

ルヌン水力発電プロジェクト 毎分 84 トン湧水下でのトンネル施工

RENUN HYDROPOWER PROJECT – TUNNEL CONSTRUCTION UNDER INGRESS OF 84 TON/M3

金井晴彦*
Haruhiko KANAI

During its construction over a period of 12 years, 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. After 6 years of struggling against groundwater during the excavation using a ϕ 3.9 m TBM, the tunnel breakthrough was achieved in September 2003. Subsequent to implementation of the countermeasures including the lining works, the project was finally completed in October 2006 to supply a power output of 82 MW. This paper presents some technical issues relating to the tunneling works.

Keywords : Pressure tunnel, groundwater ingress, TBM

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都メダン市の南 100km 地点、トバ湖北西に位置する。



図-1 ルヌン水カ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、トバ湖に転流することで 468m の総落差を利用して最大 82MW 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 260.9km²、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)、11 箇所の渓流取水堰、上流導水路トンネル(UHT: ϕ 3.4m \times 8.8km)、貯水容量 57 万 m³ の調整池、下流導水路トンネル(DHT: ϕ 3.3m \times 11.2km)、ブランチトンネル(BT: ϕ 2.5m \times 3.4km)、サージタンク(ϕ 8.0m)、ペンストック(852m)、

地上式発電所・開閉所から成る。プロジェクト水路系の模式図を図-2に示す。

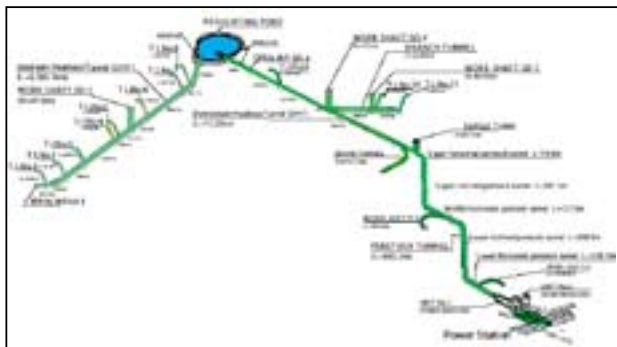


写真-1 Main intake

発電所はトバ湖岸に位置し(写真-2)、2連のボックスカルバートによってトバ湖に放流される。発電所には出力 41MW \times 2 台の水車・発電機、46MVA \times 2 台の主変圧器、150kV GIS 開閉機器が設置され、150kV 送電線により北スマトラ・グリッドに接続される。

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。

* コンサルタント海外事業本部 都市社会事業部
エネルギー開発部



図－2 水路系模式図



写真－2 発電所全景

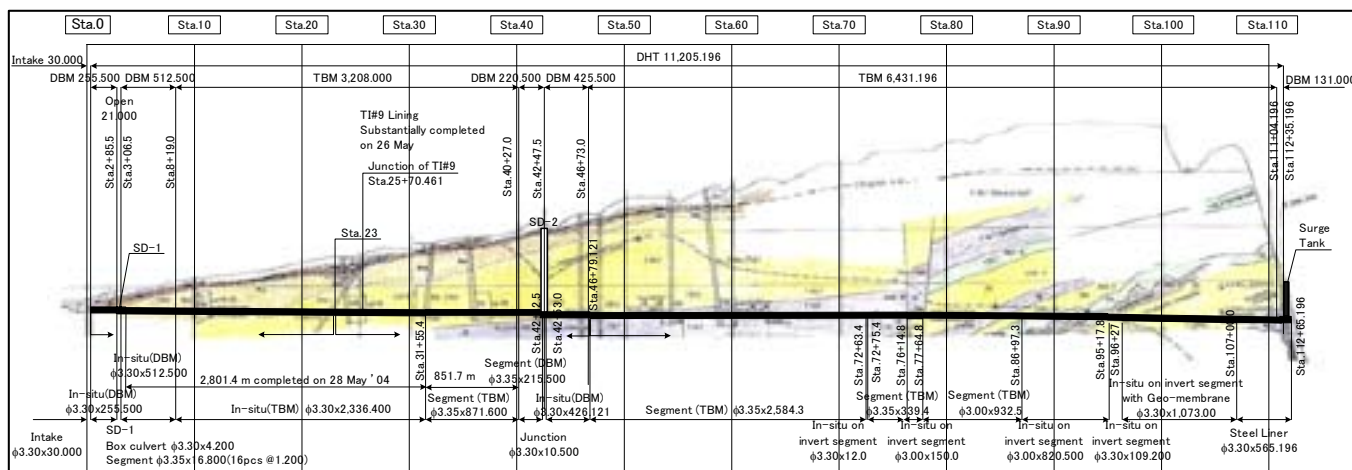
プロジェクト本体工事は、表－1 に示されるように 9 つの国際契約から構成される。実施主体はインドネシア国電力公社 PT. PLN であり、資金源は JBIC 円借款である。アクセス道路、ベースキャンプ、プロジェクト内配電線を含む準備工事は 1992 年に開始、1996 年完了、本体土木工事は 1995 年 3 月着工、2005 年 11 月に完了した。機電工事は 1995 年 8 月開始、2005 年 12 月に 2 号機商業運転、2006 年 10 月に 1 号機商業運転を開始し、実質的にプロジェクトは完了した。なお、土木工事契約は FIDIC 第 4 版(1987)、機電工事契約は FIDIC 第 3 版(1987)によった。

表－1 契約パッケージ

契約	内容	コントラクター
LOT-I	土木(上流区間)	現代建設
LOT-II	土木(下流区間)	現代建設
LOT-III	水圧鉄管	酒井・Amarta
LOT-IV	ゲート・ストップログ	B.I.B.
LOT-V	水車	GE Energy
LOT-VI	発電機	VA-Tech
LOT-VII	変電機器	丸紅
LOT-VIII	送電線	丸紅
LOT-IX	通信設備	Hydro-trent

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。プロジェクトの水路系は、トバ外輪山の外周台地上に位置する。トバ湖水面の標高 904m に対し、外輪山最高位は標高 1,600m 以上に達し、この頂部から外周斜面は、約 2° の傾斜で広大な台地を形成している。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 および高溶結 Ignimbrite から成る。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。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、比較的ポーラスな 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。



図－3 下流導水路縦断面図

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。トンネル沿いの地質縦断を図-3 に示す。

下流導水路は、サージタンクの上流 6.3km 地点で Ignimbrite と Dacitic Tuff の境界を貫いており、その上流側は Dacitic Tuff が分布している。なお、透水係数は、 $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s のオーダーにあり、それぞれの圧縮強度および弾性係数は以下の通りである。

項目	Ignimbrite (Mpa)	Dacitic tuff (Mpa)
圧縮強度	20 ~ 40	10 ~ 15
弾性係数	2,000 ~ 3,000	1,000

3. 下流導水路トンネルの掘削

下流導水路トンネル掘削は、下流端に位置する Drain Tunnel から搬入した径 3.9m のオープンタイプ TBM (米国ロビンス社製) によって、1997 年 7 月 24 日上流に向かって開始した。開始 4 ヶ月間は湧水もなく良好な Ignimbrite に恵まれ、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、不整合区間通過に 7.5 ヶ月を要した。また、その上流 1.9km 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、異常出水(毎分 18 トン)に見舞われた(写真-3)。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



写真-3 トンネル内湧水状況

立坑 SD-2 まで毎分 54 トン、SD-2 通過後の最終的なピーク湧水量は毎分 84 トン(1,400lit/sec)を記録した。地下水圧は高い地点で 1.0Mpa 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、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 通過後も Sta.31 まで強度湧水区間が続いたが、対策工の効果、SD-2 からのズリ出し



写真-4 パイプ排水

によるサイクル・タイム短縮、トンネル勾配(1/386)などの相乗効果により 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。

4. 下流導水路トンネル対策工

下流導水路トンネル対策工実施は、過酷な水理・地質条件から悪化した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工期で建設することを目的とし、エンジニア(日本工営)がすべての計画、設計、積算、施工計画を立案策定し、クライアントの承認後、施工業者との交渉を経て Variation Order として発効した。表-2 に下流導水路に適用した代表的な対策工を示す。

表-2 下流導水路対策工

No.	対策工	目的・概要
1	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)
2	ペトロ処理システム追加	トンネル底に堆積するペトロ化した細粒スリを減少させ、迅速に掻き出すシステム
3	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
4	止水ゲラウト実施	マイクロメントとポリウレタンを使用した断層部(迎え掘り区間)の止水処理
5	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
6	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
7	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
8	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
9	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
10	テレスコピック型枠採用とコンクリート配合の変更	24mスパンのテレスコピック型枠を採用し、長距離輸送・長大スパン用のコンクリート配合に変更
11	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

これらの対策工は、計画・設計・施工計画・積算をエンジニアが取り纏め、客先の承認と業者との交渉を経て、JBIC の同意取得後、Variation Order として発効し、実施に結びつけた。出状した Variation Order は下流導水路トンネルだけで 20 パッケージ以上に亘る。排水システム(表-2 No. 1)は、掘削進捗に従って増加する湧水量に対応させるため、段階に分けて Variation Order を出状していった。台地下を通過するトンネルのため横坑が設置できず、排水は下流端の Drain Tunnel、中間の立坑 SD-2(150m 深)、溪流取水 #9 斜坑(100m 深)に限定されたため、ピーク時の排水システムとして 67 台のポンプを投入し、その総出力は 4,565kW に達した。

セグメント・ライニング(表-2 No. 7)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強度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、設計最大外水圧 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、ジョイントは鋼製ボルトボックスで連結した。基本断面を図-4 に示す。

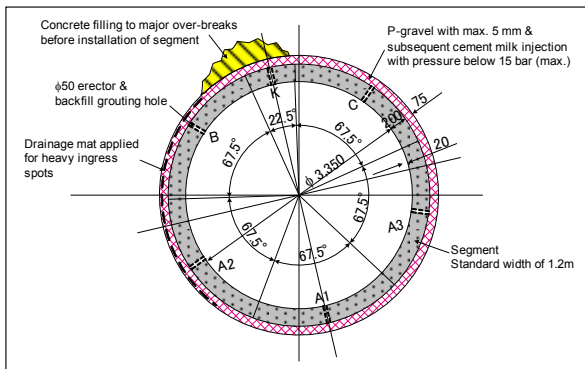


図-4 セグメント基本断面



写真-5 セグメント・ライニング

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。充填を確実にするために、グラウト区間は 25cm 径×220cm 長のモルタルグラウトで充填した

チューブ(Bullflex Seal)をセグメントリングに沿って 50m ごとに設置し仕切った。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、弾性波による非破壊試験を実施して空隙を計測し、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(表-2 No. 8)を採用した。アーチライニングには 5m の緩み荷重を考慮している。Sta.96-107 の岩盤亀裂発達区間は、コンソリデーション・グラウトから Geo-membrane(写真-4、表-2 No. 9)に変更し、トンネルからの漏水抑制工とした。TBM 掘削面に Geo-textile を縫付けた上に Geo-membrane を設置して 2 層構造とし、インバート・セグメント部ではさらに保護用 Geo-textile を載せ 3 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。Geo-membrane 間のジョイント処理には、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。



写真-6 岩盤亀裂区間に適用された Geo-membrane



写真-7 テレスコピック型枠

遅延した工程を挽回するために、現場打ライニング施工速度を倍増する目的で、24m スパン(12m × 2)のテレスコピック型枠(表-2 No. 10)を新たに導入した。しかし、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および長大スパンの型枠を用いるこ

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 0.8lit 添加し、アクシデントにより輸送時間が 90 分を超過した場合には打設直前にさらに 0.3lit 添加して 150 分間スランブを 12cm 以上に保つよう対策(表-2 No.10)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 Sta.107 下流 565m 区間は、トンネル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(表-2 No.11)に変更した。鉄管ライニング適用区間に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。高速施工を目的として、鉄管据作業は中断することなく一気に約 500m 区間を据付け、これに続いて空気混入量 59% の発泡ミルクを径 50mm パイプにより最大圧 0.3Mpa で充填した。発泡ミルクの特性として、水和熱による温度上昇が約 80℃に達することから、施工に先立ち温度応力解析を実施して、鉄管の応力および変形量を解析するとともに打設工程を確認した。打設は、下部から 1.0m、1.5m、1.4m の 3 層に分け、TBM 区間は約 200m ごとに、発破区間は約 80m ごとに隔壁で仕切り、1 リフト/日のペースで実施した。日最大打設量は 300m³とした。

なお、セグメント製作工場は 2003 年 4 月にコントラクターキャンブ内に建設し(写真-8)、韓国で製作したセグメント型枠を搬入して、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、新たに製造したセグメント・エレクターを用いて 2003 年 10 月から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、鉄管を含めたすべての作業は 2005 年 8 月末に終了した。引続き、同年 9 月上旬にトンネル充水を実施、1 週間で無事完了した。11.2km 区間のトンネル掘削に約 6 年を要したが、ライニングは予定から遅れることなく 22.5 ヶ月で完了したことになる。



写真-8 セグメント製作工場

5. トンネル初期充水

トンネル初期充水・抜水率についての明確な基準はないが、幾つかの技術論文^{2),3)}では、ライニング施工後に十分な地下水位回復があれば初期充水率を 10m/hour、地下水位が期待できない場合 2m/hour、抜水率は 2m/hour 程度としている。これらの文献を参考として、ルヌン下流導水路トンネルにおける充水率は 1m/hour かつ 10m/day と設定し、夜間作業は避けた。これは下流導水路トンネルの地質状況、ライニング設計の特殊性および充水オペレーションの精度を考慮し余裕を持たせて決定したものであるが、状況が許す限り 1m/hour かつ 10m/day を標準と考えたい。

トンネル初期充水の評価基準として、充水後のモニタリングにより、トンネルからの漏水量が 10lit/s/km、下流導水路全体で 110liter を超過した場合は、抜水し点検・補修を実施する計画とした。漏水が設定基準内に収まっている場合は、抜水に準備作業とモニタリングを含めて 2 週間、抜水にも 2 週間程度要するため約 1 ヶ月運用開始が延期されるという経済性の問題だけでなく、抜水を実施することに伴うライニング損傷リスクを考慮し、初期充水後の抜水実施は控えることとした。充水計画はクライアントの承認の下、エンジニア主導により 2005 年 9 月初旬に実施した。

圧力トンネル充水はトンネル内空間を水に置き換える作業であり、水平に近いトンネル内部に充水中は比較的緩やかに水面が上昇するが、水面がトンネル入口天端に達した後、満水位に到達するまでは流量を制御しない限り、一瞬の間に圧力上昇する。その間の圧力上昇率を基準内に抑えるため、Drain Tunnel の放流バルブを開放して細心の注意を払いつつ制御した。図-5 にトンネル充水計画図を示す。

漏水モニタリングは、発電機器のトラブルにより通水試験が中断したこともあり、初期充水後、1 ヶ月間継続して実施した。トンネル周辺部からの漏水は確認されず、観測井戸の水位変化も異常値は検出されなかった。漏水量の計測は、取水ゲートと発電所水車主弁を閉じ、調整池水位を計測することでトンネル流入量を算出した。その結果、トンネルから漏水は認められず、逆に 300 ~ 400lit/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 650lit/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。

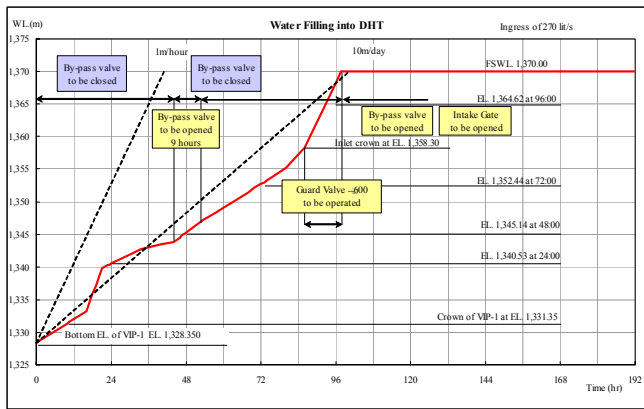


図-5 トンネル充水計画図

6. おわりに

500mを超える落差を有する圧力シャフト(ペンストック)において、岩盤の状況によっては鉄管ではなく無巻あるいは無筋コンクリートライニングを採用している例もある一方で、100m以下の落差の導水路でハイドロ・ジャッキングによりRCライニングが破壊に至った例も経験している。ルヌン水力の下流導水路トンネルでは、掘削後に坑内高圧透水試験を実施し、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サージタンクを含む導水路下流端500m区間において、鉄管を採用することでハイドロ・ジャッキング防止対策とした。また、トンネル掘削後に、鉄管だけでなくフル・セグメント、インパート・セグメント、ジオ・メンブレンを含め、当初のRCライニング設計から大幅な変更が必要となった。これは計画・設計時に想定した地質条件と実際に遭遇した条件が大幅に異なったことが原因であるが、事前調査の精度により変更規模の差はあるものの、どんなに詳細な調査を実施したとしても地下構造物の設計においては掘削後の変更の可能性は常に付随する問題である。変更が必要と判断された場合、変更の規模にも拠るが、エンジニアリング業務として調査、設計、積算、施工計画の策定が必要となり、さらに業者との交渉、予算措置、クライアントと融資先から承認取得等、実施に至るまでに要するエネルギーは1件のVariation Orderでさえ膨大なものとなる。このような作業で必要とされる時間を最小限に抑えるためには、設計にフレキシビリティを持たせるだけでなく、追加地質調査と変更を比較的容易に可能とするような契約条件と支払いメカニズムの設定および予算措置は極めて重要である。圧力トンネル・ライニングの設計は、詳細設計ステージで完了するというものではなく、掘削時に実際の岩盤状況が確認できるまで継続することが不可欠であるということを改めて認識したプロジェクトであった。

ルヌン水力建設時に遭遇した問題の中には、上記の下流導水路トンネルの湧水だけでなく、40°急斜面上のアクセス道路建設、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、流域を流れる植物性着色水放流による環境負荷低減のための発電所放水路カルバートの設計と水中施工、下流域灌漑用水確保のための調査・住民協議・対策工の実施、100億円を超えるクレーム処理、通水試験時に遭遇した水車・発電機トラブルなど、特筆すべき事例が多くある。今回は下流導水路トンネル工事の問題に絞ったが、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。

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、2003年1月より再赴任し2006年10月のプロジェクト完了まで、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で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。調査、設計および施工管理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。

謝辞：プロジェクト完了に尽力されたPT.PLN、各コントラクター、そしてルヌン水力施工管理関係者関係者一同に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Kanai : Renun Hydropower Project – Lessons and Solutions, Proceedings 4th Civil Engineering Conference in the Asian Region, 2007.
- 2) R.P. Benson : Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels, Tunneling and Underground Space Technology 1989.
- 3) Andrew Merritt : Geologic and Geological Considerations for Pressure Tunnel Design, Proceedings Third National Conference of the Geo-Institute, 1999.
- 4) 羽根悟朗、荒木一郎、滝森勉、金井晴彦：ルヌン水力 発電所放水庭周辺の湖水透明度保全対策：日本工営技術情報誌 No.14、1993.
- 5) 清水国夫、都築和夫、金井晴彦：ルヌン水力発電プロジェクト 下流導水路トンネルにおける技術的問題点、日本工営技術情報誌 No.23、2003.