

発電用水車の技術発展の系統化調査

Historical Development of Hydraulic Turbines and Pump-turbines for Hydropower and Pumped Storage Power Plants

田中 宏

Hiroshi Tanaka

■ 要旨

わが国の電力事業は、1883（明治16）年に東京電燈（株）が設立され、1887年より電燈電力の供給が開始されたことに始まる。引き続いて、同年、名古屋や関西にも多くの電燈会社が相次いで設立されたが、これらの電燈会社は往復動蒸気機関などによる小規模の火力発電によっていた。

一方、京都府では1885（明治18）年から琵琶湖疏水工事を始めたが、その落差を利用して水力発電を行なうこととし、蹴上発電所を建設した。この発電所は1891（明治24）年に発電を開始したが、これがわが国の事業用水力発電の嚆矢である。

これ以後、三相交流発電機の実用化により大容量発電が可能となり、また高電圧長距離送電技術が実用化されて遠隔地の水力発電所からの送電が可能となって、水力発電所が多数建設されるようになった。電力需要の増大にともない、数千kW級の水力発電所が次々と作られ、1912（明治45）年には水力発電容量が火力発電容量を越え、水主火従の時代に入った。しかしこれらの発電所で用いられた水車の多くは輸入品であり、国産水車は明治年間には最大出力500馬力、総出力8千馬力余に過ぎなかった。

大正年代に入り、1千kWを超える水車が国産できるようになった。1914～1918（大正3～7）年の第一次大戦中におけるドイツからの水車の輸入停止と国内景気の上昇により、国産水車が大量に製作されるようになった。1920（大正9）年からの経済恐慌や1923（大正12）年の関東大震災で一時水車の製造は停滞したものの、昭和年代に入ると工場動力や鉄道の電化などによる電力需要が急増し、次々と数千～1万kW級の大容量水車が作られるようになった。

昭和初期に、朝鮮半島の豊富な水力資源を利用して大々的に窒素肥料を生産する計画が持ち上がった。この計画は、北朝鮮と中国の国境を流れる鴨緑江の支流の長津江、赴戦江、虚川江の水を分水して日本海側に落とし、その落差を利用して12発電所、総出力約100万kWに及ぶ発電をしようという壮大な計画である。当時国内では1万数千kW程度の水車しか製作されていなかった時代に2万～4万kWの大容量水車を40台近く用いるという計画であった。この発電用機器に対し欧米メーカーからの売り込みは熾烈を極めたが、1発電所を除く11発電所、総計88万kW 35台の水車を国内メーカーが受注することに成功した。

これにより国内メーカーの大容量水車製造技術は大きく進歩した。その成果が1938（昭和13）年に発注された鴨緑江の水豊発電所向け水車である。この発電所は、当時、単機容量で世界最大であった米国ボルダーダム85,000kW水車をしのぐ出力105,000kWの水車7台を擁するもので、水車の単機容量では世界最大の記録品である。この発電所は、1941（昭和16）年8月に無事1号機が運転を開始した。この水車と発電機は、わが国の重電機産業が初めて世界一の製品を作ったという意味で、特筆すべきものといえよう。

第二次大戦後、火力発電用の石炭が調達できなかったわが国は、まず水力開発による電力復興を計画し、1948（昭和23）年に電源開発5カ年計画を策定して翌1949年に38地点に及ぶ水力発電所の着工を許可した。これにより昭和20年代後半には7万～9.5万kWの大容量水車を用いた水力発電所が多数建設された。1952（昭和27）年には大規模電源開発を目的として電源開発（株）が設立され、同社から田子倉、奥只見、御母衣の各発電所向けの10万～13万7千kWの大容量水車が発注された。これらの水車は各々別メーカーに配分して発注されたが、これによってわが国水車産業の大容量水車製作技術は大きく進歩した。

国内の電源開発が一段落した1960（昭和35）年頃から、国内の水車メーカーはその余力を駆って水車の輸出に注力した。当時、為替レートが有利であったこともあって、多くの国に国内向けの水車を凌ぐ10万～30万kW級の水車が輸出された。ベネズエラ、インドネシア、トルコ、タスマニアなどでは、日本製の水車はその国の水力発電容量の半分以上を占めた。またこの時期、世界最大容量73万kWの水車や、現在世界最大といわれる中国 三峡発電所の水車にほぼ匹敵するランナ径9.8mの巨大水車の主要部なども製作された。これらの製作経験を通して国内水車メーカーの設計・製造技術は長足の進歩を遂げた。

1960年頃からの火力発電の大容量化、1970年代に入ってから原子力発電の伸展により、日本の電源は応答速度の遅い硬直電源が増加してきた。そのため、1960年頃（昭和30年代後半）から即応性のある電源の不足が予測されるようになった。しかし即応電源である水力の開発地点が減少していたため、国内の電力会社は、河川流量

に全く頼らないで上下の貯水池の水を上げ下げするだけで揚水と発電を繰り返す揚水発電所の建設を推進するようになった。

この揚水発電所は、落差が高いほど貯水池を小さくでき用地費などを低減できることから、高落差化が要請された。これを受けて国内では高落差ポンプ水車の技術開発が進み、1973年に運転を開始した沼原発電所以後、わが国においては世界に先駆けて落差500～700m、出力20～30万kW級の超高落差・大容量ポンプ水車が多数製作されるようになった。現在、この分野では、日本の技術が世界を大きくリードしている。

また1990年には、世界に先駆けて負荷変動への追随性が非常に優れた可変速揚水発電システムを開発し、以後、国内向けに多くの可変速揚水機器を製作した。この可変速揚水発電の分野でもわが国の技術は世界をリードしている。

本報告書は、以上の歴史的経過を踏まえ、電力業界からの要請や時代の変化に対応して発電用水車および揚水発電用ポンプ水車の技術が如何に発展してきたかを概観し、考察を加えたものである。

■ Abstract

The electric power industry in Japan commenced when the Tokyo Electric Light Co. (Tokyo Dento Kaisha) was established in 1883 and started power distribution services in 1887. In the same year, many other electric light companies were established in other parts of Japan, such as Nagoya and Kansai regions.

In 1885, the Kyoto Prefectural Government started the construction of the "Lake Biwa Canal" (Biwako Sosui) to conduct the water from the lake to the city of Kyoto. By utilizing the geodetic head of the canal, Keage Hydroelectric Power Station was constructed and it started to deliver electric power to the surrounding industries in 1891. It was the first hydroelectric power plant operated by a utility company.

After then, large capacity generation by using 3-phase AC generators and long distance power transmission by implementing high voltage technologies became available. These technologies enabled to utilize the electric power generated at remote hydropower plants. This encouraged the utilities to construct many large capacity hydropower plants to cope with the rapid increase of power demand. As a result, in 1912, the total output of hydropower plants in Japan exceeded that of thermal power plants. Since then, more than half of the power generation in Japan has been borne by hydropower until 1963 when thermal power became dominant once again. However, the hydraulic turbines installed in the then hydropower plants were mostly imported from Europe or the United States. The total output of the turbines manufactured by domestic manufacturers during the Meiji era (until 1912) was only about 8,000 HP with the maximum unit output being 500 HP.

In the Taisho era (1912-26), domestic industry became capable of manufacturing hydraulic turbines with a capacity exceeding 1,000kW. During World War I (1914-1918), domestic production of hydraulic turbines increased remarkably as a result of the embargo on the import of hydraulic turbines from Germany as well as the war boom. After the war though, the production temporarily stagnated as a result of the recession from 1920 and the Great Kanto Earthquake in 1923. However, it revived again after entering the Showa era (from 1926) owing to the remarkable increase in the demand for electric power resulting from the electrification of industry and railways, and many turbines with a large capacity up to about 10MW were turned out.

In the beginning of the Showa era (1926-), an ambitious project was proposed, which aimed to produce nitrogenous fertilizer by utilizing the electric power exploited from the abundant hydropower potential in the northern part of Korean Peninsula. It was a magnificent project to divert three tributaries of Yalu River at the border of North Korea and China to the Japan Sea and to construct 12 hydropower plants with total output of 1,000MW by utilizing the big geodetic head obtained by the diversion. It was planned to use about 40 units of large hydropower generating units with capacities ranging from 20 to 40 MW, although at the time only 10 to 15MW units could be manufactured by domestic manufacturers. A domestic manufacturer overcame tough competition from overseas manufacturers and successfully won most of the contracts for this project to supply 35 units for 11 power plants, 880MW in total.

By the experiences with these turbines, this manufacturer successfully won the contract for the turbines for Supung Power Station on the Yalu River in 1938. The power station was equipped with 7 units of 105MW turbines which were the then world largest machines in terms of unit capacity surpassing the 85MW turbines at Boulder Dam in the United States. However, since international relationships were strained already at that time and the economic sanctions against Japan were being tightened, the manufacturer had difficulty in procuring the steel material. However, in spite of such adversity, the first unit was successfully commissioned in August 1941 owing to the great effort of all involved in the project. As this was the first machine to break a world record ever produced by the Japanese heavy electrical machinery industry, it should be noted as a significant milestone in the overall development of the industry.

After World War II, the Japanese government planned to restore the electric power generation by constructing hydropower stations since it could not afford to procure necessary coal for thermal power generation. The government issued a 5-year program to accelerate electric power development and, in 1949, licensed the utilities to construct 38 hydropower stations. These power stations equipped with 70-95MW hydropower generating units were successively commissioned in the 1950's and contributed to the reconstruction of the Japanese industry after the war.

In 1952, Electric Power Development Co. was established, which was a government subsidized company aiming to develop large hydropower projects, and it constructed many large capacity hydropower plants in 1950's. The contracts for these turbines were placed on domestic manufacturers to enhance their technologies.

As the development of domestic large hydropower stations was mostly completed before 1960, domestic tur-

bine manufacturers directed their business toward overseas market. Since the currency exchange rate at that time was favored exporting, Japanese products, many large capacity turbines with capacities of 100-300MW, exceeding by far the capacities of those in use at domestic power plants, were exported to various countries. Especially, in Venezuela, Indonesia, Turkey and Tasmania, more than half of the total capacity of their hydropower came from turbines exported from Japan. They included the turbines that had not only the largest capacity in the world at that time but also the largest turbines in size with runner diameters of 9.8m. By manufacturing units such as these, Japanese manufacturers were able to both build their experiences and to strengthen their design and production capabilities.

Due to the increase of both large capacity thermal and nuclear power plants since the 1960's, electric power generation in Japan became inflexible as they were unable to change their output rapidly. Then it was feared that this would cause difficulty in following the rapid fluctuation of power demand in the network and it might cause a serious problem such as frequency fluctuation or black out. Although it was obvious that hydropower generation would be the most effective measure to enhance the flexibility of power generation, it could not be a viable option because most of the hydropower potential had been already exploited until then. Then Japanese utilities considered the merit of using pumped storage to solve this problem, as it could be operated as flexibly as conventional hydropower without depending on the natural inflow to the reservoirs.

Since the construction cost of pumped storage power plants can be reduced if their operating head is higher, the operating head of reversible pump-turbines installed in these plants is required to be as high as possible. To meet with this need, turbine manufacturers in Japan conducted intensive R&D studies to develop high head pump-turbines. The first pump-turbines in the world that operated under a head in excess of 500m were those installed at Numappara Pumped Storage Power Plant, which were commissioned in 1973. Since then, many 500 - 700m head pump-turbines with a capacity of 200 - 300MW have been manufactured in Japan and put into operation. Now, Japanese technologies in this field lead those of the rest of the world.

Also, in 1990, the first adjustable speed pumped storage unit in the world was put into commercial operation in Japan. Since then, owing to their excellent load following capability, many adjustable speed pumped storage units have been manufactured in Japan and put into service. The technologies concerning the adjustable speed system are also technically superior to those of the rest of the world.

In this report, the author has reviewed the historical development of hydraulic turbine and pump-turbine technologies in Japan and considered how these technologies have been developed to meet the changing needs of the power industry and of society.

■ Profile

田中 宏

Hiroshi Tanaka

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和31年3月 東京大学工学部機械工学科卒業
 昭和31年4月 東京芝浦電気株式会社（現 株式会社東芝）入社
 以後、発電用水車およびポンプ水車の開発・設計に従事
 同社、電機技術研究所水力技術担当部長、京浜事業所技監 エネルギー事業本部首席技監を歴任
 平成5年2月 同社退職
 平成5年3月 東芝テクノコンサルティング株式会社入社
 東芝京浜事業所技術顧問に就任
 平成10年6月 （株）電業社機械製作所監査役（非常勤）に就任
 平成12年2月 東芝京浜事業所技術顧問を辞任
 平成18年4月 国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

関連活動歴

ターボ機械協会副会長（1992-1994）、（社）日本機械学会理事（1994-1996）、（社）可視化情報学会会長（1996-1997）
 International Hydropower Association（IHA）理事（1997-1999）、IHA揚水発電常置委員会委員長（1997-2001）
 日本機械学会技術功績賞受賞（1998）、工業標準化功労者表彰受賞（2004）、IEC 1906 Award受賞（2005）

■ Contents

1.はじめに.....	119
2.初期の水車と現在の水車.....	120
3.明治時代の水力発電黎明期の水車.....	125
4.大正年間における大容量化と技術の発展.....	128
5.戦前の昭和年代における新技術と大容量水車.....	132
6.第二次大戦後の復興期における水力開発と水車.....	136
7.揚水発電用ポンプ水車の開発と急速な大容量化.....	141
8.輸出用大容量水車と製造技術の発達.....	147
9.海外へ輸出した記録品.....	153
10.コンピュータ導入による技術の高度化.....	156
11.世界をリードする超高落差ポンプ水車の開発.....	161
12.揚水発電に関する新技術.....	166
13.考察.....	172
14.まとめ.....	174
謝辞.....	175
付録 参考文献.....	176
発電用水車の技術の変遷（年表）.....	177
平成18年度 資料登録候補一覧表.....	180

1 | はじめに

1882年にニューヨークで世界初の水力発電が始まった。日本ではその6年後の1888（明治21）年に宮城紡績会社が仙台市の近くの三居沢にあった紡績工場の動力用水車に三吉電機工場製の5kW直流発電機を取り付けて水力発電を行なったのが最初と言われている。

その後1891（明治24）年には琵琶湖疏水事業に併せて蹴上発電所が建設され、日本で初めての事業用水力発電が始まった。

日本の電力事業は1883（明治16）年に設立された東京電燈会社（東京電力の前身）が1887年から往復動蒸気機関による火力発電によって電燈電力の供給を開始したのが始まりである。

その後、大容量の発電機の実用化や高電圧による長距離送電技術が発達して遠隔地の大容量水力が利用できるようになり、多くの水力発電所が建設された。以来、水力発電はわが国の電力供給の基幹電源として利用されるようになり、1960年頃、当時、豊富であった石油を燃料とする火力発電が大々的に建設され利用されるようになるまで、水主火従の時代が続いた。

その後わが国の水力発電は、経済的に開発可能な水力開発地点の枯渇もあって、国内の水車メーカーは海外の発電所向けの輸出に注力した。その結果、1965年以後、多くの記録的大容量水車が世界各地へ輸出され、国内メーカーの設計・製造技術も大きく進展した。

一方、国内では、大容量火力や原子力が多数建設され、変動するピーク負荷への対応が難しくなってきた。そこで変動負荷への対応が優れている揚水発電へのニーズが高まり、大容量の揚水発電所が多数建設されるようになった。このため、その後のわが国では、揚水発電に用いられるポンプ水車の技術が大きく進歩した。その結果、この分野での技術は今や世界を大きくリードするまでになっている。

本報告書では、このような変遷の中における発電用水車および揚水発電用ポンプ水車の技術発展の過程を次のような順序に従って概観する。

まず第2章では、わが国に近代水車の技術が伝えられる前の欧米において開発された水車をいくつか紹介し、現代の水車と対比する。

第3章では明治時代におけるわが国の水車の利用状況ならびに国産水車の状況について述べ、さらに第4章では大正年間における水車の国産技術の発達について述べる。

第5章では昭和年代初期の朝鮮水力開発に用いられ

た世界トップレベルの容量の水車、特に鴨緑江の水豊発電所に設置された当時世界最大容量のフランス水車について紹介する。

第6章では戦後の電力復興に大きい役割を果たした国内の大規模水力向けの大容量水車について述べ、その製作に当たって開発された技術や関連技術について述べる。

第7章では、わが国における揚水発電の勃興とそこに用いられるポンプ水車の技術の発展について述べる。特にポンプ水車の開発初期に遭遇したいくつかの技術問題について述べる。

第8章では、国内の大規模電源開発が一巡した後、海外へ輸出された多数の大容量水車を紹介し、その製作にあたって開発された巨大水車の製造技術について述べる。続いて第9章ではそれら輸出水車の中の記録品を製作するためのメーカー間の協調、特に国際分業などについて紹介する。またわが国では珍しいタンDEM形揚水発電ユニットの記録品についても触れる。

第10章では、1970年代から発達したコンピュータによる水車の設計技術の高度化について述べ、特に現在注目されている高度な数値流体解析と遺伝アルゴリズムとを組み合わせた水車の最適設計手法などを紹介する。

第11章では、揚水発電用ポンプ水車の高落差化にとない、高落差ポンプ水車の運用初期に遭遇した動・静翼干渉によるランナの異常振動とそれによるランナの疲労破壊事故例を紹介し、それを解明して克服したことが、その後の世界最先端の超高落差ポンプ水車の実現につながったことを述べる。

第12章では、世界で最初に日本が実用化した可変速揚水発電に付き紹介し、次いで国家プロジェクトとして各社が参加して行なった大深度地下水揚水発電の研究成果を紹介する。

最後に第13章で以上の技術発展の過程の全体を概観し、これらの各時代における技術発展の動機付けとなったのは何であったか、さらにそれを可能にした基盤技術が何であったかなどにつき考察する。

2 | 初期の水車と現在の水車

2.1 初期の水車

水力エネルギーを利用する水車としては、3000年以上も前からエジプトのナイル川、中近東のティグリス、

ユーフラテス川の流域などで木製の羽根をつけた上掛け水車や下掛け水車が、脱穀、製粉、木材や石材の切断などの動力用として用いられていた。これらの水車は中世から近代にかけてかなり改良されてきたが、それでも効率は60~70%程度であった(図2.1)。

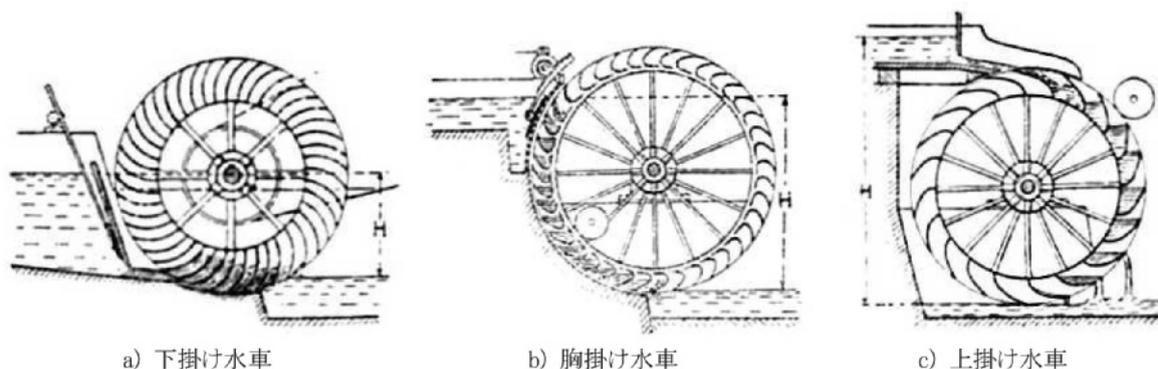


図2.1 古代から用いられていた水車⁽¹⁾

近代的な水車としては、19世紀に入り、図2.2 a)に示したような中空の主軸部から流し込んだ水を下部に取り付けた回転する円盤状の容器(ランナ)の外周に設けた後ろ向きノズルから噴出させ、その水の反動でトルクを得るようにしたパーカー式反動水車が発明された。これはその後のいろいろな反動水車の根源をなすものであるが、出力も小さく使い勝手がわるかったため一般にはほとんど普及しなかった。

その後1827年にこれを改良して円盤状のランナの全

周から水を噴出させるようにしたフルネイロン水車(図2.2 b)が発明された。これは流入水量を調整して出力を調整することができたので、当時、盛んに動力用として利用された。

その後1843年頃、回転軸に沿って水を流通させるジョンバル水車(図2.2 c)が考案された。これは平面図に示したように、ランナの上部に部分的に開口した円板を配置し、その開口部を別の半円形の円板で開閉して水量を調整するようにしたものである。

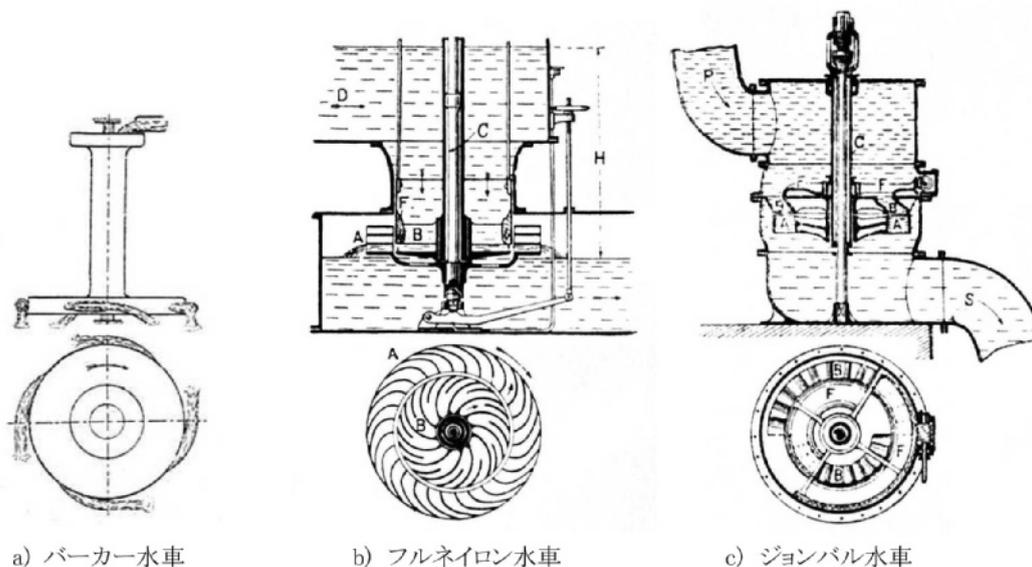


図2.2 近代水車の先駆けとなった水車の例⁽¹⁾

さらに1849年に米国のJ.B. フランシス (J.B. Francis) がランナの外周から水を流入させ、これをランナ下側から軸方向に流出させるフランシス水車を発明した。当初のフランシス水車には流量調整をする可動ガイドバーンが無かったが、後にランナの外周に配置した多数の案内羽根を一齐に動かして流量調整を行なう機構を取り入れて、現在の可動ガイドバーンを備えたフランシス水車が誕生した (図2.3)。

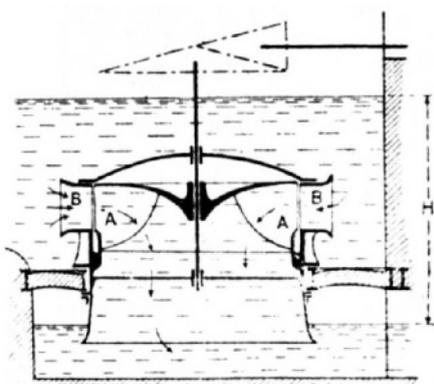


図2.3 初期のフランシス水車⁽¹⁾
(流量を調整する可動ガイドバーンが無い)

反動水車が発明された頃、一方において、圧力水をノズルから噴出させそれを回転円輪の外周に配置したバケットに当ててトルクを発生するようにした衝動水車も用いられていた。

当初、このバケットは単純な箱形または半球形であった。ところが、この水車の修理を行っていた米国のL.A. ペルトン (Lester A. Pelton) が、単純な碗形のバケットの中央に水を当てるよりも先端に当てた方が出力が増すことに気づいた。その後研究を重ね1870年に碗形バケットの中央に左右を二分する仕切りを設けることにより、さらにトルクが上昇し効率が改善されることを見出した。1880年に彼はこの構造の水車の特許をとった。これが現在のペルトン水車の始まりである (図2.4)。

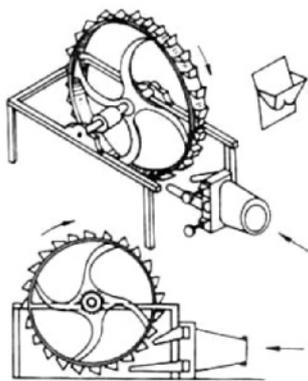


図2.4 初期のペルトン水車⁽²⁾

現在、ペルトン水車は、主として200m以上の高落差に用いられるが、初期の頃は作動原理が簡単で製作も容易なことから100m以下の低い落差にも適用された。

しかし、これらの初期の水車は、在来の木造水車と同様、主として一般の動力用に用いられていた。発電に用いられるようになったのは、1882 (明治15) 年にニューヨークで世界最初的水力発電が行なわれてからである。

2.2 現在の発電用水車

水車が発電用に使用されるようになって、大容量のものが次々と製作されるようになった。それにともない、様々な研究が行なわれ、設計・製造のいろいろな面で改良が加えられた。

日本に発電用水車が輸入された初期の頃 (1888 (明治21) 年頃) には、一部にいろいろな形式の水車 (ベル水車、マッコミック水車など) も輸入された。しかしその後、性能の劣るものや出力制御の困難な形式の水車は淘汰され、1910年ごろには、そのほとんどが現在用いられているのと同様なペルトン水車とフランシス水車となった。これらの水車の基本構造は、初期のものに対する改良がほぼ一巡した1915年頃 (大正初期) から現在に至るまでほとんど変わっていない。

フランシス水車は、低落差用になると、ランナ形状が段々軸流に近くなる。このため数十m以下の低落差ではフランシス水車のランナの外周バンドを取り去り、完全に軸流のプロペラ形状にした水車が用いられる。これがプロペラ水車である。ただし、このプロペラ水車は流量を絞った場合に、ランナ羽根への流水の流入角度が大きく変わるため羽根入口で衝突損失を生じて部分負荷効率が非常に低下する。この欠点を改良するため、流量に応じてランナの羽根角度も変えるようにしたのがオーストリアのV. カプラン (Viktor Kaplan) により1912年に発明されたカプラン水車である。この水車が日本へ導入されたのはかなり遅く、1930 (昭和5) 年になってからである。

以上の3種の形式の水車の内、ペルトン水車とフランシス水車は横軸形式のものから始まったが、その後大容量化するにつれ設置面積が小さくて済む立軸形式のものが用いられるようになった。

カプラン水車は立軸形式が最初に出現した。その後10m前後の低落差に適用されるようになると、非常に大流量となることから、立軸形式の渦巻ケーシングの製作コストが無視できなくなり、ダムを貫通する形で

水路を作り、その中に発電機と水車ランナを設置する横軸形式のカプラン水車が出現した。この形式の水車は、流路内におかれた発電機格納容器が球根 (bulb) の形状をしていることからバルブ水車と呼ばれ、カプラン水車と区別されている。この水車が日本へ導入されたのは1960年ごろである。当初は数千kWのものであったが、1975年ごろからは2万～4万kWの大容量機が製作されるようになった。

さらにその後、フランス水車とカプラン水車の中間の落差領域に可動翼ランナ羽根を適用して部分負荷時の効率を高めようとの趣旨で、斜流水車が出現した。

発電専用の水車とは別に、1960年代から、揚水発電

を行なうポンプ水車が多数建設されるようになった。このポンプ水車には、1台の機械の回転方向を逆にして揚水と発電を行なうようにした可逆ポンプ水車と、水車とポンプを一軸に連結し、これを1台の発電電動機に結合したタンデム (直列) 式ポンプ水車の2種類がある。

このような経緯で、現在は、一部の特殊な形式の水車を除き、ほぼ表2.1のような形式の水車が用いられている。この中でもフランス水車は適用範囲が広くかつ効率も高いので、わが国の水力発電所のほとんどはフランス水車を用いている。

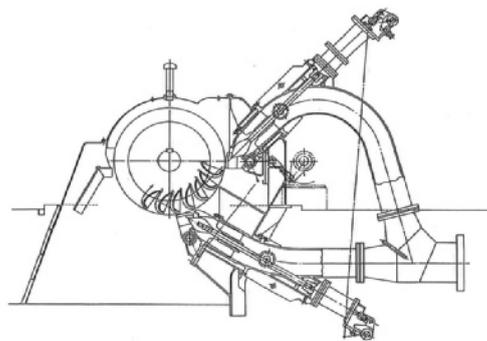
表2.1 現在用いられている発電用水車の形式

分類	水車形式	適用落差*(m)	出力範囲*(MW)	備考*	
水車	衝動水車	ペルトン水車	200～1800	～ 400	立軸 6 射、横軸 2 射まで
	反動水車	フランス水車	30～800	～ 900	立軸、横軸(～300MW)
		カプラン水車	10～80	～ 250	立軸のみ
		斜流水車	50～150	～ 150	立軸のみ
		バルブ水車	2～20	～ 70	横軸のみ
ポンプ水車	可逆形	フランス形ポンプ水車	30～900	～ 500	立軸のみ
		斜流形ポンプ水車	30～150	～ 150	立軸のみ
		バルブ形ポンプ水車	5～15	～ 70	横軸のみ
	タンデム形	ペルトン水車+ポンプ	300～1500	～ 200	立軸、横軸
		フランス水車+ポンプ	100～800	～ 300	立軸、横軸

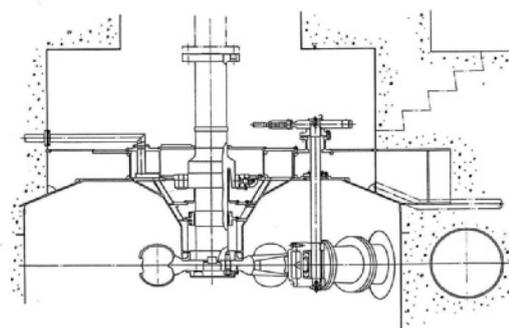
(注) *印: 例外的なものを除く。上表中のどの水車も適用落差が異なるとランナの形状が異なる。

ペルトン水車では、落差が高くなるほどランナ直径が大きく回転数も大となる。逆に低落差では流量が増すので、ノズル数を増やす。横軸では2射までであるが、立軸では6射まで可能である。なお、横軸でノズル数を増やしたいときは、ランナを発電機の両側に各1個取り付けるいわゆる両掛ペルトン水車とし、各2射、計4射まで増やすことができる (図2.5、2.6)。

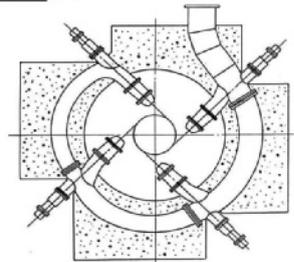
(注) 「射」はノズル数を示す。



(a) 横軸2射ペルトン水車の例



平面図 (縮小スケール)



(b) 立軸4射ペルトン水車の例

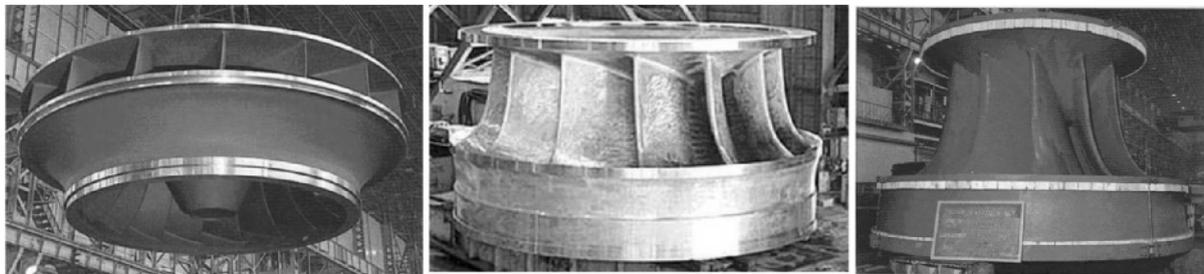
図2.5 現在のペルトン水車



図2.6 ペルトン水車ランナ
(黒部第四発電所用、
写真：日立製作所提供)

フランシス水車では、落差が高くなるに従い、ランナの入口径が出口径に比べて大きくなる。当然ながら

流量が増えると、ランナ出口径が大きくなり、全体の寸法が大きくなる (図2.7、2.8)。

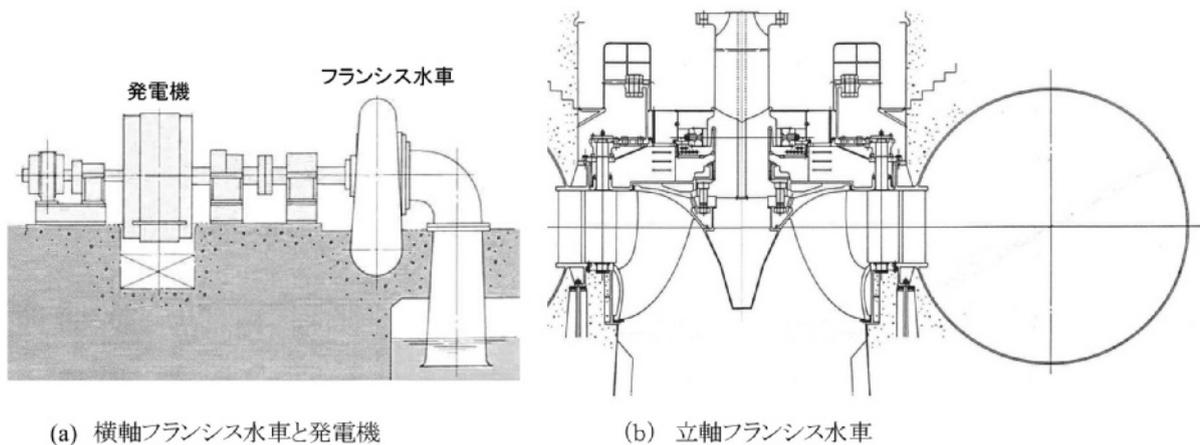


a) 高落差 (≒300m) 用

b) 中落差用 (≒130m) 用

c) 低落差 (≒40m) 用

図2.7 フランシス水車ランナの例 (写真：東芝提供)



(a) 横軸フランシス水車と発電機

(b) 立軸フランシス水車

図2.8 現在のフランシス水車の例

カプラン水車では落差が高くなると、ランナの羽根枚数が増える。またランナ羽根を操作する操作機構が

頑丈になるため、ランナボス部の直径が大きくなる (図2.9、2.10、2.11)。

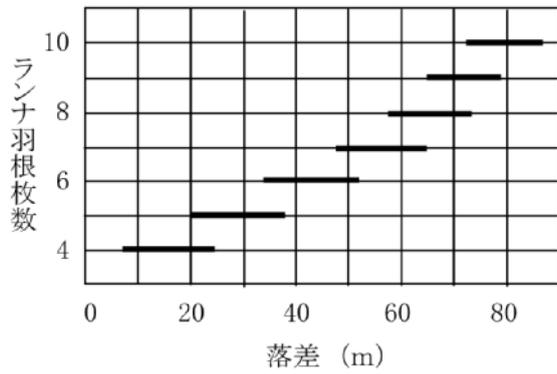


図2.9 落差とカプラン水車のランナ羽根枚数

カプラン水車はランナ羽根が主軸中心線に対し 90° の角度で水平に取り付けられているが、斜流水車はランナ羽根を 45° から 70° の範囲で傾けて取り付け、流れが内向きに流入するようにしてカプラン水車よりも高落差への適用を図ったものである。比較的高落差(80~150m)に適用する場合は 45° とし(図2.12)、低落差(60~80m)では $60\sim 70^\circ$ とする。

バルブ水車は、前述のようにカプラン水車を横軸にしたものである。代表的な例を図2.13に示す。

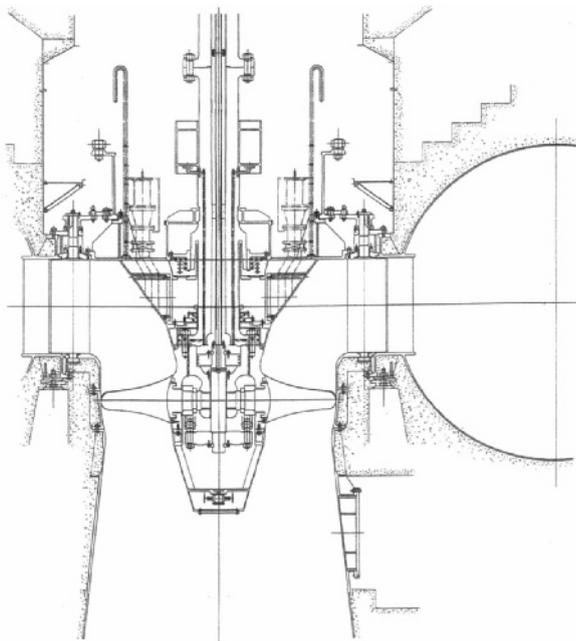


図2.10 カプラン水車の例

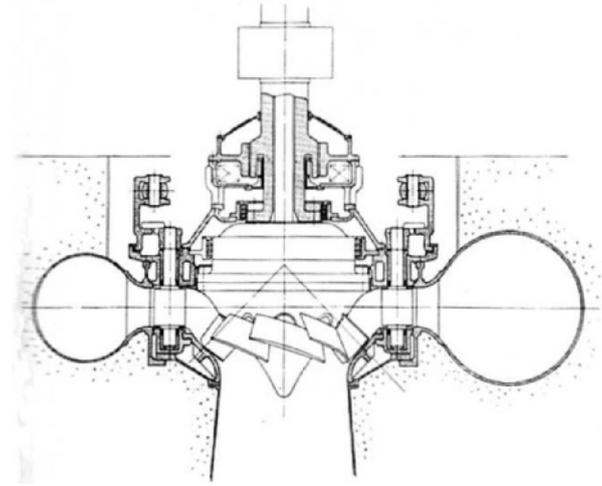


図2.12 45° 斜流水車の例
(日立製作所提供：新大倉発電所用機)⁽⁷⁾



図2.11 カプラン水車のランナ
(写真：東芝提供)

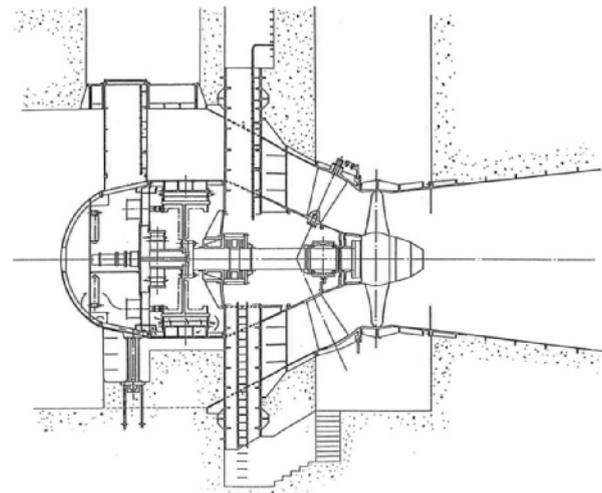


図2.13 バルブ水車の例

3 | 明治時代の水力発電黎明期の水車

3.1 わが国の発電用水車の始まり

明治維新後、時の工部省工作局が、精米などに従来用いられていた木造水車に代わり洋式水車の利用を勧奨した。これを受けて岡崎付近、甲府市郊外、市川大門紡績工場、上州桐生織物工場、京都梅津製紙工場などに動力用として採用されたとあるが、導入時期、所在、水車の形式などの詳細は伝えられていない。⁽³⁾

ニューヨークで世界最初の水力発電が開始されてから6年後の1888（明治21）年に、宮城紡績会社が仙台市の近くの三居沢にあった紡績工場の動力用水車に三吉電気工場製の5kW直流発電機を取り付けて、わが国で初めて水力発電を行なった。この発電機は、後に東芝の前身の東京電気を創立した藤岡市助が設計・製造を指導して製作したもので、現在、同型のものが東北電力三居沢電気百年館に展示されている。

その後1890（明治23）年には、下野麻紡績会社にて95馬力、足尾銅山にて400馬力の水車を用いた水力発電が行なわれている。⁽³⁾

その後1891（明治24）年5月には琵琶湖疏水事業に併せて建設した蹴上発電所が完成し、同年11月から送

電を開始した。この発電所は翌明治25年1月に京都府より電気事業の認可を受け、京都市内の紡績工場などへの送電を開始した。これがわが国における事業用水力発電の始まりである。^{(2) (3) (4) (5)}

この発電所の第一期工事では、1891年5月から1897年5月にかけて順次水車と発電機が設置された。

その配置図（図3.1）によれば、ベルト掛けで結ばれた水車と発電機は必ずしも1対1に対応しておらず、20台のペルトン水車により19台の発電機を駆動している。これらのペルトン水車のほとんどは輸入品（少なくとも内6台は米国ペルトン社製）であったが、2台のみは石川島造船所製 90kWペルトン水車が使用された。なお、発電機も、輸入発電機に混じって国産初の芝浦製作所製60kW 2相交流発電機1台が使用された。現在からみると奇異に感ずるのは、これらの19台の発電機が直流機6台、単相交流機4台、2相交流機3台、3相交流機6台と多くの機種に分かれており、電圧も200ボルトから2,400ボルト、交流の周波数も50、60、125、133Hzと多岐にわたっていることである。これは、これらの各発電機が、それぞれの需要家別（電灯、紡績、一般動力、電気鉄道など）に送電していたことによる。⁽⁵⁾

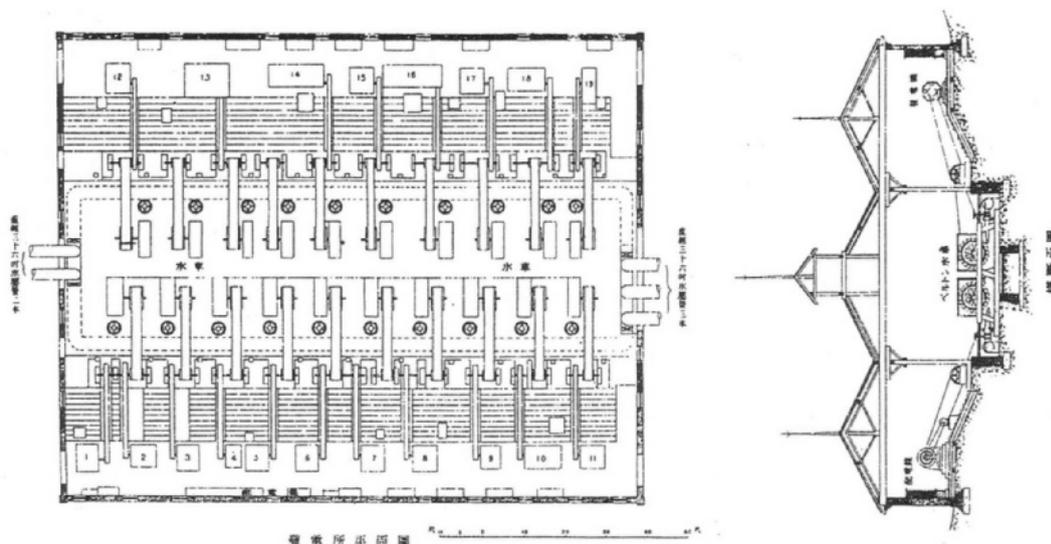


図3.1 蹴上発電所 機器配置図（京都市上下水道局所蔵）

3.2 事業用水力発電の拡大と主要な水車

日本の電力事業は、1886（明治19）年、東京電燈会社（東京電力の前身）が開業したのを皮切りに1887年以後、名古屋、大阪に相次いで電灯会社が開業した。

これらの初期の電灯会社の多くは需要地近くの小規模の火力発電から電力を供給していた。これは、当時、送電電圧が低く、送配電距離が制約されていたためである。

上記の蹴上発電所の成功と1894（明治27）年頃より

の石炭価格の高騰による火力発電のコスト高により、水力発電所の建設が盛んに行なわれるようになった。しかし、発電した電力を遠方に送電することができなかったため、水力発電所の立地も消費地に近い地点に限られていた。

この事情を一変したのが、高電圧による長距離送電技術の確立である。

わが国における高電圧長距離送電は、1899（明治32）年に郡山絹糸紡績が猪苗代湖の水を利用して建設した沼上発電所から郡山まで30kWの電力を11,000Vで22.5km送電したのが始まりである。以後、東京電燈の駒橋発電所（山梨県、桂川）から東京早稲田までの76km送電（15,000kVA、55,000V、1907年）、名古屋電燈の八百津発電所（岐阜県、木曾川）から名古屋までの44km送電（10,000kW、66,000V、1911年）、宇治川電気の宇治発電所から大阪までの77km送電（25,000kW、77,000V、1913年）と電圧と送電距離が順次伸びていった。1914（大正3）年には猪苗代水力電気の猪苗代第一発電所から東京田端までの228km送電（35,000kW、110,000V）が始まり、本格的な高電圧長距離送電が行なわれるようになった。

これにより、水力発電所を遠隔地の水力の豊富な地点に建設することが可能となり、大正時代には単機出力が6,000-10,000kWを超える水車が製作されるようになった。

このため、1912（明治45）年には、ついにわが国の水力発電の総出力（233,000kW）が火力発電の総出力（229,000kW）を超えた。以後、1963（昭和38）年に再び火力発電出力が水力発電出力を超えるまで、水力発電はわが国産業の電化により急増する電力需要をまかなう主電源として活躍し、水主火従時代が続いた。

しかしながら、明治時代におけるわが国の水車産業の技術レベルは模倣の域を脱せず、これらの大容量水力発電所に設置される水車はほとんど輸入品であった。参考文献（3）によれば、1912（大正元）年末における単機出力1,000馬力以上の水車は、最大10,000馬力のもの3台を含め86台、総出力24万馬力余に及んだが、国産水車は、最大でも500馬力どまりで、1,000馬力を超えるものは皆無であった。

当時の輸入水車で最大のものは、東京電燈 八つ沢発電所向けのエッシャー・ウイス社製10,000馬力フランス水車（Escher Wyss社、以後、EW社と略記）および鬼怒川水力電気 下滝発電所向けの10,000馬力ペルトン水車（EW社製）であった。⁽³⁾ なお、1912（明治45）年には、豊橋電燈 長篠発電所で、初めて900馬力の立軸フランス水車が運転を開始し、以後

の立軸大容量機への先鞭をつけた。⁽²⁾

輸入水車は、スイスのEW社製とドイツのフォイト（Voith）社製がともに約40%を占め、残りが米国のモルガン・スミス（Morgan Smith）社やジェームス・レップフェル（James Leffel）社の製品であった。これは欧州メーカーが日本に出張所を設け積極的に売り込みを図ったことにもよるが、米国製に比べ製品の出来が良かったことによるところが大きい。

3.3 国産技術の発達

上述のごとく、明治時代の水車はほとんどが輸入水車であったが、1892（明治25）年5月に完成した箱根電燈 湯本水力発電所（当時は発電所のことを電燈所と称した）に、東京中島製作所製の30馬力の反動水車および三吉電機工場製の直流発電機が設置された。これが国産第一号の水車⁽²⁾⁽³⁾であり、かつ国産機器のみを用いた最初の水力発電所と言われている。水車の形式はニューアメリカンタービンと記載されているがその詳細は不明である。

この後、国産水車としては、日光電力に40馬力ペルトン水車（石川島造船所製、1893年9月起工）、豊橋電燈に20馬力レップフェル水車（東京三吉工場製、1894年3月起工）、仙台電燈に40馬力水車（形式不明、赤羽製作所製、1894年7月起工）が記録されている⁽³⁾。

なお、現存するメーカーとしては、東芝の前身の芝浦製作所が1900（明治33）年から水車製造事業に参入し、1902年に完成した39kW立軸マッコーミック水車を手始めに、累計出力6,700馬力を製作している。これは明治年間の国産水車の8割余を占めた⁽⁶⁾。また1911（明治44）年には日立製作所が水車製造事業に参入し、300馬力ペルトン水車を1912（明治45）年に製作している。⁽⁷⁾

（注）芝浦製作所（現、東芝）は1911年に水車製造業務を電業社原動機製造所（以後 電業社と略記）に移管した。電業社は1955（昭和30）年に再び東芝の水車部門として東芝に合併された。現在の東芝の水車部門は、芝浦製作所-電業社の流れを汲む。

明治時代における国産メーカーは、輸入水車の模倣からスタートした。芝浦製作所から電業社にかけて初期の水車の設計に携わった田沢昌孝は、下記のような趣旨の記述を残している。⁽⁸⁾

●1900（明治33）年から水車の設計に携わったが、当初は模倣のみ。1901年に初めて自力で新しい水車を設計することになったが、ランナ羽根の三次元曲面をどう図面に表示するか判らず、難渋した。船の船

体の製図方法を応用して初めてランナを図面化した。

- 新しい水車が輸入されると聞くと、すぐに飛んでいって観察した。しかし、芝浦製作所が最初に輸入した米国製の150馬力ペルトン水車は構造が至って粗雑で、自分がそれまで芝浦製作所で手がけていた火力発電用の150-300馬力の蒸気機関に比べ、機械というにはあまりにもお粗末なものであった。ガバナも機械的な調整装置だけで、発電機の並行運転などはとても出来ない代物であった。しかし、1902年にEW社から輸入した最新式のフランス水車はまことに立派なもので、初めて機械らしき水車を見た。ガバナも当時最新式の水圧式であった。

このようにして田沢は輸入水車を観察してノウハウを学んでいったが、そのうちに輸入水車のトラブルの相談にも乗るようになった。当時は、欧米メーカーといえどもまだ手探りの状態で、必ずしも設計法が確立していたわけではなく、輸入水車にも事故が多発した。輸入水車のトラブルに関する話を再び田沢の自伝から引用して下記に示す。

- 1906（明治39）年に箱根水力 塔ノ沢発電所に据え付けられたフォイト社製ペルトン水車のランナが破裂した（注：バケットが破断して飛散したと思われる）。強度不足であることをフォイトの技術者に話し、強度を約2倍にしたランナに作り変えさせた。
- 1909（明治42）年竣工の王子製紙 苫小牧第一発電所のEW社製4,600馬力ペルトン水車の出力が試運転

時に3,600馬力しか出なかった。田沢が調査してEW社に欠点を指摘し改善を要請したが、EW社の技師はEW社の製品にはそのような欠点は有り得ないと取り合わなかった。その後、このバケットが磨耗したので電業社で設計を見直して作り変えたところ、見事に出力が出るようになった。^{(2) (8)}

- 1911（明治44）年に名古屋電燈の八百津発電所に据え付けられた米国モルガン・スミス社製の4,200馬力のフランス水車4台の内1台のケーシングが試運転中に破裂し、4名の死傷者を出す事故を起こした。翌年より残り3台で運転していたが、1920年ごろにもう1台も破裂事故を起こした。そこで1923年に4台とも電業社製に交換したが、以後1974（昭和49）年まで無事運転した。このときに電業社では、流量調整をするガイドベーンの操作機構の設計とケーシングの鑄造方法を改善した。

ちなみに、この1974年に運転を停止した旧八百津発電所（1-3号機の水車と発電機を含む；図3.2）は、国の重要文化財の指定を受け、1998（平成10）年より旧八百津発電所資料館（岐阜県加茂郡八百津町）として公開されている。また4号機は1949（昭和24）年に北陸電力 足羽（あすわ）発電所に移設され、現在も稼働中である。当時の国内メーカーは、少ない実績にもかかわらず、このような経験を通して急速にノウハウを蓄積していった。



図3.2 旧八百津発電所資料館内部（写真提供：八百津町教育委員会）

4 | 大正年間における大容量化と技術の発展

4.1 国内メーカーの入れ替わり

明治年間には芝浦製作所（後に電業社）、東京石川島造船所、東京中島製作所、東京三吉電機工場、京都吉見鉄工所、大阪大谷鉄工所、足尾銅山製作所などが水車を製作していたが⁽⁹⁾、1908（明治41）年には電業社が残るのみで、他は水車の製造を停止してしまっただ。しかし一方で、新しいメーカーも水車製造事業に参入してきた。

まず1910（明治43）年に創業した日立製作所は創業者小平浪平の水力発電に対する思い入れもあって創業直後から水車製造に着手し、1911年に峰の沢鉦山向け300馬力ペルトン水車と250kVAの発電機、また1914

（大正3）年には塩原電気 真野川発電所向けに106馬力フランシス水車を製作した。その後、このわずか2台の水車の製作経験しかなかった日立製作所が、1914（大正3）年に利根発電から岩室発電所向けの10,000馬力（7,460kW）横軸フランシス水車3台を受注した。日立製作所では、この水車を製作するため、駒橋発電所などの輸入大容量水車や海外の文献の調査を行ない、翌1915（大正4）年から1916年にかけてこの水車を無事完成した（図4.1）。これにより、国産水車の実績は一挙に引き上げられた。なお、日立製作所の実績表⁽¹⁰⁾によれば、同社は、この後大正年間（1912-1925年）に単機出力3千kWを超える水車だけでも29台、合計出力13万9千kWを製作している。

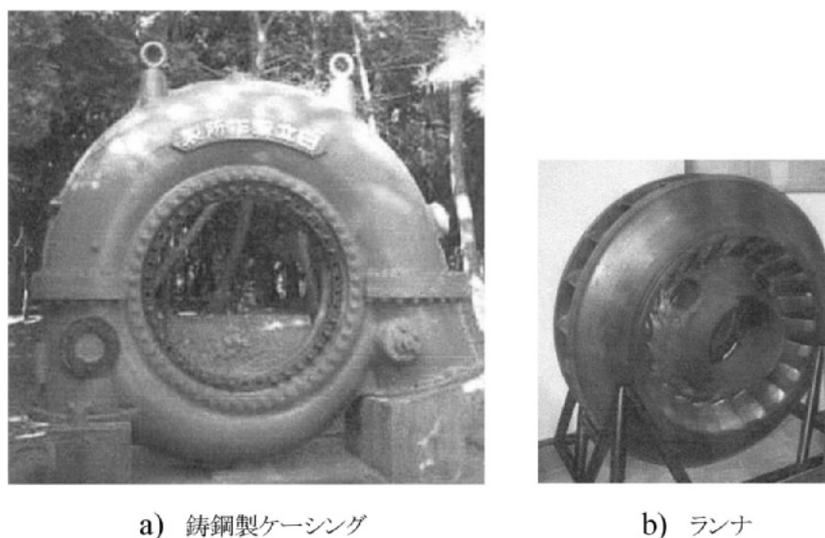


図4.1 岩室発電所向け10,000馬力フランシス水車（日立製作所小平記念館蔵、写真：同社提供）

また一方、三菱合資会社 造船部（現 三菱重工業）も1909（明治42）年に水車製造に着手し、1915（大正4）年に新日本窒素肥料の内大臣川発電所向けに3,680kWの横軸ペルトン水車を製作した。三菱重工業の実績表⁽¹¹⁾によれば、同社はこの後1917（大正6）年には東京電力 猪苗代第二発電所向けに、前記の日立製作所製の岩室発電所向け水車を凌ぐ7,700kWの横軸フランシス水車5台を納入している。同社は、これらを含め、大正年間に31台、総出力6万3千kW余（単機出力3千kW以上に限れば6台、4万2千kW）の水車を製作している。

一方、電業社も、単機出力の記録品としては後発の上記2社に後れをとったが、大正年間に、吾妻川電力

羽根尾発電所向け6,900kW立軸フランシス水車を始め、単機出力3千kWを超える水車だけで46台、合計出力18万4千kW余を製作している。⁽⁶⁾ 1914（大正3）年に第一次世界大戦（1914～1918年）が勃発したためにドイツあたりから輸入を予定していた大容量水車が輸入不能となった。ところが一方において、この世界大戦によりわが国からの輸出は急増し、国内景気も上昇して電力需要も急増した。このため、多数計画されていた水力発電所の建設を進めることが急務となり、これらの発電所向けの大容量水車が急遽国内メーカーに振り替えられて発注された。上述のように、大正時代前半に発注されたこれらの水車が、以後の国内水車製造業発展の端緒となった。

この頃電業社が受注した揖斐川電力 西横山発電所向けの国産初の立軸フランシス水車（1,350kW、1915年）（図4.2）も、ドイツのフォイト社へ発注予定であったものが急遽電業社へ振り替えられたものである⁽⁶⁾。なお、中部電力の史料⁽⁹⁾によれば、この水車は1963（昭和38）年に廃止された後、岐阜総合学園を経て岐阜県揖斐郡藤橋村に移管され、同村の「道の駅」に保管されている。

この後、第一次世界大戦が終わると1920（大正9）年の株式暴落に始まる経済恐慌に見舞われ、また1923（大正12）年には関東大震災が起こり、国内景気は一時停滞したが、国内の水力開発は着実に進み、多くの2千～5kW級の水車が製作された。しかし、第一次世界大戦後は再び欧米メーカーが国内市場に戻ってきて競争は激しくなり、国内メーカーはこれら欧米メーカーに打ち勝つべく、技術の向上に努めた。

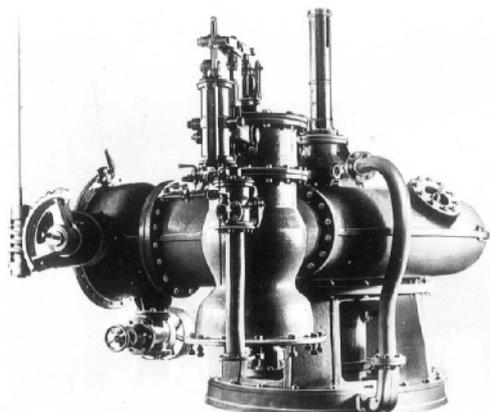


図4.2 国産初の立軸フランシス水車（1,350kW、揖斐川電力（株）西横山発電所用）⁽⁶⁾

4.2 大正年間における国産技術の発達

(1) 油圧式自動調速機の開発⁽⁸⁾

明治年間において水車は製作できるようになったが、油圧式の調速機はもっぱら輸入品に頼っていた。しかし、水車に付属して輸入する場合を除き、調速機単品の販売に応じてくれる欧米メーカーは少なく、国産水車メーカーは調速機の調達に苦労していた。

1913（大正2）年に長野電燈会社が八那池発電所用のペルトン水車をドイツのフォイト社と電業社に各1台発注した。この際、電業社では意を決して、この水車用の調速機を自社で製作することにした。このときの契約は、万一調速機不調の場合は、輸入品と無償交換するとの条件であったという。

当時、電業社では輸入水車の据付などを行なうこと

も多く、欧米メーカーとの関係を損じることは許されなかった。よって、欧米メーカーのものを模倣することなく、全く独自の設計でこの調速機を製作した（図4.3）。

運転結果は非常に良好で、以後、調速機を国産化するようになった。

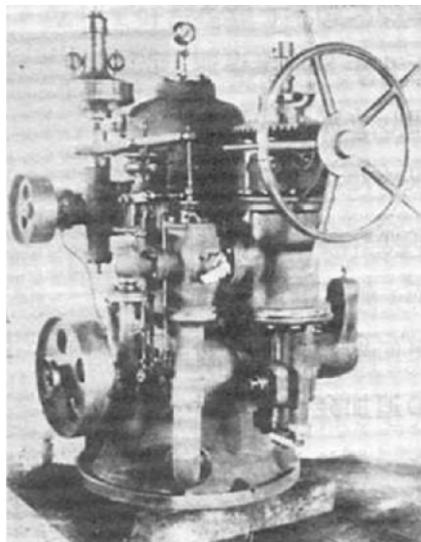


図4.3 国産初の油圧式調速機⁽⁶⁾
（長野電燈 八那池発電所用）

(2) 土砂磨耗対策のライナの発明

大正年代の初期、欧米から輸入された水車の土砂磨耗による性能低下が問題となっていた。中でも大井川にある小山発電所に納入されたボービング社製水車が、2、3ヶ月の運転で土砂磨耗により効率が20%も低下するという事態となった。この相談を受けた電業社の田沢昌孝は、ランナ、カバー、主軸などの磨耗の激しい部分に交換可能のライナを取り付けることを考案し、水車の長寿命化を図った⁽⁸⁾。これはその後他の発電所にも応用され、好評を博した。現在では世界中の水車に採用されているが、もともとは大正年代初期に日本で考案されたものである。

(3) 酸性河川用水車

1921（大正10）年に製作した群馬電力（株）金井発電所用 4,650kW横軸フランシス水車（電業社製）は、わが国初の酸性河川用水車である。この水車はランナ、ガイドベーンを砲金製とし、かつ主軸、ガイドベーン軸などの接水部分をすべて砲金で被覆した。ケーシングは比較的腐食の少ない鋳鉄で製作した。

この水車は、1989（平成元）年、一式更新で置き換えられるまで無事運転を続け、以後の酸性河川用水車の先鞭をつけた。なおこの実績により、電業社は、1927（昭和2）年、八甲田山に源を発する酸性河川の荒川に青森電燈株式会社が計画した大不動発電所（1,550kW）、寒水沢発電所（1,200kW）、矢別発電所

(930kW) の3発電所の水車を全台受注した⁽⁶⁾。

なお、酸性河川の多い東北電力では、戦後、1948(昭和23)年から約10年間にわたり東北大学と共同で「酸性河川水の水力発電所工作物の腐食・防食に関する研究」を行い、ランナ、ガイドベーンなどの材料として18Cr 8Niステンレス鋼や、チタン、モリブデン、銅などを添加した13Crステンレス鋼が優れた耐食性を示すことを認めた。1950年頃からはこれらを実機に採用し効果を挙げている。⁽²⁾

(4) 鋼板製ケーシング⁽⁶⁾⁽⁸⁾

機器が大型化するに従い、従来の一体鋳造によるケーシングでは対応できなくなり、リベット接ぎ手で鋼板をつないだ鋼板製ケーシングが用いられるようになった。

缶胴式水車の単純な円筒形のケーシングは早くから鋼板製リベット構造で製作されていたが、1912(大正元)年に越後電気 蔵々発電所に納入された1,350kW水車には、初めて鋼板製リベット構造の渦巻ケーシングが用いられた。ただしこの渦巻ケーシングは、鋳造ケーシングのように流路断面を円形にして製作することが困難であったため矩形断面であった(図4.4)。

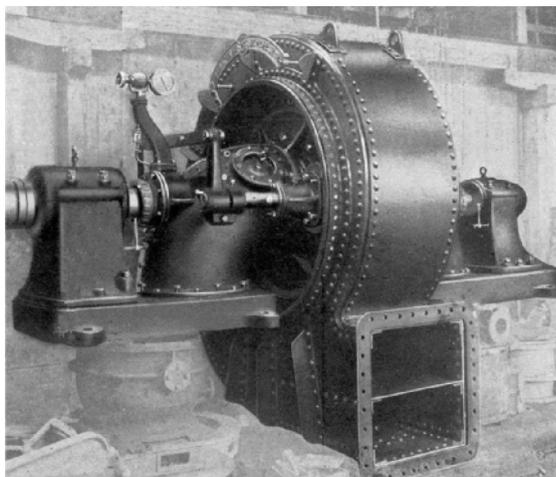


図4.4 わが国初の鋼板製渦巻ケーシングを用いた水車(1,350kW、蔵々発電所用)⁽⁶⁾

その後、1922(大正11)年に製作された鬼怒川水力電気の中岩発電所用2,000kW立軸フランシス水車において、初めて円形断面のリベット構造渦巻ケーシングが採用された(図4.5)。以後、1950年頃まで、大型の水車にはこのリベット構造の鋼板製ケーシングが主として用いられるようになった。

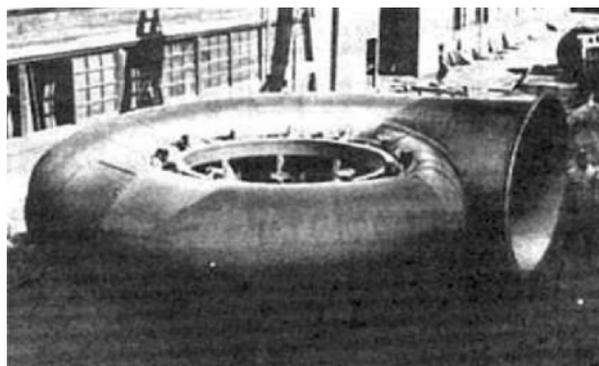


図4.5 わが国初の円形断面鋼板製渦巻ケーシング(2,000kW、中岩発電所用)⁽⁶⁾

(5) コンクリート製ケーシング

第一次世界大戦(1914~1918年)により1917(大正6)年に鉄鋼価格が暴騰した。これを受けて低落差機にはコンクリート製ケーシングが採用されるようになり、1919(大正8)年に運転を開始した奔茂尻発電所(現、北海道電力)、1924(大正13)年に運転を開始した由良川発電所(現、関西電力)などにコンクリート製ケーシングが用いられた。⁽²⁾

なお、国産水車としては1925(大正14)年に運転開始した七宗発電所(岐阜電力)用2,700kW立軸フランシス水車が初めてコンクリート製ケーシングを採用したといわれている。⁽⁶⁾

(6) 超低落差水車

落差がわずか5~6mという超低落差大流量の発電所には、現在では Kaplan 水車やバルブ水車が用いられているが、大正時代にはこのような超低落差用の水車がなかった。このような発電所にフランシス水車を適用すると、機器寸法が大きくなり、かつ回転速度が非常に遅くなって発電機も高価になってしまう。低落差・低流速でも回転速度を上げられるようにするには、ランナ径を小さくすればよい。しかしそれでは流量が少なくなってしまうので、これを解決するため、小型の水車を多数並列して設置することが考えられた。

このような考えから生まれたのが1917(大正6)年に完成した旧八百津発電所の放水口の約7mの残留落差を利用した八百津放水口発電所である(図4.6)。ここには横軸露出型2輪単流4連フランシス水車(ランナは全部で8輪、合計出力:1,800馬力)が設置され、これが1,200kW横軸発電機を駆動している。



図4.6 八百津放水口発電所の1,800馬力横軸4連
フランス水車（日立製作所製）
（写真提供：八百津町教育委員会）

1926（大正15）年に建設された天竜川電力 大久保発電所にも、ランナは4輪であるが、同様な横軸露出型2輪単流2連フランス水車（合計出力：1,550kW）が設置されている（図4.7）。なお、この発電機と水車ランナは、現在、駒ヶ根高原美術館（長野県駒ヶ根市）構内に展示されている。

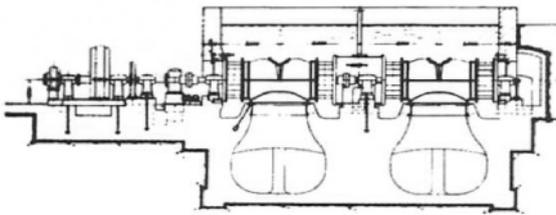


図4.7 大久保発電所用1,550kW
横軸2連フランス水車⁽⁶⁾

5 戦前の昭和年代における新技術と大容量水車

5.1 昭和初期の国産水車技術の発展

(1) カプラン水車の国産化

低落差の地点にフランシス水車を適用しようとする、前述の超低落差水車のように、多数の水車を並列した構造をとらざるを得ない。これは発電所としては大きい床面積を要するため、1台で大流量を扱える水車が要請された。このような水車としては、船のプロペラの形をしたランナを持つプロペラ水車がある。しかしプロペラ水車は、部分負荷の効率が非常に低く、かつ水流が乱れて振動を発生するため、ほとんど部分負荷での運転が出来ない。これを解決したのが、1913年にオーストリアのヴィクトール・カプラン（V. Kaplan）により発明されたカプラン水車である。カプラン水車はランナ羽根角度を船舶用の可変ピッチプロペラのように可変にすることにより、固定羽根のプロペラ水車が持つ欠点を解決した。

しかしカプラン水車は、ランナ羽根角度を可変にするための可動機構の設計・製作が問題であった。昭和年代の初めに国内では北陸電化（株）西勝原第一発電所および東京電燈株式会社 松留発電所にカプラン水車が設置されたが、いずれも輸入水車であった。国産メーカーは、このカプラン水車の開発に取組み、1930（昭和5）年、電業社が金沢市電気局 吉野第二発電所に立軸カプラン水車（700kW）を⁽⁶⁾、また日立製作所が広島電気の川平発電所に2,000馬力カプラン水車

（図5.1）を、それぞれ製作納入した。これらが国産初のカプラン水車である。

ちなみに、上記吉野第二発電所は、落差変動に対応するため、交流二次励磁方式による可変速発電機を用いている。この交流二次励磁方式は、現在わが国が世界の先端を切っている可変速揚水発電所の発電電動機に用いられている可変速制御方式と同様の方式で、その面でも国産初の技術を用いた発電所である。

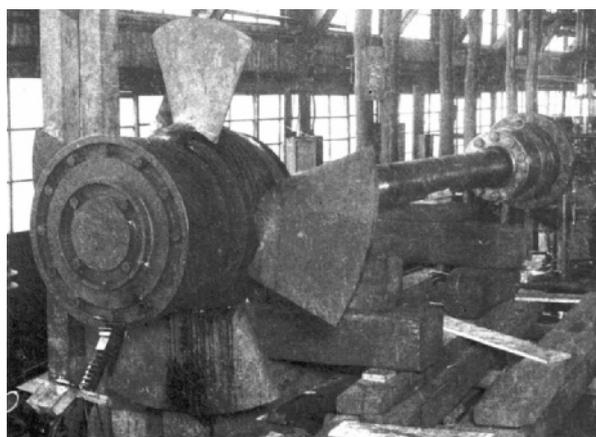


図5.1 工場では組立中の川平発電所向けカプラン水車のランナ（国産1号機）
（写真提供：日立製作所）

(2) 10,000kW超の大容量水車の国産化

昭和に入り、出力が10,000kWを超える国産水車が続々と誕生した。1930（昭和5）年までの5年間に製作された10,000kW超の水車を表5.1に記す。

表5.1 1930（昭和5）年までに製作された10,000kW超の国産大容量水車^{(6) (10)}

会社	発電所名	形式	出力(kW)×台数	運転開始年	メーカー
関川電力（現、東北電力）	鳥坂	立軸フランシス水車	10,000×3	1925	電業社
京浜電力（現、東京電力）	奈川渡	立軸フランシス水車	10,440×2	1926	日立
神岡水電（現、北陸電力）	猪谷	立軸フランシス水車	12,500×2	1928	電業社
天竜川電力（現、中部電力）	南向	立軸フランシス水車	16,500×1	1928	電業社
東信電気（現、東北電力）	豊実	立軸フランシス水車	11,950×6	1929	日立
須川電力（現、東京電力）	松谷	立軸フランシス水車	15,500×2	1929	電業社
富山県電気局（現、北陸電力）	真川	横軸ペルトン水車	13,900×1	1930	日立
大淀川水力電気（現、九州電力）	大淀川第二	立軸フランシス水車	12,000×3	1930	電業社
日本電力（現、中部電力）	小坂	立軸フランシス水車	10,500×2	1930	電業社

表5.1の中で、南向発電所用水車は、輸入を予定していた天竜川電力に国産水車採用を働きかけ、3台中1台の国産を認めてもらって製作したものであったが、試運転ではスウェーデンのボーピング社製の輸入水車よりも好成績を収め、国産技術の宣揚に役立ったという。⁽⁶⁾

以上のように、この時期に1万kW級の水車の製作経験を積んだことが、次項で述べる朝鮮の大規模水力開発に用いられる大容量水車の製作に役立った。

(3) 国内初の揚水発電所⁽⁶⁾

1930（昭和5）年、日本海電気（現、北陸電力）が小口川第三発電所に落差621m、出力9,000kWという当時わが国最高落差の横軸ペルトン水車2台（電業社製）を設置した。日本海電気では、その3年後、この発電所に当時国産最高揚程である全揚程670m、揚水量0.4m³/s、5,100馬力の6段タービンポンプを設置し、季節調整の揚水発電所としての運用を開始した。これは水車とポンプが別個に設置されたいわゆる別置式揚水発電所であるが、これがわが国初めての揚水発電所である（図5.2）。

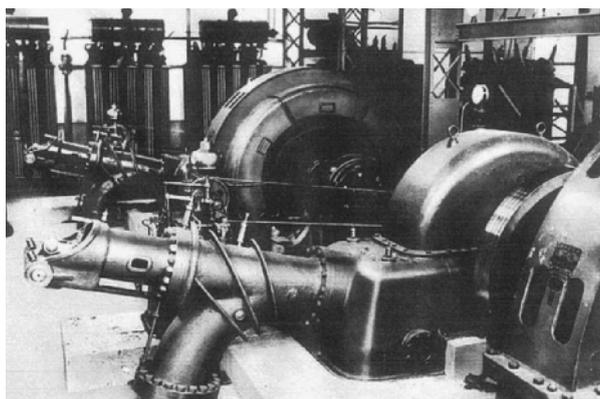


図5.2 日本海電気 小口川第三発電所用 9,000kW
横軸単輪単射ペルトン水車
（写真提供：東芝）

翌1934（昭和9）年、中央電気（現、東北電力）池尻川発電所に出力1,350kWの横軸フランシス水車と1,120kWのポンプを一軸を介して発電電動機に直結したいわゆるタンデム形揚水機を設置して揚水発電所としての運用を開始した。これがわが国における横軸タンデム形揚水機の草分けである。

5.2 朝鮮半島の大規模水力開発とそれに対応する大容量水車の開発

昭和年代初期から着手された朝鮮半島北東部の水力開発は、大正13年に久保田 豊（後の日本工営（株）の創業者）の先輩に当たる森田一雄が朝鮮半島の5万分の1の地図を入手したことから始まる。彼は久保田とともにその地図を検討し、鮮満国境を流れる鴨緑江

の支流の赴戦江をダムで締め切り、その水を北朝鮮の東側の日本海に落とせば、近距離で1,000m近い落差が得られ数十万kWの発電が可能であることを明らかにした。そこで当時の電力消費産業である硫酸肥料製造工業に狙いを付け、森田一雄の知人である日本窒素の総帥 野口 遵のぐち しんがにこの開発計画を持ち込んだ。野口は直ちにこの計画の実現に乗り出すことを決め、同年末にはその具体化に向けて動き出した。⁽¹²⁾

この開発構想は、赴戦江の他に、それに隣接する長津江と虚川江も含め水車総数35台以上を擁する水力発電所12ヶ所を建設し、総出力100万kWを得ようというものであった。またその中のいくつかの発電所には、単機出力が3万kWを越える水車16台を用いるという当時としては桁外れに大規模のものであった。⁽⁶⁾ 当時の日本の国内の総発電容量が約320万kW、内、水力発電容量が約196万kW（1926（昭和 元）年）⁽¹⁵⁾、水車の単機出力の最大のものが関西電力 蟹寺発電所の28,600kW（EW社製、1926年）であったことから見ても、この計画がいかに大規模であったかがわかる。

野口はこの計画遂行のため朝鮮水電株式会社や長津江水電株式会社を設立してこれらの水力開発に当たらせた。このとき、野口はこの計画のうち落差700mで出力33,600kWの水車4台と32,000kWの発電機4台を擁する赴戦江第一発電所の主機のみは、日本メーカーの実績を大きく超えるものであることからドイツのフォイト社とジューメンス社から輸入することとしたが、国内メーカーの技術育成のためそれ以外の主機はすべて、水車は電業社、発電機は芝浦製作所に発注した。これらの水車は、表5.2に示すように、その多くは従来の記録を大きく超える高落差、大容量のものであった。

またこの3河川の水力開発が一段落した1938（昭和13）年には、野口、久保田は鴨緑江本流に10万kWの発電機7台を擁する水豊発電所の建設に着手し、この主機の水車全台を電業社に、また納期の関係で2台を除く発電機5台を芝浦製作所に発注した。

これらの朝鮮水力開発のために電業社が製作した水車を表5.2に示す。

表5.2 朝鮮水力開発に用いられた国産水車^{(12) (13)}

受注年	発電所	形式	落差(m)	出力(kW)	台数
1929	赴戦江第二	立軸フランシス水車	214.0	23,000	2
1929	赴戦江第三	立軸フランシス水車	93.2	20,000	1
1932	赴戦江第四	立軸フランシス水車	40.0	6,700	2
1933-1935	長津江第一	横軸両掛ペルトン水車	420.0	38,500	4
1935	長津江第二	立軸フランシス水車	300.0	33,000	4
1936	長津江第三	立軸フランシス水車	116.0	17,000	3
1937	長津江第四	立軸フランシス水車	96.0	15,000	3
1937-1939	虚川江第一	横軸両掛ペルトン水車	460.0	42,000	4
1937-1939	虚川江第二	立軸フランシス水車	177.0	22,000	4
1938-1939	虚川江第三	立軸フランシス水車	140.0	19,500	4
1938-1939	虚川江第四	立軸フランシス水車	142.5	21,000	4
1938	水豊	立軸フランシス水車	82.0	105,000	7
合計				1,614,400	42

表5.2中、落差300mの長津江第二発電所用フランシス水車は、当時、世界有数の大容量高落差機で、以後の高落差フランシス水車の基となった。

また虚川江第一発電所用ペルトン水車は、落差が460mで、それに先立つ長津江第一発電所用ペルトン水車の落差420mをさらに超えるものであり、出力42,000kWは、当時、東洋最大のペルトン水車であった（図5.3）。

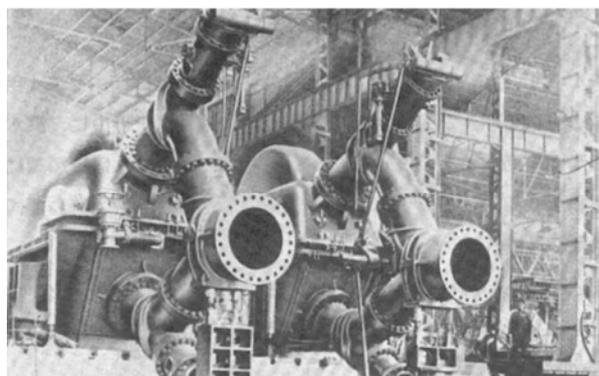


図5.3 虚川江第一発電所用42,000kW横軸ペルトン水車（当時東洋最大）⁽¹³⁾

水豊発電所用の水車および発電機は当時の世界最大容量機である米国ボルダーダムの85,000kWをはるかに凌ぐものである。国産の水車および発電機が初めて世界記録をマークしたということは、これまで欧米メーカーの後塵を拝してきたわが国の重電機業界にとっても、大きいマイルストーンとなる実績であるといえよう。

この水車を受注した1938（昭和13）年時点では、既に国際情勢は緊迫しており、資材調達にも苦勞する状態であった。また従来実績をはるかに超える機器寸法

であったため、工作機械まで電業社が自家製作するなど、さまざまな困難を克服して対応した。

例えば、水車主軸は直径1,150mm、長さ6,000mm、その両端のフランジ径は1,650mmであったが、この主軸フランジ径が当初の設計では大きく、当時の室蘭製鋼所の4,000トンプレスで鍛造できなかった。そのため呉海軍工廠の設備の使用を願い出たが話がかたず、結局、ボルトの材質をニッケルクローム鋼にしてボルトを細くしてフランジ径を小さくし、室蘭製鋼所で鍛造できるようにしたと言われている。またランナは鑄鋼製で外形4,300mmあったが、これは朝鮮の鉄道の輸送限界ぎりぎりであった（図5.4）。鋼板製ケーシングは入り口径が5,500mmという大きいものであったが、リベット接ぎ手構造で無事完成し、リベット構造の大型ケーシングの製作技術を確立した（図5.5）。⁽¹³⁾

多くの困難はあったが、この水豊発電所の1号機は昭和16年8月26日に無事営業運転に入った。この発電所の水車をはじめとする機器の製作技術の確立は、川幅1キロメートルに及ぶ鴨緑江本流を締め切った巨大ダムの建設技術とあいまって、わが国の水力開発の技術を一挙に世界トップレベルに引き上げた。

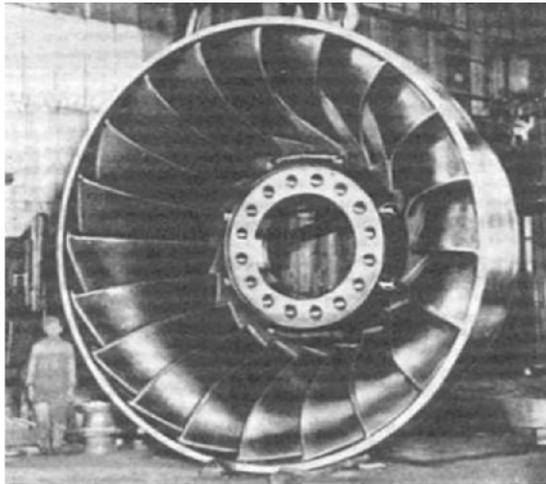


図5.4 水豊発電所用 フランシス水車ランナ⁽¹³⁾

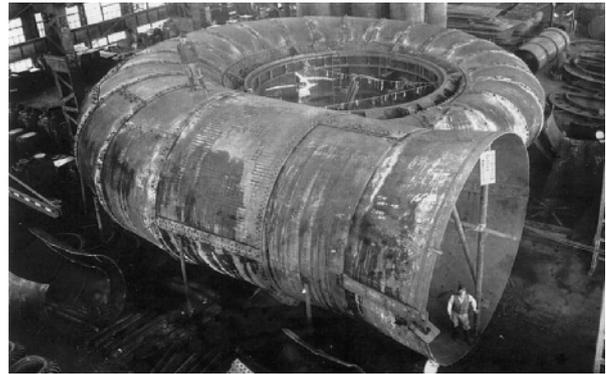


図5.6 工場仮組時の満州国 松花江発電所用
85,000kW水車のケーシング
(写真提供：日立製作所)

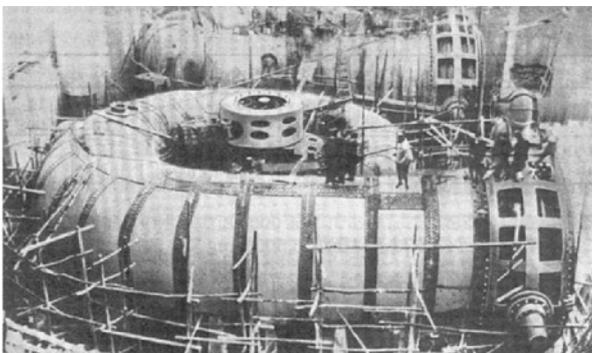


図5.5 水豊発電所用 現地据付中の
リベット構造鋼板ケーシング⁽¹³⁾

なお、日立製作所でも、水豊発電用水車より少し遅れて、昭和14年に満州国 松花江発電所向けの85,000kWフランシス水車2台を受注している。この水車もやはり戦時中の物資不足の中で苦勞して製作され、昭和17年には工場完成して出荷された(図5.6)。1台目は昭和19年に現地据付完了したが、2台目は現地据付中に終戦となった。その後、ソ連がこの発電所を接收し、水車を撤去してソ連国内へ移設したと伝えられているが、詳細は不明である。そのため、残念なことに、この水車は日立製作所のサプライリストには記載されていない。

5.3 第二次大戦中における国内向けの水車の製造

1940(昭和15)年に日独伊三国同盟が締結されると同時に日米通商条約が失効し、米国が対日屑鉄輸出禁止を決めた。これにより国内では鉄類の回収を始めるなど戦略物資の統制が厳しくなった。昭和16年になると政府はいろいろな経済統制令を発令し、鉄鋼に関しても国策代行機関である鉄鋼統制会が設立された。これにより、軍需優先で鉄鋼資材は逼迫の度を加え、特に水車に用いる鋳鉄や大型鋼材の需給が極度に逼迫した。

このような資材不足により、前期の水豊発電所や松花江発電所向け水車のような国策水車以外は、殆んど資材の調達が可能となった。太平洋戦争の勃発とともに電力の需要は増大したにも拘らず資材調達難から電源開発は急速に減少していった。1937(昭和12)年から終戦の1945(昭和20)年に至る水力・火力併せての新設発電所による発電開始量は表5.3のように急速に減少している。

表5.3 1937-1945年間の国内発電設備の発電開始量

年 度	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945
発電開始量 (kW)	43万	58万	75万	76万	36万	26万	19万	-	6万

電力の逼迫を受けて政府は電力の末端に至るまで統制を徹底するため、1942(昭和17)年4月、日本発送電株式会社の配電部門を全国9地区に分け各地区ごとに配電株式会社を設立した。これが戦後の9電力会社体制のベースとなった。

昭和18年には、軍需産業の繁忙のため電力の需要は急速に増大した。そのため応急措置として、戦時対策緊急水車が多数発注された。しかし、資材の調達がま

まならないため水車の製造とともに発電所建設工事も遅延し、結局その多くは日の目を見ないまま昭和20年に至り注文取消しとなった。注文取り消しとなった水車は、電業社のみでも74台、出力で122万2千kWに及んだという⁽¹³⁾。

6 第二次大戦後の復興期における水力開発と水車

6.1 終戦直後の電力事情と水車の事故

1945（昭和20）年8月の終戦とともに国内産業の多くの工場は生産を停止した。そのため余剰電力が生じ、配電会社は薪炭不足に悩む一般家庭に電熱器の使用などを奨励した。しかし翌年春から産業が復興し始め、昭和21年9月には早くも電力が不足する事態となった。昭和22年に入り電力不足は顕著になり計画停電などが実施されるようになった。

このように電力需給は極度に逼迫したが、経済情勢はまだ混乱の中にあり、本格的な電源開発を行なえる状態ではなかった。しかし戦時中に資材不足で工事が中断されていたいくつかの発電所の工事が再開され、昭和21年には日本発送電（株）の宮下発電所（21,000kW×2台）などが運転を開始している。それ以外には昭和23年までは新規開発はなく、わずかに農村電化用や工場の自家発電用の数百kWの水車が少しばかり製作されただけである。

このような終戦前後の混乱期にあって、水力発電業界では2つの大きい事故を経験した。

一つは、昭和20年5月に発生した日本発送電（株）の猪苗代第一発電所の水車のケーシング破裂事故である⁽¹⁶⁾。これは、大正2年にドイツのフォイト社から輸入した落差107.8mの9,000kW横軸フランシス水車6台の内の1台、2号機のケーシングが破裂したものである。

水車をほぼ50%出力で運転していたときに突然鑄鉄製ケーシングの上部が破裂して飛散し、0.8m×3.7mの開口を生じて水が噴出した。この原因は、鑄鉄製ケーシングの腐食による老朽化が進行していたところへ部分負荷運転時の大きい水圧脈動が加わり、疲労破壊を起こしたものであることが判明した。当時は終戦直前の至って物資が不足していた時であったため、急遽、同材質（FC15）のケーシングを電業社で製作して応急復旧した。しかしその後、昭和22年8月、別のケーシングでも同じ事故が発生した。そこで日本発送電（株）では、翌年、翌々年にかけて鑄鋼製ケーシングに置き換えた。なお、撤去したケーシングをいろいろ検査したところ無数の微小な鑄巣があることが分かり、最後に水圧による破壊試験を実施したところ、見かけよりもはるかに低い水圧で破壊してしまったという。なお、昭和20年に応急復旧された2号機も、その後鑄鋼製ケーシングに置き換えられている。

この事故に鑑み、日本発送電では、同発電所と同時期に設置された山梨県の駒橋発電所のEW社製の4,250kW水車も、新製水車に置き換えて更新した。

もう1件の事故は、昭和25年6月に発生した同じく日本発送電の大井川発電所の3号機水圧鉄管の破裂事故である⁽¹⁷⁾。原因は、入口弁や水車のガイドベーンを操作する油圧系の圧油ポンプの所内電源が不安定となり、油圧低下をきたして入口弁が急閉鎖したことによると言われている。3号機水圧鉄管の下部は過大な水圧により破裂して平板に近い状態にまで開口し、また水圧鉄管の上部は、逆に負圧となり、座屈により潰れて平らになった。開口した水圧鉄管から噴出した大量の水は、建屋ならびに放水路まで破壊した。このとき、1、2号機が停止作業中の事故であったため、作業員3名の方々が痛ましい犠牲となった。

これらの事故は、多くの教訓を残し、以後の機器設計や保守技術に反映された。

6.2 戦後の復興のための大規模電源開発

政府は1948（昭和23）年11月から電源開発5カ年計画の審議を開始し、翌年6月に33地点、さらに同年9月に追加5地点の水力発電所の着工を許可した。これにより戦後の電源開発が本格的に始まった。

その後、過度経済力集中排除法の指定を受け、日本発送電（株）は1951（昭和26）年に解体され、9電力会社に再編成された。それに伴い、多くの水力発電所の建設工事も地域ごとに9電力会社に引き継がれた。しかしながらこれらの電力会社は資金的にも弱く、電源開発の投資もままならない状態であった。そのため、1952（昭和27）年7月に電源開発促進法を公布し、それに基づいて同年9月に国の特殊会社として電源開発株式会社（3分の2を国、3分の1を9電力が分担出資）を設立して電源開発に当たらせた。これ以後、戦後の大規模水力電源開発が軌道に乗り、佐久間、奥只見、田子倉、御母衣を始め多くの大容量の水力発電所が全国にわたって電源開発株式会社によって建設されるようになった⁽¹⁸⁾。

他方、9電力会社でも資力のある会社は大規模電源開発に取り組むようになった。この時期に建設された主な水力発電所を表6.1に示す。

表6.1 戦後の復興期に建設された主な水力発電所（単機出力50,000kW以上、1963年まで）

事業者	発電所	水車形式	落差	単機出力×台数	メーカー	完成年
関西電力	丸山	立軸フランシス	80.7m	70,000kW×2	日立1/電業社1	1954
電源開発	佐久間	立軸フランシス	129.0m	96,000kW×4	日立2/東芝2	1956
電源開発	田子倉	立軸フランシス	118.2m	108,000kW×4	新三菱重工	1959
北陸電力	和田川第二	立軸4射ペルトン	470.0m	68,900kW×2	富士電機	1959
中国電力	滝山川	立軸フランシス	314.4m	53,200kW×1	日立	1959
電源開発	奥只見	立軸フランシス	190.2m	137,000kW×3	東芝	1960
関西電力	読書第二	立軸フランシス	117.0m	78,000kW×1	新三菱重工	1960
電源開発	滝	立軸カプラン	37.0m	50,000kW×2	新三菱重工	1961
電源開発	御母衣	立軸フランシス	200.0m	128,000kW×2	日立	1961
関西電力	黒部川第四	立軸6射ペルトン	588.0m	95,800kW×3	フォイト2/日立1	1961
電源開発	十津川第二	立軸フランシス	90.0m	61,500kW×1	東芝	1962
関西電力	天ヶ瀬	立軸斜流	57.0m	50,000kW×2	新三菱重工	1962
九州電力	一ツ瀬	立軸フランシス	152.4m	102,000kW×2	東芝	1963
電源開発	大鳥	立軸カプラン	51.0m	100,000kW×1	日立	1963
電源開発	七色	立軸フランシス	69.3m	87,300kW×1	新三菱重工	1963
電源開発	御母衣第二	立軸フランシス	454.0m	66,300kW×1	東芝	1963
関西電力	新黒部川第三	立軸フランシス	290.0m	60,000kW×1	日立	1963

表6.1の大容量水車の多くは当時の記録品であり、多くの新技術が採用された。各機種について以下に記す。

(1) ステンレス鋼製ランナの製造技術

従来、フランシス水車のランナの多くは、炭素鋼(SC46など)の一体 casting で製作されていた。しかし戦後、ステンレスなどの特殊鋼に関する技術開発が進み、水車ランナにも土砂磨耗やキャビテーション壊食に対する強度に優れたステンレス鋼製ランナを採用するようになった。

ランナ用のステンレス鋼としては、米国の内務省開拓局(Dept. of Interior, Bureau of Reclamation)がオーステナイト系の18Cr-8Niステンレス鋼が耐キャビテーション性に優れているとして推奨したことから米国では多く用いられた。しかし、この材料は炭素鋼などに比べ強度が低いことや熱膨張率が炭素鋼に比べ2倍も大きいことから加工時の切削や研削による熱で変形しやすく、かつ加工硬化を起こすため切削性が良くないなど、扱い難い点が多々あった。またNi含有量が多いことから材料も高価でありわが国ではランナ本体の材料としては多くは用いられなかった。むしろわが国では、18Cr-8Niステンレス鋼は溶接性が良いことから、炭素鋼製ランナのキャビテーション発生部位の保護のために施工される肉盛溶接の材料として多用された。

このようなことから、わが国ではランナ本体にはマルテンサイト系の13Crステンレス鋼が多く用いられた。この材料は、耐腐食性などは18Cr-8Ni鋼にやや劣るが、キャビテーション壊食や土砂磨耗に対する強度はほぼ18Cr-8Ni鋼に遜色がなく、かつ強度は炭素鋼並みかそ

れ以上である。ただしこの材料も難点があり、高熱から冷却された状態では焼入れ状態となって硬くて脆い性質になることである。このため casting 後や casting 欠陥の補修溶接などを行なった後には、必ず600度C程度に加熱してから徐冷する焼鈍処理を行わなくてはならないし、また溶接時には、割れを防ぐため300度C位に予熱しなければならない。

一般にフランシス水車の羽根間のスペースは、大型ランナといえども、狭隘部は200-300mmしかないことが多い。そのため、 casting 欠陥の補修溶接を行なう作業者は300度Cまで予熱されたランナ内で、長時間、溶接作業をすることが要求される。そのため、水冷ジャケットを内蔵した耐熱防護服などを着用して作業することも必要となる。

国内で始めて13Crステンレス鋼製ランナを採用したのは、1954(昭和29)年に運転を開始した関西電力の丸山発電所用フランシス水車(日立製)であると言われている。これ以後、13Cr鋼製ランナは国内でも段々用いられるようになった。

ただし、13Cr鋼を採用した当初は、予熱管理の不備から、しばしば溶接方法の不適合による割れなどの事故を起こした。そのため一部のユーザーは採用に慎重であったが、その後製造技術が改善され、1965年頃からは広く用いられるようになった。

(2) 鋼板製ケーシングの製造技術

1920年代から用いられ始めた鋼板製ケーシングは、もっぱらリベット接ぎ手を用いて製作されていた(図6.1)。

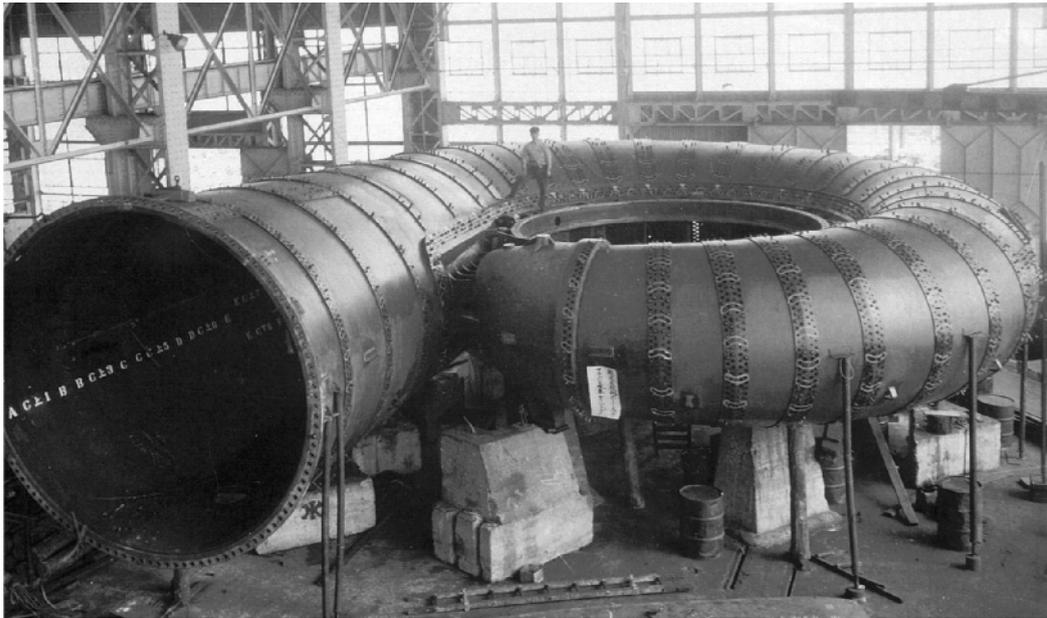


図6.1 リベット接ぎ手を用いたケーシングの例
(鉄道省 千手発電所用 60,000馬力フランシス水車ケーシング、日立製、1936年；写真提供：日立製作所)

その後、溶接技術が発達するに従い、ケーシングにも溶接構造が段々取り入れられるようになった。佐久間発電所用機については、電業社製の1、2号機は鋼板製ケーシングを鋳鋼製ステーリングに工場溶接し、これを現地でフランジ接続する方法、日立製の3、4号機は鋼板製ステーリングに鋼板製ケーシングをリベット接続する方法を採っている。

奥只見発電所のフランシス水車は、当時の国内最大容量機であるが、ケーシングは輸送限界内の寸法まで工場で溶接した上、現地の組立工事は、リベット接ぎ手よりも工期短縮が可能なフランジ接ぎ手構造を採用している (図6.2)。



図6.2 フランジ接続のケーシングの例
(電源開発 奥只見発電所用137,000kWフランシス水車ケーシング、東芝製、1960年；写真提供：東芝)

ケーシングを現地で溶接して組み立てるいわゆる現地溶接ケーシングがわが国で最初に採用されたのは、昭和27年に完成した東北電力 柳津発電所用カプラン水車 (29,000kW、三菱重工業製) や昭和31年に完成した電源開発 秋葉第二発電所用カプラン水車

(38,000kW、富士電機製) であったといわれている。しかしこれらは落差40m以下の低落差機であった。この後、1960 (昭和35) 年に完成した電源開発 田子倉発電所用フランシス水車 (108,000kW三菱重工業製) では、落差が118mの大容量機であったためケーシング板厚が

最大45mmにも及ぶものであったが、現地溶接で施工された。このような厚板のケーシングの現地溶接は、当時発達途上にあった溶接技術の最先端を行くもので、東京大学の協力の下に溶接施工要領書を作成して施工したという⁽¹⁸⁾。

これ以後、ケーシングは、特殊な場合を除き、現地の組立溶接も含めてすべて溶接で製作されるようになった。

なお、初期の頃は、図6.3に示したように、現地溶接の開先が正確に加工されているかどうかをチェックするために工場でケーシング全体の仮組立を実施していたが、1990年代に入ってから、隣接するセクション同士の仮組立のみで良しとする例も多くなり、最近ではそれも省略することが多くなった。

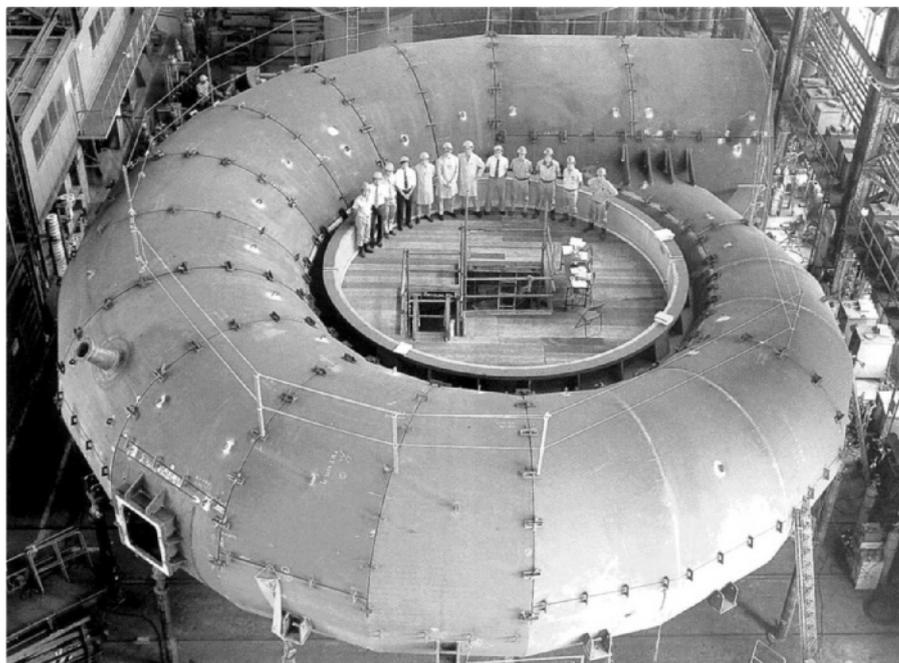


図6.3 現地溶接を採用したケーシングの溶接開先の精度確認のための工場仮組立
(米国 バウンダリー発電所用 210,000kWフランシス水車、東芝製、1984年；写真提供：東芝)

(3) 高落差カプラン水車の出現

カプラン水車は、元来40m以下の落差に適用されることが多かったが、わが国では、戦後、これの高落差への適用が進められた。

まず1957年に運転を開始した関西電力の殿山発電所用機（71.0m、17,000kW、日立製）が初めて国内で70mを超える落差に適用された。次いで1959年には熊本県営の市房第一発電所用機（73.7m、15,800kW、日立製）で記録を更新した。

その後まもなく1963年に、運転を開始した電源開発の大鳥発電所用機（51.0m、100,000kW、日立製）は50mを超える高落差機で、今に至るも国内の最大容量機である。この水車は、このような高落差機であるにも拘らず、羽根とステムを分割してボルト締めするランナ羽根の分割構造や溶接構造ガイドベーンの採用など、当時の多くの新技術を採用している（図6.4）⁽⁷⁾。

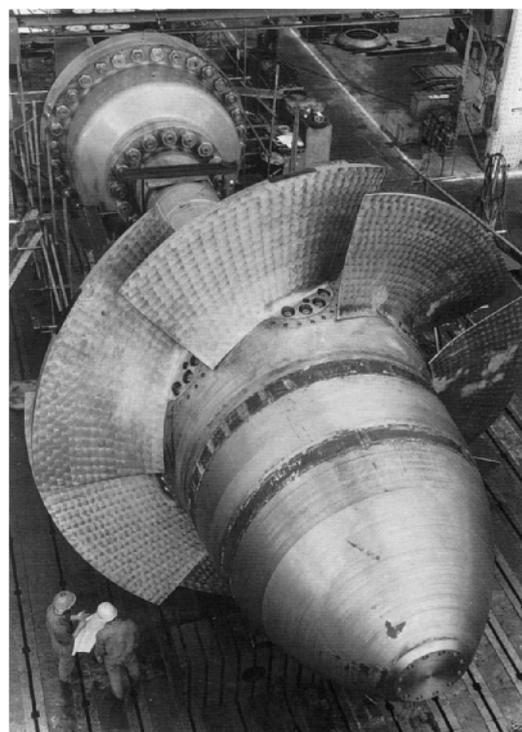


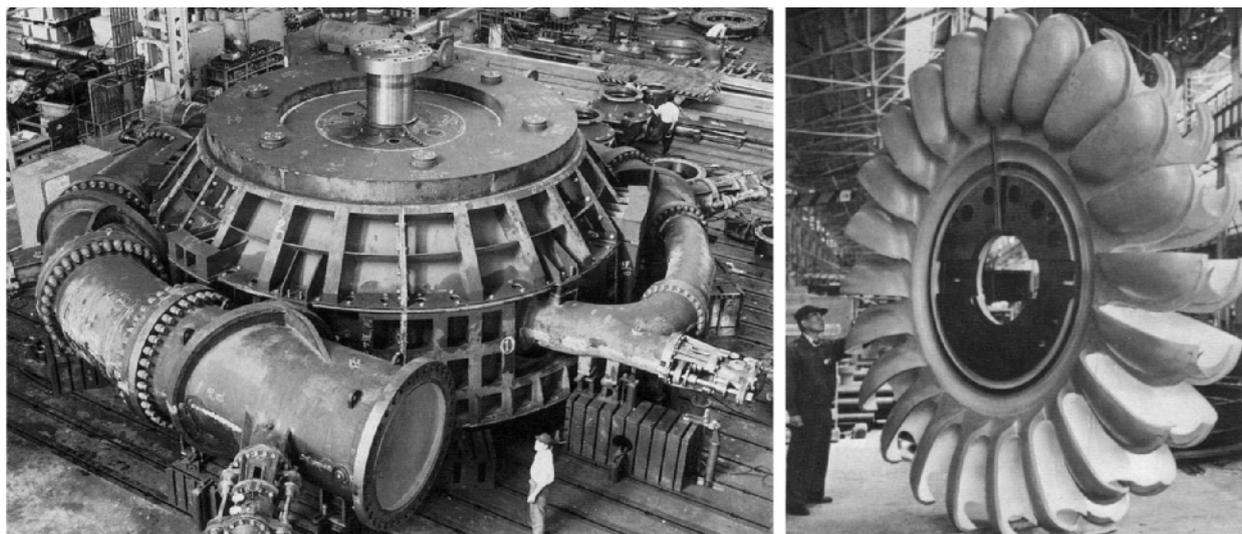
図6.4 大鳥発電所用 カプラン水車のランナ
(わが国最大容量のカプラン水車、日立製；写真提供：日立製作所)

(4) 立軸ペルトン水車の導入と一体鋳造ランナの製造技術の確立

大容量ペルトン水車には噴射ノズルを多数配置できる立軸ペルトン水車がいられる。しかしわが国ではもともと高落差地点が少なく、高落差用のペルトン水車に関しては欧米メーカーに後れを取っていた。1953年に白根発電所に国産初の12,000kW 立軸ペルトン水車が日立製作所により製作されたが、2万kW以上の国産機が作られるようになったのは、1959年以降である。

そのため、1959年に運転を開始した北陸電力 和田川第二発電所用の立軸4射ペルトン水車（470m、68,900kW）は経験の豊富なドイツのフォイト社と提携していた富士電機に発注された。ついで1961年に運転を開始した関西電力 黒部川第四発電所用の立軸6射ペルトン水車も、4台中2台はフォイト社から輸入された。他の2台は国内メーカー育成のためもある日立製作所に発注されたが、日立への発注分は当初は3号機1台のみで、増設の4号機はかなり後に発注され、1973年に運転が開始された（図6.5）。

それまでのペルトン水車は個々のバケットをランナディスクの外周にボルト締めする構造であったが、高落差大容量になるに及び、しばしばバケットの取付け部が破損してバケットが飛散する事故が発生した。そのためバケットとディスクを13Crステンレス鋳鋼で一体鋳造する製法が考案されたが、当時はまだスイスのGeorg Fischer社のみがその技術を実用化していたに過ぎなかった。日立製作所では、フォイト社に発注されたペルトン水車が一体鋳造ランナを採用していることもあって、この黒部川第四発電所用機に始めて13Crステンレス鋳鋼製一体鋳造ランナを国産化して採用することとした。しかしながら、13Crステンレス鋳鋼の鋳造技術そのものがまだ発展段階にあったときであり、かつ複雑な形状のペルトン水車ランナを一体で鋳造することは非常に難しく、日立製作所ではこの製作に非常な苦労を重ねたという。しかしこの経験によってわが国でも13Crステンレス鋳鋼製一体鋳造ペルトンランナの製作技術が確立した。



a) 工場仮組立時の水車本体

b) 13クローム鋼製一体鋳造ランナ

図6.5 関西電力 黒部川第四発電所用 95,800kW立軸6射ペルトン水車
(わが国最大容量のペルトン水車、日立製；写真提供：日立製作所)

7 | 揚水発電用ポンプ水車の開発と急速な大容量化

7.1 揚水発電の必要性

1960（昭和35）年代後半からわが国経済は急上昇し、それに伴い、電力需要も急増した。これに対処するため、昭和30年代に入り火力発電所が次々と建設され、1963（昭和38）年にはついに火力発電容量が水力発電

容量を超え、火主水従時代に入った。その後も需要増に対応するための大量の火力発電所の建設が見込まれたばかりでなく、1963年には日本初の原子力発電所である日本原電の東海発電所（12,500kW）が運転を開始し、将来、大容量火力と原子力の急増が予想されるに至った（図7.1）。

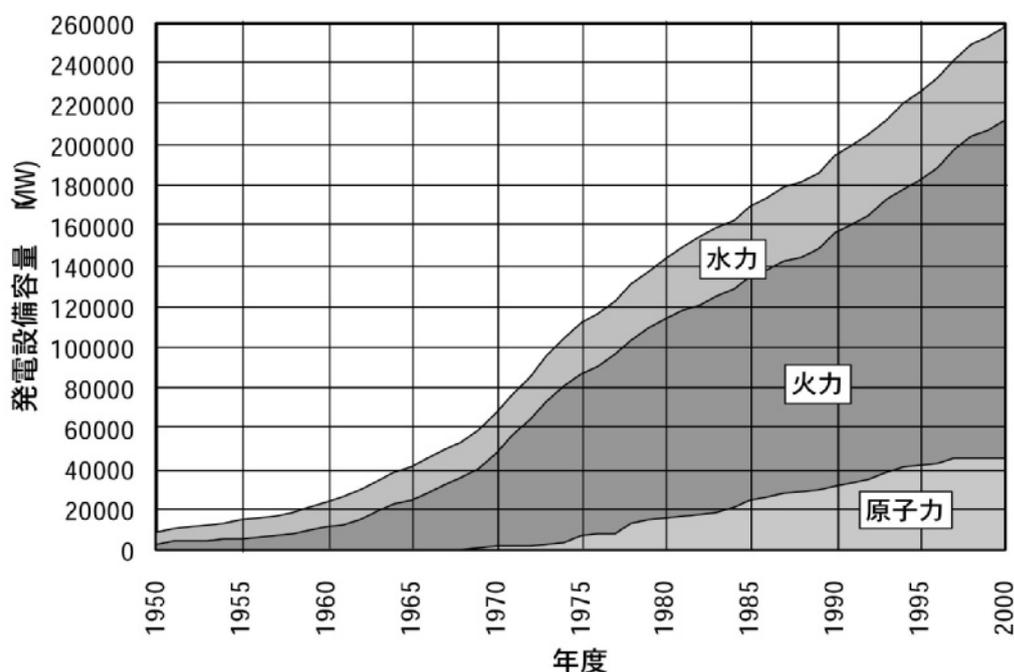


図7.1 わが国の発電設備容量（含：自家用）の変遷（参考資料（15）より作成）

この大容量火力発電や原子力発電は、本来、ベース負荷用であり、負荷変動に対する応答速度も遅く、系統の周波数や電圧を安定的に維持するには問題がある。この対策としては、即応電源としての水力発電所の建設が必要であるが、1950年代の大容量水力の建設が一段落した後は、国内の経済的な大容量水力の開発地点はほとんど無くなってしまった。このような背景から、1955年頃から国内の電力会社では、深夜のオフピーク時の火力や原子力の余剰電力を利用して揚水し、この水を用いて昼間のピーク時に発電する揚水発電に注目するようになった。揚水発電による主なメリットを下記に示す。

- ・深夜電力の吸収による火力発電所の負荷率向上
- ・揚水発電所の即応性による系統周波数や電圧の安定維持
- ・系統事故時などにおける即応予備力としての寄与による信頼性の向上

7.2 可逆ポンプ水車の出現とそれに伴う新技術の開発

わが国では、すでに1933（昭和8）年に、日本海電気（現 北陸電力）の小口川第三発電所において、8,950kWのペルトン水車に3,800kWの6段タービンポンプが併設され、揚水発電所として運用されていた。また1934年には、中央電気（現 東北電力）の池尻川発電所でも1,350kWの横軸フランシス水車と1,120kWのポンプを一軸で発電電動機に連結したいわゆる横軸タンデム式ポンプ水車が設置され、揚水発電が行なわれた。これらの先駆的な小規模の揚水発電所はいずれも季節による出水量を調整するためのいわゆる季節調整用の揚水発電所であり、現在の揚水発電所とはニーズが異なる。

1954年、米国のアリスチャルマーズ（Allis Chalmers）社（以後AC社と略記）が1台の機械で水

車とポンプの両用に使える可逆ポンプ水車を開発し(図7.2)、フラットアイアン(Flatiron)発電所で落差91.4m、8,950kWのポンプ水車の実用運転を開始した。さらに1957年にはハイワシー(Hiwassee)発電所で77.7m、59,500kWの大容量機の運転を開始した。これらの情報を受けて、1955年ごろから国内メーカーも相次いで可逆ポンプ水車の開発研究に着手した。

この研究成果を活かしてわが国で初めて建設された可逆ポンプ水車を用いた揚水発電所は、四国電力の大森川発電所である。この発電所には日立製のフランシス形可逆ポンプ水車(落差118m、水車出力12,200kW)が設置され、1959(昭和34)年に運転を開始した(図7.3)。この機械は、わが国の揚水発電所のパイロットプラント的な存在として、貴重な発電所である。

これに引き続き、1962(昭和37)年には中部電力の畑薙第一発電所が運転を開始した。これは5万kWクラスの本格的な機械であったので、リスクを分散するため、3台中1台(51,800kW機)をAC社製とし、2台(45,400kW機)を日立製作所製としている。このリスク分散の発注方法は、後の東京電力矢木沢発電所でも採用された。

なお、この後1970年までに、表7.1に示すようなポンプ水車が国内の揚水発電所に設置された。これらによって、国内メーカーのポンプ水車の設計・製造技術は急速に進歩した。

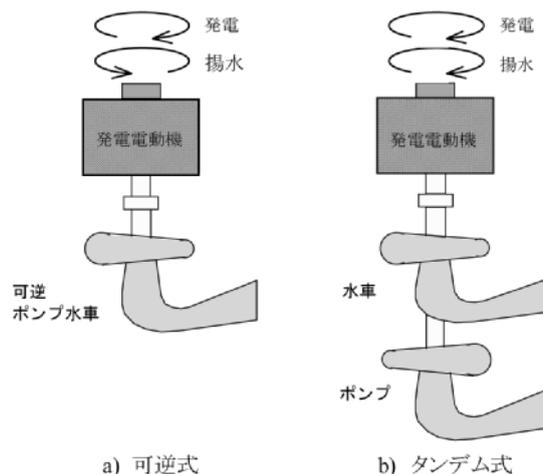


図7.2 揚水発電用ユニットの形式

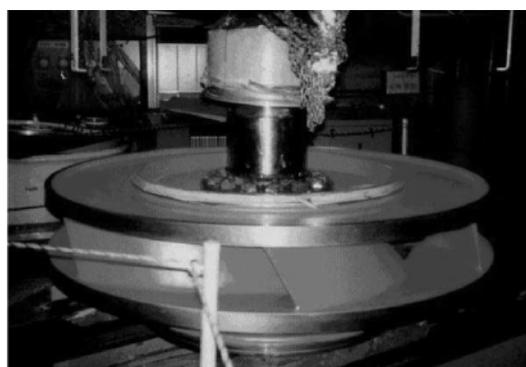


図7.3 大森川発電所用可逆ポンプ水車のランナ(四国電力提供)

表7.1 初期のポンプ水車⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾

会社名	発電所	落差(m)	水車出力(kW)	台数	運転開始年	メーカー
四国電力	大森川	118.0	12,200	1	1959	日立
中部電力	畑薙第一	101.8	51,800/45,400	1+2	1962	AC:1、日立:2
関西電力	三尾	137.0	36,000	1	1963	日立
電源開発	池原Ⅰ期	129.5	80,000	2	1964	日立
神奈川県	城山	181.4	65,000	2+2	1964	日立:2、東芝:2
東京電力	矢木沢	111.0	87,000	2+1	1965	AC:2、日立:1
電源開発	池原Ⅱ期	129.5	110,000	2	1966	日立
中国電力	新成羽川	94.7	78,000	3	1968	日立
電源開発	長野	107.5	113,000	2	1968	日立
東京電力	水殿	79.8	64,000	2	1964	日立
東京電力	安曇	134.9	108,500	4	1970	東芝
関西電力	喜撰山	220.0	240,000	1+1	1970	東芝:1、日立:1

これらの初期のポンプ水車の実用化には、在来の水車専用機とは全く異なる技術の開発が要求された。これらの内の主な問題点を以下に示す。

(1) ランナの設計

ポンプ水車のランナは、ポンプ運転のときのランナ内の流れが、流路が拡大する減速流となる。そのため流路の急拡大による流れの剥離を防止するため、ラン

ナ羽根は図7.4のような長い羽根となり、在来の水車よりもむしろ遠心ポンプに似た羽根形となる。かつ羽根枚数も水車が11-17枚なのに対し、ポンプ水車は6-9枚である。

一見遠心ポンプの羽根のようであるが、遠心ポンプのランナを逆転して水車として運転しても、多くの場合、水車出力が足りず、ポンプ水車として十分な性能

は得られない。そのため、ポンプ水車として、水車出力とポンプ入力とのバランスが取れた性能が得られるように設計する必要がある。

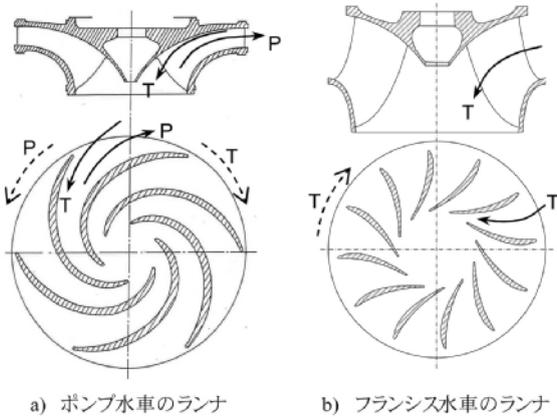


図7.4 ポンプ水車のランナと水車のランナ

T 水車運転時 P ポンプ運転時
 点線矢印はランナの回転方向
 実線矢印はランナ内の水流の方向

図7.4 ポンプ水車のランナと水車のランナ

(2) ガイドベーン的设计

ガイドベーンも、在来の水車に用いられているように羽根出口を薄くした形状では、ポンプ運転時に流れが剥離し振動を起こす。よって、初期のポンプ水車では、ポンプ運転中の振動を防止するためガイドベーン軸にブレーキを設置したものもある。しかしこれは、ガイドベーンの入口に丸みを持たせることにより振動を避けることができることが分かり、現在はそのような形状に設計されている。

また、この他にも、ガイドベーンの形状が不適当だと、後述のように、ポンプ運転の起動時に水圧鉄管に激しい水撃波の自励振動を起こすので注意が必要である。

(3) 非常停止時の過渡現象計算

在来水車の流量は、ガイドベーンの開度にほぼ比例して変化し、かつ主機の回転速度変動による影響をほ

とんど受けない。したがって、非常停止時のガイドベーン急閉鎖による水圧鉄管の水圧上昇も、直線閉鎖でかつ管路内の水柱を剛体とみなして水撃圧を計算するアリエビの式によって、かなりの精度で計算することが可能であった。

しかし、ポンプ水車の場合には、水車運転からの負荷遮断時といえども遮断による主機の回転速度上昇により流量が著しく急減する現象を起こし、それによる水圧上昇が起こる。よって回転系の慣性などを考慮した回転速度変化を考慮しないと正確な水撃計算が出来ない。またポンプ運転からのポンプ入力遮断時の過渡現象では、発電電動機が系統から切り離された途端、急速な回転速度低下を起こし揚水能力が急減する。これにより、負の水撃、すなわち水圧降下を起こすが、これも回転系の慣性とポンプ入力により決まる減速度を考慮しないと正確な予測が出来ない(図7.5)。

初期のポンプ水車が製作された頃は、まだコンピュータが十分発達していなかったこともあって、これらの過渡現象の予測計算に非常に苦労した。これらの現象は、ポンプ水車の広範囲の非設計点の特性、いわゆる完全特性を考慮しなければならない。そのため、大森川発電所の工事誌⁽¹⁹⁾によれば、完全特性の非線形関数による近似なども含め、低速アナログ計算機によるシミュレーション、手数のかかる在来の図式解法、デジタル計算機によるルンゲ・クッタ・ギル法による逐次計算などのいろいろな計算手法を用いて、この予測計算を実施している。アナログ計算機のフローチャートを作成して各計算要素をセットする手数や図式解法の作図などには膨大な労力を要する。またデジタル計算機による計算といえども、数百枚に及ぶパンチカードによる入力を要するほか、出力もグラフを描かせることが出来なかったためラインプリンタからの膨大な数字の羅列をグラフ化する作業を要するなど、いずれも大変な労力を要する作業であった。

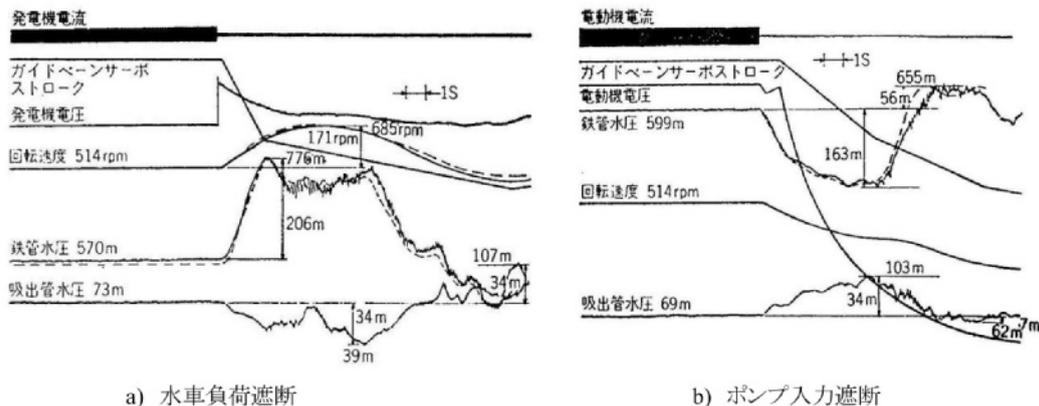


図7.5 ポンプ水車の過渡現象の例(実測値と計算値の比較:点線は計算値)(資料提供:東芝)

7.3 ポンプ水車導入初期のトラブルの克服と急速な関連技術の確立

1965年前後から大容量の揚水発電所の建設が急速に進められたため、国内メーカーは一挙に5万～10万kW級の大容量ポンプ水車を設計・製作することとなった。これらの実用化の初期には、いくつかの予測しなかったポンプ水車特有のトラブルや、新技術への挑戦を経験した。以下にその内の主なものについて述べる。

(1) 水車負荷遮断時のガイドベーン閉鎖渋滞

負荷遮断時の非常停止において、従来の水車専用機と同様にガイドベーンを直線的に閉鎖したところ、閉鎖途中で閉動作が渋滞したり、ガイドベーンが押し戻されていったん開く現象が発生した。

これは、在来水車と異なり、急速に直線閉鎖した場合に運転状態が逆転ポンプ領域(下記注参照)に深く入り込み、ガイドベーンが開方向の大きい水力モーメントを受けることによるものである。

またある発電所では、ガイドベーン的全閉直前にこの水力モーメントが急に開方向から閉方向に転じて急激な水圧上昇を起こした。

これらはガイドベーンの閉鎖速度を途中で遅くするいわゆる2段閉鎖方法を採用することにより防止できることが分かり、現在のポンプ水車ではすべて、この2段閉鎖方法を採用している(図7.5 a) 参照)。

(注) 逆転ポンプ領域：ランナは水車方向に回っているがランナの速度上昇による大きい遠心力で水が逆に揚水状態になる運転領域

(2) ポンプ起動時の自励水撃波の発生

ポンプ運転の起動時には、起動トルクを小さくするため、一般に圧縮空気でランナ周辺の水を押し下げ、ランナを空転状態にして起動する。しかる後、定格回転数に達して発電電動機が電力系統に並列された後、空気を抜き、ランナに充水して締切り圧が発生した時点でガイドベーンを開き、揚水を開始する。この一連の起動操作において、回転中のランナに充水して締切り圧が発生した状態でガイドベーンを小開したところ、水圧鉄管に激しい水撃波の自励振動が発生し、1秒程度の間隔で発電所の建屋が家鳴り震動してポンプ起動が出来ないという事態が発生した。このときは、応急的に、入口弁を閉じたままでガイドベーンを予め開いておき、その後、入口弁を開くことによって起動するという変則的な起動方法(いわゆる入口弁起動法)を採って凌いだ。

この自励振動は、ポンプ起動時のガイドベーン小開時におけるガイドベーンに働く水力モーメントが鉄管

側の水圧変動により変化し、これがガイドベーン支持機構の剛性との関係でガイドベーン開度の微小変化を生じて揚水量を変化させ、これが鉄管側の水撃波を増幅するように作用して自励的に水撃波の振動を生ずることが分かった。この問題は、その後、ガイドベーンの支持軸の位置を変えて形状を改良することによって回避できることが判明し、現在のポンプ水車は、すべてこのタイプのガイドベーンになっている。

(3) 上部貯水池の初充水試運転に関する技術の確立

大容量揚水発電所は、河川から上部貯水池への自然流入の無いいわゆる純揚水発電所として建設されることが多い。在来の発電所では、試運転前に上部貯水池に湛水し、発電方向に水車を徐々に回転するメタル馴染し運転などを経て定格速度による運転に入り、その後、水車の運転状態をチェックしながら段階的に出力を上げて試運転を行なう。

しかし、純揚水発電所では、予め上部貯水池に湛水することが出来ないため、試運転は上部貯水池の初充水のための初揚水試験から試運転を開始しなければならない。初揚水試験においては、低回転では揚水することが出来ないため、いきなり定格回転速度において全出力運転を行なうこととなる。従来の試運転とは全く異なり、これには入念な事前準備が必要である。

表7.1の発電所の中で、城山発電所と喜撰山発電所が純揚水発電所であるが、これらの発電所ではこのような慎重な準備の下に無事初揚水試験に成功し、以後の純揚水発電所の試運転技術を確立した。

以上の他にも、コンピュータによる過渡現象計算法のグレードアップ、可逆回転軸受の開発、ポンプ起動時の制御方法やポンプ充水の際の過渡時にランナに加わる水推力の制御など、ポンプ水車特有の問題があったが、これらを逐次解決して可逆ポンプ水車に関する設計ならびに制御に関する技術を確立した。

これらの技術の集大成が、1970年に運転を開始した関西電力の喜撰山発電所の240,000kWポンプ水車である。この水車は、当時の世界最大容量のポンプ水車であった米国トムソーク(Taum Sauk)発電所のポンプ水車(落差267m、出力225,000kW)を凌ぐ大容量機であったが、初揚水試験も含め、試運転は全くノータラブルであった。この成功は、わが国のポンプ水車の設計・製作ならびに制御の技術がほぼ完成の域に達したことを立証するものであった。

7.4 斜流ポンプ水車の出現と衰退、斜流水車で延命

以上述べたポンプ水車は、いわゆるフランシス形ポンプ水車と称されるもので、フランシス水車と同様、ランナ羽根は三次元曲面の固定羽根である。ところが、1957年、英国のイングリッシュ・エレクトリック(English Electric)社によって世界で初めてカナダのナイアガラにあるSir Adam Beck No. 2発電所向けに可動ランナ羽根の斜流ポンプ水車が製作され、運転を開始した。これは可動羽根であるため水車運転時の部分負荷効率がよく、かつポンプ運転時に揚水量を変えてポンプ入力を調整することが可能である。

これを受けてわが国でも1960年に四国電力の名頃発

電所に小容量ではあるが1,300kWの斜流水車(落差46.65m、東芝製)が設置され運転を開始した。この水車は、商用運転では発電運転のみであるが、試運転の時には斜流ポンプ水車のパイロットプラントとしてポンプ水車としての揚水試験も実施した。したがって、ランナ羽根などはポンプ水車として設計されている。なお、この発電所では落差変動幅が大きいため、わが国で初めての極数変換による二速度発電機(600/720min⁻¹)が採用されている。

斜流ポンプ水車はポンプ運転時の入力調整ができるというメリットを期待されて、その後、名頃の経験に基づいて計画された四国電力 穴内川発電所(落差:69.5m、出力:13,500kW、日立製)を皮切りに、表7.2のような大容量の斜流ポンプ水車が作られた。

表7.2 わが国で製作された大容量斜流ポンプ水車⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

電力会社	発電所名	水車運転時		ポンプ運転時		回転数 (min ⁻¹)	運転 開始年	メーカー、台数
		落差(m)	出力(kW)	揚程(m)	入力(kW)			
四国電力	穴内川	69.5	13,500	75.0	10,730	360	1964	日立1
四国電力	蔭平	89.7	47,700	94.0	37,500	240	1968	日立1
中部電力	高根第一	136.2	88,000	137.6	99,400	277	1969	日立2、三菱2
北海道電力	新冠	117.0	102,000	122.0	103,000	231	1974	三菱2
中部電力	馬瀬川第一	104.9	149,000	109.7	—	180	1976	日立2
北海道電力	高見	115.2	103,000	118.0	102,000	231	1983	三菱1
北海道電力	高見	115.2	103,000	122.3	140,000	208~254	1993	三菱1(可変速機)

表中馬瀬川第一発電所の斜流ポンプ水車は、世界最大容量機である(図7.6)。

しかしながら、斜流ポンプ水車のランナ羽根は、水車運転とポンプ運転では水流が逆となることから、ランナ羽根に作用する水力モーメントが最小となる位置(通常は羽根の上流側前縁から3分の1くらいの位置)で羽根を支えることができず、羽根中央部で羽根を支えなければならない。そのためランナ羽根に作用する水力モーメントが非常に大きくなる。このため、ランナ羽根を操作する油圧サーボモータが非常に大きくなるばかりでなく、ランナボス内の操作機構も強度的に非常に苛酷な状態になる。また、斜流ポンプ水車は、ポンプ運転時のキャビテーション性能がフランシス形ポンプ水車に比べて劣るので、据付け高さを低くする必要がある。

これらの短所があるため、斜流ポンプ水車を用いた揚水発電所は建設費が嵩み、経済的にフランシス形ポンプ水車に比べて劣る。またポンプ運転時の入力調整が可能であるという最大の長所も、1990年にフランシス形ポンプ水車の可変速運転が実用化されるに及んで

大きい長所とは言えなくなり、1993年に製作された高見発電所用機を最後に、斜流ポンプ水車が国内の新設揚水発電所に採用されることはなくなった。

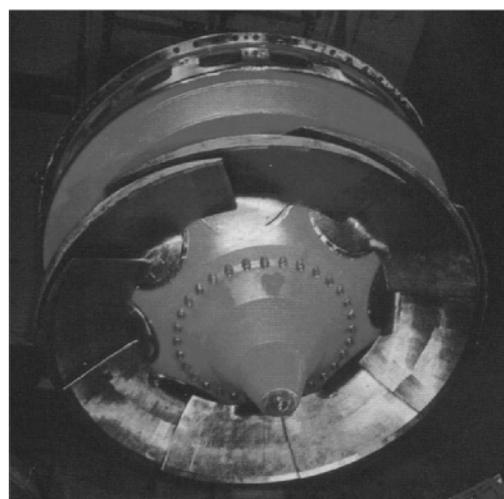
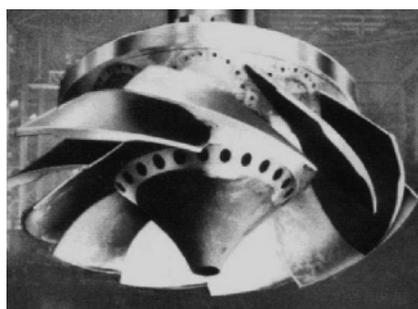


図7.6 中部電力馬瀬川第一発電所用斜流ポンプ水車(日立製)
(写真提供:日立製作所)

一方、斜流形の水車専用機の方は、ランナ羽根に作用する水力モーメントが最小となる位置でランナ羽根を支えることができるのでランナ羽根の操作機構の設計がポンプ水車に比べてはるかに容易となる。しかも可動羽根であるため、同程度の落差に適用されるフランス水車よりも部分負荷効率が良く、またカプラン水車よりも高落差に適用できることから、常時水量の少ない河川の発電所用としては優れており、水車専用機としての斜流水車はその後も多数製作されている。

1961年には東北電力 新大倉発電所用機 (96.9m、

5,500kW、日立製作所製) が製作されたが、1962年に運転を開始した関西電力の天ヶ瀬発電所用機 (57.0m、50,000kW、三菱重工製) は一挙に出力記録を押し上げた大容量機である。しかもそれまでの斜流水車は斜流角が45度のものであったが、低落差にはそれよりも速度を高く取れる斜流角の大きいものが有利であるため、この天ヶ瀬発電所用機では斜流角60度が始めて採用された。以後国内ではカプラン水車の適用落差を上回る60~90mにはこの斜流角60~70度の斜流水車が多く採用された (図7.7)。



a) 傾斜角45度の例
(電源開発 魚梁瀬発電所用)
(97.4m、43,600kW；写真提供：東芝)



b) 傾斜角60度の例
(関西電力 天ヶ瀬発電所用)
(57.0m、50,000kW；写真提供：三菱重工業)

図7.7 斜流水車ランナの例

8 | 輸出用大容量水車と製造技術の発達

8.1 国産水車の海外への進出

1960年代に入り、国内の大規模電源開発が一段落したのに伴い、国内メーカーは輸出に注力するようになった。海外プラントは大容量の計画が多く、国内メーカーはそれまでの10万kWクラスの製造経験を基に海外の20万～30万kWクラスのプロジェクトに次々と挑戦して行った。この輸出ブームは第一次石油ショック(1973年10月)および第二次石油ショック(1979年2月)により世界的大不況となる1980年頃まで続いた。これ以後、為替レートが円高になったこともあってわが国からの水車の輸出のテンポはやや低下したが、最近はまだ国際調達などにより競争力を回復してきつつあ

る。ここではわが国メーカーの技術水準を記録する意味で、これらの中から20万kW以上(カプラン水車は8万kW以上、バルブ水車は2万kW以上)の主な水車を表8.1に示した。これを見ると、水車メーカーが国際競争に打ち勝つための技術、大容量機を製作するための製造技術をいかに開発・発展させてきたかが窺える。

なお、表8.1は大容量機に限定したが、これ以下の容量の水車も多数輸出されており、例えば輸出の最盛期においては、ベネズエラでは日立の水車が、インドネシアやトルコでは東芝製の水車が、またタスマニアでは富士電機の水車がその国の水力発電容量の過半数を占めた。

表8.1 1965年以降にわが国から輸出された大容量水車
(発電所名は原語による。 F：フランス水車、K：カプラン水車、B：バルブ水車、P/T：ポンプ水車)

(a) 日立製作所⁽¹⁰⁾

国名	発電所名	最大出力MW	最高落差 m	台数	完成年	備考
ベネズエラ	Guri I	218.5	115.0	3	1966	F
ベネズエラ	Guri I	270.0	136.0	3	1972	F
パキスタン	Tarbela	216.0	136.5	4	1972	F
米国	Ludington	343.0	107.7	6	1973	P/T
米国	Castaic	261.0	328.0	6	1973	P/T
米国	Blenheim Gilboa	300.0	339.0	4	1973	P/T
米国	Bear Swamp	320.0	228.6	2	1974	P/T
ベネズエラ	Guri I	340.0	136.0	1	1975	F
カナダ	Mica	492.0	182.9	2	1975	F
ベネズエラ	Guri I	400.0	136.0	3	1976	F
米国	Brownlee	265.0	81.0	1	1980	F
南アフリカ	Drakensberg	300.0	451.7	1	1981	P/T,東芝とJV(日立製作分)
米国	Helms	414.0	531.6	3	1984	P/T
中国	Minghu	257.0	316.5	4	1984	P/T
ベネズエラ	Guri II	730.0	146.0	7	1984～86	F、当時世界最大容量機
韓国	Samrangjin	370.0	345.0	2	1985	P/T
ベネズエラ	Guri II	730.0	146.0	3	1985～88	F、東芝とJV(東芝製作分)
ブラジル	Foz do Areia	430.3	135	4	1989	F
中国	Shuikou	235.0	57.8	2	1993	K、国産最大カプラン水車
米国	Rocky Mountain	320.0	210.3	3	1995	P/T
ベネズエラ	Macagua II	216.0	50.5	12	1996	F
インド	Sardar Sarovar	224.4	116.6	6	—	P/T
中国	Lingjintan	30.93	10.5	9	1998	B
中国	Hong Jiang	48.19	27.3	5	2002	B
中国	Xilongchi	306.0	687.7	4	建設中	P/T、東芝とJV(水平分業)

(注) Guri IIの設計は日立、Drakensbergの設計は東芝、Xilongchiは東芝と日立の共同設計

(b) 東芝⁽⁶⁾ ⁽²⁴⁾

国名	発電所名	最大出力MW	最高落差 m	台数	完成年	備考
オーストラリア	Tumut 3	283.0	161.5	3	1971	F
オーストラリア	Tumut 3	283.0	161.5	3	1971	P/T、タンDEM式
カナダ	G. M. Shrum	282.0	166.0	3	1971	F
米国	Grand Coulee 3	620.0	87.0	3	1972	F、本体部分のみ製作
セルビア	Bajina Basta	315.0	600.3	2	1982	P/T、当時世界最高落差
南アフリカ	Drakensberg	300.0	451.7	3	1980	P/T、日立とJV(東芝製作分)
南アフリカ	Drakensberg	300.0	451.7	1	1981	P/T、日立とJV(日立製作分)
イラク	Mosul 1	193.0	77.2	4	1983	F
米国	Boundary	210.0	80.2	2	1985	F
ベネズエラ	Guri II	730.0	146.0	3	1985~88	F、日立とJV(東芝製作分)
ボスニア	Visegrad	111.0	47.0	3	1988	K
ブルガリア	Chaira	216.0	676.8	4	1994	P/T、当時世界最高落差
インド	Purulia	259.3	214.5	4	2001	P/T、三菱とJV
インド	Kol Dam	228.8	131.2	4	2007	F
中国	Xilongchi	306.0	687.7	4	建設中	P/T、日立とJV(水平分業)

(注) Puruliaの設計は東芝

(c) 三菱重工業⁽¹¹⁾

国名	発電所名	最大出力MW	最高落差 m	台数	完成年	備考
メキシコ	Malpaso	218.0	95.5	4	1966	F
カナダ	G. M. Shrum	266.0	170.7	5	1967	F
メキシコ	Chicoasen	318.0	185.0	5	1979	F
メキシコ	Caracol	214.0	101.3	3	1982	F
タイ	Shinakarin	205.0	121.0	1	1984	P/T
米国	J. S. Eastwood	235.0	402.0	1	1986	P/T
タイ	Shinakarin	205.0	121.0	1	1991	P/T
インド	Purulia	259.3	214.5	4	2001	P/T、東芝とJV

(c) 富士電機(現 富士フォイトハイドロ)⁽²⁰⁾

国名	発電所名	最大出力MW	最高落差 m	台数	完成年	備考
韓国	Chongpyong	206.0	473	2	1976	P/T
カナダ	G. M. Shrum	306.0	164.6	1	1977	F
カナダ	Revelstoke	495.0	130.15	4	1977	F、当時国産最大容量機
韓国	Chongpyong	206.0	500.0	2	1979	P/T
米国	Main Canal Headworks	26.8	12.8	1	1983	B
米国	New Martinsville	20.04	6.4	2	1986	B、ランナ径:7.3m
米国	Wells Dam	96.9	22.9	10	1988	K、ランナ更新、ランナ径7.4m
パキスタン	Chashma	23.7	13.8	8	1994	B
中国	百龍灘	33.0	18.0	6	1994	B

8.2 大形水車の製造技術の発達

これらの水車は、従来の国内向けの水車に比べ、大形のものが多く、そのため大形水車の製造技術が大き

く進歩した。それらの中から主なものを以下に記す。

(1) 高能率大容量自動溶接法の導入

1955年頃から溶接技術は、図8.1に示すように新しい溶接技術が実用化され、大形水車の製造に大いに寄与した。

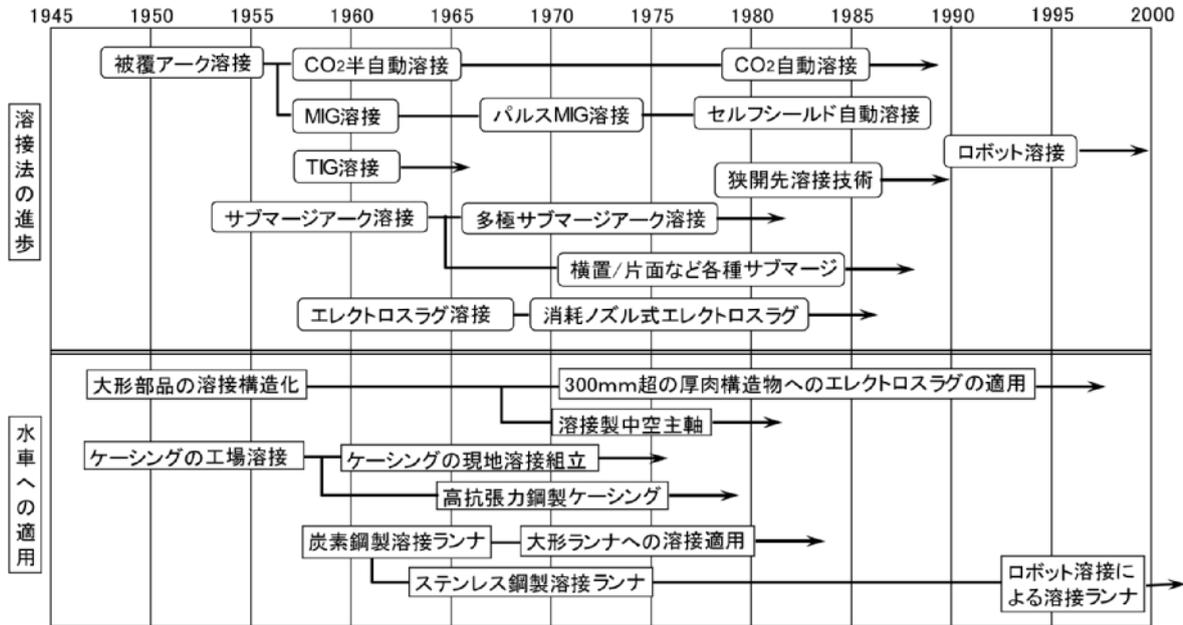


図8.1 溶接技術の発展と実用化

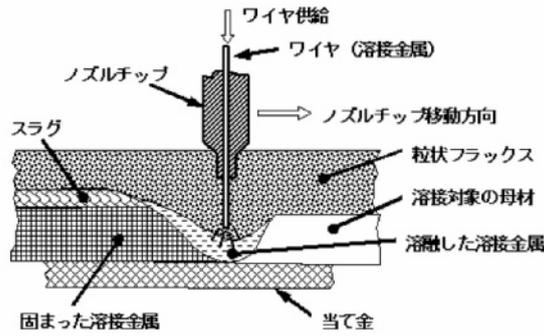
溶接工が施工する手溶接の分野では、初期のフラックスで被覆された溶接棒を用いた時代から、CO₂ガスでシールドして溶金の酸化を防ぎなおかつ通電中に溶接ワイヤが自動で供給されるようにしたCO₂半自動溶接や、CO₂に代わり、アルゴンなどの不活性ガスをシールドガスに用いたMIG溶接 (Metal Inert Gas Welding: ガスシールド消耗電極式アーク溶接法) などが利用されるようになり、大きく能率が向上した。またフラックス入りワイヤによるガスシールドなしのセルフシールドアーク溶接法なども作業性を向上させた。

この中でも大形構造物の溶接の能率向上に大きく寄与したのは、サブマージアーク溶接 (Submerged Arc Welding) と消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接 (別名: CES溶接 (Compact Electro-Slag Welding)) である。

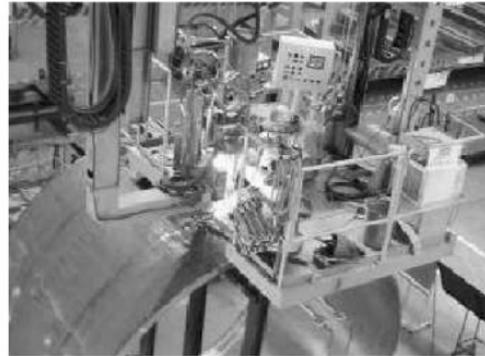
・サブマージアーク溶接

これは溶接装置が溶接線に沿ったガイドレール上を自動走行しながら溶接するものである。まず装置の先端部分から細粒状の溶接フラックスをホッパーから溶接開先部分に供給し、そのフラックスを通して開先部に挿入したノズルを通して溶接ワイヤを自動で送り込み、その先端でアークを生じさせて溶接を行なうものである。このとき、アーク近傍のフラックスは融けて溶融スラグを形成し、外気による溶融金属の酸化を防ぐ。

この溶接法は、装置を走行させるガイドレールの関係で、直線もしくは円筒状構造物 (パイプ、タンクなど) の軸方向または周方向溶接 (この場合は溶接装置を固定して、円筒状構造物をその下で回転させる) など、溶接線が単純な形状の場合にしか適用できない。しかし、かなり大きい開先でも1パスで溶接できる能率の高い方法である (図8.2)。



(a) 溶接方法の概要



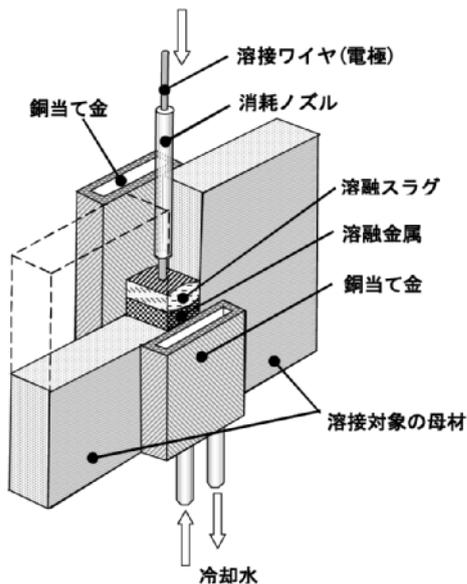
(b) 施工状況 (パイプの周方向溶接の例)

図8.2 サブマージアーク溶接の概要とその施工状況

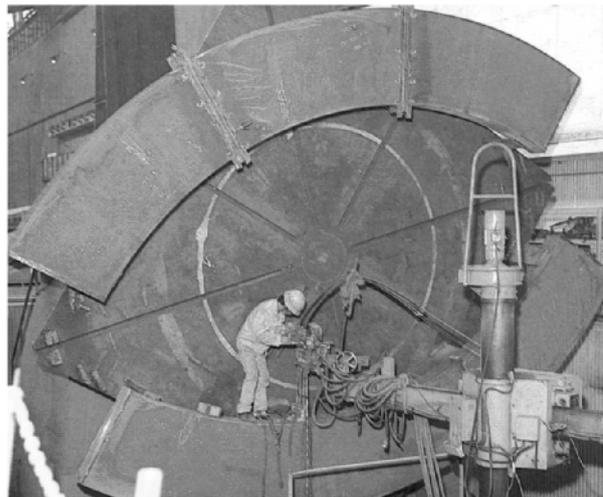
・エレクトロスラグ溶接

この方法は、溶接しようとする部材を数十mmの溶接ギャップを空けて離して置き、そのギャップの両側に銅製の水冷ジャケットを持った当て金を当てて溶融スラグや溶融金属が流れ出さないように囲み、この溶接ギャップの中のスラグ浴中に上部から溶接ワイヤを連続的に供給して溶融スラグの抵抗熱

によって溶接ワイヤと母材を溶かしながら溶接するものである。溶接の進行に応じて水冷の当て金も順次上に移動させて溶接金属を盛上げて行く。このとき、供給ワイヤと母材を絶縁するようにフラックスを被覆したノズルをワイヤに装着し、フラックスとワイヤを一緒に溶融するようにしたものが消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接である。



(a) 溶接方法の概要



(b) 施工状況 (厚板の突合せ溶接の例)

図8.3 エレクトロスラグ溶接の概要とその施工状況

エレクトロスラグ溶接は、溶接しようとする部材の位置決めや溶融金属が流れ出さないようにする当て金の取付けなどの段取りに時間がかかる。また溶接線が常に垂直に近くなるように溶接部材を支持する要があり、大形構造物に適用するには大型のポジショナー（構造部材を任意の角度に固定できる台）を必要とする。しかし、溶接ギャップの中に数本のワイヤを同時に挿入して大電流を流すことにより単

位時間当たりの溶接量を非常に多くすることができ、300-400mmの板厚の溶接などにも適用される。このような溶接技術の発達に伴い、大形水車の主軸やランナなどの主要部品も溶接構造で製作されるようになった。

(2) ランナの溶接構造化と材料開発

水車ランナの場合、重量50-100トンを超えるような大型ランナを一体鋳造で製作できる鑄鋼工場は、世界

的にもそう多くはない。このような背景から、大容量水車が製作されるようになった1950年ごろから、欧米では大型ランナの溶接構造化が進められた。わが国でも1955年から1960年にかけて溶接ランナが試験的に製作されるようになった。当時は比較的溶接性の良い普通鋼（SC46またはSC49）製のランナに適用された。しかし、普通鋼は、キャビテーションの壊食に対する強度（キャビテーションに対する耐食性）が低く、キャビテーション発生部位には18Cr-8Niステンレス鋼などの耐食性に優れた金属を肉盛溶接する必要がある。そこで13Crステンレス鋼製の羽根などを溶接で組立てる13Crステンレス鋼製溶接ランナの製作が試みられた。しかし、13Crステンレス鋼は前述のように溶接性が悪く、このため、13Cr鋼を採用した当初は、予

熱管理の不備から、しばしば溶接方法の不適合による割れなどの事故を起こした。

1969年から1975年にかけては、表8.2のような溶接構造のランナが製作されている。初期のものは普通鋼（SC46）と溶接用鋼板（SM41）の組み合わせである。その後1975年頃になって、溶接性の良い13Cr 4Niステンレス鋼（SCS5）が開発されるに及び、ステンレス鋼のランナも多数溶接構造で製作されるようになった（後述（5）参照）。なお、ランナをエレクトロスラグ溶接で組立てる場合は、ランナをポジショナーに載せて溶接線が垂直に近い状態になるように支持して施工する（図8.4）。また最近では多軸溶接ロボットによる溶接組立も実施されている（図8.5）。

表8.2 初期の代表的な溶接ランナ

	発電所名	出力 (MW)	ランナ径 (mm)	重量 (ton)	使用材料	製作年	製作者	備考
東京電力	安曇	109	5,290	66	SC46+SM41	1969	東芝	
ブラジル	イリヤソルテラ	165.5	7,391		SM41	1970	日立	エレクトロスラグ溶接採用
オーストラリア	ツマツ3	283	5,826	66	SC46+SM50	1971	東芝	
米国	ラディントン	343	8,375	300	SC46+SM41C	1971	日立	エレクトロスラグ溶接採用
九州電力	大淀川第二	11.2	2,120	5	SCS5	1991	東芝	
電源開発	新豊根	230	5,430	107	SCS5	1993	東芝	9軸溶接ロボット使用

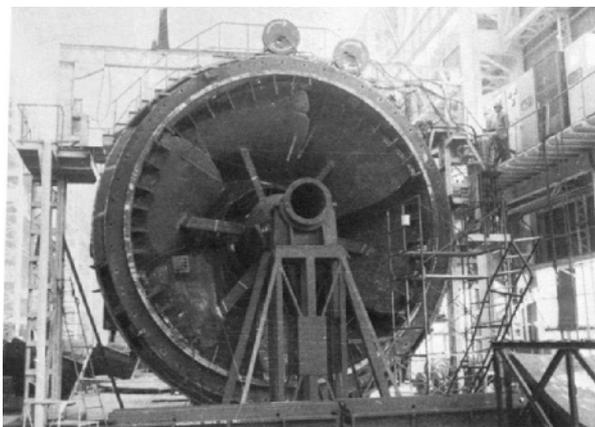


図8.4 エレクトロスラグ溶接中のランナ
(Ludington 発電所用 343,000kWポンプ水車 日立製)
(写真提供：日立製作所)

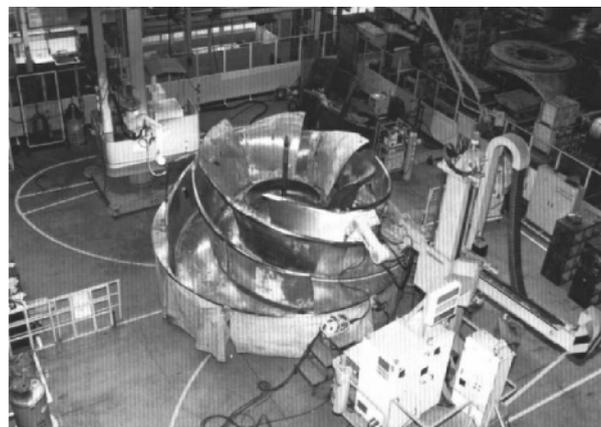


図8.5 9軸溶接ロボットによるランナの溶接
(新豊根発電所用 230,000kWポンプ水車 東芝製)
(写真提供：東芝)

(3) 溶接構造化の拡大による材料構成の変化

大型水車の主軸は、直径が2mにも及ぶものがあり、鍛造するのが困難となる。そのため溶接構造の主軸が用いられるようになった。図8.6にその構造例を示す。多くの場合、フランジ部分は厚板鋼板または鍛造で製作され、軸本体は、リング鍛造もしくは鋼板を巻いて溶接して製作される。主軸の溶接線は、単純な直線ま

たは円が多いので、自動送りのサブマージーク溶接で製作されることが多い。

以上のような溶接方法の採用により、1950年から1980年ごろにかけて水車の製造に用いられる材料構成は大きく変化し、1950年ごろは全材料のほぼ40～50%を占めていた鍛造鋼は、1980年には10%程度にまで低下し、鋼板の使用比率が80%以上を占めるまでになった。

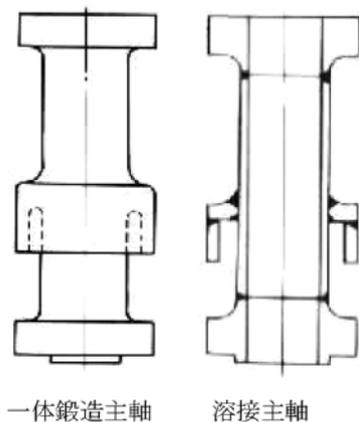


図8.6 溶接構造の主軸の例⁽⁷⁾

(4) ランナ羽根の三次元曲面のNC加工

切削作業の合理化のため、わが国でもコンピュータによる数値制御の工作機、すなわちNC加工機が導入されるようになった。しかし1970年くらいまでは、NC加工のソフトも十分でなく、平面とか円周加工ならびに簡単な曲面加工が出来る程度であった。その頃、東芝では米国からグランドクーリー第三発電所用の大型フランス水車のランナ部品を受注した。これはランナ羽根曲面の加工精度に対する要求が厳しく、東芝では新たに三次元曲面を加工するソフトを開発し、このランナ羽根を加工した。現在では水車ランナの羽根の多くはNC加工で切削されているが、水車ランナ羽根をNC加工で切削したのは、これが世界で初めてである。図8.7に当時のNC加工状況を示す。

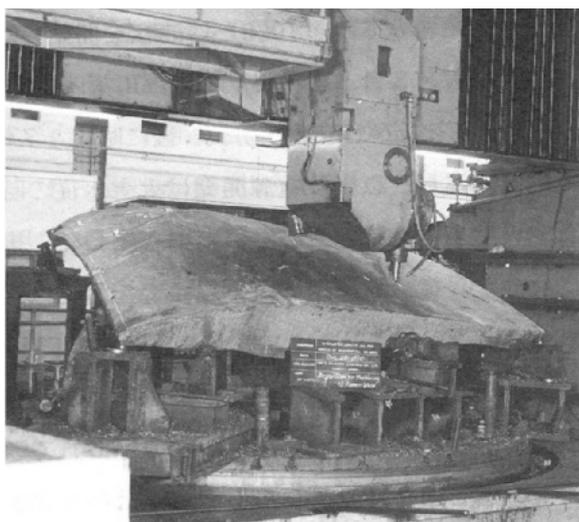


図8.7 ランナ羽根の5軸NCによる三次元曲面加工
(1971(昭和46)年)(写真提供:東芝)

(5) ランナ用の新しい13Cr系ステンレス鋼の導入

1975年前後から、スウェーデンのボフォース社(Bofors)で13Crステンレス鋼よりも溶接性の良い13Cr 4Niもしくは13Cr 6Niステンレス鋼が開発され、これがわが国へも導入された。この鋼は、13Crステンレス鋼が100%マルテンサイト組織を持つのに対し、焼入れ焼戻しをした後も残留オーステナイトを20~30%含有し、溶接時の予熱温度が100-150度Cでよい。作業性が格段に改善された。ただし、この鋼は鍛造後の冷却過程においてオーステナイト組織からマルテンサイト組織へ変態する温度が150度C位と低く、かつその時の変態膨張が13Crステンレス鋼に比べて非常に大きい。そのため、鍛造後に急冷すると不均一な変態膨張を生じて、製品に大きい割れを生ずることがある。これを避けるため、従来の13Crステンレス鋼よりも数倍長い時間をかけて徐冷する必要がある。この鋼を採用した初期には、このことがよく分かっていなかったために、鍛造時に、大きい割れを生ずる事故に遭遇した。

いずれにしても1980年頃には、これらの問題点を解決して大型の13Cr 4Niステンレス鋼の一体鍛造ランナおよび溶接構造のランナを製作する技術を確立した。この鋼種は、その後SCS5としてJIS規格にも採用された。

なお、1990年ごろからヨーロッパ(主としてフランス)では、13Cr4Niステンレス鋼よりも強度、耐腐食性ならびに耐キャビテーション性が優れていることから、マルテンサイトにフェライト組織が混在した2相ステンレス系の17Cr4Niステンレス鋼が多く用いられている。しかしわが国では、コストが少し高いこともあり、落差800m級の超高落差ポンプ水車に対しても13Cr4Niステンレス鋼で十分な強度があることから、17Cr4Niステンレス鋼はほとんど使用されていない。

9 | 海外へ輸出した記録品

9.1 大型プロジェクトの共同受注

(1) グランドクーリー第三発電所の例

1970年に米国内務省開拓局（Bureau of Reclamation）からグランドクーリー第三発電所用のフランシス水車（定格出力620,000kW、最大出力：710,000kW）3台が発注された。この水車は、出力こそ世界最大の三峡発電所の水車（定格出力：710,000kW、最大出力：840,000kW）より小さいが、落差が低いので流量が多く、ランナ直径は9.8mもあり、三峡の水車とほぼ同じという巨大水車である。

このような巨大プロジェクトの場合、リスク分散ならびにいろいろな分野で競争力のあるメーカーを集めてグループを組み応札する方法が採られる。またこのプロジェクトの当時、米国ではバイ・アメリカン法が施行されていて、外国からの政府調達品には高い関税が賦課されることになっていた。その関係で、これを受注するに当たり、米国の国内メーカーを主契約者とする下記のような国際コンソーシアムを組んで対応した。なおこの主契約者は水車を全く製造したことは無く、製造の日程管理と相互連絡のみを担当し、設計は Dominion Engineering、他の部品の製造技術は製作を分担した各メーカーが対応した。

主契約者：Willamette Iron Works（米国）

設計者：Dominion Engineering（カナダ）

（現 G.E. Canada）

製作分担：

ケーシングとドラフトチューブ

Chicago Bridge（米国）

ガイドベーンとサーボモータ

Dominion Engineering（カナダ）

上記を除く本体静止部

東芝（日本）

溶接組立前のランナ部品

東芝（日本）

ランナの現地組立溶接と現地据付け作業

General Electric（米国）

なお、前節で述べたように、東芝では、このとき、ランナ羽根の曲面加工に世界で始めてNC加工を採用した（8.2（4）参照）。またこの巨大水車のステーリング製作に当たっては、エレクトロスラグ溶接（8.2（1）参照）を大々的に採用した（図9.1参照）。



図9.1 グランドクーリー第三発電所用
フランシス水車 ステーリング（写真提供：東芝）

(2) グリ II 発電所の例

日立製作所では、ベネズエラのグリ I 発電所の増設にあわせ、下記のような大容量機を納入している。これらはすべて日立製作所が単独で受注し、製作したものである。

立軸フランシス水車

218,500kW × 3台 1966年

270,000kW × 3台 1972年

340,000kW × 1台 1975年

400,000kW × 3台 1976年

合計 3,005,500kW

その後、上記グリ Iの実績をもとに、グリ II 発電所にも下記のような当時世界最大容量のフランシス水車を大量に納入した。なお、この受注に当たって、日立製作所は東芝とコンソーシアムを組み、内3台は東芝が分担して製作した。なお、水車の設計はすべて日立が行なった。これが国内メーカー間の大規模な協調受注の始まりである。

730,000kW × 10台 1984年～1988年

合計 7,300,000kW



図9.2 グリII発電所用 730,000kWフランシス水車ケーシング 工場仮組立（写真提供：日立製作所）

このように1千3百万kWを超える巨大プロジェクトの機器を日本メーカーが一手に引き受けて納入したのは、当時の日本の水車が世界に多数輸出されたことを象徴する特筆すべきことであると言えよう（図9.2）。

これらを契機に、海外の大型プロジェクトに対応する場合、多くのメーカー間の協調や外国メーカーとの国際協調が行なわれるようになった。これらによって、製造技術の発達はもとより、メーカー相互の技術ノウハウもある程度交換されるようになり、相互の技術の進展に役立った。

9.2 タンデム式揚水発電ユニットの記録品

1955年ごろからオーストラリアでは、同国東南部のスノウイーマウンテン一帯の豊富な水資源を中西部の農地に導く大規模な分水・灌漑計画を推進していた。1966年にこの一環としてツマツ第三発電所を建設することになった。この発電所は、水資源の運用とともに、同国の小容量の電力システムの信頼度向上の目的もあって、6台中3台を揚水可能な揚水発電ユニットとすることとした。

システムの信頼度向上が差し迫った要請であったこともあり、この発電所では、揚水から発電への切替えに10数分かかる可逆ポンプ水車よりも短時間で揚水運転から発電運転に切り替えられるタンデム式揚水発電ユニットを採用することとした（図9.4参照）。

タンデム式揚水発電ユニットは、可逆ポンプ水車を用いた揚水発電ユニットより高価であるが、運転切り替えが迅速で機動性に富むので、システムの信頼度の低い場合には、信頼度の向上に有効である。

この発電所は、タンデム式揚水発電ユニット3台と発電専用の水車3台よりなるものである。タンデム式揚水発電ユニットは283,000kWの水車と194,000kWのポンプを一軸に連結し、これを発電電動機に繋ぐもので、この種ユニットとしては、当時世界最大の容量を持つものである。

それまでにタンデム式揚水発電ユニットはヨーロッパでは多数実用されていたが、その多くは数万kWから10万kW程度であった。わが国では、わずかに表9.1のようなものが製作されていたに過ぎない。

表9.1 わが国におけるタンデム式揚水発電ユニット

電力会社	発電所名	機器の出力定格		形 式	メーカー	製作年
		水車(kW)	ポンプ(kW)			
中央電気*	池尻川	1,350	1,120	横軸タンデム	東芝	1934
東北電力	沼沢沼	23,000	21,000	横軸タンデム	日立	1951
九州電力	諸塚	54,000	56,500	立軸タンデム	日立	1959

*：現 東北電力

これらのタンデムユニットは、小容量であることもあって、ほとんどすべてがポンプの充水起動方式を採用している。これは空転起動した場合、空転状態のポンプに充水する際に急激な圧力変動や振動を生じるためである。

ところが、このツマト第三発電所用のタンデムユニットでは、大容量であることとポンプ起動時間を短縮するためにポンプの空転起動を採用することとした。このような大容量ポンプの空転起動は世界最初であるが、東芝では水圧鉄管側から逆充水する特別な充水制御を行なうことによって、1973年、この方式のポンプ起動に見事成功した。

この実績を買われ、1977年、東芝ではさらに大容量の同国のワイバンホー発電所用タンデムユニット2基も受注した。このタンデムユニットは、325,000kWの水車と240,000kWのポンプを組み合わせたものである。このユニットは容量的に世界最大であるばかりでなく、落差が116.2mと低いために機器寸法も非常に大きい。発電電動機の上端からポンプ吸込み管の下端まで約50mあり、地上最大の立軸回転機といえる(図9.3)。

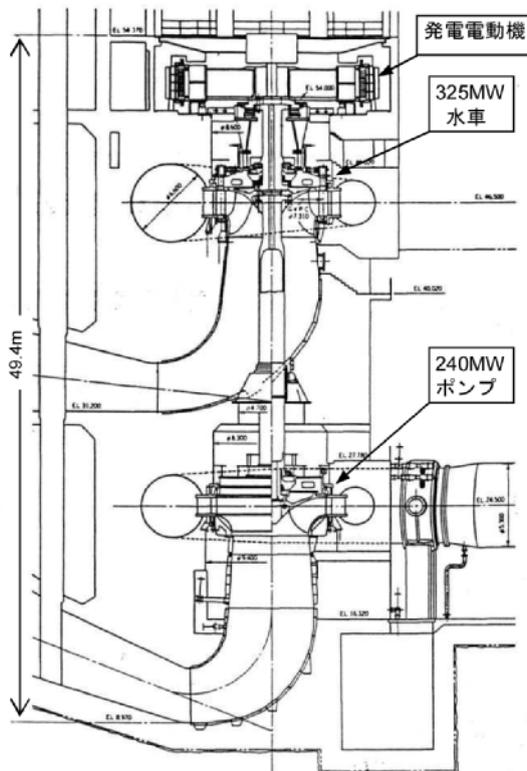


図9.3 ワイバンホー発電所 タンデム式ポンプ水車
(発電電動機：三菱電機、水車・ポンプ：東芝製)

一般に、ポンプの起動・停止操作は振動の激しい締め切り運転状態を通過するので、ほぼ1分程度の時間で行なう。これより長い時間をかけて起動・停止を行なうことは激しい振動により機器の寿命を損なうので避けなければならない。そのため、ポンプの起動・停止時には、ポンプ入力に1分以内に100%近く変化することとなり、電力系統の電力潮流や周波数に少なからぬ擾乱を引き起こす。

そこでワイバンホー発電所では、ポンプの起動・停止時にポンプの急激な入力変化を補償するように直結している水車出力をコンピュータ制御し、ポンプの起動・停止時のみならず発電から揚水、揚水から発電などのすべての運転モード切替えにおいて、ポンプ入力と水車出力の合計の電力が任意の変化率で変化するように制御する技術を開発して実用化した。この制御方法は現在においてももっとも進んだタンデムユニットの制御技術である。

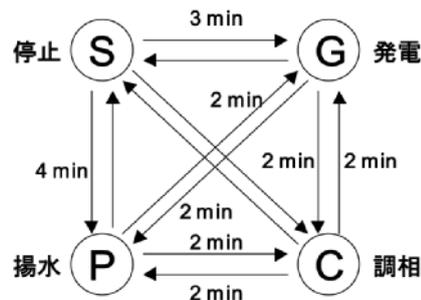


図9.4 ワイバンホー発電所の運転モード切替え所要時間

10 | コンピュータ導入による技術の高度化

10.1 初期のコンピュータの水車設計への応用

デジタルコンピュータが実際に水車の設計に使用されだしたのは、技術計算用の汎用プログラム言語のFORTRANが使用できるようになってからである。コンピュータのハードウェアも1960年頃にIBMでIBM-7070、7090などの大型コンピュータが開発され、これが1965年頃には国内メーカーにも導入され、FORTRANでプログラムされた複雑な技術計算に威力を発揮するようになった。1965～70年頃には、次のような技術計算が行なわれるようになり、設計技術が大幅に向上した。

- ・ 主要部品の構造計算、ただしこれは有限要素法（FEM）などが実用化される前の段階で、従来の構造計算をプログラム化したものである。
- ・ ポンプ水車の過渡現象計算、1965～70年にかけて国内では揚水発電所が建設されるようになったが、ポンプ水車の場合、水車と異なり、特性の非線形性が強く、従来の単純な水撃計算では計算できない。以前から複雑な水撃現象の逐次計算を行なう図式計算法が考案されていたが、その計算を実際に行なうのに数週間の時間を要していた。そこで、これを計算するプログラムを各社が開発した。
- ・ ケーシングやドラフトチューブなどの三次元構造を持つ鋼構造物の設計図作成ならびに板取り図の計算作図。これにより設計工数が大幅に削減された。
- ・ カプラン水車やフランシス水車のランナ羽根の三次元曲面の設計計算ならびにそれに基づくランナ羽根のNC加工データの作成（図10.1）。



図10.1 世界で始めて公表された
模型水車ランナのNC加工（東芝）
“Waterpower & Dam Construction” 誌
1979年10月号 所載

10.2 大形コンピュータの導入による設計計算の高度化

1970年ごろから大規模集積回路（LSI）を用いた大容量のコンピュータが出現し、計算速度、記憶容量とも一段と向上した。これに伴い、大量の計算処理を要する技術計算が実用されるようになった。これ以後、現在に至るまでのコンピュータ応用の概要を以下に記す。

(1) 有限要素法による応力解析

まず技術計算に大きく寄与したのは、1970年頃から導入され始めた有限要素法（FEM）である。これにより、従来は複雑な形状の部品を単純なはり、平板、円筒などに置き換えて単純化して実施していた応力計算やたわみ計算が、複雑な形状のままでも実施出来るようになり、応力解析の精度が格段に向上した。

従来、複雑な形状の物体の応力分布を調べるには、樹脂で模型を作り、それに荷重を印加して偏光を当て、そのときに現れる縞模様を数えて応力分布を求める光弾性実験によっていたが、この有限要素法による応力解析が出来るようになり、光弾性実験は行なわれなくなった。

(2) 内部流れ解析

従来、物体周りの流れの流速分布や圧力分布などを計算で求めるには、複素ポテンシャルを用いた写像法や翼に沿って吹き出しや渦を分布させる特異点法、または流れの可視化による実験などによらざるを得なかったが、いずれも二次元問題に適用するのが精一杯でしかも膨大な労力を必要とした。そのため、水車の設計計算などに応用されることはなかった。

大容量のコンピュータの出現に伴い、大量の計算処理が可能となったため、水車の流路内の流れの計算にも有限要素法、有限体積法、差分法、境界要素法などを適用するようになった。すなわち、流路内をメッシュにより多数の要素に分割し、これらの各要素の基礎方程式を連立して解く計算法が次々と開発され応用されるようになった。

この計算モデルも、当初の1970～75年頃は、ある解析面内における二次元解析（2D解析）からスタートした。しかし、フランシス水車のランナなどの三次元形状の流路に対しては二次元解析では役に立たず、やがて二次元の解析面を三次元方向に積み重ねて三次元空間内での流れを模擬する準三次元解析（Q3D解析）

へと進んだ。しかし、この準三次元解析では、二次元解析面を横切る流れは考慮されないため、現実の流れとは一致しなかった。このようなことから、1990年頃から以後は、完全に流れを三次元空間内で扱う三次元解析（3D解析）が開発され、広く行なわれるようになった。

また取り扱う流れも、当初は簡単な非粘性渦なし流れのいわゆるポテンシャル流れとしての解析であったが1980年代後半に入り非粘性流れと粘性流れの中間的

な流れモデルとして渦度を加味したオイラー解析が行なわれるようになった。しかしその後、数値粘性などを考慮した乱流モデルや離散渦による乱流モデルなどが提案され、1990年頃からは粘性による渦を扱った乱流解析が広く行なわれるようになった。現在では、 $k-\epsilon$ モデルとか離散渦モデル、LES (Large Eddy Simulation)、DNS (Direct Navier Stokes equation) などの乱流モデルを用いた三次元粘性流れ解析が、水車の開発研究や設計計算に多く使われている(図10.2)。

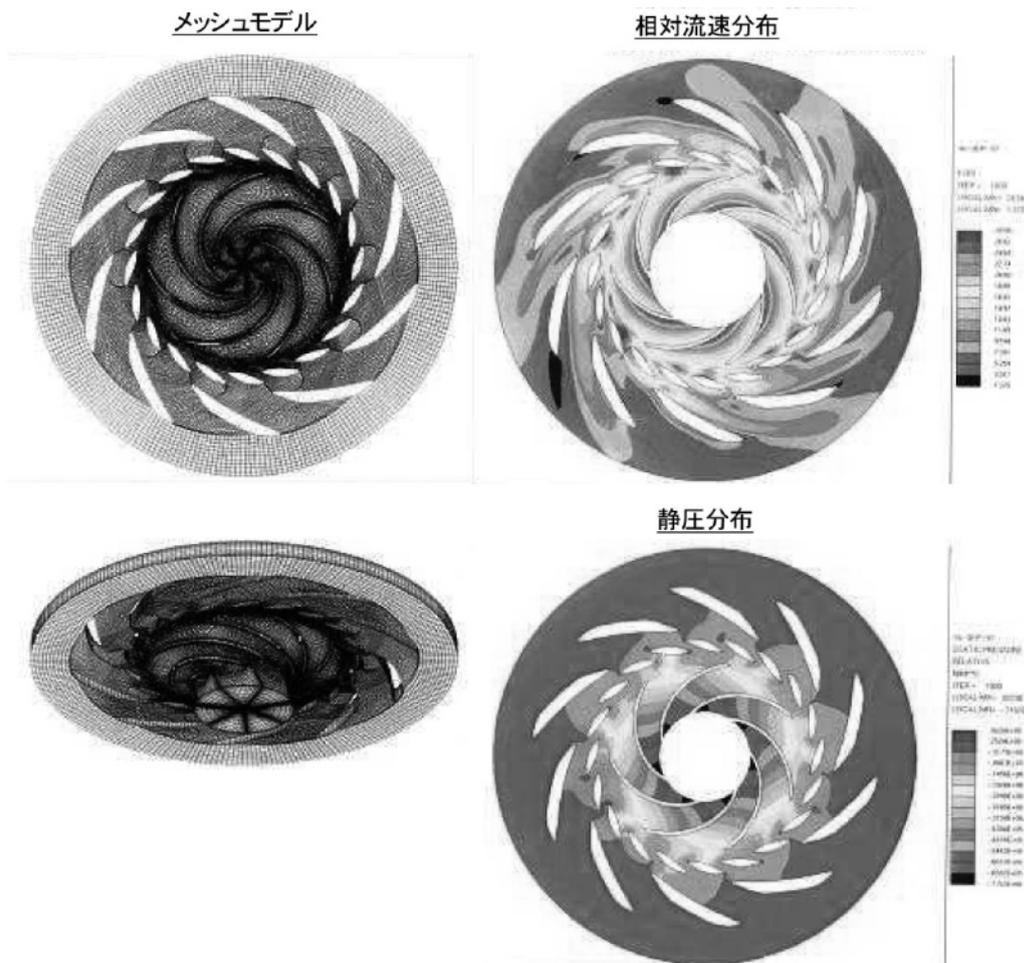


図10.2 三次元粘性流れ解析の例
(ポンプ水車の静止部・回転部 一体解析)

従来は、水車の各部分について、個々に流れ解析が行なわれていたが、1995年頃から水車の入口から出口までを連続した流路として解析する手法が用いられるようになった。その場合、静止部のガイドベーンの出口流れの速度や角度を平均化して下流のランナの入口条件として与える方法と、ガイドベーンの出口流れを平均化しないでそのままランナの入り口の境界条件にする方法とがある。後者は可変メッシュなどの高等なテクニックを要するが、これによりランナ羽根に加わ

る非定常力なども計算できるようになった。

また、水車全体の内部流れの粘性解析が出来るようになると、摩擦や乱流によるエネルギーの散逸なども評価できるようになり、水車内で生ずる損失を計算することが可能となる。これを利用して、いろいろな運転状態における損失を算定して効率を予測する、いわゆる性能予測が行なわれるようになった。

変わった解析としては、気液二相流の非定常流を扱ったキャビテーション気泡の挙動の解析、固液二相流

を扱った土砂粒子の挙動解析による土砂磨耗の予測、水車に流入した魚の魚体表面の圧力や剪断応力を解析して魚の生存率を評価する研究なども行なわれている。この魚の問題は、わが国ではあまり問題にされないが、米国では、回遊性の鮭の稚魚などが水車内を流下した際の生存率が資源保護対策として重要視されており、国の多額の補助金によって研究されている。

(3) 性能予測と新しいランナの設計手法

以上の解析は、水車の流路形状が与えられ、その中の流れがどうなっているかを調べ、その流れの損失などを計算しようとするものである。これに対し、要求性能を満たすようなランナとかドラフトチューブの形状を求めるいわゆる逆解法に関する研究も進められている。しかし、この逆解法は非常に難しく、簡単な問題しか成功していない。

これに代わる方法として最近注目を集めているのが、遺伝アルゴリズムを用いた設計手法である。これは予めいくつかの評価項目を設けておき、次のような手続きを経て、所期の性能を持った設計モデルを見つ

けようというものである。

- ・ 数個の設計モデルに付き、粘性流れ解析などで損失を計算してそれらの性能予測を行う。
- ・ 各評価項目について成績の良いモデルを選び、そのモデルの設計パラメータを掛け合わせて次世代のモデルを設計する。
- ・ この手順を繰り返し、評価項目について成績のより良いモデルを作り出す。
- ・ この手順の途中で、初期設計条件の壁をブレイクスルーするための設計パラメータの突然変異も加味する。
- ・ 以上の手続きを、数十世代にわたり繰り返す。

上記により、最高効率点の損失と部分負荷時の効率を評価項目とした場合の各ランナの評価ポイントをプロットした例を図10.3に示す。この例で分かるように、多くの設計モデルの中から、部分負荷効率はやや劣るが最高効率は優れているモデルとか、その逆の特性を持ったモデルを選択することも可能となった。

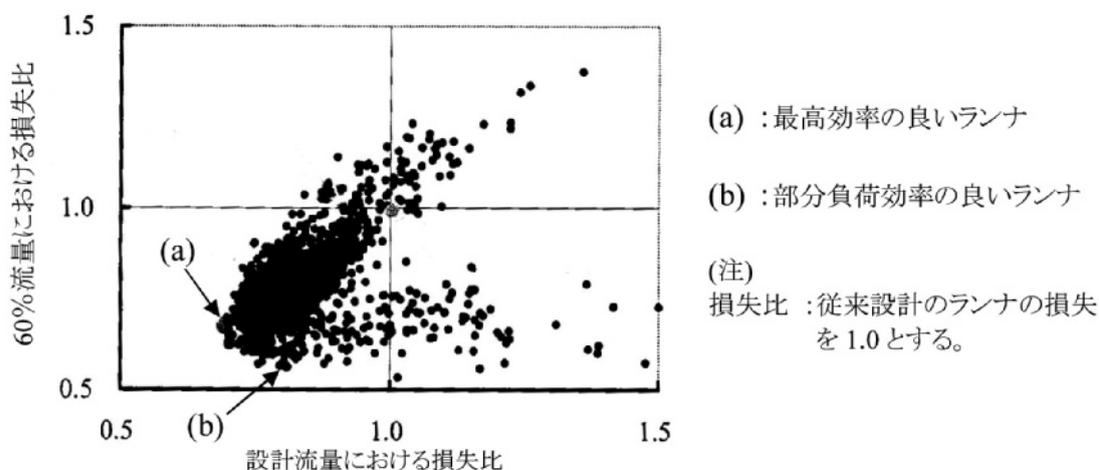


図10.3 遺伝アルゴリズムによる設計モデルの評価の例⁽²¹⁾
(最高効率点の効率と部分負荷時の効率を評価した例)

この方法は、1世代ごとに多数のランナの性能予測計算を行なって性能を評価する要があり、膨大な計算を必要とする。しかし、この方法は、従来の固定観念による設計手法と異なり、図10.4に示したような斬新な形状のランナを産み出す可能性があり、今後の発展が期待できる。

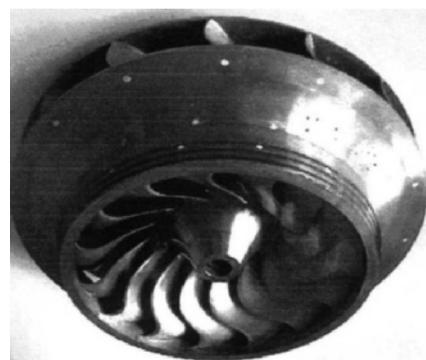


図10.4 遺伝アルゴリズムにより設計されたランナの例⁽²¹⁾

10.3 その他のコンピュータ応用

(1) 模型水車試験装置の自動化

現状では、流れの数値解析が発達しても、水車の性能を0.1-0.2%の精度で予測することは出来ず、また非設計点の大きい剥離流れを伴うような運転状態の性能は予測出来ない。そのため水車性能の正確な予測には模型水車による性能試験が欠かせない。国内各社は、それぞれ高精度の流量計や圧力計などの測定器を備えた模型水車試験装置を保有している。

1970年頃にプロセス制御用のミニコンが開発され、これを用いて1975-80年頃にかけて各社の模型水車試験装置のデータ計測とデータ処理などが自動で行なわれるようになり、模型試験が迅速に実施できるようになった。また一部の試験装置では、定型的な効率測定試験やキャビテーション性能測定試験などの試験を、試験装置の起動から落差や回転速度などの運転条件の変更を全て自動で行なえるようにしたものもある。

(2) 調速機や水力発電所の運転制御装置のコンピュータ化

1910年代に国産の調速機が製作されて以来、1955年頃までは、いわゆる機械式調速機で、フライボール式の速度検出機構によりパイロット弁を操作し、速度調整や負荷調整を行っていた。このため、水車の起動時に発電機を系統に並列する前の無負荷運転を安定して行なう調整や、並列後の定常運転における負荷変動に対する応答など異なる制御ニーズに対応するため、ダッシュポットによるダンピングを切り替える装置をつけるなど、調整が非常に面倒であった。

1956年に至り、スウェーデンのASEA社製の電気式調速機が輸入されたが、これらの調整が簡単に行なえることから国内メーカーも電気式調速機の開発に努め、1957年には真空管や磁気増幅器を用いた国産の電気式調速機が使われるようになった。

この電気式調速機は、その後改良が加えられ、1976年ごろにはPID制御（比例・積分・微分制御）を用いた高い制御性を持つPID調速機が作られるようになった。しかし、これらはまだアナログ式の制御回路によるものであった。

1980年前後に、これらの電気回路がマイクロコンピュータに置き換えられてデジタル化され、デジタル型PID調速機が誕生した。このコンピュータ化により、これ以後の調速機は、水車を制御するためのいろいろな機能を備えて高機能化が図られた。このデジタル化は、調速機にとどまらず水車や発電機の運転制

御装置全体に拡大され、遠方制御や給電指令ネットワークのデジタル化と相俟って、水力発電所の制御性を格段に向上させた。現在では、100万～200万kW級の大容量揚水発電所も全て無人で、中央給電指令室から所轄の電力制御所を通しての運転指令で遠方制御されている。

(3) CAD、CAM、CATの導入

1975（昭和50）年頃までは設計技術計算は大型コンピュータを用いてバッチ処理（一括集中処理）する方式であった。入力もパンチカードシステムで、数千枚に及ぶパンチカードを持ち込んで処理する状況であった。その後、タイムシェアリングシステムによるコンピュータの利用や入出力のオンライン化が図られ、設計技術計算が迅速化された。1980（昭和55）年以降、オフィスコンピュータ、パーソナルコンピュータ（PC）が急速に普及した。1985年以降はPCの性能向上もあって、従来の大型コンピュータにオンラインで接続する方式から、PC上に専用ソフトをインストールして業務を行なうダウンサイジングの方向へ移っていった。1990年代に入ると、EWS（エンジニアリングワークステーション）やPCの高性能化、WORD、EXCELなどの市販ソフトの高機能化により、従業員全員にPCを配備してOA体制が著しく進歩した。

このような流れの中にあって、CAD/CAM/CATの一貫システムの構築が図られた。

（注）CAD：Computer Aided Design

CAM：Computer Aided Manufacturing

CAT：Computer Aided Testing

CADシステムが出現する前は、1970年代からの大型コンピュータによる自動製図システムがあり、ランナの設計、ケーシングやドラフトチューブの製図や板取り展開作業のコンピュータ化が行なわれていた。1980年前後からミニコンCADが普及してきてCADによる製図が主流となり、1990年頃からは個人端末で利用できるPC-CADとかEWS-CADが導入された。水車は、発電所ごとに仕様が異なり、その都度新しく設計が行なわれる。その設計業務を迅速に行なうための対話型設計システムなども構築されるようになった。

1990年代半ばからは、NC加工機の増大と共にCAD/CAMシステムの適用が拡がり、特にランナの製作では設計から铸造用木型の製作、溶接ロボットの操作ソフトの作成、ランナ羽根面のNC加工、最終寸法検査などの全プロセスを通してCAD/CAM/CATの一貫システムも構築されている（図10.5）。



図10.5 ロボットとポジショナーを連動して制御する
ランナの自動溶接システム
〔 ロボットアームとランナ羽根の干渉の有無も
事前にコンピュータシミュレーションでチェック 〕
(写真提供：東芝)

11 | 世界をリードする超高落差ポンプ水車の開発

11.1 ポンプ水車の高落差化

揚水発電所は、言うなれば電力貯蔵システムである。その電力貯蔵量は、落差と有効貯水量の積で決まる。したがって、ある量の電力を貯蔵するのに、落差が高いほど貯水池を小さくすることができる。またポンプ水車の出力も落差と流量の積に比例するため、ある出力を出すのに落差が高いほど流量が少なくて済み、機械寸法も小さくできる。したがって、落差が高いほど貯水池も発電所建屋も小さくでき、全体の建設費が削減できる。このようなことから、ポンプ水車の適用落差の高落差化が要請され、メーカーも高落差機の開発に努めるようになった。

まず1972（昭和47）年、電源開発 沼原（ぬまっばら）発電所で世界で始めて落差が500mを超えるポンプ水車（図11.1参照）が運転を開始した。

これ以後、国内では、九州電力（株）大平発電所、関西電力（株）奥吉野発電所などの500m級の揚水発電所が、世界に先駆けて建設されるようになった。

沼原発電所用 ポンプ水車 要項

水車運転	ポンプ運転
最高落差:500m	最高揚程:530m
最大出力:230,000kW	最大入力:250,000kW
回転速度:375min ⁻¹	

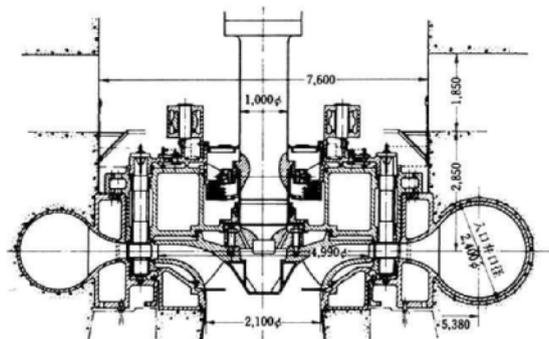


図11.1 沼原発電所用ポンプ水車（日立製）⁽⁷⁾
（資料提供：日立製作所）

11.2 高落差化にともなう技術問題とその克服

関西電力 奥吉野発電所は、1979（昭和54）年に500m級としては国内で3番目に運転を開始した発電所である。1980年、1年前から運転を開始したばかりのこの発電所の1期分3台のポンプ水車すべてのランナに、多数の疲労亀裂が発生しているのが発見された（図11.2参照）。従来、水車ランナの羽根出口後縁から発生するカルマン渦と羽根の共振によるランナの疲労破壊は知られていたが、この疲労亀裂の発生部位はそれらとは全く異なる部位であった。

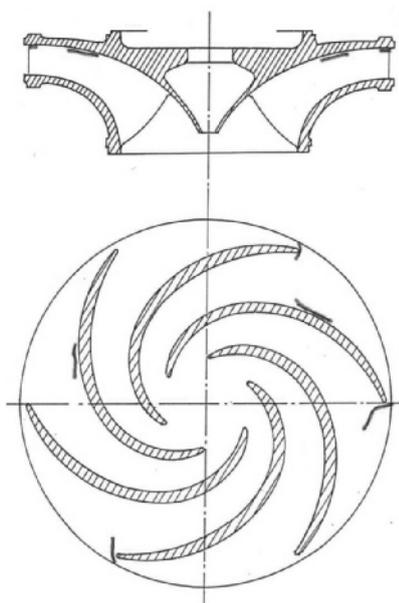


図11.2 奥吉野発電所ポンプ水車のランナの疲労亀裂
（資料提供：東芝）

そこで関西電力では事故調査委員会を設置して、ポンプ水車の製作者の東芝と共にこの原因究明に当たった。

疲労亀裂は、どれも鑄造欠陥もしくはそれらを補修した補修溶接の欠陥から発生していたが、その欠陥だけが原因で亀裂を生ずるとするには疑いが残った。その後、さらに調査した結果、このランナには、ランナ羽根とガイドベーンとの動・静翼干渉による特異な振動が生じており、それが大きい振動応力を発生していることが判明した。そのため、通常では問題にならない程度の材料欠陥から疲労亀裂が発生したものであることが判明した。

この種の振動は、従来の水車や低落差のポンプ水車では、全く問題にならなかったものである。

そこで、東芝では、実機の動・静翼干渉による水圧

脈動およびそれとのランナの共振状態を模型で再現できる実落差模型試験を実施して原因の究明に当たった。実落差模型試験の原理を簡単に説明すると、実機のポンプ水車ランナと同材質で全く相似に製作された模型ランナは寸法に反比例した固有振動数を持つ。例えば奥吉野発電所用機の場合、8分の1の模型ポンプ水車を製作すると、そのランナは実機の8倍の固有振動数を持つ。一方、動・静翼干涉による水圧脈動の振動数は回転速度に比例するから、ランナと動・静翼干涉による水圧脈動との共振の有無を調べるには、8分の1の模型を実機の8倍の回転速度で試験すればよいことがわかる。しかるとき、ランナの周速度は実機と同じとなるから、水の流動状況を実機と相似に保つには実機と同じ落差で模型を運転しなければならない。この

場合、模型の水車出力もしくはポンプ入力、寸法比の二乗に比例するので、実機の64分の1となる。また共振状態を正確に把握するためには、110%程度の過速度試験も必要であるが、その場合は落差・揚程は回転速度の二乗、出・入力はその三乗に比例して増加する。結局、奥吉野の場合、実落差模型試験の模型の運転要項は、表11.1のようになり、約470mm径のランナを持つ模型ポンプ水車を約4,500min⁻¹、4,500kWで試験することが必要となる。

東芝ではこのような大出力の模型試験を行なうため、模型ポンプ水車を2台製作し、1台をポンプ、1台を水車として運転し、その出・入力の差分のみを電動機から注入するようにした図11.3のような実落差模型試験装置を用いてこの振動現象の究明に当たった。

表11.1 実落差模型試験の例（奥吉野発電所の場合）

		実機運転要項		模型運転要項	
		定格回転速度時	定格回転速度時	110%過速度時	110%過速度時
水車 運 転	有効落差 (m)	526	526	636	
	水車出力 (kW)	207,000	3,234	4,304	
	回転速度 (min ⁻¹)	514	4,112	4,523	
ポン プ 運 転	全揚程 (m)	539	539	652	
	ポンプ入力 (kW)	214,000	3,344	4,451	
	回転速度 (min ⁻¹)	514	4,112	4,523	

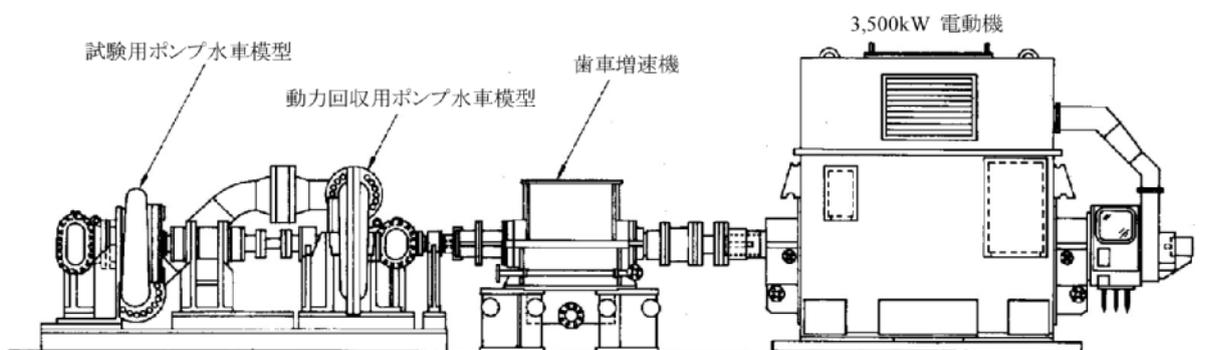


図11.3 ポンプ水車実落差模型試験装置（東芝の例）

東芝が実施したこのような実験ならびに理論解析によって、下記のような事実が新しく判明した⁽²²⁾。

- ・ランナとガイドベーン間の動・静翼干涉により、ガイドベーン枚数とランナ羽根枚数の組み合わせによって決まる特異なパターンを持った水圧脈動がランナ外周に発生し、これによりランナが励振される。
- ・ランナには、このパターンと同様な振動モードを持つ固有振動数が存在する。
- ・この固有振動数は、ランナの周辺の水の付加質量効果により、気中で測定された固有振動数の半分以下

に低下することがある。その低下率は振動モードにより異なる。

- ・500m以上の落差で運転されるランナでは、動・静翼干涉による水圧脈動の周波数がランナの固有振動数に近くなる場合があり、その場合、ランナが共振して異常に高い振動応力を生じ、疲労破壊を起こす可能性がある。
- ・ランナの形状を調整して固有振動数を変えることにより、この共振を避けることができる。

日本における超高落差ポンプ水車の開発に刺激され、世界の多くの国で500mもしくはそれ以上の落差を持つ揚水発電所が計画されるようになった。1975年に発注された旧ユーゴスラビア（現セルビア）のバイナバスタ（Bajina Basta）発電所は世界で始めて揚程が600mを超える揚水発電所であったが、これを東芝が受注して落差記録を更新した。この成功を見て同じく東欧圏のブルガリアが1980年にチャイラ（Chaira）発電所を計画したが、これも東芝が受注してさらに落差記録を更新した。

この2発電所のうち、バイナバスタ発電所は、奥吉野発電所の事故以前に設計されたものであるが、現地試験においてランナの実働応力測定を行なった結果、幸いにもランナの共振点が離れていてランナの振動応力は安全なレベルであった。この後設計されたチャイラ発電所は、設計段階で実落差模型試験を実施してランナ固有振動数の調整を行なったものであるが、現地試験でもランナの実働応力測定を行ない、振動応力が所期の低い水準であることを確認した。

1987（昭和62）年、東京電力では、世界最高の落差約750mの葛野川（かずのがわ）発電所の建設を計画

し、このような超高落差のポンプ水車が安全に運転できるかどうかを確認するため、国内メーカー3社（東芝、日立、三菱重工）にポンプ水車の信頼性に関する共同研究を発注した。これを受けて、日立、三菱重工も実落差模型試験装置を設置して追試験を行い、東芝と同様な事実を確認した。この結果、東京電力は葛野川発電所のポンプ水車が十分な信頼性を持って製作できることを確認し、この発電所のポンプ水車を3社に分割して発注した。このうち日立と三菱重工に発注された1号機と2号機は、1999（平成11）年に相次いで運転を開始し、わが国のポンプ水車の技術の高さを世界に証明した。なお、3号機と4号機は可変速機として東芝に発注されているが、その後のわが国の経済不況による電力需要停滞により据付け工事が延期され、いまだに運転には至っていない。

わが国の高落差ポンプ水車の製作実績は世界の先端を切っているが、この高落差ポンプ水車のランナの振動応力の解明がそれを可能にしたといっても過言ではない。これらの研究結果によりランナの振動応力がいかに低減され、その後の超高落差ポンプ水車の発達に寄与したかは、図11.4により端的に知ることができる。

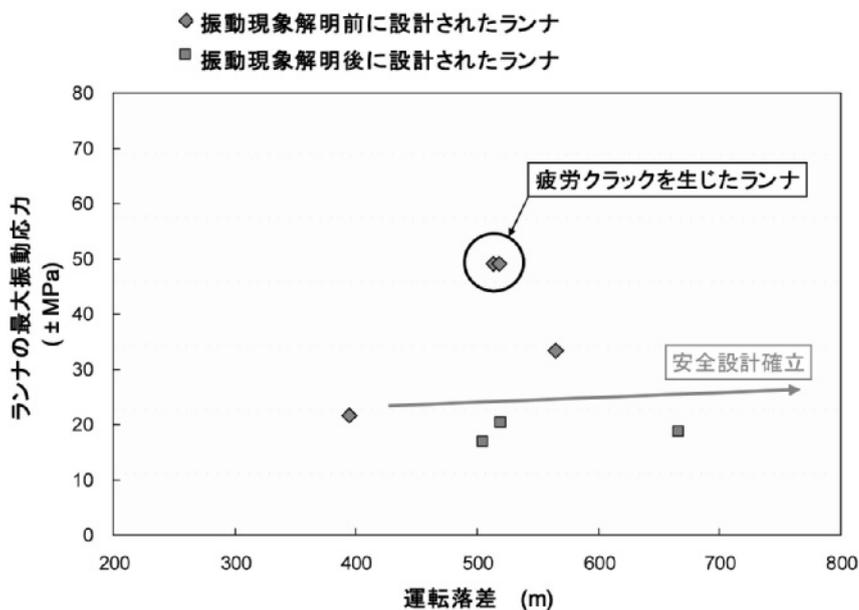


図11.4 ランナの振動現象解明によるランナ振動応力の低減
（資料提供：東芝）

東京電力では、葛野川発電所に引き続き世界屈指の高落差・大容量である神流川（かんながわ）発電所の建設を進めた。ここに設置されるポンプ水車は、運転落差では葛野川発電所用機に次いで世界第2位、出力においては世界第1位であり、その1号機は2005（平成

17）年に既に運転を開始している。

表11.2に葛野川発電所用機および神流川発電所用機の主な要項を示す。

表11.2 葛野川発電所用機および神流川発電所用機的主要項

		葛野川発電所用機		神流川発電所用機
		1・2号機	3・4号機	1～6号機
水車 運 転	最高落差 (m)	728	728	675
	最大出力 (kW)	412,000	412,000	482,000
	回転速度 (min ⁻¹)	500	482～492	500
ポン プ 運 転	最高揚程 (m)	778	782	728
	最大入力 (kW)	460,000	460,000	464,000
	回転速度 (min ⁻¹)	500	480～520	500
備 考		落差:世界最高 単機出力:世界第2位	世界最高落差・ 最大出力の可変速機	単機出力:世界最大 落差:世界第2位

ポンプ水車においては、ランナ外周の周速度が落差の平方根に比例する関係にあり、高落差になるほどランナ外径が大きく、かつ回転速度が高くなる。しかしランナ外径については、輸送限界による制約があり、回転速度についてはキャビテーションが発生するという制約がある。キャビテーションの発生は、ポンプ水車の据付高さを下部貯水池水位より低く据付ければ抑制できるが、これも土木建設費や機器の設計の関係で、100～150m程度低くするのが限度である。

500m以上の落差で運転される超高落差機の信頼性向上には、ランナの振動応力のみならず、主なものでも、以下のような技術開発の結果が織り込まれている。

(1) 耐疲労強度の高いランナ素材の開発

一般に材質は13Cr-4Niステンレス鋳鋼が用いられるが、高落差機では応力が高いため、鋳造欠陥の少ない高品質の鋳鋼素材が求められる。このため、鋳造時の凝固解析などにより鋳造欠陥の低減が図られる一方、微小欠陥、特に表面直下の微小欠陥を検出するための非破壊検査方法なども新しく開発された。

(2) ランナに作用する水スラストの制御

大容量の高落差機ではランナの上面と下面におおの8,000から10,000tonの水圧力がかかる。ランナの上下の形状は相似ではないので、この水圧力にアンバランスを生じ、その差分がランナに加わる水スラストとなる。この水スラストはスラスト軸受への負担を軽減するため、通常、500ton程度に抑える。また、非常停止の過渡状態ではこれが大きく上下に変動するが、これが過大に変動しないよう制御しなければならない。特に、回転部の重量を超える上向きの逆スラストを生ずると、回転部の浮き上がりを生じ、機器を損傷するおそれがある。したがって、いかなる運転状態でも水スラストが過大にならないよ

うに制御することが、設計上重要である。

(3) 高圧・高周速度に耐える主軸封水装置の開発

高速で回転する主軸に沿っての漏水・漏気を防ぐため、高圧・高周速度に耐える主軸封水装置が必要である。主軸の周速度は毎秒30m、かつ水圧は1MPa程度になる。この高圧の水が漏れないように主軸に強く押し付けられた状態で数千時間の運転に耐える封水装置を製作するのは容易ではない。事実、高落差ポンプ水車を実用化した初期においては、数十時間しか運転できないこともあった。経験のない欧米メーカーが中国に500m級の高落差ポンプ水車を多数輸出したが、その多くは、主軸封水装置の耐久性で問題を起こした。わが国では、現在、700m級のポンプ水車でもこの種の問題を生じないような技術を確認しているが、この技術は、高落差ポンプ水車の重要なノウハウの一つである。

(4) ポンプ起動時のランナ周囲の水面押し下げ時の問題

ポンプ起動時には、起動トルクを軽減するためランナ周囲に圧縮空気を吹き込み、ランナ内の水を下方に押し下げる。このとき押し下げた水面の水位がランナに近いとランナが攪拌した空気による気流で水が巻き上げられ、回転するランナに干渉して大きい抵抗トルクを生ずる。また水位が低すぎると、波立った水面に巻き込まれた気泡が下流側に流出し、圧縮空気が過大に消費され、空気圧縮機の容量が不足する問題を生ずる。

高落差機では、当初、低落差のポンプ水車の経験に基づいて押し下げ水位を決めていたが、高落差機では空気の密度が大きく気流の攪拌力が強いいため、抵抗トルクの増大や空気の過大流出の問題を生じた。現在では、これを克服するため、高落差機には特別なドラフトチューブの形状を採用している。

以上により、わが国の高落差ポンプ水車の実績は、世界のトップを行くまでになっている。世界における高揚程ポンプ水車の実績を図11.5に示す。西龍池（Xilongchi）、天荒坪（Tianhuangping）はともに中国の揚水発電所であるが、前者は日本連合（日立

/東芝）で製作中のもの、後者は海外メーカーの実績の中で最高揚程のものである。これを見ると、1970年以降、日本製が常に高落差（高揚程）のトップを走っていることが分かる。

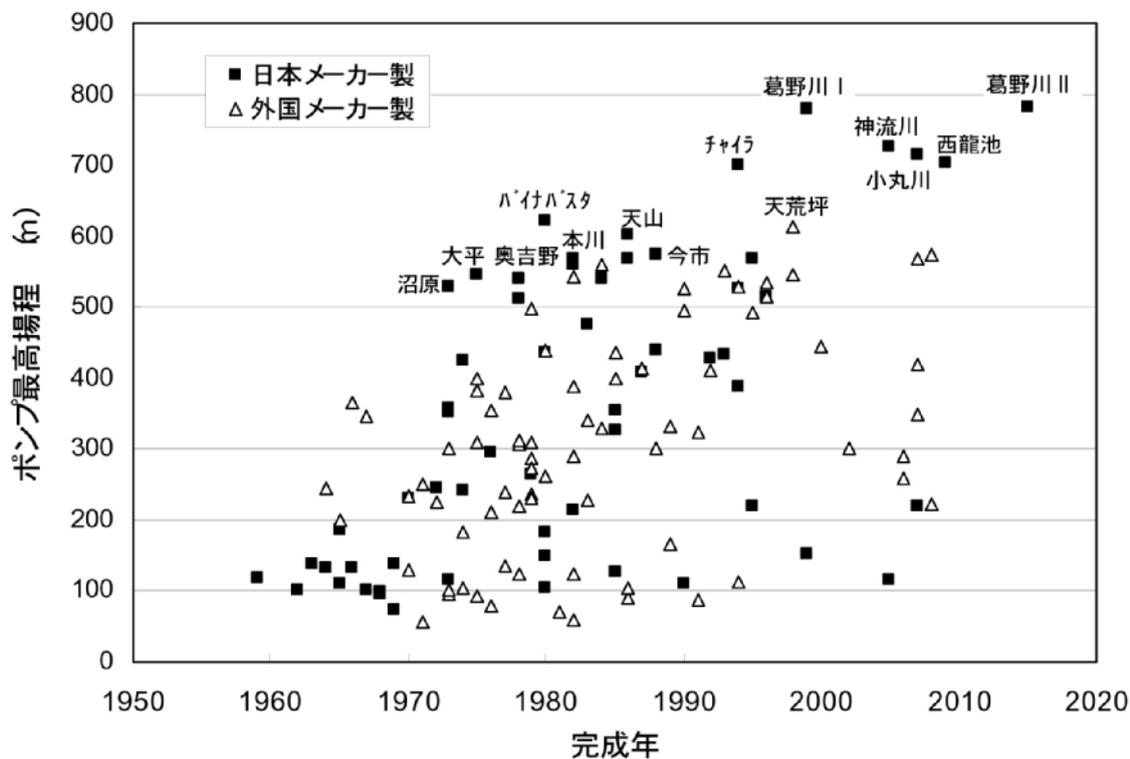


図11.5 世界における高揚程ポンプ水車の実績
(2006年現在、建設中のものを含む)

12 | 揚水発電に関する新技術

12.1 揚水発電所の役割の増大と可変速揚水発電の出現

わが国の電力は、電圧や周波数のばらつきが少なく、停電事故もほとんど無くて、品質と信頼性が高いことはよく知られている。これには送電線の二重化などの設備投資によるところも大きい。水力、特に揚水発電の寄与するところが大きい。

電力の系統運用における揚水発電の機能を列挙すると次のようなことが挙げられる。

- 貯水池式水力発電所と同様、急激な負荷変動に対する即応性が高い

例えば東京電力の平均的な週日の負荷変動は図12.1のように変化する。この中で朝の8時～9時の時間帯における負荷の上昇率は、700万～900kW/時に達し、実に1時間に大容量原子力発電所5～7基分にも相当する。また昼食時には数十分で300万～500kWにも達する負荷変動が起こる。表12.1に各種電源の応答所要

時間を示したが、このような急激な負荷変化に対しては、ミドル負荷対応の火力ならびにピーク負荷対応の水力、特に揚水発電所によって対応する必要がある。

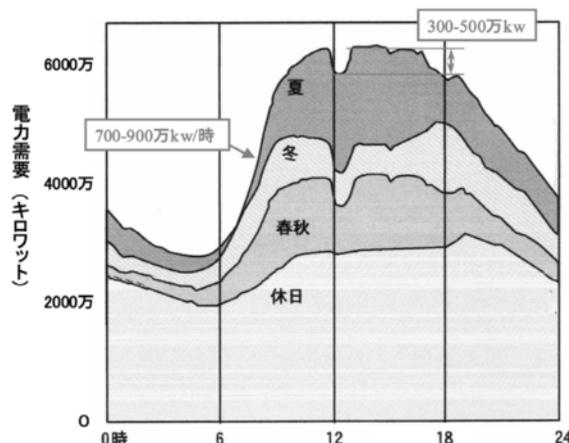


図12.1 東京電力の電力需要日変化曲線
(東京電力 ホームページより抜粋)

表12.1 各種電源の応答所要時間

電 源	起動時間	負荷応答	用 途
原子力発電	数日	1～2日	ベース電源
大容量火力発電	DSS：4～5時間 週初：7～8時間	90分	ベース電源
		180分	またはミドル電源
中・小火力発電	DSS：3～4時間	60分	ミドル電源
水力発電所	5～10分	1～2分	ピーク電源
揚水発電所	5～10分	1～2分	ピーク電源

- 運転待機による電力系統の事故時における予備力

他の発電所や変電所で事故が発生して電力の供給に支障を生じた場合、貯水池式水力と揚水発電所は、緊急予備力として直ちに起動して対応することができる。このような予備力を保持していることは電力系統の信頼性を確保する上で重要であり、自由化された電力市場では、このような緊急予備力も、商品として取引される。

- 水面押し下げによる空転運転により、調相運転を行い、電圧調整に寄与

送電線を介して、発電所からは有効電力と無効電力が需要地に向けて送られている。もし有効電力の供給が需要量を下回ると周波数の低下を生じ、逆に上回ると周波数が上昇する。また同様に、無効電力

の供給が低下すると系統の電圧低下を生ずる。このため周波数と電圧を一定に保つには、有効電力と無効電力が常に需要に合わせて適正に送電されなければならない。

有効電力は、前述のように、揚水発電などの即応電源によってバランスを保つようにする。また無効電力は、発電機の電圧を調整することによってバランスさせる。

ここで、無効電力の供給にはエネルギーを必要としないので、同期機を電力系統につなぎ、この同期機の電圧を調整することによって無効電力の調整が可能である。これが同期調相機と呼ばれる機械の役割で、変電所などに設置されている。この役目は、水力発電所の同期発電機の電圧調整を行なうことに

よってもできるが、揚水発電所の場合は、ポンプ起動のためにランナの周囲の水を押下げる装置を持っており、これを利用してランナを空転させ、有効電力と無関係に無効電力のみを調整するいわゆる調相運転を行なうことができ、系統の電圧維持に貢献することができる。

●夜間の余剰電力の吸収による大容量原子力や火力の負荷率の向上に寄与

冬季などの電力需要の低迷期においては、夜間の電力需要が大容量原子力や火力のベース電源の容量を下回ることがある。このような時は、揚水発電所で揚水運転を行い、余剰電力を吸収するとともに、昼間のピーク需要に備えてエネルギーを貯水池の貯水の形で蓄積する。

これにより、原子力や火力は出力を絞ることなく一定負荷で運転することができ、系統全体の熱効率の向上、原子力・火力プラントの長寿命化に寄与することができる。

●停電からの送電系統の立ち上げ

送電線が完全に停電した状態から発電所を起動する場合、火力発電所などではまず補機を起動する電源が必要である。水力発電所は自分自身が保持している操作用の油圧タンクの油圧さえあれば、まず自分自身を起動して発電し、それで送電線を充電して他の発電所の起動を可能にすることができる。このような機能をブラックスタート機能というが、揚水発電所もこの機能を持っているものが多く、これによって万一の停電時でも系統の復旧を迅速に行なうことができる。

以上のような機能は、一般の水力発電所でも可能であるが、揚水発電所は一般の水力発電所に比べて大容量発電所に対する地理的・水理的制約が少なく、建設地点の選定が容易である。また高落差にすれば大容量発電所でも小さい貯水池でよいので環境や景観に対する影響も小さい。このようなことから日本では、2004年現在、発電設備容量の構成は表12.2のようになっている。

表12.2 わが国の一般電気事業用発電設備の電源構成（2004年末現在）（上段：万kW、下段：％）

一般水力	揚水水力	石炭火力	LNG火力	石油火力	その他火力	地熱発電	原子力	合計
2,060	2,466	3,784	5,993	4,333	355	52	4,712	23,755
8.7	10.4	15.9	25.2	18.2	1.4	0.2	19.8	100.0

（資源エネルギー庁資料による）

12.2 可変速揚水発電の出現

上述のように、電力の品質を高める上で、水力発電や揚水発電の即応性を高めることは非常に重要であるが、1990（平成2）年に可変速揚水発電の技術がわが国で開発され、東京電力 矢木沢発電所において世界で始めて実用化された。これにより、揚水発電ユニットの即応性が一段と向上した。

すなわち、発電電動機を速度を可変にすれば、速度を変えることによって回転部分の慣性エネルギーを出し入れすることができ、それによって短時間ではあるが有効電力を迅速に出し入れすることが可能となる。従来の水力発電ユニットでは、水車のガイドベーン開度を変えて流量を調整し、それによって出力を変えていた。そのため、水圧鉄管の水撃や鉄管内の水の慣性による遅れなどで、ガイドベーン開度を変えても出力が変化するまでには数秒から十数秒の遅れが出る。しかし、可変速機の場合は、回転速度を変える指令を出

すことによりこの遅れをカバーし、短時間ではあるが数分の一秒で出力を数十%変えることが可能となる。

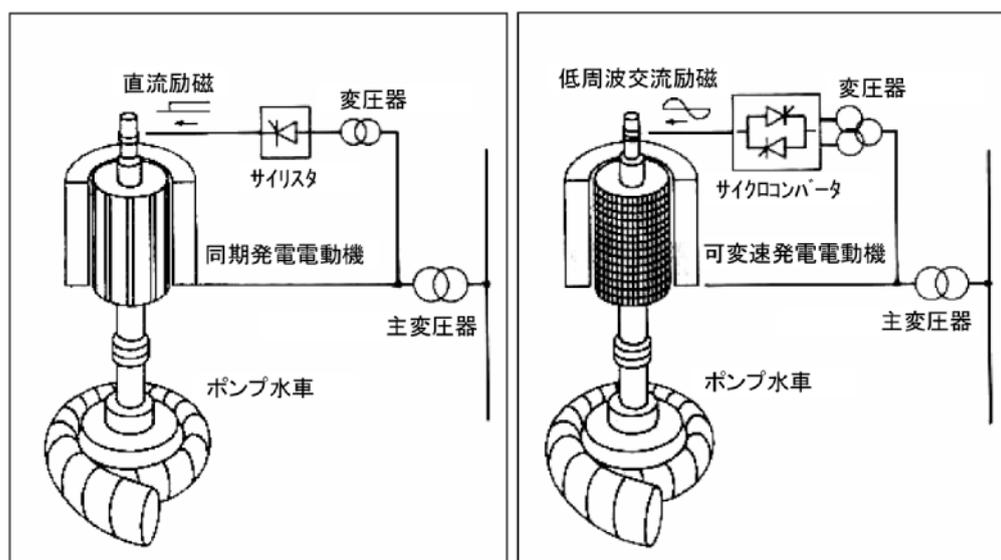
さらにポンプ水車の揚水運転では、従来の定速度機の場合、そのときの落差（揚程）とH-Q特性（揚程揚水量特性）によって揚水量が決まり、さらにそれによってポンプ入力が決まるので、任意に入力を調整することができない。しかし可変速機では、ある落差においてもポンプ水車の運転速度を変えることによりある程度揚水量を変えることが可能となり、それによりポンプ入力を変えることも可能となる。冬季の深夜などでは、ほとんどの電力が原子力や大容量火力で賄われているために、負荷変動があっても迅速に追従することができないが、可変速機で揚水運転をしていれば、その入力を調整することにより、ある程度周波数を調整することが可能となる。

従来の同期発電電動機と可変速発電電動機のシステムの相違を図12.2に示す。すなわち、従来の同期機では発電電動機のロータを直流で励磁していたため、磁極の極性が一定であるが、可変速機ではロータを巻線

形にし、それを低周波交流で励磁することによってロータに低周波の回転磁界を生じさせる。これにより、ロータはステータ側の系統周波数の回転磁界とロータ側の低周波数の回転磁界との差分の周波数に相当する回転速度で回転することとなる。この方式を低周波交流二次励磁方式という。

可変速機がいかに水車出力とかポンプ入力を正確に調整できるかの例を図12.3に示す。この例を見ると分

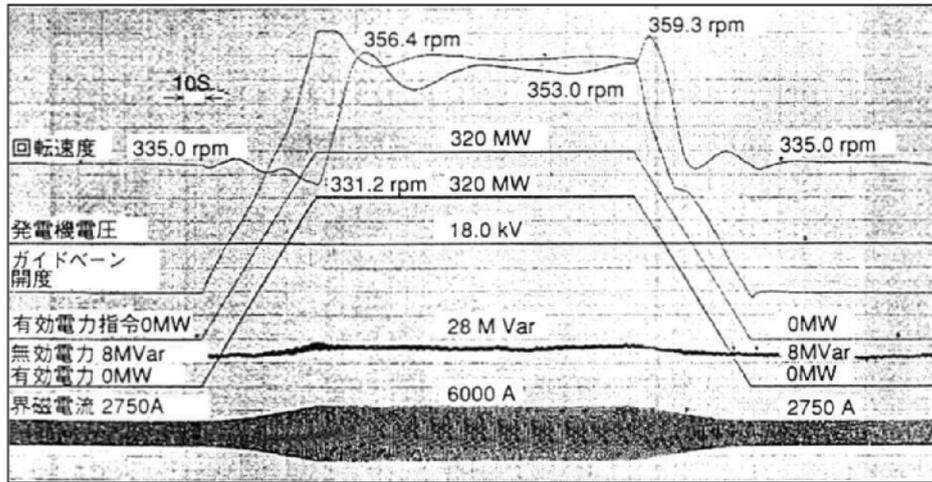
かるように、発電運転ではガイドベーンを変えて出力調整をする一方で回転速度を微妙にコントロールして回転エネルギーの出し入れを行ない、正確に指令電力に追随していることが分かる。揚水運転でも同様であるが、揚水運転の方は単に速度を変えて揚水量を調整するだけなので、回転速度の調整も発電運転ほどには複雑ではない。



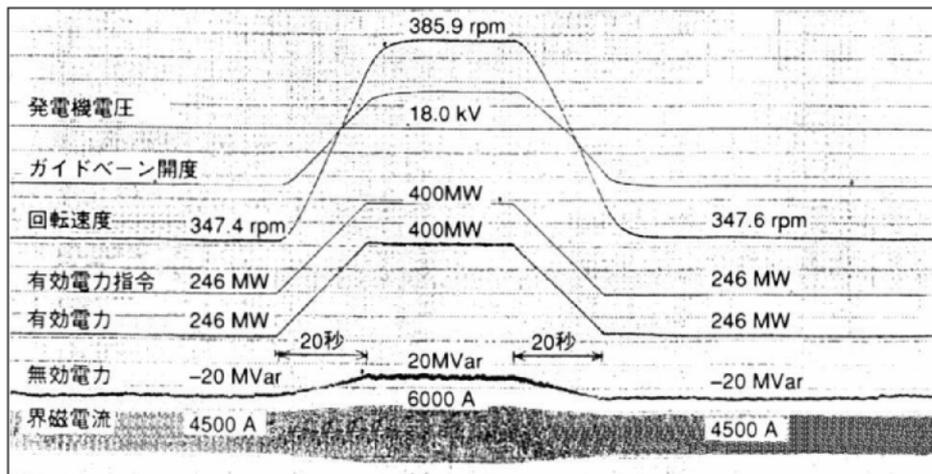
(a) 従来の同期発電電動機(定速機)

(b) 交流二次励磁可変速発電電動機

図12.2 同期発電電動機と可変速発電電動機のシステムの相違



(a) 発電運転の出力制御



(b) ポンプ運転の入力制御

図12.3 可変速機の出・入力制御の例 (関西電力 大河内発電所)
(資料提供：関西電力)

このようなメリットがあるため、可変速機は定速機に比べかなり高価であるに関らず、矢木沢発電所以後、わが国では多くの可変速機が製作され、運転されるようになった。世界の可変速機の実績を図12.4に示すが、わが国以外でこの交流二次励磁方式の大容量可変速機が実用化されたのは、わが国より約10年遅れて運転を開始したドイツのゴルディシュタール (Goldistahl) 発電所が最初である。

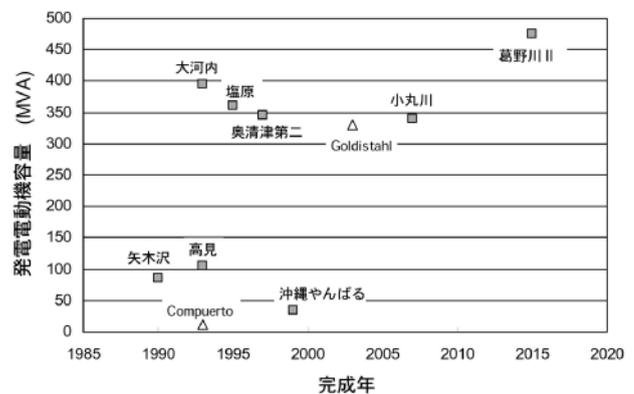


図12.4 世界における可変速揚水発電機の実績
(注) 図の中で△は日本以外の実績を示す。
2006年現在、本格的なものはGoldistahlのみである。

12.3 海水揚水発電と大深度地下揚水発電

今まで述べたように、揚水発電の主たる目的は電力の需給調整であり、それ自体がエネルギーを生み出すものではない。そのため揚水発電所は建設コストを下げるのが重要である。そのようなことから上部貯水池を海岸近くに設置し、海を下部貯水池として使用するアイデアが1970年代からあった。このような揚水発電所で問題となるのは、水車や冷却用の海水を扱う補機類の海水に対する耐食性と上部貯水池にくみ上げた海水による環境汚染の問題である。

これらの問題を解明するべく旧通商産業省が1981～1985年にかけて「海水揚水技術実証試験調査」を実施した。この調査研究は、電源開発(株)を幹事会社として水車メーカーや土木建設業者などが参画し、主として、水車材料の耐食性、高流速下における耐食塗料の耐久性、海生生物の水車・水路への付着の防止、上部貯

水池からの海水浸透対策、強風下における上部貯水池からの海水の飛散などによる周辺の野生動物・植生などへの影響評価などについての調査研究を実施した。

この成果を受けて、1990年から、沖縄本島の北部に出力30,000kW、落差136mの海水揚水発電実証試験プラント（沖縄やんばる海水揚水発電所）の建設に着手した。この発電所は、海水用ポンプ水車の他に、当時最先端であったGTOサイリスタを用いた可変速発電電動機も組み合わせ、その実用性評価を行なった。発電所は1999(平成11)年3月に運転を開始し、2003年まで5年間の実証試験運転を行なった。結果的には、基礎研究に基づき選択した材料や塗装で十分対応できることが立証できた。なお、この発電所の上部貯水池は、全面ゴムシートを張り、その下には漏水排水管を張り巡らして漏水を検知するようにしたが、これも全く問題が無かった。

図12.5にこの発電所の建設工事中の上部貯水池およびその鳥瞰写真を示す。

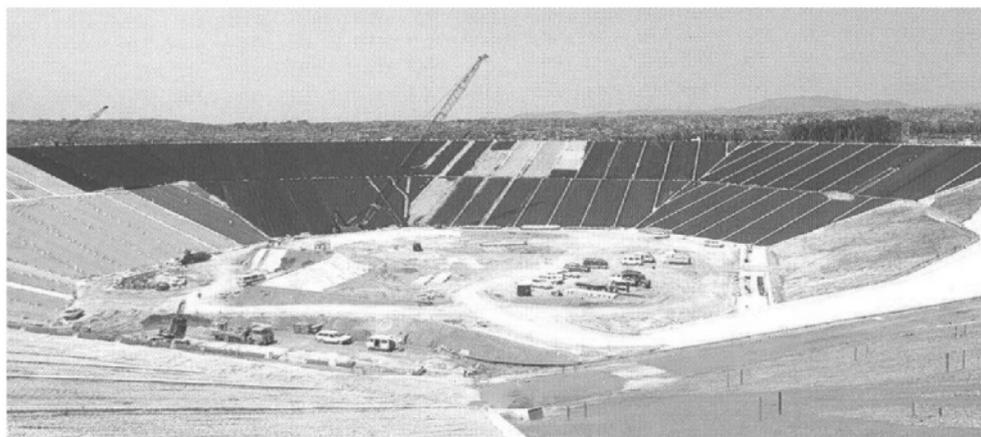


図12.5 沖縄やんばる海水揚水発電所 上部貯水池の施工状況と鳥瞰図（写真提供：電源開発（株））

このように山の上に上部貯水池を設ける方式は、大容量揚水発電所になると上部貯水池の環境への影響が生じる懸念が拭えない。そこで土木学会では1988～1996年にかけて下部貯水池を大深度地下に設ける地下揚水発電所建設についての問題点などの検討を進めた。この後、地下揚水発電所の開発課題の明確化とその対処方法を検討し、その技術的可能性と経済性評価を行なうべく資源エネルギー庁から（財）新エネルギー財団に地下揚水発電に関する技術調査が委託された。具体的には土木総合評価、地下深部評価、電気機器、環境評価の分野ごとに調査・研究が行なわれた。電気機器関係は電源開発（株）を幹事会社として1997～2001年にかけて技術調査を実施した。このとき、上部貯水池として地上の天然または人工貯水池を用いる案と海を用いる案の両案を検討した。このときの検討課題は次のような事項である⁽²³⁾。

- ・大深度地下空洞の合理的な設計・施工方法と経済性

の向上

- ・海水用ポンプ水車の開発、耐海水性二相ステンレス鋼の鋳・鍛造法などの開発
- ・超高落差揚水発電機器の設計
- ・地下深部（深度1,000m）の地質調査試験機器の開発。孔内载荷試験機、透水試験機の開発
- ・地下深部地質の調査・評価手法の開発
- ・地下揚水発電に関する環境影響評価手法

この調査研究により、実機大ランナの試験製作による確証を行なったほか、深度1,000mの地下岩盤の変形特性、透水性なども精度よく調査できることを実証した。

この結果、落差800m以上を確保することを前提とすれば、2,000MW規模の地下揚水発電所を、在来の揚水発電所と同等の工期と建設単価で建設できる目途を得た。ただ残念ながら、その後の国内の経済不況から具体的な建設計画は進展していない（図12.6）。

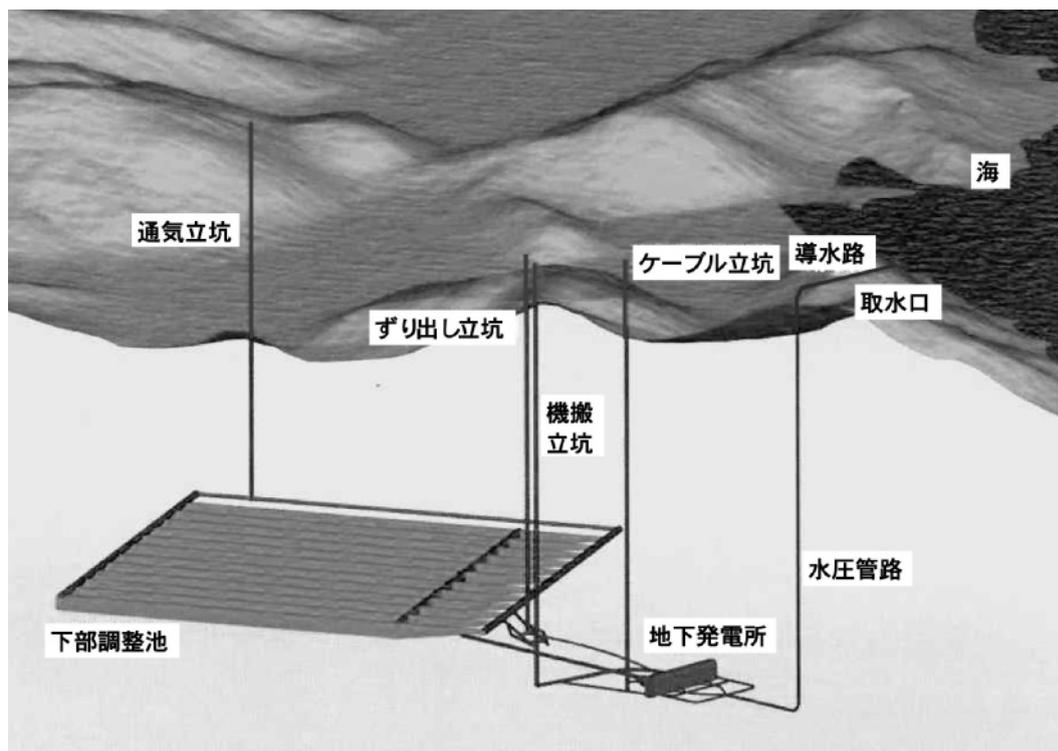


図12.6 大深度地下海水揚水発電所の概略構想図（資料提供：（財）新エネルギー財団）

なお、米国では下記の2箇所で地下揚水発電計画（海水ではない）が検討されているというが、まだ具体化はしていない。

Summit計画

- 地点：オハイオ州アクロン近郊
- 発電所出力：1,500MW
- 地下空洞：地下670mの鉱山の坑道利用
- 現状：1991年にFPRC 認可済み

Mount Hope計画

- 地点：ニュージャージー州
- 発電所出力：2,000MW（400MW×5台）
- 地下空洞：地下760mの鉱山の廃坑利用
- 現状：詳細不明

以上、明治時代に「発電用水車」がわが国に導入されてから現代に至る技術の発展経過について概観してきた。明治から昭和初期にかけてのわが国の近代産業の発展を支えた電力の基幹電源として、水力発電は大きい役割を果たし、水車も近代化・大容量化の一途を辿ってきた。第二次大戦後は、復興電源として活躍し、また海外に進出して多くの巨大プロジェクト用の水車を作った。また国内においては、1960年代以降、揚水発電の急速な発展にあわせ、世界をリードする高落差ポンプ水車が開発され、世界に誇るポンプ水車が誕生した。以下、これらを支えた各分野の技術について考察する。

なお、石油ショックの後、国産エネルギーの開発が叫ばれ、1980年前後から国内の中小水力の開発が推進された。このとき、中小水力の経済性を改善するため、機器のコストダウン、建設・保守の省力化技術がいろいろ開発された。中でもガイドベーンやランナベーン操作機構の電動化、油潤滑軸受から水潤滑軸受への転換、グリース潤滑軸受から無給油軸受への転換、各種構造の標準化・合理化などが大いに進められた。しかし本報告書では紙面の都合でこれらに関する記述を割愛した。この点をご容赦願いたい。

(1) 設計手法の進歩と今後の性能改善

水車の設計理論の根本は水力学、流体力学である。明治時代から昭和中期（1970年頃）までは、フランス水車やペルトン水車のランナの設計は、角運動量理論に基づく古典的な設計理論（いわゆるオイラーの式）によってランナ羽根の入口角や出口角を定め、その間の羽根曲線は単に水を滑らかに流すということで経験的に決める手法が取られていた。プロペラ水車については、戦後、キャビテーション防止のため羽根面の圧力分布などを考慮した翼理論が適用されたこともあるが、主流は古典的な設計理論の域を出なかった。

これが大きく変わったのは、大型コンピュータの出現により数値流体力学が発展してからである。第10章に述べたように、当初は不完全なポテンシャル流れ解析などで単に流速分布や圧力分布を計算するだけであった。その後1990年代に入り、三次元の粘性流れ解析コードによって摩擦損失などの諸損失も計算できるようになり、設計段階である程度の性能評価が出来るようになった。ここに至り、水車の設

計は、経験を脱却した科学的な手法で行なわれるようになったと言える。

その後、ある形状のランナの流れや性能を評価するのではなく、逆に、所期の性能を発揮できるようなランナの翼形を求めるという逆解法も試みられたが、これはかなり難しく、十分な成果は得られなかった。

これに代わるものとして、2000年頃から遺伝アルゴリズムを用いた設計法が試みられている。またこのほかにもこれに類したいくつかの技術が最近成果を挙げつつあり、今後の発展が期待されている。

わが国の水車産業は、今まで述べてきたように高落差化、高速化と大容量化に邁進してきたが、これは現在ではかなり限界まで来たと思われる。今後のわが国の水車産業の国際競争力を高めるには、性能面で、次のような開発をさらに進める必要がある。

1. 非設計点の性能改善、
 2. さらなる高速化（キャビテーション性能の改善）による小形化の達成
- (2) 材料と製造技術の進歩と今後の対策

水車は水を滑らかに流すために三次元曲面で構成される部品が多い。そのため当初は、ランナは元より、ケーシング、ステーパーン、ガイドベーン、ドラフトチューブに至るまで鋳造により製作されていた。

しかし水車の大型化に伴ない、一体で鋳造して製作するのが困難となった。一方、昭和初期から溶接技術が徐々に発達し、ケーシング、ドラフトチューブなどが鋼板溶接構造で作られるようになった。

1960年頃から、輸送限界一杯の巨大な水車が多く作られるようになり、それに伴って製造技術も大きく進歩してきた。特に、第8章でも述べたように、戦後1960年代における溶接技術の発達は目覚しく、300mmに及ぶ厚板の溶接が可能でエレクトロslag溶接などが導入され、ランナも含めたほとんどの水車部品が鋼板溶接構造で製作されるようになった。現在では、比較的鋳造が容易な小形水車のランナやガイドベーンを除き、ほとんどすべての水車部品は鋼板溶接構造で製作されている。また1990年頃から溶接ロボットの導入が各分野で積極的に始まったが、水車もその例に漏れず、ランナやケーシングの溶接にロボットが利用されるようになった。

一方、機械加工においても、1970年代早々に、世界に先駆けてわが国でランナの三次元曲面を加工するNC加工が実用化された。

わが国の水車の製造技術は、1960～70年代にかけて目覚しく進歩したが、大量生産ではない水車は製造コストに占める労務費の比率が高く、現在、国際的なコスト競争では苦しい立場にある。わが国の水車産業は、これらの競争に立ち向かうために、製造面で下記のような対応が必要であろう。

1. LCC (Low Cost Country) への製造移転
 2. 溶接ロボットなどの利用による新生産システムの開発
 3. 耐キャビテーション材料、耐摩耗性材料などの高機能材料の開発による技術の差別化
- (3) わが国における将来の水力開発への対応

世界のエネルギー需要の増大によるエネルギーコストの上昇ならびにエネルギーの環境負荷などの面から、最近、原子力発電が再び脚光を浴びてきた。わが国でも、かつて言われていたような原子力発電と揚水発電の組合せによるベストミックスが、再び注目されている。その点で揚水発電は、超電導蓄エネルギーシステム (SMES) などのより応答速度の速い蓄エネルギーシステムが出現するまでは、原子力発電などを補完する変動負荷対応の大規模蓄エネルギーシステムとして重用されるであろう。

しかし一方では、電力自由化を控え、電力会社が多額の投資を必要とする原子力発電や揚水発電の新しい建設を手控え、短期で投資回収が容易なLNGを燃料とするコンバインドサイクル発電とか燃料電池による分散電源などを推進する動きがある。当面はこの辺を天秤にかけた模索が続くと思われる。

これとは別に、国産の持続可能エネルギー開発の一端として小水力の開発が叫ばれているが、経済性に乏しいのが問題である。こちらは土木工事費も含めた徹底したコストダウンが必要なことは勿論であるが、国産エネルギー保護のための補助金などの政策的対応も必要と思われる。

- (4) 世界における水力開発への対応

2004年のInternational Energy Outlookによれば、世界の電力需要は今後24年間に倍増し、その中で持続可能なエネルギーは57%増加すると予測されている。この持続可能エネルギーの開発の中でも水力エネルギーの開発に対する期待は大きく、「持続可能な開発に関する世界サミット (World Summit on Sustainable Development)」(2002年、ヨハネスブルグ)、「第3回世界水フォーラム (Third World

Water Forum)」(2003年、京都)、「再生可能エネルギーに関する国際会議 (International Conference for Renewable Energies)」(2004年、ボン) などにおいても水資源ならびに水力エネルギーの開発は焦眉の急であると指摘された。

しかしながら、このように世界の水力開発に対するニーズが高まる一方において、水力資源の多くを保有する開発途上国の資金難が大きい障害になっている。この一つの原因として、十分な投資を得られるような説得力のある開発計画や運用などを含めた資金回収計画などを立案する技術者の不足などが指摘されている。

また、発電所の保守に当たる技術者の不足も深刻である。このため大規模水力発電所を建設しても、その保守や事故の予防に関する技術力が必ずしも十分でなく、事故発生リスクが指摘されている。

持続可能なエネルギーとしての水力開発を推進し、かつその運用面におけるリスクを軽減するには、わが国からの水力発電の開発、運用、保守などに関する技術の移転が重要である。水車に関しても、その基本計画、設計、製造、保守などの技術移転を大いに進める必要がある。

14 | まとめ

水車は設置する場所の落差と流量、さらには流れ込み式発電所のように常時小流量で運転するものとか貯水池式水力や揚水水力のようにピーク負荷対応で短時間に大流量による発電を行なうものなど、その地点々々や用途により設計仕様が異なる。よって、発電所ごとに設計落差、仕様流量の値が異なるため、水車は発電所ごとに新設計をされて製作される。言うなれば一つ一つの製品が試作品であるという宿命を持つ。しかも製作しても、工場での試運転は出来ず、多くは現地でコンクリートに埋設されて据付けられた後に始めて通水して試運転となる。そのため、設計者は常に新設計にチャレンジして行かねばならない。このようなことから、水車の設計者は各々が担当した水車に非常な愛着を持っている。

これは、発電所を計画し、運転仕様を決め、しかる後発電所を建設したり運転を担当する電力会社の技術者にとっても同じことで、水力発電関係者は自分が担当した発電所や機械に対する思い入れが非常に深い。そのため多くの電力会社が、水力発電に関する技術史をまとめている。

今回の調査に当たっては、訪問したメーカー、電力会社の方々から、こういった各社の史料を沢山貸与もしくは提供していただいた。それらを拝見すると、先人たちが各々担当した水車や発電所に対して並々ならぬ愛着を持っておられるのに今更ながら感銘を受けた。

水車は、機械としての寿命が非常に長く、土砂磨耗などによる部品の交換はあっても本体は20年～30年と使用され、周辺の地域の人々からも愛着を持たれていることが多い。そのため、機械としての寿命を終えても、その地域の公園とか博物館などに文化財あるいは史跡として保管・展示されているものが多い。今回の系統化調査では、それらについての調査は全く出来なかったが、例えば参考文献(9)などには、中部地方に存する水力発電の産業遺産(展示品や史料など)が詳細にリストアップされている。

これらをたどって行くと、いかにわが国の先人たちが、電力利用やそれをまかなう電源開発に非常な情熱と驚くべき技術力をもって取り組んできたかを知ることができ、感銘を受けると同時にわれわれがその技術を継承し後世に伝える責任を痛感する。

本報告書は、非常に限られた情報しか収録できなかったが、いささかでもその面で役に立てば幸である。

■ 謝辞

今回実施した「発電用水車についての技術発展の系統化調査」を進めるに際しては、多くの方々から多大のご協力を賜わった。特に調査票の作成・提出や多くの貴重な資料の提供などで下記の方々には特に面倒をお掛けしご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

電源開発株式会社	田生宏禎氏、相良秀晃氏、千葉和彦氏
東京電力株式会社	坂本幸治氏、加藤 基氏
関西電力株式会社	阿黒克俊氏、和田武士氏、奥出邦夫氏
中部電力株式会社	江本邦夫氏、古村清司氏
四国電力株式会社	国松直斗氏
京都市上下水道局	橋本 悟氏
琵琶湖疏水記念館	井垣成量氏
八百津町教育委員会	辻 常美氏、藤本清久氏
旧八百津発電所資料館	村瀬宏明氏
株式会社日立製作所	新倉和夫氏、井原一男氏
株式会社東芝	本間 啓氏、河瀬洋三氏
三菱重工業株式会社	坂 久征氏
不動技研	坂元 篤氏
富士フォイトハイドロ株式会社	木本 裕氏

なお、ご提供頂いた資料は膨大なもので、紙数の関係で今回取りまとめた報告書にはごく一部しかご紹介できなかった。ご提供頂いた各社には、折角の資料を活かせなかったことをお詫びし、お許しを乞いたい。

各社でまとめられている技術史などの中には、非常な労力をかけて収集した膨大な資料を収録した貴重なものがあり、その情報量は本報告書の比ではない。これらの技術史などは参考文献にあげたが、今回の調査でも非常に参考になったことを付言して、ご提供頂いた各社へのお礼の言葉に代えたい。

添付資料：－

付録1 参考文献

付録2 発電用水車の技術の変遷（年表）

付録3 平成18年度 資料登録候補一覧表

〈参考文献、資料など〉

(順不同)

- (1) 内丸最一郎 「水力タービン」 技報堂、1954 (昭和29) 年10月
- (2) 電力土木技術協会 水力技術百年史編纂委員会編 「水力技術百年史」2.5章 水車・発電機、1992 (平成4) 年6月、(非売品)
- (3) (社)日本工学会・(財)啓明会 著作発行 「明治工業史 機械篇、地学篇」 1930 (昭和5) 年12月25日
- (4) 京都市上下水道局疏水事務所編 「琵琶湖疏水」 1988 (昭和63) 年3月初版
- (5) 京都市水道局・京都新聞社編 「琵琶湖疏水の100年 (叙述編)」 1990年
- (6) 東芝水車100年史編集委員会編 「東芝水車100年史」 2000年9月、(非売品)
- (7) 日立 “水車のあゆみ” 編集委員会編 「日立水車のあゆみ」 1978 (昭和53) 年4月、(非売品)
- (8) 田沢昌孝 「吾が水車工業二十五年の追憶」 昭和16年6月、(非売品)
- (9) 中部電力(株) 総務部社史編纂グループ編 「時の遺産－中部地方電気事業史料目録集」 2001 (平成13) 年5月
- (10) 日立製作所 「Delivery Record - Hydraulic Turbines and Pump-turbines」 2006年
- (11) 三菱重工業 「三菱水車 製作実績表」 2003 (平成15) 年
- (12) 日本工営(株) 「日本工営三十五年史」 1981(昭和56)年6月、(非売品)
- (13) 電業社原動機製造所 「電業社原動機製造所四十五年史」 1955 (昭和30) 年、(非売品)
- (14) 電業社機械製作所 「三好松吉追悼誌」 1981 (昭和56) 年4月、(非売品)
- (15) (財)日本経営史研究所編 「日本電力業史データベース」；<http://www.jbhi.or.jp/toukei.html>
- (16) 東京電力工務部編 「東京電力 水力発電技術史」 1995 (平成7) 年3月、(非売品)
- (17) 中部電力静岡支店 大井川電力センター編 「大井川－流域の文化と電力－」 2001 (平成13) 年11月、(非売品)
- (18) 電源開発(株) 「工務部門技術史－先達に学ぶ」 1998 (平成10) 年4月 (非売品)
- (19) 四国電力(株) 「大森川発電所 工事誌」 1960 (昭和35) 年、(非売品)
- (20) 富士電機システムズ(株) 「主要納入先表 水車」 2004 (平成16) 年3月
- (21) Enomoto, Y. et al. “Design Optimization of a Francis Turbine Runner using Multi-Objective Genetic Algorithm”, Proceedings The 22nd IAHR Symposium, Stockholm, June 2004
- (22) Tanaka, H. “Vibration Behavior and Dynamic Stress of Runners of Very High Head Reversible Pump-turbines”, Special Book, IAHR Symposium-Belgrade, 1990
- (23) 資源エネルギー庁、新エネルギー財団 「平成13年度 地下揚水発電技術調査－地下揚水発電技術マニュアル」 2002(平成14) 年3月
- (24) (株)東芝 「Reference List - Hydraulic Turbines」

発電用水車の技術の変遷 (その1:水力発電の開始から第二次世界大戦の終戦まで)

	1890	1900	1910	1920	1930	1940
世界・日本の状況	1882 ニューヨークで世界初の水力発電	日清戦争	日露戦争	第一次世界大戦	1923 関東大震災 1920 国際連盟成立 日本加盟	日中戦争 1931 満州事変 1933 国際連盟脱退
電力事業の沿革と主な出来事	1886 東京電燈開業(翌年より電燈電力の供給開始) 1887 東京電燈にてわが国初の火力発電(25kW, DC210V) 1888 宮城紡績でわが国初の自家用火力発電(5kW) 1892 鐵上発電所にて事業用火力発電の始まり 1895 東京電燈浅草発電所(火力)操業開始 1899 わが国初の長距離送電の始まり(郡山絹糸紡績 沼上水力発電所) 1907 東京電燈 駒橋水力発電所より東京へ特別高圧送電開始(55kV, 75km) 1942 9配電会社設立	1895 東京電燈浅草発電所(火力)操業開始 1899 わが国初の長距離送電の始まり(郡山絹糸紡績 沼上水力発電所) 1907 東京電燈 駒橋水力発電所より東京へ特別高圧送電開始(55kV, 75km)	1892 鐵上発電所にて事業用火力発電の始まり 1895 東京電燈浅草発電所(火力)操業開始 1899 わが国初の長距離送電の始まり(郡山絹糸紡績 沼上水力発電所) 1907 東京電燈 駒橋水力発電所より東京へ特別高圧送電開始(55kV, 75km)	1906 輸入蒸気タービンによる火力発電開始 1912 東京電燈 八つ沢PS12,500馬力輸入フランシス水車運転開始 1912 鬼怒川水力 下流PS10,000馬力輸入ベルトン水車運転開始	1923 関東大震災 1920 国際連盟成立 日本加盟	1931 満州事変 1933 国際連盟脱退
輸入発電機種の動向	1887 以後火力発電用に欧米より多くの発電用水車を輸入(1935年ごろまで) 1888 以後欧米より多くの発電用水車を輸入(1935年ごろまで)	1890-1910頃まで多数のメーカー(石川島造船所、東京中島製作所、東京三吉電機工場、京都吉見鉄工所、大阪大谷鉄工所、足尾銅山製作所など)が水車を国産	1890-1910頃まで多数のメーカー(石川島造船所、東京中島製作所、東京三吉電機工場、京都吉見鉄工所、大阪大谷鉄工所、足尾銅山製作所など)が水車を国産	1906 輸入蒸気タービンによる火力発電開始 1912 東京電燈 八つ沢PS12,500馬力輸入フランシス水車運転開始 1912 鬼怒川水力 下流PS10,000馬力輸入ベルトン水車運転開始	1923 関東大震災 1920 国際連盟成立 日本加盟	1931 満州事変 1933 国際連盟脱退
国内メーカーの動向	1890-1910頃まで多数のメーカー(石川島造船所、東京中島製作所、東京三吉電機工場、京都吉見鉄工所、大阪大谷鉄工所、足尾銅山製作所など)が水車を国産	1902 芝浦製作所 水車製造開始 1910 芝浦製作所 水車事業を電業社に移管 1912 日立製作所 水車製造開始、現在に至る 1915 三菱合資会社 水車製造開始、その後社名変更を経て、現三菱重工業に至る 1936 富士電機 水車1号機完成	1902 芝浦製作所 水車製造開始 1910 芝浦製作所 水車事業を電業社に移管 1912 日立製作所 水車製造開始、現在に至る 1915 三菱合資会社 水車製造開始、その後社名変更を経て、現三菱重工業に至る 1936 富士電機 水車1号機完成	1906 輸入蒸気タービンによる火力発電開始 1912 東京電燈 八つ沢PS12,500馬力輸入フランシス水車運転開始 1912 鬼怒川水力 下流PS10,000馬力輸入ベルトン水車運転開始	1923 関東大震災 1920 国際連盟成立 日本加盟	1931 満州事変 1933 国際連盟脱退
水車の設計・製造技術の変遷	欧米から水車を輸入(当初は米国、間もなくヨーロッパ製が主流)	鉄・鋼製の水車	角運動量理論(Eulerの式)に基づく設計	角運動量理論(Eulerの式)に基づく設計	角運動量理論(Eulerの式)に基づく設計	角運動量理論(Eulerの式)に基づく設計
ベルトン水車	1879 米国にてL.A. Pelton ベルトン水車を発明	1892 国産初の90kWベルトン水車(京都電燈 藤上PS) 1907 奈津電力 500馬力ベルトン水車運転開始	1907 奈津電力 500馬力ベルトン水車運転開始	1906 山陰電氣 400馬力フランシス水車運転開始 1909-1916 田澤式軽便タービン162台を製造して水車普及に貢献(電業社) 1915 国産最大容量10,000馬力フランシス水車(利根発電 岩室PS) 1917 国産最大容量7,700kWフランシス水車(東京電力 猪苗代第二PS) 1921 国産初の飯沼河川用水車(群馬電力 金井PS)	1928 国産最大容量の13,900kW横軸ベルトン水車(富山県 真川PS) 1930 わが国最高落差(625m)の横軸ベルトン水車(日本海電氣 小口川第三PS) 1933 国産最大容量の38,500kW横軸ベルトン水車(朝鮮 長津江第一PS) 1939 東洋最大容量の42,000kW横軸ベルトン水車(朝鮮 盧川江第一PS)	1933 国産最大容量の38,500kW横軸ベルトン水車(朝鮮 長津江第一PS) 1939 東洋最大容量の42,000kW横軸ベルトン水車(朝鮮 盧川江第一PS)
フランシス水車	1848 米国にてJ.B. Francis フランシス水車を発明	1892 国産初の30馬力反動水車(箱根電燈 湯本PS) 1906 山陰電氣 400馬力フランシス水車運転開始 1909-1916 田澤式軽便タービン162台を製造して水車普及に貢献(電業社) 1915 国産最大容量10,000馬力フランシス水車(利根発電 岩室PS) 1917 国産最大容量7,700kWフランシス水車(東京電力 猪苗代第二PS) 1921 国産初の飯沼河川用水車(群馬電力 金井PS)	1906 山陰電氣 400馬力フランシス水車運転開始 1909-1916 田澤式軽便タービン162台を製造して水車普及に貢献(電業社) 1915 国産最大容量10,000馬力フランシス水車(利根発電 岩室PS) 1917 国産最大容量7,700kWフランシス水車(東京電力 猪苗代第二PS) 1921 国産初の飯沼河川用水車(群馬電力 金井PS)	1926 国産初の1万kW超フランシス水車(関川電力 鳥坂PSおよび京浜電力 奈川運PS) 1928 国産最大容量16,500kWフランシス水車(天竜川電力 南向PS) 1930 国産水車の輸出第1号60馬力フランシス水車(パナマ 大ハヤPS) 1930 国産最大容量23,000kWフランシス水車(朝鮮 赴載江第二PS)	1926 国産初の1万kW超フランシス水車(関川電力 鳥坂PSおよび京浜電力 奈川運PS) 1928 国産最大容量16,500kWフランシス水車(天竜川電力 南向PS) 1930 国産水車の輸出第1号60馬力フランシス水車(パナマ 大ハヤPS) 1930 国産最大容量23,000kWフランシス水車(朝鮮 赴載江第二PS)	1926 国産初の1万kW超フランシス水車(関川電力 鳥坂PSおよび京浜電力 奈川運PS) 1928 国産最大容量16,500kWフランシス水車(天竜川電力 南向PS) 1930 国産水車の輸出第1号60馬力フランシス水車(パナマ 大ハヤPS) 1930 国産最大容量23,000kWフランシス水車(朝鮮 赴載江第二PS)
カプラン水車	1913 オーストリアのV. Kaplan カプラン水車を発明	1930 国産初のカプラン水車(広島電氣 川平PS、金沢市 吉野第二PS) 1938 当時国内最大容量12,500kW カプラン水車(東北電力 新網PS) 1942 当時国産最大容量21,000kW カプラン水車(漢江水電 清平PS)	1930 国産初のカプラン水車(広島電氣 川平PS、金沢市 吉野第二PS) 1938 当時国内最大容量12,500kW カプラン水車(東北電力 新網PS) 1942 当時国産最大容量21,000kW カプラン水車(漢江水電 清平PS)	1930 国産初のカプラン水車(広島電氣 川平PS、金沢市 吉野第二PS) 1938 当時国内最大容量12,500kW カプラン水車(東北電力 新網PS) 1942 当時国産最大容量21,000kW カプラン水車(漢江水電 清平PS)	1930 国産初のカプラン水車(広島電氣 川平PS、金沢市 吉野第二PS) 1938 当時国内最大容量12,500kW カプラン水車(東北電力 新網PS) 1942 当時国産最大容量21,000kW カプラン水車(漢江水電 清平PS)	1930 国産初のカプラン水車(広島電氣 川平PS、金沢市 吉野第二PS) 1938 当時国内最大容量12,500kW カプラン水車(東北電力 新網PS) 1942 当時国産最大容量21,000kW カプラン水車(漢江水電 清平PS)

発電用水車の技術の変遷（その2：第二次世界大戦の終戦以後 2005年まで）

	1950	1960	1970	1980	1990	2000
世界・日本の状況	<ul style="list-style-type: none"> 1946日本国憲法公布 1949為替レート380円に 	<ul style="list-style-type: none"> 1954連で初の原子力発電開始 1955 家庭電化ブーム(3種の神器) 1956英国コールドーネル原案(初の商用炉) 1956電気事業再編成令により9電力会社発足 1956電源開発促進法公布、電源開発(株)発足 1956原子力委員会発足 1957原研第1号実験炉完成 	<ul style="list-style-type: none"> 1964東京オリンピック開催 1964新幹線営業開始 1970大阪万博開催 1973第1次石油ショック 1979第2次石油ショック 	<ul style="list-style-type: none"> 1979シ-マイアライアント原発事故 1980パブル崩壊 1983ドル100円時代 1985政府「地球温暖化対策推進大綱」を決定 1989欧州単一通貨(ユーロ)となる 	<ul style="list-style-type: none"> 1990バブル崩壊 1990同時多発テロ事件 	<ul style="list-style-type: none"> 1999欧州単一通貨(ユーロ)となる
電力事業の沿革と主な出来事	<ul style="list-style-type: none"> 1951電気事業再編成令により9電力会社発足 1952電源開発促進法公布、電源開発(株)発足 1956原子力委員会発足 1957原研第1号実験炉完成 1963日本の電源構成が「火主水従」となる 1963日本原子力研究所の動力試験炉(JPDR)が初の原子力発電に成功 1965日本原子力発電 東海発電所(125,000kW)が初の営業用原子力発電開始 1970 初のBWRとPWRが運転開始(原電 敦賀、関電 美浜) 1970 初の本邦原子力発電所が東芝に合併されて復帰 	<ul style="list-style-type: none"> 1978国内の原子力1000万kWを超える 1984最大電力が始めて1億kWを超える 1984 コハポイントサイト発電始まる(東北 東新浜火力) 1995国内の原子力2000万kWを超える 1994原子力4000万kWを超える 1995「もんじゅ」のNa漏れ事故 	<p>(注) 急速な電力需要の伸びに対応するため、1980年代に火主水従になった後、大容量火力や原子力の建設が盛んに進められた。これが1970年代以降の多数の揚水発電所建設に繋がった。</p>			
国内メーカーの動向	<ul style="list-style-type: none"> 1955 電業社が東芝に合併されて復帰 	<ul style="list-style-type: none"> 1997富士電機 水力部門を分離 富士フオートハイドロ(株)設立 	<p>(注) CFDとかFEMが設計に導入されたのは大形コンピュータと関連ソフトの開発による所が大きい。</p>			
設計技術	<ul style="list-style-type: none"> 角運動量理論(Eulerの式)に基づく水力設計 	<ul style="list-style-type: none"> 有限要素法(FEM)を用いた構造解析による設計 設計の自動化、CADの導入 	<p>(注) 高揚程ポンプ水車ランナの疲労破壊の原因究明のため、実揚程型試験などによりランナの振動現象が徹底的に研究された。これが以後の700m級ポンプ水車の開発に大きく寄与した。</p>			
ポンプ水車対応技術	<ul style="list-style-type: none"> Allieviの剛体理論による水撃計算による過渡現象計算 	<ul style="list-style-type: none"> コンピュータによる揚水発電所水路系の過渡現象解析 500m超 高揚程ポンプ水車の技術開発 ポンプ水車ランナの振動現象の解明 中小水力用技術(無給油化、水潤滑など)の開発 電動サーボモータの開発 	<p>(注) 2度にわたる石油ショックの後、国産エネルギーの有効利用が要請され、1980年頃から中小水力向けの低コスト、保守省力化を狙った対応技術が次々と開発された。</p>			
中小水力対応技術	<ul style="list-style-type: none"> 被覆アーク溶接 サブマージアーク溶接 消耗ノズル式エレクトロslag溶接 	<ul style="list-style-type: none"> ランナ羽根の3次元曲面のNC加工技術 	<p>(注) 溶接工法と水車製造技術の関連についての詳細は、図8.1参照</p>			
溶接工法	<ul style="list-style-type: none"> 00₂半自動溶接 	<ul style="list-style-type: none"> リベット接合 鋼板製ケーシング 鋼板溶接構造・現地溶接組立ケーシング 80kg/mm²級高抗張力鋼板の採用 	<p>(注) 3次元曲面加工のNCソフトが日本で開発され、世界で始めて水車ランナの羽根曲面加工に応用された。</p>			
機械加工	<ul style="list-style-type: none"> 鋼板溶接構造・現地溶接組立ケーシング 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼板溶接構造・現地溶接組立ケーシング 18Cr-8Niステンレス鋼ランナ 13Crステンレス鋼ランナ 炭素鋼溶接ランナ ペルトン水車一体構造ランナ 	<p>(注) 1972年、九州電力 大平発電所向けポンプ水車のケーシングに80kg/mm²高抗張力鋼が一部に採用されたが、その後、この種高抗張力鋼は水車には採用されていない。</p>			
ケーシング製作技術	<ul style="list-style-type: none"> 鋼板製ケーシング 鋼板溶接構造・現地溶接組立ケーシング 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼板溶接構造・現地溶接組立ケーシング 18Cr-8Niステンレス鋼ランナ 13Crステンレス鋼ランナ 炭素鋼溶接ランナ ペルトン水車一体構造ランナ 	<p>(注) ランナの溶接組立には、三次元多軸溶接ロボットも一部に用いられている。</p>			
ケーシングおよびランナの製作技術の変遷	<ul style="list-style-type: none"> 炭素鋼製ランナ 18Cr-8Niステンレス鋼ランナ 13Crステンレス鋼ランナ 炭素鋼溶接ランナ ペルトン水車一体構造ランナ 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼板溶接構造・現地溶接組立ケーシング 80kg/mm²級高抗張力鋼板の採用 13Cr高Ni ステンレス鋼ランナ 13Cr高Ni ステンレス鋼溶接ランナ 				

平成18年度 資料登録候補一覧表

番号	資料名称	資料形態	所在地	製作者	製作年	資料概要
1	薩上発電所用 ペルトン式水車	実体 (展示中)	京都市上下水道局 琵琶湖疏水記念館	東京石川島造船所	1890	わが国初の事業用水力発電に用いられた水車。19台の水車の中の2台の国産水車の内の1台。琵琶湖疏水記念館にて保存されている。
2	駒橋発電所用 横軸双輪 単流横軸フランシス水車	実体 (展示中)	東京電力株式会社 電気の史料館	スイス Escher Wyss社	1907	1907(明治40)年に建設された当時の6台の水車のうちの1台を保管中(Escher Wyss製)。当時わが国最大の水力発電所で東京へ長距離送電。
3	田澤式軽便タービン水車	写真	株式会社東芝 京浜事業所	芝浦製作所/電業社原 動機製造所	1909	明治36年から大正6年にかけて、地方村落の木製水車に代わり洋式水車による水力利用を普及させるために延162台製作された簡易水車。
4	岩室発電所用 1万馬力フランシス水車	実体 (展示中)	株式会社日立製作所 小平記念館	日立製作所	1915	わが国初の1万馬力のフランシス水車(当時国産最大出力)で、ケーシングとランナの実体が保存展示されている。
5	旧八百津発電所 本館 水車および発電機一式	実体 (展示中)	岐阜県加茂郡八百津町 旧八百津発電所資料館	電業社原動機製造所	1923	当初設置された米国製水車がケーシング破裂事故を起こし、1923年に入れ替えられた国産水車。発電所建屋と主機4台中3台が保存されている。残り1台は北陸電力 足羽発電所に移設され、現在も稼働中。
6	鴨緑江 水豊発電所用 フランシス水車	写真/資料	株式会社東芝 京浜事業所	電業社原動機製造所	1941	当時世界最大容量(105,000kW)のフランシス水車(わが国重電機業界初の世界記録品)。資料を見ると、従来実績をはるかに超える大容量水車の製造に大変な苦勞をしたことがわかる。
7	沼沢沼発電所用 横軸タンデム式ポンプ水車	写真/資料	株式会社日立製作所 日立事業所	日立製作所	1952	わが国最大容量(水車:23,000kW)の横軸タンデム式ポンプ水車。なお、これに用いられた水車ランナとポンプインペラは、機器の撤去後、東京電力 電気に史料館にて保管中。
8	佐久間発電所用 フランシス水車	実体 (使用中)	電源開発株式会社 佐久間発電所	日立製作所/東芝	1956	戦後復興期に最初に作られた当時わが国最大容量(96,000kW)のフランシス水車。戦後の国内メーカーの技術育成もあって2社に各2台分割発注された。
9	大森川発電所用 ポンプ水車 および 同発電所工事誌	実体/資料	四国電力株式会社 大森川発電所	日立製作所	1958	わが国最初のフランシス形ポンプ水車(12,200kW)。なお、この発電所の工事誌を見ると、初めての揚水発電所建設に際して非常に手間をかけて技術検討をしたことが窺われる。
10	諸塚発電所用 立軸タンデム式ポンプ水車	写真/資料	株式会社日立製作所 日立事業所	日立製作所	1960	わが国最大容量(水車:54,000kW)の立軸タンデム式ポンプ水車。
11	奥只見発電所用 フランシス水車	実体 (使用中)	電源開発株式会社 奥只見発電所	東芝	1960	戦後の大規模電源開発で作られた当時わが国最大容量(137,000kW)のフランシス水車。1981年北陸電力有峰第一発電所用機(266,000kW)ができるまで、国内最大容量機であった。
12	畑薙第一発電所用 ポンプ水車	実体 (使用中)	中部電力株式会社 畑薙第一発電所	米国 Allis Chalmers社 /日立製作所	1961	わが国では2番目であるが、大森川発電所のポンプ水車を大きく上回る大容量(45,400kW)のフランシス形ポンプ水車。
13	大島発電所用 カブラン水車	実体 (使用中)	電源開発株式会社 大島発電所	日立製作所	1963	カブラン水車として記録的高落差であるとともに、わが国最大出力(100,000kW)のカブラン水車。
14	黒部川第四発電所用 立軸ペルトン水車	実体 (使用中)	関西電力株式会社 黒部川第四発電所	ドイツ Voith社/日立製 作所	1964	わが国最大容量(95,000kW)の立軸6射ペルトン水車。当時、この機種の国内メーカーの実績が少なかったため、2台は経験豊富なドイツVoith社から輸入され、2台が日立製作所に発注された。
15	喜撰山発電所用 ポンプ水車	実体 (使用中)	関西電力株式会社 喜撰山発電所	東芝/日立製作所	1968	当時世界最大容量(240,000kW)でかつわが国最高揚程(230m)のフランシス形ポンプ水車。リスク分散のため2社に各1台発注された。
16	米岡 Ludington発電所用 ポンプ水車	写真/資料	株式会社日立製作所 日立事業所	日立製作所	1971	米国向けの低落差・大容量(343,000kW)の巨大寸法のフランシス形ポンプ水車(ランナ径 8.375m)。ランナはエレクトロスラッグ溶接で組立てられた。
17	オーストラリア Tumut 3発電所用 タンデム式ポンプ水車	写真/資料	株式会社東芝 京浜事業所	東芝	1971	当時世界最大容量(水車:283,500kW;ポンプ:194,000kW)のオーストラリア向け立軸タンデム式ポンプ水車。世界で初めて大容量立形タービンポンプの空転起動に成功。

番号	資料名称	資料形態	所在地	製作者	製作年	資料概要
18	沼原発電所用 ポンプ水車	実体 (使用中)	電源開発株式会社 沼原発電所	日立製作所	1973	当時世界最高揚程(528m)のフランシス形ポンプ水車。以後の世界の高落差ポンプ水車発展の元となったポンプ水車。
19	馬瀬川第一発電所用 斜流ポンプ水車	実体 (使用中)	中部電力株式会社 馬瀬川第一発電所	日立製作所	1975	世界最大容量(149,000kW)の斜流ポンプ水車。主軸上部に設けられたランナ羽根操作用の油圧サーボモーターは、直径5mもある大きなもの。
20	赤尾発電所用 バルブ水車	写真/資料	富士・フオイトハイドロ 株式会社	富士電機	1978	当時世界最大容量(34,000kW)のバルブ水車(ランナ径 5.1m)。わが国の低落差大容量バルブ水車発展の元となった。
21	オーストラリア Wivenhoe発電所用 タンデム式ポンプ水車	写真/資料	株式会社東芝 京浜事業所	東芝	1980	世界最大容量(水車:325,000kW;ポンプ245,000kW)のオーストラリア向け立軸タンデム式ポンプ水車。世界でも他に類を見ない高度の制御を採用。
22	旧ユースラビア Bajina Basta発電所用 ポンプ水車	写真/資料	株式会社東芝 京浜事業所	東芝	1982	当時世界最高揚程(621.3m;初めて600m超)の国産フランシス形ポンプ水車。世界に高落差ポンプ水車の実用性を知らしめた。
23	カナダ Revelstoke発電所用 フランシス水車	写真/資料	富士・フオイトハイドロ 株式会社	富士電機	1984	国産では2番目に大きい容量(495,000kW)のカナダ向けフランシス水車。2分割ランナを現地でボルト締め(ランナクラウン側)と溶接(バンド側)で組立てる新しい工法を採用。
24	ベネズエラ Guri II 発電所用 フランシス水車	写真/資料	株式会社日立製作所 日立事業所	日立製作所	1984	当時世界最大容量(730,000kW)の日本製フランシス水車。台数も10台と多く、国内メーカー2社のコンソーシアムにより製作。
25	米国 New Martinsville 発電所用 バルブ水車	写真/資料	富士・フオイトハイドロ 株式会社	富士電機	1988	国産最大かつ世界でも最大級の巨大寸法(ランナ径:7.3m)の超低落差(落差:3.3-6.3m)の米国向けバルブ水車。
26	只見発電所用 バルブ水車	実体 (使用中)	電源開発株式会社 只見発電所	日立製作所	1989	世界最大容量(65,800kW)のバルブ水車。実績をばるかに超える水車であったため、1/8模型、1/4模型などを作成して耐震強度試験を実施。
27	矢木沢発電所用 可変速揚水発電機器	実体 (使用中)	東京電力株式会社 矢木沢発電所	東芝	1990	1965年から運転を開始している既設機を1990年に改造し、世界初の交流二次励磁方式による大容量(85,000kVA)可変速揚水発電機器を完成。
28	大河内発電所用 可変速揚水発電機器	実体 (使用中)	関西電力株式会社 大河内発電所	日立製作所	1993	世界初の本格的可変速揚水発電機器(発電電動機:395,000kVA;ポンプ水車:330,000kW)。非常に応答速度の速い出力制御を実現。
29	ブルガリア Chaira 発電所用 ポンプ水車	写真/資料	株式会社東芝 京浜事業所	東芝	1994	世界で初めて揚程が700mを超えた当時世界最高揚程(701m)のフランシス形ポンプ水車。
30	葛野川発電所用 ポンプ水車	実体 (使用中)	東京電力株式会社 葛野川発電所	日立製作所/三菱重工	1999	世界最高揚程(778m)のフランシス形単段ポンプ水車。単機容量も412,000kWで神流川発電所用機に次いで世界第2位。
31	神流川発電所用 ポンプ水車	実体 (使用中)	東京電力株式会社 神流川発電所	東芝	2005	世界で初めて高落差ポンプ水車にスリットランナを採用。なおこのポンプ水車の単機容量(480,000kW)は世界最大。揚程(728m)も葛野川発電所用機に次いで世界第2位。

本報告は平成18年度科学研究費補助金特定領域研究『日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—』
計画研究「産業技術史資料に基づいた日本の技術革新に関する研究」(17074009) の研究成果である。

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第8集

平成19(2007)年3月30日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田 宇征 田里 誠、エディット 久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク

正誤表(第8集3編 発電用水車の系統化調査)

年月日	箇所	誤	正
2007年3月30日	p178 表中 「世界・日本の状況」行 の 「1990～2000」の列	▼19731ドル100円時代に	▼1973 1ドル100円時代に