# 地下空間を利用した原子力発電所の 安全性向上方策の検討

# A STUDY TO ENHANCE THE SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS BY USING UNDERGROUND SPACE

奥村 忠彦1・真下 秀明2\*・谷利 信明3・田中 達也4

Tadahiko OKUMURA<sup>1</sup>, Hideaki MASHIMO<sup>2</sup>\*, Nobuaki TANIKAGA<sup>3</sup>, Tatsuya TANAKA<sup>4</sup>

In the light of the causes of the accident at the Fukushima I nuclear power plant, a study has been carried out to investigate the concept of constructing and maintaining critical ancillary facilities of nuclear power plants (emergency power generation, water supply facilities and emergency access passageways) using underground space. Furthermore, the concept of an off-site emergency response center that integrates the functions of these facilities is summarized. In this study an exemplary arrangement for each facility is presented, after identifying the basic specifications for each facility with respect to power and water supply capacity and other requirements. Finally, the issues, that have to be taken into account in the future by considering the site specific geographical and topographical conditions, have been evaluated.

Key Words : Utilization of Underground Space, Nuclear Power Plant, Emergency Power Generator, Water Supply System, Emergency Access Tunnel

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災による福島 第一発電所の事故は、地震による「外部電源系設備の喪 失」、その後に襲来した大津波による「非常用発電設備 の損傷」が引き金となり、様々なトラブルが連鎖的に引 き起こされたものと考えられている.

事故発生後には、官・学・民の尽力によって、炉心溶 融を防ぎ得なかった要因分析と、その対策立案が検討さ れており、現時点では、各原子力発電所では緊急安全対 策を実施し、実質的な安全性向上をはかっているところ である.

一般財団法人エンジニアリング協会(ENAA)・地下 開発利用研究センター(GEC)では、平成23年7月に発 電所重要施設地下収納研究会を設立し、原子力発電所事 故の要因の一つが外部電源等の付属施設が被災したこと ととらえ、それらが地下施設であった場合の優位性につ いて検討し、今後の発電所の重要付属施設のあり方を提言する報告書を24年9月にとりまとめた.

本報告では、原子力発電所の安全性を多重、かつ多様 に確率する観点から、重要な付属施設の冗長性向上を期 待する施設として、①非常用発電設備、②水供給設備、 ③緊急時アクセス通路、④オフサイト緊急時対策センタ ーに着目し、同研究会でとりまとめた成果について紹介 する.

## 2. 地下収納の優位性

重要設備を地下に収容することの優位性として,耐震 性の向上があげられる.これは地下では地上と比較して 地震時の加速度が増幅されにくいため,地盤の応答加速 度が小さくなることに起因している<sup>1)</sup>.また,津波等の 自然災害,航空機事故,テロ等の外的環境からの遮断を

キーワード:地下空間利用・原子力発電所・非常用電源設備・水供給設備・緊急時アクセス通路

<sup>1</sup>フェロー会員 一般財団法人 エンジニアリング協会 地下開発利用センター Engineering Advancement Association of Japan, Geo-space

Engineering Center (okumura@enaa.or.jp)

- <sup>2</sup>正会員 大成建設株式会社 原子力本部 Nuclear Facilities Division, Taisei Corp.
- <sup>3</sup>正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 Civil Engineering Management Division, Kajima Corp.

4正会員 株式会社大林組 原子力本部 Nuclearr Facility Division, Obayashi Corp.

目的として、地下が有する閉鎖性を利用することが可能 と考えられる.一例として、久慈国家石油備蓄基地では、 津波により地上部の設備が被災し、設備の機能が失われ たものの、サービストンネル坑口の防潮扉を閉鎖したこ とで、トンネル内の岩盤タンク関連設備の被災を免れた という事例が報告されている<sup>9</sup>.

以下に概説する重要付属施設の基本仕様,配置概念, 設備概念等の検討は,これらの地下収納の優位性を踏ま えて実施したものである.

## 3. 非常用発電設備

### (1) 基本仕様

原子力発電施設において非常時(外部電力供給停止時) に求められる電力供給のステップは、①計測、制御等に 係る電子施設(IT施設)に必要となる電力供給, ②原子 炉を緊急停止させる(制御棒挿入等)ためのプラント用 の電力供給,および③停止後の原子炉を冷温停止状態に 保つ(冷却取水循環等)ためのプラント用の電力供給等 と考えられる. このうち①, ②は即時的な電力供給が求 められるものであり、大容量蓄電池によるUPS (無停電 電源装置)及びそれに追随し起動する非常用発電設備に より対応されるものと考えられる.一方,③については ②の操作・制御の完了後に、比較的大容量でかつ外 部電源が復旧するまでの長時間の稼働、電力供給が求め られる. そのため、本稿では、③の電力供給の多重性、 多様性を確保するための電力供給設備を対象とした基本 仕様を表-1のとおり設定し、燃料貯槽を含む非常用発電 設備の設置位置、および設備概念についての検討を行っ た.

<b>火</b> 并币用无电以用 <sup>(1)</sup> 举个Ц冰								
諸元	基本仕様	備考						
定格出力	5,000kVA	概ね100万kW相当						
燃料容量	1200kL	概ね4週間の稼働分						
起動時間	40秒	一般的な仕様						

北岸田珍電売港の甘木井祥

# (2) 設備の設置位置

原子力施設の地理・地形上の地点特性を考慮し,背面 地形および地盤の違いによる非常用電源設備の設置位置 について想定した(図-1).上図は背後に岩盤質の斜面, 高台を有するサイトを想定したものであり,背後岩盤内 空洞に非常用発電設備を設ける.一方,背後に岩盤質の 高台等を有さないサイト(下図)については,地中に RC造の格納空洞を構築し,非常用発電設備を設けるこ とで対応する.なお,非常用発電設備の格納空間は,事 故・災害の影響発生を勘案し,地中に設置したメンテナ ンス坑道内に送電線を設置し,原子炉建屋へ電力を供給 する.

#### (3) 設備の概念設計

非常用発電設備の概念図を図-2に示す.発電機は施設 の保守点検時の機能保持,地震時等の非常時における機 器損傷に対する高い冗長性を考慮し,2,000kVA出力の発 電機を3台配置する形式を選定した.さらに,発電機を 放射状に配置することで,地震による被災確率の低減を 考慮している.

燃料貯槽設備についても耐震性,耐波性,セキュリティ等の観点から,地下収納の優位性が生かされると考え, 地下式を採用した.発電設備の稼働時間は,燃料供給の 復旧(道路,油槽書等の復旧),外部電源系の普及まで の時間等を勘案し概ね4週間を設定した.

地下貯槽設備・配置の概念図を図-3に示す.地下燃料 貯槽は、その設置事例から国内最大級となる鋼製タンク (100,000L/基)を4基配置する設備を1ユニットとして、 発電機と同じく3ユニットに分散し設置していうる.



図-1 非常用発電設備の設置概念図 (上図:背後岩盤斜面ケース,下図:背後平地土質ケース)



図-2 非常用発電設備の概念図



図-3 地下燃料貯槽の概念図

のような背後に岩盤質の高台等を有さないサイトについ ては、地中にRC造の非常用貯槽槽を設けることで対応 する.なお、施設外バックアップ水供給施設の格納空間 は、事故・災害の影響発生を勘案し、地中に設置したメ ンテナンス坑道内に導水管を設置し、施設内の主要な貯 槽タンクに供給する.メンテナンス坑道の配置(傾斜) を考慮することで、水頭差を利用して電源の無い状態で も送水が可能となる.



図-4 水供給設備設置位置の概念図 (上図:背後岩盤斜面ケース,下図:背後平地土質ケース)

# 4. 水供給設備

#### (1) 基本仕様

緊急用冷却水は基本的に施設内のプラント設備(燃料 取換用タンク,補給水タンク)として配置されている. そのため,施設外より施設内の主要な貯水タンクに給水 することを目的とした,更なるバックアップ設備として 貯水槽の設置について検討した.

地下式の水供給設備の基本仕様を表-2に示す.

表-2 水供給設備の基本仕様							
諸元	基本仕様	備考					
貯槽容量	4000m <sup>3</sup>	概ね100万kW相当					
貯水水質	純粋	貯水槽内ライニング考慮					
導水方法	ポンプ圧送	電源車等を利用					

#### (2) 設備設置位置

原子力施設の地理・地形上の地点特性を考慮し,背面 地形および地盤の違いによる施設設置位置について2つ のケースを想定した(図-4).上図は背後に岩盤質の斜 面,高台を有するサイトを想定したものであり,背後岩 盤内空洞にRC造の非常用貯水槽を設ける.一方,下図

#### (3) 設備の概念設計

水供給設備の概念図を図-5に示す.貯槽は幅10m,高 さ7m,長さ60mのRC造とする.また,純水を貯槽する ことからステンレス製(または耐腐食ライニング等)と し、定期的な水質監視および入れ替え実施が可能な構造 としている.



# 5. 緊急時アクセス通路

## (1) 基本仕様

原子力発電所が緊急事態に陥った場合,地上通路のア クセスや地上設備の運用には大きな制約が生じることが ある.これに対して,構内アクセス通路の一部を地下化 することにより,多くの機能を想定した利用の可能性が 期待できる.

ここでは地下に設置した坑道・空間を緊急時アクセス 通路と称し、期待される機能から基本仕様を以下のとお り設定した.

- ① 緊急時の地下から発電所建屋へのアクセス路
- ② 緊急時の通信線,電線,水配管等の施設設置スペース
- ③ 地下シェルター (緊急避難所等)
- ④ 緊急対策室、サテライトオフィス(免震重要棟バ ックアップ機能含む)
- ⑤ 緊急対応時の休憩スペース
- ⑥ 水貯留スペース(冷却水,あるいは汚染水)
- ⑦ 放射性汚染物質(がれき等)の貯蔵設備

#### (2) 断面形状の概念設計

緊急アクセス通路の断面形状(以下,基本断面形状という)は、前節で示した期待される複数の緊急アクセス 通路の機能のうち、①のアクセス路としての確保を条件 としてその仕様を設定した.なお、アクセス通路(一般 部)の分岐・拡幅を考慮することにより、その他の要求 機能にも柔軟に対応が可能であると考えられる.

基本断面形状は、地点の地質や環境条件等に適合し柔 軟に選定可能となるように、NATM工法、開削工法、シ ールド工法の適用を想定して設定した(図-6).



図-6 緊急アクセス通路の基本断面形状の概念図

## (3) レイアウト (平面・縦断線形)

緊急アクセス通路の平面線形・縦断線形を図-7に示す. 緊急時アクセス通路により発電所地下に直接アクセス できる機能およびその他機能を有効に利用するためには, 施設内に複数配置された原子炉建屋に独立してアクセス する必要がある. そのため, 原子炉建屋へのアクセス方 式を複線分離案, 複線連結案, 単線分岐案の3方式で整 理している.

一方,縦断線形は、平面線形の決定後に地表環境、深部の地質構造を鑑み設定することが望ましい.図では、耐水圧性の水密扉で隔離した通路の容積を有効に確保する、車両運行の観点から、取り付け部の縦断勾配を5~10%とし平坦部の通路延長を長く確保する場合の縦断線形の例を示している.また、最大土被りとして10~20m程度を想定し、取り付け部の延長を200m、平坦部の延長を1,600mとしている.



図-7 緊急アクセス通路の平面・縦断線形の概念図

#### (4) 利用形態と必要設備

緊急時アクセス通路は基本仕様に示した通り,様々な 利用形態の施設として利用可能である.表-3に原子炉建 屋へのアクセス機能を基本機能としたうえで,アクセス 通路に期待する追加機能と対応する必要設備を整理する. 期待する仕様・安全機能に応じて,必要な設備を柔軟に 選定・追加することで,緊急アクセス通路の多面的な利 用が可能となり,緊急時の安全機能の多重化に貢献する ことができる.

表-3 緊急時アクセス通路へ期待する機能と必要設備等の整理

		基本機能	追加機能(オプション)					
		建屋への アクセス	通信線、電 線、水配管	地下シェ ルター	緊急 対策室	休憩 スペース	水貯留	汚染物質 の貯蔵
必要設備	洞道本坑	0	0	0	0	0	0	0
	ラック		0					
	遮蔽扉			0				0
	備蓄 スペース			0	0	0		
	通信機器、会議 スペース				0			
	拡幅·分岐坑道			0	0	0	○ アクセス確 保の場合	○ アクセス確 保の場合
	水密扉						0	0
	換気設備			0	•	0		
	洞同用 発雷設備			0	•	0		

\* アクセス洞道内に「緊急対策室」の機能を付与する場合は免震重要棟内必要設備に対応した換気・発電設備が必要

# 6. オフサイトアクセス緊急時対応センター

これまでに整理してきた①非常用発電設備,②水供給 設備,③緊急時アクセス通路は、それぞれ独立した機能 を有するものであるが、オフサイトの支援センターとし て集約的に整備することにより、的確・効率的な管理運 営の実現、整備コストの縮減などの効果が期待できる. さらに、本センターと発電所との離隔を確保することに より、2次的な被害を抑制することが可能である.また、 各設備の地下化に伴い空地となる地表用地を機器、資材 の集積基地として活用することも可能である.

本センターの概念図(地下部および地表部)を図-8に 示す.ここでは、電力供給、水供給を独立してアクセス 通路を利用するケース、アクセス通路を共同溝化し整備 するケースの2案について整理した.





給水ヤード、発電ヤードの施設は地下構造であり、地上部は緊急時の資機材の集積場等の多目的な利用が期待できる。

(a) 地下施設のイメージ (上図:供給ルート独立,下図:供給ルート共同溝化)

地上設備概念図:供給ルート独立タイプ



(b) 地表施設のイメージ



#### 7. まとめと今後の課題

本報告では、原子力発電所の重要付属施設(①非常用 発電設備、②水供給設備、③緊急時アクセス通路)を対 象として、地下収納の優位性に着目した施設の設置概念、 整備概念について検討を実施した.さらに、①~③の独 立した機能を集約する④オフサイト緊急時対応センター の利点・機能を設定したうえで、同センターの概念につ いて取りまとめた.

一方,各重要付属施設の概念検討では,各設備の機能 的側面に主眼を置いて検討を実施した.そのため,各施 設の容量,能力等の仕様については,一般に公開されて いる資料からの推定値となっている.

施設整備の具体化に向けての今後の検討のためには, 以下に示す施設の整備条件・仕様の精査が必要と考えられる.

- ・非常用電源設備の必要容量
- ・緊急時給水設備の必要容量
- ・各設備の重要度を踏まえた耐震重要度
- ・発電所サイト内の地下空間利用状況

さらに、原子力発電所はさまざまな地形的・地理的条件下に建設されている。本検討では、背後地形および地 質条件に着目して2つの想定ケースを設定したが、今後 は各サイトが有する具体的な条件を勘案した検討の実施 が有効と考えられる。

検討要素として考える事項を以下に整理する.

(a) 道路整備状況の確認

提案したオフサイト緊急時対応センターは、資機 材、人員等の受け入れが円滑である幹線道路に接し て建設することが望ましい.

(b) 燃料補給物流ルートの確認

外部電源の復旧が遅れた場合,オフサイト非常用 発電施設に対する燃料の補給も必要となる.燃料補 給ルートが脆弱な場合は、ルート整備あるいは油槽 容量の拡大等も検討の対象となる.

- (c) サイト内の地下空間利用状況と建設可能用地の確認 原子炉建屋周辺は配管等が輻輳しており,緊急時 アクセス通路の配置や建屋接続のためのルート確保 が重要である.また,オフサイト緊急時対応センタ 一建設の諸条件を満たす用地取得の可能性を確認す る.
- (d) 水資源の確認

緊急時に利用可能な近傍の溜池,地下水等によっ て必要となる水供給施設の施設仕様が異なる可能性 がある. なお、本報告書完成後(24年9月)以降も様々な検討 が各所で進められるとともに、原子力規制委員会におい ては新たな原子力発電所の設置規則(規則第五号実用発 電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基 準に関する規則、平成25年6月28日 他)が公表に至っ ている.

新規則の内容等を勘案し、施設、地下利用の位置づけ を再確認し、今後、検討内容の深化を行う必要がある.

#### 参考文献

- 1) 平井堯編著:「地下都市は可能か」, 鹿島出版会, pp162-163, 1991.
- 2) 危険物保安技術協会:Safety&Tomorrow, No. 143, pp61-68, 2012.