

ムシ水力発電所の建設 (インドネシアでの地下発電所建設)

馬場孝治^{1*}・川島基義¹・横山茂仁¹

¹ 日本工営株式会社 コンサルタント海外事業本部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2)
*E-mail : a1354@n-koei.co.jp

ムシ水力発電所の建設は、インドネシア スマトラ島の大河川ムシ河上流に位置し、インド洋に注ぐシンパンアウル川に転流することで得られる落差400mを利用して210MW (3台×70MW) の設備を有し、年間1,140GWhの発電を行う事業である。近くをスマトラ大断層 (Sumatra Fault) が通っているにも拘らず、構造物の建設は大きな問題なく完成した。特に地下発電所の地質は良好で、工事初期に行った現位置岩盤試験でも、当初設計時より良好な物性値が確認されたため、当初設計の岩盤支保工を減少させた。1997-1998年にインドネシアを襲った経済危機時に水車発電機の契約・工事が遅延したため、発電所の土木構造物を設計変更し、一部を水車契約に組み込み完成させた。

Key Word : *Underground powerhouse, Sumatra fault, In-situ test, Economic crisis*

1. 概要

ムシ水力発電所はインドネシア国 スマトラ島南部のブンクル州に位置し、南スマトラ地域の電力需要を満たすために計画・建設された流れ込み式発電所で、70MW×3台の水車・発電機が設置され、総出力210MW、年間発電量は1,140GWhと計画されている。

取水ダムはスマトラ島屈指の大河川ムシ河の上流に建設され、地下発電所を通じて発電に利用された水はインド洋に注ぐ小河川シンパンアウル河に放流される。所謂、流域変更方式の発電所である。

取水ダム近辺をスマトラ断層が通過しており、活火山、温泉も近在しており、火山性の複雑な地質状況を呈しているが、建設中大きな問題も無く、無事建設を完了した。

2. 経緯

ムシ水力発電所は1965年に日本工営が実施した総合水資源開発計画の中で立案された。その後1983-1984年に世界開発銀行 (世銀) の資金で事業化調査が実施され、

経済的・技術的に事業の妥当性が確認された。インドネシアの国営電力会社PLNは、アジア開発銀行 (ADB) の借款により1991-1993年に詳細設計を実施した。

建設資金は土木工事および施工管理 (コンサルタントサービス) はADB借款、水車・発電機については当初オーストリアの輸出信用借款が充当されることになった。

工事は1994年12月に工事用取り付け道路、宿舍の準備工事の建設で開始され、本体土木工事は1996年7月に開始され2001年完成の予定であった。1997-1998年にインドネシアを襲った経済危機により建設中断の危機に直面したが、何とか乗り越え2006年5月に10年の歳月を費やし完成した。

3. ムシ発電所の概要

ムシ水力発電所はスマトラ島の脊梁山脈であるバリサン山脈の急峻な地形を利用し計画された。ムシ発電所はスマトラ島屈指の大川でマラッカ海峡に流れるムシ河の最上流部に位置する。主要構造物としてムシ河に取水ダムが建設され、取水された最大62.0m³/sの水は、直径5.0m、長さ2.6kmの導水路トンネル、全長588mの鉄管路で地下発

電所に導かれる。

ここで得られた総落差40mを利用して、最大210MW (70MW×3台)、年間1,140GWhの発電が行われる。発電に使われた水は、直径5.1m、長さ4.0kmの放水路トンネルを経て、インド洋に注ぐ小河川 シンパンアウル川に放流される。シンパンアウル川には発電形式が6時間のピーク発電のため、放流された水の平滑化のため逆調整池が設けられている。

ムシ水力発電所の位置を図-1および図-2に平面・縦断を図-3示す。また各構造物の諸元を以下に示す。



図-1 ムシ発電所位置図

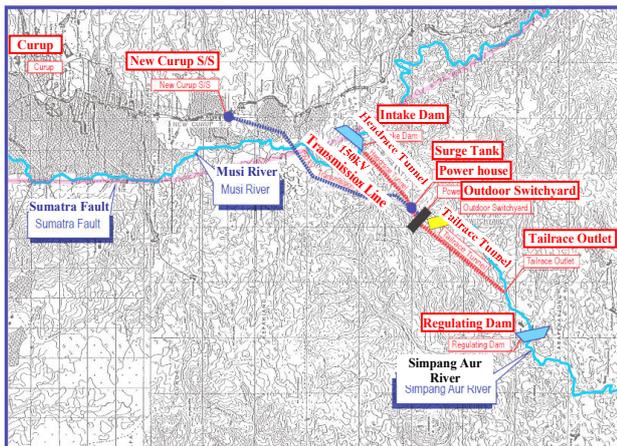


図-2 構造物配置図

表-1 ムシ河の取水ダム地点での水文資料

集水面積	587 km ²
年平均降雨量	3,100 mm

表-2 発電運転概要

a) 水位	
貯水池運転最高水位	標高 579.000 m
貯水池運転最低水位	標高 578.000 m
放水位	標高 174.700 m
有効落差	396.4 m
b) 流量	
平均発電流量	38.4 m ³ /sec
発電最大流量	62.0 m ³ /sec
c) 発電容量・発電量	
設備容量	210 MW (= 70 MW×3 units)
年間発電量	1,140 GWh

表-3 主要土木構造物諸元

a) 取水ダム		
有効貯水量	1.0×10 ⁶ m ³	
形式	鋼製門扉つきコンクリートダム	
ダム天端高	標高 572.500 m	
b) 沈砂池		
幅	28.0 m×2 池	
長さ	45.0 m	
c) 導水路トンネル		
形式	圧力式コンクリート巻き立て円形断面	
内径	5.0 m	
長さ	2,578 m	
d) 導水路調圧水槽		
形式	制水口形式	
水槽内径	10.0 m	
e) 鉄管路		
形式	斜坑内張り管	
内径	4.5 から 1.6 m	
長さ	588 m	
f) 発電所		
形式	地下形式、弾頭型 左側に主変圧器を配置	
寸法	18.5 m 幅×38.3 m 高×130.5 m 長	
g) 放水路トンネル		
形式	無圧式コンクリート巻き立て円形断面	
内径	5.1 m	
長さ	4,030 m	
h) 逆調整池ダム		
年平均流量	2.2 m ³ /sec	
有効貯水量	1.0×10 ⁶ m ³	
最高運用水位	標高 157.500 m	
天端高	標高 159.000 m	
寸法	16.0 m 高×23.0 m 幅	

表-4 発電機器

a) 水車		
形式	縦軸フランシス水車	
台数	3 台	
定格出力	73,600 kW	
定格回転数	500 rpm	
b) 発電機		
形式	3-相、縦軸在来形式	
台数	3 台	
定格出力	85,000 kVA	
周波数	50 Hz	

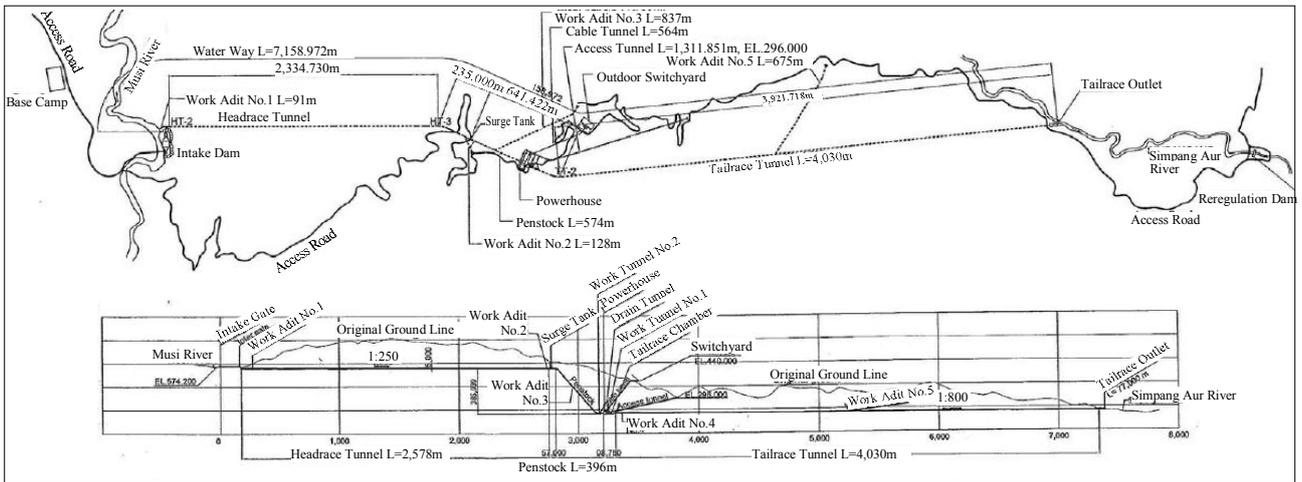


図-3 平面・縦断面図



写真-1 取水ダム及び沈砂池

右30m付近から左側主変圧器室へ広く分布している。その中に50m付近から主変圧器室にかけて砂岩・頁岩が介在している。数mmから数cmの方解石を含むフィシヤが発電所中央主器室付近を中心に分布している。フィシヤは一部粘土化し軟弱となっているが、全体的には堅固である。フィシヤおよび節理の主な走向傾斜はN60° - 70° W/70° - 80° NEで、もう一方はN70° E/35° Nである。(発電所の方向はN20° W)

発電所での湧水は僅か2箇所で見られ、湧水量は毎分数リットルであった。しかし火山活動の影響を受けていると思われる水温は43°Cを記録した。岩盤温度も搬入路トンネルが深部に進むにつれて上昇し、発電所では上記水温とほぼ同じとなった。

4. 地形・地質

ムシ発電所の位置するバリサン山脈は、インド洋プレートの圧力で形成された山脈で、多くの火山を有している。スマトラ島を縦断するスマトラ断層がバリサン山脈と平行して走っており、取水ダム付近のムシ河は断層の上を流下している。ムシ河左岸は火山活動による火山噴出物がバリサン山脈にせき止められ、比較的平坦な地形を示している。右岸は急峻な山脈でインド洋に到る。またこの地域はプレート活動により、地震も多発している。

発電所地域は火山性の複雑な地質を示している。一般的な地質構造は頁岩および砂岩の互層による基岩に閃緑岩が貫入している。またその上に火山性の凝灰岩、角礫岩が積み重なっている。

取水ダム付近の地質は火山性の角礫岩および凝灰岩で形成され、安山岩の転石が散在している。水路および発電所の地質は、導水路トンネルの最上流200mは取水ダムと同じ地質を示し、その下流側、水圧鉄管路、地下発電所、放水路トンネルは、ほぼ閃緑岩で形成されている。

主要地下構造物である地下発電所は地下約350mに位置し、地表とは1,300m長の搬入路トンネルで連絡している。発電所の地質は閃緑岩、自破碎状閃緑岩、砂岩、頁岩から構成されており、岩級区分はIからBに区分され、部分的にCM級の岩盤があったが全体的に良好な地質であった。

閃緑岩は右妻壁側30m程度に分布し、自破碎状閃緑岩は

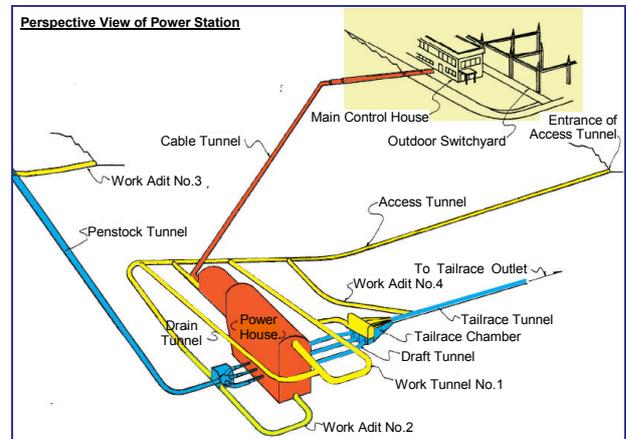


図-4 地下発電所鳥瞰図

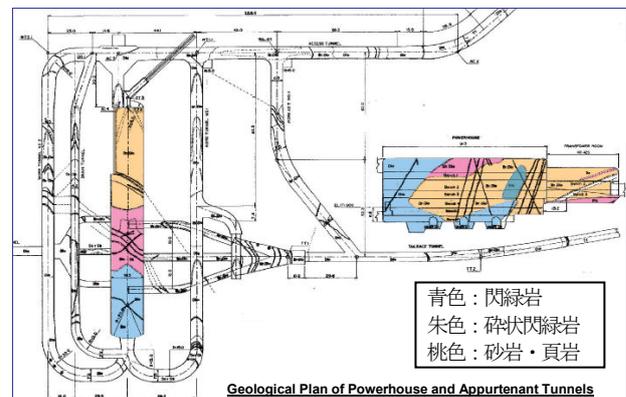


図-5 発電所付近地質図

5. 発電所の現位置岩盤試験及び空洞解析

海外の工事では、調査・設計の予算・期間が充分でないことが多く、地下発電所などの現位置岩盤地試験は工事開始されてから実施されることが多い。ムシ発電所では調査・設計時点では2本のボーリングと物理探査を行い、その結果で地下空洞解析・設計を進め、工事開始後、搬入トンネルが発電所付近まで掘り進んだ時点で、発電所左側妻壁付近および下流側放水路ゲート室近傍で原位置岩盤試験を実施し、その結果を以って地下化空洞解析を再度実施し、必要な設計変更を行った。原位置試験項目は、

大型せん断試験	3箇所
平板載荷試験	3箇所
初期応力計測	3箇所
室内試験（ボーリングコア）	45個

上述したように実際の地質状況は調査・設計時の想定より良好であった。原位置岩盤試験の結果から、または現場岩盤観測の結果、地下空洞解析に採用した物性値、解析結果は以下の通りである。

(1) 初期応力

計測初期応力: $\sigma_1=11.4\text{MPa}$, $\sigma_2=5.00\text{MPa}$, $\sigma_3=2.70\text{MPa}$
 解析に用いた初期応力:
 $\sigma_x=6.40\text{MPa}$, $\sigma_y=9.99\text{MPa}$, $\tau_{xy}=2.65\text{MPa}$

(2) 各岩盤の物性値

表—5 岩盤の物性値

岩盤	単位重量 kN/m ³	一軸圧縮 強さ MPa	変形係数 MPa	ポアソン比
閃緑岩	26.7	4.50	4,000	0.26
自破碎状 閃緑岩	26.7	4.50	4,000	0.26
堆積岩	26.7	4.50	4,000	0.26
フィシャ	23.0	2.00	300	0.40

岩盤	せん断強 さ MPa	内部摩擦角 deg.	引張強さ (推定) MPa
閃緑岩	5.0	55	1.6 - 2.5
自破碎状 閃緑岩	5.0	55	1.6 - 2.5
堆積岩	5.0	55	1.6 - 2.5
フィシャ	0.16 - 0.31	24	0.06 - 0.12

(3) 解析ケース

地下発電所周辺トンネル（工用トンネル及び排水トンネル）掘削時の地質観測結果から、フィシャの間隔を5.5m（原設計と同じ）と11.0mの2ケース行った。

(4) 解析結果

解析は2次元FEMにより、発電所周囲岩盤の応力分布、変位、緩み領域（点安全率1.2以下）を算出した。以下に

最大応力と最大変位を示す。

表—6 2次元FEMの解析結果

ケース	応力			変位	
	領域	数値	位置	数値	位置
Case 1: f=5.5m	緩み領域	32.3 MPa	アーチ	118	側壁
	緩み領域外	21.7 MPa	底部	mm	EL.175.5m
Case 2: f=11.0m	緩み領域	38.3 MPa	アーチ	114	側壁
	緩み領域外	21.5 MPa	底部	mm	EL.175.5m

また、推定した緩み領域を安定化させるための必要岩盤緊張工をすべり解析で計算した。

物性値が当初設計値より良かったことと、フィシャの間隔が11mの部分が増加したため、岩盤緊張工（PS Rock Anchor）は大幅に減ることが出来た。以下に当初設計と変更した岩盤緊張工の比較を示す。また図-6に岩盤緊張工の標準配置を示す。

表—7 岩盤緊張工の変更設計

岩盤緊張工	挿入本数	
	原設計	変更設計
P.S. アンカー (L=14m, T=1,000kN)	966	501
P.S. アンカー (L=15m, T=1,000kN)	0	74
P.S. アンカー (L=12m, T=1,000kN)	405	376
P.S. アンカー (L=9m, T=1,000kN)	353	198
P.S. アンカー (L=13m, T=600kN)	89	29
P.S. アンカー (L=11m, T=600kN)	80	0
P.S. アンカー (L=7.5m, T=600kN)	44	0
ロックボルト	1,714 (L=5m)	2,655 (L=4m)



写真—2 PS アンカー挿入作業

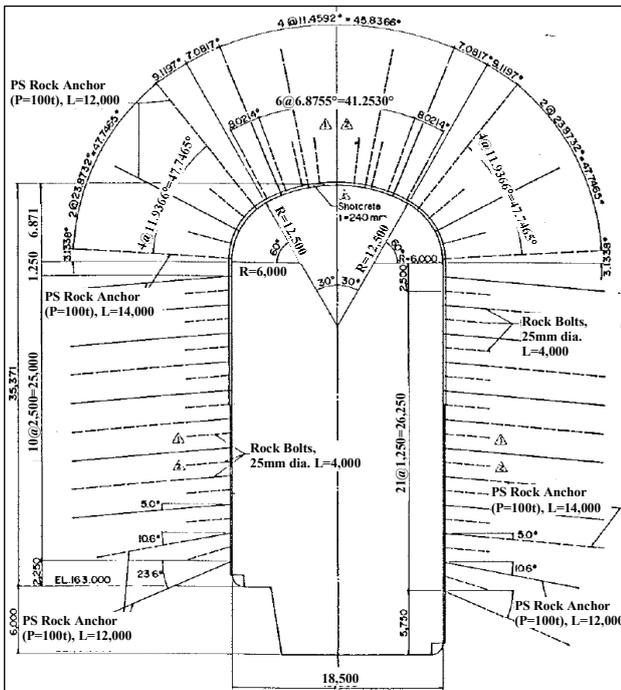


図-6 発電所岩盤緊張工配置図

6. インドネシアの経済危機

1997-1998年インドネシアを襲った経済危機により、インドネシア政府は財政建て直しを迫られ、その一環として各種プロジェクトの実施の見直しがされた。ムシ発電所も水車・発電機のオーストリアの輸出信用借款が紐付きで割高と判断され、見直し必要プロジェクトとされた。

土木工事は1996年7月に開始され2001年7月竣工予定で進行中であったが、一部中断し、大幅な遅延となり、最終的に2003年3月に完了した。また契約調印されていた鉄鋼工事（鋼製門扉、水圧鉄管など）は1年遅れて1999年3月に開始され、2002年12月に完成した。

水車・発電機工事は紆余曲折を経て、最終的にアジア開発銀行がその建設資金を貸与することになった。入札図書・方式が当初のオーストリア借款と異なるため、また土木工事の工程と合致しないため、設計・入札図書の大幅な変更後、2001年10月に入札が開始された。2003年8月に工事が開始され、2006年5月に試験運転が終了し、営業運転が開始された。

当初予定工程と実際の工程を図-7に示す。

7. 発電所の設計変更

上記インドネシアの経済危機により、発電所土木工事と水車発電機工事は大きな乖離を生じ、土木工事契約を水車発電機工事に合わせて延長することは多額な追加費用を発生する事になる恐れがあるため、発電所内コンクリート工事を2段階に分け施工する事とし、土木工事契約から、水車・発電機周りの2次コンクリート、および関連制御機器の基礎となるスラブのコンクリートを除外した（第1段階工事）。除外した部分を水車工事契約に編入した（第2段階工事）。したがって図-8～9に示すよう、第1段階としては発電所の土木工事はその骨格だけとなり、電気工用の天井クレーンの据付が可能な状態まで建設した。構造計算もこのような骨格だけで安全を確保できるように行い、鉄筋量などを変更した。同様に第2段階の構造も安全を検討した。

また水車工事契約にコンクリート工事等土木工事が組み込まれることになり、その仕様書や支払い条項に工夫を要した。

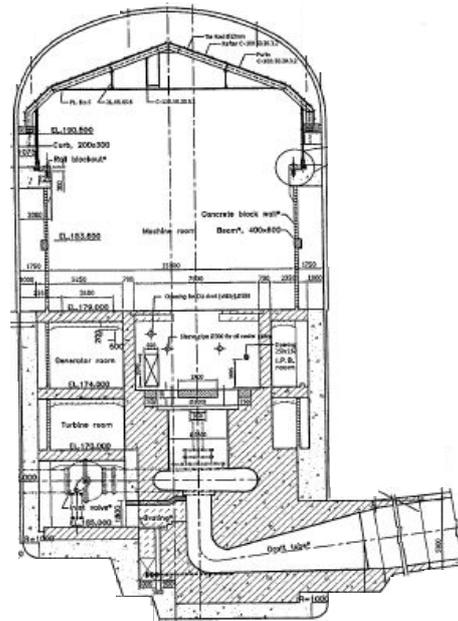


図-8 発電所横断面図(斜線部が第2段階施工)

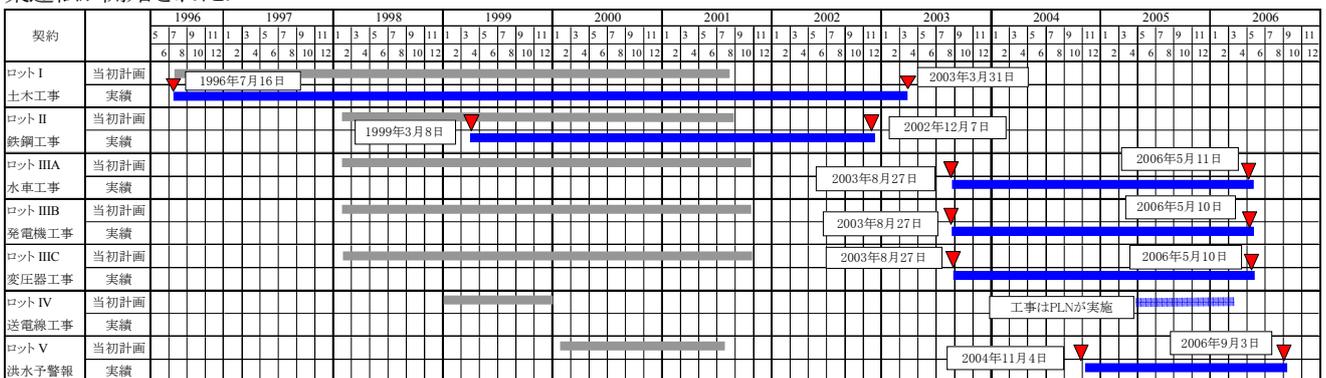


図-7 計画および実績工程

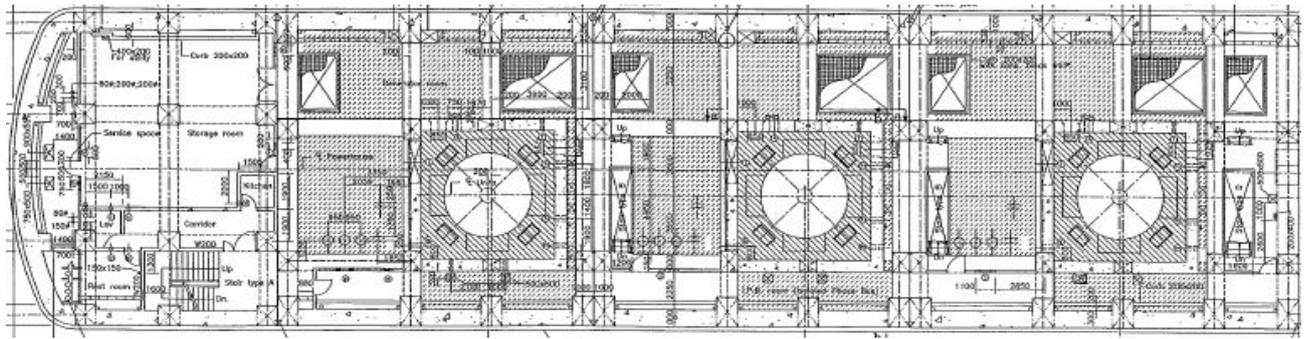


図-9 発電所平面図(斜線部が第2段階施工)

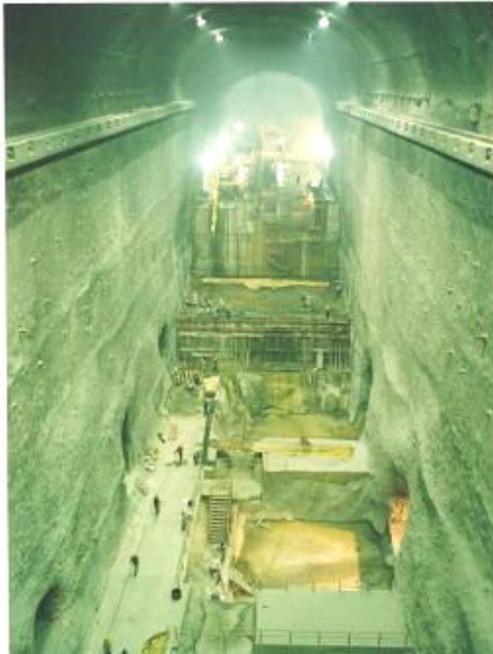


写真-3 コンクリート打設状況

8. おわりに

ムシ発電所の位置するスマトラ島インド洋岸は地震の多いことで知られる。工事中2000年6月4日ブンクル州 州都ブンクル市南約110kmのインド洋を震源とし、マグニチュード7.6の大地震が発生した。ブンクル市では100名を超える犠牲者が出たが、工事現場（ブンクルの北東約30 km）では、宿舍のレンガ造りの間仕切壁が崩落した程度で幸い負傷者は出なかった。発電所構造物にも全く損傷はなかった。その後も2005年12月のアチェにおける津波被害を出した地震や、2007年にも被害者を出す地震が発生している。しかしこれまでに発電所構造物に被害は発生していない。ムシ発電所は現在も順調に発電しており、ブンクル州及び南スマトラ地域への電力供給を通じて、地域の経済発展、民生の福祉に寄与している。

CONSTRUCTION OF MUSI HYDROELECTRIC POWER STATION

Koji BABA, Motoyoshi KAWASHIMA, Shigehito YOKOYAMA

The Musi Hydroelectric Power Station is located in the Musi River in Sumatra and equips 3 x 70MW generators with power output of 1,140 GWh/year. Even though the Sumatra fault runs near by the project site, the construction works has been completed successfully. The in-situ rock tests in the construction stage indicated better mechanical properties than one in the design stage, consequently the rock anchor works can be reduced. Owing to the economic crisis in 1997 to 1998, the Project was suspended and possible to be stopped. The design revisions on the powerhouse and modification of contracts on both Civil and Electro-mechanical works were made and the powerhouse has been completed.