

超大形・大容量バルブ水車・発電機 (米国ニューマーチンズビル発電所向け)

斉藤 純一郎(さいとう じゅんいちろう)

矢野 公惟(やの まさのぶ)

安部 昭(あべ あきら)

1 まえがき

落差約25m以下の地点に適用されるバルブ水車・発電機のうち、出力10MW以上、ランナ径4m以上の大形・大容量機が開発されて20年以上になるが、最近特にこの大形・大容量バルブ水車・発電機の有利性が見直されている。

富士電機は、昭和53年に運転開始した関西電力(株)赤尾発電所(34MW、ランナ径5.1m)以来、数々の大形・大容量バルブ水車・発電機を製作、納入し続けているが、現在世界でも屈指の大きさを誇る米国ウエストバージニア州ニューマーチンズビル(New Martinsville)発電所向けに、ランナ径7.3m、固定子枠外径8.4mの超大形・大容量バルブ水車・発電機を設計、製作、据付中であるので、ここにその概要を紹介する。

2 プロジェクト概要

本プロジェクトは、米国ミシシッピ川支流のオハイオ川

に設置されているハンニバルダム(左岸をバイパスして建設される発電所に、有効落差最高6.4m、最大使用水量396 m³/sを利用して、最大発電機出力19,540kWのバルブ水車・発電機2台を据え付けるものである。

図1に発電所付近の地図、図2に発電所全体配置図、図3に水車・発電機断面図を示す。なお、このタイプの発電所は大形河川の水量調整、洪水防止などのために設けられ

図2 発電所全体配置図

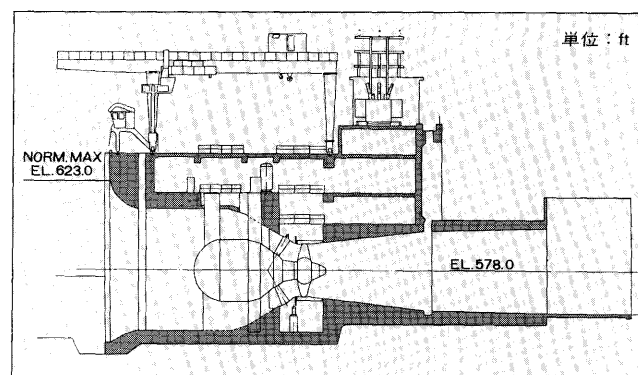


図1 発電所付近地図

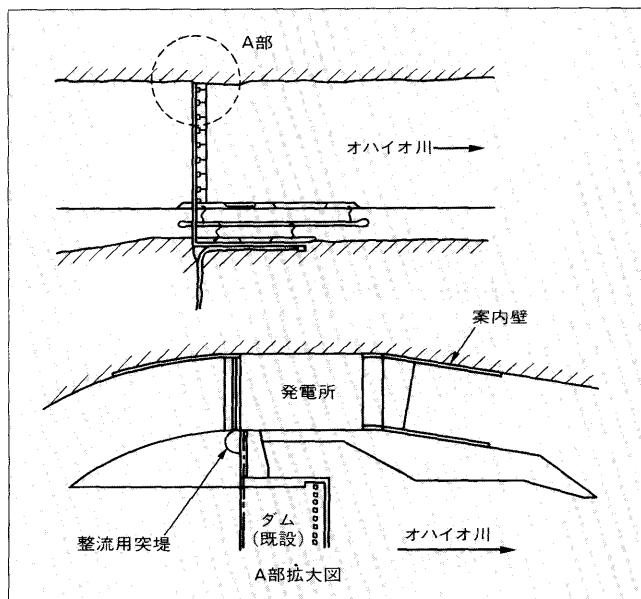
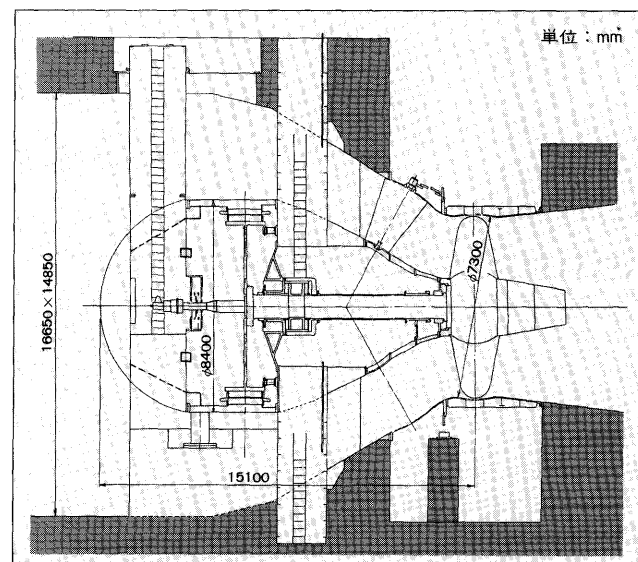


図3 水車・発電機断面図



斉藤 純一郎

昭和53年入社。水力発電所向け機器のとりまとめ業務に従事。現在、川崎工場水力技術部。



矢野 公惟

昭和29年入社。水車の構造設計に従事。現在、川崎工場水力設計部課長。



安部 昭

昭和42年入社。誘導電動機の設計に従事。現在、川崎工場回転機設計部。

らるダムに付随して建設されるもので、同様の開発は今後とも数多く行われると思われる。

一方、この発電所建設は最終顧客との間のフルターンキー契約であり、その計画・遂行にあたっては、機器の設計・製作のみならず、総合的なコンサルタント業務が大いに要求される。富士電機は、米国ベクテル社とともに、フィージビリティスタディの段階から、発電所の位置、建屋の構造、主機の出力・寸法、年間発生電力量、据付方法・期間、経済性などを考慮した総合的計画の作成に参画し、発電所の最適化を達成している。特に主機の出力・寸法の決定に際しては、世界でも運転実績のないランナ径8.0mの機器の採用も考慮して、河川の流況、年間発生電力量、輸送制限などの検討を行った。また採用に至らなかったが、建屋を鋼板プレハブ構造とし、その建屋に工場にて水車・発電機を組み込み、発電所ごと一体輸送する案なども検討された。

以下に最終主機仕様を示す。

2.1 仕 様

2.1.1 水 車

形式：横軸円筒形可動羽根プロペラ水車（バルブ水車）
 出力：7,230/18,710/9,370kW
 最大出力：20,040kW
 有効落差：6.4/5.4/3.3m
 流量：127.1/396.2/353.4m³/s
 定格回転速度：64rpm
 比速度：1,074(m-kW)
 ランナ径：7,300mm
 最大水圧：18.3m（水車中心において）
 最大速度上昇率：60％

2.1.2 発電機

形式：横軸三相交流同期発電機
 出力：21,620（最大）/18,800（定格）kVA
 定格電圧：6.9kV
 定格周波数：60Hz
 定格回転速度：64rpm
 定格力率：0.9（遅れ）

固定子枠外形：8,400mm
 励磁方式：静止形サイリスタ方式

③ 特 徴

3.1 超大形バルブ水車・発電機

本水車のランナ径は7.3mで、その大きさは現在設計、製作、据付中のもも含め世界で最大級に位置づけられるものである（表1参照）。このため、水車・発電機の受ける力も大きく、その設計にあたっては有限要素法による構造解析など、富士電機の数多くの実績に基づいて慎重な検討が重ねられている。

3.2 超低落差水車

本発電所は有効落差が最大でも6.4mと低く、しかも、年間の約5％の期間は有効落差3.3mで運転されるという超低落差かつ大変落差地点である。更に有効落差2mにおいて1時間運転することも要求されており、これまでになく広範囲な運転領域を要求されている。この超低落差かつ大変落差仕様を満足させるため3枚羽根ランナを採用し、良好な効率、キャビテーション特性を得ている。

3.3 水車・発電機主要部品の一体輸送

超大形水車・発電機にもかかわらず、ランナ、内・外側ガイドベーンリング、固定子、回転子、トップカバーなどの主要部品は一体に組み立てられ日本から出荷される。これらの輸送寸法は最大10.8m×10.8m×3.5m（内・外側ガイドベーンリング）にも及ぶ。組み立てられた主要部品はパナマ運河を経て、ニューオリンズ港まで輸送された後、バージに積み替えられる。ここから発電所地点までの約3,000kmは、バージにてミシシッピ川・オハイオ川を約5週間でさかのぼることになる。こうすることにより現地での据付期間を大幅に短縮し、発電所の総建設費を低減するよう考慮されている。

表1 世界の大形バルブ水車

（ランナ径≧7.0m）

発 電 所 名	河 川 名（国 名）	台 数	出 力 (MW)	有効落差 (m)	ランナ径 (m)	運転開始 (年)
Murray L and D	アーカンサス（米 国）	2	19.5	5.6	8.4	製作中
Sydney A. Murray, Jr. (Vidalia)	ミシシッピ（米 国）	8	24.0	4.5	8.2	未 定
Racine	オハイオ（米 国）	2	24.6	7.0	7.7	1983
Saratov	ボルガ（ソ 連）	2	47.3	15.0	7.5	1972
Jenpeg	カナン（カナダ）	6	28.0	4.9	7.5	1976
Rock Island	コロンビア（米 国）	8	53.0	12.1	7.4	1977
New Martinsville	オハイオ（米 国）	2	19.8	6.4	7.3	据付中
St. Mary's	セント・メアリー（カナダ）	3	18.0	5.7	7.1	1983

④ 水力性能

超低落差・大流量水車は剛性及び経済性を考えて、できるだけ寸法を小さくしなければならず、そのため単位流量〔 $Q_{11}=Q/D^2\cdot\sqrt{H}$ 、 Q ：流量（ m^3/s ）、 H ：有効落差（ m ）、 D ：ランナ径（ m ）〕をできるだけ大きくとることが必要となる。しかしながら単位流量が大きくなれば、単位落差あたりの損失も大きくなるので、発電所全体の水路損失の増大をいかにして防ぎ、効率を高くするかが最も重要な課題となる。

本水車の場合、実機最大流量（約 $400\text{m}^3/\text{s}$ ）に相当する単位流量は $3.3\text{m}^3/\text{s}$ にも及び、この時のランナ出口での速度水頭（運動エネルギー）は、有効落差の約100%にも達する。この速度水頭（運動エネルギー）をできるだけ多く圧力に変換して回収するために、圧力回復率の高い直線形吸出し管が採用されている。

しかしながら、いかに最適化された吸出し管を用いても、吸出し管出口ではなお多くの運動エネルギーが回収されずに排棄損として残されている。そこで、吸出し管下流の放水路形状についても検討を加え、発電所出口の両岸に案内壁（トレーニングウォール）を設けて排棄損の低減を図っている。

また、発電所入口部の流れは流速、流入角ともに一様でなければならないが、ダムでせき止められた河川の主流は、強力な二次流れを伴って発電所へ流れ込む。このため、取水口で流れが乱れ、偏流によるトラッシュラックの水力損失を無視できなくなる。この損失を低減して、偏流を少なくする目的でオハイオ川からの取水部に、流線形をした整流用突堤（ガイドピア）を設けている。

このように本発電所では、水力損失の低減のため、水車だけでなく、発電所取水部や放水路形状についても種々の対策が施されている。これらの対策は米国三大水理研究所の一つであるアイオア大学において、ダム全体（縮尺 1/160）及び発電所付近（縮尺 1/40）の相似模型を用いた水理実験において、その有効性が確認されている。

一方、大きな単位流量に対応するため、従来よりも羽根枚数の少ない3枚羽根ランナが採用されている。このため、羽根1枚あたりの水力的負荷は大きくなり、キャビテーションが発生しやすくなる。したがって、効率だけでなく、キャビテーション特性にも重点をおいた設計が必要となるが、三次元流れ理論を駆使したコンピュータ解析により、その両方の優れたランナの開発に成功している。

なお、水車単体の性能確認のための模型実験は、富士電機の流体力学研究所において実施され、良好なる水力性能が確認されている。

⑤ 水車構造

5.1 バルブの支持構造と剛性

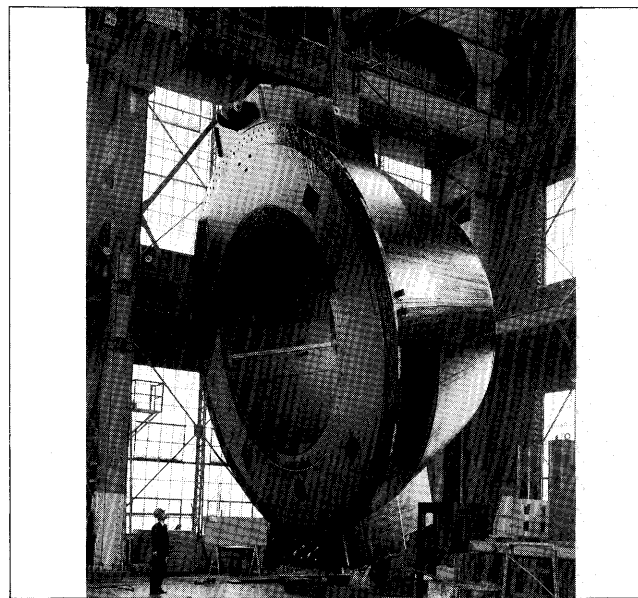
水圧スラスト、軸受荷重、回転トルク、振動力などが作

用する大形柔構造の「バルブ」を基礎コンクリートで支持する構造には、幾つかの方式がある。記録的な大形ランナを持った本発電所の支持方式選定に当たっては、あらゆる運転条件における内側ガイドベーンリングの変位（変形）、ガイドベーンサイドギャップの変化、ランナギャップへの影響などを過去の現地実測結果を反映した有限要素法解析によって慎重に検討した結果、主に上・下2本のステーションで支持する富士電機の標準構造に決定した。ステーションは、前記した設計上の要点を満足する強度・剛性と必要な保守スペースを有し、かつ流れに対する影響が少なく、コンクリート工事が容易なように配慮されている。また、ステーションのほか、補助的に防振ステーやケーシング支えを設けてバルブの固有振動数を増加させる対策が施されている。

5.2 主要埋込部品

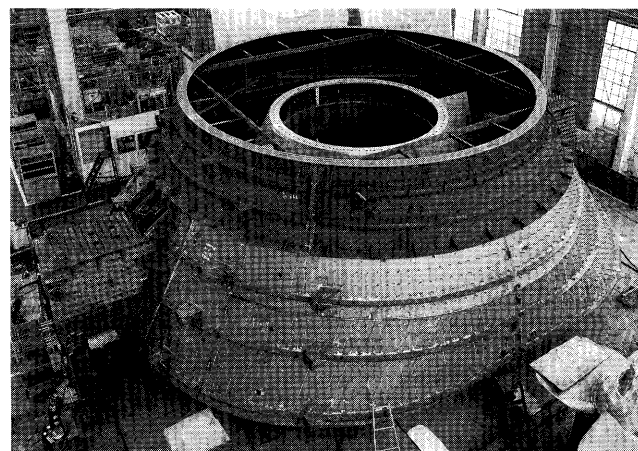
鋼板溶接製の外側ケーシング及び吸出し管は現地で組立・溶接されたのち、コンクリートに埋め込まれる。吸出し管は建屋コンクリート打設と同時に、また内・外側ケー

図4 工場組立中の内側ケーシング



N89-5120-6

図5 工場組立中の内・外側ケーシング



N89-5120-27

シングは建屋完成後に据付・組み立てられ、埋め込まれる。内側ケーシングは水平二分割・ボルト結合、ステーバーンは現地突合せ溶接構造である。内・外側ケーシングの下流側及び内側ケーシングの上流側の各フランジは、発電機エアギャップ、ガイドベーンギャップ、ランナギャップなどを左右する重要な基準面である。あらかじめ埋め込まれた吸出し管の中心とケーシング中心を一致させ、かつ、剛性の小さい部品で基準面を正確に確保する据付手法については、多くの大形バルブ水車の経験を生かして、最少の日程で行うよう工夫されている。

5.3 ガイドベーン、同操作機構

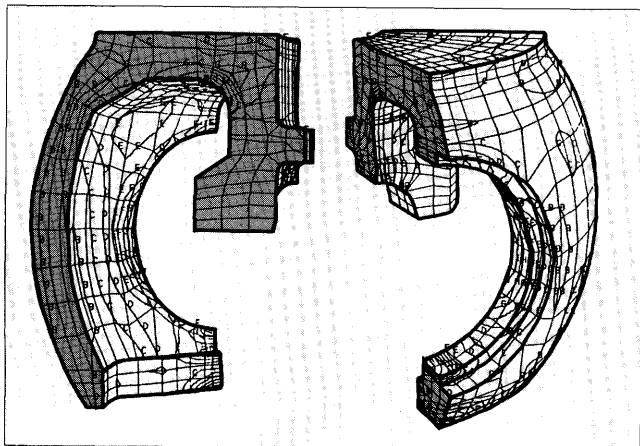
ガイドベーンは鋼板溶接構造で、両端面及びシャッタ面はステンレス鋼で製作される。内・外軸は内側ガイドベーンリングの変位に対応できるように球面軸受で支持されている。ガイドベーンは、2個の油圧開閉式サーボモータにて操作され、油圧が喪失した時には重錘にて自動閉鎖が可能な方式がとられている。

ガイドベーンリングには、ベンディングリンクが採用されているので、弱点ピンの場合のようにフリーになったガイドベーンによる弱点ピンの連鎖破断が起こらない構造となっている。

5.4 ランナ、同操作機構

3枚羽根・直径7.3mの大形可動羽根ランナは、バルブの下流側にオーバハングして取り付けられる。3枚羽根のため、ランナ操作機構の収納スペースには比較的余裕があるので、ランナサーボモータ及び同操作機構には構造が簡単で、組立が容易な新構造を採用した。圧油導入装置は、発電機ロータの上流側に設置され、圧油は主軸の中心穴を通して、ランナボス内のサーボモータに導かれる。圧油導入装置のシール構造には、横軸機用として既に開発されているフローティングメタル方式を採用している。この方式は、軸中心の据付誤差、振動に対して安定した性能を有するので、富士大形バルブ水車のすべてに採用されている。

図6 ランナボスの有限要素法解析



5.5 その他

ガイドベーン、水車軸受及び主軸シールは、いずれもバルブ水車の最も重要な部品であり、これらについては数多くの運転実績を持つ富士電機の標準構造が採用されている。

6 発電機の構造

6.1 通風冷却

発電機の通風冷却には、空気冷却器を使用した全閉強制両通風冷却方式を採用している。強制ブロワ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、また一部は回転子センタを通して下流側の極間から固定子に入り、固定子枠の上流側に設けたエアガイドで導かれ、トップカバー、空気冷却器を経てブロワに戻る。また本機では縮小モデルによる通風実験により、通風抵抗の低減に努め、ブロワ駆動電動機容量は、従来機に対して50%程度の低減を図っている。

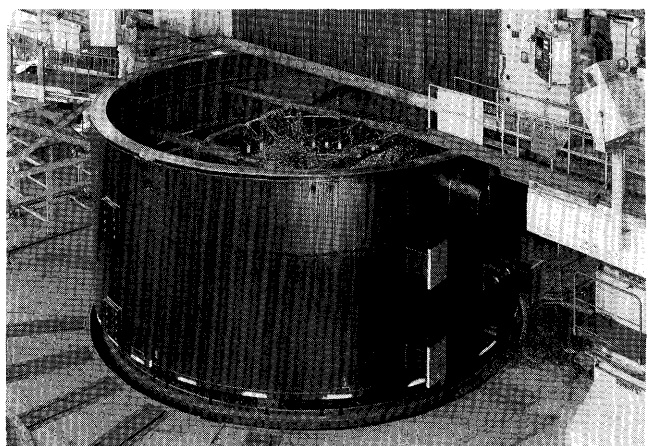
スリップリング室は、ブラシ粉が本体へ混入しないように、本体から分離した全閉構造としている。また、スリップリング室の冷却は、カバー外表面からの放熱を利用して冷却する方式を採用している。

6.2 固定子

固定子外径は水路の最適条件、 GD^2 、 Δn 、 Δp などから直径8.4mと決定された。直径が大きくなると据付過程における固定子の変形が問題となる。また、運転中に流水によって冷却される固定子により鉄心の熱膨張が拘束されるため、鉄心の内部応力も無視できないほど高くなる。この高い内部応力により鉄心に波打ちが発生しやすくなるため、これらの子防策として次の対策を実施している。

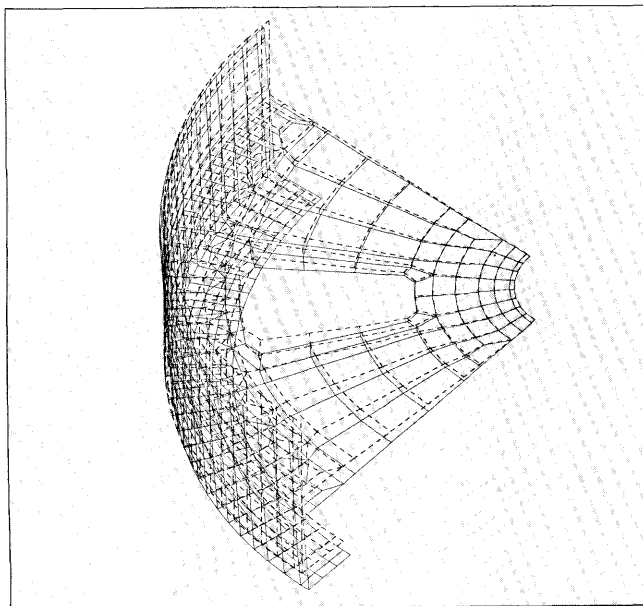
- (1) 据付及び運転中における固定子の剛性を向上させるために、固定子内に恒久的な補強ビームを設けている。
- (2) 固定子枠による鉄心の半径方向の拘束を避けるために、固定子枠と鉄心外径間に特殊な考慮を払っている。

図7 工場組立中の固定子



N89-5119-4

図8 回転子の有限要素法解析



(3) 据付時における軸方向のエアギャップの平均化を図るために、回転子のたわみに合わせて固定子枠を水車ケーシングに傾斜させて据え付ける方式を採用している。

6.3 回転子

回転子は磁極、回転子センタから構成され、センタは主軸に多数のリーマスタッドで完全固定されている。磁極は回転子センタにスタッドにより取り付けられ、一体で出荷される。回転子センタはリムとディスクで構成されたいわゆるT字形センタ構造を採用している。

大きな直径のT字形センタの採用に当たっては、有限要素法解析による固有値解析、無拘束速度におけるセンタリムの軸方向変位アンバランス、及び応力の解析を行い、最適形状寸法が決定されている。

6.4 軸受

軸受の潤滑は全軸受共通に使用する上部潤滑油タンクを用いた重力式強制給油方式とし、潤滑油ポンプなどの故障によって、補給が停止しても、安全に停止可能な給油方式を採用している。なおガイド軸受には、水車・発電機とも

に低速回転時における軸受メタルの安全性を増すために、オイルリフタを具備している。

軸受配置は、軸系の危険速度、たわみ、軸受の保守、据付工期の短縮などを考慮して、ランナ及び発電機回転子を共にオーバハングさせた2軸受方式を採用している。スラスト軸受は、下流方向の正スラスト300tのみならず、負荷遮断時の逆スラスト660tに対して、十分余裕を持たせたミッチェル形スラスト軸受を採用している。ガイド軸受は、回転子がオーバハングして取り付けられていることによる軸の傾きに対して容易に追従できるよう、特殊なフランジ構造を持ったガイド軸受サポートに取り付けられている。

6.5 その他

水中に設置されるバルブ水車・発電機において、漏水・結露対策は重要な課題である。外水と接するすべての分割フランジ部にOリングを二重に設け、更に二重のOリング間に溝を設けて漏水防止を図っている。この溝は、漏水検知と万一の漏水時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配慮されている。また、トップカバー及び固定子枠の最下部には、異常漏水や結露水があった場合に、自動起動する排水ポンプを各々に備えている。また、主機停止時における機内の結露を防止する目的で、除湿機も併設されている。

7 あとがき

以上、ニューマーチンズビル発電所向けバルブ水車・発電機の特徴と概要を述べた。

先述のとおり、今後、大形・大容量バルブ水車・発電機を有する発電所の開発はますます多くなっていくと思われるが、本稿がこれらの開発の計画に少しでも御参考になるところがあれば幸いである。

参考文献

- (1) 上田庸夫ほか：大容量バルブ水車・発電機、富士時報、Vol. 53, No.6, p.365-372 (1980)
- (2) 北原義彦ほか：電源開発(株)佐久間第二発電所納入バルブ水車・発電機、富士時報、Vol.55, No.4, p.248-253 (1982)



＊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。