

PNC TN7410 90-004

公開

PNC TR/GE 89-03

## 国際ストリパプロジェクト

1989年12月

ストリパプロジェクト合同技術委員会(JTC)

訳／武田精悦

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所

岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31

TEL 0572-54-1271 FAX 0572-55-4114

## まえがき（訳者）

動力炉・核燃料開発事業団は、地層処分に関するO E C D / N E A国際ストリパプロジェクトに参加し、その研究を進めている（本プロジェクトに関する経緯については本文参照）。現在プロジェクトは1986年に開始した第3フェーズの研究を実施中である。最近プロジェクト当局より1983年から1988年にかけて実施された第2フェーズの研究成果の概要がExecutive summaryとして公表されたので、今回これを訳出し、テクニカルレポートとして発行することとした。

尚、翻訳するに当たり、原文の構成を少し変え、「8. Summary of conclusion」の内容そのままを「Abstract」とし、訳出したものを「要旨」とした。訳出した原論文は、「The international STRIPA PROJECT, In situ experiments in granite for the underground disposal of radioactive wastes, EXECUTIVE SUMMARY OF PHASE 2, February 1989, JTC/SKB/NEA/OECD」である。

国際共同研究（国際ストリバプロジェクト）  
ストリバプロジェクト合同技術委員会（JTC）  
(訳／武田 精悦)

## 要 旨

ストリバプロジェクトの第2フェーズでは、処分場サイト研究のため、第1フェーズに引き続き、手法と技術に関する開発を継続した。クロスホールの研究は、以前には到達できなかった信頼性と現実性でもって結晶質岩中の割れ目を調査することが可能であることを示した。ストリバ研究サイトにおける地下水の流れは、地球物理学的手法によって把握された主要な割れ目中に集中することが明らかにされた。その主要な割れ目は幅広い板状で、高低透水係数のパッチ状の部分を含む。

ストリバにおいて、地下水組成に関するデータを考慮し、割れ目水理、地下水のトレーサーの移行に関する詳細な研究を進めることにより、割れ目系結晶質岩での地下水の流れに関する知識は大きく増大した。ストリバでの研究は、割れ目系にとって基本的な幾何学的特性や水理特性に関する分布の特徴とそのパラメータが決定できるデータを取得・解析できること、従って性能評価研究に必要な経験の一部として、あるサイトを他のサイトと比較できることを示した。移行の試験は、地下水の流れが岩盤中で非常に不均一に分布することを示した。それはトリチウムの測定と合わせ、流れの多くの部分が他のチャンネルからほとんど独立したチャンネルで起こっているという考えを強く支持する。今後は割れ目系結晶質岩での流れを記述する適当な数学モデルの開発にさらに大きな努力を払う必要がある。ストリバでの水理地球化学的研究は又、溶質のソースとして新しく母岩中の流体包有物を考える必要があることを示した。ストリバでは溶質の年代は地下水の年代と全く異なり、それより数億年古いかもしれない。さらにこの溶質は全間隙率 (total porosity) とも関係している。流体包有物は余剰の (residual) 又は流れに関係のない間隙 (non-flow porosity) だが、それは応力場の変化によって引き起こされる微少割れ目を通じ、流れの間隙率 (flow porosity) の一部となると思われる。

ストリバにおいて、岩盤中の人工による開削からの水の流れの密封と制御 (redirection)について試験を行った結果、様々なプラギングと密封試験によってそれが現実性のあることが判明した。粉末を高度に圧縮して適当な形にしたNaベントナイトは、処分場の試錐孔、シャフト、トンネルを密封する上で非常に実用的であることがわかった。初めは局所的に未飽和である粘土が岩盤から水を吸収すると、粘土プラグの実質の透水係数は周囲岩盤の全体の透水係数より非常に小さくなる。粘土のきわめて重要な機能はそれが岩盤と全く完全な境界部を作ることであり、従って又境界沿いの水の流れを防ぐことでもある。粘土に圧縮性と膨潤性の性質があることは、たとえ岩盤にわずかな変位が起こっても、この固い境界部が保持されることを意味する。

The International Stripa Project  
(Executive Summary of phase 2)

Joint Technical Committee  
of the Stripa Project

**Abstract**

The Second Phase of the Stripa Project included the continued development of methods and techniques for repository site investigations. The crosshole investigations demonstrated that it is possible to characterize fractures in crystalline rock with a reliability and realism not obtained before. At the investigated site at Stripa, it was shown that groundwater flow is concentrated within a few major fractures that were identified by geophysical methods. The main features were considered to be broadly planar, containing patches of high and low hydraulic conductivity.

Detailed investigations of the fracture hydrology at Stripa and of the migration of tracers in the groundwater, together with additional information of the groundwater composition, resulted in an improved knowledge of groundwater flow in fractured crystalline rock. The work at Stripa has shown that it is possible to collect and analyze data that enable one to determine the type of distribution its parameters for each of the essential geometrical and hydraulic properties of the fracture system, and hence compare one site with another as part of experience building in safety assessment studies. The migration experiment demonstrated that the groundwater flow could be very unevenly distributed in the rock. Together with the tritium measurements it also gave strong support to the notion that a non-negligible portion of the flow takes place in channels which have little contact with other main channels. A further research effort has to be devoted to development of appropriate numerical models for the description of flow in fractured crystalline rock. The hydrogeochemical investigations at Stripa also indicated that a new type of solute source must be considered — fluid inclusions in the host rock. The age of the solutes may be entirely different from the age of the groundwater. At Stripa, the age of the solutes is likely to be hundreds of millions of years older than the groundwaters. Furthermore, this source contributes the largest portion of the total porosity. Although fluid inclusions are considered to be a residual or non-flow porosity, it could become part of the flow porosity through microfracturing brought about by changing stress fields.

Sealing and redirection of the groundwater flow away from man made openings in the rock was tested at Stripa and found to be feasible as shown in the various

plugging and sealing experiments. The use of Na bentonite in the form of suitably shaped blocks of highly compacted powder has been found to be very practical for sealing off boreholes, shafts and tunnels in repositories. The net hydraulic conductivity of the clay plugs formed when the initially partially unsaturated clay takes up water from the rock and expands, is significantly lower than the gross permeability of the surrounding rock. A very important function of the clay is that it forms a tight, integrated contact with the rock, so that water flow along the rock contact is hindered. The compressibility and expandability of the clay means that this tight contact is preserved even if slight rock displacements occur.

# 目 次

1.	はじめに	1
2.	組織	2
3.	割れ目帯検出と特性調査のためのクロスホール技術	4
3.1	背景	4
3.2	目的	4
3.3	地球物理学的手法	4
3.3.1	試錐孔レーダー	4
3.3.2	試錐孔地震波トモグラフィ	5
3.3.3	成 果	5
3.4	クロスホールサイトでの地球物理学的モデル	5
3.5	水理学的手法	6
3.6	サイト研究との関連	9
3.7	結 果	9
4.	3次元移行試験	10
4.1	背景	10
4.2	目的	10
4.3	試験方法	10
4.4	結 果	11
4.5	主な結果のまとめ・議論・結論	15
4.6	安全評価への推論	16
5.	試錐孔・シャフト・トンネルプラギング試験	18
5.1	背景	18
5.2	目的	18
5.3	試験方法	18
5.3.1	試錐孔プラギング試験	18
5.3.2	シャフトプラギング試験	18
5.3.3	トンネルプラギング試験	20
5.4	試験結果	20
5.4.1	試錐孔プラギング	20
5.4.2	シャフトプラギング	20
5.4.3	トンネルプラギング	23
5.5	結論・コメント	23

6.	ストリパサイトでの水理地質学的特性調査	24
6.1	背景	24
6.2	目的	24
6.3	試験方法	24
6.4	結果・結論	26
6.5	結論の要約と安全評価への推論	30
7.	ストリバにおける地下水の地球化学的特性調査	31
7.1	背景	31
7.2	目的	31
7.3	試験方法	31
7.4	結果と結論	32
7.5	結論のまとめと安全評価への推論	33

## 1. はじめに

スウェーデン中央部にある旧鉄鉱山であるストリバ鉱山において、結晶質岩への放射性廃棄物貯蔵に関する国際共同研究プロジェクトが実施されている。地下350mの鉱石採掘跡の近傍には貫入花崗岩があり、それがこのプロジェクトの研究に利用されている。ストリバでの最初の試験は鉄鉱石の採掘が終了した1976年に開始された。そこでの国際共同研究は1977年のスウェーデン-米国2国間協定(Swedish-American Cooperative; SAC)が最初で、1980年からはOECD/NEA国際ストリバプロジェクトが始まり現在に至っている。1980年から1985年までの第1フェーズの研究には、加、フィンランド、仏、日本、スウェーデン、スイス、米国などが参加した。

第1フェーズでは、単一の垂直、水平な試錐孔や互いに離れた試錐孔間を利用し、原位置での透水係数の測定手法の開発を行った。ストリバでの地下水の起源と進化について明らかにするため、又将来の処分場サイトでの地球化学的研究手法を開発するために、SACで開始された地下水の地球化学的研究を行った。そのために、地表・坑道内から地下1200mに達する多くの試錐を掘削し、地下水の採水を行った。分析は世界各国の研究所で行い、その結果については特別に組織された地球化学諮問グループが解析した。

このプロジェクトの第1フェーズでは移行の研究も行った。それは、処分場から放出されるものと想定される全ての放射性核種の移行について予測するために、花崗岩中を流れる溶質の挙動をより明確に把握しようとするものである。花崗岩でのどの大きな流れも割れ目中で起きるが、溶質の移行は割れ目表面や岩盤中のマトリックスへの化学的吸着で抑制されることがよく知られている。重要な放射性核種に類似した非活動性のトレーサーを岩盤中の試錐孔と交互する单一割れ目中に注入し、吸着挙動に関する試験を実施した。そしてそれが割れ目中を流れる時間を測定し、トレーサーの濃度をモニターした。さらにその実験が終了した後、その割れ目を掘削し、割れ目沿いのトレーサーの含有量を決定した。

花崗岩での放射性廃棄物処分場に関する工学的設計研究は、キャニスターが水平坑道の床面に掘られた浅い垂直な試錐孔に定置することが可能なことを示している。キャニスターとその試錐孔の間の空間は高度に圧縮された粘土緩衝材によって埋められ、キャニスターが定置された後は粘土と砂の混合物によって坑道全体が密封される。本プロジェクト第1フェーズの大規模バッファマス試験(Buffer Mass Test; BMT)は、処分場を模擬した条件下でベントナイトをベースとした粘土緩衝材の挙動の予測について研究するために計画された。その試験では6孔の大口径の試錐孔の中に、使用済燃料キャニスターからの発熱を模擬するため用いられたヒーターと共にNaベントナイトブロックを入れ、その掘削孔上部の坑道は砂-ベントナイト混合物によって埋め戻された。試験期間中は各種の物理的・化学的計測が行われ、最後に綿密にコントロールされた条件下でベントナイトが掘削された。

本プロジェクトの第1フェーズで得られた経験は第2フェーズでの開発に活用された。この報告書は、1983年から1988年にかけて実施されたストリバプロジェクト第2フェーズで得られた知見の概要を述べたものである。第3フェーズは現在実施中であり、1991年に終了する予定である。

## 2. 組織

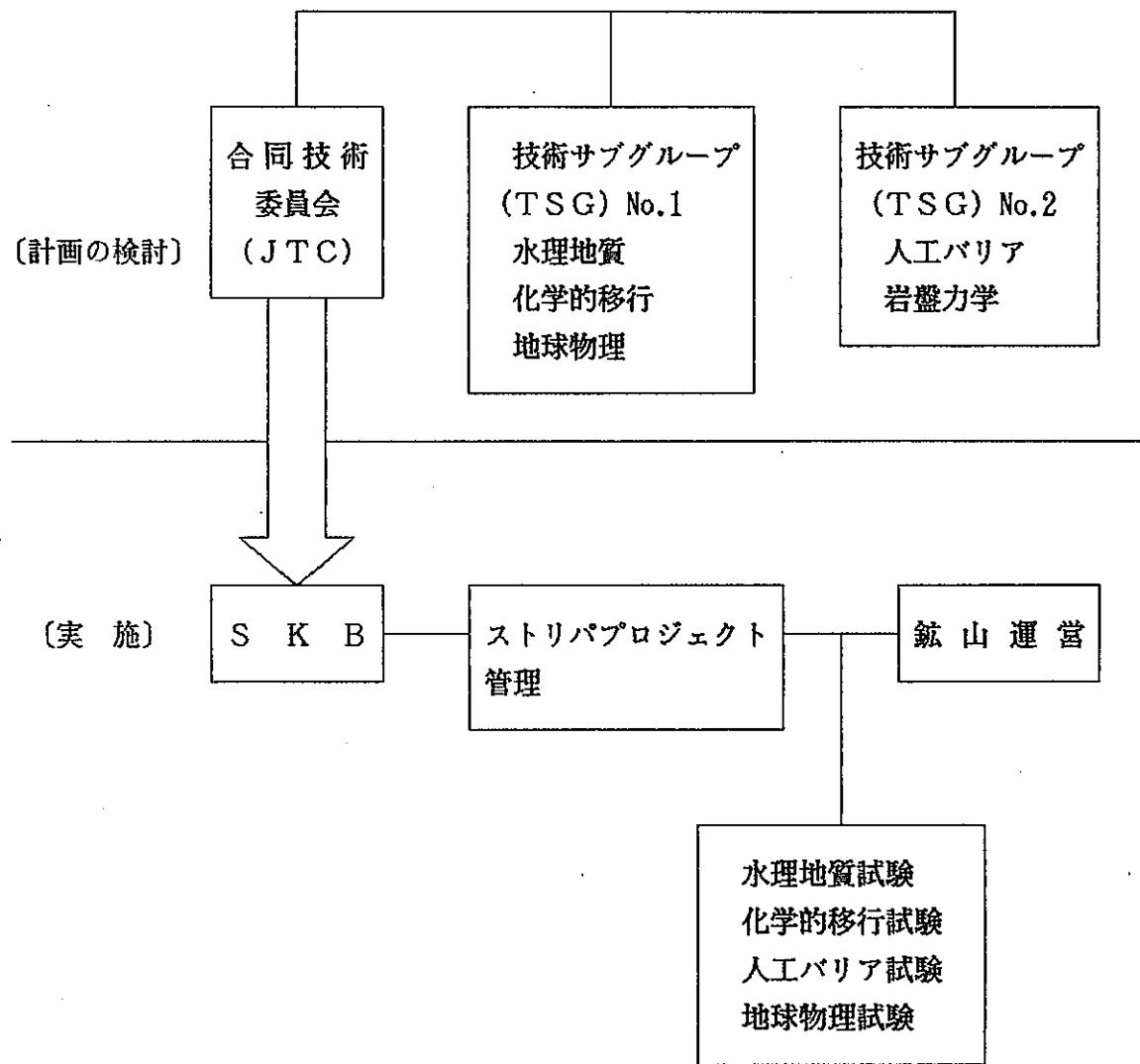
研究計画に対する管理とその財政に関する責任は、本論文の著者でもある合同技術委員会 (Joint Technical Committee; J T C) が負っている。この委員会は各国の組織の代表者から構成される。これは、放射性廃棄物管理に関するO E C D / N E A の委員会を通じ、N E A の管理委員会に対し、業務の一般的な進行に関する情報を提供する義務も負っている。

各研究活動は、当該分野での専門知識を有する研究者である研究責任者 (Principal Investigator) が担当する。試験の計画と実施については定期的に 2 つの技術サブグループ (Technical Sub-Group; T S G) によって検討され、そのメンバーは参加国からの研究者によって構成される。その 2 つはそれぞれ水理地質、化学的移行、地球物理と人工バリア、岩盤力学に関するグループである。

プロジェクトの管理は、事務を担当する組織 (host organization) として S K B 社の研究開発部によって行われている。同社はストリバ鉱山での活動、試験作業に必要な機器や物資の調達に対し責務を負っている。T S G, J T C, 研究責任者、プロジェクト管理に関する会議は、本プロジェクトの進行について検討するため、正規の手続きを経て開催される。本プロジェクトの組織図を第 2-1 図に示す。

本プロジェクト第 2 フェーズの参加組織は次の通りである。

- |          |   |
|----------|---|
| ① カナダ    | Atomic Energy of Canada Ltd (AECL)  |
| ② フィンランド | Industrial Power Company Ltd (IVO), Ministry of Trade and Industry, Imatra Power Company (IVO)            |
| ③ フランス   | Commissariat à l'Energie Atomique (CEA); Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) |
| ④ 日本     | Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)  |
| ⑤ スペイン   | Junta de Energia Nuclear (JEN)  |
| ⑥ スウェーデン | Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB)   |
| ⑦ スイス    | National Co-operative for the Storage of Radioactive Waste (NAGRA)  |
| ⑧ 英国     | Department of the Environment (UK DOE)  |
| ⑨ 米国     | Department of Energy (US DOE)   |



第2-1図 ストリパプロジェクト第2フェーズの組織

### 3. 割れ目帯検出と特性調査のためのクロスホール技術

#### 3.1 背景

処分場を囲む岩盤は、基本的には生物圏へ至る放射性核種が危険な量となるのを防げるバリアとなる。廃棄物中から核種を移行させる最も考えられるメカニズムは流動する地下水に関するものである。結晶質岩において、全ての地下水による移行は基本的には割れ目や割れ目帯で起こる。従って、処分場から生物圏へ至る核種移行の定量的記載において、割れ目の位置やその移行容量に関する情報はきわめて重要である。

割れ目帯検出と特性調査のための技術開発であるこのプロジェクトは、「クロスホール計画」として知られるに至っている。研究責任者は、Dr.Olle Olsson (Swedish Geological Co., ウプサラ, スウェーデン) である。Jörgen Phil (Swedish National Defense Research Institute; FOA, ストックホルム, スウェーデン) とCalin Cosma (Vibrometric OY, ヘルシンキ, フィンランド) は地震波に関するサブプログラムを、John Black (British Geological Survey, キーワース, 英国) は水理に関するサブプログラムそれぞれ担当している。

#### 3.2 目的

クロスホール計画の目的は、廃棄物の最終処分における岩盤の安定性についての評価手法を開発することである。重要な点は、この手法が非破壊のものであること、すなわちこの研究が数孔の試錐孔のみを必要とすることである。研究手法の開発において、割れ目帯の検出と特性調査に大きな力を注いだ。それはこれらが最も重要な核種の移行通路になると考えられているためである。

クロスホール計画では、試錐孔レーダー、試錐孔地震波トモグラフィ、水理試験に関する手法を開発した。この手法によって岩盤の電気的・弾性的・水理特性に関するデータを取得した。これら各手法のために、新しい装置の開発、野外試験の実施、取得したデータに対する評価技術の開発と試験を行った。最後に、各手法によって得られた結果の比較を行った。

#### 3.3 地球物理学的手法

クロスホール計画では試錐孔レーダーと地震波トモグラフィによる手法の開発に大きな努力が払われた。このような研究方法は波の伝播に基づいており、高い分解能と広い検出範囲を持つことを目指している。

##### 3.3.1 試錐孔レーダー

試錐孔レーダーには、シングルホール反射法、クロスホール反射法、クロスホールトモグラフィの3種の方法がある。反射法では基本的に、試錐孔から離れた場所に位置する特性に関する幾何学的データが得られる。その反射強度は、電気的特性におけるコントラストを示している。反射法は高い分解能を持つため、低いコントラストをもつ特性に対して敏感である。シングルホール反射法のデータは試錐孔に関し点対称であるため、割れ目の方向性を知ることができない。ある試錐孔とその近くの試錐孔からのシングルホール反射法データと組み合わせ、割れ目帯の絶対方向を知るために手法の開発を試みた。これと類

似のクロスホール反射法データ解析のための手法の開発も行った。その結果、それが有効であることが判明した。レーダーは1～3mの分解能を有する。ストリバ花崗岩の研究による検出可能範囲はシングルホール法で約100m、クロスホール法で200～300mである。

### 3.3.2 試錐孔地震波トモグラフィ

地震波トモグラフィによる方法は、主にトモグラフィ・インバージョンによる解析を行うクロスホール法に適用される。送信器と受信器間の（屈折波ではなく）直線波の到達時間の変動について調べた。もし十分多くの測定が行われるなら、2孔の試錐孔を通る断面上で地震波速度変化の地図を作成するためにデータセットがインバージョンされる。コンジュゲートグラディアント (Conjugate Gradients; CG) 法として知られ、迅速に繰り返し操作を行う最新のトモグラフィ・インバージョン技術は、このプロジェクトの一部として開発された。

トモグラフィ・インバージョンを行うクロスホール測定法は反射法に較べ分解能は低いが、ある特性の測定値の精度は高い。トモグラフィ法とインバージョン技術はレーダーのデータにも適用できる。しかしそのためにはレーダー速度図と減衰図を作成する必要があり、それぞれ伝達時間と振幅に関するデータを解析しなければならない。このプロジェクトを通じ、大きな人工処理を加えずにトモグラフィの図を得るためにには質の高いデータが必要であることが認識された。

このクロスホールサイトでの試錐孔間の最大距離は200mである。Gidea では1000mに達する試錐孔間隔で地震波シグナルが記録された。

### 3.3.3 成果

クロスホール計画の開始時には、有効な試錐孔レーダー装置は存在しなかった。プロジェクトの進展と共に試錐孔レーダー装置が実用的なサイト特性調査技術として開発された。これには解釈に関する手法も含まれている。地震波による方法も、データの解析及び野外での装置に係わる実用的なサイト特性調査技術として開発された。

地球物理学的手法による結果とクロスホールサイトからの水理学データとの対比の結果、それらによって把握された特性が水理地質学的に重要で、核種移行に関係することが明らかにされた。

## 3.4 クロスホールサイトでの地球物理学的モデル

クロスホール計画の研究は、主にストリバ鉱山360mレベルの坑道の先端に位置するいわゆる“クロスホールサイト”で行われた。坑道の先端から扇状に掘削された6孔の試錐によって、底面・高さ共に200mの横にしたピラミッド状の形の岩体について明らかにされた。

レーダーと地震波データで観察された特性は、およそ岩盤の割れ目の存在に関係している。例えば割れ目に伴う水の量の増加は誘電率と電導率の局所的変化を引き起こす。この電気的变化はレーダーで検出できる。割れ目の存在は又岩盤の機械的硬度と強度の減少、従ってP波及びS波速度の減少を引き起こす。機械的特性の減少は地震波による方法で検出できる。

レーダーと地震波による結果が一致することはめずらしい。しかしその場合はクロスホールデータのトモグラフィ解釈によって得られる地球物理学的異常が実際に存在し、その分布が正しいという信頼性を高めることになる。例えば、レーダーと地震波トモグラフィ

との一致は、両者の方法で同じ断面を測定した場合と、測定した断面が交差する場所で見られる。すなわちこれは、両者の測定により特性の異常が同一の場所にあり、同じ形をもつ場合に見られる。測定断面の交差は試錐孔沿い又は試錐孔間の線上で見られる。

トモグラフィの図からは、割れ目の多いゾーンを意味する暗色の部分が大体板状を成しているのがわかる。しかしこれらのゾーンの位置は不規則で、その地球物理学的異常の大きさはその中で変化する。

反射の測定は別の情報をもたらす。反射は特性の変化によって起こるが、その特性の絶対値にはそれ程敏感ではない。レーダーによる反射法の結果から、地球物理学特性の異常帯が基本的に線状であることがわかる。ある場所では反射度の変化と直線からのずれが観察される。

地球物理モデルは、全ての地球物理的手法によって把握され、かつ著しい特徴として観察されるA, C, K, L帯を対象とした。これらのゾーンの位置を第3-2図に示す。これらは明らかに方向性によって2つのグループに区分される。C, K, L帯は基本的に平行で、NE走向、NWへ急傾斜している。A帯は異なる方向をもち、NNE走向で、SW(原文のまま: Eの誤りと思われる)へ急傾斜する。

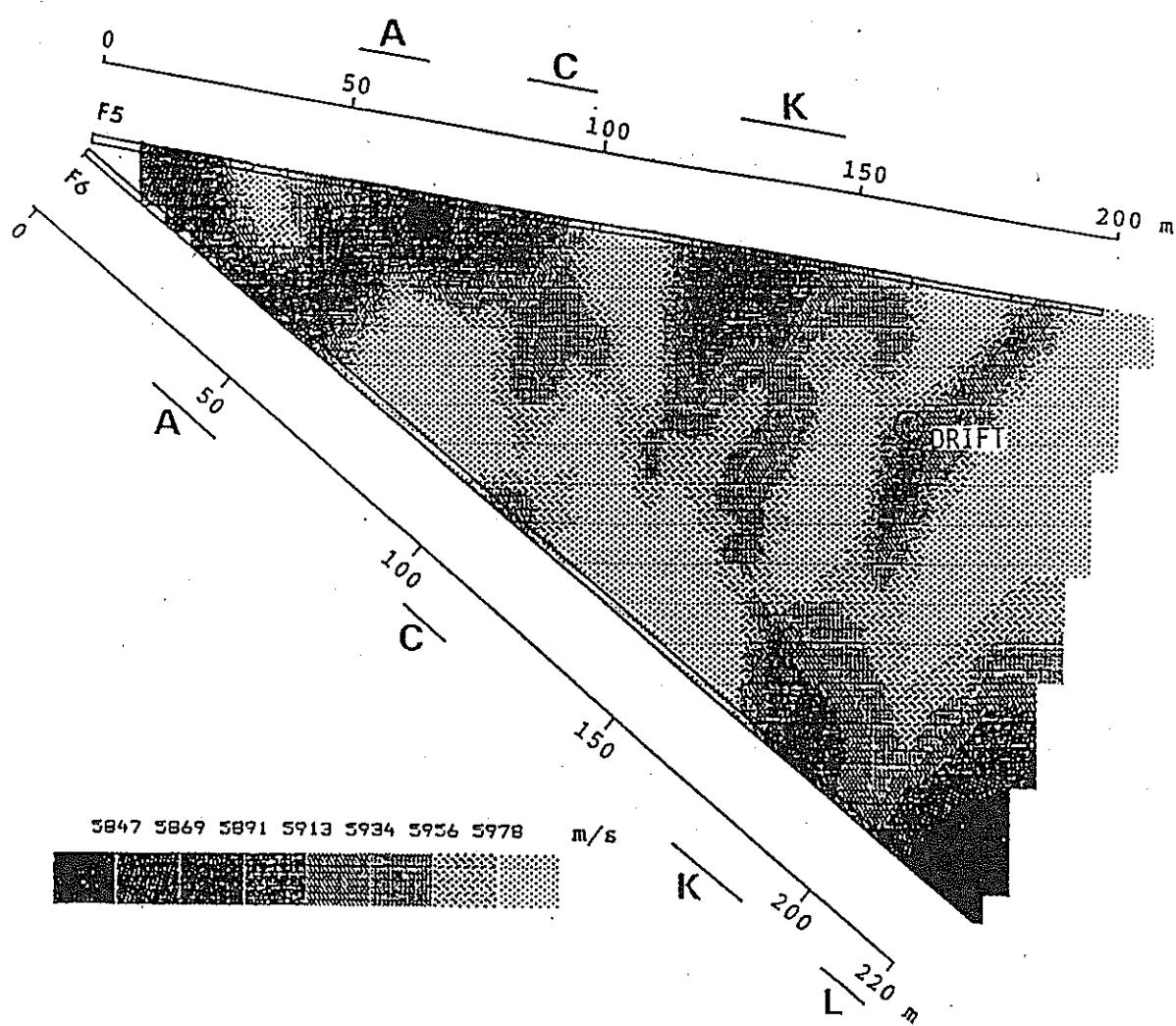
### 3.5 水理学的手法

クロスホール計画の水理学的研究は、割れ目系花崗岩類の水理地質学的評価において大きな進展をもたらした。これは、水理試験に関する次の3点の改良によっている。第1に試験対象領域全体に関する信頼性の高い幾何学的情報に基づいた計画によって試験へのアプローチが改良された。第2に試験で使用された機器はコンピューターをベースにしている。その結果、解釈のための仮説がうまくでき、試験条件がよくコントロールできるようになった。第3にこの試験では、これまでの堆積岩から得られたコンセプトより、割れ目系岩盤にもっと適合するように改良され又実現可能な解釈のコンプセントが適用された。

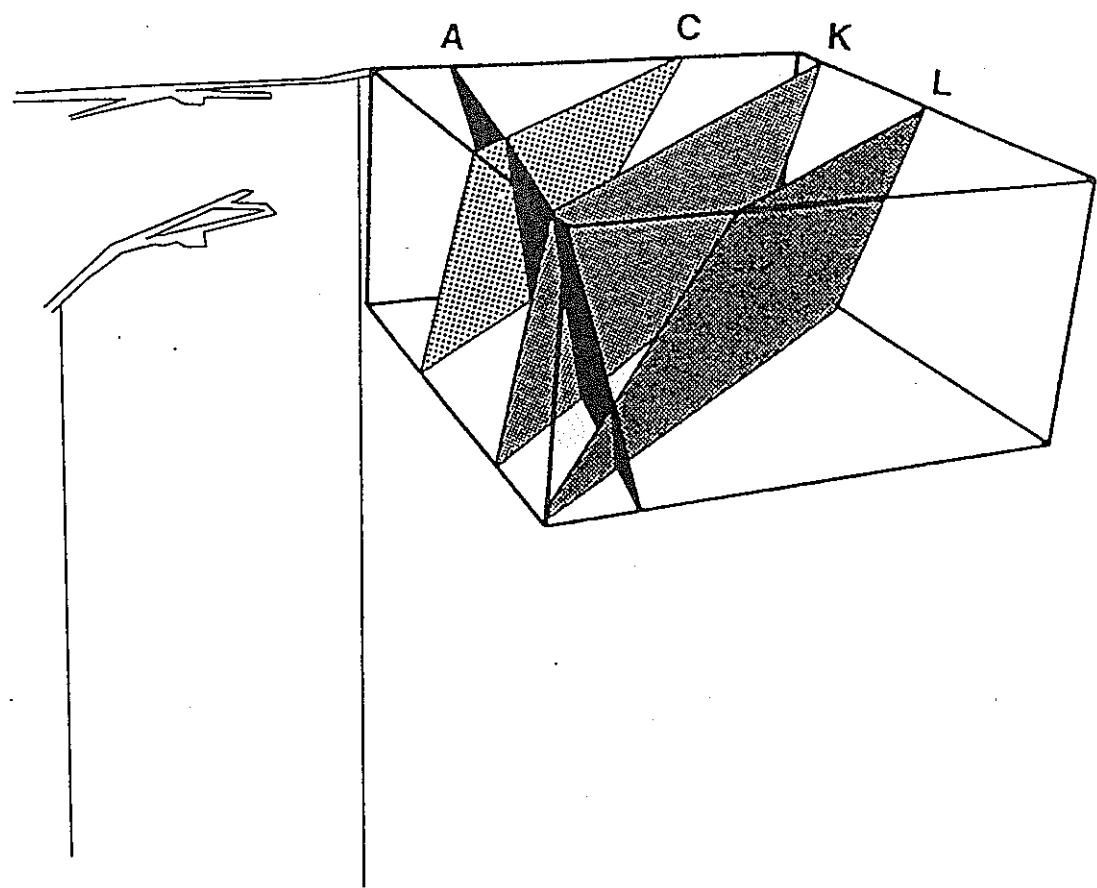
クロスホール試験では、広範囲にわたる割れ目帯の中で、水理特性の分布を測定することに力を注いだ。又、試験区域が試験前の水頭を回復する時間を最少にするため、試験のアプローチとして、波状に圧力・流量を変化させるシヌソイダル法をとった。連続的に速く変動するバックグラウンドに対してさえ、周波数シグナルは容易に認められ、クロスホール試験におけるシヌソイダル法のアプローチはこの鉱山のような環境では非常に有効であることが示された。

シヌソイダルな水理シグナルを生成・測定するための装置には、鉱山のような環境で試験を行う上で、非常に有効ないくつかの特徴がある。第1にデータの解析に含まれるある仮定に従う、正確にコントロールされたシグナルを生成することが可能である。第2にシグナルの位置を正確に知ることができる。第3に試錐孔での水頭をコントロールするため用いられるポンプが非常に有効なことである。

本プロジェクトで用いられるクロスホール水理試験であるシヌソイダル試験の仕様は、対象とする流動システムのジオメトリーに関係する。“流動のジオメトリー”が知られていない場合は、新しい解釈のアプローチを工夫する必要がある。この解析は、ある可変のジオメトリーモデルへのインプットとしてクロスホールシヌソイダル試験からのデータを



第3-1図 P波速度に関するF5-F6孔間での地震トモグラフィ



第3-2図 基本モデルに含まれる割れ目帯の位置図

用いており、普通の水理地質パラメータに加え、対象とする流動システムの見かけの“次元”をも引き出す。この解析は、本質的に2-D（平面での放射状の流れ）や3-D（多孔質媒体での球状の流れ）などのよく知られた形態の範囲でのジオメトリーの連続的スペクトルの存在を仮定している。これは、割れ目系結晶質岩に見られる流れのジオメトリーのようなものによく適した万能の解析である。

### 3.6 サイト研究との関連

放射性廃棄物のサイト研究において、データはまちがいなく3次元予測モデルのインプットとして使われる。従って、サイト研究は、サイトのジオメトリーとその中の特性の分布に関するデータを必要とする。

サイト研究計画の第1の目的は、主要な特性のジオメトリーを把握することである。本プロジェクトでの経験から、主要な特性の分布の把握には、シングルホール屈折レーダー法と、クロスホールレーダーと、又は地震波データのトモグラフィ・インバージョンとの結合によるのが最もよいことが示された。これらの特性が把握された後、第2番目の目的がアプローチされる。それは透水係数のような重要な特性の分布を記述することである。そのためには、多くの時間を要するが、クロスホール水理試験によるのが最もよい。時間と、その結果としての費用の問題を解決するためには、クロスホール水理試験の対象を主要な特性に限るのがよい。

### 3.7 結論

レーダーや地震波のような手法を用いたことで、割れ目系結晶質岩を通る地下水の流れや核種移行の研究への見通しが得られた。重要な点は、割れ目帯の構造や拡がりに関する分解能の高いデータを得る可能性が出てきたことである。これは断層運動や割れ目帯における特性の水平変化、割れ目・割れ目帯における地下水の流れのチャンネリングなどのプロセスを理解する上で役立つ。このタイプのデータは、どのようにして核種移行モデルをつくるか、又そのモデルへのインプットとして使われるデータの信頼性はどの程度かに關係する。レーダーと地震波による手法が成功したことは、クロスホールサイトでこの両者の手法による結果が一致したことによって最もよく示される。これらの手法によってこの対象岩体において割れ目の多いことの指示となる速度の減少と減衰の増加のある区域が抽出された。

クロスホールプロジェクトでの水理試験はフィールド作業でのある可能性を示した。地球物理と水理地質との結合は、問題点を明からにし、試験の焦点を定める上で非常に有益であった。

地下水の流れは、地球物理学的手法によって検出される主要な特性に集中する。この大きな特徴を示す部分は、高い透水係数と低い透水係数を不規則に持つ幅広い板状を成していると考えられている。この割れ目帯はチャンネリングとなっており、そこでは流路が板状に連結したネットワークとなっている。

クロスホールプロジェクトは、以前にも増して信頼性と現実性をもって、割れ目系結晶質岩の特性調査を行うことが可能であることを示した。同様のアプローチが、将来放射性廃棄物の地層処分のためのサイト研究に採用されるだろう。

## 4. 3次元移行試験

### 4.1 背景

多くの国々において、高レベル放射廃棄物の最終処分場は結晶質岩の深部に建設する計画である。核種が人間環境へ移行する唯一の知られているメカニズムは、岩盤の割れ目中の水による流れと分子拡散である。後者のプロセスは対象とする深度では、散逸のメカニズムとして無視できる。割れ目系の岩盤では、实际上水の動きは割れ目中に限られることが知られている。マトリックスは多孔質で、化学種はその中を拡散すると思われるが、その部分の透水係数は低いため処分場条件下でのマトリックス内での流れは無視できる。

放射性核種の放出と移行の可能性について評価するためには、流速、速度、水の通路に関する情報が必要である。水中に溶解する核種は、多孔質のマトリックス中の微少間隙中に拡散で入り込む可能性がある。従ってマトリックスの中に入り込む速度は、移動する水に接触する割れ目表面積の大きさに直接影響を受けると思われる。

岩盤中の割れ目のごく一部でのみ流れが生じる。ストリパ 2 D 試験では、割れ目中の水の流れは不均一に起こることが観察された。その様なチャンネリングは水の速く通る通路を選択的に発生させ、水に接触する部分を制限する。

割れ目あるいはチャンネリング間での速さに差があるため、それと平行又垂直方向に移行する核種に分散が生じる。平行方向への分散は希釈効果を引き起こすが、一部の核種は残りの大部分に比べ速く到達するため崩壊のための時間は短くなる。垂直方向の分散も希釈効果を起こす。

### 4.2 目的

大きな意味では、高レベル放射性廃棄物の最終処分場の安全性に関する移行プロセスを把握、定量化することが目的である。個々の目的は次の通りである。

- 低透水性割れ目系岩盤において、大規模トレーサー試験のための技術開発を行う。
- 流れの間隙率 (flow porosity) を決定する。
- 移行する方向と平行及び垂直方向への分散に関する情報を得る。
- チャンネリングに関する情報を得る。
- モデルの確認・改良のためのデータと他の情報を得る。

### 4.3 試験方法

結晶質岩の地下深部における流れと移行特性に関する研究はほとんど行われていない。又、対象とするその特性についての研究に必要な技術もまだ未確立である。流れのパターンとメカニズムについては未知の部分が多く、多くの結果と実験がうまく適合できるように研究技術を開発する必要がある。

実験前には、流速、速度、チャンネリングの頻度そして流路の形は、数桁オーダーまでは不明だった。その特性の可能な変動幅はよく知られていないし、それらを合理的に評価することも難しかった。

これらの特性の大きな変動を把握できるよう、特別な技術を開発した。その試験全体の基本となるのは、水の流速とトレーサーの通路の分布を極めて詳細にモニターできるよう

なプラスチックシート技術の開発である。岩盤の移行特性の変動を研究するためのもう1つの側面は、できるだけ多くの異なるトレーサー（9種類）を使うことである。次の2つの目的のため、様々な幅を持つように注入距離を決定した。第1に、事前に水の速度は知られていなかったので、各移行距離の差を大きくすることによって少なくともトレーサーの一部は試験期間中に検出できるようにした。第2に、基本的に同じ流路に沿って様々な移行距離を設定することによって、分散が移行距離によりどの程度影響を受けるかについての情報を得ることができる。これは未解決だが重要な問題である。

水に接触する岩盤の表面積の大きさはわかっていない。もしそれが大きいなら、低分子トレーサーはマトリックスの微少間隙中に拡散し、その多くは移動する水から差し引かれることになる。それは遅延を引き起こして希釈され、坑道内で集められた水の中にトレーサーを検出するのが困難となろう。従ってそれを防ぐため様々な分子量のトレーサーを使用した。非常に高分子のトレーサーはこの目的のために特別に合成した。

この試験のために掘削した坑道を第4-1図に示す。これは水に飽和した岩盤中にあるため自然での水の流入がある。坑道の天盤と壁面上部に375枚のプラスチックシートを張り、合計長100mの坑道に流入する水をそのシートに集め、モニターした。シートでカバーした坑道の表面面積は700m<sup>2</sup>以上に達する。さらに坑道の下部への水の流入はベンチレーションテストで測定した。旧鉱山の他のトンネルや試験坑道から離すように掘削した新しい140mのアクセス用のトンネルをベンチレーション試験用にも利用した。水頭は試験坑道から上向きに掘削した3孔の各70m長の試験孔で測定した。水の流れは2年以上にわたってモニターした。

第4-2図にプラスチックシートで被った坑道の図を示す。

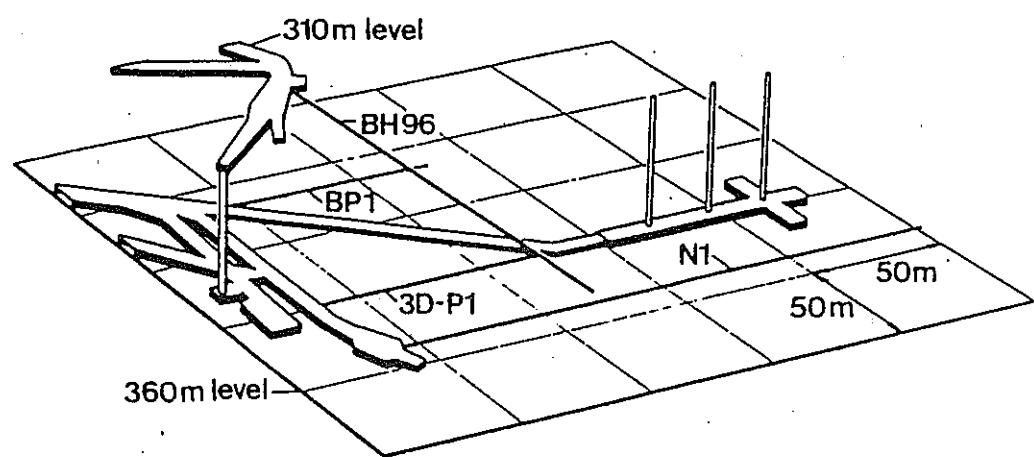
#### 4.4 結果

水の流入速度はシートごとでかなり異なる（第4-3図）。1枚のシートにシート全体に流入した水の10%が流入する場合があった。水の50%が約10枚のシートに到達し、90%がカバーした全体の約10%に当たる42枚のシートに到達した。

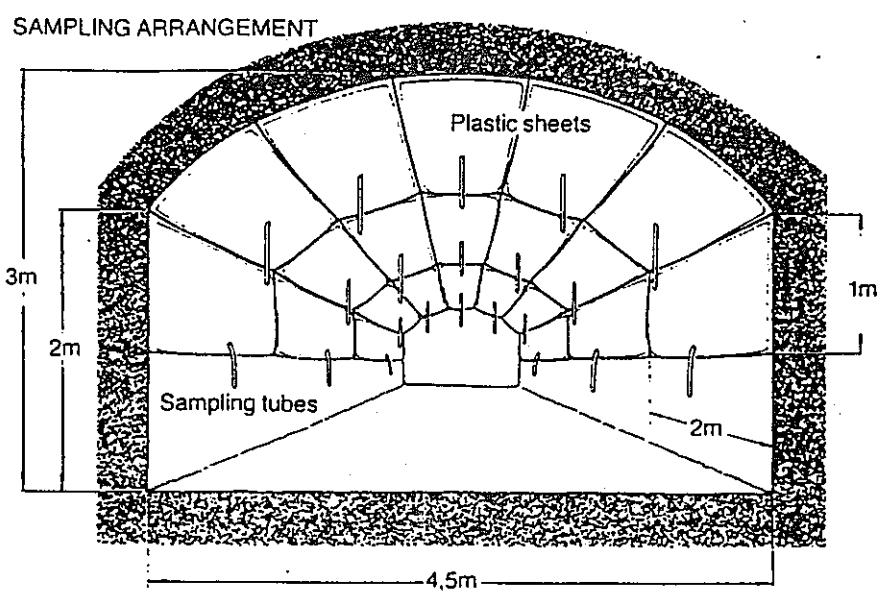
カバーした領域の平均透水係数は $0.4 \times 10^{-11} \sim 0.8 \times 10^{-11}$ m/sであることが判明した。床面と壁面下部の透水係数は $2 \sim 4 \times 10^{-11}$ m/s、アクセス坑道の平均は $0.5 \sim 1 \times 10^{-11}$ m/sという値が得られた。しかし試験坑道に沿っての変化が大きいため、その100mの長さの坑道全体を1つのREV（Representative Elementary Volume）として取り扱えるかはまだ議論の余地がある。

3孔の垂直な試験孔において、坑道の天盤から最短10m、最長55m離れた2m長の9区間を除き、それ以外は全て完全に密封された。異なった9種類のトレーサーがこれらの区間に約2年間にわたり注入された。後に2種類のトレーサーが9区間の中の1ヶ所から注入された。

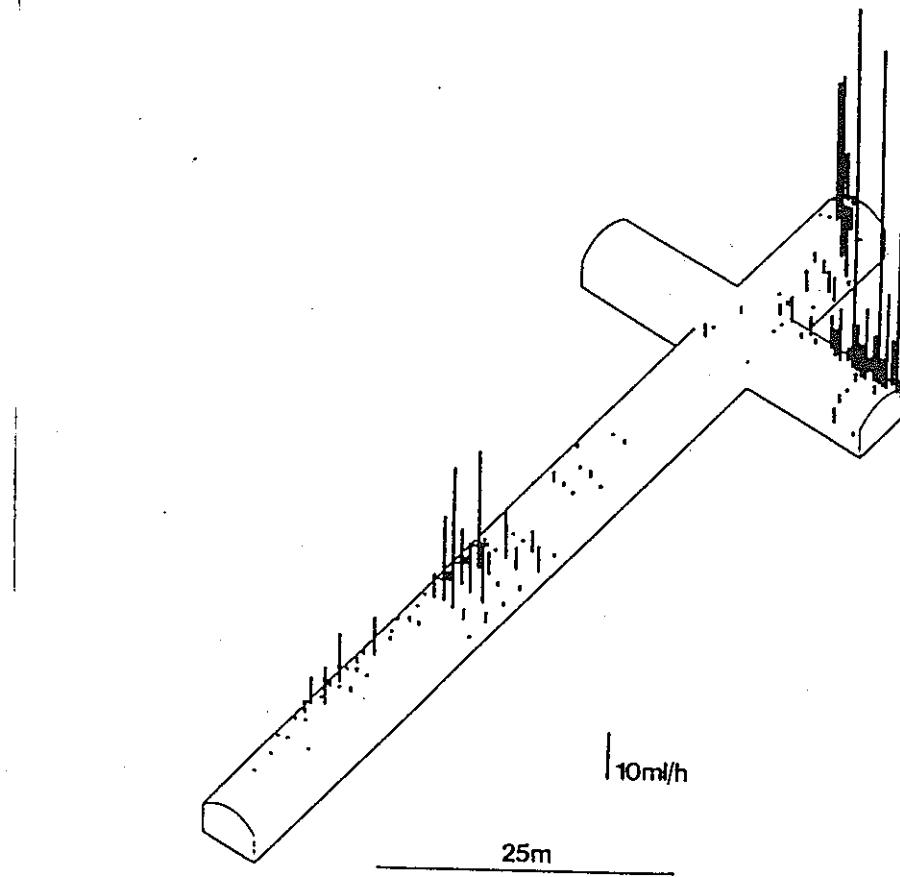
トレーサーは、水を回収した全てのシートと、坑道床面の湧水のある数地点においてモニターされた。トレーサーの大部分は強色素の染料であり、それは他の場所でサンプルされた水だけではなく、（水のない）他の坑道や他の試験坑道でもチェックされた。検出濃度に達した6種類のトレーサーに対する167のトレーサー濃度曲線について、トレーサー移行を表現する数種類の異なったモデルにそれらがフィットするよう解析された。さら



第4-1図 試験坑道（N1）位置図



4-2図 プラスチックシートによるサンプリング見取図



第4-3図 各シートへの流速分布図

にトレーサーの流速を表す25のカーブを詳細に解析した。そのモデルは水平対流一分散モデル、水平対流一チャンネリングモデル、さらにこの2つに基づき、これらにさらに滞留水への又はそれからのトレーサーの分子拡散のメカニズムを加えて作られた2つのモデルである。モデルを実験で得られた濃度曲線へフィットさせることにより異なった注入点からの水の平均移行時間と分散に関するデータが得られた。実験室でトレーサーのマトリックス拡散の拡散係数が測定され、上の2番目のモデルが割れ目を通る水の頻度、又移動する水に接触する岩盤の表面の平均量を決定するのに用いられた。

トレーサーの平均移行時間は2000~7000時間だが、それよりかなり短いのも長いのもシートの一部で観察された。

これらのデータから決定され、坑道から最も近い所で注入されたトレーサーの流れの間隙率は $15.5 \times 10^{-5}$ であった。その間隙率は坑道からの距離に反比例し、最も遠い地点では $2 - 3 \times 10^{-5}$ だった。坑道からの近傍で間隙率が高いことは、坑道の掘削によって岩盤応力が変化したためと考えられる。

1種類のトレーサーを除き、分散係数はきわめて高い。2種類のトレーサーから4以下のPeclet値が得られた。又別の2種は約5、1種は30前後の値をそれぞれ示した。非常に低い値は普通の流体力学的分散以外のメカニズムによるものと考えられる。その大きな原因はチャンネリング、すなわち異なった移行特性をもつ小さなチャンネルに沿ったトレーサーの移行であろう。“チャンネル”又は選択的な通路の存在はある試錐孔においてトリチウムが存在することからも推定される。そのトリチウムは過去30年以内に表層水から運ばれてきたものにちがいない。

トレーサーの回収率は、5種類が2.8%から65%までの範囲に入る。1種類は0.002%の回収率を示し、4種類は全く検出されない。別の1種類はかなり回収されたが、その量は不明である。注入点が最も遠い場合のトレーサーは検出されることができなかった。

その回収量に関するデータは、トレーサーの消失を引き起こしたと考えられる滞留水への拡散あるいはマトリックス拡散の可能性について検討するために用いられた。その解析結果は、両方のメカニズムが活動的で、ある程度はトレーサー消失の原因となったことを示している。しかしその消失の原因として他の可能性があることも否定できない。坑道の上位17mから注入された1種類のトレーサーは、かなりの量が新しく掘削された試験坑道へ150m以上移行したことが観察された。

鉱山の他の多くの場所で、水のサンプル中にトレーサーの痕跡が見られないからといって、他のトレーサーの消失は他の場所への移行によるものでないとは言えない。

ストリパの岩盤中の水やトレーサーの移行を正確かつ詳細に記述するために、この実験の評価において、一般のモデルを改良する必要があった。岩盤の特性の変動は非常に大きく、結果はその特性の局部的変動に大きく影響を受けるものと思われる。研究対象となった岩盤はモデリングのためのREVが可能な程十分大きくはなかった。

しかしながら、この研究で得られたデータにおける変動は確率論的モデルで用いられ、それは期待される特性の平均だけでなくその変動をも示すものと思われる。

#### 4.5 主な結果のまとめ・議論・結論

以下の結果と議論のまとめは最初の目的と関係している。

大規模トレーサー試験に関する技術開発の試みは非常に有益な結果をもたらした。流速とトレーサーの通路の変化と分布を把握するために、非常に詳細なサンプリングが必要であることが明らかになり、そのサンプリングはシートによる技術によって可能となった。シートを張る前に割れ目の記載を行うことによって、割れ目交差数と流速との関係を知ることができる。

流れの間隙率は6ヶ所の流路において決定した。その値は期待した値より低く、我々の知る所によれば、透水係数の低い大きな岩体において実験的に決定された唯一の間隙率である。

分散は平行方向について決定されたが、垂直方向への拡がりもかなり起こっていることが判明した。しかし流速が均一に分布していないため、垂直方向への分散は現在のコンセプトに基づいては定量化できない。

チャンネリングは予想以上に明瞭で、コンセプトやモデルの修正が必要であることが明らかにされた。

水の流れは研究対象とした部分の岩盤では不均一に分布し、数10平方mにわたる広い乾いた領域が存在する。もしストリーパ岩体が低透水性花崗岩の代表であるなら、本質的に一定の特性を持つ多孔質媒体モデルでは水の流れや特に溶質の移行において、その程度は必ずしも明らかではないが、多分非常に大きい誤差が生ずるだろう。

トレーサー試験とトリチウム測定の結果は、無視できない程の流れが、それぞれがほとんど独立したチャンネルで起こっていることを強く示している。これは、この試験の解析に適用されてきたモデルによって取り扱うことはできない。多分最良の方法は、そのモデルに可変性を取り入れることだろう。いわゆる確率論的モデルが多孔質媒体には有効であり、最近この種の岩体にこの方法を取り入れる試みが成されてきている。それには、モデルに必要な統計的性質を明らかにした数多くのデータや正しいプロセスを表すためのモデルの改良が必要である。チャンネルでの滞留水への拡散、マトリックス拡散、混合の頻度として特に非混合の頻度のメカニズムをさらに研究する必要がある。

#### 4.6 安全評価への推論

100mの坑道全てが非常に固い岩盤内にあり、この大きな岩体の中で流れがほとんどないことが判明した。このことにより、水がその中に溶解する核種を、岩盤中に建設される処分場からごくわずかしか遠くへ運ばないことが示された。

そのような良好な岩盤へ廃棄物処分場を建設することは非常に効果的なニアフィールドバリアを保証することになる。

ファーフィールドにおける移行を評価するためには、核種移行の定量化の改良においてより多くのデータが必要であることが観察によって示された。

この研究で見出されたチャンネルの存在は、結晶質岩中における流れの速い流路の頻度と移行特性を知るためにさらにチャンネリングの研究が必要であることを示している。そのような流路では、核種が減衰するための時間は、それらが平均速度で移行する場合に較べて短い。割れ目の交差部が多い部分を多くの水が通るという観察は、交差部が水の通り易い通路となることを示している。そのような通路は、水が開いた割れ目の広い断面を流れる場合に較べ、小さな表面積（移動する水と岩盤との接触面）を持つと推定される。

もしその収着面となる接触面が大きければ、核種は大きく遅延されるため、このような通路は核種の遅延に関し、好ましくない影響を与えることになる。多くのトレーサーの回収率が高いことは岩盤マトリックスへの摂取は中程度であることをも示す。これは、接触面がそれ程大きくないことを意味する。

流れの間隙率はむしろ低いことが判明した。従ってある流速では、水の速度は流れの間隙率が高い場合より速いことになる。今後は現在の割れ目中流れのモデルを修正し、観察された影響を考慮に入れ、新しいモデルを開発する必要がある。

## 5. 試錐孔・シャフト・トンネルプラギング試験

### 5.1 背景

処分場の建設前又は建設時に掘削される試錐孔、シャフト、トンネルは生物圈への放射性核種移行の直接の通路となりうるため、それを密封する必要がある。これに先立つバッファマス試験の結論から得られたように、あらゆる種類の空洞をプラグするのに特に有効な物質の候補として、高度に圧縮されたNaベントナイトが考えられる。シャフトやトンネルに較べ、試錐孔はその大きさが非常に異なるため、異なった設計や応用技術が必要とされる。密封の有効性や実用性に関し、様々な設計や応用技術を用いて試験を行った。

### 5.2 目的

プラギング試験の大きな目的は、試錐孔や発破による空洞に使用される適当な密度・形態を持つベントナイトブロック材料を準備するための適当な技術を選択すること、そしてその密封能を決定することである。この後者の特性はプラグ物質それ自体だけではなく、プラグと岩盤の接触部や周囲岩盤の透水係数に対する膨潤圧の影響にも関係する。

### 5.3 試験方法

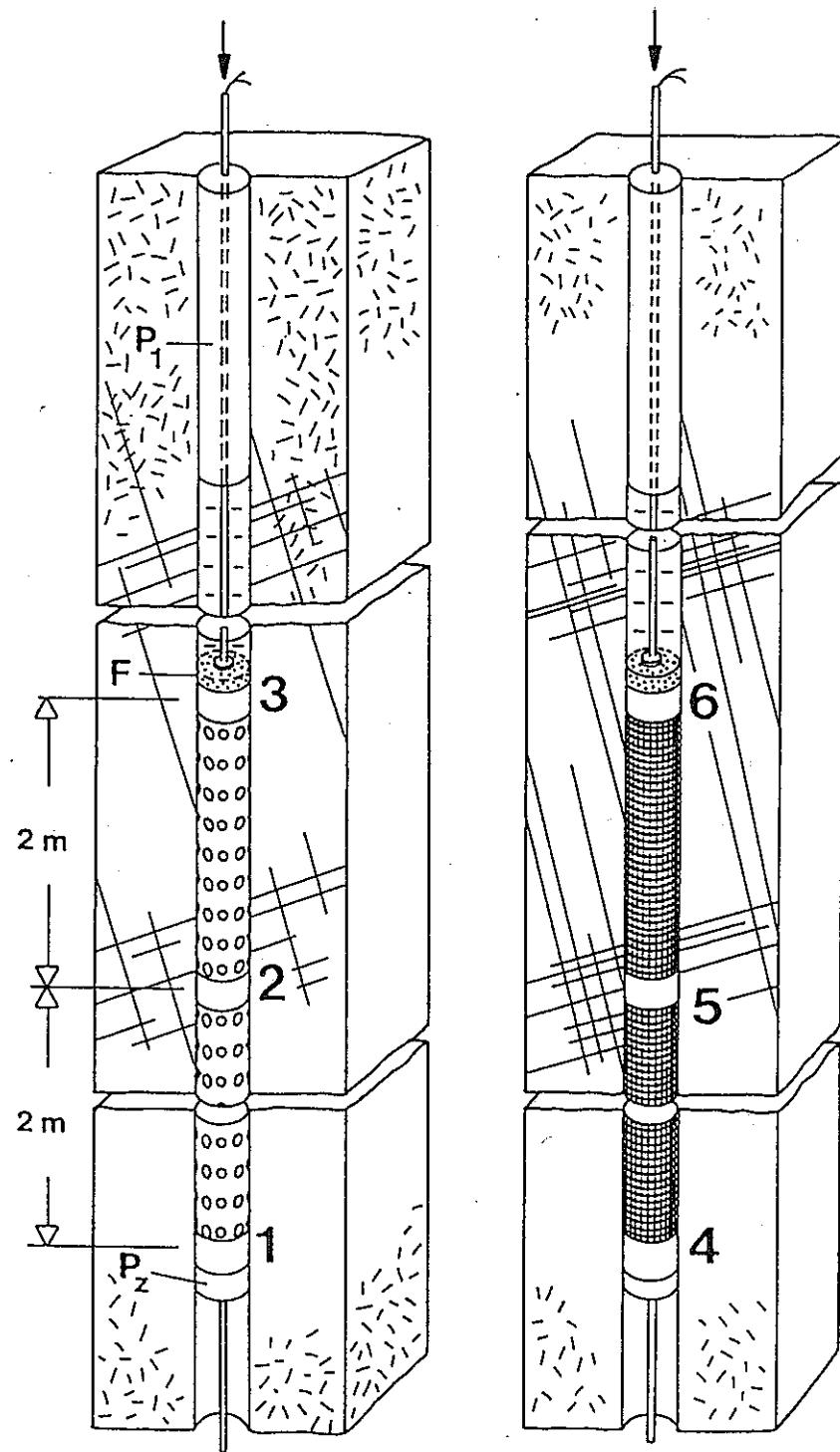
#### 5.3.1 試錐孔プラギング試験

試錐孔プラギング試験では、密封材料として高度圧縮ベントナイトのプラグを用いた3種の試験を行った。その試験では実際の条件下でのプラグの取り扱いと適用における機能と実用性について検討した。基本的な設計原則は、粘土粉を圧縮して作った円柱状ブロックを穴のあいたケーシングに入れることであった。粘土は水で満たされた試錐孔へ入れた後、水を吸収し、穴を通って膨潤するため、結果的にケーシングは均質で密な粘土の中に埋められることになる。3種の試験の概要は次の通り。

- I. 長さ100m、ほぼ水平の径56mmの試錐孔をプラグし、2m長の区間2ヶ所でパイピング(piping)の圧力を決定するため、取りつけのフィルターを通して加圧した。
- II. 長さ14m、ほぼ垂直の2孔の径76mmの試錐孔内で4mの区間をプラグした。パイピング抵抗の増大速度を決定するため一端を加圧した。又粘土鉱物の膨潤速度を記録するため圧力計を備えた。試験の最後に、結合強度を決定するためそのプラグを下から引き抜いた。この試験と上の試験との差は、この試験が水圧がほぼゼロの状態で行われたため水の摂取が非常に遅く、不完全であると思われることである。穴の量の割合の差が粘土の成熟速度に与える影響を知るため、2孔のプラグは異なった穴の量のケーシングを有している(第5-1図)。

#### 5.3.2 シャフトプラギング試験

シャフトプラギング試験は短い方の試錐孔プラギング試験と同一の場所、すなわち水圧の低い岩盤中で行われた。直径1m高さ14mのシャフトで行われたこの試験では、プラグにはされ、中央部の砂で満たされた注入区間からの水の流出量が測定された。密封効果に関する評価は、膨潤セメントをプラグとして用いたレファレンス試験での流出量と、高度に圧縮されたNaベントナイトのプラグを用いた本試験で記録された流出量との比較によって行われた(第5-2図)。



第5-1図 II-a孔(左) II-b孔(右)におけるプラグ配置の模式図。

$P_1$  : 膨張性ラバーパッカー,  $P_2$  : メカニカルパッカー

1-6 : 全圧力・間隙圧を記録するための測定ユニット, F :  
プラグと注入部を区切る上部フィルター

### 5.3.3 トンネルプラギング試験

処分場トンネル中の水の流入を遮断することを目的に、大きなプラグを建設し、かつその中をアクセスできるような技術的可能 性に関しての大規模試験を実施した。プラグは、両端をコンクリートのバルクヘッドで囲まれた、直径1.5mのスチールケーシングから成る。バルクヘッドは、岩盤-コンクリート接触部で0-リングシールを形成する高度に圧縮されたNaベントナイトのブロックと共にトンネル壁に接触している(第5-3図)。スチールケーシングと岩盤との間の空間は、水が豊富な岩盤ゾーンの存在を模擬するため砂で満たされている。ベントナイトの密封効果は、試験継続期間の約2年間、圧力増加による、砂の埋め戻し部分からの水の流出量を測定することによって決定された。この効果は、岩盤-ベントナイト、砂-ベントナイトの境界部での膨潤圧の増加と相関関係にある。

## 5.4 試験結果

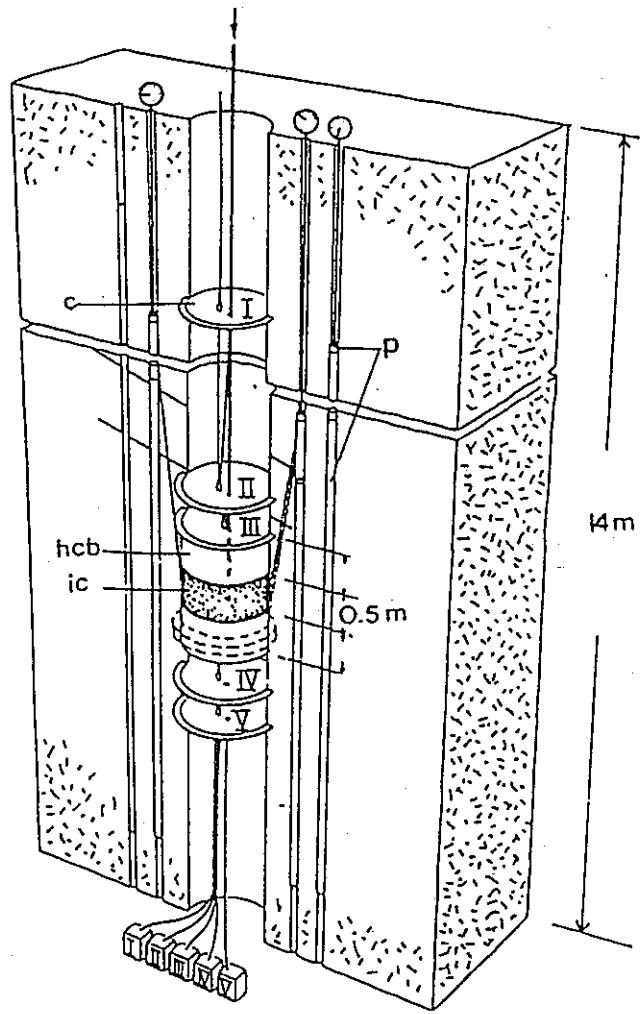
### 5.4.1 試錐孔プラギング

応用技術を用いると、長短両試錐孔のプラギングが非常に実用的であることが明らかとなった。100m長の孔において、機器の設置に伴う遅延にもかかわらず、同じ長さのプラグを挿入するのに約2.5時間のみを必要とするにすぎない。水の摂取と膨潤によるプラグの成熟速度はきわめて高いことが判明した。従って、水圧の高い岩盤中にある長いプラグでは、パイピングを引き起こさずに、わずか2日間で2m長の試験区間での一端での水圧が1.4MPaに上昇すると思われる。試験開始から2日半後、0.6mのプラグがスロット試錐技術によって引き抜かれた。その粘土は密度が $1.85\text{t/m}^3$ かつ完全な均質で、 $10^{-12}\text{m/s}$ 以下の透水係数に相当する。

14m長のプラグ2孔のケーシング上の穴の量の差は粘土成熟速度に大きな影響を及ぼさない。両方のプラグは、試験サイトの岩盤中に水理的な割れ目を引き起こすことなく、最大圧(300kPa)にも耐えうる。水の摂取速度は、100mプラグに較べ静水圧がきわめて低く、従って岩盤を通り試錐孔へ至る水の流速が遅いため、それより遅いことが期待された。しかしながら、ベントナイト粘土の吸引力は岩盤中に大きなマイナスの間隙圧を起こし、水の摂取が速くなる。粘土プラグの均質性は、試験終了後のプラグの取り出しに伴う包括的なサンプリングによって示された。プラグの取り出しに必要な力は粘土のせん断強度にはほぼ等しい結合強度に相当する。それは内部摩擦と膨潤圧の角度を知ることによって予測される。

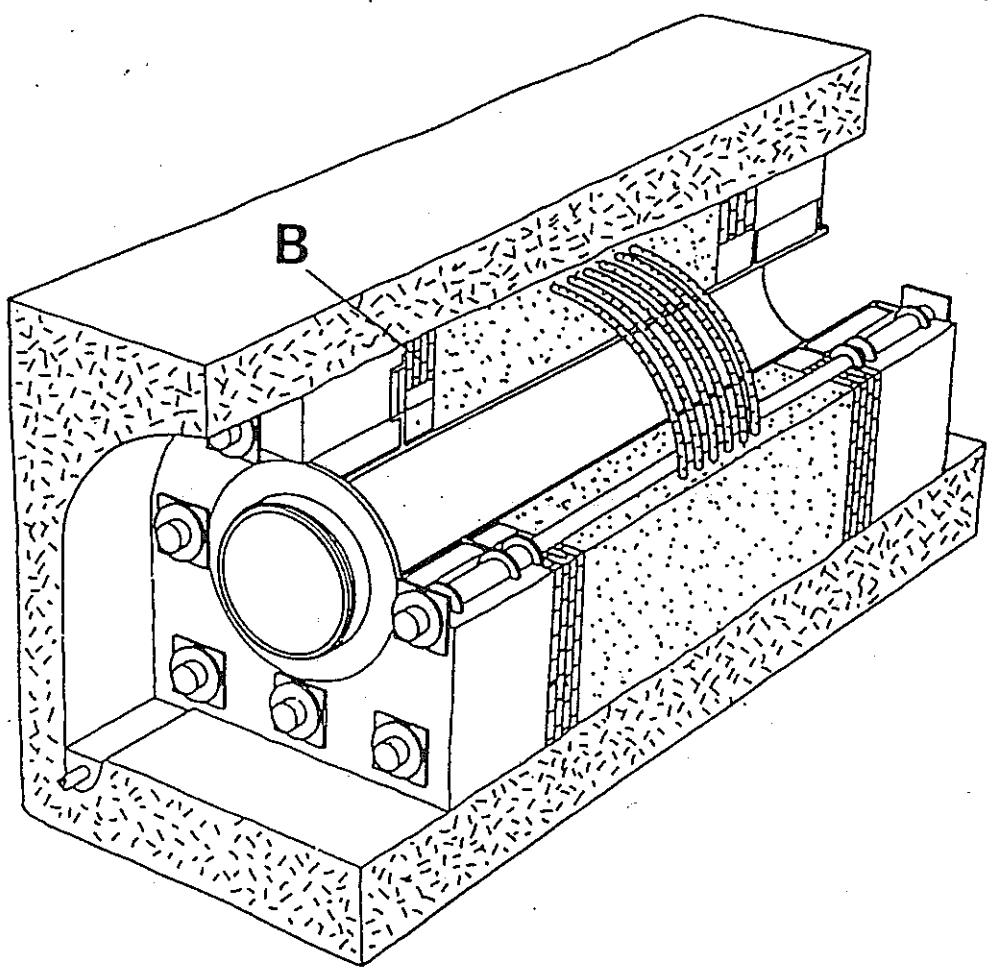
### 5.4.2 シャフトプラギング

中央部にある注入区間からの流出量が、レファレンス試験における100kPaの注入圧で8-9L/hから、本試験の終わりでの200kPaの注入圧で約0.3L/hに下がったことは、シャフトにおけるベントナイトプラグの密封能が優れていることを示している。この密封能はいくつかの現象に負っている。そのうちの大きなものの1つは、岩盤-プラグの境界部分の穴と割れ目帯を粘土でふさぐことにより、その境界に沿う水の流れを止めることである。後者の効果は粘土-岩盤の境界に沿う大きな、そして水理的に活動的な構造を通る水の流れを実質上減少させる。これによって水は境界面から離れた場所を流れることになる。粘土が割れ目を充填し、岩盤表面の凹凸面をふさぐことによって、完全に隙間のない粘土-岩盤境界を形づくることになる。



第5-2図 シャフトでの試験概要

hcb : 高度圧縮ペントナイト, ic : 砂で満たされた  
注入部, I ~ V : 水の回収タンク



第5-3図 トンネルプラギング試験模式図  
B:ベントナイト

### 5.4.3 トンネルプラギング

高度に圧縮されたベントナイトブロックから成るリング状のシールを建設することは、現実性があることがわかった。試験の結果によると、もしベントナイトシールがなければ、高圧で注入される空間からの水の漏出量は少なくとも15倍高くなる。もしプラグ周辺の適当な割れ目にさらにベントナイトグラウトを施せば、中間の水圧下でこの値は実際上30～40倍に増加する。

大きな密封効果は、試錐孔やシャフトプラグのように、岩盤と粘土との間に非常に隙間のない接触部を作る技術の開発によっていると結論された。この相互作用は主として膨潤圧によってコントロールされ、その圧力は密度によって決定される。ブロックを定置する岩盤の表面の特性は、トンネルプラギング試験における膨潤速度、最終的な全体の密度の両方に関して非常に重要であることが判明した。表面が不規則であれば、ブロックを隙間なく定置することは難しい。その結果、実質の密度は低くなり、膨潤と均質化の時間は長くなる。

しかしながら、約20ヶ月後、接触部全体で岩盤に接するベントナイトが完全に飽和し、膨潤圧が予測された範囲内である2～5 MPaになることが観察された。

### 5.5 結論・コメント

高度に圧縮された粉末で適当な形にされたNaベントナイトブロックを使用することは処分場の試錐孔、シャフト、トンネルの密封に非常に有効であることが判明した。当初は局部的に不飽和である粘土が岩盤から水を取り込み、膨潤した時点で形成される粘土プラグの実質的な透水係数は、周囲岩盤全体の透水係数よりきわめて低い。粘土の非常に重要な機能は、それが岩盤との間を完全に隙間のない接触部とし、その接触部に沿って水が流れるのを妨げることである。この点に関し、Naベントナイト粘土はセメントに較べ非常に優れている。粘土に圧縮性と膨潤性の性質があることはたとえ岩盤にわずかな変位が起こっても、この隙間のない接触部が保持されることを意味する。

## 6. ストリパサイトでの水理地質学的特性調査

### 6.1 背景

ストリパでの最初の研究開発は、放射性廃棄物の割れ目系花崗岩体への地層処分のためには割れ目系の水理・幾何学的特性の特徴と範囲を決定し、又それらが処分場サイト内で又処分場間でどの程度変化するか決定する必要がある、という前提に基づいていた。処分場サイトを比較するには、基本となる割れ目・水理データの測定・解析・統合化・解釈を行う上で系統的なアプローチを行う必要がある。

1977年の開始時に、膨大な量の水理・割れ目データがストリパサイトで取得された。割れ目データの中には、坑道壁面の幾何学的データ、そして地表・坑道から掘削された試錐岩芯データが含まれる。さらに水理地質データが試錐孔と坑道スケールの試験から得られた（第6-1図）。これらのデータは第2フェーズにおける次の調査に用いられた。a) 割れ目系の特性調査 b) 岩盤中の透水性と間隙率分布に関する特性調査 c) 流動系解析の上で規制を与える地球化学・同位体の結果を考慮した、局所的・広域流動系のシミュレーション。

### 6.2 目的

水理地質学的調査の目的は次の通りである。

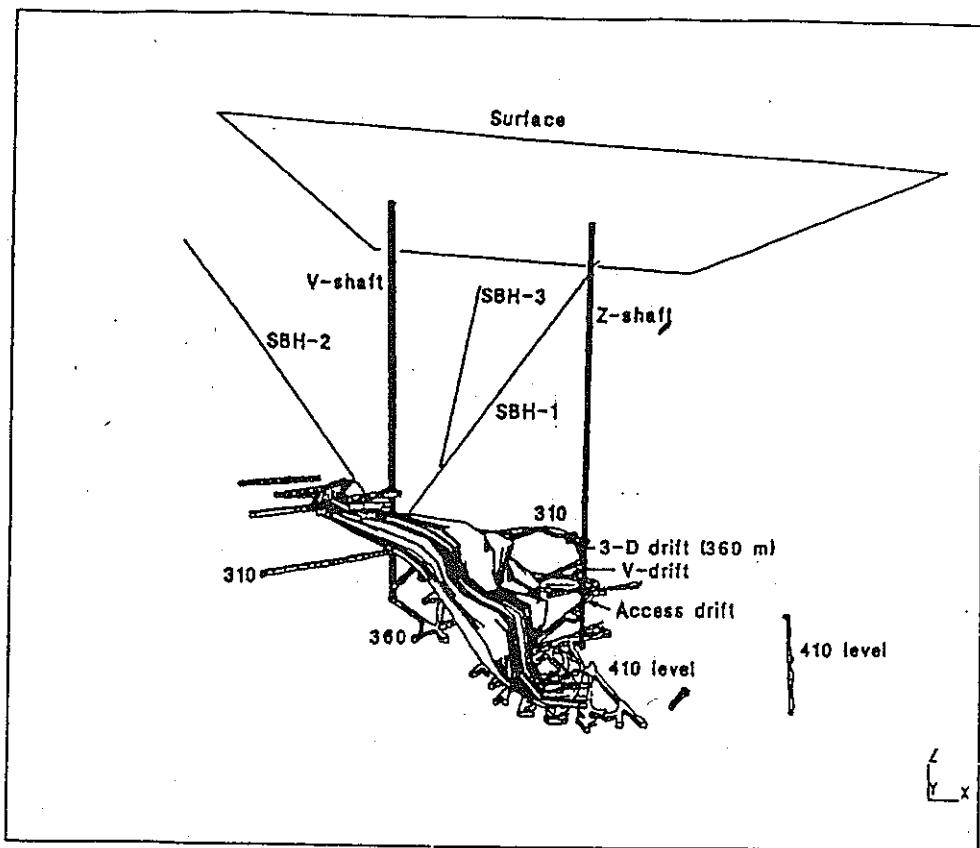
- a) 割れ目系ジオメトリーの統計学的特性調査技術を開発すること。
- b) 主としてストリパにおけるBMT地域での割れ目透水性の範囲と特性を決定すること。
- c) フィールド、実験データに基づき、有効及び全割れ目間隙率の分布を把握すること。
- d) ストリパサイトでの水理地質・地球化学・同位体データの解析のフレームを決定するため、ストリパでの地下水流动系の3次元的特性を決定すること。

### 6.3 試験方法

各割れ目群の方向性・トレース長（trace length）・間隔（spacing）の分布を明らかにするため、約10,000本の割れ目に関する測定を行った。BMT地域における透水係数の深度変化と、透水係数及び割れ目幅の分布に関する特性を決定するために、地表から3孔、坑道から15孔掘削された試錐孔内での約750回の注入・回収試験について解析した。ストリパの単一割れ目の全間隙率及び流れの間隙率は、樹脂含浸（resin impregnation）技術を用いた室内試験によって、又フィールドパッカー試験からの割れ目に関するデータと、トレース長と間隔に関する割れ目の統計に関する室内研究との総合解析によって決定された。

各割れ目群のトレース長や間隔の分布のパラメータは、BMT地域での確率論的割れ目ネットワーク作成のためのインプットとして用いられた。これらネットワークを通る全流速は、フィールドでの水理境界条件を明確に定義して計算された。ネットワークモデルのキャリブレーションでは、坑道での大規模な大透水性（macropermeability）試験で測定された流速を用いた。

さらにBMT地域での岩体の方向性を持つ透水性が次の方法によって評価された。



第6-1図 200 mレベルの南-南西から見たテストサイトの  
見取図。採掘後の鉱化帯と鉱山北東-東端にあるト  
ンネルとシャフトを示した

- a) 互いに垂直な3つの平面への割れ目ネットワークを作成し、そのネットワークを通る流れの全方向の相対的な流束量の速度を決定すること。
- b) 自然の応力の関数として、ストリバ花崗岩の自然の割れ目を通る流れの変化を室内条件で測定すること。

流動系の解析を広域的・局所的スケールで実施した。広域モデルの対象地域は、約9km×12kmで地表水の流域を境界として決定し、サブモデル又は局所的モデルは、ストリバ鉱山を中心とする約4km×4kmの地域を対象とした。花崗岩、レプタイト、変堆積岩、2ヶ所の大きな割れ目帯といった基本的な地質も各モデルで考慮し、広域モデルは3000mの拡がりを持つ7層の場合として解析した。サブモデルは3000mの拡がりを持つ11層に区分され、水頭の境界条件は広域モデルより得られた。各モデルへインプットするパラメータである透水係数・間隙率は、ストリバのフィールドデータを用いて求められ、そのキャリプレーションは坑道からの流出速度を測定して行われた。地下水位は湖のレベルからと、なめらかにした表面を地表面地形へフィットさせることによって決定した。

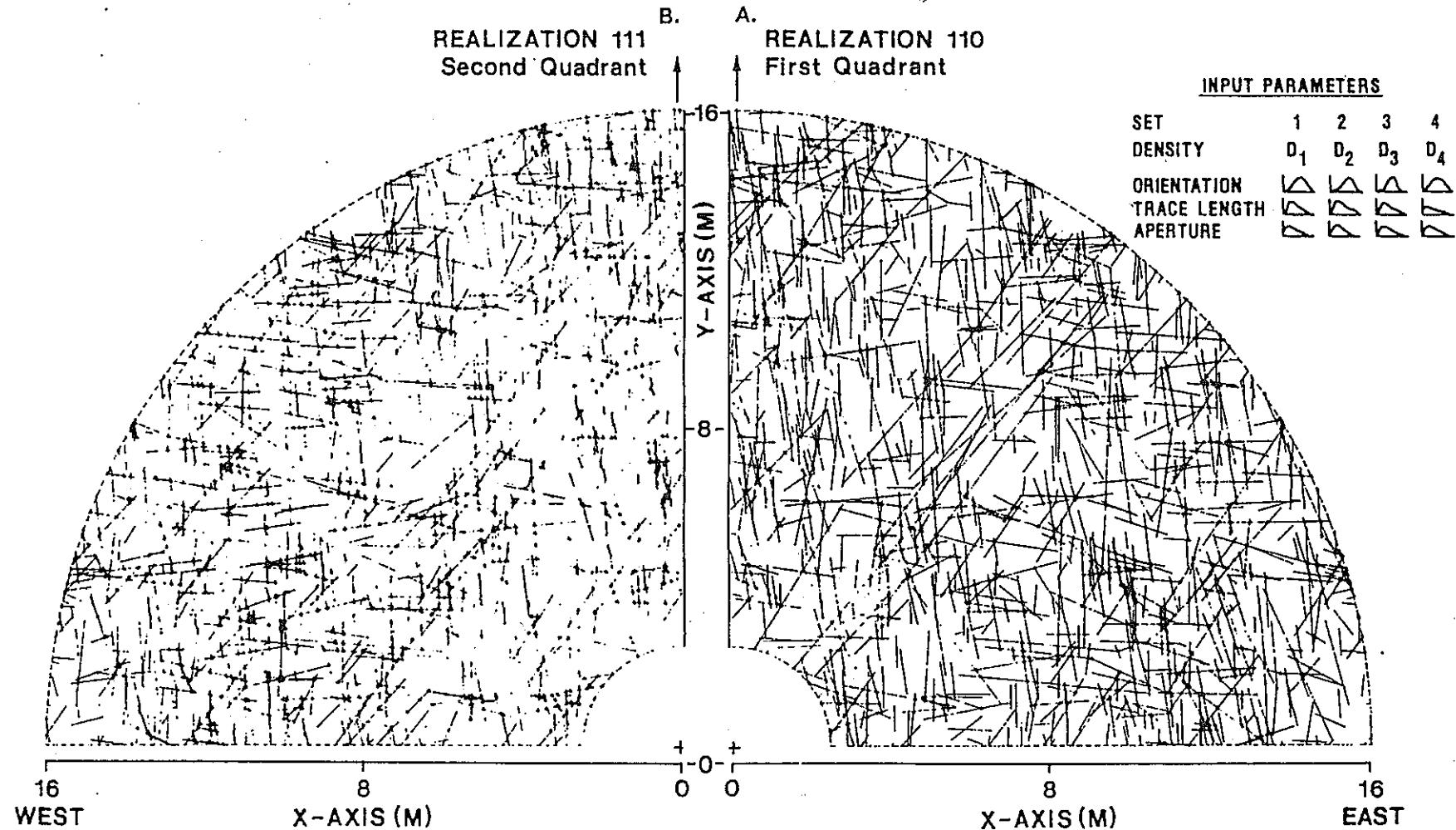
#### 6.4 結果・結論

割れ目方向データに関する解析は、ストリバのBMT地域を直接囲む岩体において少なくとも4つの割れ目群に明らかに区分できることを示している。この岩体中の割れ目群に対し、割れ目間隔、トレース長さそして密度の分布を決定した。13孔の方向性を持った坑道からの試錐孔の岩芯から得られた割れ目間隔データは、試錐孔間で各割れ目群の平均値が大きく異なることを示している。その差は、坑道に沿った同一の地点において、又大きな岩体をサンプルとして試錐孔群を比較した場合に小さくなる。BMT地域では概してトレース長と間隔データは割れ目群の間で大きな差を示す。さらにトレース長の差は、サンプリングの偏りの修正を取り除くとより明白になる。この解析は、方向性の偏りの修正を行った後の平均の割れ目密度が割れ目群によってかなり変化することを示す。

BMT地域での試錐孔から得られた透水性に関するデータは、累積確率対数正規プロットをした時に直線にのる。このことは、それらが対数正規モデルによってよく近似されることを暗示する。透水係数値の自然対数に対する平均偏差及び標準偏差を用いると、対数正規分布の平均偏差、標準偏差は、流出試験ではそれぞれ $1.09 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ と $1.53 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、注入試験ではそれぞれ $1.73 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ と $3.14 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ である。比較のために同じ坑道で行われた大透水性試験の結果では、平均透水係数は $6.6 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。パッカ試験の約5%は $6.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ かそれ以上の透水係数を持つことは注目に値する。

各割れ目群の方向性、トレース長、間隔に関する分布のパラメータは、BMT地域に直交する垂直断面への割れ目ネットワークを作成するインプットとして用いられた（第6-2図）。フィールドでの水理境界条件を明らかにすることによって計算されたこれらの割れ目ネットワークに対する全体の流速は、測定値にきわめて良く一致する。この一致は割れ目ネットワーク流動モデルで用いられた平均の割れ目幅が、試錐孔パッカ注入試験で決定された平均幅である約7ミクロンにほぼ一致する時に明確となる。

地表からの試錐孔であるSBH1、SBH2、SBH3の3孔における注入試験のデータは、地表からBMT地域へ深さが増大するにつれて、透水係数が減少することを示している。さらにその3孔でのパッカ試験のデータは、各試錐孔の平均透水係数が最大主応力と試錐孔の



第6-2図 BMT坑道に直交する垂直面への割れ目ネットワークのシミュレーション、

(A) 坑道の東半分

(B) 坑道の西半分

方向性を反映していることを示している。SBH1, SBH2は最大主応力方向にはほぼ平行である。従って最大主応力方向にはほぼ直交する方向の割れ目はこれらの試験孔に交差する可能性が高い。同様に、最大主応力方向にはほぼ平行な割れ目はSBH3と交差する可能性が高い。これら3孔の試験孔でのパッカーテストのデータによれば、SBH1とSBH2の平均透水係数はSBH3よりも低い。この結果は、岩盤応力に対する試験孔の方向が決定され、もし割れ目の透水係数が割れ目表面に働く応力の関数であるなら、予想されるパターンと一致している。

自然の割れ目を持つストリーパ花崗岩の4孔の岩芯を用いた室内実験によって、各割れ目の透水係数が、室内条件のもとで垂直応力を増加させると、実際に減少することが明らかにされた。この垂直応力に対する割れ目透水係数の依存性は、測定される岩盤応力が異方性をもち、岩盤応力が深度と共に増加するなら、水平及び垂直面における流れの大きな異方性を引き起こす。方向性を持つ透水係数は、部分的には割れ目ジオメトリーに支配される。その割れ目系は等方ではないため、岩盤応力に起因する透水係数の異方性は、割れ目ジオメトリーによって生成される方向性を有する透水係数に加えられなければならない。

ストリーパにおける岩盤透水係数の異方性に対する割れ目ジオメトリーの関与は、3つの直交面へシミュレートされた割れ目ネットワークを通した、異なる方向における相対的な流速の解析からも明らかである。全ての割れ目幅が同一と仮定し、各平面上で2つの直交方向に対する流速を計算した。次に割れ目ネットワークを15度プラスの方向へ回転し、割れ目ジオメトリーに起因する流れの相対的異方性の大きさを知るため2つの直交方向での流速を再計算した。相対的な流速は、最大の流れの方向がN-NWで、又最大異方性が水平面において、1.5倍の流れであることを示している。NSとWEの2つの垂直な平面で同程度の異方性が決定された。NS面では割れ目の連続性が少なく、全体の流速も小さくなっている。従ってストリーパでの割れ目ジオメトリーは流れの異方性を形成しており、その中で最も高透水性の方向は、地表からの3孔の試験孔でのパッカーテストのデータから推定された最も高透水性の方向とやや垂直に交わっている。従って、割れ目ジオメトリーに起因する透水係数の異方性は、部分的には岩盤応力による透水係数の異方性を含む。

ストリーパでの単一割れ目の全体の又流れの間隙率は、定常流試験と樹脂含浸技術を用いて実験室で決定された。この定常流試験から計算された割れ目幅は、全体の中の2つのサンプルにおいて樹脂の平均値幅より3~7倍小さかった。割れ目幅の変動を測定して計算されたこの2つのサンプルの等価均等 (equivalent uniform) の割れ目幅は、水理データから計算された幅と一致する。樹脂の幅の分布も割れ目幅全体の分布も、対数正規モデルによってよく近似される。

岩盤の有効又全間隙率は、フィールドパッカーテストと、トレース長と間隔に関する割れ目の統計処理を行った室内研究からの両方の割れ目幅に関するデータを用いて計算した。フィールドデータを用いて計算した岩盤の割れ目に起因する平均有効間隙率は、岩芯サンプル中の単一割れ目に関する室内試験からの水理データを用いて計算した間隙率よりおよそ1桁小さい。もっと重要なことは、樹脂の幅に関するデータを用いて計算した間隙率は、フィールドデータを用いて計算したそれよりほとんど2桁大きい。等価均等の割れ目幅と水理的な幅と一致することは、定常フィールドパッカーテストから計算された幅は、割れ目間隙率を1桁以上低く見積もるという考えを強く支持する。

計算によって求めた平均有効間隙率は0.00001から0.0001、平均全間隙率は0.0001から

0.001 の範囲である。

広域又局所モデルによる鉱山の定常シミュレーションは、明らかに坑道が少なくとも3000mの深度まで流動システムを乱していることを示す。その結果、深部地下水が坑内へ流れ込むことになる。全ての岩種と全ての地層に  $1.0 \text{E}-09 \text{m/s}$  という単一の透水係数を当てた場合、3次元数学モデルによれば坑内への流入量は約120L/minとなる。透水性の比例中頃に近似する平均透水係数と地表から全ての岩種に対して掘削された3孔の試錐孔で観察された深度一透水係数との関係を用いると、坑内への流入は534L/minとなる。この値は坑道からの平均流出量に非常に近い。同様に、各岩種に異なった透水係数を当てると坑道の流出量は177L/minと計算される。流管計算 (flow tube calculation) から予測された移行時間は、流動モデル計算で用いられた範囲の間隙率、透水係数では既存の地球化学、同位体データから予測した時間よりきわめて短い。しかし流線は予想より非常に長く、それは坑内へ流出する水が坑道からかなり離れた距離まで涵養されることを示している。坑道掘削が流動システムへ与える影響は、ポテンシャル曲線の一般的パターンからもきわめて明らかである。これらは、地下水の涵養と坑道から 3 km 以内の浅部地下水の流れが、鉱山の最深度レベルでの坑内への流出に影響を及ぼしていることを示している。それらは又、浅層と深層地下水の混合が少なくとも鉱山での数孔の試錐孔で起こっている、という地球化学的仮説をも支持する。Cl濃度の過度現象が335mレベルのM 3孔で観察されるが、そのことは浅層地下水の、それより深い坑道レベルへの混合又はその逆が起こっていることを表している。同じ6年間にわたるM 3孔での酸素-18の変化は、坑内排水が浅層と深層流体の混合を加速していることを暗示する。

坑道西側にある高度約220mの地形のため、ある間隙率では最大の流路の長さが 9 km、滞留時間が約900年となることは、(もし流れの多くが 3D モデルの境界の外側に由来するのでなければ) 浅層と深層地下水の間のおよそ  $0.1\text{\textperthousand}$   $\delta^{18}\text{O}$  の差は単に涵養の高度の差によるのではないことを意味する。それは又、深層地下水で見られる  $^{18}\text{O}$  の減少の原因が、涵養時の寒冷な気候条件のためであることを示している。そのような証拠はさらに、フィールドデータから計算された間隙率に基づく滞留時間の見積りが小さすぎる事を示している。すなわち西ヨーロッパにおいて古地下水がおよそ  $0.1\text{\textperthousand}$   $\delta^{18}\text{O}$ だけ減少しているという公表データは、約10,000年前には広域的にヨーロッパでは寒冷な気候が支配的だったことを示している。もしストリバの地下水で観察される  $\delta^{18}\text{O}$  の差が約10,000年前の涵養時の寒冷な気候条件の差によるのなら、計算による間隙率を 10 倍高くすると 3D 流動モデルの滞留時間は  $^{18}\text{O}$  のデータによく一致する。

各地球化学／同位体による滞留時間の見積りの中で、モデルによる滞留時間を 10 倍長くすると、Ra-226 と U-234/238 の滞留時間とよく一致し、又無機炭素交換モデルにより規制を与えると、多分 C-14 の見積りにも良く一致する。しかしそれでもまだ 3D モデルによる滞留時間は、Cl-36 による予測に較べると約 10~30 倍短い。この Cl-36 は現在までのところ、同位体による滞留時間の見積りの中でも最良の方法の 1 つに考えられているのである。従って、これらの岩盤中の水の移行時間に対する同位体の分散や“行き止まりの”間隙の影響について批判的検討を加えることにより、地下水中の同位体量の解釈に用いられる Cl-36 のモデルパラメータについて再評価しなければならない。

## 6.5 結論の要約と安全評価への推論

ストリバでの割れ目に関する水理学的研究によって直接安全評価に関わる次のような多くの結論が得られた。

- 1) ストリバでの研究によって、割れ目系の幾何学的・水理的な特性の分布とパラメータのタイプを決定できるようなデータの取得・解析が可能なことが示された。その結果として、安全評価研究に役立つ経験の一部として1つのサイトと他を比較することが可能となる。さらに、実規模坑道への流束をよくシミュレートできる確率論的割れ目ネットワークモデルを用いて、割れ目と水理学的データを関係づけることが可能なことが初めて示された。これは安全評価研究者に対し、3Dへ拡張された時に割れ目系の中での速度分布だけでなく、割れ目系岩体中を核種が動く時の通路をも予測できる可能性を示すことになる。
- 2) 試錐孔透水性試験は、割れ目透水係数が深度方向へ対数的に減少することを示している。ストリバのデータはこれが有効応力の関数であること、さらに岩盤応力と割れ目分布の形態が異方性を持つ透水条件を形成していることを暗示する。従って、安全評価研究において岩体中の流動システムの形態を把握する上で垂直及び水平方向における透水性の異方性の役割と、廃棄物貯蔵のために最も適当な流動システムを形成する岩盤応力と割れ目分布の条件を決定しなければならない。
- 3) 室内とフィールドでの作業は、定常での試錐パッカー試験により、流束計算のための信頼性の高い割れ目特性の見積りができるることを示した。しかし、それは割れ目系の全体の間隙率に対し、1桁かそれ以上の過少評価をする。従って以前考えられていた以上の水が水-岩石相互作用に関わる。これは、放射性核種移行において、大きな遅延要因となり、マトリックスや閉じた間隙への拡散を必要とする安全評価研究においてきわめて重要な点である。この研究で用いられた樹脂による技術は、有効間隙率と全体の間隙率との見かけ上の大きな差が割れ目表面間の幅の大きな変動によることを示している。数サンプルの試験では割れ目表面にチャンネリングの系統的な証拠は全く認められなかった。
- 4) ストリバ地域での3D流動システムの解析によると、3Dモデルはサイト研究計画における有効な手法であるだけでなく、地球化学・同位体データを解釈する上で有用な流動システムのフレームを与える。ストリバ地域での3D流動システムの解析は予備的な段階であるが、一方でそれは、安全評価モデルにおいては流動モデルの計算による場合と地球化学・同位体データから推定される場合では滞留時間に明らかな差があり、そのことを考慮する必要のあることを示している。

## 7. ストリバにおける地下水の地球化学的特性調査

### 7.1 背景

放射性廃棄物の深地層への処分においては、核種が漏えいした後その中を移行すると想定されている環境に関する詳細な知識が必要である。その環境の中で決定的に重要な要因は地下水の化学組成と地下水の化学を支配する水-岩石相互作用の力学である。地下水の地球化学プロセスを明らかにすることはいくつかの理由で、きわめて重要である。そのようなプロセスによって次の事が決定される。1) 放射性核種の移行 2) キャニスターの腐食の可能性 3) 緩衝材へ与える地下水化学の影響 4) 水-岩石相互作用による間隙率と透水係数変化の可能性 5) 各帶水層システムの把握 6) 地下水滞留時間 7) 水理地球化学に対する熱-力学の影響。地下水は涵養からある流路を通って流出へ至る過程で進化するため、滞留時間と地質環境に伴って変化する化学的痕跡が残される。化学的・同位体特性は、水理地球化学的データと調和しているはずである。もしそのような調和が見られるとすれば、安全評価の信頼性がかなり高められる。

ストリバプロジェクトの第1フェーズにおいて、花崗岩の深部地下水に関する次のような重要な知見が得られた。炭酸塩地球化学（閉鎖系での方解石の溶解と沈殿）、ホタル石・重晶石の溶解度、長石の加水分解による主要イオンへの成分規制、溶存固体物総量(TDS)の深度・水平方向における不規則な分布、流体包有物起源と考えられている塩分の地下水への付加、水化学への地熱勾配の影響、ストリバでの自然放射性同位体研究が地下での放射性核種生成の上限を決定できることへの大きな可能性、その起源と生成メカニズムに関する知見、単一の放射性同位体による地下水年代に関する基本的な問題点。

### 7.2 目的

水理地球化学プログラム全体の目的は、ストリバ花崗岩の深部地下水の地球化学的起源と進化について解明すること、結晶質岩における高レベル放射性廃棄物の地層処分の対象とする深度で予想される水-岩石相互作用のプロセスとメカニズムを明らかにすることである。第2フェーズの研究は、第1フェーズの研究結果をさらに論理的に発展させることに主眼を置いた。

- 割れ目充填鉱物中の流体包有物の特性を把握し、その成因とその地下水化学へ与える影響容量を解明すること。
- 含水割れ目帯が一時的な変化をするのかを知るために、2年間連続的に地下水を化学的にモニターすること。
- 解釈上の手法として割れ目鉱物と地下水のストロンチウムの測定を行うこと。
- 地下水中に溶解している有機化合物を分別し、その炭素同位体成分を決定すること。
- 地下での<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Cl, <sup>39</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>129</sup>Iの生成に関する研究を完結させること。
- 第1フェーズの解釈と結論について再検討すること。

### 7.3 試験方法

水理地球化学的研究は試錐孔V1とV2（第1フェーズの要約を参照）のパッカーで密封し

た含水帯からの採水によって行った。十分な流出量を確保するため、又地下水組成範囲が広くなるようにV2の5つの区間を選択した。パッカーは1984年11月に設置、1985年春に再設置を行った。1986年5月13～14日から9月までは、およそ6週間ごとにサンプリングを行い、それ以降はサンプリング計画を変更し、1988年6月まで3区間のみから3ヶ月ごとにサンプリングを行った。Zone I が試錐孔の孔底 (410mレベル試錐孔の孔口から深度 559 - 822m) であるのみで、他は全て8m間隔である。すなわち、Zone II : 550 - 558m, Zone III : 490 - 498m, Zone IV : 402 - 410m, Zone V : 389 - 397mである。これらの区間では12 - 300mL/min の流出量があり、TDSは350 - 1,200mg/L の範囲にわたる。V1の孔底区間 (430 - 505m) も同一期間を通じモニターされた。M3孔においては、計画の途中で自由な流れはなくなったが、そのモニタリングも第2フェーズを通じて継続された。

サンプルは、ルーチン又特別な分析のため、世界各地の研究室へ送られた。地下で生成する放射性核種の測定精度を上げるために、Dr. John Andrews によって現地で中性子束による分析も行われた。試錐孔V1とV2からは、流体包有物、ストロンチウム同位体、追加分の微量元素と同位体研究のため岩芯のサンプリングが行われた。

#### 7.4 結果と結論

第2フェーズの研究で得られた主な結果と結論は次のように要約される。

- ストリバは、地下水年代測定に一般的に利用される放射性同位体を生成する中性子誘発反応の研究に理想的なサイトであることが判明した。その結果は、これが原位置での放射性核種生成の最も良く証明されたケーススタディとなったことを示している。ストリバ花崗岩、その中の割れ目鉱物、周囲のレブタイト中の<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Cl, <sup>37</sup>Ar, <sup>81</sup>Kr, <sup>85</sup>Krの生成が、原子核に関する理論とこれら岩石試料の既知の成分に基づいて見積もられた。ストリバ花崗岩で中性子束の実験測定は理論値の15%以内であり、それは中性子誘発生成物の生成速度を計算するのに利用された。
- 岩盤マトリックスから割れ目の流体中に入る、原位置で生成された<sup>3</sup>Hと<sup>14</sup>Cの活動度は現在の検出限界に近い。ストリバ花崗岩において、地下生成による<sup>3</sup>Hの上限は0.7TUと見積もられる。V1とV2孔で<sup>3</sup>Hの増大が認められているが、それは非常に新しい地下水の浸透と混合によるものかもしれない。これらの結果は、ストリバにおいて、1kmに達する深度まで若い地下水が存在すること意味している。これが被圧下にある流れの条件と鉱山での作業でのポンプによって引き起こされた大きな動水勾配によるものであることはまちがいない。
- 花崗岩での中性子捕獲による<sup>36</sup>Clの生成は、宇宙線や核実験のフォールアウトに由来するものよりも重要である。塩分に富む地下水中のClの起源を評価するのに<sup>36</sup>Cl/Cl比が利用できる。この<sup>36</sup>Cl/Cl比によれば、ストリバでの水中の塩分の多くは周囲のレブタイト岩体に由来する。
- <sup>129</sup>Iの測定により、その生成量がかなり多く、地下水側へ移動することが判明した。一般にその量は、溶解しているヨウ化物濃度だけではなく、深度や<sup>36</sup>Cl/Cl比にも比例して多くなる。自然の核分裂生成物の不確実性や定常流での物質流束の仮定のため、岩石から地下水へ移行する<sup>129</sup>Iの速度の定量的な評価は難しい。
- 地下水系で初めて放射性核種<sup>37</sup>Arが検出された。その濃度は、<sup>39</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>222</sup>Rnと

同じく他の大部分の地下水系よりもきわめて高い。この結果は原位置での生成速度が大きいこととも調和する。

- $^{222}\text{Rn}$ 濃度は、地下水流动系での割れ目幅を推定するのに利用され、それは20–250  $\mu\text{m}$ である。
- 約3年間にわたる試験孔でのモニタリングでは主又微量元素の濃度が一定であることが示された。ストリバでの流动システムは、明らかに数年間のうちに溶質の物質流束に関しては定常状態に達した。連續モニタリングは又、分析データの精度を上げるために大きく役立った。
- ストリバ地下水の溶存有機炭素 (DOC) 濃度は 0.2–70 mg/L を示し、ナイロン管を用いる全てのサンプリングラインでの滞留時間と良く一致する。炭素を分別した分析の結果から、DOC の大部分は、N-ブチルベンゼンスルフォンアミド (NBBS) として知られる人工の化合物であることが判明した。NBBS は商業的に可塑剤として使われ、多分ナイロンサンプリングラインから溶脱されたものだと思われる。1本だけあるテフロンサンプリングラインでは DOC 濃度が最も低く、滞留時間とも一致しない。長い連鎖の脂肪酸、低分子量の環式炭化水素や一般にはフルビン酸として定義される色素成分など他の有機化合物も同定された。天然の DOC は 0.3 mg/L を越えない。
- DOC 中の C-14 は一般に溶存無機炭素中の  $^{14}\text{C}$  より低い。有機物質の存在は “若い” 炭素と “死んだ” 炭質の混合を意味する。それらは地下での  $^{14}\text{C}$  の生成に影響を受けないが、無機炭素は、中性子束が高く無機炭素の濃度が極めて低いストリバのような地下での生成に影響を受ける。
- 方解石脈の流体包有物の研究は、その中の塩分の含有量は岩盤のマトリックスと同じである（塩化物で約 0.017%）が、そのマトリックスに較べ方解石脈の方が流体包有物の量は多い傾向にあり、相当する塩化ナトリウムの量も多いことを示している。流体包有物の密度は低いため、塩分の含有量はほぼ同じことになる。流体包有物の研究から、花崗岩の貫入後、温度 70–250 °C の範囲で、何回かの熱水作用が起こったことが推定される。
- 方解石脈中の塩分量のマスバランスの計算から、その中には地下水の塩分濃度を説明するのに十分な塩分が存在することが示された。

## 7.5 結論のまとめと安全評価への推論

廃棄物処分における結晶質岩の安全評価に関する水理地球化学的研究から次の結論が得られた。

- 1) 結晶質岩における地下水の組成範囲は広く、ストリバでの研究によって、溶質の起源は母岩中の流体包有物という新しい考え方が必要とされた。従ってストリバでは溶質の年代は地下水の年代と全く異なり、溶質の年代が地下水より数億年古い可能性がある。さらに、この起源が全体の間隙率にも関係する。つまり流体包有物は余剰の (residual) 又は流れのない間隙と考えられるが、それがストレス場の変化で引き起こされる微少割れ目によって流れの間隙率の一部となる。放射性廃棄物処分のための地下掘削による機械的・熱的乱れによってストレス場での力学的变化が起こると思われる。
- 2)  $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  を除けば、放射性同位体による地下水の年代決定は、恐らく誤った結論に

至る。年代の計算は地下水系の移行メカニズムによっているが、それはまだ良く解明されていない。ストリバの結果によって、地下での放射性核種移行の不確実性に関する数点の問題は解決された。ウラン系列の研究では、地下水の移行においてアクチニドが大きく遅延されることが示された。

- 3) 安定同位体、特に<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>Hは普通の化学パラメータに依存せず水に天水の痕跡を残すため、地下水の起源と進化を解明する上でその測定が重要である。
- 4) 安全評価における水理地質モデルを提案するために化学的・同位体パラメータのセットを注意深く選択する必要がある。何故なら、そのデータは間隙率と透水性へ影響を与える地球化学プロセス、滞留時間への地球化学的規制、新しい地下水の浸透速度に関する詳細な空間的情報、そして様々な滯水系の記述などに関する情報を与えるからである。この情報は他の手段では取得できない。