

CONSTRUCTION OF LARGE UNDERGROUND CAVERN

Takao Akoshima

Kajima Corporation

6-5-11, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-8348

Abstract

There are various kinds of underground large caverns such as oil/LPG storage rock caverns, pumped storage underground power stations, underground concert halls and underground research facilities, etc. Particularly, notable one is pumped storage underground power stations because their sectional area and volume is more than 1000 m² and tens of thousands of cubic metres respectively.

Pumped storage underground power stations have been constructed in many places in Japan since 1970s. Due to technical progress in the underground excavation field, sedimentary rocks have been adopted as well as hard rocks like granite. Besides, the depth of the stations became deeper than a hundred metres for having high water head differences. In addition, the sectional dimensions were expanded as water turbine generators became larger, and the sectional shape has changed from mushroom shape to egg shape and bullet shape.

This paper reports the site investigations, design, construction and measurements of Kannagawa pumped storage underground powerstation operated by Tokyo Electric Power Company.

地下大空洞の建設について

1. はじめに

地下構造物としての地下大空洞は、原油やLPG（液化石油ガス）のエネルギー分野の貯蔵施設、地下発電所、地下倉庫、下水処理場、文化施設（コンサートホール）、スポーツ施設（スケート場やプール）、研究施設（スーパーカミオカンデ）など用途により種々上げられる。

人により大空洞のイメージは色々であり明確な定義は無いが、単一空洞で断面積が300m²以上の空洞を地下大空洞ということにすれば、代表的な地下大空洞は揚水式地下発電所である。

2. 地下構造物の特徴

構造物が地下に立地される利点としては、堅牢性（岩盤強度、耐震性）、恒温性、遮蔽性、遮音性、隔離性、景観保全、立地性（地表の有効利用）などがあり、利用目的によりこれらの特性が生かされる。

地下発電所の場合、水車や発電機の組み立てのための断面積と設置する断面積が必要であり、発電機の大型化により地下大空洞となった。

3. 揚水式地下発電所の変遷

揚水式地下発電所の建設時期は、1960年代後半から1980年代が最盛期であり、発電機の大型化に伴い空洞規模も大きくなった。また高落差化に伴い地下深く建設されるようになった。

空洞形状は、重要機器を納める地下空洞の天井部は安全確保のためアーチコンクリートにより覆工するという思想があり、当時の技術面からきのこ形が定着していたが、岩盤力学の進歩、設計技術の進展、NATM工法の導入、計測技術の進歩によりたまご形や弾頭形が採用されるようになった。

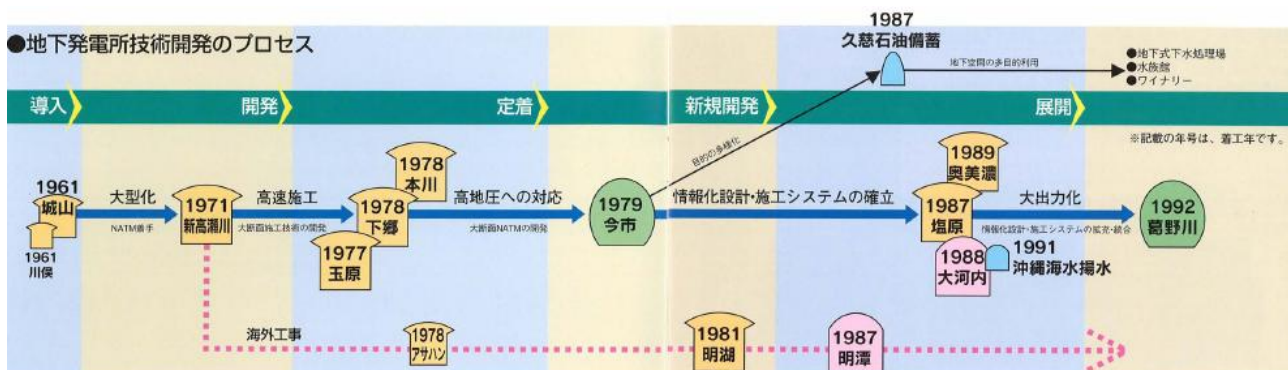


図1：地下発電所の変遷

4. 神流川発電所の建設

4.1 工事概要

神流川発電所は、信濃川水系南相木川の最上流部に上部ダム（中央土質遮水壁型フィルダム）、利根川水系神流川の最上流部に下部ダム（重力式コンクリートダム）を構築して、その間約6kmを水路で結び、有効落差653m、最大使用水量510m³/sにて発電を行う最大出力270万kW（45万kW×6基）の純揚水式発電所である。

この内、I期工事において180万kW（45万kW×4基）の発電所空洞及び周辺トンネル等を建設する。

この空洞は、発電電動機4台と変圧器2台を収納する、長さ216m、幅33m、高さ52mの最大断面積約1400m²、掘削量220,000m³の規模である。

- (1) 工事名： 神流川発電所新設工事（I期）のうち土木工事（発電所工区）
- (2) 企業者： 東京電力株式会社
- (3) 工期： 平成9年3月18日～平成17年6月30日（1997/3/18～2005/6/30）
- (4) 工事場所： 群馬県多野郡上野村
- (5) 地質： 秩父南帯に位置し、後期古生代～中生代前期の泥岩を主体とする基質に砂岩・チャート・玄武岩・石灰岩の礫が混入する混在岩

表1：主要工事数量

工事名	仕様	掘削量
発電所	高さ 52.1 m	250,000 m ³
	幅 33.0 m	
	長さ 215.9 m	
周辺トンネル	断面積 24～50 m ²	220,000 m ³
	総延長 5,700 m	
排水トンネル	掘削径 2.6 m	—
	延長 4,491 m	

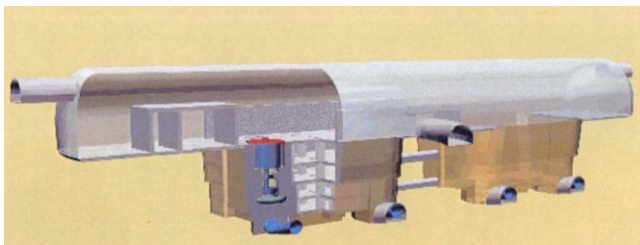


図2：発電所鳥瞰図

4.2 調査・設計

4.2.1 調査

調査は、基本計画段階、概略設計段階、詳細設計段階、施工段階の各段階で行われた。

- ・基本計画段階の予備調査
 - ：文献調査、地形調査、現地踏査

- ・概略設計段階の第一次調査
 - ：地表地質踏査、物理探査、ボーリング調査、水文調査
 - ・詳細設計段階の第二次調査
 - ：調査坑による地質調査、坑内ボーリング調査、原位置試験
 - ・施工段階の調査
 - ：切羽の観察、計測、ボーリング調査
- が行われるが、地下発電所の場合、空洞位置が地中深く設置されるため地表からのボーリング調査は限定的となり、調査坑からのボーリング調査、原位置試験が主である。

4.2.2 設計

設計は、工事の段階的に基本設計、事前設計（詳細設計）、施工中設計に分けられる。

基本設計では、予備調査～第二次調査のデータにより、空洞位置（レイアウト）、断面寸法、形状、支保などが決められる。

事前設計では、空洞の安定性の把握のため岩盤の力学的特性を考慮した数値解析と、緩み領域を設定し支保量を決めるための安定解析（円弧すべり解析、キープロック解析、スリップライン解析など）が行われた。

施工中の設計は、計測結果に基づき逆解析による変位予測が行われ、事前設計の妥当性の確認が行われた。

4.3 施工

たまご形空洞の掘削で空洞の安定を図るために、

- ・周辺岩盤の緩みを極力少なくすること
 - ・滑らかな掘削面を確保し、応力集中を緩和すること
- を掘削方針とした。

空洞の掘削はアーチ部と本体部に分けて発破工法で行った。アーチ部は頂設導坑先進アーチ切掘げ掘削工法、本体部はベンチ高さ3mのベンチカット工法で施工した。

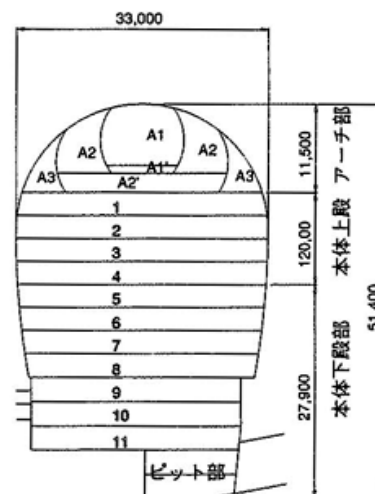


図3：加背割り図

4.3.1アーチ部の施工

アーチ部の加背割りは、図4の通り、A1→A1'→A2→A2'→A3の順に掘削した。

まず発電所長軸方向に頂設導坑(A1)を両妻側から先進し貫通させた。アーチ切詰め(A2)は切詰め基地(L=8m)を発電所長軸と直角方向に掘削し、その基地の支保(PS工)を完了後、基地から長軸と同じ方向にブロック毎(L=6m)に掘削を行ない、ブロック毎の支保(PS工)を完成後、次のブロックの掘削に移った。基地は工程確保のため両側10ヵ所設け、地山の緩みを押さえるため同一断面を避け、左右に位置をずらした。(図6)

アーチ切詰め(A3)もアーチ切詰め(A2)と同様に行った。(図5)

周辺地山の緩みを低減するため、発破法はEDD雷管とSB爆薬を使用したスムーズプラスティングを行なった。平滑な掘削面の確保のため、トータルステーションとポケコンで設計掘削線からのずれ量を切羽にマーキングし、削孔角度記憶装置を搭載した油圧ジャンボを用いて削孔角度を制御した。



図5：アーチ部掘削(A2, A3)

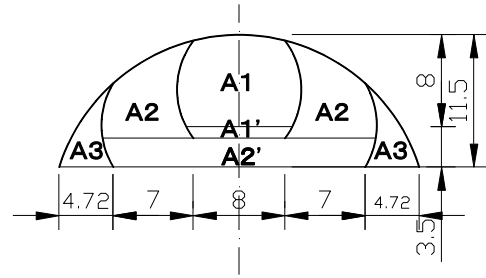


図4：アーチ部加背割り図

4.3.2本体部の施工

本体部の掘削は、中央ベンチ、サイドベンチ、側壁に分け、中央ベンチとサイドベンチはベンチカットで行なったが、側壁については発破の影響を岩盤に与えないように緩め発破と大型油圧ブレーカーを用いて掘削した。

掘削順序は、発電所長軸方向に中央ベンチ掘削し、サイドベンチと側壁は緩みを少なくするため、ブロック分割工法とした。

ブロック分割工法は、サイドベンチと側壁を先行ブロックと後行ブロックに分け、先行ブロックの支保が完了しなければ、後行ブロックの掘削を行なわない方法により、壁面の未支保区間を少なくする。また、側壁を残す幅を自由に变化できるので、変位に柔軟に対処できる利点がある。(図8)

従来は、中央ベンチ(神流川の場合、中央ベンチとサイドベンチとを合わせた幅)を掘削し、これを追いかけるように側壁の仕上げ掘削と支保(PS工)を行っていた。そのため、掘削箇所と支保完了箇所とが離れ、未支保区間が長くなり、地山が緩む恐れがあった。(図7)

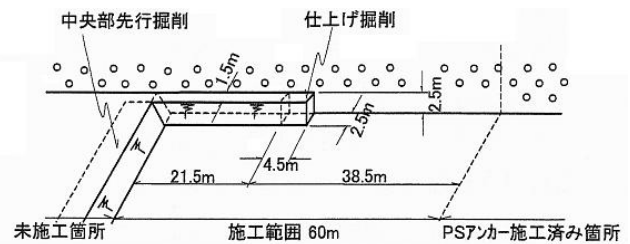


図7：従来の掘削方法

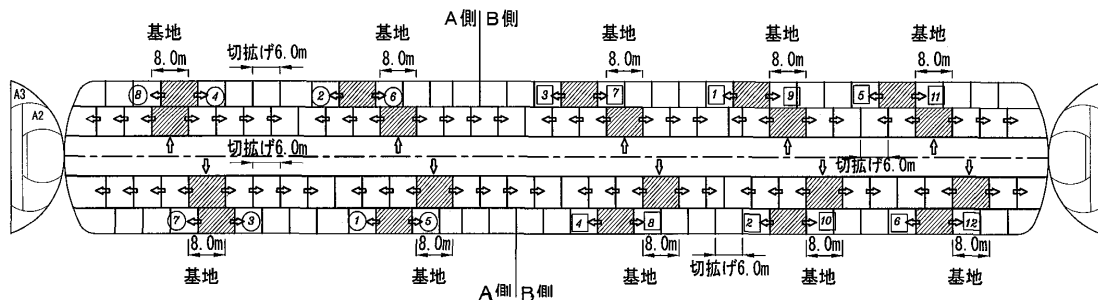
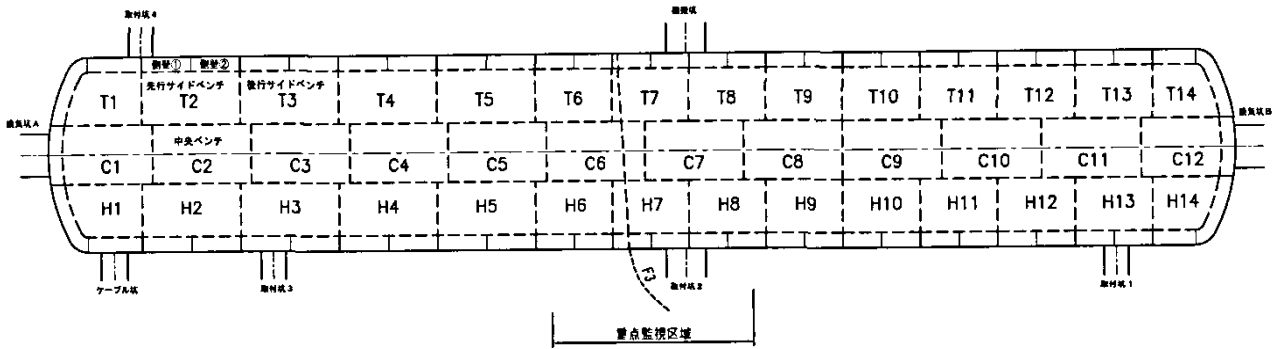


図6：アーチ部掘削順序(A2, A3)



1ベンチ平面図

図8：ベンチのブロック分割工法

4. 4計測工

大空洞掘削において地山の挙動を把握することは、空洞の安定性および支保の健全性を判断するのに重要な事である。そのために計測結果をフィードバックして予測値と比較検討し、次の施工法や支保を決める情報化施工を実施した。

計測は、日々の掘削毎に地山の挙動を監視して支保の妥当性を判断する日常計測と掘削区切りとなるステップ毎に次施工箇所の支保設計を検討するステップ計測で行った。

計測機器は想定地質図を元に配置され、地質状況に応じて追加、見直しされた。

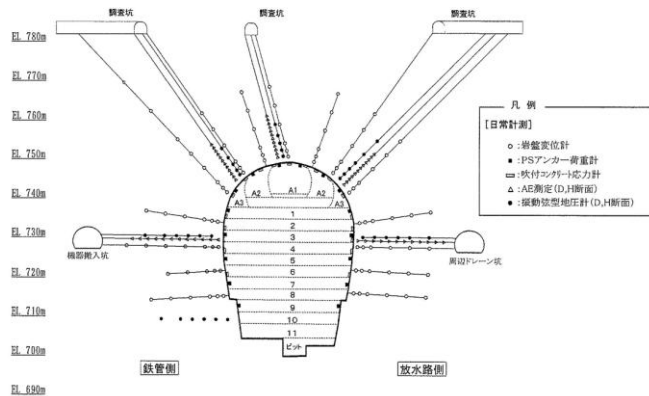


図9：計測器配置図

日常計測では、岩盤変位測定（内空変位）、PSアンカー張力測定、AE測定、岩盤内応力測定を実施し、壁面変位、緩み領域の進展状況を把握した。

管理基準値を超えた場合、掘削ブロックの細分化や火薬量の制限する対策を実施し、周辺岩盤の緩みを抑制した。

ステップ計測では、弾性波速度測定、岩盤内絶対応力測定（円錐孔底歪測定）、小区間岩盤変位測定、岩盤内亀裂変化測定（ボアホールテレビ）などの計測を行い地山緩み領域の把握を行った。

5. おわりに

発電所の掘削は、1998年10月にアーチ部頂設導坑の掘削に着手し、2000年10月に25ヵ月にわたる大空洞の掘削を完了した。

空洞周辺の緩みを極力抑制するためのブロック分割工法やPSアンカー早期緊張などの新工法の採用を図り、情報化施工を実施することで大きな変位（側壁最大変位20.2mm）も無く掘削が終了できた。この経験を今後計画されている各種の大空洞掘削に生かしたい。

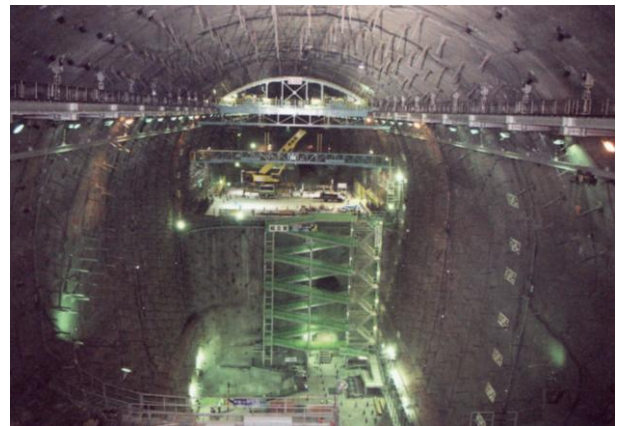


図10：掘削完了状況

参考文献

- [1] 日本電力建設業協会編，“施工から見た地下発電所の変遷と事例集”，2004年12月
- [2] 前島俊雄・森岡宏之・伊東敏彦，“ゆるみ領域に着目した大規模地下空洞の情報化設計施工”，トンネルと地下，2001年5月
- [3] 前島俊雄・森岡宏之・平井秀幸，“神流川発電所地下発電所空洞掘削における情報化設計施工”，電力土木，2001年1月