



地下1,000mに向けて・瑞浪超深地層研究所 の建設計画

佐藤 稔紀 見掛信一郎 玉井 猛 今津 雅紀 坂巻 昌工

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所

Toward a Depth of 1,000 m from the Ground Surface -Construction Scheme of Mizunami Underground Research Laboratory-

Toshinori SATO Shin-ichiro MIKAKE Takeshi TAMAI Masanori IMAZU Masanori SAKAMAKI

Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center

瑞浪超深地層研究所では、深度1,000mの立坑や水平坑道から構成される研究坑道が掘削される。本計画に求められている成果を得るために、研究坑道のレイアウトや仕様は、坑道の中で実施する地質環境や工学技術に関する調査研究やそれらの成果を出す時期、そして敷地や関連法規などの様々な制約条件を考慮したうえで決定する必要がある。本稿では、瑞浪超深地層研究所に求められる要件を満足するために立案した施設計画について述べる。まず、条件として、立地条件、研究内容、及び工程等について整理した。次に、これらの条件に基づき、研究坑道のレイアウトや仕様を決定した。空洞安定性解析、耐震解析及び通気解析などにより、研究坑道のより詳細な仕様を決定するとともに、安全性や施工性を確認した。また、事故事例の調査やリスクマネジメントにより、立坑に特有の危険源を抽出した。

One thousand meter-deep shafts and several level drifts will be excavated in the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project. Design and layout of the shafts and drifts are determined considering the limiting condition, schedule, and investigation plan for characterization of the geological environment and engineering technology.

This paper describes the limiting condition, layout and design of the shafts and drifts of the MIU, and results of mechanical stability, ventilation and earthquake-proof analysis. Details of the design of shafts and drifts are determined, and safety of the design and execution of construction of the MIU are confirmed based on the results of these analyses. Countermeasures and safety are also described in this paper.

キーワード

地層科学研究, 工学技術, 地下研究施設, 立坑, 設計, 大深度, 空洞安定解析, 耐震解析, 通気解析, 安全対策

Geoscientific Study, Engineering Technology, Underground Research Laboratory, Shaft, Design, Ultra-deep, Excavation analysis, Earthquake-proof analysis, Ventilation analysis, Safety Countermeasure



佐藤 稔紀

施設建設グループ所属
副主任研究員
超深地層研究所計画の工学
技術の研究に従事
工学博士



見掛信一郎

施設建設グループ所属
副主任研究員
超深地層研究所計画の工学
技術の研究に従事
工学博士



玉井 猛

施設建設グループ所属
副主任研究員
超深地層研究所計画の工学
技術の研究に従事
技術士（建設部門）



今津 雅紀

施設建設グループ
超深地層研究所計画の工学
技術の研究に従事
工学博士・技術士（建設部
門）



坂巻 昌工

施設建設グループ
次長・グループリーダー
超深地層研究所計画のマネ
ジメント

1. はじめに

サイクル機構が進めている超深地層研究所計画は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究であり、地層処分研究開発の基盤となる地層科学研究の一環として実施するものである。瑞浪超深地層研究所は「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（平成12年11月24日、原子力委員会）」（以下、原子力長計）に示された深地層の研究施設のひとつであり、結晶質岩（花崗岩）を主な調査研究の対象としている¹⁾（堆積岩を対象とした研究施設については、北海道幌延町において計画を進めている²⁾）。本計画において掘削される研究坑道は、深部地質環境の総合的な調査技術の確立及び深地層における工学技術の基礎の開発を行う場としての役割を担うとともに、原子力長計に示されているように深地層に対する国民の理解促進の場としてもその役割は大きい。

本計画では、①硬岩系岩盤の処分深度を1,000mと想定した第2次取りまとめ³⁾で示された地層処分の技術的信頼性を実証する場、また、処分サイトが選定されていない現段階においては、可能性のある深度まで建設して基盤研究開発を行うという超深地層研究所計画の位置づけ、②通常の土木工事と比較して後述する突発湧水や山はねの対策などの難易度が高いいくつかの技術が要求されるという大深度における坑道掘削等の工学技術的意義、③「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」（平成9年4月、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会）において要求される深地層で行う地層科学研究の意義、及び、④立坑掘削の経済性、の4つの観点を鑑み、深度1,000mまでの坑道を掘削する予定である。

本計画は1996年度から開始され、当初は岐阜県瑞浪市明世町吉に位置するサイクル機構の用地（正馬様用地）にて進められてきたが、2001年1月に瑞浪市と瑞浪市有地の賃貸借契約を締結し、瑞浪市有地において研究坑道の掘削を行うこととなった。その後、研究坑道の設計及び坑道掘削に必要な諸設備の設計を行い、2003年3月には研究坑道掘削工事の第1期分（2005年3月納期で立坑深度300mまでの工事）の契約を締結した。

深地層の研究施設の設計、施工計画の立案、研究坑道の掘削とその維持管理などの一連の技術は、深地層の工学技術の基礎に関する研究として位置づけられる。この研究の目的は、不均質性を

有する実際の地質環境に対応し、かつ深度1,000mに達する研究坑道内で展開される調査研究の実施に対応可能な坑道の設計及び施工計画を例示し体系化を図るとともに、実際に深地層の研究施設が建設可能であることを実証することにある。

我が国における立坑掘削は、1950年代から70年代にかけて炭坑において多くの実績がある⁴⁾。しかし、深度1,000m級の立坑については数本と実績が少ない。また、長大トンネルの換気立坑に代表される土木分野の立坑については、深度600m級が最深である。従って、瑞浪超深地層研究所の深度1,000mの立坑掘削を安全かつ効率的に行うためには、土木分野における最新技術と1,000m級の立坑掘削の実績を有する炭坑における経験の融合が必要である。

本稿では、瑞浪超深地層研究所の建設計画のうち、研究坑道のレイアウト、空洞安定性や耐震などの設計及び掘削工法や安全対策などの施工計画について報告する。

2. 建設計画

2.1 計画立案の基本条件

(1) 立地条件

超深地層研究所計画において、地下の研究坑道を設置する場所は、岐阜県瑞浪市明世町の瑞浪市有地である（図1）。サイクル機構は瑞浪市から約7.8haの用地を借り、このうち造成した約1haの敷地に研究坑道を掘削するための諸設備を設置する。用地の周辺には市民公園や体験学習施設などの多数の公共施設があるため、学童を含む一般市民が多く訪れることに配慮する必要がある。

(2) 地形、地質概要

瑞浪市有地周辺の地形は、標高200m程度の丘陵地であり、敷地内を普通河川の狭間川が流れている。この地域には中生代白亜紀の花崗岩体（土岐花崗岩）が基盤として広く分布しており、これを新第三紀の堆積岩（瑞浪層群）が覆っている。立坑の掘削位置においては、深度170mで堆積岩と花崗岩の境界が現われると想定している。

(3) 調査研究の実施に配慮する事項

超深地層研究所計画の調査研究は大きく3つの段階で進める¹⁾。研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）における調査研究は、地表から掘削したボーリング孔における地下水圧や水質モニタリングと坑道からの地質、地下水の水利、地下水の

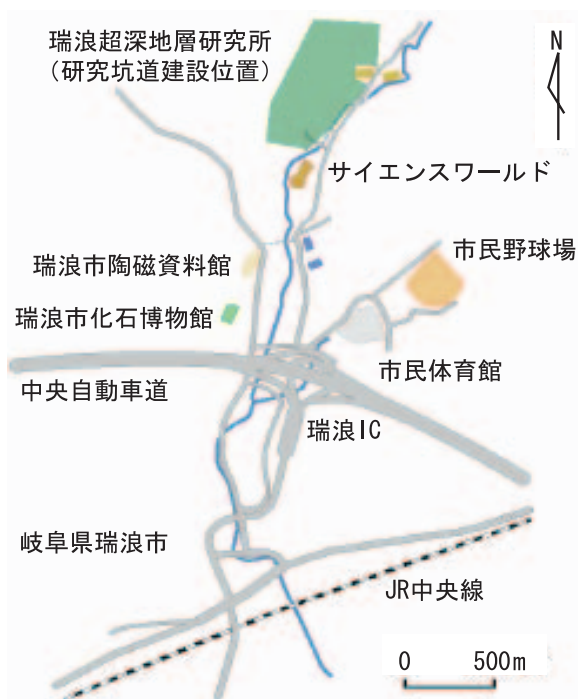


図1 瑞浪超深地層研究所研究坑道建設位置

地球化学及び岩盤力学などに関する調査・試験に大別することができる。後者については坑道掘削などの施工作業との調整が必要となる。また、立坑掘削による周辺の岩盤や地下水への影響について調査する場合、立坑掘削作業後、直ちに調査を開始することを想定しておく必要がある。研究坑道を利用した研究段階（第3段階）における研究は、大部分が坑道内で実施される。現時点で想定される下記のような各分野の調査研究が坑道内の適切な範囲で実施できるように、水平坑道のレイアウトを設定する必要がある。

- ・地質構造調査：坑道壁面地質調査，3次元地質坑道調査，深部領域地質調査など
 - ・地下水の水理学的調査：試錐孔内透水試験，坑道規模透水試験，熱応力下透水試験，単一割れ目や断層を対象とした透水試験など
 - ・地下水の地球化学的調査：地球化学モニタリング，酸化還元状態調査，水質形成機構調査など
 - ・物質移動調査：大規模物質移行試験，単一割れ目や破碎帯を対象とした物質移行試験など
 - ・岩盤力学調査：坑道掘削影響試験，長期挙動試験，原位置岩盤試験，応力測定など
 - ・工学技術：人工材料の岩盤への影響試験，掘削影響の軽減・修復試験，連成挙動試験など
- 以上のような今後の調査研究の実施にあたっ

て，研究坑道の設計や施工計画の変更の必要性が生じた場合には，これに柔軟に対応できるよう配慮する必要がある。

(4) 搬入する資機材

立坑や水平坑道の寸法は，掘削作業の効率性や経済性，搬入する資機材，研究のためのスペースなどを考慮して決定する必要がある。立坑には，水平坑道の展開や研究のための大型重機やボーリングマシンを搬入することになる。これらの機器が分割されて立坑内に搬入できることが立坑の設計及び施工計画の立案において重要である。水平坑道についても立坑と同様であるが，釜石鉱山や東濃鉱山における調査研究の経験から，3m程度の坑道径があれば坑内からのボーリング孔の掘削や調査研究の実施に支障はないと判断した。

(5) 入坑者

立坑掘削中の入坑者としては，工事請負業者等の作業員，サイクル機構をはじめ大学や関係機関等の研究者及び一般の見学者等が想定される。研究者や一般見学者は工事請負業者の労働安全衛生法に基づく安全監理体制のもとで，原則として工事工程を変更しないという条件で受け入れることとし，設計条件としては考慮しないこととした。

(6) 工程

超深地層研究所計画における研究成果については，原子力発電環境整備機構（以下，原環機構）が行う処分事業と国が行う安全基準や指針の策定に反映されるように適宜取りまとめる。立坑掘削の成果は，2010年頃を目途に原環機構が行う精密調査地区の選定に必要な技術基盤として，その成果を反映させることを想定し，そのため，2009年度頃を目安に立坑を深度1,000mに到達させ，2010年度頃には昇降設備（エレベータ）などの設備を完成させることを超深地層研究所計画の大きなマイルストーンのひとつとして設定した。それに向けて，2003年度半ばには立坑の坑口部分の掘削，2004年度末にはやぐら設備などを使用した本格的な立坑掘削を開始する。

2.2 施設設計

(1) 研究坑道のレイアウトと各坑道の機能

当初，建設を計画していた正馬様用地における検討では，超深地層研究所計画において実施すべき調査研究項目を網羅的に設定するとともに，既存のボーリング孔やこれまでに掘削した4本の深

層ボーリング孔のデータを参照していくつかのレイアウトを検討した⁵⁾。基本的なレイアウトは以下のとおりである。

- ・立坑：主立坑と換気立坑の2本
- ・水平坑道：主に第3段階の調査研究を実施するため、立坑の2つの深度（中間部及び最深部）から水平に展開する坑道

瑞浪市有地における地質状況は、正馬様用地と比較すると、堆積岩がやや厚いものの、基盤は同一の土岐花崗岩である。このため、瑞浪市有地におけるレイアウトは正馬様用地における基本的なレイアウト案を踏襲し、敷地境界や工程などの条件を考慮したうえで標準レイアウトを設定した。研究坑道のレイアウトを図2に示す。レイアウトについては、今後取得される瑞浪市有地での地質環境情報に基づいて適宜見直し、詳細化を図っていく。

それぞれの坑道の機能は以下のとおりである。

- ・主立坑：水平坑道掘削のズリ（坑道掘削によって生じた岩塊）の搬出及び掘削作業に必要な重機

の搬出入のルート。

- ・換気立坑：深度1,000m掘削完了後に昇降設備（エレベータ）を設置するスペース及び研究坑道全体の排気立坑としての機能。
- ・中間ステージと最深ステージ：第3段階（坑道を利用した研究段階）の主要な研究場所。
- ・試験坑道：水平坑道の掘削を伴う試験を実施する場所。
- ・予備ステージ：両立坑の連絡、研究坑道への湧水処理のためのポンプ座設置スペース、及び、深度依存性を研究するための場所。

(2) 研究坑道の諸元

立坑や水平坑道の内径については、上記のような、それぞれの坑道に求められる機能と施工性を考慮したうえで設定した。水平坑道については、前述の調査・試験が可能であることと施工性を考慮して設定した。各坑道の寸法は以下のとおりである。

- ・主立坑：内径6.5m、深さ1,025m
- ・換気立坑：内径4.5m、深さ1,010m
- ・中間・最深ステージ：内径3～8m、長さ785m
- ・予備ステージ：内径3m、長さ35m

(3) 空洞の力学的安定性の検討

立坑や水平坑道における空洞安定性解析と支保（坑道を支える部材：覆工コンクリート、吹付けコンクリート、ロックボルト、H型鋼等）の設定については、岩盤の状況に応じて設定するトンネルなどの土木分野における方法に準拠した。ただし、深度が深いことと、立坑と水平坑道の接続部分などの特殊な部分が存在することから、これらの部分については数値解析の手法によった。

岩盤の状況や数値解析において入力する条件については、瑞浪市有地に近接する既存のボーリング孔（DH-2号孔；深度500m）や、正馬様用地のボーリング孔の調査結果^{6),7)}などから設定した（表1）。支保に用いられる部材の物性は表2のとおりである。岩盤に作用する応力と岩盤の状態（健岩部：岩盤等級B、 C_H 、 C_M 、風化・破碎帯部：岩盤等級 C_L 、D、断層部：岩盤等級D）をパラメータとして解析を実施した。

まず、簡易な解析として弾性解析による許容応力度の判定を行い、許容応力度を越えた場合には支保を増強して詳細な平面2次元の有限要素法（Finite Element Method；FEM）弾塑性解析を実施して、支保の再設定を行った。これらの結果に基

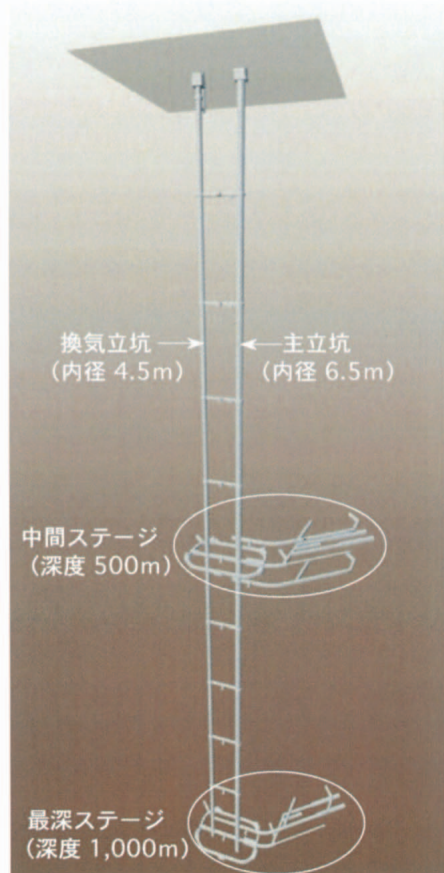


図2 研究坑道レイアウト

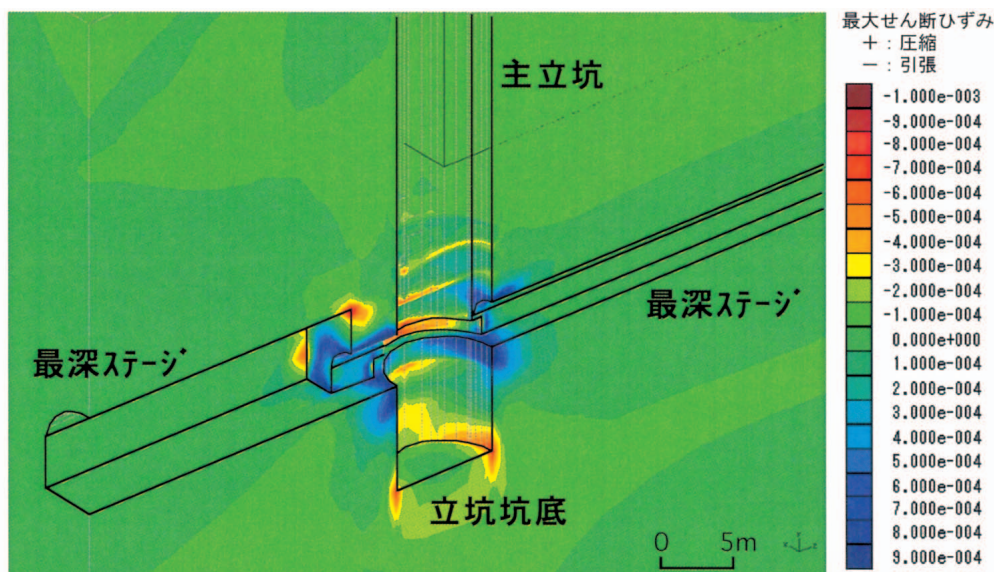


図4 接続部におけるFEM 3次元解析の結果
(最大せん断ひずみの分布)

(4) 耐震設計

瑞浪超深地層研究所の研究坑道は、その深度が1,000mに達する予定であり、通常の中地中構造物と比較して鉛直方向への広がり大きい。このため、地下深部における地震動特性を適切に評価した上で、研究坑道の地震時応答挙動や健全性を評価する必要がある。評価の手順としては、まず、過去の地震や活断層から設計用地震の規模を推定し、模擬地震動を作成した上で、基盤面（解析モデルにおける下方境界面）での入力地震動を設定した。次に、地質状況や研究坑道をモデル化し、設定した入力地震動を作用させた時の立坑や周辺岩盤の応答挙動を動的解析により把握し、地震力を等価震度で表すことにより、健全性評価を実施する際に用いる静的解析手法の適用性を確認した。最後に、静的解析手法により等価震度（動的なせん断応力を静的な震度に置き換えたもの）を与えた時の立坑の覆工コンクリートと周辺岩盤の応力状態を解析し、それぞれの許容応力と比較することにより健全性を確認した。

1) 入力地震動の設定

過去の地震や周辺に分布する活断層の規模から設計用地震の規模を設定し模擬地震動を作成した。過去の地震では、1981年に発生した岐阜県西部を震源とする濃尾地震が最も大きいと考えられる⁸⁾。これを含めて8つの地震を選択し、金井式⁹⁾により最大速度を算出するとともに、大崎スペクトル¹⁰⁾により応答スペクトルを求めて模擬地震動を作成した。

活断層については、活断層詳細デジタルマップ¹¹⁾と新編日本の活断層¹²⁾から建設用地に影響を及ぼす可能性のある活断層を抽出した。前者については、高松断層帯、恵那山断層、猿投山北断層などの6つの断層を、後者については、屏風山断層、赤河断層、猿投山北断層及び笠原断層の4つの断層を抽出し、これらの断層を震源と仮定した時の模擬地震動を過去の地震と同様の手順で作成した。このうち最も影響の大きいものは屏風山断層を震源と仮定したもので、この地震波の加速度応答スペクトルは最大1,500galで、最大加速度は478.6galである。この地震波は解放基盤面（今回は地表面と仮定した）において設定されているため、1次元成層地盤解析により、解析上の基盤面（GL-1,500m）における地震波を算出し、後述するFEM動的解析の入力地震動（最大加速度：471.9gal）とした。

2) 立坑及び周辺岩盤の地震時応答挙動の把握

FEM動的解析により、立坑、覆工コンクリート及び周辺岩盤の地震時の応答加速度及び応答変位を求めた。立坑は軸対象としてモデル化し、上記の入力地震動を作用させた。その結果、コンクリート覆工の内側、立坑から100m離れた岩盤及び地表面において、応答加速度及び変位に有意な差が見られなかった。このため、立坑の存在が地震時挙動に及ぼす影響を無視することが可能と判断し、1次

元成層地盤解析より等価震度を算定して静的解析手法により立坑の健全性を検討することとした。

3) 静的解析手法の選定及び等価震度の算定

立坑の耐震設計は、覆工構造のみでなく周辺岩盤の健全性をあわせて等価な静的応力に換算して評価する必要がある。適用可能なFEM静的解析手法としては、応答震度法¹³⁾、地盤応答法及び応答変位法¹⁴⁾に限定されるが、今回は地中構造物の耐震設計に適用実績が多い応答震度法による静的解析手法を採用した。応答震度法では、モデルに載荷させる応答震度として、自由地盤において算定された応答加速度やせん断応力のある時刻における分布や最大分布（ここでは、等価震度）を基に算定する。

等価震度の算定方法については、日比野ら¹⁵⁾の研究を参照し、最大せん断力から求める等価震度法を採用した。最大せん断力から理論式を用いて等価震度を求める具体的な方法には、以下の4つがある。

- ・方法1：最大せん断力分布により算定
- ・方法2：地表面においてせん断応力が最大となる時刻におけるせん断力分布より算定
- ・方法3：立坑の上端と下端の相対変位が最大となる時刻におけるせん断力分布より算定
- ・方法4：各時刻におけるせん断力分布より等価震度の時刻歴を算定し、その最大値分布を算定

これらの方法によって計算された等価震度を作用させた静的解析の結果と前出のFEM動的解析の結果を図5に示す。図より、方法1（最大せん断力分布により算定）による結果が、立坑全長においてFEM動的解析結果に最も近いことがわかる。このため、等価震度は1次元成層地盤解析によって得られた最大せん断力分布により算定することとした。

4) 研究坑道の健全性検討

前出の最大せん断力分布から算定した等価震度を用いた応答震度法による3次元のFEM静的解析により、研究坑道の健全性を評価した。解析に用いたモデルは主立坑と覆工コンクリートを考慮し、岩盤の物性は岩盤等級に応じて設定した（表3）。解析は以下の2つのステップで行った。

Step 1：掘削影響の解析（弾塑性解析）

Step 2：地震の影響解析（弾塑性解析）

まずStep 1で坑道掘削によって生じる周辺岩盤の応力状態を解析し、これにStep 2で地震を作用さ

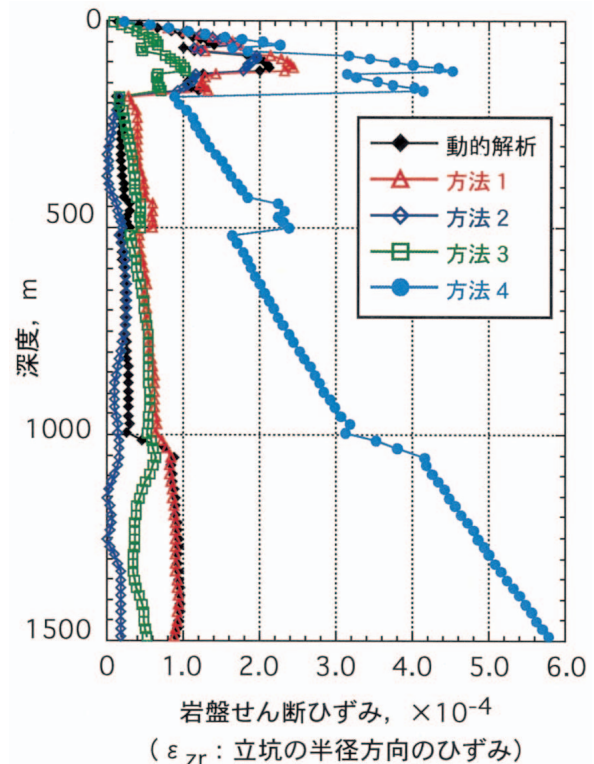


図5 岩盤のせん断ひずみの算定結果

表3 耐震解析に用いる岩盤物性

深度 (m)	岩 種	岩盤 等級	弾性係数(GPa)		ポアソン比	
			静的	動的	静的	動的
0	砂岩・泥岩	C _L	2.15	5.11	0.31	0.40
63.2	礫 岩	D	0.63	8.05	0.38	
79.2	砂岩・泥岩			5.11		
124.2	礫 岩	C _L	2.15	8.05	0.31	
175.2	花 崗 岩	B	35.6	35.7	0.35	0.34
234.2		C _H	30.1			
247.2		C _M	24.5			
262.2		C _H	30.1			
309.2		C _M	24.5			
359.2		C _H	30.1			
435.2		C _M	24.5	31.2		
466.2				32.7		
482.2		B	35.6	47.5		
508.2						
576.2		C _H	30.1			
598.5		B	35.6			
826.2	C _H	30.1				

※岩盤等級は電中研式岩盤分類による。

せた場合の応力状態を求め、許容応力の範囲内かどうかを確認した。

覆工コンクリート発生断面力のうちの立坑の円周方向軸力とコンクリート面内のせん断力を図6に示す。同図より、掘削時に卓越していた円周方

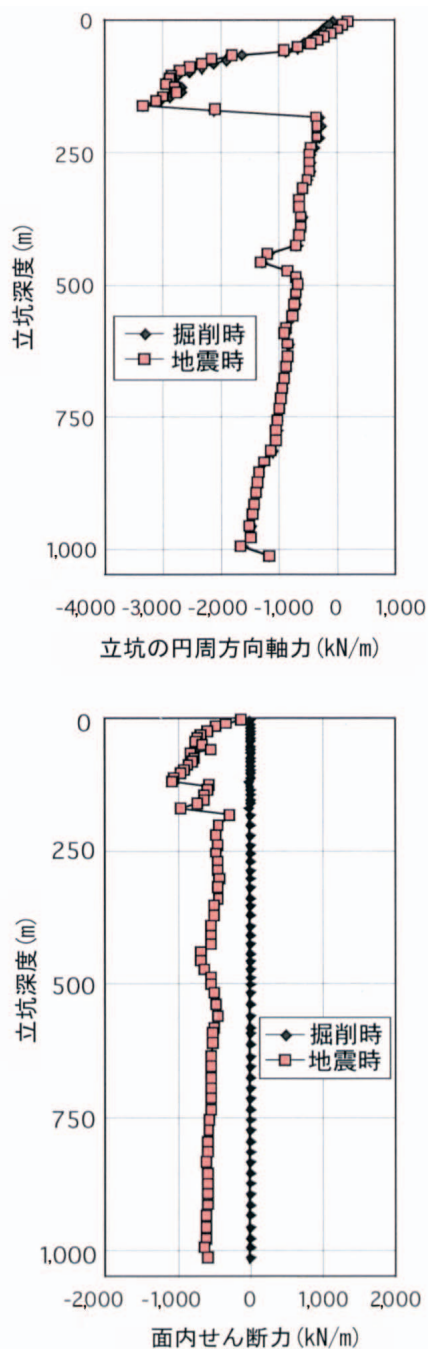


図6 覆工コンクリート発生断面力

向軸力は地震時増分が小さく、むしろ地震時には、特に深度170m以浅の堆積岩の岩盤等級の弱い部分において、面内せん断力が卓越することが分かる。地震時に覆工コンクリートに発生する応力は 12.7N/mm^2 と、地震時の許容応力 (26.1N/mm^2) と比較して小さい。このことから、地震による影響は小さく、圧縮破壊には至らないことが分かる。また、立坑周辺の岩盤においては、地震時に新たに塑性域が発生する領域はほとんど無いことが分かった。以上により、立坑の地震時健全性を確認した。

(5) 通気解析に基づく設備設計と火災時対策

研究坑道において最も起こりうる災害のひとつである火災については、火災が発生した場合の避難路と避難時間の確保が最も重要である。瑞浪超深地層研究所においては、2本の立坑以外に坑外まで避難できる安全区画(すなわち3本目の立坑)あるいは2本の立坑内の防火区画を確保することは困難であり、十分な退避時間を確保できない場合があり得ると判断した。このため、防災の基本コンセプトとして、火災発生時は避難所へ退避することとし、安全に避難できる位置(安全区画)の選定、避難時間の確保、避難所のスペース、形状、具備すべき条件について検討した。

これらの検討のために、鉱山において適用実績の多い通気網解析を用いて火災を想定した解析を行った¹⁶⁾。防災の基本コンセプトを決定する根拠となった火災時解析結果の概要を表4に示す。また、施工段階を細分化して、火元ごとに火災が発生した際の状況を解析した。この結果に基づき、避難所の位置や仕様を検討し、各水平坑道に避難所を設置するレイアウトとした。また、換気設備や消火設備を設計した。

表4 通気網解析による火災時解析の結果

発生場所	火災の状況	避難方法
中間ステージ及び最深ステージ	風向きの逆転が無く、火災ガスは換気立坑から気流に乗って排出される。	主立坑や中間ステージは安全区画となるため、主立坑からの地表避難が可能。
主立坑坑底及び換気立坑(火災の初期)	火災ガスは概ね換気立坑から排出されるが、一部のガスが浅部の予備ステージで逆流し、主立坑を降下して坑内全域に達する。主立坑や各ステージは火災ガスが流れ込むが、温度上昇や火災ガス濃度の増加は小規模。	防煙マスク着用で主立坑からの地表避難は不可能ではないが、坑内の避難所への退避の方が安全。
主立坑浅部(火災の初期)	火災ガスは中間ステージを経由して換気立坑から排出される。深部への通気量は低下し、火災ガスの拡大には時間を要するが、時間の経過とともに坑内全域にガスが達する。	状況によっては防煙マスク着用で換気立坑浅部は避難が可能であるが、坑内の避難所への退避の方が安全。

2.3 施工計画

(1) 掘削工法

1) 立坑の掘削工法

立坑の掘削工法としては、発破による工法として、ショートステップ工法、ロングステップ工法、NATM(New Austrian Tunneling Method)など、機械による工法として、トンネルボーリングマシン(TBM:Tunnel Boring Machine)やレイズボーラーを用いた工法がある。発破工法のうち、発破と覆工を短区間で交互に繰り返すショートステップ工法は実績も多く、岩盤状態の悪い場所での施工例もあり、掘進速度が速い工法である。機械工法は、道路トンネルの換気立坑のように、あらかじめ立坑到達深度に坑道が展開されていることが前提条件となる。すなわち、TBM掘削のためには水抜き用のボーリングが施工されていることが前提となり、レイズボーラーによる掘削のためには、搬入のための坑道があらかじめ必要となる。このため、今回の計画ではこれらの工法の採用は困難である。瑞浪超深地層研究所では、前述の利点を踏まえ、主立坑及び換気立坑の2本の立坑を同時にショートステップ工法で掘削することとした。

立坑掘削においては、深度が深くなるにつれて発破したブリの搬出時間が全体の掘削作業時間に

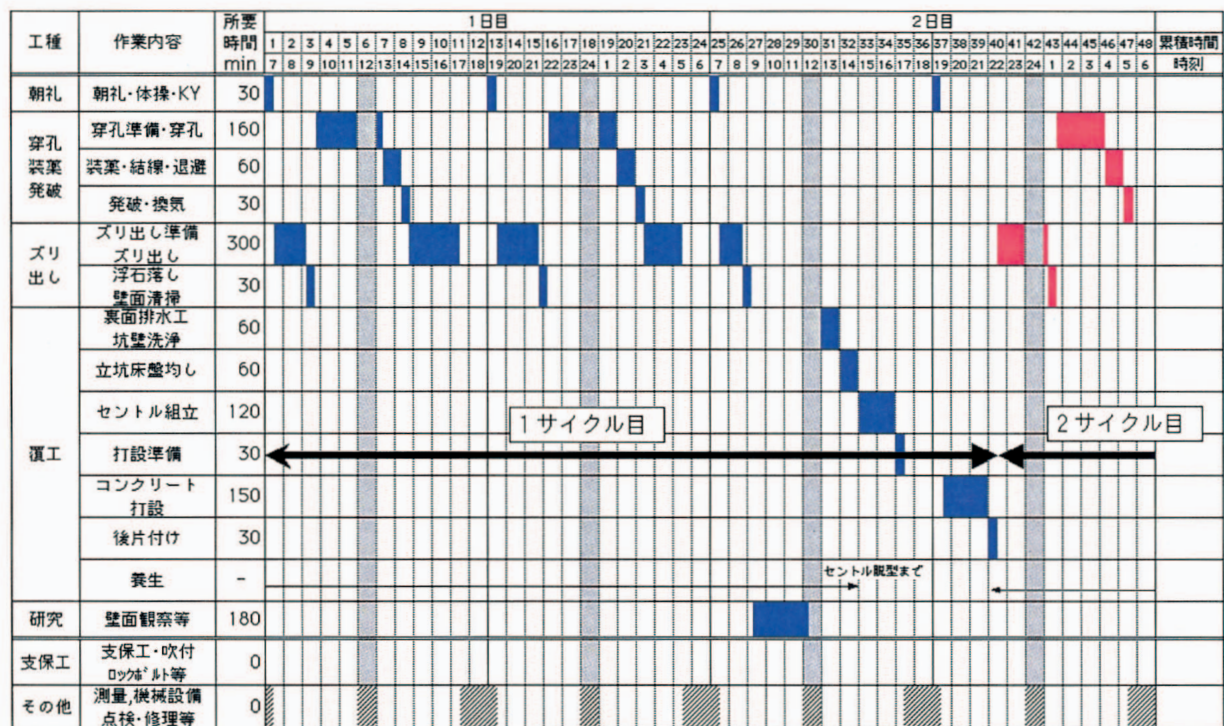
占める割合が大きくなる。このため、効率のよいズリ出し方法として、替キブル方式(2つのズリキブル(鉄缶)を使用した方法)を採用することとした。また、掘削のサイクルと1回当たりの発破進捗の関係を検討し、安全かつ最も効率の良い掘削サイクルとして、1.3mの発破を2回繰り返して、2.6mのコンクリート覆工を打設する変則のショートステップ工法を採用することとした。図7に花崗岩の深度500mにおけるサイクルタイムの例を示す。

2) 水平坑道の掘削工法

水平坑道の掘削工法としては、大きく、主に硬岩に用いられる発破工法と、自由断面掘削機やTBMによる機械掘削に大別できる。坑道掘削影響試験などの研究用に機械掘削を行う部分を除けば、瑞浪超深地層研究所における水平坑道は坑道延長も短いため、効率良く経済的に掘削できるNATM(吹付けコンクリートとロックボルトによる支保を用いて発破で掘削する工法)による発破工法を採用することとした。

(2) 立坑掘削のための地上設備

立坑の掘削設備や付帯する設備としては、櫓や巻上機、スcafford、給排気設備、給排水設備、コンクリートプラント、受電設備・非常用発電設



ケース : 掘進長L=1.3m、花崗岩硬岩部(深度500m以深)、2-Step覆工

図7 立坑掘削のサイクルタイム(花崗岩の深度500m)

備などがある。櫓や巻上機などの再設置が困難な設備については、当初より深度1,000m対応の仕様とし、排水処理設備などの追加設置が可能な設備については、研究坑道掘削の進捗に応じて増設する計画とした。地上設備のうち、主立坑の櫓と巻上機の概要図を図8に示す。また、地上設備のレイアウト案を図9に示す。

(3) 安全対策

1) 突発湧水対策

研究坑道掘削中に想定される事象のひとつに突発湧水がある。これに関連して研究坑道掘削中に遭遇する地質状況としては未固結層、断層破碎部

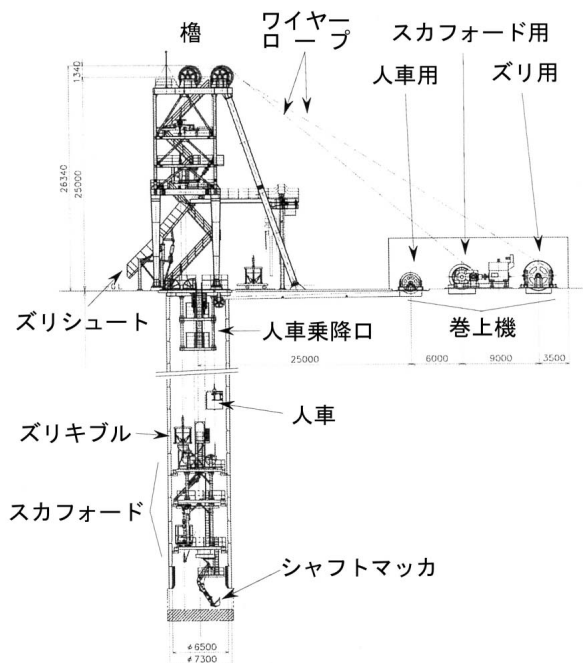


図8 主立坑の櫓と巻上機の概要図

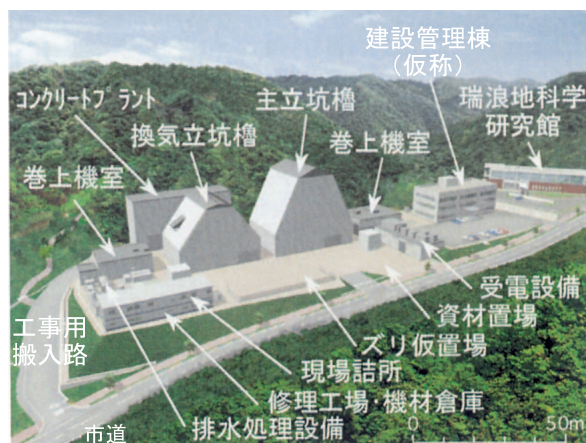


図9 地上設備のレイアウト

及び透水性割れ目が想定される。これらの部分から突発的な大量湧水（これを突発湧水という）が発生する可能性があり、突発湧水が発生した場合には、掘削の中断、掘削機械のトラブルなどをもたらす、研究坑道掘削工程に多大な影響を与える。そこで、突発湧水対策を立案することを目的に、以下の項目について調査検討を行った。

- ・突発湧水の事例調査
- ・研究坑道における突発湧水の対策工の立案
- ・対策工が地質環境に及ぼす影響に対する評価方法の検討

トンネルの掘削時に突発湧水が生じた事例を文献等により調査し、地質と湧水の状況及び対策工について整理した。その結果、得られた地質ごとの突発湧水の特徴は以下のとおりである。

- ・堆積岩：未固結層から湧水が生じる事例が多い。湧水とともに土砂流出を伴う可能性がある。グラウト等の注入による止水効果は小さいことが想定される。
- ・花崗岩：破碎帯からは大量の湧水が発生する事例があり、被圧している場合がある。規模の大きなものについては、事前のボーリング調査等により検知できる可能性がある。

突発湧水に対する対策工としては、水抜きボーリング孔の設置（水抜き工法）とセメントミルク等の注入による止水（止水工法）の2つが代表的な方法として挙げられる。研究坑道掘削時の突発湧水の対策工としても、この2つの工法が考えられるが、研究坑道周辺の地質環境を保全するという観点から、地下水位を可能なかぎり低下させない止水工法による対策を選定し、この対策を研究坑道掘削時に適用する上での課題と具体的な方法について検討した。主な課題としては、高水圧下（地下水位が地表面付近にあるため、静水圧分布を想定すると、深度1,000mで10MPaとなる）での注入ポンプや注入ツールがないことがあげられる。この対応策として、立坑底から放射状に水抜きボーリング孔を掘削し、限られた範囲において地下水の圧力を減少させることにより、グラウトによる止水が可能となると想定される。止水工法の注入計画としては、注入範囲は研究坑道中心から掘削半径の3倍、注入深さは、注入区間（突発湧水が発生した区間）とその上下に掘削径の長さ、注入材料としては普通ポルトランドセメントに土質安定用急硬材を添加したものを使用することとした。

上記の突発湧水の対策工が地質環境に及ぼす影響に対する評価方法としては、ボーリング調査等の直接的な方法と、弾性波探査、地中レーダー法及び比抵抗法等の物理探査手法による間接的な方法の実績がある。いずれも対策工の前後での実施が必要であるが、注入範囲の特定や岩盤特性の変化を把握するためには各々一長一短があるため、これらの手法のいくつかを組み合わせて実施し評価する必要がある。

2) 山はね対策

研究坑道掘削中に生じる可能性がある山はね（坑道の掘削面から岩片が突然音響を伴って飛び出す現象）については、文献調査により、国内外における山はねの発生状況を調査し、地質状況や坑道レイアウト等の山はね発生の要因について整理した。また、山はね発生の予測解析を実施し、瑞浪超深地層研究所の研究坑道掘削時の山はね発生の可能性について検討した。この結果、深度1,000mで断層等の岩盤が弱い部分を掘削する場合や、内径が大きい坑道や坑道に隣接して新たな坑道を掘削する場合に山はねが生じる可能性が示唆された。このような地質環境や坑道レイアウトにおいて掘削が行われる際には、山はねを検知する方法として実績があるAE（Acoustic Emission：音響放出）モニタリングを実施するとともに1回の発破進捗を短縮するなどの対策を実施する。

3) 災害事例調査による検討

立坑における災害は、事故の型による分類では墜落・転落災害が、事故の型による分類では仮設物・建築物・構築物等による災害が圧倒的に多い¹⁷⁾。事故の型による分類は、図10に示すとおりで、下記の5要因で80%強を占めている。

- ・墜落・転落 (40%)
- ・挟まれ・巻き込まれ (14%)
- ・崩壊・倒壊 (12%)
- ・飛来・落下 (8%)
- ・激突 (8%)

事故の起因物による分類は、図10に示すとおりで、下記の4要因で85%強を占めている。

- ・仮設物・建築物・構築物等 (44%)
- ・環境等（酸欠、崩落等） (16%)
- ・建設用機械 (14%)
- ・動力クレーン等 (12%)

次に、瑞浪超深地層研究所の立坑の仕様・工程に基づいて考えられる災害について検討する。す

なわち、立坑到達地点に坑道が存在しないこと、建設時において主立坑と換気立坑を主とする2工区に分かれて施工すること、坑内環境に不慣れな研究者や見学者が入坑することから、下記の災害が想定される。

- ・ポンプ等の停電・維持不良による水没
- ・突発湧水時における排水能力不足による水没
- ・連絡不調整による相手工区の振動・騒音・爆風が原因となって生じる事故
- ・漏電・ショートによる相手方への突発停電・給排水停止による災害
- ・不慣れな作業による昇降設備内での閉込事故
- ・入坑者の思わぬ行動による災害（落下物等）

上記のような災害事例や想定災害に基づき、立坑掘削工事においては、転落・落下物防止対策に重点をおいて設備を設計するとともに、入坑管理、

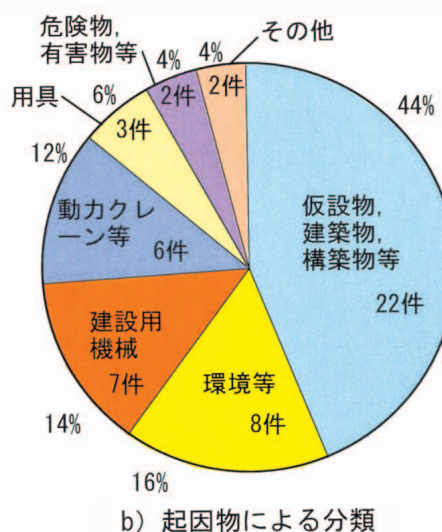
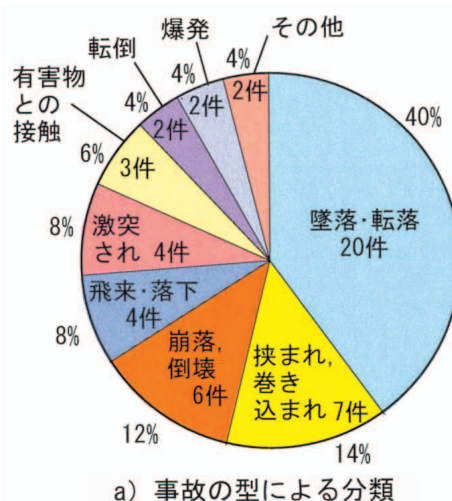


図10 立坑の災害事例の要因

環境管理、火災管理及び通信管理からなる坑内管理システムを導入し、坑内の状況を常に管理しながら施工していく。

4) リスクマネジメント

リスクには多種多様のものが存在しており、何に主眼をおいてリスクを評価し、管理するかによって方法やプロセスが異なる。ここではまず研究坑道を施工する際に生じる恐れのあるリスクに関して評価を試みることにした。また、研究坑道掘削時におけるリスク評価を具体的に実施した上で、考えられるリスクを抽出し、その予想されるリスク（年間損失日数期待値、年間損失金額期待値、年間の社会的信用低下指標の期待値）の算定を行った。それぞれの値は主観的な評価によって与えたものである。

研究坑道施工時のリスクとしては、表5に示す項目（イベント）が想定されるため、これらの項目について評価（定量化）を実施した¹⁸⁾。

表5の項目について、個々のリスクを集計した結果は、

①工程（日数）の損失期待値 31.1日
②金額の損失期待値 12.0百万単位
③社会的信用の損失期待値 21.0×10⁴unit
となった。これは、研究坑道の施工を行うに際して、1年間に平均して見込まれる①工程の遅延、②想定したリスクに対して支払われるコスト、③社会的信用の低下度合いを示す。ただし、現段階では与えられた数値は主観的評価によるものであり、その精度は実際の意思決定を行っていくうえでは十分ではない。工程（日数）の損失期待値は

31.1日である。この数字はあくまで期待値（平均値）であり、突発湧水や火災などがひとたび発生するとさらに長期間工事が停止する。ここでは、その発生確率が小さいものを考慮しており、長年にわたって同様の工事が続くとした場合にトータルで見込まれる工程の損失を1年あたりに換算したものと解釈できる。

損失日数の期待値が大きいイベントは、順に以下のとおりである。

①機械・設備トラブル	9.7日	31%
②突発湧水	4.7日	15%
③火災	3.6日	12%
④人的災害	3.0日	10%
⑤落下物による設備損傷	2.8日	9%
⑥地山（切羽）変状	2.2日	7%
計	31.1日	

工程を遅延させるリスクが最も大きい要因は、機械・設備のトラブルによるもので、ついで突発湧水、火災、人的被害、落下物事故の順となっている。機器・設備のトラブルがリスク全体の3割を占めているため、まず機械・設備トラブルによる工事停止のリスクを低減させる方策を講じる必要があることが明らかになった。機械・設備トラブルの損失日数の期待値9.7日の内訳は、中規模トラブル（修理、部品調達に5日程度要するトラブルと設定）が4.9日、大規模トラブル（修理、部品調達に1か月程度を要するトラブルと設定）が4.8日となっている。

実際の施工に際しては、上記のようなリスク評価に基づくマネジメントとして、例えば、機器整

表5 研究坑道施工時のリスク

No.	リスクを生じるイベント	内容
1	人的災害	人的な損失を含む事故（災害）
2	落下物による設備損傷	人的災害を含まないリスクの大きい事故
3	機械・設備トラブル	主として坑内でシステムとして稼動する掘削・揚土機械や電気や給水等の設備トラブル
4	支保工・覆工等に所定の品質・強度が得られない	所定の品質・強度が得られず、再施工・補修を行う。
5	発破による設備損傷	発破により周辺設備を誤って損傷する
6	計測管理値の超過	設定した計測管理値の超過による工事の中止・対策
7	火災	種々の原因による火災の発生で設備を焼失
8	地山（切羽）変状	掘削切羽の変状・崩落による工事の中止・対策
9	吹付・覆工クラック・剥落	支保完了時の吹付や覆工コンクリートのクラックや剥落・湧水などの対策
10	突発湧水	突発的な湧水に対する止水工、水没損傷設備の補修
11	地震	地震による構造物、坑内外設備の損傷
12	山はね	山はねによる工事の中止、対策

備の専任者を常駐させるなどの対策を実施することが考えられる。

(4) 環境保全対策

図1で示したように、建設用地は市街地に近く、多数の公共施設が近接する。また用地内を流れる河川の下流では河川水が田畑などに利用されている。できるだけ周辺環境へ影響を与えないようにするため、建設時における近隣施設への騒音・振動対策、井戸水への影響及び河川への放流水の水質に留意する必要がある。

騒音・振動対策については、関係法規を満足させるとともに、費用対効果の観点で影響を最大限低減させる方向で検討を行った。建設用地は岐阜県の条例で、特定工場などにおいて発生する騒音の規制に関する基準の第二種区域に該当し、夜間には45dBの基準値が設定されている。研究坑道掘削工事は法区分としては該当しないが、昼夜作業を行うことから特定工場とみなして上記基準を満足するよう設計することとした。具体的には騒音源の位置と騒音レベルを設定して周辺での騒音を計算し、さく岩機やコンクリートプラントなどの特定建設作業に該当する作業について、敷地境界における騒音が関係法令の基準を満足するように地上設備の防音建屋のパネルの仕様を検討した。施工段階においては、定期的に周辺における騒音・振動測定を実施し、防音対策の効果を確認していく。

河川水や井戸水への影響については、流量や水位を計測するとともに、放流水については排水処理設備により関係法令（例えば、水質汚濁防止法や河川法）の規定の基準（pH：6.5-8.5、浮遊物質：50mg/リットル以下、溶存酸素濃度：5 mg/リットル以上）を満足するよう適切な処理を行う。

3. おわりに

瑞浪超深地層研究所用地においては、2003年7月に、立坑坑口の基礎工事を開始した。一方で、深層ボーリング孔（MIZ-1号孔：掘削長1,350mを予定）などによる調査研究を実施中であり、これらの調査研究で新たに取得される情報に基づき、適宜、設計や施工計画を見直す予定である。また、掘削の進捗にあわせて各種のデータを取得し、設計や施工計画の妥当性を検証するとともに、それ

以降の研究坑道の掘削計画に反映していく。

参考文献

- 1) サイクル機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018(2002)。
- 2) サイクル機構：“深地層研究所（仮称）計画 地表から行う調査研究（第1段階）計画”，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-001(2001)。
- 3) サイクル機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—”，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 99-020-024(1999)。
- 4) 坂巻昌工，佐藤稔紀，他：“国内における立坑・斜坑のデータベース化と瑞浪超深地層研究所の立坑内径”，土木学会第58回年次学術講演会要旨集（2003）。
- 5) 見掛信一郎，杉原弘造，他：“地下1,000mに研究坑道を掘る”，トンネルと地下，第31巻，12号，pp.55-63(2000)。
- 6) 阿部 信，石川 清，他：“地質構造把握のための岩芯観察”，サイクル機構技術資料（契約業務報告書，開発工事株式会社），JNC TJ7440 2000-015(2000)。
- 7) 松井裕哉：“AN-1号孔およびMIU-1号孔における力学特性調査結果”，土木学会第55回年次学術講演会，CS-171(2000)。
- 8) 宇佐美龍夫：“新編日本被害地震総覧”，(1996)。
- 9) 金井 清：“地震動・地盤振動”，建築構造学体系1 地震工学，彰国社，p.17(1968)。
- 10) 大崎順彦：“新・地震動のスペクトル解析入門”，鹿島出版会（1994）。
- 11) 中田 高，今泉俊文編：“活断層詳細デジタルマップ”，東京大学出版会（2002）。
- 12) 活断層研究会：“新編日本の活断層”，東京大学出版会（1991）。
- 13) 片山幾雄，足立正信，他：“地下埋設構造物の実用的な準動的解析手法「応答震度法」の提案”，第40回土木学会年次学術講演会講演概要第I部，pp.737-738(1985)。
- 14) 立石 章：“静的FEMを用いた地中構造物横断面方向の耐震計算法における地震荷重の作用方法の研究”，土木学会論文集，No.519, pp.139-148(1995)。
- 15) 日比野 敏，駒田広也，他：“原子力発電所地下立地方式のケーススタディによる成立性評価”，電力中央研究所報告，U17(1991)。
- 16) 坂井哲郎，萩原育夫，他：“深地層の地下研究施設における通気・防災上の検討”，資源・素材2003春季大会講演集（I）資源編，3204（2003）。
- 17) 通商産業省鉱山保安局編，中央労働災害防止協会，安全衛生情報センターHP，死亡災害事例DB（<http://www.jaish.gr.jp/>）。
- 18) 見掛信一郎，佐藤稔紀，他：“超深地層研究所施設建設へのリスクマネジメント手法の適用について”，土木学会第58回年次学術講演会要旨（2003）。