

スイスグリムゼル試験場における HotBENT 試験の概要

ESE Consulting LLC 正会員 ○榎 利博

Nagra 非会員 Florian Kober

Nagra 非会員 Raphael Schneeberger

1. はじめに

スイスのグリムゼル試験場における HotBENT (High Temperature Effects on Bentonite Buffers) 試験は、結晶質岩中でベントナイトペレットを緩衝材とし従来よりも高温の模擬廃棄体を定置した実規模原位置人工バリア加熱試験である。特定の処分コンセプトを模擬するものではなく、得られる知見を既存コンセプトの改良・最適化や新たなコンセプトの提案などに資する汎用的な試験と位置づけられる。NAGRA (スイス) の主導のもと 2022 年 8 月時点で BGE (ドイツ), BGR (ドイツ), ENRESA (スペイン), KORAD (韓国), NUMO (日本), NWS (英国), NWMO (カナダ), Obayashi Co. (日本), SURAO (チェコ), USDOE (米国) がパートナーとして参画する国際共同プロジェクトである。図-1 の全体レイアウトに示すように、4 体の模擬廃棄体 (ヒーター) を定置し、2020 年 11 月に埋戻し開始、2022 年 5 月から所定のヒーター温度で稼働している。

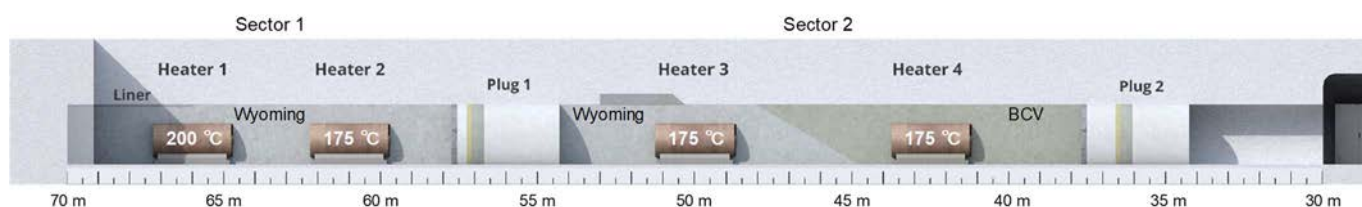


図-1 HotBENT 試験の全体レイアウト

2. HotBENT 試験の目的

人工バリアの構成要素としてのベントナイトには、低透水性、自己シール性、長期安定性、物質移行の抑制、鉱物的変化の低減、微生物活動の抑制、キャニスタの保護等の安全機能が要求される。これまでに実施されている原位置人工バリア加熱試験 (グリムゼル試験場の FEBEX 試験, モンテリ岩盤研究所の HE-E 試験および FE 試験) を通して人工バリアの工学的建設可能性および試験期間にわたる性能が実証されている。これらの試験においては、ヒーター表面温度は 90~140°C を対象としている。一方、150°C を超える高温環境下においては特にベントナイトペレットに関する知見は限られているが、セメンテーションやイライト化などの所期の機能を低下しうる物理化学的変化が発生すると考えられている。これらの変化は、大きな温度勾配下における水分の移動挙動に影響を大きく与える。したがって高温条件に晒されたベントナイトに関する知見は各国共通の関心事項である。高温条件が安全性能に与える影響が小さければ、処分場の最適設計 (処分坑道間および廃棄体間の離間や緩衝材厚さなどの最適化を通して処分場の面積やレイアウトを縮小) や中間貯蔵施設における管理期間の短縮などについて新たな方針の導入につなげられる。

そこで HotBENT 試験では、実際の坑道環境下において 200°C までの高温に長期にわたって晒されたベントナイト緩衝材の挙動に関するデータの取得、実規模における緩衝材の性能評価、緩衝材の安全機能に対する高温条件の影響の評価、微生物活動・腐食プロセス・ガス生成の評価、モデル化および室内試験との統合、などを目的として計画した。

キーワード ベントナイトペレット, 緩衝材, 高温条件下, 原位置試験, 実規模人工バリア加熱試験

連絡先 Email: tsakaki.es@gmail.com

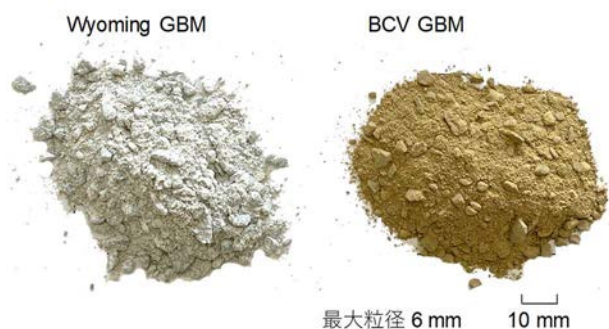


図-2 Granulated Bentonite Mixtures (GBM)

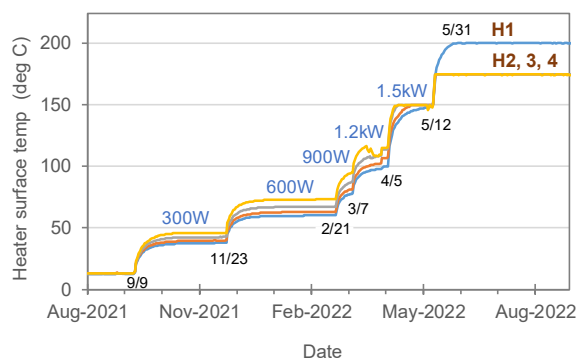


図-3 ヒーター4体の段階的な温度上昇

3. 試験条件および計画

上述した過去・現行の FEBEX, HE-E, FE 試験などの経験を参考に, HotBENT 試験では結晶質岩中に TBM で掘削した直径 2.28 m, 長さ 70 m の坑道 (FEBEX で用いた坑道) の約 35 m の区間において Sector 1, 2 の 2 区間を設定した (図-1). 各 Sector に模擬廃棄体 (直径 1.05 m, 長さ 2.5 m) を 2 体ずつ圧縮ベントナイトブロックの架台上に定置した. Sector 1 は, Wyoming 産 Na 型 (National®) のベントナイトペレット (Granulated Bentonite Mixture, GBM, 図-2) で埋め戻した後に Plug 1 を建設した. 次に Sector 2 の奥側 (Heater 3) を Wyoming GBM, 手前側 (Heater 4) をチェコ産の Ca-Mg 型 (BCV) GBM で埋め戻し Plug 2 で閉鎖した. GBM の目標乾燥密度は 1.45 g/cm^3 に設定した. 架台の圧縮ブロックは当該区間の GBM と同種のベントナイトを用いて製作した. 2 種類のベントナイトを対象とすることで幅広い情報収集が期待される. Sector 1 の Heater 1, 2 の表面温度はそれぞれ 200°C , 175°C , Sector 2 の Heater 3, 4 はともに 175°C に設定し, 図-3 に示すように 2021 年 9 月から段階的に出力を上げ, 2022 年 5 月に所定の表面温度に達した後は一定に維持している. 同条件下において 20 年後の坑道壁面温度は $80\text{--}100^\circ\text{C}$ と予測されている (Finsterle et al. 2020).

ベントナイトの湿潤期間を短縮し坑道内での水分の沸騰の抑制のため, 坑道周辺には坑壁から 1 m の離間をもって坑道に平行に人工注水用のボーリング孔 (Enhanced Geosphere Pressurization Boreholes, EGPB) を 4 本掘削した. これらは 2022 年 1 月に 300 kPa で加圧を開始, 3 月に 600 kPa に上昇させその後は一定に維持している. 坑道内には温度, 湿度, 含水率, 熱伝導率, 変位, 全圧, 間隙水圧, ガス関連など, 合計 1517 個の点計測センサーを坑道軸方向の 28 断面に設置した. 加えて, 坑道壁面に温度分布計測用の光ファイバケーブル, 比抵抗トモグラフィ用の電極を設置した. 現地のデータ収集システムによって定期的にデータを取得, 現地および外部のサーバに保存し, データの状況は外部から確認できるようになっている.

4. 今後の予定

本報では, HotBENT 試験の全体的な概要について述べた. 上述のように, 同試験は試験施設の規模だけでなく国際共同プロジェクトとして実施体制も大規模である. 加熱期間は約 20 年を予定しており, これまで最も長期間実施された実規模加熱試験である FEBEX 試験と同様の長期間にわたる計画である. 計測データは既に蓄積されてきており, その分析を通した人工バリアの初期挙動評価が始まったところである. ヒーター表面と坑道壁面の間, 隣接するヒーター同士の間においては顕著な温度勾配が形成されている. これまでになかった高温条件のため, プラグのシール性やセンサーの耐久性などにより高い性能が求められるが, 現在までのデータの挙動は予測の範囲に収まっている. Sector 2 は FEBEX 試験を参考に加熱開始から 5 年程度を目途に解体を予定しており, 高温条件に 5 年間晒された緩衝材に関する知見は Sector 1 の予測解析にフィードバックされる.

参考文献

- 1) Finsterle S., F. Kober, and S. Vomvoris (2020), HotBENT – Modelling of Enhanced Pressurisation Options, Nagra Working Report NAB 20-020, Wettingen, Switzerland.