

4. 地質及び水理環境モニタリングの手法，計画等の妥当性に関する知見の整理

【目的】

中深度処分においては，地下水の状態に加えて，人工バリアや天然バリアが設計を逸脱することなく性能を発揮しつつあること確認するために，地下水の状態等を確認するためのデータ取得（以下「地下水等モニタリング」という．）が重要である．これらを確認するためには，廃棄物埋設地周辺の地質構造を把握することに加え，地下水流動や水質等の水理環境状態を建設前の段階から把握し，廃棄物埋設地及び坑道の建設が地質及び水理環境に与える影響や埋戻しによる水位回復過程を地下水等モニタリングによって把握する必要がある，このことは処分の安全確保及び掘削制限範囲の設定の観点から非常に重要な事項である．

そこで，地質構造を考慮した地下水流動や水質の変動を把握するための効率的なモニタリング装置及びその配置や必要とされるモニタリング項目・期間等適切なモニタリング計画を設定するための関連事項及び掘削制限範囲の設定のための知見の整理を行う．そのため，既存の大規模地下空間利用の事例として，国家石油地下備蓄基地（久慈，菊間，串木野）及び国家石油ガス備蓄基地（波方，倉敷），日本原子力研究開発機構地下実験施設（瑞浪，幌延）に関して，既往公表文献（論文，報告書等）から地下水等モニタリングに関する情報を抽出し，取りまとめることで上記の知見の整理を行う．

【成果】

4.1 既存地下空間利用におけるモニタリング情報

本節では，石油地下備蓄基地，石油ガス地下備蓄基地，地下実験施設の各事例における水理地質情報及びモニタリング孔配置等に関する基本情報を整理する．

4.1.1 国家石油地下備蓄久慈基地

1) 水理地質情報

久慈地域の地質図を図 4.1.1-1 に示す¹⁾．また，岩盤タンク及び周辺地下施設の平面図を図 4.1.1-2 に示す．岩盤タンク区域の基盤岩盤は花崗岩（花崗閃緑岩）を主体とし，一部に捕獲岩様の斑れい岩やアプライトの貫入岩がみられる．斑れい岩は岩盤タンク区域の北東部にブロックとして分布し，ここから主として東部～南東部に複数の岩脈として分布する．花崗岩は新鮮部では堅硬であるが，割れ目が数 cm から数 10cm 間隔で発達している．斑れい岩は不規則な割れ目が顕著で，粘土をともなう部分が多く岩質不良部となっている．また，岩盤タンク区域には破碎幅 30cm～120cm の比較的規模の大きい断層が 7 条認められており，これらはおおむね東南東～西北西走向で急傾斜し，南から F-4～F10 断層（図中では④～⑩断層）と呼ばれており，細片～角礫状の破碎と粘土をともなう．このうち，F-5，F-9 および F-10 の 3 条の断層では周辺岩盤の劣化が激しく，F-10 断層は最大 27m の幅（水平方向）の劣化帯を伴う．地下備蓄方式岩盤分類による基地全体の岩級区分の割合は，H 級：2%，M 級：31%，L 級：66%であり，岩盤タンク区域には，M 級と断層（F-4，F-5，F-6，F-8，F-9，F10）に沿って分布する L 級が卓越して分布している（図 4.1.1-3）．

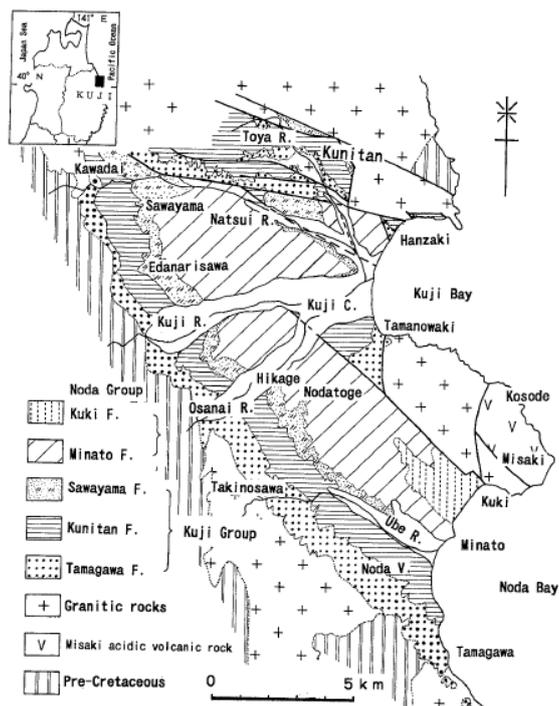


図 4.1.1-1 久慈市周辺の地質図¹⁾

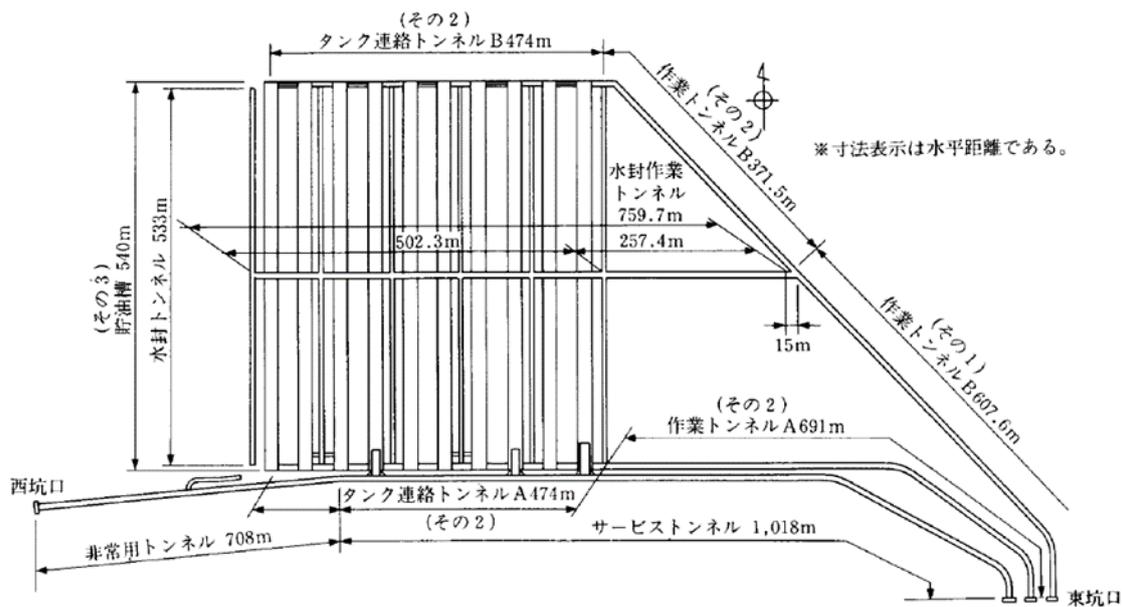


図 4.1.1-2 久慈基地地下施設全体平面図²⁾

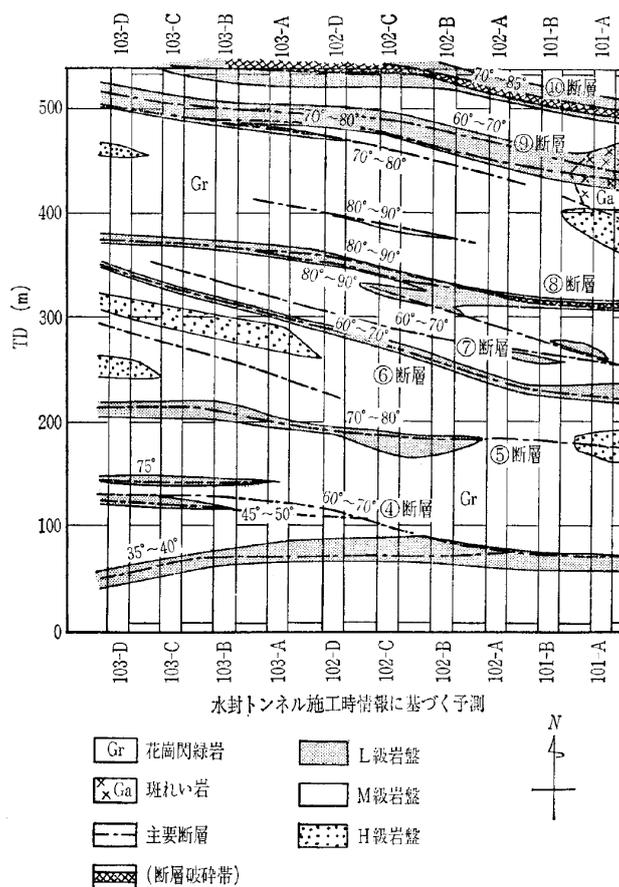


図 4.1.1-3 岩盤タンクアーチ部における地質水平断面図 (EL-27.5m)³⁾

図の横軸に示された英数字 (1**-*) は岩盤タンク番号, 凡例にある岩盤等級は地下備蓄方式岩盤分類法 (岩盤の硬さ, 割れ目間隔を主分類要素とし, 挟在物の有無等の割れ目の状態や湧水状況を副分類要素とするもの)

久慈基地においては, 岩盤透水試験 (ルジオン試験) により花崗岩の透水係数が求められている. 透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ オーダーの範囲に分布し, $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ オーダーの頻度が 80%以上で, 花崗岩の平均透水係数は $7.6 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ となっている. 各種の調査結果を総合的に判断して予想した透水ゾーン分布をみると, 割れ目沿いに $6 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以上の範囲が広がっており, 高透水部 (断層およびアプライト部) の透水係数は $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上である (図 4.1.1-4).

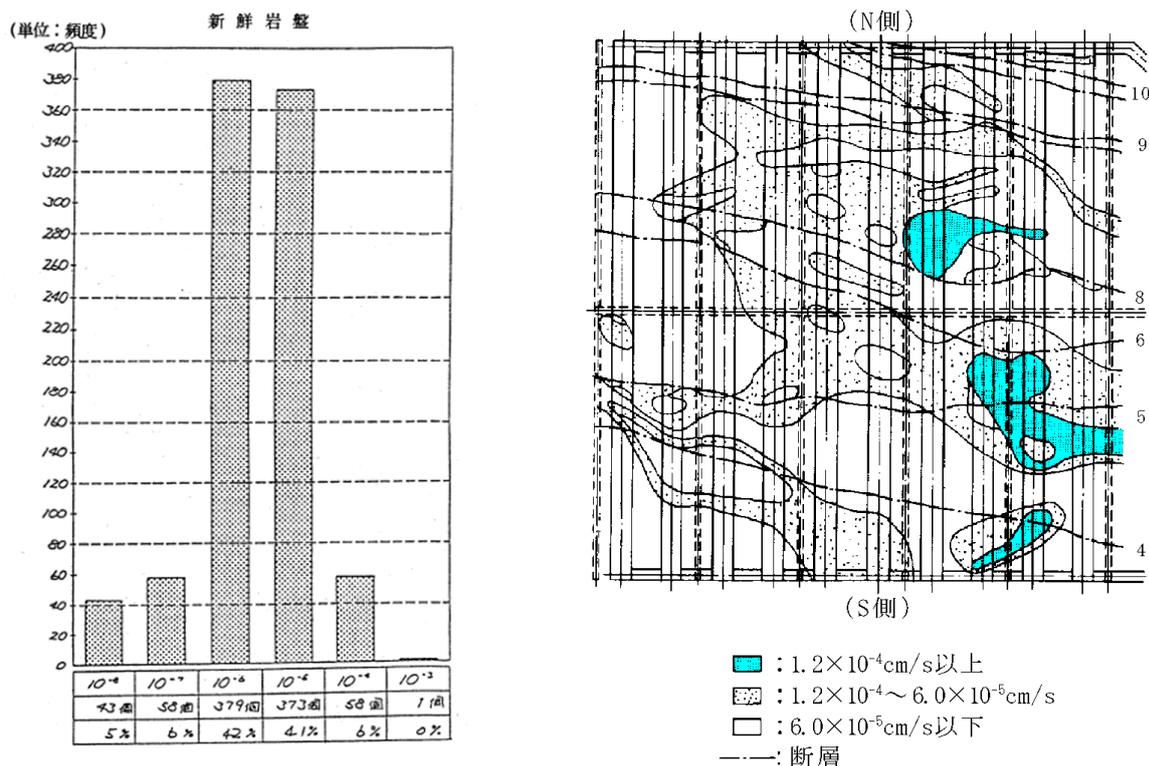


図 4.1.1-4 左：久慈基地における透水係数の頻度分布⁴⁾，右：岩盤タンク周辺での透水ゾーン分布モデル²⁾

2) モニタリング仕様

石油地下備蓄基地における地下水モニタリングは、岩盤タンクにおける水封機能の監視を目的としているため、主に水封を行っている範囲内での地下水位等の計測を行っている。久慈基地においては、掘削の影響による地下水位の変化を把握しながら、安定した地下水位を確保するために必要な対策を講じる必要から、図 4.1.1-5 に示す水封管理システムフローに従って、水封トンネル掘削工事(1988年から開始)から地下水位観測が行われている。2004年までは、地表からのボーリング孔18孔(W-1~18)のモニタリング孔が配置され、2004年~2005年には上記18孔に加え、地上注水孔8孔(岩盤タンク区域内の南東部)及び地下間隙水圧観測孔12孔(サービストンネルから岩盤タンク区域内の南東部)が追加され、それぞれ歪ゲージ式間隙水圧計による計測が行われている。図 4.1.1-6 に久慈基地におけるモニタリング孔等の配置図を上記の水理地質構造と重ね合わせて示す。

久慈基地におけるモニタリング孔配置の特徴は、以下に示す通りである。

- 岩盤タンク区域(南北方向：540m，東西方向：470m)において
 - ◇ 南北方向の中央軸沿いに6孔
 - ◇ 南北方向の東端軸沿いに5孔
 - さらに、中央軸と東端軸の間に2孔
 - ◇ 南北方向の西端軸沿いに5孔

地下水位観測にあたっては、有線テレメータによる地下水位観測ネットワークシステムを構築し、18孔(孔名：W-1~18)の水位観測孔の観測データを室内で集中管理しており、地下水位観測に間隙水圧計を使用している²⁾。

岩盤タンク区域は、約540m(南北方向)×約470m(東西方向)で、岩盤タンクより外側へ100mの範囲を含めば、その範囲は約740m×約670m(面積約495,800m²)となる。モニタリング孔(18孔)は、概ね岩盤タンクの5B(B:タンク幅18m)の範囲内で40,000m²に1箇所の割合で設置されており、設置消防法に規制される石油地下備蓄基地の運用指針、消防危第39号「岩盤タンクに係

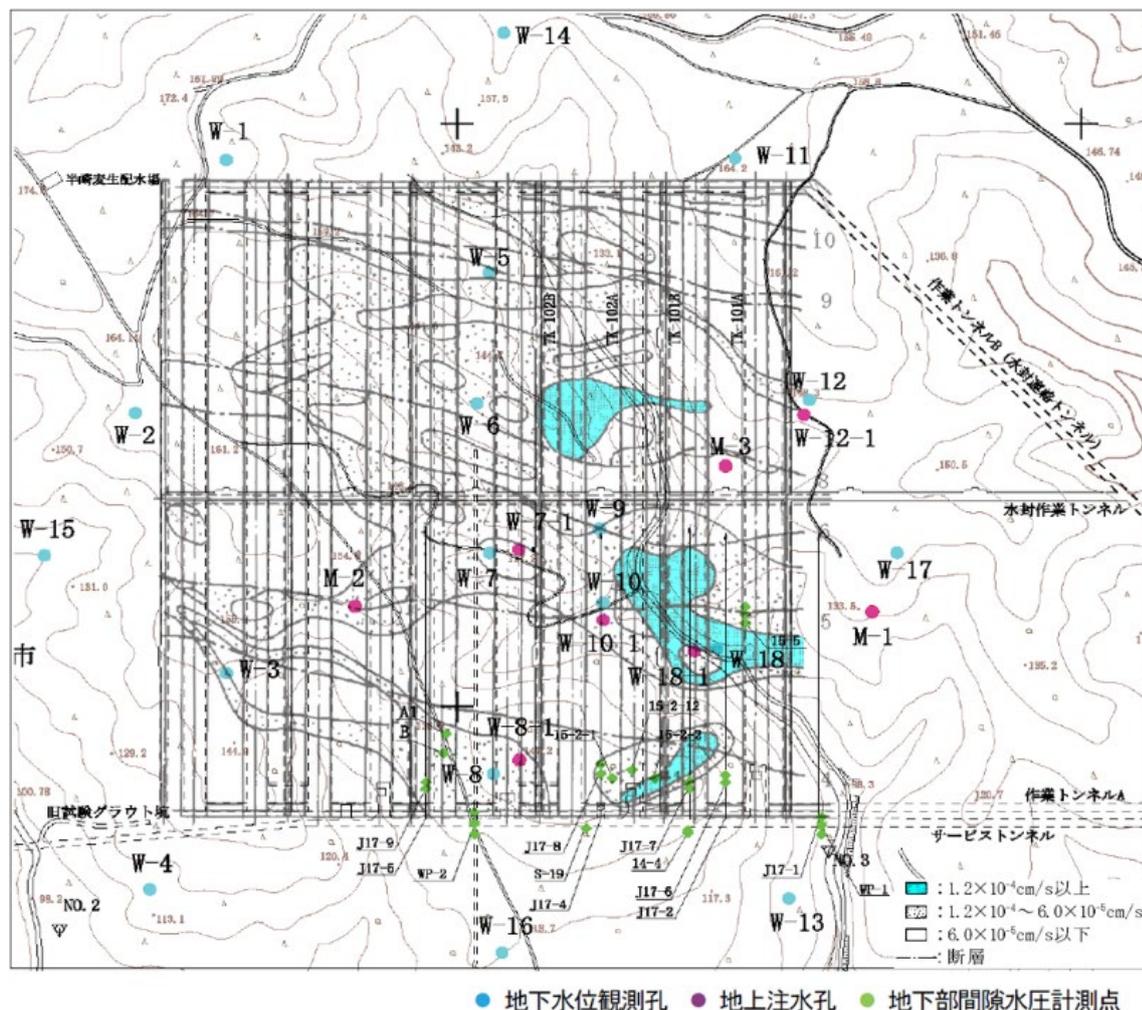


図 4.1.1-6 久慈基地でのモニタリング孔の配置〔透水ゾーン分布図（岩盤タンク設置深度）との重ね合わせ〕^{2,5)}

高い透水性を有するアプライト部 ($1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$) は岩盤タンク区域では北東部にブロック状に分布するのみであるが、文献によればここから東部～南東部に複数の岩脈として分布すること、また、図 4.1.1-6 によれば、岩盤タンク区域を北東から南西へ二分したときの南東側領域には、断層沿いに $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上の高い透水性を有する領域が分布している。このような水理地質条件によって岩盤タンク区域の南東側で相対的に地下水位が低くなることを考慮して、これらの領域にやや密な配置となっているものと考えられる。

4.1.2 国家石油地下備蓄菊間基地

1) 水理地質情報

石油地下備蓄の菊間基地（および菊間実証プラント）は、愛媛県今治市の瀬戸内海を北方に突き出た高縄半島中央部に位置し、東北東-西南西に伸びる海岸線に面し、背後には高縄山系が迫り平野部は比較的少ない地域である。

菊間基地周辺の地質平面図を図 4.1.2-1 に示す。本地点は、領家帯に属し、中央構造線の北側に分布する新期領家花崗岩類からなり、一部変成作用を受けている。文献によっては古期領家花崗岩類のトーナル岩質岩（石英閃緑岩～花崗閃緑岩）が分布するとの記述もある。

岩盤タンクを構成する地盤は、地表部からおおよそ 20～25m 間は花崗岩の強風化帯で土砂状を呈しており、その下部約 5～15m 間は風化花崗岩、その下部が新鮮岩からなる 3 層により構成される。新鮮岩の上限面標高はほぼ EL. -6m から EL. +6m の範囲にある。

新鮮岩は概ね C_H～B 級（電中研式岩盤区分）の花崗岩で青灰色～灰色の緻密、堅硬な様相を呈するが、部分的に C_M～C_L 級の亀裂の多い部分および緑灰色～桃灰色を呈するマイロナイト化した部分があり変質を受けて脆弱である。新鮮岩中の亀裂は中角度から高角度の傾斜をもつものが多く、一般に密着しており挟在物は少ないが、マイロナイト化した部分や破碎された部分には粘土や緑泥石、方解石が充填していることが多いとされる。

また割れ目分布については、ボーリング調査結果から岩盤タンク周辺は RQD が 80～85% であり、割れ目は比較的少なく、割れ目に沿った風化変色もほとんど認められないとされる。さらに、7 本の空洞掘削時に切羽で観察された亀裂の分布状況から、当基地に分布する亀裂は、N40E～N50E 走向のグループと N30W～N50W の走向を有するグループに分けられ、傾斜角度は 60°～80° と高角度のものが卓越している。これら 2 グループの亀裂帯の交差箇所の一部が高透水路となり、地下水の低下領域を形成している。

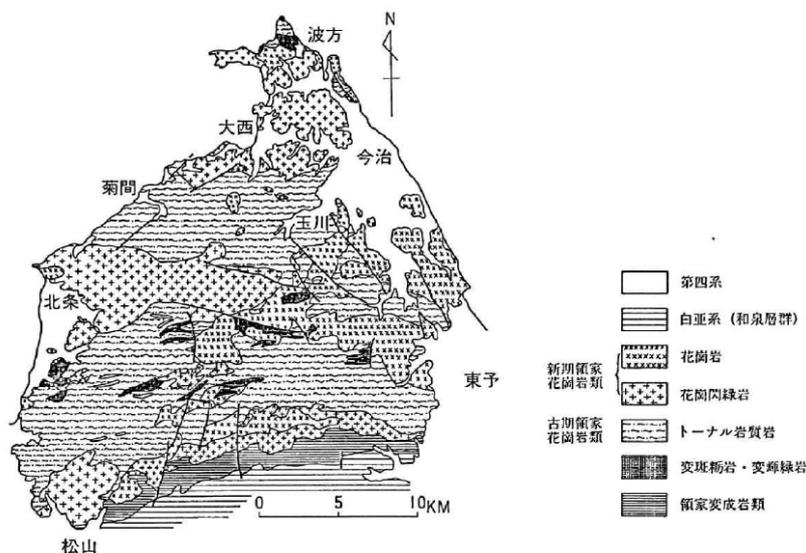


図 4.1.2-1 高縄半島の地質図^{6,7)}

基地周辺で実施した原位置の透水試験（ルジオン）では、岩盤の透水係数は $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ （亀裂の多い領域で $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ オーダー、その他は 10^{-8} cm/s オーダー）とさる。また、ルジオン試験で求められた透水係数に対数分布平均法を適用し算出した結果があり、これによると菊間基地の岩盤の平均透水係数は、新鮮部で $6.4 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、割れ目を含んだ平均が $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、風化部で $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ である。透水係数の分布を図 4.1.2-2 に示す。

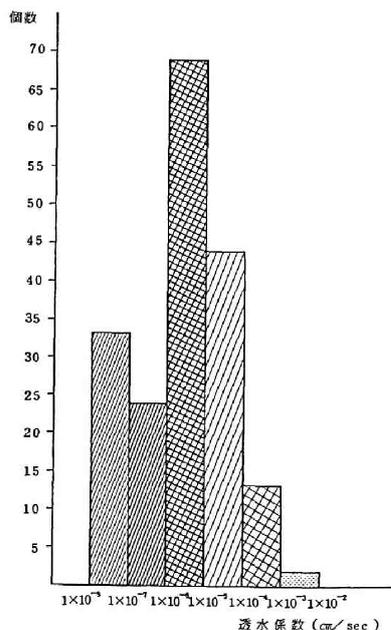


図 4.1.2-2 菊間基地における透水試験結果の頻度分布⁶⁾

菊間基地における岩盤タンク等の平面図を図 4.1.2-3 に示す。

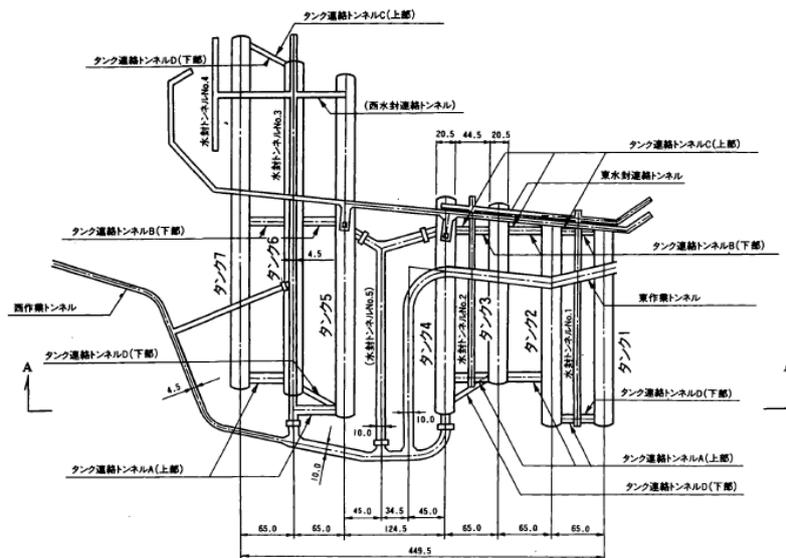


図 4.1.2-3 菊間基地における岩盤タンク等の平面図⁸⁾

岩盤タンク掘削に伴う湧水の発生状況では、掘削された空洞上部からの湧水が支配的であり、しかも特定の領域に集中する傾向を示している⁸⁾。湧水の特徴としては、空洞軸に約 30° で交差する亀裂帯と明瞭な相関関係にある。また、大規模な亀裂帯が前述の亀裂帯と交差する箇所での湧水が特に顕著となっている。一方、タンク 5～タンク 7 の湧水はタンク 1～4 に比べて少ないが、湧水は基本亀裂帯に沿って発生している。連続性の高い亀裂帯または小規模な亀裂が集中した箇所で湧水は生じており、概ね空洞内の亀裂帯と密接な関係にあるとされる。

また、地下水位の変動についてもこれら亀裂帯の位置との関連が認められている。空洞掘削開始前と空洞掘削終了後の地下水位の差分コンターとアーチ部掘削終了時の湧水マップに、亀裂帯の分布状況を合わせて示したものを図 4.1.2-4 に示す。同図に示されるように、顕著な地下水位の変動は、タンク 2 の中央部を中心とする領域とタンク 6～7 の北西部付近の領域に限

定しており、空洞内で湧水が顕著であった箇所と一致している。①、②のような N30W～N50W 走向を有する亀裂帯と③、④のような N40E～N50E 走向を有する亀裂帯が交差する箇所をほぼ中心として低下していることが示されている。

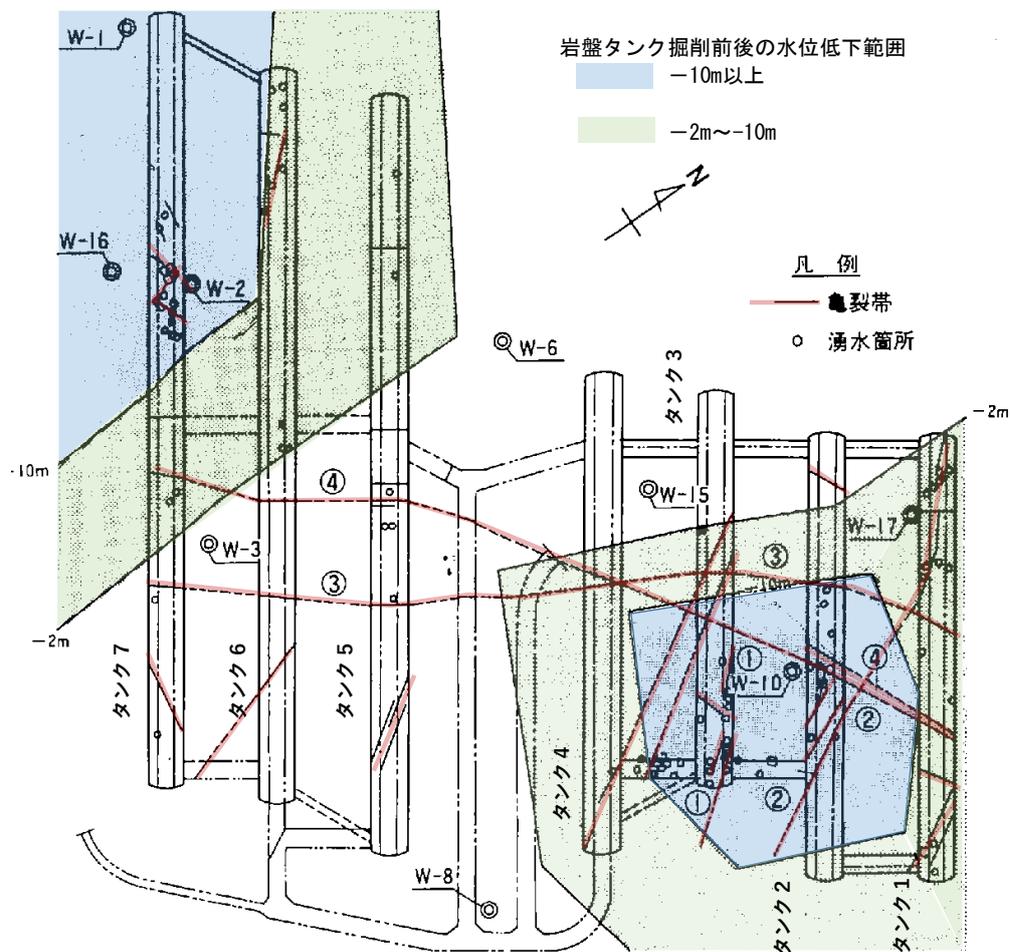


図 4.1.2-4 岩盤タンク掘削前後の水位低下範囲と亀裂帯との関係⁸⁾

2) モニタリング仕様

菊間基地建設および建設以降の水封維持管理に関わる地下水位モニタリング孔位置を図 4.1.2-5 に示す。

水封維持管理に関わる地下水位観測孔の配置については、他の基地と同様、消防法に規制される石油地下備蓄基地の運用指針、消防令第 39 号「岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準について」に従っている。

地下水位モニタリング孔は、W-1 孔～W-14 孔（現在 W-13 孔および W-14 孔は新 W-13 孔および新 W-14 孔）まで全 14 孔が施設を囲うように位置し、岩盤タンクの軸方向（北西－南東方向）に沿って 1 列に 3～4 孔、概ね 3 列配置されている。地表からのモニタリング孔で地下水位の観測対象となる深度（モニタリング孔の孔底深度）については、岩盤タンク中央断面に位置する W-3, 7, 10, 14 孔で図 4.1.2-6 に示すような配置となっており、限界地下水位 EL. -15m、水封トンネル底盤 EL. -12m に対して、すべての観測孔の孔底深度は EL. -18m と記載されている。

また地下からの観測孔は、サービストンネルからのボーリングにより、岩盤タンクの底盤標高 EL. -65m 付近へ間隙水圧計を設置している。

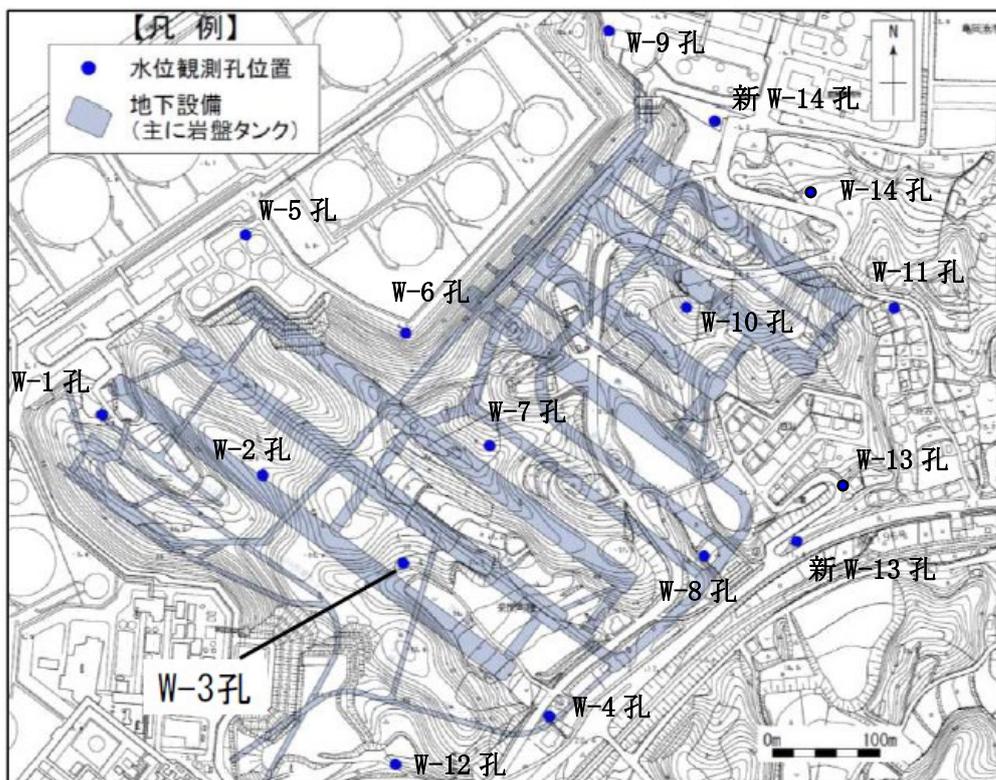


図 4.1.2-5 菊間基地における地下水位モニタリング孔配置図⁹⁾

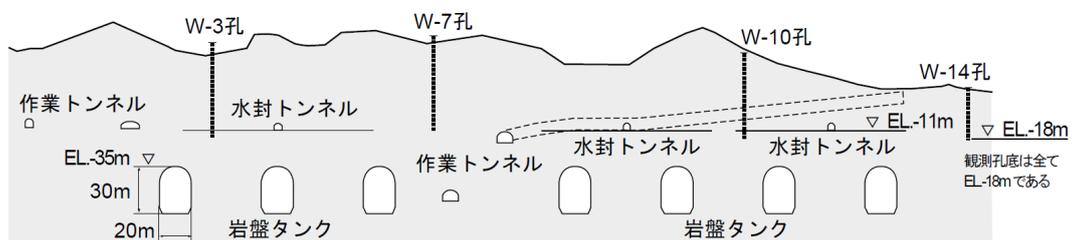


図 4.1.2-6 岩盤タンク, 水封トンネルと観測孔の配置¹⁰⁾

水位観測孔については, 地表水や浅層水が直接孔内に流入しないように地表からケーシング下端部までセメンチングされている. 計測機器は水位計 (間隙水圧計) を使用しており, 明確な記載はないが消防法に従い1回/日以上での頻度で計測されているものと考えられる.

4.1.3 国家石油地下備蓄串木野基地

1) 水理地質情報

石油地下備蓄の串木野基地は、鹿児島県薩摩半島基部のいちき串木野市の海岸に近い、平均標高200m丘陵性山地下に位置し、北東部には立岩（標高275.4m）を主峰とする山地、西側は東シナ海に面する。

串木野地域は西南日本外帯に属し、九州のグリーンタフ地域の中で北薩地区と呼ばれ、新第三紀の北薩古期及び中期安山岩類ならびに第四紀の崖錐堆積層からなり、北西側に北薩古期安山岩類、南東側には北薩中期火山岩類が分布する。

岩盤タンクを構成する岩盤は、北薩古期安山岩類の自破碎状安山岩（LB）と礫岩（LB(礫)）および安山岩（LB(An)）である。このうち、LBは岩盤タンク設置域の約7割を占め、LB(礫)は岩盤タンク設置域の南西側に分布し、LB(An)は主として岩脈状に分布している（図4.1.3-1）。岩盤タンクの主要な構成岩であるLBおよびLB(礫)は、全体的には堅硬緻密、新鮮で割れ目の少ない良好な岩盤であり、久慈、菊間の岩盤が硬岩であるのに対して中硬岩として位置づけられている。

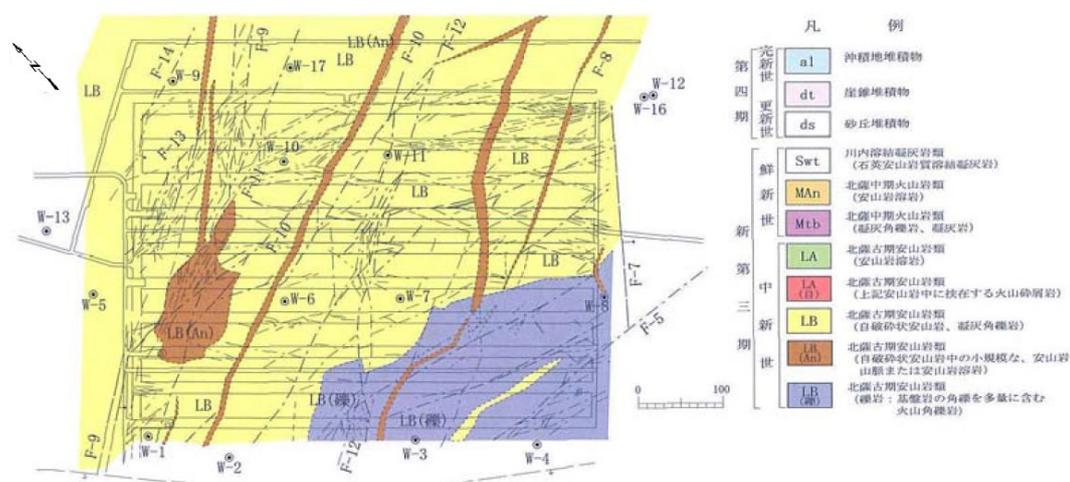


図 4.1.3-1 串木野基地地質平面図 (EL-27.5m) ¹⁰⁾

岩盤タンク設置域およびその周辺には図4.1.3-1に示す14条の主要な断層が確認されている。このうちの北部に集中して分布するF9~F14断層（F9断層群）は岩盤タンク軸方向とほぼ横断する方向となる北東-南西方向の走向で南東傾斜の比較的緩やかな30~60°の傾斜角を示すものが多く、周辺は熱水変質作用を受けて一部で白色粘土化するところ、あるいは開口亀裂の発達するところが見られるなど部分的に脆弱である。F9断層群周辺については、掘削時に警戒レベルを超える壁面の変位を観測するなど、空洞安定性に大きな影響を及ぼしたことから断面形状の変更または盤下げ中止区間を設定している。また、これらの断層周辺の一部で岩盤内の地下水圧が十分でないところも見られたため、水封機能の安定性確保の観点から自然水封方式から一部人工水封方式への変更とグラウト工事を実施している。

上記の領域については、岩盤の劣化の進行および割れ目に沿った地下水位の局所的な低下や不飽和域の形成に対して十分留意することが保安管理上重要とされている。水封管理状況として地質・水理状況（久慈、菊間、串木野の三基地）について表3.3.2に整理されている。

表 3.3-2 石油備蓄三基地の地質・水理状況¹⁾

	久慈基地			菊間基地			串木野基地		
	状 況	対 応 策		状 況	対 応 策		状 況	対 応 策	
地質・水理状況 ・母岩および岩級区分 ・亀裂開隔 ・亀裂、断層、破砕帯 ・湧水状況	H M L 久喜花崗岩95% (2% 31% 66%) I II III IV V — — 5% 82% 13%	地質が概ね判明した時点で水封検討を実施した結果湧水量を6,000l/d以下に抑制することが必要となり通常のセメントグラウト以外に広域グラウトを採用した⑤	H M L 新鮮部花崗岩97% (63% 32% 5%) I II III IV V — 2% 65% 31% 2%	22条の亀裂帯限られた亀裂から湧水および湧水があり水位低下はほとんど認められない乾燥している岩盤が一部で認められる	H M L 自衛神楽山岩76% (63% 32% 5%) I II III IV V 13% 34% 22% 26% 4% 14条の断層(貫入岩脈含む)帯 岩脈の交差したF-9断層群の一部ではタンク底盤レベル以下に水位が低下していた⑥ また局所的な異常出水があり水位低下を伴うものと伴わないものがある 岩盤が乾燥している箇所が多い	詳細地質調査を実施した結果高透水帯が賦存するため自然水封方式を一部人工水封方式に変更した⑦			
・透水係数 母岩設計値 高透水部	7.6×10 ⁻⁶ cm/sec 10 ⁻⁶ cm/sec以上 (断層およびアプタイト部)		8.1×10 ⁻⁷ cm/sec 10 ⁻⁸ cm/sec以下		1.5×10 ⁻⁷ cm/sec 10 ⁻⁶ cm/sec以上 (F-9断層群では開口性亀裂あり)				

地下施設は、貯油槽、水封トンネル、水封ボーリング、その他トンネル（サービス、作業、連絡、非常用）から構成され、主な施設の緒言は次のとおりである。

- 岩盤タンク 設置深度：EL-20～-42m
幅 18m×高さ 22m×延長 555m×10本
- 水封トンネル 底盤深度：EL-2.0m
幅 3.5m×高さ 4.5m×延長不明×3坑

岩盤の透水係数は、基地周辺で実施したルジオン試験で求められた透水係数に対数分布平均法を適用し算出した結果がある。これによると、串木野基地の岩盤の平均透水係数は、新鮮部で1.5×10⁻⁷cm/s、風化部で6.8×10⁻⁴cm/sである。

また、空洞掘削の進行(岩盤タンクのベンチ部からプレグラウト用注入孔を削孔した際)に伴い周辺地下水位が低下している。このときのプレグラウト孔の孔内水位がEL-58mであり、岩盤タンクの底盤(EL-42m)より約16m低下したことになる。地下水位を低下させた断層破砕帯周辺のルジオン試験結果(追加調査)では、10⁻⁴～10⁻³cm/s オーダーの高い透水性を示す開口割れ目を含む変質帯が認められた。

上記の水位低下が認められた領域は図 4.1.3-2 に示すように、F-9断層群を含むTK-103ユニットの北部および南部とTK-102Dの一部であり、これに対しNo.3水封トンネル・水封ボーリングを追加設置、TK-103D東側に設置したグラウトトンネルからのカーテングラウト、さらに断層深部に対する粘土グラウトにより断層周辺の透水性の低減を図った経緯がある。なお、水位低下の要因であった水みちはEL-50m以深のF-13断層において珪化の著しい箇所であった。なお後述する地下水位モニタリング孔のうち、W-16孔とW-17孔の2孔がNo.3水封トンネルとグラウトトンネルとの間に位置する。

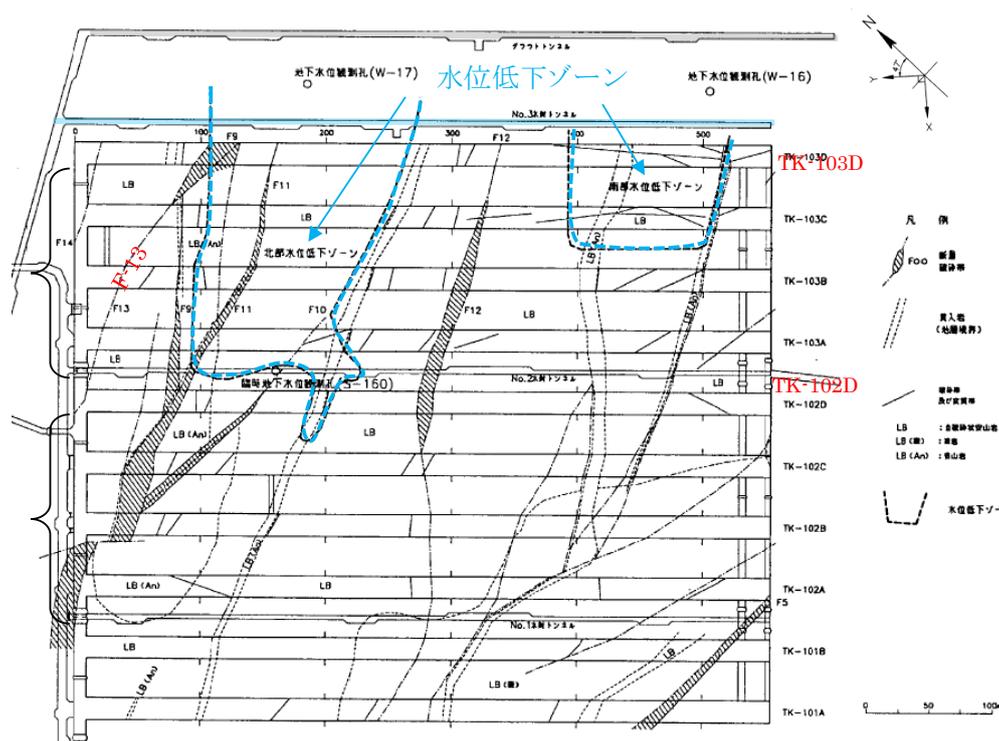


図 4.1.3-2 岩盤タンク領域の水理地質構造及び空洞掘削による水位低下領域¹²⁾

2) モニタリング仕様

地下水位観測孔の配置については、他の基地と同様、消防法に規制される石油地下備蓄基地の運用指針、消防危第 39 号「岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準について」に従っている。

地下水位観測孔は、W-1 孔～W-17 孔まで全 17 孔が施設を囲うように岩盤タンクの軸方向（北西－南東方向）に沿って、4 列（西側 1 列，中央 2 列，東側 1 列）に配置されている。また、間隙水圧設置孔は地上施設エリアと地下施設との間のサービストンネルに 1 孔（WP-1 孔：3 測点），基地北側の非常用トンネルに 1 孔（WP-2 孔：3 測点）配置されている。

地下施設建設工事以降、水封機能維持を目的としたモニタリングが実施されており、水理関連の項目として、気象（降雨，蒸発散量），地上流出量，地下水位，間隙水圧，岩盤タンク湧水量，水封水供給量がある。これらのうち，地下水位と間隙水圧計測について着目し，表 4.1.3-1 にモニタリングの情報を整理した。

計測機器については，地下水位計と間隙水圧計を用いて行われ，それぞれ 1 回/日，1 回/2 時間の頻度で測定されている。また，地下水位観測孔に関しての孔概要は記されていないが，水位計の設置深度は EL-3.0m との記載があった。

表 4.1.3-1 モニタリング情報の整理

区分	孔数	対象深度	観測項目	使用機器	測定頻度	測定開始時期
地下水位観測孔 (地表)	17	— 記載なし (※水位計の設置深度は EL+3.0m)	地下水位	水位計	1 回/日	明確な記載はないが W-1~12 孔については 1991 年 5 月以降の期間ごとの計測結果がある (オイルインは 1992 年)
間隙水圧(WP) (地下部)	2	EL+10~30m 程度 (3 点)	間隙水圧	間隙水圧計	1 回/2 時間	記載はないが 1997 年 3 月以降の計測結果あり

串木野基地での地上からのモニタリング孔の平面配置に、地下施設平面図、地質図 (EL-27.5m) を重ね合わせた (図 4.1.3-3)。岩盤タンク領域において、北方向に密な分布となっているのは、F9 断層群周辺で水位低下が生じた領域の地下水位の管理の必要性によるものと推定できる。

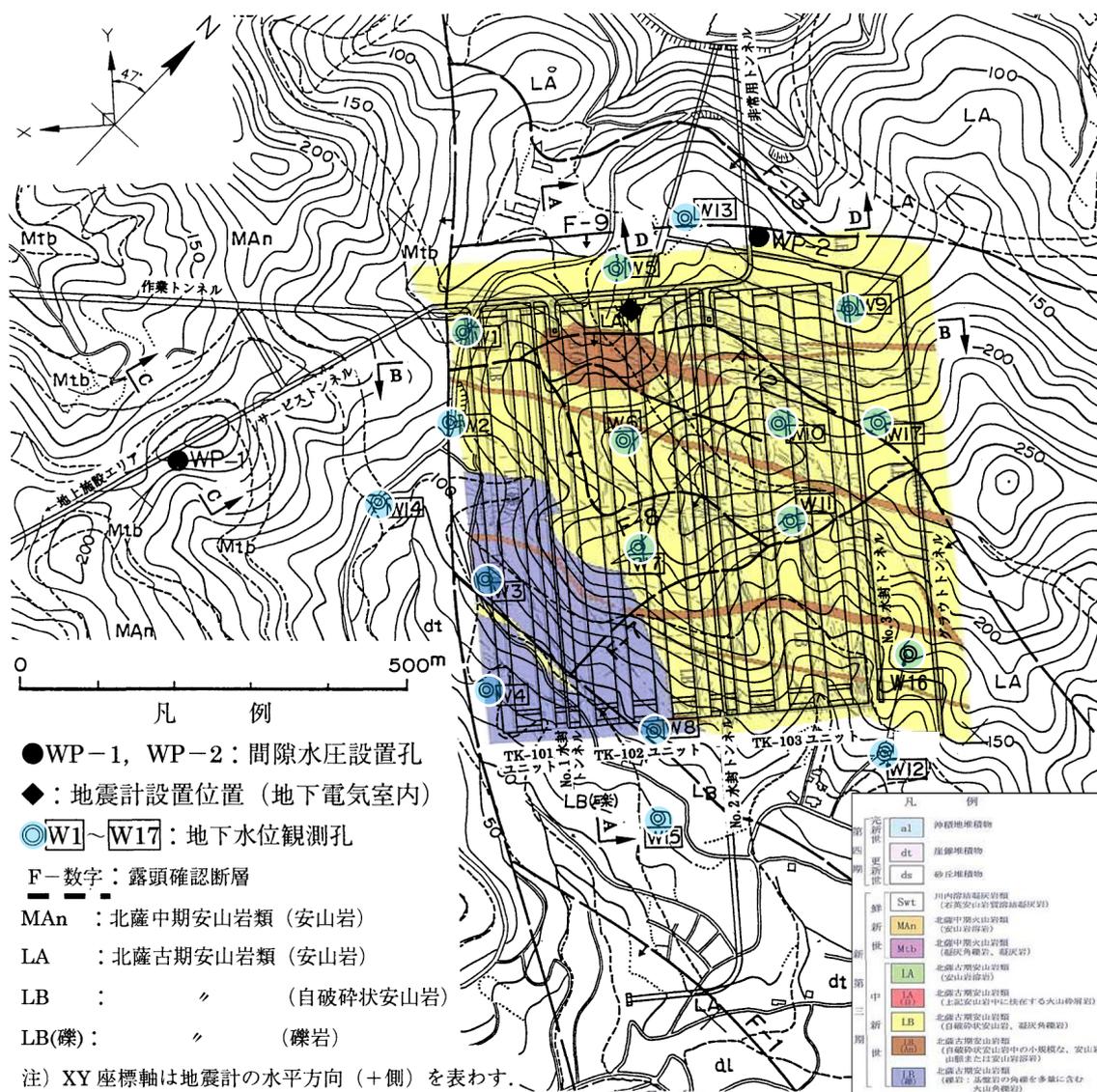


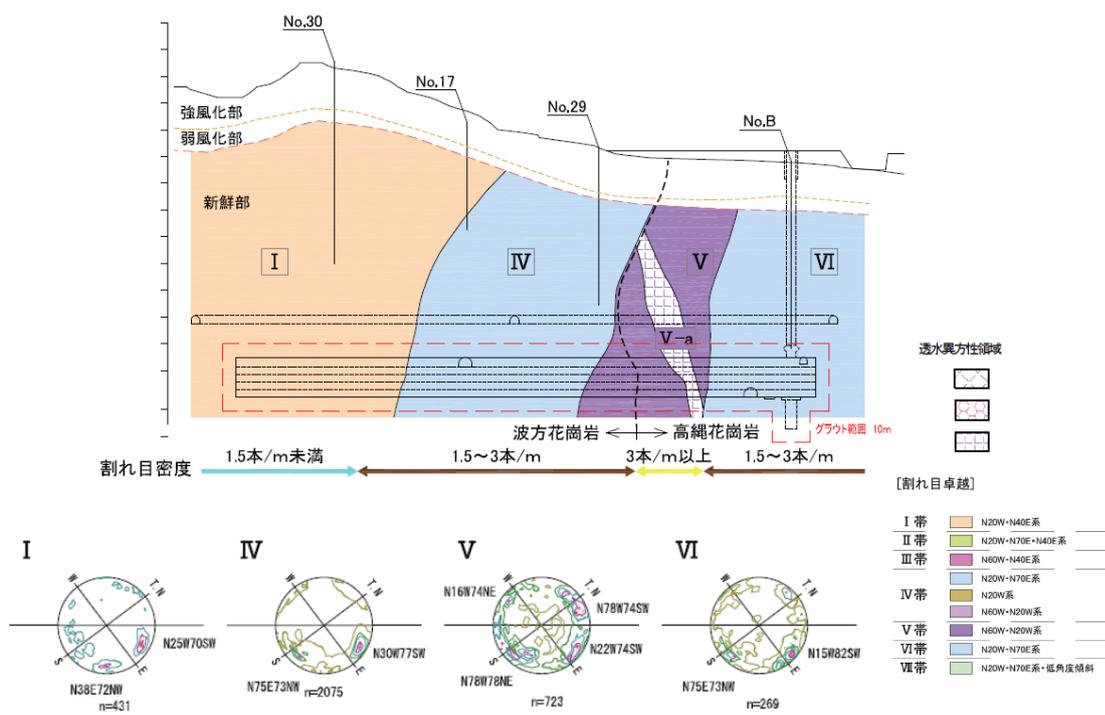
図 4.1.3-3 串木野基地における地質平面図とモニタリング孔配置 10, 12)

4.1.4 国家石油ガス地下備蓄波方基地

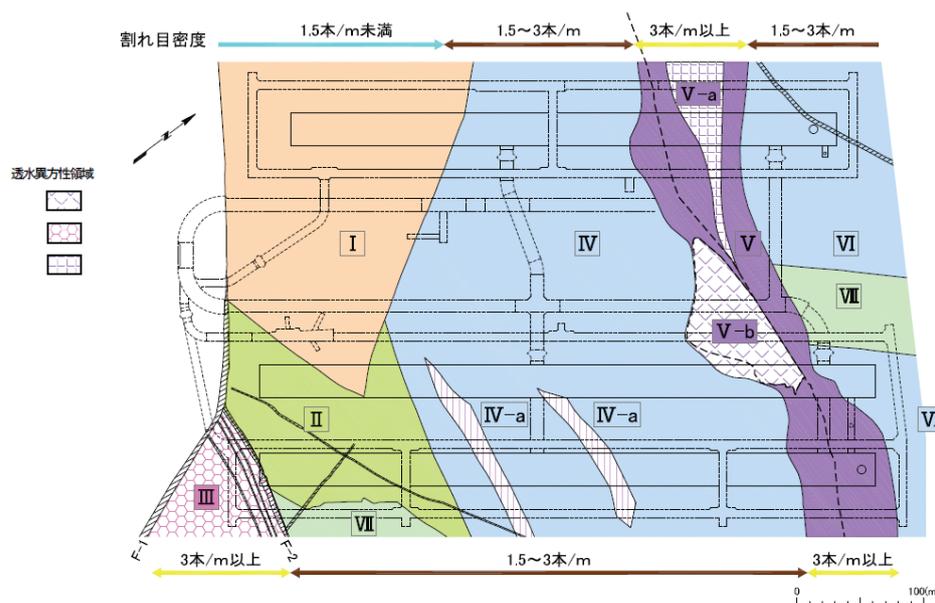
1) 水理地質情報

石油ガス地下備蓄波方基地は、愛媛県今治市波方町の高縄半島北部の瀬戸内海斎（いつき）灘に突き出た白亜紀花崗岩からなる岬に位置し、岬中央部の標高約 100m から北側の海域埋立地に至る範囲に岩盤貯槽設置エリアが建設されている。

建設地の地質は、粗粒の波方花崗岩で大部分が構成され、北側の一部に黒雲母が多く石英が少ない高縄花崗閃緑岩が分布する。これら花崗岩類は地表から 40～60m まで風化の影響を受けている。岩盤貯槽レベルは、地表からの土被りが最大 250m、最小 140m で、新鮮な花崗岩で構成され、割れ目の卓越方向と密度、変質帯により 7つの地質分帯（Ⅰ～Ⅶ帯）に区分されている。波方花崗岩と高縄花崗閃緑岩の岩種境界付近（Ⅴ帯）では、貯槽を横断する N20W 系、N60W 系の割れ目が卓越しており、割れ目密度は大きく（間隔 5～30cm）、割れ目は密着している。ⅡとⅣ帯の割れ目には、Ⅴ帯の 2 方向に加え N70E 系の貯槽軸方向に近い割れ目が分布している。Ⅵ帯の割れ目方向はⅣ帯と同様であり、割れ目密度は中程度である。Ⅰ帯には貯槽軸方向の高角な割れ目が分布しているが、割れ目密度は小さく透水性は低い（図 4.1.4-1）。



(a) 地質縦断面図 (ブタン/プロパン兼用貯槽)



(b) 地質平面図 (貯槽天端レベル EL. -150m)

図 4.1.4-1 波方基地岩盤貯槽の地質平面図及び地質縦断面図¹³⁾

花崗岩新鮮部全体の平均透水係数は $5.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 程度である。水封ボーリングから貯槽レベルの透水性をルジオン値で見ると、I帯、IV帯、V帯のルジオン値の平均は、いずれも 0.1Lu 程度で、 1Lu を超える高透水の頻度が、I帯で約4%、IV帯では約10%、V帯では約6%と各分帯で異なる(図 4.1.4-2)。高透水の割れ目の一部は、N20W系、N60W系の構造と交差するN70E系の貯槽軸方向に近い割れ目と想定されている。また、グラウト規定孔で湧水に遭遇すると間隙水圧が急激に低下することから、高透水の割れ目の一部で有効空隙率が小さく、湧水に対して間隙水圧が敏感に応答する傾向があることが、波方地点の水理特性の特徴である。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法, 計画等の妥当性に関する知見の整理

花崗岩新鮮部以外での透水係数は, 花崗岩漸移部で $2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$, 風化部で $4.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ となっている。

【花崗岩としての平均透水係数】

- 花崗岩 (風化部) : $4.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$
- 花崗岩 (漸移部) : $2.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$
- 花崗岩 (新鮮部) : $5.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$

図 4.1.4-2 には割れ目密度と地質分帯との関係が示されており, これらの関係から 3 区分された割れ目密度を代表する透水係数は表 4.1.4-1 のように整理できる。

表 4.1.4-1 割れ目密度と地質分帯, 透水係数の整理

割れ目密度	1.5本/m未満	1.5~3本/m	3本/m以上
地質分帯	I	II、IV、VI、VII	V、III
平均Lu値	0.04	0.1 (IV帯の平均Lu値)	0.08 (V帯の平均Lu値)
1Lu以上の高透水頻度	4%	10%	6%
平均透水係数 (cm/s)	$4 \times 10^{-7} \text{cm/s}$	$1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$	$8 \times 10^{-7} \text{cm/s}$
水理特性	割れ目密度が小さく透水性が低い	割れ目密度は中程度	割れ目密度は大きい割れ目は密着している

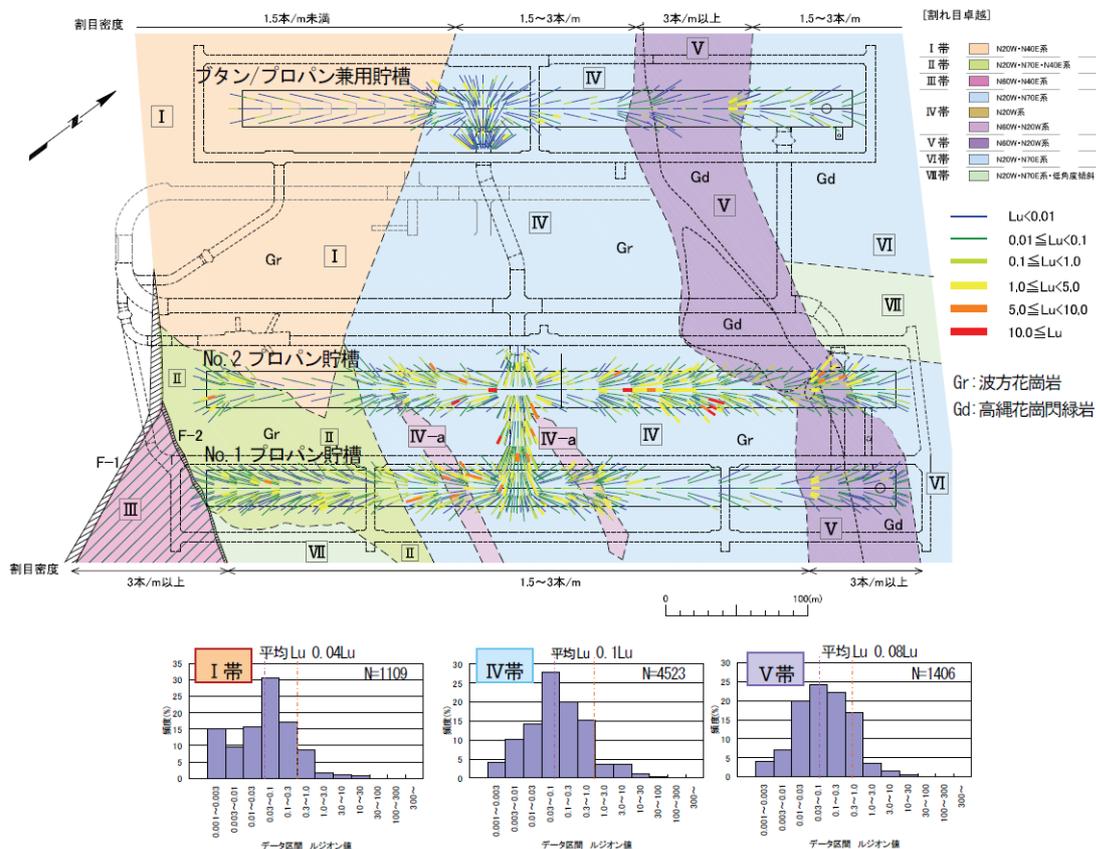


図 4.1.4-2 波方基地における地質分帯ごとの透水性分布 (EL-157.5m レベル) ¹³⁾

2) モニタリング仕様

地下施設は、岩盤貯槽、水封トンネル、水封ボーリング、トンネル（作業、水封）および配管堅坑から構成され（図 4.1.4-3）、主な施設の緒言は次のとおりであり、波方基地の限界地下水位は岩盤貯槽天盤から 135m 上の EL-15.0m に設定されている¹⁴⁾。

- 岩盤貯槽
 - 設置深度：EL. -150～180m，幅 26m×高さ 30m
 - プロパン（P）貯槽：長さ 485m，2 列
 - ブタン/プロパン（B/P）貯槽：長さ 430m，1 列
- 水封トンネル
 - 底盤深度：EL. -125m，幅 6.5m×高さ 6m，総延長：3,063m
- 水封ボーリング
 - 坑口設置レベル：EL-125m
 - 孔径：φ90mm，総数：637 孔，総延長：36,334m
- 配管堅坑
 - 内径 6.8m，深さ 155m，2 本（P，B/P）
- 限界地下水位
 - EL. -15.0m

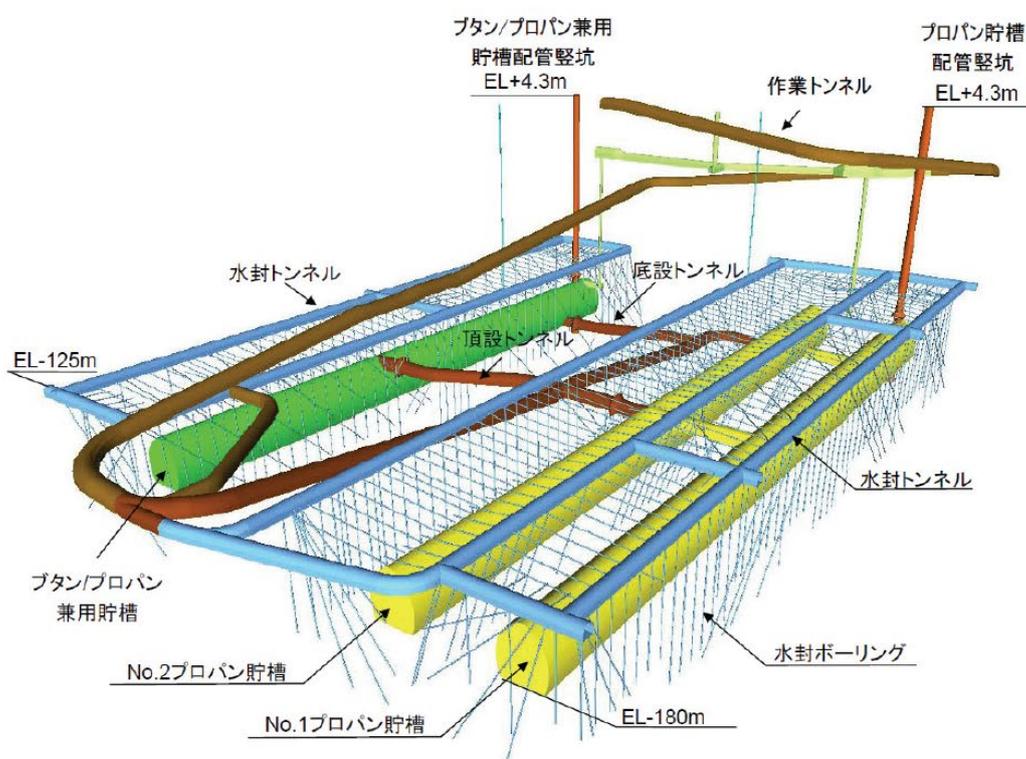


図 4.1.4-3 波方基地地下施設位置鳥瞰図¹³⁾

水封ボーリング孔上部および水封カーテン外側で深部の新鮮花崗岩を対象として、図 4.1.4-4 に示すモニタリング孔を配置している。図 4.1.4-4 は、前述の水理地質区分と重ね合わせている。凡例に示すように、モニタリング孔位置を示す数字（No. ○○）は、FS 調査段階（1～12）、設計段階（13～24）、建設段階（25～）に設置されたことを意味し、これらから法定点検孔として地下水位観測孔 12 孔（W-1～12）、間隙水圧点検孔（P-1～10）を選定している。図中に白点線○で表示した法定点検孔は、岩盤貯槽周辺で主に分布する I，II，IV，V，VI の 5 地質分帯に 2～3 点配置されている。

地下水位観測孔については、石油ガス地下備蓄における水位観測孔の配置要件¹⁴⁾である水位観測孔を貯槽外周から水平距離 100m の範囲について 1 ヶ所/40,000 m² の割合で設置の要件に従い、岩盤貯槽区域〔約 300m（北西－南東方向）×約 500m（北東－南西方向）〕の範囲において次のように配置されている。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

- No.1 プロパン貯槽から南東側に約100m 離れ 2孔 (W-12, W-6)
- No.1 プロパン貯槽軸に 2孔 (W-9, W-7)
- No.2 プロパン貯槽軸に 2孔 (W-1, W-8)
- ブタン/プロパン貯槽とプロパン貯槽間に 2孔 (W-10, W-5)
- ブタン/プロパン貯槽軸に 2孔 (W-2, W-3)
- ブタン/プロパン貯槽から北西側に約100m 離れ 2孔 (W-1, W-4)

次に、水封水圧の監視を目的として、間隙水圧観測孔 (P-1~10) を次のように配置している。

- No.1 プロパン貯槽軸北側、中央、南側に 4孔 (P-9, P-7, P-10, P-5)
- 同様に、No.2 プロパン貯槽軸に 3孔 (P-8, P-6, P-4)
- 同様にブタン/プロパン貯槽軸に 3孔 (P-1, P-2, P-3)

これら以外の孔は、自主点検孔となっている。

なお、地表からのモニタリング孔で観測対象となる深度について、地下水位観測孔に関する情報は抽出できなかったが、間隙水圧観測孔は後掲する断面図より EL-110m 付近までと読み取れる。

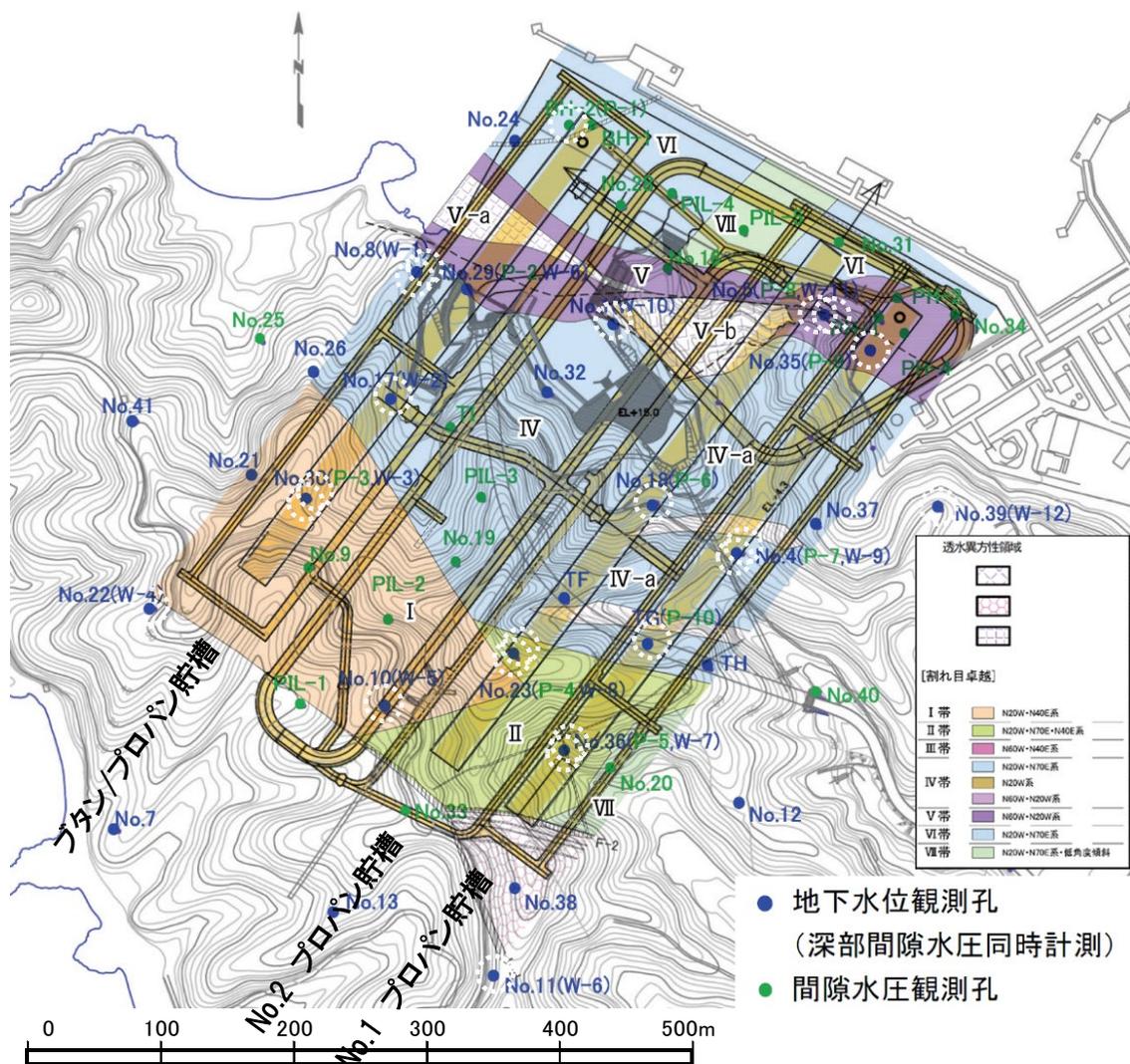


図 4.1.4-4 波方基地における地下水モニタリング位置 (地下施設平面図及び水理地質区分図との重ね合わせ) ¹³⁾

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

一方、岩盤貯槽周辺では、図 4.1.4-5 に示すように、貯槽縦断方向に 50~100m 間隔で規則的に貯槽を横断するように主計測断面 (A, B, C, D, E) を設定し、これらの断面で貯槽周辺のグラウト範囲 (貯槽壁面から 10m) の外側 (貯槽天端部, 側壁肩部, 底盤部の各標高) に間隙水圧計を配置している。また、断層、高透水のマイクロフラクチャ発達部、低透水の岩盤、配管堅坑周辺および貯槽と連結トンネルとの交差部についても、水封機能上注意すべき箇所として補助計測断面 (主要断面間の AB, BC, CD, DE) を設定している。岩盤貯槽周辺では I~VII の地質分帯のうち I, II, IV, V, VI の 5 分帯が卓越して分布しており、概ねこれらの地質分帯に複数の主および補助断面が設置されている。例として、C 断面における間隙水圧計の配置を図 4.1.4-6 に示す。

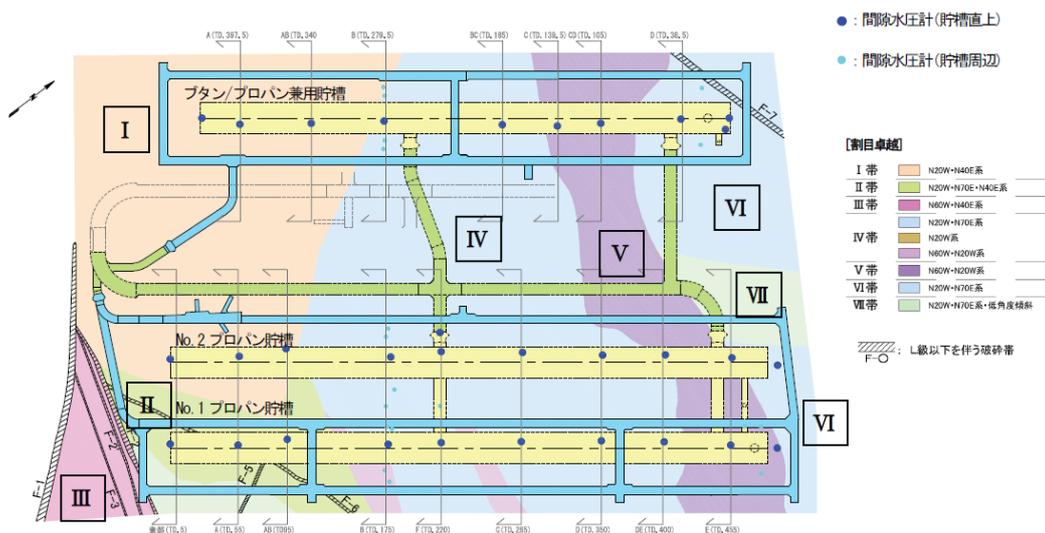


図 4.1.4-5 波方基地間隙水圧計 (天盤) の配置平面図¹³⁾

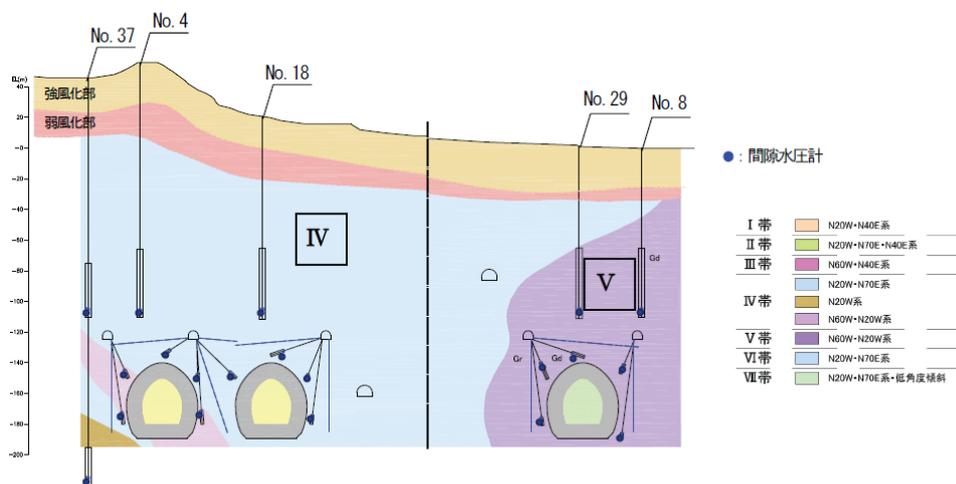


図 4.1.4-6 C 断面における間隙水圧計配置断面図¹³⁾

地表からのモニタリング孔での地下水位、間隙水圧、岩盤貯槽周辺の間隙水圧の観測には振動弦式間隙水圧計を使用しているが、使用機器や測定頻度に関する情報を入手することはできなかった。

観測期間に関する情報として、前述した建設工程を含めた事業段階 (調査設計から操業まで) における水理モニタリングの目的と主要な観測項目は表 4.1.4-2 のように整理される。調査設計段階における地表からのモニタリング孔での観測開始時期に関する情報は得られなかったが、

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法，計画等の妥当性に関する知見の整理

建設開始の8年前にあたる1994年以降，順次，必要な観測が開始されたものと考えられる。

表 4.1.4-2 各事業段階における水理モニタリングの目的と主要な観測項目

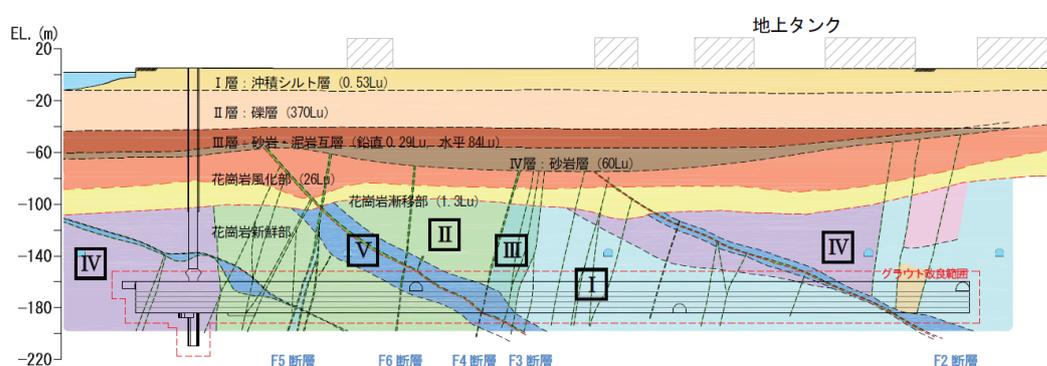
事業の段階	目的	観測項目
調査設計 1994年～	地下水，地盤・水文環境情報の把握	地盤調査， 地下水位 ，水文計測（雨・蒸発・表流量）
建設 2002年～	貯槽グラウト管理及び水封機能の評価の情報化施工に資する	間隙水圧 ，湧水量，水封水供給量
気密試験 2012年	貯槽の気密機能の確認	上記に加え，貯槽内の高精度圧力・体積・温度計測
操業 2013年～	水封機能の維持と地震などの異常時の水封健全性確認	地下水位 ， 間隙水圧 ，水文，潮汐，地震，水質

4.1.5 国家石油ガス地下備蓄倉敷基地

1) 水理地質情報

石油ガス地下備蓄の倉敷基地は、岡山県倉敷市の瀬戸内海側、高梁川河口部の干拓地・埋立地に位置し、埋立地の地下に分布する白亜紀花崗岩の新鮮岩盤中に岩盤貯槽が建設されている。建設地には、地表から EL-70m 付近まで新第三紀鮮新世から第四紀完新世の砂岩、砂岩泥岩互層、礫層、シルト層、埋土層が分布し、これらが下位の花崗岩を被覆する地質構成となっている。花崗岩は EL-70～-120m 付近までが風化の影響を受けており、EL-120m 以深で新鮮岩盤となる。岩盤貯槽レベルでは、花崗岩には NNW 方向 ENE 方向の 2 系統の割れ目が卓越し、割れ目の卓越方向と密度により 5 つの地質分帯 (I～V) に区分され、6 本の断層 (NNW 系 : F1, 4, 5, 6, ENE 系 F2, 3) が確認されている。また、貯槽南側の一部には微細な割れ目の集合体からなるマイクロフラクチャと呼ばれる岩盤等級の低い岩盤が分布する (図 4.1.5-1)。

(a) 地質縦断面図 (No. 1 水封トンネル)



(b) 貯槽アーチ部底盤レベルの地質平面図 (EL-167.5m)

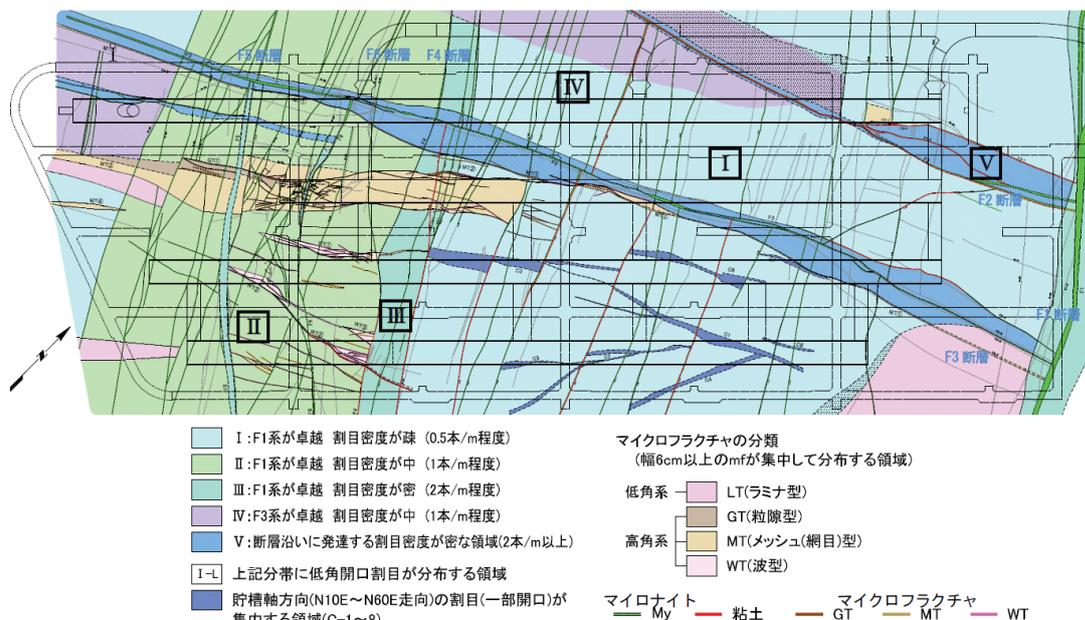


図 4.1.5-1 倉敷基地岩盤貯槽の地質平面図及び断面図¹³⁾

花崗岩新鮮部全体の平均透水係数は $3.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、割れ目密度は 0.5～2 本/m である。貯槽レベルの花崗岩の地質分帯毎の透水性は、

I :	0.3Lu (最大 4.3Lu) ⇒ 3×10^{-6} cm/s (最大 4.3×10^{-5} cm/s)
II・III :	0.5Lu (最大 8.4Lu) ⇒ 5×10^{-6} cm/s (最大 8.4×10^{-5} cm/s)
IV :	0.3Lu (最大 2.1Lu) ⇒ 3×10^{-6} cm/s (最大 2.1×10^{-5} cm/s)
V :	0.9Lu (最大 13Lu) ⇒ 9×10^{-6} cm/s (最大 1.3×10^{-5} cm/s)
マイクロフラクチャ部 :	0.6Lu (最大 3.3Lu) ⇒ 6×10^{-6} cm/s (最大 3.3×10^{-5} cm/s)

である。

花崗岩新鮮部以外の透水性は、花崗岩漸移部で 1.3Lu (1.3×10^{-5} cm/s), 風化部で 26Lu (2.6×10^{-4} cm/s) である。被覆層の透水性は、砂岩: 60Lu (6×10^{-4} cm/s), 砂岩泥岩互層は異方性があり鉛直: 0.29Lu (2.9×10^{-6} cm/s), 水平: 84Lu (8.4×10^{-4} cm/s), 礫層 370Lu (3.7×10^{-3} cm/s), 沖積シルト層 0.53Lu (5.3×10^{-6} cm/s) である。

2) モニタリング仕様

倉敷基地における地下施設は、岩盤貯槽、水封トンネル、水封ボーリング、トンネル（作業、水封）および配管堅坑から構成され、主な施設の緒言は次のとおりである。また、倉敷基地の限界地下水位は岩盤貯槽天盤から 145m 上の EL-15.0m に設定されている¹⁴⁾。倉敷基地地下構造物の鳥瞰図を図 4.1.5-2 に示す。

- 岩盤貯槽 設置深度: EL-160~184m, 幅 18m×高さ 24m
長さ 488~640m, 4列
- 水封トンネル 底盤深度: EL-140m, 幅 6.5m×高さ 6m, 総延長: 4,340m
- 水封ボーリング 坑口設置レベル: EL-140m, 孔径: φ90mm
総数: 810孔, 総延長: 50,400m
- 配管堅坑 内径 6.8m, 深さ 170m, 1本
- 限界地下水位 EL-15.0m

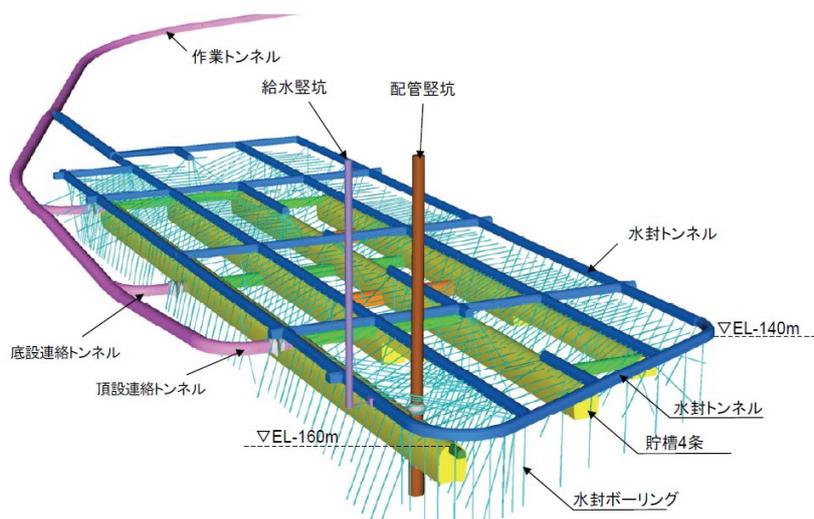


図 4.1.5-2 倉敷基地地下構造物の配置鳥瞰図¹³⁾

水封ボーリング孔上部および水封カーテン外側で、地表付近の埋土から深部の新鮮花崗岩を対象とした保安検査孔として、地下水位観測孔 9 孔, 間隙水圧観測孔 10 孔を配置し、地下水位, 間隙水圧を観測している。配置の特徴は次のとおりである。地質平面図と地表からのモニタリング孔配置を重ね合わせて、図 4.1.5-3 に示す。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

地表からのモニタリング孔に加え、岩盤貯槽周辺では貯槽縦断方向に150~200m 間隔で定期的に貯槽を横断するように主計測断面(A,B,C,D)を設定し、これらの断面で貯槽周辺のグラウト範囲(貯槽壁面から8m)の外側(貯槽天端部、側壁肩部、底盤部の各標高)に間隙水圧計を配置している(図4.1.5-4, 図4.1.5-5)。また、断層、高透水のマイクロフラクチャ発達部、低透水の岩盤、配管竪坑周辺および貯槽と連結トンネルとの交差部についても、水封機能上注意すべき箇所として補助計測断面(A',A''等)を設定している。

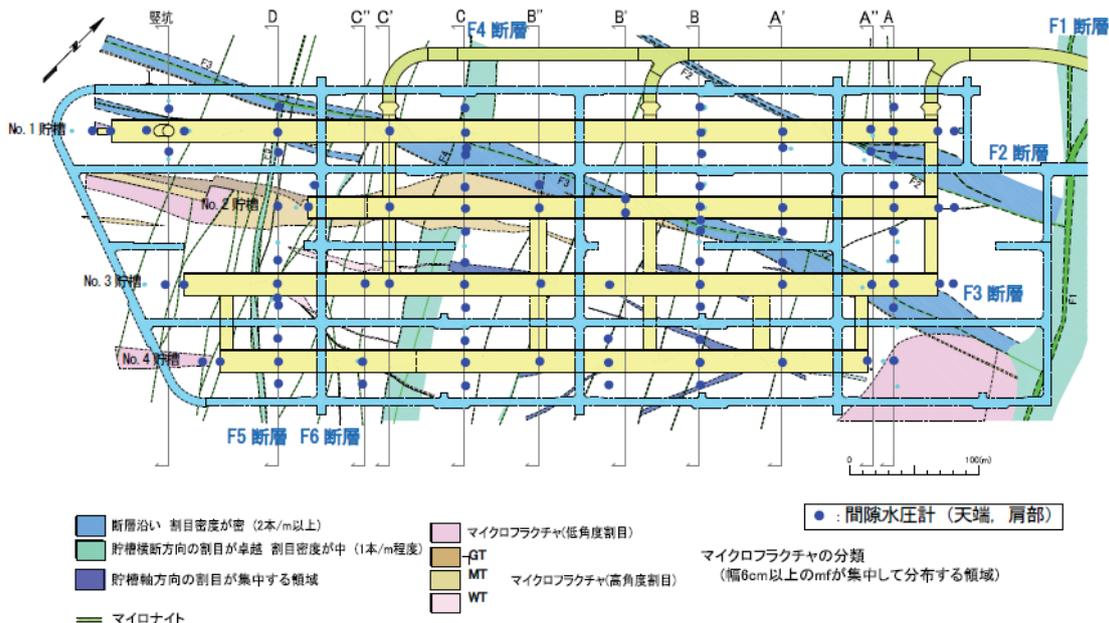


図 4.1.5-4 倉敷基地水封カーテン内側における間隙水圧計(天盤)配置平面図¹³⁾

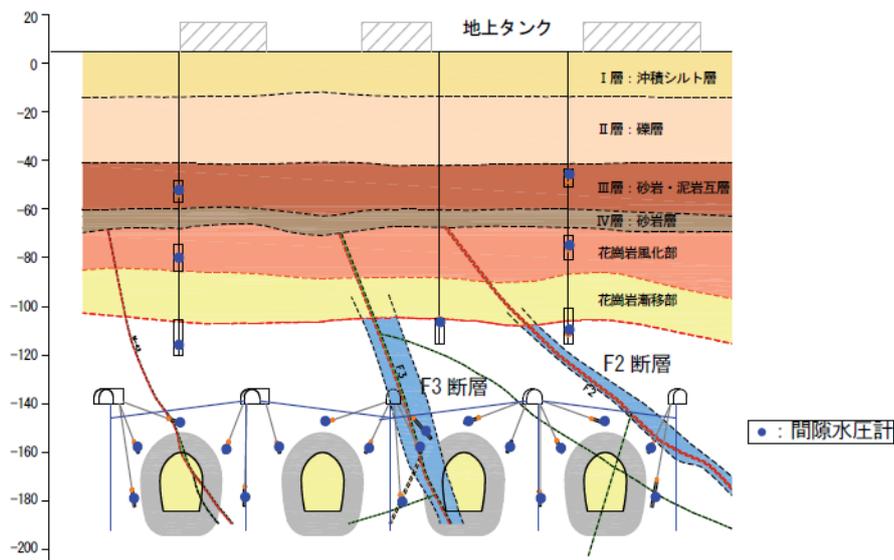


図 4.1.5-5 B断面の間隙水圧計配置断面図¹³⁾

地表からのモニタリング孔での地下水位、間隙水圧、岩盤貯槽周辺の間隙水圧の観測には光ファイバー式間隙水圧計と振動弦式間隙水圧計を使用しているが、既往公表文献から詳細は不明である。

観測期間に関する情報として、前述した建設工程を含めた事業段階(調査設計から操業まで)

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法，計画等の妥当性に関する知見の整理

における水理モニタリングの目的と主要な観測項目は表 4.1.5-1 のように整理される。調査設計段階におけるモニタリング開始時期に関する情報は得られなかったが，建設開始の10年前にあたる1994年以降，順次，必要な観測が開始されたものと考えられる。

表 4.1.5-1 倉敷基地各事業段階における水理モニタリングの目的と主要な観測項目

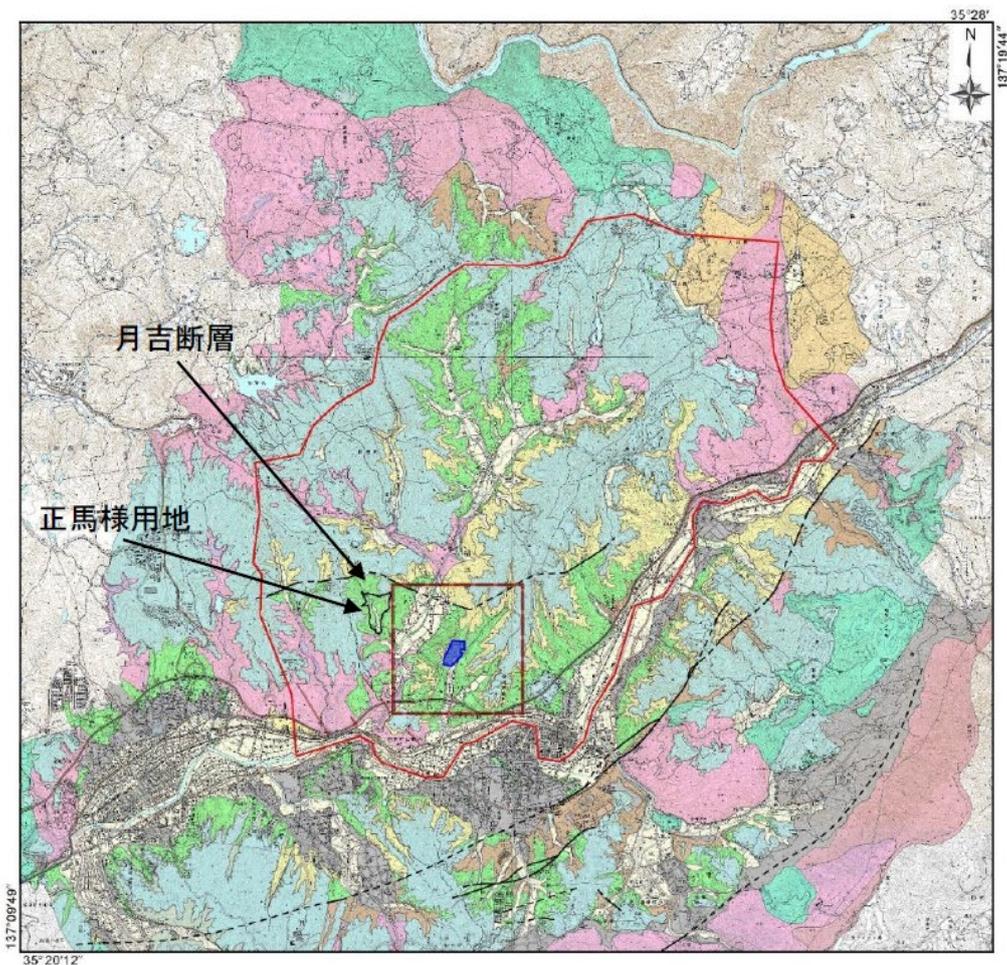
事業の段階	目的	項目
調査設計 1994年～	地下水，地盤・水文環境情報の把握	地盤調査， 地下水位 ，水文計測（雨・蒸発・表流量）
建設 2003年～	貯槽グラウト管理及び水封機能の評価の情報化施工に資する	間隙水圧 ，湧水量，水封水供給量
気密試験 2012年	貯槽の気密機能の確認	上記に加え，貯槽内の高精度圧力・体積・温度計測
操業 2013年～	水封機能の維持と地震などの異常時の水封健全性確認	地下水位 ， 間隙水圧 ，水文，潮汐，地震，水質

4.1.6 日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所

1) 水理地質情報

瑞浪超深地層研究所周辺の地質図を図 4.1.6-1 に示す。図中には、瑞浪超深地層研究所用地を中心としたサイトスケールの平面範囲（平面：数 km² 程度、深さ 2～3km 程度）を四角領域で、ローカルスケールの平面範囲（平面数 10km² 程度、深さ数 km 程度）を赤色点線で、それぞれ示されている。

同地域の地質は、白亜紀後期の花崗岩（土岐花崗岩）からなる基盤を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、その上位に固結度の低い新第三紀中新世～第四紀更新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている。瑞浪層群は、下位より泥岩・砂岩・礫岩からなり亜炭を挟む土岐夾炭累層、凝灰質の泥岩・砂岩を主体とする明世累層／本郷累層、シルト岩・砂岩を主体とする生俵累層に区分される。さらに、明世累層／本郷累層は泥岩を含む層と基底礫岩、土岐夾炭層は砂泥互層と基底礫岩とに区分される。なお、研究所用地の北方には、東西走向の月吉断層が分布している。



※ 地形図は、『1/25000数値地図画像』(国土地理院:平成12年9月1日発行)「御嵩」、「武並」、「土岐」、「瑞浪」を使用。

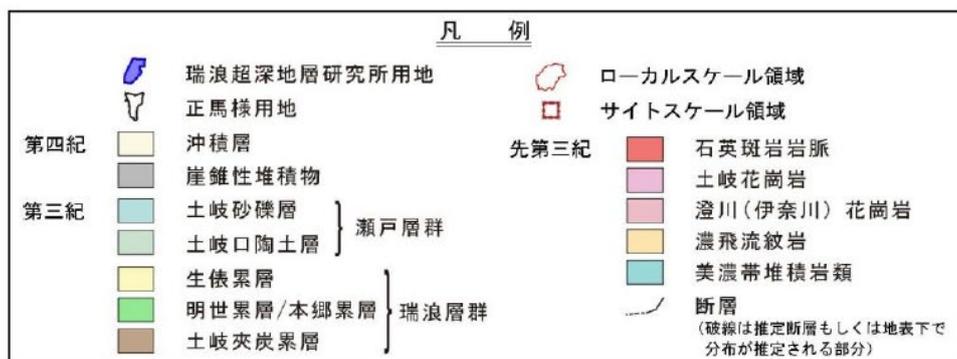


図 4.1.6-1 瑞浪超深地層研究所周辺の地質図¹⁵⁾

坑道掘削地点においては、深度約 170m 以深に土岐花崗岩が分布し、不整合を介して瑞浪層群が分布する。土岐花崗岩には、上部の低角度の傾斜を有する割れ目の分布密度が優位に高い岩盤領域（上部割れ目帯）と、下部の割れ目分布密度が低い岩盤領域（下部割れ目低密度帯）とに区分され、立坑掘削段階、研究坑道掘削段階で地質モデルが更新されている。

坑道を用いた調査段階の研究成果を受けて見直された水理地質区分で設定されている各層の透水係数（水平方向、鉛直方向）、透水異方性の有無、比貯留係数を表 4.1.6-1 に示す。

瑞浪層群の生俵累層、明世／本郷累層、土岐夾炭累層の水平方向の透水係数（ $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ オーダー）は鉛直方向よりも 2 オーダー程度大きく、顕著な透水異方性を有する。明世／本郷累層

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

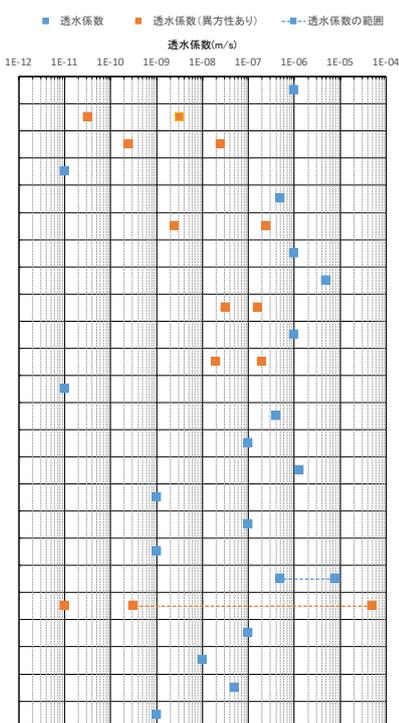
で新たにモデル化されたキャップロック構造は、月吉断層と同じ $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ の透水係数であり難透水層として設定され、土岐炭層には新たに $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の高透水層がモデル化された。

土岐花崗岩の上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯には、水平方向の透水係数 (10^{-8}m/s オーダー) に対して1オーダー大きい鉛直方向の透水係数が設定し、透水異方性を評価している。

また、第2段階の研究成果を受けて主立坑断層（低透水領域）の透水係数が新たに設定され、上部割れ目帯、下部割れ目帯にはそれぞれ $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の透水係数が設定されている。

表 4.1.6-1 地質要素ごとに設定された水理特性（調査段階ごとの推定結果の比較） 16, 17)

水理地質区分	水理特性(第2段階の推定結果)				水理特性(第1段階の推定結果)			
	透水係数(m/s)		比貯留係数(1/m)	不飽和特性曲線	有効間隙率	透水係数(m/s)		比貯留係数(1/m)
	水平方向(断層面方向)	鉛直方向(断層面垂直方向)				水平方向(断層面方向)	鉛直方向(断層面垂直方向)	
瀬戸層群	1.0E-06		7.9E-05	礫質土・砂質土 ²⁾	0.2	1.00E-05	7.40E-05	
瑞浪層群	生機炭層	3.2E-09	3.2E-11	新緑岩 ²⁾	0.2	3.20E-09	3.20E-11	
	明世/本郷炭層	2.5E-08	2.5E-10			2.80E-08	2.80E-10	
	キャップロック構造	1.0E-11				-	-	
	基底礫層	5.0E-07				5.10E-07	5.10E-09	
	土岐炭層	2.5E-07	2.5E-09			5.40E-07	5.40E-09	
	高透水層	1.0E-06				-	-	
土岐花崗岩	上部割れ目帯	3.2E-08	1.6E-07	4.0E-06	0.01	2.20E-07	2.00E-07	
	低角度割れ目帯中帯	1.0E-06		4.0E-07	0.01	4.10E-06	3.70E-08	
	下部割れ目低密度帯	2.0E-08	2.0E-07	1.0E-06		2.10E-08	1.00E-07	
	月吉断層	1.0E-11		3.2E-07		1.00E-11	2.50E-05	
月吉断層に伴う割れ目帯	4.0E-07		0.2	0.2	4.20E-07	1.60E-09		
土岐炭層(高透水層)	1.0E-07				2.5E-05	-	-	
土岐炭層(基底礫層)	1.3E-06				7.9E-05	-	-	
上部割れ目帯	1.0E-09				2.0E-06	-	-	
主立坑断層(低透水領域)	低角度割れ目帯中帯	1.0E-07		4.0E-07	0.01	-	-	
	下部割れ目低密度帯	1.0E-09		1.0E-06		-	-	
	その他の断層	7.9E-06~5.0E-7		3.2E-07		9.9E-05~1.0E-9	1.0E-04~1.0E-08	
坑道近傍(スキニング効果)	瑞浪層群部	1.0E-07		周辺岩盤と同様	0.2	5.9E-05~2.0E-09	1.00E-11	
	土岐花崗岩部	1.0E-08				-	-	
	主立坑断層部	5.0E-08				-	-	
	グラウト区間	1.0E-09				-	-	



²⁾スキニング効果: 設定値より岩盤の透水係数が高い場合にのみ適用
着色部: 第2段階で新たにモデル化され、水理特性が定量的に推定された水理地質区分

2) モニタリング仕様

瑞浪超深地層研究所の地下施設は立坑と水平坑道で構成され、立坑は主立坑（直径φ6.5m、深さ500.2m）、換気立坑（直径4.5m、深さ500.2m）の2本で、両立坑の中心間距離は40mである。水平坑道は、深度100mごとに主立坑と換気立坑を連結する予備ステージで構成されるとともに、深度100mと深度400mを除き、予備ステージから各種調査坑道（ボーリング横坑、研究アクセス坑道、計測横坑）が設けられている。

地下施設（研究坑道）の掘削工事は2003年7月に着工され、100mごとの予備ステージは、深度100m（2005年6月）、深度200m（2007年9月）、深度300m（2009年1月）、深度400m（2009年10月）、そして深度500m（2012年7月）にそれぞれ貫通し、2014年3月に第2段階の調査研究（研究坑道の掘削を伴う研究段階）を一旦終了している（図4.1.6-2）。

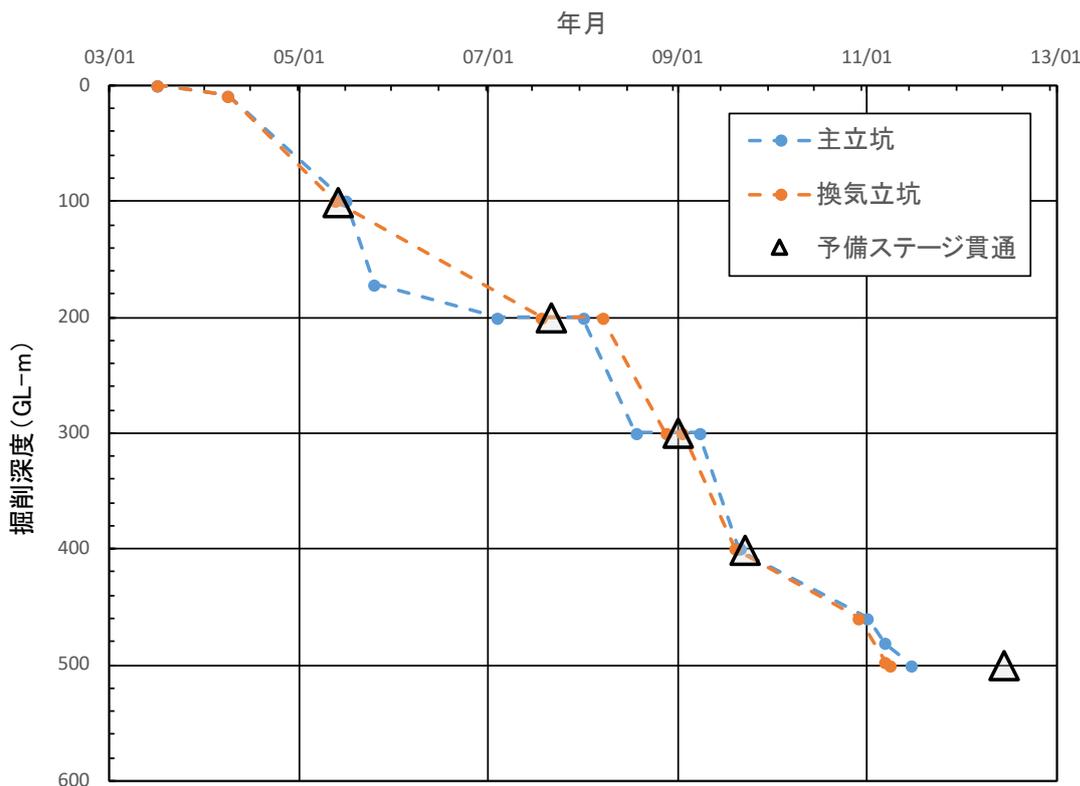


図 4.1.6-2 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削実績

岩盤水理を対象として広域地下水流動研究（広域における地表からの地下深部までの地質・地質構造，岩盤の水理や地下水の水質を明らかにするために必要な調査・解析技術などを開発すること），超深地層研究計画（研究坑道掘削にともなう地下水の水圧変化の把握，研究坑道近傍の地下水の水圧分布の把握）において地表，地下からのボーリング調査を実施し，地下水に関するモニタリングが継続している。

地表からのモニタリング孔の中で，瑞浪超深地層研究所用地には，超深地層研究所計画を目的として主立坑，換気立坑の周辺に MSB-1 号孔～MSB-4 号孔，MIZ-1 号孔，そして広域地下水流動研究を目的とした DH-2 号孔の 6 孔が配置されている。研究所用地から北西に位置する正馬様用地にも超深地層研究所計画を目的として，MIU-1 号孔から MIU-4 号孔，AN-1 号孔～AN-3 号孔の 7 孔が配置されている。これらの周囲には，広域地下水流動を目的として DH-2 号孔を含む 15 孔が配置されている。図 4.1.6-3 に，主立坑を中心とした同心円とモニタリング孔の位置を示す。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

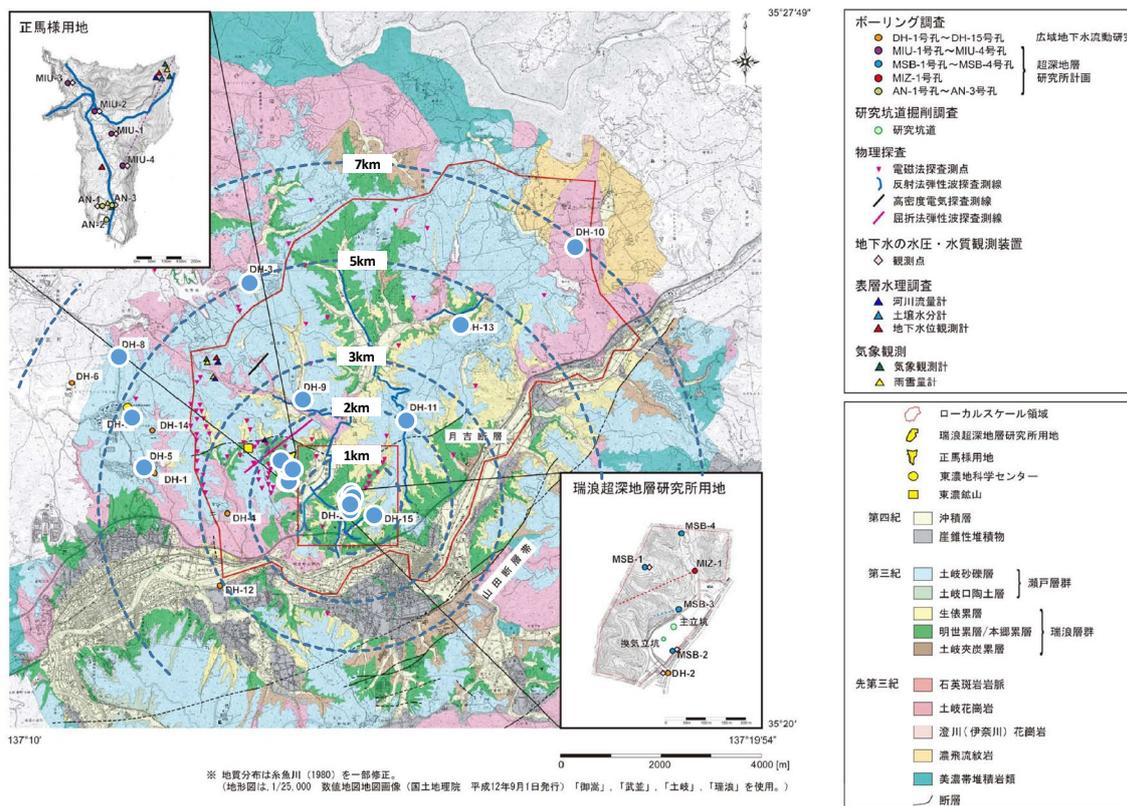


図 4.1.6-3 地表からのモニタリング孔の配置と主立坑からの距離¹⁵⁾

図 4.1.6-3 から、北東方向から西方へ流下する土岐川が流出域としてエリアを概ね南北に区分するとともに、研究所用地の西を北から南へ流下して土岐川と合流する明世川に開析された谷を境界として研究所用地を含む北側の領域が東西に区分される領域において、それぞれの領域での主たる地下水流動方向（研究所用地を中心に北西方向と北北西あるいは西北西方向）にモニタリング孔が配置されているものと推定される。

一方、研究坑道内では、研究坑道近傍の地下水の水圧分布を把握すること、研究坑道掘削に伴う地下水の水圧変化を把握すること等を目的として、深度 200m ボーリング横坑、深度 300m ボーリング横坑および研究アクセス坑道、深度 500m 研究アクセス北坑道から計 12 本のボーリング孔が水平あるいは鉛直方向に掘削され、岩盤水理に関するモニタリング孔として使用されている（図 4.1.6-4）。

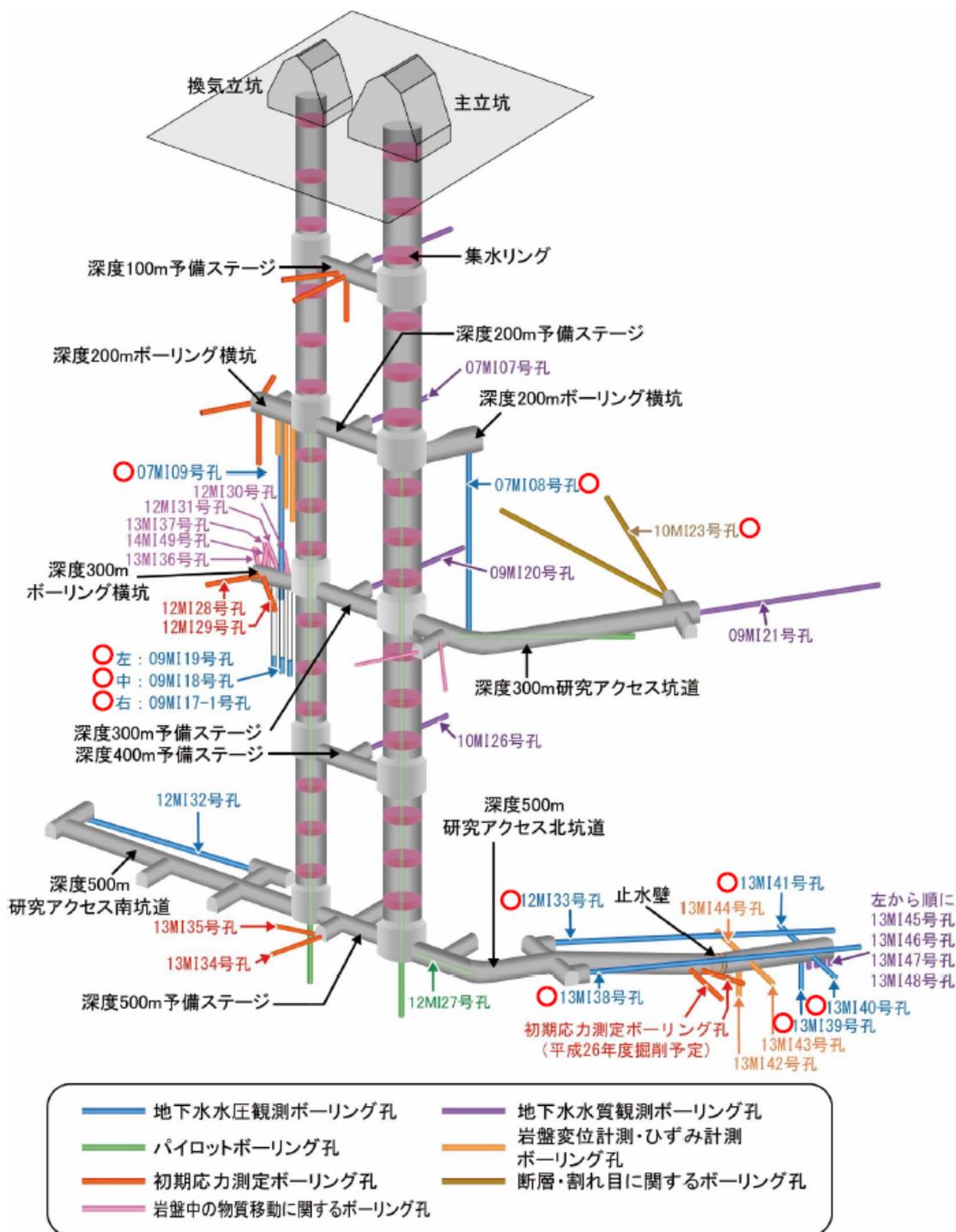


図 4. 1. 6-4 研究坑道内のモニタリング孔の配置 (赤○が岩盤水理を対象としたモニタリング孔)¹⁸⁾

地表から掘削されたボーリング孔における掘削情報（地下水圧の観測方式，区間数，モニタリング期間，観測間隔等）を整理した結果を表 4. 1. 6-2 に示す。表中の空欄箇所は情報が入手できなかった箇所である。以下に，地下水圧の観測方式，モニタリング期間，観測間隔について，それらの概要を述べる。

地下水圧計測方式には，大別して直接水圧方式とピエゾ水頭計測方式とがあり，当該サイトでは，

- 直接水圧計測方式として
MP システム (Multi-Piezometric Logger System)
- ピエゾ水頭計測方式として
SPMP システム (Stand-Pipe Multi-Packer System)
PIEZO システム

をそれぞれ使用し, 長期の地下水位モニタリングを実施している.

一部の孔 (DH-8, 10, 12 孔) では, パッカーで区切った複数区間の水位でなく, 大気に開放されたボーリング孔の孔底までの平均的な地下水位を大気開放型水位計により計測している.

観測区間数は MP システムで最大 15 点, SPMP システムで最大 10 点であり, MP システムでは観測期間の長期化に伴い, その必要性を検討して区間数を最小 4 区間程度に減らしている. モニタリング開始期間は, 研究坑道掘削開始の 2003 年 7 月より 2~3 年前から実施しており, 現在もほぼすべての孔で観測が継続している. 計測間隔は, 最小 5 分の設定が多く, 一部の孔で 1 カ月に 1 度の頻度となっている.

研究坑道から掘削されたボーリング孔における掘削情報 (地下水圧の観測方式, 区間数, 観測間隔等) を表 4.1.6-3 に整理した. 地表からのモニタリング孔と同様に, 直接水圧計測方式 (MP システム), ピエゾ水頭計測システム (PIEZO システム) に加え, ピエゾ水頭計測システムとして図 4.1.6-5 に示すような水圧モニタリング装置を使用している. 研究坑道内においては, 孔口位置よりも地下水位が高いためピエゾ管の口元を閉鎖した状態で地上に取り付けた圧力計で地下水圧をモニタリングしており, 掘削影響により地下水位が孔口位置よりも低下した場合には, ピエゾ管の口元を開放し, 水圧センサーをスタンドパイプ内に挿入して地下水位を計測する.

計測区間数は 4~7 区間で, 一部の孔 (09MI17-1 号孔, 09MI18 号孔, 09MI19 号孔) ではシングルパッカーシステムで区間数を 1 区間として観測を実施しており, 観測間隔は 5 分となっている.

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

表 4.1.6-2 瑞浪超深地層研究所における地表からのモニタリング情報

場所	目的	観測孔名	孔口標高 (EL. m)	掘削方向	掘削長 (m)	地下水圧の観測方式 (多連バカースシステム)	区間数	モニタリング期間 (yyyy/mm/dd)		観測間隔	備考	
								開始	終了			
広域地下水流動計画	広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、岩盤の物理や地下水の水質を明らかにするために必要な調査・解析技術などを開発すること	DH-1	269.5		503.7							
		DH-2	193.6	鉛直孔	501.0	ピエゾ水頭観測 (PIEZO)	7	2002/12/01	2004/09/05	5分		
						直接水圧観測 (MPシステム)	12	2005/04/01	2008/07/06	5分		
							4	2008/07/10	2015/03/31	5分		
		DH-3	356.4		1011.4	直接水圧観測 (MPシステム)	12	1999/04/01		月1回	平成11年度報告書	
		DH-4	266.6		505.0							
		DH-5			502.3	大気開放型水位計		2001/04/01			平成13年度報告書	
		DH-6			1019.0							
		DH-7	340.2	鉛直孔	1012.0	直接水圧観測 (MPシステム)	15	1999/04/01		月1回	平成11年度報告書	
							5	2003/07/01		30分		
							4	2009/01/28	2015/03/31	5分		
		DH-8	269.8		1012.0	大気開放型水位計 (mini TROLL)	—	2001/05/01			60分	平成13年度報告書
						大気開放型水位計 (平成12年度まで)						
		DH-9	275.4	鉛直孔	1030.0	直接水圧観測 (MPシステム)	11	2001/12/01	2003/08/01	30分	2005年度報告書	
							10	2005/04/01	2006/03/31	約1カ月		
5	2001/12/01											
					4	2009/01/31	2015/03/31	5分				
DH-10	475.6		1012.0	大気開放型水位計 (mini TROLL)	—	2001/06/01			60分			
					—	2014/02/28	2015/03/31	5分				
DH-11	339.9	鉛直孔	1012.0	直接水圧観測 (MPシステム)	12	2001/12/01			30分			
					5	2005/04/01	2008/06/25	30分				
					4	2008/06/29	2012/03/31	30分				
					4	2012/04/01	2015/03/31	5分				
DH-12	137.4		715.8	大気開放型水位計 (mini TROLL)	—	2015/01/22	2015/03/31	5分				
DH-13	277.5	鉛直孔	1015.0	直接水圧観測 (MPシステム)	15							
					7	2002/03/01	2006/08/13	30分				
					4	2008/07/16	2015/03/31	5分				
DH-14	317.9											
DH-15	213.2	鉛直孔	1012.0	ピエゾ水頭観測 (SPMPシステム)	10	2005/04/01	2015/03/31	5分				
超深地層研究所計画	正露様用地 ・月吉断層の上盤側と下盤側での地下水の水圧変化の把握 ・研究坑選掘削に伴う地下水の水圧変化の把握	AN-1	216.4	鉛直孔	994.1	直接水圧観測 (MPシステム)	20	1999/09/01	2000/11/01			
							12	2001/03/01	2006/01/07	30分		
							4	2008/08/29	2015/03/31	5分		
		AN-2	216.0									
		AN-3	214.9		408.0	直接水圧観測 (MPシステム)	5	2000/04/01	2007/07/12	30分		
		AN-4			115.7							
		MIU-1	220.1		1014.0	直接水圧観測 (MPシステム)	9	2000/05/01	2006/05/25	30分		
							4	2008/09/09	2009/03/31	5分	2009年9月以降休止	
		MIU-2	223.8	鉛直孔	1012.0	直接水圧観測 (MPシステム)	10	2000/02/01	2001/11/01			
							12	2003/03/01	2005/08/28	30分		
							4	2008/07/31	2015/03/31	5分		
		MIU-3	230.5	鉛直孔	1014.0	直接水圧観測 (MPシステム)	8	2000/12/01	2008/06/23	30分		
							4	2008/06/25	2015/03/31	5分		
		MIU-4	217.0	傾斜孔	790.0	直接水圧観測 (MPシステム)	10	2001/12/01	2008/06/22			
							4	2008/06/24	2012/03/05	30分		
						2012/03/06	2015/03/31	5分				
研究所用地	・研究坑選掘削に伴う地下水の水圧変化の把握 ・※05ME06孔 研究坑選掘削の地下水の水圧変化の把握	05ME06	201.1	鉛直孔		直接水圧観測 (MPシステム)	11	2005/12/12	2015/03/31	5分		
		MIZ-1	206.6	傾斜孔	1300.0	ピエゾ水頭観測 (SPMPシステム)	10		2015/03/31	5分		
		MSB-1	253.1	鉛直孔	201.0	直接水圧観測 (MPシステム)	5	2005/04/01	2015/03/31	5分		
		MSB-2	198.5	鉛直孔 地下水採水孔	176.0	直接水圧観測 (MPシステム)	10	2005/04/01	2012/03/31	約1カ月		
							4	2014/04/01	2015/03/31	5分		
		MSB-3	204.6	傾斜孔	182.0	直接水圧観測 (MPシステム)	7	2005/04/01	2015/03/31	5分		
		MSB-4	214.4	鉛直孔 地下水採水孔	99.0	直接水圧観測 (MPシステム)	7	2005/04/01	2012/03/31	約1カ月		
3	2014/04/01						2015/03/31	5分				

※ モニタリング期間のうち、終了期間として表示した 2015/03/31 は、文献番号 (URL-052) : 毛屋、別府、竹内(2018) 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(2013~2014年度) に記載された観測期間である。

表 4.1.6-3 瑞浪超深地層研究所坑道内からのモニタリング孔の情報

孔口位置	孔名	孔口標高 (EL.m)	地下水圧の観測方式 (装置名称)	区間数	観測間隔
深度200m	07MI08号孔	1.00	直接水圧計測方式 (MPシステム)	7	5分
	07MI09号孔	0.70	ピエゾ水頭計測方式 (PIEZOシステム)	5	5分
深度300m	10MI23号孔	-96.54	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	5	5分
	09MI17-1号孔	-100.74	ピエゾ水頭計測方式 [水圧モニタリング装置(シングルパッカー方式)]	1	5分
	09MI18号孔	-100.73	ピエゾ水頭計測方式 [水圧モニタリング装置(シングルパッカー方式)]	1	5分
	09MI19号孔	-100.72	ピエゾ水頭計測方式 [水圧モニタリング装置(シングルパッカー方式)]	1	5分
深度500m	12MI32号孔	-298.04	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	3	5分
	12MI33号孔	-297.80	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	6	5分
	13MI38号孔	-297.56	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	6	5分
	13MI39号孔	-297.56	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	4	5分
	13MI40号孔	-297.56	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	4	5分
	13MI41号孔	-297.56	ピエゾ水頭計測方式 (水圧モニタリング装置)	4	5分

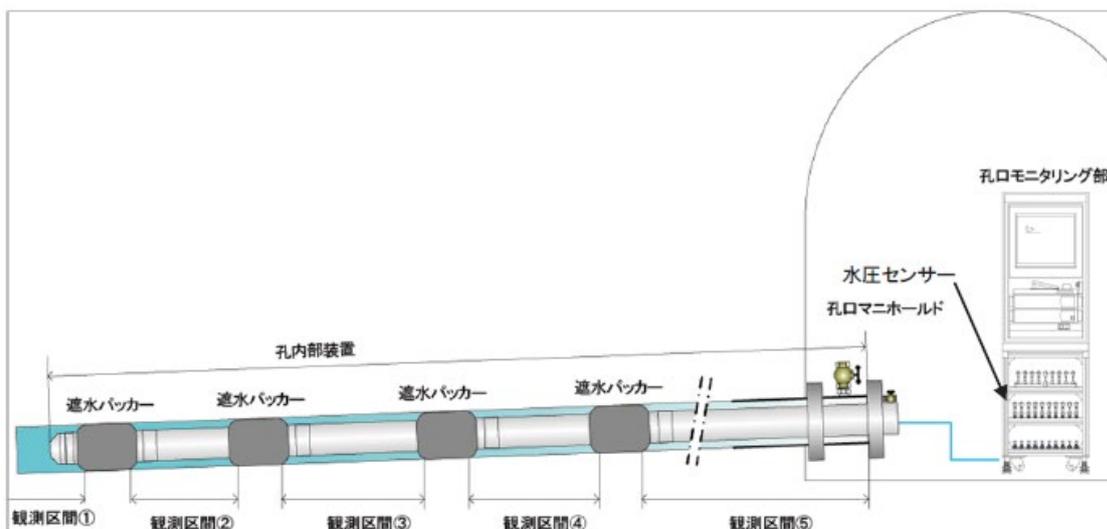


図 4.1.6-5 瑞浪超深地層研究所坑内からの水圧モニタリング装置¹⁸⁾

地下実験施設においては、水理モニタリングに加え、地下水地球化学モニタリングも併せて実施されている¹⁹⁾。地表では、地表から掘削した浅層ボーリング孔 (MSB-2, MSB-4 号孔の 2 孔) において、地下水の採水・水質分析を実施している。研究坑道内では、深度 300m のアクセス坑道から掘削されたボーリング孔研究坑道内では、深度 200m 予備ステージ内から掘削されたボーリング孔 (07MI07 号孔)、深度 300m 研究アクセス坑道内から掘削されたボーリング孔 (09MI21 号孔)、深度 300m 予備ステージ内から掘削されたボーリング孔 (09MI20 号孔)、深度 400m 予備ステージ内から掘削されたボーリング孔 (10MI26 号孔)、深度 500m 研究アクセス北坑道内から掘削されたボーリング孔 (12MI33 号孔, 13MI38 号孔, 13MI39 号孔, 13MI40 号孔, 13MI41 号孔, 13MI45 号孔, 13MI46 号孔, 13MI47 号孔, 13MI48 号孔) および冠水坑道内で地下水の採水・

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

水質分析を実施した。また、立坑坑壁に設置した集水リングに流入した地下水、深度 300m 研究アクセス坑道の壁面からの湧水についても採水・水質分析を実施している。

それぞれの採水方法を表 4.1.6-4 に整理した。研究坑道内の集水リング、坑道壁面での採水では、湧出した地下水が直接大気に触れるため、地下水が存在した原位置環境での採水、被圧・嫌気状態での採水はできない。冠水坑道では、冠水坑道（プラグで遮蔽された坑道）内部に設置している配管から採水することで、坑道内へ湧出した地下水が被圧・嫌気状態で採水が可能となる。研究坑道内でのボーリング孔には水圧・水質モニタリング装置が設置されており、ボーリング孔内でパッカーによって区分された区間ごとに採水・間隙水圧測定および物理化学パラメータ（pH、電気伝導度、温度、酸化還元電位、溶存酸素濃度）を被圧・嫌気状態で連続測定でき、孔外へ導出した地下水をステンレス製サンプラーボトル内に採水することで被圧・嫌気状態での地下水採取が可能となる。地表から掘削した浅層ボーリング孔（MSB-2、MSB-4 号孔）には MP システムが設置されており、観測用ケーシング内へサンプラープローブ等を挿入することで、パッカー区間の採水口ポートから区間ごとにポンプ採水またはバッチ採水が可能で、バッチ採水ではステンレス製サンプラーボトル内に地下水が原位置環境で採水でき、被圧・嫌気状態での採水が可能である。

地下水の分析項目は、物理化学パラメータ（pH、電気伝導度、温度、酸化還元電位、溶存酸素濃度）、主要成分濃度（Na⁺、Cl⁻など）、酸素・水素・ホウ素同位体（ $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、トリチウム、¹⁰B、¹¹B）、微量元素濃度（Al、Ti など）、蛍光染料濃度（ウラニン、アミノ G 酸、ナフチオン酸ナトリウム）である。なお、比色法による溶存酸素濃度測定については現場で測定を実施し、その他の分析は全て地上の分析室で測定を実施している。採水頻度は年 3 回を基本とし、必要に応じて採水・分析を追加している。

採水においては、事前の揚水を行いボーリング掘削時に使用したトレーサー濃度の変化を管理することで、地下水試料の品質管理を行っている²⁰⁾。採水試料は掘削水などにより乱されることから、1) 蛍光染料などを加えた掘削水を使用して試錐孔を掘削、2) ポンプやベラーによる掘削水の排水、3) 掘削水が排除された段階で地下水採水、という手順ですすめられる。なお、排水作業により採水区間がもともと地層内に存在していた水に入れ替わるまでの排水作業を予備排水としている。

地下水採水を行うための判断基準は以下の通りである。

- 予備排水試料の物理化学パラメータが、一定値に収束することを確認
- トレーサー濃度が掘削水の設定濃度に対して十分に低下していることを確認
- 予備排水試料の科学成分分析値とトレーサー濃度を散布図にプロットし、近似直線を求める。この相関に直線性のある成分に対して、トレーサー濃度が 0 になった場合の値を近似直線から求め、分析値と比較する。

また、物理化学パラメータは予備排水開始時においては掘削水に対応した値を示しているが、排水が進行するにしたがい、もともと地層内に存在していた地下水の値に漸移し収束する。従って、予備排水終了前に物理化学パラメータの値が測定精度の範囲内で一定値に収束しているかどうかを確認するとしている。

表 4.1.6-4 瑞浪超深地層研究計画における採水位置と採水方法

採水位置		採水方法	注意点	
研究坑道内	集水リング	主立坑	集水ホースから流下する地下水を直接採水 (ポリエチレン容器に1L)	被圧・嫌気状態での採水は不可
		換気立坑		
	坑道壁面	深度300m研究アクセス坑道	集水配管から湧水している地下水を直接採水 (ポリエチレン容器に1L)	被圧・嫌気状態での採水は不可
		ボーリング孔	07MI07号孔	水圧・水質モニタリング装置を利用したバッチ採水 (ステンレス製サンプラーボトルに1L)
	09MI21号孔			
	09MI20号孔			
	10MI26号孔			
	12MI33号孔			
	13MI38号孔			
	13MI39号孔			
	13MI40号孔			
	13MI41号孔			
	13MI45号孔			
	13MI46号孔			
13MI47号孔				
13MI48号孔				
坑道	冠水坑道	冠水坑道内部に設置している配管から採水(ステンレス製サンプラーボトルまたはポリエチレン製容器に1L)	被圧・嫌気状態での採水が可能	
地表からの掘削ボーリング孔	MSB-2号孔	MPシステムによりポンプ採水、バッチ採水 (ステンレス製サンプラーボトルに1L)	被圧・嫌気状態での採水が可能	
	MSB-4号孔			

4.1.7 日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター

1) 水理地質情報

幌延深地層研究計画の対象地区である北海道天塩郡幌延町は、天北堆積盆の東端部に位置し、白亜系を基盤岩とし、古第三系の羽幌層及び曲淵層、中期中新世前半の宗谷夾炭層、鬼志別層及び増幌層、中期中新世後半～鮮新世の稚内層及び声間層、鮮新世～前期更新世の勇知層及び更別層、中期更新世以降の段丘堆積物群、及び完新世堆積物が分布する。稚内層、声間層、勇知層及び更別層は、増幌層に不整合で重なり、各層は主に硬質頁岩、珪藻質泥岩、細粒砂岩及び礫岩～砂岩～シルト岩で構成される。また、幌延町は北北西-南南東走向の幌延断層（ヌカナン断層群の一部）と大曲断層により三分され、研究対象地区は大曲断層の北方～東側の領域にあたる。図4.1.7-1に示す地下研究施設周辺の深層ボーリング調査においても、地質分布に示された稚内層、声間層、勇知層が確認されている。これらのHDB-1～HDB-11孔、SAB-1孔では地質、水理調査が実施されたのち、長期モニタリング孔としての設備が設けられている。

地下研究施設付近の地質は、各種立坑（換気、東、西）及び深度140m、深度250m、深度350m水平坑道の壁面観察結果やボーリング調査によって確認されており、換気立坑を例に見ると、深度380.1mまでの壁面観察結果から、深度20m程度までは被覆層（角礫層）、深度250mまでは珪藻質泥岩を主体とする声間層、それ以深は珪質泥岩を主体とする稚内層が分布する。

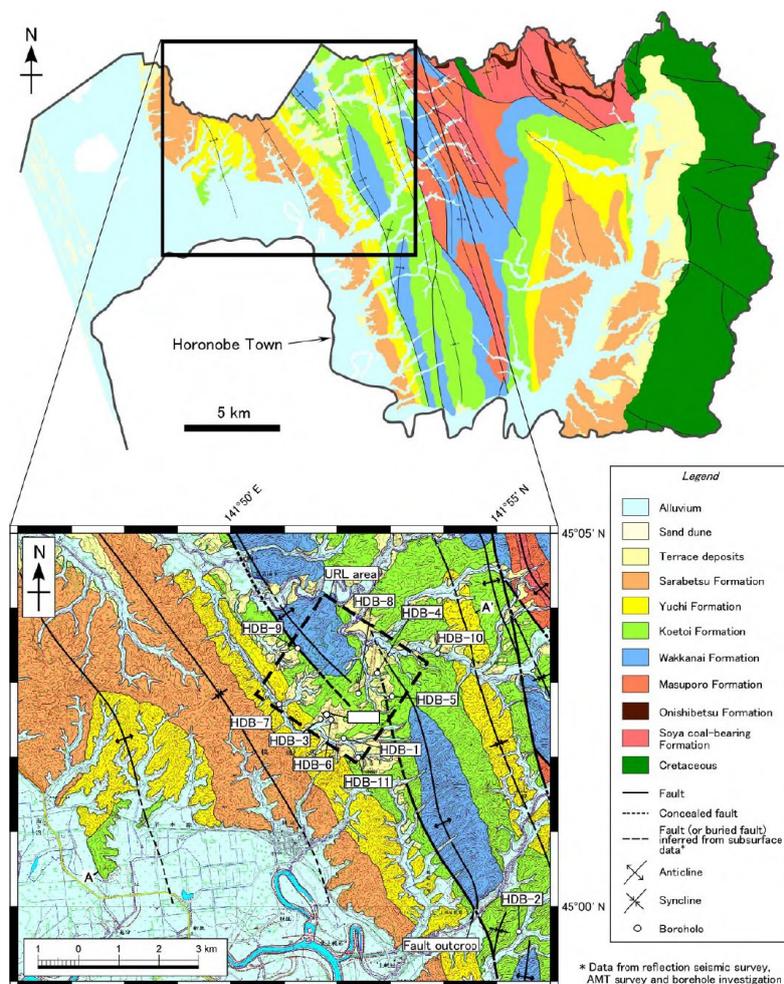


図 4. 1. 7-1 幌延深地層研究センター周辺の地質分布と深層ボーリング孔位置²¹⁾

声問層中の割れ目は連続性・連結性に乏しく、稚内層中の割れ目は層理面にほぼ平行な割れ目（北西－南東走向で南西傾斜）と層理面に交差する割れ目（東西走向で高角度傾斜）に大別され、断層運動に伴って引張割れ目が発達しやすい領域（深度 400m 以浅の稚内層）では層理面に交差する断層（破砕物を伴うせん断割れ目）が引張割れ目の派生を伴って発達している。地表から実施した複数のボーリング調査により、深度 350m 調査坑道と交差すると推定されていた稚内層中で抽出された北東－南西走向または東－西走向を有する 19 条の高角度な断層のうち、6 条の断層はその位置や方向が概ね整合的であることが確認されている。

幌延地域の地下の水理環境において特徴的なことは、堆積岩であり孔壁が崩壊しやすいこと、溶存ガスが含まれていること、そして塩水系地下水を有することである。研究所周辺の深層ボーリング孔ではこれらの制約や特徴に応じながら品質を担保しながらデータ取得されている。

図 4. 1. 7-2 に、HDB-1～11 孔で実施した水理試験の結果について健岩部だけでなく掘削中の逸水が確認された割れ目を含む岩盤の平均的な原位置の透水係数を測定深度ごとに示す²¹⁾。同図から、勇知層は $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m/s}$ オーダー、声問層は $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ オーダー、稚内層は $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ オーダーの範囲で分布する。勇知層、声問層の透水係数は比較的ばらつきが小さいのに対し、稚内層では大きな幅で分布する。また、声問層ではやや相関が低いもののすべての地層で深度と透水係数の負の相関（深度依存性）が認められ、特に稚内層の透水係数の深度に対する変化率は他の地層と比べてかなり大きい。さらに、稚内層の透水係数は特に浅部で大きい傾向を示した。

室内透水試験結果から得られた透水係数は、稚内層、声問層にかかわらず、間隙率と良い相関が認められている。

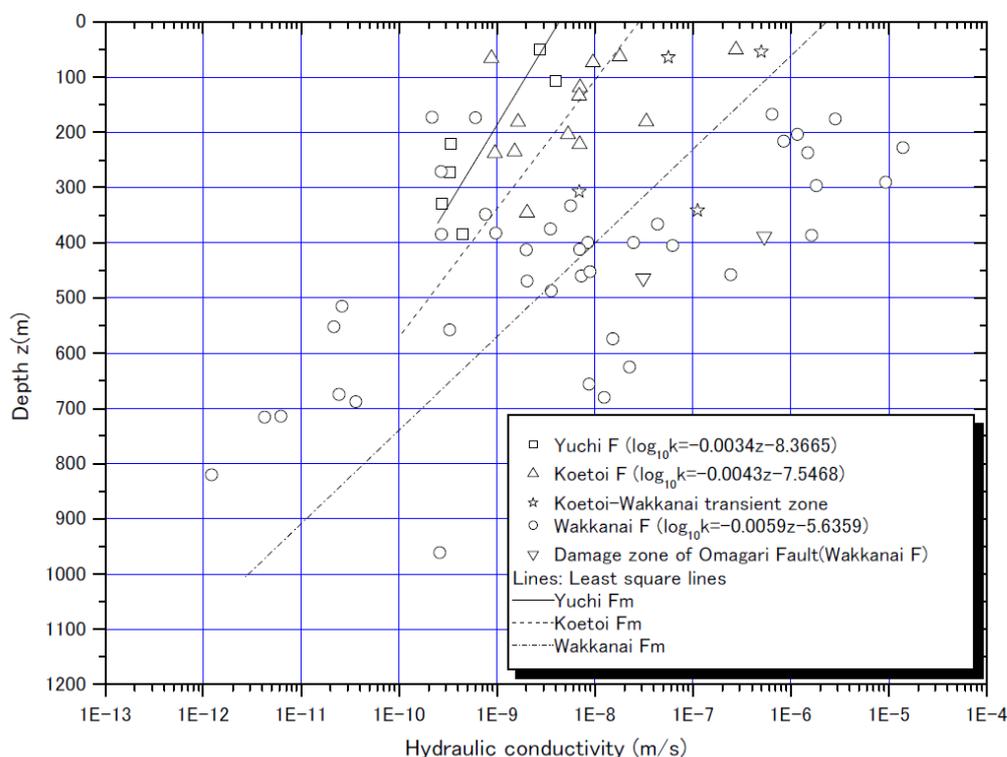


図 4.1.7-2 幌延深地層研究センターボーリング孔における深度と透水係数の関係²¹⁾

一方、地下研究施設においては、立坑掘削に伴う岩盤の力学的影響により透水性に変化が認められている。図 4.1.7-3 に示されるように、東立坑深度 350m における掘削影響領域のモニタリング孔で実施した透水試験では、掘削の前後において壁面から 1m 以内の範囲で透水係数が 2~3 オーダー ($10^{-11} \sim 10^{-10} \text{m/s}$ から $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ オーダーへ)、2m 以内においても約 1 オーダー増大している結果となっている。また、深度 250m 調査坑道の西側において実施した透水試験では、坑道壁面から 1.5m 範囲内で 2 オーダー程度高い透水性を示したが、これ以上離れた範囲では、既存の割れ目発達領域の透水性を有意に上回る掘削影響領域は形成されないことが推定されている (図 4.1.7-4)。さらに、深度 140m 調査坑道で実施した透水試験では、掘削前後で最大 1 オーダー程度の変化が認められるものの、割れ目の分布などの不均質性や試験区間内に発生したガスの影響により試験方法によってばらつきがあることも認められている。

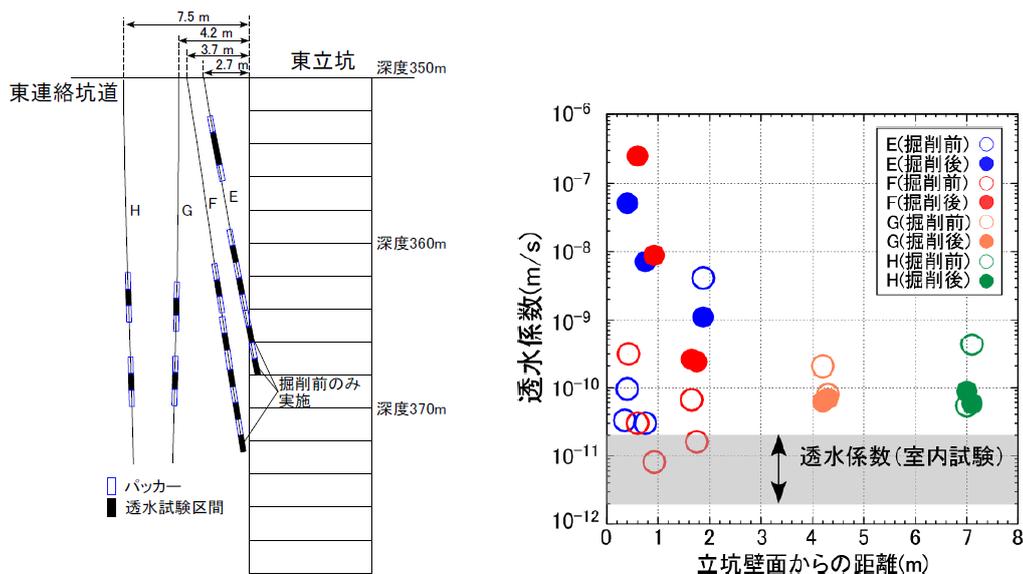


図 4. 1. 7-3 東立坑深度 350m における立坑掘削前後の透水係数の変化²²⁾

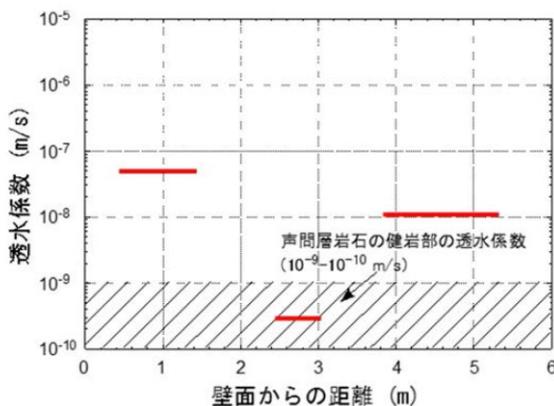


図 4. 1. 7-4 深度 250m 調査坑道における透水性に対する掘削影響の評価²²⁾

2) モニタリング仕様

地下施設は、各種立坑と水平な調査坑道から構成される。主な施設の諸言を以下に示すとともに、現段階における地下施設のレイアウトを図 4. 1. 7-5 に示す。

- 立坑
 - 換気立坑 (内径 4.5m) : 380.0m
 - 東立坑 (内径 6.5m) : 380.0m
 - 西立坑 (内径 6.5m) : 365.0m

- 調査坑道
 - 深度 140m 調査坑道 (幅 4m, 高さ 3.6m : 3 心円馬蹄形) : 186.1m
 - 深度 250m 調査坑道 (幅 4m, 高さ 3.6m : 3 心円馬蹄形) : 190.6m
 - 深度 350m 調査坑道 (幅 4m, 高さ 3.6m : 3 心円馬蹄形) : 757.1m

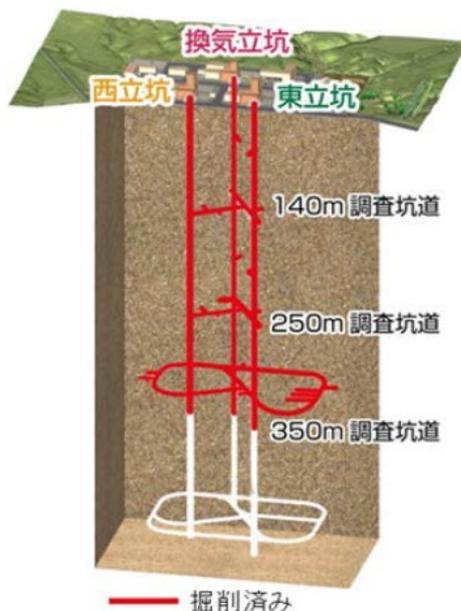


図 4.1.7-5 幌延深地層研究センター地下施設のレイアウト²²⁾

幌延深地層研究センターにおける立坑及び調査坑道の施工実績をもとに、表 4.1.7-1 に地下施設（換気立坑，東立坑，西立坑）の建設実績とともに、地表モニタリング孔（HDB-1～11，PB-V01 孔，SAB-1 孔）の掘削作業の終了年度を整理した。同表によれば、地下施設の建設に先立ち、2001 年度の HDB-1, 2 孔の着手に始まり、2004 年度までに HDB-9, 10, 11 孔までの掘削を終えている。この後、地下施設の建設が開始され、2006 年 3 月 20 日に換気立坑，同年 9 月 1 日に東立坑の掘削工事が開始され、地表モニタリング孔として 2 孔（2007 年度に PB-V01 孔，2008 年度に SAB-1 孔）の掘削完了後、2011 年 3 月 16 日に西立坑の掘削が開始された。

表 4.1.7-1 モニタリング孔及び地下施設建設の実績

年度	掘削ボーリング	地下施設 掘削深度 (GL-m) ※立坑坑口標高60m			
		換気立坑	東立坑	西立坑	その他
2001	H13	HDB-1,-2			
2002	H14	HDB-3,-4,-5			
2003	H15	HDB-6,-7,-8			
2004	H16	HDB-9,-10,-11			
2005	H17		0.0	0.0	※3/20換気立坑着手
2006	H18		51.1	41.1	※9/1東立坑着手
2007	H19	PB-V01	161.0	110.2	140m調査坑道着手
2008	H20	SAB-1	250.5	140.5	140m調査坑道掘削、250m調査坑道着手
2009	H21		250.5	223.0	0.0 140m調査坑道完成、250m調査坑道掘削
2010	H22		250.5	250.5	5.0 ※3/16西立坑着手、250m調査坑道掘削
2011	H23		345.8	345.8	46.0 250m調査坑道完成、350m調査坑道着手
2012	H24		345.8	345.8	296.0 350m調査坑道掘削
2013	H25		380.0	368.0	365.0 350m周回坑道完成
2014	H26		380.0	380.0	365.0

モニタリング孔のうち HDB シリーズ (全 11 孔) の孔口配置は, 地表地質図と合わせ図 4.1.7-6 に示されている。地表に勇知層, 声問層, 稚内層が分布する領域にモニタリング孔が配置されており, 同図には, 地下施設のうち換気立坑の位置を+とし, これを中心とした半径 1km, 2km, 3km, 7km の同心円を白色点線で描いている。全孔の配置の概要は次の通りである。

- 換気立坑から北東方向
 - 約 1km 離れて HDB-8 孔, 2km 圏内に HDB-4 孔と HDB-5 孔, 約 3km 離れて HDB-10 孔の計 4 孔が配置されており, この方向が概ね東から西へ向かう主たる地下水流動方向と推定される。
- 換気立坑より南東方向
 - 1km 圏内に HDB-6 孔と HDB-1 孔, 2km 圏内に HDB-11 孔, さらに約 7km 離れた地点に HDB-2 孔の計 4 孔が配置されている。
- 換気立坑から南西方向
 - 1km 圏内に HDB-3 孔の 1 孔が配置されている。
- 換気立坑から北西方向
 - 約 1km 離れて HDB-7 孔, 約 2km 離れ HDB-9 孔が配置されている。

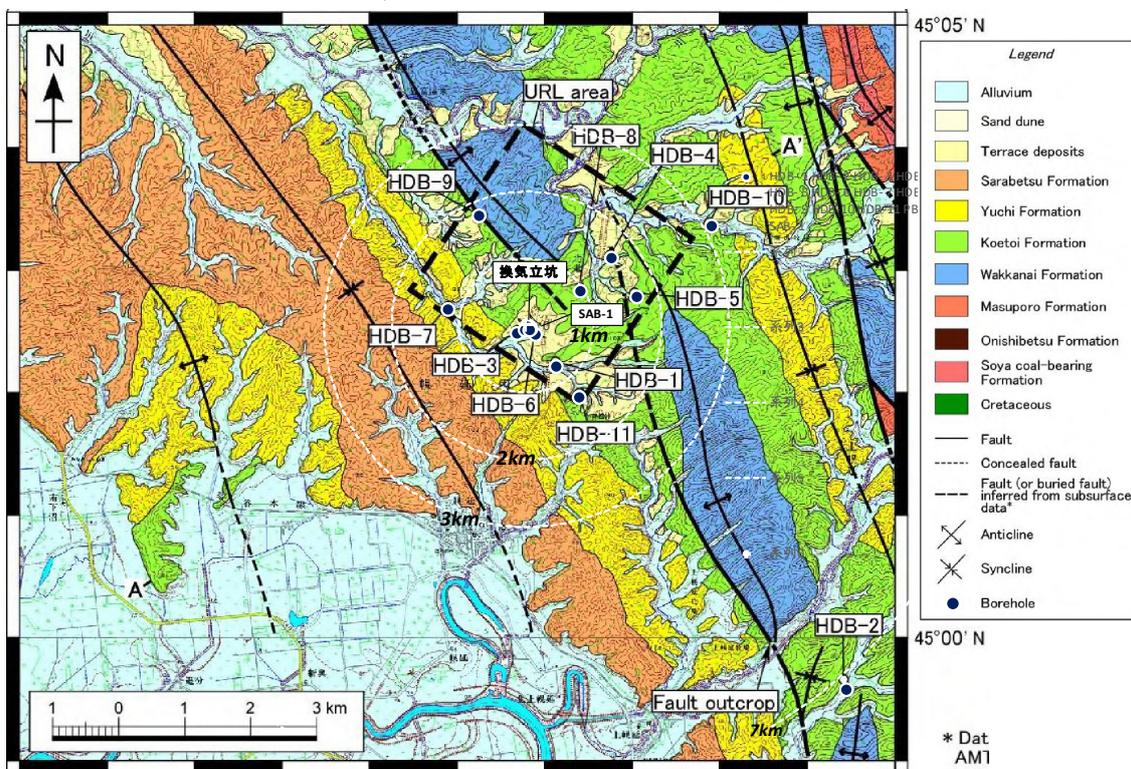


図 4.1.7-6 幌延深地層研究センター周辺の地下水モニタリング孔配置

地下実験施設周辺のモニタリング孔配置を拡大した図を図 4.1.7-7 に示す。同図には, 地下施設のうち換気立坑の位置を中心とした半径 50m, 100m, 150m, 200m の同心円を点線で描いており, モニタリング孔は次のように配置されている。

- 換気立坑から 150~200m の範囲に, HDB-3 孔, HDB-6 孔が配置されている。
- HDB シリーズの他に, 換気立坑の至近に PB-V01 孔, 東立坑の至近に SAB-1 孔がそれぞれ配置されている。
-

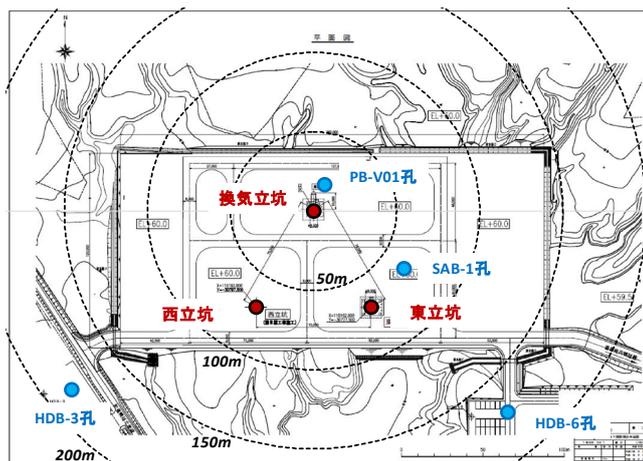


図 4. 1. 7-7 地下実験施設周辺のモニタリング孔配置

幌延深地層研究センターでの地下水圧計測方式は、瑞浪と同様に、

- 直接水圧計測方式
 - MP システム (Multi-Piezometric Logger System) : HDB-2,10 を除く HDB 孔
- ピエゾ水頭計測方式
 - SPMP システム (Stand-Pipe Multi-Packer System) : HDB-2 孔
 - PIEZO システム : HDB-10 孔, SAB-1 孔
 - スタンドパイプ式 10 連装パッカーシステム : PB-V01 孔

をそれぞれ使用し、長期の地下水位モニタリングを実施している。なお、ピエゾ水頭計測方式のスタンドパイプ式 10 連装パッカーシステムも観測区間から立ち上げたピエゾ管 (スタンドパイプ) に水圧センサーを挿入し、スタンドパイプ内の水位をモニタリングするものである。

図 4. 1. 7-8 には、換気立坑とモニタリング孔で確認された柱状図を表示した。柱状図には、深度を標高で表示し、相対的に深度を比較しやすいようにし、声問層上限面より下位の地層 (声問層、稚内層) を表示している (ただし、HDB-7 孔のみ勇知層を表示)。左端に配置した柱状図は、換気立坑 (坑口の標高 EL. +60m) の柱状図で、これまでに EL-320m まで掘削が進行し、声問層と稚内層を確認している。換気立坑の柱状図から右へ、換気立坑から半径 200m 圏内の 4 孔 (PB-V01 孔, HDB-6, 3, 8 孔), 換気立坑から北東領域の 3 孔 (HDB-4, 5, 10 孔), 南東領域の 3 孔 (HDB-1, 11, 2 孔), そして北西領域の 2 孔 (HDB-7, 9 孔) をそれぞれグループとして表示している。

HDB-6 孔を含み、換気立坑から南東領域で掘削したボーリング孔では、掘削深度が EL-500m を超え、HDB-11 孔の孔底深度は EL-953m である。南東領域にある HDB-1 孔と HDB-2 孔では、EL. -250m 以深の稚内層を対象として複数の区間を配置している。これ以外のモニタリング孔では、上位から下位へ概ね均等に複数の観測区間を配置している。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

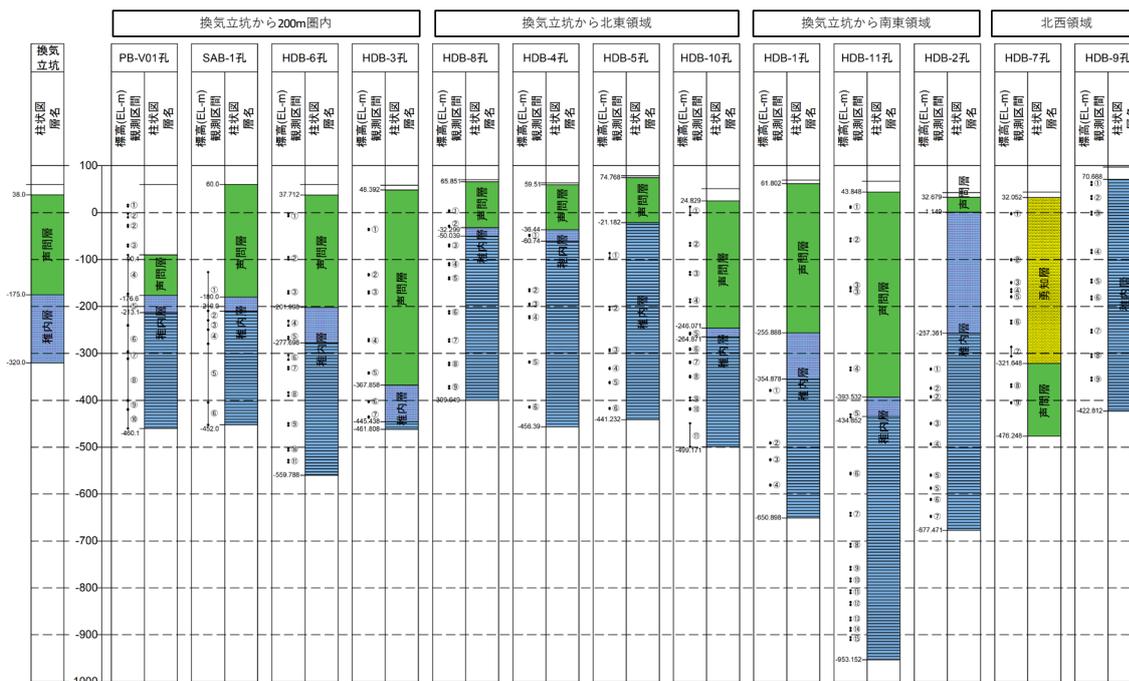


図 4.1.7-8 各ボーリング孔の柱状図と観測区間

図 4.1.7-9 に、地下施設の建設工程と各ボーリング孔の観測期間（公表されている期間）を示す。HDB シリーズでは HDB-4, 5 孔を除き、概ね 1~2 年前より地下施設建設（東立坑，換気立坑）に先行してモニタリングを開始している。

地下施設近傍の 2 孔（PB-V01 孔，SAB-1 孔）は、それぞれ換気立坑の施工計画への反映及び立坑の影響を含めたモニタリングという目的で実施され、換気立坑の掘削深度が 250.5m に達した時点から、それぞれモニタリングが開始されている。

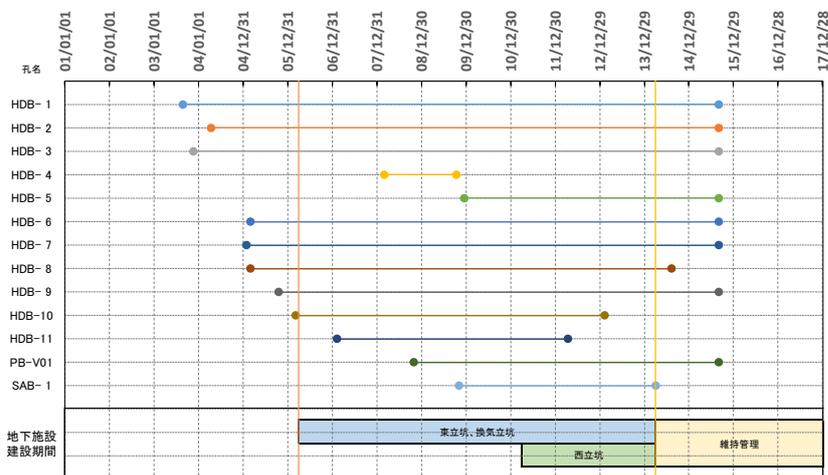


図 4.1.7-9 モニタリング期間と地下施設建設との関係

幌延深地層研究センターにおいては、瑞浪と同様に水理モニタリングに加え、採水による水質モニタリングが実施されている。

水質モニタリングは、間隙水圧モニタリングと同様の位置で実施されており、立坑内集水リング、立坑近傍孔（浅層ボーリング）および前述の研究所周辺モニタリング孔（深層ボーリング）に分けられる。各調査坑道内において採水したボーリング孔位置を図 4.1.7-10、立坑近傍の地表からのボーリング孔位置を図 4.1.7-11 に示す。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法, 計画等の妥当性に関する知見の整理

立坑における採水は東立坑と換気立坑の集水リングから実施され, 地表から概ね 30~40m 間隔で, 東立坑および換気立坑(掘削深度 380m)でそれぞれ 10 カ所の計 20 カ所となっている.

各調査坑道からのボーリング孔は, 深度 140m 調査坑道で 7 孔, 深度 250m 調査坑道で 10 孔, 深度 350m 調査坑道は 15 孔ある.

立坑近傍の地表からの採水ボーリング孔は図 4.1.7-11 中の HGW 孔 5 孔であり, 研究所周辺の深層ボーリング孔は 11 孔 (HDB-1~11 孔) で実施されている.

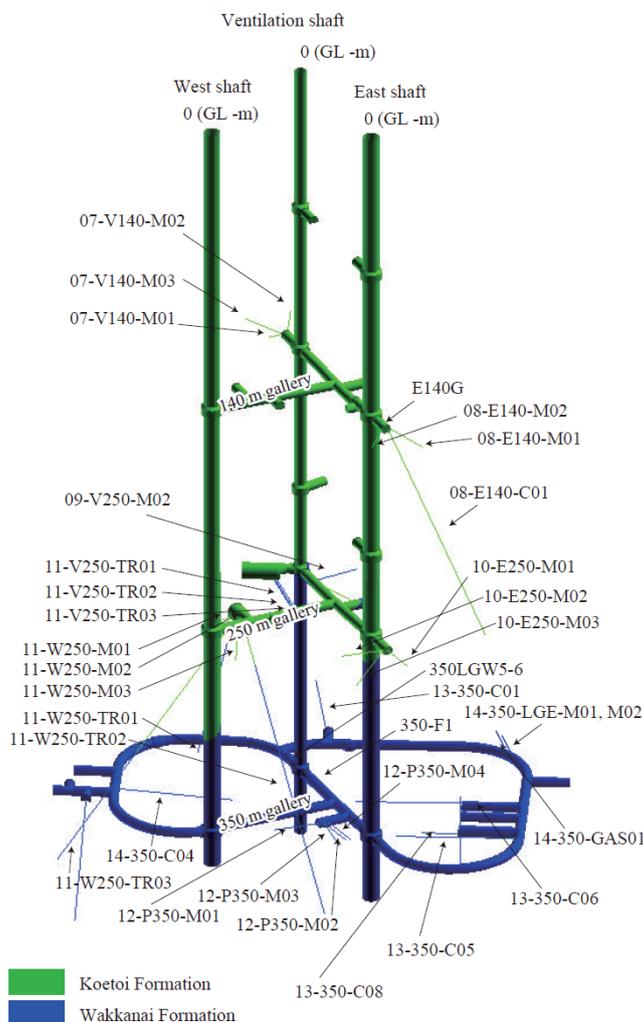


図 4.1.7-10 各調査坑道内において採水したボーリング孔位置²³⁾

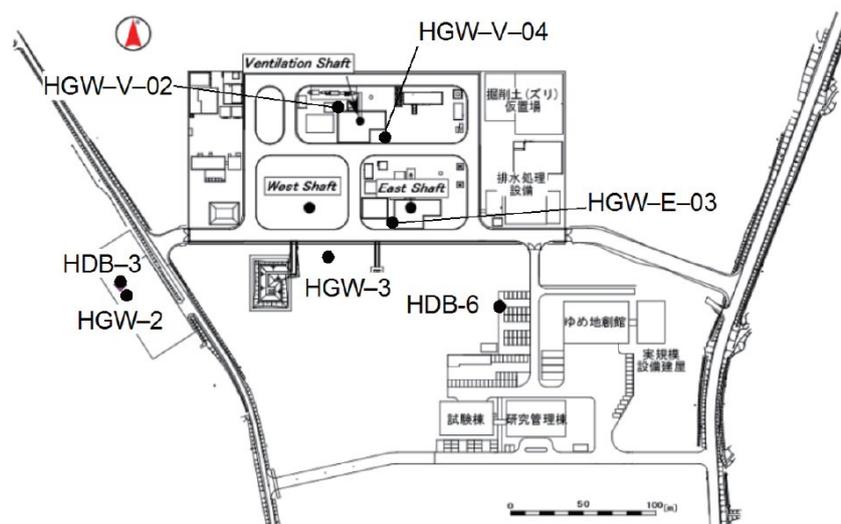


図 4.1.7-11 地下施設近傍における地表からの採水ボーリング孔位置²³⁾

それぞれの採水位置からの採水方法は、以下に示した通りである。

- 立坑集水リング
立坑集水リングの地下水の採取方法は、立坑壁面からの湧水が覆工コンクリートとの隙間を通り流れ落ちたものを、立坑の壁面に深度 30~40m 間隔で設置されている集水リングで受け、そこから各調査坑道まで伸びる採水ホースを流れた地下水を、大気開放条件で採取するものである。集水リングの試料は、一つ上の深度に設置されている集水リングとの間の立坑壁面からの湧水を集めたものとなる。
- 各調査坑道
各調査坑道から掘削されたボーリング孔における採水方法は、孔内をパッカーで区切られた採水区間から伸びるチューブを通し、大気開放条件で自然に湧出する地下水を採取している。
- 立坑近傍浅層ボーリング孔
浅層ボーリング孔 (HGW 孔) からの採水方法は、地上から地下水面までチューブを下ろし、手動のポンプで地下水を汲み上げ、大気開放条件で採取している。
- 研究所周辺深層ボーリング孔
深層ボーリング孔 (HDB 孔) からの採水方法は、MP システム設置孔であり、MP ケーシング内に採水ボトルをパッカーで区切られた採水区間まで下ろし、原位置の圧力を維持した状態で採取し、これを地上まで引き上げ、大気開放条件で採水容器に移し替えて採取している。

採取した地下水試料の分析項目及び分析方法を表 4.1.7-2 に示す。

表 4.1.7-2 地下水の分析項目

分析項目	分析方法 (JIS)	
①物理化学パラメータ	pH	ガラス電極法 (JIS K0101)
	水温	JIS K102
	電気伝導度	JIS K0101 12
②水質	Na ⁺ , K ⁺ , Li ⁺	フレイム原子吸光法 (Na ⁺ , K ⁺ : JIS K0101) (Li ⁺ : JIS K0121)
	NH ₄ ⁺	イオンクロマトグラフ法 (JIS K0101)
	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Sr ²⁺ , P, T-Mn, Si, T-Fe, Al	ICP 発光分光分析法 (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , T-Mn, T-Fe, Al: JIS K0101) (Sr ²⁺ , P, Si: JIS K0116)
	Cl ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻	イオンクロマトグラフ法 (JIS K0101)
	F ⁻	ランタン-アリザリンコンプレキソン吸光光度法 (JIS K0101)
	I ⁻	接触反応法 (九電産業規定法 KA-(F)310-08 地熱に基づく)
	アルカリ度	滴定法 (JIS K0101)
	全有機炭素(TOC)	燃焼酸化-赤外線式 TOC 自動計測法 (JIS K0102)
	全無機炭素(TIC)	燃焼酸化-赤外線式 TOC 自動計測法 (JIS K0102)
	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	全炭酸濃度と pH および TIC 濃度から算出
	生物化学的酸素消費量 (BOD)	滴定法 (JIS K0102)
	化学的酸素要求量(COD)	過マンガン酸カリウム酸性法 (JIS K0102)
	Fe ²⁺ および全鉄	1,10-フェナントロリン吸光光度法 (JIS K0400-57-10)
	硫化物 (HS-HACH)	メチレンブルー吸光光度法 (JIS K0102)
③同位体	酸素同位体比(δ ¹⁸ O)	質量分析法 (九電産業規定法 KA-(F)310-19)
	水素同位体比(δD)	質量分析法 (九電産業規定法 KA-(F)310-19)
	トリチウム(³ H)	電解濃縮-液体シンチレーション測定法 (文部科学省放射能測定法に基づく)
④微量元素	希土類元素	誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)法 (JIS K0116)
	微量元素(Th, U, Co, As, Mo, Cs, Ba)	ICP-質量分析法 (JIS K0116)
⑤蛍光染料	ナフチオン酸ナトリウム, ウラニン	高速液体クロマトグラフ法 (JIS K0124)

4.2 モニタリング結果の整理

4.2.1 国家石油地下備蓄久慈基地

久慈基地では、建設工事に合わせ 1988 年 1 月以降、地表から地下水位観測が続けられており、収集した情報から確認できた次の観測事例について以下に説明する。

- 1988 年から 1992 年までの岩盤タンク等工事中における観測データ
- 1993 年から 2013 年までのオイルイン後の各種イベントに対する観測データ

1) 岩盤タンク建設の影響に関する整理

1998 年から 1992 年の 5 年間の地下水位 (W-1~18: 18 孔)、水量 (水封水、粘土水、湧水量)、月間降水量、工事工程、岩盤タンク月間掘削量の状況を図 4.2.1-1 に示す。

モニタリング孔の地下水位は、工事開始時 (88 年 1 月末) には約 EL+70m~140m の範囲に分布するが、岩盤タンク工事に先立つ各種トンネル掘削により大きく低下している。さらに 1989 年 1 月から岩盤タンク掘削が開始すると、W-7 孔、W-12 孔、W-18 孔、W-10 孔、W-8 孔で、地下水位が EL+10m 以下に低下し、これらのうち W-18 孔と W-8 孔の地下水位は、操業段階での限界地下水位 (EL±0m) よりも低下した。1990 年 8 月から粘土グラウト工事が開始され、観測孔全体の平均地下水位は工事の進行とともに徐々に上昇し、W-18 孔と W-8 孔の地下水位も限界地下水位 (EL±0m) 以上となっている。地下水位が EL+10m よりも低下した孔は、岩盤タンク領域の南東側に位置している (図 4.2.1-2)。

2) オイルイン後の各種イベントに対する観測データ

1993 年のオイルイン以降、1994 年から 2013 年まで 20 年間の、湧水量、水封水供給量、降水量、観測孔水位の変化を図 4.2.1-3 に示す。図 4.2.1-3 には水封水供給量のグラフに記録されている水封トンネル水位変化を加えた。岩盤タンクからの湧水量、水封水供給量、孔内水位をに対しての変動要因と、要因ごとのモニタリング結果への影響は表 4.2.1-1 に示される。

タンク液位・内圧変化による影響としては、オイルイン時には岩盤タンク湧水量が約 70%減少するとともに、水封水供給量はほぼ半減している。操業段階で実施された緊急放出訓練では、放出による岩盤タンク液位の低下と内圧減少によって岩盤タンクへの湧水量と水封水供給量が増加している。また長期的変化として割れ目への目詰まりの進行により、湧水量と水封水供給量とが漸減した。なお、これらの影響が地下水位に及ぼす影響の因果関係については不明である。

地震の影響では、地震動の速度に比例して湧水量と水封水供給量が一時的に増加しているが、地下水位への影響は認められていない。降水の影響では、豊水期には湧水量が増加するとともに、水封水位を一定とするため水封水供給量は減少、孔内水位は上昇している。渇水期には、湧水量は減少、水封水供給量は増加し、孔内水位は低下する。

各モニタリング孔の地下水位を見ると、限界地下水位 (EL. ±0m) を下回る箇所はないが、W-18 孔の地下水位が EL+10m 以下と最も低く、降雨の影響を受けずに安定した水位となっている。他に相対的に地下水位が EL. +10m 付近と低い孔には、W-8 孔、W-10 孔があり、これらの孔も W-18 孔と同様に降水の影響を受けずに安定した地下水となっている。また、最低地下水位が EL+10m 付近にあるものの降水等の影響で水位が高い状態にあるのが W-7, 9, 11, 12, 13 孔で、これらの孔はいずれも岩盤タンク南東側に位置する (表 4.2.1-2、図 4.2.1-4)。

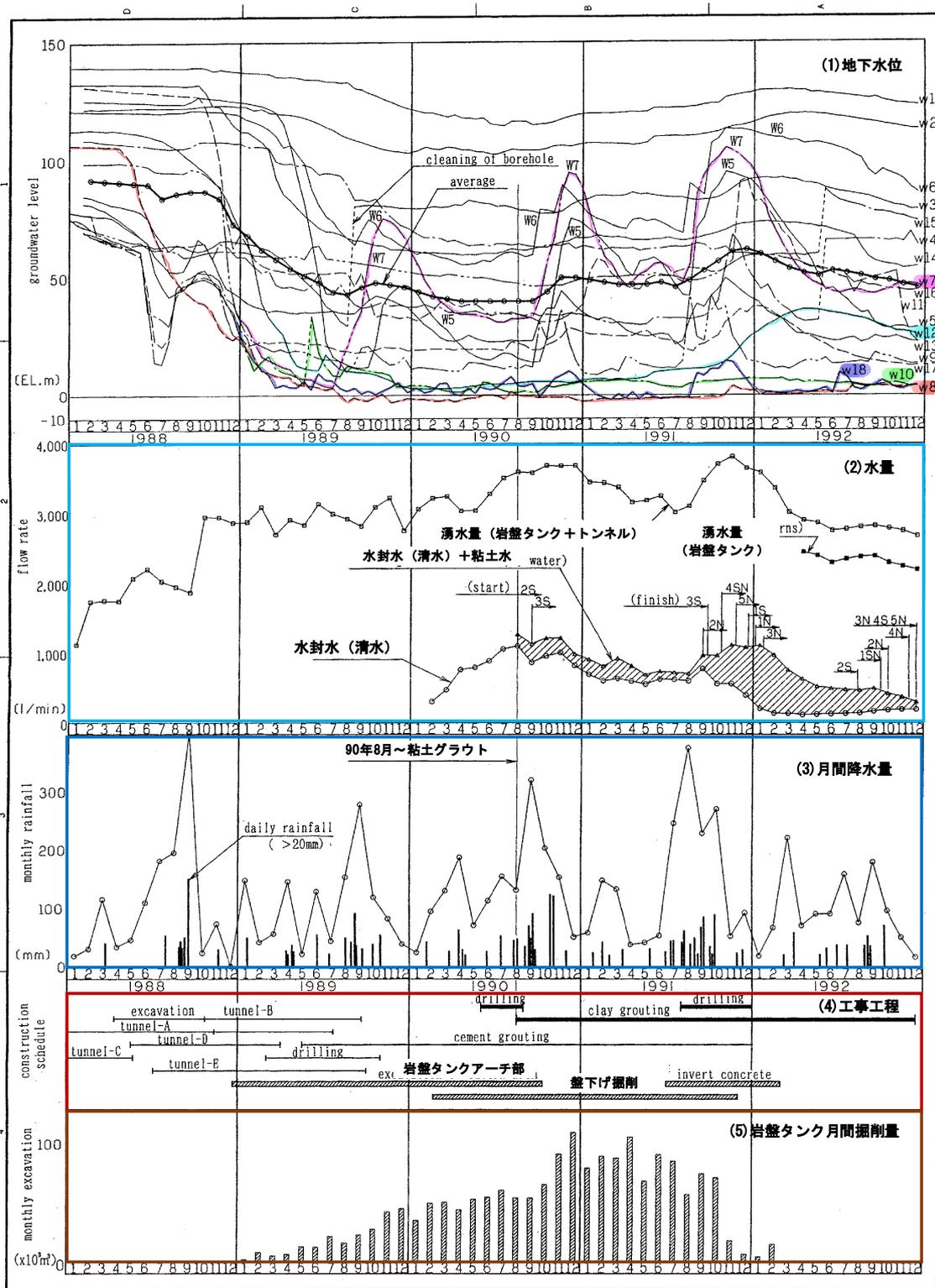


図 4.2.1-1 久慈基地における岩盤タンク掘削期間中の地下水位の変化²⁴⁾

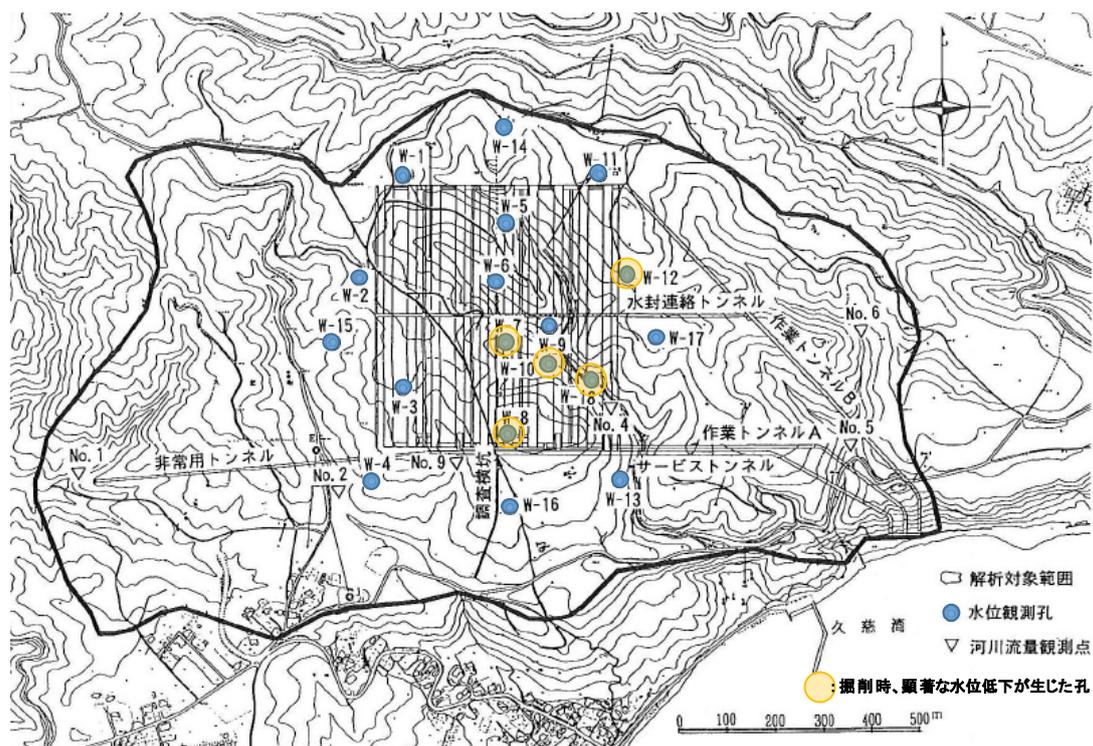


図 4.2.1-2 久慈基地においてタンク掘削期間中に顕著な地下水位低下が見られた箇所²⁵⁾

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

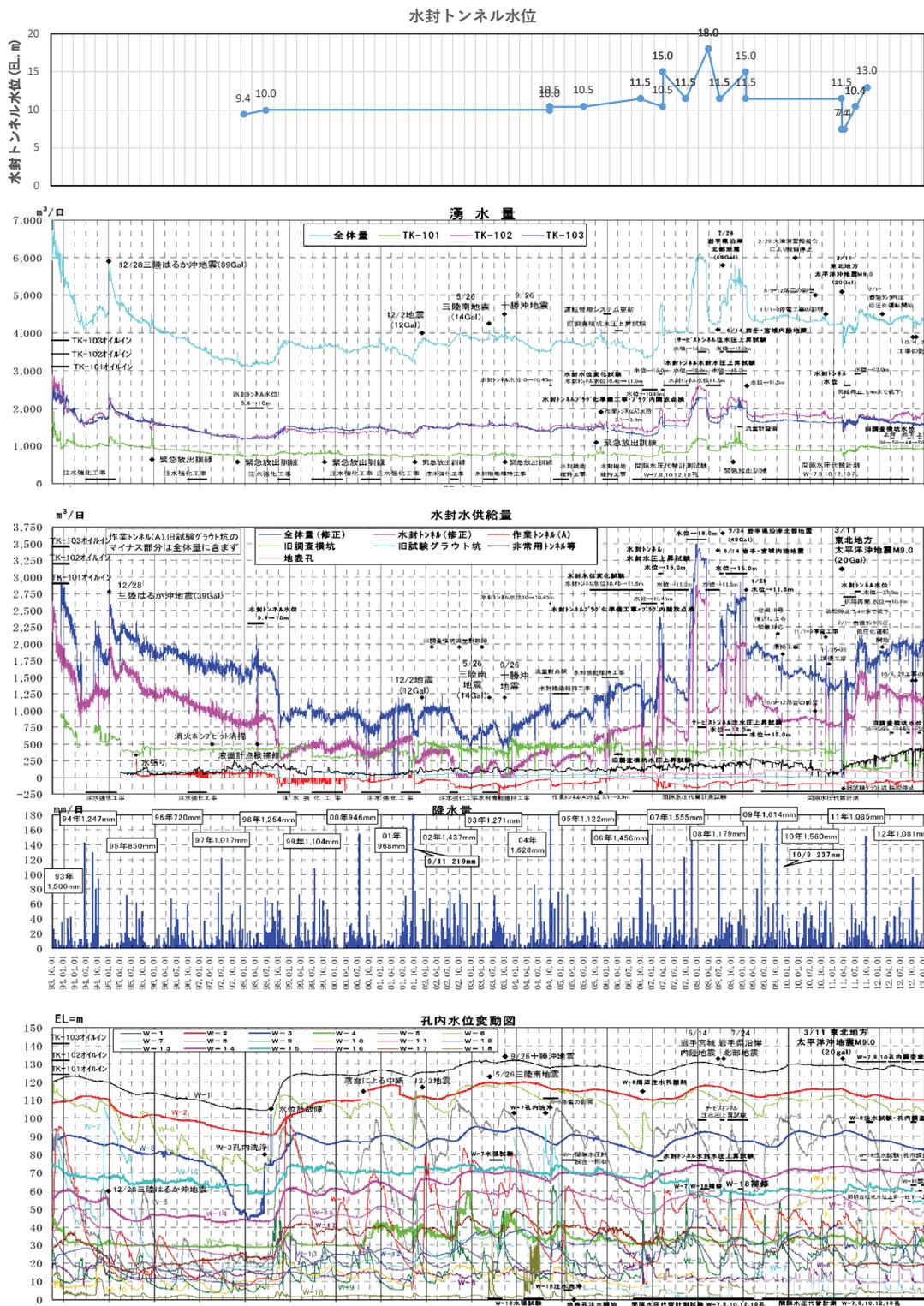


図 4.2.1-3 オイルイン以降の水封トンネル水位、湧水量、人工水封水供給量、降水量、観測孔水位の変動⁵⁾

表 4. 2. 1-1 各種イベントが水封データ及び孔内水位に与える影響

水封データの変動要因			水封データへの影響		
			湧水量	水封水供給量	孔内水位
人工要因	タンク液位・内圧変化	オイルイン	減少 (約70%)	減少 (約50%)	— (因果関係は不明)
		操業段階での緊急放出訓練	増加	増加	— (因果関係は不明)
	割れ目への目詰まりの進行		長期的漸減	長期的漸減	— (因果関係は不明)
自然要因	地震		一時的増加 (増加量は速度に比例)	一時的増加 (増加量は速度に比例)	— (因果関係は不明)
	降水	豊水期	増加	減少 (一定水位とするため)	上昇
		渇水期	減少	増加 (一定水位とするため)	低下

表 4. 2. 1-2 孔内水位と降水の影響に関する特徴

地下水位の挙動		降水の影響	
		あり	なし
地下水位	最高水位が $\text{EL}+10\text{m}$ 以下	—	W-18
	最低水位が $\text{EL}+10\text{m}$ 付近	W-7 W-9 W-11 W-12 W-13	W-8 W-10

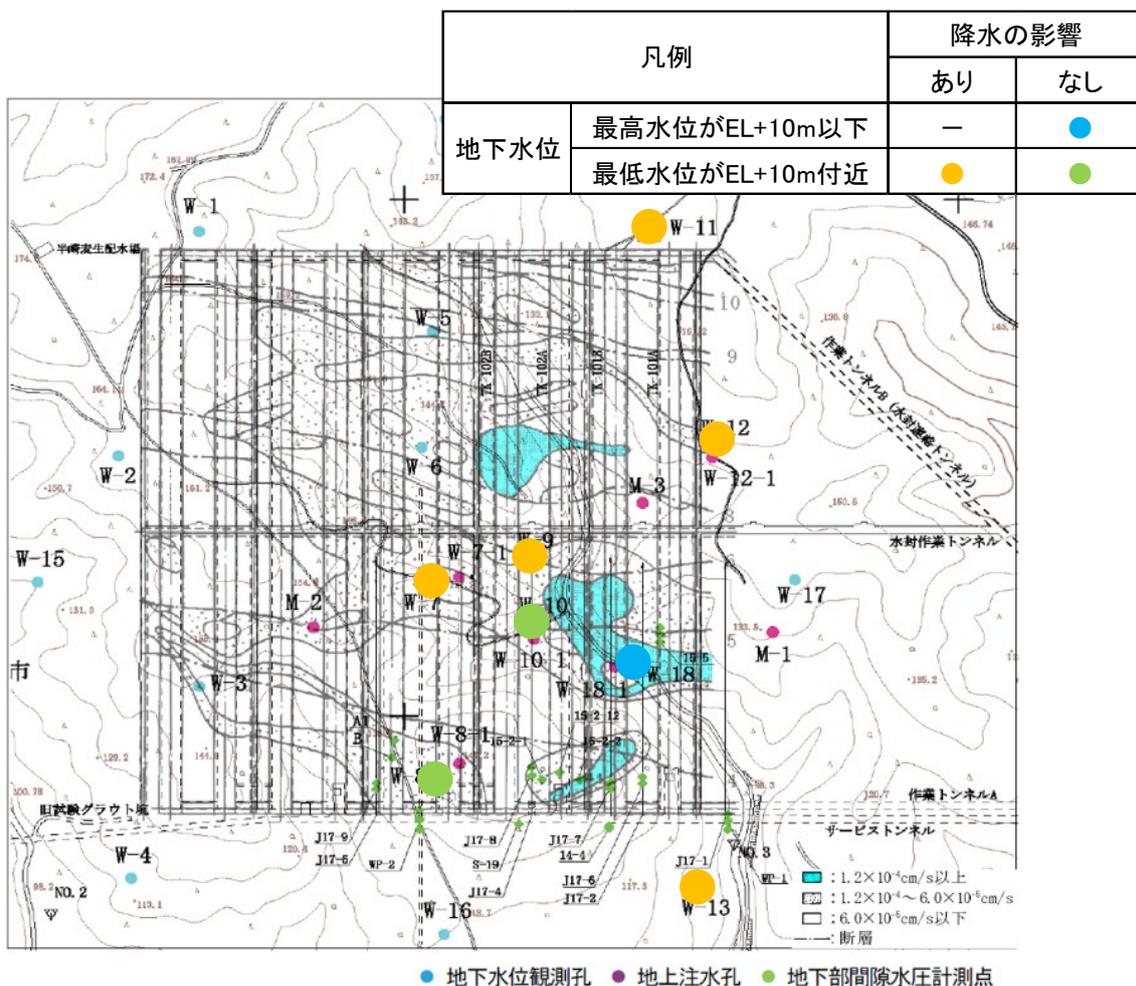


図 4.2.1-4 オイルイン後の地下水が低いモニタリング孔への降水の影響と水理地質構造

3) 久慈基地における地下水モニタリング結果の特徴

久慈基地においては、建設の進行に伴い岩盤タンク領域南東側で地下水位が低い領域が発生し、この状態は操業後も継続し、特に W-18 孔の地下水位が限界地下水位に近い。同領域とその東、南東領域には高透水性の断層やアプライト部が分布すると推定されており、降水等で地下水涵養による岩盤内の水位ポテンシャルが上昇しても、これよりも低い空洞周辺の水位ポテンシャルや、南東側に広がる海水面で規制される水位ポテンシャルとの差によって生じる地下水流動で、地下水位の高い状態を維持できていないものと考えられる。

4.2.2 国家石油地下備蓄菊間基地

菊間基地についての地下水位モニタリングに関する情報は、備蓄基地建設前の実証プラント建設時の計測例と基地建設時以降の計測例となる。収集した文献によれば、建設の進行との関連については実証プラント時代のみである。以下にそれぞれの建設時の計測結果について整理した。

1) 建設の進行による影響

図 4.2.2-1 に地下水位の計測を開始した空洞掘削前（1980年9月）から掘削中および貯油槽完成後の1984年12月に至る4年間の地下水水面の経時変化を示した。本図に示されるように、初期地下水水面は東側の丘陵部から西側の海に向かって地形にほぼ対応した形状を呈している。水封トンネル、作業トンネルの掘削が進むと、それぞれのトンネルへの湧水により地下水位の低下域が局所的に出現する。特に、水封トンネルから水封ボーリングを掘削した時点（(d)1981年2月10日）でボーリング孔からの排水に伴い、地下水位低下域は拡大している。水封トンネルに閉塞用プラグを設置して注水を行うと、約10日間で水位低下域は狭くなり（(e)1981年2月20日）、貯油槽の掘削が終了した1981年12月（h）(i)は貯油槽北端部の受入立坑、払出立坑への湧水によって再び水位低下域が拡大している。貯油槽掘削が完了し貯油槽閉塞(j)、受入立坑、作業坑を水没させると同時に、上記の水位低下域は消滅し、(k)1982年3月1日には概ね掘削前の水位に近い状態に戻っている。空洞掘削から1年後の(m)1982年12月16日時点で水封水の供給を停止し、2年後の(o)1984年12月15日の地下水位は大きな変化は認められず地下水位が安定していることが確認できたことが伺える。

また、空洞掘削中の期間について、貯油槽中央断面（C-C'断面）での地下水位の経時変化を図 4.2.2-2 に示した。本図によれば、地下水位は空洞掘削とともに低下するものの、水封水供給後、水封トンネルに近い測点（No.11）では比較的早く水位回復が認められ、ほぼ当初の水位にまで回復している。貯油槽から最も離れたNo.10においても水位低下の傾向は収束している。空洞に近いNo.13、No.14付近はNo.11よりも変動が小さかったのは、亀裂が少ない良好な岩盤のためとされる。

このように、地下水水面の変動は空洞への湧水と密接に関連しており、地質状況（流水経路となる亀裂の存在）に支配されていると言える。

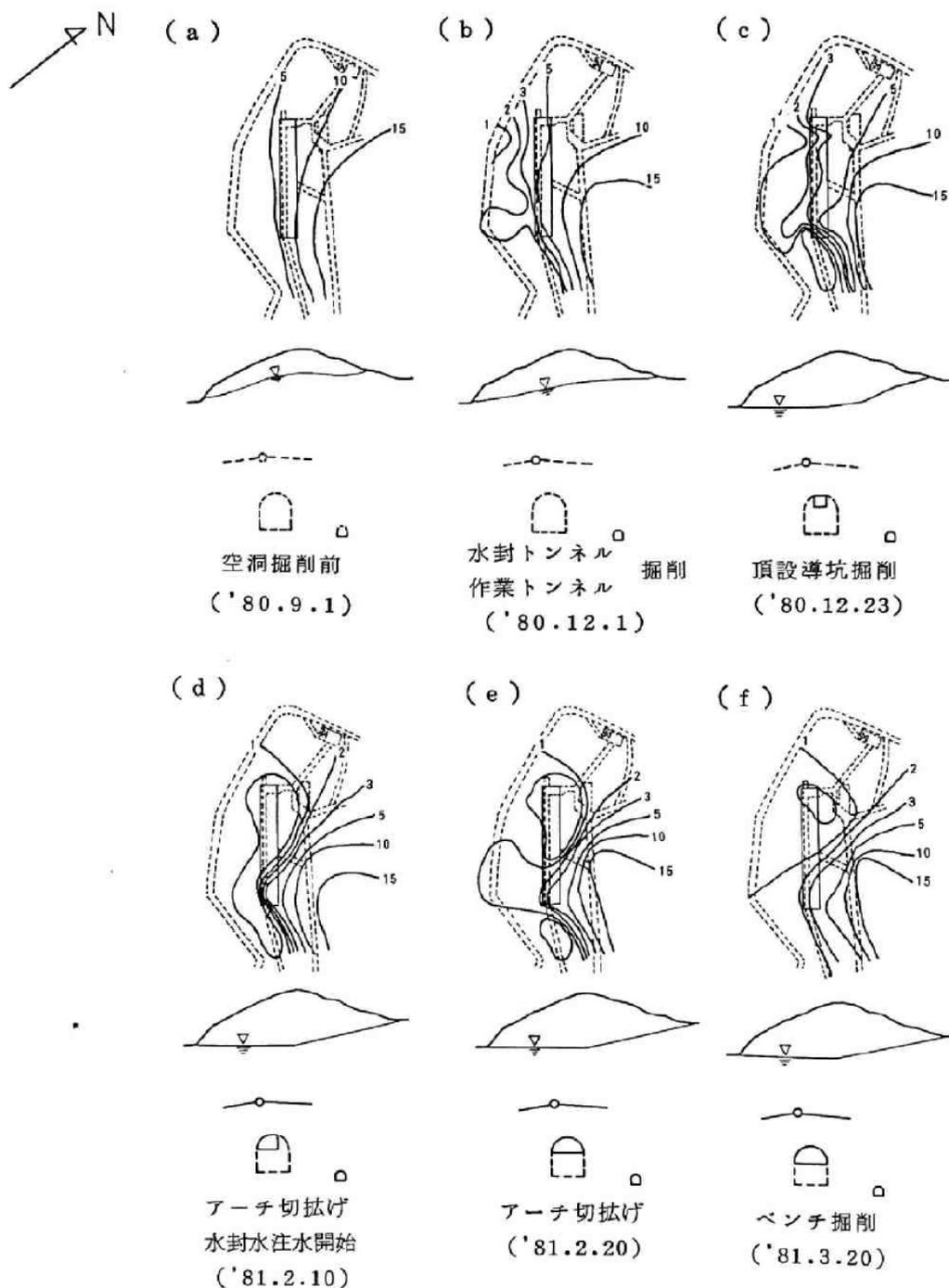


図 4.2.2-1 菊間基地実証プラントにおける空洞掘削前（1980年9月）から貯油槽完成後（1984年12月）までの地下水面分布の経時変化（単位はEL.m）⁶⁾

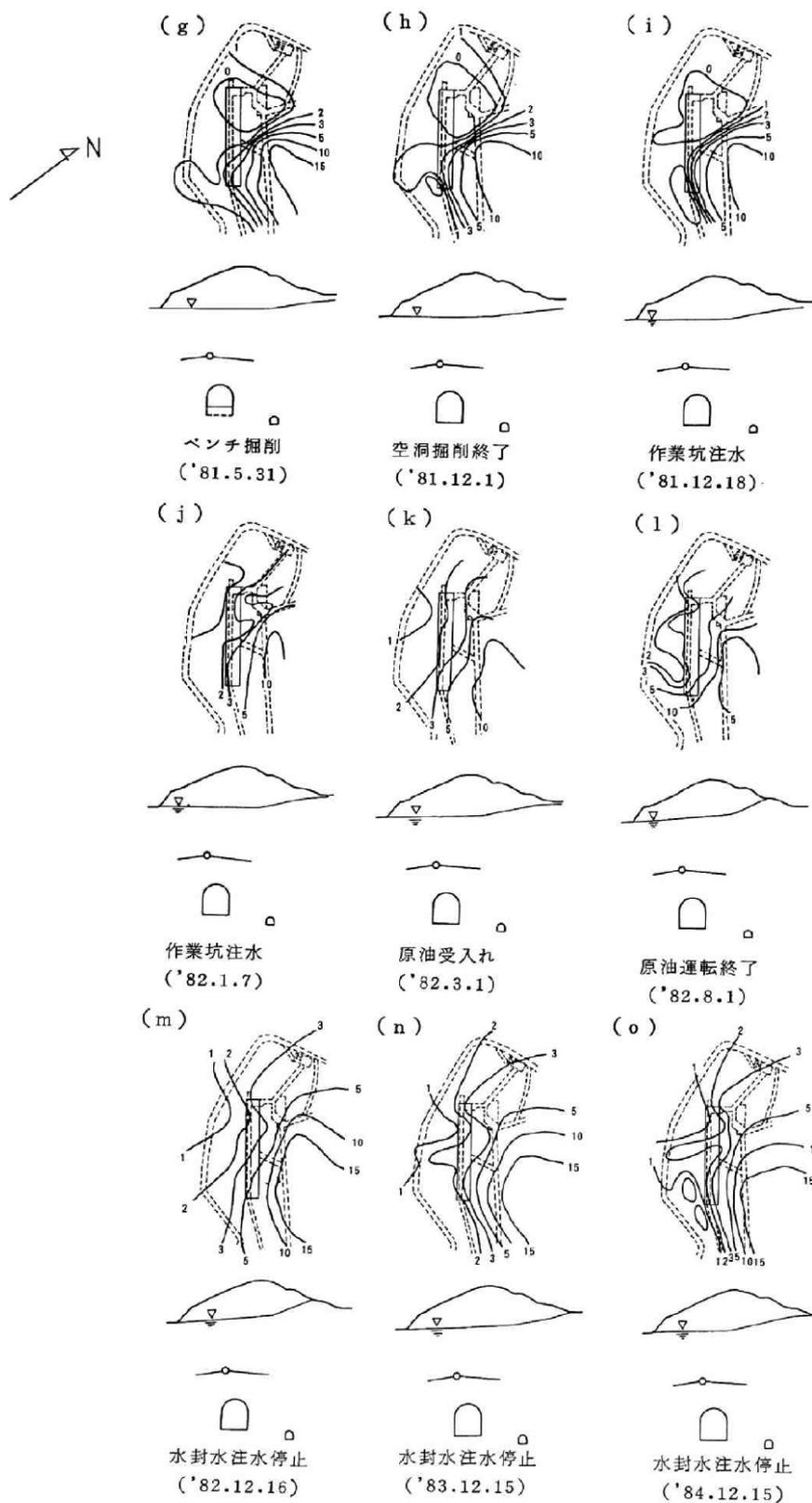


図 4.2.2-1 菊間基地実証プラントにおける空洞掘削前(1980年9月)から貯油槽完成後(1984年12月)までの地下水面分布の経時変化(続き)(単位は EL.m)⁶⁾

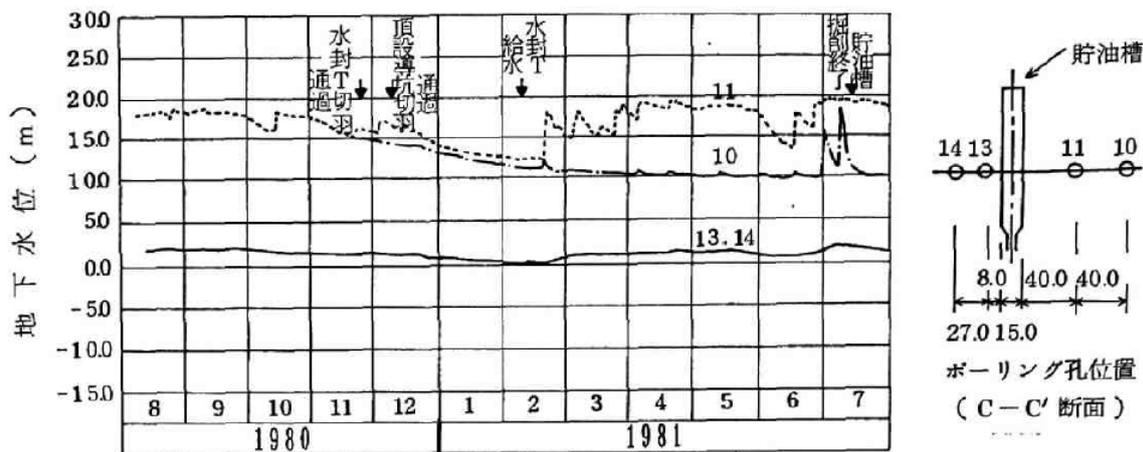


図 4.2.2-2 菊間基地実証プラントにおける建設中の地下水位経時変化 (C-C' 断面) 6)

間隙水圧の変化に関して、空洞掘削前 (1980年9月) から掘削中および貯油槽完成後の1984年12月に至る4年間の地下水面の経時変化を図4.2.2-3に示した。本図に示されるように、掘削期間中は掘削の進展とともに空洞周辺に間隙水圧の低下域が出現・拡大する。水封水の注水を開始すると空洞周辺の間隙水圧が回復し、等圧線が貯油槽と作業トンネルを含んだ形となっている。ただし、作業トンネルに引っ張られるいびつな形状となり、作業トンネル自体の影響や地質的要因 (亀裂や破碎帯の存在) が伺われる。掘削終了後に作業トンネルへ注水すると、作業トンネル周辺の間隙水圧は回復している。

また、気密試験の最高圧時 ((f)1982年1月10日) と最低圧時 ((g)1982年2月12日) を比較すると、貯油槽内圧が高いと周囲の間隙水圧は高く維持され、内圧が低いと圧力低下域が周辺に拡大する。貯油槽周辺の岩盤中の間隙水圧は、貯油槽内圧の変動に対し敏感であることが伺える。

また、水封トンネル掘削中の貯油槽中央断面 (D-D' 断面) での間隙水圧の経時変化を図4.2.2-3に示した。本図によれば、水封トンネル周辺の間隙水圧 (No. 18, No. 19) は水封トンネル切羽が近づくにつれて低下が大きくなり、切羽通過時の2、3日間で急速に20m以上低下、その後の水封トンネルへの給水を開始すると間隙水圧は上昇している。

No. 12とNo. 22の変動に着目すると、No. 12は水封トンネルおよび頂設導坑通過時に急速な低下が見られるものの、水封トンネル給水後に水圧の回復が見られない。一方、No. 22は水封トンネルおよび頂設導坑掘削時に低下は見られたが、水封水供給後は再び間隙水圧が上昇している。

このような現象は前述の地下水位の変動においても同じようなことが貯油槽の右側 (山側) で認められたことを考慮すると、高透水な亀裂や破碎帯の存在が推察され、計測管理上、重要な監視対象となることが再確認できる結果となっている。

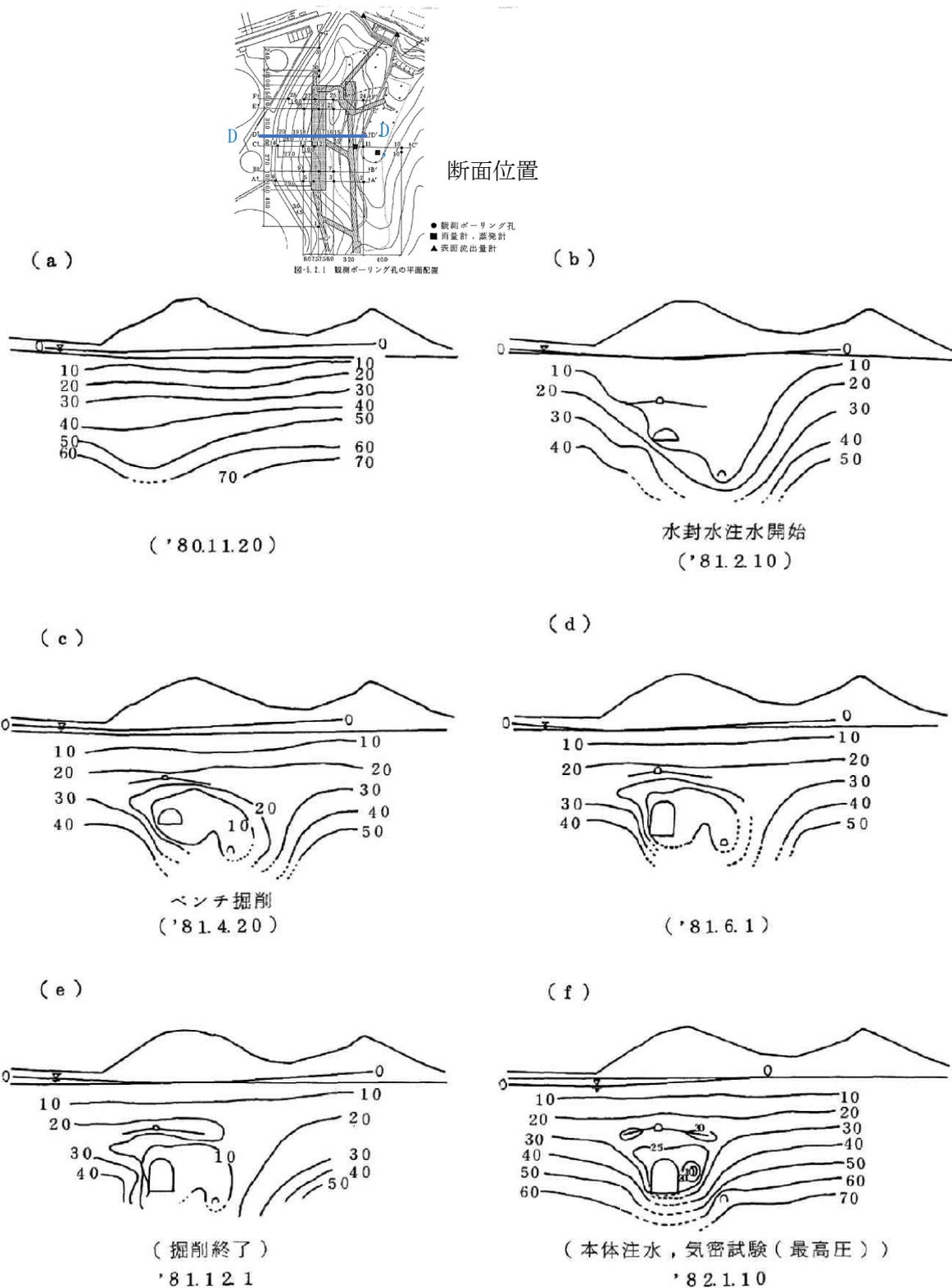


図 4.2.2-3 菊間基地実証プラントにおける空洞掘削前（1980年9月）から貯油層完成後（1984年12月）までの間隙水圧変化（水頭値に換算）⁶⁾

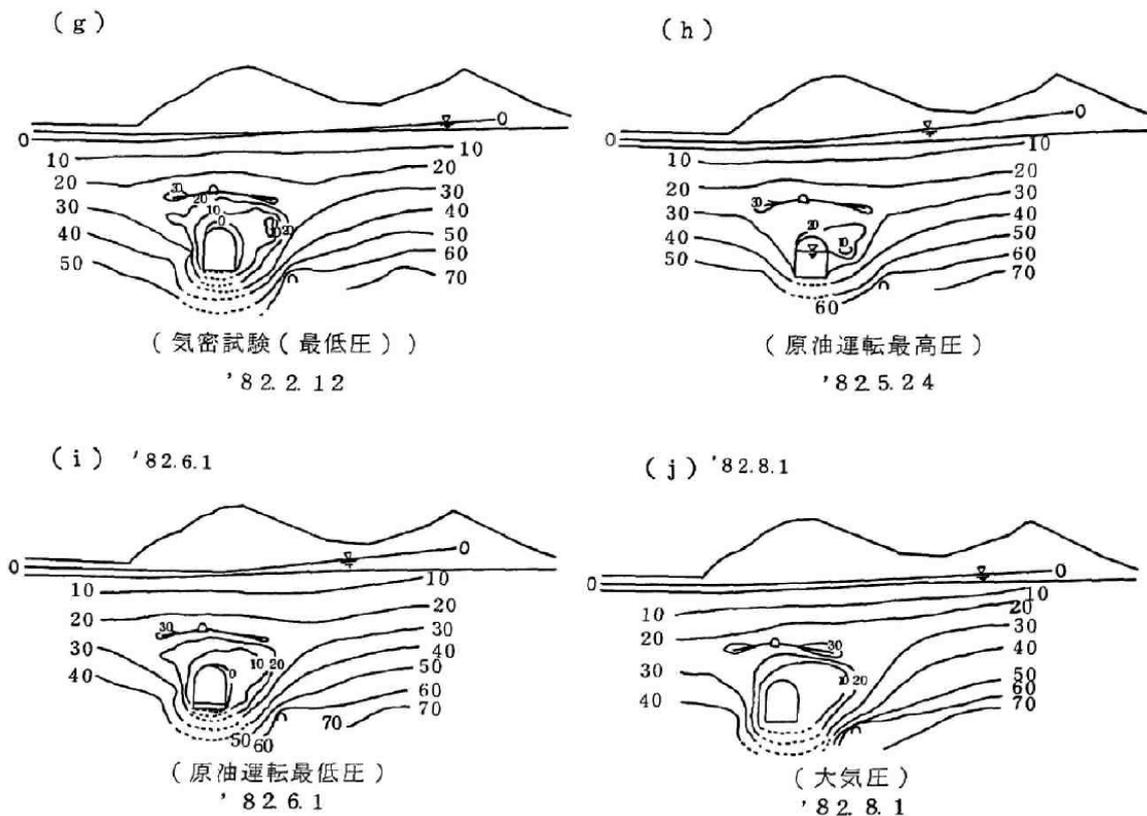


図 4.2.2-3 菊間基地実証プラントにおける空洞掘削前(1980年9月)から貯油層完成後(1984年12月)までの間隙水圧変化(水頭値に換算: 続き)⁶⁾

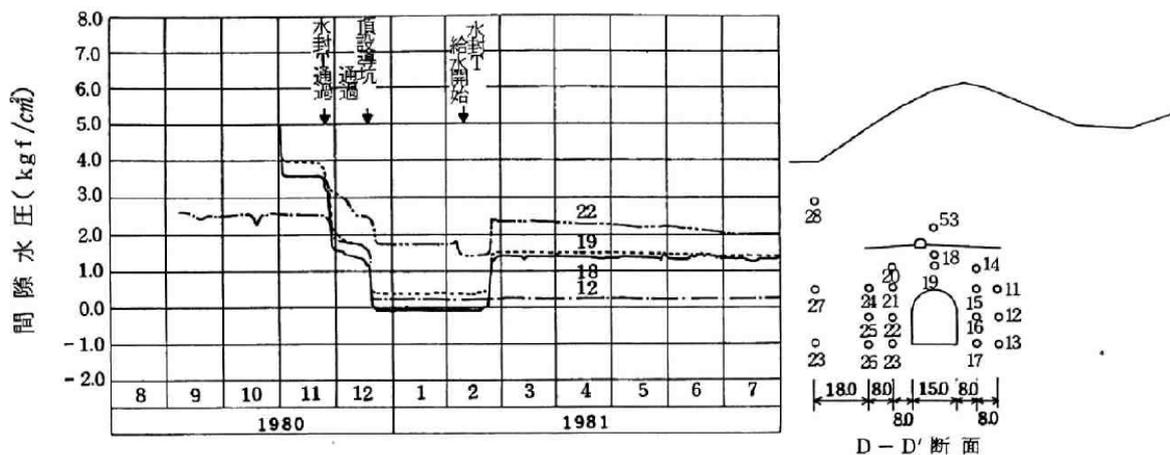


図 4.2.2-4 菊間基地実証プラントにおける間隙水圧の経時変化(貯油層中央 D-D' 断面)⁶⁾

2) オイルイン後の各種イベントに対する観測データ

1994年4月から2005年12月までの12年間の地下水観測孔(W-1孔~W-14孔)の経時変化を示した例を図4.2.2-5に示す。

4.2.3 国家石油地下備蓄串木野基地

串木野基地では、建設工事に伴うF9断層群の影響による地下水位の低下が確認され、対策として水封トンネルおよび水封ボーリングの追加設置、カーテングラウト、断層深部に対する粘土グラウトなどを実施することによって、断層周辺の透水性の低減や岩盤タンク底盤からの湧水量低減を図っているものの、当該期間中の地下水位変動が掲載されている資料は確認できない。従って、オイルイン後のモニタリングデータのみを取りまとめる。

1994年4月から1998年7月までの約4年間の、岩盤タンク内湧水量、水封水供給水量、孔内水位の変化を図4.2.3-1に示す。

本図から、以下のことが示されている。

- ①地下水位は概ね降雨による季節的な影響を敏感に受ける孔とそうでない孔が見られ、前者の孔としてW-3、W-6、W-7、W-8、W-10、W-11、W-12、W-17孔が挙げられる。特にW-11孔が顕著である。これらの孔は降雨季に上昇傾向を示し、乾季には低下傾向を示している。降雨に対する影響はやや遅れて現れている。
- ②この観測期間中において地下水位は、限界地下水位（水封上必要となる最小の地下水位）EL±0m以上を十分に確保したレベルであるが、W-16孔、W-13孔などの地下水位が相対的に低い。
- ③W-17孔については、1997年7月以降上昇傾向を示し、ボーリング孔の孔口近くまで上昇したところで安定しているが、上昇の理由は説明されていない。
- ④地震（1997年3月鹿児島県北西部地震：M6.3及び1997年5月第2鹿児島県北西部地震：M6.2）による変動は、W-9、W-13孔等で確認され、地震後1m程度の水位上昇が認められる。

また、2002年4月から2007年3月までの5年間における地下水位の安定性（水封機能維持）を評価したときの地下水位の経時変化を図4.2.3-2に示す。

W-9、W-11孔の水位が大きな低下を示したが、全体的な傾向管理の指標として用いられている平均水位には有意な変化として表れていない。W-9、W-11孔の水位低下についてはそれぞれの観測孔を交差するごく一部の亀裂の透水性が増したことが原因であり、その箇所をセメンチング等の処置を行うことで、低下前の水位に回復できている。このことから、この5年間において地下水位は、限界地下水位（EL±0m）以上のレベルに保たれていること、また、傾向管理の指標である平均水位の変動は十分に小さいことが確認できている。

図4.2.3-1（1994年4月～1998年7月）と同様に図4.2.3-2では、W-16孔、W-13孔、W-15孔、W-4孔、W-14孔の地下水位が相対的に低く、降雨による季節的な変動が認められない。これらの孔は岩盤タンク区域外に配置された地下水位モニタリング孔となり、前述した降雨による季節的な変動が認められる孔は概ね岩盤タンク区域内に位置する（図4.2.3-3）。いずれの観測孔の地下水位も限界地下水位を超えているものの、W-16孔やW-13孔で地下水位が低いのは、次の理由によるものと考えられる。

収集した文献で地下水位観測孔の掘削深度についての記載はW-17孔の1例のみであった。これによれば、岩盤タンク区域の東側、No.3水封トンネルとグラウトトンネルとの間に位置するW-17孔の孔底深度は、岩盤タンク底盤標高（EL-42m）よりも低い位置にある。菊間基地での地下水位観測孔の配置で示したように、岩盤タンク区域内に配置された観測孔の孔底深度は限界地下水位よりも低く、岩盤タンク上端標高よりも高いと考えられる。一方でW-17孔の配置のように、W-16孔やW-13孔など岩盤タンク区域外の観測孔の孔底深度が岩盤タンク底盤付近に位置するものとする、水頭換算で最大5mと圧力水頭が低い岩盤タンクの圧力が観測孔の地下水位に影響し、地下水位が低くなる可能性がある。とくに、岩盤タンク掘削時の水位低下ゾーンに近いW-16孔やW-13孔では周辺の透水性が高いため、その他の孔に比べて岩盤タンクの低水頭の影響を受けやすく、降雨による地下水涵養の影響を受けにくいことが、相対的に低い地下水位となる理由の1つと考える。

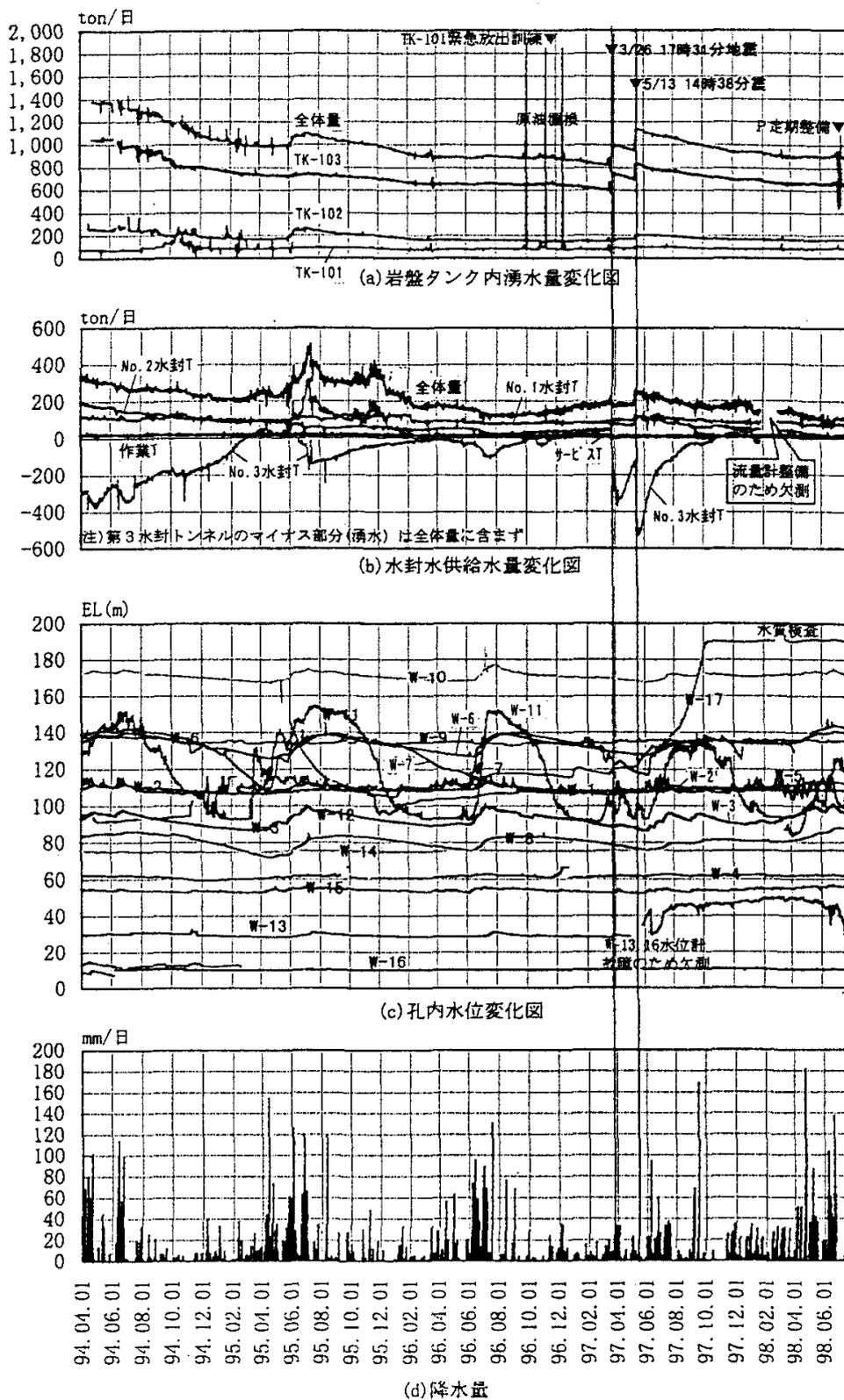


図 4.2.3-1 串木野基地地下水位モニタリング孔の孔内水位変化 (1994年4月~1998年7月) ²⁶⁾

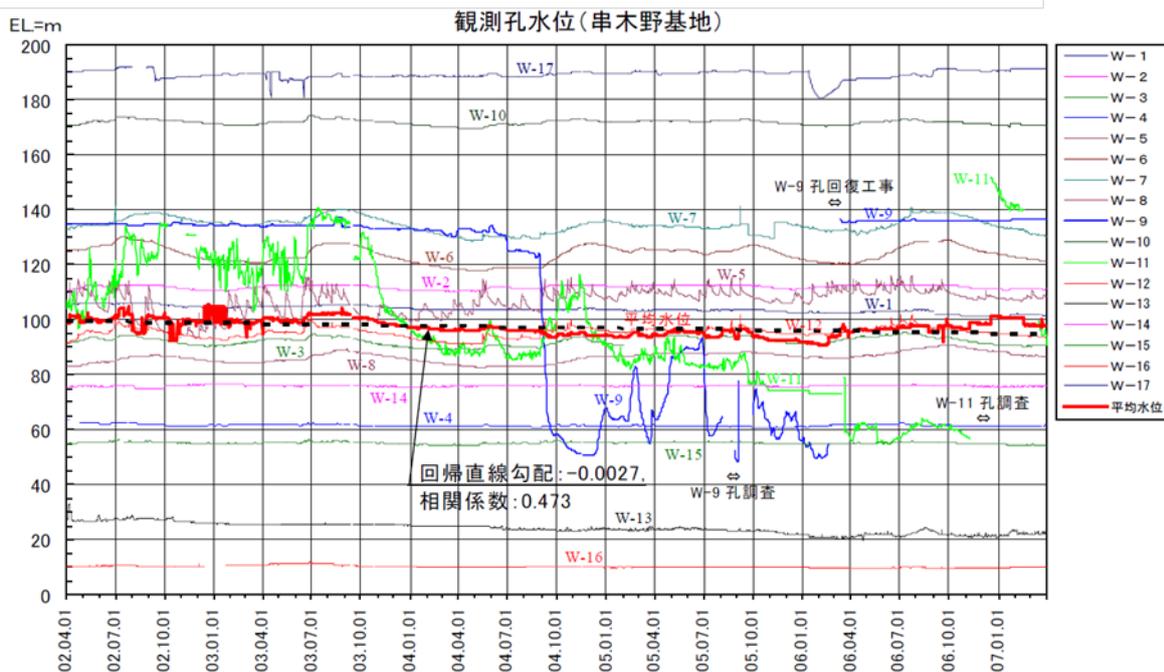


図 4. 2. 3-2 串木野基地地下水位モニタリング孔における水位の経時変化 (2002 年 4 月～2007 年 3 月) ¹⁰⁾

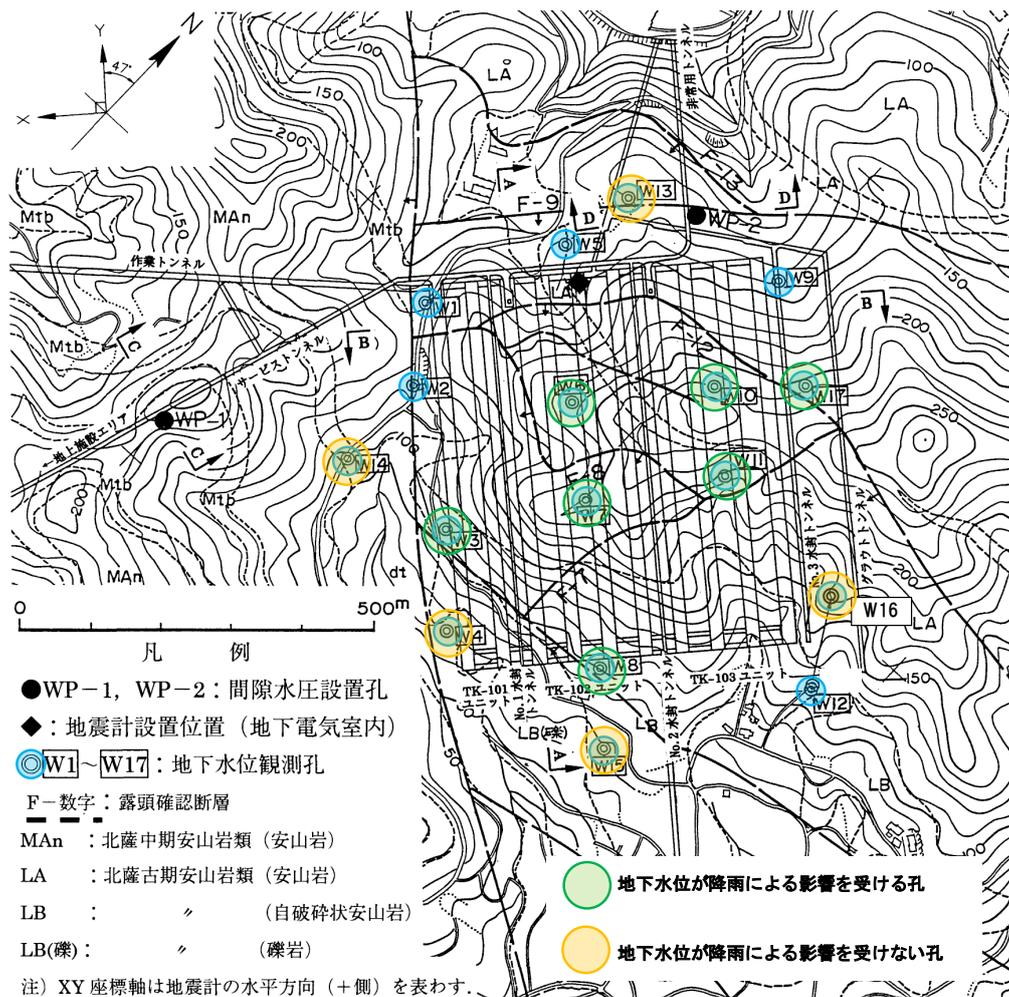


図 4. 2. 3-3 地下水位モニタリング結果に対する降水の影響の傾向

4.2.4 国家石油ガス地下備蓄波方基地

波方基地では、1994年以降に地下水モニタリングが開始されているが、取得できたデータは貯槽掘削段階（空洞掘削にともなう地下水挙動の抑制）、水封機能の確認段階（水封充水による昇圧促進）、さらに水封機能の評価段階（2012年に実施された貯槽気密試験による水封機能の評価）における個々のモニタリング孔の代表水位のみであった。

以下に、各段階での特徴を取りまとめる。

1) 貯槽掘削段階

貯槽掘削段階では、水封カーテン上部（EL. -105m）、水封カーテン内側（EL. -135m）に設置された間隙水圧計で観測されたピエゾ水頭（全水頭）を、水封トンネル掘削前、貯槽掘削前、貯槽掘削後の変化としてとりまとめている（図4.2.4-1）。

水封カーテン上部（EL. -105m）では、掘削による影響は地点によって異なるものの、水封トンネルの掘削で海水面レベルにあった全水頭が低下し、一部の地点での全水頭は管理基準値（EL-90m）付近まで低下しているものの、水封ボーリング孔からの水封水圧の供給によって掘削段階における全水頭の低下が抑制されていることが確認できる。

水封カーテン内側（EL. -135m）では、プロパン貯槽、ブタン/プロパン兼用貯槽での変化がそれぞれとりまとめられており、いずれも水封トンネル掘削により海水面レベルにあった全水頭が、それぞれの管理基準値（P：約EL-110m、B/P：約EL-85m）に対して約30mの範囲まで全水頭が低下しているが、水封ボーリング孔からの水封水圧の供給によって掘削段階における全水頭の低下が抑えられ、一部の地点では全水頭の上昇が確認できる。

図4.2.4-1の水封カーテン上部のグラフから地下水位観測孔ごとに、①水封T掘削前、②水封T掘削後（貯槽掘削後）、③貯槽掘削完了後の水位を読み取り、①水封T掘削前から②水封T掘削後の水位低下量が得られた13地点のデータから、水位低下量のコンター図を作成した（図4.2.4-2）。水位低下量の大きい領域は、岩盤貯槽南側と北側、そしてこれらを結ぶプロパン貯槽領域であり、これらの領域に比較的透水係数の高い地質分帯Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴが分布している。

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法, 計画等の妥当性に関する知見の整理

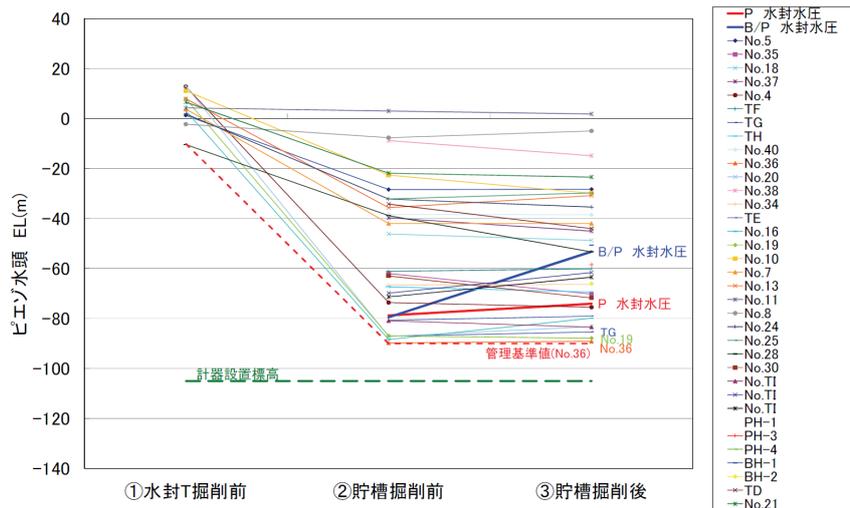


図 9.3.25(a) 水封カーテン上部 (EL-105m) 間隙水圧計 ステップ図

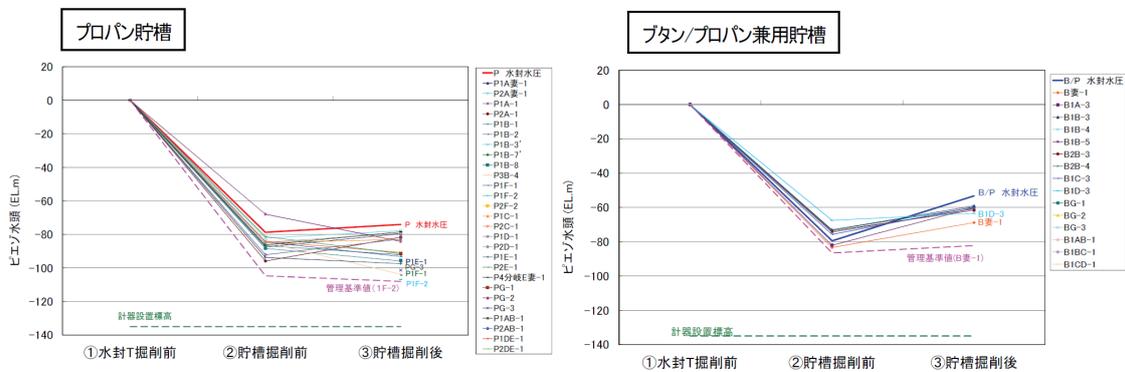


図 4.2.4-1 波方基地貯槽掘削前後の間隙水圧の変化¹³⁾
貯槽掘削前段階以降に水封供給と貯槽の掘削を行っている

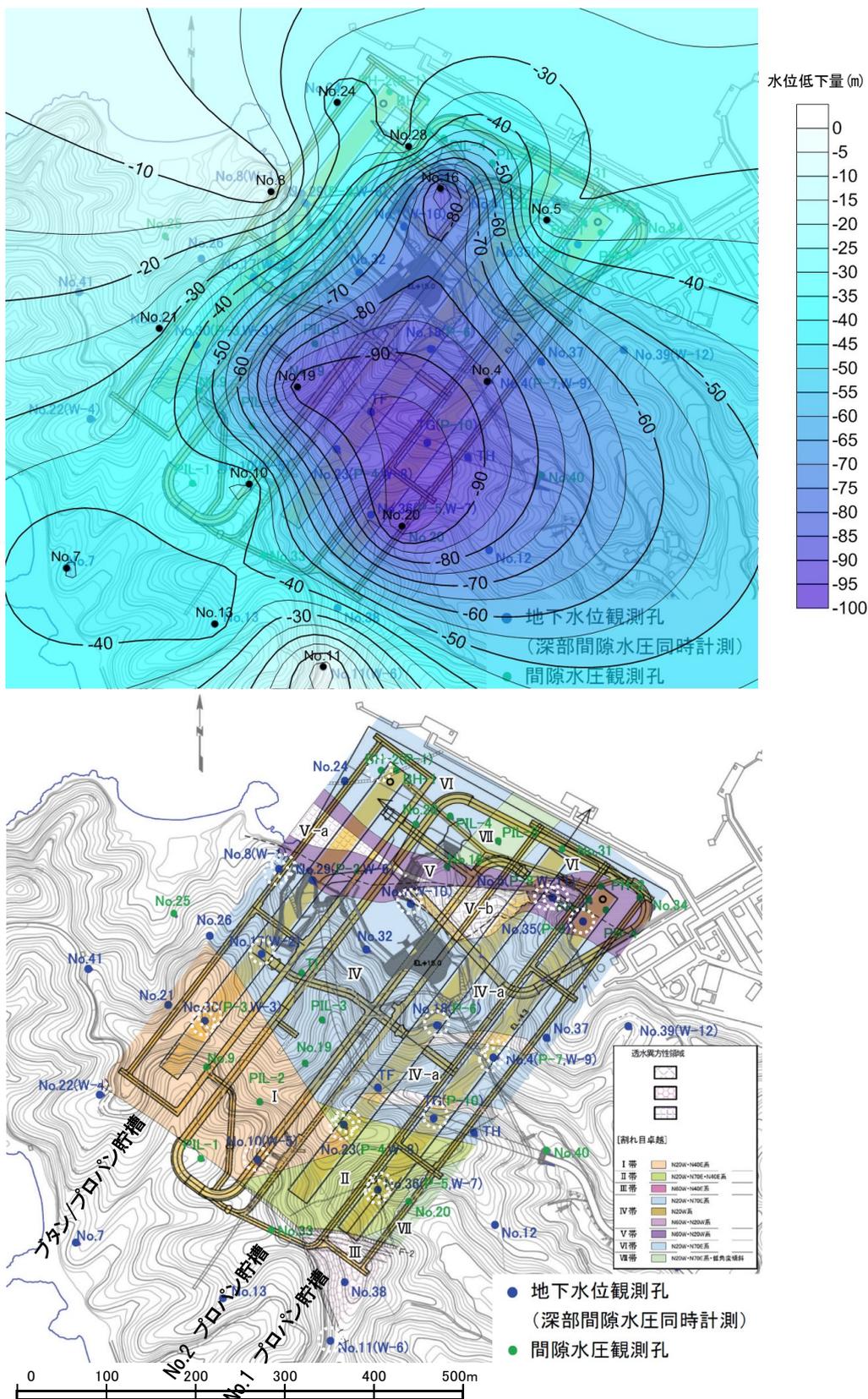


図 4.2.4-2 波方基地における水封トンネル掘削前後の水位低下コンター

2) 水封機能確認段階

水封機能の確認段階では、貯槽掘削段階より実施した水封ボーリング孔からの水封水圧供

給に加え、2010年3月よりブタン/プロパン貯槽、同年4月よりプロパン貯槽と、それぞれ作業トンネルおよび水封トンネルを冠水させることで岩盤貯槽に作用する水封水圧を上昇させ、貯槽周辺の間隙水圧を観測して水封機能（水封水圧の上昇による間隙水圧の上昇）を確認している。

3) 水封機能確認段階

2012年には、プロパン貯槽およびブタン/プロパン兼用貯槽において、高圧ガス保安法に基づく気密試験が実施された。気密試験では、岩盤貯槽へ圧縮空気を注入しながら貯槽圧力を段階的に上昇させ、貯槽周辺の間隙水圧以下の圧力で貯槽圧力が一定に維持されること、つまり貯槽からの漏洩がないことを確認している。その際に岩盤貯槽周辺の間隙水圧がモニタリングされており、貯槽圧力の上昇量に対して変化量は小さいものの、概ね貯槽圧力に比例した間隙水圧の変化が確認できている。

4.2.5 国家石油ガス地下備蓄倉敷基地

倉敷基地においては、波方基地と同様に、1994年以降に地下水モニタリングが開始されているが、取得できたデータは貯槽掘削段階（空洞掘削にともなう地下水挙動の抑制）、水封機能の確認段階（水封充水による昇圧促進）、さらに水封機能の評価段階（2012年に実施された貯槽気密試験による水封機能の評価）における個々のモニタリング孔の代表水位のみであった。

以下に、各段階での特徴を取りまとめる。

1) 貯槽掘削段階

図4.2.5-1及び図4.2.5-2は、水封カーテン外側（EL. -120m付近）、水封カーテン内側（EL. -148m）に設置された間隙水圧計で岩盤貯槽掘削後に観測された間隙水圧から作成した地下水位コンターを示したものである。両図に示す観測孔位置の色は、実測値と管理基準値（不均質モデル解析結果から設定）との差分を示しており、水封カーテン外側と内側とで実測水位が管理基準値よりも10m以上低くなる箇所は認められない。図4.2.5-1で実測地下水位コンターを地質図と対比させると、Lu値の最大値が大きいF2、F3断層沿いのV帯やⅡ・Ⅲ帯の領域に、実測地下水位が低い領域が広がっていることが確認でき、水封カーテン内側（EL.-148m）でも同様な傾向が確認できる（図4.2.5-2）。

図4.2.5-3に示した水封トンネル掘削前、貯槽掘削前後の地下水位の変化を見ると、水封カーテン外側（EL. -120m付近）では、掘削による影響は地点によって異なるものの、水封トンネルの掘削で海水面レベルにあった全水頭が低下している。一部の地点での全水頭は、管理基準値（EL.-80m）付近まで低下しているものの、水封ボーリング孔からの水封水圧の供給（あるいは追加水封ボーリング）によって掘削段階における全水頭の低下がほぼ抑制できていることが確認できる。

水封カーテン内側（EL. -148m）では、掘削による影響は地点によって異なるものの、水封トンネル掘削により海水面レベルにあった全水頭が低下し、一部の地点での全水頭は管理基準値（EL. -65m）付近まで低下している。なお、水封ボーリング孔からの水封水圧の供給（あるいは追加水封ボーリング）によって掘削段階における全水頭の低下が一部の地点で抑えられているものの、多くの地点で全水頭の低下が確認できる。

水封カーテン外側の地下水位変化から、地下水位観測孔ごとに①水封T掘削前、②水封T掘削後（貯槽掘削後）、③貯槽掘削完了後の水位を読み取り整理し、データ及び位置が明らかな12孔について、①水封T掘削前から②水封T掘削後の水位低下量を求めており、これらの値で水位低下量のコンター図を作成した（図4.2.5-4）。水位低下量の大きい領域は、岩盤貯槽南側と北側であり、北側にはF2、F3断層に沿って透水性の高いV帯が、南側にはF4～6断層と比較的透水性が高いⅡ帯が分布している。

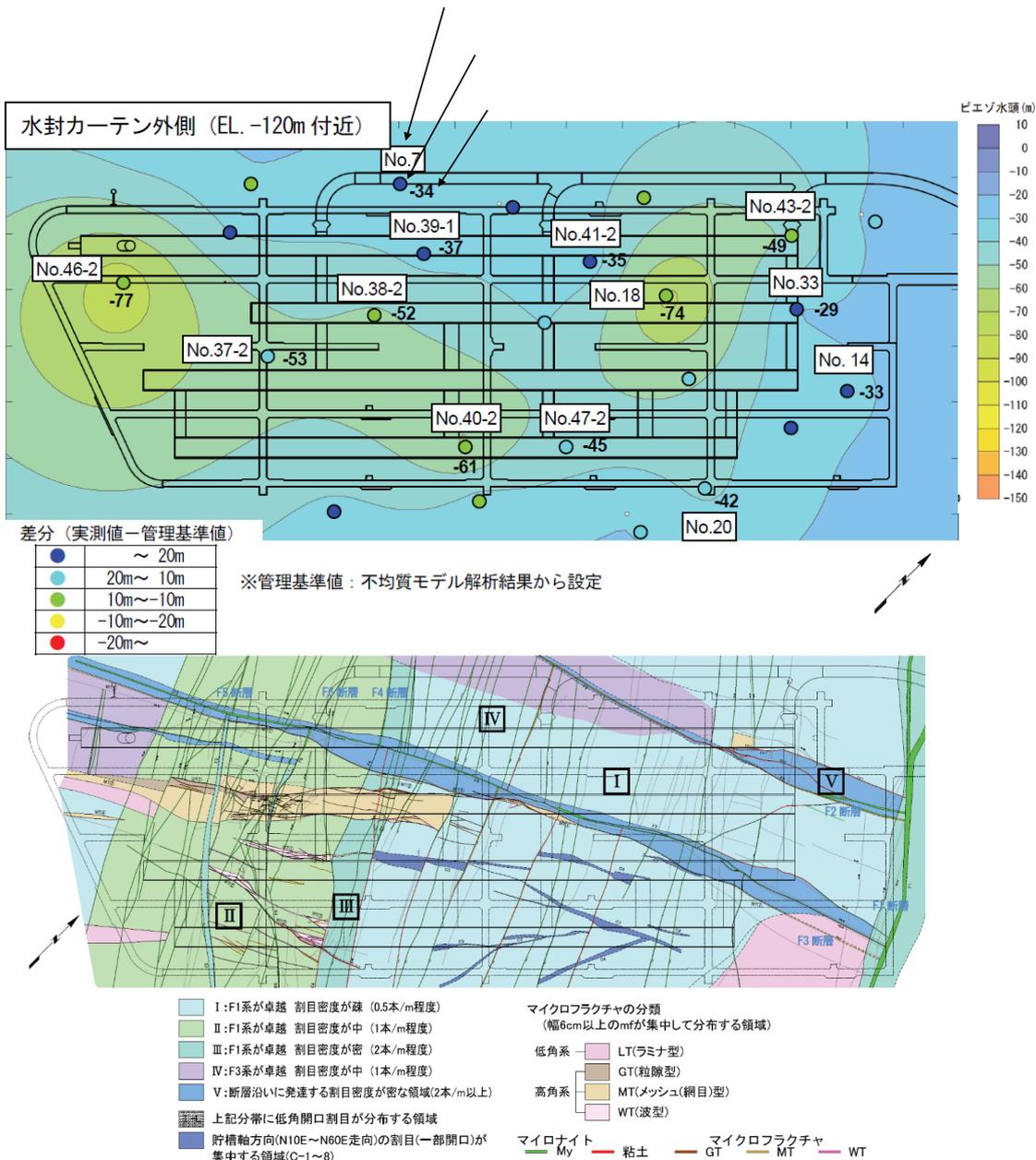


図 4.2.5-1 上：倉敷基地水封カーテン外側 (EL-120m) における貯槽掘削完了時の水頭分布
 と下：地質平面図 (EL-167.5m) ¹³⁾

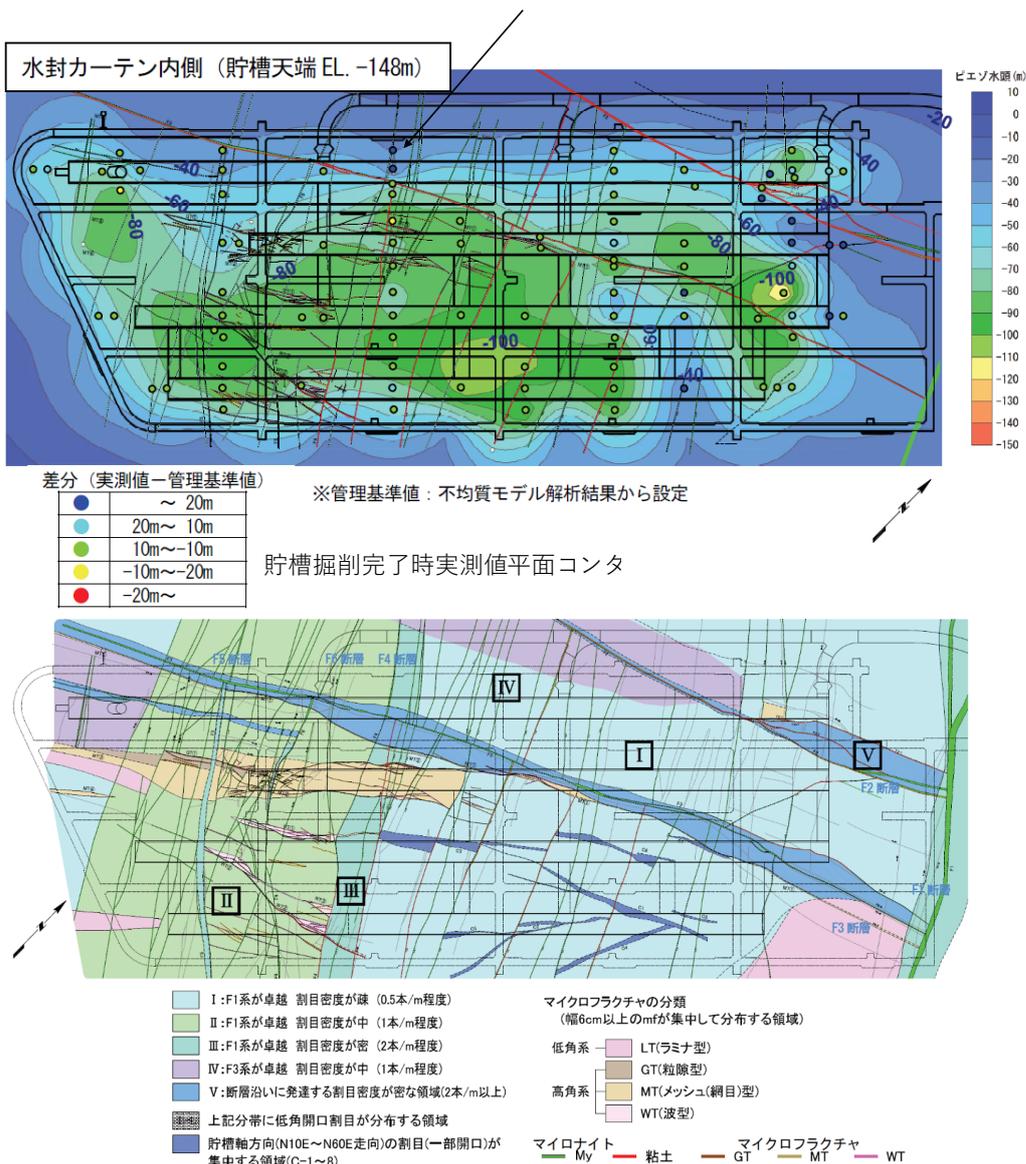


図 4.2.5-2 上: 倉敷基地水封カーテン内側 (EL-148m) における貯槽掘削完了時の水頭分布
 と下: 地質平面図 (EL-167.5m) ¹³⁾

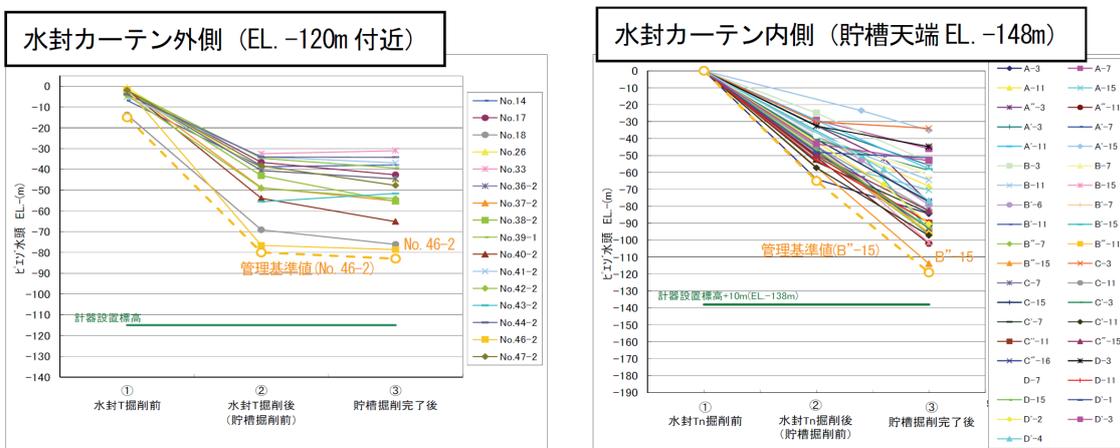


図 4.2.5-3 倉敷基地貯槽掘削前後の間隙水圧の変化 ¹³⁾

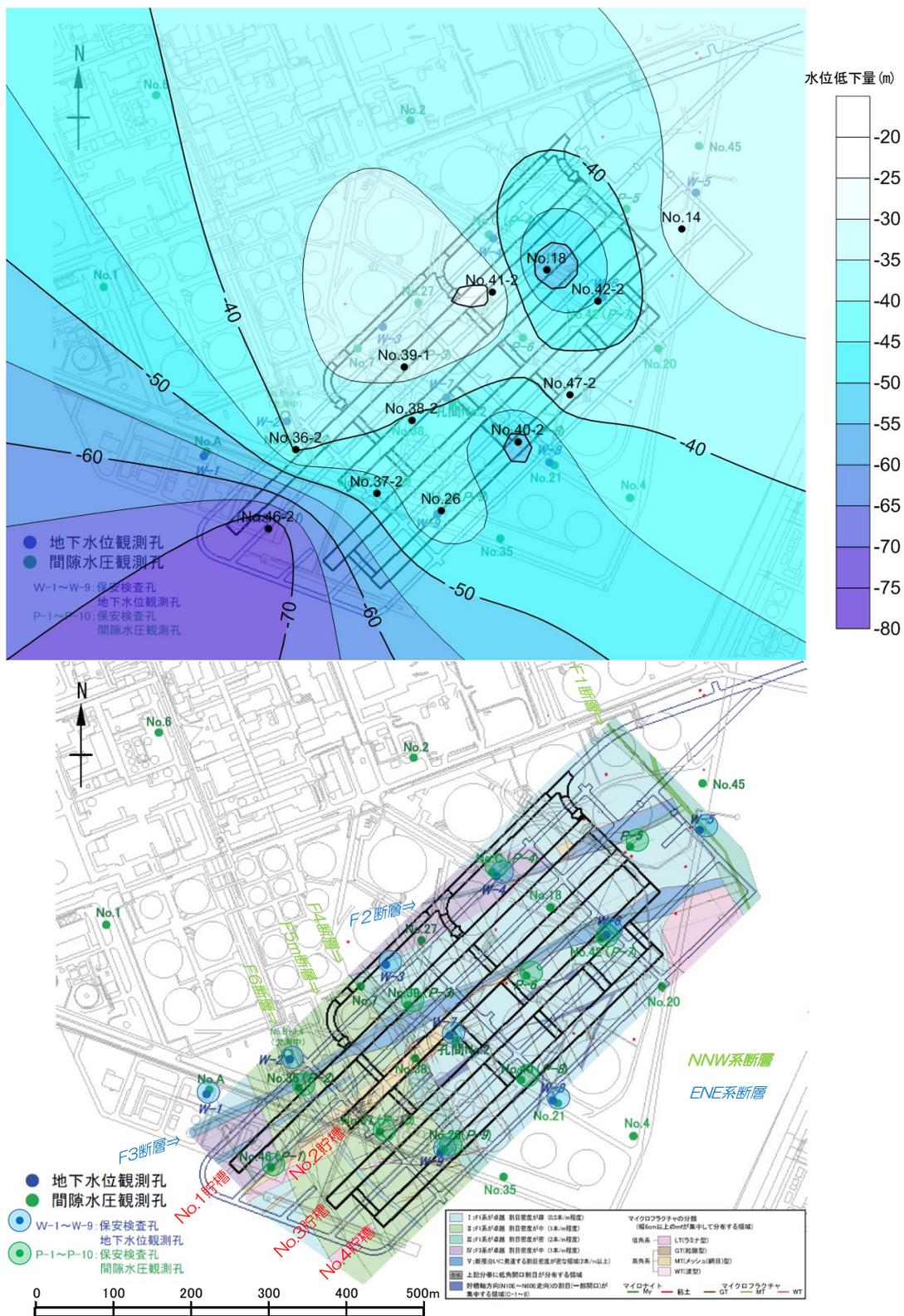


図 4.2.5-4 水封カーテン外側における水封トンネル掘削前と貯槽掘削前の水位低下量分布

2) 水封機能の確認段階

水封機能の確認段階では、貯槽掘削段階より実施した水封ボーリング孔からの水封水圧供給に加え、水封トンネルに充水することで岩盤貯槽に作用する水封水圧を上昇させ、貯槽周辺の間隙

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

水圧を観測して水封機能（水封水圧の上昇による間隙水圧の上昇）を確認している。結果として、岩盤貯槽の横断方向（B断面）で、充水・昇圧前後の解析全水頭分布と実測値との比較がなされており、間隙水圧が水封水圧に比例して上昇することが確認されている。

3) 水封機能の評価段階

2012年には高压ガス保安法に基づく気密試験が実施された。気密試験では、岩盤貯槽へ圧縮空気を注入しながら貯槽圧力を段階的に上昇させ、貯槽周辺の間隙水圧以下の圧力で貯槽圧力が一定に維持されること、つまり貯槽からの漏洩がないことを確認している。その際には、岩盤貯槽周辺の間隙水圧がモニタリングされており、貯槽圧力の上昇量に対して変化量は小さいものの、貯槽圧力に比例した間隙水圧の変化が確認できるとともに、岩盤貯槽の気密性を確認している。最も地下水位が低下したのは、F3断層と同様の走向であり高透水性のV帯が狭い幅を持って分布する領域にあたる。

4.2.6 日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所

地下施設の建設進行と地下水位変動との関係を見るため、2004年度から2013年度まで各年度の主な掘削作業と、超深地層研究所計画および広域地下水流動研究を目的としたモニタリング孔での掘削影響による地下水位変動の有無を整理した（表4.2.6-1）。同表には、掘削影響がない孔を白抜き表示とし、影響の有無が記載された文献番号を記入している。

表4.2.6-1 瑞浪超深地層研究所における地下施設の建設とモニタリング孔地下水位の変動

研究目的	モニタリング孔	主な研究坑道内での掘削作業										
		2004年度	2005年度	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	
		坑口下部工、一般掘削 (GL-70mまで)	主立坑、換気立坑、深度100m予備ステージ	主立坑、換気立坑200mまで、予備ステージ	200m予備入ステージ、主立坑、換気立坑200m以降掘削	主立坑、換気立坑掘削、深度300m予備ステージ	主立坑、換気立坑490mまで掘削	主立坑、換気立坑490mまで掘削	主立坑掘削 (480~500mまで)、深度300m水平坑道	立坑掘削 (480~500mまで)、深度300m水平坑道	換気立坑側、深度300mレベル坑道掘削、P-11掘削	深度500mレベル坑道掘削、グラウト
超深地層研究所計画	MSB-1	なし (URL-086)	あり (URL-087)	あり (No.2~4区間) (URL-088)	*なし (No.1,2区間) *あり (No.2~4区間) (URL-018)	*なし (No.1,2区間) *あり (No.3~4区間) (URL-089)	*なし (No.1,2区間) *あり (No.3~4区間) (URL-027)	*なし (No.1,2区間) *あり (No.3~4区間) (URL-090)	なし (URL-091)	あり (土岐花崗岩区間) (URL-092)	なし (URL-093)	
	MSB-2	なし (URL-037)	あり (URL-037)	あり (No.9,10区間) (URL-037)	あり (No.9,10区間) (URL-024)	なし**	あり (No.6~10区間) (URL-034)	あり (No.6~10区間) (URL-038)	なし** (URL-042)	あり (No.6~10区間) (URL-094)	あり (No.10区間) (URL-052)	
	MSB-3	なし (URL-086)	あり (URL-087)	あり (No.3~5, 6,7区間) (URL-088)	*なし (No.1,2区間) *あり (No.3~5区間) *あり (No.6,7区間) (URL-018)	*なし (No.1~4区間) *あり (No.5~7区間) (URL-089)	*なし (No.1~4区間) *あり (No.5~7区間) (URL-027)	*なし (No.1~4区間) *あり (No.5~7区間) (URL-090)	なし (URL-091)	あり (土岐花崗岩区間) (URL-092)	あり (土岐花崗岩区間) (URL-093)	
	MSB-4	なし (URL-037)	あり (URL-037)	なし (URL-023)	なし (URL-024)	なし** (URL-025)	なし** (URL-034)	あり (No.7区間) (URL-038)	なし (URL-042)	あり (No.6,7区間) (URL-094)	あり (No.6区間) (URL-052)	
	MZ-1		あり (URL-087)	なし (URL-024)	*なし (No.1~3区間) **4区間は深さが不明 (URL-088)	あり (No.1~7) (URL-018)	あり (No.1~7) (URL-027)	あり (No.1~7) (URL-090)	なし (URL-091)	あり (土岐花崗岩区間) (URL-092)	あり (URL-093)	
	OSME06 (本断層上盤)			あり (URL-088)	あり (URL-018)	あり (URL-089)	あり (URL-027)	あり (本断層南西側) (URL-090)	なし (URL-091)	あり (URL-092)	あり (URL-093)	
	AN-1 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし**	休止 (URL-019)	なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし** (URL-092)	なし** (URL-093)	
	AN-2 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし** (URL-088)		なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし** (URL-092)	なし** (URL-093)	
	AN-3 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし** (URL-088)	休止 (URL-019)	なし** (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	休止 (URL-091)	休止 (URL-092)	なし** (URL-093)	
	MIU-1 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし (URL-088)	あり (No.1~4) (URL-018)	あり (No.1~4) (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし** (URL-092)	なし** (URL-093)	
MIU-2 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし (URL-088)	あり (No.7~9) (URL-018)	あり (No.7~9) (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし** (URL-092)	なし** (URL-093)		
MIU-3 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし (URL-088)	あり (No.1~4) (URL-018)	あり (No.1~4) (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし** (URL-092)	なし** (URL-093)		
MIU-4 (月吉断層上盤)	なし (URL-086)	あり (URL-087)	なし (URL-088)	あり (No.7~9) (URL-018)	あり (No.7~9) (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし** (URL-092)	なし** (URL-093)		
広域地下水流動研究	DH-2	なし** (URL-017)	あり (URL-087)	あり (URL-088)	あり (URL-018)	あり (URL-089)	あり (URL-027)	あり (URL-090)	なし (URL-091)	あり (URL-092)	あり (URL-093)	
	DH-15	なし** (URL-017)	あり (URL-087)	あり (URL-088)	水位低下原因不明 (URL-019)	あり (URL-089)	あり (URL-027)	あり (URL-090)	なし (URL-091)	あり (URL-092)	あり (URL-093)	
	DH-7	なし** (URL-017)				なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	
	DH-8	なし** (URL-017)				なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	
	DH-9	なし** (URL-017)				なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	
	DH-10	なし** (URL-017)				なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	
	DH-11	なし** (URL-017)	なし** (URL-087)	なし** (URL-088)	水位低下原因不明 (URL-019)	なし** (URL-089)	なし** (URL-027)	なし** (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	
	DH-12	なし** (URL-017)				なし (URL-089)	なし (URL-027)	なし (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	
	DH-13	なし** (URL-017)	なし** (URL-087)	なし** (URL-088)		なし** (URL-089)	なし** (URL-027)	なし** (URL-090)	なし (URL-091)	なし (URL-092)	なし (URL-093)	

*1)地下施設建設工事との関連性についての記載がないので、影響はなしと判断した。

URL-017: 藤田ほか²⁷⁾、URL-019: 西尾ほか²⁸⁾、URL-023: 萩原ほか²⁹⁾、URL-024: 齋ほか³⁰⁾、URL-027: 國丸ほか³¹⁾、URL-034: 萩原ほか³²⁾、URL-037: 水野ほか³³⁾、URL-052: 毛屋ほか¹⁸⁾、URL-086: 渡邊ほか³⁴⁾、URL-087: 西尾ほか³⁵⁾、URL-088: 西尾ほか³⁶⁾、URL-089: 竹内ほか³⁷⁾、URL-090: 國丸ほか³⁸⁾、URL-091: 國丸ほか³⁹⁾、URL-092: 濱ほか⁴⁰⁾、URL-093: 濱ほか⁴¹⁾

広域地下水流動研究を目的としたモニタリング孔では、DH-2号孔とDH-15号孔以外のモニタリング孔で掘削影響による地下水位の変動は認められていない。超深地層研究所計画を目的とした研究所用地では、観測区間の深度によって影響の有無がことなるものの、2005年度以降、ほぼすべてのモニタリング孔で掘削影響による地下水位変動が認められている。正馬様用地では月吉断層上盤側のモニタリング孔で2005年度まで掘削影響による変動があるほか、その他の孔で

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

も2007年度まで変動が認められるが、以降に掘削影響による地下水位変動は認められていない。

掘削影響を受けたモニタリング孔の主立坑からの距離を見ると、概ね半径2km以内にあるモニタリング孔で、地下施設の掘削影響が生じている(図4.2.6-1)。

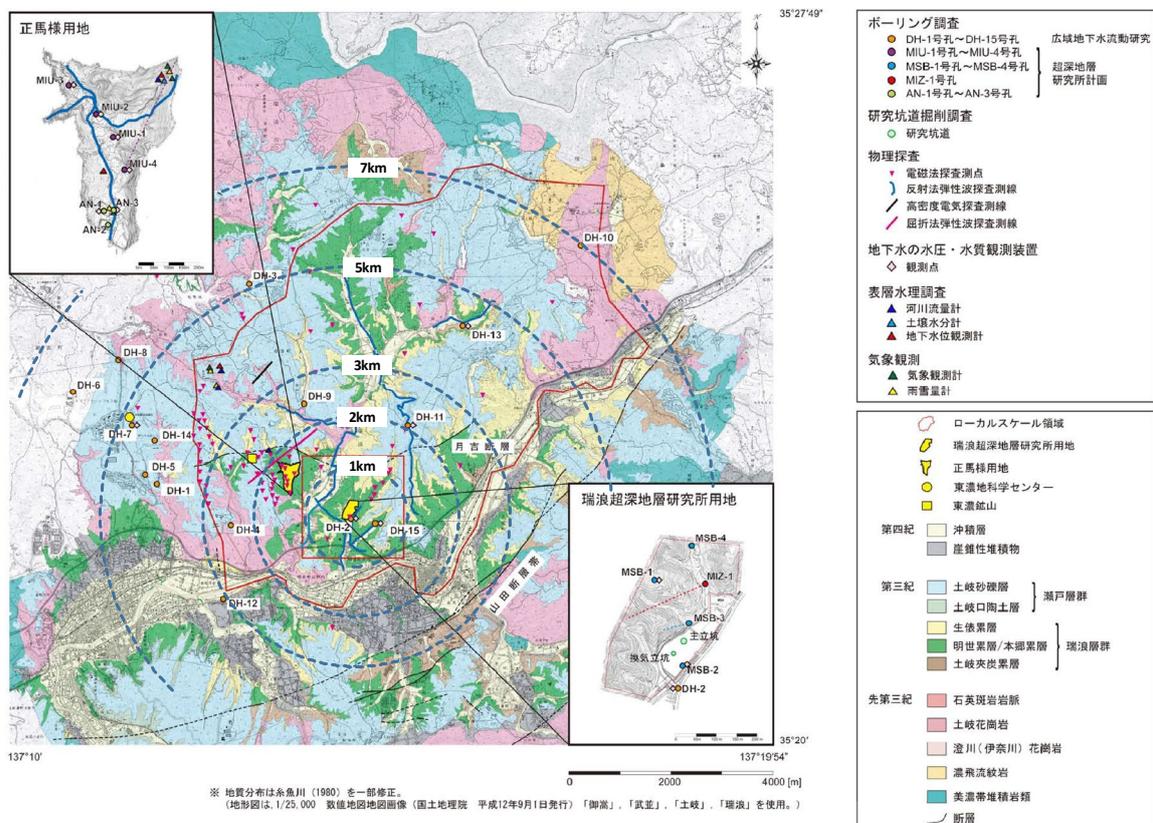


図 4.2.6-1 瑞浪超深地層研究所地下水モニタリング孔配置図

地化学モニタリングに関しては、地下坑道からのボーリング孔を中心として10年以上の採水及び分析が実施され、立坑掘削の影響が評価されている。Iwatsuki, et al.⁴²⁾では図4.2.6-2に示したように、地下水中の溶存成分の濃度変化を計測した。その後、水質形成成分に対して主成分分析を行うことで、立坑掘削後の深層地下水のコーン状の上昇とその後に発生する上方からの浅層地下水の混合が、水理地質ユニットごとに異なる挙動を示すことを明らかにした。

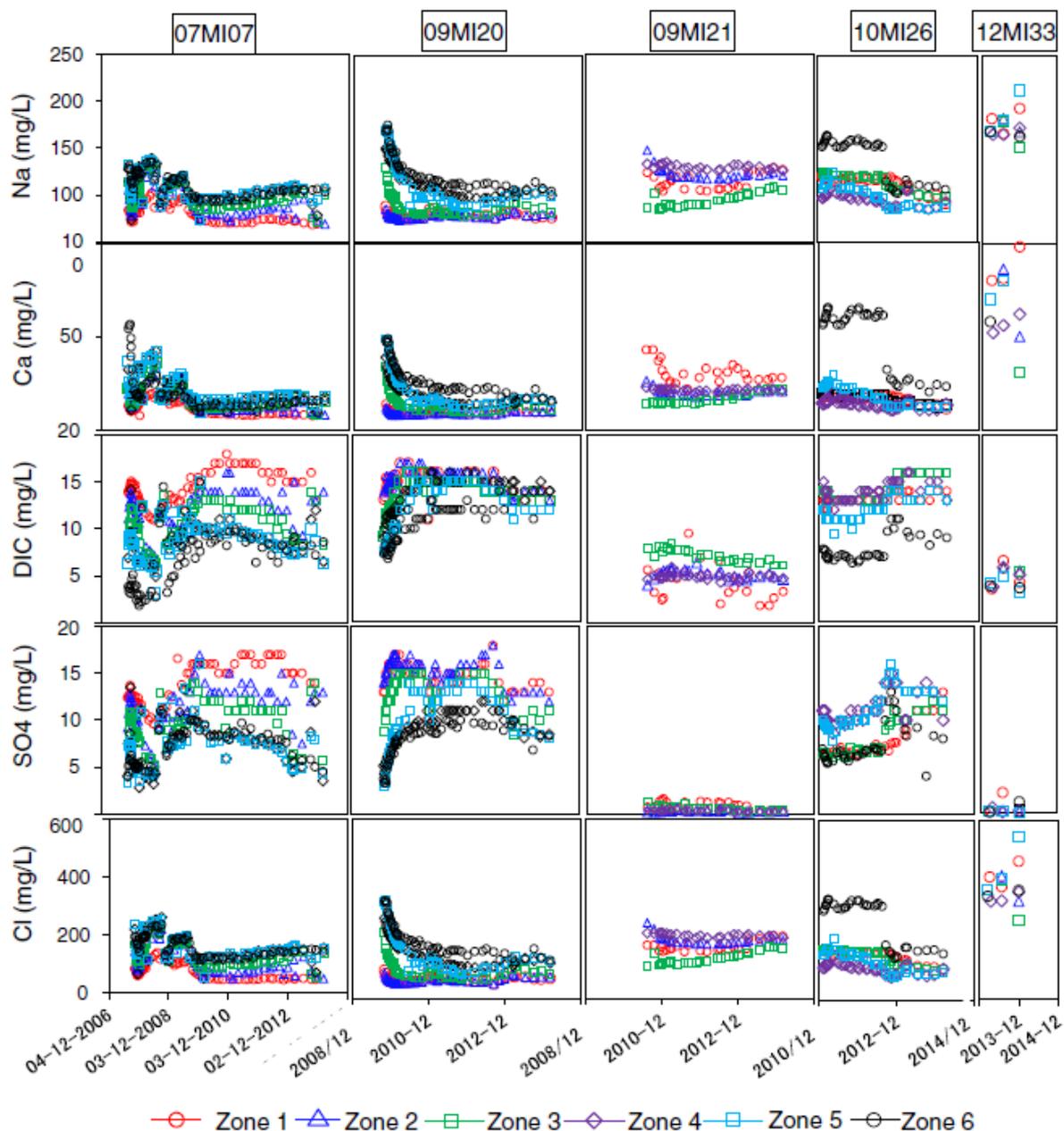


図 4. 2. 6-2 坑道内地化学モニタリング孔における水質の経時変化⁴²⁾

4. 2. 7 日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター

地下施設建設による地下水位変動への影響を見るために、換気立坑からの離間距離で次のように区分した領域に位置する地表モニタリング孔の、計測開始から計測終了、あるいは2015年3月31日時点までの地下水位（全水頭）の変動グラフを各モニタリング孔の配置図と合わせて表示した（図4.2.7-1～図4.2.7-4）。

- 3km 以上 (2 孔 : HDB-2, 10)
- 1~2km (5 孔 : HDB-9, 5, 4, 11, 7)
- 800~1000m (2 孔 : HDB-8, 1)
- 200m 以内 (4 孔 : HDB=3, 6, SAB-1, PB-V01)

換気立坑からの離間距離が 200m 以上のモニタリング孔では、掘削影響による地下水位（全水頭）の低下は認められず、200m 以内に配置された HDB-3、HDB-6、SAB-1、PB-V01 孔で地下水位

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法, 計画等の妥当性に関する知見の整理

(全水頭) の低下が確認できる。なお図 4. 2. 7-4 には、掘削影響がない HDB-1 孔と 8 孔のグラフも合わせ、掘削影響の有無を比較している。

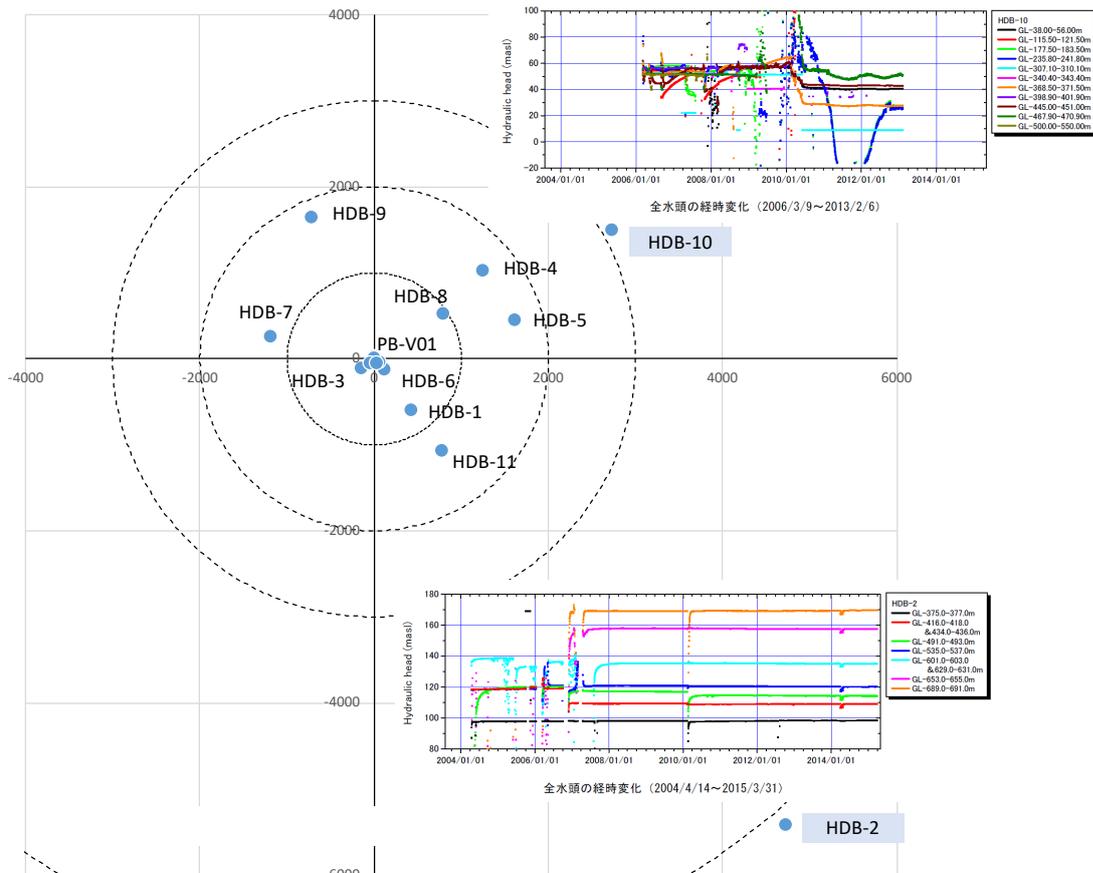


図 4. 2. 7-1 地下施設から離間距離 3km 以上のモニタリング孔での水位変化 (HDB-2, 10) (松井ほか⁴³⁾から作成)

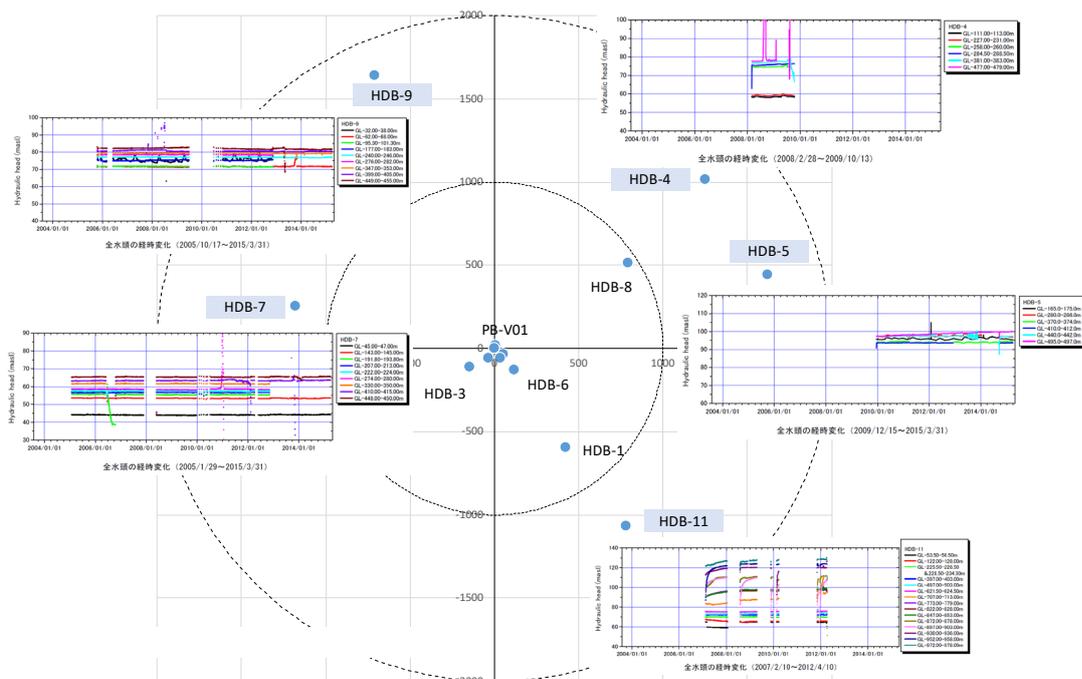


図 4. 2. 7-2 地下施設から離間距離 1~2km 間のモニタリング孔での変化 (HDB-9, 5, 4, 11, 7) (松

井ほか⁴³⁾から作成)

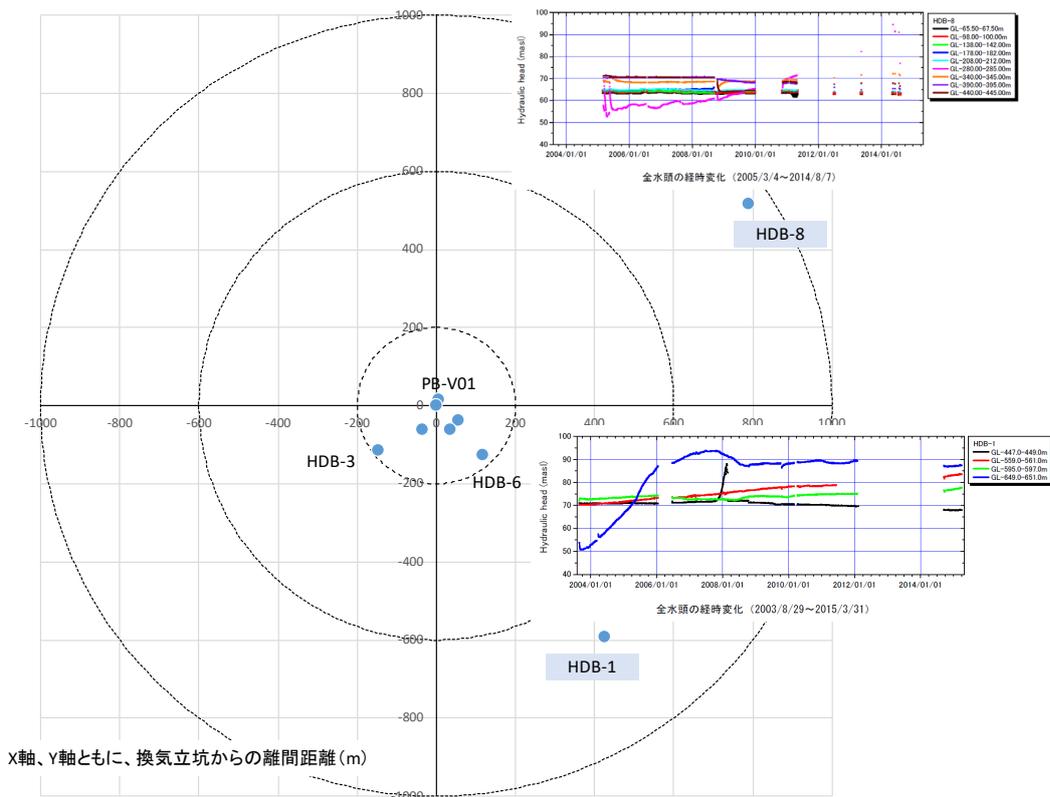


図 4.2.7-3 地下施設から離間距離 800~1000m 間のモニタリング孔での変化 (HDB-8, 1) (松井ほか⁴³⁾から作成)

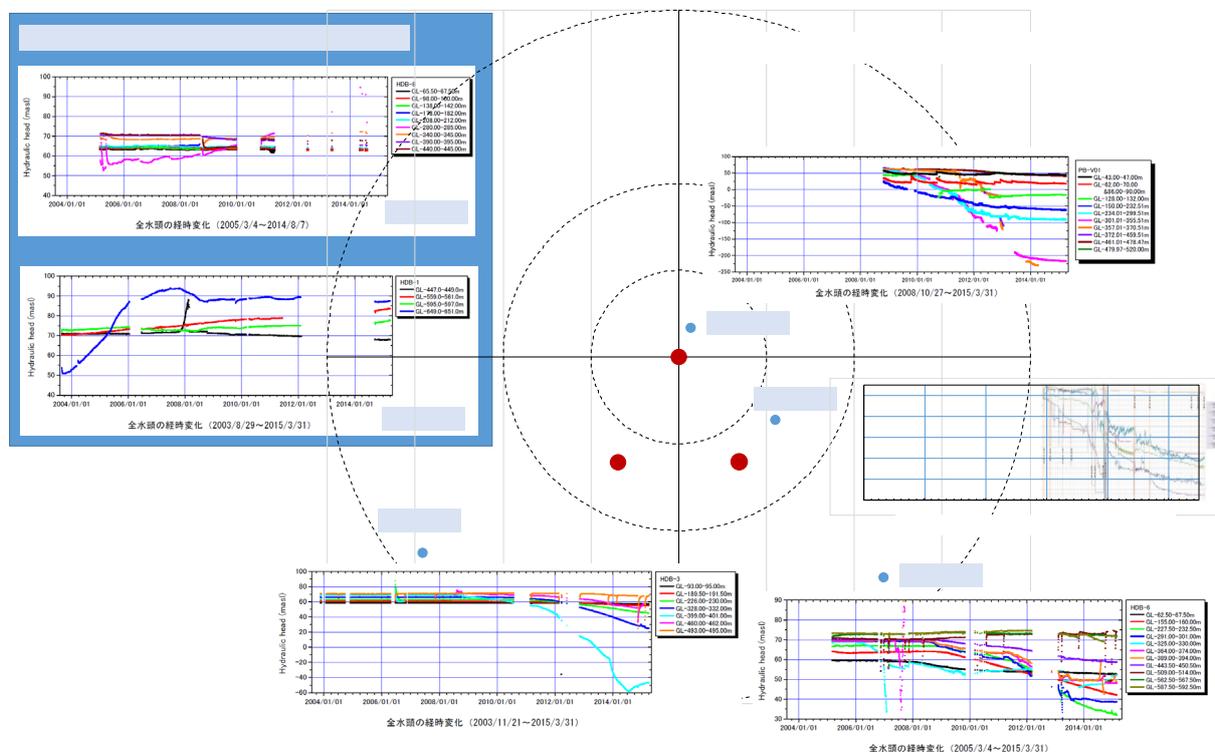


図 4.2.7-4 地下施設から離間距離 200m 以内のモニタリング孔での変化 (HDB-3, 6, SAB-1, PB-V01) (松井ほか⁴³⁾, 須甲ほか⁴⁴⁾から作成)

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

地下水位（全水頭）の低下が確認された4孔（HDB-3、HDB-6、SAB-1、PB-V01）の地下水位（全水頭）の変化を地下施設の掘削との関係で確認する。図4.2.7-5から図4.2.7-8では、グラフ縦軸の二軸を、左軸：地下水位（全水頭）、右軸：地下施設の掘削深度（標高）とし、いずれもEL+100m～EL-400mまでの範囲を示して、地下施設（換気立坑、東立坑、西立坑）の掘削進捗を実線グラフで、モニタリング区間の地下水位を色分けした実線グラフ（浅い区間から深い区間に向かって暖色系から寒色系の色で着色）で示すとともに、これらのグラフ右側にグラフ標高と合わせて柱状図、右上にモニタリング孔の位置図を示し、換気立坑からの離間距離が近い順（PB-V01、SAB-1、HDB-6、HDB-3）に図示した。

- 地下水位（全水頭）の変化の特徴には、
- 地下施設至近の2孔（PB-V01孔、SAB-1孔）での地下水位の低下量が大きいこと
- 地下施設の掘削範囲（EL-320m）より下方にある観測区間では、掘削影響による地下水位の低下が小さいこと
- SAB-1孔を除き、地表に近い深度（概ねEL-50m程度）の観測区間の地下水位は、掘削影響よりも地表からの地下水涵養の影響が大きいことから顕著な低下が認められないことなどがあげられる。

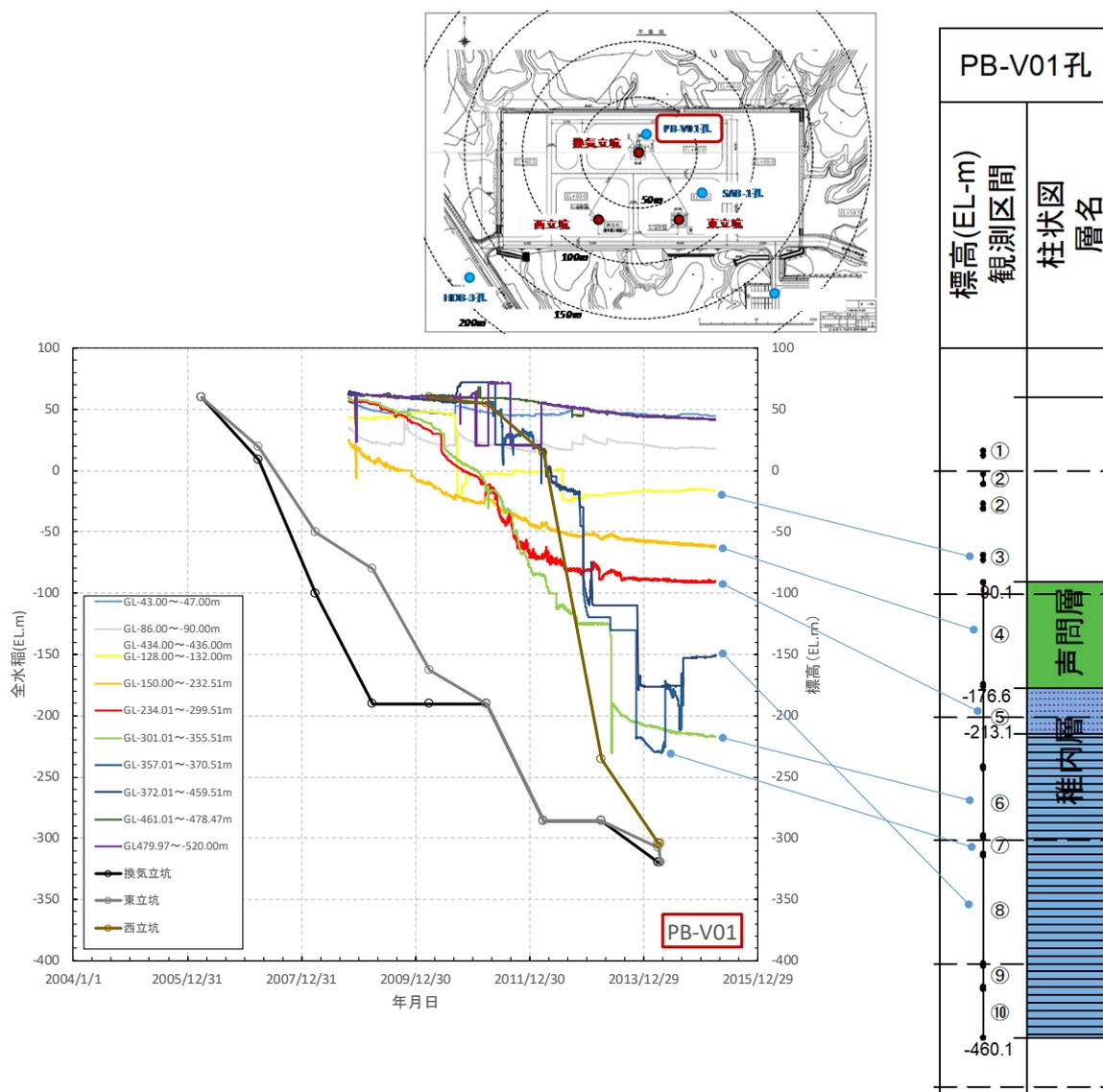


図 4.2.7-5 地下施設建設と地下水位との関係（PB-V01 孔）

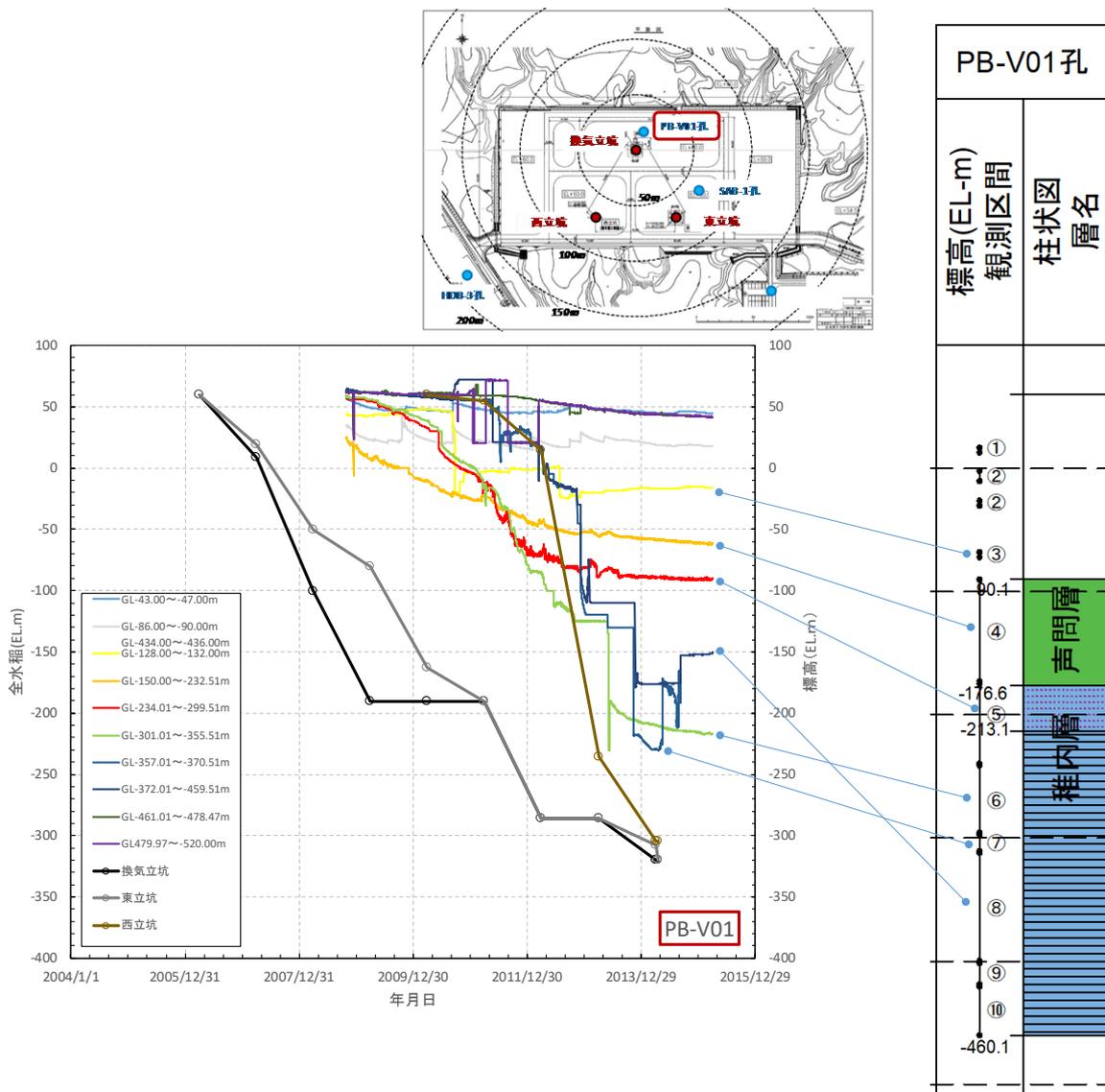


図 4.2.7-6 地下施設建設と地下水位との関係 (SAB-1 孔)

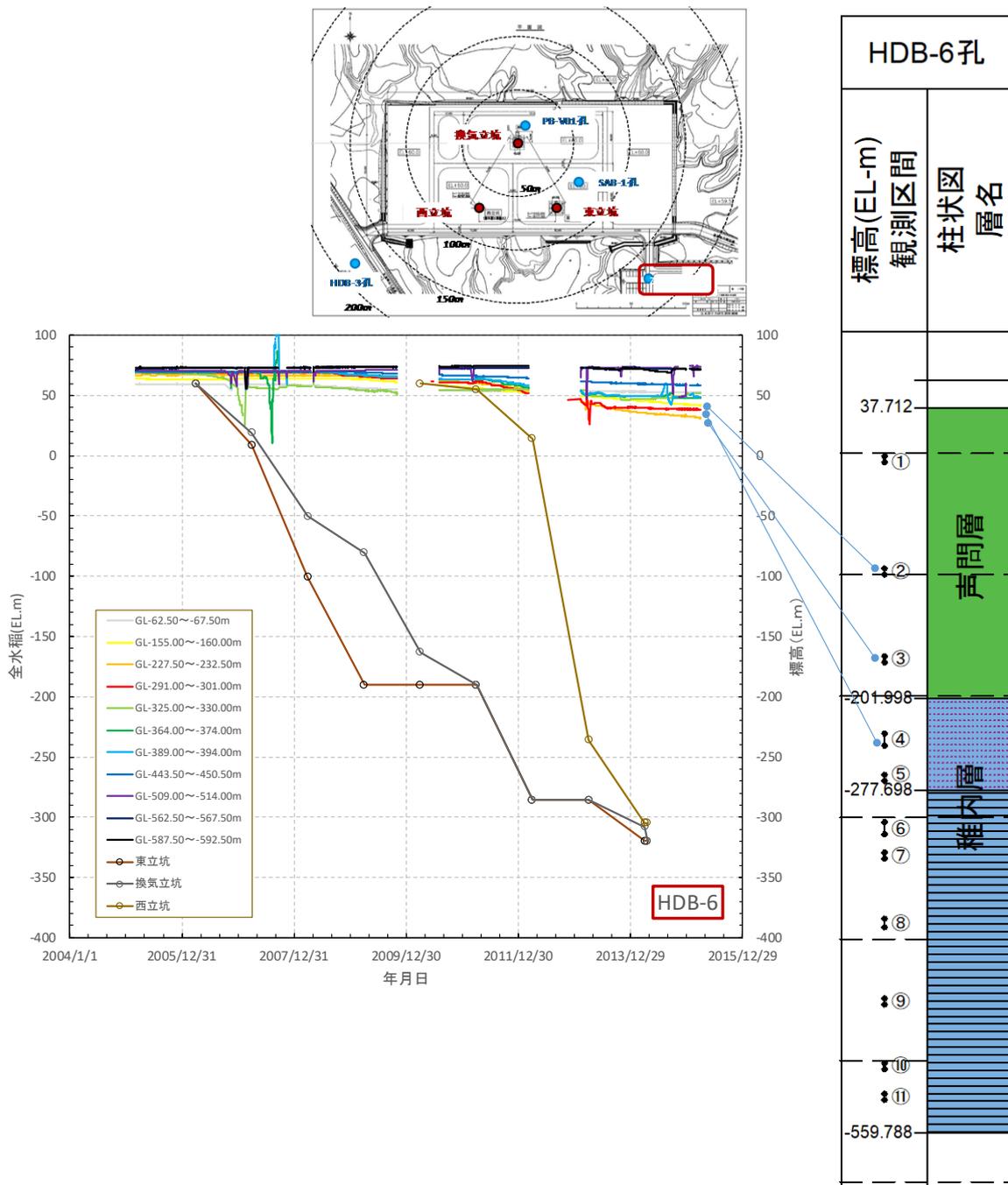


図 4.2.7-7 地下施設建設と地下水位との関係 (HDB-6 孔)

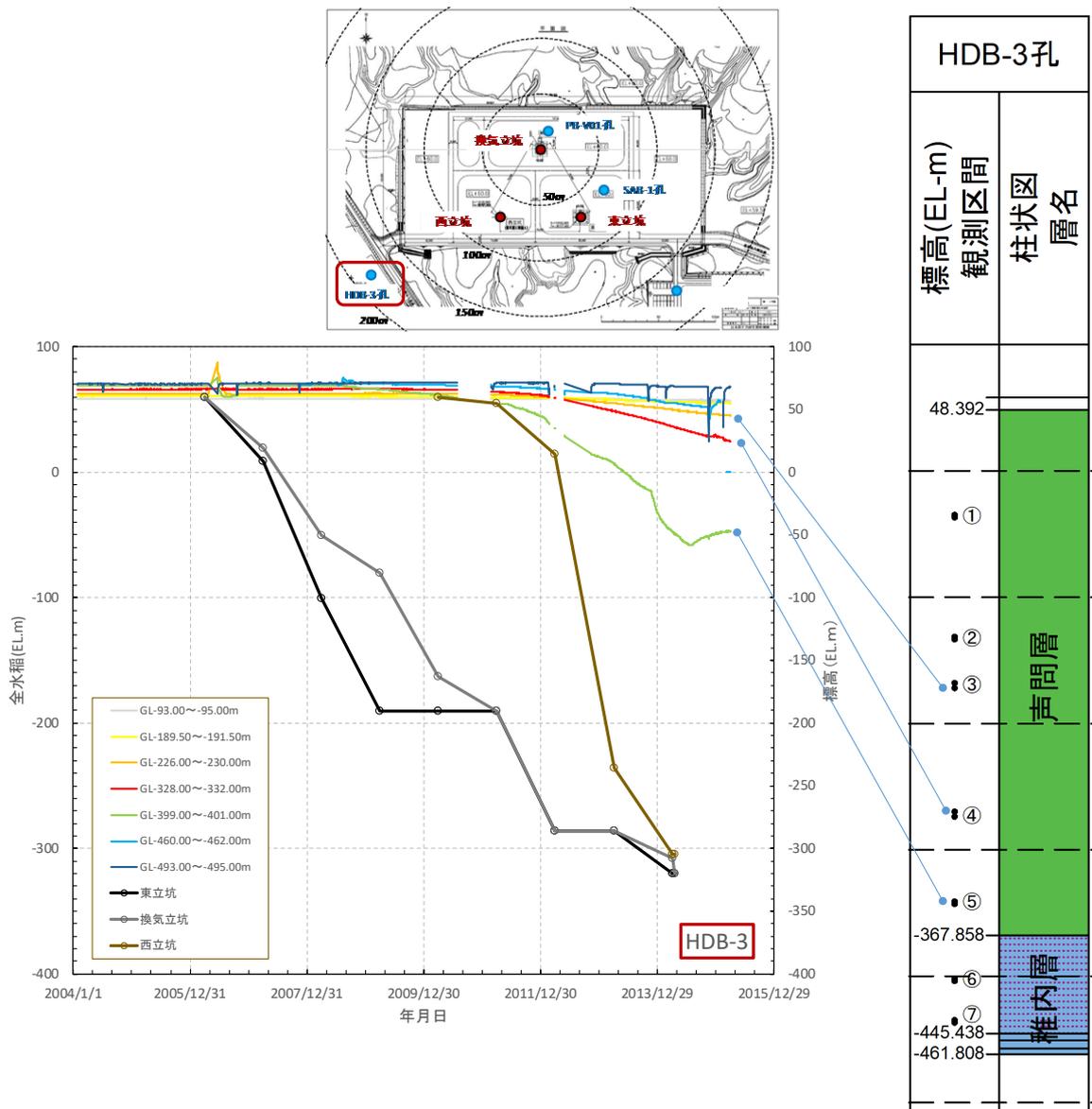


図 4.2.7-8 地下施設建設と地下水位との関係 (HDB-3 孔)

4.3 既往公表文献からのモニタリング情報のまとめ

4.3.1 石油地下備蓄・石油ガス地下備蓄

石油地下備蓄基地では、消防法に基づき（岩盤タンク幅の5B範囲内で1箇所/40,000m²）14～18孔の水位観測孔が岩盤タンク区域に配置されている。これらのボーリング孔は、岩盤タンク区域においてタンク軸に沿って設定された概ね3つの軸上にほぼ均等に配置されているものの、久慈基地のように透水性の高い岩盤タンク区域南東側にやや密な配置となるよう水理特性に応じて配置に粗密をつけている（他に串木野基地など）。

石油ガス地下備蓄基地においては、貯槽外周から水平距離100mの範囲について1箇所/40,000m²の割合で配置されており、波方基地では岩盤貯槽の位置レイアウトが決定していない調査段階に設置されたモニタリング孔を含め、設計段階、建設段階で追加されたモニタリング孔から、建設段階の水理地質情報を考慮して代表する地点を抽出し、法定点検孔（地下水位観測孔、間隙水圧観測孔）としている。倉敷地点においても同様な方法で法定点検孔の配置が決定されたものと推察されるほか、岩盤貯槽レベルで確認された断層沿いの高透水ゾーンに合わせた配置とすることを考慮しながら、概ね3ないし4本ある貯槽軸の中央、両端側にモニタリング孔を配置している。

地表からのモニタリング孔での観測項目は地下水位、間隙水圧であり、石油ガス地下備蓄基地（波方、倉敷）では、岩盤貯槽天盤の上方10m程度（EL-120m付近）に間隙水圧計（振動弦式間隙水圧計、光ファイバー式間隙水圧計）を配置することで水封管理に利用している。間隙水圧計に振動弦式あるいは光ファイバー式を使用しているのは、できるだけ単純な原理で故障を防ぎ水圧を測定することが長期の観測管理に必要なためであり、海外での長期使用実績も考慮して、これらの機種が選定されている。なお、地下水位、間隙水圧の観測頻度を消防法で定められた基準である1日/回としており、建設段階以前からの観測が継続している。

地下からのモニタリングに関して、石油ガス備蓄基地では岩盤貯槽の深度が深く（EL-150～-184m）水封水圧の管理が重要となることから、岩盤貯槽軸に50～100m間隔で、かつ地層区分ごと、あるいは相対的に高透水性領域や地下施設の構造上必要な位置に複数の計測断面を設けている。これらの断面には岩盤貯槽周辺のグラウト範囲の外側（波方基地：10m、倉敷基地：8m）で貯槽天盤部、側壁肩部、底盤部に間隙水圧計を設置し、水封管理に利用している。地表の間隙水圧計と同様に、設置後のメンテナンスフリーを実現するため、振動弦式または光ファイバー式の間隙水圧計を配置している。

石油備蓄基地では、水封水圧の管理を目的とした空洞周辺への間隙水圧計の配置を実施していないが、久慈基地においては岩盤タンク区域南東側で相対的に地下水位が低い領域に、地下トンネル内から実施したボーリング孔に追加の間隙水圧計を設置し、タンク周辺の間隙水圧の管理を実施している。

石油備蓄基地では、建設段階以降の地下水位観測データが公表されている。各基地での地下水位の変動要因が概ね解明できており、降雨による地下水涵養や地震の影響により変動することが確認されている。いずれの基地においても、地下水位は限界地下水位以上であるが、透水性が高い領域において相対的に地下水位が低い孔が存在する。

石油ガス地下備蓄基地では、調査段階も含めた連続的な観測データは公表されていないが、岩盤貯槽掘削時と岩盤貯槽掘削後の地下水位の比較データが存在し、断層等の高透水性部に位置する観測地点で地下水位が低い傾向が認められているが、限界地下水位を下回るものではない。

4.3.2 地下実験施設

いずれの地点も地表の孔配置については、広域地下水流動研究を目的として立坑から約7km圏内に11～15孔のモニタリング孔を配置し、最大深さEL-1000mまでの範囲で地質・水理に関する

調査, モニタリングを継続している. モニタリング孔の配置にあたっては, 各地域の地形的特徴から地下水涵養域における主たる地下水流動方向にモニタリング孔を配置しており, 瑞浪地点では概ね北東-南西方向と北西-南東方向の2方向に, 幌延地点では北東-南西方向の主たる地下水流動方向に加え, これと直行する方向にもモニタリング孔を配置している. これらの孔では地下水位, 間隙水圧が直接水圧計測方式 (MP システム), ピエゾ水頭計測方式 (SPMP システム /PIEZO システム/スタンドパイプ式) を利用して観測されており, その測定頻度は5分から60分あるいは1日/1回としている. 広域地下水流動研究の他にも, 立坑近傍のモニタリング孔では掘削が地下水に与える影響を検討する必要があるため測定頻度が5分と短くなっている. モニタリング開始時期は, 立坑掘削に着工する2~4年前となっている.

地下坑道では, 掘削が進捗して建設された水平坑道において順次ボーリング調査が実施され, モニタリング孔として間隙水圧の計測を実施している. 地表と同様な計測機器が使用されているが, 水平坑道内ではボーリング孔口位置よりも地下水位が高いため, ピエゾ水頭計測方式ではピエゾ管の口元を閉鎖した状態で孔口に取り付けた圧力計で地下水圧をモニタリングしている.

瑞浪, 幌延ともに, 地下施設の建設以前から地下水圧のモニタリングが開始され, 現在まで観測が継続している. 瑞浪地点では主立坑から2km圏内にあるモニタリング孔で, 幌延地点では主立坑から数百メートル圏内にあるモニタリング孔で, 地下施設の建設とともに地下水圧の低下が認められている. 瑞浪地点では同一孔でも低透水層を介する断層を境とした上位と下位との観測区間で掘削影響の有無が異なることや, 幌延地点においては浅部や立坑掘削深度よりも深部で掘削影響が小さいなどの特徴が認められている. これらを含め, 瑞浪地点と幌延地点とで掘削影響範囲に違いがあることなどには, 各地点の水理地質条件や掘削深度の違いが影響しているものと考えられる.

4.4 放射性廃棄物処分における効率的なモニタリングと掘削制限範囲

4.4.1 放射性廃棄物処分における効率的なモニタリングと調査結果の比較

前節までにおいて、国内における大規模地下空間利用の事例として、石油及び石油ガス地下備蓄基地と地下実験施設におけるモニタリングの事例を取りまとめた。既存事例と中深度処分等の放射性廃棄物処分には、対象となる構造物の規模や深度、地下水等モニタリングの目的及び必要とされるモニタリング期間等に大きな相違点がある。以下に、中深度処分を対象として調査事例との比較を行い、効率的なモニタリングを実施するための課題等をまとめる。

1) 地下施設の規模

中深度処分においては地下構造物の規模等は現状では未定である。地層処分で想定されている数 km×数 km という平面投影面積と比較すれば小規模となるであろうが、少なくとも数百 m×数百 m の規模が想定される。また、埋設深度は最小で 70m (10 万年間) であることから、100m 程度 (地層処分の場合は 300m 以深) が想定される。

中深度処分を対象とした場合、石油備蓄あるいは石油ガス備蓄基地が同等の規模及び深度と考えられる。ただし、次項に示すように、モニタリングの目的が異なるため、直接適用することは困難であろう。

一方、地下実験施設に関しては、地層処分を対象とした研究開発が目的であるため、坑道の水平展開範囲は中深度処分の想定よりも小さく、深度は地層処分深度であるため 350m あるいは 500m と深い。また、研究目的であるため、現状では閉鎖冠水を行っていない。

2) モニタリングの目的・配置

原子力規制委員会¹⁾によると、中深度処分における地下水等モニタリングは、「廃止措置の開始までの間において、地下水等モニタリングを行い、地下水の状態に加えて、廃棄物埋設地の埋戻し終了後における人工バリアや天然バリアが設計を逸脱することなく漏出抑制や移行抑制に係る性能を発揮しつつあることの確認に必要なデータを取得することを要求。」とされている。従って、地下水等モニタリングは主に廃棄物埋設地近傍の地下水する流動がベースライン状態である比較的緩慢な流動に回復しつつあること、埋設坑道等の掘削影響が消散しつつあることを確認することが主目的であると考えられる。それに加えて、廃棄物埋設地を含む地下構造物を通過する水循環系を把握することも必要となろう。そのためには廃棄物埋設地を含む地下構造物領域の周辺を中心とした配置が求められる。それに加えて立地調査段階の地下水調査に用いた調査孔をモニタリング孔として地用することが必要であろう。ただし、モニタリング孔が地表との短絡経路となる可能性を考えると、廃棄物埋設地の直近に地表からのモニタリング孔を配置することは困難であり、埋設地直近の水理環境等は地下坑道からのボーリングを利用する必要があるものと考えられる。

地下備蓄における地下水等モニタリングは、石油あるいは石油ガスのタンクからの漏洩を防止するための水封の効果を監視することが主目的である。そのために、4.1 節で示したようなモニタリング孔配置が、地下タンク建設領域及びその近傍を対象として設定されている。また、大きな特徴としては地下水位が法定の限界水位を下回らないことの監視が主目的であるため、地表からのモニタリング孔は、岩盤タンクの標高まで掘削されず、岩盤タンク上位を測定対象としていることである。また、地下における間隙水圧測定は密な間隔で実施されている。

また、地下実験施設では、広域地下水流動及び立坑や坑道掘削の影響評価、段階的な調査による水理、化学環境等の段階的モデル化という主に立地調査段階を対象とした研

究が主な目的であり、地表からの地下水モニタリングは地下水流動系の把握のために、多段式のモニタリング装置を用いて、想定される地下水流動系に従って粗く配置している。また、地下坑道からのモニタリングは水理地質構造や研究目的（水理、化学等）に応じて展開されている。

以上から、放射性廃棄物処分の地下水等モニタリングにおいては、以下の点に留意することが必要であろう。

- ・地表からの水位モニタリング孔に関しては、地形や水理地質構造を参考として地下水の卓越流動方向に密に配置するとともに、透水性が高い領域が想定される場合には密に配置すること
- ・地下坑道からの間隙水圧モニタリングを十分な数量、かつ高透水経路とならないように配置すること。

3) モニタリング期間及び装置

中深度処分の地下水等モニタリングは、1)で示したように、廃止までの間実施することが要求される。その期間は300年～400年程度が想定される。一方、調査対象の地下空間利用は、最も長い石油地下備蓄でも30年弱の期間の実績である等、長期のモニタリングの実績は存在しない。地下備蓄においては、特に久慈基地における地表からのボーリングによる地下水位に関しては20年間の安定した計測データが公開されていることから、比較的単純な計測システムを用いたモニタリングが有効であろう。地下坑道内からのモニタリングに関しては、埋設された間隙水圧計は、地下備蓄基地では交換・修理が不可能であり、これは放射性廃棄物処分の場合も同様なケースとなることが考えられるため、計測可能な期間が限られる。

地下実験施設における地表からのモニタリングにおいて用いられているMPシステム等の多段式モニタリング装置は、帯水層が複数存在する場合に、それぞれの間隙水圧を計測することが可能であること、地下水試料の採取を気密状態で行うことが可能であること等の利点はあるが、幌延での実測データを見るとデータのばらつきや欠測期間が長い場合が存在する。また、計測期間の実績がたかだか10年程度であることから、初期のベースライン調査には適用可能と考えられるが、長期間のモニタリングに利用することには注意が必要である。

4.4.2 モニタリング孔配置の最適化に向けた検討

前節で述べたように、地表からの地下水等モニタリング孔は、想定される地下水流動系の方向や水理地質構造に従って配置されるべきである。また、地下構造物周辺のモニタリング範囲は、バックグラウンドの地下水位の監視という目的の少数のボーリング孔と地下構造物の建設による地下水環境への影響が観測される範囲に配置されるべきであろう。地下構造物の影響範囲は、水理地質構造や水理特性によって決定されるため、一概に範囲を決定することは困難であるため、数値モデルを用いた事前の検討が必要であろう。

実際のモデル化や影響範囲の検討は今後の課題であるが、検討対象地域は現在水文調査及び地下水流動の概念モデルの構築が進んでいる上北平野堆積岩地域あるいは瀬戸内海沿岸地域の結晶質岩地域を対象として、透水性、透水異方性をパラメータとした検討を実施すべきと考える。

4.4.3 掘削制限範囲の設定に対する地下水等モニタリングの活用

平成28年8月、原子力規制委員会は、「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」を取りまとめた。また、平成29年4月の原子炉等規制法改正において、指定廃棄物埋設区域における掘削制限の新設等の改正を行った。従って、地表あるいは地下からの掘削、地下利用を制

限する範囲を決定することが規制期間の責務となっている。

掘削制限範囲は、人為事象の発生可能性を可能な限り低減するために設定されるものであるために、規制期間終了後において廃棄物埋設地から長期に渡って移行した核種が存在する可能性が高い範囲に対して設定されるべきもの、あるいは井戸のくみ上げ等によって廃棄物埋設地からの核種移行を促進する可能性がある範囲に対して設定されるべきものと考えられる。

掘削制限範囲の設定の考え方は、以下に分類されるであろう。

- 1) 廃棄物埋設地への直接的な接触を発生させない範囲
 - 2) 井戸利用や地下空間利用の影響範囲が廃棄物埋設地に到達しない範囲
 - 3) 廃棄物埋設地を通過する地下水が流出するまでの範囲
-
- 1) は、廃棄物埋設地を地表に投影した範囲となるが、深度の制限をどのように設定するかという点が課題となる。また、近傍における大規模な揚水やトンネル掘削等が発生した場合には人間侵入とは言えないものの、核種の移行が促進される。
 - 2) に関しては、立地調査段階における水理特性調査結果等を用い、人為事象の影響範囲の見積もりを行うことが可能である。ただし、立地調査段階、あるいは建設段階で完全な水理地質構造モデルを構築することは不可能であり、一定の不確実性は残存する。
 - 3) の場合は、深度 100m 程度が想定される廃棄物埋設地を通過する地下水流動の流出点として、最大で海岸線までを想定する必要が生じ、不確実性が增大するとともに下流域に過大な設定となる可能性がある。

現実的には、2)の考え方の妥当性が高いと考えられるが、その場合も事前の掘削制限範囲設定では想定されない高透水ゾーンの連続性が存在する場合には、範囲設定の見直しを行う必要が生じる。そのために、地下水等モニタリングにおいて、地形や水理地質構造、水理特性によるモニタリング孔の配置、モニタリング範囲の設定、中間的なモニタリングデータによるモニタリング孔の追加等、計画に一定の自由度を持たせ、地下構造物の建設段階における水位等の影響範囲を把握し、その結果をフィードバックして掘削制限範囲を柔軟に変更することが必要となろう。

4.5 まとめと今後の課題

中深度処分の規制の考え方において言及されている地下水等モニタリングに関して、国内における地下備蓄及び日本原子力研究開発機構地下実験施設の計7事業を対象とした水理地質構造、モニタリング仕様、モニタリング結果等の調査取りまとめを行った。また、取りまとめ結果から、中深度処分に適用する際のモニタリング孔配置の考え方及び掘削制限領域設定を行う際のモニタリング計画及びモニタリング結果の利用に関する取りまとめを行った。主な検討結果は以下の通りである。

- 1) 地下備蓄に関しては、モニタリングの目的が石油あるいはガスの漏洩を防止するための水封機能の監視であるため、地表からのモニタリングは一孔あたりの分担面積が決定され、モニタリング深度は岩盤タンクよりも高い標高（法定等の水位よりも下位）となっている。また、タンクに直接作用する間隙水圧は岩盤タンクからの間隙水圧モニタリングを密に行うことで評価を行っている。いずれのモニタリングも事前に想定された高透水部には密な配置となっており、水位及び間隙水圧の変動も高透水部を中心に観測されている。
- 2) 地下実験施設においては、広域地下水流動の主流動方向を中心として、主として多段の間隙水圧測定を行うモニタリング孔が配置されている。主要な目的は広域地下水流動の評価と、坑道掘削時の周辺への影響評価であるが、坑道掘削の影響は地下施設から数百mの範囲で、主に掘削が進行した深度よりも高位において顕著となっている。また、坑道内では水圧及び水質のモニタリングが実施され、坑道掘削による深部地下水の上昇とそれに追従する浅部地下水の流入が観測されている。
- 3) 中深度処分等の放射性廃棄物処分の地下水等モニタリングに関しては、廃棄物埋設地周辺と地表との短絡を回避するために、廃棄物埋設地周辺を対象として地表からのモニタリング孔掘削には制限が存在するため、廃棄物埋設地を含む地下構造物建設範囲の外側を中心とした地表からのモニタリングと地下構造物からの間隙水圧測定が必要である。ただし、想定されるモニタリング期間が長いため、モニタリング装置の選択等の課題は多い。
- 4) 掘削制限範囲の設定において、廃棄物埋設地周辺に掘削された井戸の汲み上げやトンネル等の地下空間建設が地下水流動に与える影響範囲を考慮した範囲を含め設定する場合には、立地調査段階で把握された地下水流動場や水理地質構造に基づく周辺のモニタリング孔配置の設計及び坑道掘削時の水位、水圧への影響把握によるモニタリング孔の追加や掘削制限範囲設定へのフィードバック等が必要となる。

国内の大規模地下空間利用の実績は長くても30年程度であるため、300年以上の期間が要求される中深度処分の地下水モニタリングに適用する際には、測定装置あるいはモニタリング孔そのものの耐久性や交換可能性等検討すべき課題も多い。また、モニタリング孔の配置はサイト特性を考慮した計画が必要となるため、一般的に議論することは困難ではあるが、現在、水文学的調査によって地下水流動概念モデルを構築している地域を対象として、数値モデルを活用したモニタリング計画の策定や、実際のボーリング調査や後続のモニタリング試験等を用いた検証を行うことが課題となる。

【引用文献】

1. 照井一明, 長浜春夫 (1995). 上部白亜系久慈層群の堆積相とシーケンス. *地質学論集*. 45:238-249.
2. 松下健一, 児玉直幸 (1992). *岩盤地下タンク建設工事における水封管理システム*. 西松建設技報.
3. 青島輝夫, 青木謙治, 日比谷啓介 (1992). 久慈地下石油備蓄基地における岩盤タンクの施工. *土と基礎*. 40(11):49-52.
4. 蒔田敏昭 (1991). 地下石油備蓄基地建設の概要. *資源・素材学会誌*. 107(13):927-938.
5. 城代邦宏. 11. 地下石油備蓄基地での維持管理事例. In: 土木学会, ed. *大規模地下空洞の建設・維持管理事例集*. 2014:304-327.
6. 青木謙治 (1989). *石油地下備蓄空洞の設計及び計測管理に関する研究* [博士論文], 京都大学.
7. 城代邦宏, 植出和雄, 本多眞, 長谷川誠, 小島圭二, 小川輝繁 (2007). 地下石油岩盤タンクにおける水封機能の健全性評価手法に関する研究. *土木学会論文集*. C-63(2):624-634.
8. 岡本淳, 有元平, 山本和彦, 大津宏康 (1993). 菊間地下石油備蓄基地建設工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討. *土木学会論文集*. IV-21(480):33-42.
9. 福岡航治, 藤本泰史, 入野寛彦, 大野圭佑, 今井淳二. 低透水岩盤への地下水検層適用事例. Paper presented at: 全地連「技術フォーラム 2018」高松 2018; 高松市.
10. 城代邦宏 (2008). *水封式岩盤タンクの保全点検システムに関する研究* [博士論文], 横浜国立大学.
11. 岡本昭夫, 中澤保延, 長谷川誠, 小島圭二 (1998). 岩盤の「割れ目」に対応した水封評価法. *資源と素材*. 114(1):19-27.
12. 長谷川誠 (2001). *水封式岩盤タンクの設計/施工管理及び維持管理に関する研究* [博士論文], 東京工業大学.
13. 前島俊男. 9. 倉敷・波方国家石油ガス備蓄基地. In: 土木学会, ed. *大規模地下空洞の建設・維持管理事例集*. 2014:202-276.
14. 高压ガス保安協会 (2014). *液化石油ガス岩盤備蓄基地関係 技術文書*. KHK/JOGMEC TD 5800(2014).
15. 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*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Research 2007-043.
16. 竹内竜史 (2016). *地下水長期モニタリングによる地下水流動特性の評価に関する研究* [博士論文], 岡山大学.
17. 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.72:13-26.
18. 毛屋博道, 別府伸治, 竹内竜史 (2018). *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(2013~2014年度)*. 日本原子力研究開発機構.
19. 林田一貴, 加藤利弘, 宗元隆志, 青才大介, 乾道春, 久保田満, 岩月輝希 (2017). *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—(2015年度)*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Data/Code 2017-008.
20. 古江良治, 岩月輝希, 水野崇, 弥栄英樹 (2003). *試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理*. 核燃料サイクル開発機構.
21. 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 繰上広志, 戸村豪治, 柴野一

- 則，濱克宏，松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗（2007）．*幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」*．日本原子力研究開発機構．
22. 佐藤稔紀，笹本広，石井英一，松岡稔幸，早野明，宮川和也，藤田朝雄，棚井憲治，中山雅，武田匡樹，横田秀晴，青柳和平，大野宏和，茂田直孝，花室孝広，伊藤洋昭（2017）．*幌延深地層研究計画における坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階：深度350mまで）研究成果報告書*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Research 2016-025.
 23. 宮川和也，女澤徹也，望月陽人，笹本広（2017）．*幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2014年度～2016年度）*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Data/Code 2017-012.
 24. 宮永佳晴，蒔田敏昭，江原昌彦，秦野輝儀（1994）．粘土グラウトによる地下水の制御—その理論と石油地下備蓄・久慈基地の施工実績—．*応用地質*. 35(4):23-35.
 25. 石和田靖章，小島圭二．石油とガスの地下備蓄．In: *改訂 地下水ハンドブック*．日本地下水学界；1998:1319-1337.
 26. 長谷川誠，宮下国一郎，岡本昭夫．地下石油備蓄串木野基地における長期的な岩盤水理挙動について．Paper presented at: 第29回岩盤力学に関するシンポジウム1999；東京．
 27. 藤田有二（2005）．*広域地下水流動研究における間隙水圧観測；（2004年7月-9月）調査速報*．核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター．JNC-TN7450 2005-001.
 28. 西尾和久，水野崇，大山卓也，中間茂雄，三枝博光，竹内竜史，天野健治，鶴田忠彦，濱克宏，弥富洋介，見掛信一郎，黒田英高，佐藤稔紀，尾方伸久，仙波毅，内田雅大，山本勝，杉原弘造，坂巻昌工（2009）．*超深地層研究所計画，年度報告書；2007年度*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Review 2007-038.
 29. 萩原大樹，水野崇，齋正貴，竹口真人，安江基，堀田政國，濱克宏（2010）．*MSB-2号孔・MSB-4号孔における地下水の間隙水圧および水質観測（2006年4月～2007年3月）*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Data/Code 2009-017.
 30. 齋正貴，萩原大樹，竹口真人，安江基，堀田政國，水野崇（2010）．*MSB-2号孔・MSB-4号孔における地下水の間隙水圧および水質観測（2007年4月～2008年3月）*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Data/Code 2010-007.
 31. 國丸貴紀，見掛信一郎，西尾和久，鶴田忠彦，松岡稔幸，早野明，竹内竜史，三枝博光，大山卓也，水野崇，丹野剛男，平野亨，竹内真司，尾方伸久，濱克宏，池田幸喜，山本勝，弥富洋介，島田顕臣，松井裕哉，伊藤洋昭，杉原弘造（2011）．*超深地層研究所計画，年度報告書；2009年度*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Review 2011-007.
 32. 萩原大樹，齋正貴，竹口真人，堀田政國，水野崇（2011）．*MSB-2号孔・MSB-4号孔における地下水の間隙水圧および水質観測（2009年4月～2010年3月）*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Data/Code 2010-032.
 33. 水野崇，岩月輝希，天野由紀，濱克宏（2012）．*MSB-2号孔・MSB-4号孔における地下水の間隙水圧および水質観測（2004年4月～2006年3月）*．日本原子力研究開発機構．JAEA-Data/Code 2012-004.
 34. 渡邊正，天野健治，池田幸喜，岩月輝希，三枝博光，佐藤稔紀，竹内真司（2005）．*超深地層研究所計画，年度報告書；2004年度*．日本原子力研究開発機構．JNC-TN7400 2005-027.
 35. 西尾和久，松岡稔幸，見掛信一郎，鶴田忠彦，天野健治，大山卓也，竹内竜史，三枝博光，濱克宏，水野崇，齋正貴，平野亨，弥富洋介，島田顕臣，松井裕哉，尾方伸久，池田幸喜，山本勝，内田雅大，杉原弘造（2009）．*超深地層研究所計画，年度報告書；2005年度*．日本原子力研究開発機構．

第4章 地質及び水理環境モニタリングの手法、計画等の妥当性に関する知見の整理

36. 西尾和久, 松岡稔幸, 見掛信一郎, 鶴田忠彦, 天野健治, 大山卓也, 竹内竜史, 三枝博光, 濱克宏, 吉田治生, 水野崇, 齋正貴, 中間茂雄, 瀬野康弘, 弥富洋介, 島田顕臣, 黒田英高, 尾方伸久, 仙波毅, 池田幸喜, 山本勝, 内田雅大, 杉原弘造 (2009). *超深地層研究所計画, 年度報告書; 2006年度*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Review 2009-001.
37. 竹内真司, 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野崇, 平野享, 尾方伸久, 濱克宏, 池田幸喜, 山本勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造 (2010). *超深地層研究所計画, 年度報告書; 2008年度*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Review 2010-014.
38. 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 石橋正祐紀, 上野孝志, 徳安真吾, 大丸修二, 竹内竜史, 三枝博光, 尾上博則, 武田匡樹, 狩野智之, 水野崇, 萩原大樹, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 丹野剛男, 引間亮一, 森川佳太, 湯口貴史, 尾方伸久, 濱克宏, 池田幸喜, 山本勝, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造 (2012). *超深地層研究所計画, 年度報告書; 2010年度*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Review 2012-020.
39. 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 引間亮一, 丹野剛男, 真田祐幸, 尾上博則, 佐藤成二, 狩野智之, 竹内竜史, 新宮信也, 大森一秋, 萩原大樹, 福田朱里, 岩月輝希, 湯口貴史, 濱克宏, 尾方伸久, 小出馨, 池田幸喜, 山本勝, 橋詰茂, 島田顕臣, 佐藤稔紀, 伊藤洋昭, 松井裕哉, 杉原弘造 (2013). *超深地層研究所計画, 年度報告書; 2011年度*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Review 2013-018.
40. 濱克宏, 見掛信一郎, 西尾和久, 松岡稔幸, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 引間亮一, 丹野剛男, 真田祐幸, 尾上博則, 佐藤成二, 狩野智之, 竹内竜史, 新宮信也, 大森一秋, 岩月輝希, 湯口貴史, 森川佳太, 尾方伸久, 小出馨, 池田幸喜, 山本勝, 島田顕臣, 佐藤稔紀, 伊藤洋昭, 杉原弘造 (2014). *超深地層研究所計画, 年度報告書; 2012年度*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Review 2013-050.
41. 濱克宏, 見掛信一郎, 西尾和久, 川本康司, 山田信人, 石橋正祐紀, 村上裕晃, 松岡稔幸, 笹尾英嗣, 真田祐幸, 大貫賢二, 佐藤成二, 別府伸治, 尾上博則, 竹内竜史, 三枝博光, 大森一秋, 長谷川隆, 宗本隆志, 湯口貴史, 岩月輝希, 岩崎理代, 池田幸喜, 堀内泰治, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 小出馨, 杉原弘造 (2014). *超深地層研究所計画, 年度報告書; 2013年度*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Review 2014-038.
42. Iwatsuki T, Hagiwara H, Omori K, Munemoto T, Onoe H (2015). Hydrochemical disturbances measured in groundwater during the construction and operation of a large-scale underground facility in deep crystalline rock in Japan. *Environmental Earth Sciences*. 74(4):3041-3057.
43. 松井裕哉, 新里忠史, 山口雄大 (2006). *幌延深地層研究計画; 平成17年度調査研究成果報告*. 日本原子力研究開発機構. JAEA-Research 2006-073.
44. 須甲武志, 高野仁, 内田雅大, 関陽児, 伊藤一誠, 渡部芳夫, 宗像雅弘, 田中忠夫, 天野健治 (2013). *幌延深地層研究施設周辺の地質環境情報に基づく地下水流動評価手法の検証に関する研究*. 原子力安全基盤機構. JNES-RE-2013-9032.
45. 原子力規制委員会 (2017). *炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(改訂案)*. 第27回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合参考資料 27-2-2.

5. 研究に必要な国内外の情報収集

5.1 国際学会等情報収集

1) 第23回放射性炭素国際学会（ノルウェー・トロンハイム）

・概要

第23回放射性炭素国際学会において、岩盤性状が地下水流動へ与える影響の評価手法の検討に関して、放射性炭素に関わる最新の研究についての情報収集を行った。

日程

6/17：移動（つくばー成田ーコペンハーゲンーオスロートロンハイム）

6/18～6/22：学会参加

6/23～6/24：移動（トロンハイムーオスローコペンハーゲンー成田ーつくば）

・情報収集を行った内容

従来、放射性炭素測定にはタンデム型加速器による二段階加速による分析が行われてきたが、加速電圧を抑えたシングルステージ加速器が普及し始めている。精度の高い放射性炭素測定を実現するためには、同位体分別の補正を行うことが必要であるが、この補正に必要なデータ取得に際して、シングルステージ加速器ではイオン出力の影響を受けることが報告された。受託研究の分析外注で実施する放射性炭素濃度分析について、測定装置に関する情報を得た上で、データの取扱に留意することで、より精度の高い分析が可能となると思われる。また、加速器質量分析計の製造・販売を実施する第3のメーカーの装置の性能報告があり、順調に測定が開始されていることがわかった。

水試料に関連した新規性の高い研究として、水中の溶存有機炭素に関する報告が数件あった。溶存有機炭素の安定同位体分析については、既に多くの研究事例があるが、放射性炭素の分析を実施した例はまだ少なく、その年代差を用いることで海洋におけるリザーバー年代（海洋試料で見かけ上、年代が古くなる海洋リザーバー効果による年代値）を求めるものや、有機物の運搬といった検討が行われている。地下水においても有機炭素は含まれており、それが分解することで、受託研究において分析を行っている対象である地下水中の無機炭素に影響があると考えられる。地下水流動を考慮する上での年代値の算出において、大きな影響を与えるほどではないと考えられるが、厳密な議論を行う上では留意が必要になる可能性がある。

多くの分野で試料処理の自動化が報告されたが、水試料の測定における自動処理についての報告はなされなかった。しかし、自動処理に伴って、全般的に測定数が増加する傾向にあるようで、近い将来には、単一の分析結果のみでの議論が受け入れられなくなることもあり得ると感じられた。

研究コミュニティによる研究室間の相互比較による分析確度の検証についての議論があったが、水試料は対象とされなかった。比較用の試料の配布が難しいことや、測定を実施している研究機関の数が多くないことが原因であると推察され、今後、数年間は対象とされないと思われる。また、相互比較へ参加するのは、試料処理から分析までを実施する機関が対象となっており、例えば水試料が対象となっても、産業技術総合研究所のように前処理のみを実施する機関の参加は困難と思われる。一方、いくつかの機関の研究者との個別の議論を行った限りでは、水試料の標準物質を求める意見は多くあった。このような標準物質が配布できれば、産業技術総合研究所としても利用が可能であり、今後の国際的な動向を注視していきたい。

2) 2018 AGU Fall Meeting

・概要

開催日時：平成30年12月9日～12月16日

場所：Washington DC.

・情報収集を行った内容

アメリカワシントンDCで開催されたAGU Fall Meeting 2018に参加し、断層の連結性に関する情報収集を行ったので、特に重要な内容についてのみ、以下に簡潔にまとめる。

本学会を通して、海外研究者と議論を行い、地震活動やテクトニクスに関する最新の情報を得ることができた。また、断層の連結を考える上で、現在の（自然）地震活動と断層の形成された過去の構造発達史を組み合わせる考えることが重要であると再認識した。一方、断層の連結性には直接関係はしないが、誘発地震の発生メカニズムを理解することも重要であると考えた。なぜなら、地震の発生要因が自然的、人為的のどちらであっても地震メカニズムとしては大差はなく、地震活動が人為的に誘発されたとしたら、その誘発地震の発生域では断層運動が起こっているからである。そのため、幅広い知識を総合的に解釈することは断層の連結を解明するために必要であると考えた。

3) ACES International Workshop

・概要

開催日時：平成30年9月24日～9月29日

場所：兵庫県南あわじ市

・情報収集を行った内容

兵庫県南あわじ市で開催されたACES International Workshopに参加し、断層の連結性に関する情報収集を行ったので、特に重要な内容についてのみ、以下に簡潔にまとめる。

本研究集会に京都大学の深畑幸俊准教授が参加していたため、深畑准教授の作成したプログラムを使用することで、断層の連結過程に関する重要な情報を得ることができないかを深畑博士に相談した。その際に、Fukahata & Matsu'ura^{1,2)}を用いた粘弾性プログラムでは断層の変位を可視化することが可能であるとのことをご助言をいただいた。

5.2 国内学会等情報収集

1) 短い活断層の取り扱い等に関する情報収集（5/6-8：東北大学）

東北大地震・噴火予知観測センターの松澤教授と表層に現れた短い活断層の取り扱いおよび断層の表層から深部にかけての全体像について意見交換を行った。松澤教授からは、表層に現れた短い活断層の取り扱いについては、①表層に見えている割れ目の長さが必ずしも断層長であるとは限らないこと。②断層の形状（破壊の形状）が半円形に近い形状だった場合、表層に見えている割れ目は断層の極一部であり、全体像を表すものではないこと。③マグニチュード7クラスの大規模地震が発生しても地表に残っている痕跡は少なく、大規模地震を起こす可能性のある断層が地下に埋没していることが多いこと。④現在存在する小さい断層は、大規模な断層に成長するフレームワークの一部である可能性が高く、小さい断層が連続して存在するような場所では断層が連結及び成長する可能性が高いこと。のご意見をいただいた。

また、東北大地震・噴火予知観測センターの吉田博士と断層の連結性に関する研究を行う上での震源の再決定や応力場に関して、日本国内の群発地震に対する震源再決定の先行研究についてご教授いただいた。

2) 地球惑星科学連合大会 2018 年大会(5/20-24 : 千葉)

東北大学の遠田教授の発表において、活断層評価をする上で、1) 活断層帯からの回避帯の設定(プロセスゾーンは本当に活断層幅の1/100でいいのか?)、2) 伏在断層存在、といった問題が挙げられた。活断層の幅に関しては、回避帯は1/100で妥当かもしれないが、先端の成長に関しては、上記の規定は適切でない。発表者は、2016年の熊本地震の発生により、阿蘇カルデラ内に伸長した布田川断層について詳細に調べた。その結果、布田川断層の先端の成長速度が3.3 cm/yrであると推測された。この結果は、布田川断層の先端が10万年で3.3 km伸長する可能性を示唆している。このような断層先端の成長速度を推定することは、断層の連結を考える上で非常に重要な知見であると考えられる。

3) 地下水モニタリング及び異常間隙水圧に関する情報収集(10/2-4 : JAEA 幌延)

日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターにおいて、地下水等モニタリングに関する実績に関するヒアリング及び化学浸透圧による異常間隙水圧評価に関する議論を行った。主な論点としては、以下の通りであった。

- ・幌延及び瑞浪で実施されている地下水モニタリングの概要及びデータが収録されているレポートの紹介
- ・稚内層の空隙構造、粘土の組成と浸透圧の発生の関係に関する評価方法
- ・応力変化と浸透圧、拡散係数、反射係数の関係に関して、JAEA データとの比較

4) 日本地震学会 2018 年度秋季大会(10/8-11 : 郡山)

主な情報は以下の通り

内陸地震の断層形状として、お椀型(Iio, et al. ³⁾)が指摘されている。このお椀型の断層の形成の要因として、断層の両端と下部において柔らかい領域が存在し、その領域において応力緩和が生じているからであると考えられる。そのため、そのような柔らかい領域が存在する地域では、大規模地震も単発で発生することが可能である(つまり連動しない)。上記から、断層端における応力集中と応力緩和は断層の連結を考える上で考慮すべき事象であると判断した。

5) 2018 年度日本水文科学会学術大会(10/13-14 : 京都)

- ・国内の浅層地下水系の年代・地下水流動に関する事例研究などの情報収集

地下水の年代・滞留時間に関しては、1970年代以降に待機中に急激に濃度が増加している人為起源のSF6をトレーサーとした浅層地下水の年代測定に関する講演があり、SF6により流出域の水に対する高解像度な年代解析が行われていた。大気中のトリチウムの濃度が低下し、滞留時間数十年程度の地下水に対する年代測定に対する適用性・信頼性が低下する上で、SF6の適用は今後重要となることが考えられる。

- ・深層地下水の循環、若い地下水年代測定技術などの情報収集

福島北部沿岸域の地下水・湧水の滞留時間の推定に関する講演があり、10/13の上記講演と同様に若い地下水の年代測定が行われていた。用いた手法はトリチウムに加えて、CFCs、SF6であり、CFCsとSF6とトリチウムによる年代の整合性が確認されていた。ただし、トリチウム分析用の水試料採取に制限がない一方で、CFCsとSF6は空気と触れない水をとるの必要があり、未だ制限があるという指摘があった。また、より深層の地下水の年代

測定に対する年代測定は、 4He を用いた手法が適用されていた。しかし、 4He 濃度から年代を導くに当たって考慮すべきパラメータなどの考察が浅く、 4He を用いた手法の適用方法に留意する必要が感じられた。

6) 不連続面の再滑動性実験に関する情報収集 (1/10-11 : 長崎)

長崎大学システム科学部門の蔣宇静教授と、不連続面の再滑動性の実験的研究について意見交換を行った。蔣宇静教授の実験装置と実験内容について説明をしていただき、海底地すべり面再活動性評価用一面せん断試験装置に関して、間隙水圧の制御方法及び鉛直剛性の制御方法についてご意見をいただいた。特に、鉛直剛性を制御できる一面せん断試験装置の詳細、せん断面の損傷状態の可視化技術、及び透水試験で重要なせん断面の止水に関するノウハウについてご教授いただいた。また、せん断面に断層ガウジを有する岩石試料に関しての実験的研究内容と、岩石試料が部分的に不飽和状態である場合の透水性や力学特性の変化について意見交換を行った。

【引用文献】

1. Fukahata Y, Matsu'ura M (2005). General expressions for internal deformation fields due to a dislocation source in a multilayered elastic half-space. *Geophysical Journal International*.161(2):507-521.
2. Fukahata Y, Matsu'ura M (2006). Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem. *Geophysical Journal International*.166(1):418-434.
3. Iio Y, Shibutani T, Matsumoto S, Katao H, Matsushima T, Ohmi S, Takeuchi F, Uehira K, Nishigami K, Miyazawa M, Enescu B, Hirose I, Kano Y, Kohno Y, Tatsumi K, Ueno T, Wada H, Yukutake Y (2009). Precise aftershock distribution of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake-Implication for a very weak region in the lower crust. *Phys Earth Planet In*.172(3-4):345-352.

【付録】 検討委員会の開催

【仕様書記載内容】

本事業の受託者は、専門性を有する4名程度の外部有識者で構成する「平成30年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（自然事象等の評価手法に関する調査）事業」に関する検討委員会を設置する。検討委員会は年3回程度開催し、それぞれの調査に関して検討内容及び結果の妥当性を専門性の観点から検討し、適宜修正・改善等を行う。委員の選定については選定理由も含めリストを作成し、当庁と調整することとする。

なお、本事業を円滑に進める観点から、検討委員会には、当庁職員及び当庁委託事業である「平成30年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（廃棄物埋設地の性能評価手法に関する調査）事業」の受託者がオブザーバーとして参加するものとする。同様に、本事業の受託者は上記「平成30年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（廃棄物埋設地の性能評価手法に関する調査）事業」において設置される検討委員会にオブザーバーとして参加するものとする。

【実施内容】

1) 検討委員会委員等の選定

検討委員会委員は、原子力規制庁と協議の結果、以下の方々に委嘱した。

- ・応用地質学専門家1名
- ・第四紀学専門家1名
- ・岩盤力学専門家1名
- ・水文学専門家1名 計4名

検討委員会には、委託元である原子力規制庁及び「平成30年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（廃棄物埋設地の性能評価手法に関する調査）事業」の受託者である、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究センターがオブザーバーとして参加した。また、廃棄物埋設地の性能評価手法に関する調査事業の検討委員会には、グループ長1名がオブザーバーとして参加した。

2) 検討委員会の開催

検討委員会は、2018年6月7日、2018年11月21日、2019年2月26日の3回開催し、それぞれ第一回検討委員会では実施計画、第二回検討委員会では中間成果、第三回検討委員会では最終成果案についての検討及びご意見を伺った。第一回検討委員会結果は、事業の個別課題の進め方に反映し、第二回及び第三回検討委員会結果は、最終報告書の内容に反映された。