

## 第2次取りまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その2） 地下空洞の力学的安定性評価

核燃料サイクル開発機構 正会員 黒木繁盛・谷口航

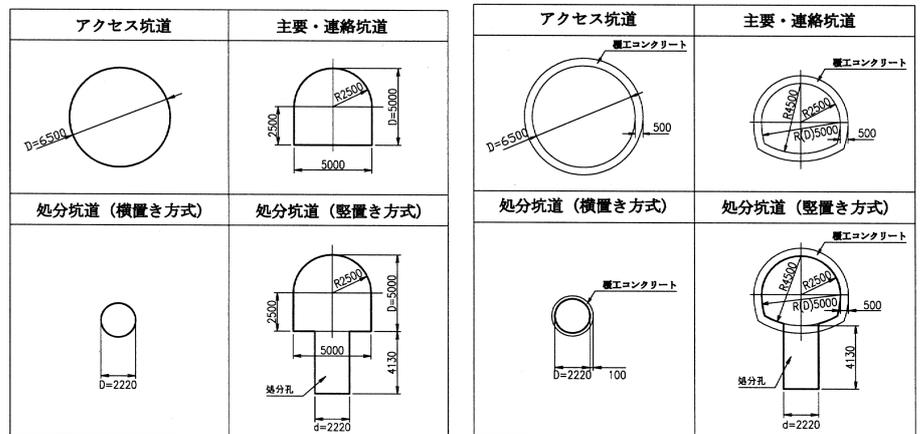
### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分場の地下施設はアクセス坑道、主要坑道、連絡坑道、処分坑道などから構成され、地下数百～1,000m に数多くのトンネルが掘削される。これらの各坑道には、建設・操業・閉鎖の期間を通して安全な物流経路を提供することが求められる。坑道として上記の役割を果たすためには、各坑道が所要の内空断面（形状、寸法、断面積）を有し、建設・操業・閉鎖の各作業段階を通じて空洞の力学的安定性が確保されるように設計を行う必要がある。ここでは、各坑道の成立性を検討するため、理論解析（岡の方法<sup>1)</sup>）および FEM 解析を用いて空洞の力学的安定性の評価を行った。また、空洞の力学的安定性を満足し、かつ合理的な処分坑道離間距離・処分孔間隔の設定（試設計）を行ったのでここに報告する。

### 2. 検討条件

#### (1) 検討断面

検討断面は、人工バリアの大きさや建設・操業機械の大きさ、建築限界などを考慮して図-1 に示すように設定した（解析結果より求められた必要支保工厚も合わせて示した）。なお、解析領域は、アクセス坑道（立坑）は側方に坑道中心から 5D を、その他の坑道においては双設坑道となることから、モデル上方および下方に 5D を、



(a) 硬岩系岩盤 (b) 軟岩系岩盤  
図-1 坑道仕様例 (単位 mm)

側方の境界までの距離を坑道の横断方向に 2～5D、長手方向に 2～4d（隣接する坑道・処分孔との中心線までの距離、ここに、D：坑道の最大幅、d：処分孔径）の間で変化させて検討を行った。なお、坑道および処分孔は、各々双設されるものが同時掘削されるものとして、モデルは対称性を考慮して作成した（図-3 参照）。

#### (2) 物性値

岩盤の物性は、日本の幅広い地質環境を考慮して、硬岩系岩盤で1ケース(HR)、軟岩系岩盤で5ケース(SR-A～SR-E)を設定した。このうち FEM 解析に用いた2ケースの物性値を表-1 に示す。支保工（コンクリート）物性値は、横置き方式の処分坑道で表-2 に示すセグメントの物性値を用い、その他の坑道では吹付けの値で評価した。なお、処分深度は硬岩系岩盤で1,000m、軟岩系岩盤で500mを対象に検討を行った。

表-1 岩盤物性値

物性区分	HR	SR-C
単位体積重量 $\gamma_t$ [kN m <sup>-3</sup> ]	26.2	21.6
一軸圧縮強度 $q_u$ [MPa]	25	15
弾性係数 $E$ [MPa]	37,000	3,500
ポアソン比 $\nu$ [-]	0.25	0.3
粘着力 $c$ [MPa]	15.0	3.0
内部摩擦角 $\phi$ [°]	45	28

表-2 支保工物性値

	吹付け	セグメント
設計基準強度 $f'_{ck}$ [MPa]	40	
許容応力度 $\sigma_{ca}$ [MPa]	14	
弾性係数 $E_c$ [MPa]	4,000	32,000
ポアソン比 $\nu$ [-]	0.2	

(3) 評価指標

評価は表-3 に示す指標を用いて行った。このうち、支保工応力度は  $\sigma_{ca} = 14 \text{ MPa}$  を目標値とし、岩盤の局所安全率は  $F_s = 1.5$  を採用、岩盤の直ひずみおよび最大せん断ひずみは櫻井らの提案する限界ひずみの考え方<sup>2) 3)</sup>を援用した。

(4) 解析手順

検討は、理論解析を用いて概略の支保工仕様を決定し、FEM 解析を用いて理論解の結果を検証することとした。FEM 解析では、施工過程のモデル化において解放率特性曲線の考え方を採用し、1 掘進長 1.5m に対し、横置き方式の処分坑道で応力解放率を 90%、その他の坑道で 65% に設定した。

これらの検討後、上記の支保工仕様にて地震時の検討、坑道交差部（交差角度 30°）で補強が必要となる範囲の検討を行った。また、処分坑道離間距離および処分孔間隔においては廃棄体から発生する熱による緩衝材への影響および経済性を考慮して検討を行った。

3. 検討結果

今回対象とした岩盤では、支保工厚として硬岩系岩盤で 0mm、軟岩系岩盤の横置き方式の処分坑道で 100mm、その他の坑道で 500mm が必要になると考えられた。また、緩み域が大きくなる場合でも、ロックボルトなどによる補強が可能な範囲にあることが示され、表-4 に示す坑道離間距離と処分孔間隔を満たせば、空洞の力学的安定性を確保できることが示された。なお、表中の括弧内の数値は、別途、熱解析から求められる廃棄体ピッチの組合せと、岩盤掘削量（経済性）の観点から決定される坑道離間距離である。

地震時においては、過去に起こった巨大地震を想定して検討を行ったが、地震が空洞の力学的安定性に及ぼす影響は小さく、

( ) 内の値は、熱解析の結果と岩盤掘削量の観点から決定された坑道離間距離。坑道掘削時の安定性が確保されれば安定であることが示された。坑道交差部において補強が必要となる範囲は、硬岩系岩盤、軟岩系岩盤ともに交差部鋭角側で 4D、鈍角側で 1D であることが分かった。

4. おわりに

以上の検討により、地層処分場における地下空洞の力学的安定性は確保され、現状の技術での建設が可能であることが示された。なお、今後の課題として、より合理的な設計・施工を目指し、サイトの特性調査方法（岩盤内亀裂の分布状況や岩盤の強度特性ほか）や岩盤の不連続面を考慮した設計法（例えば、不連続面を考慮した解析手法など）の確立が求められる。

参考文献

- 1) 岡行俊：NATM における支保理論，施工技術 第 10 巻 第 11 号，pp.6-10，1977
- 2) 櫻井春輔：NATM における現場計測と管理基準値，土と基礎，第 337 号/34-2，pp.5-10，1986
- 3) 櫻井春輔ほか：トンネル安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集 No.493/ -27，pp.185-188，1994

表-3 解析に用いた評価指標

理論解析	有限要素法解析
支保工応力度	支保工応力度
-	岩盤の局所安全率
岩盤の直ひずみ	最大せん断ひずみ

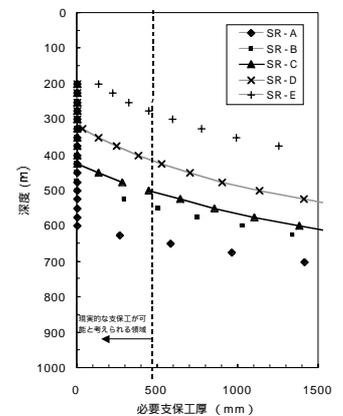
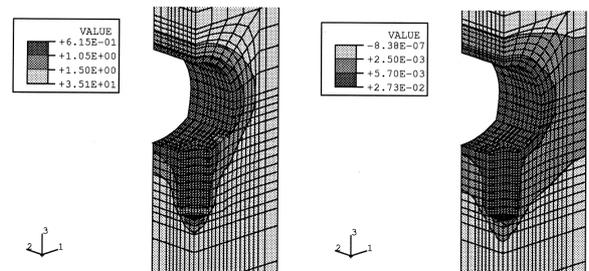


図-2 理論解析結果 (軟岩系岩盤，アクセス坑道)



(a) 岩盤の局所安全率分布 (b) 最大せん断ひずみ分布

図-3 FEM 解析結果 (軟岩系岩盤，処分坑道 (縦置き方式))

表-4 空洞の力学的安定性から必要となる坑道離間距離および処分孔間隔

対象岩盤	硬岩系岩盤			軟岩系岩盤		
	主要坑道 連絡坑道	処分坑道		主要坑道 連絡坑道	処分坑道	
		横置き	縦置き		横置き	縦置き
坑道離間距離	2.0D	2.0D (6.0D)	2.0D	2.6D	2.5D (4.5D)	2.6D
処分孔間隔	-	-	2.0d	-	-	3.0d

( ) 内の値は、熱解析の結果と岩盤掘削量の観点から決定された坑道離間距離