インド・ガトガール発電所納入揚水発電設備

早馬　弘（はやま　ひろむ）　鵜川　義昭（うかわ　よしあき）　並木　尚紀（なみき　たかのり）

1　まえがき

インド・マハラシュトラ州灌漑（かんがい）局（GOMID）向けガトガール発電所の発電設備は1998年３月に受注し，1999年末の出荷をめざし現在１号ポンプ水車の静止部の製作が鋭意進められている。

富士電機はこれまで，マハラシュトラ州にはパイタン発電所，ウジャニ発電所向けに２台の揚水発電設備を納入している。これらの設備が順調に稼動していることから，富士電機が納入する設備に対する期待が大きい。

顧客にとっては本発電所は初の高落差・大容量の揚水発電設備である。マハラシュトラ州のピーク需要が供給量を上回っており，ピークロード対策の発電所として計画された。

表１にポンプ水車・発電電動機の仕様を示す。

本発電所に納入する機器はインド有数の重電機メーカーの Bharat Heavy Electricals Ltd.（BHEL）社と共作される。富士電機は技術リーダーとして主機の設計を行い，ポンプ水車については１号機を富士電機，２号機（ランナを除く）を BHEL 社が製作を担当する。発電電動機については固定子コイルを除く固定部を BHEL 社，主な回転部を富士電機が製作を行う。

顧客に対しては富士電機がプラント全体の品質保証を負う契約になっており，BHEL 社にて製作される製品に対する製作指導，品質管理をも十分に行う必要がある。

本稿においては，本発電所機器の主な特徴を紹介する。

2　プロジェクトの概要

本発電所はインド・ボンベイから東に約 130 km の地点に位置している。貯水容量 520 万 m^3 の上池と 350 万 m^3 の下池を使い，日曜日を除く日中の６時間を発電，夜間の７時間を揚水のために運転を行う発電所として計画されている。発電所は完全地下式で，ポンプ水車・発電電動機が２台設置される機械室と，主変圧器・出口弁が設置される変圧器室から構成されている。地上制御室に設置されるコンピュータにより光ケーブルを介し地下の主機は遠隔制御・監視される。**図１**に発電所設備のレイアウトを示す。

3　ポンプ水車

本発電所のような高落差高速ポンプ水車は，高い水圧と高速化による機器の小形化により静的な応力レベルが高いだけでなく，運転状態の頻繁な変化や水圧脈動により変動応力の繰返し数も多く，疲労強度を十分に配慮した設計が要求される。また一方で高速化に伴い，効率，振動騒音，

表１　ガトガール発電所納入ポンプ水車・発電電動機の主要仕様

ポンプ水車	形式		立軸フランシス形ポンプ水車
	台数		2台
	ランナ径		3,468 mm
	水車	最大出力	139,000 kW
		有効落差	445/410/390（m）（最高/基準/最低）
		使用水量	37.4 m^3/s
		回転速度	500 r/min
		特有速度	99.6 m-kW
	ポンプ	最大入力	149,000 kW
		全揚程	455/405（m）（最高/最低）
		揚水量	34.5 m^3/s
		回転速度	500 r/min
		特有速度	32.5 m-m^3/s
発電電動機	形式		立軸三相同期発電電動機
	台数		2台
	最大出力		G：147,000 kVA / M：150,000 kW
	電圧		13,800 V
	力率		G：0.9 / M：1.0
	周波数		50 Hz
	回転速度		500 r/min
	短絡比		1.0
	はずみ車効果（GD^2）		1,600t-m^2
	始動方式		サイリスタ始動

早馬　弘

水車の構造設計に従事。現在，富士・フォイトハイドロ(株)水車設計部マネージャー。

鵜川　義昭

発電機の構造設計に従事。現在，富士・フォイトハイドロ(株)発電機部リーダー。

並木　尚紀

水力発電プラントのエンジニアリングに従事。現在，富士・フォイトハイドロ(株)プラント部。

図１　発電所全体レイアウト（断面）

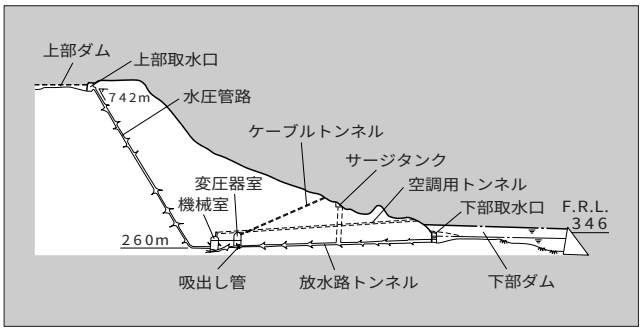


図２　模型ランナ

N89-6670-2

キャビテーション性能などの流力性能を確保することも重要な課題である。

富士電機では1979年に納入した Korea Electric Power Corp. 清平揚水発電所向けポンプ水車で得た設計・製造技術と品質管理体系を基礎にして，その後も継続的に最新の技術を導入し開発してきた。現在，ガトガール発電所のポンプ水車の設計製作を進めており，以下にその技術を紹介する。

3.1　流力設計

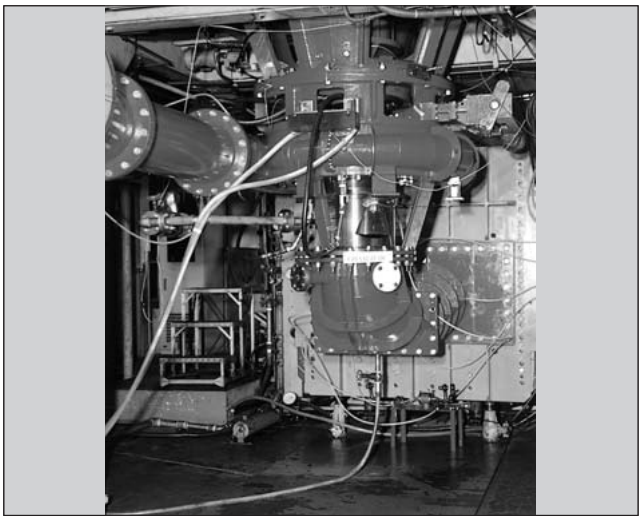
本発電所では最新の三次元粘性流れ解析にて，ステーベーン，ガイドベーン，ランナを含む流力形状の最適化を行い，その結果を踏まえて新形状のガイドベーンと本発電所向けに新たに開発した７枚羽根ランナを採用した。この７枚羽根ランナは効率やキャビテーション性能に優れているだけでなく，振動応力が従来の６枚羽根ランナより低減されている。模型ランナを**図２**に示す。

3.2　模型試験

前述の流力設計を基に模型試験を実施し，すべての性能が当初計画どおりに確保されていることを確認し，1999年４月に顧客である GOMID の模型立会い試験を完了した。**図３**に本発電所の模型試験装置の外観を示す。

模型試験では効率やキャビテーション特性の測定だけでなく，水面押下げ運転とその後の排気運転時のランナ空転トルク測定や軸方向水スラスト・径方向水スラストの測定も行った。特に調相運転時やポンプ起動時に安定的かつ迅速な制御性を確保するために重要となる，水面の挙動や下部吸出し管への漏気状態を測定観察し，問題のないことを確認した。

図３　模型試験装置



N89-6670-4

3.3　構造解析

先に述べたように高落差高速ポンプ水車では，静的な応力レベルが高いだけでなく変動応力の繰返し数も多く，疲労強度の検討が重要である。また，高速化に伴い振動に対する設計的配慮も必要となる。そこで本発電所では以下の観点から，ポンプ水車の構造検討を進めた。

(1)　三次元ソリッドモデルでの有限要素法（FEM）応力解析結果に基づく応力集中部の疲労強度評価
(2)　三次元シェル全体モデルおよび二次元軸対称全体モデルでの FEM 変形解析結果に基づく機器剛性評価
(3)　三次元ソリッドモデルでの FEM 固有値解析結果に基づく振動評価
(4)　回転軸系の振動応答解析結果に基づく軸振動評価

図４にはガイドベーンの三次元ソリッドモデルでの FEM 解析例を，**図５**にはケーシングとステーリングの三次元シェルモデルでの FEM 解析例を示す。

3.4　ポンプ水車構造の特徴

図６に本体断面図を示す。本発電所のポンプ水車構造は以下の特徴を持つ。

(1)　上下カバーのガイドベーン対向面にガイドベーンサイドシールを設け，調相運転時のガイドベーン漏水を低減し，ランナ空転トルクの増大とケーシング側への空気混入を防止している。
(2)　下カバー剛性を高め下カバー下面にルーフィング材をはることにより，下カバーはステーリング側基礎ボルトと上部吸出し管側基礎コンクリートの内外支持となる。この基礎構造により，上カバーに作用する上向き水スラ

図４　ガイドベーンの FEM 解析

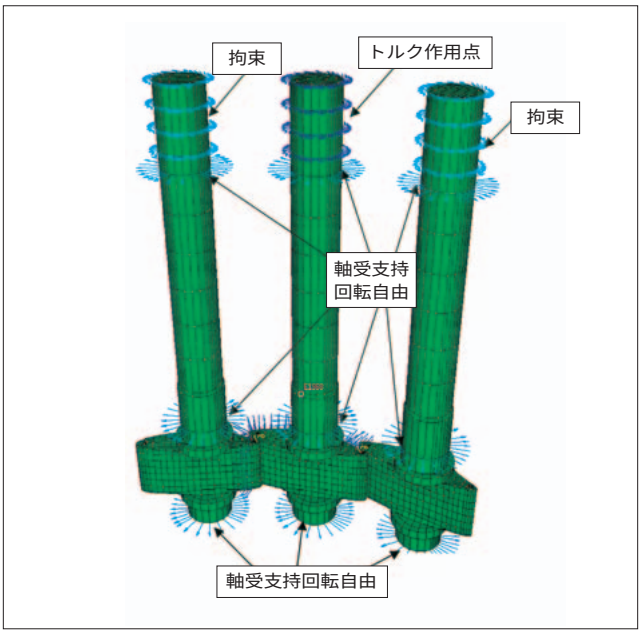
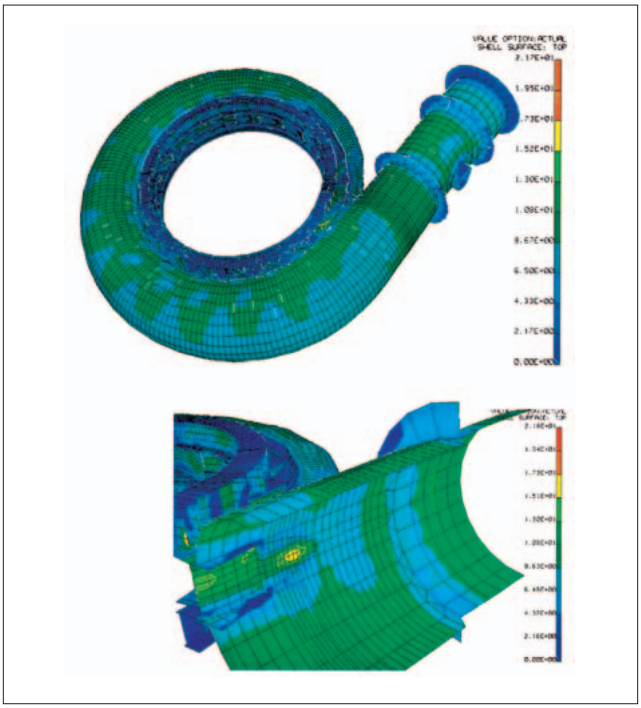


図５　ケーシング・ステーリングの FEM 解析



スト荷重と下カバーに作用する下向き水スラスト荷重が相殺し合い，基礎荷重を大幅に低減できる。

(3)　主軸受はランナに作用する大きなラジアル荷重を支持できる，負荷容量の大きなコッタ支持方式のセグメント軸受を採用している。本方式は軸受剛性も高く，回転軸系の振動を確実に抑えることができる。

4　発電電動機

4.1　構造の概要

発電電動機の本体断面を**図 7** に示す。

図６　ポンプ水車本体の断面図

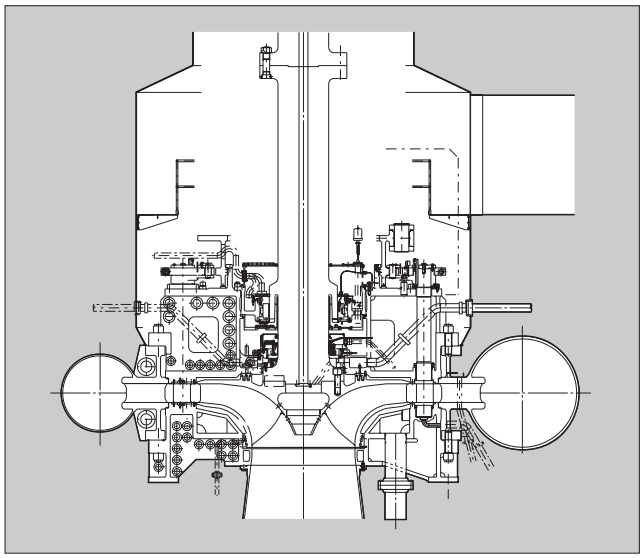
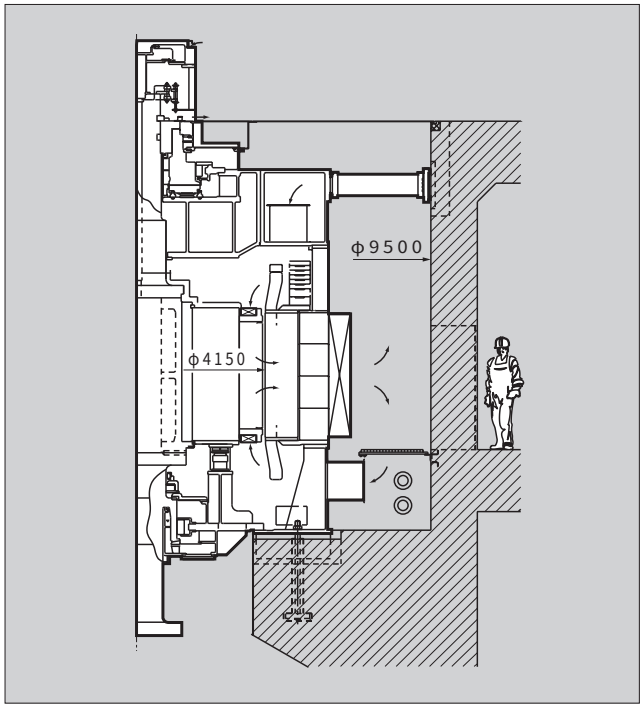


図７　発電電動機本体の断面図



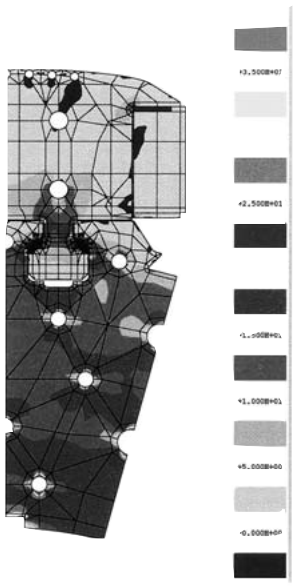
軸受配置はスラスト軸受が回転子の上部に配置される普通形構造とし，上部軸受ブラケット部には防振ステーを放射状に配置した。通風方式は高効率の電動ブロワによる強制通風方式とした。

4.2　固定子

固定子は輸送制限などを検討のうえ二分割構造とした。固定子巻線はレーベル転位を施した 1 ターン波巻コイルの三重星形結線とし，絶縁は富士電機の新 F レジン/F を採用した。

固定子鉄心は BHEL 社の工場にて製作・積層し，巻線は合せ目を除いて同社工場にてコイル入れを行い，現地据付け工期の短縮を図っている。

図８　磁極・ロータリムの FEM 解析



応力分布　　変　形

揚水用発電電動機の特徴である過酷なヒートサイクルの対策として，固定子枠，鉄心および巻線は熱膨張収縮を吸収しうる構造を採用し，熱応力疲労にさらされない設計としている。

4.3　回転子

回転子は鋼板溶接構造のロータセンタ，薄鋼板積層構造のロータリムおよび磁極から構成され，ロータリムは現地にて１リングに積層された後，ロータセンタに焼ばめにより取り付けられる。

磁極・ロータリムおよびロータセンタ部については，FEM による解析を行い，応力集中を含めた応力分布と変形を求め，低サイクル疲労強度の検討を行った。磁極とロータリムおよびロータセンタの解析例を**図８**，**図９**に示す。

4.4　軸　系

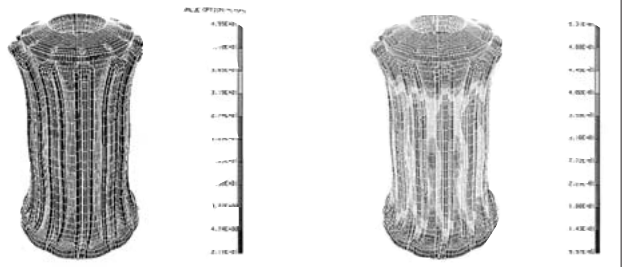
軸系は下部軸，ロータセンタ，上部軸および補機軸から構成される。水車軸を含めた軸系全体の危険速度検討を行うとともに，ポンプ水車ランナに作用する横方向動的水スラストの周波数成分に対する振動応答解析を行い，軸系各部の振れ，軸受反力，上下軸受ブラケットおよび防振ステーの必要剛性，基礎への伝達荷重などを分析し振動対策を行った。

4.5　軸　受

スラスト軸受は，各セグメントが中央で二重円板スプリングにより支持される可逆回転対応の富士電機製標準ミッチェル形軸受を採用した。始動・停止時に軸受しゅう動面に高圧油を供給するオイルリフタ装置が設けられている。

また，上下ガイド軸受は剛性の高いコッタ支持方式のセグメント軸受を採用した。軸受潤滑としては，上部軸受は効率のよい電動ポンプによる強制循環方式，下部軸受はセルフポンプによる自己循環方式とし，油冷却器は両軸受ともメンテナンスが容易な別置式を採用した。

図９　ロータセンタの FEM 解析



応力分布　　変　形

5　サイリスタ始動装置

本発電所のポンプ運転における発電電動機の始動方法はサイリスタ始動装置を採用している。このサイリスタ始動装置は直結電動機始動方式に比べて次のような利点がある。

(1)　主機が複数台の場合，１台の始動装置で切り換えて始動することが可能であり経済的である。
(2)　装置が静止形であるため保守が容易である。
(3)　発電電動機の構造が簡単である。
(4)　直結電動機の空転損失がない。
(5)　回生制動による省エネルギー効果がある。

5.1　始動回路の構成

主回路構成を**図10**に示す。構成は始動装置１台で２台の発電電動機に対して切り換えて使用できる方式としている。

始動装置は順変換装置（コンバータ），逆変換装置（インバータ），AC リアクトル，DC リアクトル，始動変圧器，アレスタ，遮断器，断路器，CT，PT および制御保護装置から構成されている。

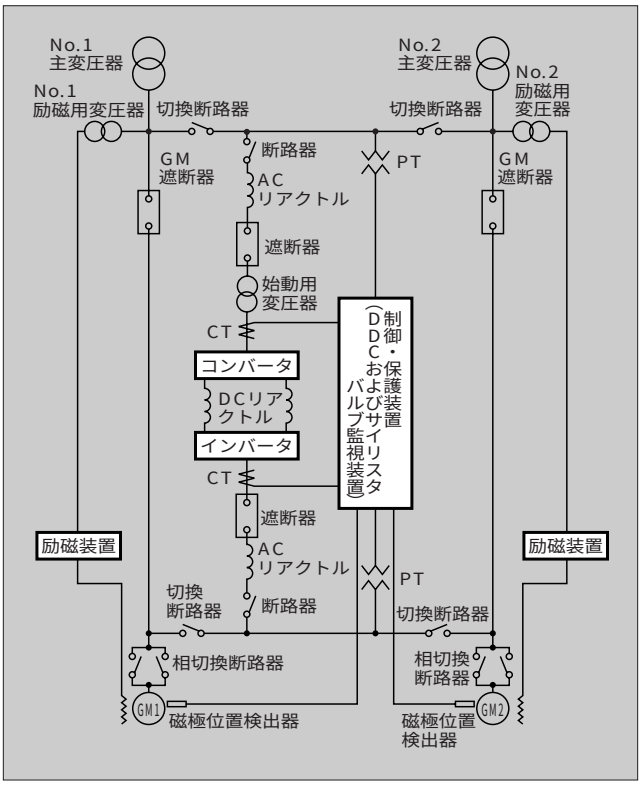
5.2　変換器の構成

富士電機ではパルミエット発電所向けに，サイリスタ始動装置を納入した実績があるが，当時のパワーエレクトロニクス技術状況により 4 kV 耐電圧仕様のサイリスタ素子を採用した。その後，パワーエレクトロニクス技術の開発は飛躍的に進み，素子の高耐電圧化が進んでいる。これらの状況を踏まえ，本発電所のサイリスタ始動装置には７kV 耐電圧仕様のサイリスタ素子を採用することとし，新規開発を行った。

サイリスタ素子を高耐電圧化することにより，それら素子を使用するインバータ装置およびコンバータ装置の素子直列数を削減することが可能となり，装置（収納盤）の縮小化およびコストダウン化を図ることができる。

また，素子数の減少によりサイリスタ素子ごとに設置される監視装置やスナバ回路も削減されるため，コストダウ

図10　サイリスタ始動装置の主回路構成



ン効果は非常に大きい。

なお，サイリスタ点弧には光間接点弧方式を採用し，変換装置の高圧部と制御装置部との信号の受渡しを光信号により行うことで高圧部と制御装置の絶縁対策やノイズ対策を行い，信頼性を高めている。

5.3　制御装置

前述のパルミエット発電所では，16ビット仕様のCPUを使用したDDC（Direct Digital Control）装置を採用したが，これも近年の技術動向から64ビット仕様とし，新規開発を行った。

このDDC装置とは，始動装置に必要な揃速（せんそく）制御などの機能をソフトウェアにて実現し，さらに高圧大容量変換器に対する保護機能を付加したものである。制御装置の信頼性向上のためにCPUは二重化（待機冗長方式）としている。

5.4　制　御

本発電所のサイリスタ始動装置は，ポンプ運転時の発電電動機の始動，定格回転速度までの加速制御および系統並入のための揃速制御を行うものであるが，電力回生制御が可能であるため，発電電動機を停止するときの制動装置としても使用している。

⑥　あとがき

以上，ガトガール発電所向け揚水発電設備の特徴について紹介した。

今後，揚水発電所の開発・計画に今回紹介した技術が生かされれば幸いである。

技術論文社外公表一覧

標　　題	所　　属	氏　名	発　表　機　関
SIMSによるSi窒化膜を含む多層絶縁膜の評価	富士電機総合研究所 〃 〃 松　本　工　場	植木　裕子 石渡　統 河島　朋之 多田　元	第60回応用物理学会学術講演会（1999-9）
4H-SiCショットキーバリアダイオードにおけるOBIC解析	富士電機総合研究所 〃 〃	辻　崇 荻野　慎次 上野　勝典	
μc-Si（p）層を用いたアモルファスシリコンセル(2)	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃 〃 〃	佐々木敏明 藤掛　伸二 田淵　勝也 吉田　隆 浜　敏夫 原嶋　孝一 市川　幸美	
a-Si系膜堆積におけるプラズマCVDの相似則	富士電機総合研究所 〃 〃	市川　幸美 藤掛　伸二 原嶋　孝一	
The study of the higih-performance encoder using the encoder model in the computer	富士電機総合研究所 〃 〃	松添　雄二 藤田　光悦 辻　伸彦	Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology（ICOSN 99）（1999-6）

＊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。