

幌延深地層研究計画
令和元年度調査研究成果報告

令和2年6月

日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

目 次

1. はじめに	1
2. 令和元年度の主な調査研究の成果	4
3. 地層科学研究	9
3.1 地質環境調査技術開発	9
3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発	50
3.3 地質環境の長期安定性に関する研究	57
4. 地層処分研究開発	62
4.1 処分技術の信頼性向上	62
4.2 安全評価手法の高度化	95
5. 地下施設の維持管理	101
5.1 地下施設の維持管理	101
5.2 掘削土(ズリ)の管理	101
5.3 排水の管理	102
6. 環境調査	104
6.1 排水量および水質調査結果	104
6.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果	115
7. 安全確保の取組み	118
8. 開かれた研究	119
8.1 国内機関との研究協力	119
8.2 国外機関との研究協力	124
引用文献	125
参考資料	129

図目次

図 1	令和元年度の主な調査研究	4
図 2	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	6
図 3	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	7
図 4	深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	7
図 5	亀裂ネットワークモデルを用いた水理解析の概要	11
図 6	実測値と解析値の比較	12
図 7	実測値と解析値との誤差 (RMSE) 一覧	12
図 8	断層帯中の割れ目 (もしくは単独のせん断割れ目) がとり得る透水性の上限値と DI の関係	15
図 9	試験孔の位置 (左図) と水圧擾乱試験の概念 (右図)	15
図 10	水圧擾乱試験中の試験区間の短縮量 (上図) と水圧および注入流量 (下図)	16
図 11	水圧擾乱試験中の区間水圧と断層のせん断変位量 (上図) および水理開口幅 (下図)	16
図 12	水圧擾乱試験中の断層の透水量係数と DI	17
図 13	地下施設からの湧水量 (上図) と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果 (下図) (2006/11/19~2020/3/24 のデータ)	18
図 14	地下施設からの湧水に伴う HDB-6 孔の水圧変化の解析結果	19
図 15	坑道内で採取した地下水の塩分の経時変化	21
図 16	深度 350m 調査坑道のボーリング孔における地下水の塩分の経時変化	22
図 17	地下水中の有機物の構成割合	23
図 18	岩石溶出試料および深度 350m 地下水の蛍光特性	24
図 19	解析モデル	26
図 20	水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較	26
図 21	内空変位の計測結果と解析結果の比較	26
図 22	水圧擾乱試験における試験区間の伸縮量とパッカー圧の変化の関係性を把握するために行った実験 (a~c) とその結果 (d~g)	28
図 23	試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所	30
図 24	C05 における水圧モニタリング結果	30
図 25	C06 における水圧モニタリング結果	31
図 26	C07 における水圧モニタリング結果	31
図 27	C08 における水圧モニタリング結果	32
図 28	C09 における水圧モニタリング結果	32
図 29	試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水質モニタリング継続可能区間	34
図 30	C05 の区間 2 における水質モニタリング結果	35
図 31	人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺の水圧分布	36
図 32	解析領域と解析条件	37
図 33	140m 調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中の飽和度の変化例	38
図 34	岩盤内部における酸素の流れ (a) 拡散による酸素の流れ、(b) 移流と拡散を合わせた酸素の流れ	39
図 35	岩盤内部におけるガスおよび地下水中の酸素濃度	39
図 36	傾斜計データの一例	41

図 37	樹脂注入試験の概要	42
図 38	樹脂浸透状況の観察	43
図 39	割れ目への樹脂浸透状況の例	43
図 40	割れ目開口幅の分布	44
図 41	地下深部の低流動域の空間分布を推定する手順	48
図 42	塩濃度および酸素・水素同位体比の空間分布の推定結果	48
図 43	酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度の関係	49
図 44	地下水流動解析から推定した地下水移行時間および動水勾配の空間分布の一例	49
図 45	地震計設置位置	50
図 46	北海道地域の震央分布	51
図 47	幌延深地層研究センター周辺の震央分布	51
図 48	令和元年 12 月 12 日の地震波の周波数別の振幅	52
図 49	ボーリングコアで観察される粘土質断層（左図）と稚内層中の粘土質断層の分析結果（右図）	54
図 50	計測器ごとの計測不良割合の経時変化	56
図 51	光ファイバー式地中変位計計測結果	56
図 52	地下施設に設置した地震計	57
図 53	抽出したイベントと各成分・各観測点での波形	58
図 54	表 2 のイベント No. 7 と No. 8 の波形図	59
図 55	声問層・稚内層から得られた岩石中のセレンの分析結果	61
図 56	人工バリア性能確認試験の概念図	62
図 57	人工バリア性能確認試験で生じる熱－水理－力学－化学プロセスの相関関係	63
図 58	緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化	64
図 59	グラウトの施工箇所	65
図 60	緩衝材外周のケイ砂部の間隙水圧変化	65
図 61	温度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定）	66
図 62	緩衝材内部の水分の飽和度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定）	67
図 63	オーバーパック腐食試験の概念図	68
図 64	腐食センサー（6 段目、135°）の炭素鋼電極表面の外観（左）とスケッチ（右）および、顕微ラマン分光分析箇所（右図 A～E）	69
図 65	腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の X 線回折結果	69
図 66	腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の顕微ラマン分光分析結果	70
図 67	模擬オーバーパックの腐食深さ分布の展開図（赤色ほど腐食量大）と極値統計解析における領域、区画の分割	72
図 68	オーバーパック腐食試験データの極値統計解析に基づく実際のオーバーパックの最大腐食深さ推定値と既往の評価式の比較（図中には幌延の地下水を想定した条件での室内試験データもプロット）	72
図 69	試験設備の概要	79
図 70	隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果（1/2）	80
図 71	隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果（2/2）	80

図 72	坑道が卓越した移行経路となり得るシナリオ例（セメント影響による劣化・変質）	83
図 73	縮尺模型試験の概念図	85
図 74	縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化（図中の破線は計測値を双曲線関数で近似した値をプロット）	86
図 75	緩衝材と埋め戻し材の境界面における膨潤変形挙動計測	87
図 76	EDZ シーリング試験の試験領域概略図	87
図 77	粘土止水壁周辺の上面図および断面図	89
図 78	粘土止水壁の施工作業の状況	90
図 79	トモグラフィ調査の断面位置	91
図 80	弾性波トモグラフィ調査の速度分布図	92
図 81	比抵抗トモグラフィ調査の比抵抗分布図	92
図 82	三次元解析の速度分布図	93
図 83	地中無線伝送システムの装置構成イメージ	94
図 84	地中無線装置による計測データの例	95
図 85	層理面に対する異方性に着目した原位置拡散試験	96
図 86	解析モデルの概要	98
図 87	2つの移行経路を考慮した解析モデルを用いた解析結果	99
図 88	フロー・スタグナント領域を考慮した解析モデルを用いた割れ目中トレーサー試験のウラニンおよびCsの解析結果	100
図 89	掘削土（ズリ）置場の構造	102
図 90	排水系統と各水質分析用試料の採取地点	104
図 91	地下施設からの排水の処理フローと試料採取点	106
図 92	天塩川の調査地点	108
図 93	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	110
図 94	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	112
図 95	環境調査実施場所	115

表目次

表 1	幌延町宮園で観測された震度1以上の地震	52
表 2	10月29日10:00~14:20の間で抽出されたイベントの時刻	58
表 3	天塩川への排水量	105
表 4	地下施設からの排水にかかる水質調査結果	107
表 5	天塩川の水質調査結果	109
表 6	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果	111
表 7	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果	113
表 8	浄化槽排水の水質調査結果	114
表 9	清水川の水質調査結果	116
表 10	確認された重要種（魚類）	117

写真目次

写真 1	緩衝材定置試験の公開の様子	73
写真 2	緩衝材可視化試験の状況	74
写真 3	オーガ方式の除去装置の外観	75
写真 4	オーガ方式で除去した充填部の様子	75
写真 5	吸引機の外観と、捕集した充填材	76
写真 6	ウォータジェット方式の装置とノズル	76
写真 7	除去試験の様子と、除去後の隙間	77
写真 8	模擬 PEM の回収試験の様子	77
写真 9	設備の点検および更新状況	101
写真 10	掘削土（ズリ）置場	102
写真 11	排水処理設備	103
写真 12	天塩川の採水状況	108
写真 13	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況（A1～A4）	110
写真 14	清水川の採水状況	112
写真 15	清水川の水質調査	116
写真 16	生息魚類調査	117
写真 17	安全パトロールの状況	118
写真 18	安全行事の状況（安全大会）	118

1. はじめに

国立研究開発法人*¹日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成13年3月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。幌延深地層研究計画は、実際の地層処分事業とは明確に区別することを前提に、堆積岩を対象とした深地層の科学的な研究（地層科学研究）および地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた研究開発（地層処分研究開発）を行うものです。また、本計画では、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて進めることとしています。

平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、「高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある」との考え方が示され、そのために「地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映する」ことが示されました。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）*²」（以下、第3期中長期目標*³）が定められ、この第3期中長期目標を達成するために、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成27年4月1日～令和4年3月31日）」（以下、第3期中長期計画）を策定しました。第3期中長期計画中の幌延深地層研究計画における研究開発としては、

*1：独立行政法人通則法の改正（平成27年4月1日施行）により新たに設定された分類のひとつで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

*2：原子力機構は、原子力基本法第2条に規定する基本方針に基づき、我が国における原子力の研究、開発および利用を計画的に遂行するために原子力委員会が定める基本的考え方に則り、その業務を総合的、計画的かつ効率的に行うことが定められています。中長期目標はこれを踏まえ、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会が、独立行政法人通則法第29条の規定に基づき定めた目標です。

*3：第3期中長期目標の期間は、平成27年4月1日～令和4年3月31日の7年間です。

「実際の地質環境における人工バリア*⁴の適用性確認、処分概念オプションの実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証に重点的に取り組む。また、平成31年度末（令和2年3月末）までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。」としていました。

これに基づき、幌延深地層研究センターでは、平成27年度以降、第3期中長期計画で重点的に取り組むとした3つの課題（以下、必須の課題）に重点を置いた研究開発を進めてきました。平成30年度には、研究開発成果の取りまとめに着手するとともに、研究開発の進捗状況等について外部専門家による評価を受け、必須の課題の成果について取りまとめた報告書⁽¹⁾を公開しました。そして、これまでの研究の成果や外部委員会の評価、国内外の状況を踏まえて検討した結果、研究の継続が必要となったことから、令和元年8月2日に「幌延町における深地層の研究に関する協定書」（以下、三者協定）に基づき、北海道および幌延町に「令和2年度以降の幌延深地層研究計画（案）」について協議の申し入れを行いました。その後、三者協定に基づき北海道および幌延町により設置された「幌延深地層研究の確認会議」（以下、確認会議）において、研究の必要性や妥当性、三者協定との整合性を論点とした内容の精査が行われ、北海道および幌延町により「令和2年度以降の幌延深地層研究計画（案）」が受け入れられ、原子力機構は「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」を策定しました。原子力機構は、これらの研究課題については、令和2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間を目途に取り組めます*⁵。その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。また、これまでと同様に三者協定の遵守を大前提に、放射性廃棄物を持ちこむことや使用することなく、また最終処分場とはせずに、安全を最優先に研究を進めます。さらに、研究開発を進めるにあたっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の資金や人材を活用することを検討します。

*4：ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、工学的に形成するものです。

*5：令和2年度以降の研究期間は9年間であり、その期間を通じて必要な成果を得て研究を終了できるように取り組むこととしています (https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html)。

なお、その後に行われた第3期中長期計画の改定において、「令和2年度以降においては、研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて定めた「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証および地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証を進める。」と追記しています。

2. 令和元年度の主な調査研究の成果

令和元年度は、「幌延深地層研究計画 平成31年度調査研究計画」⁽²⁾にしたがって、第3期中長期計画に掲げた必須の課題に関わる調査研究および地下施設の維持管理などを実施しました。

調査研究では、必須の課題に重点的に取り組むとともに、必須の課題に関わる調査研究の基礎情報となる坑道周辺の掘削影響領域を含む地質環境特性の長期的な変化や地質環境情報に関するデータの取得などを継続しました（図 1）。以下に調査研究の概要を示します。

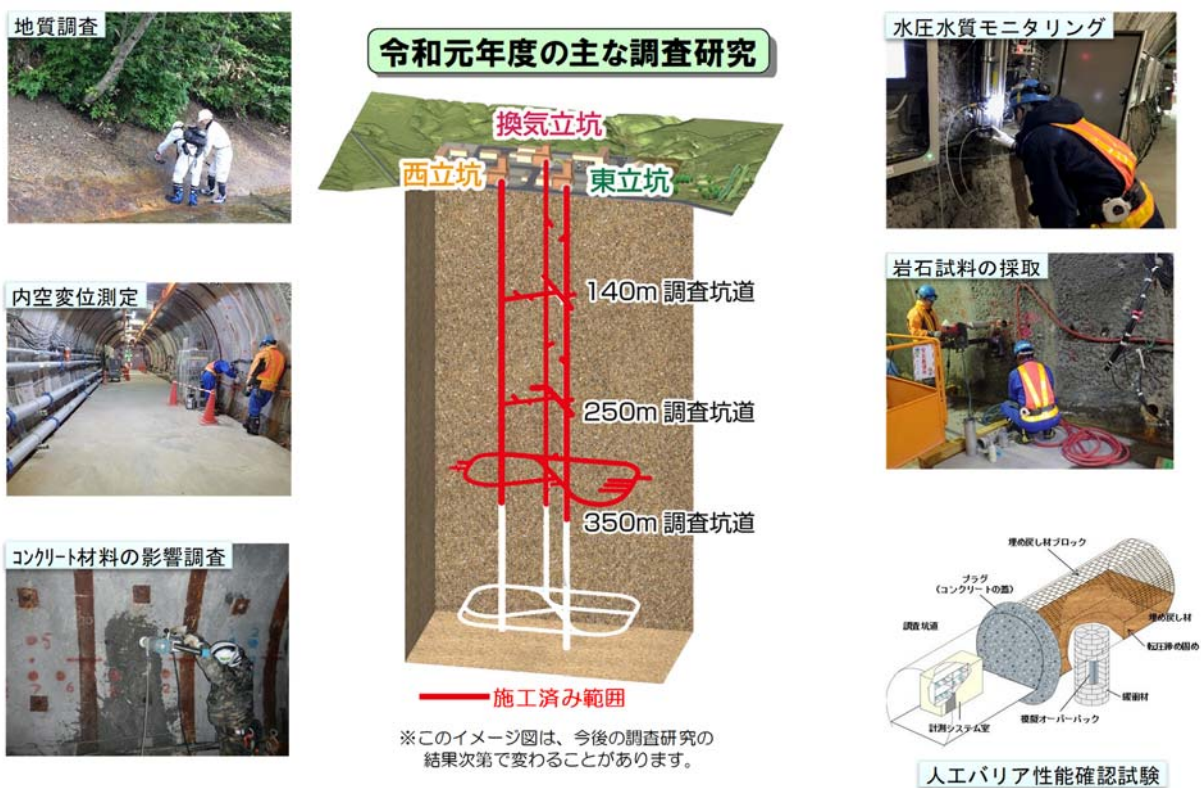


図 1 令和元年度の主な調査研究

実際の地質環境における人工バリアの適用性確認については、実際の地質環境において人工バリアや周辺岩盤中での熱－水理－力学－化学連成挙動*⁶や物質の移行挙動などを計測・評価する技術の適用性を確認し、地層処分事業における精密調査段階の後半に必要な技術基盤の確立

*6：地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤には、廃棄体からの熱、地下水との反応、岩盤から（または岩盤へ）作用する応力、化学的な変化（緩衝材中の間隙水の水質の変化）などによる影響が想定されています。実際の処分環境では、これらの影響が複合的に発生すると考えられ、その挙動を、熱－水理－力学－化学連成挙動と呼んでいます。

を目的として、深度 350m 調査坑道での人工バリア性能確認試験を継続し、オーバーパック腐食試験および原位置トレーサー^{*7}試験を実施しています。令和元年度は、人工バリア性能確認試験において、地下水の浸潤状況、温度、応力、化学特性などに関する計測を継続するとともに、試験エリアの逸水を抑制するためグラウトを実施しました。また、減熱試験を開始した場合の緩衝材の状態に関して連成解析を実施しました。オーバーパック腐食試験については、試験体から回収した腐食センサーの腐食生成物の分析を実施しました。また、健岩部および割れ目を対象として実施したトレーサー試験について、モデル化/解析手法の検討を継続しました。

処分概念オプションの実証については、人工バリアの設置環境の地質環境条件や深度依存性^{*8}を考慮しつつ、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証することを目的として、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションの整備を進めています。令和元年度は、人工バリアの定置・品質確認などの実証試験の1つとして、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）^{*9}との共同研究で進めている地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究において、隙間充填材の除去技術および模擬廃棄体の回収技術の実証試験を実施しました。

地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証については、堆積岩が有する地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を評価し、堆積岩地域における処分場の立地選定や設計を、より科学的・合理的に行うための技術と知見を整備しています。令和元年度は、断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係の解明を目指した研究を継続しました。

必須の課題に関わる調査研究における基礎情報として、既存のボーリング孔などにおける地下水の圧力や水質の観測、地下施設での調査研究

*7：地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印として混ぜる染料やその他の薬品を指します。重水や蛍光染料（ウラニンなど）、非放射性セシウムやユウロピウムなど、多種のトレーサーがあります。幌延深地層研究計画では放射性物質を利用したトレーサー試験を行うことはありません。

*8：ここでは、深さによって地質環境条件などが変化していくことを意味しています。一般的に地下深くなるほど温度が高くなり、地圧や水圧が高くなるなどの変化が認められています。

*9：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構（NUMO）を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

で使用するための調査技術や調査機器の開発を継続し、地質環境を推定するための手法について、信頼性の向上を図りました。さらに、坑道を掘削した後の岩盤と支保の長期挙動の把握や地下施設の耐震安定性に関する評価を行い、地下施設設計の妥当性の検証を継続しました。

研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 2 に示します。また、幌延町内で実施している調査研究に関わる主要なボーリング調査や観測地点などの位置を図 3 に、深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所を図 4 に示します。

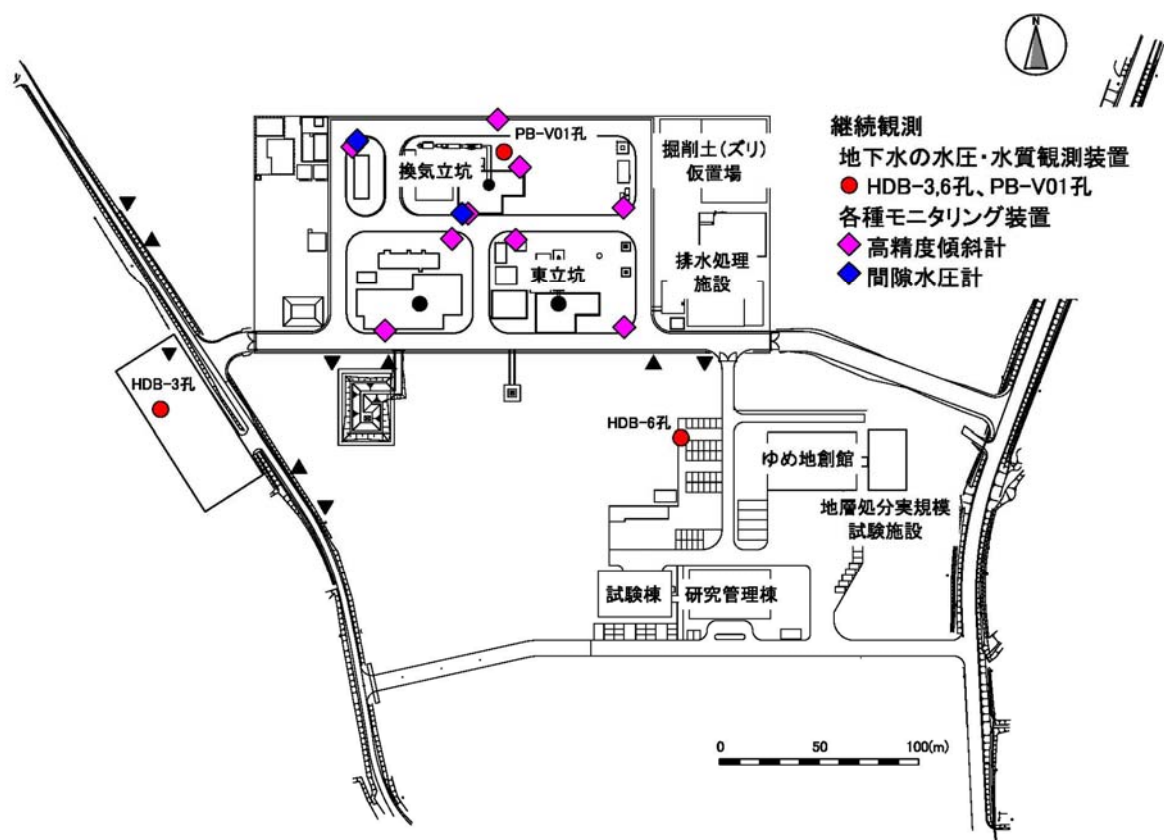


図 2 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

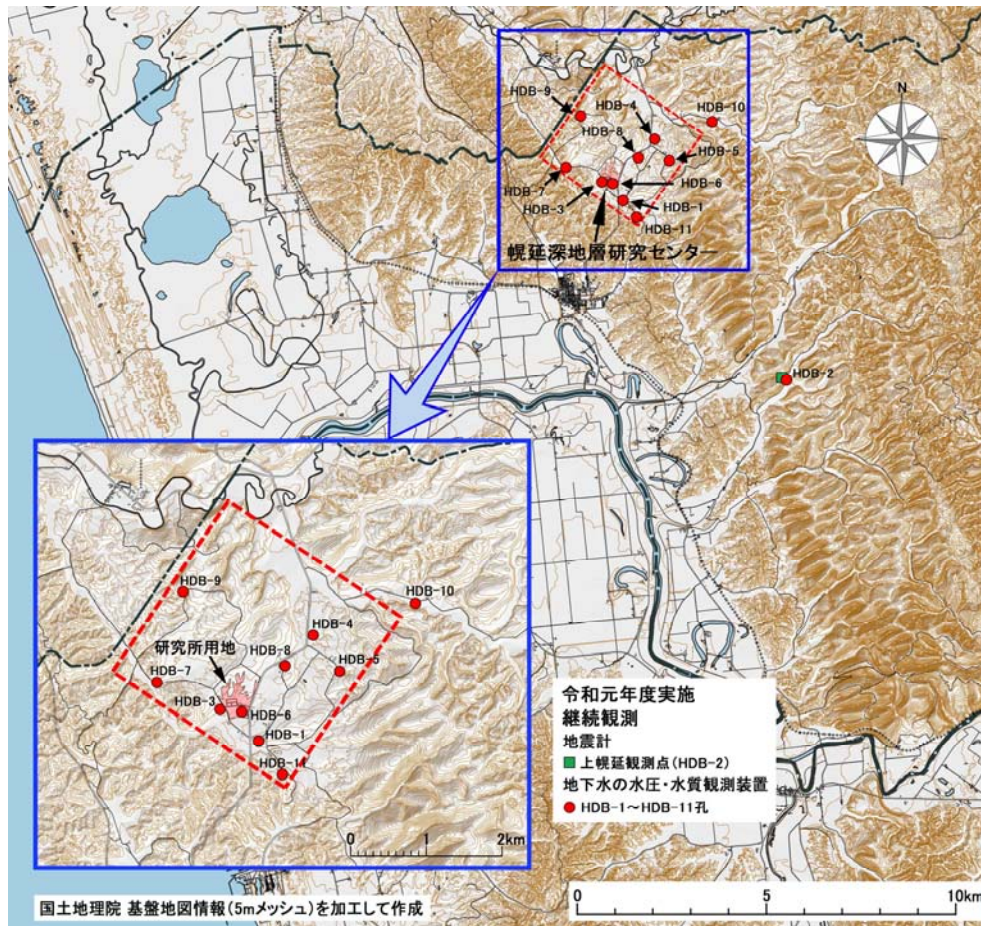


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

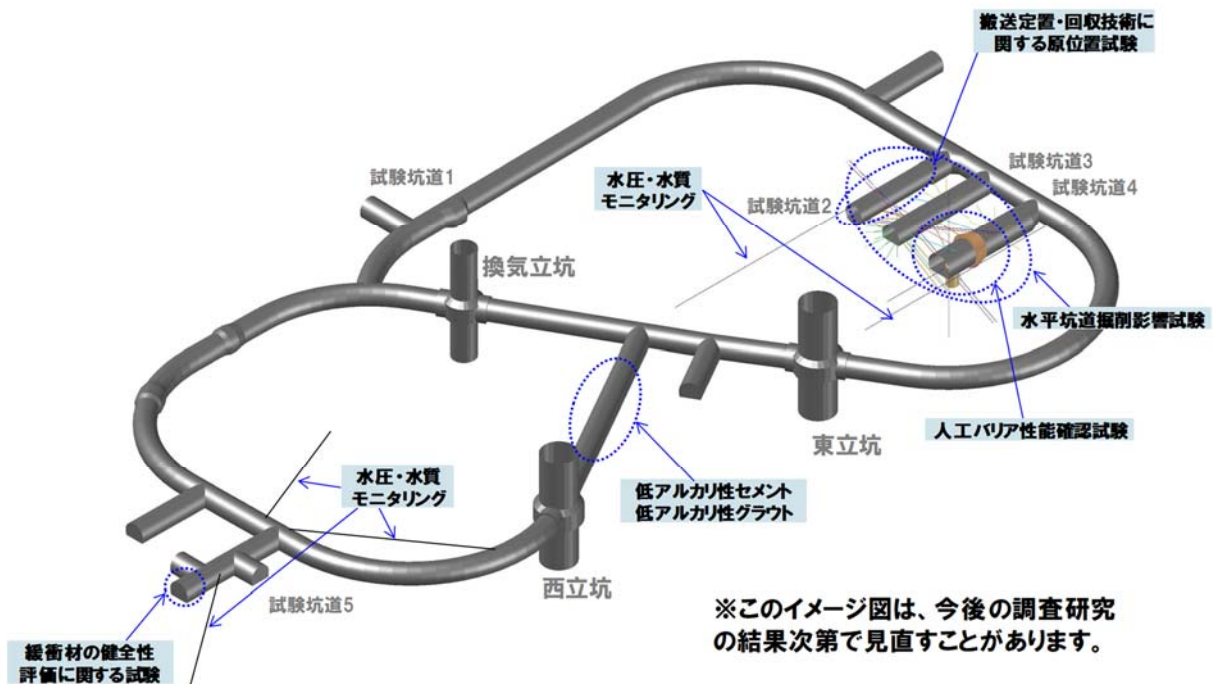


図 4 深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

地下施設の維持管理としては、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務（保守点検や修繕など）を引き続き実施するとともに、地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水を、排水処理設備において適切に処理したうえで天塩川に放流しています。また、平成31年4月9日に発生した火災について原因究明を行い、再発防止策として設備の改造とともに点検項目の追加等の対策を行いました。

幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構の核燃料サイクル工学研究所などの成果とあわせて、一連の地層処分技術として、処分事業や安全規制に適宜反映していきます。そのため、令和元年度も国内外の研究機関との連携を図るとともに、大学などの専門家の協力を得ながら、本計画を着実に効率的に進めました。また、研究開発業務の透明性・客観性を確保する観点から、研究計画から成果までの情報を国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開するとともに、ホームページ*¹⁰などを活用した情報発信を継続しました。参考資料として、巻末に令和元年度の外部発表実績を掲載しました。

*10 : <http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

3. 地層科学研究

3.1 地質環境調査技術開発

3.1.1 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発

(1) 地質構造

ボーリング調査や坑道掘削時の壁面観察において取得した地質データに基づき、地層および断層・割れ目の空間的な分布に関する特徴を整理して、地質構造の概念や坑道周辺の地質構造モデルの更新を進めています。

地下施設周辺の稚内層には、層理面に平行な断層（以下、層面断層）とそれに斜交する断層（以下、斜交断層）が分布しています^{(3),(4)}。そのうち斜交断層は水みちとして機能することが示唆されており、稚内層の水理学的特性は多孔質媒体のみならず亀裂性媒体としての特性も有しています^{(5),(6)}。すなわち、水みちとなる断層の分布が地層の透水不均質性に影響しており、そのような場をモデル化する場合、亀裂ネットワークモデル（以下、亀裂モデル）も選択肢の1つとなります。亀裂モデルにおける個別の亀裂の空間分布は、調査データから同定された割れ目特性データの統計的分布に基づき確率論的に表現することもできます。亀裂の空間分布がランダムであり、亀裂の形状が一様かつ亀裂同士の切断関係を考慮しないと仮定すると、亀裂の空間分布のモデル構築に必要となるのは、方位分布、亀裂の三次元密度および半径分布であり、これまでボーリング調査や坑道壁面の地質観察により取得される地質データに基づき検討されてきました⁽⁷⁾。また、亀裂モデルを水理解析に用いる場合には、亀裂の水理特性を設定する必要があります。そこで令和元年度は、稚内層浅部に分布する斜交断層を対象として、亀裂の透水量係数分布を検討しました。

図 5に、検討の際に実施した亀裂モデルでの水理解析の概念を示します。解析には、米国Golder社が開発したソフトウェアであるFracMan®を使用しました。一辺200 mの立方体内に亀裂モデルを構築するとともに、その中心に長さ100 mの鉛直の試験区間（ボーリング孔）を配置し、試験区間を注入区間、また、モデル領域の外側の6面を流出面とした仮想水理試験を行いました。そして、仮想水理試験の結果として、鉛直の試験区間と交差するそれぞれの亀裂の透水量係数を求めました。亀裂モデルは、平成29年度に検討した亀裂特性（方位分布、亀裂の三次元密度、半径分布）⁽⁷⁾を

用い、亀裂の透水量係数分布は変動値として構築しました。稚内層浅部に分布するそれぞれの斜交断層の透水量係数にはばらつきがあり、本検討の亀裂モデルでは、そのばらつきが対数正規分布に従うと仮定しています。その場合、亀裂の透水量係数分布として対数平均値と対数標準偏差を設定します。今回の仮想水理試験では、対数平均値を5.1から6.2、対数標準偏差を0.5から2.0の範囲でそれぞれ0.1間隔で変動させ、合計192通りの亀裂の透水量係数分布を設定しました。亀裂モデルは、確率論的に構築されるモデルであるため、サイコロを振って異なる数字が出ることと同様に、同じ亀裂の透水量係数分布であっても構築毎に異なる亀裂配置のモデルが構築されます。そのため、1つの亀裂の透水量係数分布に対して100リアライゼーションの亀裂モデルを構築し、100回の仮想水理試験を実施しました。解析結果としては、試験区間において透水に寄与する亀裂が交差する箇所（流出点）の透水量係数が得られます。図 6に実測値と解析値の比較を示します。実測値としては、地上からのボーリング調査において実施された流体電気伝導度検層（Flowing Fluid Electric Conductivity logging：FFEC検層）（HDB-11⁽⁸⁾、PB-V01⁽⁹⁾、SAB-2⁽¹⁰⁾）において取得されたボーリング孔内における流入出点の透水量係数を用いることとし、3つのボーリング孔で35箇所の流入出点が観測されています。比較には、透水量係数が高い方からカウントした累積頻度を用いており、100回分の仮想水理試験の累積頻度を、実測である3孔のFFEC検層における稚内層浅部の区間長の合計に合うように正規化しました。そして、比較の結果、最も誤差が小さくなる亀裂の透水量係数分布を抽出しました。なお、FFEC検層から取得された流入出点が仮想水理試験の試験区間と交差する個々の斜交断層に対応すると仮定しました。一方、解析値については、100回分の仮想水理試験の結果をプロットしていますが、図 6の（A）には、同じ対数標準偏差1.5の場合における対数平均値-5.1、-5.5、-5.9の3つの解析値をプロットしています。一方、図 6の（B）には、同じ対数平均値-5.5の場合における対数標準偏差1.0、1.5、2.0の3つの解析値をプロットしています。対数標準偏差は透水量係数のばらつきの大小を表しており、その値が小さいほど、ばらつきは小さくなります。すなわち、対数標準偏差が小さいほど、透水量係数の分布の範囲が狭くなるので、解析値

のプロットは対数標準偏差が小さいほど傾きが大きくなっています。実測値と解析値の比較の際には、実測値がプロットされる透水量係数の範囲において比較することとし、実測値の回帰直線と解析値の差の二乗平均平方根（Root Mean Square Error: RMSE）を算出し、その値が最も小さくなる時、実測であるFFEC検層の結果を最も再現する亀裂の透水量係数分布とすることにしました。図 7に、仮想水理試験を実施した対数平均値と対数標準偏差の組合せと、その場合のRMSEの一覧を示します。すべての組合せの仮想水理試験を実施した結果、対数平均値が-5.5、対数標準偏差1.5の時に最もRMSEが小さくなりました。

上記のように、本検討では、亀裂モデルにおいて表現される個々の亀裂に対して水理特性をどのように設定するのかを、稚内層浅部に分布する斜交断層を対象として検討しました。その結果、水理特性として実測データであるFFEC検層の結果を再現できる亀裂の透水量係数分布を設定することができました。

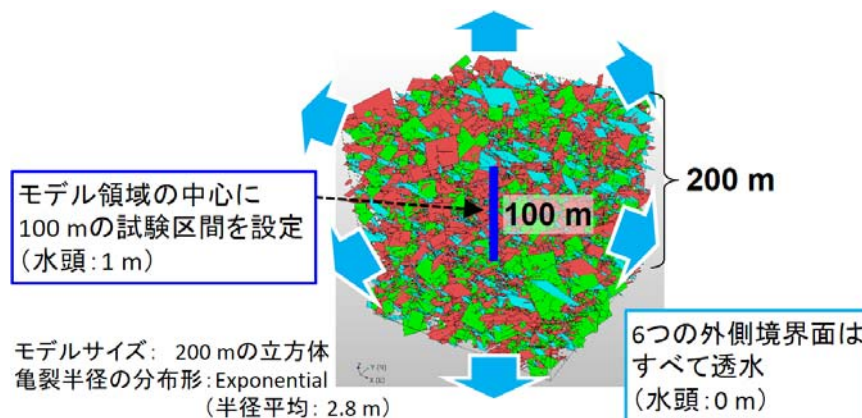


図 5 亀裂ネットワークモデルを用いた水理解析の概要

一辺 200 m の立方体をモデル領域とし、その中心に 100 m の鉛直の試験区間（ポーリング孔）が配置されています。この解析は、フローログ検層の解析的なシミュレーションです。試験区間を注入区間（水頭 1 m）として、6 つの外側境界面（水頭 0 m）に向けて地下水を流し、試験区間と亀裂が交差する位置すなわち流出点の個々の流量を取得します。その流量から個々の流出点の透水量係数を算出します。

た透水試験（水圧擾乱試験）を行っています。断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係性については、これまでにダクティリティインデックス（DI）^{*12}という岩石の強度・応力状態を表す指標を用いた検討を行ってきており、断層帯中の割れ目がとり得る透水性の上限値はDIを用いた経験式によって予測可能であることが様々な地域の岩種を対象とした検討により明らかとなってきました⁽¹¹⁾（図 8）。このような経験式は、地殻変動（断層運動や隆起侵食）を考慮した断層の透水性の将来予測に直接活かすことが期待できるため、この経験式の信頼性をさらに高めておく必要があります。水圧擾乱試験はこの経験式の妥当性の検証も兼ねて行うものであり、断層内の水圧を人工的に上昇させることによって断層内にせん断変形を誘発させ（図 9右図）、それによる透水性の変化を計測することにより、断層のずれによって透水性がどの程度上昇し得るかを確認するものです。しかし、試験中の断層のずれをどのように計測するかが技術的な課題となっています。

令和元年度は、平成30年度に東立坑底盤ボーリング孔（図 9左図）にて実施した水圧擾乱試験（深度約500 m）の結果を用いて、今回新たに開発した水圧擾乱試験中の断層変位量の算出方法（3.1.2(1)参照）の適用性を確認しました。同試験では、高圧注水中に急激な水圧低下をもたらすせん断破壊が断層沿いに生じたことがこれまでの検討で把握できていたことが（図 10下図）、このせん断破壊時に、試験区間が数cmほど短縮したことが今回の検討により明らかになりました（図 10上図）。この試験区間の短縮は断層の上盤側が下方にずれたことにより発生したものであり（断層面の傾斜角は水平面から71度）、上記のせん断破壊のイベントを境に、小さな水圧変化でも断層が敏感に動くようになりました（図 10）。このせん断破壊のイベントの前後で、試験区間の水圧と断層のせん断変位量および水理開口幅^{*13}との関係性を整理すると、図 11のように示されます。図 11上図から、区間水圧が4.4～5.1 MPaの低圧時^{*14}に、せん断破壊の前

*12：岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標であり、この値が高いほど、岩石は見かけ上、やわらかくなります。岩盤にかかる平均有効応力（岩石に実際にかかる平均的な負荷応力）をその健岩部の引張強度（岩石の引っ張り破壊に対する強度）で除した値で定義されます。

*13：亀裂の透水性を実際に支配する開口幅であり、亀裂面が平坦であると仮定して算出します。

*14：亀裂の開口幅は水圧が上昇するとせん断変位に関係なく開口し始めるので、この影響を除くため、水圧の低い段階に着目して検討を行っています。

はせん断変位量が0 mmでしたが、せん断破壊後は数mm以上のせん断変位が生じていた（残っていた）ことが確認できます。この時に、水理開口幅はせん断破壊の前後で変化しなかった、あるいはせん断破壊後の方がわずかに小さくなったことが図 11下図から確認できます。したがって、数mm以上のせん断変位によって断層の水理開口幅が増加しなかったことが示されます。数mmのせん断変位は、今回試験を行った断層の水理開口幅が数十 μ mである（図 11下図）ことを考慮すると、せん断変位による水理開口幅の変化を議論する上では十分に大きな変位量であると言えます。

せん断変位によって断層の水理開口幅が増加しなかった（透水性が上昇しなかった）結果は、同断層の試験開始時の透水性（図 12の初期状態）が既にDIの経験式が示す上限の範囲に達していた（図 12）ことと整合的であり、既に過去の断層変位によって十分に透水性が上昇しきっていたことが考えられます。また、試験中、水圧上昇に伴って、有意な水理開口幅の増加が認められましたが（図 11下図）、これは水圧上昇に伴って通常起こり得る断層の垂直的な開口変位を示しており、これによる透水性の上昇もDIの経験式が示す上限の範囲内に収まっていることが確認できます（図 12）。

今回の試験で与えた水圧上昇量は、隆起侵食に伴う封圧低下量に換算すると*15、概ね150 m～200 mの隆起侵食量に相当します。すなわち、深度500 mから深度300 mに隆起すると図 12に示すような断層の透水性の上昇が生じ得る可能性が指摘できるとともに、断層運動や隆起侵食が起こっても断層の透水性がDIの経験式の範囲を超えて有意に上昇することはないことが指摘できます。

*15：断層面には周囲の地圧によりその面を閉じようとする力が常に掛かっており、隆起侵食に伴う上載物の除去によって周囲の地圧が低下すると、その面を閉じようとする力も弱まり、断層面は徐々に開き始めます。この断層面を閉じようとする力が弱まる現象は、断層内の水圧を上昇させることによっても再現することができ、両者は力学的に等価な現象と考えられています。

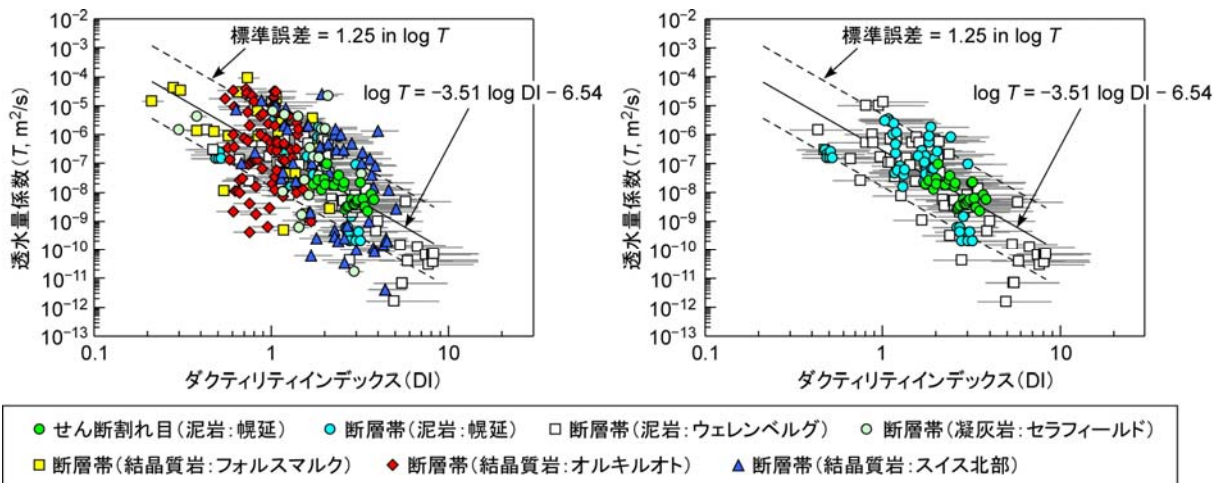


図 8 断層帯中の割れ目（もしくは単独のせん断割れ目）がとり得る透水性の上限値と DI の関係⁽¹²⁾

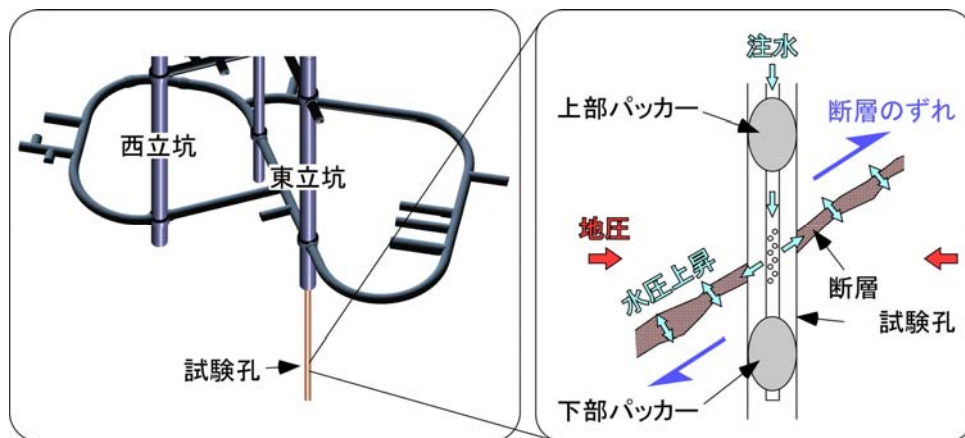


図 9 試験孔の位置 (左図) と水圧擾乱試験の概念 (右図)

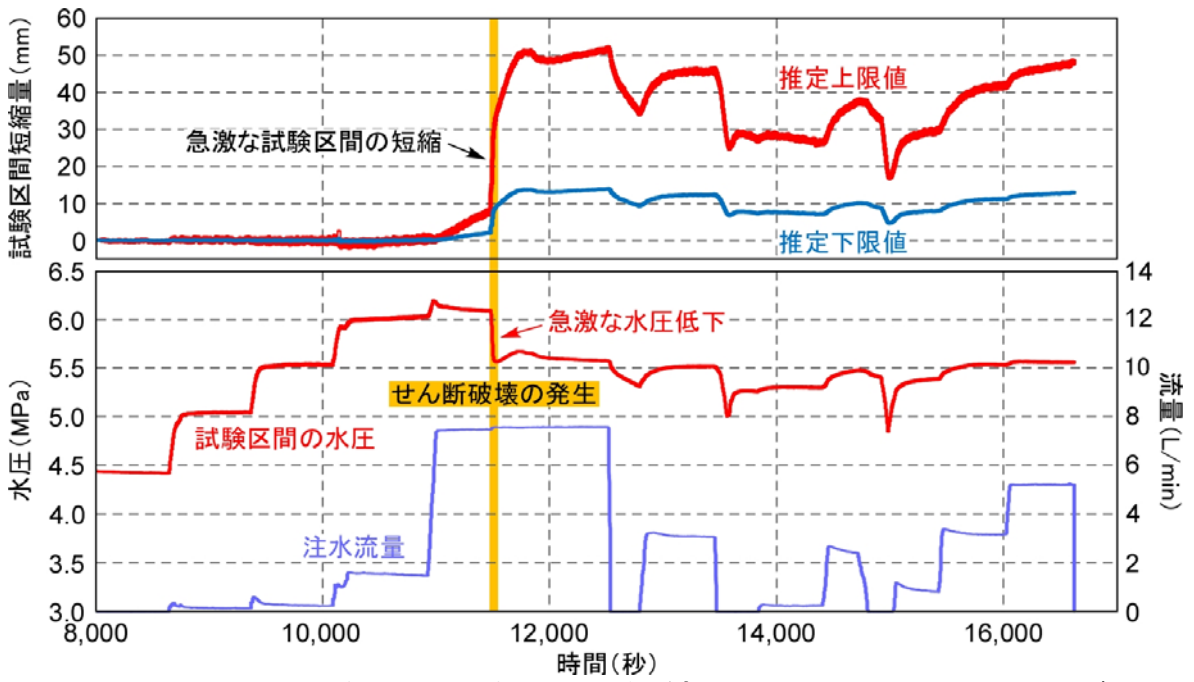


図 10 水圧擾乱試験中の試験区間の短縮量（上図）と水圧および注入流量（下図）

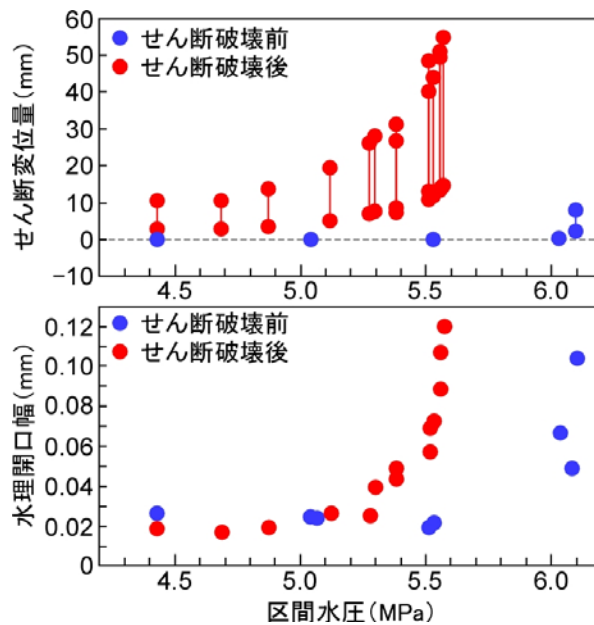


図 11 水圧擾乱試験中の区間水圧と断層のせん断変位量（上図）および水理開口幅（下図）

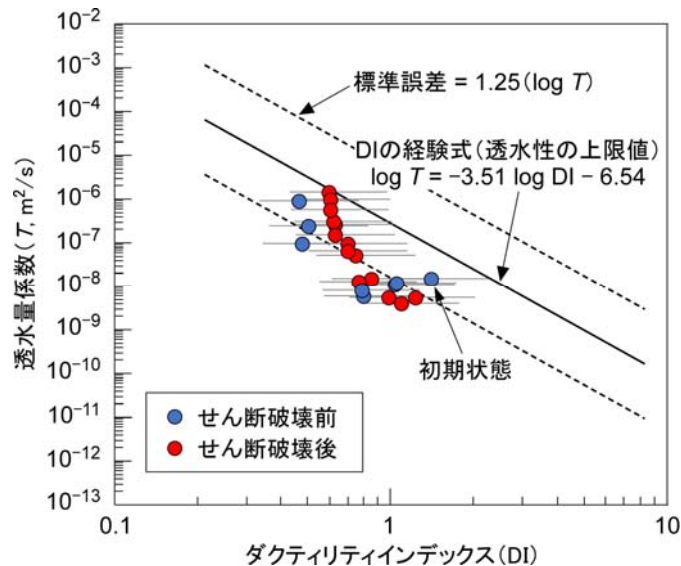


図 12 水圧擾乱試験中の断層の透水量係数と DI

地下施設からの湧水（排水）に伴う周辺地層の水圧変化を把握するために、HDB孔およびPB-V01孔に設置したモニタリング装置による地下水の間隙水圧の観測を行っています。令和元年度は平成30年度に引き続き、換気立坑から160.5 m離れたHDB-6孔の稚内層中の断層区間の水圧観測データを用いて、地層の巨視的な透水性の検討を行いました。図 13に示すように、同孔では、換気立坑が稚内層に到達した際に発生した顕著な湧水量増加以来、稚内層の浅部の観測点（深度296 m、369 m、447 m）で有意な水圧低下が認められています。一方で、稚内層の深部の観測点（深度565 m）では、浅部に認められるような有意な水圧低下は認められていません*16。なお、平成28～30年度までの一部のデータの乱れについては、平成30年度に孔内モニタリング装置内の地層の水圧とは直接関係のない部分の水の入れ替えを実施したところ、データの乱れは解消され*17、令和元年度においては同年12月に発生した宗谷地方北部で起こった地震の影響による水圧上昇が観測されたものの、1年以上にわたって水圧低下が発生していないことを確認することができました（図 13下図）。

図 13に示される稚内層の浅部と深部の水圧応答の違いを透水試験の結果や水圧・水質分布の検討から推定されている既存の水理地質構造モデル⁽¹³⁾と比較すると、両者は整合的であることが指摘できます。すなわ

*16：断層のない区間でも同様の傾向が認められています。

*17：部品を交換しても不具合が解消されない状態が続いていましたが、平成30年度に孔内モニタリング装置内に残っていた塩分濃度の高い地下水を清水に入れ替えたところ、不具合が解消されました。