

ルヌン水力発電プロジェクト 導水路トンネルにおける出水と環境問題

金井 晴彦*

日本工営（株）エネルギー開発部（〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2）

*E-mail: a3137@n-koei.co.jp

ルヌン水力発電プロジェクトは1995年3月の着工以来、様々な問題に直面し、当初5年で計画していた工期は最終的に12年を要し、2006年11月に発電運用を開始した。中でも11.2 km長の下流導水路トンネル掘削時に遭遇した出水は想定を遥かに超えるもので、ピーク時の湧水量は毎分84トン記録した。1997年に開始したTBMによるトンネル掘削は6年の歳月を要し、その後、ライニング施工も湧水下で行われたが、2年後の2005年8月にはトンネル工事を完了した。また、トバ湖に茶褐色河川水を放流することによる環境影響を最小限に留める自然環境対策、11箇所の溪流取水地点下流に広がる約2,000 haの水田灌漑用水供給と水力発電との共生を目指す流域水管理施策について報告する。

Key Words : groundwater ingress, pressure tunnel, coloured water, water management

1. はじめに

ルヌン水力発電所は図-1に示すようにインドネシア国北スマトラ州メダン市の南100km地点、トバ湖北西に位置する。



図-1 ルヌン水力プロジェクト位置図

プロジェクトは、ルヌン本流とその11支流から取水し、468mの総落差を利用してトバ湖に転流することで最大82 MWのピーク発電を行い、年間発生電力量308GWhを得る流れ込み式水力発電事業である。本・支流の集水面積は260.9 km²、年間平均流量は11.36m³/sであり、8.85m³/sを発電用水として利用する計画で、それ以外の河川水は下流域2,167 haの灌漑および生活用水として使用される。

主要構造物は、本川取水堰（写真-1参照）、11箇所の溪流取水堰、上流導水路トンネル(UHT: $\phi 4\text{m} \times 8.8\text{km}$)、貯水容量57万m³の調整池（写真-2）、下流導水路トンネル(DHT: $\phi 3\text{m} \times 11.2\text{km}$)、ブランチトンネル(BT: $\phi 2.5\text{m}$

$\times 3.4\text{km}$)、サージタンク($\phi 8.0\text{m}$)、圧力シャフト(852m)、地上式発電所・開閉所（写真-3）から成る。プロジェクト水路系の模式図を図-2に示す。

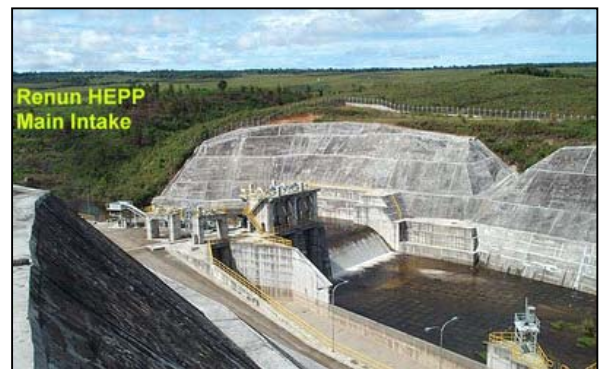


写真-1 ルヌン本流の取水堰



写真-2 調整池全景

ルヌン水力発電計画は、1972年の「アサハン川総合開発計画」の一環として計画され、1982-1985年のJICA開発調査、1987-1988年の詳細設計（円借款）を経て、1992年

から建設ステージに移行した。

資金源はJBIC円借款，実施主体はインドネシア国電力公社PT. PLN，土木施工は現代建設（韓国），エンジニアは日本工営およびローカル3社，総工費は約250億円である。アクセス道路，ベースキャンプ，プロジェクト内配電線を含む準備工事は1992年に開始，1996年完了，本体土木工事は1995年3月着工，2005年11月に完了した。機電工事は1995年8月開始，2005年12月に2号機商業運転，2006年11月に1号機商業運転を開始し，実質的にプロジェクトは完了した。



写真-3 発電所全景

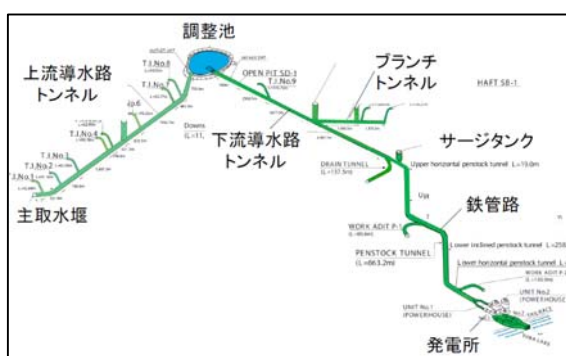


図-2 水路系模式図

2. 地質概要

トバ火山は，第四紀更新世の約100万年前以降，大規模な噴火陥没活動を繰り返し，その結果カルデラ内にはトバ湖(1,100km²)，外輪山外周には広大な緩傾斜面が形成された。トバ火山最後の噴火は7.4万年前に起こったとされている。プロジェクト周辺外輪山の地質はトバ火山の火砕流堆積物からなり，少なくとも4サイクルの噴火単元が確認され，岩相ユニットとしては，それぞれ非溶結Sandy Tuff，弱溶結Dacitic Tuff及び高溶結Ignimbriteから成る。不整合面に炭化木を含む未固結軽石層も見られる。各地層は外周方向(トンネル上流方向)に向け緩く傾斜しており，カルデラ急崖壁部に位置するサージタンクから下流導水路トンネル・ルートは，上流に向けて各地層を下位層から上位層に順次串刺し状に穿つ形となっている。水理地質的にはサージタンクから約3.7km上流のSta.76断層帯を境に，上下流で地下水賦存状況に大きな差異が認められる。断層帯より上流部では地下水面は地表近くにあり，なIgnimbrite層が主滞水層となり半被圧地下水構造を形成していると見なされる。

一方，断層下流部は2層の難透水性Sandy Tuff層および不整合層により上方からの地下水供給が著しく制限される地質構造となっている。このためSta.76断層帯から下流部では2面の地水面が考えられ，トンネル・ルートに影響を及ぼす下位地下水面は，ルート付近またはそれ以深レベルに分布する。このことは，下流導水路トンネル掘削に伴って観察された地下水湧水状況からも類推される。なお，透水係数は $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sのオーダーにあり，圧縮強度は15～40 MPa，弾性係数は1,000 ～ 3,000 MPaの範囲にある。トンネル沿いの地質縦断を図-3に示す。

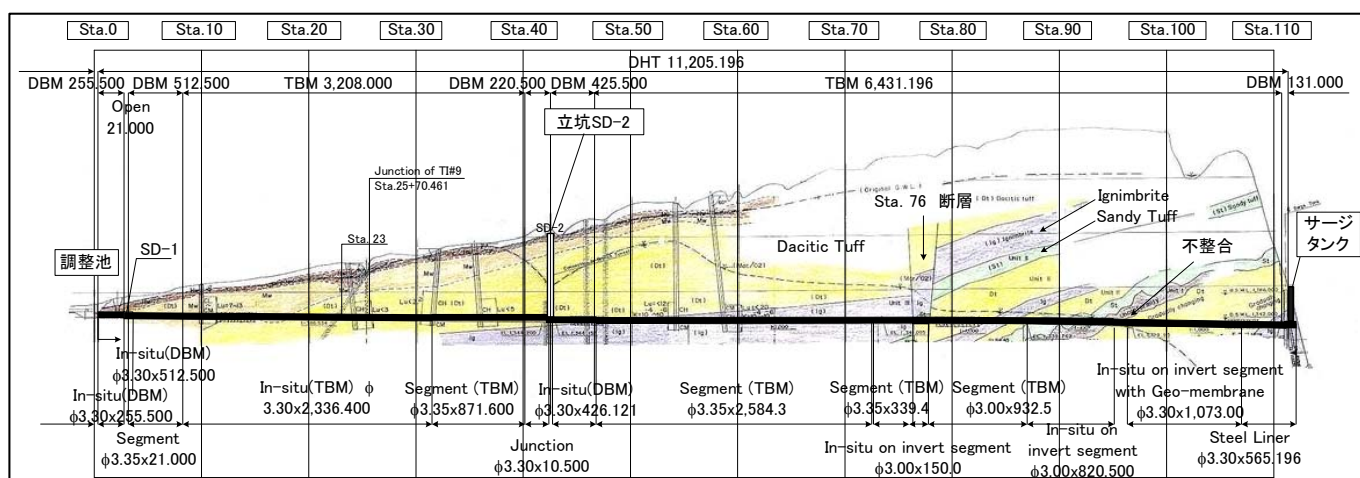


図-3 下流導水路縦断図

3. 下流導水路トンネル

(1) トンネル掘削

下流導水路トンネル掘削は、下流端の作業坑から搬入した径3.9mのオープンタイプTBM（米国ロビンズ社製、

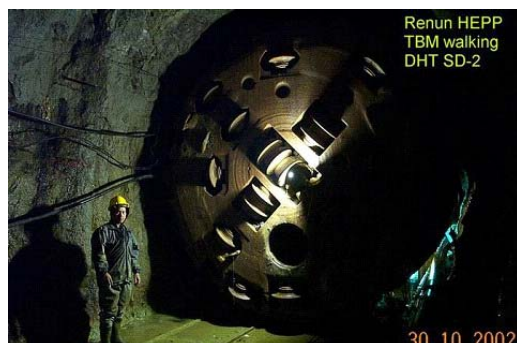


写真-4 TBM

写真-4) によって、1997年7月に上流に向って開始した。開始4ヶ月間は湧水もなく、1997年10月には記録的な進捗(月進1,113m、最大日進78m)を達成した。約1.8km掘進後、1997年11月下旬、未固結軟質層を含む655mの不整合面に遭遇し、TBMカッターヘッド周辺に発生した地山崩落に伴いTBM月進は平均87mまで低下し、不整合区間



写真-5 トンネル内湧水状況

通過に7.5ヶ月を要した。また、その上流1.9 km地点に位置するSta.76断層帯(約152m)では、TBMグリッパー用側壁コンクリート打設が必要となったためTBM平均月進は24mまで低下、断層通過に6.5ヶ月を要した。さらに断層区間通過後1999年4月24日、大量出水(毎分18ト)に見舞われた(写真-5参照)。その後、湧水は枯渇することなく掘進とともに増加し、下流端から7 km上流に位置する立坑SD-2まで毎分54ト、立坑SD-2通過後の最終的なピーク湧水量は毎分84トン（1,400 lit/s）を記録した。地下水压は高い地点で1 MPa程度である。

出水に遭遇後、追加地質調査に基づき以下に示す一連の対策工が実施された結果、立坑SD-2下流1.8km区間のTBM掘削は、平均月進148mまで回復し、2002年8月15日にSD-2に到達した。立坑SD-2通過後にもSta.31まで大量

湧水区間が続いたが、対策工の効果、SD-2からのズリ出しによるサイクル・タイム短縮、トンネル勾配(1/386)等の相乗効果によりSD-2上流区間のTBM平均掘削月進は355mとなり、2003年9月4日、下流導水路トンネルは貫通した。11.2kmのトンネル掘削に約6年間で費やした。

(2) 下流導水路トンネル対策工

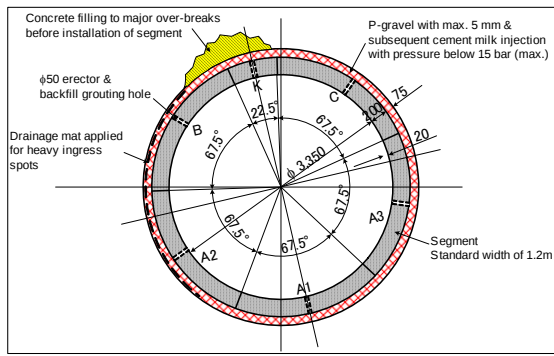
過酷な水理・地質条件から悪化した下流導水路トンネルの作業環境と工事設備を改善して掘削進捗率を向上させること、および様々な地質条件に適合し継続する湧水下でも所定の品質を有するライニングを最短期で建設することを目的とし、表-1に示す一連の対策工を実施した。

表-1 下流導水路対策工

対策工	目的・概要
排水システムの全面的改良	下流端出口と立坑からのパイプ&ポンプ排水（総出力4,565kW、計67台のポンプ投入）
ペドロ処理システム追加	トンネル底に堆積するペドロ化した細粒スリを減少させ、迅速に掻き出すシステム
TBMカッターヘッド・スクレーパーの改造	湧水を伴う掘削時において、掘削スリを洗い流されないスクレーパーへの改造
止水グラウト実施	マイクロセメントとポリウレタンを使用した断層部（迎え堀り区間）の止水処理
SD-1立坑からオープンピットへの変更	岩被り6mの区間（21m長）をボックス・カルバートとし、TBM搬出を容易にした
SD-1およびSD-2から4切羽迎え掘り実施	掘削期間短縮のため、SD-1から2切羽、SD-2から2切羽の発破掘削を追加
強度湧水区間におけるセグメント・ライニング採用	当初計画された現場打設では湧水により品質が確保できないためセグメントに変更
インバート・セグメントとRCライニングの組合せ	流水下施工での品質を確保するためインバート・セグメントを採用し、上部は現場打設とした
岩盤亀裂発達区間におけるジオメンブレン採用	10～20cm厚に達する亀裂にモルタルを充填後、ジオメンブレンで止水する
ハイドロ・ジャッキング想定区間での鉄管採用	内圧が最小主応力を上回る導水路区間にハイドロ・ジャッキング防止のため鉄管を採用

セグメント・ライニングは、現場打設では所定のコンクリート品質が確保できないと判断された大量湧水区間に適用された。内径は3.35m（無支保区間）と3.00m（支保区間）の2種とし、設計最大外水压2.5MPaが作用する圧縮型セグメントとして設計した。セグメントは5分割、厚20cm、幅1.2mの千鳥配列とし、継目は鋼製ボルトボックスで連結した。基本断面を図-4、仕上りを写真-6に示す。

セグメントと岩盤掘削面間75mmの隙間は、最大粒径5mmの玉砂利を詰めた後、最大圧1.5MPaでセメントミルクを充填した。さらにセグメント背面のグラウト注入結果を確認するため、弾性波による空隙計測を実施し、空隙率が20%以下となるまでミルク注入を継続した。



比較的ドライなSta.76断層部およびその下流の不整合区間は、インバート・セグメントと現場打設アーチライニングの組み合わせを採用した。20～30cm幅の岩盤亀裂発達区間はトンネルからの漏水が懸念されたため、コンソリデーション・グラウトからジオメンブレン（写真-7）に変更し、トンネルからの漏水抑制工とした。TBM掘削面にジオテクスタイルを縫付けた上にジオメンブレンを設置して2層構造として、インバート・セグメント据付とアーチライニング打設を行った。ジオメンブレン間の継目処理には、自動走行のホット・ウェルディング・マシンを使用し、加圧試験を行って水密性を確認した。

現場打設コンクリート区間はトンネル坑口から4km離れ長距離輸送となること及び24mスパン（12m x 2）のテレスコピック型枠（写真-8）を用いることから、輸送中のスランプロス低減とクラック防止のため、トンネル



坑口付近に設置したバッチングプラントで遅延型高性能減水剤を添加し、150分間スランプを12cm以上に保つよう対策を講じた。24mスパンのテレスコピック型枠による打設実績は、300m～550m/月であった。

サージタンク部を含む下流565m区間は、掘削後に坑内高圧透水試験を実施した結果、岩盤の最小主応力が内水圧より小さいかあるいは限界付近にあることが判明したため、ハイドロ・ジャッキング防止のために鉄管ライニングに変更した。鉄管ライニング適用区間は亀裂が発達しており、地下水位はトンネル標高以下にある。

セグメント製作は、工場をコントラクターキャンブ内に建設し（写真-9参照）、2003年4月セグメント製作を開始した。下流導水路トンネル貫通（2003年9月）に引き続き、2003年10月からセグメントのトンネル内据付を開始した。湧水はトンネル貫通後も継続し、ライニング工事は湧水下で行われたが、鉄管を含めた全ての作業は予定通り22.5ヶ月の工程で2005年8月末に終了した。

(3) トンネル初期充水

トンネル内圧力上昇速度は1m/時間、且つ10m/日と設定し、下流導水路トンネルの初期充水を2005年9月初旬に実施した。トンネル始点に設置されたゲート上のバルブを開放し、末端の作業坑の放流バルブを操作することで、トンネル内圧力上昇を目標値以下に制御した。漏水モニタリングは、初期充水後、1ヶ月間継続して実施した結果トンネル周辺部からの漏水は確認されず、逆に300 - 400 lit/sの地下水がトンネル内へ流入していることが

確認された。さらに、初期充水実施の1年後、2006年8月に再度計測した結果、トンネル内への地下水流入量は650 lit/sまで増加していることが判明した。地下水位上昇に伴って流入量も増加したものと考えられる。

4. 環境対策

(1) 茶褐色河川水放流による環境影響低減対策

ルヌン川流域の河川水は、流域に堆積した腐食土に含まれる植物性色素（タンニン）により濃い茶褐色を帯びている（写真-10参照）。発電所を通過した発電用水は13m以上の透明度を誇るトバ湖に放流されるため、茶褐色水放流によるトバ湖への環境影響を如何に軽減するかがプロジェクト実施に当たっての重要課題であった。そのために、本流と11支流、およびトバ湖の水質調査と原因分析を行い、これに基づいて水理模型実験と3次元着色水拡散シミュレーションを実施して、トバ湖水温に比べて6～7℃低い発電用水を湖底方向に沈めるために密度流を形成促進するボックス・カルバート形式の放水路（内径4m x 4m x 20m長 x 2連）を選定した。なお、この植物性着色成分は長期的には分解・無色化されるとされており、同様の茶褐色水を有する河川がトバ湖に流入しているが、湖水色調への影響は認められない。



写真-10 茶褐色の河川流況

発電所が位置するトバ湖周辺は斜面勾配約40°の急崖が形成されているが、発電所は仮締切堤を設けて建設することが可能であった。放水路建設のために、発電所用既設仮締切堤を拡張することも試みたが、急傾斜地形上での安定を確保することができず、また地形・地質上、鋼矢板の打ち込みが困難であったため、最終的には水中工事を採用することとした。そのため1,000 tバージを調達し、その上に150 tクレーンを搭載してクラムシェルとチズルによる掘削方法を採用した。ボックス・カルバートは、4m内径 x 2m長のプレキャスト・セグメントを現場で製作し、クレーンにより沈埋した（写真-11）。発電開始後の水面は極めて穏やかで建設前と変わらぬ色調を呈し、対策工の効果が確認できている（写真-12）。



写真-11 カルバートの沈埋



写真-12 運転開始後の湖水状況

(2) 下流域灌漑用水との共生と流域水管理

11箇所の溪流取水地点下流域には2,167 haの水田灌漑が行われている。発電運用計画策定に先立ち、下流域の水利用状況を確認するために現地調査を実施した結果、29箇所の灌漑システムで互いに関連した複雑な水利用と異なる作付けパターンを採用し、地区によっては1990年代から2期作を導入していることが判明した。さらに、既設灌漑設備が老朽化しているため、発電用水取水後に河川水位が低下すれば、このままでは所要の灌漑用水を確保できない灌漑地区も出てくることが予想された。

そこで現況の水利用状況と必要量を調査・分析した上で、水力用取水と下流域の灌漑・生活用水利用が共存し流域内での効率的な水利用を実現するために、発電計画を見直すとともに既設灌漑設備改修案を提案し、地元住民・地方自治体を含めたステークホルダー間の利害調整を目的として住民協議（写真-13）を重ねた。



写真-13 地元住民との協議

住民協議と並行して、影響される下流域24箇所の既設灌漑施設の測量、改修工事詳細設計を行い、基本計画に対する住民および地方自治体の合意取得後、住民参加の下で改修工事を実施した。2005年12月に1号機運転が開始される直前に既設灌漑施設改修工事は完了し（写真-14, 15）、住民との合意文書が締結された。今後は、水管理委員会の管理下で各ステークホルダー間の利害調整が行われることになっている。



写真-14 既設灌漑取水設備(改修前)



写真-15 既設灌漑取水設備(改修後)

5. おわりに

最初にプロジェクトに赴任したのが1993年1月で、8年経過後の2000年12月に帰国したが、客先からの指名により2003年1月より再赴任した。最終的に現場を離れたのは2006年10月で、合計142ヶ月のアサインメントであった。その間、軟弱地盤下での度重なるトンネル崩壊と大湧水下のトンネル掘削において、先が見えずプロジェクトで遭遇した問題と工期の遅れについて各方面から非難された苦しい時期もあった。当初5年の本体工事工期が12年に及んだことの意味は大きく、調査・設計・施工管理・マネジメントにおいても反省すべき点は多い。これらの経験を教訓として今後のプロジェクト運営に生かしていければ幸いである。

ルヌン水力発電所は電力需要が急増する北スマトラにおいて、自然エネルギーによる貴重なピーク発電所として電力供給に寄与し続けている。自然環境問題として発電所から高透明度のトバ湖へ放流される植物性着色水の影響、社会環境問題として下流域灌漑・生活用水供給の問題が懸案となったが、できる限りの対策工を講じた結果、どちらも顕在化することなく現在に至っている。流域内で共存可能な持続性を持ち長期に亘って地域に貢献できる水力発電所として運用されることを切に期待したい。

なお、今回の報告は、下流導水路での出水および環境対策に絞ったが、この他にも軟弱地盤上の調整池ダム盛土とアスファルト・フェーシングの劣化対策、クレーム処理、通水試験時に遭遇した水車・発電機トラブル等、特筆すべき事例が多い。これらについても何らかの機会に発表できればと考えている。

RENUN HYDROPOWER PROJECT UNPRECEDENTED INGRESS IN HEADRACE TUNNEL AND ENVIRONMENTAL ISSUES

Haruhiko KANAI

The Renun Hydropower Project experienced significant difficulties, particularly in the tunneling works in which groundwater ingress reached 84 ton/min in total at more than 1 MPa pressure. Comprehensive countermeasures were implemented to overcome the difficult conditions encountered. Another prominent aspect of the Project is an environmental issue relating to discharge of colored water running through the river basin into the Lake Toba with its scenic beauty and river water management including irrigation water supply for the downstream basin of the 11 tributary intakes. After 12 years of struggling to solve intricate issues, the Project was finally completed in 2006 to supply a power output of 82 MW.