

関西電力・赤尾発電所向けチューブラ水車・発電機

Bulb Turbine and Generator for Akao Power Station of The Kansai Electric Power Co., Inc.

松山英明* Hideaki Matsuyama · 矢野公惟** Masanobu Yano · 大和昌一** Shoichi Yamato

仲田 太** Tohru Nakata · 秦 恵一** Keiichi Hata

I. まえがき

超低落差水力を最も経済的に利用できる水車として、チューブラ水車が脚光を浴びて久しいが、更に経済性を向上させるためには、立軸機と同程度まで単機容量を増大させる必要があった。

立軸機の場合は周囲のコンクリートから均等に支持されるため、大形機でも剛性の確保、変形の防止が容易である。しかし、チューブラ水車の場合は、発電機外周の流れに与える損失をできるだけ少なくして、流水中の発電機を支持しなければならないため、大形化すればするほど剛性の確保、変形の防止は困難となる。

当社においてはチューブラ水車の数多くの実績をもとに、有限要素法を中心とする構造解析技術の飛躍的向上により、これらの問題を解決し、高比速度のランナの開発と相まって、大容量チューブラ水車発電機を開発してきた。

この程、関西電力・赤尾発電所向けに工場完成した世界的大容量のバルブ形チューブラ水車・発電機は、これらの研究開発の成果であり、世界的な大容量機である。

第1図は単機容量の変遷を示したものである。

赤尾発電所にバルブ形チューブラ水車を採用するに当たっては、関西電力においてあらゆる観点から立軸フラン水車との比較を行い、総合建設価格的に有利であるとの結論を得られたものである。

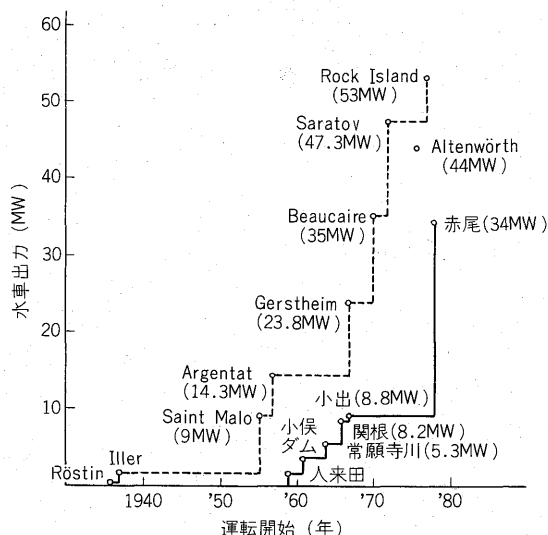
この赤尾発電所の成果が、今後の我が国の超低落差水力地点の開発に与える意義は大きいと考えられる。

ここに数多くの特長をもつ大容量バルブ形チューブラ水車・発電機の概要を述べ、参考に供したい。

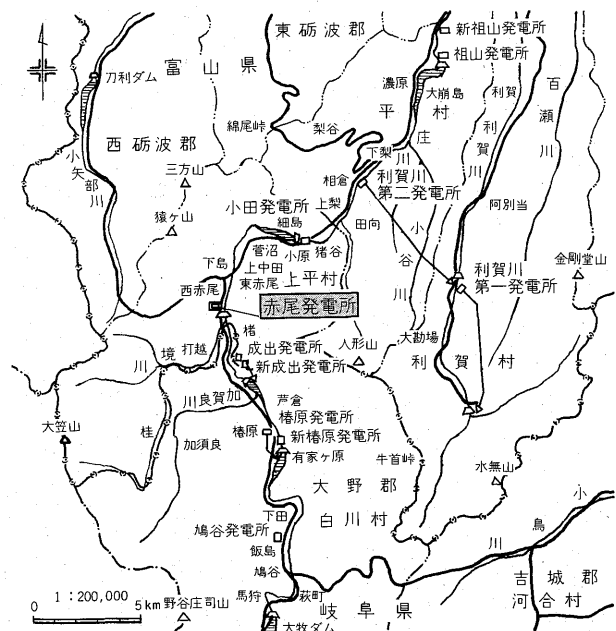
II. 発電所概要

本発電所は、第2図にみられるように富山県庄川の上流に位置し、有効貯水量60万m³を有する新設の赤尾ダムから取水し、下流の小原調整池へ放流される。

発電所の運転方式は遠隔監視制御方式で常時無人とし、10日に1回程度巡視する計画とされている。発電所の負荷はせん頭負荷として利用される。本発電所は、低落差ながら山間地の豪雪地帯に建設される大形機のため、輸送、保管に特別の配慮が要求された。

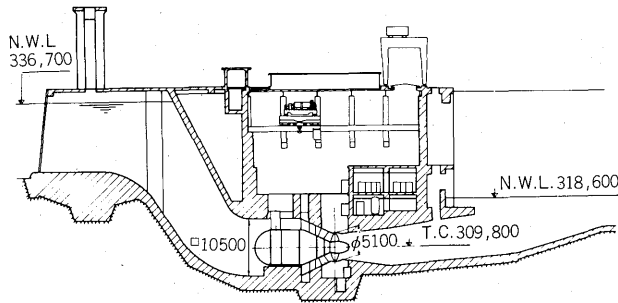


第1図 チューブラ水車単機容量の変遷
Fig. 1. Record of bulb turbine in the world



第2図 赤尾発電所の付近地図
Fig. 2. Location of Akao power station

* 水力部 ** 川崎工場 設計部



第 3 図 建家断面図
Fig. 3. Section of power station

掘削量を少なくして建設費の低減を図るため、建家幅を流路幅と同じの10.5mとし、吸出し管の上部を補機室及び組立室にするよう、流水方向に長い建家構造となっている。第3図に建家断面図を示す。その他据付工程短縮のための方策をとり、クレーン稼働開始後の据付期間を約10か月と予定している。

なお、屋外の機器搬入用ガントリークレーンは30t/3t、天井クレーンは110t/25tのものが設けられている。

III. 水車・発電機仕様

1. 水車

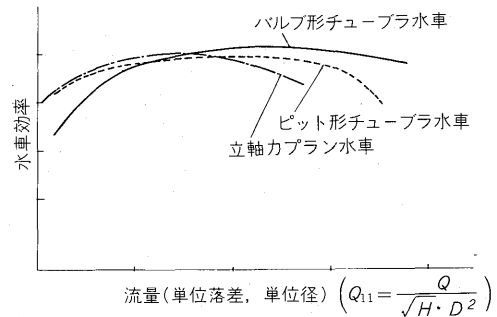
- 形 式：横軸円筒形可動羽根プロペラ水車
- 定 格 出 力：34,000kW
- 落 差：17.4m
- 流 量：220m³/s
- 定格回転速度：128.6 rpm
- 比 速 度：660(m-kW)
- ランナ直径：5,100mm
- 水車入口寸法：10,500×10,500mm
- 最大水圧：35m
- 最大速度上昇率：60%

2. 発電機

- 形 式：横軸三相交流同期発電機
- 定 格 出 力：36,000kW
- 定 格 電 圧：6,600V
- 定格周波数：60Hz
- 定 格 力 率：0.9(遅れ)
- 定格回転速度：128.6 rpm
- 固定子の外径：6,300mm

IV. 水力性能

バルブ形チューブラ水車は流れが直線的であるので、広い流量範囲にわたって効率が良い。第4図に各形式の水車の効率比較を示す。模型試験は実機の1/15の大きさの水車で行われた。大きな直径を有するランナの上部和下部における吸出し高さは大きく異なるため、実機据付高

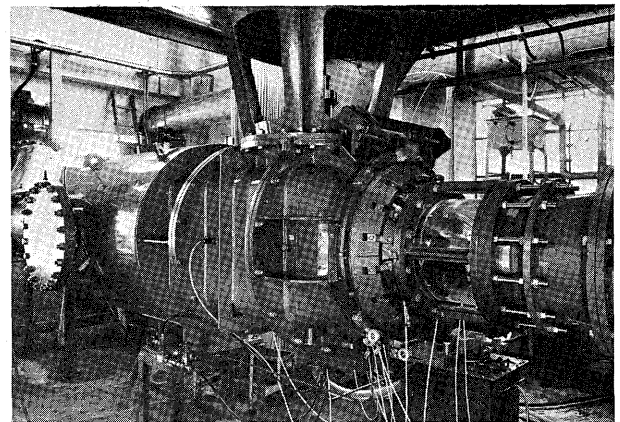


第 4 図 水車効率の比較
Fig. 4. Comparison of efficiency for turbine

さは、ランナ各部のキャビテーション係数の分布を考慮して決定された。

上記のほか、流路各部の圧力分布を測定し、バルブに生ずる各種荷重及び基礎コンクリート各部に働く荷重を算定するうえでの基礎データを得た。第5図は模型水車の写真を示す。吸出し管中心は、出口端までを完全に水平にするのが一般であるが、掘削上の制約から、効率に支障のない範囲で中心線を少し上げるように設計された。

流路条件から発電機の外径は小さく選定するので、回転子のGD²はおのずと小さくなる。このため、速度変動率は60%という高い値を採用した。



第 5 図 水車模型試験
Fig. 5. Model test for bulb turbine

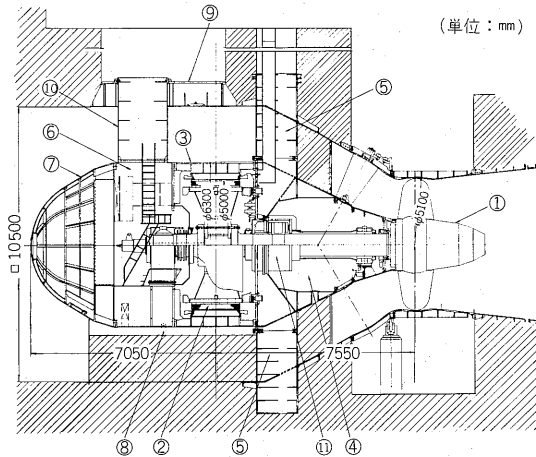
V. 水車・発電機の特長と構造

バルブ形チューブラ水車・発電機では、特に水車と発電機の協調が必要であり、あたかも一つの機械として扱うことが強く要求される。以下、これらの内容のうち幾つかの特長と構造について述べる。

第6図に組立断面図、第7図に据付状態の模型の写真を示す。

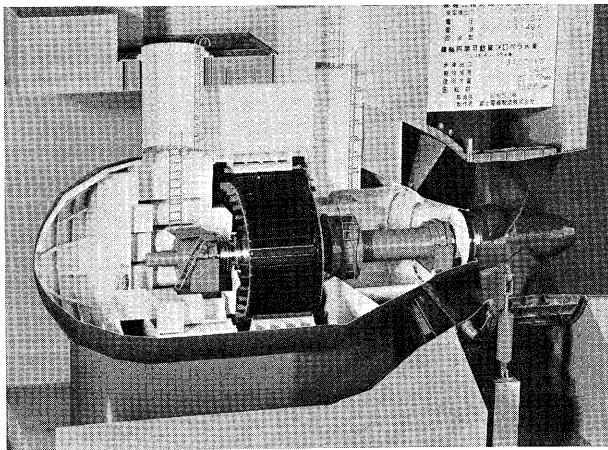
1. バルブの支持構造と剛性

バルブには、水圧スラスト、短絡トルクのほか、静的、動的に非常に大きな荷重が生ずる。この荷重の大部分は、



- | | |
|-------------|-----------|
| ① ランナ | ⑦ トップカバー |
| ② 回転子 | ⑧ ケーシング支え |
| ③ 固定子 | ⑨ ハッチ |
| ④ 水車内側ケーシング | ⑩ 点検シャフト |
| ⑤ スターベーン | ⑪ スラスト軸受 |
| ⑥ 軸受ケーシング | |

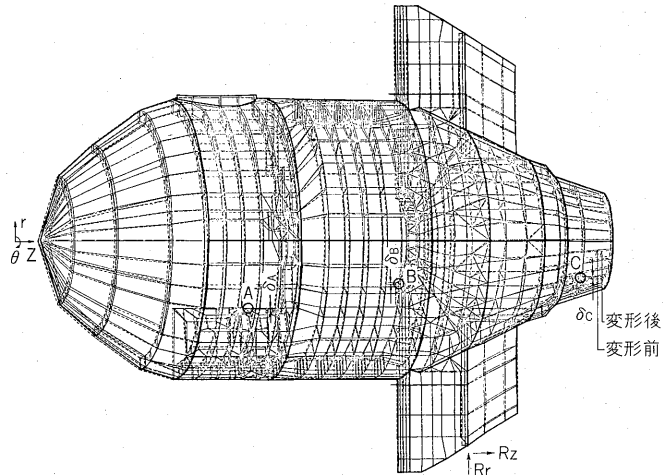
第6図 水車・発電機断面図
Fig. 6. Section of turbine and generator



第7図 水車・発電機模型
Fig. 7. Sectional view of model for turbine and generator

内側ケーシングから垂直に突き出したスターベーンによって建家基礎に伝達される。軸受ケーシング下部のケーシング支えは、発電機重量の一部を支持し、バルブの上・下方向には剛直で、流水方向と円周方向には変位自由な構造となっている。また軸受ケーシングの両側面には、バルブの振れ止めが設けてあり、基礎の変形に対し追従可能なものとなっている。

一方、バルブ自体は大形薄肉外圧容器で、かつ軸受荷重を局部的に受けるため、バルブの支持構造と相まって、その剛性確保が要点となる。これらについては有限要素法による解析により、あらゆる運転条件に対し応力並び



第8図 有限要素法による解析例
Fig. 8. Example of stress and deformation analysis by the FEM

に変形が許容値内にあることを確認している。

第8図はその一例を示す。

2. 軸受数と配置の決定

軸受数は荷重分担、コスト、保守などを考えて、一般的には二軸受、大容量機では三軸受方式が選定されるが、発電機のエアギャップが比較的小さいので、軸系のたわみに十分注意のうえ選択する必要がある。本機では種々検討のうえ三軸受を採用している。

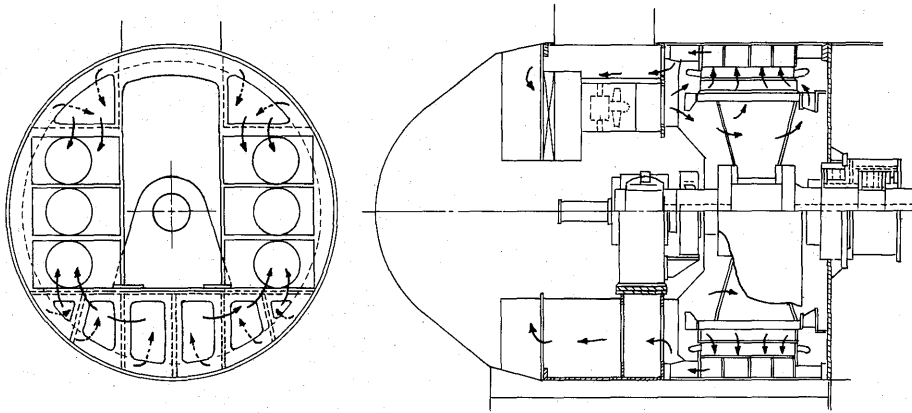
またスラスト軸受は、横軸機としては非常に大きな荷重を支えるため特に軸受支え部の変位に着目し、軸受荷重の均一化を図らなければならない。本機のスラスト軸受は荷重を基礎に合理的に伝達するため、剛性の大きい内側ケーシングに支持されている。

潤滑は全軸受共通とし、上部潤滑油タンクを用いた強制給油方式であり、各案内軸受はいずれも高荷重を受けるので、始動停止時の保護のため、オイルリフタ装置を備えている。

3. 発電機の通風・冷却方式

バルブ形チューブラ水車発電機は、水路の最適設計条件から固定子外径寸法に制約を受け、一般の水車発電機の標準設計に比べ約30%小さくしなければならない。このためポールピッチに対する鉄心長の比が大きくなり、通風冷却に特別な配慮が必要となる。本機の通風冷却は第9図に示すように、全閉強制片通風方式を採用し、各強制ファンの直前に空気冷却器を設置している。強制ファンにより押し込まれた冷却空気は、一部は直接上流側の極間から、また一部は回転子スパイダを通して下流側の極間から固定子に入り、固定子枠に集められ通風ダクトを経て再び上流側へ戻る。

鉄心長中央部の冷却向上のため、極間のエアガイド、ヨーク通風に考慮が払われており、モデル実験、実機工



第9図 発電機冷却通風経路図
Fig. 9. Air route for cooling of generator

場試験共にその効果が確認されている。なお固定子巻線端の冷却向上のため、回転子両端にも補助的に自己ファンを備えている。通風経路は発電機固定子と空気冷却器、別置ファン、通風ダクトにより完全に独立した密閉回路となっており、軸受、スリップリングなどはこの回路の外に設けているため、油、ブラシ摩耗粉などが機内に入るのを完全に防止し、また運転中のこれらの保守、点検が容易な構造となっている。

4. 発電機の水密性

バルブ形チューブラ水車発電機においては、漏水防止対策が重要な課題である。輸送制限のために分割された各ケーシングの軸方向の合わせ目は、フランジをボルトで強固に締め付けた後、シール溶接により水密性を確保している。また固定子と内側ケーシング間、あるいは固定子と軸受ケーシング間等の将来分解する必要があるフランジ面にはOリングを入れ、浸水を防止するとともにOリングの内側にも溝を設け、万一の漏水の検出が可能であり、またこの溝に特殊パッキンを封入することにより、水密性のバックアップができるように考慮されている。

また、固定子外表面が直接水に接触するため、機内の結露水に対する考慮も重要となるが、本機では機内に除湿器を設けて湿度を適正值に保つよう配慮し、更に固定子の最下部数個所に水分検出機構を備え、漏水や異常結露水を予知できるようになっている。

5. その他の水車・発電機の構造

鋼板溶接製の外側ケーシング、吸出し管ライナの外面には多数のアンカが溶接されていて、現地溶接組立した後、コンクリートに埋め込まれる。バルブに生ずる水压推力、短絡トルク、ランナ推力などがあらゆる荷重が内側ケーシングを介してステータに伝達され、更に基礎コンクリートに荷重を伝えている。このためステータ埋込み部ですべりを起こさないよう、ステータの外表面には多数のスタッドジベルが溶接されている。

ステータは中空で床面に開口し、点検、配線、配管及び部品の吊り出しができるように寸法が決められている。円錐状に配置された16枚のガイドベーンの軸受と

その閉閉機構には、すべて無潤滑軸受を使用して保守の簡易化が図られている。内側ガイドベーン軸受は、推力荷重によるステータのたわみによって下流方向に変位するので、ガイドベーン軸の「こじれ防止対策」がとられている。

ガイドベーンは2個の油圧開閉式サーボモータにて操作され、圧油源となる圧油タンクには予備圧油タンクが設けられている。ガイドベーンは半径方向、軸方向の両荷重を同時に支持できる特殊軸受で支持されている。ガイドベーンリンクには弱点リンクを用い、異常検出後でも正常なガイドベーンとの間で干渉を起こさない効果を持たせてある。ランナは5枚羽根で直径5.1mの大形ランナで、バルブの下流側にオーバハングして取り付けられる。

ランナサーボモータはランナボス内に設けてあり、発電機の上流側軸端に設けた圧油導入装置から主軸の中を導かれてきた圧油によって操作される。そのほかランナの構造は、当社大形カプラン水車で採用しているものと同じで、幾つかの特長を持っている。

水車軸受はランナがオーバハングして取付されるので、特に高荷重軸受となるため、軸の傾きに対応できるように球面支持構造としてある。軸封水装置は、立軸機で安定した実績を持ち、摩耗の少ない、端面シール式カーボンパッキンを採用し、保守のため運転中でもここに近づくことができるようになっている。

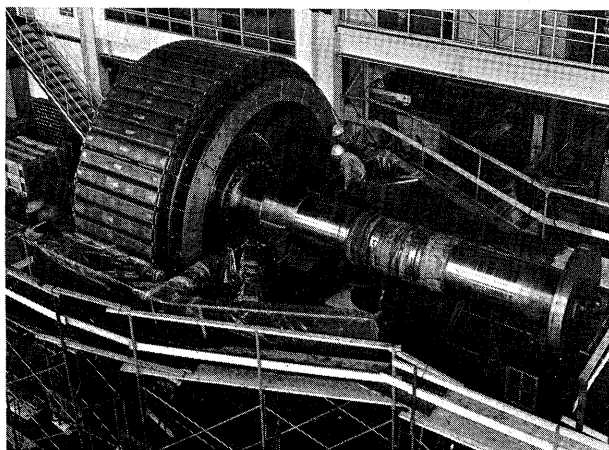
発電機回転子は磁極、回転子センタ、発電機軸などから成り、二軸受で支持されている。磁極はボルト締め構造であり、回転子センタはこの磁極を支える円筒部と内径側のボスをスパイダで結合した構造で、輸送制限から半円状に二分割となっている。発電機軸と水車軸の間には溶接構造の中間軸が設けられ、横軸機であるために生ずる繰り返し曲げモーメントに対処するため、長いカップリングボルトで両軸と結合されている。

発電機固定子は通常の機械に比べ、鉄心と固定子枠の温度差が大きいことを考慮して、鉄心を現地で全周完全なリングとして積層して合わせ目をなくし、長期にわた

る信頼性の確保を図っている。

上流側軸受は球面支持構造で軸の傾きに追従でき、また中間軸受はスラスト軸受との関係で、軸の傾きに合わせて据え付けるよう特別な構造となっている。スラストカラーは水車軸側に取り付けられ、組立上二分割構造となっている。スラスト軸受は横軸としては記録的な320 tonの荷重を受けるので、パッドの固定方法、支持部の変位などを考慮した特性解析を行っている。更に試験装置により、実機軸受を用いて実負荷(320 ton)の運転試験を行い、その性能を確認している。

回転の下流側には、漏水トルクに対して十分な容量のブレーキが設けられている。発電機の出カリード、配管などはステーベンから外部に引き出される。第10図に工場組立中の状態を示す。



第10図 発電機の工場組立
Fig. 10. Shop assembly of generator

6. 分解、組立

水車及び発電機共に、それぞれの専用ピットから単独に搬入・搬出できる。このため発電機の上には、大形の発電機搬入ハッチが設けられている。ランナを単独に取り出せることはチューブラ水車共通の特長である。

VI. 現地据付、組立

大形機でありながら厳しい輸送制限のもとに建設される本発電所の機器は、分割数が非常に多いため、据付・組立作業には特別な配慮が要求される。

吸出し管は一次コンクリートと同時に打設され、クレーン稼働後ケーシングとハッチを据付し、コンクリートに埋め込まれる。ケーシングは高さ14m、幅11mに及ぶ超大形の現地溶接品で、かつ水車・発電機の据付基準になる幾つかの機械加工部を有するが、剛性が小さいために据付後の寸法確保には種々の手段と対策がとられている。

チューブラ水車の特長から建家面積が狭く作られているので、部品の搬入、組立の順序、場所は綿密な計画のもとに実施される。

大物部品は、組立室にて一体化し、転倒したのち吊り込まれるが、これらの作業には、多くの特殊工具を用いて作業の安全と能率化が図られている。

VII. あとがき

以上赤尾発電所の概要について述べたが、このような記録的大容量機の採用に積極的に取り組まれ、低落差地点開発に先鞭をつけられた関西電力殿に敬意を表すとともに、その一端を担う機会を与えて頂き、かつ終始御指導を賜った関係各位に心からお礼を申し上げる次第である。



*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。