招待論文

放射性廃棄物処分に係わる最近の技術動向と
土木工学への期待PRESENT STATUS OF R & D FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL AND EXPECTATIONS
FOR CIVIL ENGINEERING IN ADVANCES OF THEIR TECHNOLOGY IN JAPAN河西基¹・大西有三²・油井三和³・佐々木規行⁴

Motoi KAWANISHI, Yuzo ONISHI, Mikazu YUI and Noriyuki SASAKI

¹正会員 工博 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)²正会員 工博 Ph.D. 京都大学 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)³理博 核燃料サイクル開発機構 処分研究部 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 の 33)⁴日本原燃株式会社 埋設事業部 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字野附 504 の 22)**Key Words :** radioactive waste, geological disposal, disposal technique, hydrogeological survey, engineering barrier, disposal facility

高レベル放射性廃棄物処分に關しては、原子力発電環境整備機構による「概要調査地区選定」のための公募が開始されている。低レベル放射性廃棄物に關しては、高 $\beta\gamma$ 廃棄物を主対象として、従来の浅地中処分方式よりもやや深い深度での処分方法の検討が行われている。これらの放射性廃棄物の処分にあたっては、学際的な幅広い専門分野における最先端の技術の結集が不可欠である。特に、地下処分施設等における、調査・設計技術、材料開発、性能評価手法などの面において土木工学が果たす役割は非常に大きい。本論文では、これまでに土木工学が経験をしたことのない千年～万年を超えるような超長期にわたる議論を必要とする処分技術における最近の動向とともに土木工学の果たす役割や期待について述べる。

1. はじめに

わが国における発電量の約3分の1は原子力発電によってまかなわれており、原子力発電によって発生する放射性廃棄物の処分が今後の原子エネルギー利用政策における重要な課題となっている。この内、原子力発電所の運転にともなって発生する低レベル放射性廃棄物に關しては、1992年より開始され、また雑固体廃棄物を対象とした第2期埋設処分も2000年より開始されている。いずれも、青森県六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設貯蔵センターにおいて地表面下10m前後の深度の浅地中におけるコンクリートピット埋設処分方式により行われている。次期の埋設計画においては、高 $\beta\gamma$ 廃棄物のような放射能レベルの比較的高い低レベル放射性廃棄物を主対象とした50m～100m程度のやや深い深度におけるトンネル方式等による処分の検討がなされている。一般的な地下利用に十分余裕を持った深度での処分という意味から「余裕深度処分」と呼ばれている¹⁾。一方、使用済燃料の再処理により発生する高レベル放射性廃液はガラス原料と混ぜ、ステンレス製容器に封入・固化して、高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)とされ、地下300mより深い安定した地層中に2030年代後半を目途に処分が開始されることとなっている^{2)～6)}。

この他にも、再処理施設などから出てくるTRU廃

棄物や、ウラン濃縮工場等から出てくるウラン廃棄物、病院・研究所等から発生するRI・研究所等廃棄物、さらには原子力施設の運転・解体にともなって、発生する放射性廃棄物として取扱う必要のないクリアランスレベルの廃棄物の処分・再利用など各種の廃棄物の処分問題が今日の大きな課題となっている。特に、最近ではこれらの放射性廃棄物をそれぞれの種類に応じた処分方策の確立や安全規制の制度整備の検討が国レベルで進められている⁷⁾。

以上で述べたような、放射性廃棄物の種類と処分方法等に関して、現在、わが国において検討されている考え方は表-1(文献⁷⁾に経済産業省資源エネルギー庁ホームページ「放射性廃棄物の概要」に記載されている廃棄物発生量を加筆して修正)と図-1⁸⁾のようにまとめられる。本論文においては、これらの廃棄物のうち、既に青森県六ヶ所村で操業が開始されている放射能レベルの比較的低い低レベル放射性廃棄物、あるいは2000年に制定された最終処分法に基づき実施主体である原子力発電環境整備機構(以降、「原環機構」と呼ぶ)により事業化に向けた本格的活動が開始された高レベル放射性廃棄物に焦点を当て、これらに共通して土木分野が特に関わることになる技術の現状と課題について述べることにしたい。

表-1 放射性廃棄物の種類と処分（文献⁷⁾を加筆・修正）

放射性廃棄物の種類		発生場所	廃棄物発生量	処分方法等
高レベル放射性廃棄物 ^(注1)		再処理工場	ガラス固化体にして約17,300本分相当 ^(注5) このうちガラス固化体になって貯蔵されているもの890本 ^(注6)	地層処分 (冷却貯蔵後、地下300m以深の地層への処分)
低レベル放射性廃棄物	TRU廃棄物 ^(注2) (超ウラン核種を含む廃棄物)	MOX燃料成型加工工場	ドラム缶87,000本 ^(注7)	(含まれる放射性物質の濃度に応じて区分し、コンクリートピット処分、余裕深度処分、地層処分を想定)
	炉心等廃棄物(仮称) (放射能レベルの比較的高い廃棄物)	原子力発電所	8,000トン ^(注7)	余裕深度処分 (一般的な地下利用に余裕を持った深度、例えば50～100m程度の地中への処分)
	低レベル放射性廃棄物 (放射能レベルの比較的低い廃棄物)		ドラム缶 500,000本 ^(注8)	浅地中処分(コンクリートピット処分) (日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター(六ヶ所村)で実施)
	極低レベル放射性廃棄物 (放射能レベルの極めて低い廃棄物)			浅地中処分(トレンチ処分) 〔日本原子力研究所東海研究所で実施〕
	ウラン廃棄物	ウラン濃縮工場 ウラン燃料成型加工工場	ドラム缶81,000本 ^(注7)	(含まれる放射性物質の濃度に応じて区分し、トレンチ処分、コンクリートピット処分、余裕深度処分、地層処分を想定)
R1, 研究所等廃棄物 ^(注3)		病院, 研究所等		廃棄物又は溶融固化やセメント等を用いた固型化により安定化して廃棄体として管理中
放射性廃棄物として取り扱う必要のないもの (クリアランス相当の廃棄物) ^(注4)		各原子力施設において運転・解体に伴い発生		(再利用や産業廃棄物と同様の処分が可能)

(注1) 100万kWの原子力発電所1基で約100万人分の電力量をまかなうことができる。その結果として1年間に約30本(1人当たり0.00003本)の高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)が残る。

(注2) 超ウラン核種とは、ウランより原子番号の大きい人工放射性核種であり、半減期が長く、 α 線を放出するものが多い。

(注3) 文部科学省で規制。

(注4) クリアランスレベルの制度化については、現在検討中。

(注5) 平成15年12月末現在 (注6) 平成15年12月末現在 (注7) 平成10年3月末現在 (注8) 平成12年3月末現在

2. 処分の基本概念

既に操業が行われている比較的低放射能レベルの低い低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設処分、2006年頃からの事業許可申請の開始をめざして現在検討中の、やや放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物の次期埋設処分(余裕深度処分)、さらには高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の処分など、各種放射性廃棄物の処分概念の概要を示したのが図-1である。

基本的には、放射能レベルが高く長寿命の放射性核種が支配的な廃棄物ほど、その隔離性能を確保する観点からより深い地中に処分する考え方となっている。このうち、図-2は高レベル放射性廃棄物の地層処分システムとして一般的に考えられている基本概念を示したものである⁹⁾。また、図-3は高レベルの場合にお

ける多重バリアと言われる処分施設(人工バリア)や周辺岩盤(天然バリア)による核種の隔離・移行抑制として期待する基本的なバリア機能を示している¹⁰⁾。一方、図-4は次期の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分概念として日本原燃において検討されているトンネル方式による埋設施設の例を示したものである¹¹⁾。人工バリアの構成などにおいては、高レベル放射性廃棄物ではガラス固化体、これまでの低レベル放射性廃棄物ではセメントモルタルなどで200lドラム缶に固化するというように、対象とする廃棄物の種類や放射能濃度などに応じて処分施設の形態は異なったものが考えられている。

しかし、地中トンネルに施設を構築するという点では共通している。特に、地下水の浸入や核種の漏出を抑制するなどのために用いられるベントナイト混合土(緩衝材や埋戻し材料として)やセメント系材料(処

図-1 放射性廃棄物の種類に応じた処分方法と処分深度⁸⁾

図-2 高レベル放射性廃棄物処分施設構成基本概念⁹⁾

図-4 余裕深度処分トンネル施設概念検討例¹¹⁾

図-3 高レベル放射性廃棄物処分多重バリア概念図¹⁰⁾

分施設の構造体あるいは支保工などとして）が地下施設を構成する重要な材料として考えられており、共通的な技術課題が多くなってきたと考えている。

以下では、これまでの技術的検討の現状¹²⁾を踏まえ、特に土木工学的な観点から技術的な取り組みが必要なものについて最近の技術動向を概観することとしたい。

3. 処分技術の検討の現状

ここでは、原環機構により事業化が推進されている高レベル放射性廃棄物処分に関連した技術的な現状と課題を中心に概観する。技術的には今後の次期低レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物の処分概念にも共通的な課題が多いと思われる。高レベル放射性廃棄物処分に関しては、核燃料サイクル機構による第2次取りまとめ¹²⁾や電力中央研究所・電気事業連合会による事業化報告書¹⁰⁾などにより、基本的にわが国においても技術的信頼性をもって処分を実現し得ることが示されている。さらに、今後とも技術的信頼性を向上させるとともに、合理的な処分方法を確立していくための技術的な検討がさらに必要との観点から、各方面で検討が進められている¹³⁾。

(1) サイト特性調査

図-5 は高レベル放射性廃棄物処分における段階的

〔高レベル放射性廃棄物最終処分施設建設地の段階的選定のプロセス〕

図-5 高レベル放射性廃棄物処分の段階的サイト選定の考え方¹⁴⁾

な処分地選定の考え方を概略的に示したものである¹⁴⁾。高レベル放射性廃棄物の場合、サイト選定を段階的な過程を経て進めていくこととされており、現在はその第1段階にあたる概要調査地区の選定のための公募が原環機構によりなされている。この段階では、応募がなされた市町村の対象区域等について文献調査を行い、2007年頃までに第1段階の選定を行うこととされている¹⁴⁾。例えば、活断層や火山など法律によって定められている明らかに処分場へ著しい影響を与える特定の条件に当てはまる地域は除外されることとなっている²³⁻⁴⁾。また、第2段階以降になると、ボーリング調査や地下調査坑によるさらに詳細な調査へと進むことになっている。これらのステップを踏むごとに国等による確認も行われるので、処分地としての適性を判断するためのデータ蓄積が図られ、より詳細な評価が可能となる。また、調査や評価などの新しい技術・方法などを取り入れることもできるので、合理的な調査・選定が期待できるものと考えられる。

なお、次期低レベル放射性廃棄物の埋設計画（深度50m～100mでの余裕深度処分概念）のための本格的な調査が青森県六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターのサイトで行われているが、上記の高レベル放射性廃棄物のサイト選定の3段階の中では最終ステップの処分施設建設地選定の調査段階に相当するという考え方もできる。このような段階的な調査の進め方は、スウェーデンSKBによるエスポ硬岩地下研究所（HRL）などのように、これまでに国内外での長年の研究蓄積が得られてきており¹⁵⁾、国によって差異はあるものの、処分の基本概念においては共通するところが多く、調査技術の面でもかなりの技術開発が進められている。

図-5におけるサイト特性調査の考え方の例に示されるように、調査の対象とする場のスケールや段階ごとの目標などによって調査項目や要求される内容・精

図-6 地下水年代測定技術の適用例（エスポ HRL における国際共同原位置試験研究）¹⁶⁾

度等が設定される必要がある。例えば、安全評価上の重要な要素となる地下水の流れについては、直接的に測るのは容易ではないが、間隙水圧分布と透水分布特性から解析的に評価するだけでなく、最近では地下水年代測定や水質などを指標としてその推定結果の確からしさを評価確認する方法が提案されてきている。

図-6は、ヘリウム蓄積法（He-3/4）に基づく地下水年代測定手法をエスポ HRL における原位置試験に適用した例であり、地下トンネル内での測定により、サイト内の100万年オーダーの地下水流動系がより詳細に議論できることが示されている¹⁶⁾。

サイト特性の調査・評価に必要な技術は、これまでに開発された技術が有効に適用できる段階に達していると考えられており^{9),10)}、今後はサイト選定の調査段階が深まるごとに不確実性を減らしたり、信頼性や精度を着実に向上するための技術の向上を図ることが必要と考える。

(2) 人工バリアと処分施設構成材料

放射性廃棄物処分において、人工バリアに要求される役割は、廃棄体と地下水との接触を抑制し、放射性核種の移行を遅らせ、核種の放射壊変による減衰により、人間環境に対する安全性確保の一翼を担うことである。構成としては廃棄体そのもの（従来の低レベル放射性廃棄物ではセメントなどで200 lドラム缶に固化されたもの、高レベル放射性廃棄物ではガラス固化体）、およびその外側に配置される高レベル放射性廃棄物の場合における、図-3に示すようなオーバーパック、緩衝材（ベントナイトなど）が考えられている。低レベル放射性廃棄物の場合には、オーバーパックという概念はないものの、ベントナイト混合土を用いるなど処分施設構成材料としては共通する考え方が多く取り入れられている。ベントナイト材料は、この他にも、処分坑道の埋め戻し材の一部としても用いられることが考えられており、処分における重要な材料の一つとなっている。

一方、処分施設においてはその他、支保工や止水グラウトなどにおいて鋼製材料やセメント系材料が不可欠なものとなる。特に、セメント系材料に関しては、低レベル放射性廃棄物処分では処分用ビットなどでも大量に使用されることになる重要な材料である。従来の低レベル放射性廃棄物処分においては、セメント材料の長期性能についてはデータの蓄積が十分でないこと等によりほとんど期待しないという保守的な扱いがなされてきているが、その後の調査研究の積み重ねにより長期性能の議論ができる状況となってきた。

以下に、高レベル放射性廃棄物や低レベル放射性廃棄物の処分において共通的に用いられる緩衝材（ベントナイト等）、セメント系材料についての研究の現状について述べる。

a) 緩衝材

緩衝材の候補材料は、ベントナイト、ベントナイト以外の天然の粘土、砂および破碎した岩石等がある。

高レベル放射性廃棄物の場合において考えられる緩衝材の設計要件としては、①止水性、②自己シール性、③熱伝導性、④オーバーパック支持性、⑤応力緩衝性、⑥透気性、⑦核種吸着性、⑧コロイドろ過性、⑨化学的緩衝性、⑩長期的健全性、⑪製作・施工性などがある。

例えば、周辺地下水の水質による止水性への影響に関しては、図-7に示すように、海水系における透水係数の値は、降水系の値より1桁程度大きなものとなることが報告されている¹⁷⁾。また、金コロイドを用いた緩衝材によるコロイドろ過試験の結果¹⁸⁾に基づき、有効なコロイドろ過性が機能する条件が図-8のように示されている¹⁹⁾。基本的なベントナイトの膨潤や透

図-7 人工海水及び蒸留水を比較した透水係数¹⁷⁾

図-8 ベントナイト系緩衝材の圧縮強度、ケイ砂混合割合とコロイドろ過性の関係¹⁹⁾

水特性などはかなり把握されてきているので、今後は上述のような処分環境条件を考慮した長期の性能に関わる研究への取り組みが必要と考える。

b) セメント系材料

セメント系材料は、低レベル放射性廃棄物の場合には廃棄体固化材料、コンクリートピットおよびその内部充填材などとして用いられ、また高レベル放射性廃棄物処分施設では、支保工、プラグ、グラウト等として用いられることが想定されている。これまでは、セメント系材料は、緩衝材などのように核種移行抑止機能については長期的な観点では十分な実績がないためさほど期待されておらず、例えば、操業時の坑道の安定性を保つ構造材などとして期待されていた。しかしながら、普通セメントを基本としたセメント系材料の浸出液のpHは、12.5以上の高アルカリ性を示すことから、地下水の影響によりその高アルカリ間隙水が周辺の重要なバリア材に影響を与えることも懸念される。このため、セメント材料を構成する水和物の溶脱によるセメント自体の長期変質や、セメントから溶脱した各種イオンを含む高アルカリ間隙水による周辺バ

表-2 低アルカリ性セメントの開発概要^{20),21)}

低アルカリ性セメントの開発方法	クリンカー設計	ポゾラン質混和材添加				アルミナシリケート混和剤添加
低アルカリ性セメントの名称	LAC-S	HFSC	LHHP	—	—	—
pH	10.5 程度	10.5 程度	10.5 程度	11.0 程度	10.5 程度	—
開発元	電中研・太平洋コンサルタンツ(広永ほか, 2000)	核燃料サイクル開発機構(大和田ほか, 2000)	カナダ原子力公社(AECL)	スウェーデン(SKB)・フィンランド(Posiva)	ウクライナキエフ工科大学	—

図-9 各種のセメント水和物溶脱試験方法^{20),22)}

リアへの影響などについての研究が進展する一方、pH 10.5～11 程度の低アルカリ性セメントの開発も進められてきている。

表-2 は、国内外において開発が進められている低アルカリ性セメントの特徴をまとめたものである^{20),21)}。図-9 は、セメント水和物の溶脱を検討・評価する上で最近用いられている主な試験方法である溶解法、浸漬法、通水法、電気的促進法の 4 種類の試験方法概念を示したものである^{20),22)}。

これまで、セメントの溶脱に関する評価では、主に上記の 4 種類の試験方法が用いられてきているが、解析モデルを開発するためのデータ取得という観点で行われたものが多く、溶脱メカニズムそのものを解明するために実施された研究はまださほど多くない。既往の解析評価の結果¹⁰⁾では、セメントから溶脱するカルシウム等の各種イオンが全量ベントナイト等に作用し、ベントナイトおよびオーバーパックへの腐食に影響を与えることが指摘されている。

しかし、セメント溶脱は、昨今研究により表面から徐々に進行していくことがスウェーデン SKB などの研究²³⁾で認識されてきている。今後は、溶脱現象そのものを評価するには、試験方法を目的に応じて選定し、かつ処分環境を踏まえた上での詳細な検討が必要と考える。

(3) 処分施設的设计

a) 地下施設の設計

処分施設は、地下施設と地上施設から構成されるが、このうち地下施設の設計の基本要件としては、以下のものが考えられる。

- ①人工バリアの設置手段が提供でき、人工バリアの性能に有意な影響を与えないこと。
- ②周辺岩盤が天然バリアとしての機能を発揮できるようにすること。

JNC 第 2 次取りまとめなどにも述べられているように、地下施設設計に係わる処分深度の設定にあたっては、処分深度について、地層処分の長期安全性、地質環境の安定性、対象岩盤の広がり、地下水の地球化学特性(酸化還元状態など)や地下水流動特性などの地質環境の特性、建設技術や調査技術の適用範囲、空洞の力学的安定性や人工バリアへの熱的影響、さらには経済性などを勘案して最終的には最適化が図られることとなる。例えば、地下施設の深度設定の考え方として、地下施設の基本要件を満足する深度を空洞の力学的安定性と地下水流動場の観点から図-10 に示すフローに従って処分深度の検討を行い、最終的には安全評価による確認を実施するという手順の検討例がある¹⁰⁾。

図-10 処分深度設定の検討フロー
(文献¹²⁾を加筆・修正)

b) 地下施設の埋め戻し

処分場が所要のバリア機能を保持するために、廃棄体定置後、適切な時期に処分坑道、主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道を埋め戻すことが必要である。

これらの坑道の埋め戻し材料としては、掘削ズリを含めた複数の候補材料の混合材料とするような考え方があるが、いずれにしても地質環境条件を考慮して埋め戻し材料としての要件を満足する配合などを設定することとなる。

さらに、坑道およびその周辺の緩み域、断層破砕帯、各種調査・試験用ボアホール等が将来主要な地下水移行経路（水みち）とならないようにし、また、坑道内の緩衝材や埋め戻し材の移動・流出を防止するために適切な場所にプラグを設置することも考えられる。

4. 処分技術における今後の研究ニーズ

土木学会地下環境部会が取りまとめ公表した報告書²⁰⁾では、高レベル放射性廃棄物処分技術における今後のさらなる信頼性向上に向けて考慮することが必要な研究ニーズをまとめている。その中でも特に、土

木技術分野に係わりが深く、期待される機能がこれまでの土木技術の対象に比べかなり長期にわたる課題として次の8項目に焦点を当て、最新の知見も考慮しながら今後の取り組みの方向性について議論している。

- ①オーバーバックの腐食挙動評価
- ②緩衝材の長期挙動評価
- ③セメント系材料の長期挙動評価
- ④ニアフィールドにおける相互作用評価
- ⑤坑道安定性評価
- ⑥掘削影響領域の特性評価
- ⑦シーリング性能の評価
- ⑧コロイド影響評価

ここでは、高レベル放射性廃棄物および低レベル放射性廃棄物に共通的かつ土木工学分野に関係の深い下線を引いた5項目について、その検討結果の概要を紹介する。

(1) 緩衝材の長期挙動評価

緩衝材として用いられるベントナイト材料に関しては化学的および力学的な観点での長期挙動が重要であり、このうち化学的挙動としては次のような課題が挙げられている。

- ・ベントナイト間隙水組成の長期評価：ベントナイト

には、塩化物や硫酸塩などの可溶性不純物を含むことが考えられることから、それらの拡散など移行を考慮した間隙水組成の長期評価が必要である。

- ・イオン型（Ca型化）の変化の評価：イオン型の変化は、初期のNaイオンが地下水中およびベントナイト中に存在する方解石起源のCaイオンと置き代わるCa型化が主として考えられる。Na型ベントナイトを人工的にCa型化させ処分の評価に重要となる特性に関してのデータ取得が行われており、透水係数や膨潤圧については、ベントナイトが高密度に充填されていれば、同程度の性能を示すことが分かっている。

- ・鉱物学的な変化（イライト化・シリカセメンテーション）の評価：熱の影響によってベントナイトのイライト化やシリカセメンテーションが生じる可能性があり、その評価が必要ある。

一方、力学的な観点での長期挙動に関しては次のような課題がある。

- ・長期力学評価モデルの信頼性向上：圧密試験、三軸圧縮試験、クリープ試験などの室内試験によりデータの拡充を実施する一方で既存構成モデルの体系化を行い、長期挙動評価への適用性の高い構成モデルを選定する必要がある。
- ・様々な処分環境変化に対する力学挙動評価：処分環境としては、温度条件、海水条件および支保工のセメント系材料の影響などを考慮する必要がある、これらの影響に関する緩衝材の力学特性を把握することにより長期力学挙動を評価する必要がある。

（2）セメント系材料の長期挙動評価

セメント水和物の溶脱メカニズムや化学的変質メカニズムの把握が必要である。例えば、スウェーデンのSKBでは、建設から約90年程度経過した貯水槽のモルタルからのセメント水和物溶脱状況を調査し、表面からカルシウムイオンが徐々に溶脱している現象のあることが把握されている。

このようなセメント系材料の溶脱による周辺バリアへの影響への対策として、次のような研究がなされてきている。

- ・周辺バリアへの高アルカリの影響を低減できる低アルカリ性セメントの開発：ベントナイト等の周辺バリアへの影響を低減できるセメントとして、低アルカリ性セメントの開発が進められている。今後、施工実験等を通して適用性の評価が必要である。
- ・セメント系材料の処分システムへの影響に関する研究：普通セメントを用いた場合は、周辺環境条件がアルカリ性となるため緩衝材や周辺岩盤などへの影響を評価しておく必要がある。

（3）ニアフィールドにおける相互作用評価

ニアフィールドにおける相互作用としては化学的なものと力学的な課題がある。この内、化学的な相互作用としては、普通セメントのニアフィールド周辺への影響などが考えられ、次のような検討がなされる必要がある。

- ・緩衝材への影響：高アルカリ条件におけるモンモリロナイトの溶解速度のデータ取得や溶解モデルの開発を行うとともに、ベントナイトの変質の性能評価への影響を把握するために変質ベントナイトの特性の評価も合わせて行うことが必要である。
- ・岩盤への影響：評価モデルの整備を行うとともにデータ取得も含めて高アルカリ条件における鉱物の溶解速度のデータを整備する必要がある。さらに、変質した岩石の特性評価（透水係数や分配係数など）も重要な研究項目である。

一方、力学的相互作用による影響としては、以下の項目が考えられる。

- ・岩盤クリープが緩衝材・オーバーパックに与える影響
- ・緩衝材の膨潤圧が岩盤に与える影響
- ・オーバーパックの腐食膨張が緩衝材・岩盤に与える影響
- ・支保工の劣化が岩盤・緩衝材に与える影響：今後、想定される処分環境条件下での実験データの充実、予測モデルの改良、保守的な評価を行っている現象（劣化した支保工による影響等）については室内実験等による力学特性への影響評価が必要である。

（4）坑道安定性評価

トンネル掘削の段階ごとに、次のような技術課題が考えられる。まず、掘削段階まででは、

- ・軟岩系岩盤での大深度坑道の安定性評価や支保設計：大深度の環境下における岩石・岩盤試験結果に基づく岩盤物性のモデル化や支保工材料の力学モデルの高精度化を図るとともに、既往のトンネルや空洞での施工実績や計測結果との比較検証を行って大深度坑道の限界状態を明らかにし、それに対応した解析手法、評価基準を構築することが必要である。また、操業段階では、次のようなものがある。
- ・地震時安定性評価手法：大深度の岩盤空洞における耐震設計、耐震安全性照査をどのように実施するかについては、明確に規定した指針がまだない。今後、地下施設各部位の耐震クラスの考え方、入力地震動の設定方法、耐震解析手法や安定性評価項目、評価基準などの耐震安定性検討フローやその基本的考え方について整備を図っていくことが必要である。

図-11 ニアフィールドにおける力学的相互作用要因の概念図²⁰⁾

図-12 掘削影響領域の概念モデル
(Sato et al.²⁴⁾を一部改)

- ・支保と岩盤の長期健全性：岩盤挙動を確認する調査技術の開発だけでなく、長期間供用されてきている既存トンネルの現在の健全性や、コンクリートなどの劣化状況を調査してデータベースとして取りまとめ、処分空洞の健全性評価に役立てるような手法の開発等も望まれる。一方、埋め戻し後の段階においては次の課題が考えられる。
 - ・岩盤の経時変形モデル：特に大深度の軟岩の場合には、操業中において岩盤の経時変形が問題となってくる。その場合、掘削方法や支保工等で対処せざるを得ないが、経時変形を考慮した合理的な支保設計を行うためにも岩盤のレオロジー特性を評価することが重要である。今後、室内や原位置での長期クリープ試験や挙動計測等により、岩盤レオロジーモデルの構築および構成モデルに基づく長期挙動解析手法の開発を進め、それらの妥当性の検証を継続して信頼性や精度の向上を図っていく必要がある。
- また、閉鎖後の処分坑道内外のニアフィールドにおいては、相互に力学的な影響を及ぼし合って複雑な挙

動を示すことが想定されている。図-11は、このような概念を図示したものであり、岩盤クリープ、緩衝材の膨潤圧、オーバーバックの腐食膨張圧など、各部位を構成する材料の長期的な化学的な変質・劣化も踏まえた種々の力学的な相互作用要因を適切に評価し、最終的には人工バリア性能への影響が小さいことを評価しておくとともに、施工性も考慮して合理的な設計を行うことが必要である。

(5) 掘削影響領域の特性評価

岩盤内に坑道を掘削することにより、岩盤条件にもよるが、坑道周辺には少なからず掘削の影響を受けた岩盤領域が発生すると考えられる。この領域では、もとの岩盤とは力学的、水理学的、化学的に異なる特性となり、さらにその特性は時間の経過とともに変化していくことが考えられ、これらの特性はニアフィールド環境にも影響を与えることから、その特性の把握やモデル化が必要である。図-12および図-13は、掘削影響領域の概念モデルと検討プロセスの検討例を

図-13 掘削影響に関連するプロセス
(Sato et al.²⁴⁾を一部改)

示したものである²⁴⁾。

また、第2次取りまとめでは、掘削影響領域(EDZ)内では核種の沈殿・溶解、複数崩壊連鎖を含む核種の崩壊のみを考慮し、EDZと交差する下流側の亀裂の流量に応じて瞬時に核種が天然バリアに移行すると仮定するなど、EDZ内での核種移行に対する遅延効果を考慮しない保守的な評価がなされている¹²⁾。今後、評価の信頼性向上および合理化の観点から、これらの保守性を見直しを進めることが重要である。

5. 処分技術分野における土木工学への期待

放射性廃棄物処分は、原子力はもとより地質、土木や生物の分野など非常に広範囲な技術の総合化結果を必要とする21世紀において人類が取り組んでゆく最大の技術プロジェクトと言っても過言ではなく、地球温暖化対策のための化石燃料に代わるエネルギー資源として最も有効と考えられている原子力平和利用をさらに進める上で避けて通れない課題である。このような放射性廃棄物処分に関しては、土木工学はサイトの選定・調査においては地質分野と、安全性の評価においては原子力分野と連携しつつ、さらに地下処分施設を構築するという観点では中心的な役割を果たすことが期待されている。異なる分野の技術の総合化は、土木工学の最も得意とするところである。

土木学会原子力土木委員会地下環境部会(岸清部会長)においては、これまでに中立的学術機関の立場より高レベル放射性廃棄物処分に関わる多くの学識経験者による技術検討を行ってきており、2001年8月には「概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方」²⁵⁾を、また2004年6月には「高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上にむけて—土木工学に係わる技術を中心として—」²⁶⁾をそれぞれ取りまとめ公表するなど大きな役割を果たしてきている。

一方、実施主体である原環機構においては、2004年3月に公表した報告書「概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠」²⁶⁾、および「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」²⁷⁾において現状における高レベル放射性廃棄物処分に係る技術的背景を詳細に取りまとめている。

これらの一連の報告書からは、高レベル放射性廃棄物が千年～万年オーダーを超えるような超長期の将来予測を必要とすることに起因する次のような今後に向けての課題(研究ニーズ)への取り組みの必要性が示唆されているものと考えられる。

- ・超長期の地質地下水環境および処分施設の挙動、あるいはバリア性能に関するより高精度の調査・評価手法やデータの高度化・整備
- ・長期になればなるほど一般的に増大する不確実性に対する評価シナリオ・手法の構築
- ・長期の性能がより期待できる人工バリアあるいは処分施設材料などの改良・開発
- ・安全性を十分に担保しつつ経済性にもすぐれた新たな処分施設の設計や処分システムの創出
- ・安全性への理解や安心感を深めるための合理的なモニタリング技術の高度化や情報の発信

上述のような技術的な研究ニーズは、いずれも今後、土木工学分野が他の分野との連携を深くしつつ取り組んでゆくことが期待され、それぞれ最先端の技術開発にもつながってゆくものと考えられる。そして、これまでわが国においては、処分の概念とか技術について先行する欧米からの輸入に頼る受け身の姿勢にどちらかと言えば立っていたが、将来的には日本からの技術や考え方の発信が十分に可能な実力と基盤力が蓄えられていると確信しており、特に未来を背負う土木工学やその他の関係分野に係わる若い技術者・研究者の今後の活躍に大いに期待したい。

6. あとがき

本論文においては、今後のわが国における放射性廃棄物処分に係る最近の技術動向について、低レベル放射性廃棄物の次期埋設処分(余裕深度処分)との関連を交えつつ、長期にわたる事業開始に向けて技術開発検討が進んでいる高レベル放射性廃棄物処分に関する技術を中心として述べた。既に順調な操業が続けられている第1期、第2期の低レベル放射性廃棄物浅地中埋設処分の経験も踏まえ、比較的至近年に計画されている余裕深度処分や、約30年後からの操業を目指して第1段階のサイト選定調査区域の公募が行われている高レベル放射性廃棄物処分などにおける技術的課

題は共通的なものが多くなっている。したがって、それぞれの特徴を十分にふまつつも、安全確保方策や技術面などでの連携が今後益々重要になってきていることを強調したい。そして、幅広い関連分野技術を必要とする放射性廃棄物処分においては、特に技術の総合化という面を得意とする土木工学への期待は大きく、その果たすべき役割はきわめて重要であると考え、その次第であり、本論文を通じてこれらの思いが少しでも今後を背負ってゆく若い土木技術者や研究者の方々に伝われば幸いである。

最後に、本論文の執筆にあたり、土木学会原子力土木委員会地下環境部会により公表された「高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上にむけて—土木工学に係わる技術を中心として—」²⁰⁾の一部を参考にさせていただいた。また、関連資料の収集・整理等に当たってはハザマの塩崎功博士のご協力を戴いた。ここに、記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 原子力委員会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について，1998.
- 2) 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.
- 3) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律施工規制，平成12年通商産業省令第151号，2000.
- 4) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針，通商産業省告示第591号，2000.
- 5) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画，通商産業省告示第592号，2000.
- 6) 原子力安全委員会：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告），2000.
- 7) 総合資源エネルギー調査会：放射性廃棄物処分に係る安全規制の現状と課題について，原子力安全・保安部会，第7回廃棄物安全小委員会資料，2003.
- 8) 電気事業連合会：パンフレット「わたしたちは低レベル放射性廃棄物についてしっかりと考えています」，2001.
- 9) 河西基：土木学会地下環境部会処分技術WGにおける高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状と信頼性向上に向けた今後の課題検討について，平成15年度土木学会全国大会研究討論会，2004.
- 10) 電力中央研究所・電気事業連合会：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術，1999.
- 11) 京谷修：余裕深度処分施設の地質地下水調査の現況，原子力学会バックエンド部会夏期セミナー，2003.
- 12) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート，JNC TN 1400 99-020，1999.
- 13) 例えば，土木学会原子力土木委員会地下環境部会：放射性廃棄物処分における工学技術の現状と信頼性向上に向けた課題（長期バリア性能を中心して），平成15年度土木学会全国大会研究討論会（座長：大西有三），2003.
- 14) 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物の安全，確実な最終処分を目指して，原環機構パンフレット，2003.
- 15) Stanfors, R., Erlström, M. and Markström, I.: Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/1, Overview of site characterization 1986-1995, SKB TR-97-02, 1997.
- 16) 馬原保典：高レベル放射性廃棄物処分のためのサイト特性調査・評価技術の検証—スウェーデン・エスボ地下研究施設における国際共同原位試験—，電力中央研究所研究年報2000年版，2000.
- 17) 菊池広人，棚井憲治，松本一浩，佐藤治夫，上野健一，鐵剛志：緩衝材の飽和透水特性—II—海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響—，サイクル機構技術資料，JNC TN 8430 2003-002，2003.
- 18) Kurosawa, S., Yui, M. and Yoshikawa, H.: Experimental study of colloid filtration by compacted bentonite, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 465, Materials Research Society, pp. 963-970, 1997.
- 19) Kurosawa, S., Kato, H., Ueta, S., Yokoyama, K. and Fujihara, H.: Colloid filtration by sand-bentonite buffer materials, *Proc. of 7th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*, CD-ROM, 1999.
- 20) 土木学会原子力土木委員会地下環境部会：高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上にむけて—土木工学に係わる技術を中心として—，2004.
- 21) 原子力環境整備促進・資金管理センター，シー・アール・エス：平成12年度「放射性廃棄物処分におけるセメント系材料の高度化に関する研究」報告書，p. 4.2.1.3-52，2001.
- 22) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書，p. 96，2000.
- 23) Lagerblad, B.: Leaching performance of concrete based on studies of samples from old concrete constructions, SKB TR-01-27, 2001.
- 24) Sato, T., Kikuchi, T. and Sugihara, K.: In-situ Experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, *Engineering Geology*, 56, pp. 97-108, 2000.
- 25) 土木学会原子力土木委員会地下環境部会：概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方，2001.
- 26) 原子力発電環境整備機構：概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠—「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料—，2004.
- 27) 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—，2004.

(2005.2.9 受付)

About high-level radioactive waste disposal, the general invitation in a voluntary approach for selection of "preliminary investigation areas" which is the 1st step of the stepwise site selection by Nuclear Waste Management Organization of Japan is started. On the other hand, about low-level radioactive waste disposal, several kinds of investigation for the burial disposal approach of the underground tunnel facility system in about 50-100 m depth below ground surface have been performed for disposing of high $\beta\gamma$ radioactive wastes.

For carrying forward each disposal project of these radioactive wastes, the integration of the state-of-the-art technology in an interdisciplinary broad research field is indispensable. Especially the role that civil engineering can play in fields, such as investigation, design, development of new materials and performance assessment for underground disposal facility is very large.

In this paper, the role and expectation of civil engineering, and the latest trend in the disposal techniques to need an argument to the order of very-long term of longer than 1,000 to 10,000 years which civil engineering have not experienced until now, are described.