我が国の最先端原子力研究開発

シリーズ解説 第16回

バックエンド事業の円滑な推進を支える

使用済燃料輸送・貯蔵と放射性廃棄物処分にかかわる
先端技術の開発

(財)電力中央研究所 河西 基

我が国においては、エネルギー安定供給と地球温暖化対策が重要な課題となっており、当面は原子力発電がその中核的な役割を期待されている。原子力発電の安定な推進を図る上では、使用済燃料の中間貯蔵、あるいは低レベルや高レベルの放射性廃棄物の処分を円滑に進めることが極めて重要である。電力中央研究所(以下、電中研)では、上記の課題に関わる技術開発を“バックエンド事業支援技術”という位置づけのもと、全所横断的なプロジェクト課題として取り組んできている。本稿では、それらのバックエンド事業支援技術の最新の研究開発動向を紹介する。

I. はじめに

現在、地球温暖化対策やエネルギー源の安定確保が世界規模での重要な課題になっている。特に、エネルギー資源に乏しい我が国においては、原子力発電が当面の基幹電源としての役割を果たすことが期待されるとともに、原子力発電所で運転した後の使用済燃料を再処理し、まだ使えるウランやプルトニウムを取り出して使用するリサイクル路線を基本方針としている。

我が国で初めての民間再処理工場は日本原燃(株)(以下、JNFL)により運転の準備が進められているが、今後の原子力発電の柔軟性を確保する上では、特に六ヶ所再処理工場の運開が当初の計画より遅れてきている現状などもあり、使用済燃料中間貯蔵施設の重要性が増してきている。このような状況の中、我が国初の使用済燃料中間貯蔵施設の事業許可申請が2007年3月にリサイクル燃料貯蔵(株)(以下、RFS)によりなされ、青森県むつ市において2012年度操業を目指して安全審査が行われている¹⁾。また、使用済燃料やMOX燃料に加えて放射性廃棄物などの輸送量が今後、大幅に増大することが予想さ

れており、それらの安全性確保がますます重要となっている。

一方、原子力発電所の運転に伴って発生する低レベルの放射性廃棄物を対象とした処分に関しては、低レベル濃縮廃液をセメント等により固化した第1号の埋設施設が1992年より、また雑固体廃棄物を対象とした第2号の埋設施設は2000年より操業が開始されている。いずれも青森県六ヶ所村においてJNFLにより順調に運転されてきており、2009年7月末現在で、ドラム缶廃棄体の受入れ本数は約212千本(第1号:約141千本、第2号:約71千本)に達している²⁾。また、現行に比べ、放射能レベルがやや高い高 $\beta\gamma$ 廃棄物などを対象とした次期フェーズの低レベル放射性廃棄物に関しては、地下50 m以上(おおむね100 m程度まで)のやや深い地中におけるトンネル方式による埋設処分施設の事業許可申請に向けた検討が電気事業においてなされている。これは、一般的な地下利用に対して十分に余裕をもたせた深度での処分という意味合いから「余裕深度処分」などと呼ばれており、国による基準・指針の策定や原子力学会等による民間規格等の検討も急ピッチでなされてきている³⁾。

さらに、高レベル放射性廃棄物に関しては、我が国では、再処理施設から発生するガラス固化体を対象として、2000年に制定された最終処分法により、地下300 m以上の深い安定した地層中に処分する方針とされ、原子力発電環境整備機構(以下、原環機構)がその実施主体と

Development of Advanced Technology for Transport & Storage of Nuclear Spent Fuel and Radioactive Waste Disposal by CRIEPI : Motoi KAWANISHI.

(2009年 11月25日 受理)

して設立された⁴⁾。また、処分事業として取り組む当面の大きな課題であるサイト選定については、概要調査地区→精密調査地区→最終処分施設建設地の選定という3段階で段階的に行われる計画である。原環機構では、その第1段階にあたる文献調査に基づく概要調査地区選定調査の進め方や考慮事項などを公表するとともに、2002年12月から全国の市町村を対象に調査対象地域の公募を開始した。その後、2007年1月に至って高知県東洋町から初めての応募がなされたものの、その後に取消しがなされ、それ以降、応募がない状況が続いている⁵⁾。

このような状況を受け、2007年6月には「最終処分法」が改正され、最終処分計画とその実施スケジュールが改定されるとともに、高レベルに加えて地層処分対象の長半減期低発熱性廃棄物(TRU 廃棄物)も対象とされることとなった。さらに、経済産業省総合エネルギー資源調査会・放射性廃棄物小委員会では、国による文献調査実施の申入れもできるようにしたり、国民の理解活動を国・実施主体・電気事業者や研究機関等がより連携し合って進めることなどの諸方針が打ち出された⁵⁾。

こうした状況の中、電中研は、上述のような使用済燃料の輸送・貯蔵あるいは低レベルと高レベルの放射性廃棄物処分などの技術課題全般に対して、長年にわたって取り組んできている国内でも希有な研究機関であり、事業化推進や基準・指針策定などに研究成果を反映させてきている。

以下では、電中研におけるバックエンド技術に係わる最近の研究開発状況を紹介する。

Ⅱ. 電中研のバックエンド研究推進状況

バックエンドを取り巻く周辺環境の変化が激しい近年における課題解決のため、電中研では、バックエンド事業支援研究としての位置づけのもと、次の3つのプロジェクト課題を設定して研究開発を推進している。

- (1) リサイクル燃料の輸送・貯蔵(使用済燃料をリサイクル燃料と位置づけ)
- (2) 高レベル放射性廃棄物処分
- (3) 低レベル放射性廃棄物処分

また、これらの研究推進にあたっては、次のような基本的な目標のもとに実施している。

- ・各バックエンド事業の円滑な推進の支援と将来展開に備えた技術の開発と確立
- ・国による基準・指針や学協会による民間規格の策定への積極的な協力と必要な技術開発の分担実施

なお、実施にあたっては、各課題には技術的には共通するところも多いことから、所内横断的に各プロジェクト課題間の連携による総合力の発揮や外部機関との連携・協力などを積極化させることにより、限られた研究資源を有効活用して研究の推進を図っている。

以下では、電中研における各プロジェクト課題ごとに最近の取組み状況を紹介する⁶⁾。

1. リサイクル燃料の輸送・貯蔵技術

(1) 研究の目標

わが国初のRFSによるむつ市における金属キャスク貯蔵方式での使用済燃料中間貯蔵施設の事業許可申請や、各電力における計画検討を技術的に支援するとともに、より経済的で合理的なコンクリート製のキャスクを用いることなどによる新しい貯蔵方式の実用化に向けた技術開発を行う。また、今後の輸送量の増大等に備え、合理的・経済的な輸送に向けた技術開発も行う。

(2) 最近の主な研究内容と成果

現在、RFSにより、青森県むつ市において、金属キャスク方式による使用済燃料貯蔵施設である「リサイクル燃料備蓄センター」の2012年操業開始を目指した事業許可を申請中であるが、その円滑な操業開始を支援する一方、中部電力等でも使用済燃料中間貯蔵施設計画の検討が具体化しており、これらの計画を技術的に支援している。また次世代型貯蔵方式として、使用済燃料をキャニスタと呼ばれる鋼製容器に収納した上で、それをコンクリート製キャスクに貯蔵(コンクリートキャスク貯蔵)やコンクリート製の半地下建屋内に貯蔵(ボルト貯蔵)による新しい貯蔵技術の実用化に向けて、必要な要素研究、実証試験研究等を推進している。

これまでに、金属キャスク貯蔵の安全性のほか、安心の確保の観点から、航空機が貯蔵建屋に落下衝突した場合を想定した高速飛来物衝突時の試験・解析を行い、十分な密封健全性を有することなどを確認した⁶⁾。

また、コンクリートキャスク貯蔵におけるキャニスタの長期密封性に関して、高耐食性キャニスタ材を対象としたSCC(応力腐食割れ)試験を行い、約60年程度の貯蔵期間中に、キャニスタ表面にSCCが発生する可能性は低いことを示した¹⁰⁾。一方、コンクリートキャスクの地震時安定性については、実物大のコンクリートキャスク試験体を用いて、防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センターの実大3次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)の大型振動台による試験を行った。この結果、固縛をしないコンクリートキャスクは、地震により揺れ、滑りや回転を伴う3次元的な応答を示したが、阪神大震災規模の地震でも転倒には至らないことを明らかにした。また、これらの試験結果から、キャスク内部に収納された使用済燃料集合体に発生する最大応答ひずみは弾性範囲内であることを示すと同時に、転倒評価指標と地震力に対する燃料集合体の応答評価手法の提案も行った⁶⁾。

ボルト貯蔵に関しては、第1図に示すようなフランスCEAとの共同研究により、浅地下ボルト貯蔵施設の概念の成立性につながるデータを取得した。

第1図 フランス原子力庁(CEA)との共同研究

大容量貯蔵施設の経年変化評価手法の高度化

(3) 今後の課題と研究の方向性

使用済燃料中間貯蔵施設を原子力発電所敷地内などに設置する場合の計画検討の支援にあたっては、個々のサイトの立地条件に応じた方法を考える必要があり、それらに関して技術的な蓄積と提案を図っていく。また、今後の安定的な原子力発電所の運転と再処理計画の柔軟性を支えるため、より経済的で信頼性の高い長期・大容量の貯蔵技術の開発、実用化を図っていく。このため、コンクリートキャスク貯蔵技術の実用化への課題である SCC 発生メカニズムの解明と具体的対策技術の開発、確立を図る一方、次世代型大容量貯蔵方式としてのボルト貯蔵施設の大型コンクリート構造物の実物大の試験等により、現行の温度制限値の緩和見直しの可能性等を実証的データと評価により明らかにしていく。

2. 高レベル放射性廃棄物処分技術

(1) 研究の目標

原環機構による高レベル放射性廃棄物および地層処分対象の TRU 廃棄物の最終処分事業を技術的に支援するとともに、合理的な処分を行うための調査・設計・評価技術の開発、実用化を図る。特に、処分事業のマイルストーンを考慮し、3段階のサイト選定のうち、当面の目標となる概要調査地区選定後の調査の円滑な実施およびその次の精密調査地区選定の段階に向けての調査・評価手法の高度化と体系化を図る。その他、最終処分施設建設地選定段階に備え、さらに必要となる調査・設計・評価手法に関わる技術開発を着実に進めていく。

(2) 最近の主な研究内容と成果

地質環境特性に関する実データに基づき概要調査の具体的な実施方法について検討し、時系列的で総合的な調査・評価フローを構築し、提案した。また、本フローに基づいて調査、評価を行うことにより、考慮すべき事項(選定要件)を十分に判断できるデータの取得が可能であ

る見通しを示した。これらは今後、原環機構による概要調査に反映が期待される。また、原環機構との共同研究として、電中研横須賀地区構内において、概要調査において用いられると想定される一連の調査技術、特に概要調査で重要となるボーリング調査について、計画からボーリング掘削、調査と評価の手順に関する現場での適用性を確認し、取りまとめた。

概要調査や精密調査等で用いるための基盤技術開発に関しては、経産省受託研究として、コントロールボーリング掘削調査技術(任意の方向と傾斜でボーリング掘削をしながら詳細な調査が可能な技術)の改良、高度化と適用性実証試験を、北海道幌延地区に分布する大曲断層を挟む地域において実施している(日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)との共同研究)。地表踏査や地震探査の結果に基づいて設定した計画孔跡に沿って長さ約 800 m、深さ 450 m、最終傾斜が水平となるコントロール掘削を平成20年度末までに完了し、脆弱な地質にもかかわらず、ほぼ100%のボーリングコアの採取ができたほか、孔内やコアを用いた各種の試験により、大曲断層の地質、水理特性などを明らかにするなど、コントロールボーリング掘削調査技術が、概要調査や精密調査で十分に実用的に用いることができる見通しを示した(第2図)⁶⁾。さらに、電中研が保有する水理特性調査評価技術、地下水年代測定技術および地下水水質進化評価技術を総合的に評価することにより、より精度の高い地下水年代測定と地下水流動評価ができる技術として高度化・体系化を図り、原位置への適用によりそれらの妥当性を示した。なお、国の基盤技術開発に関しては、経済産業省資源エネルギー庁主導による“地層処分基盤研究開発調整会議”(国内主要研究機関や原環機構などにより構成)において効率的な推進のための総合調整と協力が透明性を考慮して行われている。

このほか、地質環境の長期安定性調査評価技術に関しては、隆起・沈降を評価する指標である段丘の形成年代を地質・地形・火山灰層序、地形解析および地質年代測定の手法を総合的に適用することにより高精度化した。これにより、段丘の形成年代、それらを指標とした隆起・沈降速度の精度の良い特定、あるいは明瞭な変異地形の現れていない活構造の存否の判断材料を提供できる可能性を示した⁶⁾。

さらに、JAEA との共同研究として「岐阜県瑞浪サイトにおける地下水年代測定」、「核種移行特性へのコロイド影響」、「セメントの高アルカリ性によるベントナイト材料性能などへの影響を軽減するための低アルカリ性セメントの適用性」などの研究を開始した。一方、スイス放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)のグリムゼル地下研究施設(以下、地下研)における花崗岩を対象とした「コロイドの形態と移動」に関する共同研究への参加も開始した。また、経産省受託研究として岩盤中トレーサ移行

幌延の大曲断層を対象として、孔長800 m のほぼ水平に達するまでコントロール掘削を実施し、大曲断層の地質・水理・地化学・物理・力学的な特徴を把握した。

第2図 コントロールボーリング掘削調査技術の実証(幌延サイト、経産省受託/JAEA との共同研究)⁶⁾

状況を精度よく評価する手法を開発・高度化するとともに、対象とする割れ目の性状を評価するためのラドン計測、音響を用いた断層写真計測技術や高粘性流体試験法などを適用し、割れ目系岩盤中の物質移行を評価するシステムとして体系化した。さらに、スイス・モンテリ地下研における堆積岩を対象とした国際共同研究では、岩盤の異方性を考慮した応力測定法の適用・実証の研究などを行っている。このほか、東急建設・横浜国大との共同研究により、堆積軟岩が分布する相模原の地下坑道内で、処分環境を模擬した原位置ヒーター試験を実施した。ここでは、計測技術や物理探査による簡易な温度分布評価法などの高度化および加熱時の岩盤挙動特性の把握を行った。さらに、原環機構との共同研究・受託研究などとして、地下処分空洞の坑道壁面保護などに用いられる可能性のある国内外の低アルカリ性セメントの既往の知見を整理・分析し、高レベル廃棄物処分施設への適用にあたっての課題を明確化した。

(3) 今後の課題と研究の方向性

概要調査地区選定のための調査地域への自治体からの応募が近い将来になされることが期待されているが、その後の概要調査や精密調査の実施に向けて、より適切かつ合理的な調査評価技術の体系化整備を原環機構との共同研究などにより協力して進めている。一方、国の基盤技術開発にも積極的に協力してきており、上述のコントロールボーリング調査評価技術、古い地下水年代測定評価技術や岩盤中物質移行特性試験評価技術などの高度化と実用化を進めている。そのほか、JAEA やスイス NAGRA、スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社(SKB)

など国内外の研究機関などとの研究協力・共同研究をさらに積極的に展開し、当所独自の地質・地下水・岩盤等の調査・評価技術の原位置試験への適用などによる高度化・実証を進展させていく。さらに、今後の高レベル放射性廃棄物処分に係わる基準・指針の整備の方向性をにらみつつ、学会での民間規格策定や技術報告書の取りまとめなどに積極的に協力していく。

3. 低レベル放射性廃棄物処分技術

(1) 研究の目標

低レベル放射性廃棄物のうち、原子力発電所の運転や廃止措置・解体撤去に伴って発生する使用済み樹脂や高 $\beta\gamma$ 廃棄物などの従来よりもやや放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物を主対象とした余裕深度処分事業の円滑な実施に向け、電気事業や日本原燃を技術的に支援する。特に、処分施設の設計・評価における人工バリア(セメント、ベントナイト系材料)の千～万年程度の長期性能に関する技術の信頼性確保方法の高度化・確立を図る。また、地質・地下水・岩盤等の天然バリアの長期性能評価やモニタリング技術の高度化・確立を図る。さらに、国や学会において鋭意進められている基準・指針あるいは民間規格の策定に積極的に協力する。

(2) 最近の主な研究内容と成果

人工バリアの長期性能に関しては、処分環境条件下での長期耐久性試験(セメント系材料、ベントナイト系の変質)と評価を行ってきた。その結果、セメント系材料の変質については、2次鉱物の沈殿によりCaの溶脱(あるいは溶出)が抑制されることを明らかにするとともに

第3図 処分環境条件下におけるセメント溶脱メカニズムの解明⁶⁾

に、これまでに開発してきた解析コードをそれらの抑制効果を考慮できるように高度化・整備した(第3図)⁶⁾。また、余裕深度処分施設の重要な人工バリア構成要素の候補材料と考えられている高圧縮ベントナイト系材料の透気メカニズムの成果も取り込んだガス移行解析手法を提案・整備した。一方、ベントナイト混合土は現行のピット処分施設の埋め戻し材への使用が予定されているが、処分環境条件下での試験・評価を行い、塩類等による変質影響に対しても透水性などの要求性能を満足できる見通しを提示した。

さらに、電中研の地質・地下水・水質・微生物の調査技術を総合的に六ヶ所サイトの試験空洞に適用し、試験空洞の処分施設設置深度付近では安全性評価上で重要な還元性が保たれていることなどを明らかにした。

現在、余裕深度処分に係る国における基準・指針の改訂検討が進んでおり³⁾、それに連動して原子力学会による民間規格や土木学会による技術報告書の取りまとめ公表が積極的に行われている。電中研では積極的にこれらに協力してきている。特に、土木学会エネルギー委員会による技術報告書の平成20年6月⁷⁾および平成21年7月⁸⁾における取りまとめ公表に電中研は中心的な役割を果たした。これらは、原子力学会標準委員会において策定⁹⁾もしくは策定予定の学会標準に反映されている。

(3) 今後の課題と研究の方向性

原子力安全委員会による低レベル放射性廃棄物埋設処分に関する基本的考え方(中間報告)では³⁾、安全確保シナリオにおいては発生頻度を考慮して三区分とし、それぞれの安全評価の目安となる線量も国際的なレベルを考慮して設定することが検討されており、天然バリアや人工バリアの長期の不確実性を考慮した性能評価・安全評価が求められる見通しである。このため、処分施設環境条件を考慮した人工バリアの長期性能に係わるデータの取得と評価手法の高度化・確立を図り、また地質地下水

環境特性の詳細把握とその定量的評価手法を確立することなどにより不確実性を軽減化し、長期性能を合理的に考慮した余裕深度処分施設の設計・安全評価の実施に資する。また、人工バリア中のガス移行に関わるデータ取得と評価手法の高度化・確立を図る。

Ⅲ. 電中研における基盤技術の開発展開

上述のように、電中研においてはバックエンド事業を支援するための研究を重点的に推進しているが、今後も長期にわたってこれらの研究を維持・発展していくために、先端的な基盤技術力の開発・高度化を着実に進展させていくことが重要である。電中研では、これまで低レベル(廃炉措置を含む)～高レベルの放射性廃棄物処分、使用済燃料の輸送・貯蔵などのバックエンド研究に長く関わってきており、これらを俯瞰した研究展開を通じて総合的で豊富な技術蓄積をしてきている国内有数の研究機関である。それらを支える基盤技術に関しては電中研独自の技術も多く、各課題の将来展開を見通し、限られた研究資源を有効に活用するとともに、総合力を発揮して目標を達成するため、第4図に示すような進め方で研究展開を図っている。この中で、電中研における基盤技術としては、“地質環境長期挙動調査評価”、“施設の設計・性能評価”、“施設材料特性の長期挙動”、“安全評価”の4つに大きく分類して、特有の技術・手法の開発を進めており、以下に各基盤技術項目ごとにその概要と今後の方向性を述べる。

(1) 地質環境長期挙動調査評価技術

地震・断層、火山・火成活動、隆起・浸食、地形変動等の地質環境の長期安定性あるいは地質・岩盤・地下水・地化学等の地質環境特性に関する調査技術に関しては、これまでの電力施設立地調査等での豊富な知見と技術蓄積があり、さらに処分問題などに特有の超長期性なども考慮し、最先端の技術に進化させてきている。例えば、天然の環境地下水中に存在する He-3、He-4や Cl を用いた100万年オーダーの古い地下水年代を精度よく測定する技術やサンプリング技術など、電中研独自の技術を多く開発しており、これらをさらに高度化・実証していく。

(2) 施設の設計・性能評価技術

使用済燃料の輸送・貯蔵に主に係わるものとして、落下衝撃、除熱性能、地震時安定性、金属材料腐食、あるいは経年劣化・長期密封性等の試験・評価技術(実規模大を含む)を開発・高度化している。また、処分施設関連では、地下空洞・地下処分施設の長期安定性評価技術などの開発を進めており、平成21年度初めには独創的な超長期遠心载荷岩盤実験装置を導入・設置した(第5図)。本装置は、処分施設内の廃棄体～人工バリア～周辺バリアまでを模擬した縮尺モデルを供試体として、最大

り総合的に実施してきている特徴を生かして、国内外の関連研究機関等との協力・連携を一層図りつつ、電中研の総合力を発揮して、中長期的なバックエンド事業のマイルストーンを念頭におき、積極的に技術開発や技術協力等を推進し、わが国におけるバックエンド方策の確立・発展に寄与していきたいと考えている。

最後に、本稿の取りまとめにあたり、電中研バックエンド研究の3主要プロジェクト課題推進責任者である三枝利有氏、木方建造氏および廣永道彦氏の各位に多大なるご協力を戴いた。ここに記して、感謝の意を表する。

— 参 考 資 料 —

- 1) リサイクル燃料貯蔵会社ホームページ, (2009).
- 2) 日本原燃ホームページ, (2009).
- 3) 原子力安全委員会, 低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方(中間報告), (2007).
- 4) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律, 平成12年法律第117号, (2000).
- 5) 原子力発電環境整備機構, 知ってほしい今, 地層処分—放射性廃棄物の地層処分に向けた取り組み, 原環機構パ

ンフレット, (2009).

- 6) 電力中央研究所, 原子力研究の主要な成果(2008年版/2009年版), (2008, 2009).
- 7) 土木学会, 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, (2008).
- 8) 土木学会, 余裕深度処分における地下施設の設計, 品質管理および検査の考え方, (2009).
- 9) 日本原子力学会, 日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法, AESJ-SC-F 012-2008, (2009).
- 10) 三枝利有, 他, 中間貯蔵用キャニスタの耐食性評価—(1) 応力腐食割れ評価手法の提案, 原子力学会「2009年秋の大会」, (2009).

著 者 紹 介

河西 基(かわにし・もと)

電力中央研究所 地球工学研究所
(専門分野/関心分野)地下水理・安全評価,
バックエンド・放射性廃棄物管理