

委員会報告 放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用調査研究委員会

橋高 義典*1・十河 茂幸*2・前川 宏一*3・今本 啓一*4・半井 健一郎*5・山田 一夫*6・宮里 心一*7

要旨: 東日本大震災での福島第一原子力発電所の事故では、現在でも格納容器内に放射線量の高いデブリ（溶融した燃料）が放置されたままである。また、炉心へ注入した冷却水だけでなく、外部からの地下水流入により、放射性物質を有する汚染水が敷地内に大量に残留しており、それらの処理、一時保管、漏洩防止などが重要な課題となっている。一方、福島第一原子力発電所から放出された放射性物質は、エアロゾル等の浮遊粒子状物質として拡散・沈降し、林野、農地、市街地、屋外の材料、あるいは地震と津波で発生したがれきなど広く環境を汚染した。これらの汚染されたコンクリート材料の処理、処分、再利用技術が必要とされている。本報告はこれらに関する活動概要を取りまとめたものである。

キーワード: 東日本大震災, 福島第一原子力発電所, 放射性物質, 汚染, 漏洩防止, 災害廃棄物, 再利用

1. はじめに

東日本大震災での福島第一原子力発電所の事故では、大量の放射性物質が周辺環境へ放出され、現在でも格納容器内に放射線量の高いデブリ（溶融した燃料）が放置されたままである。また、炉心へ注入した冷却水だけでなく、外部からの地下水流入により、放射性物質を有する汚染水が敷地内に大量に残留しており、それらの処理、一時保管、漏洩防止などが重要な課題となっている。また、放射性物質に汚染されたコンクリート材料、コンクリートがらなどの再利用方法の枠組み、放射性物質の影響を受けた廃棄物や土壌などの封じ込め処理なども重要な課題である。社会的関心も高いこれらの課題へのコンクリート工学の分野からの技術貢献を目的とし、公益社団法人日本コンクリート工学会の中に、放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用調査研究委員会が設けられた。この委員会は、東日本大震災特別委員会（平成23年度～平成24年度）のエネルギー関連施設小委員会および材料生産・施工小委員会の活動を引き継ぐものであり、特に放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用に関し詳細な検討を行うこととした。委員会内には、①発電所からの漏洩防止、②汚染廃棄物の低減、③汚染廃棄物の封じ込め、④再利用技術の4つのWGを設置し調査活動を行ってきた。本稿は、それらについて報告するものである。

1.1 委員会の活動期間と委員会構成

本委員会の活動期間は、平成24年4月から平成26年3月である。委員会の構成を表-1.1に示す。

表-1.1 委員構成

委員長：橋高 義典（首都大学東京） 副委員長：十河 茂幸（広島工業大学） 副委員長：前川 宏一（東京大学） 幹事長：今本 啓一（東京理科大学） 幹事：半井 健一郎（広島大学） 幹事：山田 一夫（独立行政法人国立環境研究所） 幹事：宮里 心一（金沢工業大学）
【WG1：発電所からの漏洩防止】 ◎橋高 義典（首都大学東京）○今本 啓一（東京理科大学） 小澤 満津雄（群馬大学） 坂井 悦郎（東京工業大学大学院） 中野 眞木郎（独立行政法人原子力安全基盤機構） 西田 孝弘（東京工業大学） 別府 万寿博（防衛大学校）
【WG2：汚染廃棄物の低減】 ◎山田 一夫（独立行政法人国立環境研究所） 兼松 学（東京理科大学） 小西 正芳（住友大阪セメント株式会社） 細川 佳史（太平洋セメント株式会社） 丸山 一平（名古屋大学）
【WG3：汚染廃棄物の封じ込め】 ◎前川 宏一（東京大学） ○半井 健一郎（広島大学） 入江 正明（独立行政法人原子力安全基盤機構） 蔵重 勲（一般財団法人電力中央研究所） 庭瀬 一仁（日本原燃株式会社） 松沢 晃一（首都大学東京）
【WG4：汚染廃棄物の再利用技術】 ◎十河 茂幸（広島工業大学） ○宮里 心一（金沢工業大学） 大脇 英司（大成建設株式会社） 片野 啓三郎（株式会社大林組） 鈴木 澄江（一般財団法人建材試験センター） 瀬古 繁喜（愛知工業大学） 久田 真（東北大学大学院） 渡辺 博志（独立行政法人土木研究所）
◎主査 ○副査 通信委員：氏家 勲（愛媛大学） オブザーバー：梅木 芳人（中部電力株式会社）

2. 発電所からの漏洩防止

2.1 漏洩の現状

東京電力福島第一原子力発電所の敷地内および周辺に降った雨は、ほぼ全量が地盤に浸透し地下水として西側

*1 首都大学東京 教授 工博（正会員）

*2 広島工業大学 教授 工博（正会員）

*3 東京大学 教授 工博（正会員）

*4 東京理科大学 教授 博士（工学）（正会員）

*5 広島大学 准教授 博士（工学）（正会員）

*6 独立行政法人国立環境研究所 工博（正会員）

*7 金沢工業大学 教授 博士（工学）（正会員）

から東側へ地質勾配に沿って太平洋に流れ出している（図-2.1 参照）。1日に発生する平均地下水量は約800m³/日（事故当初は1000m³/日の推定）あり、このうち約400m³/日が原子炉建屋地下に流入，残りの約400m³は一部が埋設トレンチ内の汚染源に触れて，海側に流れている。

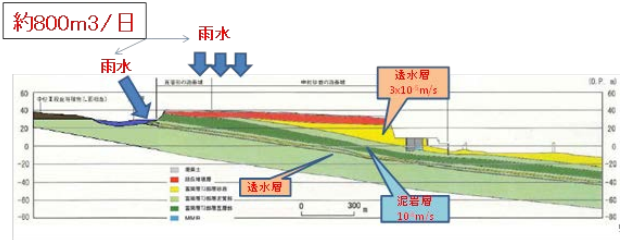


図-2.1 地下水発生メカニズムと地質構造（[1]に加筆）

一方，建屋においては，当初水素爆発等による損傷が生じていたが，現在では補修がなされている。ただし内部の床は当時の状況のままである。



写真-2.1 4号機の損傷と補修後（提供：東京電力）

2.2 衝撃圧を受けたコンクリートの損傷と耐久性

ここではコンポジション C-4 爆薬（C4 爆薬）の接触および近接爆発を受けるコンクリートの破壊性状と損傷による圧縮強度の低下について実験的な検討を行った例を紹介する。図-2.2 に示すように，爆発損傷を受けることによりコンクリートの圧縮強度が低下することが示されている[2]。

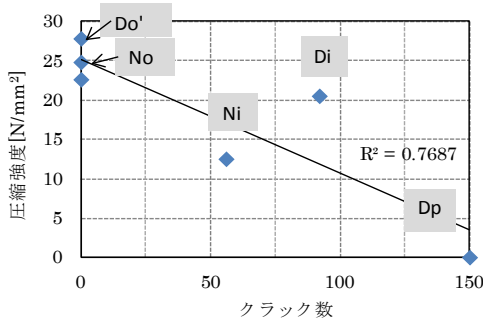


図-2.2 クラック数と圧縮強度の関係[2]

また，図-2.3 は水素爆轟による損傷を受けたコンクリート[3]への塩分浸透を観察したものであるが，ひび割

れ部分から塩分の浸透が明確に確認され，このひび割れの損傷状況に応じて物質移動が容易になっていることが確認された。

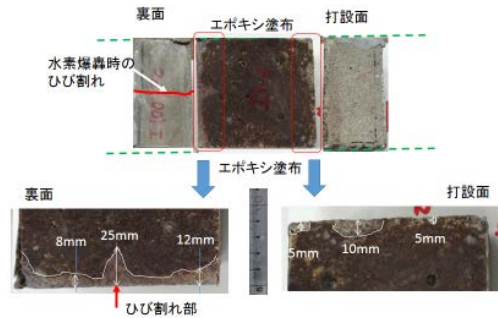


図-2.3 供試体（ひび割れ有り）の塩分浸透状況

2.3 高温加熱作用を受けたコンクリートの耐久性

爆発やデブリによる極高温加熱（熱源約2700℃）を受けた後も，撤去が完了するまでの30年間，構造物は存立していなければならない。ここでは熱的損傷を受けたコンクリートの長期性状に関する基礎研究を紹介する。

図-2.4 は高温加熱によるフライアッシュコンクリートのクリープ挙動を示したものである。加熱により圧縮強度は低下するが，その1/3荷重下のクリープひずみは，加熱を受けていないコンクリートのそれよりも約2.5倍程度大きく，さらに吸水することによってクリープひずみは継時的に増加し，吸水をしていない状態よりも若干クリープひずみが大きくなる傾向にある[4]。

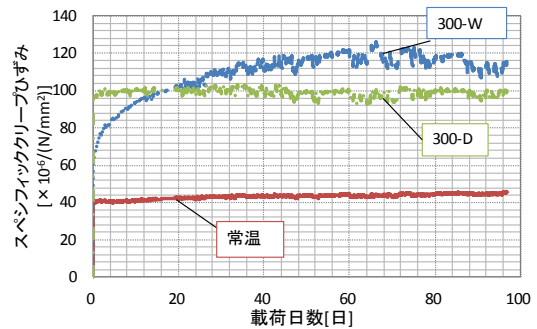


図-2.4 スベジフィッククリープひずみの変化[4]

一方，この種のコンクリートにおいて，加熱を受けることによりその細孔量は大きくなることも示されている（図-2.5）。また，圧縮強度が30N/mm²の普通コンクリートを対象として，加熱なし，100℃，200℃，500℃加熱を実施し，3%NaCl溶液（海水相当）による塩水浸漬試験を実施した。図-2.6 に示されるように，加熱なし，200℃における塩分浸透深さは5mm～14mm程度であり，大きな差異は見られなかった。一方で，500℃加熱を行った供試体は，塩分が全体に浸透していることがわかった。

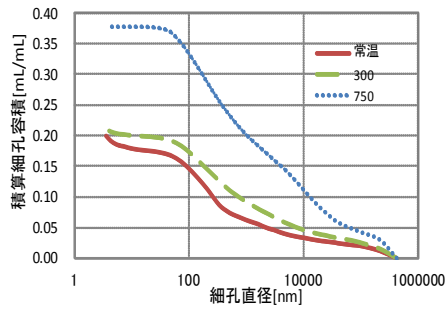
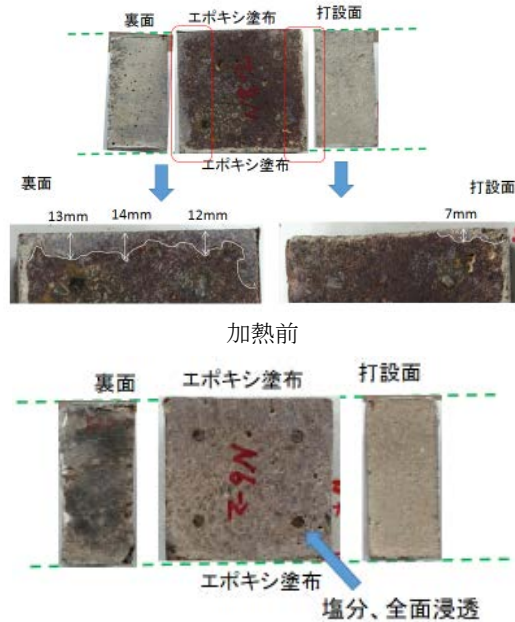


図-2.5 加熱による細孔容積の変化[4]



500°C加熱（全面浸透）

図-2.6 加熱による塩分浸透状況[5]

2.4 建屋内止水に用いるコンクリート材料に関する技術

任意の形状・場所に充填可能で、流水中においても固化し、かつその施工が地上部から可能な材料に必要とされる性能は、水中不分離性、高流動性ならびに、広域に充填させることからスランプフロー持続性などである。

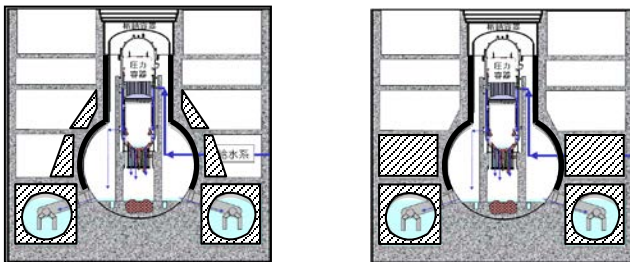


図-2.7 建屋内止水のためのJCIからの助言

本委員会では図-2.7の止水方法を助言として提案し、

- ✓ 水中不分離性コンクリートおよび高流動コンクリート[6], [7]
- ✓ コンクリートのひび割れ制御技術[8]-[11]
- ✓ コンクリートの吹付け工法に関する技術[12]

に関する委員会報告書等の概要を取りまとめた。

2.5 遮水壁に用いるコンクリートに関する技術

建屋内への地下水流入抑制対策として陸側遮水壁設置等を予定しているが、これらの対策が十分機能しないリスクを低減する為に、敷地内における主な地下水の供給源である敷地山側(海拔約 35m エリア)での降雨の地下浸透の減少、山側での地下水の遮断(原子炉建屋等の南北への地下水誘導による建屋への流入量減少)を行うことが望まれている。ここでは、図-2.8に示す建屋内への地下水流入抑制対策を助言として提案し、関連する以下の委員会報告書の概要を取りまとめた。

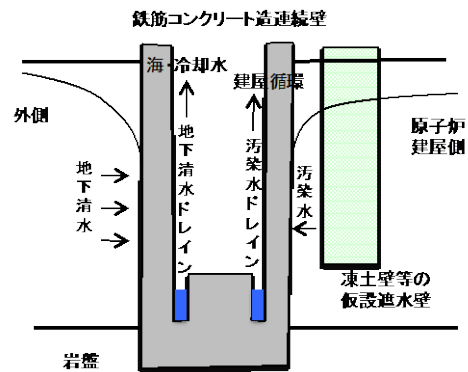


図-2.8 300年の止水効果想定 of 2重地中RC連続壁

- ✓ 注入用セメント[13]
- ✓ 地中連続壁工法[14]
- ✓ 地震時のひび割れ制御
- ✓ 長期耐久性確保のためのコンクリート技術と維持保全技術[15]-[18]

2.6 汚染水の格納

毎日発生する汚染水を処理するために、様々なタンクが設置され現在までに約 35 万 m³の汚染水が貯留されている (H25.11.19 時点)。1000m³規模のタンクが2日に1基必要になる状況にあつて汚染水を格納する鋼製タンクではピース接続部等からの漏えいが収まらない状況にある。ここでは鋼製タンクに代わるものとしての、オールプレキャスト PC タンクの適用性について紹介がなされるとともに、IRID (国際廃炉研究開発機構)における汚染水対策に関する技術募集のうち、コンクリートタンクに関する情報を取りまとめた[19]。

3. 放射性物質により汚染された災害廃棄物の処理と処分

3.1 はじめに

汚染廃棄物の低減と封じ込めのワーキングでは、原子力発電所内と汚染が特に厳しいその近傍を除き、福島第

一原子力発電所の事故により、放射性物質による何らかの汚染が広がった地域を対象に、除染や汚染された各種廃棄物の処理と処分を議論した。

3.2 事故後の放射性物質の拡散と環境汚染

まず、事故により放出された放射性物質のうち、半減期と放出量から考えて今後も問題となると考えられる Cs-137 について、その理由や放出後の移動や沈着状況などを説明した。事故により環境に放出された Cs は大気とともに移流拡散し、降雨の影響も受けて地表にもたらされた。土壌や植生などに補足された Cs の大半は環境に安定的に留まるが、一部は、人間活動によって再移動し、最終的には下水道汚泥や一般ごみの焼却灰に集積している。

次に、放射性物質により汚染された災害廃棄物処理の法律的な扱いについても説明した。放射性廃棄物の処理・処分は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（炉規法）」に基づき原子力発電所内で発生した放射性廃棄物について規定されている。しかし、今回の事故で放出された放射性物質には対応できないことから、「平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法（特措法）」が制定され、原子力発電所の敷地の外にある放射性物質に汚染された災害廃棄物の処理について規定がなされている。

3.3 コンクリートの除染

コンクリートへの放射性 Cs による汚染は表面部分に留まり、その部分を研削すれば除染されるが、地震や津波で破壊されたコンクリートは簡単に表面を研削できないので除染が難しい。ここでは粉碎による除染の方法を紹介した。

小川らは、再生骨材を製造する際、再生骨材に付着するペースト部分の脆弱な欠陥部（クラック、空隙部、気泡等）を選択的に除去することにより、副産微粉の発生量が従来法の約半分に抑制できる再生骨材製造技術を開発し、さらに、この技術を放射性物質が付着したコンクリート破砕物の表面除染に適用した[20]。再生路盤材（RC-40）に安定な CsCl の水溶液を噴霧して作製した模擬汚染コンクリートの実験では、整粒機で 1 回磨砕すると Cs 残存率が 56%に、2 回磨砕すると 46%にまで低減されたことが報告されている（図-3.1）。

3.4 コンクリートによる遮蔽

まず、コンクリートの遮蔽に関する設計について、理論的遮蔽計算方法も含めて詳細な説明を行った。放射性 Cs は、ガンマ線を発生させる放射性核種の代表種として考えられている。ガンマ線とは放射線の一種であり、エネルギーが非常に高く、主に放射性核種の崩壊によって

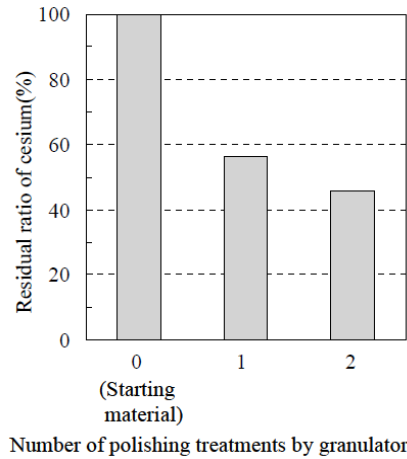


図-3.1 整粒機で磨砕した模擬汚染コンクリート試料のセシウム残存率の変化[20]

生成される。ガンマ線は透過性質を持つため、アルファ線やベータ線のように紙やアルミニウム板などの軽い物質で十分に遮蔽することはできず、密度の大きい鉛や厚い鉄板により効率的に遮蔽できる。よって、ガンマ線からの防護は他の放射線と比較して難しいと考えられていることから、コリメートされた場合と等方散乱する場合のガンマ線の減衰の考え方について示した。そのうえで、遮蔽による線量の評価手法として、特にモンテカルロ法を用い、コンクリートなどの遮蔽効果の解析を示した。

次に、放射性物質により汚染された災害廃棄物の保管用コンクリート容器について、情報を収集・整理した。容器の性能としては、放射線の遮蔽能力と物質の漏洩防止性能に加え、取扱いの容易さや積み重ねによる保管の効率性などが求められている。放射線遮蔽性能については、詳細は先に述べたとおりであるが、一般には、コンクリートの密度および厚みで要求性能を満足することが可能であることから、鉄鉱石、鉄粉、砂鉄、銅スラグ、フェロニッケルスラグ、重晶石、鉛ガラス等の密度の高い骨材が利用されている。一方、物質の漏洩防止性能については、耐久性の高いコンクリートが必要となるが、内側にエポキシなどによる樹脂ライニングあるいは防水シート等が施されているものもある。

3.5 放射性物質により汚染された災害廃棄物の処分

(1) 処分対象となる焼却飛灰の特性

多量にある土壌では放射性 Cs はほとんどが不溶性であり、安定である。課題となるのは可燃物を焼却減容化した際に発生する焼却灰である。主灰で可溶性 Cs は少ないが、飛灰では Cs の多くが可溶性であり、その処分には特に注意を要する。焼却飛灰の組成の例を表-3.2 に示す。一般ごみの性質に依存するが、CaCl₂は5~30%、NaCl と KCl はそれぞれ 5%前後、安定 Cs は 0.1~10ppm 程度含有される。

表-3.2 焼却飛灰の組成の例

含有元素	ストーカ炉飛灰	流動床炉飛灰
	重量% (内、可溶成分)	重量% (内、可溶成分)
Ca	23.3 (8.5, CaCl ₂ として 23.6)	21.3 (1.8, CaCl ₂ として 5.0)
K	4.0 (3.6, KClとして 6.8)	3.1 (1.8, KClとして 3.4)
Na	3.2 (2.3, NaClとして 5.8)	4.1 (1.9, NaClとし 5.8)
Cs	2.7ppm (1.7ppm)	?
Cl	25.2 (19.5)	10.7 (7.0)
Al	2.3	5.5
Si	7.7	9.2

(2) 灰水洗

放射性 Cs に汚染された 8,000Bq/kg 超の焼却飛灰は指定廃棄物に指定され、処分することができずに焼却施設内に保管されているが、保管スペースの不足などが大きな課題になっている。そこで、放射性 Cs に汚染された焼却飛灰を 8,000Bq/kg 以下の通常の管理型最終処分場で埋め立て可能なレベルまで洗浄・処理し、保管量を減量することを目的とした飛灰洗浄技術の検討も進められている[21]。

(3) 不溶化処理

Cs は単独のイオン半径が大きいため、水和イオン半径が実質的に小さく、イオン交換体に対する選択係数が非常に大きく、吸着が容易なイオンである。しかしながら飛灰中には水和イオン半径の比較的小さい K が多量に含まれるため、これが Cs イオンの吸着を阻害する。K イオンが吸着阻害しないイオン交換体としてはプルシアンブルーがよく知られているが、飛灰中では水酸化 Ca によって分解されてしまうため、飛灰中の放射性 Cs 不溶化法としては、飛灰の洗浄液を中和処理し、その後プルシアンブルーに通して吸着させる手法がとられてきた。

一方で、ここでは、プルシアンブルーの Fe³⁺を Ni²⁺に置き換えたフェロシアン化ニッケル (NiFeCN) を用いることで、飛灰中の放射性 Cs の不溶化処理を行ったうえで、セメント固型化する手法[22]を示した。NiFeCN 懸濁液を添加した際の Cs 除去率と NiFeCN の濃度との関係を図-3.2 に示す。高い除去率を達成していることが分かる。

このほか、焼却灰に固型化材と少量の水を添加し、高周波振動を用いた超流体工法により密実に固めることで、焼却灰を減容し、安全かつ強固な固型化ブロックや固型化盤を製造する技術についての検討[23]、放射性 Cs を含んだ刈草や切枝などの木質バイオマスの燃焼により発生した飛灰のセメント固型化処理を想定し、セメントやベントナイトを添加した木質バイオマス燃焼飛灰中のセシウムの挙動についての検討[24]、ベントナイトを主成分とした天然鉱物由来微粉末を用いて、放射性 Cs を含有した飛灰をセメント固型化し、その固型化体からの放射性セシウム溶出抑制効果に関する検討[25]なども行われ

ている。

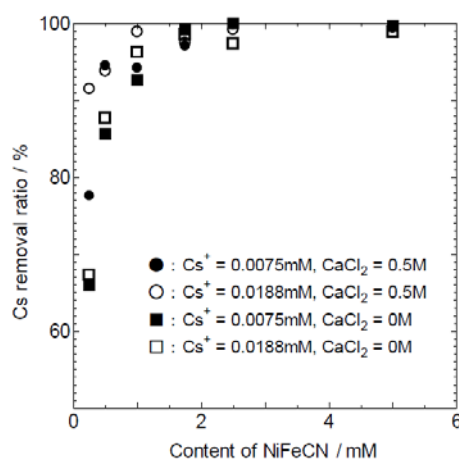


図-3.2 Cs除去能に対するNiFeCNの濃度の影響[22]
(溶液 : Ca(OH)₂飽和, NaCl, KCl濃度=0.25M)

また、原子力発電によって発生する低レベル放射性廃棄物のうち放射能レベルの比較的低い廃棄物の埋設処分(ピット処分)では、対象となる廃棄物が、発生する発電所において減容化、安定化等を目的にセメント、アスファルト、プラスチックなどで固型化処理されている。その概要を参考として示した。

(4) 最終処分場とコンクリート

10万 Bq/kg 超の指定廃棄物の最終処分においては、水による漏洩を防ぐための遮水が重要となり、鉄筋コンクリート構造物をベントナイト混合土や土壌で覆土する遮断型処分場が提示されている[26]。埋立終了・第1監視期間のイメージを図-3.3 に示す。

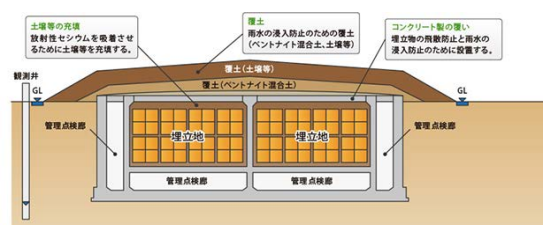


図-3.3 指定廃棄物の遮断型処分場の埋立終了・第1監視期間のイメージ[26]

放射性物質に汚染された飛灰を含む特殊な廃棄物が鉄筋コンクリートにもたらす影響と発生しえる過酷な万が一の事故を考慮し、遮断型相当の最終処分場において処分するための技術的考え方を提示し、この考え方に沿い多様な観点から鉄筋コンクリート製構造物材料の設計について論じた[27]。遮断型処分場は、浸水に関する多重防護システムになっているが、あえて、コンクリート表面の腐食防止対策が破損し、濃厚塩水に接する状況を考えた。この場合、温度ひび割れに加え、乾燥ひび割れの

発生とひび割れを通じた濃厚塩水の鉄筋への作用(塩害)、さらには、アルカリ骨材反応(ASR)や膨張性鉱物(3CaO・CaCl₂・15H₂O)の生成によるひび割れ発生と脆化にも繋がる可能性が考えられる。それらについて、設計と監理の考え方を示した。

関連して、温度応力と乾燥環境でのコンクリートのひび割れやCsのコンクリートへの浸透に関する解析事例も紹介した。

4. 再利用技術

再利用技術のワーキングでは、汚染されたコンクリートがらを再利用する技術について検討した。まずは、汚染されたコンクリートがらの再利用が、今後具体的な規・基準値を設けながら検討される際に参照されるべく、コンクリート工学において変遷されながら設定された経緯のある前例を整理した。次に、再利用される対象の把握と、再利用技術のアイデアを捻出するための情報収集の目的で、コンクリートと放射線に係わる実態を調査した。これらを踏まえて、放射性物質で汚染されたコンクリートがらを再利用するアイデアを、可能性の高低に拘らずできるだけ多く提案した。

4.1 コンクリートに係わる規・基準値

塩害やアルカリ骨材反応に関する規・基準値は、構造物の耐久性に関わるものであり、その内容は純粋な技術論によるところが大きい。一方、環境安全性の様な直接人体に関係するものは、規・基準値が安全であることともに、市民が安心を感じることへの配慮も重要になる。ここでは、その一例として、スラグ骨材の環境安全品質導入の事例について紹介した。

鉄鋼スラグ骨材、銅スラグ骨材、電気炉酸化スラグ骨材などの品質が、1997年にJISで定められた。コンクリート用骨材として用いられることから、絶対密度、吸水率、粒度、単位容積質量などが規格化された。また、骨材に含まれる化学成分の内、酸化カルシウムや硫黄、鉄などが品質規格に含まれたが、これらはいずれもコンクリート用骨材としての品質の確保、すなわち保存中の固結やコンクリート中での膨張、錆の発生の防止などを念頭に置いたものであった。すなわち、この時点では環境安全性が品質項目として設定されていなかった。

一方、一般廃棄物、下水汚泥等の熔融固化物を用いたコンクリート用細骨材の標準報告書TR A 0016が2002年に制定され、2006年にはJIS化された。この熔融スラグ骨材のJISはコンクリート用骨材の規格であるが、一般廃棄物や下水汚泥などの焼却灰を原料としていることから、環境安全性も品質の一項目として設定され、骨材に含まれる有害物質の溶出量や含有量も規定された。また、それらを確認するための試験方法が必要になり、予

め2005年にはJIS K 0058が定められた。

このように、同じコンクリート用スラグ骨材でありながら、環境安全性を品質として設定したものと、設定しなかったものが混在し、品質規格の整合化が求められた。これを受けて、コンクリート用骨材のスラグ類に化学物質評価方法を導入するための検討会が発足され、環境安全品質とその検査方法を導入するための基本的な考え方[28]がまとめられた。すなわち、循環資材のライフサイクルを考慮し、最も配慮すべき暴露条件を考慮し、規・基準値を定めることが基本となった。例えばコンクリート用骨材として使用していても、その部材がいずれ解体され埋め戻し材などとして使用される可能性があれば、その条件において該当する環境基準や対策基準を満足するように規・基準値を定める。一方、もし解体されることのないコンクリート構造物としての利用形態であれば、コンクリート構造物のままの状態の暴露環境として捉え、含有量については規定せず、溶出量のみを確認すればよいことになる。

このような、環境安全性確認の基本原則が定められ、これを反映する形でJIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材-第1部：高炉スラグ骨材」、ならびにJIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材-第4部：電気炉酸化スラグ骨材」の改定がなされ、環境安全品質が取り取り込まれることとなった。また、JIS A 5011-2「コンクリート用スラグ骨材-第2部：フェロニッケルスラグ骨材」ならびにJIS A 5011-3「コンクリート用スラグ骨材-第3部：

表-4.1 二本松市のマンションにおける放射線量

測定時期	測定場所	放射線量 (μ Sv/h)
2012年 1月	2階および3階屋内	0.1~0.38 [29]
	1階屋内	0.9~1.24 [29]
	屋外	0.7~1.0 [29]
2013年 11月		0.375
	下写真の測定点1	0.391
	下写真の測定点2	0.740



写真-4.1 二本松市のマンションにおける対応状況

銅スラグ骨材」も、近日中に環境安全品質を取り込む改定がなされる予定である。

何れにしても、技術基準の策定・改定に際しては、ハード的な技術革新のみではなく、社会的な側面によっても変化し得る。とりわけ、人体の健康に直接的な影響がある品質項目に関する規・基準値の設定に際しては、安全とともに安心も大きな影響を与える。

4.2 コンクリートと放射線に係わる調査

2011年7月に完成した、福島県二本松市のマンションにおいて、表-4.1 に示すとおり、高い放射線量が測定された[29]。このマンションの基礎部分のコンクリートに、当時計画的避難区域であった浪江町の砕石が使用されたことが主な原因であると、当初は指摘された。汚染が判明した後、写真-4.1 に示すとおり、1階のエントランスの土間を15cm厚のコンクリートで増し打ちする対応がなされ、上階への通路の放射線量は低下した。しかし、1階の各部屋および玄関への廊下は増し打ちできず、1階の住民は退居した。

浪江町の砕石工場は福島第一原子力発電所から北西へ約22kmの位置にあり、事故当時の空間線量は300 μ Sv/h、マンションの汚染が判明した2012年1月時点でも100 μ Sv/hであった。2011年3月14日から4月22日にかけて、この工場からは2社の生コンクリート工場へ1,987tの砕石が出荷され、その後940か所の現場へ生コンクリートとして出荷された。調査の結果、その内118か所で高い放射線量が測定された。2012年1月20日に福島県災害対策本部が砕石工場の立入り検査を行った結果を表-4.2 に示す。これによれば、野積みストックヤードの砕石や、事故当時に外気に曝されていた部分の線量が高かったと推察される。ただし、高い放射線量が測定されたコンクリートが、どの部分の砕石を使用したものかを確認することは不可能であった。

表-4.2 砕石工場の核種分析結果 (Bq/kg)

調査地点		Cs-134	Cs-137
屋根付き プラント ヤード	南側	2,780	3,760
	北側	2,740	3,630
	中央	2,670	3,640
屋根無 ストック ヤード	生コン用砕石	29,800	39,500
	路盤材用砕石	63,900	85,700
採石採取場		170,000	226,000
残土処理区域		840,500	114,000

前述のとおり、マンションの汚染の原因として、汚染された砕石を使用したことが主であると発表されたが、セメント硬化体には放射線遮蔽能力があることを考慮すると、工学的には汚染された砕石だけが原因ではないと

思われる。マンションの基礎を施工した時期は2011年4月であり、当時の空間線量は10 μ Sv/h以上であった。放射性物質は粘土や泥に付着しやすいので、フレッシュコンクリートの状態で空間の放射性物質を吸着し、レイタンスとともに基礎の上面に浮上したとも推察される。また、基礎コンクリートを打設した直後に放射性物質を含んだ塵や埃が飛来して吸着した可能性もある。ともかく、マンションのコンクリートのコア調査等により汚染の原因を解明することは重要な課題である。また汚染が判明した早期の段階でそのような調査を実施すべきであった。

4.3 再利用技術の提案

福島県の現状に加えて、今後にもし新たな事故が起きてしまった場合も含めて、汚染されたコンクリートがらや骨材を有効利用するアイデアを、表-4.3 に示す。ただし、地盤材料への再利用[30]と同様、通常のコンクリートとは特性が異なることから、適切に取り扱うことが大前提である。すなわち、クリアランスを超えたコンクリートがらや骨材を再利用するに当たっては、4.1 に記述のとおり安全性と安心を必ず評価しなければならない。それを満足した上で、管理された条件下でのみ再利用を許し、その記録を残すことが重要である。

表-4.3 再利用技術のアイデア

1. 構造物の状態での汚染したコンクリートの再利用
・ 構造物の外側を遮蔽材で覆う
・ 外装仕上げ材を取り替える
・ コンクリート表面を除染する
2. 地震や津波で壊れた後に汚染したコンクリートがら・構造物の状態での汚染したコンクリートがらの再利用
・ 内部のみに汚染したコンクリートがらを配置し、その周囲を非汚染コンクリートで覆う構造体にする
・ 表面を除染後に破碎し、再生骨材として用いる
・ 非汚染骨材と混合して、全体的な濃度を薄くする
・ 製造場所や供用場所を特定する
3. 原材料の状態での汚染した骨材の再利用
・ より高汚染の区域や、汚染源の復旧用コンクリートまたは埋立て等の土工材料として利用する

5. おわりに

福島第一原子力発電所の事故発生から既に3年が過ぎるが、放射性物質の制御に関しては未だ手探りの状態である。コンクリート技術に関連する課題は、如何に放射性物質の拡散、漏洩を防止し封じ込め、さらに汚染されたがらなどを除染し、如何に安全に社会基盤に還元し利用するかと考えられる。これらの問題解決に本報告書が一助となれば幸いである。末筆ながら、多忙にもかかわらず本委員会の活動に積極的に参加いただいた多くの皆様に心から感謝の意を表したい。

<参考文献>

- [1] 経済産業省, 福島第一原子力発電所における汚染水対策・汚染水処理対策委員会 (第5回) 資料2-1 東京電力(株) 福島第一原子力発電所汚染水の現状と対策, 平成25年8月23日
- [2] Yuka Yoda et.al.,: Durability of reinforced concrete member suffered from detonation, Proceedings of International Conference on concrete under severe conditions, pp.1630-1640, Sep. 2013
- [3] 米澤健次ほか: 水素爆風圧を受ける RC 壁の応答性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 601号, pp.151-158, 2006
- [4] 依田祐果他: 極高温加熱を受けたフライアッシュコンクリートの細孔構造とクリープ特性, 日本建築学会関東支部研究報告集 I ,pp.133-136,2013.2
- [5] 小澤満津雄ほか: 水素爆轟と高温および海水作用下における RC 部材の物質侵入抵抗性, セメント技術大会講演概要集, 2014(発表予定)
- [6] 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(I), 1993.
- [7] 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), 1994.
- [8] 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008年11月
- [9] 日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用委員会報告書, 2002
- [10] 日本コンクリート工学協会: 繊維補強セメント複合材料の新しい利用方法に関するシンポジウム, 2012年9月
- [11] 日本コンクリート工学協会: 高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会報告書, 2009年3月
- [12] 笹谷達也, 藤原浩己, 長澤和彦, 浜子 正: 1000m 超の長距離圧送を実現したチクソトロピー性を有するモルタル吹付け工法, コンクリート工学, Vol. 50, No. 2, pp.180-186, 2012. 2
- [13] 例えば, 丘上浩光: 注入用セメント, セメント・コンクリート, No.535, 58-63 (1991)
- [14] SMW 協会編: SMW 連続壁標準積算資料 [設計・施工・積算編], 平成13年4月
- [15] コンクリート工学協会: データベースを核としたコンクリート構造物の品質確保に関する研究委員会報告書・シンポジウム論文集, 2013.
- [16] 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の非破壊試験方法研究委員会報告書, 2001.
- [17] 日本コンクリート工学協会: 微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法調査研究委員会報告書, 2012.
- [18] 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針 2013, 2013.
- [19] 国際廃炉研究開発機構(IRID), 汚染水対策に関する国内外からの技術提案募集結果一覧, http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/2013_1108_01.html [2014年4月参照]
- [20] 小川秀夫, 長瀬孝宏, 田中博明, 名和豊春: 原子力発電所解体により発生するコンクリート廃棄物のリサイクル, 太平洋セメント研究報告, 第163号, pp.38-48, 2012
- [21] 国立環境研究所: 放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分 (技術資料 第四版), http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r4_140328.pdf
- [22] 市川恒樹, 山田一夫, 大迫政浩: 放射性セシウムを含む焼却飛灰からのセシウム溶出防止剤の開発, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会, D6-5, 2013
- [23] 斉藤栄一, 弘末文紀, 中島貴弘, 坂本守, 島岡隆行: 除染可燃物焼却時に生じた高濃度汚染焼却灰の減容固化技術, 土木学会第68回年次学術講演会, VII-101, pp.201-202, 2013.9
- [24] 大山将, 中島卓夫, 松生隆司, 吉田由郎: 木質バイオマス燃焼飛灰のセメント固化処理に関する基礎検討, 土木学会第68回年次学術講演会, CS11-002, pp.3-4, 2013.9
- [25] 椎名貴快, 石渡寛之, 石山宏二, 岩永克也, 久田真, 緑川猛彦: 天然鉱物由来微粉末を添加した飛灰セメント固化物の放射性セシウム溶出抑制, 土木学会第68回年次学術講演会, CS5-013, pp.25-26, 2013.9
- [26] 環境省: 指定廃棄物処理情報サイト (ホームページ) <http://shiteihaiki.env.go.jp/03/01.html?tab=5>
- [27] 山田一夫, 大迫政浩: 10万 Bq/kg 超の放射性 Cs に汚染した焼却飛灰の最終処分場建設の基本的考え方, コンクリート工学年次論文集 (印刷中)
- [28] コンクリート用骨材又は道路用等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会: コンクリート用スラグ骨材に環境安全品質及びその検査方法を導入するための指針, https://www.jisc.go.jp/newsttopics/2012/201203slag_hokokusho.htm [2014年4月参照]
- [29] 朝日新聞デジタル: 2012年1月15日掲載, <http://www.asahi.com/special/10005/TKY201201150290.html> [2014年4月参照]
- [30] 公益社団法人地盤工学会 東日本大震災対応調査研究委員会 地盤環境研究委員会: 災害廃棄物焼却主灰を原料とする再生資材の地盤材料利用を対象とした物性評価スキーム 第一版, 2012.