

# 落差600～700 m・容量400 MW級のポンプ水車

—技術開発と計画上の留意点—

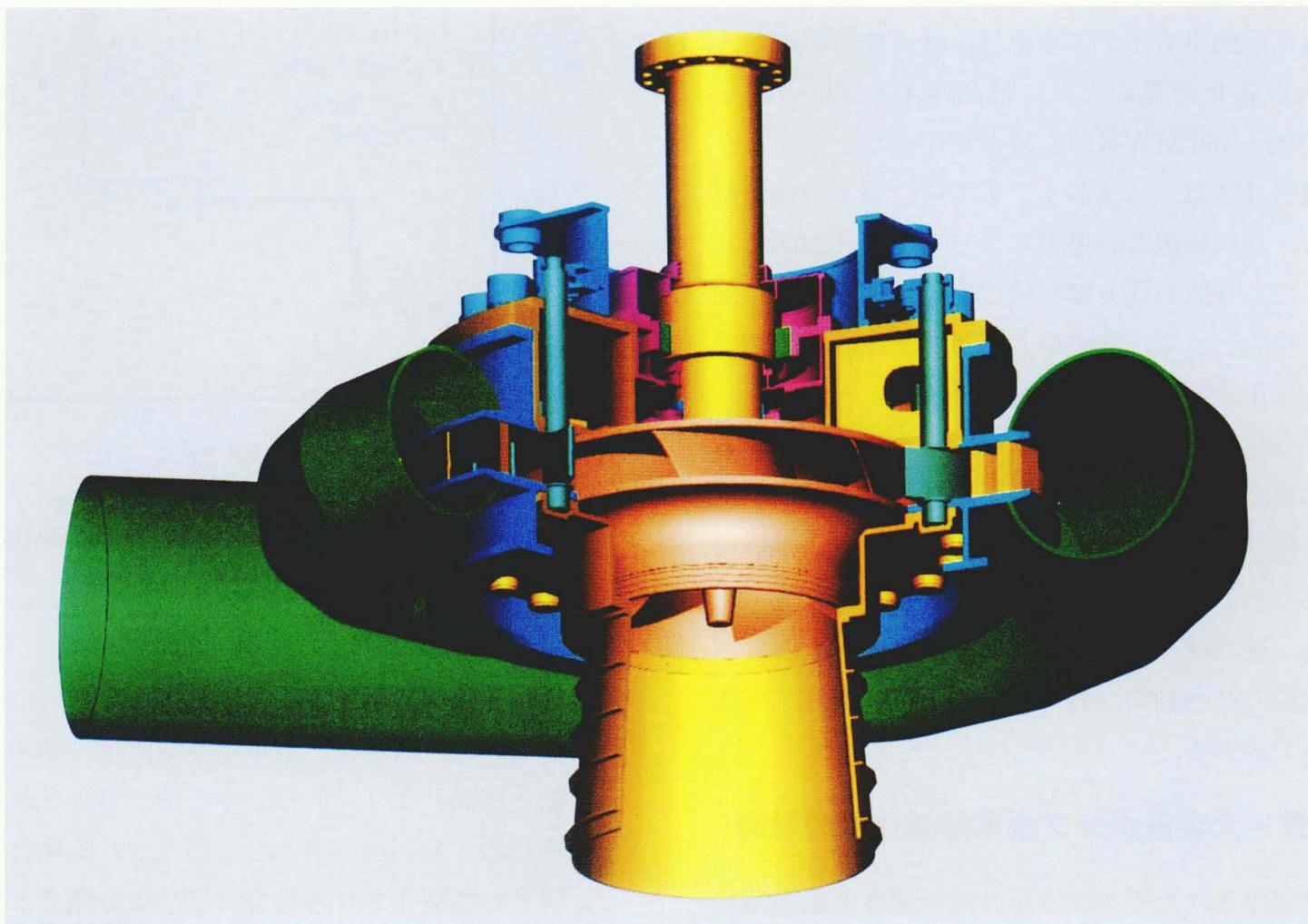
Planning of High Head, Large Capacity Pump-Turbine

吉田正博\* Masahiro Yoshida

新倉和夫\* Kazuo Niikura

佐藤譲之良\*\* Jōshirō Satō

原野正実\* Masami Harano



ポンプ水車の三次元組立断面図 コンピュータグラフィックス上で部品図から組み立てたポンプ水車三次元断面の一例である。三次元CADは、特に容量のわりに機器サイズの小さい高落差機の分解、組立、アクセススペースの検討や配管の設計などへの活用が期待される。

発電専用水車の持つ長い歴史に比べれば、ポンプ水車は比較的新しいものと言えるであろう。しかし、日立製作所が独自で国内初のポンプ水車の技術開発に着手して以来、すでに40年にわたる技術が蓄積された。この間、落差および容量は毎年のように記録を更新し続け、すでに落差では国産初号機の5倍、容量では25倍のポンプ水車が一般的なものとなっている。

国内の揚水計画地点は、発電所立地点の枯渇と経済性の追求から、ますます高落差・大容量化してきている。最近では落差600～700 m級、容量400 MW

級のポンプ水車が計画され、このような仕様のポンプ水車の設計が開始されたものもある。また、主機の回転速度を変化させ、揚水のAFC(Automatic Frequency Control)運転を可能とした可変速ポンプ水車も実用に供されている。

このように、特に従来実績を越える領域に位置づけられる新規揚水発電所については、既設機の経験や解析などから、新たに起こりうる物理現象を予想し、それらを十分考慮した最適な計画とすることが望まれる。

\* 日立製作所 日立工場 \*\* 日立製作所 日立工場 工学博士、技術士(機械部門)

### 1 はじめに

わが国での最高落差500 m以上のポンプ水車は、1973年運転開始の電源開発株式会社沼原発電所向け回転速度375 r/min、容量230 MWのもの3台をはじめとして現在8発電所、合計24台が稼動中である。さらに、8台が据付け中または試運転中である。

一方、現在計画中のポンプ水車は、経済性の観点から高落差・大容量化が進められ、最高落差が600~700 m級、容量が300~400 MW級のものが中心となっている。それらの機器寸法は、寸法および重さについての輸送制限の面から、高回転速度の選択によって小型化が図られている。また、夜間の電力調整機能を揚水運転時に付加することを目的として、計画中のポンプ水車の約半数で可変速機を採用する検討が行われている。

このような超高落差・大容量ポンプ水車を実用するには種々の課題がある。例えば、主要部品であるランナの水中固有振動数、水圧加振周波数およびランナが近接し、変動応力が高くなるのを回避する必要がある<sup>1)</sup>。

ここでは、既設機の実績と対比して高落差・大容量ポンプ水車仕様の計画動向、および計画上特に留意すべき事項について述べる。

### 2 高落差・大容量ポンプ水車計画仕様の動向

わが国で製作されたポンプ水車の回転速度と最高落差の実績を図1に示す。同図に、国内での二分割ランナと一体ランナとの適用実績境界を実線で、その高落差側への延長を破線で示す。

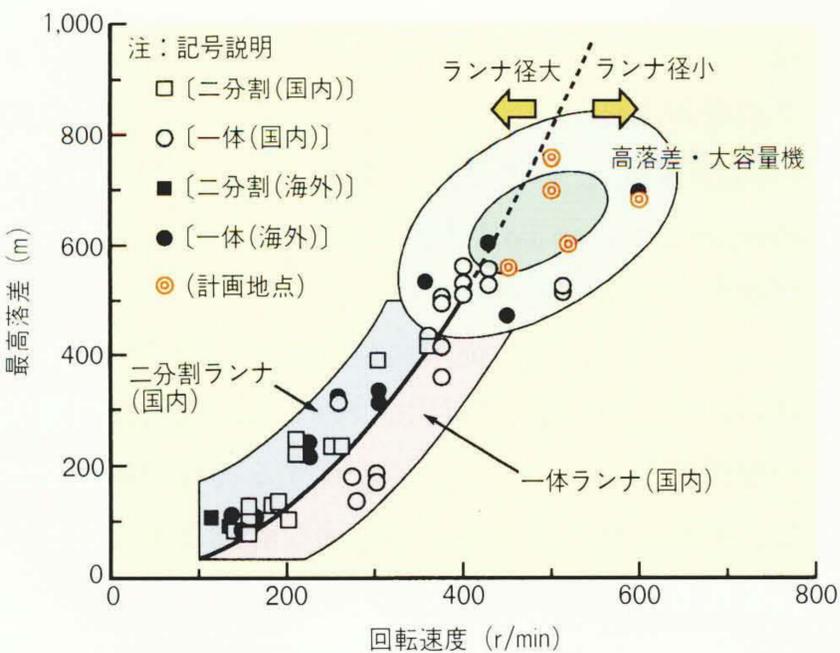


図1 ポンプ水車の回転速度・最高落差実績  
二分割ランナの適用範囲外の高落差機計画地点では、高回転速度が選択され、ランナ直径の小型化が図られている。

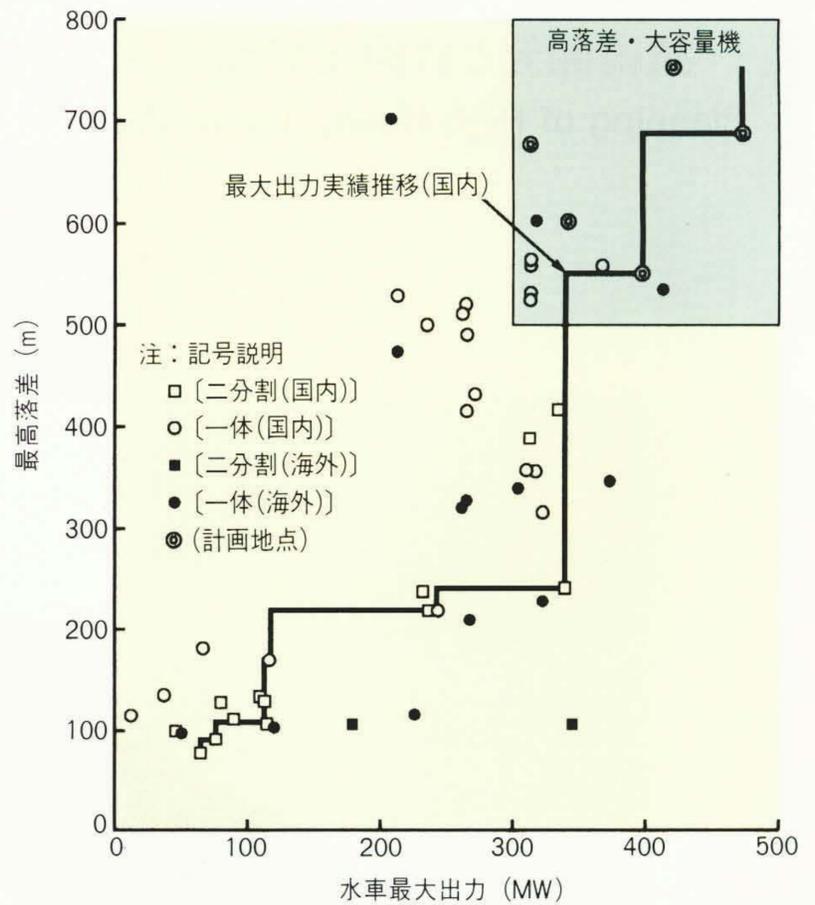


図2 ポンプ水車の最高落差・最大出力実績  
純揚水の時代になり落差200 m、単機出力200 MW級へ飛躍し、さらに500~700 m級、300~400 MW級へと高落差化、大容量化が進められている。

の延長を破線で示す。  
フランス形ポンプ水車用ランナは、その寸法と重さの輸送制限により、回転軸中心面で分割されフランジ接合される二分割ランナとして製作される場合と、一体ランナとして製作される場合の二つに分類できる。国内では、急峻(しゅん)な地形のために輸送条件が悪いので、世界にある二分割ランナ65台のうち40台がわが国で稼動している。海外向けに製作されたものや国内でも輸送条件の良い地点では、一体ランナとなっている。

また、二分割ランナはその取付けボルトの強度上、最高落差500 m以上が適用範囲外となる<sup>2)</sup>ため、500 m級ポンプ水車は、一体ランナが輸送可能な比較的条件の良い地点を中心として選定される。

現在計画中の地点は、落差600 mから700 m級のものが多く、回転速度が500 r/minから600 r/minのものが選定され、機器の小型化が図られていることが第一の特徴と言える。

最高落差と水車最大出力との関係を図2に示す。国内既設機では、落差が200 m以上に飛躍したときに水車出力は200 MW級へ、さらに300 MW級へと大容量化が図られた<sup>3)</sup>。現在の落差500 mから700 m級の計画では、400 MW級への出力増大が計画されていることが第二の特徴と言える。

また、国内での原子力発電の供給比率が増大し、近い将来夜間の必要電力量の大部分を原子力発電でまかなう状態も予想され、夜間の電力調整能力の確保を主目的として、可変速揚水発電システムが開発された。現在計画中の揚水発電所で約半数に及ぶポンプ水車に可変速機の採用が検討されていることが第三の特徴である。

### 3 ポンプ水車計画上の留意点

500 m級ポンプ水車製作初期では、メーカー側の実績をもとにしたポンプ水車の概略計画の方法が示されている<sup>3)</sup>。この章では、今後の高落差・大容量ポンプ水車の特徴と関連づけ、計画上新たに注意すべき事項について述べる。ただし、既報<sup>1)</sup>の超高落差・大容量ポンプ水車ランナでの水中共振などで留意すべき事項については省略した。

#### 3.1 吸出し管高さの選定

ポンプ水車の高落差化に伴い設備吸出し高さは、(1)ランナでのキャビテーション壊食を防止するために高い設備吸出し高さとする、(2)発電所建設の経済性の面から長放水路、高流速化および水路の共用化の採用が図られており、負荷遮断時での放水路内の水柱分離・再結合現象を防止するため、さらに高いものを必要とする傾向にある。

一方、揚水発電機器に対し電力システムの力率改善のために、**図3**に示す発電電動機を同期調相機として運転する調相運転のニーズが増大している。この運転は、電気入力低減のためにランナ室内の水を圧縮空気によって置換して、ランナを空中回転させるものである。

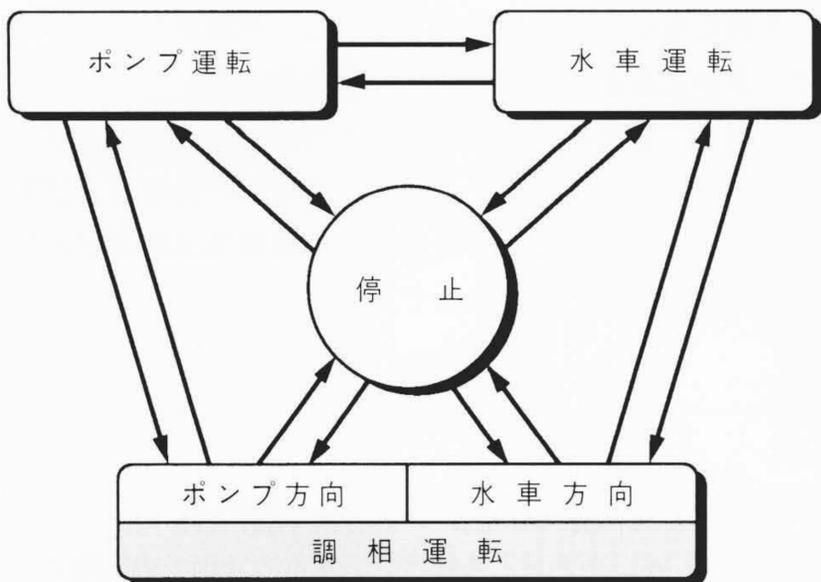
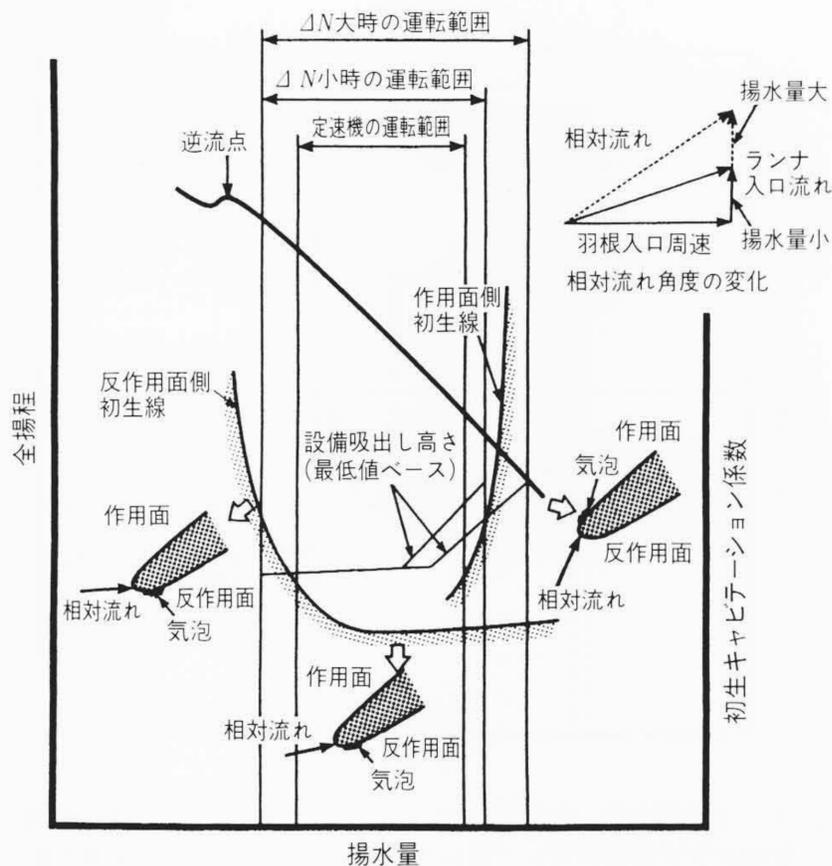


図3 揚水発電機器の運転モード  
ポンプ水車ランナを空中回転させ、発電電動機を同期調相機として運転し、系統の力率改善を行う調相運転に対するニーズが高まってきている。



注：記号説明  $\Delta N$  (可変速速度変化幅)

図4 可変速機と定速機のポンプ運転範囲比較

ポンプ水車ランナは固定羽根であるので、設計流量から大きく外れた揚水量では、初生キャビテーション係数が急増する。運転範囲の広い可変速機では、初生線が設備吸出し高さを上回る領域でのキャビテーションの発生が避けにくくなるのがわかる。

ここで、吸出し高さが高いと、ランナ室内の空気が高密度化することにより、ランナの誘起する気流が水への気泡混入効果と、かくはん効果を増大する。空気は吸出し管ベンド部を越えて放水路側へ漏れ、毎分数十立方メートルにもなることがある。これを防止し長時間の連続調相運転を可能とするには、ケーシング中心高さから吸出し管下端までの高さ  $Hd$  を深くする必要がある。高落差・大容量機では、 $Hd$  が10 m以上になる場合もあると推定されている。

この現象は気液二相の界面現象と気液二相流にかかわるものであり、未解明な部分が多い。高落差・大容量機の適正な吸出し管高さの選定は、従来機実績と模型試験とを組み合わせた比較検討により、慎重に行う必要がある。

#### 3.2 可変速機計画における留意点

可変速機のポンプ運転範囲を、模型ポンプ水車のポンプ特性上で定速機と比較して**図4**に示す。同図には、可変速速度変化幅  $\Delta N$  による運転範囲と、ランナ羽根への水の相対流入角度変化、およびポンプ羽根入口の初生キャビテーション係数を示す。

初生キャビテーション係数  $\sigma_{i1}$  は、羽根面にキャビテーション気泡の発生し始めるときの吸出し高さを、全揚程

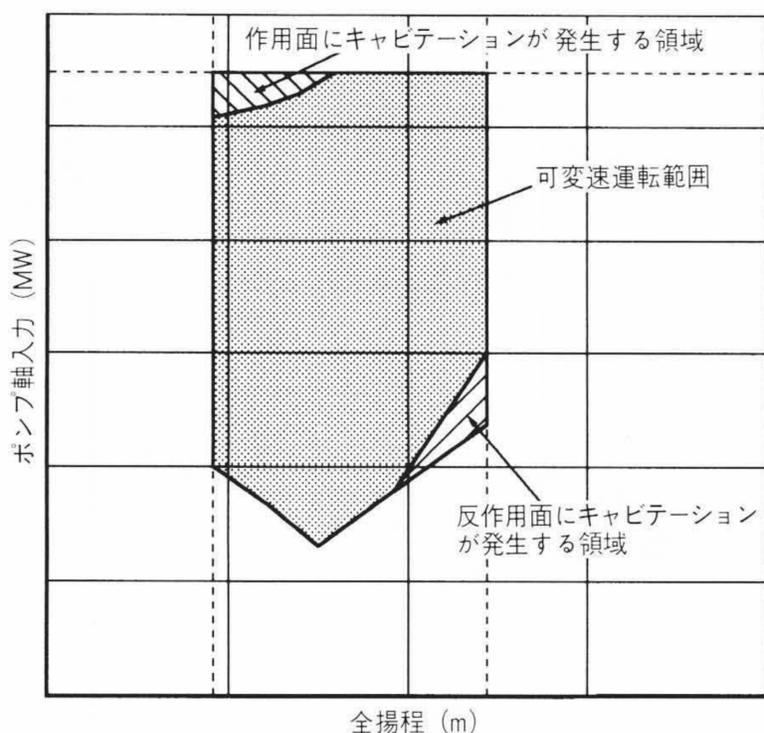


図5 可変速ポンプ水車のポンプキャビテーション発生領域  
 実物ポンプ水車のポンプ運転では、低揚程の大軸入力(大揚水量)側で作用面にキャビテーションが発生し、高揚程の小軸入力(小揚水量)側で反作用面にキャビテーションが発生する。

で無次元化したもので次式によって算出される。

$$\sigma_i = \frac{H_a - H_v - H_{si}}{H_p}$$

ここに、 $H_a$  : 大気圧(m)

$H_v$  : 水の飽和蒸気圧(m)

$H_{si}$  : キャビテーション初生吸出し高さ(m)

$H_p$  : 全揚程(m)

ポンプ水車ランナのキャビテーションは、図4に示すとおり揚水量の変化により、ランナ羽根への相対流入角が変化することによって発生するものである。つまり、揚水量が多い低揚程側では、揚水量の増大とともに作用面の初生キャビテーション係数が急速に増大し、揚水量が少ない高揚程側では、揚水量の減少とともに反作用面の初生キャビテーション係数が急速に増大する。したがって、定速機では、作用面と反作用面の初生キャビテーション係数の立上りの中間を運転範囲とすることで、設備吸出し高さの低減が可能である。

可変速機は定速機に対して、より低流量から大流量域まで使用し、いずれの領域でも初生キャビテーション係数が急速に増大するので、吸出し高さを多少高くしてもキャビテーションの発生を防止するのは難しい。実物可変速ポンプ運転範囲上でキャビテーションの発生しやすい領域を図5に示す。低揚程・大入力側の作用面キャビテーションの発生領域は、可変速速度変動幅が大きくなるほど広がる。

また、AFC運転などで指令速度を変化させる場合、実速度に対して流量の応答が遅れるので、定常時にはキャビテーションが発生しない運転領域でも過渡的なキャビテーションが発生することが予想される。

水路を共有する定速機のずれ負荷遮断で、水路分岐部を介して相互干渉現象が発生することが知られている<sup>5)</sup>。

同一特性のポンプ水車を定速機と可変速機として使用する場合でも、定速機と可変速機は回転速度の違いによってその運転特性が異なるので、負荷遮断などの過渡現象に関して水路系などの計画と協調をとる必要がある。

(1) 可変速機と定速機が水路を共有する場合には、同時負荷遮断でも相互干渉が起り、水柱分離・再結合現象発生の有無について検討する必要がある。

(2) 他号機の起動・停止に伴う圧力変動により、可変速機がポンプ運転逆流領域または水車運転のS字特性領域のラフ運転に突入する可能性がある。ポンプ水車の起動・停止時の水撃現象による圧力変動を抑制するように、水路系とポンプ水車の制御方法と協調する必要がある。

#### 4 おわりに

ここでは、今後の高落差・大容量ポンプ水車で留意すべき新たな検討課題について述べた。水路系などの計画で、多少とも参考になれば幸いである。

今後も、これら従来実績を越えた高落差・大容量ポンプ水車の実現に向けて、ポンプ水車各部の強度および振動の解析や軸封水機構の改善等の各種開発試験などの技術開発を推進していく考えである。

#### 参考文献

- 1) 藤木, 外: 落差700 m・容量400 MW級超高落差ポンプ水車ランナ, 日立評論, 73, 11, 1083~1088(平3-11)
- 2) ターボ機械協会編: ハイドロタービン, 日本工業出版(株)(1991)
- 3) 妹尾, 外: 水車及びポンプ水車に関する最近の技術進

歩, 日立評論, 64, 11, 789~794(昭57-11)

- 4) 木村, 外: フランス形ポンプ水車の計画上の問題点, 日立評論, 55, 2, 101~106(昭48-02)
- 5) 横山, 外: 最近の揚水発電機機の現地試験結果, 日立評論, 64, 11, 801~106(昭57-11)