

(4) 深地層の研究施設計画に関する 第2期中期計画取りまとめ案について

②個別の成果の取りまとめ案について —c. 地下水の地球化学—

**地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット
幌延深地層研究ユニット**

A1) とりまとめの着眼点(地球化学分野)

A1) 地質環境の初期状態の理解:

地上から地球化学特性(水質, pH, 酸化還元状態)の分布とその形成プロセスを理解するための調査技術, 解析・モデル化技術

➤ 着目した地質環境の特性とプロセス

- 地下水の塩分濃度／水－鉱物反応, 混合, 化石海水の滞留
- 地下水のpH・酸化還元電位／水－鉱物－微生物反応
- 地下水の滞留時間／ピストン流・混合流, 地表水の浸透, 長期滞留

➤ 達成目標

- 地上からの調査で, 化学的に好ましい環境条件の領域を判断できる。

A1) 地質環境の初期状態の理解:

地上から地球化学特性の分布とその形成プロセスを理解するための調査技術, 解析・モデル化技術を整備

➤ 地下水の塩分濃度分布(調査時の必須事項)

- ✓ 水理地質学的コンパートメントがある場合は, 各コンパートメントへ観測区間を配置する。
- ✓ 鉱物組成や水質分布が比較的単純な地質環境では, 数キロメートルの調査解析断面において3本程度のボーリング調査によって水質分布の概要を把握する。
- ✓ 塩水系地下水が分布している場合, 電気・電磁探査により水質の空間分布を補間する。

➤ 地下水のpH・酸化還元電位(調査時の必須事項)

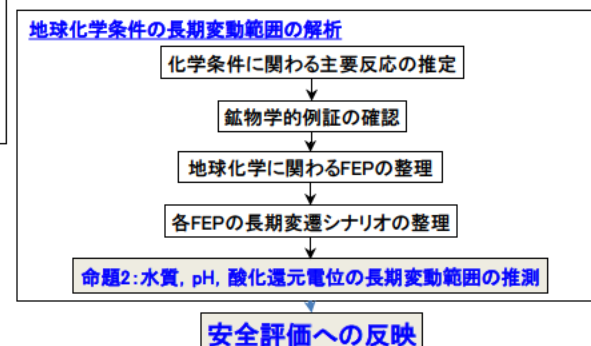
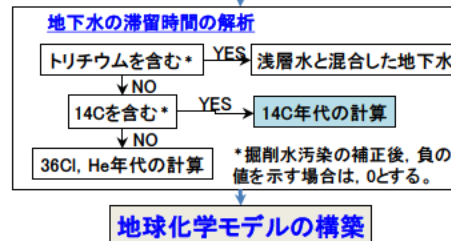
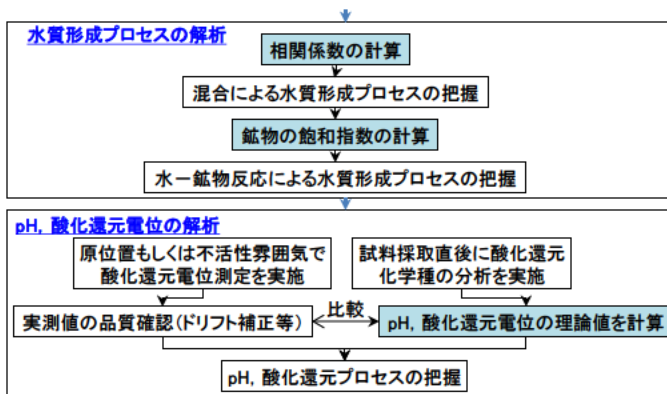
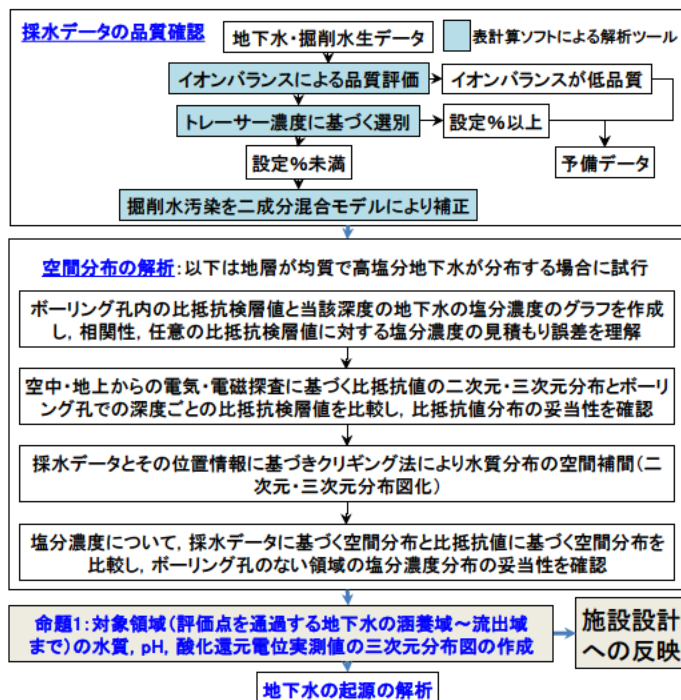
- ✓ ボーリング孔壁に酸化還元電位制限固相となる沈殿物が付着することがあるため, BTVにより孔壁を確認する。地上からの調査は予察的情報に留まるため, 坑道からの調査により補完する。
- ✓ 酸化還元電位の測定電極は応答性が異なるため, 複数電極による測定と熱力学解析に基づく検証をセットで行う(特に, 炭酸塩鉱物, 含鉄・含硫黄鉱物の反応が重要)。

➤ 地下水の滞留時間(調査時の必須事項)

- ✓ ピストン流が想定可能な均質な空隙媒体の堆積岩ではトリチウムや ^{14}C , 海水・古海水があり地下水の長期滞留が予想される環境においては, ^{36}Cl , ^4He , 酸素同位体シフトを指標にする。
- ✓ ピストン流が仮定できない割れ目媒体の花崗岩では, 溶存有機物の ^{14}C やフロンガス濃度を指標にする。

A1) 今後の課題

瑞浪・幌延の知見に基づいて、地球化学特性の三次元分布を把握するための解析・モデル化技術について、汎用的な調査解析手順、手法を提示



調査データの品質確認、空間分布の理解、形成プロセスの把握、地下水滞留時間や鉱物学的手法に基づく長期変遷の推測を順番に行う。

論文・報告書・エキスパートシステムとして整備済み。
 施設閉鎖に関わる知見を地上からの調査へフィードバック

A2) とりまとめの着眼点(地球化学分野)

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

**施設建設・操業時の地球化学擾乱や緩衝プロセスの観測・解析技術
(含事例)を提示**

➤ 着目した地質環境の特性とプロセス

- 地下水の塩分濃度／水圧低下に伴う混合, upconing
- 地下水のpH・酸化還元電位／水圧低下, 大気拡散に伴う変化

➤ 達成目標

- 建設・操業時の排水が排水基準を満たすこと, 長期的排水に伴う化学変化が, 好ましい化学条件を回復不能にしないことを判断できる。

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

施設建設・操業時の地球化学擾乱や緩衝プロセスの観測・解析技術(含事例)を提示

➤ 地下水の塩分濃度(建設に関わる留意点, 操業時に有効な調査)

- ✓ 施設建設時に大量湧水が発生する岩盤では, 操業期間が長いほど周辺の水質は大きく変化する。擾乱を低減するために, 地上からの調査時に割れ目が少なく低透水性の岩盤の分布を評価し, 坑道のレイアウトに反映させる。
- ✓ 建設前に高透水性の水理地質構造に水圧・水質観測孔を設置し, 操業期間を通して観測を行う。長期的なデータ取得, 多変量解析による変化プロセスの把握, 経時変化量に基づく将来予測により, 操業中の中長期的な水質変化を推察する。
- ✓ 大量湧水がある場合は, 操業中に坑道周辺の地下水が浅層水に入れ換わる可能性が高く, トリチウムやフロンガス濃度のモニタリングが指標となる(瑞浪と幌延の比較から, 湧水量の少ない堆積岩においては, 表層水の浸透が起こり難く, 化学的擾乱が小さいことが例示された)。

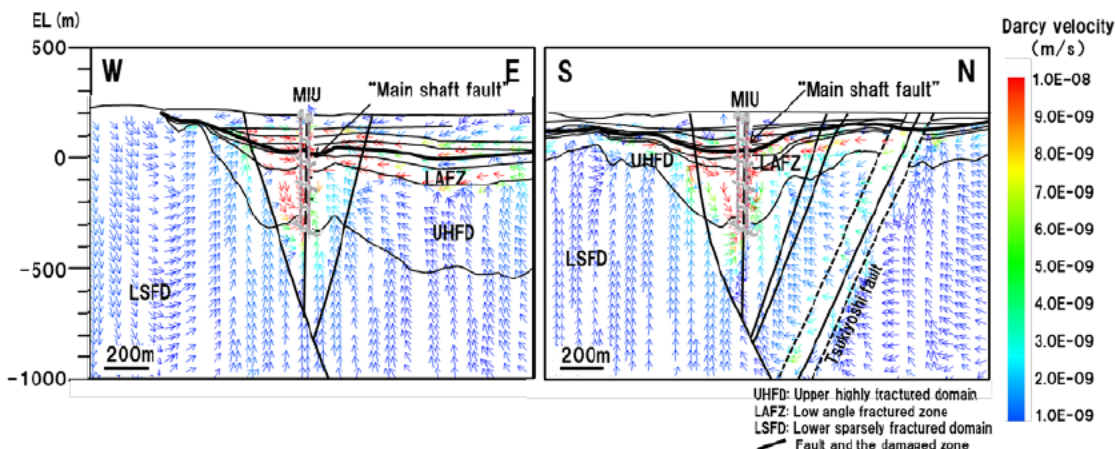
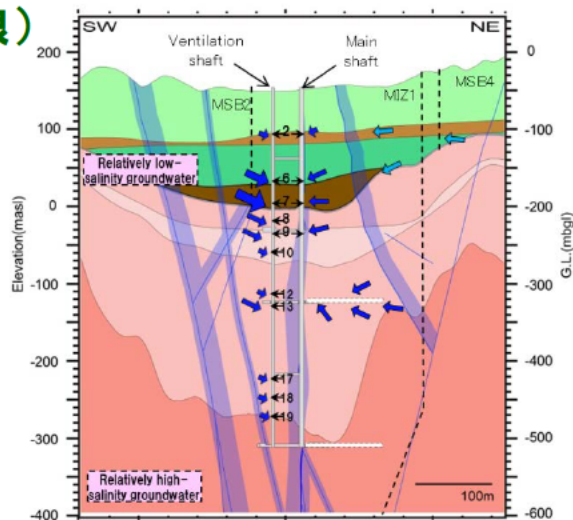
➤ 地下水のpH・酸化還元電位(操業時の現象の理解)

- ✓ 操業中は, 地下水が坑道に湧水している箇所ではセメント材料の影響は小さく, 地下水が坑道に湧出しない条件においては, アルカリ性地下水が長期滞留するため, 施設周辺に化学環境の不均質性が生じる。
- ✓ 有機物に富む堆積岩は, 坑道から酸素が拡散しても, 水—鉱物—微生物反応により, 数日で無酸素状態となる十分な酸化還元緩衝能力を有している。

成果ダイジェスト A2)地質環境の短期変動・回復挙動の理解 —地下施設建設・操業に伴う地球化学特性の変化の観測・解析技術—

施設建設時にコンパートメント毎にモニタリングを実施することで、領域ごとに影響を判断する

(瑞浪)



- 天然バリアとして岩盤の能力を有効利用するためには建設、維持管理期間中に、可能な限り元の水理化学的状態を乱さないように施工、維持管理を行なうことが重要。そのため、地下施設への排水路となり得る高透水性領域の分布を予測した上で施工時に止水を行ない、擾乱の程度を最低限に留めることが不可欠
- 酸化的地下水が深部に涵養し施設周辺が酸化的になる前に坑道を閉鎖し、低下した地下水頭を回復させることを念頭においた、事前解析が必要
- 坑道への湧水を完全止水することは安全管理上困難。湧水に伴う周辺擾乱を低減するためには、割れ目が少なく低透水性の岩盤の分布を地上からの調査時に評価し、坑道のレイアウト計画に反映させることが望ましい。
- 低透水性岩盤では、建設、維持管理期間中に坑道周囲に形成される不飽和領域が、閉鎖後、局所的に残留し、周辺の地質環境特性が不均質化する可能性もある。そのため、坑道閉鎖時に不飽和状態の回復プロセスについて留意する必要がある。

研究所閉鎖時のモニタリングにより実証

A2) 今後の課題

地質環境特性の短期変動・回復挙動

①天然現象による過去～現在までの長期変動

②建設・操業・閉鎖による人為的な短期変動

①>②:地質環境の長期変遷研究に重点を置くべき項目

②>①:坑道周囲の地質環境変化プロセスの研究, モニタリングに重点を置くべき項目

項目		pH		酸化還元状態		水質
主な変化要因		地下水流動に伴う変化	セメント材料に伴う変化	地下水流動に伴う変化	坑道からの物質移動に伴う変化	地下水流動に伴う変化
割れ目媒体	建設・操業時	①>②	②>①	②>① ?	①>②	②>①
	閉鎖後	①>②	②>①	②>① ?	②>① ?	②>① ?
空隙媒体	建設・操業時	①>②	②>①	①>②	①>②	①>②
	閉鎖後	①>②	②>①	①>②	②>① ?	①>②
重要性		変化量が小さいため重要でない	中・長期的な定常状態が不明	割れ目媒体における酸化的地下水の影響が不明	閉鎖後の埋戻し材の影響が不明	閉鎖後の地下水の入れ換わりが不明

堆積岩では相対的に施設建設の影響は小さい

施設建設～閉鎖後の長期モニタリングと坑道閉鎖試験による
人為由来現象の理解が今後の課題

A3) とりまとめの着眼点(地球化学分野)

A2) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

地質学的時間スケールにおける地球化学特性の長期変動幅を推測するための手法を提示

➤ 着目した地質環境の特性とプロセス

- 地下水の塩分濃度／海進・海退, 隆起・浸食, 塩水の洗い出し, 地震
- pH・酸化還元緩衝帯, 鉱物分布／水－鉱物－微生物反応
- 地下水の滞留時間／地下水の入れ替わり, 長期滞留

➤ 達成目標

- 施設閉鎖後, 好ましい化学条件の回復・維持が見込まれることを判断できる

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

地質学的時間スケールにおける地球化学特性の長期変動幅を推測するための手法を提示

➤ 地下水の塩分濃度・滞留時間(長期変動幅を提示する方法)

- ✓ 地球化学プロセスとそれに影響を与えてきた天然事象の相関を時間断面毎に整理することで、過去から現在までの長期変動を推測する。蓋然性の高いプロセスを将来に外挿することにより将来のシナリオ解析を行うとともに、将来の変動幅を推定する。
- ✓ 隆起・浸食速度などを踏まえた将来の天然現象に関わるシナリオ解析により、長期的に好ましい地質環境条件の分布領域(深度)を明示する。
- ✓ 地震時の変動については、その変動が既知の水質の混合範囲内で起こることを提示するため、調査領域の端成分地下水の把握と地震時の変化のモニタリングを行う。

➤ 地下水のpH・酸化還元電位(長期変動幅を提示する方法)

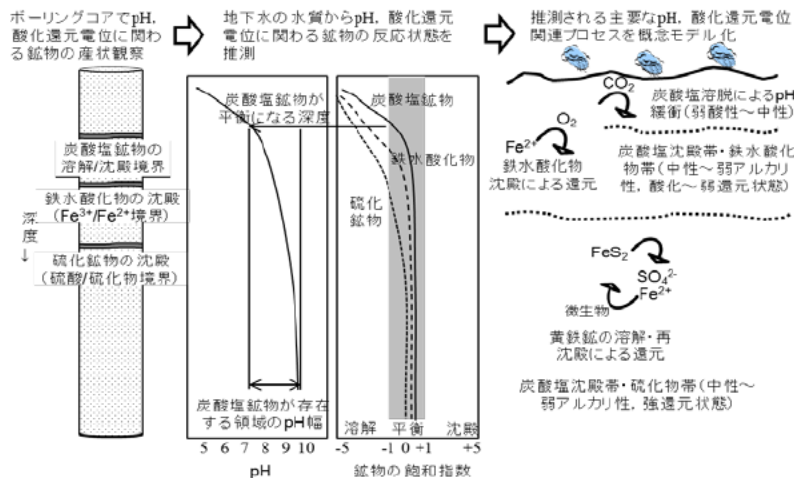
- ✓ 鉱物学的な手法により過去から現在までの長期変動幅を推測する。炭酸塩鉱物の化学・同位体組成、結晶形に基づき、その起源、沈殿年代を同定することでpHの長期安定領域を推察する。
- ✓ 含鉄、含硫黄鉱物の分布に基づき還元環境の長期安定領域を推察する。

以上は、主に地上からの調査段階で提示可能。地震時の変動については、地下施設建設時に水理地質学的コンパートメントを詳細に理解することで、より明確になる。

成果ダイジェスト A3)地質環境の長期変動・回復挙動の理解 —長期的な地球化学特性の変遷の解析・モデル化技術—

従来、調査解析手法がなかった長期的化学特性について、水理地質条件に応じて鉱物学的手法やシナリオ解析手法により、その推測が可能になった

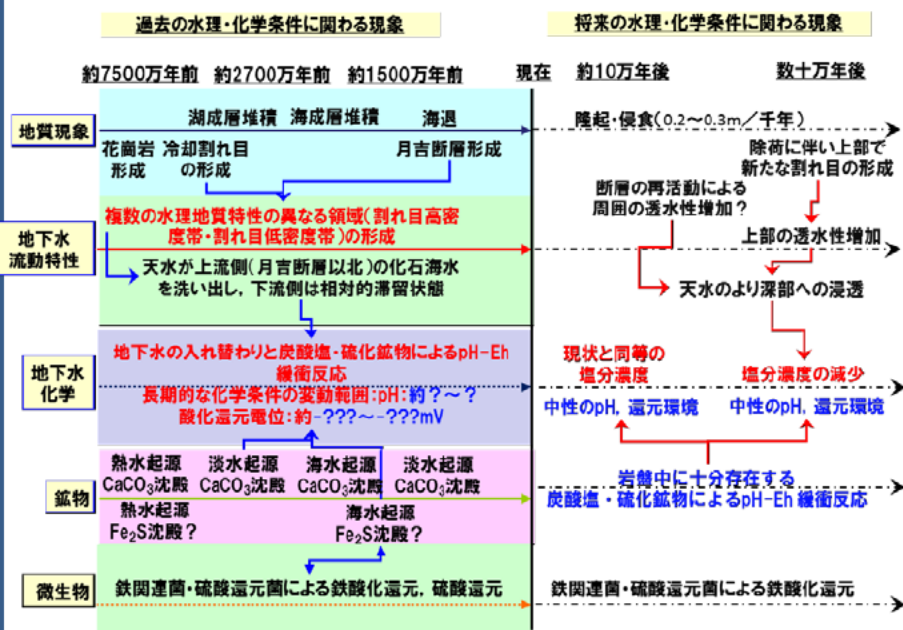
(鉱物学的手法)



➤ 割れ目充填鉱物の三次元分布、結晶構造、同位体、化学的特徴調査により、pH・酸化還元環境の長期変動(長期安定領域)を提示可能

- ・長期pH安定領域:花崗岩では深度約200m以深、堆積岩では深度数十m以深
- ・長期強還元領域:花崗岩では深度約200m以深、堆積岩では深度約30m以深

(シナリオ解析手法)



➤ 将来の地球化学特性変動幅を推測する手法として、シナリオ解析手法を提示

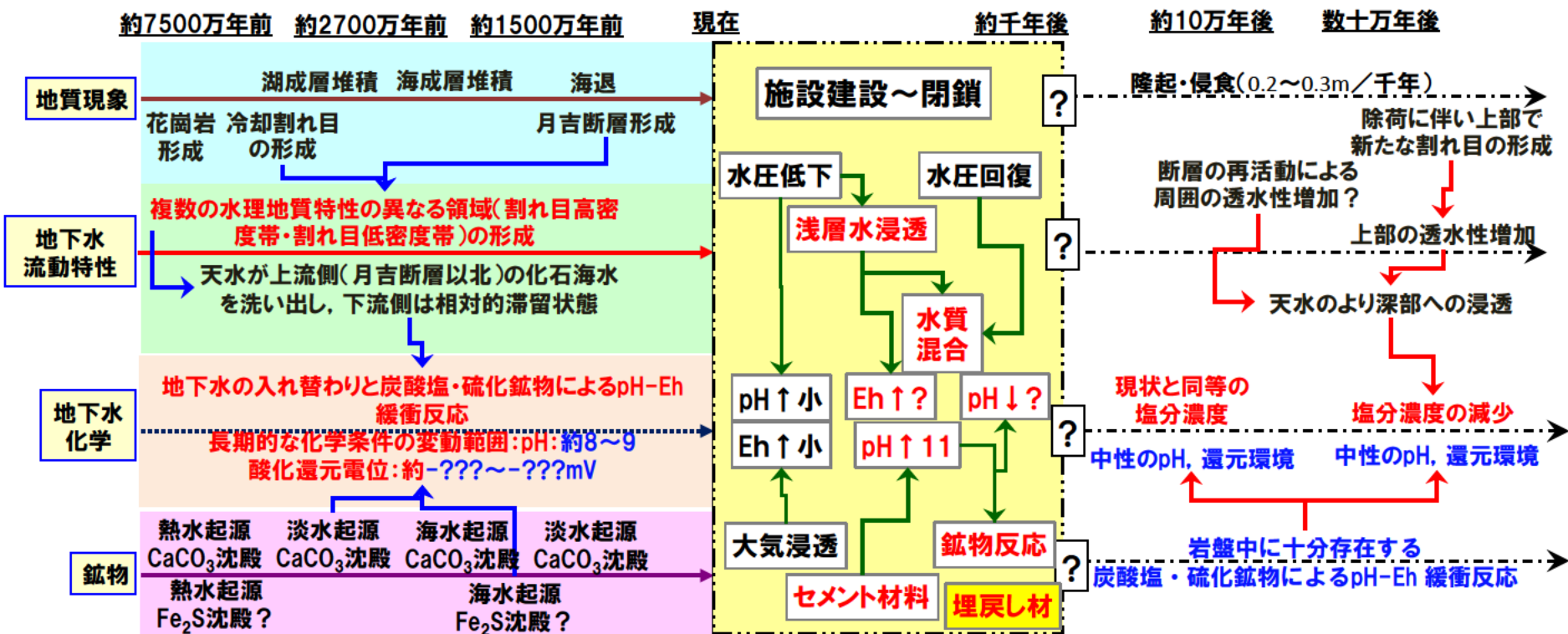
施設閉鎖時後の地球化学特性の変化幅の把握と地質学的時間スケールにおける長期変動幅の比較、安全評価への反映手法の考え方を整理

A3) 今後の課題 地質環境特性の長期変動・回復挙動

過去の水理・化学条件に関わる 天然現象

水理・化学条件に関わる 人為現象

将来の水理・化学条件に関わる 天然現象



施設建設～閉鎖後の人為現象・回復挙動のシナリオ構築
天然現象と人為現象を踏まえた地球化学特性の長期変動幅の推測手法の構築

まとめ

A1) 地質環境の初期状態の理解(サイト選定～処分開始に関する意思決定への反映):

- **施設閉鎖に関わる知見を地上からの調査へフィードバックし、調査技術開発を完了**

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解(処分開始～最終閉鎖に関する意思決定への反映): **坑道閉鎖時のモニタリング技術開発、地球化学特性の回復挙動の理解が必要**

- 坑道閉鎖(埋戻し)後の地質環境特性の回復、定常化過程に関わる知見の蓄積
 - ・ 建設・操業時に浸透した浅層地下水を、坑道閉鎖時に元来の地下水に置換・回復するための手順
 - ・ 浅層地下水が残留した場合の中長期的な地球化学特性の解析技術
 - ・ 坑道・グラウト周辺のpH分布、酸化還元状態の長期変化
- 適切な部分閉鎖(埋戻し)方法について、研究所閉鎖時の施工方法とモニタリングにより実証

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解(処分開始～追加対策に関する意思決定への反映): **施設閉鎖後の地球化学特性の定常状態化・天然事象に伴う変動幅を統合する解析技術の構築が必要**

- 地震後の長期的な水圧変化に応じた水質変動幅の予測と検証
- 施設閉鎖時後の地球化学特性の変化幅の把握、地質学的時間スケールにおける長期変動幅との比較、安全評価への反映の考え方を整理

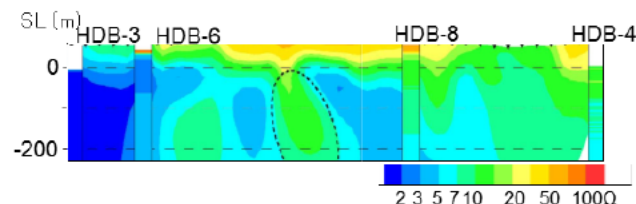
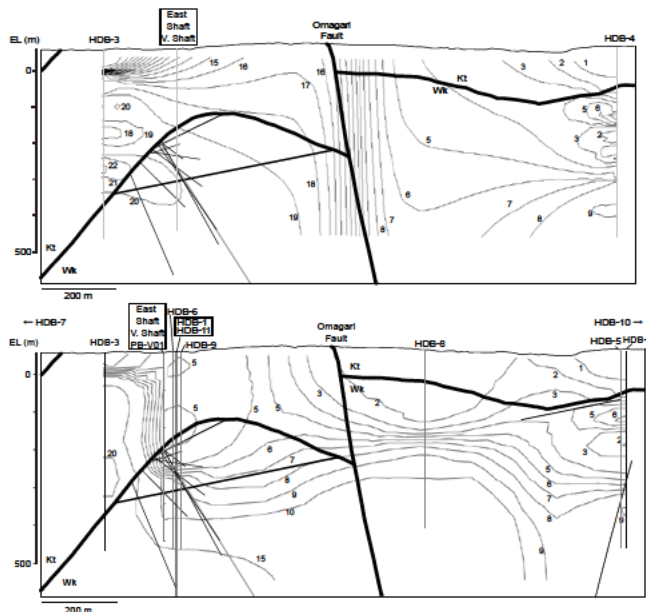
瑞浪における必須の実施項目	幌延における必須の実施項目
坑道閉鎖試験(再冠水・埋戻し)	坑道閉鎖試験(埋戻し)
割れ目媒体における長期モニタリング技術の開発	空隙媒体における長期モニタリング技術の開発

付録

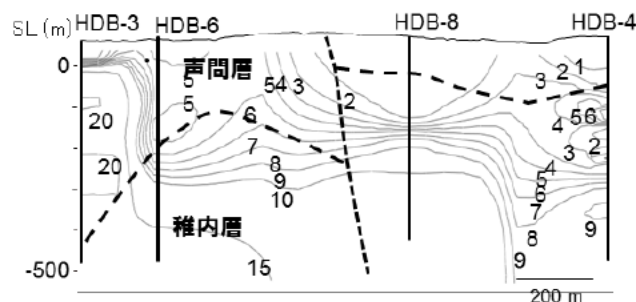
成果ダイジェスト A1)地質環境の初期状態の理解 —地下水の塩分濃度分布を把握するための調査技術—

断層などが少ない条件では、3本程度のボーリング調査と物理探査により水質分布断面を把握可能。塩水系地下水に対しては、比抵抗探査の利用を検討する。

(幌延)



c) 地上における電気探査およびボーリング孔で比抵抗検層(Ω)



d) HDB3, 4, 6, 8孔から推測される塩分濃度分布(g/L)

- 岩盤が均質な鉱物組成を有し、水質分布が主に淡水と塩水の混合により形成されているような比較的単純な岩体では、数キロメートルの調査解析断面において3本程度のボーリング調査によって水質分布の概要を把握できる(断層や割れ目帯が分布する領域では予測不確実性が大きくなるため、不確実性を低減させるためのボーリング調査が別途必要)
- 塩水系地下水が分布している場合、ボーリング調査で得られた一次元情報を比抵抗探査断面を介して二次元・三次元展開し、水質の空間分布を補足できる可能性あり(前提として、地層、岩石の比抵抗特性が均質で、計測された比抵抗値が主に地下水の塩分濃度に依存することが必要)。