

深地層の研究施設計画検討委員会(第12回)

幌延深地層研究計画・第1段階研究成果の 妥当性評価

平成24年3月15日

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

報告内容

堆積岩環境を対象とした,

- 1)地上からの地質環境特性調査技術の妥当性評価と汎用化
 - ✓ 水理地質構造と地下水流動
 - ✓ 地球化学
 - ✓ 岩盤力学

- 2)第2・第3段階の調査研究開発の現況と今後
 - ✓ 掘削影響評価技術の開発
 - ✓ 物質移行特性評価技術の開発
 - ✓ 処分技術の開発

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(水理地質構造と地下水流動)

項目	第11回委員会でのコメント	対応
1. 水理場の不均質性	● 不均質性の定量化や具体的な調査手法の提案が重要	➢ 坑内での観察結果を参考に、不均質性の要因となる大規模断層の分布・発達様式を考慮しモデルを構築する。
2. 境界条件等	● 後背地形など、水頭分布の再現性に影響を与える他の要因の検討が必要	➢ 広領域を対象に実施した既存の地下水流動解析結果との比較を実施する。
3. 解析手法	● 亀裂を等価不均質の連続体で置き換えた際に失われる可能性のある移行経路の連結性についての評価が必要 ● 水頭分布と塩分濃度分布の両方を説明するモデルの構築・流動解析が必要 ● 逆解析手法の構築が望まれる	➢ 亀裂ネットワークモデル、均質媒体等との比較を通じて、各手法の適用範囲等を明確にする。 ➢ 塩分濃度分布は、過去の地形・地質構造発達、気候・海水準変動を考慮した水理地質構造変遷モデルにより評価する。 ➢ 東濃-島根大学が開発中の手法等を適用予定
4. 解析結果	● 塩分濃度による水頭値の補正が必要	➢ 補正值を導出
5. 体系化	● 最適なボーリング孔の順番、配置、数量の検討が重要 ● 物理探査と連携した評価により、ボーリング孔が少ない条件でのモデル構築が必要	➢ 上記で改良したモデルに基づき、順番、配置、数量、地上物理探査の有無等を変えた解析を行い、最終的な体系化を図る。

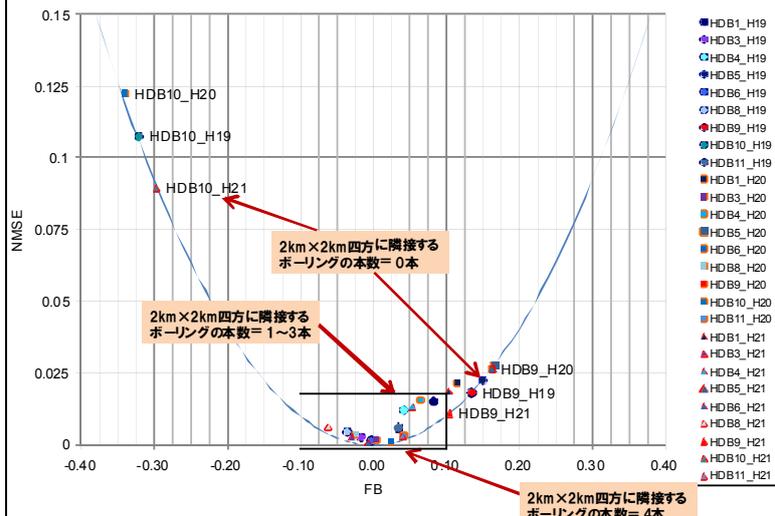


地上からの調査段階で構築した水理地質構造モデルおよび地下水流動解析により予測した水頭値、湧水量と第2段階の調査で取得された実測値との比較を通じて、

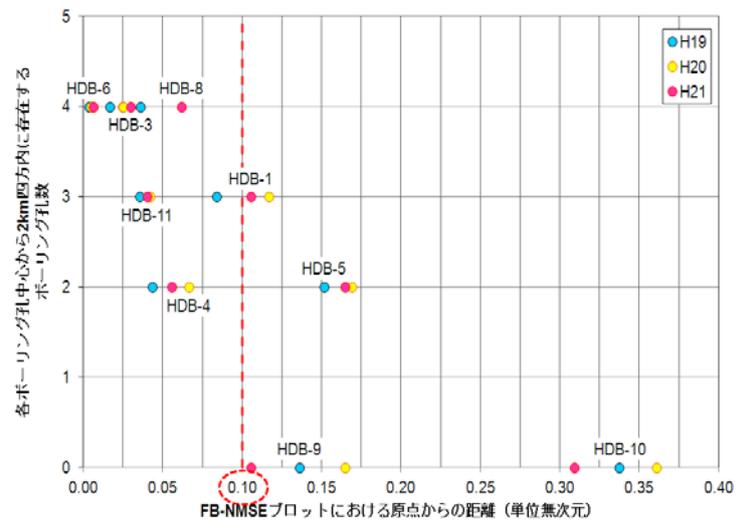
- ・ 地上からの調査の項目、順番、組み合わせ、レイアウト、データの量・質を提示
- ・ 地上からの調査技術の限界を整理
- ・ 不確実性を低減する上で不可欠なデータ等を明確化

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(水理地質構造と地下水流動)

調査数量の最適化に関わる検討



水頭実測値と予測値のFB(偏差)-NMSE(正規化平均二乗誤差)プロットを用いた各ボーリング孔での再現性評価(原点に近いほど、実測値の再現性が良い事を示す)



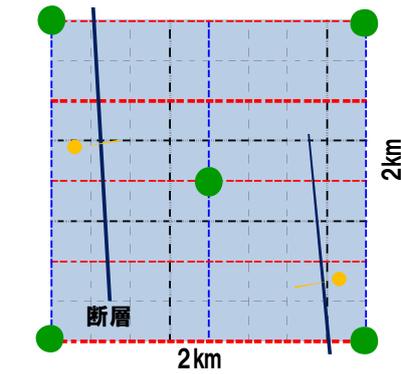
FB-NMSEプロット上の原点からの距離と各ボーリング孔周辺に存在しているボーリング孔数との相関性評価(FB-NMSEプロットの原点に近いほど、調査密度が高い)

- 水頭の予測値と実測値との差が約5m以内(右図中のプロット原点からの距離で0.1以下に相当)の箇所は、自孔を中心として2km四方にボーリング孔が2本以上配置されており、ボーリング孔の粗密が広域的な地下水流動場の予測再現性に大きく影響している。

今後、稚内層の透水性分布や水頭分布を模擬した仮想の地下水流動場を用いて、第1段階調査と同様なボーリング調査の数量・配置を実施した際に右図中の相関性が再現できるかどうかを確認する。

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(水理地質構造と地下水流動)

調査レイアウト案



- ボーリング孔, ● 断層捕捉ボーリング孔
- ⋯ 二次元反射法地震探査測線
- ⋯ 地震探査補助側線(断層方向に平行)

母岩となる堆積岩が、稚内層と同等の透水性、透水不均質性(透水係数の対数平均: 10^{-8} m/sオーダー、標準偏差: $10^{\pm 1.6}$ 程度)を有し、数kmスケールの断層が領域内に分布する場合、

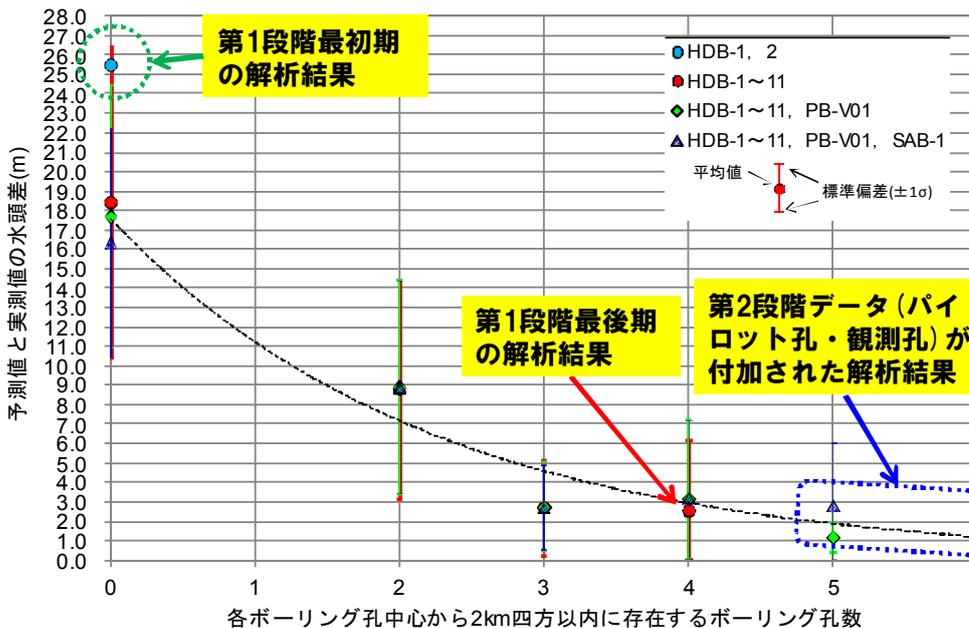
- 第1段階で実施した地質環境調査手法(装置・方法、品質)を、以下のレイアウト案で適用することで、再現性の高い地下水流動解析結果を得ることができる可能性がある。
- 透水不均質性がより単純な岩盤でのケースや三次元反射法地震探査などの調査・解析技術が実施できる場合は、調査数量は更に低減できる。

<2km四方の領域で水頭の予測値が実測値に対して5m以内の条件を満たす地上からの調査レイアウト案>

	調査レイアウト案	第1段階調査の実績
ボーリング本数	5本+断層捕捉ボーリング孔	11本
二次元反射法地震探査の総測線長	10km *補助測線を設定する場合は16km	約26km

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(水理地質構造と地下水流動)

第1段階調査の妥当性について(調査数量と水頭差の相関性)



第1段階と第2段階の地下水流動解析結果から、

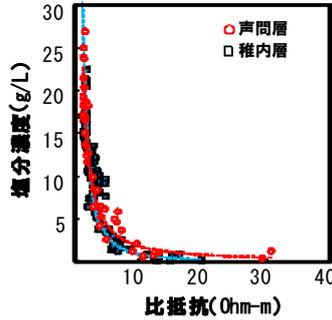
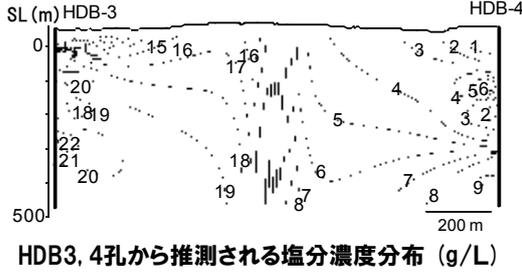
- 第1段階最初期のケースでは、水頭の予測値と実測値との差が約26mと大きい
- ボーリング孔数の増加に従い、予測値と実測値の差は指数関数的に低減する(HDB-4,5,9,10,11孔など再現性が相対的に低いボーリング孔はその原因と低減に与える影響を検討中)
- 第1段階最後期での第2段階データの追加は、予測値と実測値の差にほとんど影響を与えておらず、不確実性低減に対する効果が小さい

● 幌延の事例:地上からの調査段階において、現有の調査解析技術では、誤差 $\pm 3 \sim 2$ m程度で水頭分布を予測可能。それを達成するためには、2km四方の領域に5孔以上のボーリング孔が必要(それ以上のボーリング孔の追加による予測精度の向上は僅少)

● 今後、国内外での解析事例との比較を通じて、異なる透水性・透水不均質性を有する岩盤への活用可能性を検討し、汎用的な調査解析手法として整備

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(地球化学)

比抵抗探査とボーリング調査の考え方の整理



地層が均質、高塩分地下水が分布する→以下の解析を試行

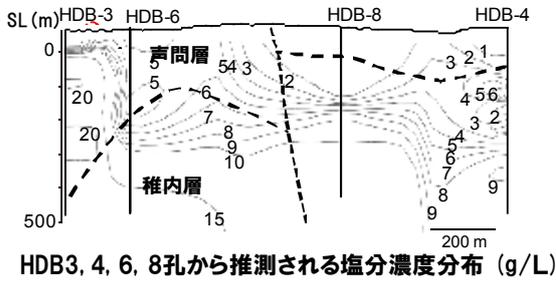
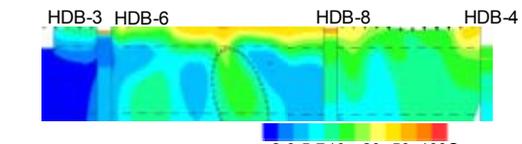
採水データとその位置情報に基づきクリギング法により水質分布の空間補間(二次元・三次元分布図化)

ボーリング孔の比抵抗検層値と塩分濃度の相関性を確認

電気探査に基づく比抵抗値とボーリング孔での比抵抗検層値を比較し、比抵抗断面図を深度補正

塩分濃度の空間分布と比抵抗値の空間分布を比較し、ボーリングのない領域の塩分濃度分布の妥当性確認

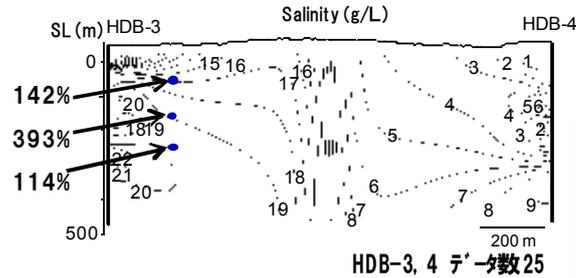
要検討項目



地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(地球化学)

ボーリング孔の水質データに基づきクリギング法により孔間の情報を補間

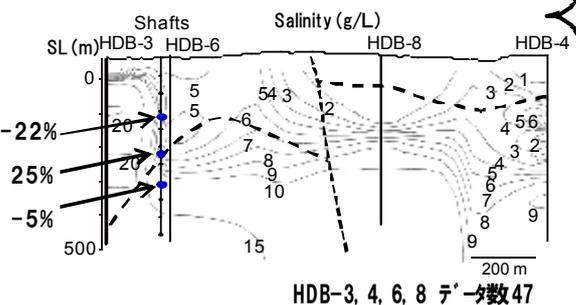
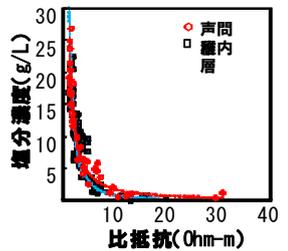
$$\text{誤差} = (\text{予測値} - \text{実測値}) / \text{実測値} \times 100 (\%)$$



今後の試行
比抵抗検層値と塩分濃度の相関が得られる場合は、クリギング法により孔間の比抵抗値分布を補間

比抵抗と塩分濃度の相関に基づき、塩分濃度分布を推定

水質データのみの孔間補間と比抵抗値を利用した孔間補間のそれぞれの予測誤差を比較



- ✓ 電気・電磁探査測線長約2kmに3本程度のボーリングが必要
- ✓ 予測誤差(不確実性)は±30%程度

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(地球化学)

目標/課題

地下水の排水基準・環境基準項目の最大濃度の把握

施設設計・施工へ反映

地下水の塩分濃度の三次元分布の把握

地下水のpH, Eh環境の把握

安全評価へ反映

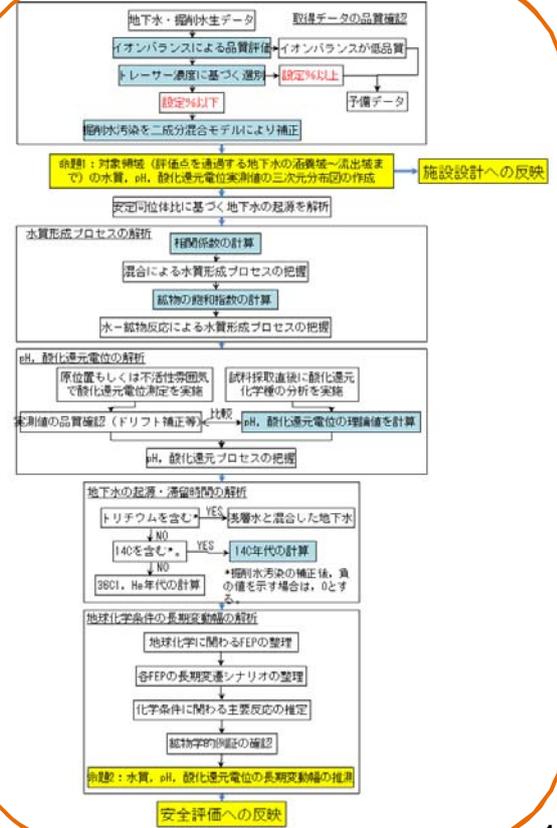
調査・データ取得

電気・電磁探査
✓ 比抵抗特性の空間分布

ボーリング調査
✓ 採水調査
✓ 物理化学パラメータの測定
✓ 比抵抗検層(電気・電磁探査との比較)
✓ 固相(コア)・液相の比抵抗特性に関わる室内試験

ボーリング調査で把握した基礎物性を物理探査の測線断面に二次元・三次元展開

モデル化・解析



今後の課題

電気・電磁探査の水質分布評価への適用条件, 手順の明確化(岩石と地下水の比抵抗値に必要な差異など)

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(岩盤力学)

項目	第11回委員会でのコメント	対応
1. 初期地圧	● 初期地圧の予測と実測の比較において、値や方向が異なる理由の解釈が必要	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地層境界が初期地圧分布に影響を与える可能性を確認する。 ➢ 深度140mおよび350mは地層境界(深度250m)から深度方向で100mの離間距離。3深度で取得される初期地圧に基づいて、初期地圧の空間分布を評価する。
2. 岩盤等級	● 低減率同士を掛け合わせて物性値を算出しているが、低減率AとBがそれぞれ独立していることが前提とある。低減率Aに低減率Bが含まれていると計算できなくなる。	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 低減率Aは、コア観察の結果認められた割れ目(分離面)数を等級区分の基準としている。低減率Bは、コア表面の微細な弱線(分離面ではない)の有無を等級区分の基準としている。両者は対象が異なることから、独立と考えている。
3. 岩盤物性	● 底面観察時の試験試料について、近傍に破碎帯があるだけで値の傾向は変わるため、他の試験方法と合わせないと解釈が難しい。	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 弾性波探査(屈折法)による弾性波速度分布およびシュミットロックハンマの反発係数を取得している。 ➢ 物性の小さかった場所では、弾性波探査の低速帯の幅が大きかった。

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(岩盤力学)

地上からの調査

地上からの調査結果の妥当性評価

目標

<p>初期地圧</p>	<p>設計のための初期地圧(地上調査ベース)</p> <p>鉛直ボーリングによる調査では、鉛直下向きを主応力方向の一つと仮定し、3次元の主応力分布を評価</p>	<p>三次元分布(原位置)</p> <p>地質構造の考慮</p> <p>坑道掘削時の支保部材応力・岩盤変位</p> <p>▲ 現段階(250m)</p>	<p>設計のための初期地圧設定の妥当性評価</p> <p>総合評価に基づく場の理解(深度ごとに検証)</p>	<p>設計のための設定の考え方の提示</p> <p>・地上からの調査</p> <p>・地下での調査</p>
<p>岩盤物性</p>	<p>岩石物性(岩石コア)</p> <p>割れ目分布(岩石コア, BTV観察)</p> <p>設計のための岩盤物性(地上調査ベース)(低減率など)</p> <p>岩石物性に、割れ目頻度に応じた低減率と微細な弱線による低減率を乗じて岩盤物性を設定</p>	<p>ロックせん断試験</p> <p>平板载荷試験</p> <p>割れ目情報の考慮</p> <p>▲ 現段階(250m)</p>	<p>地上からの調査結果に基づく岩盤物性設定の妥当性評価</p> <p>総合評価に基づく場の理解(深度ごとに検証)</p>	

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(岩盤力学)

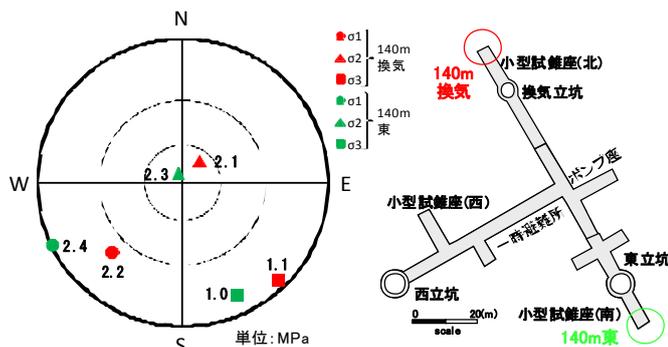
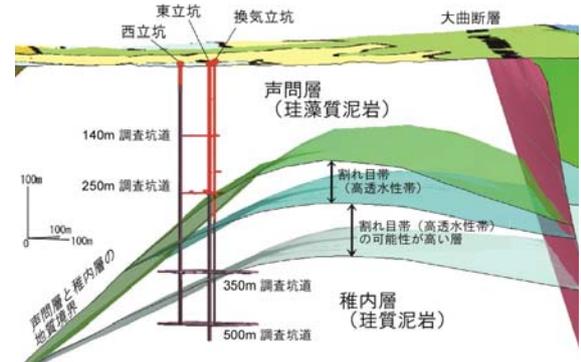
初期地圧の評価

<第1段階(地上からの調査)>

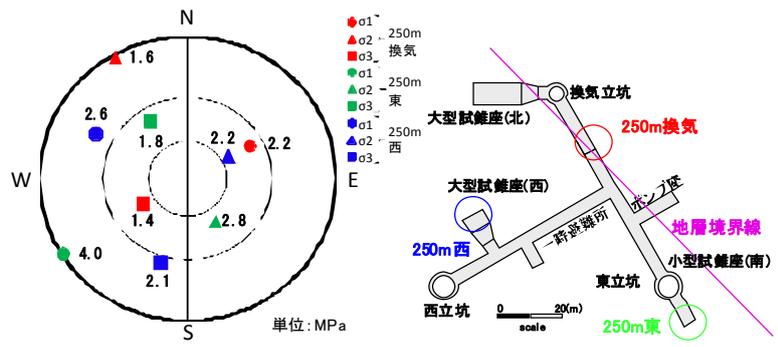
- 主応力方向の一つが**鉛直下向き**と仮定した調査
- ⇒ $\sigma_H : \sigma_h : \sigma_V = 1.3 : 0.9 : 1.0$, σ_H : は東西方向と予測
- (σ_H : 水平面内最大応力, σ_h : 水平面内最小応力, σ_V : 土被り圧)

<第2段階での検証>

- 140m坑道 : 主応力の一つがほぼ**鉛直下向き**(予測とほぼ一致)
- 250m坑道 : 主応力の**大きさ, 方向**ともに予測と**かい離**
- ⇒ **地層境界付近にて, 主応力状態が変化している可能性がある。**



深度140mの各主応力(ウルフネット下半球投影)



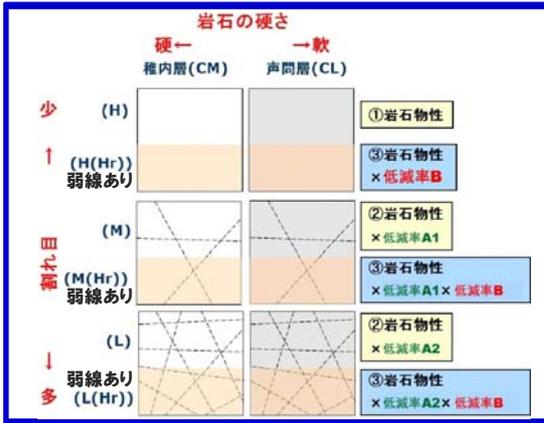
深度250mの各主応力(ウルフネット下半球投影)

課題: 地質構造と初期地圧分布の関係の分析とその概念モデルの再構築

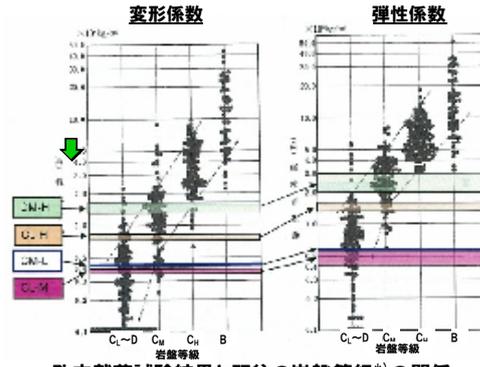
⇒350m調査坑道において, 地層境界との距離を考慮して複数地点で初期地圧を測定予定

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(岩盤力学)

第1段階で構築した岩盤区分の概念



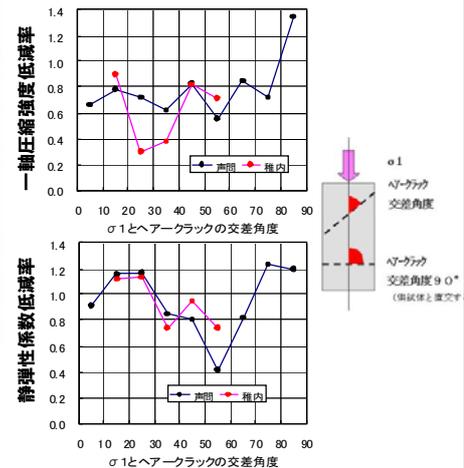
1) 割れ目の低減率A



孔内载荷試験結果と既往の岩盤等級*)の関係

*) 菊池宏吉:地質工學概論, 土木工學社, pp.103-116, 1999.

2) 微細な弱線の低減率B

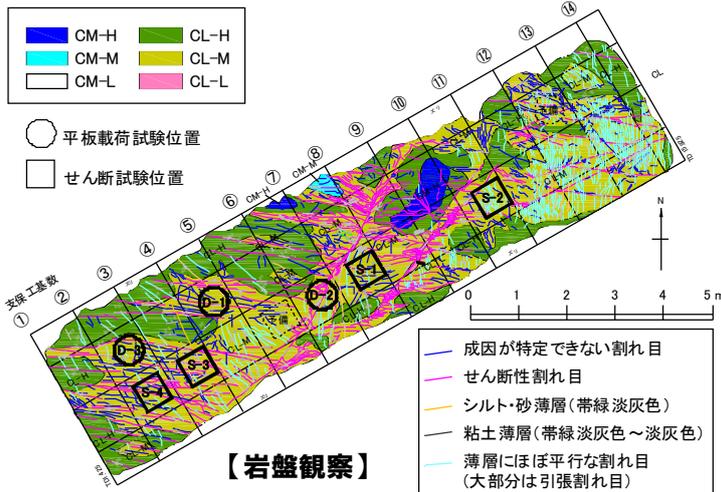


岩盤区分	菊池の岩盤区分との対比	変形係数 (MPa) (○:低減率A △:低減率B)	静弾性係数 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)
CL-H	CL級上限	800	1300	2.2	15
CL-H Hr		640 (0.8)	1040 (0.8)	1.5 (0.7)	15
CL-M	平均的CL級	400 (0.5)	520 (0.38)	0.8 (0.38)	15
CL-M Hr		360 (0.9)	450 (0.9)	0.6 (0.8)	15
CL-L	CL級下限	200 (0.25)	300 (0.32)	0.5 (0.32)	15
CL-L Hr		200 (1.0)	300 (1.0)	0.5 (1.0)	15
CM-H	平均的CM級	1500	2500	5.2	25
CM-H Hr		1200 (0.8)	2000 (0.8)	1.6 (0.3)	25
CM-M	CM級下限	1000 (0.67)	1500 (0.6)	3.1 (0.6)	25
CM-M Hr		900 (0.9)	1350 (0.9)	1.6 (0.5)	25
CM-L	平均的CL級	400 (0.27)	500 (0.2)	1.0 (0.2)	25
CM-L Hr		400 (1.0)	500 (1.0)	1.0 (1.0)	25

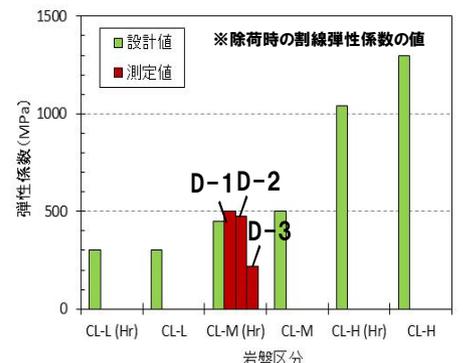
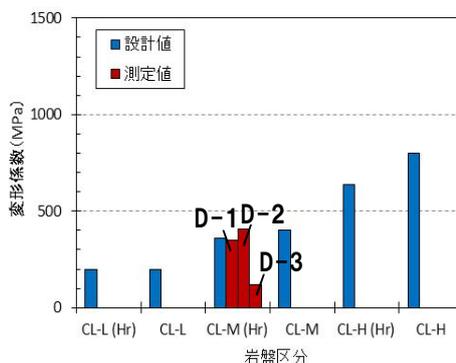
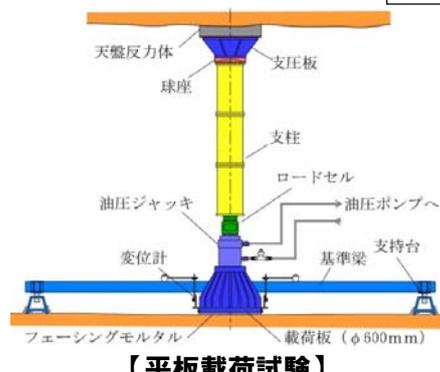
岩石物性に割れ目(明瞭な分離面)の多さを考慮した低減率Aとコア表面の微細な弱線の程度を考慮した低減率Bを乗じて岩盤区分と設計用岩盤物性を推定。

地上からの調査技術の妥当性評価と汎用化(岩盤力学)

第2段階での妥当性評価



岩盤の変形特性(変形係数・弾性係数)の評価
⇒ 平板载荷試験の実施
岩盤の強度特性(粘着力・内部摩擦角)の評価
⇒ ロックせん断試験の実施
試験対象の岩盤区分の選定(坑道内にて平均的な岩盤区分を選定)
⇒ 岩盤観察+シュミットハンマー(SH)反発値分布(岩盤表面の反発度の調査)+弾性波速度分布(試験箇所背面の岩盤性状の調査)に基づいて選定
試験結果に基づいて、設計用岩盤物性値(低減率の設定方法)の妥当性を確認



地表からの調査技術へのフィードバック

【空中・地上からの広域調査】

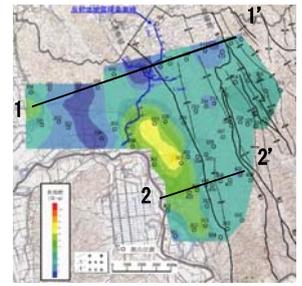
- 空中電磁探査による広域的な比抵抗分布情報の取得
- 地上からの調査（電磁探査）による比抵抗分布情報の取得

【地上からの詳細調査】

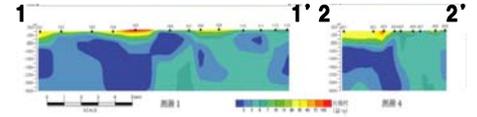
- 電気・電磁探査による詳細な比抵抗分布，地震探査による水理地質構造情報の取得
- 比抵抗・地震波分布に応じたボーリング調査
 - ✓ 広域かつ効率的な情報の取得には，地表踏査，水文調査などの既存情報に応じて，グリッド状にボーリング調査孔と測線の配置を検討
 - ✓ 水理地質特性の不均質性や断層などの不連続構造が予想される領域には密に配置（断層などを重視する場合は，追加的調査）
 - ✓ 地質が均質，地下水の比抵抗値が数Ω以下（塩水）の場合は，比抵抗検層と電気探査結果を比較し水質分布予測への活用を検討
- ボーリング調査と物理探査断面を比較し，ボーリング調査で得られた地質環境特性を物理探査測線に沿って二次元・三次元展開



施設候補地の選定および候補地の地質環境特性を施設設計に反映



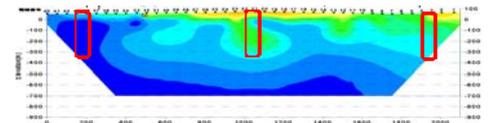
広域比抵抗平面図（海拔-500m）



広域比抵抗断面図（深度～3km）



ボーリング孔と測線のグリッド配置の例



物探-ボーリング間の比抵抗特性の比較 16

報告内容

堆積岩環境を対象とした,

1)地上からの地質環境特性調査技術の妥当性評価と汎用化

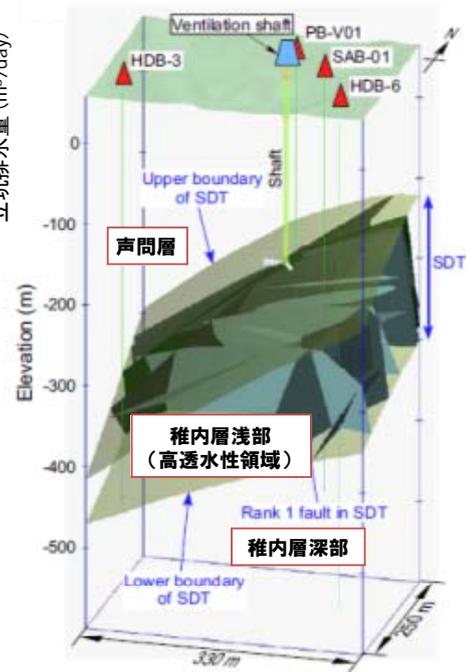
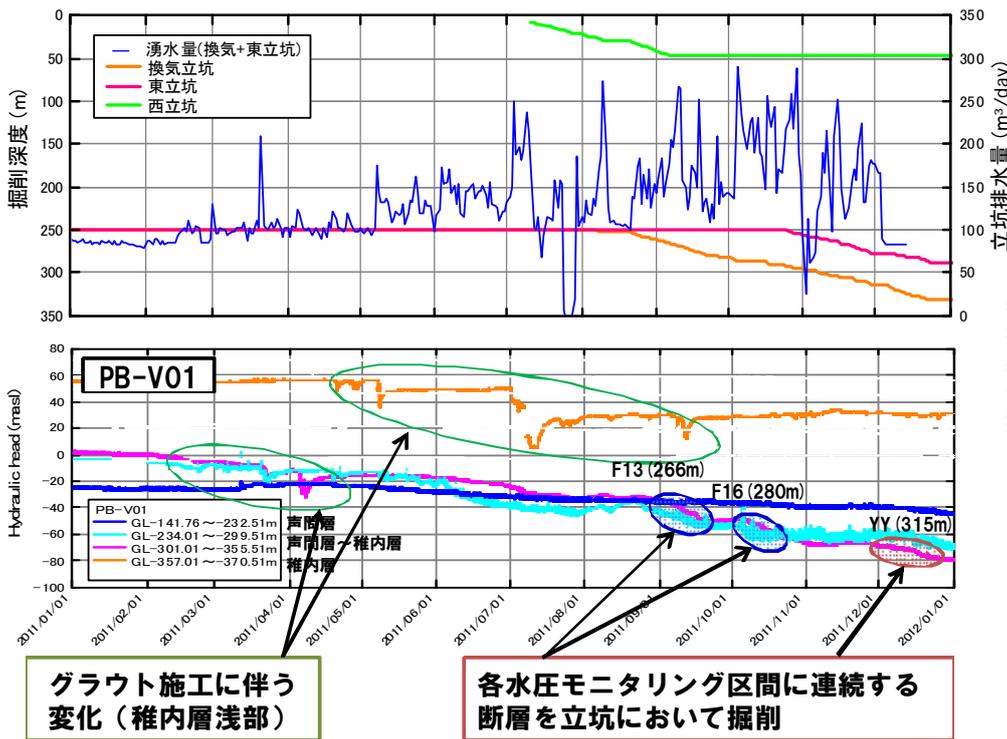
- ✓ 水理地質構造と地下水流動
- ✓ 地球化学
- ✓ 岩盤力学

2)第2・第3段階の調査研究開発の現況と今後

- ✓ 掘削影響評価技術の開発
- ✓ 物質移行特性評価技術の開発
- ✓ 処分技術の開発

掘削影響評価技術の開発(施設スケール)

施設スケールの地下水圧の経時変化



各断層深度の立坑掘削時の、周辺モニタリング孔での水圧応答により、深度300m前後までの領域において、第1段階で予測した断層の連続性を確認

掘削影響評価技術の開発(坑道スケール)

前委員会コメント：

坑道周辺の不飽和領域のモニタリングを確実に実施する（比抵抗法による水分量変化の観測やそのための施工方法など）

トモグラフィ調査：

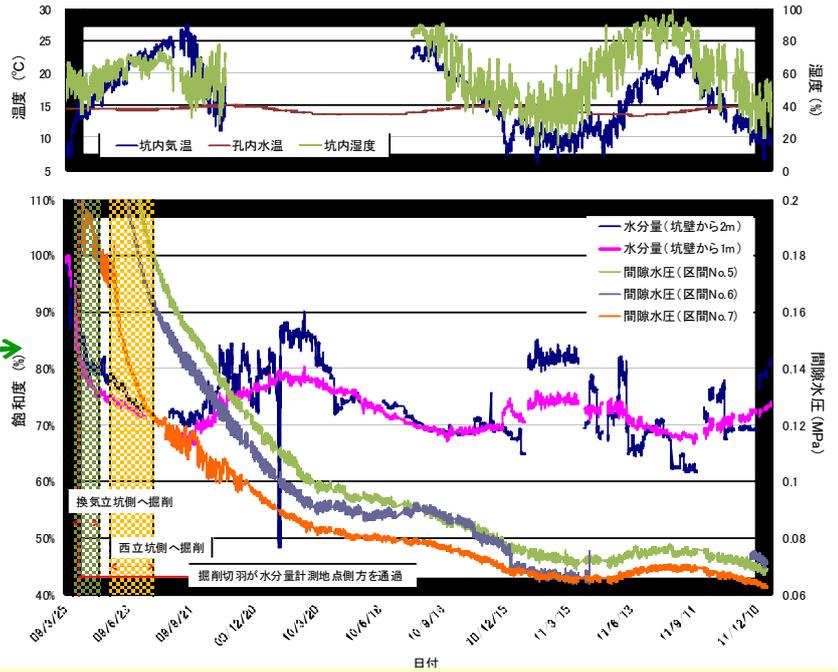
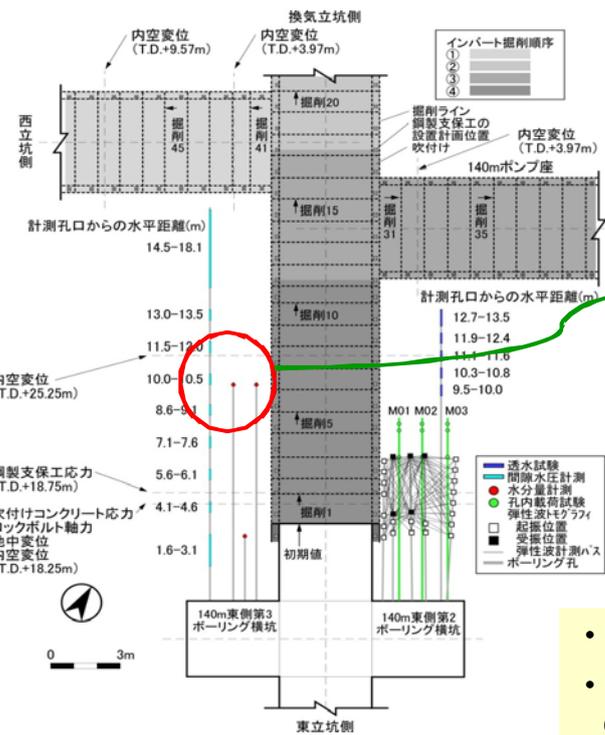
- ・長期挙動に関するデータの取得（継続中：現時点で1000日超）
- ・亀裂等による岩盤弱部と水分量変化の分離
- ・弾性波，比抵抗，音響の各手法の適用範囲の整理と評価
- ・相対評価から定量化のためのデータ解析方法の検討
- ・評価スケールと電極の適切な配置と密度の検討

水分測定，透水試験，その他：

- ・長期挙動に関するデータの取得（継続中：現時点で1000日超）
- ・不飽和状態の定量評価のためのサクション（吸引圧），ガス組成比の測定を検討
- ・坑壁から1m以内の短区間の透水試験の実施や水分測定など，計測位置の再検討
- ・防水シート施工等による不飽和域拡大抑止工の実現性を検討（350m坑道試験）

掘削影響評価技術の開発（坑道スケール）

坑道スケールの間隙水圧・水分量の変化

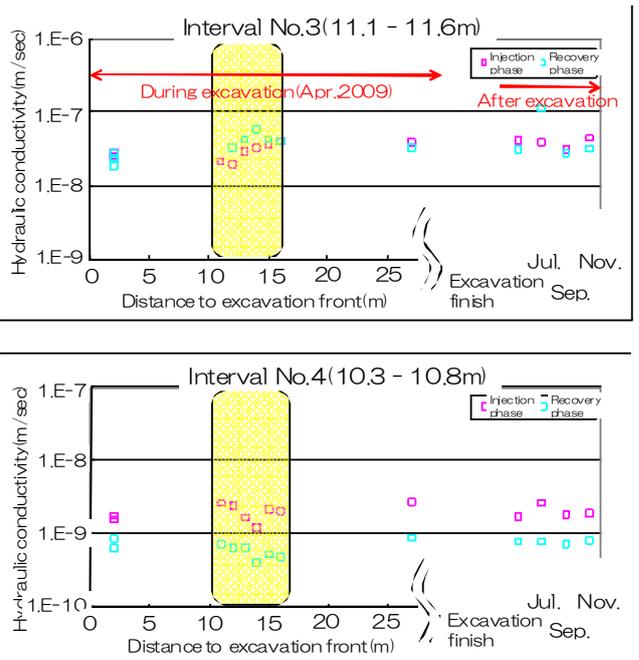
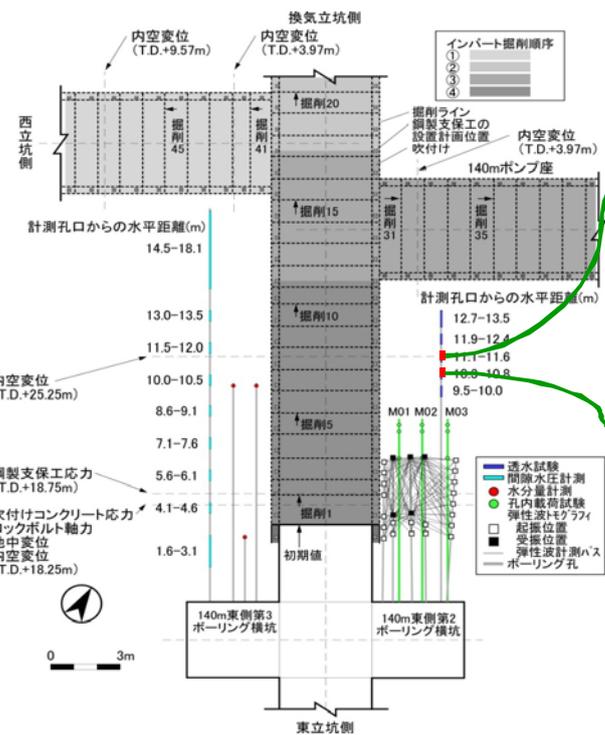


- 間隙水圧は坑道掘削後一年半程度で安定化（0.07 MPa程度）
- 水分量は飽和度70～80%で安定化。周期的変化は坑内湿度の影響と推測される（坑内湿度低下時は坑壁が乾燥し、飽和領域から水分の移動と間隙水圧の低下）

水平坑道を対象とした掘削影響試験各調査の配置(平面図)

掘削影響評価技術の開発（坑道スケール）

坑道スケールの透水性の変化

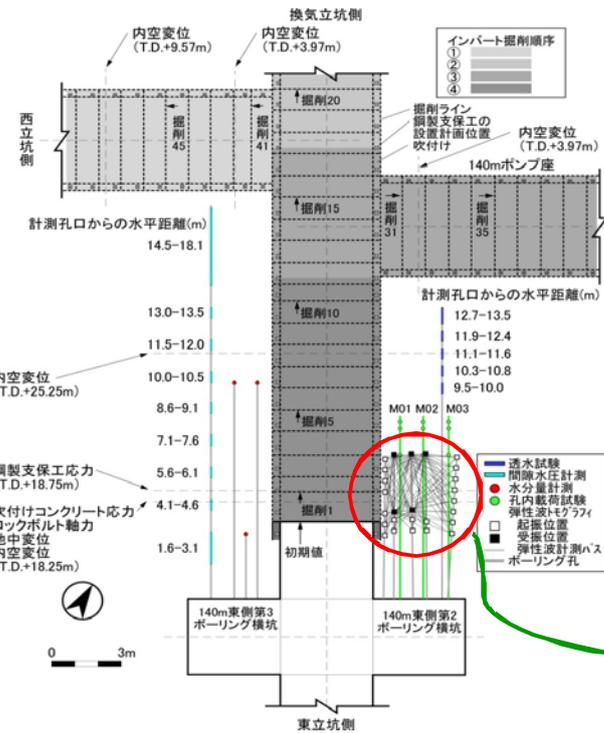


水平坑道から約3m離れた場所での掘削前・中・後の透水係数の変化は認められず、透水性に影響を与えると空隙構造の変形や新たな割れ目の形成は生じていないことを確認

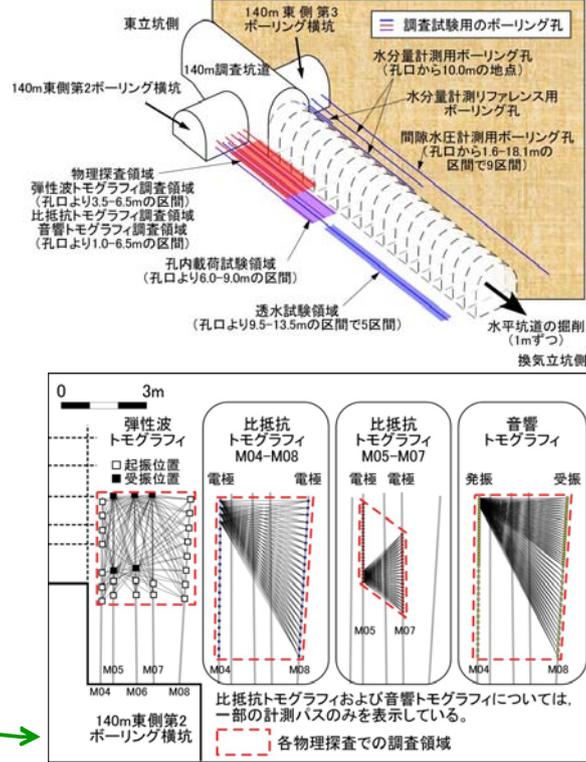
水平坑道を対象とした掘削影響試験各調査の配置(平面図)

掘削影響評価技術の開発（坑道スケール）

水理-力学連成挙動のモニタリング技術



水平坑道を対象とした掘削影響試験
各調査の配置(平面図)



- ・簡易的な弾性波トモグラフィ調査システムを開発し、モニタリング技術として手法を確立
- ・各計測結果の相互補完方法などが今後の課題

調査項目

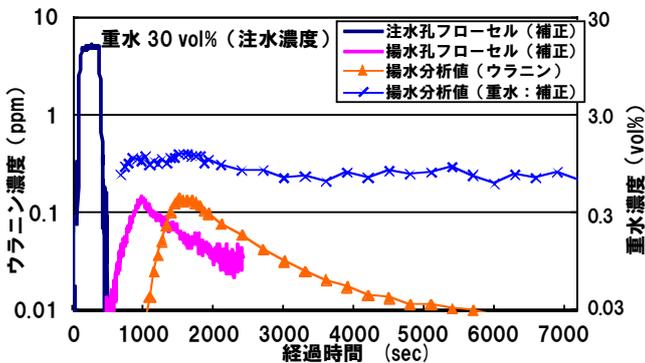
- ・トモグラフィ調査
JAEA: 弾性波
CRIEPI: 比抵抗, 音響
- ・孔内載荷試験
- ・透水試験
- ・間隙水圧計測
- ・水分量計測
- ・A計測
- ・B計測

同一の調査断面で複数のトモグラフィを実施し、長期的なデータを取得中

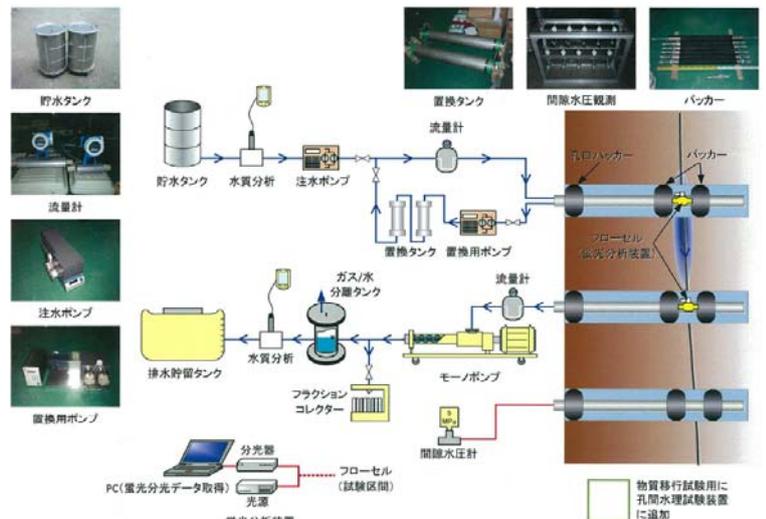
物質移行特性評価技術の開発

既存の孔間水理試験装置にトレーサーの注入・回収機能を付加し、試験機器を開発

- ✓ ガス排出機能の付加によるガス賦存環境への対応
- ✓ ダイポール試験が可能な孔間トレーサー試験装置
- ✓ 原位置フローセルによる孔内蛍光分析機能



ウランと重水素を用いたトレーサー性能確認試験の例



原位置孔間トレーサー試験装置の構成概要

フローセルを用いた原位置分析技術を開発

- ウランの原位置蛍光分析技術の堆積岩への適用性を確認

回収側フローセルの分析値が採水試料の分析値と異なり、フローセル内のマイクロバブルによる蛍光散乱が考えられたが、補正により有効なデータが取得できることを確認した。

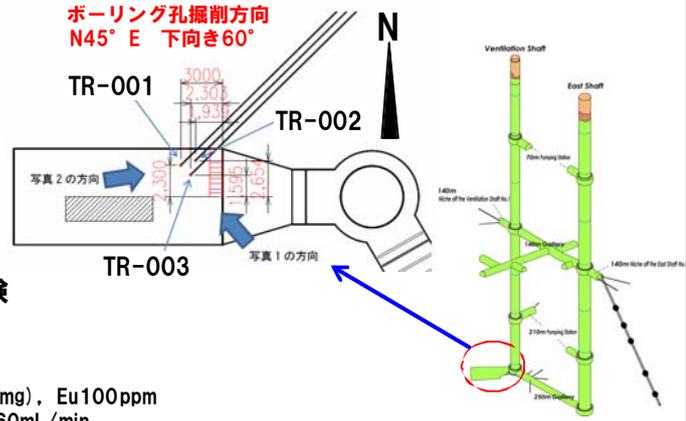
- 水・岩石との反応により蛍光物質の変質が認められたため(約40h以降)、非吸着性トレーサーとして重水素の適用性を確認(吸光光度計による分析)

- ✓ 分析精度(定量下限値)の向上が課題(光路長の増大, 散乱した光の集積など)

物質移行特性評価技術の開発

□ 物質移行試験のボーリング孔配置・仕様、手順の整理 (250m坑道での物質移行試験計画を立案)

- ✓ 孔間トレーサー試験 (ダイポール)
- ✓ 試験対象 (割れ目), ボーリングレイアウト, 試験内容の整理

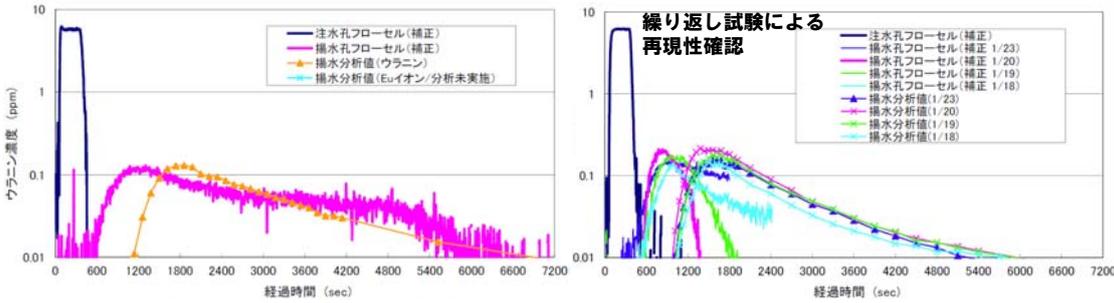


□ 試験機器の適用性確認試験

- 計画立案, ボーリング孔掘削, 検層, 水理試験, トレーサー試験
- 今後, 試験結果を用いた解析により試験の成立性を確認予定

- 使用したトレーサー物質
 - ✓ 非吸着性: ウラニン, 重水素
 - ✓ 陰イオン: ヨウ素
 - ✓ 陽イオン: セシウム, ストロンチウム
 - ✓ 希土類元素: ユーロピウム など

- トレーサー試験条件の一例
 - ✓ 流入量: ウラニン10ppm (5mg), Eu100ppm
 - ✓ 注水/揚水: 60mL/min./60mL/min.
 - ✓ 回収率: 17%, ピーク濃度: 0.13ppm
 - ✓ 試験時間: 約48時間



稚内層の物質移行パラメータに関わる基礎情報を提供し, 350m坑道での試験に反映



処分技術の開発

現状と今後の計画

【第2段階の調査研究】

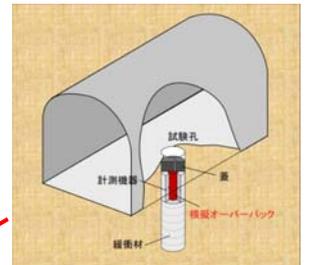
- 低アルカリ性セメントを用いた吹付け施工試験の実施。
 - ◇ 低アルカリ性セメント系材料の**実用性を確認**
 - ◇ 通常のセメント材料と**同様の手順による施工が可能**
- 低アルカリ性グラウト材料を用いた湧水抑制対策 (H24予定)
- 低アルカリ性セメントを用いた覆工コンクリートの施工試験 (H25予定)



吹付け施工状況(140m調査坑道)

【第3段階の調査研究】

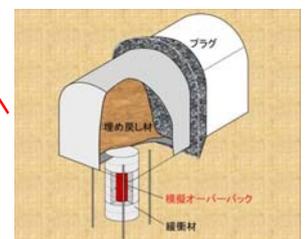
- 低アルカリ性セメント系材料の周辺岩盤・地下水への影響
 - ◇ 施工箇所からのコア及び地下水の採取・分析(継続中)
- 原位置試験(人工バリア性能試験, オーバーパック腐食試験など)
 - ◇ 試験計画の検討(材料の検討など)



オーバーパック腐食試験

成果の取りまとめ

- 第2段階
 - 低アルカリ性セメント系材料の原位置での適用性の提示→第2段階終了時
- 第3段階
 - 低アルカリ性セメント系材料の周辺岩盤・地下水への影響→適時
 - 処分環境における埋戻し前後の人工バリアの経時変化に関する知見→適時
 - 第2次取りまとめで示した工学技術の成立性の実証→第3段階終了時



人工バリア性能試験 27

