直接処分施設の建設・運用時における力学的影響予測

林　久資[1]・西内　瑞生[2]・金澤　伸一[3]・石山　宏二[4]

[1]正会員　福島工業高等専門学校　都市システム工学科（〒970-8034 福島県いわき市上荒川字長尾30）
E-mail: hayashi-h@fukushima-nct.ac.jp

[2]学生会員　福島工業高等専門学校　専攻科（〒970-8034 福島県いわき市上荒川字長尾30）
E-mail:12630@fsnct.com

[3]正会員　福島工業高等専門学校　都市システム工学科（〒970-8034 福島県いわき市上荒川字長尾30）
E-mail:kanazawa@fukushima-nct.ac.jp

[4]正会員　西松建設株式会社　技術研究所（〒105-0004 東京都港区新橋6丁目17番21号）
E-mail: koji_ishiyama@nishimatsu.co.jp

原子力発電所から発生した使用済燃料の直接処分施設を設計する場合，ガラス固化体を処分する地層処分施設と比べ，建設・操業・閉鎖の作業性の観点より坑道掘削断面が大きくなることが想定される．本研究では，直接処分施設の坑道断面の掘削時力学的安定性や，地山の特殊性を考慮した条件下の掘削影響について三次元数値解析によって検討，考察した．

その結果，掘削断面積が大きくなる直接処分施設坑道では，ガラス固化体を処分する地層処分施設と比べ側壁変位が増大すること，地山方位依存性の見られる条件下では，掘削進路によって支保工規模が低減できる可能性があることが分かった．さらに，廃棄物および運搬・定置装置の荷重が坑道底面に及ぼす影響にも言及した．

Key Words : *dynamic impact prediction , numerical analysis,NATM*

1. 研究目的

我が国では，原子力発電の過程で発生する高レベル放射性廃棄物の処分方法として，地層処分が考えられている．地層処分研究開発第2次取りまとめ[1]によると，地層処分の基本的な考え方として，核燃料サイクルの過程で発生する廃液をガラス固化し，それをオーバーパックや緩衝材で覆い地下深部に処分する多重バリアシステムが示されている．地層処分施設は立坑・連絡坑道・処分坑道・処分ピットなどから構成されるが，本文献[1]によると，経済性や建設・操業・閉鎖の作業性について十分考慮する必要があり，廃棄物が運搬・定置される坑道については断面形状や寸法を決定する因子として，力学的安定性，建設・操業・埋め戻しの作業性，経済性の3つを挙げており，地層処分施設の坑道に適した断面形状が提案されている．

一方で，2011年3月11日に発生した東日本大震災に関わる福島第一原子力発電所事故以来，原子力発電所を廃炉にする世論が高まり，現在においては廃炉となることが決定した原子炉も存在する．地層処分基盤研究開発として全体計画の中に使用済燃料の直接処分の研究開発が位置づけられたこともあり，直接処分に関する研究を進めていく意義は大きいと考える．我が国では，使用済燃料は全量再処理することを基本政策としているが，本研究では原子力発電所の貯蔵プールなどに貯蔵されている使用済燃料を地下深部に処分することを直接処分と位置づけ，研究を進めることとした．

直接処分における地下施設は前述したガラス固化体の処分施設と基本的な施設の役割は同様であり，地上から地下までのアクセスのための立坑や斜坑，立坑同士を接続するための連絡坑道，廃棄体を処分するための処分坑道や処分ピットなどから構成される．一方で，処分の対象となる廃棄物がガラス固化体から使用済燃料に変わることで，廃棄物を運搬・定置される処分坑道では以下の事項をさらに検討することが必要であると筆者は考えた．

まず直接処分を行う場合，ガラス固化体より寸法・重量が大きい使用済燃料棒などを処分坑道内に運搬・処分する必要があるため，処分坑道断面が大きくなり，廃棄

体および搬送・定置装置からの荷重も大きくなる[2]．坑道断面が大きくなると，坑道掘削時に支保工や岩盤に及ぼす影響が大きくなることが示唆されるため，数値解析による坑道掘削解析および評価が必要であるが，既往研究では二次元的検討を行っているものが多い[3]．しかしながら，地山掘削・支保工設置時期や，切羽の安定性などを考慮するには，三次元的検討を行うことが重要であると考える．

さらに，地山の特殊性が加わることによりその問題が深刻化する可能性がある．地山の特殊性の例として，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を行っている幌延深地層研究センターでは，地山の初期応力に方位依存性がみられた．このような地山条件下では，地山初期応力の卓越方向によって，内空断面の安定性が変化する可能性があり，さらに掘削断面積が大きくなる直接処分坑道ではその影響が顕著になる可能性がある．

次に，直接処分を行うことで，ガラス固化体より廃棄体および運搬・定置装置の重量が大きくなるが，現時点では吹付けコンクリートや岩盤にどの程度の影響があるのか明らかになっていない．

そこで本研究では，直接処分施設の処分坑道掘削時および地山に特殊性がみられた場合の坑道周辺地山および支保工の力学的影響，直接処分の対象となる廃棄体や搬送・定置装置の重量が岩盤および支保工に及ぼす影響を，有限差分法三次元数値解析FLAC3Dにより検討し，安全性・経済性に優れた設計の一助になるために考察を行った．

2. 直接処分坑道断面の安定性評価

使用済燃料の直接処分施設を設計する場合，ガラス固化体を対象とした地層処分施設と比べ，建設・操業・埋め戻しの作業性の観点より坑道の掘削断面積が大きくなるため，ここでは直接処分施設の坑道掘削を模擬した数値解析を行った．また，さらに地山の特殊性が見られる箇所に坑道を掘削した際の影響を数値解析により再現した．

(1) 解析概要

廃棄体を坑道内に処分する場合，廃棄体を横置きで運搬・処分する横置き方式や，竪置きで運搬・処分する竪置き方式が提案されているが，本研究では竪置き方式を研究対象とした．竪置き方式は坑道下部に処分ピットを設け，その中に廃棄体を処分する方式であるが，人工バリアを原位置施工する緩衝材ブロック方式（以下ブロック方式）と地上施工するPEM方式の二通り（**図-1**）を本研究では数値解析で模擬する．解析領域は，**図-2**のように幅60m，奥行き100m，高さ90mとし，坑道上部の土被りが500mとなるよう上載荷重を設定した．ちなみに坑道断面は半断面で掘削した．解析入力物性値は，文献[3]を参考に，岩盤に関しては軟岩系岩盤（SR-C），吹付けコンクリートに関しては設計基準強度36MPaを想定し**表-1**に示す入力定数を与えた．吹付けコンクリートの強度は掘削時期によって変化させず一定とした．坑道の掘削については全断面掘削を模擬し，吹付けコンクリートを1間遅れで施工するものとした．

次に，地山の特殊性を考慮するために幌延深地層研究

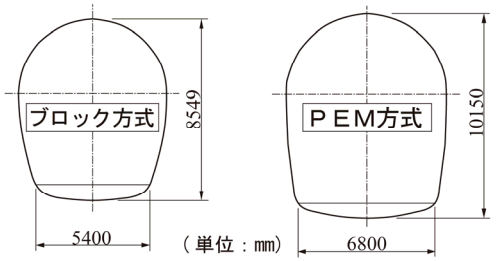

図-1 坑道断面模式図

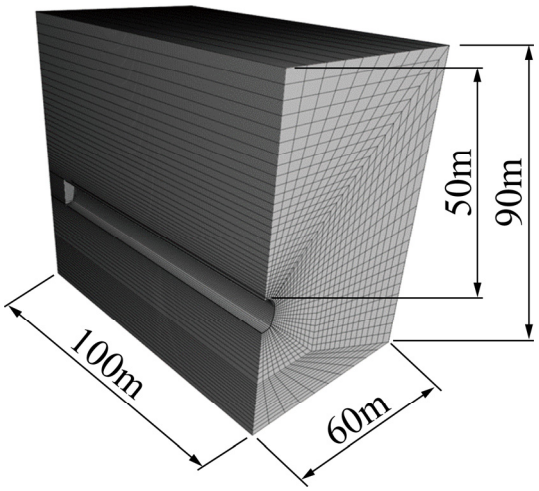

図-2 解析モデル

表-1 解析入力物性値

解析入力物性値		初期応力の設定方法
岩盤		case1
軟岩系岩盤 SR-C		P_{0Z}=18.5kN/m^3×500m
単位体積重量	18.5kN/m^3	$P_{0x}=P_{0Z}\times1.0$　$P_{0y}=P_{0Z}\times1.0$
弾性係数	3500MPa	case2
粘着力	3.0MPa	坑道側壁の内空方向が最大主応力方向
内部摩擦角	28°	P_{0Z}=18.5kN/m^3×500m $P_{0x}=P_{0Z}\times1.3$　$P_{0y}=P_{0Z}\times0.9$
吹付けコンクリート		case3
設計基準強度	36MPa	坑道側壁の内空方向が最小主応力方向
弾性係数	6000MPa	P_{0Z}=18.5kN/m^3×500m $P_{0x}=P_{0Z}\times0.9$　$P_{0y}=P_{0Z}\times1.3$
ポアソン比	0.20	
吹付け厚（ブロック方式）	30cm	
（PEM 方式）	50cm	

センターで計測された初期地圧[4]を参考に，**表-1**に示したcase1からcase3の3ケースで地山の方位依存性を模擬した．幌延深地層研究センターでは坑道が掘削される地山に方位依存性がみられたことが報告されている．地山の初期応力に方位依存性が認められる条件下で坑道を掘削すると，掘削方向や断面の形状によって，地山・支保工に受ける力学的影響が大きく異なると考えた．

(2)　解析結果および考察

はじめに，坑道断面の違いが坑道岩盤壁面の変位にどのような影響を及ぼすのか調べた．**図-3(a)**に，初期応力の方位依存性を考慮したブロック方式・PEM方式断面の側壁部変位を，切羽の進行に伴ってプロットしたものを示した．地山初期応力が等方応力状態の地山に，ブロック方式とPEM方式で坑道を掘削したときのcase1に着目すると，ブロック方式が16mm，PEM方式が20mmで変位が収束しており，4mm程度の変位差がみられた．つまり，掘削断面積の大きいPEM方式の方が側壁変位が大きくなることが分かった．

地山初期応力の方位依存性を考慮した解析結果に着目すると（**図-3(a)**），ブロック方式・PEM方式どちらの断面の場合でも，初期応力の最大主応力方向が側壁内空側となるcase2はcase1の1.4倍の変位が生じた．これより，側壁部変位は地山初期応力の大きさ・卓越方向によって変化することがわかった．

上記結果より，掘削断面積が大きなPEM方式や，地山初期応力の最大主応力方向が坑道内空側に働くcase2は，支保工にかかる荷重が大きくなることが想定されるため，吹付けコンクリート打設直後の岩盤側壁部の最小主応力（支保内圧）をプロットしたグラフを**図-3(b)**に示した．ブロック方式やPEM方式にかかわらず，切羽到達直後は地山の応力が解放されることから地山最小主応力が低下する．その後，吹付けコンクリートが打設されると，各方式のすべてのケースにおいて岩盤側壁部の最小主応力（支保内圧）が徐々に増大していることがわかる．また，case1のブロック方式とPEM方式およびcase3のブロック方式とPEM方式に大きな差はみられないがcase2ではブロック方式0.8MPa，PEM方式1.0MPaと0.2MPa程度の差が生じた．それぞれの方式のcase1とcase2を比較すると，ブロック方式ではcase2がcase1の1.3倍，PEM方式では1.4倍の支保内圧が生じた．これらより，掘削断面積が大きいPEM方式はブロック方式より支保内圧が大きく生じること，側壁部支保内圧は地山初期応力の大きさ・卓越方向によって変化することがわかった．

次に，坑道断面の大きさの違いや初期応力の方位依存性が，坑道周辺の塑性域にどのような影響を与えるかを**図-4**に示した．ここでは切羽離れ30mのときのブロック方式とPEM方式の坑道周辺弾塑性境界を実線で結んでお

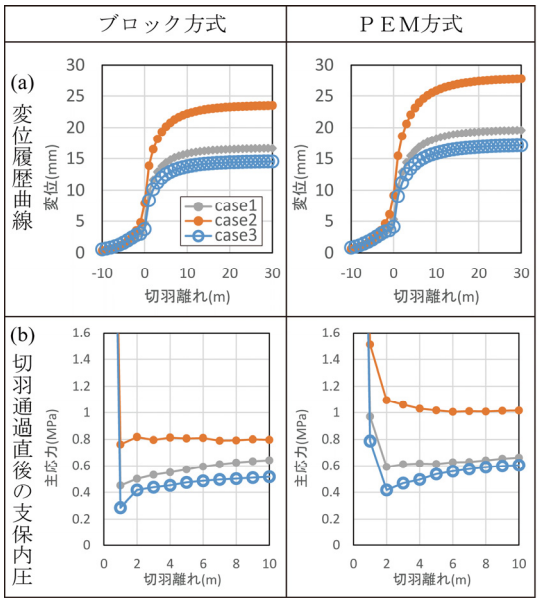

図-3　変位・支保内圧履歴曲線

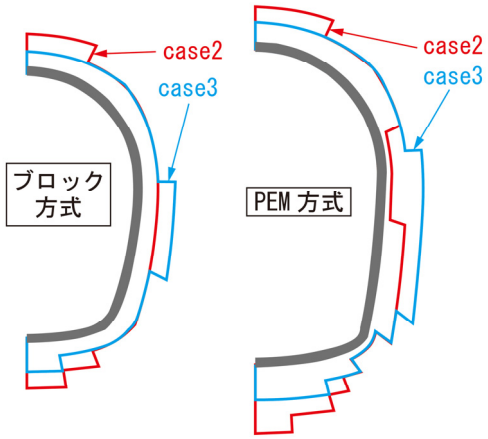

図-4　処分坑道周辺の塑性領域

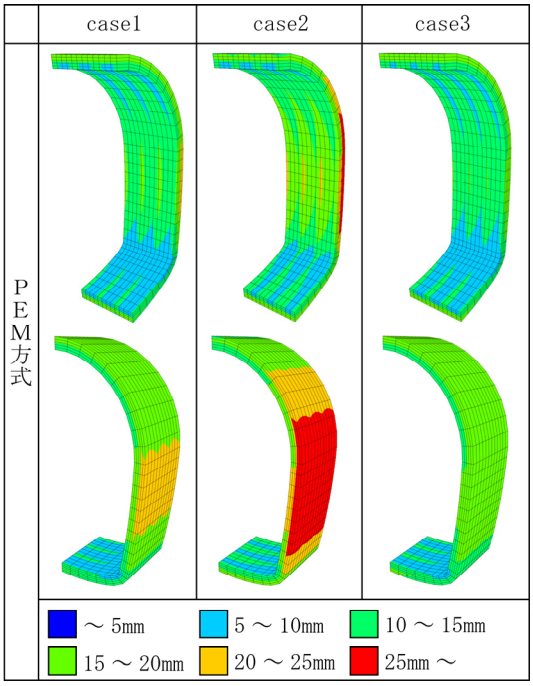

図-5　吹付けコンクリート変位

り，実線の内側が地山の塑性領域である．

ブロック方式に着目すると地山初期応力の最大主応力方向が側壁内空側かつ，側壁変位が最も大きいcase2において，天端および底盤部の塑性領域が卓越していることがわかる．一方で，地山初期応力の最小主応力方向が側壁内空側で，側壁変位が最も小さくなるcase3では側壁部の塑性領域が卓越する結果が得られた．また，PEM方式でもこの傾向は同様にみられた．これらより，地山初期応力の方位依存性がみられる地山に坑道を掘削すると，塑性領域の卓越する位置が変化することがわかった．

次に，**図-3**の結果よりPEM方式は坑道断面が大きいことから坑道側壁部の変位や支保内圧が大きくなることがわかったため，吹付けコンクリートの健全性を調べる必要があると考えた．そこで，吹付けコンクリートに生じる変位コンター図を**図-5**に示した．**図-3(a)**で最も収束変位の大きかったPEM方式のcase2に着目すると，広範囲に渡り25mm以上の変位が側壁部に生じた．また，case3からcase1，case2へと変位が大きくなる傾向があり，吹付けコンクリートの内側に比べ外側に大きく生じている．一方で，case3は全てのケースの中で吹付けコンクリート変位が最も小さく坑道を掘削できることがわかるが，切羽の押出し変位が最も大きくなる（**図-6**）．

これらの結果より，坑道断面が大きい程，吹付けコンクリートに及ぼす影響が大きいと言える．また，初期応力に方位依存性がある地山を掘削する際は，掘削方向を考慮し設計することで支保工規模が低減できる可能性がある．

3. 搬送・定置装置運用時の影響予測

2章では，竪置き方式に対応した坑道の掘削時力学的安定性について言及してきたが，直接処分方式では廃棄体や定置装置を合わせた重量が，ガラス固化処分と比較すると大きくなることが分かっており，坑道底面・処分孔口周辺の地耐力不足が懸念される可能性がある．しかしながら，竪置き方式での搬送・定置装置が坑道底面に及ぼす影響について言及された文献が見当たらないため，ここでは竪置き方式の廃棄体や定置装置が，坑道の健全性に及ぼす影響を調べた．

(1) 搬送・定置装置の概要

廃棄体の搬送・定置装置は，緩衝材を地上施工し搬送することから運搬重量が大きくなると考えられるPEM方式の断面を想定した．2.1章の条件で坑口から90m地点まで坑道を掘削した後，60kgレールを模擬するために**表-2**の条件でビーム要素を設置した．さらに，レールの上面に搬送・定置装置の車輪から伝わる荷重を集中荷重で与

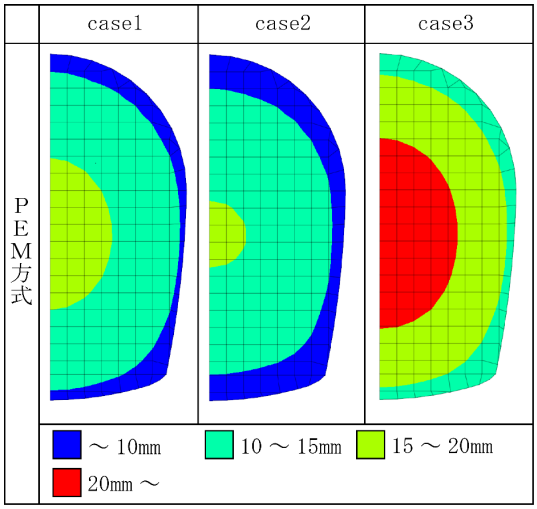

図-6 切羽押出し変位

表-2 運搬・定置装置の諸元

処分坑道搬送・定置装置（PEM 方式）		レール概要（60kg レールを想定）	
装置長さ	12m	断面積	$7.77\times10^{-3}\,m^2$
装置重量	100, 210, 300, 500ton	ヤング係数	$2.1\times10^{11}\,N/m^2$
車輪数	26, 14, 8 輪		

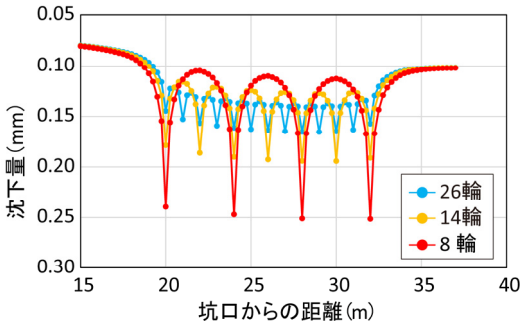

図-7 装置重量210tのときの吹付けコンクリートの沈下量

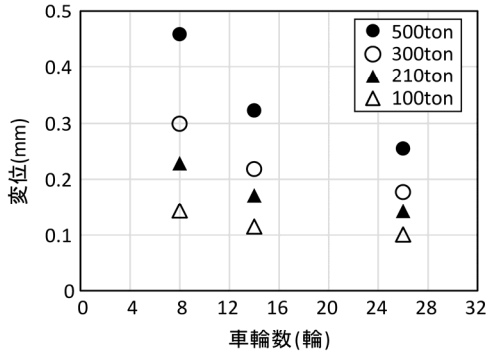

図-8 車輪数・装置重量の違いを考慮した吹付けコンクリート最大沈下量

えた．搬送・定置装置は具体的な諸元が不明確であるため，長さ12m，車輪の数を26輪・14輪・8輪，装置重量は100t・210t・300t・500tと仮定した（**表-2**）．

(2) 解析結果および考察

廃棄体を搬送・定置する装置の車輪数による影響を調べるため，装置重量を210tと仮定したときのレール直下の吹付けコンクリート沈下量を**図-7**に示した．これより，車輪が最も少ない8輪の場合，約0.25mmの沈下がみられた．さらに多くの装置重量・車輪数による影響を調べるために装置重量・車輪数を変化させて解析したところ，**図-8**に示す結果が得られた． 最も危険側である車輪数8輪の場合，装置重量100tで0.15mm，500tで0.45mmの変位が生じたため，装置重量が大きくなると変位も大きくなることがわかる．一方で車輪数が増えると徐々に変位は小さくなる．ただし，吹付けコンクリートの健全性を判断するための検討は行えていないため，本解析結果から，搬送・定置装置や吹付けコンクリートなどの支保工の規模を提言するまでは至らなかった．

4. まとめ

本研究では，使用済燃料の直接処分施設における坑道断面の大きさ，地山初期応力卓越方向の違いに着目し，坑道周辺地山や支保工にかかる影響を三次元数値解析により検討した結果，掘削断面積が大きくなるPEM方式の方が，坑道内空断面の力学的安定性は低下すること，地山初期応力が最大となる方向に坑道を進行させることにより，内空断面の安定性が最も高くなる結果が得られた．また，搬送・定置装置の重量および車輪数を考慮した数値解析を行ったところ，車輪直下の吹付けコンクリートは0.5mm以下の変位が生じることが分かった．

参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構：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-，pp.i-ix，1999.
2) 日本原子力研究開発機構：わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価-直接処分第１次とりまとめ，pp.92-123，2015.
3) JAEA(資源エネルギー庁受託事業）：平成 27 年度地層処分技術調査等事業直接処分等代替処分技術開発報告書，p3_1-3_331，2016.
4) 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，第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.69-74 ，2006.

(2017. 8. 11 受付)

DYNAMIC IMPACT PREDICTION AT CONSTRUCTION AND OPERATION OF DIRECT DISPOSAL FACILITY

Hisashi HAYASHI, Mizuki NISHIUCHI,Shin-ichi KANAZAWA and Koji ISHIYAMA

In the direct disposal facilities, tunnel digging section grows big in comparison with Geological Disposal facilities. In this study, I examine a dig influence state in consideration of dynamic stability and the characteristic of the rock when I build the direct disposal facility. I examined these by three-dimensional numerical analysis.As a result of study, transformation grows big in comparison with Geological Disposal in the tunnel of direct disposal facilities. In addition, the scale of the tunnel support may decrease by a direction to dig when bedrock has direction dependence.