

5. 各種割れ目探査技術の開発

5.1 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

5.1.1 はじめに

岩盤中の割れ目の間隙幅は様々な方法で推定がなされているが、いずれも不確実性が存在する。例えば、ボアホール TV 計測は、ボーリング孔壁の割れ目の幅を計測するものであるが、掘削によるダメージにより、孔壁の割れ目幅は岩盤内部より大きくなり、実際の間隙幅を大きく見積もる傾向がある。また、割れ目を平行平板の間隙構造モデルとした場合、水理試験によって、水理的開口幅が算出することが可能であるが (Snow 1965)、実際の割れ目の間隙構造とは異なる。このほか方法を含めて間隙幅の推定方法にはそれぞれ不確実性を有しており、決定的な手段は存在しない。このため、様々な手法を組み合わせることで相補的に割れ目の間隙幅を推定することが必要となる。本事業において提案をしている岩石から発生するラドンを用いる手法は、割れ目間隙中に存在するラドン濃度を計測する手法である。ラドンは他の元素との化学的な反応がほとんどなく、緻密な岩石では割れ目表面から発生すると見なせるため、人工のトレーサーとは異なり、繰り返しの測定が可能なパッシブな手法と言える。また、ボアホール TV と異なり、ボーリング孔壁の箇所のみならず、適切な採水や循環試験によって、岩盤内の割れ目の間隙水も計測することが可能である。したがって、ラドン濃度計測による間隙幅の推定方法は既存手法を補うことが可能であるため、本事業ではラドンを用いた割れ目の開口幅推定法の開発と原位置試験での適用性の提示を目指している。

5.1.2 ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念

ラドンによる割れ目の幅の評価は、岩盤中に存在するウラン (U-238) の崩壊過程で発生するラドン (Rn-222) を用いて推定する。ラドンは水溶性でかつ不活性のため、地下水の溶存物質や岩盤を構成する鉱物との化学反応の影響は受けず、岩盤中の親核種であるラジウム (Ra-226) から反跳して割れ目の間隙中の地下水へ溶存する。岩盤中のラドンとラジウムとが放射平衡に達していると仮定できれば、母岩中から地下水へ溶解する時間当たりのラドンの量 (ラドンフラックス) も一定と見なすことができる。この際、地下水中のラジウムの存在量は非常に低いことから、溶存ラジウムの溶存ラドン濃度への影響はほとんど無視することができる。実際に、Cecil et al. (1987) によって、地下水中の溶存ラジウムと溶存ラドンの関係に相関がみとめられないことが知られている。したがって、地下水中のラドンを用いた割れ目幅の推定では、地下水のラジウムの影響を考慮する必要がなく、岩盤から発生したものと見なせる。

岩盤中のラジウムから発生し、反跳するラドンの移動距離は小さく、結晶質岩の様な緻密な岩盤においては、地下水に溶存しているラドンは、岩石内で発生して割れ目の表面から地下水中に溶解した

ものと考えることができる。割れ目を平行平板と仮定し、割れ目表面から供給されるラドンの量と割れ目の面積には図 5.1.2-1 に示すような関係が成り立つ。本事業で提案する手法は原位置での割れ目間隙からの採水よりラドン濃度〔Rn〕を得ると同時に、室内試験によって岩石からのラドン発生量をラドンフラックス (F) として得ることで、間隙幅 (w) を評価しようとするものである。

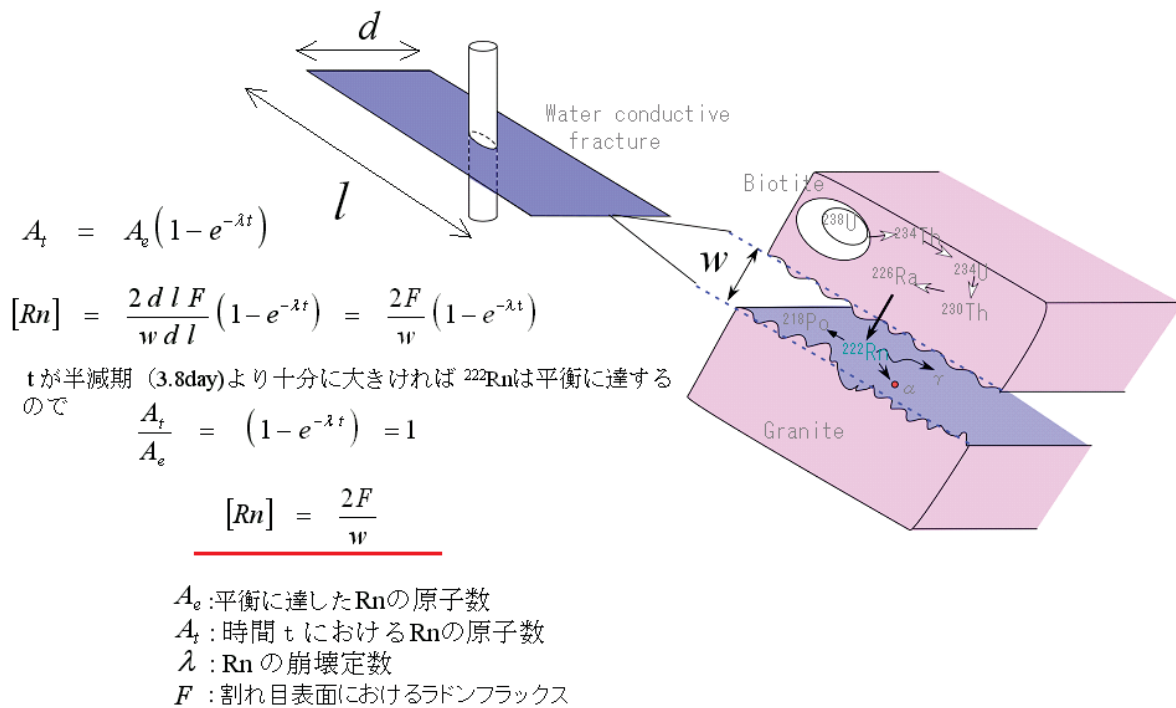


図 5.1.2-1 ラドンによる割れ目幅計測の原理

5.1.3 今年度の実施概要

本事業ではこれまでラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法を開発し、スイスグリムゼルのテストサイトへ適用した。その結果、トレーサー試験、高粘性流体を用いた水理試験から得た間隙幅や、その後に評価対象の割れ目に樹脂(レジン)を注入後、ボーリング掘削により得たコアなどから評価した割れ目の間隙と比較し、相補的にラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法の適用性を確認した。この手法を我が国の岩盤にも適用するためには、代表的な岩石や岩盤での検討を行い、その適用性を評価していく必要がある。我が国における溶存地下水のラドン濃度は変化に富み、胚胎する地質によってその濃度が異なる。特に堆積岩地域の地下水のラドン濃度の分布範囲は3オーダーにも及ぶために、割れ目間隙幅の推定手法を広く適用するためには、堆積岩への適用性を検討しておく必要がある。このため、昨年度は、砂岩、泥岩などの堆積岩への適用性を検討するとともに、比較のために花崗岩についても分析を実施し、間隙率の影響などにより、岩石内部からのラドンの発生がより寄与していることが想定された。このため、今年度も引き続き堆積岩からのラドンの発生量を検討するとともに、瑞

浪超深層研究所への適用の準備のため、ラドンフラックスの測定ならびに原位置のラドン濃度を予備的に検討する。

5.1.4 ラドンによる割れ目間隙幅の推定手法の適用性検討

5.1.4.1 岩石の物理化学特性

瑞浪超深地層研究所の深度500mボーリング横坑において掘削したボーリングコアの物理化学特性分析を行った。使用したボーリングコアは15MI52号孔、15MI53号孔、16MI59号孔の中粒花崗岩（以降、瑞浪花崗岩と呼称）である。

(1) 元素分析

岩石の元素分析においては、主要元素を蛍光X線分析(XRF)で分析するとともに、微量元素は、誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)もしくは誘導結合プラズマ発光分析法(ICP-AES)により分析を行った。これらの分析はカナダにあるALS Canada Ltd.社にて、以下の分析コード(パッケージ分析)を使用している。詳細は以下のとおりである。

a. 蛍光X線分析

分析コード：ME-XRF06によって分析を行った。

以下に対象とした分析項目、分析試料、分析方法および分析結果について示す。

1) 分析元素

SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, SrO, BaO, LOI

2) 分析試料

分析試料の一覧を表5.1.4-1に示す。深度500mの瑞浪花崗岩のボーリングコアに認められる開口割れ目とその周辺母岩には次の特徴をもつ割れ目が認められた。①石英脈もしくは淡緑色充填鉱物を伴い、岩石基質部(マトリックス)の変質を伴う割れ目(GR01とGR05)、②岩石基質部に伴質を伴わないが、割れ目表面に充填鉱物を伴う割れ目(GR06とGR07)。また岩石基質部にも部分的に特徴があり、③黒雲母の濃集部分(GR03)、④微細亀裂と橙色鉱物を含む部分(GR08)が認められた。分析では比較のために①の特徴をもたない近傍の試料(GR02)、③の特徴をもたない近傍の試料(GR04)の分析も行った。

3) 分析方法

粉末状にした試料について、ホウ酸リチウムを使用して熔融した後、ガラス試料を作成する。これを蛍光X線分析法(XRF)により試料を酸化物の形で分析する。

表 5.1.4-1 元素分析試料一覧

試料名	孔名および深度	特徴	変質	備考
ICP/XRF-GR01	15MI52 27.080m-27.110m	割れ目表面には石英脈が認められ、岩石基質部には淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。	○	割れ目表面の石英脈を除く
ICP/XRF-GR02	15MI52 27.110m-27.140m	GR01 採取箇所よりも下部に位置し、淡緑色鉱物が認められない箇所。GR01 採取箇所のカリ長石よりもピンク色が薄い。	×	
ICP/XRF-GR03	15MI52 24.405m-24.425m	黒雲母の濃集が認められる。	-	
ICP/XRF-GR04	15MI52 24.505m-24.525m	GR03 採取箇所の近傍に位置し、黒雲母の濃集は認められない。	-	
ICP/XRF-GR05	15MI52 11.332m-11.510m	割れ目面および岩石基質部分ともに淡緑色鉱物が多く認められる。	○	割れ目表面の充填鉱物は除く
ICP/XRF-GR06	15MI53 16.640m-16.840m	割れ目周辺に白色変質を伴う。岩石基質部分の変質はない。	×	割れ目表面を含む
ICP/XRF-GR07	16MI59 20.932m-21.092m	割れ目表面にごくわずかに充填鉱物が認められ、岩石基質部分の変質はない。	×	割れ目表面を含む
ICP/XRF-GR08	16MI59 11.660m-11.690m	微細亀裂が多数認められ、橙色の鉱物を伴う。	-	

4) 分析結果

蛍光 X 線分析による主要構成元素を表 5.1.4-2 に示す。各試料ともにケイ素を最大主要元素とし、次いでアルミニウム、カリウム、ナトリウムの順に構成されている。GR03 (15MI52 24.405m-24.425m) および GR04(15MI52 24.505m-24.525m) はほかの試料よりもカリウムの量が多くなっており、GR04 はカリウムのほかにもアルミニウム、ナトリウム、ストロンチウム、バリウムの量も試料の中で最も含有量が多い。また岩石基質部分の変質の有無で比較すると、変質がない試料にはカルシウムがより多く含まれている。これは割れ目周辺の白色変質や割れ目に充填していた白色粉状鉱物が方解石であったことに起因している。変質が認められる試料では Fe2O3 がより多く含まれる。これら試料内では緑泥石が多くみられ、また斜長石がセリサイト化していることが原因だと考えられる。GR01~GR08 の CaO-Na2O-K2O 成分三角ダイアグラムを図 5.1.4-1 に示す。

表 5.1.4-2 蛍光 X 線分析 (XRF) による主要構成元素

試料名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	BaO	Total	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
XRF-GR01	74.09	12.8	2.36	0.73	0.26	3.21	4.85	<0.01	0.16	0.05	0.041	0.01	0.03	99.64	1.05
XRF-GR02	74.52	13.26	1.83	1.27	0.2	3.68	4.48	<0.01	0.12	0.06	0.029	0.01	0.03	99.73	0.24
XRF-GR03	75.09	12.58	2.12	0.89	0.25	3.36	5	<0.01	0.14	0.07	0.036	0.01	0.01	99.89	0.33
XRF-GR04	71.86	15.22	1.14	1.23	0.1	3.89	6.15	<0.01	0.06	0.03	0.015	0.02	0.06	100.1	0.3
XRF-GR05	75.01	12.74	1.88	1.1	0.22	3.34	4.71	<0.01	0.12	0.06	0.032	0.01	0.03	99.93	0.68
XRF-GR06	74.38	13.28	2.02	1.28	0.23	3.6	4.61	<0.01	0.14	0.06	0.034	0.01	0.03	99.87	0.2
XRF-GR07	74.76	12.72	1.93	1.2	0.22	3.41	4.5	<0.01	0.12	0.06	0.033	0.01	0.03	99.21	0.22
XRF-GR08	74.44	13	2.02	1.22	0.23	3.5	4.65	<0.01	0.14	0.06	0.033	0.01	0.04	99.86	0.52

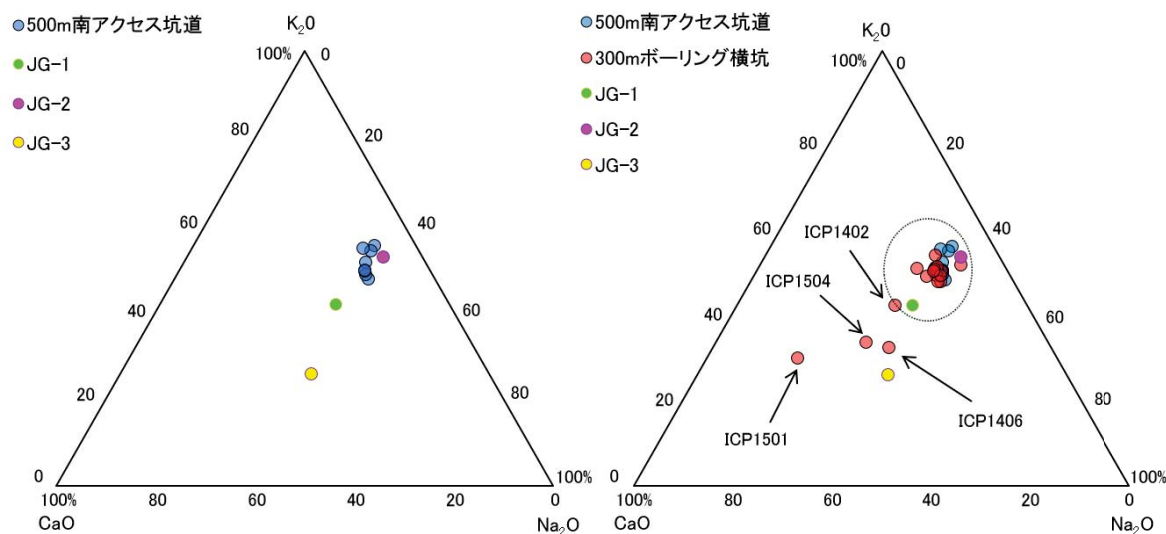


図 5. 1. 4-1 瑞浪花崗岩の $\text{CaO-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ 成分の三角ダイアグラム

左図は 2016 年度の結果をプロットしたものである。右図は 2016 年度のデータに 300m ボーリング横坑のデータを合わせた結果（赤丸）である。300m 研究アクセス坑道のニッチより掘削したボーリング（10MI22 孔、24、25）の結果は（赤丸）で示した。図中の大きな黒点線で示した範囲は、湯口ほか（2010）による土岐花崗岩体の分布範囲内を示したものである。また、比較のために産業技術総合研究所で公開している地球化学標準物質 JG-1（花崗閃緑岩：群馬県沢入産）、JG-2（花崗岩：岐阜県苗木）、JG-3（花崗閃緑岩：島根県三刀屋）を示した。

b. 誘導結合プラズマ質量分析法

誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）については、分析対象とする元素の種類によって分析コード：MS-MS612 と分析コード：MS-MS81 の 2 つの分析方法で行った。

以下に対象とした分析項目、分析試料、分析方法および分析結果について示す。

(a) 分析コード MS-MS61

1) 分析元素

Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr

2) 分析試料

分析試料の一覧を表 5. 1. 4-1 に示す。

3) 分析方法

粉末状にした試料を 4 種混合酸（塩酸・フッ化水素酸、硝酸、過塩素酸）にて溶解した後、酸溶液試料を作成する。これを誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）により元素分析した。

4) 分析結果

誘導結合プラズマ発光分析法による微量分析結果を表 5.1.4-3 に示す。

表 5.1.4-3 微量元素分析 (ME-MS61)

試料名	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu
	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-GR01	0.04	6.37	0.5	300	1.59	0.11	0.52	0.03	60.3	1.5	15	2.79	3.3
ICP-GR02	0.01	6.42	0.5	280	2.66	0.05	0.87	<0.02	41.3	1	8	4.33	2.7
ICP-GR03	0.01	6.2	0.4	150	1.95	0.07	0.62	0.02	29.7	1.2	11	4.42	0.5
ICP-GR04	0.01	7.11	0.4	610	2.47	0.04	0.82	<0.02	18.95	0.6	7	3.03	0.5
ICP-GR05	0.06	6.22	0.6	310	2.72	0.25	0.76	<0.02	40.7	1.1	9	3.39	0.5
ICP-GR06	0.01	6.53	0.3	300	2.43	0.06	0.89	<0.02	46	1.1	10	4.74	0.5
ICP-GR07	0.01	6.39	0.6	310	2.49	0.06	0.87	<0.02	46.6	1.1	10	4.75	0.4
ICP-GR08	0.01	6.2	0.5	350	2.7	0.05	0.82	<0.02	44.9	1.1	9	4.79	0.4

試料名	Fe	Ga	Ge	Hf	In	K	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Nb
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm
ICP-GR01	1.55	16.15	0.1	2.1	0.034	3.7	28.3	42.9	0.14	409	1.65	2.18	11.5
ICP-GR02	1.17	15.4	0.09	2	0.025	3.42	18.8	36.2	0.1	441	1.02	2.5	11.5
ICP-GR03	1.35	13.75	0.09	1.2	0.028	3.78	13.6	41.1	0.13	503	1.09	2.27	10.4
ICP-GR04	0.72	15.7	0.08	0.9	0.016	4.77	8.5	22.5	0.05	227	1.24	2.67	7.1
ICP-GR05	1.2	14.8	0.09	1.7	0.028	3.59	18.8	33.9	0.11	445	2.17	2.26	11.8
ICP-GR06	1.3	15.2	0.1	1.7	0.028	3.56	21.2	56.5	0.12	470	0.81	2.47	10.7
ICP-GR07	1.26	14.45	0.1	1.8	0.028	3.43	21.6	52	0.12	464	0.74	2.33	11
ICP-GR08	1.27	14.85	0.09	2	0.029	3.53	20.3	40.2	0.12	479	0.91	2.33	12.8

試料名	Ni	P	Pb	Rb	R	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Te
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-GR01	2.8	190	28.7	214	<0.002	0.02	0.16	3.2	1	3	75	1.35	<0.05
ICP-GR02	1.6	140	27.3	195.5	<0.002	0.01	0.11	2.8	1	2.7	95.4	1.66	<0.05
ICP-GR03	0.7	170	34.4	248	<0.002	0.01	0.24	2.8	1	2.5	48.4	1	<0.05
ICP-GR04	0.9	70	34	228	<0.002	<0.01	0.08	1.6	1	1.3	135	1.22	<0.05
ICP-GR05	0.7	140	34.7	207	<0.002	0.04	0.08	2.9	1	2.7	92.9	1.57	<0.05
ICP-GR06	0.6	160	27.8	201	<0.002	0.01	0.06	2.9	1	2.9	96.8	1.27	<0.05
ICP-GR07	0.7	160	25.9	198	<0.002	0.01	0.07	3	1	2.8	94.2	1.48	<0.05
ICP-GR08	0.6	150	26.5	206	<0.002	0.02	0.06	3.1	1	2.9	99.1	1.85	<0.05

試料名	Th	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr
	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-GR01	30.5	0.09	1.05	8	11	1	19.7	45	47.8
ICP-GR02	19.8	0.075	0.92	5	8	0.2	24.6	32	41.4
ICP-GR03	30.2	0.092	1.13	5	9	0.2	20.2	37	26.8
ICP-GR04	13.55	0.037	1.04	3.5	4	0.1	15.8	16	17.5
ICP-GR05	18.75	0.077	1.03	7.2	8	0.4	31	32	34.4
ICP-GR06	22	0.085	0.99	5.1	8	0.2	24.3	35	36.7
ICP-GR07	21.4	0.081	0.95	5.8	8	0.1	27.1	35	38.2
ICP-GR08	21.2	0.082	0.99	6.4	8	0.2	26.8	33	43.3

(b) 分析コード MS-MS81

1) 分析元素

Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr

2) 分析試料

分析試料の一覧を表 5.1.4-1 に示す。

3) 分析方法

粉末状にした試料について、ホウ酸リチウムを使用して溶融した後、ガラス試料を作成する。さらにこのガラス試料を再度粉末化し、酸溶液によって溶解したのちに酸溶液試料を作成する。これを誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) により元素分析した。

4) 分析結果

誘導結合プラズマ発光分析法による微量分析結果を表 5.1.4-4 にそれぞれ示す。微量元素の分析結果をコンドライト規格化した ICP-GR01~ICP-GR08 の試料の希土類元素 14 元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) のパターン図を作成した (図 5.1.4-2)。規格化

には、Taylor & McLennan (1985) のコンドライト値を採用した。また、標準試料として花崗岩類の標準試料 JG-1、JG-2、JG-3 と昨年度に瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横孔の 12MI30 孔 (12.55m-12.68m) と 13MI36 孔 (11.00m-11.20m)、13MI36 孔 (13.90-14.00m) の変質していない花崗岩のパターンも併せて示した (図 5.1.4-3)。分析した瑞浪花崗岩はいずれも、日本の花崗岩の特徴である軽希土類 (左側) に富み、Eu 負異常で特徴付けられる。また、今年度分析した 500m サンプルは 300m に比べて希土類が素体的に少ない傾向にあり、特に ICP-GRO3 と ICP-GRO4 は LREE と HREE とともに小さい他よりも大きい値を示す。一方、変質した ICP-1501 は LREE で相対的に大きい値を示している。

表 5.1.4-4 微量元素分析 (ME-MS81)

試料名	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-GRO1	309	64.2	20	2.96	5.39	3.62	0.48	16.2	4.81	4.6	1.2	31.9	0.64	13.7	25.1	7.28
ICP-GRO2	301	42.9	10	4.75	5.73	4.14	0.48	15.6	4.65	4.8	1.29	20.9	0.77	12.3	18.3	4.9
ICP-GRO3	158	30.6	20	4.96	3.92	2.77	0.34	15.1	3.44	2.4	0.93	14.4	0.46	11.9	13.6	3.53
ICP-GRO4	639	20.6	10	3.08	3.13	2.19	0.55	15.4	2.59	1.9	0.69	10.2	0.39	6.7	9.2	2.39
ICP-GRO5	316	40.9	10	3.66	6.28	4.44	0.42	16	4.97	4.2	1.44	19.7	0.78	12.7	17.4	4.62
ICP-GRO6	294	45.7	20	4.92	4.85	3.2	0.5	16.2	4.07	3.3	1.06	22.6	0.57	11.4	18.8	5.07
ICP-GRO7	312	47.7	20	5.29	5.92	3.93	0.46	16	4.94	3.8	1.29	23.5	0.75	12.7	19.8	5.36
ICP-GRO8	367	48.6	20	5.17	5.57	3.94	0.51	16.8	4.67	4.9	1.3	23.2	0.76	13.9	19.9	5.51

試料名	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-GRO1	216	5.53	4	80.5	1.9	0.82	33.9	0.58	8.63	12	2	36.1	3.98	139
ICP-GRO2	195.5	4.47	4	102	2.3	0.84	21	0.69	6.25	11	2	38.6	4.84	135
ICP-GRO3	263	3.4	3	54.5	1.8	0.62	33.4	0.44	5.91	10	1	27.1	2.97	76
ICP-GRO4	222	2.22	2	143	1.1	0.45	14.15	0.36	3.87	6	1	20.9	2.6	54
ICP-GRO5	212	4.44	3	101.5	1.5	0.93	19.05	0.69	7.99	8	1	43.2	4.86	119
ICP-GRO6	206	4.19	3	105.5	1.1	0.73	20.7	0.52	5.32	11	1	33	3.74	99
ICP-GRO7	205	4.86	3	104	1.6	0.9	19.6	0.67	5.99	8	1	40	4.68	109
ICP-GRO8	218	4.71	3	111.5	1.8	0.88	23.3	0.69	7.98	10	1	40.5	4.97	140

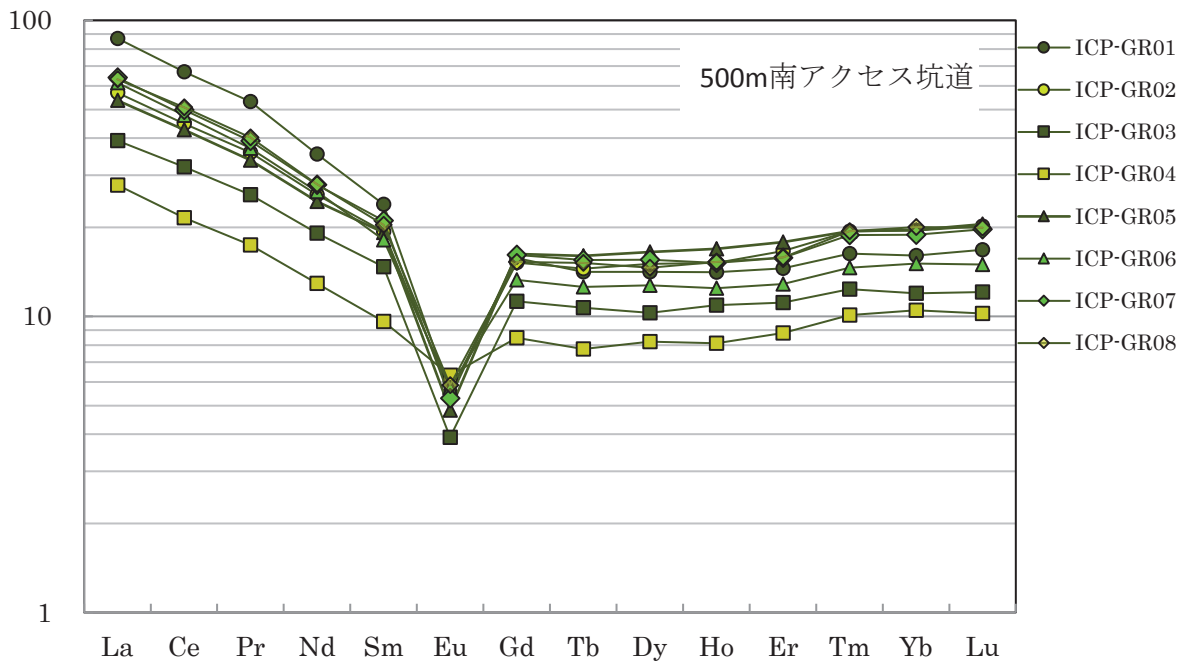


図 5.1.4-2 ICP-GR01~ICP-GR08 の希土類パターン (ME-MS81 の分析値を使用)

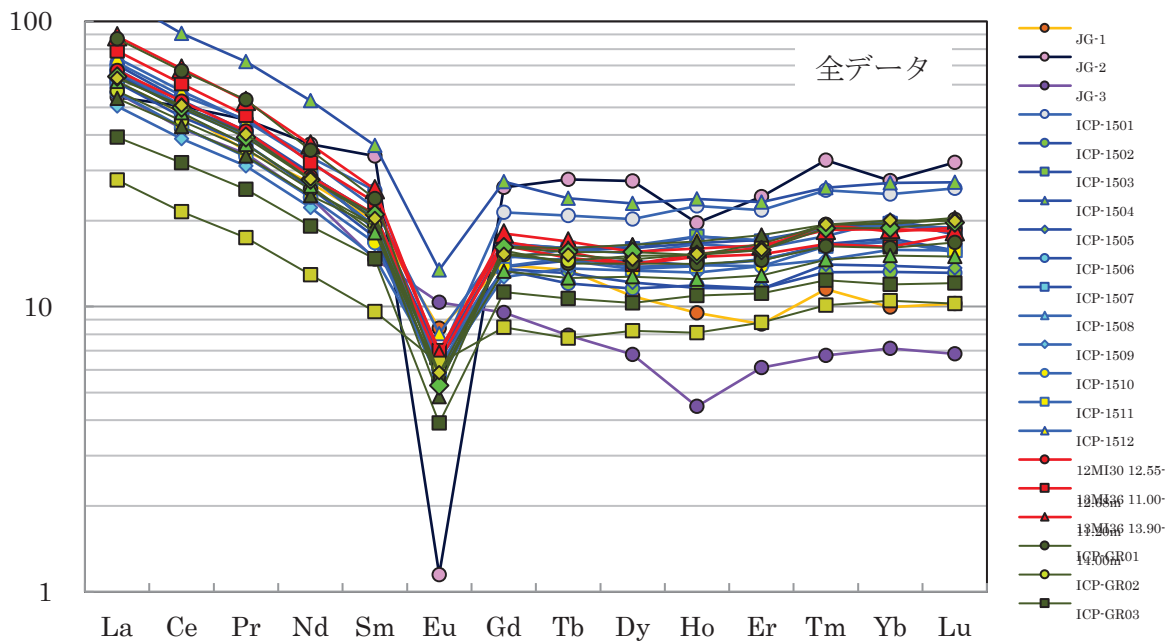


図 5.1.4-3 ICP-GR01~ICP-GR08 と標準試料および未変質試料の希土類パターンの比較

(2) 鉱物分析

試料とした瑞浪花崗岩については、一般的な変質や脈石鉱物の分布を把握するとともに、ラジウムなどのラドンの親核種の富化に影響する変質について確認するために X 線回折分析 (XRD) を実施した。分析においては試料の割れ目充填鉱物とともに割れ目近傍の母岩の変質箇所も試料とする。X 線回折分析の対象とした試料を表 5.1.4-5 に示す。

表 5.1.4-5 X 線回折分析 (XRD) による鉱物分析試料

試料名	孔名および深度	分析箇所	特徴	備考
XRD-GR01	15MI52 27.080m-27.110m	岩石基質	割れ目表面には石英脈が認められ、岩石基質部には淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。	割れ目表面の石英脈を除く
XRD-GR02	15MI52 27.110m-27.140m	岩石基質	XRD-GR01 採取箇所よりも下部に位置し、淡緑色鉱物が認められない箇所。XRD-GR01 採取箇所のカリ長石よりもピンク色が薄い。	
XRD-GR03	15MI52 24.405m-24.425m	岩石基質	黒雲母の濃集が認められる。	
XRD-GR04	15MI52 24.505m-24.525m	岩石基質	XRD-GR03 採取箇所の近傍に位置し、黒雲母の濃集は認められない。	
XRD-GR05	15MI52 11.332m-11.510m	岩石基質	割れ目面および岩石基質部分ともに淡緑色鉱物が多く認められる。	割れ目表面の充填鉱物は除く
XRD-GR06	15MI53 16.640m-16.840m	岩石基質 + 白色変質	割れ目周辺に白色変質を伴う。岩石基質の変質はない。	割れ目表面を含む
XRD-GR07	16MI59 20.932m-21.092m	割れ目周辺	割れ目表面にごくわずかに充填鉱物が認められ、岩石基質の変質はない。	割れ目表面を含む
XRD-GR08	16MI59 11.660m-11.690m	岩石基質	微細亀裂が多数認められ、橙色の鉱物を伴う。	
XRD-GR01-Qz vein	15MI52 27.075m-27.080m	石英脈	石英結晶とともに淡緑色鉱物および暗緑色鉱物が認められる。	
XRD-GR05-filling	15MI52 11.332m	充填鉱物	淡緑色鉱物および白色板状鉱物が認められる。	

XRD-GR01~XRD-GR08 は元素分析で用いた試料と同じ試料を分析する。左記の試料に加え、XRD-01 の分析では除外した石英脈部分 (XRD-GR01-Qz vein) および XRD-05 の割れ目充填鉱物 (XRD-GR05-filling) を分析箇所とする。

a. 分析方法

鉱物分析は図 5.1.4-4 のフローチャートのように、試料に各処理を施したあと、X 線回折装置による分析を行った。分析には Philips 社製全自動多目的 X 線回折装置 X' Pert を使用した。最初に全岩分析を行ったのち、粘土鉱物の認められた試料については定方位分析を行った。それぞれの分析方法を以下に示す。

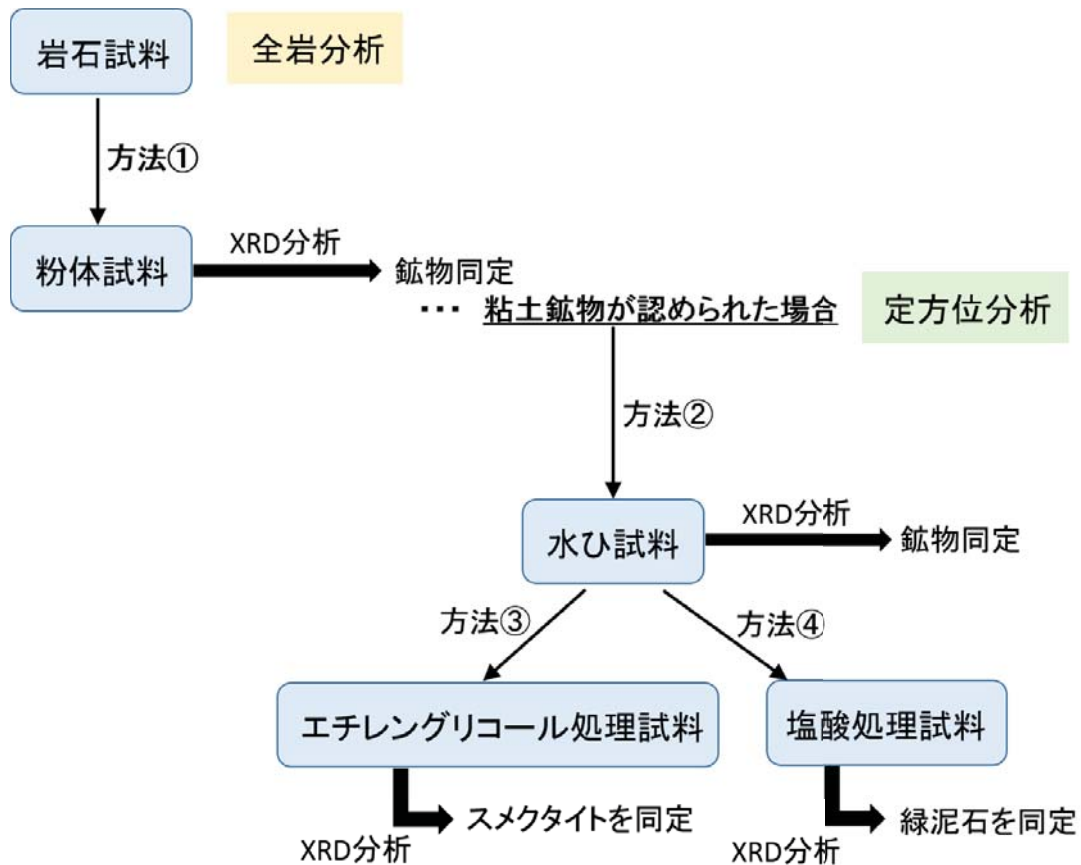


図 5.1.4-4 XRD 分析のための試料の処理方法および同定鉱物

1) 全岩分析

全岩分析は以下の方法で試料処理を行ったうえで実施した。

- ・ 方法①：岩石試料をめのう乳鉢で粉体化し、アルミ試料ホルダーに充填し、粉体試料とする。

2) 定方位分析

全岩分析の結果、試料に粘土鉱物が認められる場合にフローチャートに従い、定方位分析を行った。フローチャート中の各試料処理方法は以下の手順である。

- ・ 方法②：1Lのビーカーに粉体化した試料を蒸留水とともにいれて十分に攪拌し、試料を分散させる。その後、約4時間静置した後、水面から4.5cmまでの上ずみを採取する。上ずみ液を遠心分離機で試料粒子を沈下させて、スライドガラスに塗り、これを風乾させて水ひ試料とする。残った試料は後の分析のため取り置く。
- ・ 方法③：スメクタイトが存在する可能性がある場合、方法②で使用した試料（スライドガラスに塗ったもの）にエチレングリコールを噴霧し、半乾きの状態をエチレングリコール処理試料とする。
- ・ 方法④：緑泥石の存在する可能性がある場合、方法②で取り置いた水ひ試料を6規定の塩

酸溶液にいれ、80℃で湯煎し約 2 時間静置する。その後、塩酸を良く洗浄してスライドグラスへ塗り、塩酸処理試料とする。

c. 分析結果

分析結果を表 5.1.4-6 に示す。瑞浪花崗岩には方解石、緑泥石、セリサイト、スメクタイトが検出された。これらの鉱物は深度 300m ボーリング横坑でも認められたが、今般分析した深度 500m の試料は全体的に粘土鉱物が少なく、岩石基質の変質の程度は弱いと考えられる。その中で、セリサイトは極微量で表中に現れないものも含めると、多くの試料に存在している。XRD-GR01 の試料は、石英脈に伴う鉱物で、方解石や緑泥石が認められる。同様に XRD-GR01-Qz vein にも方解石が認められており、石英脈には方解石が共存することが多い様である。岩石基質部には淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。

表 5.1.4-6 鉱物分析結果 (XRD)

試料名	孔名および深度	方解石	緑泥石	セリサイト	スメクタイト
XRD - GR01	15MI52 27.080m - 27.110m	+	+		
XRD - GR02	15MI52 27.110m - 27.140m				
XRD - GR03	15MI52 24.405m - 24.425m			+	
XRD - GR04	15MI52 24.505m - 24.525m				
XRD - GR05	15MI52 11.332m - 11.510m	+	+	+	
XRD - GR06	15MI53 16.640m - 16.840m			+	
XRD - GR07	16MI59 20.932m - 21.092m			+	
XRD - GR08	16MI59 11.660m - 11.690m			+	
XRD-GR01-Qz vein	15MI52 27.075m - 27.080m	++			
XRD-GR05-filling	15MI52 11.332m	◎		+	(-)

含有量 (相対比較) : ◎>○>++>+>- 空欄は検知できなかったもの

(3) 岩石中のウラン系列核種およびトリウム系列核種分析

本研究で対象とするウラン、トリウムは岩石中には普遍的に存在している。ウランおよびトリウムの主要な同位体には以下のものがある (古川, 1994)。

- ^{238}U : 存在度 99.2745%, 半減期 4.468×10^9 年
- ^{235}U : 存在度 0.720%, 半減期 7.038×10^8 年
- ^{234}U : 存在度 0.0055%, 半減期 2.45×10^5 年
- ^{232}Th : 存在度 100%, 半減期 1.405×10^{10} 年
- ^{230}Th : 半減期 7.54×10^4 年
- ^{228}Th : 半減期 1.913 年

これらの放射性同位体のうち、 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th はそれぞれウラン系列, アクチニウム系列, トリウム系列の親核種であり, 何回かの放射壊変を経て最終的に鉛の安定同位体となる (図 5.1.4-5,

図 5.1.4-6, 図 5.1.4-7)。これらの壊変系列では、対象とする系が閉鎖系の場合、十分長い時間が経過すると親核種と子孫核種の放射能が等しくなる(親核種と子孫核種の放射能比が1になる)。例えば、ウラン系列核種では親核種(238U)と子孫核種の1つである234Uを考えた場合、234Uの半減期 2.45×10^5 年の10倍程度(約 10^6 年)経過すると、両者の放射能は等しくなり、放射能比は1となる。対象とした系でウラン系列核種の放射能比が1となっている場合、その系はウラン系列核種について 10^6 年程度の間、閉鎖系が保たれているとすることができる。

上述の原理を応用して、これまでに堆積岩中のウランの移動や花崗岩などの結晶質岩中の割れ目に沿った物質移動の評価が行われてきている。例えば、核燃料サイクル開発機構(1999a)では、岐阜県東濃地域に分布する堆積岩中に濃集した天然ウランの長期的な移動を評価するために、堆積岩の構成鉱物および堆積岩全岩(数10cmサイズ)について、ウラン系列核種の測定を行い、ウラン鉱床を胚胎する地層が過去約数十万年間、還元状態が保たれるなど安定な地質環境であったことを報告している。また、核燃料サイクル開発機構(1999b)では、岩手県釜石鉱山に分布する栗橋花崗閃緑岩中の透水性割れ目の近傍の岩盤中における、物質のマトリックス拡散現象を確認するために、割れ目表面から母岩内部に向けて、ウラン系列核種の分布を測定し、その結果から、ウランのマトリックス拡散深さは、少なくとも10~100mmと推定している。海外での研究事例については、Alexander et al. (1990)は、スイスグリムゼル花崗岩に認められる透水性割れ目の近傍の岩盤について、ウラン系列核種などの分布を利用して、マトリックス拡散深さを評価した。その結果から、Projekt Gewähr (Nagra, 1985)にて設定した値の保守性を示した。このように、天然のウラン系列核種、トリウム系列核種を利用したアプローチは、長期にわたる物質移動現象を評価する上で有効と考えられる。

ウラン系列						A=4n+2						Th-234	←	U-238	
												24.1d β ⁻			4.5 10 ⁹ y
														Pa-234 ×	
			Pb-214	←	Po-218	←	Rn-222	←	Ra-226	←	Th-230	←			U-234
			26.8min β ⁻	99.98%	3.05min β ⁻ 0.02%		3.8d		1600y		8·10 ⁴ y				2.5 10 ⁵ y
		Tl-210	←	Bi-214	←	At-218									
		1.3min β ⁻	0.04%	19.8min β ⁻ 99.96%		-2s									
Hg-206	←	Pb-210	←	Po-214											
8.1min β ⁻	0.75·10 ⁻⁴ %	β ⁻ 22y -100%		162 μs											
		Tl-206	←	Bi-210											
		4.3min β ⁻	5·10 ⁻⁵ %	5.0d β ⁻ 100%											
		Pb-206	←	Po-210											
		stable		138.4d											

図 5.1.4-5 天然放射性元素の壊変系列(ウラン系列)

アクチニウム系列 $A=4n+3$								Th-231 25.6h β^-	$\leftarrow \alpha$	U-235 7 10 ⁸ y	
			Bi-215 7.4min β^-	$\leftarrow \alpha$ 97%	At-219 0.9min β^- 3%	$\leftarrow \alpha$ $4 \cdot 10^{-3}\%$	Fr-223 22min $\beta^- \sim 100\%$	$\leftarrow \alpha$ 1.2%	Ac-227 22y β^- 98.8%	$\leftarrow \alpha$	Pa-231 3.3 10 ⁴ y
		Pb-211 36.1min β^-	$\leftarrow \alpha$ -100%	Po-215 1.8ms $\beta^- \sim 10^{-4}\%$	$\leftarrow \alpha$	Rn-219 3.9s	$\leftarrow \alpha$	Ra-223 11.4d	$\leftarrow \alpha$	Th-227 18.7d	
	Tl-207 4.8min β^-	$\leftarrow \alpha$ 99.68%	Bi-211 2.15min β^- 0.32%	$\leftarrow \alpha$	At-215 -100 us						
		Pb-207 stable	$\leftarrow \alpha$	Po-211 0.52s							

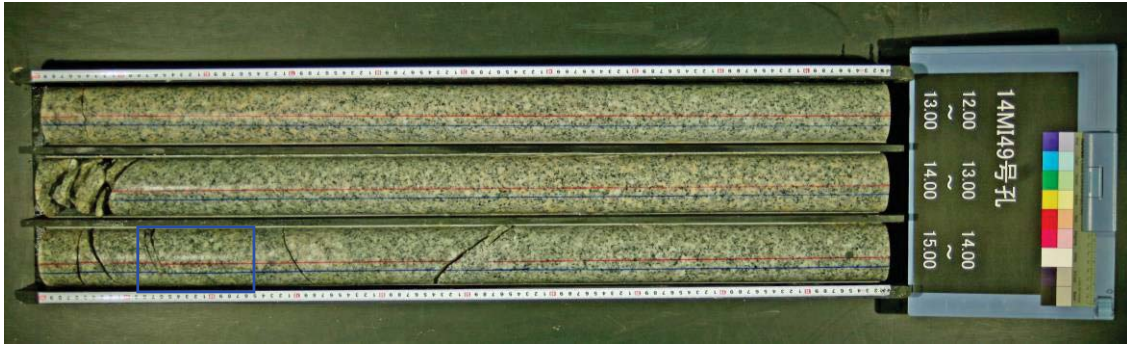
図 5.1.4-6 天然放射性元素の壊変系列（アクチニウム系列）

トリウム系列 $A=4n$								Ra-228 5.7y β^-	$\leftarrow \alpha$	Th-232 1.4 10 ¹⁰ y
								Ac-228 6.13h β^-		
		Pb-212 10.6h β^-	$\leftarrow \alpha$	Po-216 0.15s	$\leftarrow \alpha$	Rn-220 55.6s	$\leftarrow \alpha$	Ra-224 3.64d	$\leftarrow \alpha$	Th-228 1.9a
	Tl-208 3.1min β^-	$\leftarrow \alpha$ 36.2%	Bi-212 60.6min β^- 63.8%							
		Pb-208 stable	$\leftarrow \alpha$	Po-212 0.3ps						

図 5.1.4-7 天然放射性元素の壊変系列（トリウム系列）

a. 分析試料

ウラン系列核種およびトリウム系列核種分析に使用する試料は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道内の深度 300m ボーリング横坑に掘削した 14MI49 号孔のコアを利用した。このボーリング孔のコア観察やボアホールテレビ観察、水理試験結果を基に透水性の割れ目を選定した（図 5.1.4-8）。選定した割れ目の割れ目面から約 10cm の範囲で約 1cm ごとにコアを切断、粉碎し分析を実施した。



青枠はコア採取箇所



黒線箇所に沿ってコアを切断

図 5.1.4-8 分析用コア

b. 分析方法

ウランおよびトリチウムの分析方法を以下に示す。

1) ウラン分析

文部科学省放射能測定法シリーズ 14「ウラン分析法」（平成 14 年改訂）に準じた。操作の概略は次のとおりである。送付試料に ^{232}U 回収率補正用トレーサーを添加し、フッ化水素酸および硝酸を加えて加熱分解した。残さが認められた場合は分解操作を繰り返し、試料を完全に分解した。得られた溶液から TBP-キシレン溶媒抽出法で分離・精製したウランをステンレス鋼板上に電着し、測定試料とした。シリコン半導体検出器を用いて、測定試料を原則として 80,000 秒間以上測定し ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 放射能濃度を算出した。測定にはシリコン半導体検出器 ORTEC 社製 BU-020-450-AS を使用した。

2) トリウム分析

送付試料に ^{229}Th 回収率補正用トレーサーを添加し、フッ化水素酸および硝酸を加えて加熱分解した。残さが認められた場合は分解操作を繰り返し、試料を完全に分解した。得られた溶液から陰イオン交換樹脂カラム法で分離・精製したトリウムをステンレス鋼板上に電着し、測定試料とした。シリコン半導体検出器を用いて、測定試料を原則として 80,000 秒間以上測定し ^{228}Th , ^{230}Th ,

^{232}Th の放射能濃度を算出した。測定にはシリコン半導体検出器 ORTEC 社製 BU-020-450-AS を使用した。

c. 分析結果

測定結果を表 5.1.4-7 に示した。また、ウラン同位体およびトリウム同位体の α 線スペクトルの例を図 5.1.4-9, 図 5.1.4-10 に示した。 ^{238}U , ^{234}U の割れ目表面からの深度分布を検討した結果 (図 5.1.4-11 (a)), 多少ばらつきはあるものの, ^{238}U , ^{234}U ともにほぼ一定の濃度であった。 ^{232}Th , ^{230}Th についても, ウランと同様にほぼ一定の濃度であった (図 5.1.4-11 (b))。 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比, $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 放射能比についても, 全てのデータでほぼ 1 (放射平衡) の値が得られ (図 5.1.4-12, 図 5.1.4-13), 割れ目表面からの拡散が生じている可能性は低く, 過去 100 万年間程度ウラン, トリウムが移動していないことを示すと考えられる。

今後, 深度 500m 研究坑道から掘削されたボーリングコアについて, ウラン, トリウムを測定するとともに, 地下水中のウランおよびトリウムの測定も行いウラン, トリウムの挙動を評価する。

表 5.1.4-7 ウラン, トリウム同位体測定結果

Depth (mabh)	Distance from fracture surface (mm)	Geology	^{238}U (Bq/kg)	^{234}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{230}Th (Bq/kg)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Activity Ratio	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ Activity Ratio
14.745-14.758	0	Granite	62 ± 3	66 ± 3	95 ± 3	61 ± 2	1.06 ± 0.06	0.984 ± 0.054
14.758-14.771	13	Granite	71 ± 3	72 ± 3	74 ± 3	56 ± 2	1.01 ± 0.05	0.789 ± 0.044
14.771-14.784	26	Granite	57 ± 2	61 ± 2	92 ± 3	67 ± 3	1.07 ± 0.06	1.18 ± 0.06
14.784-14.797	39	Granite	62 ± 3	62 ± 3	81 ± 3	59 ± 2	1.00 ± 0.06	0.952 ± 0.052
14.797-14.810	52	Granite	57 ± 2	60 ± 3	80 ± 3	55 ± 2	1.05 ± 0.06	0.965 ± 0.055
14.810-14.823	65	Granite	55 ± 2	60 ± 2	82 ± 3	55 ± 2	1.09 ± 0.06	1.00 ± 0.06
14.823-14.836	78	Granite	54 ± 2	54 ± 2	78.0 ± 3	55 ± 2	1.00 ± 0.06	1.02 ± 0.06
14.836-14.849	91	Granite	49 ± 2	49 ± 2	84 ± 3	62 ± 2	1.00 ± 0.06	1.27 ± 0.07
14.849-14.862	104	Granite	51 ± 2	50 ± 2	86 ± 3	56 ± 2	0.98 ± 0.06	1.10 ± 0.06
14.862-14.875	117	Granite	50 ± 2	52 ± 2	70 ± 3	49 ± 2	1.04 ± 0.06	0.980 ± 0.057

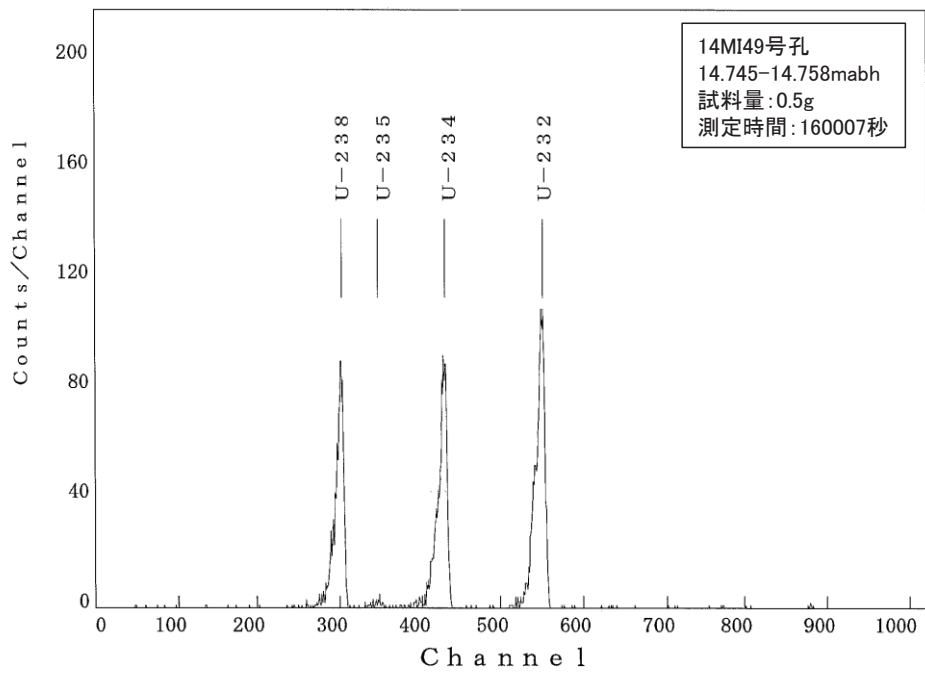


図 5.1.4-9 α 線スペクトルの例1 (ウラン同位体)

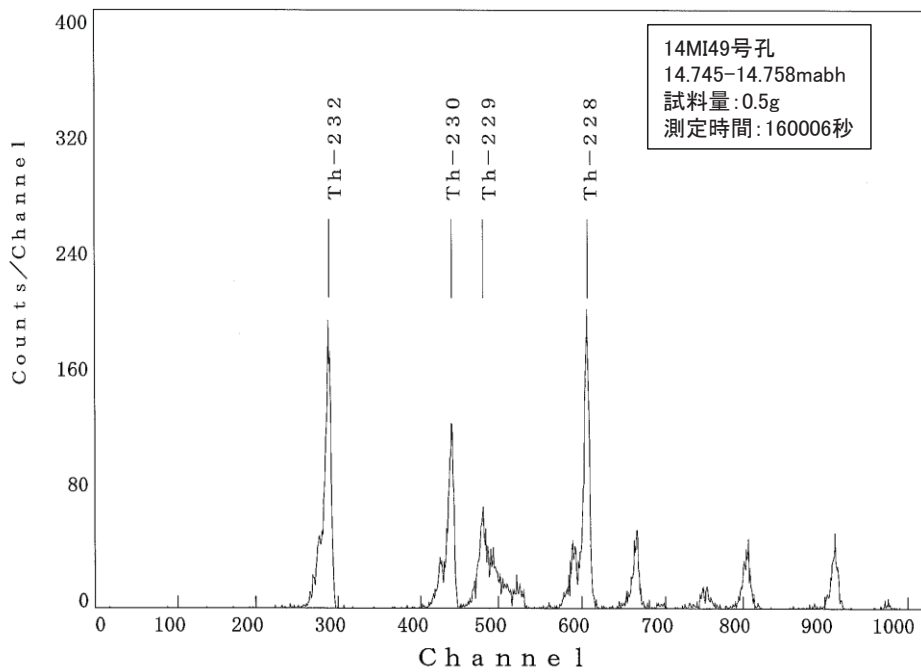
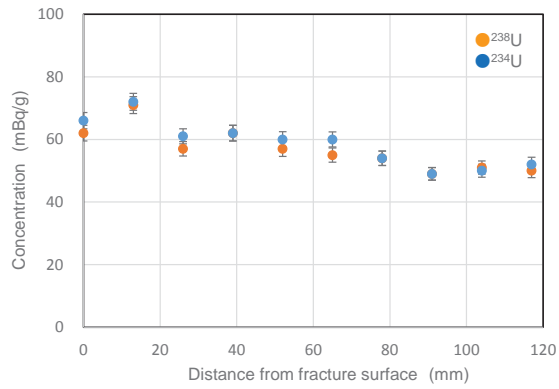
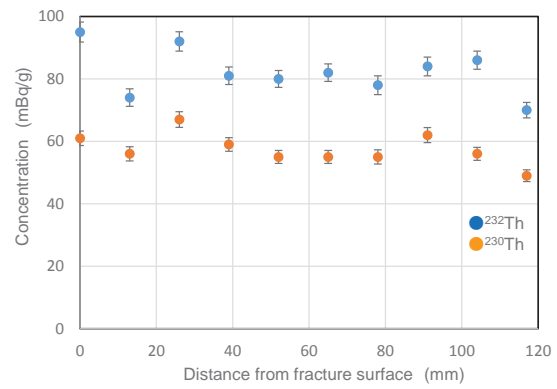


図 5.1.4-10 α 線スペクトルの例2 (ウラン同位体)



(a) ^{238}U および ^{234}U



(b) ^{232}Th および ^{230}Th

図 5.1.4-11 同位体深度分布

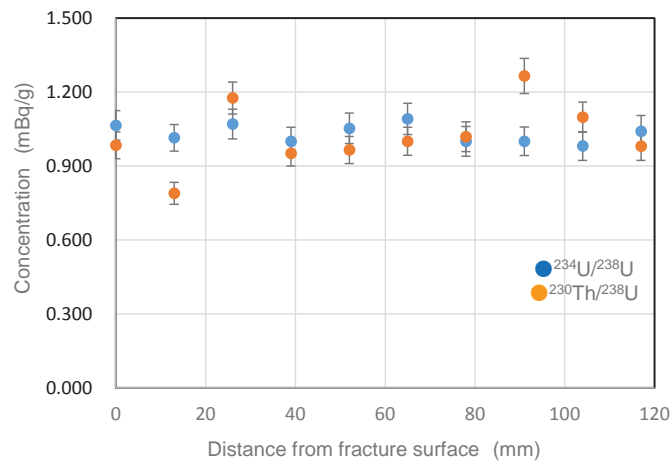


図 5.1.4-12 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ および $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ の割れ目からの深度分布

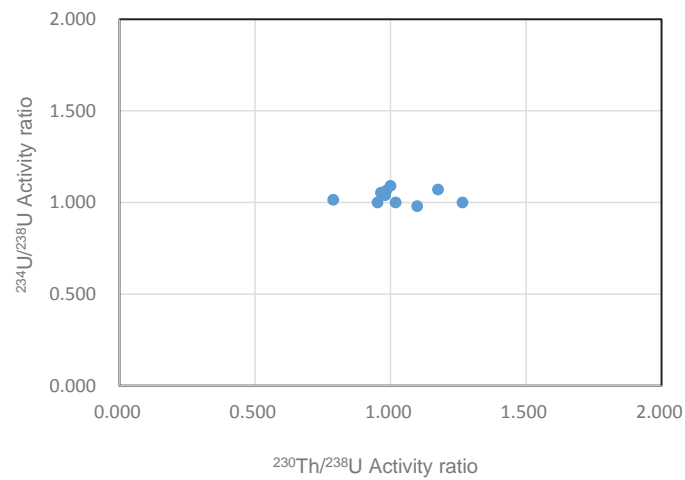


図 5.1.4-13 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ および $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ の相関

(4) ラジウム分析

ラドンの親核種であるラジウムの含有量について検討するため瑞浪花崗岩のラジウムの分析を実施した。試料は表 5.1.4-1 の元素分析試料と同じものである。

a. 分析方法

ラジウムの分析方法は文部科学省（1990 および 1990）に準拠した。U-8 容器に粉碎した試料岩石を入れて約 1 ヶ月間放置後、Ra-226 と放射平衡に達した Bi-214 の濃度をガンマ線スペクトロメトリによって測定し、Bi-214 の濃度をそのまま Ra-226 濃度と読み替えた。

b. 分析結果

分析結果を表 5.1.4-8 に示す。また、分析時に同時に得られる Pb-214、Ac-228、Pb-212、Bi-212 の濃度についてもあわせて示す。

試料全体の岩石中の U 濃度は変質試料の方が僅かに高い傾向にあるが、Ra-226 (Bi-214) では変質の有無による差は顕著ではないが、変質試料のラジウム濃度が僅かに高い。また、RA-1601 と RA-1602 は隣り合う試料であり、岩石基質部に淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色が強い方が僅かに Ra-226 濃度が高い。同様に隣り合う RA-1603 と RA-1604 では、黒雲母が少ない RA-1604 の方が、Ra-226 濃度が高い傾向が認められた。

表 5.1.4-8 ラジウム分析結果

試料名	U系列				Th系列				
	ICP-MS		γ線測定		ICP-MS		γ線測定		
	U		Bi-214	Pb-214	Th		Ac-228	Pb-212	Bi-212
	Bq/kg	(mg/kg)	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	(mg/kg)	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
RA - 1601	85.7	6.92	67 ±1	80 ±1	67.4	16.6	81 ±2	91 ±1	89 ±6
RA - 1602	60.4	4.87	58 ±1	69 ±1	84.7	20.9	76 ±2	84 ±1	79 ±5
RA - 1603	42.0	3.39	48 ±1	56 ±1	64.4	15.9	65 ±2	70 ±1	61 ±5
RA - 1604	74.8	6.03	77 ±1	91 ±1	80.8	19.9	80 ±2	89 ±1	86 ±5
RA - 1605	77.4	6.24	74 ±1	84 ±1	66.0	16.3	69 ±2	73 ±1	61 ±5
RA - 1606	60.4	4.87	56 ±1	67 ±1	77.0	19.0	78 ±2	85 ±1	85 ±5
RA - 1607	57.6	4.64	52 ±1	62 ±1	37.8	9.31	47 ±2	52 ±1	57 ±5
RA - 1608	94.3	7.60	67 ±1	83 ±1	82.4	20.3	76 ±2	81 ±1	86 ±5

5.1.4.2 物性測定

間隙率および比表面積の測定を行った。岩石試料（チップサイズ）の細孔分布測定によるミクロン～サブミクロンオーダーの間隙率と、サブミクロン～ナノオーダーの比表面積を BET 法によって行った。

(1) 細孔分布測定

細孔分布測定は水銀ポロシメータによって測定した。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、水銀の表面張力を用いて、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を利用し、マクロポア（100nm～1000 μm）の細孔径分布として測定するものである。また、細孔分布とともに比表面積、気孔率（間隙率）および密度（真密度）も合わせて測定が可能である。

間隙分布（細孔分布）の測定は島津製作所の PoreSizer9320 を使用した。試料容器に対して相対的に試料サイズが小さい場合は、測定誤差が大きくなるため、容器に入る最大のサイズ（1cm×1cm×2cm 程度）に試料をトリミングして測定を行なった。細孔分布測定に用いた試料の一覧を表 5.1.4-9 に示す。試料は割れ目面から岩石基質部にかけて、割れ目面に対して垂直な方向に連続的に採取した。図 5.1.4-15 に試料採取要領を示す。同試料における試料番号は割れ目面に近い方から 1, 2, 3, 4(, 5) とした。PRS-GR01～GR02 は割れ目周辺変質～変質を受けていない岩石基質部分への連続的な間隙率の変化、また PRS-GR03～GR04 は黒雲母濃集が認められる部分と認められない部分の間隙率の比較のために連続試料として取り扱っている。変質箇所は、割れ目充填鉱物は崩れやすく測定できないため、充填鉱物がある割れ目面の接する岩石基質部をトリミングして測定した。なお GR08 の試料については、明らかな破碎（マイクロクラック）を有していたため、本測定は実施していない。測定結果を表 5.1.4-10 に示す。

測定結果から、瑞浪花崗岩の深度 500m ボーリングコアの試料の気孔率（間隙率）は GR01 の最も割れ目面近傍の試料を除き、1%に満たなかった。この数値は瑞浪花崗岩深度 300m ボーリングコアの気孔率（H26 年度実施）では変質していない試料と同程度の値である。試料別に割れ目面から岩石基質に向けて間隙率の変化を見ていくと、割れ目面近傍の岩石基質に変質を伴う試料（PRS-GR01～GR02, PRS-GR05）では間隙率が減少しており、変質の有無が間隙率の増減に関係していることが分かる。一方、割れ目面近傍の岩石基質に変質を伴わない試料でも同様に間隙率の減少がみられるもの（PRS-GR06）もあるが、減少傾向のない試料（PRS-GR07）もあった。

表 5.1.4-9 細孔分布測定試料一覧

試料名	孔名および深度	分析個数	特徴	備考
PRS-GR01～GR02	15M152 27.080m-27.280m	5	割れ目面近傍ほど淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。割れ目面より離れるにつれて淡緑色鉱物が認められず、カリ長石の呈すピンク色が薄くなる。	GR01～GR02 にかけて連続的に測定を実施。
PRS-GR03～GR04	15M152 24.365m-24.465m	5	黒雲母の濃集（24.405m-24.425m）が認められる。	GR03～GR04 にかけて連続的に測定を実施。
PRS-GR05	15M152 11.332m-11.510m	4	割れ目周辺に白色変質を伴う。岩石基質の変質はない。	
PRS-GR06	15M153 16.640m-16.840m	4	割れ目表面にごくわずかに充填鉱物が認められ、岩石基質の変質はない。	
PRS-GR07	16M159 20.932m-21.092m	4	充填鉱物が認められる。	

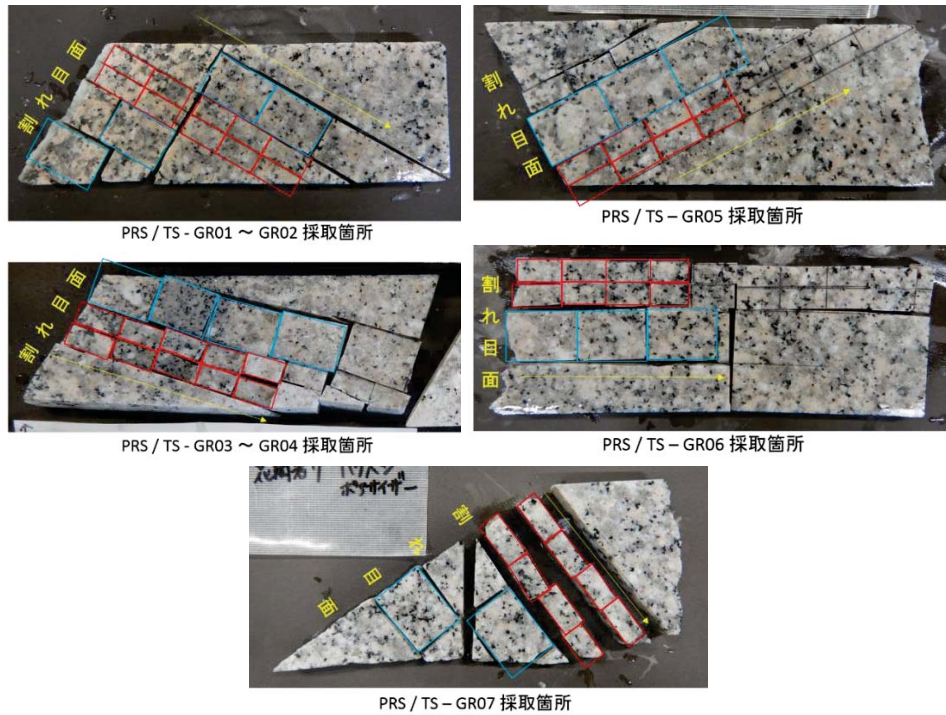


図 5.1.4-14 細孔分布測定用（赤）および岩石薄片製作用（青）試料の採取箇所（PRS/TS-GR01～07）

表 5.1.4-10 細孔分布測定結果

試料名	試料番号	かさ密度 g/cc	真密度 g/cc	気孔率		全細孔体積 cc/g	全細孔表面積 m ² /g	Median 径		平均細孔直径 4V/A μm	Mode 径		変質の程度
				[間隙率] %	体積基準 μm			表面積基準 μm	体積基準 μm		表面積規準 μm		
										g/cc		g/cc	
PRS-GR01 ~ GR02	1	2.5999	2.6324	1.2334	0.0047	0.1091	0.3274	0.0864	0.1739	0.4592	0.0559	高 ↓ 低	
	2	2.5932	2.6102	0.6510	0.0025	0.0325	0.4171	0.2034	0.3085	0.3499	0.1247		
	3	2.6183	2.6296	0.4297	0.0016	0.0258	0.3484	0.1553	0.2540	0.3117	0.1472		
	4	2.6119	2.6220	0.3846	0.0015	0.0202	0.3249	0.2040	0.2917	0.3399	0.1766		
	5	2.6196	2.6277	0.3061	0.0012	0.0168	0.3742	0.1612	0.2782	0.3909	0.0747		
PRS-GR03 ~ GR04	1	2.5965	2.6070	0.4016	0.0015	0.0222	0.4142	0.1566	0.2785	0.4091	0.0626	×	
	2	2.5983	2.6086	0.3920	0.0015	0.0176	0.4830	0.2195	0.3426	0.3885	0.1213		
	3	2.6195	2.6300	0.3998	0.0015	0.0325	0.1980	0.1298	0.1881	0.1305	0.1267		
	4	2.5759	2.5855	0.3745	0.0015	0.0110	0.7428	0.2997	0.5310	0.6963	0.2032		
	5	2.5780	2.5883	0.3979	0.0015	0.0241	0.4021	0.1338	0.2566	0.6501	0.1052		
PRS-GR05	1	2.6317	2.6465	0.5585	0.0021	0.0317	0.3565	0.2041	0.2676	0.3612	0.1087	高 ↓ 低	
	2	2.5728	2.5810	0.3141	0.0012	0.0233	0.2613	0.1456	0.2093	0.1559	0.1427		
	3	2.6009	2.6077	0.2629	0.0010	0.0123	0.4352	0.1988	0.3300	0.2179	0.2134		
	4	2.6132	2.6205	0.2773	0.0011	0.0129	0.4190	0.1983	0.3290	0.3727	0.2007		
PRS-GR06	1	2.6004	2.6175	0.6526	0.0025	0.0191	0.9569	0.2359	0.5250	0.4398	0.1215	×	
	2	2.6235	2.6380	0.5499	0.0021	0.0171	0.8813	0.2510	0.4909	0.9639	0.1055		
	3	2.6451	2.6554	0.3894	0.0015	0.0207	0.3812	0.1724	0.2847	0.5831	0.1103		
	4	2.5943	2.6037	0.3629	0.0014	0.0197	0.4163	0.1756	0.2846	0.2105	0.0521		
PRS-GR07	1	2.6105	2.6189	0.3223	0.0012	0.0212	0.3459	0.1418	0.2329	0.8283	0.0786	×	
	2	2.6174	2.6317	0.5419	0.0021	0.0285	0.4663	0.1681	0.2908	0.5444	0.0688		
	3	2.5922	2.5992	0.2710	0.0010	0.0281	0.2012	0.0962	0.1487	0.2196	0.0534		
	4	2.6195	2.6373	0.6740	0.0026	0.0303	0.7263	0.1233	0.3400	84.8735	0.0612		

(2) 比表面積測定 (BET 法)

BET 法による比表面積の測定は BET 1 点法によって実施した。測定には窒素とヘリウムの混合ガス (N_2 : 30%、He : 70%) を使用した。測定手順は、装置内に混合ガスを連続的に流し、サンプルが入った U 型セルをセットする。セル部を液体窒素温度に冷却すると、混合ガス中の窒素がサンプル表面に吸着され、相対的に混合ガス中の窒素ガス濃度が減少する。窒素ガスの吸着平衡を待って、窒素ガスの減少を熱伝導度検出器により測定する。次に吸着平衡に達したセル部を常温に戻すと、窒素ガスの脱離が始まる。この脱離により混合ガス中の窒素濃度が増加する。この脱離した窒素ガス量を吸着時同様に熱伝導度検出器で測定する。なお、測定試料は岩石を粉碎し、平均粒径 1.34mm および 0.64mm に調整したものを用いた。比表面積測定の測定試料と測定結果を表 5.1.4-11 に示す。この結果によれば、平均粒径 1.34mm および 0.64mm の試料に違いによる試料間での相対的な比表面積の大きさの割合は GR-01 を除いて変わらない。平均粒径が 1.34mm での試料で得た結果を考察した場合、最も比表面積が大きいのは GR08 である。この試料は、変質が顕著ではないが、微細な亀裂が発達しているため、比表面積が大きくなっている可能性がある。昨年度の深度 300m ボーリング横坑の分析では、未変質部で 0.07 m²/g ~ 0.17 m²/g (平均 0.12 m²/g) に対して、変質部では 0.07 m²/g ~ 2.29 m²/g (平均 0.66 m²/g) の値が得られている。これに照らせば、今般の深度 500m 研究アクセス南坑道の試料は変質の程度が弱く、相対的に比表面積が大きくはないことを示している。

表 5. 1. 4-11 測定試料一覧と測定結果

試料名	コア試料は孔名_深度	全表面積 (m ²)			比表面積	備考
	試料粒径 : #9>X>#20 平均粒径 1.34mm	1 st	2 nd	平均	m ² /g	
GR01	15M152 27.080m-27.110m	0.118	0.119	0.119	0.114504	淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。
GR02	15M152 27.110m-27.140m	0.088	0.082	0.085	0.082838	GR01 採取箇所よりも下部に位置し、淡緑色鉱物が認められない箇所。GR01 採取箇所のカリ長石よりもピンク色が薄い。
GR03	15M152 24.405m-24.425m	0.094	0.097	0.096	0.092119	黒雲母の濃集が認められる。
GR04	15M152 24.505m-24.525m	0.120	0.125	0.123	0.115327	GR03 採取箇所に隣接し、黒雲母の濃集は認められない。
GR05	15M152 11.332m-11.510m	0.095	0.093	0.094	0.132637	淡緑色鉱物が多く認められる。
GR06	15M153 16.640m-16.840m	0.143	0.137	0.140	0.135044	割れ目周辺が白色化している。
GR07	16M159 20.932m-21.092m	0.129	0.126	0.128	0.122443	充填鉱物が認められる。
GR08	16M159 11.660m-11.690m	0.202	0.193	0.198	0.182112	微細亀裂が多数認められ、橙色の鉱物を伴う。
試料名	コア試料は孔名_深度	全表面積 (m ²)			比表面積	備考
	試料粒径 : #20>X>#30 : 平均粒径 0.64mm	1 st	2 nd	平均	m ² /g	
GR01	15M152 27.080m-27.110m	0.108	0.111	0.110	0.165985	淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。
GR02	15M152 27.110m-27.140m	0.063	0.063	0.063	0.096938	GR01 採取箇所よりも下部に位置し、淡緑色鉱物が認められない箇所。GR01 採取箇所のカリ長石よりもピンク色が薄い。
GR03	15M152 24.405m-24.425m	0.058	0.054	0.056	0.083061	黒雲母の濃集が認められる。
GR04	15M152 24.505m-24.525m	0.067	0.062	0.065	0.100171	GR03 採取箇所に隣接し、黒雲母の濃集は認められない。
GR05	15M152 11.332m-11.510m	0.080	0.083	0.082	0.117232	淡緑色鉱物が多く認められる。
GR06	15M153 16.640m-16.840m	0.079	0.078	0.079	0.118419	割れ目周辺が白色化している。
GR07	16M159 20.932m-21.092m	0.067	0.074	0.071	0.107371	充填鉱物が認められる。
GR08	16M159 11.660m-11.690m	0.116	0.108	0.112	0.166840	微細亀裂が多数認められ、橙色の鉱物を伴う。

5.1.4.3 岩石薄片観察

鉱物同定を目的として、岩石薄片を製作し偏光顕微鏡による観察を行った。試料を表 5.1.4-12 に示す。TS-GR08 を除き細孔分布測定と同様に、各試料の割れ目面から垂直に連続して岩石薄片を製作した（図 5.1.4-14 および図 5.1.4-15）。岩石薄片のサイズは 24mm×32mm である。偏光顕微鏡下での観察は、鉱物組み合わせ、鉱物の形状、大きさ、変質の程度、破碎の有無、などに注目し、かつ割れ目面から岩石基質部にかけての連続的な変化も確認するため、1cm 幅の間隔で記載を行った。観察結果を表 5.1.4-13 (1)～(2) に示す。この表では上記の注目点が共通する領域ごとに鉱物記載をまとめている。

表 5.1.4-12 岩石薄片製作一覧

試料名	孔名および深度	分析個数	特徴	備考
TS-GR01～GR02	15M152 27.080m-27.280m	5	割れ目面近傍ほど淡緑色鉱物が認められ、カリ長石のピンク色がより濃く見える。割れ目面より離れるにつれて淡緑色鉱物が認められず、カリ長石の呈すピンク色が薄くなる。	GR01～GR02 にかけて連続的に岩石薄片を製作。
TS-GR03～GR04	15M152 24.365m-24.465m	5	黒雲母の濃集（24.405m-24.425m）が認められる。	GR03～GR04 にかけて連続的に岩石薄片を製作。
TS-GR05	15M152 11.332m-11.510m	4	割れ目周辺に白色変質を伴う。岩石基質の変質はない。	
TS-GR06	15M153 16.640m-16.840m	4	割れ目表面にごくわずか充填鉱物が認められ、岩石基質の変質はない。	
TS-GR07	16M159 20.932m-21.092m	4	充填鉱物が認められる。	
TS-GR08	16M159 11.660m-11.690m	1	微細亀裂が多数認められ、橙色の鉱物を伴う。	



TS-GR08 採取箇所

図 5.1.4-15 TS-GR08 試料採取箇所

表 5.1.4-13 鉱物同定結果 (1)

薄片番号	割れ目からの距離 (cm)	特徴	石英 ◎自形	斜長石	カリ長石	黒雲母	緑泥石	緑閃石	白雲母
TS-GR01~GR02	0-05	石英脈							
	0.5	脈状の放射構造	○	○結晶全体がセリサイト化	○ハースサイト組織		○非帯に結粒		○非帯に結粒
	0.5-1		○	○結晶全体がセリサイト化	○ハースサイト組織, 少量の放射長石組織		○多色性ハロ		○
	1-3		○	○結晶全体がセリサイト化	○ハースサイト組織	△	○多色性ハロ		
	3-4	岩石基質	○	○結晶全体がセリサイト化	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○多色性ハロ		△鉱物中の放射に充満
	4-6		○	○結晶全体がセリサイト化 (少量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○多色性ハロ		
	6-9		○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		△黒雲母中に産する		
	9-12		○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		△結晶結晶	(△)	
	0-1	岩石基質	○	○セリサイト化 (多量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○多色性ハロ		△斜長石中に集合して産する
	1-2		○	○セリサイト化 (多量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○結粒, 黒雲母中に産する		
TS-GR03~GR04	2-5	岩石基質, 結粒組織	○結粒	○セリサイト化 (多量-少量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○結粒, 黒雲母中に産する		
	5-8	岩石基質, 結粒組織, 黒雲母濃集帯	○結粒	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト組織		○結粒, 黒雲母中に産する		
	8-10	岩石基質, 結粒組織, 黒雲母濃集帯	○結粒-粗粒	○セリサイト化 (少量)	○巨晶, ハースサイト組織		○一部斜長石化		
	10-15	岩石基質	○	○セリサイト化 (少量)	○巨晶, ハースサイト組織, 放射長石組織		○一部斜長石化, 多色性ハロ		
	0-1		○	○セリサイト化 (多量)	○巨晶, ハースサイト組織		◎一部セリサイト化, シリコンを含む		○斜長石中に斜長結晶
	1-2	岩石基質	○	○セリサイト化 (多量)	△ハースサイト化組織	○	○多色性ハロ	△	○斜長石中に斜長結晶
	2-5		○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○結粒, 黒雲母を置換		
	5-9		○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト組織, 放射長石組織		○結粒, 黒雲母を置換		
	0-1	岩石基質	○	○	○ハースサイト化組織, 放射長石組織		△黒雲母を置換	△	
	1-3		○	○	○ハースサイト化組織, 放射長石組織		○結粒		
TS-GR07	3-5	岩石基質	○	○	○ハースサイト化組織, 放射長石組織		○結粒, 黒雲母を置換		
	5-9		○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト化組織, 放射長石組織	○多色性ハロ	△黒雲母を置換		
	0-4	岩石基質	○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト化組織, 放射長石組織	○一部斜長石化, 多色性ハロ	△黒雲母を置換		
	4-6		○	○セリサイト化 (少量)	○ハースサイト化組織, 放射長石組織	◎結粒, 一部斜長石化, 多色性ハロ	△黒雲母を置換		
TS-GR08	—	岩石基質	○	○セリサイト化 (少量), 内部に褐色羽毛状 鉱物を産する。セリサイトに類似するが干 渉色が薄いものあり	○ハースサイト化組織, 放射長石組織	△	(△)		

◎ よく産出する ○ 普通に産出する △ 少ない (△) ごくわずか

表 5.1.4-13 鉱物同定結果 (2)

薄片番号	薄片目からの距離 (cm)	特徴	セリサイト	カルサイト	スズクタイト	場リン石	不透明鉱物	その他
TS-GR01~GR02	0-0.5	石英脈 石炭脈		○自形				
	0.5	脈状の磁鉄構造	○磁鉄部を充填					複数の空間部所あり
	0.5-1		○斜長石内部					
	1-3		○斜長石内部					
	3-4		○斜長石内部	△縁部石中に筋状				
	4-6	岩石基質	○斜長石内部	△縁部石中に筋状 (△)カ/長石中に筋状				
	6-9		△斜長石内部					
	9-12		△斜長石内部					
	0-1		○斜長石内部	○セリサイト化の中に針状結晶				
	1-2		○斜長石内部					
TS-GR03~GR04	2-5		○斜長石内部		△黒雲母と一層に産する	△黒雲母と一層に産する		
	5-8	岩石基質, 細粒組織	△斜長石内部					
	8-10	岩石基質, 細粒組織, 黒雲母濃集帯	△斜長石内部					
	10-15	岩石基質, 細粒組織, 黒雲母濃集帯	△斜長石内部					
	0-1	岩石基質	○斜長石内部		(△)	(△)		
	1-2		○斜長石内部	△	(△)	(△)		
TS-GR05	2-5	岩石基質	△斜長石内部					
	5-9		△斜長石内部	○磁物中に筋状に充填	△	△		
	0-1							
	1-3		△石英や不透明鉱物中の磁鉄を充填					
	3-5	岩石基質						
TS-GR07	5-9		△斜長石内部					
	0-4	岩石基質	△斜長石内部					
	4-6		△斜長石内部		△	△		
TS-GR08	—	岩石基質	△斜長石内部	(△)筋状	△	○		微小磁鉄中に褐色色磁物が充填している

◎ よく産出する ○ 普通に産出する △ 少ない (△) ごくわずか

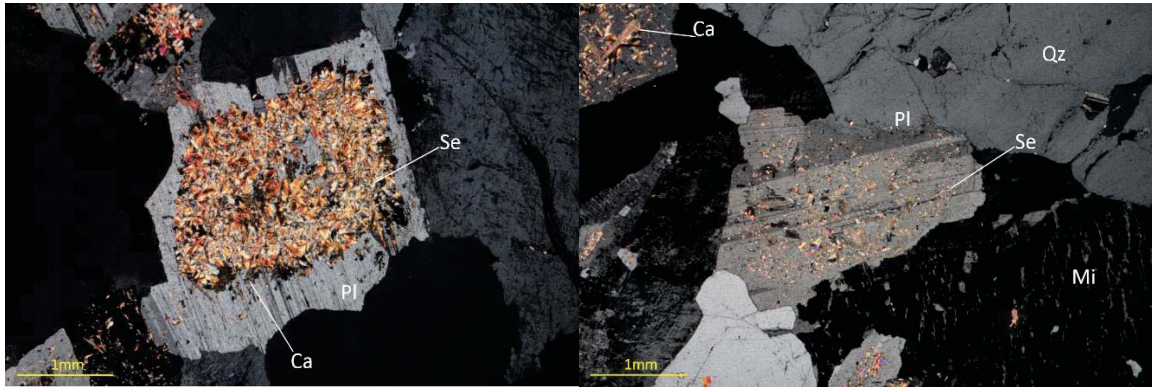
6つの試料に対して鉱物同定を行った結果、割れ目面（0cm）～6cmまでの岩石基質部分には以下の共通の鉱物組み合わせと産出状況が見られることが分かった（該当試料：TS-GR01～GR02, TS-GR03～GR04, TS-GR05）。

- ・ 割れ目付近に緑泥石を含むが、黒雲母は含まれない。
- ・ 斜長石の内部もしくは斜長石全体に白雲母（セリサイトの場合が多い）を産する
- ・ 白雲母と共に方解石を産する場合がある

緑泥石は火成岩中で黒雲母が熱水変質を受けて生じる。また白雲母の微細な結晶のことをセリサイト（絹雲母）と呼ぶが、この鉱物は斜長石の熱水変質によって生成される。また火成岩中に含まれる方解石はほとんどが2次的な変質鉱物として産する。以上のことから、上記の試料の割れ目周辺は熱水変質を被ったことが考えられる。なお、斜長石の変質の特徴として、斜長石結晶の内部が変質している例が多数みられた（図 5.1.4-16(a)）。斜長石には累帯構造（マグマから晶出する過程で結晶周りのある範囲の液相の過飽和度の変化により結晶が断続的に成長してできたもので、中心部ほどカルシウムにとみ外側ほどナトリウムにとむものを正累帯構造という）を呈するものも見られたが、一般的にこのような斜長石が変質を受けるとカルシウムの多い内側ほど激しく変質を被る（黒田・諏訪, 1983）。これに対し斜長石に累帯構造が見られない場合には図 5.1.4-16 (b) で示すように斜長石結晶全体に散りばめるようにセリサイトが産する。

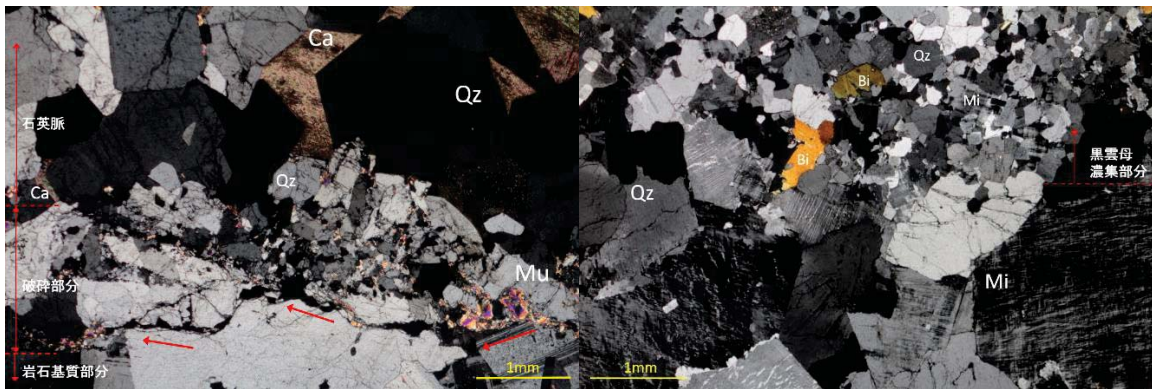
TS-GR01～GR02の割れ目面には自形の石英と方解石が晶出し、0.5cm幅の脈を形成していた。この石英脈と岩石基質部分の間には両者の境界に沿って破碎構造が認められた（図 5.1.4-16 (c)）。そしてこの破碎構造を埋めるように、セリサイトや細粒な緑泥石が産していた。この産状から現在割れ目面となっている石英脈が晶出する以前に、岩石基質部分で破碎が生じ、その破碎構造沿いに熱水が流入した結果、熱水変質を受け斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化などが起こった可能性がある。TS-GR03～GR04では割れ目から5-8cmの区間に黒雲母濃集部分が認められる。この部分を薄片上で観察すると、周辺よりもより細粒な石英、長石、黒雲母で構成されていることが分かった（図 5.1.5-1(d)）。またTS-GR08の試料には多数の微小亀裂が認められ、造岩鉱物が切られた後に充填鉱物で満たされるとともに、造岩鉱物内部も変質している様子が認められた。詳しい鉱物同定は今後実施する予定である。

そのほか6つの試料に普遍的に見られた特徴として、黒雲母もしくは緑泥石中にジルコン($ZrSiO_4$)やアパタイトなどの放射能をもつ鉱物が包有され、周囲が放射能に侵されたことで生じる多色性ハロが多数見られた。



(a) 斜長石(累帯構造)のセリサイト化

(b) 斜長石(累帯構造なし)のセリサイト化



(c) 石英脈と岩石基質の間の破碎構造

(d) 黒雲母濃集部分(上部)と巨晶部分の境界

写真の赤矢印は破碎箇所に沿う向きである。Qz:石英, Pl:斜長石, Mi:微斜長石, Ca:方解石, Mu:白雲母, Se:セリサイト

図 5.1.4-16 深度 500m コア試料の岩石薄片観察結果

5.1.5 ラドンフラックスの測定

ラドン濃度による割れ目間隙幅の評価を行うためには、原位置におけるラドン濃度の測定と共に、原位置の岩石を用いたラドンフラックスの測定を必要とする。このため、深度 300m ボーリング横坑に削孔されたボーリング孔のコアを用い、室内における浸漬試験によりラドンフラックスの測定をした。測定においては間隙率や変質の影響を考慮した。

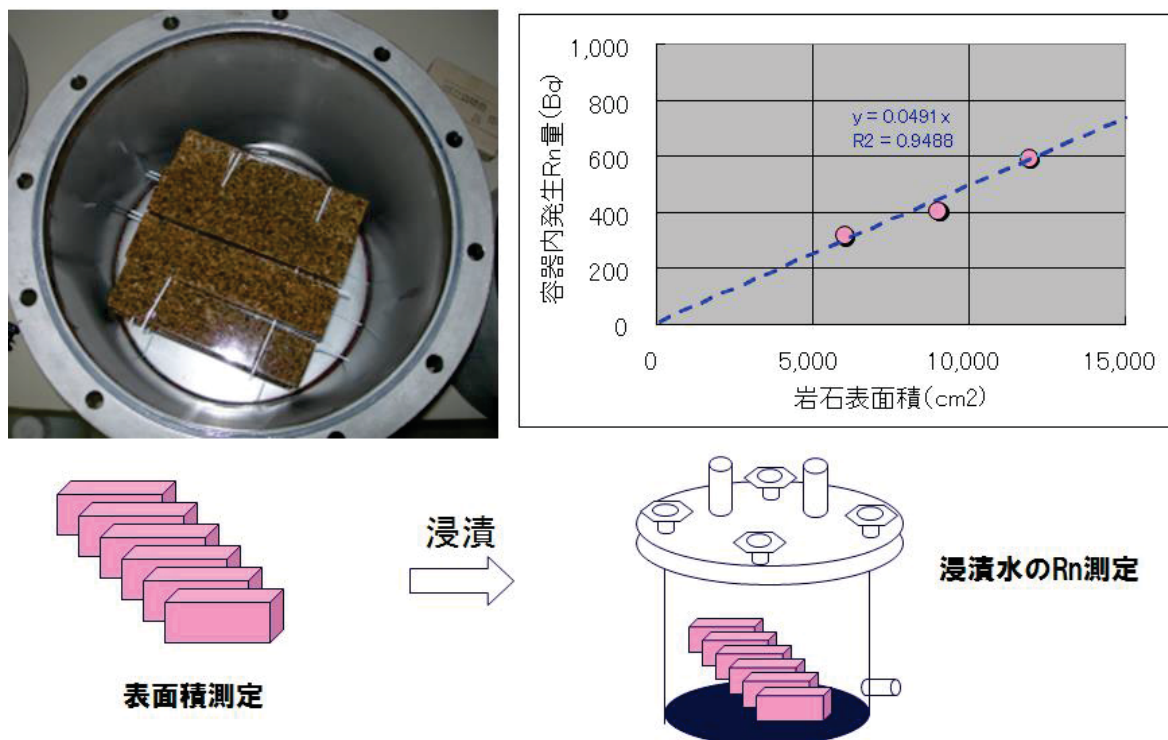


図 5.1.5-1 岩石からのラドンフラックスの測定例

図 5.1.5-1 の写真は気密容器に花崗岩をセットした例である。試料のコアの表面積を実測し、浸漬後のラドン発生量を得て、右上のグラフの関係（傾き＝フラックス）を得る。浸漬試験に用いたコアは、深度 300m のボーリング横坑管所で掘削したコアで、昨年度、大気中でラドンフラックスを測定したものと同一のものである。これらのコアは、割れ目箇所を避けつつ、岩石基質部に変質が認められるコアと求められないコアとを各 12 個ずつ選定し、端面を整形してある。これらのコアを一定期間水で浸漬した後に 250cc を採水し、そのラドンが溶解した水を計測試料とした。ラドン濃度は、採水した水を空気でパージ後、気中のラドン濃度を静電捕集型計測装置である Rad7 によって計測した。

測定結果を図 5.1.5-2 に示す。図 5.1.5-2 の左図からはラドンの発生量は試料の変質の有無の影響を大きく受けていないように見える。図 5.1.5-2 の右図から、変質したコアの容器の放射平衡濃度は、1.2Bq/L、変質が認められないコアの容器の放射平衡濃度は 1.3Bq/L と推定される。

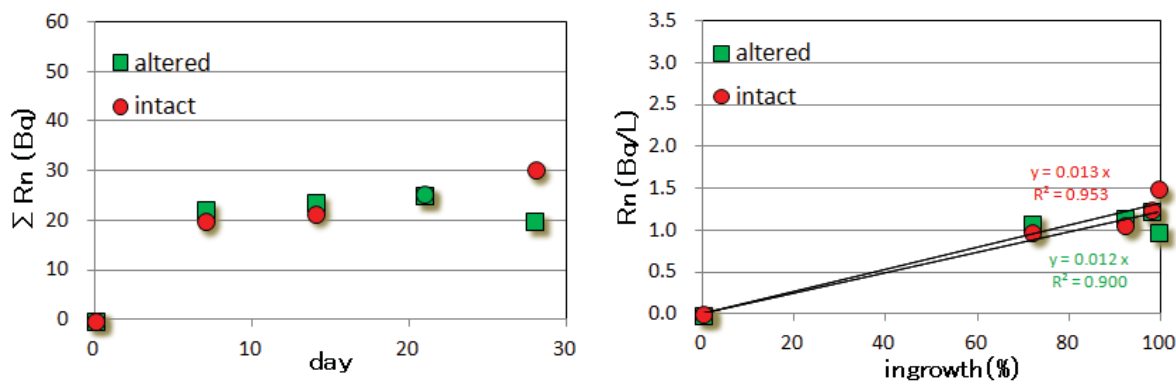


図 5.1.5-2 花崗岩コアを用いたラドン発生濃度の時間変化

- ※ [altered] : 変質したコア [intact] : 変質の認められない、若しくは変質が微弱なコア
- ※ 左図は水密容器内に発生する総ラドン量の時間変化を示している。右図は横軸に経過時間から換算した放射平衡までの割合を示している。

表 5.1.5-1 にコアによるラドンフラックスの評価結果を示す。花崗岩コアから水へのラドンフラックスは変質が認められる試料で $5.3\text{E-}03 \text{ Bq/cm}^2$ であり、変質が認められない試料の $5.7\text{E-}03 \text{ Bq/cm}^2$ に比較して僅かに小さい。H27 年度に行った岩石から空気へのラドンフラックスの測定においても、変質の認められる試料の方はラドンフラックスが小さい傾向がある。変質した試料の方がラジウム含有量が高いことを考えると、変質による間隙率の増大が逆にラドンフラックスを小さくしている可能性も考えられる。

表 5.1.5-1 コアによるラドンフラックス測定結果

試料名	実験条件	総表面積 $\Sigma S(\text{cm}^2)$	総気体積 $\Sigma V(\text{cm}^3)$	平衡 Rn 量 $\Sigma Rn_e(\text{Bq})$	flux F (Bq/cm^2)	間隙率 (%)
RFTG-1501 (変質無)	空気	7627	6466	37.2	$8.0\text{E-}03$	0.25~0.29
RFTG-1502 (変質有)		4601	6418	31.9	$6.9\text{E-}03$	0.30~0.57
試験名	実験条件	総表面積 $\Sigma S(\text{cm}^2)$	総水体积積 $\Sigma V(\text{cm}^3)$	平衡 Rn 量 $\Sigma Rn_e(\text{Bq})$	flux F (Bq/cm^2)	間隙率
RFTG-1501 (変質無)	水	7627	6466	26.5	$5.7\text{E-}03$	0.25~0.29
RFTG-1502 (変質有)		4601	6418	24.4	$5.3\text{E-}03$	0.30~0.57

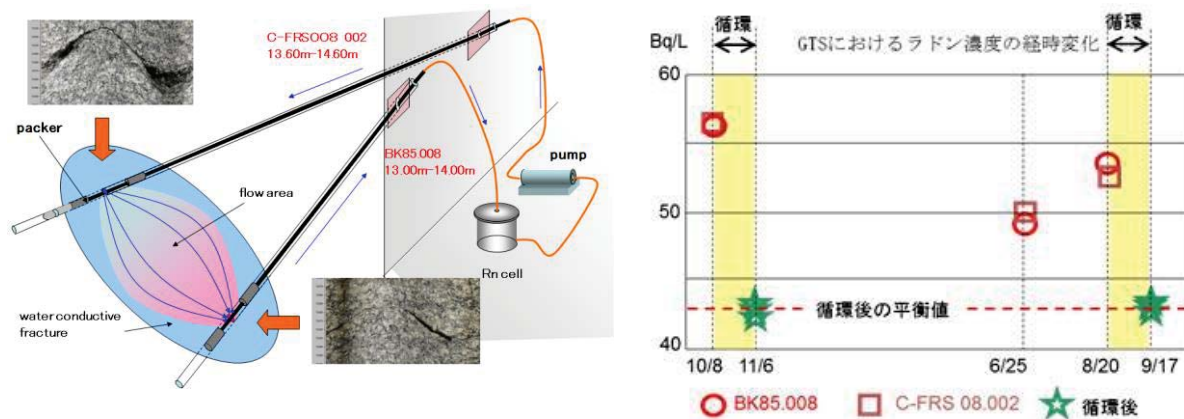
上段の空気におけるラドンフラックスは H27 年度の測定結果である。

5.1.6 原位置ラドン濃度計測による割れ目特性の検討

本事業において原位置のラドン濃度測定による割れ目の間隙幅の評価は、スイスグリムゼルサイト（以降、GTS と呼称）で実施した。GTS の花崗岩は、割れ目密度も小さく、充填鉱物も少ない岩盤であった。我が国の花崗岩を含む結晶質岩は、GTS に比較して割れ目も多く、割れ目の充填鉱物や変質もまれではない。このため、GTS で適用したこの技術を我が国の花崗岩としては割れ目や変質状況が一般的な瑞浪超深層研究所の深度 300m ボーリング横坑に適用を検討している。昨年度は深度 300m ボーリング横坑に削孔されたボーリング孔にてラドン濃度を計測し、室内で求めたボーリングコアのラドンフラックスから割れ目の間隙幅の評価を予察的に実施した。その結果、変質がなく間隙率が小さい場合は 0.41mm～0.93mm の間隙幅が得られている。さらに、ラドンから間隙幅を精度よく推定するためには、対象割れ目内で発生ラドン濃度が安定している状態で得ることが望ましい。このため、このため、今年度は一定時間に亘って評価対象の割れ目とこれを繋ぐ 2 本のボーリング孔を通して地下水を循環し、安定したラドン濃度を得るラドン循環試験を実施した。また、昨年度の深度 500m 研究アクセス南坑道で掘削した 15MI52 孔および 15MI53 孔にはパッカーが設置されており、今年度 8 月時点で数カ月の間孔内が乱されない状態が継続していることから、ラドンのバックグラウンド値を得ることを目的に採水した。さらに 2017 年 1 月末に 16MI59 孔の作業が終了したため、2 月に採水をした。

5.1.6.1 ラドン循環試験

ラドン循環試験は図 5.1.6-1 (a) に示すように、水みちにボーリングを 2 本削孔し、一方から揚水し、もう一方から注水して孔間で地下水を循環し、安定したラドン濃度を得ようとするものである。GTS の試験では 1 年間の間に 2 回の循環試験を行った。2 回の試験では、循環後に同じラドン濃度を得られたが、それぞれの循環前後のラドン濃度を比較した場合、循環前よりも 1 カ月の循環後のラドン濃度が 2 割程度低下する傾向が認められた（図 5.1.6-1 (b)）。



(a) ラドン循環試験概念図

(b) 循環試験前後のラドン濃度変化

図 5.1.6-1 GTS におけるラドン循環試験の概念図と測定結果

循環試験においてラドン濃度が低下する原因としては、被圧した地下水を循環するために、循環時や採水の際にラドンが溶出した可能性や、循環系にラドンが発生しない区間（配管、ポンプなど）があるため、ラドン濃度が低下した可能性などが考えられた。このこのため、今年度の深度300m ボーリング横坑での試験では、圧力保持が可能なボトルで採水を行うこと、採水時のガス溶出を回避する。また、採水の直前のみ循環を行うことで、ラドン非発生区間による影響を低減するなどの対策を講じた。採水のための循環のための循環流量が正確に把握可能なモーノ方式のポンプを使用した。耐圧の採水ボトルは 2L 容量のものを 2 本と 1L 容量のものを 3 本用意した（図 5.1.6-2 (a) 及び図 5.1.6-2(b)）。これらの採水ボトルには予め地下水で満たし、バルブを閉じておく。採水時は、採水するボトルのみに地下水が通るようにボトル前後のバルブのみ開放し、採水ボトル内に地下水が循環するようにする。循環時は観察タンク内にガス溶出が生じていないかを確認する。ガス溶出が認められる際は、流量をコントロールし、ガスが消失してから採水を行った。循環はタンクの容量の3倍以上の量を目安として行った。循環と採水は1カ月間に4回に分けて行い、1回目から3回目までは各2L（2L ボトル×1本）の採水を、最後の4回目は3L（1L ボトル×3本）を採水した。この試験の対象となる割れ目は13MI37-int2孔と12MI31-int3孔を交差する水みちであり、別途トレーサー試験も実施されている。循環試験では13MI37-int2孔から揚水し、12MI31-int3孔へ注水した（図5.1.6-3）。

ラドン循環試験は8月末から9月末の約1カ月間に4回実施した。毎回の循環の流量は100～200cc/分で行い、総量で6～12Lを循環させたところで採水した。この結果、表5.1.6-1に示すようにラドン濃度は230～279Bq/Lのラドン濃度が得られた。別途、室内試験で当該箇所のコアを用いたラドンフラックスの測定を実施しており、この結果から、13MI37-int2孔と12MI31-int3孔とを交差する水みち割れ目の開口幅の算出を試みる。

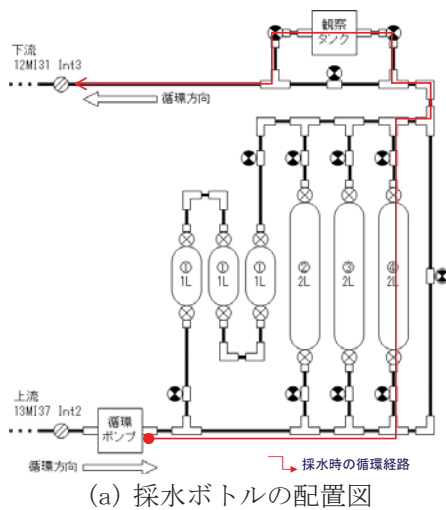


図 5.1.6-2 ラドン循環試験用採水ボトルの配置図と現場での設置状況

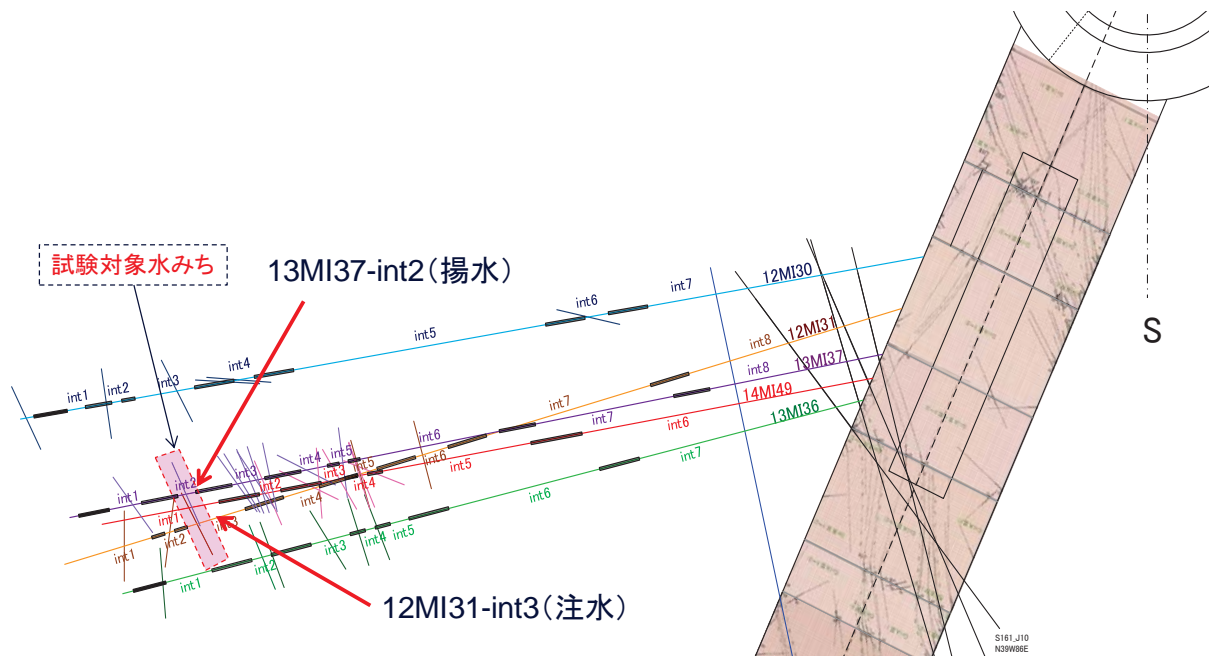


図 5.1.6-3 ラドン循環試験対象割れ目と試験孔

表 5.1.6-1 ラドン循環試験における循環流量とラドン濃度分析結果

日付	循環量 (L)	ポンプ作動時間	平均循環流量 (ml/分)	採水容器	ラドン濃度 (Bq/L)
2016年8月26日	8.955	44分34秒	200.9	2L×1	277
2016年9月06日	6.016	59分18秒	101.4	2L×1	230
2016年9月15日	10.685	1時間42分51秒	103.9	2L×1	242
2016年9月26日	12.054	1時間52分19秒	107.3	1L×3	279

13MI37-int2 孔と 12MI31-int3 孔において水みちとなっている割れ目の特徴を表 5.1.6-1 に示す。割れ目は NW 系の高傾斜割れ目で、深度 300m ボーリング横坑にも認められる割れ目の卓越方向の一方向である。精密ボアホール TV での計測では、12MI31 孔では開口幅が 0.15mm であるが、13MI37 孔では、0.7mm とやや大きい。コア観察では、割れ目の面に緑泥石および黄鉄鉱が付着している。また、両孔ともにこの割れ目周辺に緑泥石の充填脈が発達しており、割れ目周辺の基質部にも弱い変質が認められる。このため、前節で測定の変質試料のラドンフラックス $5.3E-03Bq/cm^2$ を用いて以下の様に算出した。

- ・ ラドン濃度 [Rn] : 230~279Bq/L (0.230~0.279Bq/ cm^3)
- ・ ラドンフラックス [F] : $5.3E-03Bq/cm^2$
- ・ 割れ目幅 [W] : $2F/Rn=0.38mm\sim0.46mm$

この値は BTV 測定結果範囲内にあるとともに、昨年度のトレーサー試験 (15W3137T8 試験および 15W3731T10 試験) のウランの破過曲線の解析より、間隙幅が 0.3mm および 0.55mm が最適値

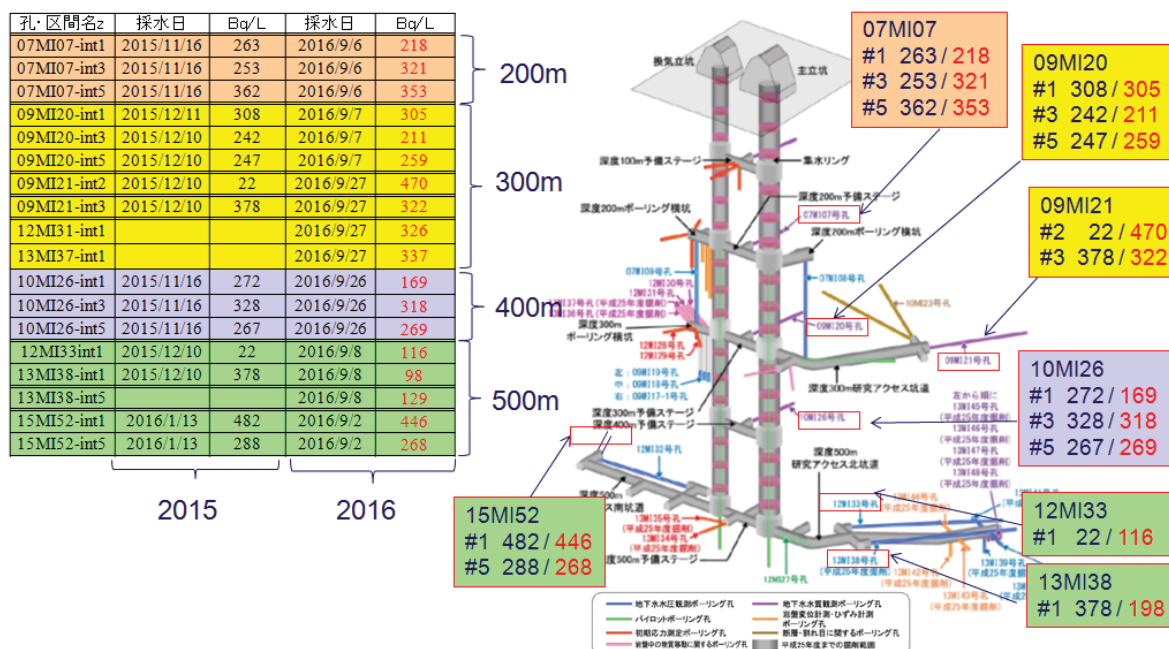
となる結果も得られている。このことから、ラドン循環試験による間隙幅が概ね妥当な値を得たと考える。

表 5.1.6-2 ラドン循環試験に箇所の割れ目の特徴

	割れ目深度	開口幅 (BTV)	方向	充填鉱物	交差距離
12MI31-int3	21.90m	0.15mm	N29° W88° E	緑泥石および 黄鉄鉱	2.93m
13MI37-int2	23.14m	0.70mm	N26° W80° E		

5.1.6.2 深度 500m 研究アクセス南坑道における原位置のラドン濃度

本受託事業においては、割れ目間隙幅の推定のために、深度 300m ボーリング横孔や深度 500m 研究アクセス南坑道などのボーリングした領域を対象としてラドン濃度測定を行っている。昨年度からは、瑞浪超深地層研究所全体における当該個所の場の理解のために、地下水年代測定のための採水時に、合わせて坑道の各所でラドン濃度測定を行っている。図 5.1.6-4 に瑞浪超深地層研究所の各坑道のボーリング孔におけるラドン濃度を示す。この結果によれば、ラドン濃度は昨年度と大差がない箇所が多い。昨年度、濃度が著しく低かった箇所は、今年度は濃度が高く、昨年度本来の値を得られていなかった可能性がある。深度や坑道における傾向は明瞭ではない。深度 500m 研究アクセス南坑道の 15MI52 孔、15MI53 孔、16MI59 孔は、瑞浪超深地層研究所全体と比較すれば標準的なラドン濃度となっている。



坑道の各所に示した数字の内「#○」は区間番号、紺色は昨年度の値、赤色は今年度の値である。

図 5.1.6-4 瑞浪超深地層研究所の各所ボーリング孔におけるラドン濃度

深度 500m 研究アクセス南坑道では、昨年度 15MI52 孔および 15MI53 孔の掘削を実施し、今年度 8 月時点で数カ月の間孔内が乱されない状態が継続している。一方、9 月以降は 16MI59 孔が掘削される予定であった。このため、岩盤内の地下水環境が安定している状態で、当該個所のラドンのバックグラウンド値を得ることを目的に採水とラドンの分析を行った。採水をした 15MI52 孔および 15MI53 孔にはマルチパッカーシステムが入っており、水みちをパッカーで挟むように、各孔ともに 6 区間が設置され、各区分より採水が可能となっている。また、16MI59 孔における孔内作業が 1 月末に終了しており、その後、採水した。分析は採水試料を持ち帰り、室内で Rad-7 によりラドン濃度を測定した。

採水日および測定結果を表 5.1.6-3 に示す。採水した地下水の溶存ラドン濃度は、予備排水が不十分だった 15MI52int3 を除いて、250～290Bq/L である。このうち割れ目が連続する両孔の区間では、ほぼ同じ濃度が得られており、水理的にも連通していることが確認された (図 5.1.6-5)。今後、ラドン循環試験によって水みちの間隙幅の測定を行い、深度 300m に引き続き、手法の確認を実施したい。

表 5.1.6-3 各孔・パッカー区間のラドン濃度測定結果

孔・パッカー区間	採水日	ラドン濃度 (Bq/L)
15MI52 int2	2016 年 8 月 25 日	279
15MI52 int3	2016 年 8 月 25 日	146 ※
15MI52 int4	2016 年 8 月 25 日	292
15MI52 int5	2016 年 8 月 25 日	269
15MI53 int4	2016 年 8 月 25 日	294
15MI53 int5	2016 年 8 月 25 日	257
16MI59 int5	2017 年 2 月 17 日	257

※ 流量が少なく予備排水が十分にされていない。このため、ラドン濃度が低い可能性がある。

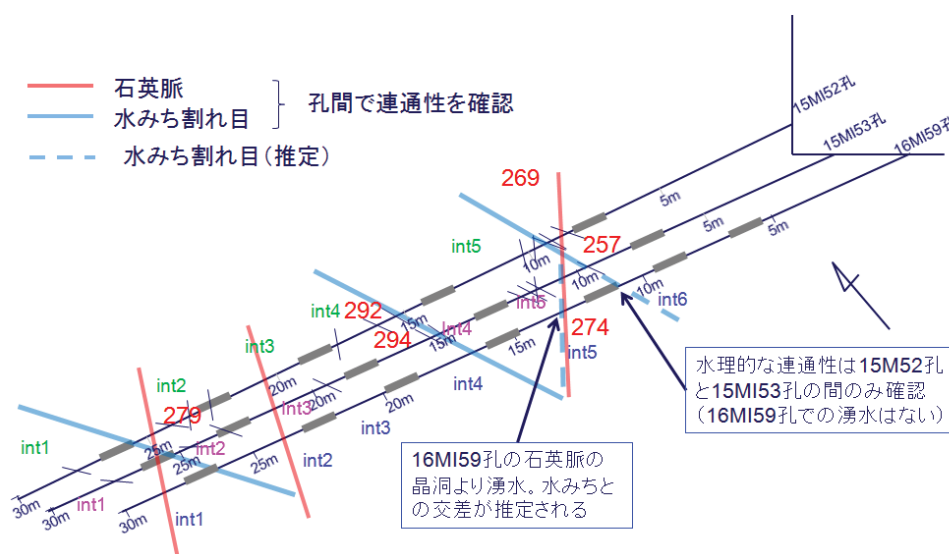


図 5.1.6-5 深度 500m 研究アクセス南坑道のボーリング孔におけるラドン濃度

5.1.7 まとめ

割れ目の間隙幅の推定方法として、水理試験による方法や、ボアホール TV による計測とは異なる方法として、ラドン濃度による方法を開発している。これまで、グリムゼルテストサイトで手法の適用を確認したが、我が国の地質および地下水での手法の適用性を確かめるために瑞浪超深層研究所への適用を行ってきた。これまでは、深度 300m ボーリング横坑を対象に原位置でバックグラウンドの溶存ラドン濃度や、ボーリングコアを用いたラドンのフラックスの測定を行い、予備的に間隙幅を計測するなどした。

今年度は、深度 300m ボーリング横坑において、顕著な水みち割れ目を対象にラドンのフラックスの測定と、原位置でのラドン循環試験によって、間隙幅の推定を行った。ラドンフラックスは現地で掘削したボーリングコアを用いて測定した。変質が認められないコアを用いた試料からは、 $5.7\text{E-}03\text{Bq/cm}^2$ のフラックスを得た。変質が認められるコアは $5.3\text{E-}03\text{Bq/cm}^2$ と変質が認められないコアの方に比べて僅かに小さい値を得た。次に深度 300m ボーリング横坑の 12MI31 孔 int3 区間と 13MI37 孔 int2 区間との間を繋ぐ、1 条の水みち割れ目を用い、ラドン循環試験を実施した。1 カ月の間に 4 回循環試験を行い、その都度、採水を行った。この試料のラドン濃度は 230~279Bq/L であった。循環試験による水みち割れ目のラドン濃度と、室内で計測したラドンフラックスを用いて割れ目の間隙幅を推定した。この水みち割れ目には緑泥石が認められ、基質部がやや変質していることから、変質したコアから得たラドンフラックスを用いて割れ目幅を求めたところ、割れ目の間隙幅は 0.38mm~0.46mm と推定された。この間隙幅は、高精度ボアホール TV により計測した開口幅 0.15mm~0.70mm 内に収まり、また、昨年度のトレーサー試験から得た間隙幅である 0.3mm および 0.55mm と近いものである。したがって、ラドン循環試験による間隙幅は、他の手法の結果と比較して、相補的に妥当な値を得たと考える。

深度 500m 研究アクセス南坑道における原位置のラドン濃度を計測した。採水した地下水の溶存ラドン濃度は、250~290Bq/L であった。このうち割れ目が連続する両孔の区間では、ほぼ同じ濃度が得られており、水理的にも連通していることが確認された。

今後の課題としては、深度 300m ボーリング横坑では、ラドンを用いて水みち割れ目の幅を推定し、トレーサー試験などの他の手法と整合する値を得たことで、相補的に手法の妥当性を示したが、手法の検証のためには、間隙幅を評価した水みち割れ目へレジンを注入し、固化後の掘削により間隙幅を直接的に計測して確認することが望まれる。また、深度 500m 研究アクセス南坑道のラドン計測では、水みち割れ目における連通性がラドンによって確認されたため、次年度はラドン循環試験によって割れ目の幅を推定することが必要である。以上の実施によってラドンを用いた割れ目幅の推定手法について検証し、取り纏める。

参考文献

- Snow D. 1965, "A parallel plate model of fractured permeable media, University of California", Berkeley, Ph. D
- Cecil L.D., Smith, R.C. II, Reilly, M.A., and Rose, A.W., 1987, Radium-228 and radium-226 in ground water of the Chickies Formation, southeastern Pennsylvania IN Graves, Barbara, ed., Radon, radium, and other radioactivity in ground water: Chelsea, Michigan, Lewis Publishers, p. 437-447.
- 湯口貴史、鶴田忠彦、西山忠男 (2010) 中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化 岩石鉱物科学 39(2), 50-70
- 地球化学標準物質 <https://gbank.gsj.jp/geostandards/>
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985). The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford. 312.
- 石橋正祐紀、安藤友美、笹尾英嗣、湯口貴史、西本昌司、吉田 英一 (2014) 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴 - 土岐花崗岩を例として - 応用地質 55(4), 156-165
- 文部科学省、1990、ラジウム分析法 放射能測定シリーズ 19
- 文部科学省、1992、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ 放射能測定法シリーズ 7 3訂
- 日本工業規格 2006 JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験法
- 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 (東濃地科学センターHP)
- 参照先: <https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/miu.html>
- 黒田吉益、諏訪兼位 (1983) 偏光顕微鏡と岩石鉱物 (第2版) 共立出版
- 都城秋穂、久城育夫 (1972) 岩石学 I 偏光顕微鏡と造岩鉱物 共立出版
- 古川路明 (1994) : "現代化学講座 15 放射化学" .
- 核燃料サイクル開発機構 (1999a) : "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 3 地層処分システムの安全評価" , JNC-TN1400 99-023.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999b) : "釜石原位置試験総括報告書" , JNC TN7410 99-001.
- Alexander, W. R., Mackenzie, A. B., Scott, R. D. and McKinley, I. G. (1990) : "Natural analogue studies in crystalline rock: The influence of water-bearing fractures on radionuclide immobilization in a granitic repository, Nagra Technical Report, NTB 87-08.

文部科学省（2002）：放射能測定法シリーズ 14「ウラン分析法」（平成 14 年改訂）。

5.2 高粘性流体注入試験技術の開発

5.2.1 背景および目的

割れ目の幅や流れの次元は、割れ目内のトレーサーの移行を評価するうえで非常に重要な情報である。これら进行评估するために、高粘性流体の注入による評価方法を開発している(長谷川ほか、2007、2015)。これは、地盤内に高粘性流体を一定流量で注入し、注入時の圧力応答から割れ目の幅や流れの次元を評価する方法である。図 5.2.1-1 に示すように、割れ目内の流路が一次元的な場合には、高粘性流体の到達距離は時間とともに線形的に増加するため、高粘性流体の注入圧力も線形的に増加する。また、二次元的な場合には、到達距離の増加は時間とともに少なくなるため、高粘性流体の注入圧力の増加も時間とともに低下し、理論的には対数関数的になる。さらに、流路や割れ目幅が小さければ、高粘性流体の到達距離が遠くなるため、圧力の増加率は大きくなる。この方法は単孔で実施でき、圧力を観測するだけなので比較的簡易に原位置で実施できるという利点がある。

昨年度までに深度 300m ボーリング横坑においてトレーサー試験が実施されている。これらで得られ割れ目幅や割れ目の連結性を確認するために、今年度は同一区間で高粘性流体試験を実施することとした。

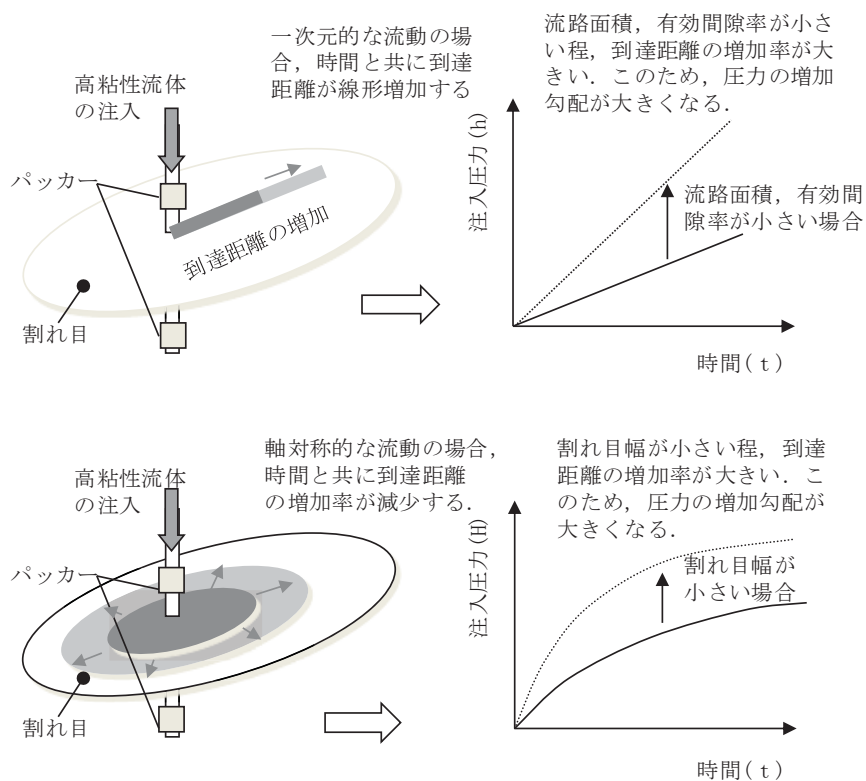


図 5.2.1-1 高粘性流体注入試験の評価方法概念図

5.2.2 試験地点

高粘性流体試験は、これまでにトレーサー試験が行われた 300m ボーリング横坑のボーリング区間を対象に実施した。図 5.2.2-1 に調査位置および仮設状況の平面図を示す。

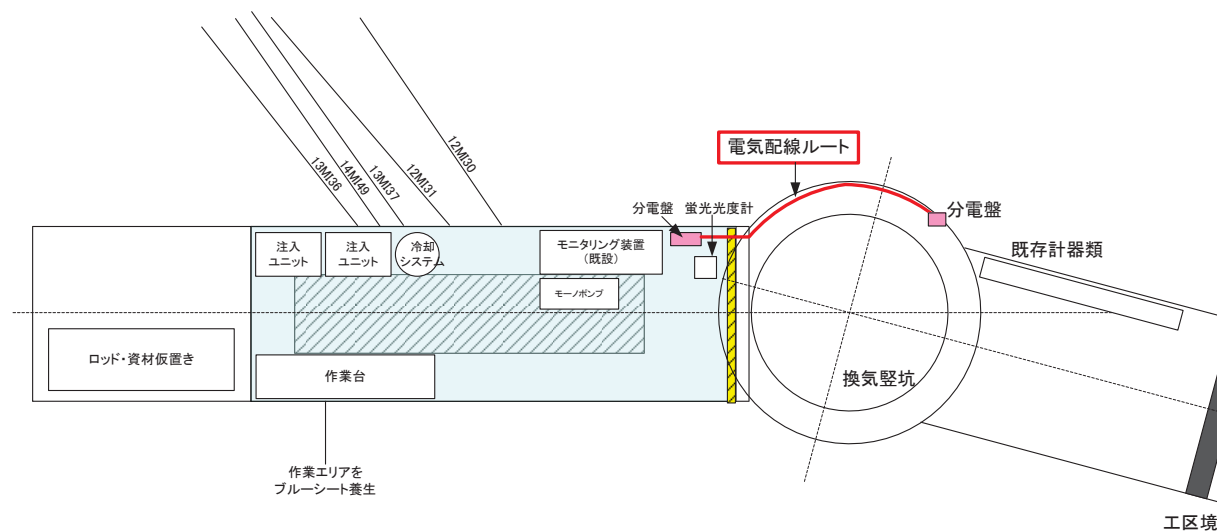


図 5.2.2-1 高粘性流体試験の実施位置と仮設状況

高粘性流体注入試験の対象割れ目は、表 5.2.2-1 に示すこれまでにトレーサー試験を実施した割れ目の内、透水係数が比較的大きく、トレーサー試験においてバックグラウンド流れが遅く回収率の比較的良好だった 13MI37 号孔の 23.135 m の割れ目を対象として実施した。対象割れ目の高精度 BTV 画像を図 5.2.2-2 に示す。

高粘性流体注入試験の対象割れ目を広げた場合の他のボーリング孔およびパッカー区間との関係を図 5.2.2-3 に示す。最も近い観測区間は、12MI31 号孔の区間 2 である。次に近いのが 12MI30 号孔の区間 2 である。これらの区間は高粘性流体の到達が確認できるように、区間長を短く設定してある。

表 5.2.2-1 トレーサー試験対象区間

トレーサー試験	孔名	深度 (m)	走向傾斜	透水量係数(m ² /s)
H27 年度試験区間	12MI31 号孔	21.90	N29W88E	6.93E-8
	13MI37 号孔	23.14	N26W80E	1.14E-6
H26 年度試験区間	12MI30 号孔	24.67	N9W73E	2.91E-5
	12MI31 号孔	24.15	N10W83W	8.88E-07

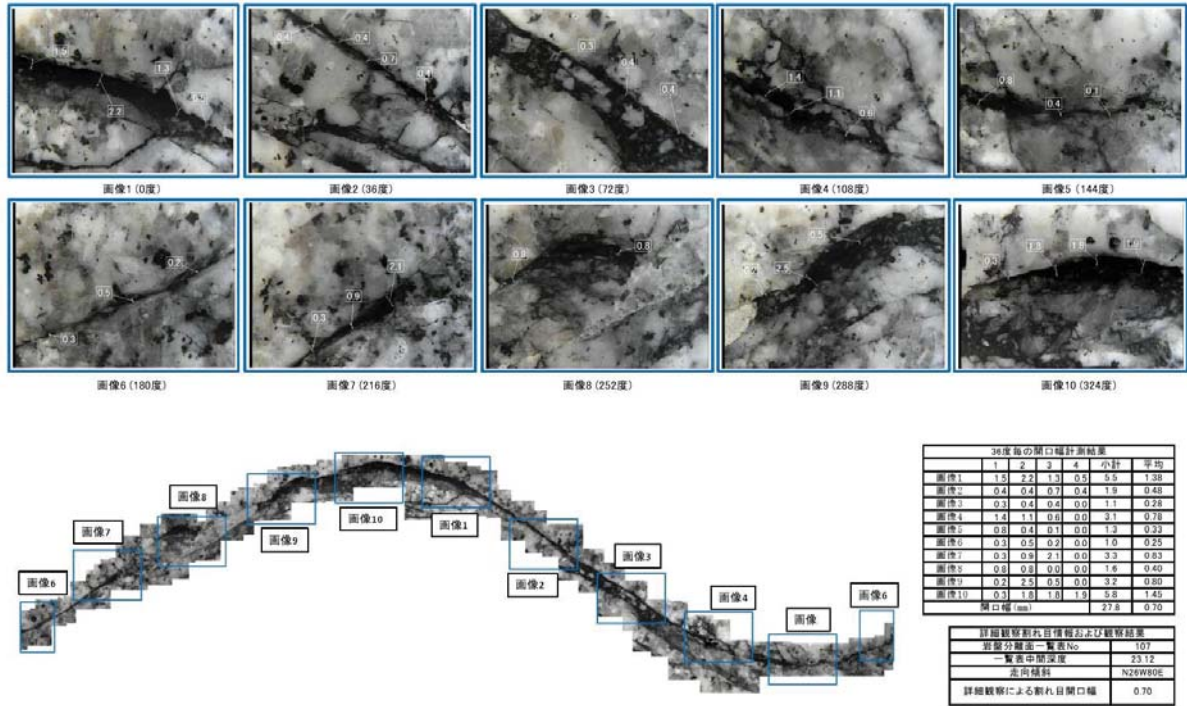
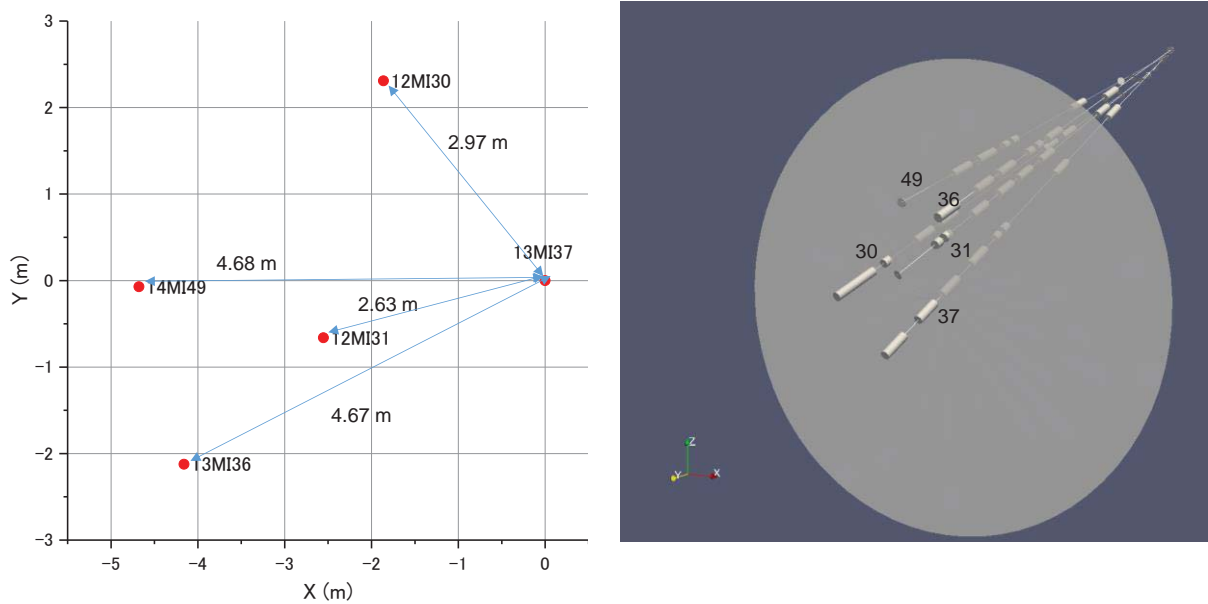


図 5.2.2-2 高粘性流体対象区間割れ目 (13MI37 号孔 : 23.135m, N26W80E)



(1) 割れ目面上の位置図

(2) 空間的な位置図(円は割れ目、円柱は区間を模したもの)

図 5.2.2-3 高粘性流体注入割れ目と他のボーリング孔との関係

5.2.3 試験方法

5.2.3.1 高粘性流体試験手順

高粘性流体試験の注入は、NAGRA Grimsel site での実績に基づいて、図 5.2.3-1 の手順で実施することとした。

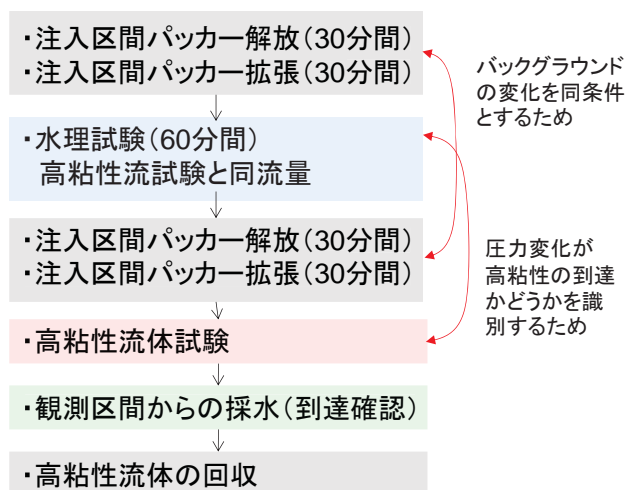


図 5.2.3-1 高粘性流体試験手順

試験方法の特徴として、高粘性流体試験前に水理試験で高粘性流体と同流量の水の注入試験を行う。これは、水理試験と高粘性流体注入が同流量であれば概ね粘性倍の圧力となるため、高粘性流体の注入圧力の確認と水理試験による周辺への影響を確認することにより、高粘性流体試験時の影響をより正確に把握するためである。高粘性流体は粘性が高いため、流動抵抗が大きく、高粘性流体の到達範囲では圧力が増加するため、この到達を見分けるために、この水理試験時の圧力応答が重要になる。最初と3番目に実施する注入区間パッカーの解放と拡張は、場に大きなインパクトを与えることによって、水理試験と高粘性流体試験の初期状態を一定に保つために実施しており、原位置での圧力状態を確認し、このような作業を行わなくても初期状態が一定と見なせるようであれば割愛する。高粘性流体試験後には、周辺のボーリング区間において高粘性流体の到達が確認できたと思われる観測区間を対象に採水を行い、高粘性流体の到達確認を行う。最後に高粘性流体を注入した区間を開放し、高粘性流体の回収を行う。高粘性流体には蛍光染料を添加してあり、回収した水量と蛍光染料濃度から回収量を推定する。高粘性流体注入試験は、流量や粘性を変えて上記手順を複数回実施する。これは、場が変化していないことの確認と、圧力挙動が線形であることを確認するためである。

5.2.3.2 高粘性流体注入試験装置

高粘性流体注入試験装置の概要を図 5.2.3-2 に示す。試験装置は、定流量ポンプ、冷却システム、注入側ユニット、孔内装置からなる。定流量ポンプには定流量性の高いモノポンプを用いている。冷却システムは、高粘性流体が温度によって粘性が変化するため、温度を一定に保つために設けてある。注入側ユニットは、高粘性流体の注入流量と圧力を地表において確認するためのシステムである。孔内部分は、高粘性流体が区間内で希釈しないようにパッカーの拡張により区間体積を減らせる図 5.2.3-3 に示すシステムを用いている。注入区間には原位置で圧力計測ができるように圧力計と高粘性流体がチューブ内で地下水と混合しないようにトレーサー試験と同様に循環用の配管を設置してある。

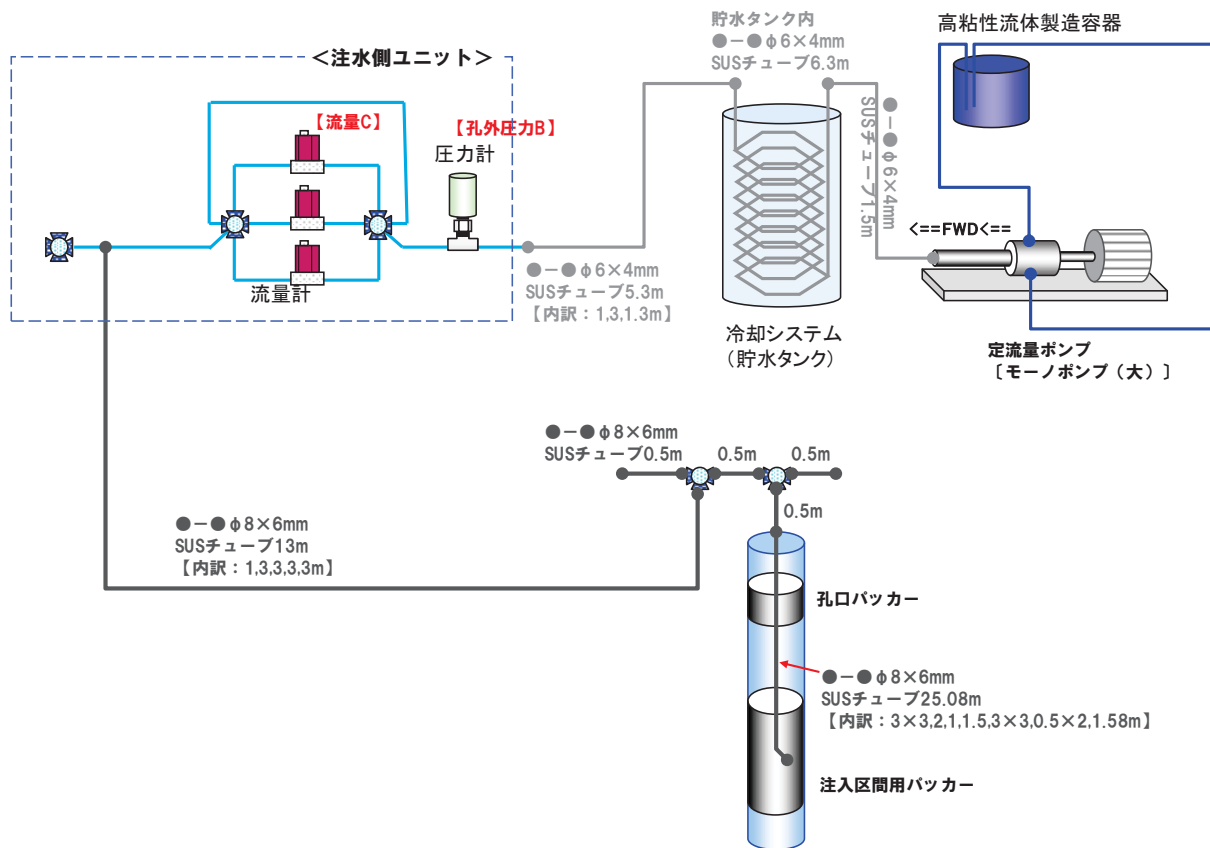


図 5.2.3-2 高粘性流体注入試験装置の概念図

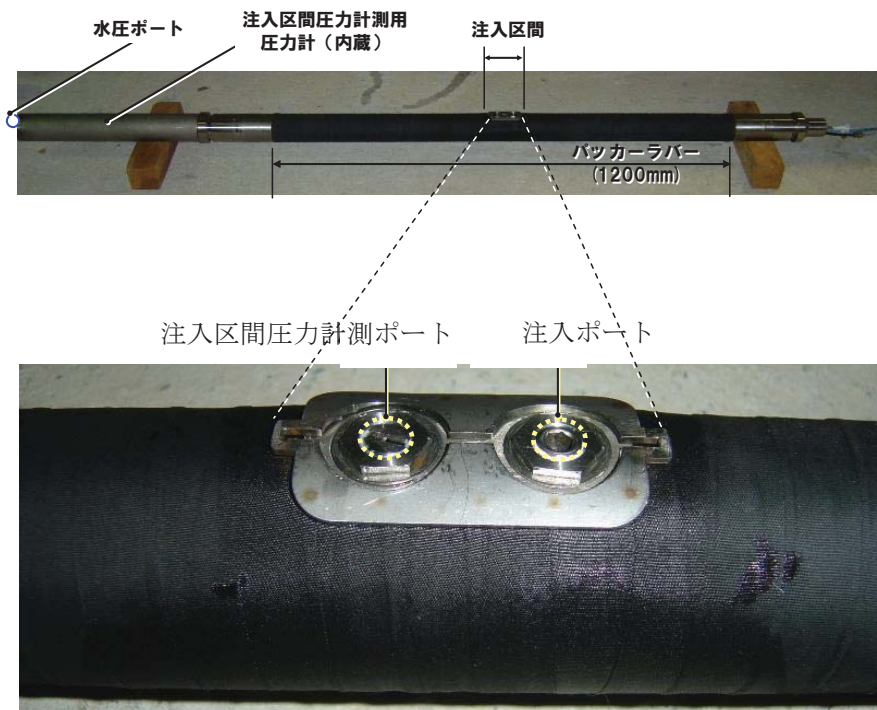


図 5.2.3-3 注入区間用パッカー

5.2.3.3 高粘性流体試験の作成

高粘性流体は、原位置の地下水にメトローズを混合したものをを用いる。メトローズは、原材料をパルプとした水溶性セルロースエーテルの粉末であり、これを水に溶かすと粘性のある透明な液体となる。メトローズは図 5.2.3-4 に示すように濃度によってその粘性が変化する。このため、必要とされる粘性から、メトローズの濃度を決定して高粘性流体を製作する。高粘性流体注入試験では定量性が重要なため、高粘性流体の圧縮性を小さくするために、高粘性流体を脱気しながら製作した。高粘性流体には、区間への到達や回収量を推定するために、蛍光染料のアミノ G 酸を添加した。

5.2.3.4 高粘性流体試験計画

対象とする割れ目(13MI37 号孔の 23.135 m)では、昨年度トレーサー試験が行われており、200 ml/min の揚水流量で圧力変化は約 0.25 MPa であった。このため、200 ml/min で粘性 100cp の高粘性流体を注入すると 25 MPa の注入圧力となる可能性がある。このため、50 ml/min で粘性 50cp 程度の高粘性流体を注入する計画とした。この場合、流量が 1/4、粘性が 1/2 で注入圧力が 1/8 となり、注入圧力は約 3 MPa 程度となる。

注入量は、最も近い観測区間(12MI31 号孔区間 2)までの距離が 2.6 m 程度あり、割れ目幅を 0.5 mm 程度と想定すると、観測区間で到達を確認するには 10 Liter 程度の注入が必要である。このため、試験時間は 200 min 程度が想定される。

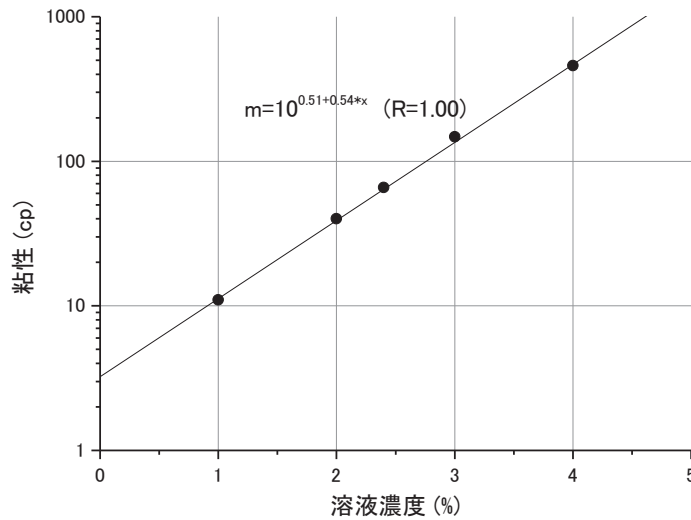


図 5.2.3-4 メチルセルロース (SH-60)における濃度と粘性の関係

5.2.4 試験結果

高粘性流体注入試験は、13MI37号孔の23.135mの割れ目を対象として、粘性と流量を変えて2回の注入を実施した。1回目は、粘性100cpの高粘性流体を70ml/minで注入した。2回目は、粘性70cpの高粘性流体を140ml/minで注入した。試験は、現場の状況を鑑みて図5.2.3-1の手順で実施した。透水試験前後のパッカーの解放と拡張を割愛した。これは本地点では圧力の応答が良く、透水試験などを実施しても比較的短い時間で圧力が回復し、安定した圧力に戻るためである。

(1) 高粘性流体試験1回目(70ml/min、100cp)

高粘性流体試験に先立ち、透水試験を高粘性流体と同流量(70ml/min)で実施した。透水試験結果を図5.2.4-1に示す。注入口での有効圧力は0.009MPa程度となった。区間の透水量係数は、注水法では 1.5×10^{-6} m²/s、回復法では 1.0×10^{-5} m²/s程度となっており、大きく異なる。ただし、貯留係数の評価値が注水法では 1.3×10^{-6} 、回復法では 1.6×10^{-46} と大きく異なっており、この影響で大きく変化していると考えられる。透水係数は、注水時を定常法で影響圏を5mと仮定して評価すると、 9.4×10^{-7} m²/sとなる。同流量で粘性100cpの高粘性流体を注入した場合、0.9MPa程度の注入圧力となることが予想される。

周辺のボーリング孔では、圧力応答の大きい順に12MI31#2(約0.003MPa)、12MI30#3(約0.002MPa)、12MI31#3(約0.0015MPa)、12MI30#2(約0.0015MPa)、12MI31#1(約0.0007MPa)となっており、概ね区間距離を反映した圧力応答となっている。

高粘性流体(100cp)を70ml/minで注入した試験結果を図5.2.4-2に示す。観測区間については、圧力変化が大きかった12MI30Int2とInt3、12MI31Int1とInt2を図化した。注入区間での圧

力と一緒に示すと圧力応答が不明確なため、観測区間の圧力については拡大図もあわせて示した。

注入は約 170 分間実施し、合計で 12 Liter 程度を注入して終了した。注入圧力は、概ね 2 段階で上昇し、1 段階目 (0~600 sec) と 2 段階目 (600 sec~) に識別できる。注入圧力が初期に 0.15 MPa 程度瞬時に増加しているが、これは後述する 2 回目の結果と整合性がとれないことから、高粘性流体が漏れ、少し広がっていたためと推測される。これは試験開始前の注入圧力の増加からも見て取ることができる。最終的には注入区間で 0.8 MPa 程度まで圧力が上昇している。また、注入観測区間だけでなく、観測区間の 12MI31Int2、12MI30Int2、12MI30Int3 において有意な圧力上昇が観測されている。これらは高粘性流体の到達の影響と考えられる。

高粘性流体注入試験終了後に観測区間におけるトレーサー濃度計測を行った。高粘性流体には 4 mg/l でアミノ G 酸が添加されている。観測区間においては、12MI31Int2(1.7 mg/l) と 12MI30Int2(1.3 mg/l) で有意にトレーサーが検出されている。その他の区間では有意にトレーサーが検出されなかった。

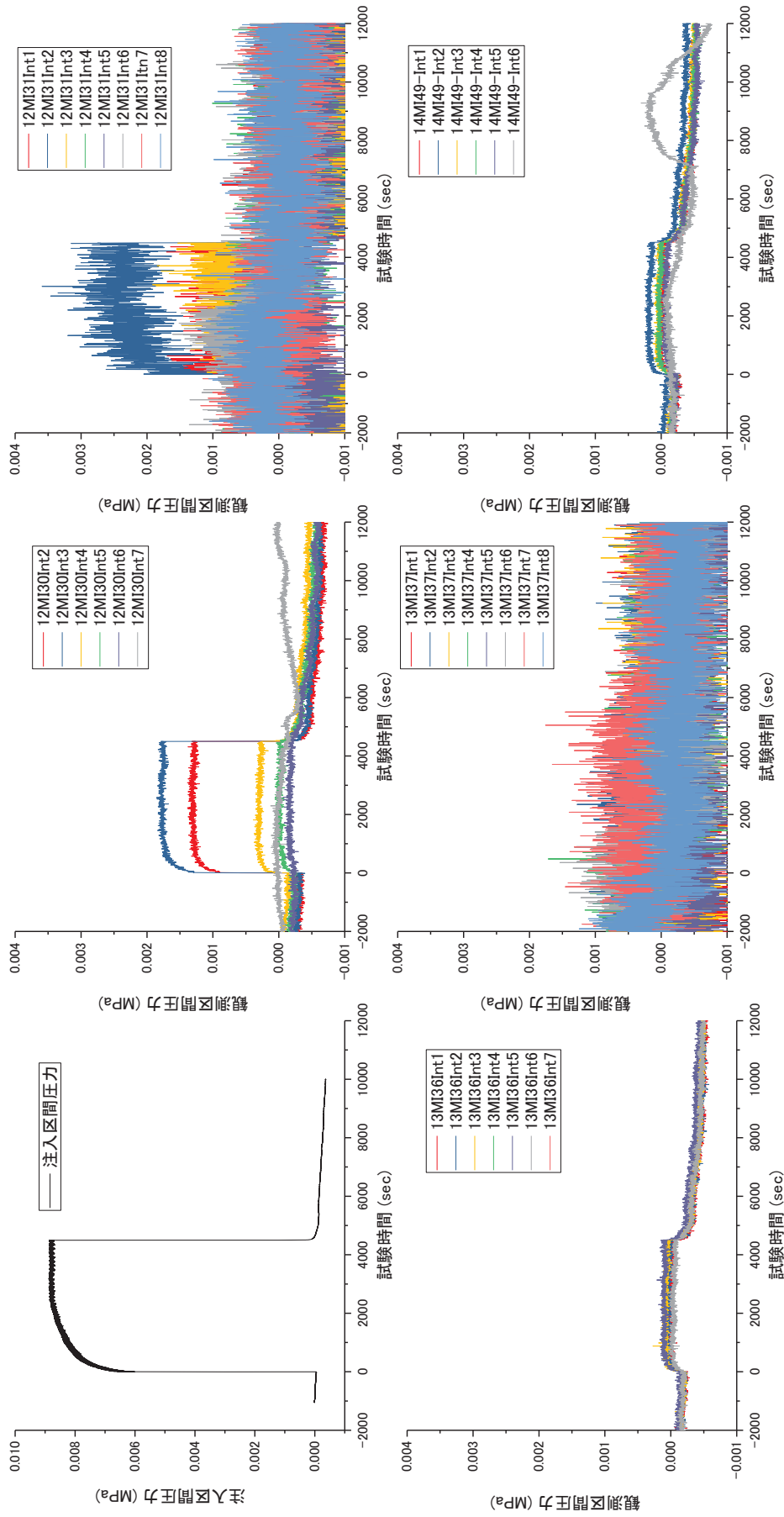
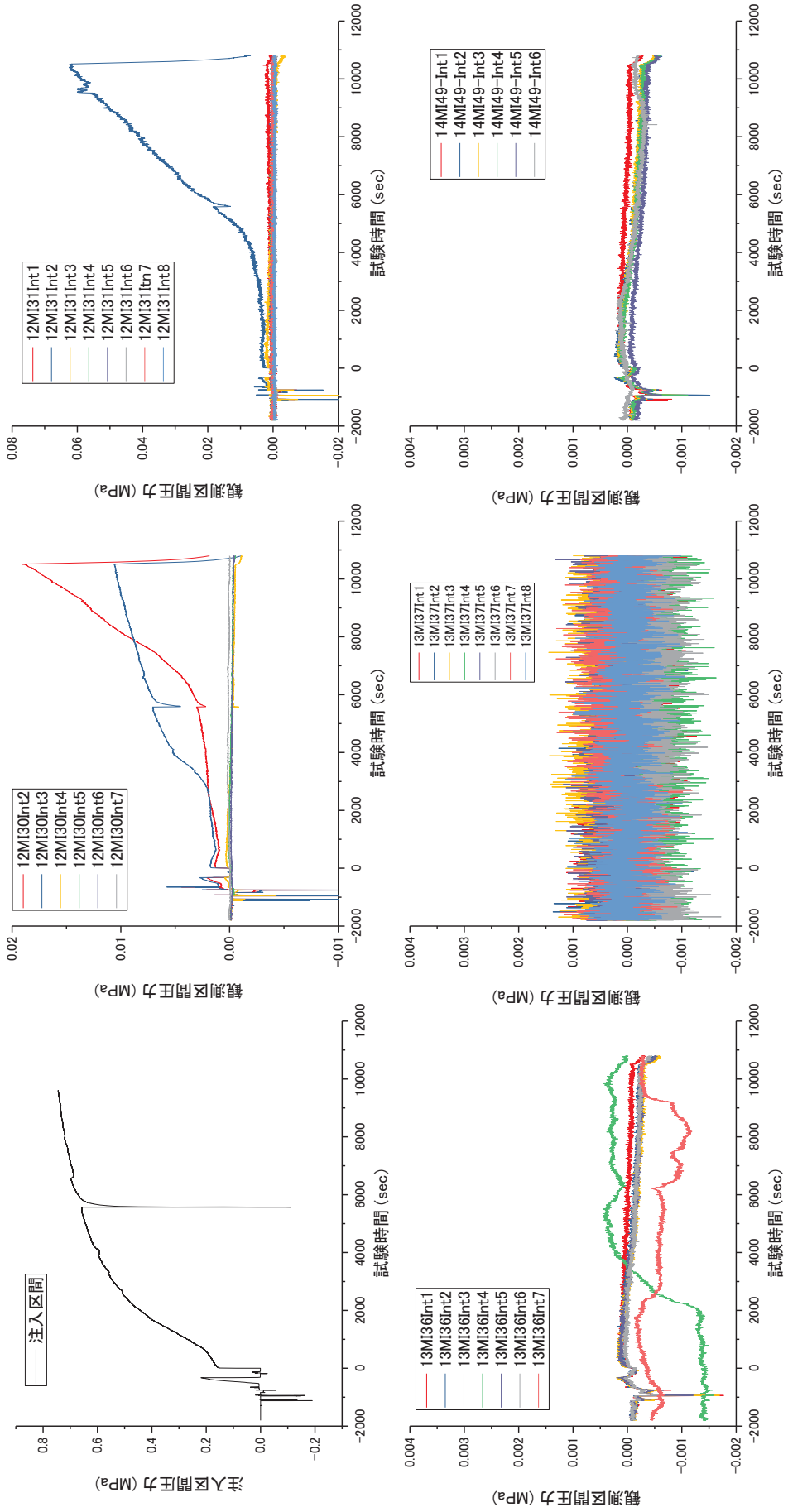


図 5.2.4-1 透水試験結果 1 回目 (70 mL/min)



図

図 5.2.4-2 高粘性流体注入試験結果 1 回目 (100 cp, 70 ml/min)

(2) 高粘性流体注入試験 2 回目 (140ml/min、70cp)

前述のように高粘性流体注入試験 1 回目での圧力上昇が 0.8MPa 程度、周辺孔の反応が 1 時間程度経過後であったことから、2 回目の試験は、粘性を低下させ、流量を増加して試験を実施した。

高粘性流体試験に先立ち透水試験を、高粘性流体の注入流量と同流量 (140 ml/min) で実施した。透水試験結果を図 5.2.4-3 に示す。注入口での有効圧力は 0.02 MPa 程度となった。注入区間の透水量係数は、注水時では 5×10^{-6} m²/s、回復時では 1.3×10^{-5} m²/s 程度となっており、大きく異なる。貯留係数は、貯留係数は、注水時では 1.7×10^{-24} 、回復時では 3.0×10^{-63} と大きく異なっており、この影響で大きく変化していると考えられる。透水係数は、注水時を定常法で影響圏を 5m と仮定して評価すると、 9.3×10^{-7} m²/s となる。この値は一回目の透水試験結果と同じである。同流量で粘性 100cp の高粘性流体を注入した場合、1.4 MPa 程度の注入圧力となることが予想される。

高粘性流体 (70cp) を 140 ml/min で注入した試験結果を図 5.2.4-4 に示す。観測区間については、圧力変化が大きかった 12MI30Int2 と Int3、12MI31Int1 と Int2 を図化した。注入区間での圧力と一緒に示すと圧力応答が不明確なため、観測区間の圧力については拡大図もあわせて示した。

注入圧力は 400 sec を境に 2 段階に変化しているように見える。2 回目の試験も 1 回目の試験と同様の傾向にあり、2 回目の試験では、初期の圧力上昇は急激ではないため、1 回目の試験の初期の圧力応答は、試験前に高粘性流体が広がったためと考えられる。観測区間の圧力は、2 回目の試験では 1 回目の試験よりも、より明確になっている。これは、粘性は低下させたものの、流量を上げたため、注入圧力が上がったためと、高粘性流体の広がり及早くなったためである。観測区間の圧力上昇も、1 回目の試験と同様に、12MI30Int2 と Int3、12MI31Int2 に有意な圧力上昇が表れている。これらは高粘性流体の到達の影響と考えられる。

高粘性流体注入試験終了後に観測区間におけるトレーサー濃度計測を行った。高粘性流体には 4 mg/l でアミノ G 酸が添加されている。観測区間においては、12MI31Int2 (1.7 mg/l) と 12MI30Int2 (1.3 mg/l) で有意にトレーサーが検出されている。その他の区間では有意にトレーサーが検出されなかった。

2 回目の試験終了後に、透水試験を実施した。透水試験は第 2 回の高粘性流体注入試験前に実施した際と同じ流量 (140 ml/min) で実施した。透水試験結果を図 5.2.4-5 に示す。注入圧力の増加は、0.02MPa 程度と高粘性流体注入試験前とほぼ同じ圧力となっている。透水試験結果は、注入時は 6.4×10^{-6} m²/s、回復時は 1.3×10^{-5} m²/s となる。他の透水試験と同様に貯留係数は、注水時では 3.0×10^{-32} 、回復法では 7.3×10^{-64} と大きく異なっており、この影響で差が出ていると考えられる。注水時を定常法で影響圏を 5m と仮定して評価すると、 8.8×10^{-7} m²/s となり、高粘性流体試験前と同程度の透水量係数 (9.3×10^{-7} m²/s) である。

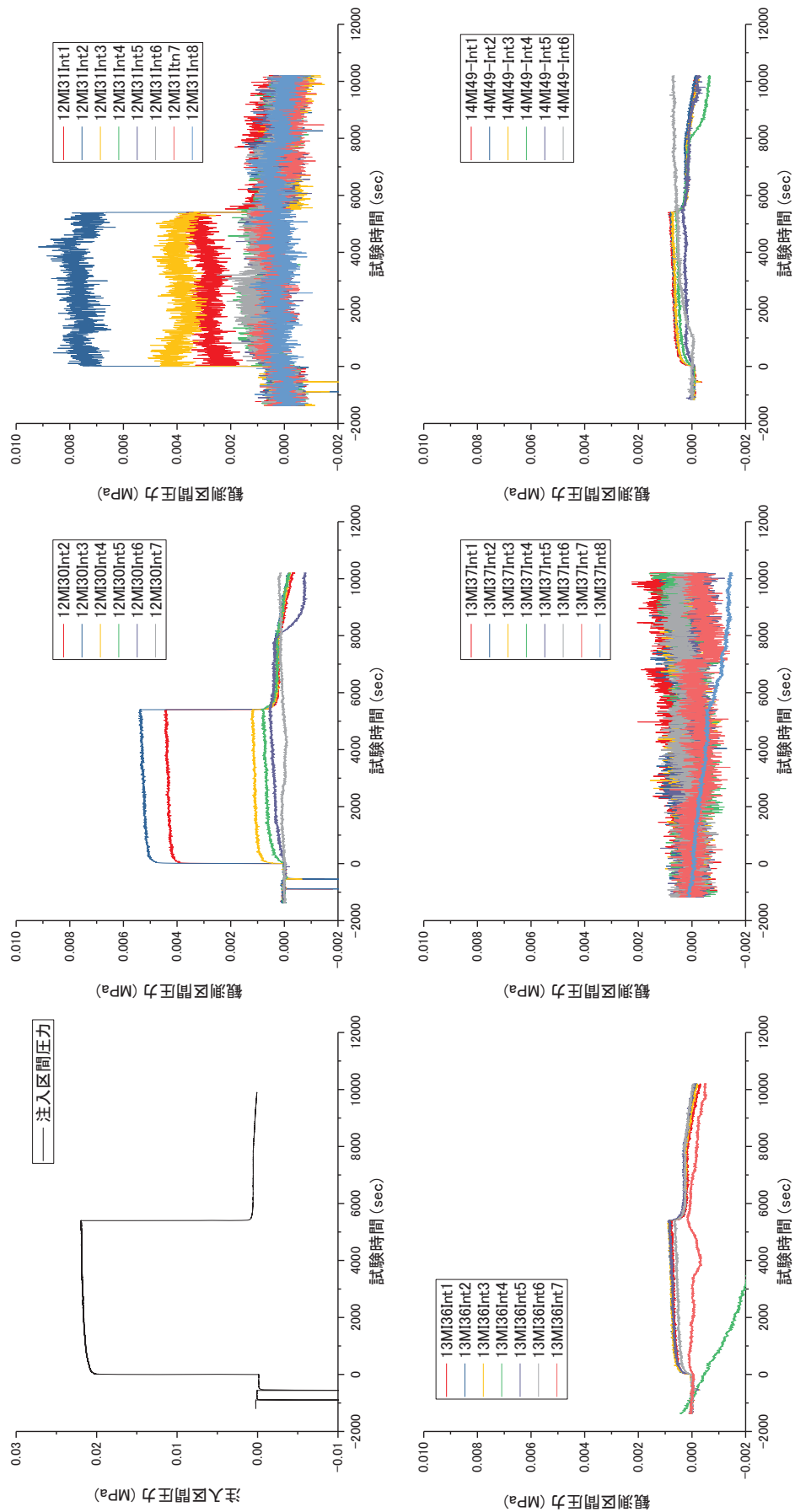


図 5.2.4-3 透水試験結果 2回(140 ml/min)

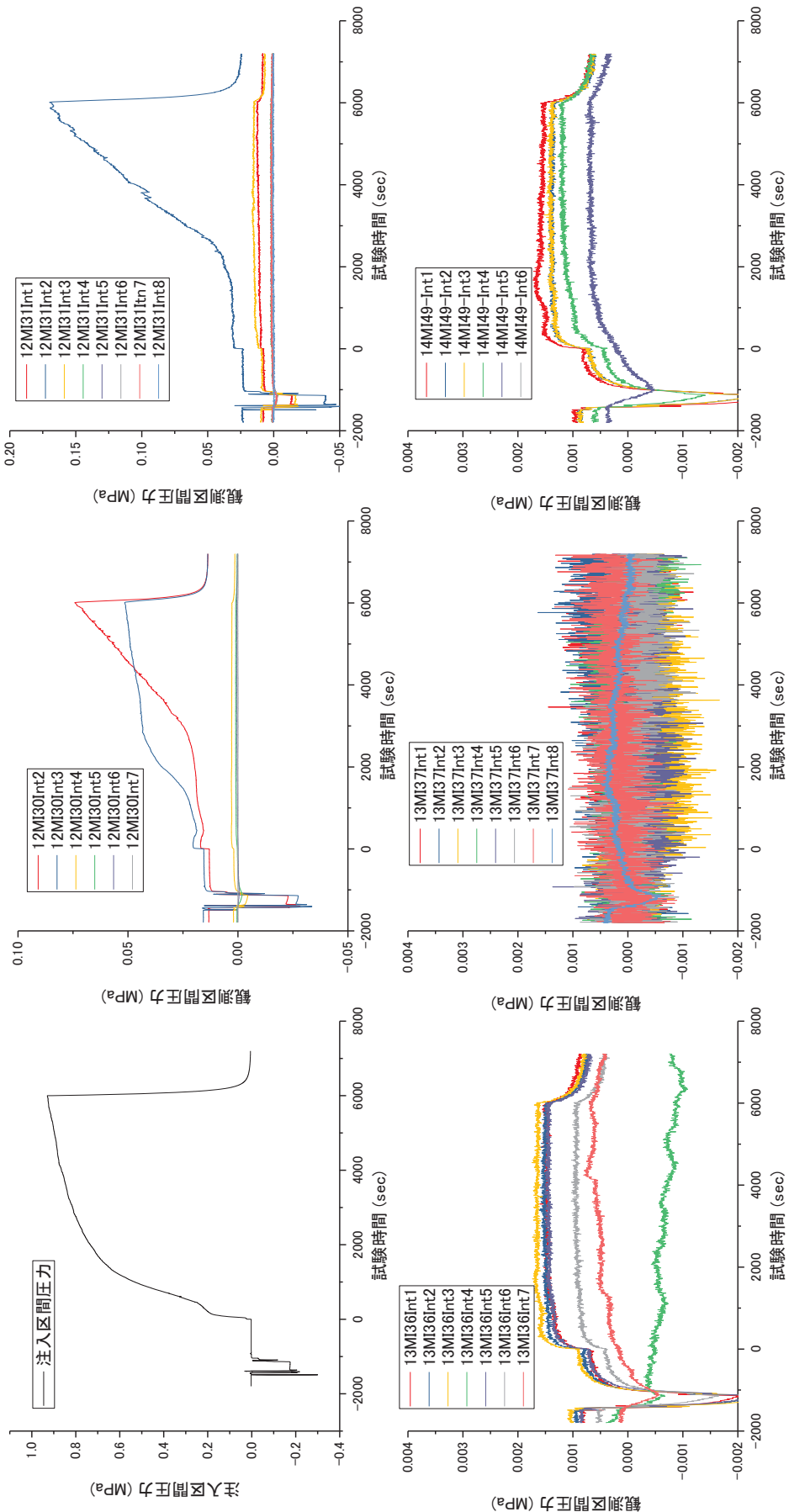


図 5.2.4-4 高粘性流体注入試験結果 2 回目 (70 cp, 140 ml/min)

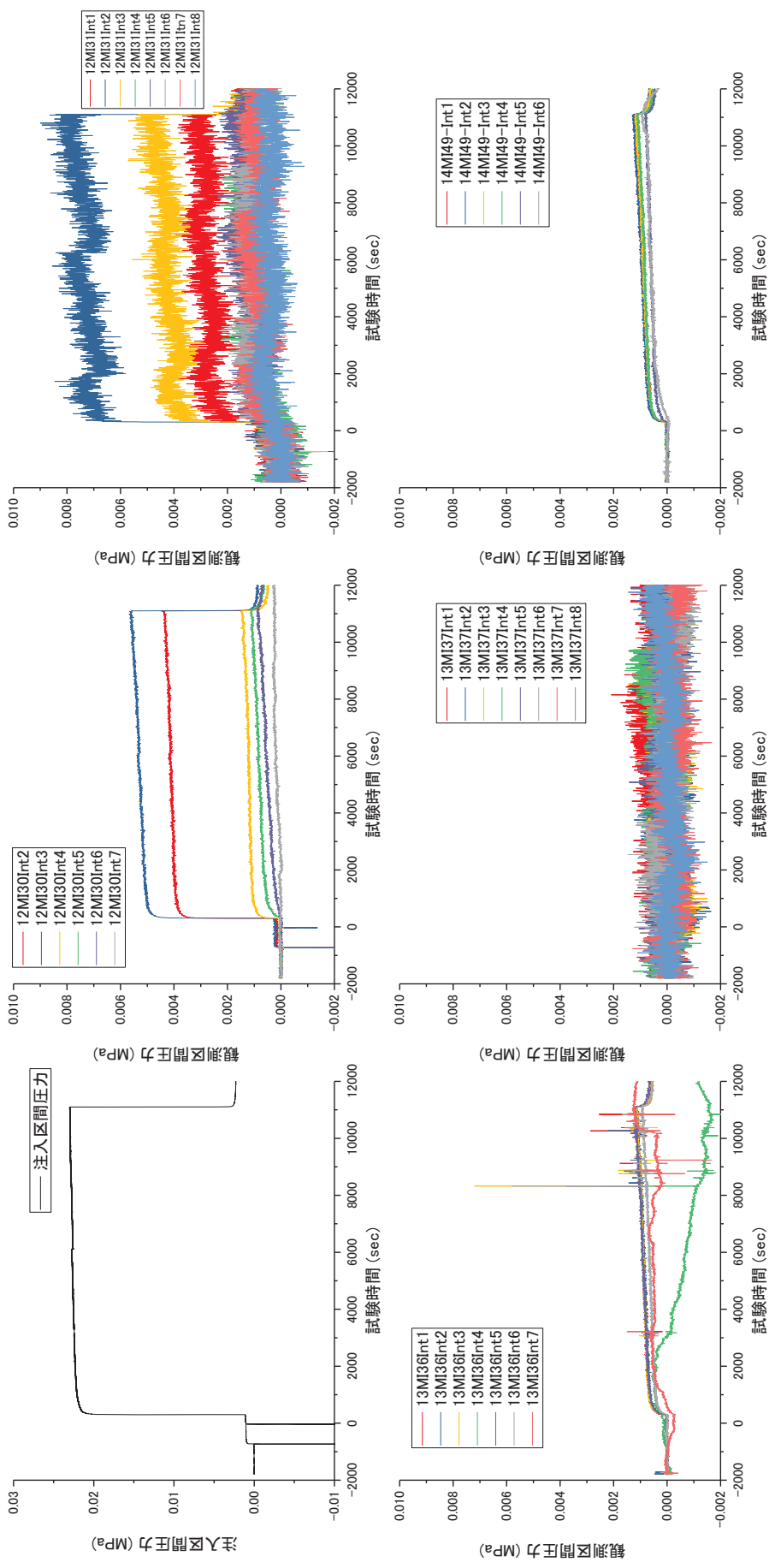


図 5.2.4-5 透水試験結果 3回(140 ml/min)

5.2.5 考察

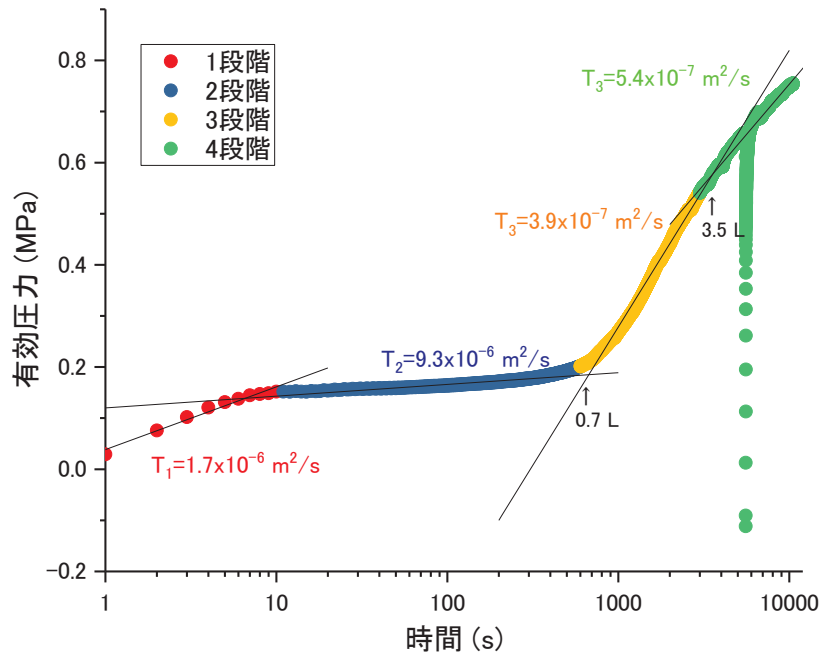
13MI37 号孔 23.135m の割れ目を対象に高粘性流体の注入を 2 回、70ml/min 100 cp と 140ml/min 70cp を実施した。高粘性流体試験前に高粘性流体注入試験と同じ流量で透水試験を実施した。また、高粘性流体試験終了後にも透水試験を実施した。この結果、高粘性流体試験前後で透水係数はそれほど変わっていないことが確認できた。注入時や回復時に着目した非定常的な評価では、原位置の圧力応答が非常に早いことから、貯留係数が非常に小さい値となり、透水量係数にバラツキが大きくなるが、注入流量と注入圧力の関係はほぼ線形関係であった。このため、高粘性流体注入による透水係数の変化は有意ではなかったと推定される。ただし、高粘性流体の回収時には、割れ目充填鉱物とみられる鉱物が非常に多く回収されており、高粘性流体を注入することにより、割れ目充填鉱物を流してしまう可能性は示唆された。

高粘性流体注入試験では、注入圧力が 2 段階に変化することが確認できた。さらに、詳細に評価するために、注入圧力と対数時間の関係を図 5.2.5-1 に示す。注入圧力と対数時間の関係は、傾きが一定であれば、軸対称的な流動であり、透水量係数が一定であると考えられる。

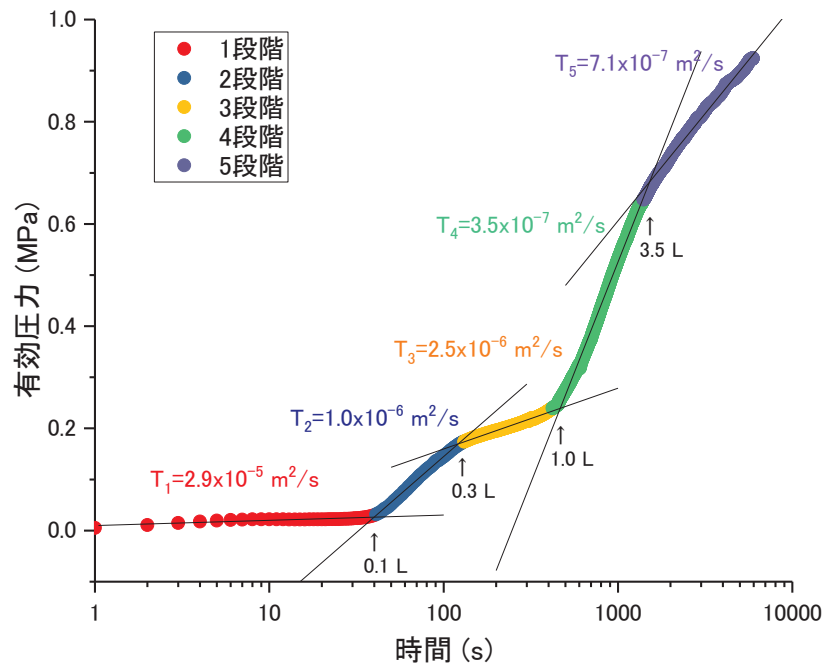
注入圧力と対数時間との関係から、透水量係数は徐々に変化していることがわかる。透水量係数は、高粘性流体の 1 回目の注入では 3 段階、2 回目の注入では 5 段階で変化しているように見える。1 回目と 2 回目とは透水量係数の変化回数が異なるが、1 回目の注入では、初期に高粘性流体が漏れたため、段階数が少なくなっていると考えられる。1 回目の 3 段階と 4 段階、2 回目の 4 段階と 3 段階とは透水量係数も近いことから同じ領域を高粘性流体が流れていると考えられる。1 回目の 2 段階目と 2 回目の 3 段階目とは注入流量から同じ段階と考えられるが、透水量係数に数倍の差が出ているが、原因は明確ではない。

段階的に圧力が変化するのは、透水係数場が変化したためと考えられる。これは、本地点に割れ目が多く、単一割れ目内を流れる場合と異なり、複数の割れ目を流れたためと考えられる。

次に、観測区間の圧力応答に基づいて割れ目の幅を評価した。観測区間で反応が確認されたのは、図 5.2.5-2 に示すように、12MI30#3 で 2.8L(1200sec)から、12MI31#2 で 4.2L(1800sec)から、12MI30#2 で 6.3L(2700sec)からである。12MI30 号孔では、同じボーリングで異なる区間に応答が出ている。この結果からも、単一割れ目ではなく、複数の割れ目を介して高粘性流体が広がったと考えられる。単一割れ目と軸対称的な流動を仮定して、到達時間から割れ目幅を求めると、12MI30#3 では割れ目幅 0.10 mm、12MI31#2 は 0.19 mm、12MI30#2 は 0.23 mm となる。透水量係数($9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)から割れ目幅の 3 乗則に基づいて求められる割れ目幅は、0.1mm 程度となっており、12MI30#3 への到達から求めた割れ目幅に近いが、いろいろな割れ目で圧力応答が得られることから、単一割れ目的な広がりではなく、複数の割れ目を介した流動であると考えられる。



(1) 高粘性流体試験 1 回目



(2) 高粘性流体試験 2 回目

図 5.2.5-1 高粘性流体試験結果の時間対数軸による比較

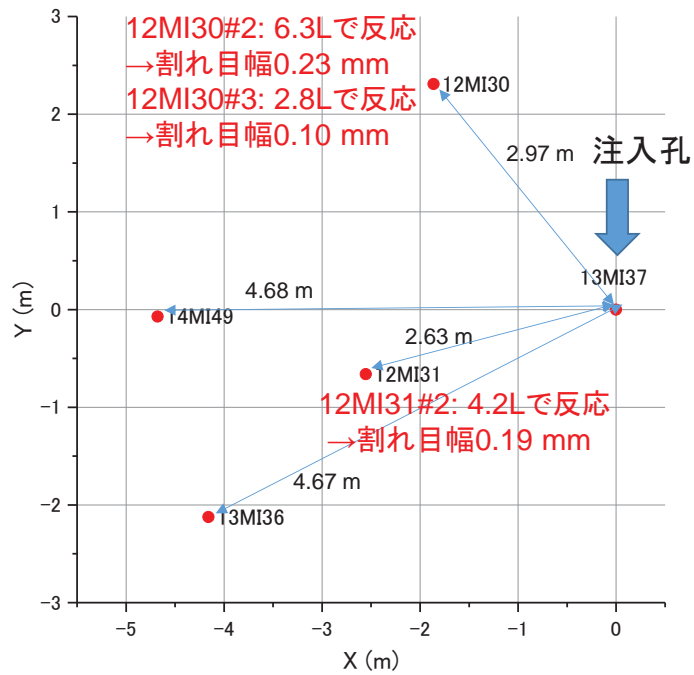


図 5.2.5-2 到達時間と注入量の関係から求めた割れ目幅

参考文献

長谷川琢磨、田中靖治、西垣誠(2007)：高粘性流体の注入による有効間隙率と流れの次元の評価、土木学会論文集 C、Vo. 63, No. 1.

長谷川琢磨・後藤和幸・田中靖治・西垣誠・野原慎太郎(2015)：高粘性流体の注入による割れ目の特性評価法の室内試験での実証、土木学会論文集 C, Vo. 71, No. 2, pp. 55-68.

5.3 割れ目の可視化技術の開発

5.3.1 背景及び目的

本事業では、トレーサー試験、溶存ラドン濃度計測、高粘性流体注入試験により、調査対象の割れ目の幅を推定する技術を開発しており、事業最後に、それらで推定された割れ目幅を検証する目的として、原位置レジン注入試験を実施することが計画されている。これら割れ目探査技術は、割れ目の分布が比較的単純なスイスのグリムゼル試験場において適用され、技術の有効性が確認されている。原位置レジン注入試験についても、スイスのグリムゼル試験場で実施されたが、その技術は過去に開発された技術をそのまま適用したに過ぎず、試験技術の開発には至っていない。

平成 24 年度より日本国内の岩盤に対しても割れ目探査技術が適用可能かを示すために、日本原子力研究開発機構（JAEA）の瑞浪超深地層研究所の深度 300m の坑道内での検討を進めてきた。原位置レジン注入試験については、事業最後に計画されているため、過去に開発された手法を参考に室内での検討を進めてきた。

本節の「割れ目の可視化技術」は、原位置レジン注入試験と原位置レジン注入試験後に掘削したボーリングコアの割れ目に対して適用する技術の二本立てであり、後者については、X線 CT 法による可視化技術、連続研削・撮影による可視化技術を整備し検討を進めてきた。

平成 26 年度からは、可視化技術の高精度化に重点を置き検討を進めてきたが、原位置レジン注入試験においては、注入レジンの選定が完了し、そのレジンの特性を最大限に活かした注入装置の開発に取り掛かった。レジン物性については、引き続き基本物性の取得などを行ってきたが、選定したレジンに適した蛍光剤の選定、原位置環境下でのレジン物性データの取得などが不十分であり、原位置の状態を想定した検討を進めている。具体的には、レジン物性の温度依存性や地下水がレジンに及ぼす影響などの検討を進めている。

本年度は、昨年度は引き続き、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で掘削したボーリングコアの割れ目にレジンが充填された岩石試料に対して、X線 CT 法、連続研削・撮影によるシリアルセクション法を適用した。両手法の可視化技術の高精度化を図るとともに、異なる手法で得られた画像の相互比較のための画像処理手法の確立に重点を置いて検討を進めた。また、蛍光剤を添加したレジンの割れ目充填物への浸潤特性を把握するため、室内レジン注入試験も実施した。さらに、その結果に基づき、本事業で使用するレジンに適した蛍光剤の選定も行った。

レジン特性試験では、水で満たされた模擬割れ目内に注入されたレジンの反応熱の測定とレジンの塩分による硬化への影響を検討した。

5.3.2 割れ目の3次元可視化と定量評価

(1) はじめに

昨年度に引き続き、室内で割れ目にレジンを(エポキシ樹脂)を充填した岩石試料の画像を用いて、割れ目の3次元可視化と割れ目の間隙幅の測定を行った。本年度は、両手法の可視化技術の高精度化を図るとともに、異なる手法で得られた画像の相互比較のための画像処理手法の確立に重点を置いて検討を進めた。

(2) 岩石試料と撮影条件

a. 岩石試料

岩石試料は、表 5.3-1 に示す JAEA の瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑のボーリングコアを用いた。これらのコアに内包する割れ目は、高精度ボアホール TV での観察を実施している。また、中間深度が 21.89m のものはトレーサー試験を実施した割れ目である。

表 5.3-1 岩石試料

孔名	採取深度 (コア)	平均開口幅 (中間深度) (BTV)	走向・傾斜 (BTV)
12MI31	14.816-14.945m	0.11mm (14.88m)	N45W/83SW
12MI31	20.535-20.645m	0.13mm (20.59m)	N25W/85E
12MI31	21.826-21.960m	0.15mm (21.89m)	N29W/88E

岩石試料へのレジンの充填は、割れ面の噛み合わせを十分配慮した後、割れ目を密着させて、レジンの流出部以外の岩石試料側面に現れる割れ目をアクリルおよびシリコンシーラントを用いてシールした。さらに、鋼製バンド等を用いてそれらのシール材を補強した。レジンの注入は割れ目の傾斜方向上向きに実施した。なお、レジンには、紫外線を照射すると黄緑色に蛍光するフルオロセインナトリウム(ウラニン)を 100ppm 添加した。

研削する試料(中間深度 14.88m)については、割れ目内に充填させたものと同じレジンをを用いて、型枠内で包埋固定し安定なブロック状に成形した(図 5.3-1)。包埋固定用のレジンには、割れ目内のレジンと区別するために、青色に蛍光するナフチオン酸ナトリウムを 100ppm 添加した。



図 5.3-1 包埋固定後の岩石試料

原位置レジンを注入試験後のレジン充填状況確認のためのボーリングでは、直径 100mm 程度のボーリングコアを掘削する予定である。マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを直径 100mm 程度のコアに適用するに当たり、コア寸法の影響により CT スキャナ特有の偽像等が生じないかを確認するために、直径 100mm の円柱状の岩石を半割にした 2 対の岩石を用いた。岩石は稲田花崗岩である。2 対の岩石を重ねわせると、ほぼ真円になるように成形している。また、重ね合わさる面はバフ研磨によって凹凸のない加工を施している。図 5.3-2 に示すように、2 対の岩石の間に 0.1mm の隙間ゲージを上下に挟み鋼製バンドで締め付けることで模擬亀裂を作成した。



図 5.3-2 模擬亀裂を有する岩石試料

b. 可視化装置

可視化には以下の装置を用いた。基本的に番号の順に適用した。

- ① 医療用X線CTスキャナ
- ② 高出力マイクロフォーカスX線CTスキャナ
- ③ イメージスキャナ
- ④ デジタルカメラ

c. X線CT画像の撮影条件

医療用X線CT画像の取得には、図 5.3-3 に示す電力中央研究所が所有する医療用X線CTスキャナ (Aquilion64、東芝メディカルシステムズ株式会社) を用いた。撮影条件は、管電圧 135kV、管電流 350mA、スライス厚 0.5mm、照射時間 1 秒/回転である。再構成関数 FC30 を使用して画像を再構成した。出力される画像の画素数は 512x512pixel である。



図 5.3-3 医療用X線CTスキャナの外観

マイクロフォーカスX線CT画像の取得には、図 5.3-4 に示すテスコ株式会社が所有するマイクロフォーカスX線CTシステムを用いた。撮影方向および画像の表示方向を図 5.3-5 に、撮影条件を表 5.3-2 および表 5.3-3 に示す。撮影時間は1投影当たりの時間とビュー数/積算枚数から算出される。例えば表 5.3-2 では、100分 (100ms×3000回転×2枚) となる。

X線源が225kVのタイプは、直径70mm程度の岩石試料（これまでのボーリング調査で掘削したコア）に適用し、X線源が450kVのタイプは、原位置レジジン注入試験で回収されるボーリングコア（コア径100mm程度）と同径の岩石試料（稲田花崗岩）に適用した。



図 5.3-4 マイクロフォーカス X 線 CT システムの外観

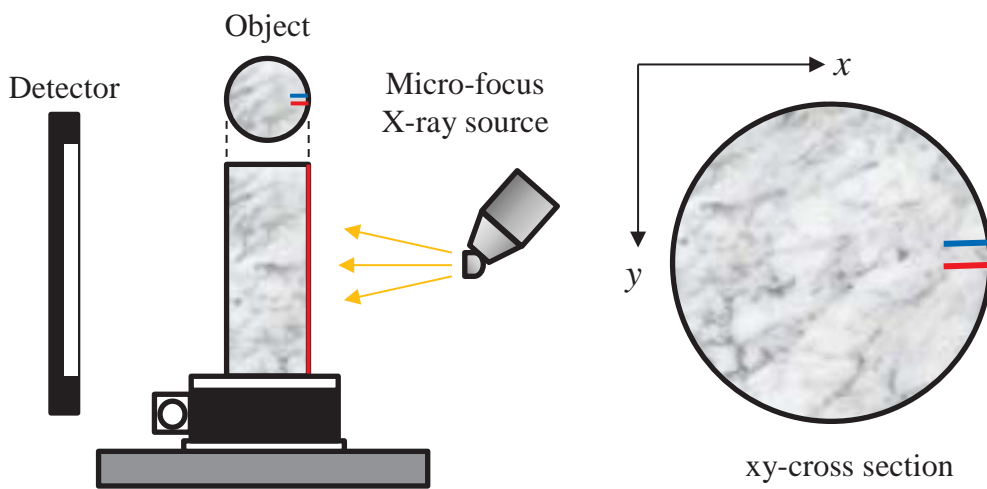
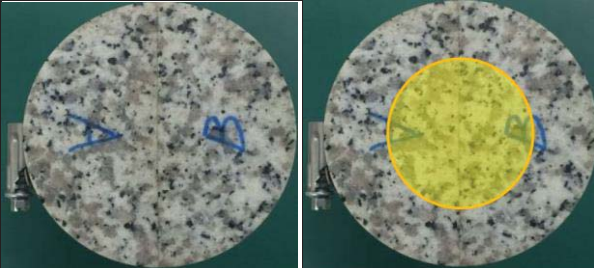


図 5.3-5 撮影方向（左）と画像の表示方向（右）

表 5.3-2 マイクロフォーカス X 線 CT 画像の撮影条件 (X 線源 225kV)

X 線源	225kV
管電圧	210
管電流	0.2mA
検出器	FlatPanel
SID (Source to Image-receptor Distance)	600mm
SOD (Source to Object Distance)	250mm
視野サイズ	83.3mm
拡大率	2.4
Integration (1 投影当たりの時間)	1000ms
ボクセルの辺長	0.0832035mm
Projection/Average (ビュー数/積算枚数)	3000/1
マトリックスサイズ	1024x1024
フィルター	銅フィルター (厚さ 2mm)

表 5.3-3 マイクロフォーカス X 線 CT 画像の撮影条件 (X 線源 450kV)

X 線源	450 kV	450 kV
管電圧	325 kV	325 kV
管電流	0.25 mA	0.25 mA
検出器	FlatPanel	FlatPanel
SID (Source to Image-receptor Distance)	700 mm	700 mm
SOD (Source to Object Distance)	376.5 mm	170.6 mm
視野サイズ	107.6 mm	48.7 mm
拡大率	1.859	4.103
Integration (1 投影当たりの時間)	450 ms	450 ms
ボクセルの辺長	0.1075688 mm	0.04876271 mm
Projection/Average (ビュー数/積算枚数)	3600/1	3600/2
マトリックスサイズ	1024x1024	1024x1024
フィルター	なし	なし
スキャン範囲 (概略図)		

d. 研削面画像の撮影方法・条件

平面研削盤を用いて岩石試料 (中間深度 21.89m のコアのみ) を一定の間隔 (0.475mm) で研削し、研削ごとにイメージスキャナとデジタルカメラを用いて研削面の撮影を行った。ただし、デジタルカメラでの撮影では、カメラと研削面との距離をほぼ一定に保つために、研削の切り込み量とほぼ同等の厚さを持つ 0.95mm のアルミニウム板 (SUS430、1mm 厚、公差±0.1mm) を岩石試料の下に重

ねていくため、0.95mm 間隔で実施した。また研削は、可能な限り割れ目面に直交する断面を選定し実施した。

イメージスキャナは A4 フラットベッド GT-X830（セイコーエプソン株式会社）を用いた。

イメージスキャナを用いた研削面の画像取得は、暗幕内でイメージスキャナの光源のみを用いて行った。また、スキャナのガラス製の原稿台を傷つけないよう、原稿台に OHP シートを設置した。取り込み条件は、解像度 2400dpi (0.011mm/pixel) の 24bit の JPEG 画像とした。

デジタルカメラは、デジタル一眼レフカメラ (D7000、株式会社ニコン) を用いた。レンズは焦点距離 40mm のマクロレンズ (AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.8G、株式会社ニコン) を用いた。また、レンズには 410nm 以下の紫外線を吸収する UV カットフィルター (Zeta UV L41、株式会社ケンコー・トキナー) を取付けた。

デジタルカメラでの撮影も暗幕内で行い、蛍光灯、紫外線、蛍光灯+紫外線の 3 つの異なる光源下で実施した。また、研削によって生じる微細なギズを消すために、研削面には撮影直前にシリコンスプレーを塗布している。表 5.3-4 に撮影条件を示す。

表 5.3-4 研削面画像の撮影条件

絞り値 (F 値)	f/5.6
ISO 感度	100
シャッタースピード	蛍光灯光源下：1/15 秒 紫外線光源下：1 秒 蛍光灯+紫外線光源下：1+2/3 秒
ホワイトバランス	蛍光灯光源下：カラーチャートで補正 紫外線光源下：高演色蛍光灯 (6500K) 蛍光灯+紫外線光源下：高演色蛍光灯 (4200K)
測光モード	マルチパターン測光
ピント合わせ	マニュアル
記録画素数	4928x3264 ピクセル
画像解像度	31.5pixel/mm (32 μ m/pixel)

(3) 可視化結果

a. 医療用 X 線 CT 画像

医療用 X 線 CT スキャナで撮影した画像の内、特徴的な断面を図 5.3-6～図 5.3-8 に例示する。画像は、WL を 2000、WW3000 で表示している。岩石の縁が白く表示されているが、これは、画像再構成をする際に用いたフィルタ関数 (FC30) の影響であり、画像をシャープにするために生じた偽像である。したがって、FC30 (類似のフィルタ関数も含めて) で再構成した画像については、境界部の取扱いには十分注意が必要である。画像では黒雲母以外の鉱物の特定は困難であるが、黒雲母よりも白く輝いて写っているものは黄鉄鉱であると考えられる。また、黒い斑点状の箇所が現れる

ことがあるが、これは、長石が変質し粘土化した領域であると考えられる。緑泥石のような鉄分を含むものも比較的白く表示される。図 5.3-6 の左下の画像では、割れ目近傍に菱形の形状をしたものが確認できるが、これはカリ長石であると考えられる。CT 画像上ではカリ長石が累帯構造を呈したように見えることもあるので、斜長石と間違えないよう注意が必要である。

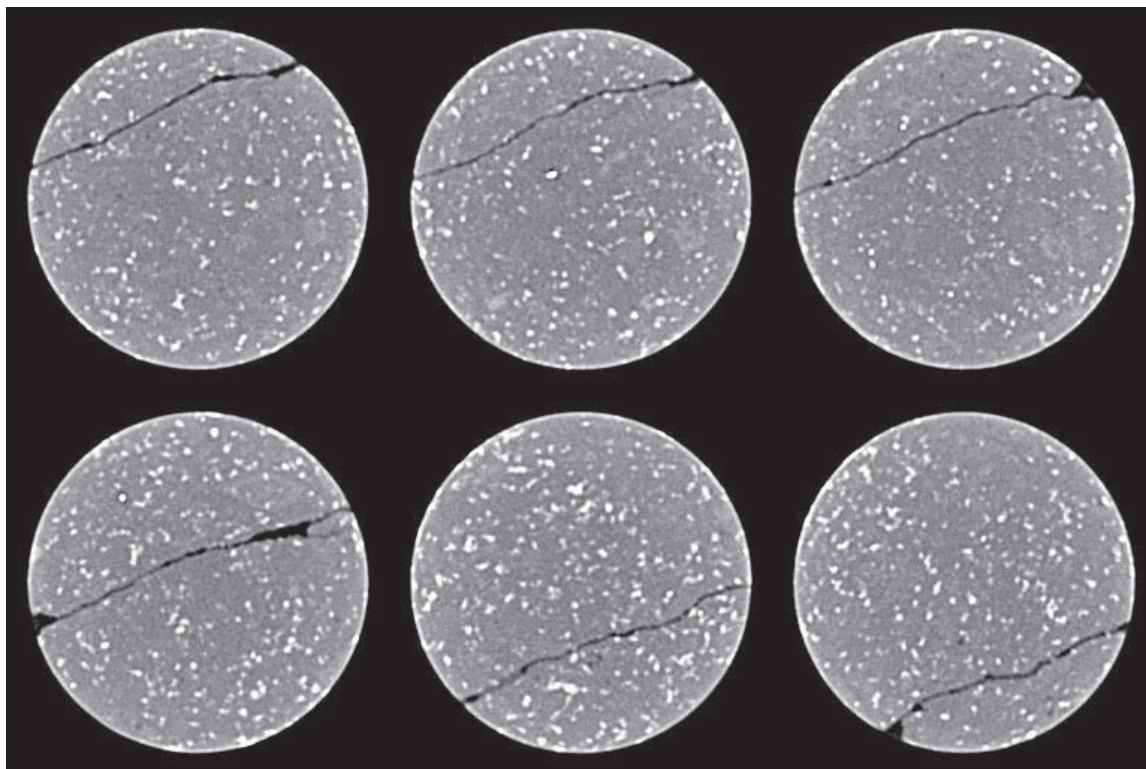


図 5.3-6 12MI31 号孔 医療用 X 線 CT 画像 (xy 断面、14.88mahh)

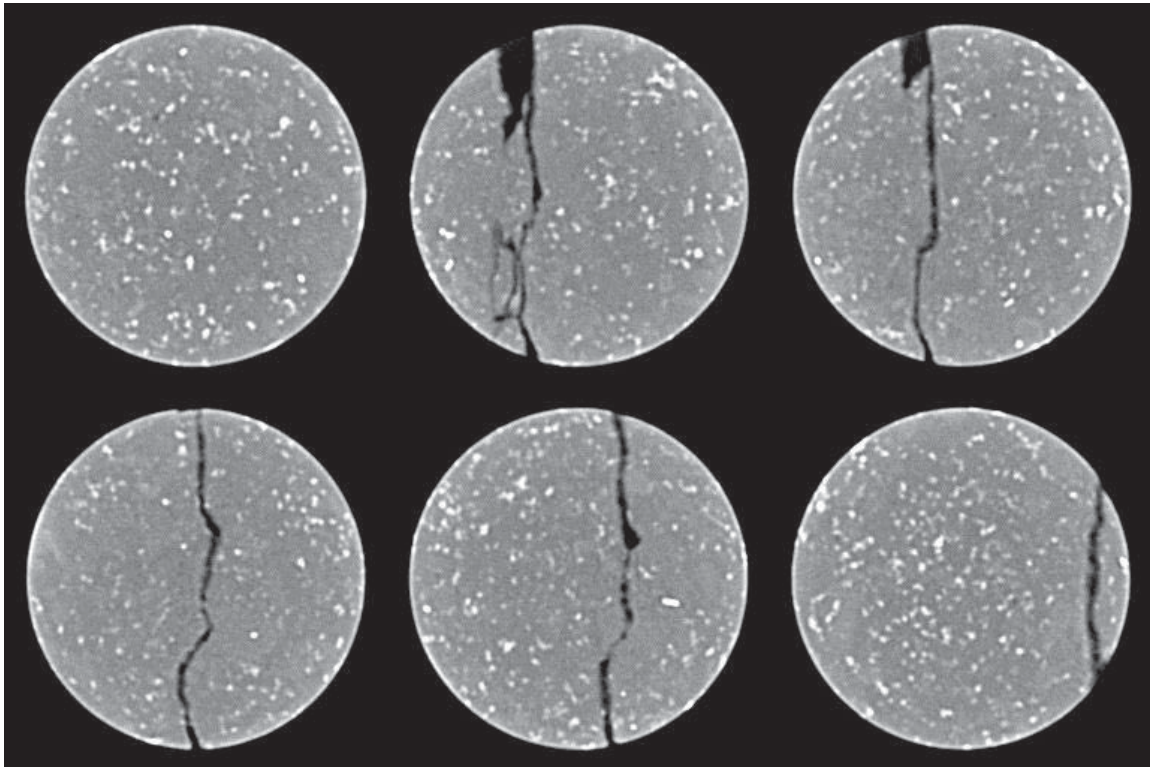


图 5.3-7 12MI31 号孔 医疗用 X 线 CT 画像 (xy 断面、20.59mabh)

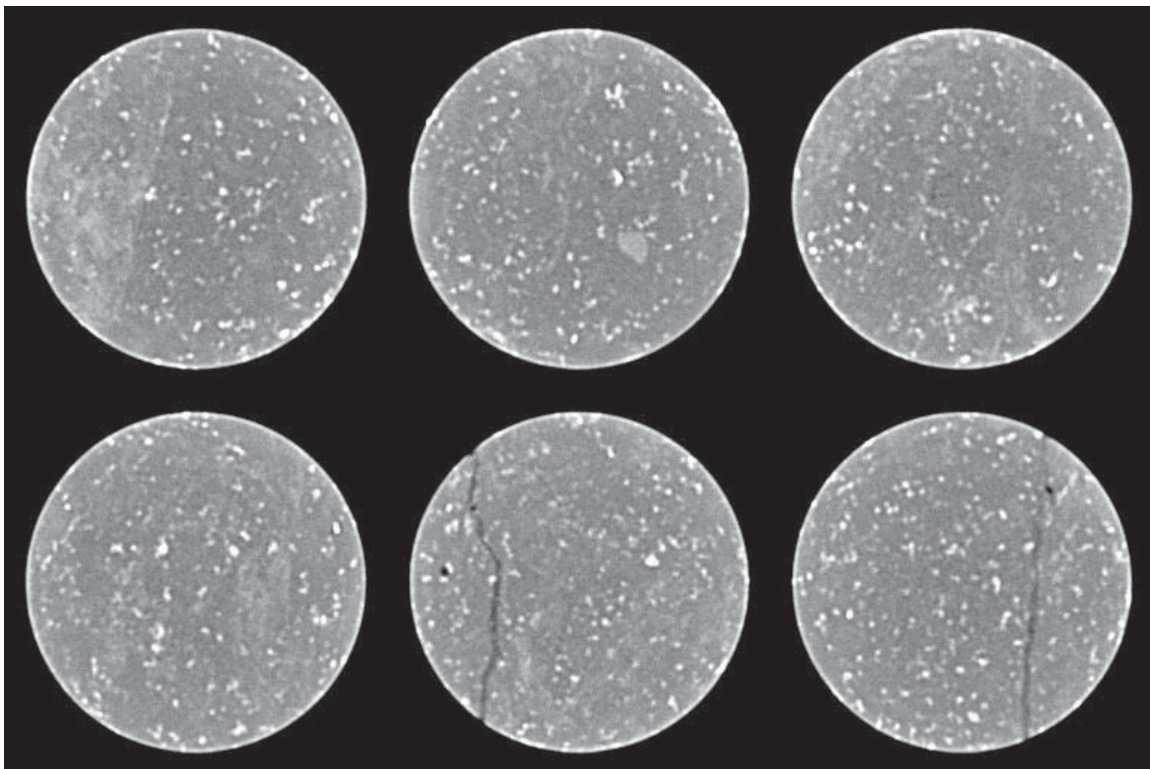
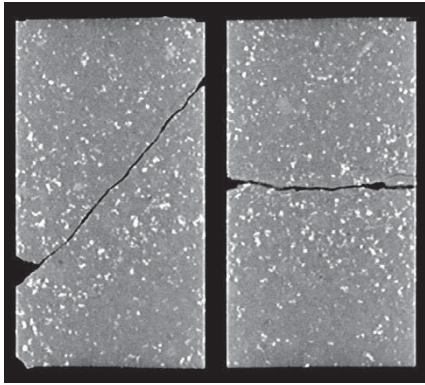


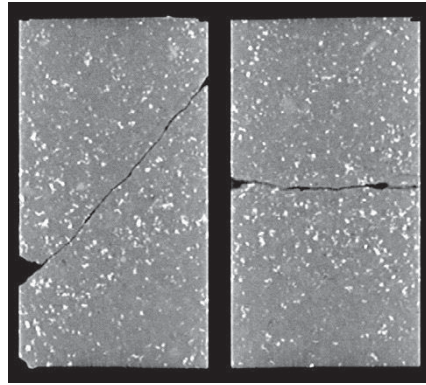
图 5.3-8 12MI31 号孔 医疗用 X 线 CT 画像 (xy 断面、21.89mabh)

医療用 X 線 CT スキャナで撮影した画像（コア軸に直交した断面）を使って、走行方向断面と傾斜方向断面を作成した。その結果を、図 5.3-9～図 5.3-11 に示す。

割れ目内が空気の画像は、割れ目面を噛み合わせた後、養生テープで固定した状態で撮影した画像であり、割れ目内がレジンの画像は、「岩石試料」で説明した方法で割れ目面を接触させた後、割れ目内にレジンを注入・固化させた画像である。両者を見比べると、概ねレジン注入後の割れ目幅の方が小さいことが確認できる。とくに、図 5.3-11 の画像で顕著である。これは、室内で評価した割れ目幅が、原位置の割れ目幅に比べて大きく評価されることを示唆しており、従来から指摘されている。したがって、原位置レジン注入試験を実施し、レジンが充填されたコアから天然の割れ目幅を評価することが、割れ目をモデル化する上で重要であると考えられる。

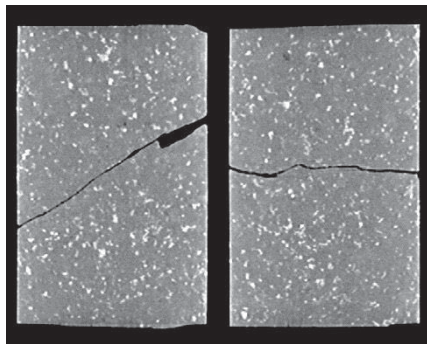


(a) 割れ目内空気 (WL:2000、WW:3000)
(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

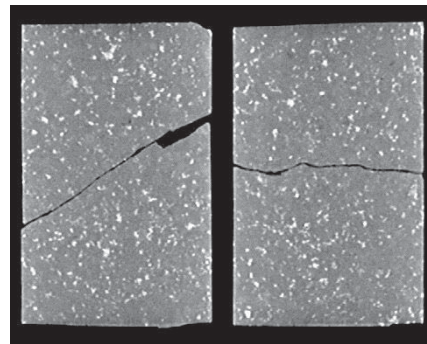


(b) 割れ目内レジン (WL:2000、WW:3000)
(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

図 5.3-9 12MI31 号孔 医療用 X 線 CT 画像 (14.88mabh)

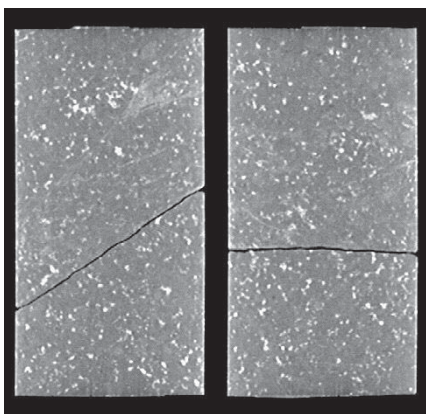


(a) 割れ目内空気 (WL:2000、WW:3000)
(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

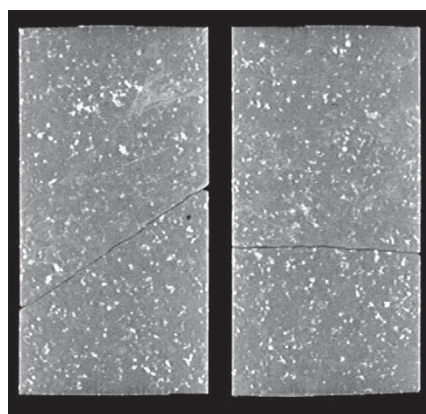


(b) 割れ目内レジン (WL:2000、WW:3000)
(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

図 5.3-10 12MI31 号孔 医療用 X 線 CT 画像 (20.59mabh)



(a) 割れ目内空気 (WL:2000、WW:3000)
(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)



(b) 割れ目内レジン (WL:2000、WW:3000)
(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

図 5.3-11 12MI31 号孔 医療用 X 線 CT 画像 (21.89mabh)

次に、医療用 X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像を図 5.3-12～図 5.3-15 に示す。図 5.3-12～図 5.3-14 は、WL1200 で二値化して作成し、図 5.3-15 は、WL1600 で二値化して作成した。また、図 5.3-12 と図 5.3-13 は同じ深度の割れ目の画像であるが、割れ目内の状態が異なる。前者は割れ目内が空気であり、後者は割れ目内がレジンである。

深度 300m ボーリング横坑で掘削したボーリングコアの割れ目は、全般的に幅が小さく、割れ目のみを抽出して 3 次元可視化画像を作成することは困難である。割れ目内がレジンで充填されると岩石部との境界が不明瞭になりさらに 3 次元可視化が困難となる。また、すべての画像で共通して確認される走行方向の線状の構造は積み重ねた画像間の境界に対応している。すなわち、体軸方向の分解能も 3 次元可視化には重要な要素となる。

図 5.3-15 は、3 つの岩石試料の中で最も割れ目幅が小さいものである（図 5.3-11 参照）。したがって、2 値化の際のしきい値もその他のものと同じしきい値で 3 次元可視化画像を作成すると何も表示されなかった。

3 次元可視化を困難にする要因としては、その他に割れ目の傾斜の関係してくる。傾斜が緩やかなものほど 3 次元化しにくい。さらに撮影時の向きも重要である。割れ目に対して直交する断面を撮影することが重要である。

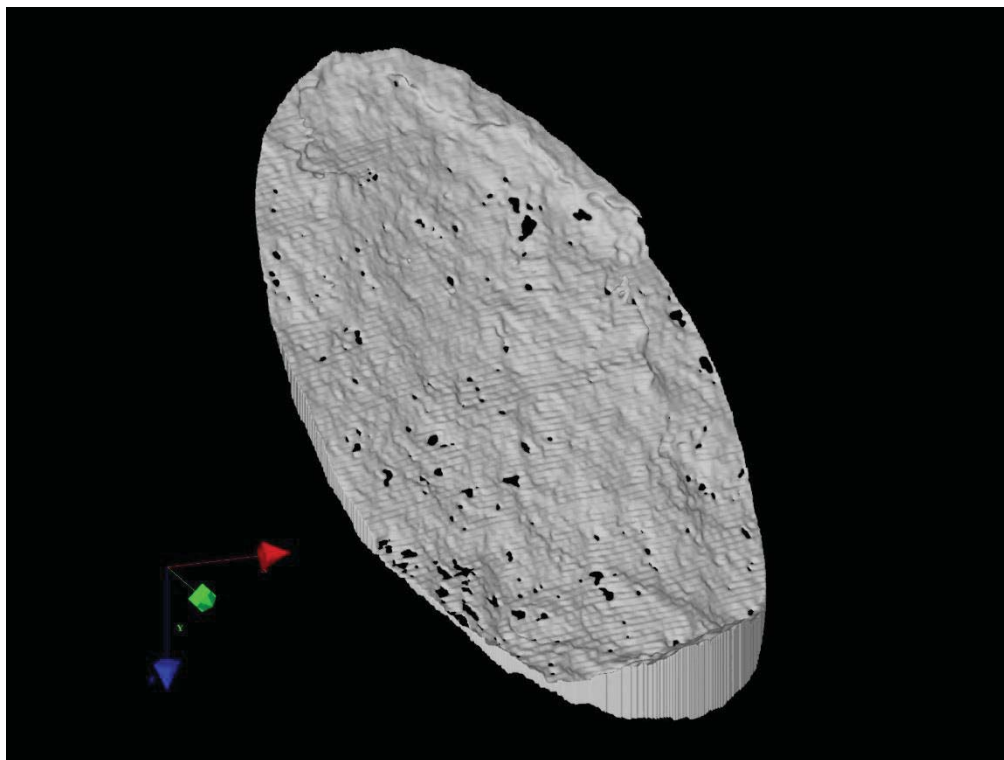


図 5.3-12 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像（割れ目内空気、14.88mabh）

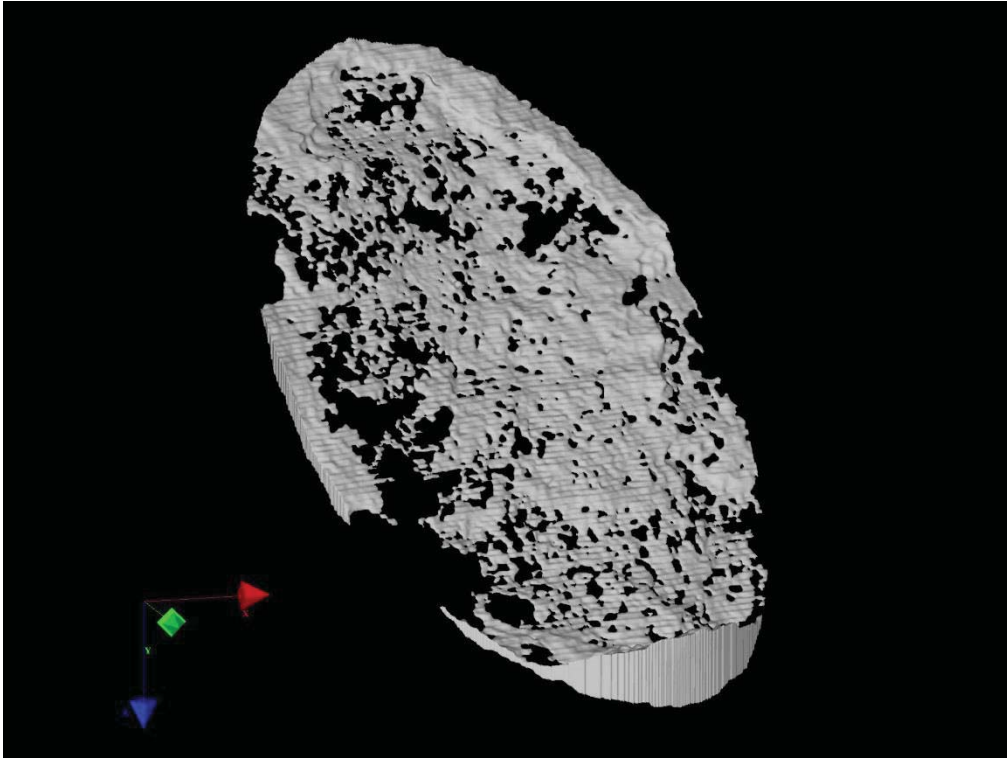


図 5.3-13 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像 (割れ目内レジン、14.88mabh)

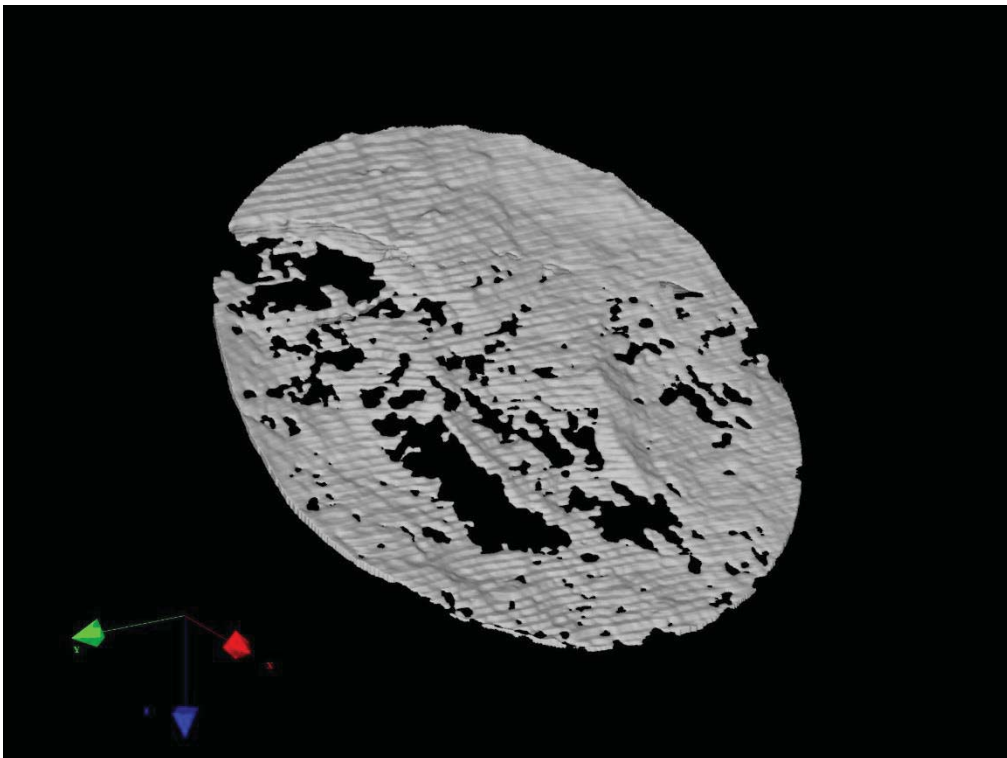


図 5.3-14 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像 (割れ目内空気、20.58mabh)

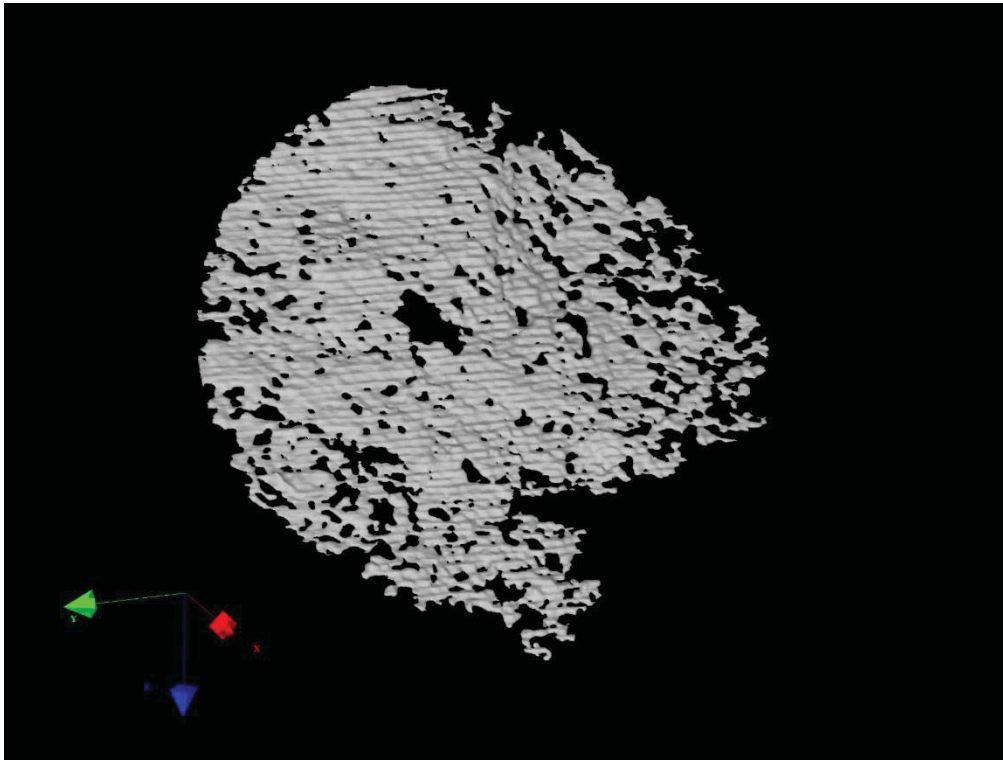


図 5.3-15 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像 (割れ目内空気、21.89mabh)

b. マイクロフォーカス X 線 CT 画像

マイクロフォーカス X 線 CT 画像を図 5.3-16～図 5.3-18 に例示する。画像は、WL を 39000、WW2000 で表示している。ビームハードニング現象のため、外側の領域が比較的白く表示されていることが確認できる。概ね、黒雲母は白く、割れ目は黒く、その他は灰色で表示されている。図 5.3-16 の左下の画像は、向きは異なるが、図 5.3-6 の左下の画像とほぼおなじ断面の画像である。X 線の出力が医療用に比べて大きいため、医療用の画像に比べて鮮明ではないが、医療用 X 線 CT 画像でも確認された割れ目近傍の菱形の形状をしたものが確認できる。X 線 CT 画像では、密度だけではなく、物質の原子番号にも依存するため密度差がないものでも画像中でその位置や形状を確認できることがある。ただし、一般的な X 線 CT スキャナを用いてそのような目的の画像を得たい場合は、岩石試料の寸法を小さくし、低エネルギーの X 線で撮影が可能ないようにしなければならない。

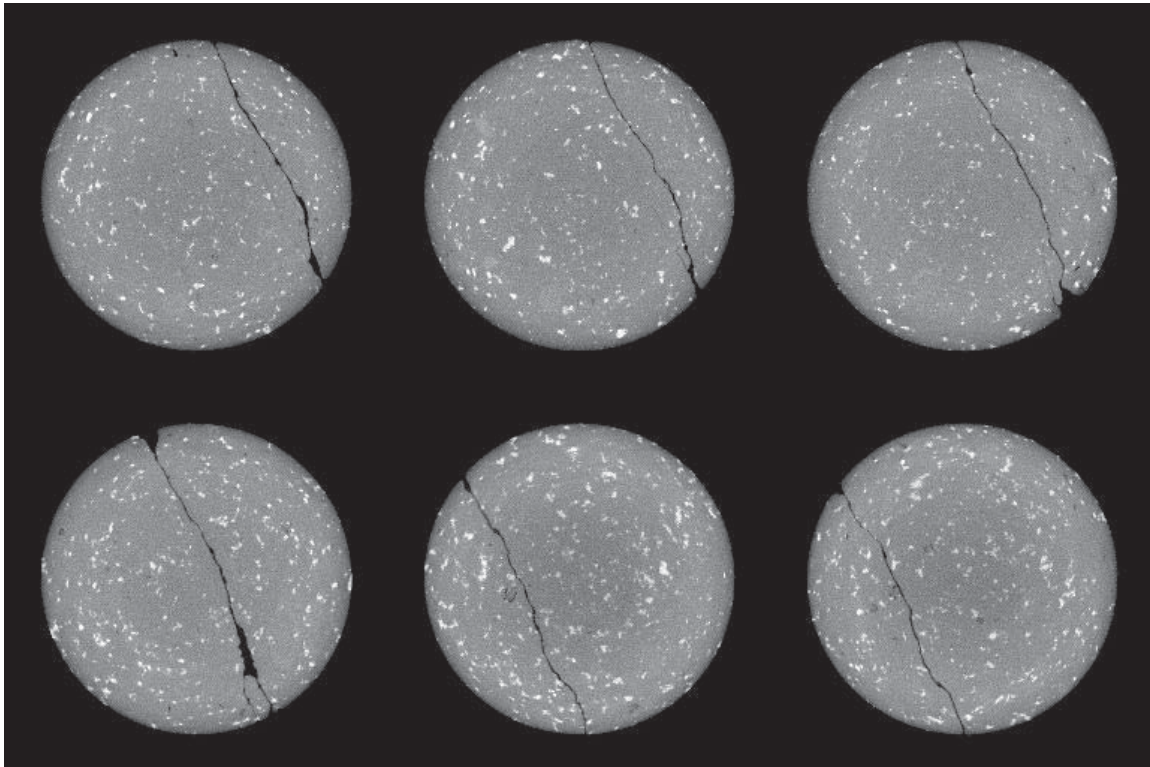


図 5.3-16 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (xy 断面、14.88mabh)

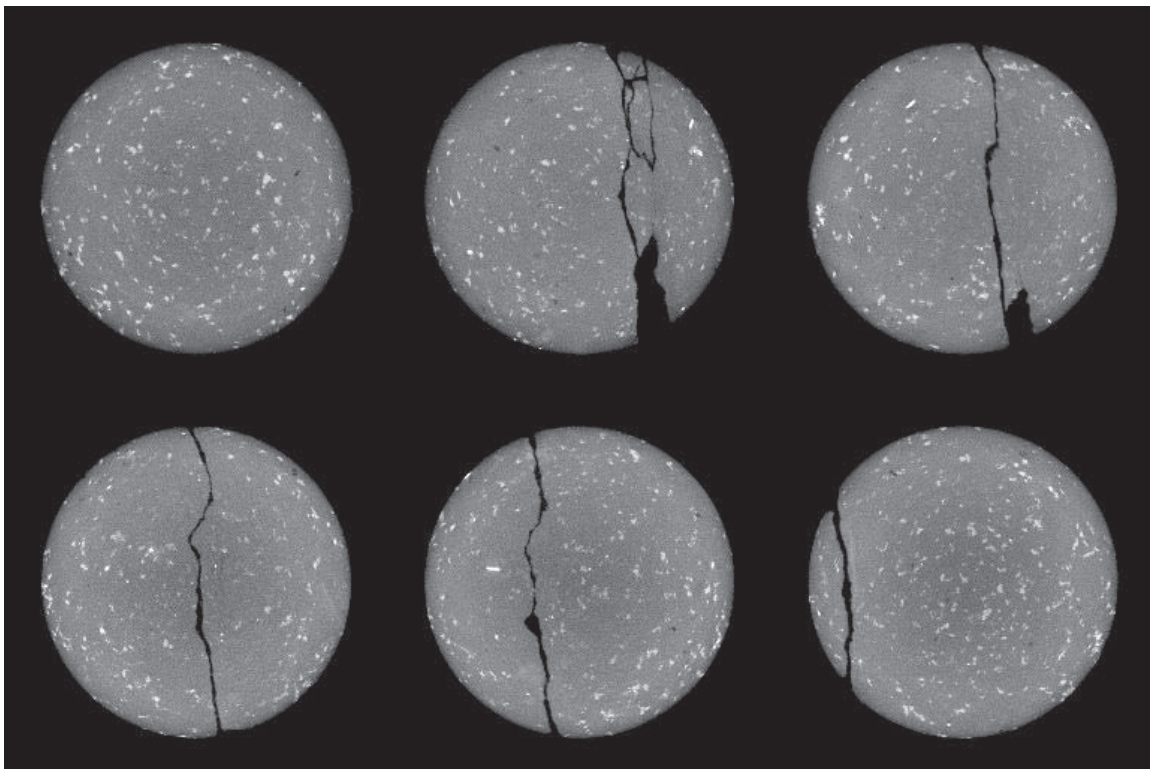


図 5.3-17 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (xy 断面、20.58mabh)

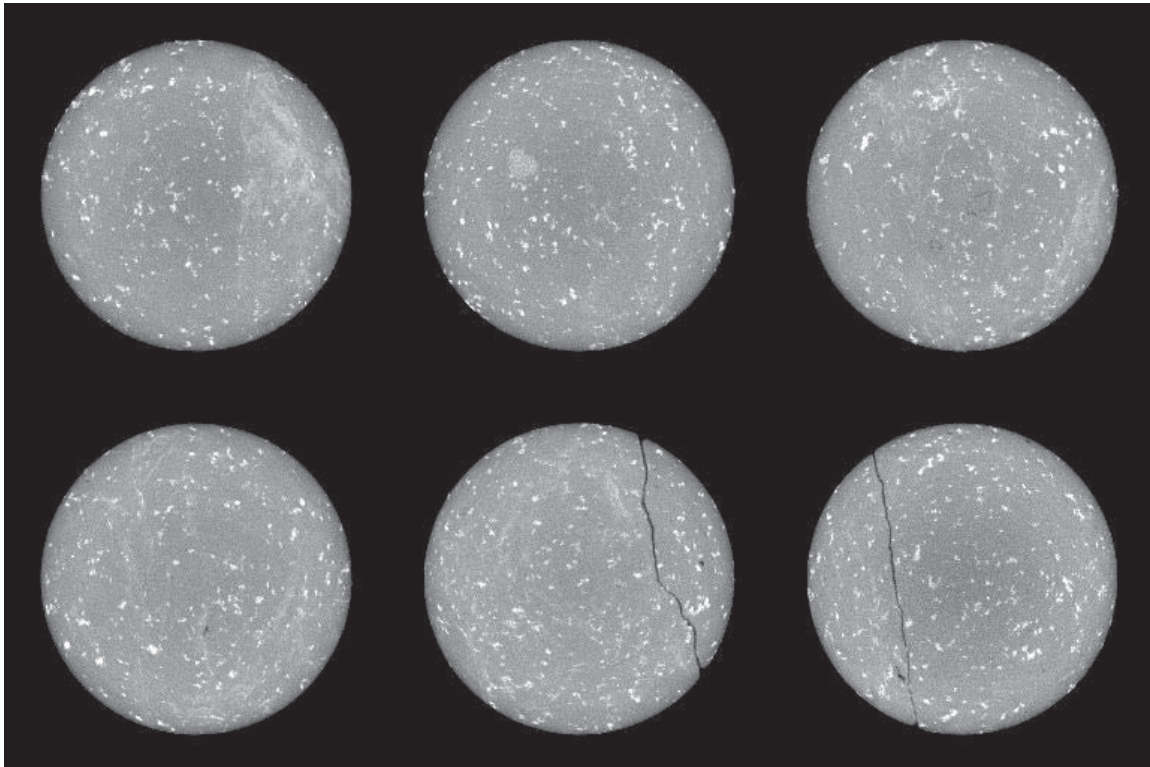
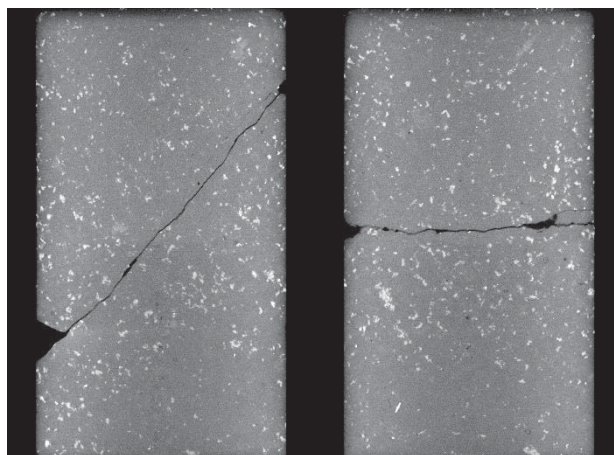


図 5.3-18 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (xy 断面、21.89mabh)

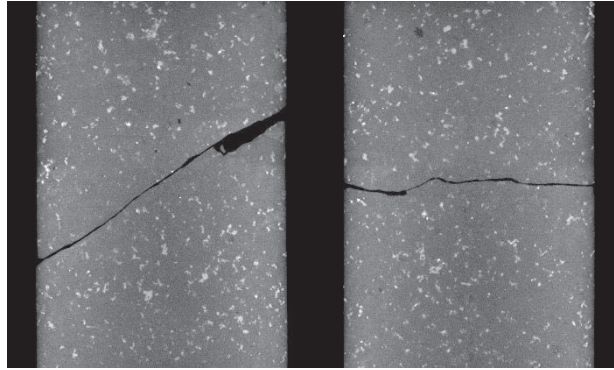
医療用 CT 画像では、CT 画像特有の部分体積効果 (パーシャルボリュームエフェクト) により、黒雲母等の鉱物が大きく表示されていたが、マイクロフォーカス X 線 CT 画像では、高分解能の画像であるため、部分体積効果による鉱物の寸法増大は確認できない。また、鉱物の形状も明瞭に表示できており、より現実に近い画像を取得できたと考える。

マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (コア軸に直交した断面) を使って、走行方向断面と傾斜方向断面を作成した。その結果を図 5.3-19 に示す。



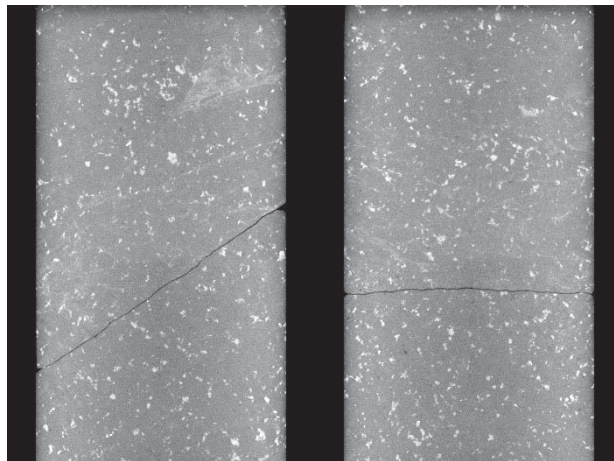
(左：走行方向断面、右：傾斜方向断面)

図 5.3-19 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (14.88mabh)



(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

図 5.3-20 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (20.58mabh)



(左：走向方向断面、右：傾斜方向断面)

図 5.3-21 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (21.89mabh)

図 5.3-22～図 5.3-24 にマイクロフォーカス X 線 CT 画像から作成した展開画像を示す。X 線 CT 画像の展開表示は、孔壁画像との比較を容易にするとともに、岩石内部の割れ目の分布を網羅的に確認できるメリットを有する。

20.58mabh の展開図で、上下でコントラストが異なっていることが確認できるが、これは、撮影時に何らかの原因で X 線の出力が弱まわったことが原因であると考えられる。

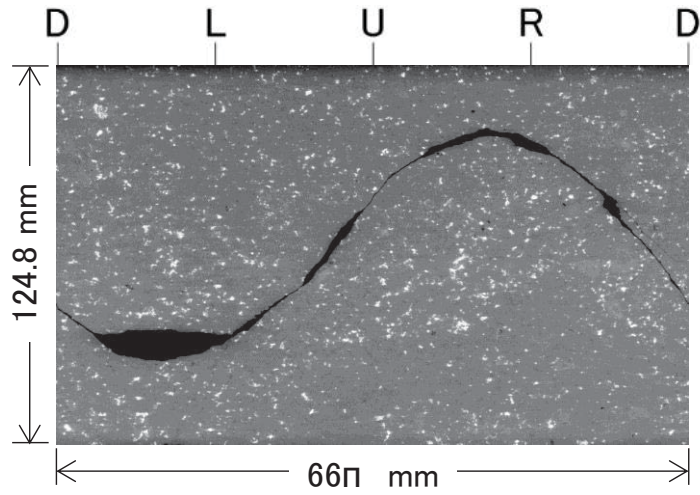


図 5.3-22 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像の展開表示 (14.88mabh)

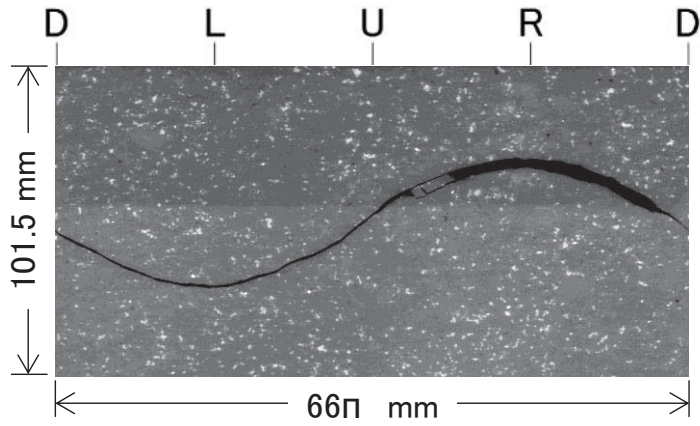


図 5.3-23 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像の展開表示 (20.58mabh)

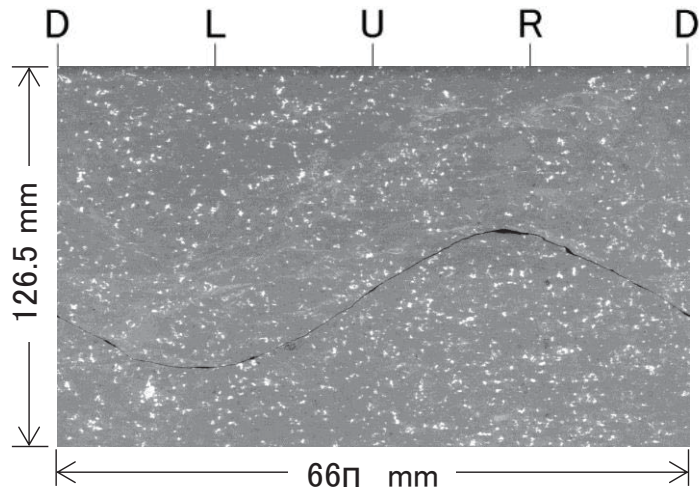


図 5.3-24 12MI31 号孔 マイクロフォーカス X 線 CT 画像の展開表示 (21.89mabh)

マイクロフォーカス X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像を図 5.3-25～図 5.3-27

に示す。これらの画像は、割れ目内がレジンである。医療用 X 線 CT 画像では 3 次元可視化が困難であった 14.88mabh の割れ目や 21.89mabh の割れ目が明瞭に可視化できていることを確認できる。

ただし、マイクロフォーカス X 線 CT スキャンでも分解できないような幅の小さな割れ目と岩石が閉塞している箇所とを見誤る可能性があるので注意が必要である。研削面画像など他の可視化手法で画像化したものと比較するなどが必要であると考えられる。

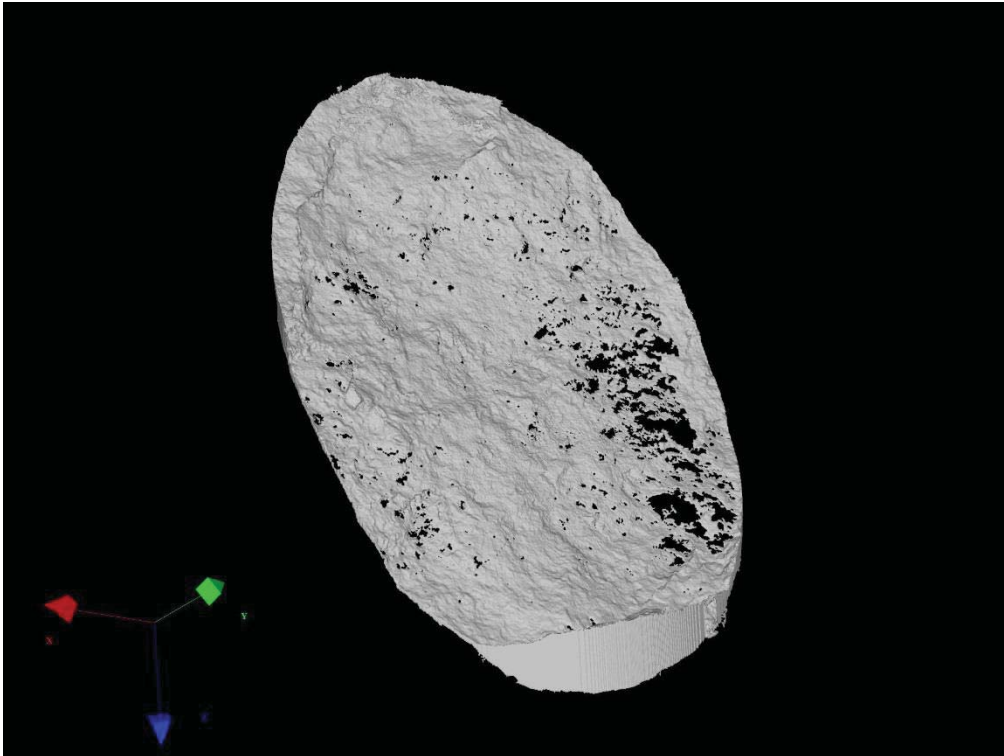


図 5.3-25 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像（割れ目内レジン、14.88mabh）

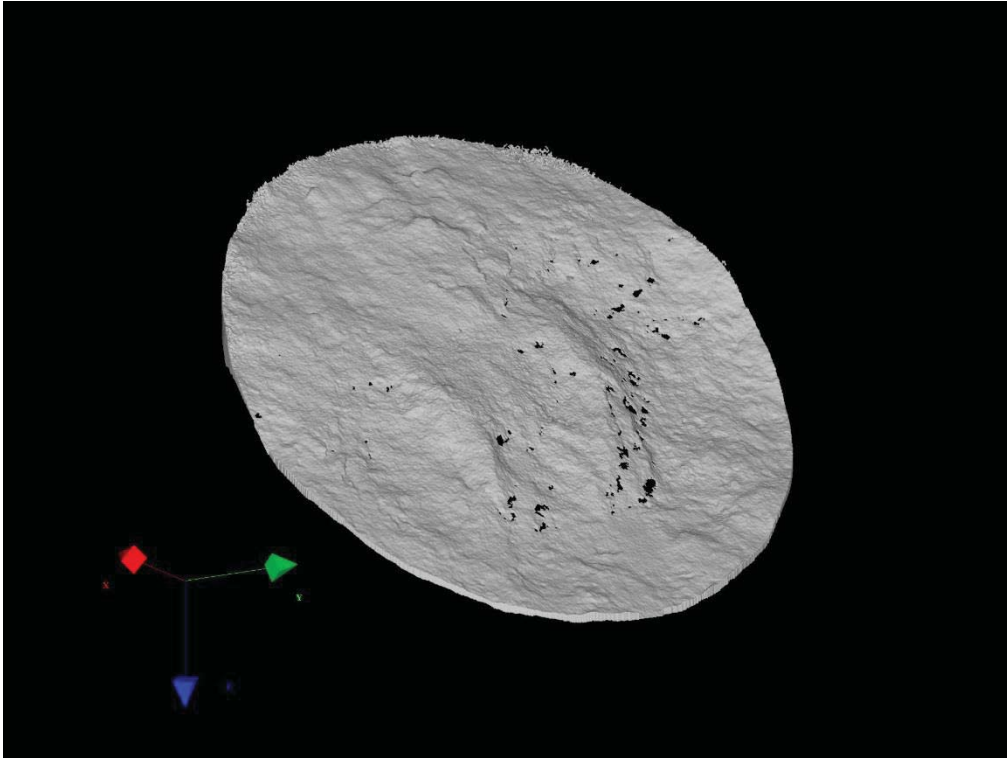


図 5.3-26 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像 (割れ目内レジン、20.58mabh)

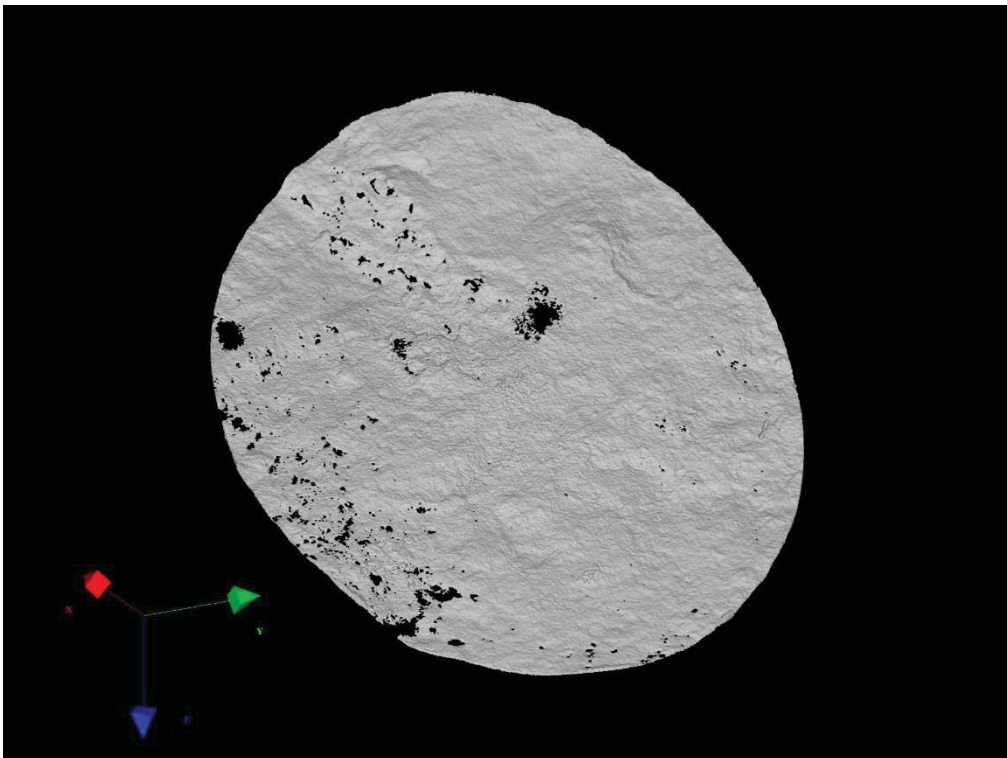
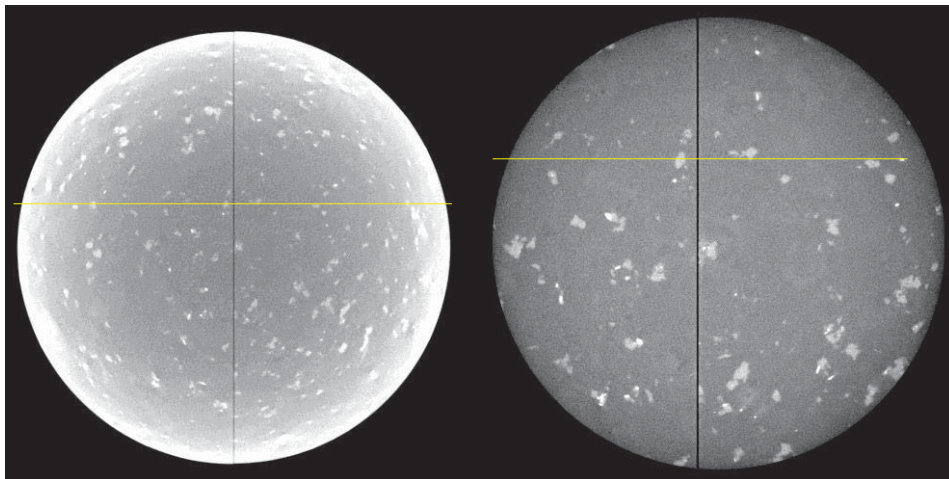


図 5.3-27 12MI31 号孔 割れ目の 3 次元画像 (割れ目内レジン、21.89mabh)

直径 100 mm のコアへのマイクロフォーカス X 線 CT の適用性について検討した。直径 100mm の稲田花崗岩の画像を図 5.3-28 に示す。左の画像は、WL26000、WW10000 で表示した画像であり、右の画像は、WL14500、WW10000 で表示した画像である。左の画像は、ビームハードニングにより岩石の外側ほど白く表示されている。一方、右の画像は中心部ほど明るい。前者をカップピング、後者をキャッピングと呼ぶこともある。

図 5.3-29 に図 5.3-30 の画像中に引いた線上のデジタル値の分布を示す。グラフ中央の分布が落ち込んでいる領域が割れ目の領域である。割れ目の可視化は、中心部を拡大して撮影した画像のほうが適しているようである。ただし、どちらの画像も岩石部の分布が湾曲しており、補正が必要であると考えられる。



(左：岩石が全て収まる領域で撮影、右：中心部を拡大して撮影)

図 5.3-28 直径 100mm の稲田花崗岩のマイクロフォーカス X 線 CT 画像

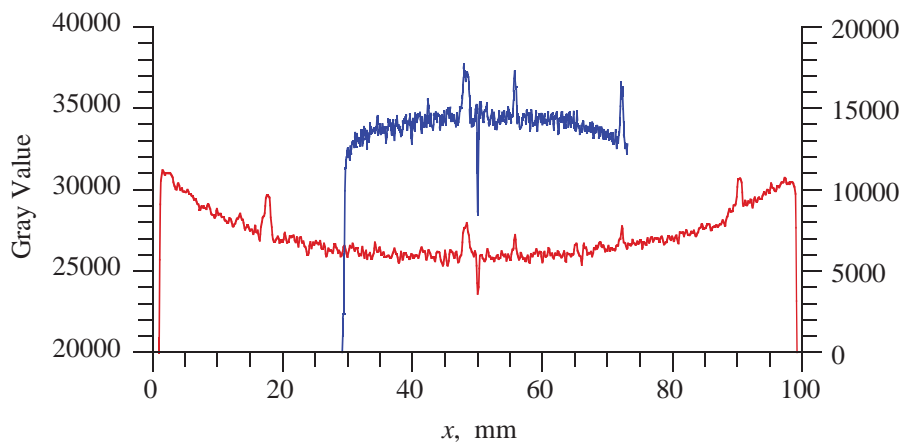


図 5.3-29 マイクロフォーカス CT 画像の測点上のデジタル値

c. 研削面画像（デジタルカメラ）

デジタルカメラで撮影した研削面の画像を図 5.3-30～図 5.3-38 に例示する。

蛍光灯光源下の画像から、画像右側でカリ長石が密集した領域の存在が確認できる。また、割れ目の進展は、カリ長石の粒間を通るものが多いことも確認できた。この事実は従来から指摘されている事実と一致している。

紫外線光源下の画像では、割れ目のみが明瞭に写し出され、蛍光灯光源下の画像からは視認が難しかった微細な割れ目も写し出されていることが確認できた。

蛍光灯光源と紫外線光源とを同時に照射した画像では、割れ目部以外でも斜長石と考えられる箇所が薄青色に蛍光している。少なくとも薄青色に蛍光している箇所は、斜長石であると判断することができる。

デジタルカメラで撮影した研削面画像から割れ目幅を定量評価することは困難ではあるが、割れ目がどの鉱物を横切るかを3つの光源から確認することができるため、有用である。とくに、割れ目が斜長石を横切るかを、これらの画像から確認することが重要である。

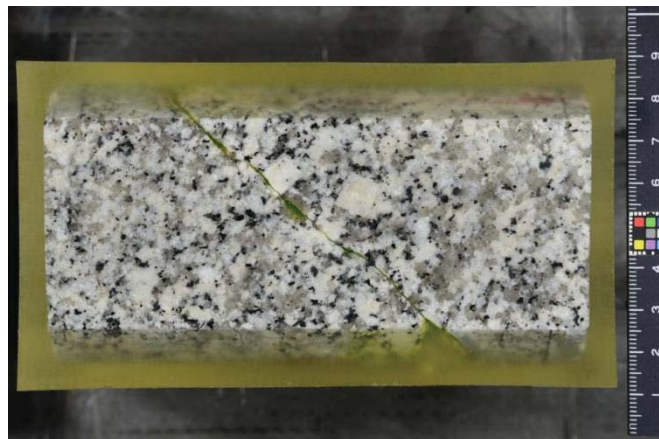


図 5.3-30 蛍光灯光源下の研削断面（切り込み深さ：10.45mm）

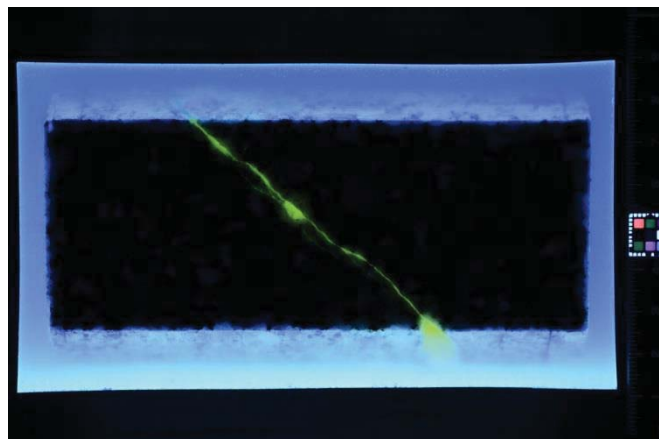


図 5.3-31 紫外線光源下の研削断面（切り込み深さ：10.45mm）

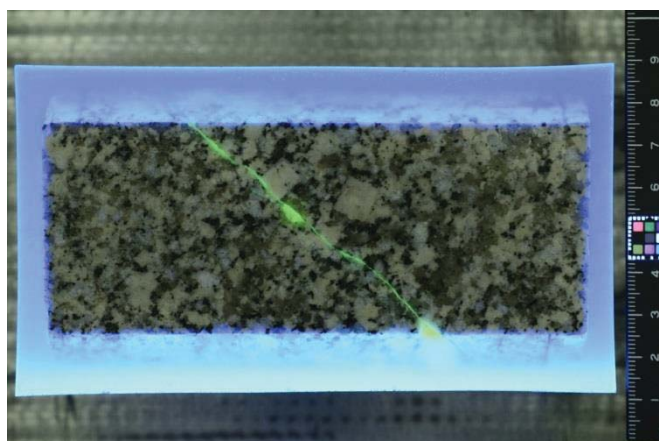


図 5.3-32 蛍光灯+紫外線光源下の研削断面（切り込み深さ：10.45mm）

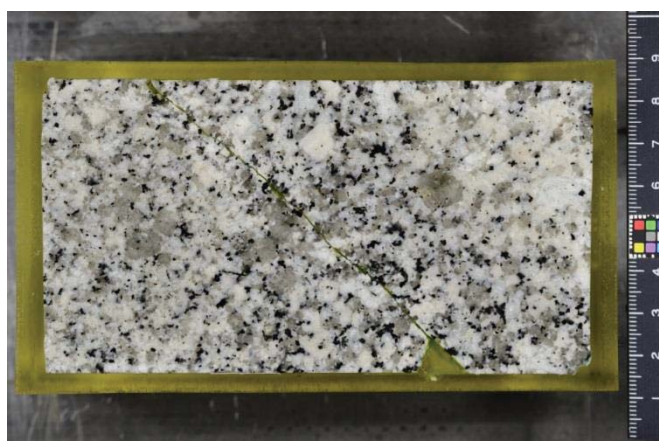


図 5.3-33 蛍光灯光源下の研削断面（切り込み深さ：30.40mm）

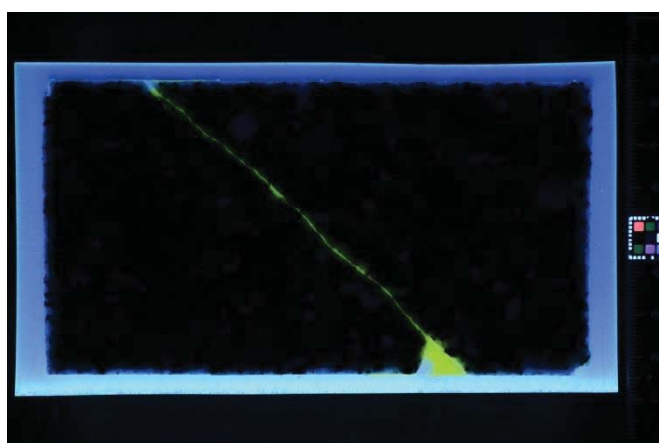


図 5.3-34 紫外線光源下の研削断面（切り込み深さ：30.40mm）

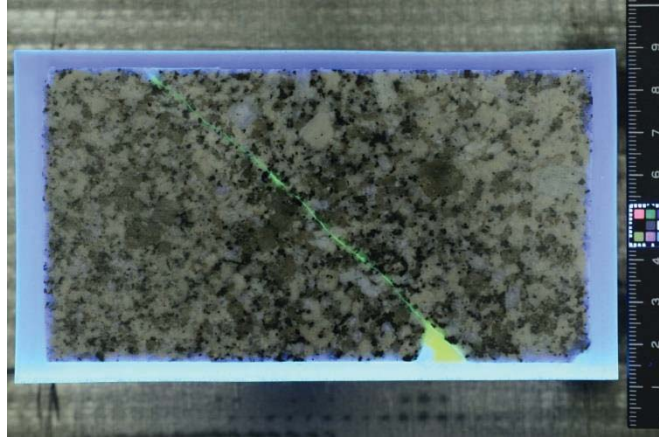


図 5.3-35 蛍光灯+紫外線光源下の研削断面（切り込み深さ：30.40mm）



図 5.3-36 蛍光灯光源下の研削断面（切り込み深さ：50.35mm）

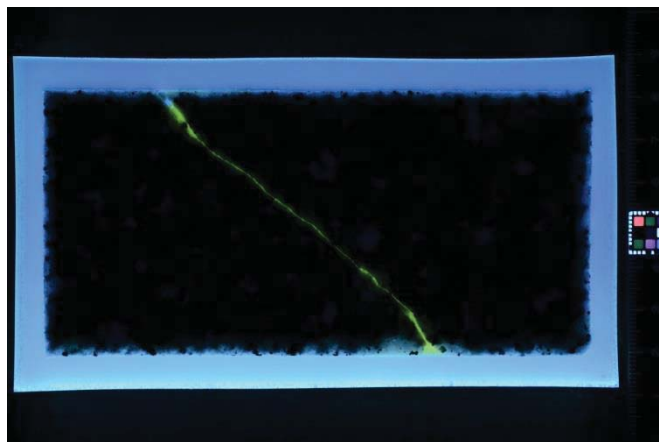


図 5.3-37 紫外線光源下の研削断面（切り込み深さ：50.35mm）

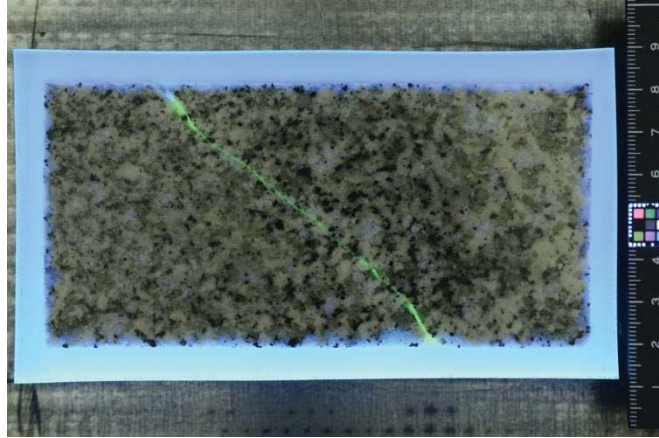


図 5.3-38 蛍光灯+紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ : 50.35mm)

d. 研削面画像 (イメージスキャナ)

イメージスキャナで読み取った研削面の画像を図 5.3-39～図 5.3-41 例示する。デジタルカメラによるものに比べて高精細な画像が取得できており、割れ目の境界や鉱物間の境界が明瞭である。ただし、1枚のファイルサイズが大きく、画像処理に時間を要する。効率的な画像処理手順の確立が不可欠であると考えられる。今後の課題としたい。また、イメージスキャナはデジタルカメラとは異なり、ピントを合わせる機能はなく、原稿台にピントが合うように設定されている。したがって、原稿台を傷つけないように設置した OHP シートの厚さの影響を受けてか、多少焦点があっていない画像であった。そのため、画像を処理する前処理としてアンシャープマスクを適用した。

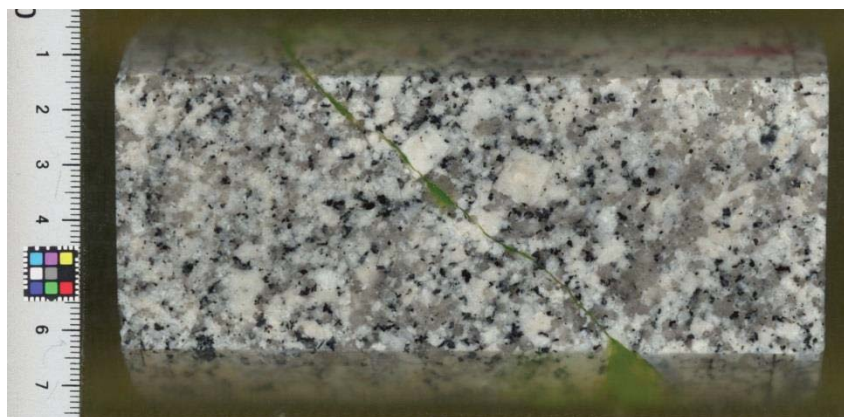


図 5.3-39 イメージスキャナで読み取った研削断面 (切り込み深さ : 10.45mm)



図 5.3-40 イメージスキャナで読み取った研削断面（切り込み深さ：30.40mm）



図 5.3-41 イメージスキャナで読み取った研削断面（切り込み深さ：50.35m）

イメージスキャナで読み取った研削面の画像からボアホール TV と同じ展開画像を作成した。その結果を図 5.3-42 に示す。この画像を用いることで、孔壁画像との比較が容易になり、より多くの地質情報を取得できると考えられる。また、CT 画像など他の手法で取得した画像との比較を行う上では、極力同じ位置での比較が不可欠である。同画像と CT 画像の展開表示画像を相互に比較することで、異なる画像間での位置合わせが容易になると考えられる。

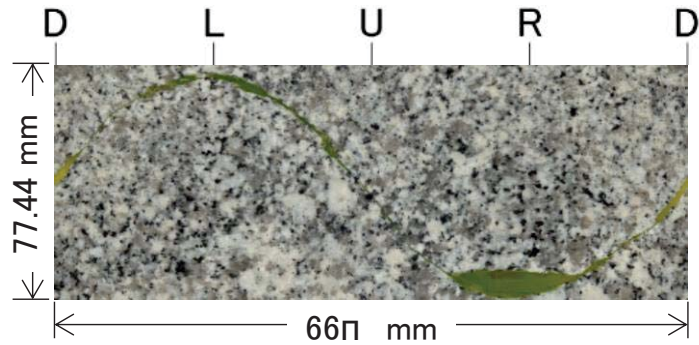


図 5.3-42 12MI31 号孔 研削面画像（イメージスキャナ）の展開表示（14.88mabh）

5.3.3 割れ目の記載と X 線 CT による割れ目可視化画像との比較

(1) はじめに

本事業では、オールコアボーリングによるボーリング調査を行っている。回収されたボーリングコアは、回収後直ちに JAEA の岩芯地質記載要領に準拠してコア記載が実施されている。また、掘削により生じたボーリング孔では、ボーリング孔壁の全周を連続孔壁面展開画像（孔壁画像）として観察記録を行い、割れ目の走向傾斜計測などの解析が行われている。

地質構造や水みちとなる湧水割れ目を孔壁画像やコア観察から判定するためには、地質を専門とする技術者あるいは研究者の適切な鑑定が不可欠であるが、とくに構造が極端に不均質あるいは微細な場合は、観察者の技量や主観的な判断に依存し、解釈が異なるなどの問題が生じる。

この問題解決には、コア観察の高度化、高精度化が不可欠であると考えられる。

(2) X 線 CT 展開表示画像

医療用 X 線 CT スキャナで、ボーリング調査で得られたボーリングコアを撮影し、さらにそれらの画像を使って展開表示画像を作成した。その結果を図 5.3-43～図 5.3-47 示す。

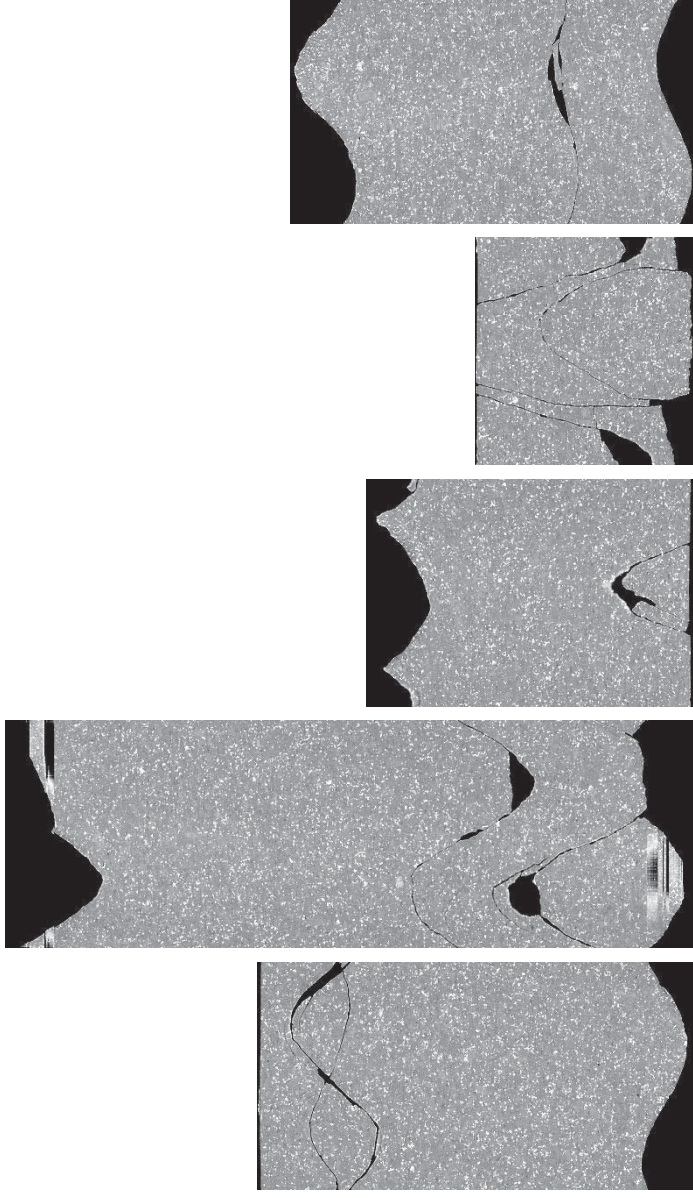


図 5.3-43 12MI30 号孔ポーリングコアの X 線 CT 展開表示画像

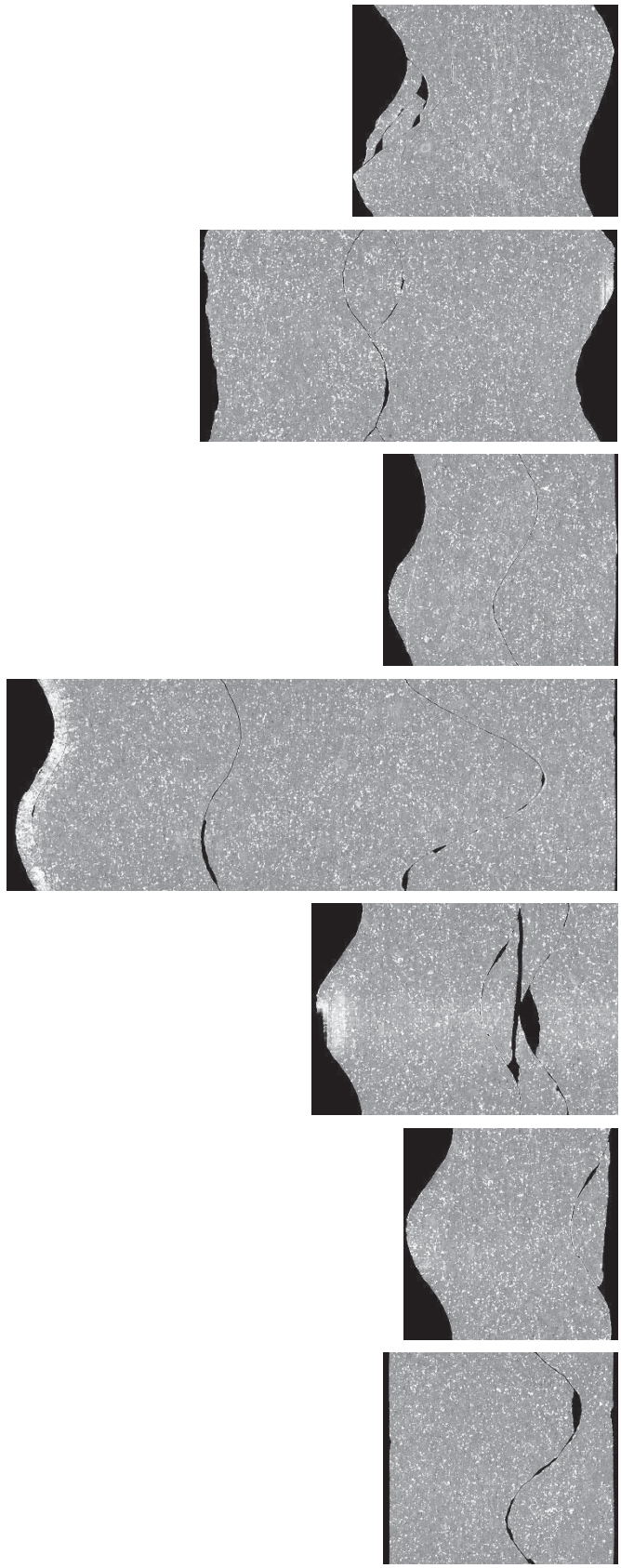


図 5.3-44 12MI31 号孔ポーリングコアの X 線 CT 展開表示画像

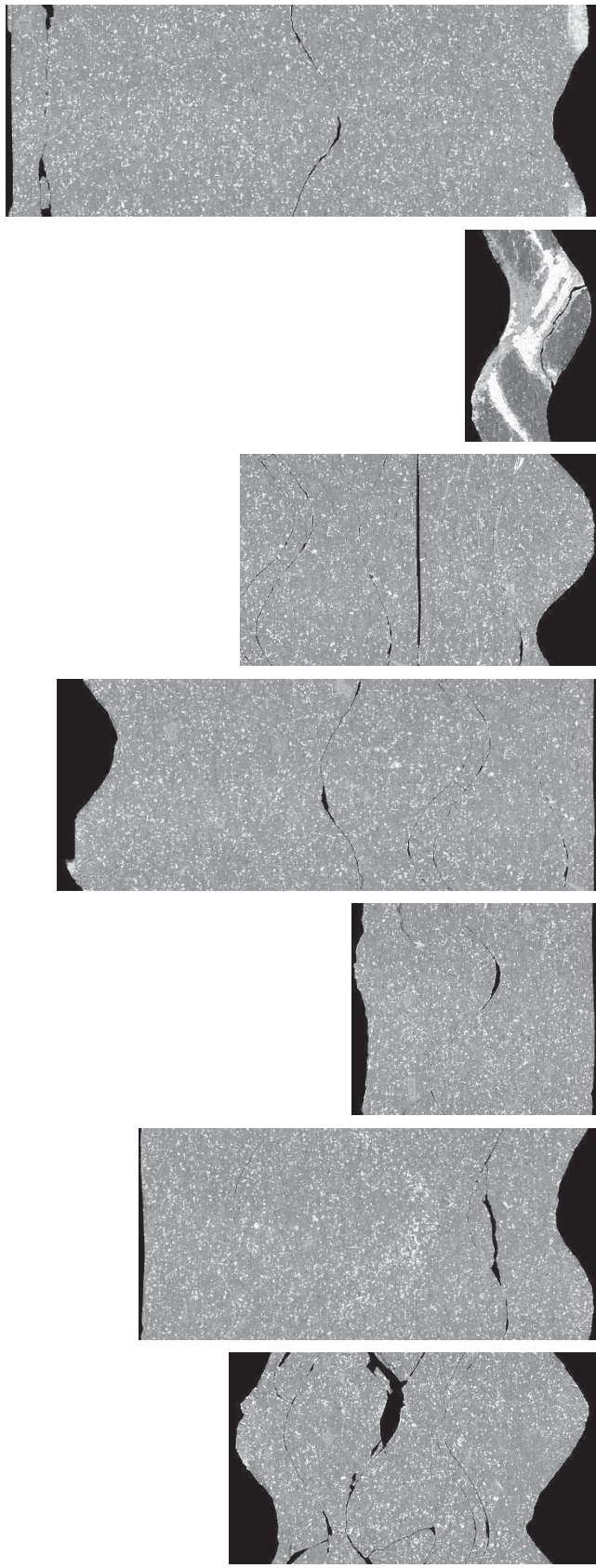


図 5. 3-45 13MI36 号孔ポリマーリングコアの X 線 CT 展開表示画像

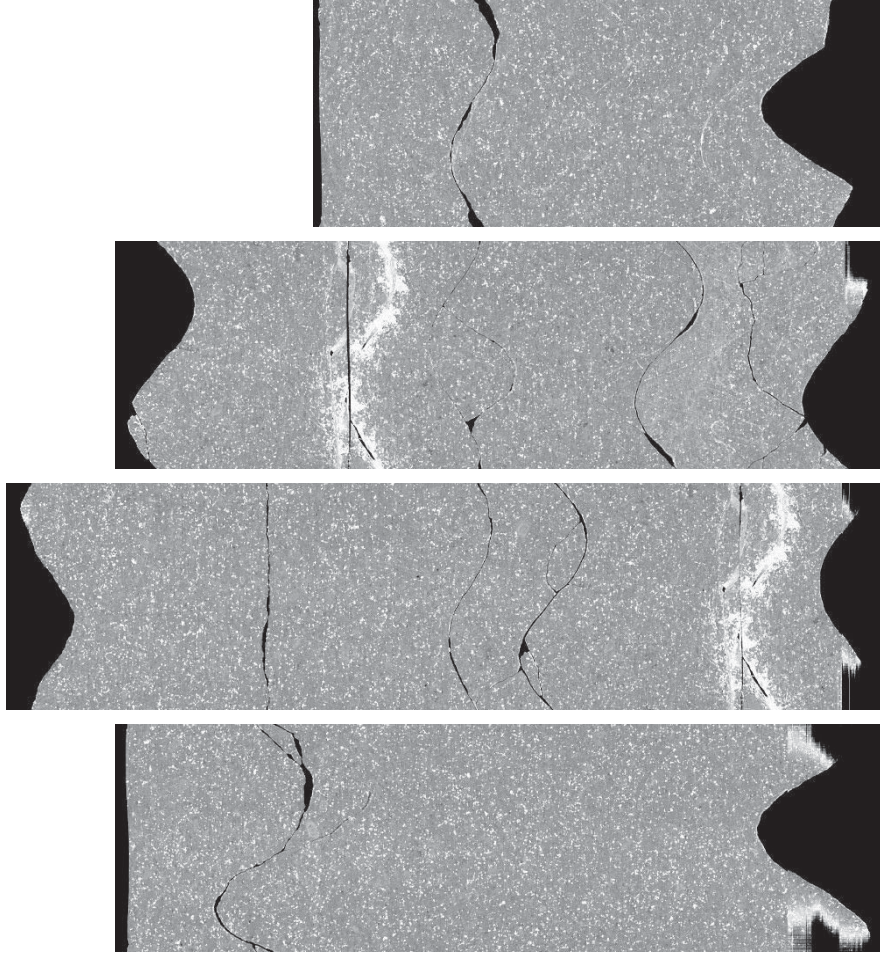


図 5.3-46 13MI37 号孔ポーリングコアの X 線 CT 展開表示画像

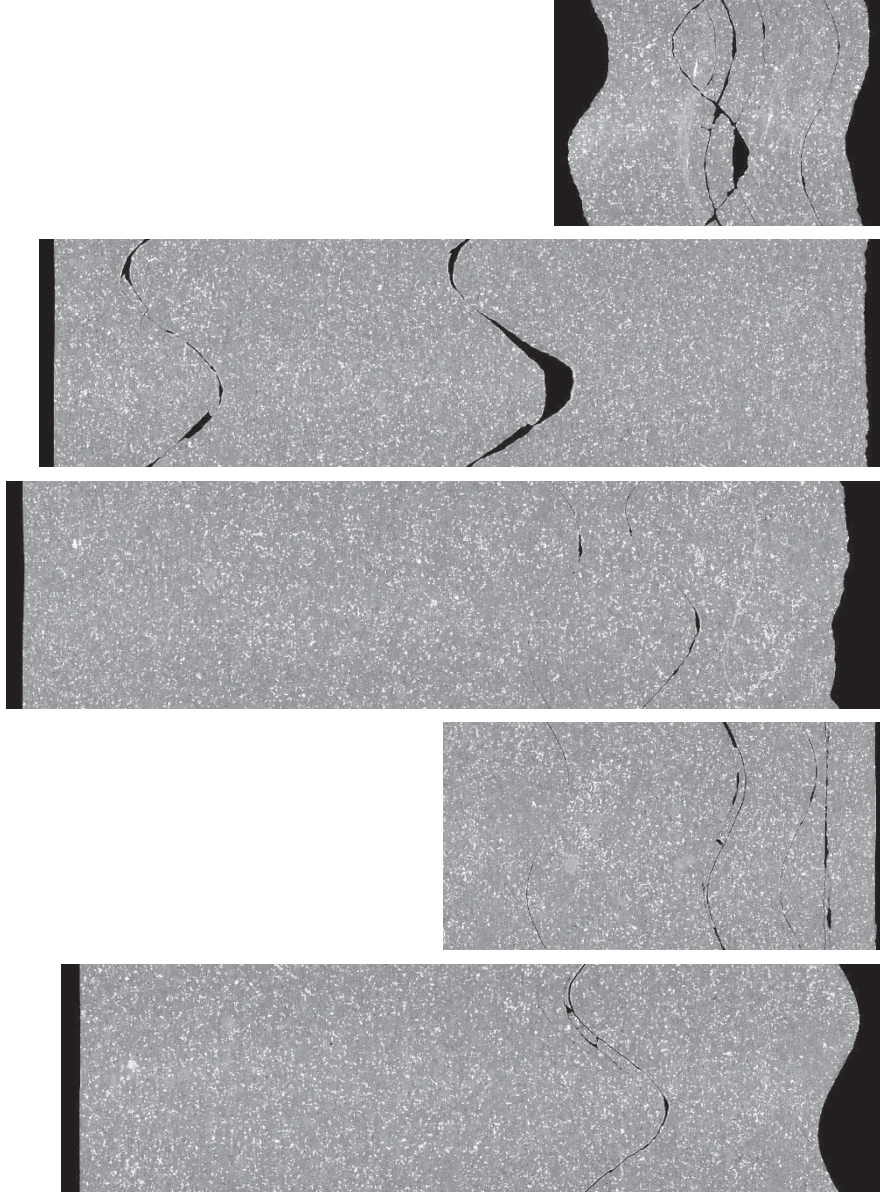


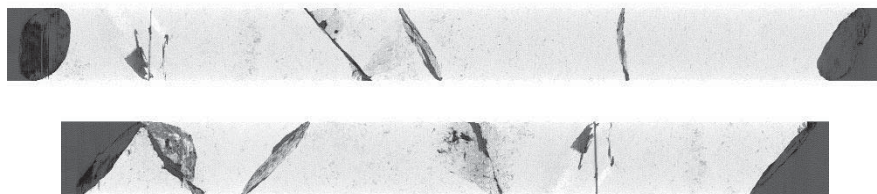
図 5.3-47 14MI49 号孔ポーリーングコアの X 線 CT 展開表示画像

(3) X線 CT による変質区間の推定

コア記載によると、各孔の割れ目沿いの変質（中変質程度以上）の区間は表 5.3-5 に示すとおりである。ボーリングコアの CT 画像の最小値投影から変質したと考えられる箇所が確認できたので、その結果を図 5.3-48 に示す。

表 5.3-5 各孔の割れ目沿いの変質状況に関するコア記載（300m 坑道）

孔名	コア深度	記載事項
12MI30	3.120～3.204mabh	断層ガウジを含む割れ目沿いに発達する。割れ目沿いの幅 40～50mm の範囲で 中変質程度 のセリサイト化、弱変質程度の緑泥石化が認められる。3.183mabh の断層沿いには弱い粘土化も認められる。
	21.640～22.040mabh	割れ目沿いに 1～40mm の範囲で 中変質程度 のセリサイト化および緑泥石化、また断層岩の発達する区間では 強変質程度 の緑泥石化および粘土化が認められる。
	27.070～27.395mabh	割れ目沿いに 10～50mm の範囲で 中変質程度 のセリサイト化、弱変質程度の緑泥石化が認められる。また、断層岩の発達する区間の一部では 中変質程度 の緑泥石化も認められる。
12MI31	0.760～1.285mabh	割れ目沿いに幅 5～40mm の範囲で弱～ 中変質程度 のセリサイト化が認められる。
	20.370～20.430mabh	カタクラサイト沿いに発達する。割れ目沿いの幅 10～20mm の範囲で 中～強程度 の緑泥石化が認められる。
13MI36	3.44～3.48mabh	割れ目沿いの幅約 20mm の範囲で 中変質程度 のセリサイト化、弱変質程度の緑泥石化が認められる。
	18.22～18.35mabh	割れ目沿いに幅約 125mm の範囲で 強変質程度 の緑泥石化および黄鉄鉱化が認められる。黄鉄鉱は深度 18.28～18.29mabh の割れ目を充填する。
13MI37	6.56～6.98mabh	割れ目沿いに幅 10～20mm の範囲で 中変質程度 の長石の白濁化が認められる。
	16.73～16.80mabh	カタクラサイト沿いに発達する。幅約 65mm の範囲で 強変質程度 の緑泥石化が認められる。
	21.28～21.33mabh	カタクラサイト沿いに発達する。幅約 50mm の範囲で 強変質程度 の緑泥石化が認められる。
14MI49	0.65～0.67mabh	割れ目沿いの幅 25mm の範囲で 強変質程度 の炭酸塩化（塩酸で反応あり）が認められる。
	7.55～8.11mabh	角礫状コアを呈する破碎帯で、岩芯もやや軟質。多数本発達した割れ目沿いに 強変質程度 のセリサイト化・粘土化が認められる。
	13.91～13.95mabh	角礫状コアを呈し脆弱。岩芯は硬質だが、角礫周縁は 中変質程度 に粘土化。
	18.57～18.64mabh	カタクラサイトを呈し、細礫状岩片の周縁が 強変質程度 の緑泥石化。
	19.78～19.83mabh	カタクラサイトを呈し、細礫状岩片の周縁が 強変質程度 の緑泥石化。
	16.73～16.80mabh	カタクラサイト沿いに発達する。幅約 65mm の範囲で 強変質程度 の緑泥石化が認められる。
	23.31～23.32mabh	カタクラサイトを呈し、細礫状岩片の周縁が 強変質程度 の緑泥石化。



(上段：13MI37 号孔 20.344-21.119m 区間、下段：13MI37 号孔 20.802-21.474m 区間)

図 5.3-48 X線 CT 画像から母岩変質が確認できたボーリングコア

5.3.4 室内レジン注入試験

(1) はじめに

原位置レジン注入試験で用いるレジン（二液混合エポキシ樹脂系接着剤）には、開口割れ目や割れ目間隙の部分のみを顕在化し、目視での観察を容易にするために蛍光剤が添加される。これまで、蛍光剤としてウラニン粉末のような蛍光染料を使用することを念頭に進めてきたが、室内での検討から、蛍光染料をベースとした蛍光レジンが水と接触した場合、蛍光染料が溶解しやすい水へと移動し、抽出されること（分離）が確認された。なお、スイスのグリムゼル試験場で実施した原位置レジン注入試験においても分離を示唆する結果が得られている。このような事実はすでに認識されており、樹脂のタイプは異なるが、西山らが開発したシアノアクリレートを用いた亀裂の蛍光観察法では、分離を生じない蛍光剤を樹脂中にあらかじめ混入したものをを用いている（ただし、蛍光剤を混入する方法は公開されていない）。

本年度は、ウラニンを添加したレジンが地下水で満たされた岩盤内部、とくに割れ目間隙内で蛍光剤が分離する様子を再現するために、室内レジン注入試験を実施した。具体的には、アクリルカラムに粒径の異なる砂を充填させ、蛍光レジンによる注入試験を実施し、レジンから蛍光染料がどのように分離するかを観察した。さらに分離に対する解決策として、水と接触した場合に分離を生じない不分離性蛍光剤を選定し、その適用性を確認するための注入試験も実施した。

(2) 試験方法

a. 試験装置及び試験材料

図 5.3-49 に本試験で用いた装置を示す。砂を充填させる容器として、内径 5cm、高さ 20cm のアクリル製のカラムを用い、ドラフトチャンバー内に設置したユニットスタンドに丸型クランプを用いて固定した。カラムの両側には紫外線光源下での撮影を実施するために、6W のブラックライト（BM-6BLB）を設置した。また、レジン注入前にカラム内の砂層間隙を水で満たす通水試験も実施するため、カラム前方にレフランプを設置した。

レジンの注入にはシリンジポンプ（Harvard Apparatus 44）を用い、シリンジはプラスチック製

のルアーロックシリンジ (50ml) を用いた。シリンジの先端には、針部の外径が 1/8inch のルアーロック基注射針を取り付けた。

カラム内でのレジンの注入状況の観察には、デジタル一眼レフカメラ (D7000、株式会社ニコン) を用いた。レンズは焦点距離 40mm のマクロレンズ (AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.8G、株式会社ニコン) を用いた。また、レンズには 480nm 以下の光をカットするフィルター (MC-Y2、マルミ光機株式会社) を取付けた。

試験材料は、粒度の異なる岐阜県東濃地区で産出された硅砂を採用し、2号、5号、8号の三種類の硅砂を用いた。

b. 試験方法

カラム内への砂の充填方法には、空中落下法、水中落下法、締固め法があるが、本試験では締固め法を採用し、乾燥密度が $1.53\text{g}/\text{cm}^3$ になるようにそれぞれの硅砂をカラム内に充填した。また、カラムの上下には硅砂の流出を防ぐため、カラム外から順にろ紙、多孔板、ガラスビーズを設置した。カラム内に硅砂を充填した後、以下の順序で試験を行った。

- ① 蒸留水をカラム下部より流量速度 $2.0\text{ml}/\text{min}$ で通水
- ② カラムの排出側に設置したねじ口瓶 (500mL) に十分な量排出された後、入口側のバルブを締めて、カラム内の水の浸透状況を X線 CT スキャナで撮影
- ③ 蛍光レジンをカラム下部より流量速度 $2.0\text{ml}/\text{min}$ で注入
- ④ カラムの排出側に設置したねじ口瓶 (500mL) に十分な量排出されるか、蛍光レジンの粘度増加によりシリンジポンプで押せなくなるまで注入
- ⑤ 入口側のバルブを締めて、カラム内のレジン充填状況を X線 CT スキャナで撮影
- ⑥ カラム内のレジンが完全に硬化した後、コアカッターを用いてカラムを切断し、切断面を観察

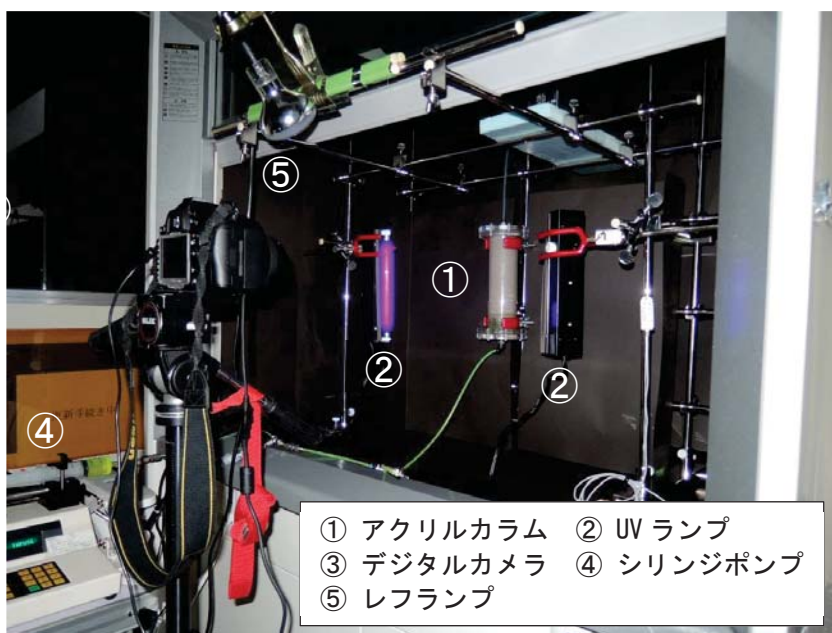


図 5.3-49 上向流カラム可視化実験の状況写真

(3) 試験結果

a. 通水試験

通水試験時に撮影した画像を図 5.3-50 に例示する。粒径の違いを問わず、水が浸透した領域と浸透していない領域を明瞭に区分する浸潤前線が形成され、均一に上昇していく様子が確認できる。

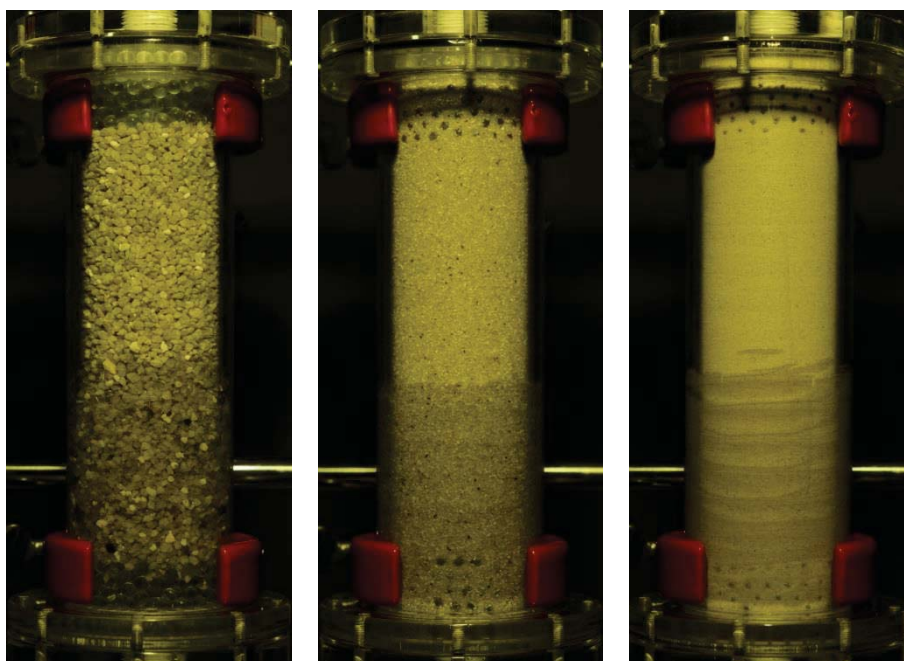


図 5.3-50 浸潤画像（左から硅砂 2 号、5 号、8 号）

b. レジン注入試験

レジン注入試験時に撮影した画像を図 5.3-51 に例示する。通水試験とは異なり、粒径の違いにより異なる移行形態が観察された。

粒径が最も大きい珪砂 2 号では、レジンが浸透している領域と浸透していない領域の境界が比較的明瞭である。一方、珪砂 5 号と珪砂 8 号の画像では、レジンに添加した蛍光染料の濃度が薄い領域と濃い領域の 2 領域が形成されて浸透している様子が確認できる。すなわち、レジンに添加した蛍光染料が溶解しやすい水へと移動し、抽出されることが確認できる。珪砂 2 号と珪砂 5 号の画像を比較すると、珪砂 5 号の画像の方が、蛍光染料の濃度が薄い領域が長い。これは、粒径が小さいほど空隙内流速（実流速）が早いいため、分散による濃度の薄まりが顕著になるためであると考えられる。また、すべてのケースでフィンガー流が発生している様子が確認できる。これは、砂層内が水で完全に飽和していなかったことが影響しているものと考えられる。

以上の結果より、蛍光レジンからの蛍光染料の分離は、経路が狭い（粒径が細かい）場合に顕著であり、蛍光染料を使用する限りは避けられない現象である。

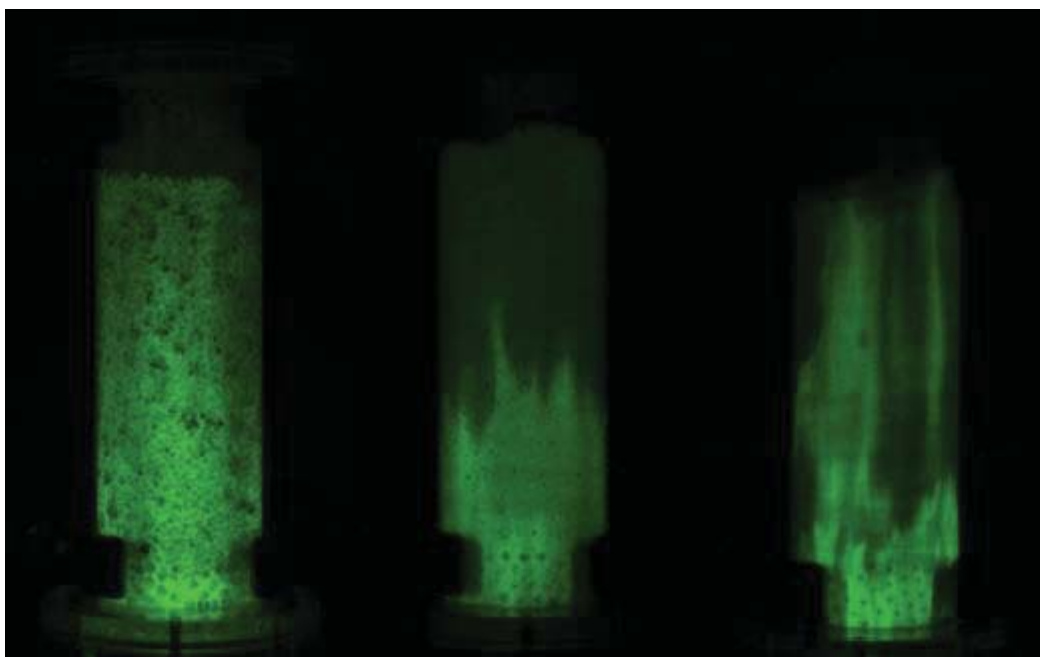


図 5.3-51 レジン注入画像（左から珪砂 2 号、5 号、8 号）

c. 不分離性蛍光剤の適用

レジンに添加する蛍光剤として蛍光染料（ウランin）を用いた場合、前述したとおり水に接すると分離を生じる。この分離を解消するためには、分離を引き起こさない蛍光剤を用いる必要がある。そこで、ピーカーを用いた事前検討で不分離性が確認されたブレニー技研製の R-ZE を選定し、同蛍

光剤を用いたレジンを注入試験を実施した。R-ZE は、2 官能エポキシ反応性希釈樹脂（ネオペンチルグリコールジグリシジルエーテル）を溶媒とした蛍光剤であり、アミン系硬化剤と架橋反応する。試験では、R-ZE を主剤に対して 2.0% 添加した。

通水試験およびレジンを注入試験の方法は前述のとおりであるが、試験材料は珪砂 8 号を用いた。試験で得られた画像を図 5.3-52 に示す。

ウラニンをを用いた試験と同様に、飽和度の影響を受けてフィンガー流が発生しているが、R-ZE を用いたケースでは、蛍光レジンを浸透した領域と浸透していない領域との境界が明瞭であり、低濃度の蛍光剤が先行して移行するといった様子は確認されない。すなわち、分離が生じていないことが確認できた。今後は、最適な添加量を決定するとともに、添加によってレジンの性能が若干変化するため、それらについては、原位置適用前に検討する計画である。

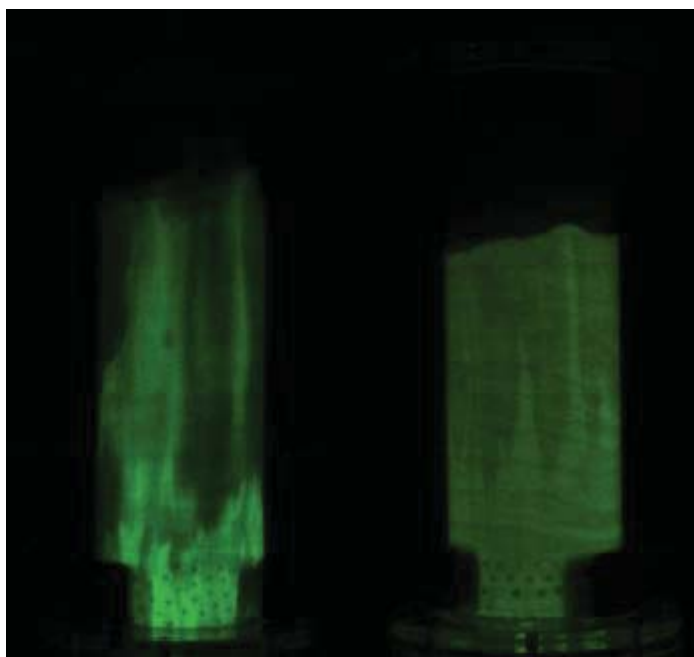


図 5.3-52 レジン注入画像（左：ウラニン、右：R-ZE）

d. X 線 CT スキャナによるレジンを充填状況の確認

通水試験およびレジンを注入試験後に X 線 CT 撮影を実施した。水よりも粘度の高いレジンを注入した際に、砂層の内部構造が乱されていないかの確認を行った。その結果を図 5.3-53 に例示する。画像は、WL1000、WW4000 で表示している（CT 値：-1000～3000 の範囲を 256 階調表示）。

すべてのケースで、通水試験後の状態とレジンを注入試験後との状態とで大きな変化は確認されなかった。珪砂 8 号のケースでは、黄色の四角で囲った領域で、レジンを注入によって砂層が締め固まったと考えられる密度増加が確認された。さらに、その密度増加に伴い、赤丸で囲った領域では、

パイピングが生じたと考えられる密度低下も確認された。カラム内部での構造変化であるため、パイピングが生じた瞬間は確認できていないが、試験中に実施した圧力計測結果によると、約 0.3MPa 程度の注入圧力でパイピングが生じたと考えられる。

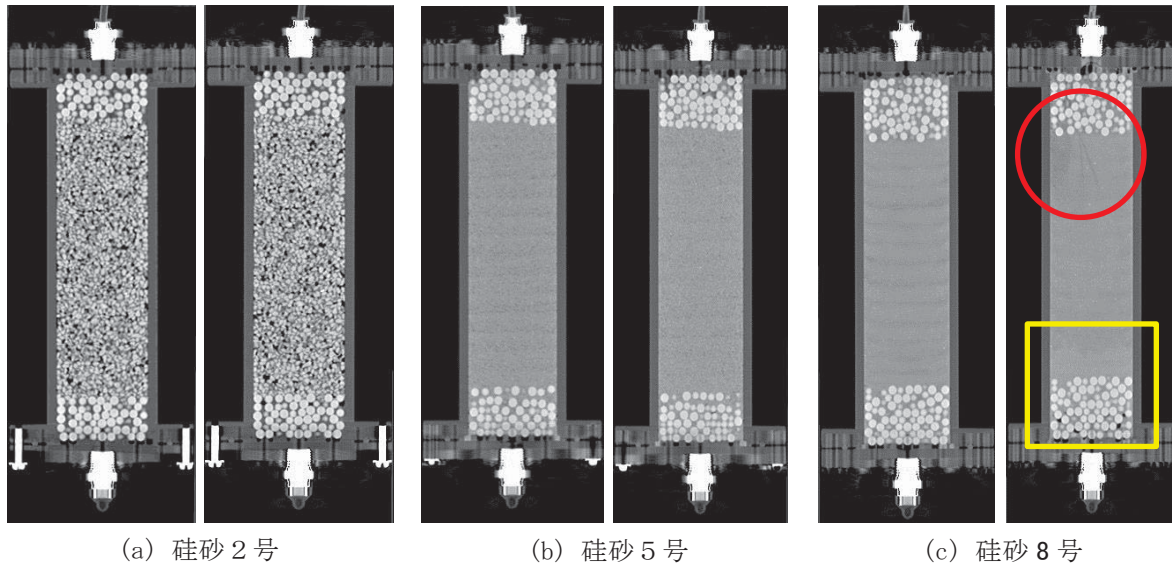


図 5.3-53 砂層内部の X 線 CT 画像（左：通水試験後、右：レジン注入試験後）

e. レジン充填状況及び蛍光剤の分布状況の確認

上向流カラム可視化実験では、砂層内の蛍光レジンの浸透状況をカラムの外周から観察しているため、内部の様子は確認できていない。そこで、カラム外周で観察された浸透形態がカラム内部でも同様に生じているかを確認するために、図 5.3-54 に示すようにアクリルカラムをコアカッターで切断し、その切断面を観察した。



図 5.3-54 アクリルカラム切断状況写真

図 5.3-55 に切断したカラムの画像を示す。それぞれ左に蛍光灯光源下で撮影した画像を、右に紫外線光源下で撮影した画像を示している。

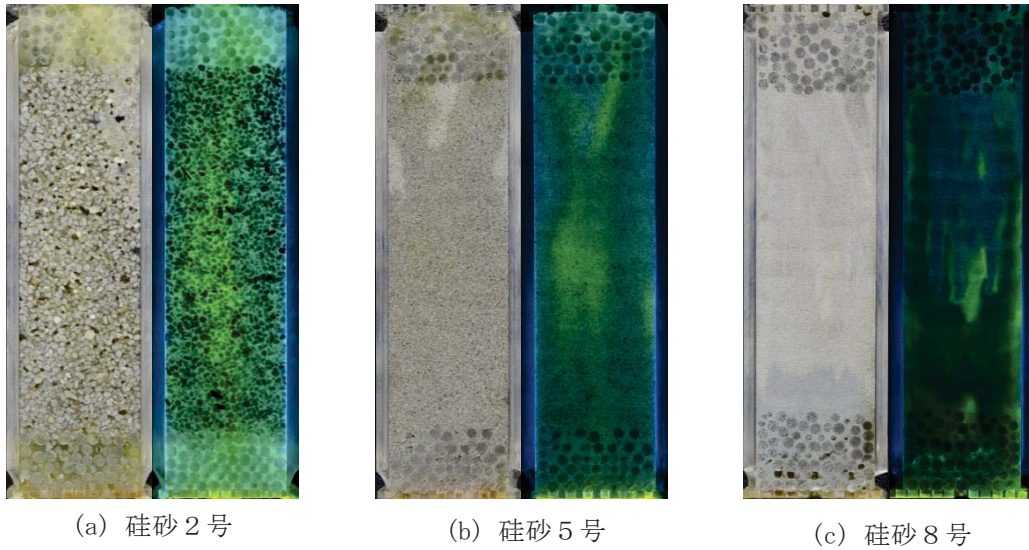


図 5.3-55 蛍光剤（ウラニン）を用いたレジン注入試験後のカラム切断面の観察結果

図に不分離性蛍光剤を用いたレジン注入試験後のカラム切断面を撮影した画像を示す。ウラニンの結果とは異なり、砂層内を満遍なく蛍光レジンが満たされている様子が分かる。

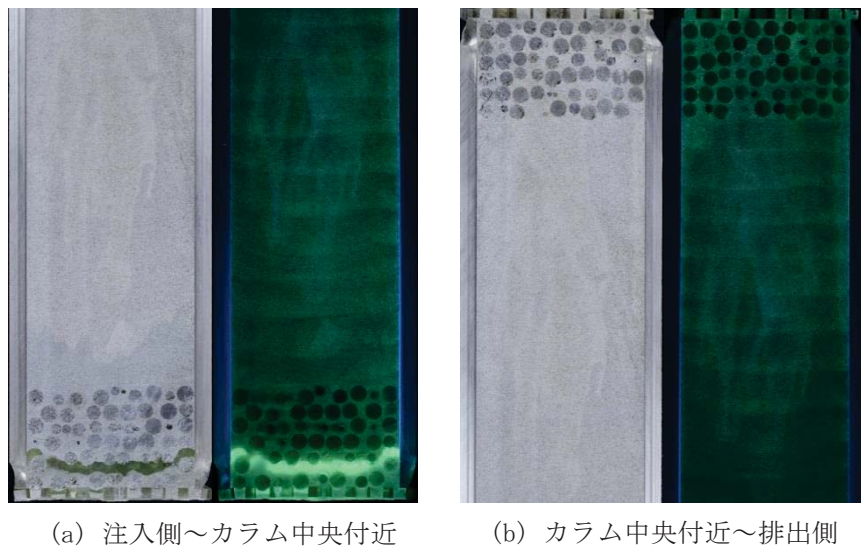


図 5.3-56 分離性蛍光剤を用いたレジン注入試験後のカラム切断面の観察結果

5.3.5 原位置レジン注入試験装置の試作

(1) はじめに

原位置レジン注入試験では2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤（以下、レジンと呼称する）を使用する。レジンの硬化反応は発熱反応であり、混合量がある一定量以上になると100～160℃程度の高温になる。したがって、グリムゼル試験場で用いた圧力容器に手動で混合したレジンを大量に投入し、窒素ガス圧で注入する方式では、レジンの発熱により可使時間が短縮され、効率的な注入が困難になることが予想される。また、レジンの物性は混合比の精度にも依存し、手動で主剤と硬化剤を混合した場合、最悪硬化不良を引き起こす場合も考えられる。その他、手動での混合は手間が増えるため作業効率が悪く、混合開始から反応が開始するため、有効な注入時間（可使時間）も短縮される。

そこで、昨年度実施した概念設計をもとに、無脈動・連続移送が可能な2台のモノポンプとスタティックミキサーを組合せて、自動で主剤と硬化剤を混合し、レジンを正確かつ均一に吐出可能な原位置レジン注入試験装置を試作した。同装置は瑞浪超深地層研究所の300m坑道内での適用を計画しているが、500mレベルでの地下水圧を考慮し、5MPaの環境下で動作可能とした。

(2) 装置の概要

a. 基本仕様

本装置は、坑道壁面から掘削された深度20m程度の試錐孔を利用して効率よく岩盤中の対象割れ目にレジンを注入するための装置である。

本装置の基本仕様は以下のとおりである。

- ① 主剤と硬化剤を配合比（重量比）に沿って混合しつつ、連続して注入できる装置であること。
- ② 主剤と硬化剤の配合比を保ちつつ、任意の速度で注入できること。
- ③ 作業完了後は、硬化する可能性のある関連部品については、本体部からの取り外し、洗浄可能であること。
- ④ 吐出する液体の容量が20L程度貯蔵できるタンクを備えること。
- ⑤ 5MPa以下の圧力で動作可能であること（貯蔵タンクは除く）。
- ⑥ 混合物へのエア混入を防ぐための対策を講じること。
- ⑦ ポンプを制御盤（タッチパネル）から操作できること。
- ⑧ 上限圧力に到達した場合、上限圧力を超えないよう流量を制御できること、また上限圧力を設定可能であること。
- ⑨ 圧力及び流量等の信号を外部に設置したデータロガーに収録可能であること。

b. 全体構成

原位置レジン注入試験装置の概要図（フローシート）を図 5.3-57 に示す。装置の構成は、①主剤移送ポンプ、②硬化剤移送ポンプ、③ミキシング部、④制御盤となっている。

表 5.3-6 に本装置の機器リストを示す。なお、表中の機番は概要図（フローシート）の機番と対応している。

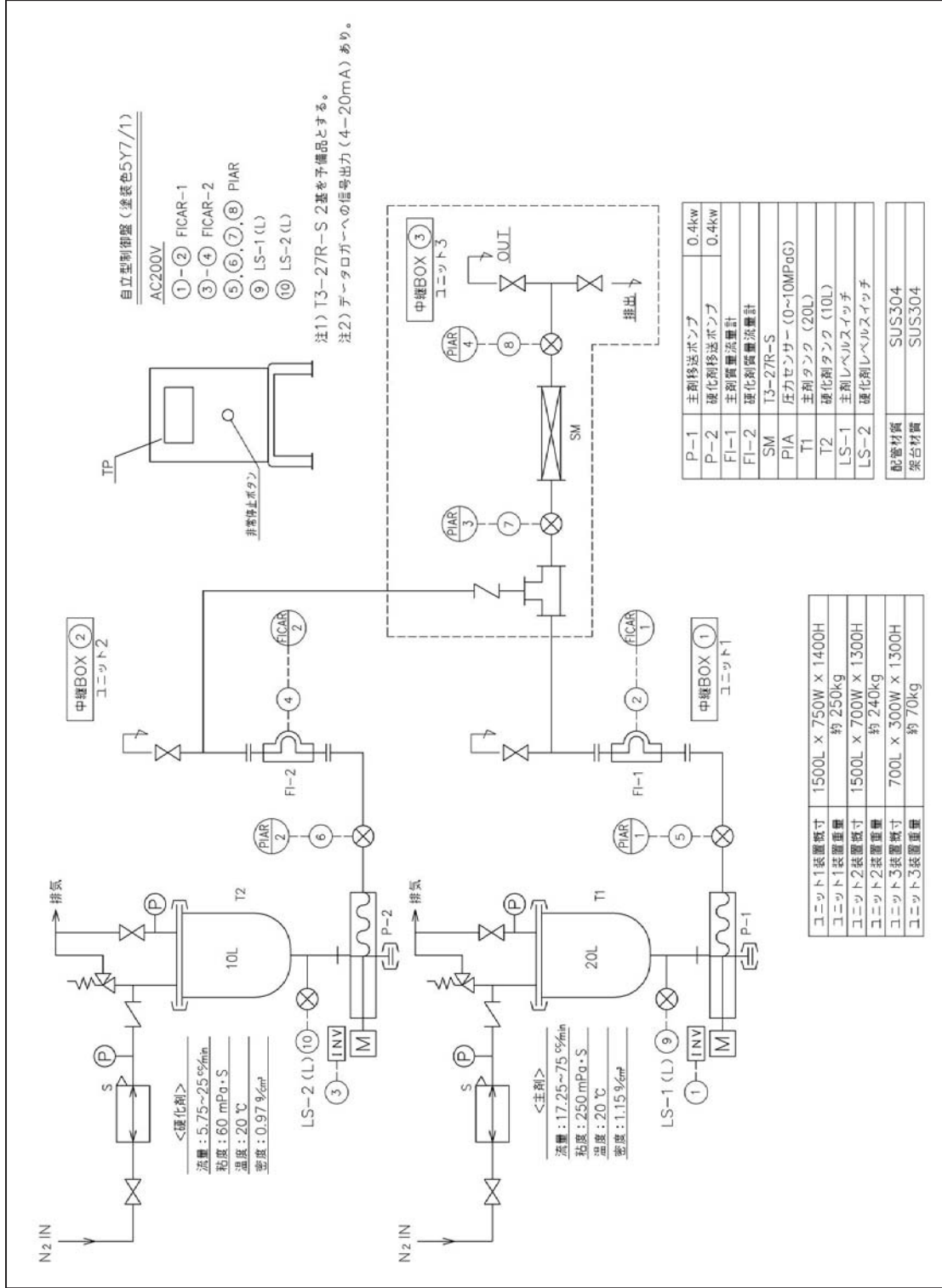


図 5.3-57 原位置レジン注入装置の概要図 (フローシート)

表 5.3-6 原位置レジン注入試験装置の機器リスト

項目	機番	機器名称	メーカー名	型式	台数	備考
タンク	T1	主剤タンク	ユニカル工業(株)	主剤タンク (有効容量: 20L)	1	材質: SUS304 原料蓋口径: 250A ^{ハル} 出口径: 1s ^{ハル} 外面: 酸洗仕上 内面: #320 相当仕上
	T2	硬化剤タンク		硬化剤タンク (有効容量: 10L)	1	材質: SUS304 原料蓋口径: 250A ^{ハル} 出口径: 1s ^{ハル} 外面: 酸洗仕上 内面: #320 相当仕上
窒素バージ用機器	-	安全弁	ニハナ製作所	KANTAE-S	2	材質: SCS13A 接続: Rc1/2 吹き出し圧力: 0.02MPaG 接液0リング材質: FKM
	-	減圧弁	(株)ヨシタケ	GD-41D	2	材質: SUS 接続: Rc1/2 設定圧力: 一次側 (0.1~0.98MPaG) : 二次側 (0.02~0.1MPaG)
圧力計	P	ブルドン管式圧力計	(株)西野製作所	AT 型圧力計	2	レンジ: 0~0.5MPaG 接続: Rc3/8 受圧部材質: 316S.S
					2	レンジ: 0~0.1MPaG 接続: Rc3/8 受圧部材質: 316SS
レベル調整機器	LS (L)	音叉式レベルスイッチ	エントレスカワ [・] ジ [・] ヤ [・] ン(株)	FTL33-AA4U3BB3CJ	2	接続: 1s ^{ハル} 測定部長: 87.3mm 接液部材質: SUS316L 電源: AC19~253V
主剤ポンプ	P-1	主剤移送ポンプ	兵神装備(株)	12NE06PAX	1	電源・モーター: AC200V×60Hz×3相×4P (0.4kW) 流量: 17.25~75ml/min 全圧力: 5.0MPaG (Max) 接続口径: Rc1/2
インバータ	INV	主剤ポンプインバーター	三菱電機(株)	FR-A800	1	AC200V×0.4kW (制御盤内に設置)
硬化剤ポンプ	P-2	硬化剤移送ポンプ	兵神装備(株)	12NE06PAX	1	電源・モーター: AC200V×60Hz×3相×4P (0.4kW) 流量: 5.75~25ml/min 全圧力: 5.0MPaG (Max) 接続口径: Rc1/2
	INV	硬化剤ポンプインバーター	三菱電機(株)	FR-A800	1	AC200V×0.4kW (制御盤内に設置)
質量流量計	FI-1	主剤用コリオリ式流量計	エントレスカワ [・] ジ [・] ヤ [・] ン(株)	80A04-ASVWAAAACCAA	1	電源: AC100~200V 計測チューブ: SUS 出力: 4~20mA 接続: VCO 接続 測定流量範囲: 17.25~75ml/min
	FI-2	硬化剤用コリオリ式流量計		80A02-ASVWAAAACCAA	1	電源: AC100~200V 計測チューブ: SUS 出力: 4~20mA 接続: VCO 接続 測定流量範囲: 5.75~25ml/min
圧力監視機器	PIA1~4	圧力センサー	(株)バルコム	VFM-A6-10MPa-4	4	電源: DC11~28V 出力: 4~20mA センサー部材質: SUS630 接続: G1/4
	-	硬化剤側逆止弁	日本スウェージ [・] ロツク [・] FST(株)	SS-CHS4-1	1	材質: SUS304 接続: 6mm 継手 <i>クワネツク</i> 圧力: 0.007MPaG
逆止弁	-	タンク側逆流防止用	(株)KITZ	UOB	2	材質: SCS13 口径: Rc1/2
	-	手動2方ボールバルブ		UTK8A	4	材質: SCS13 口径: Rc1/4
手動弁	-			UTK15A	4	材質: SCS13 口径: Rc1/2
	-		日本スウェージ [・] ロツク [・] FST(株)	SK シリーズ	2	材質: SUS316 最高圧力: 41.3MPaG 接続: Φ 6.35 用継手
ミキサー	SM	スタティックミキサー	(株)リタケカンパ [・] ニリミ [・] テ [・] ト	T3-27R-S	3	材質: 316S.S 接液部材質: 316L.S.S 接続: 1/4 継手 口径: 4.76mm (外径) 、3.4mm (内径) エレメント数: 27

(3) 装置各部の構造

a. 主剤・硬化剤移送ポンプの仕様

原位置レジジン注入試験装置の主要な機器である移送ポンプの仕様を表 5.3-7 に示す。

主剤移送ポンプと硬化剤移送ポンプとでは減速機の仕様が異なり、回転速度（周波数）が異なる。また、混合液の流量制御範囲は主剤と硬化剤の流量制御範囲の合計となるため、本装置の最小流量は、23g/min である。なお、主剤と硬化剤を重量比で混合させるため、流量の単位が g/min になっていることに注意されたい。

表 5.3-7 主剤・硬化剤移送ポンプ（モノポンプ）の仕様

項目	内容		仕様
移送液	液名		エバーボンド EP-400 (M)
	密度	主剤	1.15g/cm ³
		硬化剤	0.97g/cm ³
	粘度	主剤	110~250mPa・s
硬化剤		20~60mPa・s	
ポンプ能力	ポンプ型式		12NE06X（兵神装備株式会社）
	流量制御範囲	主剤	17.25~75g/min
		硬化剤	5.75~25g/min
	吐出圧		MAX. 5.0MPa
	吸込圧		0MPa
	全圧力		MAX. 5.0MPa
	回転速度	主剤	19~377min ⁻¹
		硬化剤	7~313min ⁻¹
	周波数	主剤	2~48Hz
		硬化剤	1~58Hz
駆動機 (インバータ駆動)	仕様		全閉外扇 屋外 インバータ専用モーター
	電源		AC200V 60Hz 三相
	出力		0.4kW
	極数		4P
	型式		枠番 71M(SF-HRFAO)
	メーカー		三菱電機株式会社
	回転速度		1800min ⁻¹
	減速機	主剤	RX57 AM71-3.79
硬化剤		RX57 AM71-5.5	

b. スタティックミキサーの仕様

主剤と硬化剤を混合するスタティックミキサーの仕様を表 5.3-8 に示す。

スタティックミキサー自体には全く動く部分がなく、流体が管内部に設置されたエレメント（図 5.3-58）と呼ばれる箇所を通過するだけで混合の目的が達成される。また、攪拌所要動力である圧力損失が比較的小さく、流体、ガス、固体のほとんどの組み合わせの混合に使用すること

ができる。必要とされるエレメント数は、流体の性状やプロセスの目的により様々に変化する。例えば、高粘性流体の場合は 18 エレメント、主剤と硬化剤を混合するエポキシ樹脂系接着剤の場合は 24 エレメント程度必要とされている。

表 5.3-8 スタティックミキサーの仕様

項目	仕様
移送液	エバーボンド EP-400 (M)
口径	3.4 mm (ミキシング部内径)
全長	75 mm
材質	エレメント : 316LS.S ハウジング : 316S.S
エレメント数	27
流量 (仕様)	23~100 ml/min
管内流速	4.2~18.4 cm/s
せん断速度	99~431 s ⁻¹
Re 数	0.78~3.4
計算圧損	0.02~0.07MPa

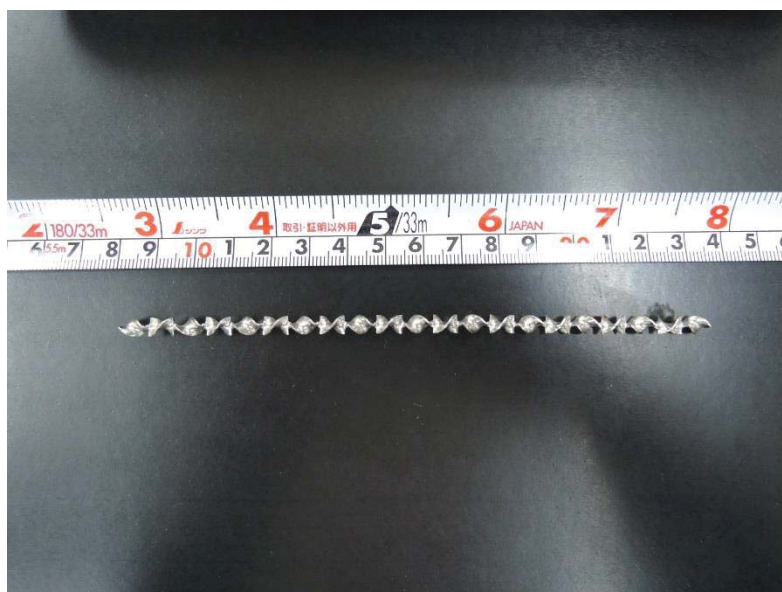


図 5.3-58 スタティックミキサーのエレメントの外観写真

c. 質量流量計の仕様

コリオリ式質量流量計の仕様を表 5.3-9 に示す。また、外観の写真を図 5.3-59 に示す。

コリオリ式質量流量計は、高精度な測定が可能であり、応答性もよく脈動に対して追従可能である。ただし、圧力損失は大きい。

表 5.3-9 コリオリ式質量流量計の仕様

項目		仕様
メーカー名・名称		エントレスハウザー・ジャパン(株) Promass 80A
口径サイズ	主剤	1/8"
	硬化剤	1/12"
圧力損失	主剤	17.25 ml/min : 15.49 kPa 75.00 ml/min : 67.43 kPa
	硬化剤	5.75 ml/min : 13.30 kPa 25.0 ml/min : 57.92 kPa
質量流量測定誤差	主剤	17.25 ml/min : 1.89 % 75.00 ml/min : 0.43 %
	硬化剤	5.75 ml/min : 1.45 % 25.0 ml/min : 0.33 %
レイノルズ数	主剤	17.25 ml/min : 0 75.00 ml/min : 2
	硬化剤	5.75 ml/min : 1 25.0 ml/min : 5
耐圧		5.0 MPa
出力		4-20 mA



図 5.3-59 コリオリ式質量流量計の外観写真（左：主剤用、右：硬化剤用）

d. レベルスイッチの仕様

音叉式レベルスイッチの仕様を表 5.3-10 に示す。また、タンク下の配管に設置された音叉式レベルスイッチの外観写真と外形図を図 5.3-60 に示す。

音叉式レベルスイッチは、フォーク状のセンサー部を一定の周波数で振動させ、その振動周波数の変化を圧電素子で検出し、液体の有無を検出するセンサーである。

表 5.3-10 音叉式レベルスイッチの仕様

項目	仕様
メーカー名・名称	エントレスハウザー・ジャパン(株) Liquiphant FTL33
測定部長	87.3 mm
プロセス温度	≤100 °C
耐圧	4.0 MPa
接液部材質	SUS316L

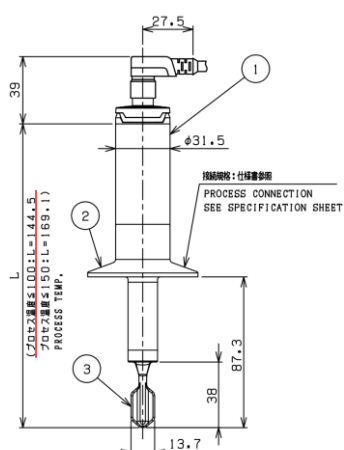


図 5.3-60 音叉式レベルスイッチの外形図と外観写真

e. 圧力センサーの仕様

フラッシュダイアフラム式圧力センサーの仕様を表 5.3-11 に示す。また、図 5.3-61 に外形図を、図 5.3-62 に外観写真を示す。

使用する液体が高粘度であるため、空気溜まりによる影響を避けるため、受圧面が平らなフラッシュダイアフラム式圧力センサーを選定した。図 5.3-62 に示すように、流量計の直下に設置した。その他、スタティックミキサーの入口と出口に各 1 箇所ずつ設置している。

表 5.3-11 フラッシュダイアフラム式圧力センサーの仕様

項目	仕様
メーカー名・名称	(株)パルコム VFM-A6-10MP-4
定格容量 <R.C.>	10 MPa
電源電圧	DC+11~+28 V
定格出力電流 <R.O.>	4.00±0.1~20.00±0.2 mA (2線式)
負荷抵抗 (単体時)	500 Ω MAX. (24V時)
精度 (0~60℃)	±1.0 %R.O.
直線性 (at 25℃)	±0.5 %R.O.
ヒステリシス (at 25℃)	±0.5 %R.O.
使用温度範囲	0~+60℃ (結露なきこと)
ゼロ点の温度影響	±0.8 %R.C. /10℃
出力の温度影響	±0.8 %R.C. /10℃

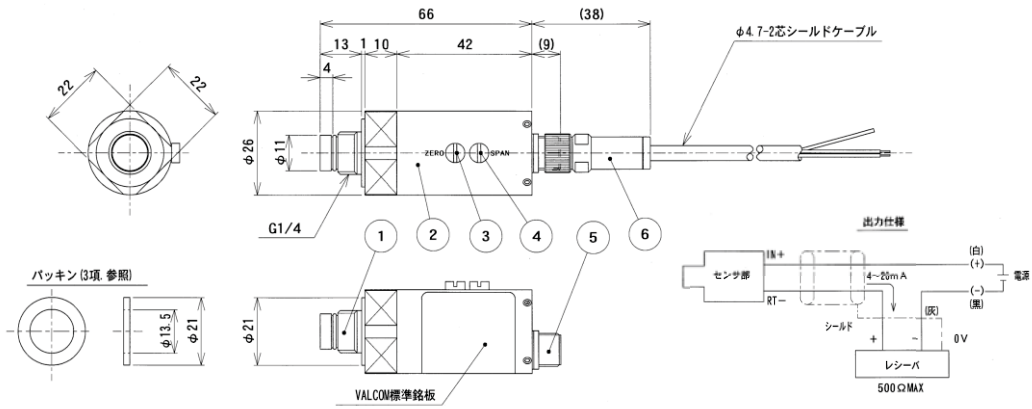


図 5.3-61 フラッシュダイアフラム式圧力センサーの外形図



図 5.3-62 フラッシュダイアフラム式圧力センサーの外観写真

(4) 原位置レジンを注入試験装置の構成と配置

原位置レジンを注入試験装置は、坑道内への搬入出を考慮して、以下の3つのユニットと制御盤で構成した。

- ① ユニット1：主剤移送ポンプユニット
- ② ユニット2：硬化剤移送ポンプユニット
- ③ ユニット3：ミキシングユニット

原位置レジンを注入試験装置の各ユニットの外観写真を図 5.3-63～図 5.3-66 に示す。

ユニット1の主要機器は主剤移送ポンプである。主剤移送ポンプは、前述したとおり、最大吐出圧5.0MPaのモノポンプを採用した。20Lのタンクを備え、エア混入を抑制するために窒素置換（窒素パージ）が可能なような構成とした。また、タンク内の主剤の残量管理は、外部出力される流量の累積値によるモニタリングでも可能であるが、タンク下部に液体の有無を検出するための音叉式レベルスイッチを設置した。異常を検知した場合は、制御盤に取り付けた警告ブザーが鳴り、装置が停止するようにした。

ユニット2の主要機器は硬化剤移送ポンプである。タンクの有効容量（10L）以外の機能・機構は主剤移送ポンプと同じである。

ユニット3はミキシングユニットであり、主要部品はスタティックミキサーである。また、レジンの移送先が坑壁から20m程度先の割れ目であるため、スタティックミキサーの入口と出口のそれぞれにアンブ内蔵型の圧力センサーを設置した。なお、後述する装置の上限圧力を設定には、スタティックミキサーの出口側の圧力センサーの測定値を用いるため、その値は、制御盤へ常時フィードバックされる。



図 5.3-63 ユニット1（主剤移送ポンプユニット）の外観写真



図 5.3-64 ユニット2（硬化剤移送ポンプユニット）の外観写真



図 5.3-65 ユニット3（ミキシングユニット）の外観写真



図 5.3-66 制御盤の外観とタッチパネルによる操作状況

原位置レジジン注入試験装置の各ユニットの配置図を図 5.3-67 示す。また、各ユニットと制御盤の外形図を図 5.3-68～図 5.3-71 に示す。

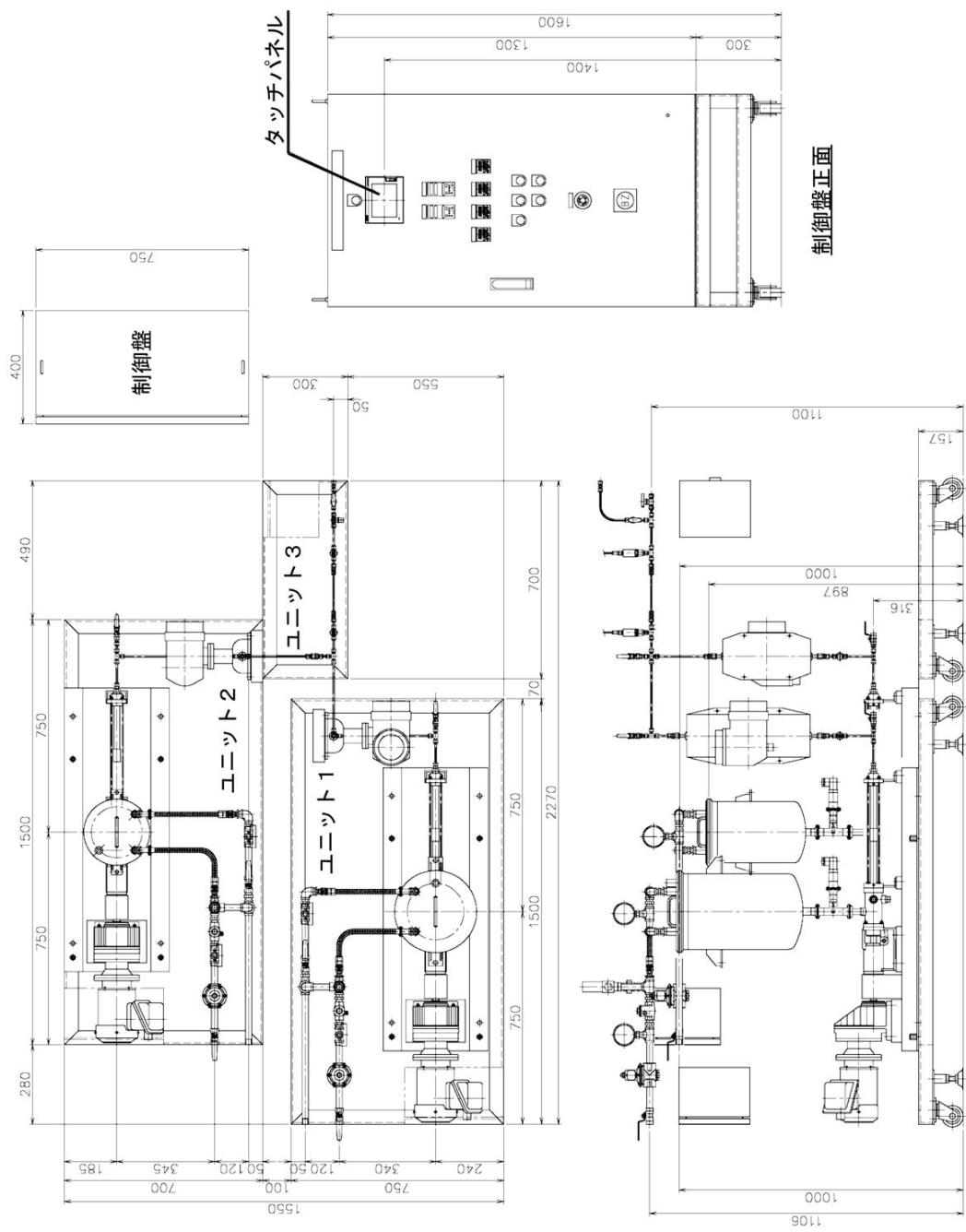


図 5.3-67 原位置レジン注入試験装置の各ユニットの配置図

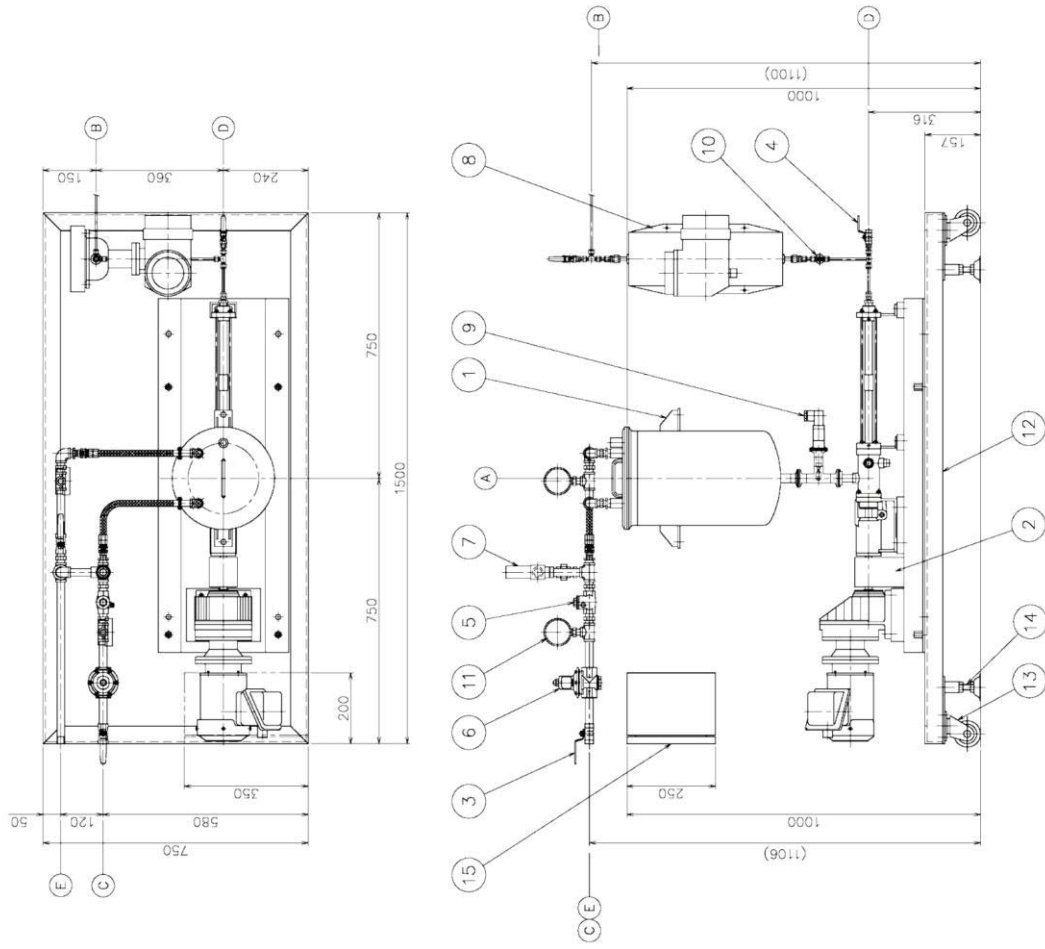


図 5.3-68 原位置レジン注入試験装置ユニット1の外形図

記号	名称	口径
A	主剤 IN	主剤タンク (20L)
B	主剤 OUT	1/4 “チューブ継手
C	窒素 IN	Rc1/2
D	ドレン	Rc1/4
E	排気	R1/2

品番	品名
1	主剤タンク (20L)
2	主剤移送ポンプ
3	ねじ込みボールバルブ (15A)
4	ねじ込みボールバルブ (8A)
5	ねじ込みチャッキバルブ (15A)
6	減圧弁 (15A)
7	安全弁 (15A)
8	主剤質量流量計 (呼び口径：4mm)
9	レベルスイッチ
10	圧力センサー
11	圧力計
12	架台
13	キャスター
14	レベルアジャスター
15	中継BOX

記号	名称	口径
A	硬化剤 IN	硬化剤タンク (10L)
B	硬化剤 OUT	1/4 “チューブ継手
C	窒素 IN	Rc1/2
D	ドレン	Rc1/4
E	排気	R1/2

品番	品名
1	硬化剤タンク (10L)
2	硬化剤移送ポンプ
3	ねじ込み式ボールバルブ (15A)
4	ねじ込み式ボールバルブ (8A)
5	ねじ込み式チャッキバルブ (15A)
6	減圧弁 (15A)
7	安全弁 (15A)
8	硬化剤質量流量計 (呼び口径：2mm)
9	レベルスイッチ
10	圧力センサー
11	圧力計
12	架台
13	キャスター
14	レベルアジャスター
15	中継BOX

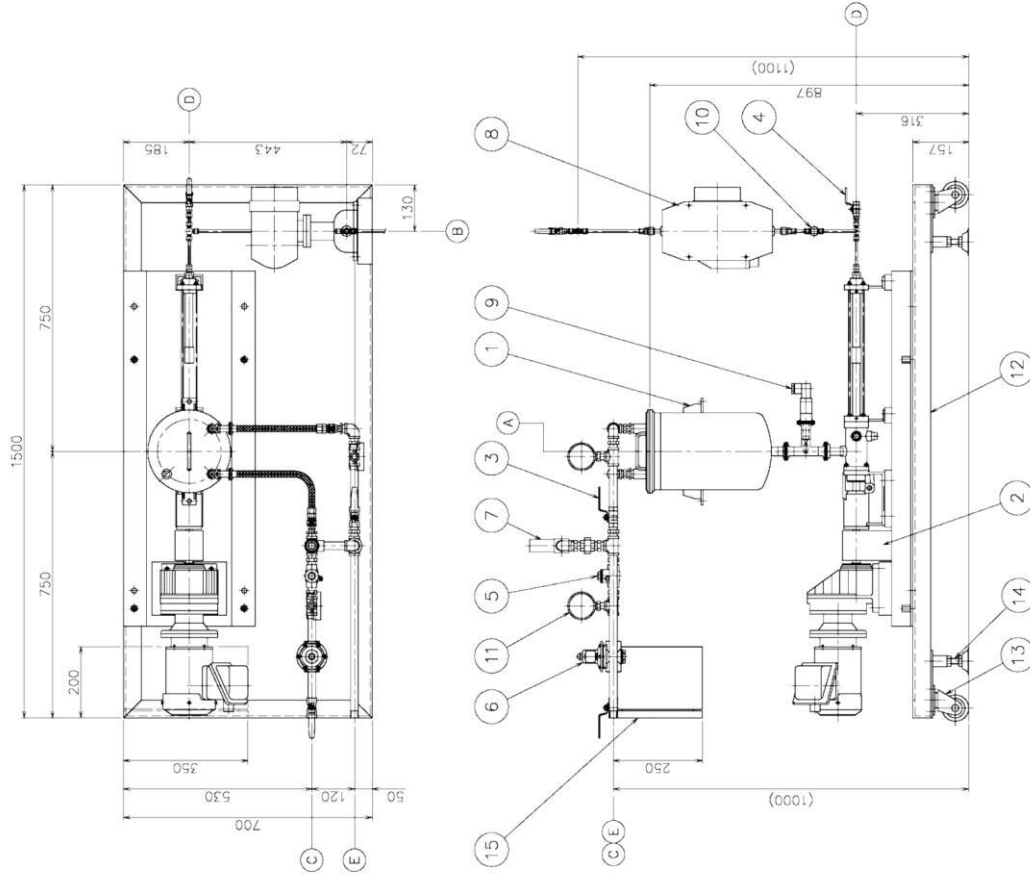
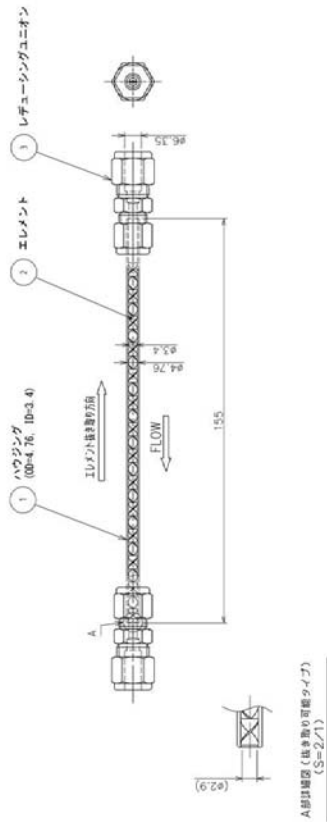


図 5.3-69 原位置レジン注入試験装置ユニット2の外形図



記号	名称	口径
A	主剤 IN	1/4 “チューブ継手
B	硬化剤 IN	1/4 “チューブ継手
C	主剤+硬化剤 OUT	1/4 “チューブ継手
D	ドレン	1/4 “チューブ継手

品番	品名
1	スタティックミキサー
2	ボールバルブ (1/4 “)
3	ポペット式逆止弁 (1/4 “)
4	圧力センサー
5	架台
6	キャスター
7	レベルアジャスター
8	中継BOX

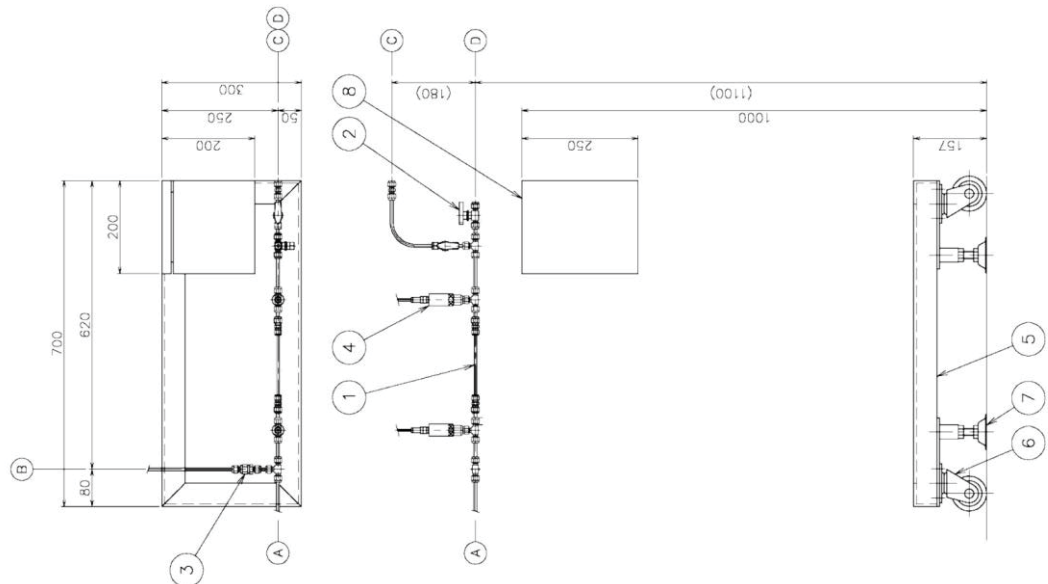


図 5.3-70 原位置レジン注入試験装置ユニット3の外形図

銘板表

No.	名称
1	原位置レジン注入試験装置
2	電源ランプ
3	セレクトスイッチ (手動/自動の切換え)
4	自動運転起動 (照明式押釦スイッチ)
5	自動運転停止 (照明式押釦スイッチ)
6	ブザー停止 (照明式押釦スイッチ)
7	異常リセット (照明式押釦スイッチ)
8	非常停止 (照明式押釦スイッチ)
9	
10	
11	主剤流量指示調節計 (デジタル指示調節計)
12	硬化剤流量指示調節計 (デジタル指示調節計)
13	主剤圧力指示計 (デジタル指示調節計)
14	硬化剤圧力指示計 (デジタル指示調節計)
15	ミキサー入口圧力指示計 (デジタル指示調節計)
16	ミキサー出口圧力指示計 (デジタル指示調節計)

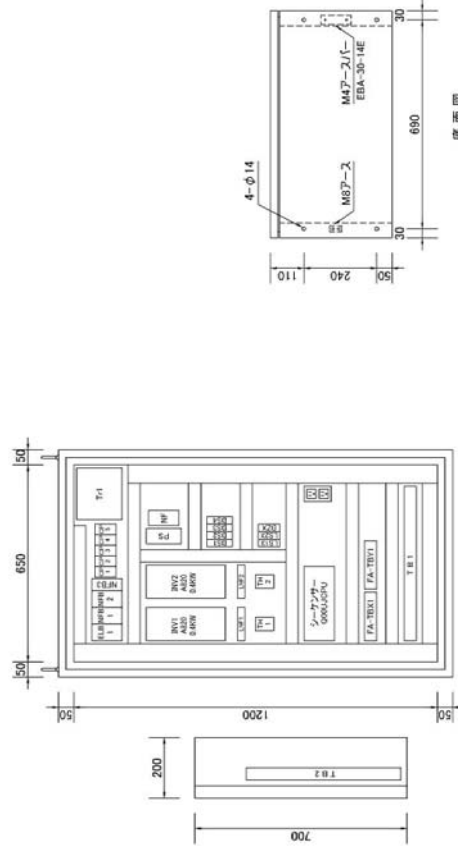
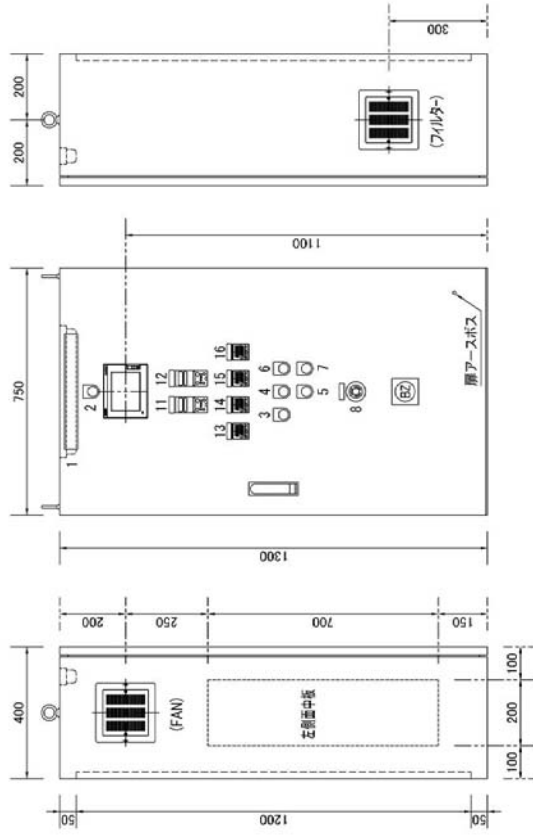


図 5.3-71 原位置レジン注入試験装置制御盤の外形図

(5) 制御盤の操作

原位置レジジン注入試験装置のシーケンス制御による動作フローを図 5.3-72 に示す。

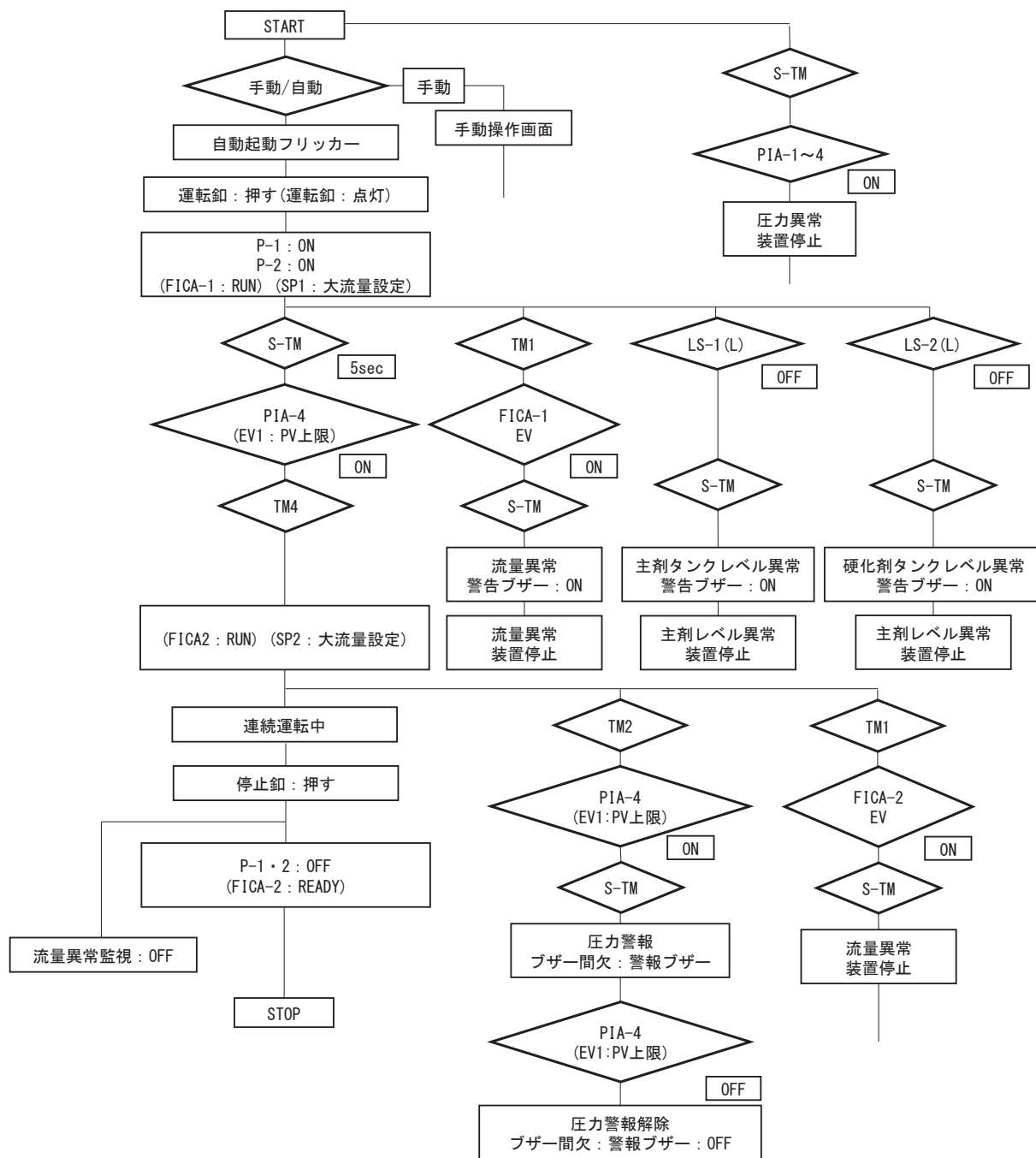


図 5.3-72 シーケンス動作フローチャート

装置の操作は、制御盤のタッチパネルから行う。制御盤の電源を投入すると、タッチパネルには図 5.3-73 の画面が表示される。

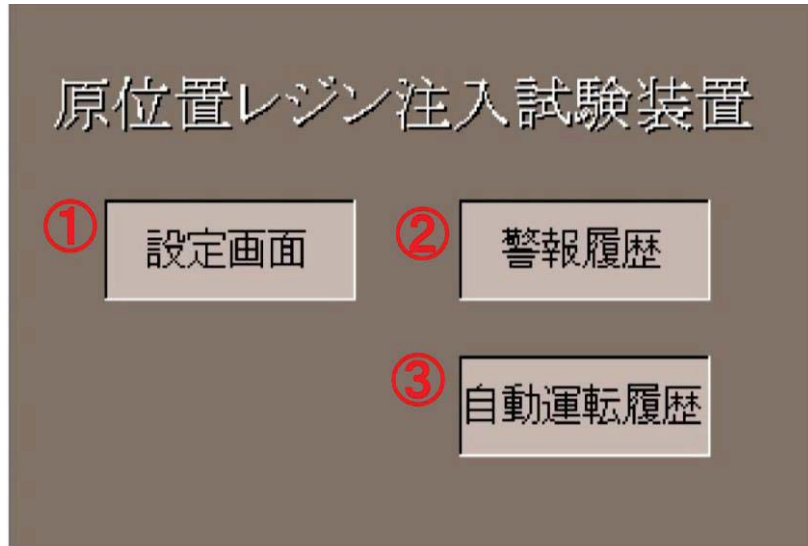


図 5.3-73 制御盤のメニュー画面

設定画面では、以下の項目を設定できる。

- ① 流量異常を検知する範囲
- ② 主剤ポンプ、硬化剤ポンプ、ミキサー入口圧力、ミキサー出口圧力の上限值
- ③ 遅延タイマーの設定（異常時の警報、流量を切り替えるまでの遅延時間）

①の設定は、主剤と硬化剤の混合比率の精度に関わる設定である。

②の設定は、圧力センサーを設置した箇所での限界圧力の設定と、流量を大流量（SP1）から小流量（SP2）へ切り替える際の出口圧力を設定することができる。詳しくは、性能確認試験の Case3 を参照されたい。

③の設定は、警報や異常を出すまでの遅延時間を設定できる。また、大流量（SP1）運転時に出口圧力が②の設定で入力した値に達した際、小流量（SP2）運転に切り替わるまでの遅延時間を設定することができる。

設定完了後、制御盤中央にあるセレクトスイッチで手動と自動を選択し、それぞれの運転のための操作画面に移行する。

手動運転では、主剤移送ポンプ、硬化剤移送ポンプを独立して操作することが可能である。設定できる項目は、図 5.3-74 に示すポンプのインバーター周波数のみである。



図 5.3-74 手動運転時の操作画面

つぎに、自動運転では、図 5.3-75 に示すように出口流量を設定することができる。主剤と硬化剤の混合比は 3 : 1 に固定しているため、出口流量を入力することで主剤と硬化剤の流量が自動的に設定される。ここで、出口流量として 2 箇所入力が可能であるが、これは、前述した大流量 (SP1) と小流量 (SP2) を指す。上段が大流量 (SP1)、下段が小流量 (SP2) の入力箇所である。

このように、基本的に吐出側の流量を設定するだけで制御できる簡単な仕様とした。なお、装置の各所に設置している圧力センサーの測定値、流量計の測定値、およびインバーター周波数は、坑道に設置されているデータロガーに出力できるようにした。



図 5.3-75 自動運転時の操作画面

(6) 性能確認試験

a. 無脈動ポンプの低速・高圧時の流量安定性

昨年度課題であった、無脈動ポンプの低速・高圧時の流量安定性について、試作で使用したポンプと同型式のテスト機で実力値ベースでの確認を行った。確認方法は、以下のとおりである。

- ① 5.75ml/min を目安とし、ポンプ回転速度を設定
- ② ニードル弁で圧力を設定し、連続運転
- ③ 吐出量をはかりにて計量（1分計測）×10回
- ④ 10回のばらつきを確認
- ⑤ 圧力条件を変え、②～④を繰り返す

測定結果を図 5.3-76 に示す。低速・高圧時においても極端なばらつきはなく、ある程度、連続して安定した流量が吐出できることが確認できた。

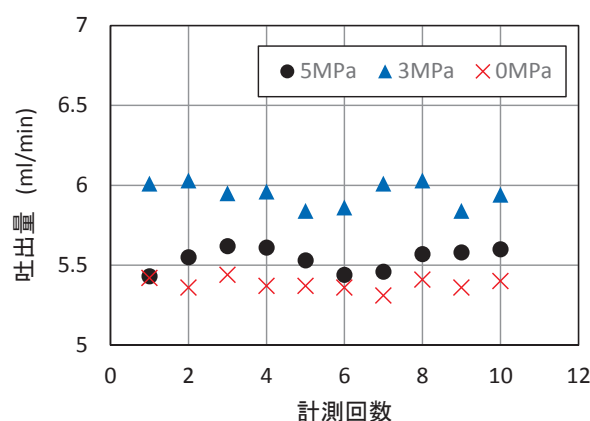


図 5.3-76 移送ポンプの流量安定性の確認結果

b. 主剤・硬化剤移送ポンプの性能確認試験

主剤・硬化剤移送ポンプの性能確認は、ミキサーユニットで連結した箇所を遮断し、それぞれのポンプで行った。具体的には制御盤のタッチパネルで設定できるそれぞれのポンプのインバーター周波数を調整して運転し、インバーター周波数と流量計の測定値（吐出流量）との関係を確認した。なお、使用流体は水、主剤、硬化剤の3種類とし、ポンプの出口を大気圧に開放した状態で行った。また、温度は室温で16.5℃の条件で行った。

性能確認試験の結果を図 5.3-77 に示す。インバーター周波数と吐出流量との関係は良い相関が認められる。

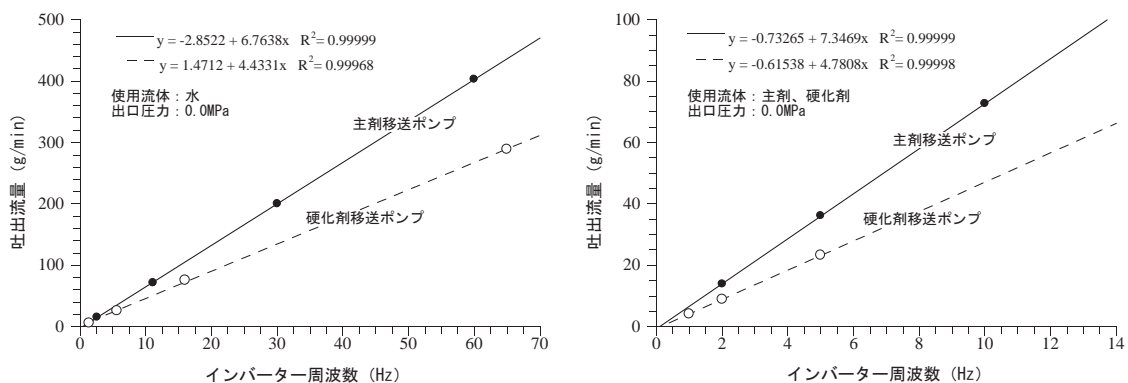


図 5.3-77 主剤・硬化剤移送ポンプの性能確認試験結果（周波数と流量の関係）

c. 原位置レジン注入試験装置の性能確認試験

原位置レジン注入試験装置の性能確認は、ミキサーユニットと連結して、主剤と硬化剤の混合液が制御どおり吐出できるかを確認する目的で行った。以下のとおり4つの試験を実施した。なお、Case 1、Case 2、Case 4では、混合されたレジンを採取し、目視及び触診による硬化確認を行った。

- ① ミキサー出口を大気圧に開放した状態で、ミキサー出口の設定流量を制御盤のタッチパネルで、60g/min、30g/min、100g/minと変化させて、制御盤に表示される測定値を記録する。
- ② ミキサー出口に設置したバルブを用いて出口圧力を4.0MPa程度にし、ミキサー出口の設定流量を制御盤のタッチパネルで、100g/min、60g/min、30g/minと変化させて、制御盤に表示される測定値を記録する。
- ③ 制御盤のタッチパネルで設定した出口の上限圧力（3.0MPa）を感知し、設定流量SP1（大流量）から設定流量SP2（小流量）への切換えが行われるかを確認する。また、設定流量SP2移行後、仕様最高全圧力（5.0MPa）を感知した場合に、装置が自動停止するかを確認する。なお、圧力はミキサー出口に設置したバルブで制御する。
- ④ ミキサー出口に設置したバルブを用いて出口圧力を3.0MPa程度にした後、装置を1時間程度連続稼働させ、流量安定性を確認する。なお、圧力はミキサー出口に設置したバルブで制御する。

Case 1の試験結果を図5.3-78に示す。Case 1の試験では、ミキサー出口が大気圧に解放されている。その条件で、出口流量を60g/min、30g/min、100g/minと変化させて、流量安定性を確認した。図を見て分かるように、急激な流量低下直後に流量、圧力ともに脈動していることが確認できる。とくに、粘性の低い硬化剤を移送しているポンプ近傍の圧力の脈動が大きい。これは、管内の流れを急激に変化させたことによって生じたウォーターハンマー（水撃作用）によるものと考えられる。一

方、出口流量は脈動が小さい。出口流量は単純に主剤流量と硬化剤流量を足し合わせたものであり、計測値ではない。したがって、混合比 3 : 1 になるように制御が働いたものと思われる。また、ミキサー出口圧力は、ウォーターハンマーにより負圧になっているが、ほとんど脈動していない。これは、スタティックミキサーが管内の速度分布を均一化する効果が作用したものと考えられる。なお、出口流量が 30g/min から 100g/min に変化するにともない、それぞれの圧力値が上昇しているが、これは圧力損失の影響である。ミキサー出口圧力の圧力変化は 0.05MPa 程度であり、表 5.3-8 に示したミキサーの計算圧損と調和的である。

各流量で稼働している際に採取したレジンのサンプルは、ベタつきもなく完全に硬化しており、混合性においても問題ないと判断した。

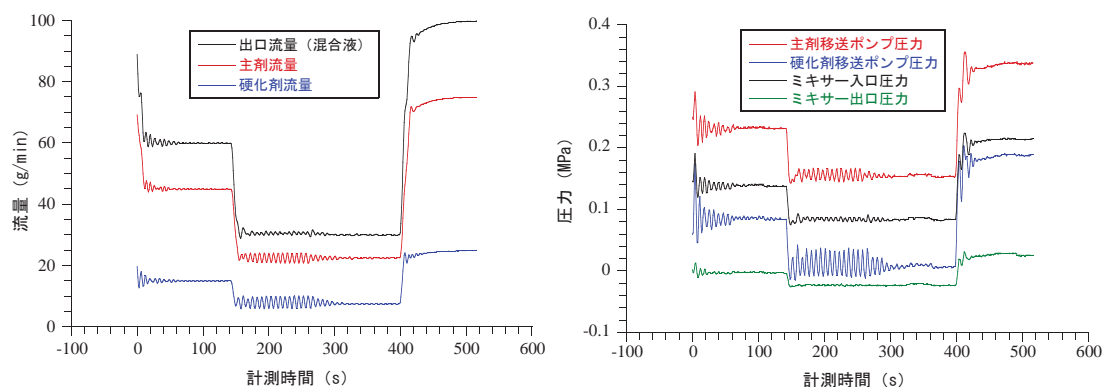


図 5.3-78 Case 1 の試験結果 (流量と圧力の挙動)

Case 2 の試験結果を図 5.3-79 に示す。Case 2 の試験では、高圧下での流量安定性を確認するために、ミキサー出口に設置したバルブを締め、出口圧力を 4.0MPa 程度に設定した。

Case 1 の試験結果とは異なり、急激な流量低下直後でも流量については脈動していないことが確認できる。圧力は出口をバルブで締めて放置しているだけなので、応力緩和により圧力が低下したものである。

各流量で稼働している際に採取したレジンのサンプルは、ベタつきもなく完全に硬化しており、混合性においても問題ないと判断した。また、試験終了後に 300g 程度レジンを容器に採取し、温度上昇法による可使時間の測定を行った。温度は室温 (16.5℃) の条件で行った。図 5.3-80 に結果を示す。立ち上がりの時刻は 160 分であり、可使時間は 112 分と評価した。硬化したレジンは、ベタつきもなく完全に硬化しており、混合性においても問題ないと判断した。

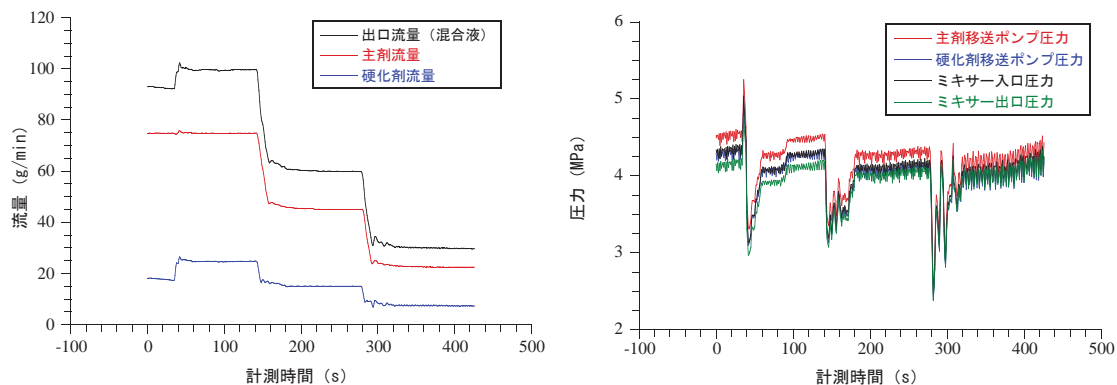


図 5.3-79 Case 2 の試験結果 (流量と圧力の挙動)

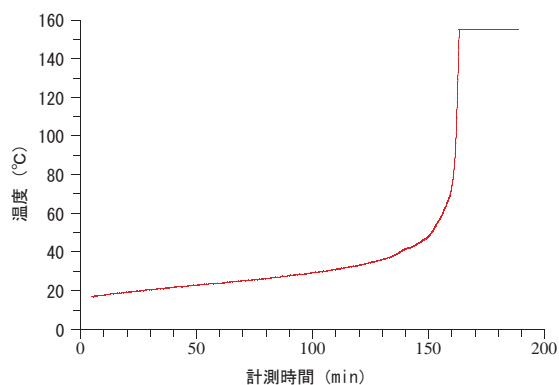


図 5.3-80 装置から採取したレジンの硬化中の温度変化

Case 3 の試験結果を図 5.3-81 に示す。Case 3 の試験では制御機能を検証する目的で実施した。試験開始時の出口流量の設定値は 100g/min である。

図を見て分かるように、出口圧力が 3.0MPa を超過したと同時に、出口流量が 100g/min から 60g/min に変化し、さらに、出口圧力が 5.0MPa を超過した時に装置が停止 (流量 0) していることが確認できる。以上のことより、自動制御がうまく機能していることが確認できた。

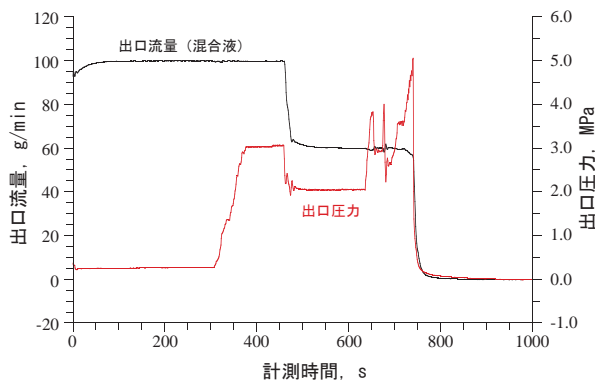


図 5.3-81 Case 3 の試験結果 (流量と圧力の挙動)

Case 4 の試験結果を図 5.3-82 と表 5.3-12 に示す。なお表の値の算定には、500～4000 秒の区間のデータを用いた。出口流量の設定値は 100g/min である。

試験中の流量は脈動なく安定しており、また、出口流量の標準偏差も小さい (0.1%)。このことから、本装置の高圧下における流量安定性は確認できたと考えられる。なお、試験中の圧力が変動しているが、これはモノポンプのステーターとロータの摩擦により流体に熱が伝わり、バルブを閉鎖して放置したままでは圧力が上昇してしまうため、仕様最高圧力 5.0MPa を超えないように手動でバルブを操作したためである。

試験開始前後に採取したレジンのサンプルは、ベタつきもなく完全に硬化しており、混合性においても問題ないと判断した。

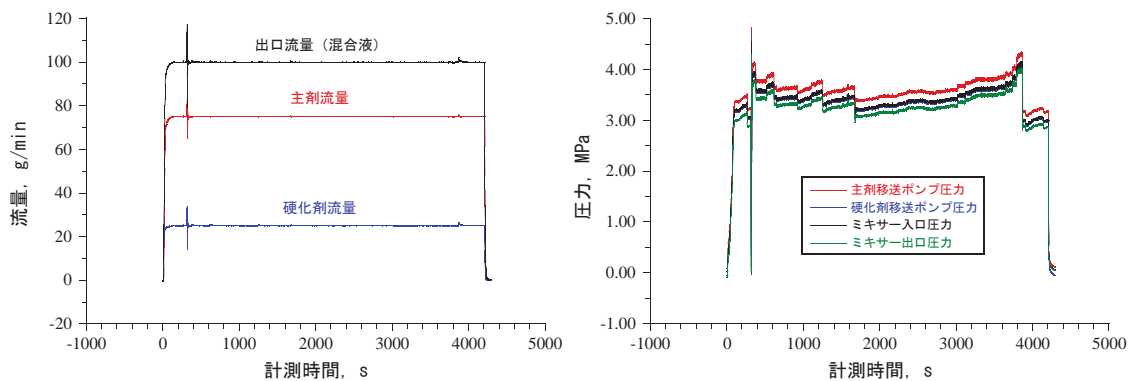


図 5.3-82 Case4 の試験結果 (流量と圧力の挙動)

表 5.3-12 Case4 の試験結果 (流量の統計)

測定項目	設定値	測定値 (平均)	測定値 (最大)	測定値 (最小)	測定値 (標準偏差)
主剤流量 (g/min)	75	74.946	75.68	74.82	0.03
硬化剤流量 (g/min)	25	24.995	26.37	24.64	0.08
出口流量 (g/min) ※主剤と硬化剤の合算	100	99.942	102.01	99.46	0.10

(7) まとめ

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で計画されている原位置レジ注入試験に必要な装置を試作した。具体的には、2液混合型エポキシ樹脂系接着剤 (レジ) を高地下水圧環境下 (約 5.0MPa) において、脈動が極めて小さく、主剤と硬化剤の混合比を一定に保て、一定品質のレジを送ることができるポンプを試作した。また、その性能を確認するための試験も実施した。同装置には、割れ目幅の急激な変化に伴う圧力変化 (圧力上昇) に瞬時に対応可能な制御機能 (インターロック機能) が組み込まれており、同機能が適切に動作することを確認した。

本装置は、制御盤で入力できる出口流量の範囲を 23g/min～100g/min で固定している。下限値については、仮に 23g/min 以下を入力できるよう変更したとしても、ポンプの性能に限界があり吐出できない可能性が高い。一方、上限値についてはスタティックミキサーの仕様はそのまま混合性能に問題がないため変更は可能であるが、流量が増えると圧力損失も増加するため、5.0MPa を超えない範囲での使用が求められる。また、流量計の測定範囲が、主剤 100g/min、硬化剤 50g/min までであるため、それを超える設定にした場合は、タッチパネルに流量が表示されなくなる。したがって、タッチパネルで表示可能な範囲で考えると、133g/min まで出口流量の範囲を拡張することができる。

一方、周波数と吐出量の検量結果を参考にタッチパネル上で周波数を入力して手動運転するのであれば、133g/min 以上での手動運転は可能であると考えられる。今後の課題としたい。

また、吐出口で主剤と硬化剤を混合するため、レジン硬化に伴う反応熱は低いと予想されるが、試験区間のデッドボリュームにレジンを満たす際には注意が必要であると考えられる。したがって、いかに試験区間のデッドボリュームを軽減するかが課題として挙げられる。

5.3.6 レジン特性試験

本試験では、原位置レジン注入試験に使用するレジンの要求性能を決定するための参考資料を得る目的で選定したレジンの物性試験を実施している。昨年度はレジンの原位置環境（温度、塩分）の変化が及ぼす影響を把握し、さらにレジンに添加する蛍光剤の検討を行った。その結果、選定したレジンでは地下水の温度（約 20℃）の条件下での管理が最適であり、塩分を含む水中環境（模擬海水）下では硬化不良や接着強度の低下を引き起こすことを確認した。レジンに添加する蛍光剤の発光は、レジンの pH に依存し、レジン混合後の反応熱の増加に伴い消光が確認された。また蛍光剤がレジンよりも水に溶けやすいため、レジンに添加した蛍光剤が水中環境で分離している可能性が考えられた。今年度はより原位置環境に近い条件下におけるレジンの物性試験を実施し、さらにレジンの反応熱により消光しにくく水への分離もしない新たな蛍光剤の選定も行う。

5.3.6.1 割れ目内でのレジン反応熱測定試験

原位置レジン注入試験に用いるレジンにはエポキシ樹脂系接着剤である。エポキシ樹脂系接着剤は、主剤と硬化剤との混合（化学反応）により発熱し硬化する。その際の温度や温度変化は、混合する量や周辺環境によって大きく変化する。昨年度行った温度上昇法による可使時間の測定によると、ビーカー内で主剤と硬化剤を混合した際の発熱温度は 155℃以上まで上昇することを確認している。一方、注入対象が割れ目である場合、割れ目が反応熱を放散してしまう放熱系であるため、割れ目内の混合物は、ビーカー内で確認された温度まで上昇しないと考えられる。また、使用しているレジンには硬化するためには熱が必要であり、反応熱の最高温度や上昇時間は、可使時間や硬化の状態に影響を及ぼすと考えられる。そこで今年度は、放熱系である割れ目内にレジンを注入した際、反応熱がどの程度まで上昇するのかを確認するとともに、割れ目内でのレジンの反応熱と硬化との関係を考察した。

(1) アクリル板による模擬割れ目内のレジン反応熱測定試験

割れ目が反応熱をなるべく放散しない条件下で、1mm 幅の模擬割れ目におけるレジンの反応熱がどれくらい上がるか確認した。試験概念図を図 5.3.6-1 に示す。供試体は 30.0cm×30.0cm×0.2cm のアクリル板の四隅に 1.0mm のステンレス製スペーサーを接着し、中央に直径 10mm のレジン注入用の円孔を設けた 30.0cm×30.0cm×0.2cm アクリル板を重ね合わせ、中央の円孔からシリンジポンプ (Model. 44, HARVARD APPARATUS) 用いてレジンを流し込む。アクリル板上盤には図 5.3.6-2 に示す位置に直径 10mm の温度測定用の円孔を計 6 箇所 (φ 50, φ 100, φ 150, φ 200, φ 250, φ 300) 設け、熱電対を図 5.3.6-3 (a))。断熱材として 27.0cm×27.0cm×0.2cm の発泡スチロールを 2 枚用意し、それぞれ上下アクリル板の外側に重ね合わせ (図 5.3.6-3 (b))、エア抜き用に一部を除き、テープで 2 枚のアクリル板をテーピングした。試験体は 36.0cm×36.0cm×10.5cm のアクリル 5 面体水槽内に設置した。使用するレジン (EP-400M) には 100ppm 濃度の蛍光剤フルオレセインを

添加し、室温 24.2℃、湿度 22%RH の環境下で、注入流量 2ml/min で注入を行った。温度測定には K 熱電対を使用し、データロガー (TDS-530、東京測器研究所) に測定結果を記録した。注入孔より注入したレジンは図 5.3.6-3 (c) のように中央から外側に向かって広がり割れ目内を満たした。レジンが割れ目内を充填したことを確認後、レジン注入を終了し、発砲スチロール上盤をアクリル板上盤に設置し養生した (図 5.3.6-3 (d))。

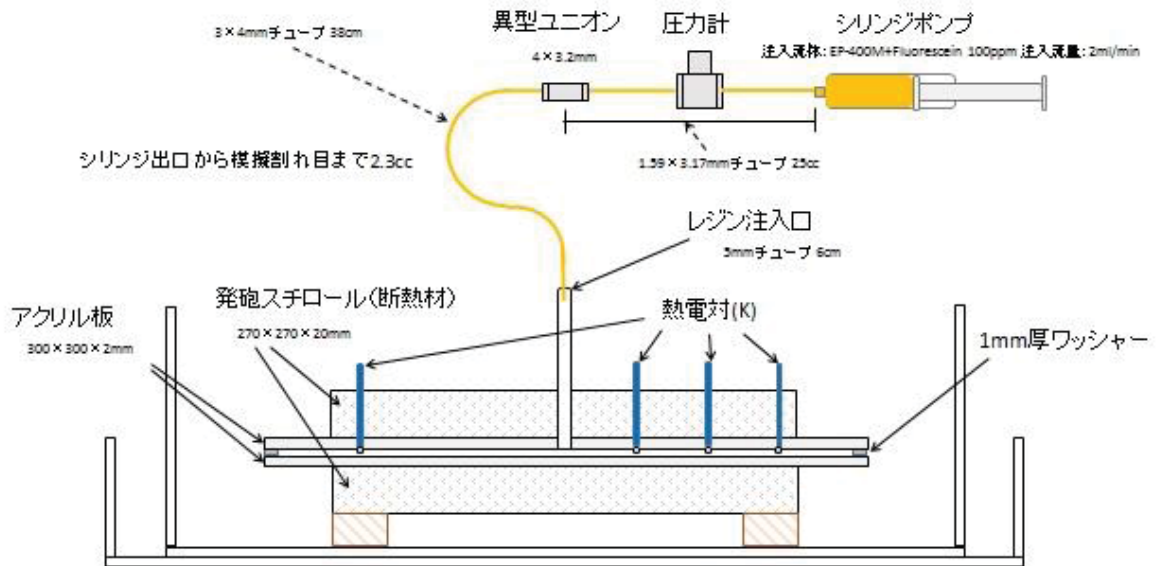


図 5.3.6-1 アクリル板によるレジン反応熱試験概念図

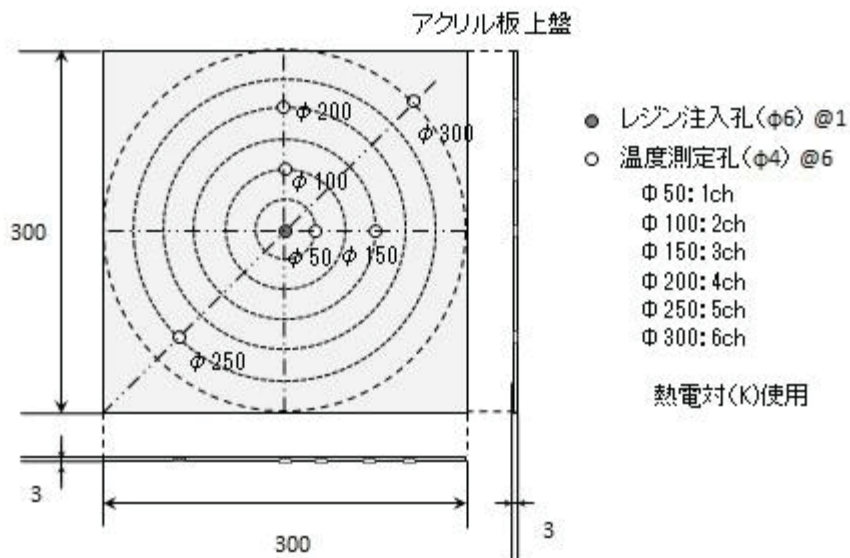


図 5.3.6-2 アクリル板上盤に作成するレジン注入孔と温度測定孔の位置

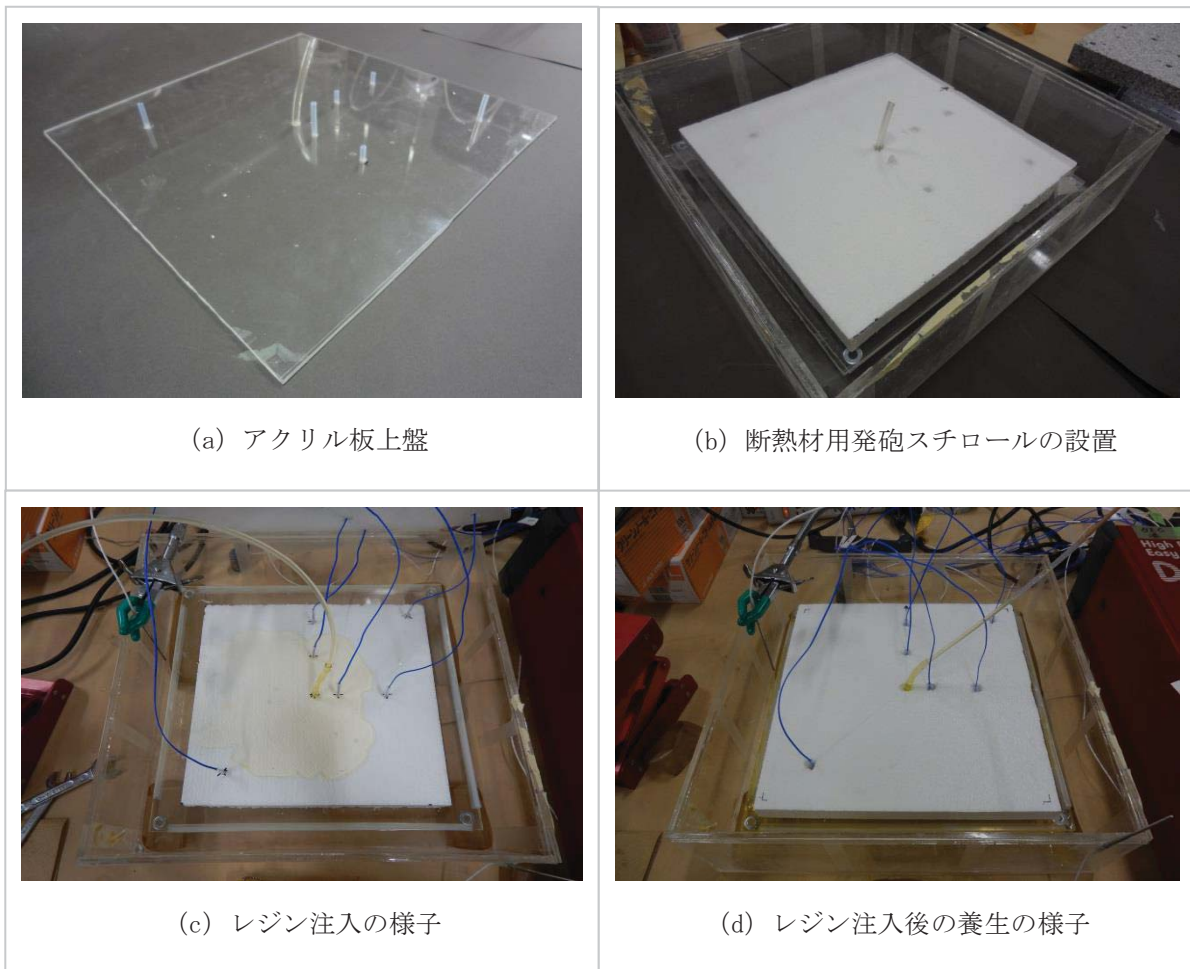


図 5.3.6-3 アクリル板によるレジン反応熱測定試験の実施状況

養生中も供試体周辺環境は温度計(おんどとり TR-71wf、T&D CORPORATION)と温湿度計(おんどとり TR-72wf-H、T&D CORPORATION)を用いて測定した。割れ目内レジン反応熱の温度測定結果を図 5.3.6-4 に示す。またレジン注入している間は、図 5.3.6-3 (c) のようにアクリル板を通してレジンの割れ目内での充填状況が観察できたことから、各測定点にレジンが到達した際の時刻と温度を目視で確認した。各測定点での温度測定開始から 120 分間の温度測定結果を図 5.3.6-5 として示す。表 5.3.6-1 に各測定点における温度測定結果を示す。

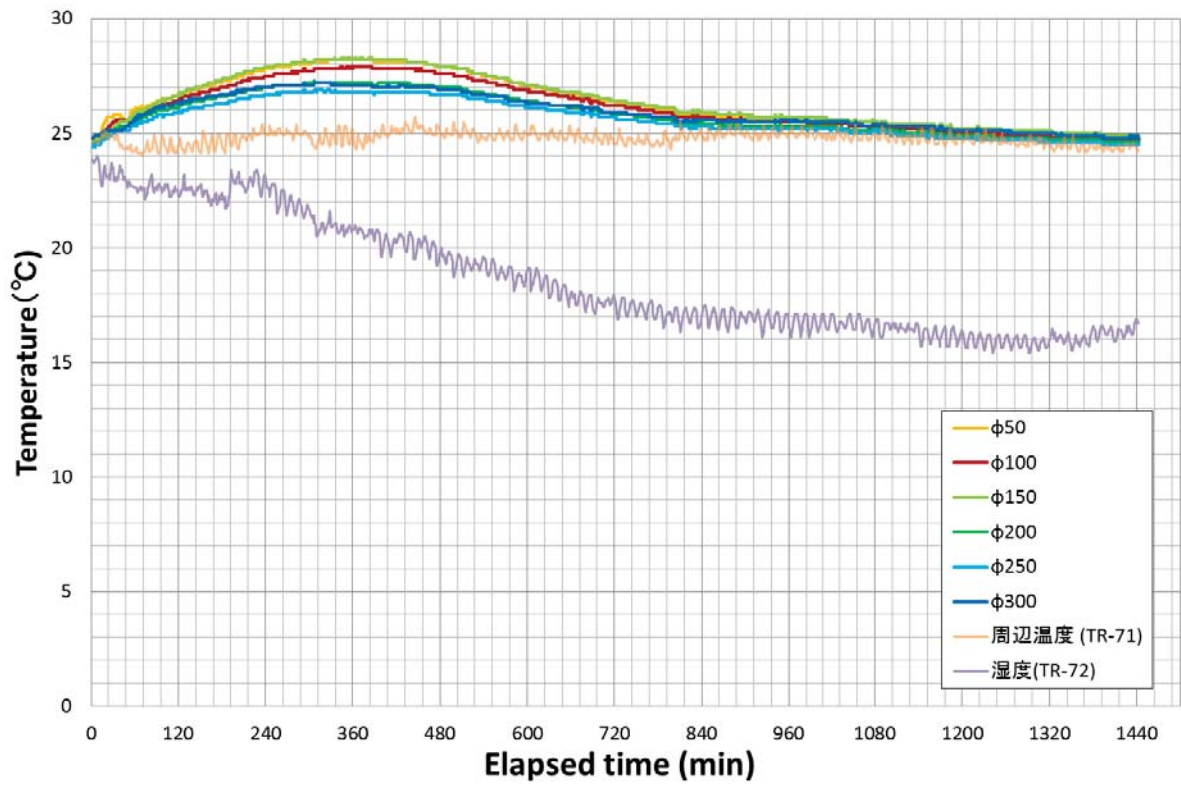


図 5.3.6-4 割れ目内レジン反応熱測定結果

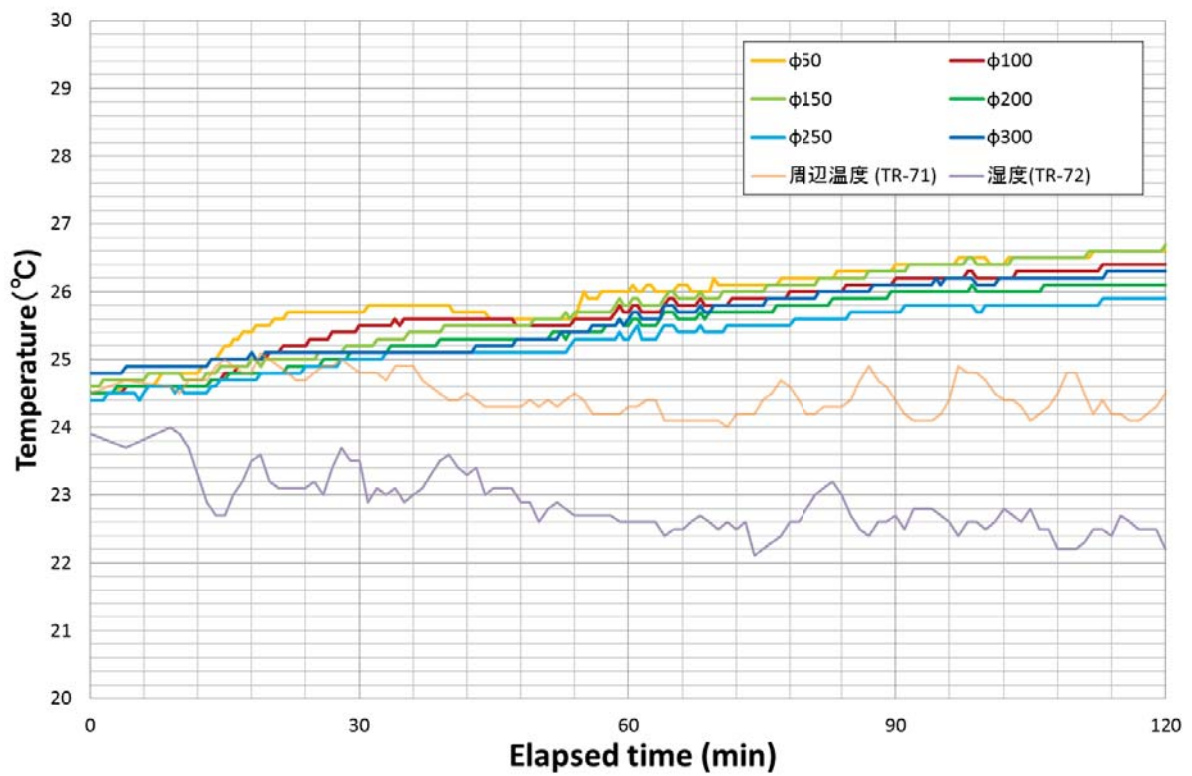


図 5.3.6-5 割れ目内レジン反応熱測定結果 (0~120 分間)

表 5.3.6-1 目視による割れ目内レジン到達時の温度測定結果

測定点	レジン到達時刻 (min)	レジン到達時温度 (°C)	最高温度 (°C)
φ 50	10	24.8	28.2
φ 100	14	24.7	27.9
φ 150	21	25	28.3
φ 200	22	24.9	27.3
φ 250	23	24.8	26.9
φ 300	39	25.1	27.2

供試体の周辺温度は測定期間中 25°C前後でほぼ一定であった。割れ目に注入されたレジンの温度はどの測定点でも徐々に上昇し、最高温度を記録した後、徐々に下降していくことを確認した。各測定点にレジンが到達した時の温度は、測定点のレジン注入孔からの距離に関わらず、24.9±0.2°Cであり、これは本試験で使用したシース熱電対のもつ性能誤差の範囲(±0.2°C)である。測定点の位置により温度上昇幅にはおよそ2つの傾向があり、φ 50, φ 100, φ 150 と φ 200, φ 250, φ 300の間にはおよそ1°Cの温度差があった。また図 5.3.6-5の測定結果では測定開始から約10分間経過したところで、φ 50の測定結果に温度上昇が見られた。この時刻と温度は表 5.3.6-1のφ 50のレジン到達時刻に一致しており、その後φ 50の温度は25.8°Cまで温度上昇した後、徐々に減少し、経過60分後には他の測定点の示す温度変化と同様の傾向を示している。φ 50はレジン注入口から最も近い位置にあり、注入開始直後は割れ目内への放熱の影響をあまり受けないままレジンが到達したことによる温度上昇であると考えられる。温度測定点の位置による温度上昇の差は見られたが、アクリル板によるレジン反応熱は最大で3.5°C程度であった。

(2) 岩石模型による模擬割れ目内のレジン反応熱測定試験

模擬割れ目を有する岩石模型を用いて、水中環境下における割れ目内でのレジンの反応熱を測定した。試験概念図を図 5.3.6-6に示す。図 5.3.6-7にはそれぞれの岩石の寸法を示す。供試体は26.0cm×26.0cm×3.0cmの花崗岩盤(図 5.3.6-8(a))の四隅に1.0mmのステンレス製スペーサーを接着し、中央に直径10mmのレジン注入用の円孔を設けた25.0cm×25.0cm×3.0cmの花崗岩盤(図 5.3.6-8(b))を重ね合わせ、中央の円孔からシリンジポンプ(Mode1.44, HARVARD APPARATUS)を用いてレジンを流し込む。供試体上部に図 5.3.6-2に示す位置に直径10mmの温度測定用の円孔を計6箇所(φ 50, φ 100, φ 150, φ 200, φ 250, φ 300)設けた。また注入したレジンが模型外に流出することを防止するために流出防止用の岩盤(図 5.3.6-8(c))を図 5.3.6-8(d)のように供試体下部の周囲に接着した。流出防止用岩盤側面2箇所および供試体下部側面2箇所(図 5.3.6-7)には、測温機能付ひずみゲージ(QFLA-5T-11-6FB-6LT、東京測器研究所)を専用接着剤(CN-E、東京測器研究所)で張り付け、防水処理を行った。温度測定には耐水処理を施したシース熱電対(TMB-

TS32 II /316L-35-TX15-6000、山里産業)を固定した。レジンを注入孔にはミニチュアボールバルブ (AML11、OKD)を設置し、レジン注入終了後にはこのバルブを閉めてレジンを養生した。供試体を40.0cm×40.0cm×12.0cmの亚克力5面体水槽内に設置し、蒸留水を9ℓ注ぎ込みスターラーで攪拌させながら水温を一定に保った状態で一週間程度養生した。試験条件は水槽内温度を23℃に調整した場合および30℃に調整した場合の2ケースとした。両ケースともに槽内湿度50%に設定した恒温恒湿槽内で実施した。

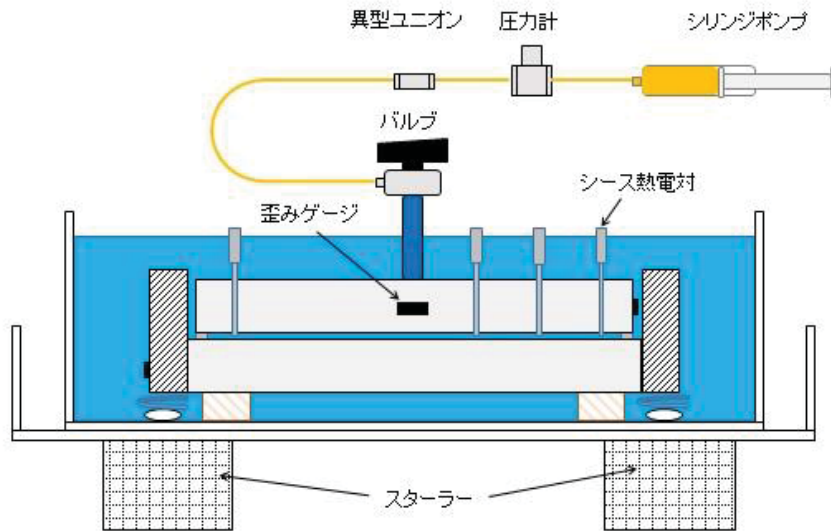


図 5.3.6-6 岩石模型によるレジン反応熱試験概念図

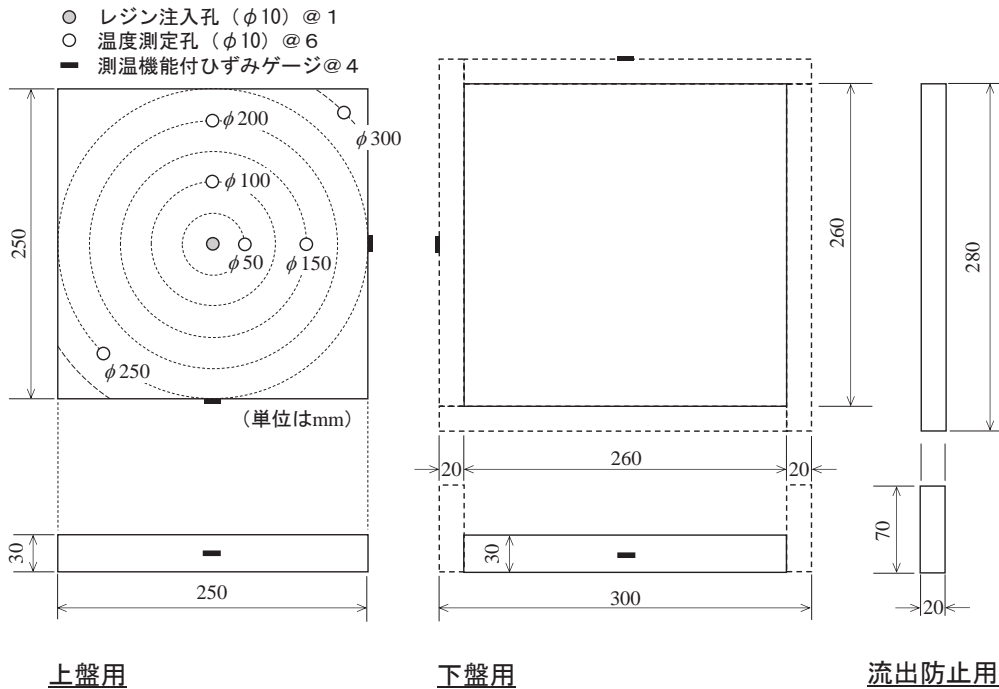


図 5.3.6-7 割れ目模型作成用の岩石の寸法図

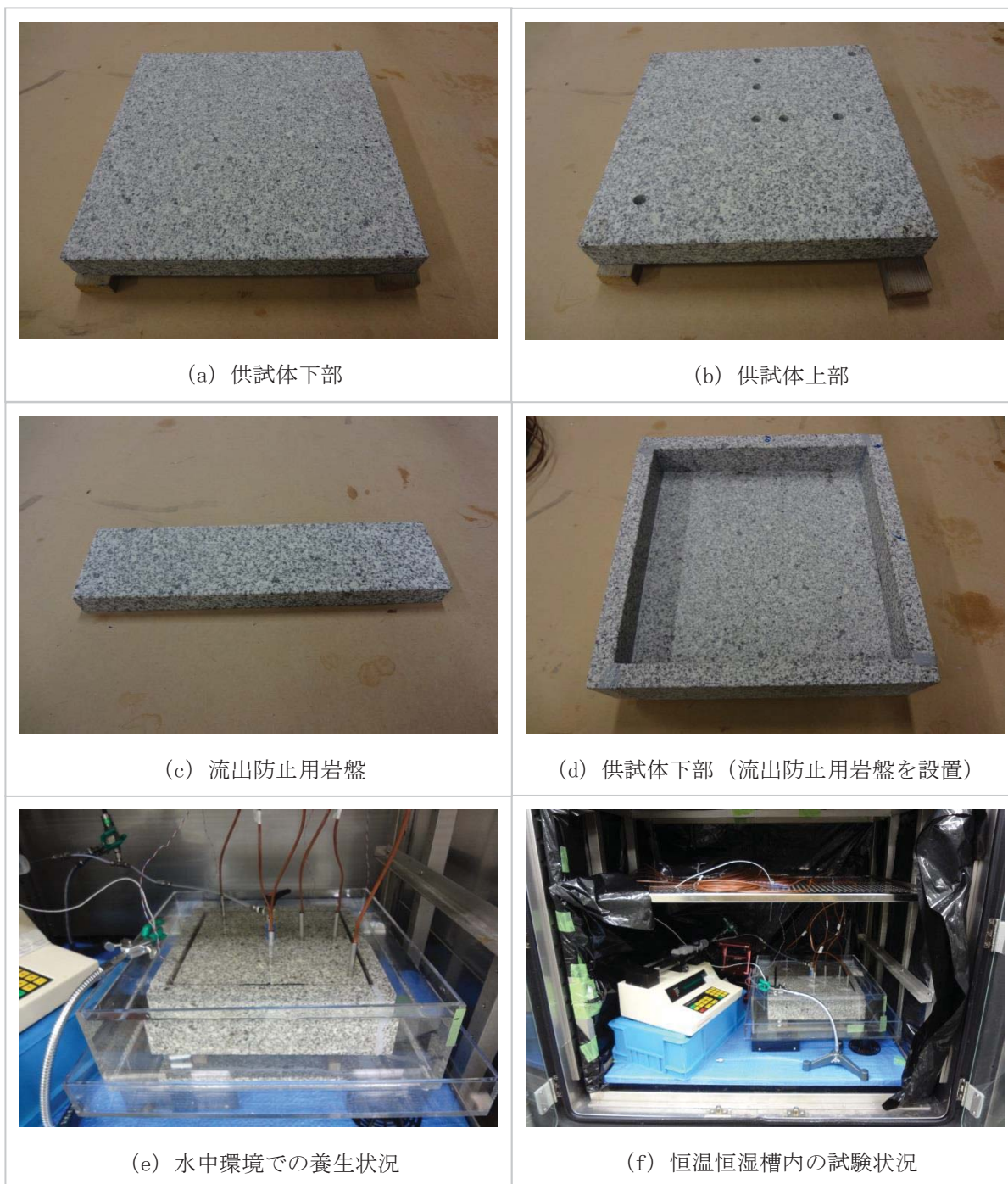


図 5.3.6-8 レジン反応熱試験の供試体と養生状況

1 週間養生後、同じ環境下の恒温恒湿槽で養生したレジン EP-400M に 100ppm のフルオレセインを添加し、注入流量 2ml/min で注入を行った（図 5.3.6-8(f)）。23℃, 50%RH の条件下における結果を図 5.3.6-9、30℃, 50%RH の条件下における結果を図 5.3.6-10 に示す。

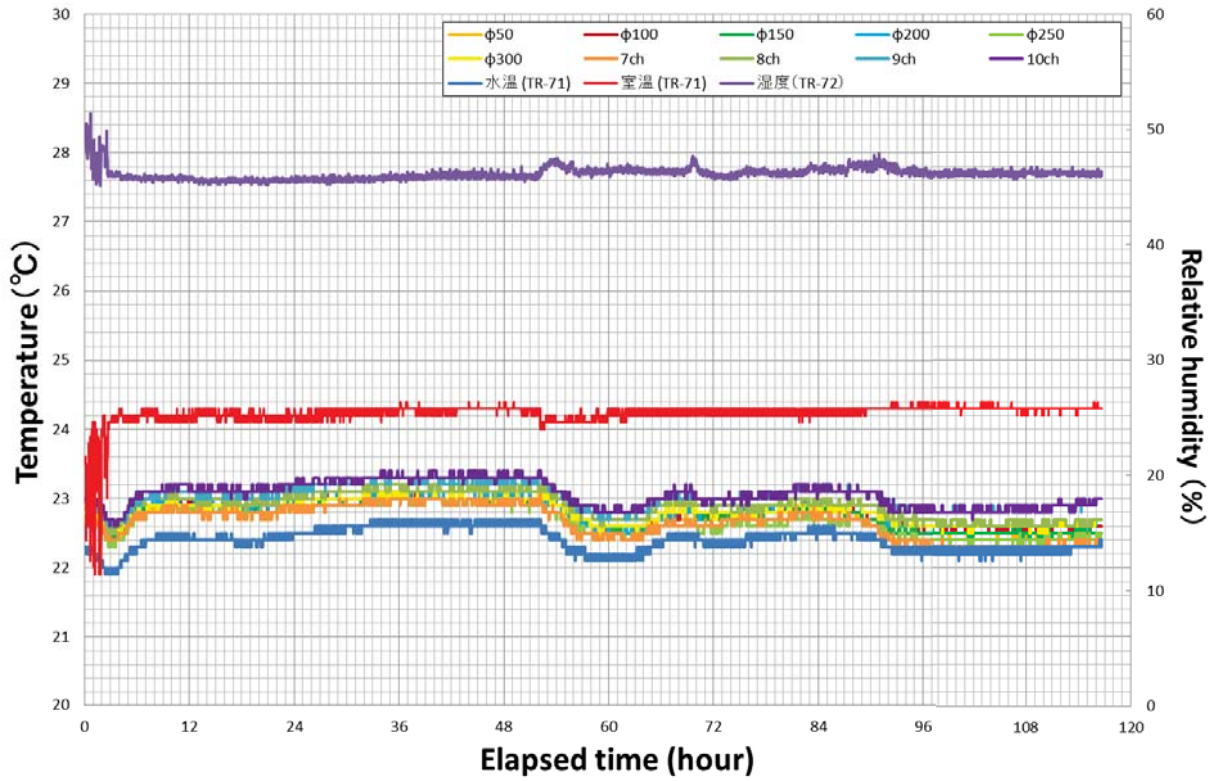


図 5.3.6-9 割れ目内レジンの温度変化 (温度 23°C, 湿度 50%RH)

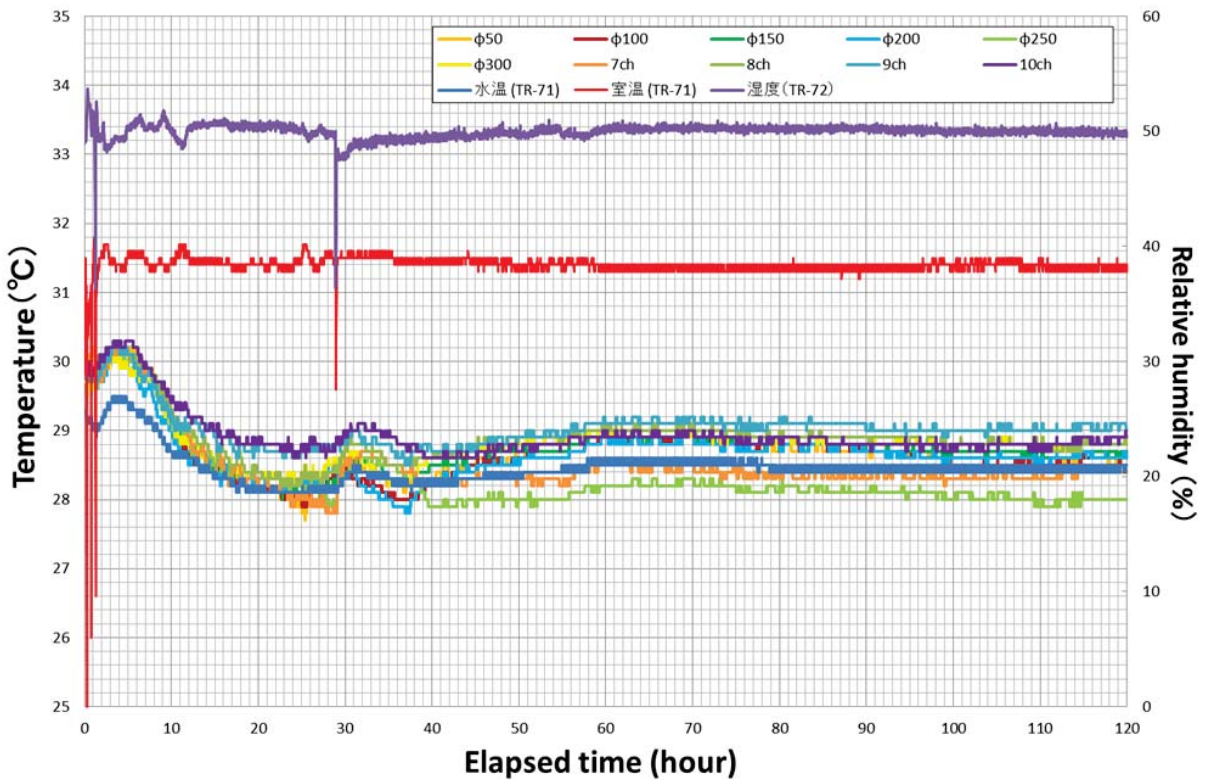


図 5.3.6-10 割れ目内レジンの温度変化 (温度 30°C, 湿度 50%RH)

両グラフとも横軸はデータロガーでの温度測定開始時間を示す。温度測定はレジンを注入後の温度変化を経て、レジンを注入前の水温程度に減少するまでをレジン反応熱を測定する期間と考えた。23℃の条件下ではレジンを注入後全体的に温度が低下し、その後上昇し一定になる傾向が見られた。測定開始から約 52 時間後には温度が減少した。ここまでのレジン反応熱による温度上昇があったと考えると、注入開始から平均して 0.2℃程度の温度上昇が観測された。30℃の条件下では、レジンを注入後全体的に温度が上昇し、その後水温と等しくなるまで温度減少した。その間約 1.2℃程度の温度上昇が観測された。なお、23℃の条件下の場合には測定開始から約 60 時間以降は恒温恒湿度内の湿度変化に追従したため温度変化を観測していると考えられ、また 30℃の条件下の場合には測定開始から約 30 時間のタイミングで人為的な開け閉めがあったため恒温恒湿度槽による自動的な設定環境への温湿度調整が行われたために温度上昇している。

以上の結果より、岩盤模擬割れ目に注入したレジンは反応熱により、23℃条件下では平均 0.2℃程度、30℃条件下では平均 1.2℃程度の温度上昇を示した。アクリル板によるレジン反応熱測定試験では最大 3.5℃程度の温度上昇を観測したことから、岩盤模擬割れ目内では岩盤の比熱の影響により、実際のレジン反応熱ほどに温度上昇しないことを確認した。レジンの硬化については、割れ目内の温度が水温程度まで下がった後、一日経過後に細長い棒などで押して確認してみたところ、人の手で押した程度の硬化は確認できた。原位置レジンを注入後には、硬化までどれくらいの期間地下環境で養生し、その後掘削すべきか期間を決める必要があるため、今後は掘削時に必要な硬度を考慮した養生期間の検討を行う予定である。

5.3.6.2 塩分影響試験

昨年度、模擬海水に投入したレジンが硬化不良を引き起こすことが確認された。レジンを注入する予定の割れ目内には地下水が賦存し、地下水には塩分が少なからず含まれている。したがって、塩分が硬化不良に及ぼす影響を把握する必要がある。そこで、本年度は塩濃度を調整した水を使用し、(1) 硬度測定試験、(2) 可使時間測定および目視による観察、以上の2項目の試験を実施した。

レジンを投入する溶液は、NaClにより塩濃度を調整した異なる2つの濃度の溶液、瑞浪超深地層研究所の深度300m坑道内で採取した地下水、幌延深地層研究センターの深度350m坑道内で採取した地下水とする。表5.3.6-2に各溶液のCl濃度およびpH電極を使用して測定したpHの値を示す(測定環境は室温24.7℃湿度19%RH)。

表 5.3.6-2 NaClにより塩濃度を調整した溶液および地下水のCl濃度

	海水の1/3	海水の1/300	瑞浪地下水	幌延地下水
Cl濃度(mg/L)	6450	64.5	65~128	6000
海水に対するCl濃度の割合(%)	33.33	0.33	0.34~0.66	31.01
pH	5.33 (24.5℃)		8.15 (24.7℃)	7.83 (24.7℃)

(1) 硬度測定試験

レジンと溶液の混合後の計時的な硬度を日本工業規格「プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法」(JIS K 7215-1986)に準拠して実施した。供試体は28.0cm×22.0cmのステンレス製トレイに各溶液333mlを用意し、100ppmのフルオレセインを添加したレジン(EP-400M)666mlを流し込み、厚さ10mm以上のものを作成した。供試体を温度25℃湿度80%に設定した恒温恒湿槽内で2週間養生し、期間毎にデュロメータにて針貫入試験を実施した。測定はレジンと溶液の混合24時間後から24時間おきに針貫入計測を行った。計測箇所は13箇所(図5.3.6-11(e))を2回ずつ行い、その平均をその箇所の硬度とした。デュロメータはタイプA(図5.3.6-12(c))、タイプD(図5.3.6-12(d))を用意した。測定初日からタイプAの測定限界90を超えており、タイプDの計測を試みたがタイプDで計測するには硬化が不十分で計測不可であった。そこで、硬化が確認された3日目以降にタイプDにより計測を行った。これは一昨年度に実施したレジンのみの硬化試験時も同様の結果であった。また、タイプDの重錘はJIS K 7215-1986によると約50N(約5kgf)であることが望ましいと記載されていたが実際50Nの重錘を使用して計測してみると硬化不十分で計測が出来ないため、30N(約3kgf)の重錘とした。

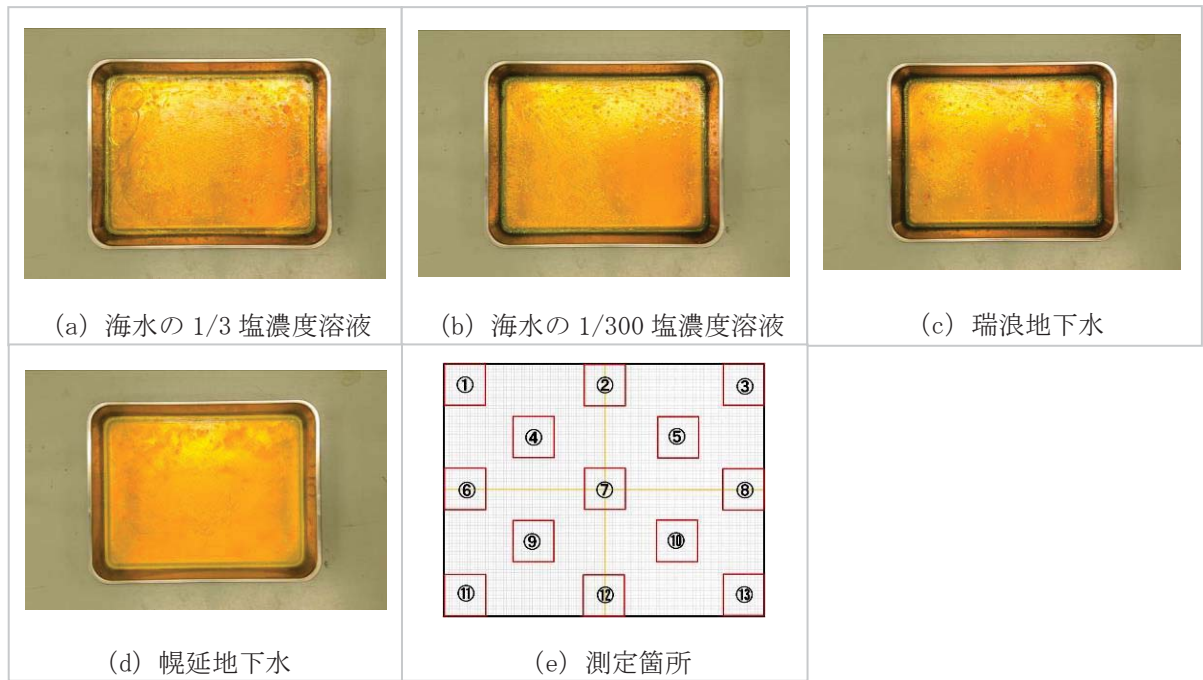


図 5.3.6-11 硬度測定試験の供試体および測定箇所

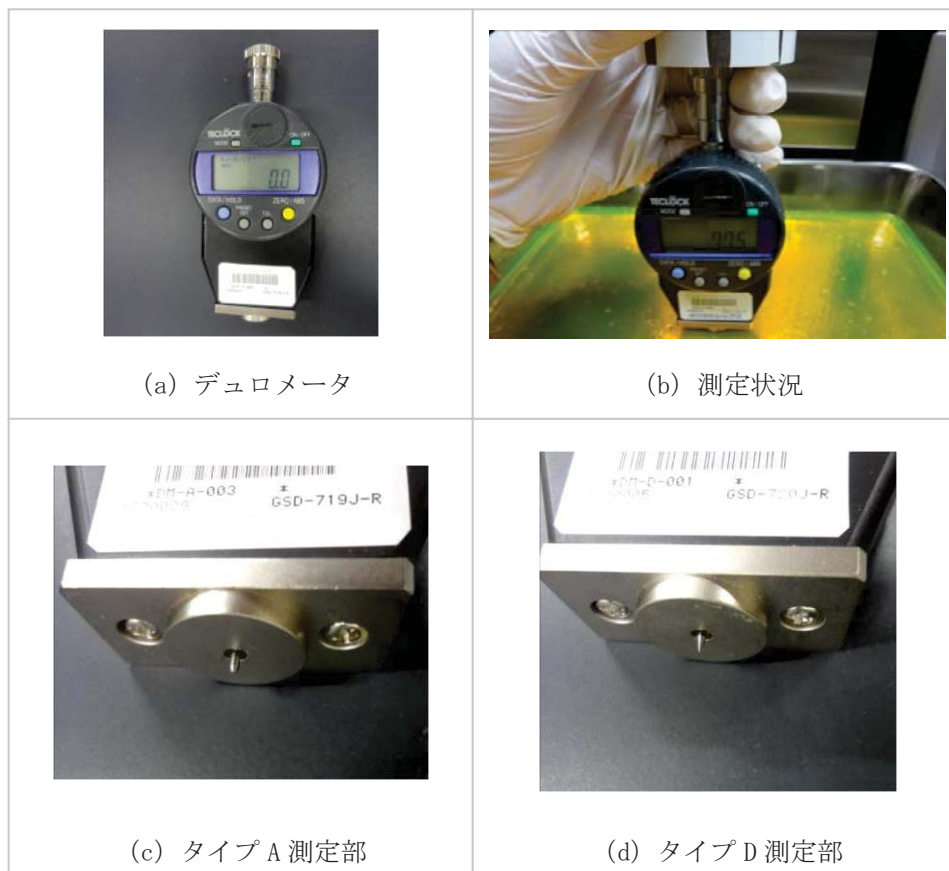


図 5.3.6-12 硬度測定試験の実施状況

測定結果を図 5.3.6-13 に示す。塩分を含む溶液はタイプ D にて測定可能となった 3 日目以降 70-78 の値の間で徐々に硬度が増加した。10 日目以降 NaCl 調整溶液は 77-79、瑞浪および幌延地下水は 77 前後の値でほぼ一定となった。H27 年度に実施したレジンのみ硬度測定結果（気中および高湿度）と比較すると、レジンのみ場合には 10 日目以降 82-83 の硬度を示したのに対し、塩分を含む溶液は 5~6 程度硬度が低下した。EP-400M の規格値は 80.0 以上としている（株式会社ダイフレックス 2016 年 6 月作成, エバーボンド EP-400 カタログ）が、その差は最大 3 程度である。

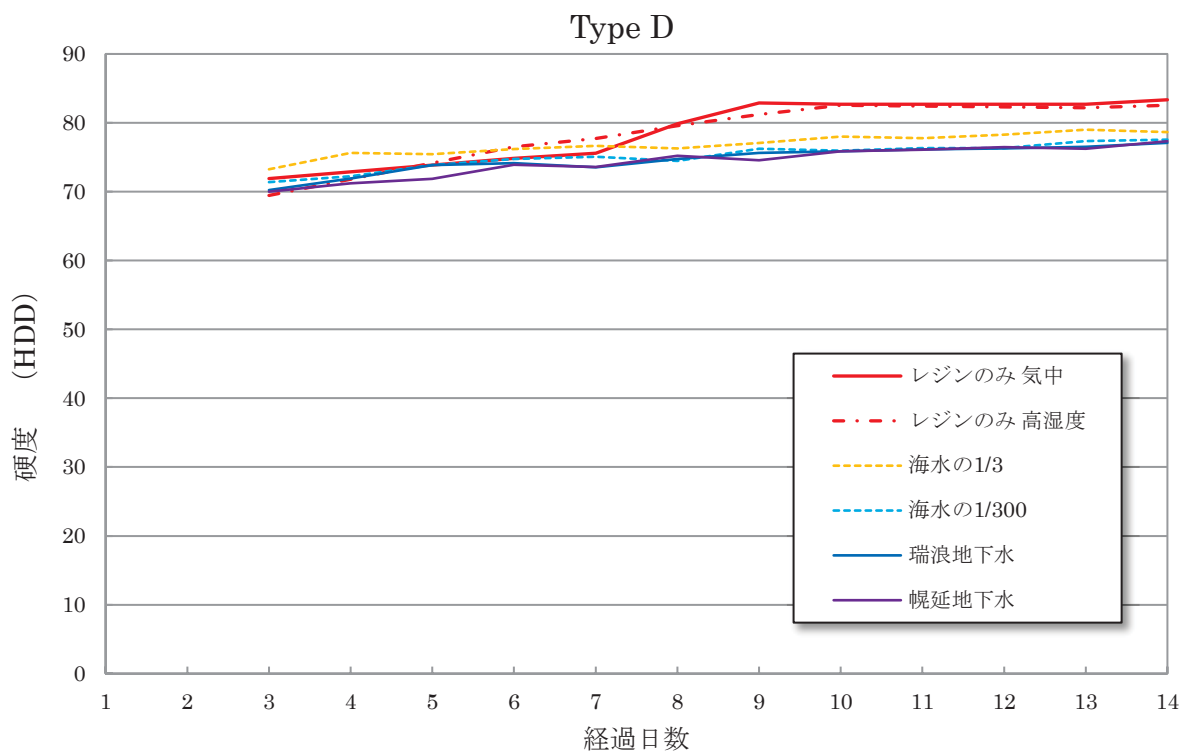


図 5.3.6-13 硬度測定結果(平均値)のプロファイル

※「レジンのみ気中」および「レジンのみ高湿度」は H27 年度実施

(2) 温度測定および目視による確認試験

塩分を含んだ溶液 100ml の中に 100ppm のフルオレセインを添加した EP-400M レジン 200ml を投入し、デジタルカメラにより撮影し硬化状況の変化を確認した。試験は室温 23°C 湿度 50%RH に設定した恒温高湿槽内にて実施した。同時に温度測定データロガー (TR-71nw、株式会社ティアンドデイ) と温度センサー (TR-1320、株式会社ティアンドデイ、図 5.3.6-14 (a))、温湿度測定データロガー (TR-72wf-H、株式会社ティアンドデイ) と温湿度センサー (HHA-3151、株式会社ティアンドデイ、図 5.3.6-14 (b))、を用い、レジン及び槽内環境の温度湿度測定も行った。なお、温度センサーの測定限界は 156°C である。デジタルカメラによる硬化状況撮影結果を図 5.3.6-15～図 5.3.6-19 に示す。

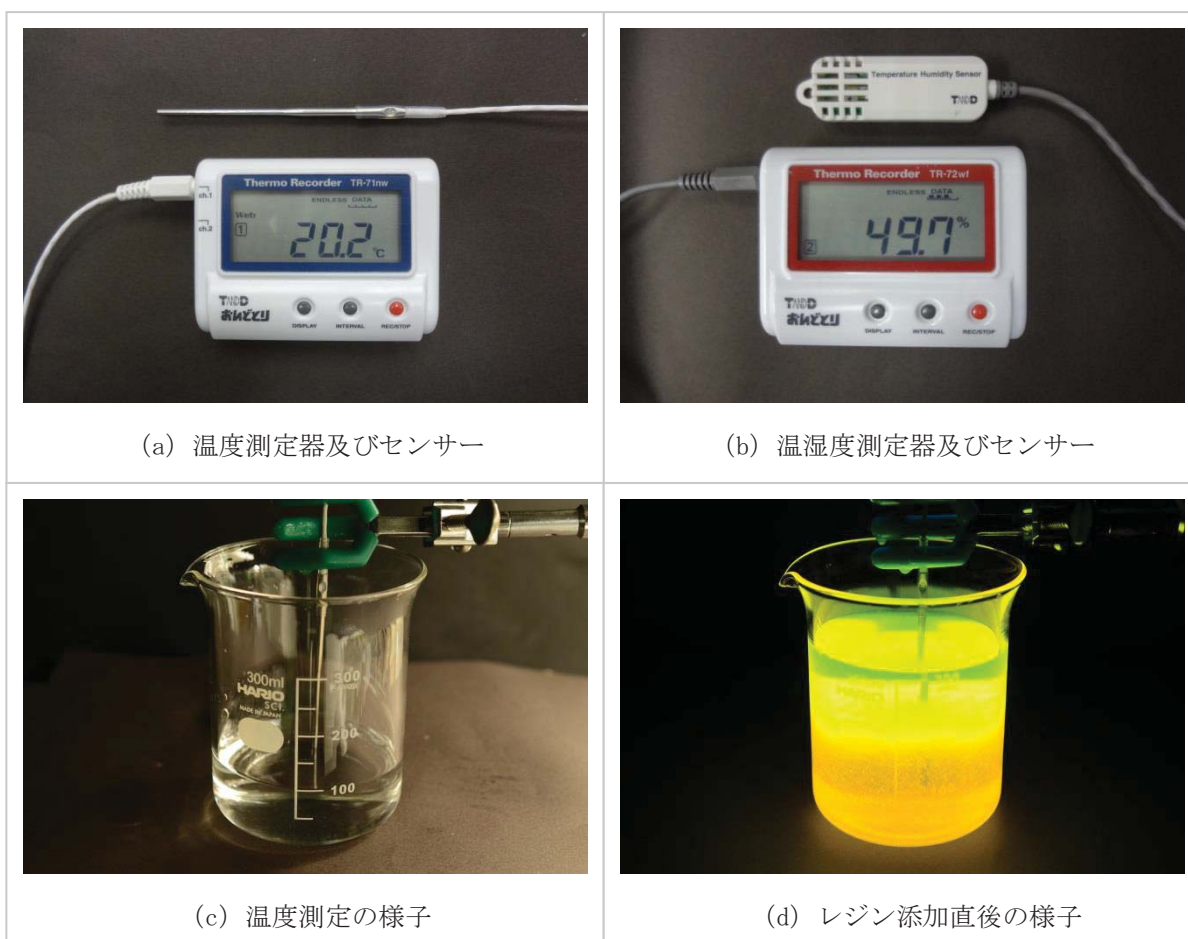


図 5.3.6-14 塩分影響試験の実施状況

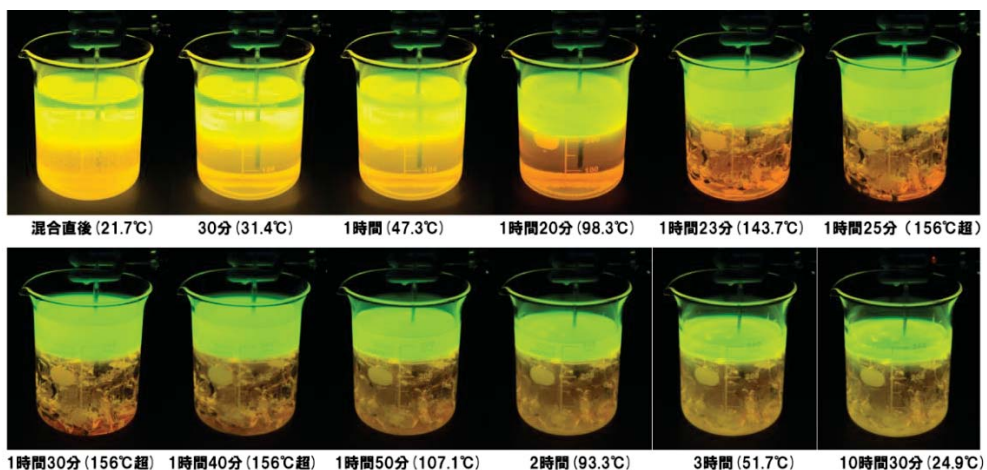


図 5.3.6-15 海水の 1/3 塩濃度 レジン硬化の様子

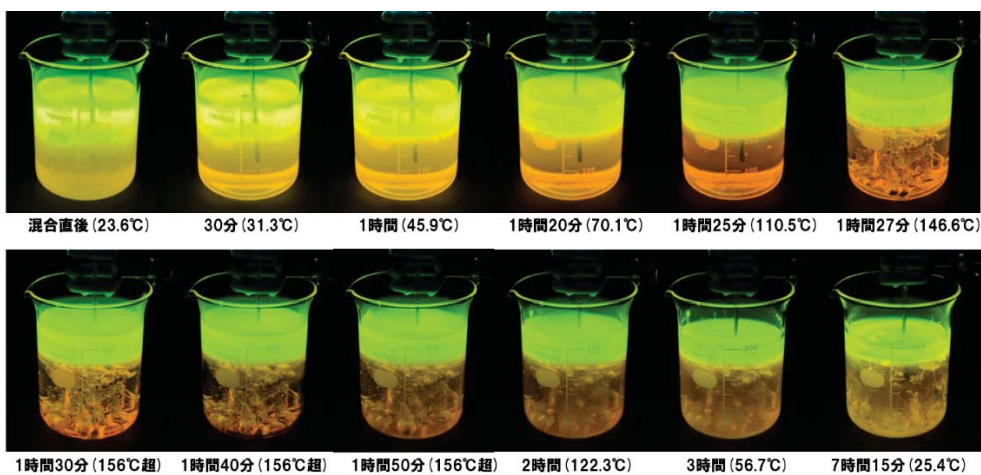


図 5.3.6-16 海水の 1/300 塩濃度 レジン硬化の様子

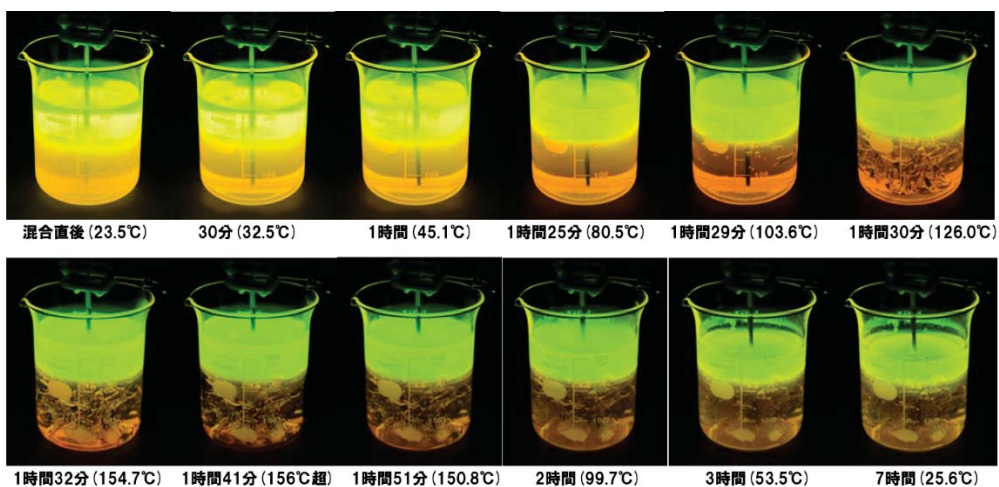


図 5.3.6-17 瑞浪地下水 レジン硬化の様子

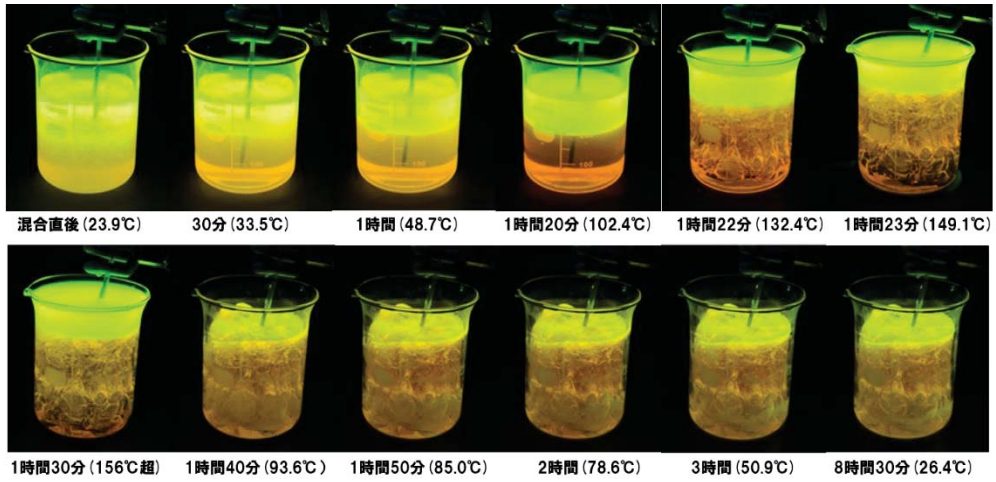


図 5.3.6-18 幌延地下水 レジン硬化の様子

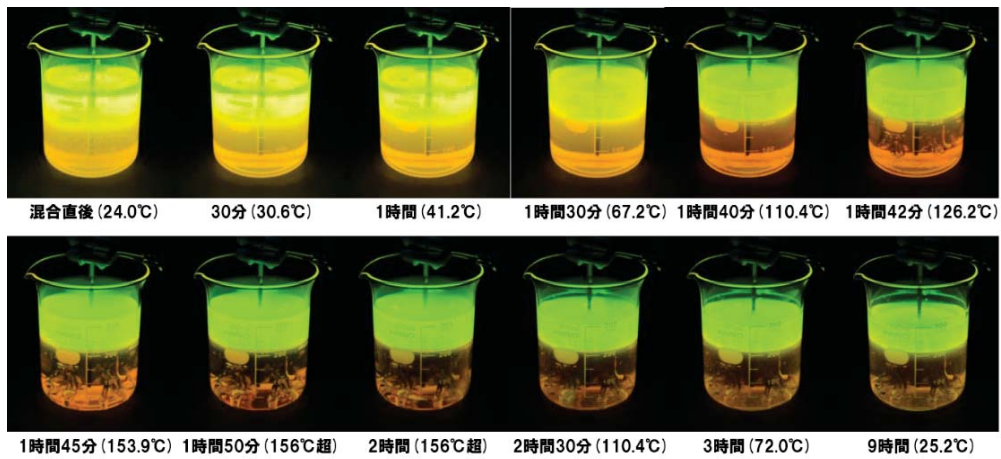


図 5.3.6-19 蒸留水 レジン硬化の様子



(a) 塩濃度 1/3 溶液



(b) 塩濃度 1/300 溶液



(c) 瑞浪地点地下水



(d) 幌延地点地下水



(e) 蒸留水

図 5.3.6-20 試験終了後のレジン硬化の様子

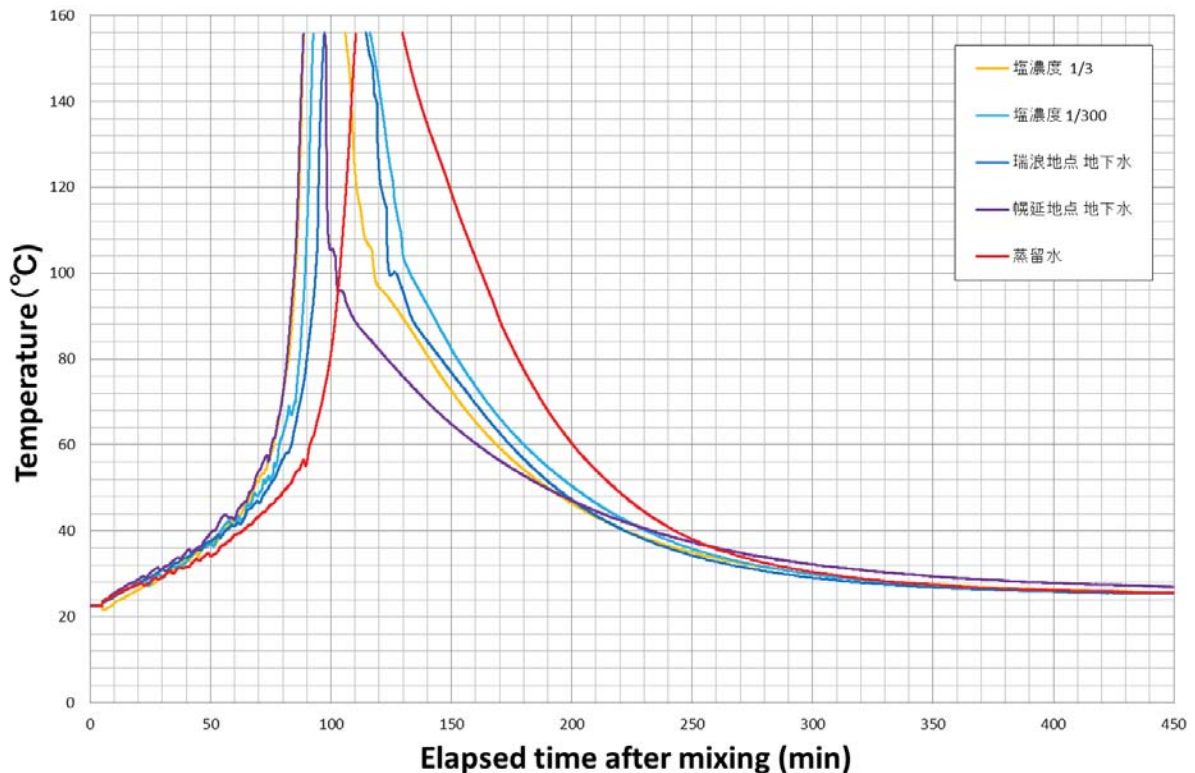


図 5.3.6-21 23°C, 50%RH におけるレジンの温度測定結果

目視による観察では、各濃度の NaCl 標準溶液および各地下水ともに、レジンの接触後 1 時間 20 分前後経過した頃にレジン内部に気泡が生じ、その後約 10 分間激しく発泡したのち、レジンの硬化とともに発泡は止み、視覚的な変化はなくなるという結果になった。レジンに添加した蛍光剤の色の変化は、発泡の影響で正確な色の変化は捉えられないものの、激しく発泡した時刻以降に消光していた。レジンの形態および色の変化が著しいのは幌延地下水の場合であった。幌延地下水に接触させたレジンの重合反応は特に激しく、ビーカー内を満たしていた溶液がビーカーの外にあふれ出てしまった。レジン内での激しい発泡の後、ビーカー内の溶液の容量が減少する変化はすべての塩濃度の条件で起こっており、これはレジンの硬化に伴い水平方向の体積収縮によりレジンとビーカーの間にできた隙間に溶液が侵入したためであることを確認した。また試験中のレジンの温度測定を行った結果、図 5.3.6-21 で示すように、NaCl 標準溶液を使用した結果は塩濃度が高いほど可使時間は短くなった。Cl 濃度だと瑞浪地下水は海水の 1/300、幌延地下水は海水の 1/3 の濃度に相当するが、同じ Cl 濃度の NaCl 標準溶液の結果とそれぞれ比較してみると、実際の地下水の方が NaCl 標準溶液よりも可使時間は短い。実際の地下水中には Cl 以外にも多くの溶存イオンが存在しているため、その影響が出ていることが予想される。比較のために蒸留水による同様の試験の温度測定結果は、最も可使時間が長くなった。温度測定開始から 24 時間後のレジンの硬度をガラス棒で押して確かめたところ、見た目上は気泡の混入等で不均一な形態に見

えるが、レジン硬度はどこを押しても完全に硬化したと判断してよいと考える。今回の塩分影響試験ではどの塩濃度の試料もすべて温度センサーの測定限界（156℃）を超える温度まで上昇しているため、そのような高温を観測した時点でレジン全体が完全に硬化したと考えてしかるべきであろう。

5.3.6.3 蛍光剤の選定

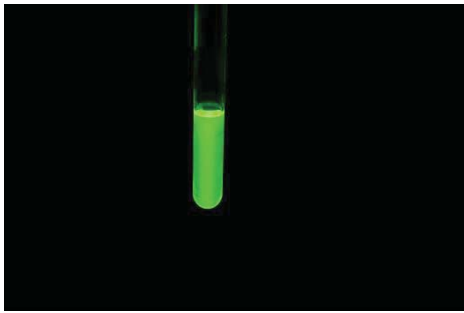
現在、蛍光剤として採用している蛍光染料（フルオレセイン）は、酸やアルカリと反応して変質しやすいことが知られており、昨年度の検討では、主剤（弱酸性）に添加した直後、蛍光しないことが確認された。また、レジン（主剤と硬化剤の混合）は硬化過程の終盤で温度が急激に上昇するため、蛍光剤が熱で分解され、蛍光を発しなくなることも確認されている。蛍光剤を添加したレジンの蛍光強度は、コア観察時における割れ目幅などの定量に関係することから、特に熱によって、その蛍光強度がどのように変化するかを定量的に把握しておく必要がある。そこで本年度は、レジンの反応熱が蛍光強度に及ぼす影響を確認する。本年度行った室内レジン注入試験において、レジンや水への不分離性が確認できた蛍光剤（R-ZE フラビンイエロー、ブレニー技研）を使用した。R-ZE フラビンイエローは高純度のエポキシ反応性希釈樹脂を溶媒とした液状の蛍光剤である。

蛍光強度の測定には当所が所有する3次元分光蛍光光度計（F-7000 形分光蛍光光度計、HITACHI）を用いた。また、昨年度と同様にデジタルカメラによる観察も行った。

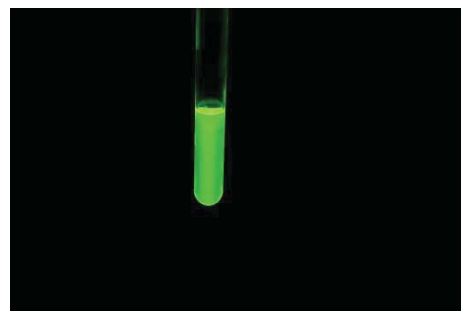
5.3.6.4 温度消光確認試験

測定試料は主剤 99.95g に対し、2%の R-ZE フラビンイエローを添加し3分間攪拌した。蛍光発光後、15ml ガラス試験管に 5ml 採取し、温度 23℃湿度 50%に設定した恒温恒湿槽に 15分間養生し、デジタルカメラによる紫外線光下での撮影を行った。同様の手順で 30～85℃の範囲で 10℃刻み毎に撮影を行った（図 5.3.6-22）。

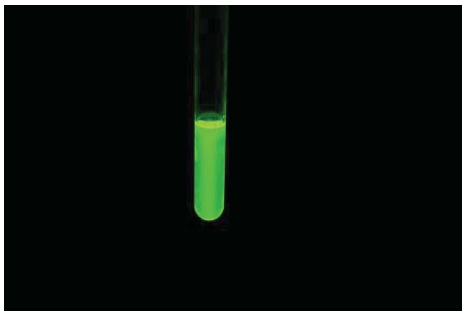
主剤に R-ZE フラビンイエローを添加したところ、容易に混ざり、添加してすぐに蛍光を発した。紫外線光下での目視による確認の結果、30～85℃の範囲で温度が上昇しても R-ZE フラビンイエローを添加した主剤の蛍光強度に明瞭な違いは見られなかった。



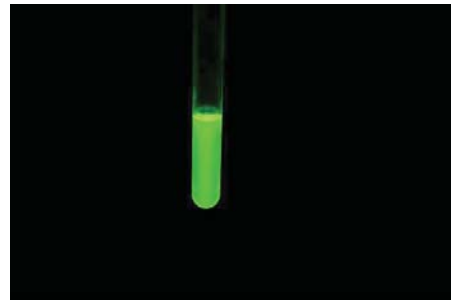
(a) 23°C, 50%RH 環境時



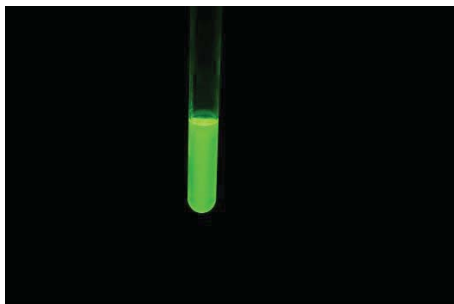
(b) 30°C加熱



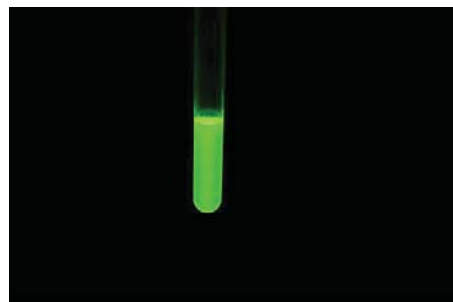
(c) 40°C加熱



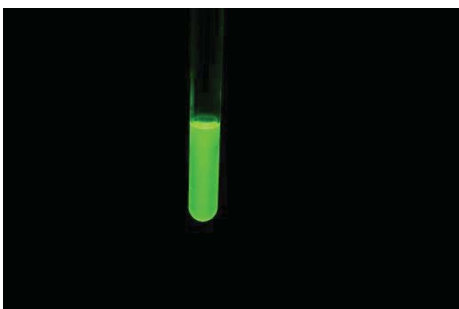
(d) 50°C加熱



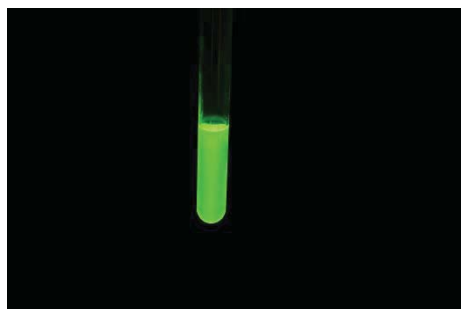
(e) 60°C加熱



(f) 70°C加熱



(g) 80°C加熱



(h) 85°C加熱

図 5.3.6-22 目視による蛍光強度確認

この結果を定量的に評価するために、3次元蛍光光度計(F-7000 形分光蛍光光度計、HITACHI 製)により同様の手順で主剤の温度をあげた試料の蛍光強度の測定を行った。3次元分光光度計は、試料に照射する励起光の波長を連続的に変化させながら蛍光強度を取得する装置であり、広範囲な励起波長域および蛍光波長域にわたって蛍光特性を調べることが可能である。測定条件は、励起波長範囲：200～600nm、蛍光波長範囲 200～600nm、スキャンスピード 12000nm/min、励起側スリット：5.0/20.0nm、ホタル電圧：400V、蛍光側スリット：5.0/20.0nm、ホタル電圧：250Vとした。

分析の結果、R-ZE フラビンイエローを添加した主剤の蛍光強度は 23～85℃の温度変化に関係なく、励起波長域 435.0～440.0nm に対し蛍光波長域は 515.0nm で常にピークが観測され、蛍光強度は 563.6～641.3 の範囲となり、ある温度を境に蛍光強度が減少することはなかった。原位置レジンを注入試験では、放熱系である割れ目に注入されるレジンの温度は、これまでビーカー内で行ってきた可使時間測定の結果ほどに上昇しないことが予想され、今年度 5.3.6.1 において実施した割れ目内レジンを反応熱試験の結果においても、岩盤模擬割れ目内に注入したレジンの温度が環境温度よりも著しく上がるような結果は得られなかった。また前述した 5.3.4 室内レジンを注入試験の結果からも分かったように、R-ZE フラビンイエローは不分離性蛍光剤であり、フルオレセインでは課題のあった蛍光剤の水への分離を克服する。従って、R-ZE フラビンイエローは不分離性で、かつレジンを反応熱による温度消光のない蛍光剤として選定可能であると考えられる。

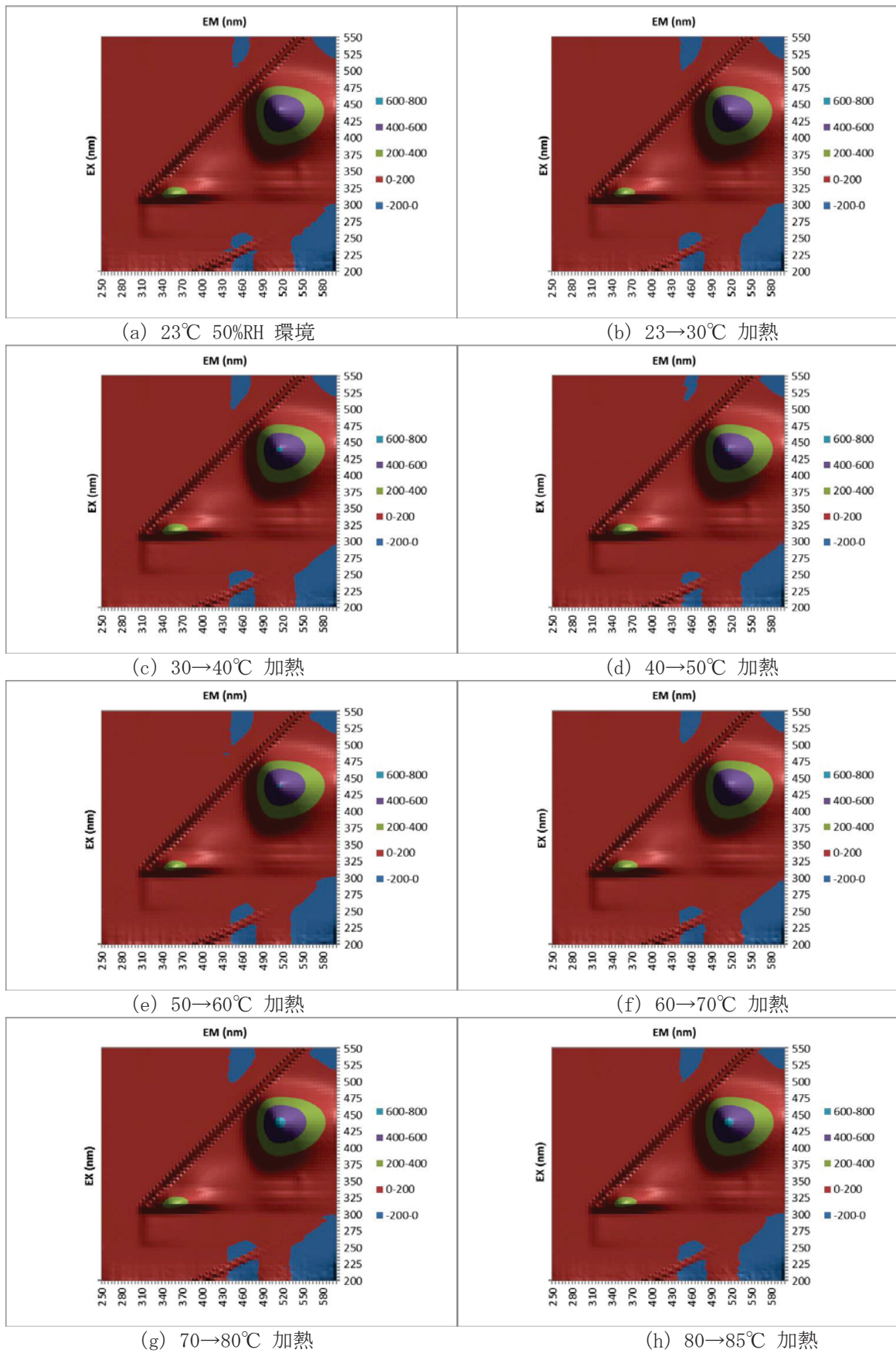


図 5.3.6-23 3次元分光光度計による蛍光強度の測定結果

5.3.7 まとめ

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で掘削したボーリングコアの割れ目にレジンを充填させた岩石試料に対して、X線 CT 法、連続研削・撮影によるシリアルセクションング法を適用した。本年度は、両手法の可視化技術の高精度化を図るとともに、異なる手法で得られた画像の相互比較のための画像処理手法の確立に重点を置いて検討を進めた。シリアルセクションング法による画像の高精度化の結果、同画像においても十分な精度を持った展開表示画像を作成することが可能となり、展開表示画像を用いた異なる手法間での相互比較が可能となった。また、深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道で掘削したボーリングコアの X線 CT 画像から斜長石の粘土化によると思われる密度低下が確認されたため、密度低下した箇所をより鮮明に画像化し、その位置を特定する試みを行った。コア観察結果との整合性をとったところ、コア観察で変質が確認された箇所と X線 CT 画像で密度低下した箇所がほぼ一致することが分かった。

室内レジン注入試験では、レジンに添加する蛍光剤の分離に関する検討を行った。具体的には、断層角礫や断層ガウジへの蛍光レジンの浸透に伴う蛍光剤の分離を想定した上向流カラム可視化実験を実施した。その結果、蛍光剤として蛍光染料（ウラニン）を用いた場合、浸透する媒体の粒径や間隙内の水の影響を受けて、蛍光レジンから蛍光剤が分離することが確認された。そのため、不分離性の蛍光剤を選定し、同蛍光剤による上向流カラム可視化実験を実施した。その結果、水で満たされた間隙内において分離は生じず、安定した蛍光強度を確保できることが確認された。今後は、この蛍光剤を添加した場合にレジンの物性が変化しないかを確認するとともに、最適な添加量について検討を進めていく予定である。

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で計画されている原位置レジン注入試験に必要な装置の試作を行った。具体的には、2液混合型エポキシ樹脂系接着剤（レジン）を高地下水圧環境下（約 5.0MPa）において、脈動が極めて小さく、主剤と硬化剤の混合比を一定に保て、一定品質のレジンを圧送できるポンプを試作した。同装置には、割れ目幅の急激な変化に伴う圧力変化（圧力上昇）に瞬時に対応可能な制御機能（インターロック機能）が組み込まれており、同機能が適切に動作することを確認した。今後は、同装置の原位置での適用性を検討していく予定である。

今年度のレジン特性試験では、より原位置環境に近い条件下におけるレジンの物性を明らかにするため、模擬岩盤割れ目内でのレジン反応熱測定試験、塩分濃度影響試験を行った。またレジン反応熱により消光しにくく水への分離もしない新たな蛍光剤の選定を行った。

1mm 幅の模擬岩盤割れ目にレジンを注入し、岩盤内でレジン反応熱がどれくらいまで上がるか確認する試験を行った。現場環境温度を想定して 23℃（深度 300m に相当）および 30℃（深度 500m に相当）の条件下で、同じ環境温度になじませたレジンを模擬岩盤に注入したところ、23℃の条件下では平均 0.2℃程度、30℃の条件下では平均 1.2℃程度の温度上昇が観測された。岩盤よりも比熱の大きいアク

リル板の模擬割れ目にレジンを注入すると、最大 3.5℃程度の温度上昇が観測されたことから、放熱系である岩盤中に注入する反応熱は、実際のレジン反応熱よりも岩盤割れ目内では温度上昇しないことが確かめられた。ただし、レジンは反応熱により硬化する性質を有するため、岩盤割れ目内で反応熱が上がらないということは、レジン注入後の硬化までより時間を要する可能性がある。今後はレジン注入後のレジン充填割れ目を掘削する際に必要な硬度を明確に定め、岩盤割れ目に注入したレジンがその硬度に到達するまでの地下環境における養生期間を具体的に検討する必要がある。

塩分を含む水にレジンを接触させるとレジンの硬化や付着強度に影響を与えることが確認された。そこで地下水中の塩分濃度とレジンの硬化との関係を確認するために、異なる塩分濃度の NaCl 標準溶液および瑞浪・幌延の地下水にレジンを接触させ、目視による観察および温度測定、硬度測定を行った。その結果同じ成分の溶液だと塩分濃度の大きい溶液ほど可使時間は短くなる傾向があった。実際の地下水とレジンを接触させると、同じ Cl 濃度でもより可使時間が短くなったことから、塩分濃度だけでなく、そのほか地下水中の溶存イオンもレジンの硬化に関係することが予想された。またデュロメータを用いた硬度測定の結果、塩分を含む溶液に接触したレジンの硬度はレジンのみの場合よりも硬度が 5-6 程度減少した。この硬度低下が原位置でのレジン充填割れ目の掘削時に十分な硬度であるか、今後検討が必要である。

これまでレジン特性試験で用いてきた蛍光剤（フルオレセイン）の発光は、レジンの pH に依存し、レジン混合後の反応熱により消光する可能性がある。そこで新たに不分離性の蛍光剤（R-ZE フラビンイエロー）の選定を考え、主剤に R-ZE フラビンイエローを添加し加熱したのち 3 次元分光光度計で蛍光強度を測定した。その結果 85℃まで温度を上げても蛍光強度は低下しないことを確認した。R-ZE フラビンイエローは不分離性で、かつレジン反応熱による温度消光のない蛍光剤として選定可能であると考えられる。

参考文献

小椋一郎 (2001) 、エポキシ樹脂の化学構造と特性の関係、DIC Technical Review No. 7

柏谷公希、中田弘太郎、長谷川琢磨 (2010) 簡便で高精度な地下水の蛍光染料濃度測定法の提案—
ボーリング調査における信頼性の高い地化学データ取得のために—、電力中央研究所報告 研究報
告 : N09026

杉田創、松長烈、柳沢教雄、田尾博明、山口勉、青木一男 (2003) 、フルオレセインの蛍光強度に及
ぼす pH および溶存イオンの影響、日本地熱学会誌 第 25 巻 第 3 号 211 頁~225 頁

杉田創、松長烈、柳沢教雄、駒井武 (2006) 、フルオレセインの熱分解挙動に関する一次反応速度式
による解析、資源と素材 Vol. 122 p. 101-106

日本工業規格「プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法」 (JIS K 7215-1986)

エバーボンド EP-400M 株式会社ダイフレックス 製品カタログ (2016 年 6 月版-2 刷)

5.4 各種割れ目探査技術の室内比較試験

5.4.1 背景および目的

これまでに割れ目探査技術として、トレーサー試験、高粘性流体注入試験、ラドン濃度計測、レジンを注入試験などを検討してきた。しかしながら、原位置では様々な制約条件により、それぞれの調査結果を十分に比較できていない。このため、昨年度から室内において各種試験の比較を開始した。これは、室内において、割れ目幅や境界条件が明確な状態で試験を行い、それぞれの調査結果の評価結果やその特性を把握するために実施するためである。このため、室内において模擬割れ目を用い、前述の各種試験を行うことにより、これらの調査結果で得られる割れ目幅を比較した。

5.4.2 試験モデル

試験モデルには、図 5.4.2-1 に示すように、一次元の割れ目モデルを用いた。昨年度は二次元の割れ目モデルも用いたが試験装置の製作と試験条件の変更が困難なため、今年度は一次元割れ目モデルで試験を実施することとした。

一次元の割れ目モデルは、棒状の岩石の上に、アクリル板を設置し、その間にステンレステーブを置くことで割れ目を模擬した。岩石には、100×100×1200 mm の岩石を用いた。長さ 1200 mm は、トレーサーなどを流す際に 1 m の流路長が稼げるようにするため、幅と厚みの 100 mm は、ラドンフラックスの試験において、フラックスが変化しなくなる厚みから設定した。

なお、隙間からの流出を防ぐためにオーリングを周囲に設置するとともに、上端と下端に溝を作り、そこにポーラスストーンを設置することにより、流入出孔とした。岩石とアクリル板の固定には、万力を用いた。一次元モデルは図 5.4.2-2 のように作成した。

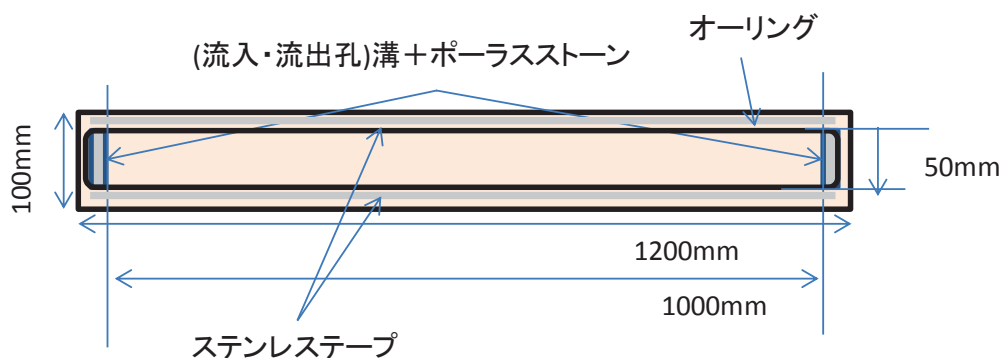


図 5.4.2-1 一次元モデルの試験装置の概念図



図 5.4.2-2 一次元モデルの写真

5.4.3 試験方法

前述の試験モデルを用いて試験を実施した。試験は、透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、ラドン濃度計測、レジジン注入の順で実施した。これらの試験方法について以下に示す。

(1) 透水試験

透水試験は、図 5.4.3-1 に示すように試験装置に流量を一定流量で注入し、圧力の安定を確認した後に、流入口と流出口の水頭差を計測する。定流量注入には、モーノポンプ、水頭差の計測には、圧力計あるいはマノメーターを用いる。一次元モデルの場合には、透水係数は以下の式で与えられる。

$$k = \frac{Q}{A} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad \text{or} \quad T = \frac{Q}{W} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad \left(Q = k \frac{\Delta H}{\Delta L} A = T \frac{\Delta H}{\Delta L} W \right) \quad (5.4.3-1)$$

ここに、Aは流路面積(=bW)、Wは割れ目の横幅、ΔLは流路長、ΔHは水頭差である。

透水試験時には、流量が大きいと乱流になる可能性があるため、流量を変化させて、流量と水頭差の線形性を確認する必要がある。

透水係数や透水量係数から割れ目幅を求めるには、割れ目幅の3乗則を用いた。これは、水の流れやすさが割れ目幅の3乗に比例することを利用したものである。割れ目幅の3乗則は以下の式で表される。

$$T = \frac{\rho g b^3}{12\mu} = \frac{g b^3}{12\nu} \quad \left(k = \frac{\rho g b^2}{12\mu} = \frac{g b^2}{12\nu} \right) \quad (5.4.3-2)$$

ここに、 T は透水量係数($T=kb$)、 k は透水係数、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 b は割れ目幅、 μ は粘性係数、 ν は動粘性係数である。ここに、水の密度は 1 Mg/m^3 、重力加速度は 9.8 m/s^2 、粘性係数は $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、動粘性係数は、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である。

このようにして求めた透水係数から割れ目幅を評価することが可能である。



図 5.4.3-1 一次元モデルでの透水試験の概念図

(2) 高粘性流体注入試験

高粘性流体注入試験は、5.1 で示したように、割れ目に粘性の高い流体を注入することにより、流れの次元や割れ目幅を評価する方法である。この方法では、割れ目に高粘性流体を一定流量で注入することにより、図 5.2.1-1 に示すように、高粘性流体の流動によって注入圧力が変化するとして、割れ目幅を評価する（長谷川ほか、2007）。

一次元モデルでの高粘性流体試験の概念図を図 5.4.3-2 に示す。

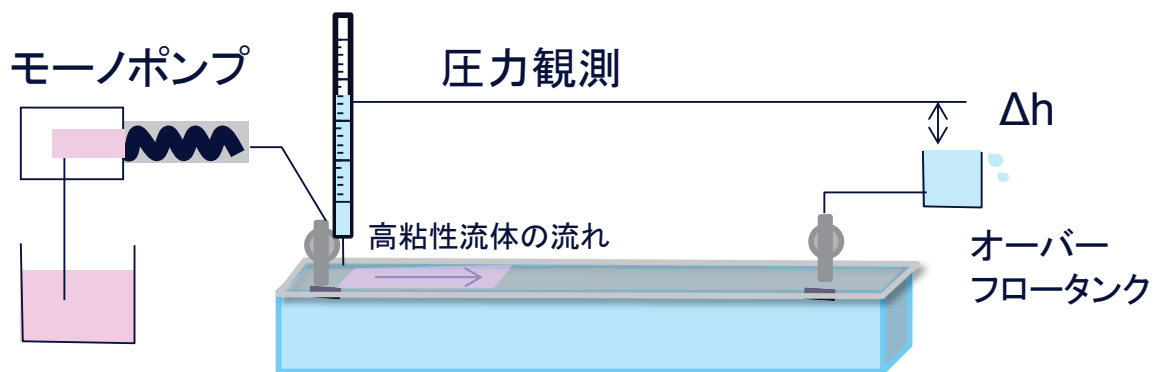


図 5.4.3-2 一次元モデルでの高粘性流体注入試験の概念図

一次元流動の場合、高粘性流体の低流量注入時の圧力増加は以下のように与えられる（長谷川ほか、2015）。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{mQ^2}{kA^2} \quad \left(h = \frac{mQ^2 t}{kA^2} \right) \quad (5.4.3-3)$$

ここに、h は注入圧力(時間の関数)、m は高粘性流体の水に対する粘性倍率、t は時間である。

高粘性流体がモデル全体に行き渡り定常状態に達した場合には、粘性倍率を考慮して水の場合と同様に、以下のように与えられる(長谷川ほか、2015)。

$$k = \frac{mQ}{A} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad \text{or} \quad T = \frac{mQ}{W} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad (5.4.3-4)$$

このように、高粘性流体の注入過程の①非定常的な圧力の変化と②定常的な圧力から、透水量係数が算定でき、割れ目幅を3乗則から求めることが可能である。

(3) トレーサー試験

トレーサー試験では、割れ目にトレーサーを投入することにより、その到着時間から割れ目幅を評価することができる。トレーサーの到達と割れ目幅の関係は次式で表すことができる。

$$b = Qt_{\text{arr}} / WL \quad (t_{\text{arr}} = WLb / Q) \quad (5.4.3-5)$$

ここに、 t_{arr} はトレーサーの到着時間、W は割れ目の横幅、L は割れ目の長さ、b は割れ目幅、Q は注入流量である。

トレーサーは割れ目内を移行するため、移流分散現象によって図 5.4.3-3 に示すように希釈する。トレーサー到着時刻は、矩形波で入れた場合には、到達のピークが出た時間に対する矩形波で入れた際の中央時間になる。一定濃度で入れた場合には、投入濃度の半分の濃度になった時間がトレーサーの到着時間である。

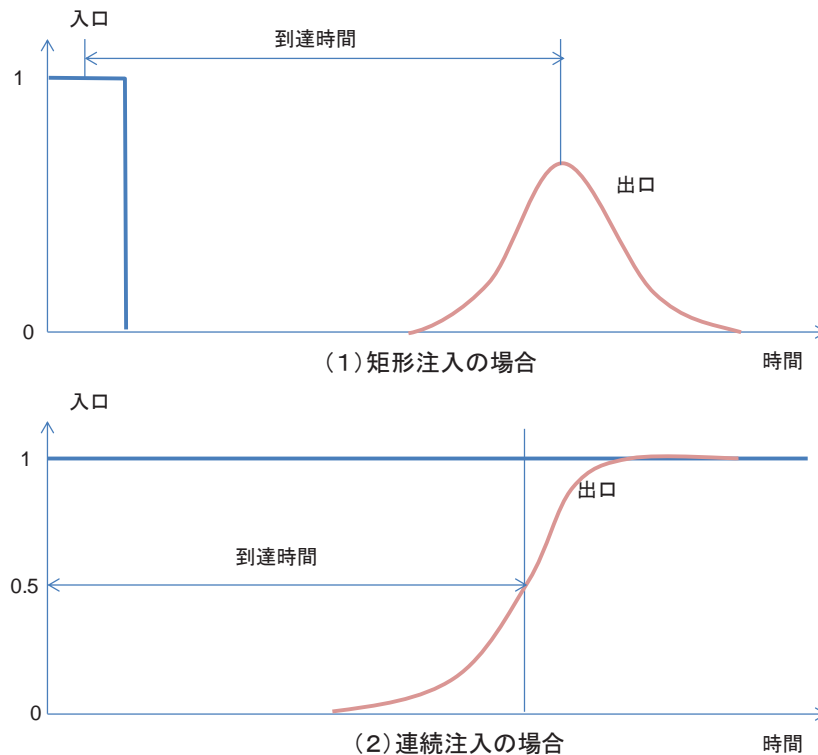


図 5.4.3-3 トレーサー注入時の到達時間の概念図

(4) ラドン濃度計測

ラドン濃度計測による割れ目幅の評価は、5.1 に示したように、地下水中のラドン濃度とラドンフラックスの関係から割れ目幅を推定する方法である。このため、ラドン濃度から割れ目幅を評価するには、割れ目内のラドン濃度と割れ目からのフラックスを求める必要がある。ここでは、割れ目に地下水を注入して割れ目内のラドン濃度を求めるとともに、割れ目にガスを循環させてラドンフラックスを計測した。

昨年度から、ラドンが装置から漏洩している可能性が示唆されたため、今年度の試験体は、図 5.4.3-4 に示すように岩石をステンレス容器に入れると共に、上板にも鉄板を用いた。さらに、オーリングではラドンが抜ける可能性があるため、オーリングに変えて鉛線をシール材に用いた。また、上板の鉄板とステンレスはアルミテープを用いてシールした。模擬割れ目は、岩石と上板の鉄板の間に 0.5mm 圧のステンステープを置いて割れ目幅を設定した。これを万力で固定することにより割れ目幅を設定した。

ラドン濃度の計測は、割れ目内に水を注入し、数日程度密閉した上で、新たにトレーサーを入れた水を注入し、割れ目内の水を追い出して試料とした。この試料水をラドン計測用の 40ml カラムに採取し、RAD7 (DURRIDGE Company) で計測した。トレーサーを入れた水を注入したのは、割れ目幅が 0.5 mm の場合、割れ目の体積が 50 ml と試料量に近いと、新たに注入した地下水の混入

が考えられるためと、ガスで追い出した場合、ラドンは水に比べてガスに 4 倍程度溶けやすいので、ガスに逃げる可能性が高いためである。このため、トレーサーを入れた水道水を用いて、試料水中のトレーサー濃度を計測することで試料のラドン濃度に割り戻すこととした。



図 5.4.3-4 ラドン濃度計測のための密閉装置

ラドンフラックスの計測は、図 5.4.3-5 に示すように、RAD7 (DURRIDGE Company) を用いて、割れ目内のガスを RAD7 に直接送り、RAD7 の排気を割れ目に戻すことで連続的に濃度を計測し、平衡濃度からラドンフラックスを求めた。

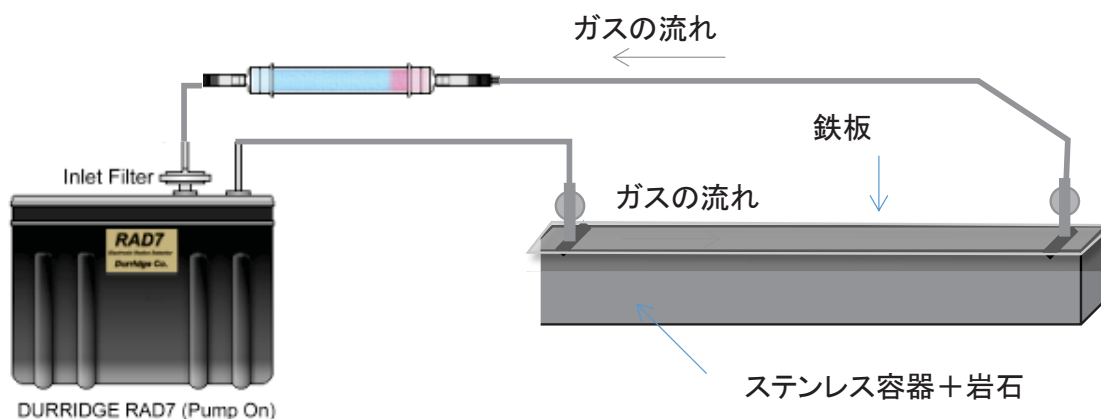


図 5.4.3-5 ラドンフラックス計測の概念図

ラドン濃度が平衡状態になるには、半減期(3.8 日)の 5 倍程度の時間(約 20 日)を要するが、割れ目内でのラドンの濃度変化は以下のように与えられる。

$$\partial C / \partial t = -\lambda C + FA \quad (5.4.3-6)$$

ここに、C はラドン濃度(Bq/m³)、λ は壊変定数(1/s)、F はラドンフラックス(n/m²s)、A は割れ目の面積(m²)、単位 Bq は一秒間に壊変する原子の個数(n/s)である。

この式を初期条件 ($t=0 : C=0$) で積分すると以下の関係が得られる。

$$C = \frac{FA}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5.4.3-7)$$

なお平衡濃度 (C_{se}) 値は、 FA/λ である。

濃度は 3.8 日間で平衡濃度の半分まで上昇するため、数日程度待てば十分に平衡濃度が予測できると考えられる。このため、安置時間とこの式の関係から上記の方法でフラックスを求める。さらに、平衡濃度とフラックスの関係から割れ目幅を以下の式で求めることができる (角森、2009)。

$$b = \frac{2F}{C_{se}} \quad (5.4.3-8)$$

ここに、 C_{se} はラドンの平衡濃度 (Bq/m^3) である。

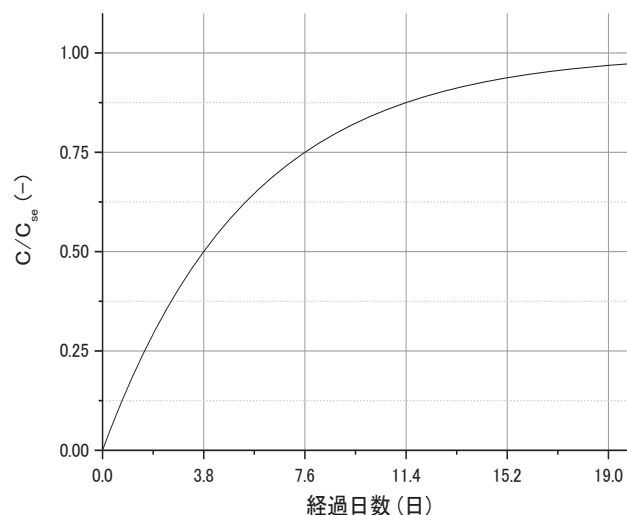


図 5.4.3-6 ラドン濃度の経時変化

(5) レジン注入試験

レジン注入による割れ目の評価は、5.3 に示すように、割れ目にレジンを注入し、その後掘削することにより、直接的に割れ目幅を調査する方法である。レジンには、5.3 で示した 2 液混合型のレジンをを用いた。レジンは注入直前に混合し、透水試験と同様に、模擬割れ目の注入孔から注入し、流出孔から流出を確認した後に、両端のバルブを閉じた。その後、レジンの硬化を確認するために、十分な時間待機した。その後、上板を取り外して割れ目幅を計測した。

5.4.4 試験結果

(1) 透水試験結果

一次元モデルでの透水試験を実施した。一次元モデルに一定流量で水を注入し、圧力の安定を確認した後に、流入口と流出口の水頭差を計測した。定流量注入には、モノポンプ、水頭差の計測には、マンメーターあるいは圧力計を用いた。流量は、100、200、300、400、500、600 ml/min と段階を変化して実施した。

試験結果を図 5.4.4-1 に示す。図には、横軸に流量、縦軸を水頭差として整理した。試験は各流量で 5 回計測を行い、水頭差の平均値と誤差を示した。流量と水頭差の関係が線形であるため、乱流は生じていないと考えられる。この関係から透水量係数を式(5.4.3-1)に基づいて求めた結果、 $1.4 \pm 0.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ となった。この透水量係数から割れ目幅を式(5.4.3-2)の 3 乗則に基づいて求めると $0.74 \pm 0.01 \text{ mm}$ となる。

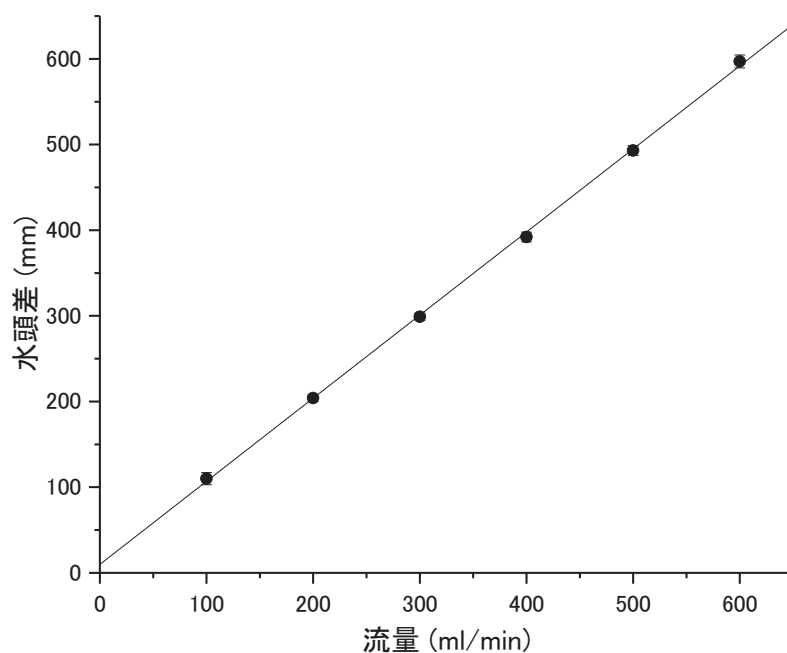


図 5.4.4-1 一次元モデルでの流量と水頭差の関係

(2) 高粘性流体注入試験結果

高粘性流体試験は透水試験と試験形態はほぼ同じであるが、透水試験と異なり、水の代わりに高粘性流体を用いることで、前述のように 3 種類の方法で割れ目の幅を評価することが可能である。図 5.4.4-2 に示すように、①定常状態の圧力は、透水試験と同様に、高粘性流体の粘性のみを考慮して透水量係数を求める方法である。②非定常状態の圧力勾配は、高粘性流体が注入して

いく際の注入圧力の経時変化から割れ目幅を求める方法である。③到達時間からは、定常になるまでに注入した流量から割れ目の体積を求める方法である。

一次元モデルでの試験結果を図 5.4.4-4 と図 5.4.4-3 に示す。割れ目幅は 0.5 mm となるように、0.5 mm のスチールテープを挟んでいる。この試験は高粘性流体の粘性 50 cp と 100 cp での試験結果であり、この結果を表 5.4.4-1 に示す。試験は同条件で 3 回試験を繰り返しているため、これらの試験の評価結果の平均値と標準偏差として示している。流量は圧力上昇を考慮して設定した。

試験結果から、評価される割れ目幅は、設定幅よりもやや大きめになっているようである。これは、0.5mm という幅が非常に小さいため、押さえる力や塗布したシリコングリースの影響でやや大きくなっているものと考えられる。割れ目幅の評価結果は、①定常状態の圧力、②非定常状態の圧力、③高粘性流体の到達の順に大きくなる。高粘性流体は完全に非混合でなく、浸潤前線付近が混合して粘性が低下するため、やや圧力応答が小さくなり、このように割れ目幅が大きく評価されるものと推定される。特に高粘性流体の到達については、高粘性流体の圧力が定常圧力になるのは、混合の影響を受けていない高粘性流体が到達した時であるため、最も評価が大きくなっているものと考えられる。

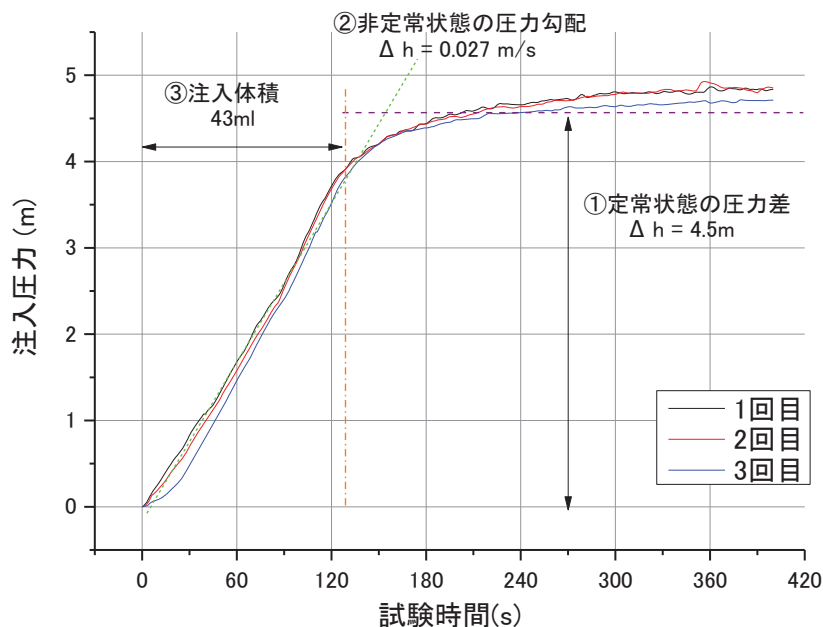


図 5.4.4-2 高粘性流体試験による割れ目幅評価方法の概念図

表 5.4.4-1 高粘性流体試験の評価結果

試験条件		透水量係数 (m ² /s)		割れ目幅 (mm)		
粘性 (cp)	流量 (ml/min)	①定常状態 の圧力	②非定常状 態の圧力	①定常状態 の圧力	②非定常状 態の圧力	③高粘性流 体の到達
50	80	2.5±0.0	4.9±0.1	0.68±0.0	0.85±0.1	1.4±0.2
	100	2.6±0.0	5.7±0.1	0.68±0.0	0.89±0.1	1.1±0.2
	120	2.6±0.0	5.6±0.3	0.68±0.0	0.88±0.2	1.1±0.1
100	20	2.6±0.0	5.2±0.3	0.69±0.0	0.86±0.2	0.98±0.06
	40	2.8±0.0	5.9±0.3	0.70±0.0	0.90±0.1	1.1±0.2
	80	3.1±0.0	7.1±0.6	0.72±0.0	0.95±0.0	1.1±0.1

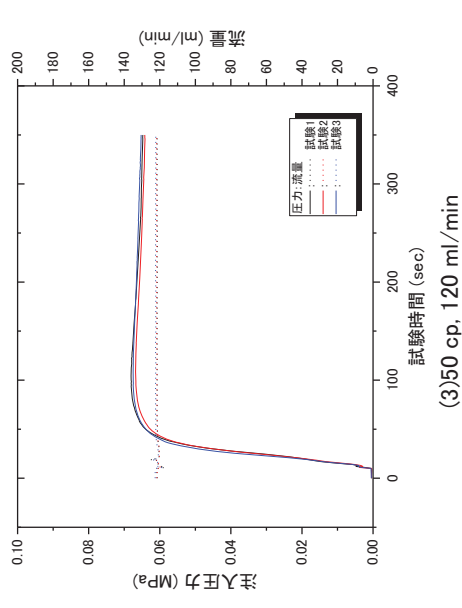
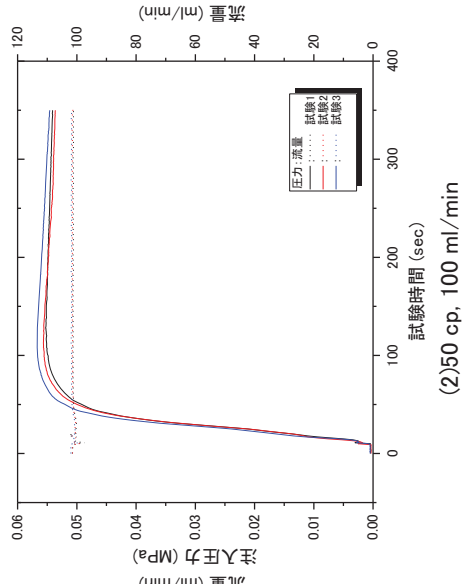
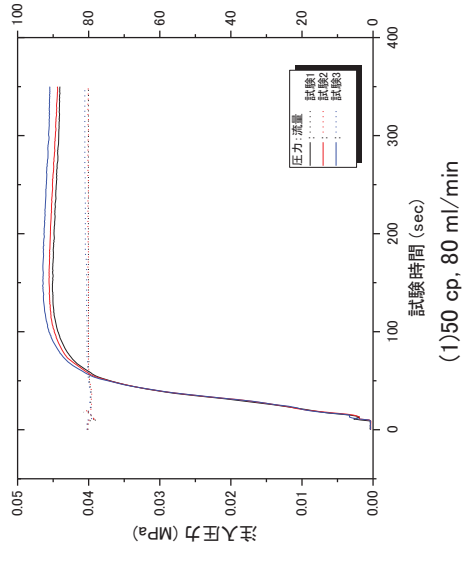


図 5.4.4-3 50cp での高粘性流体注入試験結果

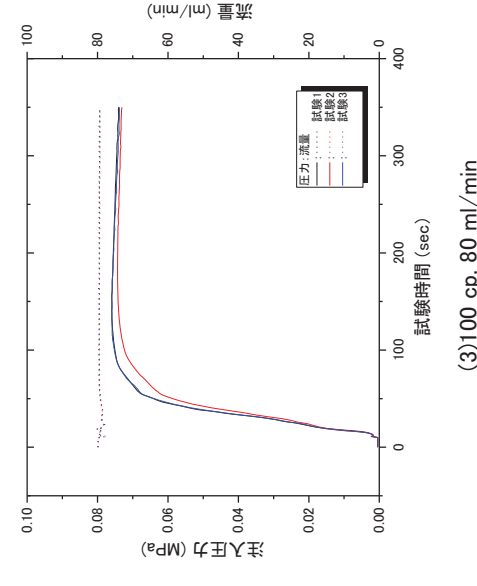
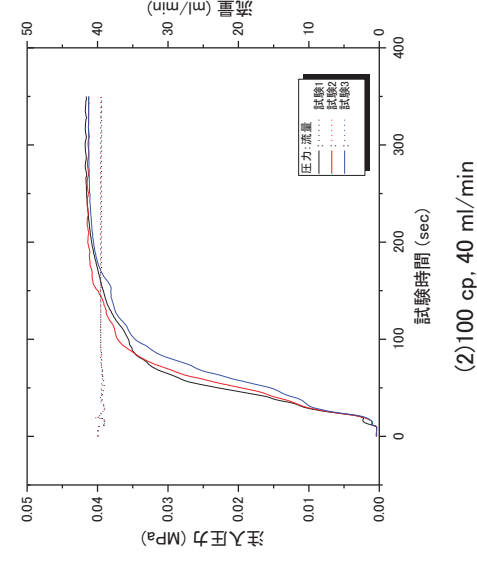
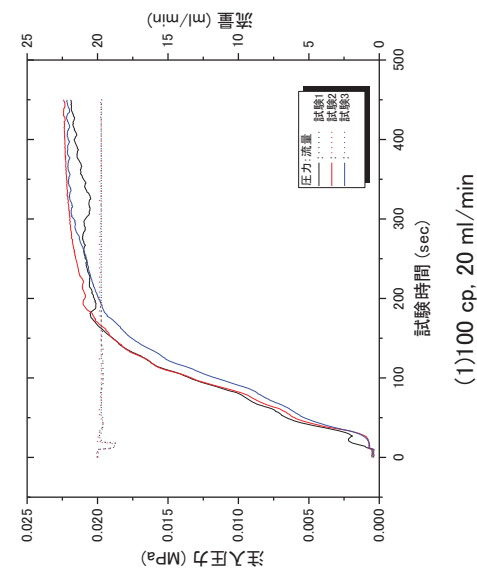


図 5.4.4-4 100cp での高粘性流体注入試験結果

(3) トレーサー試験結果

一次元モデルを用いてトレーサー試験を実施した。トレーサー溶液には 1 mg/l のナフチオン酸ナトリウム(蛍光染料)を用いた。試験では、ポンプで一定流量の水を一次元モデルの注入孔から流し、十分な時間が経過した後に、水をトレーサー溶液に切り替え 10 ml 注入した。その後、トレーサー溶液を水に切り替えて、試験終了まで一定流量で水を注入した。注入速度は、0.1 ml/min と 1 ml/min の 2 パターンで実施した。流出孔では、トレーサー試験注入開始から、流出してくる水をフラクションコレクターに導き、一定間隔で水を採取した。

この試験結果を図 5.4.4-5 に示す。試験結果から、0.1ml/min での注入も 1ml/min での注入もピーク位置はほぼ同じであり、累積で 47ml の水が流出した時に濃度ピークがみられている。流速が早い方が濃度ピークが小さくなっており、分散の影響が大きく出ている。原因は明確でないが、昨年度も同じ傾向になっており、流速が早い方が分散が大きくなるようである。トレーサー試験では、注入孔側のチューブや注入孔、流出口側のチューブなどの体積を考慮して、試験体体積を算出する必要がある。これらの体積は概ね 10 ml 程度であるため、試験体体積は 37 ml となる。試験面の大きさは、1000 mm x 50 mm であるため、割れ目幅は 0.74 mm と算出される。

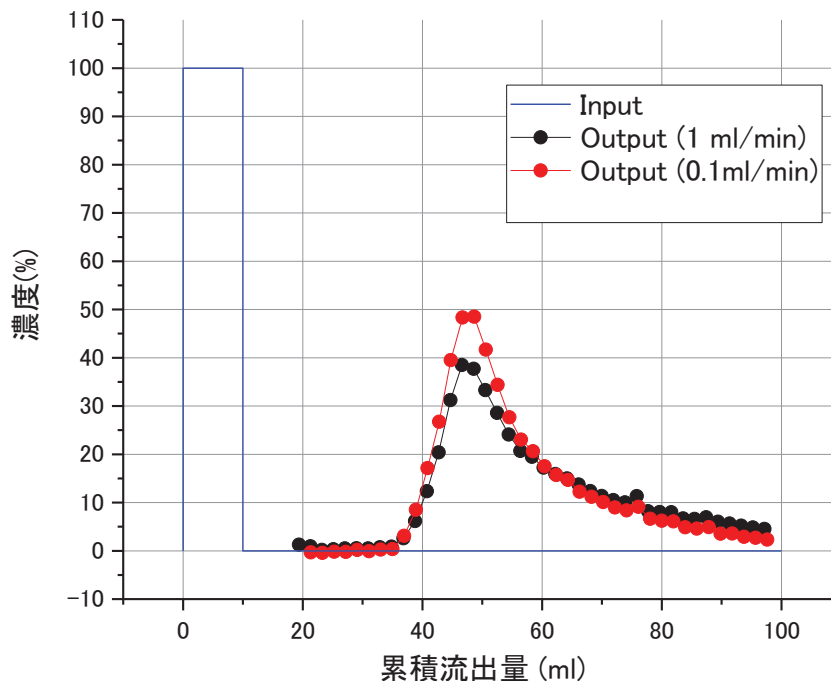


図 5.4.4-5 トレーサー試験結果

(4) ラドン濃度計測結果

ラドンフラックスを求めるために実施した RAD7 を用いて実施した試験結果を図 5.4.4-6 に示す。ここでは、蛭川花崗岩を用いている。ラドン濃度は時間と共に増加し、概ね 30,000 Bq/m³で

一定になっている。平衡濃度を 30,000 Bq/m³とした対数濃度変化もあわせて示した。対数濃度変化は単純な蓄積であれば、式(5.4.3-7)に示すように、直線的になるはずであるが、直線的なのは最初の3日間程度である。この範囲から見かけの半減期を求めると、1.7日程度となり、Rnの半減期よりも小さくなる。見かけの半減期が、漏洩の影響によるものとする、平衡値は30,000 Bq/m³の2.2倍程度になると推定される。

これはラドンの濃度変化は、式(5.4.3-6)に従い、図 5.4.3-5 のようになるはずであるが、漏洩がある場合には、以下のように表される。

$$\partial C / \partial t = -\lambda C + FA - LC = -(\lambda + L)C + FA \quad (5.4.4-1)$$

ここに、Lはラドン濃度に比例する漏洩の係数である。

これは、 λ の部分が $(\lambda + L)$ になっており、壊変定数が増加したような挙動を示すことになる。

この式を初期条件($t=0 : C=0$)で積分すると以下の式が得られる。

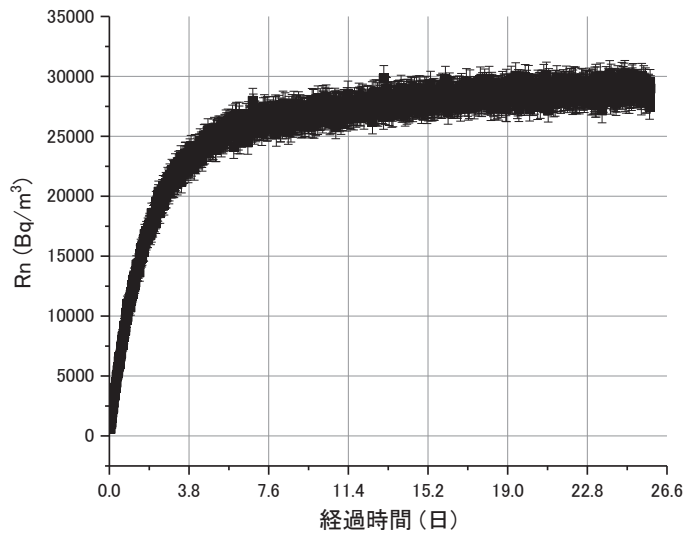
$$C = \frac{FA}{\lambda + L} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5.4.4-2)$$

したがって、平衡値は $\lambda / (\lambda + L)$ 倍になっていると考えられる。

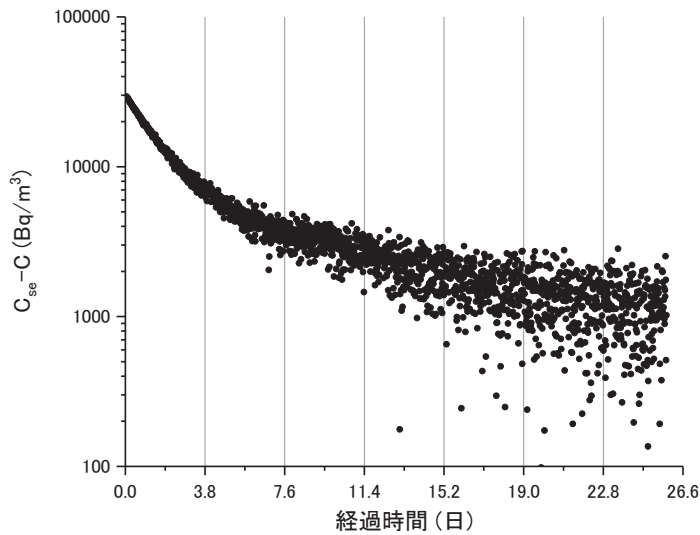
平衡値を実測値に基づいて 30,000 Bq/m³とした場合と漏洩の影響を考慮して 66,000 Bq/m³とした場合では、フラックスも 1200 Bq/m²s と 2600 Bq/m²s と変化することになる。ここでは、濃度変化が漏洩の影響なのか試験系の問題であるのかが不明確なため、フラックスは 1200~2600 Bq/m²s として評価することとする。ちなみにこの値は、5.1の室内試験で得られている蛭川花崗岩のラドンフラックス(600 Bq/m²s)の2~4倍程度の値である。

割れ目内の水のラドン濃度計測では、割れ目内に水を注入し、数日待機後に水を取り出して濃度を計測した。水を取り出す際には、前述のようにトレーサーを含む水を用いて、新しい水の混合を評価できるようにした。また、ラドン濃度の変化は、図 5.4.3-6 のように変化することが予想されるので、この濃度変化から平衡濃度を求めた。

割れ目内から採取した水の Rn 濃度の計測結果と割れ目幅の評価結果を表 5.4.4-2 に示す。表に示すとおり、割れ目幅の評価結果は非常に大きい値になっている。この結果は、ラドン濃度から評価した割れ目幅は、設定値 0.5mm に対して 1~2桁程度大きくなっており、ラドンフラックスを過大評価しているか、ラドン濃度を過小評価している可能性がある。ラドンフラックスについては、空気を流して計測しており、水と空気とでは拡散係数が異なるので過大評価している可能性がある。ラドンフラックスを求める試験を空気で実施したが、水中でのラドンフラックスを求める必要があったと考えられる。



(1) Rn濃度の経時変化



(2) 平衡値を考慮したRn濃度の対数変化

図 5.4.4-6 Rn濃度の経時変化

表 5.4.4-2 ラドン濃度の計測結果と割れ目幅の評価結果

	試料 1	試料 2	試料 3	試料 4	試料 5	統計値
Rn 濃度 (Bq/L)	61	36	79	77	41	59±20
割れ目幅 1(mm) (Flux 1200 Bq/m ² s)	20	32	15	16	29	22±8
割れ目幅 2(mm) (Flux 2600 Bq/m ² s)	42	71	33	33	63	48±18

(5) レジン注入試験結果

割れ目内にレジンを注入し、レジンの厚みから割れ目幅を推定した。レジンは 2 液混合のものを割れ目幅の倍程度の容量 100ml 程度作成して注入した。レジン注入前に、レジンが装置に張り付くのを防ぐために離形剤をアクリルの上板と岩石に塗布した。レジンの注入は、製作したレジンシリンジにとり、装置に手で注入した。この状況を図 5.4.4-7 に示す。レジンの流出を確認した後に、バルブを閉じレジンの硬化を待った。レジンが完全に硬化してしまうと、アクリルの上板などが離れなくなる可能性があるため、レジン注入後 2 日程度経過してからはがすこととした。この結果、レジンはアクリルの上板だけでなく、岩石からもはがすことができた。



図 5.4.4-7 レジンの注入状況

レジンの厚みは、はがしたレジンの厚みを約 10cm 間隔で、デジタルノギスで少数以下 2 桁まで計測することにより求めた。この結果を表 5.4.4-3 に示す。レジンの厚みは、バラツキはあるものの、 $0.82 \pm 0.14 \text{mm}$ と計測された。

表 5.4.4-3 注入孔からの距離毎のレジンの厚み

距離(cm)	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	平均±偏差
厚み(mm)	1.02	0.60	0.95	0.66	0.78	0.79	1.00	0.75	0.84	0.85	0.82 ± 0.14

5.4.5 試験結果の比較

これまで実施してきた試験結果、透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、ラドン濃度計測、レジン注入試験の結果を表 5.4.5-1 に示す。ラドン濃度計測を除き、他の試験では概ね 0.7-0.8 mm 程度の割れ目幅が得られており、試験結果は概ね整合していると考えられる。

試験結果を比較した結果、透水試験については、割れ目面が鏡面のため、割れ目幅の 3 乗則に従っ

て水が流れるため、透水量係数と割れ目幅の関係に相関性が高いものと考えられる。

高粘性流体試験では、定常法は透水試験と同じで高粘性の流体を流しているため同じ結果となっている。非定常法では、やや割れ目幅が大きめに出ている。これは、高粘性流体が水との前線付近で混合することにより粘性が低下し、圧力勾配がやや小さくなることに起因していると考えられる。高粘性流体の到達も非定常時と同じで高粘性流体の混合の影響で、到達が遅れたためこのような形態になったと考えられる。現在高粘性流体にはメチルセルロース溶液を用いているが、水と混合しにくい流体を用いれば、評価結果はより小さくなると考えられる。

トレーサー試験結果も概ね他の結果と整合しているが、トレーサーの到達から割れ目幅を評価しているため、配管や注入孔などデッドボリュームの見積りが評価結果に大きく影響する可能性があると考えられる。

ラドン濃度計測は割れ目幅が大きくなっているが、これはラドンフラックスの計測の難しさに起因していると考えられる。ラドンフラックスは、ラドンの割れ目への輸送量のため、媒体の拡散係数や間隙率に依存する可能性が高く、室内試験レベルではこれを適切に評価できていないと考えられる。たとえば、この試験ではラドンフラックスは乾燥した岩石を用いているが、飽和している場合には拡散係数は大きく低下し、ラドンフラックスも低下する可能性がある。このように条件によって大きく変化するため、ラドンフラックスを評価する方法を確立する必要がある。

レジジン注入は、設定値に比べてやや厚めの結果となっているが、割れ目からはがした状態で計測した誤差に起因すると考えられる。

このようにラドン濃度計測を除いては、概ね割れ目幅の評価が適切にできると考えられる。ラドンについては、今後、室内試験でのラドンフラックスの計測方法を検討する必要がある。

表 5.4.5-1 割れ目の評価方法と評価された割れ目幅

評価方法	評価結果 (mm)	特記事項
透水試験	0.74±0.01	
高粘性流体試験	0.69±0.02 (定常時) 0.89±0.04 (非定常時) 1.13±0.14 (高粘性流体到達)	
トレーサー試験	0.74	
ラドン濃度計測	22-48	ラドンフラックスの測定に課題
レジジン注入	0.82±0.14	

参考文献

長谷川琢磨、田中靖治、西垣誠(2007) : 高粘性流体の注入による有効間隙率と流れの次元の評価、土木学会論文集 C、Vo. 63, No. 1.

長谷川琢磨・後藤和幸・田中靖治・西垣誠・野原慎太郎(2015) : 高粘性流体の注入による割れ目の特性評価法の室内試験での実証、土木学会論文集 C, Vo. 71, No. 2, pp. 55-68.

角森史昭 : 地殻変動に伴う地下水中のラドン濃度変化, 地下水学会誌, Vol. 51, No. 1, pp. 49-54, 2009.

6. 天然トレーサーを利用した調査技術の開発

6.1 背景

高レベル放射性廃棄物処分の処分では、「地下水シナリオ」の評価が重要になる。これは、施設から漏出した核種が地下水によって輸送されることを想定したシナリオである。このシナリオの評価、特に地下水の流動が十分に遅いことを示すために、天然に存在する安定同位体、放射性同位体、希ガスなどを用いた地下水年代測定技術を開発してきた。この技術は、概要調査の地表調査やボーリング調査において、候補岩体の地下水が、一万年あるいは百万年などのように非常に古いことを示すことにより、地下水の流動が十分に遅いことを示すためのものである。この数万年～百万年の地下水年代が評価できる技術を開発するとともに、国内の地点に適用し、開発してきた技術の妥当性を確認してきた。地下水年代測定技術は、概要調査段階の候補岩体の選定において有効な調査・評価技術になりうると考えられる。

精密調査段階においては、地下施設が建設され、より詳細な調査が実施される。この調査では、概要調査での調査結果の妥当性の確認が重要になる。また、候補岩体が十分な広がりを持つこと、水みちとなりうる高透水帯が存在しないことを確認する必要がある。この調査結果の妥当性の確認や水みちの評価にも、前述の天然に存在する安定同位体、放射性同位体、希ガスなどを用いた地下水年代測定技術は有効であると考えられる。精密調査段階での地下水年代測定技術の適用を想定した場合、概要調査段階での地表調査やボーリング調査とは異なり、坑道などによる調査が主に実施される。このため、坑道などにおいて地下水年代測定技術を適用する方法を整備しておく必要がある。坑道での採水では、採水時の圧力低下が顕著なため、特に溶存ガスについては圧力低下による脱ガスを抑制して採取する必要がある。また、坑道での調査においては、水みちなど局所的に地下水流動の早い部分の検出と、その特性評価も重要な評価事項となる。これは、このような局所的かつ選択的な地下水の流動経路が存在する場合には、主要な核種の漏洩経路となり得るためである。このような調査においても、若い地下水年代を評価できる地下水年代測定技術であれば、その水みちが有意な漏洩経路になりえるかどうかを識別することが可能であると考えられる。このため、従来の非常に古い地下水を評価する地下水年代測定技術だけでなく、若い地下水を評価するための地下水年代測定技術も重要になると考えられる。

一方で、地下施設建設に伴う地下水流動の擾乱は、天然の物質を利用した広域的なトレーサー試験とも見なすことができる。本研究では、トレーサー試験技術の開発を実施しており、数メートルスケールの比較的狭い範囲において、人工的に注入したトレーサーを用いて、割れ目や高透水帯の物質移行特性を評価している。ただし、人工的なトレーサー試験では、大きいスケールの物質移行特性の評価には多大な時間を要するため、天然トレーサーによる評価によって、トレーサー試験を保管してい

く必要があると考えられる。天然トレーサーによる評価では、人工トレーサーよりも大きいスケールでの物質移行現象を評価可能であると考えられる。また、精密調査段階においては、地下水施設を建設して調査が行われるため、坑道にむけて地下水流動が発生し、このような比較的大きな地下水流動による物質移行特性を評価できる可能性がある。

以上のような概要調査における地下水年代測定結果の確認、水みちの特性評価、トレーサー試験技術の補間を目的として、精密調査における地下水年代測定の開発を行うこととした。

6.2 研究項目

精密調査における地下水年代測定法を開発するために、地下の適用性試験場における地下水調査を実施する。

地下の適用性試験場における地下水調査では、JAEA が建設を進めている瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターにおいて、研究坑道内のボーリング孔などから地下水を採取し、主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスなどを計測し、既存のボーリング調査結果との整合性を確認する。さらに、これらの経時的な変化を評価し、新しい地下水の流入を評価する。さらに、建設によって発生した擾乱を対象とした地下水流動・物質移行解析を行い、実測値と比較することにより、地下水流動や地下水水質・地下水年代の変化について検討する。

天然トレーサーによる調査では、これまでに整備してきた希ガス試料の採取方法を原位置に適用し、相互比較を行い、その適用性を検討する。また、流れが速い地下水の指標となる物質、流れが遅い地下水の指標となる物質について、採取分析方法の高度化を図る。

6.3 研究坑道における地下水調査

概要調査段階では、地上のボーリング孔などから地下水を採取するが、精密調査段階では坑道などを掘削して調査が実施される。精密調査段階においては、概要調査段階での調査結果の妥当性を確認する必要がある。また、精密調査段階では概要調査段階において十分に把握できなかった局所的な水みちの評価なども重要となる。このため、坑道などから地下水を採取し、主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスなどを計測し、ボーリング調査段階での調査結果との比較を行った。また、調査結果の経時変化を確認することにより、トンネル掘削によって生じた地下水流動によって、水質・地下水年代がどのように変化したかを評価する。

ここでは、JAEA が建設を進めている瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターを対象に地下水の採水を実施し、これまで実施してきた地下水年代測定結果の妥当性の確認を行うとともに、水質・地下水年代の変化について評価する。

6.3.1 瑞浪における地下水調査

6.3.1.1 採水地点

瑞浪超深地層研究所において、研究坑道から掘削されたボーリング孔、図 6.3.1-1 を対象に地下水調査を実施した。

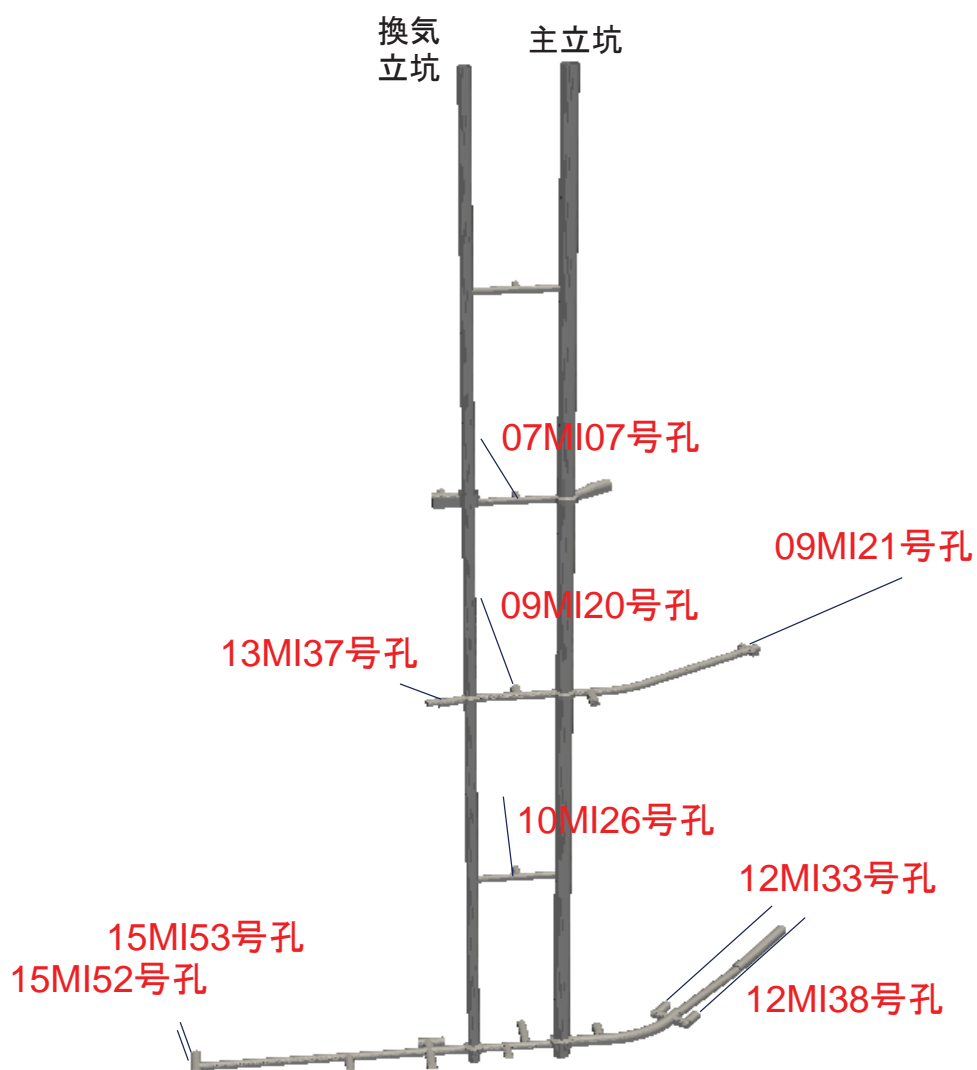


図 6.3.1-1 採水地点位置図

調査地点および区間は以下の通りである。

- 深度 200 m 予備ステージ：07MI07 号孔区間 1, 3, 5
- 深度 300 m 予備ステージ：09MI20 号孔区間 1, 3, 5
- 深度 300m ボーリング横坑：12MI31 孔 区間 1, 13MI37 区間 5(図 6.3.1-2)
- 深度 300 m 研究アクセス坑道：09MI20 号孔区間 2, 3

- ・ 深度 400 m 予備ステージ：10MI26 号孔区間 1, 3, 5
- ・ 深度 500 m 研究アクセス北坑道：12MI33 区間 1、13MI38 区間 1, 5
- ・ 深度 500 m 研究アクセス南坑道：15MI52 号孔区間 1, 15MI53 号孔区間 5(図 6.3.1-3)

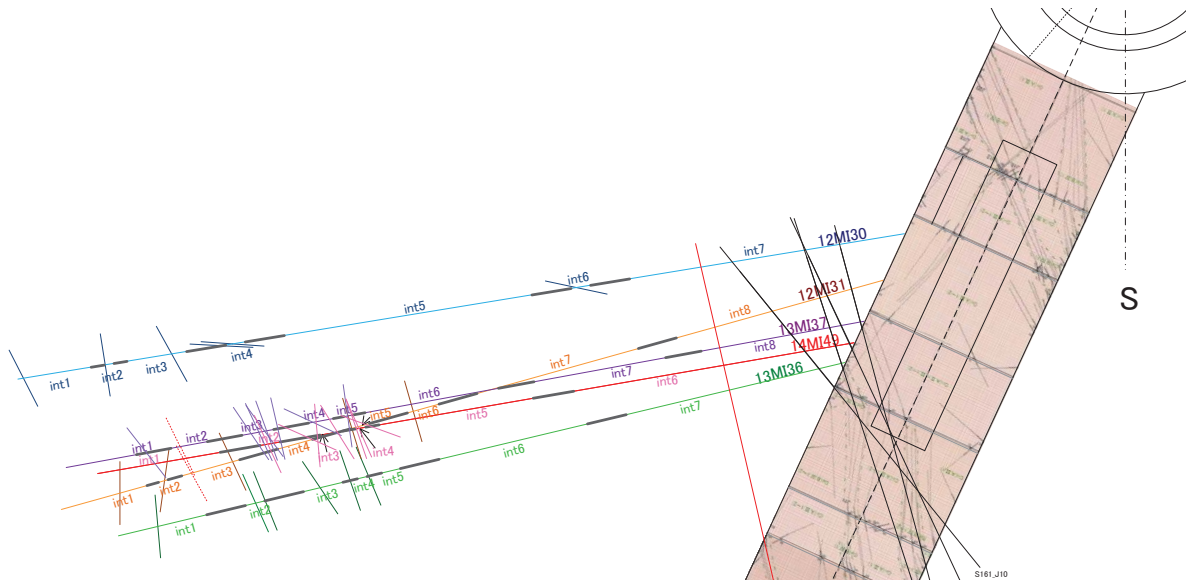


図 6.3.1-2 深度 300m ボーリング横坑でのボーリング孔の区間編成図

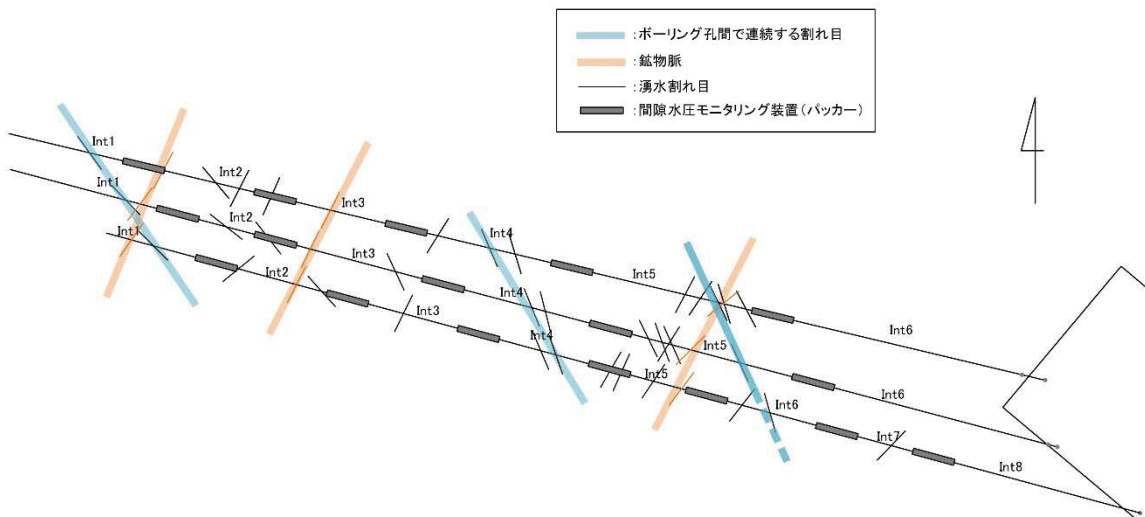


図 6.3.1-3 深度 500m 研究アクセス南坑道でのボーリング孔の区間編成図

6.3.1.2 採水方法

分析項目、必要水量を表 6.3.1-1 示す。これらの項目について採水を実施した。

各採水区間の水圧が高く、湧出することから、各採水区間へ繋がっている外径 6 mm 内径 4 mm のナイロンチューブから採水した。

希ガス採水は以下の手順により行った。試料採取時の写真を図 6.3.1-4 に示す。

- ① 銅管(外形 12mm、内径 10mm) の両側にバルブを接続する。
- ② 各採水区間へつながっているチューブを銅管に接続する。銅管は 3 本を 6 mm チューブで接続し、下流端に圧力計、ニードルバルブ、流量計をセットする。
- ③ 区間のバルブを開放し、圧力を確認する。
- ④ ニードルバルブを調整し、圧力変動を初期圧力 20%以内として地下水を流す。
- ⑤ 数リットル程度地下水を通水後、銅管のバルブを下流側から順次閉める。
- ⑥ 銅管バルブを閉めたままチューブを外す。
- ⑦ 銅管バルブを閉めたまま銅管の両端をクランプで締める(図 6.3.1-5)。銅管からバルブを外し、採取深度、孔番、採取日、採取番号を記入する。

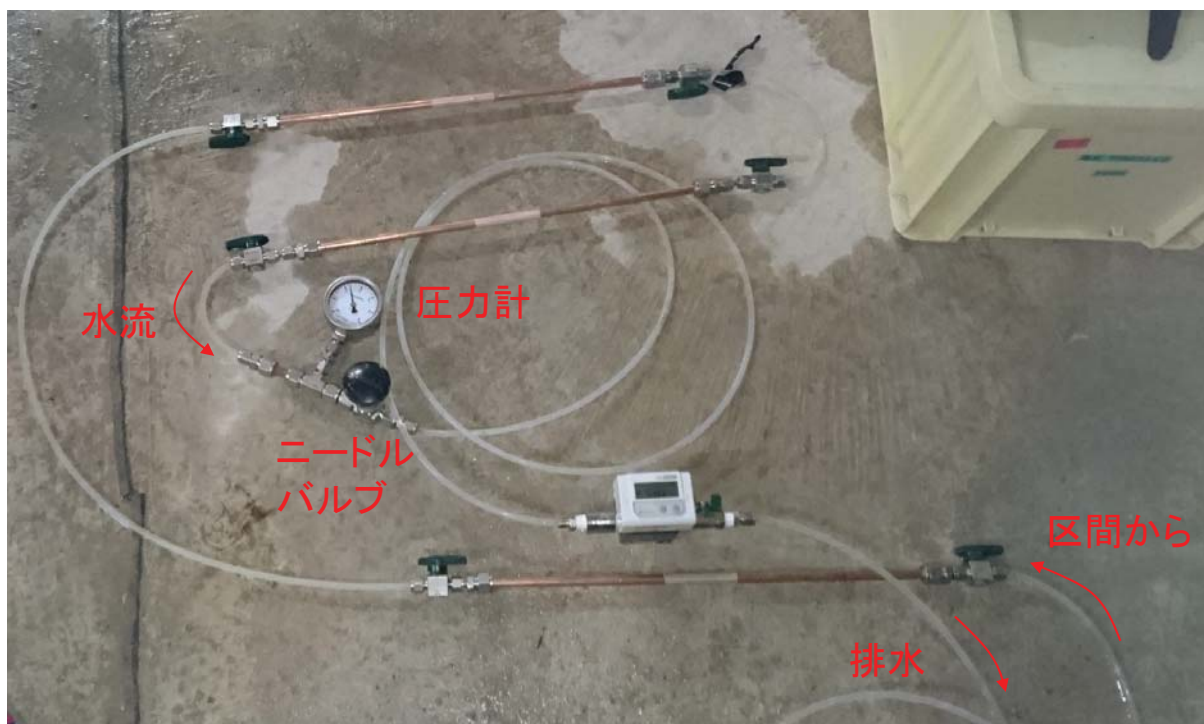


図 6.3.1-4 希ガスサンプリング状況

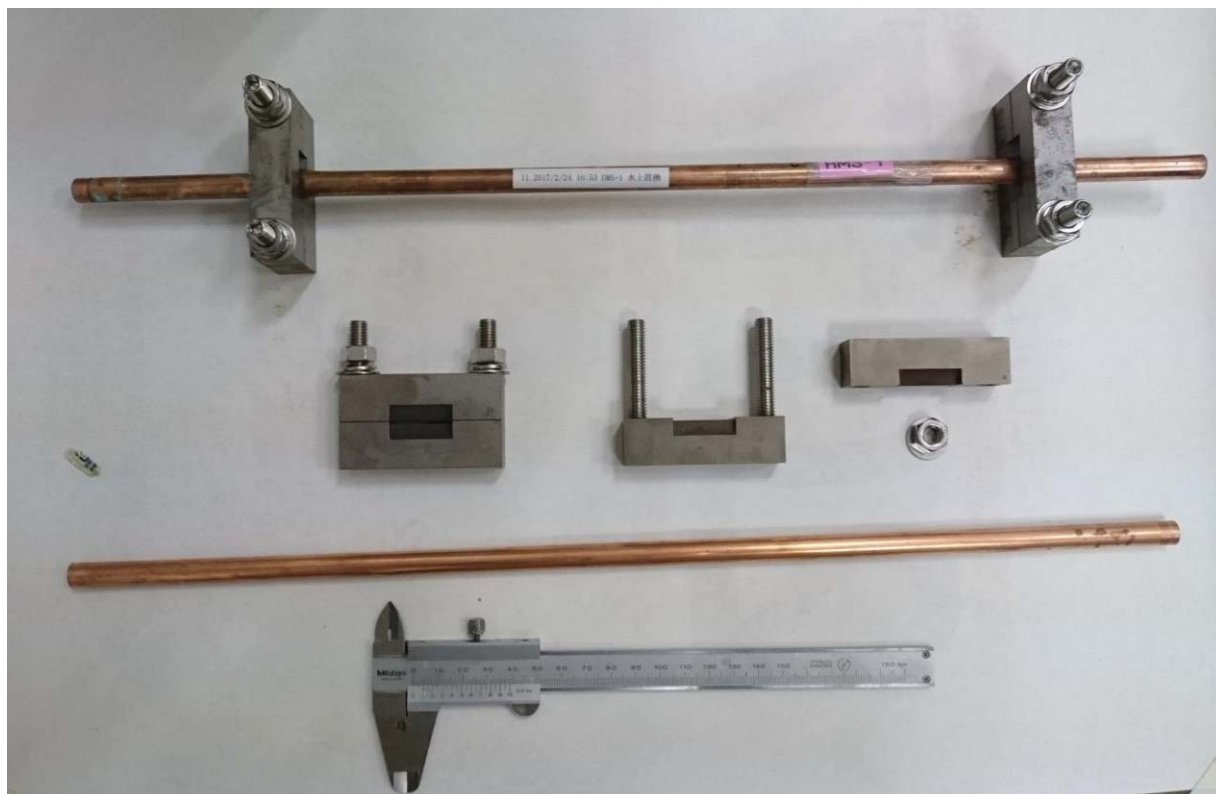


図 6.3.1-5 銅管の採取結果およびクランプ

その他の主要溶存イオン、微量元素、TOC、水素・酸素同位体比、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、CFCs、 SF_6 の採水方法について以下に説明する。

主要溶存イオンなど (Na、K、Mg、Ca、 SO_4 、Cl、I、F、Si、B) の分析用サンプルは以下のように採取した。100 ml のプラスチック製ボトルに容器の 1/10 程度に地下水を入れ、フタをして共洗いをする。共洗いを 3 度実施した後、チューブの外側を地下水で洗浄し、ボトルの底までチューブを差し込んで、ボトル内を地下水で満たす。チューブを差し込んだままで、さらに容器の 3 倍の地下水をオーバーフローさせる。その後、静かにチューブを引き抜き、気泡が入らないようにフタをする。ビニールテープでフタが閉まる方向(時計回り)に数回巻いて密封する。

微量元素 (Sr、Ba、Fe、Mn、Se、As、Se、Al、Cs) の分析用のサンプルの採取方法と使用ボトルは、主要溶存イオンと同じである。この試料では、使用ボトルの壁面への陽イオンの吸着を抑制するために、採取後に 2 ml の水を捨て、そののち、濃硝酸 1 ml を添加する。

TOC (TC、DIC、TOC(NPOC)) の分析用のサンプルは、50 ml のゴム製内蓋つきの褐色ガラス製ねじロビン瓶に採取する。採取方法は、主要溶存イオンと同じである。

水素・酸素同位体比の水素・酸素同位体比の測定用のサンプルは、採取容器が 25 ml のガラス製ねじロバイアルビンに採取する。採取方法は主要溶存イオンと同じである。

^3H 試料の採水には、1 L のプラスチック製ボトルを 2 本使用する。共洗いは行わず、チューブの外

側をよく地下水で洗浄し、チューブを底まで入れ、ボトルからオーバーフローする直前にチューブを静かに引き抜きながら、容器を満たし、なるべく空気が入らないようにフタをする。

^{14}C と $\delta^{13}\text{C}$ の分析用の採取方法は、主要溶存イオンと同じであるが、炭酸ガスの脱ガスを防ぐために、採水容器には、1 L のフロロバリアボトルを使用し、2 本採取する。

^{36}Cl 試料には 1 L のポリビンを使用する。作業者の手から塩分が混入する可能性があるため、作業時は地下水でよく洗浄したゴム製手袋を装着して行う。

CFCs の採取は USGS (2017a) の推奨する方法に準じ、125 ml のガラス瓶とアルミホイルで被覆したパッキン入りのキャップを用いる。また、空気の混入を防ぐため、採取を水中で行う。チューブは、ナイロンチューブやバイトンチューブなど低透気性でフロンが含まれないものを用いる。ガラス瓶の底までチューブを挿し込み、容器からオーバーフローさせたのち、チューブを挿したまま水が満たされた 5L ビーカーへガラス瓶を静かに沈める。さらに数回分のオーバーフローを行い、水中でフタをする。フタをする前にフタに空気などが残っていないことを確認する。

SF_6 の採取も USGS (2017b) の推奨する方法に準じて実施した。500 ml or 1000 ml のデュラン瓶とフタには PTFE 製のパッキンを用いた。採水時には、容器の底までチューブを挿し込み、容器容量の数倍をオーバーフローさせたのち、空気が混入しないようにフタを締める。

表 6.3.1-1 採水項目と採取目的および取得量

項目	目的	取得量	備考
主要溶存イオン	主要なイオン濃度評価	100mL×2本	
微量元素	微量に含まれる金属元素を定量	100mL×1本	
水素・酸素同位体比	水素・酸素同位体比を評価	10mL×2本	
炭素同位体 (¹⁴ C、 δ ¹³ C)	地下水年代測定のために地下水 中の無機炭素の ¹⁴ C、 ¹³ C を評価	1000mL×1本	
炭素同位体 (³⁶ Cl、 δ ³⁷ Cl)	地下水年代評価や、塩化物イオン の起源情報となる、塩化物イオン 同位体 (³⁶ Cl、 ³⁷ Cl) を評価	1000mL×2本	
TOC	地下水中溶存有機炭素量を評価	50mL×1本	
アルカリ度	アルカリ度を評価し、その結果か ら炭酸水素イオン濃度を評価	50mL×1本	
希ガス濃度	地下水年代指標となる希ガス (He、Ne) 濃度を評価	銅管×3本	地表でクラ ンプ留め
CFCs	溶存クロロフルオロカーボン量 から、若い地下水の混入を評価	125mL×3本	ホイルで被 覆パッキン
SF ₆	六フッ化硫黄量から、若い地下水 の混入を評価	500mL or 1000ml × 2本	PTFE 製パッ キン
トリチウム	トリチウム濃度から、若い地下水 の混入を評価	1000mL×2本	

6.3.1.3 分析方法

地下水の溶存成分の内、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、アルカリ度、Br, I, Si, B, Fe, Se, Sr, Li, Mn, Zn, Ba, Al, Rb, Cu, As, Cs、水素・酸素同位体、 ^3H 、炭素同位体(^{14}C 、 $\delta^{13}\text{C}$)、塩素同位体(^{36}Cl 、 $\delta^{37}\text{Cl}$)、希ガス、CFCs、 SF_6 を分析した。

陽イオン(Ca, Mg, Na, K)の定量分析には、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）を用いて検量線法により実施した（例えば、日本分析化学会北海道支部編、1994）。試料水中の各イオンを分離する分離カラムには、陽イオン交換樹脂が充填されている YS-50A、ガードカラムには YS-G を使用した。検量線は、元素ごとに関東化学製化学分析用標準溶液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製した。

陰イオン(F, Cl, NO_3 , SO_4)の定量分析には、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 CO_2 サプレッサ付き）を用いて検量線法により実施した（例えば、日本分析化学会北海道支部編、1994）。試料水中の各イオンを分離する分離カラムには、陰イオン交換樹脂が充填されている A Supp 5-150、ガードカラムには ShodexSI-90G を使用した。検量線は、元素ごとに和光純薬工業株式会社製化学分析用標準溶液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

アルカリ度の測定は、酸標準液(0.01mol/L 硫酸)を用いて pH4.8 まで滴定する手法(pH4.8 アルカリ度)により実施した（例えば、半谷・小倉、1995）。試料 20mL をビーカーにはかり取り、pH メーターで試料の pH を確認しながら、pH4.8 になるまで酸標準液で滴定した。

微量元素(Br, I, Si, B, Fe, Se, Sr, Li, Mn, Zn, Ba, Al, Rb, Cu, As, Cs)の定量分析には、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実施した（例えば、社団法人日本分析化学会関東支部編、2008）。検量線は、元素ごとに和光純薬工業株式会社製化学分析用標準溶液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

TOC および NPOC(Non-Purgeable Organic Carbon：不揮発性有機体炭素)の測定は、島津製作所製 TOC-V CSH を用いた非分散型赤外分析計 (Non-Dispersive Infrared Gas Analyzer：NDIR) で実施した（例えば、半谷・小倉、1995）。

TOC の定量分析は、試料中の全炭素 (Total Carbon：TC) と無機体炭素 (Inorganic Carbon：IC, または TIC) をそれぞれ測定し、TC 濃度から IC 濃度を差し引いて求める方法(差し引き法)で実施した。検量線は、TC 濃度用に和光純薬工業株式会社製フタル酸水素カリウム標準液、IC 濃度用に和光純薬工業株式会社製炭酸ナトリウムおよび炭酸水素ナトリウムを混合した標準溶液をそれぞれ既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

NPOC の定量分析は、試料水を酸性(pH3 以下)にして通気処理し、試料水中の IC を CO_2 として除去した後に TC を測定する方法(IC 前処理法またはプレ IC 除去法)で実施した。検量線は、和光純薬工業株式会社製フタル酸水素カリウム標準液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

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 Off-axis ICOS 法(Off-axis Integrated Cavity Output Spectroscopy)にて、試料中の水素同位体比および酸素同位体比の同時分析を実施した(山中・恩田、2011)。分析は手順書に準じた。

上記の分析は電力中央研究所で実施した。

^3H 分析は、電解濃縮(アルカリ水溶液電解)ー液体シンチレーション計数法によって実施した(文部科学省、2002)。試料水を予め蒸留精製しアルカリ電解溶液とした後、電解濃縮を行う。電解濃縮終了後、電解液を中和・蒸留し、液体(乳化)シンチレータを加え、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターにより計測する。分析は地球科学研究所で実施した。計測結果は、水素原子 10^{18} 個に対して ^3H が 1 個存在する率である TU で示した。

^{14}C 分析は、グラファイト・ターゲットー加速器質量分析法(AMS 法)で実施した(中村、2003)。沈殿法では、試料水 1 リットルにつき 1.2g の塩化ストロンチウムを加え、試料水中の無機炭素を炭酸ストロンチウムとして沈殿させる。沈殿物は中性になるまで洗浄し、乾燥させた後、リン酸と反応させ CO_2 ガスを生成させる。得られた CO_2 ガスを精製した後、コバルト触媒をもちいて 600°C に加熱しグラファイトを調製した。それらグラファイトをターゲットとし加速器質量分析(AMS: Accelerator Mass Spectrometry)によって定量した。ガス化法では、試料水にリン酸を加えて CO_2 をガスとして回収した後、グラファイトを生成する(Nakata et al., 2016)。分析は Beta Analytic Inc. で実施した。

^{36}Cl 分析は、 AgCl ・ターゲットー加速器質量分析法(AMS 法)で実施した。水試料に含まれる塩化物イオンを塩化銀として回収し、それをターゲットとして AMS によって定量する(Fifield et al., 2010)。分析は、Australia National Univ. で実施した。試料は、水試料の pH を酸性側に調整した後に、過剰量の硝酸銀を加えることにより、水試料中の塩素イオンを白色の塩化銀として沈殿させ回収する。一般的に水試料の塩素イオン濃度が 20 mg/L 以上ならば、煩雑な手間をかけずに直接沈殿させることにより塩素イオンを回収することができる。塩化物イオン濃度が少ない場合には、イオン交換カラムに通水させて Cl を捕集した(Nakata and Hasegawa, 2011)。 ^{36}Cl の分析では、 ^{36}S が AMS 測定に影響する可能性が指摘されている(Elmore et al., 1979)。この ^{36}S の ^{36}Cl 測定への影響を小さくするために塩化銀の精製を行う。精製手順として、回収された塩化銀をアンモニア水に溶解させ、硝酸バリウムを加えることにより不純物として微量に含まれる硫酸イオンを硫酸バリウムとして沈殿させる。この工程は硫酸イオン濃度によっても異なるが概ね 3 回程度繰り返される。

$\delta^{37}\text{Cl}$ 分析は、塩化銀-ヨウ化メチル($\text{AgCl}-\text{CH}_3\text{Cl}$)変換ー安定同位体比ガスクロマトグラフ質量分析法で実施した(Long et al., 1993)。試料水から生成させた AgCl 沈殿に、ヨウ化メチル(CH_3I)を加え、塩化メチル(CH_3Cl)に変換する。この CH_3Cl の同位体比をガスクロマトグラフ付同位体比質量分析計に導入し測定する。分析は Waterloo Univ. で実施した(Shouakar-Stash et al., 2005)。

希ガスの定量は、希ガス質量分析装置 VG-5400(VG instruments)とその前処理ラインを用いて行

った(馬原、1998)。地下水サンプルを封入した銅管を、直接装置へと接続する。これにより、銅管内の希ガスを散逸させることなく前処理ライン内へ導入することが可能である。抽出ライン内では、まず、サンプルに超音波をあてることで、地下水サンプルからガス成分のみを抽出する。抽出されたガス成分に対して、コールドトラップ(液体窒素温度)・チタンゲッターを作用させ、水分や反応性のガスを取り除き希ガス成分のみを取り出すことができる。さらに、ステージ内温度を20 Kまで低下させることができるクライオスタッドを用いて希ガスを各成分に単離し、希ガスごとに質量分析装置へと導入する。質量分析装置では希ガスをイオン化し、適切な磁力をかけることによって設定した質量数のみをカウントすることができる。既知量(0.13cc)の空気に含まれる希ガスにおけるカウント数と、サンプルに含まれる希ガスにおけるカウント数を比較し、サンプルに含まれる希ガス量および同位体比を決定した。分析は電力中央研究所で実施した。

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・定量を行った(Bunsenberg and Plummer, 2000)。

CFCsとSF₆の分析は、地球科学研究所で実施した。

6.3.1.4 分析結果

原位置において、ポータブルのメーターを用いて、pH、ORP(酸化還元電位)、EC(電気伝導度)、DO(溶存酸素)、温度を分析した結果を表6.3.1-2に示す。採取状況を図6.3.1-6に示す。

主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスの分析結果を表6.3.1-3に示す。

¹⁴Cについては、地層中に存在する鉱物や有機物によって希釈される可能性がある。このため、 $\delta^{13}\text{C}$ に基づく補正を実施した。ここでは、涵養時の地下水の $\delta^{13}\text{C}$ を-18‰、鉱物の¹⁴Cと $\delta^{13}\text{C}$ を0 pMCと0‰として、希釈前の¹⁴C濃度(Cor. ¹⁴C)を、図6.3.1-7に示すように求めた。なお、¹⁴C量は100 pMCの¹⁴C濃度の存在比率が炭素の1兆分の1として求めたものである。

なお、希ガスの分析結果は、脱ガスや空気の混入の恐れがあるため、Neによる補正を実施した。補正方法は、地下水中のNe量が大气平衡値であると仮定し、試料中のNe量が大气平衡値よりも大きければ、大気が混入したと仮定して、式(6.3.1-1)に示すように、過剰量に相当するHe量を差し引く。また、Ne量が大气平衡値よりも小さければ、式(6.3.1-2)に示すように、脱ガスしたとして減少したNe量と同率でHe量を割り戻す。

$$He_c = He_m - (Ne_m - Ne_0) \frac{He_a}{Ne_a} \quad (Ne \geq 2.0 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w) \quad (6.3.1-1)$$

$$He_c = He_m \frac{Ne_0}{Ne_m} \quad (Ne < 2.0 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w) \quad (6.3.1-2)$$

ここに、 He_c は脱ガス補正した He 濃度、 He_m は地下水中の He 濃度、 Ne_0 は大気との溶解平衡に達した Ne 濃度 ($2 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$)、 Ne_m は地下水中の Ne 濃度の計測値、 He_a/Ne_a は 0.288 である。

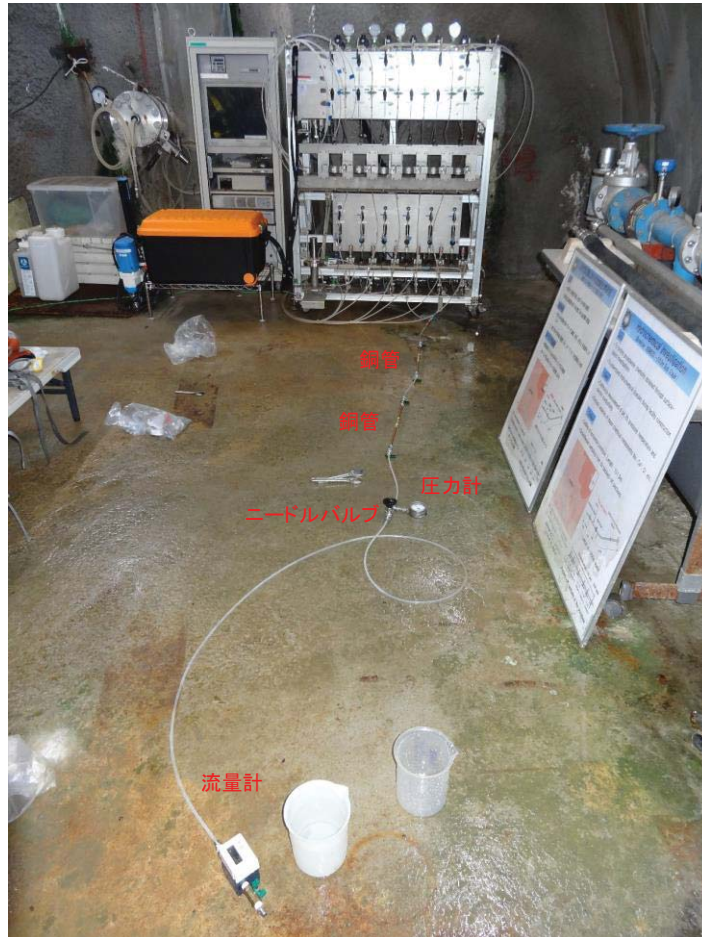


図 6.3.1-6 採水状況

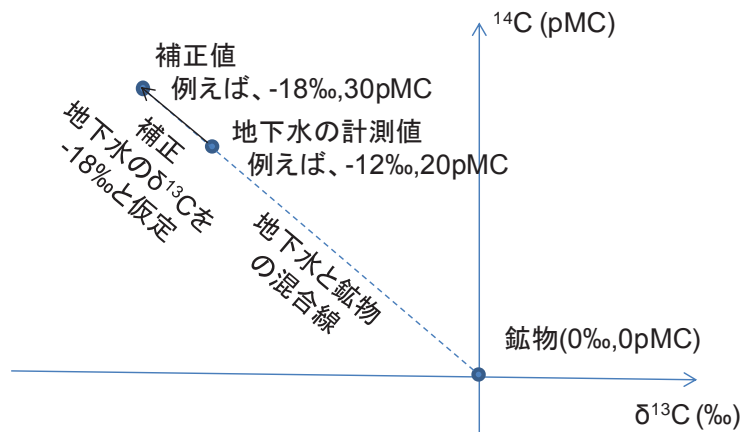


図 6.3.1-7 補正 ^{14}C 算出方法の概念図

表 6.3.1-2 原位置計測結果

項目	採水時間	區間壓力 (Mpa)		流量 L/min	pH	ORP mV	EC mS/cm	DO mg/l	T °C
		採水前	採水時						
07MI07#1	2016/9/6 10:20	0.80	0.4	0.5	8.78	-350	31.5	0.0	22.7
07MI07#3	2016/9/9 9:20	0.80	0.759	0.745	8.59	-333	45.9	0.0	22.4
07MI07#5	2016/9/6 10:25	0.80	0.5->0.7	0.44->0.26	8.78	-340	52.4	0.0	22.8
09MI20#1	2016/9/7 14:20	1.80	1.6	0.45	8.32	-358	36.9	0.0	23.7
09MI20#3	2016/9/7 14:20	1.75	1.6	0.45	8.29	-340	40.2	0.0	23.5
09MI20#5	2016/9/27 11:55	1.78	1.4	0.6	8.63	-378	38.7	0.0	23.6
09MI21#2	2016/9/27 16:20	2.10	1.6->0.8	0.11->0.05	8.83	-345	77.8	0.0	24.5
09MI21#3	2016/9/27 16:10	2.20	1.9	0.075->0.04	8.47	-330	86.0	0.0	23.8
12MI31#1	2016/9/27 11:35	1.70	1.1	0.3	8.37	-355	66.8	0.0	24.2
13MI37#5	2016/9/27 11:43	1.40	1.4	0.6	8.63	-330	73.0	0.0	24.3
10MI26#1	2016/9/26 14:00	2.60	1.8	0.3	8.26	-363	50.9	0.0	25.3
10MI26#3	2016/9/26 14:00	2.15	1.8	0.17	8.27	-331	47.8	0.0	25.2
10MI26#5	2016/9/26 14:00	2.05	1.8	0.4	8.52	-345	45.5	0.0	25.0
12MI33#1	2016/9/8 10:30	4.00	3.1	0.8	8.26	-331	142	0.0	28.1
13MI38#1	2016/9/8 10:00	3.80	3.6	0.12	8.23	-324	141	0.0	28.2
13MI38#5	2016/9/8 11:00	3.80	3.4	0.6	8.16	-328	247	0.0	28.4
15MI52#1	2016/9/2 10:30	3.60	2.8	0.11->0.12	8.4	-356	131	0.0	27.3
15MI53#5	2016/9/2 10:30	3.60	3.1	0.8	8.69	-375	172	0.0	28.4

表 6.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果

(1) 主要溶存イオン

サンプル名	Na	K	Mg	Ca	B	F	Cl	NO ₃	SO ₄	Si	ALK	TOC	TC	TIC	NPOC
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
07M07#1	70	0.36	0.055	15	1.4	10	56	<0.01	11	6.9	1.1	-3.7	8.0	12	0.19
07M07#3	85	0.42	0.089	17	1.3	10	91	<0.01	9	6.8	0.87	-1.2	8.4	10	0.17
07M07#5	98	0.46	0.16	19	1.2	10	130	<0.01	8	6.7	0.78	-0.2	7.5	8	0.14
09M20#1	72	0.37	0.11	14	1.1	9.0	47	<0.01	16	7.1	1.4	-3.7	12	15	0.19
09M20#3	76	0.44	0.22	15	1.2	10	61	0.02	13	6.8	1.3	-2.4	11	14	0.22
09M20#5	69	0.39	0.15	18	1.3	8.4	49	<0.005	15	7.2	1.3	-2.1	13	15	0.20
09M21#2	130	0.43	0.059	28	1.3	8.7	200	<0.01	0	6.1	0.48	1.6	5.5	3.8	0.07
09M21#3	120	0.52	0.082	34	1.4	8.9	190	<0.01	1	9.1	0.60	1.0	6.0	5.0	0.08
12M31#1	110	0.53	0.11	29	1.3	8.8	160	<0.005	6	6.8	0.67	0.0	7.1	7.0	0.09
12M37#5	120	0.6	0.19	35	1.2	8.5	180	<0.005	6	6.9	0.62	0.2	6.2	6.0	0.08
10M26#1	86	0.58	0.42	21	1.3	9.0	82	<0.005	13	7.3	1.3	-1.3	13	14	0.17
10M26#3	94	0.69	0.53	24	1.3	9.1	91	<0.005	11	7.7	1.5	-2.1	15	17	0.18
10M26#5	81	0.54	0.34	21	1.2	9.3	75	<0.005	13	7.3	1.3	-0.9	13	14	0.18
12M33#1	180	0.91	0.16	90	1.7	6.2	410	<0.01	0	6.7	0.37	1.4	4.5	3.1	0.00
13M38#1	180	0.91	0.17	89	1.7	6.1	400	<0.01	0	7.0	0.39	1.6	4.8	3.1	0.00
13M38#5	230	1.3	0.16	200	2.0	4.7	730	<0.01	0	6.7	0.30	1.1	3.2	2.1	0.01
15M52#1	220	1.3	0.17	120	1.9	5.0	530	<0.01	3	6.8	0.30	0.6	2.9	2.4	0.12
15M53#5	220	1.2	0.17	150	2.2	5.3	570	<0.01	4	6.7	0.28	0.4	2.2	1.9	0.05

表 6.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果 (続き)

(2) 微量元素

サンプル名	Br	I	Cs	Sr	Li	Al	Mn	Fe	Zn	Cu	As	Se	Rb	Ba
	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
07MI07#1	100	16	0.30	80	39	7.6	1.7	0.88	0.10	<0.1	1.2	<0.1	1.8	0.31
07MI07#3	170	23	0.36	110	42	6.5	1.9	1.2	0.11	<0.1	0.91	<0.1	2.1	0.48
07MI07#5	240	31	0.44	140	46	8.0	1.8	2.7	0.39	0.31	0.88	<0.1	2.4	0.66
09MI20#1	93	13	0.28	74	40	25	2.3	13	8.4	2.1	0.67	<0.1	1.7	0.45
09MI20#3	120	16	0.38	87	42	7.9	3.1	5.000	0.20	<0.1	0.95	<0.1	2	0.48
09MI20#5	110	15	0.40	82	42	8.3	2.7	4.2	0.53	1.1	0.69	<0.1	2.1	0.42
09MI21#2	380	44	1.1	210	84	11	2.2	2.4	0.65	0.099	0.77	<0.1	2.7	0.92
09MI21#3	340	44	5.9	260	100	1400	340	3500	13	150	2.4	<0.1	15	10
12MI31#1	310	44	0.64	210	56	10	2.9	2.7	0.28	0.27	0.83	<0.1	3.2	0.92
12MI37#5	350	51	0.76	270	67	6.9	4.5	2.8	0.27	0.15	2	<0.1	3.6	1.2
10MI26#1	160	23	0.46	120	50	10	5.5	3.6	0.44	0.14	0.7	<0.1	2.4	1.1
10MI26#3	180	24	0.41	160	52	6.7	9.9	4.8	2.3	0.39	0.84	<0.1	2.5	1.5
10MI26#5	150	21	0.28	120	49	8.5	5.3	2.3	1.3	2.2	0.76	<0.1	1.9	1.0
12MI33#1	720	120	1.7	890	160	8.2	10	3.8	0.79	0.2	0.59	<0.1	7.2	3.0
13MI38#1	710	170	1.7	890	160	13	11	5.7	0.97	0.59	0.57	<0.1	7.4	3.1
13MI38#5	1300	280	2.9	2200	260	7.1	25	6.5	0.34	0.36	0.69	<0.1	12	7.1
15MI52#1	930	240	2.1	1200	170	13	12	11	0.24	0.15	0.94	<0.1	8.7	3.6
15MI53#5	990	260	2.00	1500	200	47	8.9	4.3	0.15	0.15	0.89	<0.1	9.1	5.1

表 6.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果 (続き)

(3) 同位体

サンプル名	^3H		^{14}C		$\delta^{13}\text{C}$		$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$		$\delta^{37}\text{Cl}$		δD		$\delta^{18}\text{O}$	
	T.U.		pMC (%)		‰		$\times 10^{-15}$	‰		‰		‰		‰
07M107#1	0.7 ±0.1		20.5 ±0.1		-15.5		53.9 ±3.1		-0.4 ±0.1		-57.0 ±0.3		-8.36 ±0.02	
07M107#3	0.6 ±0.1		18.7 ±0.1		-15.8		N.M.		N.M.		-57.1 ±0.3		-8.41 ±0.02	
07M107#5	<0.3		15.9 ±0.1		-16.5		N.M.		N.M.		-58.3 ±0.3		-8.59 ±0.03	
09M120#1	0.7 ±0.1		25.4 ±0.1		-15.8		52.2 ±3.5		-0.8 ±0.0		-55.9 ±0.5		-8.36 ±0.04	
09M120#3	0.5 ±0.1		19.3 ±0.1		-14.2		N.M.		N.M.		-56.6 ±0.2		-8.36 ±0.06	
09M120#5	0.9 ±0.1		6.1 ±0.1		-12.7		N.M.		N.M.		-59.7 ±0.2		-8.91 ±0.04	
09M121#2	<0.3		5.8 ±0.1		-14.8		47.3 ±3.5		-0.1 ±0.2		-59.7 ±0.2		-9.03 ±0.13	
09M121#3	<0.3		8.1 ±0.1		-15.8		N.M.		N.M.		-59.4 ±0.6		-8.77 ±0.08	
12M131#1	<0.3		7.9 ±0.1		-16.0		35.2 ±6.6		-0.3 ±0.1		-59.5 ±0.6		-8.90 ±0.01	
12M137#5	<0.3		11.1 ±0.1		-16.9		N.M.		N.M.		-58.8 ±0.4		-8.84 ±0.07	
10M126#1	0.6 ±0.1		22.2 ±0.1		-15.0		35.0 ±2.6		-0.5 ±0.3		-58.6 ±0.2		-8.70 ±0.09	
10M126#3	0.3 ±0.1		16.2 ±0.1		-16.6		N.M.		N.M.		-57.8 ±0.5		-8.73 ±0.07	
10M126#5	0.6 ±0.1		24.1 ±0.1		-15.8		N.M.		N.M.		-56.0 ±0.6		-8.47 ±0.03	
12M133#1	<0.3		13.6 ±0.1		-16.8		35.3 ±2.7		-0.1 ±0.1		-58.2 ±0.5		-8.77 ±0.10	
13M138#1	<0.3		11.6 ±0.1		-16.4		44.5 ±2.9		-0.1 ±0.2		-58.3 ±0.5		-8.64 ±0.05	
13M138#5	<0.3		11.8 ±0.1		-12.1		44.2 ±2.9		-0.4 ±0.0		-56.7 ±0.2		-8.46 ±0.04	
15M152#1	<0.3		12.4 ±0.1		-10.1		42.5 ±2.9		-0.6 ±0.1		-56.6 ±0.3		-8.76 ±0.07	
15M153#5	<0.3		16.2 ±0.1		-14.0		34.3 ±2.7		-1.0 ±0.1		-56.7 ±0.4		-8.53 ±0.12	

表 6.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果 (続き)

(4) 溶存ガス

サンプル名	CFCs 濃度			SF ₆ 濃度	計測値			補正值 (Ne補正)	
	CFC-12	CFC-11	CFC-113		⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He
	pg/kg			fmol/kg	cc _{STP} /g _w	-	cc _{STP} /g _w	cc _{STP} /g _w	-
07MI07#1	1.8	1.8	0.0	0.50	3.2E-5	4.5E-7	2.5E-7	3.2E-5	4.5E-7
07MI07#3	2.0	3.4	0.0	0.49	3.9E-5	4.6E-7	2.3E-7	3.9E-5	4.6E-7
07MI07#5	0.8	1.4	0.0	0.68	4.3E-5	4.7E-7	4.6E-7	4.3E-5	4.7E-7
09MI20#1	17.3	26.1	2.4	1.06	2.6E-5	4.4E-7	3.8E-7	2.6E-5	4.4E-7
09MI20#3	8.0	7.5	1.0	0.47	3.1E-5	4.6E-7	2.4E-7	3.1E-5	4.6E-7
09MI20#5	1.0	1.1	0.0	1.03	2.3E-5	4.3E-7	2.4E-7	2.3E-5	4.3E-7
09MI21#2	3.4	6.4	0.7	0.35	5.5E-5	5.0E-7	2.3E-7	5.5E-5	4.9E-7
09MI21#3	2.8	3.8	0.3	0.46	4.7E-5	4.4E-7	2.2E-7	4.7E-5	4.4E-7
12MI31#1	1.1	0.6	0.0	0.51	5.1E-5	4.5E-7	2.2E-7	5.1E-5	4.5E-7
12MI37#5	1.6	0.5	0.0	0.48	6.0E-5	4.6E-7	2.5E-7	6.0E-5	4.6E-7
10MI26#1	1.3	1.5	0.0	0.67	3.2E-5	4.6E-7	1.8E-7	3.5E-5	4.6E-7
10MI26#3	1.3	1.5	0.0	0.53	3.8E-5	4.5E-7	2.3E-7	3.8E-5	4.5E-7
10MI26#5	0.9	1.0	0.0	0.65	3.6E-5	4.7E-7	2.2E-7	3.6E-5	4.7E-7
12MI33#1	0.9	1.9	0.0	0.55	8.6E-5	4.4E-7	3.1E-7	8.6E-5	4.4E-7
13MI38#1	1.6	1.9	0.0	0.37	9.2E-5	4.2E-7	4.4E-7	9.2E-5	4.2E-7
13MI38#5	1.2	1.8	0.0	0.48	1.9E-4	4.9E-7	1.8E-6	1.9E-4	4.8E-7
15MI52#1	1.8	2.1	0.0	0.67	1.5E-4	4.9E-7	2.8E-7	1.7E-4	4.9E-7
15MI53#5	1.4	2.6	0.0	0.46	1.5E-4	4.9E-7	2.8E-7	1.7E-4	4.9E-7

6.3.1.5 考察

(1) 主要溶存イオンの経時変化

主要溶存イオンの時間的な変化をヘキサダイアグラムとして図 6.3.1-8 に示す。

主要溶存イオンは、ほとんどのボーリング孔では Na-Cl 型であるが、500 m 深度の研究アクセス南坑道奥の 15MI52 と 53 号孔、12MI33 号孔と 13MI38 号孔では、水質が Na-Ca-Cl 型であり、溶存イオン濃度が他地点に比べて 2 倍程度である。溶存イオン量は、立坑のステージから掘削されているボーリング孔では周辺に比べてやや低い傾向がある。200 m 予備ステージ(07MI07 孔)、300 m 予備ステージ(09MI20 孔)、400 m 予備ステージ(10MI26 孔)では少しずつ溶存イオン量が減少している。これは、後ほど水素・酸素同位体比の部分でも説明するが、立坑周辺において新しい地下水混合が顕著であり、徐々に進んでいるためと考えられる。立坑から離れたアクセス坑道の先の 09MI21 孔と 300 m ボーリング横坑 (13MI30#2、13MI37#5) で水質がほとんど変化していない。これらの地点では新しい地下水の混合が少ないためと考えられる。

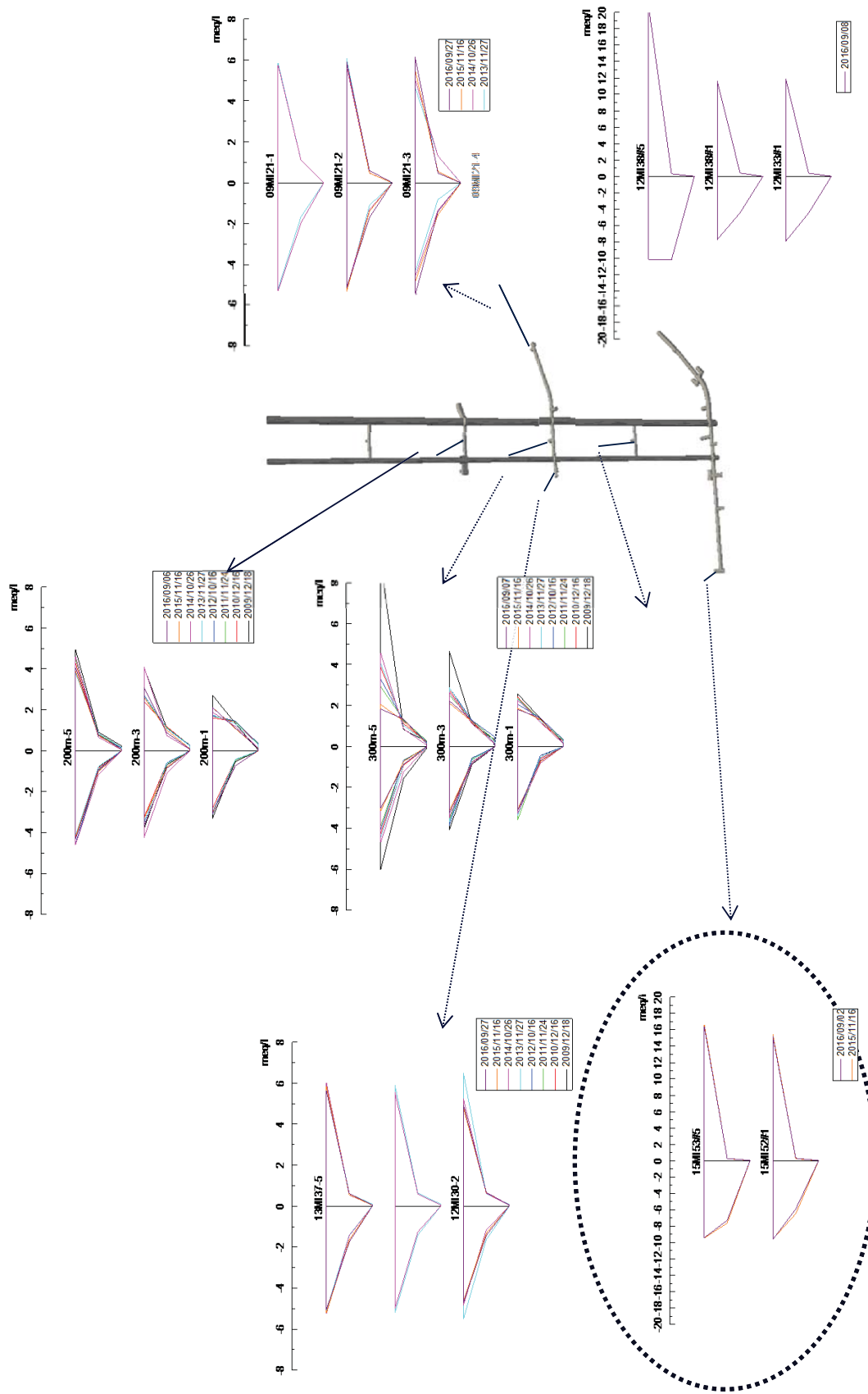


図 6.3.1-8 ヘキサダイアグラムの時間変化

(2) 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比は、広域地下水流動系において流出域に位置する立坑では、低い値を示す傾向がある。これは、Iwatsuki et al. (2005)でも議論されているように、低い温度で涵養されているためではないかと推定されている。また、Hasegawa et al. (2016a)では、流出域での地下水年代は、 ^4He 年代や ^{14}C 年代などから2万年程度のため、氷期に涵養した地下水が残留しているのではないかと推定している。これに対して新しい地下水は、氷期に比べて高い温度で涵養しているため、水素・酸素同位体比が高い。このため、水素酸素同位体比は、新しい水の指標になると考えられる。

水素・酸素同位体比の関係を図 6.3.1-9 に示す。★で示したものが、これまでの調査結果から、新しい地下水と流出域の地下水の代表的な値である。この結果から、立坑の地下水は新しい地下水と流出域の地下水の混合線上に載ることが分かる。水素・酸素同位体比は、立坑沿いの200m、300m、400m 予備ステージでは、300m アクセス坑道奥、500m 北研究坑道奥に比べて高い傾向があり、前述の主要溶存イオンと同様に、立坑周辺で新しい地下水の混合率が高いように見える。特に、300m アクセス坑道奥は、流出域の地下水とほぼ同じ値を示しており、新しい地下水の混合が進んでいないと考えられる。

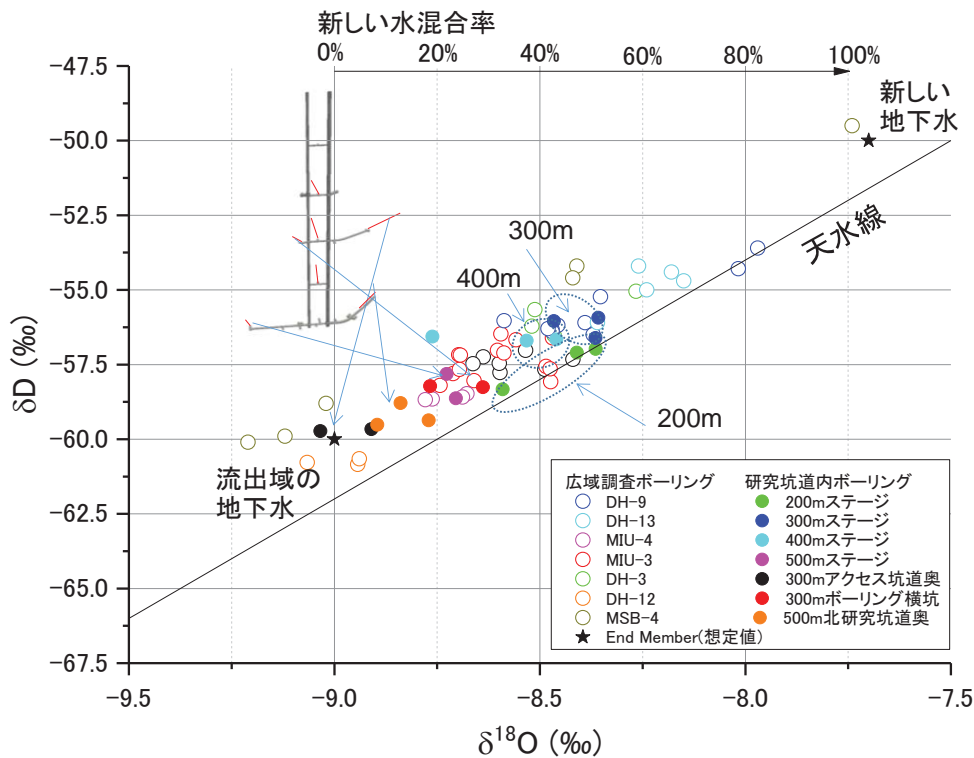


図 6.3.1-9 水素同位体と酸素同位体の関係

(3) 混合指標の評価

立坑掘削によって立坑周辺では、起源の異なる地下水の混合が起きていると考えられる。例えば、新しい地下水と元々存在した流出域の地下水とが混合する現象が想定される。これら进行评估するために、分析した項目について相関分析を実施した。

相関分析の相関係数を示したものを表 6.3.1-4 に示す。新しい水の指標としては前述の水素酸素同位体比があげられる。この水素同位体比を基に、相関の高い成分を見ると、 SO_4 、 HCO_3 (Alkalinity)、TC(Total Carbon)、TIC(Total Inorganic Carbon)、NPOC(不揮発性有機炭素)、酸素同位体比、 ^3H (トリチウム)、 ^{14}C (percent Modern Carbon)、 ^{14}C (atm/L)との相関が高い。 SO_4 、 HCO_3 、 ^3H 、 SF_6 など相関が高いものを図 6.3.1-10 に示す。あわせて、 δD と ^{14}C (percent Modern Carbon)、Cor. ^{14}C (percent Modern Carbon)、Cor. ^{14}C (atm/L)の関係を図 6.3.1-11 に示す。

SO_4 、 HCO_3 、無機・有機炭素については、新しい地下水には多く含まれているものの、流出域の地下水にはほとんど含まれていないため、高い相関が得られるものと考えられる。また、高い相関となるためには、新しい地下水において概ね一定の SO_4 、 HCO_3 、無機・有機炭素濃度である必要がある。また、 ^3H 、 ^{14}C (pMC)、 ^{14}C (atm/L)との相関性も高い。これらも、新しい地下水には含まれるが、古い地下水に含まれないためであると考えられる。 ^3H については、半減期が12.3年のため流出域の地下水にはほとんど含まれない、 ^{14}C は流出域の地下水では十分に小さくなっていると推定されるため、このような相関が得られたものと考えられる。ここで、重要な点はこのような相関が成立するためには、若い水でも ^3H や ^{14}C の濃度が一定である必要があることである。 ^3H は、原爆実験などの影響で、ここ50年間で濃度にかかなり大きな変動を持っているがその影響は明確に出ていない。

新しい水の指標になると期待していたフロンガス(CFCs)については、 δD との相関が0.3~0.4とあまり高くない結果となった。これは、還元環境ではフロンガスが微生物分解を受けるためではないかと考えられる。 SF_6 については、 δD との相関係数が0.62であり、明確に相関があるとは言にくい。これらについては、さらに6.4.2で説明する。

^{14}C については、長期に亘り比較的安定と考えられるが、涵養形態によって希釈率が異なると考えられている。これが、一定で見なせることは、涵養形態がほぼ一定(^{14}C (pMC)と ^{14}C の量(atm/L))であることを意味していることになる。このため、これらが一定で見なせることは、 ^{14}C 年代測定において初期値が確定したと見なせるため意義が大きい。 ^{14}C 年代測定については、昨年度から沈殿方からガス化法に変更したことにより、このような新しい水の浸入が明確に見えるようになった。

表 6.3.1-4 各成分の相関

Component	Unit	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	NO ₃	SO ₄	Br	I	ALK	TOC	TC	TIC	NPOC	Si	B	Cs	Sr	Li	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	As	
Na	mg/L	1.00	0.95	-0.14	0.95	-0.96	0.99																					
K	mg/L	0.95	1.00	0.11	0.94	-0.95	0.94																					
Mg	mg/L	-0.14	0.11	1.00	0.10	0.07	-0.16																					
Ca	mg/L	0.95	0.94	-0.10	1.00	-0.94	0.98																					
F	mg/L	-0.96	-0.95	0.07	-0.94	1.00	-0.95																					
Cl	mg/L	0.99	0.94	-0.16	0.98	-0.95	1.00																					
NO ₃	mg/L																											
SO ₄	mg/L	-0.80	-0.61	0.36	-0.65	0.66	-0.76																					
Br	μg/L	0.99	0.94	-0.16	0.98	-0.95	1.00																					
I	μg/L	0.97	0.96	-0.12	0.97	-0.96	0.98																					
ALK	meq/L	-0.86	-0.68	0.49	-0.73	0.73	-0.83																					
TOC	mg/L	0.73	0.57	-0.20	0.56	-0.62	0.68																					
TC	mg/L	-0.82	-0.64	0.59	-0.71	0.69	-0.80																					
TIC	mg/L	-0.81	-0.64	0.50	-0.71	0.71	-0.81																					
NPOC	mg/L	-0.24	-0.18	0.22	-0.24	0.22	-0.25																					
Si	mg/L	0.94	0.92	-0.11	0.94	-0.91	0.95																					
B	mg/L	0.53	0.42	-0.27	0.47	-0.45	0.52																					
Cs	μg/L	0.94	0.93	-0.11	1.00	-0.93	0.98																					
Sr	μg/L	0.97	0.93	-0.15	0.98	-0.95	0.99																					
Li	μg/L	-0.02	-0.10	-0.21	-0.07	0.09	-0.03																					
Al	μg/L	-0.02	-0.11	-0.20	-0.08	0.10	-0.04																					
Fe	μg/L	0.03	-0.05	-0.19	-0.02	0.04	0.02																					
Mn	μg/L	-0.08	-0.17	-0.24	-0.13	0.18	-0.09																					
Cu	μg/L	-0.17	-0.22	-0.15	-0.19	0.16	-0.17																					
Zn	μg/L	-0.12	-0.18	-0.21	-0.18	0.23	-0.13																					
As	μg/L																											
Se	μg/L																											
Rb	μg/L	0.73	0.66	-0.23	0.70	-0.67	0.74																					
Ba	μg/L	0.62	0.56	-0.15	0.62	-0.56	0.64																					
δ D	‰	-0.64	-0.43	0.41	-0.46	0.49	-0.59																					
δ ¹⁸ O	‰	-0.62	-0.48	0.09	-0.47	0.52	-0.57																					
³ H	TU	-0.70	-0.57	0.12	-0.53	0.53	-0.64																					
¹⁴ C	pMC	-0.33	-0.19	-0.07	-0.21	0.19	-0.29																					
δ ¹³ C	‰	-0.32	-0.20	0.71	-0.37	0.33	-0.38																					
¹⁴ C	atm/L	-0.75	-0.60	0.16	-0.59	0.58	-0.70																					
Cor. ¹⁴ C	pMC	-0.42	-0.22	0.19	-0.30	0.28	-0.39																					
Cor. ¹⁴ C	atm/L	-0.75	-0.57	0.36	-0.60	0.59	-0.71																					
Rn	Bq/L	-0.16	-0.21	-0.17	-0.31	0.25	-0.22																					
CFC-12	pg/kg	-0.30	-0.31	-0.18	-0.25	0.22	-0.28																					
CFC-11	pg/kg	-0.24	-0.28	-0.22	-0.20	0.17	-0.23																					
CFC-113	pg/kg	-0.30	-0.34	-0.20	-0.27	0.23	-0.29																					
SF6	fmoI/kg	-0.36	-0.25	0.07	-0.27	0.15	-0.34																					
⁴ He	ccSTP/‰	0.96	0.95	-0.13	0.98	-0.93	0.99																					
³ He/ ⁴ He	-	0.36	0.35	-0.04	0.37	-0.23	0.38																					
Ne	ccSTP/‰	0.52	0.51	-0.11	0.71	-0.52	0.63																					
Cor. ⁴ He	ccSTP/‰	0.96	0.95	-0.12	0.97	-0.93	0.97																					
Cor. ³ He/ ⁴ He	-	0.36	0.34	-0.03	0.36	-0.23	0.37																					

表 6.3.1-4 各成分の相関(続き)

Component	Unit	Rb	Ba	δD	$\delta^{18}O$	3H	^{14}C	$\delta^{13}C$	$^{14}C_{Cor.}$	$^{14}C_{Cor.}$	Rn	OF12	CF11	CF113	SF6	4He	$^3He/^4He$	Ne	4He	C	3He	C
Na	mg/L	0.73	0.62	-0.64	-0.62	-0.70	-0.33	-0.32	-0.75	-0.42	-0.16	-0.30	-0.24	-0.30	-0.36	0.96	0.36	0.52	0.96	0.36	0.36	0.36
K	mg/L	0.66	0.56	-0.43	-0.48	-0.57	-0.19	-0.20	-0.60	-0.22	-0.57	-0.31	-0.28	-0.34	-0.25	0.95	0.35	0.51	0.95	0.35	0.34	0.34
Mg	mg/L	-0.23	-0.15	0.41	0.09	0.12	-0.07	0.71	0.16	0.19	0.36	-0.17	-0.18	-0.22	0.07	-0.13	-0.04	-0.11	-0.12	-0.12	-0.03	-0.03
Ca	mg/L	0.70	0.62	-0.46	-0.47	-0.53	-0.21	-0.37	-0.59	-0.30	-0.60	-0.31	-0.27	0.98	0.37	0.71	0.97	0.36	0.71	0.97	0.36	0.36
F	mg/L	-0.67	-0.56	0.49	0.52	0.53	0.19	0.33	0.58	0.28	0.59	0.25	0.22	0.17	0.23	0.15	-0.93	-0.23	-0.52	-0.93	-0.23	-0.23
Cl	mg/L	0.74	0.64	-0.59	-0.57	-0.64	-0.29	-0.38	-0.70	-0.39	-0.71	-0.22	-0.28	-0.29	-0.34	0.99	0.38	0.63	0.99	0.38	0.37	0.37
NO ₃	mg/L																					
SO ₄	mg/L	-0.74	-0.65	0.96	0.87	0.86	0.71	0.26	0.94	0.80	0.95	0.00	0.40	0.34	0.35	0.65	-0.68	-0.21	-0.33	-0.66	-0.21	-0.21
Br	$\mu g/L$	0.73	0.63	-0.60	-0.58	-0.65	-0.30	-0.37	-0.70	-0.40	-0.72	-0.29	-0.23	-0.29	-0.35	0.99	0.38	0.64	0.97	0.38	0.38	0.38
I	$\mu g/L$	0.69	0.58	-0.48	-0.47	-0.56	-0.15	-0.37	-0.61	-0.25	-0.63	-0.21	-0.25	-0.20	-0.27	0.98	0.38	0.57	0.99	0.37	0.37	0.37
ALK	meq/L	-0.69	-0.56	0.87	0.69	0.81	0.48	0.51	0.88	0.65	0.95	-0.02	0.36	0.30	0.33	0.53	-0.78	-0.33	-0.35	-0.77	-0.32	-0.32
TOC	mg/L	0.63	0.55	-0.91	-0.84	-0.83	-0.74	-0.22	-0.93	-0.82	-0.93	0.02	-0.49	-0.43	-0.42	-0.55	0.60	0.22	0.26	0.57	0.22	0.22
TC	mg/L	-0.67	-0.55	0.81	0.57	0.74	0.35	0.58	0.80	0.55	0.89	-0.03	0.25	0.20	0.25	0.50	-0.77	-0.34	-0.35	-0.77	-0.34	-0.34
TIC	mg/L	-0.70	-0.58	0.89	0.69	0.82	0.50	0.50	0.89	0.67	0.96	-0.03	0.35	0.29	0.32	0.54	-0.76	-0.32	-0.34	-0.75	-0.32	-0.32
NPOC	mg/L	-0.68	-0.59	0.86	0.79	0.80	0.69	0.40	0.86	0.81	0.89	0.26	0.32	0.25	0.29	0.51	-0.70	-0.05	-0.42	-0.66	-0.04	-0.04
Si	mg/L	0.41	0.53	0.02	-0.24	0.08	-0.19	0.26	0.07	-0.10	0.14	-0.03	0.02	0.00	0.02	0.09	-0.28	-0.47	-0.19	-0.28	-0.47	-0.47
B	mg/L	0.69	0.61	-0.46	-0.47	-0.51	-0.21	-0.31	-0.62	-0.29	-0.63	-0.28	-0.33	-0.28	-0.35	0.93	0.34	0.48	0.94	0.34	0.34	0.34
Cs	$\mu g/L$	0.95	0.97	-0.66	-0.72	-0.52	-0.50	-0.16	-0.59	-0.56	-0.60	-0.04	-0.14	-0.11	-0.12	-0.32	0.46	-0.02	0.28	0.45	-0.02	-0.02
Sr	$\mu g/L$	0.70	0.62	-0.46	-0.46	-0.52	-0.21	-0.38	-0.58	-0.30	-0.60	-0.32	-0.24	-0.19	-0.26	-0.27	0.98	0.37	0.73	0.96	0.36	0.36
Li	$\mu g/L$	0.78	0.70	-0.60	-0.60	-0.61	-0.34	-0.34	-0.68	-0.43	-0.70	-0.30	-0.25	-0.20	-0.26	-0.34	0.96	0.29	0.63	0.94	0.28	0.28
Al	$\mu g/L$	0.65	0.73	-0.37	-0.46	-0.20	-0.37	0.03	-0.24	-0.38	-0.24	0.12	0.01	0.04	-0.15	-0.08	-0.24	-0.10	-0.08	-0.23	-0.23	-0.23
Fe	$\mu g/L$	0.64	0.72	-0.37	-0.46	-0.20	-0.37	0.03	-0.24	-0.38	-0.24	0.11	0.01	0.04	-0.15	-0.09	-0.23	-0.10	-0.10	-0.24	-0.24	-0.24
Mn	$\mu g/L$	0.69	0.77	-0.40	-0.50	-0.23	-0.40	0.03	-0.27	-0.41	-0.27	0.08	-0.02	-0.01	0.02	-0.17	-0.03	-0.23	-0.04	-0.04	-0.23	-0.23
Cu	$\mu g/L$	0.64	0.73	-0.35	-0.48	-0.16	-0.35	0.03	-0.20	-0.36	-0.21	0.10	0.03	0.02	0.06	-0.17	-0.14	-0.26	-0.12	-0.14	-0.25	-0.25
Zn	$\mu g/L$	0.43	0.52	-0.10	-0.25	-0.01	-0.13	0.08	0.09	-0.12	0.08	0.13	0.48	0.51	0.50	0.21	-0.22	-0.35	-0.09	-0.22	-0.35	-0.35
As	$\mu g/L$	0.38	0.44	-0.26	-0.24	-0.22	-0.24	-0.08	-0.22	-0.28	-0.23	0.30	-0.07	-0.12	-0.07	-0.26	-0.13	-0.05	-0.19	-0.12	-0.04	-0.04
Se	$\mu g/L$																					
Rb	$\mu g/L$	1.00	0.98	-0.67	-0.72	-0.59	-0.46	-0.27	-0.66	-0.54	-0.67	-0.16	-0.21	-0.18	-0.20	-0.34	0.69	0.06	0.43	0.67	0.06	0.06
Ba	$\mu g/L$	0.98	1.00	-0.58	-0.70	-0.52	-0.47	-0.17	-0.59	-0.52	-0.58	-0.15	-0.18	-0.15	-0.16	-0.32	0.60	0.06	0.43	0.58	0.06	0.06
δD	‰	-0.67	-0.58	1.00	0.85	0.85	0.75	0.25	0.91	0.85	0.93	-0.05	0.36	0.31	0.30	0.62	-0.50	-0.12	-0.23	-0.47	-0.13	-0.13
$\delta^{18}O$	‰	-0.72	-0.70	0.85	1.00	0.81	0.79	-0.02	0.82	0.80	0.77	-0.08	0.38	0.32	0.31	0.54	-0.49	-0.07	-0.24	-0.46	-0.07	-0.07
3H	TU	-0.59	-0.52	0.85	0.81	1.00	0.68	0.17	0.90	0.73	0.87	-0.14	0.32	0.29	0.28	0.62	-0.60	-0.31	-0.25	-0.58	-0.31	-0.31
^{14}C	pMC	-0.46	-0.47	0.75	0.79	0.68	1.00	-0.20	0.78	0.95	0.70	0.17	0.42	0.39	0.34	0.71	-0.19	0.04	-0.14	-0.14	0.03	0.03
$\delta^{13}C$	‰	-0.27	-0.17	0.25	-0.02	0.17	-0.20	1.00	0.16	0.11	0.36	0.18	-0.01	-0.02	0.03	-0.08	-0.37	0.04	-0.34	-0.35	0.05	0.05
^{14}C	atm/L	-0.66	-0.59	0.91	0.82	0.90	0.78	0.16	1.00	0.84	0.97	0.00	0.54	0.49	0.50	0.74	-0.64	-0.29	-0.25	-0.62	-0.29	-0.29
Cor. ^{14}C	pMC	-0.54	-0.52	0.85	0.80	0.73	0.95	0.11	0.84	1.00	0.82	0.19	0.40	0.36	0.33	0.68	-0.29	0.04	-0.22	-0.23	0.03	0.03
Cor. ^{14}C	atm/L	-0.67	-0.58	0.93	0.77	0.87	0.70	0.36	0.97	0.82	1.00	-0.01	0.48	0.43	0.44	0.67	-0.65	-0.27	-0.28	-0.63	-0.28	-0.28
Rn	Bq/L	-0.16	-0.15	-0.05	-0.08	-0.14	0.17	0.18	0.00	0.10	-0.01	1.00	0.10	0.13	0.14	0.07	-0.16	0.49	-0.37	-0.11	0.50	0.50
GFC-12	pg/kg	-0.21	-0.18	0.36	0.38	0.32	0.42	-0.01	0.54	0.40	0.48	0.10	1.00	0.98	0.99	0.46	-0.27	-0.10	-0.05	-0.26	-0.12	-0.12
GFC-11	pg/kg	-0.18	-0.15	0.31	0.32	0.29	0.39	-0.02	0.49	0.36	0.43	0.13	0.98	1.00	0.98	0.49	-0.22	-0.08	-0.02	-0.22	-0.10	-0.10
GFC-113	pg/kg	-0.20	-0.16	0.30	0.31	0.28	0.34	0.03	0.50	0.33	0.44	0.14	0.99	0.98	1.00	0.44	-0.28	-0.06	-0.05	-0.28	-0.08	-0.08
SF6	fmol/kg	-0.34	-0.32	0.62	0.54	0.62	0.71	-0.08	0.74	0.68	0.67	0.07	0.46	0.49	0.44	1.00	-0.31	-0.24	-0.09	-0.29	-0.26	-0.26
4He	c _{STP} /‰	0.69	0.60	-0.50	-0.49	-0.60	-0.19	-0.37	-0.64	-0.29	-0.65	-0.16	-0.27	-0.28	-0.31	1.00	0.47	0.66	0.99	0.47	0.47	0.47
$^3He/^4He$	-	0.06	0.06	-0.12	-0.07	-0.31	0.04	0.04	-0.29	0.04	-0.27	0.49	-0.10	-0.08	-0.06	-0.24	0.47	1.00	0.28	0.50	1.00	1.00
Ne	c _{STP} /‰	0.43	0.43	-0.23	-0.24	-0.25	-0.14	-0.34	-0.25	-0.14	-0.34	-0.25	-0.14	-0.34	-0.25	-0.09	0.66	0.28	1.00	0.59	0.25	0.25
Cor. 4He	c _{STP} /‰	0.67	0.58	-0.47	-0.46	-0.58	-0.14	-0.35	-0.62	-0.23	-0.63	-0.11	-0.26	-0.22	-0.28	-0.29	0.99	0.50	0.59	1.00	0.49	0.49
Cor. $^3He/^4He$	-	0.06	0.06	-0.13	-0.07	-0.31	0.03	0.05	-0.29	0.03	-0.28	0.50	-0.12	-0.10	-0.08	-0.26	0.47	1.00	0.25	0.49	1.00	1.00

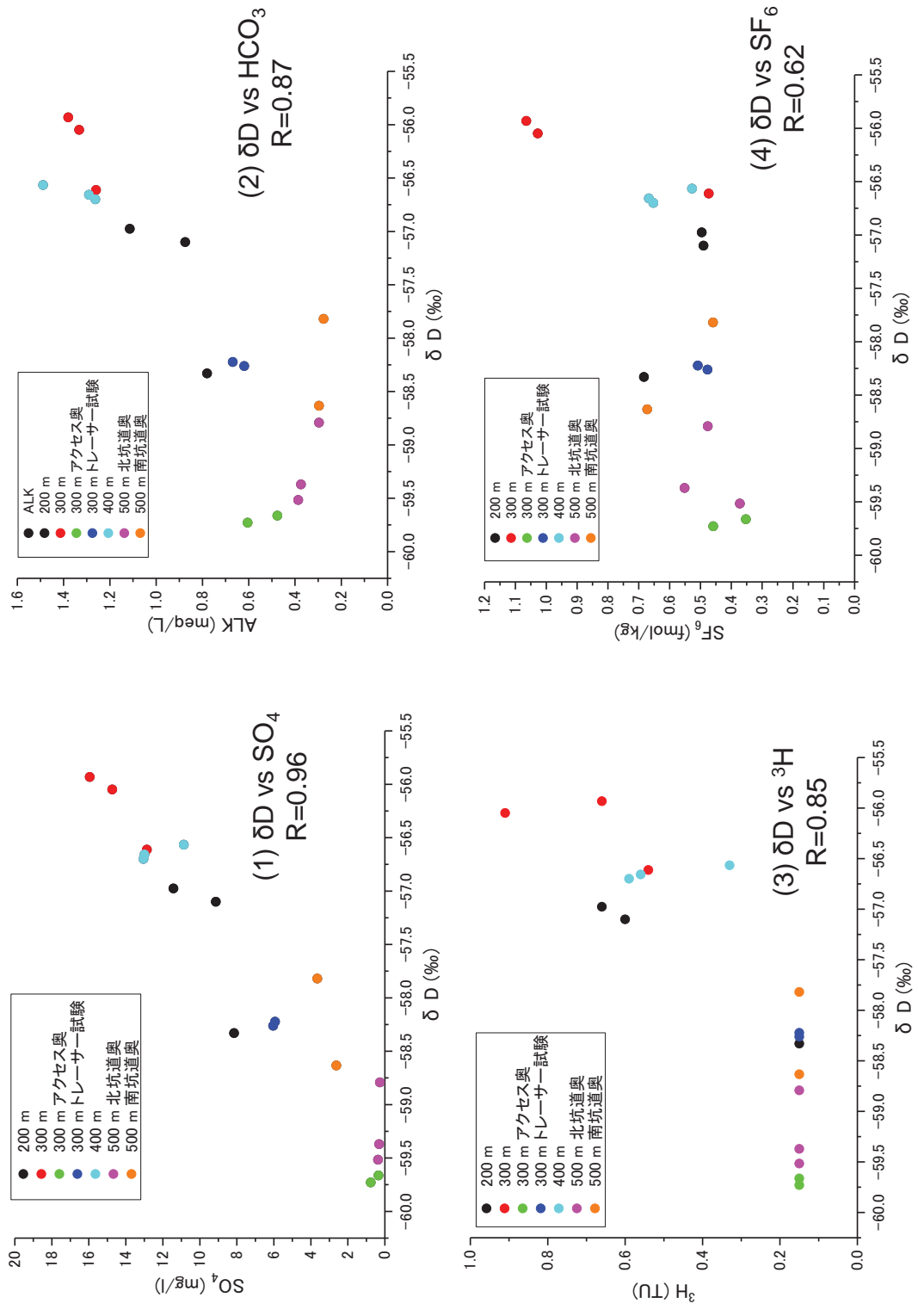


図 6.3.1-10 δD と相関性の高い成分

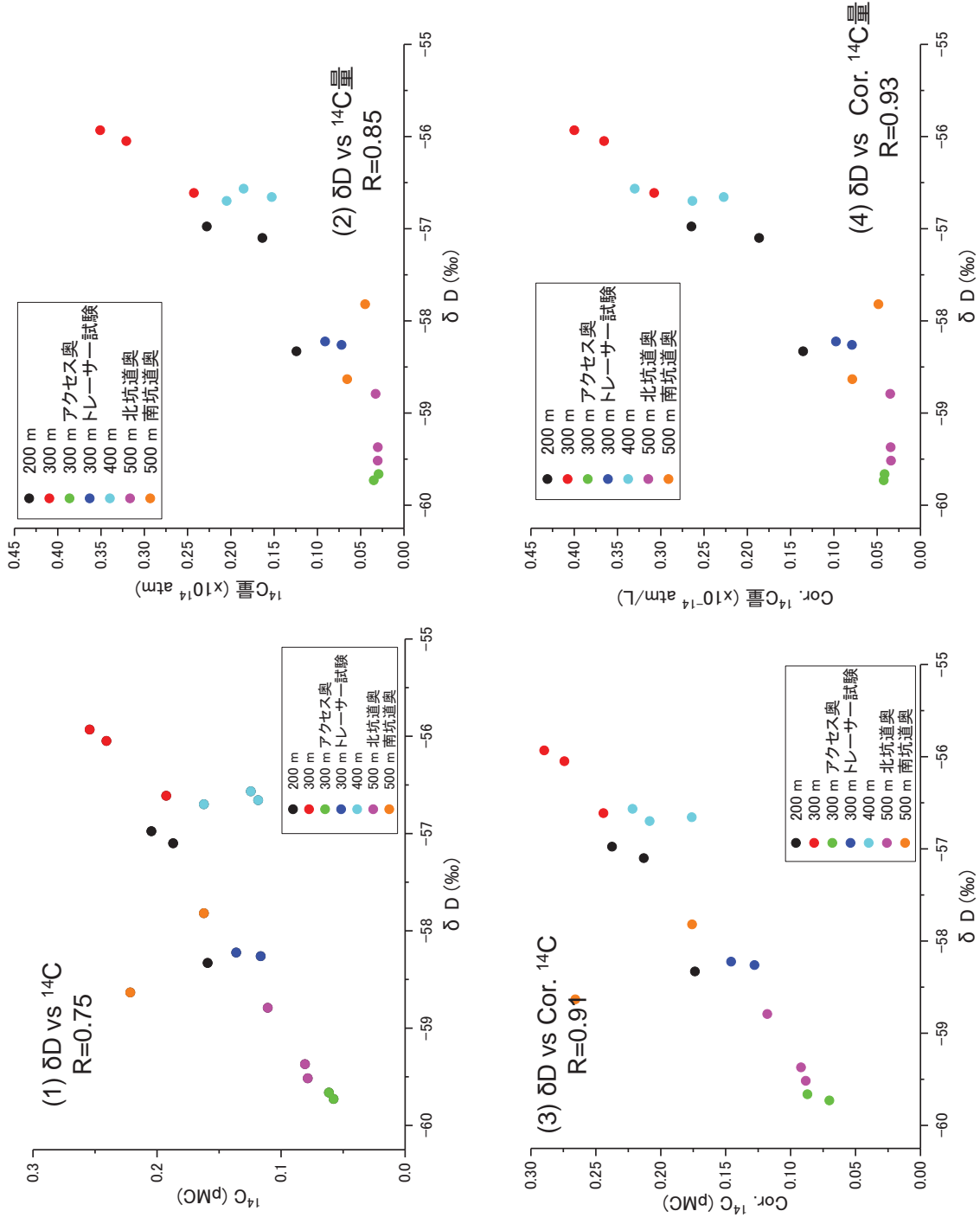


図 6.3.1-11 δD と ^{14}C の相関

古い地下水の指標としては、Cl が有望であると考えられている。これは、流出域には、Cl 濃度の高い地下水が残存しているためである。Iwatsuki et al. (2005)によれば、これは化石海水もしくは熱水起源の地下水とされている。また、立坑周辺でも Cl 濃度は深度とともに高くなる傾向がある（水野ほか、2013）。Cl 濃度と他の成分との相関性を図 6.3.1-12 に示す。Cl 濃度は、Na, K, Ca, Br, I, B, Sr, Li で 0.95-1.00 と非常に高い相関がある。さらに、 ^4He についても相関が高い。非常に相関が高いため、これは、非常に濃度が高い端成分が混合したものと考えられる。Br と I は、Cl と同じ一価の陰イオンであり、Cl と挙動が似ているため、地下水の起源を議論する際に良く用いられる。地下水の Br/Cl と I/Cl は、それぞれ、0.00173 と 0.000437 であり、海水の値の 0.00346 と 0.000003 と大きく異なる。このため、これらは現在の海水とは異なると考えられる。Na, K, Ca などと Cl の比についても地下水の値と海水の値とは大きく異なる。さらに、地下水が古い場合に、濃度が高くなる ^4He 、B、Li との相関も高い。 ^4He は、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が原位置生成の値よりも有意に高く、フラックスによって蓄積していると考えられる。He のフラックスは深部から供給され、地点によって寄与が異なる。ただし、Cl との相関が非常に良いため、Cl もフラックスによって与えられていると考えられる。このため、古い地下水は濃度の高い端成分が深部から供給されていると推定される。

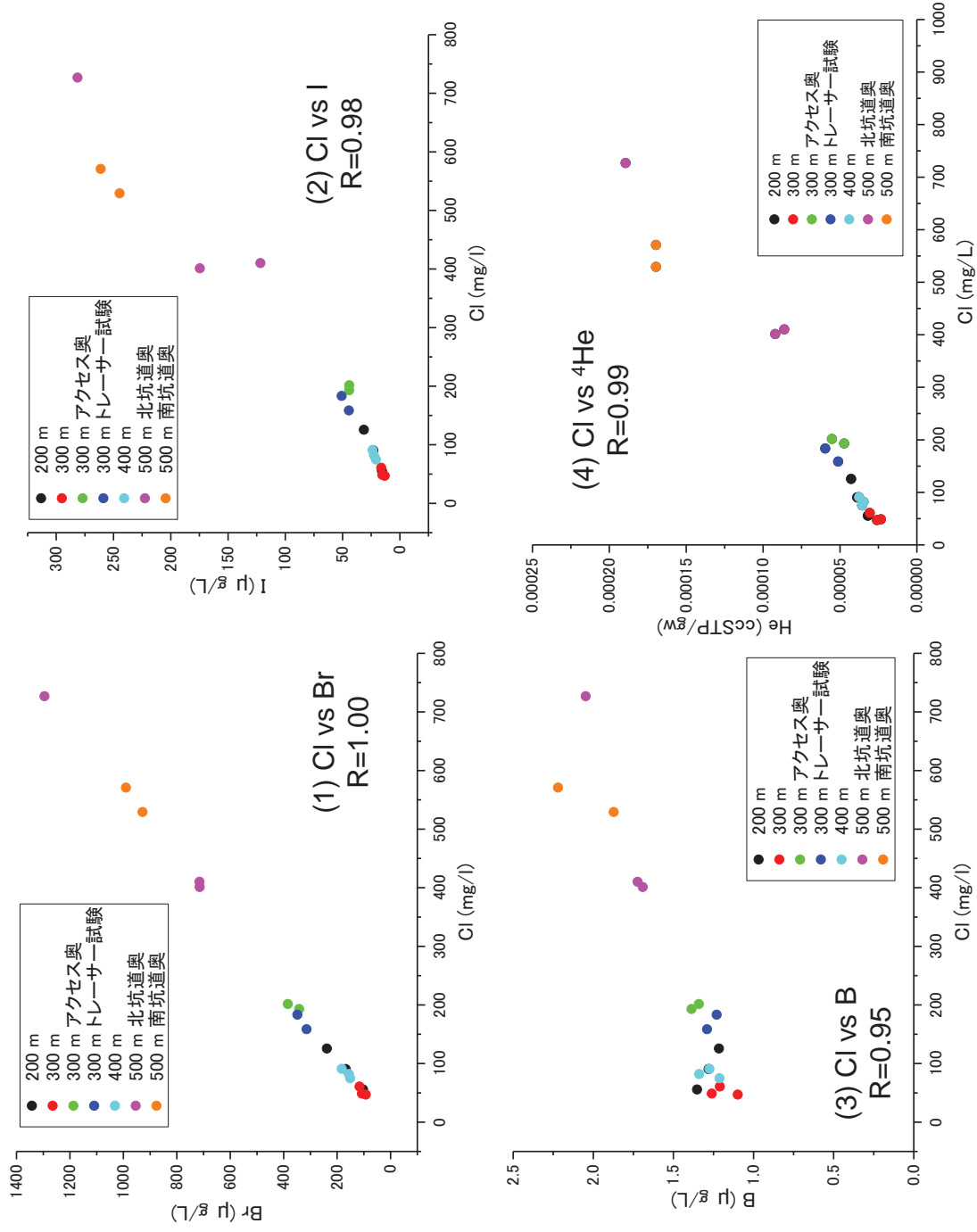


図 6.3.1-12 Cl と他成分の相関

(4) 地下水流動の概念モデル

混合指標の検討結果から、水素・酸素同位体が新しい地下水の混合指標として有望であると考えられた。また、古い水の指標としては、Cl 濃度が有効であると考えられた。これらの関係を図 6.3.1-13 示す。図から、新しい水の混合率の小さい 300m アクセス奥のボーリング孔を起点として、Cl 濃度の高い 500m ボーリングと、新しい水の混合率の高い各深度の予備ステージとで、端成分が異なることが分かる。このため、新しい水、古い水、流出域の 3 種類の地下水が混合し、本地点の地下水が構成されていると考えられる。新しい水については、地表付近の地下水が端成分になるため、端成分が明確である。深度 200m~400m の予備ステージでは、新しい水の混合率は 30~40%程度である。一方で、古い水については、端成分が明確でないため混合率が分からないが、それほど大きな混合率ではないと考えられる。これは、古い水の混合によって水素・酸素同位体比が大きく変化していないこと、後述する希ガス温度計などに影響が出ていないためである。

これらの結果から、立坑掘削による地下水流動の概念モデルは図 6.3.1-14 のように推定される。新しい水は主に立坑周辺で流入が激しく、立坑から少し離れると混合率が低下する。例えば、深度 300m のトレーサー試験地点や深度 300m アクセス坑道奥では、新しい水の流入は限定的なため、上方向からではなく横方向から集水していると推定される。また、深部からの深い地下水の流入は確認できるが限定的である。

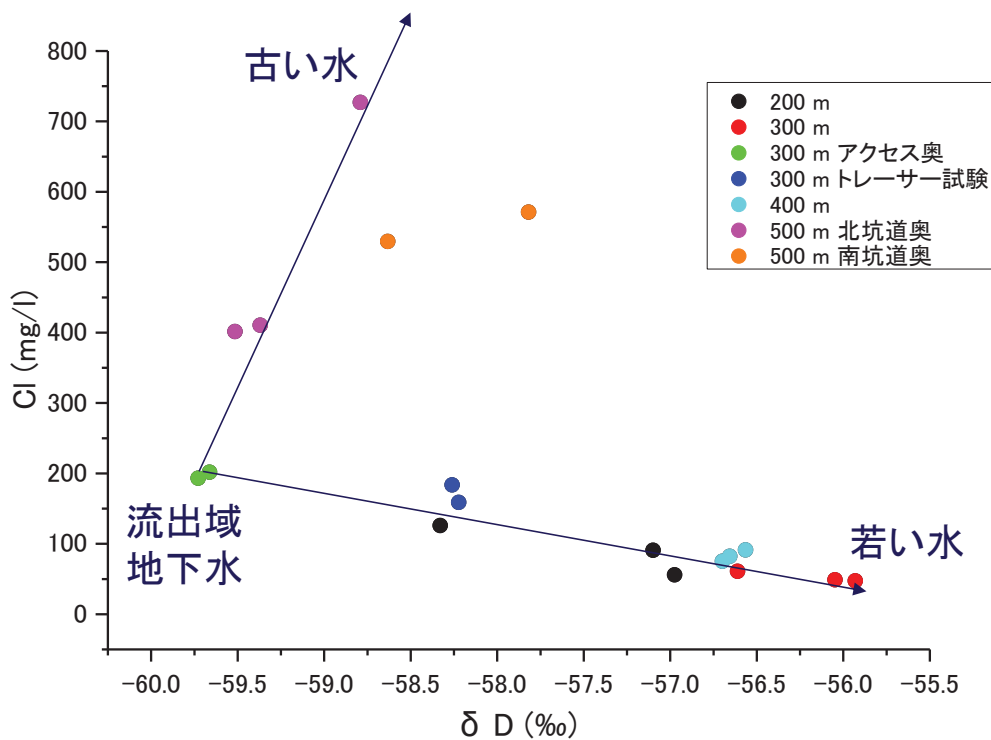


図 6.3.1-13 水素同位体比と Cl 濃度の関係

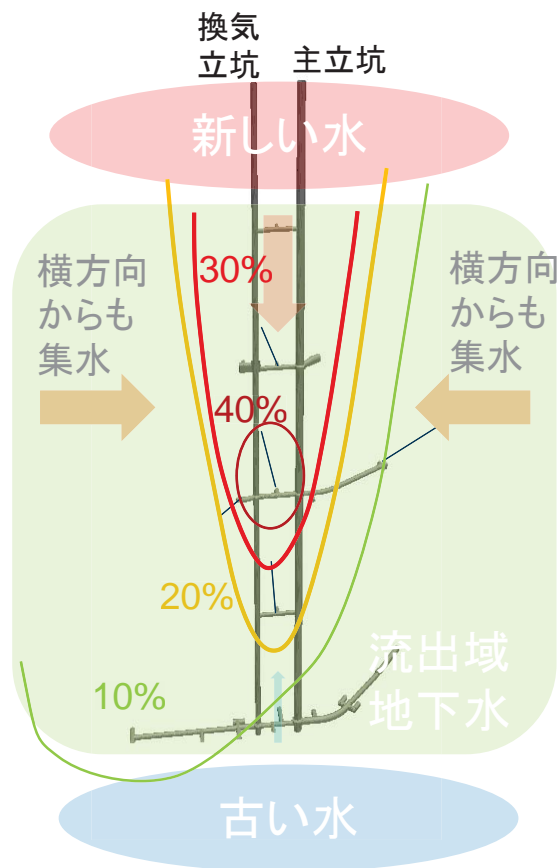


図 6.3.1-14 立坑掘削による地下水流動の概念モデル

6.3.2 瑞浪における地下水流動・物質移行解析

6.3.2.1 掘削に伴う地下水流動・水質変化の概要

施設建設では、施設への地下水の流入により、広い範囲で地下水流動・物質移行現象が発生すると考えられる。施設建設は、水理試験などよりも広範囲に大きな水理的な擾乱を与えるため、地下水流動解析モデルの検証や、物質移行現象の評価に有効であると考えられている (Mahara et al. (2001)、長谷川ほか(2004))。ここでは、瑞浪超深地層研究所の建設を対象に、このような地下水流動・水質分布の変化に着目した地下水流動・物質移行解析を実施した。

瑞浪超深地層研究所は、2005年から建設が開始され、これまでに、主立坑、換気立坑、研究坑道などが深度 500m まで建設されている。湧水量は、図 6.3.2-1 のように観測されており (佐藤ほか(2013)、上野ほか(2014))、概ね 500~800 m³/日に変動している。湧水量の平均を 600 m³/日とすると、これまでに約 200 万 m³ の湧水があったことになる。花崗岩の間隙率を 2% とすると、500m の立方体分と等価な領域の地下水が湧出したことになる。

湧水量は、主立坑、換気立坑などに数十メートル間隔で設置された Water Ring (以下、WR) で計測されている。WR によって湧水量が大きく異なることがわかり、特に、200m 予備ステージや 300m 研究アクセス坑道からの流量が比較的大きいことがわかる。湧水量の深度方向分布の経時変化を、図 6.3.2-2 に示す。

施設への地下水の湧出に伴い、図 6.3.2-3 に示すように、周辺のボーリング孔でも有意に水圧低下が発生している (毛屋・竹内(2010a, 2010b)、狩野ほか(2011a, 2011b)、狩野・竹内(2012a, 2012b, 2013a, 2013b)、別府ほか(2013, 2014))。研究施設周辺の水圧低下は、難透水性断層で規制されており、主立坑断層の北東側と南西側で 2 種類の水圧応答に分類できる。

立坑への湧水量と、周辺のボーリング孔での水圧低下をまとめた地下水流動の概念図を図 6.3.2-4 に示す。特に湧水量が多い地点とボーリング孔での水圧低下を概念的に示した。特徴的なのは、湧水量が多い地点が瑞浪層群と花崗岩の境界付近に集中していることである。これは、地層境界付近が高透水であることを示していると考えられる。予備ステージやアクセス坑道で湧水量が大きいことから、鉛直の構造をもつ割れ目などによって湧水が供給されていると考えられる。また、換気立坑の深度 300m と深度 400m でも湧水量が多くなっている。

水圧低下は、主立坑と換気立坑に近いボーリング孔で大きい。立坑周辺では、地下水調査時の圧力モニタリング結果から 100~150 m 近い水位低下が発生している。また、研究所に近い MSB-2 孔および MSB-3 孔では 100 m 程度、その他のボーリング孔でも 50 m 近い水圧低下が観測されている。ただし、MSB-1~4 孔の浅部では、水圧低下が有意ではない。一方で、かなり離れた DH-15 孔でも 50 m 程度の水圧低下が発生している。このため、研究所建設に伴い花崗岩内ではかなり広い範囲で水圧低下が発生しているが、低透水性の瑞浪層群より上位層では水圧低下が限定的と推定される。

立坑の建設に伴い、周辺の水質も変化している(齋ほか(2010, 2011)、新宮ほか(2011, 2012)、大森ほか(2013, 2014a, 2014b))。換気立坑に湧出する地下水の C1 濃度は、時間とともに増加し、その後低下する傾向が見られる。主立坑での C1 濃度は有意な変化は見られない。水野ほか(2013)は、研究坑道内から掘削した水質モニタリングボーリングでの C1 濃度の変化を示している。これらの結果でも、C1 濃度は時間的に上昇してから低下する傾向が確認されている。研究施設建設前の調査で、C1 濃度は深度方向に濃度が高くなる傾向があることが確認されている(三枝ほか、2007)。このため、この C1 濃度の変化は、建設によって深部から C1 濃度の高い地下水が流入し、その後浅部から C1 濃度の低い地下水が流入したと考えられている(水野ほか、2013)。

水素・酸素同位体比の深度分布の経時変化を、それぞれ図 6.3.2-5 に示す。立坑周辺の地下水の水素・酸素同位体比は、現在の降水よりも有意に低い。これは、研究所が流出域に位置し、地下水年代も数万年以上前と考えられるため、氷期に涵養した地下水が残留していると考えられている(Iwatsuki et al., 2005)。ただし、立坑の掘削に伴い、水素・酸素同位体比が重い現在の降水が流入してくるため、浅部から徐々に水素・酸素同位体比は現在の降水の値に近くなっている。水素・酸素同位体比は、浅部では $-50\text{‰} \cdot -7.7\text{‰}$ 、深部では $-61\text{‰} \cdot -9\text{‰}$ 程度が代表値ではないかと推測される。深部でも新しい地下水の流入によって徐々に重くなっている傾向が見られる。特に、湧水量の多い 200m 予備ステージと 300m 研究アクセス坑道に挟まれた主立坑の深度 200~300m 付近で値が大きくなっており、地表水の流入の可能性が考えられる。

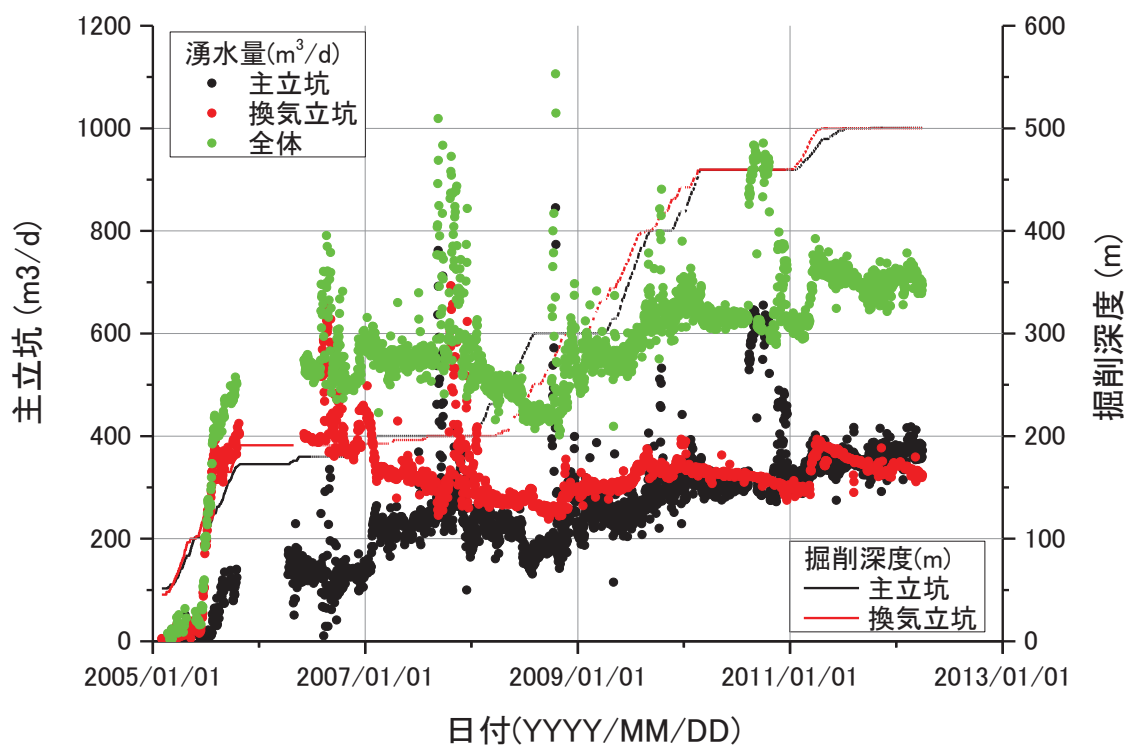


図 6.3.2-1 立坑への湧水量の経時変化

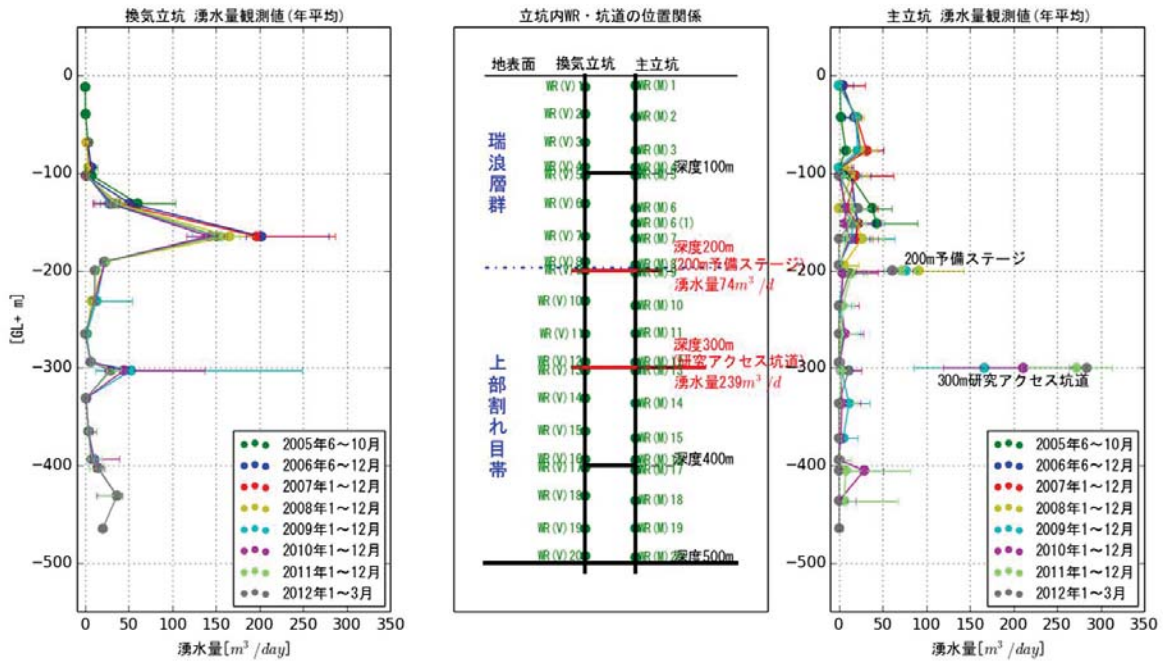


図 6.3.2-2 主立坑・換気立坑、坑道などへの湧水量の深度方向分布

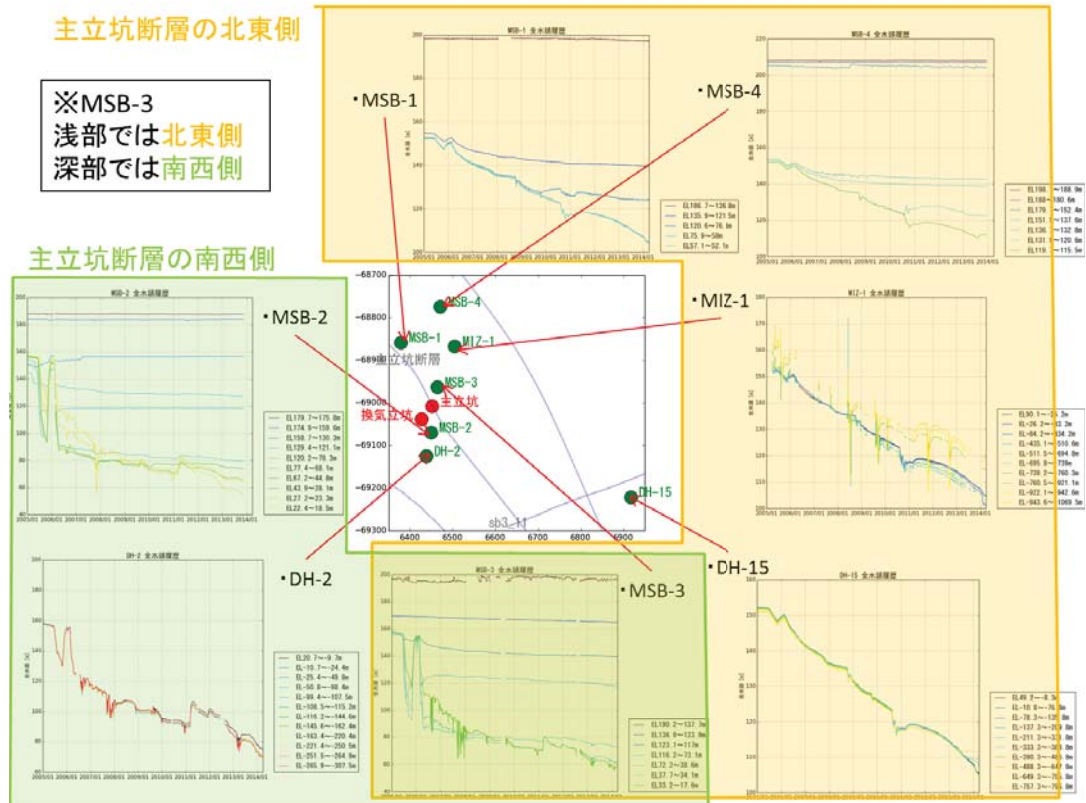


図 6.3.2-3 難透水断層を考慮したボーリング孔水圧挙動の分類

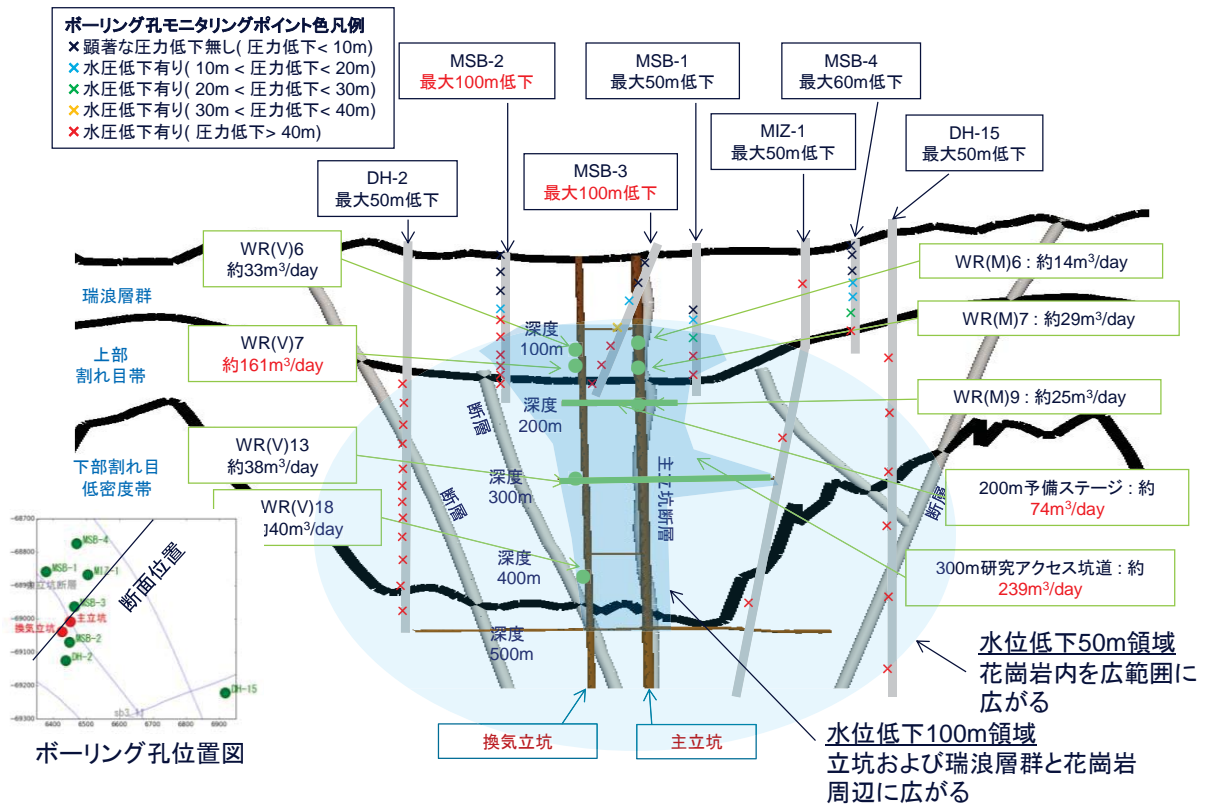
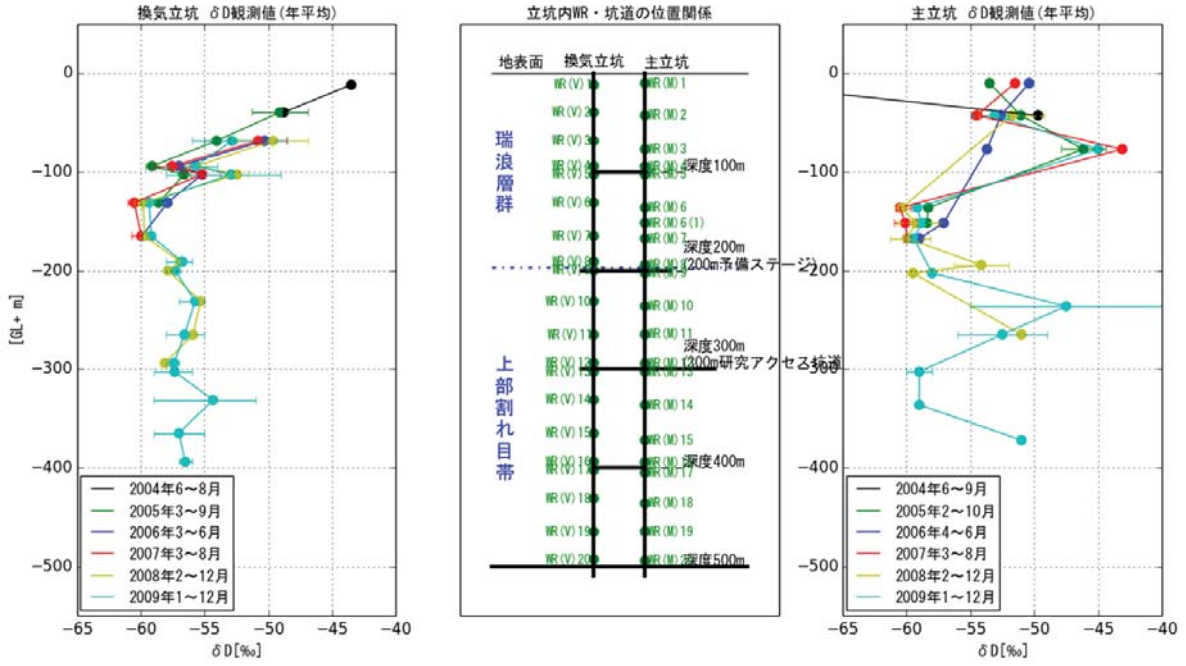


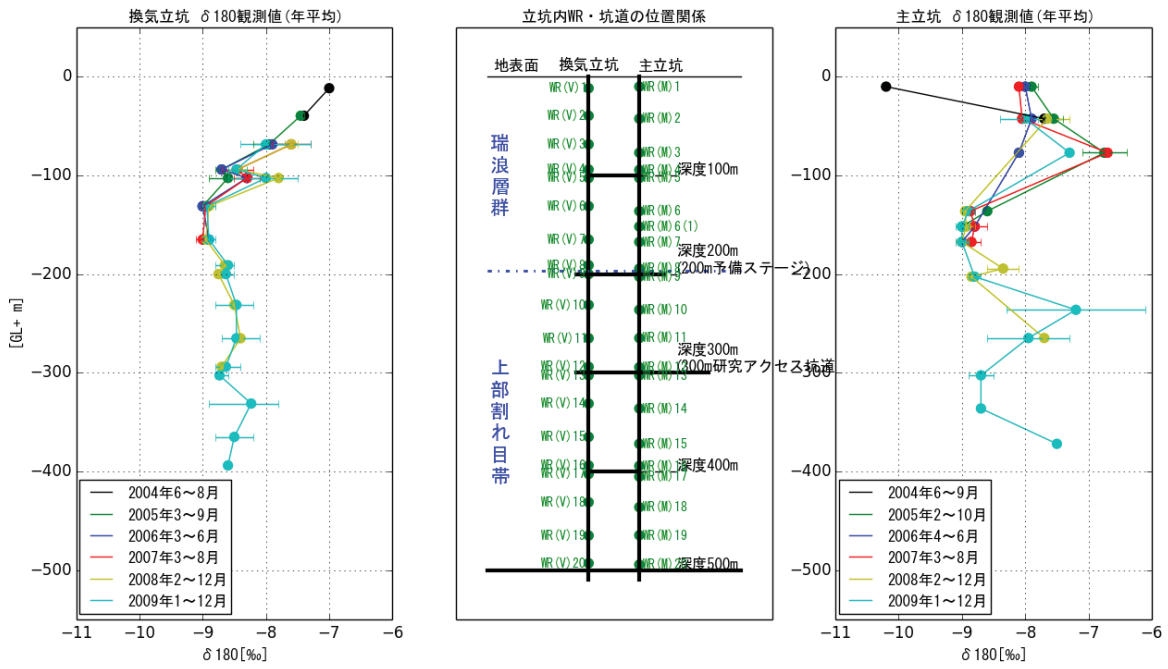
図 6.3.2-4 立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図

新しい地下水の流入の影響を見るためにトリチウムの深度方向分布の経時変化を、図 6.3.2-6 に示す。トリチウムの半減期は、12.3 年と短く、地表水には 3.7 TU 程度含まれる。このため、新しい地下水には含まれるが、古い地下水には含まれず、地表水の流入の指標になる。トリチウムは、明確な深度依存性が確認でき、地表付近で値が高く、深くなるほど値が小さくなる傾向がある。特に、湧水量の多い 200m 予備ステージと 300m 研究アクセス坑道付近で、1 TU 程度の値が観測されている。これは、水素・酸素同位体比と同様の傾向であり、地表面由来の水が深部にも流れ込んでいることを示している。

新しい水と古い水の流入の概念図は、図に示したとおりであり、立坑を中心に深度 400m まで新しい水が数十%程度流入している。一方で、300m ボーリング横坑や 300m アクセス坑道奥のボーリング孔では水素・酸素同位体比が低い、³H が検出されないなど、横方向には新しい水の流入が限定的であると考えられる。



(1) 水素同位体比 (δD)



(2) 酸素同位体比 ($\delta^{18}O$)

図 6.3.2-5 立坑湧水の δD 濃度深度方向分布の経時変化

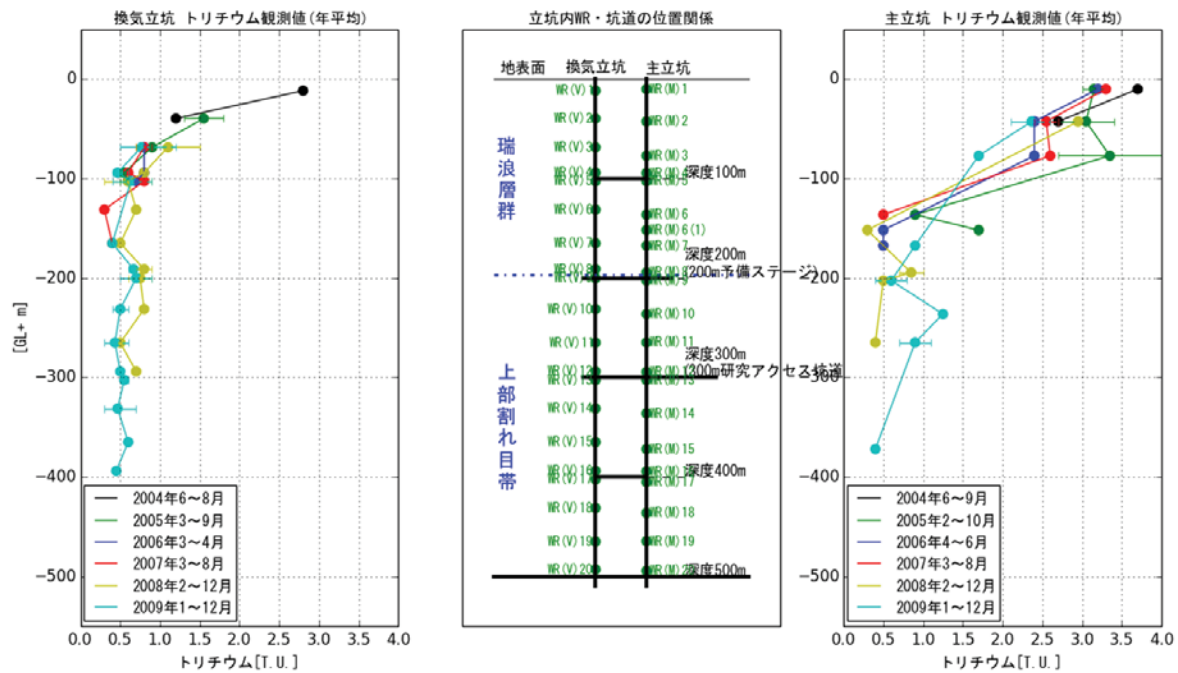


図 6.3.2-6 立坑湧水の ^3H 濃度深度方向分布の経時変化

6.3.2.2 解析モデル

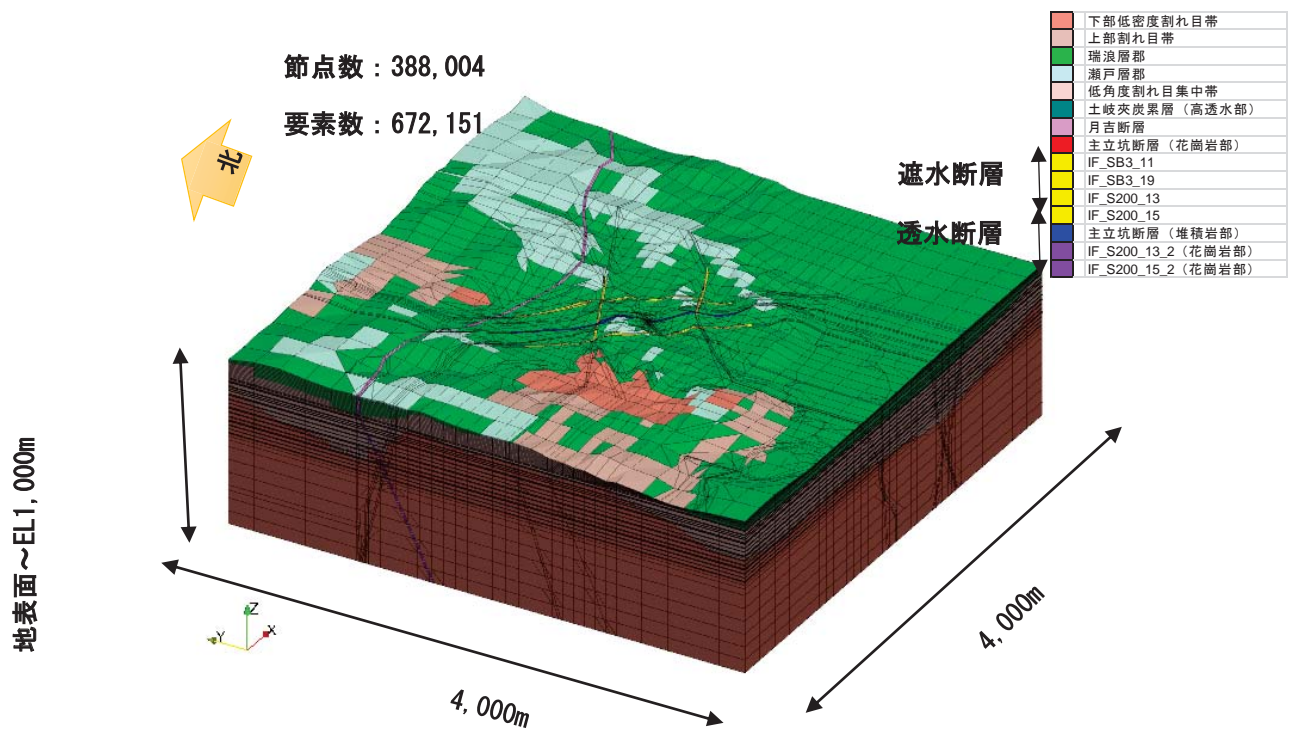
前述のように瑞浪超深地層研究所建設により、水圧の変化は図 6.3.2-4 のように、新しい水の流入は図 6.3.1-14 図 6.3.1-14 のように概念的に表される。このような挙動を地下水流動解析モデルで再現できるかどうかを検討するために、地下水流動・物質移行解析を実施する。

解析モデルは、尾上ほか(2014)と尾上ほか(2016)を参考に、図 6.3.2-7 に示すように地形・地質などを考慮したモデルに基づいて作成した。解析モデルは白亜紀後期の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、上部割れ目帯内に低角度傾斜を有する割れ目の集中帯を低角度割れ目集中帯とした。花崗岩部の上部に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瑞浪層群として扱い、高透水性の特徴である土岐夾炭累層の一部を瑞浪層群内に再現した。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。

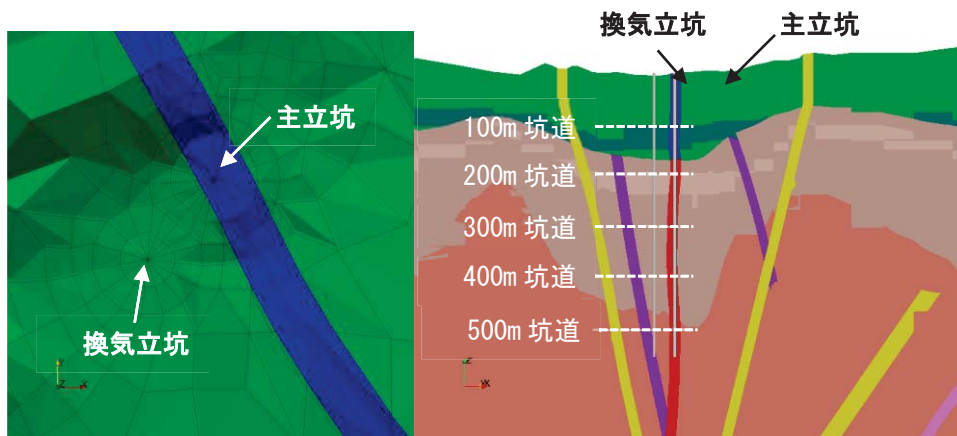
断層については、主立坑断層は堆積岩内と花崗岩内に存在する箇所それぞれモデル化した。また存在が確認されている月吉断層についてもモデル化し、研究所用地を包括するように存在すると推定されているコンパートメントを構成する IF_S200_13、IF_S200_15、IF_SB3_11、IF_SB3_19 をモデル化した。また、コンパートメント内の分布し、IF_S200_13、IF_S200_15 の二断層と雁行しており高透水性断層と推定されている IF_S200_13_2、IF_S200_15_2 もモデル化した。モデル化した主立坑断層と推定断層の分布を図 6.3.2-8 に示す。また、研究坑道については主立坑、換気立坑、100、200、

300、400、500 m のアクセス坑道を線要素で坑道形状を再現した。以上の条件で作成した FEM 解析メッシュモデルは節点数が 388,004、要素数が 672,151 となった。

これまでの研究における物性値の変遷を図 6.3.2-9 に示す。2014 年度は解析メッシュで形状より地層・断層をモデル化していたが、コンパートメントの深部が閉じていなかった。2015 年度の解析メッシュはコンパートメントの形状の再現性を向上させるため、高透水性の断層については省略していた。今年度は前年度までの問題点等を踏襲してコンパートメントを構成する断層については断層幅を 20 m に固定し、断層面の法線方向には要素で 2 分割以上となるように留意した。また、地下水の流れが比較的支配であると考えられる地層、土岐夾炭累層と低角度割れ目集中帯を追加しており、2014 年度にも表現はしていたものの形状が粗悪だった IF_200_13_2 と IF_200_15_2 についても可能な限り断層形状を表現した。



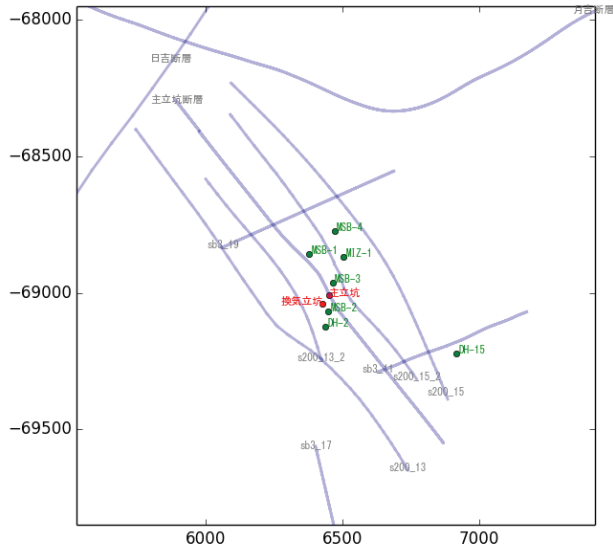
(1) 解析メッシュの全体図



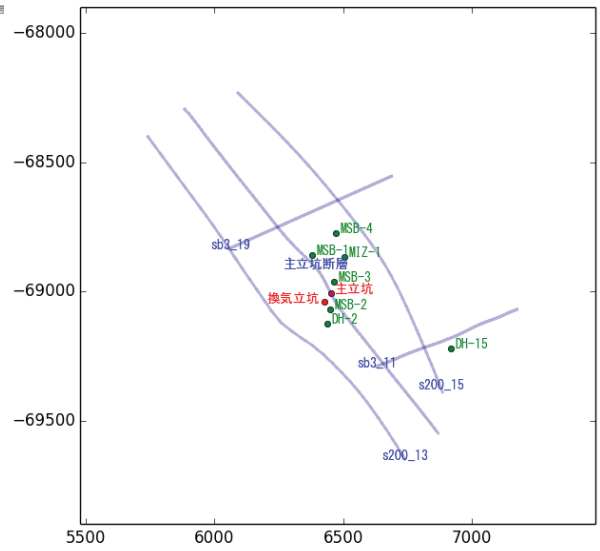
(2) 研究所周辺のメッシュ分割

(3) 研究所周辺でのメッシュ断面図

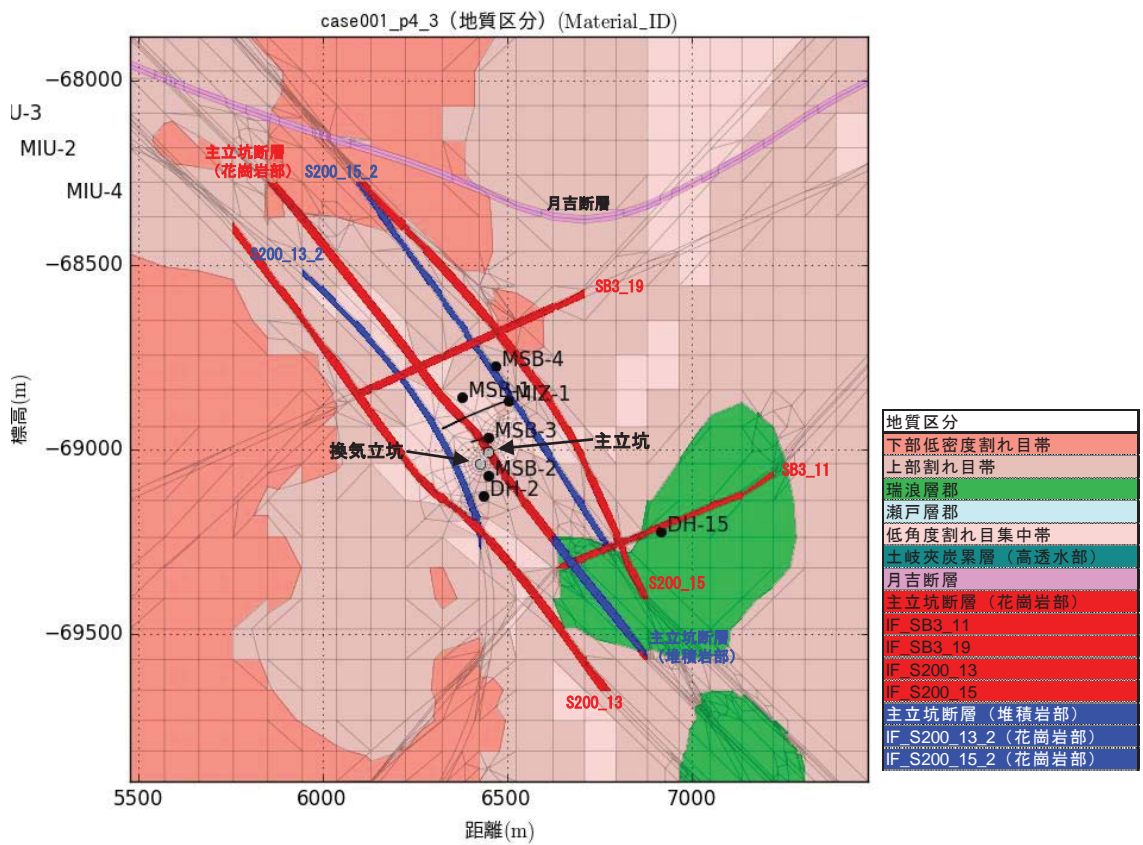
図 6.3.2-7 解析に用いた FEM 解析メッシュ



(1) 2014 年度モデルで考慮した断層

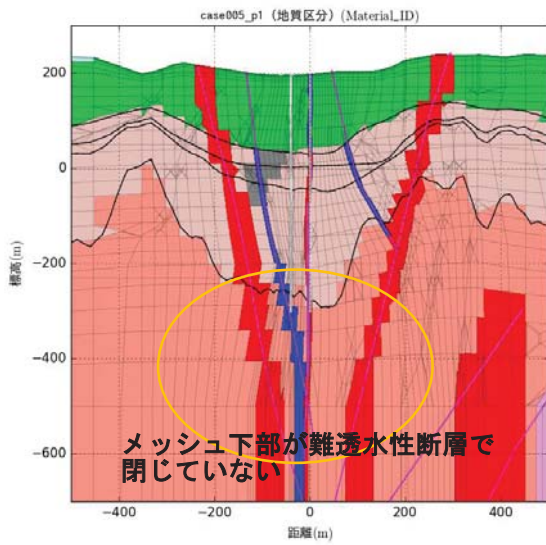


(2) 2015 年度モデルで考慮した断層

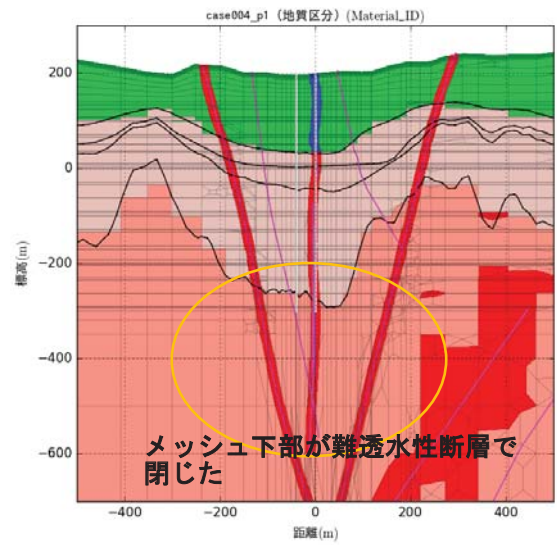


(3) 2016 年度モデルで考慮した断層

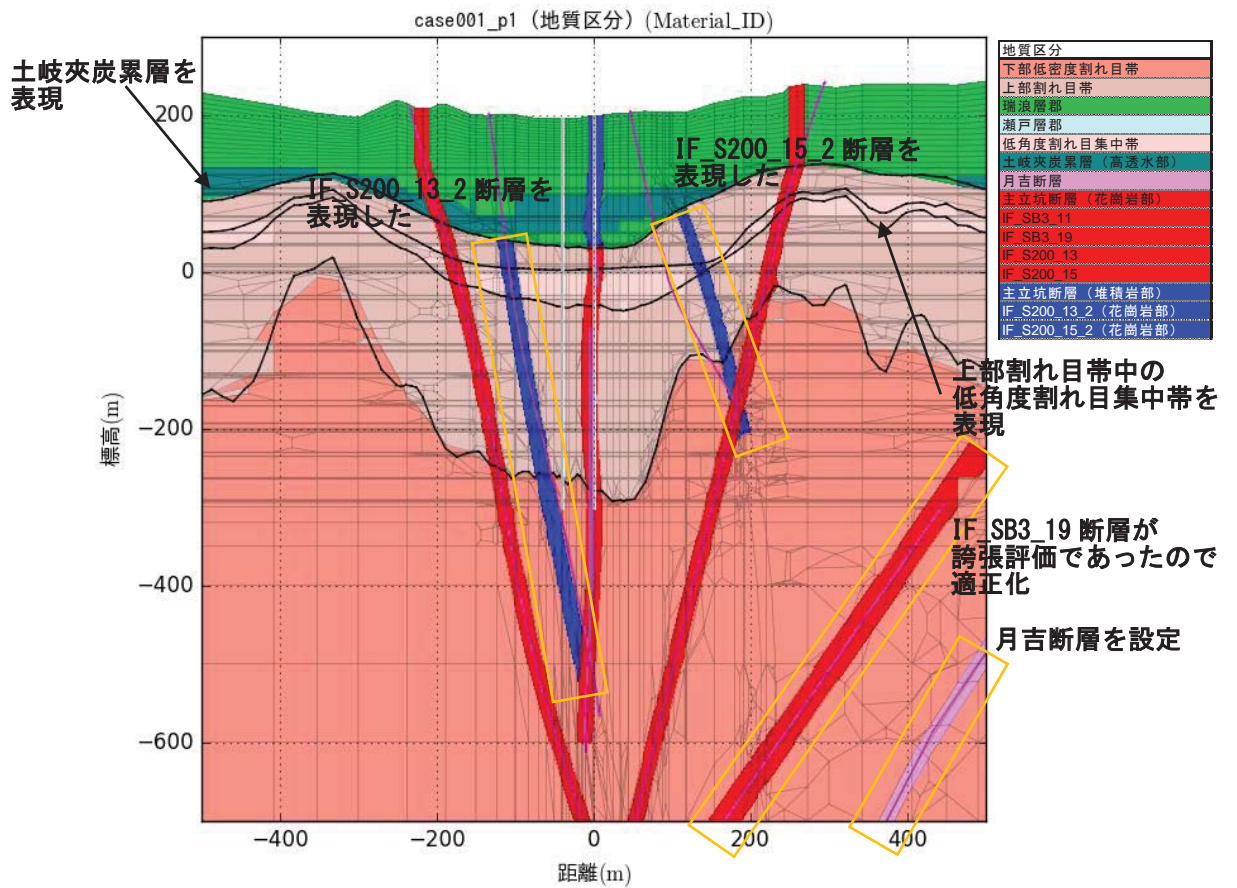
図 6.3.2-8 解析モデルで考慮した断層



(1) 2014 年度



(2) 2015 年度



(3) 2016 年度

図 6.3.2-9 物性割り当ての変更点

6.3.2.3 解析条件

(1) 境界条件の設定

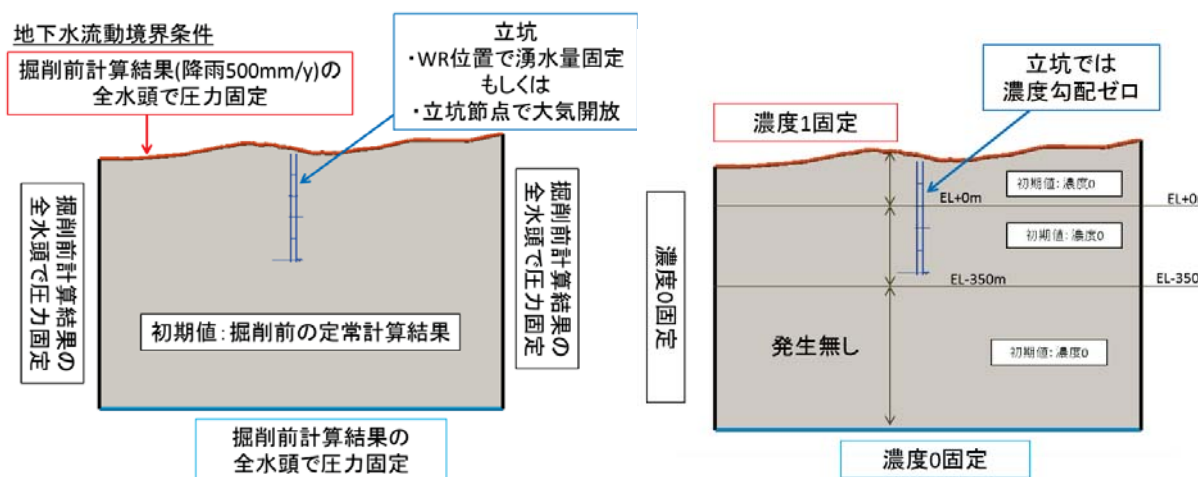
地下水流動・物質移行解析の境界条件は、図 6.3.2-10 のように設定した。

地下水流動解析の境界条件は、対象地点の降雨量 1,500 mm/y に対して、降雨量の 1/3 である 500 mm/y を涵養量として設定し、その他の境界条件を不透水境界条件として調査坑道掘削前の地下水流動解析を実施した。これまでの広域地下水流動解析では、降雨量は 20 mm/y 程度としていたが、このような小さい降雨浸では、水位低下が過剰に出るため、降雨量を増やしている。その解析結果をモデル地表面・側面・底面に圧力既知境界条件として設定した。掘削後の状態を再現するため、掘削を終了している立坑を構成する節点について、大気開放条件として圧力水頭 0 m を設定したケースと、流量既知境界条件として、WR・200 m 予備ステージ・300 m 研究アクセス坑道・500 m 研究アクセス坑道で観測されている湧水量を設定したケースを実施した。なお、定常解析では、湧水量は時系列データの平均値を設定した。非定常解析では、WR などで計測されている値を既知流量節点条件として与えた。

物質移行解析の境界条件は、新しい地下水の流入状況を比較するために、モデル地表面をトレーサー濃度 1 で固定した。立坑には濃度勾配 0 の境界を設定した。

(2) 物性値の設定

解析に用いた物性値には、尾上ほか(2015)を参考に、表 6.3.2-1 と表 6.3.2-2 に示すように設定した。なお、物質移行解析に使用する分散長は、すべて一律に縦分散 100m、横分散 10m、分子拡散係数は影響が小さいとして無視した。



(1) 地下水流動解析の境界条件

(2) トレーサー濃度の境界条件

図 6.3.2-10 解析の境界条件図

表 6.3.2-1 地質要素の水利特性（尾上ほか、2015）

地質区分	透水係数 (m/s)			間隙率	比貯留 係数 (1/m)
	水平方 向	鉛直方 向	透水 異方性		
	logK	logK			logSs
瀬戸層群	-6.0	-6.0	無	0.20	-4.1
瑞浪層群	-6.8	-8.8	有	0.20	-4.6
おいたごわら 生 俵 累層	-8.5	-10.5	有	0.20	-4.1
あけよ 明世累層／本郷累層（本体）	-7.6	-9.6	有	0.20	-4.1
あけよ 明世累層／本郷累層（泥岩）	-11.0	-11.0	無	0.20	-4.1
あけよ 明世累層／本郷累層（基底礫）	-6.3	-6.3	無	0.20	-5.1
土岐夾炭累層（本体）	-6.6	-8.6	有	0.20	-4.6
土岐夾炭累層（高透水層）	-6.0	-6.0	無	0.20	-4.6
土岐夾炭累層（基底礫）	-5.3	-5.3	無	0.20	-5.1
立坑断層周辺の母岩の変質を伴う割れ目帯（低透水性領域）					
土岐夾炭累層（高透水層）	-7.0	-7.0	無	0.20	-4.6
土岐夾炭累層（基底礫）	-5.9	-5.9	無	0.20	-5.1
上部割れ目帯	-7.5	-6.3	有	0.01	-5.7
上部割れ目帯中の低角度割れ目 集中帯	-6.0	-6.0	無	0.01	-6.4
下部割れ目低密度帯	-7.7	-7.0	有	0.01	-6.0
主立坑断層周辺の母岩の変質を 伴う割れ目帯					
主立坑断層周辺の母岩の変質を伴う割れ目帯（低透水性領域）					
上部割れ目帯	-9.0	-9.0	無	0.01	-5.7
上部割れ目帯中の低角度割れ 目集中帯	-7.0	-7.0	無	0.01	-6.4
下部割れ目低密度帯	-9.0	-9.0	無	0.01	-6.0

■ : 本解析で再現した地質区分

表 6.3.2-2 不連続構造の透水特性 (尾上ほか、2015)

不連続構造	走向方向	代表的な 厚さ (m)	透水係数 (m/s)				間隙率	比貯留 係数 (1/m)	モデル化した 断層の幅 (m)	堆積岩部の 分布
			断層面 直交方向		透水 異方性					
			断層面 方向	logK	断層面 直交方向	logK				
			logK	logK	logSs					
月吉断層										
月吉断層主要部	-	1	-11.0	-11.0	-11.0	無	0.01	-6.5	1	有
月吉断層に伴う割れ目帯	-	134	-6.4	-6.4	-6.4	無	0.01	-6.5	134	有
その他の断層 (トレース長: 3km 以上)										
Hiyoshi_NE	NE	10	-5.2	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
Tokir_NE	NE	10	-5.2	-5.2	-5.2	無	0.01	-6.5	10	有
Shiz_NNW	NNW	10	-5.2	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
Gara_NW	NW	10	-5.2	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
Shab_NW	NW	10	-5.2	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
主立坑断層 (SH500 M SHAFT)										
主要部 (堆積岩部)	NW	1	-7.3	-7.3	-7.3	無	0.01	-6.5	1	-
主要部 (花崗岩部)	NW	-	-10.5	-10.5	-10.5	無	0.01	-6.5	1	-
IF_S200_13	NW	32	-9.5	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有
IF_S200_13_2	NW	9	-5.9	-5.9	-5.9	無	0.01	-6.5	1	無
IF_S200_15	NW	10	-8.4	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有
IF_S200_15_2	NW	17	-5.2	-5.2	-5.2	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SH180_07	EW	5	-5.1	-5.1	-5.1	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SH180_08	NE	12	-6.3	-6.3	-6.3	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SH180_09	EW	12	-6.0	-6.0	-6.0	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SB3_11	NE	12	-4.3	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有
IF_SB3_17	NNW	10	-5.8	-5.8	-5.8	無	0.01	-6.5	1	有
IF_SB3_19	NE	10	-5.2	-11.0	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有

■ : 本解析で再現した不連続構造

6.3.2.4 解析結果

(1) 定常の地下水流動解析

立坑掘削によって生じる地下水流動・物質移行は非定常現象であるが、非定常での解析は計算負荷が大きいと見られ、パラメーターの感度を定常解析で確認した。

昨年までは主立坑断層の透水性に着目した解析を実施したが、解析モデルが異なるため、JAEA での設定値からかけ離れた値となっていた。今年度はコンパートメントを構成する IF_200_13、IF_200_15、IF_SB3_11、IF_SB3_19 の 4 断層の透水係数が掘削に伴う影響が大きいものと考えて解析を実施した。コンパートメントを構成する断層が完全に遮水する断層と考え、表 6.3.2-2 に該当する断層について、透水係数を最小に設定したケースと、断層方向に最大、断層の法線方向に最小となるように異方性を設定したケースで解析を実施した。境界条件は、立坑を大気開放条件（圧力水頭 0m）、観測された流量を設定した流量既知条件とでそれぞれ実施した。なお、地下水流動・物質移行解析には FEGM/FERM を用いた。

主立坑と換気立坑を通る断面での掘削前と掘削後の水位低下を図 6.3.2-11 に示す。両立坑と周辺ボーリング孔での全水頭分布を図 6.3.2-12 に示す。

水位低下の分布図に着目すると、コンパートメントを構成する断層を遮水に設定した場合は、コンパートメント内で 400m 程度の過剰な水位低下となった。この水位低下は、立坑周辺での水位低下が 100～150m 程度であるため、過大になっている。コンパートメントを構成する断層に異方性を設定した場合は、大気開放条件では水位低下が過大となっているが、流量既知境界条件では立坑周辺でも水位低下が 100～200m 程度となっており、概ね計測値と整合している。また、遮水断層ではコンパートメント内のみでの水位低下となっているのに対して、異方性の場合には、コンパートメントを超えて周辺でも水位低下が発生しており、DH-15 などで水位低下が発生していることと整合的である。このため、コンパートメントを構成する断層に異方性を設定した方が、水位低下の観点では、実測値の再現性が高くなるものと考えられた。

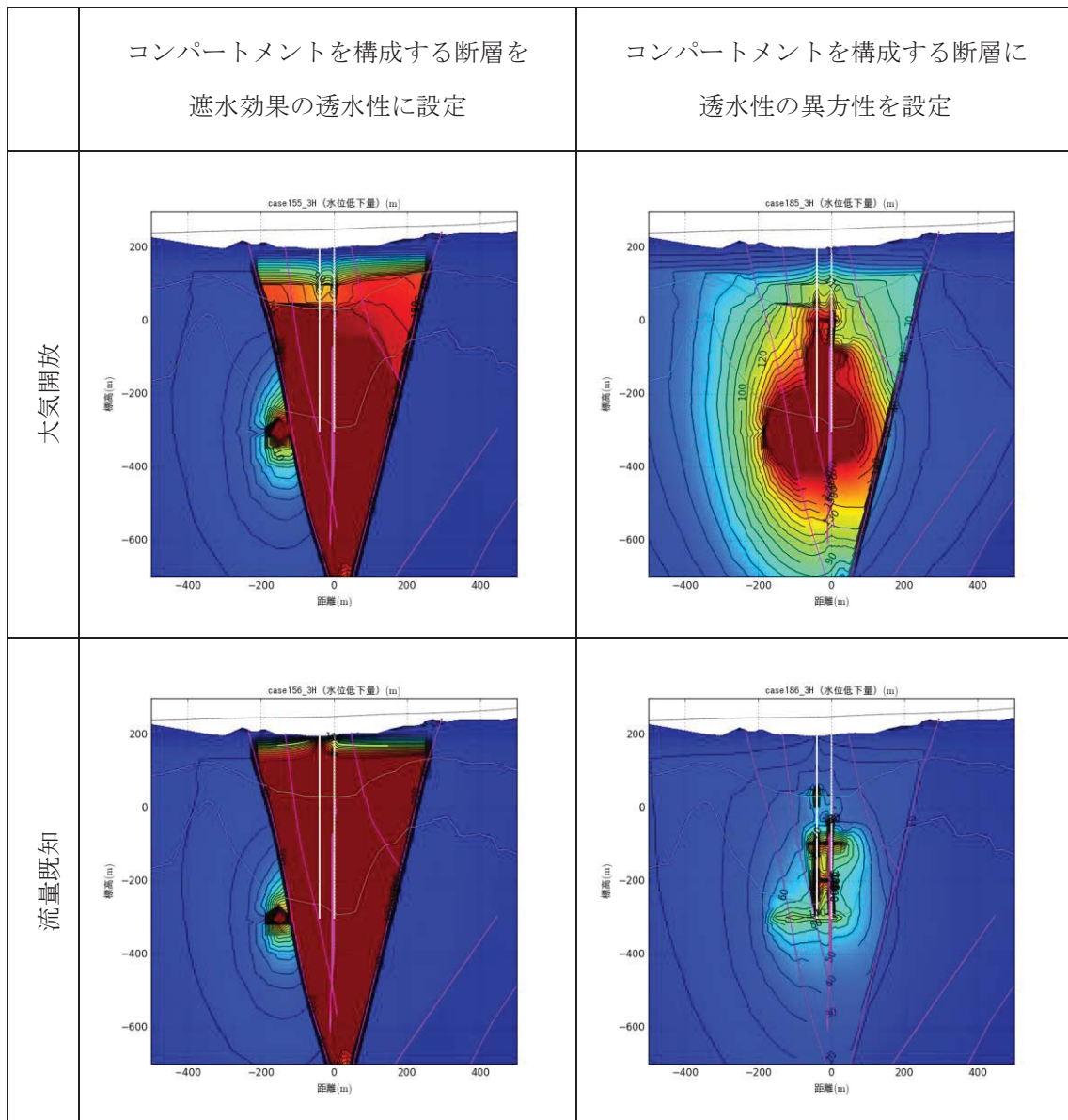


図 6.3.2-11 定常解析での水位低下分布図

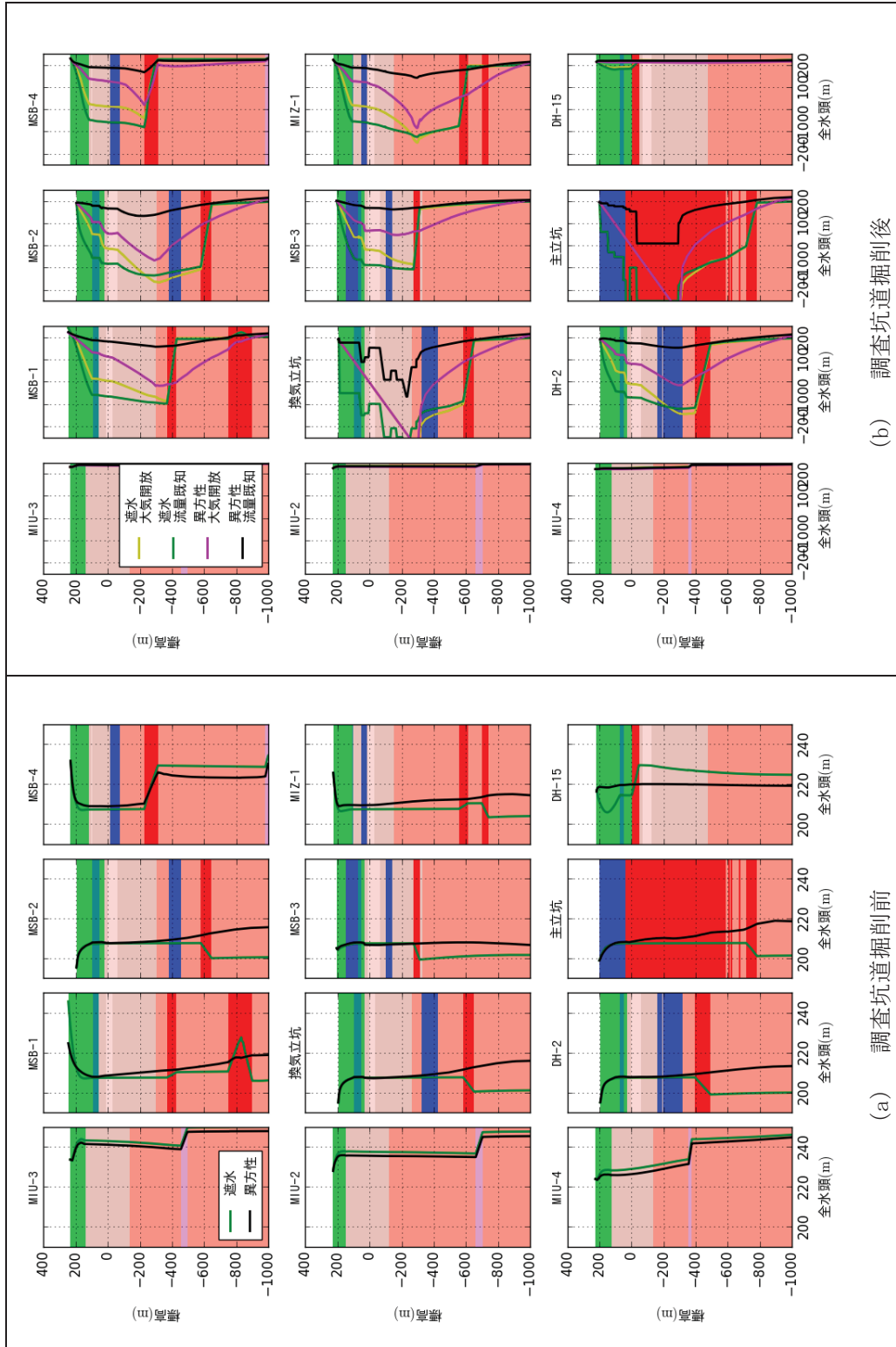


図 6.3.2-12 立坑と周辺ボーリング孔における全水頭プロファイル

(2) 定常の物質移行解析

前述の定常の地下水流動解析で実施した流動場を用いて、トリチウムを対象とした定常の物質移行解析を実施した。定常解析を実施したのは、地下水流動解析と同様に非定常解析は計算負荷が大きいためと、最終段階でのトリチウムの流入を確認するためである。トリチウムは半減期を 12.3 年とし、境界条件は図 6.3.2-10 に示すように、地表面は降雨が流入している場合は濃度 1 の既知境界条件とし、地下水が流出している場合は自由流出境界条件に設定した。側方と底面の境界条件は自由流出境界に設定した。

解析結果として主立坑と換気立坑を通る断面での掘削前と掘削後のトリチウム正規化濃度分布図を図 6.3.2-13 に、周辺ボーリング孔および、両立坑と周辺ボーリング孔でトリチウム正規化濃度分布を図 6.3.2-14 に示す。

トリチウム正規化濃度分布図(図 6.3.2-13)に着目すると、コンパートメントを構成する断層を遮水断層として設定した方が、トリチウムの浸入量が小さく、異方性を設定した方がトリチウムの浸入量が大きくなっている。これは、主立坑断層に透水異方性を設定したことにより、主立坑断層を通して深部まで新しい水が入りやすくなったものと考えられる。異方性を設定した場合には、大気圧開放条件の方が、流量既知境界条件よりもトリチウムの浸入が顕著になっている。これは、大気開放条件の方が、湧水量が多く、流入する新しい水も大きいためと考えられる。異方性を設置した場合の大気開放条件では、主立坑断層に沿って深度 500m 程度までかなり高い濃度でトリチウムが流入しており、横方向への広がりも大きくなっている。一方で、流量既知境界条件では、立坑周辺では深度 400m 程度までトリチウム濃度が 0.3 程度であるが、深度 500m では濃度が低くなっている。

両立坑でのトリチウムの浸入率(図 6.3.2-14)を比較すると、コンパートメントを構成する断層に異方性を考慮した場合、大気圧開放条件では、主立坑と換気立坑ともに、深い深度まで同じ濃度でトリチウムが侵入している、一方で、流量既知境界条件では、深度に伴って濃度が低下しており実測値に近い傾向がある。

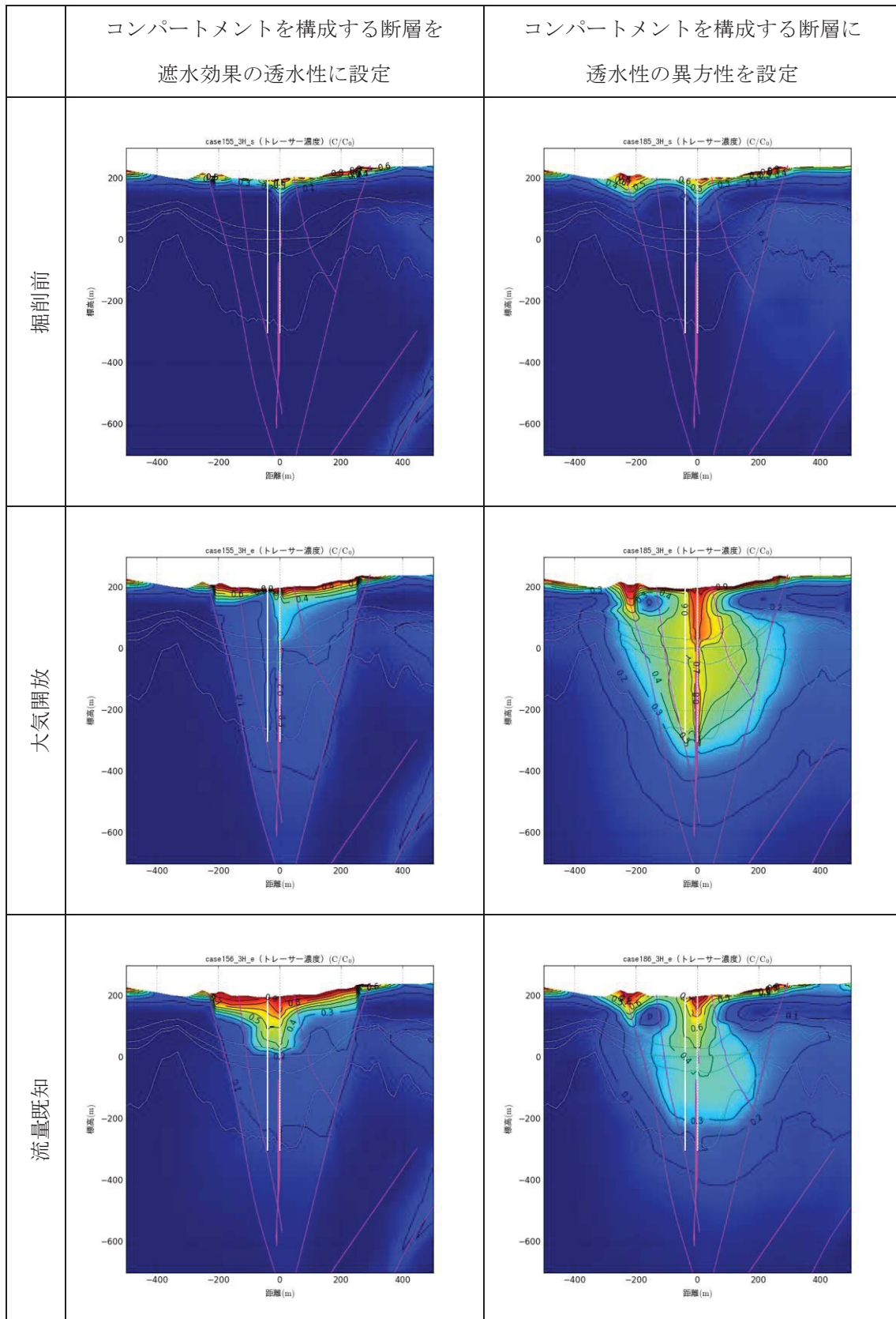


図 6.3.2-13 定常解析でのトリチウム正規化濃度分布図

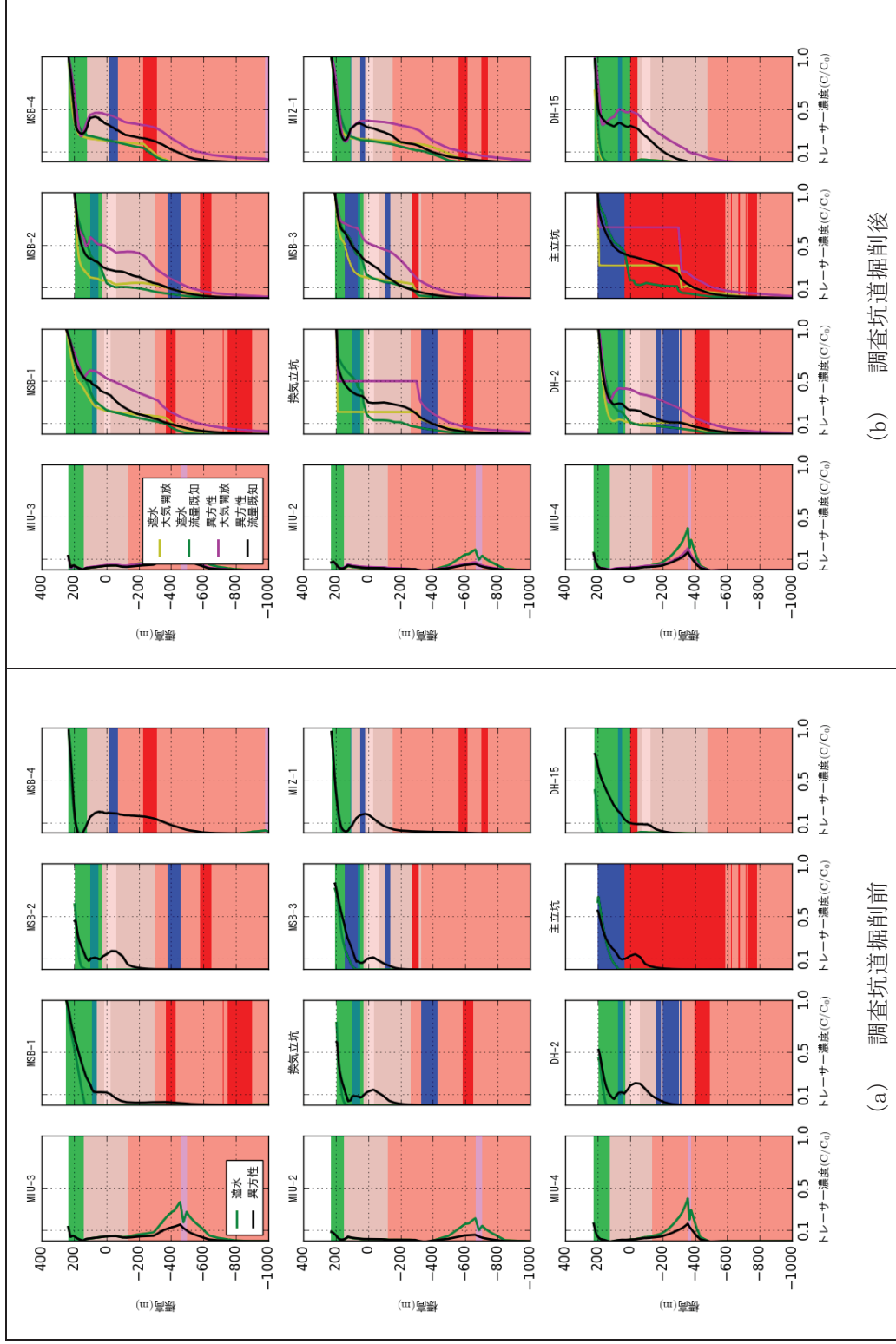


図 6.3.2-14 立坑と周辺ボーリング孔におけるトリチウム正規化濃度プロファイル

(3) 非定常の地下水流動解析

前節の定常解析での水理パラメーターや境界条件を同じにして、研究坑道の掘削に伴う非定常解析を実施した。研究坑道の掘削工程は2005年1月1日から2015年1月3日の10年間の進捗を反映して設定した。

主立坑と換気立坑を通る断面で、全水頭の圧力低下の時間変化を、図 6.3.2-15～図 6.3.2-16 に示す。周辺ボーリング孔での全水頭の時間変化を図 6.3.2-17、図 6.3.2-18 に示す。

圧力低下の分布図に着目すると、どのケースも圧力応答の追従は早く、2012年1月7日の時点では掘削後の定常解析と同等の結果となっている。このため、非定常解析でもコンパートメントを構成する断層を異方性に設定した場合に水位低下の傾向が最も実測値に近い。

周辺の観測孔での全水頭分布図に着目すると、大気圧開放境界条件では、掘削の進捗に伴って水位低下がステップ的に変動していることがわかる。流量既知境界条件では、流量が変動するため、それを反映してやや緩やかな水位低下となっている。

最も整合性が高いと考えられるコンパートメントを構成する断層を異方性に設定した場合では、周辺孔では50m程度の水位低下が発生しており、概ね原位置の水位低下と整合している。ただし、DH-15での水位低下は実際には最大50m程度であるのに対して数mと非常に少なくなっており、十分に原位置の状況を再現できていない。また、主立坑断層の北東側と南西側での水位低下の形態、北東側では緩やかで、南西側では落ち方が激しいなどが再現できていない。これは、主立坑断層を単に異方性としてモデル化しているためであり、中央部に低透水帯を挟む構造としてモデル化すれば、再現できるのではないかと考えられる。

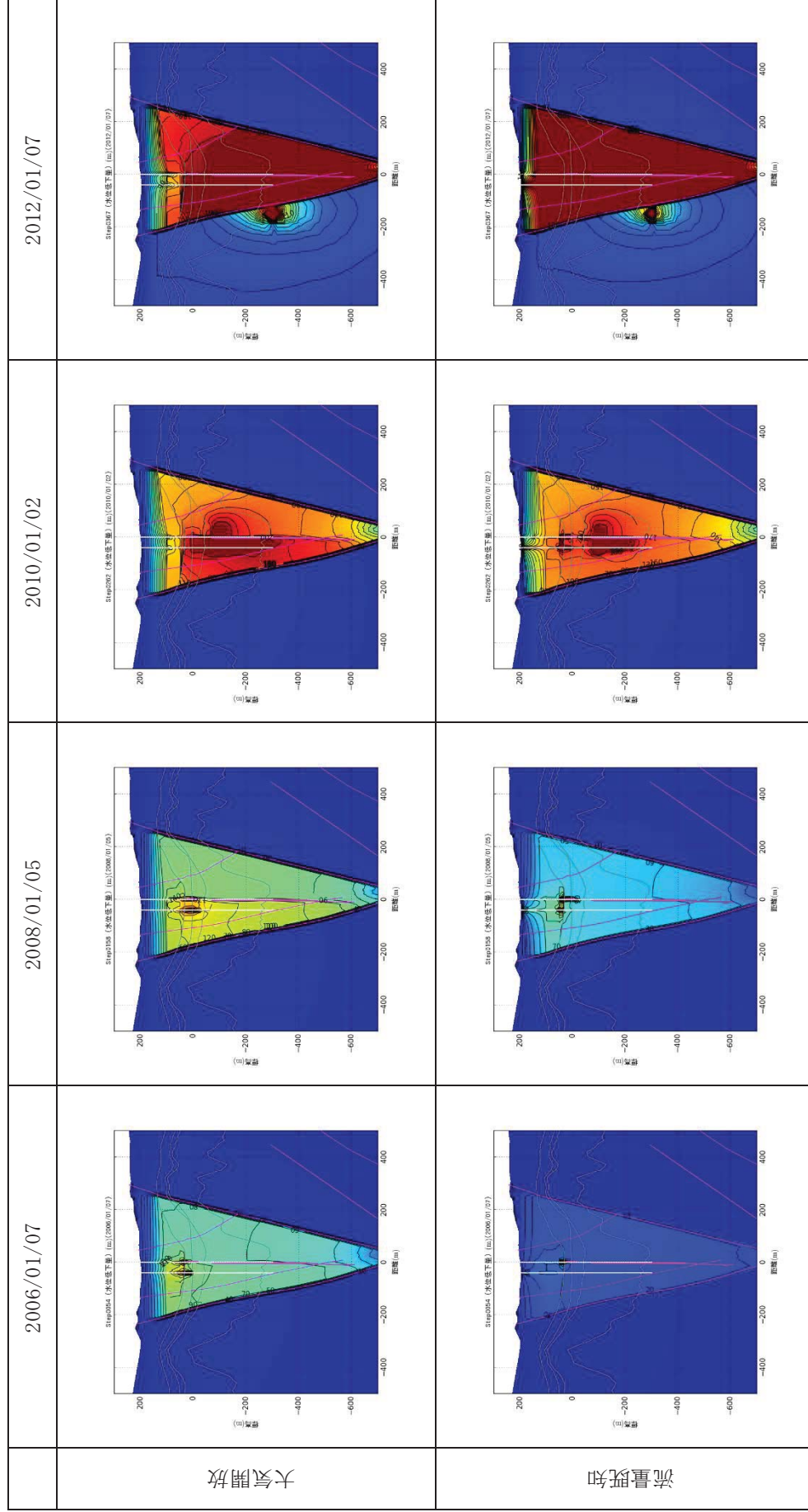


図 6.3.2-15 コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の時間断面の水位低下分布図

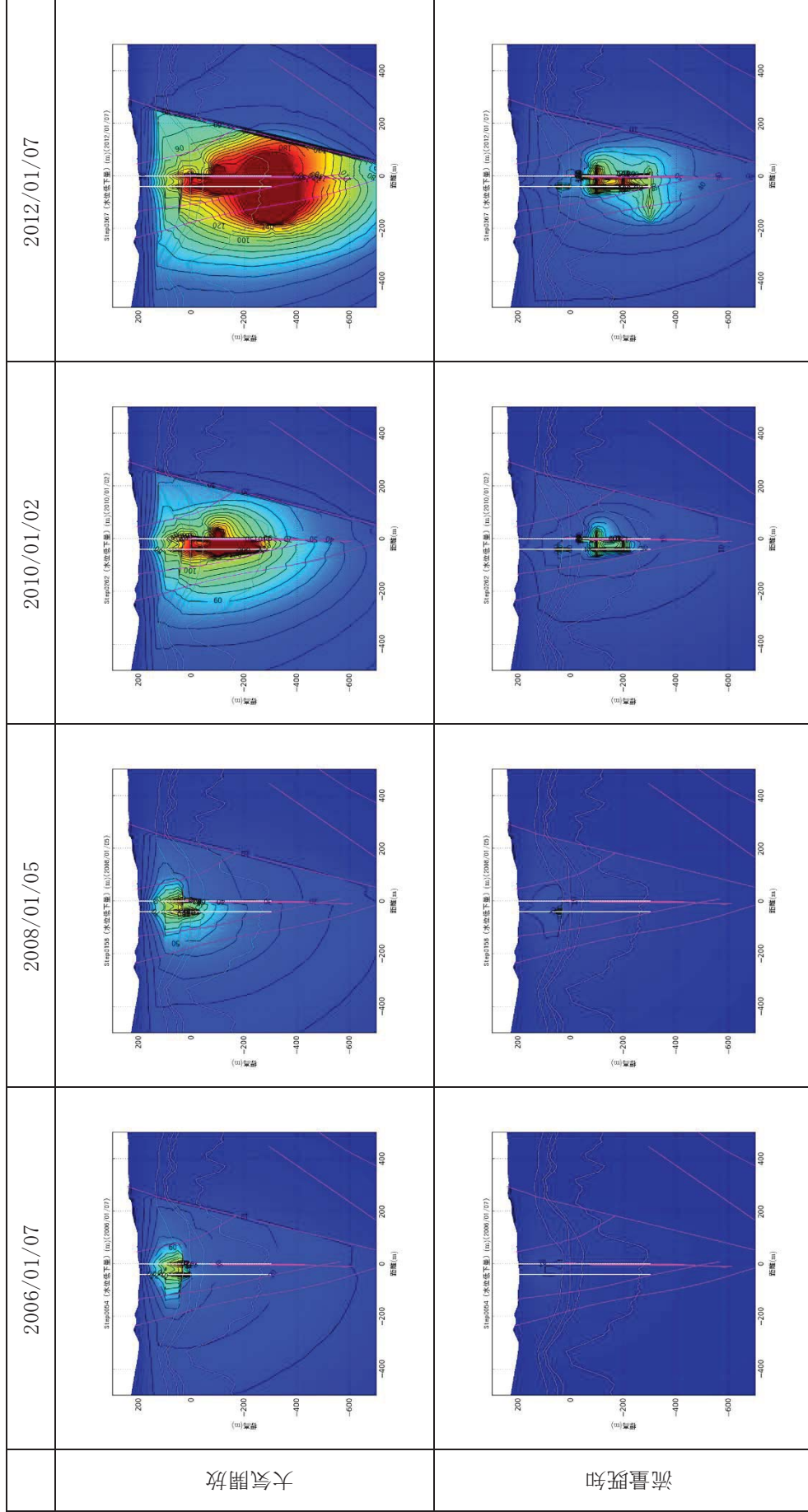


図 6.3.2-16 コンパートメントを構成する断面に透水性の異方性を設定した場合の時間断面の水位低下分布図

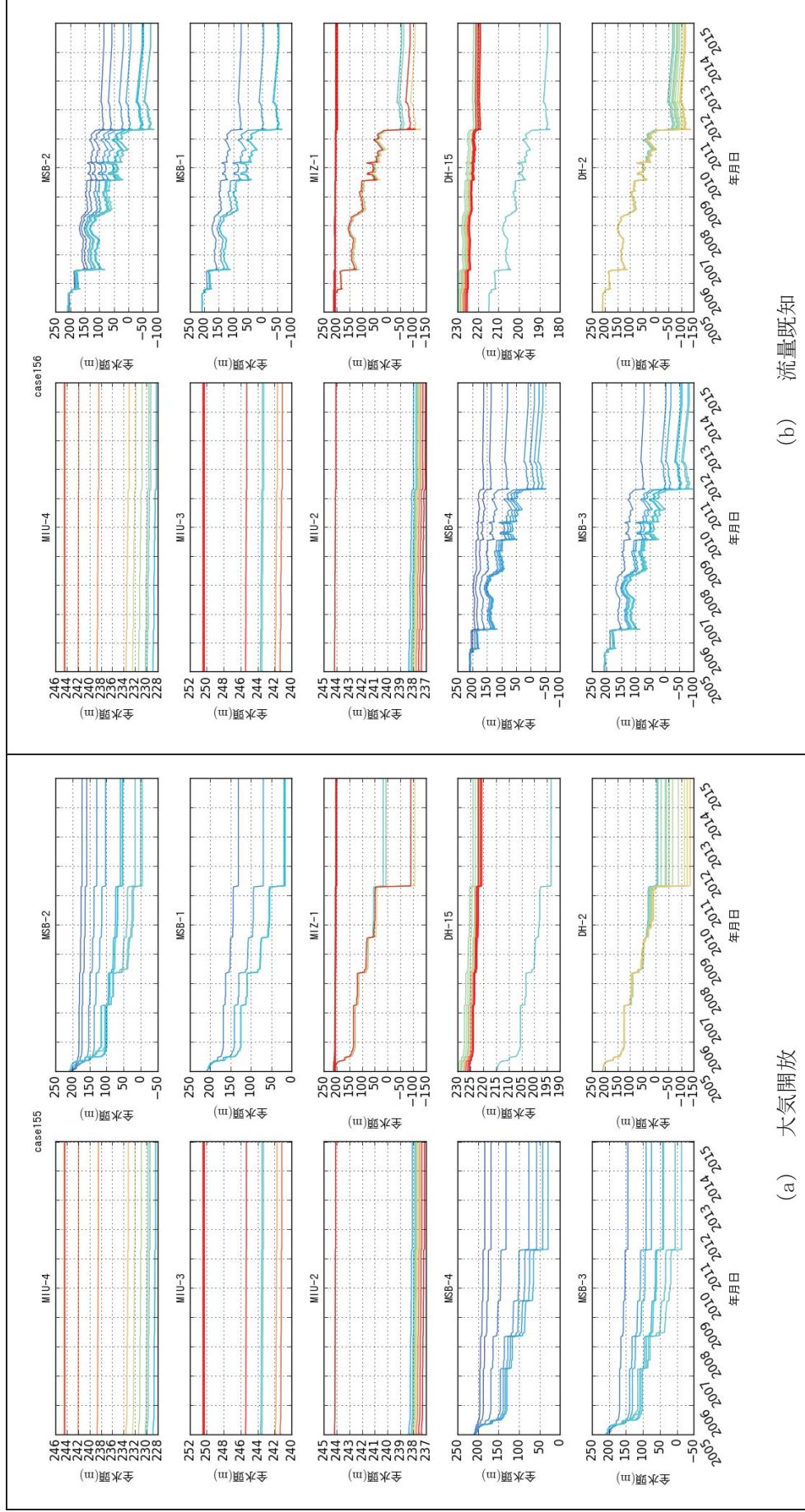


図 6.3.2-17 コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の周辺ボーリング孔での掘削に伴う水圧の時間変化

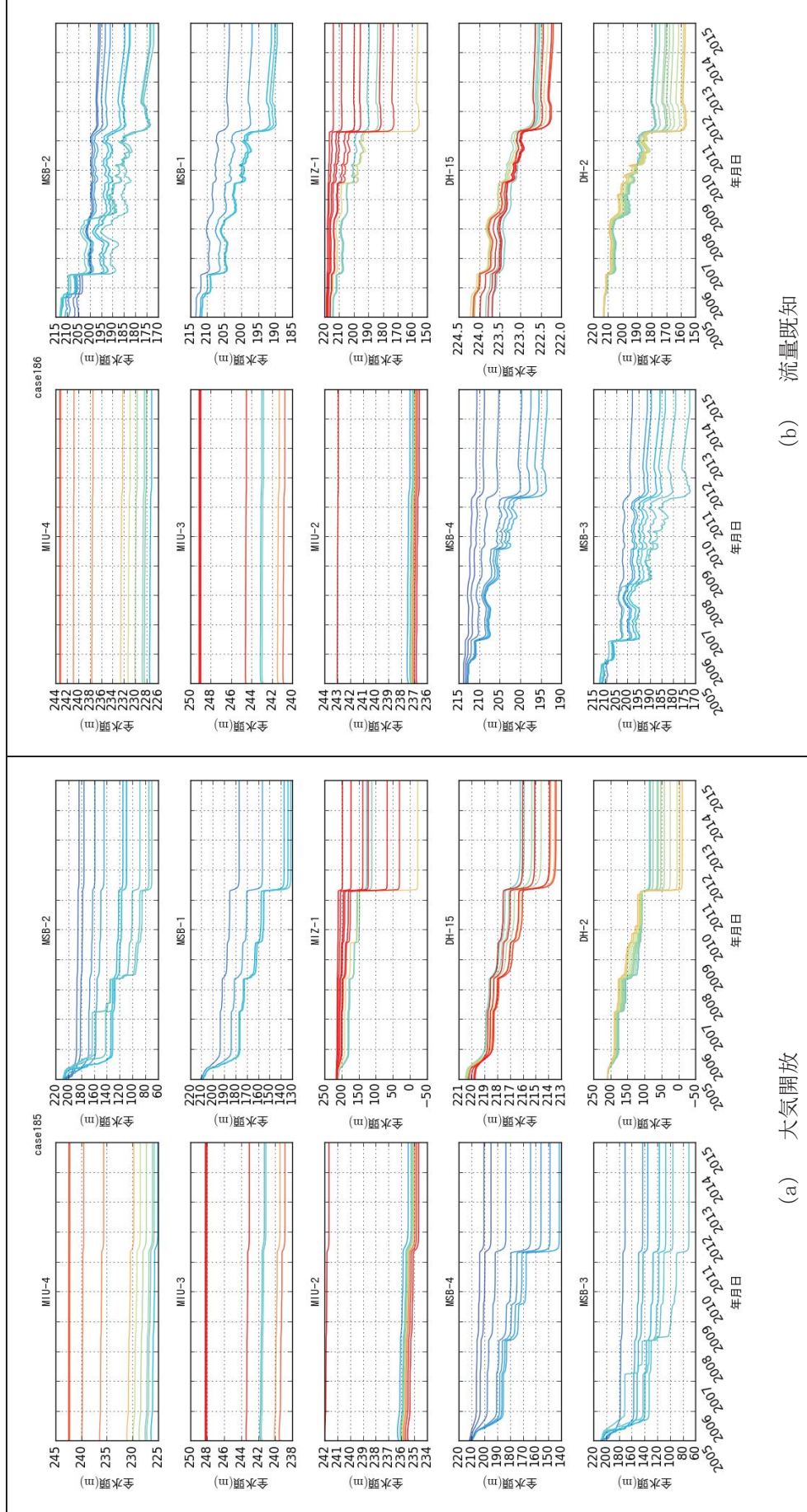


図 6.3.2-18 コンパートメントを構成する断層に透水性の異方性を設定した場合の周辺ボーリング孔での掘削に伴う水圧の時間変化

(4) 非定常の物質移行解析

前述の非定常の地下水流動解析で実施した流動場を用いてトリチウムを対象とした非定常の物質移行解析を実施した。定常の物質移行解析と同様に、トリチウムは半減期を 12.3 年とし、地表面は各日時に降雨が流入している場合は濃度 1 の既知境界条件とし、地下水が流出している場合は自由流出境界条件に設定した。側方と底面の境界条件は自由流出境界に設定した。

解析結果として主立坑と換気立坑を通る断面で、非定常地下水流動解析結果と同様に、トリチウム正規化濃度分布図の時間変化を図 6.3.2-19、図 6.3.2-20 に示す。両立坑でのトリチウム濃度分布を前述と同じ時間断面で実測値と比較した図を図 6.3.2-21、図 6.3.2-22 に示す。

トリチウム正規化濃度分布図(図 6.3.2-19、図 6.3.2-20)に着目すると、コンパートメントを構成する断層を遮水に設定した場合には、2012 年 1 月 7 日時点では定常状態に達しておらず、定常解析よりもトリチウムの浸入が少なくなり、再現性が悪い。コンパートメントを構成する断層に異方性を設定した場合でも、定常状態に達していないため、トリチウムの浸入がやや小さくなった。ただし、異方性を考慮した場合には、定常に達していないため横方向への広がりが抑制され、新しい地下水の流入の概念モデル(図 6.3.1-14)に近づいたのではないかと考えられる。

両立坑でのトリチウム濃度分布(図 6.3.2-21、図 6.3.2-22)に着目すると、異方性を設定した方が、深部までトリチウム濃度が高くなる傾向にあり、実測値に近い。ただし、異方性に設定した場合は、浅部でのトリチウム濃度が実測値に対してやや低くなっている。また、換気立坑でのトリチウム濃度が実測値に対して大きくなっている。ただし、水素・酸素同位体比など別の新しい水の指標では、主立坑だけでなく換気立坑でも同様に新しい水が浸入していることから、トリチウムだけでなく、水素・酸素同位体比など他の指標との比較も必要であると考えられる。

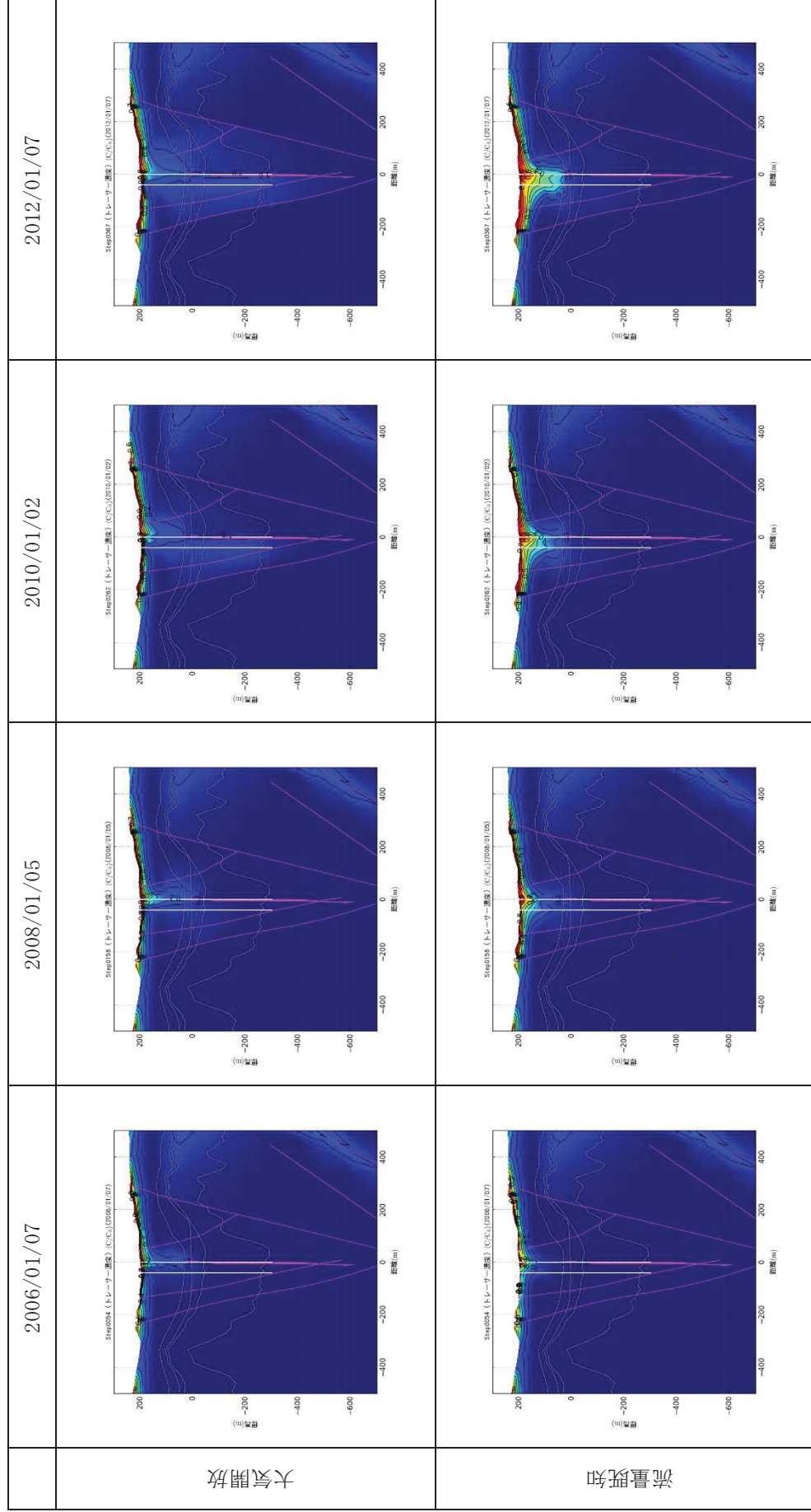


図 6.3.2-19 コンパーストメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の時間断面の正規化トリチウム濃度分布図

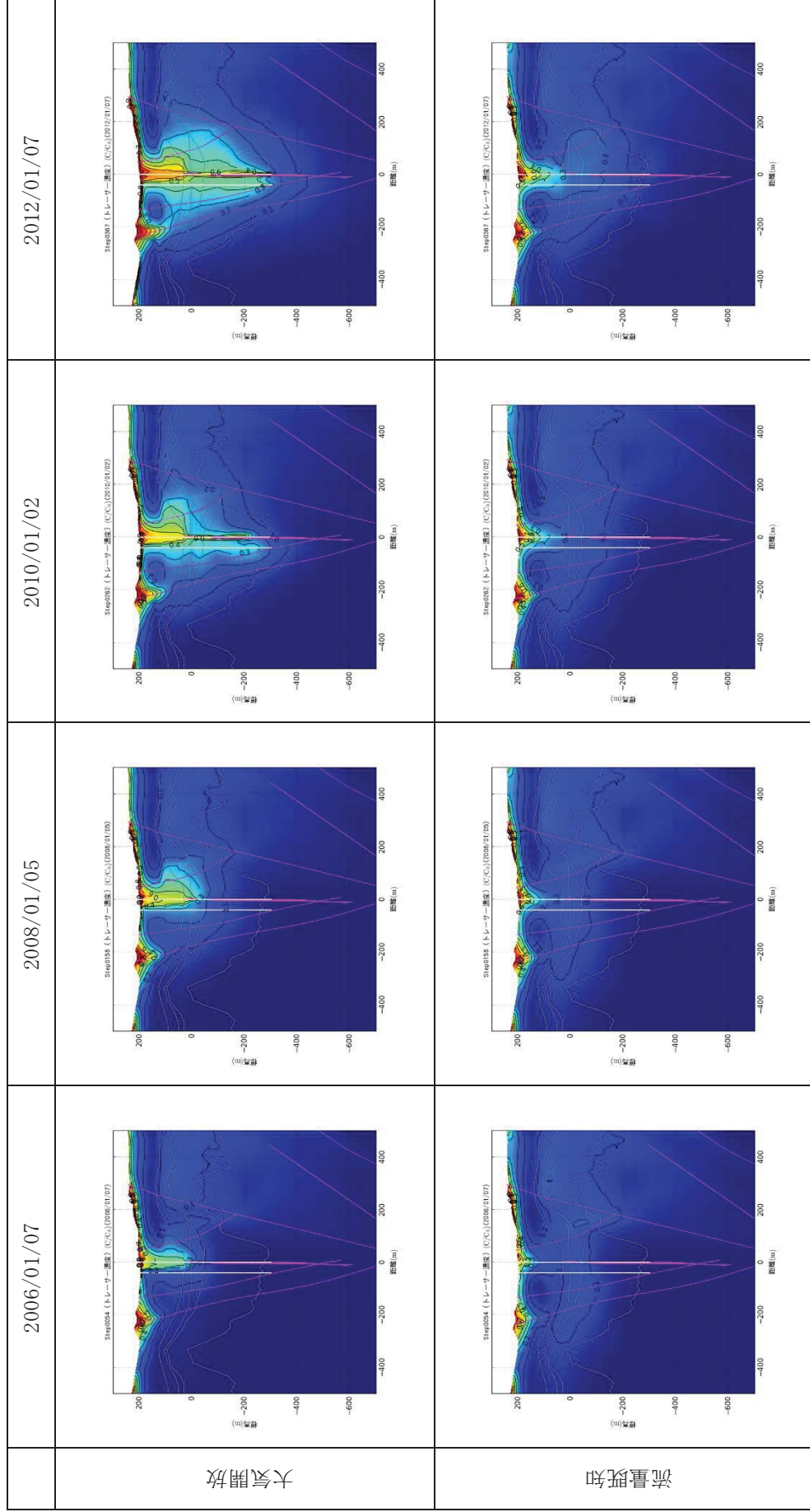


図 6.3.2-20 コンパートメントを構成する断層に透水性を異方性を設定した場合の時間断面の正規化トリチウム濃度分布図

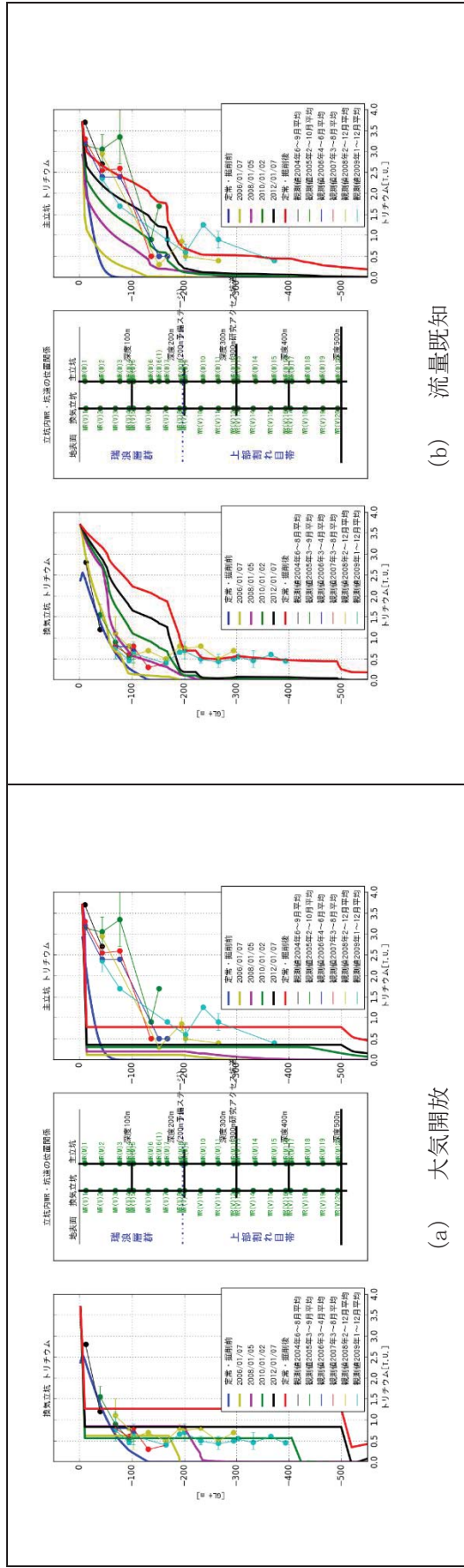


図 6.3.2-21 コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の面立坑におけるトリチウム濃度プロファイル

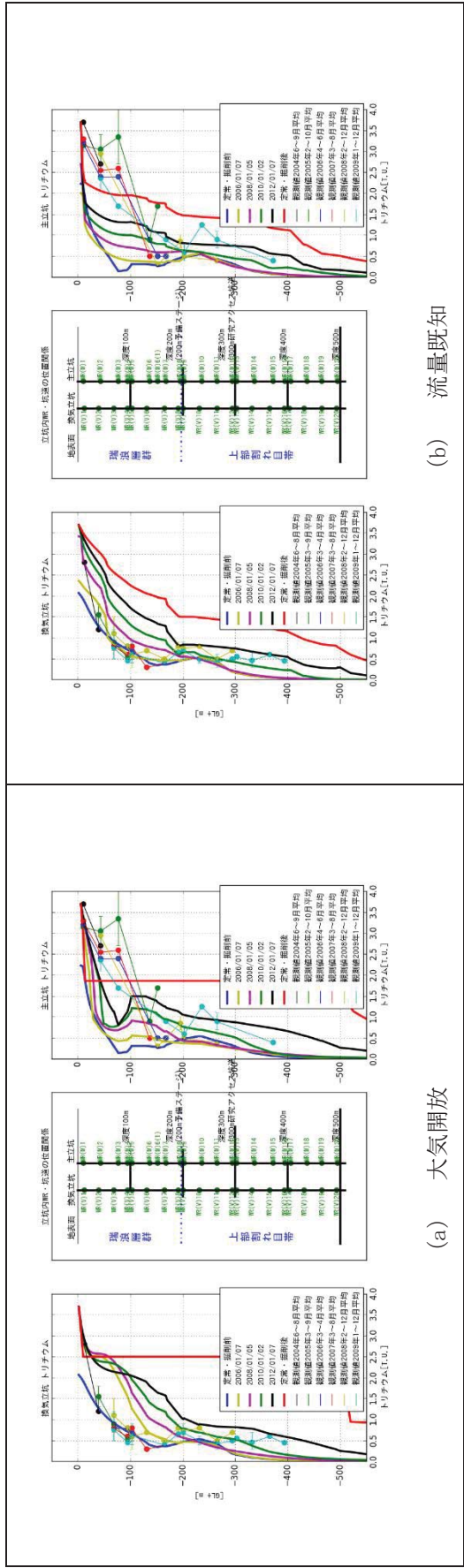


図 6.3.2-22 コンパートメントを構成する断層に透水性の異方性を設定した場合の面立坑におけるトリチウム濃度プロファイル

6.3.2.5 考察

解析モデルは、一昨年度、昨年度のモデルに比べ、高透水性の地層である土岐夾炭層と低角度割れ目集中帯を設定し、コンパートメントモデル内の高透水性の断層、主な地層での境界面を原位置に近づけたモデル化を実施した。この解析モデルを用いて、コンパートメントを構成する断層を遮水に設定した場合と異方性に設定した場合とで、立坑の境界条件を掘削に伴う大気圧開放と計測値で流量既知として、定常解析と非定常解析を実施した。

最初に、地下水流動・物質移行の定常解析を行い、定常状態において発生する水位低下やトリチウムの流入の概要を把握してから、非定常解析を実施することとした。定常解析を実施した結果、コンパートメントを構成する断層を異方性に設定し、流量既知境界条件で設定した場合、原位置で観測されている地下水流動の概念モデルや新しい水の侵入の概念モデルを概ね再現することができた。ただし、水位低下については、解析値は実測値よりもやや小さめで、トリチウム濃度については、解析値は実測値よりもやや大きめとなった。

定常解析である程度実測値の再現の目途が立ったため、非定常解析を実施した。地下水流動については、圧力の応答は十分に早いため、定常解析結果と非定常解析結果とがほぼ同じと見なせる結果となった。ただし、立坑から離れているボーリング孔では圧力応答が追従せず、水位低下が過小となっている。また、主立坑断層を境に、北東側で観測されている緩やかな水位低下と、南西側で観測されている急激な水位低下は解析では再現できていない。これは主立坑断層のモデル化に起因していると考えられた。主立坑断層のモデル化については検討が必要であると考えられた。

トリチウム濃度分布は、地下水の移動に伴って起こる物質移行現象のため現象が遅く、非定常解析は定常解析に比べて、トリチウムの流入が少ない結果となった。しかしながら、定常解析ではコンパートメントを構成する断層を異方性に設定した場合、立坑周辺で過大評価となっていたため、非定常解析では、解析値と実測値の整合性は良くなったと考えられる。トリチウムの流入では、主立坑に比べて換気立坑では少なくなっているが、解析ではこの差は表現できていない。ただし、水素・酸素同位体比では、主立坑でも換気立坑でも同じように新しい水の混合が進んでいるように見えることから、別の指標でも評価してみる必要があると考えられた。

以上の結果から、解析モデルを更新し、立坑周辺での水位低下や水質変化を概ね再現することができるようになった。ただし、水圧応答や主立坑断層を境として水圧変化の違いが再現できていない。また、新しい水の侵入については、トリチウムだけでなく、その他の指標との整合性の検討が必要であると考えられた。

6.3.3 幌延における地下水調査

6.3.3.1 採水地点

幌延深地層研究センターの地下施設において、坑道内のボーリング孔から地下水を採取した。採取した地点は図 6.3.3-1 に示す通りである。採水区間は主に湧水量の多い地点とした。

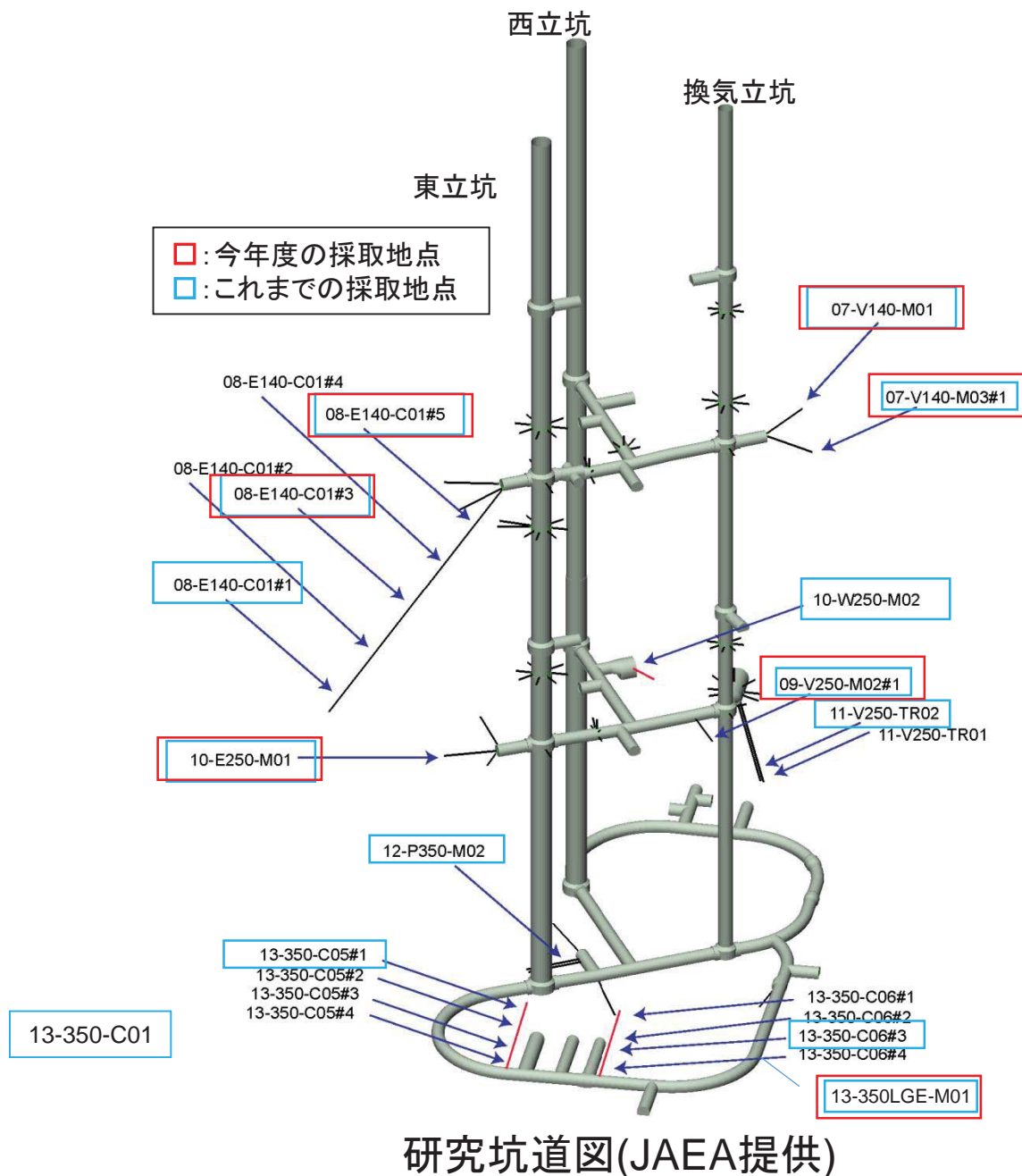


図 6.3.3-1 幌延深地層研究センターの地下施設における採水地点

(JAEA 殿より提供)

6.3.3.2 採水方法

採水は、主要溶存イオン、水素・酸素同位体比、塩素同位体比分析用と希ガス分析用とを分けて実施した。希ガス分析用は、図 6.3.3-2 に示すように、圧力制御式、循環式、原位置平衡式、水上置換で試料を採取した。これは、地下水中の溶存ガスが多く、圧力の低下によって脱ガスが発生し、希ガス分析用のサンプルの再現性が低いためである。これまでに、圧力制御式、循環式、原位置平衡式を低流量で時間をかけて実施したが、十分に再現性のある分析結果が得られなかったため、今年度から水上置換による試料採取も実施した。採水地点周辺は、湧水量が少なく、ガス量が多いため、CFCs, SF₆などは実施していない。原位置での pH, ORP, DO, EC, 温度などの計測には、数十 ml/min の流量を要し、安定までに時間を要することから実施しなかった。

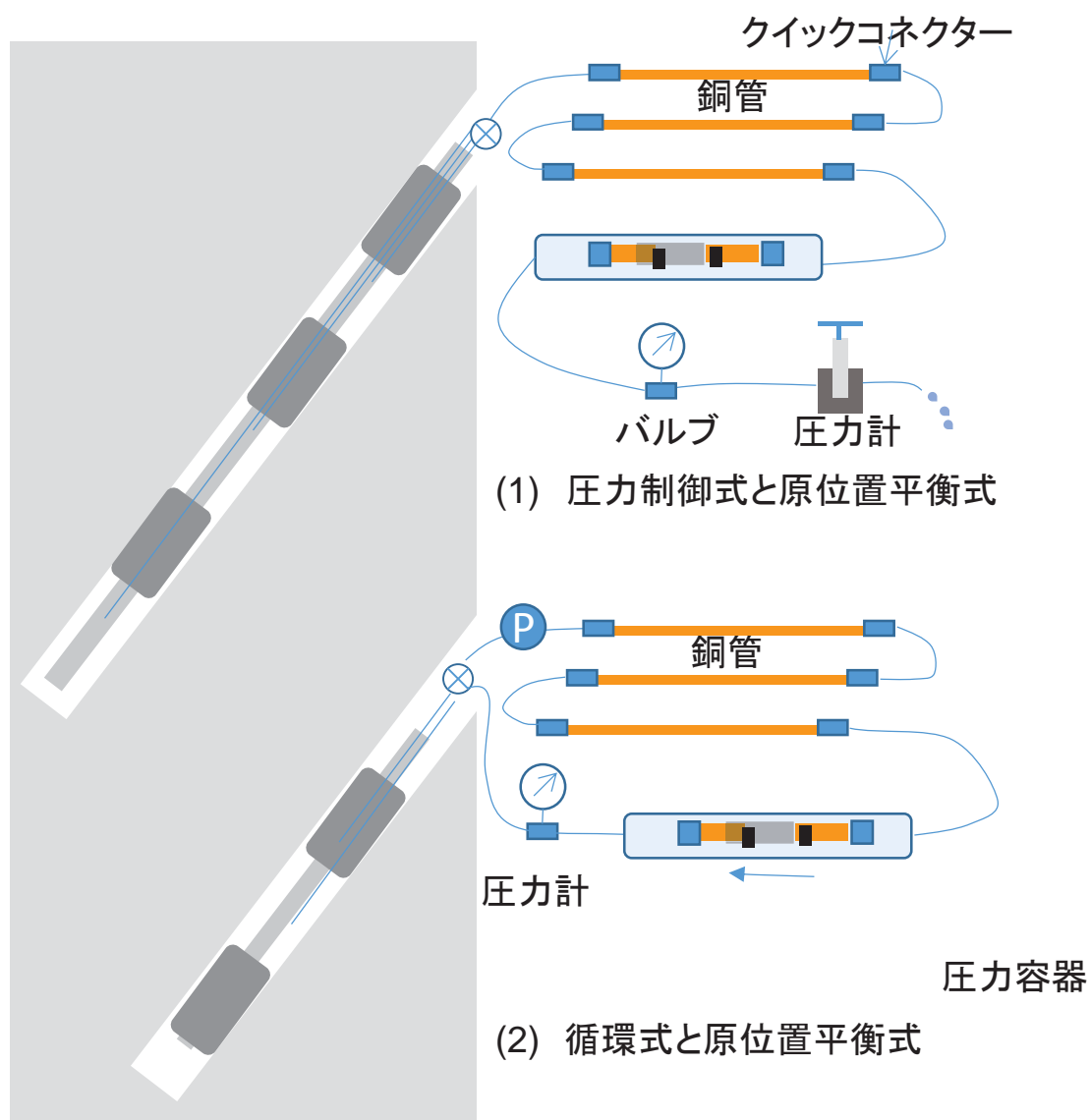


図 6.3.3-2 原位置での希ガス採水方法の概念図

6.3.3.3 分析方法

地下水の分析は 6.3.1.3 と同様に実施した。

6.3.3.4 分析結果

主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスの分析結果を表 6.3.3-1 に示す。

なお、幌延では Ne 濃度が大気平衡濃度よりも高い場合でも、大気の混入でなく、脱ガスによるガスの濃集の可能性がある。このため、Ne 濃度が高い場合でも、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ が大気よりも十分に低ければ、ガスの濃集と見なして評価する。補正方法は、図 6.3.3-3 に示すとおりである。

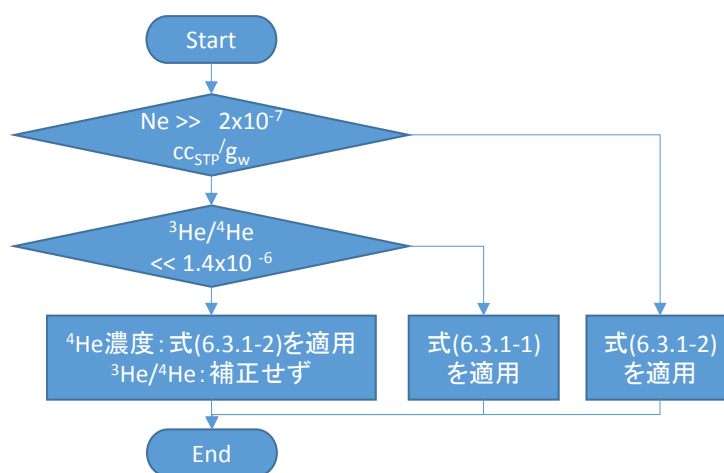


図 6.3.3-3 ガス濃集時の希ガス濃度の補正方法



図 6.3.3-4 圧力制御式の設置状況



図 6.3.3-5 循環式の設置状況

表 6.3.3-1 幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果

(1) 主要溶存イオン

サンプル名	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	B mg/L	F mg/L	Cl mg/L	NO ₃ mg/L	SO ₄ mg/L	Si mg/L	ALK meq/L	TOC mg/L	TC mg/L	TIC mg/L	NPOC mg/L	採取日
07-V140-M01	3300	110	70	110	110	<1	4000	<0.5	<5	30	52	29	310	280	23	2016/8/9
07-V140-M03#1	2800	95	54	89	96	<1	3100	<0.5	<5	31	50	25	380	350	22	2016/8/9
09-V250-M02#1	1900	52	31	60	48	<1	1900	<0.5	<5	28	37	22	210	190	11	2016/8/9
10-E250-M01	1800	54	27	47	60	<1	1600	<0.5	<5	34	41	32	170	140	15	2016/8/9
13-350LGE-M01	3900	75	86	130	100	<1	5100	<0.5	<5	26	47	25	250	220	17	2016/8/9
08-E140-C01#3	1900	69	30	53	73	<1	1800	<0.5	<5	34	50	28	280	250	18	2016/8/9
08-E140-C01#5	2400	89	45	75	100	<1	2800	<0.5	<5	33	54	35	260	220	25	2016/8/9
WR-E27	250	11	7.8	25	7.7	<10	210	48	28	30	4.7	12	58	46	10	2016/10/25
WR-E63.9	1600	60	29	60	57	<10	1500	50	<5	27	28	12	270	260	20	2016/10/25
WR-E132	3000	100	49	81	100	<10	3200	2.9	5.3	31	48	19	490	470	25	2016/10/25
WR-E169	2400	83	31	44	94	<10	2200	27	<5	31	48	25	480	460	30	2016/10/25
WR-E239	1900	66	20	29	74	<10	1500	120	20	27	42	22	380	360	25	2016/10/25
WR-E340	2500	62	40	65	68	<10	2700	2.5	7.6	25	36	19	210	190	15	2016/10/25

表 6.3.3-1 幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果 (続き)

(2) 微量元素

サンプル名	Br	I	Cs	Sr	Li	Al	Mn	Fe	Zn	Cu	As	Se	Rb	Ba	採取日
	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	μg/L	
07-V140-M01	31	14	<2	1600	11	3.8	32	50	<10	18	<2	<2	39	1200	2016/8/9
07-V140-M03#1	24	11	<2	1200	9	10	24	72	<10	<2	<2	<2	34	800	2016/8/9
09-V250-M02#1	12	5.8	<2	550	4.8	3.7	22	34	<10	10	<2	<2	26	370	2016/8/9
10-E250-M01	11	4.4	<2	440	4.6	10	31	46	<10	24	<2	<2	26	300	2016/8/9
13-350LGE-M01	37	17	<2	1900	10	2.7	31	32	<10	89	<2	<2	43	1400	2016/8/9
08-E140-C01#3	12	6.1	<2	620	5.7	5.7	22	490	1.2	10	<2	<2	25	460	2016/8/9
08-E140-C01#5	20	9.3	<2	1100	8.7	19	21	670	<2	<2	<2	<2	30	730	2016/8/9
WR-E27	1.4	0.44	<2	85	0.72	<10	2.6	41	20	<2	<2	<2	4.5	29	2016/10/25
WR-E63.9	11	4.3	<2	590	5.3	<10	35	22	2.8	<2	<2	<2	20	370	2016/10/25
WR-E132	22	10	<2	1100	9.4	<10	18	63	3.0	<2	<2	<2	33	1000	2016/10/25
WR-E169	14	7	<2	500	7.2	<10	7.1	110	0.8	<2	<2	<2	42	410	2016/10/25
WR-E239	10	5.1	<2	290	5.1	<10	6.4	76	0.8	<2	<2	<2	40	220	2016/10/25
WR-E340	18	8.5	<2	750	6.3	<10	22	22	15.0	<2	<2	<2	36	570	2016/10/25

表 6.3.3-1 幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果 (続き)

(3) 同位体

サンプル名	³ H	¹⁴ C	$\delta^{13}\text{C}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$
	T.U.	pMC (%)	‰	$\times 10^{-15}$	‰	‰	‰
07-V140-M01	ND	<0.4	+18.6	3.0 ± 0.8	-45.5 ± 0.3	-2.42	-2.42 ± 0.05
07-V140-M03#1	ND	<0.4	+19.2	2.4 ± 0.7	-49.6 ± 0.2	-3.57	-3.57 ± 0.17
09-V250-M02#1	ND	<0.4	+19.4	3.1 ± 0.9	-62.6 ± 0.4	-7.06	-7.06 ± 0.02
10-E250-M01	ND	<0.4	+19.0	3.4 ± 0.8	-60.2 ± 0.2	-6.54	-6.54 ± 0.04
13-350LGE-M01	ND	<0.4	+18.9	3.4 ± 0.8	-36.6 ± 0.8	-0.72	-0.72 ± 0.04
08-E140-C01#3	N.M	N.M	N.M	4.1 ± 0.9	-52.1 ± 1.2	-4.79	-4.79 ± 0.06
08-E140-C01#5	N.M	N.M	N.M	3.6 ± 1.0	-46.6 ± 0.6	-2.93	-2.93 ± 0.02
WR-E27	N.M	N.M	N.M	4.0 ± 0.8	-66.2 ± 0.9	-10.15	-10.15 ± 0.07
WR-E63.9	N.M	N.M	N.M	3.7 ± 0.8	-55.7 ± 1.1	-6.88	-6.88 ± 0.02
WR-E132	N.M	N.M	N.M	2.1 ± 0.7	-43.6 ± 0.8	-2.75	-2.75 ± 0.04
WR-E169	N.M	N.M	N.M	4.4 ± 0.8	-48.1 ± 0.5	-3.57	-3.57 ± 0.06
WR-E239	N.M	N.M	N.M	5.2 ± 0.8	-54.4 ± 1.1	-5.05	-5.05 ± 0.03
WR-E340	N.M	N.M	N.M	4.1 ± 0.8	-54.3 ± 0.3	-4.87	-4.87 ± 0.05

表 6.3.3-1 幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果（続き）

(4) 希ガス

採水区間	⁴ He	³ He/ ⁴ He	Net	Cor. ⁴ He	Cor. ³ He/ ⁴ He	採取方法	特記事項
	CCSTP/g _w	-	CCSTP/g _w	CCSTP/g _w	-		
07-V140-M01	5.8E-8	3.6E-7	4.6E-8	2.5E-7	3.6E-7	圧力制御式	
07-V140-M01	2.6E-6	1.0E-6	7.2E-6	7.3E-8	1.0E-6	平衡式	銅管小
07-V140-M03#1	1.1E-3	2.6E-7	1.7E-4	1.3E-6	2.6E-7	圧力制御式	水無し
07-V140-M03#1	1.3E-3	2.4E-7	1.1E-4	2.2E-6	2.4E-7	圧力制御式	水無し
07-V140-M03#1	3.4E-6	3.3E-7	1.5E-6	4.7E-7	3.3E-7	平衡式	銅管小
08-E140-C01#1	2.1E-7	2.0E-7	2.5E-8	1.7E-6	2.0E-7	循環式	
08-E140-C01#1	4.2E-3	1.0E-7	2.5E-5	3.4E-5	1.0E-7	循環式	水無し
09-V250-M02#1	7.5E-8	8.4E-7	1.0E-7	1.4E-7	8.4E-7	循環式	
09-V250-M02#1	3.2E-8	5.4E-7	1.4E-8	4.7E-7	5.4E-7	循環式	
09-V250-M02#1	5.6E-8	5.6E-7	5.0E-8	2.2E-7	5.6E-7	循環式	
10-E250-M01	3.3E-7	1.2E-7	2.1E-8	3.1E-6	1.2E-7	圧力制御式	
10-E250-M01	6.5E-6	1.1E-7	2.7E-6	4.8E-7	1.1E-7	平衡式	銅管小
13-350LGE-M01	3.2E-7	1.1E-7	5.3E-8	1.2E-6	1.1E-7	循環式	
13-350LGE-M01	4.7E-7	1.4E-7	5.1E-8	1.8E-6	1.4E-7	循環式	
13-350LGE-M01	8.9E-7	1.2E-7	2.6E-7	8.7E-7	9.2E-8	循環式	
13-350LGE-M01	3.8E-7	1.1E-7	4.4E-8	1.7E-6	1.1E-7	循環式	
13-350LGE-M01	4.2E-7	1.1E-7	4.7E-8	1.8E-6	1.1E-7	循環式	
13-350LGE-M01	1.7E-8	4.2E-7	8.8E-9	3.8E-7	4.2E-7	循環式	
13-350LGE-M01	3.4E-8	1.1E-6	1.1E-7	6.0E-8	1.1E-6	循環式	大気混入
13-350LGE-M01	8.7E-3	1.3E-6	3.3E-2	5.3E-8	1.3E-6	循環式	水無し
13-350LGE-M01	2.3E-4	8.3E-8	2.2E-5	2.0E-6	8.3E-8	循環式	水無し
13-350LGE-M01	1.1E-4	1.2E-7	7.2E-7	3.0E-5	1.2E-7	循環式	水無し
13-350LGE-M01	3.3E-6	1.5E-7	4.0E-7	1.7E-6	1.5E-7	平衡式	銅管小

注) 赤字はガス濃集時の希ガス濃度補正を実施、青背景は平衡式

6.3.3.5 考察

(1) 主要溶存イオン濃度の変化

主要溶存イオンをヘキサダイアグラムとして図 6.3.3-6 に示す。図には 2013 年～採取したデータをあわせて示した。水質の変化は、これまでの期間ではほとんどなく、測定精度の影響でヘキサダイアグラムの線が二重に見える程度である。水質のタイプは、概ね Na-Cl 型であるが、一部に、HCO₃ 濃度が高く、Na-(HCO₃)-Cl 型となっているものがある。浅部と深度 250 m 付近においては、やや大きさが小さい地点がある。浅部では降水の影響によって元の成分が希釈されているためである。深度 250m 付近では、声間層と稚内層の地層境界で比較的透水係数が高く、地下水の流動性も高いため、濃度の低い降水系の地下水が混合しているためと考えられる。溶存イオン濃度が低い地点においては、HCO₃ 濃度が高く、Na-(HCO₃)-Cl 型となっている。

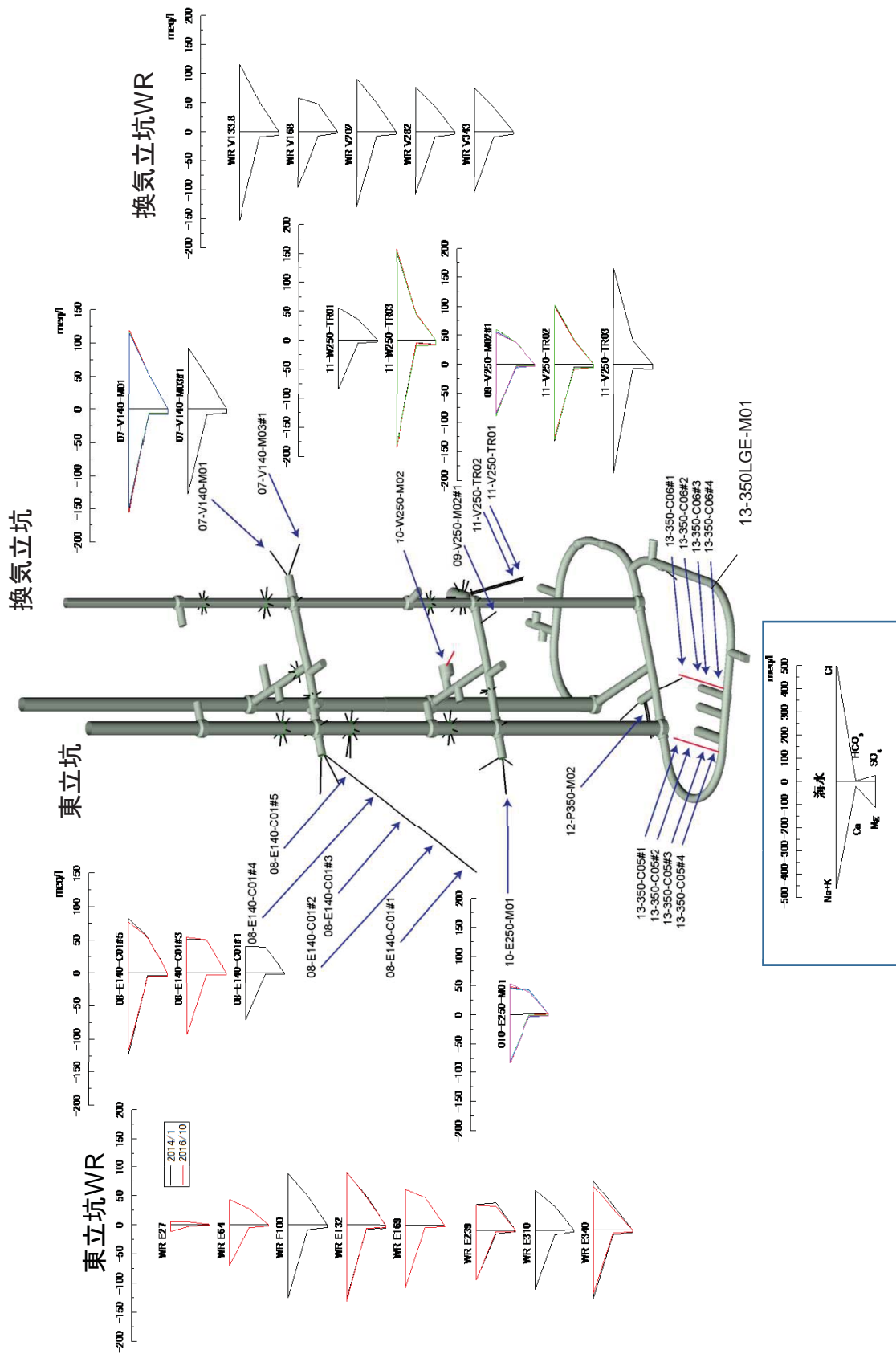


図 6.3.3-6 幌延立坑での水質のへキサダイアグラム

(2) 水素・酸素同位体比の変化

水素・酸素同位体比の関係を図 6.3.3-7 に示す。この図には立坑での調査結果だけでなく、立坑周辺に掘削された広域調査用ボーリングのデータもあわせて示した。水素・酸素同位体比も 2013 年～の結果を図化したけどほとんど変化していない。同一区間において、水素同位体比の変化は測定精度以下(1‰以下)である。酸素同位体比については、測定精度(0.1‰)よりもやや大きいものもあるが、有意な差は見られない。立坑での水素酸素同位体比は、立坑の深度 140 m から深度 250 m に向けて低くなる傾向に有り、深度 250 m 付近で反転し、深度とともに大きくなる傾向を示す。前述のように、深度 250 m 付近が声問層と稚内層の地層境界にあたり、透水係数が高いため、浅層水の混合が進んでいることが、水素・酸素同位体比からも把握できる。このような水素・酸素同位体比の傾向は、立坑掘削前に実施した先行ボーリングでの調査結果とも整合し、ここ数年間に亘って変化がないことから考えても、立坑掘削による地表水の流入ではないと考えられる。

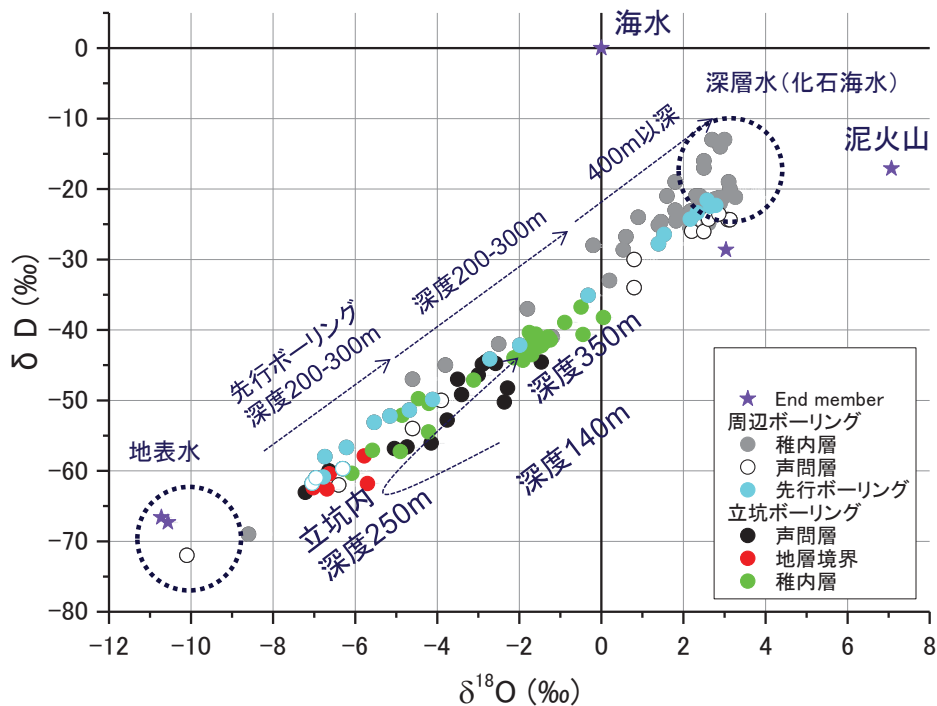


図 6.3.3-7 水素酸素同位体の関係

(3) $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の分布

立坑のボーリング孔および WR(Water Ring)から採取した地下水の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を図 6.3.3-8 に示す。図には、これまでの調査結果が複数試料ある地点については計測値の平均値と標準偏差を示した。計測値とその $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の計測値は $2.6\sim 5.2 \times 10^{-15}$ 程度の値となっている。深部ほど

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が大きくなる傾向にあり、深度 250m 坑道内は、 $3\sim 4\times 10^{-15}$ 程度であるが、深度 350m 坑道では、 $4\sim 5\times 10^{-15}$ 程度となっている。これは、深度 250m 坑道までは声間層で、これ以深は稚内層に大別されるのと調和的である。

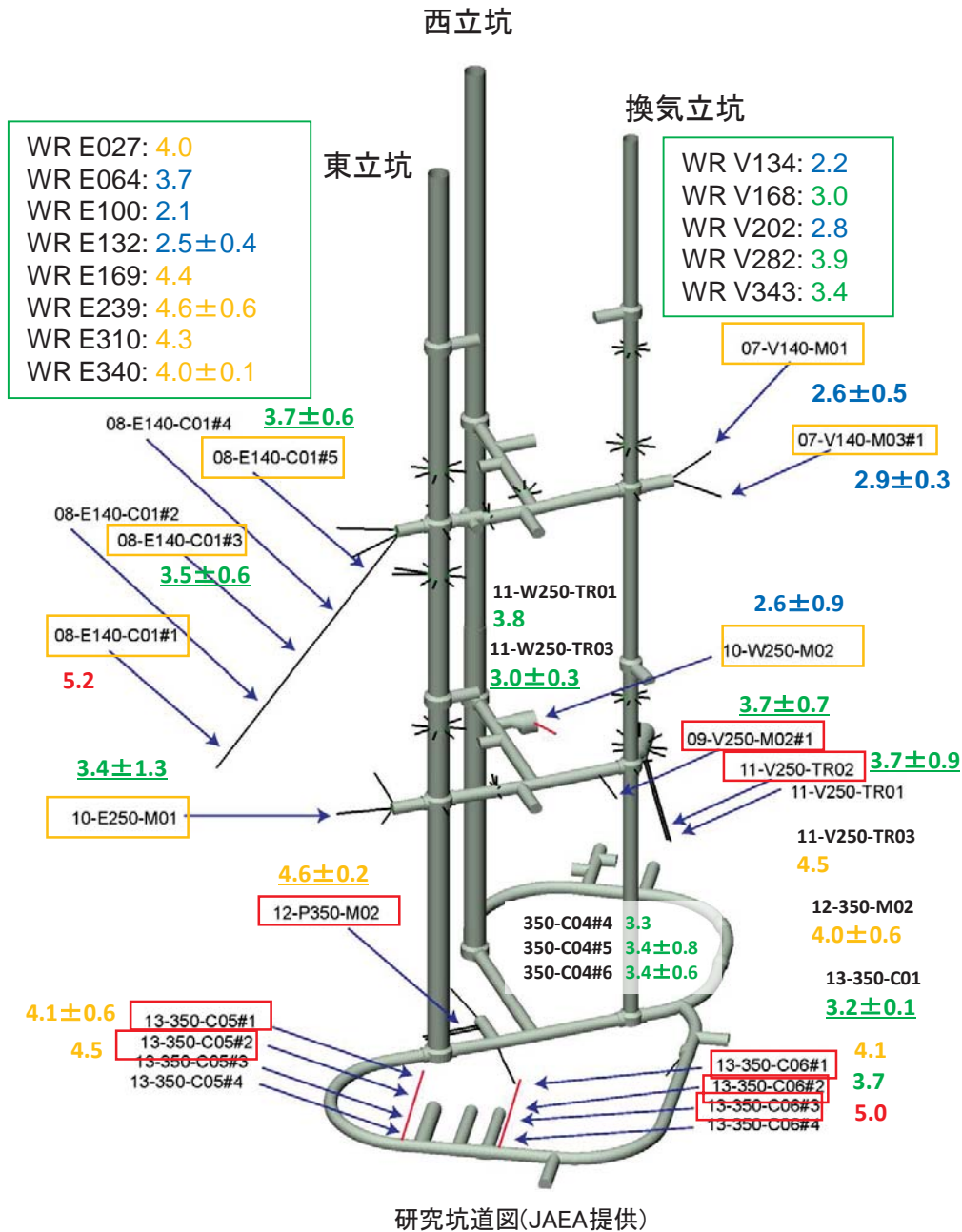


図 6.3.3-8 幌延研究坑道内での $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の分布

声間層と稚内層の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の平衡値は、図 6.3.3-9 のように表される。これは、声間層と稚内層の構成鉱物や含有元素の濃度がほぼ同じであり、間隙率のみが異なるため、このように表すことができる。平衡値は、声間層では、間隙率 50~60%程度で Cl 濃度 1900~9500mg/l (海水の

1/10~1/2)であるため、 $2.9\sim 5.4\times 10^{-15}$ 程度、稚内層では、間隙率 30~40%程度で Cl 濃度 1900~9500mg/l(海水の 1/10~1/2)であるため、 $4.9\sim 9.3\times 10^{-15}$ 程度である。

このため、声問層内(深度約 250m 以浅)の地下水は声問層の平衡値($2.9\sim 5.4\times 10^{-15}$ 程度)に達していると考えられる。稚内層(深度約 250m 以浅)の地下水は稚内層の平衡値($4.9\sim 9.3\times 10^{-15}$ 程度)に比べてやや低いため、声問層からの地下水の流入の影響を受けていると推定される。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は徐々に値が大きくなっていることから、深度が深くなれば、稚内層の平衡値程度になるのではないかと推定される。

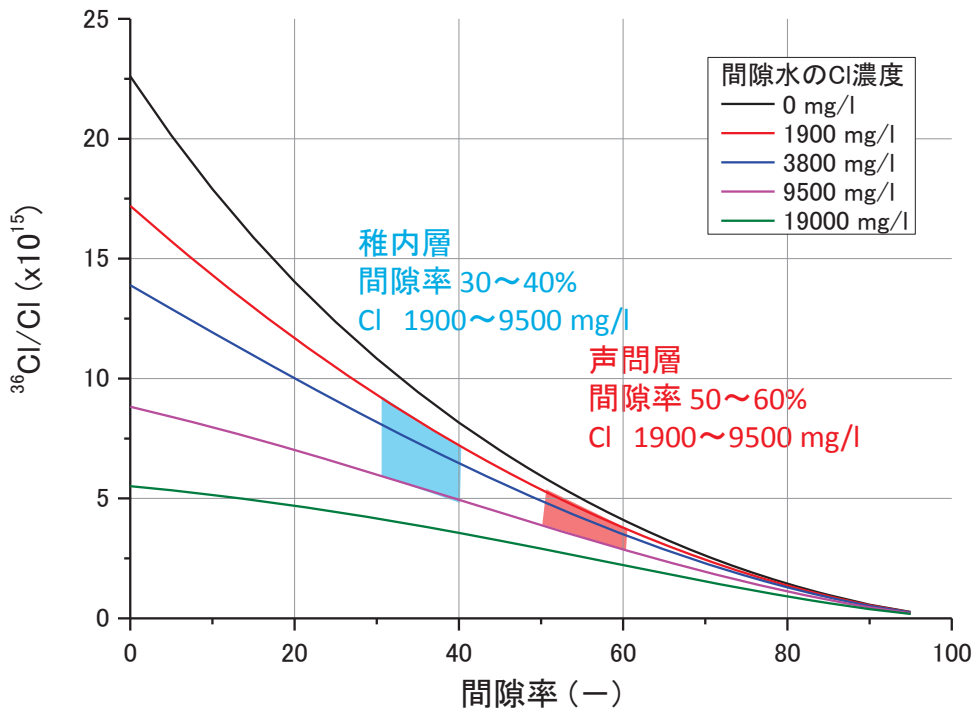


図 6.3.3-9 間隙率と平衡値の関係の計算値

(4) 希ガス分析結果

希ガス採水では、図 6.3.3-2 に示すように、循環式と圧力制御式に原位置平衡式を組み合わせ実施した。幌延では溶存ガス量が多く、脱ガスの発生が顕著である。この影響については、6.1 で説明する。このため、なるべく原位置の水圧を下げないように採水を実施している。

表 6.3.3-1(4)に示すように、平衡式と圧力制御式と原位置平衡式を比較すると、例えば、07-V140-M03#1、08-E140-C01#1、10-E250-M01、13-350LGE-M01 の平衡式の補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ は、圧力制御式や原位置平衡式と概ね整合した値を示している。一方で、 ^4He 濃度については、近い値を示す場合(13-350LGE-M01)もあるが、1 桁程度濃度が低く評価される場合がある。これは、昨

年度も示したように、サンプラー内への大気残留が、Ne 濃度に影響を与え、結果として Ne 濃度で割り戻される He 濃度に与える影響が大きいと考えられる。また、平衡式では、ガスの交換にシリコンチューブを用いているが、シリコンチューブの強度は、原位置の水圧(数 MPa)に比べて低いため、採水中の圧力変化、例えば、真空引きや区間圧力によって穴が開く場合も多かった。このため、設置時の大気の除去やシリコンの強度について検討する必要があると考えられた。

立坑のボーリング孔から採取した地下水の希ガス濃度を図 6.3.3-10 に示す。希ガスの分析結果は、圧力制御式と循環式とに分けて示した。 ^4He 濃度の結果は補正計算をしているものの、バラツキが大きく、標準偏差の方が平均値よりも大きいものも見られる。溶存ガスの脱ガスの影響が測定結果に与える影響が非常に大きいことを意味している。ただし、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ については、標準偏差に対して誤差が数十%程度となっている。これは、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ は He の比であり、脱ガス挙動が同じであれば、脱ガスしてもそれほど大きな差が生じないのではないかと推定される。

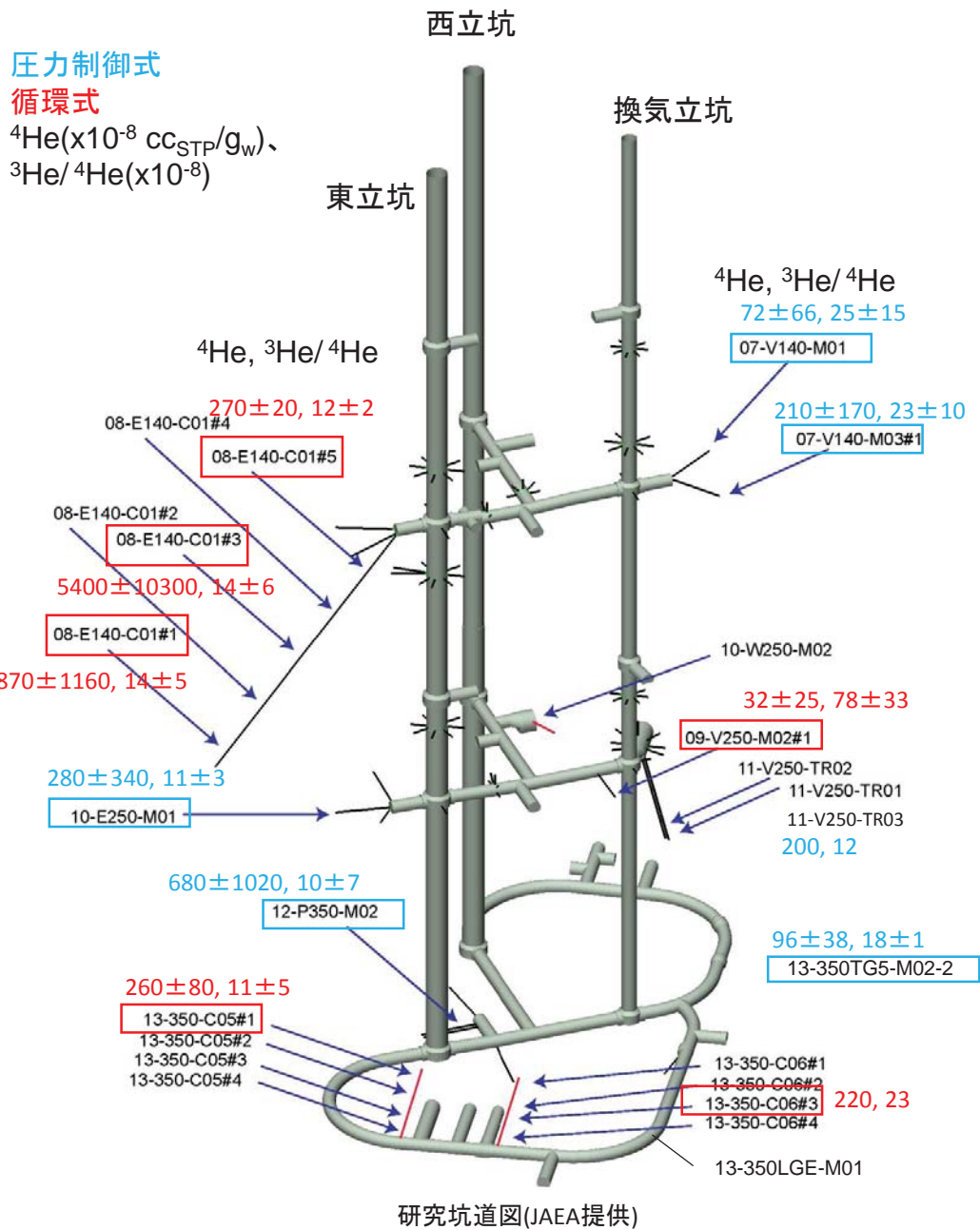


図 6.3.3-10 幌延研究坑道内での ${}^4\text{He}$ 濃度と ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ の分布

6.3.4 幌延における地下水流動・物質移行解析

6.3.4.1 地下水流動・水質変化の概要

幌延深地層研究センターの掘削に伴う地下水流動・物質移行現象の変化を評価するために地下水流動・物質移行解析を実施した。立坑掘削の進捗を図 6.3.4-1 に示す(日本原子力研究開発機構、2011)。また、立坑への湧水量を図 6.3.4-2 に示す(稲垣ほか、2011, 2012, 2013, 稲垣、2014)。図に示す様に、湧水量は東立坑と西立坑を併せて約 100 m³/日である。この程度の湧水量が、8年間程度継続したと考えると 30 万 m³の湧水量となり、これは間隙率を 50%と考えると 100×100×50 m の領域の地下水が湧出したことになる。

立坑への湧水量は、図 6.3.4-2 に示すように、掘削深度が 250m 程度で湧水量が急激に増加する傾向が見られている(日本原子力研究開発機構、2011)。これは、声間層と稚内層の境界付近に透水係数が高い領域があり、これが地下施設の建設地点では約 250 m 深度に存在することから、このような結果になっていると考えられている(日本原子力研究開発機構、2011)。

水圧低下は図 6.3.4-3 に示すように、地下施設周辺のボーリング孔で大きい(日本原子力研究開発機構、2013、日本原子力研究開発機構、2014)。先行ボーリングでは、100m 以上の水圧低下が観測されている。ただし、水圧低下が有意なのは、声間層と稚内層の境界付近の 250 m 深度、断層の影響がある深度 350 m 付近のみである。HDB-3 孔は地下施設から 100m 以上離れているが、深度 401m 区間では、350m 調査坑道における 13-350-C03 孔(仮称)を掘削の際、F1 断層と推定される断層付近を掘削した後に水圧低下が発生しており、この断層の影響を受けていると考えられる(日本原子力研究開発機構、2013)。立坑とボーリング孔の関係を図 6.3.4-4 に示した。図は、湧水量の多い地点と水圧低下の大きい地点とを概念的に示したものである。

これらの結果から、声間層と稚内層の間の高透水領域と断層の掘削にともなう湧水が、地下施設周辺の水圧応答に大きな影響を与えていると推定される。

立坑の集水リングにおける塩分濃度の変化が、天野ほか(2012)や日本原子力研究開発機構(2014)に示されている。この結果から、浅部では地下施設建設に伴い一時的に塩分濃度が増加した後、やや減少する傾向を示す。一方、深部では塩分濃度に顕著な変化は認められていない。これは、間隙率が大きいため、地下水が有意に移動していないためと考えられる。

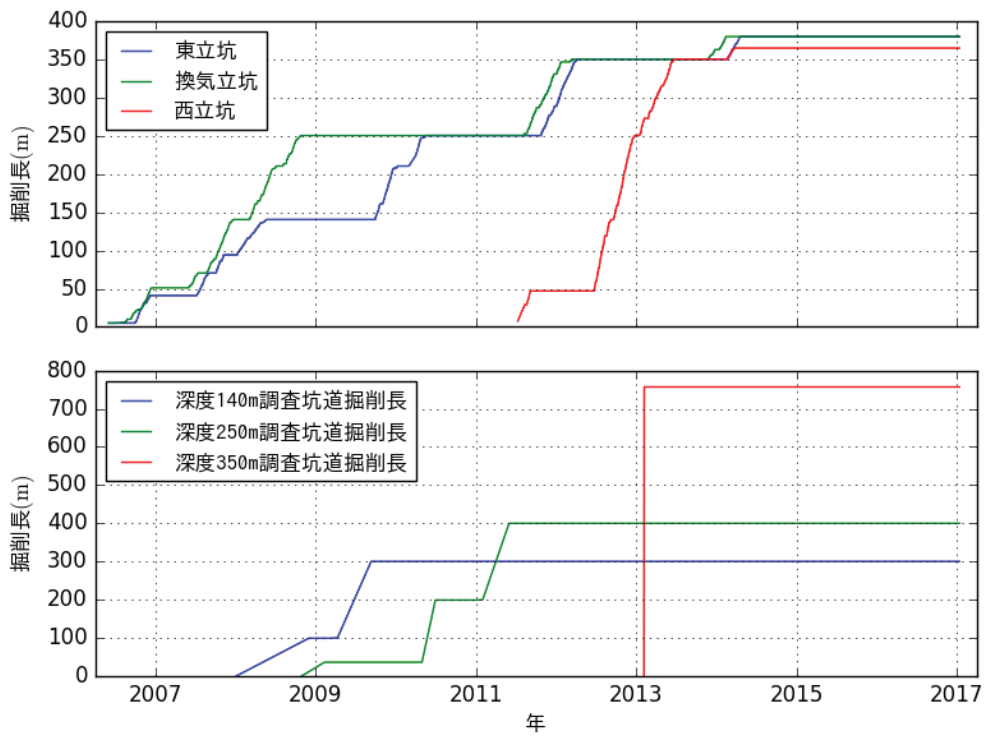


図 6.3.4-1 立坑掘削の進捗

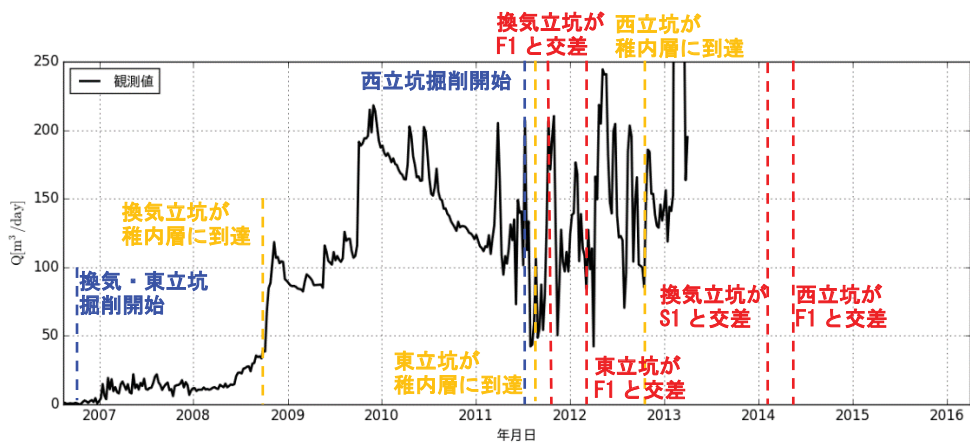


図 6.3.4-2 湧水量の時間変化

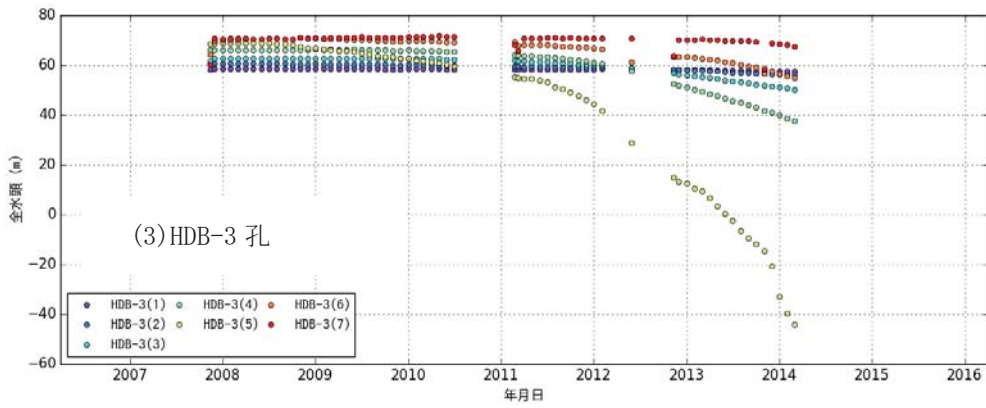
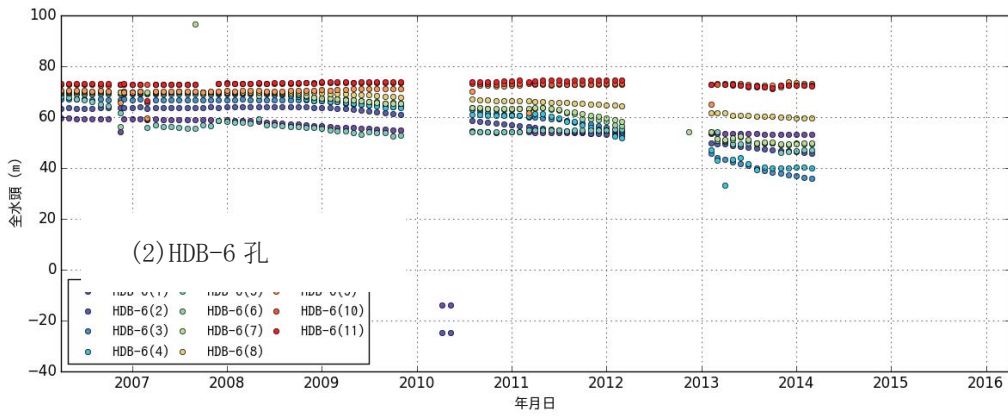
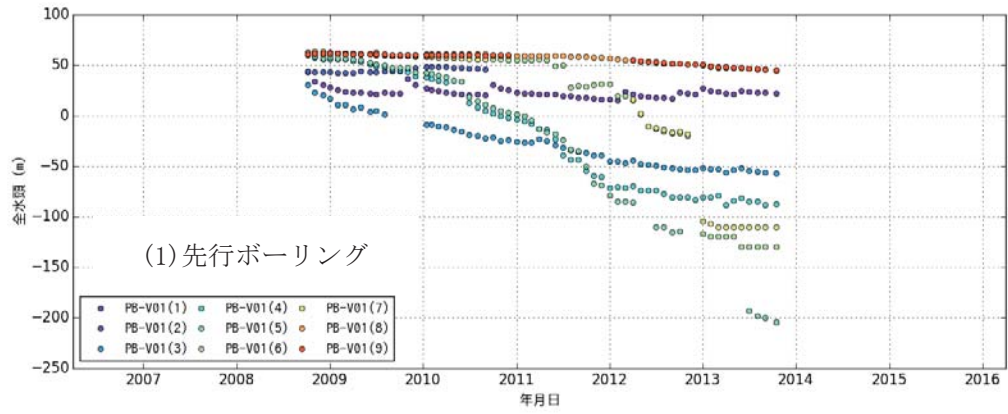


図 6.3.4-3 立坑周辺のボーリング孔における水圧低下

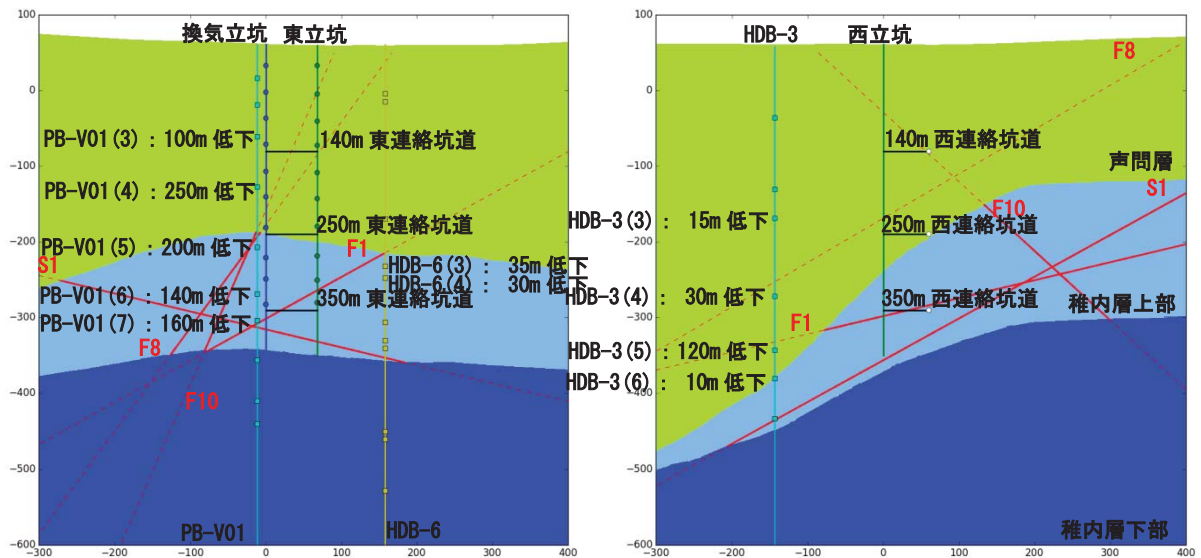


図 6.3.4-4 立坑周辺での水圧低下の概念図

6.3.4.2 解析モデル

幌延深地層研究センターにおける地下施設の建設により、水圧、水質・地下水年代分布にどのような影響を与えたかを明らかにするために、地下水流動・物質移行解析を実施する。

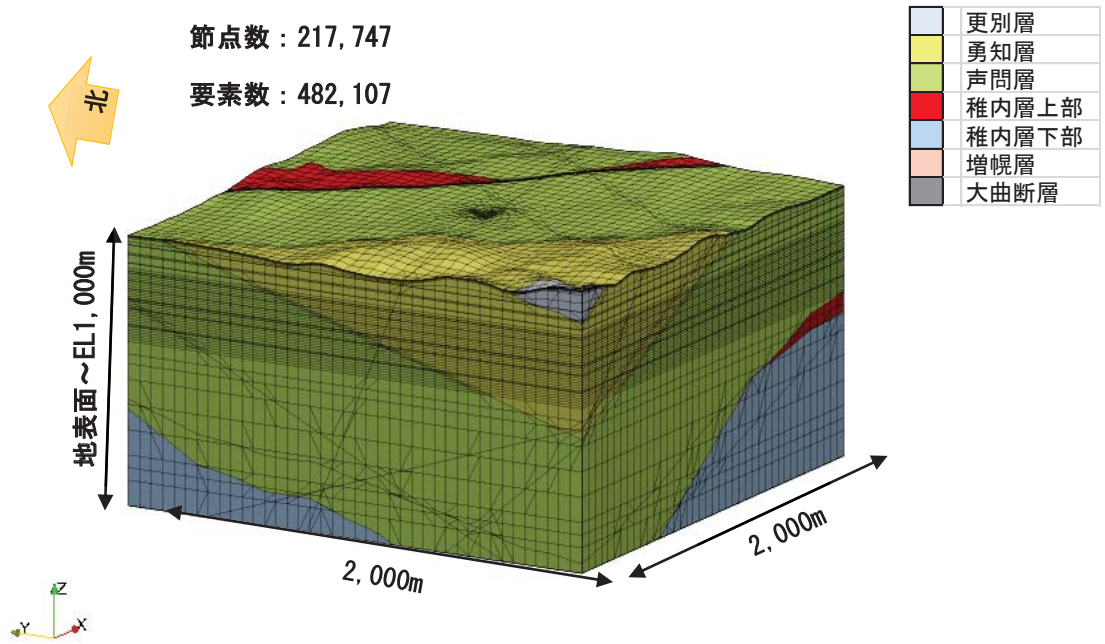
解析モデルは、日本原子力研究開発機構(2011)で作成した地形・地質などを考慮したモデルに基づいて作成した。解析モデルを図 6.3.4-5 に示す。解析モデルは主要な地層と大曲断層、主要な断層をモデル化した。

断層は、図 6.3.4-6 に示すように、板要素で表現したモデルと、スメアード法で表現した 2 つのモデルを作成した。今年度はスメアード法で各断層の影響半径も検証できるように領域全体、半径 1,000m、500m、200m、100m に設定したモデルを準備した。

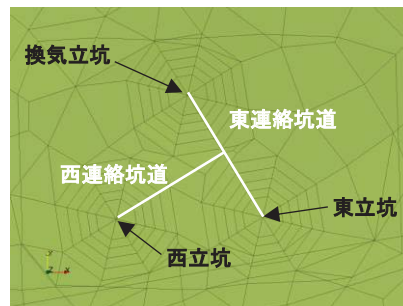
昨年度と同様に F1、F8、F10、S1 についてモデル化した。調査坑道についても昨年度と同様に換気立坑、東立坑、西立坑、140、250、350m の東連絡坑道、西連絡坑道、350m の東周回坑道と西周回坑道についてモデル化した。これは、図 6.3.4-7 に示すように 350m 周回坑道の体積が他の立坑や連絡坑道より大きいためである。

また、昨年度と同様に、調査坑内からの水の流出量は流出箇所等が不明瞭なため、流量の境界条件は坑道全体の流出量を設定した。

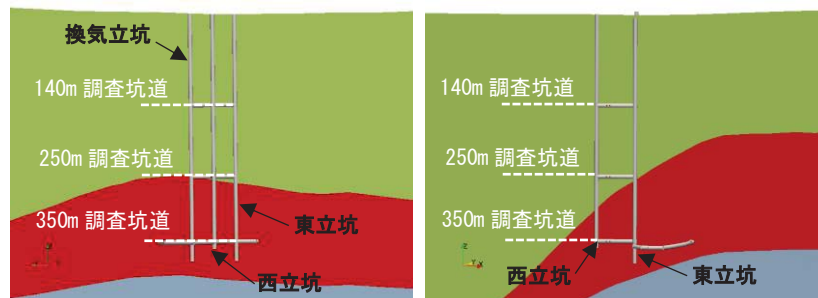
断層のような不連続面のモデル化は、不連続面と交差する立体要素の透水係数テンソルに不連続面の透水性の影響を加味するスメアードフラクチャーモデルに基づいているため、メッシュを組み直さずに断層の影響を表現することが可能である。



(1) 解析メッシュの全体図



(2) 研究所周辺のメッシュ分割



(3) 研究所周辺での断面図

図 6.3.4-5 解析メッシュ及び全体図

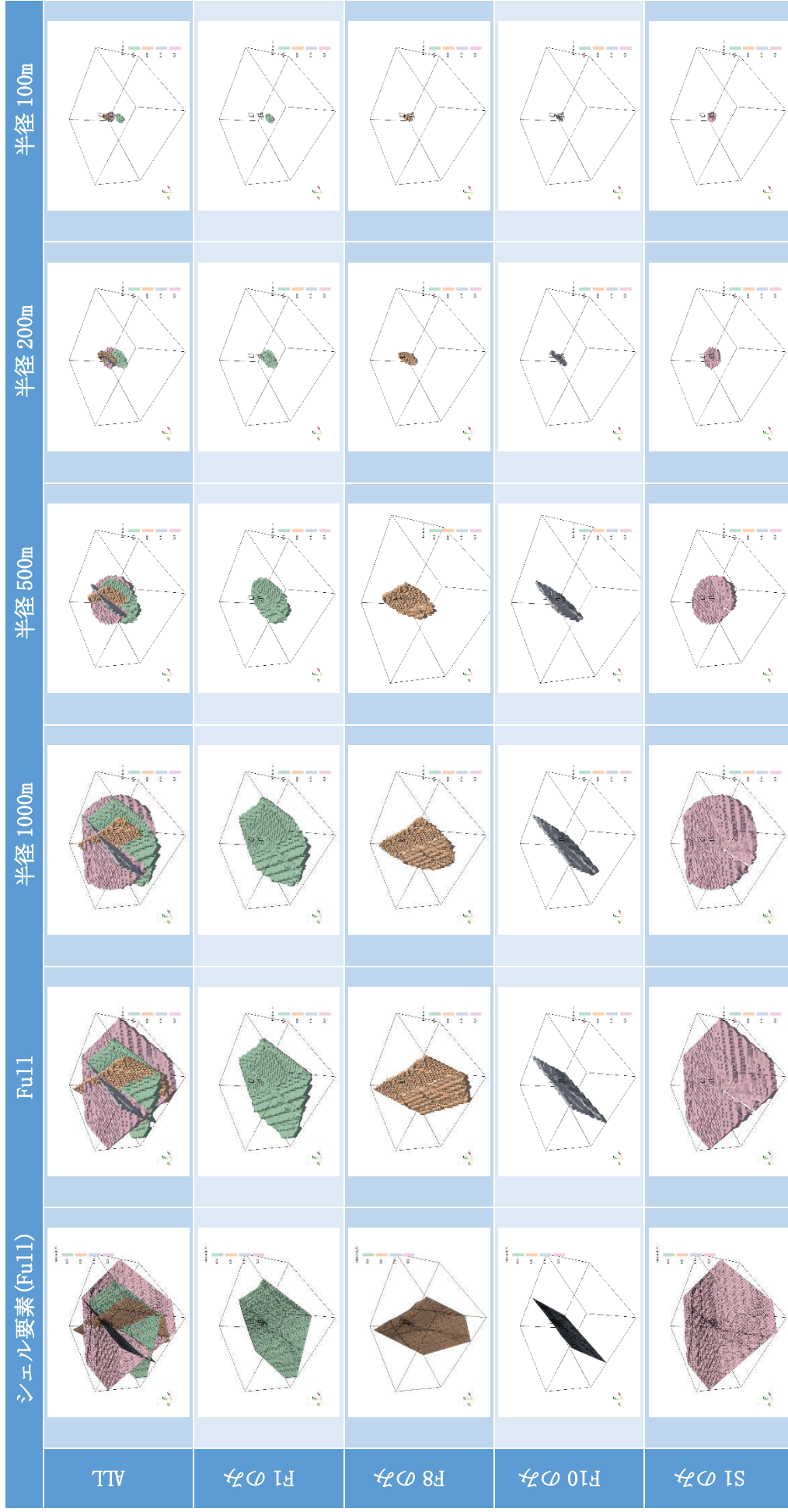


図 6.3.4-6 断層のモデル化方法の概念図

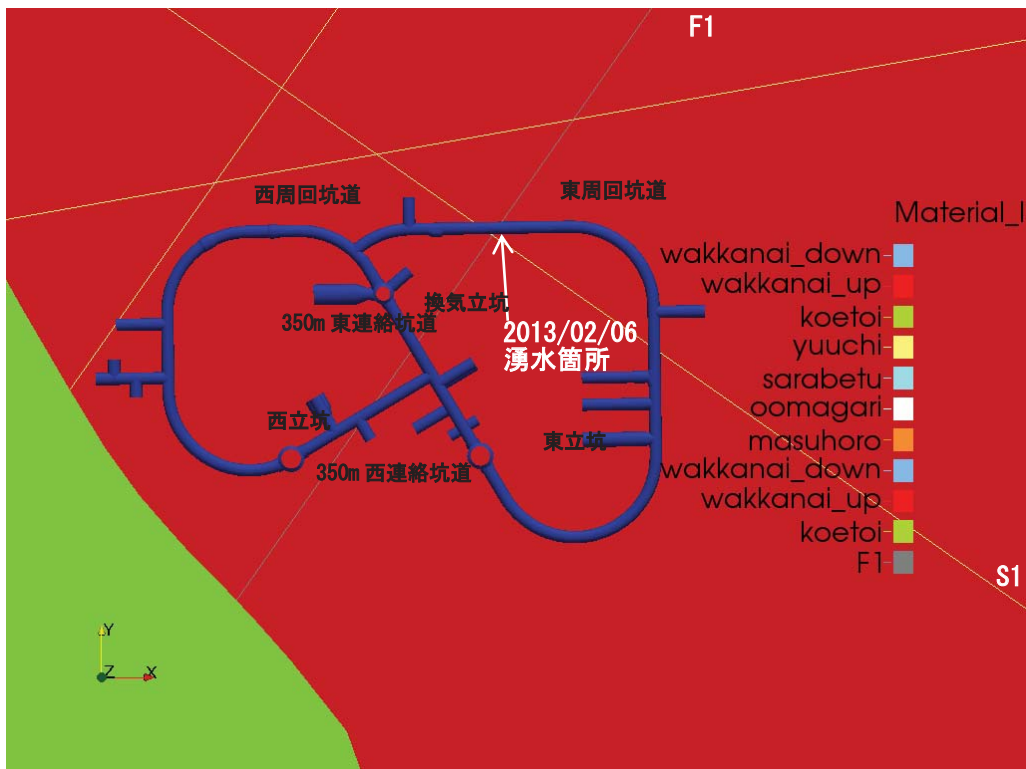


図 6.3.4-7 350m 坑道のモデル化

6.3.4.3 解析条件

(1) 境界・初期条件の設定

地下水流動の初期・境界条件には、昨年度と同様に、操上ほか(2008)や操上(2007)に記載されている HDB-1~11 孔の全観測区間の全水頭の観測値に基づいてクリギングで推定したものを用いた。物質移行解析の初期・境界条件も、地下水流動解析と同様に、ボーリング孔での調査結果(天野ほか、2012)に基づいてクリギングで推定したものを用いた。これらの推定結果を全水頭について図 6.3.4-8、塩分濃度について図 6.3.4-9 に示す。

地表面の境界条件は、これまでの検討結果に基づき、降雨境界条件として、降雨量 100mm/y を用いた。

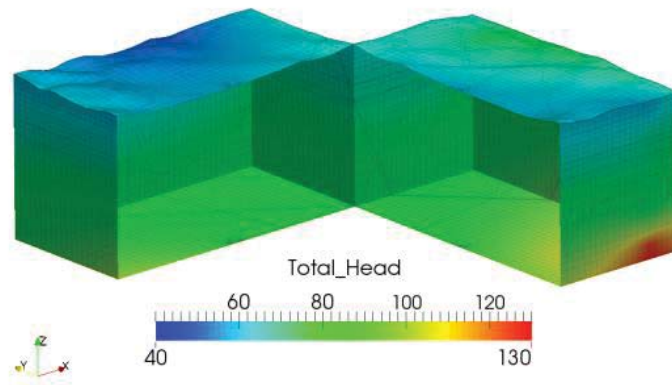


図 6.3.4-8 全水頭の初期・境界条件の分布図

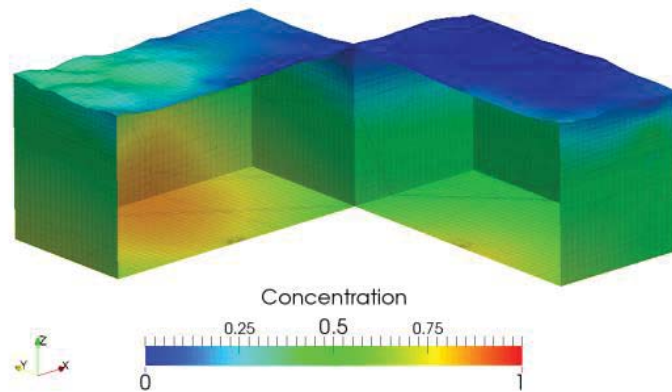


図 6.3.4-9 塩分濃度の初期・境界条件の分布図（海水の塩分濃度 19,000mg/ℓで正規化）

(2) 物性値の設定

解析に用いた物性値は、表 6.3.4-1 に基づき、表 6.3.4-2 に示すように設定した。透水係数は今井ほか(2002)を参考に設定した。比貯留係数は、操上ほか(2008)や操上(2007)を参考に、間隙率は今井ほか(2001) や下茂ほか(2004)を参考に設定した。その他の地層については実測値がないため、推定値とした。

F1、F8、F10、S1 断層については昨年度と同様に、水位低下量と湧水量の関係から Cooper-Jacob の式を用いて透水量係数と貯留係数を算出し設定した。

分散長（縦・横）、分子拡散係数は、すべての地層について縦分散長 100m、横分散長 10m、分子拡散係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ とした。

表 6.3.4-1 設置した透水係数と根拠（操上ほか 2008）

水理地質区分	透水係数 k (m/s)	設定根拠
表層、段丘堆積物	1.0×10^{-6}	大島ほか
更別層	1.0×10^{-6}	水理試験から得られた最小二乗線とし、上限を水理試験結果の最高値、下限をコアを対象とした室内試験の対数平均とした。稚内層では小断層帯の指向性を考慮して透水係数の指向性を考慮して透水係数の異方性（小断層帯に直交する方向に1桁小さいと透水係数）を与えた
勇知層	$\log_{10} k = -0.0034 \times z - 8.3665$ Upperlimit : 4.0×10^{-9} Lower limit : 2.5×10^{-10}	
声問層	$\log_{10} k = -0.0043 \times z - 7.5468$ Upperlimit : 2.5×10^{-7} Lower limit : 1.7×10^{-10}	
稚内層	$\log_{10} k_{x,z} = -0.0059 \times z - 5.6359$ $\log_{10} k_y = -0.0059 \times z - 6.6359$ Upperlimit : 1.4×10^{-5} Lower limit : 3.6×10^{-12}	
増幌層	5.0×10^{-11}	
増幌層より下位	5.0×10^{-12}	礫岩・砂岩・泥岩の互層であること、北部の温泉地域の産出層が増幌層と推定されている。このことから、稚内層より透水性は高いと想定し、稚内層の下限より1オーダー高く設定した。
大曲断層ダメージゾーン	$\log_{10} k = -0.0059 \times z - 4.6359$ Upperlimit : 1.0×10^{-5} Lower limit : 3.6×10^{-11}	水理試験および石井ほか()の知見から、稚内層の高透水方向の透水係数よりも1オーダー高く設定した。
N1断層	1.0×10^{-7}	推定値
N1断層より東側	1.0×10^{-10}	稚内層より下位の地層が分布し、また褶曲により乱されていると想定できることから、増幌層より高い透水係数を設定した。

■ : 本解析で再現した地質区分

表 6.3.4-2 解析に用いた物性値

地層名	透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m)	間隙率 (%)	備考
更別層	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-4}	45	
勇知層	9.35×10^{-10}	1.00×10^{-4}	45	
声問層	6.46×10^{-9}	1.00×10^{-4}	50	
稚内層・上部	5.89×10^{-10}	1.00×10^{-4}	40	
稚内層・下部	5.89×10^{-10}	1.00×10^{-4}	40	
増幌層	5.00×10^{-11}	1.00×10^{-4}	10	
大曲断層	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-4}	30	
F1	1.20×10^{-6}	3.70×10^{-4}	100	亀裂幅 1m
F8	1.60×10^{-6}	6.50×10^{-4}	100	亀裂幅 1m
F10	1.75×10^{-5}	2.80×10^{-7}	100	亀裂幅 1m
S1	1.80×10^{-5}	5.40×10^{-8}	100	亀裂幅 1m

6.3.4.4 解析結果

(1) 定常解析

瑞浪での地下水流動・物質移行解析と同様に、非定常解析は計算負荷が大きいため、まず定常解析を行い、断層や境界条件の影響を確認してから、非定常解析を実施することとした。

定常解析では、F1、F8、F10、S1 の断層の影響領域が解析結果に与える影響を検討するために、図 6.3.4-6 で製作したモデルを用いて、掘削前と掘削後の地下水流動解析を実施した。調査坑道の境界条件は、昨年度再現性が良かった大気開放境界条件とした。稚内層上部内に想定した 4 つの断層が分布しているモデルにおいて、東連絡坑道と同方向の鉛直断面と西連絡坑道と同方向の鉛直断面における掘削前と掘削後の全水頭分布図を図 6.3.4-10 に示す。また、周辺ボーリング孔での全水頭分布を図 6.3.4-11 に示す。周辺ボーリング孔での全水頭分布から、掘削前の状態では断層の影響はどのケースでも軽微であった。掘削後では、周辺ボーリング孔での水位低下が稚内層上部で過大評価となっており、特に、HDB-6 ではどのケースでも過大評価となっている。断層の影響という意味では、F8 と S1 が水位低下に大きな影響を与えている。F8 は広がりが多い場合に水位低下が大きく、S1 は広がりによって PB-V1 の稚内層上部での水位低下は変化する傾向にある。基本的に水圧変化は断層の存否に関係なく、稚内層上部で表れており、稚内層上部の透水係数が大きいことに依存していると考えられる。断層を全て設定した場合（図 6.3.4-11 の

ALL 欄)は、断層が複雑に影響しあっており、稚内層上部での水圧を大きく変える結果となっている。

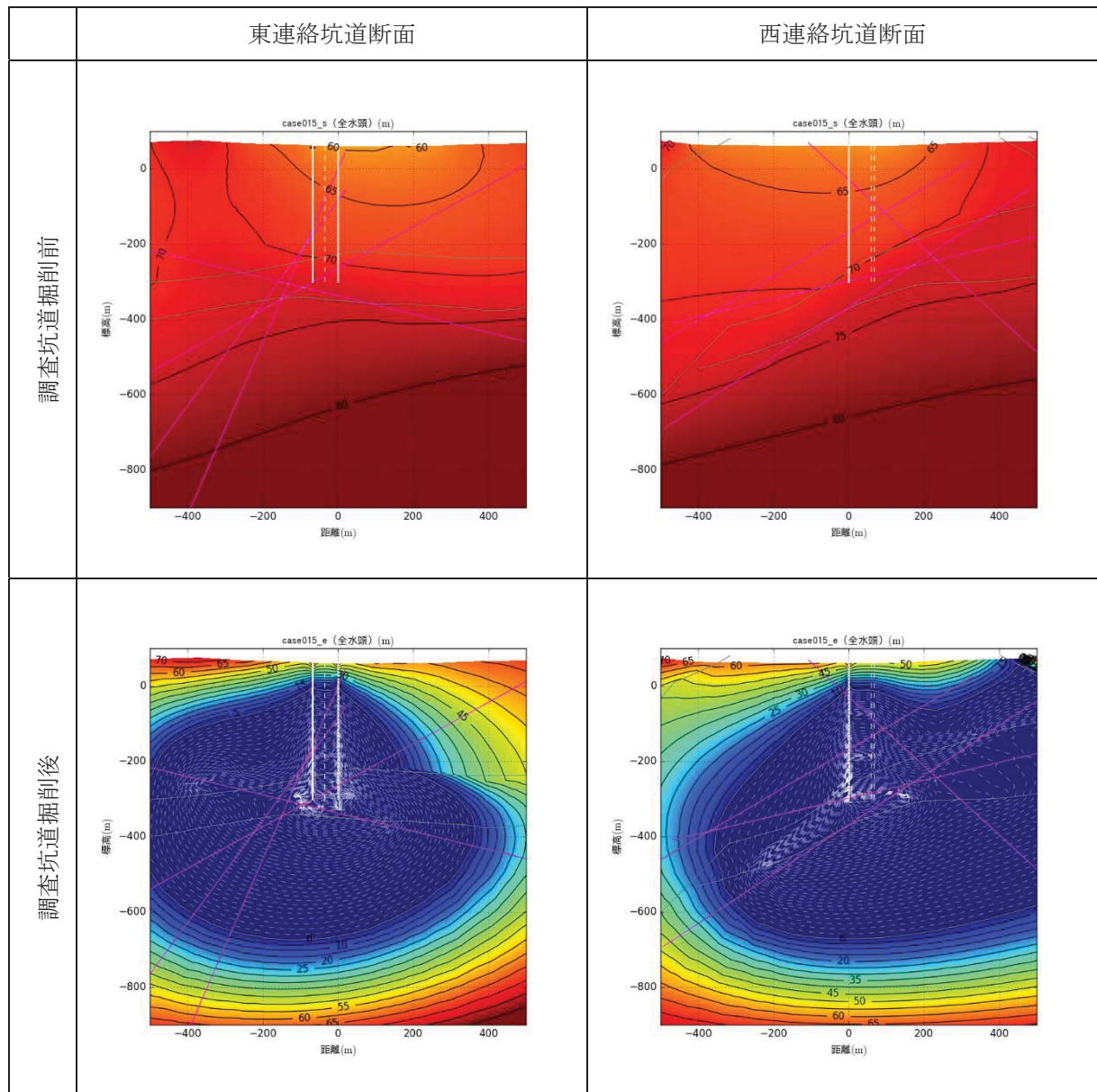


図 6.3.4-10 定常解析の全水頭分布図 (稚内層上部に4つの断層が存在するケース)

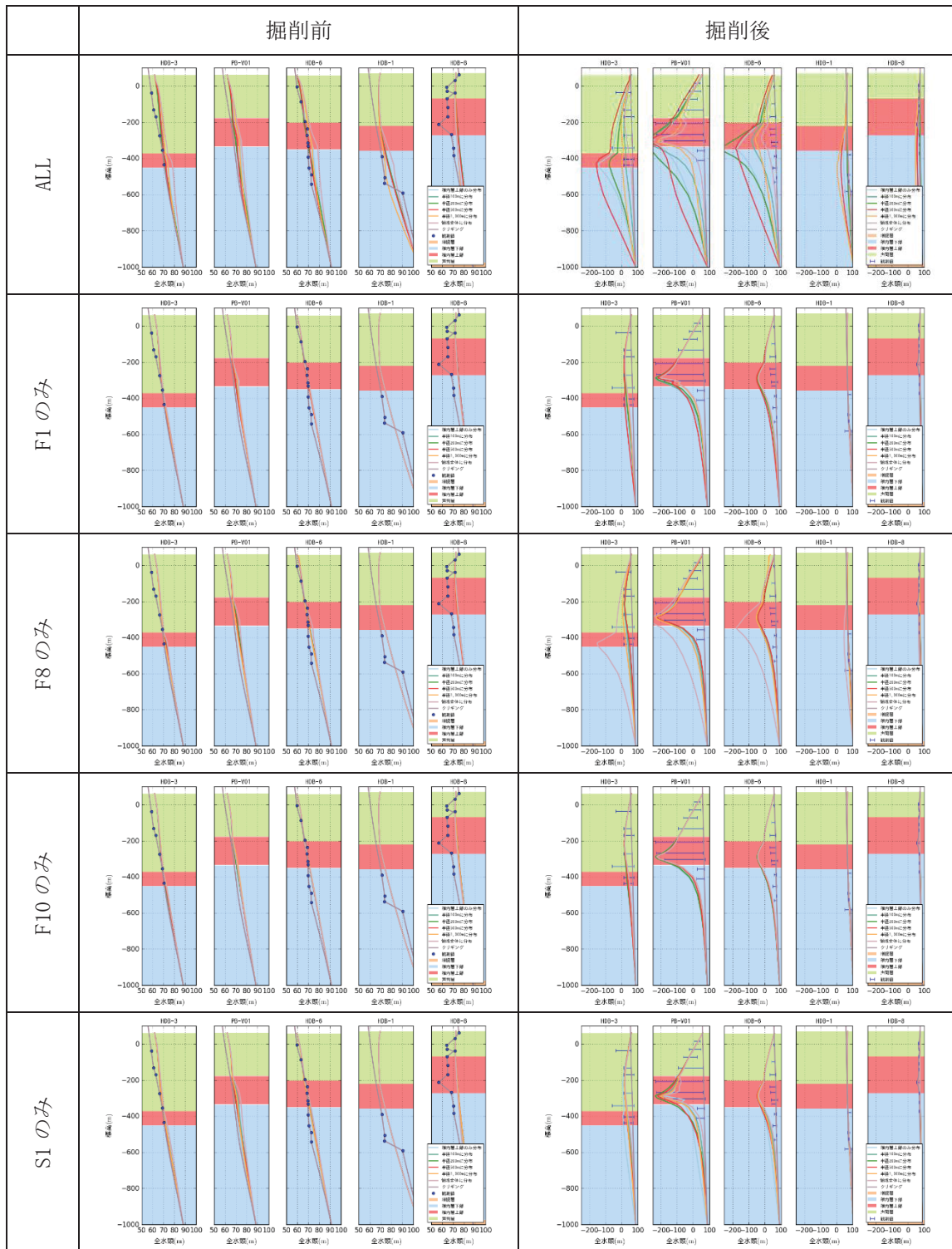


図 6.3.4-11 観測孔における全水頭プロファイル

(2) 非定常解析

非定常解析では各断層の影響について検討するために、定常解析と同様に、断層が稚内層上部領域に一本の断層のみ存在する場合を想定して解析を実施した。また、稚内層上部に4本の断層全てが存在するケースもあわせて実施した。調査坑道の境界条件は、前述の定常解析と同様に大気開放境界条件とし、各調査坑道の掘削進捗に合わせて圧力既知境界へと変更した。図 6.3.4-12 に施設建設にともなうイベント、各地層、断層などへの到達時間をまとめたものを示す。

解析結果として、図 6.3.4-13 に施設建設に伴う立坑全体での湧水量の経時変化を示す。図 6.3.4-14 と図 6.3.4-15 に、東連絡坑道と同方向の鉛直断面、西連絡坑道と同方向の鉛直断面における全水頭分布の時間変化を示す。図 6.3.4-16 に調査坑道近傍のボーリング孔での掘削に伴う全水頭変化を示す。なお、水質の変化については示していないが、初期状態からほとんど変化しないため、図化していない。

湧水量(図 6.3.4-13)については、2013年までは変化が乏しく、2013年にS1に西立坑が交差すると少し大きくなり、換気立坑がS1と交差する非常に大きくなる。

全水頭分布(図 6.3.4-14 と図 6.3.4-15)については、水圧変化の分布と断層との関係から、大きい水圧低下をもたらしているのは、F1 と S1 であると考えられる。

周辺調査孔での水圧変化(図 6.3.4-16)については、大きな水圧変化は、概ね再現できていると考えられる。ただし、HDB-3 では、実測値に対して解析値は、声問層下部において過小、稚内層上部で過大な水圧低下となっている。声問層下部については、図 6.3.4-12 に示した位置関係から見ると、F1断層を延長するとこの地点と交差する可能性が高いことから、F1断層の広がり十分でないため、このような不整合が表れていると考えられた。稚内層上部については、S1断層と全断層を考慮した場合で過大な水圧低下となることから、S1断層の影響で過大な水位低下が出ていると考えられる。PB-V1 では、声問層、稚内層上部で概ね水位低下が再現できているが、S1断層と全断層を考慮した解析値では、稚内層の深度で過大な水位低下となっている。HDB-6 では、稚内層上部～下部で水位低下が過大となっており、これもS1断層と全断層を考慮した解析値で顕著になっている。

このように、水位低下が過大となっているのは、S1断層の影響が大きいと考えられた。このため、S1断層について感度解析を実施することとした。

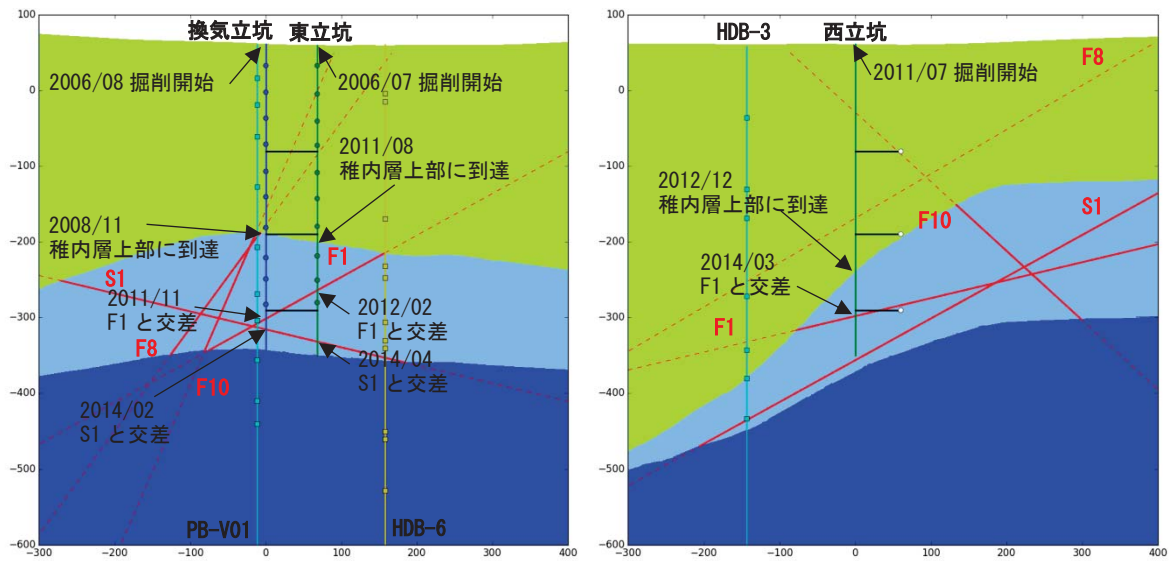


図 6.3.4-12 施設建設に伴うイベント概略図

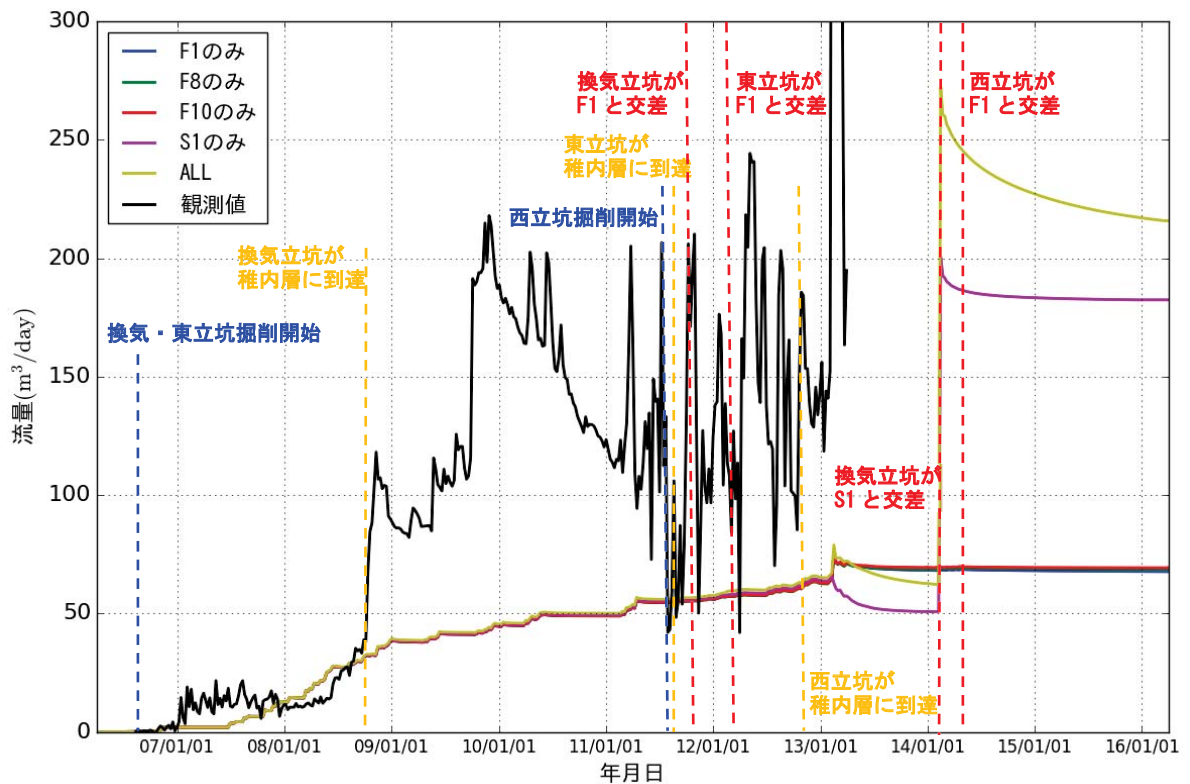


図 6.3.4-13 調査坑道掘削に伴う調査坑道全体での湧水量とイベントの経時変化

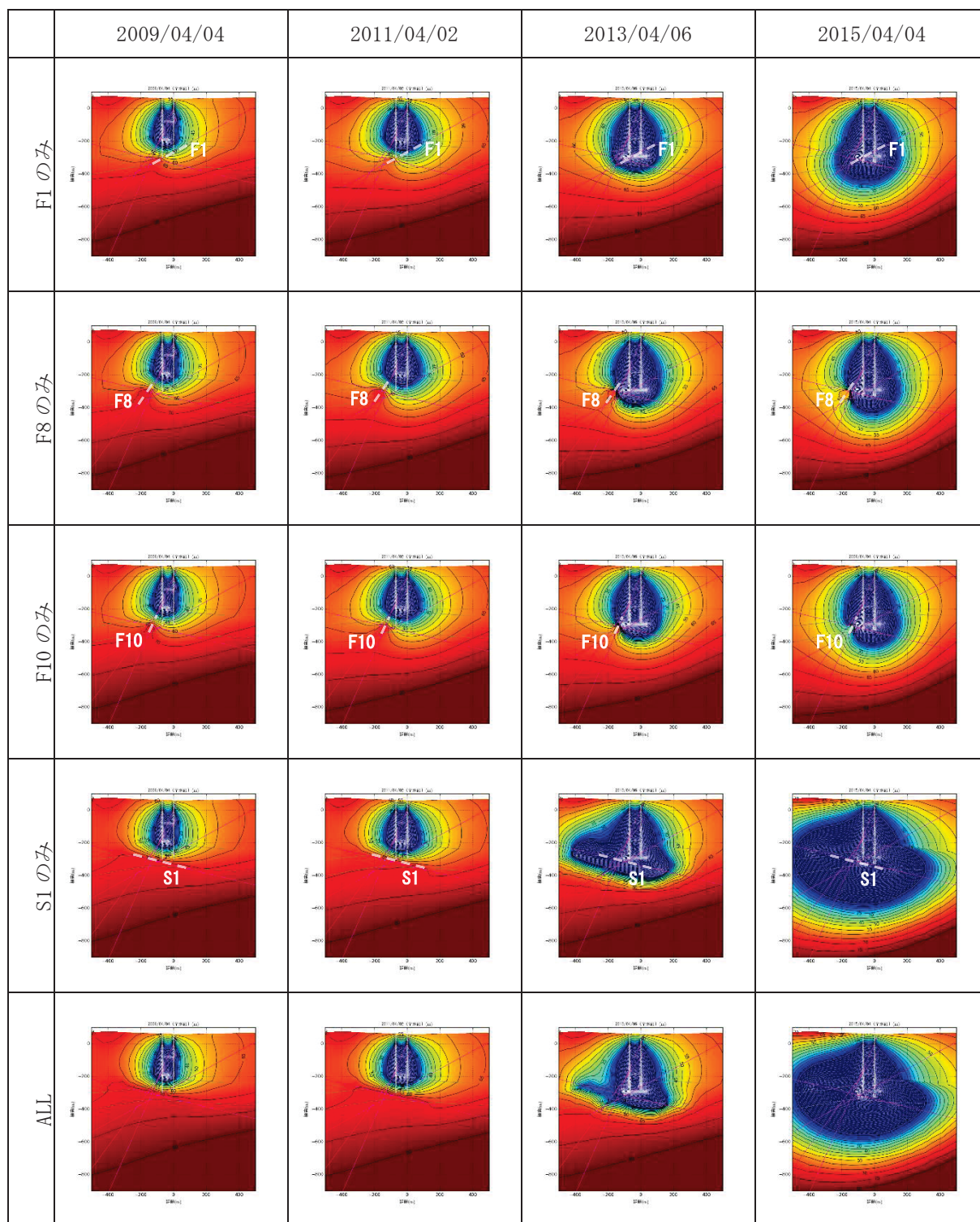


図 6.3.4-14 東連絡坑道断面における全水頭分布図

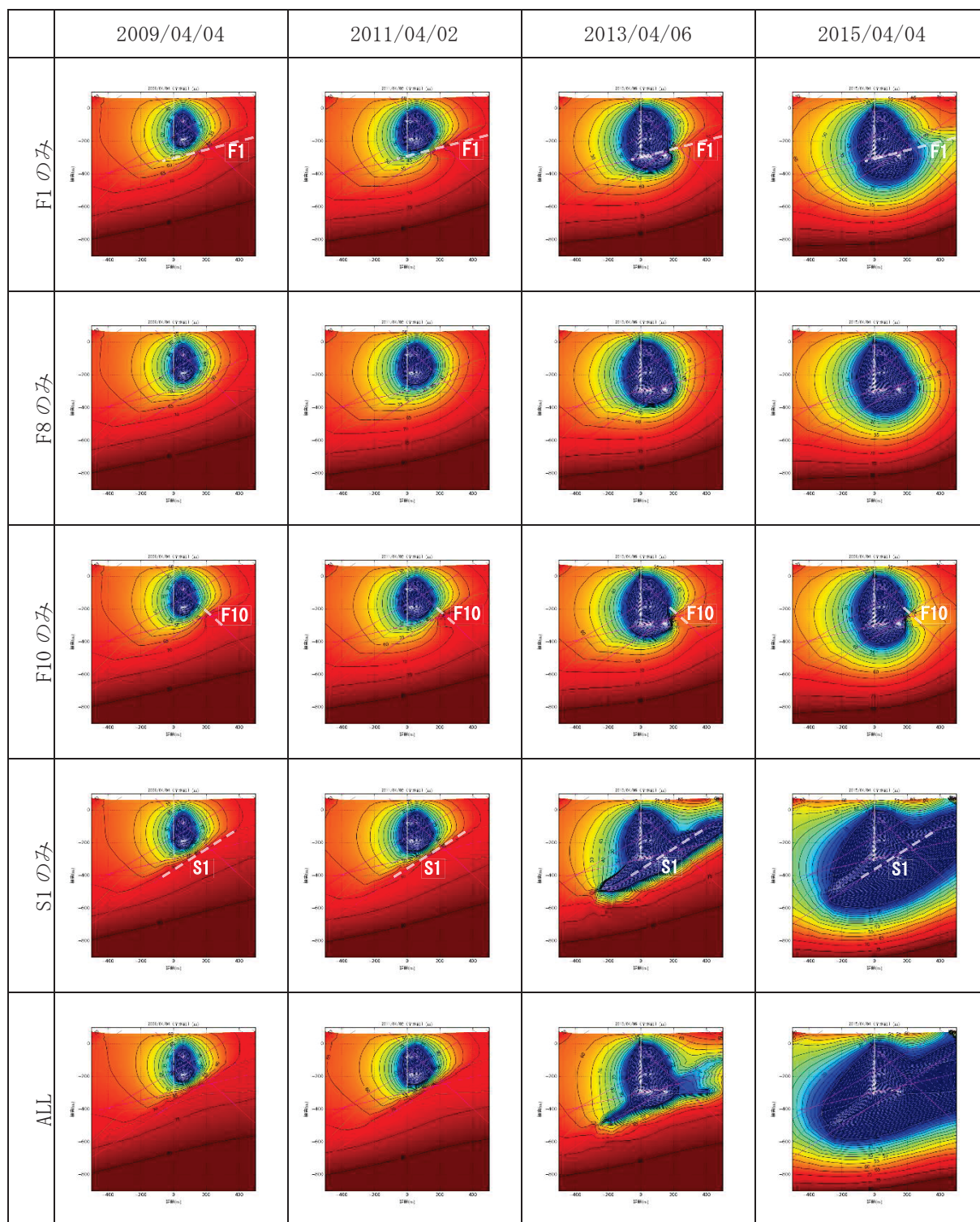


図 6.3.4-15 西連絡坑道断面における全水頭分布図

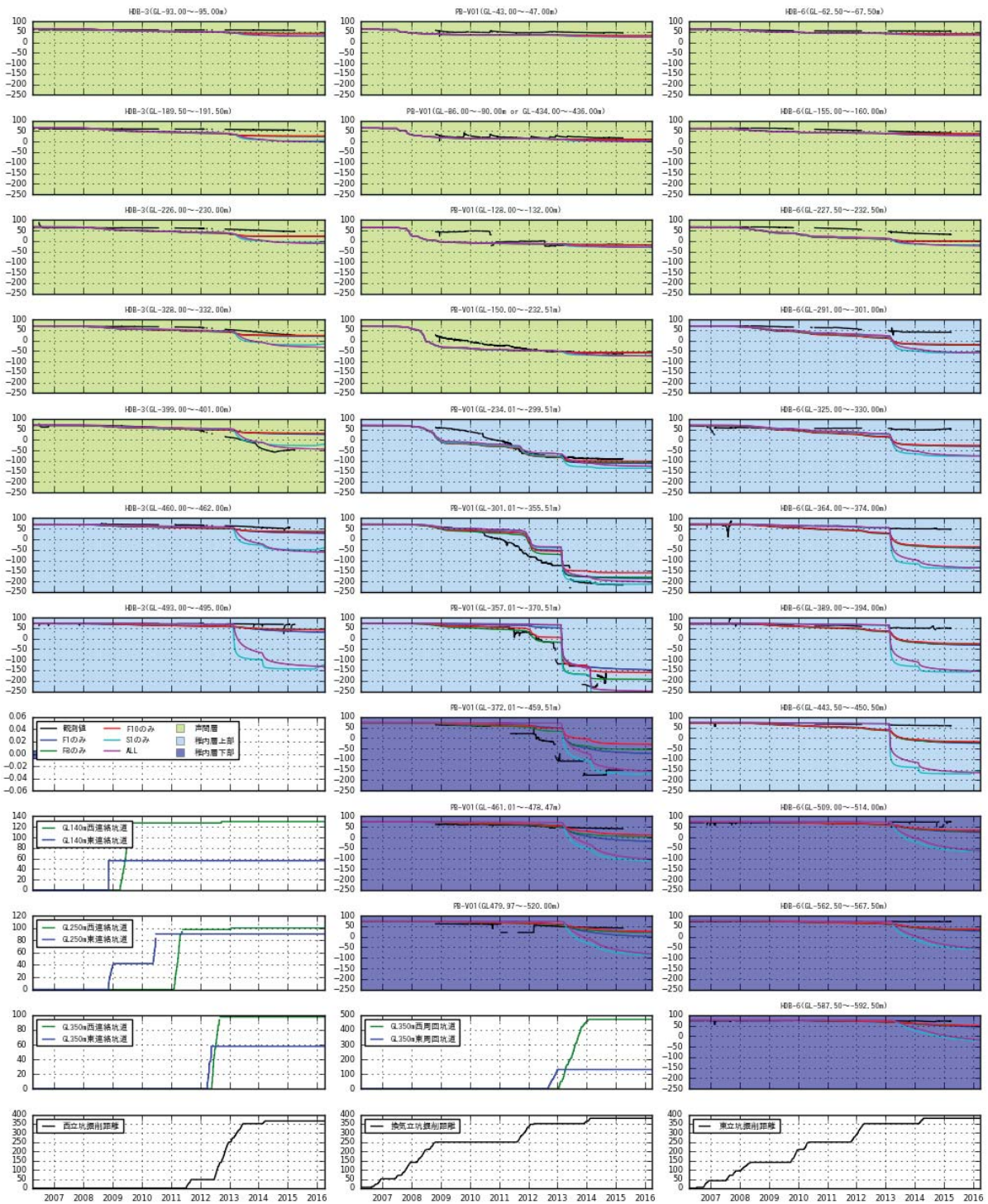


図 6.3.4-16 周辺調査孔における水圧変化

(3) S1 断層の影響解析

非定常解析で、S1 断層の影響で水圧低下が整合していない部分が多いと思われた。S1 については 2013 年 2 月頃の 350m 東周回坑道での湧水を踏まえて設定したが、S1 のモデル化によって実測値との整合性が低下することから、S1 を設定せず F1、F8、F10 を設定した場合の解析を実施した。また、2012 年迄の流量が過少であったため声問層の透水性を 3 倍に設定した。

解析結果として、図 6.3.4-17 に施設建設に伴う立坑全体での湧水量の経時変化を示す。図 6.3.4-18 と図 6.3.4-19 に、東連絡坑道と同方向の鉛直断面、西連絡坑道と同方向の鉛直断面における全水頭分布の時間変化を、S1 断層を考慮した場合と考慮しない場合について示す。図 6.3.4-20 に調査坑道近傍のボーリング孔での掘削に伴う全水頭変化を示す。

湧水量(図 6.3.4-17)に着目すると、声問層の透水性を 3 倍にしたため、2008 年後半からは比較的再現性が高いものの、2008 年前半までは逆に研究坑道への流量が過剰となった。また、S1 が存在する場合は、イベントによる湧水量の変化が大きく出ている。一方で、S1 が存在しない場合は 2008 年前半までは再現性が非常に高いものの、2008 年後半からは研究坑道への流量が過少となった。流量では S1 の有無が 2008 年後半の流量に大きな影響を与えている。

全水頭分布(図 6.3.4-18 と図 6.3.4-19)に着目すると、S1 が存在することで水圧低下が大きく変化していることがわかる。特に S1 は立坑周辺での水圧低下を周辺に伝播させる役割を担っているようである。

水圧変化(図 6.3.4-20)に着目すると、HDB-3 では S1 を考慮しないことにより、稚内層上部での解析値の過剰な水位低下が解消された。声問層下部 (GL-399~-401m) については、解析値の水位低下が過小になっているが、これは、前述のように F1 断層が届いていないためだと考えられる。PB-V1 では、S1 を考慮しない場合、実測値と解析値が概ね整合している。稚内層上部と下部の境界で解析値の水位低下が過小になっているが、これは、他の断層の透水係数が過大評価されているためではないかと考えられる。HDB-6 についても、S1 を考慮しない場合の方が実測値と解析値の整合性が高い。このように、S1 によって水位低下が過大になっていたが、S1 を考慮しないことによりこれらが解消された。ただし、まだ実測値と解析値には不整合があるため、これらについては他の断層の影響を検討する必要がある。

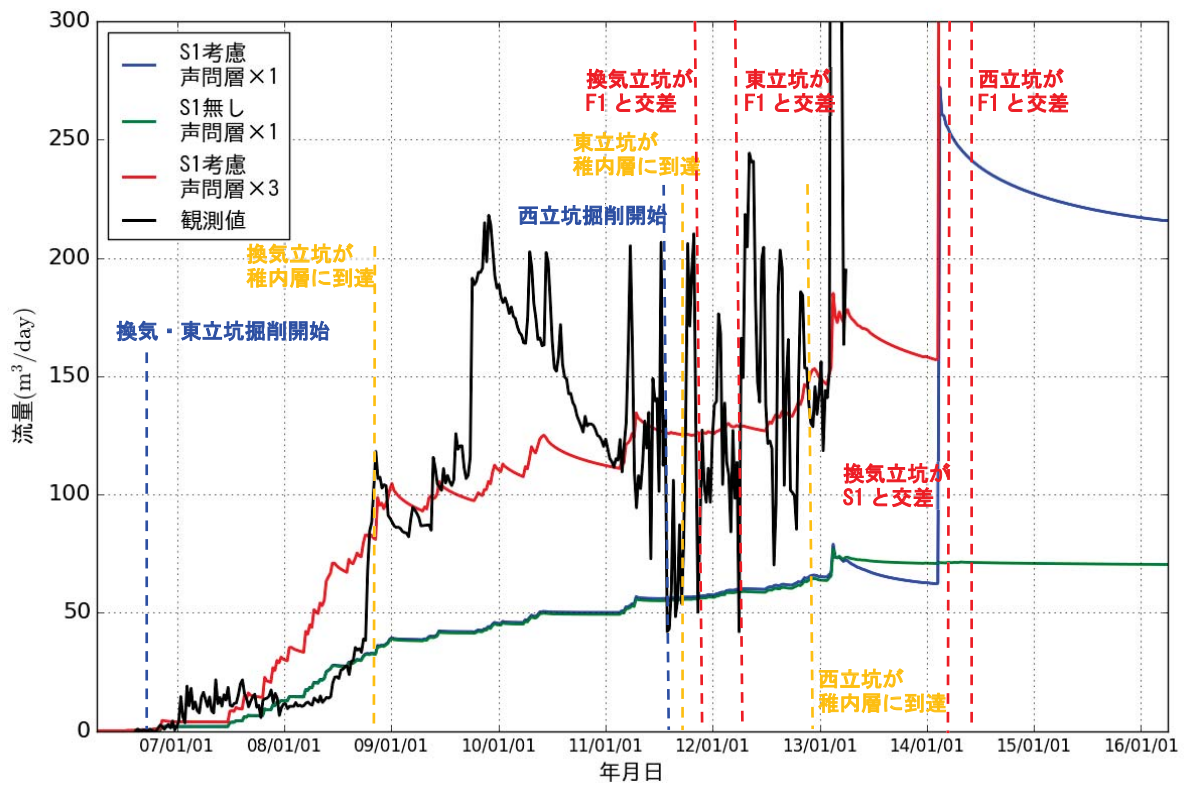


図 6.3.4-17 調査坑道掘削に伴う調査坑道全体での湧水量とイベントの経時変化

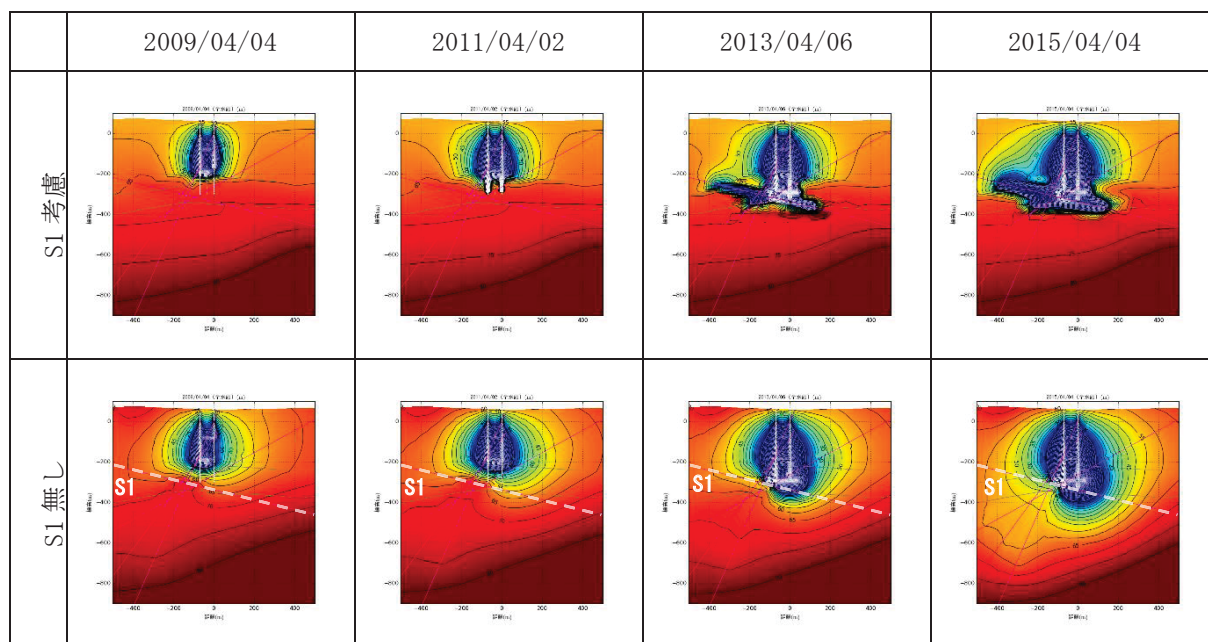


図 6.3.4-18 東連絡坑道断面における全水頭分布図

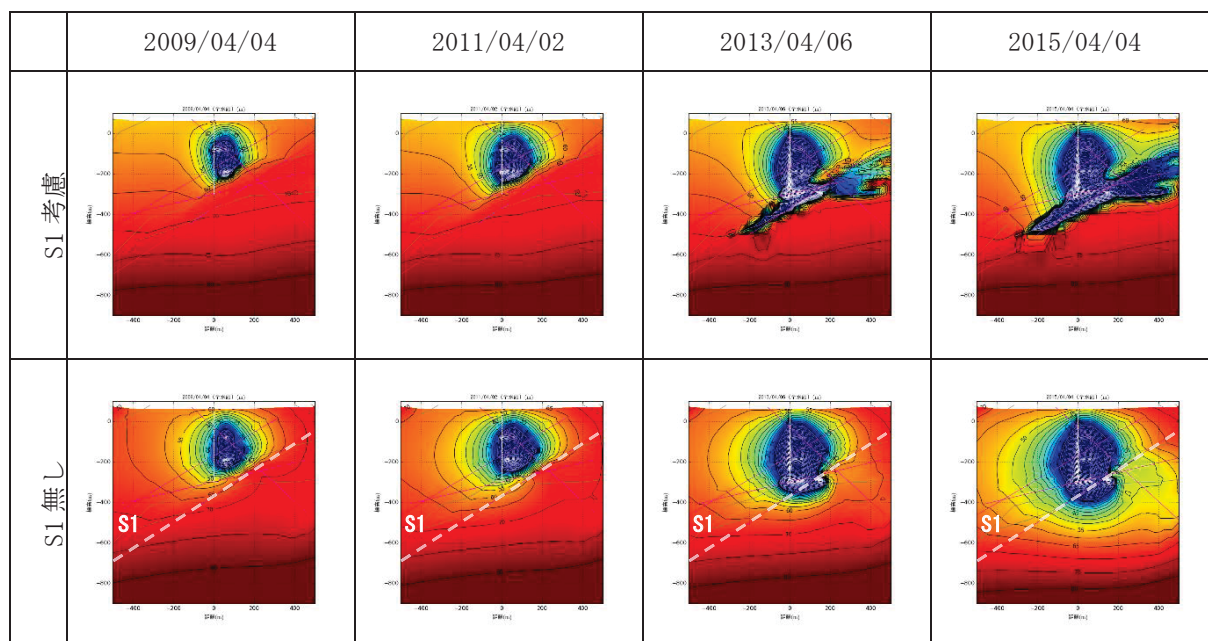


図 6.3.4-19 西連絡坑道断面における全水頭分布図

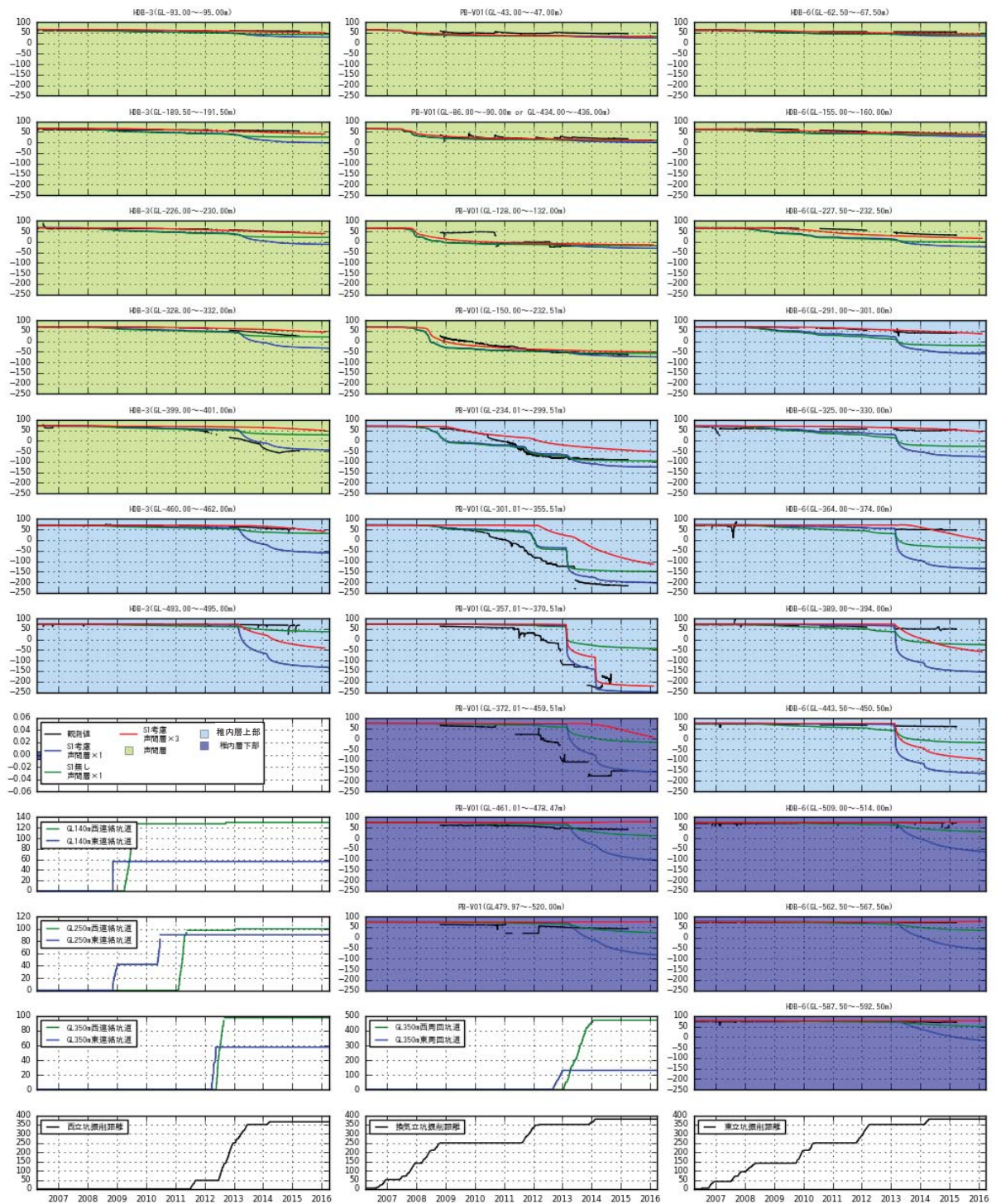


図 6.3.4-20 周辺調査孔における水圧変化

6.3.4.5 考察

幌延地域を対象に施設建設に伴う地下水流動・水質変化を対象とした地下水流動・物質移行解析を実施した。解析結果では、水圧の変化は大きいものの、水質の変化は有意でなかった。このため、水質については議論していない。この結果は、地下水調査結果とも整合しており、水圧は変化しているものの水質は変化していないものと考えられた。

水圧の変化については、調査結果とこれまでの検討から、幌延地区では施設建設と断層の関係が重要であると考えられた。このため、各断層(F1、F8、F10、S1)について、各断層の広がりを変えたモデルを作成し、感度解析を行った。施設建設と断層・地層との関係を整理した結果、湧水量の変化や水圧の変化は、掘削の断層・地層への到達と密接に関連していることがわかった。このため、施設の建設を考慮した非定常の地下水流動解析を実施した。各断層について感度解析を実施した結果、水圧の低下は、観測区間と断層の位置関係と連動しており、F1断層とS1断層が水圧変化に影響を与えていることがわかった。特にS1断層は非常に大きな範囲で水位低下を引き起こしており、これにより水圧低下が過剰になっている観測区間が多かった。このため、S1断層を考慮しない解析モデルで地下水流動解析を実施した。この結果、S1断層を考慮しないことで、概ね水圧の変化を再現することができた。ただし、湧水量や水圧の変化速度などは、十分に再現できていないため、今後これらに影響を与えるパラメーターについて感度解析を行い、再現性の向上を図る予定である。

6.4 天然トレーサーの調査

6.4.1 希ガスのサンプリング方法

(1) 脱ガスの影響

希ガス分析のための地下水を採取する際には、坑道内と地下水との水圧差が大きく、圧力低下により溶存ガスが脱ガスし、気泡が発生する場合がある。このような試料を分析すると、脱ガスした試料は溶存ガス量が少なくなり、気泡を含む試料は溶存ガスが多く評価される。このような脱ガスの影響は、保存性のガス(Ne 量など)に基づいて補正するが、図 6.3.3-10 に示したように補正しても結果にバラツキが大きく、適切に希ガス量を評価できていない。ここで、幌延と瑞浪の希ガス分析結果を比較すると表 6.4.1-1 のような結果になる。ここでは保存性の成分である Ne 濃度で脱ガスの影響を評価した。

Ne の大気平衡濃度は、 $2 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w (=10^{-6.7})$ 程度であるため、幌延での地下水は、Ne 濃度を指標とすると、平均的には $4 \times 10^{-8} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$ となるため 20%程度しか残留していないことがわかる。一方で、瑞浪での地下水は $2.4 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$ 程度と 20%程度の増加が見られる。これは、大気残留と考えられる。幌延のサンプルでは、脱ガス率が非常に高く、瑞浪のサンプルと同様に大気残留している可能性も否定できないため、試料には地下水の情報が非常に少ないおそれがある。

表 6.4.1-1 幌延と瑞浪の Ne 濃度の比較

地点	幌延のサンプル	瑞浪のサンプル
平均濃度(対数平均)	$4 \times 10^{-8} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$	$2.4 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$
バラツキ(対数分布)	$10^{-7.1 \pm 0.5}$	$10^{-6.6 \pm 0.2}$
Ne の残留率	約 20%	120%
サンプル数	50	193

(2) サンプリング方法

脱ガスが分析結果に与える影響が大きいため、脱ガスを抑制する希ガスの採水方法を検討している。希ガスの採取方法としては、昨年度までに圧力制御式、循環式、原位置平衡式を実施してきた。今年度はこれらの方法に加えて水上置換でのガス採取を実施している。これらの 4 つの方法は、図 6.4.1-1 に示したとおりである。

圧力制御式については、比較的流量が多く、ガス量の少ない地点で実績があり、例えば、瑞浪などではバラツキの小さい結果が得られているが、幌延ではバラツキの大きい結果となっている。循環式は、区間の地下水を循環することにより、圧力低下を防いで採取する方法である。幌延で主に原位置計測などに適用されている。原位置平衡式は、Sheldon et al. (2003)により考案され

た方法であり、ガス透過性のサンプラーを原位置に長期間安置することにより、原位置とサンプラー内とが平衡になることを利用してサンプリングする方法である。ただし、原位置の地下水圧が高いと、透過膜(シリコン)が破損する恐れがある、また、ガスとの交換に時間がかかる、あるいはサンプラー内への大気の影響による残留によって、 ^4He 濃度が過小に評価される場合がある。水上置換は、ガス採取で一般的に用いられている方法であるが、希ガス分析では、希ガスの濃度を水に含まれる希ガスの濃度として表現するため、一般的には用いられていなかった。ただし、水とガスとが混在するよりも、完全に分離した方が評価しやすいため、この方法も実施してみた。

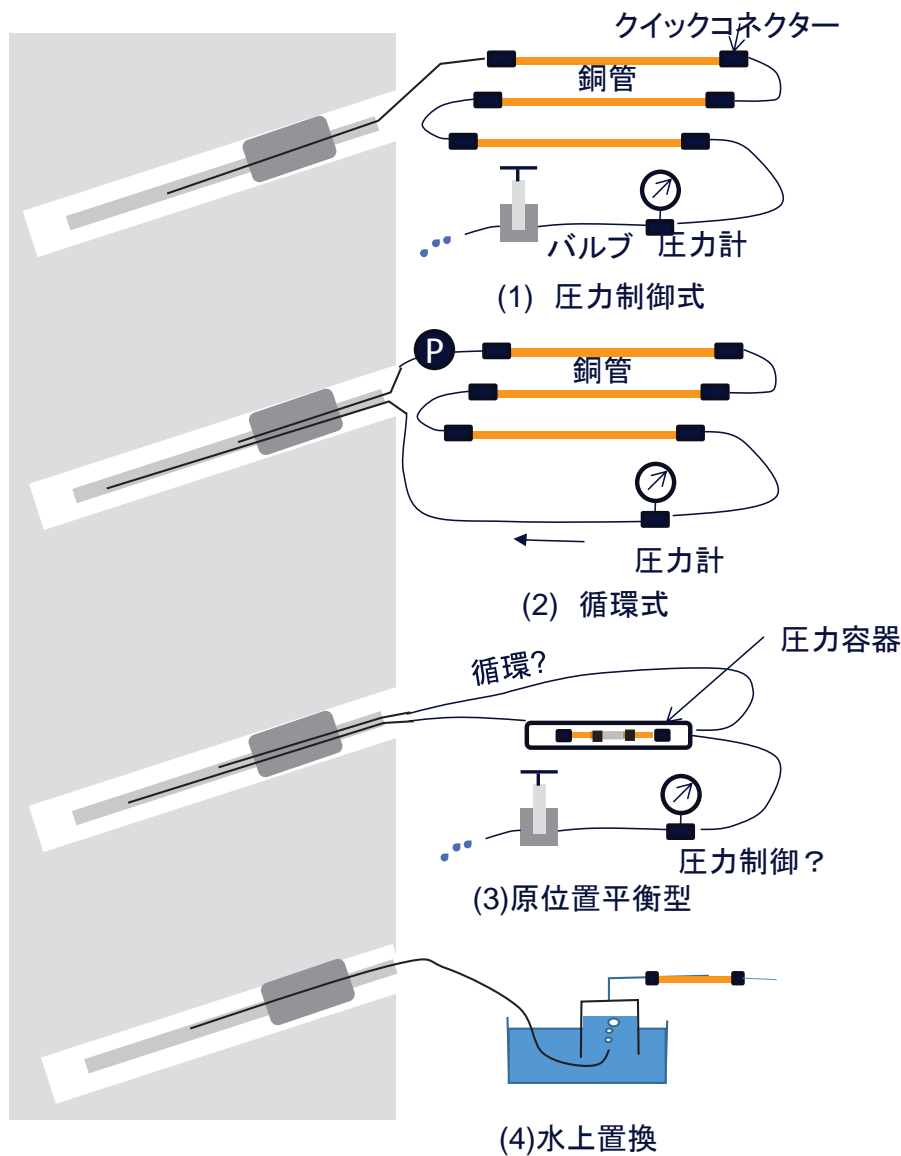


図 6.4.1-1 ガス採取方法の概念図

(3) サンプリング方法の改良

原位置平衡式サンプラーは、メンブレンを通して地下水中のガスとサンプラーのガスとが交換

することにより、水中のガスを採取する方法である。これまでの調査の結果、サンプラーを1週間程度安置することにより、水中からガスを取り込み90%程度の交換が進むことが確認された。ただし、採取後2時間程度で、シリコンゴムを通して大気と交換し、10%程度濃度が低下する可能性が示唆された。また、昨年度原位置に適用した結果、シリコンゴムの強度がないため、地下水圧が高い地点では、図6.4.1-2に示すように、膨張するなど破損する恐れがあった。また、サンプラー内に大気が残るあるいは採取時に大気が混入すると適切に濃度が評価できないことがわかっている。これは、大気中のNe濃度が地下水中のNe濃度に比べて高いため、少しの大気の残留および混入がガス比に大きな影響を与えるためである。今年度は、これらの問題を克服するために、図6.4.1-3に示すように、圧力容器内にシリコンチューブを設置し、圧力容器内でガスの交換させる方法を実施した。また、サンプリング前に圧力容器を真空引きすることで大気の排除を実施した。

しかしながら、原位置では地下水圧として数MPaの圧力がかかるだけでなく、設置時には大気の影響を除去するために、容器を真空引きする必要がある。この際、シリコンゴムにかかる圧力が非常に高くなり、シリコンゴムの破損が頻繁に発生した。シリコンゴムが破損すると圧力容器のサンプル接続部分から地下水が流出するため、破損の確認が可能である。このため、平衡式でのサンプル採取はそれほど多く実施できていない。このように平衡式においてデータの取得が難しかったため、平衡式に代わる方法として、同様にガスを回収する水上置換法を試行することとした。



図 6.4.1-2 サンプラーの設置状況(管内)とサンプラーシリコンゴムの膨張



図 6.4.1-3 圧力容器と圧力容器の内部構造

圧力容器上部のサンプリング用銅管とシリコンチューブをつなげ、圧力容器に地下水を流してガスを交換する

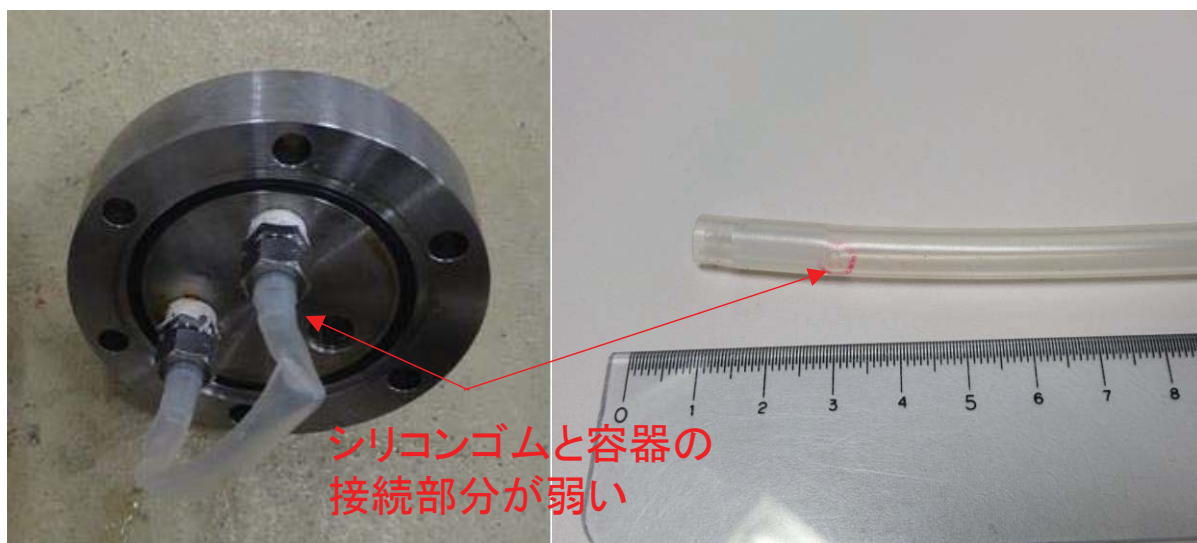


図 6.4.1-4 シリコンゴムの破損部分

水上置換法はガス分析などで用いる方法であるが、希ガス分析にはあまり用いられていない。これは、希ガス分析装置が、非常に微量の溶存希ガスを分析できる装置であり、地下水中にどれだけの希ガスが溶けているかを評価しているためである。このため、希ガス分析の単位には一般的に cc_{STP}/g_w が用いられる。 cc_{STP} は標準の温度・圧力 ($0^{\circ}C$ 、1 気圧)、 g_w は 1g 中の水を示し、1g の水に溶けている標準の温度圧力でのガス量を表している。

しかしながら、溶存ガス量が非常に多い場合には、表 6.4.1-1 に示すようにガスが分離し、ガスが溶存していた地下水量が不正確になる。このような場合には、式(6.3.1-1)や式(6.3.1-2)に示すように N_e 濃度を指標として、元の地下水量を推定することになる。水上置換によって採取した試料では、 N_e 量に基づいて地下水量を推定すれば、同じ補正方法が適用できる。また、水上置換では一般的に銅管に採取する試料量 20ml に対して、非常に多くの地下水からガスを採取するため、より平均的な値が求められることが期待できる、

水上置換装置の概念図と写真を図 6.4.1-5 に示す。ここでは、より効率的にガスを追い出すために、上部から流入した地下水を噴霧器(スプレー)によって微粒子化してガスを採取している。このように、ガスを装置上部に集め、銅管を接続してガスを採取した。採取した銅管は地下水の場合と同様に、鉄製のクランプで締めた。ガスの採取では試料量は 1ml 程度でよいので、採取する銅管は 6mm を使い、中型と小型のクランプを用いた。

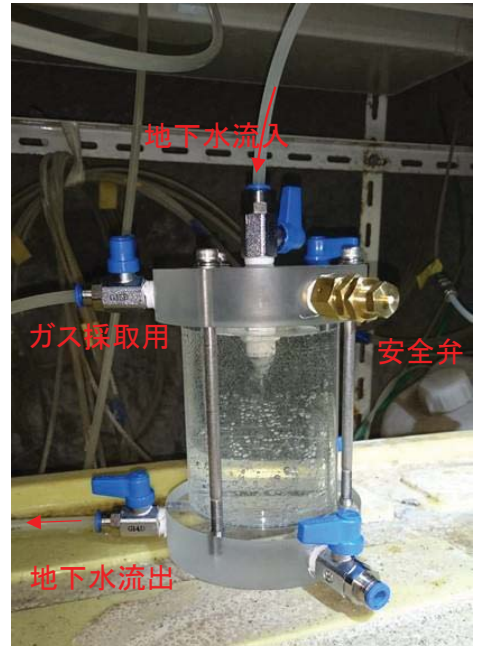
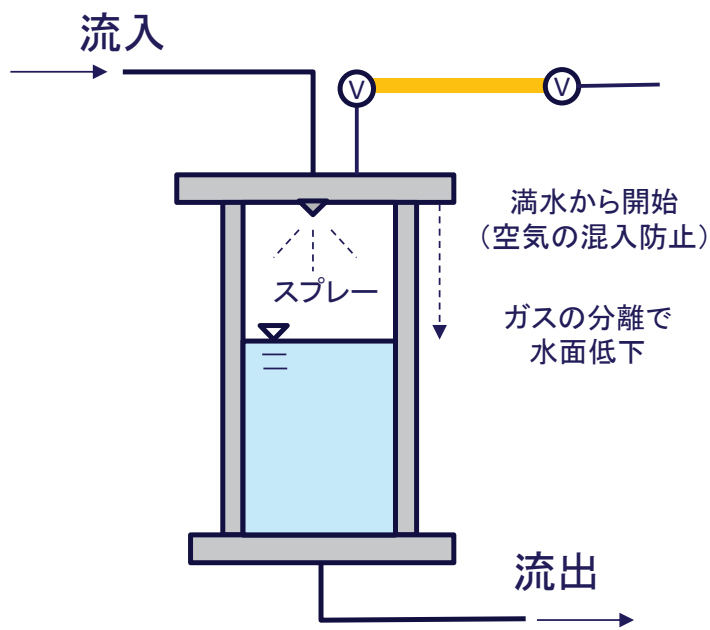


図 6.4.1-5 水上置換法の概念図と写真



図 6.4.1-6 ガス採取用の銅管とクランプ(上側：中型クランプ、下側：小型クランプ)

また、ガスを全量取り出すのが理想のため、ガス採取装置についても試作した。ガス採取装置は、Ohta et al. (2009)のKr分離抽出装置を基に製作した。装置は図 6.4.1-7 に示すように、水の中のガスを分離する分離ユニットとガスを捕集する排気ユニット、およびポンベ部で構成される。分離ユニットにはメンブレンフィルター、中空糸膜、および水トラップホルダーより構成され、排気ユニットは真空ポンプとコンプレッサーで構成される。

分離ユニット、排気ユニット、ポンベ部は全て小型のサイズであり、狭い坑道内でも個々に運搬することが可能である。装置は、2つのユニットとポンベを現地で接続できる仕様である。希ガス分離装置の写真を図 6.4.1-8 に示す。

装置のガス分離性能を確認するために、水道水を用いて、ガス分離装置によるガスの分離効率試験を行った。排気ユニットにより分離ユニット内の大気を排除した後に模擬地下水を0.4L/min-1.2 L/minの流速で導入し、水中のガスの分離を行った。装置導入前のD0(溶存酸素量)と分離ユニットから排水される水のD0の計測を行った。分離効率(=(装置導入前のD0-排水される水のD0)/装置導入前のD0)と流量の関係を表 6.4.1-2 に示す。この結果から、0.5L/min程度であれば、水中のガスをほぼ全量回収できることがわかる。

表 6.4.1-2 装置によるガス分離効率と流量の関係

流量(L/min)	0.37	0.56	1.1	1.2
ガス分離効率(%)	100	100	90	88

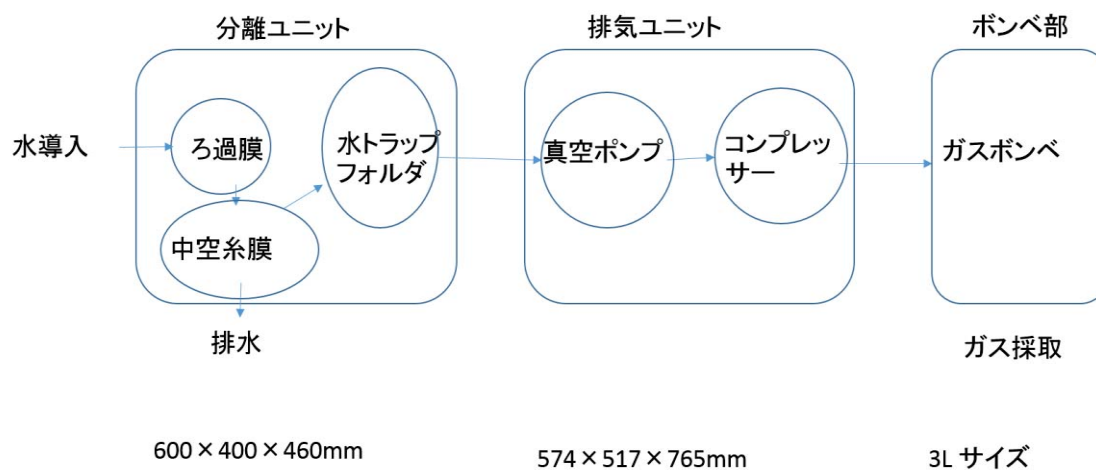


図 6.4.1-7 希ガス分離装置模式図



図 6.4.1-8 希ガス分離装置写真

(4) サンプラーの原位置への適用

複数の希ガスのサンプリング方法を単一の区間に適用し、その適用性を確認した。脱ガスの影響を評価するには、幌延で実施するのが理想的であるが、幌延では再現性のある結果が得られていないため、正解が分からない。このため、圧力制御式のサンプリングにおいて良い再現性が得られている瑞浪を対象として実施した。瑞浪では深度 300m ボーリング横坑の 12MI31#1 と深度 500m の研究アクセス南坑道の 15MI53#5 を対象に実施した。ここでは、圧力制御式、原位置平衡式、水上置換式、ガス分離装置を適用したが、原位置平衡式はシリコンチューブと圧力容器の接続部分のシリコンチューブが破損し結果が得られていない。これは、前述のように、原位置平衡式では、サンプリング前に真空引きし、その後、数 MPa の水圧がかかるため、変形が比較的大きくなる接続部分で破損したためと考えられる。破損を防ぐために内部にナイロンチューブやスプリングなどをいれて形態の安定に努めたが、高い水圧がかかると変形量が大きくなり、破損する可能性が高いようである。ガス分離装置は、15MI52#1 と 15MI53#5 に適用したが、ガス分離効率が 80%程度であったため、分析を実施してない。装置に導入する流量については、前述のように 0.5L/min 以下で実施したが、ガスを 100%分離することが困難であった。原因については今後検討するが、ガス量がガス成分の影響ではないかと考えられる。分離効率が低いと Ne や He で分離率が異なる可能性があり、これらに基づく補正が困難となる。このため、表 6.4.1-3 に示すように封圧採水とガス分離法とを比較した。なお、封圧採水の結果は、式(6.3.1-1)と式(6.3.1-2)で補正した結果を示した。水上置換の結果は、ガスを集めているため必ず Ne 量が過剰になるため、式(6.3.1-2)で補正した。

これらを比較した結果、12MI31#1 では、 ${}^4\text{He}$ 濃度と ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ が、圧力制御式では、 $5.1 \pm 0.1 \times$

10^{-6} cc_{STP}/g_wと $4.5 \pm 0.3 \times 10^{-7}$ に対して、水上置換では $5.2 \pm 0.2 \times 10^{-6}$ cc_{STP}/g_wと $4.7 \pm 0.2 \times 10^{-7}$ とほぼ同じ結果が得られた。15MI53#5 では、⁴He 濃度と ³He/⁴He が、圧力制御式では、 $2.3 \pm 0.1 \times 10^{-6}$ cc_{STP}/g_wと $4.9 \pm 0.2 \times 10^{-7}$ に対して、水上置換では $1.7 \pm 0.3 \times 10^{-6}$ cc_{STP}/g_wと $4.8 \pm 0.1 \times 10^{-7}$ と同程度の値が得られた。

幌延のような溶存ガスが多い試料では脱ガス率が高くバラツキが大きくなるが、水上置換法であれば、比率として高い脱ガスした試料を採取でき、かつ、試料量としても銅管に比べて多いガス量で評価が行えることから、より平均的な結果が得られると考えられる。これらの結果から水上置換法が脱ガスした試料を採取するには有効であると考えられる。

表 6.4.1-3 採取方法の比較結果

(1) 12MI31#1 での希ガス分析結果

区間名	採取方法	試料名	計測値			補正值 (Ne補正)	
			⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He
			cc _{STP} /g _w	-	cc _{STP} /g _w	cc _{STP} /g _w	-
12MI31#1 (300 m)	圧力制御	試料1	5.1E-05	4.2E-07	2.3E-07	5.1E-05	4.2E-07
		試料2	5.2E-05	4.8E-07	2.3E-07	5.2E-05	4.8E-07
		試料3	5.0E-05	4.6E-07	2.0E-07	5.0E-05	4.6E-07
		平均値				5.1E-05	4.5E-07
		標準偏差				1.1E-06	3.1E-08
	水上置換	試料1	9.7E-04	4.6E-07	3.7E-06	5.3E-05	4.6E-07
		試料2	6.0E-04	4.9E-07	2.4E-06	5.1E-05	4.9E-07
		平均値				5.2E-05	4.7E-07
		標準偏差				1.5E-06	1.7E-08

(2) 15MI53#5 での希ガス分析結果

区間名	採取方法	試料名	計測値			補正值 (Ne補正)	
			⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He
			cc _{STP} /g _w	-	cc _{STP} /g _w	cc _{STP} /g _w	-
15MI53#5 (500 m)	圧力制御	試料1	2.5E-04	5.0E-07	5.7E-07	2.5E-04	5.0E-07
		試料2	2.2E-04	4.8E-07	4.8E-07	2.2E-04	4.8E-07
		試料3	2.2E-04	5.2E-07	3.5E-06	2.2E-04	5.2E-07
		試料4	2.2E-04	4.8E-07	7.6E-07	2.2E-04	4.8E-07
		平均値				2.3E-04	4.9E-07
		標準偏差				1.4E-05	1.7E-08
	水上置換	試料1	2.6E-03	4.9E-07	2.7E-06	1.9E-04	4.9E-07
		試料2	1.6E-03	4.8E-07	2.2E-06	1.4E-04	4.8E-07
		平均値				1.7E-04	4.8E-07
		標準偏差				3.2E-05	9.2E-09

6.4.2 速い流れの指標となる物質

坑道などを掘削した場合に、湧水量が多い地点などが確認される場合がある。このような地点は水みちと呼ばれるが、核種の漏出などを想定すると、このような水みちをがどのような物質移行特性を有するかは、評価において非常に重要になる。水みちの評価では、従来のような半減期の長い核種だけでなく、比較的新しい地下水を評価できる物質が重要になると考えられる。この代表的なものとして、 ^3H とフロン、 SF_6 などがあげられる。また、瑞浪のように、氷期に涵養した地下水に対して現在の地下水が流入する場合には水素・酸素同位体比なども新しい水の指標となり得る。このため、このような物質について採取・分析方法の技術開発を実施した。

6.4.2.1 ^3H による評価方法

^3H (トリチウム)は、水素(H)の放射性同位体であり、水分子($^3\text{H}^1\text{H}\text{O}$)として地下水中に存在するため、化学反応の影響を受けず、地下水とともに移動する。このためトレーサーとして非常に優れている。

^3H の半減期は12.3年であり、 ^3H 年代測定では、 ^3H の放射壊変による濃度低下に着目して地下水年代を評価する。このため、比較的流動性の高い、滞留時間が50年未満の地下水の評価に有効である。

^3H の単位には、トリチウムユニット(TU)が用いられる。1 TUは、H原子 10^{18} 個に対して、1個のトリチウムが存在する状態を示す。1 TUは、SI単位系の約0.12 Bq / lに相当する。

^3H は、図6.4.2-1に示すように1960年代の核実験によって大気中に放出され、環境中の濃度が高くなったが、近年では環境中の濃度が低下し、核実験前の状態に近づいており、現在の降水の ^3H は5TU程度であり、瑞浪周辺の河川水では3.7TU程度である。

瑞浪における調査結果では、図6.4.2-2に示すように、新しい水の指標として有望と考えられた δD と ^{14}C 量(mol/L)と相関がよく、新しい水の指標になり得ると考えられた。 ^3H と δD との回帰直線は ^3H が0 TUで δD が-59.3‰と氷期に涵養した地下水の δD の代表値である-60‰に近い値をとり、傾向も一致している。さらに、 ^3H と ^{14}C 量との回帰曲線では、相関係数が0.であり、0TUで ^{14}C が0 mol/Lを示すなど、物理的な意味あいも整合している。ただし、これらの結果は、 ^3H の分析を液体シンチレーションカウンティング(LSC: Liquid Scintillation Counting)で実施しており、定量下限0.3TU、測定誤差0.1TUである。このため、0.3TU以下は、全て0.15TUとして評価している。このため、より精度高く分析できれば、より再現性が増加する可能性がある。

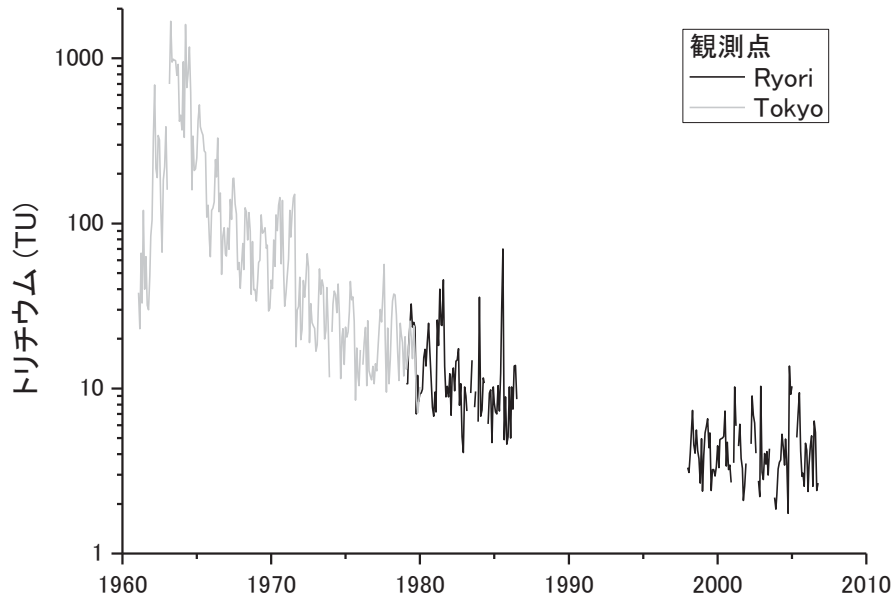


図 6.4.2-1 トリチウム濃度の経時変化(地盤工学会、2013)

トリチウムは LSC が最も一般的な分析手法である。環境試料中のトリチウム測定には、電解濃縮を含めた煩雑な濃縮操作が必須であり、測定時間も非常に長い。測定精度は 0.1TU、定量下限は 0.3TU 程度である。一方、 ^3He ingrowth 法は、トリチウムの壊変によって生成する ^3He 濃度を希ガス分析質量法により分析する方法であり、従来の液体シンチレーション法より一桁以上の高感度の分析が期待できる。この分析では、液体シンチレーション法のような煩雑な前処理やそれに伴う廃液の問題もない。ただし、希ガス質量分析に ^3He ingrowth 法では、質量分析計で測定が可能なレベルに達するまでの十分な量の ^3He の生成が必要であり、 ^3He が成長するまでに必要な時間は数ヶ月から 1 年程度に渡るため、長期間にわたる保管が求められる。1 L あたりの試料から生成する ^3He の累積量を図 6.4.2-3 に示す。測定装置に 10^{-14} cc_{STP} の精度があれば、0.1 TU の検出には、1 L の水を 10 ヶ月貯蔵する必要がある。 ^3He ingrowth 法では、試料については脱気をするだけで濃縮をしないため、貯蔵時間が短く十分な測定精度が得られない場合には、再度 ^3He の生成を待つことにより、再分析することが可能である。

また、試料量を増やすと発生量も増加するため、貯蔵期間は試料量に反比例する。このように、長期間にわたる貯蔵が必要であるため、貯蔵（ストレージ）システムの検討を実施した。

^3He を生成させるために、貯蔵容器の真空性能が重要であることから、図 6.4.2-4 のようなストレージ容器を製作した。容器の容量に比例して精度が上がるため、容器は内径 $\phi 201$ mm、高さ h205 mm のステンレス製の容器を用いた。容器の容量は 3.6 L である。

製作した装置を用いて真空試験を実施した。この結果を、ストレージ容器中の真空度の経時変化として図 6.4.2-5 に示す。この実験で用いたストレージ容器中のガスは約 60 分程度で 0.2 Pa 程度までの真空度に到達できることがわかった。

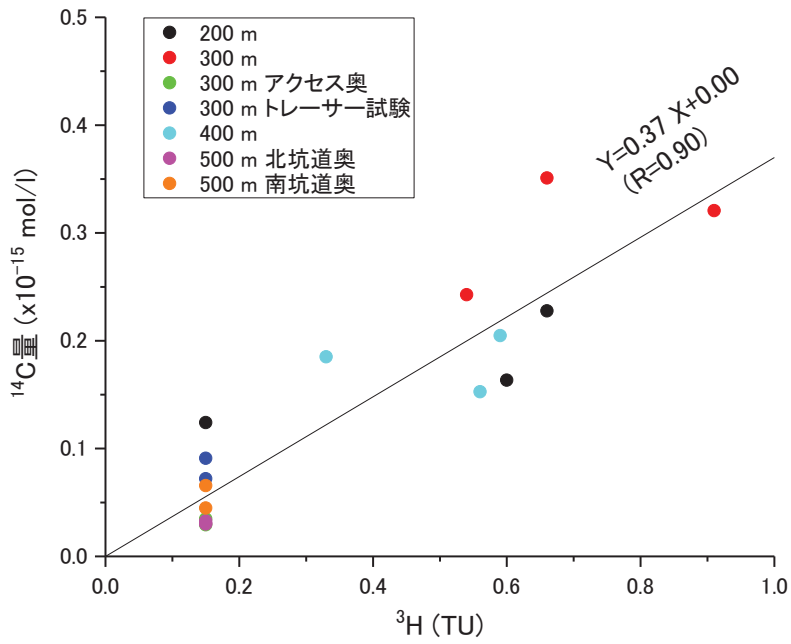
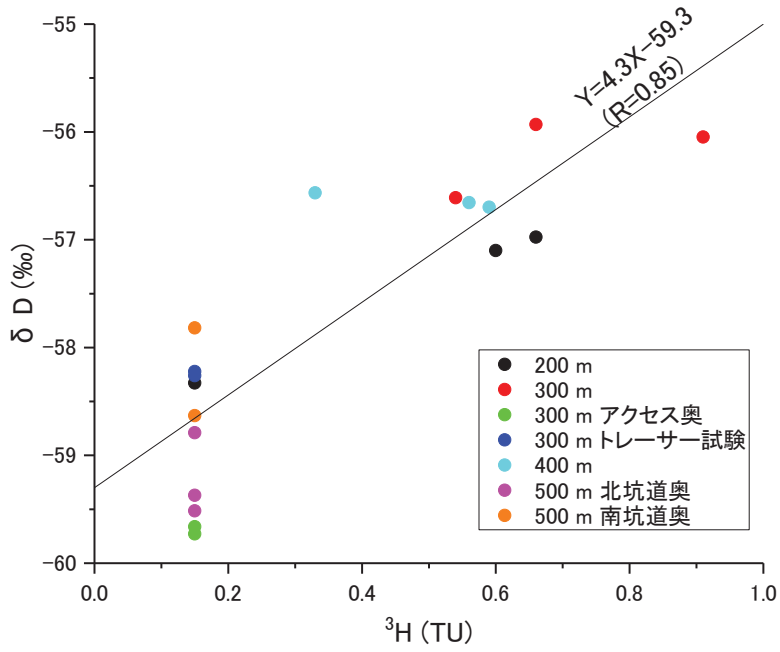


図 6.4.2-2 3H と新しい地下水の指標の相関(δD 、 ^{14}C 量)

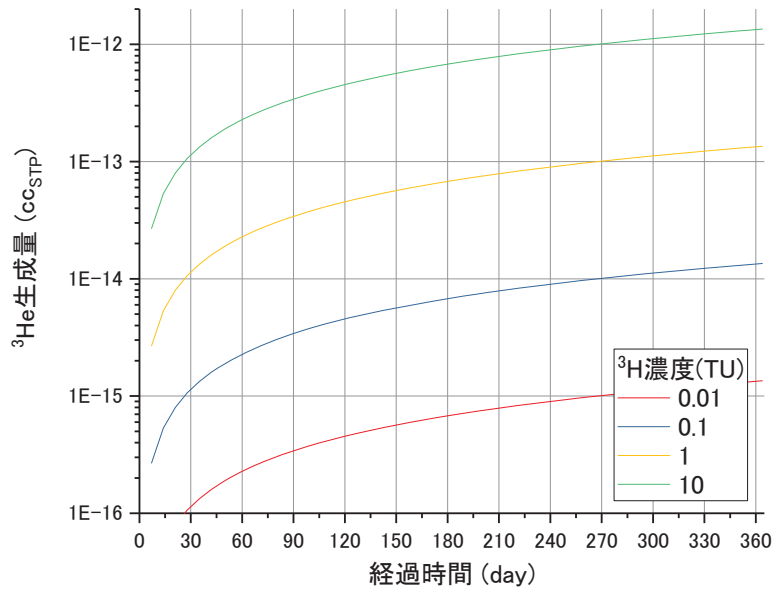


図 6.4.2-3 ^3H の生成量の経時変化(サンプル 1L あたり)



図 6.4.2-4 ^3He ingrowth 用の容器

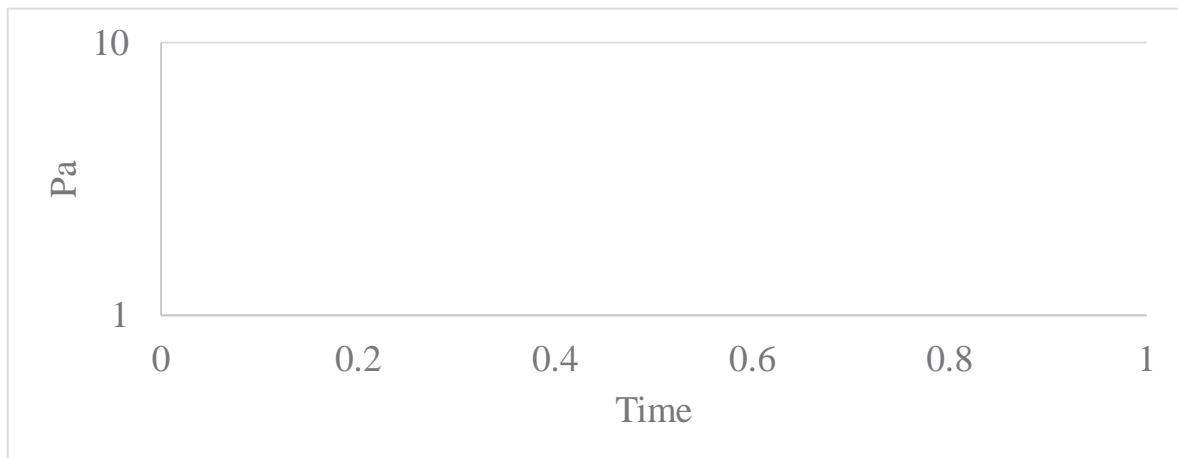


図 6.4.2-5 容器の真空度の経時変化の一例

表 6.4.2-1 にストレージ容器中の He 同位体および Ne の量を示す。気中で保管した V-A-1 および 2 の試料は、 ^3He リーク速度が $10^{-16}\sim 10^{-14}$ cc_{STP}/day と ^3He の生成速度に近い速度であった。一方で、水中で保管した V-W-1-28 は、リークが検出できなかった。このため、現在の容器の状態では気中では保管できず、水中に保管する必要があることがわかった。今後、リーク速度を抑える容器および保存方法について検討する予定である。

表 6.4.2-1 希ガスのリーク速度とストレージ期間

サンプル名	貯蔵期間 (日)	^4He リーク速 度 (cc _{STP} /day)	^3He リーク速 度 (cc _{STP} /day)	Ne リーク速度 (cc _{STP} /day)	特記事項
V-A-1-H28	66	2.29E-10	2.49E-16	2.99E-10	気中で保管
V-A-2-H28	40	6.78E-09	1.33E-14	6.16E-09	気中で保管
V-W-1-H28	31	N. D	N. D	N. D	水中で保管

瑞浪の立坑で採取した試料について、 ^3H 濃度を LSC 法と ^3He ingrowth 法で計測した。この結果を図 6.4.2-6 に示す。LSC 法は前述のように定量下限が 0.3 TU のため 0.3TU 以下のものは $0.15 \pm 0.15\text{TU}$ と表している。この結果では、 ^3He ingrowth 法において貯蔵期間が 1 ヶ月程度と短かったため、測定精度は LSC 法とそれほど変わらないが、 ^3He ingrowth 法は LSC 法と同程度の精度で計測できていることがわかる。

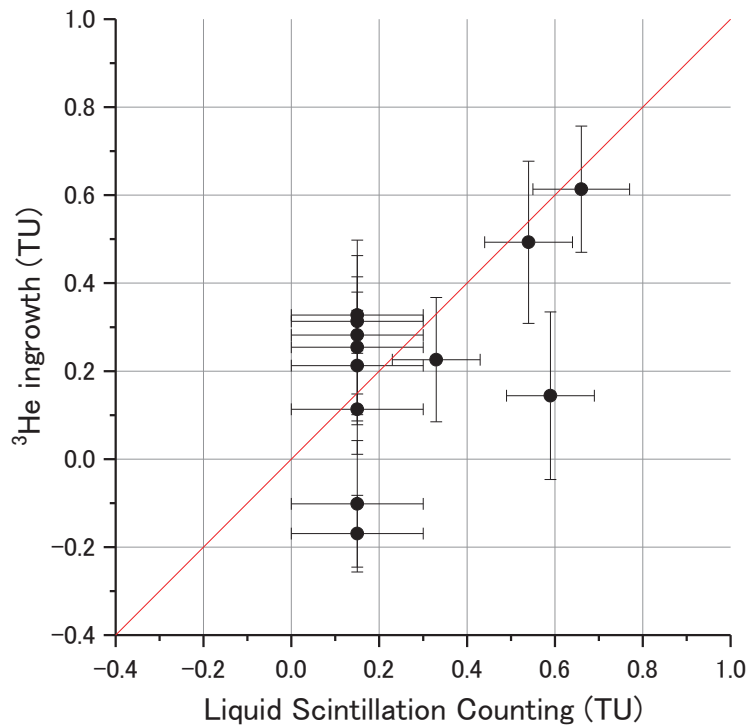


図 6.4.2-6 LSC 法と ^3H ingrowth 法の比較

6.4.2.2 フロンガスによる評価方法

フロンガス(CFC-11, 12, 113)やSF₆は冷媒や絶縁材として、約50年前から使用されてきた。しかしながら、これらのガスは地球温暖化を引き起こすとして問題視され、近年ではその使用が中止されている。ただし、近年まで使用されてきたため、大気中の濃度は図6.4.2-7に示すように単調に増加している。濃度増加に伴いガス圧も増加しているため、地下水への溶存量も時間とともに増加している。このため、地下水中の溶存量から大気中濃度に換算し、過去の大気濃度と対比することで滞留時間が推定できる。溶存ガス量だけでなく、溶存ガス比に基づいて涵養年を推定することも可能である。

測定単位は、フロンガスではpg/kgが用いられる。これは、水1kg中にpgの重量のフロンガスが溶解していることを表す。p(ピコ)は10⁻¹²を表す。SF₆はfmol/kgが用いられる。これは水1kg中にfmolの分子量のSF₆が溶解していることを意味する。f(フェムト)は10⁻¹⁵を表す。これらの濃度から大気中の濃度pptvを求めて、濃度曲線とフィッティングする。ここに、pptvは体積率で10¹²分の1を表す。

フロンガスやSF₆を、新しい地下水の指標として有効と考えらるδDと比較した結果を図6.4.2-8に示す。ここでは、フロンガスから算出した地表水の混合率は、全般的にδDから推定される混合率よりも小さくなっている。δDは新しい水で-50‰程度、流出域で-60‰程度となるため、1‰あたり10%の新しい水の混合率となる。ガスのフロンガスは還元環境では微生物分解などにより減衰することが知られている(Plummer and Bunsenberg, 2006)。このため、フロンガスは地表水の流入を表していないと考えられる。SF₆から求めた地表水の混合率はδDとともに減少する傾向が見えるものの、相関はあまり良くない。また、δDが-60‰程度でも高い値を示している。この原因には、大気の混入および原位置生成の2つが考えられる。大気の混入については、採水時を水中で実施するなど注意が必要である。また、原位置生成については、Bunsenberg et al. (2000)で指摘されるように、花崗岩などでは有意な可能性がある。

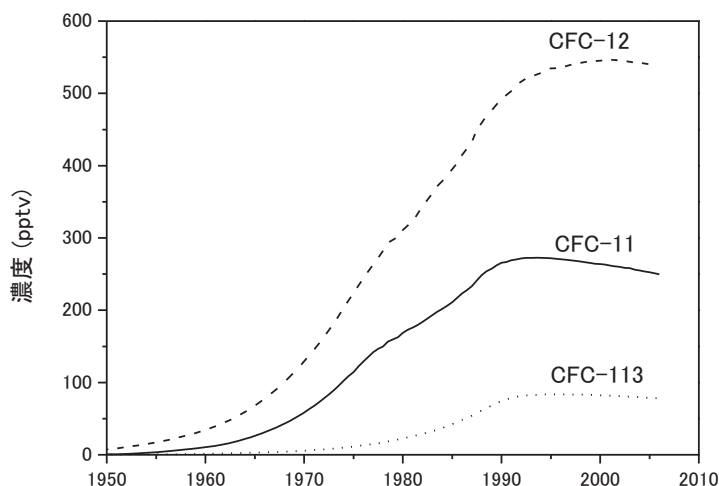


図 6.4.2-7 フロンガス濃度の経時変化(Bunsenberg and Plummer, 2004)

フロンガスにおいても希ガスと同様に脱ガスが激しい環境では適用が難しい。このため、原位置平衡式サンプラーを用いたサンプリング方法を試行した。原位置平衡式サンプラーは図 6.4.2-9 に示すように、銅管とシリコンゴムからなる。シリコンゴムで地下水中の溶存ガスと交換させフロンガスを回収する。

原位置平衡式サンプラーの有効性を確認するために、予備試験を室内で実施した。具体的には、真空引きしたサンプラーを水道水中に 1 ヶ月程度安置し、採取したガスの分析を行った。この結果を表 6.4.2-2 に示す。

フロン濃度は大気値の 1.5~2 倍程度の値を示している。フロンガスの比率も概ね大気中の濃度に近い値を示している。フロン濃度が高くなった原因としては、銅管内フロン濃度から気体のフロン濃度を求める際に、サンプルの体積を用いているが、サンプルの体積は、銅管内に水を入れた際の重量変化から求めており、正確でない可能性がある。

なお、シリコンゴムによる汚染を調査するために、フロンガスの分析用のビンにシリコンゴムを入れた水試料と入れていない水試料を用意し、1 週間経過してから測定を実施した。その結果、シリコンを入れた試料に濃度上昇はみられず、シリコンゴムからの汚染はないと考えられた。

原位置平衡式サンプラーがフロンガス計測にも適用できる可能性が高いため、幌延立坑で採取した試料に対して適用した。この結果を表 6.4.2-3 に示す。

表 6.4.2-2 平衡式サンプラーの室内での試験結果

試料名	銅管内フロン濃度 (pmol)			気体のフロン濃度 (pptv)		
	CFC-12	CFC-11	CFC-113	CFC-12	CFC-11	CFC-113
室内試験 1	0.0544	0.0322	0.0105	785	465	151
室内試験 2	0.0683	0.0402	0.0109	837	493	134
参考：2015 大気中濃度				531	232	71

表 6.4.2-3 平衡式サンプラーの原位置での適用結果

試料名	銅管内フロン濃度 (pmol)			気体のフロン濃度 (pptv)		
	CFC-12	CFC-11	CFC-113	CFC-12	CFC-11	CFC-113
07-V140-M03	0.0150	0.0030	0.0000	580	115	0
09-V250-M02	0.0013	0.0000	0.0000	41	0	0
10-E250-M01	0.0032	0.0000	0.0000	81	0	0
13-350LGE-M01	0.0018	0.0000	0.0000	43	0	0

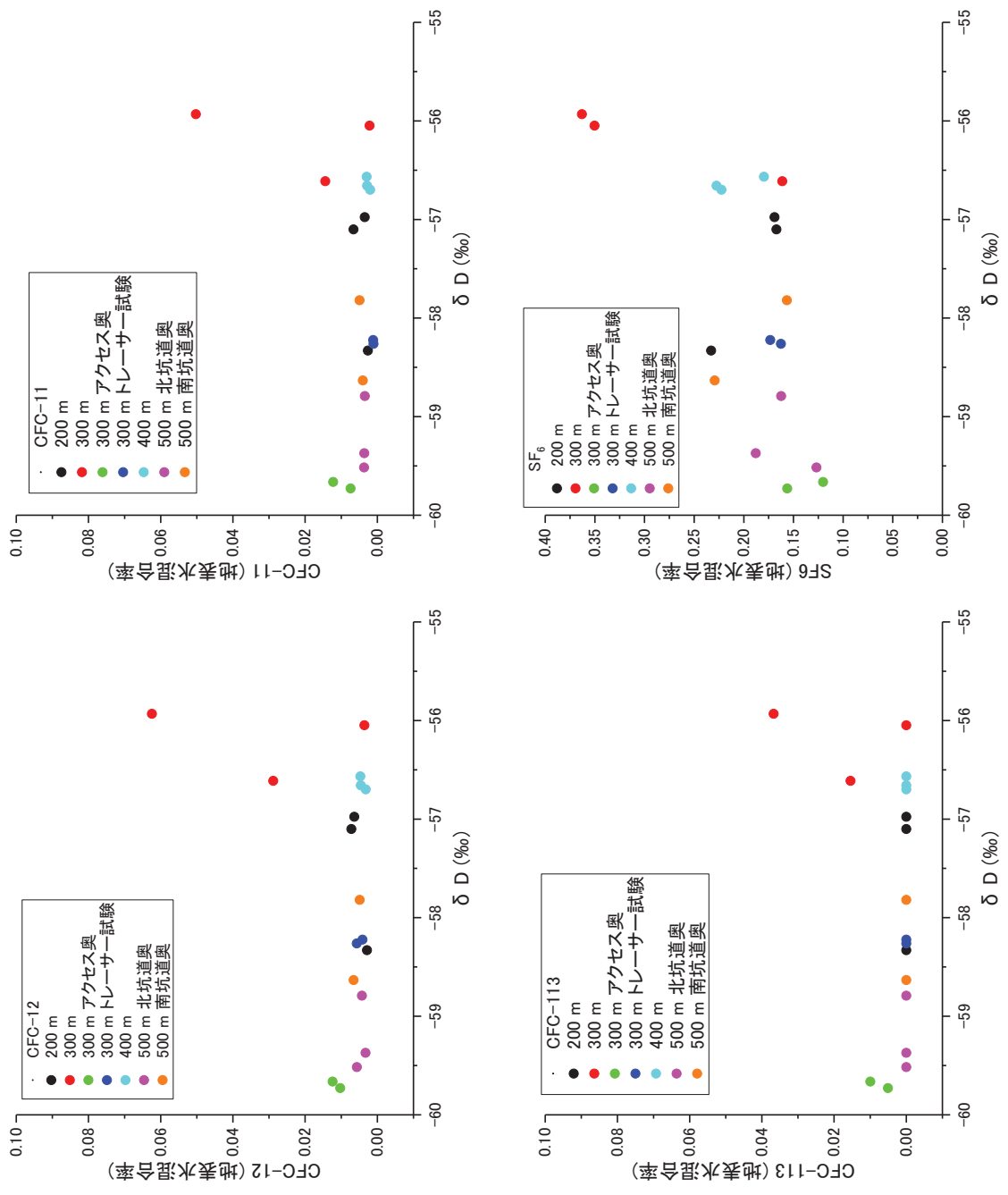


図 6.4.2-8 新しい地下水の指標 (δD) とフロンガス、SF₆の比較



図 6.4.2-9 平衡式サンプラー

07-V140-M03 は大気に近い値となった。同時に計測した希ガスサンプルも $^3\text{He}/^4\text{He}$ がやや上昇しており、大気が混入した可能性がある。ただし、大気の混入量は希ガス分析からは 20%程度であるので、フロンから求めた大気の量は過大になっている。その他のサンプルについては、CFC-12 のみ検出され、その値は大気の 10%程度である。これらのサンプルは、設置前に真空引きを行っておらず、1ヶ月間程度安置した後に採取している。このため、初期の大気が残留した可能性がある。

フロンガスについても平衡式サンプラーで採取できる見通しが得られた。ただし、初期の空気の残留や耐久性などに課題が残るため、今後、水上置換やガス採取法での適用性を検討する予定である。

6.4.2.3 水素・酸素同位体比の評価方法

(1) はじめに

地下水の水素・酸素同位体比は地下水調査において地下水の涵養、地下水の混合、地下水の移行挙動、過去の水理特性についての情報を含むことから、種々の研究において使用されてきた (Murgulet et al. 2016; Sidle 1998; Hendry et al. 2013; Prada et al. 2016; Chen et al. 2011)。低透水性の岩盤で形成される場合は、物質移行が拡散によって支配される可能性が高く、物質の移行が極めて遅いことが期待される。拡散が支配的である場合には、水素・酸素同位体比の空間分布を調べることで、拡散が起きている深度や拡散の影響が及んでいる範囲を知ることができる (Savoye et al. 2008; Rübel et al. 2002; Hendry et al. 2004) 他、地下水年代の指標や地史と組み合わせることにより、拡散が生じてからの時間を推定することも可能である。

一方でこのような岩盤においては、地下水を「液体のサンプル」として得ることが難しく、このような場合ボーリングコア等の間隙水として地下水を取得することになる。岩石の間隙水から

水や間隙水における水素酸素同位体比についての情報を抽出する方法については、例えば蒸留を使う方法(Koeniger et al. 2011; Rübél et al. 2002; Revesz & Woods 1990)、遠心分離を用いる方法(Yang et al. 2003; Gimmi et al. 2007)、圧縮抽水法(Hendry et al. 2015; Kelln et al. 2001)、同位体交換法(van der Kamp et al. 1996; Rübél et al. 2002)、ヘッドスペースガスと平衡にする方法(Hendry et al. 2004; Koehler et al. 2000)が開発され、岩石に適用されてきている。また、近年水蒸気からレーザー分光で直接的に水素酸素同位体比分析を測定できるような装置が開発されたことから(Kerstel et al. 2002)、岩石から生じる水蒸気を直接分析することで岩石間隙水の水素酸素同位体比を分析する方法(“direct vapor equilibration and laser spectrometry (DVE-LS)法”)も提案されており(Wassenaar et al. 2008)、実際のサイト調査に使用された実績もある(Hendry et al. 2015)。

上述の手法の中で、「圧縮抽水法」は岩石を1次元的に圧縮して水を抽出する方法であり、原理が単純な手法であるため適用範囲が広く、抽出した水を別の分析に使用することができるという点で大きなメリットがある。低透水性の岩盤では、岩石間隙に含まれる種々の同位体比($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 、 $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 、 $^{81}\text{Br}/^{79}\text{Br}$)が拡散挙動などの指標となる可能性が示されており、低透水性の岩盤中の物質移行を理解するために、重要な情報である(Hasegawa et al. 2016b; Alessandro et al. 1997; Desaulniers et al. 1986; Shouakar-Stash et al. 2007)。また、核種の岩盤への収着挙動や、人工バリアの性能・耐久性等に大きな影響を与える地下水の主要イオン濃度や種々の元素濃度はICP-MS、ICP-AESや原子吸光、イオンクロマトグラフィを使って分析されるため、抽出した水はこのような分析に使用することも可能である。一方、圧縮抽水においては圧縮圧力の変化に伴って、抽出される水のイオン濃度が変化することが報告されている(Nakata et al. 2016; Peters et al. 1992; Sacchi et al. 2000; Fernández et al. 2003)。このため、圧縮抽水においては、圧縮によって間隙水の水素・酸素同位体比が変化する可能性がある。しかし、既往の研究においては圧縮抽水の圧力に伴う水素・酸素同位体比の分析結果を詳細に検討した例はない。このため、圧縮抽水法で水素・酸素同位体比を分析する方法がどのような岩石に対して適用可能であるのか、どのような点に留意が必要かなどの情報が十分ではない。このため、圧縮抽水における水素・酸素同位体比の変化や、変化するとしたらそのメカニズムを明らかにすることが必要とされている。

上記のようなことから、本研究では圧縮抽水法を幌延地域で得られた岩石に対して適用し、圧縮圧力と水素酸素同位体比の関係を明らかにした。また、圧縮抽水において水素酸素同位体比が変化する可能性があるメカニズムについて考察を加えた。さらに、圧縮抽水法で得られた水素酸素同位体比を他の分析方法(DVE-LSと同位体交換法)で得られた値と比較し、圧縮抽水法の適用性を検討するとともに、各手法のメリット・デメリットについて情報をまとめた。

(2) 実験方法

a. 岩石

幌延地域で実施されたボーリングのコアを試験に使用した。ボーリング掘削で得られたコアは、できるだけ速やかに真空パックし、実験室へと移送した。コアの表面は掘削や掘削水による影響を受け、水素・酸素同位体比が変化している可能性があることから、実験室に到着後できるだけ速やかにコア表面を削り取った。表面を削ったコアは再度アルミバックに真空パックし、試験を実施するまで冷蔵庫で保管した。

b. 分析

液体試料（圧縮抽水で得られた間隙水など）における水素酸素同位体比の分析は、同位体比質量分析装置(Iso-Prime: GV Instruments Ltd., マンチェスター, イギリス)、あるいは水蒸気にも適用可能なレーザー分光装置 (IWA-45EP: Los Gatos Research, カリフォルニア、アメリカ) を用いて分析した。DVE-LS 法の水蒸気は上記のレーザー分光装置を用いて分析した。

c. 試験手順

3 種類の異なる間隙水同位体比分析方法を適用し、岩石間隙の水素酸素同位体比を評価した。それぞれの方法について、以下に記述する。

(a) 圧縮抽水

本研究で使用した圧縮抽水装置は Mower et al. (1991) を基にして、作製した(木方ほか, 1999) もので (図 6.4.2-10)、500MPa までの圧力を加えることができる。圧縮抽水に使用する岩石コアは内径 50mm、高さ 100mm の圧縮抽水用シリンダーに入るように整形したあと、シリンダーに挿入した。圧縮抽水で得られた間隙水は 1.0 μ m のポアサイズのフィルタを通過した後、チューブを介してシリンジに収集した。

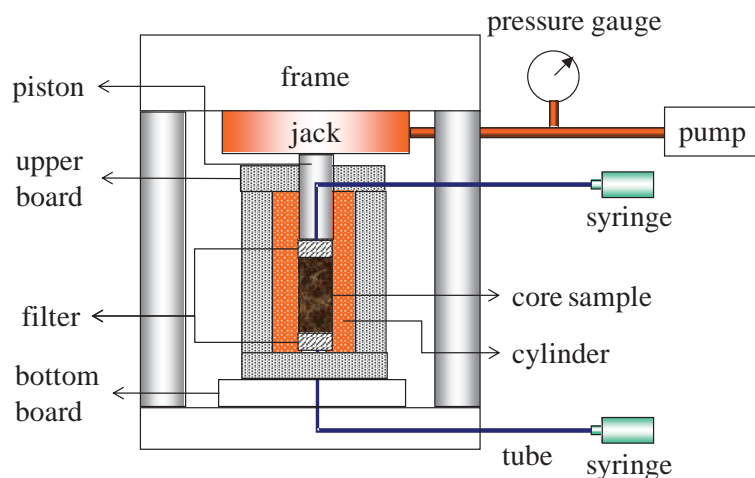


図 6.4.2-10 圧縮抽水装置の概念図

本研究では圧縮圧力に対する水素・酸素同位体比の依存性を明らかにするために、段階的に圧力をかけて間隙水を抽出する「段階圧縮抽水」を実施した。段階圧縮抽水では、間隙水がシリンジに得られるまで圧力を上げた後、岩石試料の収縮が止まるまで圧力を保持し、そのときにシリンジに得られた水のある圧力で抽出された間隙水とした。今回実験に使用した幌延地域の岩石では、圧力を 75MPa まで上げたときに、初めてシリンジに間隙水が得られた。ここから、100、193、200、300、400、500MPa に順次圧力を上げ、それぞれの圧力でシリンジに溜まった間隙水を取得した。取得した間隙水について、水素・酸素同位体比を分析した。

さらに圧縮抽水の試験では、「閉鎖空隙 (Closed-pore)」の影響について明らかにするため、整形後の岩石コアを水素同位体比が高い水に浸漬した後で圧縮抽水する試験を実施した。ここで閉鎖空隙とは、コア外部の水と相互作用ができる外部と連結性のある空隙以外の空隙を指す (図 6.4.2-11)。岩石コアを水素同位体比が自然界の水に比べて極端に高い水 ($\delta^2\text{H}=1000\text{‰}$ 程度) に浸漬した場合、水素同位体比の高い水は拡散によって閉鎖空隙以外の空隙の水と交換する。その結果、拡散が平衡に達すると、コアを浸漬した溶液と閉鎖空隙以外の空隙の水素同位体比は一致すると考えられる。岩石コアを浸漬した水は自然界に存在する水よりも極端に高いものを使用しているため閉鎖空隙の水素同位体比の正確な値は不明であるが、溶液浸漬後の岩石を圧縮抽水して得られる水の水素同位体比と浸漬後拡散が平衡に達したと考えられる溶液の水素同位体比を比較することで、圧縮抽水で得られた水における閉鎖空隙の混入率を算出することが可能である。

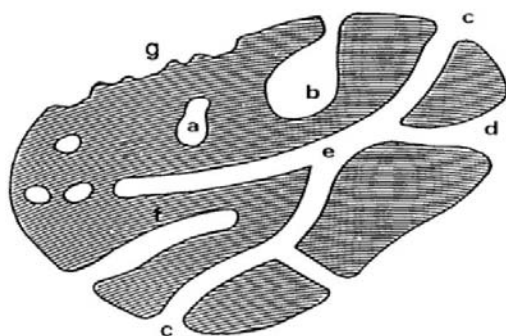


図 6.4.2-11 閉鎖空隙の概念図 (Evbomwan, 2009)

(a) 閉鎖空隙 (Closed pore) (b)~(f) 開放空隙 (Opened pore)

シリンダーに入るように整形した岩石試料を水素同位体比の高い溶液に浸漬したときの、経過日数と水素同位体比の関係を図 6.4.2-12 に示す。図からわかるように、水素同位体比は 7 日程度で経過日数に対してほとんど変化しなくなるが、本研究では溶液への浸漬を約 50 日間継続した。これは、閉鎖空隙を除く空隙に水素同位体比の高い水が拡散するようにするためである。50 日間溶液に浸漬したコアを取り出し、岩石コアと同様に 75、100、193、200、300、400、500MPa

で順次加圧し、それぞれの圧力でシリンジに得られた水の水素同位体比を分析した。

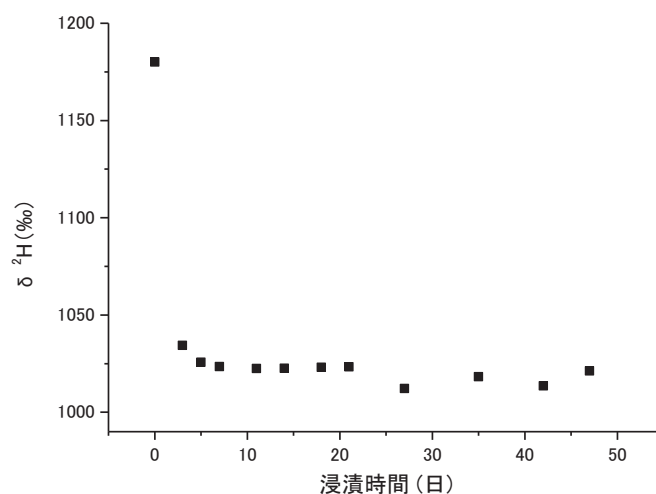


図 6.4.2-12 浸漬後圧縮抽水試験における浸漬日数と溶液の水素同位体比

液体試料（圧縮抽水で得られた間隙水など）における水素酸素同位体比の分析は、同位体比質量分析装置(Iso-Prime: GV Instruments Ltd., マンチェスター, イギリス)、あるいは水蒸気にも適用可能なレーザー分光装置 (IWA-45EP: Los Gatos Research, カリフォルニア、アメリカ) を用いて分析した。DVE-LS 法の水蒸気は上記のレーザー分光装置を用いて分析した。

(b) DVE-LS

DVE-LS は岩石を密閉した容器に封入し、ヘッドスペースに発生する岩石間隙水由来の水蒸気を分析する方法である。DVE-LS を適用して幌延岩石の間隙水の水素酸素同位体比を分析する試験は、Hendry et al. (2015)と Wassenaar et al. (2008)を参考にして、以下の手順で実施した。

ー岩石を封入する袋について：DVE-LS では岩石を容器や袋に密閉し、発生する水蒸気を分析する。その後水蒸気を装置に導入することを考慮すると、岩石を密閉するのは袋であることが望ましい。（内部のガス量に従って収縮し、ガスを押し出す圧力が大気圧で一定となるため）Wassenaar et al. (2008)の報告では、袋は通常食品等を保管するようなポリエチレン製のバッグでも良いとされているが、本研究では気体の漏れが小さいことと、コック付きの出口がありその後の操作が容易であることから、コック付きのアルミニウム製バッグ（容量 2000mL）を使用した。

ー岩石試料の封入：適切な重量（後述）の岩石試料をシャーレの上に置き、上述のアルミバッグに入れた。可能な限り空気を抜き、バッグの口を閉じた。

ー窒素ガスの封入：流速 500mL/min で乾燥した窒素ガスをアルミバッグに 2 分間入れた。アル

ミバッグ内には 1000mL の窒素ガスが充填されたことになる。この状態で室温（約 20℃）にて、バッグを静置した。

ー分析：所定の時間経過後（後述）アルミバッグを直接分析装置に接続した。分析装置内部は陰圧になっており、接続してコックを開けるとバッグ内の水蒸気が装置内部へと導入される。バッグを接続して 1 分後、バッグのコックを開いて水蒸気を装置に導入し、装置の水蒸気分析値が安定した後（コックを開いてから 1 分後）から 2 分間、装置で分析される水蒸気の水素・酸素同位体比を記録した。2 分間は 10 秒おきに分析値を記録し、この平均値を水蒸気の測定値とした。

上記の試験系における、必要とされる岩石量および試験時間について明らかにするための予備的な試験を実施した。まず必要な岩石量を明らかにするための試験では、上述の岩石の代わりにキムワイプをおき、そこに 0.1~3.0 g の水を滴下した。3 日間静置後、水蒸気の水素・酸素同位体比を分析した。分析結果を図 6.4.2-13 に示す。図から分かるように、水の量が 1.0 g を超えると水素酸素同位体比はほぼ一定の値を示すのに対して、水の量が少なくなるとより大きな値を示す。液量に依存して同位体比が変化する領域では安定した分析ができないため、間隙水の量が 1.0 g 以上になるように岩石量を調整する必要があることが分かる。

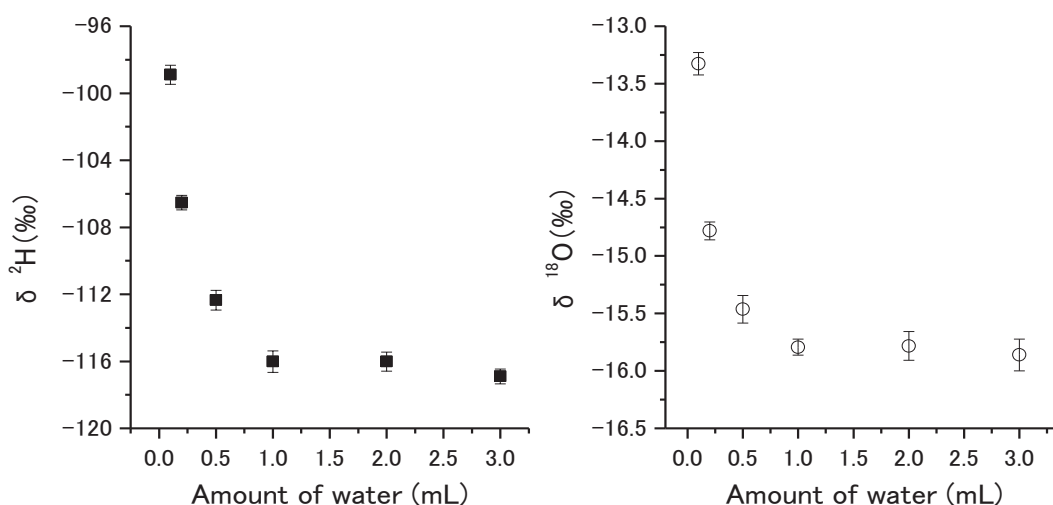


図 6.4.2-13 液量と水蒸気の水素酸素同位体比の関係

次に試験時間の影響を調べるため、岩石量を 12 g 程度に調整し、これをアルミバッグに封入した。110 °C で 48 時間乾燥した前後の重量から、岩石 12 g には約 3 g の間隙水が含まれており、12 g という岩石量は上記の試験結果から得られた「間隙水量が 1.0 g 以上」という条件を満たす量である。岩石を袋に入れて、1・2・4・7 日後の水蒸気の水素酸素同位体比を分析したところ、2 日以上の分析結果はほとんど同じ値を示したことから、試験時間は 2 日間に設定した。

最初の試験では、DVE-LS 法の幌延岩石に対する適用性を確認するため、間隙水を既知の水素・酸素同位体比の水で入れ替えた試料を作製し、これに対して DVE-LS 法を適用した。圧縮抽水試験のところに記載したように、岩石をある溶液に浸漬すると、閉鎖空隙以外の空隙は拡散により間隙水の交換が起こり、拡散が平衡に達したあとは浸漬した溶液と閉鎖空隙以外の空隙は同じ水素酸素同位体比を持つと考えられる。このため、12 g 程度に整形した岩石片を十分に長い時間（21 日程度）溶液に浸漬し、その後溶液の水素酸素同位体比を溶液の分析で、間隙水の水素酸素同位体比を DVE-LS 法でそれぞれ分析して比較した。岩石の浸漬には 0.1M 塩化ナトリウム溶液を用いた。これは、スメクタイトの膨潤によるスレーキングを防ぐためである。

次の試験では、幌延岩石に対して DVE-LS 法を適用した。上述の方法で岩石に対して DVE-LS 法を適用した他、水素酸素同位体比が既知の水 3.0 g についても、キムワイプを置いたシャーレの上に滴下し、岩石を封入するのと同じやり方・タイミングで封入した。液量を 3.0 g としたのは、間隙水の量と同程度にするためである。また、同位体比が既知の水は普段実験室で溶液の水素酸素同位体比分析において「実験室標準試料」として準備している、2 種類の水を用いた。岩石から発生した水蒸気を分析するのと同じタイミングで、実験室標準試料を封入したアルミバッグの水蒸気を分析し、既知の溶液における水素酸素同位体比と水蒸気同位体比との間で検量線を作成した。岩石を封入したバッグの水蒸気測定から得られた値は、この検量線をつかって液体状態での水素酸素同位体比に変換した。

(c) 同位体交換法

同位体交換法は同位体比既知の水（試験水）と岩石を密閉空間に入れ、水蒸気を介して試験水と間隙水の交換をさせることで、試験水に間隙水の情報抽出する方法である（Rübel et al., 2002）。試験前後の試験水の量と同位体比、試験後の間隙水量と同位体比、試験前の間隙水量がわかれば、それらから試験前の間隙水同位体比を以下の式で算出することが可能である。

$$WI_{pb} \times A_{pb} + WI_{wb} \times A_{wb} = WI_{pa} \times A_{pa} + WI_{wa} \times A_{wa} \quad (\text{式 6.4.1.3-1})$$

ここで WI_{pb} ・ WI_{pa} ：試験前後の間隙水同位体比、 WI_{wb} ・ WI_{wa} ：試験前後の試験水同位体比、 A_{pb} ・ A_{pa} ：試験前後の間隙水の量、 A_{wb} ・ A_{wa} ：試験前後の試験水の量である。

試験後の間隙水同位体比 (WI_{wa}) は直接分析することはできないが、水蒸気を介した交換が十分に平衡に達していれば、試験後の試験水における同位体比 (WI_{wa}) と一致しているはずである。岩石間隙水の量は試験実施前後に岩石試料を取り出し、重量を測定して評価した。

既往の研究では金属容器を用いた試験が実施されてきたが（図 6.4.2-14）、本研究では試験を安価にかつできるだけ迅速に実施するために、試料水と岩石とを分割シャーレの片側ずつに置いたものを上述のアルミバッグに入れて交換試験を実施した（図 6.4.2-15）。予備的に分割シャー

レの片側にそれぞれ異なる同位体比をもつ水を入れて実施した交換試験では、分割シャーレの水は約1週間で同じ程度の同位体比になることを確認した(図 6.4.2-16)。しかし、実際の交換試験においては岩石間隙が完全に交換するためにさらに時間を要する可能性があると考えられる。このため、分割シャーレに岩石と水を置いて水の同位体比の経時変化を調べる予備的な試験を実施した。その結果、7日→14日でも同位体比の値が変化している様子が観察されたが、その変化はわずかであった(図 6.4.2-17)。このため、岩石試料では14日以上の実験時間が必要であると考え、試験時間を21日に設定した。実際の試験では、14日間交換させた試料と21日間交換させた試料を比較し、値に差がないことを確認した。

上述の予備試験結果と既往の研究で示された手順(Rübel et al., 2002)から、幌延岩石における試験手順を以下のようにした。

- ① 岩石の整形：岩石試料は表面積が大きく、表面からの距離が短いほうが平衡に達する速度が速いと考えられた。このため、岩石は分割シャーレの片面にはいるような半月状の薄片にし、合計重量が12gとなるよう薄片の枚数を調整した。
- ② 岩石と試験水の封入：岩石試料約12g(試験前に正確な重量を測定)を分割シャーレの片面に、もう片面に同位体比既知の水3.0gを入れ、分割シャーレにふたをした。この状態でシャーレをアルミバッグに封入し、室温(約20℃)で静置した。
- ③ 試験水の分析：14日後あるいは21日後、シャーレを慎重に取り出して試験水を採取した。また、岩石試料をピンセットで取り出し重量を測定したほか、岩石取り出し後のシャーレ重量から間隙水の量を評価した。
- ④ 間隙水同位体比の評価：上述の試験で得られた結果から、上記の式6.4.1.3-1を使って試験前の間隙水における同位体比を評価した。

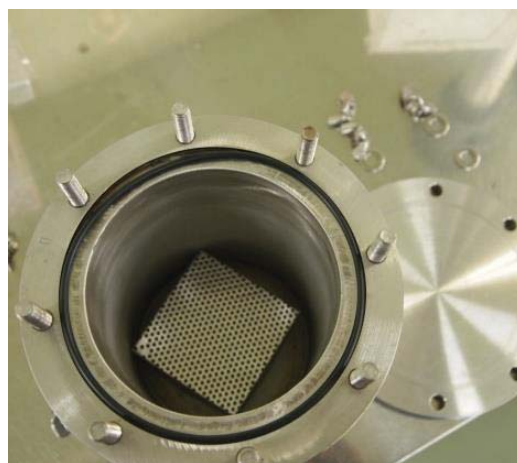


図 6.4.2-14 従来の試験で用いてきた試験容器



図 6.4.2-15 今回の試験で用いた分割シャーレ

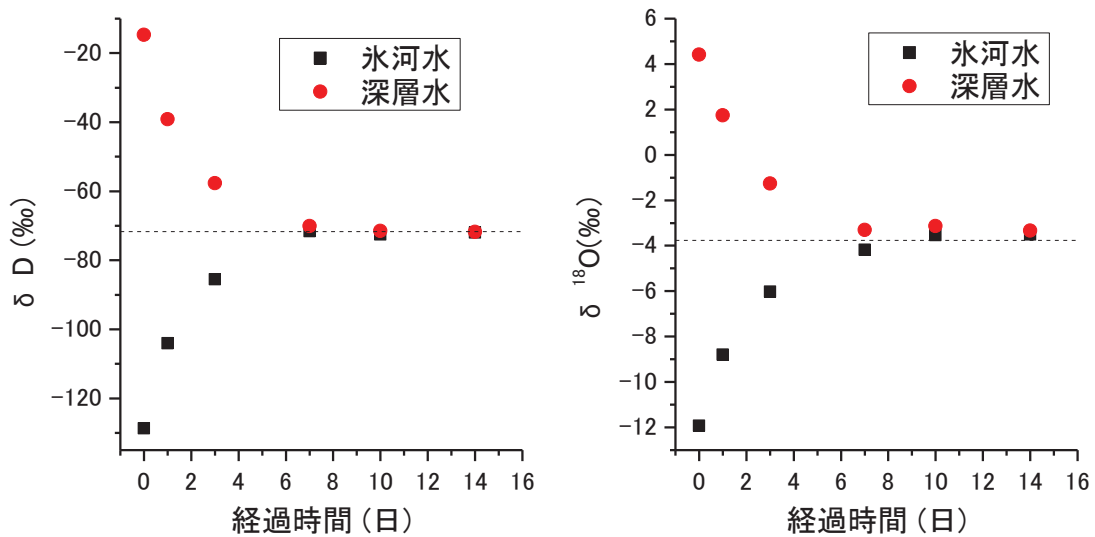


図 6.4.2-16 分割シャーレを用いた水-水間交換試験の結果

同位体比の小さい氷河の水が溶けた水（氷河水）と同位体比が大きい海洋深層水（深層水）を用いて同位体交換試験を実施した。この 2 種類の水を用いたのは自然界で比較的大きな同位体比を持つ水と小さな同位体比を持つ水を使うことで同位体比の経時変化が顕著に理解できるためである。

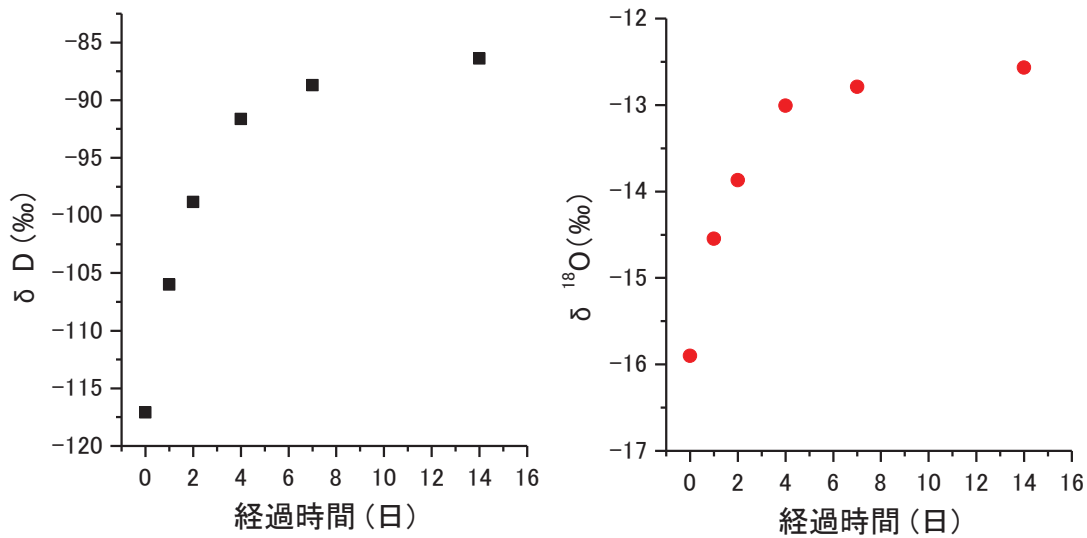


図 6.4.2-17 岩石-水交換試験における試験水同位体比の経時変化
試験水として同位体比の小さな氷河水を用いた

(3) 結果と考察

a. 圧縮抽水による評価結果

幌延岩石における圧縮圧力と抽出される水の同位体比の関係を図 6.4.2-18 に示す。図から分かるように、水素同位体比では圧縮圧力と抽出される水の水素同位体比に明確な圧力依存性があり、圧力が 75 から 300MPa に増加するときに圧力の増加に伴って抽出される水の水素同位体比が減少する傾向が見られた。一方、圧力が 300MPa 以上では圧力に対して水素同位体比の依存性は確認されなかった。また、酸素同位体比においては圧力依存性が顕著ではなかった。

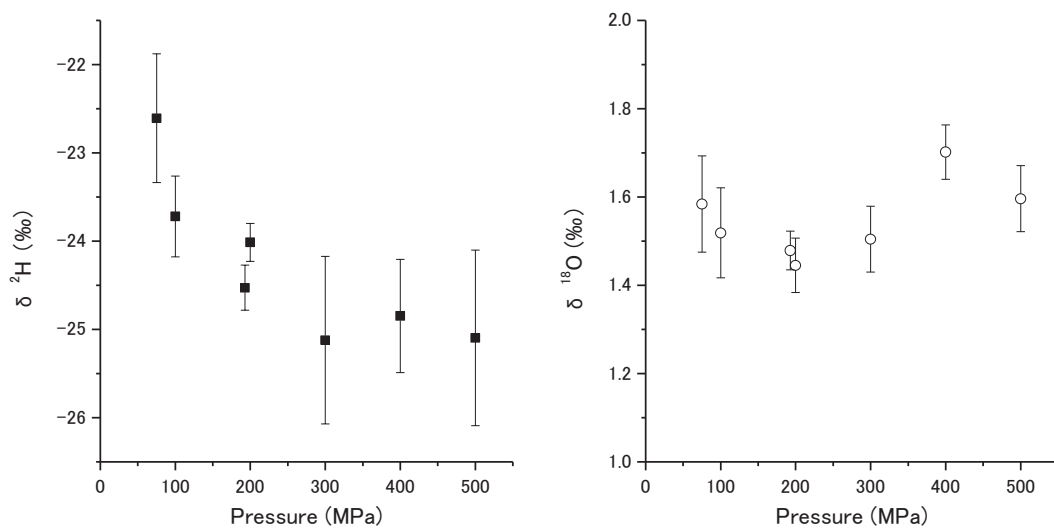


図 6.4.2-18 圧縮圧力と抽水される水の同位体比の関係

さらに高い水素同位体比を持つ溶液に浸漬した後、圧縮抽水をした試験における圧力と水素同位体比の関係を図 6.4.2-19 に示す。図に示されているように、圧縮圧力の増加とともに水素同位体比の値は増大し、浸漬した溶液の値に近くなった。このデータから以下の式を用いて圧縮抽水で得られた水に対する、閉鎖空隙の混合率を算出した。

$$[\delta^2\text{H}]_{\text{cp}} \times f + [\delta^2\text{H}]_{\text{se}} \times (1-f) = [\delta^2\text{H}]_{\text{sq}} \quad (\text{式 6.4.1.3-2})$$

ここで $[\delta^2\text{H}]_{\text{cp}}$: 閉鎖空隙の水素同位体比 (圧縮抽水試験の結果から、 $-25 \sim 0\text{‰}$ の範囲にあると考えられる) $[\delta^2\text{H}]_{\text{se}}$: $[\delta^2\text{H}]_{\text{sq}}$ 岩石の溶液への浸漬時に平衡に達した後の水素同位体比 (溶液の値と間隙水の値は一致していると考えられ、 1087‰ である)。

算出した混入率を図 6.4.2-20 にまとめた。図に示されているように、閉鎖空隙の水の混合率は圧縮圧力が低いほど高く、圧力が増加するに従って0に近くなった。

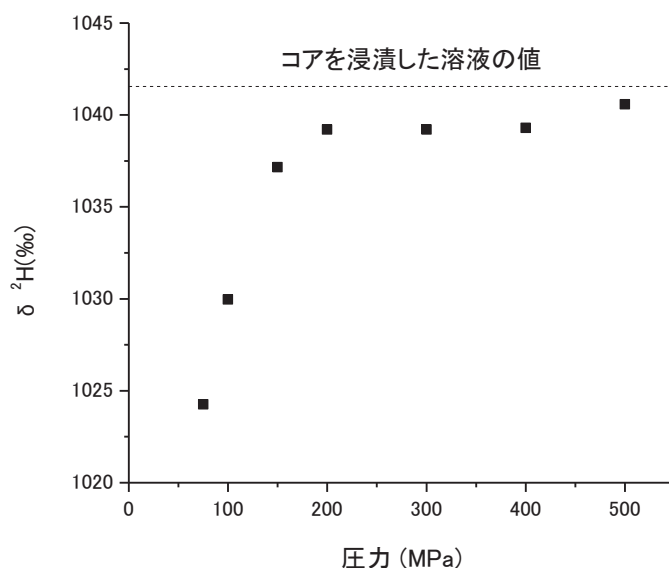


図 6.4.2-19 浸漬後圧縮抽水試験における圧力と水素同位体比の関係

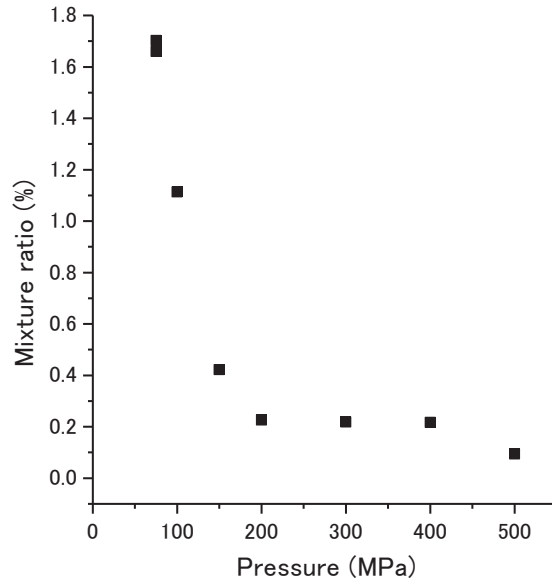


図 6.4.2-20 圧縮抽水における閉鎖空隙の混入率と圧力の関係

上述の結果を併せて考えると、圧縮圧力が低いときには抽出される水は閉鎖空隙から抽出された水の影響を受けている可能性がある。幌延の岩石は海底で堆積したものであり、閉鎖空隙に存在する間隙水の水素酸素同位体比は(0, 0)‰である可能性が高いと考えられる。これに対して圧縮抽水で得られた水素同位体は-25~-22‰程度、酸素同位体比は1.5~1.7‰程度である。このため、閉鎖空隙の水が混入した場合、水素同位体比は大きく酸素同位体比は小さくなる傾向があるものと考えられる。水素同位体は圧縮圧力が低く、閉鎖空隙の混合率が高い水ほど高い値を示しているため、水素同位体比の圧力依存性は閉鎖空隙からの混合によって定性的に説明が可能である。一方酸素同位体比については、閉鎖空隙以外に存在すると考えられる水の同位体比(1.5~1.7‰程度)と閉鎖空隙に存在すると考えられる水の同位体比の値が近く、多少混合が起きても値に大きな変化は生じないため、圧力依存性が観察されなかったと考えられる。

ただし、図 6.4.2-20 に示した混合率から計算をすると、水素同位体比の圧力依存性を定量的に説明するのは難しいことがわかった。例えば、圧力 100MPa においては閉鎖空隙の混合率は1.1%と評価されているため、閉鎖空隙以外の空隙の水素同位体比を-25‰(高圧での圧縮抽水の値)、閉鎖空隙の水素同位体比を0とすると、水素同位体比は-24.7‰程度にしかならず、試験から得られた-23.5‰とは一致しない。このため、幌延岩石の圧縮抽水において水素同位体比が変化する要因の一つとして閉鎖空隙の水の混合が挙げられるが、要因はそれだけではない可能性が高いと考えられる。

以上のように、圧縮抽水法では閉鎖空隙の影響を受けて、抽出される水の水素酸素同位体比が変化する可能性があり、これに留意して水素酸素同位体比の値を用いる必要がある。しかし、幌

延岩石における圧力と水素同位体比の関係は、閉鎖空隙だけで説明ができるものではなく、検討が必要である。

b. DVE-LS による評価結果

(a) 予備試験の結果

DVE-LS の幌延岩石への適用性を検討するため、水素酸素同位体比既知の塩化ナトリウム溶液に浸漬した幌延岩石に DVE-LS 法を適用し、評価された間隙水と溶液の水素酸素同位体比を比較した。その結果を表 6.4.2-4 に示す。

表 6.4.2-4 DVE-LS の幌延岩石への適用試験の結果

評価対象	評価方法	$\delta^2\text{H}$		$\delta^{18}\text{O}$	
		‰		‰	
間隙水	DVE-LS	-56.8 ±	0.8	-8.4 ±	0.07
溶液	溶液の分析	-56.8 ±	0.1	-8.3 ±	0.10

表から分かるように、DVE-LS で評価された間隙水の水素酸素同位体比は、溶液における水素酸素同位体比と良く一致していた。この結果によって、DVE-LS 法は幌延岩石の間隙水のうち閉鎖空隙以外の空隙の水素・酸素同位体比を分析可能であることが示された。

(b) 幌延岩石への適用

DVE-LS を幌延岩石へ適用して間隙水の水素・酸素同位体比を評価し、その値を圧縮抽水における評価値と比較した結果を図 6.4.2-21 と図 6.4.2-22 に示す。

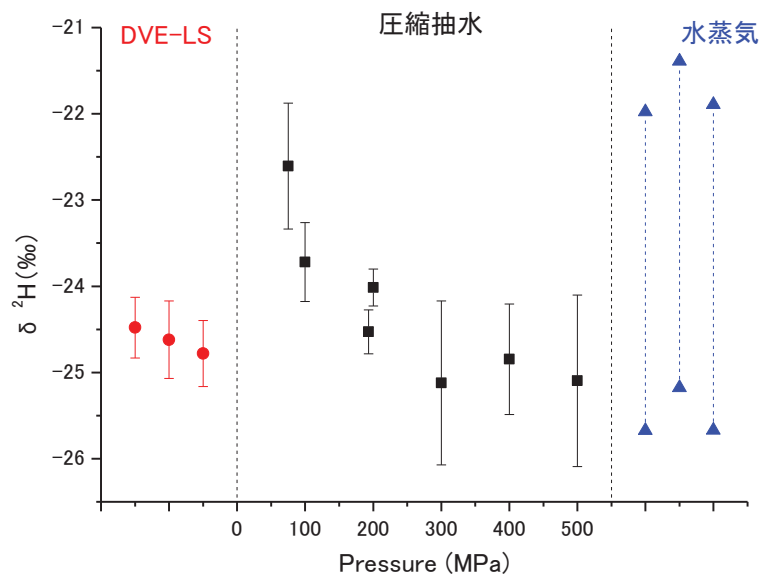


図 6.4.2-21 3種類の評価法による水素同位体比の比較

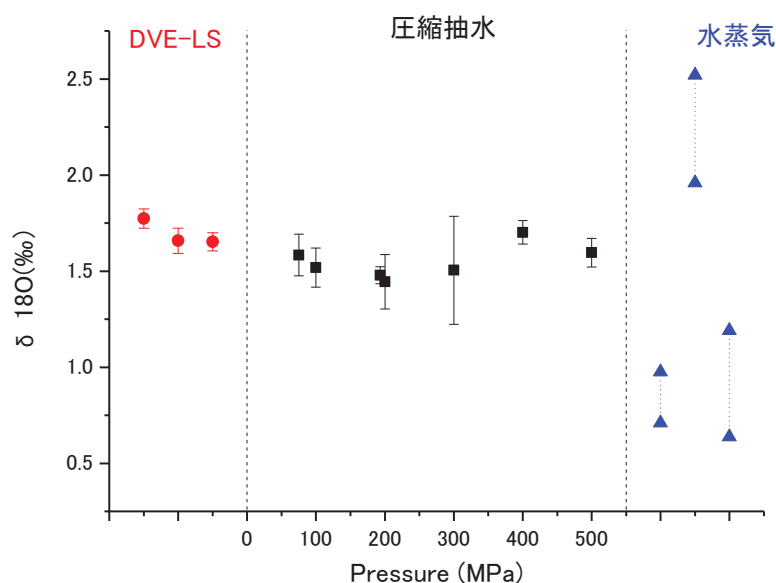


図 6.4.2-22 3種類の評価法による酸素同位体比の比較

まず水素同位体比について見ると、DVE-LS法で評価された同位体比は圧縮抽水で得られた水における水素同位体比とほぼ一致しており、しかも圧縮圧力が高い場合の値とよく一致することがわかった。先述のように幌延岩石を圧縮抽水した場合には、低圧側（300MPaより小さい）ほど閉鎖空隙の影響が顕著であり、高圧側（300MPa以上）では閉鎖空隙の影響が小さい。このため、高圧での水素同位体比は閉鎖空隙以外の空隙の水素同位体比を評価しているものと考えられる。一方、DVE-LSは岩石から発生する水蒸気を分析しているため、岩石表面や外と連結している空隙（閉鎖空隙以外の空隙）の同位体比を評価しているものと考えられる。上記のように考えると、DVE-LS法と圧縮抽水側の低圧側の水素同位体比が一致したことは、閉鎖空隙の影響評価結果と整合性がある。また、酸素同位体比の結果についても、DVE-LSと圧縮抽水法で良く一致していた。

DVE-LSと圧縮抽水との比較によって、それぞれの手法が水素酸素同位体比を測定する方法として、正しい値を示すことがわかった。それぞれの特性を考慮すると、両者を比較することで閉鎖空隙以外の情報と閉鎖空隙についての同位体比の情報を得ることが可能であると考えられる。

c. 同位体交換による評価結果

同位体交換による間隙水の水素・酸素同位体比の評価結果は、DVE-LSの結果とともに図6.4.2-21および図6.4.2-22にまとめている。図において、他の分析方法は数値と分析におけるエラーバーを表示しているのに対して、同位体交換法においては評価値の最大値と最小値の範囲を示している。これは、他の分析方法が分析方法で生じた誤差がそのまま評価値の誤差になるのに対して、同位体交換法では（式：6.4.1.3-1）を介するために分析誤差が評価値に大きく伝搬す

ることがあるためである。例として、以下ではあるデータの酸素同位体比測定における最大値と最小値を算出する。このときに使用したパラメータは表 6. 4. 2-5 に示す。

表 6. 4. 2-5 酸素同位体比を評価するために用いたパラメーター

Name of parameter*	Explanation	Value	Unit
Wi _{pb}	d ¹⁸ O of pore water before experiment	-	‰
Wi _{pa}	d ¹⁸ O of pore water after experiment	-5.1	‰
Wi _{wb}	d ¹⁸ O of test water before experiment	-9.6	‰
Wi _{wa}	d ¹⁸ O of test water before experiment	-5.1	‰
A _{pb}	Amount of pore water before experiment	2.23	g
A _{pa}	Amount of pore water after experiment	2.26	g
A _{wb}	Amount of test water before experiment	2.99	g
A _{wa}	Amount of test water before experiment	2.94	g

表に示したように、試験前後の試験水の量はそれぞれ 2.99g および 2.94g である。また試験前後の間隙水量はそれぞれ 2.23g および 2.26g であり、これは試験前後の岩石重量を秤量して評価した。試験前後の試験水の酸素同位体比はそれぞれ-9.6‰と-5.1‰である。このため、試験後の間隙水の酸素同位体比は-5.1‰であると推察される。これを式 6. 4. 1. 3-1 に代入すると、以下のように試験前の間隙水の酸素同位体比は 1.0‰であると算出できる。

$$WI_{pb} = \frac{\{(-5.1‰) \times 2.94g + (-5.1‰) \times 2.26g\} - (-9.6‰) \times 2.99g}{2.23g} = 1.0(‰) \quad (\text{式 6. 4. 1. 3-3})$$

通常酸素同位体比の分析では、±0.1‰程度の分析におけるバラツキが生じるため、6. 4. 1. 3-3 における酸素同位体比の値に-5.1±0.1 ‰、-9.6±0.1 ‰を代入すると式から評価される酸素同位体比は最大で 1.3‰、最小で 0.6‰となる。

水素酸素同位体比の分析においては、一般的な装置で水素同位体比の場合±0.5‰程度、酸素同位体比の場合で±0.1‰程度の分析誤差が生じる。これを式に入れて考えると、最終的には比較的大きなバラツキが生じてしまうことになる。このように、同位体交換法を用いた間隙水の評価では、分析の少しの誤差が大きく伝搬した結果、他の分析とは一見異なる値を示す可能性がある。同位体交換法で間隙水の評価する際には、分析のバラツキの影響が大きく伝搬することを意識して、値を使っていく必要がある。

d. 3 種類の方法の比較

上述のように 3 種類の同位体比分析方法を比較した結果、それぞれメリット・デメリットとし

て以下のようなことが考えられた。

まず、圧縮抽水法の利点として、原理が単純で適用範囲が広いことと、得られた間隙水が他の分析にも用いることができることが挙げられる。しかし、本研究で示されたように圧縮抽水中に水素酸素同位体比が変化することがあり、その主要な要因の一つとして閉鎖空隙の影響が考えられた。圧縮抽水で得られた水が閉鎖空隙の影響を受けている可能性を考慮に入れ、例えば海底で堆積した地層が隆起して地表付近に存在し天水の影響をうけている場合など、閉鎖空隙とそれ以外の空隙とで水素酸素同位体比が大きく異なる可能性がある場合には特に留意が必要である。また、一般的に放射性核種の移行挙動に関与する水は閉鎖空隙以外の空隙に存在する間隙水であると考えられるため、そのような水だけを評価対象とする場合には、DVE-LS や同位体交換法の方が、メリットが大きい可能性がある。しかし、逆の見方をすると閉鎖空隙に関する情報を得られるのは圧縮抽水法だけであり、他の方法と併用することで、閉鎖空隙とそれ以外の空隙の評価をすることが可能である。また、当然であるが圧縮抽水が可能な装置がなければ圧縮抽水を実施することができず、装置的に圧縮抽水法が採用できない場合があるかもしれない。さらに岩石にも依存するが、圧縮抽水で十分な量の水（分析項目や岩石の含水比に大きく依存するが）を得るためには、数日から1・2週間程度の時間を要する。

次にDVE-LS法であるが、閉鎖空隙を除く間隙水の水素酸素同位体比を分析する手法として、現時点でかなり有用性が高いことが示された。水蒸気を取り出せれば良いため、岩石の形状（例えば粒状・板状・塊状など）不問であり、間隙水が1.0g（今回検討した試験系において）以上確保できれば全ての岩石に対して適用が可能である。このため、含水率が極めて低いサンプルを除いて、圧縮抽水が適用できないような硬い岩石に対しても、適用することが可能である。岩石から水蒸気を抽出するための「密閉容器」は比較的安価な食品保存用の袋等で代用が可能である。岩石-水蒸気が平衡に達する時間も幌延岩石で2日程度であり（岩石に対して依存性がある可能性がある）、数日間で水素酸素同位体比の分析が可能であると考えられる。また、同じ条件で実施した繰り返し試験における再現性も比較的良好である。一方で、DVE-LS法は、水素酸素同位体比の分析装置が、水蒸気を直接装置に導入して分析できる機構を備えていないと実施することができない。また、液体のサンプルから標準試料を作製するのはやや手間であるというデメリットもある。

同位体交換法は、最終的なサンプルが水として得られるため、液体の水を分析できる装置があれば全ての分析が可能であるというのが、大きな利点である。一方で、最大のデメリットは分析における誤差が最終的な水素酸素同位体比の評価値に大きく影響を与える点である。同位体交換法を間隙水評価法として利用する場合には、この点に留意して評価値を取り扱う必要がある。

以上で述べた各手法の特性をにまとめた。

表 6.4.2-6 3種類の評価方法の比較

	圧縮抽水	DVE-LS	Isotopic exchange
適用性	○硬岩を除く岩石 ×硬達和	○ほぼ全ての岩石	○ ほぼ全ての岩石 ⁽¹⁾
必要とされる設備	圧縮抽水装置 液体の同位体比分析装置	水蒸気同位体比を分析可能な装置	液体の同位体比分析装置
必要な時間	1週間 ⁽²⁾	2～3日	2～3週間
その他の利点	得られた水がその他の分析にも使える	必要な試料量少ない	サンプルが溶液として得られる
留意事項	閉鎖空隙の影響		バラツキ大きい

(4) まとめ

幌延岩石に対して、圧縮抽水法およびDVE-LS法、同位体交換法を適用し、それぞれで評価された同位体比を比較した。その結果、圧縮抽水で抽出される水における酸素同位体比には圧力依存性が見られなかったが、水素同位体比には圧力依存性が見られた。水素同位体比が極端に高い溶液に浸漬した後の圧縮抽水結果から推定された閉鎖空隙の水の混合率と、上述の水素同位体比の圧力依存性はよく似た挙動を示したことから、閉鎖空隙からの間隙水の混合が、圧縮抽水における水素同位体比の変化の主要な要因の一つであると考えられた。圧縮抽水で得られた水の水素酸素同位体比のうち閉鎖空隙の影響が小さいと考えられる圧力での値は、他の手法（DVE-LS法や同位体交換法）で評価された水素酸素同位体比と近い値を示したため、上述の閉鎖空隙の影響を考慮すれば圧縮抽水が間隙水評価法として適していることが分かった。

圧縮抽水に加えて、DVE-LS法や同位体交換法を幌延岩石へ適用し、それぞれの方法で評価された値を比較することで、各手法のメリット・デメリットをまとめることができた。適用可能な分析方法や分析の目的、必要とされる精度、得られるサンプル量、他の情報の必要性等によって適切な方法を選定していくことが重要である。

6.4.3 遅い流れの指標となる物質

6.4.3.1 ^{14}C を用いた古い水と新しい水の混合の評価

(1) はじめに

放射性の炭素 ^{14}C は半減期が 5730 年であるため (Mook and van Der Plicht, 1999)、3 万年以下程度の地下水滞留時間評価に頻繁に使われる同位体である。処分場を建設する際などには地下空間に対して周辺の地下水が流入することが考えられるが、その際地下での滞留時間がほとんどない地表水の混合、トリチウム (^3H) やフロン化合物 (CFCs・SF₆) などが有用な指標となる可能性が高い。一方で、処分場近辺の地下水年代が 3 万年を超えており、有意な ^{14}C が検出されないようであれば、処分坑道掘削後に ^{14}C が検出されるようになった場合、処分場周辺に地下水年代数万年以下の若い地下水が流入していると推察することができる。このように、 ^{14}C を用いれば地表水よりも地下での経過時間が長かつ 3 万年より若い地下水が、地下水年代 3 万年を超えるような古い地下水に流入した場合についての情報を得ることができると考えられる。このように、放射性廃棄物処分場の候補地点では、古い地下水に対して若い地下水が流入する指標として、 ^{14}C が有効であると考えられる

^{14}C には地下水に溶存する無機炭素由来の ^{14}C と有機物に含まれる ^{14}C が存在する。無機の ^{14}C は地下水中で地化学反応等によって濃度に変化し、若い地下水混合以外の要因で変動する可能性がある。一方有機物に含まれる ^{14}C は、地下水に溶存する有機炭素 (DOC: Dissolved Organic Carbon) が岩石と相互作用を起こしにくく地下水流動とともに移動する可能性が高いため (Wassenaar, 1999; 1991; Nakata et al., 2013)、無機 ^{14}C より地下水流動状況を反映しやすい可能性がある。実際、著者らのグループが過去の研究において、瑞浪地域の地下水における有機 ^{14}C 年代と He 年代を比較した。比較の結果両者が良く一致することから、瑞浪地域においては地下水と有機物が同じ速度で移動している可能性が高いと考えられた (図 6.4.3-1: 富岡ら, 2007)。上記の性質から、ある地点の元々の地下水年代が 3 年以上であれば、有機 ^{14}C の有無によって若い地下水の流入の有無を判断することが可能であると考えられる。

そこで本研究では、①古い地下水に新しい地下水が流入している可能性があるサイトにおける溶存有機物の取得試験、②新しい地下水が流入している可能性が低いサイトにおける溶存有機物の取得試験を実施した。①と②の値の比較あるいは他の年代指標との比較をすることで、 DO^{14}C が若い地下水の流入指標となる可能性について検討した。また、取得した地下水をある特性によって分離し、分離したそれぞれの成分について ^{14}C を分析した。これは、古い地下水と若い地下水に含まれる有機物の性質が異なる場合、これらを分離しそれぞれの年代を評価するためである。若い有機物と古い有機物を分離してそれぞれの年代を分析する手法が確立できれば、地下水が混合している可能性がある場において地下水の混合と年代を議論するのに有用なツールとなる可能

性がある。

上記の地下水から取得した有機物、あるいは性質によって分離した有機物は溶液に溶けた状態で存在するが、ここから ^{14}C を測定するには有機物を精製し最終的には粉末の状態にする必要がある。しかし、精製や凍結乾燥のプロセスで多くの有機物が失われる可能性がある。このため、本研究では、液体に溶存した状態で存在する有機物を二酸化炭素として回収する手法として、有機物に紫外線を照射して分解・二酸化炭素として回収する方法についても検討した。

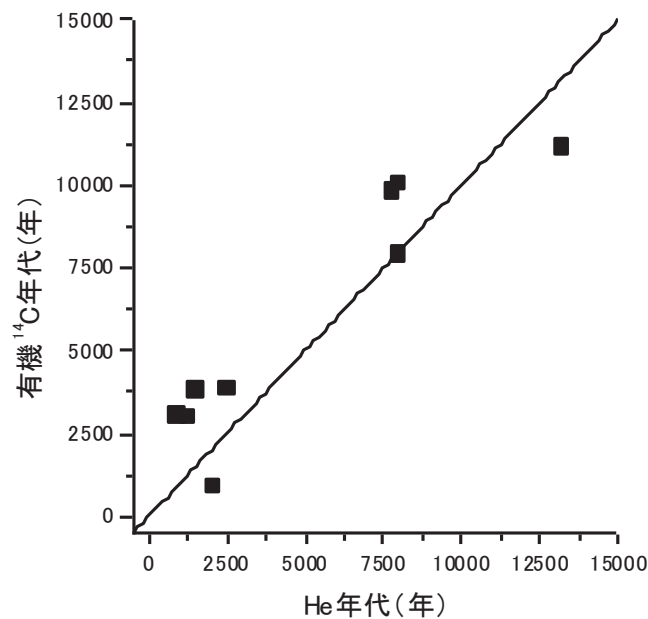


図 6.4.3-1 瑞浪地域の地下水における He 年代と有機 ^{14}C 年代の関係 (富岡ら 2007 に加筆)

(2) 古い地下水に若い地下水が混入している可能性があるサイトでの有機物採取と分析

a. 有機物の採取

先述(6.3.1および6.3.2)のように、瑞浪立坑においては掘削によって比較的若い地表の水が地下へと流れ込んでいる可能性が高いと考えられる。これは、地下数百メートルの深度からも、トリチウムや $\text{CFC} \cdot \text{SF}_6$ など、滞留時間が数十年以内の地下水年代の指標となるような物質が検出されていることから推定される。このため、立坑の地下水は採取地点によっては、新しい有機物と古い有機物が混合している箇所が存在すると考えられる。瑞浪地域立坑が存在する地点は地域全体から見ると流出域に存在し、地下水年代は 2 万年程度であると推察される。これに対して、深度 300 m の予備ステージにおいては、採取した地下水からトリチウム等が検出されることから、古い(2 万年程度)地下水に対して若い地下水が流れ込んでいる地点であると考えられる。このため、300 m の予備ステージにおいて地下水から有機物を採取し、有機物中の ^{14}C を分析する試験を

実施した。

地下水に溶存する有機物はNF膜（ナノフィルター膜）を使って濃縮した。有機物を濃縮するための膜としては一般的に逆浸透膜などが利用される。目の細かい膜は分子量の小さな有機物も採取できるというメリットをもつ一方で、膜が目詰まりを起こす「ファウリング」が起きやすいというデメリットも存在する。また、イオンも膜内に濃縮されていくため、溶解度を超えた塩が析出してファウリングを起こす可能性もあるうえ、イオン濃度が高くなることで同じ処理量を保つためにはより高い圧力が必要とされるようになる。このような事態を防ぐため、有機物濃縮に用いる膜は種々のイオンは通過し、目的とする有機物は透過しないようなものを選定することが望ましい。本試験では、以前実施した予備的な検討を基にして、東レ社製「UTC60」膜を有機物を濃縮する膜として選定した。予備的な検討では、天然有機物の模擬物質として蛍光染料であるウラニン（分子量 376.27）を用い、種々のイオンを共存させて膜の透過試験を実施した。その結果、UTC60 はウラニンの阻止率が高い一方で、塩化物イオン・ナトリウムイオンの透過率は高い値を示した。ただし、二価イオンの透過率は低い数字となった。このため、UTC60 は分子量 400 以上程度の有機物を透過させない一方で、地下水中の主要なイオンである塩化物イオンやナトリウムイオンを透過させるため、膜が目詰まりがおきにくく、高い濃縮率を期待することができる。一方で、2 価イオンはこの膜を通過できないため、濃縮が進むにつれて 2 価イオン塩（例えば CaSO_4 など）が膜表面に析出し、ファウリングを起こす可能性がある。上記のような状態になったときがこの膜の使用限界であると考えられる。

有機物濃縮に用いた試験系の概念図を図 6.4.3-2 に示した。地下水は $10 \rightarrow 1 \rightarrow 0.45 \mu\text{m}$ のフィルタを通過させた後、多連式ダイヤフラムポンプを用いて UTC60 の膜モジュールへと送り込んだ。膜モジュールは「クロスフロー式」と呼ばれるろ過形式で地下水をろ過する仕組みであり（図 6.4.3-3）、処理している水が流れる方向とろ過方向が直交するため、膜が目詰まりを起こしにくい構造となっている。この装置を用いて 5042 L の地下水を 30 L に濃縮し、濃縮した地下水を実験室に持ち帰った。イオン濃度や TOC 等を分析した結果を表 6.4.3-1 にまとめた。液体としての濃縮率が 167 倍であり、TOC の倍率が 104 倍であることから、回収率は 62.4%となった。

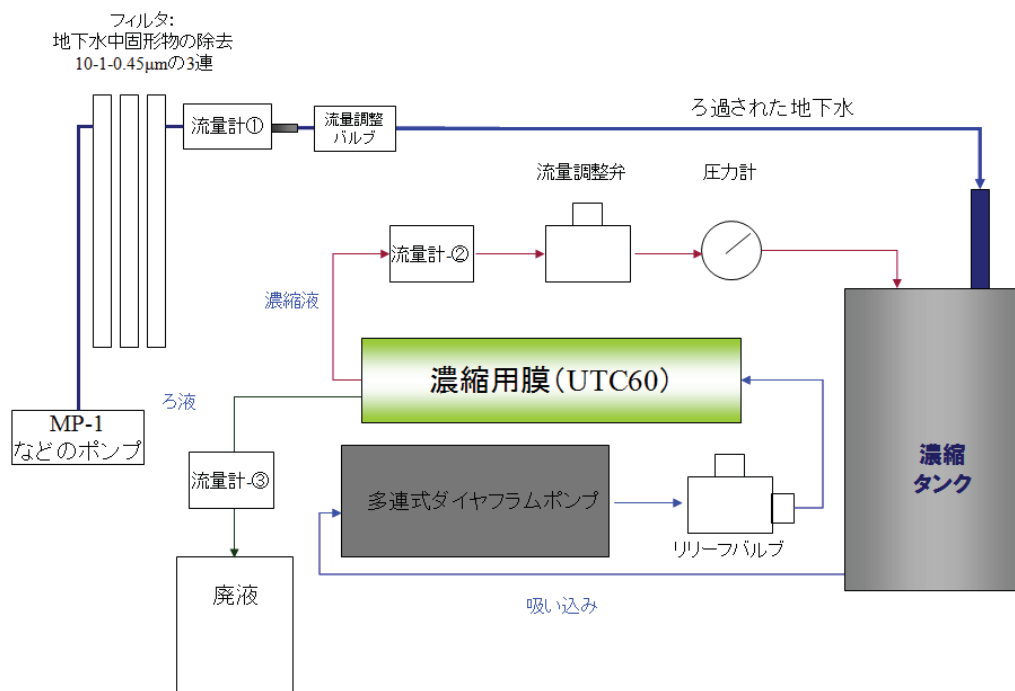


図 6.4.3-2 有機物濃縮用試験系の概念図

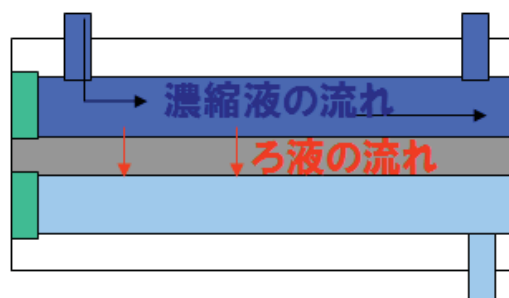
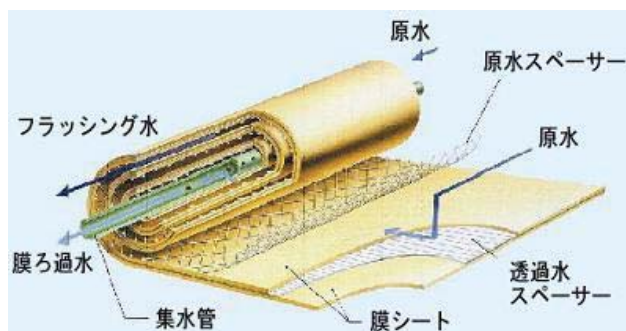


図 6.4.3-3 クロスフロー方式の概念図

表 6.4.3-1 地下水と有機物濃縮後の水質の比較

イオン種	濃度(mg/L)		濃度比 (後/前)
	濃縮後	濃縮前	
Na	1054	70	15.1
K	5.41	0.2	27.1
Mg	9.35	0.07	133.6
Ca	721	15	48.1
F	10.9	9.9	1.1
Cl	3.56	57	0.1
SO ₄	3928	11.8	332.9
TOC	52	0.5	104.0

b. 有機物の分離手法

本研究では古い有機物と新しい有機物を分離するための手法として、DAX 樹脂への収着挙動の差異を用いた手法（米林，1989；1993；Watanabe and Kuwatsuka, 1991）を採用した。地下水中で有機物が経時的にどのように変化するかは、明らかになっていないが、脱酸素雰囲気下で疎水的な官能基が増える可能性が考えられる他、水中に長時間存在するため親水的な官能基が増加する可能性も否定できない。疎水的な官能基が増えた場合には、DAX 樹脂へより吸着しやすくなり、親水的な官能基が増えた場合には DAX 樹脂へ吸着しにくくなると予想される。上記のような現象が起きた場合、DAX 樹脂による吸着挙動によって古い有機物が多いフラクションと新しい有機物が多いフラクションに分離できる可能性がある。

e. 予備的な検討

まず予備的な検討として、上述の瑞浪 300m 予備ステージの地下水から有機物を濃縮した溶液を DAX への吸着・脱離特性によって分離する試験を実施した。試験手順を以下に示す。

- ① カラムの準備：内径 1cm のテフロンカラムに高さが 10cm となるように、DAX 樹脂を充填した。このカラムの上部から純水 10mL×2 回、0.1mol/L 水酸化ナトリウム溶液 10mL×2 回、純水 10mL×2 回をそれぞれ流した後、pH=2 の塩酸溶液をカラムから流れる溶液の pH が 2 になるまで流し、カラムをコンディショニングした。
- ② サンプルの滴下：瑞浪地下水から有機物を濃縮した液 50mL に pH ガラス電極を入れ、塩酸を滴下して pH を 2.0 とした。pH 調整後の溶液を 10mL はかり取り、カラムに流した後さらに 10mL の溶液をカラムに流した。カラム内樹脂空隙に残存する溶液を流すため、10mL の塩酸溶液 (pH=2) を流し、合計 30mL の溶液を「DAX に吸着しなかった成分」として回収した（サンプル A）。

- ③ 純水による回収：上記のカラムに純水 5mL を加え、カラムに流した。この操作を 4 回繰り返し、合計 20mL の溶液を回収した（サンプル B）。
- ④ 1×10^{-5} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液（pH=による回収： 1×10^{-5} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液により③の純水と同様の回収を実施した（サンプル C）
- ⑤ 1×10^{-3} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液による回収： 1×10^{-3} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液により③の純水と同様の回収を実施した（サンプル D）
- ⑥ 1×10^{-1} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液による回収： 1×10^{-1} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液により③の純水と同様の回収を実施した（サンプル E）
- ⑦ 分析：各サンプルの TOC 濃度を分析した。アルカリ溶液の TOC 濃度分析では水酸化ナトリウム溶液に混入する IC が TOC の分析の妨害要素とならないように、溶液を塩酸溶液で希釈し、pH を中性付近に戻してから分析した。

上記の試験結果を表 6.4.3-2 に示す。表に示した回収率とは元々のサンプル溶液に含まれる有機物量を 100%としたときに、各溶液に含まれる有機物量を%で表したものである。A~E の溶液それぞれに有意な量の有機物が含まれており、DAX への吸着・脱離挙動を利用することで親水性・疎水性の異なるフラクションに分離することが可能であることが分かった。

表 6.4.3-2 DAX 樹脂への吸着・脱離挙動を利用した有機物の分離試験結果

サンプル名	サンプル概要	TOC平均値 (mg/L)	液量 (mL)	回収率 (%)
—	濃縮液原液	56.5	20	—
A	DAXに吸着しない成分	7.2	30	19.1
B	純水で回収	7.2	20	12.7
C	pH=9で回収	3.1	20	5.5
D	pH=11で回収	9.0	20	15.9
E	pH=13で回収	19.0	20	33.6
		回収率合計		86.7

f. ^{14}C 分析のための濃縮および分離試験

通常 ^{14}C を分析するためには 5mg 程度の有機物が必要である。表 6.4.3-2 に示した各フラクションに含まれる有機物量は 0.1mg 程度であるため、この操作を 50 回以上繰り返す必要があるが、これはあまり現実的ではない。このため、有機物濃度を上げたうえで、同様の試験を実施することが望ましいと考えられる。ここでは、凍結乾燥で有機物を濃縮したあと、DAX への吸着挙動を確認する試験を実施した。

この試験ではまず、瑞浪の地下水から有機物を濃縮した溶液 80mL を凍結乾燥させた。凍結乾燥

後、元々の溶液に含まれる無機物の塩（白色）に有機物（茶色）が混ざった固体が得られた。目視で固体の色を確認しながら少しずつ純水を加え、茶色が無くなった時点で純水の添加を止めた。3000回転×10分間の遠心分離で固体と液体を分離し、有機物が溶けた液相だけを回収した。この操作を合計6回繰り返して合計約480mLの溶液を処理し、16.9mLの有機物がさらに濃縮された溶液を得た。液量・TOC濃度・溶液に含まれる有機物量を表6.4.3-3に示した。表から分かるようにこの濃縮での有機物回収率は80%であり、TOC基準で有機物濃度を23倍程度にすることができた。

表 6.4.3-3 凍結乾燥による有機物の濃縮試験の結果

試験の状態	溶液量(mL)	TOC濃度(mg/L)	有機物量(mg)
凍結乾燥前	480.9	46.5	22361
凍結乾燥・上澄み取得	16.9	1054	17812

さらに、凍結乾燥で得られた溶液に対して、DAX樹脂への吸着・脱離挙動による分離を試みた。上述のDAXへの吸着・脱離試験では 1×10^{-5} (mol/L) NaOH溶液で脱離するフラクションが少なかったことから、今回の試験ではDAX樹脂へ吸着させた後純水での脱離は実施せず、最初に 1×10^{-2} (mol/L) NaOH溶液で吸着した有機物を脱離させることにした。このため、フラクションとしては、①DAXに吸着しない成分、② 1×10^{-5} (mol/L) NaOH (pH=9) で脱離する成分、③ 1×10^{-3} (mol/L) NaOH (pH=11) で脱離する成分、④ 1×10^{-1} (mol/L) NaOH (pH=13) で脱離する成分、の合計4つに分類した。各フラクションの有機物回収率をに示した。表では、凍結乾燥前後のフラクションを比較するため、上記①～④のフラクションを100%として規格化した場合の値を示した。

表 6.4.3-4 凍結乾燥濃縮前後の有機物に対するDAX樹脂を利用した分離試験結果の比較

フラクション名	フラクション詳細	回収率 (%)	
		凍結乾燥前	凍結乾燥・濃縮後
①	DAXに吸着しない成分	22.0	20.8
②	1×10^{-5} M NaOHで回収される成分	20.9	17.0
③	1×10^{-3} M NaOHで回収される成分	18.3	13.3
④	1×10^{-1} M NaOHで回収される成分	38.8	48.9

表から分かるように、多少の差異はあるが回収率の傾向は概ね凍結乾燥前後で一致していることがわかる。この結果から、凍結乾燥による濃縮によって有機物の疎水性・親水性が大きくは変化していないと考えられる。このため、本研究では凍結乾燥による濃縮を実施した後で、DAX樹脂

脂への吸着・脱離特性を用いてフラクションに分ける操作を繰り返し、各フラクションの有機物における $D0^{14}C$ を分析することにした。

g. ^{14}C の分析結果

各フラクションにおける ^{14}C の分析結果を表 6.4.3-5 に示した。まず、DAX で分離する前の時点で回収した有機物における $D0^{14}C$ 年代は 1410 年程度であり、この周辺の元々の地下水年代である 2 万年程度よりも明らかに若い値を示した。これは、この地点で採取した地下水における有機物については、掘削により流入した地下水に含まれる有機物が支配的であることを示している。このことから、 $D0^{14}C$ 年代と周辺の水理地質情報やその他の指標から得られた地下水年代を比較することにより、若い地下水が流入しているかを判断することができると考えられた。

一方、DAX への吸着・脱離挙動から合計 4 つのフラクションに分けた有機物の各 $D0^{14}C$ 年代は、DAX に吸着しない成分：910 年、 $1 \times 10^{-5}(\text{mol/L})$ NaOH で回収される成分：1050 年、 $1 \times 10^{-3}(\text{mol/L})$ NaOH で回収される成分：1120 年、 $1 \times 10^{-1}(\text{mol/L})$ NaOH で回収される成分：1570 年程度であり、各成分によって大きな差は認められなかった。これは、地下水中の有機物についてはほとんどが若い地下水と一緒に移動してきた有機物であるためか、地下水中の有機物が地下で長い時間が経過してもあまり DAX への吸着特性が変化しないためであると考えられる。ただし、各フラクションを比較すると、DAX に吸着しにくい成分ほど若い年代を示していることがわかる。このため、酸素が乏しい状態で有機物が地下水に長時間滞在した場合、疎水性が高くなる可能性があることが分かった。この性質を利用できれば、より長期間地下水に溶存した有機物と地表付近の若い有機物を分離できる可能性もあると考えられる。ただし、この結果の拡張性については慎重に検討する必要がある、上記が一般的な現象でない可能性も考慮する必要がある。

表 6.4.3-5 各フラクションの $D0^{14}C$ 年代

フラクション		^{14}C 測定値			$\delta^{13}C$
名前	詳細	year B.P.	$d^{14}C$ (‰)	pMc (%)	‰
分離前	濃縮液	1,410 ± 30	-161.0 ± 3.1	83.9% ± 0.3%	-24.8
①	DAXに吸着しない	910 ± 30	-106.0 ± 3.3	89.4% ± 0.3%	-25.8
②	$1 \times 10^{-5}(\text{mol/L})$ NaOHで回収	1,050 ± 30	-119.2 ± 3.3	88.1% ± 0.3%	-27.0
③	$1 \times 10^{-3}(\text{mol/L})$ NaOHで回収	1,120 ± 30	-125.8 ± 3.3	87.4% ± 0.3%	-27.4
④	$1 \times 10^{-1}(\text{mol/L})$ NaOHで回収	1,570 ± 30	-176.5 ± 3.1	82.3% ± 0.3%	-25.9

h. まとめ

瑞浪地域 300m 予備ステージで得られる地下水から有機物を濃縮し、DAX 樹脂への吸着・脱離挙動から 4 つのフラクションに分けて、それぞれの $D0^{14}C$ 年代を測定した。300m の予備ステージで

回収された有機物全体の $DO^{14}C$ 年代は 1400 年程度であり、He で評価される地下水年代と比べて顕著に若い値を示した。この結果から、300m の予備ステージでは掘削による影響で若い地下水が流れ込んでおり、その地下水とともに有機物が 300m 地点まで到達していることが示された。このことから、若い地下水の流入が疑われる地点では、有機物における $DO^{14}C$ 年代とその他の年代を比較することにより、若い地下水流入の可能性を確かめることが可能であると考えられる。

また、DAX 樹脂で分離された各成分については、DAX への吸着が弱いほど、そのフラクションにおける $DO^{14}C$ 年代は若いという傾向が確認された。これは、地下水に溶存する有機物が地下水年代の経過とともに疎水的に変化する可能性を示唆している。今回のケースは各フラクションにおける差異はわずかであったが、より古い地下水ではこの傾向がより顕著になり、フラクションによって古い有機物が占める割合がかなり大きなフラクションや、ほとんど若い地下水由来のフラクションを得ることができるかもしれない。今後適用例を増やすなどして、知見を増やし、この可能性について検討していく予定である。

(3) 古い地下水における有機物の採取

(2)では、トリチウム等の指標から古い地下水と若い地下水が混入している可能性が高い地点で、有機物の採取、DAX 樹脂による分離、 $14C$ の分析を実施した。ここでは、トリチウム等の指標から若い地下水の流入がほとんどなく、古い地下水のみが存在する可能性が高いと考えられる瑞浪立坑の 500m 地点から有機物を採取し、(2)と同様の試験を実施した。

300m で得られた結果と比較することにより、500m における（トリチウムでは検出できないような）比較的若い地下水の流入について可能性を検討したり、若い地下水と古い地下水とで有機物の特性が異なるかを確認することが可能になると考えられる。

a. 有機物の採取

先述の 300m と同様のやり方で地下水から有機物を濃縮した。有機物を採取したのは、瑞浪立坑 500m 地点の 15MI53 号孔区間 5 である。濃縮の経過と処理量等の情報を表 6.4.3-6 にまとめた。約 3 日間で 7400L の地下水を処理したが、0.15MPa の膜圧をかけた場合、処理される速度は 1.87 ~ 1.91L でほぼ一定であった。このため、運転期間中膜が目詰まりして処理速度が低下する現象（ファウリング）はほぼ起きなかったと考えて良い。溶液の EC を見ると、膜でろ過された溶液の EC は 1.64 程度で、濃縮液の EC も初期と運転最終日に上昇が観察されたが、それ以外の時間は 2.0 程度で一定となった。これは、この地下水では溶液の EC に支配的なイオンが 1 価（ナトリウムや塩化物）のイオンであり、これらが選定した膜を通過したためであると考えられる。500m 地点は 300m 地点と比較してもイオン濃度が高い地下水であったが、選定した膜を使ってファウリン

グを起こすことなく、有機物の濃縮が可能であることが分かった。300m と 500m 地点の水質について、表 6.4.3-7 に比較を示した。

表 6.4.3-6 500m 地点での有機物濃縮の経過

経過時間 (h)	イベント	処理速度 ¹⁾	ポンプ圧 ²⁾	ポンプ流速 ³⁾	濃縮水のEC ⁴⁾	排水のEC ⁵⁾	総処理量 ⁶⁾
		(L/min)	(MPa)	(L/min)	(ms/cm)	(ms/cm)	(L)
試験開始	試運転	1.01	-	-	-	-	-
1.1	運転状態確認	1.91	0.15	16.1	1.7	NM	98
18.1	運転状態確認	1.91	0.15	16.1	2.0	NM	2075
26.1	運転状態確認	1.91	0.16	16.1	2.0	1.64	2922
42.3	運転状態確認	1.91	0.16	16.1	2.0	1.64	4772
47.4	運転状態確認	1.87	0.16	16.1	2.0	1.64	5341
49.6	運転状態確認	1.87	0.16	16.1	2.0	1.64	5516
66.2	処理ストップ	-	-	-	2.4	1.87	7379

- 1) 処理速度：膜を通過してろ過される液の流量、ろ過した水は排水される
- 2) ポンプ圧：ポンプとバルブによって系にかける圧力、膜にも同じ圧力がかかる
- 3) ポンプ流速：ポンプで試験系に地下水を流すときの流速、この流速を高く保つことで膜のファウリングを防ぐことができる
- 4) 濃縮液の EC：有機物を濃縮している溶液の EC
- 5) 排水の EC：膜を通過して排水される溶液の EC
- 6) 総処理量：膜を通過してろ過された液の総量

表 6.4.3-7 300m と 500m 地点の水質の比較

地下水	イオン濃度 (mg/L)							TOC濃度 (mg/L)	
	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	TC-IC	NPOC
200m地点	70.0	0.36	0.06	14.9	10.2	55.9	11.4	1.1	0.3
500m地点	215.9	1.17	0.17	145.7	5.0	529.4	2.6	0.37	0.05

*有機物濃度分析は総炭素量 (TC) から無機炭素量 (IC) を引く方法と、酸を加えた溶液をバブリングして残った有機物を分析する方法 (NPOC) の 2 つの方法で実施した。

濃縮後のイオン濃度・TOC 濃度の値を表 6.4.3-8 にまとめた。濃縮後の溶液においても、Na や Cl 濃度はほとんどもとの地下水のものと変化がなく、膜が現場試験でも NaCl を透過させてこれらのイオンによるファウリングを防ぐことがわかった。TOC については、もともと地下水に含まれる有機物の量が少なく、元々の地下水濃度が正確に分析できているか疑問が残る。TOC 濃度は 0.4mg/L 以下程度の極めて低い濃度であると考えられる。TOC 濃度を基準とした場合、TC-IC で分析した値から算出した回収効率は 18%程度である。ここでいう回収効率とは、処理した地下

水に含まれる総有機物量に対する、濃縮液に回収された有機物量の割合である。一方、NPOC を基準とした回収効率は 100%に近い数字を示した。これは先述のように TOC 分析の誤差に起因するものか、実際に 500m 地下水には揮発性の有機物が多いことを示すのか、現時点では不明である。

現場では、7400L 程度の地下水を 7.29L にまで濃縮した。濃縮液に含まれる有機炭素量は 500mg 程度であり、¹⁴C の分析を実施するのに十分な量の有機物を取得することができた。

表 6.4.3-8 地下水、有機物濃縮溶液、凍結乾燥濃縮液のイオン濃度・TOC 濃度の比較

サンプルの種類	イオン濃度(mg/L)							TOC濃度(mg/L)	
	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	TC-IC	NPOC
500m地点	215.9	1.17	0.17	145.7	5.0	529.4	2.6	0.37	0.05
有機物濃縮後	404.3	10.02	2.8	1005	16.0	483	2451	68.65	59.02
凍結乾燥濃縮後	7493	39.6	51.2	1204	17.6	9914	4292	1169	1050

b. 有機物の精製と DAX 樹脂での分離試験

先述の 300m と同様に、500m の地下水から得られた有機物についても再度濃縮した後、DAX への吸着・脱離特性でいくつかのフラクションの分離することを試みた。

凍結乾燥後、沈殿の茶色が消えるまで純水を滴下して有機物を溶解させて回収した。試験ではまず、現場で有機物を濃縮した溶液（濃縮液）80mL を凍結乾燥させた。凍結乾燥後の容器底面には有機物由来と考えられる茶色と、濃縮液に存在する無機塩に由来すると考えられる白色が混合した固体が残った。この沈殿に 0.5mL ずつ純水を滴下して振り混ぜ、沈殿の色を目視で確認したところ、3.5mL の純水を加えたところで沈殿が白色になった。このあと、3000 回転×10 分遠心分離器にかけて固液を分離したあと、液相を慎重に取り出してイオン濃度と TOC 濃度を分析した。上記の濃縮後のイオン濃度および TOC 濃度を表 6.4.3-8 に示した。表に示したように、TOC 濃度 69mg/L だった濃縮液が凍結乾燥による再濃縮によって 1169mg/L まで上昇した。これによって効率よく DAX によるフラクションの分離、¹⁴C 分析用サンプルの準備ができるようになった。

次に、DAX 樹脂への吸着・脱離挙動について調べた。試験手順を以下に示す。

- ① カラムの準備：内径 1cm のテフロンカラムに高さが 10cm となるように、DAX 樹脂を充填した。このカラムの上部から純水 10mL×2 回、0.1mol/L 水酸化ナトリウム溶 10mL×2 回、純水 10mL×2 回をそれぞれ流した後、pH=2 の塩酸溶液をカラムから流れる溶液の pH が 2 になるまで流し、カラムをコンディショニングした。
- ② サンプルの滴下：濃縮液 50mL に pH ガラス電極を入れ、塩酸を滴下して pH を 2.0 とした。pH 調整後の溶液を 10mL はかり取り、カラムに流した後さらに 10mL の溶液をカラムに流した。カラム内樹脂空隙に残存する溶液を流すため、10mL の塩酸溶液 (pH=2) を流し、合計

30mL の溶液を「DAX に吸着しなかった成分」として回収した（フラクション①）。

- ③ 1×10^{-5} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液 (pH=による回収： 1×10^{-5} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液により③の純水と同様の回収を実施した（フラクション②）
- ④ 1×10^{-3} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液による回収： 1×10^{-3} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液により③の純水と同様の回収を実施した（フラクション③）
- ⑤ 1×10^{-1} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液による回収： 1×10^{-1} (mol/L) 水酸化ナトリウム溶液により③の純水と同様の回収を実施した（フラクション④）
- ⑥ 分析：各サンプルの TOC 濃度を分析した。アルカリ溶液の TOC 濃度分析では水酸化ナトリウム溶液に混入する IC が TOC の分析の妨害要素とならないように、溶液を塩酸溶液で希釈し、pH を中性付近に戻してから分析した。

上記の分析で得られた、フラクション①～④における TOC の回収率を表 6.4.3-9 に示した。表で示した回収率とは、フラクション①～④で回収した有機物量の総計を 100%としたときに、各フラクションに含まれる有機物量を%で示したものである。

表 6.4.3-9 各フラクションにおける有機炭素の回収率

フラクション		回収率(%)	
名前	詳細	500m	200m
①	DAXに吸着しない	18.7	20.8
②	1×10^{-5} (mol/L) NaOHで回収	13.2	17.0
③	1×10^{-3} (mol/L) NaOHで回収	13.8	13.3
④	1×10^{-1} (mol/L) NaOHで回収	54.4	48.9

表からわかるように、300m の地下水と 500m の地下水とでは各フラクションの回収率において大きな差が見られなかった。この結果は、それぞれの地下水に含まれる有機物において、DAX 樹脂への吸着・脱離挙動に大きな差異がないことを示すものである。これは前述の 300m の地下水から採取した有機物において、DAX 樹脂を使った分離方法では若い有機物と古い有機物を分離することができなかったことと整合性がある。

c. まとめ

若い地下水がほとんど混入していないと考えられる 500m の地下水において、有機物を濃縮した。約 7400L の地下水から 500mg 程度の有機物を濃縮することができた。500m 地下水から得られた有機物の DAX 樹脂への吸着・脱離特性を調べたところ、300m の地下水から採取した有機物における挙動と似た挙動を示した。この結果からも、今回適用した系においては DAX 樹脂を使った若い有機物と古い有機物のクリアーな分離は困難である可能性が示された。古い有機物と若い有機物を分離してそれぞれの $\text{D}0^{14}\text{C}$ を分析する方法については、さらに検討が必要である。

6.4.3.2 複数の希ガスを用いた涵養温度の評価方法

希ガスには、ヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)、クリプトン(Kr)、キセノン(Xe)などがあり、これらの内、質量数が重い希ガスは、図 6.4.3-4 に示すように、温度によって溶解度が変化することが知られている。このため、地下水中の希ガスの濃度から、涵養時の温度を推定する研究が行われている(Stute and Schlosser, 1999)。本研究でも、瑞浪では流出域において氷期の地下水の存在が指摘されている。これらを確認するために、希ガスの濃度から涵養温度を推定することとした。

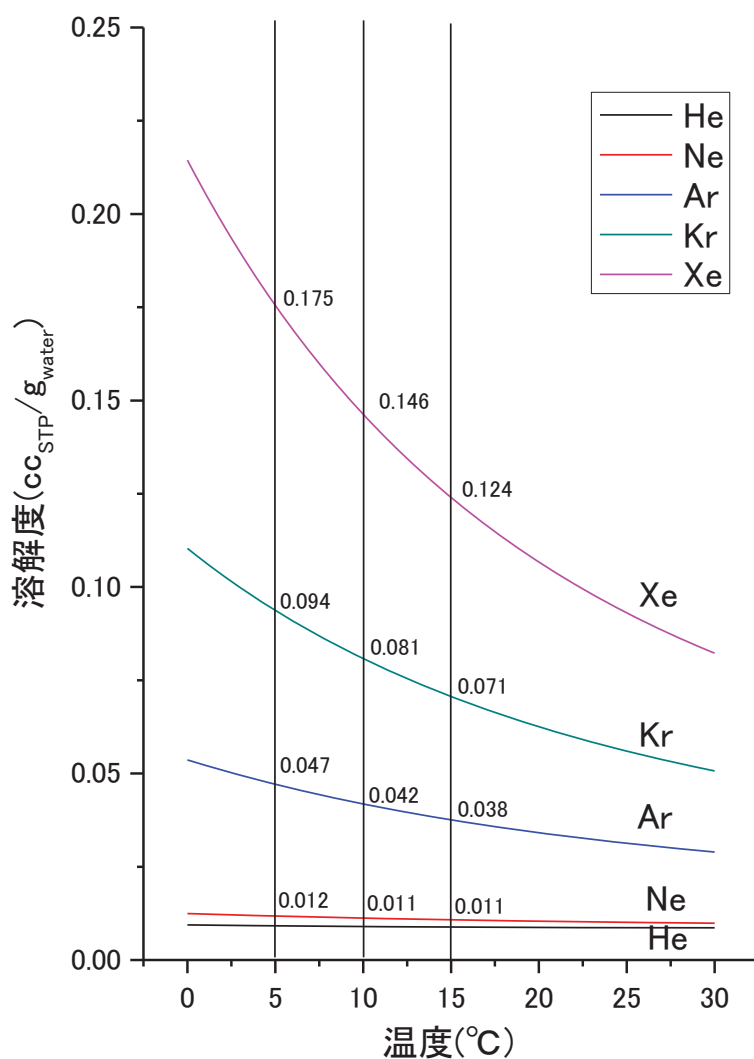


図 6.4.3-4 温度と希ガスの溶解度の関係

瑞浪地域で採取したサンプルについて、希ガスの濃度を計測した結果を表 6.4.3-10 に示す。

表 6.4.3-10 希ガス分析結果

試料名	深度 (m)	Ne _{total}	Ar _{total}	Kr _{total}	Xe _{total}	⁴ He	³ He/ ⁴ He	希ガス温度	大気混入率
		cc STP/gw	cc STP/gw	cc STP/gw	cc STP/gw	cc STP/gw	—	°C	
DH-9-1	151.00~246.40	6.56E-09	2.77E-05	1.54E-08	3.76E-09	1.54E-09	1.62E-06	N.D.	N.D.
DH-9-2	392.90~501.70	5.78E-08	1.23E-04	3.14E-08	5.28E-09	3.00E-08	8.66E-07	N.D.	N.D.
DH-9-3	573.20~681.50	2.83E-07	3.82E-04	8.73E-08	1.16E-08	4.17E-07	2.62E-07	16.2	0.5%
DH-9-5	895.40~1030.00	3.04E-07	4.52E-04	9.93E-08	1.34E-08	1.00E-06	1.01E-07	11.8	0.6%
DH-13-2	253.20~323.18	2.92E-07	4.40E-04	9.14E-08	1.31E-08	2.72E-07	4.32E-07	13.8	0.6%
DH-13-3	476.00~546.48	2.10E-07	2.45E-04	4.66E-08	6.02E-09	2.31E-07	3.83E-07	N.D.	N.D.
DH-13-4	713.38~783.88	3.42E-07	4.89E-04	1.07E-07	1.44E-08	4.56E-07	1.95E-07	9.9	0.8%
DH-13-5	992.30~1015.00	2.21E-07	2.69E-04	5.06E-08	6.41E-09	3.92E-07	2.06E-07	N.D.	N.D.
MIU3-5	781.40~832.40	2.95E-07	4.58E-04	9.81E-08	1.24E-08	1.16E-06	1.06E-07	12.4	0.6%
DH-12-1	289.70~290.70	1.57E-07	2.77E-04	6.60E-08	9.79E-09	1.28E-05	4.36E-07	N.D.	N.D.
DH-12-1	305.70~306.70	2.11E-07	4.51E-04	1.11E-07	1.56E-08	1.32E-05	4.34E-07	5.8	0.1%
DH-12-2	305.70~306.70	2.38E-07	4.07E-04	1.07E-07	1.44E-08	1.89E-05	4.80E-07	8.2	0.2%
DH-12-2	305.70~306.70	2.54E-07	4.31E-04	9.80E-08	1.45E-08	1.87E-05	4.67E-07	8.8	0.3%
07MI07#1	200 m 予備ステージ	2.34E-07	4.43E-04	1.04E-07	1.47E-08	1.72E-05	4.56E-07	8.3	0.2%
09MI20#1	300 m 予備ステージ	8.34E-07	9.27E-04	1.71E-07	2.02E-08	3.91E-05	4.75E-07	N.D.	N.D.
09MI20#1	300 m 予備ステージ	2.12E-07	3.76E-04	2.56E-07	3.34E-07	1.43E-05	4.79E-07	N.D.	N.D.
09MI21#2	300 m アクセス坑道奥	2.67E-07	5.00E-04	1.18E-07	1.65E-08	2.80E-05	4.98E-07	4.7	0.4%
09MI21#3	300 m アクセス坑道奥	2.39E-07	4.58E-04	1.08E-07	1.54E-08	2.59E-05	4.46E-07	6.9	0.2%
09MI21#3	300 m アクセス坑道奥	2.27E-07	4.18E-04	9.70E-08	1.37E-08	2.59E-05	4.74E-07	9.6	0.2%
12MI30#2	300 m トレーサー試験地点	3.21E-07	4.39E-04	9.60E-08	1.20E-08	2.14E-05	4.96E-07	14.2	0.7%
12MI31#1	300 m トレーサー試験地点	2.56E-07	4.43E-04	1.02E-07	1.30E-08	3.17E-05	4.94E-07	10.4	0.4%
12MI31#1	300 m トレーサー試験地点	1.77E-07	3.13E-04	7.04E-08	9.98E-09	2.50E-05	4.84E-07	N.D.	N.D.
13MI37#5	300 m トレーサー試験地点	2.41E-07	4.53E-04	1.10E-07	1.57E-08	2.66E-05	4.79E-07	6.6	0.2%
12MI33#1	500 m 研究アクセス北坑道	3.24E-07	5.14E-04	1.15E-07	1.63E-08	3.69E-05	4.77E-07	6.2	0.7%
13MI38#1	500 m 研究アクセス北坑道	4.26E-07	5.62E-04	1.17E-07	1.55E-08	1.63E-05	4.55E-07	7.0	1.0%
13MI38#5	500 m 研究アクセス北坑道	2.60E-07	4.46E-04	9.97E-08	1.46E-08	1.44E-04	4.71E-07	9.7	0.4%
15MI52#1	500 m 研究アクセス南坑道	2.61E-07	4.71E-04	1.09E-07	1.55E-08	1.32E-04	4.88E-07	7.0	0.3%

N. D. は Not Determined の略、セルの色の■は涵養域、■は中間域、■は流出域、□は立坑内を表す。

希ガス濃度から温度を求める方法は、希ガスの涵養温度と大気混入率の 2 つを変数として、最適値を求める場合が多い(Ballentine and Hall, 1999)。

目的関数としては以下の式が用いられる。

$$\chi^2 = \sum_i^n \frac{(c_i^{mea} - c_i^{sim})^2}{\sigma_i^2}$$

ここに、 χ^2 は目的関数、 c_i^{mea} は希ガス i の計測値、 c_i^{sim} は希ガス i の計算値、 σ_i は希ガス i の計測誤差である。

また、 c_i^{sim} は以下のように設定される。

$$c_i^{sim} = c_i^{tmp} + c_i^{air}$$

ここに、 c_i^{tmp} は温度 T における希ガス i の水への溶解量 (cc_{STP}/g_w)、 c_i^{air} は空気の混入量である。

温度 T における溶解量は以下のように計算できる。

$$c_x = \beta(T, S) \frac{P_x}{P_o}$$

ここに、 C_x は溶存ガス濃度 (cm^3_{STP}/cm^3)、 β はBunsen係数、Tは温度、Sは溶質濃度、 P_x はガス x の分圧、 P_o は大気圧 (=101.325kPa) である。 P_x は以下のように与えられる。

$$P_x = c_{xa} \frac{P}{P_o}$$

$$P = P_o \left(\frac{288.15}{288.15 - 0.0065H} \right)^{-5.25877}$$

ここでは、温度と空気混入量を一定間隔で変化させながら上記の目的関数を計算した。温度の刻みは 0~20°C を 0.1°C 間隔、大気混入率は 0~0.01 を 0.0001 間隔とした。結果の一例を図 6.4.3-5 に示す。評価結果は、表 6.4.3-10 の右端に示したとおりである。希ガス温度とガス混入率の推定値に N.D. と表示しているものは、上記の温度範囲と大気混入の範囲で最適な推定値が見つからなかった場合である。涵養温度の推定は、図 6.4.3-4 にも示したように、溶存ガス量の数%の差から涵養温度を推定するため、測定精度が悪い場合やサンプルの状態が悪い場合（脱ガスが大きい、大気の混入が大きいなどの場合）には、涵養温度が推定できない場合がある。推定温度の結果をまとめると図 6.4.3-6 のようになる。

Jouzel et al. (2007) の調査に基づく、古気候は約 1 万年前までは現在の気温とほぼ同じで、それ以前は年とともに急激に温度が低下し、約 1.8 万年前には現在よりも 10°C 程度低かったと推定されている。またそれ以前では徐々に温度が増加し、12 万年前には現在の気温に戻ったと考えられている。

図 6.4.3-6 に示したように、広域地下水流動場において、DH-9 と DH-13 は涵養域に位置し、地下水年代も数千年程度と推定されている。涵養域の温度は 9.9~16.2°C となっており、涵養域でも深部では涵養温度が低い傾向がある。また、この地域の年平均気温は約 15°C 程度であり、涵養域の温度はこの温度に近い。中間域の MIU-3 は地下水年代が 1 万年程度と推定されており、涵養温度の推定値は 12.4°C となっており、年平均気温よりもやや低くなっている。このため、氷期の影響を受けていると考えら

れ、1万年よりは少し古いと推定される。流出域の立坑と DH-12 の涵養温度は、それぞれ 8.2℃と 7.6℃と推定される。流出域では、地下水年代は 2 万年程度と推定されており、平均気温より 7~8℃程度低いため、最も寒くなった 1.8 万年前に近いと考えられる。このように、涵養温度の推定値は地下水年代から推定される古気候と概ね一致していると考えられた。

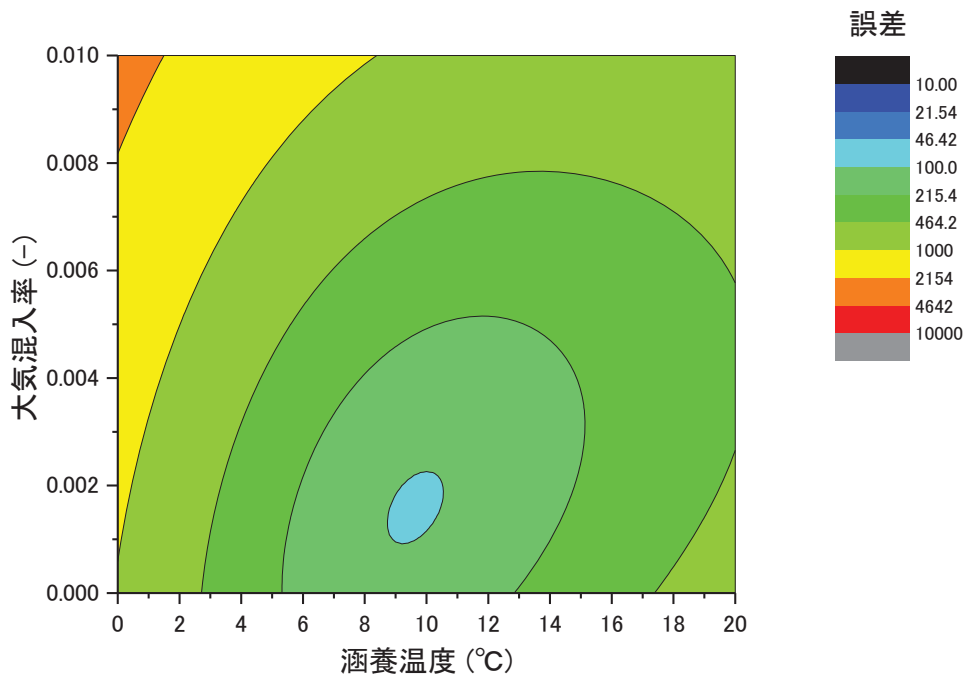


図 6.4.3-5 温度と大気混入量を変数とした目的関数の誤差分布
(09MI21#3 300m アクセス坑道奥)

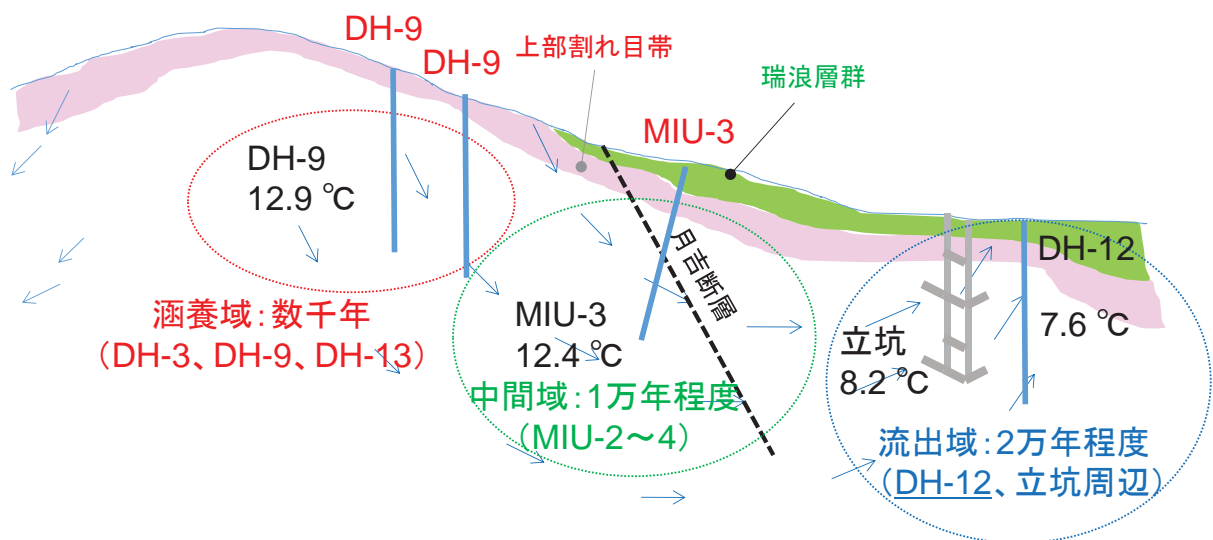


図 6.4.3-6 涵養温度と広域地下水流動の関係

6.4.3.3 同位体分別を用いた拡散評価

地下水流動が非常に遅い場合には、移流でなく拡散による輸送が支配的になる。これは、移流によるフラックスよりも拡散によるフラックスの方が大きくなる状態を意味しており、ペクレ数（移流によるフラックス／拡散によるフラックス）が 1 以下になると拡散支配と言われている。拡散は最も遅い輸送形態であり、拡散が支配的な状態は、最も天然バリア性能が高いと考えられる。このような場を確認するには、拡散によって分別する物質（ $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ ）を指標として評価するのが有効であると考えられる。Cl は ^{35}Cl と ^{37}Cl の比率が 75.53%と 24.47%となっており、Br は ^{79}Br と ^{81}Br の比率が 50.69%と 49.31%となっている。これらは、質量数が異なるため、拡散係数によって分別することが知られており（Eggenkamp and Coleman., 2009）、移流による輸送では分別は生じない。本研究では、これらをもちいた拡散場の評価方法を提案するとともに、岩石を対象に分別係数の計測を実施している。昨年度までに、セラミックディスクや岩石について ^{37}Cl の分別係数や ^{81}Br の分別係数を計測してきた。今年度は、昨年度実施が困難であった拡散係数が比較的小さく試験に時間のかかる岩石を対象として試験を実施した。

(1) 分別係数の計測方法

分別係数の計測方法は、室内試験で一般的に実施される Through-diffusion 試験を応用した物である。この試験は拡散係数を求めるために実施されるが、定常状態のフラックスは ^{35}Cl と ^{37}Cl の拡散係数比と同じになることを利用したものである。

Through Diffusion 法（図 6.4.3-7）で拡散試験を実施した場合、高濃度側のセルから、低濃度側のセルへと拡散が生じる。拡散が定常状態に達しており、高濃度側の Cl 濃度が低濃度側の Cl 濃度に比べて圧倒的に大きな場合には、拡散によって生じるフラックスは、下記の式で表現できる。

$$F_{Cl-35} = D_{Cl-35} \frac{C_{Cl-35}}{L} \quad (6.4.3-1a)$$

$$F_{Cl-37} = D_{Cl-37} \frac{C_{Cl-37}}{L} \quad (6.4.3-1b)$$

ここで F : ^{35}Cl ・ ^{37}Cl それぞれのフラックス、D : それぞれの拡散係数、C : それぞれの高濃度側における濃度、L : 拡散試験に用いた試料の厚み、を表している。

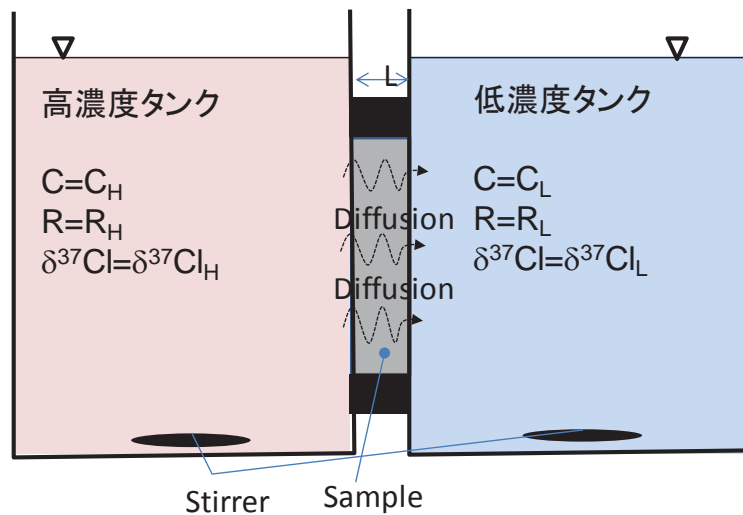


図 6.4.3-7 Through Diffusion 法における試験系の概念図

このとき、高濃度側から低濃度側に拡散する ^{35}Cl と ^{37}Cl のフラックスの比率 ($F_{\text{Cl-}37}/F_{\text{Cl-}35}$) は、下記の式で与えられる。

$$\frac{F_{\text{Cl-}37}}{F_{\text{Cl-}35}} = \frac{D_{\text{Cl-}35} \frac{C_{\text{Cl-}35}}{L}}{D_{\text{Cl-}37} \frac{C_{\text{Cl-}37}}{L}} = \frac{1}{\alpha} R_H \quad (6.4.3-2)$$

ここで R_H は高濃度側における ^{37}Cl と ^{35}Cl の比率、 α は ^{35}Cl と ^{37}Cl の拡散係数比 ($=D_{\text{Cl-}35}/D_{\text{Cl-}37}$) である。また、拡散が初めから定常状態であった場合には、低濃度側にはフラックスの比率 ($F_{\text{Cl-}37}/F_{\text{Cl-}35}$) に従って ^{35}Cl と ^{37}Cl が供給されることになるため、低濃度側における ^{35}Cl と ^{37}Cl の比率を R_L とすると、 R_L は ($F_{\text{Cl-}37}/F_{\text{Cl-}35}$) に等しくなる。

$$\frac{F_{\text{Cl-}37}}{F_{\text{Cl-}35}} = R_L = \frac{1}{\alpha} R_H \quad (6.4.3-3)$$

このため、定常状態のフラックスは高濃度側の同位体比 (R_H) を分別係数 (α) で割ったものである。上式から、 α は低濃度側の Cl における ^{35}Cl と ^{37}Cl の比率に対する高濃度側の ^{35}Cl と ^{37}Cl の比率の比で表される。このため、①拡散が定常状態に達した後で、②高濃度側に比べて低濃度側の濃度がゼロと見なせる状態で、高濃度側のセルにおける $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ と低濃度側セルにおける $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ のデータを取得すれば、 α を求めることができる。

$$\alpha = \frac{R_H}{R_L} \quad (6.4.3-4)$$

したがって、分別係数は以下の式で与えられる。

$$10^3 \ln \alpha = 10^3 \ln \frac{R_H}{R_L} \approx \delta^{37}Cl_H - \delta^{37}Cl_L \quad (6.4.3-5)$$

ここに、 $\delta^{37}Cl_H$ は高濃度タンクの $\delta^{37}Cl$ 、 $\delta^{37}Cl_L$ は低濃度タンクの $\delta^{37}Cl$ である。

ただし、現実的には拡散開始時から定常状態に達しているような拡散はあり得ず、初期の拡散では ^{35}Cl のフラックスが ^{37}Cl のフラックスを上回る非定常状態が生じる。このため、分別係数を求めるには、この初期の非定常状態の影響を排除するか、実験的に定常状態に達する前の溶液を排除する等の操作が必要である。

初期の非定常状態の影響を5%以下にするためには以下の基準を満たす必要がある。

$$\frac{Dt}{nL^2} > 4 \quad (6.4.3-6)$$

ここに、Dは拡散係数、tは時間、nは間隙率、Lはサンプルの試料長である。

また、上式の基準で Through-Diffusion 試験を実施した場合、分析に必要な試料量を得るまでには、高濃度と低濃度タンクの濃度変化が有意となる可能性があるため、濃度変化を考慮して分別係数を決定する必要がある。これは、濃度変化の影響を定量化した標準曲線状に結果を図化することにより、考慮することができる。例を図 6.4.3-8 に示す。タンクの濃度が変化する場合、 $\delta^{37}Cl_H - \delta^{37}Cl_L$ は時間とともに少しずつ小さくなる。図中の標準曲線はこれを補正するためのものである。

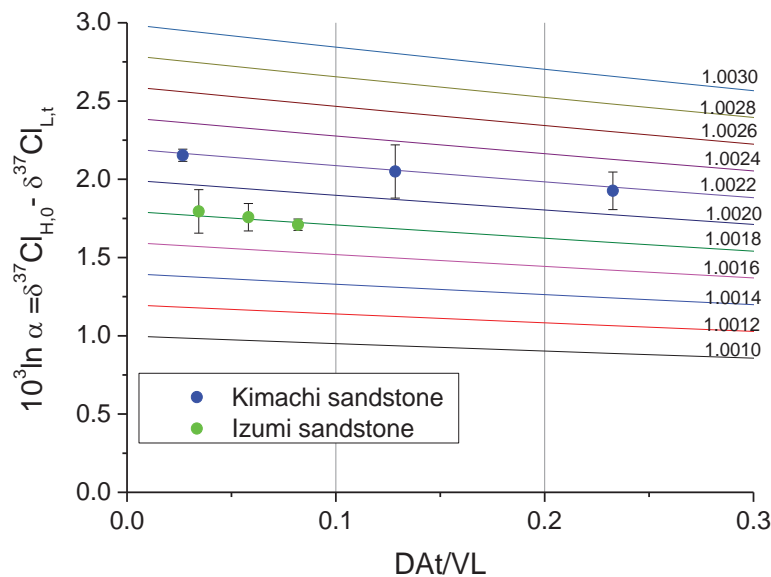


図 6.4.3-8 濃度変化を考慮した分別係数の評価方法

(2) 拡散試験方法

拡散試験は Through Diffusion 法により実施した。Through Diffusion 法は、図 6.4.3-9 に示

すように、試料を挟んで高濃度と低濃度のタンクを設け、この濃度勾配から発生するフラックスを計測することによって、拡散係数を計測する方法である。

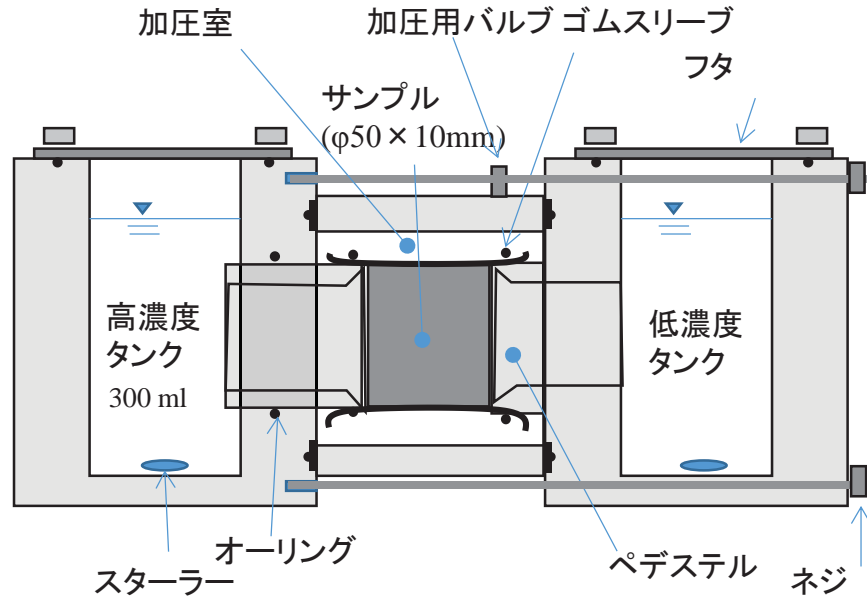


図 6.4.3-9 Through Diffusion 試験装置の概念図

Crank (1975) によれば、低濃度側の濃度変化は次式で与えられる。

$$C_L = \frac{C_H AL}{V} \left[\frac{Dt}{L^2} - \frac{n_e}{6} - \frac{2n_e}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{Dn\pi^2 t}{L^2}\right) \right] \quad (6.4.3-7)$$

ここに、 C_L と C_H は、高濃度と低濃度タンクの濃度、 A はサンプルの面積、 L はサンプルの厚さ、 V はタンクの体積、 n_e は有効間隙率である。

$Dt/\phi L^2 > 0.45$ であれば、フラックスは一定と見なすことができ、上式の括弧内第 3 項は無視することができる。この時、拡散係数は低濃度タンクの濃度勾配から、以下のように計算できる。

$$D = \frac{sVL}{C_H A}$$

ここに、 s は低濃度タンクの濃度勾配である。

また、分別係数は、そのときの $\delta^{37}C_{1H} - \delta^{37}C_{1L}$ から、時間変化を考慮して、図 6.4.3-8 で求められる。

Through Diffusion 法による拡散試験の手順は以下の通りである。

1) 岩石試料の準備・試料の飽和

岩石試料はコアカッター等を用いて外径 5.0cm、厚み 1.0cm（または 0.5cm）のディスク状に整形した。ディスクの厚みはノギスを用いて試験前に正確な値を測定した。岩石試料は間隙水とイ

オン強度が同程度になるように調製した NaNO_3 の溶液に浸漬し、 NaNO_3 溶液を定期的に交換することで、間隙水中の Cl や Br 濃度を低下させた。イオン強度が間隙水と同程度になるようにしたのは、粘土の膨潤等によるスレーキングを防ぐためである。

2) アクリル板やセルへの固定

内径 53mm の穴が空いたアクリルの板にエポキシ樹脂系の接着剤を用いて、岩石を固定した。固定が難しい試料については、ディスクをゴムスリーブで巻いて加圧し、固定する拡散セルを用いた。

3) 拡散セルの組み立て

上記の操作でアクリル板に固定した岩石を真ん中にして、それを挟み込むように 2 つのセルを合わせて拡散セルを組み立てた。一度 NaNO_3 溶液を両方のセルに入れて物理的な水漏れがないかを確認した。各セルの大きさは 350mL あるいは 500mL のものを使用した。

4) 溶液の調製

試験に用いる溶液として、臭化セシウムと塩化セシウムの混合液を用いた。塩化ストロンチウム 6 水和物 375.7g と臭化セシウム 133.2g を 5L の水に溶解させたものを「高濃度側」の試験溶液とした。低濃度側溶液としては純水等を用いるケースもあるが、本試験では圧力差の影響や浸透圧の影響を低減するため、「高濃度側」試験溶液とイオン濃度を合わせた硝酸ナトリウム溶液を「低濃度側」溶液として用いることにした。硝酸ナトリウムは 232g を 5L の純水に溶解させた。これは、硝酸イオンがその後の Br や Cl 同位体比測定分析の前処理に影響を与えにくいためである。

5) 試験の開始

低濃度側のセルには重水入りの硝酸ナトリウム溶液を、高濃度側のセルには塩化ストロンチウムと臭化セシウムの混合液を入れ、溶液を入れた時間を試験の開始時間とした。試験開始直後から、高濃度側・低濃度側のセルをスターラーで緩やかに攪拌した。

6) サンプルング

所定の時間経過後、高濃度と低濃度側のタンクから少量の試料を抜き取り、ろ過・希釈した後 IC で Cl 濃度を、ICP-MS で Br 濃度を定量するためのサンプルとした。

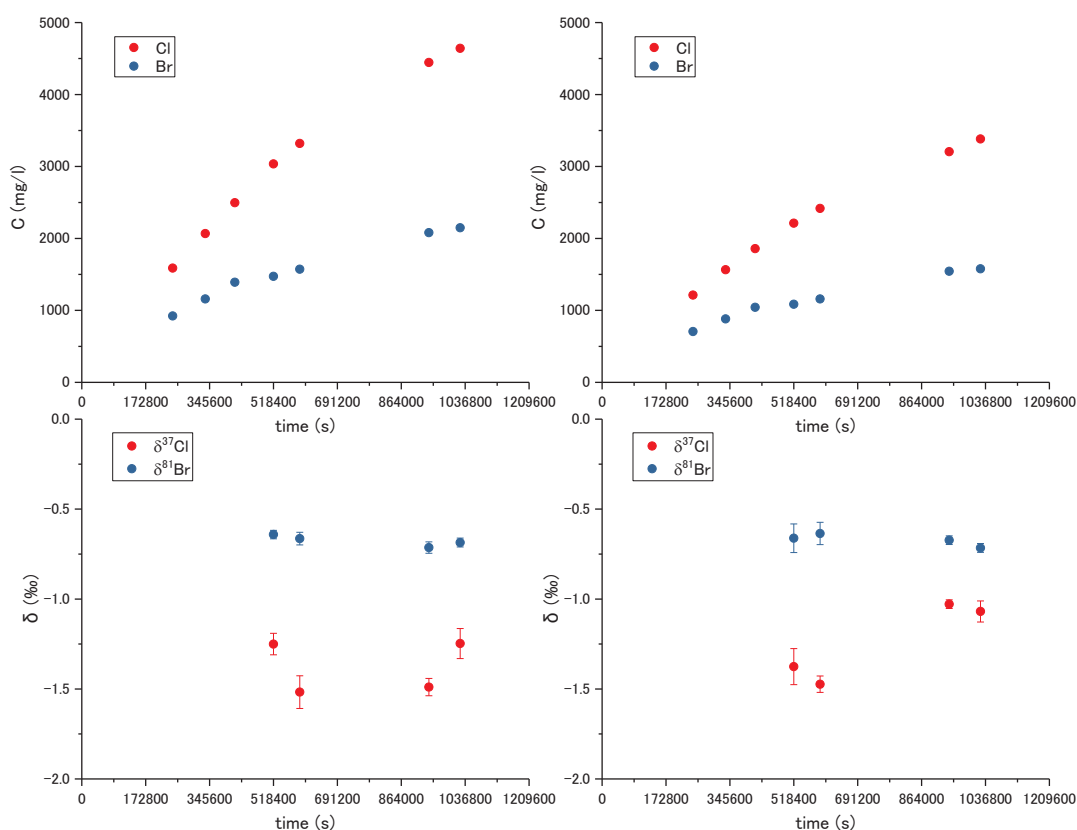
7) 分析

Cl 濃度は溶液を適切に希釈した後、IC により分析した。高い濃度の NO_3 中 Cl 濃度を測定することになるが、IC により Cl と NO_3 のピークが分離可能であることを確認できた。Br については ICP-MS により分析した。ICP-MS では共存するイオンの濃度が高くなると、イオン化の効率が落ちカウントが変化する可能性が考えられたため、イオン濃度が 0.01mol/L 以下に低下するように希釈するか、標準試料のイオン濃度をサンプルと合わせたものを調製し、これを用いて検量線を作成のうえ定量した。

(3) 試験結果

試験は、吉井砂岩、花崗岩、来待砂岩で実施した。Through-Diffusion 法による拡散試験結果を図 6.4.3-10 に示す。図は、低濃度側での濃度と同位体比の時間変化を示している。花崗岩と来待砂岩については、拡散係数が非常に小さく分析に必要な量の Cl 量や Br 量が確保できていないため、拡散試験結果のみ示す。高濃度側の Cl 濃度と Br 濃度はそれぞれ約 20000 mg/l と 10000 mg/l である。それぞれ得られた拡散係数と試料の内容について表 6.4.3-11 にまとめる。

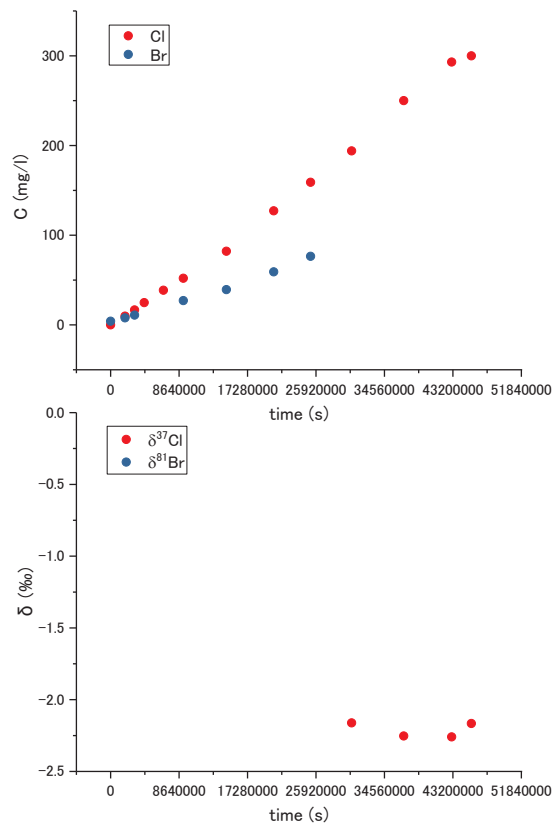
Cl と Br の拡散係数は同一試料では概ね同程度の拡散係数となっている。花崗岩と来待砂岩については拡散係数が $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ オーダーであり、吉井砂岩に比べて 2 桁程度小さいため、試験にも多大な時間を要している。Cl の分別係数は、吉井砂岩で 1.0016 程度、花崗岩で 1.0021 程度、来待砂岩で 1.0019 程度であり、これまで原位置で得られた値とほぼ同じ範囲であることから、本試験方法で分別係数が求められていると考えられる。Br の分別係数については、拡散係数が小さいため十分な Br 量が得られておらず、吉井砂岩でしか計算できていないが、1.0008 程度と昨年度と同様に Cl に対して半分程度の分別係数になっている。



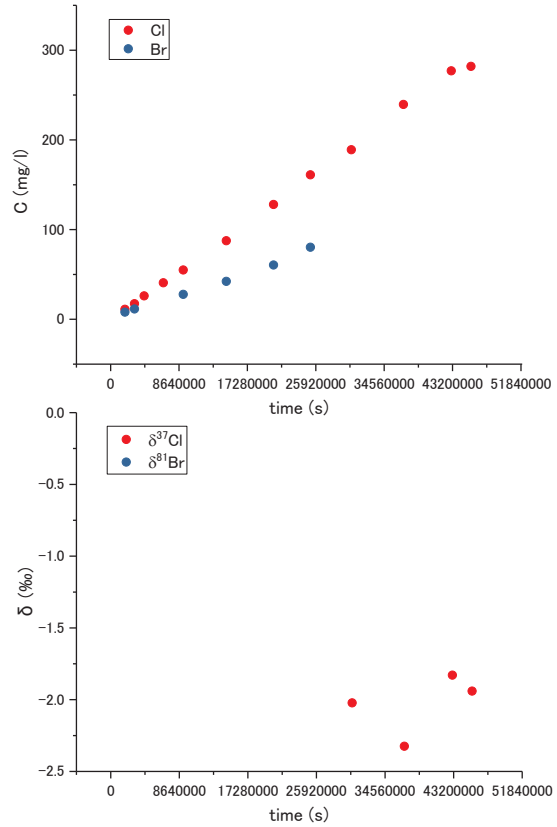
(1) 吉井砂岩 1

(2) 吉井砂岩 2

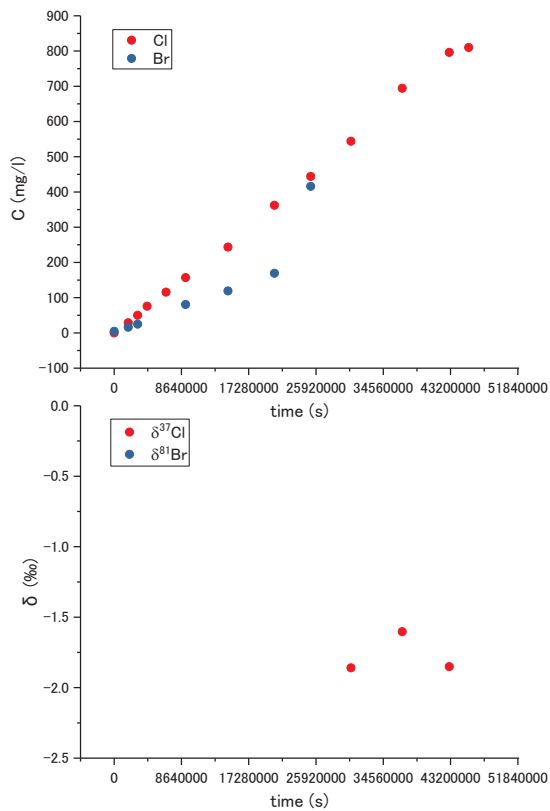
図 6.4.3-10 Through-Diffusion 法による拡散試験結果



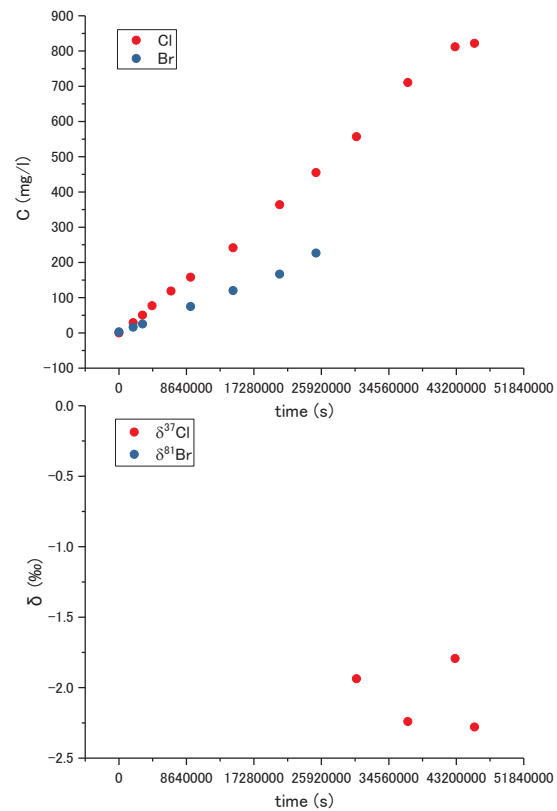
(3)花崗岩1



(4)花崗岩2

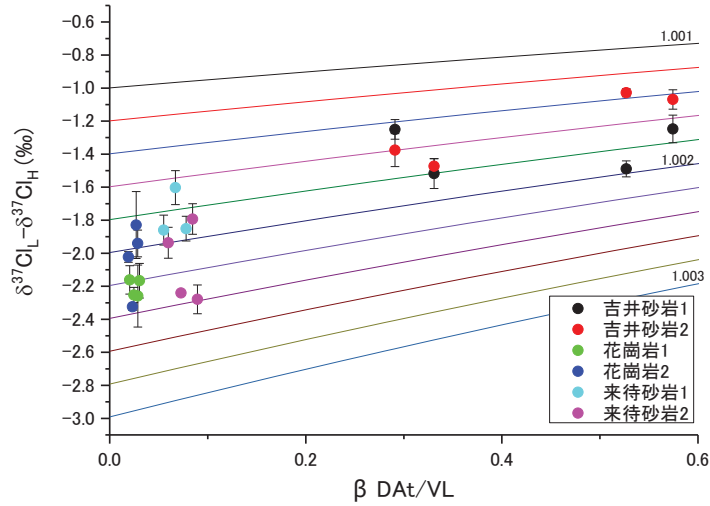


(5)来待砂岩1

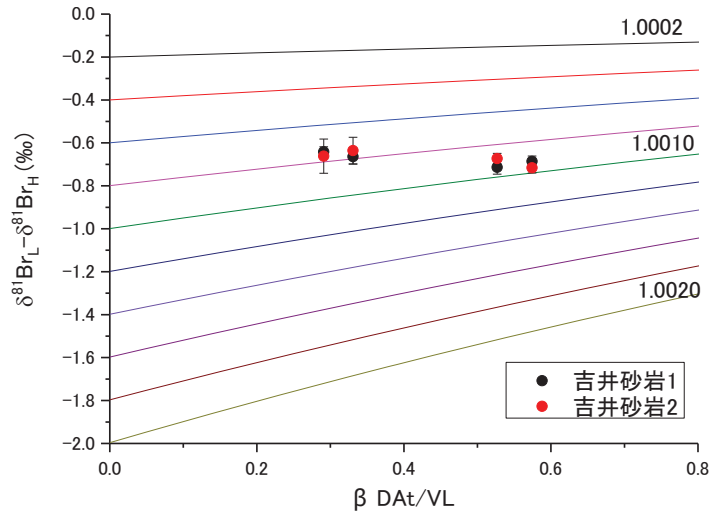


(6)来待砂岩2

図 6.4.3-10 Through-Diffusion 法による拡散試験結果 (続き)



(1) Cl



(2) Br

図 6.4.3-11 分別係数の評価結果

表 6.4.3-11 拡散試験結果

試料名	実効拡散係数 (m ² /s)	
	Cl	Br
吉井砂岩 1	5.08E-10	3.4E-10
吉井砂岩 2	3.52E-10	2.2E-10
花崗岩 1	8.61E-13	7.89E-13
花崗岩 2	8.16E-13	8.24E-13
来待砂岩 1	2.35E-12	2.19E-12
来待砂岩 1	2.52E-12	2.34E-12

参考文献

- Alessandro, M.D. et al. (1997): Laboratory and in situ investigation of the isotopic ratio $^{79}\text{Br} / ^{81}\text{Br}$ as a tracer of water migration in crystalline rocks. , 193, 351-362.
- Ballentine, C. J. and C. M. Hall (1999): 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.
- Bunsenberg, E. and Plummer, L.N., Potential Use of Other Atmospheric Gases (Chapter 10), in *Use of chlorofluorocarbons in hydrology -a guide book-*, IAEA, 2006, pp183-190.
- Bunsenberg, E. and Plummer, L.N. (2000): Dating young groundwater with sulphurhexafluoride — Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, *Water Resour. Res.*, 36, 3011-3030.
- Chen, L., Gui, H. and Yin, X. (2011): Monitoring of flow field based on stable isotope geochemical characteristics in deep groundwater. *Environmental monitoring and assessment*, 179(1-4), 487-98.
- Desaulniers D. E., Cherry J. A., Kaufmann R. S. and Bentley H. W. (1986) ^{37}Cl - ^{35}Cl variations in a diffusion-controlled groundwater system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1757-1764.
- Eggenkamp, H.G.M., Coleman, M.L. (2009): The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes, *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 3539-3548.
- Elmore, D., Fulton, B.R., Clover, M. R., Marsden, J. R., Gove, H. E., Naylor, H., Purser, K. H., Kilius, L. R., Beukens, R. P. and Litherland, A.E. (1979): Analysis of Cl -36 in environmental water samples using an electrostatic accelerator, *Nature*, 277, 22-25.
- Evbuomwan I.O. (2009): The structural characterisation of porous media for use as model reservoir rocks, adsorbents and catalysts, Ph.D Thesis, University of Bath.
- Fifield, L.K., Tims, S.G., Fujioka, T., Hoo, W.T. and Everett, S.E. (2010): Accelerator mass spectrometry with the 14UD accelerator at the Australian National University. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 268, 858-862.
- Gimmi, T. et al. (2007): Stable water isotopes in pore water of Jurassic argillaceous rocks as tracers for solute transport over large spatial and temporal scales. *Water Resources Research*, 43(4), 1-16.
- Hasegawa, .T, Nakata. K., Tomioka, Y., Kazuyuki G., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M. (2016a): Cross-checking groundwater age by ^4He and ^{14}C dating in a granite, Tono area, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, 166-185.

- Hasegawa, T., Nakata, K., Mahara, Y., Habermehl, M.A., Oyama, T. and Higashihara, T. (2016b): Characterization of a diffusion-dominant system using chloride and chlorine isotopes (^{36}Cl , ^{37}Cl) for the confining layer of the Great Artesian Basin, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, 279-294.
- Hendry, M.J. et al., 2004. Characterizing the hydrogeology of a complex clay-rich aquitard system using detailed vertical profiles of the stable isotopes of water. *Journal of Hydrology*, 293(1-4), 47-56.
- Hendry, M.J., Schmeling, E., et al. (2015): Determining the stable isotope composition of pore water from saturated and unsaturated zone core: Improvements to the direct vapour equilibration laser spectrometry method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11), 4427-4440.
- Hendry, M.J. et al., 2013. Paleohydrogeology of the Cretaceous sediments of the Williston Basin using stable isotopes of water. *Water Resources Research*, 49(8), 4580-4592.
- Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T. (2005): Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU), *Applied Geochemistry* 20, 2283-2302.
- JNC(2003): Data book on groundwater chemistry in the Tono area, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN 7450 2003-001.
- van der Kamp, G., Van Stempvoort, D.R. and Wassenaar, L.I. (1996): The Radial Diffusion Method: 1. Using intact cores to determine isotopic composition, chemistry, and effective porosities for groundwater in aquitards. *Water Resources Research*, 32(6), 1815-1822.
- Kelln, C.J., Wassenaar, L.I. & Hendry, M.J. (2001): Stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of pore waters in clay-rich aquitards: A comparison and evaluation of measurement techniques. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 21(2), 108-116.
- Kerstel, E.R.Th., Gagliardi, G., Gianfrani, L., Meijer, H.A.J., Van Trigt, R., and Ramaker, R., (2002) Determination of the $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratios in water by means of tunable diode laser spectroscopy at $1.39 \mu\text{m}$. *Spectrochimica Acta - Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 58, 2389-2396.
- Koehler, G., Wassenaar, L.I. and Hendry, M.J. (2000): An Automated Technique for Measuring $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values of Porewater by Direct CO_2 and H_2 Equilibration. *Analytical Chemistry*, 72(22), 5659-5664.
- Koeniger, P. et al. (2011): An inexpensive, fast, and reliable method for vacuum extraction

- of soil and plant water for stable isotope analyses by mass spectrometry. *Rapid communications in mass spectrometry* : RCM, 25(20), 3041-8.
- Long A., Eastoe C. J., Kaufmann R. S., Martin J. G., Wirt L. and Finley J. B. (1993): High-precision measurement of chlorine stable isotope ratios, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 2907-2912.
- Mahara Y., Igarashi T., Hasegawa T., Miyakawa L., Tanaka Y. and Kiho K. (2001): Dynamic changes in hydrogeochemical conditions caused by tunnel excavation at the Aspo Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden, *Applied Geochemistry*, Vol.16, pp.291-315, 2001.
- Mower, T.E., Higgins, J.D. and Yang, I.C. (1991): Pore-water extraction from unsaturated tuffs using one-dimensional compression. In *High Level Radioactive Waste Management*. Publ by ASCE, pp. 999-1006.
- Mook, W.G. and Van Der Plicht, J. (1999): Reporting ^{14}C activities and concentrations. *Radiocarbon*, 41, 227-239
- Murgulet, D., Cook, M. and Murgulet, V. (2016): Groundwater mixing between different aquifer types in a complex structural setting discerned by elemental and stable isotope geochemistry. *Hydrological Processes*, 30(3), pp.410-423.
- Nakata, K. and Hasegawa, T. (2011): Improvement of pre-treatment method for $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ measurement of Cl in natural groundwater by AMS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 269 (2011) 300-307.
- Nakata, K., Kodama, H., Hasegawa, T., Hama, K., Iwatsuki, T., and Miyajima T. (2013): Groundwater dating using radiocarbon in fulvic acid in groundwater containing fluorescein, *Journal of Hydrology*, 489, 189-200.
- Nakata. K., Hasegawa, T., Higashihara, T. and Oyama, T. (2015): Chloride ion concentrations during the compression of rocks to extract pore water, *Geofluids*, DOI: 10.1111/gfl.12137.
- Nakata K., Hasegawa T., Iwatsuki T. and Kato T. (2016) : Comparison of ^{14}C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, *Radiocarbon* *Radiocarbon*, 58, 491-503.
- Ohta T., Mahara Y., Momoshima N., Inoue F., Shimada J., Ikawa R., and Taniguchi M. (2009) Separation of dissolved Kr from a water sample by means of a hollow fiber membrane. *Journal of Hydrology*; doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07022. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07022
- Prada, S., Cruz, J.V. & Figueira, C., 2016. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal. *Journal of Hydrology*, 536,

pp. 409-425.

Plummer L.N. and Bunsenberg(2006): Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in Use of chlorofluorocarbons in hydrology –a guide book–, IAEA.

Revesz, K. and Woods, P.H. (1990): A method to extract soil water for stable isotope analysis. Journal of Hydrology, 115(1-4), 397-406.

Rübel, A.P. et al. (2002): Solute transport in formations of very low permeability: Profiles of stable isotope and dissolved noble gas contents of pore water in the Opalinus Clay, Mont Terri, Switzerland. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66(8), 1311-1321.

Sacchi, E., Michelot, J.-L., Pitsch, H., Lalieux, P., Aranyossy, J.-F. (2001): Extraction of water and solutes from argillaceous rocks for geochemical characterisation: Methods, processes, and current understanding, Hydrogeology Journal, 9, 17-33.

Savoie, S. et al. (2008): Transfers through argillaceous rocks over large space and time scales: Insights given by water stable isotopes. Physics and Chemistry of the Earth, 33(SUPPL. 1).

Sheldon, A.L. and Solomon, D.K. (2003): Radiogenic helium in shallow groundwater within a caly till, southwestern Ontario, Water Resources Research, 39, 12, 1331, doi: 10.1029/2002WR001797.

Shouakar-Stash O., Drimmie R. JK. and Frape S.K. (2005) Determination of inorganic chlorine stable isotopes by continuous flow isotope ratio mass spectrometry. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **19**, 121-127.

Shouakar-Stash, O. et al. (2007): Origin and evolution of waters from Paleozoic formations, Southern Ontario, Canada: Additional evidence from $\delta^{37}\text{Cl}$ and $\delta^{81}\text{Br}$ isotopic signatures. In Water-Rock Interaction - Proceedings of the 12th International Symposium on Water-Rock Interaction, WRI-12. 537-541.

Sidle, W.C. (1998): Environmental isotopes for resolution of hydrology problems. Environmental Monitoring and Assessment, 52(3), 389-410.

Stute, M. and Schlosser, P. (1999): Atmospheric noble gases in Environmental tracers in subsurface hydrology. (Edited by Cook, P. and Herczeg, A.L.), Kluwer Academic Publishers, 349-377.

USGS (2017a) :<https://water.usgs.gov/lab/chlorofluorocarbons/sampling/bottles/> (2017/3/25 閱覽)

USGS(2017b) : <http://water.usgs.gov/lab/sf6/sampling/> (2017/3/25 閲覧)

Wassenaar, L., Aravena, R., Hendry, J., Fritz, P. (1991): Radiocarbon in dissolved organic carbon, a possible groundwater dating method: case studies from western Canada. *Water Resour. Res.* 27 (8), 1975-1986.

Wassenaar, L.I. et al. (2008): High Resolution Pore Water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Measurements by H_2O (liquid) - H_2O (vapor) Equilibration Laser Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 42(24), 9262-9267.

Yang, I.C., Peterman, Z.E. and Scofield, K.M. (2003): Chemical analyses of pore water from boreholes USW SD-6 and USW WT-24, Yucca Mountain, Nevada. *Journal of Contaminant Hydrology*, 62-63, 361-380.

天野 由記, 南條 功, 村上 裕晃, 藪内 聡, 横田 秀晴, 佐々木 祥人, 岩槻 輝希(2012):北海道幌延地域における深部地下水調査ー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ー, 地下水学会誌 第54巻第4号 207~228

稲垣 大介, 石井 英一, 新沼 寛明, 真田 祐幸, 津坂 仁和, 佐野 満昭, 澤田 純之 (2011): 幌延深地層研究計画平成21年度地下施設計測データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2010-027.

稲垣 大介, 澤田 純之, 常盤 哲也, 津坂 仁和, 天野 由記, 新沼 寛明(2012): 幌延深地層研究計画平成22年度地下施設計測データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-019.

稲垣 大介, 常盤 哲也, 村上 裕晃(2013): 幌延深地層研究計画, 平成23年度地下施設計測データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-029.

稲垣大介(2014): 幌延深地層研究計画 平成24年度地下施設計測データ集、日本原子力研究開発機構.

今井 久, 前田 信行, 雨宮 清, 塩崎 功 (2001): 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.

今井 久, 前田 信行, 塩崎 功, 雨宮 清, 千々松 正和 (2002): 幌延深地層研究計画における地下水流動解析に関する検討, JNC TJ1400 2002-004.

上野哲朗、佐藤 成二、竹内 竜史(2014): 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測(2012~2013年度)データ集、日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター、JAEA-Data/Code 2014-018.

大森 一秋, 新宮 信也, 増田 薫, 青才 大介, 乾 道春, 岩月 輝希(2014a): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集 (2012年度), JAEA-Data/Code 2013-024

大森 一秋, 長谷川 隆, 宗本 隆志, 増田 薫, 青才 大介, 乾 道春, 岩月 輝希(2014b): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学

- 特性データ集(2013年度), JAEA-Data/Code 2014-019.
- 大森 一秋, 新宮 信也, 萩原 大樹, 増田 薫, 飯塚 正俊, 乾 道春, 岩月 輝希(2013):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集— (2011年度), JAEA-Data/Code 2013-001.
- 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(2014):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及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, 2014/06 JAEA-Research 2014-010.
- 尾上博則、三枝博光、竹内竜史(2016):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), 72, 1, 13-26.
- 狩野 智之, 毛屋 博道, 竹内 竜史(2011a): 広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2009年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2011-001.
- 狩野 智之, 毛屋 博道, 竹内 竜史(2011b): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2009年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2011-002.
- 狩野 智之, 竹内 竜史(2012a):広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2010年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-001.
- 狩野 智之, 竹内 竜史(2012b):超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2010年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-002.
- 狩野 智之, 竹内 竜史(2013a):広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2011年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-002.
- 狩野 智之, 竹内 竜史(2013b):超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2011年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-007.
- 木方建造、大山隆弘、馬原保典(1999):圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用、応用地質、40、5、260-269
- 操上広志(2007):幌延深地層研究計画における地下水流動解析—平成17年度までの調査結果を踏まえた再解析—, JAEA-Research 2007-036.
- 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(2008):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, 64, 3, 680-695.
- 毛屋 博道, 竹内 竜史(2010a):超深地層研究所計画における地下水の間隙水圧長期モニタリング(2005年度~2008年度)データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2009-030.
- 毛屋 博道, 竹内 竜史(2010b):広域地下水流動研究における地下水の間隙水圧長期モニタリング(2005年度-2008年度)データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2009-031.

- 齋 正貴, 新宮 信也, 萩原 大樹, 水野 崇(2011):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 -瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集- (2008 年度), JAEA-Data/Code 2011-003
- 齋 正貴, 萩原 大樹, 松島 博之, 野田 正利, 納多 勝, 安藤 賢一, 田中 達也, 上田 正, 本田 ゆう子, 水野 崇(2010):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 - 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集- (2004 年 4 月～ 2008 年 3 月), JAEA-Data/Code 2010-010.
- 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 (2007) : 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.
- 佐藤成二, 尾方伸久, 竹内竜史, 武田匡樹(2013) : 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測 (2004～2011 年度) データ集, 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット, JAEA-Data/Code 2013-020.
- 下茂 道人, 熊本 創(2004):亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究 (II), JNC TJ8400 2004-011.
- 新宮 信也, 萩原 大樹, 増田 薫, 飯塚 正俊, 乾 道春, 水野 崇(2012):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究-瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集- (2010 年度), JAEA-Data/Code 2012-003
- 新宮 信也, 齋 正貴, 萩原 大樹, 水野 崇(2011):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集(2009 年度), JAEA-Data/Code 2011-004.
- 地盤工学会 (2013) : 地盤調査の方法と解説、地盤工学会.
- 富岡 祐一, 中田 弘太郎, 長谷川 琢磨, 後藤 和幸 (2007): 地下水年代測定評価技術の開発(その 9) -溶存有機物を用いた ^{14}C 地下水年代測定方法の開発-. 電力中央研究所報告 N07039.
- 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.
- 日本原子力研究開発機構 (2011) : 幌延深地層研究計画 平成 22 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター.
- 日本原子力研究開発機構 (2013) : 幌延深地層研究計画 平成 24 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター.
- 日本原子力研究開発機構 (2014) : 幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告, 日本原子力研

究開発機構 幌延深地層研究センター.

日本分析化学会北海道支部編, 水の分析 第4版, 化学同人, 125-129 (1994).

長谷川琢磨, 田中靖治, 馬原保典, 五十嵐敏文(2004): Aspo Hard Rock Laboratory 建設に伴う地下水流動変化に着目した解析モデルの検証, 土木学会論文集, N. o. 757/III-66, pp. 189-202.

半谷高久, 小倉紀雄 共著, 第3版 水質調査法, 丸善, 239-245 (1995).

別府 伸治, 狩野 智之, 竹内 竜史(2013): 広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2012年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-012.

別府 伸治, 狩野 智之, 竹内 竜史, 尾方 伸久(2014b): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2012年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-023.

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.

水野崇, 青才大介, 新宮信也, 萩原大樹, 山本祐平, 福田朱里(2013): 瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水水質の変化, 日本原子力学会和文論文誌, 12, 1, 89-102.

文部科学省 科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室 (2002): 「放射能測定法シリーズ 9 トリチウム分析法 平成14年改訂」, (財)日本分析センター.

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, 12, 31~40(2011).

米林 甲陽 (1989): 腐植物質研究法Ⅲ. ペドロジスト, 33, 129-143.

米林 甲陽 (1993): 腐植物質の平均化学構造推定法およびXAD樹脂による分画法. 日本土壌学会編「土壌構成成分解析法(Ⅱ)-新しい手法, 考え方-」 p 55-80, 博友社.

7. まとめと今後の課題

7.1 適用性試験場の地質環境調査

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 500 m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑においてトレーサー試験技術等の適用性試験に適した割れ目を検出することを目的として、昨年度に 2 本のボーリング孔（15MI52 号孔、15MI53 号孔）の地質環境調査を実施した。今年度は、昨年度に深度 500m のボーリング調査で確認した地質的・水理的に連続した割れ目がある程度の範囲に亘って連続した割れ目であることを確認するため、また、トレーサー試験実施時にバックグラウンド流れの方向を確認するために、1 本のボーリング孔（16MI59 号孔）の地質環境調査を実施した。

以下に、今年度の地質環境調査結果についてまとめる。

（地質学的調査）

- ・ 採取したコアは、主に粗粒～中粒の黒雲母花崗岩である。
- ・ 等粒状～斑状を呈し主要な造岩鉱物は石英・カリ長石・斜長石・黒雲母で、ごく微細な角閃石を含む。これ以外に石英脈が厚さ数 cm で散見される。また、これ以外に石英脈が厚さ数 cm で散見される。
- ・ 採取したコアは母岩全体に及ぶ広範囲の変質は被っていない。変質は石英脈の貫入に伴う貫入面に並行な範囲や、開口割れ目・潜在割れ目を中心とした範囲に限定される。

（水理学的調査）

- ・ フローメータ検層を実施した結果、7.0～7.2 mabh（約 1 L/min）、13.3～13.5 mabh（約 6 L/min）、21.3～21.6 mabh（1 L/min 未満）、26 mabh 付近（1 L/min 未満）において流量変化を確認した。
- ・ 湧水割れ目を特定するため、10.5 mabh 付近、13.4 mabh 付近、17 mabh 付近および 28 mabh 以深の割れ目を対象に湧水量測定を実施した。その結果を基に各深度で確認した代表的な割れ目を対象に定流量揚水試験を実施した。試験区間は 10.30～10.97 mabh、13.20～13.87 mabh、16.60～17.27 mabh および 28.20～30.00 mabh の 4 深度とした。定流量試験より求められた透水量係数は、13.2～13.87 mabh で 1×10^{-7} m²/sec オーダー、その他の試験区間では 1×10^{-8} m²/sec オーダーであった。

また、15MI52 号孔、15MI53 号孔および 16MI59 号孔の間隙水圧の応答や、割れ目の性状や走向傾斜、コアや高解像度 BTV 検層での観察結果等から湧水割れ目の連続性について総合的に検討した。その結果、16MI59 号孔の 10.74 mabh、16.95 mabh、28.63 mabh において、15MI52、15MI53 号孔と地質的、水理的な連続性がある割れ目を確認した。ただし、16MI59 号孔の 10.74 mabh の割れ目については、他に比べて水理的なつながりは小さい。

7.2 トレーサー試験に係わる室内試験

今年度は、以下の2つの事項について検討した。すなわち、①種々の試験体・試験手法を用いた場合の分配係数の分布評価、②割れ目充填鉱物への収着試験である。

①について、瑞浪地域の立坑深度 500 m で実施したボーリングで得られたコアや土岐花崗岩に近いと考えられる岩石試料を用いて、種々の試験方法で分配係数や遅延係数を評価した。試験の結果、バックグラウンドのイオン濃度や流速は分配係数や遅延係数の評価に顕著な影響があることがわかったため、可能な限り評価したい系に合わせた試験条件で現場試験を実施することが望ましいと考えられた。試験方法や条件で分配係数は大きく変化し、室内試験に限定して比較すると、 Rb^+ の場合で最も大きな分配係数と最も小さな分配係数とは、36 倍程度の差があった。これら室内試験の結果と現場試験の結果を比較し、現場試験で評価された分配係数をどのように位置づけるかを議論することが必要であるとともに、どのように取得した分配係数を安全評価に用いるのかについては合理的な選定が必要である。

また、室内試験を実施して以下のような課題が明らかになった。一つは流れを伴う試験（カラム試験や模擬トレーサー試験）において、ピーク遅延から評価する遅延係数と、ピーク高さから評価する遅延係数が一致せず、ピーク遅延から評価される遅延係数が小さく評価されることである。さらに、もう一つの課題は同じ試験系で試験を実施したにもかかわらず、孔間と単孔式トレーサー試験で異なる分配係数が得られた点である。上記2つの課題についてはともに、モデルにおいて再現すべき現象（ピーク高さやピーク遅延、形状など）が本質的に何であるのか、あるいはモデルにおいて評価されていない現象がないのかを、検討していくことが必要となる。模擬孔間式トレーサー試験で得られた分配係数とその他の試験方法で得られた分配係数が同程度であったこと、単孔式トレーサー試験の解析がピーク高さについて感度が低く、ピーク高さを合わせるのに大きな遅延係数が必要とされたことが原因と考えられるが、根本的な原因を究明した上で、モデル等に改良を加え、適用範囲等を議論していくことが重要である。

②の割れ目充填鉱物への収着は、割れ目充填鉱物が核種の移行遅延に与える影響について評価するために実施した。瑞浪地域立坑から取得した割れ目の観察結果から、割れ目充填鉱物として、黒雲母、絹雲母、方解石、緑泥石、スメクタイトが挙げられることがわかった。スメクタイトを除く鉱物と、健岩部の代表的な造岩鉱物と考えられるアルカリ長石、曹長石に対して、 $Rb^+ \cdot Ba^{2+}$ の収着試験を実施した。その結果、単位重量あたりの収着量は、黒雲母、絹雲母がアルカリ長石や曹長石に対して高い値を示すことがわかった。このことから、これらの充填鉱物が割れ目に存在した場合、健岩部の場合よりも高い核種の収着・遅延能力を示すことが期待される。

一方で、比表面積あたりの収着量を比較するとアルカリ長石と黒雲母・絹雲母との間で大きな差が見られなかった。このことから、黒雲母・絹雲母の単位重量あたりの収着量が大きかったのは、比表面

積が大きかったことが主な要因であると考えられる。今後さらに実割れ目や割れ目から取り出した鉱物に対して試験を実施し、充填鉱物の役割についてさらに情報を取得していく予定である。

7.3 原位置トレーサー試験

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 500 m 研究アクセス南坑道 125 m 計測横坑試験場において、本事業で開発した装置を用いて原位置トレーサー試験を実施し、試験結果に対し、主に数値シミュレーションにより、試験対象割れ目の物質移行特性を評価した。また、同装置を用いてポイント希釈試験を実施する場合の地下水流量の測定精度について、室内試験と数値シミュレーションにより検討した。

開発した試験装置の適用性について、昨年度の試験で破損や作動不良を起こした 6 方バルブや出力の低下がみられた小流量用のモノポンプは、改良により期待通りの性能が発揮された。一方、昨年度、孔内設置後に蛍光強度が減衰するようになった高耐圧仕様の蛍光濃度センサーの Ver3.1 は修理を施したが、原位置試験では再び同じ現象がみられた。高圧環境下へ設置した際の急激な圧力負荷によるものが原因と考えられるが、今後室内試験等で検証する必要がある。また、ピストンパッカーでは漏れが発生し、深度 500 m の高水圧環境下では間隙水圧とパッカー拡張圧との差圧を 1 MPa 以内に留めるよう操作を行うこと、ピストン部のネジを十分に加締めることが重要と考えられる。

トレーサー試験は、15MI52 号孔と 15MI53 号孔の間で水理的に連続し、単一割れ目である可能性が高い割れ目（孔間での距離 1.44 m）を対象として実施した。単孔トレーサー試験では、ピーク濃度が極端に低くならず有意な破過曲線を取得できた。収着性トレーサーについては、一部の試験を除いてトレーサーの種類により異なる破過曲線を得られた。非収着性トレーサーの評価解析では、集中定数と単位幅当りのバックグラウンド地下水流量を変えた解析を行い、最適な組み合わせを評価できた。また、形状の異なる破過曲線を対象とした評価解析も実施し、評価された各々の集中定数とバックグラウンド地下水流量の組み合わせがほぼ等しくなることを確認した。一方、収着性トレーサーの評価解析では、評価された遅延係数にバラツキが確認された。さらに、試験では非収着性トレーサーと収着性トレーサーのピーク時間がほぼ等しいが、解析では再現できなかった。この原因としては、想定した収着モデルと実際の収着現象が異なっている可能性が考えられ、解析モデルを見直す必要がある。また、試験条件については、揚水流量を更に小さくするか、チェイサー注入後に待機時間を設けてトレーサーと岩盤の接触時間を長くする等の改善策が考えられ、今後の検討課題である。

今年度の孔間試験は、岩石基質部への収着の効果をみるために孔間での移行速度が遅くなるような小流量の試験を目指し、最終的に揚水流量 5~6 mL/min、注水流量約 2 mL/min の小流量まで下げることができた。3 孔間での水位差計測により対象割れ目内の自然状態の動水勾配は 1 %程度でバックグラウンドの地下水流れは極めて遅く、小流量の試験でも高い回収率が得られた。試験で得られた破過曲線に対して、数値シミュレーションによるフィッティングを行い、物質移行パラメーターの同定を行

った。割れ目開口幅の推定値は、高精度 BTV カメラによる値と透水量係数から 3 乗則により算出した値の中間の値となった。割れ目内分散長の推定値は孔間距離の約 2 %で、縦分散長は移行距離の 1/100 ~1 倍の範囲に分布するとした既往文献と調和的であった。収着性トレーサーの岩石基質に対する分配係数は、室内で柱状の岩石を用いたバッチ試験で同程度の試験時間で得られた分配係数に近い値となった。ただし、トレーサーの注入時間が 1 時間と短い試験では、各収着性トレーサーの破過曲線を単一の分配係数で再現できず、ピーク濃度とピーク時刻のそれぞれが一致する分配係数を算出するにとどまり、今後の課題と考える。

ポイント希釈試験による測定精度について、ダブルパッカー型孔内装置とパッカー一体型孔内装置のそれぞれを用いた場合の試験条件と測定精度の関係が明らかになった。多くの試験条件でこれらの孔内装置を用いた試験による測定精度は十分高いものの、地下水流量に比べてトレーサー溶液の循環流量が小さい場合や、地下水流れの方向と孔内装置との相対角が特定の範囲に入る場合（パッカー一体型のみ）には、測定精度が低下することをわかった。地下水流れの方向や流量は事前には不明であるため、実際の現場では循環流量や孔内装置の設置角（パッカー一体型の場合のみ）を変えた複数回の試験を実施することが対策となる。

7.4 各種割れ目探査技術の開発

(1) ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

深度 300m ボーリング横坑で掘削したボーリングコアを用いて、ラドンのフラックスを測定した。変質が認められないコアを用いた試料からは、 $5.7E-03Bq/cm^2$ のフラックスを得た。一方、変質が認められるコアは $5.3E-03Bq/cm^2$ が得られ、変質が認められないコアの方に比べて僅かに小さい値を得た。次に深度 300m ボーリング横坑の 12MI31 孔 int3 区間と 13MI37 孔 int2 区間との間を繋ぐ、1 条の水みち割れ目を用い、ラドン循環試験を実施した。1 カ月の間に 4 回循環試験を行い、採水を行った。この試料のラドン濃度は 230~279Bq/L であった。この水みち割れ目のラドン濃度と、室内で計測したラドンフラックスを用いて割れ目の間隙幅を推定した。この水みち割れ目には緑泥石が認められ、基質部がやや変質していることから、変質したコアから得たラドンフラックスを用いて割れ目幅を求めたところ、割れ目の間隙幅は 0.38mm~0.46mm と推定された。この間隙幅は、昨年度のトレーサー試験から得た間隙幅である 0.3mm および 0.55mm と近いものであり、ラドン循環試験による間隙幅が概ね妥当な値を得たと考える。深度 500m 研究アクセス南坑道における原位置のラドン濃度を計測した。採水した地下水の溶存ラドン濃度は、250~290Bq/L であった。このうち割れ目が連続する両孔の区間では、ほぼ同じ濃度が得られており、水理的にも連通していることが確認された。

今後の課題としては、深度 300m ボーリング横坑では、ラドンを用いて水みち割れ目の幅を推定

し、トレーサー試験などの他の手法と整合する値を得たことで、相補的に手法の妥当性を示したが、手法の検証のためには、間隙幅を評価した水みち割れ目へレジンを注入し、固化後の掘削により間隙幅を直接的に計測し、確認することが望まれる。また、深度 500m 研究アクセス南坑道のラドン計測では、水みち割れ目における連通性がラドンによって確認されたため、次年度はラドン循環試験によって割れ目の幅を推定することが必要である。以上の実施によってラドンを用いた割れ目幅の推定手法について検証し、取り纏める。

(2) 高粘性流体注入試験

13MI37 号孔 23.135m の割れ目を対象に高粘性流体注入試験を実施した。この結果、注入圧力は線形時間での整理では、高粘性流体の流動は軸対称的で 2 段階で変化したようにみられたが、対数時間での整理では、軸対称的に 5 段階に変化することが確認できた。このことから、場の透水係数は高粘性流体の広がりに伴い、5 回変化したと推定された。対象深度付近に割れ目が複数存在することを考慮すると、本地点での高粘性流体の流動は、単一割れ目のような様な広がりではなく、複数の割れ目を通る流動ではないかと推定された。また、同ボーリング孔の異なる深度で高粘性流体の到達による圧力変化が確認されたことから、複数の割れ目を介した流動であることが確認できた。このように昨年度トレーサー試験を実施した地点は複数の割れ目を介した流動となっており、トレーサーが通った割れ目の評価は非常に難しいと考えられた。今後、深度 500m のトレーサー試験地点でも同様に試験を行い、原位置の割れ目の状態の評価に高粘性流体試験を活用していく予定である。

(3) 割れ目の可視化技術の開発

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で掘削したボーリングコアの割れ目にレジンを充填させた岩石試料に対して、X 線 CT 法、連続研削・撮影によるシリアルセクションング法を適用した。本年度は、両手法の可視化技術の高精度化を図るとともに、異なる手法で得られた画像の相互比較のための画像処理手法の確立に重点を置いて検討を進めた。シリアルセクションング法による画像の高精度化の結果、同画像においても十分な精度を持った展開表示画像を作成することが可能となり、展開表示画像を用いた異なる手法間での相互比較が可能となった。また、深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道で掘削したボーリングコアの X 線 CT 画像から斜長石の粘土化によると思われる密度低下が確認されたため、密度低下した箇所をより鮮明に画像化し、その位置を特定する試みを行った。コア観察結果との整合性をとったところ、コア観察で変質が確認された箇所と X 線 CT 画像で密度低下した箇所がほぼ一致することが分かった。

室内レジン注入試験では、レジンに添加する蛍光剤の分離に関する検討を行った。具体的には、断層角礫や断層ガウジへの蛍光レジンの浸透に伴う蛍光剤の分離を想定した上向流カラム可視化

実験を実施した。その結果、蛍光剤として蛍光染料（ウラニン）を用いた場合、浸透する媒体の粒径や間隙内の水の影響を受けて、蛍光レジンから蛍光剤が分離することが確認された。そのため、不分離性の蛍光剤を選定し、同蛍光剤による上向流カラム可視化実験を実施した。その結果、水で満たされた間隙内において分離は生じず、安定した蛍光強度を確保できることが確認された。

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で計画されている原位置レジン注入試験に必要な装置の試作を行った。具体的には、2液混合型エポキシ樹脂系接着剤（レジン）を高地下水圧環境下（約 5.0MPa）において、脈動が極めて小さく、主剤と硬化剤の混合比を一定に保て、一定品質のレジンを送送できるポンプを試作した。同装置には、割れ目幅の急激な変化に伴う圧力変化（圧力上昇）に瞬時に対応可能な制御機能（インターロック機能）が組み込まれており、同機能が適切に動作することを確認した。今後は、同装置の原位置での適用性を検討していく予定である。

レジン特性試験では、より原位置環境に近い条件下におけるレジンの特性を明らかにするため、塩分影響試験、模擬岩盤割れ目内でのレジン反応熱測定試験を行った。また、室内レジン注入試験で選定した新たな蛍光剤の熱安定性に関する検討も行った。

塩分影響試験では、地下水に含まれる塩化物イオンがレジンの硬化に対してどのような影響を与えるかの検討を行った。具体的には濃度を調整した NaCl 水溶液、瑞浪地下水および幌延地下水に混合直後のレジンと接触させて、目視による観察、硬化までの温度測定、硬化後の硬度測定を行った。その結果、今回の試験の養生期間であれば塩分が硬度にほとんど影響しないことが確認された。ただし、塩分の影響を受けて硬化後の状態に大きな違いが確認されたことから、付着強度については低下することが危惧された。瑞浪地下水は塩分が低いため、急激な付着強度の低下などは生じないと考えられるが、原位置でのレジン注入試験適用前に、とくに付着強度については検討を加える予定である。

1mm 幅の模擬岩盤割れ目内でのレジン反応熱測定試験では、従来の知見のとおり、レジンの硬化に伴う温度上昇は極めて小さいことが確認された。ただし、使用するレジンには反応熱により硬化するため、完全に硬化するまでに相当な時間を要することが予想される。したがって、原位置適用にあたっては、養生期間を具体的にどのように設定するか検討を行う必要がある。

蛍光剤の熱安定性の検討は、室内レジン注入試験で不分離性が確認された蛍光剤を対象に行った。その結果、85℃の温度をかけても蛍光強度が低下しないことが確認された。熱安定性の結果と室内レジン注入試験の結果から、同蛍光剤が最適であると考えられる。

(4) 各種割れ目探査技術の室内比較試験

一次元モデルの割れ目モデルを、岩石を用いて製作し、透水試験、高粘性流体注入試験、トレーサー試験、ラドン濃度計測、レジン注入試験の割れ目評価技術を適用し、評価結果を比較した。ラ

ドン濃度計測を除いては、非常に整合した割れ目幅が得られた。ただし、高粘性流体注入試験では、高粘性流体の水との混合による粘性の低下で、圧力増加や高粘性流体の到達から求めた割れ目幅は、数十%過大評価になることがわかった。トレーサー試験では、注入口や流出口、試験装置までのチューブなどデッドボリュームの評価が重要であった。ラドン濃度計測においては、ラドンフラックスの評価が難しく、割れ目幅が明らかに過大評価になった。レジン注入では、割れ目幅が非常に薄いため、計測誤差が大きくなる可能性が示唆された。今後、ラドンフラックスを適切に求めるために実験系を再検討する予定である。また、割れ目評価技術の適用性を検討するために、異なる岩石でも同様に割れ目の評価を実施する予定である。

7.5 天然トレーサーを利用した調査技術の開発

精密調査における地下水年代測定法を開発するために、地下の適用性試験場における地下水調査と、新しい地下水や古い地下水の指標となる物質の採取分析方法について検討している。

瑞浪超深地層研究所における地下水調査では、立坑から地下水を採取し、分析結果の相関分析を実施した。この結果、新しい地下水の指標として、水素・酸素同位体比、トリチウム、 ^{14}C が有効であると考えられた。研究所周辺は流出域に位置し、約 2 万年前の氷期に涵養した地下水が支配的なため、このような成分が地下水の指標になると考えられた。また、氷期に涵養した地下水であることを、希ガス濃度による涵養温度推定によって確認した。古い地下水の指標としては、 Cl 、 ^4He の他に Na 、 K 、 Ca 、 Br 、 I 、 B 、 Sr 、 Li など指標になりうると推測された。研究所周辺では、 ^4He は主にフラックスによって供給されているため、古い地下水の指標となる成分もフラックスによって供給されていると推定された。また、地下水流動解析では、立坑掘削に伴う水圧変化と水質の変化を、主立坑断層に異方性を考慮することで概ね再現することができた。今後、種々の指標を用いて混合率や混合率の変化を評価し、地下水解析モデルの妥当性の検討を実施する予定である。

幌延地区の深部地下水はこれまでの調査結果から、堆積時に取り込まれた化石海水であると推定されるため、長い年代を評価できる ^{36}Cl や ^4He を対象に調査した。幌延深地層研究センターにおける地下水調査では、立坑から採取した地下水の分析値を整理し、水質・同位体の変化はほとんど発生していないことを確認した。これは、研究センターが堆積岩地域で透水係数が小さく、間隙率が大きいこと、流速が遅いためと考えられた。研究センター周辺の地下水の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、深度ともに増加するもの、声間層の平衡値程度であることがわかった。このため、地下水は声間層から流入している、あるいは、稚内層の間隙率が声間層に近いと推定された。幌延の ^4He 濃度は、80%程度のガスが脱ガスしており、脱ガスを補正してバラツキが大きいことが確認できた。採水方法として、水上置換によるガス採取が有望であることが確認できたため、今後この方法を適用し、希ガス濃度分布を明らかにしていく予定である。

新しい水や古い水の指標となる物質の調査では、新しい水について ^3H の分析精度をあげるために、 ^3H ingrowth 法の貯蔵容器を作成し、その性能を評価した。今後、実試料において ^3H ingrowth 法の有効性について検討する予定である。水素・酸素同位体比については、ガスを直接分析する方法を模擬試料に適用し、その有効性を確認した。古い水の指標では、 ^{14}C について地下水から有機物を膜を使って集める方法を瑞浪超深地層研究所の深度 500m 坑道で適用し、有機物を捕集することができた。今後、古い有機物と新しい有機物を分割する方法を検討する予定である。希ガス温度計については、瑞浪地域においてその有効性を確認できた。今後、データを増やし、信頼性の向上を図る。拡散場の評価については、拡散試験を行い、Through-Diffusion 試験で分別係数を求めた。今後、データの蓄積を図るとともに、同位体分別係数の取得から拡散場を評価する方法を提案する。