

スウェーデンエスポ地下研究施設における操業期フェーズの原位置試験と電中研の研究[†]五十嵐敏文^{††}、木方建造^{††}

1995年より操業期にはいったスウェーデンエスポ地下研究施設では、地層処分の性能評価に関連する試験として、TRUEと呼ばれる単一割れ目を対象とした地下水流動・トレーサ移行試験、REXと呼ばれる詳細スケールの酸化還元反応試験、RNRと呼ばれる大型プローブによる核種の移行・溶解に関する原位置カラム試験が実施されている。また、処分施設の操業・閉鎖に関連する試験として、埋め戻し・プラグ試験、緩衝材の長期性能試験、プロトタイプ処分施設の建設に関する試験が計画あるいは一部実施されている。本報では、それら試験の概要について述べるとともに、国際共同研究の1参加機関としての電力中央研究所の研究内容について紹介する。

Keywords: エスポ地下研究施設、地下研究施設、地層処分、操業期、原位置試験、地下水流動、トレーサ試験、処分施設建設、国際プロジェクト

An operational phase of Äspö Hard Rock Laboratory international project was started in 1995. Two different types of *in situ* experiments, i.e., experiments for description of the barrier function of host rock and for demonstration of the function of important parts of a repository system, are being carried out and/or planned. The former consists of groundwater flow and tracer migration experiments in a single fracture called TRUE, redox experiment in the detailed scale called REX, and *in situ* column experiment by CHEMLAB called RNR. The latter consists of backfill and plug test, long term performance tests of bentonite as buffer material, and construction of prototype repository. This paper describes the status and the research plans of the Äspö HRL project during the operational phase and CRIEPI's contribution to the project as well.

Keywords: Äspö Hard Rock Laboratory, underground laboratory, geological disposal, operational phase, *in situ* experiments, groundwater flow, tracer migration, construction of repository, international project

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する研究開発を進めていく上で、地下深部に研究施設を建設し、地質・地盤・地下水等に関するサイト特性調査を行うとともに、処分技術や人工・天然バリア性能に関する原位置試験を実施することはきわめて重要である。スウェーデン核燃料廃棄物管理会社 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 以下 SKB と称する) はストックホルム南方 350 km のバルト海に面したエスポ (Äspö) 島において、1986年より地下研究施設 (Äspö Hard Rock Laboratory, 以下エスポHRLと称する) 建設のための事前調査を開始し、1990年より地下研究施設の建設に着手した。1995年には、トンネルおよび立坑の掘削、地上施設の建設がほぼ終了し、本格的な操業期を迎えるに至った。

電力中央研究所は、SKB が中心となって進めているエスポHRLでの高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発に関する国際共同研究に1991年以来参加している。本報では、エスポHRLの操業期における原位置試験の概要を述べるとともに、当所のこれまでの研究内容についても紹介する。

2. エスポHRLの現状

エスポHRLプロジェクトは、地山の地質、地下水、

るための情報を取得する事前調査期(1986~1990)、施設建設のためのトンネル掘削とともに、掘削期間中に有効である原位置試験を実施する建設期(1990~1995)、施設建設終了後に本格的な原位置試験を実施する操業期(1995~)に区分されている[1]。1996年は操業期2年目であり、トンネル内の最終整備と種々の操業期試験の計画および一部実施がなされた。

図1には、トンネルのレイアウトと地上施設の状況を示す[2-4]。トンネル入口はオスカーシャム (Oskarshamn) 原子力発電所敷地内にあり、そこから斜坑で1,500 m掘削することによってエスポ島直下に到達し(深度210 m)、さらにらせん状に島の深部に向かって掘削された。ただし、斜坑とらせん状トンネルの1周半は発破工法(drill & blast method)によって掘削したが、最終の直線部分約400 mはトンネルボーリングマシーン(tunnel boring machine, TBM)を用いて掘削した。発破工法では、掘削断面積25 m²の馬蹄形で掘削し、TBM工法では、直径5 mの円形で掘削した。TBMを用いた区間はトンネル入口から3,200~3,600 m(深度は海水面下420~460 m)である。さらに、周辺岩盤への掘削影響を比較するために、TBM掘削開始地点より水平方向に23 m離れた地点からTBMトンネルに平行して、スムーズプラスティングによる掘削も行なわれた。また、内径3.8 mのエレベータ用の立坑1本、内径1.5 mの換気用立坑2本の掘削も終了している。なお、現在も後述する原位置試験のための掘削作業が最深部で続けられている。

[†] Operational Phase *In site* Experiments of Äspö Hard Rock Laboratory International Project and CRIEPI's Contribution, by Toshifumi Igarashi (igarashi@criepi.denken.or.jp) and Kenzo Kiho

^{††} (財)電力中央研究所 我孫子研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko Research Laboratory 〒270-11 我孫子市我孫子1646

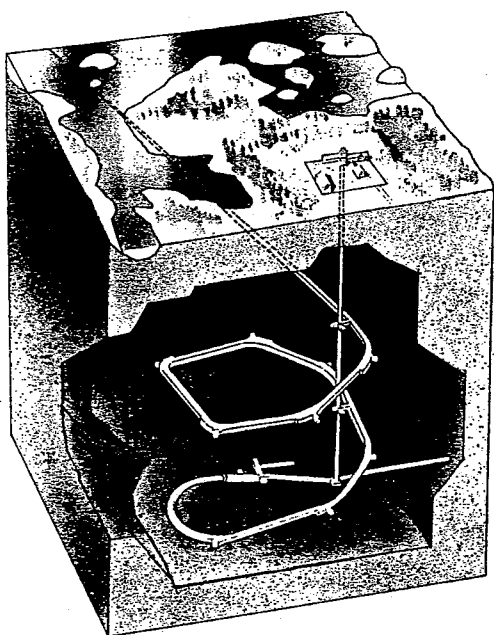


図1 エスポHRLの現状(トンネルおよび地上施設)[2, 3]

3. 操業期の目的と概要

操業期の目標としては以下の4項目が掲げられている[2]。

- (1) 事前調査期に行った調査手法の検証
- (2) 詳細スケールの調査手法の確立
- (3) 岩盤の有するバリア性能を記述するモデルの評価
- (4) 処分システムの重要な要素の実演

(1) は、地表踏査や地表ボーリング調査が、処分施設建設深度の状況に関する十分なデータを供給できるかどうかを明確にすることであり、(2) は、詳細スケールの岩盤調査に必要となる手法や技術を高度化および検証することである。(3) は、操業中および閉鎖後の地下水流動、核種移行、化学的條件を記述する手法、モデルを開発、評価することであり、(4) は、処分システムの長期安定性に関して重要である要素の実規模スケールでの試験、実演を行うことである。

上記(1)、(2)に関しては、現在とりまとめ段階で、SKB Technical Report として、事前調査期および建設期の調査概要、トンネル掘削中の詳細スケール調査結果に基づく事前調査期結果の評価、サイト特性調査およびその評価に基づくエスポ地質モデルの構築、の合計3冊が近く出版される予定である[2]。そこで、本報では、上記(3)、(4)の内容を中心として紹介する。

操業期において上記(3)の性能評価に関連する試験としては、TRUE(Tracer Retention Understanding Experiment)と呼ばれる単一割れ目を対象とした地下水流動・トレーサ移行試験、REX(Redox Experiment in Detailed Scale)と呼ばれる詳細スケールの酸化還元反応試験、RNR(Radionuclide Retention)と呼ばれる大型プローブによる核種の移行・溶解に関する原位置試験がある。上記(4)の施設の操業・閉鎖に関する試験としては、埋め戻し・プラグ試験(Backfill and Plug Test)、緩衝材の長期性能試験(Long Term Performance Tests)、それら2試験を反映したプロトタイプ処分施設(Prototype Repository)の建設に関する試験がある。以下にそれら試験の計画および一部の実施結果について述べる。

4. 操業期における各種原位置試験

4.1 TRUE試験[2, 5]

本試験は単一割れ目を対象とした地下水流動・トレーサ移行試験であり、地質条件や地下水条件が明らかにされた割れ目を対象に、透水試験、トレーサ移行試験、樹脂注入、樹脂注入試料の採取と分析という一連の試験を行う。さらに、この一連の試験を空間スケールが5m程度の詳細スケールと50m程度のブロックスケールに分けて実施するものである。

本試験の目的は、第1に、実際の割れ目を通しての物質移行と吸着の現象を理解すること、第2に、割れ目のモデル化がどこまで可能で、トレーサ移行試験前の割れ目調査や透水試験の段階で、トレーサ移行を予測するための適切なデータを取得できたかどうかを評価することである。第3に、物質移行と吸着に対するモデルの有効性を評価し、原位置データを取得することである。

詳細スケールのTRUE試験(TRUE-1)の模式図を図2に示す。この図に示すように、原位置試験の他に、パラメータ取得のための室内トレーサ移行試験や割れ目充填鉍物分析、割れ目内への樹脂注入試験等も含まれる。試験サイトは、らせん状トンネル内の海水面下390mの位置であり、試験対象割れ目はトンネル壁面から10m程度離れている。割れ目面と交差するように掘削したボーリングの配置は図3に示すように、相互に2~10mの距離がある。

トレーサ移行試験においては、同一試験サイトに対し

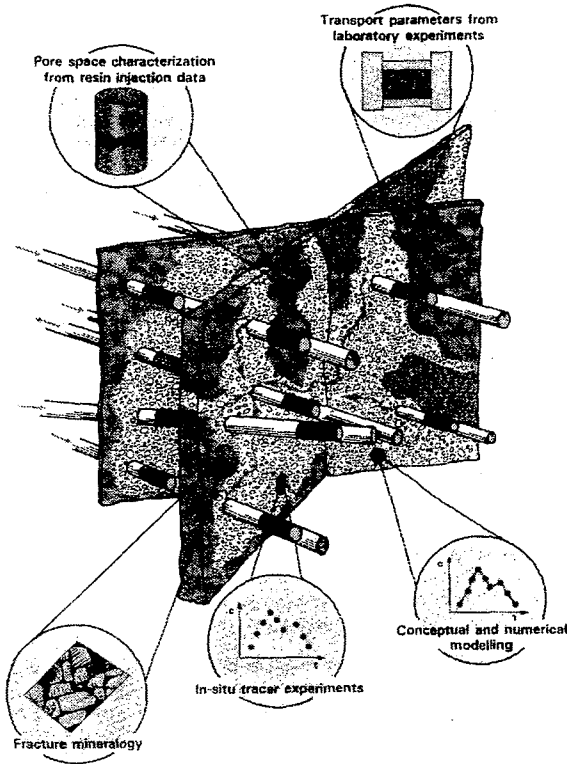


図2 TRUE-1の概要と構成[2]

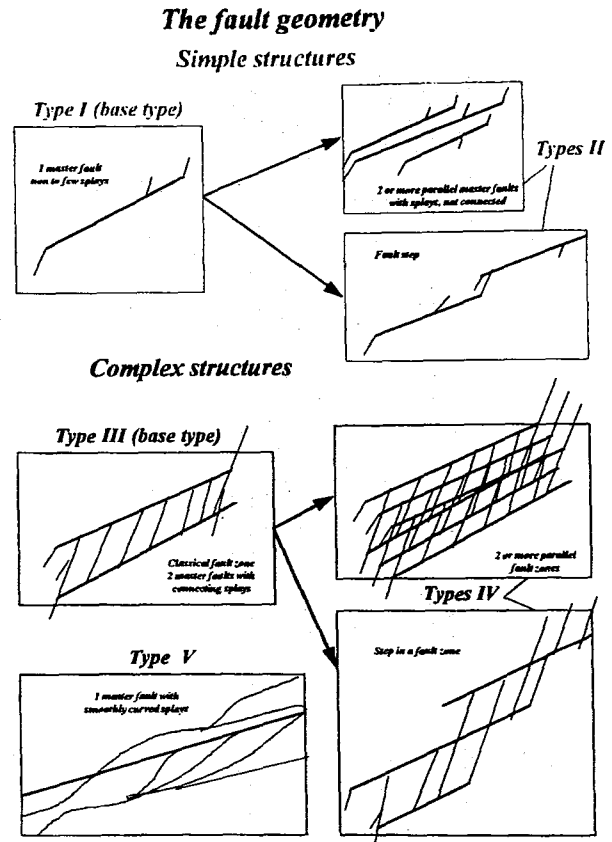


図4 水みちとなる割れ目の概念モデル[2]

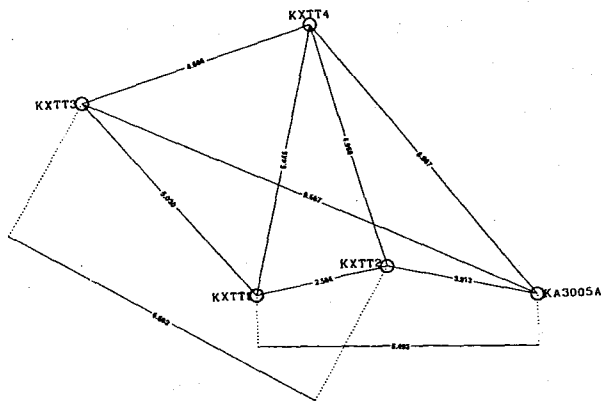


図3 TRUE-1の対象割れ目面内のボーリング配置図[2]
(図中の数値は孔間距離(m))

て、radially converging, radially diverging, dipole の異なる流動系での試験が計画され、既に一部実施されている。このような特定の単一割れ目での試験結果を評価する場合、選択した割れ目の特性によって結果が異なることが予想される。そこで、割れ目の特性に応じた評価が重要となり、エスポサイトでは、成因と履歴によって、割れ目を図4に示す合計5つのタイプに分類し、評価している[6]。

4.2 REX試験 [2, 3, 7]

REX 試験は、通常は還元環境の地下深部が、処分場建設期や操業期において一時的に酸化環境になるため、その影響を評価する試験である。実際には溶存酸素を含む地下水を割れ目内に注入し、それが割れ目充填鉱物によってどのように消費され、その影響がどの範囲まで、いつの時点まで影響するかを観測すること、さらに、微生物反応の酸化還元環境に与える影響を解明することである。また、原位置試験に先立ち、酸化還元反応に関連する基本的なパラメータを取得するための岩石コアを用いた室内試験も実施中である。

4.3 RNR試験[2, 3]

核種の吸着・溶解等に関する試験は、従来より室内試験で実施してきた。しかし、室内試験では、酸化還元環境、コロイド状態、微生物学的環境、溶存ガス等の条件を原位置試験と同じ条件に調整することは困難である。そこで、原位置における上記の条件を反映するために、図5に示す CHEMLAB と呼ばれる円筒状の大型プローブを作製し、それをトンネル内から掘削したボーリング孔に埋め込み、原位置で直接吸着・溶解等の実験ができるようにした。プローブ内部は、トレーサ溶液部、ポンプ部、カラム部、カラムからの流出溶液採取部、電源部か

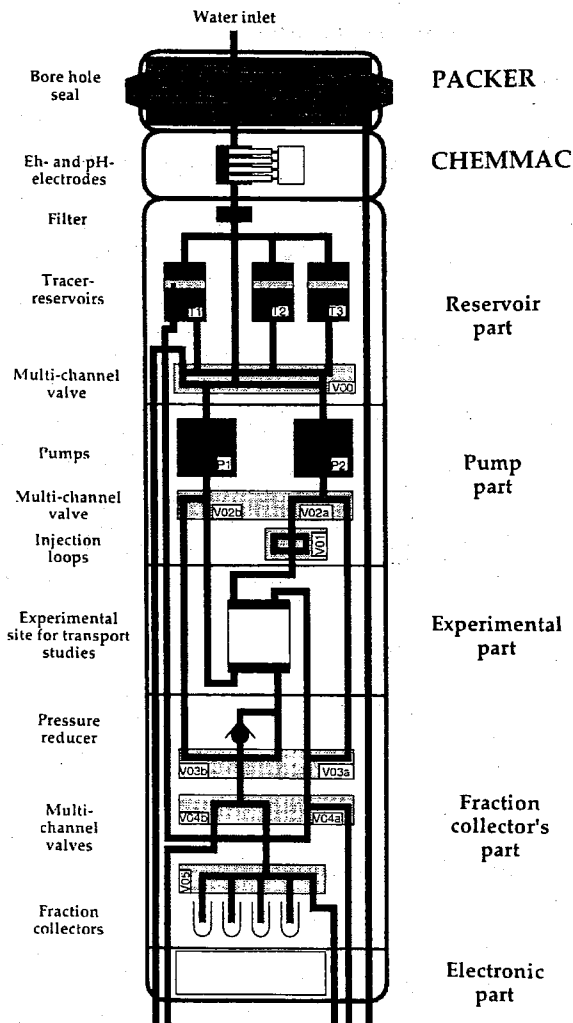


図5 RNR試験に使用するCHEMLABプローブの概要[2]

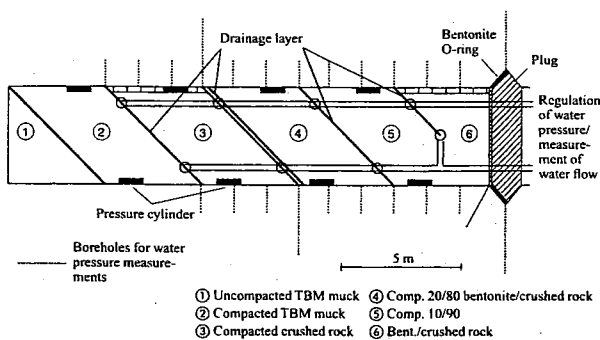


図6 埋め戻し・プラグ試験の計画案[3]

ら構成され、プローブ全体で直径 89 mm、長さ 16 m、重さ 360 kg にも及ぶ。プローブ内部で放射性核種移行に関するカラム試験が密閉系で実施できるようになっており、Sr や Cs の吸着実験を初め、最終的には実使用済燃料の溶解試験も計画している。試験サイトとしては、らせん

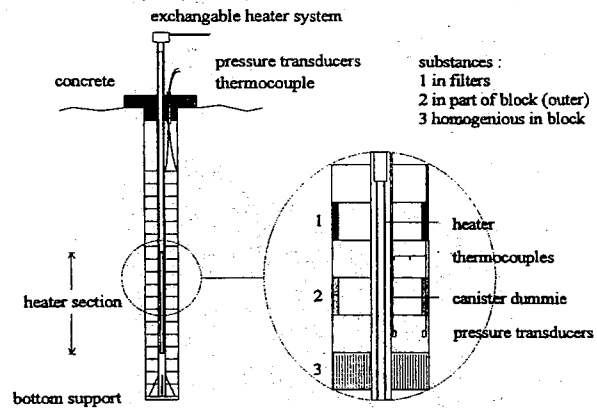


図7 長期性能試験の計画案[2]

状トンネル内の海面下 335 m の地点を予定している。

4.4 埋め戻し・プラグ試験[2, 3, 8]

いったん掘削された岩盤空洞を放射性核種の移行経路とならないようにするためのシーリング、プラグング技術は重要である。埋め戻し・プラグ試験は、種々の埋め戻し材の止水および力学特性、ならびに施工性を明らかにする試験である。図6に計画案を示す。この案では、締め固めていない TBM 掘削ずり、締め固めた TBM 掘削ずり、締め固めた粉砕 TBM 掘削ずり、締め固めたベントナイト・粉砕 TBM 掘削ずり混合物等の計 6 種類の異なる埋め戻し材の性能を比較する予定である。試験サイトとしては、掘削影響試験のスムーズプラスティングトンネルが有力である。

本試験の予備試験としての埋め戻し試験を TBM トンネルで行い、以下の結果が既に得られている[2]。

(1) TBM 掘削ずりを所定の粒度分布に調整し、一定の水分量を有するベントナイトと粉砕 TBM 掘削ずりの混合物が効率的に作製できた。

(2) トンネル内に水たまりがある場合、水平方向の埋め戻し材の締め固めは困難であった。

(3) 水平方向に対してある角度をもたせた斜め方向の埋め戻しは、トンネル壁面近傍を除いては、うまく締め固めることができた。ベントナイト 10 %・粉砕 TBM 掘削ずり 90 % 混合物の場合、乾燥密度で 2.0 kg/cm³ 以上の値が得られた。

(4) 湧水量が多い地点では、施工上の工夫が必要であった。

(5) 埋め戻し後の再取り出しはうまくできた。

4.5 長期性能試験[2, 3, 9]

緩衝材として使用するベントナイトの長期的な性能を確保することは重要である。長期性能試験は、通常の環

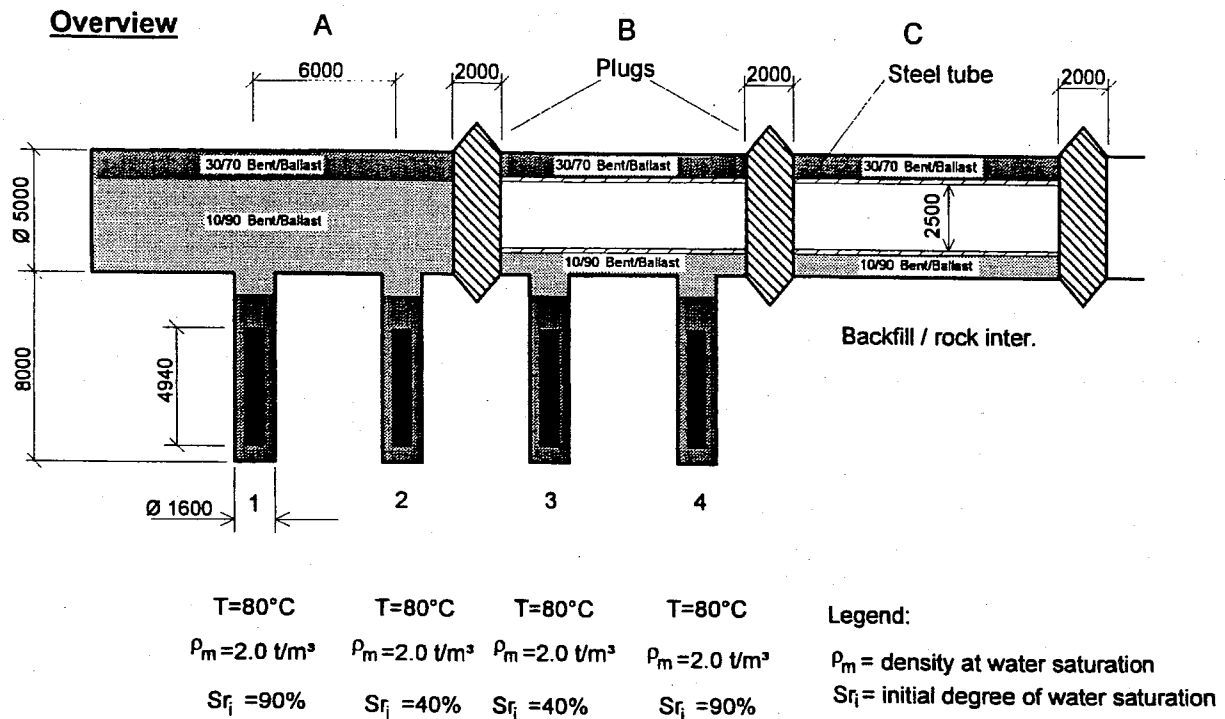


図8 プロトタイプ処分施設の計画案[2]

境条件および不利な環境条件（例えば、地下水中の塩分濃度が極端に高い場合、間隙水 pH やカリウム濃度が高い場合）におけるベントナイトの長期的な止水性、膨潤特性、変形・流動特性を比較する試験である。さらに、鉱物変質モデルの構築およびそのパラメータの取得も行う。図7に計画案を示す。ヒーター挿入孔は直径約30 cm、深さ4~7 mであり、銅管内部にヒーターを挿入し、外側にベントナイトブロックを充填し、温度、圧力、水分量の変化を最大20年にわたり測定する予定である。なお、ヒーター温度は最大150℃まで上昇させる予定である。

4.6 プロトタイプ処分施設の建設[2, 3, 10]

地下450 mのTBMトンネル最奥部に6 mの間隔で直径1.6 m、深さ8 mの処分孔を計4孔設け、熱源となる模擬キャニスターを埋設し、緩衝材と埋め戻し材で処分孔とTBMトンネルを埋め戻すことを計画している。図8に計画案を示す。KBS-3の概念に基づく、このようなプロトタイプの処分施設を建設することによって、処分孔の掘削、埋め戻し、シーリング、プラグング、モニタリング、再取り出し等の建設、施工、ハンドリングに関する課題を検討するものである。なお、それぞれの処分孔に対しては、初期ベントナイト水分量や坑道内通路の有無の条件が異なる。処分坑道に対しては、上部はベントナイト30%・掘削ずり70%混合物、中~下部はベントナイト10%・掘削ずり90%混合物で埋め戻す計画である。

5. 当所の研究内容

上記の原位置試験計画に対して、当所は以下の研究を現在実施し、国際共同研究に協力している。

第1に、安全評価上非常に重要である亀裂性岩盤中の地下水流動・核種移行現象に対して、当所が開発したスメアード割れ目モデルによる地下水流動・核種移行解析コードを適用している[11]。これまでに、長期揚水・トレーサ移行試験[12]やトンネル掘削に伴う地下水位低下に対して、当所開発コードが十分に適用できることを明らかにした[13-15]。特に、トンネル掘削に伴う地下水位低下の解析では、トンネル内への湧水量を低減するために注入したグラウトの効果をモデルに組み込むことにより、当所の解析コードが実測された地下水位低下パターンをうまく評価できることを明らかにした。さらに、現在TRUE試験に対しても本コードを適用し、解析コードの検証・高度化を進めている。

第2に、当所独自の技術である溶存ガスを利用した地下水年代測定手法[16,17]および割れ目内粘土分析による断層活動性評価手法[18,19]を本サイトに適用している。これらの手法は日本国内においては既に適用されており、エスポサイトへの適用性の拡張を目指している。

6. おわりに

エスポHRLでは、操業期においては、高レベル放射性廃棄物の地層処分の性能評価や処分施設の設計・建設に直接係わる調査・試験を予定している。現在、本プロジ

エクトには国際共同研究として8ヶ国9機関が参加し、日本からは動力炉・核燃料開発事業団と当所の、2機関が参加しているが、日本における地質・地盤・地下水等の条件を考慮した上で、ここでの成果を十分活用することが重要であると考えられる。

参考文献

- [1] Almén, K. E., Zellman, O.: Äspö Hard Rock Laboratory. Field investigation methodology and instruments used in the pre-investigation phase, 1986-1990, SKB TR 91-21, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1991).
- [2] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company: Äspö Hard Rock Laboratory Annual report, SKB TR 96-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1996).
- [3] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company: Äspö Hard Rock Laboratory 10 years of research, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1996).
- [4] 五十嵐敏文: スウェーデンエスポ地下研究施設における原位置試験研究の現状. 日本原子力学会誌 **38**, 272-278 (1996).
- [5] Winberg, A. ed.: First TRUE stage - Tracer Retention Understanding Experiments, Descriptive structural-hydraulic models on block and detailed scales of the TRUE-1 site, SKB ICR 96-04, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1996).
- [6] Mazurek, M., Bossart, P., Eliasson, T.: Classification and characterization of waterconducting features at Äspö: Results of phase I investigations, SKB HRL Progress Report 25-95-03, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1995) (internal document).
- [7] Puigdomenech, I., Banwart, S., Wikberg, P.: Test plan for Redox Experiment in detailed scale (REX), SKB HRL Progress Report 25-96-09, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1996) (internal document).
- [8] Börgesson, L.: Test plan for backfill and plug test in Zedex drift, Release 1. 1, SKB HRL Progress Report 25-95-16, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1995) (internal document).
- [9] Karnland, O.: Äspö Hard Rock Laboratory: Test plan for long term tests of buffer material, SKB HRL Progress Report 25-96-22, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1996) (internal document).
- [10] Bäckblom, G., Börgesson, L.: Programme for backfill tests and Äspö prototype repository to prepare for the deep repository of spent nuclear fuel in Sweden. Release 1. 1, SKB HRL Progress Report 25-94-36, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1994) (internal document).
- [11] 河西基, 田中靖治, 五十嵐敏文: 高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発(その1) - 割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法 -. 電中研研究報告 U93054 (1994).
- [12] Rhén, I., Svensson, U., Andersson, J. E., Andersson, P., Eriksson, C. O., Gustafsson, E., Ittner, T., Nordqvist, R.: Äspö Hard Rock Laboratory: Evaluation of the combined longterm pumping and tracer test (LPT-2) in borehole KAS06, SKB TR 92-32, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1992).
- [13] Igarashi, T., Tanaka, Y., Kawanishi, M.: Application of three-dimensional smeared fracture model to the groundwater flow and the solute migration of LPT-2 experiment, SKB ICR 94-08, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1994).
- [14] 五十嵐敏文, 田中靖治, 河西基, 宮川公雄: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究(その2) - 長期揚水・トレーサ移行試験に対する3次元スメアド割れ目モデルの適用. 電中研研究報告 U94054 (1995).
- [15] 田中靖治, 宮川公雄, 五十嵐敏文, 河西基, 重野喜政: スウェーデン SKB との国際共同研究における地下実験施設建設用の斜坑掘削による圧力水頭変化に関する数値解析. 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.171-175 (1996).
- [16] 馬原保典, 河西基, 垣内弘幸, 五十嵐敏文, 佐伯明義: 地球化学的手法を用いた地下水流動調査法の提案 - 六ヶ所サイトにおける地下水流動特性の把握 -. 電中研研究報告 U95044 (1996).
- [17] Mahara, Y.: Development of the hydrogeological survey method using the natural dissolved noble gases for the site-characterization for radwastes disposal. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **353**, pp.1371-1378 (1995).
- [18] Hataya, R., Tanaka, K., Miki, T.: A new ESR signal (R signal) in quartz grains taken from fault gouges: Its properties and significance for ESR fault dating. *Applied Radiation Isotopes*, to be published in 1997.
- [19] Hataya, R., Tanaka, K., Miki, T.: Studies on a new ESR signal (R signal) of fault gouges for fault dating. *Quaternary Geochronology*, to be published in 1997.