ダイニン水力発電プロジェクトー TBM による導水路トンネル掘削・ライニング同時施工

DAI NINH HYDROPOWER PROJECT – CONSTRUCTION OF HEADRACE TUNNEL BY USING TBM WITH SIMULTANEOUS INSTALLTION OF LINING SEGMENTS

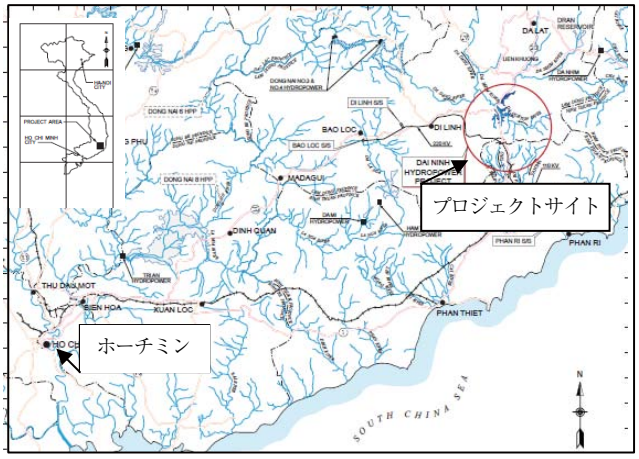
中川　誠 *・宮里達也 **
Makoto NAKAGAWA and Tatsuya MIYAZATO

The Dai Ninh Hydropower Project has a capacity of 300 MW and was implemented to cope with the rapid increase in power demand in Vietnam. The main activity on the critical path was the construction of an 11 km long headrace tunnel. The upstream 7 km section was constructed using TBM with simultaneous installation of lining segments in order to put the Project into the national grid within the shortest possible time. It took 18 months for the breakthrough of the 7 km section after launching the TBM, which was 2 months ahead of schedule. This paper outlines the construction of the headrace tunnel by TBM with simultaneous installation of lining segments.

Keywords : *headrace tunnel, TBM, segment lining*

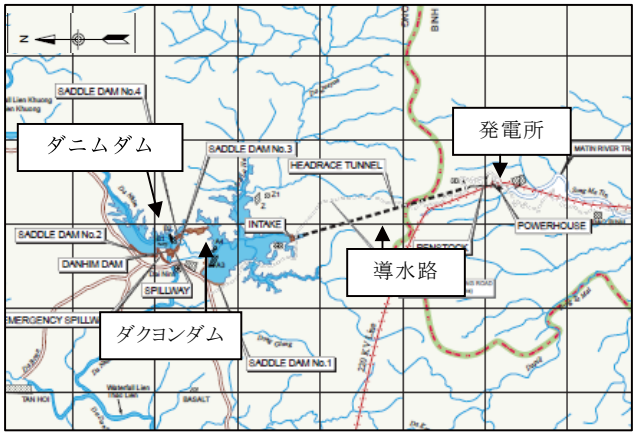
1.　はじめに

ダイニン水力発電所は**図－1** に示すようにベトナム国ホーチミン市から北東に約 260km のところに位置する。プロジェクトはラムドン省ドンナイ河流域からビントアン省に導水（流域変更）して年間 1,178GWh（設備容量 300MW）のピーク発電を目的としている。貯水池有効容量 2 億 5 千万 m^3、平均流入量 26.8m^3/s、発電最大使用水量 55.4m^3/s、総落差 670m である。ダイニン発電所からの放流水は下流域の発電所使用水、灌漑用水として有効再利用される。



図－1　プロジェクト位置図

主要構造物は、2 つの主ダム（ダニムダムとダクヨンダム）、4 つのサドルダム、洪水吐（容量 7,445m^3/s）、貯水池連結水路（延長 2.5km）、取水路（延長 1.6km）、取水口、導水路トンネル（内径 4.5-4.65m、延長 11.2km）、上部水室調圧水槽、鉄管路（内径 3.2m、延長 1.8km）、発電所（地上式）、放水路トンネル（幅 5.5m、高さ 7.5m、延長 680m）、下流河川改修（延長 9.5km）、開閉所、変電所（220kV/500kV）、220kV 送電線（延長 41km）、110kV 送電線（延長 46km）である。プロジェクトのレイアウト平面を**図－2** に示す。



図－2　プロジェクトレイアウト

ダイニン発電所にて発電された電力は 220kV 送電線を通してドンナイ省ディリン変電所に送られ 500kV に昇圧され基幹 500kV 送電線にのせられる。110kV 送電線はビントアン省ファンリ変電所につながれる。

ダイニン水力発電計画のフィージビリティスタディ

*　コンサルタント海外事業本部
**　コンサルタント海外事業本部　アサハン 3 開発事務所

は 1993 年から 1994 年にかけてベトナム電力庁の子会社（Power Investigation and Design Company No.2）により実施され、1994 年から 1995 年にかけてコンサルタント会社のソグレア社（フランス）とラバリン社（カナダ）の共同企業体によりレビューが行われた。1996 年から 1998 年にかけては、世銀資金にて同企業体が基本設計と入札書類の作成を行った。その後、ベトナム政府は工事資金を日本の円借款に求め、2001 年から日本工営・電源開発の共同企業体が入札設計・書類の見直しを行い、引き続き 2003 年 5 月からの工事開始に伴い施工管理を行った。2007 年にほとんどの工事を終了し、本年 1 月から発電を開始している。

写真－１　ダニムダム

写真－２　発電所

実施主体はベトナム電力庁で、実際の実施管理はベトナム電力庁の建設担当組織であり過去に円借款にて実施されたハムトアン・ダミ水力発電の実施管理を行った水力発電第 6 建設局が担当した。本体工事契約は以下に示すように 7 つの契約からなる。

表－１　契約パッケージ

契約	内容	コントラクタ
CW1	土木工事（導水路、発電所）	鹿島・熊谷・ソンダ JV
CW2	土木工事（ダム）	ハザマ
ME1	ゲート・鉄管工事	IHI- 酒井鉄鋼 JV
ME2	水車・発電機工事	東芝―双日 JV
TL1	送電線資材供給	9 分割契約
TL2	送電線工事	Power Construction Company 1（ベトナム）
TL3	変電所工事	住友― AE Power JV

ダイニン水力発電計画の導水路トンネルはベトナム国で最長のトンネルであり、全長 11.2km のうち上流 7.05km の区間をセグメント同時ライニングの TBM で施工を行った。TBM での施工はベトナムで初めてのものであり、セグメントライニング同時施工は日本工営が関与した発電水力計画では初めてのものである。

2.　導水路地質概要

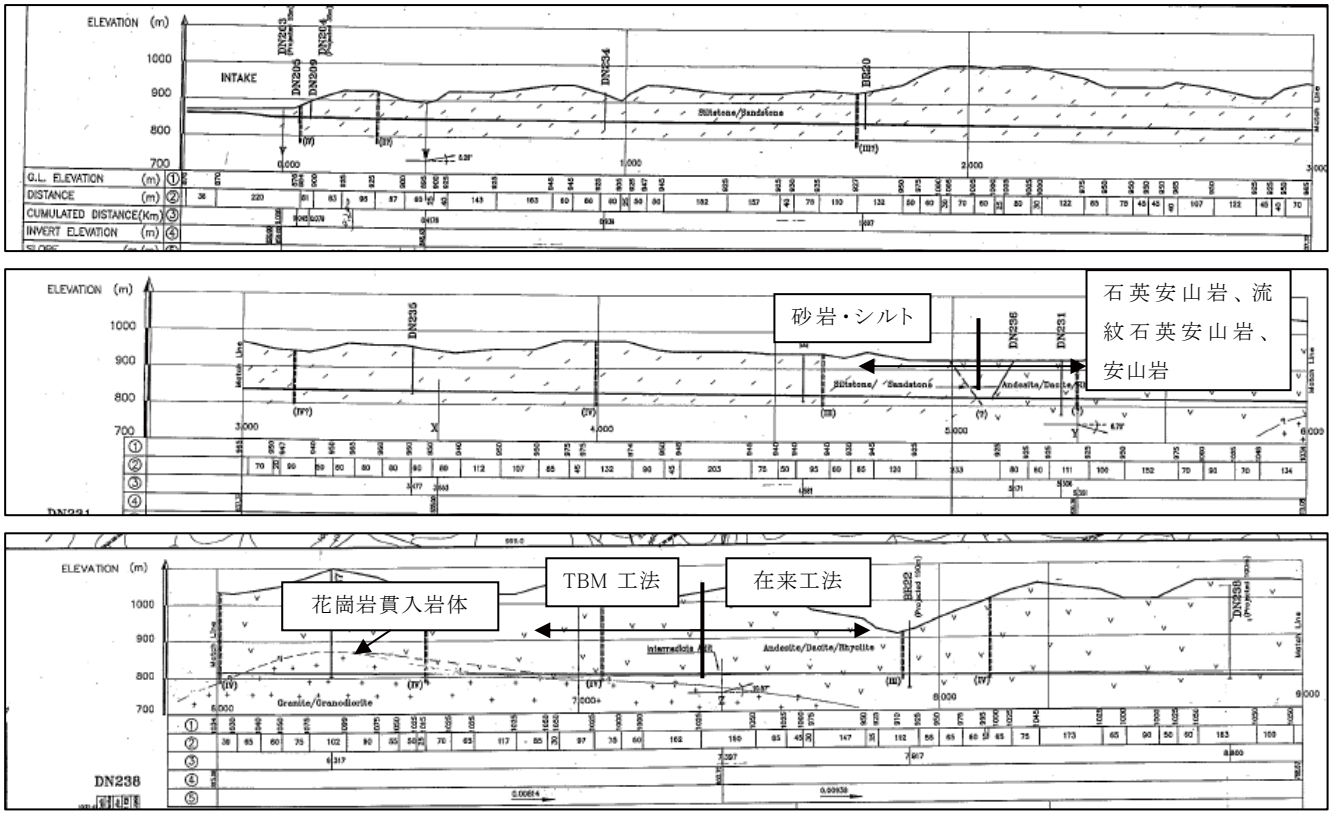
取水口から 9km までの導水路地質縦断を**図－３**に示す。取水口から下流 5.1km 区間はジュラ紀の砂岩とシルト岩の互層からなり、砂岩が卓越している。地山被りは 50-160m で、トンネル部は新鮮な砂岩・シルト岩である。この区間の岩の一軸圧縮強度は砂岩が 40-75MPa、シルト岩が 30-50MPa である。この 5.1km を過ぎて 9.7km までは白亜紀の石英安山岩、流紋石英安山岩、安山岩から成り、トンネルの一部はジュラ紀の花崗岩貫入岩体を通る。この区間の地山被りは 100-300m で、岩の強度は 110-120MPa である。花崗岩貫入岩体は 130-140MPa である。

雨季の地下水位は地表から 2-5m から 10-15m、乾季においては 5-10m から 25-30m の範囲にあり、全長にわたり運転時トンネル内水圧よりも高い位置にある。これは重要な事項であり、運転時トンネル内水圧が外水圧より高い場合にはライニングの安定上セグメントライニングの採用はできなかった。

断層部を除いて透水性は低く、上流部 5.1km 区間の堆積岩（砂岩・シルト岩）のルジオン値は 0.1-5、その下流の火山岩区間は平均的に 2 である。

導水路トンネルを対象として実施されたボーリングは 16 本、総延長は 2,055m である。物理探査は 4 本、総延長 1,750m である。調査時点では大小合わせて 14 本の断層が想定されていたが、トンネル建設に対して大きな問題とはならないと判断されていた。実際の工事においては一部の断層部で湧水に遭遇したが、とくに大きな問題となるような断層には遭遇しなかった。工事開始後に追加調査として 5.1km 地点での堆積岩層と火山岩層の境界部地質状況把握のために地表から 3 本（計 370m）のボーリング、トンネル切羽から先進調査ボーリング（244 m）を入れて境

界部の地質を確認した。境界層は軽度の風化作用を受けていたが TBM 進捗には影響なく順調に進めることができた。



図－3　導水路地質縦断

3. TBM 工法採用の経緯

1996 年から 1998 年に行われたソグレア社とラバリン社（以後前任コンサルと呼ぶ）による基本設計では、在来工法と TBM 工法の 2 案が提案され入札者に選択が委ねられる計画であった。ベトナム国の電力供給不足に対応するため出来るだけ短期間に工事を終わらせたいとのベトナム側の要請に基づき両案とも着工命令からトンネル作業坑の閉塞まで 49 ケ月の計画であった。

在来工法案の掘削にはロードヘッダー、ライニングにはテレスコピック型枠を使う案であったが、地形的に中間横坑はトンネル上流始点から 7.25km の位置に 1 本しかつけられないため 2001 年の日本工営・電源開発によるレビューにおいて在来工法ではこの期間を満たせないと結論づけ、TBM 工法と在来工法の並行案を採用した。前任コンサルの TBM 案は下流作業横坑から取水口まで 10.7km を TBM で掘削・セグメントライニングを行う案であったが、以下の理由で中間横坑より上流 7.05km に TBM を採用し、中間横坑より下流 4.2km（調圧水槽から下流の鉄管トンネル 0.45km を含む）に対しては在来発破工法を採用することとした。

- 導水路トンネルの建設がダイニン水力発電完成へのクリティカルパスである。
- TBM 掘進速度は上流 5.05km 区間（砂岩・シルト岩）で 650m/ 月、下流 5.65m 区間（石英安山岩、流紋石英安山岩、安山岩）で 440m/ 月とする前任コンサルの計画であったが、地質状況・サイクルタイムに基づいたレビューの結果それぞれ 440m/ 月、340m/ 月に計画を変更。
- 着工命令から 49 ケ月で横坑閉塞を終了させるために、TBM 工法区間を中間横坑から上流部のみとして、上流側 TBM 掘削と同時に下流側は在来工法で掘削する。
- ベトナムのトンネルサブコンの在来工法技術移転のため、TBM 工法だけではなく在来工法も取り入れて欲しいとのベトナム側の希望があった。

4. ライニングセグメントの設計と製作

セグメントライニングの主目的は緩み荷重・外水圧の支保、粗度係数の改善であり、内水圧は支保しない（調査時のボーリングデータにより運転時トンネル内水圧より高いことが判明していた）。

仕様書にはライニングセグメントは内径 4.65m、厚さ 0.3m、コンクリート圧縮強度の 45MPa と規定され、更にその設計荷重条件が記されており、その他はコントラクタが設計してエンジニアの承認を得るように規定されてい

る。設計荷重条件は以下のとおりである。

外　　圧：① 1,100kPa（上流部 5,400m 区間および断層部、セグメントは止水のためにガスケットを設ける）
② 800kPa（上記以外の区間、セグメントにはドレインホールを設ける）
上流部 5,100m 区間の地表には田んぼがあるため、地下水低下を防ぐためにセグメントのジョイントにはガスケットを入れて止水性を高めている。

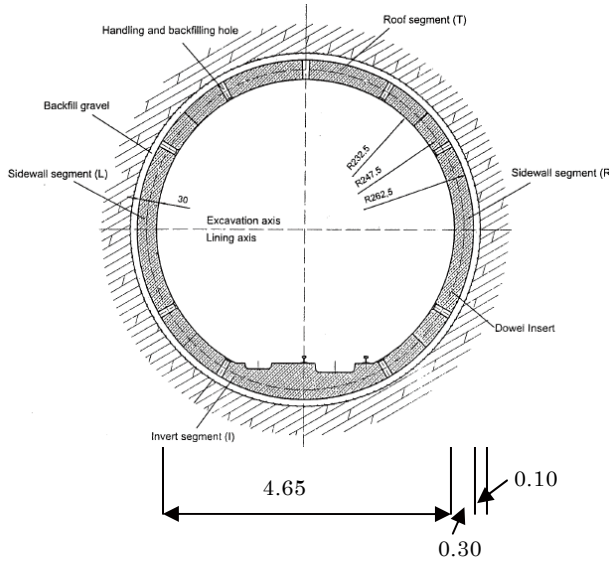
緩 み 荷 重：トンネル径 2 倍の高さに相当する岩荷重（水中重量分）

岩膨張荷重：0.15MPa

そ　の　他：TBM 推進、輸送、据付、グラウト等の一時的荷重

セグメントの幅は TBM の推進ストローク 1.45m を考慮して 1.3m とし、1 リング 4 ピース、形状は**図－4** のように天端とインバートのピースを台形、左右のピースを平行四辺形とした。

図－4　セグメント展開図



図－5　セグメント断面図

インバートはレールを直に敷設できるように幅 2.1m 部分を平らにして、レールではさまれる部分には排水溝を設けた。リング間の継手にはダウエルピンを使用し、ピース間の継手は斜めボルト構造と、ガスケットには水膨張製ゴムシールを使用した。

セグメントは坑口から約 3km 離れたヤードにバッチングプラント、鉄筋加工組み立て場、24 の鋼製モールド、蒸気養生設備、養生水槽、仮置き場を備えた工場で製作した。一日に 48 セグメント（12 リング）を製作した。全製作数は 5,432 リングである。セグメントの供給がクリティカルにならないよう約 400 リングを TBM 掘進開始前に製作しておいた。

5.　TBM と掘削

使われた TBM は 1998 年製作のもので中国の水力発電建設に使われたものを改造したもので、主要緒元は以下の通りである。

表－2　TBM 諸元

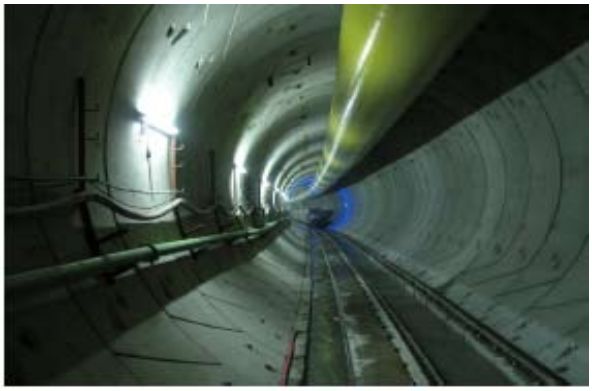
形式	フルシールド（ダブルテレスコピック）	カッタ数	38 個
掘削径	5.48m	モーター出力	6 × 250kW
機体長	12.4m	カッタトルク	2,600kNm（定格）
バックアップ長	180m	推進力	16,000kN
本体総重量	450t	推進ストローク	1.45m
総出力	1,500kW	メイングリッパ形式	水平対向
ずり出し方式	ずり鋼車	グリッパ力	27,200kN
カッタ径	17 インチ		

TBM は**写真－3** のように坑口ヤードにて組み立て、組み立て後にジャッキアップしてドーリーに乗せトラック牽引で坑内に入れ込んだ。

写真－3　TBM 組み立て

ずり出しはレール・鋼車式で行った。3 列車を使用し、各列車にはディーゼル機関車、10 両のズリ運搬車（11m^3/1 車）、4 両のセグメント運搬車、2 両のピーグラベル運搬車、1 両の平積車、1 両の作業員運搬車が連結されている。この編成は 2.6m 掘削進行（セグメント 2 リング分）に対する編成である。掘削は 3 シフトで行い、1 シフトの作業時間は 10 時間とし、シフト 1 とシフト 2 の一部をラップしてシフト 1 クルーの後半は主にメインテナンスにあてた。

写真－ 4 セグメントインバート据付

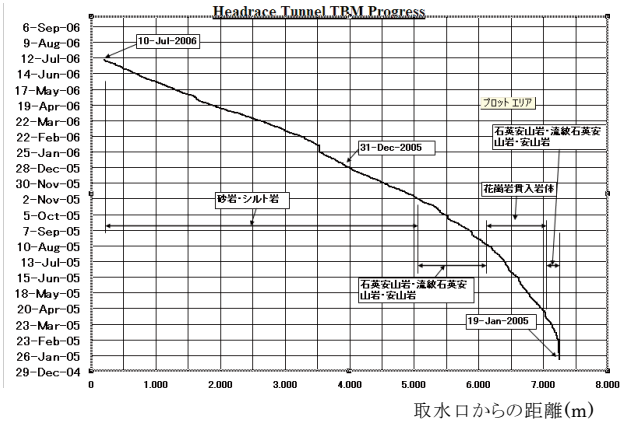


写真－ 5 セグメントライニング

写真－ 6 TBM 貫通

掘削進捗は**図－ 6** に示される通りである。

掘進開始から完了まで 7,057m の掘削・セグメントライニングに 18 ケ月を要した。花崗岩貫入岩体部の進捗は 194m/30 日、火山岩区間は 381m/30 日、堆積岩区間は 585m/30 日であった。花崗岩貫入岩体部での進捗が低かったのはビット磨耗だけでなく、初期段階での作業員の不慣れや TBM の推進能力が花崗岩に対して十分ではなかったことが上げられる。推進負荷のためにジャッキの油圧シール破損、電機系統トラブルも発生した。堆積岩部での進捗は順調で花崗岩部での遅れを取り戻す事ができた。最大進捗は、37.1m/ 日、225.1m/7 日、812.2m/30 日であった。月平均進捗は 392m である。



図－ 6 TBM 掘削実績

掘削完了後の TBM 搬出は導水路始点から 200m の所を拡幅してカッタヘッドを分解し、カッタヘッドは上流側から、その他はバックアップ設備を含めて下流側から搬出した。

6. グラウト工事

セグメントライニングと地山の 10cm 幅のスペースの裏込めグラウトと地山改良のコンソリデーショングラウトの 2 種類のグラウトを行った。裏込めグラウトは粒径 5-12.5mm のピーグラベルをセグメント建て込みと同時にセグメント裏に充填して、その後セメントミルク（W:C=0.7:1.0）を圧 0.1MPa で注入した。注入後湧水が見られる注入口は再穿孔し、湧水圧＋ 0.1MPa の圧で再注入を行った。掘削時に湧水に遭遇した部分に対してはコンソリデーシオングラウトを行った。注入圧は湧水圧 +0.3MPa とした。コンソリデーショングラウトを行った区間は全部で 280m である。

7. トンネルの初期充水

導水路トンネルの地山としては被りも十分あり良好な地山ではあるが、初期充水は慎重を期して①セグメントライニング部、在来工法部共に水位上昇は 1m/ 時、10m/ 日を目標とする、②セグメントライニング部の水位上昇は 2m/ 時、15m/ 日を上限とする、③在来工法部の水位上昇は 3m/ 時、20m/ 日を上限とするとの基準を設けた。トンネル終点の標高が 763 m であるので貯水位標高 880m まで 117m の高さを充水した。充水は 2007 年 10 月 16 日に開始したが、その時のトンネル内への地山からの流水量は 170 リッタ / 秒であった。水位が上昇するにつれ流入量は減少し、トンネル内水位が初めて 870m に達した 10 月 26 日には逆にトンネルから流出している水量が 105 リッタ / 秒となった。10 月 30 日に貯水位まで充水し、この水

位を継続し 11 月 6 日にゲートを閉めてトンネル内水位を観測したところ 5.6 リッタ / 秒の流入量に対応する水位上昇が観測された。地下水位は全般的に貯水位より高くなり、セグメントの設計条件（内圧を考えていない）を満たしたと考えられる。

8. 終わりに

ダイニン水力発電プロジェクトの建設は 2003 年 5 月に工事を開始してほぼ予定通り 2007 年末に 2 号機が 150MW の発電を開始し、2008 年 3 月からは 1 号機も 150MW の発電を開始した。工事のクリティカルパス上にあったのは 11km に及ぶ導水路トンネルの建設であったが、地質調査で得た情報と実際に遭遇した地質状況に大きな違いはなく、おおむね順調に進捗した。上流部 7.05km のセグメント同時ライニング TBM 施工は、掘進開始からしばらくは現地作業員の不慣れ、機械故障（油圧機械と電気関係）、硬い花崗岩のために進捗は思うようにあがらず焦りを感じていたが、その後堆積岩部に入ると進捗が伸びて計画より 2 ケ月早い貫通を達することができた。
当プロジェクトの導水路トンネルはベトナム国で一番長いトンネルであり、初めての TBM 施工、初めてのセグメントライニング施工のトンネルである。セグメント同時ライニング TBM 施工の目的は工期をできるだけ短縮して増加する電力需要に対応することであったが、その目的は達せられた。

当プロジェクトでは導水路全長にわたり地下水位が導水路内圧よりも高い位置にあることを計画段階の調査で確認していた。セグメントの設計では外圧のみを考慮し、内圧は設計荷重として考えていない。内圧を設計荷重として考慮しなければならない導水路トンネルに対してセグメントを採用する場合にはセグメントの安定を十分に考慮する必要があろう。

設計のレビューにおいて 11km の導水路のうち約 6km の火山岩部と花崗岩部の大半はライニングを行わない案を施主に提案したが、ベトナム国ではライニングを設けない圧力導水路は認められないといって受け入れられなかった。基本設計を変更するには政府承認が必要で、承認を取るには多大な説明書類と時間が必要となるため、敢えて提案を退けたとも受け取れる。もし実現していると、安全性を損なうことなく費用が軽減され、工期は短縮できたものと考えている。

謝辞：プロジェクト実施に尽力された、ベトナム電力庁、電力庁水力第 6 建設局、各コントラクタ、ダイニン水力の設計・施工管理関係者一同に心から感謝いたします。