量と膨張量には相関がみられること、水洗処理による事前の Al の還元、膨張抑制剤によって金属 Al 表面に酸化皮膜を形成し不動態化する方法が水素ガス発生抑制に有効であることなどを文献調査によって明らかにしている。

3.3 ジオポリマー技術による有害物質の不溶化

3.2 で示したようにセメントの水和の進行を抑制する成分を含有する物質やセメントコンクリートの耐久性に悪影響を及ぼす環境に対しても、ジオポリマー固化体では安定的に性能を発現するケースがあり、近年は放射性廃棄物の処理への適用などが検討されている。ジオポリマーはアルミナシリカ粉末とアルカリ溶液の縮重合反応で生じる硬化体の総称である。アルミノシリケートを含有するアルカリ活性材料（例えば、メタカオリン、フライアッシュ）に、水ガラスあるいは NaOH 溶液などのアルカリ刺激剤を含む溶液を混合し、常温養生あるいは給熱養生を行って硬化する。ジオポリマーによる有害物質の固定化機構は表-2 に示す通りであるが、報告書においては、有害物質毎の固定化機構の評価事例、Si/Al 比や NaOH 濃度といった配合設計や処理温度が有害物質の不溶化効果に及ぼす影響を評価している。

表-2 ジオポリマーによる有害物質の固定メカニズム

イオン交換	<ul style="list-style-type: none"> ・ジオポリマー中の四面体構造における 4 配位 Al の電荷補償に必要な Na^+、K^+ とのイオン交換 ・局所的なゼオライト細孔構造によるイオン交換
化学的結合・物理的封じ込め	<ul style="list-style-type: none"> ・アルミノシリケート構造内の共有結合 ・末端の非架橋酸素と重金属イオンとの化学配位 ・物理的封じ込め
難溶性塩の生成	<ul style="list-style-type: none"> ・重金属の水酸化物、炭酸化物、ケイ酸塩、アルミネート塩の生成

4. 放射性廃棄物処分関連のセメント・コンクリート技術

放射性廃棄物処分は、施設の建設や操業に長時間を要することに加え、閉鎖後の超長期の挙動も評価すべき特殊な事業となる。よって、最新の科学的知見に基づくとともに、説明性や透明性を確保した検討が特に重要とされ、研究成果や検討内容の多くは、各事業者や研究機関の報告書等で公開されている。しかしながら、現代社会に溢れる様々な情報の中から膨大な公開情報を体系的に理解し、全体像や詳細を把握することは容易ではない。

そこで「WG2：放射性廃棄物処分」では、放射性廃棄物処分に少しでも関心を持つセメント・コンクリートの研究者や技術者が、放射性廃棄物処分の分野における研究や技術開発の経緯の全体像を俯瞰的に理解し、自らの関心を深めるための情報収集を進めるうえでの助けとなる資料の作成を目指すこととした。

4.1 放射性廃棄物処分に関わるこれまでの事業や技術開発の推移

(1) 趣旨説明と調査対象

放射性廃棄物処分の分野における研究や技術開発の経緯の全体像を俯瞰的に理解するための助けとして、関連する事業や技術開発の推移を年表形式で整理した。まず、主な調査対象とした放射性廃棄物処分に関わる機関を説明した。次に、放射性廃棄物処分に関わる具体的な事業や技術開発の推移を機関ごとに年表形式で示し、関連技術の索引の役割を与えた。この年表上の重要なイベントに関しては、解説記事を掲載した。解説記事にはイベントの概要に加えて、原典の所在を示し、必要があれば読者が詳細を確認できるようにした。

ここで、情報の収集や整理は放射性廃棄物処分に関する事業者や研究機関ごとに行った。これは、時間軸上での情報の整理を容易とするためのものであるが、年表間での情報の流れが不明確になる問題がある。そこで、放射性廃棄物事業全体の流れにおける主要イベントを年表上（最下段）に追記することで、全体の中での位置づけを明確にすることとした。なお、調査対象の事業者や研究機関は委員の所属や情報収集の容易さを踏まえて行ったため、すべての関係機関が網羅できていない。たとえば原子力規制委員会原子力規制庁においても、放射性廃棄物処分に関する委託事業を実施し、その成果をホームページ上で公開しているが¹¹⁾、今回は情報整理ができていない。

(2) 各年表の主な記載事項

(I) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)・原子力環境整備促進・資金管理センター (RWMC) で実施した資源エネルギー庁からの委託事業

日本原子力研究開発機構 (JAEA) と原子力環境整備促進・資金管理センター (RWMC) にて、主に経済産業省・

資源エネルギー庁の委託事業として実施された、セメント系材料に関する研究の系譜を紹介した (図-7)。

JAEA は日本で唯一の原子力に関する総合研究開発機関、RWMC は放射性廃棄物処分に関する調査研究を専門に実施する機関である。なお、これらの組織のこれまでの改組や名称変更については、年表の下段に示した。

年表において紹介する内容は、地層処分における TRU 等放射性廃棄物の地下処分施設 (人工バリア) の長期的な挙動評価及び廃棄物を収納するパッケージ容器、塩水系の地下水の影響を踏まえた処分技術に関する研究について、低レベル放射性廃棄物の処分における主に中深度処分の地下施設の施工及び性能の確認等に関わる研究についてである。なお、長期挙動評価の研究は、参考となる関連研究についても紹介した。

(II) JAEA 安全研究センターで実施した地層処分に関する委託事業

JAEA 安全研究センターは、原子力安全規制行政への技術的支援及びそのための安全研究を実施することを目的に設置された組織である。そのため、上記資源エネルギー庁からの委託事業には関与せず、主に規制行政機関 (原子力安全・保安院、原子力規制庁等) からの委託事業を実施している。

年表において紹介した内容は、高レベル放射性廃棄物の地層処分において懸念されている、セメント系材料との接触に起因するベントナイト系緩衝材の性能 (低透水性) 劣化に係るものであり、平成 13~26 年度に実施したセメント系材料に係る研究およびベントナイト系材料に係る研究についてである。両研究とも、試験により取得したデータ・知見を基に評価モデルの整備が実施された。

(III) 日本原燃 (株) における低レベル放射性廃棄物処分の人工バリアに関する研究開発 (低レベル放射性廃棄物処分の実施に関する事業)

日本原燃 (株) は、原子燃料サイクルの確立を目的に設立された、主に電力会社の出資による非上企業であり、原子燃料サイクル施設の操業に関する事業の実施主体である。

原燃サイクル事業のうち、低レベル放射性廃棄物埋設センターでは、全国の原子力発電所から排出される低レベル放射性廃棄物の埋設処分を行っており、また、現行の廃棄体 (放射能レベルの比較的低い廃棄物) よりも放射能レベルの高い廃棄体 (放射能レベルの比較的高い廃棄物) の処分の成立性検討に関する調査・研究が進められている。

年表では、これまで日本原燃が実施してきた、低レベル放射性廃棄物埋設施設設計・評価にかかる研究について紹介した。人工バリアに関する研究については、セメント系材料とベントナイト系材料の 2 つの材料につい

て実施されており、また、対象とする廃棄物が放射能レベルの比較的低い廃棄物である浅地中ピット処分（L2）と放射能レベルが比較的高い廃棄物である中深度処分（L1）に大別されることから、それぞれのセメント系材料とベントナイト系材料に区分して、実施された研究の概要を解説した。さらに、L1においては、金属腐食による影響が人工バリア機能に及ぼす影響が大きかったことから、金属腐食膨脹に関する影響評価に関する研究についてもあわせて解説した。

(IV) 原子力発電環境整備機構（NUMO）関連の技術開発（高レベル放射性廃棄物・TRU等廃棄物の地層処分事業）

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、高レベル放射性廃棄物および地層処分相当の低レベル放射性廃棄物（TRU等廃棄物）の地層処分の実施主体である。JAEA、RWMC等の関係研究機関では、地層処分技術に関連した基盤的な研究開発が実施されている一方で、NUMOは、設立以来、より安全で実用性の高い技術を目指し、個々の地層処分技術の信頼性を一層高めるための技術開発が進められている。

年表では、これまで NUMO が実施してきた、セメント・コンクリート分野に関連する地層処分場の工学技術、および、性能評価技術について紹介した。工学技術に関しては、地層処分場のセメント系材料への低アルカリ性セメントの適用性に関する検討、セメント系材料利用に関する設計検討の成果を紹介した。性能評価技術に関しては、処分場において用いるベントナイト系緩衝材の長期的なバリア性能に対してセメント系材料が与える影響の評価に係る技術開発の成果について紹介した。

(V) JAEAによるセメント固化体の研究事例

1966年に日本原子力発電（株）東海発電所1号機の営業運転が始まり、1970年代においては放射性廃棄物の安全かつ経済的な処理・処分法の確立が喫緊の課題であった。発電所から排出される低レベル放射性廃棄物である固体廃棄物および濃縮廃液は、ドラム缶内でセメントを用いて固化し、海洋に投棄することが検討されていた。このため、当時の廃棄物は海洋投棄を前提に技術開発が進められていた。その後、1985年に海洋投棄が一時停止され（第9回ロンドン条約締約国会議）、1993年に禁止されるに至った（第16回ロンドン条約締約国会議）。ここでは、主にJAEA（旧、日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団、核燃料サイクル機構）が行った海洋処分から陸地処分に変更されるころまでの、いわゆる、初期の研究動向についてとりまとめた。

(VI) 電力中央研究所の放射性廃棄物処理・処分に係るセメント・コンクリートの研究

電力中央研究所は1951年に創設された電気事業共同

の研究機関である。科学、工学、社会科学等の種々の幅広い分野の研究を実施し、電気事業を技術的に支える役割を担っている。電力中央研究所では、すべての放射性廃棄物を対象として処理・処分技術に関する研究が進められており、特定の廃棄物を対象としたものではなく、共通の課題となる検討が多い。そこで、年表は研究トピックスごとに整理することとし、調査対象は公開されている「電力中央研究所報告」から放射性廃棄物処分に係るセメント・コンクリートの研究報告を抽出したものとした。

4.2 放射性廃棄物処分に関連した研究動向

前項で整理した年表は、過去から現在までの技術情報を理解するものであり、未来の議論のためには、最新の研究開発の動向に注視する必要がある。放射性廃棄物処分の分野におけるセメント・コンクリートに関する研究の動向は、国際会議や学術雑誌における研究発表から理解することができるが、土木・建築分野におけるセメント・コンクリートの一般的な国際会議や学術雑誌とは異なる会議や雑誌での研究発表も多い。そこで、国際会議や海外の学術雑誌の概要、各国の放射性廃棄物処分に関連した研究動向を紹介した。

放射性廃棄物処分量の国際会議では、アメリカでの2つの会議（Scientific Basis for Nuclear Waste Management Symposium および WM Symposia）が有名である。WM Symposiaにおけるセメント・コンクリートに関する研究発表について検索すると、1985年ごろからセメント・コンクリートに関する研究が増加し、内容を大別すると、セメント固化型29%、廃棄体化（容器を含む）27%、移行抑制（人工バリア関連）16%、コンクリート廃棄物16%、施設構造体5%、耐久性（乾燥、ひび割れ、放射線照射の影響）5%、不溶化3%となっていた。

近年は、ヨーロッパ、特にフランスやスイスを中心に、放射性廃棄物処分ににおけるセメント利用に関連したテーマを主題に含む国際会議が定期的に開催され、放射性廃棄物処分を直接には対象としない研究も含めた幅広い研究発表が行われ、情報交流の場となっている。このうち NUWCEM2018¹²⁾ および 5th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste / Cement Interactions¹³⁾ に関しては、各国の放射性廃棄物処分に関連した研究動向について、関連する学術論文の文献リストともに報告した。

さらに、特にC-S-Hなどに関する研究は放射性廃棄物処分量でも注目されていることから、セシウム（Cs）、ストロンチウム（Sr）ならびにウラン（U）などの放射性物質のC-S-Hへの固定化に関する熱力学的相平衡計算を用いた研究例を紹介した。

(I) JAEA・RWMCにおいて実施した経済産業省・エネルギー資源庁からの委託事業年表

1986以前 (-S61)	1987-2000 (SG2-H12)	2001-2005 (H13-H17)	2006-2010 (H18-H22)	2011-2015 (H23-H27)	2016-2020 (H28-R2)
<p>低レベル放射性廃棄物</p> <p>放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H62-H13)</p> <p>(I)-A-1 コンクリート構造物の止水性・ガス透過性/大型サロ試験</p> <p>RWMC</p>	<p>低レベル放射性廃棄物処分</p> <p>地下空洞型処分施設性能確認試験 (H14)</p> <p>(I)-B-1 地下空洞型処分施設閉鎖技術検証試験 (H25-H26)</p> <p>(I)-B-2 地下空洞型処分施設機能確認試験 (H27-H30)</p>	<p>中深度処分</p> <p>地下空洞型処分施設性能確認試験 (H17-H24)</p> <p>(I)-B-1 地下構造物の施工/性能確認</p>	<p>低レベル放射性廃棄物</p> <p>地下空洞型処分施設性能確認試験 (H25-H26)</p> <p>(I)-B-2 地下構造物のモニタリング</p>	<p>低レベル放射性廃棄物</p> <p>地下空洞型処分施設性能確認試験 (H25-H26)</p> <p>(I)-B-2 地下構造物のモニタリング</p>	<p>低レベル放射性廃棄物</p> <p>地下空洞型処分施設性能確認試験 (H27-H30)</p>
<p>TRU等放射性廃棄物</p> <p>TRU等放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H14-H16)</p> <p>(I)-C-1 コンクリート容器と赤堀モルタルの開発</p> <p>RWMC</p>	<p>廃棄物容器</p> <p>TRU等放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H14-H16)</p> <p>(I)-C-1 コンクリート容器と赤堀モルタルの開発</p> <p>RWMC</p>	<p>TRU等放射性廃棄物</p> <p>TRU等放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H17-H22)</p> <p>(I)-E-1 第1次TRUレポート (H12) 以降の成果の取りまとめ</p> <p>JAEA</p>	<p>TRU等放射性廃棄物</p> <p>TRU等放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H18-H22)</p> <p>(I)-E-2 ※JAEA-Researchより毎年発行された報告書より HFSCを中心とした地下水における化学変化評価に関する試験・モデル化</p> <p>JAEA</p>	<p>TRU等放射性廃棄物</p> <p>TRU等放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H23-H27)</p> <p>(I)-F-1 セメント材料影響評価技術高度化開発 (H23-H26)</p> <p>(I)-F-2 処分システム評価検証技術開発 (H27-H29)</p> <p>(I)-F-3 TRU等放射性廃棄物処分に関する技術開発 (H30)</p>	<p>TRU等放射性廃棄物</p> <p>TRU等放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H28-R2)</p> <p>(I)-D-1 TRU等放射性廃棄物処分に関する技術開発 (H30)</p> <p>(I)-F-3 地下水による化学的変質に関する試験と予測モデルの開発</p>
<p>長期化学変質</p> <p>人工VUP長期性能確認試験 (H14-H18)</p> <p>(I)-G-1 地下水による化学的変質挙動に関する試験</p> <p>RWMC</p>	<p>長期化学変質</p> <p>人工VUP長期性能確認試験 (H14-H18)</p> <p>(I)-G-1 地下水による化学的変質挙動に関する試験</p> <p>RWMC</p>	<p>長期化学変質</p> <p>人工VUP長期性能確認試験 (H19-H24)</p> <p>(I)-G-2 ペントナイト接触部の試験、アラゴ評価、長期予測手法の構築</p> <p>JAEA</p>	<p>長期化学変質</p> <p>人工VUP長期性能確認試験 (H25-H29)</p> <p>(I)-G-3 ペントナイト接触部と熱変質に関する試験、拡散係数予測</p> <p>JAEA</p>	<p>長期化学変質</p> <p>人工VUP長期性能確認試験 (H25-H29)</p> <p>(I)-G-3 ペントナイト接触部と熱変質に関する試験、拡散係数予測</p> <p>JAEA</p>	<p>長期化学変質</p> <p>人工VUP長期性能確認試験 (H27-H30)</p> <p>(I)-H-1 沿岸部処分システム高度化開発 (H27-H30)</p> <p>JAEA</p> <p>RWMC</p>
<p>高レベル/TRU等放射性廃棄物</p> <p>高レベル放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H62-H13)</p> <p>(I)-A-1 コンクリート構造物の止水性・ガス透過性/大型サロ試験</p> <p>RWMC</p>	<p>高レベル/TRU等放射性廃棄物</p> <p>高レベル放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H62-H13)</p> <p>(I)-A-1 コンクリート構造物の止水性・ガス透過性/大型サロ試験</p> <p>RWMC</p>	<p>高レベル/TRU等放射性廃棄物</p> <p>高レベル放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H14-H16)</p> <p>(I)-C-1 コンクリート容器と赤堀モルタルの開発</p> <p>RWMC</p>	<p>高レベル/TRU等放射性廃棄物</p> <p>高レベル放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H18-H22)</p> <p>(I)-E-1 第1次TRUレポート (H12) 以降の成果の取りまとめ</p> <p>JAEA</p>	<p>高レベル/TRU等放射性廃棄物</p> <p>高レベル放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H23-H27)</p> <p>(I)-F-1 セメント材料影響評価技術高度化開発 (H23-H26)</p> <p>(I)-F-2 処分システム評価検証技術開発 (H27-H29)</p> <p>(I)-F-3 TRU等放射性廃棄物処分に関する技術開発 (H30)</p>	<p>高レベル/TRU等放射性廃棄物</p> <p>高レベル放射性廃棄物処分高度化システム検証試験 (H28-R2)</p> <p>(I)-D-1 TRU等放射性廃棄物処分に関する技術開発 (H30)</p> <p>(I)-F-3 地下水による化学的変質に関する試験と予測モデルの開発</p>

図-7 JAEA・RWMC で実施した資源エネルギー庁からの委託事業年表 (年表の例示)

5. おわりに

本委員会は学際的内容であることから、構成委員の1/3が学会会員外から構成されたという特徴的なものであった。東日本大震災に伴う原子力発電所事故による環境汚染が発生し、すでに10年が経過した。放射性物質による環境汚染対策には、環境分野と原子力分野の知見の融合が必要であり、さらにセメント固型化処理や処分施設建設には最新のセメント・コンクリート技術を反映させる必要がある。事故後の環境回復に関わる研究は国立環境研究所が主導してきたが、改めて環境と原子力とセメント・コンクリートを結び付け、技術の再整理を行ったものが本研究委員会である。学会の理解と、会員外の活動に参加いただいた専門家が研究会の要点の一つであった。

FS段階では、放射性廃棄物処分に関して、処分施設の建設と物質移行予測を含む安全評価に着目した活動も考えたが、両者は一体であるため分離は難しいこともあり、本委員会では4章に示したように膨大な研究の系譜をまとめた。従来、このようなまとめは存在せず、有意義な技術史総括と言える。

また、廃棄物処理・処分において、用語があいまいなまま用いられている現状を考え、あえて用語と技術的内容を関連付ける形での整理を行った。成果報告が適切な技術用語の使用の指針となる。

最後には国際的研究動向を紹介し、特に材料面から、放射性廃棄物処分で用いられる「分配係数」に対し、少なくともコンクリートでは固液間のイオン分配が任意の条件で計算できる相平衡モデルについて特に説明を加えた。固液間の元素分配を表現する手段に関しては議論が残るところであるが、それぞれの限界と工学的役割の観点から今後の課題を提起できた。

これらの検討項目は、東日本大震災を契機に考えた委員長の問題意識によるところが大きい。各委員全員の膨大な労力をもとに、幹事団が極めて精力的に方向を制御し、情報をまとめ上げたことによってはじめて成果となったものである。関連分野の今後の研究開発活動に活用されることを期待する。

参考文献

- 1) Nanocem, <https://www.nanocem.org/about-us>
- 2) 遠藤和人, 山田正人: 埋立廃棄物の封じ込め機能と

その維持, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.27, No.1, pp.18-26, 2016

- 3) 国立環境研究所: 汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場(遮断型構造)に用いるコンクリートに関する技術資料, <https://www.nies.go.jp/whatsnew/2014/20141203/20141203.html>, 2020年10月15日閲覧
- 4) 国立環境研究所: 放射性物質汚染廃棄物のためのコンクリート容器について, <http://www.nies.go.jp/whatsnew/2017/201703XX/201703XX-1.html>, 2020年10月15日閲覧
- 5) 遠藤和人: 放射性物質汚染廃棄物の最終処分の現状と今後の展開, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.30, No.1, pp.39-48, 2019
- 6) 大山将, 橘敏明, 上村和也, 三溝達也: 特定廃棄物セメント固型化処理施設の性能確認, 第8回環境放射能除染研究発表会要旨集, p.53, 2019
- 7) Fernandez O.I., Chacon E., Irabien A.: Influence of lead, zinc, iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 31, 1213-1219, 2001
- 8) Kolářová I., Šiler P., Šoukal F.: The influence of zinc on the hydration and compressive strength of Portland cement, *Advanced Materials Research*, 1000, 43-46, 2014
- 9) Alba N., Vazquez E., Gasso S., Baldasano J.M.: Stabilization/solidification of MSW incineration residues from facilities with different air pollution control systems. Durability of matrices versus carbonation, *Waste Management*, 21, 313-323, 2001
- 10) 中山卓也ほか: 焼却灰のセメント固化試験試験手引書, 日本原子力研究開発機構, 2015
- 11) 原子力規制委員会: 令和元年度委託調査費に関する成果物の公表, https://www.nsr.go.jp/nra/chotatsu/yosayosansh/itaku_houkoku_r1.html
- 12) Proceedings of NUWCEM 2018 – International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Wastes, Avignon, France, 2018
- 13) Book of Abstracts of 5th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste / Cement Interactions, Karlsruhe, Germany, 2019