

**IEA 水力実施協定 ANNEX 11 水力発電設備の更新と増強
第二次事例収集（詳細情報）**

カテゴリーとキーポイント

- Main:** 1-d) アセットマネジメント、戦略的アセットマネジメント、ライフサイクル・コスト分析
- Sub:** 1-b) 投資支援策（電力買取制度(FIT)、RPS 制度、資金補助、税の控除等）
1-f) 環境保全及び改善
2-a) 電気機械（E/M）装置の技術革新と適用拡大
2-c) 土木建築分野の技術革新、適用拡大、新材料

プロジェクト名	: Embretsfoss 水力発電設備の増強と再開発
国名（州／県を含む）	: ノルウェー、 Buskerud 郡、 Modum 市
実施機関／団体	: EB Kraftproduksjon AS
実施期間	: 2010 年~2013 年
更新と増強の誘因	: (A) 老朽化及び故障頻発、(B) 環境劣化 (C) 発電機能向上の必要性、(D) 安全性向上の必要性
キーワード	: 老朽化した E&M 機器の更新、発電量の増加、洪水放流量の増強、ダム安全性

要旨

Drammen 川の Embretsfoss 瀑布は、20 世紀初頭から水力発電のために開発されてきた。Embretsfoss はノルウェーの首都オスロの西方約 75 キロメートルに位置している。初期には、電力は発電プラント近隣の工業で使用されていた。その工業は主として広大な地元の森林資源を基にして、厚板、紙及びパルプを生産していた。

Embretsfoss 水力発電システムは、EB Kraftproduksjon AS (50%) と E-CO Energi AS (50%) が所有し、EB が設備を運営している。

E-CO は、年間発電量 9.7 TWh のノルウェーで二番目に大きな水力発電事業者である。詳細については、www.e-co.no を参照。

EB は、年間発電量 2.5 TWh のノルウェーで 10 番目の規模の発電設備を保有する大規模な地方水力発電・配電事業者である。詳細については、www.eb.no を参照。

Embretsfoss には、同じ取水池と約 16 メートルの落差を利用している 2 か所の並列の発電所がある。川を横断するダムが自然の落差を増加させ、小規模な取水池を形成している。

Embretsfoss II は、1921 年から土木設備について問題を指摘されており、機械・電気機器が低効率で発熱が確認されていた。1954 年から運転している Embretsfoss III は、安定した運転と十分な生産性を保っていた。そのため、オーナーは Embretsfoss II に代わる Embretsfoss IV の建設を決定した。なお、Embretsfoss III は引き続き、運転を継続することとした。

建設工事は 2010 年から始まり、2013 年 6 月に更新形式が決められた。Embretsfoss III と IV の年間平均発電量は合計で約 140~355GWh となる。工事費は既許可~745,000,000NOK (2015 年 6 月の利率で約 95,000,000 ドル) の範囲内で得られた。

建設工事では長期間必要とされていない古い工事跡地や建造物の撤去と解体と清掃もあるため、瀑布周辺の環境改善にも貢献している。また、プロジェクトには、魚（鮭を含む）が堰を通り抜けられるようにする工夫も含まれている。

また、多くの課題がある中、そのひとつに 2 つの既設発電所を連続運転しながら新たな発電所とダムを建設することがあった。新しい発電所は古い工場跡地と近くの鉄道の間の岩盤を掘削し建設された。洪水吐ゲートを有する新しいダムは、その時に移動され、古い下流ダムに建設された。

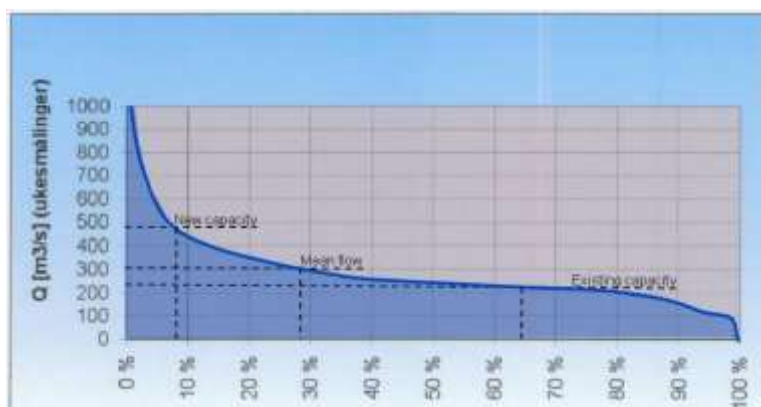
1. プロジェクトの概要（更新/増強前）

Drammen 川(Drammenselva) は、川の最終部分に約 17,000 km² の流域面積と約 300 m³/s の平均流量を有するノルウェーで三番目に大きな川である。約 80 基の発電プラントが放水域に所在しており、その多くがカスケード状になっている。大きな貯水池を持つ発電所の大半は山岳部に所在しており、上流部分で、川に年間を通して極めて均一の流量を作っている。放水域の下流部には、主として流れ込み式発電所が所在している。古い発電所の多くは、実際の地元の工業のニーズにより、複数のフェーズで建設、拡張されたものである。この容量は、地域産業および公衆の実需に応じたものであり、使用可能なすべての流量を利用するわけではない。



Drammen 川集水域と Embretsfoss 水力発電プラントの位置（出典：NVE Atlas）

Embretsfoss は、貯水容量を持たない非常に古い流れ込み式水力発電所である。既設の発電所(Embretsfoss II 及び Embretsfoss III)は、16.3 m の有効落差で、225 m³/s の水量を利用し、年間 215 GWh を発電している。それは、実際の河川水量及び当該カスケードにおける他の水力発電プラントの容量という点において、最適化されたものではない。その効率は低く、それは、保守業務の増加の要因となっている問題の設備を有している。更に、そのダムは、将来の洪水分水の要求を満足しないと思われる。その上、環境フットプリントを最小化することへの注目が高まりつつある。



Embretsfoss の流況曲線

ダムは小規模な取水池だけで、貯水能力は備えていない。ダムはさまざまな品質規格に応じていくつかの段階において建設されており、限られた文書類しかない。それは洪水分水と強度の両面において、将来の合格設計基準を満足しないと思われる。Embretsfoss の川に関しては、18 世紀中頃から、産業活動に関連していくつかのダム建設が行われてきた。これらの建設は、産業ニーズの高まりに従い、多くの段階において、拡張され、また、部分的に取替が行われてきた。

既設ダムの各部分は古い時代からの遺物であり、そこでは、我々は、基礎、補強及びコンクリートの品質についての限られた文書しか持っていない。これがゆえに、新たな水門の必要性和相俟って、将来の設計基準を満足するような形で既設ダムを改修する代わりに、下流に新たなダムを建設する方が、費用対効果が高くなったのである。

1.2 MW が 1 基の Embretsfoss I (E1, 東岸) は、1916 年にコミッショニングされ、1954 年に閉止された(Embretsfoss III のコミッショニング後)。

3 MW のフランシス水車 3 基で、75 m³/s の総水量を有する Embretsfoss II (E2, 西岸) は、1921 にコミッショニングされ、依然として運転中である。それは、多かれ少なかれ、元の状態のままであり、Embretsfoss IV のコミッショニング後、2013 年に閉止される予定である。タービンランナーは 1955 年に交換されている。



Embretsfoss II、1921 年にコミッショニングされ、2012 年、依然として運転中

150 m³/s 容量を有する 19 MW カプラン水車 1 基の Embretsfoss III (E3, 西岸、E2 の隣) は 1954 年にコミッショニングされた。このユニットもまた、多かれ少なかれ、元の状態のままである。長い年月の期間、それは、水量に余剰があったため、20%過負荷 (125 m³/s の設計フローに対し 150 m³/s) で運転されてきた。

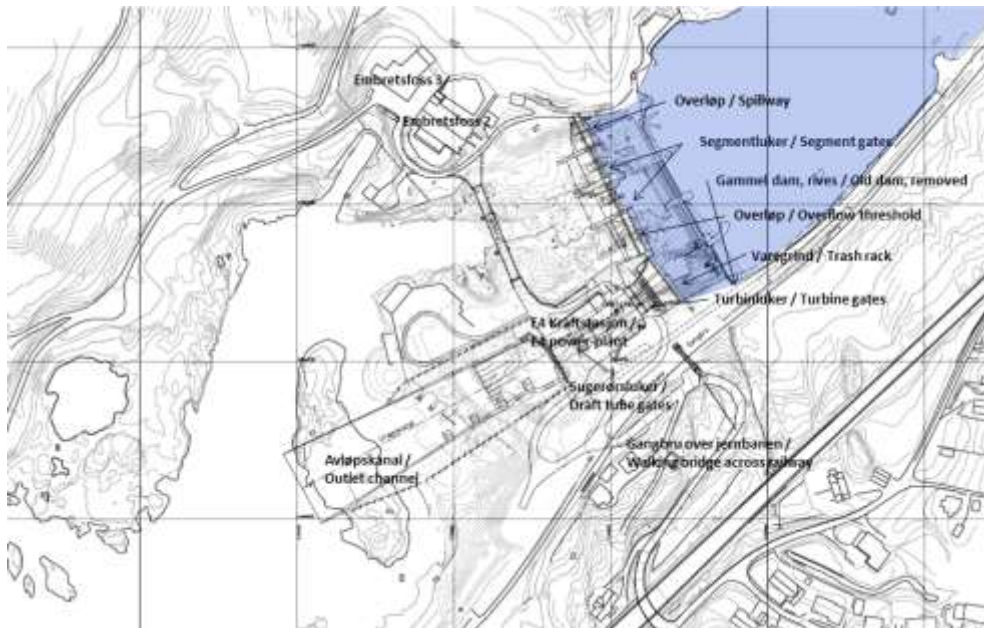
そのライセンスには、過去から全ての河川流水を利用する許可が含まれているが、川の最低水量 (約 50 m の河川敷のみ) を確保する要求は含まれていない。

その川には、E2 と E3 を合わせたフロー容量に比べ相当量の水の余剰がある。過負荷運転は、主としてランナーブレードのキャビテーション修理に関係した、E3 の保守の必要性の増加にのみ影響を及ぼしており、典型的には、2 年ごとに 1~2 週間の臨時停止を必要としている。

Embretsfoss II においては、2001 年に製材会社から東岸の土地と水力発電のポテンシャルを更に開発する権利が取得された。Embretsfoss III は、以前から EB の所有であった。

Embretsfoss IV が 2013 年にコミッショニングされる時、E3 は、単に洪水ピーク用ユニットとしてのポテンシャルを有する低ベースロード運転に変更される。大規模修理が 2020 年以降に予定されている。

近年、Drammen 川の下流部は、ノルウェーの良好な鮭と鱒の漁場のひとつとなってきた。川のこの地域はまた、非常に人口が密集している地域でもある (ノルウェーの統計による)。これに加え、鰻及び淡水真珠貝のような絶滅危惧種のレッドリストによる環境改善への注目が高まってきている。



発電所の配置

2. プロジェクト（更新/増強）の内容

2.1 誘因及び具体的なドライバー

プロジェクト実現の主な根拠は、古い発電所が不適の認定を受ける時期にさしかかり、経済的利益に合わせて河川の水流を利用するには総容量が足りないことであった。原因については、2.3 項以降で詳しく説明する。

① 状態、性能、リスクの影響度等

(一次的な原因)

(A)-(a) 老朽化/故障頻発-効率向上

新しい E&M 機器は、置き換えられた古い Embretsfoss II 発電所の機器より高効率である。さらに、総容量が増加している。

(A)-(b) 老朽化/故障頻発-耐久性、安全性、信頼性向上

置き換えられた Embretsfoss II 発電所の E&M 機器は消耗し、プラントは不適の認定を受ける時期にさしかかっていた。それ以上プラントの運転を続けることは危険であった。新しい機器は、数十年間、耐久性と安全性を保証する。

(A)-(d) 老朽化/故障頻発-保守性の向上

置き換えられたプラントの保守は、すでに時間と資源を消費し、それに比例して費用がかかる状態にあった。新しい Embretsfoss IV 発電所は最新の機器を備え、保守作業が簡略化される。時間と資源の使用が節約され、それに応じて費用が大幅に低減される。

(二次的な原因)

(B)-(b) 環境劣化-河川環境の改善

工業活動はほぼ 100 年にわたり、プロジェクト区域の各部がひどく汚染されていた。プロジェクトには、工業地域から公共レクリエーション地域への景観改造が含まれていた。それは、汚染その他の悪条件の浄化と新規発電所の建設を組み合わせるには十分であった。追加的な環境改善は魚道（特にサケとウナギ）であった。

② 価値（機能）の向上

(C)-(a) 発電機能向上の必要性－効率向上、増設、出力・アワー増

新しい機器（新しい発電所）では、水 1 m³ 当たりの効率が上がる。ただし、既存の発電所は、現時点で妥当と言えるものとは異なる前提で建設されている。総設計流量と設備容量は比較的 low、水と発電量の損失がやや高い。したがって、総容量を増やして水損失を減らし、総発電量を増やすことが有益であった。

(C)-(b) 発電機能向上の必要性－発電用途の変更、機能付加

2012 年にスウェーデン・ノルウェー電力証書市場が導入されたことは、新しい Embretsfoss IV 発電所への投資インセンティブとなった。プロジェクトの最終計画および実施は 2012 年までに開始されたが、証書市場が準備中であるという有力な信頼できる見通しがあった。2009 年 9 月 7 日以降に着工された発電所（更新と増強を含む）は、証書市場に参加する資格を得た。Embretsfoss IV の建設工事は、2010 年 2 月に開始された。

(D)-(a) 安全性向上の必要性－安全性の向上

古いダムは、2007 年の最新洪水計算に基づく洪水分流能力と構造強度（一部の区域）に関して、当該の安全区分に関する将来の基準を満たさない。発電所ソリューションの結果とは関係なく新しいダムが必要であったが、いずれにしても新しい発電所とダムを全体として計画し、建設すると有効であった。

③市場における必要性

スウェーデン・ノルウェー電力証書市場が導入され、新規の再生可能エネルギー発電に対する投資インセンティブが生じた。

2.2 経緯

- 2001 Embretsfoss II の東岸の土地及び水力発電ポテンシャルを更に開発する権利を取得。Embretsfoss III は以前から EB が所有。
- 2007 既存のライセンスの枠内で、新規ダム及び発電所の拡張と建設を承認。
- 2009 スウェーデン・ノルウェー el-certificates 市場の導入
- 2009 12 月、投資決定。
- 2010 1 月、主要土木工事会社と契約。
- 2010 1 月、主要 E&M 供給会社と契約。
- 2010 2 月、現地建設工事開始。
- 2013 6 月、完工及び商業運転開始。

2.3 内容（詳細）

1-d) アセット・マネジメント、戦略的アセットマネジメント、ライフサイクルコスト分析

Embretsfoss の更新および増強は、長年にわたって計画された。EB の水力発電ポートフォリオを収益の限度内で発展させる長期戦略の一環として、多くの選択肢が調査された。これには、発電量と費用の見積もり、運転費用、機器の技術的な残存耐用期間、倒壊リスク、将来的に予想される電力価格などが含まれる。ただし、最後の数年までは収益が出ないことが分かった。重要な決定的要因は新たな投資インセンティブであった。以下の 1-b) を参照する。

正味現在価値（NPV）を計算して比較し、決定の根拠となる複数の選択肢に関する詳細な費用便益分析が実施された。モデルには、プロジェクト費用/建設費、作業中の生産損失（生産停止または減少）の価値、稼動開始後の生産増加の価値、更新前後の運転費および保守費、電力証書（「グリーン証書」）および税（これは残念ながら、新しい機器に投資せずに古い機器を修理するなど、機器をあまり交換しないという強力な動機になりうるため、非常に重要である）が含まれる。NPV が最も高くなる選択肢を実施することが選択された。

1-b) 投資支援策（電力買取制度(FIT)、RPS 制度、資金補助、税の控除等）

共通のノルウェー・スウェーデン電力証書市場（新規再生可能発電を開発するインセンティブ）の計画は、プラント容量の決定およびプロジェクト発表時期に寄与した。

1-f) 環境保全及び改善

汚染された地面を除去する必要がある、プロジェクト実施の一環として実行するには十分であった。そのほかに、景観と魚類の条件の保全および改善が実施された。魚類に関しては、十分な魚道を確保することで状況が改善された。

2-a) 電気機械（E/M）装置の技術革新と適用拡大

2-c) 土木建築分野の技術革新、適用拡大、新材料

ダム

2007 年の最新洪水計算によれば、洪水放流容量と安全の両面において、既設ダム（クラス 1）は将来の基準を満足しない（何か所かのエリアで）。現在の洪水放流容量は、ゲート放流容量 650 m³/s（最大運転取水位 30.23 ASL において）、洪水位 33.8 ASL において、約 1 900 m³/s である。2007 年の最新洪水計算により、洪水位 35.86 ASL において 2 660 m³/s の結果が得られている。（Q500 とは、今後 100 年間に洪水位を超える可能性が 18%ある、500 年間での洪水で、ノルウェーのクラス 1 ダムの面積基準になっている）。

将来において要求される洪水容量は、ゲートのサイズ及び固定余水路の容量を増強することにより満足されなければならない。ゲートは、サイズとコストの両面において、ダムの重要な部分であるため、既設ダムの下流に新たなダムを建設する方が、費用対効果が高いと判断された。これにより、既設発電所（E2 と E3）での通常発電を維持することがより容易になったのである。水門の更なる重要な機能は、余剰水が有る時に安定した取水位を制御・維持することである。以前のプロジェクトにおける良好な経験に鑑み、20 x 7 m のラジアルゲート 2 門が選定された。



建設中のダム（2011 年 6 月）と新しい水門が運用されている西部地域（2012 年 10 月）

発電所

3 基のフランス水車を有する E2 発電所は、そのライフサイクルの末期にある。1921 年以降、総運転時間約 750 000 時間、総発電量約 4.5 TWh (4 500 000 000 kWh) の継続的な使用を経て、損耗している。保守コストは増加してきており、当該発電所は運転員の作業環境についての現在の基準を満足していない。

当該サイトには著しい余剰水があるので、容量を増加することが重要であったのである。これは、E2 発電所を建て替え、既設のユニットを交換するか、川の反対側に新しい発電プラントを建設するかのいずれかにより達成可能であった。

E2の建て替えには、導水路トンネルのサイズ増強を含む相当量の工事が必要であった。それはまた、25%、即ち、19 m³/s と想定される、限定的な容量増加しかもたらさないと考えられた。これでは、年間の発電量増加は20 GWh未満であり、そのポテンシャルに遠く及ばない。建て替えには1年半の停止時間が必要であり、およそ100 GWhの発電量の損失が見込まれた。この解決策の推定ライフサイクルは30年程度である。

川の反対側に新たな発電所を建設すれば、容量を最適化する機会が得られると思われた。洪水容量を削減することなく、取水を新しいダムに統合することが可能であった。大型のカプランタービン(ランナー流入径 D₂ = 6.7、回転速度 93.75 rpm で、16.3 mにおいて52.5 MW) 1基が選定された。これにより、年間約120 GWhの新規再生可能エネルギー発電が追加されることになる。1基のユニットとする代わりに2基の小さなユニットにすることが検討されたが、これはよりコストが高くなる解決策であり、また、E3の既設ユニットは、まだ長い年月、相当量の容量(150 m³/s まで)で運転される予定である。新しい発電所を建設することにより、建設期間中に停止することなく、E2のフル運転を行うことが可能である。その新規発電所はまた、容量を2倍以上にすることに加え、総プラント効率を約8%改善する。これは、少なくとも50年先を見据えた解決策である。さらに、新しい発電所により容量が2倍以上に増加し、合計プラント効率が250 m³/秒で約15%向上した。これは、少なくとも50年を視野に入れたソリューションである。

新しい発電所を建設することにより、最先端の流路とタービンを最適化して設置することができた。低水頭の発電所であるため、設計タービン形状が特に重要である。古い二重フランシスタービンの最高効率は84.8%(消耗前)であった。カプランタービンの最高効率は94.5%である。



古い発電所(E2)と新しい発電所(E4)の配置

環境

既設プラントにおいては議論の対象とはなっていなかったが、本プロジェクトの重要な目的は、環境フットプリントを低減、最小化するために最新の知見を用い対策を実行することであった。

ほぼ100年にわたる、製材業を主とした産業活動によって、東岸の土地には汚染されてきたエリアもある。数千立方メートルの土が、危険廃棄物として、認定企業により除去され、処分されなければならなかった。

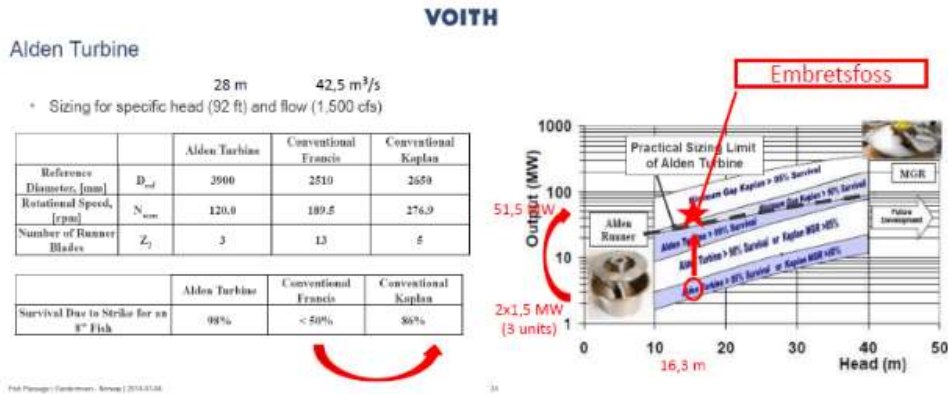
近年、Drammen川は、ノルウェーにおける、特に鮭と鱒についての良好な漁場のひとつになってきている。魚の上流への溯上を容易にするために、魚道(fish ladder)/ホイスト(hoist)を将来的に設置する準備が行われている。ダムに、季節的に使用する魚フラップゲートを設置することにより、魚が下流に下る条件が改善される。

また、小型フランシス水車3基から大型の回転の遅いカプラン水車1基に変更することにより、タービンを通過する魚の生存率が改善される。タービンランナーの大型化及びタービントップの変更の両方によりプラス面の寄与がある。

カプランタービンは以下のように設置され、魚と優しいタービンとして高評価を得た。

Fish friendly turbine:

From 3 small double Francis turbines (1,45m)
to a large Kaplan turbine (6,68m)!



あわせて以下のことが挙げられる。

- 新しいタービンの圧力降下勾配は古いものに対して約 33%になっている
- ランナーブレード周波数は 54Hz から 8Hz に減少した。

ダムの下流の川の東岸に、魚の産卵場が建設される予定であり、魚にとっての条件は改善されることになる。

今日では、鰻は絶滅危惧種のレッドリストにのっている。鰻の移動には、通り道と季節的な湿地帯が重要である。鰻の上流への溯上を容易にするために、新しいダムには鰻用の水路／チャンネルと特別な鰻の通り道が設けられている。鰻が安全に下流の方へ移動できるようにするために、東岸側に所在する発電所の取水口の前に浮き方式の鰻用軽量バリアを使用する準備が行われている。これが、鰻を西岸側に設置された、季節的に使用される魚フラップゲート又は鰻用の通り道に誘導する。当該ダムを既設ダムの下流側に再立地することにより、排水域が約 30%縮小され、これでまた、鰻の通過が容易になる。



2012 年 6 月に捕獲された A 20.6 kg の鮭 (出典: dt. no, 写真 Arild R. Hansen)

当該プロジェクトには、工業用地から将来の公共リクレーション用地への地目転換が含まれている。

環境フットプリントの文書として、ライフサイクル分析(LCA) が実施されてきており、環境製品宣言(EPD) 証明書が取得される予定である。EPD とは、コンポーネント、最終製品又はサービスの環境プロフィールを標準化された形で取り纏めることを目的とした簡易的な文書である。EPD は、国内的並びに国際的、両方で使用されている国際的に認知された標準である。

EPD は、製品の環境特性に関する情報を提供し、そのユーザーに対し、彼らが要求する環境情報を提供するものである。標準化された方法を用いれば、同一の製品カテゴリーの製品に対し提供された環境情報を、地域や国に関係なく比較することが可能になる。

環境製品宣言の内容は、原材料の生産、製造、使用及び処分までの環境データのライフサイクル分析 (LCA) に使用される製品カテゴリー規則 (PCR) に規定されている。

プロジェクトの遂行

2009 年 9 月、グリーン証書のスウェーデン・ノルウェー共通市場が発足した。2009 年 12 月、取締役会により投資の決定が行われた。2010 年 2 月、現地工事が開始された。新しい発電所 E4 は、2013 年 5 月に運転開始の予定である。

簡潔に言えば、1 年目 (2010 年) は主として岩盤掘削が行われた (約 350 000 m³)。2 年目 (2011 年) は主としてコンクリート工事関連であった (40,000 m³ 及び 1 200 メートルの鉄筋)。最後に、3 年目即ち最終年 (2012 年) は、主として、発電機器 (ランナー流入口直径 6.7 m のカプランタービン及び直径 7.4m の発電機ローター、回転機械の総重量 410Mt) の据付関連工事であった。この 3 年間で、約 450 000 時間の現地工事が行われることになる。

これまでにおいて、工事遂行上の主たる難題は 2011 年の 6 月初旬から 10 月初旬までの継続的な洪水であった。この 4 か月の期間中の洪水は 700 – 900 m³/s の範囲であり、ピーク時には、随時、約 1 000 m³/s に達した。この期間の通常の流量は 170 – 200 m³/s のはずである。当該プロジェクトは十分な準備が行われ、1 400 m³/s の一時的な洪水放水容量を有していた。この特別な夏季の洪水 (100 年以上前に記録が取られて以来、最悪) により、一部が夏の工事から冬の工事に変更されたが、プロジェクトの遅延はなかった。

コンクリート工事は、気温がマイナス 25°C からプラス 25°C と大きく変動する中、注意深く実施された。

プロジェクトの進捗は、ウェブサイト "e4.eb.no" (without www) でモニターすることができ、ここでは、5 分ごとに 5 台のカメラの映像が更新されている。



洪水中のダムセンターピラー建設 (2011 年)

3. プロジェクトの特徴

3.1 好事例要素

最も古い発電所 (E2) を代替することにより、今後 50 – 100 年間、最小の環境フットプリントで、予測可能で費用対効果に高い発電が確保される。ほぼ 100 年間使用された後に、その自流式水力発電プラントは最新技術のプラントに建てかえられる。これにより、年間 110 GWh の代替発電量に加え、グリーン証書の資格を有する年間 140 GWh の新規発電量が生み出される (E2 は閉止、E3 から E4 へ負荷シフト)。これは既存のライセンスの枠内で、7 億 2000 万 NOK (約 1 億 2500 万米ドル) のコストで達成される。

3.2 成功の理由

- ・複数の代案の詳細計画と発電シミュレーション
- ・プロセスに基づいた品質システムを含む最新技術のプロジェクト管理
- ・相当の経験を有する優秀なサプライヤー
- ・設置された機器の監視
- ・ノルウェー・スウェーデン電力証書市場の始動

4. 他地点への適用にあたっての留意点

本プロジェクトは、古い、旧式の機器と余剰の水量を有する将来の同様のプロジェクトのベンチマークになる。

5. その他（モニタリング、事後評価等）

年間エネルギー生産量の増加を監視、記録、分析し、期待された水準（通常の年より多湿で雨量の多かった 2014 年に 390 GWh）を満たす。

6. 詳細情報

6.1 参照文献

Hydro 2012 Bilbao - Session 17 - Embretsfoss 発電所の増強／再建設

著者：Birger Godal Holt, プロジェクト開発・管理責任者、EB Kraftproduksjon AS

6.2 問い合わせ

会社名: E-CO

URL: www.e-co.no

会社名: EB

URL: www.eb.no