

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2001.9.NO.58

目次

フィンランドの高レベル放射性廃棄物処分予定地におけるサイト調査について……………	
センターのうごき……………	

フィンランドの高レベル放射性廃棄物処分予定地におけるサイト調査について

はじめに

わが国における高レベル放射性廃棄物の処分に関しては、2000年6月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が成立し、2000年11月には、処分の実施主体である「原子力発電環境整備機構」が設立された。わが国における高レベル放射性廃棄物の最終処分方策は、諸外国と同様に「地層処分」が考えられている。地層処分とは、ガラス固化体を地下数100mより深い地層中に隔離する方法であり、先に示した法律では地下300m以上の深部に処分するとされている。この「地層処分」の技術的信頼性に関しては、核燃料サイクル開発機構が「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（1999年11月）」として取りまとめた。同レポートでは、これまでの研究開発により地層処分概念の成立に必要な条件をみだす地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発され、信頼性のある技術的

基盤が整備されたことが示された¹⁾。今後、原子力発電環境整備機構を主体として高レベル放射性廃棄物の最終処分事業が本格的に進められる。

一方、本稿で紹介するフィンランドでは、原子力発電所で発生した使用済燃料を直接高レベル放射性廃棄物として地層処分する方策が考えられている。1981年以来、国内で発生した使用済燃料はロシアの再処理工場に輸送されていたが、1994年のフィンランド原子力法の改訂により、使用済燃料の国外への輸送が禁じられたため、1996年のLovisa原子力発電所を最後にロシアへの使用済燃料輸送は中止された。このため TVO 社と IVO 社は、1995年10月に使用済燃料の最終処分を行う合弁会社である POSIVA 社（TVO60%、IVO40%）を設立した。POSIVA 社は電力会社の委託に基づく使用済燃料の処分の実施と、原子力発電所の中低レベル放射性廃棄物のコンサルタントを行っている。同社は、使用済燃料を処分するためのサイト候補地として4地点を選定し、地質、地下水調査等のサイト調査を実施した。そのサイト調査の

結果から、最終的に Olkiluoto 原子力発電所近郊の Eurajoki を最終処分地地点として選択し、1998 年 5 月フィンランド政府に対して正式に申し入れた。そして、フィンランド政府は、2001 年 5 月 Eurajoki(Olkiluoto サイト)を使用済燃料の最終処分地点として決定した。

本稿では、世界でも高レベル放射性廃棄物処分の最先進国であるフィンランドの最終処分地として選定された Olkiluoto サイトでこれまでに実施されたサイト選定のための地質、地下水に関する調査技術や調査の考え方について紹介する。なお、本稿は、2001 年 3 月に実施した現地視察結果と POSIVA (1999)²⁾に示された内容を中心にとりまとめた。

1. フィンランドにおけるサイト選定経緯

フィンランドにおける使用済燃料の最終処分地のサイト選定経緯をまとめる。

1980-1982 年 General Studies

フィンランドに分布する岩盤の使用済燃料の最終処分に対する一般的な適性調査を実施した。

1983-1985 年 Site identification survey

衛星写真、地質図、物理探査データによる調査を実施した。本調査により 327 ブロック、162 ブロック、61 ブロックと段階的にサイトを選定した。さらに、地質学的分類や環境評価(人口密度、土地所有者、輸送コストなど)により 101 の調査候補地点を選定した。

1986 年 Evaluation by authorities

Radiation and Nuclear Safety Authority(STUK)による評価により 85 調査地域を選定した。さらに、原位置調査のための調査地域の選定調査を実施し、5 調査地域(Romuvaara, Veitsivaara, Kivetty, Syyry, Olkiluoto)を選定した。

1987-1992 年 Preliminary characterization

5 調査地域での原位置調査、地質構造モデルの開発、水理、地化学特性の評価等を実施した。

1993 年 Review by authorities

4 調査地域(Eurajoki, Loviisa, Aanekoski, Kuhmo)を選定した。

1993-2000 年 Detail site characterization

地下水、地化学特性の基礎研究、3 調査地域での補足調査、地下水流動、地化学特性の評価、力学特性等の評価を実施した。

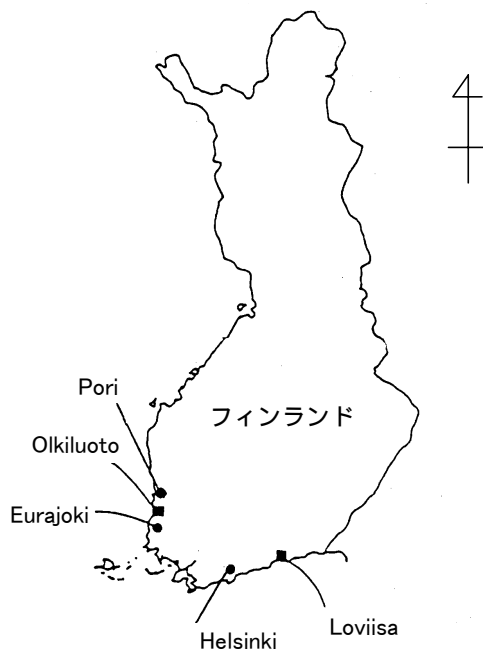


図-1 Olkiluoto サイト位置図

2. Olkiluoto サイトにおける地質、地下水調査

2.1 Olkiluoto サイトの地形、地質、水理概況

Olkiluoto サイトは、図-1 に示すように首都ヘルシンキから北西に約 300km の海岸沿いに位置する Olkiluoto 島内にある。Olkiluoto 島の面積は約 12km² であり、図-2 に示すように TVO 社の原子力発電所 2 基が Olkiluoto 島西部で稼働中である。また、原子力発電所の近傍には、中低レベル放射性廃棄物処分場である VLJ 処分場が操業中である。

Olkiluoto 島は非常に平坦な地形であり、最も高い地点でも海拔 18m であり、大部分が海拔 5m 以下である。年間平均降水量は 550mm (1961~1995 年の平均値) であり、その約 70-80% は蒸発散及び河川等の表流水となる。残りは地下へ浸透し、年間降水量と地下水位の変化の関係から基盤岩中への浸透量は年間降水量の 1-2% 程度、残りは表土中の側方流動と推定されている。

Olkiluoto サイトには、18 億 ~ 19 億年前の Svecofennian metasediments (堆積岩起源の変成岩)、深成岩が分布する。これらはミグマタイト化した雲母片麻岩を主体とし、中性 ~ 珪長質の深成岩、トーナライト、花崗閃緑岩、花崗岩、ペグマタイトが貫入する。また、Olkiluoto サイトに特徴的な

地質構造として、過去の変形作用により生じた大規模な高角度の割れ目ゾーンが存在する（一部低角度の割れ目ゾーンも存在する）。これらは、R構造と呼ばれており、図-3に示すようにサイト内での分布がボーリングにより確認されている。R構造以外の部分（健岩部）は非常に硬質で、風化部や割れ目はほとんど見られない。したがって、Olkiluoto サイトに分布する岩盤は、地下水移行評価において割れ目系媒体として考えられている。

図-4にR構造の透水量係数と健岩部の透水量係数の分布図を示す。R構造の平均透水量係数は $3 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ （2m 区間の透水試験）である。R構造の透水性は、健岩部の透水性と比較すると相対的に大きい。一方、健岩部では、透水量係数分布に見られるように $1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 以下の原位置透水試験の測定限界を下回る区間も多く存在し、 $1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ より大きい透水量係数を用いて推定された健岩部の平均

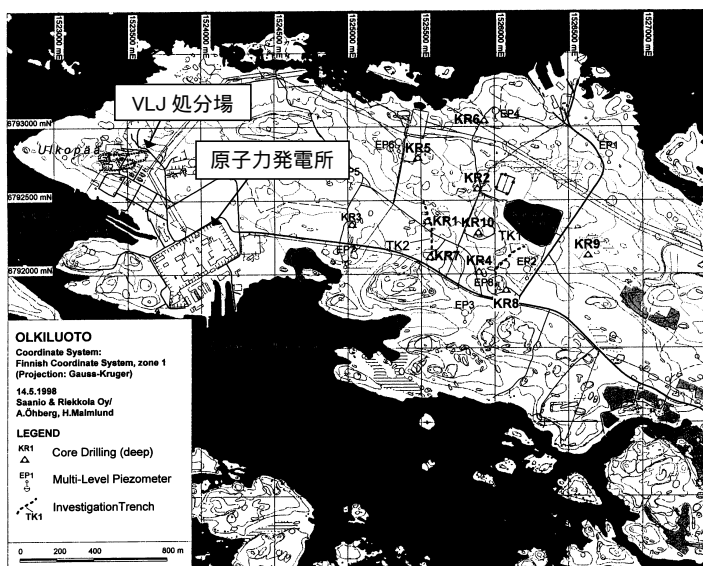


図-2 Olkiluoto サイトの主要施設及びボーリング孔位置図

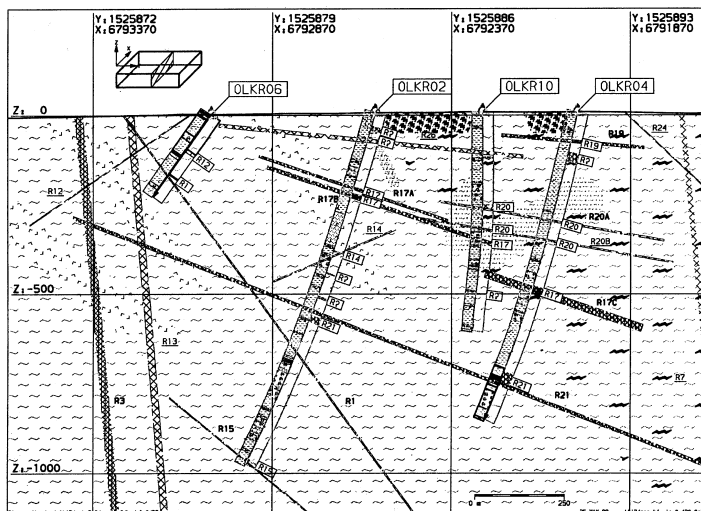


図-3 地質断面図（南北方向）

Normal Probability Plot

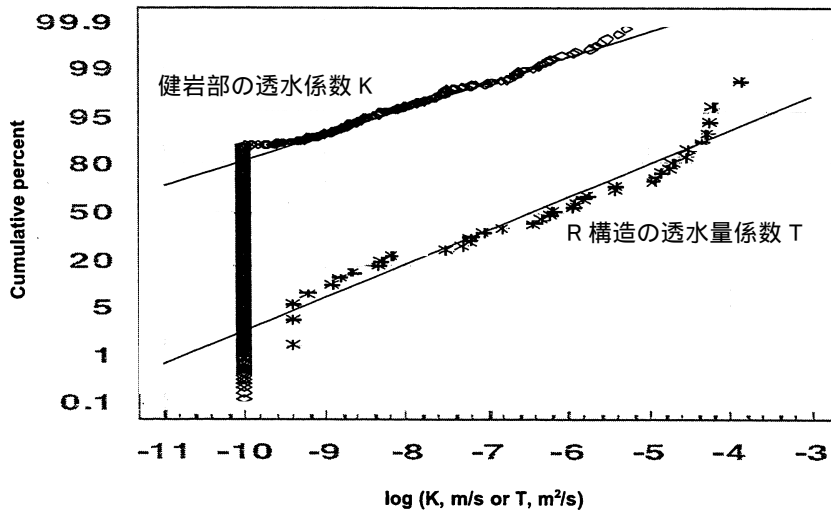


図-4 R 構造の透水量係数分布及び健岩部の透水係数分布

透水係数は $8 \times 10^{-13} \text{m/s}$ と非常に小さい。また、健岩部の透水性は深度が深くなるにつれ小さくなるという深度依存性の傾向を有することも明らかになっている。

地化学的な特性からは、約 150m 以浅に分布する 2,500 年以降の天水起源である $\text{HCO}_3\text{-rich}$ タイプの地下水、約 100 ~ 300m に分布する 2,500 ~ 7,500 年前 Litorina 期の海水起源である $\text{SO}_4\text{-rich-Na-Cl}$ タイプの地下水、約 100 ~ 500m に分布する約 7,500 ~ 10,000 年前先 Litorina 期の氷床溶融水を起源とする Na-Cl タイプの地下水、約 500m 以深に分布する約 10,000 年以前の熱水性の塩分含有流体による影響を受けた前氷河期の溶融水を起源とする Ca-Na-Cl タイプの地下水に分類される。

2.2 地質・地質構造調査技術

(1) ボーリング掘削

Olkiluoto サイトでは、1987 ~ 1992 年の Preliminary characterization 段階、1993 ~ 2000 年の Detail site characterization 段階において、地質、水理、地化学特性を把握するために、約 7km^2 の領域において原位置調査用に 10 本の深層ボーリング孔を掘削した。これらのボーリング孔の平面位置は前掲図-2 に併記した。図中の KR1 孔、KR2 孔、KR4 孔は約 1000m の掘削深度であり、KR3 孔、KR5 ~ KR10 孔は 300m ~ 600m 級の

掘削深度である。これらのボーリング孔に特徴的なことは、前掲図-3 を見ても分かるようにボーリング孔の掘削方向が鉛直方向ではなく、斜め方向であるということである。この理由は、地下水移行評価においてサイトに分布する R 構造を支配的な地下水の移行経路と考え、その分布特性や水理特性を把握することを最も重要な課題とし、R 構造に向かって掘削したためである。もう一つの特徴は、これらのボーリング孔は、先に示したように深層ボーリング孔であるにも係わらず、泥水掘削工法ではなく全て清水掘削工法により掘削されたことである。泥水掘削工法の場合、ボーリング孔壁に泥膜が形成されるためボーリング孔内で実施する各種試験に悪影響を及ぼす可能性が生じる。一方、清水掘削で実施する場合には、ボーリング孔で実施する水理試験などの孔内試験に関して、掘削に伴うスライムの除去方法が問題になる。Olkiluoto サイトでは清水掘削工法を採用し、スライム除去の問題に対しては、高揚水性能を有する特製の揚水ポンプによって孔内を十分に洗浄することにより対処している。また、ボーリング掘削に使用する掘削水も地化学調査結果に影響を及ぼす可能性があるが、これについては掘削水中にトレーサ（ウラン）を混入させる方法を採用している。掘削水中に混入させたトレーサの

濃度は、本採水前に地上でモニタリングを実施し、十分に濃度が低下した後、本採水が開始される。

ボーリング掘削は掘削後に実施する様々な調査に影響を及ぼす可能性があることから、サイト調査で最も重要な調査技術の一つであると考え、常に高精度化、合理化を念頭においた技術開発が進められている。

深層ボーリング以外にも、露頭観察（275箇所）、トレンチ掘削（2箇所）、浅層ボーリング（35孔）や次に述べる物理探査などが行われ、それらのデータは Olkiluoto サイトにおける地質・地質構造モデルの構築のために利用されている。

(2) 物理探査

物理探査技術は、ボーリング掘削では得ることの出来ないボーリング孔間の地質・地質構造

等の情報を補間するために実施された。特に、R 構造の方向性や広がりや空間的に把握するための調査技術として活用された。Olkiluoto サイトで実施された物理探査技術は、空中物理探査と地上物理探査に大きく分けられる。

空中物理探査は、ヘリコプターを使用して Olkiluoto 島を中心にした 30km²（総延長距離 407km）の領域に対して行われた。詳細な調査仕様を表-1 にまとめた。空中物理探査によって地質や透水性亀裂/破碎帯の分布図を作成するためのデータが得られた。また、Olkiluoto サイトで実施された地上物理探査は、表-2 に示すように岩質区分や亀裂の特定を目的とした地中レーダー探査や塩水の分布域を把握することを目的とした直流電気探査、EM 法周波数探査などが挙げられる。

表-1 Olkiluoto サイトで実施された空中物理探査

手 法	装 置	対象領域と技術仕様	計測間隔	目 的
全磁場と鉛直方向勾配	Cs 蒸気センサ、間隔 1.5m	50m 0.01n、0.0033nT/m	0.1 秒	地質図作成
VLF EM 法（全場と鉛直方向直角分析）	VLF 受振器、2 点	55m 0.25%	0.1 秒	透水性亀裂/破碎帯図作成
EM3 法 周波数、実数部/虚数部	コイル間隔 6.45m、 888Hz(鉛直方向、同軸コイル)、 7837/51520Hz（水平方向両面コイル）	43m 0.25ppm（888Hz） 0.5ppm（7837Hz） 1.0ppm（51520Hz）	0.1 秒	透水性亀裂/破碎帯図作成
γ線放射線分析	256 チャンネル 線分光分析計、 16.8L の NaI 検出器	95m 1cps	1 秒	地質環境図作成
飛行経路	ビデオカメラ	94m 0.1m	連続	飛行経路復元
高度	レーダー	94m 1m	0.1 秒	
ナビゲーション	レーダー	94m 0.1m	1 秒	

出典：原子力環境整備促進・資金管理センター（2001）³⁾

表-2 Olkiluoto サイトで実施された地上物理探査

手 法	使用 法	対象領域/間隔	目 的
地中レーダー	探査ライン	延長距離 13.4km	岩質区分と基盤岩の亀裂図作成
全磁力と鉛直方向勾配	直線格子区域	5km ² 、77km/10m、直線間隔 50m	地質図作成
直流電気探査（半シュランベルジャ配列）	絶縁点、 各サイトでの反対側への非 対称探査	21 点 42 回探査 最大電流電極間隔 200-1000m	塩水の存在図示、土壌と基盤岩上部の比抵抗変化
水平ループ EM 法（実数部/虚数部）	直線格子 100m の格子間隔、 1760Hz、14080Hz	5km ² 、71km/10m、測線間隔 50m	土質分布と基盤岩の亀裂図の作成
EM 法周波数探査（広域帯 GEFINEX400S'SANPO'）	いくつかの測線と側面の観 察による探査グループ	11 グループ、トータル 99、コイル間隔 200m-1025m	塩水の存在の図示、基盤岩深部での比抵抗変化
水平地震探査	分割された測線、 固定震源 3 震源/1 測線	6 測線（3.4km）、 受信器間隔 5m	海岸地域での亀裂体と岩相境界面の位置把握

出典：原子力環境整備促進・資金管理センター（2001）³⁾

2.3 水理特性調査技術

Olkiluoto サイトに分布する岩盤は割れ目系岩盤であり、前述のように R 構造が地下水の移行経路として重要視されている。したがって、R 構造を対象とした水理試験機器の開発や原位置調査が重点的に行われてきた。

その水理試験機器の一つに図-5 に示す Flow logging がある。本装置の大きな特徴は、試験区間をゴム製の円盤状の Rubber disk によって構築することである。Olkiluoto サイトに分布する岩盤が硬質で風化部等の脆弱部がほとんど存在しないためボーリング孔壁の崩壊がほとんど見られないことから、簡易である Rubber disk を考案し、試験を効率化した。本装置では、流量と概略流向を測定することが出来る。微少な地下水の流量 (0.1~10ml/分) を測定する場合には熱パルス法が使用され、流量が大きい場合 (2~5000ml/分) には、熱ユニット方式が用いられる。熱パルス法では、装置中の温度センサーを用いて温度変化を測定する。

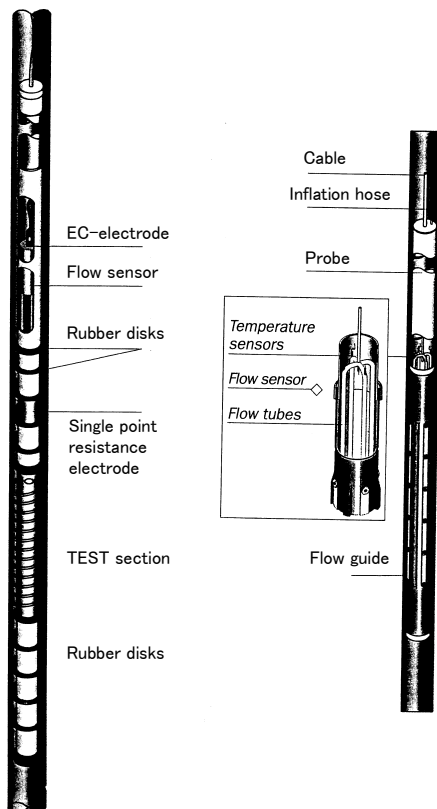


図-5 流量流向検層装置模式図

図-5 に示すように、装置内には 4 個の温度センサーが Flow tube 内に対照的に配置されており、試験区間へ流入する地下水、あるいは、流出する地下水が存在する場合に、トレーサである熱は下流側の温度センサにより速く温度変化として検知される。

その他の水理試験装置として Hydraulic Testing Unit(通称 HTU)がある。これは、いわゆる単孔式透水試験装置である。特徴的なことは、試験の効率化を図るために計測装置一式がコンテナ内に装備されていることや孔内装置の降下にボーリングロッド等の降下用装置を用いないことである。その他、R 構造の水理的な連続性や透水性を把握するための孔孔間における長時間透水試験(揚水法)が実施された。本試験は、各ボーリング孔で確認された R 構造を含むように遮水パッカーによって試験区間を構築し、ある区間から地下水を揚水した時の水頭変化量を計測するという方法である。さらに、浅層ボーリング孔での地下水位測定や深層ボーリング孔でのマルチパッカーシステムによる多区間のピエゾ水頭測定も実施された。

2.4 地化学特性調査技術

地化学特性調査は、Preliminary characterization 段階の 1989 年から始められ、1993 年からの Detail site characterization 段階から本格的に実施された。将来実施される予定の調査用の地下空洞掘削によって地下水の地化学特性の空間分布に変化が生じてしまうため、地下空洞掘削前の地化学データを取ることが出来る期間は限られる。したがって、これまでに実施されたサイト調査の中でも特に重要視された調査の一つである。

地下水の地化学特性及び生物学的調査のために、原位置採水装置(通称 PAVE)が開発された。この装置は、地下水の溶存ガス、化学成分等を精度良く分析するために封圧採水を可能にするように設計されている。本装置は、試験区間を構築する遮水パッカー、採水容器、圧力バルブ、揚水ポンプから構成される。採水前には掘削水の混入の影響が無いことを確認するために、地上のフローセルにより掘削水に混入したトレーサの濃度や地下水の地化学データである水素イオン濃度 (pH)、酸化還元電位 (Eh)、電気伝導度 (EC)、溶存酸素量、水温などが安定するまでモニタリングを実施する。図十分に安定したことを確認した後に、PAVE 装

置を用いて地下水を採水する。また、PAVE 装置による採水終了後も、地下水の定期的な水質モニタリングは継続されている。

3. Olkiluoto サイトにおける調査事例に対する一考察

前項では、フィンランドの Olkiluoto サイトでこれまでに実施された地質・地下水調査技術の概要を紹介した。これらの調査技術が、わが国で今後進められる高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けたサイト選定のための地質・地下水調査にそのまま適用できるとは限らない。その理由は、地下に存在する岩盤や地下水の物理的、化学的な特性は、サイト毎に異なることが多いこと、サイト周辺の地理的環境（沿岸部、山間部など）の違いによっても必要とする調査技術が異なること、安全評価や施設設計に用いられるパラメータの要求精度が違えば必要とする調査精度も異なること、等が挙げられる。しかし、調査目的の設定や目的を達成するための調査技術の組合せ方（言い換えれば、調査システム化）など、調査を実施する上での基本的な考え方は非常に参考になる。

Olkiluoto サイトにおける地下水移行評価上最も重要な水理地質構造は R 構造である。ボーリングの位置、方向、深度は、R 構造の地質、水理特性を把握することを目的に計画された。一方で、将来的にボーリング孔が地下水の移行経路になる危険性を考えて、ボーリング掘削は最小限の本数で実施された。Olkiluoto サイトでこれまでに掘削した主要な深層ボーリングは 10 本であるが、この 10 本のボーリング孔では把握しきれない孔孔間の情報を補間するために、物理探査技術が多く適用され、最終的に他の水理特性調査の結果と併せて水理地質構造モデルが構築された。このように、地下水移行評価上、問題となる水理地質構造を把握することを調査の最優先課題として位置付け、最小限のボーリングから最大限の成果を挙げるために物理探査技術、水理試験技術との組合せを考え、サイト調査のシステム化が行われている。また、流量・流向検層装置や HTU 装置は、Olkiluoto サイトに分布する岩盤の特性を生かした合理的な調査技術である。将来わが国でもサイトが選定された段階で調査技術の合理化を念頭においた研究

開発は必要になると思われる。

データの品質という観点では、ボーリング孔で実施する物理検層や水理試験への影響を避けるためにボーリングロッドや掘削ビットに極力潤滑油を使用しないことや、先に述べたように地化学特性調査の精度を向上させるために、ボーリング掘削時に掘削水にトレーサを混入させて、採水前にその影響度を評価するということが実施されている。このように、調査技術の細部にまで気を配り、データの品質を確保するという考え方も注目すべき点である。

あとがき

冒頭に述べたように、わが国でも高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた動きが本格化した。地質・地下水調査は、サイトに分布する岩盤の諸特性を適切に理解することや安全評価で使用される評価パラメータを決定するなど、処分プロジェクトを遂行する上で重要な位置付けにある。今後、わが国の処分プロジェクトを遂行する中で海外の優れた地質・地下水調査技術を導入することも必要であるが、調査の考え方（調査目的の設定、目的に対する調査のシステム化方法、調査の優先順位など）に関する情報を得ることも重要である。そして、わが国に分布する岩盤に適合した独自の調査技術と調査システムを開発していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構（2000）：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 -
- 2) POSIVA OY（1999）：Final Disposal Of Spent Nuclear Fuel In Finish Bedrock-Olkiluoto site report-, POSIVA99-10
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター（2001）：高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書（第一分冊）-高精度物理探査技術高度化調査-（1/2）

（安達哲也、橋本秀爾）

センターのうごき

第 53 回 通常理事会開催

平成 13 年 6 月 15 日（金）開催の第 53 回通常理事会において、「平成 12 年度一般会計に関する事業報告」、「平成 12 年度一般会計に関する決算」、「平成 12 年度資金管理業務に関する事業報告」及び「平成 12 年度資金管理業務に関する決算」について付議し、提案のとおり承認されました。

第 9 回 評議員会開催

平成 13 年 6 月 22 日（金）開催の第 9 回評議員会において、平成 12 年度一般会計に関する事業報告及び同決算並びに平成 12 年度資金管理業務に関する事業報告及び同決算について報告し、引き続き「理事の選任」について付議、提案のとおり承認されました。

この理事の改選により、次の方々が交替されました。

区分	退任者	新任者	所属、役職
理事（常勤）	川人 武樹（理事長） （13.6.30 付）	板倉 治成 （13.7.1 付）	㈱東京エネシス専務取締役
理事（非常勤）	高須 司登 （13.6.22 付）	白倉 茂生 （13.6.22 付）	中国電力㈱取締役社長
理事（非常勤）	住田 光生 （13.7.3 付）	高橋 暉 （13.7.3 付）	日本公認会計士協会副会長

第 54 回 臨時理事会開催

平成 13 年 6 月 26 日（火）開催の第 54 回臨時理事会において、「理事長の選任」及び「評議員の選出」について付議し、提案のとおり承認されました。

理事長には板倉治成氏が互選され、評議員については同日付をもって次の方々が交替されました。

区分	退任者	新任者	所属、役職
評議員	鈴木 篤之	-	
評議員	日浦 治也	三宅 芳男	三菱重工業㈱常務取締役

平成 13 年度調査研究受託状況

平成 13 年 4 月 2 日以降、8 月末までの間で、次の受託契約が行われました。

委託者	調査研究課題	契約年月日
経済産業省	・地球化学バリアの開発	13.4.2
	・人工バリア材料の照射影響の評価	13.4.2
	・地層処分サイト評価技術確認試験	13.4.2
	・高精度物理探査技術高度化調査	13.4.2
	・遠隔操作技術高度化調査	13.4.2
	・モニタリング機器技術高度化調査	13.4.2
	・人工バリア・天然バリアのガス移行挙動の評価	13.4.2
	・ヨウ素固定化技術高度化開発	13.4.2
	・廃棄体の開発調査	13.4.2
	・放射能レベルの比較的高い低レベル放射性廃棄物を対象とした処分システムの検討調査	13.4.2
	・原子力発電施設解体放射性廃棄物基準調査	13.4.2
	・低レベル放射性廃棄物安全対策事業	13.4.2
	・ウラン廃棄物処分高度化調査	13.4.2
	・サイクル廃棄物ウラン高度回収処理技術開発調査	13.4.2
	・地層処分資金管理システム開発調査	13.4.2
・地層処分重要基礎技術研究調査	13.4.2	
・総合情報調査	13.4.2	
電力各社等	・天然バリア性能・人工バリア材料の性能の評価手法に関する研究	13.8.15

第 2 回 積立金運用委員会の開催

平成 13 年 5 月 30 日（水）に第 2 回積立金運用委員会（委員長は東京大学大学院教授若杉敬明氏）を開催しました。今回は、平成 12 年度の運用実績についての報告を行うとともに積立金運用に関する情報公開の内容等、今後の資金管理に関する諸課題についてご審議いただきました。

編集発行

財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2 丁目 8 番 10 号 第 15 森ビル

TEL 03-3504-1081（代表） FAX 03-3504-1297

ホームページ <http://www.rwmc.or.jp/>