

カナダ・レベルストーク発電所納入 495 MW フランシス水車と発電機

495 MW Francis Turbine and Generator for Canada Revelstoke Project

松山英明* Hideaki Matsuyama · 羽田賢二** Kenji Haneda · 宮島武夫** Takeo Miyajima

I. まえがき

カナダ・ブリティッシュコロンビア州 水力発電公社 (B.C.H.) レベルストーク発電所の第 1 期工事 495 MW × 4 台の水車と発電機は、基本設計をすべて完了し、1983 年の完成を目指して現在、鋭意製作中である。

当社では既に、B.C.H. にピースリバー・ポータージマウンテン発電所向け 306 MW × 2 台、ジョルダンリバー発電所向け 183 MW などの水力発電用機器を納入しており、好調に運転している。これらの機械の運転実績から、機械の信頼性と当社の技術力が高く評価され、発注となったものである。

レベルストーク発電所は、カナダの西海岸ブリティッシュコロンビア州の東寄り、コロンビア川の上流に位置し、カナダ・ロッキー山脈の豊富な水源を用いて、最終的には 6 台で 3,000 MW に及ぶ出力を持つ、世界的な大容量発電所となるものである。

水車及び発電機も単機 500 MW に及ぶ世界屈指の大容量機であるため、機械の設計・製作に当たっては、従来の設計法に加えて、各分野において電算機による数値的な検討が加えられ、品質保証のために徹底的な検証が行

われている。また、このための新しい技術も種々取り入れられている。

当社は先般の大容量揚水発電所・韓国チョンピョン揚水発電プラントを完成したこと、また、B.C.H. ピースリバー・ポータージマウンテン発電所向け 306 MW の水車発電機 2 台を完成したこと、更に今般のレベルストーク発電所用機器の設計・製作を進める中で、大容量水力発電所用機器の設計・製作に一層の自信を得たものと自負している。

II. 発電所の概要

レベルストーク発電所の位置を第 1 図に示す。この発電所の構造及び機器配置は、第 2 図に示すとおりである。

1. 仕様

1) 水車

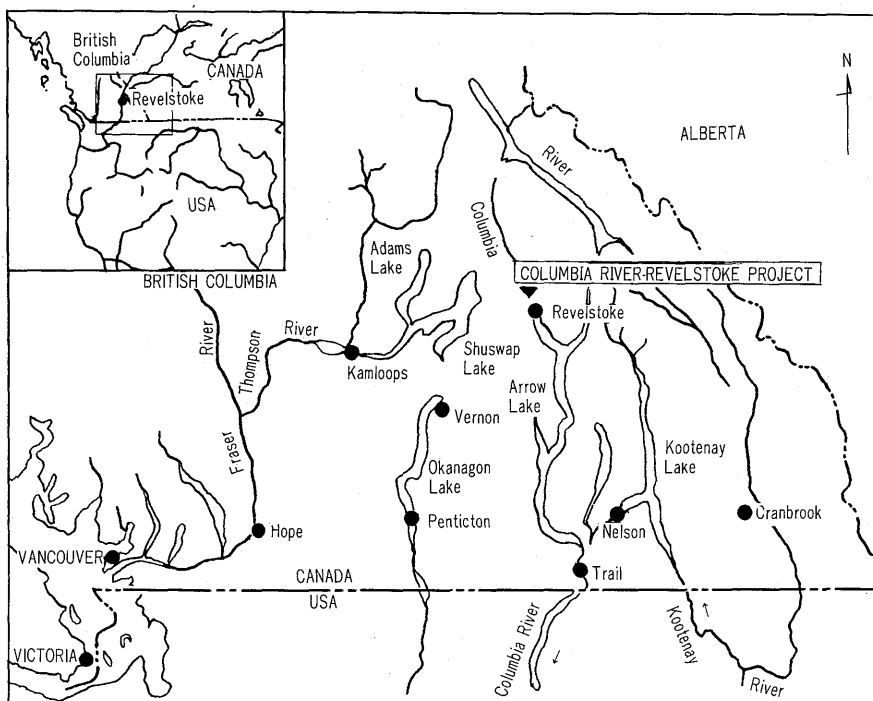
形 式：立軸単輪単流うず巻フランシス水車

出 力：495/467/370 MW

有効落差：130.15/126.8/110 m

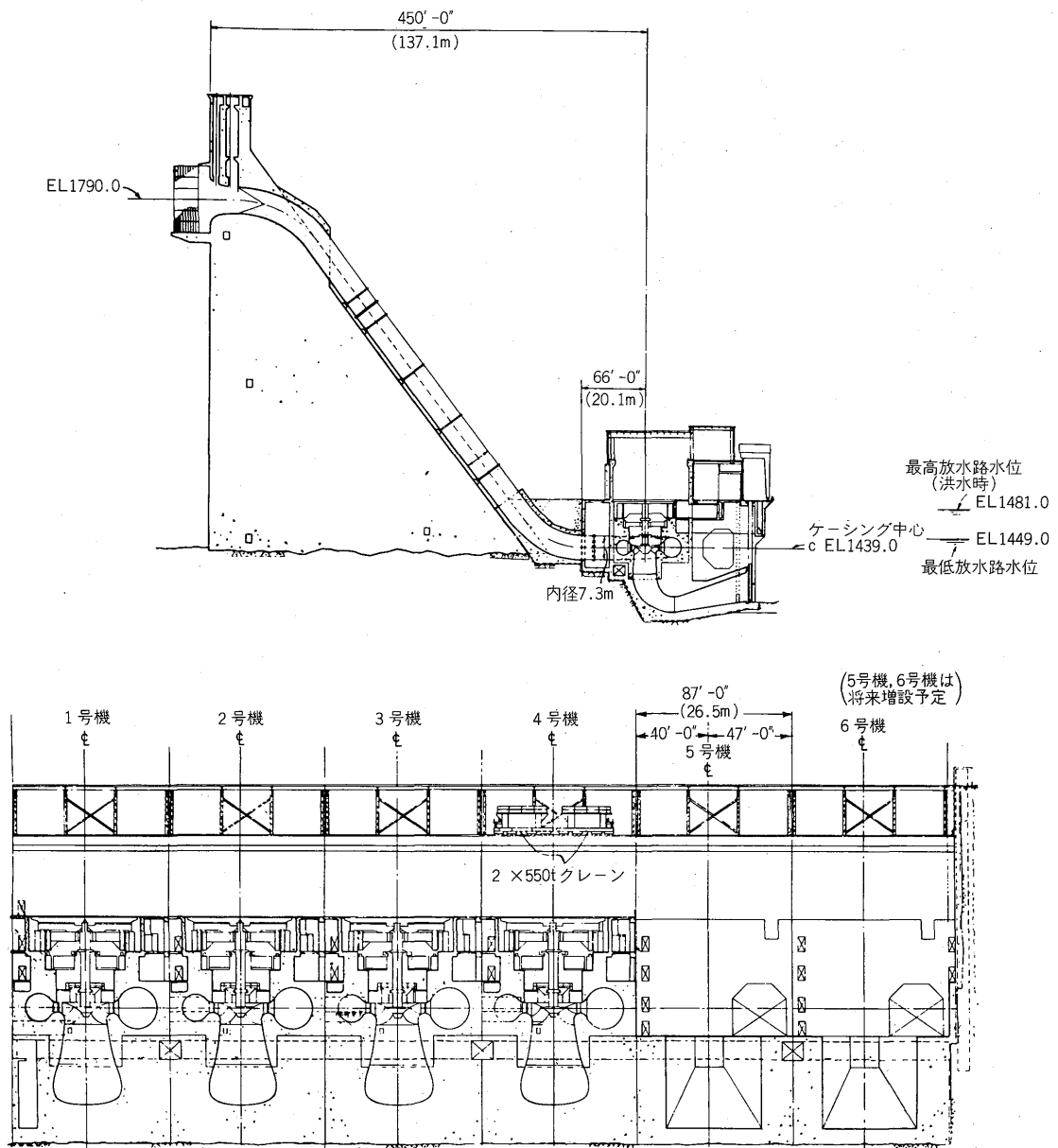
回転速度：112.5 rpm

比 速 度：180.6(m・kW)



第 1 図 発電所位置図
Fig. 1. Location of power station

* 電力事業部 水力部 ** 川崎工場 設計部



第 2 図 発電所断面図
Fig. 2. Sectional view of power station

2) 発電機

形 式：立軸かさ形三相全閉内冷形同期発電機
容 量：485 MVA (巻線温度：100℃)
550 MVA (巻線温度：120℃)

電 圧：16 kV

周 波 数：60 Hz

力 率：0.95 (遅れ)

回転速度：112.5 rpm (64 極)

直軸リアクタンス： $X_{du} \leq 100\%$ (不飽和値)

過渡リアクタンス： $X'_{ds} \leq 23\%$ (飽和値)

はずみ車効果：129,000 t·m²

最大推力荷重：2,050 t

2. 特 徴

1) 水車

- (1) 水車ケーシングの入口径は、7 m からなる大形水車で、ステーリングは応力集中を少なくするため、当社独特の平行形ステーリングを採用している。
- (2) 主軸は発電機軸と一体とした一本軸の中空鍛造製で、品質の向上と輸送重量の低減を図っている。
- (3) ランナは重量約 160 t で、輸送制限上 2 分割構造とし、現地において溶接接続される。

2) 発電機

- (1) 回転子の外径は 13.6 m に及ぶ大形発電機である。
- (2) スラスト軸受は当社独自のミッチェル形で、荷重は 2,000 t を超える世界的な記録品である。
- (3) 固定子鉄心の積層及び固定子コイル組込み作業、並びに回転子鉄心の積層及び磁極の組立作業はすべて現地で行う。

III. 水車

1. 水車の性能

1) ランナの開発

本水車は荷重平均効率 93% 以上の高効率が要求され、しかも輸送上の制約からランナ径をできる限り縮小する必要があり、効率特性、キャビテーション特性ともに良いランナを開発する必要があった。

ランナの開発に際しては、このような特性向上のために、ランナ内部流れを電算機による流れ解析プログラム“RUNFLAS”により解析し、翼形状の最適化を図った。これにより、ランナ縮小化による損失の増加を抑え、更に局所的な圧力降下のない最適翼形状を得ることができ、効率、キャビテーション特性ともに優れたランナを開発した。

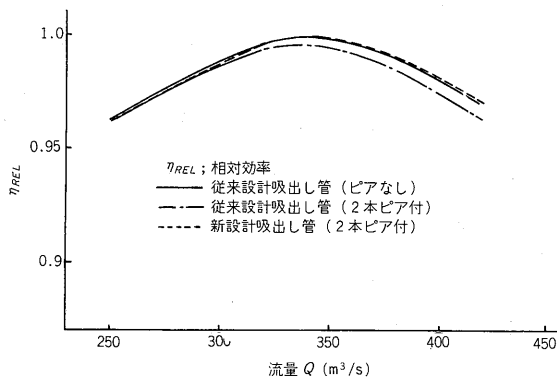
2) 吸出し管の開発

吸出し管の形状は、発電所のコンクリート容量を低減させるために、出口幅はスパイラルケーシング寸法により決まる主機間隔とほぼ同じ値で、約 23.5 m を採用している。このため土木強度上の要求から、吸出し管内にフランス水車では異例ともいえる 2 本のピアを設ける必要があった。

吸出し管内のピアは、円滑な旋回流れを阻害するのでディフューザ効率に及ぼす影響が大きい、設計点をはずれる運転状態では、流れは旋回を伴った複雑な三次元流となり、数値解析により性能を予測することは不可能である。このため、吸出し管の開発は、模型水車による比較試験を主体に形状の最適化を図った。

第 3 図に従来設計によるピアなしと、2 本のピア付吸出し管の模型試験結果を示す。2 本のピアを設けると、特に大流量側での効率低下が著しく、約 0.7% も低下することが分かる。種々の設計パラメータを変えた模型比較試験の結果、次のことが明らかになった。

- (1) ピアノーズまでの面積拡大率の影響が大きい。
- (2) 2 本のピアにより分割される三つの流路の面積配分の影響が大きい。



第 3 図 効率比較曲線

Fig. 3. Effect of draft tube shape in efficiency

以上のことから最適パラメータを選定し、新吸出し管を設計した。模型試験結果を第 3 図中の破線で示す。新吸出し管は 2 本のピア付であるが、大流量側での効率低下もなく、ピアなし吸出し管と同等のレベルまで効率を向上させることができた。

3) 模型試験

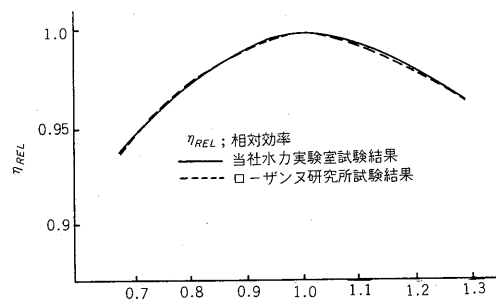
水車の広範囲な性能を把握する上で、模型試験は極めて重要である。特に、本水車のように大形大容量で、しかも効率の評価が高い水車の模型試験は、これまで以上に高い測定精度が要求される。当社の模型試験設備は、電算機による自動計測システム、データ処理システムを備えており、高精度の性能測定が可能である。

今回、本水車の開発に当たり、第三者機関の一つであるスイス・ローザンヌ工科大学の水力機械研究所と当社の両試験設備で、同一模型を比較試験する機会を得た。

第 4 図に両設備での試験結果の比較を示す。両者間の効率差は約 0.2% 以内にあることが確認された。

このことから、当社の模型試験設備の測定精度は、世界的研究機関の一つであるローザンヌ研究所と同レベルにあることが実証された。

以上のように、水車各部の形状を数値解析と模型試験の両面から最適化を図り、実機の厳しい仕様を十分満足する水車の開発を完了した。



第 4 図 模型水車効率比較曲線

Fig. 4. Comparison of measured model turbine efficiency

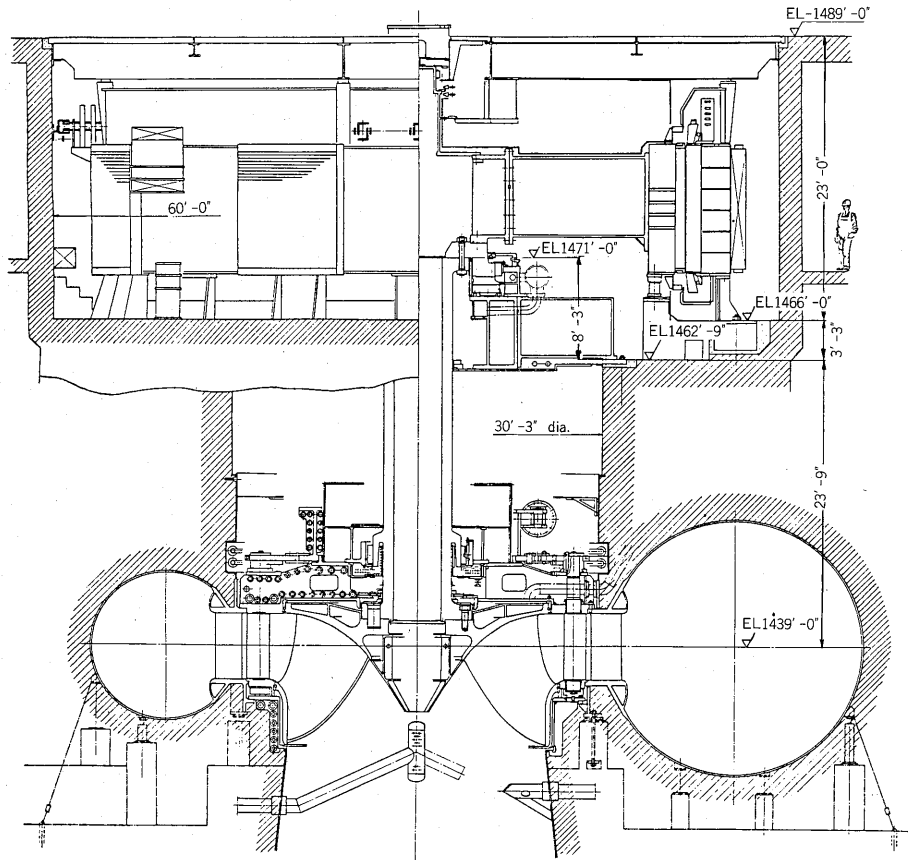
2. 水車の構造

第 5 図に水車・発電機の組立て断面図を示す。

本発電所は入口弁の備えがなく、水圧鉄管とスパイラルケーシングの間に、フレキシブルカップリングとクロージャセクションが接続されている。

フレキシブルカップリングは、内径 7,315 mm (24 ft)、長さ 1,829 mm (6 ft) の現地溶接構造の短管部と 2 分割フランジ接続構造のカップリング部から構成されており、現地組立て後、345 psi の耐圧試験が行われる。

クロージャセクションは、据付調整を行う長さ 3,658 mm (12 ft) の短管で、輸送上から 4 分割して出荷され、スパイラルケーシングがコンクリートに埋設されてから、その入口部に現地溶接される。



第 5 図 水車・発電機断面図
Fig. 5. Sectional view of turbine and generator

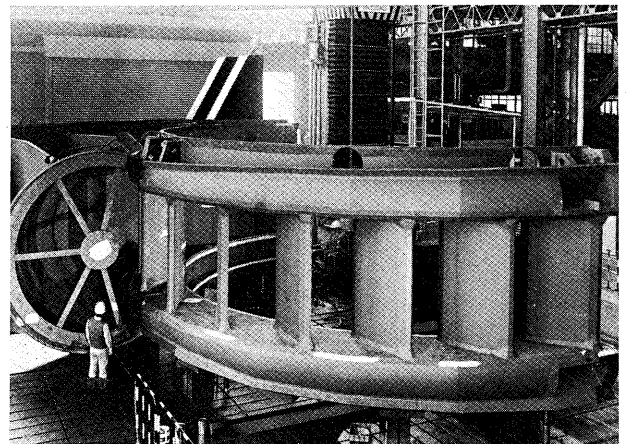
材料は特に発電所が寒冷地にあるため、シャルピー衝撃値が -34°C において 15 ft-lb 以上の特殊仕様の溶接構造用圧延鋼板 SM 50 B Modify が使用される。

スパイラルケーシングは、入口径 7,315 mm (24 ft), 入口直管部の長さ 11,582 mm (38 ft), 巻胴部最大板厚 59 mm の現地溶接構造で、輸送上から 29 分割して出荷され、現地でステーリングと一体にした後、345 psi の耐圧試験が行われる。

大形ケーシングである上、加圧打設方式が採用されるため、スパイラルケーシングの据付及び埋設時の変形が有限要素法により解析され、パイプジャッキによる新しい固定方法が採用されている。

材料はフレキシブルカップリング及びクロージャセクションと同様に、シャルピー衝撃値が 0°C において 15 ft-lb 以上の特殊仕様の溶接構造用圧延鋼板 SM 50 B Modify が使用される。

ステーリングは、性能的にも強度的にも優れ、信頼性の高い合理的構造である当社独特の平行形ステーリングが採用されている。このタイプのステーリングは、同じ顧客へ納入したピースリバー・ポーター・マウンテン発電所 306 MW 水車など多くの運転実績をもつものであるが、すべての運転状態について有限要素法による各部の応力、変形が軸対称及び三次元プログラムを用いて解析され、その信頼性が確認されている。なお、ステーリングは 4 分割フランジ接続構造であり、外径約 11.5 m、高



第 6 図 製作中のステーリング
Fig. 6. Stay ring under manufacturing

さ約 3.6 m、重量約 200 t の大物部品であるので、工場及び現地における作業をやりやすくするための特殊工具が用意されている。

第 6 図に製作中のステーリングを示す。

上カバーは、2 分割フランジ接続構造で、ステーリングとの結合フランジには、剛性の増大と構造の簡略化のため超厚板が採用されている。大形水車の上カバーのような構造物の場合、設計上各部の変形が重要となるので、水車本体の全体解析が有限要素法により各運転状態について行われた。その結果、上カバーの主軸受支持部の半径方向の変形、ランナシール部のギャップの変化、ガイドベーン軸受中心線の曲がり、ガイドベーン上下ギャッ

ブの変化及びガイドリングのしゅう動部のギャップの変化等その数値は、大形水車として十分な強度と剛性を持っていることが確認されている。また、上カバーは水車の静止部のうちで、メンテナンスを要する部品として最も重い部品であり、その重量は 100 t を超えるため、分解組立用の特殊工具が用意されている。

下カバーは、ディスチャージリングにボルト結合され、共に 2 分割フランジ接続構造であり、剛性を増すため超厚板が採用されている。ディスチャージリングは、ランナバンド下端部の対向面、及び吸出し管に接続するスロート付近に 18-8 ステンレス鋼が肉盛されている。また、上下カバーのガイドベーンとの対向面には、13Cr ステンレス鋼のシートライナ、及びガイドベーン全閉時の漏水防止のための青銅製ガイドベーンシールが設けられ、ランナシール部との対向面には、13Cr3.8Ni ステンレス鋼のシールライナが設けられている。

ガイドベーンは鋳鋼性で、油圧喪失時 20% 開度まで自己閉鎖できるような翼形が採用されている。また、上下面には 18-8 ステンレス鋼が肉盛されている。ガイドベーン軸受とその操作機構には、すべて固体潤滑剤埋込形の無給油軸受が採用され、保守の簡易化が図られている。

ガイドベーンリンク機構は偏心ピンにより調整され、弱点ピン破断警報装置を備えている。また、弱点ピン破断時に隣接するガイドベーンとの衝突による連鎖的な弱点ピンの破断、及びガイドベーンの損傷を防止するためのブレーキ装置が設けられている。

サーボモータは 4 個の油圧開閉式で、ピットライナ部にピン接手で支持されており、このピンを支点としてサーボモータを持ち上げることにより、下側にあるガイドベーンリンク機構の分解が可能な構造となっている。

ランナは、外径 7,000 mm、重量約 160 t の鋳鋼製 2 分割構造で、ランナクラウン側はボルト結合され、ランナバンド側は現地で溶接される。現地で一体にしたランナは、専用の動的バランス装置と特殊切削機械装置により、外周加工が行われ、その後バランス試験が行われる。キャビテーションピッチングを起こしやすい箇所は、18-8 ステンレス鋼の肉盛が行われ、ランナクラウン、バンド側ともランナライナが省略されている。また、ランナ寸法が大きく輸送限界に対し余裕がないため、特殊な輸送用架台に組み込まれて出荷される。

水車軸は発電機軸と一体となり、軸径 1,700 mm、軸長約 9,200 mm、重量約 100 t の中空鍛鋼製で、品質の向上と輸送重量の低減が図られている。

主軸受には負荷容量の大きなセグメント軸受が採用され、従来のねじによる軸受ギャップ調整方式の代わりに軸受支持部の剛性を高めるため、2 個のこう配コッタでピボットを支持する方式が採用されている。

主軸封水装置は、自己調整能力を持ち、封水効果に優れた当社独特の軸端面シール式カーボンパッキングが採用されている。また、ケーシング内の水を排水せずにカーボンパッキングの取替えができるように、主軸封水装置の下側に圧縮空気圧操作によるメンテナンスシールが設けられている。

吸出し管はエルボ形で、垂直部約 13 m 及びピアノーズ部 3,048 mm (10 ft) の部分のみ鋼板製ライナが供給され、ほかの部分はコンクリート製である。上部は 4 分割、下部は 8 分割の現地溶接構造で、上部はディスチャージリングに現地で溶接される。部分負荷運転時の吸出し管への給気は自然給気方式で、ガイドベーン開度に応じて動作するエアシリンダ操作バタフライバルブが、エアバルブとして設けられている。

水車は調相運転ができるようになっており、上部吸出し管に水位検出装置が設けられている。水面押下げ用給気装置として、空気圧縮装置が採用される。

IV. 発電機

1. 主要部の構造

本機は第 5 図に示すように完全かさ形構造であり、全体の寸法は 18 m × 18 m × 8 m (高さ) の世界屈指の大容量水車発電機である。

発電機鉄心寸法の決定に際しては、電機設計上の制約となる過渡リアクタンス $X'_{as} \leq 23\%$ 、巻線の温度上昇、及び回転子吊上げ時のクレーン容量制限が吊りビームを含めて 1,000 t 以下であることなどを考慮し、慎重に検討の結果、鉄心内径を 13.6 m、鉄心長を約 3.1 m に決定した。

以下に本発電機の構造の概要を述べる。

1) 固定子

固定子わくは直径 16 m で輸送上から 4 分割されている。固定子鉄心は現地で合せ目なしに積層され、スタッドを介して固定子わくに取り付けられる。直径が大きくなると熱膨張により鉄心の内部応力が大きくなり、鉄心に波打ちが発生しやすくなる。この予防法として本機では次の対策を施している。

- (1) 複数枚のコアセクタを一つのブロックとしたものを 1/2 重ねに積層し、鉄心相互の内部摩擦力を低減させるブロックセクタ積みの採用。
- (2) 鉄心に設けられた締付スタッド穴を楕円状にし、固定子わくと鉄心の半径方向の拘束を避ける特殊スタッドと溶接固定片の採用。
- (3) 固定子わくとベース間の熱膨張拘束力を逃がすための放射トルクピンの採用。

これらの対策は、先に製作し好調に運転しているカナダ・ピースリバー・ポーター・マウンテン発電所向け 9,

10号機(容量 316 MVA)で実績のある構造であるが、本機では、更に改良を加え信頼性をより一層高めている。

固定子巻線は、レーベル転位を施した1ターンコイル波巻の八重星形結線とし、主絶縁はエポキシレジン为主体としたFレジン/F絶縁である。本機ではバー間の短絡事故を検出するために、各並列回路内に不平衡電流検出用変流器を取り付け、常時監視できるシステムとなっている。

2) 回転子

回転子は水車軸上に直結されたスラストブロックと回転子スパイダ、薄板積層リム、磁極、軸流ファン、上部軸とから構成されている。

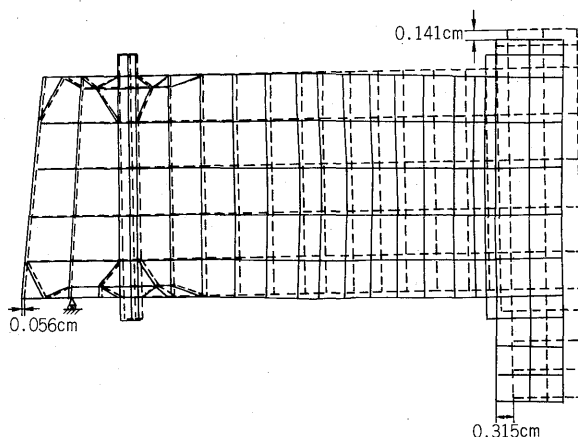
磁極鉄心はダブテール脚により回転子リムに取り付けられ、また磁極頭部には極間接続片付制動巻線を備えている。磁極頭部の磁束分布は運転により回転の遅れ側に偏磁し、制動巻線間の温度上昇及び電磁力にアンバランスを生じさせ、巻線の異常変形等の誘因となる。本機ではこの対策として非対称配置形制動巻線を採用するとともに、巻線材質には水素ぜい性、クリープ特性に対し信頼性のある銀入無酸素鋼を採用している。

界磁巻線は、磁極高さを従来と変えることなく有効巻回数が多くできる非整数ターン方式を採用し、界磁電流の低減を図っている。この構造は巻線極間接続が回転子の下端にバランスして備えられるので、通風上からも風量配分が均一になる利点がある。巻線銅帯は冷却面積を増し、温度上昇の低下が図られるプロファイル銅帯を使用している。極間接続部は、運転、停止による巻線の熱的・機械的変位に対し、安全に運転できるよう特別な考慮が払われている。

近年、運転保守上の見地から界磁巻線温度の常時監視の必要性が高まっているが、本機では界磁巻線内に銅測温体を埋め込み、検出した信号を軸上に取り付けられたF/V変換器にて変換して送信し、巻線温度を常時監視する方式を採用している。

回転子直径が大きくなると回転子リムの運転中の広がり量が増大し、発電機主空隙は停止時と運転時で大幅に異なることがある。したがって、回転子の広がり、固定子鉄心の温度上昇による広がり、据付時の空隙値を設定しなければならない。本機では、これらの検討を加えた上、更に磁極取付部のライナにより容易に空隙調整可能な構造としている。

回転子スパイダは、一体リングのボスと8本のアームから構成されている。本部品は水車トルクを回転子リムに伝達するとともに、回転応力、焼ばめ応力、回転子リム等の重量による曲げ応力を受ける重要部品であり、かつ複雑な形状をしているので、有限要素法により応力、変形の解析が行われ、最適形状、寸法が決定された。第



第 7 図 有限要素法による回転子スパイダの焼ばめ変位解析図

Fig. 7. Deformation of rotor spider after shrink-fitting of rim

7 図に焼ばめ状態での変位解析結果を示す。

また、水車部品を分解する際は回転子リムをピット中に残して回転子スパイダだけを吊り出すことができる構造になっている。

3) 軸受

スラスト軸受は二重デスクスプリングにより支持されるミッチェル形軸受で、約 2,050 t のスラスト荷重を 14 個のパッドで受けもつ大形軸受である。運転中のパッド内の油膜厚さ、温度、圧力分布はパッドの熱変形を考慮して電算機により解析され、最高冷却水温において軸受温度 70°C が保証されるよう決めている。

油の循環はスラストカラーに設けたポンプ穴の自己ポンプ作用により行われ、2 個の油冷却器により冷却された油は、下部ブラケットの配油箱を介して噴油管からスラストカラーしゅう動面に噴出し、カラーと軸受パッドしゅう動面の冷却を効果的にしている。本機の油槽は、案内軸受を支える軸受支えと油槽外壁を一体化させ、更に油冷却器は油槽外壁に直接装着され、途中の配管を全く必要としないコンパクトな新構造油槽を採用している。

始動・停止時にはスラスト軸受しゅう動面に高圧油を供給し、油膜の形成を容易にするオイルリフタ付である。

案内軸受はスラスト油槽内に収納され、セグメンタル形でパッド背面のコッタにより軸受ギャップの調整とラジアル荷重の確実な伝達が行われる。

下部ブラケットは直径 10 m の 6 本アームからなるスパイダ形で、4 本のアームを取り外して一体で輸送する。

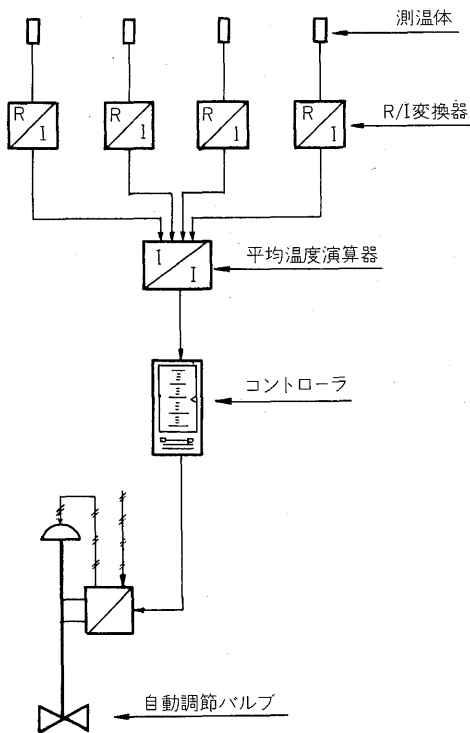
油槽油温によるブラケットの熱膨張力が直接基礎に伝達されないよう、ベース取付部には特別な工夫がされている。

2. 冷却空気温度自動調節装置

本機には空気冷却器の冷却水量を自動的に調節する装置を備えている。一般に冷却器の設計水量は、最高冷却

水温下において発電機出力最大の条件で冷却風温度が規定以下になるよう決められている。しかしながら、最高水温は夏季のわずかな期間だけで、他のほとんどの期間はかなり低い水温になっている。したがってほとんどの期間冷却水量はむだに流していることになる。

本機では、冷却空気中に設けた抵抗温度計と水量自動調節バルブにより4か所の冷却空気温度の平均温度を常時 25℃ に保つよう水量を調節している。第8図にこの



第8図 冷却空気温度自動調節装置系統図
Fig. 8. Cooling air temperature control system

空気温度調節装置の系統図を示す。本機の場合、この装置により発電機1台当たり年間150万t以上の節水が期待できる。

また、本装置は発電機の負荷変動に伴う熱変化量を緩和させ、機械の信頼性を高める効果も期待できる。

3. その他

風道上面を覆う19m×19mのトップカバーは、ASTM・E 413に規定されたSTC 45クラス(透過損失効果が500 Hzにおいて45 dB以上)に合致した高いしゃ音効果を有する特殊処理を施された防音カバーである。このしゃ音効果は、従来構造のカバーに対し20 dB以上改善されたものである。

本機には16個のブレーキジャッキ、冬季室内暖房用空気取入装置として空気操作式エアルーバ8個、注水式消火装置一式が備えられている。

V. あとがき

以上、レベルストック発電プラントの水車及び発電機の特徴と概要を述べた。

先述のとおり、カナダ・ピースリバー・ポージェマウンテン発電所向けの306 MW 発電用機器、及び韓国チョンピョン発電所向けの500 m 206 MW 揚水発電用機器の完成したことに続き、この大形発電プラントを完成させることは、昨今のエネルギー問題の中で無公害のエネルギー源として事のほか注目されてきた水力エネルギー資源の開発に対し、大きく寄与することができるものと確信している。

最後に、本稿が水力発電設備の計画に少しでも御参考になる所があれば幸甚に思う次第である。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。