

# ルヌン水力発電事業における流域水管理とその推進方法

金井 晴彦

日本工営（株） エネルギー開発部（〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4）

E-mail:kanai-hr@n-koei.jp

導水路トンネル掘削時に遭遇した想定を遥かに超える異常出水への対応に係わる10年間の苦闘の後、プロジェクトの終盤になって、11箇所の溪流取水口下流に位置し、発電運用の影響を受ける灌漑・生活用水への対応という社会環境上の課題解決が発電運転開始前に顕在化した。

この論文は、水力発電と灌漑・生活用水利用に係わる流域内の水管理と共生に関し、実践を通して得られた知見について述べたものである。

**Key Words :** *hydropower, water management, irrigation water supply, residential participation, project 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 ルヌン水力プロジェクト位置図

本事業は、ルヌン本流とその11支流から取水し、468 m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308 GWh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 km<sup>2</sup>、年間平均流量は11.36 m<sup>3</sup>/sであり、8.85 m<sup>3</sup>/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。

プロジェクトは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 (Japan International Cooperation Agency) 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（円借款）に移行した。

2年間の調達期間とそれに並行する準備工事を経て、1995年3月に着工された本体工事は、当初5年間の工期で計画されていた。しかし、工事期間中、毎

分84トンに達するトンネル湧水<sup>1) 2)</sup>、茶褐色の河川水を高い透明度を誇るトバ湖へ発電放流することに対する環境負荷低減対策、工期遅延に係わる契約問題等、様々な課題と問題に遭遇した<sup>2)</sup>結果、本体工事は約7年遅れ、発電がフル稼働開始したのは2006年11月であった。現地への乗り込みは1993年1月、プロジェクト完了に伴い現場を離れたのは2006年10月であり、現地での業務は14年に亘った。

プロジェクトの過程で遭遇した問題点と、それを乗り越えるために実施した対策のうち、ここでは11箇所の発電用溪流取水口が含まれる河川流域に広がる水田約2,000 haへの灌漑用水供給と約9,500人への生活用水供給に関して、流域内水管理の観点から水力発電との共生を目指して策定した流域水管理計画とそれに伴って実施した対策に焦点を絞って論じる。

## 2. 事業概要

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（φ3.4 m x 8.8 km）、貯水容量57万m<sup>3</sup>の調整池（写真-2）、下流導水路トンネル（φ3.3 m x 11.2 km）、ブランチトンネル（φ2.5 m x 3.4 km）、サージタンク（φ8.0 m）、水圧鉄管路（852 m）、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

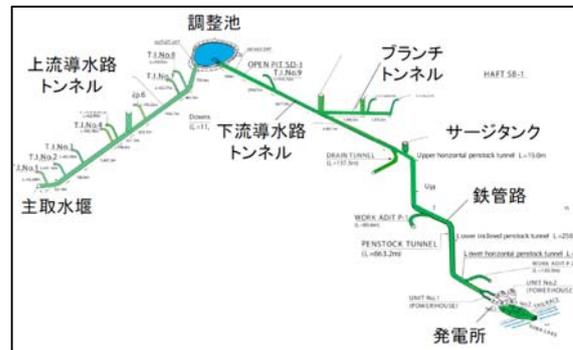


図-2 水路系模式図



写真-2 調整池全景

契約	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08
エンジニアリング・サービス	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
準備工事	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(土木-I)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(土木-II)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(鉄管)						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(ゲート)						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(水車)						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(発電機)						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(変電機器)						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
本体工事(通信)									■	■	■	■	■	■	■	■	■

図-3 全体工程図



写真-3 発電所全景

資金源はJBIC(Japan Bank for International Cooperation)円借款，実施主体はインドネシア国電力公社PT. PLN(Perusahaan Umum Listrik Negara)，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。インドネシア国内入札によるアクセス道路，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，国際入札による本体土木工事は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。全ての国際契約のクレーム解決および支払が完了したのは2008年12月である（図-3 参照）。

### 3. 背景と経緯

ルヌン川本流は深い渓谷を形成しており，発電用の取水により河川流量減水が影響する範囲内では灌漑や生活用水取水は行われていないが，11箇所の溪流取水地点下流では，約2,000 haの水田灌漑が行われ，生活用水にも利用されている。

環境アセスメントは1980年代に実施され，更に2003年に発電取水と灌漑・生活用水の基本的水利利用に関し事業主体と地域住民との間に包括的な合意書が締結された。

その一方で，現地NGO団体を中心に発電所建設に係わる住民との合意形成において問題点が指摘され，2004年12月24日の新聞には，「ジャカルタで2004年秋に開催された日本のODAをテーマとする会合で，ルヌン水力発電の建設により，農業用水や生活用水を川から得にくくなったとしてルヌン発電所建設に伴う被害を訴えた」という報道があった。2004年時点では発電所は建設中であり，発電用の取水は実施していないので，工事による河川流量への影響は考え難いが，そのような指摘の背景には，事業者側から流域住民に対するプロジェクト建設および運用に関する説明が十分ではなく，プロジェクト完成後の下流域への影響についても再確認する必要性があることが推察された。

2004年12月にはインドネシアにおける水資源法が制定され，流域における水管理委員会の設立が義務付けられたことに伴い，発電取水と灌漑・生活用水の配分と運用について，流域水管理の視点から合理的な説明が必要となった。

また，詳細設計段階で作成された発電運用計画を

精査し、実際の運用に資するマニュアルに反映するために、11箇所の溪流取水口下流に広がる約2,000 haの水田および生活に係わる水需要現況を確認する必要があった。

#### 4. 水利用調査

2005年末に発電開始が予定される中、2005年1月より11支流域における水利用調査を開始した。衛星画像を用いて作成した1/5,000流域マップを使用するとともに灌漑地区の地上測量を実施し、現地のNGO団体LSPLの協力の下で流域と既設灌漑施設を踏査して、複雑に入り組んだ流域内水路網を整理した(図-4に11支流域の発電取水口と灌漑取水口の位置図を示す)。また、住民集会、地域住民へのインタビューとアンケート調査を実施し、水需要および水利用状況を把握した。調査結果および水需要算定の概要は以下の通りである。

- (1) 11支流域の灌漑面積は将来拡張計画面積110 haを含め全2,167 haで、このうち1,549 haの灌漑地区が発電取水の影響を受け、559 haが1990年代から2期作を行っている。単位面積当りの年間平均灌漑需要量を1.22 lit/s/ha、ピーク時の灌漑需要量 3.98 lit/s/ha、減水深15 mm/日、浸透・蒸発損失率41%として算定した結果、年間63.8 百万 $m^3$ の灌漑用水量が必要と見積った。灌漑用水量は、それぞれ作付けパターンの異なる29箇所の灌漑地区に対して10日毎に算定した(図-5参照)。
- (2) 生活用水量は、1日当りの需要量を220 リッター/人とし、2010年まで人口増加率1.4%を加味して算定した人口9,464人に対し、年間0.8 百万 $m^3$ と見積った。
- (3) 養魚は1期作の裏作として水田で営まれ、単位面積需要量を3.4 lit/s/haとして、年間0.7 百万 $m^3$ と見積った。
- (4) 河川維持用水は、流域単位面積当り0.3  $m^3/s/km^2$ として、年間9.2 百万 $m^3$ と見積った。
- (5) 11支流域の合計水需要量は74.5 百万 $m^3$ で、年平均流量は2.36  $m^3/s$ となる。これを11箇所の溪流取水口から下流域の需要パターンに応じて放流する必要がある。
- (6) 11支流域全体における現況の水路網および灌漑・生活用水システムを位置、水需要および相互依存関係整理して、水利用系統図を作成した。

また、水利用調査の結果、発電取水との関連において以下のような課題があることが明らかとなった。

- ① 各支流に接続するそれぞれの灌漑・生活用水取水口における水需要を積み上げた上で、その上流に位置する発電取水口から放流すべき灌漑・生活用水量と取水可能な発電利用水量を算定し、

各溪流取水口毎に詳細な水利用計画を策定する必要がある。その際、下流域の水需要を優先させるとともに、水力発電によるフィージビリティを確保できることを確認する必要がある。

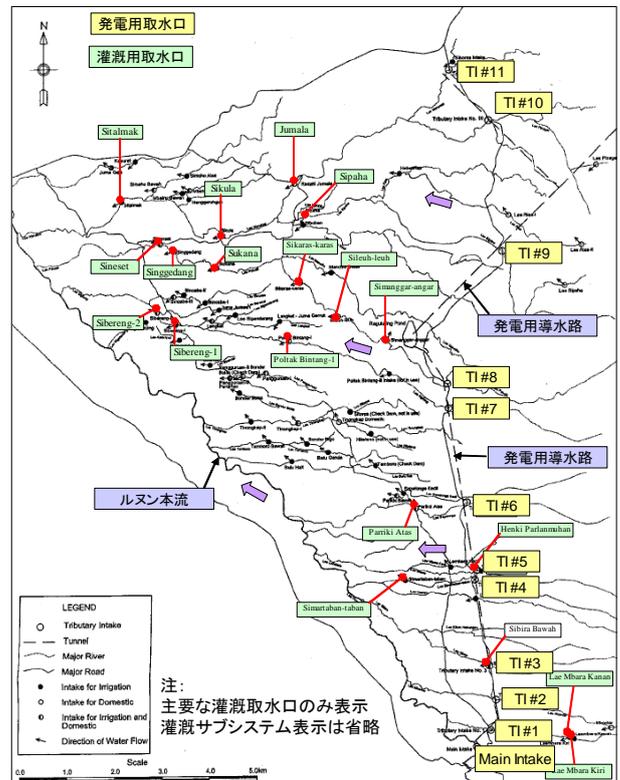


図-4 11支流域の発電取水口と灌漑取水口レイアウト

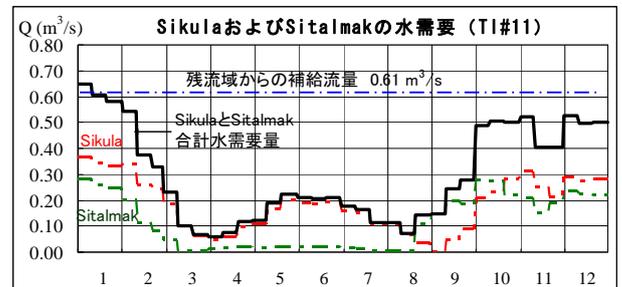


図-5 灌漑・生活用水水需要量算定の例

- ② 各支流には既設の灌漑施設が段階的に配置されており、流域に亘って複雑な水路網が構築されている。1本の河川に複数の灌漑・生活用水取水施設がある場合、上流で過取水があれば下流での水供給が不足する。また、ある灌漑地区からの排水を利用して灌漑している副次的な灌漑地区もある(図-7 上図参照)。したがって、各灌漑区域の個別取水計画を基に各河川の包括的な年間取水計画を策定し、その中で各取水施設における取水量を明示するとともに、連携した運用とモニタリングが必要となる。併せて、発電と灌漑・生活用水取水における流域内水管理組織を組成し、渇水等の問題発生時における体制を整備する必要がある。



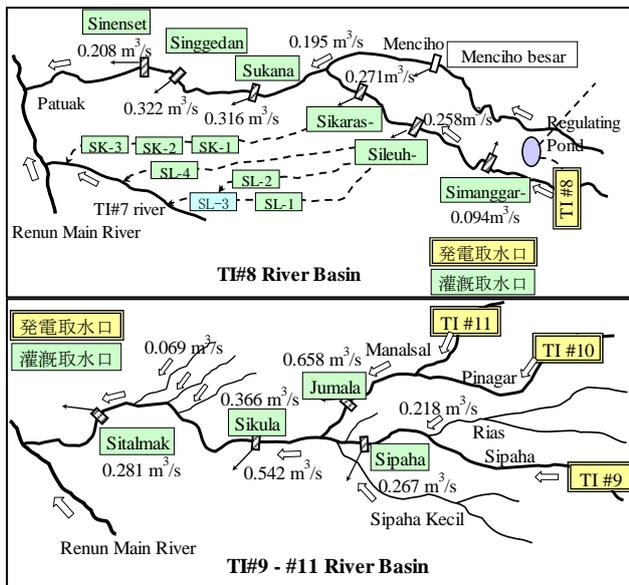


図-7 灌漑取水口への流量配分模式図

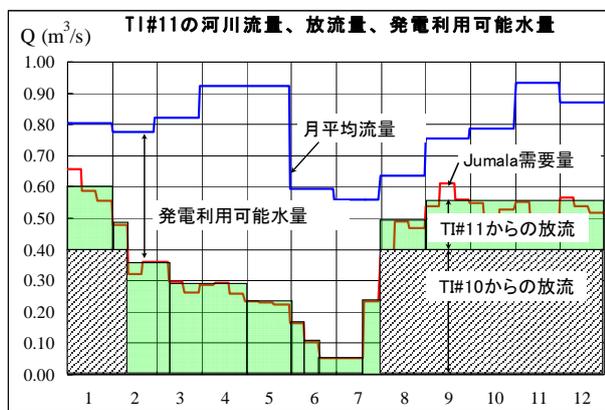


図-8 灌漑用水量と発電利用水量算定の例

既設灌漑・生活用水取水口・用水路においては、ラジャ・ボンダール立会いの下で行った測量結果と用水路流量の実測値に基づいて、取水・送水容量についての不等流解析を行い、取水口付近の水路における水位-流量曲線を作成した。

既設灌漑取水口および用水路の改修工事用設計においては、ピーク需要量を取水可能な構造とし、それを超過する河川水は堰から越流するよう堰先端標高を決め、水路内からも流量を調節できるようなゲートの設置が必要と判断した(写真-5 参照)。設計は周辺地域で一般的に用いられている水利施設スタンダードに準拠することとした。

これらの解析・設計結果を基に、11箇所の発電用溪流取水口毎の発電取水および放流運用マニュアルおよび、下流17箇所の灌漑・生活用水取水地点における取水運用マニュアルを作成し、地域住民が内容を理解できるようにインドネシア語版も作成した。

これに引続く既設灌漑取水口の改修工事実施段階では、水路チェックポイントに水位ゲージを設け、その地点における水位-流量曲線と10日毎の年間水需要量図とを利用して取水管理を行うための礎とすることとした。また、水管理委員会における各ステー

クホルダーの役割分担、問題発生時の解決等に備えた組織体制に対する提案を計画報告書に盛り込んだ。



写真-5 灌漑取水口における流量調節施設の例

1990年代から2期作水田灌漑を開始したこともあり、下流域の水需要量は1980年代に実施した計画、詳細設計時より確実に増加している。2004年時点まで実測した河川流量と上記で算出した下流域への放流量を基に、発電用のシミュレーションを実施した結果、平均河川流量 11.36 m³/sのうち発電利用可能水量は8.85 m³/s、年間発生電力量は308.1 GWhとなった。なお、詳細設計時の見積では313.5 GWhであり、これから1.7%の減となった。水力発電における経済・財務評価の結果は、EIRR(Economic Internal Rate of Return) 15.3%、FIRR(Financial Internal Rate of Return) 10.3%となり、水力発電によるフィージビリティを確保できることが確認された。

## 6. 問題解決のプロセス

水利用調査により把握された問題点・課題は、発電運用開始前までに解決する必要があった。2005年1月に水利用調査開始、同年6月に調査完了、流域内水管理計画のドラフトが完了したのが2005年8月である。一方、発電所運用開始はその時点では2005年末に予定されていたため、それまでの猶予期間は約4ヶ月となった。

問題解決までに乗り越えるために、以下のような課題があった。これらの課題解決なしには、発電運用開始は困難となることが予想された。

- ① 各取水口における取水量と運用に関する基本ルールおよび河川毎の運用組織体制の合意形成
- ② 既設灌漑施設の改修工事コンセプトについて、住民・地方政府・事業主体による協議を通じた合意形成
- ③ 合意に基づいた最終設計・積算・仕様書作成・追加工事契約書類の作成と承認
- ④ 改修工事予算の承認
- ⑤ 改修工事請負業者との交渉と契約手続き
- ⑥ 改修工事実施

⑦ 住民からの合意文書取得

2005年7月から測量と既設灌漑施設の詳細設計を進めると同時に、流域住民、特にラジャ・ボンダールに流域水管理計画およびプロジェクトとして進めるべき既設灌漑施設の改修工事のコンセプトを説明する機会を重ねた(写真-6参照)。その中で、彼らの意図するものは水力発電自体に反対するというところにあるのではなく、発電による下流域での利水量減少、特に劣化が著しい取水・送水施設の改修に強い関心があることが確認できた。

実施主体は住民対策委員会を設立し、NGO団体LSPLと連携しつつ、流域住民への説明と協議の場を設けた。住民との協議においては、実施主体およびローカル・エンジニアに主導的に立ち回ってもらい、外国人コンサルタントは計画立案・設計・積算等を担当し、必要に応じて住民集会で説明する役割り分担とした。



写真-6 地元住民・地方自治体との協議

各灌漑水路の通水能力は、水利用調査において見積った灌漑・生活用水需要のピーク水量にほぼ一致している。当初、プロジェクト側で見積った灌漑・生活用水需要量と現況の取水量に乖離が生じた場合、取水量に係わる合意形成が困難となることが予想されたが、既設構造物の設計精度の高さを確認すると同時に、流量配分における関係者協議でも現実的な解決策を探る目処をつけることができた。数回に及ぶ住民集会での説明を経て、各ラジャ・ボンダールからそれぞれの取水口における取水量と取水運用ルールについて基本的な合意が得られた。その前提として既設灌漑施設の改修工事をプロジェクト側で実施することが合意され、改修設計のコンセプトを確認するとともに、現場において工事実施箇所と数量の細部をステークホルダーの合意の上で決定した。当初、灌漑地区への立ち入りさえ頑なに拒んでいたラジャ・ボンダールもいたが、説明と協議を根気よく重ねていくにつれ対応が和らぎ、最終的には改修工事を含めた流域管理計画を理解し協力的になっていった。ラジャ・ボンダールは水利施設の建設・維持・運営を担ってきた人々であり、その点も踏まえて改修工事への参加・協力を求めたところ、

快諾を得ることができた。目指すところは、彼らにプロジェクトを主体的に進めてもらうことにあった。

11支流域に存在する29箇所の灌漑・生活用水取水施設の内、プロジェクトによって直接的に影響を受け、取水・送水施設の改修が不可欠な15施設が住民および地方自治体との合意の上で選定され、改修工事を進めることとなった。工事に含まれる施設は、取水堰および用水路の改修、ゲートの設置等である。水利用調査～対策工実施に至る工程の推移を本体工事工程とともに図-9に示す。

作業項目	2005												2006									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
本稿に係わる作業工程																						
水利用調査	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
流域水管理計画																						
改修工事設計・積算																						
住民集会・関係機関協議																						
改修工事書類・契約交渉																						
改修工事実施																						
住民合意取得																						
プロジェクト本体工事工程																						
導水路トンネル工事	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
トンネル充水計画																						
トンネル充水																						
発電機器試験運転																						
発電機器トラブル対応																						
2号機運転開始																						
1号機運転開始																						

図-9 作業実施の推移

2005年9月末までに改修工事に係る全ての設計・積算・仕様書作成を終え、10月からローカル業者との間で契約交渉に入ったが、地元からの要請を反映した工事であっただけに、交渉は速やかに完了した。それに引続いて、契約変更の承認手続きを進めた。

改修工事には、ラジャ・ボンダールおよび地域住民も主体的に参加している。既に雨季に入っていたが、住民参加の下で進めた改修工事は順調に推移し、2005年12月20日に工事は完了した。15箇所における改修工事が予定通り完了した主要な要因として、地域住民の積極的な参加があったことが挙げられる。灌漑用水路に設置した流量調整用のゲートを写真-7に、既設灌漑取水設備の改修前および改修後の比較を写真-8と写真-9に示す。2005年12月20日、関係する全ラジャ・ボンダールのサイン入り合意書が締結された。

一方、本体工事は同年9月10日にトンネル充水を無事完了、引続いて水車・発電機の通水試験を開始し、2台ある機器のうち2号機の試験が完了したのが2005年12月23日である。同日から2号機の試験運転(実質的な商業運転)が開始された。灌漑施設の改修工事完了と合意書の締結は、その3日前であった。

なお、水車・発電機1号機は、主に水車の設計・施工上のトラブルから回転不良となり、パーツを海外の工場まで輸送して修理に当たったため、大幅に試験が遅れた。最終的に1号機試験が完了したのは2006年10月である。また、全ての契約上の懸案事項を解決できたのは2008年末であった。



写真-7 流量調整ゲート

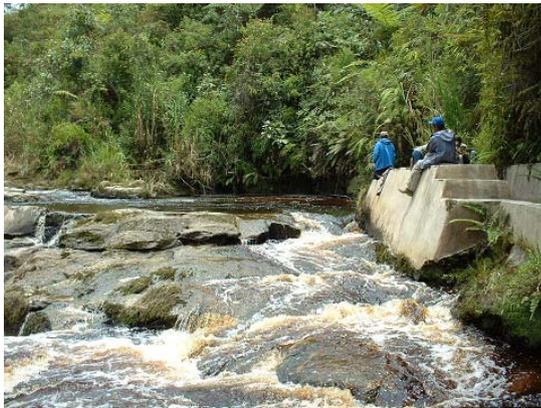


写真-8 既設灌漑取水設備（改修前）



写真-9 既設灌漑取水設備（改修後）

## 7. 結論

### (1) 俯瞰と実践

海外でのインフラ事業において、計画～設計段階で表面化しなかった課題・問題が施工時に顕在化することは少なくない。施工管理におけるエンジニアリング業務の内容は、契約におけるTOR (Terms of Reference：委託条項)で規定されるが、TORとは業務実施に当り、事前に想定したものであって、その前提となるのは計画・設計条件あるいは想定された自然・社会環境条件である。

本事業におけるTORにおいても、今回実施したような対応が当初から想定されていた訳ではない。施工管理だからといって施工に係わる技術あるいはマネジメントだけを遂行すれば良いというものではなく、プロジェクト全体における計画・調査～設計～施工～運用までのプロセスと成果を見渡すとともに流域におけるプロジェクトの位置付けというものを俯瞰的に見る態度を持たなければ、トラブルが顕在化する前に問題を察知し、事前に解決に導くことは難しい。

今回の水利用調査開始に当っては、調査の必要性に対してさまざまな意見が出されたが、調査の進展に伴い新たな事実が明らかになるに従って、調査の必要性が理解され、必要不可欠で且つ緊急性を帯びた最重要事項のひとつという共通認識に変化していった。

課題の本質を見極め、優先度を持った事項を含む計画を立案する際には、俯瞰的な見方が必要であり、それを達成するためにはステークホルダーの理解を得ながら、時間・予算等の制約の中で速やかに実行に移す行動力が必要となる。そこで求められる能力は、技術力だけではなく意志力やコミュニケーション力といったプロジェクトを前進させるための遂行力であり、特に言語や文化の異なる海外プロジェクトの推進においては、その重要性は高い。

### (2) 住民参加と流域水管理

今回の事例に於けるキーワードのひとつは「住民参加」である。それを当初から掲げていたわけではないが、地域住民の理解を得て工期内に完了させるためにはどうすべきかを考えた結果、「住民参加」という手法が最善であるとの結論に至った。地元における雇用機会の創出という点にも意義があるが、参加することでプロジェクトに対する見方が主体的な視点に切り換わる、という点においてもメリットがある。そして何より重要なことは、今回の改修工事への住民参加により、今後確実に発生する灌漑施設のメンテナンスにおいて、事業主体側および住民側が何をどうすれば良いか、また予算規模はどの程度必要かを実体験として把握したという点にある。2004年12月の水資源法の制定により、事業実施主体は発電用の水使用料金を新たに設立された水管理委員会に収めることになるが、それが灌漑施設のメンテナンス用の補助金としての原資にもなり、流域管理の持続的なサイクルを形成する仕組みが構築されることが期待される。また、複雑な水系の中で全体としてのシステムと個別の水管理ユニットの位置付けが明確化されたことで、将来の問題発生時の対応の構造化が図れたことにも意義があった。今回の流域水管理計画と改修工事を通じて、この地域の水力発電と流域水利用における共存関係の枠組みができたと考えている。

## 8. おわりに

1982年の計画開始から四半世紀を経て、プロジェクトが完了した。今回の問題に対応した2005年には、毎分84トンの未曾有の大出水により大幅に遅延したトンネル工事がまだ継続しており、その完工目標を2005年8月に置き、本工事の方は最終段階にあった。また、トンネル工事に引き続き実施予定のトンネルへの初期充水計画策定とその実施を9月に予定し、その後には水車・発電機の通水試験が控えていた。その他、クレーム処理を含む6本の国際契約における予算処理と契約上の課題解決が進行中であった。そういったプロジェクトにおける多くの懸案事項を同時に抱えた中で、社会環境問題への緊急的な対応が必要となっただけに、その解決が予定していた工期限内に完了した意味は大きい。

2007年以降、本格的な商業運転に入っているが、計画した年間発生電力量308.1 GWhに対し、実際には326.0 GWh (2007年)、360.8 GWh (2008年)の電力を得ており、下流域の水ユーザーとの調整も順調に

推移していると聞いている。本流域における持続的な水運用が継続していくことを期待する。

**謝辞：**本事業に係わり、事業完了に至るまで惜しみない支援、協力していただいたJBIC, PT. PLN, コントラクター、地域住民の関係者の方々に深謝する。

### 参考文献

- 1) 金井 晴彦：ルヌン水力プロジェクト～毎分84トン湧水下でのトンネル施工，こうえいフォーラム第16号，2007.
- 2) 金井 晴彦：ルヌン水力プロジェクト～導水路トンネルにおける出水と環境問題，土木学会岩盤力学シンポジウム，2009.

(2009. 10. 15 受付)

## IMPLEMENTATION OF WATER MANAGEMENT IN THE RENUN HYDROPOWER PROJECT

Haruhiko KANAI

After 10 years of struggling to solve significant difficulties against unprecedented ingress into the headrace tunnel, the Renun Hydropower Project faced another issue to be settled before commencement of the operation, in terms of social environment relating to the water management including the irrigation and the domestic water supply to the downstream river basins of the 11 tributary intakes.

This paper presents the experiences and lessons learned through the countermeasures for the water management aimed at coexisting with the water users in the river basin.