

パイピングによる緩衝材の流出現象を考慮した 高レベル放射性廃棄物の廃棄体定置率の検討

原子力発電環境整備機構 正会員 ○後藤 考裕 鈴木 寛 窪田 茂
(株)大林組 正会員 田中 達也
(株)イーエムジー 非会員 橋本 秀爾

1. 背景と目的

高レベル放射性廃棄物は、金属製のオーバーパックに封入され、粘土鉱物を主とした緩衝材とともに地下300m以深に処分される。廃棄体定置直後は岩盤の割れ目などからの湧水により、緩衝材と処分孔壁の界面で管状の水みちを形成する現象が報告されている（パイピング）¹⁾。この時、水みち表面の緩衝材が侵食され、湧水とともに流出することが懸念される。このため、パイピングによる緩衝材の流出現象が緩衝材の安全機能に及ぼす影響を評価し、必要に応じて対策を実施する必要がある。そこで、高レベル放射性廃棄物の堅置き処分を対象に、パイピングへの対処方法について検討した。さらに、対処方法をわが国の代表的な地質環境（岩種：深成岩および新第三紀堆積岩）に適用し、例示した。

2. パイピングによる緩衝材の流出の現象論的背景と対処方法

パイピングは緩衝材施工後に発生する現象であるが、わずかな湧水量でもパイピングおよび、緩衝材の流出が観察されている。また、パイピングによる緩衝材の流出量は、図1に示すように緩衝材を通過した水の流量が増加するほど増加する。降水系地下水条件を模擬した、蒸留水を用いた試験では、流量の増加に伴う緩衝材の流出量の増加が、継続して観察されている¹⁾。

また、降水系地下水条件における緩衝材の流出量は、図中にも示すように、以下の式で近似することが出来る。

$$ms = \alpha \times (Mw)^\beta$$

ここで、 ms は流出量[g]、 Mw は総流量[L]、 α および β は任意の定数である。この評価式は試験範囲内で良く一致する。

一方、海水系地下水条件を模擬した、塩水を用いた試験では、初期は流量の増加に伴う緩衝材の流出量の増加が観察されるものの、途中で流出が抑制されている（図1中の矢印）。この時、緩衝材に含まれるケイ砂が水みち閉塞する様子が観察されており、この水みちの閉塞によって流出が抑制されたと考察されている¹⁾。

上記の知見に基づき、本検討でのパイピングへの対処方法を述べる。本検討では、パイピングが緩衝材の安全機能に有意な影響を及ぼす処分孔への廃棄体の定置を回避することで、パイピングに対処することとする。廃棄体の定置の可否の判断は、処分孔への湧水量を指標とし、基準値は緩衝材の安全機能が損なわれない、流出量の限界値（許容流出量）に対応する湧水量（許容湧水量）とする。また、海水系地下水条件ではパイピングによる緩衝材の流出はわずかであることから、本検討では降水系地下水条件を検討対象とした。

3. 緩衝材の許容流出量と許容湧水量の設定

緩衝材の許容流出量から許容湧水量を求めた手順を述べる。許容流出量は、パイピングによって隙間が増大し、緩衝材の密度が低下しても、自己シール性（最大膨潤率／隙間体積比 ≥ 2 ²⁾）とコロイドろ過能（流出後の平均乾燥密度 $\geq 1.0 \text{ Mg/m}^3$ ²⁾）を同時に満足できる流出量とした。パイピングは局所的な現象であるため、図2に示す評価対象領域を設定し、領域内の緩衝材領域と隙間領域の断面積の関係より、許容流出量を設定した。この時、緩衝材の流出量は隙間領域の断面積から設定した。次に緩衝材の許容湧水量に対する総流量を図1中の式よ

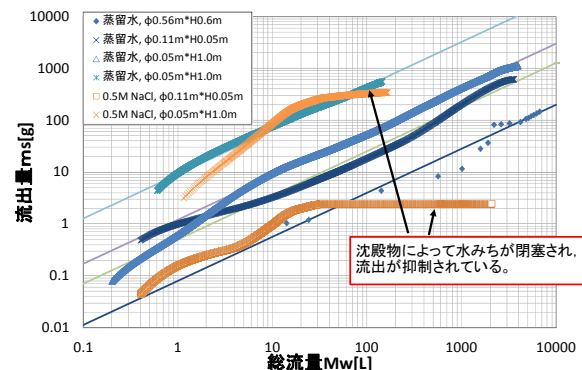


図1 総流量と緩衝材流出量の関係（参考文献1）を編集）

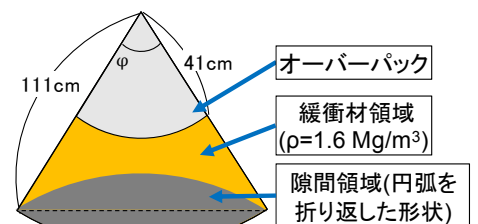


図2 パイピング評価の対象領域

キーワード 地層処分、緩衝材、パイピング、許容湧水量、廃棄体定置率

連絡先 〒108-0014 東京都港区4丁目1-23 三田NNビル2階 TEL 03-6311-6109

り求め、その総流量に基づいて、許容湧水量を求めた。総流量は、実際の処分環境において、ある期間、処分孔に流れ込んだ湧水の総量と考えることが出来る。そこで、緩衝材を施工してから処分孔上部の処分坑道が埋め戻されるまでを評価期間（約 300 日）として、湧水量＝総流量／評価期間の関係から許容湧水量を設定した。

上記の手順に基づき、許容湧水量を設定した。流出後の最大膨潤率／隙間体積比および、平均乾燥密度と流出との関係をそれぞれ図 3 および図 4 に示す。自己シール性を満足する流出量の限界値は 2.2 Mg、コロイドろ過能を満足する流出量の限界値は 1.3 Mg となった。そこで、双方満足する緩衝材の許容流出量を 1.3 Mg とした。次に、この許容流出量に対する総流量を求めた。総流量は、図 1 中の 4 つの式で得られた。総流量が小さいほど、許容湧水量は厳しく設定されるため、得られた値の最小値を採用することとした。最後に、総流量を評価期間で除して許容湧水量を求めた。その結果、許容湧水量は深成岩で 2.8 L/分、新第三紀堆積岩で 3.0 L/分となった。

4. わが国の代表的な地質環境への適用

許容湧水量を用いて、処分場を建設した時に、廃棄体を定置できる処分孔の割合（廃棄体定置率）を岩種ごとに求めた。まず、岩種に応じた解析モデルを作成し、水理解析を実施した。水理解析では岩種の割れ目などの情報に基づき、岩盤の水理地質構造モデルを作成したが、湧水量は割れ目の分布に依存して変化する。そこで、統計的に有意な湧水量の母集団の標本数を求めるため、水理地質構造モデルの作成を複数回繰返し行い、湧水量の累積確率分布を作成した。最後に、許容湧水量と比較し、廃棄体定置率を求めた。

水理解析を実施するに当たり、解析コードは Connect Flow (Version 11.2) を使用した。解析モデルは、岩種に応じた処分深度に処分場を設置した時の、処分孔を深成岩で 20 本、新第三紀堆積岩で 15 本施工した処分坑道を 3 本と、その周辺岩盤を切り出した状態を模擬した。また、岩盤の水理地質構造モデルは、深成岩では割れ目ネットワークモデルを、新第三紀堆積岩では等価不均質連続体モデルを作成した。水理地質構造モデルの作成回数はそれぞれ 50 回とした。

水理解析によって得られた湧水量の累積確率分布を、図 5 に示す。深成岩では 0.01 L/分以下から 10 L/分以上まで非常に幅広い幅で湧水量が評価されたのに対して、新第三紀堆積岩では、最大でも 0.6 L/分程度であり、ばらつきも小さくなった。これは、それぞれの岩種の地質環境情報の違いに由来する。図 5 より、降水系地下水条件における、パイピングによる緩衝材の流出を考慮した廃棄体定置率は、深成岩で 92.6%、新第三紀堆積岩で 100%と設定した。

6. まとめ

本稿では、高レベル放射性廃棄物の堅置き処分を実施する場合の、パイピングによる緩衝材の流出現象に対して、安全機能を維持するための判断指標と基準を提示した。そして、わが国の代表的な地質環境を対象にこの判断基準を適用し、廃棄体定置率として例示した。今後、パイピングによる緩衝材の流出量の評価方法などについて、知見を拡充していく。

参考文献

1) 原環センター、平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）-人工バリア品質／健全性評価手法の構築 - 緩衝材、2015。2) 原子力発電環境整備機構、処分場の安全機能と技術要件、NUMO-TR-10-11, 2011。

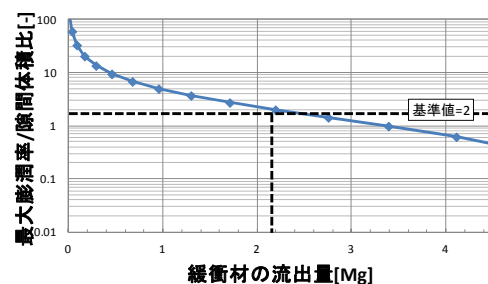


図 3 緩衝材の流出量と最大膨潤率／隙間体積比の関係

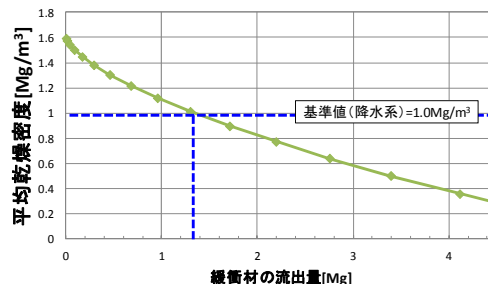


図 4 緩衝材の流出量と平均乾燥密度の関係

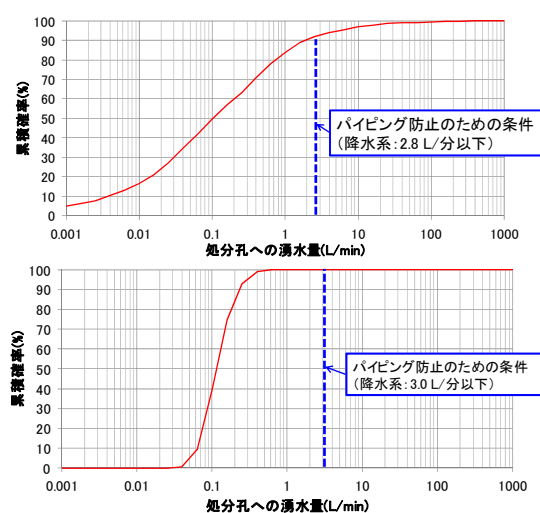


図 5 処分孔からの湧水量の累積確率分布（上：深成岩，下：新第三紀堆積岩）