

技術展望

低レベル放射性廃棄物処分に関する技術展望

THE TECHNICAL VIEW OF LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

駒田広也¹・河西基²・広永道彦³

Hiroya KOMADA, Motoi KAWANISHI and Mitihiko HIRONAGA

¹正会員 工博 (財) 電力中央研究所 バックエンドプロジェクトリーダー

²正会員 工博 (財) 電力中央研究所 バックエンドプロジェクト 天然バリアチームリーダー

³正会員 (財) 電力中央研究所 バックエンドプロジェクト 天然バリアチーム

(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1181)

Key Words : low-level radioactive waste, land disposal, groundwater flow, cement material

1. はじめに

廃棄物の中には、一般の産業廃棄物と一緒に処分できないものとして、放射性廃棄物がある。放射性廃棄物は、原子力発電所など核燃料サイクル施設の運転および解体に伴って、放射性核種で汚染されたものとして発生する。運転に伴う廃棄物は適切な処理が施された後、施設内で貯蔵され、最終的には、公衆への放射性核種が許容される範囲に納まるように安全に処分されることになる。

処分方法に要求される隔離の程度は、放射性廃棄物に含まれる放射性核種の濃度と種類によって異なる。表-1に我が国において発生する放射性廃棄物の処分方策の概要を示した。

低レベル放射性廃棄物のうち、原子力発電所からの廃棄物で放射能レベルの比較的低いものに対しては、軽度の隔離機能を有する処分方式、例えば、陸地処分(浅地中処分)などが世界的に適用されている。我が国においても後述の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターで実施されている。更に、解体廃棄物として発生したコンクリート等の放射能レベルが極めて低いものに対しては、コンクリートピットを用いたりしない簡易な方法による埋設処分も実施済みである。一方、発電所から発生する低レベルのうちでも比較的高い放射能レベルの放射性廃棄物に対しては、やや深い地下への処分方策を検討している。

一方、低レベル放射性廃棄物のうち、TRU 廃棄物はその放射能レベルに応じた処分方策を現在検討中である。

再処理施設において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃棄物については、量的には少ないが、半減期が長く、高い放射能を有している。そのため環境汚染と

公衆の放射線被曝を防止するとの観点により、人間の生活圏から隔離することが必要であるとの考えのもとに、廃棄物をガラス等で安定形態に固化した後、30年から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下数百から千メートル程度の深い地層中に処分する(地層処分)ことを基本的な方針として、諸施策を進めている。

本報告では、低レベル放射性廃棄物のうち、主に原子力発電所運転で発生する廃棄物の処分の現状技術を述べ、今後の技術展望を概観する。

2. 低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方

原子力発電所の運転で発生する低レベル廃棄物は、量的には放射性廃棄物の大部分を占めるが、一般に短半減期で短寿命であり、長期間の管理を必要としない。ただ危険とみられている放射線を少量ではあるが出し続けているので、非放射性廃棄物と比べて慎重な取り扱いと隔離を必要とする。しかし、その管理の基本は一般廃棄物に対する管理方法を、さらに改善して適用しているものであり、全く異なる技法を使っているわけではない。

我が国で行われている低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設処分の基本的な考え方は、時間の経過に伴って、放射能が減衰して人間環境への影響が十分に軽減されるまでの間、施設等の人工バリアによって核種移行を抑止し、土壌等の天然バリアによって核種の移行遅延をはかるといふものであり、段階的に管理を軽減していく方法が取られている。

3. 低レベル放射性廃棄物処分施設の概要

低レベル放射性廃棄物の埋設処分は、我が国を含めて海外においても既に行われている。以下に主な施設を

表-1 我が国で発生する放射性廃棄物の処分方策

廃棄物の種類	発生源	主な廃棄物	放射能レベルの区分	処分方策	
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物 原子力発電所等の運転及び解体	運転廃棄物：濃縮廃液、雑固体廃棄物、等 解体廃棄物：コンクリート、原子炉容器、配管等の金属、等	放射能レベルが比較的高いもの	やや深い地下への処分概念について検討する。	
			放射能レベルが比較的低いもの	浅地中処分として検討済み。	
			放射能レベルが極めて低いもの	コンクリートについては、容器に固化したりコンクリートピットを用いたりしない簡易な方法による浅地中処分として検討済み。	
	TRU核種を含む放射性廃棄物	再処理施設及びMOX燃料加工施設	濃縮廃液、雑固体廃棄物、イオン交換樹脂、等	α 核種濃度が区分目安値（約1 GBq/t）よりも高いもの	浅地中以外の地下埋設処分（コンクリート、ベントナイト等からなる人工バリアを配した比較的大きな地下空間又はホールト等を設け、その中に廃棄物を集中する形で処分する方法等）が考えられる。
				α 核種濃度が区分目安値（約1 GBq/t）よりも低いもの	発電所廃棄物と同様、浅地中処分が可能と考えられる。このうち、放射能濃度が極めて低いものについては、簡易な方法によるトレンチ処分等の合理的な処分の可能性について検討する。
	ウラン廃棄物	ウラン転換・成型加工・濃縮等	焼却灰、雑固体廃棄物、フィルタ、等	ウラン濃度が比較的高いもの	TRU核種を含む放射性廃棄物のうち、 α 放射能濃度が比較的高いものに関する処分方法を参考にしつつ、検討する。
ウラン濃度が比較的低いもの				簡易な方法による浅地中処分を検討する。	
RI研究所等廃棄物	研究所及び放射性同位元素等の使用施設等	RI廃棄物：プラスチック、紙、密封線源、等 研究所廃棄物：廃液、雑固体廃棄物、コンクリート、等		可能な限り分別管理を実施し、各廃棄物毎に発電所廃棄物、TRU核種を含む放射性廃棄物、ウラン廃棄物の処分方策に準じて処分を行う。	
高レベル放射性廃棄物	再処理施設	再処理により使用済み燃料から分離された高レベル放射能廃液		安定な形態に固化した後、30年から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下の深い地層中に処分（地層処分）することを基本的な方針とする。	

紹介する。

① 六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター¹⁾

青森県上北郡六ヶ所村に位置し、低レベル放射性廃棄物を逐次受け入れ、約20万m³（200リットルドラム缶約100万本相当）を埋設し、最終的には約60万m³（200リットルドラム缶300万本相当）とする予定である。このうち第1期分として、200リットルドラム缶20万本相当の廃棄物埋設施設の許可を得て、1992年12月に操業を開始している。

埋設施設は、図-1のように、第三紀層の岩盤を掘り下げて、地表面下約14~19mに設置するもので、鉄筋コンクリート製ピット、点検路、覆土から構成されている。廃棄体定置後にはセメント系の充てん材により充てんし、上部に覆いを設置する。その後、埋設設備上面から2m上まで岩盤より透水性が小さいベントナイト混合土で覆い、更にその上を土砂等で4m以上覆土する。

② フランス ラ・マンシュ処分場²⁾

図-2に示すように、地表下のコンクリート・トレンチ

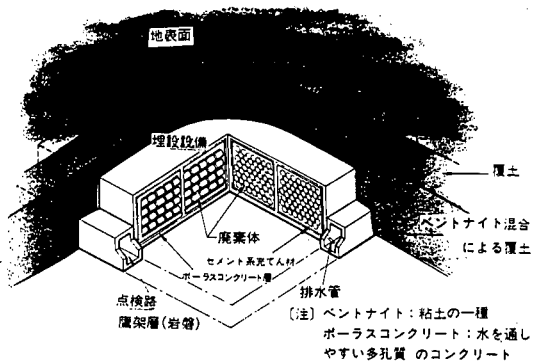
に比較的高い濃度の廃棄物を収納し、セメントを注入して一体化したモノリスと、その上に比較的低い濃度の廃棄物を積み上げて覆土するチェムリの複合方式の埋設施設である。1969年に操業開始している。

③ スウェーデン フォースマーク（SFR）処分場²⁾

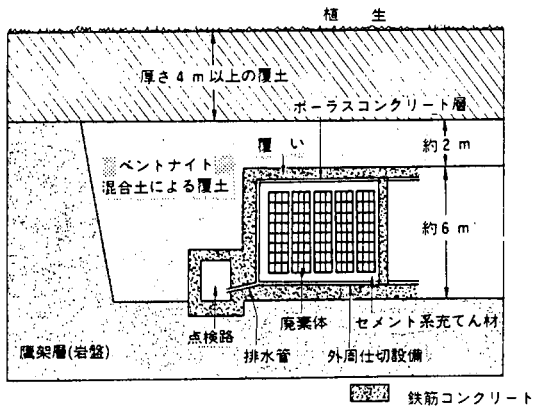
図-3に示すように、沖合海底下50m以深の地下空洞（サイロ型およびトンネル型）に廃棄物を収納する。サイロ型（高さ70m、直径30mの円筒型に掘削し、コンクリート製中空円筒を設置）には比較的高い放射能レベルのものを処分する。1988年に操業開始している。

4. 処分施設の安全確保方策

我が国で操業している六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターでは、以下のような方策で施設の安全を確保している。



A. 埋設設備の鳥かん図



B. 埋設設備の断面図 (概念図)

図-1 六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター

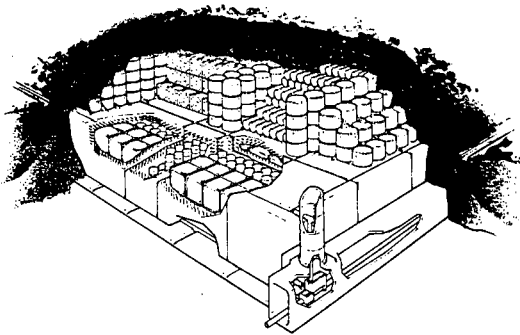


図-2 フランス ラ・マンシュ処分場

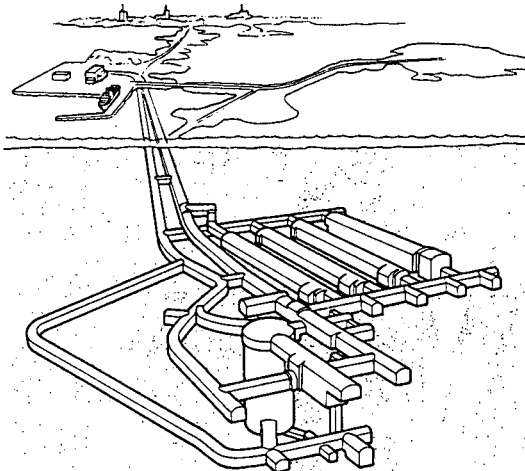


図-3 スウェーデン フォースマーク (SFR) 処分場

(1) 安全性に対する施設の役割分担

埋設した廃棄物の放射能が時間の経過に伴って低減し、放射能のレベルが安全上支障のないレベル以下になるまでの間、レベルに応じて廃棄物埋設地の管理を段階的に軽減していくため、第1～3段階の管理段階を設定している。

第1段階：埋設開始以降30～35年以内

埋設施設周辺に覆土を施さないで、埋設施設のみで放射性物質を閉じ込める。放射性物質がコンクリートピットから漏出していないことを監視し、漏出があったときにはピットの修復を行う。

第2段階：第1段階終了後30年間

埋設施設周辺に土壌を設置し、埋設施設と周辺土壌により放射性物質の移行を抑制する。地下水中の放射性物質を監視し、必要に応じて覆土の手直しなどの修復を行う。

第3段階：第1段階終了後300年間

主に周辺土壌により放射性物質の移行を抑制する。この段階では一般公衆の立ち入りは可能となるが、地表面の掘削禁止等の制約はある。

第3段階以降：制度的管理がなくなり、土地利用に

制約がなくなる。

以上の各段階における線量当量評価（放射能による人体への影響評価）では、廃棄体や埋設施設等の劣化が工学的に予測される以上に速く進行する条件を用いて、人体への影響が実際よりも安全側評価の結果になるようにしている。

(2) 地下水に対する安全性

放射性物質は、地下水の存在によって移行・拡散するものである。六ヶ所埋設センターでは、以下のような地下水対策等により、安全性を確認している。

- ① 埋設設備を透水性の小さい堆積岩盤（ 10^{-5} cm/sec オーダー以下の平均透水係数）まで掘り下げて設置するとともに、その上面および側面を難透水性材料であるベントナイト混合土で覆うことにより、地下水が埋設設備に容易に浸透していかないようにしている。
- ② 廃棄体は放射性廃棄物をセメントなどでドラム缶に固化化したもので、これを鉄筋コンクリート製の埋設設備に収納し、ドラム缶とドラム缶との間をセメント系充てん材で充てんする。この鉄筋コンクリートおよびセメント系充てん材は透水性が小さく地下水を通

しにくい。

- ③ 鉄筋コンクリート製ピットの内側に設置したポーラスコンクリート層等の排水・監視設備により、万一地下水が埋設設備内に進入した場合でも、この水が廃棄体に達することなく排水できるようにしている。この結果、埋設開始から60～65年間（第1～2段階）はこの水を排水することから、少なくとも第2段階終了までは、この埋設設備の外に放射性廃棄物が容易に漏出することはない。

(3) 操業管理

埋設設備に廃棄体を埋設する操業時およびそれに引き続き管理段階においては、設計および安全評価が想定した安全上の諸条件が確実に維持されるように、地下水のモニタリングや廃棄体の確認などが行われる。

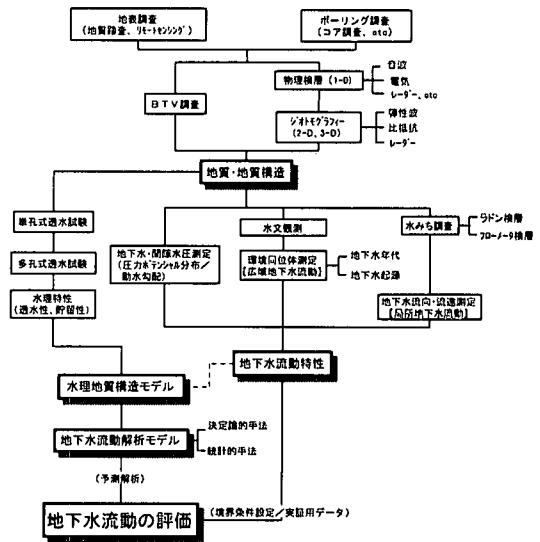


図-4 地質・地下水調査と地下水流動評価の手順

5. 地下水流動調査評価法に関する課題

放射性廃棄物処分の安全評価等においては、放射性核種の主要な移行媒体となる地下水の流動を適切に評価することが重要となる。

地下水流動を評価する上では、対象となる場の水理地質構造、とりわけ透水特性や圧力ポテンシャル（動水勾配）の調査を行うとともに、それらの結果に基づいた地下水流動解析モデルの構築を経て浸透流解析を行うことにより、定量的な地下水流動場を間接的に推定することが一般的に行われる。

一方、ボーリング孔等を利用して地下水流動を直接的に調査する方法として、地下水中の環境同位体、溶存希ガス、水質等を分析して地下水の起源・年代を測定することにより、比較的広域のゆっくりした地下水流動系を概略的ではあるが推定する技術がある。また、局所な地下水の流向と流速を単一のボーリング孔で測定する技術も開発され、既に実用段階に達している。

これらの技術を系統的に組み合わせることで、従来は間接的な推定の域にとどまっていたきらいのある地下水流動の調査・評価が、最近ではより定量的かつ精度的にもかなり向上した結果として得ることが大いに期待される状況になってきている。以上のような近年の技術開発の進展を踏まえ、系統的に地下水流動の調査・評価を実施する手順を図-4に示す⁹⁾。

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処分では地表付近の浅地処分の対象になっているが、今後、処分サイトは未定であるが、実施を予定している TRU 廃棄物のうち放射能レベルが高い廃棄物や高レベル放射性廃棄物の処分対象は数百から千メートルの深さとなり、前述の種々の技術を、より深い、より広域、より遅い流速、より低い透水性の地盤を対象とし

て、更に向上させる必要がある。

6. ベントナイト混合土に関する課題

砂あるいは砂礫にベントナイトを混合したベントナイト混合土が、図-1の六ヶ所埋設センターでは埋設施設周辺に、図-3の SFR 処分施設ではコンクリート製のサイト型躯体と岩盤との隙間に設置されている。このような放射性廃棄物処分の分野でベントナイトが使用されている理由として以下が挙げられる⁴⁾。

- ① 天然の砂に適度なベントナイトを混合することによって、周辺地盤に比べて低い透水係数の難透水性材料を構築することができる。
- ② 水みちとなる隙間が存在していても、あるいは、せん断ひずみが過大になり亀裂が発生しても、ベントナイト混合土に含まれるモンモリロナイトの膨潤作用によって水の浸入経路となることを防ぐ自己修復能力がある。
- ③ ベントナイト混合土は天然状態において地質学的な長期間にわたって安定であった材料で構成されており、長期安定性がある程度保証されている。
- ④ ベントナイトと砂礫の混合土では低透水性でしかも支持力も発揮できる特長がある⁵⁾。

以上の主な特長を有するベントナイト混合土は低レベル廃棄物のうち放射能レベルの比較的低い廃棄物の処分施設に適用されているが、将来は、TRU 廃棄物、高レベル廃棄物等のような、より濃度の高い放射性廃棄物の処分には、さらに低い透水係数をベントナイト系材料に要求されるようになるであろう。しかも更に力学的、化学

的な超長期の安定性が問われることになる。これらの課題に対する具体的かつ定量的なデータの充実が必要である。

7. セメント系材料に関する課題

(1) 処分施設におけるセメント系材料の現状

放射性廃棄物の処分はセメントの物理的、化学的な特長を生かし、あるいは精度よく評価することによって、処分施設の合理化と経済性に大きく寄与することになる。

図-1の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターでは、セメント系材料は廃棄体の固形化材、内部充てん材モルタル、躯体コンクリートとして使用されており、核種閉じ込めのための人工バリアとしても期待されている。しかし、これらのセメント系材料は、前述の第2段階以降、透水係数が 10^{-3}cm/sec （砂程度）になるとして、その止水性能は評価に取り入れないで、放射性核種に対する安全評価が行われている。また、核種（放射性物質）移行に対する遅延効果の評価として、セメントの高アルカリ性環境における溶解度の低下および吸着性の向上に関するメカニズムは、実際の安全評価に使用されるまでには十分に明確にされていない。

セメントは安価であり、現場施工が可能である。また、構造物としての実績、研究が豊富である等に加えて、その高アルカリ性および化学形態から、核種が溶解しにくく、バリア材としての吸着が大きい等の特徴があり、核種移行抑制機能が期待できる人工バリア材料である。

セメント系材料の人工バリア材料としての有用な特性を評価し、今後、実施される予定のTRU廃棄物や高レベル廃棄物の処分システムに合理的に組み込み、処分の経済性に寄与することが重要である。

(2) セメント系材料の長期耐久性評価

セメント系材料は、これまで構造部材としてその耐力および劣化対策が課題とされてきた。また、現在の一般コンクリート構造物の供用年数も50~100年程度であり、その間の構造物を維持するために、基本的に保守・補修で対応してきた。しかし、放射性廃棄物の処分施設は地下に建設されるため、処分場閉鎖後は、保守・補修を行うことが困難である。したがって、事前の設計段階で構造体としてできるだけ長期的に機能するように配合、材料等を決定し、長期にわたっての機能評価が必要となる。

放射性廃棄物処分施設から見たセメント系材料の長期耐久性評価には、地下水流速を速める物理的劣化と核種移行を速める化学的劣化の評価に大別される。地中コンクリート構造物の外壁部を対象に、図-5に示すような評

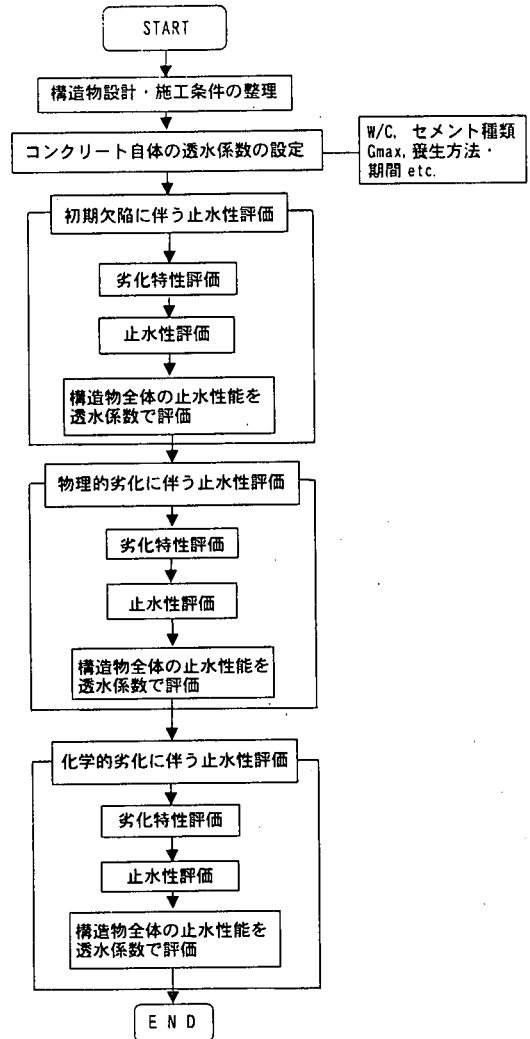


図-5 止水性能評価フロー

価フローにしたがって、止水性能を透水係数で評価した結果の例を図-6に示す。

(3) セメントの間げき水 pH 調整技術

セメント系材料の間げき水は高アルカリ性であり、吸着性能が期待される核種が多くある。そのため、現在行われている低レベル放射性廃棄物の埋設処分では、セメント系材料は物理的なバリア材としてよりも、むしろ化学的なバリア材として安全評価上考えられている。一方、処分施設におけるセメント系材料はベントナイト混合土と人工バリアシステムを構成する場合、間げき水が高アルカリ性ゆえに、ベントナイトがカルシウム型化し、膨潤性、低透水性等の特徴が損なわれる懸念がある。

したがって、将来の廃棄物処分施設等において、セメント系材料を核種移行抑制性能、すなわち、吸着性の優

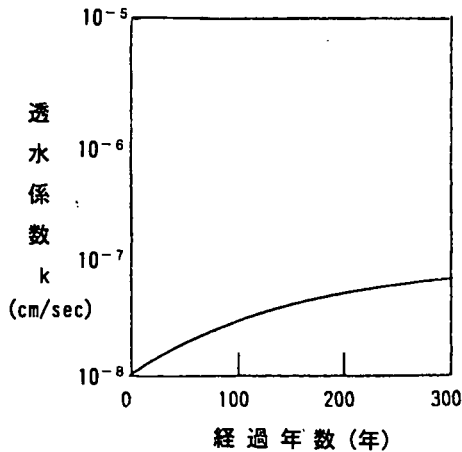


図-6 透水係数の経時変化

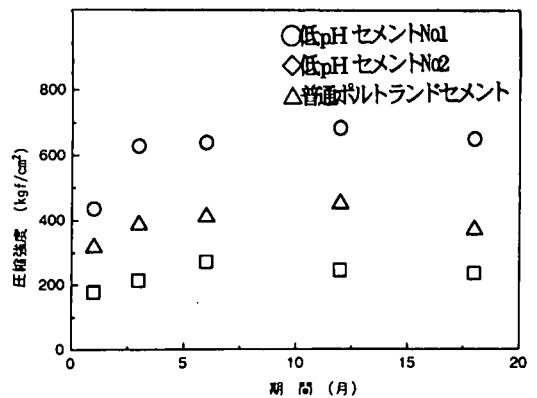


図-7 低 pH セメントの圧縮強度

れたバリア材として有効に活用していくためには、吸着性能に大きく影響を与える①セメント間けき水の pH 挙動評価手法の確立、②セメント間けき水の pH 調整技術の開発、が必要である。

このような背景の下で、低 pH セメントの試作を行っている⁶⁾。これまで低 pH セメントでは圧縮強度ならびに初期強度が低い欠点があったが、図-7 に示すように強度も発揮できる材料となっている。

8. おわりに

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に対する埋設処分の安全評価の現状を紹介し、今後の地下水流動調査評価手法、施設構成材料などの高度化方策を述べた。

更に、今後は低レベル廃棄物のみでなく、TRU 廃棄物および高レベル処分も計画されており、放射能レベルの高さに応じた合理的で経済的な処分システムを構築していく必要がある。

参考文献

- 1) 下田秀雄, 飯村秀文, 黒田輝夫:「六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センターの概要と安全確保」, 日本原子力学会誌, VOL. 33, NO. 11, pp. 35~42, 1991.
- 2) (財)原子力環境整備センター:「放射性廃棄物データブック」, 1990年3月.
- 3) 河西基, 馬原保典, 田中靖治, 田中和広, 宮川公雄, 塩崎功:「電力中央研究所における岩盤中地下水流動の調査・解析手法の現状」, 原子力学会バックエンド部会, 原子力バックエンド研究, VOL. 4, NO. 2, pp. 37~57, 1998年3月.
- 4) 石井卓, 中島均, 三谷泰浩:「ベントナイト混合土の透水係数の長期変化に関する研究の現状—放射性廃棄物の処分に関する文献調査結果—」, 粘土科学, VOL. 36, NO. 4, pp. 210~223, 1997.
- 5) 平松住雄, 他:「礫ベントナイト混合土の支持力模型実験」, 土木学会年次学術講演会Ⅲ, pp. 512~513, 1996.
- 6) 広永道彦:「放射性廃棄物処分におけるセメント系材料のバリア機能評価について」, 原子力学会バックエンド部会, 原子力バックエンド研究, VOL. 4, NO. 1, pp. 29~38, 1997年8月.

(1998. 7. 14 受付)