4.4 地下水の地球化学に関する調査研究

4.4.1 実施概要

2005 年度は，第 2 段階の調査研究として，研究坑道の掘削と並行した研究所用地に内における地下水水質の連続観測を行い，研究坑道の掘削が周辺の地球化学環境に与える影響を把握することにより，第1段階で構築したサイトスケールの地球化学モデル[18)]の妥当性を確認し，それを適宜更新した。さらに，第 2 段階の課題として挙げられた，モデルの検証や地下水中の溶存ガスに係るデータの取得，脱ガスの影響のない酸化還元電位の把握などを解決するための調査研究を実施した。

なお，2005 年 10 月の研究坑道からの排水停止に伴い，研究坑道内での調査を中断したため，研究所用地内における地下水水質観測は浅層ボーリング孔を中心に実施した。

4.4.2 実施内容

(1)地下水の地球化学特性に関するデータ取得

①立坑壁面および集水リングを用いた坑内湧水の採水分析

第 1 段階で構築した地球化学モデルの妥当性を評価すること，地下施設の建設が地質環境に与える影響を評価することを主目的として，立坑壁面での切羽湧水および集水リングにおける坑内湧水を採水し，測定・分析を実施した。採水の頻度は，切羽湧水が観察時の 1 回，集水リング湧水がリング構築後から 6 ヶ月間は 1 回／週，それ以降は 1 回／月である。測定・分析項目は，水温，pH，酸化還元電位，電気伝導度，溶存酸素，蛍光染料濃度，主要・微量成分，溶存ガス，安定・放射性同位体（年2回）などである。

○壁面湧水（図 4.4-1）

・pH：深度 80m 程度まで深度の増加とともに上昇し（pH7→10），深度 120m以深では 8～10 の範囲である。

・Na^+, Cl^-：深度とともに濃度が上昇している。

・F^-,B：深度 120m まで深度とともに濃度が上昇し，これ以深ではほぼ一定となる。

これらの傾向は，研究所用地内の浅層ボーリング調査結果[18)]と整合している。

○集水リング

2005 年度に取得したデータでは（図 4.4-2），時間経過に伴い，地下水水質が変化していることがわかった。この水質変化は研究坑道からの排水停止が原因であると考えられる。Cl^-濃度を例とすると，排水停止期間中（2005 年 10 月 27 日～2006 年 2 月 20 日）に濃度が上昇していることから，より濃度の高い深部の地下水が立坑を大規模な水みちとして浅部に流入した結果である可能性が高い。

また，集水リングに集められる地下水については，覆工コンクリートと接触している可能性や，立坑からの排水停止による水没，その後の排水の再開による影響を受けている可能性がある。このことを踏まえて，2006 年度以降も観測を継続してデータを蓄積することにより，地下水水質変化の把握，その変化に関わるプロセスの考察，集水リングを活用した水質データの取得手法の有効性の検討などを進めていく予定である。

②100m 予備ステージにおけるボーリング掘削，地下水水質観測

100m 予備ステージから，掘削長 86m のボーリング孔（05MI01 号孔）を掘削し，水質の連続モニタリング装置を設置した（図 4.4-3）。しかし，深度 100m 以深の立坑の掘削を進めることにより，品質を確保した水質の観測に必要な量の湧水が得られなくなったことおよび，立坑からの排水を停止したことから，水質観測を中止した。図 4.4-4 には，水質連続モニタリング装置を設置した直後に取得したデータの一部を示した。これらの測定では，上述の理由により信頼性のある測定値を得ることができなかった。

③地表からのボーリング孔を用いた地下水長期観測（水質）

研究所用地内の浅層ボーリング孔（MSB-2,4 号孔）において，1 回／月の頻度で水圧観測および地下水の採水・分析を実施した。

間隙水圧については，立坑掘削に伴い周辺地下水が立坑へ流入することによって，水圧の低下が認められた（図 4.4-5）。また，2005 年 10 月から 2006 年 2 月の間，立坑排水を一時停止したことから，MSB-2 号孔の間隙水圧は，2005 年 12 月に掘削前の水圧程度まで回復した。

地下水中の溶存化学成分については，複数の元素で立坑の掘削と排水停止による影響と考えられる濃度の変化が確認された（図 4.4-6）。

(2)モデル化・解析

①地球化学データの品質評価システムの構築

地下水の採水～化学分析に至るまでのプロセスを対象に，データの品質を評価する手法を構築した。データの品質評価には TESLA (The Evidence Support Logic Application)を用いた。TESLA は，ESL (Evidence Support Logic) [19),20),21),22),23)]に基づいたソフトウェアであり，設定した仮説がどのような根拠によってどの程度の信頼性を持つかを定量的に評価できる特徴を持ち，評価過程を階層モデル化し，様々な根拠に基づいて，仮説の真偽およびそこに含まれる不確実性を定量的に評価することを目的として開発されたものである。このソフトウェアを用いることで，データの品質を評価するための項目（掘削水による汚染率，脱ガスの有無，物理化学パラメータの測定方法など）について，得られた地下水データの各項目（pH，酸化還元状態，化学組成，同位体組成等）がどの程度の品質なのかを定量的に評価することが可能である。品質評価のための TESLA では，図 4.4-7 に模式的に示したようなプロセスモデルと呼ばれる品質評価指標を，関連する項目ごとにまとめ，系統的に品質評価を行うための基礎を構築する必要がある。今回は，以下の手順でプロセスモデルを構築した。

(a)元素の溶解，化学形態，吸着/収着に影響を与える地球化学データの把握
(b)地下水に汚染と化学的擾乱を起こす要因の抽出
(c)他の考慮すべき要因の抽出
(d)それぞれの要因における適・不適の基準の設定

(a)については，ここでの研究の反映先は，地層処分の基盤となる技術開発であるため，放射性核種の移行特性に影響を与える地下水データ（pH や Eh など）について，品質を評価するためである。(b)および(c)については，データに直接影響を与える項目（地下水以外の水との混合など）と間接的に影響を与える項目（分析時の誤差など）について項目毎にまとめた。(d)については，(b)および(c)で決定した項目が，どのような状態であれば品質に影響を与えないとするのかの判断基準を決定した。

今回はこれまでに採取した地下水の pH について，試行的に品質評価を行った。設定する仮説は「測定した地下水の pH が原位置の値を反映している」とする。この仮説を証明するための項目は，

・掘削水による汚染が十分に低い，
・掘削水以外の証拠からも十分に仮説が支持される，

の二つに区分できる。前者については，採取試料への掘削水の混入率が主な観点であり，後者については，測定方法や測定機器の精度や測定時のばらつき，化学分析結果におけるイオンバランスなどが挙げられる。pH の品質評価を行う過程では，全体で 65 の項目から品質を評価した。

TESLA を用いて品質評価を行い，一定以上の品質であることを確認したデータと，品質を評価していない全てのデータについて，pH の深度に対する傾向を比較した。その結果，品質を評価していない全てのデータでは pH が 8～12 の範囲に分布したのに対し（図 4.4-8(a)），一定の品質以上のデータでは，pH8～10 のより狭い範囲に分布した（図 4.4-8(b)）。品質が低いと判断された試料に共通する要因としては，ボーリング孔掘削中に使用した掘削水による汚染率が高い，もしくは品質管理が不十分なために汚

染率を把握できない，採水区間長が長い，採水前の排水量が適切でない，ことなどが挙げられる。この結果から，地下水の品質評価結果を研究に反映させることで，より正確に地下深部における地球化学環境を把握できる可能性を示すことができた。

(3)地下水水質の長期変遷に関する調査

地下深部における地下水の長期的変遷を推定するため，土岐花崗岩中の割れ目に産出する方解石を対象として調査を行った。対象とした試料は土岐花崗岩中の割れ目に産する方解石であり，これらの試料について SEM およびルミノスコープでの微視的観察と，流体包有物の分析を行った。

SEM およびルミノスコープによる微視的観察の結果，沈殿時期を 4 段階に区分することができた（古い時代からI～IV に区分，図 4.4-9）。I 以外の世代については自形を示す。方解石の結晶形は沈殿時の地下水水質に依存することが知られており [24),25)]，II および IV が示す結晶形は，淡水系の地下水から沈殿したと考えられ，III が示す伸長した結晶形は塩水から沈殿した可能性が高い。他方，流体包有物は II および III の方解石にのみ確認でき，多くの流体包有物の塩濃度は 1wt% NaCl Eq. 未満の値を示した。ただし，II の方解石では 3 wt % NaCl Eq.を，III の方解石では 4 wt % NaCl Eq.を超える塩濃度を示す流体包有物が確認できた。

これらの結果は，方解石が沈殿する過程において，淡水（II の方解石沈殿時），海水（III の方解石沈殿時），淡水（IV の方解石沈殿時）と，地下水の塩濃度が変化したことを示す。ただし，流体包有物の塩濃度の解析においてII および III の方解石の間に明瞭な差が認められなかったことから，これらの変化は漸移的であったと考えられる。また，これらの変遷を地史学的な視点から検討した場合，瑞浪層群は下位から上位へ堆積する過程で，湖成層から海成層へと堆積環境が変化している。さらにその上位の瀬戸層群は再び淡水の環境下で沈澱している。これらのことから，今回の方解石の解析結果は，この履歴を反映しているとも考えられ，海進による海成層の堆積と，塩濃度の高い地下水からのIIIの沈殿が同じイベントの結果である可能性が考えられる。

今回の結果から，方解石の微視的観察と流体包有物の解析により，過去の地下水水質の変化を把握できる可能性を示した。今後は，得られた結果を現在の地下水の化学環境と比較し，地史や方解石から得られる環境同位体などのデータに基づき，各世代の方解石とそれらを沈殿させた地下水の対比をより正確に行い，地下水の起源等を把握することにより，本手法をより確実なものにしていく。

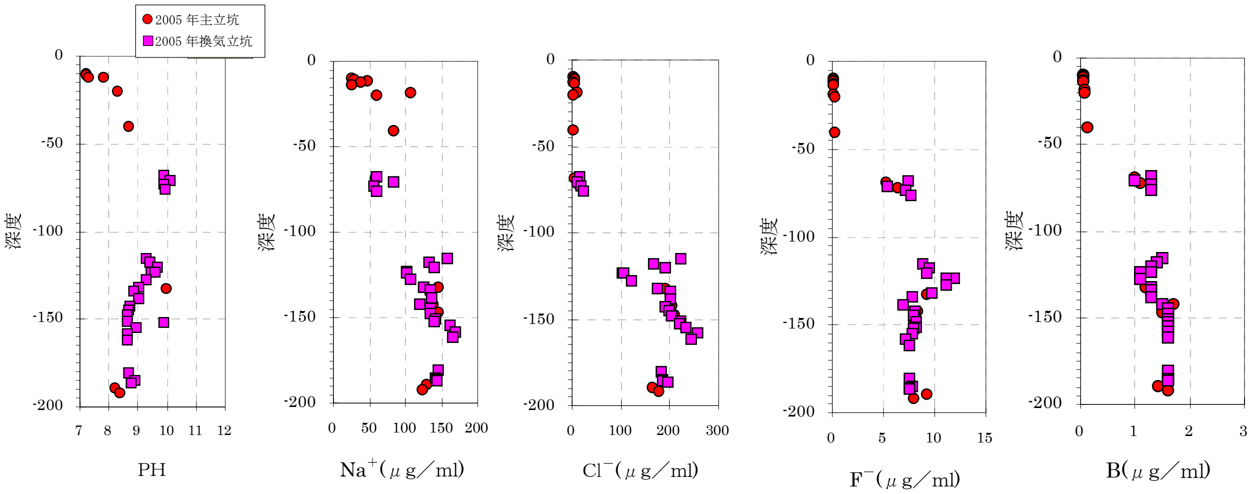
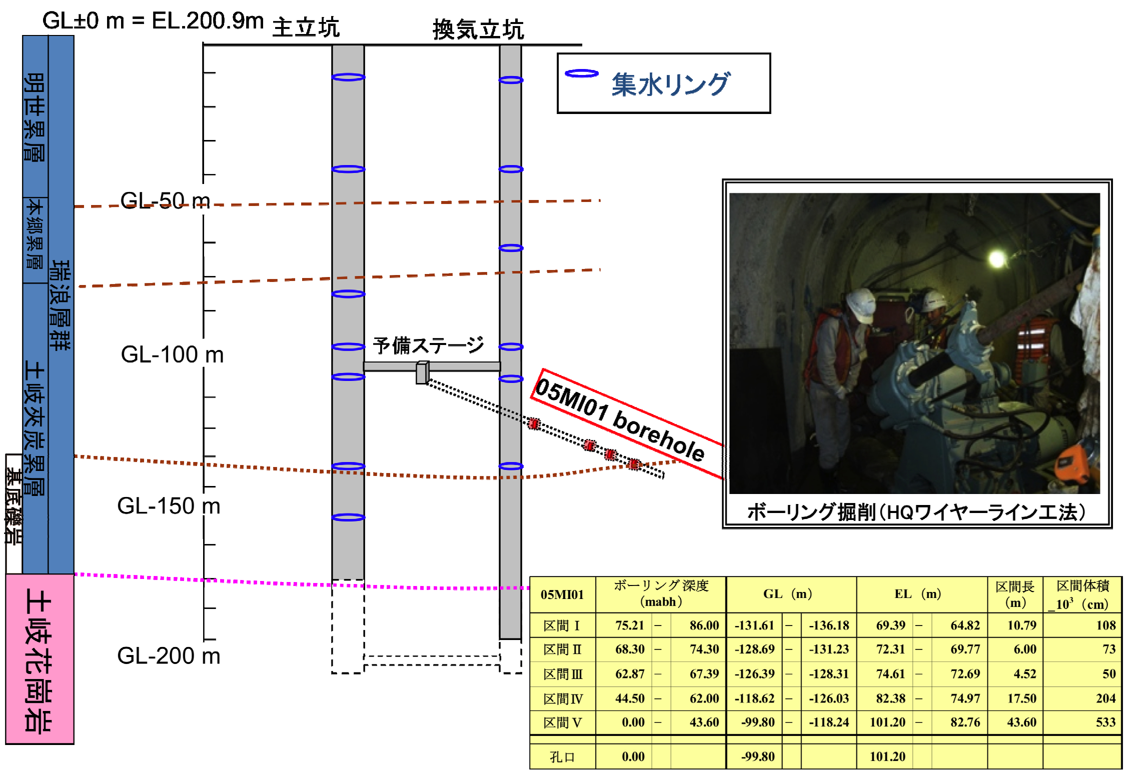
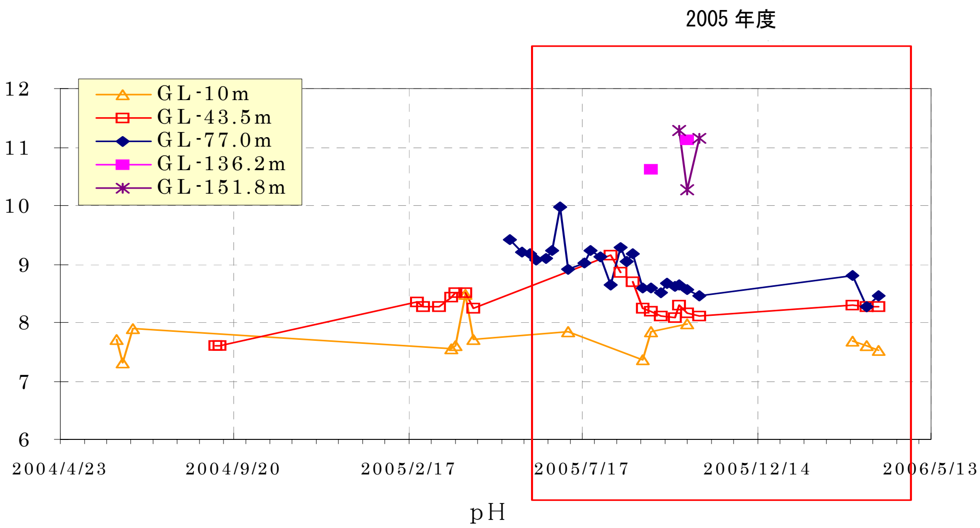


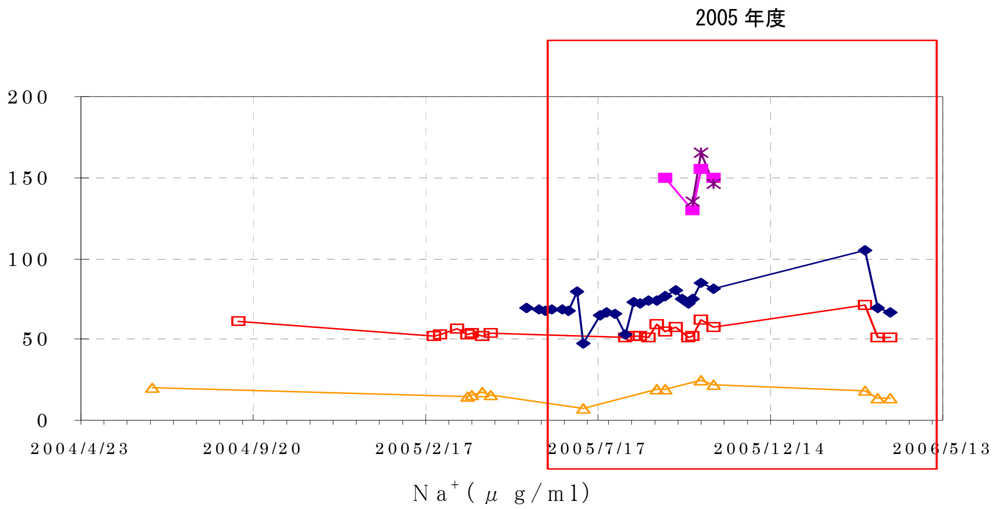
図 4.4-1　地下水水質分析結果（立坑壁面湧水）



05MI01	ボーリング深度 (mabh)			GL (m)			EL (m)			区間長 (m)	区間体積 _10^3 (cm)
区間 I	75.21	–	86.00	-131.61	–	-136.18	69.39	–	64.82	10.79	108
区間 II	68.30	–	74.30	-128.69	–	-131.23	72.31	–	69.77	6.00	73
区間 III	62.87	–	67.39	-126.39	–	-128.31	74.61	–	72.69	4.52	50
区間 IV	44.50	–	62.00	-118.62	–	-126.03	82.38	–	74.97	17.50	204
区間 V	0.00	–	43.60	-99.80	–	-118.24	101.20	–	82.76	43.60	533
孔口	0.00			-99.80			101.20				

図 4.4-3　05MI01 号孔のレイアウト





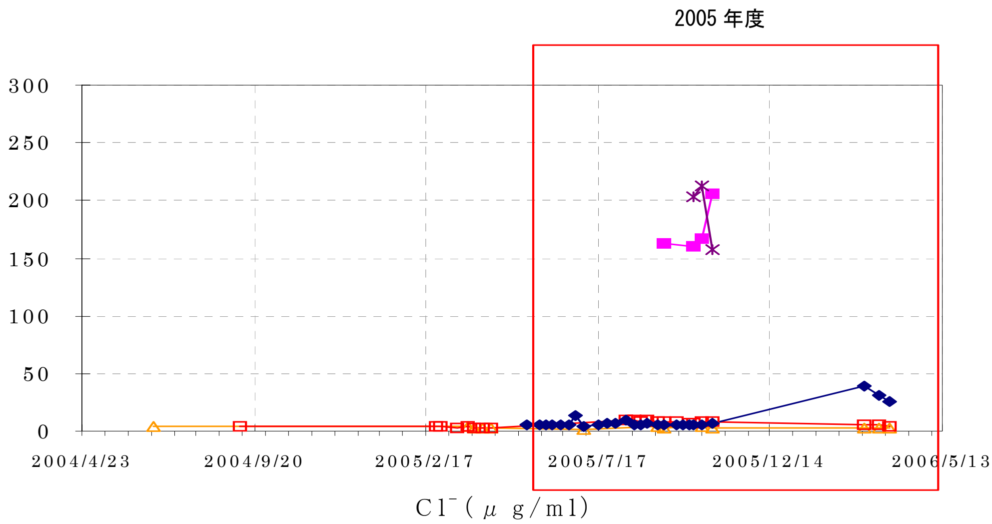


図 4.4-2(a) 地下水水質分析結果(主立坑 集水リング)

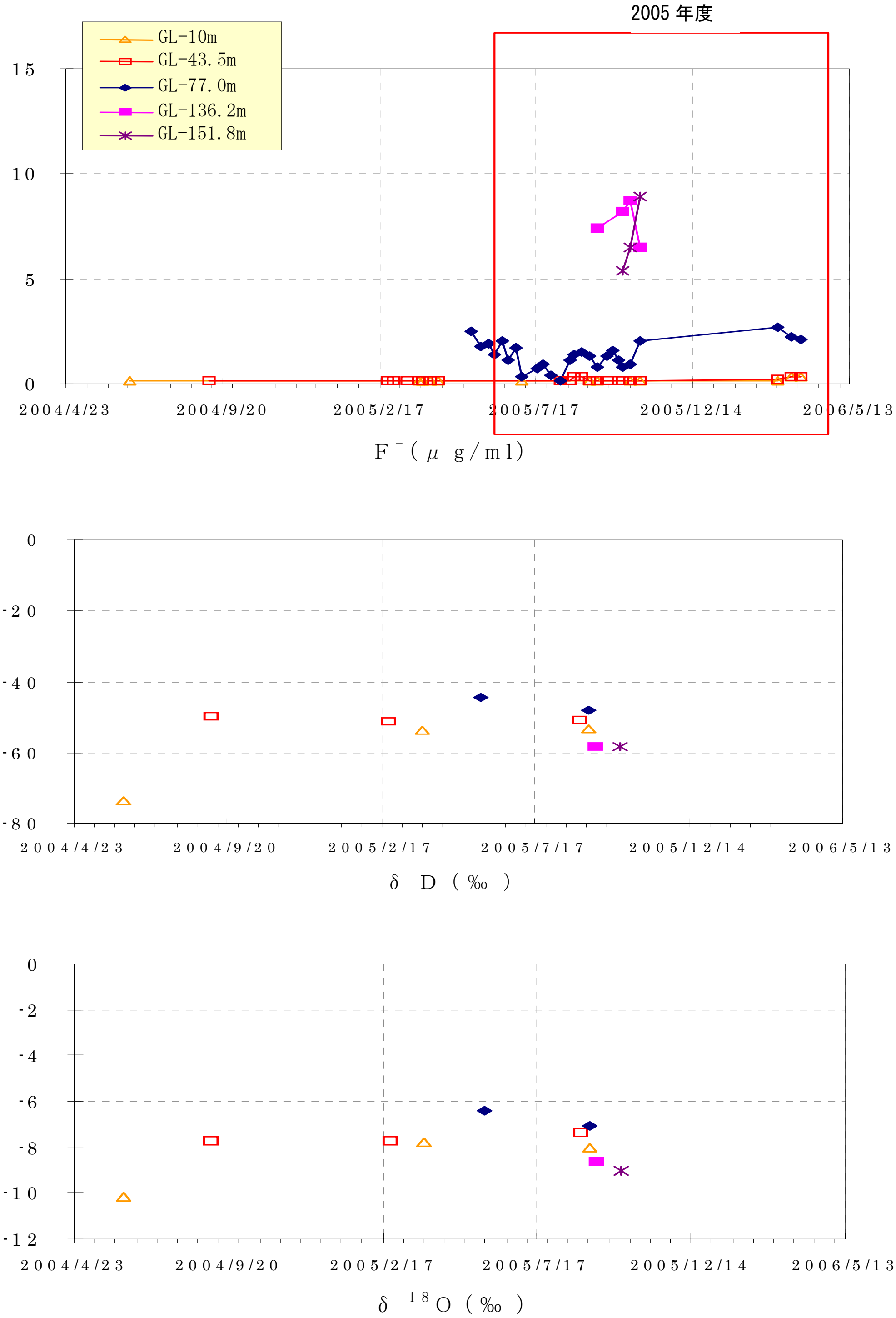


図 4.4-2(b) 地下水水質分析結果(主立坑 集水リング)

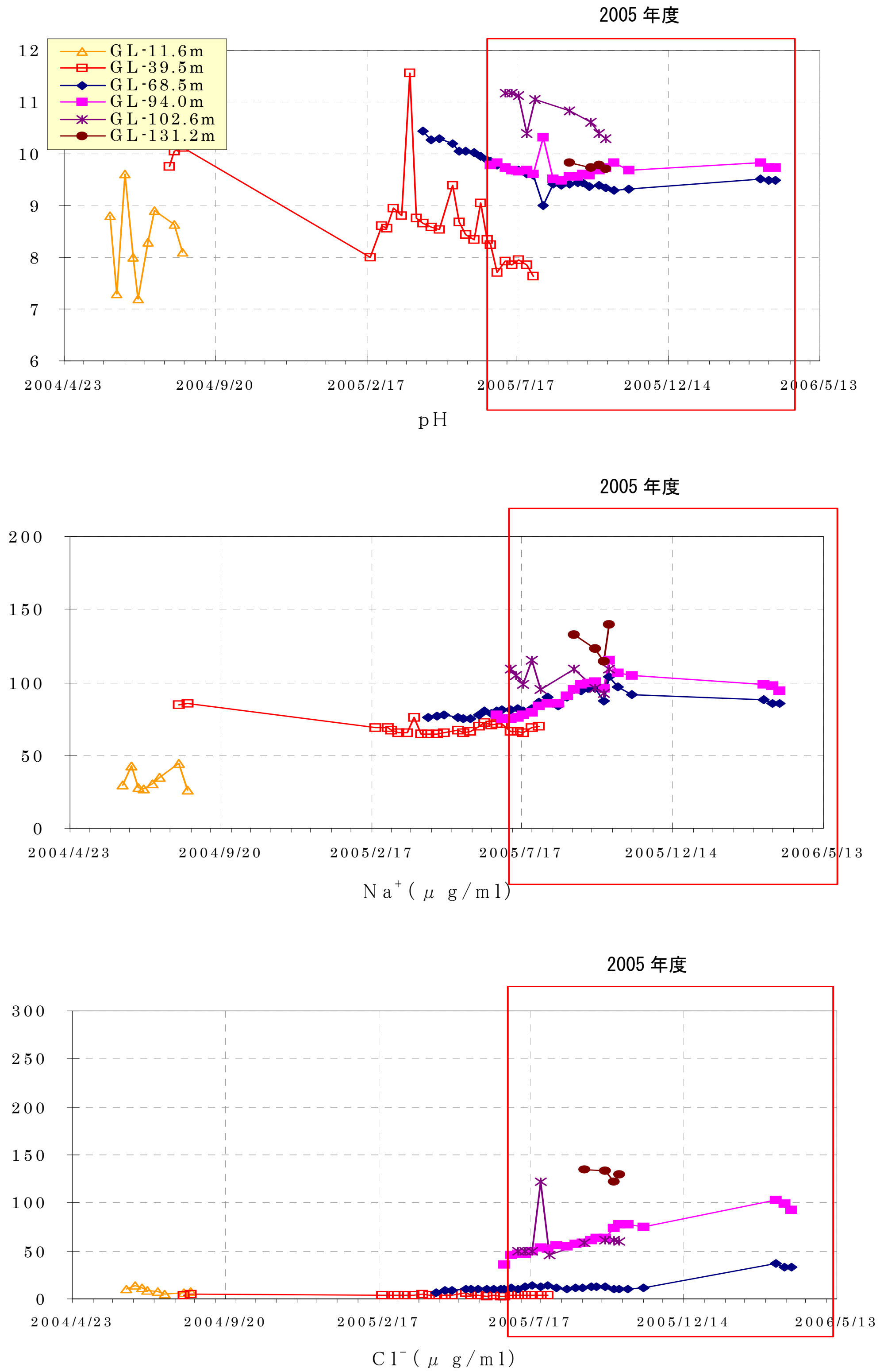
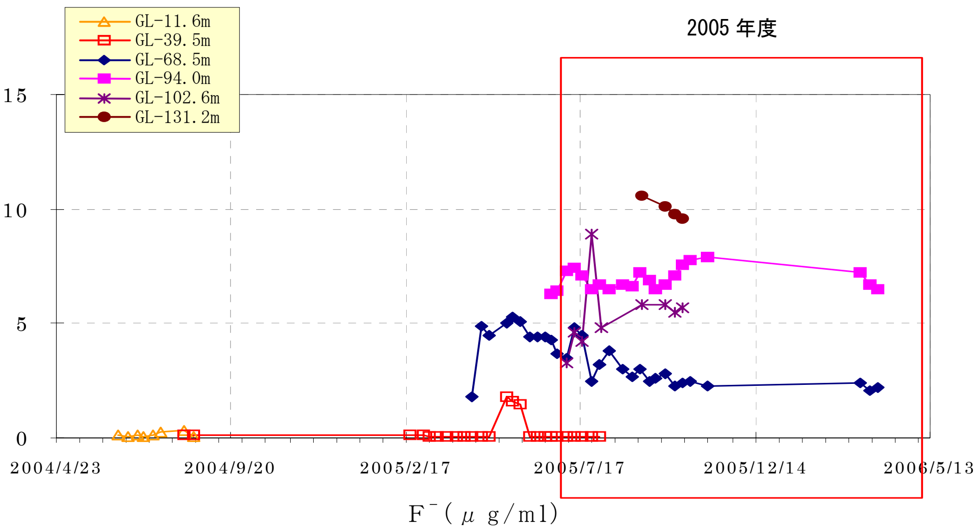
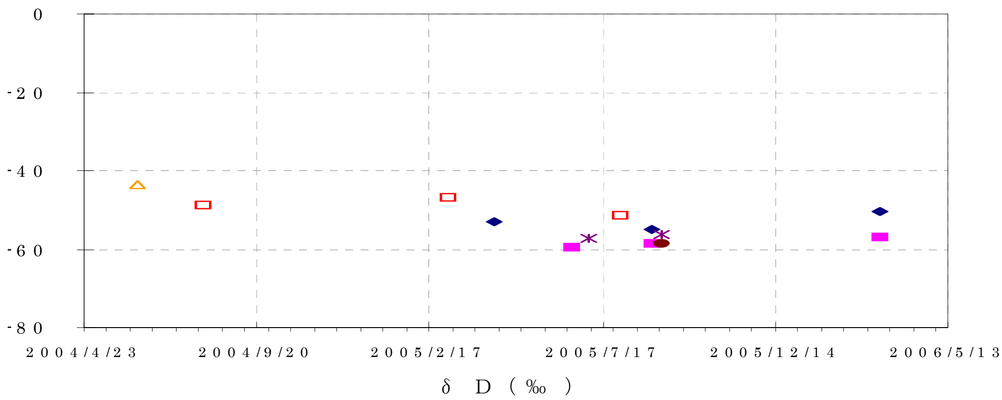


図 4.4-2(c) 地下水水質分析結果(換気立坑 集水リング)





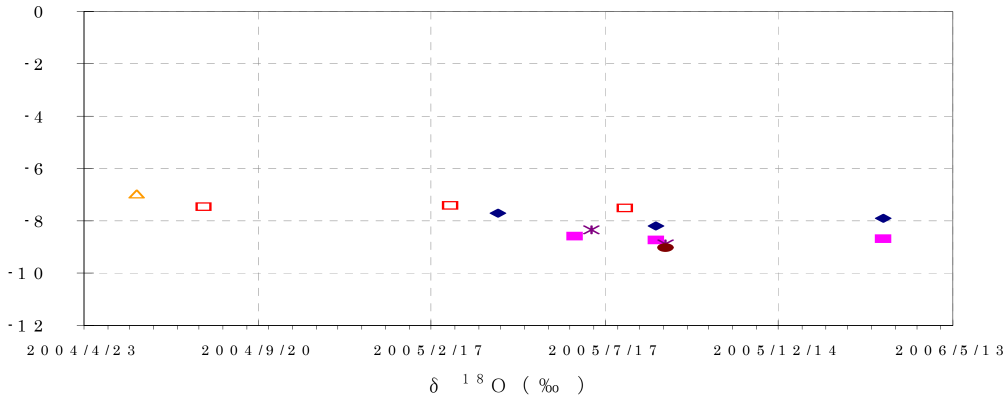


図 4.4-2(d) 地下水水質分析結果(換気立坑 集水リング)

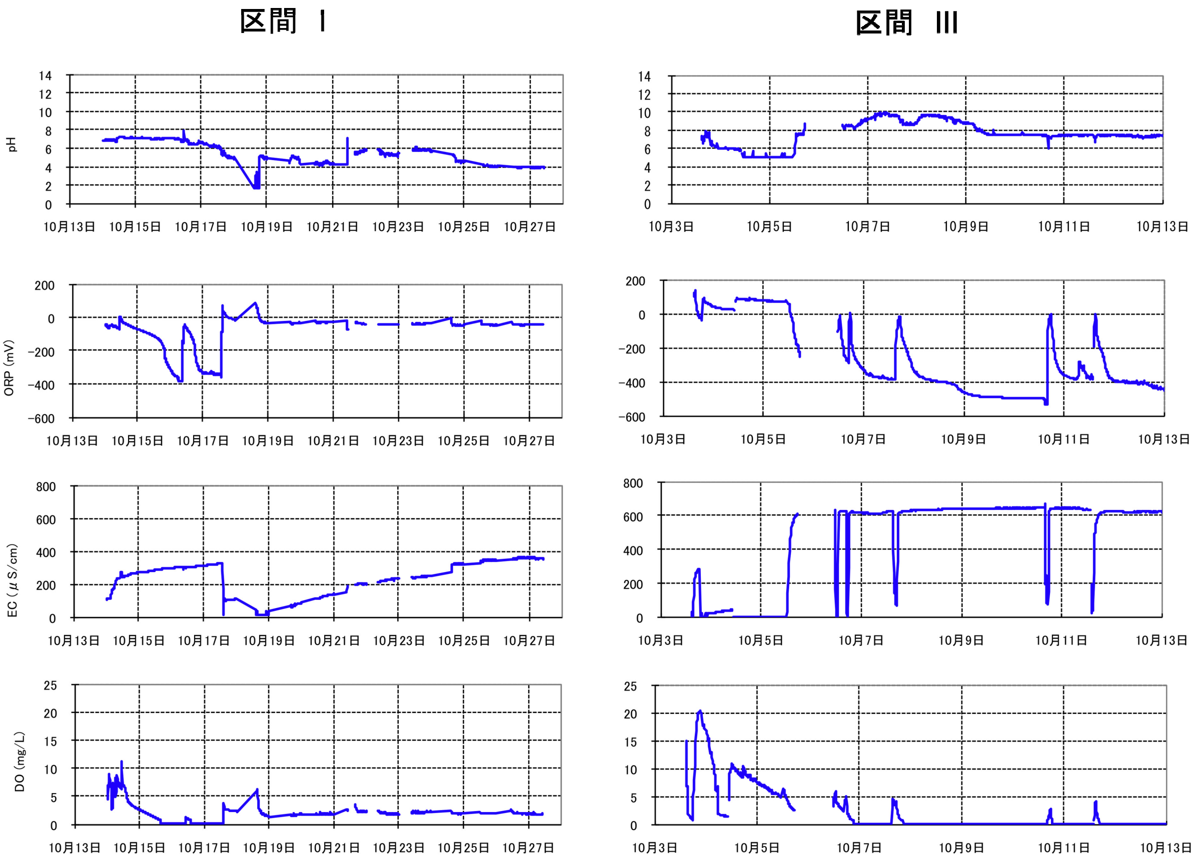
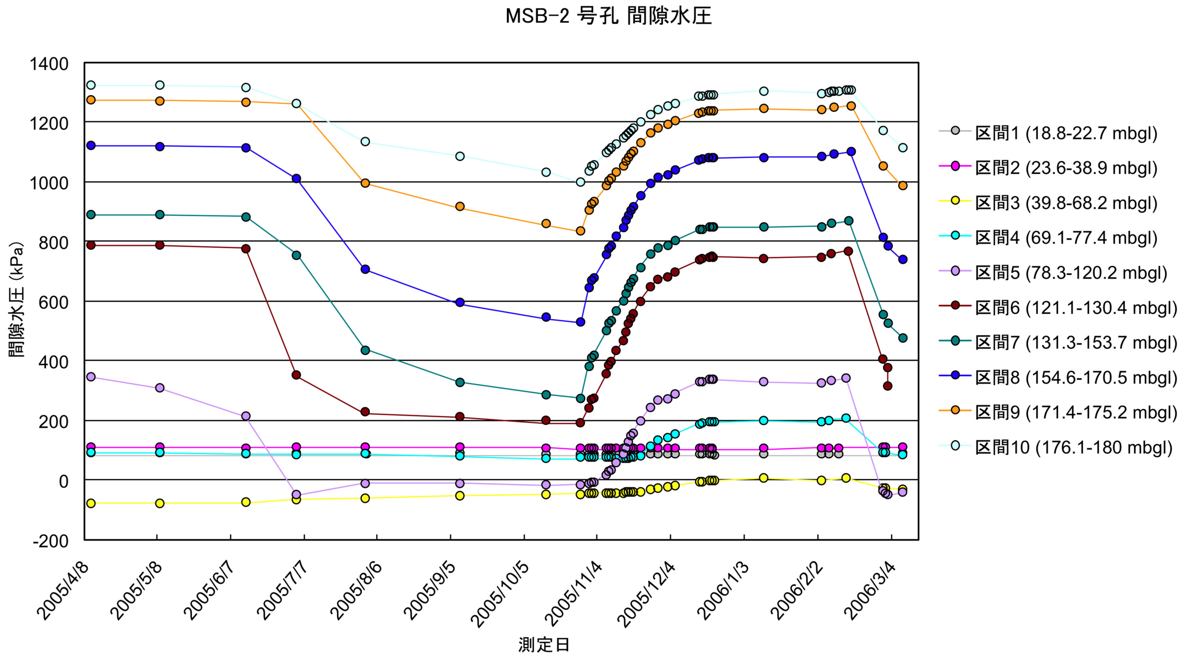


図 4.4-4 05MI01 号孔における水質モニタリング結果の例



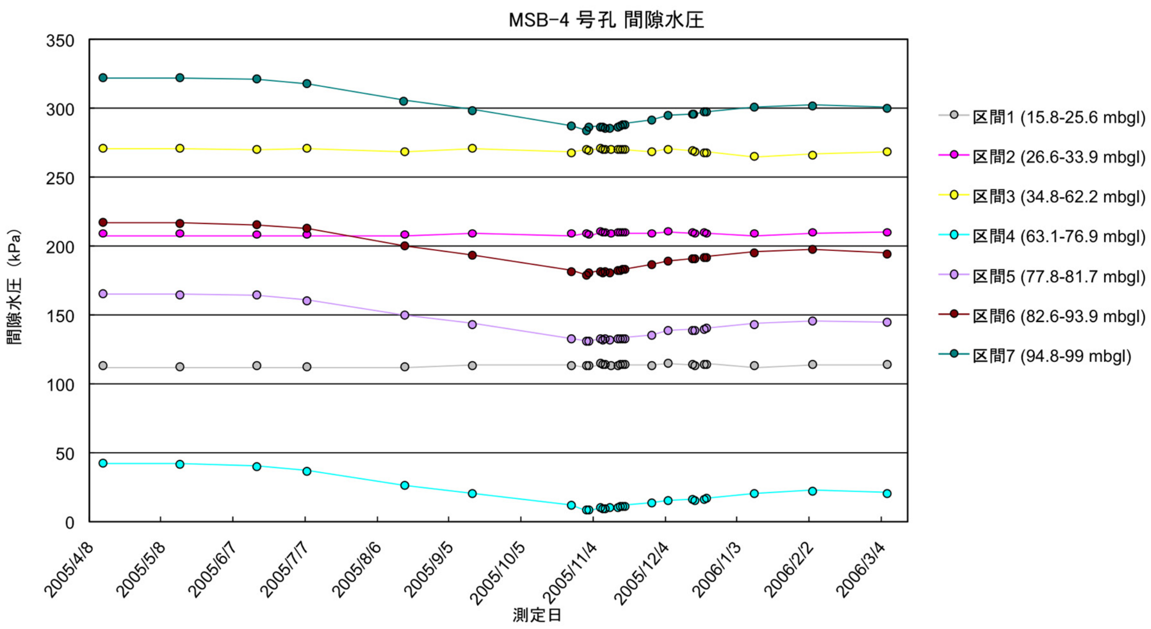
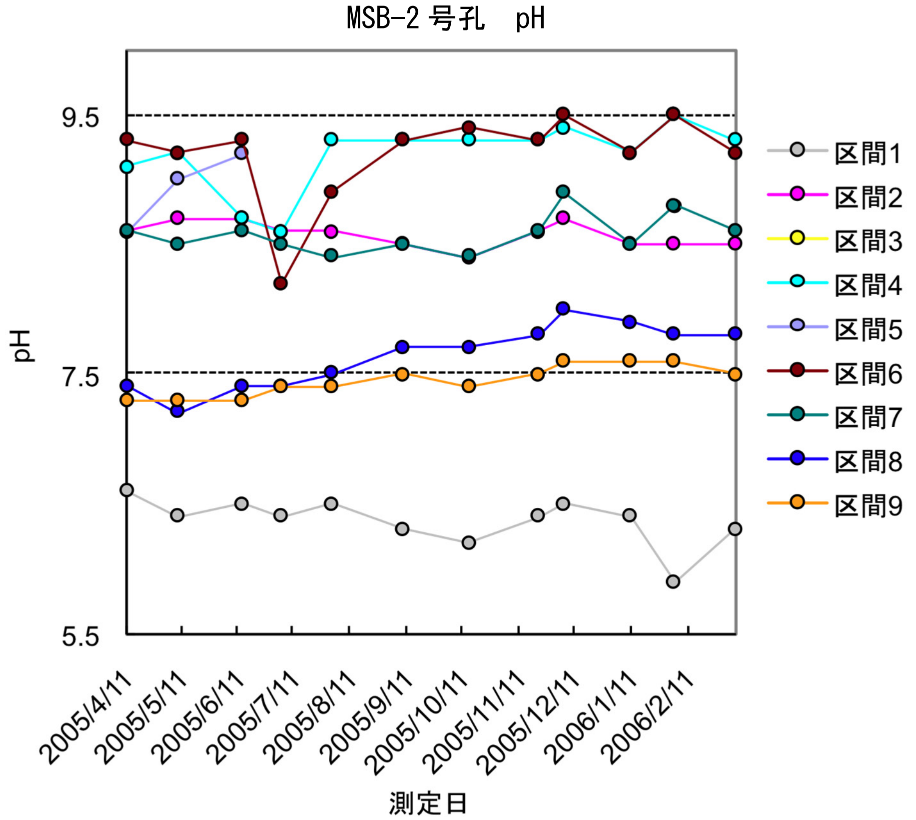


図 4.4-5 浅層ボーリング孔における水圧観測結果の例



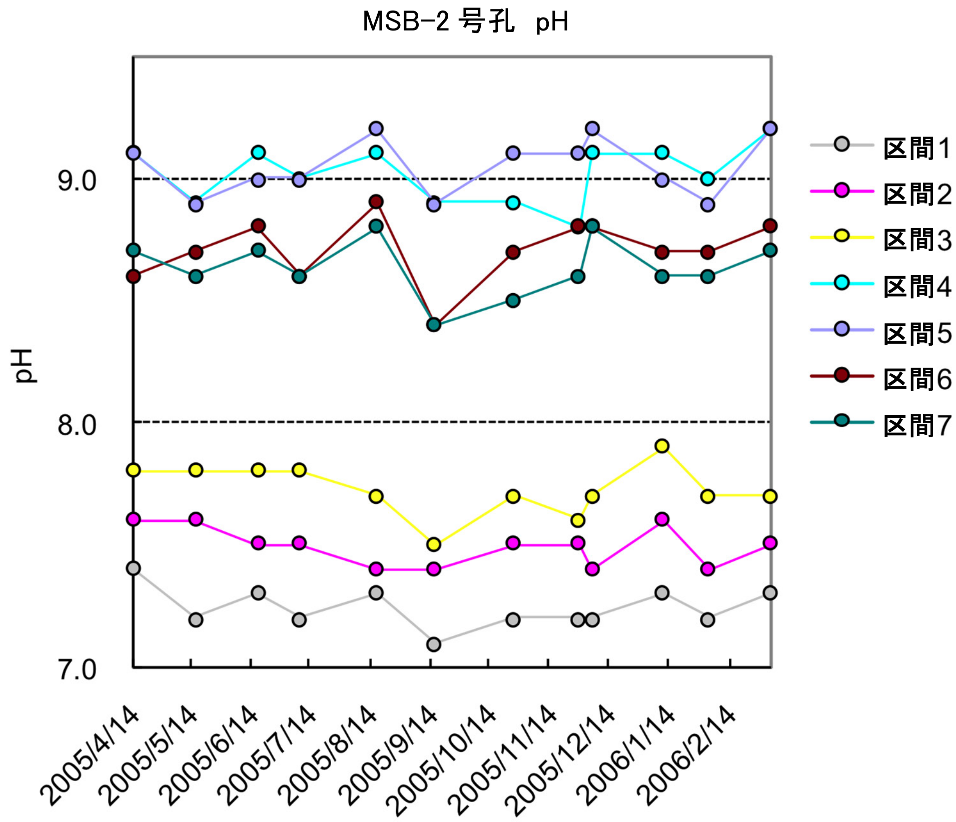
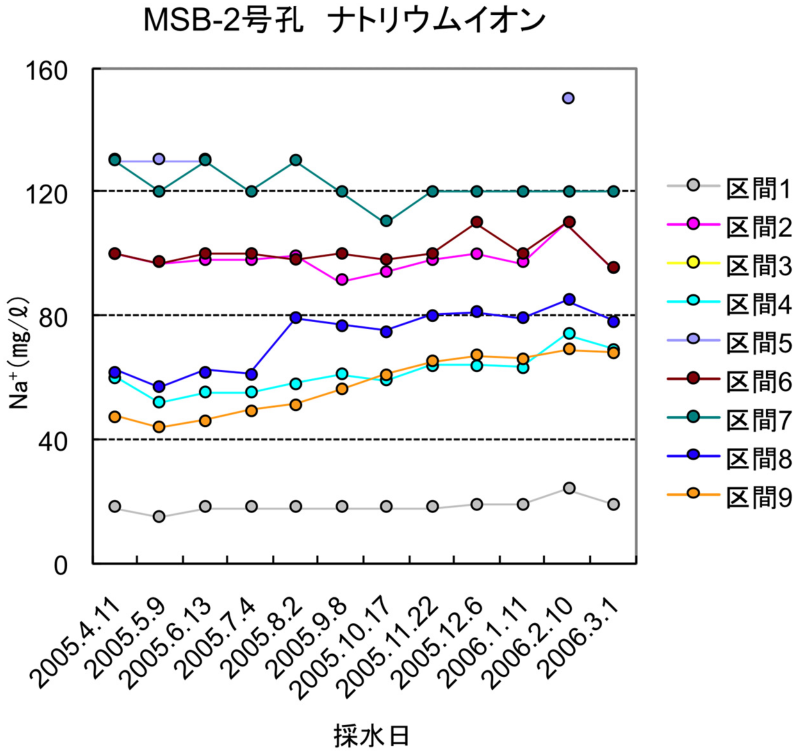


図 4.4-6(a) 浅層ボーリング孔における水質観測結果

※各区間の深度は図 4.4-5 と同じ



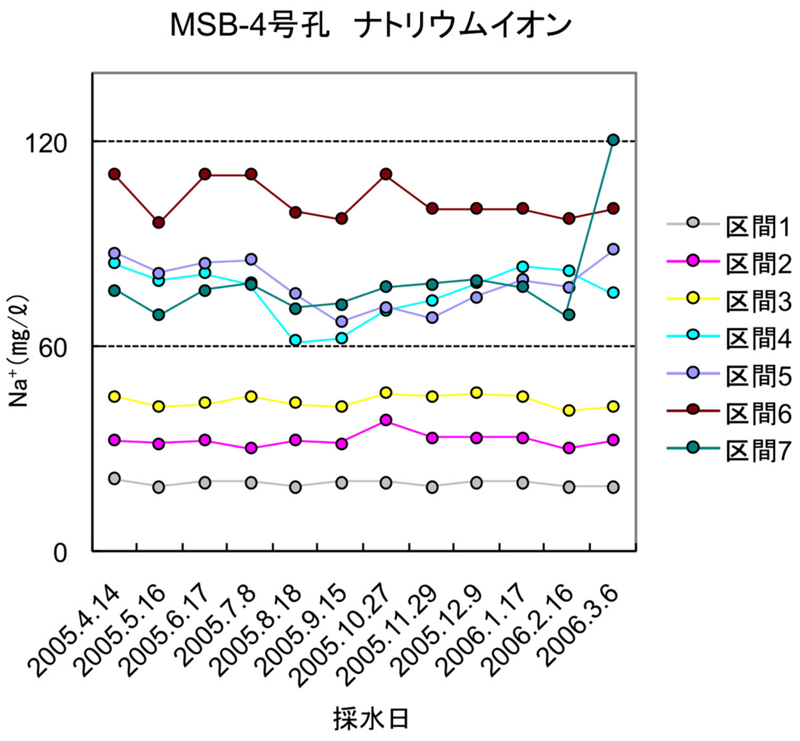
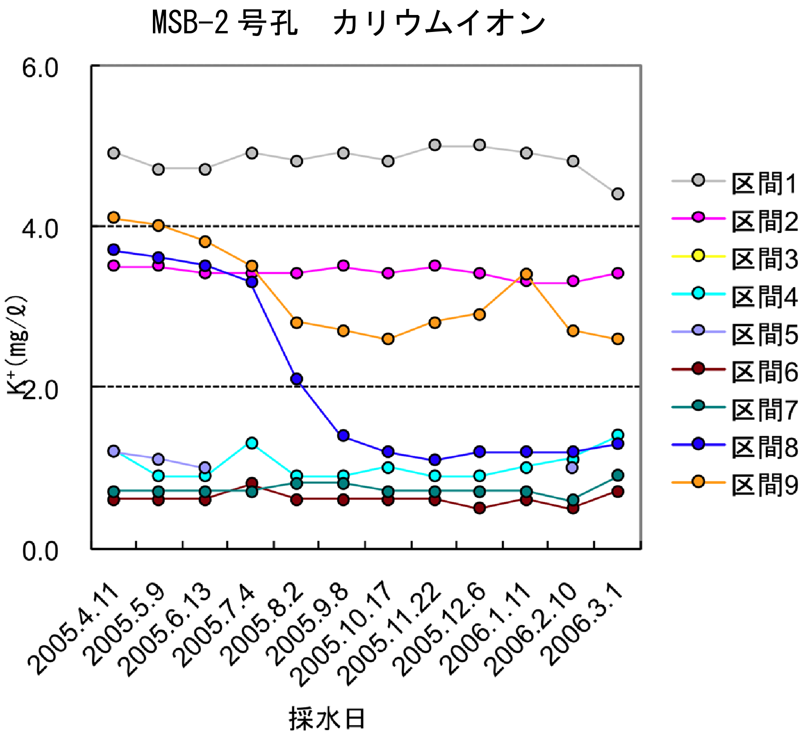


図 4.4-6(b) 浅層ボーリング孔における水質観測結果

※各区間の深度は図 4.4-5 と同じ



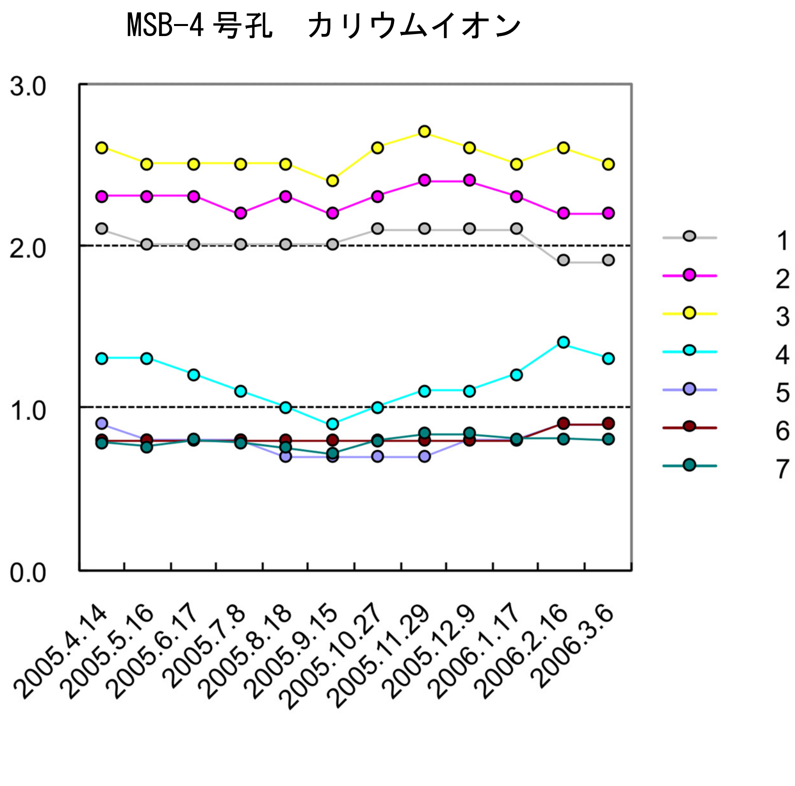


図 4.4-6(c) 浅層ボーリング孔における水質観測結果

※各区間の深度は図 4.4-5 と同じ

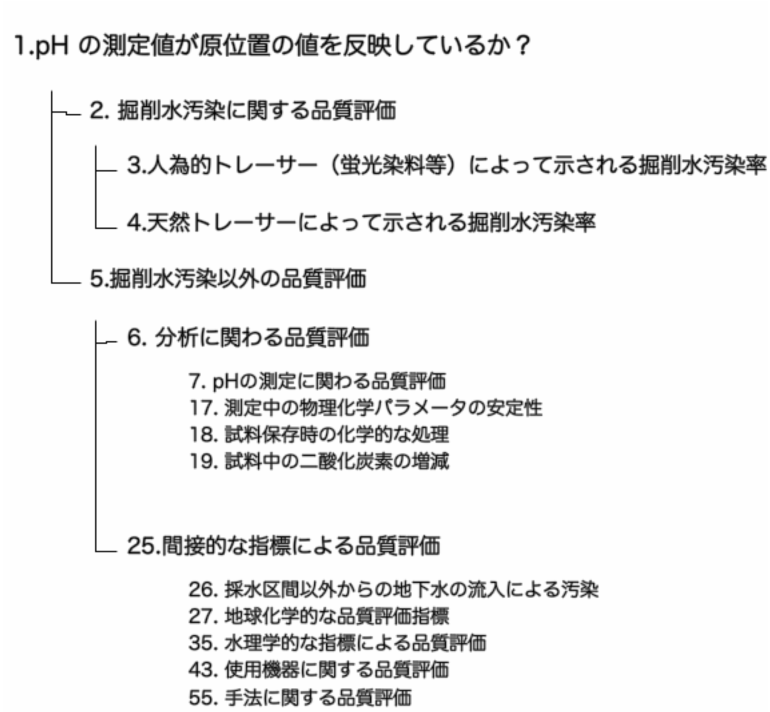


図 4.4-7 模式的なプロセスモデル

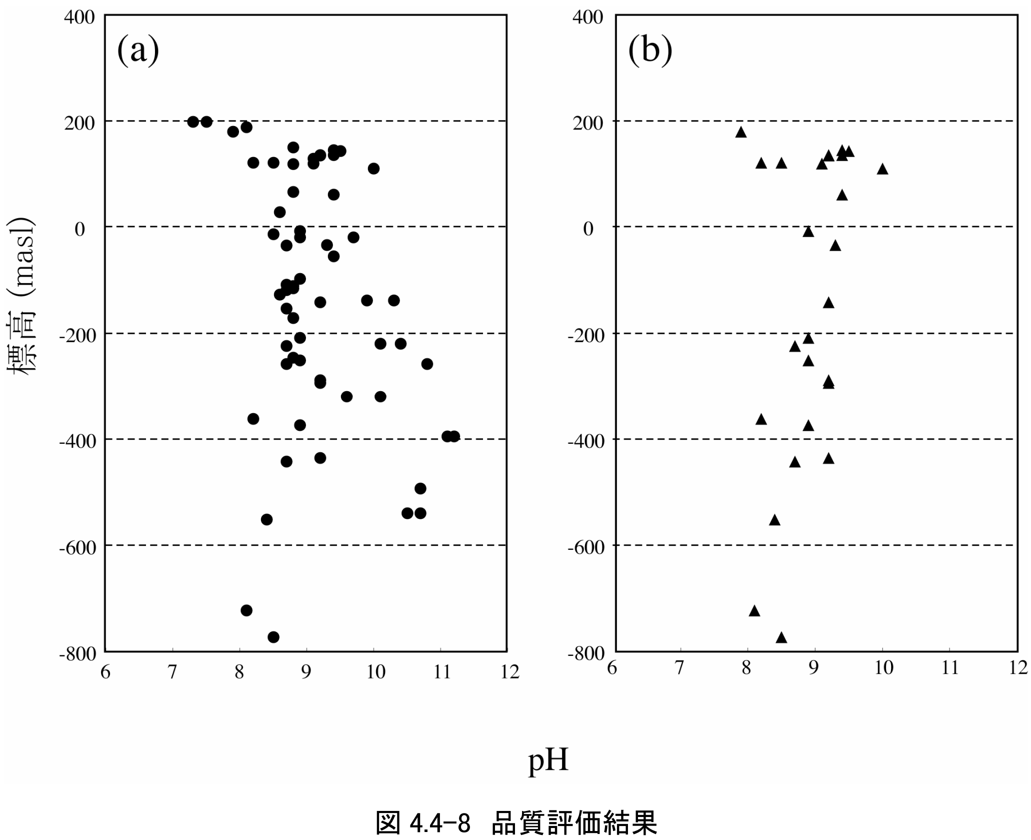


図 4.4-8 品質評価結果

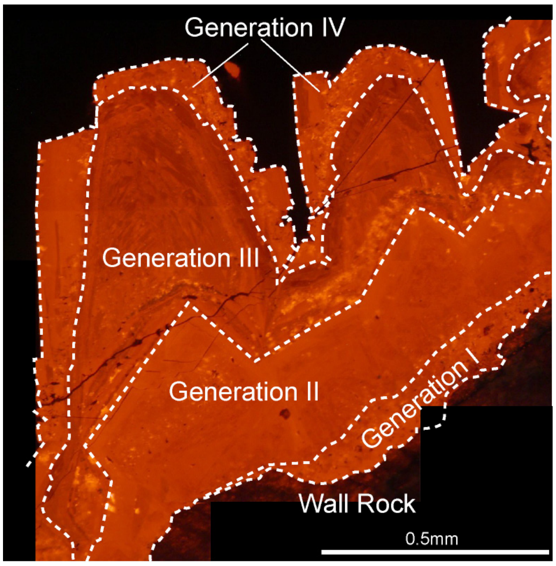


図 4.4-9 土岐花崗岩中の方解石のカソードルミネッセンス像

4.5 深地層における工学技術に関する研究

4.5.1 実施概要

深地層における工学技術に関する研究の目標は，現状のあるいは新たに開発される工学技術を瑞浪超深地層研究所の地質環境に適用することにより，地下深部に研究坑道を設置し，安全かつ合理的に施工・維持・管理できることを確認することである。2005 年度は，2004 年度に引き続き，実際の建設工事を通じて，掘削技術，対策工，品質確保技術や安全対策などの有効性を評価していくとともに，年度途中に生じた水質問題に関連する排水と掘削工事停止に伴う立坑水没の影響，今後の湧水抑制対策に関する基本検討などを実施した。また，工学技術の基礎として，掘削設備の妥当性，大深度地下におけるグラウト技術，高抜け崩壊，リスクマネジメント，維持管理マニュアルの検討等を実施した。

4.5.2 実施内容

(1) 研究坑道の計測とその結果に基づく設計検証

1) 計測工の設置，計測データの取得

研究坑道建設の安全性の確保（安全性の観点），設計手法の妥当性の確認・高度化，施工への反映（工学技術の観点），深部地質環境の予測結果の確認（深部地質環境調査の観点）を目的として，A 計測，B 計測，C 計測の三つのカテゴリーの計測工を実施した。ここで，A 計測は日常施工管理のために実施し，B 計測は地質環境条件などに応じて A 計測に追加して実施した。また，立坑の特殊性を考慮して山岳トンネルでは通常実施しない特殊な計測を C 計測とした。

a) A 計測
・内空変位計測（計測位置；立坑連接部，100m 予備ステージ）
・天端沈下計測（計測位置；100m 予備ステージ）
b) B 計測（計測位置；深度 80m，160m）
・地中変位測定
・ロックボルト軸力測定
・吹付けコンクリート応力測定
・覆工コンクリート応力測定
・鋼製支保工応力測定
・立坑湧水量測定
c) C 計測
・壁面観察（観察場所；立坑一般部）
　壁面マッピングおよび地質記載
　デジタルカメラによる可視画像データ
　赤外線サーモグラフィによる熱画像データ
　三次元レーザースキャナによる計測データ
　採取試料を用いた室内試験による物性データ
・レーザー内空変位測定（計測位置；立坑一般部）
　深度 55m，120m，175m：1測線（直径方向1箇所）
　深度 75m，150m：2測線（直径方向2箇所）

2) 計測データに基づく設計検証

2004 年度は，立坑掘削時の力学的挙動を計測するとともに，立坑掘削解析に関するパラメータスタディを実施し，各パラメータが立坑の全体挙動に与える影響度合を把握した。そして，この結果をもとに，計測結果を利用した同定解析（逆解析）手法について検討した。2005 年度は，立坑一般部（堆積岩部）の

計測データを用いて，逆解析手法の適用性を検討した。

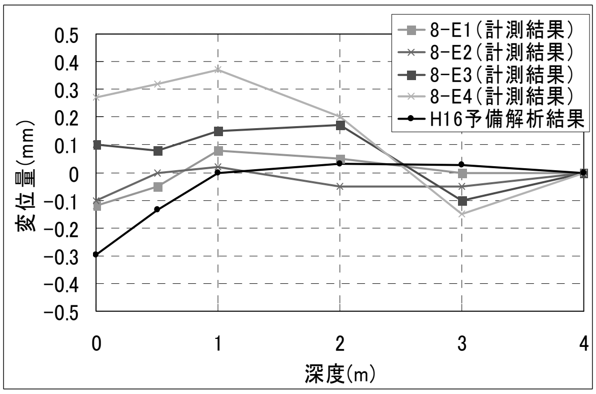
① 変形挙動の計測結果

立坑一般部のB計測において取得された計測結果と設計値の比較を表4.5-1に示す。なお，主立坑においては，立坑を鉛直方向の断層が貫通していたため，断層の影響により立坑掘削時の挙動が複雑になっていることが予想された。そこで，今年度はショートステップ工法における基本的な変形挙動を検討するために，換気立坑における計測結果を用いた。工事着手前に行った基本設計，実施設計では，周辺のボーリング調査結果に基づき岩級を想定し，ともに平面ひずみモデルにより応力解放率80%と設定して解析を実施している。また，基本設計では地圧の側圧比を2.0，実施設計では地圧の側圧比を1.2とし，初期地圧の異方性を考慮している。一方，調整設計（2004年度）においては，実施設計と同じ岩級を設定し，軸対称モデルによる逐次解析を実施している。計測データと設計値を比較すると，実際の地盤条件は基底礫岩層付近などの一部で当初CL級と予想された部分にD級が存在するなど，事前の想定よりも幾分悪かったにもかかわらず，GL-80m，GL-160mともに，計測結果の値は基本設計および実施設計の値に比べて小さい値が得られており，調整設計の値が最も近いことがわかる。これは，初期地圧の異方性に加えて，検討モデルの違いによる影響が考えられる。設計においては平面ひずみモデルが用いられているが，実際の変形挙動は3次元的であることによる応力解放率の影響および覆工剛性の仮定の違い等により覆工に作用する荷重が小さくなったためと推定される。

表 4.5-1 設計と計測結果の比較（換気立坑）

測定深度		基本設計	実施設計	調整設計（2004 年度）	計測結果
80m	岩級	D 級	CL 級	CL 級	CL 級
	覆工ｺﾝｸﾘｰﾄ応力（N/mm^2）	6.2	1.4	0.8	0.48
	鋼製支保工縁応力（N/mm^2）	88.0	52.5	―	36.3
160m	岩級	CL 級	CL 級	CL 級	CL 級
	覆工ｺﾝｸﾘｰﾄ応力（N/mm^2）	7.8	2.8	1.6	1.51
	鋼製支保工縁応力（N/mm^2）	99.6	100.8	―	20.5

図4.5-1に，換気立坑のGL-80mにおける地中変位計測結果の一例と調整設計時の予備解析結果との比較を示す。同図より，予備解析結果と同様に，実際の計測結果においても地中変位の値が壁面付近で頭打ちになっている状況が読み取れる。これは，覆工コンクリートの影響を受けて，特に発破損傷領域において，地中変位が抑制されているものと考えられる。この現象は，ショートステップ立坑の力学的特徴と考えられる。



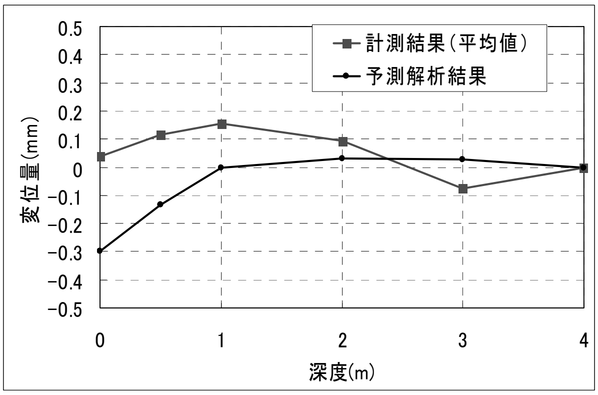


図 4.5-1　地中変位の設計と計測結果の比較
(換気立坑，GL-80m，左:全計測データ，右:計測値の平均値)

② 逆解析の適用性に関する検討

ショートステップ工法による立坑掘削時の変形挙動を把握する目的で，平面ひずみモデルを仮定した逆解析手法の適用を試みた[26)]。図4.5-2に地中変位の解析結果と計測結果の平均値の比較を示す。これより，計測データから今回のような逆解析を行うことで，ショートステップ工法による立坑の全体的な変形(岩盤全体の弾性係数)をある程度表現できることが確認されたが，覆工近傍の掘削損傷領域の挙動については再現することは出来なかった。これは，ショートステップ工法による立坑掘削では，覆工コンクリートの剛性の影響が大きいため，変形が3次元的挙動を示すことに起因しているものと考えられる。

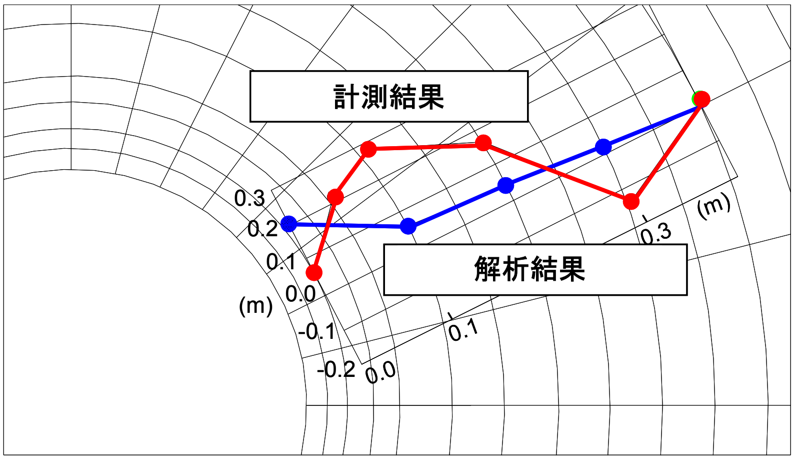


図 4.5-2　地中変位の解析結果と計測結果の比較

3) 冠水の計測器への影響について

2005 年 10 月の立坑排水停止により，それ以前に設置した地中変位測定や覆工応力測定などの B 計測の計測装置は冠水した。排水後に抵抗チェック等の点検を行ったところ，大半の計測装置の絶縁抵抗が低下しており，測定値が不安定で信頼性が低い状況であった。そのため，計測を継続しても有効なデータが得られないと判断し，GL-160m 以浅の B 計測については計測を中止することとした。これらの計器は設置後 1～6 ヶ月を経過しており，計測目的のひとつである立坑掘削時の初期変化についてはデータ

を得ることができた。もうひとつの計測目的である地中変位の長期的挙動についてはこれ以深での計測で把握していく予定である。

(2) 施工情報の DB 化

1) 仮想現実（VR）技術を用いたデータベース（DB）化の検討 [27]

大規模地下構造物は，調査，設計，施工，計測の各作業過程で収集された情報を相互に活用し，合理的な構造物の設計・施工にフィードバックすることが求められる。しかしながら，それらのデータ量が膨大であること，およびそれぞれの情報の目的，用途が異なり，情報の形式も画像，図面，数値等の多岐にわたるため，これらを一括管理し，必要に応じて適切に処理することが難しい。そこで，地下構造物の施工過程で時々刻々と蓄積される情報を統括的に管理，共用するシステムを仮想現実（VR: Virtual Reality, コンピューターを用いて人工的な環境を作り出し，あたかもそこにいるかのように感じさせること）技術とデータベース（DB: Data Base, コンピューターで関連しあう情報を収集・整理して，検索や更新を効率化したシステム）機能を用いて構築した。

コンピューター上の仮想空間内に地下構造物の施工現場を3次元，あるいは多次元(時間変化，属性情報も加え)で再現するとともに，施工過程で収集された様々な情報を DB に蓄積し，必要に応じて演算処理を加えて表示するものである。このようなデータ処理方法は，直感的に分かりやすく，大量のデータを可視化する事ができる等の特徴を持っており，鉱山の分野では，仮想現実を鉱山稼動に活用しようとする研究が世界中で行われている。

本研究では，現実世界の対象地域を一つのジオワールド・オブジェクトで表した。ジオワールドは，いくつかのジオネットワークで構成される。ジオネットワークの構成要素は，交通ネットワーク，土地利用，河川，植生等の現実世界のあるテーマと対応し，例えばジオデータセットとして保存される。これらの構成要素はデータの形態によっても分類される。

従来の可視化手法は，時間変動する情報を考慮しない静的な地図・グラフ等によって表示されていたが，本研究で提案した手法は，ある時間領域での構造物施工過程やデータ変動を画像として描画することができる。この意味で，本システムにより動的な仮想空間の構築が可能となる。

今回開発したシステムの構成はデータサービス・レイヤー，処理レイヤー及び可視化表示レイヤーに大きく分けることができる。データサービス・レイヤーは収集された情報がデータベース化されたものであり，ここでは汎用データベースソフトによるサービスを利用した。図 4.5-3 に瑞浪超深地層研究所を例にした可視化表示レイヤー画面を示す。

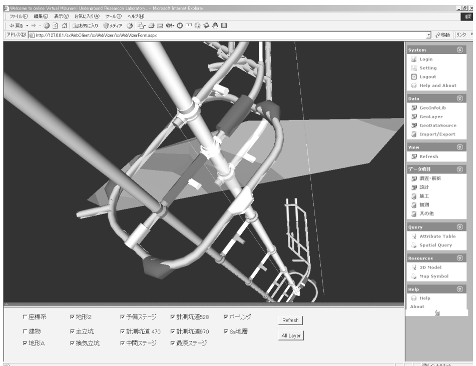


図 4.5-3　可視化表示レイヤー画面の例

(3) 工学技術の基礎に関する解析・検討

1) 立坑施工設備の妥当性評価

瑞浪超深地層研究所の研究坑道は，土岐花崗岩中に深度 1,000m，仕上がり内径φ6.5mとφ4.5m の 2 本の立坑を築造する計画で，鉱山を除き日本では前例のない規模となる。このため安全性確保と施工効率向上のため，多くの斬新な施工法と施工設備が計画され現在施工中である。将来の最終処分場の計画に向けて，これらの新しい試みを検証し最適な施工法と立坑設備の提案を準備することがこの研究の目的である。

検証の対象はショートステップ工法，換えキブル方式によるズリ出し方式，大型のズリ積み込み機械，高速の巻揚げ設備等の施工法および設備である。

2004 年度に妥当性評価の評価対象，評価方法，収集データ項目とデータシートを作成し，「施工・設備計画の妥当性評価の計画」を策定した。2005 年度は主立坑と換気立坑の概略サイクルタイムの調査分析を実施，さらに主立坑の詳細サイクルタイムの調査分析を実施して，施工実績の整理を行った。

図 4.5-4 に，主立坑一般部（堆積岩：GL-141.4～144.0m）の詳細サイクルタイムの分析結果を示す。図中「その他」には，風管・配管，湧水処理，計測，ウォータリング設置等の作業が含まれる。このときの地山状況は，予想より軟質で湧水が多い状態であり，発破穿孔数は少ないが余掘りが大きく覆工作業に影響していると思われる。これより，ズリ出しと覆工作業のサイクルタイムが設計に比べ大幅に大きく，その他作業についても予定外の配管作業や点検整備，湧水処理に時間を要していることがわかる。また，ズリキブル，コンクリートキブルとも安全上積込率を 80%に抑え，巻上速度も計画より低い状態で運転されていること等，計画と運用に差が見られた。今後のサイクルタイムの低減策は，主要作業についてさらに検討するとともに，その他作業やロスタイム（故障修理，見学者対応など）の縮減に取り組むことが有効である。また，花崗岩に移行した場合，穿孔・発破のサイクルタイムが増大する可能性があり，花崗岩部でのサイクルタイムの分析が必要である。

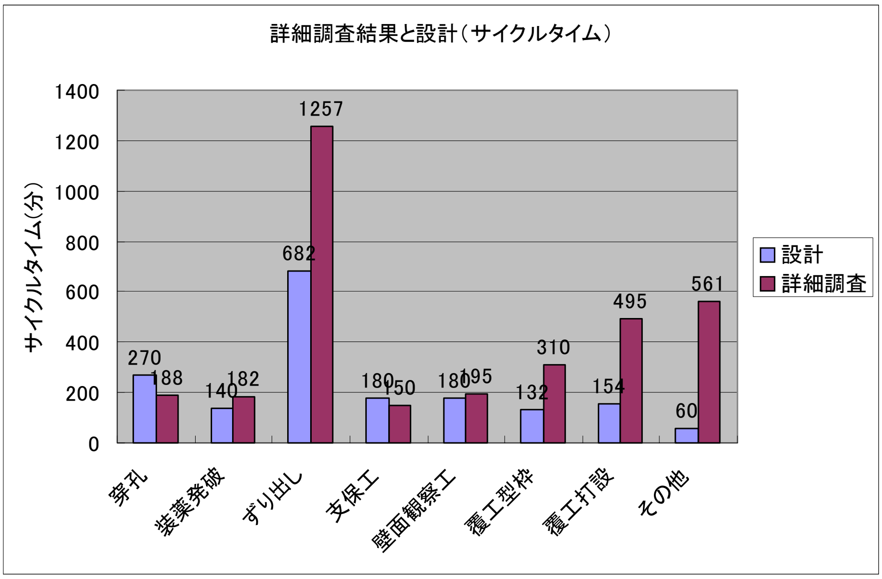


図 4.5-4 主立坑の各作業の詳細サイクルタイム

2) 湧水抑制対策の検討（グラウト基本計画，グラウト効果検討）

突発湧水を含む湧水抑制対策に関し，2005 年度は，深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔）などの研究所用地において得られたデータに基づき，施工上問題となる断層に対する前方予測技術に関する検討および対策工の検討を必要に応じて実施する計画としていた。今年度は，湧水量を抑制するためのグラウト工法の検討を進め，前方予測技術の検討については，今後，必要に応じて実施することとした。以下に，湧水抑制対策としてのグラウト基本計画，グラウトの効果検討について述べる。

① グラウト基本計画

研究坑道に流入する湧水量を抑制する対策としては，流入を防止するウォータータイト構造を取ることが考えられる。しかし，本研究坑道は深度 1,000m に到達する立坑とその深度で展開する水平坑道を計画しており，10MPa に相当するウォータータイト構造の構築が必要となる。しかしながら，立坑と水平坑道の連接部等を有する複雑な構造物を対象とした場合，ウォータータイト構造は現実的ではないと考えられる。したがって，グラウト工法を基本とすることとした。

グラウトにより湧水を抑制する場合，既に掘削が行われた範囲（ポストグラウト）とこれから掘削を行う範囲（プレグラウト）とを分け，さらに地質等にも考慮して検討を行う必要がある。

a） ポストグラウト計画

ポストグラウトを必要とする範囲は，既に掘削が終了し，湧水が多く発生している場所である。現在の研究坑道であれば，換気立坑深度約 115～168m の土岐夾炭累層が候補となる場所であり，砂岩～礫岩（緩いマトリックス）を主体とする。本立坑の掘削に伴う湧水は覆工コンクリート打設前に地山に設置した裏面排水材を用いて集水するとともに，それを坑内に導水することで覆工コンクリートに水圧が作用することを防止している。このため，ポストグラウトを計画するに当たっては，この裏面排水材が閉塞することによる覆工コンクリートへの水圧の作用を防止することが必要である。

グラウトの施工位置としては，地上（鉛直方向）・連接部（深度 100m より斜め下方向）・坑内（水平方向）について比較・検討を行い，坑内から水平方向に注入する方が工期・工費の面から有利と判断した。

図 4.5-5 に基本コンセプトを示す。覆工コンクリート背面から厚さ 4.0m の無注入領域，その外側に厚さ 1.0m の仮止水領域（水ガラス）を設けた上で，厚さ 5.0m の本格注入領域（カルシウムシリカ系恒久グラウト）を設けるものである。なお，無注入領域は注入材の裏面排水材への浸透防止とともに，注入圧を保持するためのバルクヘッドの役割を兼ねている。

注入材料としては，対象地質が堆積岩であり，通常のセメント系材料では浸透性がよくないことから，恒久グラウト材として開発された懸濁型カルシウムシリカ系（商品名：シラクソル）を用いることとした。また，注入工法は，地質状況から注入孔の孔壁安定性が乏しいと予測されるため，二重管ダブルパッカー工法を採用することとした。

なお，中空ドーナツ状の注入領域が形成されることから，注入範囲の上下端に関しては，地下水の流入防止のために人工または天然の水理的バリアを形成することとする。

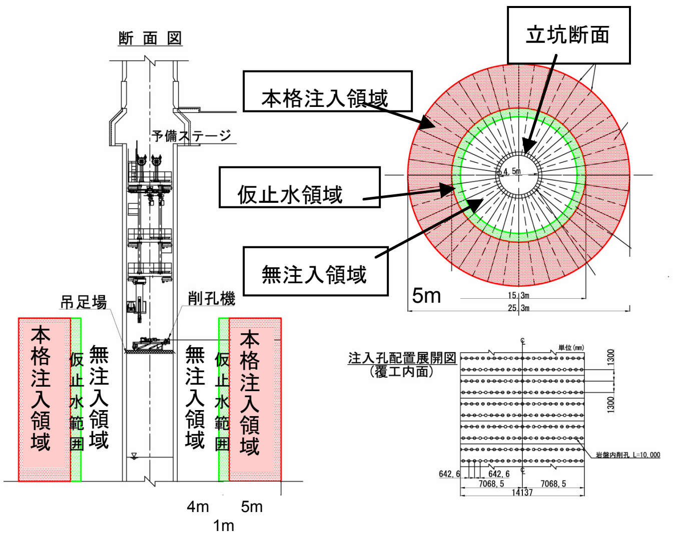


図 4.5-5 立坑ポストグラウトの基本コンセプト

b) プレグラウト計画

プレグラウトを必要とする範囲は，立坑および水平坑道の深度 180m 以深のこれから掘削する範囲の土岐花崗岩であり，亀裂性岩盤を主体とし，一部で破砕帯状を呈する。

プレグラウトは，通常の施工管理としての先行削孔（探り削孔）による湧水の確認，もしくは地質モデルから予想される湧水箇所に対して詳細な調査のもとに，その実施を判断する。図 4.5-6 に基本フローを示す。

特に，立坑でのプレグラウトに関しては，施工に使用しているシャフトジャンボを利用できることから，湧水帯の規模（連続性）により 2 種類の施工方法を計画した。1 つは比較的規模の小さな湧水帯に対してシャフトジャンボを用いて短尺（8m 程度）での削孔と注入を繰り返す短尺注入方法，もう一つは比較的規模の大きな湧水帯に対して専用の削孔機を用いて長尺（40m 程度）での注入を行う長尺注入方法である。図 4.5-7，図 4.5-8 にそれぞれの注入方法の概要を示す。

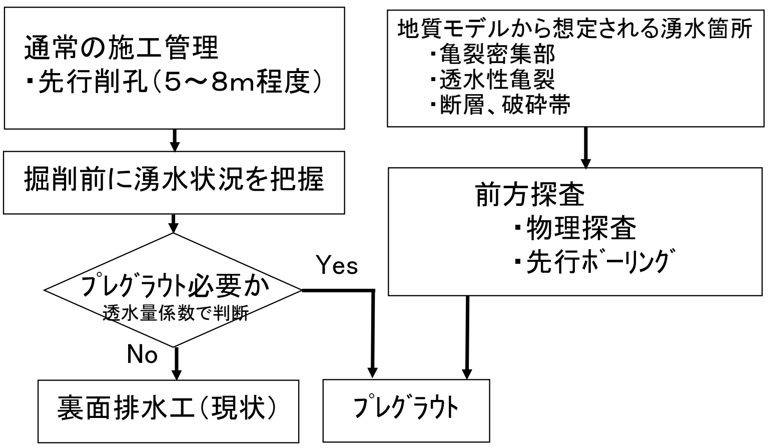


図 4.5-6 プレグラウトの基本フロー

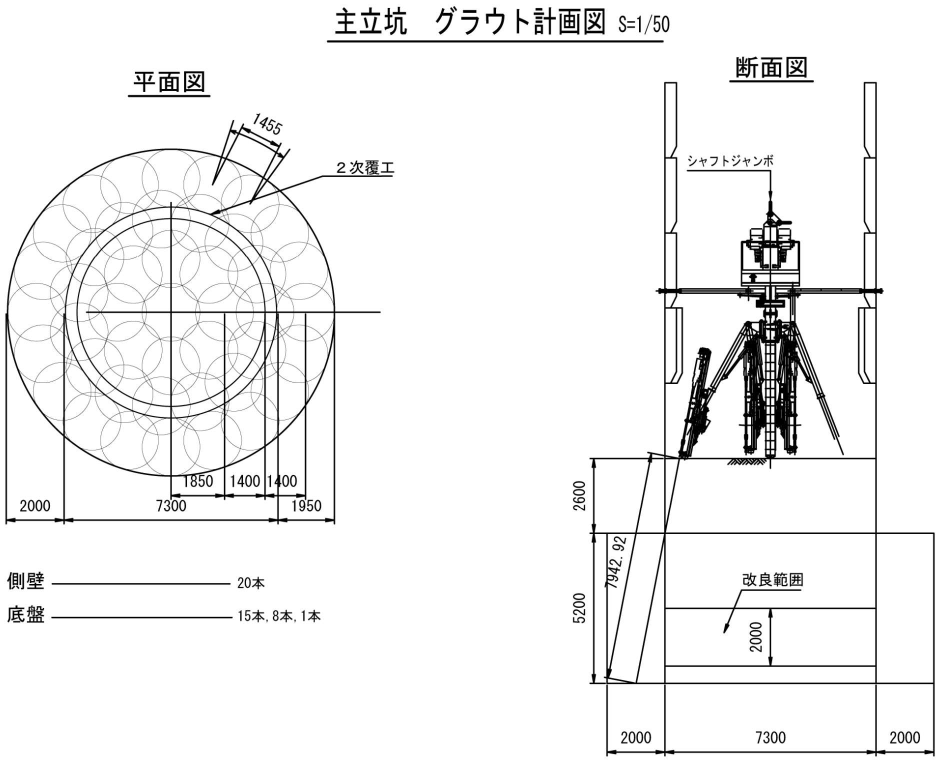


図 4.5-7　シャフトジャンボを用いた短尺注入工法概念図

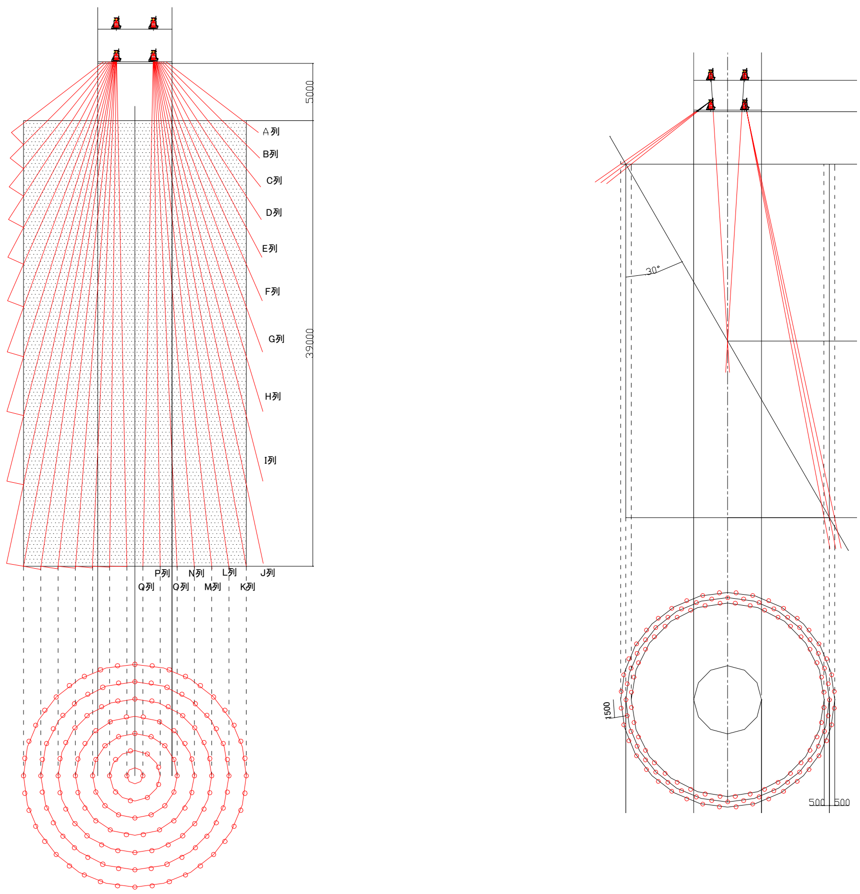


図 4.5-8　専用削孔機を用いた長尺注入工法概念図

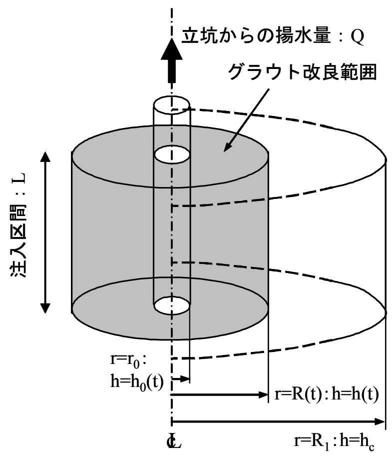
プレグラウトでの注入材料としては，対象地質が亀裂性岩盤であることから，粒子径が小さい超微粒子セメントを基本とし，配合切替を行いながら用いることとした。また注入工法は，注入孔の孔壁安定性が良いと考えられることからステージ工法（注入孔の全長を適当な長さのステージに分割して順次深部に注入していく工法）を採用することとした。

なお，注入範囲の設定に関しては，後述する理論解析および軸対称 FEM 浸透流解析より，掘削壁面より 2m 程度を 2 ルジオン(Lu)程度に改良することを目標とする。

② グラウト効果検討

グラウト効果を事前に検討するために，グラウト注入領域の透水係数と幅をパラメータとした理論解析と軸対称 FEM 浸透流解析を実施した。

理論解析では，浸透流の支配方程式より，グラウト改良前に対するグラウト改良後の透水係数の比率とグラウト改良幅をパラメータとした解析を実施した。解析結果を図 4.5-9 に示す。図より，グラウトにより透水係数を 1/10 に低下すれば改良幅 2m で 4 割程度，改良幅 5m で 6 割程度の湧水量の低減が見込まれる。このように透水係数を低く，改良幅を広くとれば湧水量の低減率は高くなる。ただし，透水係数は 1/10 程度（数 Lu）が現状技術では達成可能の範囲であり，それ以上の改良は現実的ではない。また改良幅に対する低減効果はそれほど大きくないことが予想される。



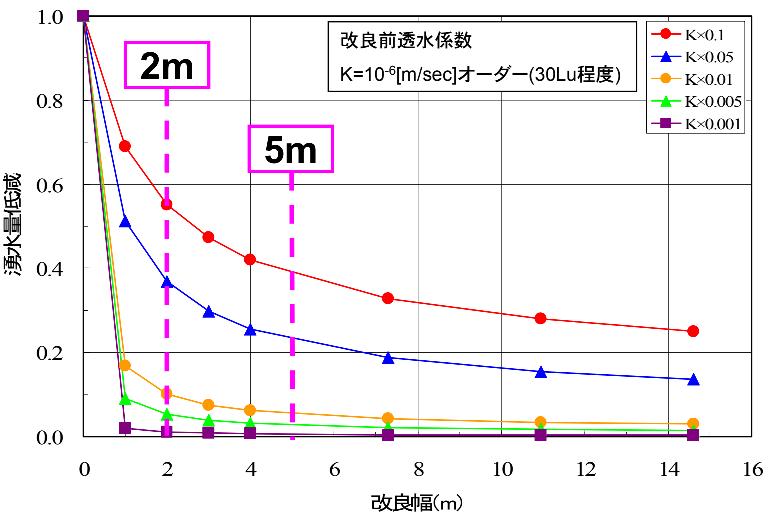


図 4.5-9 理論解析によるグラウト改良幅と湧水量低減の関係

次に，軸対称 FEM 浸透流解析により，施工過程を模擬したグラウト効果の検討を行った。

まず，ポストグラウトに関しては，図 4.5-10 に示すモデルにおいて想定される地質毎の透水係数を設定し，グラウト領域（透水係数，範囲，幅）をパラメータとして解析を行った（表 4.5-2）。解析結果を，グラウトを行わない場合に予想される湧水量との比で整理し，図 4.5-11 に取りまとめた。これより，全面改良を行いグラウト領域の透水係数を 1.0E-07 [m/sec]（土岐夾炭累層の 1/10 程度）にすると，グラウト領域幅 3.0m で 42%，グラウト領域幅 6.0m で 54%の湧水量低減が予想され，理論解析と整合的な結果が得られた。一方，全面的に改良しない場合（部分改良）では効果は限定的であると言える。

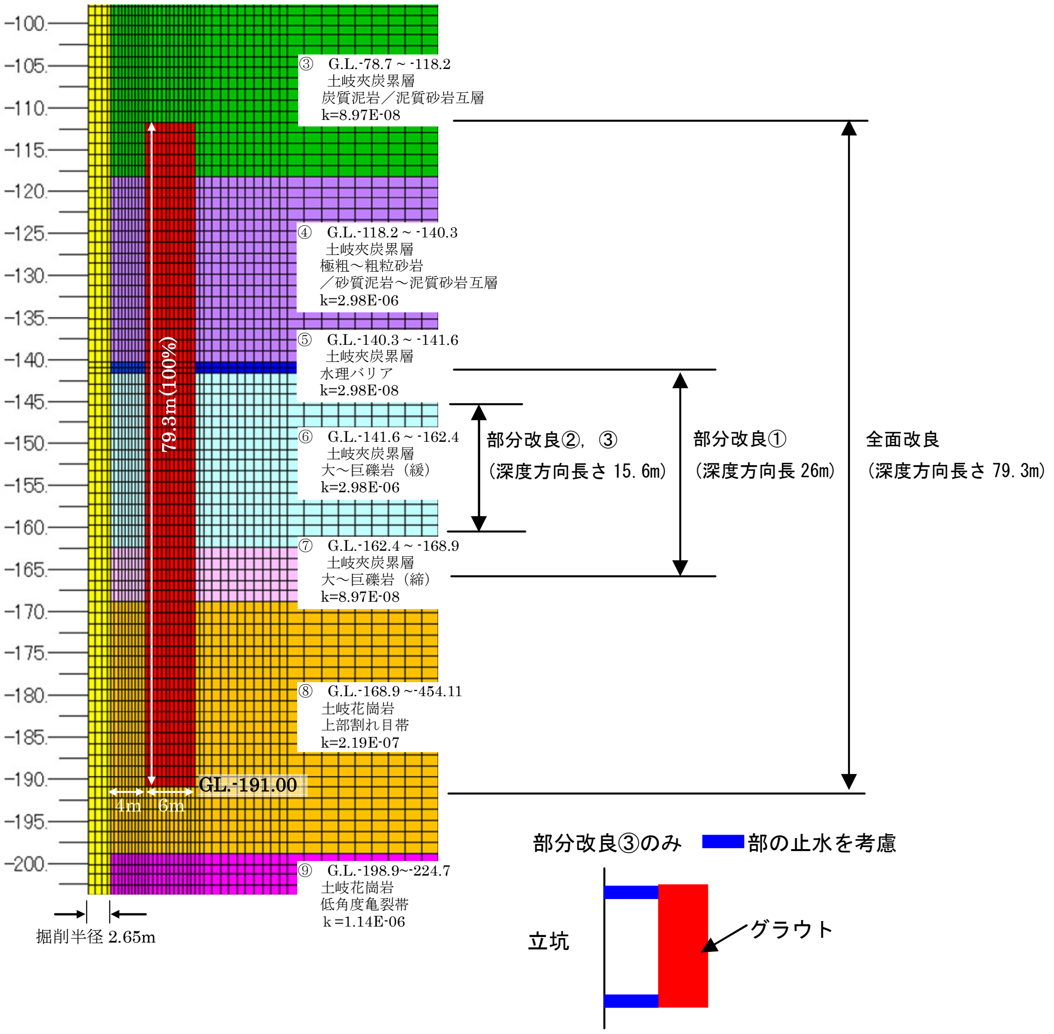


図 4.5-10 軸対称解析におけるポストグラウト計算モデル

表 4.5-2　解析ケース

解析ケース	深度方向改良長	考え方
全面改良	79.3m	透水係数が小さい（10^{-8}(m/s)オーダー）の地層③から，現状の切羽の深度（GL-190m）まで改良する。
部分改良①	26.0m	湧水の多い地層⑥全体を改良する。改良部の上下端部の地層⑤，⑦の透水係数は 10^{-8}(m/s)オーダーである。
部分改良②	15.6m	湧水の多い地層⑥を部分的に改良する。改良部の上下端部は原地盤のままとする。
部分改良③	15.6m	湧水の多い地層⑥を部分的に改良する。改良部の上下端部の止水を考慮する。
改良なし	—	改良しない。

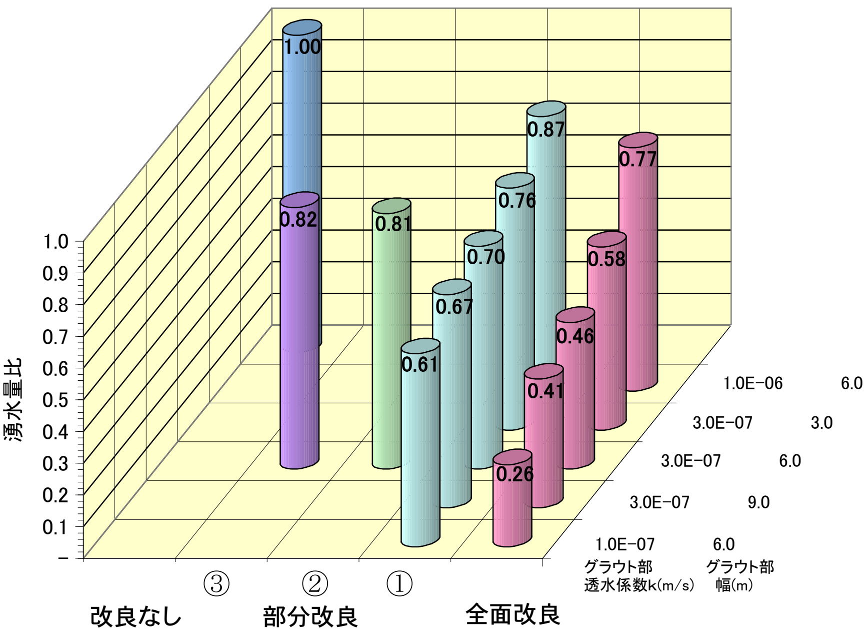


図 4.5-11 軸対称解析によるポストグラウト改良幅と湧水量低減の関係

次に，プレグラウトに関しては，図 4.5-12 に示すモデルにおいて想定される地質毎の透水係数を設定し，グラウト領域(透水係数，範囲，幅)をパラメータとした解析を行った。解析結果をグラウトを行わない場合に予想される湧水量との比で整理し，図 4.5-13 に取りまとめた。これより，グラウト領域幅 2.0m でグラウト領域の透水係数を 1.0E-07 [m/sec](1Lu 程度)にすると 38%，1.0E-08[m/sec](0.1Lu 程度)にすると 87%の湧水量低減が予想される。さらに，領域幅を 3.0m と 5.0m にすると，それぞれ 2m に比べて 23%と 38%の低減が予想される。

以上の解析結果より，グラウト改良幅については，ポストグラウトでは堆積岩での効果の確実性を念頭に本格注入領域を 5.0m(仮止水領域幅 1.0m と合わせて 6.0m)，プレグラウトでは亀裂性岩盤であることを念頭に当所計画値として 2.0m を採用することとした。

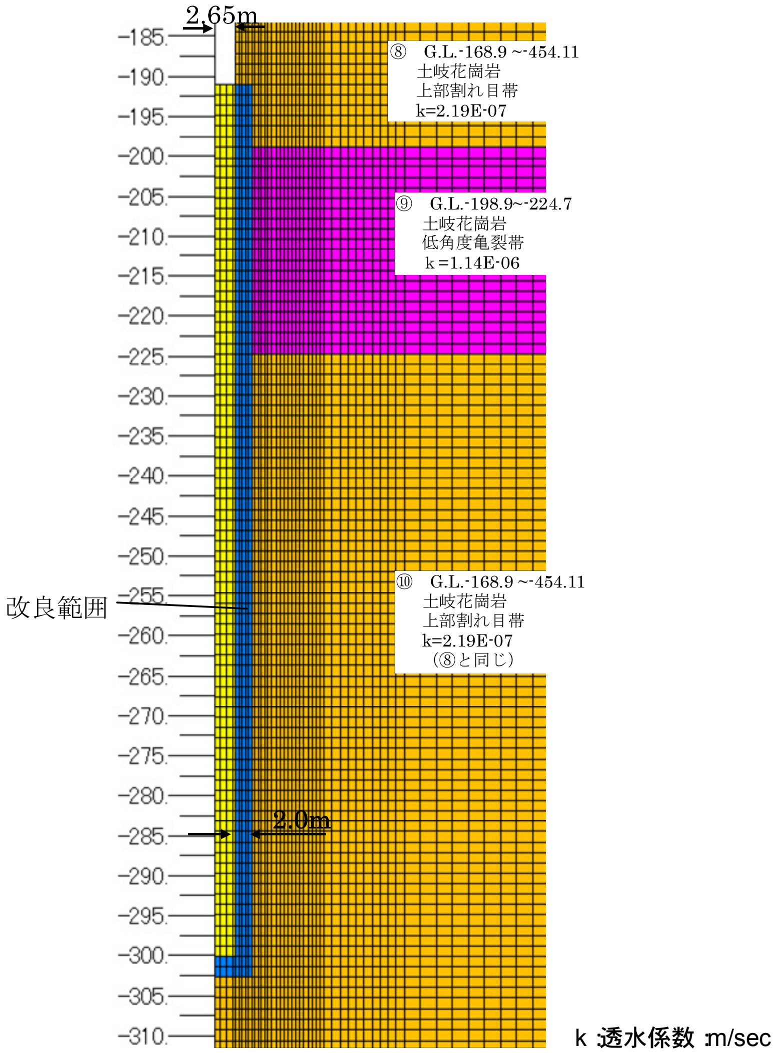


図 4.5-12 軸対称解析におけるプレグラウト計算モデル

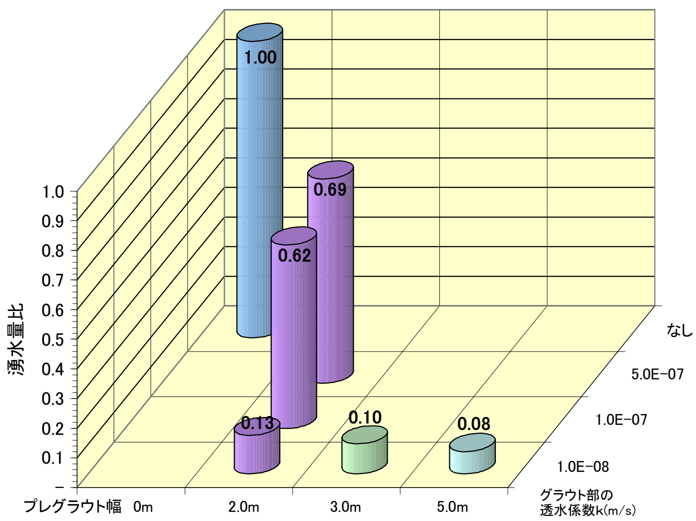


図 4.5-13 軸対称解析によるプレグラウト改良幅と湧水量低減の関係

3) 大深度地下構造物におけるグラウト技術の検討

地層処分の概念は，「安定な地質環境に，性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」[28]ことであり，処分場の構築に適した地質環境を確保する技術に向け，グラウト技術の高度化が必要と考えられる。グラウト技術に関しては，特に地層処分技術の基盤となる工学技術の観点から，建設時及び操業時の地下坑道への湧水を低減するために，高い止水性を有するグラウト技術について，特に注入材料等の検討を行った。

① 止水性能に注目したグラウト注入方法の整理 [29]

既往のグラウト技術に関する研究は，特に国内においてはダムにおけるグラウト技術を中心として技術開発されてきたため，地層処分施設のような大深度の坑道掘削工事を対象とした研究事例は極めて少ない。そこで，高水圧下で高い止水性を確保しているトンネルを中心とした国内外のグラウト施工事例をレビューした。次に，地層処分技術に関する研究開発を対象に，グラウト研究事例をレビューするとともに，その技術的課題を明確にした。最後に，浸透メカニズムを考慮して，地下深部において高い止水性を確保するためのグラウト注入方法について，その考え方を整理した。

まず，高い止水性を確保しているトンネルを中心とした国内外のグラウト施工事例として，北欧の環境配慮型ウォータータイトトンネル5事例，日本の海底トンネル，一般トンネル，岩盤地下空洞の5事例についてレビューを行い，その特徴について比較を行った。

次に，地層処分におけるグラウト研究として，次の事例を取り上げ，レビューを行った。

- NUMO-SKB-Posiva による低 pH グラウトに関する共同研究
- SKB によるセメントグラウト注入方法に関する研究
- JAEA による低 pH グラウト研究
- NUMO によるエタノールベントナイト研究
- 塩水ベントナイト研究

これらの研究は，低アルカリセメントの実施工での適用性の確認，また天然材料としてのベントナイトの注入材としての性能を確認するものである。特に，セメント材料を主体とする研究では，弱酸性のシリカフュームスラリーであるグラウトエイドが注目され，種々の配合による材料特性が研究されている。また，天然材料としてのベントナイトは，淡水を溶媒にすると粘性が高くなりグラウト材としての性能が悪いので，エタノールおよび塩水を溶媒とすることで粘性上昇を防止した材料特性が研究されている。

これらのレビュー結果を参考に，地層処分技術としての要求性能の整理，施工方法の検討，経済性（工期，工費）の検討（工種別費用構成，所要時間構成の分析）を行った。ここで，グラウト施工方法として，日本の海底トンネル等で実績のある長尺ボーリング型（50m 程度）と北欧の環境配慮型トンネルで使用されている短尺高密度ボーリング型（15～20m 程度）の比較を行い，短尺型の方がやや有利と評価された。

② 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討 [30]

セメント系グラウト材料の浸透性能については，これまでは標準砂を用いた簡易試験や平行平板試験が実施されてきているが，国内ではダムにおけるグラウトを対象としているため，一般に低注入圧で試験が行われている。しかし，地層処分技術においてはダムより高い止水性能が望まれるため，100 μm あるいはそれ以下の微少な亀裂まで浸透する材料が必要となる。しかしながら，このような微少亀裂では亀裂入口あるいは亀裂幅減少部において，図 4.5-14 に示すような目詰まりが生じフィルターケーキが形成されやすい。そこで，高水圧下における微少亀裂への浸透性能を確認するための室内試験方法について検討し，具体的な試験計画を提案するとともに，試験装置の予備試験を実施した。

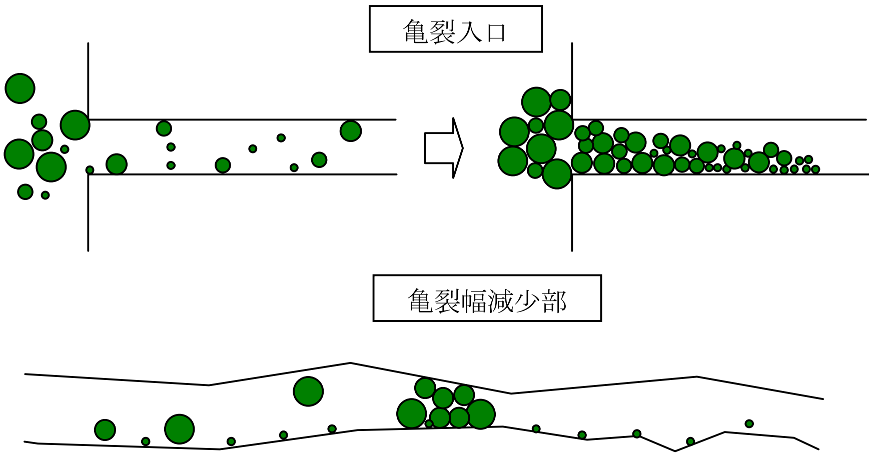


図 4.5-14 亀裂入口及び亀裂幅減少部におけるグラウト材の目詰まりのイメージ

まず，既往の目詰まり試験方法，特に海外の地層処分に関する研究において使用されている試験方法についてレビューした。その結果，次のような試験方法があり，試験の目的により使い分けられている。ただし，これらの試験方法は低圧（0.1MPa 程度が多い）で実施されている。

- フィルターポンプ試験（ペネトラビリティメーター，フィルターポンプ）
- NES 試験
- サンドコラム試験
- 平行平板試験

これらの試験方法を参考に，高い注入圧力（10MPa），微少な開口幅（30，50，80，100 μm）を念頭に試験装置について検討を行い，図 4.5-15 に示すようなスリット入り鋼柱にグラウト材を注入する試験方法を考案した。

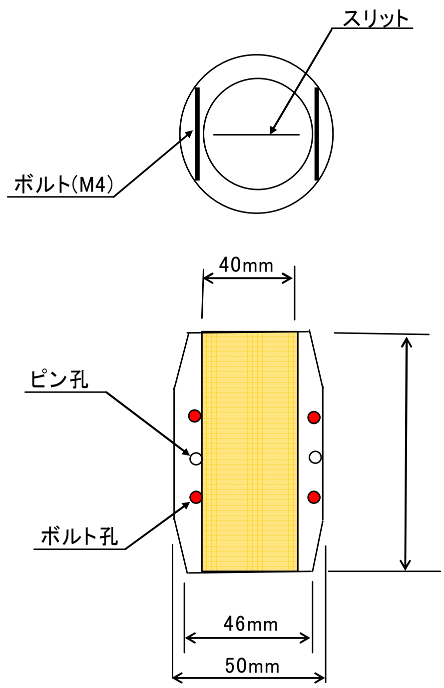


図 4.5-15 高圧注入試験装置の外観

図 4.5-15 に示す試験装置を用いて予備試験を実施した試験全体のフローを図 4.5-16 に示す。まず耐圧試験，通水試験により試験装置の性能を確認し，これと平行して設定した配合におけるグラウト材の基本物性を確認する。この上で，目詰まり特性を確認するために，低圧加圧試験（約 1.0 MPa），連続加圧試験（段階的に 1.0→6.0 MPa に加圧），高圧加圧試験（1.0→3.0 or 4.0 or 5.0 MPa に加圧）を実施した。なお，表 4.5-3 にグラウト材の配合を示す。

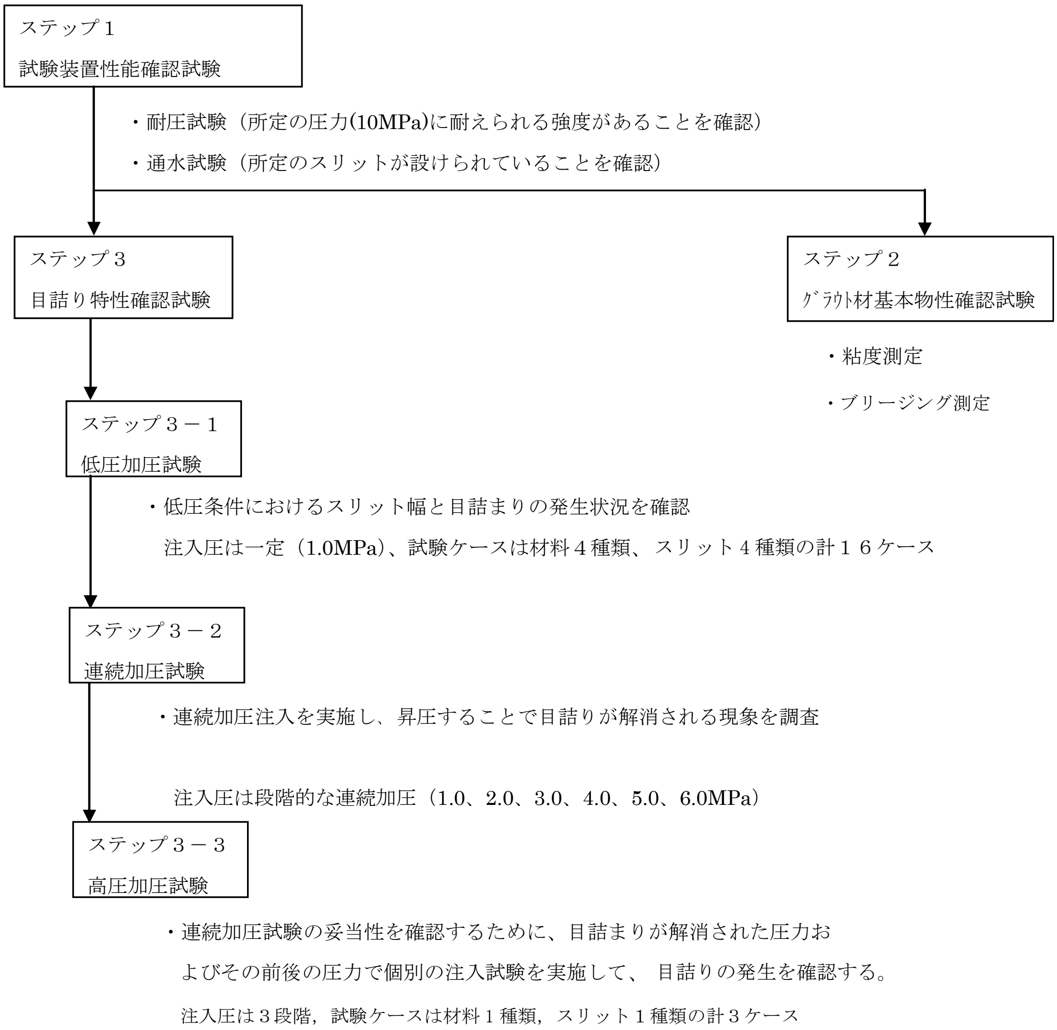


図 4.5-16 予備実験フロー図

表 4.5-3 予備実験注入材配合表

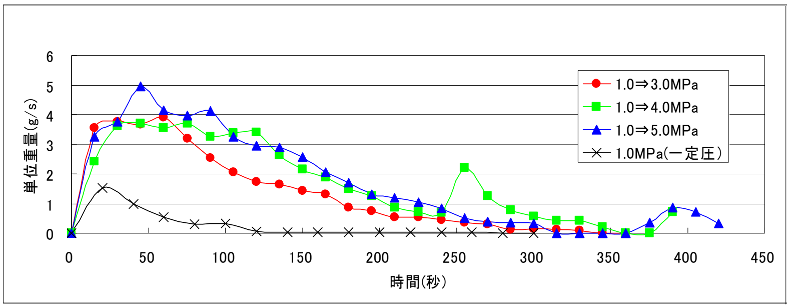
	単位	配合 1 w/c=1.0 （GA：5%）	配合 2 w/c=1.6 （GA：0%）	配合 3 w/c=1.6 （GA：10%）	配合 4*) w/c=1.6 （GA：41%）
超微粒子セメント	kg	20.000	20.000	20.000	20.000
グラウトエイド（スラリー）	kg	2.105	0	4.444	27.797
水	kg	20.000	32.000	33.333	40.339
分散剤（マイティー150R）	kg	0.589	0.560	0.622	0.678
体　積	L	28.651	39.123	43.682	67.413
単位重量	kg/m^3	1490	1343	1337	1317

＊）Posiva が Onkalo の原位置試験において使用している配合を参考。

w/c：水セメント比，GA：グラウトエイド（浸透・安定材）

表 4.5-3 に示す材料を用いて低圧加圧試験を実施した。このうち，低加圧試験で目詰まりが発生し，グラウト材がほとんど通過しなかった配合 3，スリット開口幅 50μm のケースについて，注入圧力と通過量の関係を調べるために，連続加圧試験と高圧加圧試験を実施した。連続加圧試験は，段階的に注入圧力を増加させてグラウト材の通過量を測定するものであるが，この試験でグラウトが顕著に通過し始めた圧力(4.0MPa)およびその前後(3.0，5.0MPa)で高圧注入試験を実施した。高圧注入試験の結果を図 4.5-17 と図 4.5-18 に示す。この結果より，注入圧を高圧にすることによりグラウト材のスリット通過量は低圧の場合よりも増加することがわかった。また，スリット上に盛り上がるようにフィルターケーキが形成されたが，いずれも注入圧との関係等については明確な傾向を得ることはできなかった。

今後，試験装置，試験方法の課題の抽出を行い，解決を図る予定である。



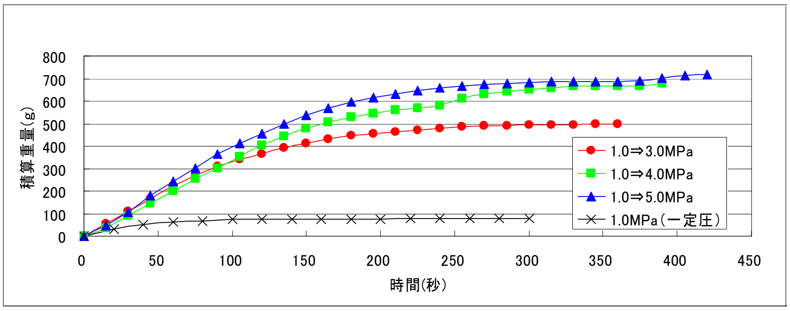


図 4.5-17 高圧注入試験におけるグラウト材透過量の経時変化グラフ

図 4.5-18 高圧注入試験におけるフィルターケーキ形成例

③ より微少な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査

高い止水性能を確保するためには，亀裂開口幅 100 μm 程度より小さい極めて微少な亀裂に浸透可能なグラウト材料を用いることが有効と考えられる。この要求性能を満足するグラウト材料としては，いくつかの候補が考えられている。そこで，既往の材料を基本として，より微少な亀裂へ浸透可能となるグラウト材料の可能性について調査を行った。

その結果，懸濁型材料としてベントナイト（空気（風力）分級材料，水簸（すいひ）材料，水熱合成材料）やセメント（超々微粒子セメント），溶液型材料としてシリカゾル（コロイダルシリカ），パーマロック（純粋シリカからなる活性シリカに酸性添加剤を加えたもの），低アルカリ水ガラス（活性シリカに酸性反応剤を加えた酸性シリカゾル）などが候補として挙げられた。ただし，溶液型材料についてはホモゲル強度が 0.1 N/mm^2 程度と低いため，地圧・水圧ともに高くなる地下深部への適用性については現時点では問題があるが，高強度化に向けた研究の動向については注視していく必要がある。

4) 大深度立坑におけるリスクマネジメント手法の検討

地下施設建設リスクマネジメント手法の開発は，2004 年度までに，リスク低減のための施設設計および調査手法についての検討として，施工時に大きなリスク要因となる項目を抽出し，そのリスクを定量的に評価し，低減する方策を検討した。

2005 年度は，研究坑道掘削工事で取得，測定されているデータを整理し，これらのデータをリスク評価に反映できるよう，過去 3 年間で実施してきたリスクマネジメント手法を現実に即したものに見直すとともに，工程遅延に影響を及ぼすリスク要因の分析を行い，工程遅延に及ぼすリスク要因を明らかにし，その対策を提示した。検討対象は主立坑一般部の GL-51～-172.4m 区間である。

工程リスク分析の検討フローを図 4.5-19 に示す。まず，現場で取得した施工サイクルデータを，ズリ出し，ジャンボセット，穿孔，装薬・発破，鋼製支保工等の作業グループに分類し，施工時間と積算想定時間の比較分析を行った。各施工サイクルにおける合計施工時間を図 4.5-20 に示す。これより，立坑掘削工事は，合計施工時間に占めるズリ搬出やコンクリート打設時のキブル作業時間の割合が高く，合計施工時間に対して余掘量が大きく影響することから，地山の状態に対して非常に敏感であることがわかった。

次に，1施工サイクルを構成する各作業時間のばらつきや地震・火災・突発湧水といったリスクを生じる恐れのあるイベントの発生を考慮した工程評価シミュレーションモデルを構築し，工程分析により算出した各統計量を入力値として与えることによって，工程リスク評価を実施した。シミュレーションには，GoldSim Technology Group が無償で提供している GoldSim Player®[33]を使用した。1 サイクルのうち，ズリ出し～発破～計測等の標準的な施工サイクル（基本サイクル）および基本サイクルに人的災害，機械・設備トラブル等の工程遅延要因となるリスク事象を考慮した全サイクルの累積超過確率分布を図 4.5-21 に

示す。これより，基本サイクルにおける施工時間のばらつきはそれほど大きくないのに対して，工程遅延要因を考慮した施工時間は低頻度で発生する工程遅延事象の影響を受け，工程が大幅に遅れる可能性があることを示しており，仮に10%超過確率で評価した場合には，必要工期は343.0日となり，基本サイクルタイムの90%信頼確率工期270.3日に27%程度の余裕をみる必要があることになる。したがって，リスクマネジメントの観点からリスクを回避した工程を考慮するためには，工程遅延要因事象のリスク軽減を図り，基本サイクルタイムに加えて予備の時間を考慮する必要がある。基本的には地山状態を的確に把握することが重要であり，その上で，余堀量の低減（スムースブラスティングの適用など），替えキブル方式実施によるズリ搬出時間の短縮等の対策を実施することが必要である。

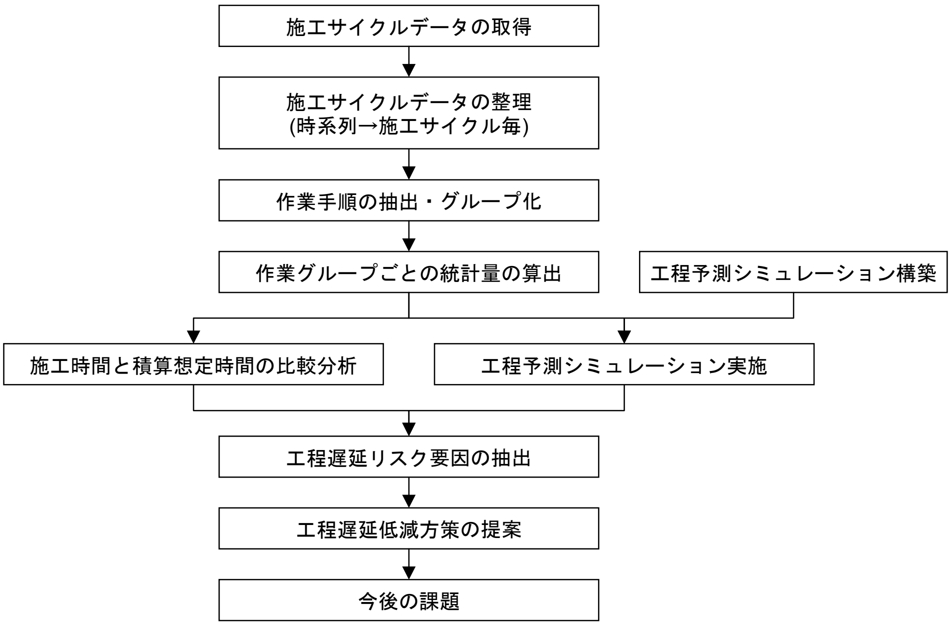


図 4.5-19 工程リスク分析の検討フロー

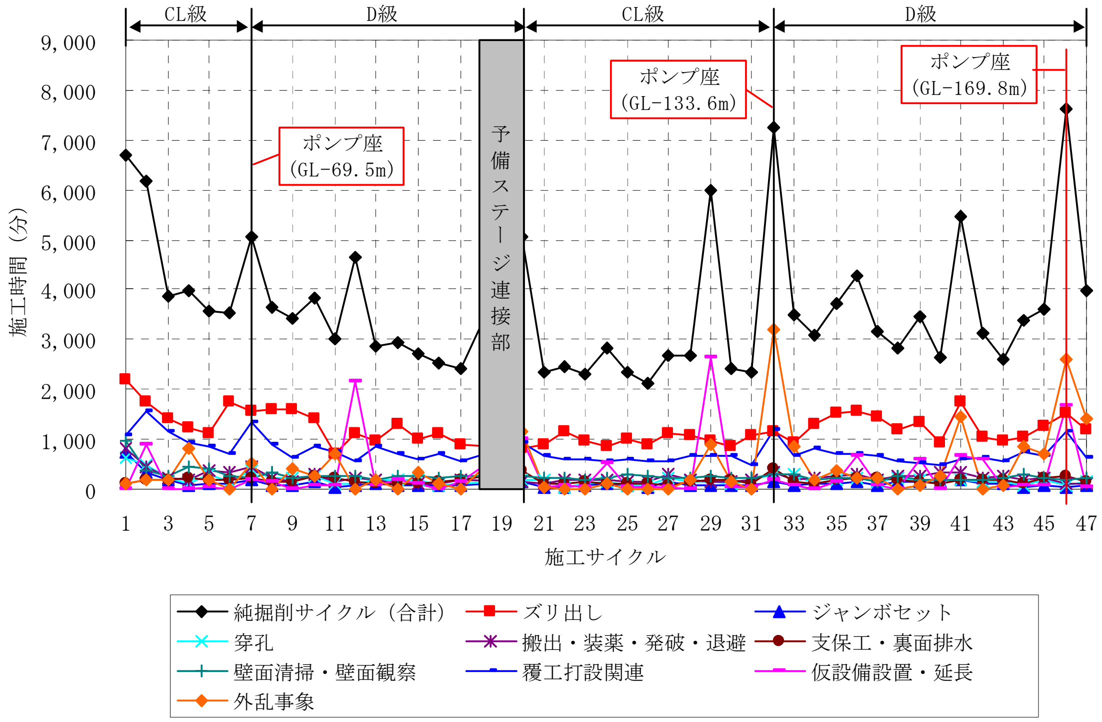
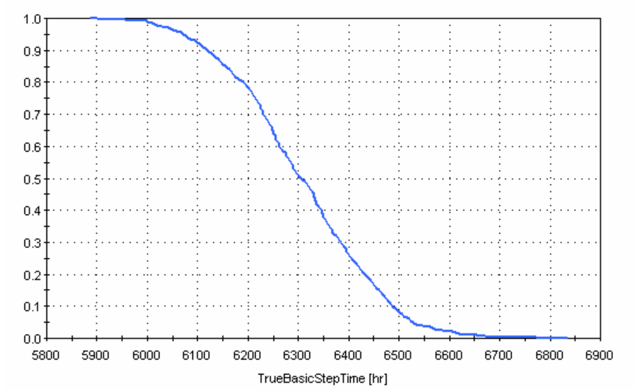
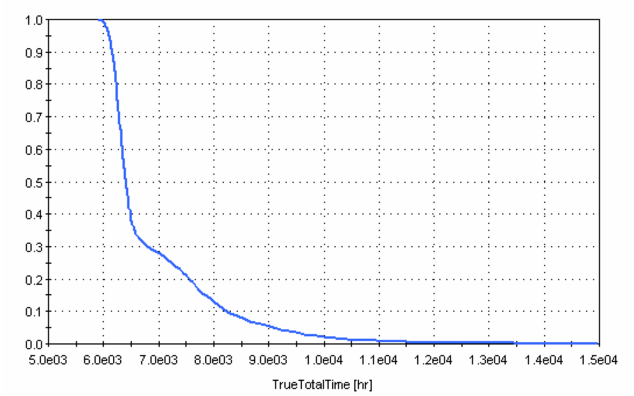


図 4.5-20 各施工サイクルにおける合計施工時間



90%超過確率	6120.1 時間 (=255.0 日)
75%超過確率	6214.2 時間 (=258.9 日)
50%超過確率	6306.0 時間 (=262.8 日)
25%超過確率	6405.7 時間 (=266.9 日)
10%超過確率	6486.2 時間 (=270.3 日)

(a) 基本サイクル



90%超過確率	6160.9 時間 (=256.7 日)
75%超過確率	6257.8 時間 (=260.7 日)
50%超過確率	6408.9 時間 (=267.0 日)
25%超過確率	7238.8 時間 (=301.6 日)
10%超過確率	8231.7 時間 (=343.0 日)

(b) 全サイクル(基本サイクルに工程遅延要因を考慮)

図 4.5-21 基本サイクルと工程遅延要因を考慮した全サイクルの累積超過確率分布

5）大深度地下構造物の維持管理マニュアルの検討

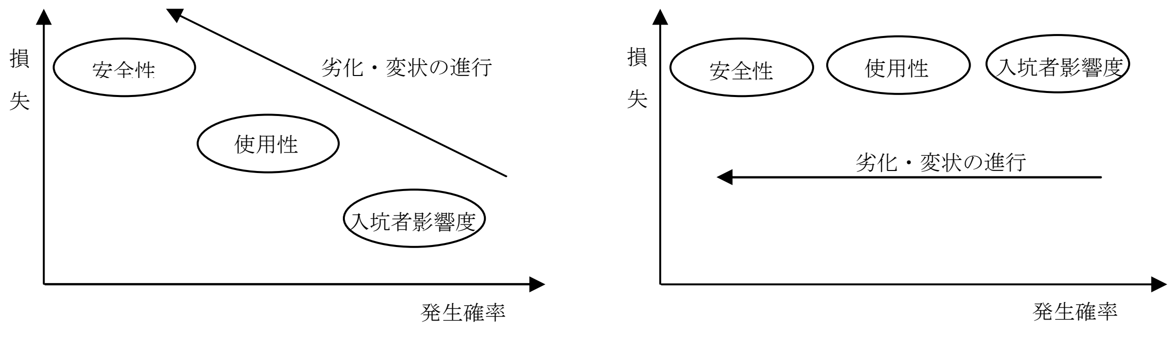
2004 年度は，大深度地下における地下構造物の機能・性能を長期にわたり適切に維持・管理・補修し，安全を確保するための技術を確立するため，既存の維持・管理・補修技術の整理を行った。これを踏まえて，2005 年度は「瑞浪超深地層研究所立坑維持管理マニュアル」構築に資する情報提供を目的に，大深度地下構造物における課題を整理するとともに，瑞浪超深地層研究所の立坑における維持管理フロー（概要版）を作成した。

瑞浪超深地層研究所の研究坑道を始めとする大深度地下施設は，大深度かつ三次元的な広がりを有した土木構造物ではあるが，基本的には線形構造物の立坑と水平坑とを組み合わせた構造物である。したがって，大深度地下施設の維持管理マニュアルについても，基本的には既往の一般的なトンネルの維持管理マニュアルに順じて構築することとし，立坑，大深度，超長期間および重要構造物という特殊条件に応じた項目を追加した。

維持管理の基本的な進め方については，主に社団法人土木学会の「コンクリート標準示方書(維持管理編)」[34)]と「トンネルの維持管理」[35)]を参考とした。

一般のトンネルに要求される機能としては，安全性能，使用性能，入坑者影響度，景観・美観，耐久性能，作業性能が考えられる。これらのうち，大深度地下施設においては，景観・美観は対象外とし，耐久性能はそれぞれの機能が共用期間中継続せねばならぬことを考えると，維持管理においては絶対条件であることから，安全性能，使用性能，入坑者影響度に含めて考えることとした。作業性能については，維持管理手段を検討する際に考慮することとした。したがって，ここでは安全性能，使用性能，入坑者影響度を主な機能として考えた。一般のトンネルにおいて，各性能が損失した場合のリスク（＝事象が起きた場合の損失の大きさ×事象が起きる確率）は図 4.5-22(a)のようであると考えられる。しかし，大深度地下施設においては，立坑・大深度・超長期間という特殊条件に加え，社会的責任の大きい重要構造物であること，すなわち，①安全性能は最も基本的かつ重要な性能であること，②立坑構造物における使用性能喪失の不具合事象としては，覆工コンクリートの変形による排水管の変形損傷やエレベータ走行障害などが考えられ，これらは安全性能消失ほど破局的ではないものの坑道の水没や人身事故などの重大事象につながるためリスクは大きいこと，③入坑者影響度に関する性能とは，たとえば構造物の一部が落下することによる被害であるが，立坑の場合重大な人身事故となる可能性が高いため，リスクは大きいこと，を考慮すると，各性能が損失した場合のリスクは図 4.5-22(b)のようになる。したがって，一般のトンネルでの維持管理手法に固執せず，大深度地下施設でのリスクの大きさに相応した維持管理を行うべきであると考えた。

以上の考え方を踏まえ，瑞浪超深地層研究所立坑における維持管理フロー（概要版）を作成した（図 4.5-23）。今後は，このフローに基づき，詳細版と維持管理マニュアルを構築していく。



(a) 一般のトンネルでのリスク　　　(b) 大深度地下施設でのリスク

図 4.5-22 リスクの考え方

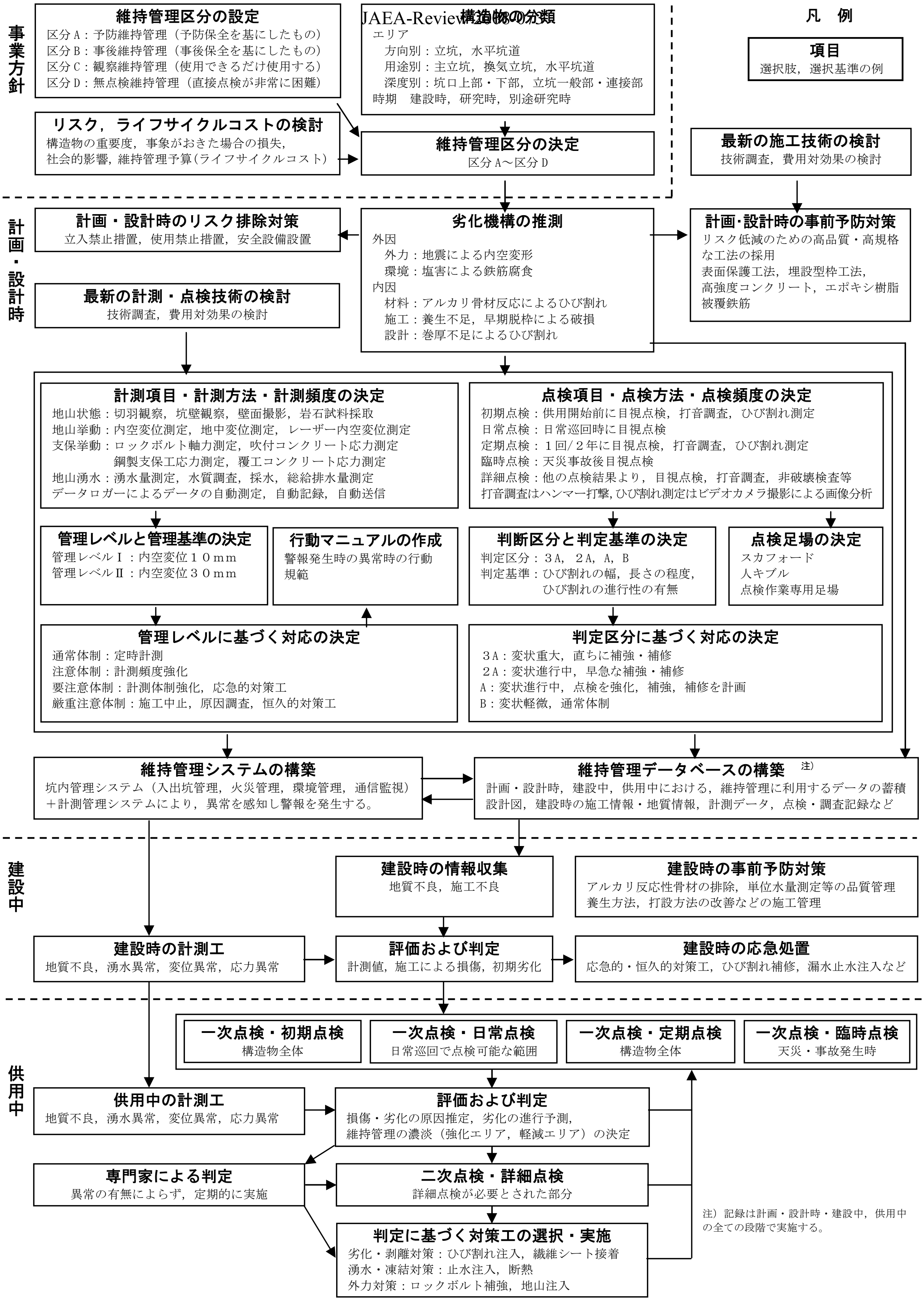


図 4.5-23　瑞浪超深地層研究所立坑維持管理フロー（概要版）

6）耐震の検討

2005 年度は，換気立坑の深度 100m の立坑連接部に地震計および動ひずみ計を設置し，実際に計測されたデータを用いて地震動を評価し，検討用地震振動との比較，また，必要に応じて実際の地震動に基づいた地震時健全性評価を実施する予定であった。しかし，2005 年 10 月の研究坑道からの排水停止に伴い，研究坑道の掘削および研究坑道内での調査を中断したため，実施できなかった。2006 年度は，計測機器の設置を行い，耐震に関する検討を行う予定である。

(4) 研究坑道に関する調整設計

研究坑道に関する調整設計としては，実施設計に対して MIZ-1 号孔等での取得データに基づいた物性値や岩盤等級の見直しによる検討，また，立坑における高抜け崩壊の検討を実施している。

1) 支保の安全性確認のための調整設計

一般的にトンネル等の地下岩盤構造物では事前の調査と実際の岩盤等級が完全に合致することは少なく，必ず支保パターンの変更が伴う。本研究坑道では，現状の実施設計・調整設計では，岩盤等級の分布深度を固定しているため，深部で想定よりも悪い岩盤が出たとき，場合によっては改めて個別に詳細設計を実施する必要がある。また，水平坑道に関しては，現場の作業効率等の関係から断面を大きくしたいという要望があり，その際にも個別の詳細設計が必要であった。

そこで，深度方向の岩盤等級と水平坑道断面をパラメータとして，支保の安全性を確認するための調整設計を実施した。立坑については，主立坑，換気立坑ともに深度 200m 毎に 1000m まで，水平坑道については，深度 100m 毎に 500m まで実施している。表 4.5-4 に立坑の解析条件の組合せを，表 4.5-5 に水平坑道の解析条件の組合せを示す。また，解析結果の代表例として，表 4.5-6 に主立坑解析結果を，表 4.5-7 に水平坑道(3.0m×3.0m 断面)解析結果を，表 4.5-8 に水平坑道(3.0m×3.0m 断面)の支保パターン見直し結果を示す。

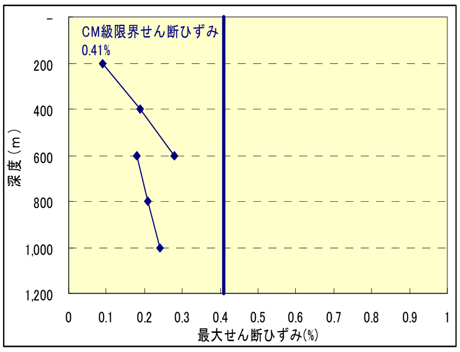
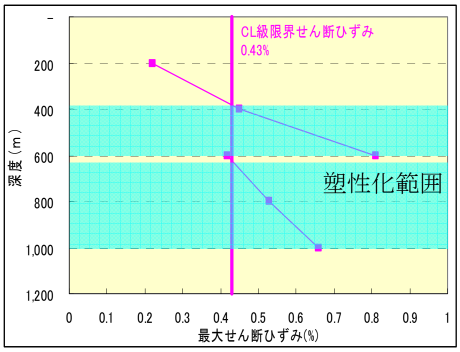
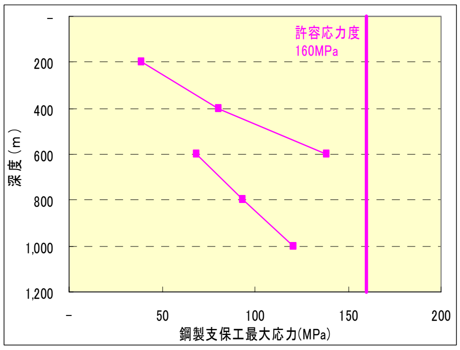
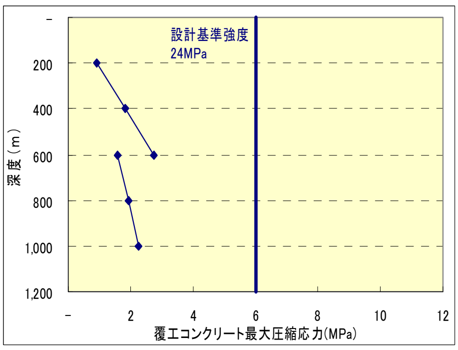
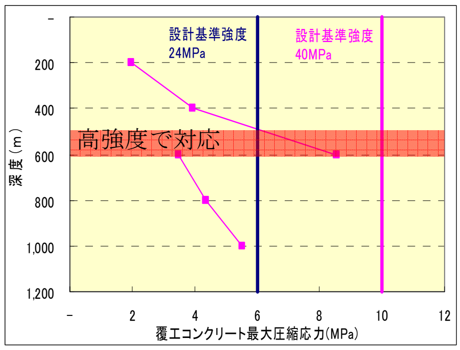
表 4.5-4 立坑解析条件組合せ表

解析断面	深度(m)	岩級	
① 主立坑 (内径 φ6.5m) ② 換気立坑 (内径 φ4.5m)	200	C_L 級	C_M 級
	400	C_L 級	C_M 級
	600	C_L 級	C_M 級
	800	C_L 級	C_M 級
	1,000	C_L 級	C_M 級

表 4.5-5 水平坑道解析条件組合せ表

深度(m)	掘削形状	岩級		
200	3.0×3.0m 4.0×4.0m 5.0×5.0m 8.0×6.5m	C_L 級	C_M 級	B 級
300	3.0×3.0m 4.0×4.0m 5.0×5.0m 8.0×6.5m	C_L 級	C_M 級	B 級
400	3.0×3.0m 4.0×4.0m 5.0×5.0m 8.0×6.5m	C_L 級	C_M 級	B 級
500	3.0×3.0m 4.0×4.0m 5.0×5.0m 8.0×6.5m	C_L 級	C_M 級	B 級

表 4.5-6 立坑解析結果総括表(主立坑)

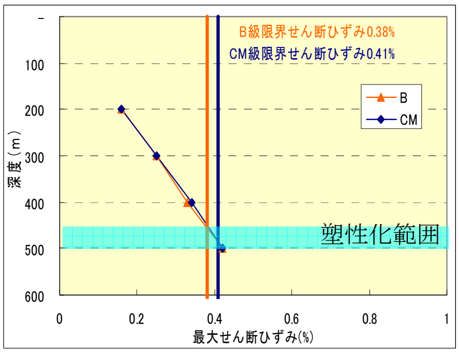
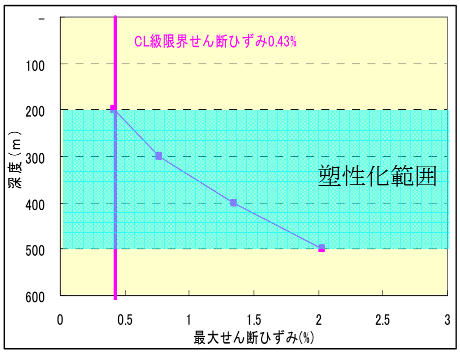
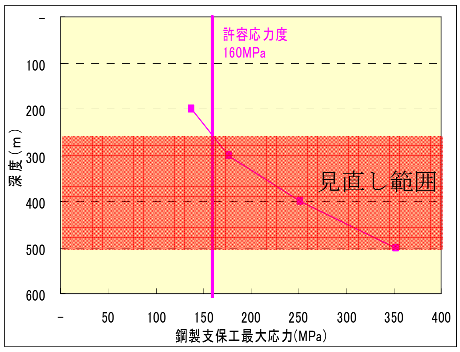
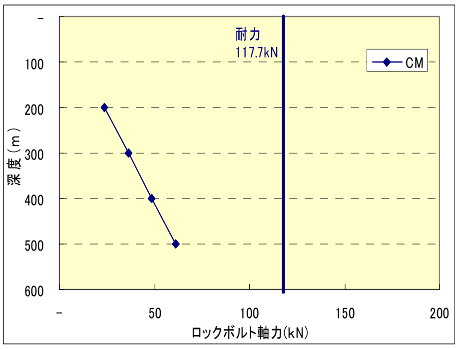
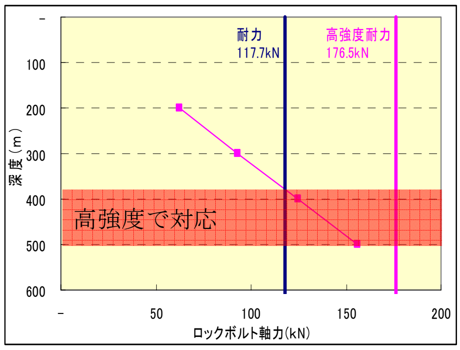
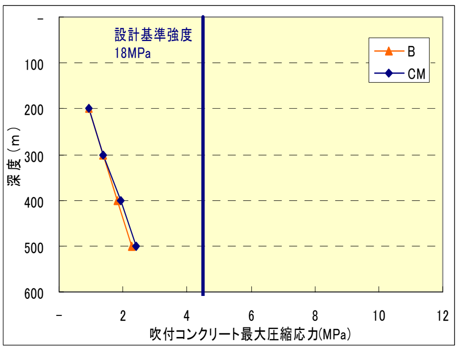
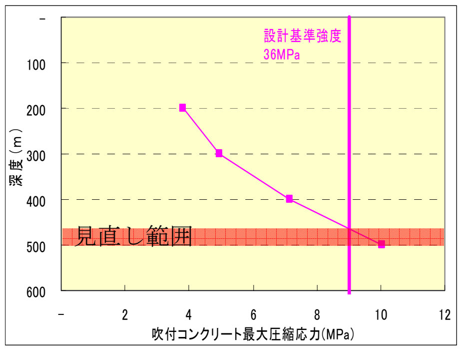
岩級	C_M 級	C_L 級
岩盤の最大せん断ひずみ		
鋼製支保工応力	(支保に用いない)	
覆工コンクリート応力		

岩盤のせん断ひずみが超えている範囲

支保の見直しが必要な範囲

注)図中の深度 600m は, MIZ-1 号孔において断層の存在が確認された位置であり, 解析結果は断層の上下で異なる数値となっている

表 4.5-7 水平坑道解析結果総括表(3.0×3.0m)

<table>
<tr><th>岩級</th><th>B, C_M 級</th><th>C_L 級</th></tr>
<tr><td>岩盤の最大せん断ひずみ</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>鋼製支保工応力</td><td>(支保に用いない)</td><td>
</td></tr>
<tr><td>ロックボルト軸力</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>吹付けコンクリート応力</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

岩盤のせん断ひずみが超えている範囲

支保の見直しが必要な範囲

表 4.5-8 水平坑道支保パターン見直し総括表

岩級	深度(m)	吹付けコンクリート		鋼製支保工		ロックボルト				
		厚さ(mm)	設計基準強度(MPa)	部材	ピッチ(mm)	耐力(kN)	長さ(mm)	本数	周方向ピッチ(mm)	軸方向ピッチ(mm)
C_L	200	100	36	H100	1,000	117.7	1,500	8	1,000	1,000
	300	100	36	H100	900	117.7	1,500	8	1,000	1,000
	400	125	36	H125	850	176.5	1,500	8	1,000	1,000
	500	150	36	H150	800	176.5	1,500	8	1,000	1,000
C_M	200～500	50	18	—	—	117.7	1,500	1.5(千鳥)	3,000	1,500
B	200～500	30	18	—	—	—	—	—	—	—

この結果，CL 級岩盤では立坑深度 450～600m 付近で，水平坑道では深度 300m 以深で支保パターンの変更が必要と判断され，立坑では高強度吹付けコンクリートの使用，水平坑道では鋼製支保工のランクアップとピッチの変更，吹付けコンクリートの層厚増加，ロックボルトの部材変更が必要となる。

これらの結果は適宜設計等に反映するとともに，施工時には計測等により発生応力等を評価し，設計・施工へのフィードバックにつなげていく予定である。

2) 立坑における高抜け崩壊の検討

高抜け崩壊（立坑と大きな角度で交わる断層・破砕帯等の脚部付近を掘削した際に，これら不連続面の上部地山が立坑内に崩落する現象）はわが国の鉱山技術者の間で広く知られた崩壊形態であるが，その発生機構は十分には明らかにされておらず，また対策工の設計手法も開発余地が残された状況にある。本検討においては，過去の高抜け現象に関する文献調査・聞き取り調査を実施するとともに，有限差分法を用いた数値解析的研究を実施し，高抜け崩壊の発生機構を客観的に明らかにすることを試みた。

① 高抜け現象に関する文献調査・聞き取り調査

既存の文献や工事計画書・工事報告書・工事日誌等を基に，立坑連接部施工時の崩壊・変状発生の有無とその状況を調査するとともに，施工経験者に対して聞き取り調査を実施した。調査対象は，鉱山立坑 16 事例，土木立坑 1 事例の計 17 事例である。

今回の文献調査および聞き取り調査から判明した大深度立坑連接部における崩壊・変状事例生の一覧を表 4.5-9 に示す。

文献調査，聞き取り調査の結果，連接部で発生した崩壊や変状の事例はいたって少ない。これは，今回の調査対象に鉱山立坑が多いことも一因であると思われる。鉱山立坑では，鉱石の積込み連接部を除いて連接位置を比較的自由に選べるため，地質条件の良い深度に連接位置を変更する事例がしばしば見られた。表 4.5-9 に示す事例は，その中で判明した数少ない崩壊・変状例であるが，いずれも地山条件に大きく支配されているものと判断される。

表 4.5-9 大深度立坑連接部崩壊・変状事例一覧

立坑名	発生深度	崩落・変状の概要
B 立坑	SL.−550m	SL.−550m 連接部において連接立坑部の貫通時に，断層に沿った側壁崩壊が発生。この崩壊は復旧時にも引続き，最終的な崩落箇所の大きさは高さ 5m，幅 8m，奥行平均 1m にも達する。この崩落の原因は連接部に現れた小断層によるものと思われる。
F 立坑	深度 607m	最深連接部で，連接部近傍コンクリートの広い範囲にわたって破壊が発生。地山自体の崩落は，連接部の第 3 次ブロック築壁時の坑道切羽の崩落のみが報告されている。その規模は記述されていないが，インバート（底盤コンクリート）型枠が損傷したことから，ほぼ数 m^3～$10m^3$ 程度の地山が塊として落下したものと推定される。このような岩塊が崩落する形態としては，掘削の影響で岩目（不連続面）が緩み崩落するか，切羽に生じたすべりによるものと考えられ，砂岩等の軟岩系の地山で生じる切羽崩壊に近いと推測される。また，連接地点の地山は雲母質の軟弱な岩質とされている。
H 立坑	深度 636m	連接部の天端は弱層を天井に被る位置にあり，岩盤状態が良好にみえたため支保枠の建て込みをしなかったが，微量の水分が回り，鉄筋組み，型枠組立が大半終了した時点で，連接部で小崩落が発生した。
U 立坑	深度 920m	立坑より一般坑道への断面変更部で，支保工の変状が認められたが，拡幅作業によりしのいだ。なお，崩落を引き起こすような地山自体の変状は認められなかった。

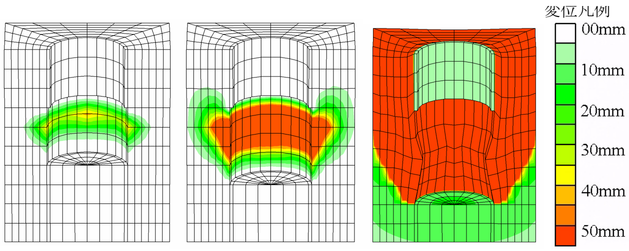
② 数値解析による崩落機構の解明

事例調査によって得られた高抜けの現象を対象として，特殊な問題に対する自由度が高い解析手法である有限差分法を用いて数値解析を実施し，ショートステップ工法における立坑周辺地山の安定機構について検討した。また，断層や破砕帯で発生する高抜けや異常地圧の発生機構について検討するために，亀裂の進展など不連続体的な挙動を再現することができる個別要素法に基づく粒状体解析を用いて数値解析を行なった。

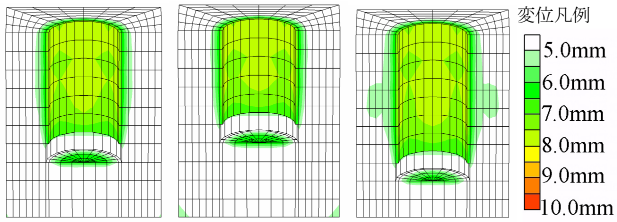
・有限差分法を用いた数値解析

非常に小さな粘着力を有する岩盤を対象として，ショートステップ工法とロングステップ工法を模擬した掘削解析を実施した[31)]。その結果，ショートステップ工法では，立坑壁面の接線方向に圧縮力が作用し，グランドアーチが形成されることが分かった。一方，ロングステップ工法では，立坑近傍の地山の広い範囲で塑性化が進行し，地山が応力再配分に寄与しないため，より深部まで塑性化が広がることが明らかとなった（図4.5-24）。

有限差分法を用いた数値シミュレーションにより，立坑掘削に伴う周辺岩盤の崩壊機構をある程度解明できたと考える。また，崩壊を伴う地山条件においてはショートステップ工法によるグランドアーチ形成の促進が，塑性域の拡大防止に寄与することを数値解析より明らかにした。



深度−505.0m　深度−507.5m　深度−510.0m
(a)ロングステップ工法

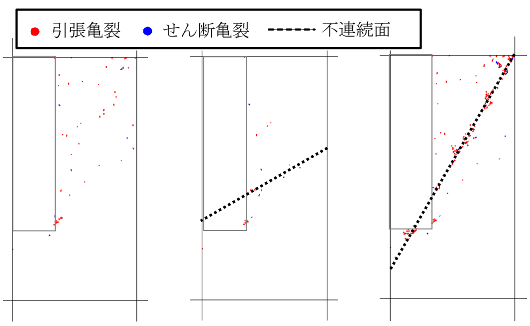


深度−505.0m　深度−507.5m　深度−510.0m
(b)ショートステップ工法

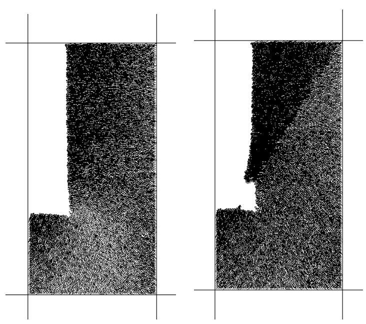
図 4.5-24 掘削工法による地山変位発生の比較

・個別要素法を用いた数値解析

硬岩地山を対象とし立坑掘削の影響によって発生した亀裂による岩盤構造物への影響を検討するために，亀裂の進展など不連続体的な挙動を再現することができる個別要素法に基づく粒状体解析を用いて数値解析を行なった[32)]。解析ケースは，不連続面がない場合，不連続面が存在し立坑との交差角が30°，60°，75°の場合の計4 ケースについて解析を行った(図4.5-25)。また，深度1500m以浅程度では硬岩破壊が発生する可能性は低いと考え，鉛直方向の応力は深度1500m相当として40MPa，水平方向の応力は20MPa とした。解析の結果，不連続面の有無にかかわらず，立坑切羽面の偶角部に割れ目が発生した。不連続面があるケースでは，不連続面の角度によって割れ目の発生の状況が異なり，交差角が60°では，他の角度と比べて割れ目がより多く発生した。一方，75°の場合には不連続面の影響がほとんどない。交差角60°の場合には不連続面上部で立坑に向かって大きな変位が生じており，不連続面が存在する場合には立坑を掘削することにより立坑側壁の崩落が生じる，いわゆる高抜け現象の発生の可能性を示していることがシミュレーションの結果で明らかとなった(図4.5.26)。



(a)不連続面なし　(b)交差角 30°　(c)交差角 60°　(d)交差角 75°
図 4.5-25 割れ目分布図



(a)不連続面なし　(b)交差角 60°
図 4.5-26 変位分布図

(5) その他の工学技術の検討（開発）

1) 工学技術に関する第3段階実施内容の予備検討

2004年度は第3段階で実施する工学技術研究の項目を抽出した。2005年度は，抽出した各試験項目の目的・実施内容の再整理を行い，各試験項目における地質環境，実施方法への要望を取りまとめた。抽出した試験項目は，①低アルカリ性セメントの施工性確認試験，②EDZの力学的・水理学的・地球化学的評価試験，③坑道・EDZの埋め戻し，プラグ設置試験，④試錐孔埋め戻し試験，⑤グラウト試験，⑥熱・水・応力・化学連成挙動試験，⑦緩衝材と周辺岩盤の力学的長期相互作用試験である。地質環境への要望としては各試験項目とも基本的に掘削方法や埋め戻し方法など工学的対策の違いの影響を正確に把握できるように，一様に均質な地質環境で実施することが望ましい。そこで，瑞浪超深地層研究所領域における地質環境特性に関する情報整理を行い，原位置試験を行うにあたり，深度方向と平面方向において好ましい場所を検討した。ここで用いた地質構造モデルには不確実性が含まれているため，実際に実施する際にはこの不確実性も踏まえ，可変型の試験レイアウトを検討する必要がある。

4.6 調査技術開発

4.6.1 実施概要

瑞浪超深地層研究所第 2 段階および第 3 段階において必要とされる既存の調査技術や調査機器の高度化を図るとともに，必要に応じて新規の開発を行うことを目標とする。これらの調査技術や調査機器については，地質環境特性の異なる様々な地域への適用を考慮し，第 1 段階において開発した技術や機器も含め，適用条件や適用範囲などを明確にしていく。2005 年度は以下の項目について調査技術開発を実施した。

① 地質構造調査技術開発
② 地質環境データ解析・可視化システムの構築
③ 水質モニタリング装置の設計・製作
④ データベースの構築

4.6.2 実施内容

① 地質構造調査技術開発

研究坑道の壁面調査において，技術者の技量に依存せず，高品質かつ効率的な透水性割れ目の抽出・分類を目的として，地質観察や可視画像撮影に加えて，3 次元レーザー計測および熱赤外線計測を実施した（表 4.1-1 参照）。

3 次元レーザー計測については，取得される反射強度画像の解析により，泥質岩層と砂岩層が明瞭に区分できることや，斜交層理などの堆積構造，一定規模を有する断層，ならびに連続性の良い割れ目を識別することが可能であるとの結果が得られた [36]。今後は，より客観的かつ定量的な地層や構造の区分手法の検討 [5]とそれらの花崗岩への適用，および効率的な情報処理などによる施工情報としての活用方策を検討する必要がある。

熱赤外線計測については主に，①覆工背面からの流水により壁面全体が濡れている場合が多かった，②地下水と壁面が有為なコントラストを示すほどの温度差が無い場合が多かった（地下水が壁面より高い温度を示す場合も認められた），③測定時の気象条件によって計測値が異なることから，一定区間をまとめた評価・解析が困難などの理由により，これまでのところ十分な成果は得られていない。今後は，壁面を一様に乾燥させ，赤外線計測値の乾燥状態からの経時変化などを計測するなど，計測手法の見直しも含めて，検討を行っていく。

② 地質環境データ解析・可視化システムの構築

データ解釈，地質構造および水理地質構造のモデル化，地下水流動解析，ならびにモデル化・解析結果の可視化に関する作業を通じて，抽出されたシステムの問題点の改善および機能の拡張を適宜実施した。

特に，2005 年度は，本システムを研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化のシミュレートに適用するための準備として，格子分割方法の修正や，解析ソルバーの修正などを実施した。

③ 水質モニタリング装置の設計・製作

2005 年度は，2004 年度に引き続き，深度 300m 以深の予備ステージで実施するボーリング孔（掘削長 100m 程度）に装置を設置するため，地下水の採水，ならびに物理化学パラメータの長期観測が可能な多区間水質連続モニタリング装置の製作を実施した。2005 年度に製作した多区間水質連続モニタリング装置は，2004 年度までに製作した装置と比較して，より水圧の高い環境下での使用に耐えられるように高差圧対応としているほか，基本設計を見直すことによって装置を小型化するなどの改良が実施された。

④ データベースの構築

これまでに東濃地科学センターにおいては調査データを管理するためのデータベースシステムを導入・運用している。

このデータベースシステムにおいては，データ登録の効率化とともに，データベースシステムにおいて管理されている調査データの共有化を図ることが課題として挙げられている。このデータの共有化のためには，研究者が容易にデータを閲覧，検索，およびダウンロードできるシステムを構築する必要があると考えられる。また，調査データのみならず，総合地質柱状図や地質構造／水理地質構造モデルなどのデータ解釈結果についても共有化できるシステムとすることが望ましい。

以上のことから，2005 年度は，2004 年度までに実施したデータの閲覧・検索システムの設計結果に基づき，調査データおよびデータ解釈結果を共有化するための機能，および既存のデータベースシステムに効率的にデータを登録するための機能を有するソフトウェアを統合したシステム（地質環境特性評価データベースシステム）を構築した。

4.7 研究所用地における施設建設

4.7.1 実施概要

2005 年度は，2005 年 2 月に設置が完了した櫓設備や巻上げ設備などの研究坑道掘削のための地上設備を使用して，深度約 50m 以深の掘削を行った。

4.7.2 実施内容

(1)研究坑道の掘削

2003 年 7 月から開始した主立坑と換気立坑の掘削工事を継続して行った。2005 年度は，2005 年 2 月に設置が完了した櫓設備や巻上げ設備などの研究坑道掘削のための地上設備を使用して，深度約 50m 以深の掘削を行った。2005 年 6 月には，深度 100m に位置する予備ステージを完成させた。さらに 2005 年末までに主立坑の深度 172.6m，換気立坑の深度 191.0m までの掘削を実施した。立坑掘削においては，掘削サイクルと 1 回当たりの発破進捗の関係を検討し，掘削サイクルとして，1.3m の発破とズリ搬出を 2 回繰り返した後に，2.6m の覆工コンクリートを打設する変則的なショートステップ工法を標準とした。

掘削の概要を以下に示す。

・主立坑

深度 64.5m～172.6m を掘削

・換気立坑

深度 68.5m～191.0m を掘削

・水平坑道

深度 100m に位置する予備ステージを完成

(2)研究坑道の掘削に伴うウランを含む掘削土の管理

瑞浪超深地層研究所は月吉ウラン鉱床の東端付近に位置しており，主立坑および換気立坑の深度約 120m～180m の区間の掘削土には普通の土よりやや高い濃度のウランが微量に含まれている可能性が高いことから，これらの掘削土については研究所用地内の堆積場に保管し，研究終了後の立坑の埋め戻しに利用することとした。保管場所である堆積場については，周辺の空間放射線線量率や水中のウラン濃度自主管理目標値を定めてこれらの測定を行い，その結果を公開している。なお，本掘削土の管理については，2005 年 10 月 20 日に第 3 者の専門家による公開測定（瑞浪市主催）を受けた。

(3)研究坑道の掘削に伴う排水

地上設備の一つである排水処理設備は，研究坑道掘削工事に伴い発生する地下水（湧水）を処理した上で排水基準に適合させ，近傍河川へ放流していた。この排水の水質は，排水基準値を超えてはいないものの，放流先河川の水質のうち 2 項目（ふっ素及びほう素）が環境基準値を超えていたことが 2005 年 10 月に判明した。このため関係自治体と協議を行い，排水を停止した上で（排水停止時，主立坑深度 172.6m，換気立坑深度 191.0m まで進捗），既存排水処理設備にふっ素およびほう素の濃度低減のための設備を付加し，環境基準以下の水質に浄化できる設備とし，2005 年 11 月 17 日より排水を開始した。

(4)排水を停止後の進捗

排水停止直後においては，排水処理対策を主眼とした検討を行い，当初の排水処理設備にふっ素およびほう素の濃度低減のための設備を既存設備に付加する方式を採用し，2005 年 11 月 17 日より排水を開始した。ただし，当初の日処理量は 480m^3/日であり，立坑内のスカフォードの水没を避けることの出来る程度の処理能力であった。このため，ふっ素およびほう素の処理能力を増強し，坑内に滞留している湧

水を全て排出できる 720 m^3/日に増強した設備を完成させた。この設備を 2006 年 2 月以降稼動させ，両立坑内から地下水の排水を開始した。今後，排水停止前の深度まで排水させる予定である(2006 年度末主立坑内地下水位:深度約 144m，換気立坑内地下水位:深度約 110m)。

(5)周辺環境モニタリング調査

立坑掘削にともなう周辺環境への影響の有無を確認するため，2005 年度は以下のモニタリングを実施した。

1)河川流量調査

河川流量調査は狭間川の 3 箇所に設置した河川流量計(水位計)により実施した。設置場所は狭間川の上流，中流および下流地点の 3 箇所であり，上流地点は研究所用地の北東約 1,300m，中流地点は北東約 300m，下流地点は南南東約 800m である。調査方法は，観測される水位(P)と流量(Q)の関係を示す水位流量曲線(P-Q 曲線)を予め求めておき，この関係を用いて，計測した水位を流量に換算し，流量を算定する方法である。2005 年度は水位流量曲線式を設定するためのデータを蓄積した。

2)地下水位調査

研究所周辺の民家等の井戸 10 箇所に設置した地下水位計により調査を実施した。各地点において年間を通じての地下水位の変動幅が把握されるとともに基準水位が分かり，揚水との関係，降雨時の地下水位の反応の状況を把握した。

3)騒音・振動調査

騒音・振動調査は研究坑道掘削工事において稼動している機械や発破作業による影響を把握するために実施している。2005 年度は，2005 年 7 月，8 月，2006 年 2 月(2 回)の計 4 回(各 1 日間)実施した。調査結果は，騒音・振動とも特定建設業の規制に関する基準[注1)]を大きく下回るレベルであった。

4)水質調査

研究坑道掘削工事に伴う立坑からの排水の放流先である狭間川の水質調査として，試料を採取し行なった。調査場所は狭間川の上流および下流地点の 2 箇所であり，上流地点は瑞浪国際地科学交流館敷地北側，下流地点は排水口から約 20m 下流である。排水は，排水基準に適合するように処理した上で放流していたが，放流先河川の水質のうち，ふっ素・ほう素が，排水基準を超えてはいないものの，環境基準を超えていたことが判明した(2005 年 10 月)。このため，関係自治体と協議を行い，排水を停止した上で既存排水処理設備に除去設備を付加し，環境基準以下の水質に浄化できる設備とし，2005 年 11 月より排水を開始した。

注1)「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に定める作業時間，期間の基準」
「振動規制法施行規則第 11 条に定める特定建設作業における作業時間及び期間の規定」

参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所計画年度計画書（2005 年度）”，JNC TN7410 2005-001(2005).

2) 持田裕之(2004): “瑞浪超深地層研究所用地のボーリングを利用した瑞浪層群地質層序の検討結果速報 IR04-14”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7420 2004-003

3) 糸魚川淳二: “瑞浪層群の地質”，瑞浪市化石博物館研究報告，No.1，pp.9-42 (1974)

4) 細山光也(2002): “瑞浪層群明世累層山野内層最上部の凝灰岩層”，名古屋地学，No.64，pp.26-31

5) 持田裕之,天野健治，鶴田忠彦(2007): “3D レーザースキャナーの受光強度画像を用いた画像処理による岩相区分の試みー瑞浪超深地層研究所に分布する瑞浪層群での適用事例―”，応用地質，Vol.48，No.3，pp.126-131.

6) Cosma C, Heikkinen P and Keskinen J (2003): “Multiazimuth VSP for rock characterization of deep waste disposal sites in Finland, in Hardrock seismic exploration”, SEG, pp.207-226.

7) 吉田秀典，堀井秀之(1996)：“マイクロメカニズムに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析”，土木学会論文集，No.535，Ⅲ-34，pp.23-41.

8) M. Oda(1988): “An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.2, pp.59-69.

9) 石井卓，郷家光男，桜井英行，里優，木下直人，菅原健太郎(2002)：“仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法”，土木学会論文集，No.715／III-60，pp.237-250.

10) 郷家光男，堀田政國，多田浩幸(2004)：“掘削損傷領域を考慮したクラックテンソル・仮想割れ目モデルによる坑道掘削影響解析”，核燃料サイクル開発機構（契約業務報告書；清水建設株式会社）JNC TJ7400 2004-007.

11) 大久保誠介(1998)：“長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究（平成 9 年度）”，動力炉・核燃料開発事業団（委託研究成果報告書；東京大学），PNC TJ1602 98-004.

12) 下茂道人，山本　肇(1996)：“等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法”，大成建設技術研究所報 pp.257-262.

13) 三枝博光，下茂道人，文村賢一，竹内真司，尾上博則(2006)：地下研究坑道掘削に伴う地下水流動状態の変化を予測するための地下水流動解析とそれに基づく調査研究計画の策定，日本地下水学会 2006 年秋季講演会講演要旨，pp.258-263.

14) 尾上博則，三枝博光，本島貴之，渡邊正，井尻裕二，大津宏康(2006)：突発湧水に対するリスク評価・管理手法の構築（その 1） －立坑掘削時における突発湧水リスクに対する断層の水理学的調査について－，土木学会第 61 回年次学術講演会論文集，CS05-009，pp.223-224.

15) 大津宏康，尾ノ井芳樹，大西有三，李圭太：金融工学理論に基づく地盤リスク評価・対応に関する一考察，土木学会論文集，No. 742/VI-60，pp.101-113，2003.

16) 本島貴之，井尻裕二，尾上博則，三枝博光，渡邊正，大津宏康(2006)：突発湧水に対するリスク評価・管理手法の構築（その 2） －観測水位を指標とした立坑掘削時における突発湧水リスクの管理手法について－，土木学会第 61 回年次学術講演会論文集，CS05-010，pp.225-226.

17) 田中達也，安藤賢一，橋本秀爾，三枝博光，竹内真司，天野健治：岩盤中の透水構造分布に着目した水理地質構造モデルの構築手法の検討，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集，pp.267-272，2007.

18) Iwatsuki,T., Furue,R., Mie,H. and Mizuno,T. (2005): Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU), Applied Geochemistry, 20,

pp.2283-2302.
19) Cui W. and Blockley D. I. (1990): Interval probably theory for evidential support, Inter. Jour. Intelli. Sys., 5, pp.183-192
20) Foley L., Ball L., Hurst A., Davis J. and Blockley D., (1997): Fuzziness, incompleteness and randomness: Classification of uncertainty in reservoir appraisal, Petroleum Geoscience, 3, 203-209
21) Hall J. W., Blockley D. I., and Davis J. P., (1998): Uncertain inference using interval probability theory, Inter. Jour. Approx. Appli. Reason., 19, pp.247-264
22) Blockley D. I., and Godfrey P., (2000): Doing it differently – system for rethinking construction, Thomas Telford, London
23) Davis J. P. and Hall J.W., (2003): A software-supported process for assembling evidence and handling uncertainty in decision-making, Decision Support System, 35, pp.415-433
24) Folk, R. L. (1974): The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity, Jour. Sed. Petrol. , 44, pp. 40-53
25) Mildowski, A. E., Gillespie, M. R., Fortey, N. J., Shephered, T. J., Pearce, J. M. and Metcalfe, R. (1998):The petrology and paragenesis of fracture mineralization in she sellafield area, west Cumbria, Proc. York. Geol. Soc. , 52, pp.215-241.
26) 延藤　遵, 福田和寛, 佐藤稔紀, 黒田英高：ショートステップ立坑の変形挙動に関する計測と解析, トンネル工学報告集第 16 巻, pp.1-8(2006)
27) 板倉賢一, 徐招峰, 佐藤稔紀, 山地宏志：仮想現実システムを利用した地下構造物設計・施工支援システムの開発, 土木学会, 平成 18 年度第 61 回土木学会年次学術講演会, CD-ROM, CS05-008, pp.221-222(2006)
28) 増田純男, 梅木博之, 清水和彦, 宮原要, 内藤守正, 長谷川宏(1999): “わが国における高レベル放射性廃棄物　地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－　総論レポート”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-020.
29) 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 延藤遵, 秋田哲志：硬岩を対象としたグラウト注入方法に関する考察－瑞浪超深地層研究所におけるグラウト研究（その　1）－, 土木学会, 第　61　回年次学術講演会, pp.227-228(2006)
30) 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 延藤遵, 秋田哲志, 西垣誠：グラウトの高圧注入試験による目詰まり特性の把握－瑞浪超深地層研究所におけるグラウト研究（その 2）－, 土木学会, 第 61 回年次学術講演会, pp.229-230(2006)
31) 山地宏志, 山田文孝, 佐藤稔紀, 船津貴弘, 清水則一：ショートステップ工法の地山安定化機構に関する数値解析的考察, 平成 18 年度第 61 回土木学会年次学術講演会, CD-ROM, CS05-032, pp.269-270(2006)
32) 船津貴弘, 足立　光, 李　茜, 清水則一, 佐藤稔紀, 山地宏志, 硬岩地山における高抜け発生に関する数値解析による検討, 平成 18 年度第 61 回土木学会年次学術講演会, CD-ROM, CS05-034, pp.273-274(2006)
33) Gold Sim Player®ダウンロードサイト：http://www.goldsim.com/Products/GoldSimPlayer.asp
34) (社)土木学会：コンクリート標準仕様書（維持管理編）(2001)
35) (社)土木学会：トンネルの維持管理, トンネル・ライブラリー, 第 14 号（2005）
36) 鶴田忠彦, 天野健治, 持田裕之, 秋好賢治, 松田重雄, 兵頭浩(2005): “3D レーザースキャナーを用いた地質・地質構造の把握と施工情報への活用”, 日本応用地質学会 2005 年度研究発表会・講演論文集, pp.263-266

37) Cosma C, Heikkinen P and Keskinen J (2003): "Multiazimuth VSP for rock characterization of deep waste disposal sites in Finland, in Hardrock seismic exploration", SEG, 207-226.

5. 正馬様用地における調査研究

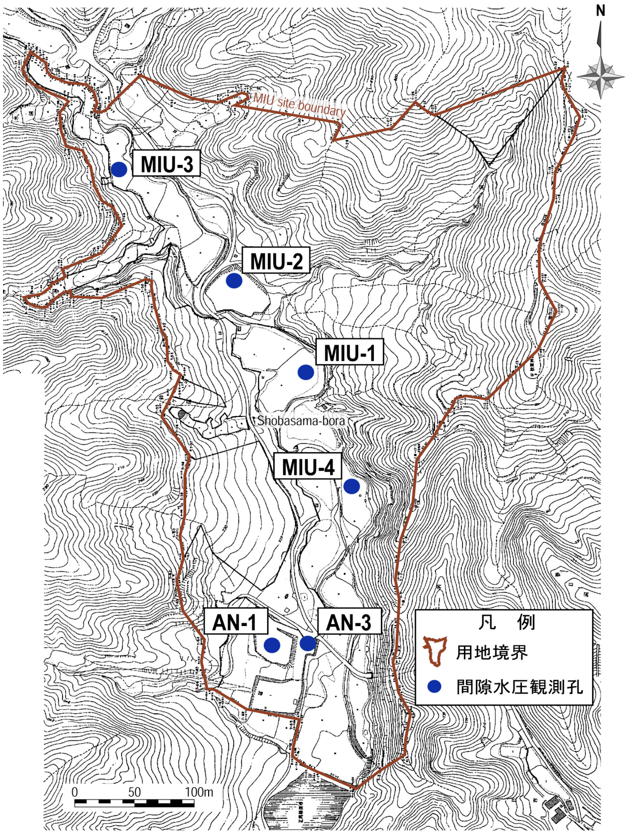
5.1 目標

正馬様における調査・研究では，断層に着目した地下水流動場の把握を目的とした地下水の長期モニタリングおよび地下への涵養量の把握を目的とした表層水理観測を継続する。

5.2 実施内容

(1) 地下水長期モニタリング

2004 年度に引き続き，AN-1 号孔，AN-3 号孔，MIU-1 号孔，MIU-2 号孔，MIU-3 号孔および MIU-4 号孔において MP システムを用いた間隙水圧のモニタリングを継続した（図 5.2-1）。2005 年度における正馬様用地内のボーリング孔で観測された代表的な間隙水圧の変動を図 5.2-2 に示す。図 5.2-2 によると，MSB-1，MSB-3 号孔において間隙水圧低下が確認された約 2 ヶ月後に正馬様用地内の観測孔においても間隙水圧低下が見られた。2006 年 1 月までに低下量は月吉断層の上盤側を対象とした区間で 1～1.5m 程度，月吉断層の下盤側を対象とした区間で 0.5m 未満である。これまで，月吉断層の上盤側と下盤側では間隙水圧の挙動が異なる観測結果が得られていた（例えば藤田，2005）[1]が，今回は変動量の違いはあるものの類似した変動傾向が見られた。なお，2005 年度においては，地震の影響によると考えられる間隙水圧の変動は観測されなかった。



出典：瑞浪市 都市計画基本図（基図は 1/2,500）

図 5.2-1 ボーリング孔位置図（正馬様用地）

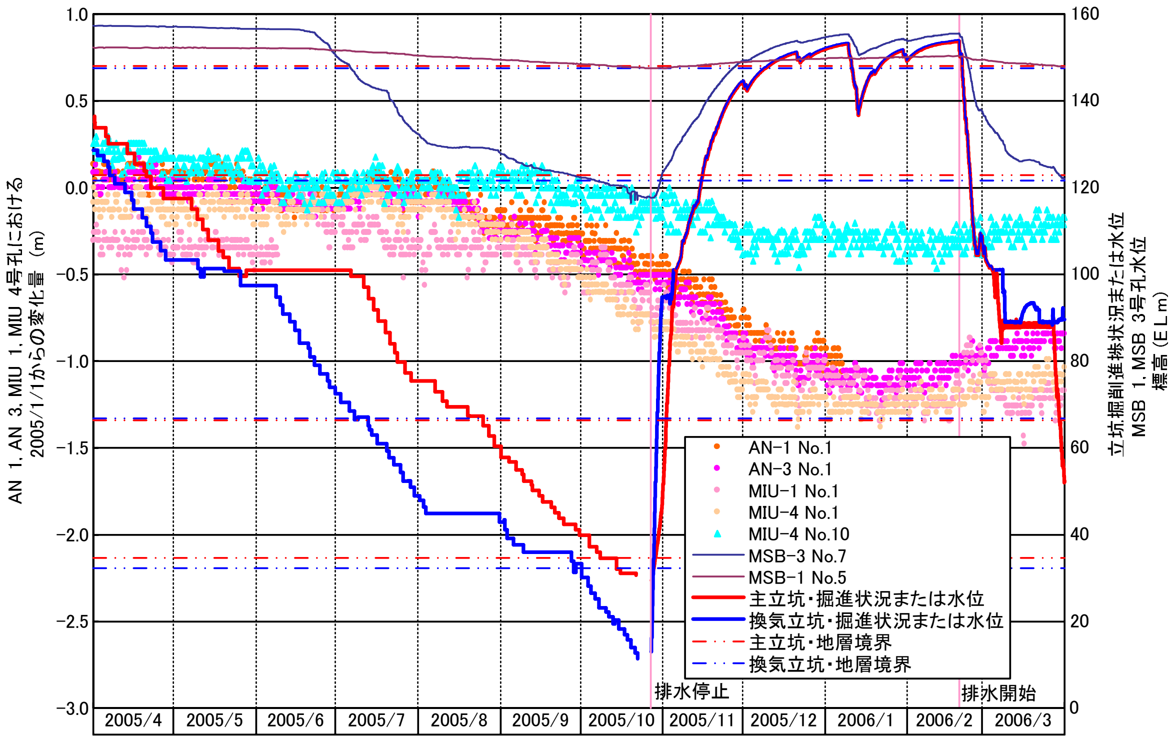


図 5.2-2　正馬様用地内における間隙水圧の変動

(2) 表層水理観測

地下水流動解析において上部境界条件を与える岩盤浸透量を水収支法で算出すること，および水理地質構造モデルのキャリブレーションに必要なデータを取得することを目的として，表層水理定数観測システム（地下水位計，河川流量計，気象観測装置，土壌水分計）での表層水理観測を継続している。また，2004 年 3 月には研究所用地内にも表層水理観測システムを設置し，観測を開始した（図 5.2-3，表 5.2-1）。

2005 年度の観測結果については，欠測期間などにおける補正や補完前のデータに基づき岩盤浸透量の算出を行った。その結果を表 5.2-2 および表 5.2-3 に示す。

正馬川流域における 2005 年度の岩盤浸透量は，全域では 290mm，上流域では 391mm，下流域では 260mm となり，過去の観測結果を見ても上流域の岩盤浸透量が下流域のそれよりも多い傾向にあることがわかる（図 5.2-4）。また，1999 年度以降，正馬川下流域の岩盤浸透量は正の値であり，涵養域を示している。

正馬川モデル流域における 2005 年度の岩盤浸透量は 505mm であり，正馬川流域同様，涵養域であると考えられる。

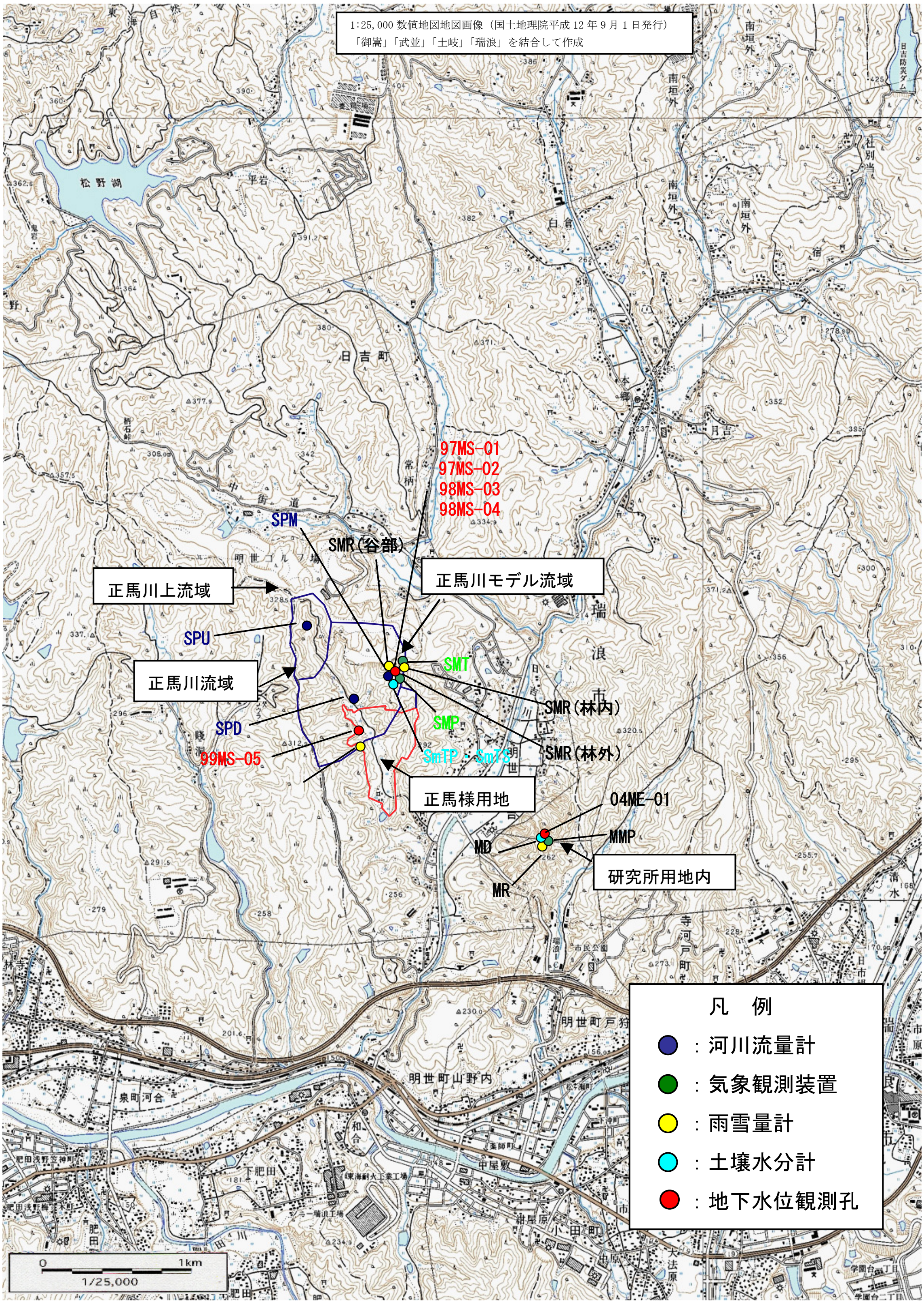


図 5.2-3　表層水理観測位置図

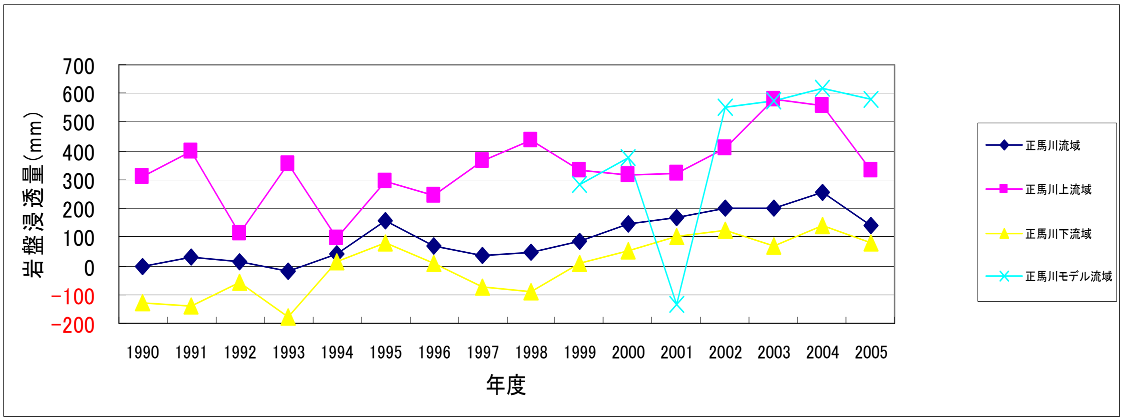


図 5.2-4 岩盤浸透量の経年変化

表 5.2-1 観測項目一覧表

設置流域名	観測装置の名称および記号（記号は図に対応）		蒸発散量	雨雪量	河川流量	地下水位	土壌水分	備考（対象地質他）
研究所用地内	研究所用地内気象観測装置	MMP	●					
	研究所用地内雨雪量計	MR		●				
	04ME01	04ME01				●		瑞浪層群明世累層
	土壌水分計1（3深度）	MD1					●	20cm, 40cm, 70cm
	土壌水分計2（5深度）	MD2					●	20cm, 40cm, 70cm, 130cm, 200cm
正馬様流域	正馬様気象観測装置	SM	●					
	正馬様コミュニティー雨雪量計	SR		●				
	正馬川下流河川流量計	SPD			●			
	正馬川上流河川流量計	SPU			●			
	99MS-05	99MS-05				●		瑞浪層群明世累層基底礫岩層
正馬川モデル流域	正馬川モデル流域タワー	SMT	●					
	正馬川モデル流域ポール	SMP	●					
	正馬川モデル流域林内雨雪量計	SMR林内		●				
	正馬川モデル流域林外雨雪量計	SMR林外		●				
	正馬川モデル流域谷部雨雪量計	SMR谷部		●				
	正馬川モデル流域河川流量計	SPM			●			
	97MS-01	97MS-01				●		瑞浪層群明世累層
	97MS-02	97MS-02				●		瀬戸層群土岐砂礫層
	98MS-03	98MS-03				●		瑞浪層群明世累層
	98MS-04	98MS-04				●		瀬戸層群土岐砂礫層
	SmTP（10深度）	SmTP					●	20cm, 40cm, 60cm, 100cm, 300cm, 500cm, 750cm, 1000cm, 1250cm, 1500cm
	SmTS（8深度）	SmTS					●	20cm, 40cm, 60cm, 100cm, 150cm, , 200cm, 300cm, 500cm

表 5.2-2 正馬様流域における岩盤浸透量

				17年度
P:降水量(mm)			(正馬様)	1321
			(鉱山)	1252
			(平均)	1286.5
E:蒸発散量(mm):鉱山				414
降水量に対する蒸発散量の割合(%)			(正馬様)	31
			(鉱山)	33
			(平均)	32
正馬川流域		R:河川流出高(mm)		583
		降水量に対する河川流出高の割合(%)	(正馬様)	44
			(鉱山)	47
			(平均)	45
		G:岩盤浸透量(mm)	(正馬様)	324
			(鉱山)	255
			(平均)	290
		降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(正馬様)	25
			(鉱山)	20
			(平均)	23
	正馬川上流域	R:河川流出高(mm)		482
		降水量に対する河川流出高の割合(%)	(正馬様)	36
			(鉱山)	38
			(平均)	37
		G:岩盤浸透量(mm)	(正馬様)	425
			(鉱山)	356
			(平均)	391
		降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(正馬様)	32
			(鉱山)	28
			(平均)	30
	正馬川下流域	R:河川流出高(mm)		612
		降水量に対する河川流出高の割合(%)	(正馬様)	46
			(鉱山)	49
			(平均)	48
		G:岩盤浸透量(mm)	(正馬様)	295
			(鉱山)	226
			(平均)	260
		降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(正馬様)	22
			(鉱山)	18
			(平均)	20

表 5.2-3 正馬川モデル流域における岩盤浸透量

			17年度
P:降水量(mm)		(モデル林外)	1321
		(正馬様)	1168
		(平均)	1245
E:蒸発散量(mm):鉱山			414
降水量に対する蒸発散量の割合(%)		(モデル林外)	31
		(正馬様)	35
		(平均)	33
正馬側モデル流域	R:河川流出高(mm)		326
	降水量に対する河川流出高の割合(%)	(モデル林外)	25
		(正馬様)	28
		(平均)	26
	G:岩盤浸透量(mm)	(モデル林外)	581
		(正馬様)	428
		(平均)	505
	降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(モデル林外)	44
		(正馬様)	37
		(平均)	41

参考文献

1) 藤田有二(2005):“超深地層研究所計画における間隙水圧長期観測 2003 年 4 月～2004 年 3 月”, 核燃料サイクル研究開発機構技術資料, JNC TN7450 2005-002.

おわりに

超深地層研究所計画は,「地層処分技術に関する研究開発」のうち, 結晶質岩を対象とした深地層の科学的研究の一環として, 1996 年度から実施しているプロジェクトである。本報告書は, 超深地層研究所計画において 2005 年度に実施した調査研究等で得られた成果等を年度報告書として取りまとめたものである。これらは, 原子力発電環境整備機構による処分事業と国による安全規制の両面を支える技術基盤として活用できるものであると考える。

付録 広域地下水流動研究 2005 年度報告

A-1 はじめに

広域地下水流動研究では，①土岐花崗岩における水理学的・地球化学的な基礎情報の取得，②地下水流動解析結果の妥当性確認のためのデータ取得の二点を目的として，広域地下水流動研究の研究実施領域内に掘削された最大深度約 1,000m の複数のボーリング孔において，地下水長期観測システムを設置して間隙水圧（水頭）計測を継続している。

本報告では 2005 年 4 月から 2006 年 3 月までの間隙水圧（水頭）観測結果および孔内水位観測結果を示す。

A-2 観測地点

2005 年現在，地下水長期観測システムとして MP システム（カナダ Westbay 社製）が設置されているボーリング孔は DH-2，DH-3，DH-7，DH-9，DH-11，DH-13 号孔である。同様に，SPMP システム（スイス Solexperts 社製）が設置されているボーリング孔は DH-15 号孔である。このうち，対象とする間隙水圧の長期観測を実施している箇所は DH-2，DH-11，DH-13，DH-15 号孔である。各ボーリング孔の位置を図 A-1 に示す。

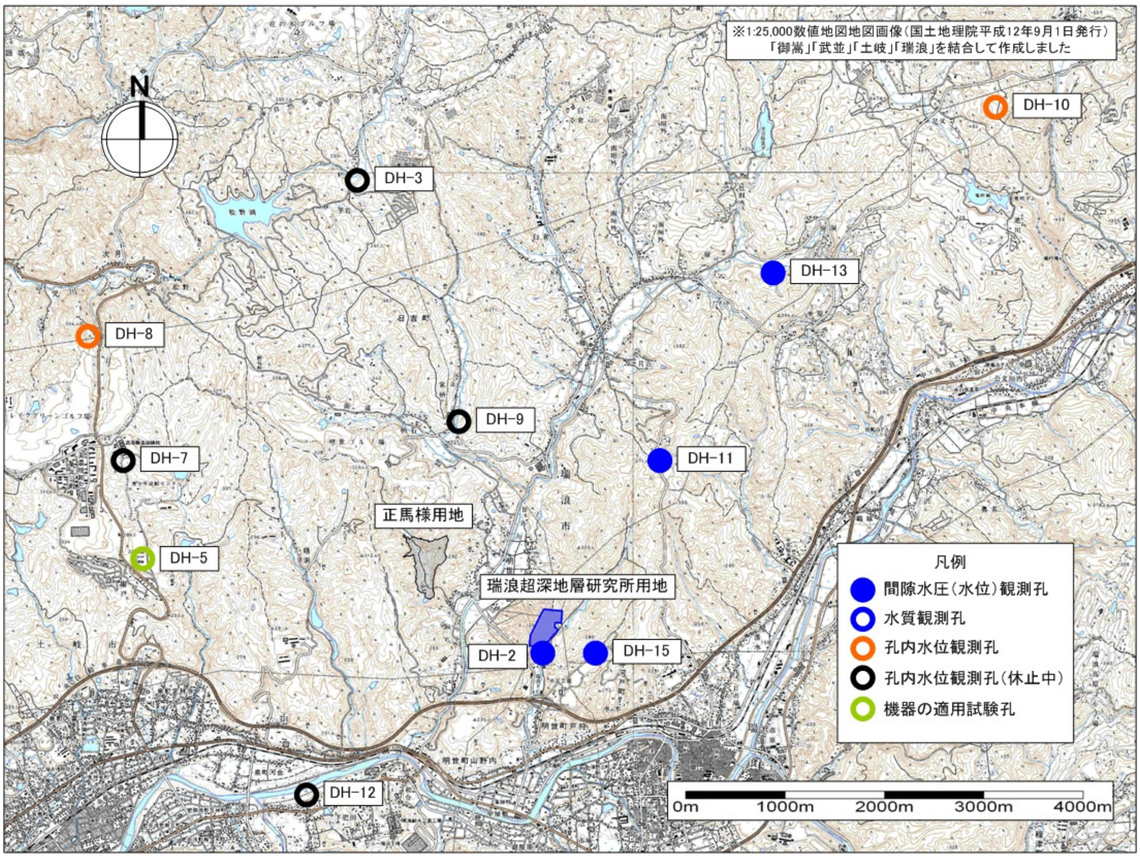


図 A-1 ボーリング孔位置図

A-3 観測結果

(1) DH-2，DH-15 号孔（研究所用地近傍）の水位変化

各孔におけるデータ取得間隔は，DH-2，15 号孔が 5 分，DH-11，13 号孔が 30 分である。2005 年 4 月から 2006 年 3 月までの間隙水圧（水頭）観測結果を以下に記す。

DH-2 および DH-15 号孔では以下のような変化が観測された（図 A-2，A-3）。

6 月まで　：　元来間隙水圧は低下傾向だが，2005 年 4 月頃よりさらに低下傾向が増し，6 月より間隙水圧は急激に低下

6～10 月　：　研究坑道掘削工事の進捗にともない間隙水圧は低下し，研究坑道内の水位が上昇した 2005 年 10 月末より上昇を開始，特に DH-2 号孔では研究坑道内水位と連動するように上昇・低下

10 月以降　：　研究坑道内の水位が低下を始めると共に低下

これら，今までの観測では見られなかったような大きな間隙水圧（水位）低下は研究坑道掘削工事や研究坑道の水位に起因するものである。

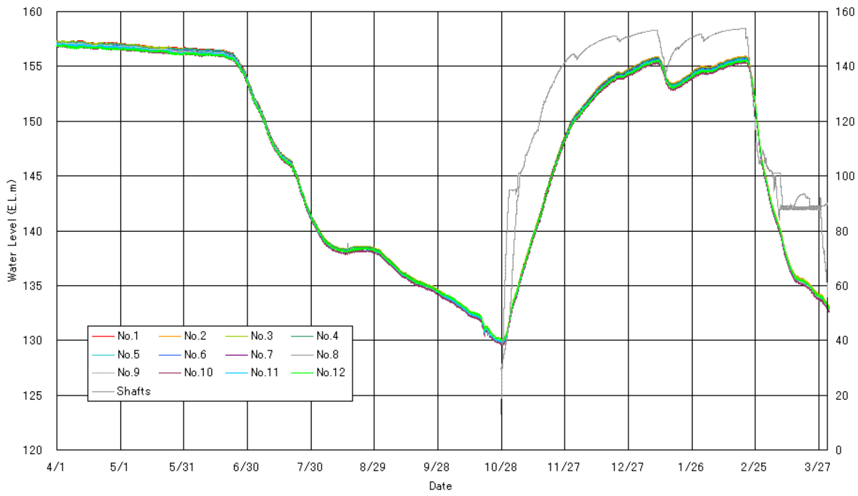


図 A-2　DH-2 号孔の水位変化

（観測区間は全て花崗岩）

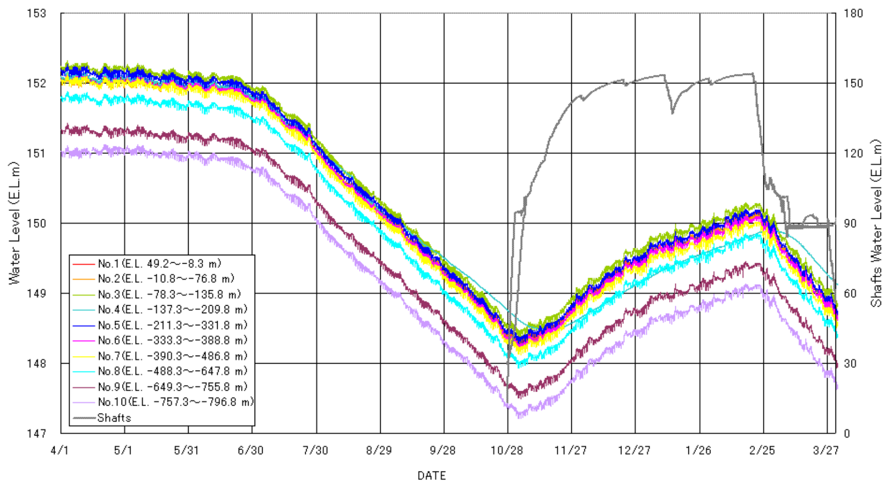


図 A-3　DH-15 号孔の水位変化

（観測区間は全て花崗岩）

(2) DH-11，DH-13 号孔の間隙水圧変化

2005 年 4 月から 2006 年 3 月まで，DH-11 号孔は，水位低下傾向を示す（図 A-4）。DH-13 号孔においては，区間 No.1～6 が水位上昇傾向を示し，区間 No.7 が水位低下傾向を示す（図 A-5）。

本年度においては，地震の影響によると思われる間隙水圧の変動は確認されていない。

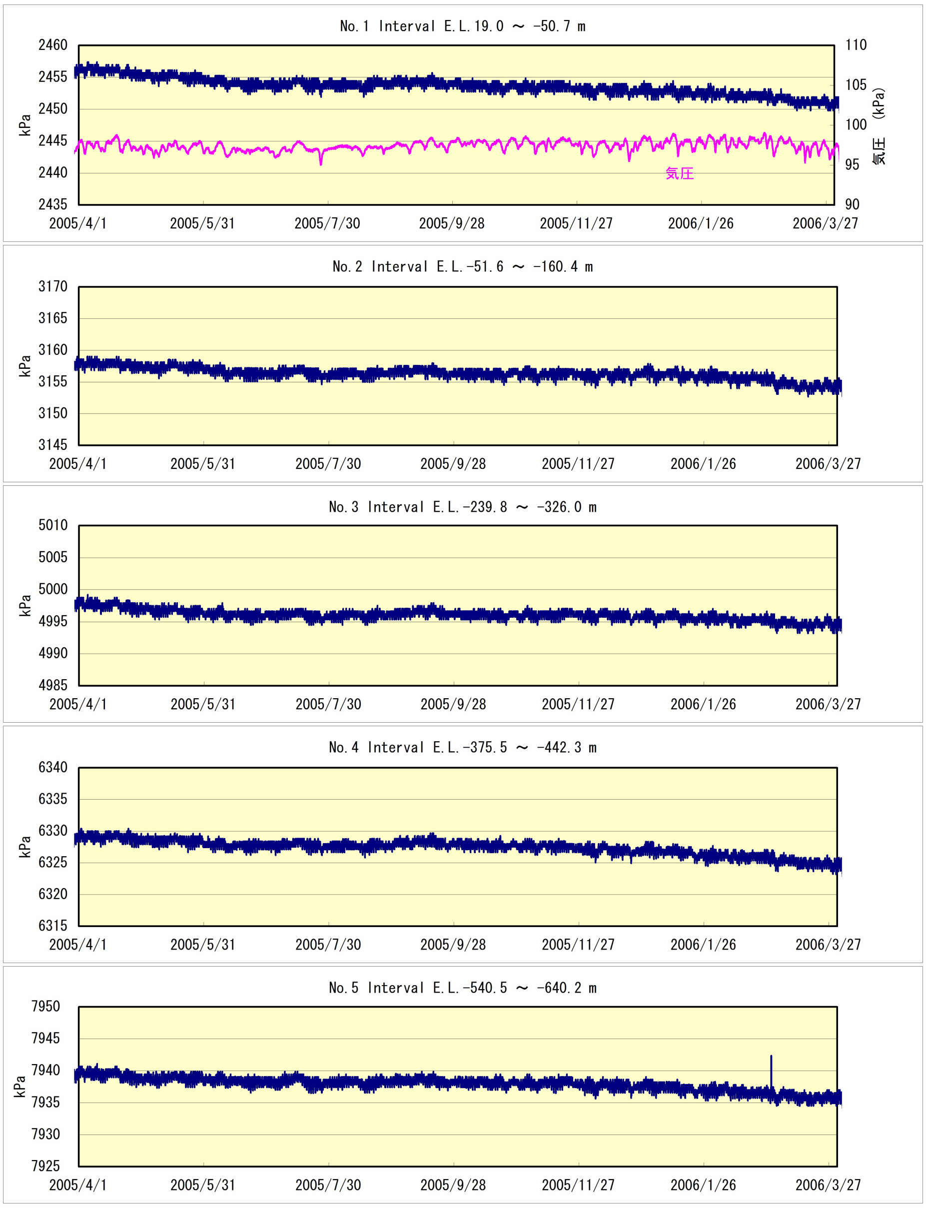


図 A-4　DH-11 号孔の間隙水圧変化

（観測区間は全て花崗岩）

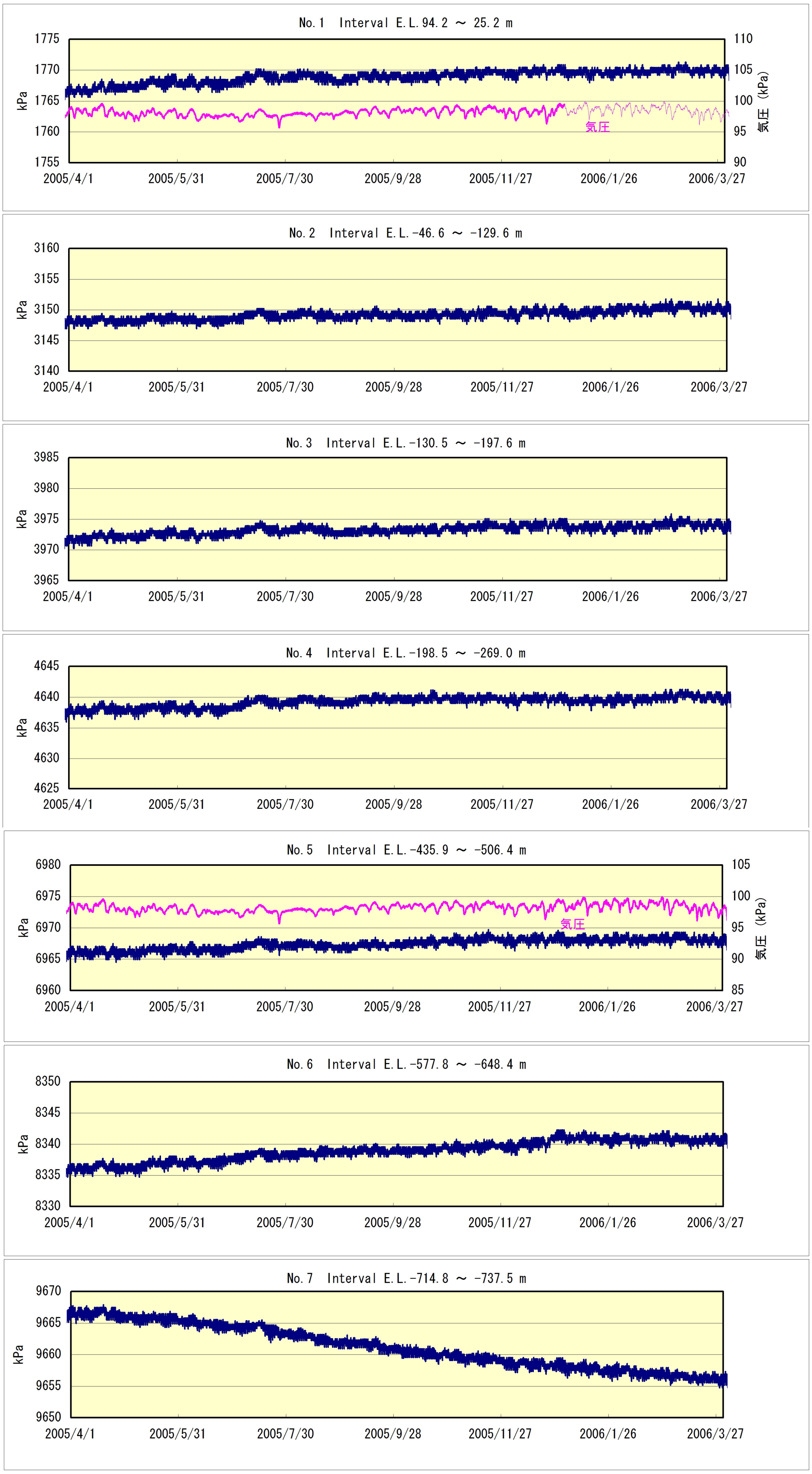


図 A-5 DH-13 号孔の間隙水圧変化(観測区間は全て花崗岩)

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[(a)]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[(b)]	（数字の）１	1
比透磁率[(b)]	（数字の）１	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	µ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[(b)]	rad	1[(b)]	m/m
立体角	ステラジアン[(b)]	sr[(c)]	1[(b)]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[(d)]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[(e)]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[(c)]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能[(f)]	ベクレル[(d)]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[(g)]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で”radioactivity”と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（Ｘ線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}$ mol

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド[(c)]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	µ	$1\ µ=1µm=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）