# 平成 31 年度

高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業

一岩盤中地下水流動評価技術高度化開発-

## 報告書

## 令和2年3月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 一般財団法人電力中央研究所

# 目次

1.	はじめに	1-1
	1.1 背景と目的	1-1
	1.2 事業の全体概要	1-3
2.	2019 年度の実施概要	2-1
	2.1 内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化	2-1
	2.1.1 地下水流動・物質移行解析技術の高度化〈実施者:電力中央研究所〉	2-1
	2.1.2 地下水年代測定技術の高度化〈実施者:電力中央研究所〉	2-1
	2.2 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための提	支術
	の高度化	2-2
	2.2.1 地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築	2-2
	2.2.2 地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備	
	〈実施者:日本原子力研究開発機構〉	2-3
	2.2.3 概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案	
	〈実施者:日本原子力研究開発機構〉	2-4
	2.3 水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化	2-5
	2.3.1 水みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化	
	〈実施者:電力中央研究所〉	2-5
	2.3.2 亀裂性岩盤の透水不均質性評価〈実施者:日本原子力研究開発機構〉	2-7
	2.4 研究成果の統合	2-8
	2.5 地質環境特性調査に関する研修2	-11
3.	内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化	3-1
	3.1 地下水流動・物質移行解析技術の高度化	3-1
	3.1.1 背景と目的	3-1
	3.1.2 逆解析手法および推定誤差の計算方法	3-2
	3.1.3 全水頭および <sup>4</sup> He 年代の実測値を使用した透水係数の校正	3-4
	3.1.4 まとめ	-13
	3.1.5 参考文献	-14
	3.2 地下水年代測定技術の高度化	-16
	3.2.1 背景と目的	-16
	3.2.2 新しい地下水年代評価手法の整備と高度化	-17
	3.2.3 瑞浪深地層研究所での地下水採取と評価3	-36
	3.2.4 瑞浪広域における井戸からの地下水採取と評価 3	-42
	3.2.5 参考文献	-48
4.	内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための打	支術
	の高度化	4-1
	4.1 背景と目的	4-1
	4.2 アプローチ	4-1
	4.3 地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築	4-5

	4.3.1	既存のボーリング検層データの再整理	. 4-8
	4.3.2	既存物理探査データの再整理	4-21
	4.3.3	既存データ(ボーリング検層・物理探査)の再整理を踏まえた再評価	4-32
	4.3.4	地下水の同位体比に着目した古水理地質学的指標の開発	4-37
	4.4 地	下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備	4-51
	4.4.1	広域地下水流動評価における透水不均質性の取扱いに関わる検討	4-51
	4.4.2	広域地下水流動のモデル化・解析手法の改良	4-59
	4.5 概	要調査における調査・モデル化・解析手法の提案4	-100
	4.5.1	地上からの各種調査から取得されるデータを統合した地下深部の低流動域の	評価
		に係る現状と課題4	-101
	4.5.2	低流動域の分布評価を補完する上での地下水流動評価の利用に係る現状と課題	Ī
			-102
5.	水みち	の水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化	. 5-1
	5.1 水	みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化	. 5-1
	5.1.1	水みちの検出技術の高度化	. 5-2
	5.1.2	水みちの微細透水構造・物質移動モデルの構築5	-101
	5.1.3	水みちのネットワークによる物質移動予測手法の高度化5	-174
	5.2 亀	裂性岩盤の透水不均質性の評価5	-188
	5.2.1	背景と目的5	-188
	5.2.2	アプローチ	-189
	5.2.3	実施結果5	-191
	5.2.4	まとめ5	-222
6.	まとめ		. 6-1
	6.1 内	陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化	. 6-1
	6.1.1	地下水流動・物質移行解析技術の高度化	. 6-1
	6.1.2	地下水年代測定技術の高度化	. 6-1
	6.2 内	陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための	技術
	の	高度化	. 6-1
	6.2.1	地下深部の低流動領域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構	築
			. 6-1
	6.2.2	地下深部の低流動領域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整	備
			. 6-2
	6.2.3	概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案	. 6-3
	6.3 水	みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化	. 6-3
	6.3.1	水みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化	. 6 <b>-</b> 3
	6.3.2	亀裂性岩盤の透水不均質性の評価	. 6-4

义	1.1-1	広域を対象とした地下水流動の調査・解析の流れ1	-1
义	1.1-2	本事業で取り組む地下水流動解析のフロー1	-2
义	1.2 - 1	事業の全体概要1	-3
図	2.4-1	研究成果の統合イメージ(瑞浪)	-9
义	2.4-2	個別の研究開発項目からのアウトプット(瑞浪)2	-9
义	2.4-3	研究成果の統合イメージ(幌延)	10
义	2.4-4	個別の研究開発項目からのアウトプット(幌延)2-1	10
义	3.1 - 1	地下水シナリオの概念図	-1
义	3.1 - 2	地下水年代を考慮した地下水モデルの評価フロー	-2
义	3.1-3	逆解析の手順	-4
义	3.1-4	地下水流動の概念モデル3	-5
义	3.1 - 5	地下水年代の概念モデル3	-5
义	3.1-6	解析モデル3	-6
义	3.1-7	地下水流動の境界条件	-7
义	3.1-8	<sup>4</sup> He 濃度の境界条件	-7
义	3.1-9	全水頭の実測値(標高0mを基準)3	-8
义	3.1-10	<sup>4</sup> He 年代の実測値3	-8
义	3.1-11	実測値を取得したボーリング孔の位置3	-8
义	3.1 - 12	データセット1・2・5における全水頭による透水係数の校正値と推定誤差.3-1	10
义	3.1-13	データセット3・4・5における全水頭による透水係数の校正値と推定誤差.3-1	10
义	3.1-14	データセット 1・2・5 における校正結果での実測値と解析値の比較(全水頭	)
			11
义	3.1-15	データセット 3・4・5 における校正結果での実測値と解析値の比較(全水頭	)
	•••••		11
义	3.1-16	データセット1・2・5における 4He 年代による透水係数の校正値と推定誤差	
			12
义	3.1-17	データセット3・4・5における <sup>4</sup> He 年代による透水係数の校正値と推定誤差	
			12
义	3.1-18	データセット1・2・5における校正結果での実測値と解析値の比較(4He年代	£)
			13
义	3.1-19	データセット3・4・5における校正結果での実測値と解析値の比較(4He年代	£)
			13
义	3.2 - 1	地下水年代測定法の種類と評価時間スケール3-1	16
図	3.2-2	中空糸膜法による地下水中のガス分離3-1	18
义	3.2 - 3	真空脱気による地下水中のガス抽出システム	18
义	3.2-4	主要ガス分析	19
义	3.2 - 5	Hollow fiber 法および真空脱ガス法による希ガスの抽出率3-1	19
図	3.2-6	<sup>129</sup> Iにより推測された若い地下水流入マップ	22
义	3.2-7	14Cを2回分析した場合の1回目と2回目の差異	23
図	3.2-8	サンプリング条件と <sup>14</sup> Cの関係	25
図	3.2-9	涵養温度と溶解度の関係	27
义	3.2 - 10	推定誤差評価方法の概念図	28

図目次

义	3.2 - 11	涵養温度推定方法による推定誤差の変化	3-30
叉	3.2-12	最適な膜の材質確認試験のための試験系	3-32
叉	3.2-13	フィルタ内圧力と時間の関係(フィルタ材質依存性)	3 <b>-</b> 33
义	3.2-14	フィルタ内圧力の経時変化の圧力依存性	3 <b>-</b> 33
义	3.2-15	フィルタ内圧力の経時変化の塩分濃度依存性	3 <b>-</b> 34
义	3.2-16	<sup>14</sup> Cの値とサンプリング-分析におけるばらつきの関係	3 <b>-</b> 41
义	3.2 - 17	サンプルを採取した井戸の位置	3 <b>-</b> 43
义	3.2-18	ガス化法と沈殿法で評価された <sup>14</sup> C の値の比較	3 <b>-</b> 44
义	4.2-1	個別の研究開発項目とアウトプット	4-2
义	4.2-2	地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の	の構築に
	係わる	る検討フロー	4-2
义	4.2-3	地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の	の整備に
	係わる	る検討フロー	4 <b>-</b> 3
义	4.2-4	概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案に係わる検討フロー.	4-4
义	4.3 <b>-</b> 1	幌延における地上からの調査段階で実施された調査のイメージ	4 <b>-</b> 6
义	4.3-2	地下深部の低流動域を地上からの調査により把握する場合の評価例	4-6
义	4.3-3	幌延における地下水の特徴(化石海水分布の特徴)	4-7
义	4.3-4	空間分布の補間手順 (a) 塩濃度の空間分布の補間方法 (岩月ほか, 2012)	、(b) そ
	の他の	Dパラメータの空間分布の補間方法	4-9
义	4.3-5	HDB6 孔における等価 NaCl 濃度の推定値と実測値の比較例	4-10
义	4.3-6	各ボーリング孔の空隙率の深度分布	4 <b>-</b> 13
义	4.3-7	各ボーリング孔の空隙率の深度分布	4 <b>-</b> 14
义	4.3-8	等価 NaCl 濃度の計算結果	4-15
义	4.3-9	等価 NaCl 濃度の計算結果	4-16
义	4.3-10	推定値と実測値の比	4-17
义	4.3-11	推定値と実測値の比	4-18
义	4.3-12	間隙水中の Na+と Cl のモル分率の和と推定値と実測値の差の関係図	4-19
义	4.3-13	側線位置図 左下の図は側線1と2周辺の拡大図	4-22
义	4.3-14	解析フローチャート	4 <b>-</b> 24
义	4.3-15	FEM メッシュ図	4 <b>-</b> 24
义	4.3-16	測線1および2の断面におけるグリッド図	4-25
义	4.3-17	電位減衰曲線 測線1(上)と測線2(下)	4-25
义	4.3-18	測線1における全データ(上)と誤差プロット(中)および不良データ	削除後の
	データ	タプロット(下)	4-26
义	4.3-19	測線2における全データ(上)と誤差プロット(中)および不良データ	削除後の
	データ	タプロット(下)	4-27
义	4.3-20	測線1と2における解析結果の断面図	4-28
义	4.3-21	二次元解析結果と各ボーリング孔における比抵抗検層値との比較	4-29
义	4.3-22	三次元解析結果と各ボーリング孔における比抵抗検層値との差	4-30
义	4.3-23	測線1と2におけるボーリング調査時の比抵抗検層値を拘束条件とし	て与えた
	解析統	結果の断面図	4 <b>-</b> 31
义	4.3-24	間引いた比抵抗検層結果を用いたクリギング結果(側線 1)	4 <b>-</b> 34
义	4.3 - 25	クリギングによる推定誤差分布図(側線 1)	4-34

义	4.3-26	コア試料からの圧縮抽出水の塩化物イオン濃度分析結果を用いたクリギン	/ グ結
	果		.4-35
义	4.3-27	コア試料からの圧縮抽出水の水質分析結果を用いたクリギング結果	. 4-35
义	4.3-28	コア試料からの圧縮抽出水の水質分析結果を用いたクリギング結果	. 4-36
义	4.3-29	幌延地区における水素酸素同位体比の分布(JAEA, 2012)	. 4-37
义	4.3-30	幌延深地層研究センターでの Cl 濃度分布と拡散場・ <sup>81</sup> Kr 年代測定法の概念	家図
			.4-38
义	4.3-31	Cl 濃度と δD の関係(左は全体、右は PB-01 を抜粋)	. 4-39
义	4.3 - 32	拡散試験による低濃度タンクでの Cl 濃度と δD の変化と δ <sup>37</sup> Cl の分別	. 4-40
义	4.3-33	SAB02 における Cl と δ <sup>37</sup> Cl の調査結果	. 4-41
义	4.3-34	SAB02 における δD・δ <sup>18</sup> O の再調査結果	. 4-41
义	4.3 - 35	SAB02の再調査結果における Cl と δD の関係	. 4-42
义	4.3-36	Cl と δD の拡散が影響するシナリオ	. 4-42
义	4.3-37	各シナリオでの Cl と δD、δ <sup>37</sup> Cl の分布結果	. 4-43
义	4.3-38	Krとメタンの温度による分離試験、試験系の概念図	. 4-44
义	4.3-39	メタンの燃焼試験、試験系の概念図	. 4-45
义	4.3-40	メタンの燃焼試験における反応管温度と反応管通過後のメタン濃度	. 4-45
义	4.3-41	hollow fiber 法(HF)と水上置換法(WD)による <sup>81</sup> Kr 濃度の比較	. 4-48
义	4.3-42	Cl 濃度と天水の涵養年代の深度プロファイル	. 4-48
义	4.4-1	稚内層に分布する断層	. 4-52
义	4.4-2	水理解析の概要	. 4-54
义	4.4-3	モデルサイズと等価透水係数の関係	. 4-56
义	4.4-4	200m の場合のダムケラー数分布	. 4-57
义	4.4-5	東西方向におけるダムケラー数分布	. 4-57
义	4.4-6	モデル化・解析領域	. 4-61
义	4.4-7	地形・地質構造モデル(三次元分布)	. 4-62
义	4.4-8	地層の三次元分割格子	. 4 <b>-</b> 63
义	4.4-9	断層の三次元分割格子	. 4 <b>-</b> 63
义	4.4-10	解析結果断面位置(現在の地質モデルにおける地表面の地質分布)	. 4-71
义	4.4-11	動水勾配分布の断面図の比較	.4-72
义	4.4-12	標高-1,000 m における動水勾配分布の平面図の比較	. 4-73
义	4.4-13	移行時間分布の断面図の比較	. 4-73
义	4.4-14	標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較	. 4-74
义	4.4-15	動水勾配分布の断面図の比較	. 4-75
义	4.4-16	標高-1,000 m における動水勾配分布の平面図の比較	. 4-75
义	4.4-17	移行時間分布の断面図の比較	.4-76
义	4.4-18	標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較	. 4-76
义	4.4-19	動水勾配分布の断面図の比較	. 4-77
义	4.4-20	標高-1,000 m における動水勾配分布の平面図の比較	. 4-78
义	4.4-21	移行時間分布の断面図の比較	. 4-78
义	4.4-22	標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較	. 4-79
义	4.4-23	動水勾配分布の断面図の比較	. 4-81
义	4.4-24	標高 <b>-1,000 m</b> における動水勾配分布の平面図の比較	. 4-82

义	4.4-25	移行時間分布の断面図の比較	4-83
义	4.4-26	標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較	4-84
义	4.4-27	動水勾配分布の断面図の比較	4-85
义	4.4-28	各孔における間隙水中の 8 <sup>2</sup> H と Cl 濃度、深度の関係図	4-90
义	4.4-29	各孔における間隙水中の δ <sup>18</sup> O と Cl·濃度、深度の関係図	4-91
义	4.4-30	各孔における間隙水中の <sup>62</sup> H と <sup>618</sup> O、深度の関係図	4-92
义	4.4-31	幌延地域における地表水および地下水(間隙水)などの酸素・水素同位体組	成図
			4-92
义	4.4-32	モデル化領域および地形概況	4-93
义	4.4-33	ケース1の解析結果 (a)初期状態、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年	4-95
义	4.4-34	ケース2の解析結果 (a)初期状態、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年	4-95
义	4.4-35	ケース3の解析結果 (a)1000 年、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年	4-96
义	4.4-36	ケース4の解析結果 (a)初期状態、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年	4-96
义	4.4-37	黄鉄鉱・炭酸塩を指標とした天水影響領域(甲斐・前川(2008)を基に作図)	
	•••••		4-97
义	4.5-1	幌延深地層研究センター周辺における電気・電磁探査データの測定位置4	-102
义	$5.1 \cdot 1$	亀裂性岩盤内での地下水溶存物質の移動イメージ	5-1
义	5.1 - 2	割れ目分布を考慮した解析モデルのイメージ	5-2
义	5.1 - 3	深度 300m ボーリング横坑構造図(左)、瑞浪超深地層研究所概要(右)	5-3
义	5.1-4	調査工の施工フロー	5-4
义	5.1 - 5	位置出し測量のための座標点(左)、測量状況(右)	5-5
义	5.1-6	深度 300m ボーリング横坑(上)、予備ステージ(下)での資機材仮設状況	5-6
义	5.1-7	分光蛍光光度計	5-6
义	5.1-8	一段目掘削の手順	5-8
义	5.1 - 9	孔口装置模式図	5-8
义	5.1-10	コア表面への基準線の記入例	5-9
义	5.1 - 11	コア撮影用の架台	5-9
义	5.1 - 12	キャリパー検層の測定概念図	5-10
义	5.1-13	高精度孔曲がり検層のシステム概念図	5-11
义	5.1-14	フローメータ検層の測定概念図	5-12
义	5.1 - 15	スポンジパッカーを用いた流速測定の概念図	5-12
义	5.1-16	水理試験装置の設置概念図	5-13
义	$5.1 \cdot 17$	フィックスエンドパッカー(遮水有効長:1.4m)	5-14
义	5.1-18	各測定・試験時の装置概念図	5-14
义	5.1-19	Log(t)-s 曲線(左)、Derivative Plot(右)の例	5-15
义	5.1 - 20	Log(tp・Δt/(tp+Δt))-Sr 曲線(左)、Derivative Plot(右)の例	5-16
义	5.1-21	水理試験中の差圧測定の概念図	5-17
义	5.1 - 22	BIP-V システム模式図	5-18
义	5.1 - 23	面構造の走向傾斜の解析ルーチン	5-18
义	5.1-24	幅の計測結果の例	5-20
义	5.1 - 25	詳細観察シートの例	5-20
义	5.1 - 26	音響トモグラフィの計測概念	5-21
义	5.1 - 27	擬似ランダム波の原理とメリット	5-22

义	5.1 - 28	データ取得のフロー(音響トモグラフィ)	5-22
义	5.1 - 29	計測機器の外観(音響トモグラフィ)	5-23
义	5.1 - 30	発振器(左)と受振器(右)(音響トモグラフィ)	5-23
义	$5.1 \cdot 31$	音響トモグラフィにおける取得データの例(発振:18MI63号孔;深度35.25	m,
	受振孔	:18MI64 号孔)	5-23
义	5.1 - 32	3D-HD トモグラフィの解析フロー	5-25
义	5.1 - 33	取得波形(左)と走時の自動読み取りおよび不確実性の付与(右)の例	5-26
义	5.1 - 34	S/N 比が低いデータに対する自動走時読み取りの例	5-26
义	5.1 - 35	読み取り走時と走時読み取り不確実性のプロット例(発振 19MI66 号孔、	受振
	18MI6	3 号孔における例)	5-27
义	5.1 - 36	高い不確実性データを削除後の読み取り走時と走時読み取り不確実性のプ	ロッ
	ト例(	発振 19MI66 号孔、受振 18MI63 号孔における例)	5-27
义	5.1 - 37	VSP 探査の概念(左)と解析結果例(右)	5-28
义	5.1 - 38	データ取得のフロー(VSP 探査)	5-29
义	5.1 - 39	受振点-起振点配置図(VSP 探查)	5-29
义	5.1-40	取得波形の例(VSP 探査)	5-30
义	5.1-41	解析フロー (VSP 探査)	5-32
义	5.1-42	バンドパスフィルタの適用例(左)、初動波形ミュートの適用例(右)	5-32
义	5.1 - 43	メディアンフィルタの適用例	5-32
义	5.1-44	三次元波形計算に用いた速度モデル	5-33
义	5.1 - 45	三次元波形計算により求められた波形(左)と反射波(右)の例	5-33
义	5.1-46	受振波形から抽出した反射波の例	5-34
义	5.1-47	間隙水圧モニタリング計測で使用したパッカー、ロッド一式	5-34
义	5.1-48	トレーサー試験装置の全体構成	5-36
义	5.1 - 49	集合配管	5-37
义	5.1 - 50	蛍光濃度測定の概念	5-37
义	5.1 - 51	(上左)高出力タイプ LED 光源、(上右)分光器、(下)蛍光濃度センサー (Ver.3	.1)
	••••••		5-38
义	5.1 - 52	孔間トレーサー試験の配管模式図	5-40
义	5.1 - 53	19MI66 号孔のケーシング編成	5-41
义	5.1 - 54	19MI66 号孔 アミノG酸の濃度変化(左)、掘削時の湧水量(右)	5-42
义	5.1 - 55	19MI66 号孔 変質の程度、割れ目充填物の分布	5-43
义	5.1 - 56	19MI66 号孔 長石類の色調の違い	5-43
义	5.1 - 57	19MI66 号孔 長石類の溶脱(左:14.45mabh 付近、右:19.90mabh 付近)	
			5-44
义	5.1 - 58	19MI66 号孔 割れ目沿いの変質(左:8.70mabh 付近、右:11.20mabh 付:	近)
	•••••		5-44
义	5.1 - 59	19MI66 号孔 絹雲母が挟在する割れ目(左:9.46mabh 付近、右 11.91mab	h 付
	近)		5-45
义	5.1-60	19MI66 号孔 緑泥石が付着する割れ目(7.37mabh 付近:粘土・方解石が共	(存)
	••••••		5-45
义	5.1-61	19MI66 号孔 方解石が挟在する割れ目(25.17mabh 付近)	5-46
义	5.1-62	19MI66 号孔 粘土が充填する割れ目(7.37mabh)	5-46

义	5.1 - 63	19MI66 号孔 各角度の割れ目密度分布、岩盤区分、RQD	. 5-48
义	5.1-64	19MI66 号孔のキャリパー検層結果	. 5-49
义	5.1-65	ボーリング孔跡図(計画と実績)	. 5-50
义	5.1-66	19MI66 号孔 水平方向の孔跡位置(実績)	. 5-51
义	5.1-67	19MI66 号孔 上下方向の孔跡位置(実績)	. 5-51
义	5.1-68	19MI66 号孔 フローメータ検層結果	. 5-52
义	5.1-69	フローメータ検層結果(左:18MI63 号孔、右:18MI64 号孔)	. 5-52
义	5.1-70	19MI66 号孔 2.6m 区間長の湧水量測定結果	. 5-53
义	5.1-71	試験対象区間 27.47mabh~孔底の湧水量測定深度と割れ目分布①~③	. 5-54
义	5.1-72	試験対象区間 27.47mabh~孔底の湧水量測定深度と割れ目分布④~⑤	. 5-55
义	5.1 - 73	試験対象区間 22.27~27.47mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑥	. 5-55
义	5.1-74	試験対象区間 19.67~22.27mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑦	. 5-56
义	5.1-75	試験対象区間 11.87~17.07mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑧	. 5-56
义	5.1-76	試験対象区間 36.0mabh 以深の湧水量測定深度と割れ目分布①~②	. 5-57
义	5.1-77	試験対象区間 26.0~29.0mabh の湧水量測定深度と割れ目分布③	. 5-58
义	5.1-78	試験対象区間 26.0~29.0mabh の湧水量測定深度と割れ目分布④~⑤	. 5-58
义	5.1-79	試験対象区間 31.5~32.5mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑥	. 5-59
义	5.1-80	試験対象区間 22.0mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布⑦	. 5-59
义	5.1-81	ボーリング横坑東側のボーリング孔3孔の水理試験結果	. 5-62
义	5.1-82	ボーリング横坑東側ステレオネット	. 5-64
义	5.1 - 83	割れ目総数における割れ目、開口割れ目の割合と割れ目傾斜の占有率	. 5-64
义	5.1-84	高傾斜割れ目総数における割れ目開口率の割合と割れ目方向の占有率	. 5-65
义	5.1-85	三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(三次元表示)	. 5-66
义	5.1-86	三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(18MI63 号孔-18MI	64 号
	孔間の	二次元表示)	. 5-67
义	5.1-87	三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(18MI63 号孔-19MI	66号
	孔間の	二次元表示)	. 5-67
义	5.1-88	三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(18MI64 号孔-19MI	66号
	孔間の	二次元表示)	. 5-67
义	5.1-89	三次元弾性波トモグラフィにおける低速度帯の分布(18MI63 号孔-18MI	64 号
	孔間の	二次元断面上において、5,000m/s を下回る領域を黒枠で示している)	. 5-68
义	5.1 - 90	電磁フローメータ検層と三次元弾性波トモグラフィの統合解釈図	. 5-68
义	5.1 - 91	VSP 探查結果図(三次元表示)	. 5-69
义	5.1 - 92	VSP 探査結果図(18MI63 号孔-18MI64 号孔間の二次元表示)	. 5-69
义	5.1 - 93	<b>VSP</b> 探査結果の解釈図	. 5-70
义	5.1 - 94	三次元弾性波トモグラフィと VSP 探査結果との重ね合わせ図	. 5-71
义	5.1 - 95	探査結果と湧水箇所との比較	. 5-71
义	5.1 - 96	19MI66 号孔 間隙水圧モニタリング装置の編成	. 5-72
义	5.1 - 97	間隙水圧の計測状況	. 5-73
义	5.1 - 98	自区間からの揚水による他区間の圧力変化(上左:18MI63 号孔区間圧力、	上右:
	18MI6	4 号孔区間圧力、下:19MI66 号孔区間圧力)	. 5-74
义	5.1 - 99	自区間からの揚水による他区間の水位低下量	. 5-74
义	5.1 - 100	孔間の水圧応答結果	. 5-75

义	5.1 - 101	蛍光濃度センサー(Ver.3.1)の検量線(左:C1、右:C2)	5-76
义	$5.1 \cdot 102$	水頭差測定の時系列変化	5-77
义	$5.1 \cdot 103$	予備試験の試験条件と配管構成	5-78
义	$5.1 \cdot 104$	孔間トレーサー試験の注入・揚水の配置	5-80
叉	$5.1 \cdot 105$	19W6663T1の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-81
义	$5.1 \cdot 106$	19W6366T2の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-82
义	5.1 - 107	19W6663T4の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-83
义	5.1 - 108	19W6663T5の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-84
义	5.1 - 109	19W6366T6のの破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-85
义	5.1 - 110	19W6366T7の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-86
义	5.1 - 111	19W6366T8の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-87
义	$5.1 \cdot 112$	19W6366T9の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-88
义	$5.1 \cdot 113$	19W6664T10の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-89
义	$5.1 \cdot 114$	19W6663TS1の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)	5-90
义	$5.1 \cdot 115$	ボーリング横坑東側での孔間トレーサー試験の破過曲線	5-91
义	$5.1 \cdot 116$	揚水位置におけるトレーサー濃度のピーク時間の簡易的解釈	5-92
义	5.1 - 117	19MI66 号孔 水みち割れ目の特徴(左:28.4m付近、右:28.9m付近)	5-94
义	5.1 - 118	18MI63 号孔の割れ目模式図(26.0~29.5mabh)	5-94
义	5.1 - 119	18MI63 号孔 水みち割れ目の特徴(左: 26.5m付近、右: 36.5m付近)	5 - 95
义	$5.1 \cdot 120$	ボーリング横坑東側の AVTD 図(高角度割れ目: dip≧60)	5-96
义	5.1 - 121	ボーリング横坑東側で遭遇しやすい割れ目方位・傾斜(赤:NE 走向、青	: NW
	走向).		5-96
义	$5.1 \cdot 122$	ボーリング横坑東側の AVTD 図(水平割れ目 : dip<30)	5-97
义	$5.1 \cdot 123$	弾性波探査結果と高角度割れ目の方向分布の対比	5-98
义	$5.1 \cdot 124$	水圧応答と高角度割れ目の方向分布との対比	5-98
义	$5.1 \cdot 125$	X線CT画像の360°展開表示画像	5-103
义	$5.1 \cdot 126$	17MI61 号孔におけるレジン充填割れ目の X 線 CT 画像	5-143
义	$5.1 \cdot 127$	17MI62 号孔におけるレジン充填割れ目の X 線 CT 画像	5-144
义	$5.1 \cdot 128$	17MI61 号孔におけるレジン充填割れ目の研削面画像	5-146
义	$5.1 \cdot 129$	17MI62 号孔におけるレジン充填割れ目の研削面画像	5-146
义	$5.1 \cdot 130$	割れ目面に直交する方向から見た研削面画像	5-147
义	5.1 - 131	研削面画像の 360°展開表示画像	5-149
义	5.1 - 132	レジン充填割れ目の分布(平面図)	5-150
义	5.1 - 133	レジン充填割れ目の分布(断面図)	5-151
义	$5.1 \cdot 134$	ディスク状岩石の加工の様子	5-153
义	$5.1 \cdot 135$	拡散試験に用いるディスク状岩石試料の模式図	5-153
义	$5.1 \cdot 136$	ディスク状岩石試料の表面のトポグラフィー測定	5-154
义	$5.1 \cdot 137$	岩石薄片によるモード測定の範囲	5-154
义	5.1 - 138	岩石薄片によるモード測定結果	5-155
义	$5.1 \cdot 139$	水銀ポロシメータ測定用試料のサイズ	5-156
义	$5.1 \cdot 140$	拡散試験セルの様子	5-156
义	$5.1 \cdot 141$	割れ目面からの距離に応じた実効拡散係数の比較	5-158
义	5.1 - 142	粉末収着バッチ試験で用いる試料の例	5-159

义	$5.1 \cdot 143$	岩石粉末試料中の鉱物のモード測定結果のグラフ	5-160
义	5.1-144	一次元模擬割れ目モデル	5-164
义	5.1-145	室内トレーサー試験系概念図	5-164
义	5.1 - 146	室内トレーサー試験系の外観	5-164
义	5.1 - 147	蛭川花崗岩の収着等温線	5-166
义	5.1-148	来待砂岩の収着等温線	5-166
义	5.1-149	概念モデル	5-168
义	5.1 - 150	数値モデル	5-168
义	5.1 - 151	Trh01の試験結果および解析結果	5-168
义	5.1 - 152	Trh02の試験結果および解析結果	5-168
义	5.1 - 153	Trk01の試験結果および解析結果	5-169
义	5.1 - 154	サイトスケールの解析モデル	5-175
义	5.1 - 155	サイトスケールでモデル化した断層の分布	5-175
义	5.1 - 156	サイトスケールでモデル化した坑道の形状	5-175
义	$5.1 \cdot 157$	深度 300 m ボーリング横坑のサイトスケールのモデル化形状	5-176
义	5.1 - 158	サイトスケールの解析モデルの有限要素分割	5-176
义	5.1 - 159	ブロックスケールの解析領域	5-177
义	5.1 - 160	深度 300 m ボーリング横坑のレイアウト	5-177
义	5.1 - 161	ブロックスケールの解析モデルの有限要素分割	5-178
义	5.1 - 162	サイトスケール解析結果(全水頭分布)	5-180
义	5.1 - 163	サイトスケール解析結果(流速分布)	5-180
义	5.1 - 164	ブロックスケール解析結果(全水頭分布)	5-181
义	5.1 - 165	ブロックスケール解析結果(流速分布)	5-181
义	5.1 - 166	トレーサー試験の前後における深度 312m 水平断面内全水頭分布	5-182
义	5.1 - 167	トレーサー試験の前後における深度 312m 水平断面内の水平流速分布.	5-182
义	5.1 - 168	間隙率をパラメータとした破過曲線の計算結果(T10試験;縦分散長)	2.1 m)
			5-183
义	5.1 - 169	縦分散長をパラメータとした破過曲線の計算結果(T10試験;間隙率)	0.07 %)
			5-184
义	5.1 - 170	トレーサー濃度分布の経時変化の解析結果(T10 試験)	5-184
义	5.1 - 171	間隙率をパラメータとした破過曲線の計算結果(T9 試験;縦分散長	1.5 m)
			5-185
义	5.1 - 172	縦分散長をパラメータとした破過曲線の計算結果(T9試験;間隙率0	.27 %)
			5-185
义	5.2-1 東	通濃地域を事例とした地下水の実流速の推定結果	5-189
义	5.2-2 亀	A裂性岩盤の透水不均質性評価の検討フロー	5-190
义	5.2-3 瑞	記超深地層研究所の研究坑道レイアウト	5-191
义	5.2-4 瑞	記泡超深地層研究所周辺の地質・地質構造モデル	5-192
义	5.2-5 瑞	おおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおお	5-193
义	5.2-6 18	8MI65 号孔の掘削レイアウト	5-194
义	5.2 <b>-</b> 7 主	- 要な検層機器の寸法	5-198
义	5.2-8 18	8MI65 号孔の水理試験区間設定	5-199
义	5.2-9 水	<理試験装置の概念図	5-200

义	5.2 - 10	18MI65 号孔ボーリング調査実績工程表	5-202
义	5.2 - 11	18MI65 号孔のコア観察総合柱状図	5-203
义	5.2 - 12	18MI65 号孔の物理検層・水理試験結果	5-204
义	5.2 - 13	18MI65 号孔の水理試験結果(TNP)	5-205
义	5.2 - 14	水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.6)	5-207
义	5.2 - 15	水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.7)	5-208
义	5.2 - 16	水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.10)	5-209
义	5.2 - 17	水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.13)	5-210
义	5.2 - 18	水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.21)	5-211
义	5.2 - 19	水理試験結果と割れ目分布との比較	5-212
义	5.2 - 20	18MI65 号孔と既往の水理試験結果の累積分布	5-213
义	5.2 - 21	データセット毎の割れ目の走向傾斜分布	5-214
义	5.2 - 22	<b>DFN</b> モデルの構築手法	5-215
义	5.2 - 23	HydroDFN モデルを用いた透水量係数分布の推定方法	5-217
义	5.2 - 24	割れ目の透水量係数分布のパラメータの推定結果(DFN_DS1)	5-218
义	5.2 - 25	割れ目の透水量係数分布のパラメータの推定結果(DFN_DS2)	5-218
义	5.2 - 26	割れ目の透水量係数分布のパラメータの推定結果(DFN_DS3)	5-219
义	5.2 - 27	構築した HydroDFN モデル (DFN_DS1:1 リアライゼーション).	5-219
义	5.2 - 28	構築した HydroDFN モデル (DFN_DS2:1 リアライゼーション).	5-220
义	5.2 - 29	構築した HydroDFN モデル (DFN_DS3:1 リアライゼーション).	5-220
义	5.2 - 30	ボーリング孔沿いの割れ目の方位分布の比較	5-221
义	5.2 - 31	ボーリング孔沿いの割れ目の密度分布の比較	5-222
义	5.2 - 32	ボーリング孔沿いの割れ目の透水量係数分布の比較	5-222

表	1.2-1	岩盤中の水理・物質移動場の特性評価に係わる技術開発課題と本事業の実施	施内容
	の関係	£	1-4
表	3.1-1	校正に使用するデータセット	3-9
表	3.1-2	透水係数の文献値および初期値	3-9
表	3.1 <b>-</b> 3	全水頭による透水係数の校正値と推定誤差	3-10
表	3.1 <b>-</b> 4	校正および検証での全水頭の平均絶対誤差	3-11
表	3.1-5	<sup>4</sup> He 年代による透水係数の校正値と推定誤差	3-12
表	3.1 <b>-</b> 6	校正および検証での 4He 年代の平均絶対誤差(対数)	3-13
表	3.2-1	14C 分析用試料の採取条件のまとめ	3-24
表	3.2-2	4ヶ月間保管した後の地下水試料における <sup>14</sup> C 分析の結果	3-25
表	3.2-3	瑞浪立坑での原位置計測結果	3-36
表	3.2-4	採水量および採水方法の概要まとめ	3-37
表	3.2 - 5	瑞浪立坑での分析結果	3-38
表	3.2-6	瑞浪広域井戸における同位体比分析結果	3-45
表	3.2-7	DH-13 号孔で取得された地下水における 14C の値(採水方法による比較)	3-48
表	4.3-1	等価 NaCl 濃度への換算にあたり式 4.3-6 で用いた係数	4-11
表	4.3-2	NaCl 濃度実測値と等価 NaCl 濃度計算値の比に対する平均値および相対	標準偏
	差		4-16
表	4.3-3	NaCl 濃度実測値と等価 NaCl 濃度計算値の比に対する平均値および相対	標準偏
	差		4-18
表	4.3-4	データ数およびデータ取得頻度	4-34
表	4.3-5	ガス主成分濃度	4-47
表	4.3-6	封圧採水中の希ガス濃度	4-47
表	4.4-1	稚内層浅部に分布する斜交断層の亀裂パラメータ	4-53
表	4.4-2	ダムケラー数の算出に必要なパラメータとその値の設定方法	4-55
表	4.4-3	三次元分割格子の範囲および大きさ	4-64
表	4.4-4	パーティクルトラッキング解析の指定点の配置条件(基本配置)	4-64
表	4.4-5	感度解析ケースの一覧(1/2)	4-65
表	4.4-6	感度解析ケースの一覧(2/2)	4-66
表	4.4-7	解析における境界条件	4-66
表	4.4-8	設定条件 A における各地層の物性値	4-68
表	4.4-9	設定条件 B における各地層の物性値	4-69
表	4.4-10	設定条件 <b>C</b> における各地層の物性値	4-69
表	4.4-11	設定条件 D における各地層の物性値	4-70
表	4.4-12	モデル化した断層幅に応じた断層の透水係数	4-70
表	4.4-13	各地層の物性値	4-93
表	4.4-14	解析ケースの一覧	4-94
表	$5.1 \cdot 1$	二重間隙モデルの構築に必要なデータと取得方法	5-2
表	5.1 - 2	割れ目分布モデルの構築に必要なデータと取得方法	5-2
表	$5.1^{-3}$	ボーリング資機材一覧表	5-6
表	5.1-4	キャリパー検層装置の仕様	5-10
表	5.1 - 5	フローメータ検層装置の仕様	5-12

表 目 次

表	5.1-6	差圧 20mH <sub>2</sub> O 用差圧計の仕様	5-16
表	5.1-7	計測機器の概要・仕様(音響トモグラフィ)	5-22
表	5.1-8	計測機器(GeoSEIS)の仕様(VSP 探査)	5-30
表	5.1-9	間隙水圧モニタリング装置の仕様	5-35
表	$5.1 \cdot 10$	蛍光濃度センサーの主な仕様	5-38
表	$5.1 \cdot 11$	分析項目と分析方法	5-40
表	5.1 - 12	希釈方法	5-41
表	$5.1 \cdot 13$	19MI66 号孔の実績	5-41
表	$5.1 \cdot 14$	掘削方向の計画と実績	5-50
表	$5.1 \cdot 15$	19MI66 号孔 湧水割れ目特定のための湧水量測定結果(黄色行:本試験	Ę)
			<b>5-5</b> 4
表	$5.1 \cdot 16$	18MI63 号孔 湧水割れ目特定のための湧水量測定結果(黄色行:本試験	į)
			5-57
表	$5.1 \cdot 17$	19MI66 号孔 定流量揚水試験の結果	5-61
表	5.1-18	18MI63 号孔 定流量揚水試験の結果	5-61
表	5.1-19	18MI63 号孔 定流量揚水試験の結果(日本原子力研究開発機構・電力中	央研究
	所,2	019)	5-61
表	5.1-20	19MI66 号孔 全岩盤分離面の内訳	5-63
表	5.1-21	19MI66 号孔 水みち割れ目の詳細観察箇所と開口幅	5-65
表	5.1-22	調査数量表(三次元弾性波トモグラフィ)	5-65
表	5.1-23	調査数量表(VSP 探査)	5-68
表	5.1-24	<b>19MI66</b> 号孔 各モニタリング区間の湧水量	5-72
表	5.1 - 25	原位置トレーサー試験 試験区間一覧	5-76
表	5.1-26	水頭差測定の結果一覧	5-77
表	5.1 - 27	孔間トレーサー試験条件および結果	5-79
表	5.1-28	レジン充填箇所一覧	.5-101
表	5.1-29	拡散試験のための試料一覧	.5-152
表	5.1-30	ディスク状岩石試料の 3D スキャナーによる寸法の測定結果	. 5-154
表	5.1-31	各トレーサーの実効拡散係数および間隙率	.5-157
表	5.1-32	岩石粉末試料の採取箇所およびその性状	. 5-159
表	5.1-33	岩石粉末試料のモード測定結果(数値はすべて wt %で表示)	. 5-160
表	5.1-34	各試料の比表面積および Rb および Ba の溶出量、収着率、分配係数、脱	離率の
	結果		.5-162
表	5.1-35		.5-165
表	5.1-36	蛙川花岡岩および来待砂岩の物性値	.5-167
表	5.1-37	評価解析による推定結果	.5-169
表	5.1-38	解析に使用した各地質区分の透水係数	.5-179
表	5.1-39	上部割れ目帯の透水係数と深度 300m 付近の坑直への地下水流入流量	.5-179
表	5.2-1	果濃地域を事例とした地下水の実流速の推定根拠	.5-189
表土	5.2-2	日本と海外における結晶貿宕の特徴の比較(深度 500m 付近)	.5-192
表	5.2-3	UHFD と LSFD における割れ日の分布特性の比較(細谷はか, 2015)	.5-192
表	5.2-4	18M16b 亏扎の諸元	.5-195
表	$5.2^{-5}$	一種一個人的時間, 一個人的人的人類, 一個人的人的人類, 一個人的人的人類, 一個人的人, 一個人, 一個人, 一個人, 一個人, 一個人, 一個人, 一個人, 一個	.5-195

表	5.2-6	検層機器一覧表(共通)	5-196
表	5.2-7	検層機器一覧表(各検層項目)	5-197
表	5.2-8	水理試験装置一覧表	5-200
表	5.2-9	18MI65 号孔水理試験中の周辺ボーリング孔水圧応答星取表	5-206
表	5.2 - 10	18MI65 号孔の水理試験結果(データ一覧)	5-206
表	5.2 - 11	DFN モデル構築のためのデータセット	5-213
表	5.2 - 12	割れ目のパラメータの推定手法	5-216
表	5.2 - 13	割れ目のパラメータの推定結果	5-217

#### 1. はじめに

本事業は、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地 下水流動評価技術高度化開発)として、経済産業省資源エネルギー庁から、日本原子力研究開発 機構(以下、原子力機構)、電力中央研究所(以下、電中研)の二機関が共同で受託したものであ る。

#### 1.1 背景と目的

地下水の流動方向や、流速、移行経路、移行時間は、地下水の駆動力である動水勾配および岩 盤の透水性の空間的な不均質性に影響を受けている。原子力発電環境整備機構(NUMO)が行う 概要調査では、地下水の涵養域から流出域までを包含する広域スケール(数 km~数+ km)を対 象とした地下水流動解析が行われ、地下水の流動方向や、流速、移行経路、移行時間が評価され る。地下水流動解析を行う際には、岩盤の透水性の空間分布を推定した水理地質構造モデルを構 築する必要がある。また、調査の進展とともに評価対象となる主な空間スケールが広域スケール から施設スケール(数百 m~数 km)、坑道スケール(数 m~数百 m)と変化する。そのため、そ れぞれの空間スケールに応じた岩盤の透水性の空間分布を推定するための手法を整備する必要が ある。さらに、狭い空間スケールで推定した岩盤の透水性の空間分布をより広い空間スケールに どのように反映させるのかといった空間スケールによって見え方が異なる岩盤の透水性の空間分 布を空間スケール間でつなぐための手法や考え方の整備が重要となる。

広域スケールの水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析による地下水圧の空間分布の算出 結果の妥当性は、地下水圧の算出結果と原位置での観測結果とを比較することによって確認され ることが一般的である(図 1.1-1)。加えて、断層などの大規模な不連続構造や岩盤中の割れ目ネ ットワーク(連続性など)に起因する不均質な岩盤の透水性の空間分布の推定結果の妥当性を確 認する上では、地下水圧の経時変化を用いることが有効である。



図 1.1-1 広域を対象とした地下水流動の調査・解析の流れ

地層処分において対象となる地下深部の地下水流動を対象とした場合、物質移動の評価に必要

となる地下水の流速や移行時間(地下水流動解析によって算出)については、その算出結果の妥 当性を示すためには、地下水流動の結果である地下水水質分布や地下水年代との整合性も確認す る必要がある。しかしながら、地下水年代や水質分布と地下水流動解析との整合的な解釈に係る 事例は少ないのが現状である。

天水の浸透(涵養)を起源とした地下水が動水勾配を駆動力として移流する環境においては、 地下水の涵養域から流出域への流動に伴って、地下水の水質や年代が変化していく。従来は、地 下水流動解析から算出される地下水圧の分布と地下水圧の実測データとの比較など、主に地下水 の「流れ方」に係る情報に基づき解析結果の妥当性が確認され、地下水の「流れ方」に伴う「変 化」に係る情報(実測データから推定される地下水の水質や地下水年代の分布など)は、地下水 流動解析結果の妥当性を示す傍証とされてきた。本事業においては、地下水流動に伴う水質の変 化を解析に取り組むことを検討する。これにより、従来の地下水の「流れ方」に基づく解析だけ でなく、「流れ方」に伴う「変化」を加味した解析方法の構築に取り組む(図 1.1・2)。この結果、 解析結果と現場で取得される「データ」を直接比較することが可能になり、地下水流動解析結果 の信頼性が向上する。さらに、結晶質岩では地下水流動は亀裂や断層の分布に規制されるが、そ れらの分布は不均質である。そのため、本事業においては、結晶質岩中での地下水流動を規制す る地質構造の不均質性の理解を深め、それに基づく広域の地下水流動解析手法を提案する。これ らの検討の結果として、調査・解析の体系的な手法を整備することを目的とする。



図 1.1-2 本事業で取り組む地下水流動解析のフロー

一方、堆積岩分布地域の深部領域においては、しばしば古い化石海水が存在することが報告さ れているが、そのような場は天水起源の地下水流動を前提とした地下水流動解析の適用が困難な 場である。地下水年代についても、堆積岩では埋没過程において初期の間隙水の大部分が置き換 わり得るため、地下水年代の評価も単純ではない。したがって、このような場を対象に地下水年 代を用いた地下水流動解析結果の妥当性の検証を行うことは困難であるため、アプローチを分け る必要がある。地下浅部の天水浸透領域については、水質の実測値を用いた地下水流動解析結果 の妥当性の検証方法を整備する一方で、古い化石海水が残存するような深部低流動域については、 その三次元分布、水理学的特性、形成要因を明らかにするための調査・解析手法の開発を目的と する。

#### 1.2 事業の全体概要

1.1 に述べたとおり、本事業では地層処分事業における概要調査において重要となる涵養域から流出域までの広域的な地下水流動(移流場)や地下水が長期にわたり滞留する領域(拡散場)の三次元分布に係る調査・評価の信頼性向上に向け、これまでに整備された水理・物質移動場の特性に係る調査・評価技術の妥当性の確認および高度化として、以下の技術開発課題に取り組む。

(1)内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化(2)内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度化(3)水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化

上記の技術開発課題については、原子力機構が保有する2つの地下研究施設周辺を事例として 取り組む。具体的には、結晶質岩が分布する東濃地域にある瑞浪超深地層研究所周辺地域を移流 場の事例とし、堆積岩が分布する幌延地域にある幌延深地層研究センター周辺地域を拡散場の事 例とする。両地域を事例とした研究開発成果を統合することで、移流場と拡散場に応じた水理・ 物質移動場の特性の調査・評価技術の整備を図る(図 1.2-1)。

また、本事業における実施内容は、表 1.2-1 に示す岩盤中の水理・物質移動場の特性評価に係 わるいくつかの技術開発課題を解決するための研究開発として位置付けられる。



図 1.2-1 事業の全体概要

## 表 1.2-1 岩盤中の水理・物質移動場の特性評価に係わる技術開発課題と本事業の実施内容の関係

地質環境特性		地質構造	水理地質					
空間スケール		【瑞浪/幌延】	【瑞浪】	【幌延】				
広域スケール (数km~数十km)	アウトプット	・地質構造モデル(広域スケール)	<ul> <li>・水理地質構造モデル(広域スケール)</li> <li>・地下水流動モデル(広域スケール)</li> <li>・物質移動モデル(広域スケール)</li> </ul>	<ul> <li>・水理地質構造モデル(広域スケール)</li> <li>・地下水流動モデル(広域スケール)</li> <li>・物質移動モデル(広域スケール)</li> </ul>				
【地下施設を通過する地下水流動の 涵養域から流出域までの地下水流動 状況を把握するための空間スケール】	技術開発課題 (要素技術/解析・評価技術)	<ul> <li>・地質調査の技術群の統合の在り方(体系化)</li> <li>・地質構造解釈技術、地質年代測定、物理探査などの精度・信頼性向上(高度化)</li> </ul>	・地下水年代測定技術 ・モデルの妥当性評価技術	<ul> <li>・地下水年代測定技術(Kr法)</li> <li>・地下水滞留域の空間分布の評価技術</li> <li>・モデルの妥当性評価技術</li> </ul>				
空間スケール間	間の関連性	【↑】母岩の割れ目ネットワーク(地質特性)の反映 【↑】広域スケールの地下水流動に影響を及ぼしうる地質構造 の抽出	【↑】母岩の割れ目ネットワーク(水理特性, 物質移動特性)の反映 【↑】広域スケールの地下水流動に影響を及ぼしうる水理地質構造の抽出					
		【↓】地質構造モデルの解像度向上(モデル化対象の分布形状 などの詳細化)	【↓】施設スケールの地下水流動に影響を及ぼしうる水理地質構造の抽出					
施設スケール (数百m~数km)	アウトプット	・地質構造モデル(施設スケール)	・水理地質構造モデル(施設スケール) ・地下水流動モデル(施設スケール) ・物質移動モデル(施設スケール)	・水理地質構造モデル(施設スケール) ・地下水流動モデル(施設スケール) ・物質移動モデル(施設スケール)				
【地下施設全体を包含し,施設の設計 や安全評価に必要となる空間スケー ル】	技術開発課題 (要素技術/解析・評価技術)	<ul> <li>・地質調査の技術群の統合の在り方(体系化)</li> <li>・地質構造解釈技術、地質年代測定、物理探査などの精度・信頼性向上(高度化)</li> </ul>	・地下水年代測定技術 ・モデルの妥当性評価技術	<ul> <li>・地下水年代測定技術(Kr法)</li> <li>・地下水滞留域の空間分布の評価技術</li> <li>・モデルの妥当性評価技術</li> </ul>				
空間スケール間	間の関連性	【↑】母岩の割れ目ネットワーク(地質特性)の反映 【↑】施設スケールの地下水流動に影響を及ぼしうる地質構造 の抽出	【↑】母岩の割れ目ネットワーク(水理特性,物質移動特性)の反映 【↑】施設スケールの地下水流動に影響を及ぼしうる水理地質構造の抽出					
		【↓】地質構造モデルの解像度向上(モデル化対象の分布形状 などの詳細化)	【↓】坑道スケールの地下水流動に影響を及ぼしうる水理地質構造の抽出					
坑道スケール (数m~数百m)	アウトプット	・地質構造モデル(坑道スケール)	<ul> <li>・水理地質構造モデル(坑道スケール)</li> <li>・地下水流動モデル(坑道スケール)</li> <li>・物質移動モデル(坑道スケール)</li> </ul>	・水理地質構造モデル(坑道スケール) ・地下水流動モデル(坑道スケール) ・物質移動モデル(坑道スケール)				
【坑道近傍の地質環境特性や坑道掘	技術開発課題 (要素技術/解析·評価技術)	<ul> <li>・地質調査の技術群の統合の在り方(体系化)</li> <li>・物理探査の高精度化(高度化)</li> </ul>	・水みちの検出、三次元分布特性の調査技術 ・水みちのネットワークを対象としたトレーサー試験技術 ・母岩の割れ目ネットワークのモデル化技術	・母岩の割れ目ネットワークのモデル化技術				
削影響などを評価する空間人ケール】				・割れ目およびマトリクスを対象としたトレーサー試験技術				
	旧本明注社	【↑】割れ目の地質特性の反映	【↑】割れ目の水理特性,物質移動特性の反映 【↓】トレーサー試験結果の反映					
空間スケールに	前の関連性	_						
微視スケール (十cm以下)	アウトプット	・地質構造モデル(微視スケール)	・水理地質構造モデル(微視スケール) ・地下水流動モデル(微視スケール) ・物質移動モデル(微視スケール)	・水理地質構造モデル(微視スケール) ・地下水流動モデル(微視スケール) ・物質移動モデル(微視スケール)				
【母岩中の割れ目や間隙中の物質移 動特性を評価するための空間スケー ル】	技術開発課題 (要素技術/解析・評価技術)	・割れ目・マトリクスの可視化技術(要素技術開発)	・割れ目内水みちの可視化技術 ・マトリクス内間隙の可視化技術	・堆積構造に起因した収着・拡散特性の評価技術 ・割れ目からマトリクスへの物質移行挙動の評価技術				
<ul> <li>(1)内陸部の広域的な地</li> <li>(2)内陸部の地下深部に</li> </ul>	下水流動を評価するための技術 存在する長期的に安定な水理場	所の高度化の実施内容 局・化学環境を評価するための技術の高度化の実施内容						
(3)水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化の実施内容 【赤字:水みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化、緑字:亀裂性岩盤の透水不均質性評価、黒字:両者共通】								

【赤子:水みらのイツ 「る水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化、「稼子:亀袋性石盛( 1透水不均負性評価、羔子:阿石

本事業以外で実施

#### 2.2019年度の実施概要

1.2 に示した各研究課題の分野毎の研究開発目標および実施内容は以下のとおりである。

#### 2.1 内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化

地下水シナリオでは、漏出した核種の地下水による輸送を評価するため、処分施設周辺の地下 水流動を精度良く把握することが重要となる。そのため、これまでに地下水の起源や滞留時間を 評価する地下水年代測定技術を開発してきた。しかしながら、これらの情報を用いた地下水モデ ルの検証は十分に行われていない。このため、地下水年代を対象に、地下水流動・物質移行解析 を行うことにより、地下水モデルの妥当性を示す方法を開発する必要がある。あわせて、地下水 年代測定技術についても、技術の高度化と適用性の向上を図る必要がある。近年、計測技術の発 達により、新たな物質の分析が可能となるとともに、前処理および計測方法の改良によって測定 精度の向上が図られている。これらについても調査・整備するとともに、原位置に適用し、有効 性を確認していく必要がある。

これらの課題について、具体的には下記の内容について取り組む。

#### 2.1.1 地下水流動・物質移行解析技術の高度化〈実施者:電力中央研究所〉

地下水モデルの妥当性は、地下水の水位や水圧など水理的な結果に基づいて検証される場合が 多い。しかしながら、安全評価では、地下水の流況や流動性などの評価も重要になる。したがっ て、水理的な情報だけでなく、地下水年代などの情報を用いた地下水モデルの検証が必要になる と考えられる。

広域的な地下水年代を対象とした地下水流動・物質移行解析方法を調査し、その評価方法を例 示する。また、この方法に基づいて、原位置データを用いた地下水流動解析を実施し、地下水モ デルと地下水年代の整合性を確認する。さらに、課題を検討することにより、評価方法の高度化 を図る。これらの検討により、地下水年代を用いた広域的な地下水流動解析モデルの妥当性を検 証する方法を提案する。

平成 30 年度は、地下水年代を対象とした地下水流動・物質移行解析の文献調査を行い、評価方 法のプロトタイプを提示した。また、瑞浪地区を対象に、原位置の地形、地質、水理、水文など の情報を考慮した地下水モデルを構築し、地下水年代測定結果を対象とした地下水流動・物質移 行解析を実施した。

平成 31 年度は、地下水流動・物質移行解析結果と地下水年代測定結果を比較し、その整合性を 検討するととともに、感度解析を実施することにより、パラメータの不確実性を検討した。これ らの検討を通して、さらに、地下水年代を用いた広域的な地下水流動解析モデルの妥当性を検証 する方法を提案した。

#### 2.1.2 地下水年代測定技術の高度化〈実施者:電力中央研究所〉

これまでに、地下水に溶存する物質やガスの量や同位体から、地下水の滞留時間を評価する方 法を整備してきた。これによって、数万年から数百万年のような滞留時間の長い地下水が国内に も存在することを確認することができた。ただし、どの方法にも長所・短所および適用条件があ るため、複数の方法で評価を行い、整合性を示すことが結果の信頼性を示すうえで重要である。 近年、新しい技術(<sup>39</sup>Ar、<sup>81</sup>Kr、<sup>129</sup>I など)が開発されてきており、既存技術(<sup>4</sup>He、<sup>14</sup>C、<sup>36</sup>Cl、 希ガス温度計など)についても、前処理方法や分析方法の改良によって、測定精度や適用性の向 上が図られている。

以上の課題認識から、下記の内容について取り組む。

新しい分析方法や前処理技術について調査するとともに、可能なものについて整備する。また、 整備した技術を原位置で試行することにより、有効性を確認するとともに課題の抽出を行う。こ れらの検討を通じて、新しい地下水年代測定法や分析方法を抽出するとともに、有望な方法につ いて整備する。あわせて、これまでデータがとられていない高透水帯や低透水帯などで採水を開 始し、これらの地点での地下水年代の違いを確認することにより、地下水流動・物質移行特性を 明らかにする。

平成 30 年度は、測定方法や前処理方法の進歩・発展による地下水年代測定技術の高度化に追 従していくために、文献調査を実施し、地下水シナリオ評価の観点から有望であると考えられる 方法(<sup>81</sup>Krの真空脱ガス法、<sup>14</sup>Cのガス採取分析法、希ガス温度計)について、整備に着手した。あ わせて、坑道周辺での地下水流動・物質移行特性を評価するために、瑞浪超深地層研究所の研究 坑道を利用して、地下水年代調査を実施するとともに、整備した方法を試行した。

平成 31 年度は、整備している新しい方法について、原位置に適用した結果を踏まえて、適用性 の向上を図るために、高度化と課題の抽出を行った。あわせて、坑道周辺での地下水年代調査を 実施した。

### 2.2 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度 化

これまでの研究開発では、岩盤中の水みちの透水性を把握するための調査技術や水理学的な不 均質性をモデル化・解析する技術の整備が進められ、対象とする場を網羅的に調査・解析・評価 するための手法が構築されている。今後はこれまでの成果を踏まえつつ、地下深部に化石海水が 滞留しているような、水理学的に閉鎖的な環境の形成・維持が推定される領域における巨視的な 透水性を評価するとともに、水理場・化学環境の古水理地質学的変遷などの評価を行い、長期的 に安定な水理場・化学環境の三次元分布を地表から把握する調査・評価技術の体系化を図る必要 がある。

上述の必要性に対して、下記の内容について取り組む。

#### 2.2.1 地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築

既存情報に基づくと、地下深部の低流動域の分布は、透水試験を含むボーリング調査と地質図 などに基づく低透水領域の分布の推定により、効率的に抽出することが可能と考えられる。この 方法は、通常の短期的な透水試験から断層・亀裂の水理的不連続性を推定するものである。この ような方法に基づく推定結果の信頼性を向上させるためには、より長期の透水試験のデータを用 い、推定結果の妥当性を検証する必要がある。また、透水試験から推定した水理学的不連続性は、 地下水の水質・年代・水圧により検証することが重要であり、信頼性の高い検証を行うためには、 より多くの古水理地質学的指標を整備することも必要である。

以上のような課題認識から、本事業では、幌延に分布する堆積岩を対象とし、地下深部の低流 動域の分布を効率的に把握するための方法論を整備・検証し、信頼性の担保された調査方法とし て提示するため、以下を実施する。

- (1) 低透水領域の抽出方法の検討〈実施者:日本原子力研究開発機構〉
  - a 既存孔を用いた長期揚水/注水試験
  - b 試験結果に基づく、低透水領域の抽出方法の妥当性検証と高度化

- (2) その他の方法論の可能性の検討〈実施者:日本原子力研究開発機構〉
  - a 化石海水、異常間隙水圧、亀裂の水理的連続性、ボーリング調査などのキーワードに着目し た文献調査
  - b 他の方法論の可能性の検討
- (3) 地下水の同位体に着目した古水理地質学的指標の開発〈実施者:電力中央研究所〉
  - a 拡散で分離・分別する指標を用いた拡散場調査の有効性の検討
  - b <sup>81</sup>Kr を用いた地下水年代測定の有効性の検討

上記の(1)および(2)については、下記の内容について取り組む。幌延の地下研究施設周辺における既存のボーリング孔を用いた長期揚水/注水試験から得られた水圧データの解析により、低透水領域を抽出するとともに、抽出方法の妥当性について検討する。また、低透水領域の抽出に係るその他の方法論について、キーワードとなる化石海水・異常間隙水圧・亀裂の水理的連続性・ボーリング調査等を対象に、国内外での先行事例を調査した結果についてとりまとめる。

平成 30 年度は、既存ボーリング孔を用いた長期注水試験により、通常の短期的透水試験によ る断層・亀裂の水理的連続性の推定結果の信頼性を確認した。また、低透水領域の抽出に係るそ の他の方法論として、上述したキーワードのうちの幾つかに着目した文献調査を行い、予察的な 見解をまとめた。

平成 31 年度は、上記抽出方法の妥当性を検証するために幌延で得られている他の関連する既存情報の整理を行うとともに、低透水領域の空間分布を概要調査で効率的に把握するための方法として、ボーリング調査と物理探査を組み合わせた手法を対象に、その適用性や課題について幌延の既存データを用いて検討・整理した。

上記の(3)については、下記の内容について取り組む。

拡散場の調査については、既存のボーリング孔などを対象に、化石海水と浅層水が混合している領域を対象に、δDとCl、35Clと37Clの原位置での分布を調査する。また、室内で拡散試験を行い、拡散係数や分別係数を求める。これらの結果を用いて、原位置のプロファイルの再現を 試み、その分離や同位体分別から移流が支配的か、拡散が支配的かを評価する方法を提案する。 また、<sup>81</sup>Kr 法を試行することにより、その有効性を確認する。

平成 30 年度は、拡散場の調査については、既存の δ D、Cl、δ<sup>37</sup>Clの濃度プロファイルを見直 すとともに、既存ボーリングからデータの採取や原位置の岩石コアを用いた拡散試験や物性試験 に着手した。<sup>81</sup>Kr については、メタンガスなどの溶存ガスが多い環境で、原位置における溶存ガ ス採取の捕集、採取した溶存ガスからの Kr の抽出、<sup>81</sup>Kr 計測の一連の作業を試行した。

平成 31 年度は、拡散場の調査については、 $\delta$  D、Cl、 $\delta$ <sup>37</sup>Cl などのプロファイルの調査と拡散 試験を引き続き実施した。これらの調査結果から、拡散が支配的かの判定方法を検討し、拡散場 の評価方法を提案した。<sup>81</sup>Kr については、適用結果を踏まえて採取方法を改良し、異なる深度な どで適用することにより、<sup>81</sup>Kr 法の有効性を確認した。

#### 2.2.2 地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備

#### 〈実施者:日本原子力研究開発機構〉

広域地下水流動解析では、通常、涵養域や流出域を包含するように解析対象領域を設定し、解 析を通じてある特定の区間の移行時間などを算出する。しかし、このような解析では、天水起源 の地下水が地下において流動することを前提としている。地下深部の低透水領域は、化石海水の 存在から示唆されるように、長期にわたり海水起源の地下水が滞留する場である。このような場 合、涵養域や流出域を包含するように解析対象領域を設定する方法や、涵養域からの移行時間の 算出結果を地下水年代と直接比較するような方法は、適切とは言えない。このため、新たな広域 地下水流動解析の考え方や手法を構築する必要がある。この問題は、セーフティーケースにおけ る安全戦略において、地下深部の低透水領域のみならず、地下浅部の領域に対してどのような安 全機能を設定するかにも深く関係するため、この点も考慮した検討が必要である。

上記のような課題認識から、本事業では、地下深部の低透水性領域を含む地域を対象とした場 合の広域地下水流動モデル化・解析手法を整備するため、以下のことを実施する。

- (1) 地下深部の低透水性領域を含む地域を対象とした地下水の洗出し解析手法の高度化
  - a 氷期/間氷期(最終氷期/後氷期)における亀裂を介した天水浸透(物質移行) メカニズムの解明
  - b 浸透メカニズムを考慮したモデル化手法(スケールアップ)の開発
  - c 洗出しの解析条件(洗出し開始時期や海水準変動を考慮した境界条件など)の 設定方法の提示
  - d 水理地質構造モデル(地下深部の低透水領域の拡がりや透水性など)の妥当性 の検証方法の構築

#### (2) 地下浅部から深部までを対象とした広域地下水流動モデル化・解析手法の提示

幌延の沿岸部〜内陸部までの広域を対象とし、氷期/間氷期における亀裂を介した天水浸透メ カニズムについて、既報の評価例などの文献調査結果を踏まえ、情報・知見を整理する。また、 天水浸透に係る簡易モデルを用いた解析を行い、スケールアップにあたり留意すべき事項を整理 する。さらに、地下水の洗出し解析の条件設定のために必要な情報(洗出し開始時期や海水準変 動を考慮した境界条件など)について文献調査を行うとともに、条件設定を変えた洗出し解析を 複数ケース行い、結果をまとめる。なお、地下浅部から深部までを対象とした広域地下水流動モ デル化・解析手法については、キーワードとなる泥岩、安全戦略、広域地下水流動解析等を対象 に、国内外での先行事例を調査した結果についてとりまとめる。

平成 30 年度は、低透水性領域を含む地域を対象とした地下水の洗出し解析を行う上で必要と なる情報・知見を収集・集約するための文献調査に着手するとともに、簡易モデルを用いた天水 浸透に関わる予察解析を行った。また、地下水の洗出し解析に関わる既往モデルを基に、条件設 定を変えた試解析を行い、境界条件の設定の違いによる解析結果への影響について整理した。さ らに、上述したキーワードのうちの幾つかに着目した文献調査を行い、予察的な見解をまとめた。

平成 31 年度は、天水浸透による地下水の洗出し解析については、平成 30 年度に実施した広域 スケールでの予察解析結果や 2.2.1 の成果を踏まえつつ、施設スケールを主な対象とした水理地 質構造モデルの妥当性確認のための方法について検討した。また、坑道スケールから施設スケー ルへのアップスケーリングを念頭に、スケールの違いによる不均質性の影響や取扱いについて、 簡易モデルを用いた解析的検討を行った。地下浅部から深部までを対象としたモデル化・解析手 法に関しては、平成 30 年度の文献調査の結果も参考にしつつ、幌延を対象とした場合のモデル 化・解析手法に係る具体案の検討を進めた。

#### 2.2.3 概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案〈実施者:日本原子力研究開発機構〉

堆積岩にしばしば認められる化石海水の存在は、極めて長い地史の中で隆起・侵食や海水準変 動といった自然現象の影響を受けないと想定され、地層処分にとって好ましい環境である可能性 が高いことを示す証拠となりうる。このような地質環境を概要調査段階で効率的に把握し、化石 海水が滞留する低透水領域の三次元的分布を推定できれば、地層処分が可能と判断し、精密調査 地区を選定するという概要調査の主たる目的を果たすことができると考えられる。

これまでの研究開発成果、ならびに、本事業で取り組む 2.2.1 地下深部の低流動域の分布を概 要調査で効率的に把握するための方法論の構築と、2.2.2 地下深部の低流動域を対象とした広域 地下水流動のモデル化・解析手法の整備の成果を踏まえ、堆積岩にしばしば認められる化石海水 が存在し、拡散が支配するような場を概要調査でどのように把握するべきか、調査・モデル化・ 解析の方法論やフローあるいは評価にあたっての留意点などを検討し、提案する。このような検 討結果や提案内容は、概要調査を効率的・効果的に行うための情報として重要になる。

上記のような課題認識から、本事業では、以下のことを実施する。

#### (1) 幌延における研究成果の再整理

化石海水領域や拡散が支配する場を抽出するために、指標となりうるパラメータを検討すると ともに、調査・解析手法の有効性を再整理する。

#### (2) 化石海水が存在し拡散が支配する流動場における概要調査の方法論・フローの検討

既存の報告書などに基づき、幌延における化石海水領域や拡散支配場に係る指標となりうるパ ラメータを抽出・整理する。また、化石海水が存在し、拡散が支配する流動場での概要調査にあ たって留意すべき事項や調査フロー案等について、2.2.1および2.2.2の成果も踏まえ、整理する。

平成 30 年度は、幌延における化石海水領域や拡散支配場に係る指標となりうるパラメータを 抽出・整理するための文献調査に着手するとともに、拡散が支配する滞留場の概要調査にあたっ て留意点の抽出を試行した。

平成 31 年度も平成 30 年度に引き続き、幌延における既存データや情報の抽出・整理を行い、 化石海水領域や拡散支配場との関係について検討し、拡散が支配する滞留場の概要調査における 留意点を整理した。

#### 2.3 水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化

#### 2.3.1 水みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化

#### 〈実施者:電力中央研究所〉

我が国では割れ目密度の高い岩盤がしばしば見られるが、割れ目のすべてが地下水の流動や物 質の移動に寄与するわけではない。そのため、ある程度の大きさの岩体の水理特性を把握するた めには、岩体内で支配的な役割をになう水みち割れ目の三次元的な分布を把握し、岩体の水理地 質構造モデルを構築する必要がある。これまでに事例研究として、ボーリング孔に交差する水み ちを検出するための各種の検層(ボアホール TV 検層、フローメータ検層、透水試験)や単一割 れ目を対象としたトレーサー試験などが実施されてきた。これら技術を必要に応じて改良を加え た上で組み合わせ、岩体内に分布する水みちの三次元的な分布を精度良く推定する技術の開発が 必要となる。

一方、岩体内の水みちの三次元分布がわかったとしても、それら多数の水みちのネットワーク による水理・物質移動特性を推定するためには、水みちの微細透水構造・物質移動特性も把握し ておく必要がある。例えば、割れ目充填鉱物の有無や種類、水みち内の地下水流速やマトリクス 拡散に寄与する割れ目面の割合を示す割れ目開口度、吸着に寄与するマトリクス空隙と割れ目面 からの距離との関係などである。

そして、水みちの微細透水構造や岩体の水理地質構造を基に、多数の水みちのネットワークに よる水理・物質移動特性を精度良く効率的に評価する手法の高度化も必要となる。 さらに、我が国に特徴的な高割れ目密度の岩盤において、広域を対象とした地下水流動・物質 移行解析を行う場合、大規模な断層については解析モデルで明示してモデル化することは可能で あるが、最近の計算機環境の著しい発展をもってしても、小規模な個々の水みち割れ目までモデ ルで直接表現して計算することは困難である。そのため、それら小規模の水みち割れ目を含む岩 体については、等価な透水性・物質移動特性を有する多孔質媒体に置き換えて計算を行うことが 現実的である。透水性に関しては、個々の割れ目あるいは小スケールのボーリング区間を対象と した透水試験の結果から、確率論を導入するなどしてより広い岩体の透水係数を推定する手法の 開発が望まれる。また、物質移動特性に関しては、マトリクス拡散を考慮した等価な間隙率や分 配係数の設定手法の開発が必要である。

以上の課題認識から、本事業では、我が国で多く見られる高割れ目密度の岩盤において、水み ちの微細透水構造モデルを構築し、水みちの三次元分布を精度良く検出する技術や水みちのネッ トワークによる水理・物質移動予測技術を高度化し、広域的な物質移動場の解析条件の設定手法 の最適化につなげることを目指す。

#### (1) 水みちの検出技術の高度化

高割れ目密度の岩盤を対象として、ボーリング掘削、各種地質調査(コア観察、ボアホール TV 検層等)、地下水調査(フローメータ検層、湧水量計測、透水試験、間隙水圧モニタリング等)、 物理探査(ボアホールレーダー、VSP(Vertical Seismic Profiling)探査等)、トレーサー試験等、 既存の調査技術を必要に応じて改良して適用し、岩盤内の水みちの三次元分布(特性)を明らか にし、試験場の水理地質構造モデルを構築する。この作業を通じて、岩盤内の支配的な水みちを 検出し、その分布(特性)を調査・評価する技術の高度化を図る。

#### (2) 水みちの微細透水構造・物質移動モデルの構築

蛍光剤を添加したレジン(樹脂)が充填された岩石コアの水みち割れ目について、X線 CT 解 析やコア試料を 1mm 毎に研削し撮影した画像の分析により透水構造を把握するとともに、紫外 光下での観察や薄片観察により割れ目周辺のマトリクス部の空隙構造を明らかにする。

また、岩石の粉体試料やブロック試料を用いて、室内吸着試験やトレーサー試験を実施し、水 みち割れ目および周辺のマトリクス部の物質移動モデル構築のための基礎資料を取得する。

#### (3) 水みちのネットワークによる物質移動予測手法の高度化

上記(1)により構築された試験場の水理地質モデルを基に、地下水流動に関する数値シミュレーションを実施し、試験場周辺の水みちによる影響を受けた地下水の流速と流向の分布を明らかにする。そして、その結果を基に数値シミュレーションによるトレーサー試験の予測解析を行い、(1)で実施するトレーサー試験の試験条件の策定に反映させる。また、トレーサー試験の評価解析に着手する。

平成30年度には、以下の内容を実施した。

#### 水みちの検出技術の高度化

割れ目密度の高い瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑の試験場にボーリング孔を 2本掘削し、既存の各種地質地下水調査技術を適用して水みちを検出した。そして、水みちの方 向や透水性などから、試験場周辺岩盤の水理地質構造モデルを構築した。

#### (2) 水みちの微視的な物質移動モデルの構築

水みち割れ目を含む岩石コアのX線CT解析や詳細な観察、岩石ブロック等を用いた室内での 吸着・トレーサー試験により、単一の水みち割れ目の物質移動モデルを構築するための基礎資料 を取得した。 (3) 水みちのネットワークによる水理・物質移動予測手法の高度化

上記(1)で構築した水理地質構造モデルを基に地下水流動解析を実施し、試験場周辺の地下水場の推定を行った。

平成31年度には、以下の内容を実施した。

#### (1) 水みちの検出技術の高度化

試験場にボーリング孔を1本追加掘削し、既存の各種地質地下水調査技術に加えて、物理探査 技術、トレーサー試験技術を適用した。そして、試験場周辺岩盤の水みちの三次元分布(特性) を明らかにし、昨年度構築した水理地質構造モデルを修正した。

a 追加ボーリングでの調査による試験場周辺の水みちの追加検出

b 昨年度に構築した水理地質構造モデルの修正

#### (2) 水みちの微視的な物質移動モデルの構築

水みち割れ目を含む岩石コアについて、X線 CT 解析やコア試料を 1mm 毎に研削し撮影した 画像の三次元可視化分析により、水みち割れ目の透水構造を把握した。また、薄片観察や間隙径 分布測定により、水みち割れ目近傍のマトリクス部の空隙構造を把握した。

さらに、室内において吸着試験や拡散試験、トレーサー試験を実施し、水みち割れ目の物質移 動モデル構築のための基礎データを取得した。

- a 水みち割れ目の微細透水構造とマトリクス部の空隙構造の把握
- b 水みち割れ目の物質移動モデル構築のための基礎データ取得

#### (3) 水みちのネットワークによる水理・物質移動予測手法の高度化

上記(1)で修正した水理地質構造モデルを基に水みちの影響を考慮した地下水流動解析を実施し、試験場周辺の地下水流動場を推定した。また、その解析結果を基に、(1)で実施するトレーサ

- ー試験の予測解析を実施し、試験条件の策定に反映した。
  - a 試験場周辺の地下水流動場の推定精度の向上
  - b 原位置トレーサー試験の予測・評価

#### 2.3.2 亀裂性岩盤の透水不均質性評価〈実施者:日本原子力研究開発機構〉

わが国の亀裂性岩盤における水理・物質移動特性を評価するにあたっては、地下水の水みちと なる割れ目の位置、方向、大きさなどの幾何学的特性(地質学的特性を含む)や水理学的特性、 物質移動特性を把握することが重要である。国内では亀裂性岩盤を対象とした調査やモデル化を 通じて割れ目の特性評価に関する調査研究を進めており、割れ目の統計分布を再現しうる割れ目 ネットワークモデルの構築手法が整備されつつある。

しかしながら、個々の割れ目の透水性とその幾何学的・水理学的連続性の情報が不足している ため、割れ目に依存して局所的に不均質に分布する透水構造の空間分布を十分に理解できていな いのが現状である。そのため、岩盤の透水不均質性を把握するために必要な原位置調査の最適化 や、取得した調査データに基づく割れ目ネットワークモデルの構築及び構築したモデルの信頼性 確認のための方法論が確立されていない。さらには、空間スケールに応じた岩盤の透水不均質性 のモデル化手法が整備されていない。

平成 30 年度には、瑞浪超深地層研究所において既存の調査密度が高い領域である深度 500m の冠水坑道周辺岩盤を対象として掘削長約 100m のボーリング孔を掘削し、掘削長約 40~100m (60m 区間)において土岐花崗岩健岩部の割れ目データの取得を目的とした調査が実施できるよ うに、ボーリング孔内を整備した。 平成 31 年度には、ボーリング孔を利用した調査を実施して割れ目の透水性などのデータを取得するとともに、それらのデータを用いた岩盤の透水不均質性の評価を行った。

本検討の実施項目を以下に示す。

#### (1) 割れ目データを取得するためのボーリング調査

ボアホール観察及び孔内検層を実施し、冠水坑道周辺岩盤における割れ目の幾何学的特性に関 するデータを取得した。また、複数の水理試験とそれに伴う既存孔への圧力応答観測を実施し、 岩盤中の割れ目の透水性とその連続性に関するデータを取得した。ボーリング調査での主な調査 項目として、BTV 観察、孔内検層(孔径検層、電気検層、密度検層、中性子検層、音波検層、電 磁フローメータ検層)、水理試験(21 点程度、試験区間長:1~2m、5m、60m)を実施した。

### (2) 割れ目データを用いた岩盤の透水不均質性の評価

ボーリング調査で取得した割れ目の幾何学的特性及び水理学的特性データを整理・分析すると ともに、割れ目に起因する冠水坑道周辺岩盤の透水不均質性の統計分布を定量的に評価した。

#### 2.4 研究成果の統合

図 2.4-1 および図 2.4-2 に、瑞浪超深地層研究所周辺地域を事例とした研究成果の統合のイメ ージと、個別の研究開発項目から想定されるアウトプットを示す。

図 2.4-3 および図 2.4-4 には幌延深地層研究センター周辺地域を事例とした研究成果の統合の イメージと、個別の研究開発項目から想定されるアウトプットを示す。

これらの図に示すように、本事業においては両地域で実施する個別の研究開発項目からのアウ トプットを統合または反映させつつ、移流場と拡散場に応じた水理・物質移動場の特性の調査・ 評価技術の整備を進めていく。



広域的な地下水の流動域(移流場)の三次元分布の調査・評価技術

図 2.4-1 研究成果の統合イメージ(瑞浪)



図 2.4-2 個別の研究開発項目からのアウトプット(瑞浪)



広域的な地下水の低流動域(拡散場)の三次元分布の調査・評価技術

図 2.4-3 研究成果の統合イメージ(幌延)



図 2.4-4 個別の研究開発項目からのアウトプット(幌延)

#### 2.5 地質環境特性調査に関する研修

近年、原子力分野において人材育成・技術継承が最重要課題の一つであると考えられている。 地下坑道における地質環境調査に係る作業を、実際の現場において経験することは人材育成・技 術継承においては非常に有効ではあるものの、その機会は非常に限られている。

平成 31 年度において、本事業の一環として「瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査 に関する研修」を、原子力学会バックエンド部会と連携して、日本原子力研究開発機構および電 力中央研究所と共同で開催した。

この研修では、瑞浪超深地層研究所の研究坑道内において、ボーリングコアの観察や水理試験・ トレーサー試験の現場見学、さらに原位置で取得した調査データに基づく解析や解釈などを実施 し、坑道周辺岩盤の地質環境特性の調査や評価の考え方や方法を体験・取得ことを目的として実 施した。

#### 3. 内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化

#### 3.1 地下水流動・物質移行解析技術の高度化

#### 3.1.1 背景と目的

地下水シナリオでは、図 3.1-1 に示すように、漏出した核種の地下水による輸送を評価する。 このシナリオでは、核種の生物圏への到達が遅いほど、核種の放射壊変による減衰が進み、安全 評価上有利になるため、遅い流速の評価が重要となる。このため、これまでに地下水の起源や滞 留時間を評価する地下水年代測定技術を開発してきた。

地下水シナリオでは、地下水の流速だけでなく流向や流出点も重要である。地下水流動は、地 形、地質、水理、水文状態の影響を受けるため、これらの影響を統合するには、地下水モデルが 有効と考えられている。このため、評価に用いる地下水モデルの妥当性が重要となる。

地下水モデルの妥当性は、地下水の水位・水圧など水理的な情報に基づいて検証されてきた。 しかしながら、安全評価では、地下水の流況や流動性などの評価も重要になる。このため、水理 的な情報だけでなく、地下水年代などの地化学的な情報を用いた地下水モデルの検証が必要にな ると考えられる。ただし、地下水年代を用いた地下水モデルの検証は十分に行われていない。こ のため、地下水年代を対象に、地下水流動・物質移動解析を行うことにより、地下水流動モデル の妥当性を示す方法の開発を行う必要がある。

昨年度は広域的な地下水年代を対象とした地下水流動・物質移動解析方法を調査し、その評価 方法を例示した。また、例示した方法に基づいて、原位置で取得した実測値を用いた解析を実施 し、地下水モデルと地下水年代の整合性を確認した。4He 年代の実測値の半分程度を透水係数の 校正に用い、残りを検証に用いて地下水モデルの予測精度を検証した。透水係数の校正は逆解析

(修正マルカート法)で実施した。この結果、4He年代の予測誤差は、対数で±0.25程度である ことが確認できた。この予測誤差は、透水係数を対数で統計処理した際の標準偏差(±1.0~±1.5) に比べ非常に小さいことが確認できた。また、校正で推定された透水係数は、実測値の透水係数 の対数平均値と同程度であることが確認できた。このため、透水係数と4He年代とは概ね整合し ていると考えられた。



図 3.1-1 地下水シナリオの概念図

これらの結果を受けて、今年度は、図 3.1-2 に示すように、地下水流動部分について、全水頭 で地下水モデルの透水係数の校正を行うこととした。これは、地下水流動解析部分での校正・検 証を実施していなかったためである。この全水頭と 4He 年代による地下水モデルの校正・検証結 果の違いから、全水頭、4He 年代、それぞれによる校正の有効性が確認できると考えられる。ま た、これらの結果の比較において、全水頭と 4He 年代の誤差情報のみでは比較が困難なため、逆 解析で推定される透水係数の推定誤差を比較することとした。安全評価などにおいても、透水係 数の校正値に対する推定誤差も示されていれば不確実性の指標になり、校正結果の確からしさを 判断し易いと考えられる。



図 3.1-2 地下水年代を考慮した地下水モデルの評価フロー

#### 3.1.2 逆解析手法および推定誤差の計算方法

#### (1) 逆解析

地下水モデルの校正には、図 3.1-3 に示すように、昨年度と同じく、修正マルカート法による 逆解析を用いた(Sun,1994)。逆解析は、以下の目的関数を最小にするように行った。

$$O(P_k) = \frac{1}{m - n} \sum_{m=1}^{m} \left( C_{oj} - C_{k0j} \right)^2$$
(3.1-1)

ここに、Oは目的関数、mは観測点数、nはパラメータ数、Cojはj地点での観測値、Ckojはj 地点での逆解析の繰り返し計算k回目の基本ケースの解析値である。

修正マルカート法では、目的関数を最小にするために、パラメータは次の手順で変更する。

$$P_{k+1} = P_k + \lambda_k d_k \tag{3.1-2}$$

ここに、 $P_{k+1}$ と  $P_k$ はそれぞれ次のステップ(k+1)とこのステップ(k)のパラメータ、 $\lambda_k$ は変化率、 $d_k$ (= $\Delta P_k$ )はガウス・ニュートン勾配であり、透水係数の変化方向である。

修正マルカート法では、以下のようにパラメータを変更する。

 $\Delta P_{ki} = \left(A_{kij}^T A_{kij} + \lambda_k I\right)^{-1} A_{kij}^T E_{kj}$ 

(3.1-3)

ここに、 $\Delta P_{ki}$ は k ステップでの i 番目のパラメータ変化率、 $A_{kij}$ は感度マトリックス、 $\lambda_k$ は 係数、I は単位行列、 $E_{kj}$ は誤差ベクトルである。 $\lambda$ が 0 の場合、 $\Delta P_k$ はガウス・ニュートン法と 同じになる。

具体的には、図 3.1-3 に示すように、基本パラメータでの解析値に対して、基本パラメータを 少し変化させて感度解析を行い、パラメータの変化に対する解析値の変化から、感度マトリック スを作成する。これらと誤差ベクトルから $\Delta P_{ki}$ を求める。式(3.1-2)に基づいて、次のパラメータ を求め、解析を行う。この解析値と前解析値とで収束判定を行い、誤差が小さくなっていればパ ラメータを修正し、再度感度解析に戻る( $k \rightarrow k+1$ )。収束しない場合には、式(3.1-3)で $\lambda$ を変化さ せて $\Delta P_{ki}$ を再度求め、このパラメータで解析を行い、収束判定を行う。収束すれば、感度解析に 戻るが、所定回数以上繰り返しても収束しない場合には、現在の基本パラメータを最適値とする。

#### (2) 推定誤差の計算方法

逆解析におけるパラメータの推定値に対し、パラメータの誤差分散は、次式で与えられる(Hill and Tiedeman, 2007)。

$$V(P_k) = \sigma(P_k) (A_k^T \omega A_k)^{-1}$$
(3.1-4)

推定パラメータ数が1つ、重み関数が単位行列とすると、以下のように書ける。

$$A_{kij} = \frac{dC_{kij}}{dP_{ki}} = \left[\frac{\Delta C_{k11}}{\Delta P_{k1}} \quad \frac{\Delta C_{k12}}{\Delta P_{k1}} \quad \cdots \quad \frac{\Delta C_{k1m}}{\Delta P_{k1}}\right]$$
(3.1-5)

$$\left(A_{kij}^{T}A_{kij}\right)^{-1} = \left[\frac{\Delta C_{k11}^{2} + \Delta C_{k12}^{2} + \dots + \Delta C_{k1m}^{2}}{\Delta P_{k1}^{2}}\right]^{-1} = \frac{\Delta P_{k1}^{2}}{\Delta C_{k11}^{2} + \Delta C_{k12}^{2} + \dots + \Delta C_{k1m}^{2}}$$
(3.1-6)

ここで、重み関数ωは単位行列とした。従って、

$$V(P_{k}) = \frac{\Delta \varepsilon_{k11}^{2} + \Delta \varepsilon_{k12}^{2} + \dots + \Delta \varepsilon_{k1m}^{2}}{m - n} \frac{\Delta P_{k1}^{2}}{\Delta C_{k11}^{2} + \Delta C_{k12}^{2} + \dots + \Delta C_{k1m}^{2}}$$
(3.1-7)

ここで、 $\Delta_{\epsilon kii}$ はkステップ目のi番目のパラメータに対するj地点での誤差である。

すなわち、実測値と解析値(基本ケース)の誤差をパラメータの変化に対する誤差(右辺2項)で スケール化した量になっている。

推定するパラメータが複数の場合、誤差分散は行列表示すると以下のようになり、誤差間の相 関も評価することができ、変数間の依存度も評価できる。

$$V(P_{k}) = \sigma(P_{k})(A_{k}^{T}\omega A_{k})^{-1} = \begin{bmatrix} Var(1) & Cov(1,2) & \cdots & Cov(1,NP) \\ Cov(2,1) & Var(2) & & \\ \vdots & & \ddots & \\ Cov(NP,1) & & Var(NP) \end{bmatrix}$$
(3.1-8)



#### 図 3.1-3 逆解析の手順

#### 3.1.3 全水頭および <sup>4</sup>He 年代の実測値を使用した透水係数の校正

地下水モデルの妥当性検証として、①校正(実測値を再現できるようにモデルを校正すること)、 ②検証(校正で未使用のデータで妥当性を確認すること)を実施する。瑞浪地域を対象にした地 下水モデルを用いて、全水頭および <sup>4</sup>He 年代の実測値を使用した透水係数の推定を行い、地下水 流動モデルの校正を行った。透水係数の推定では図 3.1-3の逆解析手法を用いた。また、推定さ れた透水係数の推定誤差を計算することで、推定結果がどの程度の確からしさで求められたかを 評価した。

#### (1) 概念モデルと解析モデル

瑞浪地域を対象とした地下水流動・物質移行解析を実施する。使用した解析コードは(一財) 電力中央研究所が開発した FEGM である。以下で、瑞浪地域の概念モデル、解析モデル、解析に 使用した実測値について示す。

#### 1) 瑞浪地域

瑞浪地域における地下水流動の概念モデルについては、これまでに(三枝ほか,2007)などに おいて、図 3.1-4 のようにまとめられている。瑞浪地域周辺の地質は、白亜紀の花崗岩(土岐花 崗岩)が広く分布し、これを基盤として、堆積岩(瑞浪層群)と砂礫層(瀬戸層群)が不整合に 覆うことが知られている。また土岐花崗岩は、上部に低角度傾斜(30°以下)の割れ目が卓越す る岩盤領域(上部割れ目帯)と、下部に比較的割れ目密度が低い岩盤領域(下部割れ目低密度帯) の2つに大きく区分できることが知られている。また、主要な断層としては月吉断層が確認され ている(三枝ほか,2007;尾上ほか,2015)。地下水年代の概念モデルについては、(Hasegawa et al., 2016)により、図 3.1-5のようにまとめられている。4He については、涵養域から流出域で は原位置生成量で蓄積しており、流出域では外部フラックスの影響が顕著になるため、流出域で は4He 年代の推定が困難である。<sup>14</sup>C については、涵養域において、地化学反応(炭酸塩鉱物の 溶解など)の影響を受けて希釈されるものの、涵養域で溶解平衡に達した後は、主に放射壊変で 濃度変化している。<sup>14</sup>C についても、流出域においては、地下水中の C が少ないため、バラつき が大きく <sup>14</sup>C 年代の推定が困難になっている。4He 年代と <sup>14</sup>C 年代については相関があり、この 相関から、4He の原位置生成速度、<sup>14</sup>C の涵養域における地化学反応による希釈が推測されてい る。







図 3.1-5 地下水年代の概念モデル

#### 2) 解析モデルの概要

解析モデルは、(尾上ほか,2007) に基づいて、図 3.1-6 のように作成した。解析メッシュは、 南北方向 9,600 m を 192 分割、東西方向 9,100 m を 182 分割、鉛直方向を地表面から標高-2,000 m を 73 分割程度で分割した。総節点数は 2,613,606、総要素数は 2,550,912 である。地層は、瀬 戸層群、瑞浪層群、土岐花崗岩の上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯、主要な断層である月吉断 層をモデル化した。その他の断層は下部割れ目低密度帯と同じ材質区分とした。

地下水流動の境界条件は図 3.1-7 に示すように、側面および底面を不透水境界とした。地表面 の境界条件の設定に、降雨涵養量の感度解析を実施した。透水係数の初期設定(瀬戸層群:1.0× 10<sup>-5</sup> m/s、瑞浪層群 kh:1.0×10<sup>-7</sup> m/s、瑞浪層群 kv:1.0×10<sup>-9</sup> m/s、上部割れ目帯:1.0×10<sup>-9</sup> m/s、下部割れ目低密度帯:1.0×10<sup>-8</sup> m/s、月吉断層:1.5×10<sup>-11</sup> m/s)において、降雨涵養量が 20 mm/yの時に実測値と解析値の整合性が良くなった。このことから、上記の際に計算される圧 力を地表面に固定した。降雨涵養量が 20 mm/y での透水係数の感度解析によると(日本原子力開 発機構・電力中央研究所,2019)、透水係数が小さいときは実測値と計算値の誤差が変化せず感度 は小さいが、透水係数が大きくなると地下水位が低下するため、実測値と計算値の誤差が大きく なる結果が得られている。このように、降雨量の設定値によって最適な透水係数が決まってしま うおそれがあるため、地表面に全水頭を固定した。

4He 年代の境界条件は図 3.1-8 に示すように、側面および底面をゼロフラックス境界、地表面 を濃度固定境界として原位置生成を考慮した。流出域の 4He 濃度の実測値は底部からのフラック スの影響を受けているものの、3He/4He を考慮して影響を排除したため、数値解析では考慮しな い。4He 年代の解析では、縦分散長 100 m、横分散長 10 m とした。これは、(Gelhar et al, 1992) が示しているように、縦分散長は移行距離の 1/10、横分散長は縦分散長の 1/10 に基づいて設定 した。また、間隙率は炉乾燥によって求めた 2%を使用した。この値は想定される最大の値であ り、不確実性が高い。割れ目のみでの輸送を想定すると、この値の 1/10~1/100 程度になる可能性 がある。



図 3.1-6 解析モデル


図 3.1-7 地下水流動の境界条件





#### 3) 使用する実測値とデータセットについて

全水頭の実測値を図 3.1-9 に示し、<sup>4</sup>He 年代の実測値には図 3.1-10 を示す。また、瑞浪地域に おける上記の実測値を取得したボーリング孔の位置を図 3.1-11 に示す。図 3.1-9 に示すように、 全水頭の実測値はボーリング孔の標高で決まり、深度方向に対して概ね一定であることが分かる。 全水頭は、流況を反映している場合、涵養域では深度とともに減少、流出域では深度とともに増 加するという形態を示す。しかし、地下水流動が少ないためか、そのような流況を反映した分布 とはなっていない。図 3.1-10 に示す <sup>4</sup>He 年代の実測値は、涵養域、中間域、流出域と徐々に古 くなっており、流況を反映した年代となっていることが分かる。



解析モデルの校正と検証方法はいくつか挙げられている(Spitz and Moreno, 1996)が、ここでは全水頭および <sup>4</sup>He 年代の実測値を校正用と検証用に分ける方法を採用した。手順として、まず校正用の実測値を使用して透水係数の校正を行い、次に校正で使用しなかった実測値(検証用の実測値)と解析結果を比較することで解析モデルが十分校正されたか検証を行う。透水係数の校正で使用するデータセットを表 3.1-1 に示す。また、表 3.1-1 中において、\*が付与している 孔名については、<sup>4</sup>He 年代の実測値があることを示す。データセットは、それぞれのデータセットに割り当てられた実測値の数が均等になるように留意しつつ、校正に使用する実測値の位置の 影響を評価するため、ボーリング孔ごとに以下の方法で分けた。

- ・ データセット1: 涵養域から流出域にわたって満遍なく抽出
- ・ データセット2:データセット1で未使用
- ・ データセット3: 涵養域周辺の実測値を主に抽出
- ・ データセット4:中間域から流出域にかけて抽出(データセット3で未使用)
- データセット5:全ての実測値

校正において実測値の配置がどう影響するのかを検討するため、データセット 1・2 ではデー タを全領域から万遍なく、データセット 3・4 では涵養域・流出域にわけて設定した。ボーリング 孔ごとに実測値を選んだ理由としては、透水係数の校正を効率良く行う上で、優先的に調査すべき地点(つまり、概要調査などで優先して実測値を取得すべき場所)を明らかにするためである。

	→1 <i>L</i>					
	孔名	4He	データセット1	データセット2	データセット3	データセット4
	DH-3	*	DH-3		DH-3	
涵	DH-13	*		DH-13	DH-13	
<b></b> 載	DH-9	*		DH-9	DH-9	
	DH-11		DH-11		DH-11	
	MIU-1		MIU-1		MIU-1	
中間域	MIU-2			MIU-2	MIU-2	
	MIU-3	*	MIU-3			MIU-3
	MIU-4	*		MIU-4		MIU-4
	MSB-1			MSB-1		MSB-1
	MSB-2		MSB-2			MSB-2
	MSB-3			MSB-3		MSB-3
流	MSB-4		MSB-4		MSB-4	
山城	MIZ-1			MIZ-1	MIZ-1	
	DH-2			DH-2		DH-2
	DH-15		DH-15			DH-15
	DH-12	*	DH-12			DH-12
3	データの選	び方	均等	均等	涵養域~中間域	中間域~流出域

表 3.1-1 校正に使用するデータセット

逆解析によって校正する地層の透水係数は、①瑞浪層群の水平方向 kh(kxx = kyy)、②瑞浪層 群の鉛直方向 kv(kzz)、③上部割れ目帯、④下部割れ目低密度帯、⑤月吉断層を対象とした。感度 解析の結果によると(日本原子力開発機構・電力中央研究所, 2019)、瀬戸層群は非常に薄く、透 水係数は感度が小さいため、透水係数を 1.0×10<sup>-5</sup> m/s に固定して逆解析を実施した。ここで校正 する透水係数に関する文献値(尾上ほか, 2015)および逆解析時の透水係数の初期値を表 3.1-2 にまとめる。

	瑞浪	層群	花園	菌岩		
	水平方向 kh	鉛直方向 kv	し如割を日世	下部割れ目	月吉断層	
	(kxx = kyy)	(kzz)	上司 刮 4 0 日 ന	低密度帯		
立赴(m)	$14 \times$	10-8	$5.8  imes 10^{-8}$	$2.2  imes 10^{-8}$		
又瞅他 (m/s)	(10-6	$8^{\pm}1 0$ )	$(10^{-7}  {}^{2^{\pm}1}  {}^{0})$	$(10^{-7}  {}^{7\pm1}  {}^{6})$		
初期值 (m/s)	$10 \times 10^{-8}$ $0.1 \times 10^{-8}$		$10 \times 10^{-8}$	$1.0  imes 10^{-8}$	$1.5  imes 10^{-11}$	

表 3.1-2 透水係数の文献値および初期値

## (2) 全水頭による透水係数の校正

データセット1・2・5における全水頭による透水係数の校正値とその推定誤差を図 3.1-12 に 示す。また、データセット3・4・5における全水頭による透水係数の校正値とその推定誤差を図 3.1-13に示す。また、全水頭による透水係数の校正値とその推定誤差を表 3.1-3にまとめる。デ ータセットの違い(つまり、使用する実測値の位置)によって、透水係数の校正値が異なる。ま た、校正対象である多くの地層で、透水係数の校正値は約1桁以上の推定誤差を有する。さらに、 いずれのデータセットでの校正値も実測値と整合性が良くない。データセット5はすべての結果 を使っているため、もっとも推定値が良くなるはずであるが、実測値とはかけ離れた値になって いる。ただし、全体的な透水係数の相対的な関係、例えば、データセット3と5は推定結果が近 い、データセット1,2,4 はデータセット5に比べて全体に1~2桁透水係数が低くなるなどは整合 している。これは、全水頭の分布、すなわち流動方向が、透水係数の相対的なバランスによって 決まるためと考えられる。一部に高透水領域や低透水領域ができた場合には、全水頭の分布が変 化し流動形態が変化してしまう。透水係数の推定誤差が非常に大きい点から見ても、全水頭の分 布は、十分に透水係数の制約条件になっていないと考えられる。これは、地表面を水圧固定にし ているため、全水頭も深度方向に変化がなく、ボーリング孔の標高でほぼ決まっており、特徴が ないためと考えられる。





図 3.1-12 テータセット 1・2・5 における全水頭 による透水係数の校正値と推定誤差

図 3.1-13 データセット 3・4・5 における全水頭 による透水係数の校正値と推定誤差

	瑞浪層積	牂 (m/s)	花崗岩	∃ (m/s)	日士派团						
	水平方向 kh	鉛直方向 kv	上部	下部割れ目	月 吉 例 唐 (m/s)						
	(kxx = kyy)	(kzz)	割れ目帯	低密度帯	(111/5)						
データセット1	$1.0  imes 10^{-6}$	$1.2 \!  imes \! 10^{-9}$	$1.0  imes 10^{-8}$	$1.0  imes 10^{-9}$	$1.5  imes 10^{-10}$						
7 7 2 9 1 1	$(10^{-6\ 0^{\pm}1\ 7})$	$(10^{-8}  {}^{9\pm1}  {}^{6})$	$(10^{-8}  {}^{0\pm2}  {}^{6})$	$(10^{-9}  {}^{0^{\pm}1}  {}^{5})$	$(10^{-98\pm18})$						
デーカセットの	$1.0  imes 10^{-5}$	$1.4  imes 10^{-8}$	$1.0  imes 10^{-7}$	$1.0  imes 10^{-8}$	$1.5  imes 10^{-13}$						
7-92912	$(10^{-5}  {}^{0^{\pm}2}  {}^{2})$	$(10^{-7}  {}^{9\pm1}  {}^{9})$	$(10^{-7}  {}^{0^{\pm}3}  {}^{4})$	$(10^{-8}  {}^{0\pm2}  {}^{4})$	$(10^{\cdot 12}  {}^{8\pm 309})$						
デークセットの	$1.0  imes 10^{-9}$	$1.0  imes 10^{-11}$	$1.0  imes 10^{-10}$	$1.0  imes 10^{-11}$	$1.5  imes 10^{-14}$						
7-92913	$(10^{-9}  {}^{0^{\pm}3}  {}^{9})$	$(10^{\cdot 11^{\pm}3}  {}^9)$	$(10^{\cdot 10^{\pm 5}  0})$	$(10^{-11^{\pm_3}6})$	$(10^{\cdot 138 \pm 50})$						
デーカセットイ	$4.0  imes 10^{-7}$	$1.8  imes 10^{-10}$	$1.0  imes 10^{-10}$	$1.3  imes 10^{-10}$	$1.5  imes 10^{-12}$						
7-92914	$(10^{-6}  {}^{4\pm_0}  {}^{4})$	$(10^{-9}  {}^{9\pm 0}  {}^{4})$	花崗岩 (m/s)           水         上部         下部割れ目           割れ目帯         低密度帯           1.0×10 <sup>-8</sup> $1.0 \times 10^{-9}$ $(10^{\cdot 8 0^{\pm 2} 6})$ $(10^{\cdot 9 0^{\pm 1} 5})$ 1.0×10 <sup>-7</sup> $1.0 \times 10^{\cdot 8}$ $(10^{\cdot 7 0^{\pm 3} 4})$ $(10^{\cdot 8 0^{\pm 2} 4})$ $1.0 \times 10^{\cdot 7}$ $1.0 \times 10^{\cdot 10}$ $(10^{\cdot 10^{\pm 5} 0})$ $(10^{\cdot 11^{\pm 3} 6})$ $1.0 \times 10^{\cdot 10}$ $1.3 \times 10^{\cdot 10}$ $(10^{\cdot 10^{\pm 5} 0})$ $(10^{\cdot 9 9^{\pm 0} 6})$ $1.0 \times 10^{\cdot 10}$ $4.3 \times 10^{\cdot 11}$ $(10^{\cdot 10^{\pm 2} 3})$ $(10^{\cdot 10 4^{\pm 1} 8})$ $5.8 \times 10^{\cdot 8}$ $2.2 \times 10^{\cdot 8}$ $(10^{\cdot 7 2^{\pm 1} 0})$ $(10^{\cdot 7 7^{\pm 1} 6})$	$(10^{-118\pm0.7})$							
デーカセット	$1.0  imes 10^{-9}$	$1.0  imes 10^{-11}$	$1.0  imes 10^{-10}$	$4.3  imes 10^{-11}$	$2.3  imes 10^{-14}$						
7-92915	$(10^{.9\pm_2 2})$	$(10^{-11\pm1}  {}^9)$	$(10^{\cdot 10^{\pm}2}{}^3)$	$(10^{-10}  {}^{4\pm1}  {}^8)$	$(10^{\text{-}136^{\pm}65})$						
大赴店	$14 \times 10^{-8}$		$5.8  imes 10^{-8}$	$2.2  imes 10^{-8}$							
又瞅胆	(10-6	$8^{\pm}10)$	$(10^{.72^{\pm_{1}}0})$	$(10^{.7}  {}^{7\pm1}  {}^{6})$	_						

表 3.1-3 全水頭による透水係数の校正値と推定誤差

データセット1・2・5 における校正結果での実測値と解析値を比較した結果を図 3.1-14 に示 す。また、データセット3・4・5 における校正結果での実測値と解析値を比較した結果を図 3.1-15 に示す。図 3.1-14、図 3.1-15 において、塗りつぶしが校正時の結果で、白抜きが検証時の結果 を示している。データセット4では、透水係数の校正によって、全水頭150m付近の計算結果を 修正できたことが分かる。その他のデータセットについては、校正時と検証時ともにプロットの 分布が大きく変わらず、実測値と計算結果の誤差が大きい。



校正および検証での全水頭の平均絶対誤差を表 3.1・4 にまとめる。検証では、前述の通り、校 正に使用しなかった実測値と解析値で平均絶対誤差を計算した。校正での平均絶対誤差について、 データセット4で非常に小さいが、検証での平均誤差は17.0 mと他の結果とほぼ同じになって いる。それ以外では、校正および検証の平均絶対誤差は、同程度の値となっている。すべてのデ ータを用いたデータセット5の校正の平均絶対誤差が、他の校正結果に比べてもっとも大きくな っており、すべての結果を整合的に説明できる透水係数の設定は難しい可能性が高い。逆にデー タセット1では、校正よりも検証の平均誤差が小さくなっている。これは、校正しても誤差が小 さくならないデータが含まれている可能性がある。

このように全水頭でのモデルの校正では、データセット毎に推定値のバラツキが大きく、推定 誤差も大きくなっている。これは、境界条件を地表面圧力固定としており、広域的な地下水流動 に対して全水頭に感度がないためと考えられる。

	データセット1	データセット2	データセット3	データセット4	データセット5
校正 (m)	18.6	14.3	19.5	6.6	20.8
検証 (m)	16.1	17.2	23.4	17.0	-

表 3.1-4 校正および検証での全水頭の平均絶対誤差

## (3) <sup>4</sup>He 年代による透水係数の校正

データセット1・2・5における <sup>4</sup>He 年代による透水係数の校正値と校正値の推定誤差を図 3.1-16 に示す。また、データセット3・4・5における <sup>4</sup>He 年代による透水係数の校正値と校正値の推定

誤差を図 3.1-17 に示す。また、4He年代による透水係数の校正値と推定誤差を

表 3.1-5 にまとめる。<sup>4</sup>He 年代による透水係数の校正値は、ケースごとのばらつきが小さいこ とがわかる。特に花崗岩の上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯では、非常に校正値がそろった結 果となっており、対数紙上では-7.5 程度で推定されている。また、校正値の推定誤差も非常に小 さく、特に花崗岩の下部割れ目低密度帯では対数スケールで±0.1~0.2 となっており、推定精度の 高さを反映していると考えられる。これは、<sup>4</sup>He 年代の実測値が主に花崗岩内に集中しているこ とが理由の一つに挙げられる。逆に、瑞浪層群や月吉断層で校正値にばらつきがあり、推定誤差 が大きいのは、これらの地層に実測値が少ないため、校正がうまくいっていないとも考えられる。 花崗岩での透水係数の校正値は、実測値(透水係数の対数平均値)とも整合性が高いのも特徴的 である。



	瑞浪層種	牂 (m/s)	花崗岩	₩ (m/s)	日十条团
	水平方向 kh	鉛直方向 kv	上部	下部割れ目	
	(kxx = kyy)	(kzz)	割れ目帯	低密度帯	(m/s)
ゴークセット1	$1.8  imes 10^{-8}$	$3.0  imes 10^{-9}$	$2.2  imes 10^{-8}$	$2.0  imes 10^{-8}$	$4.2  imes 10^{-10}$
7-92911	$(10^{-7}  {}^{8\pm4}  {}^{3})$	$(10^{-8}{}^{5\pm0}{}^2)$	$(10^{-7}  {}^{7\pm_0}  {}^3)$	$(10^{-7}  {}^{7\pm_0}  {}^1)$	$(10^{-9}  {}^{4\pm0}  {}^{4})$
ゴークセットの	$6.2  imes 10^{-8}$	$9.7  imes 10^{-10}$	$4.5  imes 10^{-8}$	$2.5  imes 10^{-8}$	$1.5  imes 10^{-11}$
7-92912	$(10^{-7}  {}^{2^{\pm}3}  {}^{3})$	$(10^{-9}  {}^{0\pm 3}  {}^{0})$	$(10^{-7}  {}^{3\pm0}  {}^7)$	$(10^{-7}  {}^{6\pm 0}  {}^2)$	$(10^{-10}  {}^{8\pm3}  {}^{0})$
デークセットの	$2.4  imes 10^{-6}$	$3.6  imes 10^{-9}$	$1.1  imes 10^{-8}$	$1.6  imes 10^{-8}$	$3.4  imes 10^{-10}$
7-92913	$(10^{-5}  {}^{6\pm3}  {}^{6})$	$(10^{-8} 4^{\pm} 45)$	$(10^{-7}  {}^{9\pm0}  {}^{9})$	$(10^{-7}  {}^{8\pm 0}  {}^{5})$	$(10^{-9}{}^{5\pm3}{}^{1})$
ゴークセットイ	$1.6  imes 10^{-8}$	$4.2  imes 10^{-10}$	$2.7  imes 10^{-8}$	$2.8  imes 10^{-8}$	$2.4  imes 10^{-11}$
ワータセット4	$(10^{-7}  {}^{8\pm2}  {}^{5})$	$(10^{-9}  {}^{4\pm 0}  {}^{6})$	$(10^{-7}  {}^{6\pm0}  {}^7)$	$(10^{-7}  {}^{5\pm 0}  {}^2)$	$(10^{-10.6\pm1.9})$
データセット	$2.5  imes 10^{-8}$	$4.3  imes 10^{-10}$	$3.8  imes 10^{-8}$	$2.4  imes 10^{-8}$	$1.6  imes 10^{-10}$
7-96915	$(10^{.7}  {}^{6\pm 0}  {}^8)$	$(10^{-9}  {}^{4\pm0}  {}^{7})$	$(10^{.74\pm_{0}2})$	$(10^{.7}  {}^{6\pm 0}  {}^{1})$	$(10^{-9}8^{\pm0}3)$
<b>立</b> 赴店	14×	10-8	$5.8  imes 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-8}$	
又厭胆	(10-6	$8^{\pm 1}0)$	$(10^{.72^{\pm_{1}}0})$	$(10^{-7}  {}^{7\pm1}  {}^{6})$	

表 3.1-5 <sup>4</sup>He 年代による透水係数の校正値と推定誤差

全水頭の校正値(図 3.1-12、図 3.1-13)と 4He 年代の校正値(図 3.1-16、図 3.1-17)を比較 すると、4He 年代の方が実測値とも整合性が高く、推定誤差も小さいため、精度良く校正できた ことが分かる。これは、滞留時間は地層の透水係数と相関性が高く、透水係数に感度が高いため であると考えられる。これらの結果から、4He 年代は地下水モデルの校正や透水係数の推定に有 効であることが確認できた。

データセット1・2・5における校正結果での実測値と解析値を比較した結果を図 3.1-18 に示 す。また、データセット3・4・5における校正結果での実測値と解析値を比較した結果を図 3.1-19 に示す。図 3.1-18、図 3.1-19において、塗りつぶしが校正時の結果で、白抜きが検証時の結果 を示している。データセットに関わらず、校正に使用した実測値と計算結果での誤差が小さく、 検証に使用した実測値と計算結果で誤差が大きい。



校正および検証での <sup>4</sup>He 年代の平均絶対誤差を表 3.1-6 にまとめる。なお、<sup>4</sup>He 年代の実測値 と解析値は常用対数をとり、平均絶対誤差を計算した。データセットの違いによる、校正での平 均絶対誤差の顕著な差異は認めらない。また、全てのデータセットで校正と検証での平均絶対誤 差の差は小さい。検証結果は校正結果より誤差は大きくなるものの、1.50 倍~1.69 倍 (データセ ット 1) ほどの実測値と計算値の誤差であることが分かる。

表 3.1-6 校正および検証での <sup>4</sup>He 年代の平均絶対誤差(対数)

	データセット1	データセット2	データセット3	データセット4	データセット5
校正 (m)	$0.09 \\ (10^{0.09} = 1.23)$	0.17 (10 <sup>0 17</sup> =1.49)	$0.14 \\ (10^{0} {}^{14}=1.39)$	$0.12 \\ (10^{0} {}^{12}=1.33)$	0.15 (10 <sup>0 15</sup> =1.40)
検証 (m)	$0.23 \\ (10^{0} {}^{23}=1.69)$	$0.18 \\ (10^{0.18} = 1.50)$	$0.19 \\ (10^{0.19} = 1.55)$	$0.19 \\ (10^{0.19} = 1.55)$	-

#### 3.1.4 まとめ

地下水モデルによる評価では、①校正(実測値を再現できるようにモデルを校正すること)、②

検証(校正で未使用のデータで妥当性を確認すること)が重要である。ここでは、瑞浪地域を対 象に全水頭および <sup>4</sup>He 年代の実測値を使用した透水係数の校正を行い、地下水モデルの校正を行 った。また、校正された透水係数の推定誤差を計算し、校正結果の確からしさを評価した。さら に、校正に使用する実測値の位置の影響を評価するために、涵養域から流出域にかけて偏りなく 実測値を抽出した場合と、涵養域ならびに流出域に偏って実測値を抽出した場合で、地下水モデ ルの校正を行った。

全水頭による透水係数の校正では、データセット(つまり、使用する実測値の位置)によって、 校正された透水係数の値が異なり、バラつきが大きかった。また、校正対象とした多くの地層で 透水係数の校正値は約1桁以上の推定誤差があった。このため、全水頭ではモデルの校正があま りうまくいっていないと考えられる。これは、地表面に圧力を固定しており、地下水の流動が少 ないため、解析結果が透水係数の変化に敏感でないこと、全水頭の実測値もボーリング孔の標高 でほぼ決まっており、涵養域や流出域に特徴的な挙動を示していないためであると考えられた。

<sup>4</sup>He 年代による透水係数の校正では、花崗岩(上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯)はデータ セットの違いに関わらず、概ね同等の透水係数に校正でき、推定誤差も小さかった。<sup>4</sup>He 年代の 実測値の位置が花崗岩に集中していることが理由の一つに挙げられる。

全水頭と<sup>4</sup>He 年代の校正結果を比較すると、<sup>4</sup>He 年代の校正結果の方が実測値とも整合してい る。加えて、データセットの違いによる校正結果の推定誤差が小さかったことから、精度よく校 正できたことが分かる。これは、滞留時間は低透水の地層の透水係数と関連性があり、透水係数 に感度が高いためであると考えられる。また、<sup>4</sup>He 年代による校正結果を検証したところ、1.50 ~1.69 倍ほどの実測値と計算値の誤差であった。これより、校正に使用しなかった実測値と計算 値でも誤差が小さく、十分に地下水モデルが校正されたことを示す。

瑞浪地域では、全水頭および 4He だけでなく、14C など他の天然トレーサーを使った地下水年 代測定が行われている。地下水中の 4He 濃度は地層中で蓄積することで増加するが、地下水中の 14C 濃度は地下に涵養してから放射壊変により減少する。これらの天然トレーサーの特性の違い は、感度がある地層および物性の違いに関連している可能性が高い。そこで、今後は、全水頭お よび 4He 年代だけでなく、14C 年代の実測値を使用して、地下水モデルの透水係数の校正を行う ことを予定している。また、ここでは、全水頭および 4He 年代の実測値をそれぞれ独立に使用し て校正したが、全水頭と 4He 年代の実測値を合わせて使用する技術を確立することで精度よく地 下水モデルを校正できる可能性があるため、このような組み合わせについても検討していく予定 である。

## 3.1.5 参考文献

- Hasegawa, .T, Nakata. K., Tomioka, Y., Kazuyuki G., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M.,Cross-checking groundwater age by 4He and 14C dating in a granite, Tono area, central Japan, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol.192, 166-185, 2016.
- Hill, M.C and Tiedeman, C.R, Effective groundwater model calibration with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty, Wiley Inter-Science, p.455, 2006.
- 尾上博則、小坂寛、竹内竜史、三枝博光,超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究);第 2段階におけるサイトスケールの水理地質構造モデルの構築、JAEA-Research2015-008,146p, 2015.

日本原子力研究開発機構・電力中央研究所、岩盤中地下水移行評価手法高度化開発、2019.

Spitz, K. and Moreno, J. 著, 岡山地下水研究会 訳, 実務者のための地下水環境モデリング, 技

報堂出版, p.321, 2003.

- Sun, N-Z., Inverse Problems in groundwater modeling, Kluwer Academic Publisher, 337p, 1994.
- 三枝博光,瀬野康弘,中間茂雄,鶴田忠彦,岩月輝希,天野健治,竹内竜史,松岡稔幸,尾上博則,水野 崇, 大山卓也,濱 克宏,佐藤稔紀,久慈雅栄,黒田英高,仙波 毅,内田雅大,杉原弘造,坂巻昌工, 超深 地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書,JAEA-Research 2007-043, 337p, 2007.

## 3.2 地下水年代測定技術の高度化

#### 3.2.1 背景と目的

放射性廃棄物処分の安全評価においては、施設から漏出した核種が地下水によって輸送される 「地下水シナリオ」が重要なシナリオであると考えられている。このシナリオでは放射性核種の 壊変による減衰を評価するため、放射性廃棄物の処分場周辺は地下水流動がほとんど動かないか 極めて遅い速度で流動していることが望ましい。地下水流速を評価する方法として、例えば透水 試験や流向流速測定といった手法があるが、透水係数は試験を実施した局所的な値であり、処分 場スケールの場全体を把握することは難しく、透水係数から流速を求めるにはさらに動水勾配や 有効間隙率のパラメータが別途必要とされる。流向流速測定は、直接的に地下水流速が測れると いう意味で有益であるが、流速測定が数 cm/y 以下のような遅い流速を評価するのは、ボーリン グ掘削や計測装置の設置による擾乱の影響が大きく、拡散の影響を受けるため、困難であると考 えられる。一方、地下水の地下での滞留時間(地下水年代)は広域における長期の地下水流動を 推定するのに、有用な情報である。評価対象となる場における地下水年代の分布を明らかにする ことで、涵養域・流出域を特定し、地下水の流向を明らかにすることができる。さらに、地下水 年代と涵養域との距離から広域のマクロな(局所的ではない)地下水流速を算出することが可能 であり、これらの情報は放射性廃棄物処分場の選定や安全評価に重要な情報となる。

図 3.2-1 に示すように、これまでに地下水に溶存する溶存イオンやガスの濃度およびそれらの 同位体比から、地下水年代を評価する方法を整備してきた。これによって、数万年から数百万年 のような滞留時間の長い地下水が国内にも存在することを示すことができた。



図 3.2-1 地下水年代測定法の種類と評価時間スケール

一方、それぞれの手法には長所と短所が存在し、適用する上で必要な条件も存在する。このため、対象となる地下水に複数の年代評価法を適用し、整合性を確認することが結果の信頼性向上のために必要とされている。近年の技術開発により、<sup>39</sup>Ar・<sup>81</sup>Kr・<sup>129</sup>I などは新たに地下水年代のトレーサーとして使用できる可能性が指摘されている。これらの適用性を確認することにより、適用可能な年代評価法を増やすことができ、結果として地下水年代評価法の精度を高めることが可能となる。また、<sup>4</sup>He・<sup>14</sup>C・<sup>36</sup>Cl・希ガス温度計などの既存技術についても、前処理方法や分析方法の改良によって、測定精度や適用性の向上が期待できる。処分場の選定や安全評価に必要とされる精度を意識しつつも、測定等の精度を向上できる技術を開発しておくことは、安全評価の精度向上に資するものと考えられる。

以上のことから、本研究においては、(1)新しい地下水年代手法の整備、(2)採取・分析・前処理 方法の高度化、について検討を実施した。(1)新しい地下水年代手法の整備については、新しいト レーサーとして<sup>81</sup>Krに着目し、採取方法や瑞浪地域の地下水への適用結果についてまとめる。ま た、<sup>129</sup>I については処分場建設等に伴い、大きな坑道を掘削した際の若い地下水の流入指標とし ての有用性を検討した。(2)採取・分析・前処理方法の高度化については、無機炭素濃度が低く<sup>14</sup>C も小さい場合の最適な採水方法について検討したほか、希ガス温度計においては新しい誤差評価 方法(感度マトリクス法)を適用し涵養温度評価における誤差を評価した。さらに、既往の研究 において、希ガスの分析については圧力が開放されたときの脱ガスの影響が顕著であることがわ かったため、これを防ぐことができる簡易な原位置サンプラー(パッシブサンプラー)について 検討した結果をまとめた。

#### 3.2.2 新しい地下水年代評価手法の整備と高度化

## (1) 新しい年代評価手法の整備

1) <sup>81</sup>Kr の瑞浪地域地下水への適用

#### ① 適用の目的

地層処分に求められる科学的特性を明らかにするために、科学的特性マップが示された(経済産 業省資源エネルギー庁、2017)。300m 以深の地下深部では塩分濃度が高くメタン濃度も高い地下 水も存在しており、我が国の地層処分のための地層・深層地下水特性(深部地下水のイオン濃度 と共存ガス濃度が高い条件)に適応した抽出システムの構築が必須である。

近年、Radio-Kr の抽出に利用される Hollow fiber 法と真空脱ガス法は、大量の地下水から効率的に放射性 Kr を抽出できる特徴があるが、日本で HLW の地層処分のサイト周辺の地下水で <sup>81</sup>Kr を抽出するためには、1)現代の大気性 <sup>81</sup>Kr の汚染防止と、2)地下水より Kr を抽出できる システムの構築が重要である(Ohta et al., 2019)。第一の現代の大気性 <sup>81</sup>Kr の汚染防止は、正確 な地下水中の <sup>81</sup>Kr 値を得るために、必須の条件である。一方、2)の Kr 抽出率向上のためには、 抽出時の地下水の流量を低くする手法がオーソドックスな手法である。一方、抽出率低下と供に 現代の大気性 <sup>81</sup>Kr のコンタミネーションの増加が懸念される。真空脱ガス法では、真空装置の密 閉性が課題である。Hollow fiber 法および真空脱ガス法の両システムに共通した課題は、リーク 量の最小化であり、リーク量を抑えるために捕集時間を短くすることも重要である。

透水係数が小さい流動性の低い地下水では、抽出ラインに導入する地下水流量に制限があるため、より低流量で地下水中の Kr を抽出する必要がある。一方、透水係数が大きな場の流動性の高い地下水中の Kr を抽出するためには、低流量で Kr を抽出するよりも、大流量で Kr を抽出するほうが、最終的なコンタミネーションが小さくなると考えられる。

ここでは、瑞浪の流動性の高い深部地下水を対象として、地下水中の Kr を抽出し、Hollow fiber 法と真空脱ガス法を利用した現場への適用時における Kr の抽出率の比較を行った。さらに、瑞 浪坑道内の地下水を対象に、Hollow fiber 法による Radio-Kr の抽出を行い、<sup>81</sup>Kr 法による地下 水年代測定の適用を行った。

#### ② 採取方法

Radio Kr 分離技術は、Hollow fiber system(Ohta et al., 2019)と真空脱ガスシステムの2系統 で比較・分析を行った。Hollow fiber 装置は、中空糸膜を内蔵した装置であり、中空糸膜の内側 を真空に脱気し、膜と接触したガスを捕集できるシステムである。図 3.2-2 に装置の概念図を示 す。図 3.2-3 に真空脱気による地下水中のガス抽出システムを示す。真空脱ガス装置は、真空タ ンク内に地下水をパージし、地下水中の遊離態のガスと溶存態のガスを気層に分離し、ガスを捕 捉させるシステムである。両システムとも、地下水を実験室に運搬せずに、現地で地下水中のガ スのみを分離し、ガスのみを持ち帰ることができるシステムである。



図 3.2-2 中空糸膜法による地下水中のガス分離





## ③<sup>81</sup>Krの評価・適用結果

瑞浪の深度 300mの地下水へ Hollow fiber 法と真空脱ガス法の適用を行った。まず、Hollow fiber 法と真空脱ガス法によるマトリックスガスを確認するために、抽出ガス中の  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ をガスクロマトグラフィーで測定を行った。

図 3.2-4 に抽出したガス中の主要ガス成分の O<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>を示す。図 3.2-5 より、真 空脱ガス法および Hollow fiber 法により脱ガスできるメインは N<sub>2</sub> であることがわかった。







(a)Hollow fiber 法



(b)真空脱ガス法図 3.2-5 Hollow fiber 法および真空脱ガス法による希ガスの抽出率

次に、地下水の原水の圧力の変化を極力小さくし、Cu tube に封圧採水を行った。次に、Hollow fiber および真空脱ガス装置によりガスを抽出した後の水を Cu tube に通水させ、水中のガスを 密封した。水試料を封入した Cu tube は、クランプで Cu tube 両端を圧着させ、大気性のコンタ

ミネーションを防止した。原水および、Hollow fiber 適用後の水試料中の He は希ガス質量分析 計で、Ne, Ar, Kr, Xe は QMS で計測を行った。図 3.2-5 に瑞浪地下水で適用された He, Ne, Ar, Kr, Xe の抽出効率を示す。真空脱ガス法と Hollow fiber 法による Kr 抽出効率はそれぞれ 73-82% と 92-94%程度であることがわかった。瑞浪の地下水は脱ガスがさほど顕著ではないため、溶存 態の Kr は遊離体の Kr より支配的であり、溶存態の抽出効率の良い Hollow fiber 法のほうが、 真空脱ガス法より地下水中の Kr の抽出率が高くなったと考えられた。

次に、深部 500m の地下水中のガスを Hollow fiber 法で採取し、<sup>81</sup>Kr を ATTA で分析を行った。化石海水と天水起源の混合率より、化石海水-天水起源淡水の混合領域の天水起源の淡水の涵養年代を求めたところ、2±1万年であり、流出域の <sup>14</sup>C 年代(Hasegawa et al., 2016)と一致することがわかった。地下水中の <sup>14</sup>C の抽出システムに関しては Nakata et al. (2016)を参照されたい。

#### 2) 若い地下水の流入指標としての<sup>129</sup> の適用

#### ① 適用の目的

深部地下水への若い水の混入率の評価のため、CFCs, SF6, <sup>85</sup>Kr, <sup>3</sup>H などの人為起源および天然 トレーサー利用が活用されている(Hasegawa et al., 2016,)。しかし、CFCs, SF6, <sup>85</sup>Kr は近年活 発化した人間活動に付随した化学種および人為起源放射性核種であり、観測できる年代に限りが ある(Ohta et al., 2009; Visser et al., 2009; Busenberg et al., 2000; Gooddy et al., 2006; Stadler et al., 2010; Asai et al., 2011; Bauer et al., 2001; Cook et al., 1997; Corcho et al., 2005; Corcho et al., 2007; Rozanski et al., 2003; Side and Fischer 2003; Side 2006; Smethie et al, 1992)。ト リチウムは天然起源の放射性核種だが、近年の濃度は 10 TU 以下と濃度が低く、測定が困難にな ってきている。一方、<sup>129</sup>I は半減期 1570 万年の超寿命放射性核種であり、核実験以後の原子力稼 働および再処理の過程を含む人間活動の活発化により、近年はけた違いに濃度が高くなっている (Ohta et al., 2013)。<sup>129</sup>I は半減期の長さから、今後削減される可能性が低いため、ここでは、若 い地下水流入指標として、<sup>129</sup>I の活用の検討を行うとともに、研究坑道掘削後の深部地下水中の <sup>3</sup>H と <sup>129</sup>I の比較を行った。

#### ② 採取方法

<sup>3</sup>H 分析用の試料は蒸留を行い、電解濃縮後に液体シンチレーションカウンターでβカウンティ

ングを行い、<sup>3</sup>H 濃度を求めた。<sup>3</sup>H 濃度が 1TU 以下の試料は、金属容器に試料溶液を入れ、脱ガスを行い、地下水中の <sup>3</sup>He を除去した後に <sup>3</sup>H より生じる <sup>3</sup>He を蓄積させた。蓄積した <sup>3</sup>He を希ガス質量分析計で測定を行い、試料中の <sup>3</sup>H 濃度を求めた

## ③ 適用結果

地下水中の<sup>129</sup>I 濃度は 5.1×10<sup>4</sup> atom/L - 7.2×10<sup>6</sup> atom/L の範囲にあった。一方、<sup>3</sup>H 濃度は 0.03 TU-0.7 TU の範囲にあった。地下水中の<sup>3</sup>H 濃度と<sup>129</sup>I 濃度の相関係数は、0.956 であり、<sup>3</sup>H と<sup>129</sup>I は相関が高いことがわかった。次に、酸化雰囲気および還元雰囲気の場に応じた地下水中の<sup>129</sup>I の挙動を推測するために、酸化雰囲気と還元雰囲気で、岩石-水中の<sup>127</sup>I のバッチ試験を行った。 酸化雰囲気および還元雰囲気で花崗岩(瑞浪および蛭川花崗岩)とヨウ素溶液(I, IO<sub>3</sub>)を混合し、 振トウを行った。シントウ後、静置を行い、ICP-MS で<sup>127</sup>I の測定を行った。ヨウ素の分配係数 (Kd)は酸化還元電位(Eh)が低下するにしたがって小さくなった。酸化還元電位は-n×100 mV 付近でも Kd がほぼゼロになることが示された。地下深部の地下水中の酸化還元電位は-n×100 mV のオーダ ーであるため、沿岸の還元雰囲気中の地下深部では、Retardation factor は 1 となり、岩石の割れ 目・間隙中のヨウ素同位体は地下水の流れとともに移動できると考えられる。

したがって、酸化還元電位が 0 mV 付近以下の花崗岩地帯の地下環境では <sup>129</sup>I は地下水とともに 移動できるトレーサーとして活用できると考えられる。

陸域・海域では、地球規模・ローカルレベルのヨウ素の物質循環の過程を通じ、植物・海水・ 陸域地表面よりヨウ素が大気中に放出され、大気中のヨウ素を含むエアロゾルの washout、fallout によりヨウ素を含む降水が陸域や海域へ沈着する。海水中のヨウ素の形態は主に IO<sub>3</sub>であるが (Hou et al., 2007)、陸水中のヨウ素の形態は溶存態(I<sup>\*</sup>, IO<sub>3</sub>など)や懸濁態など様々な形態で存在し ている(Muramatsu et al.,2001, Ohta et al.,2012)。近年、Fallout 核種の不飽和層中の分布や形態別分 離試験では、<sup>129</sup>I は主に有機物に賦存している。また、不飽和層中の人工起源の<sup>129</sup>I の環境動態解 析では、Fallout より数年程度の時間スケールでは、不飽和層中のヨウ素は Fe, Mn 酸化物態が有機 物結合態より優勢である(Ohta et al., 2016)。一方、有機物の少ない花崗岩地帯では、遅延がほとん どないと考えられた。したがって、<sup>129</sup>I は核実験後の若い地下水の流入指標として適用できる可 能性があると考えられた。地下水中の<sup>129</sup>I より推測された若い地下水の混入率のマップは図 3.2-6 のようになると推測された。



図 3.2-6 <sup>129</sup> により推測された若い地下水流入マップ

## (2) 採水・分析・前処理方法の高度化

## 1) 地下水採取方法が無機<sup>14</sup>Cの値に与える影響の評価

## ① 背景·目的

放射性の炭素(14C)は数千年から2万年程度の地下水年代を評価するために最も重要なトレー サーの一つであり、既往の研究でも多く利用されてきた(例えば、Geyh 2000; Iwatsuki et al., 2000)。14Cを用いた地下水年代の精度を向上させるために、サンプリングや分析前処理において 14Cの値が影響を受けるような操作等があればこれを特定し、改善する方法や補正する方法を提 案していくことが必要であると考えられる。昨年度、9月と12月に立坑内の同じ箇所でサンプル を採取し、14Cを分析したところ同じ箇所で採取したデータにもかかわらず最大で3倍程度の差 異が観察された。総無機炭素濃度(TIC)、14Cの値、採水時の流量でこれらのデータをプロット したところ、TICおよび14Cの値が低く採取地点の流量が小さいほど14Cの値にばらつきが大き いという傾向が見られた(図 3.2-7)。このため、昨年度のサンプリング・分析においては、サン プル採取時に一部のサンプルは大気の影響を受けて14Cの値が増大しており、大気の影響が地下 水サンプリング時の流量に依存している可能性があると考えられた。

このため、本年度の研究では1つの採取地点から、採取条件(採取容器、採取時の流速、採取時の環境など)を変えてサンプルを採取し、サンプル毎の無機<sup>14</sup>Cを分析した。分析結果から、 <sup>14</sup>Cを分析するためのサンプル採取方法として最も適した条件を提示することを試みた。



図 3.2-7 <sup>14</sup>C を 2 回分析した場合の 1 回目と 2 回目の差異

## 2 試験手法

上述のように、<sup>14</sup>C はサンプリング中の大気のコンタミにより影響を受けている可能性がある。 このため、大気混入の影響を受けそうな条件を意図的に変化させてサンプルを採取し、<sup>14</sup>C を評 価することで、<sup>14</sup>C の値に影響を与えるサンプリング条件について明らかにすることを試みた。 また、併せてサンプルを採取してからある程度保管する必要が生じたときのために、容器による 保管期間の影響についても調べた。サンプル採取条件を表 3.2-1 に示した。サンプルは1つの条 件につき 2 つを取得した。

条件1として金属容器にバックプレッシャーをかけながらサンプルを採取する方法を採用した。 この方法では地下水の出口となっているテフロンチューブと金属容器の1端を直接接続し、もう 片タンバルブと接続してサンプルを採取する。バルブを適切に調整することで、容器内の圧力を 高く保ち、脱ガスを防ぎながらサンプルを採取することが可能である。条件1と他の条件を比較 することで、サンプリング中の二酸化炭素の脱ガスが14Cに与える影響を評価することが可能で ある。条件2~4では、大気中でPET製容器にサンプルを取得した。地下水の出口であるチュー ブを容器の奥まで差し込み、地下水を容器内体積の3倍量オーバーフローさせたあと、大気が混 入しないように慎重にフタをした。条件2・3・4では地下水の出口となるチューブにバルブを取 り付け、それぞれ流速500・100・50 mL/minでサンプリングを実施した。条件2~4を比較する ことにより採取中の流速が14Cに与える影響を評価した。条件5では流速を50 mL/minとして、 オーバーフローする容量を容器の1倍量にした。さらに条件6ではオーバーフローさせず容器が 満たされた時点でサンプルを取得した。条件4~6を比較することにより、採取時のオーバーフ ローが14Cの値に与える影響を評価することが可能である。さらに条件7では、サンプル採取を 水中で実施し、大気の混入を減らすことを試みた。条件5と7を比較することにより、サンプル を採取するときの環境(水中・空気中)が14Cの値に与える影響を評価することができる。

さらに条件 8~10 では、採取条件は流速 500 mL/min、オーバーフロー3 倍、大気中採取で固定し、容器を PET 製・アルミ製・PAN (polyacrylonitrile)製の 3 種類をそれぞれの条件で使用した。現地でサンプル採取後実験室へ移送し、冷蔵室内(5°C、暗所)で4ヶ月間保管したあと、分析機関へと送付し、分析を実施した。

全てのサンプルにおいて、水試料からの無機炭素の回収は「ガス化法(Nakata et al., 2016)」 で実施し、<sup>14</sup>C は加速器質量分析法(Accelarator Mass Spectrometory)で分析した。

条件番号	採取条件
条件-1	バックプレッシャーをかけた状態で3倍のオーバーフロー、金属容器
条件-2	流速500mL/min、大気中採取、オーバーフロー3倍、PET容器
条件-3	流速100mL/min、大気中採取、オーバーフロー3倍、PET容器
条件-4	流速50mL/min、大気中採取、オーバーフロー3倍、PET容器
条件-5	流速50mL/min、大気中採取、オーバーフロー1倍、PET容器
条件-6	流速50mL/min、大気中採取、オーバーフローなし、PET容器
条件-7	流速50mL/min、水中採取、オーバーフロー1倍、PET容器
条件-8	PET容器:3ヶ月保管後分析
条件-9	アルミ容器:3ヶ月保管後分析
条件-10	PAN容器:3ヶ月保管後分析

表 3.2-1 <sup>14</sup>C 分析用試料の採取条件のまとめ

#### ③ 結果と考察

条件 1~4 を比較した結果を図 3.2-8(a)に示した。分析における誤差は 0.1 pMC である。図か ら分かるように、多くの分析値は 2.5~3.5 pMC 程度の値を示しており、これらが地下水におけ る <sup>14</sup>C の「真の値」であると考えることができる。これと比較するとバックプレッシャーをかけ て採水したサンプルは 3.5~4.4 pMC とわずかながら高い値を示した。これは、バックプレッシ ャーをかけるプロセスで大気由来の二酸化炭素が地下水に溶解した可能性が考えられる。また、 流速 100 mL/min および 500 mL/min では極端に大きな値 (9.8 と 17.6 pMC) を示すサンプル が見られたが、同じ流速でも他方のサンプルは 2.8 や 2.5 pMC という値を示していることから、 流速が本質的に <sup>14</sup>C の値に影響を与える可能性は低いと考えられる。

さらに条件 5~7 の結果をまとめたものを図 3.2-8(b)に示した。条件 1~4 の結果と同様にほと んどの測定値が 2.5~3.5 pMC の値を示したが、オーバーフローが容器体積の 1 倍のもので、5.7 pMC というやや高い値を示すものが見られた。しかし、オーバーフロー1 倍のサンプルの他方お よびオーバーフローなしのサンプルと容器 3 倍のサンプルにおける <sup>14</sup>C が 2.5~3.5pMC の値を 示すことから、オーバーフローが <sup>14</sup>C の値に与える影響は顕著ではないと考えられる。水中での 採水(オーバーフローは容器体積の 1 倍)の <sup>14</sup>C は 5.2~6.1pMC であり、他の値と比較してや や高い値を示した。これは浸漬した水に大気由来の二酸化炭素が溶解しており、1 回の水中オー バーフローでは十分に水が置換しなかった可能性がある。



図 3.2-8 サンプリング条件と<sup>14</sup>Cの関係

さらに表 3.2・2 には 3 種類のボトルで 4 ヶ月間サンプルを保管した後、14C を分析した結果を 示した。PET と PAN ボトルで保管されたサンプルにおける 14C はほぼ一致しており、2 つのボ トルの性能が同等であることを示している。14C の値は 3.1~4.4 pMC であり採取直後に分析さ れた値 (2.5~3.5 pMC) と比較してやや高い値となった。一方アルミボトルで保管された 14C の 値は 2 つのサンプルともに 2.2 pMC となり 4 ヶ月保管期間を経ても低い値を示したことから、 アルミボトルのガスバリア性能が、ガスバリア性能が高いと言われるプラスティックボトルより も高く、14C 分析用のボトルとして適していることが示された。

採取条件	分析値 (pMC)	年代 (年)
PETボトル	$3.7 \pm 0.1$	$26470 \pm 110$
流速500mL/min, オーバーフロー3倍体積	$3.1 \pm 0.1$	$27880 \pm 110$
アルミボトル	$2.2 \pm 0.0$	$30770 \pm 110$
流速500mL/min, オーバーフロー3倍体積	$2.2 \pm 0.0$	$30860 \pm 110$
PANボトル	3.3±0.1	27410±110
流速500mL/min, オーバーフロー3倍体積	$4.4 \pm 0.1$	$25180 \pm 110$

表 3.2-2 4ヶ月間保管した後の地下水試料における<sup>14</sup>C分析の結果

#### ④ まとめ

地下水サンプル採取時の条件が地下水サンプルの<sup>14</sup>C に与える影響を評価するため、流速やオ ーバーフロー体積を変えてサンプルを採取した。また、一部のサンプルは3種類の保管容器を用 いて4ヶ月間冷暗所で静置した。サンプルの<sup>14</sup>C を AMS で分析し、以下のような知見を得た。

- (1) サンプリング条件への<sup>14</sup>Cの依存性:流速およびオーバーフローの体積を変化させてサンプルを取得したが、<sup>14</sup>Cの値に顕著な依存性は確認出来なかった。また、水中で採取したサンプルやバックプレッシャーをかけた場合のサンプルとも<sup>14</sup>Cを比較したが、水中での採取やバックプレッシャーをかけたサンプリングに顕著な有意性は確認されなかった。このため、サンプリングを実施する方法としては従来通り「大気中、オーバーフロー3回」で実施すれば良いと考えられた。
- (2) 分析の繰返し回数:サンプリング条件に依存せず、ときおり<sup>14</sup>Cの値が大きく異なるサンプルが見られた。今回の検討だけからは、値が大きく異なる原因について推察し、それを防ぐ方法を提案することは困難である。しかし、<sup>14</sup>Cの値が、pMCが増加する方向に変化していることから、サンプリングから前処理、分析のプロセスにおいて気泡の混入など大気由来の二酸化炭素が混入したためであると推察された。このように値が大きく変わるサンプルが存在する可能性があることから、<sup>14</sup>Cを用いた年代推定の精度を上げるためには複数のサンプルを取得して分析の繰り返し回数を確保し、大きく値のずれたものを除外するということが必要であると考えられた。
- (3) <u>サンプルの保管と容器</u>: PET製・アルミ製・PAN製の3種類のボトルに地下水を4ヶ月間保管 し、<sup>14</sup>Cを分析したところ、アルミ製のボトルに採取した地下水における<sup>14</sup>Cが最も低い値を示 した。このことから、上記3種類のボトルではアルミ製のボトルが最もガスバリア性能が高 いと考えられる。アルミ製のボトルはプラスティックと遜色ない程度に軽量であり、現場に おける取り回しも良いことから、今後はアルミ製のボトルを<sup>14</sup>C採取用のボトルとして採用す ることとした。

## 2) 希ガス温度計評価における誤差評価法の検討

希ガス温度計は、希ガスが地化学反応などの影響を受けず、溶解度が温度に強く影響を受ける ことから、涵養温度を推定する方法である。この技術は、氷期もしくは間氷期の涵養を見分けら れるため、特に2万年より古い地下水かどうかを判定するときに有用である。



図 3.2-9 涵養温度と溶解度の関係

涵養温度を推定するには、Stute and Schlosser (1993)が示すように、Ne, Ar, Kr, Xe の濃度を 定量し、この濃度にもっとも整合性の高い涵養温度を推定する。ただし、実際には大気の混入や 脱ガスの影響を受けるため、それらを考慮して評価する必要がある。以下の目的関数を最小とす る涵養温度と大気混入率(脱ガス率)を推定する。

$$O(t,\alpha) = \frac{\left(Ne_{t} + \alpha Ne_{a} - Ne_{o}\right)^{2}}{\left(Ne_{o}E_{Ar}\right)^{2}} + \frac{\left(Ar_{t} + \alpha Ar_{a} - Ar_{o}\right)^{2}}{\left(Ar_{o}E_{Ar}\right)^{2}} + \frac{\left(Kr_{t} + \alpha Kr_{a} - Kr_{o}\right)^{2}}{\left(Kr_{o}E_{Kr}\right)^{2}} + \frac{\left(Xe_{t} + \alpha Xe_{a} - Xe_{o}\right)^{2}}{\left(Xe_{o}E_{Ar}\right)^{2}}$$

ここに、O は目的関数、t は温度、 $\alpha$  は大気混入率、Ne, Ar, Kr, Xe は各希ガスの濃度、添え字の a は大気、o は実測値、E は測定誤差であり、 $E_{Ne}$ は Ne の測定誤差である。

ただし、溶存希ガスの溶解度の変化は、温度に対してそれほど大きく変化しないため、推定した温度の誤差を評価しておく必要がある。このため、モンテカルロ法や感度マトリックス法による誤差評価が実施されている(図 3.2-10)。

モンテカルロ法では、以下に示すように、実測値に計測誤差をランダムに与え、この誤差を含 む測定値をターゲットに最適値を推定する方法である。

 $c_{ei} = c_{oi} + r_i E_i$  (Ci= Ne, Ar, Kr, Xe)

ここに、Ceiは最適化する濃度、Coiは実測値、Eは測定誤差、riは正規乱数、iはガス種であり、 Ne, Ar, Kr, Xeの4種である。

これまで、モンテカルロ法で推定誤差を評価してきたが、実測値と評価値の誤差が大きい場合 (図 3.2-10(1)のT<sub>1</sub>のような場合)、すなわち目的関数が大きい場合(誤差が大きい場合)でも最適値 が求められる場合があった。このため、目的関数の大きさ(誤差の大きさ)が推定誤差に影響を およぼす感度マトリックス法による推定誤差の評価方法について検討した。

感度マトリックス法による推定誤差の評価方法は、Aeschbach-Hertig et al.(1999)や Ballentine and Hall (1999)に示されているように、①すべてのパラメータを同じ方法で推定でき る、②各測定結果の誤差を考慮できる、③推定誤差を評価できる、④パラメータの相関を評価で きる、などの優位性がある。



(1)モンテカルロ法

(2)感度マトリックス法

## 図 3.2-10 推定誤差評価方法の概念図

評価理論は 3.1.2 において示したとおりであり、推定誤差の計算方法は、Hill and Tiedeman(2007)によれば、以下の式で与えられる。

 $V(b) = s^2 \left( A^T \omega A \right)^{-1}$ 

Vはパラメータ誤差の共分散関数、s<sup>2</sup>は実測値と解析値の誤差の分散、Aは感度マトリックス、 ωは重み関数である。

感度マトリックス A<sub>ij</sub>はパラメータが2つで実測値が4のため、2行4列の行列になり、以下のように与えられ、各濃度の温度と大気混合による影響の影響を表している。

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Ne}{\partial T} & \frac{\partial Ar}{\partial T} & \frac{\partial Kr}{\partial T} & \frac{\partial Xe}{\partial T} \\ \frac{\partial Ne}{\partial EA} & \frac{\partial Ar}{\partial EA} & \frac{\partial Kr}{\partial EA} & \frac{\partial Xe}{\partial EA} \end{bmatrix}$$

重み関数ωを単位行列として、G<sub>ij</sub>(=XTωX)を計算すると

$$\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{X}^{T} \boldsymbol{\omega} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Ne}{\partial T} & \frac{\partial Ar}{\partial T} & \frac{\partial Kr}{\partial T} & \frac{\partial Xe}{\partial T} \\ \frac{\partial Ne}{\partial EA} & \frac{\partial Ar}{\partial EA} & \frac{\partial Kr}{\partial EA} & \frac{\partial Xe}{\partial EA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Ne}{\partial T} & \frac{\partial Ne}{\partial EA} \\ \frac{\partial Ar}{\partial T} & \frac{\partial Ar}{\partial EA} \\ \frac{\partial Kr}{\partial T} & \frac{\partial Kr}{\partial EA} \\ \frac{\partial Xe}{\partial T} & \frac{\partial Xe}{\partial EA} \end{bmatrix}$$

さらに、ぷは以下の式で与えられる。

$$s^{2} = \frac{\frac{\left(Ne_{0} - Ne_{t}\right)^{2}}{\sigma_{Ne}^{2}} + \frac{\left(Ar_{0} - Ar_{t}\right)^{2}}{\sigma_{Ar}^{2}} + \frac{\left(Kr_{0} - Kr_{t}\right)^{2}}{\sigma_{Kr}^{2}} + \frac{\left(Xe_{0} - Xe_{t}\right)^{2}}{\sigma_{Xe}^{2}}}{4 - 2}$$

分子は、残差を標準偏差で割ったものの二乗和のため、χ<sup>2</sup>とも呼ばれる。分母は計測値数から 推定したパラメータを引いたもの(自由度)である。

上記を計算すると最終的に以下の形で算出される。

$$V(T, EA) = \begin{bmatrix} Var(T) & Cov(T, EA) \\ Cov(EA, T) & Var(EA) \end{bmatrix}$$

ここに、V は誤差マトリックス、Var は分散、Cov は共分散であり、Var (T)と Var (EA)は温度と 大気混入率の誤差となる。

上記のマトリックスは、誤差だけでなく、誤差の共分散も求められており、先に述べた④パラ メータの相関が評価できる。

ここでは、実際にモンテカルロシミュレーションと感度マトリックス法の推定値および推定誤 差を比較した。

ここでは、09MI21#3 での希ガスによる涵養温度推定を、感度マトリックス法、モンテカルロ 法の誤差 1%, 2%, 5% 10%で実施した。09MI21#3 は、<sup>3</sup>H が検出されない、δDとδ<sup>18</sup>O が他地 点に対して低いことから、浅層地下水の混合が少なく、涵養温度が低いと推定されている地点で ある。

ここでは、9 つのサンプルを対象に涵養温度を推定した。この結果、涵養温度の推定値と推定 誤差は図 3.2-11 のように求められた。

推定値は、感度マトリックス法を適用した結果とモンテカルロ法を適用した結果で概ね一致し ている。モンテカルロ法で誤差が大きい場合(例えば誤差 10%の場合)は、やや推定値が大きくな る傾向にある。これは、0℃以下が発生しない条件で、バラツキが大きくなることで平均値が大き い方に偏り易いためと考えられる。モンテカルロ法の誤差は、与えた誤差(1~10%)に対応して増 加しているようである。これは、ばらつきが大きい方が結果のバラツキも大きくなるためである。 一方、感度マトリックスで推定誤差を評価した場合、推定誤差は計測によってまちまちであるこ とがわかる。これは、感度マトリックス法の誤差は、式に示すように、フィッティング時の残差 と最適値での各変数の微分値によって変わるため、各計測値に対応して変化するためである。こ のように、モンテカルロ法では、与えた誤差に対応して誤差が変わり、誤差が 1%で±0.3℃、誤 差が 2%で 0.6℃、誤差が 5%で 1.5℃、誤差が 10%で 2.9℃とほぼ誤差に比例している。このた め、感度マトリックス法で誤差評価を実施した方が、実測値の誤差を加味したフィッティングの 誤差が再現できていると考えられる。 09MI21#3の推定値は、感度マトリックス法では、6.8±1.6℃(推定値の平均と標準偏差)となる。この値は、モンテカルロ法で見ると 5%程度の計測誤差に相当する。このため、測定誤差は 2%程度と考えられるが、実際に採取から分析までを含めたトータルの測定精度は 5%程度と考えられる。

本地点の付近にあるアメダスの観測所の観測結果によれば、1981~2010年の平均気温は、多治見(標高120m)14.8℃、恵那(標高315m)13.0℃となっている。これらの平均気温から見ると、 6.2~8℃と低い結果が得られており、氷期に涵養した地下水と判定してよいものと考えられる。



図 3.2-11 涵養温度推定方法による推定誤差の変化

## 3) 希ガスサンプラーの検討

## ① 背景・目的

地下水年代を推定するのに、希ガスおよびその同位体比は重要な情報となり得る。ヘリウム(He) は地下水と接触する岩石に含まれるウランやトリウムのアルファ崩壊により発生して地下水に蓄 積するため、地下水年代の経過とともに地下水における He 濃度は高くなる。また、上述の 2)の ように各希ガス溶解度の温度依存性の差異を利用した「希ガス温度計」は、地下水の涵養温度を 推定するために有用である。

一方で希ガスは溶存ガスであるために、サンプル採取時に大気に散逸したり大気による汚染を 受たりする可能性があり、注意深いサンプリングが必要とされている。特に深部の地下水は地圧 により被圧しているが、採水のためにこれを地表に汲み上げたり地下坑道内に水を出したりする と圧力が開放されることにより、脱ガスが生じる可能性が高い(Nakata et al., 2019)。圧力開放 による脱ガスを防ぐためには、原位置でのサンプリングあるいは圧力を保ったままサンプリング を実施することが望ましいが、地下深部に原位置サンプラーを適用するのは多くの労力と費用を 必要とするという欠点がある。このため、簡易・安価に原位置のガス情報を反映したサンプルを 取得する手法の開発が必要とされている。 本研究では、拡散サンプラーあるいはパッシブサンプラーと呼ばれているサンプラーに着目した。通常パッシブサンプラーはガス・水分離部とガスリザーバーから構成されている(参考文献)。 ガス・水分離部には、ガスは透過するが水は透過しない素材のものを用いて、地下水中に溶存する ガスを分離する。分離したガスはガスリザーバーに蓄積し、最終的にリザーバー内のガスを分析 することで地下水中の希ガス濃度についての情報を得る。既存のサンプラーはガス水分離部分と してシリコンチューブを用いる。しかしシリコンチューブは高圧で物理的に潰れて収縮するため、 高圧下で(つまり地下深部で)シリコンチューブをガス水分離部として用いることはできない。 このため、本研究ではシリコンチューブよりも耐圧性が高く地下深部でも使うことができるガス ・水分離部を開発することを目的として種々の試験を実施した。

#### 2 試験手順

#### (1)ガス水分離部の作製

本研究ではガス・水分離部として金属の焼結フィルタを種々のプラスティックでコーティング したものを用いた。金属焼結フィルタはプラスティックコーティングを内側から物理的に支える 役割をしており、高圧に対して耐性をもたせるのに有用であると考えられた。また、焼結フィル タはガス水分離部内部の空隙の体積を減少させることにも寄与し、パッシブサンプラー内部と地 下水に溶存するガスが早く平衡に達するのに重要な役割を果たすと考えられた。また、焼結フィ ルタをプラスティックの薄膜でコーティングすることによって市販のフィルタやシリコンチュー ブよりもプラスティック部分の厚みを薄くすることが可能となり、市販のフィルタやシリコンチ ューブを用いるよりも早く平衡に達することが期待された。

金属焼結フィルタとして、SMC 社が作製している ESKA-Z2802-002(全長 52mm 直径 17mm) を購入し、これに種々のプラスティックやゴムをコーティングしたものを作製した。コーティン グしたプラスティックは以下の 5 種類である。①材質:テフロン、膜厚:1.0µm 以下、②材質: シリコンゴム、膜厚:2.0µm 以下、③材質:シリコン樹脂、膜厚:2.0µm 以下、④材質:テフロ ン、膜厚:40µm 以下、⑤材質:フッ素ゴム、膜厚:50µm 以下

#### (2) 最適な膜の材質の確認

ガス水分離部に要求される性能として、①高圧に耐えられること、②可能な限り速やかに内部 のガスと溶存ガスが平衡に達すること、が挙げられる。ここではまず、アルゴンガスで 0.4MPa の圧力をかけた水にプラスティックでコーティングした金属フィルタを浸漬し、フィルタ内部の 圧力が平衡になるまでの時間を測定した。試験系の概念図を図 3.2-12 に示す。試験系は 2 の圧 力容器から構成されており、圧力容器①は水で完全に満たされており内部にコーティングした金 属フィルタが接続されている。金属フィルタの内部は圧力容器のフタを通じて容器外部に接続し た圧力トランスデューサと接続されており、金属フィルタ内部の圧力が経時的にモニタリングで きるようにしている。圧力容器①は配管で圧力容器②と接続されている。圧力容器②は容器①よ りも少し高い位置に設置されており、容器の半分程度が水で満たされている。圧力容器②内部の ヘッドスペースを Ar ガスで加圧することにより容器内部に存在する水の圧力を制御している。 圧力容器②の水をポンプで容器①に循環させることで、容器内部の水を全て高圧の Ar と平衡に なった状態にキープをしている。

Ar での加圧を開始して 24 時間程度が経過し Ar ガスが十分に溶解した後に、一旦圧力トラン スデューサ内部のガスを一旦大気開放し、さらにバルブを閉じた時間を試験開始時間として、経 過時間とフィルタ内部の圧力の関係を調べた。



図 3.2-12 最適な膜の材質確認試験のための試験系

## (3) 圧力に対する依存性の確認

上記の試験(2)で最適と判断された膜については、0.2~0.9MPaの範囲で水にかける圧力を 変化させ、圧力が平衡に達するまでの時間変化を調べた。この結果から、この材質のフィルタが 収縮して深部地下水で使えなくなる可能性について検討した。

## (4) 塩分に対する依存性の確認

さらに上記の試験(2)で最適と判断された膜については、塩水に浸漬した場合の影響について も評価した。100mLの純水に対して 3.5gの塩化ナトリウムを溶解させたもの(海水相当の塩化 ナトリウム濃度)を用いて(2)と同様の試験を実施し、試験に用いた水が純水の場合と塩化ナトリ ウム溶液である場合の結果を比較した。

#### ③ 結果と考察

図 3.2-13には、シリコンゴム(膜厚 2.0µm)、テフロン(膜厚 40µm)、フッ素ゴム(膜厚 50µm) で実施した試験の結果を示す。図の縦軸は水と接触している Ar の圧力(0.4MPa)を100%とし て規格化した値を示している。テフロン(膜厚 1.0µm 以下)、シリコン樹脂(膜厚 2.0µm)につ いては、Ar ガスで圧力をかけるとフィルタ内部にまで水が浸入する様子が観察された。これは、 テフロンやシリコン樹脂の膜が焼結フィルタの孔を塞ぎ切れていなかったか、膜厚が薄いために 圧力に対して耐性がなく、Ar で圧力をかけた瞬間に破壊されたかであると考えられる。試験結果 が得られた3種類の膜を比較すると、シリコンゴム(膜厚 2.0µm)が最も早く圧力が100%近く に達した。これは、他の材質のものと比較してシリコンゴムの厚みが薄く成形できたことが主な 原因であると推察される。圧力が平衡に達するまでの時間が最も早いことから、本研究ではシリ コンゴムでコーティングされた金属焼結フィルタについて、以下の試験で性質を調べることとし た。



図 3.2-13 フィルタ内圧力と時間の関係(フィルタ材質依存性)

図 3.2-14 には、シリコンゴム(膜厚 2.0µm)をコーティングした焼結フィルタにおける水に 付与した Ar の圧力とフィルタ内圧力が平衡に達するまでの時間との関係を示した。図中の縦軸 は水に付与した Ar の圧力を100%として測定値を規格化した値を示した。図中の点線は圧力95% の線である。まず図に示したように、Ar で水にかけた圧力が 0.9MPa(90m 深度相当)の場合で もフィルタは圧力に耐え、最終的にフィルタ内の圧力は 0.9MPa に達することを確認することが できた。このことから、作成したガス水分離部がある程度高圧でもガス・水分離部としての役割 を果たすことができるのが確認できた。圧力 95%を達成するまでに必要な時間は 0.2MPa の場 合で 950 分、0.4MPa の場合で 1050 分、0.9MPa の場合で 1140 分であり、圧力の増大とともに 平衡に達するまでに要する時間が増加する傾向が観察された。このため、さらに水の圧力が増大 した場合、さらに平衡に達するまでの時間を要する可能性がある。今年度の検討では 100m 程度 までの適用性を確認することができたが、さらに深部の高い圧力を持つ地下水において実証的な 試験を実施することが必要である。



図 3.2-14 フィルタ内圧力の経時変化の圧力依存性

図 3.2-15 には、シリコンゴムでコーティングしたフィルタを用いて、海水相当の塩化ナトリ

ウム溶液と純水とで試験をした場合(圧力は 0.9MPa)の結果を比較した。塩化ナトリウム溶液 を用いた場合の試験結果と純水での試験結果はよく一致しており、ガスの透過性能に対して溶液 中のイオン濃度が影響を与えないことを確認することができた。



図 3.2-15 フィルタ内圧力の経時変化の塩分濃度依存性

④ まとめ

深い深度の地下水にも適用可能なガス・水分離部を開発することを目的として、部品の開発と 適用性検討試験を実施し、以下のような知見を得た。

- (1) 高圧に耐えうるガス水分離部の作製:金属焼結フィルタをプラスティックの膜でコーティン グすることにより、高圧でも使用可能なガス水分離部を作製した。金属焼結フィルタを入れ ることで水の圧力に物理的に耐え、フィルタ表面に極めて薄いコーティングを形成すること でフィルタ内部のガスと地下水中の溶存ガスが早く平衡に達することができるデバイスにす ることが可能となった。
- (2) <u>最適な材質の選定</u>: テフロン、シリコンゴム、シリコン樹脂、テフロンゴムなどの材質で金属焼結フィルタをコーティングし、それぞれのフィルタについてフィルタ内の圧力とArガスでかけた圧力が平衡に達するまでの時間を調べた。その結果、シリコンゴムがコーティングする材質として最も適していることが分かった。
- (3) <u>圧力や塩分濃度への依存性確認</u>:シリコンゴムをコーティングした焼結フィルタを用いて、 フィルタ内のガスと溶存ガスの圧力が平衡になるまでの時間における、圧力や塩分濃度依存 性を調べた。海水相当の塩化ナトリウム溶液と純水で試験をした結果に顕著な差異が認めら れなかったことから、ガスの透過性における塩分濃度依存性はないと判断された。一方、水 の圧力の増加に伴って平衡までに達する時間が増加する傾向が観察された。このため、高い 圧力で被圧した地下水へ実際に開発したガス水分離部を適用し、より高い圧力における平衡 が達成されるまでに必要な時間を確認する必要がある。

#### (3) 新しい地下水年代評価手法の整備と高度化のまとめ

今年度は新しい地下水年代評価方法として、<sup>81</sup>Kr・<sup>129</sup>I について検討し、それぞれを用いて立 坑の地下水における年代測定と立坑における若い地下水の混合率評価を試みた。<sup>81</sup>Kr については まず、真空脱気と中空糸膜の2つの方法を地下水に適用し、それぞれの手法が地下水からガスを 抽出するのに有効であることを確認することができた。また、<sup>81</sup>Krによる年代測定では立坑内の 地下水の年代が2±1万年程度と評価され、<sup>14</sup>Cを用いた年代評価値と近い値を示した。このこと から、<sup>81</sup>Krによる年代評価が数万年程度の地下水においても有用である可能性を示した。<sup>129</sup>Iに ついては、立坑内の地下水において<sup>3</sup>H濃度との相関性が高く、若い地下水の流入指標として有 用である可能性を示すことができた。

既往の技術の精度を高めるための技術開発として、①サンプリング方法が<sup>14</sup>Cの値に与える影響評価、②希ガス温度計における新たな誤差評価方法の検討、③希ガス分析用パッシブサンプラーの開発、を実施した。サンプリングの際の種々の条件(流速、オーバーフロー体積、水中/空気中採取)を変えてサンプルを採取し、<sup>14</sup>Cを分析したが<sup>14</sup>Cの値にサンプリング条件への明確な 依存性は確認されなかった。しかし、条件によらずときおり値が大きくシフトしたものが存在したことから、このようなサンプルのデータを除外するために複数個のサンプルを並行で取得し分析に供することが必要であると考えられた。②の誤差評価では、従来モンテカルロ法で評価していた誤差を感度マトリクス法で評価した。感度マトリクス法では目的関数の最小値と最小値付近の目的関数の傾きから本質的な誤差の値を評価することが可能であり、あるサンプルのサンプリングから分析までのプロセスが持つ本質的な誤差を反映した値を評価できる。感度マトリクス法を立坑内の地下水における希ガス温度計評価に適用し、涵養温度評価における誤差を評価した。③の希ガス分析用パッシブサンプラーの開発では、地下深部でも使用することができる耐圧性の高いガス水分離部分の開発を目的として検討を進めた。金属焼結フィルタ表面をシリコンゴムでコーティングしたものをガス水分離部として採用し、少なくとも0.9MPaまで使用できるデバイスを開発することができた。

#### 3.2.3 瑞浪深地層研究所での地下水採取と評価

#### (1) 地下水調査概要

瑞浪立坑内のボーリング孔において、立坑掘削による水質・地下水年代の変化や、流出域地下 水、浅部地下水、深部地下水の特性評価のために、地下水調査を実施している。今年度は、以下 の地点において地下水調査を実施した:深度 200m 地点(07MI07 号孔)、深度 300m 地点(09MI20, 09MI21, 10MI23)、深度 400m 地点(10MI26)、深度 500m 地点(12MI33, 13MI38, 15MI52, 18MI64)。

## (2) 地下水の採取・分析方法

上記の地点においては、地点で掘削されているボーリング孔に挿入された採水対象とするパッ カー区間と接続されているテフロンチューブ(6/4mm)から採水した。採水と並行してポータブ ルメータにより pH, ORP, EC, DO, T を計測した。表 3.2-3 にはこれらの測定結果を採水時間、 採水前と採水中の区間内圧力と併せて示した。さらに表 3.2-4 には、採水量・採取に用いた容器 についての情報に加えて、採取方法についても簡単に記載した。

項目	「古ち」	区間圧力 (Mpa)		流量	pН	ORP	EC	DO	Т
坝日	休小时间	採水前	採水時	L/min		mV	mS/m	mg/l	°C
07MI07#1	2019/8/2213:50	0.6	0.4	0.80	8.91	-360	38.1	0.0	22.2
07MI07#3	2019/8/2213:30	0.5	0.3	0.75	8.73	-344	57.6	0.0	22.4
07MI07#5	2019/8/2213:26	0.5	0.4	0.80	8.73	-368	57.9	0.0	22.0
09MI20#1	2019/8/238:57	1.9	1.0	1.40	8.82	-342	37.6	0.0	23.8
09MI20#3	2019/8/239:55	1.9	1.2	1.10	8.69	-327	44.7	0.0	23.0
09MI20#5	2019/8/239:03	1.8	1.4	1.10	8.70	-331	39.20	0.1	23.2
09MI21#2	2019/9/108:55	1.4	1.0	0.08	7.93	-342	86	0.0	23.6
09MI21#3	2019/9/4 9:00	1.9	1.0	0.19	8.68	-290	88.5	0.0	22.9
10MI23#1	2019/9/314:00	2.1	0.4	0.60	8.62	-264	50.4	0.0	23.5
10MI23#2	2019/9/214:49	1.9	1.1	1.90	8.72	-325	61.4	0.1	23.5
10MI23#3	2019/9/213:30	2.0	1.8	2.00	8.72	-334	43.7	0.0	23.7
10MI26#1	2019/8/229:07	2.4	1.2	0.60	8.14	-324	51.3	0.0	22.2
10MI26#3	2019/8/2210:02	1.9	1.1	0.45	8.32	-300	58.3	0.1	22.0
10MI26#5	2019/8/229:35	1.7	1.2	0.90	8.52	-336	44.2	0.0	22.9
12MI33#1	2019/6/269:15	3.7	2.1	0.75	8.02	-334	141	0.0	23.8
13MI38#1	2019/6/2514:34	2.9	2.6	0.60	8.10	-300	156	0.1	21.1
13MI38#5	2019/6/2513:32	3.3	2.7	0.45	7.80	-286	259	0.1	21.0
15MI52#1	2019/8/2113:20	3.2	0.9	0.80	8.39	-349	163	0.0	24.1
18MI64#3	2019/7/213:00	1.6	1.0	1.20	7.90	-319	76	0.0	23.7
18MI63#3	2019/7/213:45	2.0	1.5	3.13	8.54	-334	78	0.0	23.6

表 3.2-3 瑞浪立坑での原位置計測結果

地下水中の主要な溶存イオン(Ca, Mg, Na, K, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2</sup><sup>-</sup>) については「主要溶存イ オン」のボトルの水を 0.45µm のフィルタで濾過し、適宜純水によって希釈した濾液をイオンク ロマトグラフィー(メトローム社製コンパクトプロフェッショナル IC881)により定量した。ア ルカリ度の測定は、滴定用の硫酸(濃度 0.01mol/L)を用いて pH4.8 に達するまでに摘果した硫酸 量を測定する「pH4.8 アルカリ度」により評価した。微量元素(Br, I, Si, B, Fe, Se, Sr, Li, Mn, Zn, Ba, Al, Rb, Cu, As, Cs)の濃度は、ICP-MS (誘導結合プラズマ・質量分析装置: Agilent Technologies 製 Agilent7500CE)を用いて検量線法により定量した。総有機炭素(Total organic carbon:TOC)濃度および不揮発性有機体炭素 (Non-Purgeable Organic Carbon: NPOC)の測 定は、島津製作所製 TOC-V CSH を用いて定量した。水素・酸素同位体の計測は、Los Gatos Research 社製のレーザー吸収ガス分析装置を用いて定量した。

<sup>3</sup>H 分析は、電解濃縮(アルカリ水溶液電解) – 液体シンチレーション計数法、<sup>14</sup>C 分析は、グ ラファイト・ターゲット – 加速器質量分析法(AMS 法)で実施した(中村、2003)。

希ガス濃度および同位体比の定量は、希ガス質量分析装置 VG-5400(VG instruments s)とその 前処理ラインを用いて行った(馬原、1998)。

CFCs の分析は、Purge and Trap 法によって地下水中の CFC を分離・抽出した後に、GC-ECD にて検出・定量を行った(Plummer and Bunsenberg, 2006)。CFC は CFC-12, CFC-11, CFC-113 を対象とした。SF6の分析も CFCs と同様に、Purge and Trap 法によって地下水中の CFC を分離・抽出した後に、GC-ECD にて検出・定量した(Bunsenberg and Plummer, 2000)。

		•					
分析項目	取得量	取得方法の概要					
主要溶存イオン	100mLPP容器×2本						
微量元素	100mLテフロン容器×1本						
水素酸素同位体比	10mL硝子バイアル×2本	大気中取得、容器共洗後、容器体積の3倍量					
炭素同位体比	250mLPETボトル×3本	をオーバーフローさせて取得					
総有機炭素量	50mL硝子ビン×1本						
アルカリ度	50mL硝子ビン×1本						
希ガス濃度・同位体	銅管3本	地下水出口と銅管を接続し、他端をバルブで調整して バックプレッシャーをかけて採水、 採水後銅管両端をクランプ締め					
CFCs濃度	125mL硝子ビン×3本	水中採取、容器3倍量を水中でオーバーフローさせ、					
SF6濃度	500mL硝子ボトル×2本	水中でフタをする					
トリチウム濃度	1000mLPP容器×2本						

表 3.2-4 採水量および採水方法の概要まとめ

#### (3) 分析結果および考察

瑞浪立坑のボーリング孔での分析結果を表 3.2-5 にまとめた。

## ・若い地下水の混合指標

経年的に立坑でのデータを取得している一つの目的として、坑道掘削に伴い表層の若い地下水が地下に入ったときに、若い地下水の混合率の指標となり得るパラメータを抽出することがある。 各成分における相関を調べた結果、δD、δ<sup>18</sup>O、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>H、SO4<sup>2</sup>、HCO<sub>3</sub>が若い地下水の流入指標として有用であると推察された。<sup>3</sup>H については水の形で存在し、新しい地下水には入っており

(~60 年程度)、古い(100 年以上程度)地下水では検出されないものであることから、新しい 地下水が古い地下水に混入したときに指標となり得ることは明らかである。<sup>14</sup>C は H<sup>14</sup>CO<sub>3</sub>-とし て地下水中に存在し、古い地下水では <sup>14</sup>C の濃度が低いため、若い地下水の混合指標となったと 考えられる。ただし、若い地下水が地下に入るときに、地化学反応等で HCO<sub>3</sub>が急激に消費され た場合 <sup>3</sup>H 等との相関が悪くなるはずであるが、今回の分析結果からそのような傾向は認められ なかった。このため、瑞浪地域の立坑に対して若い地下水が流入する場合には、HCO<sub>3</sub>が関与す る地化学反応が顕著ではなかったと考えられる。このため、<sup>14</sup>C や HCO<sub>3</sub>が若い地下水の流入指 標として有用あることは現時点では一般化することはできず、HCO<sub>3</sub>の顕著な濃度変化を伴う地 化学反応や微生物反応が起きる場では、定性的な指標としてしか使えない可能性がある。また、 昨年度までの研究において有機物に含まれる<sup>14</sup>C を評価したところ、300 および 500m 地点にお いても有機物に含まれる<sup>14</sup>C の年代が若く評価された。有機物は炭酸水素イオンほど地化学に関 与せず、岩石との相互作用反応も顕著ではないため、500m の地点まで地表由来の有機物が浸入 していた可能性も考えられる。このため今後の検討において、無機<sup>14</sup>C と併せて、有機<sup>14</sup>C につ いても若い地下水の流入指標としての有用性を確認していく。

 $\delta D$ および<sup>18</sup>Oが瑞浪地域の立坑で若い地下水の流入指標として有効であったのは、立坑近辺 の地下水が氷期に涵養した地下水で $\delta D$ や<sup>18</sup>O が低く、地表の $\delta D$ ・<sup>18</sup>O と差があったためであ ると考えられる。 $\delta D$ ・<sup>18</sup>O も水として移動しイオンほど急激な地化学・微生物反応には関与しな いと推察されることから、地下水の流入指標としては有用であると考えられる。ただし、古い地 下水の起源・年代や岩石との相互作用によって地表水との $\delta D$ ・<sup>18</sup>O との間で顕著な差が生じない 場合には、混合指標として使用することができないことに留意する必要がある。

硫酸イオンについても、地下深部では一般的に硫酸還元菌の働きにより硫酸イオン濃度が低い と考えられる。硫酸イオン濃度が若い地下水の混入指標として有効だったのは、上記の理由で地 表と深部地下との間で硫酸イオン濃度に顕著な差が存在したためであると考えられる。このため、 炭酸水素イオンと同様に地化学反応や微生物反応で急激に消費されることがなければ、硫酸イオ ンは若い地下水の混入指標として有用であると考えられる。

上記の δ D、 δ<sup>18</sup>O、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>H、SO<sub>4</sub><sup>2</sup>、HCO<sub>3</sub>については、それぞれ水中における拡散係数が異 なることから、岩石間隙水における拡散係数についても異なっていると考えられる。このため、 若い地下水が地下への浸入プロセスにおいてマトリクス拡散の影響を受けた場合、古い地下水と 若い地下水の混合だけでは説明できない比率のずれが生じると考えられる。しかし、今回取得し たデータからは、上述のような顕著なずれは確認されていないことから、瑞浪地域の立坑におけ る若い地下水の流入では、物質の比率が変化するほどマトリクス拡散の影響は顕著ではなかった と考えられた。

しょう	ALK	TOC	TC	TIC	NPOC	Na	К	Mg	Ca	F	CI	NO3	S04	Br	I
休小区间	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L
12MI33#1	0.32	1.49	4.15	2.66	<0.1	181	0.90	0.17	111	6.1	455	0.007	0.13	0.81	159
13MI38#1	0.33	1.32	4.00	2.68	<0.1	178	0.90	0.18	105	6.1	440	< 0.005	0.30	0.79	151
13MI38#5	0.25	1.72	3.47	1.76	0.16	245	1.26	0.24	263	4.8	806	< 0.005	0.26	1.44	284
18MI63	0.55	0.94	6.19	5.25	0.11	117	0.62	0.35	29	8.7	194	< 0.005	4.6	0.38	75
18MI64	0.58	0.92	6.58	5.66	0.14	119	0.78	1.03	29	8.5	199	< 0.005	2.7	0.39	69
07MI07#1	1.01	0.94	10.94	10.00	0.20	67	0.33	0.21	9	11	56	0.01	8.0	0.11	20
07MI07#3	0.81	0.91	8.76	7.86	0.18	90	0.41	0.34	28	10	108	< 0.005	7.5	0.22	37
07MI07#5	0.74	1.43	8.14	6.72	0.12	99	0.43	0.23	14	9.7	127	0.01	7.7	0.26	44
09MI20#1	1.28	1.45	14.75	13.30	0.21	71	0.35	0.24	8	9.4	50	< 0.005	15	0.10	18
09MI20#3	1.18	1.52	13.70	12.18	0.17	77	0.45	0.43	11	9.9	67	0.01	11	0.13	24
09MI20#5	1.31	1.24	15.02	13.78	0.23	71	0.35	0.30	9	9.4	50	0.01	15	0.10	18
10MI26#1	1.28	1.47	15.12	13.65	0.18	89	0.60	0.66	11	9.5	86	< 0.005	12	0.16	29
10MI26#3	1.58	1.79	19.04	17.25	0.19	100	0.70	0.72	15	9.4	99	0.01	10	0.18	33
10MI26#5	1.33	1.72	15.32	13.61	0.17	81	0.50	0.45	11	9.6	70	< 0.005	12	0.13	25
15MI52#1	0.27	1.37	3.39	2.03	0.13	209	1.2	0.88	103	5.2	478	0.01	2.4	0.87	165
09MI21#2	0.45	1.15	4.49	3.34	0.12	128	0.4	0.07	29	8.3	211	< 0.05	<1.25	0.41	62
09MI21#3	0.47	1.39	5.52	4.13	0.13	126	0.48	0.09	32	8.3	220	<0.025	<2.5	0.40	69
10MI23#1	0.58	1.52	6.78	5.25	0.25	104	0.44	0.05	17	9.9	153	< 0.025	1.24	0.29	47
10MI23#2	0.59	1.25	6.45	5.20	0.41	102	0.4	0.05	15	10.1	147	0.04	1.4	0.28	45
10MI23#3	0.75	1.15	7.80	6.66	<0.1	85	0.35	0.04	13	11.6	109	<0.025	1.39	0.21	35

## 表 3.2-5 瑞浪立坑での分析結果

(1)主要溶存イオンおよび溶存炭素

## (2)微量元素

サンプルタ	Li	В	Si	Sr	AI	Fe	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cs	Rb	Ba
977724	μg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
12MI33#1	168	1.8	6.5	1115	7.9	1.8	11	1.2	<1	1.1	< 0.1	2.25	8.1	3.3
13MI38#1	165	1.7	6.6	1056	11	2.8	12	< 0.5	<1	0.9	< 0.1	2.2	8.3	3.1
13MI38#5	267	2.1	6.6	2608	4.9	3.6	25	< 0.5	<1	1.3	< 0.1	2.9	12	7.1
18MI63	67	1.2	6.3	271	5.7	1.7	6.9	< 0.5	<1	1.3	< 0.1	0.8	3.5	1.6
18MI64	70	1.2	6.3	265	8.1	22	20	< 0.5	<1	1.4	< 0.1	0.5	3.2	2.4
07MI07#1	39	1.3	6.7	80	6.5	0.6	1.6	<0.5	<1	2.6	< 0.1	0.3	1.8	0.3
07MI07#3	46	1.2	6.5	124	7.1	1.4	2.1	< 0.5	<1	1.6	< 0.1	0.6	2.6	0.5
07MI07#5	49	1.2	6.4	142	7.5	1.0	1.6	< 0.5	<1	1.4	< 0.1	0.6	2.7	0.6
09MI20#1	42	1.2	6.7	75	9.1	0.7	2.2	< 0.5	<1	1.5	< 0.1	0.4	2.0	0.3
09MI20#3	44	1.3	6.7	93	10	4.5	3.8	< 0.5	<1	2.1	< 0.1	0.3	1.7	0.5
09MI20#5	42	1.2	6.9	76	8.1	3.5	2.4	< 0.5	<1	1.5	< 0.1	0.4	2.0	0.3
10MI26#1	51	1.3	6.7	124	7.3	2.8	6.5	< 0.5	<1	1.5	< 0.1	0.6	2.6	1.0
10MI26#3	54	1.3	7.3	157	7.7	5.9	13	< 0.5	<1	1.8	< 0.1	0.6	2.8	1.3
10MI26#5	46	1.2	6.6	110	7.4	2.3	5.4	< 0.5	<1	1.6	< 0.1	0.4	2.2	0.8
15MI52#1	150	1.8	6.3	1019	16	7.6	8.2	<0.5	< 0.5	1.8	< 0.1	1.5	7.2	2.8
09MI21#2	94	1.4	6.1	262	12	3.3	2.9	<0.1	< 0.5	1.2	< 0.1	1.1	3.1	0.6
09MI21#3	97	1.4	6.4	333	162	3.8	5.3	0.1	0.7	0.9	< 0.1	1.3	3.5	0.9
10MI23#1	71	1.6	6.5	192	18	4.8	5.9	<0.1	1.0	0.9	< 0.1	0.6	2.9	0.8
10MI23#2	72	1.6	6.4	185	16	4.5	5.2	0.1	0.6	0.9	< 0.1	0.6	2.9	0.9
10MI23#3	62	1.5	6.7	159	8.3	1.3	2.5	< 0.1	< 0.5	0.9	< 0.1	0.5	2.9	0.6

# (3)同位体

はそうに	δ <sup>18</sup> 0	δD	<sup>14</sup> C	<sup>13</sup> C
抹小区间	‰	‰	рМС	‰
13MI38#1	-8.9	-60.0	15.2	-15.8
13MI38#5	-8.8	-58.8	6.8	-16.4
12MI33#1	-8.9	-59.8	5.1	-16.3
18MI63	-8.9	-59.5	9.5	-15.7
18MI64	-8.9	-59.2	8.0	-14.0
07MI07#1	-8.6	-58.0	15.2	-13.2
07MI07#3	-8.7	-57.9	14.8	-15.1
07MI07#5	-8.7	-58.1	13.0	-16.9
10MI26#1	-8.6	-57.0	10.5	-10.0
10MI26#3	-8.7	-57.9	8.1	-7.9
10MI26#5	-8.5	-56.6	15.6	-11.5
15MI52#1	-8.8	-57.9	7.2	-11.2
09MI20#1	-8.5	-56.5	21.8	-14.2
09MI20#3	-8.5	-56.8	15.1	-13.0
09MI20#5	-8.4	-56.1	22.3	-14.8
10MI23#1	-9.0	-60.4	6.8	-11.1
10MI23#2	-9.0	-60.2	4.3	-12.0
10MI23#3	-9.0	-60.5	2.1	-12.9
09MI21#3	-9.0	-59.9	5.2	-12.7
09MI21#2	-9.0	-60.3	4.9	-9.8

拉田区目	He	Ne	Ar	Kr	Xe	340/440
休収区间		-не/ не				
07MI07#1	5.35E-05	7.40E-07	7.06.E-04	1.19E-07	1.56E-08	4.18E-07
07MI07#3	3.1E-05	2.56E-07	4.53.E-04	9.12E-08	1.33E-08	4.29E-07
07MI07#5	3.97E-05	2.55E-07	4.38.E-04	9.16E-08	1.32E-08	4.29E-07
09MI20#1	2.12E-05	1.95E-07	2.74E-04	5.99E-08	8.88E-09	4.26E-07
09MI20#3	2.05E-05	1.70E-07	2.68E-04	5.73E-08	8.10E-09	4.39E-07
09MI20#5	1.27E-05	1.87E-07	3.19E-04	6.70E-08	9.18E-09	4.11E-07
09MI21#3	2.30E-05	7.49E-07	5.95E-04	9.99E-08	1.34E-08	4.71E-07
09MI21#2	9.93E-05	4.83E-07	6.60E-04	1.14E-07	1.46E-08	4.11E-07
10MI23#1	4.27E-05	3.04E-07	3.60E-04	7.90E-08	1.11E-08	4.53E-07
10MI23#2	5.13E-05	2.68E-07	4.67E-04	9.24E-08	1.37E-08	4.39E-07
10MI23#3	3.61E-05	2.34E-07	3.72E-04	9.12E-08	1.30E-08	4.16E-07
10MI26#1	3.84E-05	2.86E-07	4.72E-04	9.76E-08	1.39E-08	4.43E-07
10MI26#3	3.96E-05	3.12E-07	4.55E-04	9.57E-08	1.37E-08	4.50E-07
10MI26#5	2.44E-05	1.82E-07	2.49E-04	5.76E-08	7.68E-09	4.45E-07
12MI33#1	2.02E-04	4.46E-07	6.00E-04	1.15E-07	1.52E-08	4.63E-07
13MI38#1	9.59E-05	3.03E-07	4.71E-04	1.00E-07	1.39E-08	4.32E-07
13MI38#5	1.60E-04	2.13E-07	3.58E-04	7.37E-08	1.08E-08	4.48E-07
15MI52#1	7.03E-05	1.81E-07	4.10E-04	9.12E-08	1.37E-08	4.50E-07

(4)溶存希ガス

・14Cの繰り返し分析の結果

<sup>14</sup>C の分析におけるばらつきは 0.1pMC 程度であるが、サンプリング・前処理・分析の一連のば らつきについては、今まで評価された例が少ない。先述のように、無機 <sup>14</sup>C ではサンプリングか ら分析のプロセスにおいてばらつきが生じることが確認されていることから、本年度は1つの 採取区間に対して3つのサンプルを取得し、平均値とばらつきを評価した。(表に示した結果は 3つの分析値の中央値である)

図 3.2-16 には、3 回分析の<sup>14</sup>C 平均値を横軸に、3 回分析の標準偏差を平均値で除した値を 縦軸にプロットしたものを示した。図からわかるように、標準偏差/平均値はときおり 50%程度 の大きな値を示した。これは先述のように<sup>14</sup>C の分析において、他の 2 つのサンプルと比較し て、ときおり大きく外れた値が観察され、これによって標準偏差が増大するためである。大きく 値が外れるサンプルについては<sup>14</sup>C の値への依存性はみられず 2~15pMC の広い範囲で存在が 確認される。一方、標準偏差/平均値が大きく外れた値を除外して傾向を見ると、<sup>14</sup>C の平均値が 10pMC を超えるものについては標準偏差/平均値の値が 1.7%程度であったのに対し、10pMC を 下回ると 7.7%程度にまで増大する傾向がみられた。上述の「大きく外れたデータの除外」とい う目的に加えて、特に 10pMC を切るような低い<sup>14</sup>C をもつ地下水を分析する場合には、サンプ ルを複数本取得し、サンプリングから分析を通じた不確かさを評価していくことが必要であると 考えられた。



図 3.2-16 <sup>14</sup>C の値とサンプリング-分析におけるばらつきの関係

(4) まとめ

瑞浪立坑内のボーリングで地下水を採取し、主要溶存イオン、微量元素、同位体、溶存ガスを 調査した。この結果、立坑周辺に元々存在する流出域の地下水に、浅部地下水と深部地下水が混 合していると考えられた。浅部地下水は、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、δDとδ<sup>18</sup>O、SO<sub>4</sub>が指標となることが確認 できたが、これが瑞浪地域の地下水だけでなく一般的に用いることが可能な指標であるかを検討 する必要がある。

<sup>14</sup>C については、1 地点について 3 つのサンプルを取得して分析し、そのばらつきを明らかに した。<sup>14</sup>C の値が他の 2 つのサンプルと比較して大きく外れるサンプルが散見されたが、大きく 外れるサンプルについては <sup>14</sup>C への依存性は確認できなかった。多く外れた値を持つサンプルを 除外してみると、<sup>14</sup>C が 10pMC を下回る場合にサンプリングから分析のプロセスにおけるばら つきが増大する傾向が見られた。大きく外れた値を除外するため、また特に 10pMC 以下の値で <sup>14</sup>C 分析値の不確かさを把握するため、1 箇所から複数のサンプルを取得し分析値を得ることが 必要であると考えられた。

#### 3.2.4 瑞浪広域における井戸からの地下水採取と評価

#### (1) 地下水調査概要

瑞浪超深地層研究所周辺には、地下水の涵養域から流出域まで広域に水位観測等を目的とした 井戸が複数存在しており、地下水の採取が可能である。これらの井戸からは過去の研究において 既に地下水が採取・評価されているが、地下水モデルの妥当性を検証するための地下水年代デー タの拡充を目的として、今年度改めて地下水を採取した。

改めて調査を実施するのは、複数の地下水の採取・分析の経験を経て、あるいは新しい技術の 開発によって、以下の点に着目して再度地下水を採取・評価することが必要であると考えられた ためである。

・地下水の採取方法の選定(原位置での採水/揚水採水/真空を駆動力とした採水):評価対象とし た井戸には「MPシステム」という水位観察等に用いることができるシステムが挿入されており、 「ポンピングポート」と呼ばれるポートを開けて対象となるパッカー区間内の水を井戸の中に出 した上で揚水して採水が可能であるほか、「サンプリングポート」と呼ばれるポートにプローブを 入れサンプラーとパッカー区間を接続することで直接水を採取することも可能である。今までに 実施してきた検討によって、被圧した地下水の圧力が開放された場合溶存ガスが脱ガスし、希ガ ス等の濃度や水質に影響を与える可能性があることが分かった(Nakata et al., 2019)。このため、 今回の採水では希ガス採水については「ピストン式」と呼ばれる採水方法を採用した。ピストン 式採水では、プローブに採水用の銅管・ピストンを取り付け、プローブをポートに入れる。対象と するパッカー区間の水圧によってピストンが押され、銅管内の水が地下水と置換して銅管内に地 下水が採取される。「ボトル式採水」はプローブの先に真空引きした容器を入れ、容器内の真空を 駆動力にしてボトル内に地下水を導入する方法である。「揚水採水」はパッカー区間内の水を井戸 の中に出し、井戸の水を汲み上げて地表で採水をする方法である。希ガス分析以外の項目につい ては、この2つの方法でも採水を実施し、分析結果を比較した。

・<u>無機 <sup>14</sup>C 分析のための溶存炭酸回収方法</u>:地下水中の無機 <sup>14</sup>C を分析するためには、対象とす る地下水中の溶存無機炭酸を回収する必要がある。この回収法として、炭酸ストロンチウムの沈 殿を利用する「沈殿法」とサンプルの pH を下げて溶存炭酸を二酸化炭素として回収する「ガス 化法」がある。過去の検討により、沈殿法はサンプル調製時にわずかに大気由来の二酸化炭素が 混入し、値が若くなる傾向があることが分かった(Nakata et al., 2016)。このため、今回の調査 では <sup>14</sup>C を分析するためにガス化法を採用した。

・<u>希ガス温度計による涵養温度の推定</u>:過去の研究においては、1 つのサンプルから全ての種類 の希ガスを分析する技術が確立されておらず、全ての希ガス濃度を必要とする希ガス温度計の適 用ができていなかった。現在では1つのサンプルから全ての希ガスを回収し、分離した上で質量 分析装置を用いて分析するシステムが確立されたため、全てのガスの分析が可能となった。

今回の検討では、全ての希ガスを分析対象として分析し、希ガス温度計による涵養温度の推定 を実施した。

・水同位体比分析:10年程度前には、水の同位体比(δD、δ<sup>18</sup>O)を分析する手段として、水を 閉鎖空間で反応させて水素や一酸化炭素に変換し、水素や一酸化炭素ガスを質量分析装置で分析 する方法が主流であった。この方法は分析の前処理の手間が多く、そのために分析価格も高価で あり、分析可能なサンプルの量が限られていた。近年では、水蒸気化したサンプルにレーザーを あてて光の吸収を分析する、波長スキャンキャビティダウンリングダウン分光法(WS-CRDS法 山中ら,2011)が分析法の主流となっている。WS-CRDS法の1回の分析精度は前述の質量分析 装置による分析に劣るものの、面倒な前処理が不要であり1回の分析時間が数分と短いため、繰 り返し回数を上げて平均値を算出することで最終的な分析値の精度を出すことが可能となった。
WS-CRDS 法の確立により、多くのサンプルを繰り返し測定することが可能となった。

水の同位体比は希ガス温度計と並んで地下水の涵養温度推定の重要な情報となるため、全ての サンプルについて水素酸素同位体比を分析し、その涵養域から流出域における値の変化を明らか にしていく。

・<u>81Kr の分析</u>: <sup>81</sup>Kr は 2.29×10<sup>5</sup>年の半減期を持ち、大気には一定割合で存在するが地下での発 生源がないと考えられているため、数万年から数十万年の地下水年代推定に有用であると考えら れる。<sup>81</sup>Kr は以前シンチレーションカウンターにより分析されており、分析に必要とされる Kr の量を確保するために10トン程度の地下水が必要とされる場合もあった(Lehmann et al., 2003)。 近年 Atom trap trace analysis (ATTA) 法により、100L 程度の地下水からガスを抽出すること ができれば<sup>81</sup>Kr が分析可能となった (Yokochi, 2016)。瑞浪における地下水の地下での存在時間 は数千年から数万年と推定されており (Hasegawa et al., 2016)、<sup>81</sup>Kr による評価の対象となる 可能性があるため、MIU3 および 4 からガスを抽出し、分析を実施した。

### (2) 地下水の採取地点・採取方法

地下水の採取対象としたのは、涵養域から流出域に分布する7つのボーリング孔(MSB-2, MSB-4, DH-12, DH-13, MIU-2, MIU-3, MIU-4) である。採水項目や採水方法の概要については、前述の表 3.2-4 にまとめた通りである。採水地点を地図上にまとめたものを、図 3.2-17 に示した。



# (3) 採水・分析の途中経過

広域井戸で採水を実施し、すでに分析が終了している項目のうち、<sup>14</sup>C および δ D・<sup>18</sup>O の分 析結果、炭素と主要イオン濃度、微量元素濃度の分析結果を表 3.2-6 に示した。

今回の調査で得られた<sup>14</sup>Cの分析結果(ガス化法で取得)と過去の研究で得られた分析結果(沈 殿法で取得)を図 3.2-18 で比較した。図中の点線は Y=X の直線である。図からわかるように、 過去の研究において取得されたデータは全て直線の下側にプロットされており、今回取得した <sup>14</sup>C から推定される年代が過去に推定された年代よりも古いことがわかる。これは沈殿法によっ て取得された年代が、サンプル前処理中に混入する大気由来の二酸化炭素によって汚染され、年 代が若くシフトしたためであると推察することができる。このように、前処理方法を精度の良い ものに変えることで、より正確な地下水年代を評価することが可能となった。

また、表 3.2-6 では、容器内を真空にして地下水を容器内に導入する「真空法」と地表まで 地下水を揚水してから採水した「揚水法」の2種類で取得したサンプルにおける<sup>14</sup>Cから推定 される年代を比較した。表からわかるように、真空法で得られたサンプルの<sup>14</sup>C年代は揚水法で 得られたサンプルの<sup>14</sup>C年代よりもわずかに若い年代を示した。真空法は採水ボトルから、実際 にサンプルを輸送・保管するときの容器へと移し替える必要があるが、その過程で大気が混入し た可能性がある。また、真空に地下水を入れたときに地下水から二酸化炭素が抜け、同位体の分 別が起きた可能性がある。このように採水方法によっても<sup>14</sup>Cの値が影響を受ける可能性もある ため、採用する採水方法もこれらの結果に留意して選定する必要がある。



図 3.2-18 ガス化法と沈殿法で評価された <sup>14</sup>C の値の比較

# 表 3.2-6 瑞浪広域井戸における同位体比分析結果 (1)同位体比

		<sup>14</sup> C	<u> </u>	δ <sup>13</sup> C	δ 18 Ο	δD
試料名	米水方法	pMc (%)		‰	‰	‰
MSR-4 #1	ボトル(真空)	95.5%	±0.4%	-17.9	-7.37	-49.8
	ボトル(真空)	96.2%	±0.4%	-17.8		
MSR-4 #2	ボトル(真空)	58.1%	±0.2%	-17.4	-8.01	-54.0
	ボトル(真空)	58.1%	±0.2%	-17.3		
MSB_/ #3	ボトル(真空)	48.1%	±0.2%	-17.9	-8.16	-55.3
10130-4 #3	ボトル(真空)	47.5%	±0.2%	-17.7		
MSB_2 #1	ボトル(真空)	99.6%	±0.4%	-19.5		
10130-2 #1	ボトル(真空)	99.0%	±0.4%	-19.5		
MCR 2 #2	ボトル(真空)	75.8%	±0.3%	-19.0		
10130-2 #2	ボトル(真空)	76.0%	±0.3%	-19.0		
MSB-2 #6	ボトル(真空)	6.7%	±0.1%	-18.0		
10100 2 #0	ボトル(真空)	7.8%	±0.1%	-17.6		
MSB-2 #8	ボトル(真空)	24.9%	±0.1%	-14.8		
	ボトル(真空)	18.2%	±0.1%	-14.6		
	揚水	32.4%	±0.1%	-17.8	-8.1	-53.8
DH-13 #/	揚水	32.4%	±0.1%	-17.8		
DH-13 #4	ボトル(真空)	32.5%	±0.1%	-19.0	-8.1	-54.0
	ボトル(真空)	35.3%	±0.1%	-18.9		
MCP 2 #10	ボトル(真空)	26.9%	±0.1%	-17.7	-8.9	-59.2
IVISD-2 #10	ボトル(真空)	26.5%	±0.1%	-17.6		
	揚水	37.1%	±0.1%	-16.4		
DU 12 #6	揚水	37.6%	±0.1%	-16.6		
DH-13 #0	ボトル(真空)	40.1%	±0.2%	-18.1		
	ボトル(真空)	40.5%	±0.2%	-18.3		
	揚水	40.3%	±0.2%	-17.9	-8.0	-53.2
DU 12 //0	揚水	40.3%	±0.2%	-18.0		
DH-13 #8	ボトル(真空)	40.8%	±0.2%	-17.8	-8.0	-53.4
	ボトル(真空)	40.5%	±0.2%	-18.0		
	揚水	10.1%	±0.1%	-19.3		
	揚水	10.3%	±0.1%	-19.3		
MIU-2 #2	ボトル(真空)	17.5%	±0.1%	-15.5		
	ボトル(真空)	13.7%	±0.1%	-17.3		
	揚水	9.7%	±0.1%	-19.0		
	揚水	9.6%	±0.1%	-19.1		
MIU-2 #3	ボトル(真空)	13.5%	±0.1%	-18.9		
	ボトル(真空)	11.2%	±0.1%	-18.9		
	揚水	24.2%	±0.1%	-17.4		
DU 10 //11	揚水	24.4%	±0.1%	-17.6		
DH-13 #11	ボトル(真空)	29.8%	±0.1%	-17.5		
	ボトル (真空)	29.1%	±0.1%	-17.7		
	揚水	28.5%	±0.1%	-17.9		
DH-13 #15	揚水	28.5%	±0.1%	-17.8		

(4) 灰木やよし工女イタイ 仮り	(2)	炭素および主要イ	オン濃厚
-------------------	-----	----------	------

試料名	ゼッキナ	nH	ALK	TOC	NPOC	Na	К	Mg	Са	F	CI	SO4	Br	
	抹小刀法	рп	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	$\mu$ g/L	$\mu$ g/L
DH-12	揚水	9.34	0.52	0.60	< 0.1	70	0.37	0.02	14	10.5	93	< 0.05	195	38
MSB-4 #1	ボトル (真空)	7.43	3.36	2.29	0.99	19	1.9	7.5	47	0.1	1.3	17	21	15
MSB-4 #2	ボトル (真空)	7.55	3.14	1.99	0.44	32	2.1	6.4	45	0.2	1.1	51	14	5.3
MSB-4 #3	ボトル (真空)	7.76	3.01	2.10	0.32	46	2.4	4.1	36	0.2	1.1	56	13	3.3
MSB-2 #1	ボトル (真空)	6.41	2.52	3.13	1.65	16	4.0	8.2	51	0.1	5.6	65	54	46
MSB-2 #2	ボトル (真空)	8.41	3.74	3.08	1.14	113	3.5	1.0	13	0.2	7.7	79	56	47
MSB-2 #6	ボトル (真空)	9.48	0.84	0.80	0.21	91	0.3	0.09	4.6	12	98	0.6	202	29
MSB-2 #8	ボトル (真空)	8.44	0.43	0.57	0.15	121	0.6	0.4	27	8.5	205	1.1	426	60
MSB-2 #10	ボトル (真空)	7.74	0.58	0.78	0.22	113	1.0	2.1	23	8.7	185	0.5	371	67
DU 12 #4	揚水	8.54	1.52	1.93	0.50	18	0.8	0.3	19	3.5	1.1	4.0	10	2.6
DH-13 #4	ボトル (真空)	8.71	1.08	1.65	0.64	18	1.0	0.2	11	3.6	1.1	3.1	12	8.1
DU 12 #C	揚水	8.60	1.40	2.14	0.57	19	1.1	0.1	16	3.7	1.2	4.3	8.0	3.3
DH-13 #0	ボトル (真空)	8.44	1.32	1.35	0.26	19	1.2	0.1	15	3.4	1.2	4.7	7.0	3.2
DU 12 #9	揚水	8.28	1.65	1.28	0.15	18	0.4	0.1	25	3.2	1.2	4.7	7.0	3.2
DH-13 #8	ボトル (真空)	8.18	1.63	1.48	0.18	18	0.4	0.2	22	3.2	1.2	4.6	7.0	3.1
DUI 12 #11	揚水	8.74	1.40	1.16	0.27	30	0.5	0.02	18	5.4	1.1	4.5	6.0	2.1
DH-13 #11	ボトル (真空)	8.75	1.42	1.73	0.36	28	0.6	0.03	22	5.3	1.1	4.4	6.0	2.2
DH-13 #15	揚水	8.76	1.30	1.13	0.21	25	0.6	0.04	23	5.5	1.0	4.4	6.0	2.5
MILL 2 #2	揚水	9.22	1.59	1.47	0.23	44	0.4	0.02	7.2	9.3	0.9	2.0	5.7	<1
IVIIU-2 #2	ボトル (真空)	9.13	1.57	2.13	0.75	44	0.4	0.02	6.7	9.2	1.1	1.9	5.7	<1
MILL 2 #2	揚水	9.21	1.57	1.42	0.24	44	0.3	0.02	6.6	9.3	1.0	1.9	5.8	<1
10110-2 #3	ボトル (真空)	9.10	1.53	1.53	0.28	44	0.3	0.02	6.1	9.3	1.0	1.8	5.5	1.2
MILL 2 #4	揚水	9.31	1.65	1.5	0.4	46	0.2	0.02	6.6	9.7	0.9	1.8	5.5	<1
10110-2 #4	ボトル (真空)	9.12	1.61	1.4	0.2	46	0.2	0.01	5.9	9.7	0.9	1.7	5.6	1.4
MILL_2 #9	揚水	9.05	1.35	1.2	0.2	40	0.3	0.006	4.8	10	1.3	< 0.05	6.7	<1
10110-2 #3	ボトル (真空)	8.81	1.42	1.7	0.4	39	0.3	0.01	5.4	10	1.4	< 0.05	7.2	<1
MILL 2 #11	揚水	9.07	1.47	1.0	0.2	39	0.3	0.004	4.5	10	1.5	< 0.25	6.0	
WIIO-2 #11	ボトル (真空)	8.86	1.40	1.3	0.2	39	0.3	0.004	4.3	10	1.4	< 0.05	6.0	
MILL-2 #12	揚水	8.97	1.43	1.1	0.3	38	0.3	0.003	4.5	9.8	1.3	< 0.05	6.0	
WIIU-2 #12	ボトル (真空)	8.83	1.38	1.1	0.2	38	0.3	0.003	4.5	9.8	1.3	< 0.05	6.0	
MILL-3 #5	揚水	9.40	1.68	1.2	0.1	42	0.6	0.02	4.6	9.8	4.0	0.9	5.4	1.9
IVIIU-3 #5	ボトル (真空)	9.04	1.67	1.4	0.3	43	0.7	0.03	4.6	9.9	6.0	1.0	13.0	1.9

# (3) 微量元素

討料之	採水方法	Li	В	Si	Sr	AI	Fe	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cs	Rb	Ba
12-01-1-L	JAN 107 JA	μg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
DH-12	揚水	107	0.84	4.6	111	1.5	9.8	1	20.2	24	1.1	< 0.1	0.5	2.3	14
MSB-4 #1	ボトル (真空)	21	0.05	35	232	1.6	755	464	0.3	7.4	0.3	< 0.1	0.2	4.5	25
MSB-4 #2	ボトル (真空)	23	0.11	35	217	2.5	357	361	0.3	5.2	< 0.1	< 0.1	0.2	4.8	20
MSB-4 #3	ボトル (真空)	26	0.12	33	160	1.7	126	190	0.4	2.2	< 0.1	< 0.1	0.4	5.9	11
MSB-2 #1	ボトル (真空)	11	0.04	22	263	2.6	2271	1351	0.2	11	4.0	< 0.1	0.2	8.1	40
MSB-2 #2	ボトル (真空)	12	0.14	25	40	2.3	6.1	17	0.1	1.1	0.3	< 0.1	0.5	7.5	3.3
MSB-2 #6	ボトル (真空)	4.3	0.94	6.1	7.3	18	10	2.3	0.2	37	0.5	< 0.1	0.2	0.8	0.3
MSB-2 #8	ボトル (真空)	87	1.5	7.2	262	5.1	17	43	0.2	13	1.9	< 0.1	0.3	4.3	3.8
MSB-2 #10	ボトル (真空)	62	1.4	6.0	155	6.1	55	216	0.1	37	1.5	< 0.1	0.3	4.3	9.8
DUL 12 #4	揚水	29	0.09	12	160	4.6	82	15	0.3	39	1.6	< 0.1	0.7	4.2	4.2
DH-15 #4	ボトル (真空)	31	0.09	12	136	33	5.6	1.1	0.2	7.7	1.5	< 0.1	0.5	3.7	7.2
DUI 12 #C	揚水	28	0.10	11	159	7.5	38	5.6	0.4	84	1.7	< 0.1	1.2	5.8	3.1
DH-12 #0	ボトル (真空)	27	0.10	12	165	22	14	2.7	0.4	31	1.8	< 0.1	1.0	5.8	4.8
DUI 12 #0	揚水	27	0.10	13	204	3.9	38	14	0.5	123	1.2	< 0.1	1.6	3.9	2.3
DH-13 #8	ボトル (真空)	27	0.10	12	201	12	20	11.6	0.8	43	1.2	< 0.1	0.8	2.6	4.3
DUI 12 #11	揚水	43	0.08	11	114	6.7	12	3.3	0.3	22	0.7	< 0.1	1.6	4.0	1.7
DH-13 #11	ボトル (真空)	41	0.08	12	134	15	4.0	3.8	0.2	20	0.8	< 0.1	1.6	4.3	1.6
DH-13 #15	揚水	37	0.08	13	180	2.9	8.0	5.9	2.5	17	1.0	< 0.1	1.2	4.3	3.1
N#11.0 #0	揚水	47	0.23	8.1	34	80	12	1.7	0.4	186	1.9	< 0.1	0.7	3.0	1.1
MIU-2 #2	ボトル (真空)	46	0.23	7.9	35	77	8.0	1.6	0.2	44	1.9	< 0.1	0.6	2.7	1.0
	揚水	47	0.22	8.0	28	75	7.1	1.8	0.3	15	2.5	< 0.1	0.8	2.5	0.6
MIU-2 #3	ボトル (真空)	49	0.22	8.0	28	71	6.6	1.6	0.3	5.3	2.4	< 0.1	0.7	2.2	0.6
N#11.0 #4	揚水	48	0.26	6.9	22	30	2.4	1.1	0.4	7	1.5	< 0.1	0.7	2.0	0.3
IVIIU-2 #4	ボトル (真空)	46	0.25	7.2	22	29	4.5	1.0	0.2	5.3	1.5	< 0.1	0.5	1.7	0.3
	揚水	52	0.17	9.2	63	11	1.6	3.6	0.5	16	1.0	< 0.1	2.2	3.9	0.3
MIU-2 #9	ボトル (真空)	50	0.17	9.1	60	18	3.7	2.4	0.3	102	0.9	< 0.1	2.4	4.1	0.9
MILL 2 #11	揚水	53	0.17	10.2	73	19	4.0	3.0	< 0.5		0.7	< 0.1	2.6	4.7	0.6
WIU-2 #11	ボトル (真空)	53	0.18	10.3	72	17	1.9	1.9	< 0.5		0.8	< 0.1	2.1	4.0	0.7
MILL 0 #10	揚水	54	0.16	9.7	69	22	2.4	1.4	< 0.5		0.7	< 0.1	3.6	5.2	0.2
WIU-2 #12	ボトル (真空)	52	0.16	10.1	69	20	1.2	2.1	< 0.5		0.7	< 0.1	2.3	4.4	0.3
MILL 2 #F	揚水	2300	0.25	6.8	17	40	5.0	2.6	< 0.1	12	0.9	< 0.1	0.2	2.1	0.9
MIU-3 #5	ボトル (真空)	2245	0.26	6.8	17	20	5.9	2.2	< 0.1	5.1	0.8	< 0.1	0.2	2.4	0.5

区間名	<sup>14</sup> C年代(年)								
	真空-1	真空-2	揚水-1	揚水-2					
区間4	9040	8360	9060	9050					
区間6	7350	7270	7960	7860					
区間8	7210	7250	7290	7310					
区間11	9740	9920	11400	11350					

表 3.2-7 DH-13 号孔で取得された地下水における<sup>14</sup>Cの値(採水方法による比較)

# (4) まとめ

地下水モデルの妥当性を検証するための地下水年代データの拡充を目的として、瑞浪の広域井 戸から地下水を採取した。新しく技術を適用した結果、以前のサンプリングよりも精度が上がっ た項目などがすでに観察されており、以前より精度良く地下水年代を評価することが可能である と期待できる。

今後さらに分析を進めて地下水年代を評価し、モデルの妥当性検証等に用いていく予定である。

### 3.2.5 参考文献

- Asai, K., Tsujimura, M., Fantong, W.Y., Satake, H., Impact of Natural and local anthropogenic sources on dating springs and groundwater using SF6 in central Japan, Hydrol. Res. Lett., vol. 5, pp. 42–46, 2011.
- Aeschbach-Hertig, W., F. Peeters, U. Beyerle, and R. Kipfer, Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters, Water Resour. Res., 35(9), 2779-2792, 1999.
- Ballentine, C. J. and C. M. Hall, Determining paleotemperature and other variables using an error weighted non-linear inversion of noble gas concentrations in water, Geochim. Cosmochim. Acta, 63, 16, 2315-2336, 1999.
- Bauer, S., Fulda, C., Schafer, W., A multi-tracer study in a shallow aquifer using age dating tracers 3H, 85Kr, CFC-113 and SF6 – indication for retarded transport of CFC-113, J. Hydrol., vol. 248, pp. 14–34, 2001.
- Bunsenberg, E. and Plummer, L.N., Dating young groundwater with Sulphur hexafluoride
  Natural and anthropogenic sources of Sulphur hexafluoride, Water Resour. Res., vol.36, pp.3011–3030, 2000.
- Cook, P.G., Solomon, D.K., Recent advances in dating young groundwater: chlorofluorocarbons, 3H/3He and 85Kr, J. Hydrol., vol.191, pp. 245–265, 1997.
- Corcho Alvarado, J.A., Purtschert, R. Hinsby, K., Troldborg, L., Hofer, M., Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W., Arno-Synal, H., <sup>36</sup>Cl in modern groundwater dated by a multitracer approach (<sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He, SF<sub>6</sub>, CFC-12 and <sup>85</sup>Kr): a case study in Quaternary sand aquifers in the Odense Pilot River Basin, Denmark, Appl. Geochem., vol. 20, pp. 599–609, 2005.
- Corcho, Alvarado, J.A., Purtschert, R., Barbecot, F., Chabanlt, C., Rueedi, J., Schneider, V., Aeschbach-Hertig, W., Kipfer, R., Loosli, H.H., Constraining the age distribution of highly mixed groundwater using 39Ar: a multiple environmental tracer (<sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He, <sup>85</sup>Kr, <sup>39</sup>Ar and

<sup>14</sup>C): study in the Semiconfined Fontaineblean Sands Aquifer (France), Water Resour. Res., vol.43, pp. 1–16, 2007.

- Geyh MA., An overview of 14C analysis in the study of groundwater. Radiocarbon vol.42(1), pp.99–114, 2000.
- Gooddy, D.C. Darling, W.G. Abesser, C. Lapworth, D.J., Using chlorofluorocarbons (CFCs) and sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) to characterize groundwater movement and residence time in a lowland Chalk catchment, J. Hydrol., vol.330, pp. 44–52, 2006.
- Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Goto, K., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T., Takeda, M., Cross-checking groundwater age by 4He and 14C dating in a granite, Tono area, central Japan. Geochim. Cosmochim. Acta., vol.192, pp. 166-185, 2016.
- Hill, M.C and Tiedeman, C.R, Effective groundwater model calibration with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty, Wiley Inter-Science, p.455, 2006.
- Hou, X., Aldahan, A., Nielsen, S. P., Possnert, G., Nies, H. and Hedfors, J., Speciation of 129I and 127I in Seawater and Implications for Sources and Transport Pathways in the North Sea, Environment Science and Technology, vol.41, pp.5993–5999, 2007.
- Lehmann B. E., Love A., Purtschert R., Collon P., Loosli H., Kutschera W., Beyerle U., Aeschbach Hertig W., Kipfer R., Frape S. K., Herczeg A. L., Moran J., Tolstikhin I., and Groening M., A comparison of groundwater dating with <sup>81</sup>Kr, <sup>36</sup>Cl and <sup>4</sup>He in four wells of the Great Artesian Basin, Australia. Earth and Planetary Science Letters 211, 237-250, 2003.
- 馬原保典(1998):溶存希ガスを用いた地下水年代測定法の開発 -溶存希ガス地下水調査法の体 系化-,電力中央研究所 研究報告:U97052.
- Muramatsu, Y., Fehn, U. and Yoshida, S., Recycling of iodine in Pacific areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan, Earth and Planetary Science letters, vol.192, pp.583-593, 2001.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Iwatsuki, T., Kato, T., Comparison of <sup>14</sup>C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, Radiocarbon, vol. 58, pp.491-503, 2016.
- Nakata, K. Hasegawa, T. Solomon, D.K. Miyakawa, K. et al., Degassing behavior of noble gases from groundwater during groundwater sampling, Applied Geochemistry, 104, 60-70, 2019.
- 中村俊夫 (2003): I. 加速器質量分析 (AMS) における環境中およびトレーサー放射性同位体の高感度測定, Radioisotopes, 52, 145-171.
- Ohta, T., Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Matsumoto, T., Mahara, Y. Optimization of a portable hollow-fiber-based device for extracting radio Kr dissolved in deep groundwater and selection of <sup>222</sup>Rn as an indicator of Kr extraction efficiency, Journal of Hydrology, vol. 574, pp. 476-485, 2019.
- Ohta, T., Mahara, Y., Fukutani, S. Kubota, T., Shibahara, Y., Igarashi, T., Fujiyoshi, R., Watanabe, N. and Kozaki, T., Speciation of 137Cs and 129I in soil after the Fukushima NPP accident, Radiological issues for Fukushima's revitalized future, Springer Nature, pp.13-24, 2016.
- Ohta, T., Mahara, Y., Kubota, T., Abe, T., Matsueda, H., Tokunaga, T. and Matsuzaki, H., Separation and measurement of 129I and 127I in pre-nuclear-era marine algae with ultra low 129I/127I isotopic ratios, Nuclear Instrument and Method of Physics Research B,

vol.294, pp.559-562, 2013.

- Ohta, T., Mahara, Y., Kubota, T., Fukutani, S., Fujiwara, K., Takamiya, K., Yoshinaga, N., Mizuochi, Y. and Igarashi, T., Prediction of groundwater contamination with 137Cs and 131I from the Fukushima nuclear accident in the Kanto district, Journal of Environmental Radioactivity, vol.111, pp.38-41, 2012.
- Ohta, T., Mahara, Y., Momoshima, N., Inoue, N., Ikawa, R., Taniguchi, M. and Shimada, J., Separation of dissolved Kr from water sample with hollow fiber membrane, Journal of Hydrology, vol.376, pp.152-158, 2009.
- Plummer L.N. and Bunsenberg, Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in Use of chlorofluorocarbons in hydrology -a guide book-, IAEA, 2006.
- Rozanski, K., Florkowski, T., 85Kr dating of groundwater. In Isotope Hydrology 1978, IAEA, Vienna, p. 949, 1979.
- Side, W.C., Fischer, R.A., Detection of <sup>3</sup>H and <sup>85</sup>Kr in groundwater from arsenic bearing crystalline bedrock of the Goose River basin, Mar, Environ. Geol., vol. 44, pp. 781–789, 2003.
- Side, W.C., Apparent <sup>85</sup>Kr ages of groundwater within the Royal water shed, Marin, USA J. Environ. Radioactiv., vol. 91, pp. 113–12,2006.
- 資源エネルギー庁(2017):科学的特性マップ、

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\_and\_gas/nuclear/rw/kagakutekitokusei map/maps/kagakutekitokuseimap.pdf(最終確認 2020/3/25)

- Smethie, W.M., Solomon, D.K. Schiff, S.L. Mathieu, G.G., Tracing groundwater flow in the Borden aquifer using krypton-85, J. Hydrol., vol. 130, pp. 279–297, 1992.
- Stadler, S. Osenbrück, K. Suckow, A.O. Himmelsbach, T. Hötzl, H., Groundwater flow regime, recharge and regional-scale solute transport in the semi-arid Kalahari of Botswana derived from isotope hydrology and hydrochemistry, J. Hydrol., vol. 388, pp. 291–303, 2010.
- Stute, M., and Schlosser, P., Principles and applications of the noble gas paleothermometer in Climate Change in Continental Isotopic Records edited by P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie, and S. Savin, published by AGU Book Board, 1993.
- Visser, A., Schaap, J.D., Broers, H. P., Bierkens, M. F.P., Degassing of 3H/3He, CFCs and SF6 by denitrification: Measurements and two-phase transport simulations, Journal of Contaminant Hydrology, vol. 103, pp. 206–218, 2009.
- 山中勤,恩田裕一、波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体分析計の測定 精度について,筑波大学陸域環境研究センター報告,vol.12, pp.31~40、2011.
- Yokochi, R., Recent developments on field gas extraction and sample preparation methods for radiokrypton dating of groundwater, Journal of Hydrology, vol.540 no.1, pp.368-378, 2016.

# 4. 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術 の高度化

#### 4.1 背景と目的

これまでの調査研究において、堆積岩中の地下深部には化石海水(本事業では、堆積時の海水 が埋没続成過程で変化し、その後、天水浸透の影響を受けていない地下水を化石海水と称す)に 代表されるように、長期にわたり地層中に残留していると考えられる地下水の存在が確認されて いる(例えば、Pearson et al., 2003;馬原ほか、2006)。また、化石海水が残留しているような 場所では、地下水流動が遅く、拡散による物質輸送が支配的である例も報じられている(例えば、 Mazurek et al., 2009)。拡散による物質輸送は最も遅い輸送であり、拡散による輸送が支配的で あることを示すことができれば、天然バリア性能が高いことの証左となる。実施主体が行う概要 調査では、このような地下水の流れが非常に遅く、拡散が支配的な場の空間的な拡がりを把握で きることが重要となる。

これまでの事例研究により、岩盤中の水みちの透水性を把握するための調査技術や水理学的な 不均質性をモデル化・解析する技術の整備が進められ、対象とする場を網羅的に調査・解析・評 価するための手法が構築されてきた(例えば、太田ほか,2007;佐藤ほか,2017)。今後は、そ れらの成果を踏まえ、水理学的に閉鎖的な環境の形成・維持が推定される領域に対して、水理場・ 化学環境の古水理地質学的変遷などの評価を行い、長期的に安定な水理場・化学環境の三次元分 布を地表から把握するための調査・評価技術の体系化を図る必要がある(地層処分研究開発調整 会議,2018)。

このような背景を踏まえ、本事業では、実施主体が行う概要調査を念頭に、これまでに新第三 紀堆積岩を対象に地質環境データが蓄積されている幌延地域を一例とし、長期的に安定な水理場・ 化学環境の三次元分布を地表から把握可能な調査・評価技術を整備することを目的とする。この 目的に対する実施内容として、以下の3つの研究開発項目を設定し、平成30年度より検討を開 始した(日本原子力研究開発機構、2019)。

- ① 地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築
- ② 地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備
- ③ 概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案

### 4.2 アプローチ

図 4.2-1 に、4.1 で述べた本事業で取り組む 3 つの研究開発項目について、各項目で期待される主なアウトプットを整理した(日本原子力研究開発機構、2019)。

1 つ目の研究開発項目である「地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するため の方法論の構築」におけるアウトプットとしては、水理学的に閉鎖的な環境が形成・維持されて いると推定される領域(低流動域)を抽出するための調査・評価技術、低流動域に存在する地下 水の年代測定技術および低流動域における物質移動プロセスの調査(拡散場の調査)技術の提示 を目標とする。

2 つ目の研究開発項目である「地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・ 解析手法の整備」におけるアウトプットとしては、広域の地下水流動のモデル化・解析にあたり 流動域と低流動域を考慮する場合の評価技術の提示を目標とする。

3 つ目の研究開発項目である「概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案」における アウトプットとしては、幌延における既往の研究成果や本事業における1つ目および2つ目の研 究開発項目における成果を踏まえ、候補地において実施主体が行う概要調査段階での利用を想定 し、低流動域の調査・評価の方法論/フローの案を提示することを目標とする。



図 4.2-1 個別の研究開発項目とアウトプット

次に、本事業における各研究開発項目での平成 30 年度の成果および平成 31 年度の実施概要に ついて、検討フローをもとに説明する。

1 つ目の研究開発項目である「地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するため の方法論の構築」の検討フローを図 4.2-2 に示す。



図 4.2-2 地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築に係 わる検討フロー

平成 30 年度は、坑道スケールおよび施設スケールを対象にした検討として、幌延の地下研究 施設周辺における既存ボーリング孔(HDB-11)を用い、既往の試験により亀裂の水理学的連結

性が限定的と推定されている稚内層深部に分布する断層を対象に、長期透水試験を行った。その 結果、同断層の水理学的連結性が限定的であると共に、断層の透水性は、地層の巨視的な透水性 に匹敵するほど低いことを示唆するデータが得られた(日本原子力研究開発機構、2019)。一方、 ボーリング調査における透水試験では、評価可能な領域が限定されるため、広域スケールを対象 とした低流動域の三次元分布を抽出するための調査・評価としては、幌延地域における地上から の調査段階で行われた地質調査、物理探査およびボーリング調査の結果を統合させた解釈の事例 を示すことも必要である。このため、平成31年度は、低流動域の空間分布を概要調査で効率的に 把握するための方法として、ボーリング調査と物理探査を組み合わせた手法を対象に、その適用 性や課題について幌延の既存データを用いた検討・整理を行った。

また、施設スケール〜広域スケールを対象にした検討として、平成 30 年度は天水の浸透に伴 い化石海水との混合が生じていると想定される領域を対象に、<sup>81</sup>Krを用いて数十万年〜百万年程 度の年代測定に適した技術開発に着手した。さらに、拡散で分離・分別する指標として、地下水 中の水素や塩素の同位体比に着目し、これらの元素プロファイルの解釈を試みる調査も実施した。 平成 31 年度も <sup>81</sup>Kr を用いた年代測定の技術開発を継続すると共に、拡散で分離・分別する指標 を用い、天水と化石海水の混合域における元素プロファイルの解釈を進めた。

2 つ目の研究開発項目である「地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・ 解析手法の整備」の検討フローを図 4.2-3 に示す。



図 4.2-3 地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備に係わる検討フロー

本項目では、広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備として、幌延地域の浅部で想定され る流動域での天水浸透による化石海水との混合による影響範囲を評価する手法を改良・開発し、 深部に存在する影響が小さい領域(低流動域)の分布を評価する(日本原子力研究開発機構、2019)。 評価手法の開発にあたっては、坑道スケール、施設スケールおよび広域スケールといった異なる スケール間での不均質性の取扱いに留意することが重要である。特に、亀裂の発達する堆積岩で ある稚内層を対象とした場合、各スケールで用いられるモデル(例えば、亀裂ネットワークモデ ルと連続体モデル等)と空間スケール間の関連性について検討を進めることが必要である。

平成 30 年度は、天水の浸透影響が小さく地下水の流れが非常に遅い低流動域の三次元分布を 推定するためのモデル化・解析手法整備の一環として、地表からの天水の浸透に影響を与え得る 幾つかの要因(断層と地層の透水性の違い、海水準および塩水密度の違い等)に着目した感度解 析手法の検討を行った(日本原子力研究開発機構、2019)。平成 31 年度は、平成 30 年度に実施 した広域スケールでの天水浸透影響に係る感度解析の結果を踏まえつつ、解析の初期条件や境界 条件等の見直しを図った。また、亀裂の発達した地層である稚内層を対象に、透水不均質性のス ケール依存に関わる解析的検討、亀裂とマトリクスの二重空隙を考慮した場合のダムケラー数に よる移流・拡散の影響度合いに係る検討および広域・施設スケールでの地下水流動解析に基づく 地下水移行時間の三次元分布の推定に関わる解析的検討を実施した。

3 つ目の研究開発項目である「概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案」の検討フ ローを図 4.2-4 に示す。



図 4.2-4 概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案に係わる検討フロー

本項目では、これまでに幌延深地層研究計画で得られた成果や本事業における1つ目および2 つ目の研究開発項目における成果をもとに、実施主体が将来の候補地域で実施する概要調査段階 での利用に資するため、地上からの調査により地下に存在する長期的に安定な水理場・化学環境 の三次元分布を評価する上で必要な技術を体系的に整理する。平成30年度は、幌延における既 存の研究成果の再整理を重点的に行った(日本原子力研究開発機構、2019)。平成31年度は、上 記の2つの実施項目における成果に基づき、地上からの複数の調査方法を統合した手法による低 流動域の評価手法に係る現状と課題、調査による低流動域の三次元分布の推定を補完する上での 地下水流動解析の適用に関わる現状と課題について、各々、整理した。

# 参考文献

地層処分基盤調整会議,地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度~平成 34 年度), 2018. 馬原保典,中田英二,大山隆弘,宮川公雄,五十嵐敏文,市原義久,松本裕之,化石海水の同定法 の提案-太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価-,地下水学会誌, vol.48, no.1, pp.17-33, 2006.

- Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T. and Waber, H.N., Natural tracer profiles across argillaceous formations: The CLAYTRAC project. OECD/NEA Report 6253, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France, 2009
- 太田久仁雄,阿部寛信,山口雄大,国丸貴紀,石井英一,操上広志,戸村豪治,柴野一則,濱 克 宏,松井祐哉,新里忠史,高橋一晴,丹生屋純夫,大原英史,浅森浩一,森岡宏之,舟木泰智, 茂田直孝,福島龍郎,幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究 成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」,JAEA-Research 2007-044, 2007.
- 日本原子力研究開発機構,平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発 事業 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書 平成 31 年 3 月, 2019.
- Pearson, F.J., D. Arcos, A. Bath, J.Y. Boisson, A.M. Fernandez, H.E. G\u00e4bler, E. Gaucher, A. Gautschi, L. Griffault, P. Hernan and H.N. Waber., Mont Terri project Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Federal Office for Water and Geology Report 5, Bern, Switzerland, 2003.
- 佐藤稔紀, 笹本 広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野 明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山 雅 史, 武田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊藤洋昭, 幌延深地層 研究計画における坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第2段階: 深度 350m まで) 研究成果報告書, JAEA-Research 2016-025, 2017.

#### 4.3 地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築

4.2節で述べたように、本研究開発項目の実施にあたり、平成31年度は、低流動域の空間分布 を概要調査で効率的に把握するための方法として、ボーリング調査と物理探査を組み合わせた手 法を対象に、その適用性や課題について幌延の既存データを用いた検討・整理を行った。

実施主体が行う概要調査は、精密調査地区選定段階において行われる調査であり、この結果に 基づき、概要調査地区の中から精密調査地区が選定される(原子力発電環境整備機構、2002)。概 要調査の方法としては、ボーリング、地表踏査、物理探査(空中、地上又は水上において行うも のに限る)およびトレンチの掘削が挙げられている(原子力発電環境整備機構、2002)。これらの うち、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階では、ボーリング、地表踏査および物理 探査が実施され、これらの調査結果を踏まえ、地下に分布する地層や地下水の空間分布の評価が なされた(太田ほか、2007)。図 4.3-1 に、地上からの調査段階で実施された調査のイメージと 各調査で実施された調査概要を示す。調査の手順としては、まず、既存の文献情報や地質調査に よる結果をもとに、対象エリア内に分布する地質や地質構造の概略を把握し、平面図や断面図と して整理された。次に、物理探査として、地震探査による地下の地質・地質構造分布の推定・地 質調査結果の確認や、電磁・電気探査による岩相の違い・比抵抗分布(塩濃度分布)の推定が行 われた。さらに、地質調査や物理探査といった面的調査に加え、ボーリング調査による各種試験 や分析等により、地下の鉛直方向のデータが取得され、これらを踏まえ地下に分布する地層や地 下水の空間分布が推定された。



図 4.3-1 幌延における地上からの調査段階で実施された調査のイメージ

図 4.3・2 には、地下深部の低流動域を地上からの調査により把握することを念頭に、概要調査 で想定される各種調査のうち、どのような主要な調査を組み合わせて、どのような考え方で評価 していけば良いかを、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階に行われた調査・解析事 例をもとに模式的に整理した。また、図 4.3・3 に、地下深部における低流動域の分布の評価にあ たり、幌延における地下水の特徴(化石海水分布の特徴)を整理した。

幌延では、これまでの調査結果により、幌延の地下水は、天水と化石海水を端成分とし、それ らが混合していることが示されている(図 4.3·3)。また、深さ方向でみると、深い所には化石海 水が存在していることも示唆されている(図 4.3·3)。このため、化石海水の年代は非常に古く、 このような地下水が存在する領域では、地下水の流れが非常に遅いことが示唆される。そこで、 本事業では、地下深部の低流動域を把握するにあたり、まず、化石海水を指標とし、地下におけ る化石海水の三次元分布を評価する方法を考えた。



図 4.3-2 地下深部の低流動域を地上からの調査により把握する場合の評価例



図 4.3-3 幌延における地下水の特徴(化石海水分布の特徴)

化石海水は、海水に由来するため、一般的に塩濃度が高く、また、長期間にわたり岩石-水反 応の影響を受けていることから、水の安定同位体比(δDおよびδ<sup>18</sup>O)も海水とは異なる特徴を 有する。したがって、化石海水の存在を確認するには、塩濃度および水の安定同位体比が重要に なる。塩濃度および水の安定同位体比は、ボーリング調査による採水・分析で結果が得られるが、 概要調査で想定される調査手順を勘案すると、地表踏査および物理探査が終了した後であり、ま た、ボーリング本数が限られることを考慮すると、これらの情報のみで化石海水の三次元分布を 評価するのは困難である。一方、物理探査のうち、電磁・電気探査では、地下の比抵抗分布に係 るデータが得られ、これらの結果に基づき等価 NaCl 濃度(塩濃度として近似)として推定する 試みが多数行われている(例えば、光畑ほか、2006;水野ほか、2017)。ボーリング調査におけ る採水調査で得られる情報は、岩盤中の点としてしか得られないが、物理探査で得られる情報は、 ある連続性をもった線もしくは面の情報へと拡張でき(水野ほか、2017)、地下水の塩濃度の三 次元分布を評価する上で有効であると考えられる。そこで、まず、電磁・電気探査による地下の 比抵抗分布をもとに、地下の塩濃度分布を推定する。この際には、地下の比抵抗分布に影響をあ たえる地質・地質構造に関わる情報(地表踏査および地震探査の結果)も加味して検討する。な お、地下水の塩濃度に関しては、化石海水の水質形成過程における続成変質作用の影響程度によ り、塩濃度が異なる可能性も示唆されている(甲斐・前川、2009)。このため、地下水の塩濃度が 相対的に低くても、地表水との混合影響が大きいかどうか不明な場合がある。その場合、水の安 定同位体比を化石海水かどうか裏付ける値として利用する。これらの検討により、地下における 化石海水の三次元分布を推定する。

一方、地下水の流動性は、地層の透水性と動水勾配により影響される。化石海水の分布域は、 地下水の流動性の観点でも安定な領域で、流れが緩慢であると推定される。このような水理的に 安定な領域を地下水流動解析からも示唆することを検討する。検討にあたっては、既往の地下水 流動モデルや解析手法に基づき、広域・施設スケールでの地下水流動解析を行い、地下水移行時 間の三次元分布を推定する。これらの解析結果をもとに、別途実施された化石海水の三次元分布 の推定結果と照らし合わせ、化石海水の分布域が水理的にも安定な領域(地下水の移行時間が長 い領域)であることを確認する。また、別途実施する地下水年代測定結果による結果(天水と化 石海水との混合域における移行時間が長いこと)も踏まえ、化石海水を指標とすることで、地下 深部の低流動域を地上からの調査により把握する手法について、幌延を対象に例示する。

#### 参考文献

原子力発電環境整備機構,概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠-「概要調査地区 選定上の考慮事項」の説明資料-,NUMO-TR-04-02,2002.

甲斐邦男,前川恵輔,北海道幌延地域の新第三系珪藻質泥岩中の地下水の酸素・水素同位体比と 塩化物イオン濃度,石油技術協会誌,74巻1号,pp.96-106,2009.

水野 崇,岩月輝希,松崎達二,ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の 推定方法に関する検討,応用地質,第58巻第3号2017年8月,2017.

光畑裕司,電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査-九十九里浜平野における例-, 地学雑誌, Vol.115, No.3, pp.416-424, 2019.

太田久仁雄,阿部寛信,山口雄大,国丸貴紀,石井英一,操上広志,戸村豪治,柴野一則,濱 克宏,松井祐哉,新里忠史,高橋一晴,丹生屋純夫,大原英史,浅森浩一,森岡宏之,舟木泰智, 茂田直孝,福島龍郎,幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成 果報告書 分冊「深地層の科学的研究」,JAEA-Research 2007-044, 2007.

4.3 節では、本事業で取り組む地下深部の低流動域の空間分布を概要調査で効率的に把握する ための方法論の概要について述べた。以下の4.3.1 項~4.3.3 項では、4.3 節で述べた方法論に基 づき、幌延を対象に既存の情報やデータをもとに、低流動域の空間分布を推定するために実施し た一連の検討内容について説明する。なお、4.3 節でも述べたが、本事業では化石海水が分布する 領域で想定される一般的特徴(地下水の年代が古く、このような地下水が存在する領域では、地 下水の流れが非常に遅いことが示唆される)を踏まえ、地下深部の低流動域の把握にあたり、化 石海水を指標とし、その三次元分布を評価する方法で検討を進めた。まず、4.3.1 項および4.3.2 項では、塩濃度分布の評価にあたり重要となる比抵抗値のデータの再整理を行った。次に、4.3.1 項および4.3.2 項でのデータ再整理の結果も踏まえ、ボーリング調査で得られた地下水の安定同 位体比のデータも加味し、化石海水の三次元分布を評価した。

#### 4.3.1 既存のボーリング検層データの再整理

#### (1) 文献調査

これまでに、地下深部の塩濃度の分布を推定するための探査として、電気・電磁探査が行われ、 探査の結果として得られる比抵抗値を塩濃度と関連づけて評価が行われている。比抵抗値は、電 気・電磁探査の様な地上から行われる物理探査に加え、ボーリング孔を用いた検層からも得られ る。本事業でも、物理探査と検層で得られる比抵抗値をもとに、地下深部の塩濃度分布の推定を 試みるため、まず、既往の調査例として、どのような検討がなされているかを文献調査に基づき 整理した。

文献調査の結果、その多くは、物理探査による比抵抗値の測定結果に対して一次元または二次 元解析を実施し、直交する断面図(鈴木ほか,2009; Fu et al., 2013; Chongo et al., 2015; 西山ほ か,2016)あるいは異なる深度での平面図(Danielsen et al., 2007; Levi et al., 2008; Chongo et al., 2015)で比抵抗分布を示したものであり、地下での空間分布を目的として三次元のブロック 状で比抵抗値の分布を示した事例はごくわずか(Kontar and Ozorovich, 2006)であった。一方、 火山観測研究においては、火山地帯の地下数 km~数+ km に分布する地熱帯や沈み込み帯を対 象に、地質の三次元構造を考慮した三次元逆解析にもとづいて比抵抗値の分布を示した研究事例 が多数存在するが(市原・市來,2011; 相澤,2016)、深度数百 m における地下水に対しては、こ のような三次元逆解析手法の適用事例はほとんど無かった。なお、これまでに三次元探査におい て課題となっていたデータ取得の時間的・コスト的制約を解消するための新規な探査方法につい ても開発が進められており、実際の現場でも比抵抗値の三次元分布が取得されているものの (Mogi et al., 2009; 城森ほか, 2013)、これらは相対的に探査可能深度の浅い TEM 法に関連し たものであり、深度数百 m~数 km を対象とする可能性のある地層処分事業の概要調査に適用す るには依然として課題が多いと考えられる。

電気・電磁探査により取得された比抵抗分布は、地上からのボーリング孔の電気検層で取得さ れた比抵抗値と比較することにより、電気・電磁探査による比抵抗値の信頼性を確認することが 可能である(Unsworth et al., 2000; 光畑、2006; Unsworth et al., 2007; Levi et al., 2008; Schaa et al., 2018)。上記の文献においては、電気・電磁探査とボーリング検層とで比抵抗値の分布は大 局的に一致しているものの、一部の深度では両者に局所的な乖離が見られる。その理由としては、 断層の存在による岩盤の比抵抗値の局所的な変化(Unsworth et al., 2000)、電気・電磁探査にお ける測定の標準誤差の増加(光畑、2006)、電気・電磁探査における解像度の低さ(Levi et al., 2008)などが指摘されていた。本事業において、同様な検討を行う場合、このような既往事例に おける考察も参考になると考えられる。

#### (2) 背景と課題

本事業では、地下水の低流動領域の空間分布の推定手法の構築に取り組んでいる。4.3 節でも 触れたとおり、本地域は、厚い海成の堆積岩に覆われており、地下深部には海水を起源とする高 塩濃度の地下水が存在することが分かっている。このような地下水は、地層の堆積時に間隙中に 取り込まれた海水が長い地質時間の中で岩石・水反応などの続成作用により組成が変化したもの と考えられており、このような地下水が分布する領域は、地下水の流れの非常に遅い低流動域に 相当する可能性が高いと考えられる。海水中の塩濃度は、概ねナトリウムイオンと塩化物イオン により占められ、反応性が低い塩化物イオン(Cl-)は、特にこのような高塩濃度の地下水の指標 として適している。4.3 節では、このような地下水の指標として地下水中の塩濃度やその他のパ ラメータの三次元分布の推定手法の整理に取り組む。



図 4.3-4 空間分布の補間手順 (a) 塩濃度の空間分布の補間方法(岩月ほか, 2012)、(b) その他のパラメータの空間分布の補間方法

図 4.3・4 に、本事業の中で実施した塩濃度とその他のパラメータの空間分布の推定手順の方法 を示す。このうち、4.3.1 項では、図 4.3・4 の手順1 に係る検討内容について説明し、4.3.2 項で は、図 4.3・4 の手順2と4 および手順a について説明する。また、4.3.3 項では、図 4.3・4 の手 順3及び手順bとc に関わる検討内容について、各々、説明する。

まず、4.3.1項に関わる背景と課題について説明する。地下水の塩濃度が電気伝導率と正の相関 を持つことから、地下水として塩水が分布している場合、ボーリング調査で得られた岩盤の比抵 抗検層値や採水した地下水の水質分析値と電気・電磁(比抵抗)探査結果の相互比較により、ボ ーリング調査で得られた塩濃度の一次元情報を電気・電磁探査断面を介して二次元・三次元展開 することにより、地下水の塩濃度の空間分布を補足できる可能性がある。

これまでの幌延深地層研究計画では、地上からのボーリング孔において実施された比抵抗検層 結果から地下水の塩濃度を把握するための手法について検討が行われてきている(水野ほか、 2017)。その結果、対象としたボーリング孔11孔のうち9孔において、推定した等価 NaCl 濃度 と分析値の間に良い相関が認められた(水野ほか、2017)。推定値と分析値が一致しなかった2孔 のボーリング孔(HDB7孔と8孔)については、ボーリング孔掘削時の掘削水が孔壁から岩盤に 浸透したことにより比抵抗検層の結果に影響を与えた可能性が報告されている(水野ほか、2017)。 一方、地下施設近傍に掘削された HDB6 孔における等価 NaCl 濃度の推定結果の深度プロファイ ルを地下施設から得られた地下水の水質分析結果と合わせて比較すると、推定結果の深度プロファイ ルを地下施設から得られた地下水の水質分析結果と合わせて比較すると、推定結果の深度プロファイ のあいては声問層と種内層との地層境界における不連続点や、トレンドの違いが認められた(図 4.3・5)。水野ほか(2017)では、声問層と稚内層の空隙率として、それぞれ単一の値(声問層: 0.5、稚内層:0.4)を用いているが、実際の空隙率は深部ほど減少する深度依存性を示す。図 4.3・5 の水野ほか(2017)の推定値に見られる不連続点やトレンドの違いの要因として、空隙率の連続 的な深度依存性を考慮していないことが考えられることから、本事業では、空隙率の連続的な深



図 4.3-5 HDB6 孔における等価 NaCl 濃度の推定値と実測値の比較例

#### (3) 推定方法

比抵抗検層データの整理及び等価 NaCl 濃度の推定方法については、基本的に水野ほか(2017) と同様であるため、ここでは、最低限必要な点のみを記述する。使用したデータは、2001 年から 2005年の間に地表から掘削された 11 本のボーリング調査(HDB1~HDB11)において取得され た比抵抗検層データと温度検層データ、中性子検層データ、コア試料からの圧縮抽出水の分析結 果、コア試料を用いて室内試験(浮力法)により得られた試験結果である。比抵抗検層データと 温度検層データ、コア試料からの圧縮抽出水の分析結果については、水野ほか(2017)と同じデ ータを用いた。ボーリング調査時の物理検層データについては、宮良・松岡(2017)で公開され ており、コア試料からの圧縮抽出水の分析結果については、天野ほか(2012)において公開され ている。比抵抗検層データについては、発信と受信の電極間距離が 100 cm であるロングノルマ ルにより得られたものを用いた。温度検層データについては、3回目の実施結果を用いた。

比抵抗検層により得られた比抵抗値は、岩盤の比抵抗値であるため、Archieの実験式(式 4.3-1)及び Humble の式(式 4.3-2)を用いて間隙水の比抵抗値に換算した。

$$R_r = F_r R_w$$
 (式 4.3-1)  
 $F_r = a\phi^{-m}$  (式 4.3-2)

ここで、 $R_r$ は間隙水に満たされた岩盤の比抵抗、 $R_w$ は間隙水の比抵抗、 $F_r$ は地層比抵抗係数、 mは膠結係数、aは迂回係数、 $\phi$ は岩盤の空隙率である。本計算では、水野ほか(2017)と同様に、 m = 2, a = 0.81とした。電気伝導率( $\sigma_w$ )と比抵抗の関係式(式 4.3-3)及び温度(T)と電気伝 導率との関係式(式 4.3-4)を用いることで、25℃における電気伝導率は、式(式 4.3-5)として表 される。

$$\begin{split} \sigma_w &= 1/R_w & (\ensuremath{\vec{x}}\ 4.3\math{\cdot}\ 3) \\ \sigma_w(T) &= \sigma_w(25)\{1+0.02(T-25)\} & (\ensuremath{\vec{x}}\ 4.3\math{\cdot}\ 4) \\ \sigma_w(25) &= \frac{0.81}{R_r}\phi^{-2}\{1+0.02(T-25)\} & (\ensuremath{\vec{x}}\ 4.3\math{\cdot}\ 5) \end{split}$$

得られた 25℃における電気伝導率は、式 4.3-6 により、等価 NaCl 濃度(*C<sub>sm</sub>*, mol/L)へ換算 され、式 4.3-7 により、質量濃度(*C<sub>sp</sub>*, g/L)へ換算される。

$$\log C_{sm} = b_1 + b_2 \log \sigma_w(25) + b_3 (\log \sigma_w(25))^2 + b_4 (\log \sigma_w(25))^3 + b_5 (\log \sigma_w(25))^4 \quad (\text{$\pm t$.4.3-6$})$$
$$C_{sp} = 10^3 C_{sm} / (17.061 + 0.69787C_{sm}) \quad (\text{$\pm t$.4.3-7$})$$

ここで、定数 $b_1 \sim b_5$ は、電気伝導率から等価 NaCl 濃度を算出するための係数であり(Tiab and Donaldson, 2012)、計算に用いた値を表 4.3-1 に示す。

	(That and Donaldson;	2012).					
Coofficients	Ranges of relative resistivity ( $\Omega$ m)						
Coefficients	0.94 - 796	0.09–1.03					
<b>b</b> 1	-1.03024	-1.03015					
$b_2$	1.06627	1.06090					
$b_3$	$2.41239 \times 10^{-2}$	$5.66201  imes 10^{-2}$					
$b_4$	$3.68102 \times 10^{-3}$	$-6.09085  imes 10^{-2}$					
$b_5$	$1.46369  imes 10^{-4}$	$5.33566  imes 10^{-2}$					

表 4.3-1 等価 NaCl 濃度への換算にあたり式 4.3-6 で用いた係数

(Tiab and Donaldson, 2012).

水野ほか(2017)では、空隙率の値として、幌延深地層研究計画の第1段会報告書(太田ほか、 2007)で報告されている複数のボーリング調査結果で得られた代表値(声問層:0.5、稚内層:0.4) を用いている。本事業では、値が連続的に得られているデータとして、中性子検層による空隙率 の推定値(太田ほか、2007)及びコア試料を用いて室内試験(浮力法)により得られた試験結果 (太田ほか、2007)を用いた2通りの計算を行った。計算で用いた各ボーリング孔の空隙率の深 度分布を図 4.3-6 と図 4.3-7 に示す。中性子検層で得られた空隙率の推定値は、コア試料を用い て室内試験により得られた値と比較して、全体的に高い値が得られる傾向が見られる。コア試料 を用いて室内試験により得られた空隙率の値については、深度の3次関数として近似した連続値 を計算に使用した。

# (4) 推定結果

計算結果の等価 NaCl 濃度をコア試料からの圧縮抽出水の分析結果(太田ほか、2007)と合わ せて図 4.3・8と図 4.3・9に示す。連続的な空隙率の深度分布(中性子検層による推定値及びコア 試料を用いた室内試験結果)を用いた結果は、水野ほか(2017)による報告結果と比較すると、 明らかな不連続点は見られなくなっている。しかしながら、図 4.3・8と図 4.3・9を見る限り、今 年度の結果の方が明らかに水質の実測値(コア試料からの圧縮抽出水の分析結果)とより整合的 な結果が得られているようには見ることができない。HDB7 と HDB8 については、実測値と推 定値が大きく異なる結果が得られている。この要因について水野ほか(2017)では、比抵抗検層 に利用した機器類の不具合などの技術的な問題の可能性や、本推定手法の適用性の限界などの可 能性、コア試料からの圧縮抽出水の実測値に問題がある可能性などを検討した結果、ボーリング 孔掘削時の掘削水が孔壁から岩盤に浸透したことにより比抵抗検層の結果に影響を与えた可能性 が最も考えられる要因であると結論されている。このため、今年度に実施した再解析においても、 この点の改善はされないものと考えられる。



図 4.3-6 各ボーリング孔の空隙率の深度分布



図 4.3-7 各ボーリング孔の空隙率の深度分布







# (5)考察

Archie の式を用いた本推定手法は、Na-Cl型の高 NaCl 濃度の地下水を含む空隙率が高い岩盤 (30%以上)に対して考案された手法であるため、適用性の可否を調べるためには、Na-Cl型の 水質を持つ地下水に対して実測値と推定値を比較する必要がある。そのため、水野ほか (2017) により Na-Cl型と判別されている地下水試料のみについて、NaCl 濃度の実測値との比を図 4.3-10 と図 4.3-11 に示す。図中では、1 より小さい場合、等価 NaCl 濃度の推定値が実測値より 小さいことを示し、1 より大きい場合、推定値が実測値より大きいことを示している。また、図 中の結果の平均値及び相対標準偏差を表 4.3-2 に示す。中性子検層データを用いた推定値は、全 体的に実測値より低い値を示していることが分かる。一方で、水野ほか (2017)の結果及びコア 試料の室内試験結果を用いた結果は、HDB7 と HDB8 を除くと、比較的実測値に近い値を示し ていることが分かる。HDB1 と HDB6 の結果については、コア試料の室内試験結果を用いた推 定値が、最も実測値との差が小さくなっているが、その他については、水野ほか (2017)の推定 値あるいは中性子検層データを用いた推定値の方が、実測値に近い値を示している。

	Mizuno et a	al. (2017)	Buoyancy	method	Neutron logging		
	average	1 σ (%)	average	1 σ (%)	average	1 σ (%)	
HDB1	1.1	31	1.0	16	0.7	20	
HDB2	1.2	33	1.5	33	0.8	31	
HDB3	1.0	25	0.7	16	0.6	25	
HDB4	1.2	34	1.8	24	0.9	15	
HDB5	1.2	23	1.3	26	0.9	28	
HDB6	0.9	27	1.0	23	0.6	19	
HDB7	0.4	16	0.3	14	0.2	10	
HDB8	0.5	14	0.7	11	0.3	7.4	
HDB9	1.1	24	1.2	18	1.0	7.4	
HDB10	1.1	12	1.0	22	0.9	17	
HDB11	1.0	19	0.9	26	0.8	15	

表 4.3-2 NaCl 濃度実測値と等価 NaCl 濃度計算値の比に対する平均値および相対標準偏差



図 4.3-10 推定値と実測値の比



図 4.3-11 推定値と実測値の比

関根ほか(1996)は、比抵抗値が 20~100  $\Omega$ m であるような NaCl 濃度の低い間隙水を含む岩 盤に対しては、Archie の式が適用できないことを報告している。今回の解析で使用した比抵抗検 層値は、表層数十メートル以深では概ね 20  $\Omega$ m 以下である。比抵抗値が 20  $\Omega$ m 以下であり、か つ深部の Na-Cl 型とは異なる Na-HCO<sub>3</sub>型の水質を持つ地下水に対して、表 4.3-2 と同様に推定 値と実測値の比を取ったものを表 4.3-3 に示す。ただし、HDB7 と HDB8 は除外した。また、 HDB2 と HDB3、HDB11 については、Na-HCO<sub>3</sub>型の水質の分析値が存在しない、あるいは、該 当データが 1 点しか存在しないため、平均と標準偏差を示すことができない。表 4.3-3 に示され る結果は、表 4.3-2 と比較して明らかに高い平均値と大きな相対標準偏差値を示すことが分かる。 このことから、比抵抗値が 20  $\Omega$ m 以下であっても、Na-HCO<sub>3</sub>型の水質を持つ地下水には、Archie の式を単純に適用することは難しいことが分かる。

	Mizuno et a	al. (2017)	Buovancy r	nethod	Neutron logging		
	average	1 σ (%)	average	1 σ (%)	average	1 σ (%)	
HDB1	1.9	24	1.0	16	0.7	20	
HDB2	-	-	-	-	-	-	
HDB3	-	-	-	-	-	-	
HDB4	3.1	22	2.9	32	1.7	34	
HDB5	5.4	43	4.8	36	2.8	25	
HDB6	1.8	62	1.1	62	0.8	54	
HDB9	10.6	112	5.9	100	6.5	113	
HDB10	1.0	13	1.0	27	0.9	22	
HDB11	-	-	-	-	-	-	

表 4.3-3 NaCl 濃度実測値と等価 NaCl 濃度計算値の比に対する平均値および相対標準偏差 (浅層の NaHCO<sup>3</sup>型の地下水)

幌延の地下水中には、Na+と Cl·以外に主要な溶存イオンとして、K+や Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub>+、Br、
 I、HCO<sub>3</sub>などが存在している(天野ほか、2012;笹本ほか、2015;宮川ほか、2017)。Na+と Cl<sup>-</sup>
 以外の溶存イオン量が相対的に多い場合は、推定値の誤差も大きくなることが予想される。図

4.3-12 に、今回の再解析で用いたコア試料から圧縮抽出により得られた間隙水中の Na+と Cl·が 全溶存イオン電荷に占める割合 (モル分率)と推定値と実測値の差の関係を示す。ただし、HDB7 と HDB8 は除外した。推定値 ( $x_{\text{estimated}}$ )と実測値 ( $x_{\text{measured}}$ )の差 (d)は、式 4.3-8 で与えら れる。

# $d = 1 - x_{\text{estimated}} / x_{\text{measured}} \qquad (\text{$\vec{x}$ 4.3-8$})$

全溶存イオンに占める Na+と Cl:の割合が小さくなるにつれて、d の値が負になる傾向が予想さ れるが、しかしながら、図には明確な相関が認められない。本手法で比較対象としたコア試料か らの圧縮抽出水の分析結果には、NH4+や Br、I、HCO3の分析値が報告されておらず、また、 SO42の量が非常に多く検出されている(天野ほか、2012)。地下施設内のボーリング孔から得ら れた地下水の分析値には SO42 はほとんど含まれていないことから(笹本ほか、2015;宮川ほか、 2017)、本手法で比較対象とした実測値は、試料採取から分析の間の期間に酸化の影響を強く受 けたデータであることが推察される。図 4.3-12 に明確な関係性が見られない要因として、比較 に用いた実測値が原位置の水質を正確に代表していない可能性が考えられる。この点を明らかに することで、本手法の適用性の限界をより正確に議論することが可能になり、さらなる手法の改 善が期待される。



図 4.3-12 間隙水中の Na<sup>+</sup>と Cl<sup>-</sup>のモル分率の和と推定値と実測値の差の関係図

#### (6) まとめと今後の課題

今年度は、ボーリング調査時の比抵抗検層データを用いた岩盤中地下水の等価 NaCl 濃度の推定方法について、水野ほか(2017)で報告されている幌延地域を対象とした適用事例に見られた、 推定値の不連続点や深度分布のトレンドの実測値との不一致に着目し、推定手法の改良を試みた。 不連続点やトレンドの不一致は、推定の際に用いたパラメータの一つである岩盤の空隙率を地層 毎に一定の値を用いていることが原因であると考え、コア試料を用いた室内試験や中性子検層に より推定された空隙率などの連続的な深度分布を用い、再解析を実施した。その結果、不連続点 や HDB6 孔に見られた推定値と実測値のトレンドの不一致については、コア試料を用いた室内試 験から得られた空隙率を用いることで、改善することができた。一方で、中性子検層による空隙 率の推定値は、コア試料から得られた値と比較すると全体的に高い値を示し、このことにより、 地下水中の等価 NaCl 濃度の推定値は全体的に低い値を示した。しかしながら、実測値と推定値 の差(推定誤差)については、水野ほか(2017)による一定の空隙率を用いた場合と本事業によ る連続的な深度分布を用いた場合とで目立った違いは見られなかった。

水野ほか(2017)では、本手法の幌延地域に対する適用性の確認を Na-Cl 型の水質を持つ地下 水のみに対して実施しており、浅部に見られる Na-HCO<sub>3</sub> 型の水質を持つ地下水に対しての適用 性の検討は、実施しておらず、今後の事例の蓄積が課題であると報告している。この点について 本事業で検討した結果、幌延地域において、Archieの式を用いた本手法を単純に Na-HCO<sub>3</sub>型の 水質を持つ地下水に適用することは難しいことが分かった。本手法による推定誤差の要因を明ら かにするためには、推定結果と比較する原位置の水質データについても、より正確なデータが必 要であることが示唆された。本事業において、新規にボーリング調査を実施する場合、この点に 留意することで、今年度に検討した本手法についても、さらなる改善が期待される。

#### 参考文献

相澤広記, 火山電磁気観測の進展, 火山, vol.61, no.2, pp.345-365, 2016.

- 天野由記,山本陽一,南條功,村上裕晃,横田秀晴,山崎雅則,國丸貴紀,大山隆弘,岩 月輝希,幌延深地層研究計画における地下水,河川水及び降水の水質データ(2001~ 2010年度), JAEA-Data/Code, 2011–023, 2012.
- Chongo, M., Christiansen, A.V., Tembo, A., Banda, K.E., Nyambe, I.A., Larsen, F. and Bauer-Gottwein, P., Airborne and ground-based transient electromagnetic mapping of groundwater salinity in the Machile-Zambezi Basin, southwestern Zambia, Near Surface Geophysics, vol.13, pp.383–396, 2015.
- Danielsen, J.E., Dahlin, T., Owen, R., Mangeya, P. and Auken, E., Geophysical and hydogeologic investigation of groundwater in the Karoo stratigraphic sequence at Sawmills in northern Matabeleland, Zimbabwe: a case study, Hydrogeology journal, vol.15, pp.945– 960, 2007.
- Fu, C., Di, Q. and An, A., Application of the CSAMT method to groundwater exploration in a metropolitan environment, Geophysics, vol.78, no.5, pp.B201–B209, 2013.
- 市原寛, 市來雅啓, 地殻・上部マントルの電気比抵抗構造: 観測の原理・精度と物性データの現状, 岩石鉱物科学, vol.40, pp.73-90, 2011.
- 岩月輝希,水野崇,國丸貴紀,天野由記,松崎達二,仙波毅,地層処分事業に関わる地球 化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化・文献調査から精密調査段階に おける地球化学解析手順について,原子力バックエンド研究, vol. 19, no. 2, 51–64, 2012.
- 城森明, 鈴木浩一, 山口覚, 城森信豪, 近藤隆資, 3 次元探査のための高速測定可能な可搬式時間 領域電磁探査(PTDView)装置の開発と検証実験, 応用地質, vol.54, no.4, pp.154-167, 2013.
- Kontar, E.A. and Orozovich, Y.R., Geo-electromagnetic survey of the fresh/salt water interface in the coastal southeastern Sicily, Continental Shelf Research, vol. 26, pp.843–851, 2006.
- 草野由貴子, 鈴木浩一, 徳永朋祥, 電磁探査を用いた隠岐島前・中ノ島における塩水・淡水分布に 関する検討, 応用地質, vol.57, no.1, pp.2-14, 2016.
- Levi, E., Goldman, M., Hadad, A. and Gvirtman, H., Spatial delineation of groundwater salinity using deep time domain electromagnetic geophysical measurements: A feasibility study, Water Resources Research, vol.44, W12404, 2008.
- 光畑裕司,電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査-九十九里浜平野における例-, 地学雑誌, vol.115, no.3, pp.416-424, 2006.
- 宮川和也, 女澤徹也, 望月陽人, 笹本広, 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質デ

ータ(2014 年度~2016 年度), JAEA-Data/Code, 2017-012, 2017.

- 宮良信勝, 松岡稔幸, 幌延深地層研究計画(第1段階)における深層ボーリング調査の物 理検層データ集, JAEA-Data/Code, 2017-005, 2017.
- 水野崇, 岩月輝希, 松崎達二, ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水 質の推定方法に関する検討, 応用地質, vol.58, no.3, pp.178–187, 2017.
- Mogi, T., Kusunoki K., Kaieda, H., Ito, H., Jomori, A., Jomori, N. and Yuuki, Y., Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of Mount Bandai, north-east Japan, Exploration Geophysics, vol.40, pp.1–7, 2009.
- 西山成哲,田中和広,鈴木浩一,電磁探査および地質・地下水調査による深部流体の移動経路の可 視化-山口県北東部徳佐盆地における適用-,応用地質,vol.57, no.3, pp.102-112, 2016.
- 太田久二雄,阿部寛信,山口雄大,國丸貴紀,石井英一,操上広志,戸村豪治,柴野一則, 濱克宏,松井裕哉,新里忠史,高橋一晴,丹生屋純夫,大原英史,浅森浩一,森岡宏之, 舟木泰智,茂田直孝,福島龍郎,幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段 階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」,JAEA-Research,2007-044,2007.
- 笹本広,山本信幸,宮川和也,水野崇,幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ(2011年度~2013年度),JAEA-Data/Code, 2014–033, 2015.
- Schaa, R., Harris, B., Pethick, A., Costall, A., Pigois, J.P. and Takougang, E.T., Magnetotelluric inversion for characterization of complex aquifer systems, ASEG Extended Abstracts, vol.1, pp.1–6, 2018.
- 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏昭, 斎藤章, 岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係, 土木学会論文集, no.541/III-35, pp.75-86, 1996.
- 鈴木浩一, 徳安真吾, 田中和広, 電磁探査法および地形・地質調査による新潟県十日町市泥火山の 深部地下構造, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.373–389, 2009.
- Tiab, D. and Donaldson, E.C., Petrophysics, Elsevier, pp. 221-326, 2012.
- Unsworth, M.J., Lu, X. and Watts, M.D., CSAMT exploration at Sellafield: Characterization of a potential radioactive waste disposal site, Geophysics, vol.65, no.4, pp.1070–1079, 2000.
- Unsworth, M., Soyer, W., Tuncer, V., Wagner, A. and Barnes, D., Hydrogeologic assessment of the Amchitka Island nuclear test site (Alaska) with magnetotellurics, Geophysics, vol.72, no.3, pp.B47–B57, 2007.

# 4.3.2 既存物理探査データの再整理

#### (1)背景と課題

二次元・三次元比抵抗探査は、低比抵抗部の検知性に優れているものの、実用的な探査可能深 度については、地質条件や使用する測定器により異なるが、およそ 300 m 程度であり、探査対象 の深度が 300~400 m 以上となる場合、電磁探査法などを検討する必要がある(物理探査学会, 2008)。幌延地域は新第三紀の厚い海成堆積岩に覆われており、地下深部には高塩濃度の地下水 が分布している。地表から深度数十メートルの表層では、数十 Ωm の比抵抗値を示すが、深部で は数 Ωm 以下の低比抵抗値を示す(宮良・松岡, 2017)。このことから、本地域においては、地 下深部の比抵抗分布の検知性が良く、比較的深部まで精度良く推定できることが期待されるもの の、その信頼性について確認する必要性が指摘されていた(日本原子力研究開発機構, 2010)。本 事業では、地上からのボーリング調査数の密度の高い地下施設周辺領域において 2006 年に実施 された高密度電気探査の測定結果を用いて三次元解析を実施し、その結果をボーリング調査時の 電気検層の比抵抗値と比較することで、地上からの電気探査により得られた地下深部の比抵抗分 布の信頼性について確認した。このことは同時に、図 4.3-4 に示す手順2に相当する。次に、図 4.3-4 に示す手順 a として、地上からの電気探査結果とボーリング調査時の比抵抗検層結果を組 み合わせた地下の比抵抗値の三次元分布を求めた。

### (2) 高密度電気探査結果の三次元解析

#### 1) 使用データ

2006年に実施した高密度電気探査は、2極法により2つの側線に対して実施された。側線の位 置図を図 4.3-13に示す。側線1は、HDB4と HDB6を結ぶ線上に位置し、距離が約2.1 km で あり、電極数が42本、電極隔離係数が15、測定点数が510点である。側線2は、HDB9から HDB6を経て HDB11を結ぶ線上に位置し、距離が3.1 km であり、電極数が61本、電極隔離係 数が15、測定点数が795点である。



2) 解析方法

解析には比抵抗解析ソフト E-Tomo (ver. 5.0) (株式会社ダイヤコンサルタント)を使用した。 図 4.3-14 に解析フローチャートを示す。前処理として、遠電極補正および屈曲測線の補正など のデータ編集を行った。電極座標から FEM (Finite Element Method: 有限要素法) モデルを作 成した (図 4.3-15、図 4.3-16)。地形データは、酒井・松岡 (2019) においてまとめられている 本地域の地質構造モデルを用いた。

逆解析計算の手順は次の通りである。全データの平均見掛け比抵抗を計算し、その平均値を用 いた均質なモデルを初期モデルとした。比抵抗分布の初期モデルから、現地での測定時と同じ電 極配置で測定した場合の電位(理論電位)を FEM により計算した。測定値の対数と計算値の対 数から、残差を計算し、一定の値に収束するまでモデルの修正を繰り返した。モデルの修正の際 には、ダンプト最小二乗法(初期値拘束条件)、平坦化制約条件付最小二乗法、平滑化制約条件付 最小二乗法の3 通りの条件を試したが、結果にほとんど差が見られなかったため、本報告では、 平坦化制約条件付最小二乗法による結果を用いる。上記の制約条件の最適な重み係数(ダンピン グ係数)を決定する際には、ABIC(ベイズ統計手法を用いた赤池情報量基準)を用いた。得られ た最終比抵抗モデルから、比抵抗分布図を作成した。

本事業では、データの前処理の際に、ボーリング調査時に得られた電気検層(比抵抗検層)デ ータ(宮良・松岡, 2017)を拘束条件として与えたケースを実施した。検層データによって与え られる任意の地点の比抵抗を*R*<sub>i</sub>とする。電気探査の解析モデルでは任意の地点の比抵抗*r*<sub>i</sub>は、解 析セルまたは解析グリッドの比抵抗*p*<sub>i</sub>から次式によって求められる。

 $r_i = \sum_i g_{ii} \rho_i \cdot \cdot \cdot \cdot ( \vec{\mathfrak{X}} 4.3-9 )$ 

ここで、 $g_{ij}$ は解析グリッドの比抵抗から任意地点の比抵抗を内奏するための補間係数または重み係数で、任意地点iの座標とグリッドの座標の位置関係によって決定される。解析セルを使った解析では、地点iを含む解析セルjの重み係数は1となり、他の解析セルについては重み係数が0となる。初期モデルの比抵抗 $r_i^0$ が検層の比抵抗と異なるときは、両者の違いが小さくなるように解析セル(グリッド)の比抵抗を修正する必要がある。逆解析の際に、比抵抗の修正量( $\Delta \rho_j$ )を、次式として与えることで、与えた比抵抗検層値を解析に取り込んだ。

 $g_{ij} = 0$ の場合、任意の地点に与えた比抵抗検層値による拘束はされず、 $g_{ij} = 1$ の場合、任意の地点に与えた比抵抗検層値は逆解析を通して完全に拘束される。



図 4.3-14 解析フローチャート



図 4.3-15 FEM メッシュ図



図 4.3-16 測線1および2の断面におけるグリッド図

# 3) 測定データの品質確認

電極間隔(探査深度)が大きくなるほど測定電位は低下する(見掛けの抵抗は小さくなる)こ とから、測定データの電位減衰曲線(図 4.3·17)を確認することで、不良データを判別すること ができる。2006年度の高密度電気探査の測定データにも明らかなデータ不良箇所が見られる(図 4.3·17)。本事業における再解析にあたっては、全データを用いた解析結果と測定データの違い(誤 差)の絶対値が 20%以上を示す測定点における測定データを、不良データとして削除した(図 4.3·18、図 4.3·19)。





図 4.3-18 測線1における全データ(上)と誤差プロット(中)および不良データ削除後の データプロット(下)



図 4.3-19 測線2における全データ(上)と誤差プロット(中)および不良データ削除後の データプロット(下)

### 4) 解析結果と考察

地上からの電気探査の結果のみを用いた解析結果として、測線1と測線2の断面の比抵抗分布 を図 4.3-20 に示す。表層では比抵抗値が比較的高く、深部では低くなる傾向や、東から西にかけ て比抵抗値が低くなる傾向が得られている。ただし、図 4.3-18 や図 4.3-19 の台形の形から外れ る部分については、測定データが無いため、測定データのある領域と比較するとデータの信頼性 は低いと考えられる。一方で、今回の解析では、全データの平均見掛け比抵抗を初期値として与 えているため、本地域の地下深部の比抵抗分布が均質であることを考慮すると、オーダーで異な るほどの差は無いと考えられる。地上からのボーリング孔(HDB1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11)におけ る電気検層で得られた比抵抗値との比較を図 4.3・21に示す。先に述べたように、HDB3の標高-400 m 以深、HDB4 の標高-100 m 以深、HDB9 の標高-100 m 以深、HDB11 の標高-100 m 以深 については、地上からの電気探査の測定データが無いため、信頼性は比較的低い。また、HDB7 や HDB5 については、側線から大きく外れた場所に位置するため、特に浅部の比較的高比抵抗領 域における解析の感度はほとんど無いと考えられる。測線 1 と 2 の交点に位置する HDB6 や測 線上に位置する HDB1、測線近傍に位置する HDB3 や HDB8 については、解析結果の信頼性は 比較的高いと考えられる。これらの孔について見てみると、おおよそ電気検層により得られた比 抵抗値の深度プロファイルに近い解析結果が得られていることが分かる。図 4.3・22 に図 4.3・21 に示される電気検層で得られた比抵抗値と解析結果の差の絶対値を示す。ここでは、差の絶対値 を示したが、この傾向は、検層値などで規格化した相対的な差として表してもほとんど変わらな い。図 4.3・22 からも、HDB6 や 1、3、8 の結果は、深部ほど目立った変化が見られる傾向では なく、浅部から深部まで差が小さいことが分かる。




図 4.3-21 二次元解析結果と各ボーリング孔における比抵抗検層値との比較



図 4.3-22 三次元解析結果と各ボーリング孔における比抵抗検層値との差



図 4.3-23 測線1と2におけるボーリング調査時の比抵抗検層値を拘束条件として与えた解 析結果の断面図

測線1と2におけるボーリング調査時の比抵抗検層値(HDB1,3,4,6,7,8,9,11)を拘束条件 として与えた解析結果の断面図を図 4.3・23 に示す。図 4.3・21 や図 4.3・22 で比較したように、 測線上においては、電気探査の結果とボーリング調査時の比抵抗検層結果に元々大きな差が無い ため、比抵抗検層値を組み込んだ解析結果にも大きな違いは見られない。図 4.3・23 に示す解析 結果は、測線1および測線2の断面における最も信頼性の高い比抵抗分布として、クリギングな どによる空間分布推定の際の誤差の評価に用いる。

## (3)まとめ

本事業では、地上からのボーリング調査数の密度の高い地下施設周辺領域において 2006 年に 実施された高密度電気探査の測定結果を用いて三次元解析を実施し、その結果をボーリング調査 時の電気検層の比抵抗値と比較することで、地上からの電気探査により得られた地下深部の比抵 抗分布の信頼性について確認した。その結果、ボーリング調査深度である標高-500 m 程度まで比 較的精度の良い結果が得られていることを確認した。ただし、このような結果が得られるのは、 地上から深度数十メートルの比較的高比抵抗領域における誤差の方が、地下深部における誤差よ り大きい事実を踏まえると、本地域の地下深部の比抵抗値が低く、分布が比較的均質であること が要因であると考えられる。

地下の比抵抗分布の最良推定分布の例として、電気探査結果とボーリング調査時の比抵抗検層 結果を組み合わせた地下の比抵抗値の三次元分布を求めた。ここで求めた分布は、地下水の酸素 水素同位体比の分布などを求める際の誤差の評価に使用する。本事業では、有限要素法を用いた 逆解析により、三次元分布を求めた。このため、測定点から外れた領域では、データの信頼性は 大きく低下する。4.3.3 項では、クリギングによる空間分布の推定を行うが、実質的に評価可能な 分布は、測定点の存在する断面に限られてしまう。この問題点については、次章のまとめで、改 めて述べる。

#### 参考文献

- 物理探査学会,新版 物理探査適用の手引き-土木物理探査マニュアル 2008-, p.589, 2008.
- 宮良信勝, 松岡稔幸, 幌延深地層研究計画(第1段階)における深層ボーリング調査の物 理検層データ集, JAEA-Data/Code, 2017-005, 2017.
- 日本原子力研究開発機構, 幌延深地層研究計画・第1段階研究成果の妥当性評価, 深地層 の研究施設計画検討委員会(第12回)資料 12-4, 2010.

酒井利啓, 松岡稔幸, 幌延深地層研究計画における広域スケールを対象とした地質構造モ デルの構築データ集, JAEA-Data/Code, 2019-007, 2019.

## 4.3.3 既存データ(ボーリング検層・物理探査)の再整理を踏まえた再評価

#### (1)背景と課題

4.3.1 項および 4.3.2 項では、低流動域の指標として地下水中の塩濃度の三次元分布を、地上か らの電気探査やボーリング調査時の比抵抗検層を組み合わせて推定する手法についてまとめた。 本地域の地下深部に存在する地下水は、地層の堆積時に間隙中に取り込まれた海水が長い地質時 間の中で岩石・水反応などの続成作用により組成が変化したものである。海水中の塩濃度は概ね ナトリウムイオンと塩化物イオンにより占められ、反応性が低い塩化物イオン(Cl)は、特にこ のような高塩濃度の地下水の指標として適している。しかしながら、続成作用におけるシリカ鉱 物からの脱水による地下水中の Cl 濃度の希釈と、天水の地下への浸透などの異なる組成を持つ 地下水や表層水との混合による Cl-濃度の希釈については、Cl-濃度だけでは区別できない。この ため、このような地下水の指標として Cl-濃度の他に、水の酸素水素同位体比(δ<sup>18</sup>O、δD)が用 いられる。一方で、地下水の酸素・水素同位体比の三次元分布は、物理探査によって推定するこ とができないため、概要調査段階において得られる情報は、ボーリング調査時におけるコア試料 からの圧縮抽出水および透水試験時の揚水試料の分析結果のみである。このことから、4.3.1 項お よび 4.3.2 項で述べた地上からの物理探査とボーリング調査を組み合わせた三次元分布の推定手 法のみでは評価できない。本項では、地下水の酸素・水素同位体比などの塩濃度以外の低流動域 の指標の三次元分布の推定手法として、主に図 4.3-4 の手順3と4 およびbとcについて整理し た。

#### (2) クリギングによる化石海水の三次元分布の推定

概要調査で得られる物理探査データやボーリング調査データなどは、空間的に離散的なデータ であり、どのような手法を用いても最終的に推定される空間分布には推定手法に起因する不確実 性が含まれる。地下水中の水質の空間分布などの不確実性を有するデータを確率論に基づいて表 現し、限られたデータから統計的にモデル化を行う手法の一つに地球統計学的手法がある。本多 ほか(2010)では、これまでに幌延深地層研究計画で得られた電磁探査による比抵抗値とボーリ ング調査による比抵抗検層値およびコア試料からの圧縮抽出水の水質分析結果の間に相関関係が 認められることに着目し、クリギングによる塩濃度の三次元分布モデルを構築する手法を提案し ている。彼らは、地上からの電気・電磁探査の結果とボーリング調査時における比抵抗検層結果 を統合した比抵抗三次元分布モデルを構築し、これを補助情報として水質分析結果(塩濃度)を 用いてクリギングを行い、塩濃度の三次元分布を得るとともに、合わせて推定結果の不確実性を 評価している。先に述べたように、地下水の酸素・水素同位体比は地上物理探査結果との間に直 接的・物理的な相関関係を見出すことが難しいため、本多ほか(2010)のように統合化モデルを 構築することができない。どのようなモデルにも必ず不確実性が含まれ、どのモデルを採用する かという議論の余地もあることを踏まえ、幌延地域を対象とした詳細な地球統計学的手法の検討 実例については本多ほか(2010)などに委ねるとし、本事業では、最も簡易的なクリギングであ る単純クリギングを用いた。

地下水の酸素・水素同位体比などの塩濃度以外の低流動域の指標の三次元分布の推定手法の手順については、図 4.3-4 (b)に示した通りである。はじめに、4.3.2 項で得られた地上電磁・電気探査結果とボーリング調査時の比抵抗検層結果を組み合わせた地下の比抵抗値の三次元分布を、概要調査段階で得られる最も信頼性の高い比抵抗分布とする(手順 a)。次に、ボーリング調査時の比抵抗検層データのみを用いて、クリギングにより三次元分布を推定し、これを手順 a で求めた分布と比較することで、クリギングによる推定誤差を評価する(手順 b)。この時、比抵抗検層のデータ密度を、コア試料からの圧縮抽出水のデータ密度に合わせるように、間引いた比抵抗検層データを用いる。最後に、酸素・水素同位体比などのパラメータについて、クリギングにより 三次元分布を求める。ここで、クリギングによる推定誤差が手順 b で評価した誤差分布と同じであるとする(手順 c)。このように地上からの物理探査とボーリング調査を組み合わせることにより、低流動域の三次元分布を推定する手法の構築を試みた。

地上からの電気探査結果とボーリング調査時の比抵抗検層結果を組み合わせた地下の比抵抗値 の三次元分布については、4.3.2 項において得られている(図 4.3・23)。ボーリング調査時の比 抵抗検層データは、約 0.1 m 毎にデータが得られているため、データの取得頻度は、約 9 点/m になり、一方で、コア試料からの圧縮抽出水の水質分析データは、50~100 m に 1 点であり、 データの取得頻度は、約 0.02 点/m である(表 4.3・4)。酸素・水素同位体比などの水質分析結 果の三次元分布の推定誤差を適切に評価するためには、データの取得頻度が同程度のデータセッ トを用いたクリギング結果を比較する必要がある。そのため、比抵抗検層結果のデータ取得頻度 を圧縮抽出水の水質分析データの取得頻度と同程度になるように、データを間引き、クリギング に用いた。クリギングの計算は、株式会社地層科学研究所製の作図ソフトである Geo-Graphia (https://www.geolab.jp/geo-graphia/)を用いた。ただし、ここでは、空間相関のランダム関数 モデルのみによる単純クリギング法を用いた。間引いた比抵抗検層結果を用いたクリギング結果 を図 4.3・24 に示す。式 4.3・11 を用いて、図 4.3・23 と図 4.3・24 に示される結果を比較するこ とでクリギングによる推定誤差の分布(Error)を求めた(図 4.3・25)。

$$\operatorname{Error} = \frac{\left(ER_{best} - ER_{kriging}\right)}{ER_{kriging}} \quad ( \vec{\mathbf{x}} \ 4.3\text{-}11 )$$

ここで、*ER*<sub>best</sub>は、図 4.3-23 に示される地上電磁・電気探査結果とボーリング調査時の比抵抗 検層結果を組み合わせた地下の比抵抗値の三次元分布を意味し、*ER*<sub>kriging</sub>は、図 4.3-24 に示され る間引いた比抵抗検層結果を用いたクリギングによる地下の比抵抗値の三次元分布を意味する。 図 4.3-23 と図 4.3-24 に示される地下の比抵抗分布の傾向を比較すると、全体的に同じ傾向が得 られていることが分かる。図 4.3-25 に示される誤差を見ると、全体的に+50%(黄)~-50%(水 色)の誤差になっているが、HDB6 付近の浅部や、HDB4 付近の浅部と深部において誤差が大き くなっていることが分かる。しかしながら、誤差の大きい箇所と比抵抗値の大小とは関係性が見 られない。

	Number (n)		Sampling frequency (n / m)	
	Analysis	Electric	Analysis	Electric
	of squeezed	resistivity	of squeezed	resistivity
	pore water	logging	pore water	logging
HDB1	20	6530	0.028	9.1
HDB2	20	6621	0.028	9.2
HDB3	10	4550	0.019	8.8
HDB4	10	4575	0.019	8.8
HDB5	10	4588	0.019	8.8
HDB6	9	5960	0.015	9.6
HDB7	8	4962	0.015	9.5
HDB8	7	4496	0.015	9.6
HDB9	9	4851	0.017	9.3
HDB10	13	4632	0.024	8.4
HDB11	37	8527	0.036	8.4

表 4.3-4 データ数およびデータ取得頻度



図 4.3-24 間引いた比抵抗検層結果を用いたクリギング結果(側線1)



図 4.3-25 クリギングによる推定誤差分布図(側線1)

コア試料からの圧縮抽出水の水質分析結果(天野ほか,2012b)として、塩化物イオン濃度及び酸素・水素同位体比を用いたクリギング結果をそれぞれ図 4.3-26と図 4.3-27に示す。計算に用いたボーリング孔は、HDB1,3,4,5,6,7,8,9,10,11である。図 4.3-26と図 4.3-27に示される結果は、式 4.3-11で示される誤差を持つものとする。天野ほか(2012a)は、図 4.3-4に示さ

れる手順3と4に相当する確認事項として、ボーリング調査で得られたコア試料からの圧縮抽出 水の塩濃度の分析結果を用いて逆距離荷重法による空間補間を行い、これを側線1における電気 探査の結果(図 4.3-23)と定性的に比較し、両者の傾向が概ね一致すること述べている。本多ほ か(2010)は、詳細な地球統計学的手法により、塩濃度分布の定量的な誤差評価を行なっている。 本事業では、図 4.3-4 (b)に示す手順 a と b によりボーリング孔の無い領域の塩濃度分布などの 誤差の評価を行なった。より精確な誤差評価という観点では、本多ほか(2010)で示される手法 の方が優れているが、本事業で示した手法は塩濃度分布の評価が主目的ではなく、地下水の酸素・ 水素同位体組成などの分布の評価を行うことが主目的であり、これは、先行研究に示される手法 では評価できない。

図 4.3-28 に酸素同位体比について広範囲の例を示す。図 4.3-28 に示されるクリギングによる 推定結果の誤差については、電気探査の側線と重なる断面において最も誤差が小さくなり、式 4.3 -11 を用いた評価が可能であると考えられるが、一方で、側線から外れた場合、図 4.3-23 に相当 する比抵抗分布の解析手法が逆解析であることを踏まえると、誤差は大きくなり信頼性はほとん ど無くなると考えられる。データ密度の小さくなるような外挿領域においては、誤差を評価する 際の比抵抗分布自体の誤差が大きくなるため、本手法による誤差の評価は、ほとんど意味をなさ なくなるからである。このような誤差が大きいことが予想される領域における推定手法の確から しさを評価する手法については、今後検討する必要がある。





酸素同位体比(δ<sup>18</sup>O, ‰)

## (3)まとめと今後の課題

4.3 節では、低流動領域の指標として古海水が地質学的時間を経て変質した地下水の三次元分 布推定手法について、幌延を例として整理した。本事業では、クリギングの手法として、空間相 関のランダム関数モデルのみによる単純クリギング法を用いた。しかしながら、地下水の水質な どはランダムな分布ではなく、例えば塩濃度については、浅部ほど低く深部ほど高い深度依存性 の傾向が見られる。このため、単純クリギングの結果には深度依存性の情報が反映されにくく、 図 4.3-25 に示したような比較的誤差の大きい領域が生じるものと考えられる。地下水の水質の 深度依存性などの既知のトレンドを補助情報として取り込んだクリギングの適用性については、 本多ほか(2010)において詳細に検討されている。また、4.3.2項において分布の推定の誤差を評 価するために、地下の比抵抗分布の最良推定分布の例として、電気探査結果とボーリング調査時 の電気検層結果を統合した地下の比抵抗値の三次元分布を、有限要素法を用いた逆解析により求 めた。この手法では、測定点から外れる領域では解析結果の信頼性が無くなるため、クリギング による推定誤差を含めた評価が可能な領域は、実質的に電気探査の測定点近傍に限られてしまう。 したがって、本事業で例として示した断面図のみでなく、本質的な三次元分布を推定するために は、上述したクリギング手法の改善の他に、調査領域全体に渡って信頼性の高い比抵抗分布を求 める必要がある。そのためには、例えば、電気探査の結果に電磁探査の結果を統合させるなどの 工夫が必要と考える。その際には、本多ほか(2010)に示される統合比抵抗分布の構築手法の考 え方が参考になる。

4.3 節で示した手法には、地質断層や難透水層などの不連続構造の影響が陽には取り込まれて いない。そのため、不連続構造周辺の推定結果の確からしさについては、小さくなることが考え られる。この点については、4.4 節で述べる不連続構造を考慮した水理地質構造モデルを用いた 地下水流動解析による低流動域の推定結果と比較することにより、補間する必要があると考える。

### 参考文献

天野由記,南條功,村上裕晃, 薮内聡,横田秀晴,佐々木祥人,岩月輝希,北海道幌延地 域における深部地下水調査・地上からの地球化学調査の妥当性評価と地下施設建設に伴 う地球化学特性変化・,地下水学会誌, vol. 54, no. 4, pp. 207-228, 2012a.

天野由記,山本陽一,南條功,村上裕晃,横田秀晴,山崎雅則,國丸貴紀,大山隆弘,岩 月輝希,幌延深地層研究計画における地下水,河川水及び降水の水質データ(2001~ 2010年度), JAEA-Data/Code, 2011–023, 2012b.

本多眞,山本真哉,櫻井英行,鈴木誠,真田祐幸,杉田裕,松井裕哉,地球統計学的手法 を用いた地下水水質分布の推定とその不確実性の評価,土木学会論文集 C, vol. 66, no. 3, pp.609-624, 2010.

### 4.3.4 地下水の同位体比に着目した古水理地質学的指標の開発

#### (1) 背景と目的

これまでの調査で、幌延地区の地下深部には化石海水が長期にわたり残留していることが確認 されている(Nakata et al., 2018)。ただし、図 4.3・29 に示すように、幌延地区の地下水は、化石 海水と現海水の二成分混合で表され、混合が進んでいると考えられる。この混合の速度は、地下 水の安定性を評価するうえで重要である。すなわち、化石海水が存在していても、それが短時間 で洗い流されるようでは、地下水が安定とは言えない。このため、図 4.3・30 に示すように、この 降水の混合速度を評価するために、拡散指標や <sup>81</sup>Kr など地下水に含まれる同位体に着目した検 討を開始した。



図 4.3-29 幌延地区における水素酸素同位体比の分布(JAEA, 2012)

混合が発生していても、この混合が拡散で発生していることを示せれば、拡散による輸送は最 も遅い輸送形態であるため、天然バリア性能が高いことを示すことができる。拡散係数は、物質 によって異なり、水分子と Cl とでは数倍程度異なる(例えば、Muzurek et al., 2011)。また、Cl の同位体 (<sup>35</sup>Cl と <sup>37</sup>Cl) は拡散によって分別することが知られている(例えば、Desaulniers et al.,1986; Hasegawa et al.,2016)。

このため、拡散が支配的な場であることを、概要調査段階で得られる水質や同位体などから明

らかにする方法論の整備を開始した。昨年度は、幌延地区の Cl と  $\delta$  D の分布を再確認した結果、 Cl と  $\delta$  D は直線関係にないことから拡散の影響を受けていることがわかった。ただし、Cl と  $\delta$  D の輸送は、移流と拡散の両方の影響を受けていると推定された。また、データの間隔が粗く、拡 散支配であるかどうかの確認が困難であったため、これらの分布の再調査を行う。さらに、Cl と  $\delta$  D の拡散係数と Cl の分別係数を計測するために、拡散試験を実施する。

化石海水のように長い滞留時間を持つことが予想される地下水の年代測定は、<sup>36</sup>Cl/Cl の平衡値 や <sup>4</sup>He の蓄積に基づいて評価されてきた。しかし、これらの物質は原位置での生成に基づいた評 価になっており、主に化石海水の年代を反映しており、浅層水が混合しても、年代値が大きく変 化しないという課題がある。このため、浅層水の年代を評価するために、<sup>81</sup>Kr による年代測定の 適用を開始した。<sup>81</sup>Kr は近年 Atom Trap Trace Analysis の開発により、計測が可能になり、原 位置適用が実施されるようになってきた。<sup>81</sup>Kr は半減期が約 23 万年で、浅層水には含まれるが、 化石海水には含まれない。このため、<sup>81</sup>Kr は、<sup>36</sup>Cl や <sup>4</sup>He と異なり、浅層水の年代測定に有効 であり、浅層水の流動性の評価に有効であると考えられる。

昨年度は、<sup>81</sup>Kr を計測するために、幌延立坑において、地下水中のガスを採取した。幌延の深 部地下水はガスを多く含み脱ガスが激しいため、大気の汚染がなく試料採取ができた。ただし、 メタンガスの含有率が高く、Kr の精製に課題がある。このため、ガスの精製方法を検討するとと もに、異なる深度で Kr ガスを採取し、分析を行うことにより、化石海水と混合する降水の年代 を評価する必要がある。



図 4.3-30 幌延深地層研究センターでの CI 濃度分布と拡散場・<sup>81</sup>Kr 年代測定法の概念図

## (2) 拡散場の評価方法の検討

## 1) 目的

拡散は最も遅い輸送形態であり、拡散が支配的であることを示すことができれば、輸送が遅い ことを示すことができる。このため、幌延地区を対象に、拡散によって分離分別する物質・同位 体の調査を開始した。昨年度から、声問層や稚内層の拡散係数や分別係数を計測するとともに、 実測値を評価できるシナリオを実際の物質・同位体の分布に基づいて検討している。

## 2) 調査方法

拡散場を評価するために、Cl と  $\delta$  D の拡散係数の違いに着目し、これらを横軸と縦軸にプロットすることにより、その屈曲から拡散の影響を評価する方法を提案している。図 4.3・29 に示すように、  $\delta$  D と  $\delta$  <sup>18</sup>O の関係を図に書くと、直線的であり、2 成分混合が発生しているのがわかる。しかし、Cl と  $\delta$  D の関係は、図 4.3・31 のように与えられ、混合線よりも左上に位置する。これは、Cl と  $\delta$  D が拡散により分離するためであると考えられる。また、このように分布が左上に位置するためには、一度、淡水によって洗われた領域に化石海水が拡散で出てくる必要があることがわかった。このような分布を確認するために、今年度は SAB02 においてデータの取り直しを実施した。また、新たに移流・拡散に基づくシナリオを検討した。



図 4.3-31 CI濃度とδDの関係(左は全体、右は PB-01 を抜粋)

#### 3) 調査結果

拡散試験は、昨年度と同様に、Through-Diffusion法で実施した(Hasegawa and Nakata, 2018)。 この方法は、サンプルを挟んだ両側に高濃度タンク(高 Cl 濃度、高  $\delta$  D)と低濃度タンク(低 Cl 濃 度、低  $\delta$  D)を設定し、拡散で移動させることで、拡散係数を計測する方法である。昨年度からの 調査結果から、拡散係数は  $\delta$  D で 1~2×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s, Cl で 3~6×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s 程度である。  $\delta$  D と Cl の拡散係数比は、3~4 倍程度である。また、<sup>35</sup>Cl と <sup>37</sup>Cl の拡散係数比(D<sub>35Cl</sub> /D<sub>37Cl</sub>)は、 1.0015~1.0020 であった。この結果の実測例を図 4.3-32 に示す。ここでは、  $\delta$  D と Cl の拡散係 数比は約 4 倍、<sup>35</sup>Cl と <sup>37</sup>Cl の拡散係数比は 1.0019 となっている。  $\delta$  <sup>37</sup>Cl は、低濃度側の Cl を サンプルとして用いており、拡散により-1.9‰分別するため、分別係数は 1.0019 となる。声問層 の方が稚内層よりも拡散係数が大きく、分別係数が小さくなる傾向にある。これは、声問層の方 が間隙率が稚内層に比べて大きいためと考えられる。

次に、Cl とδ<sup>37</sup>Cl、Cl とδD の関係を調査するために、既存のコアを用いて調査を実施した。 これは今までの調査結果は、比較的サンプリング間隔が広く、化石海水と降水の混合域が明確に 見えないものが多いためである。ここでは、比較的褶曲軸に近く、稚内層が露頭している SAB02 を対象に調査を実施した。これは、SAB02 が掘削時期が最も新しく、状態が最も良いと考えたた めである。

既存の調査で、概ね SAB02 の混合域は概ね深度 200~400m とわかっているため、特にその部 分を中心にコアを採取し、Cl 濃度と $\delta$ <sup>37</sup>Cl、 $\delta$ D・ $\delta$ <sup>18</sup>O を求めた。Cl 濃度は、リーチングによ

って求め、 $\delta$ <sup>37</sup>Cl は安定同位体比ガスクロマトグラフ質量分析法によって求めた(Hasegawa et al.,2016)。 $\delta$  D・ $\delta$ <sup>18</sup>O は、蒸気法によって求めた(Nakata et al., 2018)。

調査結果の鉛直プロファイルを図 4.3-33 と図 4.3-34 に示す。過去の結果に比べると Cl 濃度 がやや低く、 $\delta D \cdot \delta^{18O}$  はやや重くなっている。Cl 濃度は、採水方法を圧縮抽水からリーチン グに変更して採取したため、層間水(イオンが入れない部分)の希釈の影響で、低くなっている可 能性がある。 $\delta^{37}$ Cl は深部では低い値であるが、浅部に向けてプラスにシフトしてるように見え る。このため、上方向に拡散している可能性がある。 $\delta D \cdot \delta^{18O}$  は乾燥の影響でやや重くなって いる可能性もあるが、他のボーリング孔での調査結果との整合性を考えると、妥当に求められて いると考えられる。

図 4.3-35 に示すように、 $\delta D \geq \delta^{18}O$ の関係は概ね混合線上に載っている。一方で、Cl  $\geq \delta$  Dの関係は、以前の調査ではそれほど拡散の影響は明確でなかったものの、混合域のデータを重点的に採取したことにより、混合線よりも左上にでる拡散の影響が明確になっている。この結果はこれまでの結果と整合的である。



図 4.3-32 拡散試験による低濃度タンクでの CI 濃度と δ D の変化と δ<sup>37</sup>CI の分別



図 4.3-34 SAB02 における δ D・ δ<sup>18</sup>O の再調査結果



図 4.3-35 SAB02の再調査結果における CI と SD の関係

昨年度までの検討結果から、Cl と  $\delta$  D、 $\delta$ <sup>37</sup>Cl の分別が発生するシナリオとしては、図 4.3·36 の②化石海水が下部から拡散するシナリオが最も整合性が高いと考えられた。これに近い状態と して、降水が移流・拡散で輸送される場合を想定して評価を実施した(徳永ほか、2008)。この結 果をその他のシナリオとともに図 4.3·37 に示す。Cl と  $\delta$  D の関係は、混合線より右下に①、左 上に②、その間に③降水が移流と拡散で輸送される場合が分布する。分布の形態は①を下から押 し上げたようになっている。 $\delta$ <sup>37</sup>Cl については、移流の前線より降水側はマイナスシフトし、化 石海水側はプラスにシフトする。実際の分布は、 $\delta$ <sup>37</sup>Cl がマイナスにシフトする場合が多いため、 ②化石海水が上部へ拡散というシナリオが最も可能性が高いシナリオと考えられる。



図 4.3-36 CIと SD の拡散が影響するシナリオ



図 4.3-37 各シナリオでの CI と SD、 S<sup>37</sup>CI の分布結果

## (3) K r 法の適用

#### 1) 適用の目的

低流動域における地下水で<sup>81</sup>Krを抽出するためには、地下水の流量が 500 ml/min 以下と考え られるため、対象流量の低下に伴い、現代の大気性<sup>81</sup>Kr のコンタミネーションの増加が懸念され る。さらに、還元雰囲気が進行した地下深部では、有機物の分解に伴いメタンガスを多く含むた め、地下水とガスの比率もガスのほうが高いものも多い。

ここでは、地下水の流動性が低く、還元雰囲気が卓越した環境で有機物が分解し、メタンガス が多い幌延の深部地下水をスタディーケースととして、深部地下水中の<sup>81</sup>Kr 地下水年代測定の 高度化に必要と考えられる課題を抽出・検討を行った。今年度は、地下水中の Kr 同位体を分離・ 捕集する手法および捕集したガス中の Kr の精製手法に焦点を当て、<sup>81</sup>Kr 年代測定の高度化に必 要な2つの課題を選定した。分離・捕集に着眼した1つめの課題は、地下水中の Kr 形態におけ る同位体比情報を保持できる抽出システムの確立である。脱ガスが顕著な深部地下水では Kr 同 位体は遊離体と溶存態のふたつの形態があり、可動範囲が溶存態より広いと考えられる遊離体と 溶存態の形態で同位体比を議論する必要がある。捕集したガス中の Kr 精製に着眼した2つめの 課題では、メタンガスをマトリックスとするガスより Kr を精製するために、メタンガスの除去 を行う必要がある。

ここでは、1)遊離態と溶存態の形態別の <sup>81</sup>Kr/Kr 情報を取得し、得られる同位体比情報を加味 した分離・捕集方法を整備し、地下深部の <sup>81</sup>Kr/Kr 情報を基に化石海水と天水混合領域における 天水の涵養年代を求めた。2) 地下水より分離・捕集したガスのマトリックス成分であるメタン除 去手法の最適化を行った。

#### 2) 分離・精製方法

流動性が低く、メタンガスが多い幌延の深部地下水を対象として、Hollow fiber 法と水上置換 脱ガス法を利用した手法で、ガス中の Kr の捕捉を行った。Kr 分離技術は、Hollow fiber system(Ohta et al., 2009, 2019)と真空脱ガスシステムの2系統で比較・分析を行った。Hollow fiber 装置は、中空糸膜を内蔵した装置であり、中空糸膜の内側を真空に脱気し、膜と接触したガ スを捕集できるシステムであり、溶存態の Kr を効率よく捕捉できると考えられる。水上置換装 置は、地下水中の遊離態のガスを捕捉させる。両システムとも、地下水を実験室に運搬せずに、 現地で地下水中のガスのみを分離し、ガスのみを実験室に運搬した。

#### 3) 精製方法

## ① 背景

Atom Trap Trace Analysis(ATTA)法の開発により、地下水から 10 L 程度のガスを抽出するこ とで<sup>81</sup>Kr を分析することが可能となった(Yokochi, 2016)。しかし、現時点では ATTA で<sup>81</sup>Kr を分析できる機関は世界でも限られており、それらの研究機関に抽出したガスを送付する必要が ある。一部の地域の地下水では、原位置でメタンガスが発生して地下水中に蓄積し、地下水中の 溶存ガスにおける主要成分となっている(Miyakawa et al., 2017)。このような地下水において は、①涵養時の溶存ガスにメタンが付加されているため地下水の溶存ガスにおける Kr 濃度が低 下しており必要とされるガスのサンプル量が多い、②メタンが可燃性のガスであるため安全な輸 送が困難である、といった問題点が分析機関へのサンプルの送付を困難にする可能性が高い。こ のため、サンプル中のメタンの濃度・メタンの量(サンプルの量)を減らし、安全かつ簡易にサ ンプルを輸送する方法の確立が必要とされている。

本検討ではメタンをベースガスとし、Kr を 1ppm 程度含む模擬的なサンプルを調製し、模擬 サンプルのメタン濃度を減らすあるいは Kr を抽出するための手法開発を試みた。

## ② 試験方法

今年度の検討では、以下の2つの手法を適用し、Krの抽出やメタン濃度の低減を試みた。

・温度による分離: Kr の融点は-157℃であり、メタンの沸点は-162℃である。このため、冷却 トラップの温度を正確に-160℃付近に制御することができれば、ガスから Kr のみを抽出できる 可能性がある。ここでは、2-メチルブタン(イソペンタン)を凍らせて調整する冷却バスでは温 度を-160℃に制御することが可能であるため、イソペンタンの冷却バスに冷却トラップ(モレキ ュラーシーブ 3A を封入した U 字管)を入れ、ここに模擬サンプルを流速 200 mL/min で流す試 験を実施した。冷却トラップ前後の Kr 濃度を分析し、メタンベースのガスから Kr を抽出できる 可能性を検討した。試験系の概念図を図 4.3-38 に示した。



図 4.3-38 Kr とメタンの温度による分離試験、試験系の概念図

<u>・メタンの燃焼と二酸化炭素のトラップ</u>:上述の試験において、Krの融点とメタンの沸点は近 く、上手く分離ができない可能性が考えられたため、メタンを高温に加熱した酸化銅を充填した カラムに通じて二酸化炭素と水に変換し、それぞれをトラップしてサンプル量を減らす試験を実 施した。試験系の概念図を図 4.3-39 に示した。最終的に 50L のサンプルを処理できるシステム の構築を目指し、メタンの完全燃焼に必要な温度や処理が可能な流速などの情報を得た。





#### ③ 結果と考察

・温度による分離: -160℃に制御したトラップに流速 200 mL/min で 16L の模擬サンプルを流 したところ、1.58L のガスが捕捉された。ガスの主要成分はメタンであるため、この条件でのメ タンの捕捉率は 9.9%である。一方、トラップ通過前後の Kr 濃度は 18.5%減少しており、捕捉さ れたメタンの量を補正すると 16.7%の Kr がトラップされたことになる。トラップされたガス量 を見ると Kr はメタンの 1.7 倍程度であり、このような操作を繰り返すことでメタンから Kr が濃 縮できる可能性を示すことができた。しかし、Kr のトラップ率が低く、トラップ率においてメタ ンと極端に大きな差がないことから 50L のサンプルの処理には、この手法が不適であると考えら れた。

・メタンの燃焼と二酸化炭素のトラップ:温度を変えて、酸化銅カラムからでてくるガスを分析した結果、酸化銅カラムの温度が750℃以上で98%程度のメタンを燃焼可能であることが分かった(図 4.3・40)。また、発生した水をモレキュラーシーブ粉末で、二酸化炭素を冷却トラップで捕捉することで、サンプルの量を大きく減らすことができることを示すことができた。さらに燃焼装置を大規模化し、50 L のメタンが流速 500 mL/min で燃焼可能であるシステムを構築した。



図 4.3-40 メタンの燃焼試験における反応管温度と反応管通過後のメタン濃度

#### ④ まとめ

メタンをベースとしたガスから、メタンを減らし Kr を抽出するための検討を実施した。検討の結果、酸化銅でメタンを燃焼させて生じた水と二酸化炭素をトラップする方法が最も現実的で

あり、50L程度のサンプルが2時間程度で処理可能なシステムを構築した。今後 Kr の捕集効率 を検討のうえ、実サンプルに適用していく予定である。

## 4)<sup>81</sup>Krの評価・適用結果

140m(07V-140-M01) と 250m(09-V250-M02#1)のステージでは、Hollow fiber 法と水上置換 法の両方の手法で採取を行った。一方、幌延の 350m(13-350-C01)深度では地下深部で脱ガスが 多いため、地下水の採取が困難であるため、350m は水上置換法のみを対象とした。その他ガス の採取地点を表 4.3-5 に示す。

捕集したガスはガスクロマトグラフィーで O<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>の定量を行った。各ガスは全 て、検量線法により濃度を求めた。抽出したガス中の主要ガス成分の N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>を表 4.3-6 に 示す。水上置換法により脱ガスできるメインは CH<sub>4</sub> であることがわかる。主要濃度は CH<sub>4</sub> で 75-89 %、CO<sub>2</sub>を 9-24%含み、残りは N<sub>2</sub> で 1-2%程度であった。

次に、現地で、地下水原水を圧力の変化を極力小さくし、Cu tube に封圧採水を行った。次に、 Hollow fiber および水上置換法によりガスを抽出した後の水を Cu tube に通水させ、水中のガス を密封した。水試料を封入した Cu tube は、クランプで Cu tube 両端を圧着させ、大気性ガスの コンタミネーションを防止した。

	$N_2$ %	$ m CH_4\%$	$\mathrm{CO}_2\%$
07-V140-M01	1.6	88.6	9.4
07-V140-M01	1.9	84.4	13.4
12P350-M02#1	1.6	74.6	23.5
12P350-M02#1	1.8	74.6	23.3
09-V250-M02	1.8	88.5	8.8
09-V250-M02	2.2	88.7	9.3
10-E250-M01	1.7	87.9	10.0
10-E250-M01	1.4	88.5	9.8
11-V250-TR02	1.7	86.0	12.0
11-V250-TR02	2.4	88.6	8.5

表 4.3-5 ガス主成分濃度

原水中の He は希ガス質量分析計で、Ne, Ar, Kr, Xe は QMS で計測を行った。Cu tube に封 圧採水中のガスより検出された各希ガスのガス濃度を表 4.3-6 に示す。地下水中の Kr 濃度 は、(0.5-1.5)×10<sup>-8</sup> cc/g の範囲にあった。したがって、ATTA 分析に必要な採水水量は 200 L 以 上と考えられた。

Y		He Total	Ne Total	Ar Total	Kr Total	Xe Total
		(cc/g STP)				
2018	07V-140-M01	4.7E-08	2.7E-09	8.5 E-06	1.5E-08	1.2E-08
2018	09-V250-M02#1	1.2E-08	3.6E-09	1.1E-05	1.5E-08	2.6E-08
2018	13-350-C01	4.9E-08	6.3E-09	5.8E-06	1.1E-08	1.8E-08
2019	07-V140-M01	2.9E-07	2.3E-09	9.4E-06	7.9E-09	$5.2 \text{E} \cdot 09$
2019	10-E250-M01	6.9E-08	1.3E-09	1.7E-05	1.9E-08	8.6E-09
2019	10-E250-M01	7.1E-08	9.5E-10	1.3E-05	1.7E-08	9.9E-09
2019	09-V250-M02	6.9E-08	1.6E-08	1.8E-05	1.6E-08	8.3E-09
2019	11-V250-TR02	1.7E-08	4.6E-10	2.2E-06	5.0E-09	3.7E-09
2019	11-V250-TR02	1.9E-08	5.4E-10	3.2E-06	7.3E-09	1.0E-08

表 4.3-6 封圧採水中の希ガス濃度

次に、原水と Hollow fiber および水上置換適用後に採取したガス試料中の<sup>81</sup>Kr を図 4.3-41 に 示す。<sup>81</sup>Kr は、Hollow fiber 法では、52±6pMKr,水上置換法では 60±4pMKr であり、両手法 により、採取したガス中の<sup>81</sup>Kr/Kr 同位体比は一致することがわかった。したがって、深部地下 水中の溶存態および遊離体の<sup>81</sup>Kr/Kr 同位体比は誤差範囲内で一致をしたと考えられ、溶存態お よび遊離体で<sup>81</sup>Kr/Kr 同位体比は同じであり、遊離体中の<sup>81</sup>Kr/Kr 同位体比も地下水年代測定に 活用できると考えられた。



図 4.3-41 hollow fiber 法(HF)と水上置換法(WD)による<sup>81</sup>Kr 濃度の比較

ATTA 測定により得た<sup>81</sup>Kr/Kr 同位体比を基に地下深部へ侵入した天水の涵養年代を求めた。 幌延地区の 600m 採取地点における地下深部の Cl 濃度は 9000ppm であり、600m 地点の Cl 濃 度を古い地下水のエンドメンバーとし、 天水起源の淡水の Cl 濃度を 50ppm として、天水起源 の地下水の混合率を計算した。化石海水起源と天水起源の混合領域における Cl 濃度と天水の涵 養年代を図 4.3-42 に示す。化石海水起源と天水起源の混合領域では、地下深部へ侵入した天水 の涵養年代は 140m 地点で 35 万年、250m で 50 万年であると推測された。



図 4.3-42 CI 濃度と天水の涵養年代の深度プロファイル

## (4)考察

幌延地域の物質輸送が拡散支配であるかどうかを検討するために、拡散により分離・分別する 物質の拡散試験と原位置データの再取得、シナリオの検討を実施した。

原位置の岩石コアを用いて拡散試験を行い、拡散係数を求めた結果、δDで1~2×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s, Clで3~6×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s 程度であった。δDとClの拡散係数比は、3~4 倍程度である。また、<sup>35</sup>Cl と<sup>37</sup>Clの拡散係数比(D<sub>35Cl</sub>/D<sub>37Cl</sub>)は、1.0015~1.0020であった。声問層の方が稚内層よりも拡散 係数が大きく、分別係数が小さくなる傾向にある。

既存のボーリング SAB02 のコアを用いて、Cl をリーチング、δD・δ<sup>18</sup>O を蒸気法でデータを 再取得した。特に、混合領域について従来よりもデータを高密度で採取した。この結果、既存の 結果とやや異なるものの、既存の結果と同様のCl とδDの関係が得られた。このため、褶曲軸周 辺の稚内層が露頭するような地点においても、他地点と同様のシナリオで拡散が発生していると 考えられた。

また、降水が移流・拡散で化石海水と混合するシナリオを検討した。このシナリオでは、δ<sup>37</sup>Cl のマイナスシフトは表現できるものの、Cl とδD の関係については十分に表現できなかった。今 後、化石海水が洗われた後に化石海水が拡散するというシナリオについて、地史との整合性も含 めて検討していく予定である。

<sup>81</sup>Kr 法の適用では、溶存態と遊離体に賦存する Kr 同位体比を実測したところ、遊離体の Kr 同位体比は溶存態の同位体比と有意差が見られなかった。これより、遊離体の Kr 同位体比も溶 存態と同様に<sup>81</sup>Kr 年代情報を反映すると考えられた。したがって、脱ガスが顕著な深部地下水で は、水上置換法により地下水よりガスを採取し、水上置換法で脱ガスした後の水より Hollow fiber 法で Kr 同位体を抽出するシークエンス法が最適であろうと考えられた。地下深部の<sup>81</sup>Kr 情報を 基に化石海水と天水混合領域における天水の涵養年代を求めたところ、35 万年および 50 万年前 に涵養された天水が 140m、250m の地下深部まで浸透していると考えられた。

また、地下水より分離・捕集したガスよりメタンマトリックスを分離する条件は、CuO 触媒を 750℃まで加熱した手法が最適であると考えられた。

#### 参考文献

- Desaulniers, D.E., Kaufmann, R.S., Cherry, J.A. and Bentley, H.W., <sup>37</sup>Cl-<sup>35</sup>Cl variations in a diffusion-controlled groundwater system. *Geochim. Cosmochim. Acta* vol.**50**, pp.1757–1764, 1986.
- Hasegawa, T., Nakata, K., Mahara, Y., Habermehl, M.A., Oyama, T. and Higashihara, T., Characterization of a diffusion-dominant system using chloride and chlorine isotopes (<sup>36</sup>Cl, <sup>37</sup>Cl) for the confining layer of the Great Artesian Basin, Australia. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol.192, pp.279-294, 2016.
- Hasegawa, T. and Nakata, K., A measurement method for isotope fractionation of <sup>35</sup>Cl and <sup>37</sup>Cl by a conventional through-diffusion experiment. Chemical Geology, 483, 247-253, 2018.
- Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Niklaus Waber, H., Buschaert, S., Cannière, P.D., Mieke De Craen, M, Andreas Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. and Wouters, L., <u>Natural tracer profiles across argillaceous formations</u>, *Applied Geochemistry*, 26, 1035-1064, 2011.
- Miyakawa K, Ishii E, Hirota A, Komatsu D, Ikeya K, Tsunogai U (2017) The role of lowtemperature organic matter diagenesis in carbonate precipitation within a marine deposit. Applied Geochemistry, 76, 218–231.
- Nakata,K., Hasegawa,T., Oyama,T., Ishii,E., Miyakawa,K. and Sasamoto, H., An Evaluation of the Long-Term Stagnancy of Porewater in the Neogene Sedimentary Rocks in Northern Japan, Geofluids, vol. 2018, Article ID 7823195, 21p, doi:10.1155/2018/7823195, 2018.
- Nakata,K., Hasegawa,T., Oyama,T. and Miyakawa,K., Evaluation of <sup>2</sup>H and <sup>18</sup>O of water in pores extracted by compression method -effects of closed pores and comparison to direct vapor equilibration and laser spectrometry method-, Journal of hydrology, 561, 547-556,2018.
- Ohta, T., Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Matsumoto, T., Mahara, Y. Optimization of a portable hollow-fiber-based device for extracting radio Kr dissolved in deep groundwater and selection of <sup>222</sup>Rn as an indicator of Kr extraction efficiency, Journal of Hydrology, vol.

574, pp. 476-485, 2019.

- Ohta, T., Mahara, Y., Momoshima, N., Inoue, N., Ikawa, R., Taniguchi, M. and Shimada, J., Separation of dissolved Kr from water sample with hollow fiber membrane, Journal of Hydrology, vol.376, pp.152-158, 2009.
- 徳永朋祥、松本慎司、嶋田純、國丸貴紀、井尻裕二、19.塩素安定同位体比を用いた堆積岩中の地 下水挙動の評価―北海道幌延地域を対象とした検討―、日本地下水学会秋季講演会、4p、2008.
- Yokochi, R., (2016) Recent developments on field gas extraction and sample preparation methods for radiokrypton dating of groundwater, Journal of Hydrology, 540, 368-378.

# 4.4 地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備4.4.1 広域地下水流動評価における透水不均質性の取扱いに関わる検討(1)はじめに

4.3 節で述べたように、広域スケールないし施設スケールを対象とした地下水流動解析によっ て評価される地下水の流速、動水勾配や移行時間といった水理学的特性の三次元分布は、流れが 緩慢な領域を推定する際の検討材料になる。今年度の検討では、幌延地域の広域スケールを対象 とした地下水流動解析を実施し、地下水の移行時間や動水勾配といった水理学的特性の三次元分 布の推定を行う。その内容は、4.4.2項で後述する。堆積岩地域を対象として広域スケールの水理 地質構造モデルを構築する場合、各地層を多孔質の連続的な媒体と仮定した多孔質媒体モデルで 構築されることが多いが、実際の地層には程度の大小はあるが不均質性を有している。そのため、 評価対象となる地層における地下水流動評価に影響する不均質性の要因とその影響の程度を把握 し、影響が大きい場合には、水理地質構造モデルの構築において考慮する必要がある。幌延地域 における主要な評価対象となる地層は、新第三紀の稚内層とそれを整合に覆う声問層であり、稚 内層は塊状な珪質泥岩、また、声問層は塊状な珪藻質泥岩から構成される。稚内層では一部にお いて弱い層理が認められるものの、いずれの地層も均質無層理である。岩相の特徴は、どちらの 地層の透水性も同一地層内では均質であることを示唆する。一方、稚内層には層理面に平行な断 層(層面断層)とそれに斜交する断層(斜交断層)が発達することが、地表露頭調査、坑道壁面 の地質観察やボーリングコアの観察(図 4.4-1)により確認されている(石井ほか, 2006; Ishii et al., 2010; Hayano et al., 2016; Ishii, 2016)。このうち斜交断層は、水みちに寄与することが 示唆されており、稚内層は多孔質媒体のみならず亀裂性媒体としての特徴を有する(石井ほか, 2006;舟木ほか,2009)。地上から実施されたボーリング調査の単孔式透水試験やビルドアップ 試験の水理試験の結果に基づきと、声問層では試験区間の長さに関係なく、透水係数は2桁程度 のバラつきであるが、稚内層では試験区間が短い場合(数m~50m程度)の透水係数のバラつき が5桁程度である一方、試験区間が200mを超えるような長い区間の場合、透水係数のバラつき は2桁程度である(Kurikami et al., 2008)。これは、稚内層に分布する斜交断層が透水不均質の 要因となり、透水試験から求められる透水係数にバラつきを生じさせている一方で、対象とする 領域をより巨視的に捉えることで、一定の物性値(ここでは透水係数)に収束する代表要素体積

(REV)における透水係数を評価できることを示唆している。もし、稚内層が REV を示すよう な特徴が認められる場合、水理解析において対象スケールや解析の目的によっては、REV の透水 係数を設定した均質モデルを適用することも妥当と言える。

また、亀裂媒体を対象に地下水流動のみならず塩水の分布する地下深部への天水浸透といった 物質移動現象を解析する場合には、亀裂中の移流のみならず亀裂からマトリクス部への拡散(マ トリクス拡散)の影響を考慮する必要がある。昨年度の検討では、格子状に亀裂を配列させた簡 易的な亀裂モデルを用いた物質移行解析を行い、マトリクス拡散の考慮の有無が解析結果に大き な違いを生じさせることを示した(日本原子力研究開発機構, 2019)。そのため、亀裂性媒体であ る稚内層浅部を含めた領域を対象とした物質移行解析において稚内層浅部を均質なモデルに置き 換えて解析する場合であっても、マトリクス拡散の効果を適切に考慮すべきである。

以上のことから本検討では、広域スケールや施設スケールといったより大きいスケールでの地 下水流動解析を実施する場合に、亀裂性媒体である稚内層浅部のモデル化における留意点として、 それを均質なものとみなすことができる REV がどの程度のスケールなのか検討するために、亀 裂ネットワークモデルに基づく水理解析を実施し、透水係数のバラつきとスケールの関係を求め た。また、物質移行解析を実施する場合の留意点として、構築した亀裂ネットワークモデルに基 づき、稚内層浅部におけるマトリクス拡散の影響が発現する諸条件を検討した。



図 4.4-1 稚内層に分布する断層

## (2) 検討方法

本検討では、稚内層浅部を対象に異なるモデルサイズの亀裂ネットワークモデルを構築し、そ のモデルに基づき水理解析を行い、透水係数のバラつきとスケールの関係およびマトリクス拡散 の影響が発現する諸条件を検討した。亀裂ネットワークモデルの構築方法も含め、具体的な検討 方法について以下に述べる。

## 1) 稚内層浅部を対象とした亀裂ネットワークモデルの構築

稚内層では岩石強度と応力状態により断層近傍に発達する割れ目タイプが異なる(Ishii, 2016)。 岩石強度と応力状態を定量化する指標として、岩盤にかかる平均有効応力をその健岩部の引張強 度で除した値として定義されるダクティリティインデックス(DI)が提案されており(Ishii, 2015)、この値に基づき稚内層を浅部と深部を分けている。稚内層において DIが2未満となる浅 部では、引張/ハイブリッド割れ目が断層運動に伴って断層近傍に発達する。一方、DIが2以上 になる深部では、せん断割れ目も断層近傍に形成されるようになり、引張/ハイブリッド割れ目 の発達が抑制されていると推定されている(Ishii, 2016)。よって、稚内層浅部に分布する斜交断 層の方が、連結性が良くより水みちとして機能していると推定される。

本検討における亀裂ネットワークモデルの構築には FracMan®を使用し、表 4.4-1 に示す稚内 層浅部の斜交断層の亀裂パラメータに基づき、個別の断層を確率論的に表現する亀裂ネットワー クモデル(以下、DFN モデル)を構築する。DFN モデルの構築に必要なパラメータのうち、幾 何学形状に関するパラメータは、方位分布、3次元密度、半径分布である。方位分布および3次 元密度の設定には、地上からのボーリング調査のうち、大曲断層の影響がない PB-V01、SAB-1、 HDB-1、HDB-3、HDB-6、HDB-11のデータを用いて設定した。それらの断層の分布深度を示し たボーリング柱状図を図 4.4-1 に示す。一方、半径分布は、調査データから直接設定することが できないため、幌延深地層研究センターの地下施設のうち換気立坑の坑道壁面において観察され たトレース長分布を再現する半径分布を探し出すシミュレーションによる設定した(早野ほか, 2018)。

水理学的なパラメータについては、亀裂の透水量係数分布を設定する必要があり、開口幅は亀 裂の透水量係数との関係式に基づいて設定する。亀裂の透水量係数分布についても、原位置調査 により個々の亀裂の透水量係数を取得することは難しいが、本検討では、地上からのボーリング 調査において実施された FFEC 検層の結果を再現できる透水量係数分布を探し出すシミュレー ションにより設定した。その際、亀裂の透水量係数分布は対数正規分布を仮定し、対数分布と対 数標準偏差を求めた。

	亀裂特性 パラメータ	設定方法		稚内層浅 パラメー	部の -タ値	
				Trend P	lunge	К
+40+	ボーリング調査から直接取得できる方位データに基づき、	セット1	198.8	40.6	23.7	
	方位分佈	FracMan®の分析ワールによりセット分けを行い、Fisher 分布を仮定して卓越方位を設定	セット2	131.0	36.5	10.5
举				353.6	40.0	13.4
何学的		ギーリング調本かと古体取得できて1次二級在(D10) ト		1次元頻 [1/m]	度 3》 [	欠元密度 m²/m³]
特 密度 性	ホーリンク調査から直接取得できる「次元頻度(P10)と 方位分布に基づき、FracMan®の分析ツールにより換算 係数(C31)を求め、P10を3次元密度(P32)に変換	セット1	0.03	60	0.0589	
		セット2	0.03	89	0.0757	
				0.01	15	0.0234
	半径分布	換気立坑壁面の斜行断層のトレース長分布を最も再現す る半径分布を探し出すシミュレーション	指数分布	(Expone 平:	ential) 均半径	: 2.8 m
水理学的	透水量係数分布	地上からのボーリング調査において実施されたFFEC検 層の結果を再現できる透水量係数分布を探し出すシミュ レーション	logT=-5.5, σ (logT) =1.5			
特性	開口幅	亀裂の透水量係数との関係式(経験則)に基づく		2√T		

表 4.4-1 稚内層浅部に分布する斜交断層の亀裂パラメータ

## 2) 透水係数のバラつきとスケールの関係の検討方法

透水係数のバラつきとスケールの関係を調べるために、①に示した亀裂パラメータに基づき構 築する DFN モデルを用いて、水理解析を行った。水理解析の概要を図 4.4-2 に示す。水理解析 においても、FracMan®を使用した。モデルサイズについては、大きい方から 300 m、250 m、 200 m、160 m、120 m、100 m、80 m、40 m、20 m、10 m 立方とし、それぞれのモデルサイズ に対して 100 個のモデルを構築した。確率論的な DFN モデルであることから 100 個のモデルは どれも異なる。水理解析では、向かい合う 2 つの面の片方を水頭 1m の流入面、もう片方を水頭 0m の流出面とし、それ以外の 4 つの面を不透水面として、東西、南北、鉛直の 3 つの方向の流 量を求め、その値から等価透水係数を算出した。DFN モデルを構築した結果、流入面から流出面 まで亀裂が連結していない場合がある。あるいは亀裂が連結していたとしても水理解析の結果、 流量がマトリクス部の透水係数を下回る流量になる場合がある。これらの場合には、マトリクス 部相当の透水係数である 1.0×10<sup>-11</sup> m/s を等価透水係数とした。



## 3) マトリクス拡散の影響が発現する諸条件を検討方法

天水が亀裂性媒体中を浸透する場合に、亀裂からマトリクス部への天水の拡散(マトリクス拡 散)が、亀裂内の塩水が天水に置換される挙動に与える影響の大きさは、稚内層中の斜交断層の 幾何学的特性や水理学的特性、あるいはマトリクス部における有効間隙率や拡散深さ、動水勾配 といった境界条件などの値の大小とその組み合わせに依存すると考えられる。本検討では、稚内 層浅部の亀裂ネットワークモデルから導かれる諸条件に基づき、稚内層浅部におけるマトリクス 拡散の影響の程度、すなわち、天水浸透の挙動に与える影響を検討した。例えば、等価透水係数 が大きく評価される岩盤では、亀裂部を流れる地下水の流量が多く、地下水流速が速くなり、天 水の移流による移行率が大きくなる。この亀裂部の天水の移行率が亀裂部からマトリクス部への 拡散による移行率に比べて大きくなるほど、岩盤全体の天水の浸透挙動は亀裂部の天水の移行率 に大きく依存するようになり、マトリクス拡散により天水浸透が遅延する効果が相対的に小さく なると考えられる。この関係は、ダムケラー数を用いることにより、検討することができる。ダ ムケラー数 Dal (Damköhler number) は、亀裂内の移流と亀裂に接するマトリクス部での拡散 という異なる移行プロセスが支配的な媒体が隣接する系において、どちらの媒体の移動プロセス が全体の物質移動を支配するかを分析する指標として次式で表される(例えば、Haggerty and Gorelick, 1995; Holt., 1997)。

$$\mathrm{D}al = (\beta + 1)\frac{BDaL}{d^2}\frac{L}{v}$$

(式 4.4-1)

ここで、

β:二つの媒体の溶質の保有率比

(定常状態では移流媒体の間隙率に対する拡散媒体の間隙率の比に近似できる) B:拡散媒体の形状に関する変数

(拡散モデルに対する1次近似では常に1以上が与えられる、球状モデルの場合にはπ、 層状モデルの場合にはπ2/4)、

Da:みかけの拡散係数

(=実効拡散係数/マトリクス部有効間隙率)

d:拡散媒体の厚さ

(=(1-亀裂部有効間隙率)/三次元亀裂密度/2)

L:移流による移行距離

v:移流場の地下水流速

(=等価透水係数×動水勾配/ 亀裂部の有効間隙率)、

である。DaI は、拡散媒体と移流媒体間の溶質を保有する間隙率の比、拡散媒体と移流媒体間の拡散 による移行率を表す係数(B Da/d2)と移流媒体中の移行率の逆数(L/v)の積であらわされる指標で、その 大小により拡散媒体と移流媒体のどちらの媒体での移動プロセスが全体の物質移動を支配しているのか を分析することができる。Haggerty and Gorelick (1995)や Holt (1997)では、支配的な移動プロセス の判断の目安として、DaI が約 100 より大きな値の場合には拡散が支配的になり拡散媒体での近似が 可能で、逆に、約 0.01 より小さい値の場合には移流が支配的となり移流媒体での近似が可能としている。 また、DaI が 0.01 から 100 の範囲に分布する場合には、移流と拡散の両方の媒体の移動プロセスの 影響が現れる。表 4.4-2 に DaI を算出に用いるパラメータ値の設定方法を示す。透水係数については、 水理解析により算出した等価透水係数とし、3つの方位(東西、南北、鉛直)のそれぞれ 100 個のリアライ ゼーションに対して DaI を算出した。亀裂部有効間隙率および亀裂の三次元密度は、実際に構築した それぞれの亀裂ネットワークモデルから求めた。また、動水勾配については、後述(4.4.2 項)の広域スケ ールの水理解析により推定された動水勾配の値を参考に、ありうる値の範囲として 0.1、0.01、0.001 の 3 ケースを設定した。

パラメータ	算出方法
等価透水係数	DFNモデルの水理解析により算出
亀裂部有効間隙率	DFNモデルの地下水の移行に寄与する 亀裂開口部の体積とモデル体積との比率
亀裂の三次元密度	DFNモデルの透水に寄与する亀裂の 三次元密度
実効拡散係数	2.0×10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s (JNC-TN1400 2005-021に基づく)
マトリクス部の有効間隙率	稚内層のマトリクス部の間隙率:0.4
移流による移行距離	モデルサイズの大きさ
動水勾配	0.1、0.01、0.001の3つを設定

表 4.4-2 ダムケラー数の算出に必要なパラメータとその値の設定方法

#### (3)解析結果

#### 1) 透水性のバラつきとスケールの関係

図 4.4・3 にモデルサイズと等価透水係数の関係を東西、南北、鉛直の3つの方向別に示す。それぞれの方向のそれぞれのモデルサイズに対して、構築された 100 個のモデル毎に算出された等価透水係数がプロットされている。モデルサイズ毎に 100 個の等価透水係数に対しては、平均値 と標準偏差(σ)を求め、それぞれのプロット図には、平均値を実線、平均値±1σを点線で示した。東西では 40 m、南北では 100 m、鉛直では 120 m 以下のモデルにおいて、亀裂ネットワークモデルにおいて流入面から流出面まで亀裂が連結していないか、あるいはマトリクス相当の流量よりも低い等価透水係数となる場合が含まれており、それらは 1.0×10<sup>-11</sup> m/s にプロットされている。 3つの方向のモデルサイズと等価透水係数の関係について共通する特徴として、モデルサイズが小さいほど、等価透水係数のバラつきが大きく、平均値も低い。これは、モデルサイズが小さい場合には、マトリクス相当の等価透水係数が含まれていることに起因する。一方、モデルサイズが大きくなると等価透水係数のバラつき(標準偏差)は小さくなり、平均値もある一定の値に収束する傾向を示す。この傾向は REV を示すものであり、モデルサイズがおおよそ 200 mより大きい場合に等価透水係数の平均値とそのバラつきが一定になる傾向が示された。

また、3 つの方位の収束する等価透水係数を比較すると、東西と南北の水平方向の等価透水係 数と比較して、鉛直方向の等価透水係数は2から3桁程度低く、透水異方性が認められる。構築 した亀裂ネットワークモデルでは、設定した傾斜方位から約49から54度の傾斜角に集中するよ うに斜交断層がモデル化されている。そのため、必ずしも斜交断層が高角度ではないため、鉛直 方向の連結性が水平方向よりも乏しくなっており、透水異方性が生じていることはこれに起因す る。



#### 2) マトリクス拡散の影響が発現する諸条件

表 4.4-2 のパラメータ値に基づき、地下水流速 v に影響を与える透水係数や動水勾配の値の変 化が DaI に与える影響範囲を図 4.4-4 および図 4.4-5 に示す。また、前述の通り、動水勾配は、 0.1、0.01、0.001 の3 ケースについて検討した。図 4.4-4 には、モデルサイズが 200 m の場合 の3つの方位の等価透水係数とダムケラー数の関係を示す。基本的な特徴ではあるが、等価透水 係数が大きくなると、または動水勾配が大きくなると亀裂内の流速が早くなりマトリクス拡散が 発現しにくい状況になるため DaI は小さくなる。動水勾配 0.1 のケースの場合、透水係数がお よそ 10<sup>-6</sup> m/s より大きくなると DaI が 0.01 以下となり移流が支配的となり、東西方向では、 ほとんどが移流支配となるが、南北方向や鉛直方向では等価透水係数が 10<sup>-6</sup> m/s より小さくなる 場合も含まれるため、マトリクス拡散の影響が発現する場合も含まれている。また、動水勾配が 0.01 あるいは 0.001 といったように一桁ずつ小さく、DaI は逆にその桁数分だけ大きくなり、よ りマトリクス拡散の影響が発現する条件にシフトする。図 4.4-5 に、東西方向について異なるモ デルサイズ(10m、40m、80m、120m、200m、)の等価透水係数とダムケラー数の関係を示 す。基本的な特徴は図 4.4-4 に対して説明した内容と同様であるが、モデルサイズが小さいほど 同一の等価透水係数および動水勾配の時の Dal のバラつきが大きくなる傾向が認められる。Dal を求める際、亀裂部有効間隙率や亀裂三次元密度といった亀裂の幾何学的特性に関するパラメー タが必要になるが、モデルサイズが小さいほどこれらのパラメータのバラつきが大きくなること に起因している。そのため、この場合においても、おおよそモデルサイズが 200m より大きい場 合に DaI のバラつきは小さくなり、斜交断層の空間分布の不均質性の影響が無視できると言える。

以上のような検討結果を目安として、亀裂性媒体を対象として塩濃度分布を対象とした物質移 行解析を実施する場合には、亀裂部の移流による移行のみならず亀裂部からマトリクス部への拡 散の効果を考慮する必要があるのか、あるいは、マトリクス拡散の効果を無視した亀裂内の移流



分散モデルで物質移動評価結果を近似することができるか判断することが必要であると考えられる。

#### (4) まとめと今後の課題

本検討では、亀裂性媒体の特徴を有すると考えられる稚内層浅部を対象に、斜交断層が分布す ることによる透水不均質性の影響を坑道スケールの亀裂ネットワークモデルでの水理解析により 検討した。その結果は、モデルサイズと等価透水係数のバラつきの関係から、REV を示すような 特徴が認められ、おおよそ 200m よりも大きいスケールでは、透水係数が一定の値に収束する結 果になった。解析の目的にもよるが広域スケールの解析では、稚内層浅部の透水不均質性の影響 を無視しても解析結果に大きく影響しないと考えられる。また、東西方向、南北方向、鉛直方向 の3つの方向の収束する等価透水係数の平均値やバラつきの程度は異なっており、透水異方性が 認められた。この結果については、4.4.2項で後述する広域スケールの地下水流動解析の透水係数 の設定に反映した。また、亀裂性媒体である稚内層浅部を対象に物質移行解析を実施する場合に、 亀裂内の移流とそれに接する亀裂面からのマトリクス拡散のどちらの移行プロセスが支配的にな るのか、DaI を算出しその結果に基づき検討した。その結果、ほとんどの条件では、亀裂内の移 流のみならずマトリクス拡散の影響を考慮する必要があることが示された。このような検討を目 安として、亀裂部の移流による移行のみならず亀裂部からマトリクス部への拡散の効果を考慮す る必要があるのか、あるいは、マトリクス拡散の効果を無視した亀裂内の移流分散モデルで物質 移動評価結果を近似することができるか判断することは、物質移行解析を実施する上で必要なア プローチであると考える。

今後の課題として、今年度の検討では、透水異方性を東西、南北、鉛直の3つの方向に限定し て算出し、それを広域スケースの地下水流動解析に反映したが、正確にはクラックテンソルに基 づく透水係数の設定が必要であり、必要に応じて、広域スケールにおける透水係数の設定を修正 する必要がある。また、今後、塩濃度の三次元分布の推定を物質移行解析により実施する場合に は、マトリクス拡散の影響を考慮について検討する必要がある。

## 参考文献

- 舟木泰智,石井英一,常盤哲也,新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?,応 用地質 50 巻,4 号, pp.238-247, 2009.
- Haggerty, R. and Gorelick, S. Multiple-rate mass transfer for modeling diffusion and surface reactions in media with pore-scale heterogeneity, Water Resources Research, VOL. 31, NO. 10, pp.2383-2400, 1995.
- Hayano, A., Ishii, E., Relationship between faults oriented parallel and oblique to bedding in Neogene massive siliceous mudstones at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 44, p.022004\_1 -022004\_8, 2016.
- 早野 明,石井英一,新第三紀塊状珪質泥岩に分布する断層を対象とした亀裂ネットワークモデ ル,平成 30 年度(2018 年)資源・素材学会春季大会資源・素材講演集(インターネット),5(1), 9p., 2018.
- Holt., R., Conceptual Model for Transport Processes in the Culebra Dolomite Member, Rustler Formation, SAND97-0194, Sandia National Laboratories, U.S.A, 160p., 1997.
- 石井英一,福島龍朗,新第三紀珪質岩における断層の解析事例,応用地質 47 巻,5 号, pp.280-291, 2006.
- Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T., Ota, K., Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan,

Journal of Structural Geology 32, pp.1792-1805, 2010.

- Ishii, E., Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: preliminary results, vol.120, pp.2220-2241, 2015.
- Ishii, E., The Role of bedding in the evolution of meso- and microstructural fabrics in fault zones, Journal of Structural Geology 89, pp.130–143, 2016.
- Kurikami, H., Takeuchi, R., Yabuuchi, S., Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, Physics and Chemistry of the Earth, vol.33, pp.S37-S44, 2008.
- 日本原子力研究開発機構,平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発 事業 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発 報告書, 2019, 383p.

## 4.4.2 広域地下水流動のモデル化・解析手法の改良

#### (1)はじめに

4.3 節で述べたように、地下深部の低流動域の三次元分布を把握するためには、化石海水に着 目して地下水の塩濃度(Cl-濃度)や安定同位体比(δ<sup>18</sup>O およびδD)を指標として、それらの 三次元分布を物理探査とボーリング調査のデータを組み合わせて評価する方法に加え、地層の透 水性や動水勾配などの水理学的特性の三次元分布に基づき地下水の流れが緩慢な領域を評価し、 低流動域の三次元分布の推定結果を補完する方法を検討する必要がある。水理学的特性のうち地 層の透水性については、地上からのボーリング調査における透水試験などの原位置データから直 接評価することも可能であるが、動水勾配や地下水の移行時間などの地下水の流速に係る特性の 三次元分布の推定には、地下水流動解析を通じたアプローチが必要となる。

昨年度は、幌延を対象として、天水浸透の影響範囲を検討するための洗出し解析を施設スケー ル~広域スケールで実施した。地下水の水質分布の形成に影響すると考えられるパラメータとし て以下に着目し、天水の浸透挙動に対してこれらが与える影響を確認するための感度解析を実施 した。

- ・海水準(現在/氷期)
- ・大曲断層の透水性(高透水/低透水)
- ・地層(勇知層・声問層・稚内層)の透水性(観測されている透水係数のばらつきを考慮)
- ・解析開始時に対象地域に分布する塩水の密度(海水と同等/海水の1/2相当)

主な結果は以下の通りである。

- ・海水準の違いについて、天水浸透の継続時間(解析時間)を2万年とした場合には、天水浸透 挙動の明瞭な違いは認められなかった。一方、解析時間10万年以上の場合、海水準を氷期の値 に設定した方が、断層部においてより深部まで天水が浸透した。
- ・大曲断層の透水性について、高透水(1.0×10<sup>-7</sup>m/s)に設定した場合、天水浸透は解析時間100 万年で深度1,000 m 程度にまで及ぶが、低透水(2.7×10<sup>-10</sup> m/s)に設定した場合には同様の解 析時間でも深度500 m 程度に留まった。
- ・稚内層深部の透水係数を、断層岩箇所を含む試験データに設定した場合は、断層岩箇所を含まない試験データに設定した場合よりも深部まで天水が浸透した。一方、透水係数を試験データの最低値に設定した場合、解析時間100万年においても、大曲断層以外での天水浸透範囲は稚内層浅部までに留まった。
- ・塩水密度について、解析時間 10 万年以上の場合には、塩水密度を海水の 1/2 に設定したほう が、大曲断層およびその西側の背斜翼部においてより深部まで天水が浸透した。

・解析結果と、ボーリング調査で得られた地下水の Cl-濃度分布とを比較すると、稚内層深部については塩水密度を低く設定した方が実測値とよく整合し、稚内層浅部についても解析時間およそ10万年未満で実測値と整合する。ただし、昨年度のモデルでは現在の地形や地質が過去100万年間にわたって変化しないと仮定されており、またマトリクス拡散による遅延効果の影響も考慮されていないため、天水浸透や地下水流動を過剰に評価している可能性がある。

以上の検討結果をふまえて今年度は、低流動域の三次元分布の推定に資することを目的として、 既往の地下水流動モデルや解析手法に基づき(日本原子力研究開発機構,2016)、広域・施設スケ ールでの地下水流動解析を行い、地下水移行時間や動水勾配の三次元分布を推定した。その際、 寒冷期と温暖期での海水準および涵養量の違い、大規模な断層の透水性の違い、稚内層の透水性 の違いが地下水流動に与える影響に着目した感度解析を実施することとし、複数の解析ケースを 設定した。稚内層には透水に寄与する断層が分布しており、これに起因して透水不均質性を有す る可能性がある。そのため、4.4.1 項で述べた亀裂ネットワークモデルから算出した稚内層の透水 不均質性(異方性)の検討結果を解析ケースに反映した。さらに、幌延地域における古水理地質 学的変遷が地下水流動に与える影響を検討するための解析ケースも設定した。

## (2)水理地質構造モデルの構築

既存の幌延地域における幌延深地層研究所(以下、幌延 URL)を包含する地質構造モデル(日本原子力研究開発機構, 2016)をもとに、解析領域内で考慮すべき主要な水理地質構造の三次元的な分布を図化(数値化)し、三次元分割格子を作成した。作成にあたっては、以下の点に留意した。

- ・可能な限り地形の起伏および水理地質構造の三次元分布を詳細に表現できるようにする。
- ・水圧や水質のモニタリングを実施しているボーリング孔位置や観測区間位置を考慮する。
- ・解析格子の総節点数は80万節点程度を目安として領域分割することとし、特に着目する範囲については、分割格子の解像度をその外側より詳細にする。

## 1) モデル化・解析領域

モデル化・解析領域は日本原子力研究開発機構(2016)における地質構造モデルを踏襲した。 ただし、西側の境界を海岸線近傍に変更し、深度は標高-10kmまでとした。このうち特に着目す る範囲として、海岸線から内陸に至る10km×20km(深度は標高-1km程度まで)の領域を、 パーティクルトラッキングの指定点の設定範囲とした。各領域を図 4.4-6 に示す。



図 4.4-6 モデル化・解析領域

## 2) 水理地質モデル

図 4.4-7 に本事業のモデル化領域における地形・地質構造モデルの三次元分布を示す。既存検 討事例(日本原子力研究開発機構, 2016)で構築された地形・地質構造モデルを踏襲し、地質を 更別層以浅(沖積層、段丘堆積物を含む)、勇知層、声問層、稚内層浅部、稚内層深部、増幌層~ 古第三系、白亜系の7層に区分するとともに、各地層の現在、33万年前、100万年前の分布を設 定した。また、対象領域の陸域に分布する大規模な断層として大曲断層、サロベツ断層、幌延断 層、北川口断層、デタッチメントの5条を考慮した。断層のモデル化にあたっては、検討領域が 数十 km四方以上と広範囲を対象としていること、断層近傍ではなく検討領域全体の地下水流動 特性の評価を行うことを目的としていることから、日本原子力研究開発機構(2016, 2017)に準 拠し、ある厚さを持った一枚の面構造としてモデル化した。モデル化する断層幅は、水理地質構 造モデルの解の収束性を勘案し10mを設定した。その上で、断層の透水係数の設定値と等価とな るように、モデル化する断層幅に応じた透水係数を算出した。



図 4.4-7 地形・地質構造モデル (三次元分布)

## 3) 三次元分割格子

対象領域および断層における三次元分割格子分布を、それぞれ図 4.4-8 および図 4.4-9 に示す。 図 4.4-8 では、1)で設定した水理地質構造を分割格子に反映させている。また、水平・深度方向 での格子分割の範囲および大きさを、表 4.4-3 に示す。



図 4.4-8 地層の三次元分割格子



図 4.4-9 断層の三次元分割格子

分割範囲		格子分割の大きさ(m)		
水平方向	深度方向	水平方向	深度方向	
	標高-10000m~-6000m	500	500	
全領域	標高-6000m~-1000m	500	250	
	標高-1000m~-200m	300	100	
	標高-200m~地表	150	50	
	地表~深度 75m	150	25	
断層	標高-10000m~地表	200	-	

表 4.4-3 三次元分割格子の範囲および大きさ

## (3)解析方法および解析条件の設定

## 1) 解析方法および解析コード

地下水流動の感度解析(三次元定常飽和・不飽和地下水流動解析)として、パーティクルトラ ッキング解析を実施した。同解析は、モデル化領域内に指定点を任意に設定し、その点を通過す る涵養域から流出域までの地下水移行経路を算出するものである。感度解析として、対象地域の 地形・地質条件、気候条件(涵養量・海水準)および地層・断層の透水性を変化させた計40ケー スの解析を実施し、結果を比較することで、各パラメータの地下水流動への影響を検証した。指 定点は2,310点程度(約231点×10深度)とした。指定点の基本の配置条件を表4.4-4に示す。 解析には、GEOMASSシステム(大山・三枝,2009)のうちの地下水流動解析コードである Frac-Affinityを用いた。

項目	幌延地域
設定範囲(水平)	着目範囲(10km×20km)
設定範囲(鉛直)	G.L50~-1200m
指定点間隔(水平)	1km×1km 間隔
指定点間隔(鉛直)	G.L50m、-100m、-200m、-300m、-400m、 -500m、-600m、-800m、-1000m、-1200m(10 深 度)
指定点数	231 点/1 深度

表 4.4-4 パーティクルトラッキング解析の指定点の配置条件(基本配置)

#### 2) 解析ケース

解析ケースを表 4.4-5 と表 4.4-6 に示す。「地形変化条件」は、日本原子力研究開発機構(2016) において構築された、現在、33万年前、100万年前の3種類の時間断面における地質構造モデル を適用した。「気候変動条件」は、温暖期と寒冷期の2パターンを設定した。詳細は3)境界条件 で述べる。「断層の透水性」は2パターン(低透水/高透水)、「岩盤の透水性」は4パターン(A ~D)を設定しており、それぞれ4)物性値で詳述する。なお、網掛けをしたケースは、解析の収 束状況が悪いため結果の評価から除外したものである。
表	4.4-5	感度解析ケ	ースの一覧	ī (1/2)
---	-------	-------	-------	---------

No	一般 折 ケーフ	地形変化条件 気候変動条件		医剤の体と生	岩盤の
NO.	JF1017 ~ ~	(地形・地質分布)	(涵養量・海水準)	町層の近小江	透水性
1	R01_H_pre_IGS_FKlow_RKA	現在	温暖期 (120.5mm/年・E.L.0m)	低透水性(2.7E-10m/s)	設定A
2	R01_H_330ka_IGS_FKlow_RKA	0.33Ma	温暖期 (120.5mm/年・E.L.0m)	低透水性(2.7E-10m/s)	設定A
3	R01_H_1ma_IGS_FKlow_RKA	1.0Ma	温暖期 (120.5mm/年・E.L.0m)	低透水性(2.7E-10m/s)	設定A
4	R01_H_pre_GS_FKlow_RKA	現在	寒冷期 (0mm/年・E.L.−120m)	低透水性(2.7E-10m/s)	設定A
5	R01_H_330ka_GS_FKlow_RKA	0.33Ma	寒冷期 (0mm/年•E.L120m)	低透水性(2.7E-10m/s)	設定A
6	R01_H_1ma_GS_FKlow_RKA	1.0Ma	寒冷期 (0mm/年•E.L120m)	低透水性(2.7E-10m/s)	設定A
7	R01_H_pre_IGS_FKhigh_RKA	現在	温暖期 (120.5mm/年・E.L.0m)	高透水性(1.0E-7m/s)	設定A
8	R01_H_330ka_IGS_FKhigh_RKA	0.33Ma	温暖期 (120.5mm∕年∙E.L.0m)	高透水性(1.0E-7m/s)	設定A
9	R01_H_1ma_IGS_FKhigh_RKA	1.0Ma	温暖期 (120.5mm/年•E.L.0m)	高透水性(1.0E-7m/s)	設定A
10	R01_H_pre_GS_FKhigh_RKA	現在	寒冷期 (0mm/年•E.L120m)	高透水性(1.0E-7m/s)	設定A
11	R01_H_330ka_GS_FKhigh_RKA	0.33Ma	寒冷期 (0mm/年•E.L120m)	高透水性(1.0E-7m/s)	設定A
12	R01_H_1ma_GS_FKhigh_RKA	1.0Ma	寒冷期 (0mm/年・E.L120m)	高透水性(1.0E-7m/s)	設定A
13	R01_H_pre_IGS_FKlow_RKB	現在	温暖期	低透水性	設定B
14	R01_H_330ka_IGS_FKlow_RKB	0.33Ma	温暖期	低透水性	設定B
15	R01_H_1ma_IGS_FKlow_RKB	1.0Ma	温暖期	低透水性	設定B
16	R01_H_pre_GS_FKIow_RKB	現在	寒冷期	低透水性	設定B
17	R01_H_330ka_GS_FKlow_RKB	0.33Ma	寒冷期	低透水性	設定B
18	R01_H_1ma_GS_FKlow_RKB	1.0Ma	寒冷期	低透水性	設定B
19	R01_H_pre_IGS_FKhigh_RKB	現在	温暖期	高透水性	設定B
20	R01_H_330ka_IGS_FKhigh_RKB	0.33Ma	温暖期	高透水性	設定B
21	R01_H_1ma_IGS_FKhigh_RKB	1.0Ma	温暖期	高透水性	設定B
22	R01_H_pre_GS_FKhigh_RKB	現在	寒冷期	高透水性	設定B
23	R01_H_330ka_GS_FKhigh_RKB	0.33Ma	寒冷期	高透水性	設定B
24	R01_H_1ma_GS_FKhigh_RKB	1.0Ma	寒冷期	高透水性	設定B

網掛部:水理特性の条件が厳しく収束状況が悪いため、結果の評価から除外

表 4.4-6 感度解析ケースの一覧(2/2)

No	<b>留折ケーフ</b>	地形変化条件	気候変動条件	新岡の添水性	岩盤の
NO.	解約17 一へ	(地形・地質分布)	<ul><li>(涵養量・海水準)</li></ul>	間層の返水圧	透水性
25	R01_H_pre_IGS_FKlow_RKC	現在	温暖期	低透水性	設定C
26	R01_H_330ka_IGS_FKlow_RKC	0.33Ma	温暖期	低透水性	設定C
27	R01_H_1ma_IGS_FKlow_RKC	1.0Ma	温暖期	低透水性	設定C
28	R01_H_pre_GS_FKlow_RKC	現在	寒冷期	低透水性	設定C
29	R01_H_330ka_GS_FKlow_RKC	0.33Ma	寒冷期	低透水性	設定C
30	R01_H_1ma_GS_FKlow_RKC	1.0Ma	寒冷期	低透水性	設定C
31	R01_H_pre_IGS_FKhigh_RKC	現在	温暖期	高透水性	設定C
32	R01_H_330ka_IGS_FKhigh_RKC	0.33Ma	温暖期	高透水性	設定C
33	R01_H_1ma_IGS_FKhigh_RKC	1.0Ma	温暖期	高透水性	設定C
34	R01_H_pre_GS_FKhigh_RKC	現在	寒冷期	高透水性	設定C
35	R01_H_330ka_GS_FKhigh_RKC	0.33Ma	寒冷期	高透水性	設定C
36	R01_H_1ma_GS_FKhigh_RKC	1.0Ma	寒冷期	高透水性	設定C
37	R01_H_pre_IGS_FKlow_RKD	現在	温暖期	低透水性	設定D
38	R01_H_330ka_IGS_FKlow_RKD	0.33Ma	温暖期	低透水性	設定D
39	R01_H_1ma_IGS_FKlow_RKD	1.0Ma	温暖期	低透水性	設定D
40	R01_H_pre_GS_FKlow_RKD	現在	寒冷期	低透水性	設定D
41	R01_H_330ka_GS_FKlow_RKD	0.33Ma	寒冷期	低透水性	設定D
42	R01_H_1ma_GS_FKlow_RKD	1.0Ma	寒冷期	低透水性	設定D
43	R01_H_pre_IGS_FKhigh_RKD	現在	温暖期	高透水性	設定D
44	R01_H_330ka_IGS_FKhigh_RKD	0.33Ma	温暖期	高透水性	設定D
45	R01_H_1ma_IGS_FKhigh_RKD	1.0Ma	温暖期	高透水性	設定D
46	R01_H_pre_GS_FKhigh_RKD	現在	寒冷期	高透水性	設定D
47	R01_H_330ka_GS_FKhigh_RKD	0.33Ma	寒冷期	高透水性	設定D
48	R01_H_1ma_GS_FKhigh_RKD	1.0Ma	寒冷期	高透水性	設定D

網掛部:水理特性の条件が厳しく収束状況が悪いため、結果の評価から除外

# 3) 境界条件

解析における境界条件を表 4.4-7 に示す。

境界条件	幌延地域					
		自由浸出面境界(涵養量:温暖期·寒冷期)				
	陸側	※河川部:地表面固定水頭境界				
上部境界条 <mark>件</mark>		(温暖期のみ)				
	海側	海水の比重や水深を考慮した固定水頭境界				
	/毋1则	(温暖期のみ)				
	陸側	不透水培思				
	(東側)	1 22 / 32 31				
側方培果冬姓	海側	不添水培思				
剧力现外本厅	(南北側)	不超小現介				
	海側	医力因定接界(現海水進お上パ氷期海水進)				
	(西側)	江刀固定現か (玩海小竿および小朔海小竿)				
下部境界条 <mark>件</mark>	不透水境界					

表 4.4-7 解析における境界条件

これらの解析条件は、既存の検討事例(日本原子力研究開発機構, 2016, 2017)を参照にして設定

した。上部境界条件の涵養量は、温暖期は120.5 mm/年、寒冷期は0 mm/年相当(0.499 mm/年) に設定した。河川部は、各時代の地形に基づく流路解析結果に基づき、以下のように設定した。

- ・温暖期の場合、現在のモデル化対象河川は、流路解析結果のうち、高次2次の河川を抽出し、20万分の1地形図における河道形状を簡略化したものを設定した。33万年前、100万年前のモデル化対象河川は、流路解析結果のうち、高次2次の河川を抽出し、抽出した河道形状を簡略化したものを設定した。
- ・寒冷期の場合は、現在、33万年前、100万年前いずれの時代も河川に水は流れていないものと 仮定し、設定しなかった。
- ・河道幅は、格子分割条件を勘案し100 m とした。 海水準変化は、現在、33 万年前、100 万年前とも、温暖期の海水準を標高0mとして汀線位置 を設定した。寒冷期の海水準は標高-120 m と想定されているが、汀線位置がモデル化・解析領 域の外側にあるため、寒冷期の場合は設定しなかった。
- 海域の上部境界に設定した海水比重を考慮した水頭分布は、以下のように作成した。
- ・各時代の地形面分布を基に三次元格子を作成した。
- ・淡水の全水頭(海水比重考慮前の全水頭)を海水準に設定し、三次元の水頭分布データを作成 した。
- ・上記の水頭分布から算出した各点の圧力水頭に、海水の比重 1.025 を掛けた後、各点の位置水 頭(標高値)を足すことで、海水比重を考慮した全水頭を算出した。

### 4) 物性値

表 4.4-8~表 4.4-11 には、地層の透水係数の設定条件 A~D において各地層(更別層、勇知層、 声問層、稚内層浅部、稚内層深部、増幌層~古第三系、白亜系、断層)に与えた物性値を示す。 設定条件 A では、これまで各地層に対して実施されてきた既往検討に基づき物性値を設定してお り、水平・鉛直方向での透水係数の異方性は考慮していない。設定条件 B では、稚内層浅部のみ に対して、4.4.1 項で亀裂ネットワークモデルにより求めた等価透水係数を適用し、透水係数の異 方性を考慮した。設定条件 C では、稚内層深部に対しても稚内層浅部と同様の透水異方性を考慮 した。なお、稚内層深部の透水係数は、設定条件 A で同層に与えた透水係数である 7.3×10<sup>-10</sup> m/s に対して、稚内層浅部の透水係数は、設定条件 A で同層に与えた透水係数である 7.3×10<sup>-10</sup> m/s に対して、稚内層浅部の透水係数は、設定条件 A で同層に与えた透水係数である 7.3×10<sup>-10</sup> m/s に対して、稚内層浅部の透水係数は、設定条件 C では、地層以外のパラメータ(地形・地質モデル、気候条件など)の影響を判別しやすくするため に、断層以外のすべての地層の透水係数を声問層と同じ値に設定した。

		透水係数(ms <sup>-1</sup> )				
	水理地質構造区分	水平方向 (断層面 方向)	鉛直方向 (断層面直交 方向)	有効 間隙率	不飽和 特性曲線	備考
	更別層	1 0E-06	1 0E-06	0.45	礫質土• 砂質土 <sup>1)</sup>	・透水係数 <sup>2]</sup> :「深度0~250m:10 <sup>-5</sup> (ms <sup>-1</sup> )オーダー, 深度250~470m:10 <sup>-7</sup> (ms <sup>-1</sup> ) オーダーの値」の対数平均値を設定 ・有効間隙率 <sup>3)</sup>
	勇知層	9.4E-10	9.4E-10	0.44	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数<sup>4)</sup>:HDB-1~11の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> </ul>
	声問層	6 5E-09	6 5E-09	0 55	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>透水係数<sup>4)</sup>:HDB-3, 6, 8, 10, PB-V01の声問層中の対数平均値から設定</li> <li>有効間隙率<sup>5)</sup></li> </ul>
	稚内層浅部	1 0E-07	1 0E-07	0.4	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・透水係数<sup>4)</sup>:HDB-1,4~6,8~11,PB-V01の対数平均値から設定、ただし、HDB-9の216.9m以深のデータは大曲断層の影響を考慮し除外</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> <li>・稚内層の深部と浅部はDI(Ductility Index)=2を基準として区分<sup>7)</sup></li> </ul>
	稚内層深部	7 3E-10	7 3E-10	0.4	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・透水係数<sup>6)</sup>: HDB-1, 3, 5, 6, 8, 11, PB-V01の対数平均値から設定、ただし、HDB- 9の216.9m以深のデータは大曲断層の影響を考慮し除外</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> <li>・稚内層の深部と浅部はDI(Ductility Index)=2を基準として区分<sup>7)</sup></li> </ul>
	増幌層~古第三系	5 0E-11	5 0E-11	0.1	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>
	白亜系	5 0E-12	5 0E-12	0.1	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>
新國	低透水性	2.71	E-10	0.3	泥出 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・透水係数:低透水性:大曲断層の透水係数[1.9~3 5E-10(ms<sup>-1</sup>)」の対数平均値を 適用<sup>9)</sup>,高透水性:HDB-1~11の水理試験結果の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>
断層	高透水性	1.0E-07		03	泥岩。	

表 4.4-8 設定条件 A における各地層の物性値

1)財団法人国土技術センター (2002), 2)産業技術総合研究所 (2010), 3)今井・山下 (2001), 4)NAGRA (2010), 5)Ishii et al. (2011), 6)竹下 (1990), 7)Ishii (2018), 8)株式会社安藤・間 (2014), 9)電力中央研究所 (2011)

水理地質構造区分		透水係数(ms <sup>-1</sup> )				
		水平方向 (断層面 方向)	鉛直方向 (断層面直交 方向)	有効 間隙率	不飽和 特性曲線	備考
	更別層	1 0E-06	1.0E-06	0.45	礫質土• 砂質土 <sup>1)</sup>	・透水係数 <sup>2</sup> :「深度0~250m:10 <sup>-5</sup> (ms <sup>-1</sup> )オーダー, 深度250~470m:10 <sup>-7</sup> (ms <sup>-1</sup> ) オーダーの値」の対数平均値を設定 ・有効間隙率 <sup>3)</sup>
	勇知層	9.4E-10	9.4E-10	0.44	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>・透水係数<sup>4)</sup>:HDB-1~11の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> </ul>
	声問層	6 5E-09	6.5E-09	0 55	泥岩6)	<ul> <li>透水係数<sup>4)</sup>:HDB-3, 6, 8, 10, PB-V01の声問層中の対数平均値から設定</li> <li>有効間隙率<sup>5)</sup></li> </ul>
	稚内層浅部	東西:5.6E-6 南北:7.3E-7 水平平均:2 0E-6	5.6E-09	0.4	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・亀裂ネットワークモデルから求めた等価透水係数</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> <li>・稚内層の深部と浅部はDI(Ductility Index)=2を基準として区分<sup>7)</sup></li> </ul>
	稚内層深部	7 3E-10	7.3E-10	0.4	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・透水係数<sup>4)</sup>: HDB-1, 3, 5, 6, 8, 11, PB-V01の対数平均値から設定、ただし、HDB- 9の216 9m以深のデータは大曲断層の影響を考慮し除外</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> <li>・権内層の深部と浅部はDI(Ductility Index)=2を基準として区分<sup>77</sup></li> </ul>
	増幌層~古第三系	5 0E-11	5.0E-11	0.1	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	・透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献 <sup>8)</sup> など)
	白亜系	5 0E-12	5.0E-12	0.1	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>
断層·	低透水性	低透水性         2.7E-10           高透水性         1.0E-07		0.3	泥 半6)	<ul> <li>・透水係数:低透水性;大曲断層の透水係数「19~35E-10(ms<sup>1</sup>)」の対数平均値を 適用<sup>9)</sup>,高透水性;HDB-1~11の水理試験結果の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>
	高透水性			U.3 j	泥岩 <sup>0</sup>	

表 4.4-9 設定条件 B における各地層の物性値

1)財団法人国土技術センター (2002), 2)産業技術総合研究所 (2010), 3)今井・山下 (2001), 4)NAGRA (2010), 5)Ishii et al. (2011), 6)竹下 (1990), 7)Ishii (2018), 8)株式会社安藤・間 (2014), 9)電力中央研究所 (2011)

水理地質構造区分		透水係数(ms <sup>-1</sup> )					
		水平方向 (断層面 方向)	鉛直方向 (断層面直交 方向)	有効 間隙率	不飽和 特性曲線	備考	
更別層		1 0E-06	1.0E-06	0.45	礫質土• 砂質土 <sup>1)</sup>	・透水係数 <sup>21</sup> :「深度0~250m:10 <sup>-5</sup> (ms <sup>-1</sup> )オーダー, 深度250~470m:10 <sup>-7</sup> (ms <sup>-1</sup> ) オーダーの値µの対数平均値を設定 ・有効間隙率 <sup>3)</sup>	
	勇知層	9.4E-10	9.4E-10	0.44	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数<sup>4)</sup>:HDB-1~11の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> </ul>	
	声問層	6 5E-09	6.5E-09	0 55	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・透水係数<sup>4)</sup>:HDB-3, 6, 8, 10, PB-V01の声問層中の対数平均値から設定</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> </ul>	
	稚内層浅部	東西:5 6E-6 南北:7 3E-7 水平平均:2.0E-6	5.6E-09	0.4	泥岩 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・亀裂ネットワークモデルから求めた等価透水係数</li> <li>・有効間隙率<sup>5)</sup></li> <li>・稚内層の深部と浅部はDI(Ductility Index)=2を基準として区分<sup>7)</sup></li> </ul>	
	稚内層深部	東西:1.4E-8 南北:1 9E-9 水平平均:5.2E-9	1.4E-11	0.4	泥岩6)	・稚内層浅部と同様、異方性を考慮 ・ケースAの7.3E-10に稚内層浅部の割合を反映	
	増幌層~古第三系	5 0E-11	5.0E-11	0.1	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>	
	白亜系	5 0E-12	5.0E-12	0.1	礫質土· 砂質土 <sup>1)</sup>	<ul> <li>透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>	
断層·	低透水性	2.7E-10 1 0E-07			泥 出 <sup>6)</sup>	<ul> <li>・透水係数:低透水性;大曲断層の透水係数「19~3.5E-10(ms<sup>1</sup>)」の対数平均値を</li> <li>適用<sup>9)</sup>,高透水性;HDB-1~11の水理試験結果の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>8)</sup>など)</li> </ul>	
	高透水性			0.0	泥岩"		

表 4.4-10 設定条件 C における各地層の物性値

1)財団法人国土技術センター (2002), 2)産業技術総合研究所 (2010), 3)今井・山下 (2001), 4)NAGRA (2010), 5)Ishii et al. (2011), 6)竹下 (1990), 7)Ishii (2018), 8)株式会社安藤・間 (2014), 9)電力中央研究所 (2011)

水理地質構造区分		透水係数	(ms <sup>-1</sup> )		不飽和 特性曲線	
		水平方向 (断層面 方向)	鉛直方向 (断層面直交 方向)	有効 間隙率		備考
更別層		6 5E-09	6.5E-09	0 55	礫質土• 砂質土 <sup>1)</sup>	<b>声問層の値で統一</b>
	勇知層	6 5E-09	6.5E-09	0 55	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	声問層の値で統一
	声問層	6 5E-09	6.5E-09	0 55	泥岩 <sup>2)</sup>	<ul> <li>透水係数<sup>3</sup>:HDB-3, 6, 8, 10, PB-V01の声問層中の対数平均値から設定</li> <li>有効間隙率<sup>4)</sup></li> </ul>
	稚内層浅部	6 5E-09	6.5E-09	0 55	泥岩 <sup>2)</sup>	声問層の値で統一
	稚内層深部	6 5E-09	6.5E-09	0 55	泥岩 <sup>2)</sup>	声問層の値で統一
	増幌層~古第三系	6 5E-09	6.5E-09	0 55	礫質土・ 砂質土 <sup>1)</sup>	声問層の値で統一
		6 5E-09	6.5E-09	0.55	礫質土·	声問層の値で統一
日里糸		6 5E-09	6.5E-09	0.55	砂質土 <sup>1)</sup>	
断層	低透水性	2.7E-10 1.0E-07		0.3	泥岩 <sup>2)</sup>	<ul> <li>・透水係数:低透水性:大曲断層の透水係数「19~35E-10(ms<sup>1</sup>)」の対数平均値を 適用<sup>5)</sup>,高透水性:HDB-1~11の水理試験結果の対数平均値を設定</li> <li>・有効間隙率:既往検討に基づき設定(文献<sup>6)</sup>など)</li> </ul>
	高透水性					

表 4.4-11 設定条件 D における各地層の物性値

1)財団法人国土技術センター (2002), 2)竹下 (1990), 3)NAGRA (2010), 4)Ishii et al. (2011), 5)電 カ中央研究所 (2011), 6)株式会社安藤・間 (2014)

表 4.4-12 には、断層の透水係数の設定値(低透水性/高透水性)に対して、モデル化した断層 幅を考慮して算出した断層の透水係数(断層面方向・断層面直交方向)を示した。

	文南	伏 <sup>11)</sup>		モデル化断層幅考慮		
きょう ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・ション・		`禾- <i>山 仄 粉</i>	モデル化した	透水係数	係数(ms <sup>-1</sup> )	
	断僧幅 <sup>^</sup> (m)	远小孫致 (ms <sup>-1</sup> )	剧 (m)	断層面方向	断層面 直交方向	
低透水性	150	2.7E-10	10	1.8E-11	1.8E-11	
高透水性	150	150 1.0E-07		1.5E-06	1.5E-06	

表 4.4-12 モデル化した断層幅に応じた断層の透水係数

\*大曲断層の地下250m付近での幅150mを適用

### (4)解析結果

前述した三次元解析メッシュと設定パラメータを用いて、地下水流動の感度解析およびパーティクルトラッキング解析を実施し、動水勾配分布および涵養域から指定点までの地下水の移行時間を取得した。なお、動水勾配については、パーティクルトラッキング解析の指定点から1タイムステップ進んだ地点におけるダルシー流速と透水係数から算出した。地下水の移行時間については、ダルシー流速から算出された、有効間隙率を考慮しない移行時間を用いた。解析結果について、平面図はモデル化・解析領域、断面図はDD-1 孔および HDB-6 孔を通る東西断面(図 4.4-10 の EW1 断面) での結果を示す。



図 4.4-10 解析結果断面位置(現在の地質モデルにおける地表面の地質分布)

#### 1) 地形の発達に着目した解析

地形・地質モデルについて、現在、33万年前、100万年前の3つのパターンで解析を実施した。 各解析パターンにおける動水勾配分布について、図 4.4-11 には断面図を、図 4.4-12 には標高-1,000 m における平面図を示した。また、移行時間分布についても同様に、断面図と平面図をそ れぞれ図 4.4-13、図 4.4-14 に示した。なお、地形・地質モデル以外のパラメータは、気候は温 暖期、断層の透水性は低透水、岩盤の透水性は設定条件 A の値で統一した。

図 4.4-11 および図 4.4-13 より、全体的な傾向として、深部ほど動水勾配が小さく地下水の移 行時間が長いことがわかる。また、図 4.4-12 および図 4.4-14 の平面図でも認められるように、 適用する地形・地質モデルの年代が古いほど深部の動水勾配は小さく、移行時間は長い。この傾 向は対象地域の西側で特に顕著である。これは、過去の地形・地質モデルにおいて汀線が現在よ りも内陸側に位置するため、対象地域西側の領域が海面下に位置し、天水浸透の影響を受けにく くなったことによると考えられる。

現在の動水勾配分布において、大曲断層下盤側(西側)の稚内層浅部(WkU)に、相対的に動 水勾配の小さい領域が認められる(図 4.4-11)。これは、大曲断層の透水係数を低透水性の値に 設定しているために、相対的に動水勾配が大きい上盤側の領域の影響が下盤側に及びにくくなっ ているためと考えられる。「3)断層の透水性の違いに着目した解析」で後述するが、大曲断層を高 透水性に設定した場合にはこの領域は消失することからも、上記の考えが支持される。また、地 形・地質モデルを現在の状態に設定した場合、更別層(Sb)に動水勾配の小さい領域が認められ る(図 4.4-11)。これは、同領域の東側に位置する、更別層に比べて透水係数の低い勇知層(Yc) の影響を受けて、更別層内に地下水の滞留しやすい領域が形成されているものと考えられる。「4) 稚内層の透水異方性の違いに着目した解析」で後述するが、すべての地層において透水係数を声 問層の値に設定した場合には同領域は消失することから、地層の透水係数の違いの影響を反映し ているものと推測される。地下水の移行時間については、現在および33万年前の地形・地質モデ ルの場合、大曲断層西側の声問層(Kt)において、周囲よりも相対的に移行時間の短い領域が地 表から標高-1,000 m 近くまで分布する(図 4.4-13)。これは、周囲よりも相対的に透水係数の高い声問層を通じて天水が浸透しうることを示唆している。なお、100万年前の地形・地質モデルの場合にこのような傾向が認められないのは、声問層の上部が相対的に低透水性である勇知層によって覆われていること、ならびに汀線位置の内陸側への移動の影響によるものと考えられる。

以上の結果より、地形の発達が地下水流動に与える影響としては、汀線位置の変化にともなう 沿岸域の地下深部での動水勾配および地下水移行時間の変化が挙げられる。





Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在/33 万年前/100 万年前、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-12 標高-1,000 m における動水勾配分布の平面図の比較 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在/33万年前/100万年前、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件



図 4.4-13 移行時間分布の断面図の比較

Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在/33 万年前/100 万年前、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-14 標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在/33万年前/100万年前、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A

### 2) 気候の違いに着目した解析

気候の影響について、温暖期と寒冷期の2つのパターンで解析を実施した。各解析パターンに おける動水勾配分布について、図 4.4-15 には断面図を、図 4.4-16 には標高-1,000 m における平 面図を示した。また、移行時間分布についても同様に、断面図と平面図をそれぞれ図 4.4-17、図 4.4-18 に示した。なお、気候以外のパラメータは、地形・地質モデルは現在、断層の透水性は低 透水、岩盤の透水性は設定条件Aの値で統一した。

動水勾配分布の断面図の比較(図 4.4-15)から、温暖期と比べると寒冷期では、動水勾配の小 さい領域が更別層全体に広がっている。また、大曲断層の上盤側(東側)における動水勾配も寒 冷期のほうが小さく、特に同断層に沿った標高約-500 m までの声問層および稚内層浅部におい て、周囲よりも動水勾配の小さい領域が認められる。地下水の移行時間についても、温暖期では 地表付近の値が 10<sup>2</sup> 年オーダーであるのに対し、寒冷期では地表から標高-500 m までおおむね 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> 年オーダーの範囲にある(図 4.4-17)。標高-500 m よりも深部では、サロベツ断層から 大曲断層までの間には温暖期と寒冷期で大きな差は見られないが、対象領域の西側および大曲断 層の東側において、寒冷期のほうがより長い移行時間を示している(図 4.4-18)。

一般的に寒冷期には、海水準の低下にともない動水勾配が増加すると考えられている(核燃料 サイクル機構,1999)。しかし、今回の解析ではそれとは逆の結果が得られた。これは、解析にお いて寒冷期の涵養量を0mm/年相当とし、また河川には水が流れていないと設定したことによる と考えられる。すなわち、地上からの涵養がきわめて少ないため、パーティクルトラッキング解 析において設定された指定点の移動がほとんど起こらず、低い流速値が算出されたと考えられる。 本解析での動水勾配は、ダルシー流速と地層の透水係数をもとに算出されている。そのため、更 別層、声問層、稚内層浅部といった相対的に高透水性の地層で動水勾配が低くなるなど、地層の 分布を反映した動水勾配分布を示したと考えられる。

以上の結果より、気候の違いが地下水流動に与える影響としては、寒冷期において相対的に高 透水性の地層で動水勾配が小さく、また地下水の移行時間が長くなることが挙げられる。ただし、 これは本解析の設定条件を反映した結果である可能性があることに留意する必要がある。



図 4.4-15 動水勾配分布の断面図の比較 Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期/寒冷期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-16 標高-1,000 m における動水勾配分布の平面図の比較
 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層
 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期/寒冷期、
 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-17 移行時間分布の断面図の比較 Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期/寒冷期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-18 標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期/寒冷期、 断層の透水性:低透水、岩盤の透水性:設定条件 A

## 3) 断層の透水性の違いに着目した解析

断層の透水性の影響について、高透水と低透水の2つのパターンで解析を実施した。各解析パターンにおける動水勾配分布について、図 4.4-19 には断面図を、図 4.4-20 には標高-1,000 m における平面図を示した。また、移行時間分布についても同様に、断面図と平面図をそれぞれ図

4.4-21、図 4.4-22 に示した。なお、断層の透水性以外のパラメータは、地形・地質モデルは現在、 気候は温暖期、岩盤の透水性は設定条件 A の値で統一した。

動水勾配および移行時間のいずれにおいても、断層の透水性の違いに由来する大局的な分布の 違いは認められない(図 4.4-19~図 4.4-22)。局所的には、以下の相違点が認められる。「1)地形 の発達に着目した解析」で前述したように、大曲断層の透水係数を低透水性の値に設定した場合 には、下盤側の稚内層浅部に相対的に動水勾配の小さい領域が形成されたが、断層を高透水にし た場合にはこれが消失している。また、サロベツ断層西側の標高約-800 m 以深においても、断層 を高透水性に設定したほうが、動水勾配の大きな領域がより広範囲に分布している。地下水の移 行時間に関しては、断層の透水係数を高透水性の値に設定した場合、大曲断層下盤側の稚内層深 部における移行時間が1 オーダー程度短くなっている(図 4.4-21)。これは、断層の透水係数の 変化を反映したものであると考えられる。

以上の結果より、断層の透水性の違いが地下水流動に与える影響としては、透水係数を高い値 に設定した場合のほうが断層周辺の動水勾配が大きく、また移行時間が短くなることが挙げられ る。ただし、この影響が及ぶ水平方向の範囲は断層から最大でも1km程度であり、本解析で設 定した 10km×20km 程度の領域における動水勾配や移行時間の分布を大局的に変化させるも のではない。



Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水/高透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-20 標高-1,000 mにおける動水勾配分布の平面図の比較
 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層
 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期、
 断層の透水性:低透水/高透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-21 移行時間分布の断面図の比較 Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水/高透水、岩盤の透水性:設定条件 A



図 4.4-22 標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期、 断層の透水性:低透水/高透水、岩盤の透水性:設定条件 A

## 4) 稚内層の透水異方性の違いに着目した解析

稚内層の透水異方性の影響について、4つの設定条件で解析を実施した。設定条件Aは透水異 方性を考慮しないもの、設定条件Bは稚内層浅部のみに透水異方性を設定したもの、設定条件C は稚内層の浅部・深部両方に透水異方性を設定したもの、設定条件Dはすべての地層の透水係数 を声問層と同じ値に設定したものである。各パターンにおける動水勾配分布について、図 4.4-23 には断面図を、図 4.4-24 には標高-1,000 mにおける平面図を示した。また、移行時間分布につ いても同様に、断面図と平面図をそれぞれ 図 4.4-25、図 4.4-26 に示した。なお、断層の透水性 以外のパラメータは、地形・地質モデルは33 万年前、気候は温暖期、断層の透水性は低透水の値 で統一した。本来であれば、現在の地形・地質モデルで比較すべきであるが、設定条件Bおよび 設定条件Cの解析結果は収束条件が悪いため対象から除外している。33 万年前の地形・地質モ デルの汀線位置は、現在と比較して東側(内陸側)にあるため、現在の地形・地質モデルの場合 の解析結果とは異なるが、ここでは、西側の稚内層が分布する領域に着目する。

設定条件 A に対して設定条件 B および設定条件 C を比較すると、設定条件 B では稚内層浅部 のみ、設定条件 C では稚内層の浅部および深部において、動水勾配が小さくなっている(図 4.4-23)。これは、稚内層に透水異方性を設定したことにより、鉛直方向の透水係数が設定条件 A と比べて低くなっていること(表 4.4-8~表 4.4-10)によるものと考えられる。地下水の移行時 間について、設定条件 B の場合、大曲断層東側における稚内層浅部と深部の境界付近では移行時 間が 1 オーダー程度長くなっている一方で、大曲断層近傍の標高-500~-700 m 付近ではむしろ 移行時間が短くなっている(図 4.4-25)。これは、稚内層に透水異方性が設定され、東西方向に ついては設定条件 A に比べてむしろ透水係数が増加したことにより(表 4.4-8~表 4.4-10)、大 曲断層を通じての地下水流動の影響が及ぶようになったためと考えられる。設定条件 C では、大 曲断層東側の標高約-600 m 以深における移行時間が設定条件 A よりも 1 オーダー程度長くなっ ている(図 4.4-25)。なお、設定条件 A から C までで、標高-1,000 m での移行時間分布には大 きな相違点は認められない(図 4.4-26)。 設定条件 D では、すべての地層の透水係数を声問層と同じ値に設定した。設定条件 A と比較 すると、対象領域の東側では動水勾配の分布に大局的な差はないことから(図 4.4-23、図 4.4-24)、 この領域の分布は主に地形(大曲断層など)に起因するものと考えられる。一方、西側の領域で は、勇知層の動水勾配が設定条件 A に比べて大きくなっている(図 4.4-23、図 4.4-24)。また、 「1)地形の発達に着目した解析」で前述したように、現在の地形・地質モデルにおいて設定条件 A で見られた更別層の低動水勾配領域が、設定条件 D では消失している(図 4.4-27)。これらは 地層の透水係数の違いを反映しており、特に勇知層の透水係数が相対的に低いことに起因してい ると考えられる。また、地下水の移行時間を比較すると、設定条件 D では地表付近の更別層で移 行時間が長く、また大曲断層周辺の勇知層および稚内層深部で移行時間が短くなっている(図 4.4-25)。前者は更別層の透水係数( $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ )が声問層の値( $6.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ )の透水係数 が声問層の値への変化により増加したことによるものと解釈される。

以上の結果より、地層の透水性の違いが地下水流動に与える影響としては、透水異方性が設定 され鉛直方向の透水係数が低くなることにより、基本的にはその領域の動水勾配が小さく、また 地下水の移行時間が長くなることが挙げられる。ただし、透水異方性の設定により水平方向の透 水係数が高くなる場合には、断層を通じての地下水流動の影響を受けて移行時間が短くなること も確認された。



図 4.4-23 動水勾配分布の断面図の比較 Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部 地形・地質モデル:33万年前、気候:温暖期、断層の透水性:低透水、 岩盤の透水性:設定条件 A/設定条件 B/設定条件 C/設定条件 D



図 4.4-24 標高-1,000 m における動水勾配分布の平面図の比較 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:33 万年前、気候:温暖期、断層の透水性:低透水、 岩盤の透水性:設定条件 A/設定条件 B/設定条件 C/設定条件 D



図 4.4-25 移行時間分布の断面図の比較 Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部 地形・地質モデル:33万年前、気候:温暖期、断層の透水性:低透水、 岩盤の透水性:設定条件 A/設定条件 B/設定条件 C/設定条件 D



図 4.4-26 標高-1,000 m における移行時間分布の平面図の比較 Yc:勇知層、Kt:声問層、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:33 万年前、気候:温暖期、断層の透水性:低透水、 岩盤の透水性:設定条件 A/設定条件 B/設定条件 C/設定条件 D



図 4.4-27 動水勾能分布の断面図の比較 Sb:更別層、Yc:勇知層、Kt:声問層、WkU:稚内層浅部、WkL:稚内層深部、Mp:増幌層 地形・地質モデル:現在、気候:温暖期、断層の透水性:低透水、 岩盤の透水性:設定条件 A/設定条件 D

#### (5)施設スケール領域における地下水流動解析

本事業では、広域地下水流動解析により天水の浸透の影響を受けない領域の分布を推定し、 これをクリギングにより推定した塩濃度や同位体組成の高い領域の分布や、地下水年代測定 の結果と比較・補完することで、低流動域の分布の推定を試みる。ここでは、解析における 初期条件や境界条件の設定にあたり、幌延地域における古水理地質学的情報をもとに、幾つ かの仮定を設定し、施設スケールを対象に地下水流動解析を実施した結果について述べる。

## 1) はじめに

地下浅部の重力流支配下の水理環境では、一般的には原位置で取得された水頭分布の再現 により、水理モデルの検証が試みられている。一方、深部の地下水流動場においては、異な る地下水起源、異なる駆動力が複雑に影響する複数の地下水システムが存在する可能性があ るため、水頭のみのデータによる検証は困難であることが指摘されている(酒井ほか,2011 など)。地下水システムの水理的連続性が保証されない範囲において、水理地質構造モデルに 平均的な水理パラメータと一定の涵養量を与え、地形のみによる重力流支配を前提とした地 下水流動解析がなされた場合、算出された水理水頭値は観測データと異なる可能性が生じる (産業技術総合研究所,2007)。これは、対象地盤内において水理的不均質や異方性に由来す る難透水層が存在すると、その構造を境として深部地下水は浅部の地下水流動系と分断され、 浅部とは異なる流動系が保持されている可能性があるためである。このような考えから、酒 井ほか(2011)では、幌延地域を対象として、各地下水システムの流動特性(重力流以外の 駆動力の有無や地下水流速の大小、流動方向)、地下水システム間の流動境界(局所~広域流 動系の各流動系間の境界、あるいは広域流動系と停滞性の深部地下水との境界)の有無・位 置を、水理モデルの検証項目とすることを提案している。

昨年度に実施した広域地下水流動解析では、海水相当あるいは海水の半分の塩化物イオン 濃度の地下水が天水により洗い出されるモデル解析を実施し、海水の半分の塩化物イオン濃 度の場合、一部のボーリング孔において塩化物イオン濃度の深度分布が、地下水流動解析に より良く再現される結果が得られた。その理由として、本地域の地下深部の地下水中の塩化 物イオン濃度が、おおよそ海水の半分程度であることが考えられるが、海水の半分程度とは 異なる塩化物イオン濃度の分析結果が得られているボーリング孔においては、地下水の分析 結果と整合した地下水流動解析の結果が得られていない。天水による洗い出しの影響を受け る浅部の流動系とほとんど影響を受けない深部の流動系との境界については、地下水流動解 析によりボーリング調査による観測結果とおおよそ整合的な結果が得られていた。しかしな がら、本地域の地下深部の流動系のように非常に遅い地下水の流れでは密度の違いによる重 力流(密度流)や、地下深部で観測される最大 150 m 程度の異常高圧の影響を考慮する必要 があると考える。

今年度は、はじめに、地下水中の塩濃度の初期分布を推定するための基礎情報として、本 地域の地下水の水質形成機構について既存の情報などを整理した。次に、地上からのボーリ ング孔が多く存在する地下施設周辺領域について、ボーリング調査結果を用いてクリギング を行い、施設スケール領域における天水の浸透開始前の地下水中の塩濃度分布および地下水 圧分布を推定した。最後に、これらを用いて密度流を考慮した地下水流動解析を実施し、そ の結果を地上からのボーリング調査で得られた天水浸透の影響を受けたと推定される領域の 分布と比較することで、水理モデルおよび地下水流動解析による、現在認められる地下での 塩濃度分布の解釈を試みた。

#### 2) 水質形成機構

寺本ほか(2006)は、地上からのボーリング調査時に得られたコア試料からの圧縮抽出水 の酸素・水素同位体組成の分析結果を用いて、本地域の地下水が、堆積当時に取り込まれた 海水、氷期に地表から涵養された天水、最終氷期以降に涵養された天水の3つの端成分を持 つことを報告している。また、酒井ほか(2012)では、地下水の水質分析結果を用いた主成 分統計解析により、地下水を構成する4つの端成分を抽出し、本地域の水質形成機構は不明 であるものの、天水起源の地下水混合系とは区別される地下水流動系が地下深部に存在する ことを述べている。端成分としては、天水の他に、HDB5の深部地下水に代表されるような 高い酸素・水素同位体比と低い塩濃度を特徴とする地下水、HDB7の深部地下水に代表され るような高い酸素・水素同位体比と高い塩濃度を特徴とする地下水などが抽出されている。 そして、これまでに想定されているような現海水相当の塩濃度の地下水が地層中に分布し、 地表から天水によって洗い出されるような単純なモデルではなく、もともと現海水とは地下 水組成が異なる3種類の深部地下水の混合によって、本地域の西から東に向かって塩濃度が 低下するような地下水分布が存在し、その後、深度 200 m~450 m まで天水による希釈が進 み、現在見られるような水質分布が形成されたと推定されることを報告している。また、深 部地下水は100万年以上の長い地下水年代を示すことや、熱的に流動の兆候がほとんど見ら れないことなどから、地表から洗い出しが始まる 30~25 万年前頃までにはすでに深部地下 水分布域では現在と同様な塩素濃度プロファイルがすでに形成されていたと考えられること を述べている。さらに、地下水中の微量元素濃度を調べ、深部の地下水が大曲断層を通して 地表に湧出している可能性が指摘されている。

幌延地域は、北海道北部に位置する新第三系から第四系の堆積層に覆われた堆積岩地域で あり、地下施設近傍は、稚内層(主にオパール CT よりなる珪質泥岩)、声問層(主にオパー ルAよりなる珪藻質泥岩)、勇知層(細粒砂岩)、更別層(礫・砂・シルト・泥・亜炭の互層) および更新世末~完新世の堆積物により覆われている。本地域において石油資源開発の目的 で掘削された深層ボーリング(基礎試錐「天北」)によると、稚内層以深においても深度約5000 m 以深まで堆積岩が分布しており、下部から順に白亜紀の蝦夷層群(砂岩と泥岩の互 層)、白亜紀の函淵層群(砂岩と泥岩の互層、凝灰岩、石炭層)、古第三紀の羽幌層(砂岩、 泥岩、石炭層)、古第三紀の曲淵層(砂岩と泥岩の互層)、新第三紀の増幌層(礫岩、砂岩、 泥岩)が分布している(Miyakawa et al., 2013)。本地域には、西傾斜の逆断層である大曲断 層が北西-南東に走り、その東側では背斜構造が形成されている。中央部の背斜部でも深度2 km まで珪藻質泥岩が分布し、南西では珪藻質泥岩の基底部が深度4kmに達するなど、堆積 岩が広く厚く分布している。

幌延地域における地質環境の長期変遷については、岩月ほか(2009)においてまとめられ ている。地下施設近傍の領域は、約 21 万年前の間氷期に浅海域に面していた可能性や、ま た、10~100 万年の間に、汎地球的な海水準変動変動の他に、褶曲作用によっても海岸線の 位置が変動してきた可能性が示唆されており、涵養する地表水の水質も時代ごとに淡水から 海水までの範囲で変動してきたことが推察されている。また、約 2 万年前の最終氷期の最寒 冷期では、本地域は不連続的永久凍土帯に属していたことが報告されており、氷期・間氷期サ イクルを通じた降水量や地下水位、涵養量の変動が生じていたことが推察されている。一方 で、地下水の動水勾配に影響を与え得る表層地形変化の様式(古地形)に関しては、詳細は 不明である。

大曲断層とその近傍の褶曲構造は約 2.2~1.0 Ma の間に始まり、0.3~0.2 Ma には終了し ていたと考えられている(岩月ほか,2009)。声問層と稚内層は、約 1.3~1.0 Ma の間に最 大埋没し、その後に隆起に転じた(石井ほか,2008)。堆積に伴う地層の圧密については、13 ~1 Ma の間の現象と考えられ、両層の見かけの空隙率の減少は、3/4~1/2 と推察されてお り、稚内層ではシリカの続成作用によりオパール A からオパール CT への相変化により圧密 の程度が大きい(岩月ほか,2009)。稚内層下部では、シリカの続成作用により、オパール CT から石英への相変化が見られる。増幌層以深では、スメクタイトからイライトへの粘土鉱物 の相変化が確認されている。これらの相変化の主要因は温度であると推定されている(甲斐・ 前川,2009)。

声問層や稚内層などの本地域の堆積層は海成層であり、堆積時には間隙中に海水が含まれ ていたと考えられるが、地層の埋没過程では、圧密により間隙率が低下し、間隙から押し出 された水は上部へ押し出されることが考えられる。Togo et al. (2016)は、本地域の地下水や 岩石中のヨウ素濃度および同位体比(<sup>129</sup>I/<sup>127</sup>I)を調べ、堆積盆の発達に伴う下位層からの間 隙水の上昇移動が示唆されることを報告している。さらに、埋没過程では、シリカ鉱物の相 変化に伴って間隙率が減少するが、その際に結晶水が間隙中に放出される。このように、堆 積層の埋没過程では、間隙中の地下水は、続成作用に伴う深部からの上昇流により、置換や 混合などの影響を受けることが考えられる。ただし、地層が隆起に転じた後では、続成作用 の影響は弱まると考えられるが、一方で、褶曲運動などのネオテクトニクスや泥岩の持つ半 透膜性による化学的浸透圧により圧力勾配が生じ、断層周辺などの局所的な高透水性領域を 通して、深部から上昇流が生じている可能性が考えられる。

図 4.4-28 と図 4.4-29 に地上からのボーリング調査時に得られたコア試料からの圧縮抽出 水の酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度(天野ほか,2012)と深度の関係図を示す。図 中の深度 0 m は、声問層と稚内層との地層境界を意味する。HDB10 孔を除いて、各孔とも 深部では酸素・水素同位体比がそれぞれ 0‰と-30‰より高い値を示しているが、塩化物イオ ン濃度については、場所により大きく異なることが分かる。大曲断層の近傍あるいは東側に 位置する HDB2、HDB4、HDB5、HDB8、SAB2 では、深部においても塩化物イオン濃度は 6000ppm 未満である。一方で、西側に位置する HDB1、HDB3、HDB6、HDB11、PB-V01、 SAB1 の深部では、塩化物イオン濃度は 9000~12000ppm を示す。このように、酸素・水素 同位体比から天水浸透の影響を受けていないと判断されるような地下水においても、塩化物 イオン濃度は場所により大きく異なる。このような水質変化は、地層の埋没時の続成作用に 伴うシリカの相変化による脱水反応が要因の一つとして考えられている(甲斐・前川, 2009)。 岩月ほか(2009)では、声問層から稚内層にかけてのオパール A からオパール CT への相転移 の際の脱水反応のみでは、観察される塩濃度変化を説明できないことを述べており、一方で、 甲斐・前川(2009)では、稚内層以深におけるシリカの相変化による脱水反応も考慮すること により、観察される塩濃度変化を説明しようと試みている。

本地域における地下水の水質形成機構について整理するために、図 4.4-30 に各孔における 間隙水中の酸素・水素同位体比と深度の関係を示す。HDB から得られた間隙水の値は、正の 傾きを持つ直線関係を持ち、主に2成分の混合を示していると考えられる。沿岸域における ボーリング調査で得られた値(DD1)については、HDBから得られた値と比較して、端成分 の1つが海水により近い値を示す。図中の天水線は、寺本ほか(2006)により北海道石狩市厚 田区における降水のデータを用いて作成された回帰直線であり、傾き 7.0、切片が 6.9、R<sup>2</sup>が 0.9 と報告されている。また、地下水データに重ねて図示される直線は、HDB1 と HDB3 の 深部のデータを用いた回帰直線である。寺本ほか(2006)は、これらの直線が天水線と交わる 点(δ<sup>18</sup>**O**=-13.1‰、δ<sup>2</sup>**H**=-85.3‰)が過去の氷期の天水を代表する表層水とすることで、 本地域の地下水が、現在の天水(δ<sup>18</sup>O=-10.2‰、δ<sup>2</sup>H=-64.4‰)と氷期の天水、堆積時に 地層中に取り込まれた海水の三つの端成分から形成されることを述べている。このうち、堆 積時に地層中に取り込まれた海水とは、上述の続成作用により変質した海水を起源とする地 下水のことを指す。寺本ほか(2006)は、過去の氷期の天水を代表する酸素・水素同位体比の 値が、現在の天水を代表する表層水の値と比較して、酸素同位体比について約3‰、水素同 位体比について約 10‰小さいことから、現在より 5℃寒冷な気候の下で HDB1 や HDB3 の 回帰直線に代表されるような混合線が形成された可能性を述べている。同様の結果は、本地 域の沿岸域におけるボーリング調査からも報告されている(Ikawa et al., 2014)。

本事業において取得した本地域における約1年間の天水の酸素・水素同位体比と、これま での幌延深地層研究計画において得られた天水の酸素・水素同位体比(天野ほか,2012)を 用いて、本地域における天水線を求め、図 4.4-30 を更新したものを図 4.4-31 に示す。幌延 地域において得られた天水線は、傾きが 7.1、切片が 3.8、R<sup>2</sup>が 0.9 であり、寺本ほか(2006) で報告された石狩市厚田区における天水線と同様の結果が得られた。図中の URL は、地下 施設を利用して得られた地下水の分析結果(笹本ほか, 2015; 宮川ほか, 2017)である。先 に述べたように、続成作用により変質した海水は、主にシリカ鉱物からの脱水により希釈さ れ、同時に酸素・水素同位体比が海水と比較して重くなったものと考えられる。シリカの続 成作用による脱水反応については、オパール CT から石英に相転移する際に放出される量が、 その他の相転移と比較して、最も多いと考えられている。図 4.4-31 に Opal-CT として示さ れる値は、Knauth and Epstein (1974)で報告される深海底掘削で得られた海底堆積物中の オパール CT の分析結果である。図中の Silica water equilibrated with opal-CT の値は、石 英と水の酸素同位体分別係数(Kawabe, 1978)と粘度鉱物と水の水素同位体分別係数(Yeh, 1980)を用いて、40~60℃における Opal-CT と同位体交換平衡にある水の値を推定したも のである。続成作用により海水が変質による影響を受ける過程は、図中の海水の値(δ<sup>18</sup>O=  $0^{\infty}$ 、 $\delta^2$ H = 0<sup>\infty</sup>) と Silica water equilibrated with opal-CT の値とを結ぶ混合線で一次的 に近似されると考えられる。本地域に存在する上幌延泥火山から湧出する地下水は、白亜紀 の堆積層から湧出している可能性が示されており(Miyakawa et al., 2013)、その酸素・水 素同位体比は、Silica water equilibrated with opal-CT で示される値に近い値を示す。HDB や URL で示される変質した海水と氷期の天水とを結ぶ混合線の下側にデータが存在しない ことは、海水がシリカ鉱物からの脱水反応の影響を受ける過程と、天水が地下水と混合する 過程が同時に起きていないことを示していると考えられる。また、HDBや URL のデータが 含まれる地下施設周辺領域では、変質した海水と氷期の天水とを結ぶ混合線の直線性が比較 的良いことから、地層の隆起・侵食の際に海水準の変動に伴い海水が地下に涵養される影響 もあまり見られないことが分かる。現在の表層水の涵養についても、地下施設周辺領域から 得られる混合線の上部にあまりデータが存在しないことからも、影響領域は限定的であると 考えられる。

本地域の地下施設周辺領域における水質形成機構について、主要なプロセスをまとめると 次のようになる:(i) 地層の堆積時に間隙中に含まれていた海水が、地層の埋没時の続成作用 に伴うシリカの相変化の脱水反応による希釈プロセス。このプロセスは、1.3~1.0 Ma 頃ま で続いたと考えられる。(ii) 地層の隆起・浸食に伴い岩盤中に透水性の割れ目が形成され、 地表から天水あるいは海水が地下へ浸透を開始したプロセス。本地域の褶曲構造運動が、約 0.3~0.2 Ma 頃には終了していたと考えられることから、海水が浸透した影響が残されてい ないことを踏まえると、本地域が浅海域に属していたと考えられる約 0.2 Ma 以降の氷期に 天水が浸透した可能性が考えられる。以上のことから、地下水流動解析の初期条件として、 現在と同じ地形の水理地質構造モデルが、天水の影響を受けていないシリカ続成作用の影響 を受けて変質した海水で満たされた状態を考える。約 0.2 Ma に天水の浸透が開始したと考 えると、解析期間は 20 万年程度が目安となる。





図 4.4-29 各孔における間隙水中の δ<sup>18</sup>O と Cl<sup>-</sup>濃度、深度の関係図 深度は、稚内層と声問層の地層境界を 0 m とした



义

## 3)施設スケール領域における地下水流動解析

### ① 解析モデル

モデル化領域は、昨年度と同様に、過去の検討結果(下茂ほか,2005)を踏襲し、モデル 境界を地形解析により抽出した流域界や河川、海岸線とし、図 4.4-32 に示す広域スケール領 域の中に、施設スケール領域を設定した。モデルの鉛直方向の範囲は、地表面から標高-1900 mまでとした。解析メッシュについては、昨年度に用いた施設スケールの解析メッシュの中 から、深度方向に地表面から 25 層分の三次元解析メッシュを抽出し、これを今年度の解析 に用いた。一層当たりの要素数は、1228 点であり、総要素数は、30700 点である。水理地質 モデルについても、昨年と同じものを用いた。地層区分としては、更別層以浅、勇知層、声 間層、稚内層浅部、稚内層深部、増幌層以深、大曲断層が反映されている。稚内層の浅部と 深部は Ishii (2018)に従い、Ductility Index = 2 を基準として区分した。表 4.4-13 に、解析 で用いた各地層の物性値を示す。



図 4.4-32 モデル化領域および地形概況

水理地質構	透水係数(ms <sup>-</sup>	有効	供考	
造区分	1)	間隙率	加方	
			透水係数 <sup>2)</sup> : 「深度 0~250m : 10 <sup>·5</sup> (ms <sup>·1</sup> )オーダー, 深度 250~	
更別層	1.0E-06	$0.45^{(1)}$	470m : 10 <sup>.7</sup> (ms <sup>.1</sup> ) オーダーの値」の対数平均値を設定	
勇知層	9.4E-10	$0.44^{(3)}$	透水係数 <sup>4)</sup> : HDB-1~11 の対数平均値を設定	
- 古問國	6 5F-09	0.553)	透水係数 <sup>4)</sup> : HDB-3, 6, 8, 10, PB-V01 の声問層中の対数平均	
广旧归	0.5E 05	0.00	値から設定	
			透水係数 4) : HDB·1,4~6,8~11,PB·V01の対数平均値から設	
稚内層浅部	1.0E-07	$0.4^{(3)}$	定、ただし、HDB-9 の 216.9 m 以深のデータは大曲断層の影響を	
			考慮し除外	
			透水係数 <sup>4)</sup> : HDB-1, 3, 5, 6, 8, 11, PB-V01 の対数平均値か	
稚内層深部	7.3E-10	$0.4^{(3)}$	ら設定、ただし、HDB-9 の 216.9 m 以深のデータは大曲断層の影	
			響を考慮し除外	
増幌層以深	5.0E-11	0.1	透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づく推定値	
大曲断層	1.0E-07	0.3	透水係数及び有効間隙率:既往検討に基づく推定値	
	- (			

表 4.4-13 各地層の物性値

1) 今井・山下 (2001)、2) 産業技術総合研究所 (2010)、3) Ishii et al. (2011)、4) NAGRA (2010).

# ② 境界条件および計算方法

塩分を含む地下水によりモデル内部が満たされており、これが地表面からの天水の浸透に より洗い出される過程をシミュレーションした。地表面には、120.5 mm/年の淡水の涵養量 (操上ほか,2008)を与え、これと接するモデル上面では、大気圧を101300 Paに固定し、 気相飽和度を100%に固定した。モデル側面および底面では、塩濃度および圧力を初期条件 に固定した。地温勾配については、地表面を15℃とし、3℃/100 mの深度依存条件を与えた。 ただし、熱の移動の計算は行わないものとし、水の粘性と密度の温度(深度)依存による変 化を計算した。解析には、多成分・多相系の地下流体流動シミュレータTOUGH3 (Jung et al., 2018)を用いた。EOS7 モジュールを用いて、3 成分(水、塩分、空気)の気液2相流連 成解析を実施した。計算では、先に述べた密度の影響のほかに、塩分の拡散を扱った。拡散 係数は、3.95e-10 m<sup>2</sup>/s を与えた。解析期間については、本地域の隆起が約1 Ma 以降に始ま っており(岩月ほか,2009)、21 万年前以降は少なくとも陸化していたと考えられること(新 里ほか,2007)、および 30~20 万年前には大曲断層およびその近傍の褶曲運動は終了してい たと考えられること(岩月ほか,2009)から、数十万年前には現在と同様の地形構造におい て天水の浸透が開始していたと近似できると考え、最大50 万年とした。

地下水中の初期の塩濃度分布および圧力分布などを変えた4ケースについて、解析を行っ た。解析ケース条件の一覧を表 4.4-14 に示す。ケース1 については、地下水中の初期塩濃度 分布を、続成作用により変質した海水とし、初期圧力分布を地形に応じた静水圧とした。続 成作用により変質した海水の分布については、HDB1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 のボーリング 調査時に得られたコア試料からの圧縮抽出水の酸素同位体比の分析結果の深度プロファイル が、0‰より大きくなる深部の塩濃度データのみを用いて、クリギングにより、モデル領域全 体の塩濃度分布を推定したものになる。ケース2については、地下水中の初期塩濃度分布を 続成作用により変質した海水とし、初期圧力分布を異常高圧を考慮したものにした。異常高 圧を考慮した圧力分布は、HDB1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11のボーリング調査時に得られた水 頭分布データを用いて、モデル領域全体の圧力分布をクリギングにより推定したものになる。 ケース3については、昨年度の地下水流動解析と同様の条件を模したものであり、地下水中 の初期塩濃度分布を海水相当とし、初期圧力分布を静水圧とした。ケース4については、大 曲断層に添うように地表にガス徴や油徴が分布していること(長尾, 1960)や、大曲断層を 境として東西で地下水中の塩濃度分布が大きく異なること(太田ほか,2007)から、大曲断 層の透水性について異方性を与えたものであり、地下水中の初期塩濃度分布や初期圧力分布 は、ケース2と同じである。

ケース	初期塩濃度分布	初期圧力分布	その他
1	変質した海水	静水圧	
2	変質した海水	異常高圧を考慮	
3	海水相当	静水圧	
			大曲断層の透水性
4	変質した海水	異常高圧を考慮	鉛直方向 : 1.0E-7 m/s
			水平方向:1.0E-11 m/s

表 4.4-14 解析ケースの一覧

#### 4) 結果と考察

解析結果の断面図は、全て、図 4.4-32 に示される断面図位置(HDB6 と HDB4 を通る断面)における結果を示す。図 4.4-33、図 4.4-34、図 4.4-35、図 4.4-36 に、それぞれケース 1, 2, 3, 4 の 1000 年、1 万年、10 万年、50 万年における結果を示す。図中のカラーコンターは、海水中の塩濃度で規格化した地下水中の塩濃度(比濃度)を示している。地下水中の塩濃度の初期分布は、全体的におおよそ海水の半分程度であるが、東から西にかけて、塩濃度が増加する傾向になっており、また、大曲断層周辺において塩濃度が低下している。全てのケースにおいて、東西方向における天水浸透領域の広がりについては、ほとんど差が見られないことから、天水浸透領域の水平方向の広がりについては、おおよそ地形により規定されてい

ることが分かる。ケース3の海水相当の塩濃度を初期条件とした場合、天水の浸透深度が明 らかに小さいことが分かる。ケース1と3は静水圧分布であり、ケース2と4は異常高圧を 考慮しているが、これらを比較すると、大曲断層周辺や断面図左側の勇知層の分布するあた りにおいて、天水浸透領域が異なることが分かる。ケース4の大曲断層の透水性に鉛直方向 と水平方向の異方性を持たせた場合では、断層部を通して深部の地下水が上昇し、断層の周 囲では天水が深部まで浸透しやすくなっていることが分かる。



図 4.4-33 ケース1の解析結果 (a)初期状態、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年



図 4.4-34 ケース2の解析結果 (a)初期状態、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年



図 4.4-35 ケース 3 の解析結果 (a)1000 年、(b) 1 万年、(c) 10 万年、(d) 50 万年



図 4.4-36 ケース4の解析結果 (a)初期状態、(b)1万年、(c)10万年、(d)50万年

解析期間1万年~10万年の結果について、図4.3-26に示したクリギングによる塩化物イオン濃度分布と比較すると、ケース4の結果が天水の浸透深度や分布の形について、整合的な結果が得られている。一方で、50万年の結果を見ると、ケース2と4では、特に大曲断層

の東側や断面図左側の勇知層のあたりで天水浸透深度が大きくなっており、ケース1の結果 がクリギングの結果に近い分布を示す。

甲斐・前川(2008)は、本地域において過去から現在までに天水浸透の影響を受けた領域分 布の指標として、岩盤中の黄鉄鉱と炭酸塩の存在度の相対的な変化に着目し、図 4.4-37 中に 青線で示すような分布を提示している。ケース 4 の 1 万年~10 万年の結果が、甲斐・前川 (2008)に示される観察結果に最も近い天水浸透分布を示すことが分かる。したがって、初期 条件や境界条件を含めたケース 4 の水理モデルが、現時点で最も確からしいと考えられる。 本事業で実施したケースは全て、10 万年時点では完全な定常状態には至っておらず、時間の 経過と共に天水が深部へ浸透し、初期の地下水が洗い出される結果が得られている。今年度 の結果には、流線などを図示していないが、地下水がほとんど動いていない領域については、 50 万年時点において天水が浸透していない領域と概ね一致すると考えられる。しかしながら、 数万年を大きく超えるような時間スケールを考える場合、侵食による地形変化の影響を無視 できないと考えられる。このため、長期的な時間スケールの中で生じる地形変化の影響が塩 濃度変化に与える影響も考慮することが重要である。前述した広域スケールでの地下水流動 解析の結果とも合わせて、今後解釈を深めていく予定である。



図 4.4-37 黄鉄鉱・炭酸塩を指標とした天水影響領域(甲斐・前川(2008)を基に作図)

### 5) 施設スケール領域における地下水流動解析のまとめ

地下に高塩濃度を持つ地下水が分布する領域に天水が浸透するような、地下水の流れが遅い領域における地下水流動を扱う場合、密度差による重力流(密度流)や濃度勾配による拡散を考慮する必要がある。そのためには、解析の初期条件として、できるだけ正確な地下水の塩濃度分布を設定する必要があると考える。今年度は、地上からのボーリング調査数の多い施設スケール領域において、塩濃度を指標とした地下水流動解析を実施するにあたり、地下水の塩濃度の初期条件を正しく設定するために、本地域の地下水の水質形成機構などについて整理した。整理した初期条件や境界条件に従った解析結果は、ボーリング調査で得られている観測結果と概ね整合的であることを確認した。

ただし、地下水流動解析により示された天水の浸透の影響を受けていない領域については、 10万年以上の時間スケールを対象とした場合、地下水のほとんど動かない領域とは限られない。また、異常高圧などの圧力分布についても、本解析のようなゆっくりとした地下水流動 を扱う場合には、できるだけ正確に考慮する必要があるものの、今年度は圧力分布の初期条 件や境界条件の妥当性については議論していない。これについても今後の解析における課題 の一つとして検討が必要である。

#### (6) まとめと今後の課題

地下水流動に影響すると考えられるパラメータとして地形の発達(地形・地質モデルの変化)、 気候(海水準および涵養量の変化)、断層と地層の透水性に着目し、それらの影響を感度解析によ り確認した。地形の発達については、汀線位置の変化にともなう沿岸域の地下深部での動水勾配 および地下水移行時間の変化が生じ、海面下に位置した地層では動水勾配が低く、また地下水移 行時間が長くなる結果が得られた。気候については、相対的に高透水性の地層において寒冷期の 動水勾配が小さくなった。これは、寒冷期に動水勾配の増加が生じると想定されている既往の報 告とは逆の結果である。一方で、たとえば今回の解析では、涵養量の減少に寄与すると考えられ る寒冷期の永久凍土の発達について考慮されていないなど、気候変動が地下水流動に与える影響 についてはさらなる検討の余地がある。断層の透水性については、透水係数の変化にともない断 層周辺の動水勾配や移行時間が変化するものの、その影響が及ぶ水平方向の範囲は断層から最大 でも1 km 程度であった。地層の透水性については、透水異方性の適用にともなう鉛直および水 平方向の透水係数の変化を反映して、動水勾配や地下水の移行時間にも変化が認められた。

以上の結果をふまえると、対象領域西側の沿岸域では地形の発達にともなう汀線位置の変化の ため、また大曲断層の周辺では断層や地層の透水係数の変化のために、動水勾配や移行時間が比 較的大きく変化したといえる。前者については、今回の解析で実施したように汀線が内陸側へ移 動した場合には、動水勾配の低下や移行時間の増加が想定される一方で、地層の隆起等により汀 線が海域側へ移動した場合には、それとは逆の地下水流動の変化が生じる可能性がある。また、 上記以外の領域、すなわちおおよそサロベツ断層から大曲断層までの範囲では、動水勾配や移行 時間の絶対的な大小は議論できないものの、幌延地域で想定されるパラメータの古水理地質学的 変化が与える影響は相対的に小さいことが示唆される。

本解析により得られた動水勾配および移行時間の分布と、本事業で別途実施されている塩濃度 などの分布結果とを比較することにより、低流動性と考えられる領域を推測するとともに、その 閾値となる動水勾配や移行時間の値も推定できる可能性がある。今後は、このような観点からも 結果の解釈を進めていく必要がある。

また、今年度、広域と施設スケールで、異なる観点に着目し地下水流動解析を行うことで、共 通して認められる傾向と、着目した観点で異なることによる傾向の違いも示唆された。今後は古 水理地質学的情報に基づく初期・境界条件の見直しを引き続き図るとともに、低流動域の分布の 評価において、地下水の安定性を示すうえでの解析の有効性について、塩濃度の三次元分布の解 釈を深めつつ示していく予定である。

#### 参考文献

- 天野由記,山本陽一,南條功,村上裕晃,横田秀晴,山崎雅則,國丸貴紀,大山隆弘, 岩月輝希,幌延深地層研究計画における地下水,河川水及び降水の水質データ (2001~2010年度), JAEA-Data/Code, 2011–023, 312p., 2012.
- 電力中央研究所, 平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費(地層処分共通技術調査:ボーリング 技術高度化開発)成果報告書, 580p, 2011.
- Ikawa, R., Machida, I., Koshigai, M., Nishizaki, S., Marui, A., Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, Hydrogeology Journal, vol. 22, pp. 987-1002, 2014.
- 今井久,山下亮,堆積岩地域における広域地下水流動解析手法に関する検討, JNC TJ1410 2001-002, 318p., 2001.
- Ishii, E., Assessment of hydraulic conductivity of fractures I mudstones by single-borehole

investigations, Water Resource Research, vol.54, pp.3335-3356, 2018.

- Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y, and Kurikami, H., The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Journal of Geophysical Research, vol.116, B09206, 2011.
- 岩月輝希,石井英一,新里忠史,北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変 遷シナリオの構築,地学雑誌, vol. 118, no. 4, pp. 700–716, 2009.
- Jung, Y., Pau, G.S. H., Finsterle, S., Doughty, C., TOUGH3 User's Guide Version 1.0, LBNL-2001093, California, USA, 2018.
- Kawabe, I., Calculation of oxygen isotope fractionation in quartz-water system with special reference to the low temperature fractionation, Geochemica et Cosmochimica Acta, vol. 42, pp. 613-621, 1978.
- 株式会社安藤・間, 地質構造発達を伴う地下水流動解析手法の整備, 日本原子力研究開発機構 契約業務報告書, 2014.
- 核燃料サイクル機構,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 分冊1 わが国の地質環境,JNC-TN1400 99-021,559,1999.
- Knauth, L. P., Epstein, S., Hydrogen and oxygen isotope ratios in silica from the JOIDES deep sea drilling project, Earth and Planetary Science Letters, vol. 25, pp. 1–10, 1975.
- 操上広志,竹内竜史,藪内聡,瀬尾昭治,戸村豪治,柴野一則,原稔,國丸貴紀,幌 延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研 究,土木学会論文集 C, vol. 64, no. 3, pp. 680–695, 2008.
- 宮川和也, 女澤徹也, 望月陽人, 笹本広, 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水 質データ(2014年度~2016年度), JAEA-Data/Code, 2017–012, 60p., 2017.
- Miyakawa, K., Tokiwa, T., Murakami, H., The origin of muddy sand sediments associated with mud volcanism in the Horonobe area of northern Hokkaido, Japan, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 14, no. 12, pp. 4980–4988, 2013.
- 長尾捨一,5万分の1地質図幅 豊富(旭川·第15号),北海道立地下資源調査所, 42p., 1960.
- NAGRA, Project Report NPB-10-05, 2010.
- 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古 地理と地質構造発達史, 地質学雑誌, vol. 113, pp.119–135, 2007.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証 技術開発報告書, 265p, 2016.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証 技術開発報告書, 230p, 2017.
- 太田久二雄,阿部寛信,山口雄大,國丸貴紀,石井英一,操上広志,戸村豪治,柴野一 則,濱克宏,松井裕哉,新里忠史,高橋一晴,丹生屋純夫,大原英史,浅森浩一, 森岡宏之,舟木泰智,茂田直孝,福島龍郎,幌延深地層研究計画における地上か らの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」,JAEA-Research, 2007-044, 434p., 2007.
- 大山卓也, 三枝博光, GEOMASS system, JAEA-Testing 2008-007, 248p, 2009.

酒井隆太郎, 宗像雅広, 木村英雄, 大岡正雄, 瀬口真理子, 広域地下水流動モデル検証のための データ整備方法の検討-幌延地域、新潟堆積盆の例-(受託研究), JAEA-Research 2011-029, 24p., 2011.

酒井隆太郎, 宗像雅広, 木村英雄, 地下水の地化学データに基づく地下水流動評価方法の検討−幌 延地域の例-(受託研究), JAEA-Research 2011-054, 19p., 2012.

産業技術総合研究所,沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 成果開発報告書,209p,2010. 竹下祐二,地盤の浸透特性値の算定方法に関する研究,岡山大学博士論文,143p,1990.

- 産業技術総合研究所, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料--長期変動と地質環境の科学的 知見と調査の進め方-, 197p., 2007.
- 産業技術総合研究所,沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発成果開発報告書,209p.,2010. 笹本広,山本信幸,宮川和也,水野崇,幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質

データ(2011 年度~2013 年度), JAEA-Data/Code, 2014–033, 43p., 2015.

- 下茂道人,山本肇,熊本創,小野誠,藤原靖,幌延深地層研究計画における地質環境のモデル化研究,TJ5400 2004-004, 120p., 2005.
- 寺本雅子,嶋田純,國丸貴紀,コア間隙水中の安定同位体比をもとにした低透水性堆 積岩盤における地下水挙動の兆候,応用地質, vol. 47, no. 2, pp. 68–76, 2006.
- Togo, Y.S., Takahashi, Y., Amano, Y., Matsuzaki, H., Suzuki, Y., Terada, Y., Muramatsu, Y., Ito, K., Iwatsuki, T., Age and speciation of iodine in groundwater and mudstones of the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Implications for the origin and migration of iodine during basin evolution, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 191, pp.165–186, 2016.

Yeh, H.W., D/H Ratios and late-stage dehydration of shales during burial, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 44, pp. 341-352, 1980.

財団法人国土技術センター,河川堤防の構造検討の手引き,192p,2002.

#### 4.5 概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案

4.3 節の図 4.3-2 において、概要調査で想定される地上からの各種調査のうち、主要な調査を組 み合わせて、どのような考え方で地下水の低流動域の三次元分布を推定するのかを模式的に整理 してした。堆積岩中の地下深部には化石海水に代表されるように、長期にわたり地層中に残留し ていると考えられる地下水の存在が確認されおり(例えば、Pearson et al., 2003;馬原ほか、2006)、 化石海水が残留するような領域は、地下水流動が遅く、拡散による物質輸送が支配的でもある例 が報じられている(例えば、Mazurek et al., 2009)。本事業では、堆積当時の海水が埋没属性過 程で変化し、その後、天水浸透の影響を受けていない地下水を化石海水と言うこととし、それを 指標として、地下深部における低流動域の三次元分布を評価する方法論の整理を進めた。本節で は、今年度の検討結果に基づき、概要調査において実施されると想定される地上からの各種調査 から地下深部の低流動域の三次元分布の評価に至る過程の現状と課題について述べる。

図 4.3-2 に示した地下水の低流動域の三次元分布を推定する方法論は大きく二つのアプローチ に分けられる。一つは、物理探査やボーリング調査といった地上からの各種調査から取得される データを統合して地球統計学的手法により化石海水の指標の三次元分布を推定し、その結果によ り地下深部の低流動域を評価するアプローチである。もう一つは、地上からの調査により構築さ れた水理地質構造モデルに基づく広域スケールの地下水流動解析により低流動域を評価するアプ ローチである。本事業の結果を踏まえそれぞれの現状と課題を以下に述べる。
# 4.5.1 地上からの各種調査から取得されるデータを統合した地下深部の低流動域の評価に係る現 状と課題

幌延における地下水の特徴は化石海水の観点から図 4.3·3 に整理した。これまでの調査により、 幌延の地下水は、天水と化石海水を端成分とする混合した地下水であることが示されている。こ こで言う化石海水とは、地層の堆積当時に地層中に取り込まれた海水が地質学的な長い時間をか けて変質した古海水を意味する。化石海水の存在を確認するための指標は、それが海水に由来し ていることから、塩濃度と水の安定同位体比(δ<sup>18</sup>O およびδD)とすることが効率的であると 考える。海水中の塩濃度は、おおむねナトリウムイオンと塩化物イオン(Cl)により占められて おり、反応性の低い Cl·が指標に適しており、地下水の起源を推定できる水の安定同位体比と組み 合わせる必要がある。幌延の地下水は、海底に堆積した地層が長期間にわたる変動により地下深 部に埋没して生じる続成作用として岩石-水反応が生じていることから、海水の塩濃度や安定同 位体比とは異なっているが、幌延の化石海水側の端成分の安定同位体は、δ<sup>18</sup>O が 2~4‰、δD が-30~-20‰であり、それに相当する Cl:濃度は 3000ppm 以上と評価されている。

Cl:濃度と水の安定同位体比を直接測定できる調査は、概要調査ではボーリンク調査における地 下水の採水および水質分析であると想定され、そのデータは、評価対象領域における離散的なデ ータである。そのため、どのような手法を適用しても最終的に推定される三次元分布には適用し た手法に起因する不確実性が介在する。本事業では、既存研究により示された手法(本多ほか, 2010; 岩月ほか, 2012) を参考にして、Cl:濃度と水の安定同位体比の三次元分布の推定手法を整 理した。その方法の概略は、電気・電磁探査とボーリング調査時における比抵抗検層により取得 される比抵抗値が Cl-濃度と相関することに着目し、それらのデータを組み合わせて調査領域全 体にわたってより信頼性の高い比抵抗分布を求め、その結果から Cl-濃度の三次元分布を推定す るというものである。また、水の安定同位体比などの塩濃度以外の指標の三次元分布は、物理探 査のデータとの間に直接的・物理的な相関関係は認められないものの、比抵抗分布の推定から得 られる予測誤差を用いて推定される。今年度は、幌延において取得された水質分析を含むボーリ ング調査データおよび電気探査データに基づき、Cl:濃度および安定同位体比の三次元分布の推定 を試みた。その方法の詳細と結果については、4.3.3 項で述べた。Cl-濃度の三次元分布を推定す る際、ボーリング調査の水質分析データのみを用いて単純クリギング法を適用した。この方法に より推定した三次元分布には、実際の地質の分布の影響、特に大規模な断層や難透水層などの場 の特徴が極端に変わる場所の影響が反映されにくい。そのため、今後の課題として、既存研究(本 多ほか、2010:岩月ほか、2012)を参考にして整理した手法に基づき、電気探査のみならず電磁 探査のデータを用いて統合的に推定した比抵抗分布を用いることにより、塩濃度分布やそれ以外 の指標の三次元分布の信頼性を向上させる必要がある。既存の電気探査および電磁探査の側線あ るいは測定点の配置は、幌延深地層研究センターを中心として直線状に配置しており、これは2 次元での比抵抗分布の推定を前提としている(図 4.5-1)。そのため、より信頼できる比抵抗の三 次元分布を推定するためには、それに最適な条件のデータを用意する必要であり、例えば、最新 の測定器を直線状ではなく可能な限り格子状に配置にさせた電気探査あるいは電磁探査を実施す ることにより、より条件の良いデータを取得できると考える。よって、新たな物理探査データの 取得が今後の課題のひとつである。



図 4.5-1 幌延深地層研究センター周辺における電気・電磁探査データの測定位置

また、化石海水の年代は非常に古いという特徴を有しており、その存在を評価する際には、地下水の年代も重要な指標となる。地下水の年代測定のデータは、塩濃度や安定同位体比のデータから独立するものとして扱えるので、地下水年代測定の結果を三次元分布から推定される低流動域の三次元分布の評価結果と照らし合わせることで評価結果の信頼性を確認することができると考える。今年度は、天水浸透に伴い化石海水との混合が生じていると想定される領域を対象に、<sup>81</sup>Krを用いて数十万年~百万年程度の年代測定に適した技術開発に着手した。さらに、拡散で分離・分別する指標として、地下水中の水素や塩素の同位体比に着目し、水と化石海水の混合域における元素プロファイルの解釈についても調査した。その方法の詳細と結果については、4.3.4 項で述べた。

## 4.5.2 低流動域の分布評価を補完する上での地下水流動評価の利用に係る現状と課題

4.5.1 項では、化石海水に着目して低流動域の三次元分布を評価するアプローチの現状と課題 について述べた。ここでは、もうひとつのアプローチとして、広域・施設スケールの地下水流動 解析による地下深部の低流動域の三次元分布を評価の現状と課題について述べる。地下水の流動 性は、地層の透水性や動水勾配といった地下水流速に係る特性に影響するので、地下水流動解析 によりその特性の三次元分布を推定するといった手法も必要なアプローチであると考える。概要 調査において想定される大まかな手順は図 4.3-2 に示したとおり、地上からの各種調査の取得デ ータから構築される水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析により、地下水流速に関する特 性の三次元分布が推定される。今年度は、幌延を対象に、これまでの調査により構築された水理 地質構造モデルに基づく地下水流動解析を実施し、幌延深地層研究センターを範囲に含む 10× 20 km スケールの領域の地下水流速に関する特性の三次元分布の推定を試みた。その方法の詳細 と結果は、4.4.2 項で述べた。

地下水流動解析にからのアプローチは、もうひとつのアプローチから推定される塩濃度や地下 水の安定同位体比といった化石海水に直接関連する指標からの評価を補完するものとして位置付 けている。しかしながら、本事業で実施した地下水流動解析から推定される地下水流速に関する 特性の三次元分布を低流動域の三次元分布の評価に用いる際には、注意が必要である。なぜなら、 塩濃度や安定同位体比は化石海水に直接関連する指標であり、その三次元分布は、堆積当時から の隆起浸食といった地形変動や気候変動などの過去に実際に発生した事象の結果を表しているも

のであるが、今年度実施したようなある特定の時代の水理地質構造モデルを用いた定常地下水流 動解析の結果は、適用した時代の地質構造モデルが定常的に続いていると仮定した場合の地下水 流動の状態を表しているものであり、意味合いが異なる。これに対する対処策として、ひとつは、 自然現象の長期変動を考慮した水理地質構造モデルを構築し、その自然現象の長期変動を可能な 限り再現した非定常地下水流動解析により、地下水流速に関する特性のみならず塩濃度の三次元 分布を推定する方法が考えられる。しかしながら、この方法では、評価結果に介在する不確実性 が多くなり、その不確実性の取り扱いに関して大きな課題が残ると考えられる。そのため、その 代替手法として、化石海水が分布する領域の特徴を現在の地質・地質構造の分布や水理場などの 地質環境特性から特徴付け、それに基づいて化石海水に着目した低流動域の三次元的な拡がりを 補完することが効果的であると考える。化石海水に着目した低流動域の三次元分布の推定結果に は、物理探査の側線あるいは測定点の位置およびボーリンク調査の実施位置からの距離に依存し て、場所によって信頼性にバラつきがある。地下水流動解析の結果は、特に、その信頼性の低い 領域の推定結果を補完する際に、有効であると考える。今年度の検討の実施により、化石海水に 関連する塩濃度および安定同位体比の三次元分布、および地下水流動解析により地下水流速に関 する特性の三次元分布を推定した。低流動域の三次元分布について最終的な評価結果を得るため には、これらの結果を照らし合わせ、化石海水が分布する領域の特徴と現在の地質・地質構造の 分布や水理場などの地質環境特性を関連付けが必要であり、この実施は今後の課題としたい。ま た、低流動域の三次元分布の推定結果の妥当性を検証するためも、新たな物理探査とボーリング 調査から得られるデータが必要であり、それを実施することが今後の課題である。

## 参考文献

- 本多眞,山本真哉,櫻井英行,鈴木誠,真田祐幸,杉田裕,松井裕哉,地球統計学的手法を用いた地下水水質分布の推定とその不確実性の評価,土木学会論文集 C, vol. 66, no.3, pp.609–624, 2010.
- 岩月輝希,水野崇,國丸貴紀,天野由記,松崎達二,仙波毅,地層処分事業に関わる地球化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化・文献調査から精密調査段階における地球化学 解析手順について,原子力バックエンド研究,vol. 19, no. 2, 51-64, 2012.
- 馬原保典,中田英二,大山隆弘,宮川公雄,五十嵐敏文,市原義久,松本裕之,化石海水の同定法の提案-太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価-,地下水学会誌,vol.48, no.1, pp.17-33, 2006.
- Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T. and Waber, H.N., Natural tracer profiles across argillaceous formations: The CLAYTRAC project. OECD/NEA Report 6253, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France, 2009.
- Pearson, F.J., D. Arcos, A. Bath, J.Y. Boisson, A.M. Fernandez, H.E. G\u00e4bler, E. Gaucher, A. Gautschi, L. Griffault, P. Hernan and H.N. Waber., Mont Terri project Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Federal Office for Water and Geology Report 5, Bern, Switzerland, 2003.

# 5. 水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化

## 5.1 水みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化

3.1 では、地下水年代測定の指標となる物質の広域スケールで濃度分布を地下水流動・物質移行解析 により算出し、実際にボーリング孔で採取された地下水中の濃度との整合性について検討を行っている。 亀裂性岩盤においては、地下水は主に割れ目の中を選択的に流れていく。一方、地下水中の溶存物質は、 図 5.1・1 に示すように地下水とともに割れ目中を移流分散により下流へと移動していく過程で、割れ目 周辺のマトリクスへも拡散・吸着し、地下水より遅い速度で移動する。したがって、亀裂性岩盤におい て地下水や物質の移動を精度良く推定するためには、図 5.1・1、図 5.1・2 に示すような岩盤中の割れ目 の分布と周囲のマトリクスを忠実に再現した解析モデルにより地下水流動・物質移行解析を行うのが理 想である。比較的狭い領域であればそれは不可能ではないが、特に我が国に多く見られる高割れ目密度 の岩盤を対象とした広域スケールの解析においては現実的でなく、割れ目を含む岩盤を多孔質媒体で表 現した解析モデルを用いざるを得ない。そのため、水理・物質移行特性に関して亀裂性岩盤とできるだ け等価な多孔質媒体の物性値(透水係数、間隙率、分散長)の設定手法を構築する必要がある。

透水係数については主に5.2 での検討となるため、ここでは間隙率と分散長について述べる。間隙率 については、図 5.1-1 に示すような割れ目内の移流分散とマトリクスへの拡散を考慮した二重間隙解析 モデルで下流側の地下水溶存物質の濃度を計算するとともに、間隙率をパラメータとして多孔質媒体モ デルでも計算を行い、下流側の濃度が二重間隙解析モデルによる濃度とほぼ一致するような(等価な) 間隙率を同定する。同様に分散長についても、図 5.1-2 に示すような割れ目の分布を考慮した解析モデ ルで下流側の濃度の経時変化を計算するとともに、分散長をパラメータとして多孔質媒体モデルでも計 算を行い、下流側濃度の経時変化が割れ目分布を考慮したモデルによる結果とほぼ一致するような分散 長を同定する。

ただし、図 5.1-1 や図 5.1-2 に示すような解析モデルを構築するためには、割れ目の水理・物質移行 特性や分布・幾何形状に関する統計量など様々なデータが必要となる。二重間隙モデルと割れ目モデル を構築するのに必要なデータとその取得方法を、表 5.1-1 と表 5.1-2 にそれぞれ示す。次項以降に、こ れらデータを取得するために実施した各種調査・試験の方法と結果について述べる。



図 5.1-1 亀裂性岩盤内での地下水溶存物質の移動イメージ





必要なデータ	取得方法			
水みち割れ目の開口幅	ボアホール TV 検層、坑道壁面観察			
水ひた割れ日の問阿 (密府)	コア観察、坑道壁面観察、ボアホール TV 検層、フ			
小みら割は日の間隔(名度)	ローメータ検層、水理試験			
水みち割れ目の透水係数	水理試験、フローメータ検層			
動水勾配	間隙水圧測定			
マトリクスの拡散係数	室内扩散試験 マトリクス内間隙構造細察			
(割れ目面からの深度分布)				
マトルクマ抗散客ち両積	コア観察			
	レジン注入による割れ目内開口部可視化			

表 5.1-1	二重間隙モデルの構築に必要なデータ	と取得方法
---------	-------------------	-------

## 表 5.1-2 割れ目分布モデルの構築に必要なデータと取得方法

必要なデータ	取得方法			
水ひた割れ日の密度	コア・坑道壁面観察、ボアホール TV 検層、フロー			
小みら割は日の名及	メータ検層、湧水量計測			
水みち割れ目の方向	ボアホール TV 検層			
水みち割れ目の長さ分布	露頭・坑道壁面でのトレース長調査			
水みち割れ目の開口幅	ボアホール TV 検層			
水みち割れ目の透水係数	水理試験			

※ブロックスケールのトレーサー試験結果は、水みち割れ目の分布モデルの較正・検証 に使用される。

## 5.1.1 水みちの検出技術の高度化

## (1) はじめに

平成 24 年度より日本原子力研究開発機構が所有する瑞浪超深地層研究所の深度 300m ステージ(土 岐花崗岩上部割れ目帯)、500m ステージ(土岐花崗岩下部割れ目低密度帯)にて、独立した単一の水み ち割れ目の検出のための地質環境調査および対象割れ目を用いた数 m スケールの原位置トレーサー試 験等の適用性試験が実施されてきた。また、原位置で取得した試験データを説明しうるモデルとして、 平行平板での表現、均質な間隙構造や鉱物分布を有するマトリクス部を仮定した割れ目の評価がなされ てきた。

平成 30 年度からは、高密度割れ目の岩盤における支配的な水みちの分布を検出する技術の高度化を 図ることを目的に実施している。本年度は、瑞浪超深地層研究所の土岐花崗岩上部割れ目帯を対象に水 みちの三次元分布(特性)や水理・物質移行特性を示すことに先立ち、地質・地下水調査手法を適用し た水理地質構造モデルを構築した。調査試験場は深度 300m ボーリング横坑の東側とし、ボーリング掘 削、各種試験および検層を実施した。

## (2) 調査概要

## 1) 試験場の地質概要

瑞浪超深地層研究所は、日本原子力研究開発機構により進められてきた結晶質岩と淡水系地下水を対象とした深地層の研究施設であり、調査試験場は深度300mボーリング横坑の東側とした。本研究所周辺の地質は、白亜紀後期に美濃帯の堆積岩類と濃飛流紋岩類に貫入する土岐花崗岩(石原・鈴木,1969)を基盤とし、新第三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)や新第三紀中新世〜第四期更新世の砂礫層に覆われ(糸魚川,1980)、不整合関係にある(中山ほか,1989)。本研究所周辺の瑞浪層群の層厚は百数十mであり、深度300mボーリング横坑は土岐花崗岩体中で建設されている。土岐花崗岩は土岐市周辺に東西約12km、南北約14kmにわたり分布し、主に細粒〜粗粒の等粒状完晶質の黒雲母花崗岩、部分的に斑状組織を呈する(石原・鈴木,1969)。本研究所周辺の土岐花崗岩を対象として、割れ目特性や物質移行などに着目した研究が日本原子力研究開発機構主体で進められている。本研究所の立坑壁面などの地質記載から、深度で低角度(0~30°)傾斜の割れ目密度が変化しており、上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯に分類されている(三枝・須山,2000)。深度300m坑道掘削時の壁面観察からは、おおむねNW走向の割れ目が卓越し、炭酸塩鉱物や緑泥石が充填する。

上部割れ目帯に属する深度 300m ボーリング横坑は、換気立坑中心から南西方向へ約 20m、坑道高 さ約 3m、坑道幅約 4m の馬蹄型の坑道(図 5.1-3)であり、主立坑断層と SH300\_13\_2 断層が並走す る間を通過する(石橋ほか,2012)。周辺の主な造岩鉱物は、石英、カリ長石、斜長石、および黒雲母で あり、微細な角閃石が認められる箇所もある。緑泥石を挟在した割れ目は換気立坑側に近づくにつれて 頻度が減少する傾向があり、炭酸塩鉱物と同様、水平割れ目で確認される(鶴田ほか,2010)。



**図** 5.1-3 深度 300m ボーリング横坑構造図(左)、瑞浪超深地層研究所概要(右) (右図:日本原子力研究開発機構 HPより引用、加筆)

## 2) 調査手順

深度 300m ボーリング横坑の東側において、新規ボーリング孔 (19MI66 号孔)の掘削と各種検層(キャリパー検層、高精度孔曲がり検層、フローメータ検層、高解像度 BTV 検層)、新規孔 (19MI66 号孔) と既存孔 (18MI63 号孔)の水理試験、間隙水圧モニタリング計測 (18MI63 号孔、18MI64 号孔、19MI66 号孔)、原位置トレーサー試験を実施した。図 5.1-4 に調査工の施工フローを示す。



## (3) 調査方法

1) ボーリング掘削

深度 300m ボーリング横坑の東側エリアにて、地質(割れ目分布、充填鉱物など)の把握、調査孔の 活用などを目的としたボーリング孔を掘削した。孔跡の設定条件として、換気立坑から離す(大気圧解 放の影響を低減する)こと、原位置トレーサー試験で対象とする数十 m スケールのネットワーク状の 水みち割れ目を把握できる場(孔間距離)であることを主としている。なお、坑道内の狭小な作業スペ ースを考慮したボーリングマシン(東邦地下工機製 D2-K-92)を選定し、オールコアボーリング(外径 86mm、コア径 72mm)とした。

ボーリング掘削に先立ち、ボーリング孔の掘削方向と孔口位置のための測量を行った。ベンチマーク (BM)を基準とし、掘削方向の見通しを出すために一孔あたり三点分の位置を鋲打ちした。孔口の位 置は、三点分の鋲を全て通るようにレーザーで見通しし、壁面にレーザー光が投影される点とした(図 5.1-5)。



図 5.1-5 位置出し測量のための座標点(左)、測量状況(右)

ボーリング資機材の仮設・配置状況を図 5.1-6、ボーリング資機材の一覧表を表 5.1-3 に示す。 ボーリング掘削の間、孔内のカッティングスの排除、ビットなどの回転部を冷却する目的で、孔内の 掘削水をボーリングポンプで一定量を送水、循環させている。そのため、孔内からの湧水・逸水状況は、 泥水分離タンクなどからの水位変化から確認できる。その水位変化の記録に加え、掘削水にトレーサー を泥水タンクに添加し、定期的にトレーサー濃度を分光蛍光光度計で現地計測し、湧水・逸水管理を行 った(図 5.1-7)。 I ~IVに手順を示す。

- I. 7-アミノ-1,3-ナフタレンジスルホン酸モノカリウム水和物(以後、アミノG酸)をトレーサー材 とし、ボーリング掘削作業開始直前にアミノG酸をボーリング循環水に添加する。
- Ⅱ. 泥水分離タンクを湯かき棒で十分かき混ぜ、サンプリングする。アミノ G 酸の濃度が 5mg/L± 10%の範囲にあることを確認する。
- Ⅲ. アミノ G 酸の濃度が 5mg/L±10%の範囲外となったときは、アミノ G 酸もしくは清水を添加し、 濃度調整する。
- IV. 孔内湧水が 5L/min を超えるまで、Ⅱ、Ⅲを繰り返し行う。(5L/min は、過年度事業の実績に基づきトレーサー濃度の希釈が大きく計測が困難と判断される湧水量)





図 5.1-6 深度 300m ボーリング横坑(上)、予備ステージ(下)での資機材仮設状況

品名	型式	数量	単位	寸法 (H×W×L)	備考
ボーリングマシン	東邦地下工機 D2-K-92	1	台	1570 × 870 × 1546	能力250m モーター含む(7.5kW)
ボーリングポンプ	東邦地下工機 BG−5C	1	台	1563 × 600 × 715	最大圧力 3.2MPa モーター含む(3.7kW)
ロッド類	NQ ロッド	1	式	2m、1m、0.5m	掘削用
ロッド類	NQ ロッド × 1.0m	5	本	8kg/m	掘削用
ダブルコアチューブ	<i>ϕ</i> 86mm⊐ア掘削用	1	本	L=1.68m	掘削用 インナーチューフ <sup>°</sup> 1.0m
掘削ダイヤビット	$\phi$ 86mm, $\phi$ 101mm $\phi$ 127mm, $\phi$ 140mm	1	式		コア掘削用( <b>φ86mm)</b> 拡掘用( <b>φ101~140mm</b> )
タンク類	泥水分離タンク	1	台	600  imes 600  imes 450	鉄製
タンク類	泥水ノッチタンク	1	台	760 × 870 × 1070	鉄製(掘削水貯水)
タンク類	貯水ローリータンク	1	台	760 × 870 × 1070	樹脂製
孔口装置	プリペンダー等	1	式		

表 5.1-3 ボーリング資機材一覧表



項目	内容
品番	分光蛍光光度計 F-2700(㈱日立ハイテクサイエンス)
光源	150Wキセノンランプ(オゾン 自己解消ランプハウス)
測光方式	単色光モニター比演算測光方式
感度	水のラマン光 S/N 800以上(RMS) バンドパス <b>5 nm</b> レスポンス <b>2sec</b>
スリット	2.5、5、10、20nm(励起·蛍光)
波長走査速度	60~3,000nm/min(4段) + PC制御のみ12,000nm/min
サイズ/重量	$600mm\left(W\right)\times503mm\left(D\right)\times343mm\left(H\right)\diagup\$941kg$
電源	AC100, 115, 220, 230, 240V(50/60Hz) 400VA

図 5.1-7 分光蛍光光度計

坑道周辺の岩盤部には、坑道掘削中に生じる衝撃や応力の再配分による岩盤の破壊や割れ目の発生な どによる掘削損傷領域が存在している。ボーリング掘削で発生する掘削水が掘削損傷領域の割れ目を介 して逸水しないように、孔口から掘削損傷領域を抜けた深度までを一段目掘削とし、その区間をフラン ジ付ケーシング(外径: φ114.3mm、フランジ外径: φ250mm)で保護した。一段目掘削は、φ86mm でコア採取をした後、ケーシングが挿入できる径(φ140mm)まで拡孔することを指す。一段目掘削の 深度は5m程度とし、採取したコアの割れ目状況に応じて調整した。 I ~VIIに一段目掘削の手順を示す (図 5.1-8)。

- I. φ86mm で掘削して採取したコアより、掘削損傷領域による影響(割れ目の密度、変質状況など) が小さくなる深度を適宜確認し、その深度まで掘削する。
- Ⅱ. ケーシングの設置深度まで、 φ140mm で拡孔する。
- Ⅲ. グラウト注入管、エア抜き管、およびラバーパッキンをケーシングに装着させて挿入する。
- IV. ケーシングの口元にコンクリートを打設して固定する。
- V. グラウト材を手押しポンプで圧入し、ケーシングと孔壁の間を固定する。なお、エア抜き管から グラウト材の還流を確認することで、グラウト材が全体に注入されたと判断する。その後、グラ ウト注入管とエア抜き管のバルブを閉鎖する。
- VI. ケーシング下端のモルタルブロックと孔底のグラウト部を 20cm 程度浚渫し、グラウト注 入管を回収する。
- Ⅶ. ケーシング内に水を充填し、検査用のフランジを装着する。テストポンプで孔内を加圧し、一定時間圧力を保持することを確認する。

二段目掘削は、一段目掘削で掘削した \$ 86mm 以深をオールコアボーリングで掘削した。掘削中に数 MPa の水圧を伴う大量湧水の可能性があるため、一段目掘削で設置したフランジ付ケーシングに孔口 装置(プリベンダーとゲートバルブ)を取り付け、迅速に湧水を抑制できるようにした(図 5.1-9)。な お、掘削中の湧水量は、コアチューブの一掘進ごとに測定することとし、ロッドの昇降の影響が小さく なるタイミングとした。



図 5.1-8 一段目掘削の手順



図 5.1-9 孔口装置模式図

# 2) コア観察

ボーリングコアの回収するタイミングは一掘進長(最大 1m:コアチューブでコア採取可能な長さ) ごととし、必要に応じてジャッキなどを使用して揚管した。コアチューブ内から取り出したボーリング コアは、コアの上下方向と連続性が確認できるように赤線を記入した。その後、コアの深度方向の間違 いを防ぐため、コアの浅部を上としたとき、反時計回り方向に 1cm 程度離隔をとって青線を記入した (図 5.1-10)。

コア記載は、鶴田ほか(2012)のコア観察記載要領に準拠して 1/10 スケールとし、コアを採取した 直後に実施することを原則とした。最終的に、コア観察の結果に加えて後述する検層結果などを反映し た総合柱状図として取りまとめた。

採取したコアは、坑道内から地上へ楊重した後、写真撮影をした。撮影には 1,200 万画素以上のカメ ラを使用することとし、手振れや撮影位置を固定するために架台を準備した(図 5.1-11)。撮影の際、 コア表面を霧吹きで湿潤状態とする、コア上面に調査ボーリング孔の孔番とコア深度(mabh)、およびカ ラーチャートを掲示する、背景を黒色とする、光反射を抑制するために光源位置を調整することに留意 した。



図 5.1-10 コア表面への基準線の記入例



図 5.1-11 コア撮影用の架台

# 3) キャリパー検層

ボーリング孔径の形状を計測し、孔壁の崩壊による孔径の拡大箇所の深度と拡大径を把握する ことを目的としてキャリパー検層を実施した。表 5.1-4 にキャリパー検層装置の仕様、図 5.1-12 に測 定概念図を示す。作業手順を I ~ IVに示す。

- I. キャリパーセンサーを配線し、キャリブレーションをする。
- Ⅱ. キャリパーアームを閉じた状態でセンサーを孔底まで降下させた後、アームを開く。
- Ⅲ. 深度計の数値と孔底深度(mabh)が同じことを確認する。
- IV. PC (ロガー) の測定スタートボタンを押し、ウインチでセンサーを引き上げながらデータを収録 する。
- V. 孔口まで上昇させた段階で測定終了し、データが PC に保存されていることを確認する。

項目	性能
適応孔径	$\phi 50 \mathrm{mm} \sim \phi 400 \mathrm{mm}$
測定方式	4アーム式(X孔径:Y孔径)
測定精度	1mm(分解能0.1mm)、1~10cmピッチ
耐水圧、耐温度	15MPa、0∼80℃
センサー外径	$\phi45\mathrm{mm} imes1,800\mathrm{mm}$ 13kg

表 5.1-4 キャリパー検層装置の仕様



図 5.1-12 キャリパー検層の測定概念図

## 4) 高精度孔曲がり検層

ボーリング孔を掘削した後の孔跡を把握するため、高精度孔曲がり検層を実施した。高精度孔曲がり 検層は、方位センサー精度 0.1°(分解能 0.05°)、傾斜センサー精度 0.1°(分解能 0.01°)をもつ村 田式デジタルオンラインシステム(DOS-180)を使用した。当システムは三軸構成角速度センサー・磁 気センサーを備えたプローブを孔内に挿入し、ある深度における方位角と傾斜角を測定して距離換算す ることで、孔曲がりの状況を座標系に落とすことができる。作業手順として、検層装置を孔底まで降ろ した後、孔底から孔口までを 50cm ごとに測定した。孔底は、プローブの余裕長を差し引いた深度とし た。現地での測定終了後、各深度の測定データから三次元の孔跡を求め、世界測地系(坑道内で適用し ている座標系)へ変換した。



図 5.1-13 高精度孔曲がり検層のシステム概念図 (株式会社村田製作所 HP より引用)

## 5) フローメータ検層

孔内からの湧水量について、どの程度の流量(湧水量)がどの深度を境に流量変化(湧水)しているのかを把握することを目的にフローメータ検層を実施した。本検層で使用した装置には、BTV(ボアホールテレビ)を装備しており、フローメータ検層と同時に孔壁の状況を観察可能である。装置の構成は、 測定プローブ部(フローメータプローブ、BTV、スポンジパッカー、ケーブル)、地上部(ケーブルドラム)、地上計測部(検層コントローラーBSM-200、ノート PC)からなる。表 5.1-5 にフローメータ検層 装置の仕様、図 5.1-14 に測定概念図、図 5.1-15 に流速の測定概念図を示す。作業手順を I ~VIIに示す。

- I. 孔口に検層装置を設置し、孔口からの湧水量とフローメータから得られた流量を確認し、ダイバ ーターの効果を確認する。
- Ⅱ. ロッドを用いてプローブを孔底まで降下させる。
- Ⅲ. 検層装置を静止させて、流量の測定値が安定した数値を記録する。また、BTVの測定システム上のモニターで孔壁が撮影可能の状態であることを確認する。
- IV. ロッドを電動ホイストにより一定速度で引き上げる。同時にBTVの記録を開始する。原則、1m ピッチで安定流速を測定し、流量変化(アノマリー)がある付近では、必要に応じて細かいピッ チで測定する。流量変化のある深度付近のBTV 画像から、湧水割れ目の候補を挙げる。

- V. 孔口まで検層装置を引き上げた後、孔内の全体湧水量を流量計で測定する。
- VI. フローメータ検層で測定した積算流量と、Vで測定した流量を比較し、差異を確認する。
- VII. BTV で撮影した孔壁展開画像は BSM システムで画像解析し、岩盤分離面の深度と方向(走向・ 傾斜)を測定した。

項目	仕様
プローブ外径寸法	D=51mm L=2,700m
最大適用深度	500m
フローメータの適用孔径	$\phi 66 \sim 250 \mathrm{mm}$
<b>BTV</b> の適用孔径	φ66~120mm(清水に限る)
流速測定範囲	二系統常時出力 レンジ1:0 ~ ±120cm/sec レンジ2:0 ~ ±600cm/sec
装置の孔内移動方法	ワイヤーライン(鉛直孔)・ロッド(斜孔)

表 5.1-5 フローメータ検層装置の仕様



図 5.1-14 フローメータ検層の測定概念図



図 5.1-15 スポンジパッカーを用いた流速測定の概念図

## 6) 水理試験

水理試験は、湧水割れ目区間の選定、選定した湧水割れ目の水理情報の取得を目的として実施 した。湧水割れ目区間は、フローメータ・BTV 検層結果や、掘削時の湧水量記録等を基に湧水量測定を 複数区間実施し、湧水量の多い区間を絞り込みした。また、選定した湧水割れ目区間を対象として定流 量揚水試験を実施し、透水量係数を算出した。使用した水理試験装置は、トリプルパッカーの編成を基 本とし、パッカー間の接続は、Oリングを装着している JFT ロッド(φ42mm)を用いた。パッカーで 区切られた区間は、下部より P1(測定区間下方)、P2(試験区間)、P3(試験区間上方)とし(図 5.1-16)、 各区間圧、パッカー圧を地上の圧力センサーと接続して測定した。試験で使用するパッカーのうち、P1 と P2 についてはフィックスエンドタイプのパッカー(遮水有効長:1.4m)を適用した(図 5.1-17)。 水理試験の試験手順を I ~ WIIに示す。

- I. 事前に作成した Tally List に基づき、所定のロッド本数、パッカー編成、および残尺を確認しながら、装置を孔内へ挿入する。
- Ⅱ. 湧水圧による装置の浮き上がりを防止するため、壁面のアンカーにチェーンブロックなどでロッドを固縛する。パッカー拡張は、タンク内の水を窒素ガスなどで加圧して送水する。拡張圧力は水圧+1.0MPa程度とする。
- Ⅲ. 湧水割れ目を推定するために、湧水割れ目近傍の複数区間で湧水量測定を実施する。湧水量測定は、パッカー拡張後の間隙水圧の安定を待たずに試験区間 P2 の湧水量を計測する。測定した複数区間の内、原則として湧水量の最大区間を定流量揚水試験の対象とする。
- IV. 間隙水圧測定は、定流量揚水試験区間で実施する。試験前日にロ元バルブを閉鎖して区間を閉鎖 し、翌朝までに収束した間隙水圧を測定する。
- V. 一定流量で揚水した時の圧力変化から透水量係数を求めるため、定流量揚水試験を実施する。揚水過程、およびモーノポンプを停止した後の水圧回復過程の圧力変化を測定する。揚水方法は、 揚水流量の設定値が 2L/min 以下ではモーノポンプの利用、2L/min を超える場合は口元のボー ルバルブで開度調整とする。
- VI. 水理試験の終了後、パッカー拡張用タンク内の窒素ガスを排気し、パッカーを収縮させる。タン ク内に戻る水位から収縮確認をする。
- VII. 次の試験対象区間に合わせてロッドの追加、もしくは抜管する。
- ₩. 全試験終了後、パッカーを収縮させて装置を抜管する。



図 5.1-16 水理試験装置の設置概念図



図 5.1-17 フィックスエンドパッカー (遮水有効長:1.4m)

図 5.1-18 に間隙水圧の測定時、湧水量測定時、定流量揚水試験時の装置概念図を示す。 間隙水圧測定時は、パッカー拡張後、ロ元バルブを閉鎖して圧力ライン(測定チューブライン)内の エア抜きをし、圧力計のライン末端に取り付けた圧力ラインバルブを閉じて密閉区間を形成してから水 圧測定を行う。湧水量測定時は、水頭を一定にして揚水したときの流量変化を測定する。なお、湧水量 測定は、定流量試験区間の選定のための湧水量の把握を目的としている。定流量揚水試験は、一定の揚 水流量で試験区間の圧力変化を測定する。所定時間まで揚水した後、ポンプを停止、あるいはバルブを 閉鎖して回復試験へ移行する。回復試験は原則として初期間隙水圧に収束、あるいは揚水時間と同じ時 間経過をもって試験終了とする。



図 5.1-18 各測定・試験時の装置概念図

水理試験で得られたデータを用いて解析を行う。定流量揚水試験の解析では Cooper-Jacob 法 (Cooper and Jacob, 1946)、回復試験の解析では Agarwal 法 (Agarwal, 1980)を適用する。なお、定流量揚水 試験のポンプ停止直前のデータは、おおむね定圧状態であるため、10 分程度のデータを用いて Hvorslev の定常法 (Hvorslev, 1951)を適用する。図 5.1-19 に Cooper-Jacob 法を適応した定流量揚水試験の解 析例を示す。Log(t/r<sup>2</sup>) – S 曲線と Derivative Plot を作成し、Derivative Plot の dS/dLn(t)がおおむねー 定値を示す時間の区間を探る。その時間の区間を Log(t/r<sup>2</sup>) – S 曲線の直線勾配を選定する区間とし、 1cycle での水位差  $\Delta$  S を用いて式 5.1-1 で透水量係数を求める。また、Log(t/r<sup>2</sup>) – S 曲線の直線勾配の 延長が  $\Delta$  S=0 と交差する点(t/r<sup>2</sup>)の(sec)を用いて、式 5.1-2 で貯留係数 S を求める。

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4\pi \cdot \Delta s} \cdot \cdot \cdot ( \pm 5.1 - 1)$$



図 5.1-19 Log(t)-s曲線(左)、Derivative Plot(右)の例

図 5.1-20 に Agarwal 法を適応した回復試験の解析例を示す。回復過程の Log(tp· $\Delta t$ /(tp+ $\Delta t$ ))-Sr 曲線、Derivative Plot を作成し、Derivative Plot の dSr/dLn(e.t)がおおむね一定値を示す時間の区間を探る。その時間の区間を Log(tp· $\Delta t$ /(tp+ $\Delta t$ ))-Sr 曲線の直線勾配を選定する区間とし、1cycle での水位差  $\Delta$ Sr を用いて式 5.1-3 で透水量係数を求める。また、Log(tp· $\Delta t$ /(tp+ $\Delta t$ ))-Sr 曲線の直線勾配の延長が Sr =0 と交差する点 tp· $\Delta t$ /(tp+ $\Delta t$ ) (sec)を用いて、式 5.1-4 で貯留係数 S を求める。

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4\pi \cdot \Delta Sr} \cdot \cdot \cdot ( \pm 5.1 - 3)$$

$$S = \frac{2.25 \cdot T}{r_{w}^{2}} \cdot (tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t))_{0} \cdot \cdot \cdot ( \pm 5.1 - 4)$$

- T : 透水量係数 (m<sup>2</sup>/sec)
- S : 貯留係数 (-)
- $\Delta Sr$  : Log(tp· $\Delta t$ /(tp+ $\Delta t$ ))の1サイクル間における水位回復量 (m)
- *rw* : 試錐孔半径 (m)
- Q : 平均流量 (m<sup>3</sup>/sec)

 $tp \cdot \Delta t/(tp + \Delta t)_0$ : Sr=0 における  $tp \cdot \Delta t/(tp + \Delta t)$  (sec)

tp: 湧水時間(湧水停止時間) (sec)

 $\Delta t:$  回復過程(湧水停止後)の経過時間 (sec)



図 5.1-20 Log(tp・ムt/(tp+ムt))-Sr 曲線 (左)、Derivative Plot (右)の例

定流量揚水試験のポンプ停止の10分程度前のデータよりおおむね定圧状態を確認できた場合、その データを用いて Hvorslev の定常法を適用する。揚水試験開始直前のP2(試験区間)圧力を計測し、 口元の圧力が0となるように圧力値を水位に換算する。式 5.1.-5より透水量係数を求める。

$$T = \frac{Q \times ln[(m \times L/(2r)) + \{1 + (m \times L/(2r))^2\}^{1/2}]}{2\pi \times \Delta s} \cdot \cdot \cdot (\vec{x} \ 5.1-5)$$
  

$$T : \overline{s} \times \underline{s} \times \underline{k} \times \underline{k$$

- L : 試験区間長 (m)
- *Q* : 平均流量 (m<sup>3</sup>/ sec)
- m : 縦横方向の透水係数比 (通常は1)
- r : 試錐孔半径 (m)

18MI63 号孔、18MI64 号孔、19MI66 号孔の各区間について、水頭差の測定をする。測定手順を I ~ Vに、使用した差圧計の仕様を表 5.1-6 に示す。

- I. 図 5.1-21 に示す配管を構成する。
- Ⅱ. V2-1、V2-2 バルブを開放し、測定区間の湧水でエア抜きする。
- Ⅲ. エア抜き後、ドレーン側のチューブを連結して間隙水圧の安定を待つ。
- IV. データ収録(初期値)を開始し、V3-1バルブを測定対象とする区間の方向へ開く。
- V. V2-1、V2-2のバルブを同時に閉鎖し、5~10分間測定する。

20mH <sub>2</sub> O用 差圧計	/ + = =+	Honeywell社製
	メーカー・空式	TYPE:AD114BM.1B.2U.5H.6A
	耐圧	約10MPa(1500psi)
	差圧	約 $21 m H_2 O(30 psi)$
	精度	$\pm 0.1\% FS(\pm 2.1 cmH_2O)$
* - =+	メーカー・型式	データトラック社製 <b>TYPE: 223-1-R</b>
衣亦訂	表示単位	$30 \text{psi} \Rightarrow 0.1 \text{mmH}_2\text{O}$

表 5.1-6 差圧 20mH<sub>2</sub>0 用差圧計の仕様



図 5.1-21 水理試験中の差圧測定の概念図

## 7) 高解像度 BTV 検層

## ① 概要

高解像度 BTV 装置は、株式会社レアックス社製 BIP-V を使用してボーリング孔の壁面観察を行った。当システムは、展開画像記録装置(以下 ODS)、詳細観察記録装置〔以下 DVS(HR-BTV)〕から 構成される。ODSは、ボーリング孔壁の全周を孔壁面展開画像として連続して記録するもので、取得デ ータは室内解析システムで割れ目の走向傾斜など解析を行う。

DVS は、前方視カメラと側方視カメラを組み合わせて割れ目の詳細観察をする。VTR に記録される データのほか、現場で必要箇所をキャプチャー記録する必要がある。システム構成は、現場システムと 室内システムから構成される。高解像度 BTV 検層の概念を図 5.1-22 に示す。

- ・ ODS プローブ(孔壁面展開画像を撮影するカメラ)
- ・ DVS プローブ(孔壁面詳細画像を撮影するカメラ)
- ウインチコントローラおよびケブラーケーブル・ウインチ
- 電動押し込み機(深度計測機能付き)
- ・ 画像処理・プローブコントロールユニット(プローブ制御) ノート PC(画像データ記録)



# ②ODS(BIPS)画像解析方法

# (a) 画像処理、および割れ目データの取得

岩盤分離面の走向傾斜は、画像データを読み出して室内解析システムのディスプレイ上に表示し、 孔壁との切合線として示される岩盤分離面にフィットするトレースライン(サインカーブ)より求め た(図 5.1-23)。計算された面の走向傾斜はディスプレイに表示され、ファイルに記録される。また、 開口幅もポイントした二点間の実距離として示される。



## (b) 深度

深度は岩盤分離面が出現する上端、消滅する下端、および中間深度を示す。

## (c) 区分

面要素は、I~Vに区分する。

- I. 初生構造 堆積岩の層理・葉理、火山岩や深成岩などに見られる流理構造、変成岩に見られる片理構造
- Ⅱ.開口割れ目 割れ目のうち画像上で1mm以上の開口性が認められ、開口幅の測定が可能な割れ目
- Ⅲ. 割れ目

画像上 50%以上連続している割れ目

- IV. 破砕部 破砕した部分が 5cm 以上の幅を持つ場合
- V. 鉱物脈 鉱物が脈状に割れ目を充填

## (d) 開口幅または充填幅

幅 1mm 以上の分離面の開口幅、鉱物脈、破砕部の充填幅は最大傾斜位置(孔軸に対する最大交差 角位置)において、境界面の上・下盤の正距離とする。

# (e) 分離面形状

面要素の形状について、以下の3つに区分する。 plane-----岩盤分離面がきれいなサインカーブを描くもの angulated----岩盤分離面が曲がっている、ゆがんでいるもの step------岩盤分離面が階段状になっているもの

## (f) 状態

面要素について、I~IVに示す事項を状態として記載する。

- I. 区分が開口割れ目、割れ目の場合
  - ・角礫状、細片状、派生割れ目付随など
- Ⅱ. 区分が破砕部の場合
  - 上盤、下盤
- Ⅲ. 区分が初生構造の場合

・層理、片理、葉理、流理、岩相境界

- IV. 区分が鉱物脈の場合
  - ・白色鉱物、緑色鉱物、黄色鉱物、石英、方解石など

# (g) 備考

面要素について、以下に示す事項を備考として記載する。 ・褐色化、介在物あり、鉱物伴う

# ③ DVS(HR-BTV)画像解析方法

DVS 画像の解析は ODS 解析を補助し、より詳細な岩盤分離面の特性をうることを目的とする。岩盤 分離面の開口割れ目を対象に、0.1mm 精度で割れ目幅を計測する。幅の計測箇所は最大傾斜位置(孔軸 に対する最大交差角位置)の2箇所を基本とし、幅が一定でない場合は、追加計測してその平均値を使 用する。幅の計測値の精度を確認するため、スケールプレートを孔口にセットし別途撮影、計測する。 計測結果の例を図 5.1-24 に示す。なお、図 5.1-24 に映る気泡については、孔内から発生するガスがス ケールプレートに付着したものである。



DVS の観察対象区間のうち、湧水している可能性、かつ開口幅の計測が可能な割れ目については、幅 を計測した箇所を展開画像上に明示した詳細観察シートをA3 横で作成する。詳細観察シートの例を図 5.1-25 に示す。幅の計測は対象の開口割れ目 1 本に対して 36 度刻みに 10 箇所計測する。なお、割れ目 の連続性がないものについては、他角度を計測して 14 箇所とする。



図 5.1-25 詳細観察シートの例

# 8) 弾性波探査

## ①調査の概要

硬質な岩盤は高レベル放射性廃棄物処分場の一つの候補として検討されているが、その透水性状は割 れ目が支配的になると考えられている。坑道坑壁やボーリング孔のみからは推定できない割れ目の空間 分布を把握するには、物理探査法の適用が期待されている。一方、物理探査法による割れ目帯の可視化 に関する研究は数多く行われてきているが、水みちとなる割れ目の連続性を探査することは容易ではな いのが現状である。

本事業では、弾性波探査による割れ目の可視化を目指した調査を実施した。亀裂帯では、周辺地盤と比較して弾性波速度の低い領域として検出されることが通常である。従って、一般的な花崗岩の弾性波

速度として想定される約 5,500m/s よりも低い弾性波速度を示す調査結果は、亀裂帯を含む変質した地 盤であると解釈できる。そのため、地盤の弾性波速度分布を解析結果として出力する弾性波トモグラフ ィは、亀裂帯の検出に対して有効な手法であると考える。

しかし、一般的な地質調査で通常用いられる2本のボーリング孔を用いた孔間弾性波トモグラフィは、 すべての弾性波動が二次元平面を通るものであると仮定してデータ解析を行うため、調査に使用するボ ーリング孔が同一平面上に存在することが必要である。また、本事業において調査に使用できるボーリ ング孔は、18MI63 号孔、18MI64 号孔、19MI66 号孔の3 孔存在するが、2 孔の組み合わせはいずれ も同一平面にならないことを踏まえ、3 孔全てのボーリング孔を利用した三次元弾性波トモグラフィを 実施した。

三次元弾性波トモグラフィは亀裂帯の調査に対して非常に有効な手段である。一方、ボーリング孔に 垂直な亀裂帯の可視化は難しい側面を持つ。そのため、三次元弾性波トモグラフィのみでは一部の亀裂 帯を検出できないことが懸念される。また、調査地点周辺には亀裂帯が複雑に配置されていることが想 定されている。そこで、三次元弾性波走時トモグラフィに加えて VSP 探査を行い、両探査の実施結果 を総合的に解釈することで、亀裂帯を高い確度で可視化することを試みた。

# ② 三次元弾性波トモグラフィ

## (a) データ取得方法(音響トモグラフィ)

音響トモグラフィは、圧電式の孔内発振器(ピエゾ震源)と多連の受振器(ハイドロフォン)を別々のボーリング孔に配置して、発受振器間における弾性波速度等の分布を可視化する技術である。音響ト モグラフィの計測概念を図 5.1-26 に示す。

本手法は、超音波と地震波の中間の周波数帯域である音響波(可聴波)を用いることに特長がある。 一般的な孔内震源よりも高い周波数を用いることにより、高い精度を維持しながら従来の弾性波探査と 同等の計測距離を維持することができる。これは、通常の弾性波探査や地震探査などと異なり、発振波 形にパルス波ではなく連続波の一種である疑似ランダム波を用いることで可能となる。疑似ランダム (PRBS: Pseudo Randomness Binary Sequence)波の原理とメリットを図 5.1-27 に示す。①周波数

を任意に制御した計測、②精度の高い計測、③信号を数万倍に増幅、という特長を持つことから、地表 震源と比較して出力の小さい孔内発振器でも、高周波数を低減衰で取得することができる。

データ取得のフローを図 5.1-28 に示す。受振器を所定の深度に設置した後、発振・受振と発振器の移動を繰り返すことにより、弾性波の波線が対象断面全体を切るように計測を行う。受振器に設置したセンサーの波形からセンサー毎に到達時間(走時)を読み取る。このデータから逆計算により弾性波速度 分布を出力する。

データ取得において使用した主な計測機器の概要・仕様を表 5.1-7 に示す。また、計測装置一式の外 観を図 5.1-29 に、発振器と受振器を図 5.1-30 に、音響トモグラフィにより取得した波形データの例を 図 5.1-31 にそれぞれ示す。



図 5.1-26 音響トモグラフィの計測概念



図 5.1-27 擬似ランダム波の原理とメリット



図 5.1-28 データ取得のフロー(音響トモグラフィ)

表 5.1-7 計測機器の概要・仕様(音響トモグラフィ)

機器名称	仕様・明細	備考
ピエゾ発振器	$\phi$ 44mm × 1 600mm	ケーブル長100m, トーキン製
19ab 平 /	$\phi$ 30mm × 1 250mm,	ケーブル長100m
	センサー間隔10~20cm	ターミナルボックス
データロガー	マルチ(同時)計測	24ch計測まで対応
受信器ノイズフィルター	24ch	バンドパスフィルター
発振器用増幅器	出力150Vrms,電源100Vrms	FOSTEX
オシロスコープ	ソニーテクトロ	発振信号モニター用
信号延長ケーブル	150m×6本	最長1000mまで延長可能



図 5.1-29 計測機器の外観(音響トモグラフィ)



図 5.1-30 発振器(左)と受振器(右)(音響トモグラフィ)



図 5.1-31 音響トモグラフィにおける取得データの例(発振:18MI63 号孔;深度 35.25m、受振 孔:18MI64 号孔)

## (b) 解析方法(3D-HDトモグラフィ解析)

## (i) 解析の概要

全ての取得データに対して、3D-HDトモグラフィ解析(佐藤ほか,2019)を適用し、三次元弾性波 速度分布を得た。HDトモグラフィ解析とは、従来の走時トモグラフィ解析に、(1)初動走時の自動読取 および読取走時への不確実性の付与、(2)相関距離の概念を導入した速度モデルの修正、(3)波線密度の平 滑化、などの要素を加えて高精度化を図った解析技術(佐藤ほか,2018)である。3D-HDトモグラフ ィ解析は、HDトモグラフィの特徴をそのままにデータ解析領域を三次元に拡張した解析手法である。 すなわち、3D-HDトモグラフィ解析も HDトモグラフィ解析と同様に、取得波形データ全ての走時 読み取りおよび不確実性の付与を行った後、初期モデルおよび初期相関距離を決定し、最小二乗法によ るインバージョン解析により三次元弾性波速度断面を得る。波線密度の平滑化は、インバージョン解析 の過程で自動的に実行される。

HD トモグラフィが持つこれら解析要素のうち、特に相関距離を導入した速度モデルの修正手法は、 三次元への拡張を行った 3D-HD トモグラフィにおいて特に有用であると考えられる。相関距離は、 初期相関距離を与え、解析の進行に伴い狭めてゆく方法で決定する。この手順は可変型の空間的ローパ スフィルタを適用することに相当し、初期段階で大きなスケールの構造が再現され、その後相関距離を 段階的に小さくすることによって、次第に小さなスケールの構造が再現される。二次元断面で行う走時 トモグラフィ解析をそのまま三次元に拡張する場合、弾性波の波線分布が疎になる傾向となっていた。 一方、3D-HD トモグラフィ解析で行う同手法の導入により、三次元走時トモグラフィ解析で特に問題 となりやすい粗い波線分布においても解析を安定して進行させることが可能となり、精度の高い結果を 得ることができる。

3D-HD トモグラフィの解析フローを図 5.1-32 に示す。

## (ii) 初動読み取りおよび不確実性の付与

全ての取得データについて、3D-HDトモグラフィ解析により、走時の自動読み取りおよび不確実性の付与を実施した。取得波形に対して走時の自動読み取りおよび不確実性の付与を行った例を図 5.1-33 に示す。

走時の自動読み取りは、読み取り開始前に設定したガイド用速度を基準に、ガイド速度と震源受振器配置から計算される理論走時付近で最も初動波形の可能性が高い波形の到達時間を読み取る。ガイド用速度には複雑な速度モデルを適用することも可能であるが、本事業では、坑道周辺の主要岩盤が花崗岩であることを踏まえて、一律でP波速度 5,500m/s をガイド用速度として自動走時読み取りを行った。観測波形と自動走時読み取りの例を図 5.1-33 に示す。ガイド用速度を決定すると、すべての観測波形について走時自動読み取りが実施され、それに合わせてデータの S/N 比やトレース走時の相関性、波形の振幅などが参照され、自動的に読み取りの不確実性が付与される。付与された不確実性は、緑(不確実性極小)から紫(不確実性大)までの間で色分けして表示され、解析者が視覚的に確認することができる。図 5.1-33 の右図を見ると、観測波形で比較的 S/N 比が高い波形は緑(不確実性極小)と判断される一方、初動走時が明確ではない波形は紫(不確実性大)と判断されていることが分かる。このように付与された読み取り不確実性は、インバージョンの際にデータのミスフィット関数に入力され重みづけが適用され、不確実性が高い読み取り走時は不確実性が低いデータと比較して相対的に重みが下げられることにより、不確実性が低いデータを主に反映したインバージョン解析が実施されることになる。

自動読み取りおよび不確実性の付与は、自動的に不確実性の高いデータの重みを減らすことから、イン バージョンの際に有効な手段である。一方、全ての測定データに対して走時読み取りを実施することか ら、図 5.1-34 に示すように、震源の指向性や孔内湧水などによる S/N 比の低下から、明らかに波動が 到達しておらず、初動走時を読み取ることができないデータに対しても走時を読み取ってしまう懸念が ある。そのような S/N 比が低いデータに対しては、走時不確実性の付与により高い不確実性が付与され るが、高い不確実性ではあっても明らかに走時読み取りが困難なデータに対して行った自動読み取り結果は、インバージョンの際に僅かながらも悪影響を与えることが懸念される。そこで、目視によって読み取り困難と考えられる走時データに関しては、インバージョンに用いないこととした。

S/N 比が低いデータに対する自動走時読み取りの例を図 5.1-35 に示す。受振深度約 22m 以深では取得 波形の S/N 比が低く、初動走時の読み取りは困難であるにもかかわらず、不確実性大と判断としながら も自動読み取りが行われている。また、読み取られた走時は不連続な階段状に推移しており、ほぼ一定 速度であれば走時曲線が二次曲線を描くであろうことを考慮すると、誤った走時読み取り結果であると 判断できる。

このような誤っていると考えられる走時データを削除するために、発振孔-受振孔の組み合わせごと に発振-受振配置ごとの観測走時とその読み取り不確実性をプロットし、それぞれの観測波形と照らし 合わせた上で、発振器からの距離が遠い測定データを中心に走時データを削除し、インバージョンに用 いないこととした。発振 19MI66 号孔、受振 18MI63 号孔の場合における読み取り走時プロットおよび 読み取り不確実性のプロットを図 5.1-36 に示す。読み取り走時図は寒色ほど読み取り走時が遅く、波 動の到達に時間を要していることを示しており、読み取り不確実性は寒色ほど高いことを示している。 図より、読み取り走時図で寒色を示す傾向がある発振点と受振点との距離が離れている読み取りデータ ほど、高い不確実性を示す傾向がある。これは、発振-受振点間の距離が大きいほど波動が減衰して S/N 比が低下するためと考えられる。

不確実性が高くインバージョンに用いないと判断した読み取り走時を削除した、読み取り走時および 走時読み取り不確実性のプロット例を図 5.1-37 に示す。図より、走時読み取り不確実性が高い走時が 削除され、信頼度の高い読み取り走時が中心になっていることが分かる。



図 5.1-32 3D-HD トモグラフィの解析フロー







図 5.1-34 S/N 比が低いデータに対する自動走時読み取りの例



図 5.1-35 読み取り走時と走時読み取り不確実性のプロット例(発振 19MI66 号孔、受振 18MI63 号孔における例)



図 5.1-36 高い不確実性データを削除後の読み取り走時と走時読み取り不確実性のプロット例(発振 19MI66 号孔、受振 18MI63 号孔における例)

(iii) 初期モデルおよび初期相関距離の決定

(ii)に続き、インバージョンの際に必要な初期速度モデルおよび初期相関距離を決定した。初期速度モデルは、調査対象地盤が花崗岩体であることを踏まえ、一律で 5,500m/s とした。初期相関距離は、調査対象となる亀裂帯が大規模な断層などではないことと、調査対象とするボーリング孔の掘削深度が 40mabh 程度であることを踏まえて、一辺 5m の立方体様とした。

(iv) インバージョン解析

(ii)で示した手順により、すべての取得波形に対して走時読み取り走時不確実性の付与を行った後に、 明らかに誤った走時読み取りである可能性が高い走時データも合わせて削除した。以上により得た信頼 度の高い走時データと、(iii)で作成した初期モデル、初期相関距離を使用してインバージョン解析を実 施した。

まず、ミスフィット関数S(m)を式(1)と定義した(Barnes et al., 2011)。

$$S(m) = \Delta d^T C_D^{-1} \Delta d + \Delta m^T C_M^{-1} \Delta m \qquad (1)$$

*∂S(m)/∂M*が十分に小さくなる点をミスフィットの極小点となると考える要領で、最小二乗法により解 を探索した。ここで、式(1)の*C*<sub>D</sub>はデータ領域の相関行列で、(ii)で算出された読み取り不確実性は当項 に代入される。*C*<sub>M</sub>はモデル領域の相関行列であり、(iii)で設定された相関距離は当項で使用され、特定 の相関距離で十分にミスフィット値が低下した後、相関距離を 1/1.2 に縮めて再度インバージョン解析 を実施する。この過程で、大まかな構造から細かな構造に至るまで誤差の小さい正確な解析結果を得る ことができる。このようにして、初期相関距離5×5×5mから順次相関距離を縮めてインバージョンを 繰り返し、最終相関距離2.9×2.9×2.9mのインバージョン結果を、最終的な3次元弾性波走時トモグ ラフィ解析結果とした

#### ③ VSP 探査

## (a) データ取得の方法

VSP 探査の概念および解析結果例を図 5.1-37 に示す。VSP 探査は、取得データ波形のうち、反射波 のみを抽出して、マイグレーション処理(物理探査学会編, 2016)を施して、反射面の位置を特定する 探査手法である。調査対象とする亀裂帯は周辺地盤と比較して低速度を示すと考えられるため、調査対 象領域に亀裂帯が存在する場合には、弾性波高速度帯と低速度帯の境界で反射して受振器に到達し観測 されるため、亀裂帯の位置の把握に有効な探査手法であると考えることができる。

VSP 探査の測定フローを図 5.1-38 に示す。受振に関しては、三次元弾性波トモグラフィと同様、ハイドロフォンをボーリング孔に挿入した。起振は孔内起振ではなく、坑道坑壁をハンマーで起振した。受振点ー起振点配置図を図 5.1-39 に、取得波形の例を図 5.1-40 にそれぞれ示す。

VSP 探査の実施時において、取得した弾性波動が湧水と考えられるノイズを含む傾向が見られた。そこで、湧水量が比較的少ない時間帯に多数起振することにより、データの S/N 比の向上に努めた。

VSP 探査におけるデータ取得に使用した計測機器の仕様を表 5.1-8 に示す。VSP 探査には、計測機器のほか、受振用途に三次元弾性波トモグラフィにも使用したハイドロフォンを、起振用途にハンマーを それぞれ用いた。



図 5.1-37 VSP 探査の概念(左)と解析結果例(右)









表 5.1-8 計測機器 (GeoSEIS) の仕様 (VSP 探査)

項目・形式						仕様	メーカー
観測器	本	体	入力インと	· - 🤊 î	ンス	20k Ω //0. 05 μ F	
			利		得	16倍,64倍,256倍	
			周波数	女 帯	堿	2Hz~5000Hz	
CooPEIP			A / D	分解	能	24ビット	
サイスモグラフ			サンフ・リン	ノクシン	- }	20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 4000 μ sec	
/ /// = / ///			メモリ	-	長	1k, 2k, 4k, 8k, 16kワ−ト*	
型式:GeoSEIS-48			データフ	7- 4	7 F	SEG-1準拠, SEG-2	
			<u>7 ' ]                                  </u>	IJ ħ	• –	1287-}*	ジオファイ
			<u>トリカ^-</u>	- V ^	î //	100~1000mV(100mVステップ)	ブ
			成分	虏	数	48ch + AUX2ch	
			記録	媒	体	SDHCメモリーカード(FAT32フォーマット)	
			動作	ŧ	源	DC11~14V	
			消費	電	流	0.5A(12V スタンバイ時)	
						1.5A以下(12V データ収録時)	
			外径	寸	法	390 (W) $\times$ 308 (D) $\times$ 171 (H) mm	
			重		量	5.3kg	
		ALL ALL					
			1	J/			

## (b) 解析方法

VSP 探査におけるデータ解析のフローを図 5.1-41 に示す。得られた受振波形は反射波以外の波動を 多数含んでおり、VSP 探査データ解析においては反射波以外の測定データはすべてノイズと見なされ ることから、測定データの中から反射波であると判断した波形のみを抽出する必要がある。そこで、す べての測定データに対して、バンドパスフィルタ(狐崎,2001)による外部ノイズの軽減、ミュート(狐 崎,2001)による初動前に表れている外部ノイズの除去、メディアンフィルタ(安居院・長尾,1992)に よる直達波やS波の除去を実施して、反射波の視認性を向上させた。そして、測定データ内に視認され る反射波と、数値計算によって確認された代表的な反射波の出現パターンとを照らし合わせた後、ミュ ート処理を行うことにより、反射波を抽出した。

得られた測定データに対して、まず、湧水によると考えられるノイズを低減させるため、バンドパスフィルタを適用した。バンドパスフィルタの適用例を図 5.1-42 (左) に示す。受振器番号 10 番未満の領域(図中左側)において、S/N 比が向上していることがわかる。続いて、直達波以前に観測される外部ノイズの除去を目的として、初動波形部以前にミュートを適用した。初動波形ミュートの適用例を図 5.1-42 (右) に示す。また、本調査においては、初動波形に加えてS波もノイズと見なされるため、メディアンフィルタを適用して直達波および S 波の除去を行った。メディアンフィルタの適用例を図 5.1-43 に示す。

ここまで実施した処理により、解析結果へ影響を及ぼす可能性を有する反射波以外の外部ノイズや直達 波、S波は除去されたと考えられる。一方、直達波の後続波形群もVSP探査のデータ解析においてはノ イズとなりうることから、さらにミュート処理を施して反射波のみを抽出した。ミュート処理を行う際 には、反射波の位置特定の参考とするため、三次元速度モデルを作成し、三次元波形計算を行うことに より、参考とする記録波形を作成した。三次元波形計算に用いた速度モデルを図 5.1-44 に示す。波形 データに存在する反射波を抽出するための参考とする数値計算波形を得ることが目的であるため、P 波 速度は 5,500m/s で一定とし、亀裂帯が存在すると考えられる位置に密度変化面を配置する要領で数値 モデルを作成した。起振位置および受振位置は VSP 探査データ測定と同じ配置とした。このようにし て作成した速度モデルを使用し、三次元波形計算を実施した。

三次元波形計算により求められた波形の例を図 5.1-45(右)に示す。得られた波形は反射波に加えて 直達波も観測されているため、効率的に反射波のみを観察することができない。そこで、図 5.1-44 に 示した速度モデルから密度変化面を取り除き、P 波速度 5,500m/s で一定の速度モデルを作成して、直 達波のみを波形計算により再現し、図 5.1-45(右)に示した計算波形から差し引くことにより、計算波 形から反射波を抽出した。

三次元波形計算により求められた反射波の例を図 5.1-45(左)に示す。この計算により、計算波形から 測定波形に反射波群が現れた場合における反射波の出現傾向を知ることができる。

以上により得られた三次元波形計算による反射波形例を参考に、ノイズ処理を施した観測波形から反射 波と考えられる波形群のみをミュートにより抽出した。抽出した反射波の例を図 5.1-46 に示す。

全ての発振記録に対して上記に示した反射波の抽出処理を行い、三次元キルヒホッフマイグレーション(物理探査学会編, 2016)を適用して、VSP 探査結果を得た。







図 5.1-42 バンドパスフィルタの適用例(左)、初動波形ミュートの適用例(右)



図 5.1-43 メディアンフィルタの適用例




# 9) 間隙水圧モニタリング計測

ボーリング掘削、各種検層、および各試験の結果に基づき、湧水割れ目を含む区間をパッカーで区切り、区間水圧をモニタリング計測する。なお、パッカーの設置深度は、水理試験や BTV 結果などを参考に Tally List を作成した上で決定する。図 5.1-47 に間隙水圧モニタリング計測で用いたパッカー、ロッドの写真、表 5.1-9 に装置の仕様を示す。



図 5.1-47 間隙水圧モニタリング計測で使用したパッカー、ロッドー式

大項目	項目		主な仕様		
	外径		収縮時外径 :		
パッカーユニット	長さ		全長:1800mm、パッカー有効長:1200mm		
	最大使用差	臣	1.5MPa		
	拡張方式		水拡張		
nul*	外径		ソケット部(最大外径): φ 76mm		
ц 9F	長さ(定尺)		2000mm、1000mm、500mm		
	間隙水圧測定用		$\phi$ 6×4mm、耐圧5.0MPa		
中継ぎ用チューブ	採水用		$\phi$ 6×4mm、耐圧5.0MPa		
	パッカー拡張用		φ4×2.5mm、耐圧5.OMPa		
	圧力計	製造元	Honeywell社		
		レンジ	0~7.0MPa(間隙水圧計測用) 0~10.0MPa(パッカー拡張圧計測用) 0~0.2MPa(大気圧計測用)		
		精度	±0.1%		
即吸水压乱测水器		製造元、型番	KEYENCE社、FD-SS2A		
间原水庄訂測装直		レンジ	(小)0~200mL/min、(大)0~2000mL/min		
	流量計	精度	$\pm 1\%(0\sim 500$ mL/min) $\pm 4\%(500\sim 2000$ mL/min)		
		使用圧力範囲	5MPa以下		
	A/D計測	製造元、型番	Agilent Technologies社、34980A		
	ユニット	計測プログラム	最大80ch収録可能		

表 5.1-9 間隙水圧モニタリング装置の仕様

#### 10) 原位置トレーサー試験

## ①概要

本研究においては、平成 17 年度より収着性トレーサーの使用も可能な原位置トレーサー試験装置を 試作するとともに、試験結果から割れ目の開口幅や分散長等の溶質移行パラメーターを同定する評価手 法を開発してきた。そして、平成 20 年度から平成 22 年度には、スイス Nagra の Grimsel Test Site (以下、GTS と呼ぶ)において、試作した試験装置を用いて原位置トレーサー試験を数 m スケールで 実施し、試験装置や試験結果の評価手法が基本的に整備できたことを確認した。その後、平成 23 年度 から平成 25 年度には、スイスでの原位置試験を通じて抽出した課題に対し、トレーサー試験装置の改 良を進めてきた。また、孔間トレーサー試験だけでなく、単孔トレーサー試験についても試験方法・評 価方法の検討を行い、平成 26・27 年度には JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑 において、また、平成 28・29 年度にはより大深度の深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑試 験場において、改良した試験装置を用いて我が国の地質環境に対する原位置適用性試験を数 m スケー ルで実施した。その結果、我が国の地質環境においても、開発した試験装置や単孔、孔間トレーサー試 験技術に十分な適用性があることが示唆された。

過年度に国内原位置適用性試験で対象としてきた場(数mスケールの独立した単一の水みち割れ目) に対し、本年度は、複数の水みち割れ目がネットワーク状に広がる数十mスケールの水理場を対象に 原位置トレーサー試験を適用し、場の評価を行うこととした。

#### ② トレーサー試験装置の概要

トレーサー試験は、孔内装置として 9)に示した間隙水圧モニタリング装置を使用して実施した。試験 孔は、18MI63 号孔、18MI64 号孔、および 19MI66 号孔の 3 孔を対象とし、試験条件に合わせて 2 孔 を注水/揚水試験孔として選択した。

図 5.1-48 にトレーサー試験装置の全体構成を示す。

- ・ウラニンの蛍光濃度
- 注水側:検量線の範囲を超過する高濃度トレーサー溶液を使用するため設置しない。
- 揚水側:試験区間からの揚水用チューブ2本を選定し、トレーサー装置の計測ユニットでデー タ取得する。
- ・流量
  - 注水側:流量計を経由してモーノポンプを注水区間の採水チューブに接続する。
  - 揚水側:間隙水圧モニタリング装置に設置されている採水・圧力チューブを使用し、バルブ開放による自然排水の方法とする<sup>(※)</sup>。

※1 区間あたり2本のチューブ(採水・圧力)が備わっており、区間湧水量が十分にあれば1本あたり 最大2L/min 程度の揚水が可能である。なお、揚水流量を上げる必要がある場合は、隣接する複数区間 で中間のパッカーを収縮して区間を連結し、複数区間の採水・圧力チューブを活用し揚水を行う。複数 の揚水チューブは1/2インチ径の集約配管(図 5.1-49)に合流させ、下流側に設けた分岐配管の一方を フラクションコレクター側へ、もう一方は電磁流量計を経由させる。





図 5.1-49 集合配管

## ③ 蛍光濃度センサーのキャリブレーション

トレーサー剤に用いた蛍光染料は、非収着性のウラニンとアミノG酸を用いた。この内、蛍光濃度センサーで測定可能なウラニンについては、蛍光濃度センサーのキャリブレーションを行った。蛍光濃度 センサーのキャリブレーションは、10試料程度の濃度が異なるウラニン溶液(以下、試料水)を蛍光濃 度センサーにて測定し、蛍光強度(counts)と蛍光濃度(mg/L)の相関から検量線を作成した。

# (a) 蛍光濃度測定の原理

ウラニンの蛍光濃度の測定は、蛍光濃度センサー、LED 光源と分光器、光ファイバーケーブル、およびデータロガーPC を用いて行った(図 5.1-50)。蛍光濃度の測定原理を(i)~(iii)に示す。

- (i) LED 光源から 470nm 付近をピーク波長とする励起光を照射する。
- (ii) 照射した励起光は、光ファイバーを通して蛍光濃度センサーの流路中に入射され、流路内を通 過するウラニン溶液を蛍光させる。
- (iii) 蛍光したウラニン溶液の光は、受光側の光ファイバーを通して分光器に伝送される。分光器内では、光を分光して MLD イメージセンサーにて電気信号に変換してデータを取り込む。MLD イメージセンサーを使用しているため、特定の波長の強度だけではなく、ある帯域の光を波形として見ることが可能である。



図 5.1-50 蛍光濃度測定の概念

## (b) 使用機器

表 5.1-10 に蛍光濃度センサーの仕様を示す。本試験で対象とする場の水圧は約 1.6MPa であり、使用機器には最低限 1.6MPa の耐圧が求められる。そのため、蛍光濃度センサーは Ver.3.1 (図 5.1-51)

の C1、C2 を使用することとする。蛍光濃度センサーへ入射させる高出力の LED 光源(図 5.1-51)、 センサー内で蛍光した光を受光する分光器(図 5.1-51)は、キャリブレーションで使用した組み合わせ が変わらないよう留意する。

蛍光分光光度計については、ボーリング掘削の泥水管理の際に使用した日本分光(株)の FP-8200 型の 蛍光分光光度計(図 5.1-7)と同様である。

項目	Ver.1.0	Ver.3.1
試作年度	平成 18 年度	平成 27 年度(C1)
		平成 29 平度(C2)
特色	・センザー部に LED 光源を内 蔵	・ 耐圧性能向上 ・光ファイバーとセンサー部が 分離可能な構造
材質	接液部:SUS316 窓 材:サファイアガラス	接液部 : SUS316 窓 材 : サファイアガラス
サイズ (mm) 流路×幅 <sub>A</sub> ×幅 <sub>B</sub>	$48 \times 30 \times 25$	$100 \times 26.1 \times 26.1$
流路径(mm)	$\phi$ 4.83	$\phi 4$
重量	98 g	290g(光ファイバー 1.5m 含む)
光コネクター	SMA	SMA
配管コネクター	1/4in.	$\phi  6$ mm
耐圧性能	1MPa	5MPa

表 5.1-10 蛍光濃度センサーの主な仕様





図 5.1-51 (上左)高出カタイプ LED 光源、(上右)分光器、(下) 蛍光濃度センサー(Ver.3.1)

# (c) キャリブレーション手順

キャリブレーションは、蛍光分光光度計で求めた試料水の蛍光濃度を「正値」とし、その濃度と蛍光 濃度センサーで測定した蛍光強度(counts)の相関から検量線を作成した。ウラニンの蛍光強度は、地 下水のpHに依存する性質があるため、原位置とほぼ同条件の水質となるようボーリング孔から採水した地下水を溶媒とした。キャリブレーションに用いた試料水は、5mg/Lを上限値とし、原水を含めた10段階の濃度を作製した。

1秒サンプリングのデータ取得条件でより大きな蛍光強度を取得するため、適切な Integral Time (照 射光の積算時間)と Average (データの平均化)を試行錯誤的に設定した。なお、蛍光強度の測定は、 流路内に気泡が含まれると大きく減衰するため、キャリブレーションは試料水を加圧し気泡を地下水に 溶解させた状態でも実施した。蛍光濃度センサーのキャリブレーション手順を(i)~(vi)に示す。

- (i) 蛍光濃度センサー、プランジャーポンプ(HPLC ポンプ)を含む循環系配管を構築する。
- (ii) 上限値(5mg/L)と下限値(≒0mg/L)を含む10段階の濃度を作製する。
- (iii) 蛍光強度の上限値に対応する Integral Time と Average を設定する。それに先立ち、事前に上限 値の8割程度の濃度に対応する Integral Time と Average の値を確認する。
- (iv) 検量水を注水して循環系配管を 1MPa で加圧し、HPLC ポンプ(約 100mL/min)で循環させる。
- (v) 試料水10試料について、低濃度から順に蛍光強度データを取得する。
- (vi) 取得した蛍光濃度と蛍光強度の相関から検量線を作成する。

#### ④ 差圧測定

原位置トレーサー試験前の間隙水圧安定時、試験孔の各区間の水頭差測定を実施した。表 5.1-6 に差 圧計の仕様、図 5.1-21 にトレーサー試験中の差圧測定の概念を示す。測定手順を(i)~(v)に示す。

- (i) 試験区間を基準水圧とする配管を構築する。
- (ii) V2-1、V2-2 バルブを開放し、測定区間の湧水でエア抜き(ドレーン)する。
- (iii) ドレーン側のチューブを連結し、間隙水圧の安定を測定する。
- (iv) V2-1、V2-2 バルブを開放した状態でデータ収録し、初期値(無負荷状態)を把握する。
- (v) V2-1、V2-2 バルブを同時に閉鎖し、水頭差が安定した状態から約5分測定する。測定後は 再びV2-1、V2-2 バルブを開放し、再度無負荷状態を測定し、初期値と変化がないことを確認した。

#### ⑤ 孔間トレーサー試験

孔間トレーサー試験の代表的手法としてダイポール試験が挙げられ、過年度調査では採用してきた方法である。本試験では、1 試験あたり数日~数週間程度の時間が見込まれるため、この方法を適用した場合、チェーサーの供給源・供給量確保とモーノポンプの終日稼働等は必須である。しかし、夜間や休日の管理体制上の問題が生じたため、注入側はモーノポンプを使用して場の安定のためのチェーサー注入、トレーサー注入後のチェーサー注入を試験開始日の日中のみとし、揚水側はモーノポンプを使用せず、揚水区間のバルブ開放による自然排水をベースに流量管理する方法とする。

トレーサーは、ウラニン、アミノG酸、重水素の非収着トレーサー、ルビジウム(以下、Rb+)、バリウム(以下、Ba<sup>2+</sup>)の収着トレーサーを使用する。また、トレーサー溶液作製に使用する溶媒は18MI64 号孔 Int2 の地下水を原則とする。

#### ⑥ 試験手順

図 5.1-52 に孔間トレーサー試験の配管模式図を示す。試験手順を(i)~(vi)に示す。

- (i) タンクに所定濃度のトレーサー溶液、チェーサー(孔内地下水)を投入する。
- (ii) 揚水側の採水バルブを開放して揚水を開始した後、集合配管の V2 バルブを絞り、フラクション コレクター側に適切な流量を分配できるよう調整する。この流量に応じてフラクションコレクタ ーの分画時間を決定する。

- (iii) V1 バルブを地下水 (チェーサー) 側とし、注水用モーノポンプを駆動する。
- (iv) 各区間の間隙水圧が安定(場が安定)していることを確認する。(約30分)
- (v) 場の安定が確認できたら V1 バルブをトレーサー側に切り替え、同時にフラクションコレクター でサンプリングを開始する。
- (vi) 所定時間トレーサーを注入した後、V1バルブを地下水(チェーサー)側に戻し、注入区間のデッドボリュームの数倍程度を注水し、注水用モーノポンプを停止する。
- (vii) フラクションコレクターでサンプリングしたサンプルの一部を使って蛍光濃度を測定する。なお、 回収率の計算には、フラクションコレクターのドレーンを使用し、全体の揚水流量との比で求め ることとする。



図 5.1-52 孔間トレーサー試験の配管模式図

# ⑦室内分析

トレーサー試験中にサンプリングした地下水試料について室内分析を行った。

# (a) 分析項目

今年度の分析項目は重水 (D<sub>2</sub>O)、蛍光染料 (ウラニン、アミノ G 酸)、イオン (RbCl、BaSO<sub>4</sub>)の 濃度分析とした。分析項目と分析方法を表 5.1-11 に示す。ウラニンとアミノ G 酸については現地でも 蛍光分光光度計を用いて濃度測定を行った。

表 5.1-11 分析項目と分析方法

分析項目	分析法	使用装置
Rb、Ba	ICP質量分析法(ICP-MS)	Agilent Technologies社製 Agilent 7500Ce
水素酸素同位体比(δD)	元素分析—質量分析法	Los Gatos Research社製 水同位体分析装置DLT-100
ウラニン、アミノG酸	蛍光分光分析法	日本分光社製 FP-8300

# (b) 前処理方法

室内分析では、試料を0.20µmPTFEフィルターでろ過し、目的の分析項目の予想濃度、マトリクスや

妨害元素と装置への負荷を考慮して希釈した。分析項目ごとの希釈方法を表 5.1-12に示す。ウラニンは pH9で安定することから、蛍光測定用の前処理ではpH調整も兼ねて2倍以上の希釈を行った。これに対 して、現地の分析では基本的に前処理は行っていない。

表 5.1-12 希釈方法

分析法	希釈方法
ICP質量分析法(ICP-MS)	1%硝酸溶液となるように61%硝酸を添加し、超純水で希釈
元素分析—質量分析法	トレーサーを添加していない瑞浪地下水で希釈
蛍光分光分析法	四ホウ酸ナトリウム溶液(0.05mol/L)を用いて希釈

# (4) 調査結果

## 1) ボーリング掘削

19MI66 号孔の掘削総長、および掘削方向を表 5.1-13 に示す。

表 5.1-13 19MI66 号孔の実績

孔名	19MI66号孔
掘削方法	オールコアボーリング、清水掘削
主要孔径	86mm
掘削方向	鉛直方向: -39.9°(水平下向き) 水平方向: S53.9° E
掘削総長	29.30mabh

19MI66 号孔の一段目掘削は、5.8mabh( $\phi$ 86mm)まで掘削し、明瞭な掘削損傷領域が認められな いことを確認した。その後、 $\phi$ 140mmまで拡掘をし、ケーシングを4.75mabhまで挿入した(図 5.1-53)。 ケーシングを挿入後、孔口にコンクリートブロックを打設、孔内ケーシングと孔壁の間はグラウトを注 入した。養生確認後に加圧試験を行い、遮水性に問題がないことを確認した。



図 5.1-53 19MI66 号孔のケーシング編成

19MI66 号孔の二段目掘削は、突発的な大量湧水に備えて孔内装置をフランジに取り付け (図 5.1-9)、  $\phi$  86mm で掘削をした。掘削作業の間、コアチューブの回収のタイミングで孔口からの湧水量を測定し た。また、アミノ G 酸をトレーサーとして掘削水に添加し、5mg/L±10%で濃度調整をした。図 5.1-54 に掘削時の湧水量、アミノ G 酸の濃度変化を示す。掘削時の湧水量は、24mabh 付近で孔内湧水量 5L/min を超過し、29.3mabh で約 60L/min であった。流量変化が表れたのは、24~25mabh 付近、 28~29mabh 付近であるが、孔底付近の湧水量が孔内湧水量の大半を占めるため、顕著な流量変化は少 ない。アミノ G 酸の計測は、孔内湧水量 5L/min 程度が確認された 24.2mabh までとした。



図 5.1-54 19MI66 号孔 アミノG酸の濃度変化(左)、掘削時の湧水量(右)

#### 2) コア観察

18MI63 号孔のコア観察結果について、岩相、変質、割れ目、および岩盤等級と RQD について取り まとめた。

#### ① 岩相

19MI66 号孔の孔口より 0.046mabh はコンクリート区間である。掘り止めとした掘削深度 29.30mabhまでの地質は中粒黒雲母花崗岩(土岐花崗岩)より構成され、弱い変質といくつかの時期の 異なる変形作用を被っている。花崗岩は石英、長石類、黒雲母および角閃石を主体として構成される。 岩石の組織は中粒の等粒状組織もしくは、長石の斑晶を伴う斑状組織を示し、斑晶は最大径 38mm 程 度のものが認められる。

#### 2 変質

図 5.1-55 に 19MI66 号孔の母岩変質の程度、割れ目沿いの変質および割れ目充填鉱物の分布を示す。 なお、図 5.1-55 で示す変質の評価(強、中、弱)は、鶴田ほか(2012)のコア観察記載要領に基づく。 本孔の全体的な変質の特徴としては、長石類が白色、および淡桃色を呈する区間が認められ、断層や割れ目の集中する区間には、絹雲母、方解石、緑泥石、赤鉄鉱等の形成が認められる。

長石類の色調 (図 5.1-56) については、2.00~6.00mabh で白色、0.05~2.00mabh、6.00~9.20mabh、12.00~18.00mabh で白色~淡桃色、9.20~12.00mabh、18.00~25.00mabh、27.00~29.30mabh で 淡桃色、25.00~27.00mabh で淡赤褐色を呈する。

27.00~29.30mabh では深度の増加に伴い、色調が弱くなる傾向を示す。また深度 25.00mabh 付近 以深では、その以浅と比べ石英や長石類等の無色鉱物が粗粒となる傾向を示す。

6.10~6.40mabh、7.20~7.40mabhでは長石類の変質による脱色が認められる。13.53~13.66mabh、14.37~14.54mabh、16.90~17.20mabh、19.90~20.10mabhではコア全体に弱度の溶脱を被る(図 5.1-57)。



図 5.1-55 19MI66 号孔 変質の程度、割れ目充填物の分布



白色(7.20mabh 付近) 淡桃色(24.50mabh 付近) 淡赤褐色(25.20mabh 付近)
 図 5.1-56 19MI66 号孔 長石類の色調の違い



図 5.1-57 19MI66 号孔 長石類の溶脱(左:14.45mabh 付近、右:19.90mabh 付近)

割れ目沿いの変質について、以下に特徴を述べる。

- ・2.76~2.78mabh 割れ目内に砂状変質物が充填されている。
  ・3.67~4.00mabh 割れ目沿いの母岩に弱い変質、破砕を被る。
- ・6.06mabh 付近 割れ目周辺の母岩が変質を被り、硬度はやや軟質である。
- ・8.69~8.71mabh (図 5.1-58)
- 破砕を受け、一部粘土質を示す。
- ・9.07~9.11mabh
   割れ目周辺の母岩の硬度がやや脆い。
- ・10.23mabh
   割れ目沿いの母岩が破砕を被る。
- ・11.21~11.24mabh (図 5.1-58) 割れ目間が破砕し、断層角礫岩を呈する。
- ・24.00mabh 付近 割れ目沿いの母岩硬度が脆い。
- ・27.66~27.96mabh 傾斜角 50°の短柱状コアが連続し、断層角礫岩を呈する。



図 5.1-58 19MI66 号孔 割れ目沿いの変質(左:8.70mabh 付近、右:11.20mabh 付近)

割れ目充填鉱物は、絹雲母、緑泥石、方解石、粘土を主体とし、少量の赤鉄鉱も認められる。以下にその分布区間や特徴について述べる。

・絹雲母

白色~淡緑色を呈し、3.59~4.13mabh、24.00~28.99mabh では、数多くの割れ目面で確認される。3.69~4.00mabhの割れ目では、特に絹雲母の濃集がみられる。白色と淡緑色の色調は、深度により区別される傾向があり、0.00~3.00mabh、18.00~21.00mabhでは白色(図 5.1-59 右)、それ以外の深度では淡緑色(図 5.1-59 左)を呈する。



図 5.1-59 19MI66 号孔 絹雲母が挟在する割れ目(左:9.46mabh 付近、右11.91mabh 付近)

・緑泥石

暗緑色を呈し、1.56~5.65mabhの割れ目面、7.37mabh、28.07mabhの割れ目、鉱物脈として存在する(図 5.1-60)。深度 300m ボーリング横坑西側のボーリング孔や、昨年度掘削した東側のボーリング孔では、カタクラサイトの基質部の緑泥石化や緑泥石による細脈の充填が確認されていたが、19MI66 号孔では、これらの発達は稀である。



図 5.1-60 19MI66 号孔 緑泥石が付着する割れ目(7.37mabh 付近:粘土・方解石が共存)

・炭酸塩鉱物(方解石)

淡灰色~灰色を呈し、2.52~3.88mabh、5.56~5.65mabh、7.28~7.37mabh、23.8~25.87mabh (図 5.1-61) 、26.79~28.07mabh、28.99~29.23mabhの割れ目で認められる。方解石は灰色の 粘土鉱物の中に含まれ、セリサイトやスメクタイト等と混在していることもあるため、塩酸を滴下し、 発泡の有無で存在を判断した。



図 5.1-61 19MI66 号孔 方解石が挟在する割れ目(25.17mabh 付近)

・粘土

19MI66 号孔 の 1.00~10.00mabh と浅い深度に分布が集中しており、特に 3.59~5.65mabh、8.44 ~9.09mabh で認められる。7.37mabh の割れ目では粘土の集塊(図 5.1-62)があり、方解石と共存 する。



図 5.1-62 19MI66 号孔 粘土が充填する割れ目 (7.37mabh)

# ・赤鉄鉱

赤鉄鉱は 23.23mabh、27.79mabh、27.91mabh で認められる。1.55mabh、2.55mabh 付近のコア 外周にも、赤鉄鉱と考えられる赤褐色鉱物の存在が認められる。

## ③割れ目

割れ目の発達状況に基づき、19MI66 号孔を 10 区間に区分して以下に記述する。ボーリング掘進方向に対して、割れ目が発達する傾斜角を低角 ( $0 \le n < 30$ )、中角 ( $30 \le n < 60$ )、高角 ( $60 \le n < 90$ )の 3 種に分類すると、いずれの区分においても中角が優勢である。なお、割れ目密度については、コア観察時に分離した(非密着)状態の構造性割れ目の本数とし、「TorD(引張、または機械割れ目)」と判定した割れ目もカウント数に含めた。

図 5.1-63 に 1mabh ごとの割れ目密度分布および各角度の割れ目密度分布を示す。

・0.0~2.0mabh 区間

割れ目が少ない区間であり、割れ目密度は 4~5 本/m である。

・2.0~7.0mabh 区間

割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は 9~14 本/m である。3.67~4.00mabh では変質を伴う 破砕を受けており、コア状態は CL 級を示す。

・7.0~8.0mabh 区間

割れ目が少ない区間であり、割れ目密度は6本/mである。

・8.0~12.0mabh 区間

割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は 10~13 本/m である。8.69~8.71mabh では破砕を受けて一部粘土質を示す。10.23mabh 付近では割れ目沿いに破砕が認められる。11.21~11.24mabh では、割れ目間が破砕を受けて断層角礫岩を呈しており、脆い。8.77mabh、8.79mabh では条線が確認される。

・12.0~14.0mabh 区間

割れ目が少ない区間であり、割れ目密度は7本/mである。13.65mabhでは、割れ目面に鉱物の伸長が確認できる。

・14.0~21.0mabh 区間

割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は 8~14 本/m である。17.03~17.05mabh では砂状コア、 17.05~17.20mabh では角礫状コアを呈する。14.35mabh、19.90mabh、20.04mabh、20.72mabh では条線が確認される。

・21.0~24.0mabh 区間

割れ目が少ない区間であり、割れ目密度は4本/mである。

・24.0~25.0mabh 区間

割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は16本/mである。

•25.0~27.0mabh 区間

割れ目が少ない区間であり、割れ目密度は2~5本/mである。

•27.0~29.3mabh 区間

割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は 11~18 本/m である。27.66~27.96mabh では傾斜角 50°程度の割れ目が連続する短柱状コアとなり、断層角礫岩を呈する。27.79mabh、27.91mabh では 条線が確認される。29.00~29.30mabh の 0.30m 長の区間では、4 本の割れ目が認められ、1m あたりに 換算すると 13.3 (本/m) である。

## 4 岩盤等級と RQD

19MI66 号孔の岩盤等級は、鶴田ほか (2012) のコア観察記載要領に基づき変質の程度から判断する。 B 級が 3.0mabh、CH 級が 12.0 mabh、CH~CM 級が 1.0 mabh、CM 級が 6.0 mabh、CH~CL 級が 8.0 mabh と判定される。

RQD は全孔平均で 70 を示し、特に低い区間として、15.0~16.0mabh で 29、24.0~25.0mabh で 27 を示す(図 5.1-63)。

割れ目密度(本/m)は全孔平均で 9.7 を示し、割れ目密度が特に高い区間として、24.0~25.0mabh、27.0~28.0mabh でそれぞれ 18 を示す。



# 3) キャリパー検層

図 5.1-64 に 19MI66 号孔のキャリパー検層結果を示す。

ケーシングの下端は 5.80mabh であり、その直下で孔径が拡大する箇所が認められる。これは、一段 目掘削時に余堀り(掘削径最大 $\phi$ 140mm)で拡掘した影響である。7.0mabh 以深で顕著に孔径が拡大 する箇所は認められない。数 mm の孔径変化については、花崗岩が変質を被り孔壁面が脆い部分(凹凸 が表れている部分)と考えられる。



図 5.1-64 19MI66 号孔のキャリパー検層結果

# 4) 高精度孔曲がり検層

19MI66 号孔の掘削総長 29.3mabh について、高精度孔曲がり検層を実施した。図 5.1-65 にボーリ ング孔跡の平面図、表 5.1-14 に 19MI66 号孔の掘削方向の計画、および実績を示す。また、掘削方向 の計画に対する実績の差異について、水平方向(図 5.1-66)および上下方向(図 5.1-67)でまとめた。 掘削方向のうち、水平方向は計画に対して時計回りに約1°、上下方向は 10cm 程度のずれが生じた。 この偏りは、ボーリングロッドのしなりや、岩盤の不均質性によるビットのずれなどが蓄積することで 生じる。過年度事業の孔曲がりの結果と比較しても、偏り程度は同等である。



図 5.1-65 ボーリング孔跡図(計画と実績)

表 5.1-14	掘削方向の計画と実績
----------	------------

71	19MI66号孔					
九田	計画	実績				
掘削深度	40.00mabh	29.30mabh				
掘削方向	S55°E -40°(水平下向き)	S53.9°E -39.9°(水平下向き)				





5) フローメータ検層

60

50

19MI66 号孔のフローメータ検層の結果を図 5.1-68 に示す。流量変化がみられる区間は、深部より 28.0mabh 付近、24.2mabh 付近である。28mabh 以深で孔内湧水量の 9 割を超える約 55L/min が確認 されており、24.2mabh 以浅の僅かな流量変化については、測定誤差との判別が難しい。なお、29mabh 以深については、孔内湧水量 50L/min で排水される掘削水を処理することが困難と判断し、掘削を中断している。

19MI66 号孔と深度 300m ボーリング横坑東側(18MI63 号孔、18MI64 号孔)の結果(日本原子力 研究開発機構・電力中央研究所, 2019)を比較すると、19MI66 号孔の孔内湧水量は 18MI63 号孔と同 様の傾向であるが、流量変化の点では 18MI63 号孔でみられるような明瞭な流量変化は 19MI66 号孔で 確認されない。しかし、19MI66 号孔の 29mabh 以深を掘削した場合、更なる湧水ポイントが出現し、 18MI63 号孔の流量変化の傾向に近づく可能性はあると考えられる。

一方、18MI64 号孔の孔内湧水量は 42mabh の掘削長に対し約 8L/min と少なく、18MI63 号孔、 19MI66 号孔付近の水理場とは異なることが示唆される。





図 5.1-69 フローメータ検層結果(左:18MI63 号孔、右:18MI64 号孔)

#### 6) 水理試験

水理試験の試験孔は、新規孔の19MI66 号孔に加え、18MI63 号孔を対象とした。18MI63 号孔の水 理試験は、日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2019)で実施しているが、19MI66 号孔を掘削 したことによる場の変化が生じているため、その影響を確認することを目的とする。19MI66 号孔につ いては、湧水割れ目の本試験(定流量揚水試験)に先立ち、試験区間の絞りこみを目的として湧水量測 定を行った。事前に孔全体の湧水量分布を把握するため、2.6m 区間長の湧水量を測定し(図 5.1-70)、 ボーリング掘削時の湧水量記録(図 5.1-54)、フローメータ検層結果(図 5.1-68)などと合わせて大枠 の試験区間を絞った。これらの結果基づき湧水量測定区間を 4 箇所(11.87~17.07mabh、 19.67~22.27mabh、22.27~27.47mabh、27.47mabh~)に絞り、ボーリングコア記載等を参考に水みち 割れ目と考えられる位置を考慮しながら、湧水量が多い箇所を探った。18MI63 号孔については、日本 原子力研究開発機構・電力中央研究所(2019)で実施した試験区間を参考に、4 箇所(36.0mabh~、 31.5~32.5mabh、26.0~29.0mabh、22.0mabh 付近)に含まれる湧水割れ目の再試験を行った。

表 5.1-15、表 5.1-16 に、19MI66 号孔、18MI63 号孔の湧水量測定結果を示す。湧水量測定の結果 は、フローメータ検層時に同時測定した BTV の孔壁展開画像(割れ目は赤線でトレース)と試験区間 深度を対比し、推定される湧水割れ目の分布状況を整理した(19MI66 号孔:図 5.1-71~図 5.1-75、 18MI63 号孔:図 5.1-76~図 5.1-80)。



図 5.1-70 19MI66 号孔 2.6m 区間長の湧水量測定結果

		試験深度		区間長	湧水量
対象区間	実施日	上端	下端		1 /min
		mabh	mabh	m	L/ min
28.70mabh以深	8/2	28.70	29.30	0.60	41.30
湧水割れ目	8/8	28.80	29.30	0.50	42.80
	"	28.85	29.30	0.45	41.30
ゾーン①	"	28.90	29.30	0.40	28.50
	"	28.93	29.30	0.37	22.10
	8/2	28.96	29.30	0.34	5.30
	8/8	28.97	29.30	0.33	5.30
28.20mabh付近	8/19	27.65	29.30	1.65	48.90
湧水割れ目	"	27.77	29.30	1.53	48.50
	"	27.85	29.30	1.45	48.20
ゾーン2	"	28.00	29.30	1.30	47.10
	"	28.20	29.30	1.10	47.70
	"	28.30	29.30	1.00	47.20
	"	28.40	29.30	0.90	43.30
	"	28.50	29.30	0.80	41.30
24.20mabh付近	8/20	23.80	29.30	5.50	51.40
湧水割れ目	"	24.10	29.30	5.20	51.00
	"	24.20	29.30	5.10	50.70
ゾーン③	"	24.50	29.30	4.80	49.80
	"	24.70	29.30	4.60	49.80
	"	24.90	29.30	4.40	49.70
	8/21	23.13	23.70	0.57	0.40
	"	23.43	24.00	0.57	3.20
	"	23.53	24.10	0.57	2.10
	"	23.73	24.30	0.57	2.40
試験対象外	8/22	22.10	22.67	0.57	0.05
	"	22.23	22.80	0.57	0.03
20.70mabh付近	8/22	19.63	20.20	0.57	0.08
湧水割れ目	"	20.43	21.00	0.57	0.32
ゾーン④	"	20.73	21.30	0.57	0.02
14.00mabh付近	8/23	13.20	13.77	0.57	0.08
湧水割れ目	"	13.55	14.12	0.57	0.08
	"	13.68	14.25	0.57	0.74
ゾーン⑤	"	13.73	14.30	0.57	0.78
	"	13.78	14.35	0.57	0.83
	"	13.83	14 40	0.57	0.78

表 5.1-15 19MI66 号孔 湧水割れ目特定のための湧水量測定結果(黄色行:本試験)



図 5.1-71 試験対象区間 27.47mabh<sup>~</sup> 孔底の湧水量測定深度と割れ目分布①~③



図 5.1-72 試験対象区間 27.47mabh<sup>~</sup>孔底の湧水量測定深度と割れ目分布④~⑤



図 5.1-73 試験対象区間 22.27<sup>~</sup>27.47mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑥



図 5.1-74 試験対象区間 19.67<sup>~</sup>22.27mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑦



図 5.1-75 試験対象区間 11.87~17.07mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑧

		試験深度		区間長	湧水量
対象区間	実施日	上端	下端		1.7.1
		mabh	mabh	m	L/ min
36.00mabh以深	10/3	36.00	37.20	1.20	21.50
湧水割れ目	"	36.20	37.20	1.00	21.60
	10/2	36.30	37.20	0.90	21.70
ゾーン①	10/3	36.33	37.20	0.87	21.70
	"	36.45	37.20	0.75	21.60
	"	36.55	37.20	0.65	21.50
	10/2	36.60	37.20	0.60	21.20
	10/3	36.65	37.20	0.55	13.50
	10/2	36.70	37.20	0.50	12.00
	"	36.80	37.20	0.40	9.30
26.0~29.0mabh	10/8	25.73	26.30	0.57	1.60
湧水割れ目群	"	25.78	26.35	0.57	3.70
	10/7	26.28	26.85	0.57	15.00
ゾーン②	10/8	26.35	26.92	0.57	13.20
	"	26.40	26.97	0.57	12.60
	10/7	26.48	27.05	0.57	1.40
	"	26.90	27.47	0.57	0.30
	10/8	26.98	27.55	0.57	13.00
	10/7	27.05	27.62	0.57	14.10
	10/9	27.20	27.77	0.57	14.50
	10/8	27.33	27.90	0.57	16.20
	10/9	27.47	28.04	0.57	14.20
	10/8	27.55	28.12	0.57	14.60
	10/9	27.79	28.36	0.57	14.70
	"	28.05	28.62	0.57	14.00
	10/8	28.12	28.69	0.57	12.00
	10/9	28.55	29.12	0.57	10.10
	"	28.62	29.19	0.57	8.80
	10/8	28.70	29.27	0.57	0.60
31.5~32.5mabh	10/11	30.83	31.40	0.57	0.60
湧水割れ目	"	31.10	31.67	0.57	1.80
	10/10	31.40	31.97	0.57	1.90
ゾーン③	"	31.65	32.22	0.57	1.80
	"	32.00	32.57	0.57	1.80
	10/11	32.27	32.84	0.57	1.30
	10/10	32.50	33.07	0.57	0.60
	10/11	32.60	33.17	0.57	0.50
22.0mabh付近	10/15	20.50	21.07	0.57	0.90
湧水割れ目	"	21.16	21.73	0.57	0.50
	"	21.73	22.30	0.57	1.70
ゾーン④	"	22.30	22.87	0.57	1.80
	"	22.65	23.22	0.57	0.80

表 5.1-16 18MI63 号孔 湧水割れ目特定のための湧水量測定結果(黄色行:本試験)



図 5.1-76 試験対象区間 36.0mabh 以深の湧水量測定深度と割れ目分布①~2



図 5.1-77 試験対象区間 26.0<sup>~29.</sup>0mabh の湧水量測定深度と割れ目分布③



図 5.1-78 試験対象区間 26.0<sup>~29</sup>.0mabh の湧水量測定深度と割れ目分布④~⑤



図 5.1-79 試験対象区間 31.5<sup>~</sup>32.5mabh の湧水量測定深度と割れ目分布⑥



図 5.1-80 試験対象区間 22.0mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布⑦

19MI66 号孔の湧水量測定結果(表 5.1-15、および図 5.1-71~図 5.1-75)から選定した 8 箇所を対象とし、定流量揚水試験を実施した。試験結果を表 5.1-17 に示す。

定流量揚水試験の解析は、非定常解析法の Cooper-Jacob 法(揚水過程)、Agarwal 法(回復過程)、 定常解析法の Hvorslev 法(定圧時)により透水量係数を求め、それらの結果について検討した(解析 図は付録 5.1-3 参照)。

三者の結果を比較する際、圧力変化と Derivative Plot との相関性、貯留係数の数値の妥当性を判断 基準とし、Hvorslev 法で求めた透水量係数を採用した。Cooper-Jacob 法、Agarwal 法の双方に共通し た特徴として、揚水開始、および揚水停止直後に瞬間的な圧力低下、および圧力回復の挙動を圧力変化 のグラフで示している。本試験で対象としている湧水割れ目は、湧水量が大きい割れ目としているため、 透水性が非常に良い。しかし、Derivative Plot の水平が取れる区間での貯留係数は、現実的ではない非 常に小さな値を示す。これは、試験孔周辺の局所的な貯留係数を示し、極小に見積もられていると考え られる。

一方で Hvorslev 法では、定流量揚水試験で一時間揚水をしているうち、shut-in する 10 分前からの データを用いて透水量係数を求めた。試験区間が一定圧力であるデータであることに留意し、貯留係数 でも比較的妥当な値であることが確認できたため、Hvorslev 法での結果を採用した。

昨年度実施した 18MI63 号孔の定流量揚水試験区間(表 5.1-19)を参考に、湧水量測定と定流量揚水 試験(図 5.1-76~図 5.1-80)を再実施した。試験結果を表 5.1-18 に示す。

定流量揚水試験の解析は、非定常解析法の Cooper-Jacob 法(揚水過程)、Agarwal 法(回復過程)、 定常解析法の Hvorslev 法(定圧時)により透水量係数を求め、それらの結果について検討した(解析 図は付録 5.1-3 参照)。

今年度の試験では、ラバー有効長1.4mのパッカーを使用しており、パッカー連結の治具長の関係から試験区間が十 cm 程度異なっているが、試験 No.4 を除いて湧水量は昨年度と同等である。試験 No.4 の湧水量の違いについては、試験対象区間周辺の湧水割れ目を止水するラバー長が昨年度試験(約50cm)の倍以上に延長しているため、高角度~水平割れ目が複雑に交差する27.0~28.0mabh区間の湧水割れ目をパッカーで完全に止水したことにより、試験区間に集水したと考えられる。故に27.0~28.0mabh区間の湧水割れ目は独立しておらず、高角度割れ目や水平割れ目をネットワーク状に伝播していると推察される。

透水量係数については、昨年度同様 Hvorslev 法での結果を採用した。定流量揚水試験で一時間揚水を しているうち、試験区間が一定圧力であるデータであった shut-in する 10 分前からのデータを用いて 透水量係数を求めた。

ボーリング横坑東側の3 孔で実施した水理試験結果を図 5.1-81 に示す。3 孔で確認される透水量係数 は 10<sup>8</sup>~10<sup>5</sup> オーダーであり、ボーリング横坑西側の透水量係数のオーダー(電力中央研究所, 2015) と同等である。透水性の傾向は、18MI63 号孔、19MI66 号孔は孔底付近で透水性が良い傾向がみられ る一方、18MI64 号孔は前者2 孔と比べて全体的に透水性は悪く、コア観察からも割れ目充填鉱物が多 く、母岩変質を被っている傾向がある。18MI64 号孔の下部は、主立坑断層によるダメージゾーン(鶴 田ほか, 2012)に差し掛かっている可能性が高く、18MI63 号孔、19MI66 号孔周辺と場が異なると推 定される。

Na	計除口	<sub>* 陸口</sub> 試験区間	測定区間長	湧水量	揚水量	透水量係数(m <sup>2</sup> /sec)		
INO.	こ 利利 クロ	(mabh)	(m)	(L/min)	(L/min)	Jacob	Agarwal	Hvorslev
-	2019/8/7	28.70-29.30	0.6	41.30	12.40	5.16E-05	3.91E-05	5.25E-06
/	2019/8/8	28.70-29.30	0.6	41.30	5.40	5.16E-05	3.91E-05	5.25E-06
6	2019/8/9	28.97-29.30	0.33	5.30	2.50	5.50E-05	3.84E-05	8.52E-07
5	2019/8/20	28.30-29.30	1.0	47.10	8.10	4.64E-05	7.29E-05	1.02E-05
4	2019/8/21	28.40-29.30	0.9	43.60	8.20	5.06E-05	4.36E-05	8.99E-06
3	2019/8/22	23.43-24.00	0.57	2.00	0.46	1.14E-05	3.26E-05	4.74E-07
2	2019/8/23	20.43-21.00	0.57	0.35	0.10	1.73E-07	5.12E-06	6.79E-08
1	2019/8/26	13.68-14.25	0.57	0.86	0.14	2.09E-07	2.11E-07	1.14E-07

表 5.1-17 19MI66 号孔 定流量揚水試験の結果

表 5.1-18 18MI63 号孔 定流量揚水試験の結果

Ne	計除口	試験区間	間 測定区間長 間隙水日		湧水量	揚水量	透水量係数(m <sup>2</sup> /sec)		
INO.	武 殿 口	(mabh)	(m)	(MPa)	(L/min)	(L/min)	Jacob	Agarwal	Hvorslev
7	2019/10/7	36.3-37.2	0.9	1.619	21.3	5.2	6.70E-05	4.83E-05	3.35E-06
6	2019/10/3	36.7-37.2	0.5	1.619	11.8	3.1	7.60E-05	5.06E-05	1.49E-06
5	2019/10/9	26.35-26.92	0.57	1.616	13.2	4.7	7.11E-05	4.48E-05	1.41E-06
4	2019/10/10	27.47-28.04	0.57	1.616	14.1	5.1	6.82E-05	4.97E-05	1.24E-06
3	2019/10/11	28.55-29.12	0.57	1.617	10.1	3.3	2.35E-05	5.45E-05	8.89E-07
2	2019/10/15	31.10-31.67	0.57	1.614	1.8	0.36	2.84E-06	3.23E-05	2.45E-07
1	2019/10/16	22.30-22.87	0.57	1.612	1.8	0.36	2.68E-06	1.23E-05	3.55E-07

表 5.1-19 18MI63 号孔 定流量揚水試験の結果(日本原子力研究開発機構・電力中央研究所, 2019)

20	I	9	)	

No	計除口	試験区間	測定区間長	間隙水圧	湧水量	揚水量	量 透水量係数(m <sup>2</sup> /sec)		sec)
NO.	品式海火 山	(mabh)	(m)	(MPa)	(L/min)	′min) (L/min)	Jacob	Agarwal	Hvorslev
7	2018/11/14	36.30-37.20	0.9	1.619	21.7	8.4	1.61.E-06	8.76.E-05	2.52.E-06
6	2018/11/15	36.70-37.20	0.5	1.619	9.6	3.6	1.25.E-05	1.02.E-04	1.12.E-06
5	2018/11/16	26.25-26.82	0.57	1.614	14.9	5.1	4.18.E-05	6.19.E-05	1.58.E-06
4	2018/11/12	27.33-28.00	0.67	1.617	26.3	6.7	9.13.E-05	6.00.E-05	3.58.E-06
3	2018/11/9	28.16-28.83	0.67	1.616	8	2.4	5.88.E-05	6.40.E-05	2.84.E-06
2	2018/11/8	31.00-31.67	0.67	1.616	1.5	0.4	1.44.E-07	9.92.E-07	2.16.E-07
1	2018/11/13	22.26-22.93	0.67	1.612	1.9	0.5	1.13.E-06	1.55.E-06	2.85.E-07



図 5.1-81 ボーリング横坑東側のボーリング孔3孔の水理試験結果

## 7) 高解像度 BTV 検層

高解像度 BTV 検層で撮影した壁面の展開画像(付録 5.1-4)から、全岩盤分離面の走向傾斜を解析して整理した。全岩盤分離面は、割れ目、開口割れ目、鉱物脈などを全て含めたものとしている。19MI66 号孔の全岩盤分離面の内訳を表 5.1-20、19MI66 号孔を含めたボーリング横坑東側 3 孔の全岩盤分離 面、割れ目(0.1mm 未満)、開口割れ目(開口幅 0.1mm 以上)のステレオネット投影図を図 5.1-82 に示す。

19MI66号孔の割れ目の特徴として、NE方向、およびENE方向の高角度割れ目、水平割れ目に集中 し、開口割れ目はNE方向、水平割れ目に集中する傾向がみられる。19MI66号孔(NW方向/40°伏角) は、NE方向割れ目との遭遇率が最も高くなりやすく、計測結果(NE方向、およびENE方向の高角度割 れ目)と整合する。

19MI66号孔の1mあたりの割れ目密度は8.6条/mであり、18MI63号孔の9.1条/m、18MI64号孔の12.6 条/m(日本原子力研究開発機構・電力中央研究所,2019)と同等である。各孔同程度の割れ目密集であ ると判断し、孔あたりの割れ目、開口割れ目の割合で比較する(図 5.1-83)と、18MI63号孔、18MI64 号孔が3割程度であるのに対し、19MI66号孔は0.5割に満たない。19MI66号孔の水平割れ目の分布密度 は2.7条/mであり、18MI63号孔の2.1条/m、18MI64号孔の3.1条/m(日本原子力研究開発機構・電力中 央研究所,2019)と同等である。こちらも各孔同程度の割れ目密集であると判断し、孔あたりの水平割 れ目の占有率で比較すると、各孔開口していない水平割れ目の割合は全体の20~30%、開口した水平割 れ目の割合は2~4%と同程度の遭遇率である。

各孔の高傾斜割れ目について、割れ目、開口割れ目の割合を比較する(図 5.1-84)と、高傾斜の開口

割れ目の割合は、18MI63号孔、18MI64号孔の3割に対して19MI66号孔は0.2割と劇的に少ない。割れ 目、開口割れ目に限らず、18MI63号孔はNE方向、18MI64号孔はNW方向の占有率が高く、掘削方向 による遭遇率の影響を受けていると考えられる。

ボーリングコア観察、水理試験結果、壁面の展開画像などに基づいて水みち割れ目を7箇所選定し、 詳細観察(付録5.1-5)を実施した。水みち割れ目の詳細観察箇所について、表 5.1-21に示す。

19MI66 号孔の水みち割れ目とされる方向は NW 方向であり、多くが N~NE 方向へ傾斜する水平割 れ目(傾斜 30 度以下)である。一方、18MI63 号孔は、NW~NE 方向/W 方向傾斜の高傾斜割れ目、 18MI64 号孔は、NW~NE 方向/垂直に近い高傾斜割れ目の傾向が強い(日本原子力研究開発機構・ 電力中央研究所, 2019)。単純に19MI66 号孔の NW 方向 NE 傾斜の水平割れ目が一面で伸びていると 仮定すると、18MI63 号孔、18MI64 号孔の水みち割れ目と交わる可能性は低い。

孔番	19MI66号孔
測定区間長 (m)	24.3
全岩盤分離面(条)	210
割れ目(条)	202
開口割れ目(条)	7
鉱物脈(条)	1
全岩盤分離面の分布密度(条/m)	8.6
全岩盤分離面の平均間隔(m)	0.1

表 5.1-20 19MI66 号孔 全岩盤分離面の内訳



図 5.1-82 ボーリング横坑東側ステレオネット



図 5.1-83 割れ目総数における割れ目、開口割れ目の割合と割れ目傾斜の占有率



図 5.1-84 高傾斜割れ目総数における割れ目開口率の割合と割れ目方向の占有率

衣 3.  -2    9  100 万七。 水みら割れ日の詳細観祭園所と用し	表 5.1-21	19MI66 묵귀.	水みち割れ目の詳細観察箇所と開口
---	----------	------------	------------------

No.	深度(mabh)	走向	傾斜	開口幅(mm)	区間湧水量(L/min)	備考
1	23.9	N 30W	86NE	0.13	2.0	かみ合わせ悪い部分にCalの自形結晶
2	27.82	N 29W	20E	0.04	4.4%1	て相則かつといった割を日
3	27.92	N 52W	29NE	0.06	1.4 <sup>m</sup> 1.4 <sup>m</sup> 个 成則かうVuggyな割れ日	个規則がうVuggyな割れ日
4	28.47	N 47W	11NE	0.2	43.6 <sup>%2</sup> (3.9 <sup>%3</sup> )	充填鉱物少ない
5	28.42	N 66W	10N	0.13	47.1 <sup>%4</sup> (2.0 <sup>%5</sup> )	充填鉱物少ない
6	28.99	N 33W	7E	0.17	41.0	かみ合わせ悪い部分にCalの自形結晶
7	29.03	N 40W	9NE	0.09	41.3	かみ合わせ悪い部分にCalの自形結晶

※1: 湧水量計測結果の差分から、27.77~28.0m区間の湧水量を明記。

※2:28.4~29.3m(孔底)の湧水量。中間パッカーを含めたダブルパッカー編成で計測。

※4:28.3~29.3m(孔底)の湧水量。中間パッカーを含めたダブルパッカー編成で計測。

※5: 湧水量計測結果の差分から、28.3~28.4m区間の湧水量を明記。

# 8) 弾性波探査

①三次元弾性波トモグラフィ

# (a) 調査数量

三次元弾性波走時トモグラフィは、18MI63 号孔、18MI64 号孔、19MI66 号孔の3 孔全てを利用し、 8)に示す方法による調査を行った。調査数量表を表 5.1-22 に示す。

1				
測定1	名称	深度(m)	間隔(m)	点数
発振孔	18MI63	0-37	0.25, 0.5, 1	115
受振孔	18MI64	6.5-42	0.5	72
測定2	名称	深度(m)	間隔(m)	点数
発振孔	18MI64	0-42	1	43
受振孔	18MI63	0-37	1	38
測定3	名称	深度(m)	間隔(m)	点数
発振孔	19MI66	0-29	0.5	59
受振孔1	18MI63	1.5-37	0.5	72
発振孔2	18MI64	6.5-42	0.5	72

# 表 5.1-22 調査数量表 (三次元弾性波トモグラフィ)

<sup>※3:</sup> 湧水量計測結果の差分から、28.4~28.5m区間の湧水量を明記。

(b) 調査結果·考察

三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面の三次元表示図を図 5.1-85 に示す。また、各孔間の二次元断面上に示した速度断面を図 5.1-86、図 5.1-87、図 5.1-88 にそれぞれ示す。なお、図 5.1-87 に示す 18MI63 と 19MI66 との断面に関しては、ねじれが大きく両孔間の二次元断面として示すことが困難であったため、18MI63 号孔の孔口、孔底と 19MI66 号孔の孔底の 3 点を結んだ面上における二次元断面を示している。

得られた速度断面のうち、暖色系で示される低速度帯が亀裂帯あるいは変質帯と推察できる。そこで、 坑道周辺の花崗岩体の弾性波速度(P波速度)を概ね 5,500m/s であると考え、解析結果のうち、P波 速度値が 5,000m/s を下回る領域を抽出した。解釈した低速度帯に黒枠線を施した低速度帯の分布を図 5.1-90 に示す。黒枠線の内部が低速度帯である。図より、調査領域内の低速度帯は、孔口から掘削深度 9mabh 程度まで、掘削深度 14~20mabh 付近まで、掘削深度 25mabh~孔底までの概ね 3 つの領域に 分けることができる。

続いて、これら低速度帯の位置と既存地質情報とを比較するため、電磁フローメータ検層から湧水帯 と判断される深度を解釈図に青丸でプロットした(図 5.1-90)。同図の寒色で示された球が電磁フロー メータ検層より得られた湧水の発生深度であり、寒色が濃いほど湧水量が大きいことを示している。ま た、同図には、電磁フローメータ検層の湧水発生深度とトモグラフィ解析結果の低速度帯から、亀裂と 解釈される位置に白破線を示した。電磁フローメータ検層によって得られた湧水割れ目は掘削深度で概 ね 20mabh 以深に集中しており、三次元弾性波トモグラフィの解析結果においても低速度帯が支配的 であることから、これらは整合的である。また、掘削深度 14~20mabh 付近の低速度帯についても、対 応する湧水割れ目が観測されていることから、これに対応する低速度帯として検出されていることが分 かる。

弾性波トモグラフィの結果からは、割れ目が集中している割れ目帯の位置を検出するのみで、個々の 亀裂がどのように枝分かれし、連結しているかを明らかにするだけの分解能は有していないが、18MI63 号孔と 18MI64 号孔との間で連結している割れ目帯の位置を概ね明らかにすることはできたと考えら れる。図 5.1-90 に記した割れ目 A と割れ目 B は低速度帯が 18MI63 号孔と 18MI64 号孔との間に途 切れずに連結しており、両孔間を連結していると解釈できる。



図 5.1-85 三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(三次元表示)



図 5.1-86 三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(18MI63 号孔-18MI64 号孔間の 二次元表示)



図 5.1-87 三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(18MI63 号孔-19MI66 号孔間の 二次元表示)



図 5.1-88 三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(18MI64 号孔-19MI66 号孔間の 二次元表示)



図 5.1-89 三次元弾性波トモグラフィにおける低速度帯の分布(18MI63 号孔-18MI64 号孔間の二 次元断面上において、5,000m/s を下回る領域を黒枠で示している)



図 5.1-90 電磁フローメータ検層と三次元弾性波トモグラフィの統合解釈図

# ② VSP 探査

## (a) 調査数量

VSP 探査は、調査地点に掘削された3本のボーリング孔のうち、18MI63 号孔と18MI64 号孔の2孔 に受振器としてハイドロフォンを挿入し、坑道坑壁をハンマーで起振することによりデータ取得を行った。調査数量表を表 5.1-23 に示す。

	名称	深度(m)	間隔(m)	点数
発振点	深度300m横孔壁面		-	13
受振孔1	18MI63	0-37	1	38
発振孔2	18MI64	0-42	1	43

表 5.1-23	調査数量表	(VSP 探査)

#### (b) 調査結果・考察

8)に示す方法により、VSP 結果断面を得た。VSP 探査結果図(三次元表示)を図 5.1-91 に示す。また、調査領域内の亀裂帯の解釈に供するため、18MI63 号孔と 18MI64 号孔との二次元断面を切り出した図(図 5.1-92)を作成した。

探査結果において見られた反射イベントは、弾性波速度が変化する地点において発生した反射波によ りイメージされている。坑道周辺岩盤はすべて花崗岩であることから、反射面となりうる箇所は亀裂帯 や変質帯等に限られると考えられることから、VSP 探査より得られた反射イベントは、調査地点に存在 する亀裂帯や変質帯等との境界と解釈することができる。VSP 探査結果の解釈図を図 5.1-93 に示す。 VSP 探査解釈図は、VSP 探査解析結果に表れた特徴的な反射イベントに青線を重ねたものである。青 線で記した位置付近に亀裂帯が存在するものであると考えることができる。VSP 探査解釈結果からは、 掘削深度で 25~30mabh 付近に反射イベントが集中していることが分かる。



図 5.1-91 VSP 探査結果図(三次元表示)



図 5.1-92 VSP 探査結果図(18MI63 号孔-18MI64 号孔間の二次元表示)


図 5.1-93 VSP 探査結果の解釈図

#### ③ 三次元弾性波トモグラフィと VSP 探査結果の比較

①で示した三次元弾性波トモグラフィと、②で示した VSP 探査の結果から、調査地点の亀裂帯の分 布等をより詳細に検討することを目的に、両探査結果の重ね合わせを行った。三次元弾性波トモグラフ ィと VSP 探査結果とを重ね合わせた図を図 5.1-94 に示す。

図より、三次元弾性波トモグラフィ探査で 20mabh 以深に観測されている低速度帯の位置と、VSP 探査より得られた反射イベントとの位置が整合しており、同掘削深度付近において、亀裂帯が支配する 地質状況となっていることが分かる。一方、三次元弾性波トモグラフィで亀裂帯と解釈した掘削深度 14 ~20mabh に関しては、VSP 探査で反射面が観測されていない。これは、亀裂帯の存在を否定するもの ではなく、亀裂帯は同地点に存在するものの、VSP 探査においては観測されていないと考えられる。

両探査結果の重ね合わせ図(図 5.1-94)に、電磁フローメータ検層より得られた湧水箇所をプロット した結果図を図 5.1-95 に示す。上述の通り、電磁フローメータ検層からはボーリング掘削深度で概ね 20mabh 以深に高い湧水量を有する箇所が多く確認されている。さらに、同深度では三次元弾性波トモ グラフィにおける低速度帯、VSP 探査における反射イベントが観測されている。以上より、同掘削深度 において亀裂が卓越していると考えられる。また、三次元弾性波トモグラフィで低速度帯が観測されな がら、VSP 探査では反射面が観測されていない 14~20mabh についても、電磁フローメータ検層にお いて湧水が観測されていることから、亀裂帯が存在していると解釈できる。以上より、同調査地点にお いては、掘削深度 14~20mabh 付近、掘削深度 25mabh 以深において、亀裂が卓越していると考える ことができる。

本調査では、調査地点に掘削されている3孔のボーリング孔において、どの2孔の組み合わせも同一 平面内にないことから、一般的に適用されることが多い二次元探査を適用することが困難である。そこ で、三次元弾性波トモグラフィおよび VSP 探査を併用し、その両者に既存地質情報である電磁フロー メータ検層の情報を加えることにより、調査地点の亀裂帯の位置を把握することができた。本調査地点 に限らず、坑道内に水平方向に掘削したボーリング孔を用いた調査を実施する場合、ボーリング孔が同 一平面上にない場合がほとんどである。これは、複数のボーリング孔を活用した物理探査の実施を困難 にさせている一因であったとも言える。しかし、当調査の結果より、このようなねじれの位置関係にあ るボーリング孔の配置であっても、三次元探査の実施により、地質構造を明らかにできることが示され た。



図 5.1-94 三次元弾性波トモグラフィと VSP 探査結果との重ね合わせ図



図 5.1-95 探査結果と湧水箇所との比較

### 9) 間隙水圧モニタリング計測

19MI66 号孔の間隙水圧のモニタリング区間は、水理試験結果、および高解像度 BTV 検層結果など に基づき、観測区間を8区間(パッカー7連編成)とした(図 5.1-96)。表 5.1-24 に各区間の湧水量を 参考値として示す。ここでの区間の湧水量は、区間チューブ(内径 \u03c6 4mm)で簡易計測しているため、 1.0L/min 以上の湧水量は管内損失の影響が大きく、実際の湧水量より小さい値を示す。



図 5.1-96 19MI66 号孔 間隙水圧モニタリング装置の編成

年1月11日1日日	上端深度	下端深度	区間長	湧水量	<i>(</i> ₩; ₩,
観測区间	m	abh	m	L/min	加方
Int-1	28.72	29.30	0.58	₩5.50	孔底を含む区間
Int-2	25.42	27.52	2.10	0.27	
Int-3	23.62	24.22	0.60	₩2.20	
Int-4	20.32	22.42	2.10	0.35	
Int-5	16.02	19.12	3.10	0.35	
Int-6	13.68	14.82	1.14	0.76	
Int-7	8.88	12.48	3.60	0.11	
Int-8	4.75	7.68	2.93	未計測	区間長は裸岩部表記

表 5.1-24 19MI66 号孔 各モニタリング区間の湧水量

19MI66 号孔を含めた深度 300m ボーリング横坑東側の間隙水圧モニタリング装置の設置状況について、各区間の圧力分布と併せて図 5.1-97 に示す。掘削深度 18mabh 以深では、ボーリング横坑や換気立坑による大気圧解放の影響を受けず、約 1.6MPa の圧力を保持している。



図 5.1-97 間隙水圧の計測状況

図 5.1-97 に示すモニタリング装置の設置位置は、コア観察、BTV 計測結果、水理試験結果などを考慮し、湧水割れ目を区間に含むよう設定している。故に、区間から定量揚水した際、ある区間で水圧応答が認められると、その間の水理応答性が良いと判断される。そこで、各区間に1つ設置されている採水ポートを利用して自然揚水した際、他区間でどのような応答を示すのかを確認した。なお、採水ポートからの揚水(自然排水)は、18MI64 号孔、19MI66 号孔、18MI63 号孔の順とし、自区間の揚水による周囲の水位低下の影響を低減させるため、Int1(→Int7)→Int2→Int6→Int3→Int5→Int4の区間順で揚水を実施することとした。

図 5.1-98 に自区間からの揚水による他区間の圧力変化、図 5.1-99 に自区間からの揚水による他区間の水位低下量を示す。18MI63 号孔 Int3、Int4 と 19MI66 号孔 Int3、Int4 の応答は約 50cm 程度の水位低下(図 5.1-98 赤矢印)であり、試験全体の中では孔間の水圧応答は良い傾向であった。19MI66 号孔 Int1 は孔内湧水量の大半を占めるため、採水ポートを全開放したときの揚水量(3L/min 程度)であっても、自区間の水位低下量は約 2m と小さく収まっている。その際、18MI63 号孔、18MI64 号孔の全区間で水位低下が確認された。

各区間で揚水した際、他孔他区間で最も水位低下が確認された区間についてピックアップし(図 5.1-99 赤枠)、その結果を図 5.1-100 へ反映した。18MI63 号孔と 19MI66 号孔は、相互に水圧応答が 表れる傾向が強い。一方 18MI64 号孔は、自孔を揚水孔とした場合、18MI63 号孔 Int1 に応答が集中 した。



図 5.1-98 自区間からの揚水による他区間の圧力変化(上左:18MI63 号孔区間圧力、上右:18MI64 号孔区間圧力、下:19MI66 号孔区間圧力)





図 5.1-100 孔間の水圧応答結果

### 10) 原位置トレーサー試験

原位置トレーサー試験は、間隙水圧モニタリング区間を用いて合計 12 試験実施した。表 5.1-25 に原 位置トレーサー試験の試験区間一覧を示す。試験名称については、下記に示すよう設定した。

·19W6663T1 → 19: 実施年度(2019) W: 孔間 66: 注水孔 63: 揚水孔 T1: 試験番号

なお、19W6663T3、19W6663T3'、19WW6663T4の試験については、試験(揚水)を継続した状態で試験条件を変更(揚水量確保を目的に揚水区間を増設など)して再実施している。また、試験区間の連結については、対象となる区間を区切るパッカーを収縮させる方法とした。

⇒+ €4 ₽		注水区間	揚水区間		
訊駛名	区間名	深度 mabh(区間長 m)	区間名	深度 mabh (区間長 m)	
19W6663T1	66 Int-3	$23.62 \sim 24.22 \ (0.60)$	63 Int-3, 4	25.84~29.24 (3.40)	
19W6366T2	63 Int-3, 4	25.84~29.24 (3.40)	66 Int-3	23.62 $\sim$ 24.22 (0.60)	
19W6663T3	66 Int-1	28.72~29.30 (0.58)	63 Int-1	36.24~37.20 (0.96)	
19W6663T3'	66 Int-1	28.72~29.30 (0.58)	63 Int-1, 2	30.44~37.20 (6.76)	
19W6663T4	66 Int-1	28.72~29.30 (0.58)	63 Int-1, 2	30.44~37.20 (6.76)	
19W6366T5	63 Int-1	36.24~37.20 (0.96)	66 Int-1, 2	25.42~29.30 (3.88)	
19W6366T6	63 Int-2	30.44~35.04 (4.60)	66 Int-1, 2	25.42~29.30 (3.88)	
19W6366T7	63 Int-2	30.44~35.04 (4.60)	66 Int-3, 4	20.32~24.22 (3.90)	
19W6366T8	63 Int-1	36.24~37.20 (0.96)	66 Int-3, 4	20.32~24.22 (3.90)	
19W6364T9	63 Int-3, 4	25.84~29.24 (3.40)	64 Int-2、3、4、 5	24.00~42, 05(18.05)	
19W6664T10	66 Int-1	28.72~29.30 (0.58)	64 Int-2、3、4、 5	24. 00 $\sim$ 42. 05 (18. 05)	
19W6663TS1	66 Int-3	$23.62 \sim 24.22  (0.60)$	63 Int-3, 4	25.84~29.24 (3.40)	

表 5.1-25 原位置トレーサー試験 試験区間一覧

### ① 蛍光濃度センサーの検量線作成

蛍光濃度センサーVer.3.1 の C1、C2 について、検量線を作成した(図 5.1-101)。蛍光濃度センサー はウラニンの励起光波長仕様のため、ウラニンを添加した試験時のみ使用した。



#### 2 水頭差測定

水頭差測定は、注水や揚水をしていない状態(バックグラウンド)の動水勾配を把握するために行った。基準とする水圧は、最も区間圧が大きいと推定される各孔の最深区間(Int1)とし、孔間での動水 勾配を知るために一部他孔の区間との水頭差も計測した。18MI63 号孔、18MI64 号孔、19MI66 号孔 の各孔について、Int1を基準圧とした Int2~Int6の水頭差測定結果を表 5.1-26、水頭差測定の時系列 変化を図 5.1-102 に示す。

水頭差の測定値は、5分間の平均値を原則とし、水頭差が安定しない(5分以上を要する)場合は30 分程度を限度とし、測定終了前の数分間のデータを記録した。

基準圧区間		対象区間		基準区間に対する水頭差		備考
18MI63号孔	Int-1	18MI63号孔	Int-2	-2.8	cm	安定平均
	"		Int-3	-6.8	cm	安定平均
	"		Int-4	-6.9	cm	安定平均
	11		Int-5	-11.9	cm	安定平均
	"		Int-6	-14.7	cm	安定平均
	11	18MI64号孔	Int-4	-13.1	cm	安定平均
18MI64号孔	Int-1	18MI64号孔	Int-2	-0.7	cm	安定平均
	11		Int-3	-0.9	cm	安定平均
	11		Int-4	-5.6	cm	安定平均
	"		Int-5	-8.5	cm	安定平均
	"		Int-6	-224.0	cm	計測終了直前平均
19MI66号孔	Int-1	19MI66号孔	Int-2	-0.7	cm	安定平均
	11		Int-3	-5.2	cm	安定平均
	11		Int-4	-12.7	cm	安定平均
	11		Int-5	-664.8	cm	計測終了直前平均
	11		Int-6	-706.9	cm	計測終了直前平均
	11	18MI63号孔	Int-3	-1.3	cm	安定平均
18MI63号孔	Int-4	18MI64号孔	Int-5	-7.5	cm	安定平均
19MI66号孔	Int-3	18MI63号孔	Int-5	-1.6	cm	安定平均







図 5.1-102 水頭差測定の時系列変化

### ③予備試験

トレーサー試験の本試験に先立ち、18MI63 号孔、18MI64 号孔でトレーサー到達確認のための予備 試験を実施した。実施時期は、場の圧力変化の少ない19MI66 号孔の掘削前から一段目掘削までの期間 とした。図 5.1-103 に予備試験の試験条件と配管構成を示す。

注入区間を18MI64 号孔 Int4、揚水区間を18MI63 号孔の Int3、Int4 の連結区間とした試験とし、 トレーサーの到達確認が視覚でもできるようウラニンを採用した。トレーサー溶液(100mg/L)の入っ た耐圧容器をコンプレッサーで加圧し、約0.2L/min でトレーサーを20L 圧入した。ただし、トレーサー注入後に配管や区間のデッドボリュームに残るトレーサー溶液を押し流すチェーサーを圧入していないため、正確には20L 注入できていない。トレーサー濃度測定用のサンプリングは、フラクションコレクターを使用した。

予備試験の揚水を 19/7/8 の揚水開始から 19/7/16 まで継続したが、トレーサーの到達は確認されなかった。



図 5.1-103 予備試験の試験条件と配管構成

### ④孔間トレーサー試験結果

表 5.1-27 に孔間トレーサー試験の試験条件および結果を示す。トレーサー材、濃度、流量、試験区間(図 5.1-104)など条件を変えて、計 12 試験を実施した。なお、表中の赤文字は原位置で測定したデ ータを表記しており、19W6663T3、19W6663T3については、19W6663T4の予備試験とした。

各試験の計測結果(トレーサーの破過曲線、試験区間および周辺区間の圧力と流量データの経時変化) を図 5.1-105~図 5.1-114 に示す。

試驗	食名	19W6663T1	19W6366T2	19W6663T3	19W6663T3'	19W6663T4	19W6366T5
試験	捐始日	10月25日	10月30日	11月1日	11月6日	11月8日	11月12日
試験緣	§了日	10月29日	10月31日	11月6日	11月8日	11月11日	11月13日
10000	<u>ウラニン</u>	106 776	-		30	-	-
	アミノG酸	-	10.316	30	-	105 848	30
トレーサー	Ph Rb	20	-		20	50	-
(ppm)	Ro	0.2	-	<u> </u>	20		_
		0.2	1	\	_	_	1
	重小米(700)	0					-
	ワラニン	U	-	<u>\-</u>	-	-	-
トレーサー	アミノG酸	-	0.008	/-	-	0.002	-
バックグランド	Rb	0.003	-	t t	-	-	-
(ppm)	Ba	-	-	+	-	-	-
	重水素(‰)	-	0	-\	-	-	-
トレーサー	-溶液(L)	30	60	60\	58.5	60	60
		19MI66 int3	18MI63 int3-4	19MI66 nt1	19MI66 int1	19MI66 int1	18MI63 int1
		23.615	26.110	28.72	28.72	28.72	36.51
	区間(m)	20.010	1		1	1	
注入		24 215	29 510	29 30	29,30	29 30	37 20
江八		24.213	(2.4)	(0.59)	(0.59)	(0.59)	(0.60)
	は日よい	(0.0)	(3.4)	(0.58)	(0.58)	(0.58)	(0.09)
		into 1	111.4 <u>1</u> *				
	流重(L/min)		0.5	0.2	0.5	0.5	0.5
		18MI63 int3-4	19MI66 int3	18MI63 int1	18MI63 int1-2	18MI63 int1-2	19MI66 int1-2
		26.110	23.615	36.51	30.71	30.71	25.415
	区間(m)				$\setminus$ I		
18.1		29.510	24.215	37.20	37.20	37.20	29.30
扬水		(3.4)	(0.6)	(0.69)	(6.49)	(6.49)	(3.885)
	·	int3.4挼			\int1.2挼	int1.2挼	int1.2挼
	使用ポート	int4 FF	int3採	int1採	\int1 F	int1 IF	int2 IF
	***			a -			
	流童(L/min)	6.6	1.8	2.3	6.7	6.7	7.5
	ウラニン	1203	<u> </u>		\ <mark>36</mark>		
(上段)	,,	1.02			\10		
トレーサー	アミノの酸		125			121	122
ピーク			5.33			10.67	6
(ppb)	DL	6.7			+		
	ND	4.33			-\		
(下段)	р.						
到達時間	Ва						
(hour)	-		-		1		0.00258
(nour)	重水素 $(C/C_0)$		-				7
	<b>ウラー、</b> /	68.6			10.8		
	アミル酸	00.0	06 F		10.0	004	507
回収率	7376版	0.4	20.0			22.4	JZ.1
(%)	RD D	9.4			- \		
	Ba						01.0
	里小系		-		N N		31.2
			-				
					-		
試專	食名	19W6366T6	19W6366T7	19W6366T8	19W6364T9	19W6664T10	19W6663TS1
試驗 試験閉	食名 <b>乳始</b> 日	19W6366T6 11月15日	<u>19W6366T7</u> 11月19日	<u>19W6366T8</u> 11月22日	<u>19W6364T9</u> 12月2日	<u>19W6664T10</u> 12月10日	<u>19W6663TS1</u> 11月27日
試験 試験 試験	食名 割始日 冬了日	<u>19W6366T6</u> 11月15日 11月18日	<u>19W6366T7</u> 11月19日 11月21日	19W6366T8 11月22日 11月26日	19W6364T9 12月2日 12月10日	<u>19W6664T10</u> 12月10日 12月18日	<u>19W6663TS1</u> 11月27日 11月29日
試験 試験웻 試験絼	検名 朝始日 終了日 ロラーン	<u>19W6366T6</u> 11月15日 11月18日	<u>19W6366T7</u> 11月19日 11月21日	<u>19W6366T8</u> 11月22日 11月26日	<u>19W6364T9</u> 12月2日 12月10日	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888	<u>19W6663TS1</u> 11月27日 11月29日
試験 試験 試験		<u>19W6366T6</u> 11月15日 11月18日 - 97.262	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94 163	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116	<u>19W6664T10</u> <u>12月10日</u> <u>12月18日</u> 19.888	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10
武験 試験 試験 トレーサー	後名 月始日 <u> 冬了日</u> ウラニン アミノG酸	<u>19W6366T6</u> 11月15日 11月18日 - 97.262	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163	<u>19W6366T8</u> <u>11月22日</u> <u>11月26日</u> - 96481	<u>19W6364T9</u> 12月2日 12月10日 - 62116	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 -
試験 試験 試験 トレーサー (ppm)	検名 開始日 <u> 冬了日</u> ウラニン アミノG酸 Rb	<u>19W6366T6</u> 11月15日 11月18日 - 97.262 -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 -	<u>19W6366T8</u> <u>11月22日</u> <u>11月26日</u> - 96481 -	<u>19W6364T9</u> 12月2日 12月10日 - 62116 50	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97
試験 試験 試験 トレーサー (ppm)	<u> 検名</u> 月始日 <u> やうニン アミノG酸 Rb Ba チャルキ(パン)</u>	19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2
試験 試験 試験 トレーサー (ppm)		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - - 0.5	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1
<u>試験</u> 試験 試験 トレーサー (ppm)	後名 引始日 <u>やうラニン</u> アミノG酸 Rb Ba 重水素(‰) ウラニン	19W6366T6 11月15日  97.262 - - 0.5 0.004	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - -	19W6366T8 11月22日 	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0
<u>試験</u> <u>試験</u> トレーサー (ppm)		19W6366T6 11月15日 	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - 0	19W6366T8 11月22日 - - 96481 - - - - - 0.003	19W6364T9 12月2日 12月10日 - - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004	19W6664T10 12月10日 12月18日 19,888 100 50 0.2 1 0.001 -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49.97 0.2 1 0 - -
試験 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド	余名 7日 ウラニン アミノG酸 Rb Ba 重水素(%) ウラニン アミノG酸 Rb Rb	19W6366T6 11月15日  97.262  0.5 0.004 - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - 0 0	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - 0.003 -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 - 49.97 0.2 1 0 - 0 0 - 0 0 0 - 0 0 0 -
<u>試験</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm)	<u> 後名</u> 月始日 ウラニン アミノG酸 Ba 重水素(%) ウラニン アミノG酸 アシノG酸 Rb Ba 	19W6366T6 11月15日  97.262  0.5 0.004  - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - 0 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - 0.003 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 -
<u>試壊</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm)	検名           別治日           ウラニン           アミノG酸           アb           重水素(%)           ウラニン           アミノG酸           アシスG酸           Rb           国水素(%)           ウラニン           アミノG酸           Rb           国水素(%)           ウラニン           アミノG酸           周a           重水素(%)	19W6366T6 11月15日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - 0 - - - 0 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 - 96481 - - - 0.003 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - - -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - -
試験 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー	<u> 衰名</u> 月始日 <u> 登了日</u> アミノG酸 電水素(%6) ウラニン アミノG酸 電水素(%6) ウラニン アミノG酸 思 電水素(%6) -溶液(L)	19W6366T6 11月15日 11月18日 - - - 0.5 0.004 - - - - 60	19W6366T7 11月19日 11月21日 - - 94.163 - - - 0 0 - - - 60	19W6366T8 11月22日             	19W6364T9 12月2日 12月10日  62116 50 0.2 0.25  0.25  - - - 90	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - 150	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49,97 0.2 1 0.02 - 0.003 - - 60
<u>試験</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー	<u> 養名</u> 月始日 ウラニン アミノG酸 電水素(% <sub>0</sub> ) ウラニン アミノG酸 電水素(% <sub>0</sub> ) ウラニン アミノG酸 Rb Ba 重水素(% <sub>0</sub> ) -溶液(L)	19W6366T6 11月15日  97.262  0.5 0.004  - - - 60 18MI63 int2	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - - 90 18MI63 int3-4	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - 150 19MI66 int1	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49.97 0.2 1 0 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3
<u>試験</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー	余名	19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - 18MI63 int2 30.71	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - 0 - - - 0 18MI63 int2 30.71	19W6366T8 11月22日 11月22日 - 96481 - - - - 0.003 - - - 100 18MI63 int1 36.51	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 18Mf63 int3-4 26.110	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - 1 50 19MI66 int1 28.72	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615
<ul> <li>試験</li> <li>試験</li> <li>ドレーサー (ppm)</li> <li>ドレーサー</li> <li>パックグランド (ppm)</li> <li>ドレーサー</li> </ul>	<u>検名</u> 開始日 <u>ジ了日 フラニン</u> アミノC酸 Ba 重水素(%o) フラニン アミノC酸 Rb Ba 重水素(%o) -溶液(L) 区間(m)	19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - 0 - - - 60 18M163 int2 30.71 	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 100 18M63 int1 36.51 	19W6364T9 12月2日 12月10日  62116 50 0.2 0.25 - - 0.004 - - - 90 18MI63 int3-4 26.110 	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - 150 19MI66 int1 28.72 	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49,97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615 
<u>試験</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー ドレーサー	<u>後名</u> 開始日 ウラニン アミノG酸 電水素(%o) ウラニン アミノG酸 電水素(%o) ウラニン アミノG酸 Rb Ba 重水素(%o) 一溶液(L) 区間(m)	19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110   29.510	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49,97 0,2 1 0 0 - 0,003 - - 60 19MI66 int3 23,615   24,215
<u>試験</u> <u>試験</u> トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー 注入	検名 月始日 クラニン アミノG酸 Rb Ba 重水素(%) ウラニン アミノG酸 ウラニン アミノG酸 ロクラニン アミノG酸 国本素(%) ● 日 「フラニン アミノG酸 ロクラニン アミノG酸 国本 国本素(%) 国本 国本 国本 国本 国本 国本 国本 国本 国本 国本	19W6366T6 11月15日 11月15日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6)	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 - 0.25 - 0.004 - - - 18Mf63 int3-4 26.110   29.510 (3.4)	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58)	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6)
<u>試験</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー ドレーサー	<u>検名</u> 開始日 <u>シ了日</u> フラニン アミノC酸 Ba 重水素(%) ウラニン アミノC酸 Rb Ba 重水素(%) -溶液(L) 区間(m) 使用ポート	19W636676 11月15日 11月18日 - 97.262 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - 0 - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 100 18MI63 int1 36.51   37.20 (0.69) int1探	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110 129.510 (3.4) int3探	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - 150 19MI66 int1 28.72 4 29.30 (0.58) int1探	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49,97 0.2 1 0 - - - - - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 24.215 (0.6) int3探
<u>試験</u> 試験 トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 0.25	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110 1 29.510 (3.4) int3探 0.3	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 1 0.001 - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1探 0.5	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49,97 0.2 1 0 0 - - - 60 19MI66 int3 23.615 60 19MI66 int3 24.215 (0.6) int3探 1
<u>試験</u> <u>試験</u> トレーサー (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー 注入		19W6366T6 11月15日 11月15日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 19MI66 int1-2	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - - 90 18Mf63 int3-4 26.110   29.510 (3.4) int3探 0.3 18Mf64 int2-5	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1採 0.5	19W66663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49.97 0.2 1 0 0 - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - - - 0.003 - - - - - - - - - - - - - - - - - -
<u>試験</u> 試験 ドレーサー (ppm) ドレーサー バックグランド (ppm) ドレーサー バックグランド (ppm) ドレーサー	<u>検名</u> 開始日 <u>シ了日 フラニン</u> アミノC酸 Ba 重水素(%) ウラニン アミノC酸 Rb Ba 重水素(%) -溶液(L) 区間(m) 使用ポート 流量(L/min)	19W6366T6 11月15日 11月18日 - - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> 0.25 19M166 int1-2 25.415	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - 0 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 100 18MI63 int1 36.51   37.20 (0.69) int1探 0.4 19MI66 int3-4 20.315	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110 129.510 (3.4) int3探 0.3 18MI64 int2-5 24.00	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 0.2 1 0.001 - - - - 150 19MI66 int1 28.72 9.30 (0.58) int1探 0.5 18MI64 int2-5 24.00	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19M166 int3 23.615   24.215 (0.6) int3探 1 18M163 int3-4 26.110
試験 試験 に (ppm) トレーサー バックグランド (ppm) トレーサー ドレーサー パックグランド (ppm) トレーサー 注入		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) (4.6) (int2探 0.25 19MI66 int1-2 25.415	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - 100 18MI63 int1 36.51   37.20 (0.69) int1採 0.4 19MI66 int3-4 20.315	19W6364T9 12月2日 12月10日 - - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) 18MI64 int3提 0.3	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 1 0.001 - - - - - - 150 19MI66 int1 28.72 19MI66 int1 28.72 19MI66 int1 28.72 19MI66 int1 28.72 19MI66 int1 28.72 10 11 11 11 29.30 (0.58) int1 探 0.5	19W6663TS1 11月27日 11月27日 10 - 49,97 0.2 1 0 0 - - 0.003 - - - 60 19MI66 int3 23.615 1 24.215 (0.6) int3採 1 18MI63 int3-4 26.110
<u>試験</u> <u>試験</u> トレーサー (ppm) トレーサー パックグランド (ppm) トレーサー 注入	<u> </u>	19W6366T6 11月15日 11月15日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - - 62116 50 0.2 0.25 - - 0.004 - - - 90 18Mf63 int3-4 26.110 月 29.510 (3.4) int3課 29.510 (3.4) int3課 29.510 (3.4) 29.510 (3.4) int3課	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - - 9.02 1 0 0 - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - 0.2 1 1 0 0 - - - - 0.2 1 1 0 - - - - - - - - - - - - - - - - -
試験       試験       ドレーサー       (ppm)       ドレーサー       バックグランド       (ppm)       ドレーサー       注入       揚水	<u>検名</u> 開始日 <u>シ了日 ウラニン</u> アミノC酸 Ba 重水素(%) ウラニン アミノC酸 Rb Ba 重水素(%) -溶液(L) 区間(m) 使用(ポート 流量(L/min)	19W636676 11月15日 11月18日 - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> 0.25 19M166 int1-2 29.30 (3.885)	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 100 18MI63 int1 36.51   37.20 (0.69) int1骤 0.4 19MI66 int3-4 24.215 (3.9)	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110 129.510 (3.4) int3探 0.3 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0)	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 0.2 1 0.001 - - - - 150 19MI66 int1 28.72 9.30 (0.58) int1探 0.5 18MI64 int2-5 24.00 月 39.00 (15.0)	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> 119MI63 int3-4 26.10 11月29日 10 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> 25.510 (3.4)
試験       試験       トレーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水		19W6366T6 11月15日 11月18日 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18M63 int3-4 29.510 (3.4) int3張 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0)	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1探 0.5 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0)	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 0.003 - - 0.003 - - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3禄 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4)
<u>試験</u>		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18M63 int3-4 26.110   29.510 (3.4) int3探 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5睽	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 1 0.001 - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1探 29.30 (0.58) int1探 0.5 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49,97 0.2 1 0 0 - - - 0.003 - - - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3探 1 24.215 (0.6) int3探 1 18MI63 int3-4 25.510 (3.4) int3.4探
試験       試験       ドレーサー       (ppm)       ドレーサー       バックグランド       (ppm)       ドレーサー       注入       揚水	<u>検名</u> 開始日 <u>シフ日 フラニン</u> アミノC酸 Ba 重水素(%) ウラニン アミノC酸 Rb Ba 重水素(%) -溶液(L) 区間(m) 使用ポート 流量(L/min) 使用ポート	19W636676 11月15日 11月18日 - - 97.262 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - - 90 18M63 int3-4 26.110 129.510 (3.4) (3.4) (3.4) 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49.97 0.2 1 0 - - - - - - - - - - - - - - - - - -
試験       試験       トレーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 0.25 19MI66 int1-2 25.415 19MI66 int1-2 29.30 (3.885) int1.2探 int2提 7.55	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 29.510 (3.4) int3探 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5圧 5.4	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 1 0.001 - - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1採 0.5 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5採 4.6	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 0 - 0.003 - - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615 1 24.215 (0.6) int3探 1 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) int3.4探 int4圧 6.6
試験       試験       トレーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.25 - 0.004 - - - 90 18MI63 int3-4 26.110   19.510 (3.4) int3採 0.3 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5採 int5圧 5.4	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 1 0.001 - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1探 29.30 (0.58) int1探 0.5 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 4.6 25	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - - 9.02 1 0.003 - - - - - - - - - - - - - - - - - -
試験       試験       トレーサー       (ppm)       トレーサー       バックグランド       トレーサー       注入       揚水       (上段)	検名           開始日           冬了日           ウラニン           アミノC酸           重水素(%)           ウラニン           アミノC酸           アミノC酸           アミノC酸           西水素(%)           -溶液(L)           区間(m)           使用ポート           流量(L/min)           区間(m)	19W636676 11月15日 11月18日 - - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2採 0.25 19M166 int1-2 29.30 (3.885) int1.2採 int2圧 7.55	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - - 0.003 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 26.110 129.510 (3.4) int3探 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5採 int5臣 5.4	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 - 50 0.2 1 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49.97 0.2 1 0 - - 0.003 - - 60 19M166 int3 23.615   24.215 (0.6) int3探 1 18M163 int3-4 26.510 (3.4) int3.4探 int4臣 6.6 235 1.37
試験       試験       トレーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水       (上段)       トレーサー		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2提 0.25 19MI66 int1-2 29.30 (3.885) int1.2探 int2提 29.30 (3.885)	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 29.510 (3.4) int3探 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣 5.4 - -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.01 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 0.02 1 0 - - 0.003 - - - 60 19MI66 int3 23.615 1 24.215 (0.6) int3提 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) int34採 int4E 6.6 235 1.37
は		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110   29.510 (3.4) int3採 0.3 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5採 int5臣 5.4 - 171 34.00	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - - 49,97 0.2 1 0 - - 0.003 - - - 60 19MI66 int3 23.615 1 24.215 (0.6) int3探 1 18MI63 int3-4 26.110 1 29.510 (3.4) int3.4探 int4臣 6.6 225 1.37
試験       試験       ドレーサー       (ppm)       ドレーサー       バックグランド       (ppm)       ドレーサー       注入       揚水       (上段)       ドレーウー       ピーク       (gph)	検名           開始日           ※7日           ウラニン           アミノC酸           重水素(%)           ウラニン           アミノC酸           アミノC酸           アミノC酸           アミノC酸           アミノC酸           アミノC酸           広間(m)           使用(ボート           流量(L/min)           ウラニン           アミノC酸           マミノC酸	19W636676 11月15日 11月18日 - - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 0.25 19M166 int1-2 25.415   29.30 (3.885) int1/2探 7.55 - - 310 6	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 26.110 129.510 (3.4) int3禄 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5禄 int5臣 5.4 - -	19W6664T10           12月10日           12月18日           19.888           100           50           0.2           1           -           -           -           -           150           19M166 int1           28.72           9.30           (0.58)           int1探           0.5           18M164 int2-5           24           39.00           (15.0)           int2-5採           4.6           25           48           143           44.25	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3採 1 18MI63 int3-4 26.110   29.510 (3.4) int3.4採 int4臣 6.6 235 1.37 - 20.94
試験       試験       トレーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水       (上段)       トレーウー       ピーク       (ppb)		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2提 0.25 19MI66 int1-2 25.415 19MI66 int1-2 29.30 (3.885) int1.2採 int2圧 7.55 - 310 6	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 29.510 (3.4) int3採 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5圧 5.4 - - 171 34.00	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.02 1 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615 i 24.215 (0.6) int3禄 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) int4任 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67
試験形           試験形           トレーサー           (ppm)           トレーサー           パックグランド           (ppm)           トレーサー           注入           揚水           (L段)           トレーサー           ビーサー           (ppb)		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110   29.510 (3.4) int3探 0.3 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5採 int5臣 5.4 - 171 34.00	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 23.615   24.215 (0.6) int3探 1 18MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3探 1 18MI65 int3-4 26.110   29.510 (3.4) int3.4採 int4臣 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67
試験           試験           以の           トレーサー           パックグランド           パックグランド           トレーサー           注入           撮水           (上段)           トレーサー           ピーク           (ppb)           (T)           (D)	検名           開始日           ※7日           ウラニン           アミノC酸           重水素(%)           ウラニン           アミノC酸           重水素(%)           ウラニン           アミノC酸           度間(m)           ウス酸 (L)           区間(m)           使用(ボート           流量(L/min)           ウラニン           アミノG酸           Rb           Ba           国(m)           使用(ボート           流量(L/min)           ウラニン           アミノG酸           Rb           Ba           アミノ(G酸           Ba	19W636676 11月15日 11月18日 - - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 0.25 19M166 int1-2 25.415   29.30 (3.885) int1.2探 int2圧 7.55 - - 310 6	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - 0.003 - - - - - 0.003 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 26.110 3.4) int3禄 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5禄 int5臣 5.4 - - - - - - - - - - - - -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19M166 int3 23.615 124.215 (0.6) int3採 1 18M163 int3-4 (2.6) int3採 1 18M163 int3-4 (3.4) int3.4採 int4臣 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67
試験時           試験時           トレーサー           (ppm)           トレーサー           パックグランド           (ppm)           トレーサー           注入           揚水           (LPサー           ピーク           (ppb)           (Tright)		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 0.25 19MI66 int1-2 29.30 (3.885) int1.2探 int2提 29.30 (3.885) int1.2探 int2E 7.55 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 29.510 (3.4) int3採 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣 5.4 - - 171 34.00 - - - - - - - - - - - - -	19W8664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 0.001 - - - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1採 29.30 (0.58) int1採 39.00 (15.0) int2-5採 4.6 25 48 143 44.25	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615 i 24.215 (0.6) int3課 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) int4狂 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67
試験時           試験時           試験時           トレーサー           (ppm)           トレーサー           パックグランド           (ppm)           トレーサー           注入           揚水           (L段)           トレーサー           ビーサー           ビーウ           (ppb)           (下段)           到達時間           (hour)		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - 96481 - - - - 0.003 - - - - 100 18MI63 int1 36.51   37.20 (0.69) int1採 2.2 - 67 21.33	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18MI63 int3-4 26.110 39.00 (3.4) int3探 0.3 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣 5.4 - 171 34.00 - - - - - - - - - - - - -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 - - - - - 150 19MI66 int1 28.72   29.30 (0.58) int1探 0.5 18MI64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5採 4.6 25 48 143 44.25 - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - - 0.003 - - - 60 19MI66 int3 23.615   24.215 (0.6) int3探 1 18MI65 int3-4 29.510 (3.4) int34探 int4臣 6.6 2355 1.37 - 20.94 4.67
試験時       試験時       以のサー       トレーサー       パックグランド       トレーサー       注入       揚水       (上日サー       ピーク       (pbb)       (下段時間 (hour)		19W636676 11月15日 11月18日 - - 97.262 - - 0.5 0.004 - - - - 60 18M163 int2 30.71   35.31 (4.6) int2探 0.25 19M166 int1-2 25.415   29.30 (3.885) int1.2探 int2 7.55 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 100 18M163 int1 36.51   37.20 (0.69) int1探 0.4 19M166 int3-4 24.215 (3.9) int3.4探 int4臣 2.2 67 21.33	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 26.110 39.00 (3.4) int3探 0.3 18M64 int2-5 24.00 月 39.00 (15.0) int2-5採 int5臣 5.4 - - 171 34.00	19W6664T10           12月10日           12月18日           19.888           100           50           0.2           1           -           -           -           -           150           19M166 int1           28.72           9.30           (0.58)           int1探           0.5           18M164 int2-5           24.0           39.00           (15.0)           int2-5採           4.6           25           48           143           44.25	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19M166 int3 23.615 1 24.215 (0.6) int3採 1 18M163 int3-4 (0.6) int3採 1 18M163 int3-4 (3.4) int3.4採 int4臣 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67
試験時       試験時       上しーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水       (上0)       上000       (ppb)       (hour)		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - 60 18MI63 int2 30.71   35.31 (4.6) int2提 0.25 19MI66 int1-2 25.415 19MI66 int1-2 29.30 (3.885) int1.2提 29.30 (3.885) int1.2提 19.55 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18Mf63 int3-4 29.510 (3.4) int3提 0.3 18Mf64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣 5.4 - - - - - - - - - - - - -	19W6664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615 i 24.215 (0.6) int3禄 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) int34採 int4任 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67 - - - - - - - - - - - - -
試験時       試験時       大レーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水       (LDサー       ビーク       (ppb)       (下達時間)       (hour)       回収率		19W6366T6 11月15日 11月18日 - 97.262 - 0.5 0.004 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月26日 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - 0.004 - - 90 18M163 int3-4 26.110 1 29.510 (3.4) int3探 0.3 18M164 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣 5.4 - 171 34.00 - - 64	19W6664T10           12月10日           12月18日           19.888           100           0.2           1           -           -           -           150           19M166 int11           28,72           月           29,30           (0.58)           int1採           0.5           18M164 int2-5           4.6           25           48           143           44.25           21.7           30.3	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 23.615 1 24.215 (0.6) int3探 1 18MI66 int3 23.615 1 24.215 (0.6) int3探 1 18MI66 int3 29.510 (3.4) int34探 int4臣 6.6 23.55 1.37 - - - - - - - - - - - - -
試験時       試験時       以中サー       レーサー       パックグランド       トレーサー       注入       揚水       (レーク)       ドレーサー       注入       切り       り       「いの」       し       シーク       (ppb)       (hour)       回収率       (96)		19W636676         11月15日         11月18日         -         -         0.5         0.004         -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 - 96481 - - 0.003 - - 0.003 - - 0.003 - - 100 18M163 int1 36.51   37.20 (0.69) int1採 0.4 19M166 int3-4 24.215 (3.9) int3.4採 int4臣 2.2 67 21.33 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 26.110 39.00 (3.4) int3禄 0.3 18M64 int2-5 24.00 月 39.00 (15.0) int2-5禄 int5臣 5.4 - - - - - - - - - - - - -	19W6664T10           12月10日           12月18日           19.888           100           50           0.2           1           -           -           -           -           150           19M166 int1           28.72           -           -           -           -           0.5           18M164 int2-5           24,0           139,00           (15.0)           int2-5採           4.6           25           48           143           44.25           -           21.7           30.3	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 0.003 - - 60 19M166 int3 23.615 124.215 (0.6) int3採 1 18M163 int3-4 (0.6) int3採 1 18M163 int3-4 (3.4) (3.4) int34採 int4臣 6.6 235 1.37 - - - - - - - - - - - - -
試験時       試験時       トレーサー       (ppm)       トレーサー       パックグランド       (ppm)       トレーサー       注入       揚水       (上日サーク       (pb)       (hour)       回収率       (%)		19W6366T6           11月15日           11月18日           -           97.262           -           0.5           0.004           -	19W6366T7 11月19日 11月21日 - 94.163 - - - - - - - - - - - - -	19W6366T8 11月22日 11月22日 11月22日 - 96481 - - - - - - - - - - - - -	19W6364T9 12月2日 12月10日 - 62116 50 0.2 0.25 - - 90 18M63 int3-4 26.110 - 29.510 (3.4) int3提 0.3 18M64 int2-5 24.00   39.00 (15.0) int2-5探 int5臣 5.4 - - - - - - - - - - - - -	19W8664T10 12月10日 12月18日 19.888 100 50 0.2 1 - - - - - - - - - - - - -	19W6663TS1 11月27日 11月29日 10 - 49.97 0.2 1 0 - 0.003 - - 60 19MI66 int3 23.615 i 24.215 (0.6) int3禄 1 18MI63 int3-4 29.510 (3.4) int34禄 int4任 6.6 235 1.37 - 20.94 4.67 - 73.3 -

# 表 5.1-27 孔間トレーサー試験条件および結果



図 5.1-104 孔間トレーサー試験の注入・揚水の配置

< 19W6663T1 >

図 5.1-105 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。なお、揚水流量の経時データは欠損したため図中には反 映されていないが、揚水流量は約 6.6L/min であり、フラクションコレクターで一定時間、間隔で採水 したサンプル量が試験全体で大きく変わっていないことから裏付けられる。

蛍光濃度は二度ピークを示し、蛍光濃度センサーの経時変化では揚水区間 Int3、Int4 のピーク濃度、 およびピーク到達時間が大きく異なっていることから、区間に含まれる水みち割れ目のパスが複数存在 することが示唆された。



< 19W6366T2 >

図 5.1-106 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。



図 5.1-106 19W6366T2の破過曲線(上)と区間圧力・流量の経時変化(下)

< 19W6663T4 >

図 5.1-107 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。

本試験は、19W6663T3'の揚水を継続し、トレーサーをアミノG酸(100mg/L)に変更して実施しているため、試験開始直後の残留したアミノG酸の濃度が僅かに表れた。



< 19W6366T5 >

図 5.1-108 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。

本試験は、19W6663T4の注入、揚水区間を入れ替えて、双方に応答があることを確認するために実施した。なお、アミノG酸を参考に添加したが、19W6663T4の影響が残るため、図中から省いた。



< 19W6366T6 >

図 5.1-109 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。



< 19W6366T7 >

図 5.1-110 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。



< 19W6366T8 >

図 5.1-111 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。



< 19W6364T9 >

図 5.1-112 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。

揚水量を確保するため、18MI64 号孔 Int2~Int5 を連結した区間を揚水区間とした。



< 19W6664T10 >

図 5.1-113 破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 にトレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。

19W6364T9 と同様に揚水量を確保するため、18MI64 号孔 Int2~Int5 を連結した区間を揚水区間とした。



< 19W6663TS1 >

図 5.1-114 に破過曲線と試験区間および周辺区間の圧力と注入・揚水流量の経時変化、表 5.1-27 に トレーサーのピーク到達時間と回収率を示す。

19W6663T1 では事前に想定したトレーサー到達時間よりも早くトレーサーの到達が確認されたため、 溶液やデータのサンプリング間隔などの設定値を到達後に変更することとなった。そのため、同一区間 で適切な設定値に変更して再実施した。



#### ⑤ 考察

深度 300m ボーリング横坑東側で実施した孔間トレーサー試験の破過曲線を図 5.1・115 に示す。孔間の水圧応答試験(図 5.1・100)で確認されているように、ボーリング横坑東側は割れ目が複雑に交差したネットワーク構造の場と推定される。孔間トレーサー試験の各試験での非収着性トレーサーの回収率は20~70%程度であることからも、注水-揚水のパスだけではなく、多方向へトレーサーが分散していることが想定される。特に、②のバックグラウンドの水頭差測定からは、坑道へ向かうトレーサーの流れの存在が推定される。そこで、非収着性トレーサーの揚水孔における濃度ピーク時間に着目し、注水ー揚水間のパスの連続性について簡易的な検討を行った。図 5.1・116 に揚水位置におけるトレーサー濃度のピーク時間の簡易的解釈の図を示す。揚水位置には等方的に地下水が流入し、トレーサーの平均到達時刻が破過曲線のピーク時刻 tpeak に一致すると仮定する。分散を無視すると、揚水位置を中心として、トレーサー投入位置と揚水位置の距離rを半径とする球内の間隙容積とトレーサー到達までの揚水量は等しいため、Q・tpeak=0・4πr³/(3Q)と表される。各試験に適用したところ、回帰直線から極端に外れた試験ケースはなく、割れ目がネットワーク状に連なり水みちを形成している可能性を示唆している。収着性トレーサーについては、T1 を除いて到達が確認されなかった。収着性トレーサーは、非放射性

トレーサーを使用している上、地下水中(バックグランド中)にも微量含まれているため、揚水孔に到 達していたとしても、バックグランドに埋もれて判断できなかった。あまりに高濃度の収着性トレーサ ーで試験をしても意味はなく、また、岩盤中に収着性トレーサーが残留し、試験後の洗浄が困難となる ことから実施しなかった。

SKB (Andersson et al., 2002) では放射性トレーサーを使用しており、バックグランドの影響を考え る必要もないため、低濃度の収着性トレーサーも検出できる。ただし、回収のために揚水量を大きくし ているため、収着が平衡に達していない可能性が高い。放射性物質を国内の原位置で使用できない場合、 収着性トレーサーを用いた原位置試験はせいぜい数 m スケールが限度と考えられる。室内での粉末試 料を用いたバッチ試験の結果から、割れ目周辺のマトリクスへの収着性を類推する技術が重要となる。



図 5.1-115 ボーリング横坑東側での孔間トレーサー試験の破過曲線





(5) 試験場周辺岩盤の水理地質モデル

### 1) ボーリング孔3孔でみられた割れ目の特徴

### ① 19MI66 号孔

19MI66 号孔でみられた割れ目は、NE 方向の高角度割れ目と水平割れ目に集中しており(図 5.1-82)、 その大半が閉じた割れ目(開口幅 0.1mm 以下)で、開口割れ目(開口幅 1mm 以上)は少なかった。 孔内全体の開口割れ目のうち、僅かながら水平割れ目が開口している割合が高かった(図 5.1-83)。

19MI66 号孔は孔全体で約 60L/min の湧水があり、その 9 割以上が孔底付近(27.5~29.3mabh)に 集中したため、湧水量の変化は孔底付近を除いて顕著にみられなかった。孔底付近の区間においては、 (i)27.5~28.0mabh、(ii)28.2~28.5mabh、(iii)28.8~29.3mabhに分けられ、それぞれ1~2L/min 程度、 6L/min 程度、40L/min 程度の湧水量に大別された。(i)区間の湧水割れ目は NW 方向の水平割れ目と推 定され、割れ目開口部は不規則かつ Vuggy であった。(ii)区間の湧水割れ目は NW 方向の水平割れ目と 推定され、岩石コアのかみ合わせが悪く、割れ目充填鉱物は少ない(図 5.1-117)。(iii)区間の湧水割れ 目は NW 方向の水平割れ目と推定され、岩石コアのかみ合わせが悪く、割れ目充填鉱物は少ない。割れ 目面には方解石の自形結晶が晶出しており、開口部が晶洞となっていた(図 5.1-117)。(i)~(iii)に共通 して、湧水割れ目は水平割れ目であり、割れ目充填鉱物は少ない特徴があった。

以上、19MI66 号孔の割れ目は、NE 方向の高角度割れ目と水平割れ目が多く分布するが、水みちとして機能しているのは NW 方向の水平割れ目であり、割れ目開口部は不規則かつ充填鉱物が少ない特徴がみられた。

#### ② 18MI63 号孔

18MI63 号孔でみられた割れ目は、NS に近い NW~NE 方向の高角度割れ目と水平割れ目に集中し ており(図 5.1-82)、割れ目の開口割合は3割程度であった(図 5.1-83)。また、孔内全体の開口割れ 目のうち、高角度割れ目が開口している割合が高く(図 5.1-83)、NE 方向との遭遇率が高かった(図 5.1-84)。しかし、開口割れ目について岩石コアと BTV 画像を対比したとき、コアでは充填鉱物が介在 していたケースもあり、各種試験、検層時に充填物が wash-out された後の状態を BTV 撮影し、開口割 合が過剰評価されている可能性があった。そのため、開口割れ目の密集区間と湧水区間は必ずしも一致 しない原因の一つと考えられた。 18MI63 号孔は孔全体で約 50L/min の湧水があり、湧水区間は(i)26.0~28.5mabh、(ii)36.3~37.2mabh の 2 区間に大別された(日本原子力研究開発機構・電力中央研究所, 2019)。(i)区間の湧水割れ目(約 15L/min)は、NW 方向の高傾斜割れ目が支配的で、割れ目面には緑泥石や方解石が充填、フィルム状 に被覆している箇所(図 5.1-119 左)も確認され、深度 300m ボーリング横坑西側の水みち割れ目と同様の傾向(濱田, 2019)を示した。一方で、(i)区間の詳細な湧水量計測(0.57m ピッチ)の積算値と大略的な湧水量計測(2.5m ピッチ)の値が大きく異なっており、(i)区間の水平割れ目が高角度割れ目と交差して(図 5.1-118 左)、パスの役割を担っていることが示唆される。(ii)区間の湧水割れ目(約 20L/min) は、NE 方向の中角度~高角度割れ目が支配的で、割れ目面には方解石の自形結晶が晶出しており(図 5.1-119 右)、開口部が晶洞となっている。

以上、18MI63 号の割れ目は、NS に近い NW~NE 方向の高角度割れ目と水平割れ目が多く分布し、 水みちとして機能する割れ目は NW 方向の高傾斜割れ目、NE 方向の割れ目と各々であるが、水平割れ 目がパスとして役割を果たしていることが示唆された。水みち割れ目の開口部は不規則で、充填鉱物は 少ない傾向である特徴がみられた。

#### ③ 18MI64 号孔

18MI64 号孔でみられた割れ目は、NW 方向の高角度割れ目と水平割れ目に集中しており(図 5.1-82)、 割れ目の開口割合は3割程度であった(図 5.1-83)。また、孔内全体の開口割れ目のうち、高角度割れ 目が開口している割合が高く(図 5.1-83)、NW 方向との遭遇率が高かった(図 5.1-84)。しかし、18MI63 号孔と同様、開口割れ目について岩石コアと BTV 画像を対比したとき、コアでは充填鉱物が介在して いたケースもあり、各種試験、検層時に充填物が wash-out された後の状態を BTV 撮影し、開口割合が 過剰評価されている可能性があった。

18MI64 号孔は孔全体で約 8L/min の湧水があるが、18MI63 号孔、19MI66 号孔と比較して湧水量 は1オーダー小さいため、湧水量の変化も数 L/min オーダーであった。湧水区間は(i)29.0~31.5mabh、 (ii)36.5~37.5mabh、(iii)38.5mabh 付近の3 区間に大別された(日本原子力研究開発機構・電力中央研 究所, 2019)。

(i)区間の湧水割れ目(約 1L/min)は、岩石コアのかみ合わせや割れ目の開口具合などから、NW 方向の高傾斜割れ目と NE 方向の水平割れ目が水みちであると推察された。ただし、この(i)区間に含まれる割れ目は NW 方向の高傾斜割れ目が主であるが、水平割れ目やコア軸に沿った割れ目が存在するため、孔壁の奥でネットワーク状に水みちが連結している可能性はある。(ii)区間の湧水割れ目(約 1L/min)は、割れ目の開口具合から EW 方向の高傾斜割れ目(孔軸に沿った割れ目)が水みちであると推察された。(iii)区間の湧水割れ目(約 2L/min)は、割れ目面に方解石が充填する箇所があるが、周辺の割れ目開口幅と対比して開口幅が大きいことから、NE 方向の高傾斜割れ目が水みちと推察された。

以上、18MI64 号孔の割れ目は、NW 方向の高傾斜割れ目と水平割れ目が多く分布し、水みちとして 機能する割れ目は NW~EW 方向の高傾斜割れ目、水平割れ目と各々である。18MI63 号孔や 19MI66 号孔と異なり孔内湧水量が少なく、割れ目充填鉱物が多く分布する点から、18MI64 号孔周辺と 18MI63 号孔、19MI66 号孔周辺の間で水理地質場が異なる可能性が考えられる。



図 5.1-117 19MI66 号孔 水みち割れ目の特徴(左:28.4m付近、右:28.9m付近)



図 5.1-118 18MI63 号孔の割れ目模式図 (26.0~29.5mabh)



図 5.1-119 18MI63 号孔 水みち割れ目の特徴(左:26.5m 付近、右:36.5m 付近)

### 2) 割れ目の方向分布

ボーリング孔3孔の割れ目の方向分布について、図 5.1-82 で孔全体の割れ目傾向を確認しているが、 この結果からは掘削深度方向の割れ目の分布傾向を把握することができない。そこで、割れ目の最大傾 斜方向を代表方位 (Azimuth) とし、深度 (Depth) 方向の変化を得るために AVTD 法 (Azimuth Versus Traverse Distance plots method) (例えば Wise and McCrory, 1982)を適用した。AVTD 図の深度は 鉛直下向きを正とし、プロットは閉じた割れ目(赤丸)と開口割れ目(水色)に分類して表記した。本 来、AVTD 図中の割れ目データについてクラスタリングすることが望ましいが、ここでは簡易的な方法 として深度 2m ごとに含まれる全割れ目データをセットとした。高角度割れ目は深度 2m 間隔、水平割 れ目は深度 2m 区間に割れ目が 10 本以上含まれる箇所のみとし、その区間の割れ目中心点の傾斜方位 をその区間の代表方位として図中に示した(図 5.1-120、図 5.1-122)。

高角度割れ目については、18MI63 号孔と 19MI66 号孔の割れ目は E~S 方向、18MI64 号孔の割れ 目は NE~E 方向への傾斜方位に集中した。割れ目の走向はボーリング孔掘削方向と直交し、最も遭遇 しやすい方向であり、割れ目の傾斜方向は割れ目の走向に関係なく東傾斜方位であることを示しており、 ボーリング横坑東側に存在する高傾斜割れ目は、図 5.1-121 に示すような割れ目形態であると推察され る。水平割れ目については、深度によって割れ目の粗密が異なっており、浅部ではプロット数が少ない 傾向がみられた。また、水平割れ目が密集する区間の方位については、18MI63 号孔の深部と 18MI64 号孔で W~NW 傾斜の傾向、18MI63 号孔、19MI66 号孔の浅部では SE 傾斜の傾向がみられ、波状の 水平割れ目として存在している可能性が考えられる。



図 5.1-120 ボーリング横坑東側の AVTD 図(高角度割れ目:dip≧60)



図 5.1-121 ボーリング横坑東側で遭遇しやすい割れ目方位・傾斜(赤:NE 走向、青:NW 走向)



図 5.1-122 ボーリング横坑東側の AVTD 図 (水平割れ目: dip<30)

### 3) 各種試験と割れ目方向分布との比較

図 5.1-123 に弾性波探査結果と高角度割れ目の方向分布を示す。なお、図中のカラーコントラストは 弾性波トモグラフィ、白黒コントラストは VSP 探査の結果を反映し、ローズダイヤグラムは掘削深度 5mabh ごとに含まれる高角度割れ目について、方向角 10 度刻みで表記した。VSP 探査結果で表れた 反射イベントは 18MI63 号孔、18MI64 号孔の 25~30mabh を通過しており、高角度割れ目の本数増 加と高角度割れ目方向の傾向に相関がある可能性が考えられた。一方、弾性波トモグラフィ結果におい て周囲と速度が異なるゾーンは、母岩変質による密度の違いが反映されていると考えられ、各孔 0~ 5mabh の低速度帯は掘削損傷領域による緩み、18MI64 号孔の深部でみられる低速度帯は、主立坑断層 によるダメージゾーン(割れ目周辺の母岩変質)(鶴田ほか, 2012)が影響している可能性がある。

図 5.1-124 に水圧応答と高角度割れ目の方向分布を示す。図中の水色矢印の方向は、試験区間のバル ブ開放をしたとき、他区間で最も大きく応答が表れた区間を始点として表記し、ローズダイヤグラムは 図 5.1-123 と同様である。水圧応答は 18MI63 号孔と 19MI66 号孔の相互で応答がよいが、割れ目の 方向に共通性はみられない。また、18MI64 号孔深部と 18MI63 号孔 int1 についても同様である。水み ち割れ目の方向は必ずしも孔間で同傾向を示さず、その間に水平割れ目が水みちを連結させるパスの役 割を果たしていることが考えられた。



図 5.1-123 弾性波探査結果と高角度割れ目の方向分布の対比



図 5.1-124 水圧応答と高角度割れ目の方向分布との対比

#### 参考文献

- Agarwal, R. G, A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data, paper SPE 9289 presented at the 55th SPE annual technical conference and exhibition, Dallas, TX, 1980.
- Andersson P., Byegård J. and Winberg A., Final report of the TRUE Block Scale project 2. Tracer tests in the block scale, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. SKB Technical Report TR-02-14, 2002.
- 安居院 猛, 長尾智晴, 画像の処理と認識, 昭晃堂, 206p, 1992.
- Barnes, C., Gerea, C., Clement, F. and Mougenot, J. M., Diving wave tomography: a robust method for velocity estimation in a foothills geological context, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011, pp.3953-3957, 2011.
- 公益社団法人物理探査学会編,物理探査ハンドブック増補改訂版,1045p,2016.
- Cooper,H.H., Jr.and Jacob, C.E., A generalized graphic method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, Transactions ,American geophysical Union, vol.27, no.4, pp.526-534, 1946.
- 一般財団法人電力中央研究所, 平成 24 年度地層処分技術調查等事業(地層処分共通技術調查:岩盤中地 下水移行評価技術高度化開発)-岩盤中物質移行特性評価技術高度化調查-, 2013.
- 一般財団法人電力中央研究所,平成25年度地層処分技術調査等事業(岩盤中地下水移行評価確証技術開 発)・岩盤中物質移行特性評価技術の確証-,2014.
- 一般財団法人電力中央研究所,平成26年度地層処分技術調査等事業(岩盤中地下水移行評価確証技術開 発)・岩盤中物質移行特性評価技術の確証-,2015.
- 濱田 藍, 土岐花崗岩中の水みち割れ目とその周辺マトリクスの微細間隙構造, 電力中央研究所報告, N18004, pp.1-31, 2019.
- Hvorslev, M., Time lag and soil permeability in ground water observations, Corps of Engineers, U.S. Army, No.36, pp.1-50, 1951.
- 石橋 正祐紀, 栗原 新, 松岡稔幸, 笹尾英嗣, 超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築-第2段階における Shaft180 から Stage300 地質構造モデルへの更新-, JAEA-Research, 2012.
- 石橋 正祐紀, 笹尾英嗣, 窪島光志, 松岡稔幸, 超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モ デルの構築-第 2 段階における Shaft460 および Shaft500 地質構造モデルへの更新-, JAEA-Research, 2013.
- 石原舜三, 鈴木淑夫, 東濃地方ウラン鉱床の基盤花崗岩類, 地質調査所報告, vol.232, pp.113-127, 1969. 糸魚川 淳二, 瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, 1, pp.1-50, 1980.
- 狐崎長琅,応用地球物理学の基礎,古今書院,297p,2001.
- 窪島光志,石橋 正祐紀,笹尾英嗣,鶴田忠彦,田上雅彦,湯口貴史,超深地層研究所計画 地質・地質構 造に関する調査研究-深度 300m までの地質・地質構造-, JAEA-Research, 2012.
- 株式会社村田製作所 HP
- http://www.well-murata.co.jp/attached/Online.pdf(2019年3月12日最終閲覧)
- 中山勝博, 陶土団体研究グループ, 瀬戸層群の堆積盆地, 地球科学, vol.43, pp.392-401, 1989.
- 国立研究開発法人日本原子力開発機構,一般財団法人電力中央研究所,平成 30 年度高レベル放射性廃 棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発),2019.
- 日本原子力研究開発機構, 東濃地科学センターHP

https://www.jaea.go.jp/04/tono/pamph/tgcpamph.pdf(2019年3月13日最終閲覧)

三枝博光, 須山泰宏, 深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析, サイクル

機構技報, no.9, pp.89-101, 2000.

- 佐藤 礼,山田信人,土家輝光,Christophe,B., 「HD(高精細)トモグラフィ」の導入と適用例,公益社団 法人物理探査学会第 138 回学術講演会論文集, pp.1-4, 2018.
- 佐藤 礼,山田信人,赫 伸仁,林 和男,佐藤 進,藤本 潤,傾斜構造における「3D-HD トモグラフィ」 適用の検討,公益社団法人物理探査学会第140回学術講演会論文集,pp.37-40, 2019.
- 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 程塚保行, 田上雅彦, 石田英明, 早野 明, 栗原 新, 湯口貴史, 超深地層研究所計 画 地質・地質構造に関する調査研究(2008年度)報告書, JAEA-Research, 2010.
- 鶴田忠彦, 武田匡樹, 上野孝志, 大丸修二, 徳安真吾, 尾上博則, 新宮信也, 石橋 正祐紀, 竹内竜史, 松 岡稔幸, 水野 崇, 田上雅彦, 超深地層研究所計画 主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報告 書, JAEA-Technology, 2012.

### 5.1.2 水みちの微細透水構造・物質移動モデルの構築

### (1) レジン注入による水みち割れ目の可視化・分析

1) 概要

本年度も引き続き水みち割れ目の構造を把握するために、割れ目内に十分レジンが充填され、割れ目 面が密着した状態であった N44W64NE・N19W87E(17MI61号孔)と N31W82SW(17MI62号孔) の割れ目の可視化を行い、水みち割れ目の構造、とくに水みち割れ目の連続性と連結性の把握を試みた。

孔名	诵】番号	走向・傾斜	深度		BTV 詳細観察
13MI37 是习	注入了	N26W80F	23.14 mabh		
		N20W00E	20.14 IIIabii		0
12MI31 亏扎	<b>壮</b> 人扎	N29W88E	21.09 mabh		0
12MI31 号孔	注入孔	N8E22E	22.74 mahb	—	$\bigcirc$
17MI60 号孔	$\bigcirc$	N28W76E	22.12 mabh	密着	0
	$\bigcirc$	N3E25E	21.75 mabh	密着	0
	2	N28W77E	22.01 mabh	充填領域小	0
	3	N34W82NE	22.13 mabh	充填領域中	×
17MI61 号孔	4	N22W85E	22.25 mabh	充填領域中	×
	5	N44W64NE	22.47 mabh	密着	0
	6	N19W87E	22.53 mabh	密着	0
	$\overline{\mathcal{O}}$	N9E25E	22.87 mabh	充填領域大	0
	$\bigcirc$	N29E80W	22.48 mabh	密着	0
17MI62 号孔	2	N49W46NE	22.71 mabh	充填領域小	0
	3	N34E29SE	22.78 mabh	充填領域中	0
	4	N12W82E	23.30 mabh	充填領域小	×
	5	N31W82SW	24.38 mabh	密着	0

表 5.1-28 レジン充填箇所一覧

※走向・傾斜および深度はBTV 検層によるもの

### 2) X線CT法による可視化・分析

①はじめに

X線 CT 法による可視化には、電力中央研究所が所有する高出力マイクロフォーカス X線 CT スキャ ナー(TXS-CT450/160、テスコ株式会社)を用いた。本装置は X-tek 社(最大管電圧 450 kV)と X-ray workX社(最大管電圧 160 kV)の二つの X線源を搭載されていることが特徴である。本研究では、直 径 95 mmの円柱状の花崗岩(ボーリングコア)が撮影対象であることから、X線が 95 mmの花崗岩を 十分に透過できる 450 kVの X線源で撮影を行った。また、今年度の試料は割れ目内にレジンが充填さ れ密着した状態で回収されたものであったが、レジン充填割れ目の近傍やレジン充填割れ目と共役をな すレジンが充填されていない割れ目で破断していたため、撮影の際は、破断された部分を可能な限り噛 み合せた後、噛み合せた破断面が分離しないように熱収縮チューブで試料の周囲を覆って固定した。

## ② X線 CT 画像の 360° 展開表示によるボーリングコアの定方位化

BTV 検層による走向・傾斜データから描かれるサインカーブと重なるように、X線 CT スキャナーの 撮影で得られたボリュームデータから直径 80mm の 360°展開表示画像を作成した。

X線 CT 展開表示画像に BTV 検層の走向・傾斜のサインカーブを重ね合わせたものを図 5.1-125 に 示す。なお赤色のサインカーブはレジンが充填され割れ目面が密着していた箇所を示している。また、 青色の枠で囲まれた領域は高出力マイクロフォーカス X線 CT スキャナーの撮影で得られた画像から 作成した展開表示画像である(それ以外の領域は医療用X線CTスキャナーの撮影で得られた画像から 作成したもの)。

BTV 検層の結果と概ね一致していたが、17MI61 号孔の N44W64NE の割れ目については X 線 CT 展開表示画像からレジン充填割れ目と共役をなす割れ目の走向・傾斜であったため、X 線 CT 展開表示 画像からレジン充填割れ目の走向・傾斜を読み取り直して、この区間のレジン充填割れ目の走向・傾斜 を N39W84NE に修正した。その他のレジン充填割れ目についても X 線 CT 展開表示画像から描かれ るサインカーブに合うように傾斜角度を多少修正した。



図 5.1-125 X線CT 画像の 360°展開表示画像

### ③ X線 CT 法による可視化結果

X線CT法による可視化結果を図 5.1-126~図 5.1-127 に例示する。図中の上下左右(UDLR) は展開表示画像の上下左右と同じ方向を示している。

17MI61 号孔のX線CT画像中には4本の開口した割れ目が確認できる。このうち2本がレジン充填割れ目である。浅部のレジン充填割れ目(N39W84NE)は直線的ではなく、共役をなす割れ目の一部にも分布している。おそらく、古い割れ目(レジン充填割れ目と共役をなす割れ目)が再動したことにより形成された割れ目であると考えられる。一方、深部のレジン充填割れ目

(N19W87E)は雁行状に配列していることが確認できる。この割れ目の開口部は、その形状からせん断変形によって形成されたと考えられる。



図 5.1-126 17MI61 号孔におけるレジン充填割れ目の X線 CT 画像

17MI62 号孔の X線 CT 画像中には 2本の開口した割れ目とそれらと交差する鉱物脈(白色) が確認できる。開口した割れ目のうち深部に分布している割れ目(N31W84SW)がレジン充填割 れ目であり、白色の鉱物脈は方解石であると考えられる。

2本の開口した割れ目と方解石脈の交差部では、ずれは認められない。また開口した割れ目が 鉱物脈を切断する形で分布していることから、方解石脈が先に形成されたものと考えられる。さ らに方解石は開口した割れ目のうちレジン充填割れ目にも充填されているが、もう一方の開口し た割れ目には充填されていない。3つの割れ目はそれぞれ異なる時期に形成された可能性が高い と考えられる。



図 5.1-127 17MI62 号孔におけるレジン充填割れ目の X 線 CT 画像
### 3) 逐次研削法による可視化・分析

### ① はじめに

割れ目内のレジンの充填状況を把握し、水みち割れ目の連続性・連結性、およびその特徴を把握するために逐次研削法による水みち割れ目の可視化を行った。

逐次研削法(シリアルセクショニング法)とは、平面研削による試料表面の研削とデジタルカ メラなどによる撮影とを繰り返して数十µmサイズの組織の三次元像を取得する方法である。逐 次研削法では、平面研削により最終的に試料が失われることになるが、X線CT画像とは異なり 割れ目内でのレジンの充填状況を蛍光色により識別が可能であるため、実際にレジンがどの箇所 を通っていったかをより詳しく把握することが可能である。

### ②研削面画像の取得方法

試料の研削は、電力中央研究所が所有する成形研削盤(PFG-450DXC、株式会社岡本工作機械 製作所)を用いた。この研削装置では長さ 450 mm x 幅 150 mm x 高さ 200 mm のサイズの試 料を 5 μm の精度で平面研削することができる。本業務では、この成形研削盤を用いて割れ目に 直交する方向に 0.475 mm 間隔で研削していった。

画像の取得には、フラットベッドスキャナー(GT-X830、セイコーエプソン株式会社)とデジ タルー眼レフカメラ(D7000、株式会社ニコン)を用いた。研削深さ 0.475 mm ごとにフラット ベッドスキャナーによる画像収録を、研削深さ 0.95 mm ごとにデジタルー眼レフカメラによる 研削面の撮影を行った。デジタルー眼レフカメラでの撮影は簡易暗室内で行い、蛍光灯、紫外線、 蛍光灯+紫外線と光源の種類を変えて行った。

### ③ 逐次研削法による可視化結果

逐次研削法による可視化結果を図 5.1-128~図 5.1-129 に示す。

17MI61 号孔の研削面画像中には 2 本のレジン充填割れ目(淡青色)が確認できる。X 線 CT 画像においても確認されたように浅部のレジン充填割れ目(N39W84NE)は直線的ではなく、共 役をなす割れ目の一部にも分布している。前述したように、N39W84NE の割れ目は古い割れ目 (レジン充填割れ目と共役をなす割れ目)が再動したことにより形成された割れ目であると考え られる。一方、深部のレジン充填割れ目(N19W87E)はカタクレーサイト部に沿って雁行状に配 列しており、X 線 CT 画像からは確認できなかったがレジンがまばらに充填されている様子が確 認できる。せん断変形により割れ目が開口して水みちを形成したものと考えられる。

17MI62 号孔の研削面画像中には 4 本の割れ目が確認できる。淡青色の割れ目がレジン充填割 れ目、濃青色の割れ目が破断面、残り 2 本の白色の割れ目が方解石脈である。X 線 CT 画像から は確認できなかったが、レジン充填割れ目と鉱物脈が交差する地点を境に、レジンが充填されて いる箇所と充填されていない箇所に二分されていることが確認できる。また方解石脈が雁行状に 分布していることも確認できる。せん断変形により形成された後に、割れ目に熱水等が浸透して 方解石が充填されたものと考えられる。



図 5.1-128 17MI61 号孔におけるレジン充填割れ目の研削面画像



図 5.1-129 17MI62 号孔におけるレジン充填割れ目の研削面画像

図 5.1-130 に逐次研削法で得られた画像から作成した割れ目面上のレジン充填分布を示す。緑 色で表示されている箇所がレジンである。また、割れ目を充填していた微量の金属元素を含む鉱 物が褐色で表示されている。なおこれらの画像は定方位化を行っていない。

移行先の割れ目の走向・傾斜が注入割れ目の走向・傾斜(NW-E系)と同じであれば、レジン は割れ目面上に一様に分布していることが確認できる。ただし割れ目沿いにカタクレーサイトが 形成されていた N28W76E と N19W87E の割れ目は相対的にレジンがまばらに分布している。 これらの割れ目では X線 CT 画像や研削面画像から確認されたようにせん断変形により開口した 部分にレジンが充填したためにまばらに分布したと考えられる。

N29E80W はジョグ部を介してレジンが選択的に移行したことを示している。N3E25E の割れ 目では割れ目の形状(紡錘状)を反映してレジンが不均質に分布しており、右上から左下へとレ ジンが流動したことが読み取れる。

N39W84NE(17MI61号)とN31W84SW(17MI62号)では、一部レジンが充填されていない箇所 が確認できるが、前者は古い割れ目(レジン充填割れ目と共役をなす割れ目)が再動したことに より形成された割れ目であることから、レジンが充填されていない箇所は再動しなかった箇所あ るいは割れ目が進展しなかった箇所であると考えられる。後者は方解石によりレジンの流れが遮 られたためにレジンが充填されない箇所が形成されたものと考えられる。



N28W76E(17MI60号)



N39W84NE(17MI61号)



N19W87E (17MI61号)



N29E80W(17MI62号)



N31W84SW(17MI62号)



N3E25E(17MI61号)

図 5.1-130 割れ目面に直交する方向から見た研削面画像

# ④ 研削面画像の 360°展開表示による流れ場の推定

研削面画像から展開表示画像を作成した。その結果を図 5.1-131 に示す。なお展開表示画像での上下左右は、ボーリング孔の孔底側からみた方向を示している。

17MI60 号孔の N28W75E 割れ目のレジンは全周にわたって分布していることから、13MI37 号孔(注入孔)と17MI60 号孔間では、レジンは割れ目面上を比較的一様に流れていったものと 考えられる。

17MI61 号孔の N3E25E 割れ目のレジンは右上から左下にかけて分布していることから、この

方向に沿ってレジンが流れてきたと考えられる。

17MI61 号孔の N19W87E 割れ目のレジンは全周にわたって分布していることから、13MI37 号孔(注入孔)と17MI61 号孔間の割れ目は連続していて、レジンが割れ面上を比較的一様に流 れていったものと考えられる。17MI61 号孔の N39W84NE 割れ目についても左上と右側に未充 填の領域が存在するが比較的全周にわたって分布しており、17MI60 号孔の N28W75E 割れ目を 介してレジンが流れていったと考えられる。

17MI62 号孔の N29E80W 割れ目のレジンは右下から左上にかけて線状に分布していることから、17MI60 号孔の N28W75E 割れ目からジョグ部を介して浅部の割れ目へとレジンが移行していったものと考えられる。17MI62 号孔の N31W84SW 割れ目のレジンは右上から左に分布していることから、この方向に沿ってレジンが流下していったものと考えられる。



図 5.1-131 研削面画像の 360° 展開表示画像

#### 4) 水みち割れ目の連結性

レジンが充填されていた割れ目と注入割れ目といった主要な開口割れ目の位置関係を孔跡平面 図と孔跡断面図にプロットした。その結果をそれぞれ図 5.1-132 と図 5.1-133 に示す。

割れ目内のレジン充填状況は様々な様相を呈していたが、13MI37 号孔(注入孔)と 17MI60 号孔および 17MI61 号孔のレジン充填割れ目との関係から、平成 27 年度に実施したトレーサー 試験の対象区間である 12MI31 号孔と 13MI37 号孔間では、NW-E 系の高角度傾斜の割れ目が単 一割れ目として主要な水みちを形成していたと考えられる。一方、13MI37 号孔と 12MI30 号孔 間の割れ目は単一割れ目として連続しておらず、17MI62 号孔の N29E80W で確認されたジョグ 部を介して、12MI30 号孔の N29W86E 割れ目に連結していたと考えられる。

高粘性流体試験やレジン注入試験では、12MI30 号孔の N9W73E 割れ目において良好な水圧 の応答が確認されているが、この割れ目には 17MI62 号の N31W84SW の割れ目が連結している と考えられる。また 13MI37 号孔(注入孔)から N31W84SW の割れ目へは、割れ目面上にレジ ンが付着していた 17MI62 号孔の N34E29SE 割れ目を介してレジンが流動していったものと考 えられる。

17MI61 号孔の N3E25E 割れ目へは、割れ目面上のレジン充填分布画像や展開表示画像から 17MI61 号孔の N39W84NE 割れ目を介して 13MI37 号孔からレジンが流動してきたと考えられ る。なおレジン注入試験では、12MI31 号孔の N29W88E 割れ目から 2 回目のレジン注入試験を 実施しているため、この割れ目から 17MI61 号孔の N3E25E 割れ目にレジンが流動していった 可能性も考えられる。



図 5.1-132 レジン充填割れ目の分布(平面図)



図 5.1-133 レジン充填割れ目の分布(断面図)

### 5) まとめ

レジン注入による水みち割れ目の可視化では、瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横 坑の水みち割れ目にレジンを注入し、その後の掘削により得られた計 5 本のボーリングコアを用 いて、計 6 本のレジン充填割れ目構造の可視化を行ってきた。割れ目内のレジン充填分布は様々 な様相を呈していたが、主要な水みちとして NW-E 系の高角度傾斜の割れ目が抽出され、平成 27 年度に実施したトレーサー試験の対象区間である 12MI31 号孔と 13MI37 号孔間では、この主要 な水みちが単一割れ目として連続していることが確認できた。また主要な水みち割れ目の一部は カタクレーサイト沿いに分布しており、周辺母岩には特異な変質や、割れ目内に充填鉱物が確認 されなかった。またこれらを連結する水みちとして、NE-W 系の高角度傾斜の割れ目と NE-E 系 の低角度傾斜の割れ目が抽出された。NE-W 系の高角度傾斜の割れ目はジョグ部のみにレジンが 充填されており、高粘性流体試験やレジン注入試験で良好な水圧の応答がみられた 12MI30 号孔 の NW-E 系の割れ目(N29W86E)と連結していた。12MI30 号孔の N9W73E の割れ目へは NW-W 系の割れ目が連結していたが、この割れ目と主要な水みちとは NE-E 系の低角度傾斜の割れ目 が連結していた。以上、推論にとどまる部分も残されたが、深度 300m ボーリング横坑の水みち 割れ目の連続性と連結性について概ね把握できたものと考える。

# (2) 岩石マトリクスへの拡散・収着

# 1) 水みち割れ目周辺マトリクスの拡散試験

### ① 背景と目的

花崗岩などの結晶質岩において、放射性核種は地下水を媒体として岩盤中の割れ目内を流動するとともに、マトリクス中のマイクロクラックなどの微小な間隙を拡散していく(Neretnieks, 1980)。これまで土岐花崗岩中の割れ目の地質学的特徴と物質移動に関わるパラメータ値(拡散

係数や収着分配係数)の関係の把握を目的とした室内試験が行われてきた(日本原子力研究開発 機構,2012;2014;2016;2017)。その結果、土岐花崗岩の変質・未変質部の試料を比較した場 合、変質部の方がより大きな実効拡散係数を示し、これは試料の有効間隙率と相関があり、有効 間隙率は鉱物組成比、特に長石類の量比との相関があることを示した。また未変質部の試料にお いて蛍光レジンによる微視的な間隙分布の可視化とその定量的な評価を行った結果、長石類の中 でも斜長石中の微細間隙構造が拡散の経路となる可能性が高いことを述べている(石橋ほか, 2016)。

本研究では、原位置トレーサー試験で試験対象となる水みち割れ目の岩石マトリクスにおける 核種の拡散・収着挙動を考慮したパラメータ値を取得することを目的とする。透水量係数の大き さにより移流・拡散の場と判断された水みち割れ目周辺マトリクスを試料として、当所で開発さ れた室内試験技術を参考に、割れ目面からの距離(マトリクス拡散深さ)に応じた拡散試験を行 った。その際、割れ目面からマトリクスにかけての間隙率およびモード測定による鉱物量比の変 化と拡散係数との関係について確認した。

#### 2 試験試料

試験に用いる試料は、瑞浪超深地層研究所深度 300 m ボーリング横坑の西側孔壁および深度 500 m 研究アクセス南坑道 125 m 計測横坑の西側孔壁において掘削した土岐花崗岩のコア試料 である。両深度においてそれぞれ実施された複数のボーリング孔間における透水試験では、透水 量係数が深度 300 m では 10<sup>-7</sup>~10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s(電力中央研究所, 2015)深度 500 m では 10<sup>-10</sup>~10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s(電力中央研究所, 2015; 2016)であり、各深度でより透水性の高い割れ目と判断された割 れ目面とその周辺マトリクスを選定した。また比較として、試料番号 R01\_D\_4 には、割れ目か ら十分に遠く、熱水変質の影響がない深度 300 m の健岩部の試料についても試験を行った。コア 試料中でかみ合う割れ目面の深度の浅い側を上盤、深度の深い側を下盤とする。

深度 (m)	試験番号	試験箇所 孔名_深度 (mabh)	割れ目面からの距離 (mm)	試料の性状
	R01_D_1	12MI30_22.77_上盤_No.1	0-10(割れ目面)	表面に灰色の充填鉱物を産する
01 000	R01_D_2	14MI49_19.50_上盤_No.1	0-10(割れ目面)	表面に灰色の充填鉱物を産する
GL-300	R01_D_3	14MI49_19.50_上盤_No.3	20-30	
	R01_D_4	17MI61_16.35	_	健岩部
	R01_D_5	15MI53_15.07_下盤No.1	0-10(割れ目面)	
GL-500	R01_D_6	15MI53_15.07_下盤No.3	20-30	
	R01_D_7	15MI53_21.41_下盤No.1	0-10(割れ目面)	表面に白色の充填鉱物を産する

表 5.1-29 拡散試験のための試料一覧

### ③ 試料の加工と計測方法

### (a) ディスク状岩石試料の加工

試料の加工には、径 52 mm のビットを装着したコアドリルを用いて、割れ目面に対して垂直 な方向に掘削し、直径 5.0 cm の円柱状試料を得た。次に円柱状試料の割れ目面に対して平行に岩 石カッターで厚み 1.0 cm のディスク状に整形した。試料の整形の様子およびディスク状試料を 示す(図 5.1-134 (a)~(f))。割れ目面から厚み 1.0 cm ずつカットして製作したディスク状岩石試 料には、割れ目面からマトリクスにかけて順番に No.1, No.2, No.3 と番号を付与した(図 5.1-135)。



図 5.1-134 ディスク状岩石の加工の様子

(a) コア試料, (b) 割れ目面, (c) コアドリルによる掘削の様子, (d) 掘削後のコア試料の 様子, (e) ディスク状カット前の試料, (f) ディスク状カット後の試料





### (b) ディスク状岩石の厚みの測定

拡散試験で用いたディスク状岩石のうち、No.1 は片面が自然の割れ目面そのものであるため、 試料表面の凹凸の程度によって厚みが均一ではない。割れ目面の凹凸に応じたより正確な試料の 厚みを測定するため、試料表面の形状(トポグラフィー)を3次元的に測定することが可能な3D スキャナーを用いて、No.1の試料表面の凹凸情報を取得することにした。測定には、ワンショッ ト3D形状測定機(キーエンス製、VR3000)を用い、試料台には高さの基準面となるように、厚 さ9.08 mmの金属片を試料とともに載せて測定した。得られた画像と計測値を図 5.1-136 には、 測定領域と測定結果の例を示す。試料の高さと表面積の測定は、図 5.1-136 (b)に示すように試料 の最外径から1 mm内側の領域を測定することで、試料の縁のコアドリルで掘削した際の欠けが 最大もしくは最小高さと認識されないようにした。No.3 は No.1 と異なり、両面を整形した試料 であったため、平均高さ(厚み)はノギスでディスク状試料の四方を正確に測定し、平均値を求 めた。



図 5.1-136 ディスク状岩石試料の表面のトポグラフィー測定

(a) 測定試料の写真。下部には厚みが既知の金属片を置く。(b) 計測位置と計測領域。△は最大高 さ位置、▽は最小高さ位置、水色領域は表面積算出領域を示す。(c) トポグラフィー画像の例。カ ラースケールの 0.00 mm が金属片の高さと同じになるように表示する。

封約来日	直径	最大高さ*1,2	最小高さ**1,2	平均高さ*1,2	表面積※1
叶杆宙力	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
R01_D_1	49.75	10.14	8.05	9.11	1825.88
R01_D_2	49.04	11.62	7.96	10.0	1830.52
R01_D_5	49.69	9.95	7.19	8.51	1920.02
R01_D_7	49.75	10.76	7.83	9.51	1979.82

表 5.1-30 ディスク状岩石試料の 3D スキャナーによる寸法の測定結果

・※1:試料の最外周から1mm内側の円領域内において計測(直径-2mmの値)。

・※2:基準面の金属片高さ 9.08 mm を加えた値。

# (c) 岩石薄片による鉱物の同定とモード測定

各ディスク状試料に含まれる鉱物の同定および鉱物の割合を把握するために、整形後に残った 試料について、割れ目面から垂直に約3 cm 幅の岩石薄片を製作し、偏光顕微鏡による鉱物同定 およびモード測定を行った。モード測定はディスク状岩石の幅に合わせて、割れ目面(0 cm)か らほぼ1 cm 幅ずつに測定範囲を区切り、ポイントカウント法により測定を行った(図 5.1-137)。 モード測定の結果を図 5.1-138 に示す。







図 5.1-138 岩石薄片によるモード測定結果

凡例〔〕は、2次鉱物で鉱物同士の粒界もしくは鉱物粒内に脈状に産するもの、もしくは鉱物 粒子内にプール状に産するものを示す。赤枠は拡散試験を実施した試料を示す。

### (d) 間隙率測定

各ディスク状試料の間隙率は、ディスク状試料加工後に残った試料を整形し測定を行った。残 試料の状態により、間隙率は水銀ポロシメータもしくは絶乾・湿潤法により測定した。水銀ポロ シメータは岩石中の細孔を円柱状の間隙と仮定し、表面張力の高い水銀の注入圧と試料中の円柱 状間隙の直径との相関関係からマクロポア(100 nm ~ 1000 µm)の細孔径分布を測定するもの である。測定試料は、ディスク状岩石の幅に合わせて、割れ目面から 1 cm 幅間隔で、かつ花崗 岩の間隙率は小さいことが予想されるため、試料セルに入る最大の大きさ(1 cm×1 cm×2 cm) に加工した(図 5.1-139)。測定には、micrometrics AutoPoreIV9500(島津製作所製)を使用し た。また上記の試料サイズへの加工が難しかった試料については、絶乾・湿潤法による間隙率の 測定を行った。測定は、JIS A 1110 「粗骨材の密度及び吸水率試験法」に準拠して行った。測定 結果は表 5.1-31 に載せる。



図 5.1-139 水銀ポロシメータ測定用試料のサイズ

### ④ 試験方法

拡散試験は Through Diffusion 法を採用し、具体的な試験方法は、電力中央研究所, 2016; 2017; 2018 に準拠して行った。Through diffusion 法は、2 つのセルの間にディスク状岩石を挟みこみ、 片方のセルに高濃度溶液、もう片方のセルに低濃度溶液を入れ、両者間の濃度勾配から発生する フラックスを計測し、拡散係数を計測する方法である。図 5.1-112 には拡散試験用セルの写真を 示す。非収着性トレーサーとして Cl および Br、また収着性トレーサーとして Rb および Ba を 添加した。セルの容量は 400 mL とし、臭化ルビジウム 162 g および塩化バリウム二水和物 220 g を 5 L の純水に溶解させた溶液を調整し、高濃度側のセルに入れた。低濃度側のタンクには、 高濃度側の溶液とイオン濃度を合わせた硝酸ナトリウム溶液を入れ、両セルの間で生じる圧力差 や浸透圧の影響を低減するようにした。ディスク状岩石試料は、予め容器に入れた低濃度側溶液 に浸漬し、容器ごと真空デシケータ内で脱気しながら 3 週間ほど静置することで、試料中に含ま れる Cl や Br の濃度を低下させた。各セルに溶液を入れた時間を試験の開始時間とし、試験の間、 各タンクはスターラーで緩やかに攪拌した。サンプリングはおよそ 2 週間に 1 回実施し、高濃度 側および低濃度側のセルから少量抜き取った。サンプリングした溶液はろ過・希釈したのち、Cl および Br 濃度はイオンクロマトグラフ (881 Compact IC pro, Metrohm)、Rb および Ba 濃度 は ICP-MS (7500ce, Agilent) により分析を行った。



図 5.1-140 拡散試験セルの様子

各セルは円柱形をしており、左は低濃度側,右は高濃度側である。中央の2枚のアクリル板の間 に O リングを巻いたディスク状岩石を挟み込んで固定した。両セルには撹拌子を入れ、スターラ ーで常時セル内の溶液を撹拌した。

#### ⑤ 結果

表 5.1-31には各トレーサーの低濃度側の濃度変化の近似曲線より求めた実効拡散係数(m<sup>2</sup>/s) および③-(d)で求めた間隙率の値をまとめた。また、図 5.1-141 には各トレーサーの実効拡散係 数の値をグラフにし比較した。

試験番号	割れ目面からの		拡散係数(m <sup>2</sup> /s)				試料の 直径	試料の 平均厚さ	間隙率
	此稱(mm)	CI	Br	Rb	Ba	(日数)	(cm)	(cm)	(%)
R01 D 1	0-10(割れ目面)	3.67E-12	3.93E-12	3.79E-12	3.46E-12	1年1か月	4.98	0.91	0.65
R01_D_2	0-10(割れ目面)	1.52E-12	1.55E-12	1.66E-12	7.65E-13	6.5か月	4.90	1.00	0.82 (※1)
R01_D_3	20-30	9.33E-13	9.37E-13	1.04E-12	4.31E-13	5.1か月	4.93	1.06	0.64 (※1)
R01_D_4	健岩部	1.15E-12	1.13E-12	1.31E-12	5.52E-13	5.1か月	4.98	1.00	0.75
R01_D_5	0-10(割れ目面)	1.50E-12	1.42E-12	1.82E-12	7.33E-13	5.1か月	4.97	0.85	0.76
R01_D_6	20-30	4.14E-13	4.85E-13	5.33E-13	2.31E-13	6.5か月	4.97	1.00	1.05
R01_D_7	0-10(割れ目面)	2.05E-12	2.03E-12	2.38E-12	1.57E-12	8.9か月	4.98	0.95	0.93

表 5.1-31 各トレーサーの実効拡散係数および間隙率

※1 絶乾・湿潤法による間隙率の測定

拡散試験の結果、収着性トレーサーおよび非収着性トレーサーの実効拡散係数は、割れ目面(0 -10 mm)の方が健岩部や割れ目面から離れた(20-30 mm)ものよりも大きな値を示した(図 5.1-141)。各トレーサーの値を比較すると、非収着性トレーサーである Cl および Br は、R01 D 1 以外はどちらのトレーサーも同程度の値を示した。R01\_D\_1 は Cl よりも Br の方が少し大きな 値となった。割れ目面および健岩部では 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーであり、割れ目面から離れた試料で は 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーを示した。 収着性トレーサーである Rb および Ba はすべての試料において Rb の方が Ba よりも大きな値を示す傾向にあった。Rb は割れ目面および健岩部では 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーであり、割れ目面から離れた試料では10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーとなった。これに対し、Ba は 割れ目面 R01 D 1 および R01 D 7 では 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーで、それら以外は 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s オーダ ーとなった。試料の間隙率は、R01\_D\_6を除いて、割れ目面の方が割れ目面から離れた試料より も比較的大きな値を示す傾向にあった。よって、試料の間隙率と各トレーサーの実効拡散係数と の間には相関があると考えられ、先行研究でも同様の傾向が得られている(日本原子力研究開発 機構、2012:2014:2016)。間隙率を大きくする原因としては、岩石薄片の観察およびモード測定 結果より、割れ目面では割れ目面よりも離れた試料よりも、2次鉱物(絹雲母、緑泥石、方解石 など)の産する割合が大きいことが考えられる。絹雲母は斜長石の熱水変質により生成されたと 考えられ、絹雲母の分布と微細な間隙のある領域が一致し、かつウラニンによる拡散試験におい て、斜長石部分でウラニンの蛍光が確認されたことから、花崗岩中の拡散経路に寄与すると考え られている(日本原子力研究開発機構, 2017; 石橋ほか, 2016)。収着性トレーサーの Rb と Ba の間で実効拡散係数に差が出た原因については明らかではないが、後述する粉末バッチ試験の結 果との関係を考慮する必要がある。



図 5.1-141 割れ目面からの距離に応じた実効拡散係数の比較

### 2) マトリクスの鉱物割合の異なる試料の収着試験

### ① 背景と目的

高レベル放射性廃棄物処分の安全評価の対象とされている「地下水シナリオ」では、地下水は 岩盤中の割れ目を通り、核種は割れ目の表面への収着や岩石マトリクスへ拡散した核種もマトリ クスを構成する鉱物に収着し、その移行が遅延することが考えられるため、岩石に対する核種の 遅延能力を評価することは重要である。電力中央研究所,2017においては、割れ目充填鉱物への 収着能力を評価することを目的に、入手可能で産地の異なる7種類の鉱物単体について、収着ト レーサーとしてルビジウム(Rb)およびバリウム(Ba)を用い、岩石粉末試料による収着バッチ 試験が実施された。その結果、Rbは黒雲母および絹雲母,Baはスメクタイトへの収着率が大き く、これらの鉱物が他の鉱物よりも大きな比表面積を有することが収着能力を高める要因である と述べている。通常、花崗岩の割れ目とその周辺マトリクスは、複数の鉱物で構成されており、 割れ目充填鉱物や母岩の変質の程度によってその鉱物の量比は異なる。そこで本研究では、土岐 花崗岩の割れ目とその周辺マトリクスの粉末試料を作成し、粉末試料の鉱物割合をモード測定に より把握したうえで、収着バッチ試験を実施し、個々の鉱物の収着能力とバルク試料の収着率の 関係を明らかにする。

### ② 試料の加工

岩石粉末を用いた収着バッチ試験の方法は、電力中央研究所,2017の試験方法(「割れ目充填鉱物への核種収着試験」)に準拠して実施した。試験に用いる試料は、瑞浪超深地層研究所深度300mボーリング横坑の西側孔壁および東側孔壁において掘削したコア試料であり、試料の採取箇所およびその性状については表 5.1-32に示す。岩石試料はタングステンミルで細かく砕いたのち、篩にかけて試料の粒径を250 µm~1000 µmに揃えた。なお、この深度における瑞浪花崗岩の造岩鉱物の分配係数を求めるため、割れ目から離れた健岩部をサンプリングし、タングステンのミ

ルで粗く砕いたあと、拡大鏡下で光沢と色の違いから石英、斜長石、カリ長石、黒雲母に分別した(R01\_MIZ\_01~04)。

#### ③ 比表面積測定

それぞれの試料について、BET1 点法による比表面積測定を実施した。比表面積の測定結果は表 5.1-34 にまとめる。

試料名	孔名	深度(mabh)	箇所	採取の範囲、特定の鉱物	試料の粒径
R01_MIZ_01		16.40 - 16.50	健岩部試料	石英のみを選別	
R01_MIZ_02	171460	16.40 - 16.50	健岩部試料	斜長石のみを選別	
R01_MIZ_03	1/10102	16.40 - 16.50	健岩部試料	カリ長石のみを選別	
R01_MIZ_04		16.40 - 16.50	健岩部試料	黒雲母のみを選別	
R01_MIZ_05	1014162	27.60 - 27.70	高角NW	割れ目面から3cm幅	250 - 1000 //
R01_MIZ_06	1010100	36.57(N58E85NW)上盤	高角NE	割れ目面から3cm幅	$250 - 1000 \ \mu \text{ m}$
R01_MIZ_07	101164	30.62(N10W88E)下盤	高角NW	割れ目面から3cm幅	
R01_MIZ_08	10101104	38.48(N20E76E)上盤	高角NE	割れ目面から3cm幅	
R01_MIZ_09	1014166	23.94(N30W86NE)下盤	高角NW	割れ目面から3cm幅	
R01_MIZ_10	1 910100	28.42(N66W10N)上盤	水平	割れ目面から3cm幅	

表 5.1-32 岩石粉末試料の採取箇所およびその性状



図 5.1-142 粉末収着バッチ試験で用いる試料の例 左よりRO1\_MIZ\_01 (石英), RO1\_MIZ\_02 (斜長石), RO1\_MIZ\_03 (カリ長石), RO1\_MIZ\_04 (黒 雲母)。いずれも試料の粒径は250 - 1000 μmに揃えている。

### ④ 岩石粉末試料のモード測定

岩石粉末試料を構成する鉱物の割合を把握するために、岩石粉末試料の鉱物のモード測定を行った。②で粒径を250µm~1000µmに揃えた試料は、左右相殺法により均一に振り分けたのち、さらに70メッシュ(210µm相当)まで粉砕を施し、うち2gをMLA分析(Mineral Liberation Analysis)に供した。MLA分析によるモード測定は、研磨片の表面に分布する鉱物量比を、その面積比から求めるものである。粉末試料はエポキシ樹脂で固定し研磨片を作成した。MLA分析装置はFEI MLA 650Fを用い、ラインスキャンによりモード測定を行った。分解能は2~4µm程度である。粉末モード測定の結果を表 5.1-33またグラフを図 5.1-143に示す。鉱物同定の結果、深度300mの健岩部を粉砕し主要造岩鉱物ごとに選別した R01\_MIZ\_01~04 は選別の対象とした鉱物が70%以上含まれていた。深度300mボーリング横坑東側孔壁の試料であるR01\_MIZ\_05~10は、花崗岩の主要造岩鉱物に加え、2次鉱物である絹雲母や緑泥石、方解石が少量含まれた。スメクタイトなどのアルミに富む粘土鉱物はR01\_MIZ\_02,05,09で0.01 wt%程度、R01\_MIZ\_07で0.05 wt%程度と非常に少ないが認められた。

	初生鉱物							2次	鉱物の害	合					
試料名	分析箇所	石英	斜長石	カリ長石	長石の 凝集体 <sup>*1</sup>	黒雲母	初生鉱物 の割合	緑泥石	絹雲母	炭酸塩 鉱物 <sup>*2</sup>	AIに富 む粘土 鉱物 <sup>*3</sup>	緑簾石	2次鉱物 の割合	その他 <sup>*4</sup>	合計
R01_MIZ_01	健岩部_石英	94.99	2.47	1.81	0.02	0.28	99.56	0.05	0.09	0.01	0.00	0.03	0.18	0.26	100.00
R01 MIZ 02	健岩部_斜長石	2.22	88.62	7.31	0.70	0.32	99.17	0.19	0.16	0.05	0.01	0.15	0.56	0.27	100.00
R01 MIZ 03	健岩部_カリ長石	2.92	22.31	73.40	0.25	0.57	99.46	0.15	0.11	0.01	0.00	0.08	0.34	0.20	100.00
R01_MIZ_04	健岩部_黒雲母	2.34	8.89	4.81	0.15	78.60	94.79	1.83	0.04	0.03	0.00	0.74	2.64	2.56	100.00
R01 MIZ 05	マトリクス	33.62	31.41	24.45	2.73	2.49	94.70	3.24	1.13	0.20	0.01	0.05	4.63	0.67	100.00
R01_MIZ_06	マトリクス	41.86	28.67	22.06	2.22	3.94	98.76	0.27	0.12	0.05	0.00	0.14	0.58	0.66	100.00
R01_MIZ_07	マトリクス	40.61	25.70	25.62	1.46	3.09	96.47	2.07	0.41	0.08	0.05	0.17	2.78	0.75	100.00
R01 MIZ 08	マトリクス	37.58	27.64	25.50	2.33	2.02	95.06	2.74	0.88	0.32	0.00	0.05	3.99	0.94	100.00
R01_MIZ_09	マトリクス	37.78	31.47	20.55	2.08	6.75	98.63	0.46	0.12	0.01	0.01	0.17	0.78	0.59	100.00
R01_MIZ_10	マトリクス	44.09	29.29	20.44	2.94	2.34	99.10	0.16	0.16	0.00	0.00	0.10	0.42	0.48	100.00

表 5.1-33 岩石粉末試料のモード測定結果(数値はすべて wt %で表示)

\*1 長石凝集体とは斜長石とカリ長石に相当する。これらは粒径が極めて小さく、前処理中に斜長石とカリ長石の凝集体が 形成されることにより、両鉱物の判別が難しいため、この項目を設定した。

\*2 炭酸塩鉱物は方解石、ドロマイトおよびアンケライトに相当する。なお、ドロマイトとアンケライトは R01\_MIZ\_04, 07, 08 にのみ極小量(<0.02wt%)含まれる。

\*3 Al に富む粘土鉱物とは主にスメクタイトをさす。

\*4 その他には、イルメナイト,マグネタイト,ヘマタイト,チタン石,褐簾石,ジルコン,アパタイト,蛍石,自然鉄, 滑石,ルチルが含まれる。このうち、大半のマグネタイトもしくはヘマタイトの粒径は30μm以下で、個々の粒子として 観察され、結晶形は等方から板状である。また自然鉄は前処理中の試料汚染により混入した可能性が高いと考えられる。



図 5.1-143 岩石粉末試料中の鉱物のモード測定結果のグラフ

# ⑤ 溶出試験

岩石粉末試料そのものに含まれる Rb および Ba が溶液中に溶出することが想定されるため、 溶出試験を実施した。②で準備した岩石粉末試料 0.2 g に対して、0.01 M の NaCl 溶液 5 mL を 添加した。溶液の pH を 8.5±0.1 に調整し、途中振り混ぜながら 7 日間岩石粉末と溶液を接触さ せた。7 日後に上澄み溶液を 0.45 µm のフィルタでろ過して、ろ液中の Rb および Ba 濃度を分 析した。Rb および Ba の濃度分析には ICP-MS (Agilent Technology 製、7500cx)を用いた。分 析結果は表 5.1-34 に示した。後述する収着率の計算式において、溶出試験の結果は「岩石ブラン ク濃度(*C*<sub>rock blank</sub>)」とする。

### ⑥ 収着試験

⑤と同様に、岩石粉末試料 0.2gに対して、0.01 Mの NaCl 溶液 5 mL を添加した。溶液の pH を 8.5±0.1 に調整し、途中振り混ぜながら 7 日間岩石粉末と溶液を接触させた。7 日間後、塩化 ルビジウム 0.145 gを 100 mL の純水、また臭化バリウム 2 水和物 0.09 gを 100 mL の純水にそ れぞれ溶解したストック溶液を準備し、溶液の Rb 濃度および Ba 濃度がそれぞれ 2 mg/L および 1 mg/L になるように添加した。これらの濃度は原位置トレーサー試験で添加するトレーサー濃度に等しい。Rb および Ba 添加直後に溶液の pH を 8.5±0.2 に調整し、途中振り混ぜながら 7 日間岩石粉末と溶液を接触させた。7 日後に上澄み溶液を 0.45 µm のフィルタでろ過して、ろ液 中の Rb および Ba 濃度を分析した。Rb および Ba の濃度分析には ICP-MS (Agilent Technology 製、7500cx)を用いた。後述する収着率の計算式において、収着試験の結果は「サンプル濃度(C)」 とする。

また、岩石粉末試料を入れずに、Rb および Ba ストック溶液を加えたブランク溶液も準備し、 同様の pH 調整を行った。ブランク溶液を分析した結果は、「ブランク濃度(*C*<sub>blank</sub>)」とする。

### ⑦脱離試験

⑥でサンプリング後に遠沈管に残った岩石粉末試料に、0.01 M の KCl 溶液 5 mL を入れ、pH を 8.5±0.1 に調整し、途中振り混ぜながら 7 日間岩石粉末と溶液を接触させた。7 日後に上澄み 溶液を 0.45 μm のフィルタでろ過して、ろ液中の Rb および Ba 濃度を分析した。Rb および Ba の濃度分析には ICP-MS (Agilent Technology 製、7500cx)を用いた。脱離試験の結果は「脱離 サンプル濃度(C<sub>desorn</sub>)」とする。

また、収着試験において岩石粉末試料を入れずに、Rb および Ba ストック溶液を加えたブラン ク溶液にも 0.01 M の KCl 溶液 5 mL を入れ、同様の pH 調整を行った。脱離試験におけるブラ ンク溶液を分析した結果は、「脱離ブランク濃度(*C*<sub>desorp blank</sub>)」とする。

#### ⑧ 結果

各岩石粉末試料の比表面積、溶出する Rb および Ba の量、Rb および Ba の収着率、分配係数、 脱離率を表 5.1-34 に示す。ここで、収着率は次式により算出した(原子力環境整備センター, 1990)。

収着率 [%] = 
$$\frac{C_{blank} - (C - C_{rock \ blank})}{C_{blank}} \times 100$$

また、分配係数は次式により算出した。

分配係数
$$K_d$$
 [mL/g] =  $\frac{C_{blank} - (C - C_{rock \ blank})}{(C - C_{rock \ blank})} \times \frac{V}{S}$ 

ここで、*V*:溶液の量[mL]、S:岩石粉末の量[g]である。 脱離率は次式により算出した。

脱離率 [%] = 
$$\frac{C_{desorp} - C_{desorp\ blank}}{C_{blank} - (C - C_{rock\ blank})} \times 100$$

表 5.1-34 各試料の比表面積および Rb および Ba の溶出量、収着率、分配係数、脱離率の結

-	
<u>H</u>	
ѫ	
- 1 -	

		比素面積	Rb				Ва			
試料番号	箇所		溶出量	収着率	分配係数	脱離率	溶出量	収着率	分配係数	脱離率
		(m /g)	$(\mu g/L)$	(%)	(mL/g)	(%)	$(\mu g/L)$	(%)	(mL/g)	(%)
R01_MIZ_01	健岩部_石英	0.04	30.9	3.62	0.9	91.4	16.1	0.5	0.2	-
R01_MIZ_02	健岩部_斜長石	0.08	24.3	0.79	0.2	-	13.9	0.7	0.2	>100 %
R01 MIZ 03	健岩部 カリ長石	0.08	24.6	2.74	0.7	-	16.6	-1.0	-0.2	-
R01_MIZ_04	健岩部_黒雲母	0.25	46.7	1.64	0.4	51.3	17.6	17.2	5.3	77.7
R01_MIZ_05	マトリクス	0.12	10.5	8.46	2.3	46.1	8.3	-23.0	-4.6	-
R01 MIZ 06	マトリクス	0.12	22.3	7.18	2.0	93.9	14.1	-16.6	-3.2	>100 %
R01_MIZ_07	マトリクス	0.23	18.4	12.0	3.7	-	11.9	-34.5	-6.1	-
R01_MIZ_08	マトリクス	0.18	27.8	9.39	2.7	>100 %	16.9	-14.1	-2.9	94.9
R01 MIZ 09	マトリクス	0.13	18.5	6.41	1.8	86.4	11.5	5.3	1.4	>100 %
R01_MIZ_10	マトリクス	0.09	23.5	4.83	1.3	58.1	15.7	7.0	2.0	>100 %

健岩部試料では石英および黒雲母で Rb の溶出が多く、Ba は黒雲母で最も溶出量が多い。収着 率については、石英、斜長石およびカリ長石で収着量にはほとんど差がないが、黒雲母で Rb が より大きい。脱離量は、黒雲母で Rb および Ba の脱離が多い。黒雲母粉末のモード測定結果では 緑泥石および緑簾石が含まれており、いずれも黒雲母が変質してできた 2 次鉱物であり、層状の 構造をもつ。以上のことから、瑞浪花崗岩を構成する石英、斜長石、カリ長石、黒雲母について の物質移行試験では、石英、斜長石、カリ長石については収着力および脱離力についてはほとん ど差がなく、その能力は小さい。これに対し、黒雲母は自ら放出する Ba の量がとても多く、収 着量よりも脱離量の方が大きい。黒雲母は結晶構造内の層間に存在する Rb と Ba が放出されて いると考えられる。

東側水みち割れ目周辺のマトリクスは、健岩部試料よりも全体的に Rb および Ba の溶出量が 小さい傾向にあった。いずれの試料も Rb および Ba の収着力はブランク試料と変わらないにも かかわらず、脱離する Rb および Ba の量はブランク試料よりも多かった。これは試料そのもの からの溶出量が多いと解釈できるが、溶出試験においては、溶出量が多い試料でも、ブランク試 料とさほど差はなかった。東側水みち割れ目周辺のマトリクスで 2 次鉱物(主に緑泥石、絹雲母) が比較的多い R01\_MIZ\_05, 07, 08 では Rb の分配係数が大きい傾向にあった。今回の試料では スメクタイトの含有量が非常に少なかったため、スメクタイトと Ba の収着率の関係については 不明である。

以上の結果から、土岐花崗岩を構成する主要造岩鉱物の個々の粉末バッチ試験、また深度 300m 坑道東側水みち割れ目周辺の異なる鉱物の量比をもつ割れ目充填鉱物とその周辺マトリクスの粉 末バッチ試験を実施して以下の点が分かった。

・主要造岩鉱物からの Rb および Ba の溶出量は、黒雲母で多い。

・Rbの収着力は、絹雲母および緑泥石の含有量と相関がある。

試料中に含まれる収着能力の高い鉱物の量が少量であっても、試料全体の収着率を変化させる傾向にあることから、収着能力の高い鉱物の試料中における割合を正確に把握しておくことは重要である。今後は、これまで取得した複数の試料の鉱物の含有割合と収着率から、個々の鉱物の収着率を求め、土岐花崗岩試料における鉱物の含有割合が把握できれば、試料の収着能力を定量的に予想できるか検討を行いたい。

⑨ まとめ

原位置トレーサー試験で試験対象となる水みち割れ目及び周辺のマトリクス部の物質移動モデ ル構築を考えるうえで、岩石マトリクスにおける核種の拡散・収着挙動を考慮したパラメータ値 を取得するため、岩石マトリクスに分布する鉱物の割合に着目した拡散・収着試験を行った。拡

5 - 162

散試験では、収着性・非収着性トレーサーにかかわらず、水みち割れ目の近傍でより大きな実効 拡散係数が得られた。また異なる鉱物割合の岩石粉末による収着・脱離試験の結果、土岐花崗岩 の主要造岩鉱物では黒雲母が収着に最も寄与するが、そのほかの石英および長石類の関与は非常 に小さいことが分かった。よって、健岩部の黒雲母、また充填鉱物やマトリクスに含まれる収着 能力の高い鉱物の含有割合が、バルクとしての収着・脱離の挙動を説明できる可能性があること が確認された。今後は鉱物の含有割合と収着能力について定量的な検討を行っていくことが必要 である。

### 3) 室内トレーサー試験

### 1)背景と目的

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価では、物質が地下水に溶解し地下水とともに移行し 人間環境に接近する「地下水シナリオ」が最も重要な評価対象である。物質移行では岩盤中の地 下水による移流とともに、地下水流速の不均質性により拡がる分散現象を伴う。また、割れ目が 存在する岩盤に対しては、割れ目内の移流分散現象に加えて、岩石マトリクス部への拡散現象(マ トリクス拡散)も考慮する必要がある。また、溶解した物質が収着性を持つ場合は、岩盤への収着 現象も考慮する必要がある。これらの物質移行特性の調査手法の一つとしてトレーサー試験があ り、原位置で実施されるトレーサー試験ではその試験現場の岩盤が有する物質移行特性を直接評 価することが期待される(田中・細谷,2008)。原位置トレーサー試験を実施する際、その場本来 の地下水流速の下で試験することが望ましいが、現実的な試験期間での実施やトレーサー回収率 の向上などを目的に地下水流速を加速させるトレーサー試験手法が採用されることが多い。一方 で、岩石粉末試料を用いたバッチ試験による収着分配係数の取得、拡散試験による実行拡散係数 の取得が行われており、これら室内試験で取得した値を物質移行解析に使用することが多い。室 内試験は、試験条件を細かく制御し易い事や将来の環境変化なども考慮でき、比較的簡便に収着 分配係数および実行拡散係数を取得することが可能である。

これら、原位置トレーサー試験と拡散試験で取得される実効拡散係数は整合的であることは熊本ほか(2014)などで示されている。しかし、原位置トレーサー試験と室内バッチ試験では、試料の比表面積や固液比、試験系内の溶媒の流動の有無などの違いがあり、取得される分配係数の整合性は明らかでない。本稿では、バッチ試験に加えて、試験条件の設定が容易な室内トレーサー試験を実施した。室内トレーサー試験で得らえた破過曲線に対し評価解析を行い、収着分配係数や実効拡散係数を推定した。その推定値とバッチ試験や拡散試験から得られた収着分配係数や実効拡散係数を比較し、両者の整合性について検討した。

#### ② 室内トレーサー試験の試験方法

100 mm×1,200 mm×100 mm の柱状の岩石をステンレス容器に入れ、スペーサーとオーリン グを介してアクリル板を押し付けて一元的な模擬割れ目モデルを作成した(図 5.1-144)。岩石が 有する物質移行特性の差異が室内トレーサー試験結果(破過曲線)に与える影響を評価するため、 二種類の岩石を使用した。岐阜県の蛭川を産地とした蛭川花崗岩と島根県の来待を産地とした来 待砂岩である。図 5.1-144 に示す模擬割れ目部分の面積は 50 mm×1,000 mm である。割れ目 を模擬するためにスペーサーとして、厚さ 0.5 mm のステンレスゲージを使用した。模擬割れ目 部分の面積およびスペーサーの厚さから、模擬割れ目部分の体積は 25 cm<sup>3</sup>=25mL となる。アク リル板には注水用の溝と揚水用の溝を模擬割れ目部の長辺両端にそれぞれ設けた。



図 5.1-144 一次元模擬割れ目モデル

図 5.1-145 に室内トレーサー試験系の概念図、図 5.1-146 に試験系の外観を示す。ポンプを使用してトレーサー溶液ならびにバックグラウンド溶液を模擬割れ目モデルに送液する。他方から排出される溶液をフラクションコレクターにて採取した後、分析し破過曲線を得た。



図 5.1-145 室内トレーサー試験系概念図



図 5.1-146 室内トレーサー試験系の外観

試験に使用するトレーサー溶液は非収着性トレーサーと収着性トレーサーの混合溶液を使用した。非収着性トレーサーの破過曲線より移流・分散・マトリクス拡散を評価し、収着性トレーサーの破過曲線より収着性を評価する。非収着性トレーサーは、マトリクス拡散の差異を検討することを目的に、蛍光染料であるナフチオン酸ナトリウム(以下、NAP)と重水の二種類を使用した。収着性トレーサーは、収着性の差異を検討することを目的に、Rb+と Ba<sup>2+</sup>の二種類を使用した。バックグラウンド溶液は 0.1 M の NaCl を使用した。バックグラウンド溶液を基に、NAP: 1.0 mg/L、重水: 10  $\mu$ L / 100 mL (0.01%)、Rb+: 2.0 mg/L、Ba<sup>2+</sup>: 1.0 mg/L となるように試験溶液を調整した。

試験手順を以下に示す。

#### (a) 一次元模擬割れ目モデルの準備

岩石表面がある溶液と接触した際、岩石・溶液間で相互作用が発生し、岩石表面に収着したイオンが溶液中のイオンと交換反応する。このような反応がある程度平衡になった状態で試験を開始するため、トレーサー溶液の送液前にバックグラウンド溶液を一次元模擬割れ目モデルに十分量流した。本試験における割れ目内の体積は25 mL であることから、その10 倍にあたる250 mL 程度のバックグラウンド溶液を送液した。

### (b)トレーサー溶液の送液と排出側でのサンプリング

三方バルブをトレーサー溶液側に切り替えて、トレーサー溶液を一次元模擬割れ目モデルに送

液した。また、トレーサー送液開始と同時にフラクションコレクターを起動し、一次元模擬割れ 目モデルから排出される溶液をサンプリングした。送液した正確なトレーサー量を把握するため、 トレーサー溶液の重量を送液前後で測定した。

#### (c) バックグラウンド溶液の送液

パルス入力を再現するため、トレーサー溶液は表 5.1-35 の試験条件に示す溶液量を一次元模 擬割れ目モデルに送液した後、三方バルブをバックグラウンド溶液側に切り替えて、バックグラ ウンド溶液を送液した。この時の流量はトレーサーを送液した時の流量と同じである。

#### (d)サンプルの分析

試験終了後、サンプリングした溶液を分析した。NAP の分析は蛍光分光光度計(FP-8300:日本分光)、重水の分析は水トリプル同位体比アナライザー(IWA-35EP: Los Gatos Research)、 Rb<sup>+</sup>、Ba<sup>2+</sup>の分析は ICP-MS(7500CE: アジレントテクノロジー)を使用した

流量の違い(割れ目内流速の違い)による収着、マトリクス拡散挙動の影響を考察するために、 トレーサーおよびバックグラウンド溶液の流量を変えた 3 種類の試験を行った。試験条件を表 5.1-35 に示す。本試験系において、トレーサー溶液およびバックグラウンド溶液が通過する断面 積は概ね一定になるように割れ目幅をスペーサーで設定していることから、流量条件の違いは割 れ目内流速条件の違いとして考察する。表 5.1-35 には設定した割れ目幅から計算される割れ目 内流速も併せて示す。

試験名	计每些工	流量	送液量	設定した割れ目幅から計算される
	刈家石石	[mL/min]	[mL]	割れ目内流速 [m/s]
Trh01	蛭川花崗岩	1.0	10	$6.67  imes 10^{-4}$
Trh02	蛭川花崗岩	0.1	10	$6.67  imes 10^{-5}$
Trk01	来待砂岩	1.0	10	$6.67  imes 10^{-4}$

表 5.1-35 室内トレーサー試験の試験条件

#### ③ 岩石物性値の取得

室内トレーサー試験に使用した蛭川花崗岩および来待砂岩について、拡散係数、収着分配係数、 間隙率、真密度を測定した。

拡散係数取得のための拡散試験は Through-diffusion 法を採用した。蛭川花崗岩および来待砂岩 を直径 50 mm 厚さ5 mm に整形することでディスク試料を作成した。その後、拡散試験開始前 まで水に浸漬し真空脱気した。真空脱気したディスク試料を高濃度側タンクと低濃度側タンクで 挟むように合わせ、拡散試験系を構築した(Hasegawa and Nakata, 2018)。高濃度側溶液とし て、塩化バリウム2水和物 220 g と臭化ルビジウム 162 g、重水 25 mL(6D にして 23,000‰程 度)を5Lの純水に溶解させた。低濃度側溶液として、硝酸ナトリウム 382 g を5Lの純水に溶 解させた。低濃度側溶液に純水などを使用する方法もあるが、硝酸ナトリウム水溶液を用いた理 由としては、密度差による浸透流の影響などを低減するためである。これらの高濃度・低濃度側 溶液を高濃度・低濃度タンクにそれぞれ入れ、拡散試験を開始した。試験中はスターラーで緩や かに撹拌した。所定の時間経過後に高濃度側タンクと低濃度側タンクから少量ずつサンプリング した。詳細な試験方法は(Tachi et al., 2011)、(電力中央研究所, 2016; 2017; 2018) などが詳 しい。測定結果は表 5.1-36 に記載する。

収着分配係数の取得のため、バッチ試験により収着等温線を求めた。蛭川花崗岩および来待砂

岩を粉砕した後、ふるい分けを行い 500 µm · 1 mm の粒径範囲の粉末試料を作成した。微細な粉 末を除去するため、粉末試料 200 g に対して 1 L の水を加えて撹拌したあと 1 分間静置し、上澄 み液を捨てる作業を 3 回繰り返した。上記の粉末試料を 80°Cで乾燥させ試験に使用した。50mL 遠沈管に岩石試料 9 g を入れ、0.1 M の NaCl 溶液を 45 mL 添加し、穏やかに振とうした。振と う開始から 2,4 日目に pH を確認し、8.5±0.1 の範囲になるように調整した。振とう開始から 1 週間後、溶液の Rb+もしくは Ba<sup>2+</sup>の初期濃度 $C_0$ が 0.1、0.5、1.0、5.0、10.0 mg/L となるよう添 加した。添加直後に溶液の pH を再度調整したあと、遠沈管に密栓をし、平衡になるまで穏やか に振とうした。蛭川花崗岩、来待砂岩ともに概ね 1 週間で平衡に達した。詳細な試験方法は(電 カ中央研究所, 2017)や(財団法人原子力環境整備センター, 1990)などが詳しい。

平衡に達した時の平衡濃度を*C<sub>i</sub>*とすると、単位重量あたりの収着量*W<sub>i</sub>*は以下の式で表すことができる(安部, 2002)。ここで、*V*は溶液量で、*M<sub>i</sub>*は岩石試料の重量である。

$$W_i = \frac{V(C_0 - C_i)}{M_i}$$
 (£ 5.1-6)

図 5.1-147に蛭川花崗岩の収着等温線、図 5.1-148に来待砂岩の収着等温線を示す。図 5.1-147 および図 5.1-148に示すように、収着量が平衡濃度に比例して直線的に増加することが確認でき る。そのため、蛭川花崗岩および来待砂岩は初期濃度が 0.1 – 10.0 mg/L の範囲では線形収着に 従うと考えられる。線形収着は以下の Henry 式で表現できる。(式 5.1-7)は分配現象を表して おり、*K*<sub>d</sub>は分配係数と呼ばれる。

$$W = K_d C \tag{$\frac{1}{3}$.1-7}}$$

図 5.1-147 中に示す蛭川花崗岩の収着等温線の傾きから Rb+の分配係数は 6.7×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg で あり、Ba<sup>2+</sup>の分配係数は 2.8×10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/kg である。また、図 5.1-148 中に示す来待砂岩の収着等 温線の傾きから Rb+の分配係数は 8.0×10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/kg であり、Ba<sup>2+</sup>の分配係数は 2.5×10<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>/kg で ある。これらの結果から、蛭川花崗岩では、Ba<sup>2+</sup>に比べ Rb+は収着し易く、来待砂岩では Rb+に 比べ Ba<sup>2+</sup>は収着し易い。また、分配係数の比較により、蛭川花崗岩に比べて来待砂岩は Rb+およ び Ba<sup>2+</sup>を収着させる性質が遥かに大きいことが分かった。



間隙率の測定は水飽和法、真密度の測定は Quantachrome 社製ペンタピクノメーターを使用 し、ガス置換法で実施した。間隙率の詳細な試験方法は(國丸ほか, 2012)などが詳しい。測定 結果は表 5.1-36に記載する。

表 5.1-36 に蛭川花崗岩、来待砂岩の拡散係数、収着分配係数、間隙率、真密度をまとめる。蛭 川花崗岩および来待砂岩の NAP の拡散係数は、取得することができなかった。これは、試験期 間内で低濃度側セルにて検出された濃度が低いためで、NAP の拡散係数が極めて小さいことを 示す。

物性値		蛭川花崗岩	来待砂岩
	NAP	-	-
拡散係数	δD	$3.5 imes10^{\cdot12}$	$4.5  imes 10^{-11}$
$[m^2/s]$	$Rb^+$	$3.7 imes10^{\cdot12}$	$5.1 imes10^{\cdot11}$
	Ba <sup>2+</sup>	$1.0  imes 10^{-12}$	$1.7  imes 10^{-11}$
収着分配係数	$Rb^+$	$6.7  imes 10^{-3}$	$8.0  imes 10^{-2}$
[m³/kg]	Ba <sup>2+</sup>	$2.8  imes 10^{-3}$	$2.5  imes 10^{-1}$
間隙率 [-]		0.018	0.227
真密度 [kg/m <sup>3</sup> ]		2660.9	2561.7

表 5.1-36 蛭川花崗岩および来待砂岩の物性値

### ④ 評価解析方法

室内トレーサー試験で取得した破過曲線について、数値解析による物質移行パラメータの推定 を行った。数値解析には図 5.1-149 に示すような室内トレーサー試験系の概念モデルを仮定し評 価した。概念モデルは割れ目部とマトリクス部で構成される。割れ目部は平行平板とし、片側に 多孔質岩石を仮定したマトリクス部を有するモデルである。概念モデル構築には(Callahan and Reimus, 2000)や(Grisak and Pickens, 1980)、(熊本ほか, 2014)などを参考にした。

割れ目内において流体の流動方向に垂直する方向(z 軸方向)濃度は、常に瞬時的に混合する と仮定した。また、マトリクス部の透水性が非常に低く、拡散による濃度の拡がりが支配的であ ると仮定した。割れ目部、マトリクス部での収着は線形平衡収着現象を仮定した。つまり、数値 解析においては、割れ目部では x 軸方向のみの移流・分散・拡散(自由水中)に加え、割れ目表 面への収着を考慮し、マトリクス部では移流・分散を考慮せず拡散とマトリクスへの収着を考慮 することを意味する。

室内トレーサー試験系を基に数値モデルを作成した(図 5.1-150)。X 方向の空間分割数は 534、 Y 方向の空間分割数は 1、Z 軸方向の空間分割数は 114 である。節点数は 123,050 で、要素数は 60,876 である。割れ目部は微薄要素も含め、合計 2 要素で表現した。解析には(一財)電力中央 研究所が開発した岩盤中地下水流動・物質移行解析コード FEGM を使用した。トレーサーおよ びバックグラウンド溶液の流入はフラックス境界で表現し、流出は自由流出境界で表現した。流 入・流出以外の境界は不透水境界および∂C/∂x = 0を与えた。



図 5.1-149 概念モデル

図 5.1-150 数値モデル

評価解析における推定パラメータは①割れ目幅、②割れ目部の縦分散長、③マトリクス部の実 効拡散係数、④割れ目表面収着係数、⑤マトリクス部の収着分配係数の5個である。室内トレー サー試験では、送液流量は一定で与え、図 5.1-144 に示すように横幅 50 mm が決まっている。 そのため、評価解析でも流量を一定とし、割れ目幅を変えることで割れ目部の断面積が変わり、 割れ目内流速の値を変えた。横分散長については、縦分散長の 10 分の 1 になるよう固定した。 室内トレーサー試験に使用したトレーサーによって、物質移行特性が異なるため、それぞれの特 性を顕著に示す推定パラメータを評価解析にて推定する。たとえば、NAP は収着・マトリクス拡 散は小さいため、NAP の破過曲線からは割れ目幅と割れ目部の縦分散長を評価解析によって推 定する。

### ⑤ 実験結果および評価解析結果

図 5.1-151 に Trh01 (蛭川花崗岩:流量 1.0 mL/min)の試験結果および解析結果、図 5.1-152 に Trh02 (蛭川花崗岩:流量 0.1 mL/min)の試験結果および解析結果、図 5.1-153 に Trk01 (来 待砂岩:流量 1.0 mL/min)の試験結果および解析結果を示す。なお、図 5.1-151~図 5.1-153 に おいて、解析対象としたトレーサーは塗りつぶしで示した。また、解析結果の曲線の色は対象と なるトレーサーと同じ色で示した。また、評価解析によって推定された結果を表 5.1-37 にまと めて記載する。



図 5.1-151 Trh01の試験結果および解析結果 (流量条件: 1.0 mL/min, 蛭川花崗岩)



図 5.1-152 Trh02の試験結果および解析結果 (流量条件:0.1 mL/min,蛭川花崗岩)



図 5.1-153 Trk01 の試験結果および解析結果 (流量条件:1.0 mL/min, 来待砂岩)

	割と日間	割れ目部の	マトリクス部の	割れ目表面	マトリクス部の			
試験名	割なし日 幅 [mm]	縦分散長	実効拡散係数	収着係数	収着分配係数			
		[mm]	$[m^2/s]$	[m]	[m³/kg]			
Trh01	0.695	8.0	_	$7.91 \times 10^{-5}$	$4.50 \times 10^{-3}$			
(蛭川花崗岩, 1.0 mL/min)	0.625	8.0	-	1.81 \ 10 %	$4.30 \times 10^{-6}$			
Trh02	0 500	20	_	V	~			
(蛭川花崗岩, 0.1 mL/min)	0.960	8.0	-	~	~			
Trk01	0.020	0 5	$4.54 \times 10^{-11}$	_	_			
(来待砂岩, 1.0 mL/min)	0.630	9.0	4.04 ^ 10 11	-	-			

表 5.1-37 評価解析による推定結果

図 5.1-151 に示す Trh01 について、非収着性トレーサーNAP と  $\delta D$  の破過曲線では、ピーク 高さは  $\delta D$  の方が僅かに高いが、立ち上がりや破過曲線の尾部(以下、テール部)は概ね同じ傾 向を示した。表 5.1-36 に示すように NAP に比べ  $\delta D$  の方が拡散係数は高いにも関わらず、NAP と  $\delta D$  の破過曲線で明瞭な差異が認められない。これは、Trh01 では、マトリクス部に拡散が進 行していないと示唆される。収着性トレーサーRb+と Ba2+の破過曲線では、明瞭な差異は認めら れない。非収着トレーサーと比較すると、収着効果によってピーク位置が僅かに遅れ、ピーク高 さが明らかに低くなった。表 5.1-36 に示すように、蛭川花崗岩における Rb+と  $\delta D$  の拡散係数は 同等の値を示していることと、前述の通り Trh01 (図 5.1-151) において  $\delta D$  はマトリクス部に 拡散が進行していないことが示唆されるため、Rb+もマトリクス部に拡散していないと考えられ る。

図 5.1-151 に示す Trh01 では、NAP と Rb+を対象に、評価解析を行った。NAP は非収着性で マトリクス部に拡散しないため、NAP の破過曲線と評価解析により、割れ目幅と割れ目部の縦分 散長を評価した。推定結果によると、割れ目幅は 0.625 mm と推定され、実験系の設定値 0.5 mm に比べると僅かに厚い。また、割れ目部の縦分散長は 8 mm と推測された。縦分散長は、一般的 に移行距離の 10 分の 1 であることが知られている(Gelhar et al, 1992)。しかし、推定結果は移 行距離 1,000 mm の 1/10 である 100 mm と比較すると、はるかに小さい。Rb+の破過曲線と評価 解析により、割れ目表面収着係数とマトリクス部の収着分配係数を推定した。Rb+の破過曲線に 対する評価解析は、テール部の再現性はあまり良くないが、ピークの立ち上がりとピーク高さは 精度良く再現することができた。割れ目表面収着係数は7.81×10<sup>-5</sup> m と推定された。また、マト リクス部の収着分配係数は4.50×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg と推定され、バッチ試験で取得された蛭川花崗岩の Rb+の収着分配係数 6.7×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg と比較すると、僅かに小さく(0.67 倍)推定されたことが分 かる。

図 5.1-152 に示す Trh02 について、非収着トレーサーNAP と δD の破過曲線では、Trh01 (図 5.1-151) と同様で、NAP と δD の破過曲線は同じ傾向を示した。これは、Trh02 についても、マトリクス部に拡散が進行していないと示唆される。収着性トレーサーRb+と Ba<sup>2+</sup>では、Ba<sup>2+</sup>の方が僅かにピーク高さは高いが、Rb+と Ba<sup>2+</sup>は同じ傾向を示した。非収着トレーサーと比較すると、収着効果によりピーク位置が遅れ、ピーク高さが明らかに低くなった。また、Rb+および Ba<sup>2+</sup>の 破過曲線について、Trh01 の結果と比較すると、非収着トレーサーに対して、ピーク位置の遅れ、ピーク高さ低下の度合いは大きくなる。これは、流量が小さくなることで割れ目内流速も遅くなり、岩石と接する時間が長くなったため、収着による遅延効果が大きく表れたと考えられる。

図 5.1-152 に示す Trh02 では、NAP と Rb+について、評価解析を行った。NAP の破過曲線と 評価解析によって、割れ目幅は 0.560 mm、割れ目部の縦分散長は 8 mm と推定された。Trh01 の推定結果と比較すると、割れ目幅は僅かに薄く推定され、縦分散長の推定値は同じであった。 これより、流量条件が変わっても割れ目幅と分散長については、大きなバラつきなく推定できる と考えられる。Rb+の破過曲線に対し、評価解析を行った。しかし、Rb<sup>+</sup>の破過曲線を評価解析に て再現することはできなかった。特に、評価解析では、Rb+破過曲線に対してピーク高さを小さく することができなかった。評価解析では瞬時平衡収着と仮定しているため、流量条件が変わって も、Rb+破過曲線を評価解析によって再現できるべきである。Trh02 の Rb+破過曲線を評価解析 で再現できなかったことは、流量条件が変わったことにより、Trh01 とは異なる収着現象が破過 曲線に反映されている可能性がある。

図 5.1-153 に示す Trk01 について、非収着トレーサーNAP と 6D の破過曲線では、NAP に比べて明瞭に 6D のピーク高さが小さくなっており、マトリクス部に拡散が進行したと示唆される。 Trh01 (図 5.1-151) と比べても、Trk01 (図 5.1-153) の 6D のピーク高さを比較しても、Trk01 (図 5.1-153) の方がマトリクス部に 6D が拡散したと推測できる。これは、表 5.1-36 に示すように、6D の拡散係数は蛭川花崗岩に比べ、来待砂岩の方が大きいことを反映した破過曲線である と考えられる。収着トレーサーRb+と Ba<sup>2+</sup>についてはサンプリングした濃度が低すぎたため、測定することができなかった。表 5.1-36 や図 5.1-148 に示すように、来待砂岩は Rb+や Ba<sup>2+</sup>を収 着する性質が大きいため、室内トレーサー試験では回収できなかったと考えられる。

図 5.1-153 に示す Trk01 では、NAP と  $\delta$ D について、評価解析を行った。NAP の破過曲線と 評価解析によって、割れ目幅は 0.630 mm、割れ目部の分散長は 9.5 mm と推定された。この推 定結果は Trh01 (図 5.1-151)の推定結果と概ね整合的である。  $\delta$ D の破過曲線と評価解析によ って、マトリクス部の実効拡散係数を評価した。マトリクス部の実効拡散係数は 4.54×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s と推定された。拡散試験で取得された来待砂岩の  $\delta$ D の実効拡散係数は 4.5×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s であり、 推定結果とよく整合している。

#### ⑥ まとめ

原位置トレーサー試験とバッチ試験・拡散試験で取得される収着分配係数・実効拡散係数の整 合性を検討するため、原位置トレーサー試験の代替として、試験条件の設定が容易な室内トレー サー試験を行った。加えて、室内トレーサー試験で使用した岩石試料について、バッチ試験や拡 散試験を実施した。また、室内トレーサー試験で得られた破過曲線に対し評価解析を行い、収着 分配係数や実効拡散係数を推定した。

蛭川花崗岩を使用した室内トレーサー試験について、流量条件 1.0 mL/min (Trh01) で得らえた Rb+の破過曲線を評価解析したところ、マトリクス部の収着分配係数は 4.50×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg と推定された。バッチ試験で得られた Rb+の収着分配係数は 6.7×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg で、室内トレーサー試験で推定された値は僅かに小さい。一方で、流量条件 0.1 mL/min (Trh02) で得られた Rb+の破過曲線は評価解析によって再現することができず、マトリクス部の収着分配係数を推定することができなかった。Trh01の Rb+破過曲線を評価解析で概ね再現できたのにも関わらず、Trh02の Rb+破過曲線を評価解析で再現できなかったことは、流量条件が変わった(割れ目内流速が変わった)ことにより、割れ目内流速に依存した収着現象が破過曲線に反映されていることを示唆する。

来待砂岩を使用した室内トレーサー試験(Trk01)について、 $\delta$ Dの破過曲線から評価解析を行ったところ、マトリクス部の実効拡散係数は  $4.54 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s と推定された。拡散試験によって得られた  $\delta$ Dの実効拡散係数は  $4.5 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s であり、推定結果とよく整合した。

以上のように、室内トレーサー試験から推定されたマトリクス部の収着分配係数はバッチ試験 の収着分配係数と概ね整合的であるが、流量条件を変える(割れ目内流速)と破過曲線を評価解 析で再現できず、マトリクス部の収着分配係数を推定できない場合もあることが分かった。今後 は、①流量条件(割れ目内流速)を変えた室内トレーサー試験結果を充実させること、②割れ目 内流速に依存した収着現象やパラメータの推定方法など評価解析手法を再検討することで、室内 トレーサー試験とバッチ試験で得らえる収着分配係数の整合性についてさらに検討を進めたい。

(3) まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価においては、廃棄物から漏洩した物質が地下水に よって移行する、いわゆる地下水シナリオが重要である。花崗岩類などのいわゆる結晶質岩は、 割れ目が主な地下水の流動経路と考えられることから、岩盤割れ目をモデル化して物質の移行現 象の解析的評価を行っている。この評価に供する基本的なモデルは、平行平板の割れ目の上・下 盤とその間の間隙の中を物質が移行するものである。しかし、実際の割れ目とその間隙は複雑な 形状をしており、地下水溶存物質は割れ目内のチャネリング状の流路を移流分散により移行して いくとともに、割れ目周辺の岩石マトリクスへ拡散し、さらに物質が収着性の場合は岩盤への収 着も起こっていると考えられる。したがって、広域地下水流動を評価する場合においても、これ らの現象の影響を考慮することで、より現実的かつ精度の高い物質移行評価となることが期待さ れる。

本節では、水みちの微細透水構造・物質移動モデルを構築するために、ミクロなスケールで起 こる割れ目内の移流分散、マトリクス部への拡散や収着に係わる現象の解明を行うことで、水み ちにおける微視的な物質移動モデルを構築し、広域スケールの地下水流動・物質移行解析の条件 設定の最適化につなげることを目指し、そのためのデータ取得を行った。

レジン注入による水みち割れ目の可視化・分析においては、蛍光剤を添加したレジンが充填さ れた岩石コアの水みち割れ目について、X線CT解析やコア試料を1mm毎に研削し撮影した画 像の分析により透水構造(もしくは間隙構造)を明らかにすることを目的としている。今年度は 割れ目N19W87E(17MI61号孔)とN31W84SW(17MI62号孔)を調査対象としたが、両者と もに割れ目面全体にレジンが注入されていた。昨年までの調査結果と併せて考えた場合、割れ目 の走向がNW系の場合レジンは割れ目面上にほぼ一様に分布している一方で、NE系の割れ目で はレジンはジョグの間隙を、低傾斜の割れ目では晶洞の間隙をそれぞれ充填しており、レジンは ともにチャネリング状に分布していた。これはNW系の水みち割れ目がNE系や低傾斜の割れ目 に比較して割れ目部分の間隙率が高いことを示唆しており、坑道西側の岩盤の主な水みちがNW 系であることと符合する。

岩石マトリクスへの拡散・収着では、水みち割れ目周辺マトリクスの拡散試験や構成鉱物割合の異なる試料を用いた収着試験を行うとともに、岩石のブロック試料を用いたトレーサー試験を 実施し、水みち割れ目および周辺のマトリクス部の物質移動モデル構築のための基礎的なデータ を取得した。

水みち割れ目周辺のマトリクスを試料として、割れ目面からの距離に応じた拡散試験を行った。 拡散試験の結果では、収着性・非収着性物質にかかわらず、水みち割れ目の近傍ほど拡散係数が 大きい傾向が顕著に認められた。また水みち割れ目の割れ目面に近いほど、絹雲母や緑泥石など の2次鉱物の含有量が多い(または割れ目面から遠いほど斜長石やセリサイトが減少する)こと から、拡散係数は2次鉱物の量と相関関係にある可能性がある。割れ目面からマトリクスにかけ ての間隙率およびモード測定による鉱物量比の変化と収着・脱離試験の結果を比較した場合、花 崗岩の主要造岩鉱物では黒雲母に最も収着するが、絹雲母や緑泥石などの2次鉱物の含有量の多 い場合に特に収着が大きくなる傾向がある。

原位置トレーサー試験とバッチ試験・拡散試験で取得される収着分配係数・実効拡散係数の整 合性を検討するため、原位置トレーサー試験の代替として、試験条件の設定が容易な室内トレー サー試験を行った。また、試験に供した岩石でバッチ試験や拡散試験も併せて実施した。トレー サー試験は、ブロック状の花崗岩と砂岩を用いて模擬割れ目を作製し、流量を変えて実施した。 花崗岩の模擬割れ目に対して 1.0 mL/min の流量で実施した試験では、収着性トレーサーRb+の 破過曲線の解析により得られた収着分配係数は、バッチ試験による収着分配係数に比べやや小さ い値であった。一方で、0.1 mL/min の流量の試験で得られた Rb+の破過曲線は評価解析によって 再現することができず、割れ目内流速に依存した収着現象が破過曲線に反映されていることを示 唆している。一方、砂岩の模擬割れ目に対して実施した室内トレーサー試験について、δD の破過 曲線から評価解析により推定したマトリクスの実効拡散係数は、拡散試験によって得られた数値 とほぼ一致していた。

今後は、本項で示した室内試験で取得したデータと 5.1.1 に示した原位置調査・試験で取得し たデータを合わせて、5.1 の冒頭に示したように数値解析的な検討を行い、広域スケールの地下 水流動・物質移行に係わる解析条件設定の最適化に繋げていく必要がある。

### 参考文献

安部郁夫,入門講座吸着の化学,オレオサイエンス,第2巻,第5号,pp.275-281,2002.

- Challahan, Timothy, J. and Reimus, Paul, W., Using multiple experimental methods to determine fracture/matrix interactions and dispersion of nonreactive solutes in saturated volcanic tuff, Water Resources Research, Vol. 36, No. 12, pp. 3547-3558, 2000.
- 一般財団法人電力中央研究所,平成 26 年度地層処分技術調査等事業(岩盤中地下水移行評価確証 技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-,2015.
- 一般財団法人電力中央研究所, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業(岩盤中地下水移行評価確証 技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証--, 2016.
- 一般財団法人電力中央研究所,平成 28 年度地層処分技術調査等事業(岩盤中地下水移行評価確証 技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-,2017.
- 一般財団法人電力中央研究所,平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開 発事業(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-, 2018.
- Gelhar, L., W., Welty, C., Rehfeldt, K., R, A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, Water Resource Research, Vol. 28, No. 7, pp.1955-1974, 1992.

財団法人原子力環境整備センター、土壌と土壌溶液間の放射性核種の分配係数,1990.

- Grisak, G., E. and Pickens, J., F., Solute Transport Through Fractured Media 1. The Effect of Matrix Diffusion, Water Resource Research, Vol. 16, No. 4, pp. 719-730, 1980.
- 濱田 藍, 土岐花崗岩中の水みち割れ目とその周辺マトリクスの微細間隙構造, 電力中央研究所 報告, 研究報告:N18004, 2019.
- 濱 克宏, 岩崎理代, 森川佳太, 土岐花崗岩のブロックサンプルを用いた拡散試験, JAEA-Technology 2017-015, 2017.
- Hasegawa, T. and Kotaro, N., A measurement method of for isotope fractionation of 35Cl and 37Cl by a conventional through-diffusion experiment, Chemical Geology, Vol. 483, pp. 247-253, 2018.
- 石橋 正祐紀, 笹尾英嗣, 濱 克宏, 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散 現象の特徴, 原子力バックエンド研究, vol. 23, pp.121-130, 2016.
- 岩崎理代, 濱 克宏, 森川佳太, 細谷真一, 物質移動に関わるパラメータ値の取得, JAEA-Technology 2016-037, 2016.
- 熊本創,下茂道人,天野健治,亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の影響評価のためのマルチトレーサー試験の適用性検証,土木学会論文集C(地圏工学),Vol. 70, No. 4, pp.353-365, 2014
- 國丸貴紀, 森川佳太, 舘 幸男, 久野義夫, 細谷真一, 下田 紗音子, 加藤博康, 中澤俊之, 生瀬博 之, 久保田 政子, 花崗岩試料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定, JAEA-Data/Code 2012-013, 2012.
- Neretnieks, I., Diffusion in the Rock Matrix: An Important Factor in Radionuclide Retardation?, Geophys. Res., vol. 85, no. B8, p.4379-4397, 1980.
- 国立研究開発法人日本原子力開発機構,一般財団法人電力中央研究所,平成30年度高レベル放射 性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)報告書, 2019.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y. and Yui, M., Diffusion and sorption of Cs+, I- and HTO in sample of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 75, No. 22, pp. 6742-6759, 2011.
- 田中靖治、細谷真一, 岩盤を対象とした原位置トレーサー試験の現状, 資源・素材学会誌, Vol.124, No.10, 11, pp. 601-610, 2008.
- 山下理代, 濱 克宏, 竹内竜史, 森川佳太, 細谷真一, 中村敏明, 田中 由美子, 花崗岩試料を用い た拡散試験環境の整備と間隙率測定および鉱物試験, JAEA-Technology 2014-029, 2014.

# 5.1.3 水みちのネットワークによる物質移動予測手法の高度化

### (1) はじめに

5.1.1 では、我が国で多く見られる高割れ目密度の岩盤において水みちの検出技術の高度化を 図るために、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度 300 m ボーリング横坑の東側 の岩盤に、昨年度約 40 m のボーリング孔を 2 本掘削したのに続き、約 29 m の孔長のボーリン グ孔を 1 本追加掘削し水みち調査を実施した。その結果、ボーリング孔上の水みちの位置、水理 特性、方向などが明らかとなった。

しかし、調査の対象となった岩盤では大規模な水みちは存在せず、比較的小規模の水みちがネットワーク状に連なり、岩体としての水理・物質移行特性を形成しているものと推定された。従来、瑞浪超深地層研究所を含むサイトスケール以上での地下水流動解析は実施されている(三枝ほか,2003;尾上ほか,2007;尾上ほか,2015;尾上ほか,2016;電力中央研究所,2018a)。しかし、深度 300 m ボーリング横坑周辺の狹域を対象とした解析例はない。また、岩体としての物質移行特性を推定するためには、5.1.1 で実施した孔間トレーサー試験の結果を、数値シミュレーションにより解析することが有効と考えられる。

そこで、水みち調査の対象領域である深度 300 m ボーリング横坑東側の岩体の地下水流動状況 を把握するための地下水流動解析を実施するとともに、今年度実施した孔間トレーサー試験の再 現解析に着手した。

### (2) 解析手法

### 1) 解析モデル

解析は3段階で実施した。すなわち、まず、瑞浪超深地層研究所を中心とした4km四方の領域を対象としたサイトスケールの地下水流動解析を実施した。続いて、その結果を基に5.1.1の調査場所である深度300mボーリング横坑を中心とした100m立方のブロックスケールの境界条件を設定し、ブロックスケールの地下水流動解析を実施した。さらに、その結果を基に、ブロックスケールのトレーサー移行解析を実施した。

#### ① サイトスケール

サイトスケールの解析領域は、世界測地系でX座標が4,478~8,479(m)、Y座標が-70,900~ -66,880(m)、Z座標が-1,000.7~362.3(m)である。

解析モデルは、図 5.1-154 に示すように地形・地質などを考慮したモデル(尾上ほか, 2015) に基づいて作成した。解析モデルでは、白亜紀後期の土岐花崗岩を比較的割れ目密度が低い領域 を下部低密度割れ目帯、その上部を上部割れ目帯として大きく区分した。土岐花崗岩部の上部を 瑞浪層群が覆っており、瑞浪層群内には数種類の地層が存在しているが、一つの地層として扱っ た。上部割れ目帯内の低角度割れ目集中帯と瑞浪層群内の土岐夾炭累層を再現した。瑞浪層群の 上部には固結度の低い瀬戸層群が場所により分布しているため区分した。断層については、主立 坑断層は堆積岩内と土岐花崗岩内に存在する箇所にそれぞれ区分した。また、存在が確認されて いる月吉断層についても対象とし、研究所用地を包括するように存在されていると推定されてい るコンパートメントを構成する IF\_S200\_13、IF\_S200\_15、IF\_SB3\_11、IF\_SB3\_19 を対象とし た。解析モデルで考慮した断層の分布を図 5.1-155 に示す。

研究坑道については、図 5.1-156 に示すように主立坑、換気立坑、100、200、300、400、500m のアクセス坑道をモデル化した。坑道は空洞で表現され、境界条件を与えるものとなり、換気立 坑、主立坑は鉛直である。座標は、主立坑の中心軸が(X:6,451.6, Y:-69,007.4)、換気立坑が(X:6,426, Y:-69,038.1)であり、深度 300 m 坑道の Z 座標は-99.1 (m)である。深度 300 m ボーリング横坑の モデル化形状を図 5.1-157 に示す。 解析モデルの有限要素分割を図 5.1-158 に示す。解析モデルは、すべてテトラ要素で構成され、 節点数 485,224、要素数 2,787,958 である。なお、坑道壁面から 5 m の範囲では、スキン効果や グラウト領域を表現するために、周辺岩盤とは異なる物性を与えることが可能となっている。



図 5.1-154 サイトスケールの解析モデル



図 5.1-155 サイトスケールでモデル化した断層の分布





図 5.1-157 深度 300 mボーリング横坑のサイトスケールのモデル化形状



(a) 全体図





(c) 坑道周辺 (d) 深度 300 m 坑道周辺 図 5.1-158 サイトスケールの解析モデルの有限要素分割

# ② ブロックスケール

ブロックスケールの解析領域を図 5.1-159 に示す。解析領域は、深度 300 m ボーリング横坑を 含む一辺の長さ100mの立方体から主立坑断層の影響帯部分を削除した五角柱である。基本とな る立方体は、上面および下面は水平面で、ボーリング横坑の坑道軸に垂直な面と平行な面により 構成される。立方体の中心座標は(6,427.3695, -69,061.1707, -118.42)であり、深度 300 mのZ座 標は-99.1 (m)である。解析領域内には、深度 300 m ボーリング横坑、予備ステージの一部、換気 立坑の一部が含まれる。ブロックスケールの解析領域内の岩盤はほとんどが土岐花崗岩上部割れ 目帯であるが、上部割れ目帯中の低角度割れ目集中帯が一部含まれる。

深度 300 m ボーリング横坑のレイアウトを図 5.1-160 に示す。同横坑は、換気立坑中心から南 南西方向へ約 20 m まで伸びており、坑道幅 4 m、坑道高さ 3 m の馬蹄型の坑道である。ただし、 同横坑の奥側 5 m の区間は高さが 2.5 m で、手前側の区間との間には床面に 1.3 m の段差があ る。また、換気立坑よりの区間には縦 8 m、横 1.5 m、深さ 1.3 m のピットがある。坑道壁面に はコンクリートが吹き付けられ、床面にはコンクリートが打設されているが、奥側 5 m 区間の床 面と段差部分、手前側 11m 区間の左下部分は、岩盤が観察できるように露出させている。解析モ デルでは、ボーリング横坑および予備ステージは直径 4 m の円筒とし、ボーリング横坑内の段差 は無視した。また、換気立坑は直径 4.5 m の円筒とした。

ブロックスケールの解析用モデルの有限要素分割を、図 5.1-161 に示す。有限要素にはテトラ 要素を用い、要素数は 4,422,380、節点数は 789,840 である。



図 5.1-159 ブロックスケールの解析領域

図中の水平の赤線は深度 300 mボーリング横坑と予備ステージ、鉛直の赤線は換気立坑を表す.



図 5.1-160 深度 300 m ボーリング横坑のレイアウト





### 2) 解析条件

## ① 境界条件

# (a) サイトスケール

まず、地表面を浸出面境界として地表からの涵養量を 20 mm/year に設定し、周囲境界、底面 境界、坑道面を不透水境界として、坑道掘削の影響が無い状態の地下水流動解析を実施した。そ して、得られた結果から、周囲境界、領域底面境界の全水頭値を抽出し新たな境界条件として、 坑道掘削の影響を考慮した地下水流動解析を、地表からの涵養量 20 mm/year の下で、すべての 坑道壁面を浸出点境界として行う。

### (b) ブロックスケール

サイトスケールの地下水流動解析により得られた全水頭分布から、ブロックスケールの境界面 の全水頭分布を補間し境界条件として設定した。ボーリング横坑、予備ステージ、換気立坑の壁 面は、浸出面境界とした。

また、トレーサー移行解析では、ブロックスケールの境界面をトレーサー移行に関して自由流 出境界として設定した。

### 2 物性値

サイトスケールおよびブロックスケールの地下水流動解析には、表 5.1-38 に示す透水係数を 使用した(電力中央研究所, 2018a)。ただし、サイトスケールおよびブロックスケールの解析と もに、スキン効果として、換気立坑、ボーリング横坑、予備ステージのすべての坑道壁面から 5 mまでの距離の岩盤の透水係数を表 5.1-38の数値の 1/2 に設定した(尾上ほか, 2016)。また、 サイトスケールの解析では、坑道周囲にグラウト施工を行った箇所の透水係数は 1×10<sup>-9</sup> m/sec を設定した。そして、ブロックスケールの解析では、ボーリング横坑、予備ステージの坑道壁面 から 25 cm までの透水係数は、コンクリートを想定して 2.6×10<sup>-10</sup> m/sec に設定した。

解析には、電力中央研究所が開発した岩盤中地下水流動・溶質移行解析コード FEGM (河西ほか, 1994; 1995)を使用した。

地研区八	透水係数(m/sec)					
地員区方	kx	ky	kyz			
瀬戸層群	1.0E-5	1.0E-5	1.0E-5			
瑞浪層群	1.0E-7	1.0E-7	1.0E-9			
上部割れ目帯	3.5E-8*	3.5E-8*	3.5E-8*			
下部割れ目低密度帯	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8			
月吉断層	2.0E-10	2.0E-10	2.0E-10			
主立坑断層(堆積岩部)	1.0E-6	1.0E-6	1.0E-6			
主立坑断層(花崗岩部)	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10			
コンパートメントを構成 する断層群	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11			

表 5.1-38 解析に使用した各地質区分の透水係数

\*:上部割れ目帯の透水係数をパラメータとした解析を実施し、ブロックスケールの解析で坑道への湧水量が実測値と一致するように設定

#### (3) トレーサー試験開始前の地下水流動場

まず、土岐花崗岩上部割れ目帯の透水性を等方性として扱い、上部割れ目帯の透水係数をパラ メータとした地下水流動解析を実施した。そして、ブロックスケールの解析において、深度 300 mボーリング横坑、予備ステージ、換気立坑への地下水流入流量を算出した。その結果を表 5.1-39 に示す。一方、上野・竹内(2017)によれば、2014年4月~2016年3月の地下水湧水量は、換 気立坑の深度 265.0~293.9 m で 2.46 m³/day、深度 293.9~302.6 m と深度 300 m ボーリング横 坑、予備ステージの合計で 23.57 m³/day、深度 302.6~365.0 m で 1.81 m³/day で計 27.84 m³/day であった。上部割れ目帯の透水係数は、深度 300m 付近の坑道への地下水の総流入流量が実測値 とほぼ等しくなる 3.5×10<sup>-8</sup> m/sec に設定することとした。

表 5.1-39 上部割れ目帯の透水係数と深度 300m 付近の坑道への地下水流入流量

上部割れ目帯透水係数(m/sec)	2.0E-8	3.5E-8	5.0E-8
ボーリング横坑への流入流量(m³/day)	12.43	17.19	23.28
換気立坑への流入流量(m³/day)	5.68	9.02	13.11
予備ステージへの流入流量(m³/day)	0.98	0.99	1.05
合計(m³/day)	19.09	27.20	37.44

サイトスケールの解析結果として、全水頭分布、流速分布を図 5.1-162、図 5.1-163 にそれぞ れ示す。図 5.1-162 では、坑道掘削の影響による地下水位の低下が確認できる。ただし、坑道を 取り巻く断層群が難透水性であるために、地下水位の低下は断層群に囲まれた内側の領域にほぼ 限定されている。また、同図(b)からは、主立坑断層の透水性が周囲の岩盤に比べて低いために、 同断層の北東側と南西側とで全水頭が不連続になっていることがわかる。

図 5.1-163 からは、立坑や水平坑道の近傍では動水勾配が急になるために、坑道付近では地下 水の流速が速くなっていることが確認できる。また、断層は透水性が低いために地下水の流速が 遅く、同図(b)からは、主立坑断層が同断層の北東側と南西側の地下水流動場を分断していること がわかる。



(a) 坑道周辺の鉛直断面 (b) 深度 300m ボーリング横坑付近水平断面 図 5.1-162 サイトスケール解析結果 (全水頭分布)



(a) 坑道周辺の鉛直断面 (b) 深度 300m ボーリング横坑付近水平断面 図 5.1-163 サイトスケール解析結果(流速分布)

サイトスケールの地下水流動解析結果から、ブロックスケールの解析領域の境界面上の全水頭 値を抽出して境界条件として設定し、ブロックスケールの地下水流動解析を実施した。解析の結 果得られた全水頭と地下水流速の分布を図 5.1-164、図 5.1-165 にそれぞれ示す。

図 5.1-164 から、換気立坑やボーリング横坑、予備ステージに向かって全水頭が低下していく 様子がうかがえる。特に換気立坑周囲の深度 300 m より下の部分や水平坑道の下側で低くなって いる。岩盤を多孔媒体でモデル化して解析を行っているため、5.1.1 の図 5.1-48 や図 5.1-77 に示 したボーリング孔で計測された間隙水圧の計測結果に比べて、坑道掘削の影響による水位低下が 坑道から 30 m 程度離れた範囲にまで広がっている。

図 5.1-165 を見ると、ボーリング横坑東側では地下水は南東から北西に向かって流れ、坑道に
近づくにつれ坑道壁面に直交する方向に向きを変え、坑道近傍で加速しているのがわかる。ボー リング横坑の先端部や東側で特に流速が速くなっているのは、ボーリング横坑先端部や東側の坑 道下部でコンクリートの吹き付け処理がされておらず、裸岩状態になっているためである。



(a) 深度 300 m 水平断面





(b) 深度 322 m 水平断面



(c)ボーリング横坑の坑道軸を通る鉛直断面
 (d)ボーリング横坑中央で直交する鉛直断面
 図 5.1-164 ブロックスケール解析結果(全水頭分布)

図中の黒線は(a)、(b)は1辺40mの正方形、(c)は上が縦10m、横20m、下が縦30m、横20m の長方形、(d)は坑道の左、上は長さ10m、右は長さ40m、下は長さ25m.



(a) 深度 300 m 水平断面



(b) 深度 322 m 水平断面



(c)ボーリング横坑の坑道軸を通る鉛直断面
 (d)ボーリング横坑中央で直交する鉛直断面
 図 5.1-165 ブロックスケール解析結果(流速分布)

## (4) トレーサー試験の解析

# ①トレーサー試験時の地下水流動場

地下水流動解析では、(3)と同様に、まず、サイトスケールの地下水流動解析を実施し、その結果を基にブロックスケールの解析領域の境界面の全水頭を設定し、ブロックスケールの地下水流動解析を実施した。

トレーサー試験は、5.1.1 に示したように全部で 12 回実施したが、ここではトレーサー投入区 間と揚水区間の距離が 21.27 m と最も長い 19W6664T10 試験(以下、T10 試験)について解析 結果を示す。T10 試験では、19MI66 号孔の Int-1 からトレーサーを投入し、18MI64 号孔の Int-2~Int5 において間のパッカーを収縮して一つの区間として揚水を行った。その結果、揚水区間 は 15 m と長くなったため、地下水流動解析では 18MI64 号孔の Int-2~Int5 の 4 区間それぞれ の中心位置から 1.15 L/min ずつ計 4.6 L/min の揚水を行うように条件設定を行った。

T10 試験では 19MI66 号孔の Int-1 からトレーサー溶液が 0.5 L/min の流量で岩盤中に注入されたが、注入は試験初期の5時間のみであり、その後は揚水のみが行われた。そのため、ここでは、トレーサーの注入が終了し揚水のみが行われている期間の地下水流動解析結果を、試験開始前の揚水を行っていない期間の解析結果と比較して示す。揚水点付近を通る水平断面上の試験開始前後の全水頭分布を図 5.1-166 に、流速分布を図 5.1-167 にそれぞれ示す。図 5.1-166 では、揚水の影響により揚水点周りのすべての方向に広範囲にわたり地下水位が低下するのがわかる。また、図 5.1-167 では、試験開始前には換気立坑へ向かっていた地下水の流れが、試験開始後にはやはり広範囲にわたり揚水点の方向に向きを変えていることがわかる。



(a) 試験開始前 (b) 試験開始後 図 5.1-166 トレーサー試験の前後における深度 312m 水平断面内全水頭分布



(a) 試験開始前 (b) 試験開始後 図 5.1-167 トレーサー試験の前後における深度 312m 水平断面内の水平流速分布

#### ② トレーサー移行解析

トレーサー試験時の地下水流動解析に続き、トレーサー試験時のトレーサーの移行に関する解 析を実施した。

T10 試験では、注入したトレーサーのうち、最も明瞭な破過曲線が得られたウラニンの移行解 析結果を示す。同試験では、19MI66 号孔の Int-1 から 20 ppm のウラニンを含むトレーサー溶 液を5時間注入し、18MI64 号孔の Int-2~Int-5 区間で間のパッカーを収縮し一つの区間として 揚水を行った。トレーサー注入区間の中心と揚水区間の中心との距離は 21.27 m であったため、 縦分散長はその 10 分の 1 の 2.1 m、横分散長はさらにその 10 分の 1 の 0.21 m に設定した。そ して、間隙率をパラメータとしたトレーサーの移行解析を実施した。解析により得られた揚水区 間中のトレーサー濃度の経時変化を、実測値とともに図 5.1-168 に示す。図に示すように、間隙 率が小さいほどトレーサーは揚水区間に早く移動し濃度ピーク値は高く、破過曲線はシャープな 形状となる。それに対して、間隙率が大きいほどトレーサーの揚水区間への到達は遅くなり濃度 ピーク値は低く、破過曲線の形状はなだらかとなる。間隙率を 0.04%に設定した場合に濃度のピ ーク到達時刻は実測値に一致するが、濃度ピーク値は実測値を大きく上回る。一方、間隙率を 0.07%に設定した場合には、濃度ピーク値は実測値とほぼ一致するが、ピーク到達時刻は大きく 遅れる。

続いて、間隙率を 0.07%に固定し、縦分散長をパラメータとした移行解析を実施した。横分散 長は常に縦分散長の 10 分の 1 に設定した。解析により得られた揚水区間中のトレーサー濃度の 経時変化を図 5.1-169 に示す。分散長が大きいほど破過曲線の立ち上がりは急でピーク到達時刻 は早くテール部分の濃度低下速度は遅くなる。一方、分散長が小さいほど破過曲線の立ち上がり やピーク到達時刻は遅く、破過曲線の形状もよりシャープとなる。縦分散長を 7.0 m(間隙率は 0.07%)に設定した場合に、特に立ち上がり部分において破過曲線は実測値に一致する。

図 5.1-170 には、間隙率を 0.07%、縦分散長を 7.0m としたケースについて、試験開始から 1 日後、3日後、5日後、8日後のトレーサーの濃度分布を示す。トレーサー投入位置と揚水位置 4 点は、図中に白い点で示している。揚水孔周辺のトレーサー濃度は、試験開始から 1日後、3日 後に濃くなっている。トレーサーは投入位置と揚水位置中心を結ぶ線分より坑道に近い側にやや 多く分布しているが、坑道掘削により圧力が解放されたことにより坑道に向かうバックグラウン ドの地下水流れの影響と考えられる。



図 5.1-168 間隙率をパラメータとした破過曲線の計算結果(T10試験;縦分散長2.1 m)



図 5.1-169 縦分散長をパラメータとした破過曲線の計算結果(T10 試験;間隙率 0.07 %)



図 5.1-170 トレーサー濃度分布の経時変化の解析結果(T10試験)

続いて、18MI63 号孔からトレーサーを投入し 18MI64 号孔で揚水によるトレーサーの回収を 行った 19W6366T9 試験(以下、T9 試験)について解析結果を示す。T9 試験については、注入 したトレーサーのうち、最も明瞭な破過曲線が得られたアミノ G 酸の移行解析結果を示す。T9 試験では、18MI63 号孔の Int-3 と Int-4 から中間のパッカーを収縮して一つの区間として 100 ppm のウラニンを含むトレーサー溶液を5時間注入し、18MI64 号孔の Int-2~Int5 においてや はり間のパッカーを収縮して一つの区間として 5.4 L/min の揚水を行った。トレーサー注入区間 の中心と揚水区間の中心との距離は 15.20 m であったため、縦分散長はその約 10 分の 1 の 1.5 m、横分散長はさらにその 10 分の 1 の 0.15 m に設定した。そして、間隙率をパラメータとした トレーサーの移行解析を実施した。解析により得られた揚水区間中のトレーサー濃度の経時変化 を、実測値とともに図 5.1-171 に示す。間隙率を 0.24%に設定した場合に濃度のピーク到達時刻 は実測値に一致するが、濃度ピーク値は実測値を大きく上回る。一方、間隙率を 0.30%に設定し た場合には、濃度ピーク値は実測値とほぼ一致するが、ピーク到達時刻は大きく遅れる。

続いて、間隙率を 0.27%に固定し、縦分散長をパラメータとしたトレーサーの移行解析を実施 した。横分散長は常に縦分散長の 10 分の 1 に設定した。解析により得られた揚水区間中のトレ ーサー濃度の経時変化を図 5.1-172 に示す。縦分散長を 3.0 m(間隙率は 0.24%)に設定した場 合に、特に立ち上がり部分において破過曲線は実測値に一致する。



図 5.1-171 間隙率をパラメータとした破過曲線の計算結果(T9試験;縦分散長1.5m)



図 5.1-172 縦分散長をパラメータとした破過曲線の計算結果(T9試験;間隙率0.27%)

5.1.1 で実施したボアホール TV 検層において、すべての開口割れ目の開口幅の合計値を計測区 間長で除すことにより、ボーリング孔毎の割れ目間隙率を算出した。その結果、18MI63 号孔は 0.14 %、18MI64 号孔は 0.15 %、19MI66 号孔は 0.006 %であった。18MI64 号孔と 19MI66 号 孔の割れ目間隙率を各ボーリング孔の計測区間長も加味して平均すると 0.092 %となり、これら 2 孔を用いて実施した T10 試験のトレーサー移行解析により得られた間隙率 0.07 %に非常に近 い。一方、18MI63 号孔と 18MI64 号孔の割れ目間隙率の平均は 0.142 %となり、これら 2 孔を 用いて実施した T9 試験のトレーサー移行解析により得られた間隙率 0.27 %に比べ小さいものの 近い数値ではある。

#### (5) まとめ

水みち調査の試験場となっている深度 300 m ボーリング横坑周辺の地下水流動状況、物質移行 特性を把握することを目的として、地下水流動解析、トレーサー移行解析を実施した。今年度は、 岩盤を多孔媒体で表現した解析モデルにより解析を行った。

トレーサー試験開始前の地下水流動解析では、土岐花崗岩上部割れ目帯の透水性を等方性とし、 換気立坑、ボーリング横坑、予備ステージへの地下水の総流入流量が実測値に一致するような上 部割れ目帯の透水係数を同定した。全水頭は換気立坑やボーリング横坑、予備ステージに向かっ て低下し、特に換気立坑周囲の深度 300 m より下の部分で低くなっている。地下水は、ボーリン グ横坑東側では南東から北西に向かって流れ、坑道に近づくにつれ坑道壁面に直交する方向に向 きを変え、坑道近傍で加速しており、裸岩状態になっているボーリング横坑の先端部や東側で特 に速くなっている。

5.1.1 に示したトレーサー試験の中で孔間の直線距離が 21.3 m と最も長く 18MI64 号孔と 19MI66 号孔の間で実施された T10 試験について、試験中の地下水の流れを数値解析により推定 した。その結果、揚水の影響により揚水点周りのすべての方向に広範囲にわたり地下水位が低下 し、試験開始前には換気立坑へ向かっていた地下水の流れがやはり広範囲にわたり揚水点の方向 に向きを変えていると推定された。

トレーサー移行解析では、T10 試験に加えて、18MI63 号孔と 18MI64 号孔との間で実施され た孔間の直線距離が 15.2 m の T9 試験について、揚水孔のトレーサー濃度破過曲線の再現を試み た結果、間隙率と分散長を推定することができた。推定された間隙率は、ボアホール TV 検層に よる割れ目開口幅から得られた割れ目間隙率と整合的であった。一方、縦分散長の推定値は、T9 試験で孔間の直線距離の 20%、T10 試験で 33%と長く、トレーサーが連続する複数の割れ目面 に沿って移行するために実際の移行距離が孔間の直線距離よりも長いこと、あるいはトレーサー が多数通りの移行経路を通って揚水区間に到達していることが示唆された。また、解析によれば、 坑道の影響によりトレーサーの流れが若干坑道寄りになっていることが推測された。

今後は、間隙率や分散長の他に水みちの分布に伴う透水不均質性なども考慮して、他のトレー サー試験も含めて破過曲線のより良好な再現を試み、深度 300 m ボーリング横坑周辺の水理地質 構造を明らかにしていくことが重要と考える。

#### 参考文献

上野哲朗, 竹内竜史, 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集-2014~ 2015 年度-, JAEA-Data/Code 2017-003, pp.34, 2017.

尾上博則,三枝博光,大山卓也,,遠藤令誕,繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理 地質構造のモデル化・地下水流動解析(ステップ4), JAEA-Research 2007-034, 2007.

尾上博則,小坂寛,竹内竜史,三枝博光,超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究)第

2 段階におけるサイトスケールの水理地質構造モデルの構築, JAEA-Research 2015-008, pp.123-124, 2015.

- 尾上博則,三枝博光,竹内竜史,超深地層研究所計画の研究坑道の掘削を伴う研究段階における 地下水流動のモデル化・解析,土木学会論文集 C, Vol. 72, No.1, pp.13-26, 2016.
- 河西基,五十嵐敏文,田中靖治,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-,電力中央研究所研究報告 U93054, 1994.
- 河西基,五十嵐敏文,田中靖治,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2) –割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法–,電力中央研究所研究報告 U94053,1995.
- 三枝博光, 稲葉薫, 澤田淳, 断層の透水異方性に着目した水理地質構造のモデル化・地下水流動解 析 ・ 東濃地域を例として ・, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.371-376, 2003.
- 電力中央研究所,平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中 地下水移行評価確証技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-,2018a.
- 電力中央研究所,平成25年度~平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開 発事業(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-,2018b.

#### 5.2 亀裂性岩盤の透水不均質性の評価

#### 5.2.1 背景と目的

結晶質岩に代表される亀裂性岩盤を対象とした地層処分の安全評価においては、放射性核種の 主要な移動経路となる岩盤中の割れ目を対象とした水理特性や物質移動特性の評価が重要となる。 特に、地下水の水みちとなる割れ目の位置、方向、大きさなどの幾何学的特性(地質学的特性を 含む)や水理学的特性、物質移動特性を把握することが重要である。

国内では、瑞浪超深地層研究所において亀裂性岩盤を対象とした調査やモデル化を通じて割れ 目の特性評価に関する調査研究を進めており、割れ目ネットワークモデル(Discrete Fracture Network Model;以下,DFNモデル(Dershowitz,W.,1985))を用いた割れ目の統計分布のモ デル化手法が整備されつつある(例えば、三枝ほか,2015)。しかしながら、個々の割れ目の透水 性とその幾何学的・水理学的連続性の情報が不足しているのが現状である。特に、既往の調査研 究では岩盤中の主要な水みちとなる断層などの水理特性の把握や、研究坑道掘削のための前方探 査を目的として透水性の高い割れ目に着目した水理試験が主体として実施されている。そのため、 低い透水性の割れ目の情報が不足しており、割れ目の分布に起因した亀裂性岩盤の水理学的な不 均質性(以下、透水不均質性)を十分に理解できていない。

また、瑞浪超深地層研究所での既往の調査研究では、広い領域から狭い領域へと段階的な調査・ 評価を繰り返し実施することで、各空間スケールの透水不均質性を把握するための調査・評価の 考え方や手法を整備してきた(例えば、三枝ほか,2007;尾上ほか,2016)。広域スケール(数 km~数+ km 程度)では、地下水の涵養域から流出域までの1つの地下水流動系としての大局 的な地下水の移行経路などが評価対象となるが、坑道スケール(数 m~数百 m)では、坑道周辺 岩盤中の個々の割れ目沿いや、それらの割れ目で形成されたネットワーク状の地下水の移行経路 などが評価対象となる。つまり、それぞれの空間スケールで地下水流動モデルにおける岩盤の不 均質性の表現方法が異なり、それらの異なる方法で表現された岩盤の不均質性を複数のスケール 間でどのように連携させるかが課題となる。特に、広域スケールを対象とした地下水流動モデル において、坑道スケールで評価される個々の割れ目に起因した透水不均質性のモデル化方法につ いては十分に整備されていない。

上記の 2 つの技術的な課題(亀裂性岩盤の透水不均質性を理解するための調査データの蓄積、 広域の地下水流動モデルにおける透水不均質性のモデル化方法の整備)は、1 章で示した地下水 流動モデルから推定した地下水の実流速と地下水年代から推定した地下水の実流速の不整合(図 5.2-1)を解決するために取り組むべき課題といえる。

そのため本事業では、これまでに割れ目データが蓄積されている瑞浪超深地層研究所周辺岩盤 を事例研究の場とした研究開発を行う。岩盤の透水不均質性を把握するために必要な原位置調査 の最適化や、取得した調査データに基づく DFN モデルの構築および構築したモデルの信頼性確 認のための方法論の構築、さらには広域スケールにおける岩盤の透水不均質性のモデル化手法の 整備に資するためのボーリング調査を実施するとともに、ボーリング調査で取得したデータを用 いた岩盤の透水不均質性の評価を実施する。



(図中の実流速の推定根拠は、表 5.2-1 を参照)

		地下水流動場			
		中間域	流出域		
		44~110m/y	6~160m/y		
地下水の	地下水流動モデル による推定値	【推定根拠】 動水勾配:0.007 <sup>*1</sup> 透水係数:2E-8m/s <sup>*2</sup> 有効空隙率:4E-5 <sup>*3</sup> ~1E-4 <sup>*4</sup>	【推定根拠】 動水勾配:0.001~0.01 <sup>*1</sup> 透水係数:2E-8m/s <sup>*2</sup> 有効空隙率:4E-5 <sup>*3</sup> ~1E-4 <sup>*4</sup>		
実流速	地下水年代 による推定値	0.1m/yオーダー (数km/数万年)	0.1m/yオーダー (数km/数万年)		
		【推定根拠】 14Cと4Heの相関:1万年程度 <sup>*5</sup>	【推定根拠】 14C年代、4He濃度:2万年程度 <sup>*5</sup>		

表 5.2-1 東濃地域を事例とした地下水の実流速の推定根拠

\*1 三枝ほか, 2007、\*2 尾上ほか, 2016、\*3 核燃料サイクル開発機構, 2005、\*4 尾上ほか, 2014、

\*5 Hasegawa et al., 2016

## 5.2.2 アプローチ

図 5.2・2 に、本事業における亀裂性岩盤の透水不均質性評価の検討フローを示す。平成 30 年 度、31 年度の二か年においては、坑道スケールの透水不均質性のモデル化手法の検討を目的とし た調査研究として、ボーリング調査を実施して割れ目の透水性などのデータを取得するとともに、 それらのデータを用いた岩盤の透水不均質性の評価を行う。図中の黒字部分が本事業で実施する 項目と期待されるアウトプットとなる。本事業で得られたデータや知見は、坑道スケールの透水 不均質性のモデル化手法の体系化や、施設スケールおよび広域スケールへの透水不均質性の反映 方法の検討への反映が期待される。なお、透水不均質性のモデル化手法の体系化にあたっては、 5.1 章に示した「水みちのネットワークによる水理・物質移動の調査・評価技術の高度化」での成 果との統合を図る。また、広域スケールへの透水不均質性の反映方法の検討で得られた成果は、 3.1 章に示した「地下水流動・物質移動解析技術の高度化」に反映させる。 以下に、本事業で実施する具体的な実施内容を示す。

平成 30 年度には瑞浪超深地層研究所において既存の調査密度が高い領域である深度 500m の 冠水坑道(図 5.2-3)周辺岩盤を対象として掘削長 100m 程度のボーリング孔を掘削し、土岐花 崗岩健岩部の割れ目データの取得を目的とした調査が実施できるように、ボーリング孔内および 周辺の環境整備を行った。

平成 31 年度には、平成 30 年度に掘削したボーリング孔で各種検層を実施し、冠水坑道周辺岩 盤における割れ目の幾何学的特性に関するデータを取得する。また、複数の水理試験とそれに伴 う既存孔への圧力応答観測を実施し、岩盤中の割れ目の透水性とその連続性に関するデータを取 得する。これらのボーリング調査で取得した割れ目の幾何学的特性および水理学的特性データを 用いて割れ目に起因する冠水坑道周辺岩盤の透水不均質性を評価する。



図 5.2-2 亀裂性岩盤の透水不均質性評価の検討フロー



図 5.2-3 瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウト

# 5.2.3 実施結果

## (1) 割れ目データを取得するためのボーリング調査

#### 1) 調査対象領域の概要

瑞浪超深地層研究所周辺の地質は、白亜紀後期の花崗岩(土岐花崗岩)からなる基盤を、新第 三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)が不整合で覆う(糸魚川, 1980;陶土団体研究グループ, 1999) (図 5.2-4)。立坑の掘削地点においては、深度約 170m 以深に土岐花崗岩が分布し、不整合を介 して瑞浪層群が分布する。土岐花崗岩では、上部の低角度の傾斜を有する割れ目の分布密度が有 意に高い岩盤領域(以下、上部割れ目帯)と、下部の割れ目の分布密度が低い岩盤領域(以下、 下部割れ目低密度帯)とに区分されている(石橋ほか, 2013)。本事業でボーリング調査を実施す る冠水坑道周辺岩盤は、土岐花崗岩の下部割れ目低密度帯である。

冠水坑道周辺に分布する土岐花崗岩の下部割れ目低密度帯とスウェーデンの Forsmark 周辺に おける深度 500m 付近の岩盤について比較すると、日本の結晶質岩のほうが、形成年代が若く割 れ目の頻度は一次元割れ目密度で4倍程度多い。さらに、割れ目の透水性は高い傾向にあること がわかる(表 5.2・2)。一方で、瑞浪超深地層研究所周辺に分布する土岐花崗岩についてみると、 立坑の深度 460m 付近が上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯の境界と解釈されており、図 5.2・5 に示す坑道壁面観察結果から、上部割れ目帯と比較して下部割れ目低密度帯の割れ目密度が低い ことがわかる。研究坑道の壁面観察結果を用いて、上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯の割れ目 の分布特性を定量的に比較した(表 5.2・3)。表 5.2・3 からは、上部割れ目低密度帯の割れ目 の分布特性を定量的に比較した(表 5.2・3)。表 5.2・3 からは、上部割れ目低密度帯の三次元割 れ目密度は上部割れ目帯の 40%程度であることがわかる。また、割れ目の大きさを表す指標であ るべき乗数をみると、上部割れ目帯と比較して下部割れ目低密度帯のほうが小さいことから、下 部割れ目低密度帯に分布する割れ目は比較的長い傾向にあるといえる。



表 5.2-2 日本と海外における結晶質岩の特徴の比較(深度 500m 付近)

	日本(瑞浪超深地層研究所)*1	スウェーデン(Forsmark) <sup>*2</sup>
母岩の形成年代	7000万年前	18~19億年前
割れ目の頻度(本/m) ※ボーリング調査結果	1.96	0.54
割れ目の透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	$1.3 \times 10^{-10} \sim 6.2 \times 10^{-6}$	$6.2 \times 10^{-10} \sim 8.9 \times 10^{-8}$

 $^{\ast}\,{}^{\scriptscriptstyle 1}\,$  Ishibashi et al., 2016,  $\,\,^{\ast}\,{}^{\scriptscriptstyle 2}\,$  SKB, 2008

表 5.2-3 나	IFD と LSFD における割	れ目の分布特性の比較	<ul><li>(細谷ほか)</li></ul>	2015)

土岐	坑道名称	方位	方向	分布	一次元割れ目密度	三次元割れ	目密度	半径分布
花崗岩 延長方向/長さ(m)		セット	方向	Fisher定数	P <sub>10</sub> <sup>※1</sup> (本/m)	P <sub>32</sub> <sup>%2</sup> (m <sup>2</sup> )	/m <sup>3</sup> )	べき乗数
でした。 WHFD 深度300mボーリング横坑 N24.767E/16.05	NW系	N29W 87N	12.7	1.34	1.81			
	UHFD 株皮300mホーリング横坑 N24.767E/16.05	NE系	N43E 88N	11.0	0.12	0.38	2.65	4.0
		低角度系	N25E 8S	7.6	0.12	0.46		
		NW系	N62W 83S	17.9	0.24	0.32		
LSFD	深度500m冠水坑道	NE系	N66E 84S	20.1	0.10	0.11	1.02	2.4
	N10.231W/46.5	NS系	N7W 84N	17.1	0.09	0.45	1.03	3.4
		低角度系	N65W 31S	11.5	0.06	0.16		

※1:スキャンライン調査結果に基づく単位長さあたりの割れ目数

※2:スキャンライン調査結果に基づく単位体積あたりの割れ目の総面積



図 5.2-5 瑞浪超深地層研究所における坑道壁面観察結果

2) ボーリング調査の概要

# ① ボーリング孔(18MI65 号孔)のレイアウト

本事業で平成 30 年度に掘削したボーリング孔 (18MI65 号孔) で坑内検層および水理試験を実施した。18MI65 号孔の掘削レイアウトを図 5.2-6 に、ボーリング孔諸元を表 5.2-4 に示す。

また、平成 30 年度事業で実施したコア観察等により取得した岩盤情報(柱状図)を図 5.2-11 に示す。

# 2 調査項目

(a) 孔内検層

ボーリング孔内に各種検層装置を挿入し、ボーリング孔内表面から周辺岩盤のデータを 取得した(孔口から約30mのケーシング設置部分を除く)。

検層項目を表 5.2-5に、使用した機器一覧表を表 5.2-6および表 5.2-7に、主要な機器の寸法を図 5.2-7に示す。

(b) 水理試験

水理試験区間の設定を図 5.2-8に示す。水理試験は、主立坑沿いに分布する断層(図 5.2-6)や掘削深度13mabh付近に分布する断層(図 5.2-11)の影響帯を除く健岩部と考 えられる掘削深度41mabh~101mabhの60m区間を対象に実施した。60mの全区間につい ては、高透水部以外の岩盤部の透水係数データの取得を目的として水みちの有無に関わら

ず5m区間長の試験を12区間で実施した(試験No.1~12)。また、水みち割れ目以外の割 れ目の透水量係数データの取得を目的として、透水性が低いと推定される割れ目を優先に 2mまたは1m区間長の試験を実施した(試験No.13~20)。割れ目の選定は、平成30年度 事業の掘削作業で取得した岩石コアの情報、BTVデータおよび上記(a)孔内検層結果を参 考とした。最後に、試験対象区間全体の水理特性を確認するための60m区間長の水理試験 を実施した(試験No.21)。

試験方法は、パルス試験(Hvorslev法/Cooper法)および定流量試験(Jacob法/ Agarwal法)で実施した。ただし定流量試験は湧水量が十分確保できる区間についてのみ 実施した。当該区間の透水性パラメータとしては、各種試験手法のうち最もその手法への 適合性の良いデータを採用した。水理試験装置一覧表を表 5.2-8に、装置の概念図を図 5.2-9に示す。

#### ③ 作業工程

ボーリング調査は2019年7月~12月で実施した。

平成 30 年度事業で実施したボーリング孔掘削作業(2019 年 1 月~3 月)も含めた全体工程表 を図 5.2-10 に示す。



深度(mabh)	走向(磁北基準)	傾斜	孔径
孔口	N2.73W	$-7.0^{\circ}$	
10	N1W	$-7.0^{\circ}$	PQ ( \ \ 123)
20	N1W	$-7.5^{\circ}$	PQ ( $\phi$ 123)
30	N1W	$-8.0^{\circ}$	$PQ$ ( $\phi$ 123)
50	N1W	$-8.0^{\circ}$	HQ $(\phi 98)$
70	N1W	$-8.0^{\circ}$	HQ $(\phi 98)$
90	N2W	$-8.0^{\circ}$	HQ ( $\phi$ 98)
103	N2W	$-8.0^{\circ}$	HQ ( $\phi$ 98)

表 5.2-4 18MI65 号孔の諸元

表 5.2-5 検層項目

実施項目	測定項目	測定深度区間	仕様等
孔径検層	裸孔径	30.07~103.1m	<ul> <li>φ98 mm以上の孔径で対応</li> <li>x 軸、 x 軸独立測定可能</li> </ul>
			<ul> <li>・ φ98 mm 以上の孔径で対応</li> </ul>
電気検層	岩盤比抵抗	30.07~103.1m	<ul> <li>ノルマル比抵抗,自然電位</li> </ul>
			<ul> <li>・ 電極間隔:25cm ノルマル/100cm</li> <li>ノルマル/SP</li> </ul>
			<ul> <li>φ98 mm 以上の孔径で対応</li> </ul>
密度検層	密度(散乱γ線)	$30.07 \sim 103.1 \mathrm{m}$	・ 使用線源: <sup>137</sup> Cs,5.55GBq 以上
			<ul> <li>線源と検出器間隔:1m</li> </ul>
	中性子(熱中性子)		<ul> <li>φ98 mm 以上の孔径で対応</li> </ul>
中性子検層		$30.07{\sim}103.1{\rm m}$	<ul> <li>使用線源:Am-Be, 111GBq 以上</li> </ul>
			<ul> <li>線源と検出器間隔:2m</li> </ul>
	法量		<ul> <li>φ98 mm 以上の孔径で対応</li> </ul>
	流速		<ul> <li>測定流量範囲:静止状態で</li> </ul>
電磁フローメータ		$30.07{\sim}103.1{\rm m}$	0.05ℓ/分以上
	孔内水温度 孔内水温度		<ul> <li>・ 分解能:静止状態で±0.02 ℓ/分</li> </ul>
			以上
			<ul> <li>φ98 mm 以上の孔径で対応</li> </ul>
	P 波速度		・ 振動子固有周波数:25KHz 以上
音波検層	I 谈述及 S 波速度	$30.07 \sim 103.1 \mathrm{m}$	(電気歪振動子)
	N WARD		<ul> <li>発信器と受信器間隔:1m</li> </ul>
			<ul> <li>・ 受信器:2 レシーバー型</li> </ul>

種目	機器	型式	仕様
	ウィンチ	GSC-PW4	GSC製・AC100Vモーター駆動
	ケーブル	4芯硬鋼線 アーマードケーブル	外径: 4.7 mm 耐熱: 260 ℃ ケーブル長: 146m
	エンコーダ	深度パルスエンコーダー	分解能: 1,000カウント/m 許容速度: 200m/min
	データ収録		多ペンレコーダ(R0-300) Ch数:6Chs 入力形式:フローティング方式 測定範囲: 0.5mV~50V/F.S. 精度:±0.25%F.S.以下(DC電圧の場合) 感度:±0.1%F.S.以下 外部データ出力:各Ch1V/F.S.
全種目共通	<ul> <li>データ収録 データ収録 データ処理 ツール制御</li> <li>BINモジュール型 GSC検層データ 収録システム</li> <li>BINモジュール型</li> <li>GSC検層データ 収録システム</li> <li>Century 検層データ 収録システム (SYSTEM VI)</li> </ul>	BINモジュール型 GSC検層データ 収録システム	ICカード型データ収録装置(ID-06 GSC) 収録メディア:SRAM(2MB*2スロット),内蔵RAM 記録データ分解能:12bits(0.025%F.S.) サンプリング周期:1Sample/1外部深度パルス データ形式:ASCII、16進データ
			プレイバックスケーラ(PBS-mini) 外部深度パルス出力:深度1cm/10cm毎 (外部分周器により2cm/5cmサンプル可能) 検層深度方向切替機能:Up/Down Survey
		ツール制御インターフェイス 使用OS:Windows 98 以降 電源: AC115V 50/60 Hz 供給電流:250 mA,供給電圧:max180V 深度精度:10cm以内	
	データ 収録 データ 処理 ツール制御	MATRIX Logger	ツール制御インターフェイス 使用OS:Windows 2000/XP/Vista 電源: AC100-240V 50/60 Hz Dual DSP

表 5.2-6 検層機器一覧表 (共通)

<b>衣 5.2−/ 使</b> 憎慨 品一 筧 衣 ( 谷 検	「僧垻日)
----------------------------------	-------

種目	機器	型式	仕様
電気検層 Electrical Survey	地上機器	ELM-204 SCM-304	電源: AC 100 V ±10% 50/60 Hz 出力電圧: 150 V 出力電流: 0~50 mV 測定動作周波数: 240 Hz±10 Hz 出力: 25cm/ルマル / 100cm/ルマル / SP 動作範囲:比抵抗 (0~20KΩ-m) SP (0~200mV)
	孔内機器		外径: 51 mm 全長: 1.7 m 電極: 25cm/ルマル / 100cm/ルマル / SP
乙仅拾网	地上機器	LPM-202 RMM-2003 (×2)	電源: AC 10 0V ±10% 50/60 Hz BIN DC 300 V ・測定電源 90 mA
式往夜眉 Caliper Log	孔内機器	X-Y AXIS	外径: 44 mm 全長: 2.17 m 測定範囲: 5~71cm 耐圧:15,000 psi 測定温度: max 190 ℃
	地上機器	SYSTEM VI	
中性子検層 Neutron Log	孔内機器	CNL-9073	外径: 50.8mm 全長: 2.83m 線源: <sup>241</sup> Am-Be(185 GBq) デテクタ:He-3 比例計数管×2
	地上機器	SYSTEM VI	
密度検層 Density Log	孔内機器	CDL-9139	外径: 51mm 全長: 2.92m 線源: <sup>137</sup> Cs(74 GBq) デテクター:NaIシンチレーション 測定誤差:0.05g/cm <sup>3</sup> 以内
	地上機器	MATRIX Logger	
音波検層 Sonic Log	孔内機器	ALT社 FWS50	外径:50mm 全長:3.9 m 最小対応坑径:60mm 耐圧:20.0MPa 耐温:70°C Tx-Rx:Rx1 0.8m, Rx2 1.2m, Rx3 1.6m 基本周波数:20kHz 収録時間間隔:最小 2 μS
雷磁刑	地上機器	SYSTEM VI	
电磁主 フローメーター 検 層 Electro Magnetic Flowmeter Log	孔内機器	EMFM-9721	外径: 60.5mm 全長: 1.6m 電磁センサ型フローメーター 流速範囲: 10cm/min ~ 78.6 m/min 温度測定範囲: 0~60°C 精度:±5% 泥水比抵抗測定範囲: 0~500 Ω·m 精度:±5%



図 5.2-7 主要な検層機器の寸法



試験No.	区間上端 (mabh)	区間下端 (mabh)	パルス試験	定流量試験
≪5m⊠¦	罰長≫			
No.1	96.00	101.00	0	
No.2	91.00	96.00	0	
No.3	86.00	91.00	0	0
No.4	81.00	86.00	0	
No.5	76.00	81.00	0	
No.6	71.00	76.00	0	
No.7	66.00	71.00	0	0
No.8	61.00	66.00	0	
No.9	56.00	61.00	0	
No.10	51.00	56.00	0	0
No.11	46.00	51.00	0	
No.12	41.00	46.00	0	0

試験No.	区間上端 (mabh)	区間下端 (mabh)	パルス試験	定流量試験		
≪2m、1m区間長≫						

No.13	72.00	74.00	0	
No.14	69.00	71.00	0	
No.15	76.30	77.30	0	
No.16	71.00	72.00	0	
No.17	65.85	66.85	0	
No.18	53.50	54.50	0	0
No.19	45.50	46.50	0	
No.20	43.70	44.70	0	0
≪全区間	(60m) »			
	11.00	4.0.4.0.0	0	0

101.00 0 0
------------

図 5.2-8 18MI65 号孔の水理試験区間設定

装置	主要部品の数量など	仕様	大きさ,重量等
パッカーユニット	3本	スライド式	全長 2m
		適用孔径φ100~140mm	約 20kg
ストレーナ	定尺 0.5~3m,区間長決定	穴あきパイプ	約 5kg/m
	後,必要量を持ち込み	外形 <i>ϕ</i> 42.7mm	約 10m 用意
JFT ロッド	定尺 0.5~3m,区間長決定	外形 <i>ϕ</i> 42.7mm	約 5kg/m
	後,必要量を持ち込み	内径¢35.8mm	計約 kg
		連結部φ49.0mm	
ロッドバンド	2 個		約 6kg×2
パッカー用	パッカー用3セット	PEEK 製 4×2.5mm	軽量,手運び可能
チューブ		最高使用圧力 10MPa	
圧力用チューブ	区間用3セット	ナイロン製 4×2.5mm	同上
孔内パッカー用チ		最高使用圧力 4.4MPa	上記併せて 1 箱 40×40×
ューブ			80cm 程度
電磁流量計	2 台	最大流量 300L/min および	付属品と共に箱入り
		100L/min 精度 FS:0.1%	40×40×80cm 程度約 20kg
データ収録装置	パソコン(PC) 1台	HOST-PC, Graph-PC	各 90cm 四方のボックス型
	表示器/バッテリー1 台	サンプリング間隔 1sec	約 50~60kg
データ収録装置用	1台	電気通信用ケーブル	40×40×80cm 程度
ケーブルボックス			約 20kg
チャンバータンク	1 台	パッカー拡張用 容量 30L	約 20kg
圧力計ボックス	水晶振動式絶対圧計2台	水晶振動式 MAX:15MPa	各 50cm 四方のボックス型
	ひずみゲージ圧力計 4 台	精度:0.01%FS	約 15kg, 圧力計など精密機
	気圧計1台	ひずみ型 MAX:10MPa	器内蔵
メインバルブ	1台	ボールバルブ 高耐圧仕様	インチ半のボールバルブ
グローブバルブ	1台	流量調整用	軽量,手運び可
コンプレッサー	1台	高圧タイプ(2.5MPa)	約 10kg
手押しポンプ	1 台	パッカー拡張用	約 2kg

表 5.2-8 水理試験装置一覧表



図 5.2-9 水理試験装置の概念図

#### 3) ボーリング調査の結果

# ① 孔内検層結果

電磁フローメーターにより、深度 37mabh 付近で 9.7L/min、88mabh 付近で 2.6L/min の湧水 を検出した。また深度 73mabh 付近で間隙率の上昇、比抵抗の低下、および音波検層データの不 鮮明が確認された。検層結果を図 5.2-12 に示す。

#### 2 水理試験結果

## (a) データ分析

水理試験時の水圧変化データを用いた岩盤内の水みちの連結性や連続性の推定手法として Transmissivity Normalized Plot(TNP)を用いた手法がある(Enchescu et al., 2004、竹内ほか, 2013)。TNP は、圧力変化の時間微分プロットを流量で正規化し、透水量係数相当値の経時変化 に置き換えたものであり、TNP の時間変化やその収束傾向が水みちの評価指標となる。

対象データは、定流量試験を実施した試験区間における回復期間のデータとし、横軸に規格化時間(揚水時間と回復過程時間の調和平均)、縦軸に次式により規格化した透水量係数をプロットしたものを、図 5.2-13 に示す。

# $TNP = \frac{d\log t}{dp} \frac{q\rho g}{4\pi}$

ここで、 $\frac{d\log t}{dp}$  は圧力変化量の対数時間微分の逆数、q は流量、 $\rho$  は水密度、g は重力加速度

5m 区間長の試験と重複する深度で実施した 1m 区間長の試験において、TNP が試験時間後期 で収束傾向を示す(試験 No.10 と No.18、試験 No.3 と No.21、試験 No.12 と No.20)。このこと から、各短区間にある割れ目がそれぞれの長区間の試験結果に影響を及ぼす水みちであると解釈 できる。また、異なる深度で実施した試験結果がそれぞれ固有の変化傾向を示すことから、冠水 坑道周辺岩盤には複数の異なる水みちが形成されていると考えられる。

#### (b)水圧応答

パルス試験または定流量試験の実施に対して、周辺ボーリング孔の観測区間で水圧応答が確認 された。各試験中の周辺ボーリング孔の水圧応答の有無を表 5.2-9 に示す。特に、試験 No.6,7,10,13,21 の実施時に複数の観測区間で明瞭な水圧応答が確認された。なお、No.13 (2m 区 間)は No.6 (5m 区間)に含まれる区間である。

上記試験時における観測区間の水圧応答を図 5.2-14~図 5.2-18 に示す。水理試験を実施した 18MI65 号孔に最も近接している 12MI33 号孔のみならず、冠水坑道を挟んだ位置にあるボーリ ング孔(13MI38,13MI40 号孔など)でも水圧応答が確認されている。これらの水圧応答データ は、割れ目の連結性によって形成された水理学的な連続性の空間分布を推定するための基礎情報 となる。

## (c) 物性值

パルス試験および定流量試験(一部区間では定常揚水試験による)で算出した水理パラメータ を表 5.2-10 に示す。またこれらの手法のうち最も適合したデータについて、柱状図とともにボ ーリング深度方向に表示したものを図 5.2-12 に示す。深度 88m 付近、深度 73m 付近で、割れ 目分布や孔内検層データとの関連性が確認できる。



図 5.2-10 18MI65 号孔ボーリング調査実績工程表

			201	9年	3月														
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
火	*	*	숲	±	Ħ	月	火	*	*	龛	±	Ħ	月	火	*	*	*	±	Ħ

2019年9月																					
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
月	火	*	*	숲	±	Ħ	月	火	*	*	슜	±	Ħ	月	火	*	*	金	±	H	月
									ſ	也											
		L							. 1	Έ											
										_											
									3	ŧ											
									0	の											
									. 7	ŧ											
										_											
									°	0											
									1	木											
										Г											

					2	2019	9年1	12月														
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	火	*	*	2	±	Ħ	月	火	*	*	龛	±	Ħ	月	火	*	*	*	±	Ħ	月	火
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1																						
1				1									•••••									



図 5.2-11 18MI65 号孔のコア観察総合柱状図

5 - 203



図 5.2-12 18MI65 号孔の物理検層・水理試験結果



図 5.2-13 18MI65 号孔の水理試験結果 (TNP)

	12MI33					13MI38 1			13MI39				13MI40				13MI41							
試験区間	P1	P2	<b>P</b> 3	P4	P5	P6	P1	P2	<b>P</b> 3	P4	P5	P6	<b>P</b> 1	P2	<b>P</b> 3	P4	Ρ1	P2	<b>P</b> 3	P4	P1	P2	P3	P4
No.1																						0		0
No.2													0	0	0							0	0	0
No.3		0							欠	測				欠	測			欠	測			欠	測	
No.4																								
No.5																								
No.6							0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0		0	0	0	0	O
No.7								0	0					0		0		0				0		0
No.8																								
No.9																								
No.10		0	0	٥	٥	٢				٥	٥		0	0	0								0	
No.11																								
No.12										0														
No.13		0	0	٢	0	0	0							0	0	0						0	0	0
No.14																								
No.15																								
No.16																								
No.17																								
No.18				٢																				
No.19																								
No.20																								
No.21		0		0											0	0						0	0	0
	0	:討	験区	間の	水圧	変化	と同	等の	志答			0	:試	験区	間の	水圧	変化	の1/:	10程/	度の	応答			

# 表 5.2-9 18MI65 号孔水理試験中の周辺ボーリング孔水圧応答星取表

表 5.2−10 18M165 号孔の水埋試験結果(ナー	ダ・	一覧)
------------------------------	----	-----

試験No.	透水量係数 T(m2/sec)	透水係数 K(m/sec)	貯留係数 S	比貯留係数 Ss(1/m)	解析方法	代表値
	7.34E-11	1.47E-11	6.94E-07	1.39E-07	Cooper	0
No.1	8.34E-11	1.67E-11	-	-	Hvorslev	-
	8.04E-09	1.61E-09	9.36E-09	1.87E-09	Cooper	0
No.2	8.17E-09	1.63E-09	-	-	Hvorslev	-
No.3	-	4.82E-08	-	-	定常式	0
No.4	8.04E-11	1.61E-11	1.07E-06	2.14E-07	Cooper	0
NO.4	1.24E-10	2.48E-11	-	-	Hvorslev	-
No F	3.07E-09	6.14E-10	9.40E-08	1.88E-08	Cooper	0
10.5	2.61E-09	5.22E-10	-	-	Hvorslev	-
No 6	2.58E-10	5.16E-11	8.67E-06	1.73E-06	Cooper	0
10.0	3.51E-10	7.02E-11	-	-	Hvorslev	-
	4.11E-08	8.22E-09	3.88E-04	7.76E-05	Cooper	-
No 7	2.14E-08	4.28E-09	-	-	Hvorslev	-
10.7	3.63E-08	7.26E-09	5.52E-04	1.10E-04	Jacob	-
	3.01E-08	6.02E-09	7.95E-04	1.59E-04	Agarwal	0
No 9	1.13E-09	2.26E-10	1.12E-09	2.24E-10	Cooper	0
110.0	8.07E-10	1.61E-10	-	-	Hvorslev	-
No 9	2.67E-10	5.34E-11	1.08E-08	2.16E-09	Cooper	0
10.5	1.80E-10	3.60E-11	-	-	Hvorslev	-
	2.85E-08	5.70E-09	1.67E-04	3.34E-05	Cooper	-
No 10	4.26E-09	8.52E-10	-	-	Hvorslev	-
140.10	1.28E-08	2.56E-09	1.28E-06	2.56E-07	Jacob	-
	5.04E-09	1.01E-09	1.42E-03	2.84E-04	Agarwal	0
No.11	1.63E-09	3.26E-10	7.22E-06	1.44E-06	Cooper	0
10.11	2.37E-09	4.74E-10	-	-	Hvorslev	-
	-	-	-	-	Cooper	-
No 12	5.40E-08	1.08E-08	-	-	Hvorslev	-
10.12	-	-	-	-	Jacob	-
	7.30E-09	1.46E-09	1.71E-05	3.42E-06	Agarwal	0

==#释AN a	透水量係数	透水係数	貯留係数	比貯留係数	经抵方法	华主庙
DADRING.	T(m2/sec)	K(m/sec)	S	Ss(1/m)	//////////////////////////////////////	1 \42310
No. 12	5.28E-10	2.64E-10	7.93E-07	3.97E-07	Cooper	0
NO.15	4.49E-10	2.25E-10	-	-	Hvorslev	-
No.44	1.45E-10	7.25E-11	7.71E-09	3.86E-09	Cooper	0
NO.14	9.45E-11	4.73E-11	-	-	Hvorslev	-
No. 4E	7.94E-11	7.94E-11	6.25E-07	6.25E-07	Cooper	0
NO.15	7.08E-11	7.08E-11	-	-	Hvorslev	-
Nett	1.95E-11	1.95E-11	6.71E-11	6.71E-11	Cooper	0
NO.10	1.12E-11	1.12E-11	-	-	Hvorslev	-
No. 47	6.96E-10	6.96E-10	6.74E-11	6.74E-11	Cooper	0
NO.17	2.75E-10	2.75E-10	-	-	Hvorslev	-
	4.76E-08	4.76E-08	6.98E-05	6.98E-05	Cooper	-
N= 40	3.56E-09	3.56E-09	-	-	Hvorslev	-
NO.18	7.23E-09	7.23E-09	4.01E-05	4.01E-05	Jacob	-
	5.05E-09	5.05E-09	9.63E-04	9.63E-04	Agarwal	0
N- 40	3.59E-09	3.59E-09	5.27E-15	5.27E-15	Cooper	0
No.19	9.50E-10	9.50E-10	-	-	Hvorslev	-
	-	-	-	-	Cooper	-
N= 20	2.42E-08	2.42E-08	-	-	Hvorslev	-
NO.20	8.63E-09	8.63E-09	7.52E-06	7.52E-06	Jacob	-
	3.70E-09	3.70E-09	1.53E-05	1.53E-05	Agarwal	0
	-	-	-	-	Cooper	-
N= 24	4.50E-06	7.50E-08	-	-	Hvorslev	-
NO.21	1.94E-07	3.23E-09	1.01E-03	1.68E-05	Jacob	-
	1.72E-07	2.87E-09	2.25E-03	3.75E-05	Agarwal	0



図 5.2-14 水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.6)



図 5.2-15 水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.7)



図 5.2-16 水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No. 10)



図 5.2-17 水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.13)



図 5.2-18 水理試験実施中の周辺ボーリング孔での水圧応答(試験 No.21)

#### (2) 割れ目データを用いた岩盤の透水不均質性の評価

本節では、広域スケールの地下水流動モデルの設定パラメータの妥当性確認および坑道スケー ルにおける岩盤の透水不均質性の統計分布のモデル化方法の高度化に資するためのデータ分析や モデル化・解析を実施する。

#### 1) 岩盤の水理特性の分析

図 5.2-19 に、試験区間長 5m および 60m の水理試験結果を示す。図中には BTV 観察で確認 した開口および明瞭割れ目の分布位置と、主要な水みち位置として 18MI65 号孔掘削時に周辺 観測孔で水圧応答が確認された深度、電磁フローメーターのアノマリー深度を記載した。主要な 水みちを含む試験結果は 6.0×10<sup>-9</sup>~4.8×10<sup>-8</sup> m/s であり、主要な水みちを含まない試験結果は 1.5×10<sup>-11</sup>~2.9×10<sup>-9</sup> m/s である。つまり、試験対象領域においては、主要な水みちの有無で岩 盤の透水係数が 1~2 オーダー程度異なる可能性がある。

図 5.2・20 に、18MI65 号孔と既往の水理試験結果(尾上・竹内,2016)の累積分布図を示 す。既往データとして、超深地層研究所計画で地上から掘削されたボーリング孔である MIZ・1 号孔と DH・15 号孔の試験結果と、冠水坑道周辺で坑道内から掘削されたボーリング孔である 12MI33 号孔と 13MI38 号孔の試験結果をプロットした。18MI65 号孔における水みちの有無に 依存しない水理試験の結果は、主に水みちを対象とした既往の試験結果と比較して全体的に低 い。このことから、5.2.1 で述べたとおり既往調査では主に水みちとなる高透水部を対象とした 試験データが多いために、広域スケールの地下水流動モデルを実施するにあたっては岩盤の透水 係数が実際より高く設定されている可能性が示された。上記は、広域スケールの地下水流動モデ ルの更新に有効な情報となる。また、18MI65 号孔および既往の試験結果ともに、1×10<sup>-11</sup> m/s 以下のデータが取得できていない。つまり、原位置での水理試験の測定限界が 1×10<sup>-11</sup> m/s 程 度であることが確認された。



図 5.2-19 水理試験結果と割れ目分布との比較



図 5.2-20 18MI65 号孔と既往の水理試験結果の累積分布

# 2) DFN モデルの構築

調査データの種類や量が DFN モデルに及ぼす影響や冠水坑道周辺岩盤の透水不均質性の評価 結果の違いの把握を目的として、表 5.2-11 に示す 3 つのデータセットを用いて DFN モデルを 構築した。データセット毎の割れ目の走向傾斜分布の違いに着目すると、冠水坑道周辺のボーリ ング調査(DFN\_DS2)では、地上からのボーリング調査(DFN\_DS1)に比べて、よりローカ ルな情報が取得できているため、割れ目の集中度が高くなっている。また、坑道壁面観察

(DFN\_DS3)は、ボーリング調査(DFN\_DS2)に比べて観察スケールが大きいため、面的に 情報が取得できていると考えられる(図 5.2-21)。

整理項目	データセット	調査データ					
	DFN_DS1	コア・BTV観察 【地上BH調査:MIZ-1号孔 <sup>*1</sup> 、DH-15号孔 <sup>*2</sup> 】					
割れ目の 幾何特性	DFN_DS2	コア・BTV観察 【坑道BH調査(冠水坑道周辺):12MI33号孔 <sup>*3</sup> 、 13MI38号孔 <sup>*4</sup> 、18MI65号孔 <sup>*5</sup> 】					
	DFN_DS3	坑道壁面観察:割れ目トレース <sup>*6</sup> 【総延長約90m:冠水坑道部および斜坑部(主立坑 断層影響領域除く)】					
	DFN_DS1	水理試験 【地上BH調査:MIZ-1号孔 <sup>*7</sup> 、DH-15号孔 <sup>*7</sup> 】					
岩盤の 水理特性	DFN_DS2	水理試験 【抗道BH調杏(冠水抗道用辺),12MI33是31* <sup>7</sup>					
	DFN_DS3	「【玑坦BH調査(冠水玑垣周辺):12M133号孔"、 13MI38号孔 <sup>*7</sup> 、18MI65号孔 <sup>*5</sup> 】					

表 5.2-11 DFN モデル構築のためのデータセット

\*1 大石, 2005、\*2 鶴田ほか, 2005、\*3 露口ほか, 2013、\*4 長谷川ほか, 2015、\*5 日本原子力研究開発機構・電力中央研究所, 2019、\*6 川本ほか, 2014、\*7 尾上・竹内, 2016



図 5.2-21 データセット毎の割れ目の走向傾斜分布

DFN モデルを構築するためには、調査データに基づき図 5.2-22(a)に示すパラメータを推定 する必要がある。既往研究(例えば、三枝ほか,2015)を参考に図 5.2-22(b)に示す手順で DFN モデルを構築した。最初に、モデル化対象領域で取得された調査データの分析を行い岩盤 の特徴を把握する。次に、割れ目の密度、走向傾斜、長さ分布といった幾何学的パラメータを推 定して、割れ目の幾何学的特性を統計的に再現した GeoDFN モデルを構築する。さらに、割れ 目の透水量係数分布を推定して GeoDFN モデルに水理学的な情報を付加した HydroDFN モデ ルを構築する。

割れ目のパラメータは、既往研究(例えば、三枝ほか,2015、細谷ほか,2015、石橋ほか, 2017)を参考に推定した。表 5.2-12 および表 5.2-13 に、それぞれ割れ目のパラメータの推定 手法と推定結果を示す。透水量係数分布については、図 5.2-23 に示す手順で岩盤の透水係数分 布の実測値の再現性が高い変数の組み合わせを解析的に推定した(図 5.2-24~図 5.2-26)。な お、表 5.2-12 の式④は割れ目が大きくなるほどその透水量係数が高くなる相関を意味する。そ のため、モデル化する割れ目の大きさの上限値を 100m と設定して透水量係数が極端に高くな る割れ目の発生を制限した。また、HydroDFN モデルを用いて数値解析を実施する際には、モ デルに発生させた割れ目の透水量係数のコントラストが大きすぎると解析の収束性が悪くなる。 そこで、1×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s 以下の透水量係数の割れ目は岩盤のマトリクス部に相当すると仮定し て、モデル化する割れ目の透水量係数の下限値を 1×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s と設定した。



図 5.2-22 DFN モデルの構築手法

割れ目特性	推定手法
走向傾斜分布	Oフィッシャー分布【式①】を仮定し、卓越方位セットごとの 平均方位(傾斜・傾斜方位)と広がり(フィッシャー係数)を 算定 $f(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{\kappa \sin \theta}{e^{\kappa} - e^{-\kappa}} e^{\kappa \cos \theta} \qquad \exists ①$ $\theta : 割れ目の集中方向(極)との交角(0<\theta < \pi)K : フィッシャー係数$
	○DFN_DS1, DS2:BTV観察結果のうちへアークラック以外の割れ 目をモデル化対象の割れ目と設定。ボーリング孔方位による偏 りをTerzaghi の補正法で補正したデータを適用 ○DFN_DS3:数m離れた地点からの目視による観察で抽出された 割れ目
	〇ベき乗分布【式②】を仮定
長さ分布	$f(r) = \frac{b-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r}\right)^b = (b-1) \cdot r_{\min}^{b-1} \cdot r^{-b}  \text{ st (2)}$
JF C 71 山	r:割れ目半径(m), r <sub>min</sub> :最小半径(m), b:べき乗数
	〇坑道壁面における割れ目のトレース長の頻度分布(の傾き) を再現した既存の解釈結果(べき乗数) <sup>*1, *2</sup> を適用
	○DFN_DS1, DS2:BTV観察結果のうちへアークラック以外の割れ 目の1次元密度に基づき、式③を用いて3次元密度を算定
	$P_{32} = \frac{\sum Area}{Volume} = \frac{\sum \pi r_1 r_2}{l \pi r_1^2} = \frac{\sum \pi r_1^2 f_{Terzaghi}}{l \pi r_1^2} = \frac{\sum f_{Terzaghi}}{l} = \frac{\sum f_{Terzaghi}}{l}$
密度分布	r1:ボーリング孔と交差する割れ目面の最小長さ r2:ボーリング孔と交差する割れ目面の最大長さ f <sub>Terzaghi</sub> :Terzaghi係数, / :ボーリング観測長
	ODFN_DS3:坑道壁面における割れ目のトレース長の頻度分布 (の頻度)を再現した既存の解釈結果 <sup>*2</sup> を適用
	〇割れ目の長さと透水量係数の準相関モデル【式④】を仮定
	$T = lognorm(\mu, \sigma) \times r^{C} \qquad \exists 4$
透水量係数分布	<i>Τ</i> :透水量係数, μ:対数平均, σ:対数標準偏差 <i>r</i> :割れ目半径, C:定数
	〇水理試験で得られた透水係数分布を再現する透水量係数分布 のパラメータを算定

表 5.2-12 割れ目のパラメータの推定手法

\*1 細谷ほか, 2015、\*2 石橋ほか, 2017
データ セット	卓越方位 セット	極方位/傾斜 [deg.]	Fisher 定数 [-]	長さ (最小割れ目長さ[m], べき指数 [-])	三次元 [m <sup>2</sup> /	;密度 m <sup>3</sup> ]	透水量係数 (対数平均,定数, 対数標準偏差)
	Set 1	74. 2/0. 5	15.6		0.53		
	Set 2	5.3/0.9	12.4	0 0 0 4*1	0. 58	1 2/	_10 0 4 0 1 0
ונע_מות	Set 3	313.8/3.8	17.3	Z. U, 3. 4	0.17	1.34	-10.0, 4.0, 1.0
	Set 4	48.2/83.2	7.5		0.06		
	Set 1	248.0/9.1	29.1		1.5		
	Set 2	152. 2/3. 6	23.5	0 0 0 4*1	0.16	1 0 2	_11 0 2 0 2 0
	Set 3	16.0/3.4	35.8	2.0, 3.4	0.12	1.02	-11.0, 5.0, 2.0
	Set 4	103.8/78.0	3. 2		0.04		
	Set 1	22.9/2.2	18.5	2.0, 3.1 <sup>*2</sup>	0. 43 <sup>*2</sup>		
	Set 2	330. 6/0. 4	17.8	2.0, 3.4 <sup>*2</sup>	0. 13 <sup>*2</sup>	0 60	10 0 2 0 2 0
טרוע_שטט	Set 3	260.7/3.8	15.3	2.0, 4.7 <sup>*2</sup>	0. 05*2	0.09	-10.0, 2.0, 2.0
	Set 4	30.7/59.7	12.1	2.0, 3.3 <sup>*2</sup>	0. 08*2		

表 5.2-13 割れ目のパラメータの推定結果

\*1 細谷ほか, 2015、\*2 石橋ほか, 2017



<u>Thiemの平衡式</u>

$$T = \frac{Q \ln(R/r_w)}{2\pi \Delta h} \qquad K = T/L$$

- T:透水量係数 (m<sup>2</sup>/s) Q:流量 (m<sup>3</sup>/s) R:影響半径 (m) r<sub>w</sub>:ボーリング孔半径 (m) Δh:水位低下量 (m)
- *K*:透水係数 (m/s)
- L: 試験区間長 (m)

# 【実施手順】

- ① 変数を設定しHydroDFNモデルを構築(100 リアライゼーション)
- ・解析領域:100mブロック
- 注水区間:10m
- ・外側境界条件:固定水頭(Om)
- ·注水区間境界条件:固定水頭(1m)
- ② 定常解析(100リアライゼーション)を実施して、注水区間の流量を算出
- ③ 解析で算出された流量からThiemの平衡式 を用いて岩盤の透水係数を算出
- ④ 透水係数分布の実測値と解析値を比較
- ⑤ 変数の組み合わせを変更して①~④を繰り返し実施
- ⑥ 実測値の透水係数分布から求めた回帰曲 線(対数正規分布)に対する二乗平均平 方根誤差(RMSE)が最小となる変数の組 み合わせを抽出

図 5.2-23 HydroDFN モデルを用いた透水量係数分布の推定方法



図 5.2-24 割れ目の透水量係数分布のパラメータの推定結果 (DFN\_DS1)



図 5.2-25 割れ目の透水量係数分布のパラメータの推定結果 (DFN\_DS2)



図 5.2-26 割れ目の透水量係数分布のパラメータの推定結果 (DFN\_DS3)

# 3) DFN モデルの特徴の分析

図 5.2・27~図 5.2・29 に、各データセットに基づき推定した割れ目のパラメータを用いて構築 した HydroDFN モデルの1リアライゼーションの結果を示す。データセット毎の HydroDFN モデルを比較すると、他のデータセットに比べて DFN\_DS3 の割れ目本数が少なく、表 5.2・13 に示した割れ目の三次元密度の違いが可視化されている。また、DFN\_DS1 における割れ目の透 水量係数の設定パラメータによって、他のデータセットよりも割れ目の大きさと透水量係数の相 関性が高くばらつきが小さいことが確認できる。



(a)モデル鳥観図

(b)モデル化した割れ目の透水量係数と大きさの関係





図 5.2-28 構築した HydroDFN モデル (DFN\_DS2:1 リアライゼーション)



図 5.2-29 構築した HydroDFN モデル (DFN\_DS3:1 リアライゼーション)

各データセットに基づき構築した HydroDFN モデル内に 18MI65 号孔を想定したボーリング 孔をモデル化し、ボーリング孔沿いの割れ目の統計量を算定した。ボーリング孔は、方位 N10W、長さ 60m の線オブジェクトとしてモデル中央部に設定した。なお、統計量は 20 リア ライゼーションの HydroDFN モデルに基づき算定した。図 5.2-30 および図 5.2-31 に、ボーリ ング孔沿いの割れ目の方位分布と密度分布を示す。各データセットの統計量と 18MI65 号孔の 実測値(BTV 検層結果に基づく開口・明瞭割れ目)を比較すると、割れ目の方位分布および密 度分布ともに、モデル化対象領域内の調査データを用いて構築した DFN\_DS2 および DFN\_DS3 が実測値と調和的であり、モデルの信頼性が高い。このことから、坑道スケールにお ける岩盤の不均質性の統計分布の再現性を高めるためには、評価対象領域内で取得した情報を用いることが重要である。

図 5.2-32 に、ボーリング孔沿いの割れ目の透水量係数分布を示す。HydroDFN モデルにおけ る割れ目の透水量係数は、数値シミュレーションで線オブジェクトと交差する割れ目の比湧水量 を算出し、図 5.2-23 に示した Thiem の平衡式で求めた。また、18MI65 号孔の水理試験で得ら れた透水量係数をその試験区間の開口・明瞭割れ目の本数で除して算出した割れ目の透水量係数 を実測値としてプロットした。割れ目の方位分布や密度分布と同様に、DFN\_DS1 に比べて DFN\_DS2 および DFN\_DS3 のほうが実測値に近い分布を示すものの、全てのデータセットに おいて全体的に実測値よりも高い透水性をもつ割れ目が多い傾向にある。図 5.2-24~図 5.2-26 に示す通り、岩盤の透水係数分布は概ね再現できているものの、個々の割れ目の透水量係数分布 の再現は不十分であり、表 5.2-13 に示した割れ目の透水量係数のパラメータの見直しが必要と 考えられる。

3つのデータセットに基づき構築した HydroDFN モデルの分析を実施した結果、今後の検討 課題として割れ目のパラメータの見直しの必要性が確認できた。一方、本検討を通じて坑道スケ ールの DFN モデルの構築から信頼性確認までの一連の手順や考え方などモデル化手法の高度化 に資する知見を得ることができた。また、本事業で取得した岩盤の透水係数や割れ目の透水量係 数のデータはモデル化手法の高度化検討に有効に活用できると考えられる。今後は、DFN モデ ル構築に必要となる割れ目のパラメータを見直すとともに、構築した DFN モデルから算定した 各統計量とボーリング調査および坑道調査結果との比較を通じてモデルの信頼性確認を進める必 要がある。



図 5.2-30 ボーリング孔沿いの割れ目の方位分布の比較



図 5.2-31 ボーリング孔沿いの割れ目の密度分布の比較



図 5.2-32 ボーリング孔沿いの割れ目の透水量係数分布の比較

# 5.2.4 まとめ

平成 31 年度事業においては、平成 30 年度事業で瑞浪超深地層研究所の深度 500m に位置す る冠水坑道周辺岩盤を対象として掘削したボーリング孔(18MI65 号孔)で各種検層と水理試験 を実施した。調査の結果、水みちの有無に依存しない岩盤の透水係数や割れ目の透水量係数のデ ータを取得するとともに、既存の地下水圧観測孔で水理試験に伴う水圧応答を観測し、坑道周辺 岩盤中の水理学的な連続性に関するデータを取得することができた。冠水坑道周辺岩盤の透水係 数は、主要な水みちの有無で1~2オーダー程度異なることが示唆された。

原位置で取得した調査データを用いて、広域スケールの地下水流動モデルの設定パラメータの 妥当性確認および坑道スケールにおける岩盤の透水不均質性の統計分布のモデル化方法の高度化 に資するためのデータ分析やモデル化・解析を実施した。その結果、既往研究では岩盤の水理特 性が実際より高く設定されている可能性が示され、広域スケールの地下水流動モデルの更新を行 う上で有益な情報が取得できた。また、調査データの種類や量が異なる複数のデータセットを用 いて構築した DFN モデルを比較することで、評価対象領域内で取得した情報の重要性や割れ目 のパラメータの見直しの必要性が確認できた。本検討を通じて、坑道スケールの DFN モデルの 構築から信頼性確認までの一連の手順や考え方などモデル化手法の高度化に資する知見を得るこ とができた。

今後の課題としては、冠水坑道周辺岩盤を事例として既往の調査研究および本事業で得られた 調査データや知見を活用した坑道スケールの地下水流動モデルの構築手法の高度化を図る必要が ある。さらに、坑道スケールで評価した岩盤の水理学的な不均質性を広域スケールの地下水流動 モデルに反映するための水理パラメータの設定手法を整備するための検討を行う必要がある。 参考文献

- Dershowitz, W., Rock Joint Systems, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA., 987p, 1985.
- Enachescu C. Freig B. and Wozniewicz J., A New Visual Synthesis Tool for Transient Test Data ,Proc. NGWA Conference, Portland Maine , pp.173-184, 2004.
- Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Goto, K., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M., Cross-checking groundwater age by <sup>4</sup>He and <sup>14</sup>C dating in a granite, Tono area, central Japan, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.192, pp.166-185, 2016.
- 細谷真一,鈴木一成,石橋正祐紀,澤田 淳,渥美博行,岩野圭太,深度 300m と 500m における 割れ目の分布特性の違いが地下水流動特性に与える影響に関する研究(その2)―割れ目の分 布特性の比較―,土木学会第70回年次学術講演会論文集,Ⅲ-181, pp.361-362, 2015.
- 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 窪島光志, 松岡稔幸, 深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構 造モデルの構築-第2 段階における Shaft460 から Shaft500 地質構造モデルへの更新-, JAEA-Research 2013-019, 31p, 2013.
- Ishibashi, M., Yoshida, H., Sasao, E. and Yuguchi, T., Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: an example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan. Engineering Geology, Vol.208, pp.114-127, 2016.
- 石橋正祐紀,澤田 淳,田中達也,尾上博則,地下坑道調査結果に基づく亀裂ネットワークモデル の構築,日本応用地質学会平成29年度研究発表会講演論文集,pp.65-66,2017.
- 糸魚川淳二,瑞浪地域の地質,瑞浪市化石博物館専報,第1号, pp.1-50, 1980.
- 核燃料サイクル開発機構,地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 2 つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階(第1段階)における地質環境情報に基づく検討-, JNC-TN1400 2005-021, 148p, 2005.
- 川本康司,村上裕晃,石橋正祐紀,笹尾英嗣,渡辺和彦,見掛信一郎,池田幸喜,超深地層研究 所計画,瑞浪超深地層研究所;深度 500m ステージの壁面地質調査データ集,JAEA-Data/Code 2014-014, 27p, 2014.
- 長谷川隆, 川本康司, 山田信人, 大貫賢二, 大森一秋, 竹内竜史, 岩月輝希, 佐藤稔紀, 深度 500m 研究アクセス北坑道におけるボーリング調査報告書(13MI38 号孔~13MI44 号孔), JAEA-Technology 2015-011, 135p, 2015.
- 大石保政,超深地層研究所計画における試錐調査(MIZ-1 号孔), JNC-TJ7440 2005-091, 1833p, 2005.
- 尾上博則,前村庸之,木村仁,菱谷智幸,水野崇,竹内竜史,岩月輝希,超深地層研究所計画 (岩盤の水理に関する調査研究)研究坑道掘削に伴う地下水流動場および地下水水質の変化 を考慮した地下水流動のモデル化・解析(2011年度), JAEA-Research 2014-010, 35p, 2014.
- 尾上博則, 竹内竜史, 超深地層研究所計画における単孔式水理試験結果; 2012 年度-2015 年度, JAEA-Data/Code 2016-012, 46p, 2016.
- 尾上博則,三枝博光,竹内竜史,超深地層研究所計画の研究坑道の掘削を伴う研究段階における 地下水流動のモデル化・解析,土木学会論文集C(地圏工学),Vol.72, No.1, pp.13-26, 2016.
- 日本原子力研究開発機構・電力中央研究所,平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物の地層処分に 関する技術開発事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発),経済産業省資源エネルギー庁, 381p, 2019.

- 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野 崇, 大山卓也, 濱 克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波 毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工, 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報 告書, JAEA-Research 2007-043, 337p, 2007.
- 三枝博光, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田中達也, 鐙 顕正, 橋本秀爾, Bruines, P., 割れ目分布に起因 した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関わ る検討, JAEA-Research 2015-011, 78p, 2015.
- SKB, Bedrock hydrogeology Forsmark, Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark, SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2008.
- 竹内真司, 澤田淳, 竹内竜史, 大丸修二, 戸谷成寿, 透水性の空間的変化に着目した水理試験デー タに基づく水みちの連結性に関する考察, 13th Japan Symposium on Rock Mechanics & 6th Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, 2013.
- 陶土団体研究グループ,断層境界を伴う多数の基礎ブロックからなる内陸盆地-岐阜県多治見市 周辺の東海層群堆積盆地の例-,地球科学, Vol. 53, pp.291-306, 1999.
- 鶴田忠彦,藤田有二,鐙 顕正,彌榮英樹,冨士代秀之,広域地下水流動研究におけるボーリング 調査(DH-15 号孔), JNC-TN7400 2005-025, 82p, 2005.
- 露口 耕治, 黒岩 弘, 川本 康司, 山田 信人, 大貫 賢二, 岩月 輝希, 竹内 竜史, 尾方 伸久,
   須藤 正大, 見掛 信一郎, 深度 500m 研究アクセス北坑道における先行ボーリング調査報告
   書(12MI27 号孔, 12MI33 号孔), JAEA-Technology 2013-044, 89p, 2014.

# 6. まとめ

# 6.1 内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化

# 6.1.1 地下水流動・物質移行解析技術の高度化

瑞浪地域を対象に全水頭および 4He 年代を用いたモデルの校正と検証を実施した。なお、校正 では逆解析を行い、校正の効果を確認するために、透水係数の推定誤差を計算した。

全水頭による透水係数の校正では、校正された透水係数の値が使用するデータで異なり、推定 誤差も1桁以上であった。つまり、全水頭ではモデルの校正が精度よくできなかった。これは、 全水頭の実測値がほぼボーリング孔の標高で決まっており、透水係数に対して感度が小さいため であると考えられる。4He年代による透水係数の校正では、データによらず同等の透水係数に校 正でき、校正も実測値に近かった。特に、花崗岩では推定誤差は0.2程度(対数紙上)であった。 これは、4He年代が地下水モデルの校正・検証に有効であることを示していると考えられる。

地下水年代測定結果がモデルの校正・検証に有効であることが確認できたため、今後 <sup>4</sup>He 年代 だけでなく <sup>14</sup>C 年代なども用いるとともに、これらを組み合わせた校正・検証を実施していく予 定である。

### 6.1.2 地下水年代測定技術の高度化

新しい地下水年代評価方法として、<sup>81</sup>Kr・<sup>129</sup>I について検討し、それぞれを用いて立坑の地下 水における年代測定と立坑における若い地下水の混合率評価を試みた。<sup>81</sup>Kr による年代測定では 立坑内の地下水の年代が2±1万年程度と評価され、<sup>14</sup>Cを用いた年代評価値と近い値を示した。 <sup>129</sup>I については、立坑内の地下水において<sup>3</sup>H 濃度との相関性が高く、若い地下水の流入指標とし て有用である可能性を示すことができた。

既往の技術の精度を高めるための技術開発として、①サンプリング方法が<sup>14</sup>Cの値に与える影響評価、②希ガス温度計における新たな誤差評価方法の検討、③希ガス分析用パッシブサンプラーの開発、を実施した。これらの検討により、それぞれ、採水時の大気汚染の影響、涵養温度推定の妥当性、脱ガスしたサンプルの採水方法の高度化を図っていくことができると考えられる。

今後、これらの地下水年代測定技術の測定・前処理方法を高度化し、適用性の向上を図るとと ともに、広域の地下水調査に適用し、種々の方法の相互比較から、その有効性を確認していく予 定である。

# 6.2 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度 化

# 6.2.1 地下深部の低流動領域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築

低流動域の空間分布を概要調査で効率的に把握するための方法として、ボーリング調査と物理 探査を組み合わせた手法を対象に、その適用性や課題について幌延の既存データを用いた検討・ 整理を行った。幌延深地層研究計画における地上からの調査段階(第1段階)で実施された調査 内容をもとに、本事業でも同様な手法・手順に基づき、再現性の確認や第1段階で示されていた 幾つかの課題について取り組んだ。本事業では、地下深部の低流動域を把握するにあたり、化石 海水を指標とし、その三次元分布を評価する方法に基づき実施した。地下での化石海水分布の評 価にあたっては、第1段階で検討された塩濃度分布の評価に加え、酸素・水素同位体比の分布も 加味し、検討する手順を提示し、それに基づき、化石海水の三次元分布の推定を行った。化石海 水の分布域は場所により異なるものの、別途実施した広域の地下水流動解析結果と照らし合わせ てみると、例えば、現在の地形・地質モデルでの推定では、動水勾配として 10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>、移行時間 として 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>年に概ね相当した。この結果は一例ではあるものの、化石海水の分布域は、低動 水勾配・低流動性の場であることを示唆した。今後は、地上からの限られた調査で得られたデー タをもとに、調査量の少ない領域を対象に低流動域の空間分布を推定した場合、推定結果はどの 程度の確からしさを有しているのか、推定方法の適切性を評価するための検討も必要である。

また、上述した様な低流動域での物質輸送が拡散であるかどうかを流入している降水の年代に 基づき調べるために、<sup>81</sup>Krによる年代測定を実施した。拡散場の検討については、既存の SAB02 のボーリングコアを用いて、Cl をリーチング、 $\delta D \cdot \delta^{18}$ O を蒸気法でデータを再取得した。こ の結果、Cl と  $\delta D$  は単純な混合でなく拡散の影響を受けていると考えられた。このため、褶曲軸 周辺においても、他地点と同様に拡散による輸送の影響を受けていると考えられた。今後、拡散 による物質輸送のシナリオについて、地史との整合性も含めて検討していく予定である。さらに、 幌延立坑の深度 140 m と 250 m のボーリング孔からガスを採取して <sup>81</sup>Kr を計測した。この結 果、降水の <sup>81</sup>Kr 年代は 35 万年および 50 万年前の結果が得られた。このため、化石海水に混合 している降水も十分に古いことが確認できた。今後、ガスの分離・精製方法を検討するとともに、 複数の地点に <sup>81</sup>Kr 年代を適用し、これらの年代の妥当性と降水の浸入形態を明らかにする予定 である。

### 6.2.2 地下深部の低流動領域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備

亀裂の発達した地層である稚内層を対象に、透水不均質性のスケール依存に関わる解析的検討、 亀裂とマトリクスの二重空隙を考慮した場合のダムケラー数による移流・拡散の影響度合いに係 る検討および広域・施設スケールでの地下水流動解析に基づく地下水移行時間の三次元分布の推 定に関わる解析的検討を実施した。透水不均質性のスケール依存に関しては、亀裂性媒体の特徴 を有する稚内層浅部を対象に、坑道スケールでの亀裂ネットワークモデルによる水理解析により、 モデルサイズと等価透水係数のバラつきの大小の関係を整理した。その結果、概ね 200m を超え るサイズでは、等価透水係数のバラつきが小さくなり、一定の値に収束するような傾向が認めら れた。このことから、稚内層浅部を対象とした広域スケールでの水理解析では、透水不均質性の 影響は小さく、多孔質媒体的な取扱いも可能であることが示唆された。ダムケラー数による移流・ 拡散の影響度合いに係る検討では、稚内層浅部を対象とした場合、亀裂内での移流及び亀裂表面 からのマトリクス拡散が共に影響することが示された。今後は、別途実施している塩濃度の三次 元分布評価におけるマトリクス拡散による影響の反映方法の検討が必要である。

広域スケールを対象とした地下水流動解析による移行時間の三次元分布の推定では、地形の発 達(地形・地質モデルの変化)、気候の変化(海水準および涵養量の変化)および断層と地層の透 水性に関係に着目し、これらのパラメータの違いによる動水勾配や地下水の移行時間分布への影 響を感度解析的に検討した。検討の結果、地形や気候の変化に伴い、広域において変化が推察さ れ、汀線の位置が内陸側に移動すると動水勾配が低下・移行時間が増加し、汀線の位置が海域側 に移動すると動水勾配が増加・移行時間が減少した。一方、断層の透水性の変化に伴う影響は、 限定的であり、断層から最大1km程度の範囲に留まる可能性が示唆された。今後は、「地下深部 の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築」を通じて推定された化石 海水の三次元分布に関わる調査結果や天水と化石海水の混合域における年代測定結果との比較を 行いつつ、広域地下水流動のモデル化・解析手法の改良を図り、低流動域の三次元分布の推定を 解析側から補完していくことが必要である。

また、平成 30 年度に実施した広域スケールでの天水浸透影響に係る感度解析の結果を踏まえ つつ、施設スケールを対象に解析の初期条件等の見直しを図った。塩濃度に関しては、化石海水 の水質形成機構を踏まえ、解析初期の塩濃度分布を見直した。水圧に関しては、初期圧力分布を 静水圧の場合に加え、異常高圧を想定した条件も設定し、解析を行った。これら初期条件の見直 しや異常高圧の仮定を加味することで、解析により推定された塩濃度分布とボーリング調査で得 られた観測結果との整合に改善が見られた。今後も引き続き、古水理地質学的情報の整理に基づ き、必要に応じて初期・境界条件を見直し、解析結果への影響を把握することが重要である。

### 6.2.3 概要調査における調査・モデル化・解析手法の提案

上述した「地下深部の低流動域の分布を概要調査で効率的に把握するための方法論の構築」及 び「地下深部の低流動域を対象とした広域地下水流動のモデル化・解析手法の整備」の2つの実 施項目における成果に基づき、地上からの複数の調査方法を統合した手法による低流動域の評価 手法に係る現状と課題、調査による低流動域の三次元分布の推定を補完する上での地下水流動解 析の適用に関わる現状と課題について、各々、整理した。

# 6.3 水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化

### 6.3.1 水みちのネットワークによる水理・物質移動特性の調査・評価技術の高度化

わが国に特徴的な高割れ目密度の岩盤における水みちの水理特性や物質移動特性を調査・評価 する技術の高度化を目指して、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度 300 m ボー リング横坑の東側に試験孔(18MI63 号孔、18MI64 号孔、19MI66 号孔)を掘削し、地質地下水 調査を実施した。ボーリング横坑東側の割れ目分布は、NW 方向、NE 方向の高傾斜割れ目と水 平割れ目が卓越しており、換気立坑側に近い18MI64 号孔では割れ目に充填鉱物が多く存在した。 ボーリング横坑東側での水みち割れ目の特徴として、岩石コアの割れ目面のかみ合わせが悪く、 開口部が晶洞となっていること、粘土鉱物などの割れ目充填鉱物が少ないこと、水みち割れ目で ある水平割れ目が一定数存在した点が挙げられた。孔間の水圧応答試験では、多方向へ分散した 結果を示し、18MI64 号孔側への応答性は小さく現れた。以上のことより、ボーリング横坑東側 の水理地質場は、ネットワーク状に広がる割れ目の中で充填鉱物をほとんど介在しない割れ目を 水みちとし、それには高傾斜の割れ目だけでなく水平割れ目が大きく寄与していると考えられた。 また、18MI64 号孔側への応答性が悪い点から、18MI63 号孔、19MI66 号孔と 18MI64 号孔していることが考えられ、弾性波トモグラフィ探査による速度が異なる ゾーンからも、そのことが示唆された。

続いて、水みち内のチャンネリングやマトリクス部の不均質性を考慮した微視的な物質移動モ デルを構築することを目的とした各種室内試験を実施した。レジン注入による水みち割れ目の可 視化・分析においては、NW系の場合レジンは割れ目面上にほぼ一様に分布し、NE系および水 平な割れ目ではレジンはチャネリング状の分布となっていた。これは NW系の水みち割れ目が NE系や水平な割れ目に比べ割れ目内の間隙率が高いことを示唆しており、坑道西側の岩盤の主 な水みちが NW系であることと符合する。水みち割れ目周辺のマトリクス試料を用いて割れ目面 からの距離に応じた拡散試験を行ったところ、割れ目面に近いほど拡散係数が大きい傾向が認め られた。割れ目面に近いほど絹雲母や緑泥石などの2次鉱物の含有量が多いことから、拡散係数 は2次鉱物の量と関連がある可能性がある。花崗岩の岩石ブロックを用いた模擬割れ目に対する 室内トレーサー試験では、試験結果に対して数値解析によりマトリクスの収着分配係数を同定す ることができた。同定値は、粉体試料によるバッチ試験から得られた収着分配係数よりもやや小 さく、この差異はブロック試料と粉体試料の比表面積の差が影響しているものと推定される。

さらに、水みち調査の試験場となっている深度 300 m ボーリング横坑周辺の地下水流動状況、 物質移行特性を把握することを目的として、地下水流動・トレーサー移行解析を実施した。トレ ーサー試験開始前には、地下水はボーリング横坑東側では南東から北西に向かって流れ、坑道に 近づくにつれ坑道壁面に直交する方向に向きを変えていると推定された。一方、トレーサー試験 中には、揚水の影響により換気立坑へ向かっていた地下水の流れが広範囲にわたり揚水点の方向 に向きを変えていると推定された。トレーサー移行解析では、揚水孔濃度の実測値との比較によ り推定された岩盤の間隙率は、ボアホール TV 検層により得られた割れ目間隙率と整合的であっ た。一方、解析により得られた縦分散長の推定値は孔間距離の 20~33%と長く、トレーサーが連 続する複数の割れ目面に沿って移行するために実際の移行距離が孔間の直線距離よりも長いこと、 あるいはトレーサーが多数通りの移行経路を通って揚水区間に到達していることが示唆された。

今後は、地下坑道内および室内で取得したデータを基に数値解析による検討を行い、広域スケ ールでの地下水流動・物質移行の最適な解析条件の設定に繋げていくことが必要となる。

# 6.3.2 亀裂性岩盤の透水不均質性の評価

平成 31 年度事業では、瑞浪超深地層研究所の深度 500m における冠水坑道周辺岩盤において、 水みちの有無に依存しない岩盤の透水係数や割れ目の透水量係数のデータの取得、坑道周辺岩盤 中の水理学的な連続性に関するデータを取得した。平成 30 年度および平成 31 年度のボーリング 調査を実施することで、広域スケールの地下水流動モデルの設定パラメータの妥当性確認および 坑道スケールにおける岩盤の透水不均質性の統計分布のモデル化に活用できる有益な情報が得ら れた。上記の調査データを用いた予察的な検討として、複数のデータセットを用いた DFN モデ ルの構築や解析を実施し、調査データの種類や量の違いがモデル化された割れ目の分布特性や連 結性、岩盤の水理特性に及ぼす影響を把握した。

今後の課題としては、冠水坑道周辺岩盤を事例として既往の調査研究および本事業で得られた 調査データや知見を活用して坑道スケールの地下水流動モデルの構築手法の高度化を図る必要が ある。さらに、坑道スケールで評価した岩盤の水理学的な不均質性を広域スケールの地下水流動 モデルに反映するための水理パラメータの設定手法を整備するための検討を行う必要がある。

# 平成 31 年度

# 高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業

一岩盤中地下水流動評価技術高度化開発-

# 報告書

# 付録集

付録 2.5-1 瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査 に関する研修 実施概要 付録 5.1-1 19MI66 ボーリングコア写真

- 付録 5.1-2 19MI66 コア観察記録シート
- 付録 5.1-3 19MI66 水理試験データシート
- 付録 5.1-4 19MI66 孔壁面全周画像(BIPS)
- 付録 5.1-5 19MI66 割れ目詳細画像(HR-BTV)
- 付録 5.1-6 拡散試験試料集

付録 2.5-1

瑞浪超深地層研究所における地質環境特性 調査に関する研修 実施概要

# 瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査 に関する研修

# 講義資料



2019年10月16日(水)~18日(金)

日本原子力学会バックエンド部会 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 電力中央研究所

# 瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査に関する研修 バックエンド部会主催

# プログラム

開催日 : 2019年10月16日(水)~18日(金)

開催場所:日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市明世町山野内1番地の 64)

	睛	$7 \square M \ni \Delta$	講師/担当(敬称略)
ф <u>ж</u>	# ×	港販ポ側ロータリー前集合 ≮参加者が集合次第、バスで瑞浪超深地層研究所に移動 【JR中央本線快速(名古屋駅8:06発→瑞浪駅8:54着)】	JAEA 尾上博則
9:15 Ħ	# <del>\</del>	耑浪地科学研究館1F セミナールーム 集合	
9:15~9:20		朝催挟拶	パックエンド部会 (部会長挨拶代読:藤鳥敦)
9:20~9:30	IN IN	オリエンテーション (研修の趣旨、プログラム説明)	JAEA 濱克宏
9:30~9:35	.11.	参加者自己紹介	JAEA 濱克宏
9:35∼10:00 <sup>≸</sup>		【講義1】瑞浪超深地層研究所について 発表時間:20分、質疑応答:5分 現要:MIUの概況説明(地質概要、施設概要、目標と進め 5、研究成果などの紹介)	JAEA 濱克宏
10:00~10:40 後 発	- 谷务	【講義2】地層処分事業における地質環境調査の果たすべき た割 法時間:35分、質疑応答:5分	NUMO 鈴木覚
$10:40 \sim 10:50$		休憩	
10:50~11:25 多		【講義3】地下水調査・地下水年代評価技術について ≷表時間:30分、質疑応答:5分 要要:地下水の流れや年代を調査・評価する手法の紹介	CRIEPI 中田弘太郎
11:25~12:00		【講義4】瑞浪超深地層研究所における地質環境調査・評価 の事例 発表時間:30分、質疑応答:5分 既要:MIU計画における地質環境調査・評価による繰り返 レアプローチの実例紹介)	JAEA 尾上博则
12.00~13.00	-	居食	

日程	時間	プログラム	講師/担当(敬称略)
		入坑にあたっての諸注意・連絡事項、班割	JAEA 渡辺勇輔
		1四下、0分	案内者:JAEA 尾上博則
	$13:00 \sim 13:10$	Tが・O合	随行者:JAEA 小橋昭夫
		0日 ・ ユ令	案内者:CRIEPI 田中靖治
		222・1.4	随行者:JAEA 渡辺勇輔
	$13:10 \sim 13:15$	瑞浪超深地層研究所管理棟1F 概況説明室に移動	JAEA 渡辺勇輔
	$13:10 \sim 13:30$	更衣	案内者、随行者で対応
	$13:30\sim$	入坑(13:30)1班→(13:40)2班	
		【実習1:1班】 コア翻要実習、水理試驗現場、坑道內見学(深度500mス	呈出田舗 AALEA 書
	13:40~14 25		現場説明:JAEA 尾上博則
		※18MI65号孔のコアを使って、コア観察の目的やポイント、実際の産状などについて説明(資料準備)	坑道内説明:JAEA 尾上博則
		【実習2:2班】 トレーサー試験現場、坑道内見学(深度300mステージ)	現場説明:CRIEPI 田中靖治
10/16 (⁊k)	13:50~14:35	説明内容:坊道内でのボーリング孔を用いた水理・物質移 行特性調査(資料準備)	坑道内説明:JAEA 渡辺勇輔
≥	$14\ 25 \sim 14:35$	1班移動:深度500mステージ→深度300mステージ	
	$14:35 \sim 14:45$	2班移動:深度300mステージ→深度500mステージ	
	14:35~15 20	【実習2:1班】 トレーサー試験現場、坑道内見学(深度300mステージ) 説明内容:坑道内でのボーリング孔を用いた水理・物質移 行特性調査(資料準備)	現場說明:CRIEPI 田中靖治 坑道内說明:JAEA 渡辺勇輔
		【実習1:2班】 コア観察実習、水理試験現場、坑道内見学(深度500m ス	コア観察:JAEA 鶴田忠彦
	$14:45 \sim 15:30$	$\overline{r} - \dot{z}$	現場説明:JAEA 尾上博則
		※18Ml65号孔のコアを使って、コア観察の目的やボイン ト、実際の産状などについて説明(資料準備)	坑道内説明:JAEA 尾上博則
	$15:20\sim$	出坑(1520)1班→(15:30)2班	
	$15:30 \sim 16:00$	更衣および質疑応答	
	16 20~16:30	バスで瑞浪駅に移動 ※瑞浪駅に到着後、解散 【JR中央本線快速(瑞浪駅I6:47発→名古屋駅17:33着)】	

日程	誯绐	プログラム	講師/担当(敬称略)
	00:6	瑞説駅北側ロータリー前集合 ※参加者が集合次第、バスで瑞浪超深地層研究所に移動 【JR中央本線快速(名古屋駅8:06発→瑞浪駅8:54着)】	JAEA 尾上博則
	9:15	瑞浪地科学研究館1F セミナールーム 集合	
	$9:15 \sim 10:00$	【講義5】ボーリング調査の概要について 発表時間:40分、質疑応答:5分 概要:ボーリング調査の計画立案から調査結果の整理まで の一連の流れの紹介	JAEA 松岡稔幸
	$10:00 \sim 10:15$	休憩	
	10:15~12:00	【実習3】 実データを用いた岩盤の地質環境特性の評価 ・グループ演習(3-4名/グループ) ・パソコン使用 ・使用データ:ボーリング調査結果(コア観察、BTV観 察、各種検層および間辺岩盤内水圧応答など)	JAEA 松岡稔幸 JAEA 尾上博則
10/17	$12:00 \sim 13:00$	昼食	
¥	13:00~13:45	【講義6】原位置地下水調査 ①地下水の採水調査 発表時間:40分、質疑応答:5分 概要:ボーリング孔を用いた地下水の採水調査の内容や留 意点、品質管理、調査事例の紹介	JAEA 渡辺勇輔
	13:45~14:30	【講義7】原位置地下水調査 ②水理調査 発表時間:40分、質疑応答:5分 概要:ボーリング孔を用いた水理調査手法(検層や水理試 験)と水理地質構造の推定方法についての紹介	JAEA 竹内竜史
	$14:30 \sim 14:45$	休憩	
	14:45~16:00	【実習4】 水理試験結果の解析の演習 ・グループ演習(4名/グループ) ・パソコン使用 ・パソコン使用	JAEA 竹内竜史
	$16:20 \sim 16:30$	バスで瑞浪駅に移動 ※瑞浪駅に到着後、解散 【JR中央本線快速(瑞浪駅16:47発→名古屋駅17:38着)】	

日程	睛朝	プログラム	講師/担当(敬称略)
	00:6	湍浪駅北側ロータリー前集合 ※参加者が集合次第、バスで瑞浪超深地層研究所に移動 【JR中央本線快速(名古屋駅8:06発→瑞浪駅8:54着)】	JAEA 尾上博則
_	9:15	瑞浪地科学研究館1F セミナールーム 集合	
		【実習5】 <i>mites</i> tanのキャッチ	
		th惨結果のまとめ ・地層処分の概念	
_	0.16-17.00	・地層処分事業における地質環境調査	山口へ、涼子中
		・ボーリング調査の実施方法	JACA 溴光函
01/01		・水理学的調査の役割や位置づけ	
01 /01		・実習1~4の成果	
(車)		・まとめ	
_	$12:00 \sim 13:00$	昼食	
		【実習6】	IAFA 竣力中
_	$13:00 \sim 15:00$	研修結果報告会	noro 武巧丞 2 6 章
		・グループ発表(30分/グループ、質疑応答5分含む)	<u> 11 (2 ) 1</u>
	$15:00 \sim 15:10$	講評・閉会挨拶	JAEA 濱克宏
_	15:10	集合写真撮影	JAEA 漢克宏 その他
	15 20~15:30	バスで瑞浪駅に移動 ※瑞浪駅に到着後、解散 「ローム本2044-1年(津油町15-17発っを末屋町16-35巻)】	

#決證業地層##Seff config (# # # # = 1 = 1 = 2 = 2 = 1 = 2 = 2 = 2 = 2 = 2	令和元年10月16日 原子力発電環境整備機構 技術部 工学技術G Serzuki@numo.or.jp	#決超業地層研究所における地質環境性調査に置する#修 「講義4」 満義4」 満えれておける 法良超深地層研究所における 地質環境調査・評価の事例	令和元年10月16日 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ 尾上 博則
構造組業地層研究所になける地質環境性調査に関する研修 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	令和元年10月16日 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 演 克宏	#浪趙梁地属邱空所における地質環境推測査に関する#修 「講義3」 地下水調査・地下水年代評価技術について	令和元年10月16日 電力中央研究所 バックエンド研究センター 中田 弘太郎

職務部属最終所における地質機構在調査に図する研修 「講義6」 「「「「「「「「」」」」」 「「「」」」」」 「」」」 「」 「	令和元年10月17日	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ 渡辺 勇輔			
職業地層単設所における地質環境体調査に関する研修 「講義5」 ボーリング調査の概要についく	令和元年10月17日	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 研究計画調整グループ 松岡 稔幸	職過趙深地層研究所における地質環境特性調査に関する研修 (講義7) (講義7) (京位置地下水調査 ②水理調査	令和元年10月17日	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ 竹内 竜史



# バックエンド部会主催 瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査 に関する研修

# 研修生による成果発表資料



















### 実習4: 定流量揚水試験結果の解析







# まとめ(所感)

- ボーリング調査
- コア観察による岩盤区分・岩盤等級の判定には、 エキスパートジャッジが必要であり、知識を有していない者では判定が難しいと感じた。また、判定には複数の業者の観察者による判定を行っており、調査結果の品質を確保するためには、観察結果のマニュアルを整備することが必要。
   地下研は湿度100%・温度25℃程度で蒸し暑く、長時間の観察等の作業を続けた場合、的確な判断を行うことも困難になると感じた。今後、地下研内では空調を管理された部屋を確保するなど



今回の実習では、単純な条件による人為的なデータを使用して解析を実施した。また、線形できれいなデータであったので、結果を導出しやすかった。一方、実際の水理試験から得られる生データには測定誤差が入ってくるため、データの解釈が今回のようにスムーズにいかず、もっとエキスパートジャッジが必要になると思われる。



# 高レベル放射性廃棄物とは

瑞浪超深地層研究所での目標

> 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

深地層における工学技術の基盤の整備

高レベル放射性廃棄物 (ガラス目化件)

D

研修結果のまとめ(B班)

安全評価

シナリオ構築

核種移行解析

モデル構築
データ整備

•

ス

化学特性

















### 実習3の内容





### 掘削孔に影響のあるクラックの分布



まとめ
実習3のまとめ
ボーリング調査のデータをもとに、周辺岩盤の水みちのつながりを考察した
その結果、掘削孔と既存孔の間に水みちとなるクラックを確認した
掘削の進行による水頭の応答が確認できない箇所があった → コアの写真を見て,確認できるクラックのすべてが水みちとなるわけではない
すなわち, コア観察以外にも他の調査方法と組み合わせて地質環境を推定することが重要


















### I係 実習3:18MI65号孔のコア記載、掘削の記録



①:38m付近の名良割れ目からの湧出量が大きく寄与?
②:一帯の亀裂からのじわじわとした地下水の湧出による湧出量の増加?





①ここの傾きをJacob法に 代入して、透水係数を求める。<sub>27</sub>

#### バックエンド部会主催

#### 瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査に関する研修

#### 研修生の感想

- 実データを扱える機会は貴重なので有意義であった。データの解釈についてもう少し深く 取り組みたかった。
- 地下坑道内の現場を確認できたのはよかったが、実際の作業状況(コア抜きなど)を見学できるとよりよかった。
- 事前の学習と現場の経験のリンクが重要と感じた。
- これまで深く考えずに実施していた分析や作業が持つ必要性や意味合いを深く理解するい い機会であった。
- 実データの見方を知るいい機会になった。
- 実習を通じて、現場で取得できるデータには人為的な影響が含まれていることを経験することができた。データ分析のミスリードをしないためには、現場と分析担当のコミュニケーションが重要と感じた。
- 坑道内の環境は想像以上に過酷であることを体験できた。実際の処分事業においては、地下坑道内の労働環境を改善することが課題の1つと思う。

## 参加者リスト

# (実習グループと入坑時の班分け)

実習グループ	名前	所属	入坑時の班分け
		日本原子力研究開発機構 安全研究センター廃棄物安全研究グループ	
Δ <i>/</i> ブル <i></i> プ		原子力発電環境整備機構 技術部技術企画グループ	
		原子力発電環境整備機構 技術部性能評価技術グループ	
		原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ	1班 (7名)
		株式会社安藤・間	
Bグループ			
		及前部リイト評価技術グルーク 原子力発電環境整備機構	
		技術部性能評価技術クルーク 鹿島建設技術研究所 岩盤・地下水グループ	
Cグループ		原子力発電環境整備機構 技術部工学技術グループ	
		原子力発電環境整備機構 技術部性能評価技術グループ	
		公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 地層処分バリアシステム研究開発部	(6名)
Dグループ		原子力発電環境整備機構	
		 京子力発電環境整備機構 技術部技術開発統合グループ	

# (参考) バックエンド部会ホームページ 掲載の募集要項

# バックエンド部会主催「瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査に関する研修」 のお知らせ

近年、原子力分野において人材育成・技術継承が最重要課題の一つであると考えられています。 パックエンド部会としても同様の認識から、実際の現場での作業を経験できるような場として、「瑞浪超深地層研究所における地質環境特性調査に関する研修」を、日本原子力研究開発機構および電力中央研究所と共催することとしました。 この研修では、瑞浪超深地層研究所の研究坑道内において、ボーリングコアの観察や水理試験・トレーサー試験の現場見学、さらに原位置で取得した調査データに基づく解析や解釈などを実施することにより、坑道周辺岩盤の地質環境特性の調査や評価の考え方や方法を体験・取得することができます。本研修は、現場経験がない若手技術者が参加いただける内容となっておりますので、ふるってお申し込みください。

実施日 : 2019 年 10 月 16 日(水)~18 日(金)

主催:日本原子力学会バックエンド部会 共催:日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、電力中央研究所 実施場所:日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、電力中央研究所 (岐阜県瑞浪市明世町山野内 1番地の 64) 対象 :大学生以上対象(原子力学会員でなくても可) 募集数 :最大 16 名(先着順) 参加費用:無料 ※集合場所である瑞浪駅までの交通費と食事代・宿泊代は参加者負担となります。 ※準合場所である瑞浪駅までの交通費と食事代・宿泊代は参加者負担となります。 ※集合場所である瑞浪駅までの交通費と食事代・宿泊代は参加者負担となります。 ※集合時には、昼食をご持参ください。 ※集合時には、昼食をご持参ください。 ※4000着の力や学生の方が参加申し込みされる場合には、国籍や傷害保険について確認 させていただきますので、申し込み時にご連絡ください。

※瑞浪超深地層研究所の研究坑道への入坑にあたっては、ヘルメットやつなぎ服などの安全装備を着用していただきます。また、研究坑道内では高さ 22m のらせん階段の昇降や閉所の通行があります。研究坑道内の環境や入坑の状況について確認したい方は、別途お問い合わせください。

※研究坑道内への入坑の注意事項や手続きの詳細については、参加者確定後にご連絡いたします。

研修プログラム案:バックエンド部会 HP 参照 申込み期間:2019 年 9 月 2 日(月)~9 月 24 日(火) \* 定員に達した時点で終了 問合せ・申込:メールにて下記担当者まで 担 当 :バックエンド部会 吉田幸彦(日本原子力研究開発機構)

×−JL : yoshida. yukihiko@jaea. go. jp

# < 存 器 ご >

2019 年 10 月 19 日 (土) ~20 日 (日) には、2019 年度バックエンド週末基礎講座を開催いたします。同じ場所(日本原子力研究開発機構東濃地科学センター瑞浪超深地層研究所)での見学、講座(多治見市学習館)を予定しております。別途ご案内させていただきますので、あわせてご検討ください。

# 別紙 研修プログラム案

10月16日(水) 時間

備 考	・JR 中央本線快速(名古屋駅	8:06 発→瑞浪駅 8:54 着)		・概況説明室		・概況説明室				・2 班編成(8 名/班)で入坑	・深度 200m ステージ		・深度 300m ステージ			・概況説明室	・16:30 頃に瑞浪駅着	・JR 中央本線快速(瑞浪駅 16:47	発→名古屋駅 17:38 着)
内容	瑞浪駅北側ロータリー前集合	※参加者が集合出来次第、バスで瑞浪超深地	層研究所に移動	開催挨拶/オリエンテーション	【講義】瑞浪超梁地層研究所について	【講義】地層処分事業における地質環境調査	技術の概要	※講義内容は調整中	昼食	坑道入坑にあたっての説明、更衣	【実習】A班:コア観察実習、水理試験現場、	坑道内見学(終了後、B班と交代)	【実習】B班:トレーサー試験現場(現場作業	の進捗状況で変更の可能性あり)、坑道内見	学(終了後、A 班と交代)	更衣および質疑応答	・バスで瑞浪駅に移動	※瑞浪駅に到着後、解散	
時 間	6:00			$9:30 \sim 10:00$		$10:00 \sim 12:00$			$12:00 \sim 13:00$	$13:00 \sim 13:30$	$13:30 \sim 15:30$					$15:30 \sim 15:50$	16:20		

10月17日(木)

い いっぽん いっぽう いっぽう いっぽう いっぽう しょう しょう いっぽう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょ	内 容	備考
9:00	瑞浪駅北側ロータリー前集合	・JR 中央本線快速(名古屋駅
	※参加者が集合出来次第、バスで瑞浪超深地	8:06 発→瑞浪駅 8:54 着)
	層研究所に移動	
$9:30 \sim 10:15$	【講義】ボーリング調査の概要について	・概況説明室
$10:15 \sim 10:30$	半憩	
$10:30 \sim 12:00$	【実習】実データを用いた水みちの特定やそ	・概況説明室
	れらの連続性の評価	・グループ演習
	・使用データ:ボーリング調査結果(コア観	(3~4名/グループ)
	察、BTV 観察、各種検層および周辺岩盤内水	
	圧応答など)	
$12:00 \sim 13:00$	昼食	
$13:00 \sim 14:30$	【講義】原位置地下水調査の概要について	・概況説明室
$14:30 \sim 14:45$	能利	
$14:45 \sim 16:00$	【実習】水理試験結果の解析の演習	・概況説明室
	・使用データ:ボーリング調査結果(水理試	・グループ演習
	験データ)	(3~4名/グループ)
16:20	・バスで瑞浪駅に移動	・16:30頃に瑞浪駅着
	※瑞浪駅に到着後、解散	・JR 中央本線快速(瑞浪駅 16:47
		発→名古屋駅 17:38 着)

10月18日(金)		
時間	内容	備 考
00:6	瑞浪駅北側ロータリー前集合	・JR 中央本線快速(名古屋駅
	※参加者が集合出来次第、バスで瑞浪超深地	8:06 発→瑞浪駅 8:54 着)
	層研究所に移動	
$9:30 \sim 12:00$	【実習】研修結果のまとめ	・概況説明室
	・調査対象領域の地質環境の特徴や重要な構	・グループ演習
	造の解釈	(3~4 名/グループ)
	・ボーリング孔における水理地質学的調査の	
	考之方	
	など	
$12:00 \sim 13:00$	昼食	
$13:00 \sim 15:00$	【実習】研修結果報告会(グループ発表、30	・概況説明室
	分/グループ)	
$15:00 \sim 15:10$	閉会挨拶	
15:20	・バスで瑞浪駅に移動	・15:30頃に瑞浪駅着
	※瑞浪駅に到着後、解散	・JR 中央本線快速 (瑞浪駅 12:47
		発→久古屋駅 16:35 着)

# 付録 5.1-1 19MI66 ボーリングコア写真



19MI66 号孔(0.00~9.00mabh)



19MI66 号孔 (9.00~18.05mabh)



19MI66 号孔(18.05~27.00mabh)



付録 5.1-2 19MI66 コア観察記録シート

	孔	名 19M	66	深	渡	0.	00~3	3.00m	nabh		記	載者	高安	<u>.</u>										開如	台	7/	5	ł	終了 7/5	縮尺 1/10
	深	岩	岩	組	鉱	カー	風	岩	RQ		<u> </u>		1	1	1	1		1	割れ	<u>1目</u>	<u>記</u> 載	<b></b> 載		er						
	度	相	相	織	物  と	ĺ	化	盤		割   れ		は宝川	割	深	傾	界	条	形	断	■岩 ■ <b>由</b> ■	바프	幺日	妇	変質	Į ⊥+	74	汯		充填割れ目   <sub>去</sub>	
0	(mabh) g	与真			<del>〕</del> 粒径	インデックス	の程度	万類	1ア回収率)	目密度 (n/m)		出 引 式 引 目	れ 日 番 号	度(mm)	斜角	<b>血</b> 形状	称(レーク角)	<b>成要因</b>	公分	擥(mm)	單(mm)	<b>補雲母化</b>	<b>秘泥石化</b>	<b>亦鉄鉱化</b>	和土鉱物化	小酸化鉄	格脱	里 (mm)	元填鉱物と量	備考
U	<b>_</b>										049	04	9 0-1	046	75	Wr		D				1	1	1	1	1		<1	コンクリートと接合	0.000~0.046mabh 吹付けコンクリート
10											145	~	0-2	137	65	Wr		D				1	1		1					0.000~2.000mabh 長石類は白色~淡桃色を呈す
20			pe		n 1~3m/m						203		5 0-3 9 0'-1	 208	70 75	Pr Pr		S S				. 1 1	. 1 	1 	1 1	. 1 1		<1 <1		<ul> <li>              2.000~3.000mabh 長石類は白色を呈する             0.000~3.000mabh      </li> </ul>
30			graine		m∕m, Hor									<b>_</b>																絹雲母は白色を呈する
40			um∹fine	ranula	0 1~2						425.	41	2 0 4		60								1							
50			e, međiu	o equig	5m/m, Bi	7 <b>~</b> 9	a	CH.	92	8				442 																※割れ目密度は 花崗岩部のみ対象
60			l granit	ritic t	fd 2~1						543 <		0"-1	576	40	Pf		S				2	1	1	 1	1		1	Ser(1)	
00			alterec :	Porphy	/m, P1/K							65		<b>_</b>																
70	_ · · · · · · · ·		Nęaklý		2∼20m							· · · J · · · · · · · · · · · · · · · ·		••••••••						•••••										
80					Qtz				42+13)					<b>-</b>																
90									4+23+		865 908	86	<sup>6</sup> 0-5 0"-2	864 921	90 45	Pr Pf		D SorT				1	1	1	1	1		<1 <1	Ser(1)	0.864mabhコア採取
100	1. 00												0																	
10													5 0"-3	069	25	Pf		s				2	1	1	2	1		2	Cal(1)	
10											172	/   		<b>_</b>																
20	<b>-</b>		ed		~ 3m/m							····		<b>.</b>						•••••										1.250~1.420mabh コア表面上に赤鉄鋼が の20mm程度の斑状に分布
30			∭n−gräin		Horn: 1-									 (赤鉄鋼	の分布)															· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
40			e, mediu	granul	~3m/m,						<b>-</b>																			
50			granite	to equi	, Bio 1.	7	β	B	96	7		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	0'-2		25	Pf		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				 	1			 		<		
60			l ter ed	yrit:ic	~ 15m/π						520 555 575	54	2 0-6 0-7 4 0"-4	558 558 561	60 40 35	Pr Pf Pf		Š S SorT				1 1 1	1 1 2	2 1 1	2 1 1	1 1 1		1 <1 <1	Hem(1)、粘土(1)	
00			ately a	Porph	/Kfd 2						667	63	1 0"-5	620	35 85	Pf Wr		SorT				1	2	1	1	1		<1		1.697mabhコア採取
70	<b>-</b>		Modera		8m/m, P						693 <u>-</u> / 720 /		0"-6	730	75	Wf		SorT					1	1	 1	1		<1		1.750~2.000mabh コア表面上に赤鉄鋼が w20mm程度の選ばに分布
80					0tz 2~				27)		3		0"-7	845	30	Pf		SorT				1	2	1	1	1		<1		
90									56+13+					(赤鉄鋼	の分布)															
100	2.00										969 	<u>L</u> 95	2 0'-3 0-9	970 982	80 70	Pr Wr		S S				1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	•••••	<1 <1		
10											····• /	<u>/1_04</u>	0"-7 0"-8	023  071	35 35	Pf Pf		S S				1 1	2 2	1 1	1 1	1 1		<1 <1 <1		
10											105 147 148	11	0-10	160	35	Pf		SorT				1	1	1	1	1		<1	Cal(1)	
20	<b>-</b>				1∼2m/m						<b>.</b>																			
30		-	⊢gräine		n, Horn						294 315	34	0-11 0-12 0 0-13	291 329 347	60 40 70	Pf Sr Wr		SorT S S				1 1	1	1 1	1 2	1 1		<1 		2.347mabhコア採取
40			, medium	granula	1 ~2m/i						360 372	35	0 0-14 0"-9	375 410	65 50	Wr Pf		S S				1	1	1	2	1		50 -		2.347~2.410mabh 弱度に風化を受け、溶脱してい る
50	<b>_</b>		granite	tò equi	/m, Bio	7	β	СН	91	9	498	····	0_0_15	522	60	Df		SorT					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		······	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	(al/3)	
60	<u> </u>		ltered {	/ritic ·	2∼22m						515	54	0 0-16 0"-10 0"-11	547 550 557	50 50 50	Pf Pf Pf		S S S				1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1		<1 <1 <1		
00			ite ly al	Porphy	PI/Kfd					 	627 643	67	6 0-17	655	60	Pf		т				1	1	1	1	1		<1		
70		A CONTRACT	Modera		?~~8m/m,	 			+35)	 	759		0"-12 0'-4	724 740	40 40	Pf Pf		S S				1 1	1 2	1	1 1 1	1		<1 <1		
80					Otz 2				16+11+		765 828	79   80	0"-13 5_0"-14 0	787	60 60	PT Pf		5 5				1	2	.1	1	1		5 <1		2.707-2.70711d011 割れ目を砂状に充填 弱度に風化
90						[		1	6+13+	   	850	····											• • • • • • • • • •							
100	3.00								Ē		.																			

	孔	名	19MI	66	深	渡	3.	.00~	6.00n	nabh		記	載者		高安						_			-		開如	8	7/	5	ł	終了 7/5	縮尺 1/10
	深	뉢	븝	岩	組	鉱	カ	風	岩	RC		1			1	r	1		1		割れ	1目	記載	鈛						r		
	度	1	泪	相	織	物	フ	化	盤	Ď	割				割	深	傾	界	条	形	断層	<b>暑岩</b>		-		変質	Ĵ.	-		3	充填割れ目	
	(n	7	F			と歩	イ	の	分		日		柱害	IJ	れ	度	斜	面	線	成	X	幅	幅	絹	緑	赤甡	粘	水	溶	幅	充填	備者
	nat	ļ	Į į			松径	ノデ	程	類		密		状れ	l	目	m	角	形	$\widehat{\nu}$	要	分	(mm	(mm	<del>芸</del>   母	泥石	鈑鉱	山鉱	酸化	肬	imm)		<b>C</b> · 614
	, h					IT.	ック	度		収	皮 (n		ЩЕ	3	番	m)		状	ーク	因			)	化	化	化	物化	鉄			物	
	3 00						クス			判	/m)				号				角								16				C   量	
0	0.00	a la	1 and											019																		3.000~6.000mabh 長石類は白色を呈する
10		1	1										K		0-18	058	45	Pf		SorT				1	1	1	1	1	1	<1		3.000~6.000mabh 絹雲母は淡緑色を呈する
10												121	/			<b>_</b>																
20		and a state				2m/m										<b>_</b>																
						<u>~</u>										<b>_</b>																
30				aine		Hòrn										<b>_</b>																
				g	ar	2m∐m,						358	÷	356	0-19	350	80	Wr		DorT				1	1	1	1	1	1	<1		3.350mabh コア採取
40				meäi	ranu	<u>₹</u>								····																		
				∩itë,	ginbe	m, Bic	7	ß	сц	64	 ∖11		i	••••												• • • • • •						3.550~3.700mabh 赤鉄鋼が斑状に公布
50		A STATE		grar	to	~ 8mi∕.1		<i>P</i>	<u>S</u>				i   	••••	······	 (赤鉄鋼	 の分布)									• • • • • •						/小女到1/2-771/1/2/2111
60		Y		tered	itic	fd 1						579	Ω.L	593	0-20	595	40	Pf		S				2	1		2	1		1		3.600~4.000mabh
00				y al	rphyi	PI/K						587	X.	621 650	0-21	650	40	Pf		S				2	2	1	1	1	1	<1	Ser(1)	絹雲母は淡緑色を呈する
70				atel	<u>е</u>							675	). Miji		0"-15	650	30	Sr		Τ				1	1	1	1	1	1	<1		
		and the second	1	Moder								/04 722				765	35	Pf		S				1	. 2	1	1	1	1	<1		3675~4000m-bb
80		1	2			0tz						770 \ 		785	0-22	773	45	Pf  Wr		S ç				2	2	1 1	1	1	1	<1 1	Cal(3), Ser(1)	5.0757~4.000111abl1 風化を受けやや破砕(CL級)
										3+12		856	. <u>(?</u> -		0'-6	.808		Wr							1	1	2	1	1	<u>i</u>	Cal(3)	
90			1							9+23					0-23	883	50			S				3	1	1	2	1	1	1	Cal(3)	3.693~4.000mabh
			1									963		····		953	40	Pf		S				2	2	1	1	1	1	<1	Chl(1)、Ser(1)	「絹雲母の濃集」
100	4.00		13									018		000	0-24		40 40	Pf Pf		<u>S</u>				2	<u>2</u> 1	1 1	1	1	1 1	<u>&lt;1</u> 1	Chl(1), Cal(1) Cal(2) Cal(1), Sor(3)	
10			2								• • • • • • • •	<u>020</u> .:		015	0-10					<u>&gt;</u>						]			]	!	. Cal(1)/ Sel(3)	
10		A	1										·····		0-25	131	40	Pf		SorT				2	1	1	1	1	1	<1	Cal(1)	
20		d'	1									170																				
20						2m/m									0-26	241	40	Pf		S				1	. 1	1	2	1	1	<1	Cal(1)	
30			X	ined		····						265		290	0-27	265	45	Pf		S				1	1	1	1	1	1	<1		4.245 J.J
			X	-gra	a	n, Hor						318		308	0-28	315	45	Pf 		S 				1 	1	1	1	1	1 	<1		4.315mabh 山 / 採取
40					sr anu	~ 2m/n								370																		
		1.		te; me	equi g	0.1~						455		472	0-29	425	45	Pf		S				1	1	1	1	1		<1		
50		4		srani.		/m, Bi	7	<u>a</u>	<u>CM</u>		12			./••••	0.20		40			 SorT							·····				Col/1)	
				red: g	ritio	~ 22m,								••••	0-30		40	гі 														
60		No. of Street	-	alte	r phy	fd 2.							····i···	••••																		
70				akly	<u></u>	PI/K										<b>_</b>																
70		and a		We		1m/m;																										
80			30			2						760	) P I ¦			<b>_</b>																
		4				0tz				<del></del>		805																				
90										: 1+:33		902		896	0-31	854	40	Pt 		Sor1				1	1	1	1	1		<1		
		X	1									965			0"-17	950	45	Pf		Sort				1 1 	2	1 	1	1 	1	<1		
100	5.00	100	1.00										$\mathbf{X}$		ປີ-18 	997	30	t						1	1		1	1	1	<		
			and and					·····				079 080 1	¦、	<mark>.</mark>	0'-8	073	60	Pf		SorT				1	1	1	2	1	1	<1	Cal(1)	
10			X										$\langle \cdot \rangle$	103		<b> </b>													1			
20						m/		<b>.</b>		<b>[</b>				2	0-32 0"-19	156 167	40 40	Pf Pf		S S				1	3	1	1	1	1	<1	Chl(1)	
20		22				~2m							1			[																
30			and a second	ned		orn .										<b>_</b>																
			and the second s	-grai	ar.	ı∕m, H						255		252		L																5355mabh つ之採取
40			A Cart	d î um-	ranu	1 ~ 2n								353	0-33	355	90	Pr						1 	1	1	1	1	1 	<1		区間湧水量 0.63L/min
				:e; me	igi igi	Bio										<b> </b>													<b> </b>			
50		1.1.1		ranit	to e	5m/m,	7	<u>.</u> a	CH.	58	. 12	510				<b>-</b>																
	<u> </u>		1	red: g	`itic	2~1						577			0-34	565	60	Pf		s S				1	1	1	1	1	1	<1	Cal(1)	
60		the second		alter	r phy r	/Kfd						577	 ∕ ¦	597 608	0"-20	583	30	Pf		<u> </u>				1	2	1	1	1	1	<1		
		A State		kly	<u>0</u>	`m, P:I ,						┟┄┛		/. <b>-</b>	0-35	657	25	Pf		S				1	3	1	2	1	1	<1	Chl(3)、Cal(2)	
70			All and	Weä		~10m/							· · · · L · · ·     																1			
80			1			z 1.			<b> </b>			[]]	···· ····     	792		[																
50			1			0t				+16)		830		807	0-36	828	45	Wf		SorT				1	1	1	1	1	1	<1		
90		1ª	P							+22+		885	K	<b>≁</b> 2872	0-37	839	45	Pf		SorT				1	1		1	1	1	<1		
	<u> </u>	1								(20		914 	¦		0'-9	894	80	Sr		D				1	1	1	1	1	1	<1		
100	6.00	100	1.5.5					I		L			i																			

	孔	名 19	AI66	深泽	渡	6.	00~9	9.00m	nabh		記	載者	高安						-					開如	H i	7/1	7	ł	終了 7/18	縮尺 1/10
Γ	深	岩	岩	組	鉱	カニ	風	岩	RQ				<b>1</b>	1				-	割れ	1目	記載	戓						r –		
	度 (mabh)	相 写 真	相   	織	物と粒径	フーインデック	化の程度	盤分類	)D(コア回収	割れ目密度 (n	서 위 []	注割 伏れ 図目	割 れ 日 番	深度(mm)	傾斜角	界面形状	条線(レーク	形成要因	断層区分	<sub>諾</sub> 幅(mm)	嶇(mm)	絹雲母化	緑泥石化	変質 赤鉄鉱化	[ 粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	, 幅 (mm)	充填割れ目 一 充 填 弧 物	備考
0	<u> </u>					クス			率)	ר)/m)			号				<u>角</u> )								1Ľ				と 量	6.000~9.000mabh付近
10-		1									· · · · <b>·</b> · · ·		0-38 0'-10	060 063	45 45	Pf Sf		S S				1 1	1 1	1 1	1 1	1	1 1 1	<1 <1		.長石類は白色~淡桃色を呈す. る
20-					Zm/m						112 × 175 -	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		亀裂周辺がやや脆弱 6.100~6.400mabh付近 長石類がやや脱色
20			ned		orn 1~						233 <u>-</u> .^. 238	27	0'-11 0-39	256 266	50 45	Pr Pf		S S				1 1	1 1	 1 1	1 1	1 1	1	<1 <1		
30-		6.35m 6.40m 蒜婆	ium-gra	ular	~2mi/m, H						394		2 0"-21	350	90															6.350~6.390mabh 雪山开採取
40_			ni të, med	auigran	m, Bio 1.						~	40	3 0-40	400	90	Sr		D				1	1	1	1	1	1	<1		6.266mabh □7採取
50			red grär	tic to e	2 <del>~</del> 20m/́	5		СП			· · · <b>a</b> · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		••·····																区间涝水重-0.60L/min
60- -			ely alte	orphyri	, PI/Kfd						· · · •	····¦·····		 											• • • • • • • • • • • •					
70-			Moderate		1 ~ 4m/m						688	72	0-41 6	684 	50	Pf		SorT				1 	1	1 	2	1	1	<1		
80-					0tz						· · · •	····		<b>_</b>																
90-									(34+33)					L																
100	7.00										· · · = · · ·			<b>-</b>																7 200~7 400mabh
10-											· · · •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		長石類が脱色
20-											· · · • • • · · ·	22		 																
- 30-		/	ra ined		rn 1∼2						288 		0'-12	287	30	Pf		SorT					1	 1	1	1	1	<1	Cal(3)	7.378mabh コア採取
40_			nedium-g	anular	2m/m, Hor						X	35	0-42	378	35	Pf		SorT				2	2	1	3	1	1	2	Chl(2)、粘土(3)、Cal(3)	7 370 m bb
50			granite, I	co equig	Bio 1∼	5	β	СН	. 86	6	425		0"-22	415	30	PT		۲ 				1 	1 	1 	1 	1	1 	<1		亀裂内に粘土の集塊挟む
60			ltered g	yritic t	~20m/m,						526		0"-23 0'-13 2 0-43	542 560 597	35 40 25	Sr Sr Pf		s s s				1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 2	1 1 1	1 1 1	<1 <1 <1	Cal(1)	
-			ately a	Porph	PI/Kfd 2						640			<b>-</b>																
70-			Moder		~10m/m;1						····•·/·	····		••••••••																
80-					0tz 1				7+:41)		· · · • • • • • •	82	3 0"-24	826	25	Pf		s				1	1	 1	1	1	1	<1		
90-			· · · · · · ·						(28+1		· · · • • · · ·	91	5	 																
100	8.00										020		0"-25	981 027	25 40	Pf Pf		s				1 1	1	1 1	1	1	1	<1 <1		
10-											089 103 135		0"-27	063	35	Pf						1	1							
20-			ined		~ 2m∕.m						····•·	     		<b>_</b>																
30-			dium-gra		, Horn 1						305	1 30	0-45 <sup>3</sup> 0"-27	297 336	85 10	Wr Wr		TorD T				. 1 1	1	. 1  1	1 1	1	1	<1 <1		8.297mabh コア採取
40_			nite, me	granula	1 → 2m/ñ						445	40	3 0'-14	436	40	Pr Df		 T				 1 1	1	 1	1	1	1	<1	Cal(2)	
- 50-			ered gra	to equi	m/m, Bio	7	a	СМ	64	13	501		0"-28	503	45	 						!  1	····!···· ····1	'  1	1	1	1	<1		
60_			kily ail tu	hyritic	fd 2~15						528 593	55	2 0-47 0'-15	525 586	45 50	Sf Pf		TorD SorT				1 2	1 1	.1 1	1	1 1	1 1	<1 <1		
70			ş  y~₩ea	Porp	1/m, P1/K1						692	66	7 1 0-48	693	80	Pf		S				 1	1	1	3	1	1	20		8.693~8.717mabh 破砕され、 <del>(</del> 部粘土質
80		0	Moderati		tz 1∼8n				13)		/19 785	71	0-49 0-50 0-51	712 777 790	75 50 50	Pf Pf Pf	R40 R40	S S S				1 2 2	1 1 1	1 1 1	3 1 1	1 1 1	1 1 1	<1 1 1		8.777mabh
					G				14+11+		790 × 872																			条線あり、脆い 8.790mabh 条線あり
90-	9, 00								(26+		915 980	91	7 0-52 3 0-53	938 952	45 60	Pf Pf		SorT SorT				1 1	1 1	1 1	1	1 1	1	<1 <1		

	孔	名 19M	66	深	度	9.0	)0~1	2.00r	nabh		記	載者	高安											開如	÷	7/1	7	ş	終了 7/18	縮尺 1/10
	渕	垖	岩	組	鉱	カニ	風	岩	RC									-	割れ	1目	記載	戓						1		
	度(	相	相	織	物と	フーイ	化の	盤公	рD( П	割れ		は国	割	深	傾	界工	条緽	形	断層	晶岩	바르	絽	緑	変質	1 ¥£	7k	洃	3 恒	充填割れ目 「 <sub>- </sub> <sub>- </sub>	
0	(mabh) 🖁	与真			J粒径	ィンデックス	の程度	万類	1ア回収率)	田密度 (n/m)	· · · [	出 式 別 目	れ目番号	度(mm)	斜角	<b>囱</b> 形状	称 (レーク角)	反要因	凶分	惲(mm)	堙 (mm)	<b>帮</b> 雲母化		<b>亦鉄鉱化</b>	柏土鉱物化	小酸化鉄	溶脱	≞ (mm)	元填鉱物と量	備考
0													0-54 0'-16	074	35	Pf Pf		s S				1 1	1	 1 1	3	1	1	1	粘土(3) 粘土(3)	9.000~9.200mabh 長石類は白色~淡桃色を呈す. る 0.200a,12.000mabh
10											112 141	139	0-55	110	40	Pf		S				1	1	1	1	1	1	<1		長石類は淡桃色を呈する 9.000~12.000mabh
20			i ned		n: 1∼2m/						215		0-56	204	30	Pf		S				 1	1	 1	1	1	1	<1		絹雲母は淡緑色を呈する 9.074~9.110mabh 亀裂周辺がやや脆い
30	<b>-</b>		dium-gra		m, Horn						339	278	0-57	315	40	Pf		S					1		1	1	1	<1		9.315mabh コア採取
40			∴ nitė,me	granula	io 1∼2						377	364 382 437	0-58	350	45	Pf		S				1	1	1	1	1	1	<1		
50	<b>-</b>		red gra	to equi	20m/m, B	7	<u>а</u>	СМ	62	. 11	4.3.0 		0-59	469	45	Pf		SorT				3	1	 1 	1	1	1	1	Ser(3), Cal(1)	
60	<b>-</b>		ely alte	lyritic	∕Kfd 2:~						· · · • • • · ·	••••		<b>-</b>																
70			Aoderate	Porph	3m/m, P1,						 690 _																			
			eak I y∼I		tz 1~1				18)		···•	719	0-60 0"-29 0"-30 0"-31	703 .705 .720 .780	75 50 45 45	Sr Pf Pf Pf		S S S				1 1 1 1	1 1 1 .1	1 1 1 1	1 1  1 1	1 1  1 1	1 1 1 1	<1 <1 <1 <1		
80			×						1+23+		855	820 855	0"-32 0-61	788	45 65	Pf Pf		S SorT				1	1	1	1	1	1	<1	Cal(1)	
90									(10+1		921		0-62	953	35	Pr		D				1	1	1	1	1	1	<1		
100	<u>10.00</u>										• • • • • • • • •	000	0'-17		25			·····				1 	1 	1 		1	1 	<		
10											· · · •			<b>.</b>																
20					2m/m						232 258	164	1'-1 1-1	232 234	90 30	Wr Pf		S S				1 1	1 1	 1 1	1 1	1 1	1 1	<1 3		10.234mabh 亀裂沿いが破砕を受けている
30			rained	<u> </u>	lorn 1∼						260	264	1-2	261	85	Wr		D				1	1	1	1	1	1	<1		10 261mabh コア採取
40			iedi um-g	granula	~2m/m.H										40			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·												
50			ranite; m	to equi	m, Bio 1		a	CH	74	10	445 	477			40			د						· · · · · · · ·						
60			tered g	hyritic	2∼12m/						· · · • • • · ·	••••																		
70			akly al	Porp	PI/Kfd						675		1-4	655	40	Pf		S				1	1	 1	1	1	1	<1		
			We		~10m/m				13)		••••	705	1'-2	770	10	Pf		 Dor⊺				1	1		1	1	1	<1		
80					0tz 1				6+22+		883	843	1"-1 1"-2	846 855	30 30	Pf Pf		S S				1	1	1 1	1	1	1	<1		
90									(23+1		895 ( .	930			30	PT								 		1				
100	11.00										•••• <b>•</b> •••	····		•••••••••																
10											· · · •	146		•·····																
20			ined		~ 2m∕/m						247		1-6 1'-3	219 247	35 30	Pf Pf		S S		20		1 1	1 1	 1 1	1 1	1 1	1	<1 <1		11.219~11.247mabh 亀裂間が破砕を受け脆い
30			lium−gra		, Horn 1						290 315	293	1-7	312	75	Pr		D				1	1	1	1	1	1	<1		断層角礫岩 11.312mabh コア採取 区間通水量 0.031 (min
40			nite, mec	granular	1 ~2m/m						···•	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
50			red gra	tò equi	n/m, Bio	7	a	СН	74	10		····																		
60			sly alte	iyritjic	d 2∼14r							····																		
70			Moderate	Porpt	'n, Pi/Kf.							648	1'-4	700	55	Pf		т					1	1	1	1	1	<1		
10			leakly~¦		z 1.~8m/						724 X	746	1-8 1"-3	726 783	45 65	. Pf . Pf		S SorT				<u>1</u> 1	1	.1 1	<u>1</u> 1	1	1	<1 <1		
80			<u>.</u>		0tz				0+13)		788 853	780	1"-4 1-9	805 860	65 90	Pf Sr		SorT DorT				1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1	<1 <1 <1		
90									(21+4		885	870	1-10	910	70	Pf		SorT				3	1	1	3	1	1	3	Ser(3)、粘土(3)、Cal(1)	
100	12.00											_i																		

	孔	名 19	MI66		深度	12	.00~	15.00	mabh		記	載者	高安	1										開如	Å I	7/1	8	ł	終了 7/19	縮尺 1/10
	深	岩	岩	制約	目卸	니 그	風	岩	RQ	фı					1			<u>!</u>	割れ	<u>1目</u>	記載	<b></b>			÷			_	~ 년 후 나 ^ 그	
0	度 (mabh) 12.00	相写真	札		載 彩 と 料 谷	ノ ーインデックス	化の程度	盤 分 類	D(コア回収率)	割れ目密度 (n/m)		柱割 状れ 図目	割 れ 目 番 号	深度(mm)	傾斜角	界面形状	条線(レーク角)	形成要因	町区分	<sub>結</sub> 幅 (mm)	嶇(mm)	絹雲母化	緑泥石化	変 一 赤 鉄 鉱 化	粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	fund fund fund fund fund fund fund fund	<sup>紀</sup> 項割れ日 	備考
10			· · · · · ·		m/m						029 121		41 1-11 1-12 39	004	65 55	Pf Pf		SorT T				1	. 1	1 	1 	1	1	<1	Cal(1) Cal(1)	12.000~15.000mabh 長石類は白色~淡桃色を呈す. る 12.000~15.000mabh
30 40				ular	~2m/m. Horn :1~2						316 ~	3	12 1-13	316	90	Wr		 D				1	 1	 1	 1	1	1	<1		12.316mabh ⊐7採取
50 60			red granite, mediu	ritic to equigrar	fd 2∻15ṁ/m.Bio †		a	.CH					1-14	598	30	 Pf		SorT							······ ······	1	1	<1		
70			Weakly alte	Porphy	0tz 1∼6m/m.PI/KI				10+13)		646 769 788	6	35 92 1-15 33 1-16	767 780	35 85	Pf Wr		SorT TorD				2 1	  1 1	  1 1		1	1	<1 <1		
90 100									(21+28+16+		845	8	74 1-17	892	40	Pf		SorT				1	1		1 	1	1	<1		
100																														
30 40			ite, medium-graineo	ranular	?m/m Horn 1~?m/m						264 326 -	2 <sup>1</sup> 32 P <i>l</i>	31 1'-5 24 1-18 1-19	286 306 331	90 35 80	Pr Pf Sr		T SorT D				1 2 1	1 1 	 1 .1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	<1 1 	Cal(3)	13.331mabh コア採取 湧水量 0L/min 13.380mabh 付近 ゅ22mm程度の淡桃色の
50 60			teily ail tered gran	phyritic to equig	1 2~23m/m Bio 1~		β	CH.			514	4	97 1-20 17	530	45	Wr						1	 .1	 . 1		1	2			長石塊 13.530~13.660mabh 弱度に溶脱
70 80				Por	0tz 1~15m/m Pl/Kfc				+12+29)		641		1-21 34 1-22	657 718	40 70	Wr Wr	90	S T				2	2	1 1 	2	1	2	<1		鉱物の伸長あり 亀裂面に黒色鉱物 (黒雲母あるいは角閃石)の :濃集あり
90 100	<u>14. 00</u>		·····		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				(28+20		· · · · • • • · ·	P1 0												 	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			14,040mabh付封近
10 20			ined	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	'n 1∼2m/m				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		210		93 1-23 90	237 253	45 35	Pf Pr		SorT				1	  1 .1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	   1 	1	1	<1 <1		<i>Q</i> 2311110 <sup>1</sup> <sup>1</sup> 21
40 50		the second s	fanite, médium-gra	to equigranular	/m. Bio 1~2m/m. Hoi	7	β	СН	57	11	305 478 488	33	14 1'-6 1-25 34 1-26 60 1-27	300 354 370 500	35 25 20 40	Pr Pf Pr Pr	90	DorT S S S				1 1 1	1 1 1 	1  1 	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1	<1 <1 <1 <1		14.300mabh コア採取 区間湧水量 0.541/min 14.354mabh 条線あり 14.370~14.544mabh コア全体が溶脱を受け、軟質
60 70			lerately altered g	Porphyritic t	n/m. Pl/Kfd 2∼25m/	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					532 	5	31 1"-5 66 1"-6 1-28 22 1'-7	544 571 595 616	35 50 60 30	Pf Pf Pr Pr	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	S S S				1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	<1 <1 <1 <1		
80 90			Mod		0tz 1~8				3+23+11)		835		26	856	45	Pf		SorT				 1		····· 1	1	1	1	<1	Cal(1)	
100	<u>15. 00</u>		2.2 						(2:		937	9	22 1-30	953	50	Pf		SorT				1	1	1	1	1	1	<1	Cal(2)	

	孔	名 i 19MI	66	深	度	15.	00~	18.00	mabh		記	載者	高安											開如	4 1	7/1	9	ł	終了 7/2	2 縮尺 1/10
	深	岩	岩	組	鉱	カラ	風	岩	RQ	÷.								:	割れ	<u>1目</u>	記載	載		<b>本</b> <i>时</i>	÷			_	~ 년 회 1 이	-
0	度 (mabh) 15.00	相 写 真	相	弒	物と粒径	ノーインデックス	化の程度	盤分類	D(コア回収率)	刮れ目密度 (n/m)	オ ド ロ	注割 伏れ 図目	割れ目番号	深度(mm)	傾斜角	界面形状	条線 (レーク角)	形成要因	区分	<sup>電</sup> 幅(mm)	幅(mm)	<b>絹雲母</b> 化	緑泥石化	変 赤鉄鉱化	1 粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	f 幅 (mm)	<sup>近</sup> 項割れ日 一 売 項 鉱 物 と 量	備考
0		and the									000 050	電中研 000 050			90 90															15.000~18.000mabh 長石類は白色~淡桃色を呈す.
10											128																			る 15.000~18.000mabh 絹雲母は淡緑色を呈する
20 30			a i ned		/m,Horn 1∼2m/m						248 278	153 153 153 153 250 286	1-31 1-32 1-33 1-34	190 207 253 286	35 35 60 90	Pf Pf Wr Pr		S S DorT D				1 1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1 1	<1 <1 <1 <1 <1 <1		15.000~15.050mabh 電中研コア採取 この区間のコプ採取を考慮 せずコア100cmをカットした ため、15~18mabhのコア箱 は下記構成となっている。
40			ediųm-gr	granular	io 1∼2n							· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1-35		20	Wf		 т					1			1		~		16.050~17.050mabh 17.050~18.050mabh
50	<b>_</b>		anite, me	to equig	25m/m, B		a	CM	29	10	• • • • • • • • • •		1'-8	487	70	Sr		' Т				' 1	1		1	1	' 1	<1 <1		
60			ered gr	iyritic	∕Kfd 2~						····	562		<b>-</b>													· · · · · · ·			
70			aklyält	Porph	0m/m, P I /							· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		<b>-</b>													· · · · · · ·			15.286mabh コア採取 区間湧水量 0.10L/min
80	<b>_</b>		We		)tz 1∼1						712	786	1-36	768	40	Pf		SorT				2	1	1	1	1	1	<1	Cal(2)	
00					)				-16)			800	1-37	802	15	Wf		Τ				1	1	1	1	1	1	<1		
90	16 00								(13+		940	908	1'-9 1-38	958 970	80 35	Sr Pf		T S				1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1	<1 <1		
100											••••	         	1' 10		15	Pf		 т					1					~1		16.050mabh コア箱でコア切断
10												145	1-39 1-40	116 143	25 25	Pf Pf		S S				1	1	1	1	1	1	<1 <1	Cal(1)	
20					~2m/m						235	211	1'-11	265	30	Pf		 S					1	 1	1	1	 	<1	Cal(1)	
30			∵ m-ğraine	ular.	n, Horn 1						300 	304	1-41	303	90	Wr		D				1 1	1 1	1 1	1	1 1	1 1	<1		16.303mabh コア採取
40			e; medi ur	aqui granı	1∼2m/r						· · · · • • · · ·	· · · ¦ · · · · • · · · •		<b>-</b>													 			
50			d granit	tic to e	0m/m,Bic	7	β	CL S	.63	11		521	1'-12	505	40	Pf		 T				1	1	 1	1	1		<1		
60			y altere	orphyri	<fd 2∼1<="" td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1'-13</td><td></td><td>40</td><td>Pf</td><td></td><td>T</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></fd>								1'-13		40	Pf		T								1				
70			Weakly		/m, P1/I						698	701		 741	65	Pf		s							1	1		1	Cal(2)	
80					.z :1~8m,				() ()		· · · · • · · · ·	i Ca	1"-8	765	65	Pf		S				1	1	 1	1	1	1	<1		16.835mabh
90					ot				)+26+18		893	848	1-43 1"-9	845	70 65	Pr Pr		τ ς				1 1 	1	1  	1 1	1	 	<1		厚さ4mm程度の方解石脈 16.900~17.200mabh
100	<u>17.00</u>								<u></u>		955		1"-10	.942		Pf		<u>S</u>				1	1	1		1	1	<1		弱度に溶脱している
10											025		1-44 1-45	032	70 25	Pf Pf						1 1	. 1 	1 1 	1 2	1	1 1	<1<1 <1	Cal(3) Cal(1)	厚さ6mm程度の方解石脈
20					m/n						/. 	140 	1'-14 1-46	163 200	45 45	Wr Pf		s S				1 1	1 1	1 1	2 2	1 1	1	<1 <1		17.052 17.050mabh 砂状コア 17.050mabh
30			jed		jrn 1.∼21						222																			コア箱でコア切断 17.050~17.200mabh 角礫状コア
40				mular	~ 2m/m, Hc						329	313	1-47	323	75	Sr		D 				1	1	1	1	1	1	<1		17.323mabh コア採取 区間湧水量 0.05L/min
50		17.45 m 17.50 m 英敬	hite, medi	o equigra	/m, Bio 1•	7	β	СН	73	>10		電中研		450 500																17.450~17.500mabh 電中研コア採取
60			ly altered gra	Porphyritic to	Pil/Kfd 2 → 12m			۲ ۲CL			591		1-48	599	30	Pf		S				1	1	1	1	1	1	<1	Py(1)	17.599mabh 黒色鉱物(黒雲母あるいは 角閃石?)と黄鉄鉱が塊状 に濃集
70			Weak		~10m/m,						735	678	1-49	741	40	Sf		S				1	1	1	1	1	1	<1		
80					0tz 1				+13+20)		<u>792</u>	808	1-50	823	70	Sr		T				1	1		1	1	1	<1		
90									(12+28		<b>-</b>			- · · · · · ·																18.05000266
100	18.00	Sec. 2																												コア箱でコア切断

	孔	名 19M	166	深	度	18.	00~2	21.00	mabh		記載	战者	高安											開如		7/2	22	÷	終 <b>了</b> 7/24	縮尺 1/10
	深	岩	岩	組	鉱	カ	風	岩	RQ	da la								:	割れ	<u>1目</u>	記載	<u> </u>		FF						-
0.	度 (mabh) <sup>18.00</sup>	相 写 真	相	纎	物と粒径	ノーインデックス	化の程度	盤分類	D(コト回虸蝌)	割れ目密度 (n/m)	추 가 <sup>[11</sup>	主割 犬れ 図目	割れ目番号	深度(mm)	傾斜角	界面形状	条線 (レーク角)	形成要因	断 区分	<sup>翻宕</sup> 幅(mm)	睅(mm)	絹雲母化	緑泥石化	変質赤鉄鉱化	[ 粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	n、 幅 (mm)	<sup>充</sup> 填割れ目 充 填 鉱 物 と 量	備考
10	<b>-</b>				,m						095	010	1-51	092	30	Pf		S				1	1		2	1	1	<1	粘土(1)	18.000~21.000mabh 長石類は淡桃色を呈する (18mabh以浅より色調が強い) 18.000~21.000mabh 絹雲母は白色を呈する
20 30			rained		m/m, Horn 1∼2m/						227 261 300	240	1'-15 1-52 1'-16 1-53	205 241 285 300	40 15 50 85	Pf Pf Pf Wf		S S D				1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1	1 1 1 1	<1 <1 <1 <1		18.000mabh以降のコア箱 では5cmズレが解消 18.300mabh コア採取 区間湧水量 0.03L/min
40 50			ranite,medium-g	to equigranula	~18m/m,Bio 1.~2		β	CH S	59	11	408 	532	1"-12	440	40	Pf		SorT				1	1	 1		1	1	<1		
60 70			akly altered g	Porphyritic	10m/m,P1/Kfd 2∽								1-54	615	25	Pf		······						······		······	1		Cal(1)	18.615mabh φ20mmに黒色鉱物 (黒雲母あるいは角閃石) が濃集
80			We		Qtz 1∼				19)		755 798	785 800 885	1-55 1-56	735	25	Pf Pf		S				1	1		1 	1	1	<1<1<<1<		
90 100	 19.00								(40+		· · · · • • · · · ·		1"-13	019	35	Pf		SorT					1	 	 1	1	1	<1		
10 20	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		ained		2m/m						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	)  P <i>L</i>												· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						19.150mabh付近 φ32mmの長石
30 40			anite, mėdium-gr	igranular	∼2m/m,Horn 1~						320	341	1-57 1-58	341 403	70 35	Sr Pf		D				1	1	 1  1	1  1	1	1	<1		. 19.341mabh ユア採取. 区間湧水量 0.03L/min
50 60			ely altered gra	hyritic to equ	2∼32m/m,Bio 1		β	CH S CL	. 60	8	453	465 500 522 582	1-59 1"-14	460 492	35 30	Sr Pf		S S				1	1	1 1 	1	1	1	<1 <1		
70			Weakly∽Moderat	Porp	1∼8m/m,PI/Kfd						660		1-60 1"-15	600 652	50 50	Pf 		S S				1	1 1	1  	1 1	1	1	<1	Cal(1)	
90					.0tz				(34+26)		846	873	1-61 1'-17 1'-18	855 885 907	55 40 25	Wf Wf Wf	R30,R45	Dor⊤ T S				1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 	1 1 1	1 1 1	<1 <1 <1		19.901mabh 条線が明瞭に発達する
100 10		Ŕ									041 061 099 146	1 - / 149	2'-1 2'-2 2'-3 2-1	000 045 045 081	25 30 55 35	Pf Wf Wf Pf	L45	S S S				1 2 2 2	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	<1 <1 <1 <1	Cal(1) Cal(1) Cal(1)	19.900~20.100mabh 溶脱しやや脆い、角礫状コア 20.045mabh 条線が不明瞭に発達する
20 30		Dough Co. Jacoba Haa	rained		m, Horn 1:∼2m/m						····· 200 ···· 331		2'-4 2-2 2-3	191 203 250 300 336	70 35 65	Sr Pf Sr		T S D				1 1 1	1 1  1	1 1  1	1 1  1	1 1 1	1 1 1 1	<1 <1 <1		20.250~20.300mabh 電中研コア採取 20.336mabh コア採取
40 50			ranite, medťum-≗	to equigranule	0m/m, Bio 1⊷2m/	. 7	β	CH	79	. 14																				区間湧水量 0.12L/min
60 70			akly altered g	Porphyritic	ı/m, P:  /Kfd 2 ≁2			CL			661	675	2"-1 2"-2 2-4	568 593 663	45 45 45	Pf Pf Pf	 	S S S				1 1 	1	1 1 	1 1 1 1	1 1 1	1 1 1	<1 <1 <1		
80 90			Mı		0tz 1≁15ı				+14+33+22)		720 760 768 780	714 775 805 821	2-5 2'-5 2-6 2"-3 2"-4 2"-5	720 751 775 780 800 821	35 90 60 55 55	Wr Sr Pf Pf Pf	к55 	S S S S			• • • • • • • •	1 1 1 1 1	1 1 1 1 1	1 1 .1 .1 .1 .1	1 1 1 1		1 1 1 1 1	<1 <1 <1 <1 <1 <1 <1		zuri zuridun 条線が発達する
100	21.00								(10-																					

	孔	名 19MI	66	深	度	21.	00~2	24.00	mabh	ı	記	載者	高安	1								_		開如		7/2	4	ł	終了 7/25	縮尺 1/10
	深	岩	岩	組	鉱	カニ	風	岩	RQ	-the state			<u> </u>		1	1		:	割れ	<u>1目</u>	記載	<u> </u>		FF						
	度 (mabh) 2	相 写 真	相	織	物と粒径	ノーインデックス	化の程度	盤分類	D(コア回収率)	割れ目密度 (n/m)	オ ド [	注割 伏れ 図目	割 れ 日 番 号	深度(mm)	傾斜角	界面形状	条線(レーク角)	形成要因	町区分	<sup>翻</sup> 幅(mm)	幅(mm)	絹雲母化	緑 泥 石 化	変質 赤鉄鉱化	[ 粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	9 幅 (mm)	<sup>充</sup> 填割れ日 充 填 鉱 物 と 量	備考
0 10											· · · • • · ·	075																		21.000~24.000mabh 長石類は淡桃色を呈する 21.000~24.000mabh 絹雲母は淡緑色を呈する
20	- · · · · · · ·				~2m/m						172	142 198	2"-6 2-7	151 178	30 50	Wf Wf		s S				1 2	1	1 . 1	1 1	1 1	1	<1 <1	Cal(1)、Ser(1)	絹雲母は淡緑色
30			inėd		n, Horn 1.						240 262		2-8 2-9	.246 271	. 45 40	Pf Pf	L50	S 				2 2	1 1	1 . 1	1	1 1	1 1	<1 <1	Cal(1) Cal(1)	21.180mabh <i>φ</i> 38mmの淡桃色の長石
40			diÿm−gřa	ranular	o 1∼2m//						· · · •	····																		21.180mabh <i>φ</i> 38mmの長石?
50		21.45	anite, me	to equig	•28m/m,₿i		а	CH	89	4				450 500																21.450~21.500mabh 電中研コア採取
60	 		ltered gr	phyritic	/Kfd 2∽						· · · • • · · ·	····		·										• • • • • • •						21.271mabh コア採取 区間湧水量 0.47L/min
70			Weakly a	Por	~20m/m, P						••••	· · · · J · · · · · · · · · · · · · · ·																		
80					Qtz 1							         																		
90									(17+72)		· · · • • · ·																			
100	22.00										· · · •	····		•																
10											· · · • • · ·	121																		
20		- All	р		l ~2m/m						211	217	2'-6 2-10 2"-7	198 211 218	30 45 40	Sf Wf		S S S				1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 .1	1 1 1	<1 <1 <1	Cal(1)	22.211mabh コア採取
30	 		∷ : um-ëraine ∶:	nular	l∕m, Horn						298 / 	····																		
40	- · · · · · · · ·		nite, mediu	o equigran	Bio 1∼2m		 a	СН			···•		2-11	405	10	Wf		Т				1	1	 1	1	1	1	<1	Cal(1)	22.405~22.631mabh 円周コアでないためRQDに含 めていない
60			ered gran	yritic to	2 ~ 10m/m,						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																			22.540mabh <i>φ</i> 10mmの長石明瞭
70			aklyal-	Porpl	PI/Kfd						····		2'-7	666	50	Pr		T				1	1	 1	1	1	1	<1	Cal(2)	
80			We		; 1∼18m/m							703	2"-8	706	30	Pf		SorT				1 	1	1 	1	1	1	<1		
90					0tz				9+18+37)		· · · • • · · ·	••••																		
100	23.00								51)		···•	····		•																
10	 										· · · • • · ·	· · · J. · · · · · <b>a</b> · · · · I · · · · J. · · · · · <b>a</b> · · · · I		•																
20					~ 2m∕/m						196	208	2-12	204	80	Sr		D				1	1		1	1	1	<1		
30			grained	ar	m, Horn 1																									
40			e, med i um-	quigranul	tio 1 ~2m/						····•	····		450																23.450∼23.500mabh
50		AF SUM BZ	∋d grapit	itic to e	∼12m/m, E	7	a	CH	70	4				500																電中研コア採取 23.710~24.000mabh
60			⟨ly alter€	Porphyr	, PI/Kfd 2						<b>.</b>	····		. <b> </b>																円周コアでないためRQDに含 めていない
70			Weak		z 1∼5m/m,						771 x	680 770	2'-8	. 710 	35	Sr		Т				1	1	1	1	1	1	<1		
80- 00-					0ť:				-50)		840		2-13	808	50	Pf		Т				2	1	1	1	1	1	<1	Cal(2)	編雲母は淡緑色
100	24.00			•••••				•••••	(20+																					

	孔	名 19M	166	深	渡	24.	.00~2	27.00	mabh	n	記載	載者	高安											開如	÷	7/2	5	ş	終了 7/25	縮尺 1/10
	深	岩	岩	組	鉱	끄	風	岩	RQ		<del></del>							:	割れ	1目	<u>記載</u>	載								
	度	相	相	織	物レ		化	盤	Ũ(	割れ	<sub>+</sub>	・ナーロー	割	深	傾	界	条	形	断層			40	47	変質	Ĵ.	1.	<b></b>	3	充填割れ目	
0	(mabh) <sup>0</sup>	与真			C 粒 径	インデックス	の 程 度	分類	コア回収率)	?目密度 (n/m)	1   1   []	土制 犬れ 図目	れ目番号	度(mm)	斜角	面形状	線 (レーク角)	成要因	区分	幅(mm)	幅(mm)	絹 雲 母 化	緑泥石化	赤鉄鉱化	粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	幅 (mm)	充填鉱物と量	備考
0												015	2-14	.006	40	Pf		s				2	1	1	2	1	1	<1	Cal(2)	24.000~25.000mabh付近 長石類は淡桃色を呈する 25.000付近~27.000mabh
10											094		2-15	131	10	Pf		s				2	1	1	2	1	1	<1	Cal(3)	.長石類は淡赤褐色を呈する 24.000~27.000mabh .絹雲母は淡緑色を呈する
20		-	ained		ר 1∼2m/m						212	203 222 243	2-16 2'-8	206 239	70 90	Sr Sr		DorT DorT				1	1	1 1	1 1	1	1	<1 <1		24.006mabh付近 亀裂に沿って脆い 24.206mabh コア採取 区間湧水量 3.40L/min
30			dium÷gr		i∕m, Hori																									24.000~24.577mabh 絹雲母は白色
40			itė,me	sranula :	o †~2n						380	373	2-17 2-18	378 	55 	Pf Pf		s s				3	1	1 1	1	1	1	1	Cal(3), Ser(2)	
50			ed grär	o: eduj 6	Omi∕m, Bi	7	β	CM	27	16	4427 	465	2'-9	487	35	Wf		S				2	1	1 	1	1	1	1	Cal(3)、Py(1)	QRD: 周回しているコアが少ない
60 -			derately alter	Porphyritic t	/m, P1/Kfd 2∼20						539	594	2'-10 2"-9 2'-11	577 630 641	65 45 45	Pf Pf Pf		S S S				3 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 <1 <1	Cal(3), Ser(2)	
70	- · · · · · · · ·		<li>Nio. Si ~ Mio. Si ~ Mio.</li>		1 ~ 5m						703	· · J · · · · · · · · · · · · · · · · ·		<b>-</b>																
80			Weak		0tz				1)		860		2-19 2'-12	804 806	40 30	Wf Pf		s s				1 1	1	1 1	1 1	1 1	1	<1 <1	Cal(1) Cal(3)	24.940mabh .φ28mmの黒色鉱物の集塊 (あるいはゼノリス?)
90		T							(16+1		925	0003	2'-13 2-20	908 915	35 35	Pf Pf		s S				2	1 1	1 1	1 1	1 1	1	<1 <1	Cal(3), Ser(2) Cal(2)	編雲母は淡緑色を呈する (緑泥石の可能性あり)
100	<u>25.00</u>										· · · • • • · · ·	···		••••••																長石類の色調変化
10											125 132	121	2-21	100	45	Wr		T					1	1 	1	1	1	<1	Cal(3)	25.000mabh付近以深 炎赤褐色
20			ied ::		2m/m						233	231	2"-10 2-22	179 232	55 85	Pf Pr		SorT D				1 	1 1	1 1	1 1	1	1 1	4 <1	Cal(3)	25.232mabh コア採取 区間湧水量 -0.10L/min
30			edjum-grai		n, Horn: 1∼						· · · · <b>-</b> · · ·	••••																		25.000mabh 以深 石英、長石類が若干粗粒化
40		354	oar se~m	ular	o 1∼2m/						····•			450																25.450~25.500mabh 電中研コア採取
50			anite, co	duigran	8m/m,Bio	7	<u>a</u>	В.	100	2	≣ ∎			500 .																
60			ered gr		fd 2~1							···																		
70			kly alt		/m, P1/K																									
80	- · · · · · · · · ·		Wea		z :1~6m				(2		804								•••••	•••••				• • • • • • •	•••••					
90					0t				+13+77		833	860	2"-11 2"-12	855 873	50 60	Pf Pf		s S				2 3	1	1 1	1 1	1 1	1	<1 1	Cal(3) Cal(3)	
	26.00										952	/ I 	2"-13	897 	30	Pf		SorT				1	1	1 	1	1	1	<1		
100											068	151	2-23	005	30	Pf		SorT		•		1	1	1	1	1	1	<1	Cal(2)	
10											· · · · <b>-</b> · · ·	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••		<b>-</b>																
20			jed		~2mi/m						219	224	2-24	223	85	Wr		D				1	1	1	1	1	1	<1		26.223mabh コア採取
30			m-ërair		ı, Hörn 1																									
40			~medíu		1 ~ 2m/m																	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								
50			coarse	anular	/m, Bio	7	а	В	85	5	431	434	2-25	407	40	PT		Sor I				1 	1	1	1	1	1	<	Cal(1)	
			granite.	Equigr	2 ~ 18m						515	528	2"-14	573	40	Pf		S				1	1	1	1	1	1	<1		
60		14.65 14.65	l tered		ı, P.I /Kfd						···· <b>-</b>		[	650																26.650~26.700mabh
70			eakly a		~ 10m/m						735 742	еттит 1 753	2"-15	700	50	Pf		S				1	1	 1 	1	1	1	<1		電中研コア採取
80			8		0tz 1				55)				2-26	790	50	Pf		S				2	1	1	1	1	1	<1	Cal(2), Ser(2)	
90								<b> </b>	21+18+		<b>]</b>	893		<b>-</b>			•••••													
100	27.00											···/···· <b>·</b> ··	2-27	956	25	Sf		T				1	1	1	1	1	1	1	Cal(3)	·····

	孔	名 19M	166	深	度	27.	00~3	30.00	mabh	1	記	載者		高安											開如	H H	7/2	25		終了 7/25	6 縮尺 1/10
	深	岩	岩	組	鉱	カニ	風	岩	RQ		1			[		1	1	[	!	割れ	1目	記載	戓						<b>1</b>		
	度	相	相	織	物		化	盤	ĩD(۱	割れ		++		割	深	傾	界	条	形	断層	■岩 		40	47	変質	[ 	<u> </u>	<u> </u>	5	充填割れ目	
0	(mabh) 27.00	与真			こ粒径	インデックス	の 程 度	分類	コア回収率)	:田密度 (n/m)		社割状れ図目	ין נ ן	れ目番号	度(mm)	斜角	面形状	線 (レーク角)	戊要因	区分	幅(mm)	檉(mm)	<b>絹雲母化</b>	緑泥石化	赤鉄鉱化	粘土鉱物化	水酸化鉄	溶脱	睅(mm)	充 填 鉱 物 と 量	備考
10		XX									025		153	2-28 2"-17	103 126	30 30	Pf Pf		s S				 1 1	1	 1 1	1	1	1 1	<1 <1	Cal(1)	27.000~29.270mabh 長石類は淡桃色を呈する 27.000~29.270mabh 編要母が淡緑色を呈する
20 30			lium:grained		/m,Horn 1∼2m/r						205 222 260		222 238 262	2-29 2-30 2-31	237 247 263	35 35 90	Pf Pf Pr		S S D				2 3 1	1 1 1	2 1 	1 1 1	1 1 1	1 1 1	<1 1 <1	Cal(3) Cal(3)	27.263mabh ⊐77採取
40 50			ed grạnitệ,meở	o equigranular	2mi/m,Bio f∼2mi	7	β	CH.	51	18	· · · · • • · ·		· · · · • • • • • • • • • • • • • • • •																		
60			derately alter	Porphyritic t	/m,PI/Kfd 2≻1			ĆL			585		603	2-32 2-33 2'-14	.637 662 680	50 50 50	Pf Pf Wr		 S Т	<u>)</u>			1 2 1		 1			 1 1	<1 <1 <1	Cal(2)	27.662~27.968mabh 確約毎50°の梅註サコアが
70 80		T	Weak I'y ~ Mo		0tz 1~4m				)		703 745 810		746 810	2'-15 2-34 2-35 2-36	735 752 778 795	50 50 55 50	Wr Pf Pf Pf	R70	T S S S		Fb		1 2 1 1	1	1 1 1 2	1 1 1 1	1	1 1 1 1	<1 <1 <1 <1	Cal(2)	連続する。 27.662~27.910mabh 断層角礫岩 27.795mabh 条線の発達が明瞭
90 100	28.00		 						(13+38		913 980 980		910 1 940 968 000 017	2-37 2-38 2'-16 2-39	857 910 947 968	50 50 60 60	Pf Pf Pf	R45	S S S	)			1 1 1 1	1 1 1 1	1 2 1 	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	<1 <1 <1 <1		27.910mabh 条線の発達が明瞭
10 20											188			2-40	070	15	Wf		T				1	3	 1 	1	1	1	1	Chl(3), Py(1), Cal(2)	
30			⊨ërained	ular	m,Horn 1 ~2m/n						245 283 338		265	2-41 2-42	235 283	35 50	Pr Pr		S S				1	1	1 	1	1	1	<1	Cal(1)	28.283mabh コア採取 区間湧水量 3.80L/min
40 50			granite; mediur	c to equigran	m/m,Bio 1∼2m/		a	CH S		11	451 491 508 \	) ({	435 477 515	2-43 2-44 2-45 2-46	411 453 546	40 40 45	Pf Pf Pf Pf		S S S S				2 1 1 1	1 1 1 1	1 1  1 	1 1 1 1	1 1 1 1 1	1 1 1 1 1	<1 <1 <1 <1	(al(2)	
60 70			eakly altered	Porphyrit	n Pl/Kfd 2~15						563		580	2"-18	593	45	Pf		S				1	1	1 	1	1	1	<1		「法心創約自不应方示をは」
80		18.82 19.82	M 		0tz 1~10m/n				(9		· · · · • • • · ·														· · · · · · · ·						12-Xiii1(日の床存の)との コアは 28.900~29.000mabhは 29.000~30.000mabhの レーンへ移動 28.850~29.900mabh
90 100	29.00	5m	· · · · · · · ·						(16+3		940  005		970	2-47 2-48 2-49	.900 	50 40 50	Pf Pf Pf		SorT S				1 2 1	1	 1 .1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	<1 <1 <1	Cal(2)	電中研コア採取 29.022mabh 方紹石の見词あり
10 20					, m						051 		050									· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			 	·····		·····			27194-1129日内2022
30			m-ërained	nular	2m/m, Horin 1∻2m,						294	<u> </u>	215	2-50 2-51	233 270	40 50	Pf Sr		SorT D				1	2	1  1 	1	1	1 1	<1	Cal(2)	29.270mabh コア採取 区間湧水量 55.10L/min 掘り止め

40-		mediu	igrar	<u></u>						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••	 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
50		nite.	nbə q	n, Bio	7	а	СМ	21	4				 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
		d gra	ic t	~ 8m/r						 		 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
60_		terec	: hyrit	fd 2.						 	<mark>-</mark>	 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
-		ly∷al	Porp	Pi/K						 ····.¦.	🖣	 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
70_		Weäk		8m/m,						 ·····	<mark>-</mark>	 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
-										 	<mark>-</mark>	 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
80–				t						 ····i·		 	 	 	 	 	• • • • • • • •	 	 	 	 	 	 
90												 [	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
30								(21)				 	 	 	 	 		 	 	 	 	 	 
100	30. 00																						

付録 5.1-3 19MI66 水理試験データシート







ap/dLnt

119MI66号孔(& 86mm) 28.70~29.3mabh RW Jacob法 平均流量:1.97E-04 (m<sup>3</sup>/s)





2.17.E-09 3.62.E-09

4.04.E-05 6.74.E-05

8.01E-05

透水量係数 (m<sup>2</sup>/s) 透水係数 (m/s) 貯留係数 比貯留係数

1.34E-04 6.93E-19 1.15E-18







dSr/dLn(e.t.)

3	5.02E-05	8.37E-05	2.36E-11	3.94E-11
Ū	9.69E-05	1.62E-04	3.50E-22	5.83E-22
	透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数

Jacob法 Jacob法 平均流量: 8.94E-05 (m<sup>3</sup>/s)

19MI66号孔(々86mm) 28.70~29.3mabh RW





MI66号孔 (	.97∼29.3mabh	VS	garwal法 均流量: 4.13E-05 (m3/s)	
IM6	28.9	SWS	Agar 行力	







dSr/dLn(e.t.)

5.50E-05	1.67E-04	6.31E-114	1.91E-113
透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数















0	4.64E-05	4.64E-05	5.78E-11	5.78E-11
Ð	6.79E-05	6.79E-05	2.96E-16	2.96E-16
	透水量係数 (m <sup>2/s)</sup>	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数









19MI66号孔(々86mm) 28.40~29.3mabh RW Jacob法 平均流量:1.37E-04 (m<sup>3</sup>/s)





2.51E-252

比貯留係数 貯留係数

1.43E-252







dSr/dLn(e.t.)

1.14E-05	2.00E-05	1.73E-53	3.03E-53
透水量係数 (m <sup>2/s)</sup>	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数





_				
	5.12E-06	8.98E-06	0.00E+00	0.00E+00
	透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数







量係数( 水係数(小 貯留係数
-----------------------









9.71.E-19

9.33E-07

比貯留係数









1 0E+07

1 0E+06

1 0E+05

1 0E+04

1 0E+03

15 1 0E+02

4

log(t/r2)









6.69E-05	7.43E-05	2.43E-51	2.70E-51
透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数




i水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	4.48E-05
透水係数 (m/s)	7.87E-05
貯留係数	2.71E-28
比貯留係数	4.75E-28









	s) 7.11E-05	1.25E-04	7.18E-112	1.26E-111
	透水量係数 $(m^2/s)$	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数







6.13E-74 3.50E-74

比貯留係数

貯留係数





ұu¬p/dp









9.56E-05 8.33E-137 1.46E-136

透水係数 (m/s)

比貯留係数

貯留係数





1uJb∕qb

Jacob法 平均流量:5.71E-05 (m<sup>3</sup>/s) 18MI63号孔(々86mm) 28.55~29.12mabh Ň

3.54E-58

比貯留係数



1 0E+07

1 0E+06

1 0E+05

1 0E+04

1 0E+03

12 1 0E+02

0 e

œ 10 log(t/r2)



0.00E+00 0.00E+00

比貯留係数 貯留係数





(.1.9)nJb/r2b

3	1.03E-05	1.81E-05	4.07E-95	7.14E-95
Ð	2.84E-06	4.98E-06	8.12E-27	1.42E-26
	透水量係数 (m <sup>2/s)</sup>	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数

18MI63号孔(々86mm) 31.10~31.67mabh

Ň





1.36E-209 2.39E-209

貯留係数 比貯留係数

1.23E-05 2.16E-05

透水量係数 (m<sup>2</sup>/s) 透水係数 (m/s)







0	5.48E-06	9.62E-06	9.71E-36	1.70E-35
Ð	2.68E-06	4.70E-06	3.23E-18	5.66E-18
	透水量係数 (m <sup>2/s)</sup>	透水係数 (m/s)	貯留係数	比貯留係数

1 1



付録 5.1-4

19MI66 孔壁面全周画像 (BIPS)

















D

D N40W9NE N33W7NE N41W15NE



付録 5.1-5 19MI66 割れ目詳細画像(HR-BTV)





画像8

画像9

画像6















画像10

10画像の割れ目開口幅計測結果								
	1	2	3	4	小計	平均		
可像1	0.19	0.77	0.49	0.00	1.45	0.363		
可像2	0.18	1.03	0.00	0.00	1.21	0.303		
画像3	0.42	0.00	0.00	0.00	0.42	0.105		
可像4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000		
可像5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000		
可像6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000		
可像7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000		
可像8	0.19	0.00	0.00	0.00	0.19	0.048		
可像9	0.06	0.36	0.00	0.00	0.42	0.105		
可像10	0.18	0.30	0.06	0.34	0.88	0.220		
	開口幅	f (mm)		4.57	0.114			

詳細観察割れ目情報および観察結果					
見察孔名	19MI66				
皆盤分離面一覧表No	159				
-覧表中間深度(m)	23.90				
E向傾斜	N30W 86NE				
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.11				







画像6



画像8

画像9







画像10

10画像の割れ目開口幅計測結果							
	1	2	3	4	小計	平均	
画像1	0.19	0.12	0.09	0.00	0.40	0.100	
画像2	0.25	0.00	0.00	0.00	0.25	0.063	
画像3	0.48	0.18	0.37	0.14	1.17	0.293	
画像4	0.41	0.54	0.00	0.00	0.95	0.238	
画像5	0.22	0.00	0.00	0.00	0.22	0.055	
画像6	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	0.015	
画像7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
画像8	1.03	0.06	0.00	0.00	1.09	0.273	
画像9	0.12	0.44	0.61	0.12	1.29	0.323	
画像10	0.06	0.06	0.00	0.00	0.12	0.030	
	開口幅	(mm)	5.55	0.139			

詳細観察割れ目情報および観察結果					
観察孔名	19MI66				
岩盤分離面一覧表No	159				
一覧表中間深度(m)	23.90				
走向傾斜	N30W 86NE				
詳細観察による割れ目開口幅(mm)	0.14				
詳細観察による割れ目開口幅(mm) 1-1、2-1合算	0.13				



【19MI66孔】割れ目画像 No2 N30W 86NE(下側)







【19MI66孔】割れ目全周画像 No1+No2 N30W 86NE



<sup>【19</sup>MI66孔】開口幅計測結果 No3 N33W 7NE

36度毎の割れ目開ロ幅計測結果							
	1	2	3	4	小計	平均	
「像1	0.36	0.82	0.00	0.00	1.18	0.295	
可像2	0.26	0.22	0.00	0.00	0.48	0.120	
画像3	1.23	0.19	0.00	0.00	1.42	0.355	
可像4	0.22	0.00	0.00	0.00	0.22	0.055	
可像5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
「像6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
可像7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
可像8	1.26	0.61	0.54	0.00	2.41	0.603	
「像9	0.27	0.22	0.27	0.17	0.93	0.233	
「像10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	開口幅	G (mm)			6.64	0.166	

詳細観察割れ目情報および観察結果					
見察孔名	19MI66				
皆盤分離面一覧表No	208				
-覧表中間深度(m)	28.99				
<b>上</b> 向傾斜	N33W 7NE				
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.17				



【19MI66孔】割れ目全周画像 No3 N33W 7NE



【19MI66孔】開口幅計測結果 No4 N40W 9NE

36度毎の割れ目開ロ幅計測結果							
	1	2	3	4	小計	平均	
「像1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
「像2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
可像3	0.26	0.60	1.29	0.82	2.97	0.743	
可像4	0.06	0.06	0.00	0.00	0.12	0.030	
可像5	0.41	0.00	0.00	0.00	0.41	0.103	
「像6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
可像7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
「像8	0.09	0.14	0.00	0.00	0.23	0.058	
可像9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
「像10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	開口幅	f (mm)			3.73	0.093	

詳細観察割れ目情報および観察結果					
見察孔名	19MI66				
皆盤分離面一覧表No	210				
-覧表中間深度(m)	29.03				
<b>上</b> 向傾斜	N40W 9NE				
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.09				



【19MI66孔】割れ目全周画像 No4 N40W 9NE



【19MI66孔】開口幅計測結果 No5 N66W 10N

36度毎の割れ目開口幅計測結果						
	1	2	3	4	小計	平均
可像1	0.12	0.00	0.00	0.00	0.12	0.030
「像2	0.22	0.00	0.00	0.00	0.22	0.055
「像3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像4	0.30	0.17	0.06	0.00	0.53	0.133
可像5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
「像6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像7	0.64	0.31	0.00	0.00	0.95	0.238
「像8	0.34	0.79	1.21	0.00	2.34	0.585
「像9	0.06	0.60	0.22	0.19	1.07	0.268
「像10	0.14	0.00	0.00	0.00	0.14	0.035
開口幅(mm)					5.37	0.134

詳細観察割れ目情報および	睍察結果
見察孔名	19MI66
皆盤分離面一覧表No	202
-覧表中間深度(m)	28.42
<b>上</b> 向傾斜	N66W 10N
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.13



【19MI66孔】割れ目全周画像 No5 N66W 10N



【19MI66孔】開口幅計測結果 No6 N29W 20E

36度毎の割れ目開口幅計測結果						
	1	2	3	4	小計	平均
可像1	0.18	0.14	0.00	0.00	0.32	0.080
「像2	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	0.015
可像3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
「像6	0.77	0.18	0.00	0.00	0.95	0.238
可像7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
「像8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
「像9	0.06	0.09	0.00	0.00	0.15	0.038
可像10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
開口幅(mm)					1.48	0.037

詳細観察割れ目情報および	睍察結果
見察孔名	19MI66
皆盤分離面一覧表No	193
-覧表中間深度(m)	27.82
<b>上</b> 向傾斜	N29W 20E
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.04



<sup>【19</sup>MI66孔】割れ目全周画像 No6 N29W 20E



36度毎の割れ目開口幅計測結果						
	1	2	3	4	小計	平均
可像1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
「像3	0.12	0.06	0.00	0.00	0.18	0.045
可像4	0.77	0.79	0.00	0.00	1.56	0.390
可像5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像6	0.37	0.00	0.00	0.00	0.37	0.093
可像7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
「像8	0.12	0.12	0.00	0.00	0.24	0.060
「像9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
開口幅(mm)					2.35	0.059

詳細観察割れ目情報および	<b>睍察結果</b>
見察孔名	19MI66
皆盤分離面一覧表No	196
-覧表中間深度(m)	27.92
E向傾斜	N52W 29NE
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.06



<sup>【19</sup>MI66孔】割れ目全周画像 No7 N52W 29NE



【19MI66孔】開口幅計測結果 No8 N47W 11NE

36度毎の割れ目開口幅計測結果						
	1	2	3	4	小計	平均
可像1	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36	0.090
可像2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
画像3	0.12	0.39	0.00	0.00	0.51	0.128
画像4	0.14	0.00	0.00	0.00	0.14	0.035
可像5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
可像6	0.43	0.00	0.00	0.00	0.43	0.108
画像7	0.66	0.12	0.00	0.00	0.78	0.195
可像8	1.04	0.81	1.55	0.68	4.08	1.020
可像9	0.33	0.17	0.22	0.00	0.72	0.180
可像10	0.34	0.30	0.17	0.00	0.81	0.203
開口幅(mm)					7.83	0.196

詳細観察割れ目情報および	<b>観察結果</b>
見察孔名	19MI66
皆盤分離面一覧表No	203
-覧表中間深度(m)	28.47
E向傾斜	N47W 11NE
洋細観察による割れ目開口幅(mm)	0.20



【19MI66孔】割れ目全周画像 No8 N47W 11NE

## 付録 5.1-6

拡散試験試料集



14MI49\_19.50m 上盤\_No.3 (R01\_D\_03)

14MI49\_19.50m 上盤\_No.1 (R01\_D\_02)

12MI30\_22.77m 下盤\_No.1 (R01\_D\_01)



15MI53\_15.07m 下盤\_No.3 (R01\_D\_06)

15MI53\_15.07m 下盤\_No.1 (R01\_D\_05)

17MI61\_16.35m (R01\_D\_04)



15MI53\_21.41m 下盤\_No.1 (R01\_D\_07)

拡散試験試料の写真

二次利用未承諾リスト

平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処 分に関する技術開発事業(岩盤中地下水流動

受注事業者名 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

頁	図表番号	タイトル
3-8	図 3.1-9	全水頭の実測値
3-8	図 3.1-10	4He年代の実測値
3-10	🗵 3.1-12	データセット1・2・5における全水頭による透水係数の校正値と推定誤差
3-10	図 3.1-13	データセット3・4・5における全水頭による透水係数の校正値と推定誤差
3-11	図 3.1-14	データセット1・2・5における校正結果での実測値と解析値の比較(全水頭)
3-11	図 3.1-15	データセット3・4・5における校正結果での実測値と解析値の比較(全水頭)
3-12	図 3.1-16	データセット1・2・5における4He年代による透水係数の校正値と推定誤差
3-12	⊠ 3.1-17	データセット3・4・5における4He年代による透水係数の校正値と推定誤差
3-13	⊠ 3.1-18	データセット1・2・5における校正結果での実測値と解析値の比較(4He年代)
3-13	図 3.1-19	データセット3・4・5における校正結果での実測値と解析値の比較(4He年代)
3-19	図 3.2-4	主要ガス分析
3-19	extstyle 3.2-5	Hollow fiber法および真空脱ガス法による瑞浪地下水のHe, Ne, Ar, Kr, Xeの抽出率
3-22	⊠ 3.2-6	I-129により推測された若い地下水流入マップ
3-23	⊠ 3.2-7	14Cを2回分析した場合の1回目と2回目の差異
3-25	⊠ 3.2-8	サンプリング条件と14Cの関係
3-27	⊠ 3.2-9	涵養温度と溶解度の関係
3-30	🗵 3.2-11	涵養温度推定方法による推定誤差の変化
3-33	🗵 3.2-13	フィルタ内圧力と時間の関係(フィルタ材質依存性)
3-33	🗵 3.2-14	フィルタ内圧力の経時変化の圧力依存性
3-34	図 3.2-15	フィルタ内圧力の経時変化の塩分濃度依存性
3-42	図 3.2-16	14Cの値とサンプリング・分析におけるばらつきの関係
3-46	図 3.2-18	ガス化法と沈殿法で評価された14Cの値の比較
4-39	🗵 4.3-31	Cl濃度と&Dの関係(左は全体、右はPB-01を抜粋)
4-40	🗵 4.3-32	拡散試験による低濃度タンクでのCl濃度と8Dの変化と837Clの分別
4-41	🗵 4.3-33	SAB02におけるClと837Clの調査結果
4-41	🗵 4.3-34	SAB02におけるδD・δ18Oの再調査結果
4-42	🗵 4.3-35	SAB02の再調査結果におけるClとδDの関係
4-43	図 4.3-37	各シナリオでのClとδD、δ37Clの分布結果
4-45	図 4.3-40	メタンの燃焼試験における反応管温度と反応管通過後のメタン濃度
4-48	図 4.3-41	hollow fiber法(HF)と水上置換法(WD)による81Kr濃度の比較
4-48	图 4.3-42	Cl濃度と天水の涵養年代の深度プロファイル
5-66	⊠ 5.1-85	三次元弾性波トモグラフィにより得られた速度断面(三次元表示)
5-116	図 5.1-138	岩石薄片によるモード測定結果
5-119	図 5.1-141	割れ目面からの距離に応じた実効拡散係数の比較
5-121	図 5.1-143	岩石粉末試料中の鉱物のモード測定結果のグラフ
5-127	図 5.1-147	・ 単川花崗岩の収着等温線
5-127	図 5.1-148	来待砂岩の収着等温線
5-129	図 5.1-151	Trh01の試験結果および解析結果
5-129	図 5.1-152	Trh02の試験結果および解析結果

(様式	2	)
(12/20	_	/

5-130	🗵 5.1-153	Trk01の試験結果および解析結果
3-10	表 3.1-3	全水頭による透水係数の校正値と推定誤差
3-11	表 3.1-4	校正および検証での全水頭の平均絶対誤差
3-12	表 3.1-5	4He年代による透水係数の校正値と推定誤差
3-13	表 3.1-6	校正および検証での4He年代の平均絶対誤差(対数)
3-25	表 3.2-2	4ヶ月間保管した後の地下水試料における14C分析の結果
3-36	表 3.2-3	瑞浪立坑での原位置計測結果
3-38	表 3.2-5	瑞浪立坑での分析結果
3-47	表 3.2-6	瑞浪広域井戸における同位体比分析結果
3-50	表 3.2-7	DH-13号孔で取得された地下水における14Cの値(採水方法による比較)
4-47	表4.3-5	ガス主成分濃度
4-47	表4.3-6	封圧採水中の希ガス濃度
5-118	表 5.1-31	各トレーサーの実効拡散係数および間隙率
5-121	表 5.1-33	岩石粉末試料のモード測定結果(数値はすべてwt%で表示)
5-123	表 5.1-34	各試料の比表面積およびRbおよびBaの溶出量、収着率、分配係数、脱離率の結果
5-128	表 5.1-36	蛭川花崗岩および来待砂岩の物性値
5-130	表 5.1-37	評価解析による推定結果