

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

平成 27 年 2 月

国立環境研究所

<はじめに>

東日本大震災に伴う原子力発電所事故により、東日本の広域が放射性物質で汚染され、事故由来の放射性物質に汚染された廃棄物（以下「放射性物質汚染廃棄物」という）が大量に発生することとなった。この対処のため制定された放射性物質汚染対処特別措置法（以下、「特措法」という）では、放射性物質汚染廃棄物はいくつかの種類に分類され、汚染廃棄物対策地域以外で発生したもので放射能濃度レベルが 8000Bq/kg を超えるものを指定廃棄物とし、このうち福島県外の指定廃棄物は鉄筋コンクリートを用いた遮断型構造の最終処分場で処分することが検討されている[1][2]。

指定廃棄物には、焼却灰、下水汚泥、浄水発生土、農林業系副産物などがある。このうち、減容化のため可燃物を焼却した際に発生する焼却灰には焼却主灰と焼却飛灰があり、主灰－飛灰間の分配により、飛灰には元の廃棄物と比較して 20～30 倍程度の放射性セシウムが最終的に濃縮される。この焼却飛灰（以下、ここでは「汚染焼却飛灰」という）は、その他の焼却主灰や浄水発生土等とは異なり放射性セシウムの溶出率が高く、水が作用すると放射性セシウムが漏出するリスクがある。さらに汚染焼却飛灰は指定廃棄物のかなりの割合を占めることから、最終処分においては特に注意が必要な廃棄物である。ただし、下水汚泥の焼却飛灰は放射性 Cs の溶出率は低い。

指定廃棄物の最終処分は特措法などの関連法規に従い、環境省から安全性確保の基本的な考え方が例示され、そこには安全性確保における「遮断」「遮蔽」「安全確認」の機能の必要性が明示されている[3][4][5]。最終処分場を遮断型構造で建設する場合、放射性セシウムの溶出性が高いという汚染焼却飛灰の特性を考慮して、鉄筋コンクリート構造物内で指定廃棄物を長期間にわたり安全に管理することが必要である。安全で合理的な鉄筋コンクリート製の遮断型構造を有する最終処分場の建設・維持管理のためには、コンクリート工学および関連する科学的知見・技術を集積し、これらを適用・活用して、具現化しなければならない。

そこで、(独) 国立環境研究所（以下、「国環研」という）では、従来の廃棄物最終処分場の構造や放射性物質汚染廃棄物の特性等に関する各種知見・経験を有する研究者及びコンクリート工学の専門家から構成される研究会（汚染廃棄物等最終処分場へのセメント・コンクリート技術適用に関する研究会）を設け、汚染焼却飛灰の持つ様々な特性を十分に踏まえた上で、最終処分場へのコンクリート技術適用に関して、主に構造面・材料面に着目した技術的な議論・検討を行ってきた。

本技術資料は、これまでの研究会での検討結果をもとに、放射性物質に汚染した廃棄物処分に関わるコンクリート構造物に対する技術的要件をとりまとめたものであり、最終処分場の建設において考慮する点を抽出し、事例検討を行い、さらに建設に係わる基本的な考え方を示した。実際の設計・施工にあたっては、本技術資料で提示した事例や考え方を参考にして、安全かつ合理的なコンクリート構造物を建設することが望ましい。

本技術資料は、以下のように三部構成としている。

第Ⅰ部：汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）の鉄筋コンクリートについて考慮する点

第Ⅱ部：各種影響要因の検討

第Ⅲ部：汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）における鉄筋コンクリートの設計・施工・維持管理の考え方（案）

第Ⅰ部では、まず汚染焼却飛灰等の最終処分場（遮断型構造）建設の根拠となる関連法規類を整理した。環境省が説明に用いてきた事例^{1,2)}について、最終処分場の特徴を明確にし、その特徴に対応する鉄筋コンクリートについて考慮する点を抽出した。すなわち、関連法規で示されている最終処分場（遮断型構造）が具備すべき機能を説明し、その機能を実現するために最終処分場を構成する鉄筋コンクリートの性能の観点から、特に今回の最終処分場建設に特有の考慮すべき点を明確にした。

第Ⅱ部では、第Ⅰ部で挙げた鉄筋コンクリートについて考慮すべき点に関連して、本研究会で行ったコンクリートに関する事例検討の成果を説明した。まず、焼却飛灰からの吸湿・潮解現象による高濃度塩水の発生を検討した上で、コンクリートの温度および乾燥収縮ひび割れ、耐久性、高濃度塩水の作用と施工における品質確保に関する検討結果を記載した。事例検討では、第Ⅰ部で示した考慮する点を考慮すると、一般的に用いられる普通セメントコンクリートでは性能が不十分と考えられたため、対策としてフライアッシュと膨張材を用いたコンクリートを取り上げ、両者を比較検討した。第Ⅱ部の各事例検討の詳細については、適宜参考資料を用いながら説明し、コンクリート以外にも覆土、ベントナイト、指定廃棄物が入ったフレキシブルコンテナ間の間詰め方法についても示した。

第Ⅲ部では、第Ⅱ部での個別のコンクリート技術の検討を踏まえ、最終処分場に求められる遮断、遮蔽、安全性の確認の各機能とこれらを実現するための鉄筋コンクリートの耐久性などの性能を明らかにしたうえで、それを実現できる、設計と安全性を確認する方策、考慮すべき作用と対策、施工時の留意点などの重要な点について考え方を示した。特に、予期することが難しい汚染焼却飛灰から発生する可能性のある高濃度塩水の作用を偶発作用の一つとし、マネジメントによる対応も含め、整理して記載した。ここで検討した内容や考え方は、中間貯蔵施設で使用するコンクリートにも活用できると考えている。

本技術資料は、2012年11月7日から2013年12月26日の間に10回の研究会を持ち、案をまとめ、2014年7月14日と9月19日に関連分野の専門家4名による外部評価を行い、研究会委員の尽力により完成させたものである。関係者各位に謝意を表す。また、関連する実験的検討は進行中であり、まとめ次第、適宜、参考資料として追加する予定である。

今後、国において実施される放射性物質汚染廃棄物の最終処分場の設計・施工・維持管理等に本技術資料が適宜活用されることにより、放射性物質汚染廃棄物の安全かつ合理的な最終処分の推進の一助となることを期待する。

独立行政法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター センター長
委員長 大迫 政浩

引用文献

- [1] 環境省、指定廃棄物の今後の処理の方針（平成 24 年 3 月 30 日）、
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/memo20120330_waste-shori.pdf
- [2] 環境省災害廃棄物安全評価検討会検討会（第 14 回）（平成 24 年 8 月 20 日）、資料 4
指定廃棄物の最終処分場等の構造の考え方について、
http://www.env.go.jp/jishin/attach/haikihyouka_kentokai/14-mat_1.pdf
- [3] 平成 25 年 2 月 28 日環境省告示第 15 号、特定廃棄物の埋立処分の場所に係る外周仕切
設備の要件、http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/an25_015.pdf
- [4] 環境省、放射性物質対策、指定廃棄物の最終処分場の候補地提示、栃木県、9 月 14
日、指定廃棄物の最終処分場候補地選定等に係る市町説明会、栃木県における指定廃棄物
の最終処分場候補地について（2014 年 9 月 15 日閲覧）
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/waste_fds-candidate_tochigi120903-01.pdf
- [5] 環境省、指定廃棄物処分等有識者会議（第 2 回）、資料 1-1 最終処分場等の構造・維
持管理による安全性の確保について、平成 25 年 4 月 22 日
http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_other/conference/pdf/conference_02_01.pdf

外部評価委員会からのコメント

「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（案）」に関する外部評価は、個別委員による専門的内容の打合せと、2回の全体委員会により行った。鉄筋コンクリート構造、コンクリート材料、廃棄物処分、および環境地盤工学の専門家により原案を精読した。初期の原案では、全体構成を見た時に何を目的としているのかがわかりにくいこと、多岐に渡る専門的理解が必要な内容に対して各分野の非専門家が読んだ際に意味が不明確な部分があることと、文章表現が読者にとって理解しやすいものでないことなどが指摘され、まずは読みやすい技術資料へ改定する作業をお願いした。ただし、個別分野における技術的課題の検討は綿密になされており、分かりにくい部分などは、その都度、直ちに適切に修正された。そうした作業で、現在の特異な状況での事業に必要な用語の統一、本事業の関係者に十分理解しえる説明、3部からなる各部の関連性の明確化などについて相応の努力をしていただき、最終案の状況まで改善された。関係各位のご努力に敬意を表したい。

さて、近年あらゆる分野でリスクマネジメントが求められるようになってきている。本技術資料では、放射性物質に汚染した焼却飛灰などの廃棄物を最終処分する鉄筋コンクリート製の遮断型処分場に関するものであるが、この施設についてもこの最新のリスクマネジメントの考えが導入されなければならない。

ここで従来の体系をリスクマネジメントから考えてみる。鉄筋コンクリート製の遮断型最終処分場が最後に建設されたのは1990年ごろとされるが、当時は鉄筋コンクリートへの塩害とアルカリ骨材反応の問題が顕在化し、その抑制対策がようやく制定されたばかりであった（1987年制定）。廃棄物処分分野では、これらの劣化現象のリスクが十分には考慮されていないものもあったと思われるが、最新の知見に基づいたリスクマネジメントの強化が望まれる。またコンクリート工学でも、塩害対策は主に海洋環境からの飛来塩分を対象に始まっており、可溶性塩類とコンクリートが直接接するような条件での挙動は十分に明確にされていない。本技術資料では、多量に可溶性塩類を含む焼却飛灰の特性がコンクリートの耐久性に及ぼすリスクを、最新のコンクリート工学の知見を活用して議論する必要があった。限られた時間ではあるが可能な限りの議論がなされ、多くの重要な論点が提示された。それをもとに現時点で考える最も合理的なリスクマネジメントを考慮した対策が提案されていると思われる。

本技術資料は、最先端の知見を最大限に活用し、安全・安心な汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）を実現するために重要かつ有効なものである。外部評価に参加した各委員としても得るところが多い資料であり、環境省による実工事においても最大限に活用されることを期待する。

外部評価委員会委員長
京都大学教授 河野広隆

汚染廃棄物等最終処分場へのセメント・コンクリート技術適用に関する研究会
構成委員

委員	大迫 政浩	(独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター センター長
顧問	長瀧 重義	東京工業大学名誉教授
幹事	山田 一夫	(独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 研究開発連携推進室 主任研究員
委員	遠藤 和人	(独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 廃棄物適正処理処分研究室 主任研究員
委員	川端 雄一郎	(独)港湾空港技術研究所 構造研究領域 主任研究官
委員	蔵重 勲	(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 主任研究員
委員	斉藤 成彦	山梨大学 工学部土木環境工学科 准教授
委員	半井 健一郎	広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 准教授
委員	丸山 一平	名古屋大学 環境学研究科環境学専攻 准教授
委員	山田 正人	(独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 廃棄物適正処理処分研究室 室長
委員	市川 恒樹	(独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 客員研究員 北海道大学名誉教授

外部評価委員（専門分野）

委員長	河野 広隆	京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 教授（コンクリート材料）
委員	勝見 武	京都大学大学院地球環境学堂社会基盤神話技術論分野 教授（環境地盤工学）
委員	勅使川原 正臣	名古屋大学大学院環境学研究科コンクリート工学研究室 教授（鉄筋コンクリート構造）
委員	樋口 壯太郎	福岡大学大学院工学研究科資源循環・環境工学専攻 教授（廃棄物処分）

第Ⅰ部 汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）の鉄筋コンクリートについて考慮する点

1.はじめに.....	I - 1
2.関連法規と環境省の説明資料の概要.....	I - 2
3.最終処分場の特徴.....	I - 5
4.最終処分場に適用されるコンクリートについて考慮する点.....	I - 6
参考資料 I-1 最終処分場等の構造・維持管理による安全性の確保について.....	参考資料 I - 1
参考資料 I-2 関連法規の整理.....	参考資料 I -36

第Ⅱ部 各種影響要因の検討

1.はじめに.....	Ⅱ - 1
2.焼却飛灰の吸湿・潮解現象と漏出液の検討.....	Ⅱ - 2
2.1.はじめに.....	Ⅱ - 2
2.2.吸湿メカニズム.....	Ⅱ - 5
2.3.温度・湿度と吸湿速度.....	Ⅱ - 7
2.4.変動温度・湿度下での吸湿挙動.....	Ⅱ - 8
2.5.吸湿速度に及ぼすその他の影響.....	Ⅱ - 9
2.5.1.空隙率の影響.....	Ⅱ - 9
2.5.2.初期吸水の影響.....	Ⅱ - 9
2.5.3.NaCl、KCl の影響.....	Ⅱ - 9
2.5.4.表面被覆の影響.....	Ⅱ -11
2.6.溶液漏出時期計算法.....	Ⅱ -11
2.6.1.漏出の可能性判定.....	Ⅱ -11
2.6.2.吸湿速度定数の測定.....	Ⅱ -12
2.6.3.漏出開始時間計算式.....	Ⅱ -12
2.7.焼却飛灰から溶出する水溶液の組成.....	Ⅱ -12
2.8.焼却飛灰長期保管時に注意すべき点.....	Ⅱ -14
3.ひび割れに関する事例検討（温度ひび割れおよび乾燥収縮ひび割れ対策）.....	Ⅱ -15
3.1.はじめに.....	Ⅱ -15

3.2.温度ひび割れ	II-15
3.2.1.設計の考え方.....	II-15
3.2.2.解析事例.....	II-16
3.3.乾燥収縮ひび割れ	II-20
3.3.1.ひび割れ制御設計の考え方.....	II-20
3.3.2.解析事例.....	II-20
4.高い耐久性が求められるコンクリートに関する事例検討.....	II-33
4.1.はじめに.....	II-33
4.2.アルカリ骨材反応	II-33
4.2.1.基本的な考え方.....	II-33
4.2.2.CPTによる膨張試験	II-34
4.2.3.膨張予測の流れ.....	II-34
4.2.4.試算例	II-37
4.2.5.CPTの加速倍率.....	II-38
4.3.化学的侵食（地盤由来の硫酸塩劣化）	II-39
4.3.1.基本的な考え方.....	II-39
4.3.2.硫酸塩地盤の照査の検討例.....	II-39
4.4.中性化	II-40
4.4.1.基本的な考え方.....	II-40
4.4.2.中性化の照査方法	II-40
5.高濃度塩水の作用に関する事例検討.....	II-42
5.1.はじめに.....	II-42
5.2.塩害	II-42
5.2.1.基本的な考え方.....	II-42
5.2.2.塩害の照査方法.....	II-42
5.2.3.塩害の照査の検討例.....	II-45
5.3.アルカリ骨材反応	II-53
5.3.1.基本的な考え方.....	II-53
5.3.2.アルカリ骨材反応の照査の検討例.....	II-53
5.4.化学的侵食（塩類劣化）	II-56
5.4.1.基本的な考え方.....	II-56
5.4.2.化学的侵食（塩類劣化）の照査の検討例.....	II-57
5.5.化学的侵食（硫酸塩劣化）	II-57
5.5.1.基本的考え方.....	II-57
5.5.2.化学的侵食（硫酸塩劣化）の照査の検討例.....	II-58
5.6.Cs浸透.....	II-58

5.6.1.基本的な考え方.....	II-58
5.6.2.Cs 浸透の照査の検討例.....	II-58
6.施工における品質確保に関する事例検討（コンクリート施工）.....	II-61
6.1.はじめに.....	II-61
6.2.品質管理.....	II-61
6.3.検査.....	II-61
6.4.品質確保に関する実践例.....	II-62
6.5.表層透気試験の活用.....	II-64
6.6.フライアッシュを用いたコンクリートの養生.....	II-66
参考資料 II-1 コンクリート以外に関する検討.....	参考資料 II- 1
参考資料 II-2 膨張材を使用したコンクリートの規格とデータ集.....	参考資料 II-17
参考資料 II-3 膨張材とフライアッシュを用いたコンクリートの基本特性.....	参考資料 II-25
参考資料 II-4 温度ひび割れの制御で用いた解析手法とその検証.....	参考資料 II-31
参考資料 II-5 乾燥収縮ひび割れ解析での物性値決定事例とその検証.....	参考資料 II-37
参考資料 II-6 過大なかぶりが構造性能に及ぼす影響について.....	参考資料 II-48
参考資料 II-7 アルカリ骨材反応ーコンクリートプリズム試験(CPT)の有用性.....	参考資料 II-50
参考資料 II-8 小型コンクリートプリズムを用いた ASR 促進試験方法に関する試案.....	参考資料 II-57
参考資料 II-9 CaCl ₂ に起因する化学的侵食（塩類劣化）.....	参考資料 II-70

第Ⅲ部 汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）における鉄筋コンクリートの設計・施工・維持管理の考え方（案）

1.はじめに.....	III- 1
2.構造物の監視期間.....	III- 2
3.構造物の目的と機能.....	III- 2
4.コンクリート構造物に要求される性能.....	III- 3
5.構造計画.....	III- 5
5.1.はじめに.....	III- 5
5.2.施設の全体系.....	III- 6
5.3.コンクリート構造物への作用.....	III- 6
5.3.1.考慮する作用.....	III- 6
5.3.2.水の作用.....	III- 7
5.3.3.偶発作用.....	III- 8

5.3.4.高濃度塩水の作用	Ⅲ- 9
5.4.各種要求性能に対する検討	Ⅲ-12
5.4.1.構造安全性の検討	Ⅲ-12
5.4.2.水密性の検討.....	Ⅲ-12
5.4.3.耐久性の検討.....	Ⅲ-12
5.4.4.維持管理性の検討	Ⅲ-12
5.4.5.復旧性の検討.....	Ⅲ-13
6.施工計画.....	Ⅲ-16
6.1.コンクリートの材料設計	Ⅲ-16
6.2.コンクリートの施工計画	Ⅲ-17
6.2.1.はじめに.....	Ⅲ-17
6.2.2.立地条件と工期の考慮.....	Ⅲ-18
7.設計や施工計画の妥当性	Ⅲ-19
7.1.第三者評価の必要性	Ⅲ-19
7.2.関連法規への適合	Ⅲ-19
参考資料Ⅲ-1 構造体例	参考資料Ⅲ- 1
参考資料Ⅲ-2 モニタリングに使用するセンサ.....	参考資料Ⅲ- 8
参考資料Ⅲ-3 特別措置法におけるコンクリート容器利用時の適法性の工学的検討	参考資料Ⅲ-10
参考資料Ⅲ-4 材料と性能の例	参考資料Ⅲ-12