解説シリーズ

高レベル放射性廃棄物地層処分の工学技術

—技術開発から理解促進へ—

第2回 緩衝材の製作、搬送、定置と定置後の品質に関する技術開発

原子力環境整備促進・資金管理センター 朝野 英一

高レベル放射性廃棄物の人工バリア材料の製作や処分場の操業技術に関わる工学技術の開発が国の基盤研究開発として進んでいる。第2回目は、オーバーパックの周囲に設置する緩衝材について、実規模スケールの試験を基本にした製作、搬送、定置に関する技術開発、およびそれらの技術によって構築される緩衝材の水との相互作用の特性を施工品質として捉えて評価して緩衝材の設計、施工に反映しようとする検討の成果を紹介する。

I. 緩衝材に関する技術開発

1. 技術開発の背景

我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と、処分予定地選定と安全基準の策定の技術的よりどころを提示した第2次取りまとめにあるように、地層処分ではガラス固化体を内包するオーバーパックと岩盤の間に緩衝材を設置して人工バリアシステムを構築する(本シリーズ第1回の第1図参照)¹⁾。緩衝材には放射性核種の移行抑制とオーバーパックの保護が求められている。前者に対しては、地下水移動抑制のための低透水性、放射性核種に対する収着性などが、後者に対しては力学的に安定な状態を維持する観点から応力緩衝性と強度などが基本的な設計要件として示されている。また、施工の際に生じる隙間を埋めることに対して、水を吸って膨潤するという自己シール性や、ガラス固化体からの発熱に留意した熱伝導性も同要件の一つとされている。こうした要求に応える材料として天然に産する粘土に着目し、圧縮したベントナイトを緩衝材として用いることとして、その仕様例—材質：ベントナイトとケイ砂の重量比7:3の混合物、厚さ：70 cm、乾燥密度：1.6 Mg m⁻³(この時の透水係数は 4.5×10^{-13} ms⁻¹、膨潤圧は

0.5 MPa 程度。また含水比は自然含水比で10%程度)が示されている。処分場の岩盤は堆積岩(軟岩)と結晶質岩(硬岩)の2種類とし、廃棄体の埋設ピッチや処分坑道の離間距離を適切に取ることにより、緩衝材の経年挙動としての変質が抑制される100℃未満の温度条件に維持できることも確認されている。処分概念には処分孔縦置きと処分坑道横置きの2つの方式があるが、緩衝材の製作・施工技術として、現場締固め(本稿では原位置締固めという)、ブロック、一体型、吹付けの4方式を挙げ、前2者の実現可能性が指摘されている²⁾。

2. 緩衝材の製作、搬送、定置の特殊性と課題

以上の経緯と本技術開発での検討結果より、緩衝材の性状や製作、定置方法を組み合わせたものを第1図に示す。緩衝材はベントナイトとケイ砂の混合物を所定の密度に圧縮成形したものであることから様々な方法で作ることが可能である。そしてその方法—言い換えると緩衝材の形—により縦置きと横置きの2つの定置方式に適用できる技術も多様なものとなる。すなわち、緩衝材の形に適した方法で搬送、定置することが合理的である。一方、緩衝材に求められる機能は前述した通りであり、どのような方法で構築される緩衝材であっても、地層処分場の人工バリア材料として要求される機能は同じである。

そこで本技術開発では、以下の点に着目した試験、検討を行い、緩衝材の製作、搬送、定置技術について多様な処分場概念に対する技術選択肢の整備を目指した³⁾。実規模スケールの試験装置と実物の材料を用いた実証的な手法は第1回のオーバーパックの溶接に関する技術開発と同様である。試験は地上の施設において実施した。

(1) 縦置きと横置きの両技術の実現可能性の提示

Engineering Technologies for Geological Repository Program of High-Level Radioactive Waste—Turning Developing Technologies to Public Relation (2); R&D on manufacturing, Transportation and Emplacement Technologies for Buffer Material : Hidekazu ASANO.

(2013年 5月20日 受理)

■前回のタイトル

第1回 オーバーパックの溶接と溶接部の健全性評価に関する技術開発

方法	定置方式	
	処分孔縦置き	処分坑道横置き
ブロック		
一体型		
原位置締固め		
ペレット		
吹付け		

第1図 緩衝材に関する手法の組合せ

- (2) 定置後の緩衝材の品質(施工品質)の評価
 (3) 上記(2)に基づく緩衝材の施工品質に関わる指標の提示に向けた検討

なお、緩衝材の製作、定置に関わる指針や技術基準はまだ定められていない。そこで、前述した第2次取りまとめの仕様例を基本とし、緩衝材に要求される止水性(透水性係数)や自己シール性(膨潤圧)に直結する乾燥密度をひとつの判断指標とした。

緩衝材ブロック(以下、ブロックという)を処分孔に縦置きにする場合の概念を第2図に示す。同図において、(a)は前述した緩衝材の要件に基づく概念、(b)は装置を用いて緩衝材を設置することを念頭に、オーバーバックと緩衝材、緩衝材と岩盤の間に隙間を確保したもので、ブロックの初期乾燥密度は、膨潤後に 1.6 Mg m^{-3} になるように 1.8 Mg m^{-3} としている²⁾。本技術開発では緩衝材を実際に製作、搬送、定置する試験を行うことから、供試体等の準備に際しては同図(b)を参考にした。なお、原料のベントナイトはクニゲルV1を用いた。

Ⅱ. 緩衝材の製作、搬送、定置に関わる技術開発

1. 処分孔縦置き

処分孔縦置きには、第1図に示す様々な方法がある

第2図 処分孔縦置きでの緩衝材の概念(単位: mm)

(a) 要件に基づく概念 (b) 装置の利用を考慮した概念

第3図 緩衝材ブロックの成形³⁾

が、いずれもケイ砂を30 wt%混合したベントナイト粉末(以下、緩衝材原料という)を所定の乾燥密度を有する形に成形する技術と、成形したものを処分孔に施工する技術が必要になる。本技術開発では、ブロック、原位置締固め、吹付けの3つの方式を実証的に検討した。

ブロックは緩衝材原料を金属製の型に入れ、1軸圧縮プレス機を用いて成形した。第3図にその状況を示す。本技術開発では2,000トンのプレス機を使用した(第2図よりブロックは直径2 m以上のリング型(オーバーバック周囲)あるいは、円盤型(オーバーバックの下部と上部)になる。その成形に必要な1万トン以上の圧縮能力を持つプレス機は、産業界では珍しくはないが、技術開発目的の利用には制限が伴った)。ブロックの形状は外径2.26 mのリングを8等分した1個分で、半径方向の厚さが700 mm、縦方向の厚さは300 mm。重量は約250 kg。目標乾燥密度は 1.9 Mg m^{-3} (含水比は約9%)。ブロック表面は平滑で、ひび、縁や角の欠けは見られなかった。小型サンプルの切り出しによる1ブロック中の乾燥密度分布の測定では、ブロック側面の上部が高く(1.96 Mg m^{-3})同底部が低い(1.78 Mg m^{-3})傾向が見られた。中央部の密度差はそれより小さかった(上部 1.93 、底部 1.87 Mg m^{-3})。

ブロックに割れや欠けを生じさせることなく持ち上げ(以下、把持という)、移動、積み上げを行う搬送、定置には、ゴム製吸着パッドをブロック表面に圧着し、内部の空気を排気して把持する真空吸引に着目した。製作した真空把持装置を第4図に示す。吸着パッド単体の把持能力を確認し、鋼製バンドを用いてリング型に組んだ緩衝材(総重量約2.3トン)を4個の吸着パッドで把持するものとした。同装置の装着、排気、吸引、吊り上げ、水平移動、降下、接地、真空破壊、吸着パッド脱着の一連の作業からその有効性を確認した。

原位置締固めと吹付けは処分孔に直接緩衝材を施工する技術である。前者は直径約2.3 m、深さ約3.3 mのコンクリート製ピットを利用して1層100 mm厚さ分の緩

第4図 真空把持装置とその使用状況³⁾

(a) 真空把持装置外観 (b) ブロックの把持

衝材原料を投入し、上から重錘(重り)を落下させて所定の密度に締固める作業を繰り返した。中心部には脱着可能な金属製型枠を設置してオーバーパック用の空間を確保した。緩衝材の密度分布は $1.54\sim 1.82\text{ Mg m}^{-3}$ (含水比は約15%)であった。一層分では上部の方が下部よりも乾燥密度が高くなる傾向が見られた。後者は緩衝材原料を圧縮空気を用いてノズルから噴出させて吹付ける技術である。直径約2.2 m、深さ約3.5 mの鋼製の模擬処分孔内に、模擬オーバーパックを設置して吹付けを行った。緩衝材の密度分布は $1.68\sim 1.72\text{ Mg m}^{-3}$ (含水比は約20%)であった。吹付けにより模擬オーバーパックを含めて模擬処分孔内に隙間なく緩衝材を施工した状況を第5図に示す。

2. 処分坑道横置き

処分坑道横置きは、第1図のPEM方式(Pre-Fabricated EBS Module, 以下 PEM という。EBS: Engineered Barrier System)とペレット充填方式の2つを実証的に検討した。本稿では前者を紹介する。

PEM はオーバーパックと緩衝材を地上で一つのパッケージにして地下に搬送し定置する。地下での作業の単純化が期待されるが、その製作と組立て、外枠の鋼製ケーシングを含めて約34トンの重量物の水平方向の搬送と所定位置での定置が求められる。鋼製ケーシングの中にブロック型の緩衝材を積み上げる製作試験では、ブロック同士、およびブロックと鋼製ケーシングの間に数 mm から数10 mm の隙間が発生した。そこで、鋼製のリング型ケーシング内で緩衝材原料を締め固め、これを重ねて接続し1ユニット分の緩衝材を組み立てる鋼殻リング方式を採用した。その状況を第6図に示す。締め固めた緩衝材の乾燥密度は、目標 1.6 Mg m^{-3} に対して、最大1.65, 最小1.57, 平均 1.62 Mg m^{-3} (含水比は約23%)であった。一方の端部と側面の鋼殻リングを接続後、模擬オーバーパックを内部に挿入し、もう一方の端部の鋼殻リングを取り付けてPEMの組立てを完了した。模擬オーバーパックと緩衝材の隙間にはペレットと呼ぶ粒状のベントナイトを充填した。

こうして製作した重量約34トンの PEM の坑道内での

(a) 外観と断面 (b) 模擬オーバーパックと緩衝材の界面

第5図 吹付けによる緩衝材の施工³⁾

(a) 緩衝材原料の締め固め (b) PEM の組立

第6図 鋼殻リングによる PEM の製作と組立³⁾

(a) エアベアリングを装着した搬送装置 (b) 模擬処分坑道での PEM の水平方向の移動

第7図 エアベアリングによる PEM の搬送³⁾

水平方向の搬送にはエアベアリングを採用した。搬送、定置試験の状況を第7図に示す。PEM を載せる搬送装置の下部にエアベアリングが5個ずつ2列に取り付けてある。圧縮空気の供給によりエアベアリングが膨張、コンクリート製模擬処分坑道の接地面との間に空気層が生じて摩擦を減じる。ウインチを利用して100~200 kgf の牽引力で PEM を所定の位置まで搬送し、圧縮空気の供給を停止。エアベアリングが収縮して PEM を降下させ模擬処分坑道中央部の台座上に定置した。その後、搬送装置を回収した。PEM と坑道内面との間の隙間は粒状のベントナイトで充填可能なことも別途確認した。

Ⅲ. 緩衝材の施工品質の評価

緩衝材は地下水を吸って膨潤することで機能を発揮する。一方、製作や定置の結果、緩衝材には隙間や密度分布が生じる。本技術開発では、定置後の緩衝材の状態を念頭に、吸水、膨潤する過渡期における力学、及び水理特性に着目して、密度の均質化、パイピング/エロージョンなどについて試験装置のスケールアップを図りながら調査を進めた。

1. 定置後の緩衝材の品質

乾燥密度の異なる緩衝材(1.8 と 1.4 Mg m^{-3} , 2.0 と 1.2 Mg m^{-3})を直列につなぎ、給水した後の密度変化を第8図に示す。約1,000日経過後も乾燥密度は同じ値にはなかった。この膨潤後の残留密度差について、高密度側の膨潤による密度低下と低密度側の圧縮による密度上昇を有効ベントナイト乾燥密度と圧密圧力の関係から検討し、両者の膨潤圧が均衡するところまで膨潤することの妥当性を説明した。これは緩衝材の機能を満足するための施工上の密度分布幅を規定する知見につながるものと考えられる。

定置した緩衝材の止水性については地下水浸入による

第8図 乾燥密度の異なる緩衝材の吸水後の密度変化³⁾

(a) 蒸留水(給水後6時間) (b) 塩水(給水後12時間)

第9図 ブロック供試体におけるパイピング/エロージョンの発生³⁾

水みちの発生(パイピング)や緩衝材の流失(エロージョン)が指摘されている⁴⁾。第9図にブロック供試体におけるパイピングとエロージョンの発生と収れんの様子を示す。流量(0.1~100 cc/min)や液組成(蒸留水と塩水)を種々変えた試験、および長尺セルを用いた試験により、流量100 cc/minでは純水、塩水共に通水初期に複数のパイピングが生じた後、徐々に一つの水みちに収れんすること、また流量が減少すると緩衝材の膨潤により水みちが閉じることを確認した。このようなデータを水の組成や流量を変えて蓄積することで、湧水に対する定置場所の適否の判断、あるいは緩衝材の適切な施工方法を設定する際の判断指標が提示できると考えている。

2. 緩衝材の施工品質に関わる指標の検討

現状の知見に基づく湧水に着目した処分孔の使用可否判断と緩衝材施工方法の選定に関するフローを第10図に示す。ある量の湧水(降水系と海水系で分類)の上限値での適否の判断、及びパイピング/エロージョンの発生に対する湧水量とそれへの対策によって緩衝材の仕様(乾燥密度)と施工方法を提示しようとするものである。

緩衝材の機能は乾燥密度に大きく依存する。従ってその製作、搬送、定置という施工方法の選択には、吸水、膨潤する緩衝材の諸特性をあらかじめ考慮に入れておく必要がある。本技術開発では、密度差とパイピング/エロージョンのほかにイオン交換や水移行の現象と特性を考慮して、緩衝材が機能を発揮するための設計と施工における指標を与えるプロセスフローの提示も試みた。

第10図 湧水に着目した緩衝材の施工方法の選定³⁾

IV. まとめ

平成12年度から平成24年度までの技術開発の展開を第11図に示す。書式は本シリーズ第1回と同様、時間に沿った年表形式で、品質に関わる部分は処分孔縦置きと処分坑道横置きで共通とした。開発初期は要素技術の適用性確認、その後、個々の技術を束ねて装置化し、実規模スケールでの実証的な試験を実施した。一方、地層処分において、緩衝材をどのような方法で製作、搬送、定置したとしても、その機能発揮が最も重要であるとの認識から、製作方法や、搬送、定置方法の結果としての緩衝材の施工品質の評価に調査、検討を拡げた。そしてその成果を「技術メニュー」と呼ぶデータベースにまとめた³⁾。これにより、本稿では紹介し切れなかったものを含めて、各要素技術の適用性や適用条件が系統的に把握できると同時に、処分坑道横置きであれば緩衝材の製作から定置、定置後の隙間充填まで一連の技術の組合せとその到達度を追うことが可能である。

本技術開発では、高レベル放射性廃棄物における緩衝材の役割(機能)とそれに基づく基本的な仕様を基に、製作、搬送、定置という実際のもの作りの部分の実現可能性と到達度を示すと同時に、その結果として生じる緩衝材の状態が処分場での環境条件、特に湧水との関係において成立するかどうかを施工品質という視点から検討した。両者は両立しなければならない。これは、地層処分の性能評価において前提となる人工バリアの状態を施工の段階で用意することができるかどうかに関わる課題である。もの作りでいえば技術の高度化と信頼性の向上が、施工品質に関しては定量的な指標の提示が求められる。また、両者の間でのフィードバックは不可欠である。同時に、性能評価に関連する長期性の問題とも関係する。これらの課題に取り組むことが、結果として緩衝材の仕様をより具体的に提示することにつながっていく。

この一連の技術開発は資源エネルギー庁の委託事業として実施されたもので、その成果は国の地層処分基盤研究開発の成果の一部である。

棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発
報告書，原環センター，平成25年3月。

- 4) RD&D Programme 2007, Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, TR-07-12, September 2007, SKB.

朝野英一(あさの・ひでかず)

本誌, 55〔7〕, p.402(2013)参照.