

原子炉建屋地下からの燃料デブリ取り出しの ためのアクセスルート構築に関する検討

STUDY FOR THE ACCESS ROUTE TO REMOVE THE DEBRIS FROM THE BASEMENTS OF NUCLEAR REACTOR BUILDINGS

今津 雅紀^{1*}・伊東 敬²・福田 俊彦²・山田 淳夫³

Masanori IMAZU^{1*}, Takashi ITO², Toshihiko FUKUDA², Atsuo YAMADA³

It is important to remove the fuel debris from the primary containment vessel and/or the reactor pressure vessel for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Authors investigated the possibility of the construction of an access route for removing the fuel debris from the basements of the nuclear reactor buildings. As results of investigation of conventional techniques, it is possible to construct the access route from the surface to the basements by using a shield tunneling method, an open caisson method, and so on, while controlling a change of the ground water level and expansion of the pollution. It is considered that an all casing method will be able to make an approach hole through the base foundation of the buildings. However the problems, such as sealing of bearings of boring tools, remote control devices and remote control methods of perforation, cutting of very hard fuel debris, collection of the core including the debris, and so on, are left behind. A clear perspective is not necessarily provided under the present conditions about such problems. In the case of the method to access from the basement, it is estimated that the cost of more than ten and several billion yen and the construction period of several years or so will be needed, except the development of such as machine systems.

Key Words : fuel debris, tunnels, shaft, decommissioning, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

1. はじめに

福島第一原子力発電所の廃炉を進めるにあたっては、燃料デブリ（事故により核燃料が炉内構造物の一部と溶解した後、再固化したもの）を取り出すことが重要な課題となっている¹⁾。

燃料デブリは原子炉圧力容器（RPV）内のみならず、原子炉格納容器（PCV）底部にも存在しているものと推定されており、各号機における燃料デブリ位置やバウンダリーの考え方に応じた取り出し方法決定のための最適なアクセスルート選択が検討されている。アクセスルート構築の実現可能性の観点から、PCVの上からのアクセス、横からのアクセスを前提とした燃料デブリ取り出し工法が有望視され検討されているものの、いずれの工法

とも実現への課題も多い。このことから、これらの工法の代替として、原子炉建屋地下（下部）からのアクセスルートの構築の可能性について検討したものである。

2. 下部からのアクセスルートの概要と現状技術での対応

原子炉建屋下部からの燃料デブリ取り出しのためのアクセスルートの基本構成は、地上から地下へ降りるための進入坑（斜路または立坑を想定）、地下を水平に移動するための水平坑道、原子炉建屋直下の地下から原子炉建屋底面へアプローチするための上向き立坑、そして原子炉建屋基礎底版から格納容器内まで穿孔し、燃料デブ

キーワード：燃料デブリ、トンネル、立坑、廃止措置、福島第一発電所

¹フェロー会員 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ Technological Strategy Group, Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation, (E-mail: imazu-masanori@ndf.go.jp)

²非会員 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ Technological Strategy Group, Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation.

³正会員 安藤ハザマ 技術本部 原子力部 Radwest & Environmental Tech. Team, Nuclear Power Department, Hazama Ando Corporation.

り取り出し用の機器類がPCV内にアクセスできるための孔（アプローチ孔）である。これらのルートを構築するにあたっては、原子炉建屋内部の汚染を環境中に拡散しないこと、現段階においては凍土方式による陸側遮水壁（凍土壁）へ干渉しないことが求められ、トンネル坑内に湧水を発生させない工法（遮水性）や凍土壁よりも深い深度での掘削が可能である工法が必要である。

既往技術の調査を行い、これらに要求される技術と比較し、技術開発要素の抽出を行った。図-1（原子力規制委員会²⁾ (<http://www.nsr.go.jp/data/000051090.pdf> (2016/3/25参照))および東京電力³⁾ (http://rss.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/140806j0102.pdf (2016/3/25参照))に加筆）は適用可能な既往技術例を示したものである。主に掘削可能深度が数十m以上のもので、水密性・遮水性が確保できる工法として、進入坑（立坑方式）の掘削には地中連続壁やケーソンを使った工法、斜路・水平坑道・上向き立坑の掘削技術には、シールド工法や上向き推進工法等が適用可能であることがわかった。

アプローチ孔の穿孔技術として、鉄筋コンクリートなどの削孔が可能であり、アプローチ孔として要求される直径を確保することが可能な工法を抽出した。杭基礎の施工や撤去等に適用されている全旋回オールケーシング工法やコアカッターやボーリングマシンを用いた工法の適用性が高いと考えられる。しかしながら、現状の性能を考慮した場合、上向きにアプローチ孔を削孔するのは困難であり、無人化施工や遠隔操作への改良する等の開発課題があることがわかった。次節以下では、これらの技術を用いた施工概念について検討した結果を示す。

3. 施工概念の検討

原子炉建屋下部の地下作業室に到達するまでのアクセスルートは、シールド工法等の既存技術で対応できる可能性が高いことがわかった。ここでは、原子炉建屋下部の地下作業室から格納容器内部に到達するための施工方法について検討した結果を示す。

(1) アプローチ孔穿孔作業室が原子炉建屋底面付近の例

図-2にアプローチ孔穿孔作業室を原子炉建屋底面付近に設置した場合の施工方法（A案）を示す。図には、原子炉建屋直下の地質構造の概況も併せて示してある。

本施工方法は、IV層泥質部中に水平坑道を掘削し、そこから上向き立坑を原子炉建屋底面付近まで掘進し、その後、地下室を横方向に掘削するというものである。以下に特徴をまとめる。

a) 機械操作室からの立坑と穿孔機械室への出入坑

立坑で建屋直下の機械操作室に出入りする。その隣の

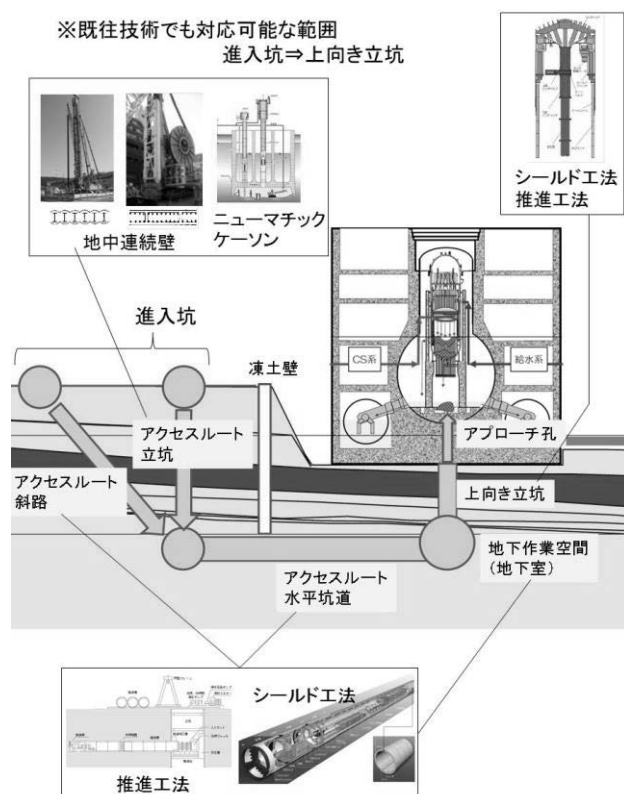


図-1 適用可能な既往技術の例

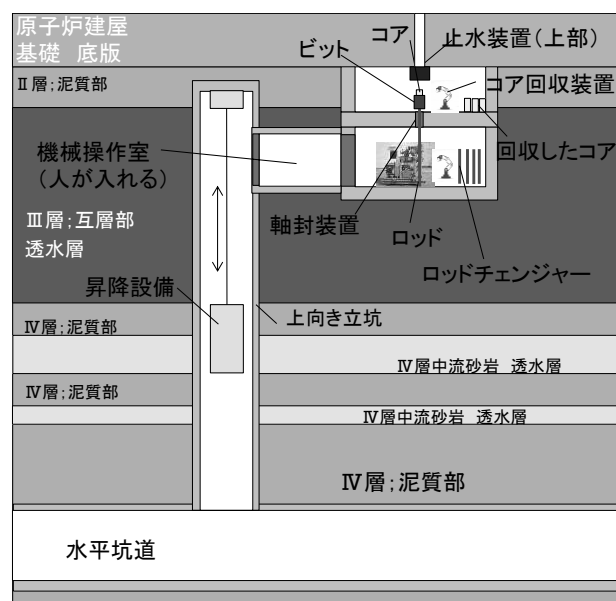


図-2 アプローチ孔穿孔作業室が原子炉建屋底面付近の施工方法（A案）

コア回収室と穿孔機械室とは隔絶されており、コア回収装置と穿孔機械、ロッドチェンジャーを遠隔操作する。

b) コア回収室と穿孔機械室を縦上下2階建

原子炉建屋に接続している上部の空間でコア回収を行う。この上部空間は止水装置で乾燥状態を維持する。その下部に位置する空間に穿孔機械を設置する。

c) コア回収室と穿孔機械室の隔絶

コア回収室と穿孔機械室は、高濃度汚染域であるもの

の機械操作室は人が入れる区域とする。

本施工方法を実現するためには、穿孔作業、すなわちロッドの継ぎ足し・切り離し、コア回収、コアの収納容器への収納作業を遠隔操作することが必要である。さらに、機器類の搬出入を立坑の昇降設備で行う必要があるため、想定した重量物に対応できるような昇降設備が必要である。ただし、掘削ロッド摺動部をはじめとした止水装置の水密性確保のための技術開発が必須である。

(2) アプローチ孔穿孔作業室が水平坑道内の例

図-3にアプローチ孔穿孔作業室を水平坑道内に設置した場合の施工方法(B案)を示す。

本施工方法は、IV層泥質部中に水平坑道掘削後、上向き立坑を原子炉建屋底面まで掘進した後、アプローチ孔穿孔機械室を水平坑道内に構築するものである。立坑は、遮水性を確保することによって、アプローチ孔穿孔時の汚染された掘削水等が環境中に拡散しないようにし、作業スペース確保のため設置するというものである。以下に本施工方法の特徴をまとめる。

a) 水平坑道を掘削と坑道内への2階建て地下室構築

地下1階に穿孔機械を設置し、地下2階は掘削用チューブを継ぎ足し、掘削コア等回収、掘削水の排泥・循環等の作業室とする。

b) 原子炉建屋直下口元での排水の回収

掘削水は地下2階の口元に設置した止水機能を有するスィベルからチューブ内を通して切削面へ供給する。排水は、切削くず（くり粉）とともにチューブと切削孔壁の隙間を流下させる。排水の回収は原子炉建屋直下の口元処理で設置した止水・集水装置から行うものとする。

c) 地下2階口元でのゲートバルブ設置

地下2階の口元にゲートバルブを設置する。ゲートバルブより下側は、着脱可能な機構とする。高線量のコア等は、ゲートバルブより下側にドッキングさせた収納容器内に直接収納する。

本来、下向き穿孔に適用される全旋回オールケーシング工法という既往技術を上向き穿孔に適用させた新しい工法概念であり、実際の施工に適用していくには改良・開発、モックアップ試験等による検証が必要な段階にある。高線量が想定される汚染水や汚染ガラの処理をはじめ、放射線対策全般についても多くの課題が残されていると考えられるが、汚染水の環境中への漏出に対し、遮水構造にすることができる上向き立坑、穿孔用のアウターケーシングおよびインナーチューブの三重にバリアを施すことによって汚染拡大の抑制に配慮した工法である。本施工方法では、穿孔用のアウターケーシングおよびインナーチューブの継ぎ足しは有人作業で全て行い、放射線防護上、格納容器突破後の遠隔作業時には掘削用チューブの継ぎ足しを行わないものとする。そのため、コア回

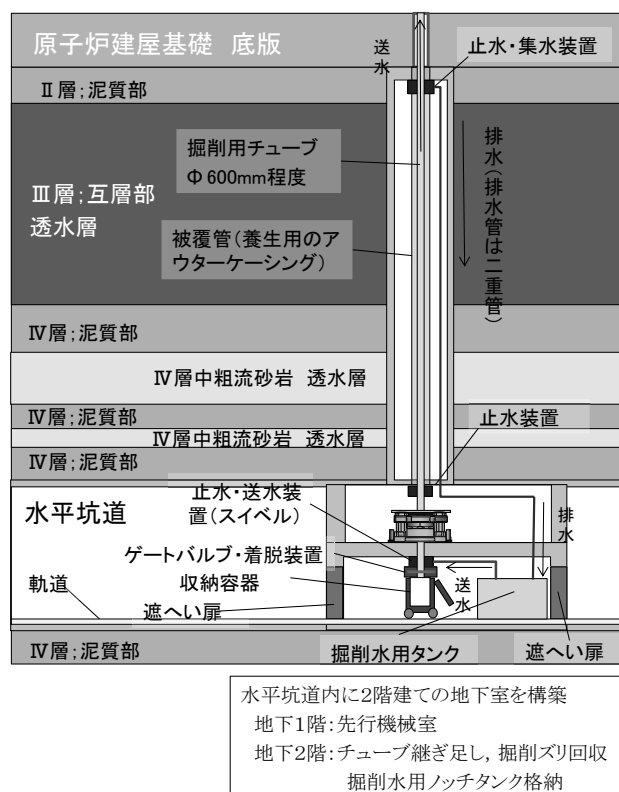


図-3 アプローチ孔穿孔作業室が水平坑道内とした場合の施工方法(B案)

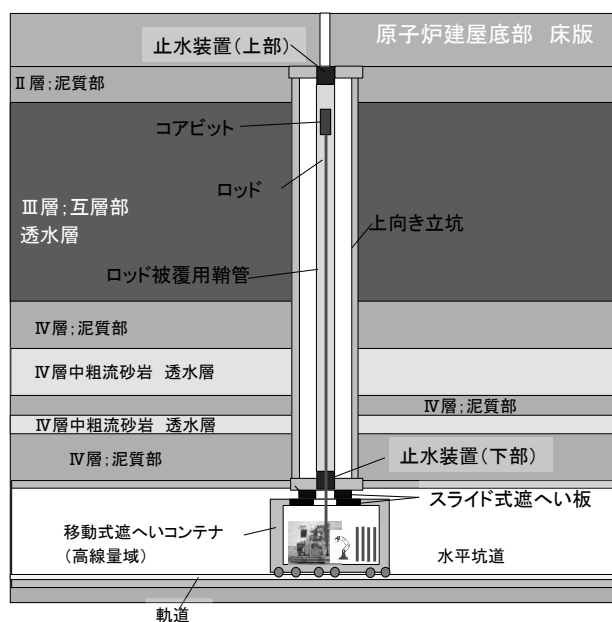


図-4 アプローチ孔穿孔作業を水平坑道内のコンテナ作業室から行う施工方法(C案)

収、コアの収納容器への収納作業までが遠隔操作の対象となる。また、PCV穿孔以降、掘削用ビットの交換もできなくなるため、ビットの長寿命化が必要であり、掘削ロッド摺動部をはじめとした止水装置の水密性の確保のための技術などの開発課題が挙げられる。

(3) アプローチ孔穿孔作業を水平坑道内のコンテナ作業室から行う施工方法の例

図-4にアプローチ孔穿孔作業を水平坑道内のコンテナ作業室から行う施工方法(C案)を示す。

本施工方法は、IV層泥質部中に水平坑道掘削後、上向き立坑を原子炉建屋底面まで掘進し、施工機械室兼汚染物回収容器となる移動式遮へいコンテナを水平坑道内に設置し、水平坑道内からアプローチ孔の穿孔作業を行うものである。立坑は、前述したとおり、アプローチ孔穿孔時の汚染拡大防止と作業スペース確保のため設置するというものである。以下に本施工方法の特徴をまとめる。

- 穿孔機械、ロッドチェンジャーを移動式遮へいコンテナに設置し、コンテナ内からコアビット、ロッドを上向きに継ぎ足しながら穿孔する。穿孔後のボーリングマシン・回収コア・掘削水は、コンテナごと廃棄する。
- コンテナ内は高線量域となる。コンテナの遮へい性を確保するために、鋼性の壁厚は300mmとするため、コンテナ質量は100～200トンクラスとなる見込みである。
- PCVの鋼製シェル突破後には、コアビットおよびロッドが汚染されるため、移動経路として汚染拡散防護のためのロッド被覆用鞘管を上向き立坑内に設置する。
- 穿孔機械の操作は、移動式遮へいコンテナの外側から行う。

本施工方法を実現するためには、穿孔作業を遠隔操作することが必要である。すなわち、ロッドの継ぎ足し・切り離し、コア回収作業までが対象となる。また、掘削ロッド摺動部をはじめとした止水装置の水密性の確保のための技術開発が必須である。本方法の重要な部分となるコンテナの重量により、アクセストンネルの形状は、斜路に限定されると考えられる。

(4) 具体的な施工手順の検討

A案～C案のうち、現実性が高いと考えられるB案(図-3)すなわちアプローチ孔穿孔機械を水平坑道内に構築する地下室内に設置する施工方法を対象として、具体的な作業手順について図-5に示すように検討した。これは、鋼材や鉄筋コンクリート等の切削能力があることと、ビット交換やロッド延長・切り離し作業を省略できる可能性があることより、全旋回オールケーシング工法の適用性が高いと考えられたためである。以下に手順を示す。

a) ステップ1：アウターケーシング設置

φ900mm程度の径で格納容器到達まで穿孔する。この時、掘削水は止水・集水装置から回収し、循環使用する。アウターケーシングを穿孔した孔内に設置する。孔壁とケーシングとのクリアランスをセメントミルクで充填して孔内に被覆管を固定する。

b) ステップ2：アプローチ孔穿孔

格納容器底面からφ600mm程度で穿孔する。ケーシ

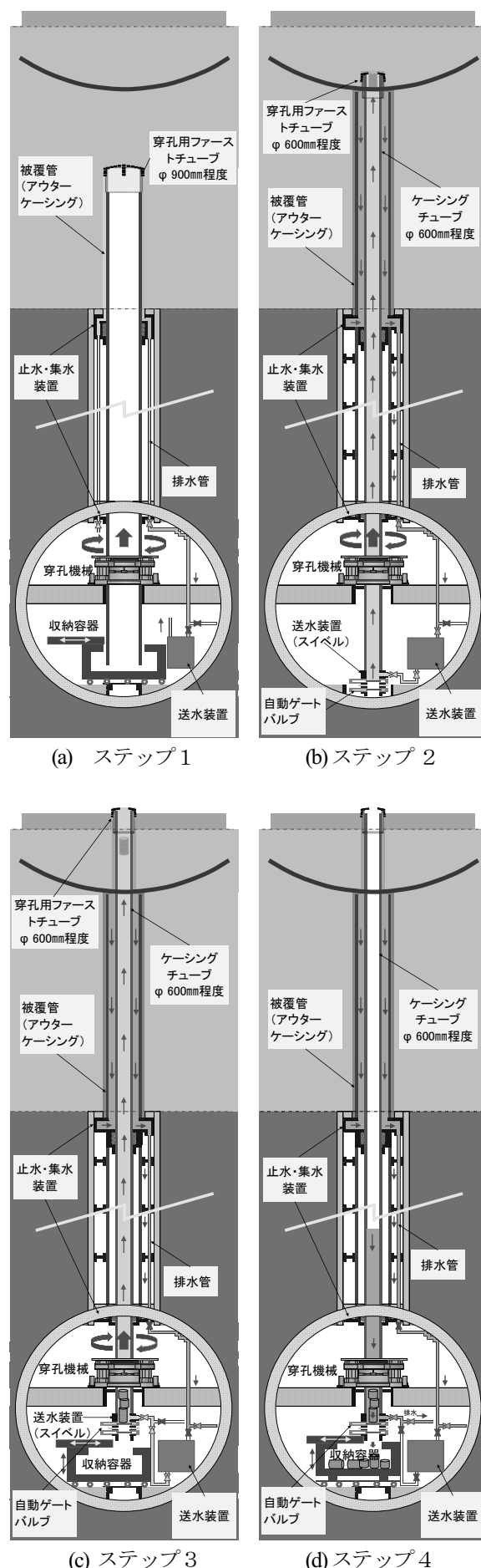


図-5 アプローチ孔作業室を水平坑道内とした場合の施工手順

グチューブの下端から送水し、先端部でアウターケーシング内でリターン水として排水を集水する。格納容器到達後は、燃料デブリ貫通まで連続的に穿孔する。

c) ステップ3：コア回収準備

燃料デブリ貫通後のコアをケーシング内に回収する。高濃度汚染物用の収納3容器を地下2階にセットする。収納容器の蓋を明け、収納容器をケーシング下端のφ600mm程度の自動ゲートバルブに接続する。この時、収納容器の高さをリフトで調節する。

d) ステップ4：配管内の排水とコア回収

排水経路を切り替え、高濃度汚染水を排水および回収を行う。ケーシング内の排水が完了したら、自動ゲートバルブを開口し、収納容器内にコアを収納する。リフトを下げ、自動ゲートバルブとの接続を解除する。コアを収納した収納容器の蓋を遠隔操作で閉め、収納容器を搬出する。ケーシングチューブの外側の隙間の充填を行う。排水経路を利用し、セメントミルクでアウターケーシング（φ600mm程度）とケーシングチューブ（φ600mm程度）の隙間と、格納容器内の孔壁とケーシングチューブ（φ600mm程度）の隙間を充填してケーシングチューブを固定する。

以上の手順によってアプローチ孔の穿孔を行う。アプローチ孔穿孔後は、インナーチューブ・アウターケーシング・地下1階に設置した穿孔機械が残置物となり、燃料デブリ取り出しは、地下2階からとなる。

燃料デブリが付着した高濃度に汚染された格納容器内の掘削コア等を回収する際に、遮へい性を有する収納容器を水平坑道にセットし、直接この容器の中に回収することが可能であるため、燃料デブリを回収する際にも、この回収機能を活用することができると考えられる。

4. 原子炉建屋基礎地盤・原子炉建屋健全性に対する影響に関する検討

適用性が高いと考えられる施工方法（B案）でアクセスルートを構築した際の、原子炉建屋基礎地盤及び原子炉建屋健全性への影響について検討を行った。

経験則や理論式に基づくLimanov⁴⁾の式（式-1）やPeck⁵⁾の式（式-2）を用いて地表面沈下の影響を計算した。入力した地盤物性値等については、設置許可申請書⁶⁾の富岡層の平均値相当とした。ただし、掘削とともに構築されるトンネル構造物が土圧に抵抗するために、地盤に作用していた鉛直土圧がすべて開放されるわけではない。開放される割合を応力開放率 α とすると、橋本ら⁷⁾は、洪積粘性土の応力解放率として $\alpha \approx 40\%$ 、沖積粘性土では $\alpha \approx 20\%$ としているので、 $\alpha = 40\%$ とし、シールド工法の最大沈下量を計算した。

$$U_{\max} = (1 - \nu^2) \frac{P}{E} \cdot \frac{4r_0^2 \cdot Z}{Z^2 - r_0^2} \quad (\text{式-1})$$

$$\delta(x) = \delta_{\max} \cdot e^{-\frac{x^2}{zi}} \quad (\text{式-2})$$

ここに、

ν ：ポアソン比

P ：トンネル中心位置の鉛直土圧 (kN/m²)

E ：地盤の弾性係数 (kN/m²)

r_0 ：トンネル半径 (m)

Z ：地表面よりトンネル中心までの深さ (m)

δ ：シールド中心から x 離れた位置の沈下量 (cm)

δ_{\max} ：最大沈下量 (cm)

x ：シールド中心からの水平距離 (m)

Z ：地表面よりトンネル中心までの深さ (m)

i ：曲線の変曲点までの水平距離 (m)

これらの式に基づいて計算した結果、水平坑道の直径 r_0 が4.0mの場合、トンネル直上の沈下量で1.4mmであり、トンネル中心より5m離れると0.5mm、10m離れると0.1mm程度となり、15m離れるとほとんど影響がなくなることがわかった。

上向き立坑の掘削による原子炉建屋底面の設置面積の低減を地盤支持力との関係により評価した。原子炉建屋の設置面積に対して、上向き立坑掘削による面積の減少率は0.3%と非常に小さく、局所的な応力集中の影響等を検討する必要があるが、原子炉建屋基礎地盤の支持力は十分に確保されていると判断できる。このことより、原子炉建屋からの離隔を確保して水平坑道を掘削することによって、原子炉建屋直下の基礎地盤への影響や原子炉建屋の沈下への影響を排除できることがわかった。また、原子炉建屋基礎底板内のアプローチ孔穿孔による鉄筋切断の影響についても、基礎底板の強度の低下は小さいと考えられる。ただし、地震時における複雑な影響に対する詳細な検討は別途実施する必要がある。

5. 福島第一原子力発電所構内におけるレイアウト案

アクセスルートのルート選定に係る選択肢を抽出した。抽出した選択肢は、進入坑の坑口位置、進入方式（立坑、斜路）、水平坑道の掘進深度、アプローチ孔穿孔機械の設置深度と設置方式などである。これらの選択肢の組み合わせによってルート選定を行った。ルートの線形は坑口と原子炉建屋の地下を結ぶ曲線またはループ形状とした。坑口位置が凍土壁の外側にある場合、水平坑道の掘削深度は凍土壁よりも深くなる。また、アプローチ孔穿

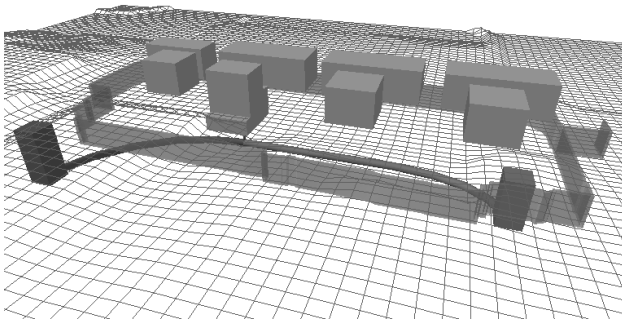


図-6 凍土壁内（発進坑）と凍土壁外（到達坑）の場合

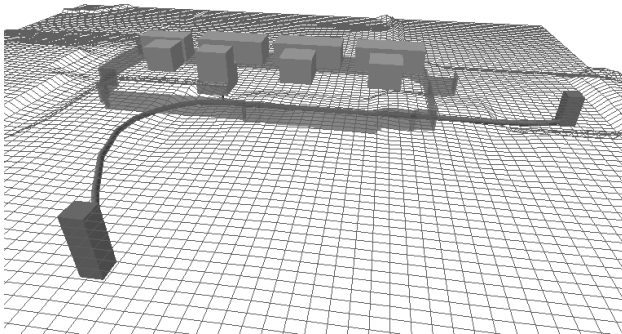


図-7 発進坑，到達坑ともに凍土壁外の場合

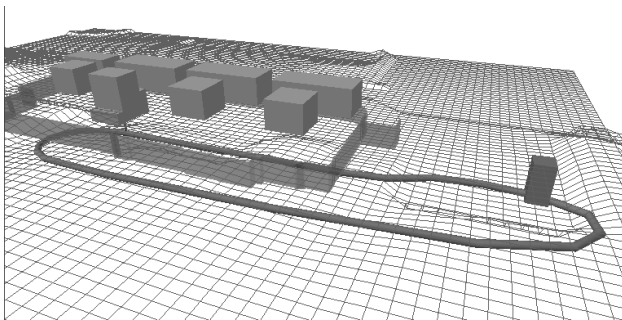


図-8 凍土壁外の立坑を共有したループ状の場合

孔機械の設置深度によって，施工の難易度や機器類の搬出入方式に影響が出てくる．このように，選定したルートごとに，トンネル延長や施工の難易度等が異なる．そのため，工程・コスト面，放射線防護上の安全面，実現可能性を考慮した技術面より概略評価を行った．抽出した選択肢には各々一長一短があり，選定した各ルートについて，現時点において判断できないが，詳細設計時には現場の状況を鑑みて，選定することが望ましい．図-6～図-8に，アクセスルートのトンネル線形の例を示す．いずれの場合も水平坑道の深度は凍土壁より深くなり，図-6は凍土壁の内外に立坑を設置した例である．図-7は凍土壁外に立坑を設置したものであり，立坑ヤードの面積を広くとれる可能性のあるルートである．そのため水平坑道の径を大きくすることが可能である．図-8はループ形状のルートとすることで，立坑の本数を1本にする

ことが可能なルートである．掘削延長は長くなるものの，立坑設置位置とトンネル掘進長とのコスト比較や仮設用地の有無等により採用の是非が分かれると考えられる．

6. 原子炉建屋下部からの燃料デブリ取り出しにおける課題

建屋下部までのアクセスのための進入坑，水平坑道，上向き立坑については，シールド工法等の既存の工法により，地下水位の変動や汚染拡大を抑制するという条件を満たしつつ構築することは可能と考えられた．建屋基礎底盤に設けるアプローチ孔に関しては，全旋回オールケーシング工法が比較的適用性が高いと考えられるが，穿孔時の軸受けの止水，穿孔作業の遠隔操作，アプローチ孔から搬入できる燃料デブリ取出装置の開発，格納容器内の水密を保持できる止水装置の設置，デブリの切削，デブリを含むコアや汚染水の回収装置，遠隔操作方法，水密シールド部の長期的健全性の確保などの課題が残されている．こうした課題については，現状では必ずしも明確な見通しが得られておらず，解決のためのハードルは低いとは言えない．地下アクセスの場合，工費・工期に関して，課題解決のための機械・機器等の開発のほかに，百数十億円以上の上乗せコストと数年以上の工期を要することが検討の結果，明らかになった．総合的に判断して，原子炉建屋下部からの燃料デブリ取り出しには，乗り越えるべき困難な課題が多く存在し，実現のためには多大な技術的検討，技術開発が必要になると考えられる．

参考文献

- 1) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構：東京電力㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015～2015 年中長期ロードマップの改訂に向けて～，2015.
- 2) 原子力規制委員会：“東京電力 平成 26 年 5 月 26 日凍土方式遮水壁造成前後の地下水流動予測について”，2014.
- 3) 東京電力：“福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第 2 回進捗報告 平成 26 年 8 月 6 日”，2014.
- 4) K.チェッキー著，島田隆夫訳：トンネル工学，鹿島出版会，1971.
- 5) R.B.Peck:Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground, Proc. 7th ICSMFE, Mexco, 1969.
- 6) 東京電力㈱：福島第一原子力発電所設置許可申請書，添付書類六，2002.
- 7) 橋本正他：粘性土地盤における実測地に基づくシールド掘削時の応力開放率について，第 31 回地盤工学研究発表会，pp.2191-2192，1996.