大深度地下空間におけるエネルギー供給システム

解説

キーワード

大深度地下空間、地下ドーム、地下空間特性、電力供給、SNW、高信頼度

正 員 豊 田 武 二
日立プラント建設(株)

1. 大深度地下空間開発技術の推移

東京などの大都市圏においては、人口、機関、交通が集中し土地利用が過密状態になっている。そのため土地価格の高騰と入手難、自然環境の喪失等多くの深刻な問題が発生している。これにより現在未利用の大深度地下空間の有効活用が、近年多に注目されるようになった。

通商産業省は、大深度の空間資源利用の拡大をはかるために、工業技術院の「大深度地下開発の技術の研究」を平成元年より8年計画で開始し、現在最終年度として総合評価の取り纏め中である。この研究開発プロジェクトは、(財)エンジニアリング振興協会の地下開発利用研究センター(エン振協)が民間分を委託を請けて実施している。都市部の大深度地下に広く分布する半固結堆積岩から軟岩地盤を対象として地表から50mから100mの所に図1に示す直径50m、高さ30mのドーム状の地下空間を構築し、各種用途の利用を可能とするために、下記を主要技術として、必要な技術開発を行っている。

- (1) 高精度地下構造評価技術
- (2) 大深度地下空間構築技術
- (3) 大深度地下環境制御、防災技術
- (4) トータルシステム、利用技術

現在、実証試験用ミニドーム(地下70m、直径30m、高さ12、5m)を完成し、平成8年6月に公開した。これを用いて種々の実験、計測を行い、最終評価に向けて作業が進行している。しかしながら、エン振協を中心に実施されている技術開発は上述の4項目が主であり、空間における利用プロセス、サービス、居住、安全、保安に欠くことの出来ないエネルギー供給、特に必用電源の確保については触れていない。そこで電気学会生産設備技術管理委員会(D部門)にて、このエネルギー供給について調査専門委員会を設置して調査研究することにした。

2. エネルギー供給システム調査研究の趣意

地下50mから100mの地中に構築された直径50m、高

さ30m地下ドームの大深度空間を利用した各種の用途、プロセスに対して安定した高信頼度のエネルギーを供給する事が必要である。この為のエネルギー供給システムについて、大深度地下利用としてのシステムの概念、特性と機能、利用できる現在の要素技術と開発すべき技術、研究課題と問題点について調査研究する必要がある。

このため「大深度地下空間利用におけるエネルギー供給システム調査専門委員会」(委員長 豊田武二、委員12名、幹事1名)を設置して下記を中心に調査研究し報告書の作成を行うことにした。

- (1) 大深度地下利用形態とエネルギー供給システムの仮構築
- (2) エネルギー供給系と利用のあり方
- (3) 統合管理システムとエネルギー管理
- (4) エネルギー管理システムの実現化と今後の課題

平成6年4月に設置、13回の委員会、2回の研究会を開催し、技術資料約70件が提出されて活発な議論と調査を行い、平成8年3月をもって調査結果を纏める段階になったので解散した。

本稿に於いて、この調査研究の内容について総説特集として解説する。

図1 ジオドームの標準構造図

3. 大深度地下空間特性と利用形態

3.1 地下空間特性

大深度地下空間特性については各種の文献、研究レポートに

The Outline of The Power Supply System for Very Deep Underground Space, Geo Dome.

By Takeji Toyoda, Member (Hitachi Plant Engineering & Construction Co., Ltd).

表 1 大深度地下空間特性

分 類	項 目	内 容
物 理 特 性	隔離性	気密性、遮光性、遮音性、電磁波遮断
	低温性、断熱性	地盤の有する大きな熱容量のため、地上温度変化の影響を受けにくい
	耐震性、低振動性	岩盤のもつ高い剛性 地中における地震は地中深くなればなるほど小さくなる
	地下空間の構造力学	岩盤の高い剛性、大きな熱容量、低電気伝導率 透磁率大、波動透過損失大、地中空気流小、不燃
	不燃性、防火性、防爆性	岩盤の特性により、自己内にてクローズ、他の隣接地下空間への不拡大
機 能 特 性	非常特性	火 災 時 現 象 (パニック、長時間燃焼) 火災発生時の住居者のパニック防止 外部よりの防災、消火活動困難のための長時間燃焼
	地上非難に対する安全と輸送	地下空間内の災害時の安全非難と地上脱出救出ルート確保
	地上災害(水、火)からの隔離	地上の災害や火災が地下空間に侵入させないための対策
	構造特性	発生騒音処理 排気音などの地下空間から地上への発生騒音の処理
	機 器 搬 入 出	地下空間の設置される重量物、大型機器の搬入 出ルートの確保(立坑から搬入)
	収 納 空 間	限られた地下空間内に各種設備を有効に収納するための対策 コンパクト化、前面点検
	地 上 と の 交 通	地下空間と地上との移動のため立坑部の昇降機設備
	生活特性	温 熱 環 境 移動空間の経時変動必要(生活リズム)
	音 環 境	単調防止のための外界騒音導入が必要
	視 環 境	廊下、ホールにおける地上との一体感覚が必要
用地特性	用 地 特 性	大都市などの用地の確保の困難な地域に対する大深度地下における利用空間の確保

報告されており、その内容を分類すれば大略下記の如くとなると筆者は考える。

- (1) 地下空間そのものの持つ物理特性。
- (2) 地下空間を利用する場合の機能に関する特性。この特性は機能内容によりさらに、非常特性、構造特性、生活特性に分類される。
- (3) 大都市における用地の確保の困難さに対応する用地特性。

表1に以上の特性に基づく特徴的項目と、その対応する内容を示す。大深度地下空間の利用は長期的な利用を基本として物理的特性を有効に活用できる利用形態に対して計画し、建設と運用に当たっては非常特性、生活特性を十分に検討して、地上建築物と同等な安全、快適、生産性を確保する必要がある。

3.2 利用施設と利用形態

エン振協の平成3年度成果報告によれば、大深度地下空間の想定利用施設を下記としている。

- (1) 産業施設——天然ガス貯蔵、倉庫、電算センター、下水処理プラント、廃棄物処理工場、燃料電池発電所
- (2) 公共施設——コンサートホール、博物館、地下駐車場

表2にその内部の一部の空間構成例を示す。今回はエネルギーを消費する利用施設を対象とするために、エネルギー供給側としての天然ガス貯蔵、廃棄物処理工場、燃料電池発電所を除き、これに公共としての地下オフィス、隣接した地下空間の相互地下連絡通路を追加した。殆どが空間内に多層化された階を

表 2 空間構成の概要

項目	施設名	概略図 (空間構成)
1	倉庫	
2	電算センター	
3	下水処理プラント	
4	コンサートホール	

表 3 地下空間利用施設の特徴

施 設	目 的	電源の主用途 (1)	概 略 電源容量 (KW)	利用地下 特性	非常時 対 象
倉 庫	貯 蔵	低温保温 換気		恒温 防爆 気密	貯蔵品
電算機センタ	オンライ ンセン タ	CPU 電源 電算空調 トレーニング センタ	4,000	電磁波 遮断 耐震 恒温	情 報 人 間 プロセス
下水処理プラ ント	都市イ ンフラ	処理プロセス 電源 除具、除害		恒温 気密 用地	
博 物 館	文 化	空調、衛生 照明	2,000	恒温	人 間 展示物
コンサートホ ール	文 化	空調、衛生 照明 音響	2,000	防音 恒温	人 間
駐 車 場	都市イ ンフラ	換気 機械式電源		用地	人 間
地下オフィス	企業活 動	空調、衛生 照明 OA、情報	2,500	用地	人 間
地 下 空 間 連 絡 路	移 動 非 難	照明 空調、換気	—		人 間

(注) 次の共通特性を含む：換気、地下空調環境維持、火災対策、待避、地下水維持、環境監視、総合安全

持つ構造となっている。表3に今回の利用施設とその利用目的、利用地下特性、電源の主用途、概略電源容量、非常時の対象をしめしている。

安全、快適を維持するための通気、空調環境の維持、火災、避難、地下水維持、環境モニタの為に必要な電力供給は、共通用途としてすべての利用施設に含まれるものとする。

4. エネルギー供給システムの内容と現状

4.1 供給エネルギーと電力供給の要件

エネルギーの供給媒体には電気、ガス、蒸気がある。各需要家の空調、換気、給排水、昇降機、照明、防災、防犯、情報通

信、生産プロセス等の各設備の動力源には電気依存し、その電気も電力会社との供給契約により給電されている。地下空間施設における各設備は、基本的には地上の場合と同様であるため、地上と同じく安全性、取り扱い、信頼性、柔軟性、効率、クリンクの点で優れて、電力会社より安定して給電されている電気をエネルギー媒体として取り扱うこととした。今回は地下空間利用施設にたいする最適な電力供給設備について調査研究を行う事とした。

一般に電力供給系に求められる要件は次のとおりである。

- (1) 24時間365日連続して安定した電力を高信頼度に供給する。
- (2) 電圧、周波数、波形等の電力の質の向上を図る。
- (3) 防災性の向上、コンパクト化と高機能化を図る。
- (4) 柔軟性があり、保守性と施工性がよい。
- (5) クリーン化、低騒音、発生高調波の抑制等の無公害化。
- (6) 省資源、省エネルギー、省力化の追求。
- (7) 運転操作、保守の熟練要員の不足に対応して、制御、監視、保守の自動化とイージオペレーション化を図る。

表1に示す大深度地下空間の諸特性からも、これらの要求はすべてあてはまる。特に(1)(3)(4)(7)は重要である。

図2 標準的受電方式

表4 低圧、高圧SNW受電方式比較

No.	大 区 分	ス ポ ッ ト ネ ッ ト ワ ー ク (SNW)			
1	小 区 分	低圧 SNW		高圧 SNW	
2	受 電 電 圧	22 kV	33 kV	22 kV	33 kV
3	NWTR 二次側	210-415 V 50 Hz 又は 60 Hz 三相 4 線式(Y 結線)中性点直接接地		3.3 kV 又は 6.6 kV 50 Hz 又は 60 Hz 三相 3 線式(Δ線)非接地	
4	NWTR 条件	500～2 750 kVA		上限 3 500 kVA (東電) 規制なし (その他)	
5	最大契約電力	500～7 150 kVA 以下		上限 10 000 kVA (東電) 規制なし (その他)	
6	記 事	負荷が集中しているビル受電設備に採用されることが多く、従来の SNW のほとんどがこの方式である ○ 契約電力が多いとき ○ 負荷が分散しているとき ○ 高圧受電を特高受電に昇圧するときなどに用いられる			

4.2 適用電力供給系統

各利用施設の受電容量と必要供給信頼度の点から、電力会社からの受電電圧は20 kV、または30 kVの特別高圧が中心となろう。特高受電における標準受電方式を図2に示す。大深度地下空間利用は東京などにおける土地問題解決の一つの手法として研究開発されていることから、大都市圏に普及している22 kV地中配電網の適用が最も実用的である。

図2に示すループ受電方式とスポットネットワーク (SNW) 受電方式が他に比して供給信頼性は高い。東京地区を中心に需要家側の電力増加、供給信頼度の向上、設備効率向上のニーズに対応するために、22 kV SNW配電網が進められている。その結果、SNW受電方式が普及している。従って、今回も電力供給方式としてはSNW受電方式の導入が最も適しているように。

需要電力が2000 kW以下の利用施設に対しては、東京電力を中心に開発が進められている新22 kV受電設備が推奨されるように。

受電設備の設置場所として地下ドーム内と地表の2方式が考えられる。地下ドーム内に設置される場合、地下ドームからの縦坑が50 m以上有るために地表近くに電力会社の地中配電設備に対して、引き込み開閉所を設けて、ドーム内の受電設備までの引き込みケーブルの施工を需要家側で行う必要がある。

受電設備を地表に設置した場合は、縦坑を経由して負荷に電力供給するために、電圧降下、ケーブルサイズに有利な6 kVの高圧にて送電し、ドーム内のサブ変電設備にて低圧にする方式が適しているように。

SNW受電方式には、2次電圧が415 Vの低圧SNWと、6、6 kVの高圧SNWの2種があり、それぞれの内容と特徴を表4に示す。

受電設備が地表に有る場合は高圧SNWが適している。

特に高い供給信頼度を必要とする重要負荷に対しては、二重化二次母線と、重要負荷までの2回線配電等の冗長性のある送配電方式の検討と適用が必要である。

4.3 自家発電設備

非常用設備としての自家発電設備は、非常時における安全と地下空間の機能維持のために地上建築物の場合以上に必要不可欠である。

従来の停電時に自家発を始動して重要系統に電力の供給を行う方式の他に、自家発を常時運転して、電力供給系と系統連系を行って、連続的にバックアップして冗長性を高めて高信頼度化を図る方式も考えられている。図3にSNW受電設備における発電設備の系統連系の構成と運用例を示す。系統連系を行う場合は、電力供給系統における電力品質と信頼性の維持、他需要家に対する悪影響の防止のため分散電源系統連系技術指針 (J EAG 9707-1993) に基づいて計画、設計、構築する必要がある。

図 3 SNW 構成例

図 6 防災センター設置案

図 4 システムの高信頼化

図 5 統合インテリジェント化システム

発電設備は、ディーゼルエンジン等の内燃機関により発電機を駆動するのが主流である為に、大量の燃焼空気、燃料、冷却水、排気、換気の確保を必要とする事から、地下ドーム内に設置するには問題があり、必然的に地上設備となろう。バックアップ電源には安全、保安、地下空間維持のための常用と、電算センター等の地下利用施設の目的とする機能、サービスの最低機能を維持するための2種類がある。この2種類に対して、それぞれの電源の種類と容量、信頼性レベル、電力供給経路、継続時間を検討して計画する必要がある。

4.4 システム対策とインテリジェント化

電力供給信頼度の向上は、構成機器の高信頼度化、定格に対

する最適使用等のハード上の対策と、図4に示す冗長性の確保、故障除去範囲と除去時間の最小化、復旧時間の短縮などのシステム上の対策がある。長時間連続的に高信頼度を維持し、緊急時の速やかで確実な対応のためには、管理運用と保全上の対策が必要不可欠である。

この為、構成ハード、保護継電、監視制御の各システムが分散統合化され、トータルとしてのインテリジェント化が重要である。即ち「管理の集中、制御の分散」を基本理念とした機能分散システムであり、管理端末も含め各端末が自律的に機能することにより、信頼性、応答性、柔軟性、オープン性が大いに確保される。図5に特高変電所の統合インテリジェント化システムの例をしめす。

エン振協の報告によれば、防災センターは図6に示す要に、地上側にメインセンターを、地下ドーム内にサブセンターを設置する事にしている。電力供給のための中央監視設備も、同様に、地上側にメイン監視設備を、地下ドーム内にサブ監視設備を、防災センターと協調して設置することが、妥当と考えられ、又非常時の運用に於いても効果がある。地上側とドームとの連絡路として、縦坑(約50m)がある。従って、非常時にメインとサブを相互に人的に交流する事は困難である。何れの側に於いても、ドーム内のあらゆる必要情報の入手と、制御コマンドの伝達が重要要素となる。この為にも中央監視設備は、統合化機能分散構成で、コンパクトで高信頼度の遠隔監視設備でなくてはならない。

5. 電力供給システムに求められる条件

以上の検討から、大深度地下空間利用に対するエネルギー供給システムとしての電力供給設備に求められる条件は、地下空間特性から見た基本条件と、これに基づく供給設備の構築上の条件に分けられて次のとおりとなる。

(1) 地下特性からの基本条件

(a) 大深度密閉空間に於ける温熱環境、照明、給排水、交

- (b) 日常及び非常時の安全の確保が地上以上に重要。
- (c) 火災等に於けるパニック対策。
- (d) 地上までの縦坑（50m以内）が唯一の連絡経路であり、この為に地上側とドーム側の人的、物的交通が構造上の制約されることに対する対策。
- (e) 非常時の地下水による冠水、水没に対する対策。

前述の基本条件を満足させるためには、常時、非常時の何れに於いても、高信頼度で、安定した電力の供給は必要不可欠である。この電力供給設備の構築に求められる条件は下記となる。

(c) 管理と保守上の条件としては、(i) 多量の必要情報をリアルタイムに処理する高信頼度の中央監視設備、(ii) 自律分散と統合化による高信頼度システム、(iii) 防災センターとの連携協調、(iv) 中央からの遠隔保守、診断の実施、(v) 保守性

地 下 特 性	問 題 点	開 発 課 題	備 考
隔 離 性	気密性	高信頼度電源 高信頼度配電 バックアップ内容とB.U.電源	
	安全性が より重要	退避ルート、緊急避難施設に対するバックアップ特殊電源	30人・3日間/箇所 (エン振協方区)
	地上がりの 給気	発電機用機関の設置箇所電算センタなどの大容量バックアップ電源の小形化または、バックアップサービス内容の限定	地上設値が望ましいが、設置スペースに制限
断 然 性	内部発熱処理 排気ファン騒音による公害	低損失機器による低発熱 排熱回収システム 低騒音機器 アクティブ消音システム	
火災時現象	パニック	パニック防災設備に対する高信頼度電源	表示、案内放送 非常照明
	長時間燃焼	難燃化、不燃化 難燃化、不燃化材料による設備	
地上までの 立坑 (隔離性)	50 m 以上	機器搬入ルート の確保 ドーム内収納空間による制限	コンパクト化機械 ユニット化、パッケージ化 分解搬入出
		電力会社との受電点 か地表 電力会社との責任分 解点	引込み開閉所の設置 立坑部分の送電および保護協調
	地上まで 交通(E/V) 要する。	中央監視設備(メイン)を地上設置とし、サブとドーム内設置 地上からの高信頼度リモコン、リモートモニタが必要	高信頼度遠隔監視制御システム 統合化機能分散システム 非常時の多量情報処理力 耐悪条件(ホコリ、熱、水、雑音)メイン、サブ、入出力端末間の適切な機能分担とバックアップ防災センタとの連携協調
	安全 性 が より 重要	安定した機能の維持、 確保 メンテ、修理中も機能維持	オンライン予防診断 穴長化システム 短時間復旧
高コスト化	コスト的に引き合うか	ジョードーム構築、保守に見合った経済的なシステム	
地 下 水	冠水、水没対策	ジョードームの上層部に設置 封水、排水設備 防滴化	重要設備を対象
耐 震 性		(エン振協にて報告がでてから検討開始)	
そ の 他	信頼性レベル	電力用途ごとの信頼性レベルとレベルごとのB.U.方式	
	電力バックアップ内容	緊急避難、防災・保安機能・サービスごとに決定	
	系統接地	接地場所、接地条件、方式

記号	受電設備 ドーム内設置	受電設備 地表設置
①	ELV 機械室	
②	中央監視室（防災センタ内）	
③	低圧非常発電設備	高圧非常発電設備
④	引込み開閉所	新 22 kV 受電設備
⑤	22 kV SNW 配電線	22 kV 常用一予備 配電線
⑥	SNW 引込回線 (22 kV 3 回線)	6 kV 配電線 (フィーダ数)
⑦	22 kV SNW 受電設備	サブ変電設備 (高圧/低圧)
⑧	低圧非常発電 設備連絡線	高圧非常発電 設備連絡線

T. IEE Japan, Vol. 117-D, No. 7, '97

の高い機器の使用等である。

- (d) 立地上の対策としては、(イ)電力会社との受電箇所とドーム内送電方式に対して協調のとれた主変電所の設置箇所、(ロ)燃焼空気と冷却の必要な発電設備の地上設置と、蓄電設備の必要場所近くの分散設置、(ハ)メイン中央監視設備の地上設置とサブ監視設備のドーム内設置及び両者間の自律性と相互連携協調の確保等がある。

6. 問題点と開発課題

現状では、大深度地下空間の各利用設備毎の建築構造、付帯設備が明確で無いために電力供給システムの構築が現状技術をベースとして一般的なものにならざるを得ない。火災については、エン振協ではブロックごとのゾーニングで延焼を防止でき、地下内では気密性が高いので容易にブロックに対する酸素の供給を遮断できるとしている。しかしながら大規模な火災や災害時の避難ルート、緊急避難施設の設置箇所、これらに対する要求電源条件が不明確であり、今後明確にする必要がある。図6の図中に緊急避難施設の設置例をしめしている。

表5に大深度地下特性から見た問題点と、これに対する開発課題を示す。表に示すように、高信頼度受電方式、信頼性レベルと負荷への電力供給方式、安全とサービスに対するバックアップ電源、機器のコンパクト化と難燃化、電気諸室とシャフトの配置とスペース、自律分散統合化監視制御方式、対環境技術、保安全管理に関するものが主となっている。図7に大深度地下空間に対する一般的に考えられる電力供給系について、ドーム内に受電設備を設置した場合と、地表近くの電気室に設置した場合の例を示す。

7. 結 言

大都市に於ける土地利用の過密状態の解決策としての地下空間利用に於けるエネルギー供給システムに対して電力供給を中心として現状、動向、課題を調査研究した。しかし大深度地下空間技術は通産省、工業技術院、エン振協にて技術開発報告書の取りまとめ中である。平成8年6月に実証試験用ミニドームが完成しこれを用いて各種の実験と計測を行い最終評価を取りまとめている。

各種の用途に対する地下空間の構築と利用施設の建設の技術が確立し、具体的な地下空間開発プロジェクトが現実となれば、電力供給システムの研究開発が一層進むであろう。今回は現状法規制をベースとし、法的問題、追加、改正すべき内容には触れていない。地下空間利用の実用化のためには建築、電気設備、消防、労働安全等の法的関連の研究は是非必要である。

材料、機器構造、系統構成、情報処理、立地、運用、保守についてはハード、ソフトの両面について設計、制作、構築を含めた検討を行い実用化を図る必要がある。さらに、異常時、非常時、両者の中間的な状態に対する対応の分析を行うことは、経済的で高信頼度のシステムを構築するために必要不可欠である。

(平成9年4月30日受付)

文 献

- (1) エン振協：「大深度地下空間開発研究成果報告5/10分冊」平成4年
- (2) エン振協：「大深度地下空間開発研究成果報告4/7分冊」平成5年
- (3) カタログ：「大深度地下空間開発技術」地下開発利用センター
- (4) 小池：「大深度地下開発技術は今」OHM 94-12
- (5) 大谷：「地下特性を生かした地下清掃工場の可能性」配管技術 93-3
- (6) 資源エネルギー庁公益事業部監修：「分散形電源系統連系指針」IEAG 9901-1993 (社) 日本電気協会 (1993)
- (6) 豊田：「需要家電気設備の保護協調 (保護方式の基礎、保護継電のインテリジェント化)」電気設備学会誌 vol. 15-4

豊田 武二 (正員) 1962年電気通信大学電気通信学部卒業。

同年(株)日立製作所に入社。主に受変電設備、プラント制御システム、ビル管理システムの設計、計画、開発に従事。1990年日立プラント建設(株)に転籍。現在、同社空調プラント事業本部主任技師。空調制御の設計、開発に従事。電気学会会員、電気設備学会会員。