

## 特集

## 放射性廃棄物処分におけるセメント・コンクリート

## 廃棄物処分におけるセメント・コンクリートの関わり†

石崎寛治郎<sup>††</sup>、天野 恕<sup>††</sup>

## 1. セメント・コンクリートの劣化要因と改善または回避策

コンクリートは、本質的には砂利・砂と結合材であるセメントに水を混練して固めた多孔質の硬化体で不均質な複合材料である。原子力発電とセメント・コンクリートの関わりは、大型重施設の構造材としての利用から始まって廃棄物処分システムの構成素材としての利用まで多岐に亘っている。その中で廃棄物処分システムの構成素材として利用するに当たっては、セメント・コンクリートの機能を有効に活用することが肝要である。殊に、廃棄物処分システムの耐久性を長期間に亘って確保する上でセメント・コンクリートが果たすべき役割は大きく、対象とする廃棄物の種類・固化（不動化）処理方法・使用部位等によって異なってくるが、低レベル廃棄物に関連しては主として物理的バリア機能が、TRU、高レベル廃棄物に関連しては主に化学的バリア機能が重要視されている。これらの機能は、①セメントの水和時に発生する熱応力、自己収縮、硬化体の乾燥収縮などによるひび割れの発生、②侵蝕性化学物質による物理的・化学的性質の変化、③炭酸化現象によるセメント・コンクリートの中酸化、④アルカリ骨材反応、⑤高温に接した際のひび割れ、などが原因になって劣化もしくは変化を生じる。一般的には、これらの劣化もしくは変化を回避するために、①生コンクリートへの減水剤・流動化剤・空気連行剤等の混入、②物理的な緻密性の改善を目的とする微粒子の反応性混合材の混入、③硬化体の物性改善を図るための鉄筋・繊維等の補強材の付加または添加、④硬化体の化学安定性・物性の改善を意図する有機高分子のプレミックス剤の添加または有機高分子の含浸などの対策が目的に応じて適宜組合わせて使用されている。しかし、原子力発電産業の実際的な各局面が持つそれぞれの固有の事情によっては、これらの対策の“安易かつ性急な適用”は避けた方がよい場合もあり、対策の実施に当たっては事前に十分な検討を行うのが望ましいと考える。

## 2. コンクリート構造物の耐久性に関する考察の例

セメント・コンクリートは、現在、大量に生産され工業的に使用されている多くの構造材料の中で、成型が自由に出来て、且つ、長期間安定して使用できることが実証された材料であることに対しては異論はないと考えられる。一般的にセメント・コンクリートを用いた大型の重施設を建設する場合に局所的な欠陥（主に部分的なひび割れ）の無い完璧な構造体を建設することは困難である。一方、コンクリート構造物に負荷される応力を十分に予測・評価した上で設計と施工管理を行ったコンクリート構造物が、‘予測が困難な程に巨大な規模の自然災害’または‘明らかな設計ミス’以外の原因で数十年以内の短期間で自壊した例は知られていない。このことは、コンクリートの主な設計負荷性能が圧縮応力であるため、小さな欠陥に対する感度が低い事にある。

米国の原子力規制委員会（NRC）は、その定めた規則（10 CFR61）の中で“放射性廃棄物の固化方法”に代替できる方法として“高健全性容器（High Integrity Container, HIC）へ封入する方式”を認め[1]、規則が要求している材料にとって最も厳しい技術要件である“三百年の構造安定性”という条件を満足した容器として、“鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリート（SF PIC）容器”[2]と“高密度ポリエチレン（HDPE）製HICを鉄筋コンクリートでオーバーパックする処分容器”[3]を認可している[4]。

上述の二種の容器がNRCの認可を獲得するに際しては、次のような手続きが取られている。すなわち、①申請者はNRCに対して「認可許可申請書—Topical Report」を提出し、その中で“申請物件はNRCが課している許可条件を満たしていること”を論証する、②NRCは申請内容を、対話・討論スタイルで審査し、必要な時には追加資料の提出、追加確認試験の実施等を要求する、③審査行為が終了した段階で、当該物件に関する審査経過、認可を「可」とするに至った理由等の全体を、技術レポートとして纏めた上で公表し、申請者に交付する、④技術レポートが公表・交付された時点で、申請物件はNRCの「型式承認」を取得したことになる、といった手順である。この二種の容器につい

† Affiliation of cement and concrete with radioactive waste management, by Kanjiro Ishizaki, Hiroshi Amano

†† 秩父小野田(株)中央研究所 〒285 千葉県佐倉市大作2-4-2 Chichibu Onoda Cement Corporation

て、NRCが公表している“認可に至った理由”のうちの「“三百年の構造安定性”という条件を満足したと認定した理由」をそれぞれの容器について整理すると次のようになる。

- (1) “SFPIC容器”については、申請者側が議論展開の冒頭に置いた‘一般的にコンクリート構造物が百年程度は安定的に存在する’という大前提を受け入れた上で、①今回申請したSFPICは普通コンクリートと比較して緻密で高強度であり化学安定性が非常に高いため数倍以上の耐久性は保証できる事が実験によって証明されている、②さらに、SFPICの設計強度を十分な裕度をもって採用すれば安定期間は更に伸長する、という申請者側の主張をNRCが認めた。
- (2) “HDPE製HICを鉄筋コンクリートでオーバーパックした処分容器（HDPE製HICが環境に対する腐食や浸出抵抗性などのバリア機能を分担し、鉄筋コンクリートが構造安定性のみを付与する）”については、NRCは申請者との討論の末に、申請者側の‘1860年頃に米国に導入されたポルトランドセメントを用いたコンクリートの下水パイプシステムが劣化に対して大変良好な抵抗性を示してきており、実際に多くの初期に建造されたシステムが今日もなお使用されている。さらに、最近のコンクリート製造技術は1900年代の初期の技術より遥かに向上している。しかも、容器が埋設される環境は「乾燥しており、腐食は起こり難い環境」であることを考慮すると、この申請容器がNRCが要求する“三百年の構造安定性”を保持しえないとする理由は何もない’という主張を認め認可を与えた。以上の事柄から推察できるように、NRCはプレキャスト製品に対してではあるが、“三百年の構造安定性”を基本的には認める立場を取っていると解される。

日本においては、この間の事情は若干異なっている。すなわち、“セメント・コンクリート構造物の耐久性は既に実績のある普遍的事実としては一応認め、比較的短い期間内での安全性評価を行う際には活用するが、長い期間が経過した後の安全性評価を行うに際しては十分な安全裕度を取るという立場を取って「処分施設自体の止水性は考慮に入れていない」と仮定すること”になっている。

セメントメーカーの一員で、且つ、原子力分野にも関わってきたものとしては、そのような仮定を置かれることは誠に残念でならないが、斯界の権威が議論された上での結論であり、止むを得ない事情があったものだろうと受け止めている。ただ、一号埋設事業が無事にスタートした上は、“耐久性は考慮に入れず”という現在の仮定がセメントの機能を正当に評価した仮定に置き換えられる事を願っている。

### 3. セメント・コンクリートの共通の議論の場

前述のように「処分施設自体の止水性は考慮に入れていない」という仮定は、セメントメーカーの一員としては残念である。筆者等の一人に対しても、一号埋設の計画が進行中の頃にセメントについて色々な質問や技術相談があったが、質問されてこられる方々のご専攻やご専門、ご造詣が異なるごとに、同じ課題に対しても視点と優先度の認識が異なっていて、議論が噛み合わない場面も何度かあり、応対に苦勞した。

そこで、セメント・コンクリートに対する共通の問題意識を持った方々と議論の場を設けたら、色々な問題の解決に資するのではないかと考えた。丁度、日本原子力学会の原子力夏期セミナー（1990年7月、八幡平）の折りに主だった関係者の方々に、1メーカーとして僭越ではあるがセメント・コンクリートの耐久性などについての共通議論の場として「放射性廃棄物処理処分の高度化に関するセメント・コンクリート研究懇談会（主査／当初 天野恕、第4回より東北大学名誉教授 菅野卓治氏）」を開催したい旨をご相談したところ大方のご賛同とご支援を得ることができ、その年の12月に第1回を開催した。以来、年2回のペースで開催を続けて昨年12月には13回を終了した。研究懇談会の他にトピックスについて開催した特別講演会を含めると15回の集まりを持ったことになる。毎回、日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団、原子力環境整備センター、電力各社、日本原燃（株）、プラントメーカー、エンジニアリング各社などの関係機関から専門家が50名以上参加され、活発な議論・討論が行われており、共通の議論の場として定着してきたものと考えている。これまでの「研究懇談会・特別講演会」で発表されたテーマを各回ごとに別けて参考資料として添付した。これに見られるように、初めの頃は原子力関連の問題点の討議よりもセメント・コンクリートの基本的な課題の勉強に焦点が絞られていたのが、だんだんに原子力関連の今日的な問題点へと移行してきているのがお分かりいただけると思う。また、新規のセメント・コンクリートに関する研究開発・動向の紹介も行ってきた。

ただし、セメントメーカーに身を置く立場の者として最近気にかけていることは、折角の「研究懇談会」での勉強の成果が“ある新しい機能を持ったセメント製品の開発・導入の必要性”を示しても、セメントメーカーとしては定常生産品とすることに二の足を踏まざるを得ないということである。すなわち、新しい機能を持った少量生産のセメント製品（年間数千トン規模でも）の製造単価は量販品（1工場の年間生産量は数百万トン）のそれとは大きく異なり、どうしても高価になる（もともと普通セメントの単価そのものが安すぎるのだが）ことが、認知されないと研究開発そのものが無意味となり、新規の開発など望むべくも

なくなる（これは発電電力規模とコストの関係でも同様と思われるが）。やはり、発注する側も局所的な部材のコストだけで判断せず総合的なトータルコストとして価格をとらるようにして頂きたいと考える。このことは、民間企業の本質的な問題であるので敢えて付け加えさせて頂いた。

今回、「廃棄物におけるセメント・コンクリート」に関する特集号が発行される事になり、序論を執筆する機会を与えられたことは望外の喜びである。特集号に掲載される論文の中には、セメント・コンクリートの経年劣化性の改善を目標とした耐久性の高いセメントの開発、セメント系充填材の開発、セメントの長期間の化学バリアとして設定するシナリオの考え方と実験的検討、デコミコンクリートの再利用に関する研究など、今後重要となる課題に関するものが含まれており、誠にタイムリーな企画であると思う。更めて、関係された方々の炯眼に敬意を表して拙文の結びとしたい。

## 参考文献

- [1] Technical Position on Waste Form, Rev. 0, U.S. Nuclear Regulatory Commission, May 1983.
- [2] 米原子力規制委員会認可レポート, Chichibu Cement Co., Ltd., "Topical Report for High Integrity Container, 200 l /400 l -NP-A for Disposal of Low Level Radioactive Wastes", Volume 1 - Non-Proprietary, 41pp., Approved Issue, 1986.
- [3] Sauer, R. E., Wong, O. P.: Enhancement of High Density Polyethylene High Integrity Container at a Low Level Radioactive Waste Disposal Site, Waste Management 89, Vol.2, pp.735-737 (1989).
- [4] Bangart, R. L., Tokar, M.: Low-Level Radioactive Waste Disposal in the United States, American Society for Testing and Materials, pp.3-11 (1992).

## 参考資料

放射性廃棄物処理処分の高度化に関するセメント・コンクリート研究懇談会、プログラム一覧（敬称は全て当時のものを使用した）

### 第1回研究懇談会（平成2年12月6日、秩父セメント株式会社・日比谷分室）

- ①「セメントの物理・化学-水和の機構と耐久性-」  
東京工業大学無機材料工学科 教授 大門正機氏
- ②「原子力研究所に於ける放射性廃棄物セメント固化体の健全性試験研究」  
日本原子力研究所人工バリア研究室長 村岡 進氏

- ③「秩父セメント(株)における放射性廃棄物管理関連技術開発の基本的考え方」  
秩父セメント(株)中央研究所 顧問 天野 恕
- ④「放射性廃棄物管理システムにおけるセメントの役割に関する一考察」  
秩父セメント(株)中央研究所開発部 主任研究員 石崎寛治郎

### 第2回研究懇談会（平成3年6月6日、秩父セメント株式会社・日比谷分室）

- ①「コンクリート構造物の耐久設計について」  
群馬大学工学部建設工学科 教授 辻 幸和氏
- ②「放射性廃棄物の処理処分と廃棄物容器について」  
日本原子力研究所放射性汚染処理 第一課長 川上 泰氏
- ③「セメントコンクリートの耐久性に関わる規格及び試験方法」  
秩父セメント(株)中央研究所開発部 主任研究員 小柳直昭

### 特別講演会（平成3年9月12日、秩父セメント株式会社・日比谷分室）

- 「放射性廃棄物の処理処分に関するセメントの役割と性能」  
東北大学 名誉教授 菅野卓治氏

### 第3回研究懇談会（平成3年12月6日、秩父セメント株式会社・日比谷分室）

- ①「古代セメント構造物の調査結果の概要と基本的コンセプトの重要性」  
埼玉大学工学部建設工学科 教授 町田篤彦氏
- ②「安全評価について」  
日本原子力研究所環境影響解析研究室長 松鶴秀夫氏
- ③「セメント（コンクリート）技術の面から見た原子力安全の一側面」-秩父セメント株式会社における原子力安全研究の基本論理-  
秩父セメント(株)中央研究所開発部 島 秀有

### 第4回研究懇談会（平成4年6月18日、秩父セメント株式会社・日比谷分室）

- ①「セメント・コンクリートの劣化事例とメカニズム及びその対策」-凍結融解とアルカリ骨材反応を中心として-  
北海道大学工学部建築工学科 教授 鎌田英治氏
- ②「放射性廃棄物処分のためのナチュラルアナログ研究」
  - a. 天然における鉱物の変質と核種移行  
日本原子力研究所環境安全研究部深地処分研究室 村上 隆氏
  - b. 人工バリア材の長期耐久性に関するナチュラルアナログ研究  
動力炉・核燃料開発事業団環境技術開発部地層処分開発室 亀井玄人氏

### 第5回研究懇談会（平成4年12月10日、秩父セメント株式会社・本郷分室）

- ①「TRU核種の移行に関するバリア材の化学的影響」  
東京大学工学部 助教授 田中 知氏
- ②「六ヶ所村低レベル放射性廃棄物貯蔵センターの安全設計とセメントコンクリートに対する今後の課題」  
日本原燃株式会社濃縮埋設本部環境整備部 建設課長 馬原保典氏  
土木建設部 土木課長 片平冬樹氏
- ③「低発熱型セメントコンクリートの最近の開発状況」  
秩父セメント(株)中央研究所研究部 主任研究員 原田 宏

## 第6回研究懇談会 (平成5年6月10日、秩父セメント株式会社・本郷分室)

- ① 「解体コンクリートの再利用—原子力施設の解体をふまえて—」  
日本大学生産工学部 教授 笠井芳夫氏
- ② 「放射性廃棄物処分施設におけるコンクリート構造物の耐久性評価について」  
(財)電力中央研究所我孫子研究所原燃サイクル部 次長 駒田広也氏
- ③ 「セメント・コンクリートにおける混和剤の役割」  
秩父セメント(株)中央研究所研究部 主任研究員 深谷泰文

## 特別講演会 (平成5年11月4日、秩父セメント株式会社・本郷TKビル)

- 「セメントコンクリート用高性能混和剤の作用機能と新しい粘性理論について」—  
ナフタリンスルホン酸ホルムアルデヒド縮合物の物理化学的性質を中心として—  
服部分散技術研究所 所長 工学博士 服部健一氏

## 第7回研究懇談会 (平成5年12月8日、秩父セメント株式会社・本郷分室)

- ① 「コンクリートの施工と耐久性—実構造物の耐久性調査をふまえて—」  
足利工業大学工学部建築学科 教授 依田彰彦氏
- ② 「セメントの核種閉じ込め機能」  
(財)電力中央研究所原燃サイクルプロジェクト部 研究主幹 馬原保典氏
- ③ 「セメント・コンクリートと原子力との関わり」  
秩父セメント(株)中央研究所 顧問 天野 恕

## 第8回研究懇談会 (平成6年6月1日、秩父セメント株式会社・本郷分室)

- ① 「コンクリートの炭酸化がセメント硬化体組織に及ぼす影響について—コンクリート劣化の観点から—」  
名古屋工業大学 名誉教授 鈴木一孝氏
- ② 「安全評価手法の構築について」  
日本原子力研究所環境影響解析研究室長 松鶴秀夫氏
- ③ 「低レベル廃棄物の埋設処分からみたセメント・コンクリートに関する技術的課題」  
日本原燃株式会社濃縮・埋設本部環境整備部 副長 廣永道彦氏

## 第9回研究懇談会 (平成6年12月15日、秩父小野田株式会社・本社講堂)

- ① 「硬化コンクリート中の水の存在と役割」  
山口大学 名誉教授 田代忠一氏
- ② 「人工バリアの構成とその役割」  
日本原子力研究所環境安全研究部 次長 村岡 進氏
- ③ 「放射性廃棄物処分用鉄筋コンクリート製サイロの止水性能評価」  
原子力環境整備センター研究第二部 課長 藤原 愛氏

## 第10回研究懇談会 (平成7年7月27日、秩父小野田株式会社・本社講堂)

- ① 「セメント関連化合物の放射性核種イオン交換挙動—Ni, Co, Sr, I, Csの交換能の観点から—」  
山梨大学工学部化学生物工学科 教授 鈴木 喬氏
- ② 「動燃事業団におけるTRU廃棄物処理処分研究の現状」  
動力炉・核燃料開発事業団環境技術開発推進本部 担当役 間野 正氏

## ③ 「80年材令コンクリートの水和生成物とその形態」

秩父小野田(株)中央研究所建材研究所 主幹研究員 岡田 能彦

## 第11回研究懇談会 (平成8年1月26日、秩父小野田株式会社・本社講堂)

- ① 「耐振面から見た構造物の安全性 (阪神淡路大震災の事例を踏まえて)」  
埼玉大学工学部建設工学科 教授 町田 篤彦氏
- ② 「不燃性雑固体廃棄物廃棄体製作へのセメント系固型化材の適用」  
原子力環境整備センター研究 第一部長 林 勝氏
- ③ 「低アルカリ性セメントの開発」  
秩父小野田(株)中央研究所セメント・コンクリート研究所 参事補研究員 田熊 靖久
- ④ 「高流動コンクリートの現状と展望」  
秩父小野田(株)中央研究所セメント・コンクリート研究所 参事補研究員 名和 豊春

## 第12回研究懇談会 (平成8年7月10日、秩父小野田株式会社・本社講堂)

- ① 「原子炉の解体とコンクリート解体廃棄物の処理処分」  
日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部長 宮坂 靖彦氏
- ② 「コンクリート副産物に関する建設省(土木分野)の取り組み」  
建設省土木研究所 コンクリート研究室室長 河野 広隆氏
- ③ 「原子力発電所解体コンクリートの合理的な再処理シナリオの検討」  
東京電力株式会社原子力研究所 主任研究員 内山 則之氏

## 第13回研究懇談会 (平成8年12月5日、秩父小野田株式会社・本社講堂)

- ① 「ジャーナリスト50年の軌跡 [原子力篇]」  
(財)日本総合研究所 名誉会長 岸田 純之助氏
- ② 「無機質材料による核種の閉じ込め性能」  
東北大学素材工学研究所 講師 三村 均氏
- ③ 「ベントナイトとセメント系材料の相互作用の現状」  
動力炉・核燃料開発事業団 三原 守弘氏
- ④ 「セメント水和物への各種無機物の取り込みについて」  
秩父小野田(株)中央研究所基礎第1グループ 主任研究員 羽原 俊祐