

最近のフランシス水車に就いて

深 栖 俊 一* 高 橋 春 夫**

The Recent Development of Francis Turbine

By Shun'ichi Fukasu and Haruo Takahashi

Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

With the advance of hydroelectric resource development programme, large capacity Francis turbines are being completed one after another to serve the growing needs of Japanese industries.

These turbines are the products that incorporate several improvements for the betterment of operation efficiency, positiveness of maintenance, economy of materials and the like, which could have been attained by the innovated design, supplementation of manufacturing facilities and elevated manufacturing technique.

The characteristics of hydraulic turbines have been greatly improved as a result of application of preliminary model tests or efficiency test at installation site. In fact, the major part of the credit in the production of better turbines is to be occupied by the testing facilities. The thorough investigation in the materials could never be dispensed with for securing high reliability, excellent wear- and corrosion-resistance of the material. And such investigation is possible only by recent completed testing devices as well as ameliorated method of machining.

The controlling equipment has also undergone remarkable improvement in operating features, maintenance and appearance.

The writers describe in detail these noteworthy points of improvement.

〔I〕 緒 言

貯水池或いは調整池を有する中落差領域の大容量フランシス水車が各メーカーにより近来引続き製作され、経済復興5箇年計画による電源開発は愈々その最盛期を迎えるに到つた。これ等の水車は何れも運転の効率を高め又保守の確実を期するため各部構造若しくは材料に関し種々の改良が行われ、一方水力実験室に於ける多数の模型試験或いは既設又は新設水車の据付現場に於ける効率試験等により著しく水車の性能が改善されている。日立製作所でこの程完成された丸山発電所用 70,000 kW 水車或いは神通川第一発電所用 48,000 kW 水車等はその代表例であつて、本邦最大容量の記録品としてこれ等の

* ** 日立製作所日立工場

製品は斬新な設計及び製作内容を含んでおり、こゝにその一部を紹介すると共に尙参考迄に高落差大容量フランシス水車の製作限界に関し多少考察せる結果を述べる。

〔II〕 水車性能の向上

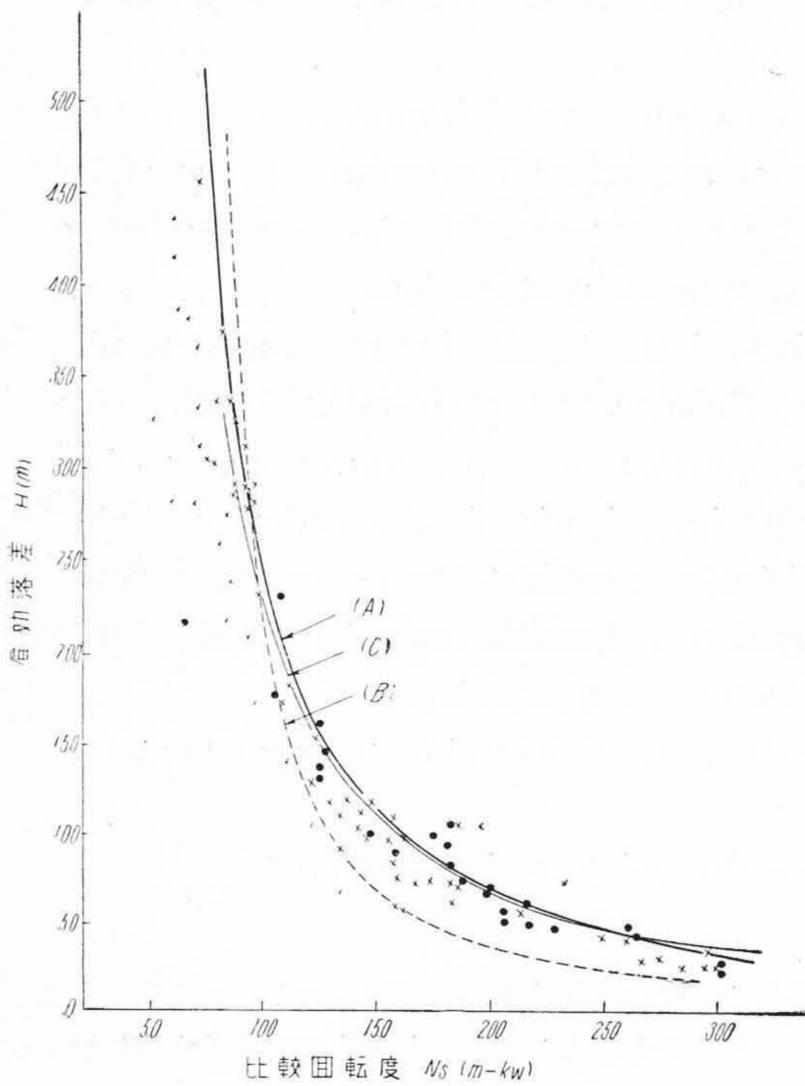
(1) 有効落差対比較回転度の限界

近来多数の大容量フランシス水車が相續いて工場に於て完成し又製作中であるが、これ等の水車の大体の傾向としては極力建設若しくは運転に要する経費及び資材を節減し尙最大負荷時の運転効率を増昇するため第1表(次頁参照)の如く、設置台数を減少して単位容量を増大し、しかも各水車の比較回転度は、それぞれの適用落差に対し極力高い数値が採用されつゝあるように見受けられる。

これ等の関係は第1図に示される如く本邦にて昭和20年以降に製作された主要な水車を特に分けて表示すれば、従前のものはかなり両者の関係を示す印点が散乱しているに反して昭和20年以後のものは(沼沢沼発電所用水車は揚水式のため特例として比較回転度は小さい)大体同図中の限界曲線近く或いはこれを僅か超過せる数値が選定されていることが知られる。図中の限界曲線Aは昭和17年に水力設備委員会にて制定された限界曲線で

$$N_s = \frac{13000}{H+20} + 50 \text{ (m-kW 単位)} \dots (1)$$

による数値を示し、その他に最近の文献により発表され米国の例をそれぞれB及びC曲線として示す。



- (A) 実線 $N_s = \frac{13,000}{H+20} + 50$ (m-kW 単位)
(水力発電所設備特別委員会決定)
- (B) 点線 $N_s = 3,814 \left(\frac{5,050}{H(\text{ft})+32} + 19 \right)$ (m-kW 単位)
(米国)
Hand Book by Creager & Justin
1949 年版
- (C) 細線 独逸 (Z.V. D.I. 1951)

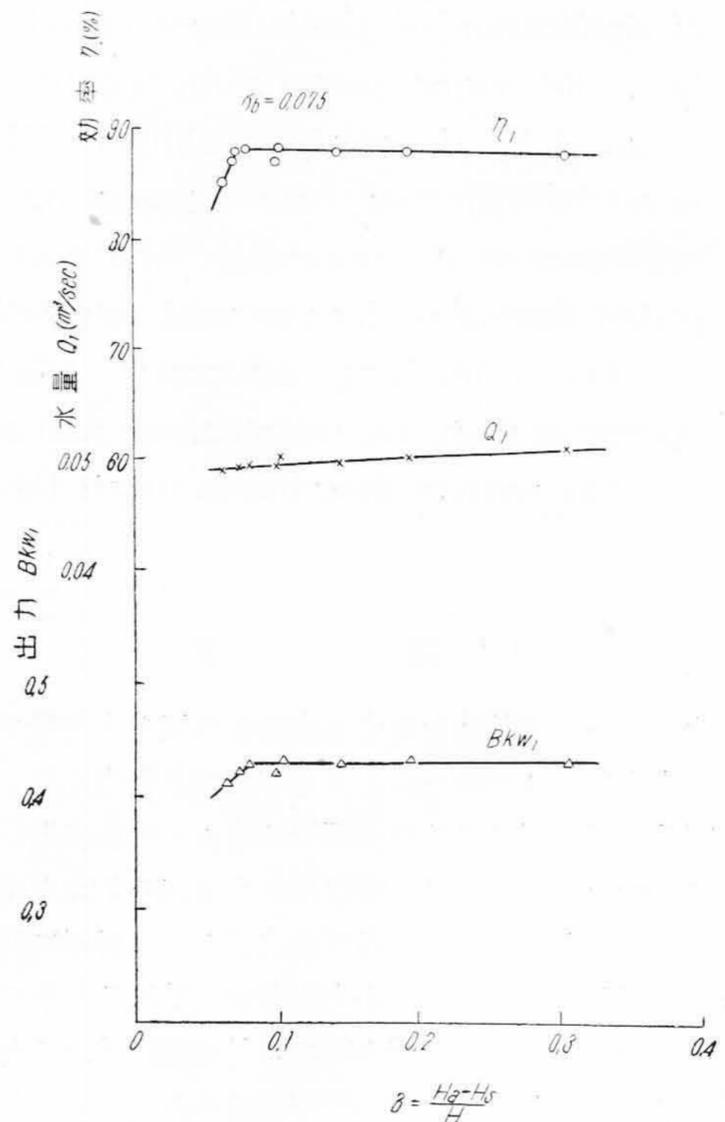
第1図 フランシス水車の落差対比較回転度曲線
●印..本邦水車にて昭和20年以後に新設された例
×印..その他

Fig. 1. Curve of Specific Speed Against Effective Head for Francis Turbine

A曲線は我国に於てB及びC曲線より相当以前に制定されたにもかかわらず後者より多少高い数値となつており、最近の我国の水車が上記の如くA曲線を寧ろ上回る迄に到っていることは後述の如く近来水力実験室に於て多数の模型フランシス水車により空洞現象試験を実施し、或いは既設又は新設水車の据付現場に於ける多数の試験結果等によりランナの性能が著しく向上していることによると見て差支えないと思われる。

(2) 吸出高及び空洞現象性能

フランシス水車が設置された当初即ち大正年間に建設されたものは発電機床面を洪水面上に設ける等の関係より吸出高を非常に大きくとり、水車停止時にて4~5m程度としたものがかなりあつた。これ等の中には明らかに軽負荷時或いは甚だしい場合最大負荷時に於てもランナ出口部又は吸出管内にて水流中に空所を発生し騒音振動等を引起していることが認められるものがある。しかしフランシス水車にあつては、ランナ出口部に万一空所を発生し、これがためランナが相当短時間に腐蝕するような状態であつても、その外部に表われる騒音又は振動は一般にカプラン水車の場合より微弱である。従つて、



第2図(a) 模型フランシス水車の空洞現象性能試験結果例

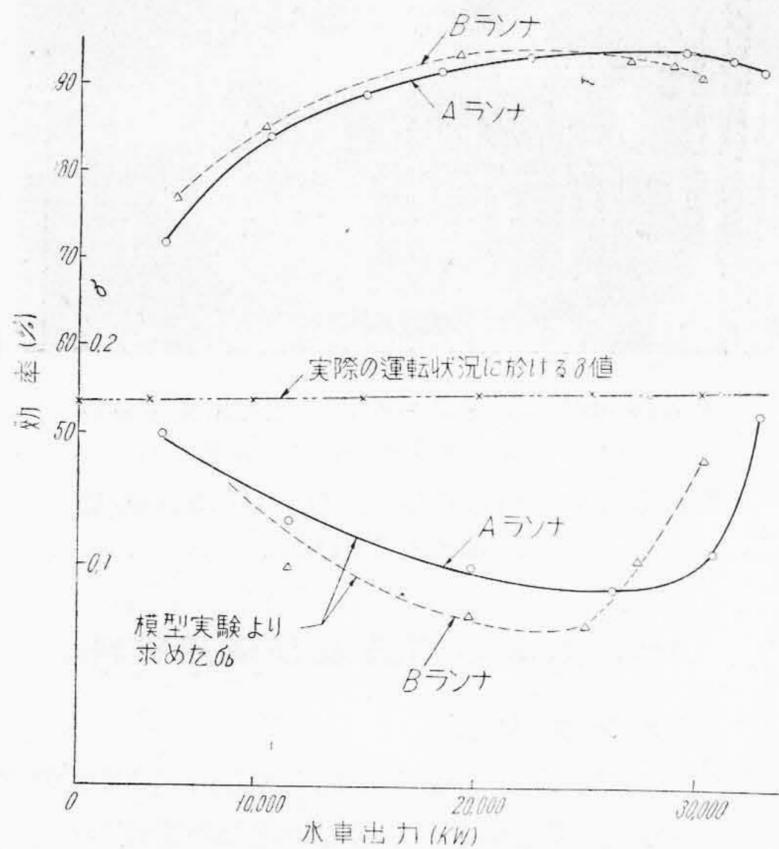
Fig. 2.(a) Cavitation Characteristic Curve of Model Francis Runner

最近のフランシス水車に就いて

第1表 本邦に於ける豎軸フランシス水車製作例

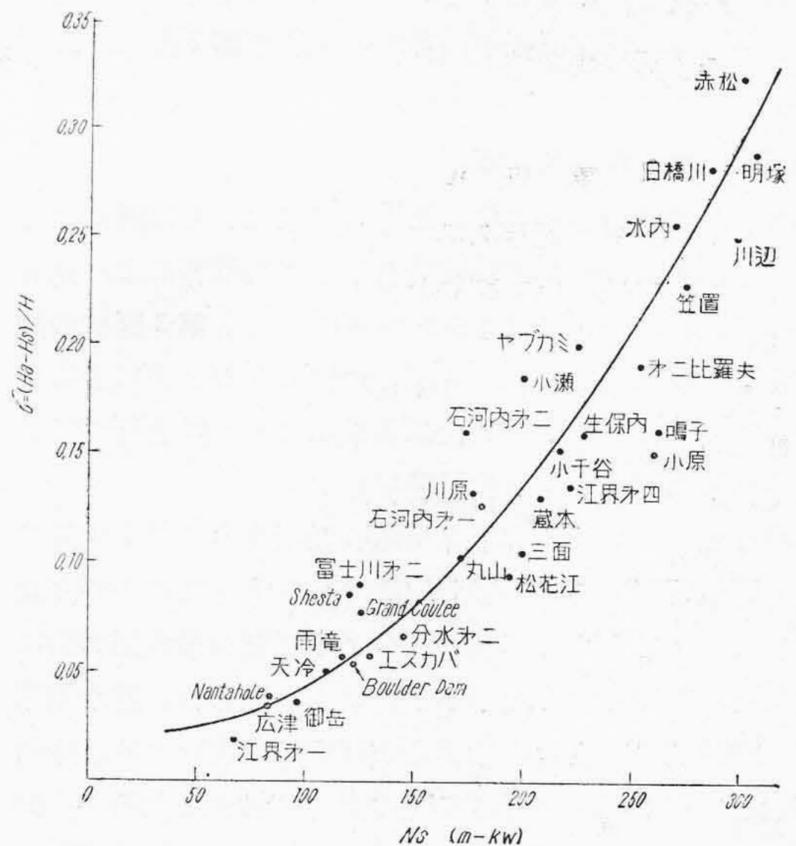
Table 1. Large Capacity Vertical Francis Turbine Completed in Japan

納先	所名	出力 (kW)	落差 (m)	水量 (m ³ /sec)	回転数 (r.p.m.)	型式	台数	製作者	運転開始
関西電力 北陸電力 中部電力 九州電力	丸山第一	70,000	89.5	96.5	163.8	FSS-V	2	日立-1 電業-1	昭-29
	神通川	48,000	65.0	81.3	171.5	FSS-V	2	日立 立業	昭-28
	奥泉	47,000	168.0	30.0	300/250	FSS-V	2	日電 業立	昭-29
	上推葉手	45,000	144.5	36.6	277	FSS-V	2	日電 業立	昭-29
関西電力 東京電力 関西電力 東京電力 関西電力	椿原	42,000	69.0	72.2	180	FSS-V	1	三 J. M. 菱	昭-28
	信濃川	39,000	109.8	39.2	214/257	FSS-V	5	J. M. V. 業	昭-14
	黒部川	33,000	280.0	11.0	500/600	FSS-V	3	日電 業	昭-15
	秋元寺	32,000	171.4	22.1	375	FSS-V	2	日電 業	昭-14
関西電力 東京電力 関西電力 関西電力	小千谷	27,500	48.2	64.8	167	FSS-V	3/5	日立 立	昭-25
	打保	27,000	69.0	43.5	225	FSS-V	1	日富 A. C. 業	昭-28
	佐久	26,900	112.2	26.4	300	FSS-V	3	A. C. 業	昭-3
	黒部川	26,000	178.9	17.4	375/450	FSS-V	3	日電 業	昭-11
関西電力 中部電力 東北電力 中部電力 東北電力	市荒川	26,000	69.0	42.2	200	FSS-V	2	日電 業	昭-19
	御岳	25,000	229.0	12.8	500/600	FSS-V	3	日電 業	昭-19
	平岡	25,000	46.0	—	150/180	FSS-V	3	日電 業	昭-26
	伊南川	25,000	109.0	25.5	300	FSS-V	1	日電 業	昭-28
姫川電力 東北電力 北海道電力 関西電力 関西電力	大井川	23,500	115.1	20.8	500/600	FSS-V	3	日電 業	昭-11
	沼沢	23,000	215.5	12.1	500/600	FDS-H	2	日電 業	昭-26
	姫川第七	23,000	99.4	25.9	300/360	FSS-V	2	日電 業	昭-29
	宮下	21,800	41.0	58.4	166.7	FSS-V	4	日電 業	昭-21
北海道電力 関西電力 関西電力	雨龍	21,700	170.0	15.5	300	FSS-V	3	日電 業	昭-15
	小牧	21,600	62.7	36.6	—	FSS-V	4	EW-2 IPM-2	昭-5
	寝覚	21,000	64.5	38	200/240	FSS-V	2	日電 業	昭-13



第2図(b) 模型試験結果より得られた実物水車の空洞現象、性能、限界と実際運転状況との関係例

Fig. 2.(b) Relation Curve between Operating σ and σ_b for A and B Runner



第2図(c) フランシス水車の N_s 対 σ 実績例

Fig. 2.(c) Operating σ against N_s of Francis Turbine

従来フランス水車は概して吸出高に就いては多少高目の数値が採られて来たように思われる。

一般に水力実験室に於ける模型試験結果と実際発電所に於ける実物試験結果とを比較するには Thoma のキャビテーション係数 σ によつて比較される。

$$\sigma = (H_a - H_s) / H$$

ここに H_a = 大気圧 \approx 標高 0m, 20°C にて 10m

H_s = 吸出高

H = 有効落差

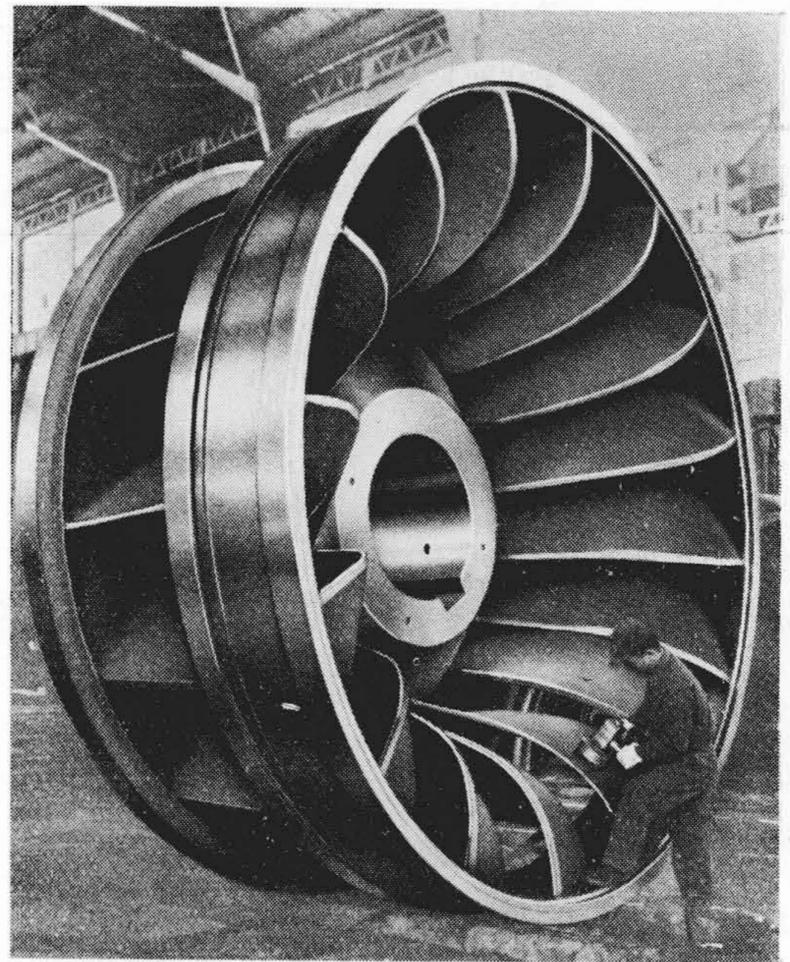
最近日立製作所日立工場にて施行されたフランス模型水車のキャビテーション試験結果の一例を第2図に示す。第2図(a)は模型水車の或る案内羽根開度に於ける σ 限界値、第2図(b)はそれ等の σ 限界値を集積してこれを実物水車に換算せるもので、これに実際運転の際変動する放水面を σ 数値にて表わし、且つ同水車ランナの効率を併せて掲げてある。フランス水車にては一般に本例の如く σ 限界値が無負荷に近い軽負荷に於て σ 運転値より上昇する例が多いように見受けられる。一般にこのような軽負荷時に於ては空所発生に依り振動を誘起するため、実際運転に当つては極力かような無負荷に近い範囲の運転を避けるようにし、或いは万一必要止むを得ない際は吸出管に空気を吸入せしめる等の処置が構ぜられている。かくの如き試験がフランス水車に対しても次第に実施され正規負荷時或いは空所発生時の流動状態を透明なドラフトパイプを通して観察しながら速度分布を測定し得るに到つたことは非常な進歩であつて、今後の設計製作に大きな寄与をなすものと考えられる。

尚参考迄に現在運転中の各所の σ 値を第2図(c)に掲げる。

(3) 水車効率

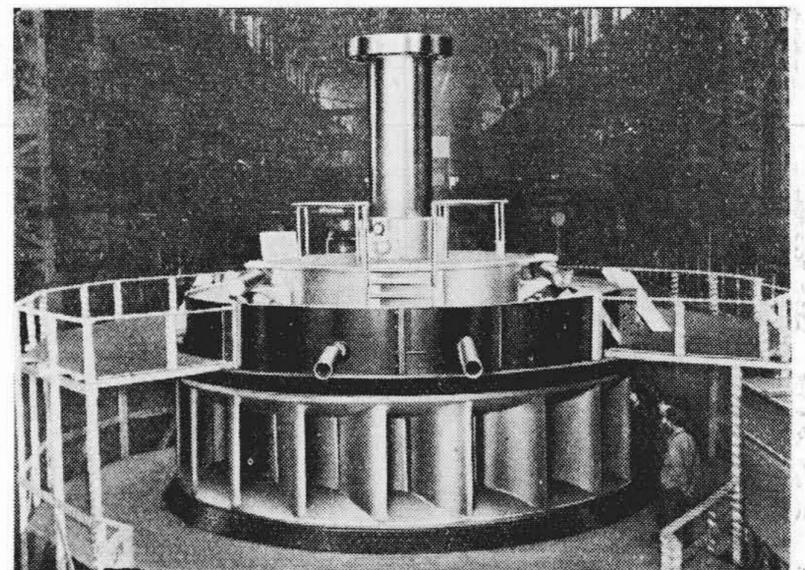
水車の効率が近年次第に上昇して来たことは既に数多くの運転実績、模型試験結果若しくは文献等により例証されているが⁽¹⁾、フランス水車に於ても第3図例の如きランナの羽根形状、角度或いは枚数等の差異による影響に就いて、多数の模型及び実物により比較を行つて、その効果に対する詳細の研究を行つている。

大容量フランス水車を実際に運転するに對し考究すべき問題としては、調整池用には余り大きな落差の変動は少なく主として最高効率点をどの程度迄最大出力側に近よせるかに関する問題が多いように思われ、貯水池用には季節的に落差の変動範囲が非常に大きいため基準落差をどの程度に定めれば年間の出力が最大となるかの問題が多いように見受けられる。従つてランナの性能としてもその研究にはこの二様の問題に分けて検討しなくてはならない。第4図に前者の例に該当する模型試験結果を示す。



第3図(a) 関西電力株式会社丸山発電所用
水車ランナ仕上作業状況

Fig.3.(a) Finishing of Runner



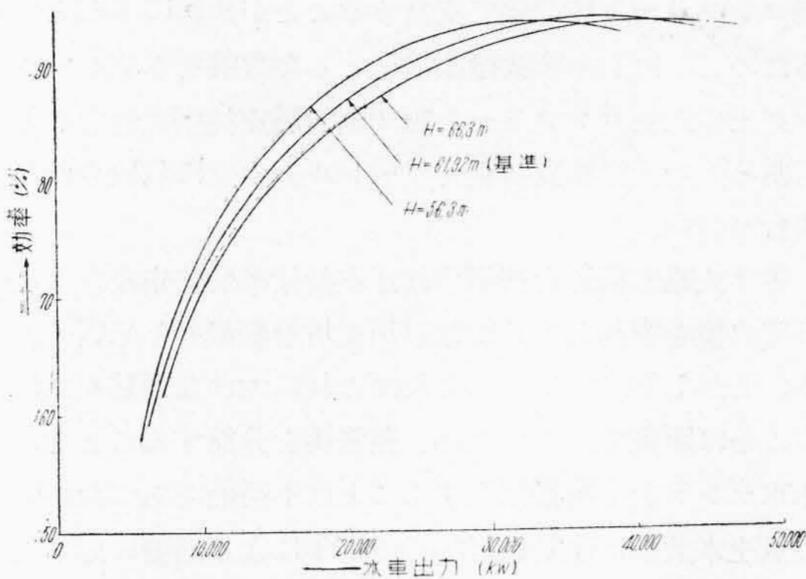
第3図(b) 関西電力株式会社丸山発電所納
70,000 kW 水車工場組立

Fig.3.(b) Shop Assembly of 70,000kW
Francis Turbine

〔III〕 水車の構造及び使用材料

(1) ランナ材質

ランナの材質としては長期運転中生じ得べき腐蝕磨耗による補修の頻度を極力軽減せしめるため最近の鑄造及び溶接技術の進歩により大容量水車には殆どすべて最初製作時に普通鑄鋼の所要羽根面にオーステナイト系不銹鋼 (Ni-8%, Cr-18%) の溶接肉盛が施行され或いは積極的にパーライト系不銹鑄鋼 (Cr-13%) 又はオーステ



第4図 北陸電力株式会社神通川第一発電所納
48,000 kW 水車効率

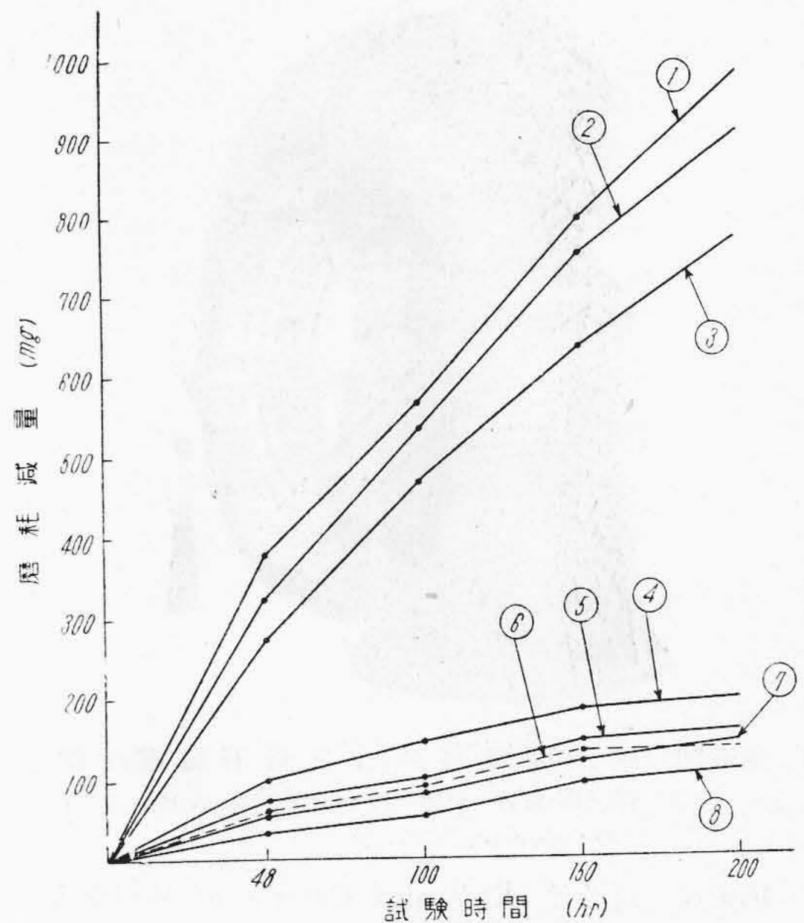
Fig. 4. Expected Efficiency Curves of
48,000 kW Francis Turbine for
Various Heads

ナイト系不銹鋼の如き特殊鋼にて製作されるに到つた⁽²⁾。

これ等の材料の使用に当つては材料の成分、熱処理或いは強度等の選択に十分な検討を要するは勿論であつて、例えば同じ材料を使用してもその熱処理の相違による材質の組織若しくは硬度の如何によつてはランナの磨耗腐蝕量は相当の差異を生ずる。日立工場ではすべて自家の鑄造或いは製罐工場に於てこれ等のランナの鑄造又は熔接肉盛作業を行つているが、その作業に当つては日立研究所材料試験室に於て莫大なる材料試験片により綿密なる基礎研究を行い細部の作業工程を定めると共に、完成品に対しても実物より採取せる試験片より独特の流水中の土砂による磨耗試験装置及び空洞現象による腐蝕試験装置により迅速にその耐磨耗性或いは耐腐蝕性を検査確認の上製品を納入し得ることゝなつた。尙工場には既設の 300,000 V レントゲン装置の他に先般 1,000,000 V レントゲン装置も設けられ、如何なる大容量のランナも容易に内部を透視し得ることゝなつた。

最近製作完了せる丸山及び神通川第一両発電所用ランナはそれぞれ仕上り約 30 t の記録品であるが、何れもパーライト系不銹鋼にて製作され、尙羽根の要所にはオーステナイト系不銹鋼にて熔接肉盛されている。実物より採取されたパーライト系不銹鋼の試験片により磨耗並びに腐蝕試験結果では何れも鑄鋼に比しては格段の耐久性を示しており、尙オーステナイト系肉盛部分はパーライト系鑄鋼部分に比して一層強力な耐久性を有している。又レントゲン装置による検査の結果はその内部にも何等の材質上の欠陥も認められなかつた。

これ等は従来より長年に亘る日立工場の鑄造及び熔接技術の経験、関係者の絶大なる努力に加えて上述の如き



第5図 砂を含む流水による各材料の磨耗試験
結果例

- ① Mn SC-47
- ② SF-55
- ③ 特殊 SC-47
- ④ 13% Cr 鑄鋼
- ⑤ 特殊 13% Cr 鑄鋼
- ⑥ 18-8 熔接
- ⑦ 18-3 鋼
- ⑧ 特殊 18-3 鑄鋼

Fig. 5. Example for Experimental Results
of Erosion Loss by Sand-Water Jet

進歩せる作業研究分析の三者の総合結果によるものと考ええる。

参考迄に第5図にその磨耗試験結果例を示す。

(2) 熔接スピードリング及びケーシング

水車本体の主要部分たるスピードリング及びケーシングに全熔接構造が採用されたのは昭和 10 年に製作された湯野上発電所用 3,660 kW 水車が我国に於て最初であつて、その後引続き多数の製作品を出した⁽³⁾。熔接構造を採用すれば鑄造品に比し製作工程を短縮し均一な材質が得られる。

この場合大容量フランシス水車にあつて上表例と同じくスピードリングを鑄鋼にて製作し、これにケーシングを工場内にて熔接しフランジ接手による分割構造、或いは据付現場に於て熔接接続する構造もかなり採用されているが、かくの如き構造では例えば前者の場合スピードリングの鑄造終了後その合わせ目及びカバー取付部を機械加工するを要し、これにケーシングを熔接し熱処理を



第6図 電源開発株式会社猿石発電所納
16,500kW 水車用溶接構造のスピード
リング及びケーシング

Fig.6. Speed Ring and Casing of Welded
Construction

行つて更に又精密に機械加工を行わなくてはならぬ。従つて鑄造と溶接の組み合わせでは十分その目的を達することは困難であつて、出来得れば上述の如く両者を鋼板全溶接とし各分割片を熱処理終了後機械加工の方が望ましく、かくすれば著しくその製作工程を短縮することが出来る。若しケーシングの入口径が約 3,000mm 以上に達しこれをフランジ接手にて分割製作することが有利でない場合はそれぞれを別箇に輸送可能の範囲迄溶接接続して据付現場に於てスピードリングにケーシングを銲接又は溶接により合わせることにすればよい。

スピードリングを溶接構造とするには胴板は円形のリングを水圧プレスで曲げて皿形球面とし、ステーベーンは別に2枚の厚板を合わせて流線形に削成する。ステーベーンと胴板の溶接部は最も重要であつて、同部の強度を増し且つ耐摩耗度を増すためにはステーベーンを胴板より突抜の構造とし胴板の両面にて溶接すれば確実である(実用新案第400262号)。日立工場にてはかくの如き作業に当初以来幾多の苦心を重ねてスピードリングは初期には中落差以下の中容量程度に限られたものを次第に大容量のものを製作することが可能となり、最近はこの有効落差 100m の程度の領域迄拡張し得るに到つた。

第6図に最近工場に於て製作中の猿石発電所納 16,500kW 水車用スピードリング及びケーシングを示す。

(3) 単床式建家構造に於ける
水車ランナ搬出入装置

縦軸構造の水車では容量の増大するに伴ないその建家構造を二床式とし発電機をビーム式或いはアーチ式の鉄

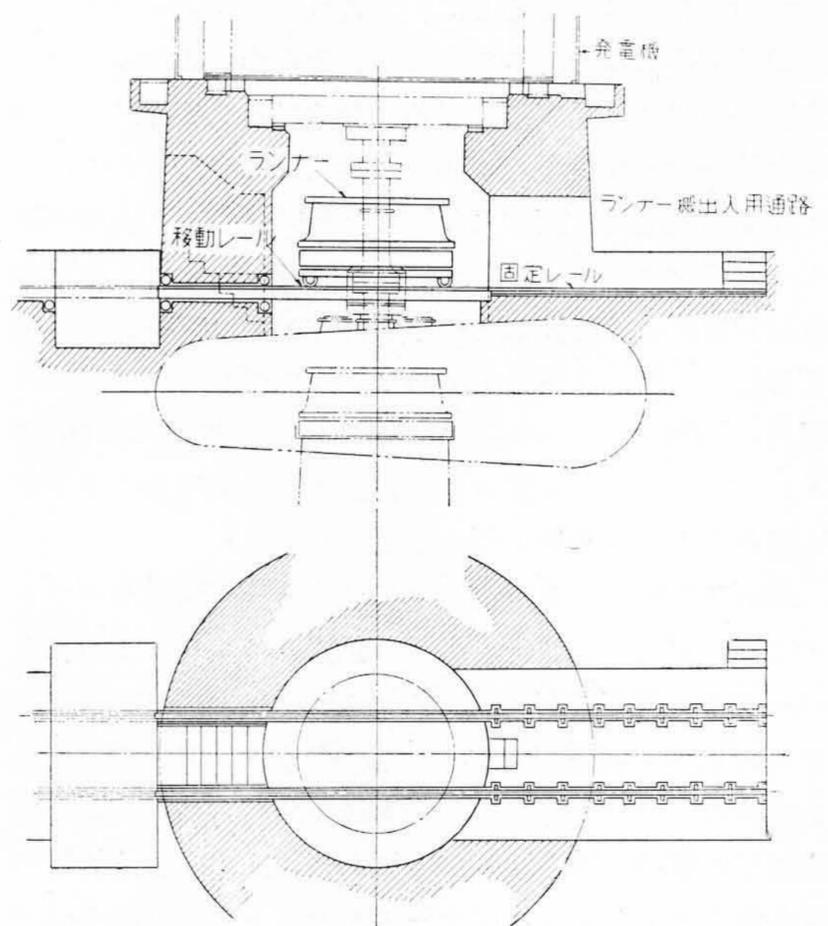
筋コンクリート製の梁で支持することが次第に困難となるため、これを単床式建家構造とし発電機を水車ケーシング上の鉄筋コンクリート製(鋼板製支持胴を含むこともある)の円筒状支持胴(パーレル)の上に設置される場合が多い。

単床式建家構造を採用すれば支持架構を安定ならしめ日常点検を容易とし且つ建設用資材を軽減せしめ得られる。しかし従来の構造によればこれに大きな通路をあけることは困難であつたため、発電機を分解することなく水車ランナを分解搬出入することは不可能であつたが、最近土木並びに建築施行技術の進歩により必要に応じてこれに通路をあけることも可能となり、水車側のみを単独に分解しランナを搬出入し得ることゝなつた。

この場合ランナ主軸、中間軸、水車カバー類又はガイドベーン等を搬出入するに簡単な装置を設け極力短時間に作業を終ることが望ましい。これがために新らしく考案実施されている例を次に述べる。

(A) 移動レール式

部品の吊揚げ又は吊降しは発電機下部ブラケット下側にとりつけられた2台のホイストで行い。その搬出又は搬入毎に第7図(a)に示さたる如き予め側方に置かれてある移動レールを水車室上部迄引込み、同レール上の台



第7図(a) 単床式建家構造に於ける移動レール式ランナ分解装置

Fig.7.(a) Turbine Runner Dismounting Device by Removable Rail Method

車に部品を載せて外部に搬出又は搬入することが出来る。この装置は最も簡単な方法で相当大容量の水車に迄これを適用することが出来る。

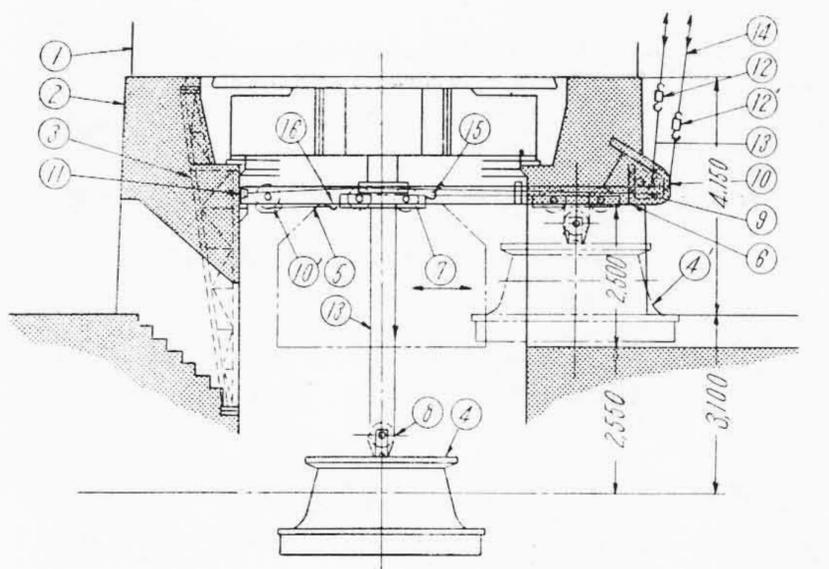
日本国有鉄道小千谷発電所 27,500 kW 水車に最初に適用されて以来、その他にも相当採用され好成績を収めている⁽⁴⁾。

(B) 移動滑車式

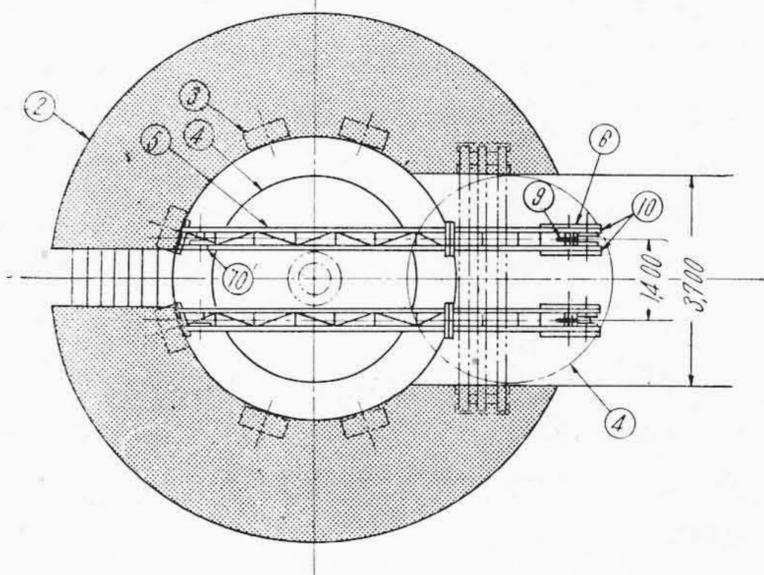
バーレル内水車室上部に設けられた2本のレール上に移動式のトラック型滑車を介し、天井起重機の主巻及び

補巻フックの先にロープを延長せしめてランナ、主軸、中間軸及び水車カバー類等の部品を吊上げ、これ等を主巻及び補巻の操作によりその儘外部に搬出又は搬入せしめることが出来る。

第7図(b)は本装置によりランナを吊出す場合の作業を示すもので、吊りロープ止め金具⑩に固定された吊りロープ⑬はトラック型移動滑車⑦を介してその中央部にランナ④に接続された吊り金具⑧を懸垂させ、その一端を固定滑車(吊上用)⑨に掛け上端を平衡ビーム⑫



分解装置断面図

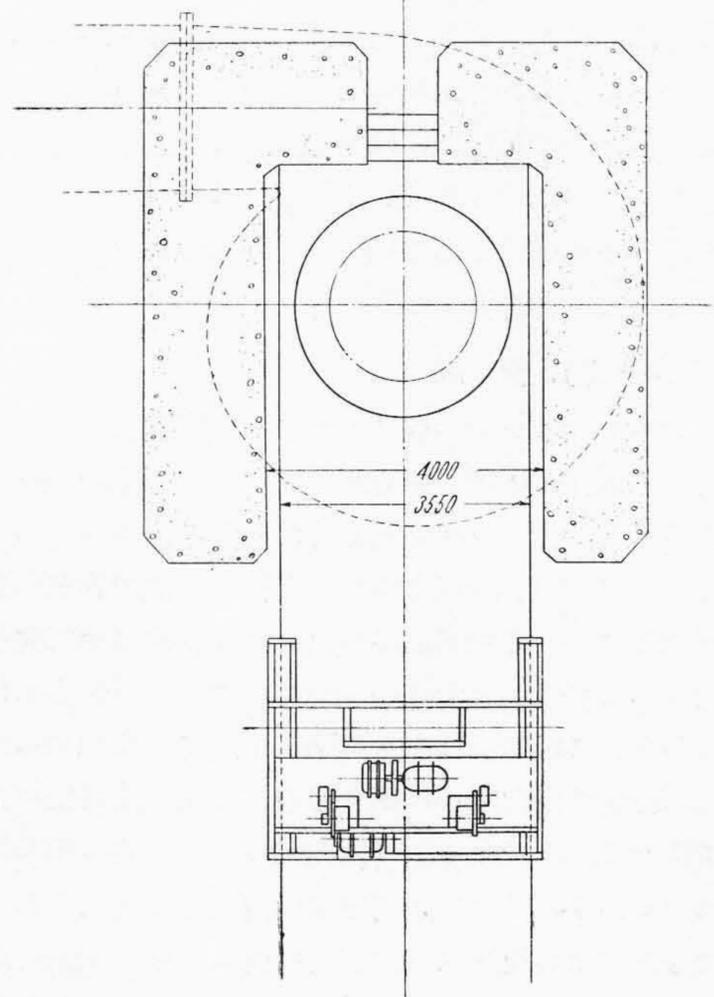
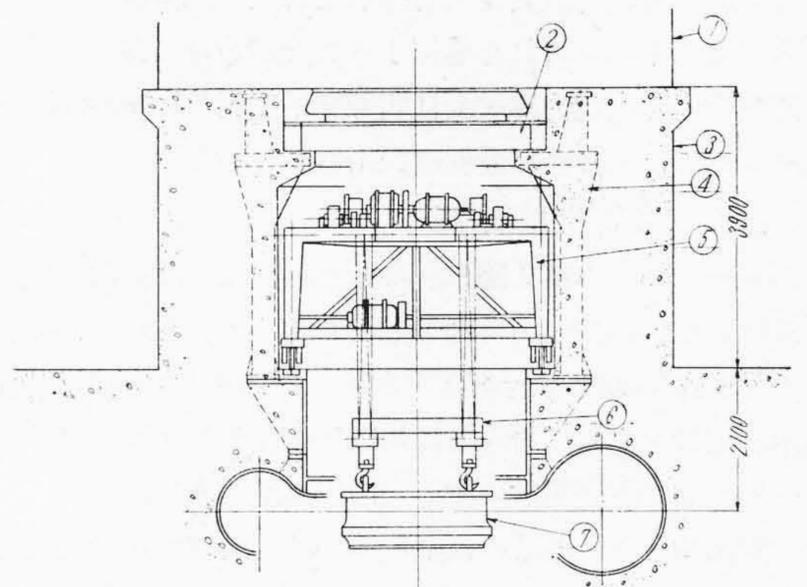


分解装置平面図

- | | |
|----------------------|------------------------|
| ① 発 電 機 | ⑨ 固定滑車(吊り用) |
| ② バ ー レ ル | ⑩⑩' 固定滑車(移動用) |
| ③ バ ー レ ル 鉄 骨 | ⑪ 吊りロープ止め金具 |
| ④④' ラ ン ナ | ⑫⑫' 平 衡 ビ ー ム |
| ⑤ 移動滑車用レール
(分解可能) | ⑬ 吊りロープ
(起重機主フックへ) |
| ⑥ 移動滑車用レール
(埋込) | ⑭ 移動ロープ(起
重機補助フックへ) |
| ⑦ トラック型移動滑車 | ⑮ フック(搬出用) |
| ⑧ 吊り金具 | ⑯ フック(搬入用) |

第7図(b) 移動滑車式ランナ分解装置

Fig.7.(b) Turbine Runner Dismounting Device by Removable Block Method



- | | |
|-----------------------|---------------|
| ① 発 電 機 | ④ バ ー レ ル 鉄 骨 |
| ② 下 部 エ ン ド ブ ラ ケ ッ ト | ⑤ 門 型 ク レ ー ン |
| ③ バ ー レ ル | ⑦ ラ ン ナ |

第7図(c) 門型起重機式ランナ分解装置

Fig.7.(c) Turbine Runner Dismounting Device by Arch Type Crane

を介して起重機主巻フックに接続せしめる。一方移動用ロープ⑭は搬出用と搬入用の2本設けられている。搬出の場合はトラック型移動滑車⑦に取付けられたフック⑮に結ばれて固定滑車⑩に掛けその上端を平衡ビーム⑫'に接続される。搬入の場合はロープ⑭をフック⑯に結び固定滑車⑩'及び⑩'にかけ、その上端を平衡ビーム⑫'へ接続する。尚平衡ビーム⑫'は起重機補巻フックへ接続される。

本方式は移動滑車その他に多少の資材を要するが、天井走行起重機を直接使用し得るため比較的経済的で而も大容量水車にもこれを適用することが可能である。目下建設中の中国電力株式会社明塚発電所用 14,000 kW フランス水車2台に最初に採用されている⁽⁵⁾。

(C) 門型起重機式

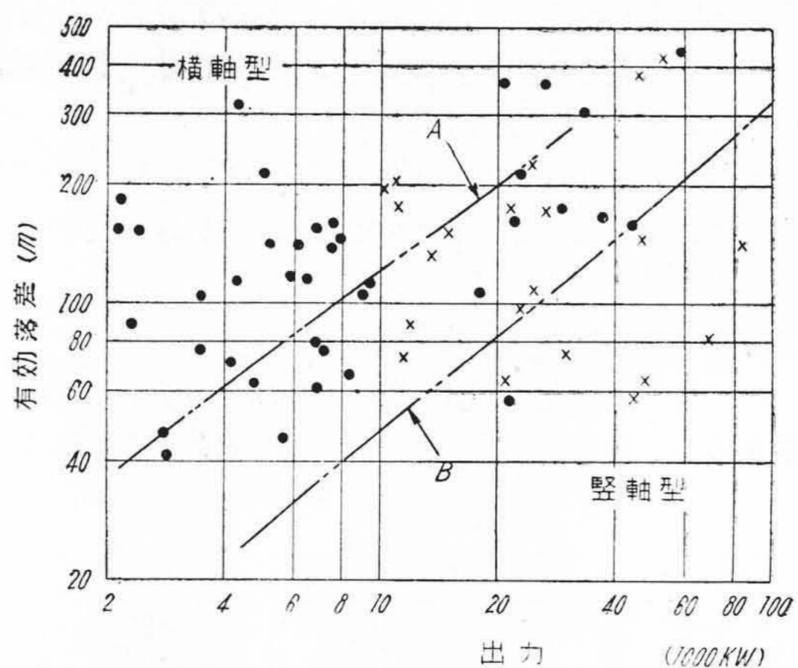
バーレル内に第7図(c)の如き移動式の門型起重機を設け、水車部品の吊揚卸を行うと共に走行も行い得るもので、操作は最も迅速確実であつて大容量水車或いは流水に土砂を多量に含み又は酸性が強くランナ及びガイドベーン等の磨耗腐蝕の激しい箇所に適する。

同図に示されるものは姫川電力株式会社姫川第七発電所納 23,000 kW フランス水車用として目下製作中のもので、水車2台に対し1台設けられて両号機には天井起重機で吊上げ方向を逆向にして使用するよう計画されている。尚本門型起重機には上述の如くランナ或いは主軸用のフックが設けられている他に、ガイドベーン及びレバー等の吊揚卸用として円形レールにホイストが取付けられている(特許第190791号)。

(4) 横軸構造

フランス水車を横軸構造とすれば制御装置その他をすべて同一床面に配置し得る故、機械及び建家を経済的に纏めることが出来、組立若しくは分解、点検等が容易である。しかし中容量以上になると種々の点で次第に製作が困難となり、縦軸構造の発達と共に従来は殆ど縦軸が採用されて来たが、上述の利点は相当高く評価され得る所もあり、これ等の難点も次第に克服されて横軸の採用範囲は各国の例を見るに第8図の如く特に中落差以上の領域に於て揚水式発電所の積極的な建設と共に相当拡大されつゝあり、従前は同図中のA曲線迄と考えられていた頃もあつたが現在はB曲線迄は既に多数の実績を示されるに到つた。尚参考迄に第2表に本邦の横軸水車の実績を掲げる。

昭和26年末より運転を開始せる東北電力株式会社納沼沢沼発電所用 23,000 kW 水車は揚水式発電所用として発電機及びポンプと共に同一主軸上に直結された単輪複流型であるが、その運転結果は騒音或いは振動等の問題は些かもなく効率も模型試験で確かめられたように甚



第8図 横軸フランス水車製作例

●印..横軸フランス水車
×印..縦軸フランス水車

Fig. 8. Production Sheet of Vertical and Horizontal Francis Turbine

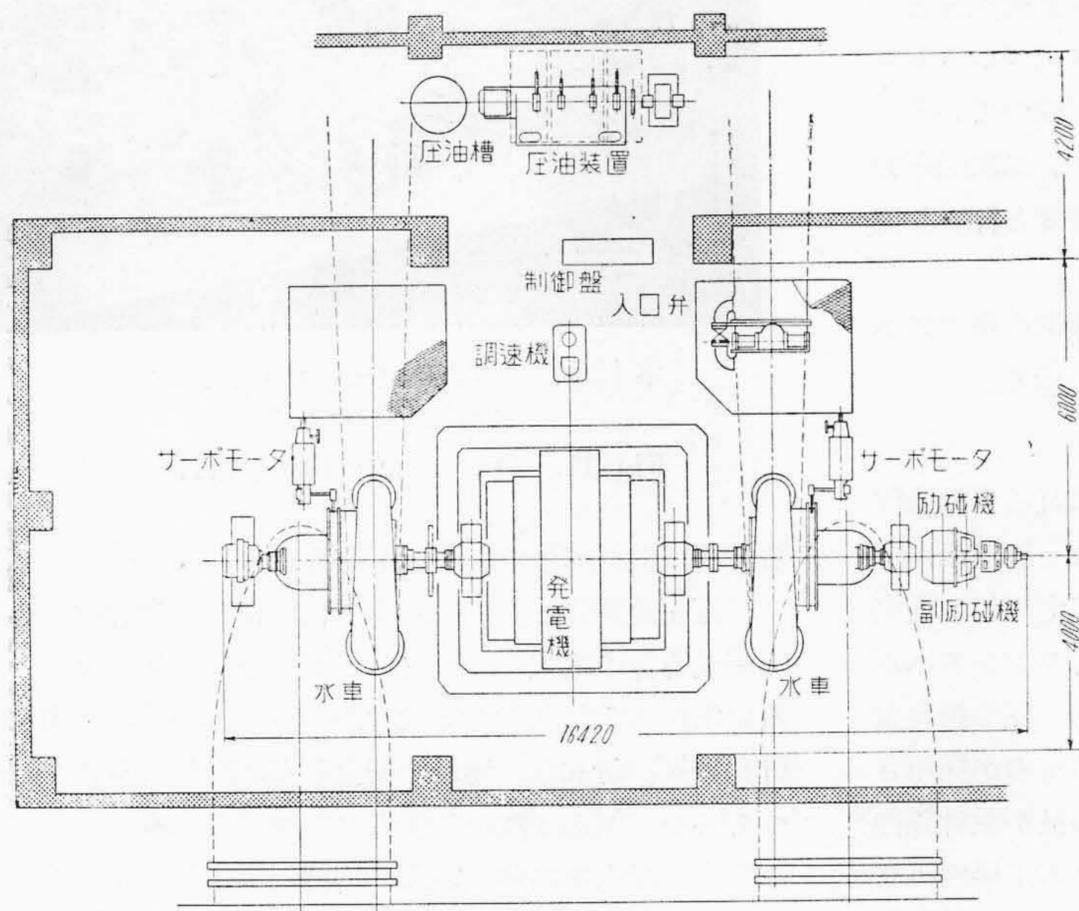
だ良好であつた。即ち従来単輪複流型はランナ出口側ドラフトバンド中に主軸が貫通しているため、水車効率は縦軸型に比してかなり低下すると考えられていたが、保証最高 90.3% に対し本水車の場合は模型設験で最高が 88.2% 得られ、これを Moody 式で実物に換算すれば最高 92.5% に達する⁽⁶⁾。又横軸構造では従来ランナの自重による主軸の撓み、推力軸受の構造或いはブレーキの構造等に多少の問題を生じた例もあつたが、本水車に関してはこれ等の点も全く問題なく優秀な成績を示している。

最近設計に着手せる北陸電力株式会社桑島発電所用の 16,000 kW 水車は発電機の両側に第9図の如く、それぞれ対称の 8,000 kW 単流単輪型を直結したもので、16,000 kW 1台が形成され、中央の调速機アクチュエータにより2箇のサーボモータを駆動して 8,000 kW 迄は片側のみを運転しこれを超過すれば自動的に両側の水車に負荷を平衡せしめ高能率運転を行うよう計画されている。本水車はこれを若し縦軸型とし 8,000 kW 水車2台を設置する場合に比較すれば、最初建設に要する所要資材は水車及び発電機の合計では前者は多少軽減されるが、総合効率は後者の方が最高値に於て僅かに優つている。しかし運転に当つては前者はこれを全自動発電所として常時運転員を置かず昼間だけの勤務員で十分と考えられるが、後者は通常の中容量発電所として昼夜交代の勤務員で保守に当らなくてはならぬ故、かなりの運転経費を要することになる。これ等の諸点を総合すれば本水車の場合には縦軸2台案より横軸1台案の方が有利とされ、本案が採用されることとなつた。

最近のフランシス水車に就いて

第2表 本邦に於ける横軸フランシス水車の製作例
Table 2. Horizontal Francis Turbine Completed in Japan

電力会社	所名	出力 (kW)	落差 (m)	水量 (m ³ /sec)	回転数 (r.p.m.)	台数	型式	製造者	運転開始
東北電力	沼沢沼	23,000	215.5	12.8	500/600	2	FDS-H	日立	昭一26
北陸電力	桑島	16,000	107.0	17.28	514	1	2FSS-H	日立	建設中
東京電力	八沢	9,320	114.7	4.30	176.5	6	FDS ₂ -H	E. W.	明一45
東北電力	猪苗代第一	9,000	107.3	9.13	375	6	FDS ₂ -H	J.M.V.	大一3
東北電力	猪苗代第二	8,260	68.3	12.22	375	6	FDS ₂ -H	三菱	大一6
東京電力	早川第三	7,830	149.5	5.56	600	1	FSS-H	電業	昭一2
東京電力	岩室	7,460	160.0	5.67	500	2	FDS-H	日立	大一2
東京電力	鹿留	7,457	142.4	6.45	500	4	FDS-H	J.M.V.	大一2
中部電力	和知野	7,120	76.0	11.1	428/514	1	FDS-H	日立	昭一13
関西電力	宇治	6,938	61.8	13.7	360	6	FDS-H	三菱	昭一8
北陸電力	尾口	6,900	159.2	3.2	720	2	FDS-H	電業	昭一13
中部電力	洞戸	6,880	80.0	—	600	2	FDS-H	電業	昭一15
北陸電力	西勝原第一	6,341	115.9	5.56	500	4	FDS-H	Böv.	大一12
東北電力	遠刈田	6,300	144.7	4.55	600	1	FDS-H	電業	昭一15
九州電力	津留	6,120	148.5	5.20	500	2	FDS-H	日立	大一7
中国電力	久田	5,810	116.9	—	720	1	FDS-H	三菱	昭一3
中部電力	賤母	5,625	46.2	12.1	360	3	FDS-H	Böv.	大一8



第9図 北陸電力株式会社桑島発電所 16,000 kW 横軸フランシス水車配置計画図

Fig. 9. Arrangement of 16,000 kW Horizontal Francis Turbine in Kuwajima Power House

〔IV〕 調整装置

(1) キャビネット型调速機

日立キャビネット型调速機は従来の调速機のアクチュエータに相当する部分及び二次配圧弁等を美粧鋼板に覆われたキャビネットの中に収めたもので、表面には必要な

指示計及び操作ハンドルのみを取付けてあり、指示計を見ながらハンドルにより調整が出来る。又各部点検のためには、運転中でも扉を開き内部に入り容易に調整出来るような構造になつている。従つて従来の何れの型式よりも取扱が容易で各部の調整は正確に而も迅速に出来るため、長期にわたつてその優秀な性能を維持することが

可能である。

内部の構造はベース、コントロールボード、スピードボックス及び配圧弁の四つの部分よりなり、ベースはコントロールボード及び配圧弁を取付けベース自体が操作油の排油タンクを兼ねている。又正面扉部には電気結線のターミナル類が整然と集束されている。

コントロールボードには水車運転に必要な諸機構及び諸計器指示装置、案内羽根開度、負荷制限位置、速度調整位置指示計の送信器等およそ调速機に必要なもの一切を取付けている。これ等は略々平面的に取付けられており又表面には有機ガラスの扉があり保守点検が容易であり一見して中の機構の動作がわかるようになっている。

スピードボックスには従来と同じ薄板ばねに遠心重錘を取付けた構造のスピードとして一次配圧弁及び回転計の駆動関係が収められている。スピードの下には弾性復原を与えるためのダッシュポットがあり復帰時間は運転中でも容易に調整出来る。スピードボックスの窓には有機ガラスのカバーを設け運転中のスピードの動作が一見してわかるようになっているが、更にその動きをボックスの外側に指示しスピード板ばねの疲労度を容易に点検出来るようになっている。

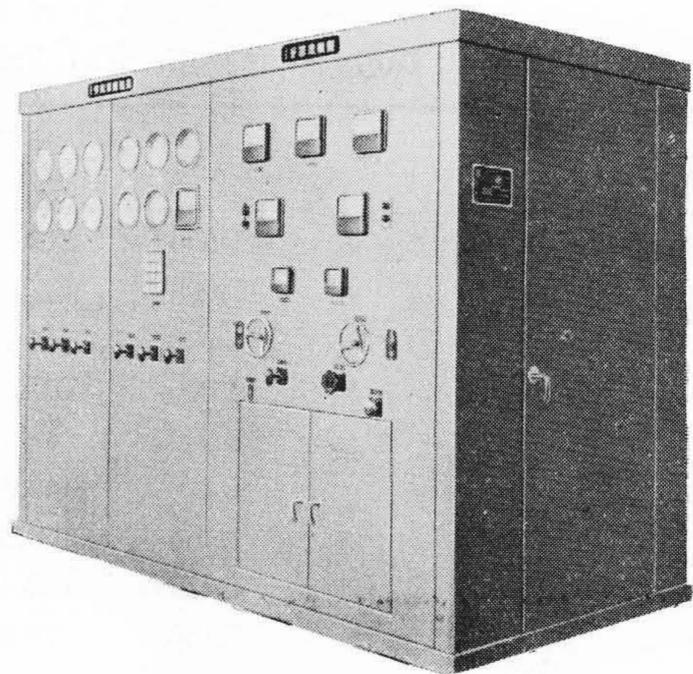
配圧弁はスピードの動きを直接感ずる一次配圧弁と一次配圧弁の動きに応動して、サーボモータ内のピストンの前後に圧油を分配する二次配圧弁とから成っている。一次配圧弁は前述のスピードボックス内に、二次配圧弁はベースの上に取付けられ両者の間は圧油管と杆より成る連動装置によつて連結されている。

第10図にこの程工場で作成された日立標準のキャビネット型调速機及び水車操作盤の外観写真を示す。

(2) 圧油装置

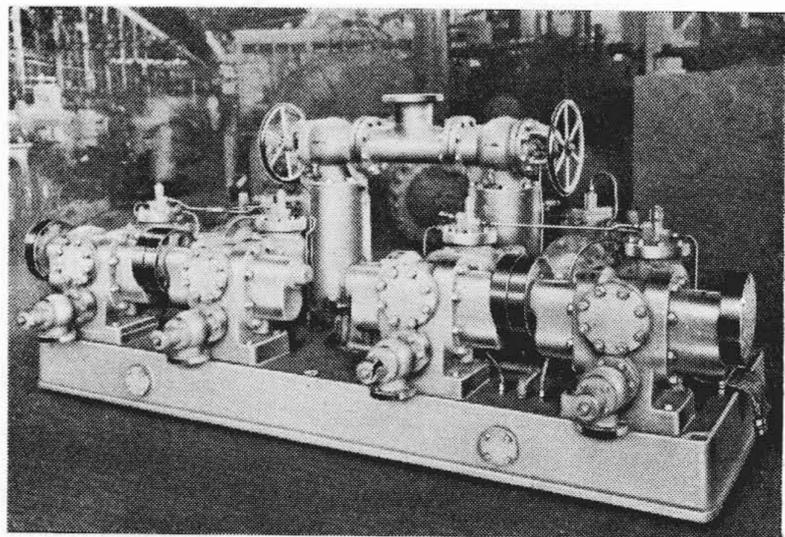
昨今水車容量増大の傾向に伴い、多種に亘る自動操作及び保護バルブ機構の増設に加えて、更に一層運転保守の万全を期する意味より圧油容量は水車出力に対し従来より一層大きいものが要求され、例えばフランス水車1台に対し圧油ポンプ容量 1,100 l/min, 圧油槽容量 10,000 l, 集油槽容量 12,000 l にも達するものが採用されるようになり、嘗て例を見ない記録的製品が設計製作されることとなった。第11図に同油ポンプの工場内組立状況を示す。

しかし油ポンプが大容量に過ぎることは貯油槽の油量をいたづらに増大するのみならずたとえアンロードが万全であつても、常時多量の油を強制循環せしめる結果、油温を上昇させ、やがて油を劣化せしめる要因となる不利があるので、むしろポンプはその能力をより有効に使用する如く幾分容量を切縮める反面、圧油槽を十分余猶のある大きさとし、所謂蓄圧槽本来の使命を発揮せしめ



第10図 北陸電力株式会社神通川第一発電所納水車用キャビネット型调速機工場組立

Fig. 10. General View of Cabinet Type Governor and Instrument Panel



第11図 北陸電力株式会社神通川第一発電所用油ポンプ

Fig. 11. Oil Pump Equipment

る方向に進むべきであると考え。

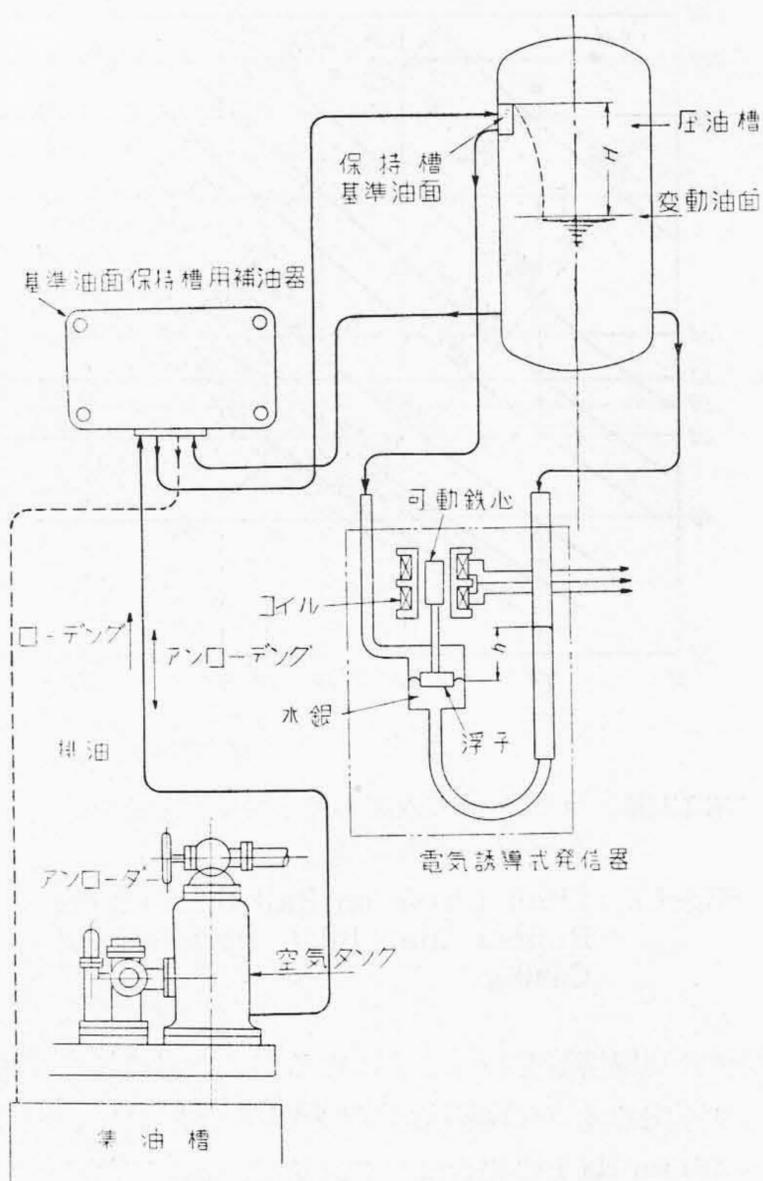
最近圧油装置としては水車運転保安の万全を期するため圧油容量の増大と共に更に不斷に圧油を確保せんとする要求から新たなる考案設計がなされ、諸種の保護及び計測装置が附加され運転の安全確実が計られるようになって来た。例えば次の如きものが挙げられる。

(i) 混水検出警報装置 (特許出願中)

操作油系統中に万一混水した場合に水分が定量値に達すれば自動的に警報を発するものである。この検出器は集油槽内に設けられたが又セグメント軸承、潤滑油槽等にも用いられる。

(ii) 圧油槽油圧遠方表示装置

ブルドン管により槽内油圧を検出しこれを電氣的に配電盤室へ表示すると共に警報油圧を信号するものである。



第12図 圧油槽油面遠方表示警報装置取付図
Fig. 12. Remote Indicating Device of Oil Level in Pressure Chamber

(iii) 圧油槽内油面遠方表示装置及び基準油面用補油器 (第12図参照)

圧油槽内に基準油面を設け、これと槽内変動油面との差圧を検出し電氣的に配電盤室に遠方表示すると共に上限下限接点を具えて油面異常上昇又は下降した場合に警報する。

圧油槽内の基準液面を構成維持するために変動油面よりも高位置に設けられた基準油面器へ常時極めて少量づゝ圧油を補給することを要するが、このためアンローダの動作毎にポンプ作用をなす特殊小型ポンプを設けた。この補油器は最初充油時等一時に多量給油する場合はハンドルを切換えることにより連結自動給油を行うことが出来る。(特許出願中)

(iv) 貯油槽の洪水時保護対策

発電所の洪水時保護対策としては防水建家構造とするのが最も抜本的で賢明な策であろうが実際に完全防水とすることは困難であろう。排水ポンプの能力以上に浸水して貯油槽が被水した場合に槽内の油が流出しないことが先づ要求される。次に槽内に水が流入しないことが尙更望ましい。

近來の発電所建設に際しては通常洪水位が水車室床面上 1m をこえない条件を保証限度とされることが多いので、貯油槽の据付位置によつて水深 8~10m にも及ぶ場合がある。如何なる場合でも完全防水型密閉槽とすれば最も完璧であるがこれには種々困難が伴うものであつて、必要以上の資材を要し構造も複雑となる故、かゝる不利を避けるため、水圧に等しい内圧を加えて槽の破壊を防止する工夫がなされ実施された。即ち油槽を気密防水型とし被水時には外圧と等しい空気圧を自動的に送るか、又は被水時槽内への浸水を許して内外水圧を均衡せしめる方法が採られた。何れの場合も油の流出がなく、流油損失及び所内の油による汚損から避けられる。これらの方式を実施する上に於て種々障害となる通気管やフロート式油面計等の諸点に就き検討が加えられ、密閉型フロート式油面計、防水型ロープ式フロートスイッチ、混水防止弁、空気呼吸管兼浸水保安弁等が考えられた。(特許出願中)

(v) 圧油槽油面異常低下検出器

水圧自動閉鎖型案内羽根を圧油の保償装置として採用した場合に使用し、万一圧油槽内の油面が異常降下した場合にサーボモータを圧油系統から絶縁し水圧による自己閉鎖をなさしめてサーボモータに空気の流入するのを防ぐため、油圧に無関係に油面を検出するもので特殊フロートにより油面を検知して油圧を切替えるものである。元來油圧を維持したまゝ油面が降下することは、常態では考えられず本検出器が作用することは極めて稀であろうから、一般に使用されるシリンダ型切換弁では長期間の油滓等により、その切換動作が甚だ不確実となることは想像に難くないので特殊な二段切替え方法を採用した。この方式は丸山、神通川第一、桑野内、水内の諸発電所に採用された。又自動閉鎖案内羽根は圧油槽の油面異常降下時のみならず、油圧異常降下及び過速度時にも自己閉鎖する如く考案されている。(特許出願中)

〔V〕 製作容量の限界

丸山或いは神通川第一発電所は本邦に於けるフランシス水車として或る条件より見ればそれぞれの適用落差に於ける一台容量の限度に近い大きさとなつている。最近これ等に引続き多少高い落差に於て更に大容量の変落差地点の開発が進められているので、その容量の限度に就き考察を加えて見るに、水車の製作限界に関係をもつ大きな要素としては鉄道の輸送限界によるランナの大きさケーシングの分割可能範囲及び主軸の鍛造可能寸法が先づ挙げられる。尙この他に橋梁その他により輸送重量に制限を受けることもあるが、この点は寧ろ発電機側が常に問題となるので、本項では触れることを省略する。

(1) 鉄道の輸送限界によるランナ

大きさによる制限

フランシス水車ランナは特殊の低床車を使用すれば鉄道の建築限界に略々近い寸法迄のものを製作し得るが、而も尙これを超過する場合は二つ割或いは三つ割とし合わせ目をボルトで締めつけることは構造上十分可能で既に実施されている例もある。しかしランナ外周のライナは何としても一体にて製作されなくてはならぬ故、工場で一体に製作し道路輸送によるか、或いは工場で分割製作して据付現場で熔接接続し機械加工を行う方法等が採用或いは考案されている。

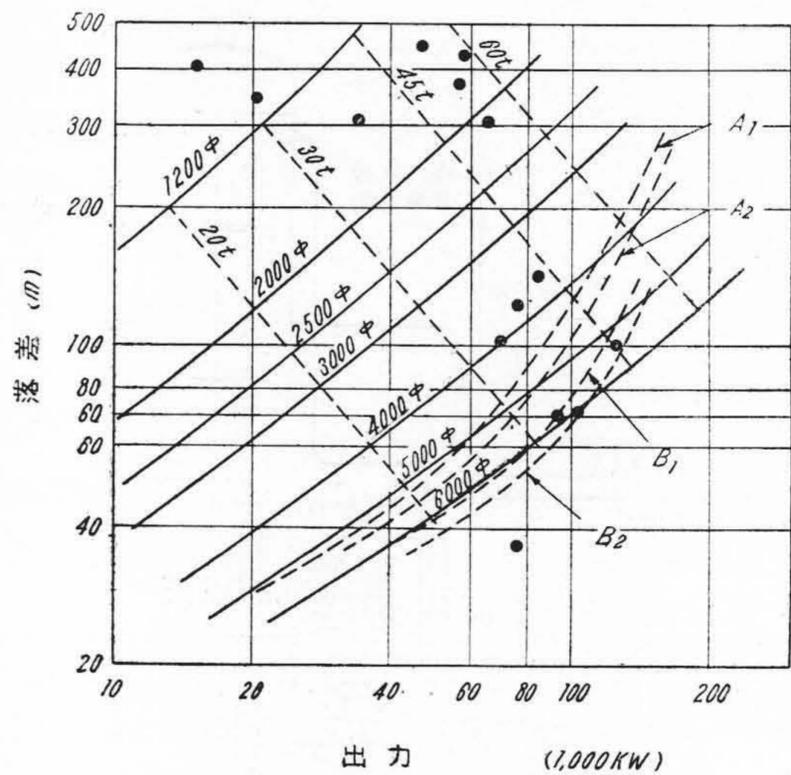
しかしランナを分割することは実際保守或いは補修に際し多少不便な点もあるので、これを一体にて製作される範囲を求めれば第13図の如くなる。図中 A_1 曲線は落差対比較回転度の関係を前述の第1図に示される(1)式より算出したものであるが、若し掘鑿を深くして比較回転度の限界を増大せしめれば同図 A_2 曲線程度迄その容量を大きくすることも不可能ではない。尙 A_1 及び A_2 曲線は本邦に於ける狭軌鉄道の場合であるが、参考迄に軌幅 1,335 mm の広軌鉄道の場合をそれぞれ B_1 及び B_2 曲線として掲げてある。

(2) ケーシングの大きさによる制限

ケーシングの大きさは入口弁の型式若しくは落差に応じて入口流速をどの程度迄とり得るかによつて相当影響される。入口流速は落差が高くなるにつれて速くすることが出来、外国に於ては高落差に於て 10.5m 程度迄を限度とされている旨記載されている文献も散見するが⁽⁷⁾、本邦に於ては既に以前より御岳発電所用 23,000 kW 水車或いは沼沢沼発電所用 23,000 kW 水車等に於て入口流速を 11m 以上とし運転結果好成績を収めている例が相当ある。

かくの如き関係例を基準として落差と容量に対するケーシングの入口径を第13図に示す。図中には尙これに相当するケーシングの大体の板厚を規格鋼板を使用するものとして表示してある。

ケーシングの材質としては高落差領域に於ては従来より鑄鋼が採用され、スピードリングと共に数箇に分割されてフランジ接手にて一体にボルト締めとしている。従つて高落差大容量水車には鑄鋼を使用して鉄道輸送上許し得る大きさ迄分割製作すれば、その容量に限度はない筈であるが、鑄鋼技術若しくは強度上非常に厚肉となり経済的でなくなつて来る故、大容量水車にてはケーシングの材料として極力鋼板を使用する方が望ましいこととなる。鋼板を使用する場合は鋸接と熔接構造に分かれ、鋸接の場合は現在技術的に板厚 45mm 程度迄が可能とされている。熔接の場合は前述の如くフランジ接手或いは



第13図 フランシス水車のランナ輸送限界とケーシング入口径

Fig. 13. Limit Curve on Rail for Francis Runner and Inlet Diameter of Casing

は据付け現場熔接を行うことになるが、後者の場合は未だ余り厚肉のものは技術的に時期尚早であつて、板厚 30~45mm 以上の場合はフランジ接手とし工場に於て十分試験を行えば強度的には鑄鋼の場合よりかえつて安全と考えられる。

ケーシングより考えられる製作限度としては以上の如く構造の他に材質或いは分割箇数に関連する問題となり、これ等を十分検討しどの程度迄経済的にこれを設計製作するかにあつて、ランナの場合程確然とその限度は押えられぬと見て差支えない。

(3) 主軸の鍛造による制限

主軸の大きさ及び重量が増大すれば鍛造は次第に困難となるが、製鋼設備の充実技術の進歩に伴い、前述の如き容量の水車に対しては現有の各製作者の製鋼設備で十分鍛造することが出来ると考えられる。

輸送上も荷姿寸法より制限されることはないが、発電所建設地点に依つては鉄道輸送以外に道路橋梁等の重量制限を受けることもあるので、一応考慮すべき点と考える。

[VI] 結 言

最近製作された大容量フランシス水車の技術的に進歩せる内容に関しその主要なる点を紹介した。水車の容量の増大に伴ない各部の構造及び材質には従来の多数の実績より見て慎重なる検討を加え改善を重ねられており、保守運転に当つて特に確実を期し強度及び耐久度の増大を計つている。又調整装置に関しても取扱いが容易とな

るよう新しい試みを逐次取入れて改良が加えられている。

水力実験室に於ける多数の模型試験によりランナ、ガイドベーン及び吸出管等の試作研究の結果若しくは各所の既設及び新設水車の据付現場に於ける効率試験の結果等よりフランス水車の効率並びに空洞現象性能は著しく向上されるに至つた。

これ等の諸点に関する概要の説明が各位の御参考になれば幸甚である。

参考文献

- (1) 深栖：日立評論 35, 649 (昭 28. 4)
- (2) 深栖：日立評論 35, 649 (昭 28. 4)
- (3) 深栖：日立評論 35, 649 (昭 28. 4)
- (4) 小森谷：日立評論 33, 429 (昭 26. 6)
- (5) 特許 195595 号
高橋：日立評論 35, 1275 (昭 28. 9)
- (6) 深栖他：日立評論 34, 637 (昭 27. 5)
- (7) 根宣：機械学会誌 56, 413 号 (昭 28. 6)



日立製作所社員社外寄稿一覧表 (昭和28年8月分受付)

寄稿先	題名	執筆者所属	執筆者
日刊工業新聞社	ダクタイル鋳鉄の応用に就いて	亀有工場	西山太喜夫 谷口 実
Journal of Applied Physics	Experimental Investigation of Chromatic Aberration in Electron Microscope and Observation of Thick Specimen	中央研究所	片桐信二郎
日本化学会	エナメル線皮膜の導体への接着性 (第13報)	日立電線工場	間瀬喜好
日本自動車整備研究会	最近の電装品の取扱と修理方法 (その一)	多賀工場	杉浦慎三
農業電化協会	新製品紹介 新型日立モートル	本社	新野 豊
日本機械学会	ポンプ設備	川崎工場	孤田広利
東北七県電力使用合理化協議会	変圧器の使用合理化に就いて	本社	田村三郎
計測懇談会	プロセス自動制御のボーデ線図による検討	多賀工場	北川 栄
日本動力協会	最近の水車	日立工場	小森谷 享
高圧瓦斯協会	日立 2,600 HP 高圧瓦斯圧縮機	川崎工場	重松 久
日本電気協会	色彩調節の実際的効果に就いて	亀戸工場	山津幸夫
Journal of Applied Physics	On the Chromatic Field Aberration of the Magnetic Lens in the Electron Microscope	中央研究所	森戸 望
照明学会	蛍光灯スタンドの新型	中央研究所	中村純之助
日本科学技術連盟	図面公差に於ける経済的ねらいの一考察	亀戸工場 中央研究所	猪瀬 実 島田 正三
電子顕微鏡学会	電子顕微鏡に於ける軸外色収差に就いて	中央研究所	森戸 望
精密鑄造研究会	精密鑄造研究の現況	多賀工場	丹 浩平 江 刺清夫
日本学術会議	Permanent Deformation Appeared on the Diameter of Rotating Bodies	中央研究所	須藤 卓郎
電気書院	自動電圧調整器の進歩	本社	小関陽一

創刊号(大正7年1月)～第35巻第9号(昭和28年9月)

(第20頁より続く)

621.224.03 水車の効率

- 1) 7,100 HP 縦軸水車の能率試験
高山佐綱、小松重次郎：日立評論 8 8 (大 14. 8) 466
- 2) 水車の速度並びに落差を変えた時の能率の変化(その一)
今井恒三郎：日立評論 9 8 (大 15. 8) 481
- 3) 水車の速度並びに落差を変えた時の能率の変化(その二)
今井恒三郎：日立評論 9 9 (大 15. 9) 573
- 4) 水車能率試験の一实例
永田八郎：日立評論 14 2 (昭 6. 2) 97
- 5) 水車の効率換算式
山崎卓爾：日立評論 27 5 (昭 19. 5) 275
- 6) 再び水車の効率換算式
山崎卓爾：日立評論 29 5 (昭 22. 12) 129
- 7) 塩水法及びギブソン法による水車の性能試験
山崎卓爾：日立評論 32 5 (昭 25. 6) 261
- 8) 模型水車による Index Test 法の一実験
山崎卓爾、手島友亮：日立評論 34 10 (昭 27. 10) 1177

621.224.12 ペルトン水車

- 1) 最近のペルトン水車に就いて
三瓶重宏：日立評論 10 10 (昭 2. 10) 727
- 2) 18,650 HP ペルトン水車
三瓶重宏：日立機械評論 1 (昭 5. 7) 13
- 3) ペルトン水車の針弁に作用する推力
大戸英雄、田中重三：日立評論 26 8 (昭 18. 8) 450

621.224.24 フランス水車

- 1) 7,100 HP 縦軸水車の能率試験
高山佐綱、小松重次郎：日立評論 8 8 (大 14. 8) 460
- 2) 高速度フランス型水車に就いて
山口重二郎：日立評論 9 7 (大 15. 7) 415
- 3) 鉄道省信濃川千手発電所 60,000 HP 水車
今井恒三郎：日立評論 20 6 (昭 12. 6) 403

4) フランス水車の振動

今尾隆、小森谷亨：日立評論 25 4 (昭 17. 4) 218

5) 模型試験結果より見たるフランス水車の特性

小森谷亨、羽鳥勇：日立評論 25 5 (昭 17. 5) 259

6) 満洲帝国松花江発電所 85,000 kW 水車

小森谷亨：日立評論 26 6 (昭 18. 6) 293

7) 日本国有鉄道山辺発電所 27,500 kW 水車

小森谷亨：日立評論 33 6 (昭 26. 6) 429

621.224.35 カプラン水車

1) 宮川電灯株式会社低落差水車に就いて

福元稔：日立評論 4 7 (大 10. 7) 278

2) プロペラ型水車の性能に就いて

田中文吉：日立評論 11 9 (昭 3. 9) 601

3) プロペラ型水車の現在及び将来

田中文吉：日立評論 12 11 (昭 4. 11) 687

4) 可動翼プロペラ型水車調整上の一考察

田中文吉：日立評論 13 9 (昭 5. 9) 473

5) 可動翼プロペラ型水車

栗野義六郎：日立評論 14 4 (昭 6. 4) 201

6) 52,000 HP カプラン水車の構造並びに試験成績

今井恒三郎：日立評論 19 12 (昭 11. 12) 769

7) 可動翼プロペラ水車の翼材に就いて

田村勝人：日立評論 21 9 (昭 13. 9) 653

8) プロペラ水車の羽根数に就いて

深栖俊一：日立評論 23 3 (昭 15. 3) 181

9) カプラン式水車用羽根の材質に就いて

守永孫江、清水三男：日立評論 26 9 (昭 18. 9) 494

10) 北海道電力株式会社納班溪発電所用 10,600 kW カプラン水車の製作並びに据付に就いて

照沼美知夫、伊藤晃二：日立評論 35 6 (昭 28. 6) 891

621.311.17 発電所建設

1) 鬼怒川水力電気株式会社竹之沢発電所工事に就いて

太田国馨：日立評論 6 6 (大 12. 6) 199

(第54頁へ続く)