

アッパーチソカン揚水発電所の計画と設計

山岡 暁^{1*}・丸 清美¹・佐野 裕一¹・平川 芳明²

¹株式会社ニュージェック 国際事業本部 (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-2-30)

²株式会社ニュージェック 技術開発グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋1-12-13)

*E-mail : yamaokast@newjec.co.jp

インドネシア国では、ジャワ島における夜間の電力需要ピークに対応するため、ジャワ島西部にアッパーチソカン揚水発電所の建設を計画している。本稿では、その計画と設計について報告する。

本計画は、標高700～1,000mの山岳部において、有効落差276m,および最大使用流量432m³/sにより、1,040MW (260MW×4台)を出力するものである。貯水池有効容量は1000万m³であり、上部貯水池には高さ75.5mの重力ダム(RCC)、下部貯水池には高さ98mの重力ダム(RCC)、その間に約2kmの水路トンネルと地下発電所を建設する予定で、2014年の運転開始を目指している。

Key Words : Indonesia, pumped storage, hydropower plant, feasibility study, RCC, dam

1. はじめに

インドネシア国のジャワ島における急速な電力需要の増大とピーク負荷に対応するため、国有電力会社(PLN)は、西ジャワ州にインドネシア国で初めての揚水発電所の建設を計画している¹⁾。この発電所は、アッパーチソカン揚水発電所(UCPS)と呼ばれ、建設に向けて準備中である。

ジャワバリ電力系統における最大発生電力は2007年には16,251MWであり、1998年以降、平均で毎年約6%増加している。ジャワバリにおける2006年の発生電力量は101,611GWhであり、内訳は水力5%、地熱6%、石炭火力52%、石油火力23%、ガス火力14%である。これらの内、石油火力はkWh当たりの燃料コストが最も高い。高速ディーゼルオイル(HSD)を使用したガスタービンプラント(GT)の燃料コストは、2006年には26U.S.cent/kWhであり、石炭火力のコスト2U.S.cent/kWhに比べて実に13倍となっている。PLNは、エネルギー開発において、高価な石油火力を早急に石炭火力に変える政策を打ち出した。2010年までにインドネシア全土で合計10,000MW(ジャワバリ系統では6,900MW)の石炭火力発電所を完成し、ジャワバリにおける石炭火力の発電比率(MWベース)を2006年の39%から2010年には64%に引き上げる計画である。

UCPSの基本的な利点は、オフピーク(低負荷)時に安い石炭火力の電力を使って揚水を行い、高価な石油火力に代わりピーク時に発電するものである。最大出力は

1,040MWであり、揚水発電のエネルギー効率は75%で、kWあたりの建設コストは637\$ (2006年時の積算)である。ピーク電力への対応の他に、補助的な効果として、緊急時予備電源、動的応答特性、周波数調整、システム崩壊時の立ち上げが期待される。経済性評価の結果では、UCPSは優位性が極めて高い。

プロジェクトサイトは、ジャカルタの南南東約150kmであり、標高700m～1,000mの山岳地帯に位置する。その地域では、自然の植生が残されている場所は限られており、2次・3次林が多い。上下部ダムは、RCC(roller compacted concrete)を予定し、上部ダムは高さ75.5m、下部ダムは高さ98mである。PLNが所有する石炭火力から産出されるフライアッシュは、RCCの混和材として適用される予定である。PLNは建設に向けて資金調達を準備中である。

UCPSはインドネシア国で最初の揚水発電所で、計画中であるため、本稿では、同国の電力需給、揚水発電の必要性や利点を述べるとともに、設計については既公表の内容²⁾を中心に述べる。

2. 背景

(1) 電力需給の傾向

ジャワバリは、インドネシア国において主要なエネルギー消費地であり、2005年においては、インドネシア国全土の最大負荷の76.9%(14,821MW)、出力の

72.6%(16,356MW)、電力量の 79.3%(100,948GWh)を占めている。ジャワ島とバリ島間は、1 系統の 150kV 海底送電線によって連系されている。

2005 年におけるジャワバリの発生電力量のうち、80%は PLN とその関連会社によって発電され、20%は、PLN 以外の事業者から PLN が購入している。さらに、ジャカルタ地域はインドネシア国における最大の需要地であり、ジャワバリのエネルギー消費の約半分を占める。貯水池式水力発電は、ピーク負荷に貢献できるが、1998 年にチラタ水力発電所が 504MW の増設をして以来、ジャワ島においては建設されていない。

ジャワバリにおける年間の最大負荷と設備容量の変化を図-1 に示す。2006 年までの数値は実績であり、それ以降は PLN の予測値を示している。昼間に記録されたオフピーク負荷も併記している。年間の最大負荷は、アジア通貨危機以前の 1990 年～1997 年末までの間、14%/年の急激な増加を示している。

1998 年に最大負荷は一旦下降したが、1999 年にはすぐに回復し、現在まで増加している。年間の最大負荷は、1998 年から 2006 年の間、5.8%上昇している。2007 年 11 月 21 日 19 時に過去最大電力 16,251MW（発電所内使用電力含まず）を記録した。PLN の長期開発計画では、2006 年から 2016 年の最大電力の伸び率は 5～7%と予測されている。

1998 年にはジャワバリ系統の PLN 所有の最大設備容量は 15 GW 強であったが、2004 年においても 15.5 GW 程度で、ほとんど設備投資がなされてこなかった²⁾。2005 年以降徐々に設備容量は増え始め、2006 年には PLN 所有 16 GW、PLN 以外 4 GW の合計 20 GW(最大)に達した。現在のジャワバリ系統の定格設備容量（所内電力含まず）は 20,536 MW（2008 年 6 月 26 日、最大 22 GW 以上）であるが、設備の経年劣化・水力の水不足・定期点検・事故停止点検などにより、供給可能容量は 15,586 MW まで低下している。したがって、供給不足により

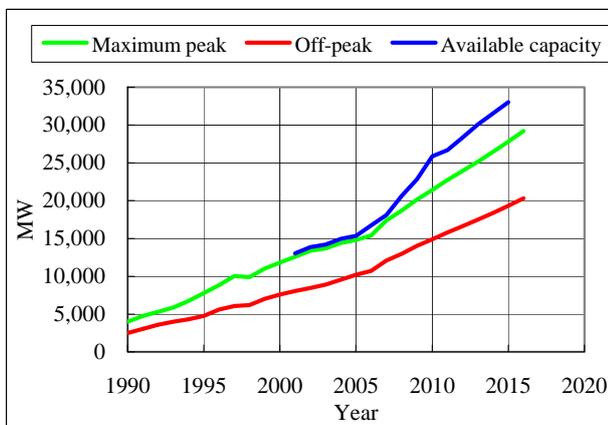


図-1 ジャワバリ系統における最大負荷と設備容量の推移

停電が頻繁に発生している。2009 年末までの設備容量増加は期待できないが、早急に発電所を建設する必要があると生じている。

図-2 は、ジャワバリにおける 1990 年から 2006 年における年間最大負荷を記録した 1 日の負荷曲線を示す。日々のピーク需要は夜の 18:00～22:00 に生じている。これは、家庭での照明、エアコン、テレビなどの使用による。ピークとオフピークの差は、近年増加傾向にあり、約 4,000MW に達している。しかし、昼間の負荷も増加している、これは、工場が集中するジャカルタ周辺地区での産業用需要によるものである。

ガス会社から供給されるガスは石油よりも廉価であるが、供給が不安定で供給量も不足している。PLN は、日々の負荷変動に対応するため、高速ディーゼル油(HSD)や重油(MOF)などの高価な油燃料を使わざるを得ない。2006 年のジャワバリの発生電力量 101,611GWh の内訳は、水力 5%、地熱 6%、石炭火力 52%、石油火力 23%、ガス火力 14%である。総発電量は 2005 年に比べて 3.6%増加し、その内、石炭火力の比率が 4.6%増加し、石油火力の比率は 1.2%およびガス火力の比率は 1.4%減少した。

石油価格は 2006 年の夏ごろから著しく増加し、WTI 1 バレルあたり 140US\$以上となり、2008 年 9 月現在も 100US\$前後で推移している。2006 年末において、初期費用と維持管理費を除いた HSD 使用の GT(ガスタービン)の発電コストは、HSD 57cent/L で約 26US cent /kWh、MOF 使用の GT の発電コストは、MOF 36cent/L で約 11US cent/ kWh である。これに対して、石炭火力では、石炭価格 4cent/kg で約 2US cent/kWh であるため、HSD 使用の GT は、石炭火力に比べて 13 倍も高いことになる。

PLN は、図-3 に示すように、燃料を石油から石炭に変換する政策を取っている。原子力発電は、2018 年以降に運転を開始する計画である。石炭への依存は、2006 年の 39%から 2010 年の 64%に増加する。また、

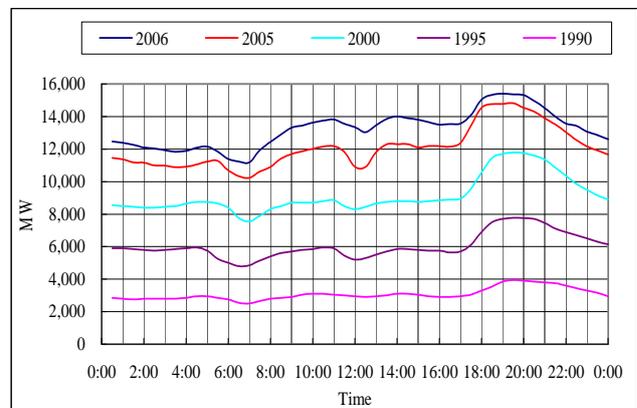


図-2 ジャワバリの負荷曲線の推移 (年最大負荷を記録した日の負荷曲線)

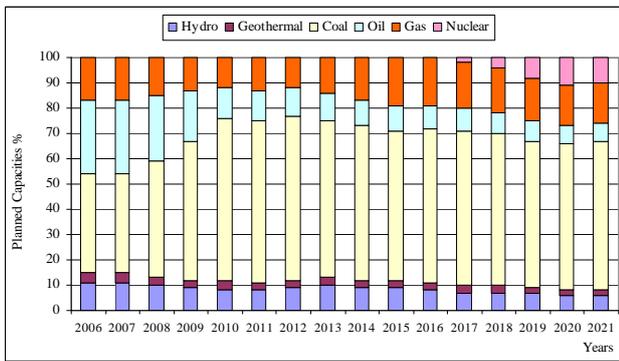


図-3 ジャワバリの2006～2021年における燃料別発生電力量の推移

2010年までに石炭火力を6,900MW新設することを前提としている。IPPは、わずかなGTを除き、地熱発電、石炭火力または小水力発電であるため、負荷変動の調整には効果的ではない。ピーク負荷に対応するためには、さらに発電所が必要である。このような状況下において、アッパーチソカン揚水発電所(UCPS)は、オフピーク時の安価な石炭火力発電を利用し、ピーク時の高価なガスタービン発電を代替する役割を果たす。

(2) プロジェクトの形成

UCPSプロジェクトは、1985年に発掘され、数多くの揚水発電候補地点の中から選定された。その後、本プロジェクトのフィージビリティスタディー(FS)が、1992年から1995年の間で実施された。詳細設計(DD)は1999年から2002年に実施された。FSからDDの検討は日本のODA予算で実施されている。DD以降の補足調査(SS)は、世界銀行の融資で2006年4月から2007年3月の間で実施された。

UCPSのサイトは首都ジャカルタ市の南南東約150kmに位置し、標高700mから1000mの山間部にある。サイトは、西ジャワのチソカン川流域に位置する。チソカン川はチタルム川の支流であり、チタルム川は、ジャカルタ市の約30km北東でジャワ海にそそぐ。チタルム川は、標高2,000m級の山脈に囲まれた標高700mのバンドン盆地に発し、延長350km、流域面積6,000km²、年間出水量は約75億m³である。この川は、ジャワ島で3番目の大河である。

チタルム川は、第二次世界大戦後、大規模な水力電源として開発されてきた。ジャティルフル水力発電所は流域の最下流に位置し、1967年に完成した。当初の最大出力は150MWであったが、後に出力180MWに改修された。流域面積は4,500km²である。次に、最上流のサグリン水力発電所(出力700MW)が開発され、1985年から1986年にかけて運転を開始した。これらの水力発電所の落差間に出力1,008MWのチラタ水力発電所が2期の工事を経て建設された。第一期の出力は504MWで

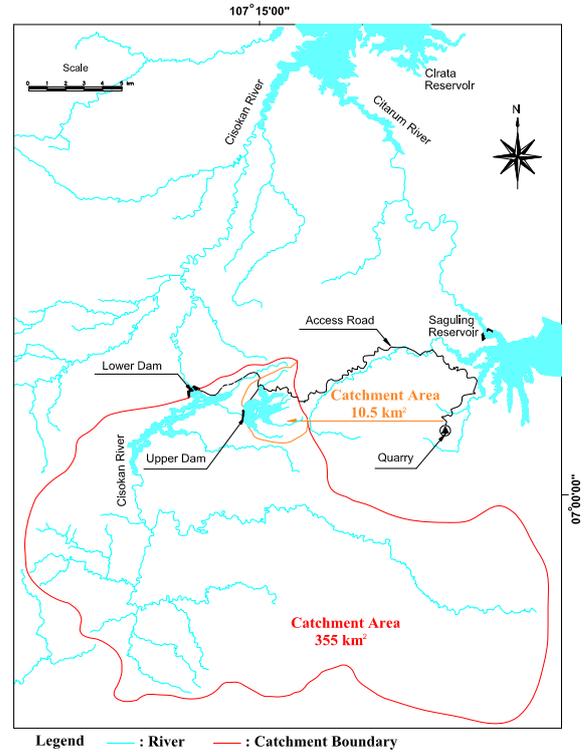


図-4 主な流域とUCPSサイト

1988年に運転を開始し、第二期の出力は504MWで1997年から1998年にかけて運転を開始した。サグリンとチラタの貯水池は発電のみに供されているが、ジャティルフルの貯水池は、灌漑、飲料水、洪水調節、発電などの多目的で使用されている。チタルム川本流の水資源は相当量開発されており、チタルム川の水利用は最適化されている。

山岳地帯に位置するチソカン川は未開発である。下部ダム建設位置における平均流量は14.9m³/sであり、流域面積は355km²、河床の平均勾配は1:70である。チソカン川に通常もしくは、流れ込み式の水力発電所を建設することは、地形特性から見て経済的ではない。一方、揚水発電方式は、短距離で高落差を稼げる点で有望であり、チソカン川上流で適切なサイトが発掘された。

下部ダムはチソカン川に位置し、上部ダムはチソカン川の支流チルマニス川に位置する(図-4)。UCPSのサイトでは、約2kmの水路で総落差約300mを得ることができる。2つの貯水池間には、高さ50mの滝がある。

3. 揚水発電の利点

UCPSの第一のメリットは、電力需要のピーク時に低コストで発電できる点にある。計画出力は1,040MWであり、総合エネルギー効率率は75%である。石油燃料を利用する高価なガスタービン(GT)発電は、主に、平日の18:00～22:00の間で運転されている。UCPSの建設費は637\$/kWであり、ガスタービンプラントの建設費よりも

高いが、UCPS は、安価な石炭火力発電の電力を揚水に使用するため、その燃料費はガスタービンプラントに比べてかなり安くなる。

2010 年以降、数多くの石炭火力発電所が運転を開始する。オフピークの時間帯では、電力需要が発電能力を下回り、例えば、幾つかの石炭火力発電所を停止したり、出力を低下する必要がある。しかし、このオフピーク時の余剰電力を揚水に使用し、ピーク需要時に発電を行えば、揚水発電が、他の発電所に必要な電力を肩代わりできる。このように、全体の電力システム運用において、石炭火力発電所を高い効率で運用できる（すなわち、負荷カーブを平準化する）ことが期待される。ピーク供給の他に、UCPS の補助的な利点として以下が挙げられる。

- 1) システム全体に対する予備力
- 2) 負荷変動に対する動的応答能力
- 3) 周波数の調整
- 4) 電力システム崩壊時の立ち上げ

4. プロジェクトの特徴

(1) プロジェクトの概要

水路平面図を図-5、設計諸元を表-1に示す。上部貯水池と下部貯水池は、いずれも重力ダムにより形成される。上部ダムは、高さ 75.5m、堤頂長 375m、堤体積 347,000m³であり、下部ダムは、高さ 98m、堤頂長 294m、堤体積 490,000m³である。延長約 2km の水路トンネルおよび地下発電所を要する。有効落差 276m および最大使用水量 432m³/s により、最大出力 1,040MW を発生する。有効貯水量は 1000 万 m³ であり、最大出力で約 6.5 時間発電し、約 8.5 時間で揚水を行う。

地下発電所は、弾頭型の横断形状で、高さ 51m、幅 26m、長さ 157m である。4 台の立軸単段フランシスタイプの水車発電機を設置し、単機定格容量は 260MW である。500kV 関連送電線は UCPS の開閉所を通じ、既存の南北の 500kV 送電線にそれぞれ接続される予定である。

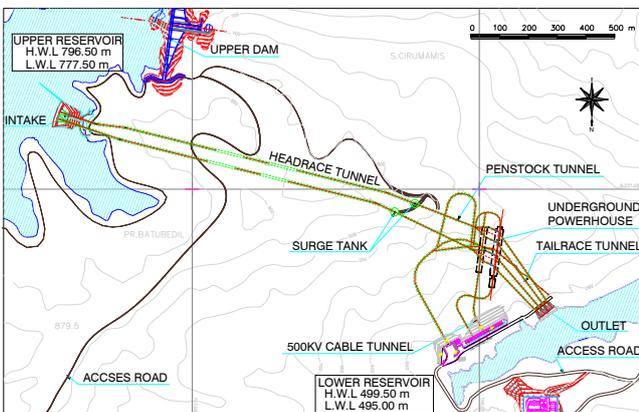


図-5 水路平面図

表-1 UCPS の設計諸元

(1) Plant Data		
Installed Capacity	(MW)	1,040 (260 MW × 4 units)
Maximum Input	(MW)	1,100 (275 MW × 4 units)
Maximum Turbine Discharge	(m ³ /s)	432
Maximum Gross Head	(m)	301.5
Minimum Gross Head	(m)	278
Loss Head	(m)	10
Rated Net Head	(m)	276
Generation duration with full capacity	(hrs/day)	6.5
Pumping duration with full capacity	(hrs/day)	8.5
(2) Reservoir Scale and Hydrology		Upper Reservoir
Catchment's Area	(km ²)	10.5
Reservoir Surface Area at H.W.L.	(km ²)	0.8
H.W.L.	(m)	796.5
L.W.L.	(m)	777.5
Effective Depth	(m)	19
Gross Storage	(10 ⁶ m ³)	14
Active Storage	(10 ⁶ m ³)	10
Average River Discharge	(m ³ /s)	0.4
Design Flood	(m ³ /s)	230
		Lower Reservoir
		355.0
		2.6
		499.5
		495
		4.5
		63
		10
		14.9
		1,100

(2) ダム

a) ダムの設計

上下部ダムは、本プロジェクトの全体建設工程の確保と経済的な建設の実現のために重要である。V字型の谷と良好な地質条件により、両地点では、コンクリート重力ダムを建設することが可能である。写真-1には、上流側から見た下部ダムサイトの写真を示す。建設費を削減するために、両ダムでは RCC タイプを採用する予定である。幾つかの仮設設備とコンクリート用骨材は、両ダムで共用される。PLN が西ジャワに保有する火力発電所は、サイトから約 250km の位置にあり、十分な量と品質のフライアッシュを供給することが可能である。

上部ダムは、凝灰角礫岩、砂岩/シルト岩の互層を基盤岩とし、安山岩も部分的に存在する。その基盤は高さ 75.5m の RCC ダムを建設するための強度と水密性を有している。原位置ブロックせん断試験の結果によれば、互層部の粘着力は 1.4MPa、内部摩擦角は 40° であった。ダム着岩部は、地表面から 5~20m 以深では 5 ルジオン以下の低透水性を示した。

下部ダムは、新鮮、堅硬な火山性角礫岩を基礎岩盤とする。左岸頂部には不良な頁岩が散見されるため、部分的なコンクリート置換えが必要である。基礎岩盤は、高さ 98m の RCC ダムの建設に適していると判断された。原位置ブロックせん断試験の結果によれば、角礫岩の粘着力は 1.6MPa、内部摩擦角は 45° であった。ダム着岩部は、地表面から 5~15m 以深では 5 ルジオン以下の低透水性を示した。

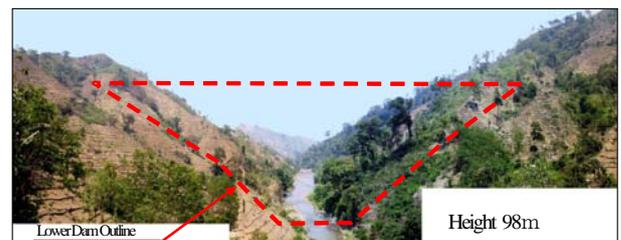


写真-1 上流側から見た下部ダムサイトの状況

建設中の地盤リスクを避けるために、両ダムサイトでグラウトテストを実施した。岩級ならびに透水性と両ダムサイトで実施したグラウトテストの結果は良好な相関を示した。すなわち、良好な岩盤のため、透水性は低く、注入量も少ない。

コンクリート打設を効率的に行うためにダムの上流面は鉛直とし、下流面の勾配は安定解析により決定した。上部ダムの下流面勾配は、1(V) : 0.73(H)であり、下部ダムのそれは1(V) : 0.74(H)である。設計地震動は、過去の地震記録の分析結果に基づき、運用時の地震(OBE)として0.15を採用した。

b) RCCの特徴

ダム堤体の内部コンクリートは、貧配合のRCCではなく、富配合のRCCを採用した。細骨材と粗骨材は、安山岩から成る原石山から調達される。サグリン水力発電プロジェクトでは、平均一軸圧縮強さ100MPa以上の骨材が採用された。砕石骨材は、細長く、薄い形状となり、空隙比(void rate)が0.45以上である。この性状では、RCCのワーカビリティが良くないので、ワーカビリティ改善のためフライアッシュを混合した富配合のコンクリートを計画している。火力発電所から調達されるフライアッシュを試験し、物理特性および化学特性においてRCC配合に適していることを確認した。単位結合材量は約200kg/m³であり、フライアッシュの置換率は60%、最大粗骨材寸法は75mmである。これは、最大粗骨材寸法40mmに対して単位結合材量約240kg/m³に対応する。

良好なワーカビリティを有する富配合のRCCは、貧配合のRCCに比べて以下の利点を有する。

- 1) コールドジョイントやRCCの低強度により、リフト間の結合力の低下が懸念される。リフト間のコールドジョイントは回避すべきである。富配合のRCCは、良好な結合力とせん断力を有する。富配合のRCCにフライアッシュを多く用いることにより、敷きモルタルを施工することなく、長期間、ジョイント部のせん断強度を高くすることができる。
- 2) 富配合のRCCは、貧配合のRCCに比べて、水分変化の影響を受けにくい。他のプロジェクトでの経験によれば、富配合のRCCは、貧配合のRCCよりも強い降雨強度に耐える。RCCの打設は、通年実施する予定であるので、雨期における連続的な打設はRCCの均質性と工期の短縮に資する。
- 3) ポゾラン物質の添加は、RCCのワーカビリティを改善し、単位体積重量を増加させる。単位体積重量が大きくなると、ダム下流面を急勾配にして、ダム堤体積を低減できる可能性がある。

しかしながら、着工前には、骨材の形状を改善するために、コーンクラッシャーの他に、インパクトクラッシャーを用いた破砕試験を実施する予定である。

単位体積重量、透水性、強度などのダムコンクリートの重要な特性は、室内試験で実験を行い、設計要件を満足していることを確認した。RCCの単位体積重量は、ペースト-モルタル比と細骨材の空隙比に依存する。ペースト-モルタル比は、ペースト(ポゾラン物質、水とエントレインドエア)の体積とモルタル(ペーストと細骨材)の体積の比率である。ペースト-モルタル比は0.5であり、必要な単位体積重量23.0kN/m³を満足することを確認した。また、原位置での透水係数を10⁻⁹m/s以下にするには、単位結合材量を180kg/m³以上とする必要があることが確認された。室内試験において、一軸圧縮強度が設計基準強度(材齢90日で10MPa、材齢180日で15MPa)を下回らないことを確認した。

5. 実施工程

PLNの長期電源開発計画では、UCPSは、2014年に520MWの運転を開始し、2015年に残りの520MWの運転を開始する予定である。建設のための設計図書と入札図書は完成している。環境影響評価は、2001年にEIA(Environmental Impact Assessment)によって実施されたものが、2006年に更新されている。PLNは、取り付け道路の建設と準備工事の準備をしている。延長31kmの取り付け道路は、7kmの既存道路と24kmの新設道路から成る。本体工事は、準備工事(取り付け道路、事務所、キャンプなど)の後に開始し、1号機運転開始までの最速建設期間は、3.5年と見込まれている。

6. 経済性評価

経済性評価は、既存発電設備、PLNの開発計画と電力需要予測に基づいて実施した。需要予測は、ASEAN諸国における1人当たりの電力消費量と成長率の関係をを用いて、PLNの2015年までの予測を20年間延長した。評価プロセスは、3段階からなり、2種類の動的計画法による分析を経て内部収益率を算定した。最初の動的計画法は、WASP IVを用いたシミュレーションである。この段階では、電力需要の増加を満足するように、系統に揚水がない条件での将来の火力発電所の構成を求める。また、揚水がある条件では、UCPSの最も経済的な運転開始時期も同時に決定される。2番目の動的計画法は、毎日の電力供給シミュレーション(Load Dispatch Simulation, LDS)モデルを用いた検討である。UCPSが存

在する場合と存在しない場合の最適な火力発電所の運用法と運用コストが解析される。UCPS が存在する場合と存在しない場合のコスト差が UCPS の商用運転によって得られた利益として計上される。解析の最終ステップは、UCPS への投資が系統全体の経済性に有益であるかどうか、を判断するために、内部収益率を算定・評価する。不利な状態においてもプロジェクトが成立するかどうかを検討するために、条件を変えた感度解析も実施した。

すべての結果は、UCPS は経済的に成立可能であり、揚水建設に対し不利な条件下であっても成立することを示した。

7. 環境影響評価

プロジェクト地域では、自然の植生が残されている場所は限られており、多くは 2 次・3 次林であり、あるいはバナナなどのプランテーションが行われている。チソカン川に沿ったなだらかな斜面には水田も存在し、ダムサイトに近い川辺の大部分は焼畑が広がる。このプロジェクト地域の住民は第一次産業で生計を立てている。送電線用地を除き、本プロジェクトによって直接的に影響を受ける土地は、水田 183ha (35.2%)、畑 148ha (28.5%)、森林 189ha (36.3%)である。

環境影響を抑制するために、サグリン水力発電プロジェクトに使用された事務所や住宅などの施設を再利用する予定である。工事のための重機器や資材は、ジャカル

タ港から既存の道路と新規の取り付け道路(延長 24km)を通して、陸送される。

上部および下部貯水池では約 500 世帯の移転が必要となる。アンケート調査によると、本プロジェクトに直接的な影響を受ける住民の大部分は、プロジェクトの推進に賛同している。

8. まとめ

ジャワバリ電力系統では、増加傾向にある日々のピーク需要と負荷曲線の変動に対応するため、効果的、効率的な発電所を必要としている。UCPS は、石炭火力発電所と連携して運用することにより、電力のピーク需要と補助的な機能に対して重要な役割を担うことが期待されている。経済性評価結果は、UCPS の建設が極めて有効であることを示している。社会環境への影響は、チタルム川に建設された同規模のダム式水力発電所に比べて小さい。プロジェクトの早期着工が期待されている。

参考文献

- 1) Yamaoka, S., and Netto, M. : First pumped-storage plant planned for Indonesia, *Hydropower & Dams*, Volume 15, issue 1, 2008.
- 2) PLN : *PLN Statistics 2005, 2006*

PLAN AND DESIGN OF UPPER CISOKAN PUMPED STORAGE HYDROPOWER PLANT IN INDONESIA

Satoshi YAMAOKA, Kiyomi MARU, Yuichi SANO and Yoshiaki HIRAKAWA

To cope with a rapid increase of its peak load in the Java-Bali power system in Indonesia, the state owned power company, PLN is going to construct a first pumped storage hydropower plant, named Upper Cisokan Pumped Storage Power Plant (UCPS) in Indonesia. The rated net head is 276 m, the discharge 432m³/s and the maximum capacity about 1,040 MW, the generation duration with full capacity is 6.5 hours. The upper and lower reservoirs are created with two gravity dams, the upper dam 75.5 m high and a lower dam 98 m high. The stored water will flow through a total 2 km long tunnel. The power house is an reverse U-shape cross sectional type in the underground. The project is ready for construction.