

## 幌延深地層研究計画における地下施設建設の概要

(独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門  
幌延深地層研究ユニット 堆積岩工学技術開発グループ  
森岡宏之・松井裕哉

### 1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構が、北海道北部に位置する幌延町において実施している幌延深地層研究計画は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として、「原子力政策大綱(平成17年10月,原子力委員会)」で示された「深地層の研究施設計画」の一つである。本計画では、地層処分技術の信頼性を高め、処分事業や安全規制の技術基盤を整備していくことを目的として、堆積岩における「深地層の科学的研究」「地層処分研究開発」の課題に対して研究開発を行うものである。

幌延深地層研究計画は、調査研究の開始から終了まで約20年間とし、それを「地上からの調査研究段階(第1段階)」、「坑道掘削時の調査研究段階(第2段階)」、「地下施設での調査研究段階(第3段階)」の3段階に区分している。第1段階は平成13年度に開始し、平成18年度は第2段階の2年目にあたる。

幌延深地層研究計画における第2段階の調査研究の主たる目標は、第1段階で構築した地質環境モデルや地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測結果の妥当性を検討し、それらの結果に基づき、地上からの調査によって地質環境を体系的に把握・評価する技術を確立することである。第2段階における地下施設の建設の目的は、この目標を達成する上で必要なデータ取得のための空間の確保とともに、地上からの調査研究段階で実施した施設設計と実際の施工を通じた堆積岩を対象とした地下坑道の設計・施工計画技術、建設技術、施工対策技術および安全確保技術の高度化・体系化および、地下研究施設として坑道が安全に建設・維持可能であることの実証である。建設した地下施設は、第2段階終了後、主として地層処分研究開発に関する原位置試験の場として利用することとなる。

地下施設の建設は、平成17年11月に開始し、第1期工事(平成20年度まで)では、東立坑約280m、換気立坑約400m、水平坑道約230mを掘削する予定である。第1期工事まで含めた全体の建設工事期間は平成25年度頃までを予定している。その設計にあたっては、地上からの調査結果より想定される地下深部での様々な現象を考慮し、坑道の安全確保や坑内環境の維持のために必要となる対策工および施工管理方法の検討も行った<sup>1)</sup>。

本稿では、幌延における地下施設建設計画の概要ならびに現況について報告する。

### 2. 地下施設の概要

#### (1)地下環境(表-1)

地下施設建設地点周辺の地質は新第三紀の堆積岩であり、上部は珪藻質泥岩(声問層)、下部は珪質泥岩(稚内層)である。これらの岩盤は、空隙率が大きく、単位体積重量が小さく、強度が低い、いわゆる軟岩に属する。また、透水性は低く、膨張性の粘土鉱物の含有率が低いため吸水による膨張性が少なく、中～高程度の耐スレーキング特性があるという特徴を有している。

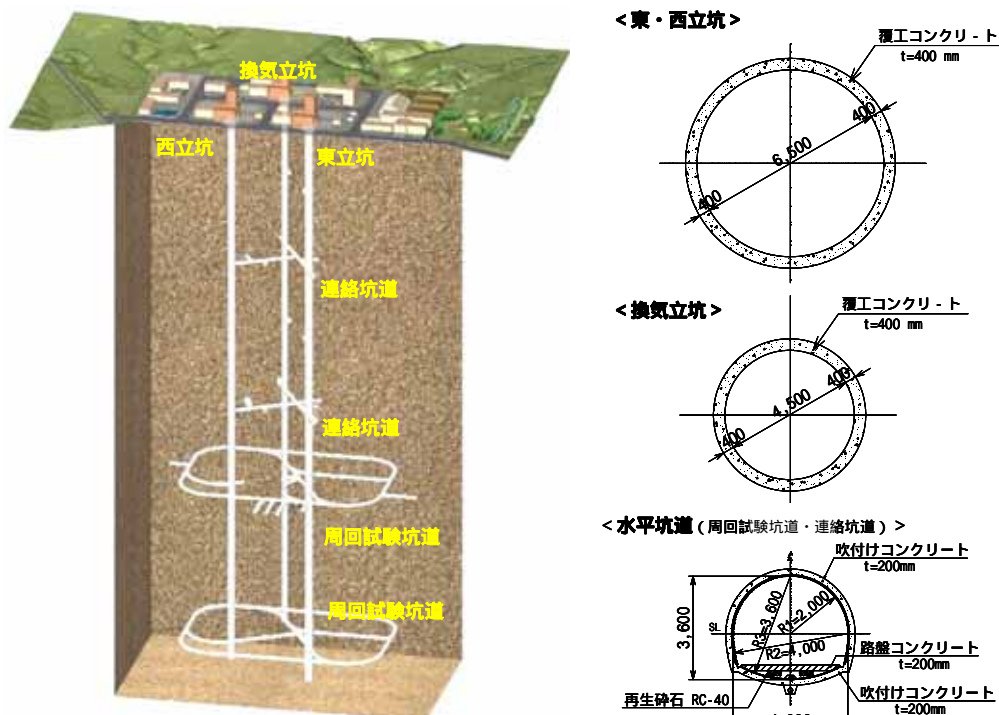
初期地圧については、ボーリング孔での水圧破碎試験結果から、最大主応力方向は概ね東西方向が卓越し、主応力比 1.5 程度の異方性を有することが確認されており、水平面内最小主応力は概ね推定土被り圧相当となっている。また、地下深部では塩水系地下水が分布しており、その中には少量ながらメタンガスを主成分とする可燃性ガスが溶存している。

表-1 岩盤の物理性状（地表からのボーリング調査による）

項目	珪藻質泥岩 (声問層)	珪質泥岩 (稚内層)	備考
単位体積重量 [kN m <sup>-3</sup> ]	14~16	16~18	
空隙率 [%]	60~65	40~50	
一軸圧縮強度 [MPa]	5程度	5~25	ボーリングコア
透水係数 [m s <sup>-1</sup> ]	10 <sup>-9</sup> ~10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-11</sup> ~10 <sup>-6</sup>	原位置透水試験
耐スレーキング指数 [%]	90以上	95以上	スレーキング試験（ISRM指針）
膨張ひずみ指数 [%]	0.04以下	0.03以下	吸水膨張試験（ISRM指針）
水平面内最大主応力方向	E-W方向		水圧破碎法による初期応力測定
主応力比	水平面内最大主応力 1.3 水平面内最小主応力 0.9 鉛直応力 1.0		鉛直応力は土被り圧相当を仮定

(2)地下施設の諸元（図-1）

地下施設は、3本の立坑と水平坑道（周回試験坑道および連絡坑道）から構成される。レイアウトの選定にあたっては、可燃性ガスが賦存する環境を考慮し、安全性確保の観点から坑道内の通気制御等の防災対策を検討した結果、換気立坑1本を含む立坑3本方式としている。また、試験研究用の水平坑道（周回試験坑道）は、2深度で展開する計画としている。



\*このイメージ図は、今後の調査研究等の結果次第で見直すことがあります。

図-1 地下施設イメージ図および坑道標準断

立坑の深度はいずれも約 500m を計画しており，断面は東・西立坑で内径 6.5m，換気立坑で内径 4.5m の円形断面を，水平坑道は内空幅 4.0m の三心円馬蹄形断面を標準としている。

### 3. 施工計画

#### (1) 掘削工程

地下施設は，平成 17 年度に換気立坑の掘削を開始しており，平成 18 年度に東立坑，平成 21 年度に西立坑の掘削を順次開始する計画である。坑道の掘削は，第 2 段階における研究計画に基づく調査試験（第 1 段階での予測結果の検証，長期に亘る原位置試験，周辺部での掘削影響モニタリング，立坑部における掘削影響調査など）を実施しながら行われる。

換気立坑は，各水平坑道の設置深度において，後続の水平坑道掘削に必要最小限の範囲を掘削しつつ，最終深度まで掘り下がる。東立坑は，各水平坑道の設置深度に到達した段階で，換気立坑との接続坑道を掘削してから掘り下がることを繰り返す。西立坑は，それらの既設水平坑道との連絡坑道を掘削しつつ，最終深度まで掘り下がる計画としている。

#### (2) 掘削工法・施工方法

立坑掘削は，全断面掘下がり工法で行う計画である。掘削方式は，掘削予定深度の 500 m 付近まで一軸圧縮強度 30 MPa 以下の岩盤が分布することから，周辺地山への掘削作業による影響を抑制できる機械方式による掘削を基本とした。ただし，東立坑は，掘削方式の違いによる周辺岩盤への影響（掘削影響領域）の差異を確認することを目的として，発破方式で掘削する計画である。立坑の施工方法は，1 m×2 回の掘削後に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。図-2 に立坑の掘削工法のイメージ図を示す。

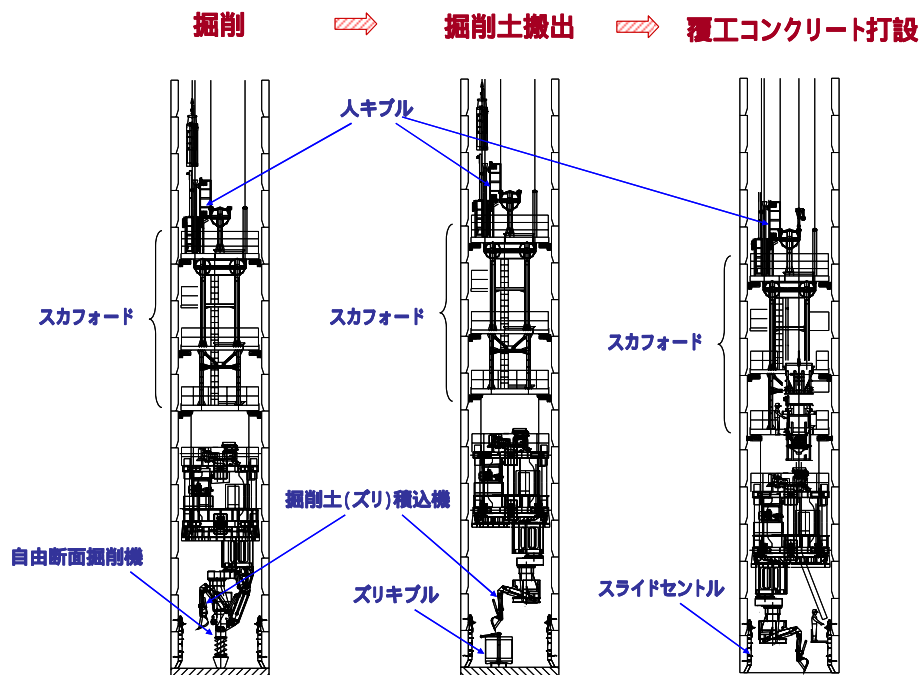


図-2 立坑の掘削・施工のイメージ（換気立坑の場合）

水平坑道の掘削は、自由断面掘削機およびブレイカによる機械掘削方式を基本としている。周回試験坑道の施工は、換気・走行路盤・防爆面で有利なレール方式を採用し、掘削土（ズリ）の運搬にはズリ鋼車を使用し、立坑との交差部でズリキブルに積み替えて坑外へ搬出することとしている。また、坑道の大半部分において地山強度比が 2 以下となる岩盤条件を考慮し、盤膨れなどの変状を防止するため、全区間において掘削後早期の吹付けコンクリートによるインバート閉合を支保工の標準仕様としている。

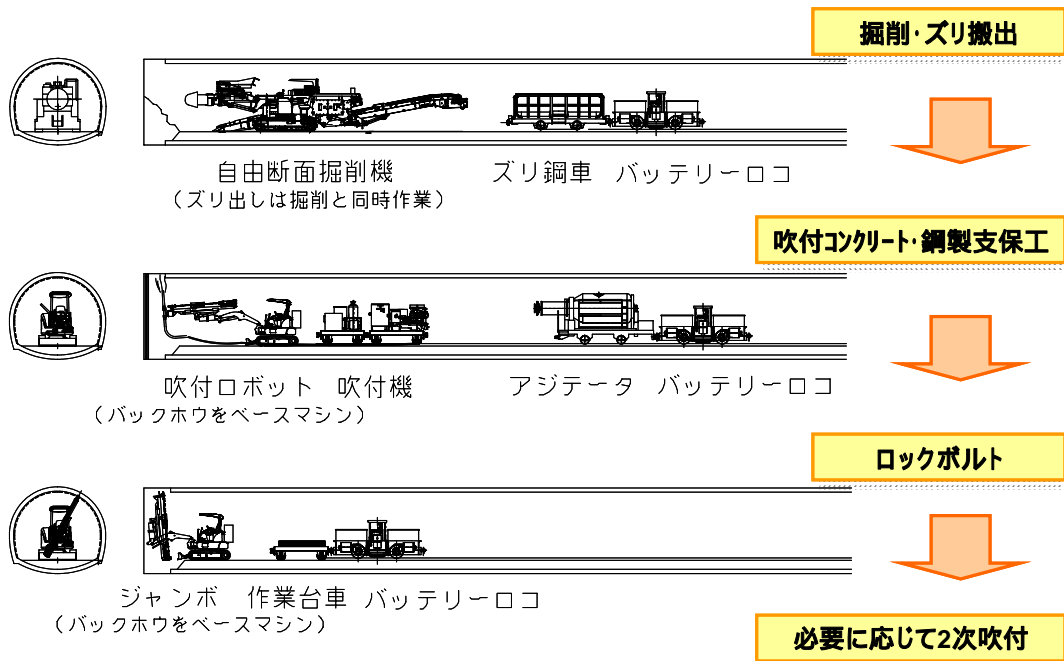


図-3 水平坑道の掘削・施工のイメージ（自由断面掘削機の場合）

#### 4. 地山区分および支保設計<sup>1)</sup>

##### (1) 地山区分および岩盤物性値の設定

地下施設周辺の岩盤の変形特性は、軟岩でありながら割れ目の多寡の影響を受けることが、近傍のボーリング孔で実施した孔内載荷試験結果で確認されている<sup>1)</sup>。また、ボーリングコア観察の結果、岩盤中に乾燥や外的荷重の変化により顕在化する潜在的な分離面（以下、ヘアークラックと記す）が広範囲に分布することが確認された。ボーリングコアによる一軸圧縮試験での供試体の破断面を分析した結果、事前に観察したヘアークラックに沿って破断しているものが多数確認され<sup>1)</sup>、それが存在しない供試体の試験結果と比べ岩石の強度や弾性係数が低下することがわかっている。

これらの知見を踏まえ、坑道掘削時の挙動予測解析に用いる岩盤物性値の設定にあたっては、割れ目の影響を考慮した「節理性岩盤」としての評価に加え、ヘアークラックに対する強度・弾性係数の低減の可能性を考慮することとした。表-2 にボーリングコアでの岩盤等級区分判定基準を、表-3 に岩盤等級毎の物性値を示す。

表-2 ボーリングコアでの岩盤等級区分

地層	岩盤等級区分	割目	ヘアークラック	岩石コアの特徴
声問層	D	-	-	岩石は軟質で、カッターの刃が2 mm以上刺さる。コアは角礫状～岩片状～粘土状を示す。
	CL	L	-	岩石は、カッターの刃が1 mm程度刺さる硬さを有し、コアは角礫状～岩片状を示す。
		M	有・無	岩石は、カッターの刃が1 mm程度刺さる硬さを有し、コアは概ね10 cm未満の短柱状を主体とする。
		H	有・無	岩石は、カッターの刃が1 mm程度刺さる硬さを有し、コアは概ね10 cm以上の長柱状～棒状を主体とする。
稚内層	CM	L	-	岩石は、カッターの刃で傷が付く程度の硬さを有し、コアは角礫状～岩片状を示す。
		M	有・無	岩石は、カッターの刃で傷が付く程度の硬さを有し、コアは概ね10 cm未満の短柱状を主体とする。
		H	有・無	岩石は、カッターの刃で傷が付く程度の硬さを有し、コアは概ね10 cm以上の長柱状～棒状を主体とする。

(割れ目：コア観察や検層結果によって確認できる既存の分離面)

(ヘアークラック(Hr)：コアで柱状となる岩盤において乾燥や外的荷重により顕在化する潜在割れ目)

表-3 解析用岩盤物性値

岩相名	岩盤等級区分	岩盤物性値					低減係数*	
		単重 kNm <sup>3</sup>	ポアソ 比	変形 E MPa	強度 c MPa	φ	弾性 係数	強度 特性
声問層	D	14.8	0.300	8.3	0.1	24.1	-	
	CL-L	15.1	0.164	300	0.5	15	0.23	
	CL-L (Hr)			300	0.5		1.00	1.00
	CL-M			500	0.8		0.38	
	CL-M (Hr)			450	0.6		0.90	0.80
	CL-H			1,300	2.2		1.00	
CL-H (Hr)	1,040			1.5	0.80		0.70	
稚内層	CM-L	18.5	0.186	500	1.0	25	0.20	
	CM-L (Hr)			500	1.0		1.00	1.00
	CM-M			1,500	3.1		0.60	
	CM-M (Hr)			1,350	1.6		0.90	0.50
	CM-H			2,500	5.2		1.00	
	CM-H (Hr)			2,000	1.6		0.80	0.30

\* (上段) 割れ目による低減係数, (下段) ヘアークラックによる低減係数

## (2) 支保設計

支保設計では、挙動予測解析で算定した塑性領域に着目し、塑性領域を含む坑道周辺岩盤と支保工の一体化を図るために、覆工等により塑性領域の幅を標準的なロックボルト長の範囲内に抑えることを基本とした。挙動予測解析は、岩盤の構成式として弾完全塑性モデルを用いた二次元 FEM 解析を採用し、Mohr-Coulomb の破壊規準を適用した。支保部材の応力度照査は、許容応力度設計法に従った。

幌延における地下施設周辺の岩盤は、前述の通り、地山強度比が低い条件下での施工区間が多いため、支保部材への荷重負担が増大する。このため、通常のショートステップ工法における支保（覆工コンクリート）では、坑道を安全に掘削・維持するために大きな巻厚が必要となる。

そこで、幌延では NATM の設計の考え方を準用した二重支保構造を導入した設計手法を適用した。立坑での二重支保構造は、切羽掘削直後に吹付けコンクリートを中心とした一次支保工を施工し、掘削直後の安定性を確保した上で、一次支保工と岩盤の強度を最大限に活用すると共に、二次支保（覆工コンクリート）にも応力を負担させることで、トータルで空洞の安定性を確保するものである。これにより、覆工などの厚さを減じることが可



能となった。

上記の考え方に従い、立坑および水平坑道の支保設計を行った結果、坑道総延長の約 50% の区間で二重支保構造を採用することとなった。図-4 に二重支保構造を導入した箇所での支保パターンの一例を示す。また、これらの断面の挙動予測解析により算定した塑性領域分布を図-5 に示す。挙動予測解析の結果から、坑道の掘削に伴い発生する塑性領域の幅は、立坑で最大 3.4m 程度、水平坑道で最大 1.8m 程度と予想している。

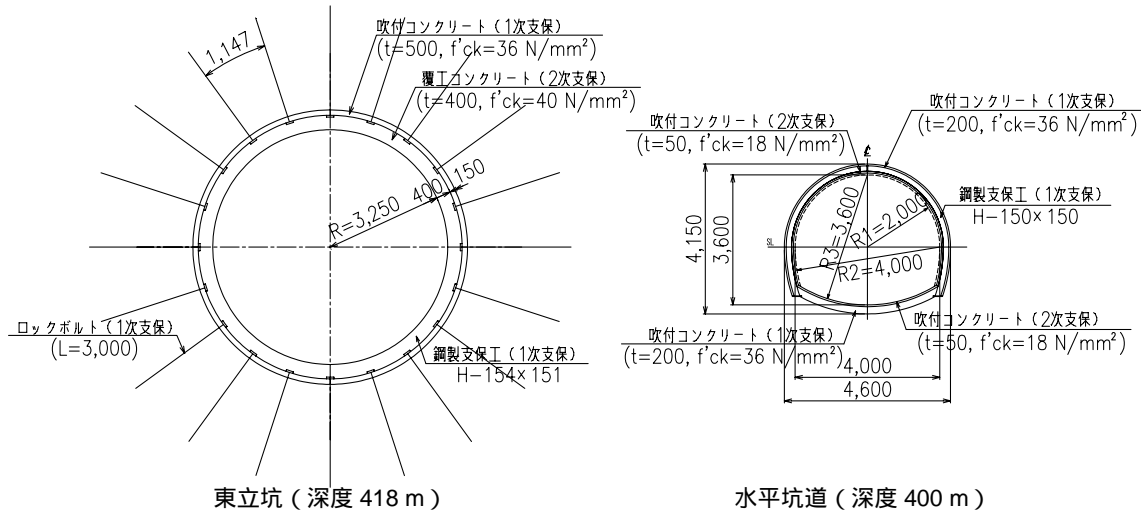


図-4 支保パターン例 (二重支保構造区間)

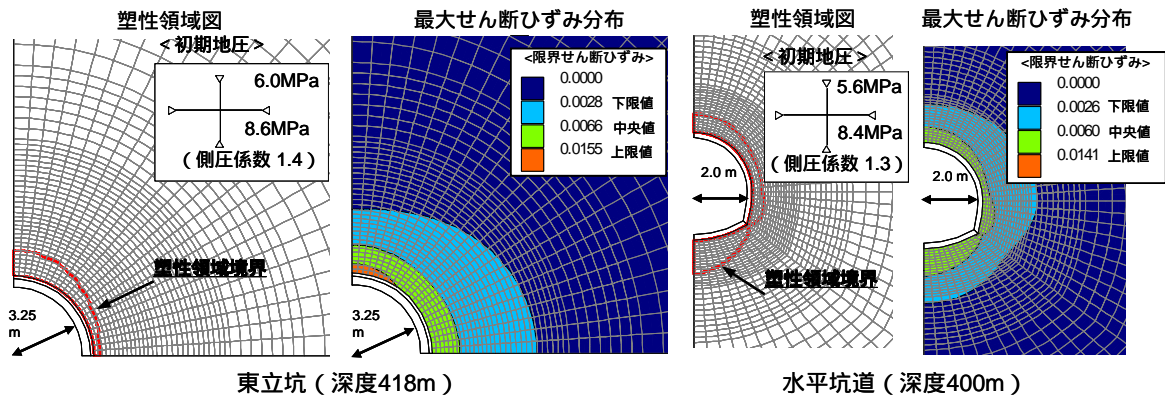


図-5 塑性領域および最大せん断ひずみ分布

## 5. おわりに

本稿では、幌延における地下施設建設計画の概要について報告した。

地下施設の掘削工事は、平成 18 年 8 月 10 日現在、換気立坑において GL-8m まで完了している (写真-1 および写真-2)。

地下施設の掘削工事は今後本格化することとなるが、掘削中は、切羽観察による岩盤評価や各種計測データの分析結果を迅速かつ的確に設計・施工に反映する情報化施工が重要な役割を担うこととなる。今後は、情報化施工を通じて、割れ目やヘアークラックが空洞周辺岩盤の挙動に与える影響や支保部材に対する掘削解放力の負担状況を確認するとともに、予測解析モデル・設計手法の妥当性を検証しながら掘削を進めていく予定である。

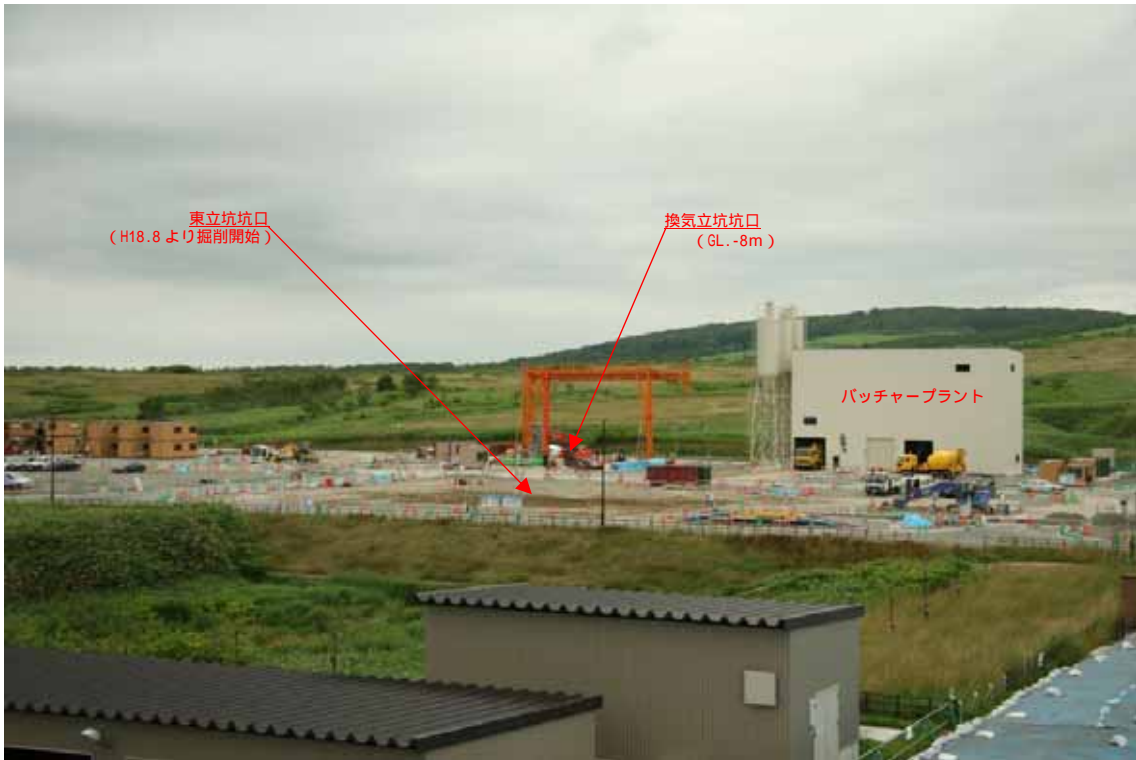


写真-1 幌延地下施設ヤード全景（南側より H18.8.11 撮影）



写真-2 換気立坑切羽 GL.-8m（坑口より H18.8.11 撮影）

（参考文献）

- 1) 森岡宏之, 尾留川剛, 村川史朗, 菅原健太郎, 小林隆志: 幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計, 土木学会第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2006.1

(追記)

幌延深地層研究センターでは、「安全の確保」「情報公開による透明性の確保」「適正で効率的な業務推進」「地元をはじめとした理解と信頼の獲得」の4つの基本方針に基づき、深地層研究を推進して参ります。

詳細につきましては、日本原子力研究開発機構(幌延深地層研究センター)のホームページ(<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>)をご覧ください。