

放射性廃棄物処分場のプラグおよび 埋め戻し要件に関する研究

REQUIREMENTS ON THE PLUG AND BACKFILL FOR A RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

武内邦文*・正本美佳**・田中達也*・増田良一***・稲継成文****・金谷賢生*****

Kunifumi TAKEUCHI, Mika MASAMOTO, Tatsuya TANAKA, Ryouichi MASUDA, Shigefumi INATSUGU, Kensei KANAYA

The sealings such as plug and backfill will be important for a radioactive waste repository, because their volume is large and their cost effect is critical due to their specification of low hydraulic conductivity. This study aims to propose a method of specification down on the backfill of TRU and to check its possibility by performing 3D groundwater flow analyses. The conclusions suggest that the specification of the backfill shall be reasonably down compared with the hydraulic conductivity of host rock.

Key Words: radioactive waste disposal, plug, backfill, hydrological requirements, groundwater flow analyses

1. はじめに

放射性廃棄物処分場の長期的な安全性は、廃棄物固化体、ベントナイトのような低透水性の緩衝材、および天然バリア等の多重バリアシステムで担保される。これらのバリアとともに、地下に掘削される処分場を安全に閉鎖するにはプラグや埋め戻し等のシーリング技術が重要となり、その物量は多大なためコストと効果をバランスさせる経済合理性が求められる。図-1に示すTRU廃棄物処分場計画においても同じであり¹⁾、具体的には大量の処分坑道上部埋め戻しが必要となり、その要件が地下水流動場に極大影響しないように母岩相当の低透水性が求められれば大きなコスト要因となる。

本研究の目的は、TRU廃棄物処分システムを対象として、プラグおよび埋め戻しの要件に影響する要因を整理し、それを緩和するための方策を提案して、具体的な解析により、その技術的見通しがあることを示すことである。本論では、3次元地下水流動解析によりプラグの有無や埋め戻し材の透水係数等をパラメータとした感度解析を幅広く実施した結果の一部を取りまとめ、その結果からTRU廃棄物処分場のプラグおよび埋め戻し材に関する経済合理的なオプションの成立性を検討した結果を報告する。

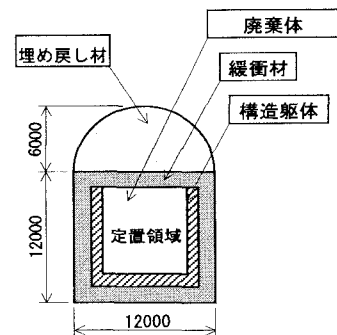


図-1 TRU廃棄物処分坑道
断面の一例¹⁾

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第四部

** (株)大林組 土木技術本部技術第四部

*** 正会員 原子力環境整備促進・資金管理センター

**** 関西電力㈱原子力事業本部

***** 正会員 関西電力㈱土木建築室

2. プラグおよび埋め戻しの要件整理

人工バリアとともに地下に掘削された空間の埋め戻しやプラグが長期的な安全評価上いかなる影響があるかは重要であり、それらの要件については、従来からの報告書¹⁾²⁾によれば、埋め戻しについては地下水流動場への影響を極力少なくするための母岩相当の低透水性が、また、プラグについては、ベントナイトの膨出抑制や掘削影響領域(EDZ)の止水機能が要求されている。

T R U廃棄物処分概念検討書¹⁾によれば、埋め戻しやプラグのような閉鎖部位には、もとの地下水流動場を極力乱さないという考え方を前提に、母岩相当の低透水性の確保が求められている。それに対して、本研究では、表－1にまとめたような埋め戻しおよびプラグの要件整理案を提示する。すなわち、埋め戻し材の要件として、現時点での予備的な安全評価が立脚している前提条件であるベントナイト緩衝材より内部では拡散支配場であることを念頭に、その安全評価上問題が生じない範囲まで要件を緩和できるものと考えた。具体的には、拡散支配場における核種濃度勾配が大きくなるように、緩衝材外側の地下水流速が基本ケースより大きくならないような仕様を要件と考えた。

表－1 プラグおよび埋め戻しの要件整理案

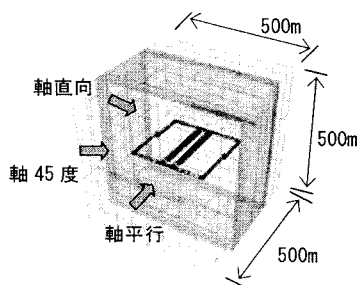
部 位	基本的考え方	要件案の具体化
処分坑道上部埋め戻し	・ 水理機能として、現在の予備的安全評価の前提条件を満足させる。	・ ベントナイト緩衝材外側の地下水流速が基本ケースより大きくならない材料仕様とする。
坑道端部プラグ		・ 同上 ・ 掘削影響領域が地下水の卓越流路になることを防止する。

3. 解析条件の設定

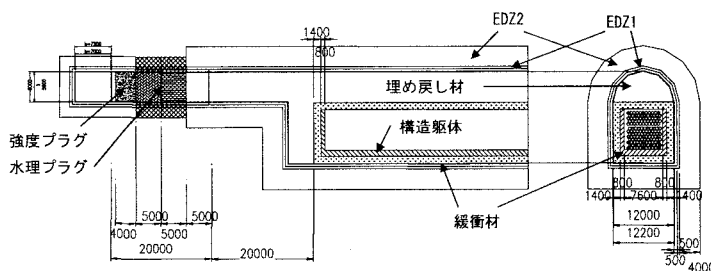
(1) 解析モデル

図－2は構築した3次元地下水流動解析モデルであり、具体的には、T R U廃棄物処分坑道の規模をほぼ実寸で再現した2本の処分坑道と周辺の連絡坑道を中央にモデル化し、周辺全体の解析領域は境界条件の影響のないところまで広げるものとして、結果的に500m×500m×500mとした。細部のモデル化は、図－3に示すように、処分坑道上部の埋め戻しと坑道端部プラグを想定し、その部分の透水係数を変更できるようにした。また、掘削影響領域(EDZ)については、壁面から0.5mをEDZ－1として発破損傷領域、その外側4.5mをEDZ－2として応力再配分領域としたモデルを作成した。

地下水の巨視的な流動方向は、処分坑道の軸方向に対して直向、平行、および45度の3種類を解析ケースで考慮した。これは、本来、地点が決められレイアウトが仮設定されれば固定できる要因であるが、ここではその影響を把握するためパラメータとして扱った。



図－2 地下水流動解析モデル図と地下水流向



図－3 処分坑道および端部の構造断面図

(2) 解析パラメータ

本研究で設定した地下水流動解析用のパラメータを表-2にまとめた。固定したパラメータとしては、岩盤、掘削影響領域、および緩衝材とその内部の透水係数であり、変化させたパラメータは埋め戻し材の透水係数、プラグの有無、および地下水流向である。

表-2 本研究の解析用パラメータ

項 目	材料特性パラメータ
岩盤特性	透水係数: 10^{-9} m/s、動水勾配: 0.01
掘削影響領域	[EDZ1] 透水係数: 10^{-7} m/s、領域幅: 0.5m [EDZ2] 透水係数: 10^{-8} m/s、領域幅: 4.5m
埋め戻し材	透水係数: $10^{-5} \sim 10^{-9}$ m/s
水理プラグ	透水係数: 3×10^{-11} m/s、延長: 5.0m
強度プラグ	透水係数: 10^{-5} m/s
緩 衝 材	透水係数: 3×10^{-11} m/s
構造躯体と 廃棄体層	透水係数: 10^{-5} m/s

(3) 解析ケース

表-3は本研究で実施した地下水流動解析ケースの一覧表である。同表にある通り、解析ケース設定の基本的な考え方として、埋め戻しの透水係数が母岩相当でプラグなしの3ケースを基本ケースとして、埋め戻しの透水係数とプラグの有無をパラメータとしてケース展開したものである。なお、要件なしとした 10^{-5} m/s の透水係数は、砂もしくは劣化したコンクリートを想定したものである。

表-3 地下水流動解析ケース一覧表

(4) 評価指標の考え方

プラグおよび埋め戻しの要件設定のための評価指標としては、予備的な安全評価の前提条件を満足するという考え方のもと、具体的には、上記の基本ケースにおける地下水流速に対し、パラメータを変更したときの各ケースにおける流速との比較を実施する。前述のように、安全評価の前提である拡

解析ケース	地下水 の流向	埋め戻し材の 透 水 係 数	プラグ	掘削影響領域
基本 ケース	C 1 坑道軸直向	10^{-9} m/s(母岩相当)	なし	発破損傷領域 (EDZ1) 幅:0.5m 透水係数: 10^{-7} m/s
	C 2 坑道軸平行	10^{-9} m/s(母岩相当)	なし	
	C 3 水平 45 度	10^{-9} m/s(母岩相当)	なし	
C 4	坑道軸直向	10^{-5} m/s (要件なし)	なし	応力再配分領域 (EDZ2) 幅:4.5m 透水係数 10^{-8} m/s
C 5	坑道軸平行	10^{-5} m/s (要件なし)	なし	
C 6	水平 45 度	10^{-5} m/s (要件なし)	なし	
C 7	坑道軸直向	10^{-5} m/s (要件なし)	あり	
C 8	坑道軸平行	10^{-5} m/s (要件なし)	あり	
C 9	水平 45 度	10^{-5} m/s (要件なし)	あり	
C 10	坑道軸直向	10^{-7} m/s (要件低減)	なし	
C 11	坑道軸平行	10^{-7} m/s (要件低減)	なし	

散支配場の影響を考慮すると、緩衝材外側の地下水流速が重要な要因となる。本研究では、図-4に示すように、上流側坑道の周辺4ヶ所と下流側1ヶ所の合計5ヶ所を地下水流速の評価参照点とし、処分坑道延長で分布する地下水流速の最大値をそのケースにおいて坑道周辺で発生する最大流速として整理し、標準ケースに対する流速の増減を評価指標に設定した。

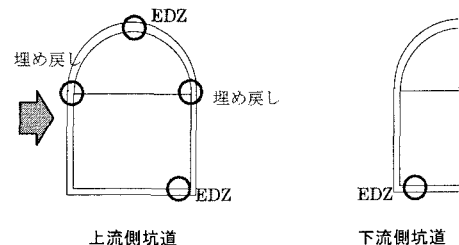


図-4 地下水流速の参照地点

4. 解析結果

(1) 埋め戻しの透水係数とプラグの効果について

ここでは、埋め戻しの透水係数とプラグの効果について考察するため、表-3の基本ケースC1～C3に対し、C4～C9の解析結果について比較検討することとした。図-5は地下水流動解析結果の典型的な一例として、処分坑道周辺の鉛直断面で表示した流速ベクトル分布図である。実際の解析は3次元で実施しているが、同図における表示は流速ベクトルを2次元上に表現したものである。

図-6はC1～C9の解析ケースを比較するため、処分坑道軸の延長上にあるポイントにおいて得られる参照点5ヶ所における地下水流速の最大値を、地下水流向別に取りまとめて比較した結果である。

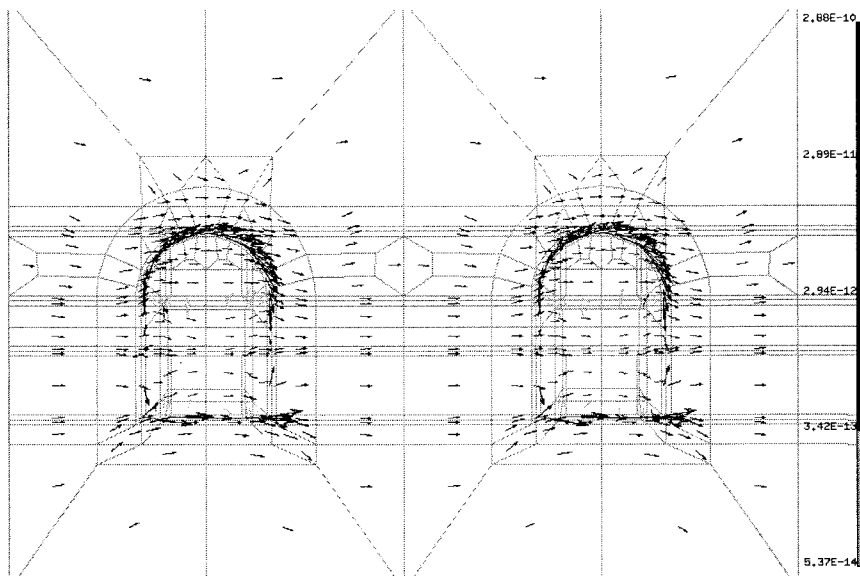


図-5 処分坑道周辺の流速ベクトル出力図の一例

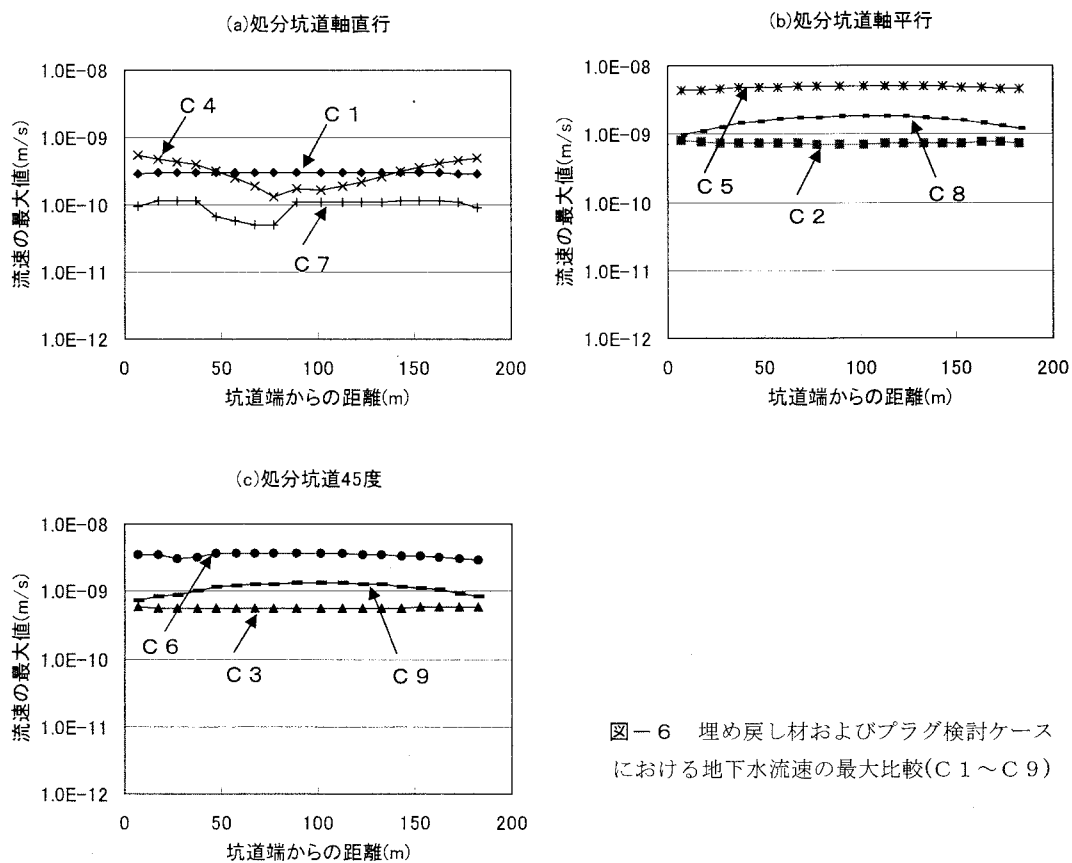


図-6 埋め戻し材およびプラグ検討ケースにおける地下水流速の最大比較(C 1～C 9)

①処分坑道軸直向の場合

埋め戻し材の透水係数を大きくしたケースC 4では、基本ケースC 1と比較して処分坑道端付近における流速が大きく、中央部の流速が小さいという傾向が認められるが、平均的には基本ケースと大きな相違はない。一方、プラグを設置したケースC 7は、分布傾向としてはC 4と類似しているが全体に流速の最大値が基本ケースC 1を下回っている。これにより、地下水流向が処分坑道軸直向の場合には、プラグを設置することにより基本ケースC 1となる埋め戻しが母岩相当と比較して止水性能が少し向上する傾向があると認められた。

②処分坑道軸平行および45度の場合

埋め戻し材の透水性を大きくした場合C 5またはC 8では、基本ケースより最大流速が1オーダー程度大きくなっている。これから判断して、流向が軸平行または45度の場合には、埋め戻し材の透水係数に水理的な要件がない状態と考えられる 10^{-5} m/sに設定した場合には、基本ケースとなる母岩相当と比較して、止水性能が低下することが確認された。一方、プラグを設置したケースであるC 8またはC 9では、いずれの地下水流向でも流速は基本ケースを上回るものの、C 5およびC 6のケースに比べると低減効果が少しあることが確認できる。また、流速の低減はプラグ近傍の坑道端部付近で大きく、処分坑道中央部では小さいことも認められた。

上記①および②の考察から総合的に判断して、坑道軸平行および45度流向の場合には、坑道端部にプラグを適切に設置しても、埋め戻し材の要件がないと考えられる 10^{-5} m/sでは、基本ケースである母岩相当と比較して、地下水流速が大きくなる傾向が認められた。したがって、プラグを設置しても埋め戻しの要件を 10^{-5} m/sまで緩和できるという可能性は見出せない。

(2) 埋め戻しの要件を低減する効果について

次に、埋め戻し材の透水性能を基本ケースである母岩相当から低減し、その透水係数を 10^{-7} m/sとした場合について考察する。具体的には、解析ケースC 10とC 11の地下水流速の最大値を基本ケースであるC 1およびC 2と比較した結果を図-7にまとめた。これらの図より、埋め戻し材の透水性能を低減した状態C 10およびC 11が、いずれの地下水流向の場合でも基本ケースの流速の最大値を下回っており、したがって、要件を満足していることが確認できる。この考察結果から、従来要求されていた岩盤相当の透水係数である 10^{-9} m/sに対して、1～2オーダー程度透水係数を増加させた場合でも、廃棄体層周辺の最大流速には大きな影響を生じないことを確認した。

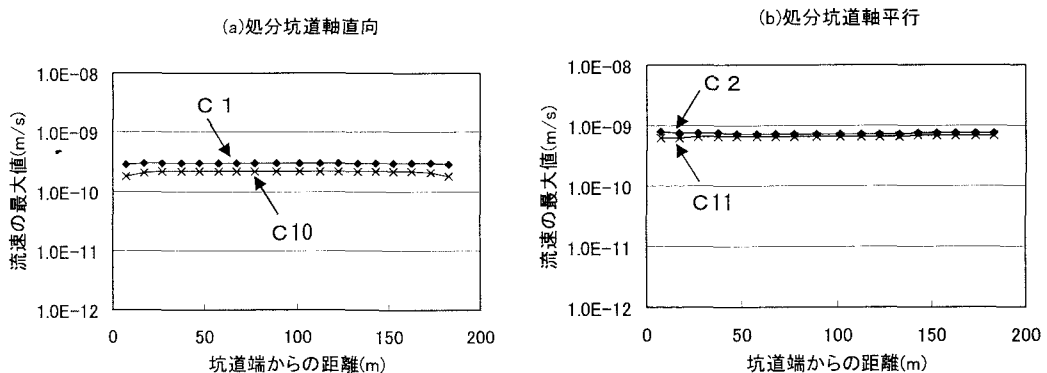


図-7 埋め戻し材の性能検討ケースの流速の最大値比較

(3) 廃棄体層通過流量への感度について

解析ケースC 1～C 9それぞれにおける廃棄体層への地下水通過流量を比較した結果が図-8である。地下水通過流量は、地下水流向が処分坑道軸直向、平行および45度の場合においても同じ傾向の影響が確認できる。すなわち、埋め戻し材の透水係数を増加させた場合には、廃棄体層通過流量はハイドロリックゲージ効果

により減少する。特に、地下水流向が軸平行および軸 45 度の場合にその傾向は顕著である。一方、プラグを設置した場合も廃棄体層通過流量は小さくなるものの、その影響は埋め戻しの透水係数に比して小さい傾向が認められる。結果として、廃棄体層通過流量の観点からは埋め戻し材の透水係数の増大は不利にはならない。

5. まとめ

本研究では、TRU 廃棄物処分概念を対象として、大きなコスト要因であるプラグおよび埋め戻しの要件に影響する要因を整理し、緩和するための方策を提示した。そして、具体的な 3 次元地下水流動解析により、その技術的見通しがあることが判明した。以下に、本研究で得られた主な知見を取りまとめる。

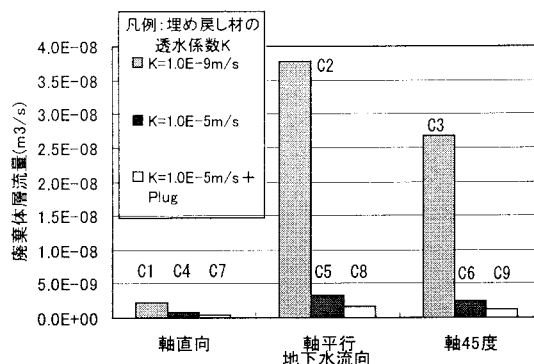
- ① 処分坑道上部の埋め戻し材の透水係数要件に関しては、埋め戻し材の透水性が岩盤相当の 10^{-9} m/s ではなく、少し大きい場合、例えば 10^{-7} m/s 程度でも廃棄体層周辺の地下水流速に大きな影響を及ぼさないことを確認した。
- ② 処分坑道端部プラグに関しては、地下水流向によっては、それが埋め戻し材の低透水性と併せて、処分坑道周辺の地下水流速を低減させる効果を発揮することが分かった。
- ③ ただし、埋め戻し材の透水性を岩盤相当 10^{-9} m/s から 10^{-5} m/s に低減させた場合には、プラグ設置による地下水流速の低減効果には限度があり、埋め戻し材の透水性が岩盤相当の場合の流速以下にはならない結果となった。
- ④ これらの結果より、埋め戻し材の設計目標値を岩盤相当である 10^{-9} m/s とするリファレンス案に対して、上述の検討にて設定した要件として 10^{-7} m/s 程度とする合理化オプション案の成立見通しが得られた。

ただし、本研究の成果はサイトが決められていない段階での一般的な検討であり、今後、サイトや施設概念が決まれば、それらの条件に基づき検討を実施してサイト個別の合理的なオプション案の成立性を詳細に検討する必要がある。また、本研究で対象をとした合理化オプションは、低透水性能のみに着目して研究した一案であり、最終仕様の決定には緩衝材の支持性や自己シール性等のその他の要求性能を考慮した設計が必要となる。

6. 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会：TRU 廃棄物処分概念検討書(2000)
- 2) 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-分冊 2 (1999)

※本研究は、北海道・東北・東京・中部・北陸・関西・中国・四国・九州の各電力会社と日本原燃、日本原電、電源開発による電力共通研究成果の一部である。



図－8 廃棄体層通過流量の比較（C 1～C 9）