

大規模揚水発電所における設計と施工 ～小丸川発電所～

井上 和敏

小丸川発電所は、宮崎県児湯郡木城町を流れる小丸川水系に建設中の揚水発電所（小丸川発電所、出力120万kW）であり、初号機（出力30万kW）の運転を平成19年7月に開始した。

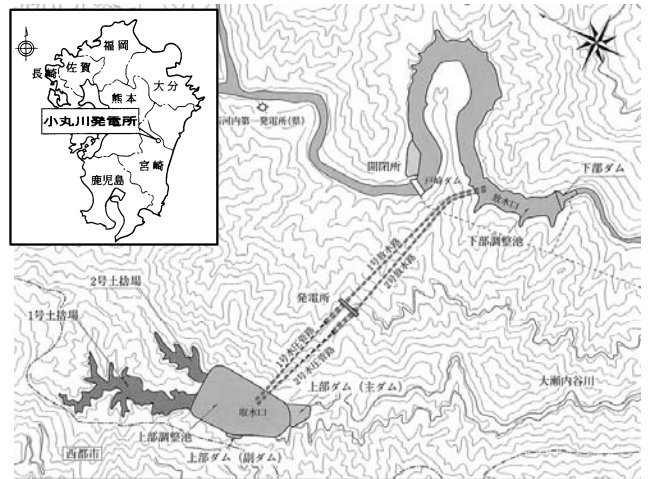
当建設地点は、宮崎県の中中部・尾鈴山水系の南西部に位置し、建設地点の一部及びその周辺地域は尾鈴県立自然公園及び石河内鳥獣保護区に指定されており、豊かな自然環境の中にある。このため建設工事では、環境に配慮し、自然との共生を目指すとともに国内最大規模のアスファルト遮水壁や大規模地下空洞の掘削、油圧シリンダーの大型ゲート等建設分野の最新技術を導入している。本稿でその概要を述べる。

キーワード：ダム、揚水発電所、アスファルト遮水壁、大断面 NATM、クレストゲート、IT 施工、TBM

1. 小丸川発電所の計画概要

揚水発電所は、起動時間が非常に短く短時間での出力調整が可能であり、お客さまに品質の良い電気を安定してお届けするため、昼間のピーク供給力及び緊急時対応用の電源として開発している。

本計画は、宮崎県の木城町を流れる小丸川の支流大瀬内谷川の最上流部に上部ダム（アスファルトコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム）を築造して上部調整池とし、小丸川中流部に下部ダム（コンクリート重力式）を築造して、下部調整池とし、上部調整池と下部調整池の間を約2.8kmの水路で連結し、有効落差約646mを利用して最大出力120万kW（30万kW×4台）の発電を行う純揚水発電所であり、九州の純揚水発電所としては、大平発電所（最大出力50万kW、昭和50年運開、熊本県）、天山発電所（最大



図一 小丸川発電所計画平面図

出力60万kW、昭和62年運開、佐賀県）に次ぐものである。表一1に発電計画諸元、図一1に小丸川発電所計画平面図を示す。

表一1 発電計画諸元

| | | |
|---------|--------------------------|-------------|
| 発電所所在地 | 宮崎県児湯郡木城町大字石河内 | |
| 水系及び河川名 | 小丸川水系小丸川及び大瀬内谷川 | |
| 発電方式 | ダム水路式（純揚水式） | |
| 最大出力 | 120万kW（30万kW×4台） | |
| 最大使用水量 | 222.00 m ³ /s | |
| 有効落差 | 646.20 m | |
| 運転開始 | 平成19年7月 | 30万kW（I期一） |
| | 平成20年7月 | 30万kW（I期二） |
| | 平成22年7月 | 30万kW（II期一） |
| | 平成23年7月 | 30万kW（II期二） |

2. 上部ダム・上部調整池

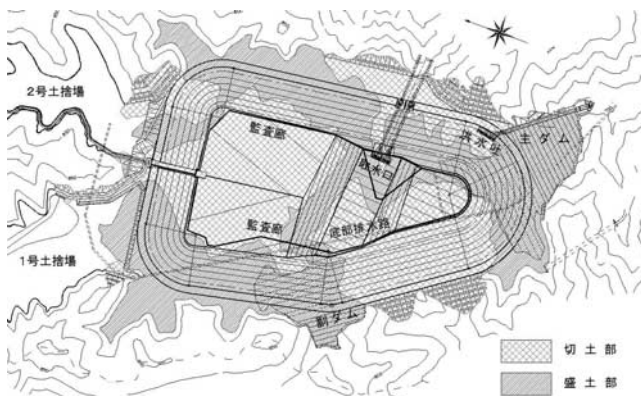
(1) 工事計画

上部調整池は、小丸川支流の大瀬内谷川の最上流部の標高750～850mに位置し、薄尾根部を有する山体の頂上付近であることから、信頼性の高い遮水性を確保するため、遮水方式としてアスファルト全面表面遮水工法を採用した。遮水壁の面積は約30万m²で同タイプの調整池としては国内最大である。

当調整池工事は、2つのロックフィルダム（ダム高主ダム：65.5 m，副ダム：42.5 m）の築堤と周辺地山の切盛によりすり鉢形状に調整池を造成するとともに、洪水吐、取水口、監査廊などのコンクリート構造物を構築した後、遮水壁の舗設基盤とするトランジション（碎石盛立層）の盛立て、アスファルト遮水壁の舗設を行うものである。表一2に上部ダム・上部調整池の諸元、図一2に上部調整池平面図を示す。

表一2 上部ダム・上部調整池諸元

| | | |
|----------|--------------------------|------------------------|
| 水系河川名 | 小丸川水系大瀬内谷川 | |
| 名称 | 大瀬内ダム (主ダム) | かなすみダム (副ダム) |
| ダム型式 | 表面遮水壁型ロックフィル | |
| ダムの高さ×長さ | 65.5m × 166.0m | 42.5m × 140.0m |
| 堤体積 | 860,000 m ³ | 390,000 m ³ |
| 流域面積 | 1.7 km ² | |
| 総貯水容量 | 6,200,000 m ³ | |
| 有効貯水容量 | 5,600,000 m ³ | |
| 湛水面積 | 0.27 km ² | |

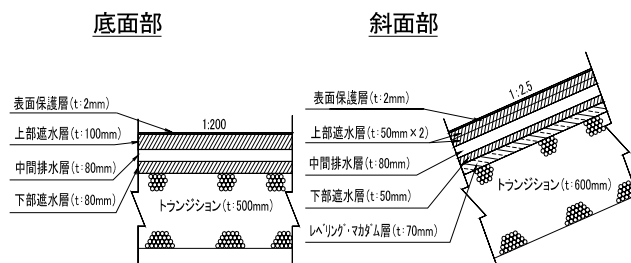


図一2 上部調整池平面図

アスファルト遮水壁の構造については、先行地点の実績を踏まえ、室内配合試験及び舗設試験の結果から斜面部については、5層構造（厚さ 300 mm）とした。一方、底面部については、施工の効率化（1層当りの施工厚を厚くし、所定の厚さを確保するために必要な層数を低減）、品質向上（遮水層の1層施工を行うことで層間ジョイントがなくなり、プリスタリング^{a)}の発生を抑制）を目的として国内ではじめて厚層舗設工法を採用し、3層構造（厚さ 260 mm）とした。図一3にトランジション・遮水壁構造図を示す。

遮水壁の安定性評価は、遮水壁の材料となるアスファルトコンクリートについてコンクリートや土質材料等と異なり破壊強度が温度やひずみ速度に依存し、応

^{a)} 層間又は層内に水などが膨張して隆起する現象



図一3 トランジション・遮水壁構造図

力で評価できないため、遮水壁に発生するひずみで評価する必要があった。

このため、遮水壁の安定性評価は、解析により求まる遮水壁の変形とアスファルト材料試験により求まる許容ひずみを比較評価した。

(2) 施工上の特徴

当調整池工事の施工及び工事管理にあたっては、大規模土工工事（掘削量 670 万 m³，盛立量 425 万 m³）であることや全面遮水型の調整池であること及び地形の特殊性から種々の課題があったため、近年、土木分

表一3 IT 施工管理システム一覧表

| | システム名 | システムの内容 |
|----|---------------------------|--|
| 施 | ダンプトラックナビシステム | S-GPS を用いたダンプトラック運行管理システム（土工量管理） |
| | 3次元マシンコントロール（3D-MC）システム | RTK-GPS もしくは自動追尾型トータルステーションを用いたブルドーザ及びモーターグレーダの土工板自動制御システム |
| | 締固管理システム | RTK-GPS を用いた転圧ローラー運行軌跡管理システム |
| 測 | 舗装厚自動管理システム | 非接触式超音波センサを用いた舗装厚自動管理システム（フィニッシャ搭載） |
| | フィニッシャ誘導システム | レーザを用いたフィニッシャ誘導による自動走行システム |
| | 3D-NAVi システム（3次元位置誘導システム） | 設計図と連携した RTK-GPS 測量によるワンマン測量システム |
| 工 | 3D-スキャンシステム | 3D-スキャンカメラを用いたノンプリズム測量システム |
| | 3次元ダム設計施工支援システム | CAD をベースとしたダムの設計・施工に係わる3次元図形処理システム |
| 管理 | GIS を用いた工事データ管理システム | GIS を用いた調査・設計、施工、維持管理データの一元管理システム |

※S-GPS：カーナビゲーションに使用されている GPS 測位システム

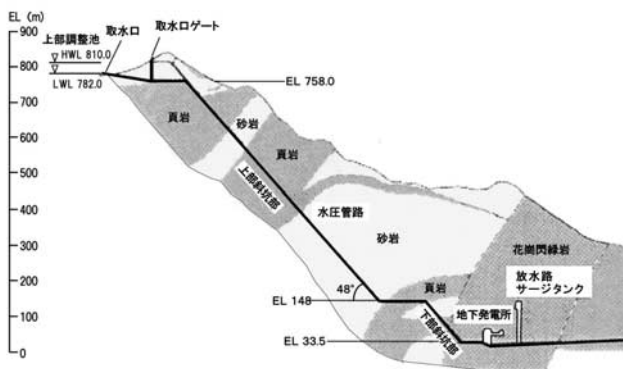
※RTK-GPS：移動局（観測点側）測量時に基地局から無線等によりリアルタイムに補正データを受信し高精度な測量を行う GPS 測位システム

野でも活用されはじめた IT 施工システムを設計・施工管理に導入した。表—3 に IT 施工管理システムの一覧を示す。

3. 地下発電所・水圧管路

(1) 発電所の配置と断面形状

地下発電所空洞は、地下構造物では大規模なものとなるため、慎重に配置を検討した。地質調査の結果、水路中央部に概ね C_H 級の花崗閃緑岩の岩脈が横断することから、この花崗閃緑岩体中に設置した。図—4 に地質縦断面図を示す。



図—4 地質縦断面図

また、発電所空洞の長軸方向及び位置を決定する際は、①不連続面の方向性、②初期地圧、③地質境界部からの距離について検討し、地下構造物を花崗閃緑岩体中の中央部に配置するとともに、空洞長軸方向を水路線形に直角に配置した。

発電所の断面形状は、きのこ形、たまご形、弾頭形を比較検討し、以下の理由から、弾頭形を採用した。

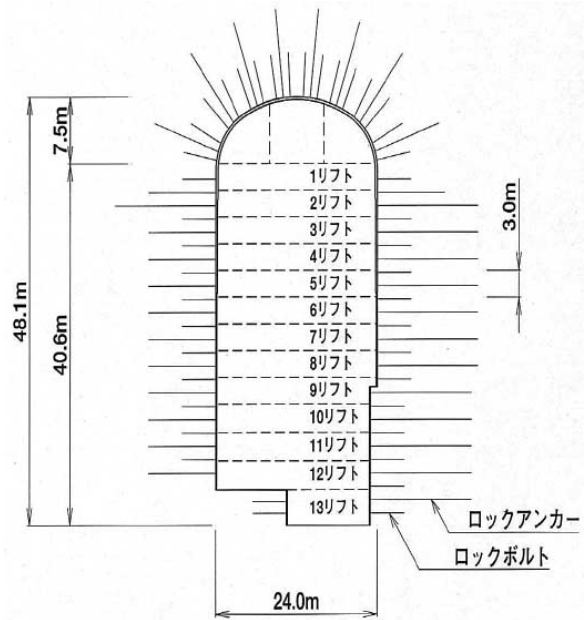
- ①ゆるみ領域が小さく空洞の安定性が高い
- ②掘削量が少なく経済的である
- ③アーチ部の工期が有利である
- ④岩盤力学の進歩・設計技術の進展を背景とした NATM 工法の実績増

(2) 地下発電所本体空洞掘削工事

当発電所の発電所本体空洞は、地下約 400 m の岩盤中に建設する幅 24 m、高さ 48 m、長さ 188 m、掘削容積約 16 万 m³ の大規模地下空間であり、断面積は約 1,000 m² で通常の道路トンネルの 10 倍以上の規模となる。空洞の支保工は、地山自体のもっている保持力を最大限に活用する NATM 工法に基づき吹付コンクリート、ロックボルト、PS アンカーによる支保

設計を行った。

発電所本体空洞の掘削工事は天井アーチの 3 ステップと盤下げの 13 ステップの計 16 ステップで計画し、平成 13 年 4 月から約 2 年間をかけて掘削工事を完了した。図—5 に本体空洞掘削ステップを示す。



図—5 本体空洞掘削ステップ

掘削中の施工管理は、周辺岩盤の地質や挙動をリアルタイムに観察・計測し、基本計画（設計・施工）に反映させていく情報化施工を採用した。

情報化施工の監視システムは、計測器と建設所端末装置とで LAN 環境を構築し、自動計測システムや自動図化処理システムを導入した。

施工中の岩盤の挙動は、天井アーチ、側壁ともに岩盤の割目が多いゾーンで局所的な変形が現れたが、切羽の進行に対応した日常管理や掘削ステップの進行に



写真—1 掘削完了後の発電所本体の空洞状況

対応したステップ管理を行い、逐次、PS アンカーの追加補強などを行い、予定工期内で掘削を完了した。写真—1 に掘削完了後の発電所本体の空洞状況を示す。

(3) 水圧管路の設計・施工

水圧管路（図—4）のうち、長大斜坑となる水圧管路上部斜坑部（延長約 900 m、傾斜角 48°）の掘削は、実績があり安全性と信頼性の面で優れているパイロット TBM（導抗径 ϕ 2.70 m）とリーミング TBM（切抗径 ϕ 6.10 m）の機械化施工を行った。写真—2 にパイロット TBM、写真—3 にリーミング TBM を示す。



写真—2 パイロット TBM



写真—3 リーミング TBM

水圧管路下部斜坑部（延長約 150 m、傾斜角 48°）の掘削は、地質が砂岩・頁岩と花崗閃緑岩体の境界部付近は変質が顕著で亀裂が発達し、多量の湧水が確認されたため安全性が高く、信頼性もあるレイズボイラー工法（導抗径 ϕ 1.47 m）と発破工法（切抗径 ϕ 3.90 m）により掘削を行った。

水圧鉄管には最大 10.30 Mpa (105 kgf/cm²) の内圧が作用するため、上部及び下部斜坑においては内圧の一部を鉄管周囲の岩盤に負担させる岩盤負担設計を行った。水圧鉄管に用いる鋼材は、採用実績の多い 80 キロ級高張力鋼 (SHY685NS-F) に加え、国内では 2 例目となる高張力鋼 (HT100) を採用し、コスト低減を図った。

4. 下部ダム・下部調整池

(1) 工事計画

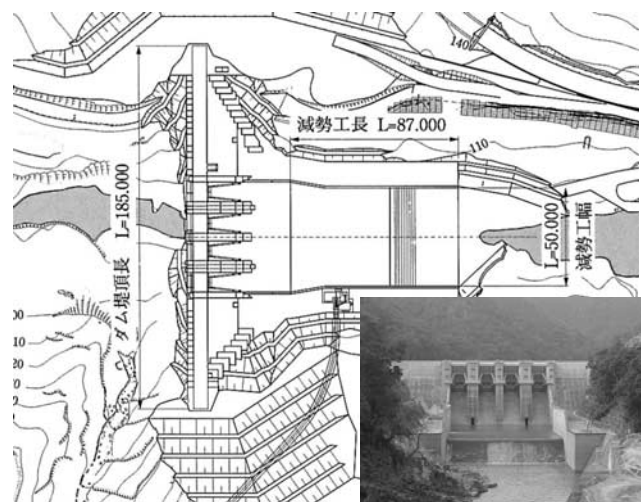
下部ダムは、小丸川中流域の標高 80 ~ 130 m に位置するコンクリート重力式ダムである。ダムサイトの選定にあたっては、発電計画に必要な落差及び貯水容量を確保することを前提に、ダム基礎及び周辺斜面の地形・地質に問題がないこと、近傍で確認された絶滅危惧種であるクマタカの営巣地から極力距離をとることなどに配慮して位置を選定した。また、流域面積は 329 km² と大きく、設計洪水流量が 4,400 m³/sec (200

年確率流量により設定) に達するため、堤体規模に対して大規模な洪水吐ゲートを有している。

放流設備は、洪水を安全に放流することを考慮し、クレストゲート 4 門と小流量放流精度を確保するためのコンジットゲート 2 門を設置した。また、景観上の配慮から開閉装置に油圧シリンダ式を採用し、ピア内に開閉装置を収めた。表—4 に下部ダム・下部調整池諸元、図—6 に下部ダム平面図を示す。

表—4 下部ダム・下部調整池諸元

| | |
|-----------|--|
| 水系河川名 | 小丸川水系小丸川 |
| ダム型式 | コンクリート重力式 |
| ダムの高さ×堤頂長 | 47.5 m × 185.0 m |
| 堤体積 | 133,400 m ³ |
| 流域面積 | 329.0 km ² |
| 総貯水容量 | 6,900,000 m ³ |
| 有効貯水容量 | 5,600,000 m ³ |
| 放流設備 | クレストゲート(高さ 16 m × 幅 10 m) × 4 門 放流能力 4,400 m ³ /s (ダム設計洪水流量) コンジットゲート(高さ 2.1 m × 幅 1.7 m) × 2 門 放流能力 100 m ³ /s (最低水位時) |
| 減勢工 | 跳水式水平水叩き型、高さ 21 m、幅 50 ~ 56 m、こう長 55 m、副ダム高さ 8 m |



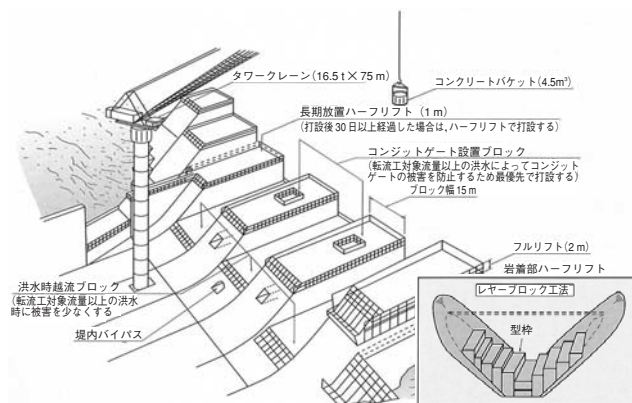
図—6 下部ダム平面図

(2) 施工上の特徴

下部ダム工事は、はじめに仮排水トンネル、上・下流に仮締切を設置して河川を付け替えた後、アンカー等により法面対策を施しながら、法面上部から順次河床部まで基礎掘削を行った。

堤体コンクリートの打設については、堤内構造物が多いこと、施工中の洪水への対処、レヤー長が最大約 40 m と短いことなどからレヤーブロック工法を採用し、また経済性（法面対策費）、施工性、環境面（改変面積が小）からタワークレーンを採用した。これに

より、堤体コンクリート打設中に仮締切を越流（6回）する洪水もあったが、設備の被害を最小限に抑え、工期内に完了することができた。図一七にレヤーブロック工法・堤体打設イメージを示す。



図一七 レヤーブロック工法・堤体打設イメージ

5. 環境保全

小丸川発電所建設所では平成13年8月にISO14001（環境マネジメントシステム）認証を取得している。

本計画に当っては、豊かな小丸川水系の自然との共生を目指し、環境保全に配慮した建設工事を推進するため、以下の取り組みを行っている。

(1) 希少猛禽類保全対策

計画地点である下部ダム周辺において確認されたクマタカ（環境省レッドデータブックにおける絶滅危惧種）について、工事によるクマタカへの影響の有無を把握するためモニタリングを実施し、必要に応じて適切な保全対策（①工事休止、②視覚対策、③騒音対策）を実施した。その結果、平成14年9月には幼鳥を視認し、繁殖の成功を確認できた。また、これらの取り組みは、学識経験者、鳥類の専門家及び関係自治体から評価を得ている。

(2) 貴重植物の保全対策

上部調整池改変区域内に確認されたコウヤマキ（宮崎県版レッドデータブックにおける準絶滅危惧種）の群落は、可能な限り伴生木（コウヤマキ周辺に互いに影響し合って生育しているその他の植物）とともに仮

移植を行い、工事完了後は上部調整池周辺の整備地に移植した。また、下部調整池内で確認されたサクラバハンノキ（環境省レッドデータブックにおける準絶滅危惧種）の群落については、下部調整池内の高標高部に植栽し、群落の再生を図った。

(3) 改変区域の緑化

従来、切土・盛土等の法面緑化には、外来種が用いられてきたが、当地点では植物育成環境の回復、遺伝資源の保護の観点から現場周辺に自生する植物から種子を採取し、吹付けを実施している。特に大規模な改変を伴う上部調整池周辺（約28万m²）は、本来の自然環境の復元を目標とし、植栽する苗木は、周辺から山引き苗や自然個体の種子から育成した約10万本の苗木により緑化を行った。

(4) 建設副産物のリサイクル

工事排水を浄化する過程において大量に発生する建設汚泥については、セメントと混ぜて固化処理し、盛土材料としてリサイクルを行うことで環境負荷低減及びコスト低減を図った。また、コンクリートがら（道路材、構築物周辺の埋め戻し材）及びアスファルト混合物がら（遮水材、表層の舗装材）もリサイクルを行った。ちなみに伐採木や型枠材等の木くずは、マルチング材、堆肥としてリサイクルを行っている。

6. おわりに

当発電所は、平成11年2月に建設工事を着手し、平成19年7月に初号機30万kWが運開した。今後、平成23年の120万kWの最終運開に向け、所員・請負先が一丸となり安全確保や環境保全に努め、地元と共生した発電所づくりを目指して、工事の円滑な推進に努めていきたい。

JICMA

[筆者紹介]

井上 和敏（いのうえ かずとし）
九州電力株
小丸川発電所建設所長

