

電源開発株式会社・早明浦発電所納め斜流水車を参考として

落差変動の大きい斜流水車計画上の問題点

Some Problems of Planning Diagonal Turbine With Large Varying Head

A 44,000 kW diagonal flow turbine has been delivered by Hitachi to the Sameura Powerplant, Electric Resource Development Co. and put into commercial operation recently. With the lowest to highest head ratio of 32%, this turbine is a typical example of turbines for large head variation.

This article discusses such problems as determination of head variation, vibrations at turbine start, turbine construction, runner gaps, load rejection, etc. based on the actual data obtained from the 44,000 kW Sameura turbine.

白川 哲郎* *Teturô Sirakawa*

井上 久男** *Hisao Inoue*

佐藤 譲之良** *Zyosirô Satô*

山口 雄三*** *Yuzô Yamaguti*

1 緒 言

近年、わが国の水力開発は揚水発電を主体として進められ、この傾向は将来の原子力を主体とする発電設備構成により、ますます顕著になると考えられる。一方、国土広域開発の見地から多目的ダムも建設され、この場合は一般に落差変動範囲が大きい。具体的な例として、昭和47年2月営業運転にはいった電源開発株式会社・早明浦(さめうら)発電所納め斜流水車は、後者の典型であり落差が洪水時の100mから最低落差時の32mまで変化する。

本論文では各種水車の落差変動範囲の選定と、変落差の大きい地点に設置される斜流水車の製作上の二、三の問題点を、早明浦発電所の試験結果をもとにして紹介し、関係各位の参考に供したいと考える。なお早明浦発電所はダム工事一部未完のため現在は基準落差以下の運転を行なっていることを付記する。

2 早明浦発電所納め

斜流水車の仕様および構造

表1は早明浦発電所納め斜流水車の仕様を示したものである。本水車は最高落差87.5mの表示になっているが、実際上は洪水時落差100mで計画されている。図1は水車据付断面図、図2はランナ工場試験状態を示したものである。

構造上の特長としては、

- (1) 斜流角60度を採用した。現在運転されている斜流水車は斜流角45度、60度、70度などがあり、一般に比速度 N_s が大きくなると斜流角は大きくなり軸流に近くなる。本発電所の場合は、比速度と落差変動範囲を考慮して60度としてある。
- (2) ランナサーボモータをボスに内蔵させた。これは輸送が可能であり、かつ機器製作上の経済効果の面から採用したものである。
- (3) ランナサーボモータ内蔵のため、水車メタルからランナブレードまでの距離が大きくなり、

一般に軸振れを生じやすいので制振のためベアリングケースを強固な構造とした。

(4) ランナボス内にはボス油を封入し、加圧する構造としてある。

(5) ケーシングは60kg/mm²高張力鋼の現地溶接構造で水压試験は省略されている。ランナブレードは13クロム鋳鋼である。

以下、落差変動範囲の大きい水車一般例について述べ、再び一例として早明浦についての説明に戻りたいと考える。

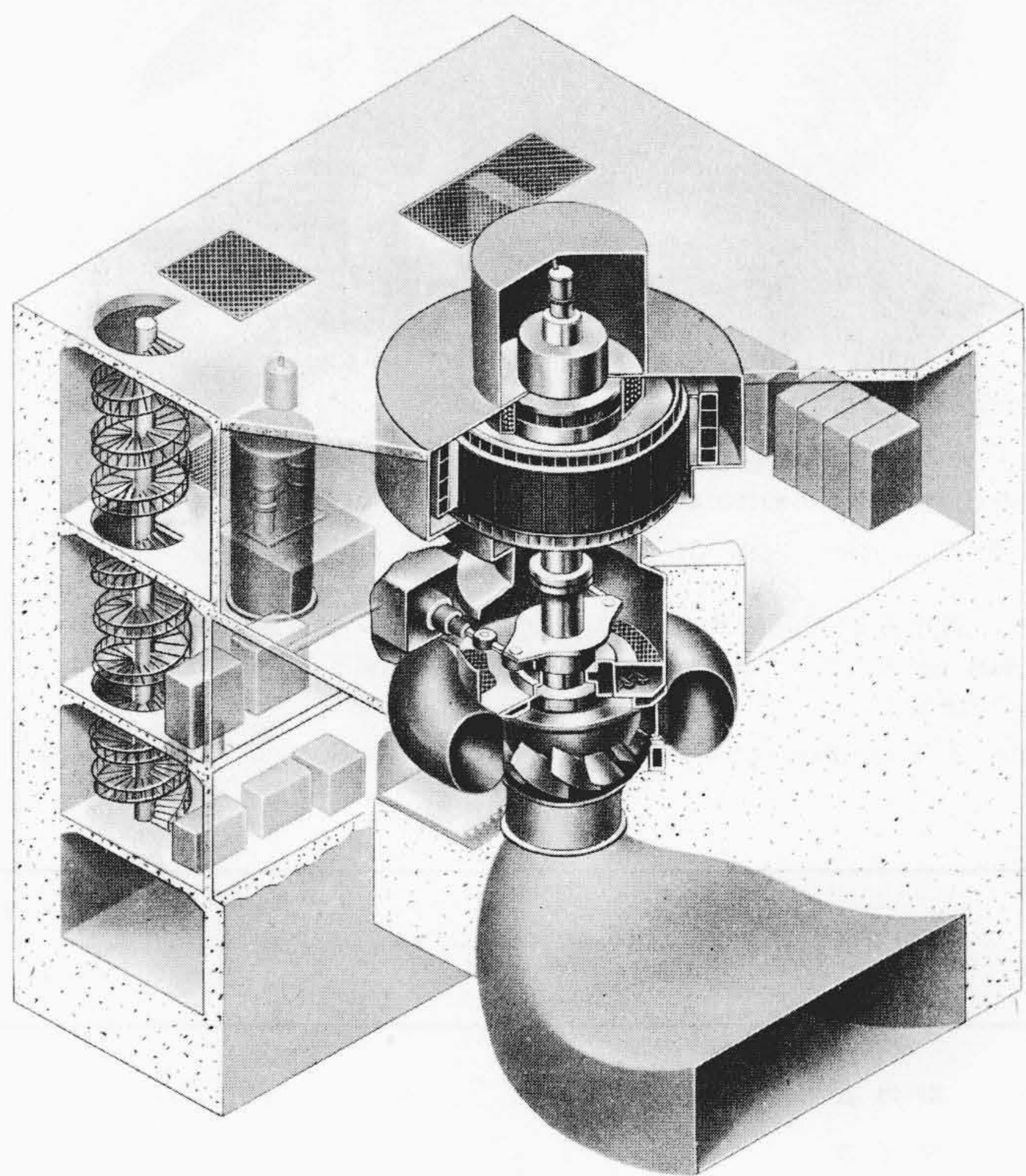


図1 早明浦44,000kW斜流水車据付透視図 早明浦発電所納め44,000kW斜流水車の据付透視図を示す。

Fig. 1 Installation Perspective Drawing of 44,000kW Diagonal Turbine Supplied to Sameura Power Station

* 電源開発株式会社 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所

表 1 早明浦発電所 斜流水車仕様 早明浦発電所納め 44,000kW 斜流水車の仕様を示す。()内は参考値

Table 1 Specification of Diagonal flow Turbine Supplied to Sameura Power Station

	出力 P (kW)	落差 H (m)	流量 Q (m^3/s)	回転数 N (rpm)
洪水時	(44,000)	100	(50)	257
最高	44,000	87.5	56.1	
基準	44,000	76.0	65.0	
最低	7,100	32.0	33.6	

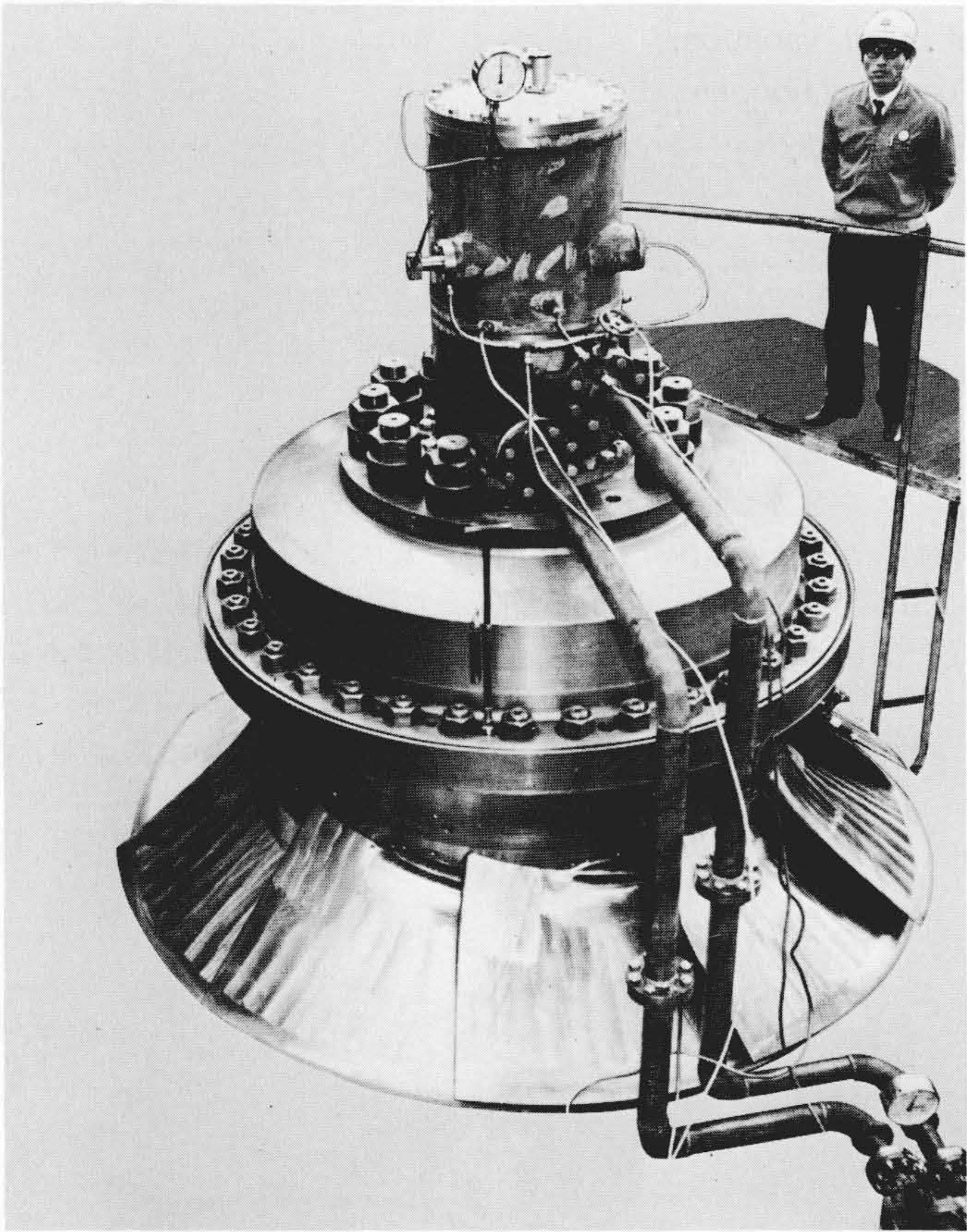


図 2 ランナ工場操作試験 ランナサーボモータの上に圧油導入装置を仮組みし、操作機構の動作試験を行なった。

Fig. 2 Operation Test of Runner Blade at the Shop

表 2 落差変動範囲の大きいフランシス水車（日立製作所製）
日立製作所納入のフランシス水車のうちで、落差変動範囲の大きいフランシス水車の例を示す。

Table 2 Examples of Francis Turbines with Large Varying Head Range (Supplied by HITACHI)

		最低	最高
発電所名	落 差 変 動 範 囲 (m)		
	100	200	比速度 N_s (m-kW)
御 母 衣			125.4
マ イ カ			138.9
パーラビ			134.2
パークラ			148.2
グ リ			199.0
タルベラ			163.4
佐 久 間			126.7
イリヤソルテイラ			32.3

3 落差変動範囲の大きい水車の計画

表 2, 3 は落差変動範囲の大きいフランシス水車およびカプラン水車の例である。また表 4 は現在わが国で運転されている斜流水車の落差変動範囲を示したものである。変動範囲は水車の種類、比速度 N_s により異なるが、これを一つのグラフ

表 3 落差変動範囲の大きいカプラン水車（日立製作所製）
日立製作所納入のカプラン水車のうちで、落差変動範囲の大きいカプラン水車の例を示す。

Table 3 Examples of Kaplan Turbines with Large Variable Head Range (Supplied by HITACHI)

発電所名	落差変動範囲 (m)		比速度 N_s (m-kW)
	50	100	
金山			279
市房第一			274
敷山			258
素波理			278
大鳥			258
マタチラ			441
ダム			409
コアラシヌーネス			485

表 4 斜流水車落差変動範囲 国内で運転中の斜流水車の落差変動範囲を示す。早明浦発電所の落差変動範囲はきわめて大きい。

Table 4 Variable Head Range of Diagonal Turbine

発電所名	落差変動範囲 (m)		比速度 N_s (m-kW)
	50	100	
早明浦			241
西勝原第三			189
魚梁瀬			197
大倉			202
下笠			228
松原			247
新竜島			291
天ヶ瀬			262
名頃			221

に示すと図3となる。落差変動範囲と称する場合、変動落差の絶対値を示すべきか、あるいは変化率を示すべきかは問題のあるところであるが、ここでは、最高落差 H_{max} と最低落差 H_{min} の比を示すことにする。表2および図3よりフランシス水車ではタルペラ発電所の40.1%が最も小さいが、他は50%以上であり一般に50%以上と考えねばならない。これに対し可動翼の斜流水車およびカプラン水車では30%台まで可能である。もちろん比速度 N_s が大きくなれば、落差の絶対値は小さくなる。斜流水車の落差としては40~150mぐらいが製作上からも適当と考えられる。図3は変落差の水力プラントを計画する場合の一つのめやすとなるが、吸込み高さの制限や振動を伴う特殊な運転範囲などに対する配慮も必要となるので、計画時に水車メーカーとの情報交換が必要である。

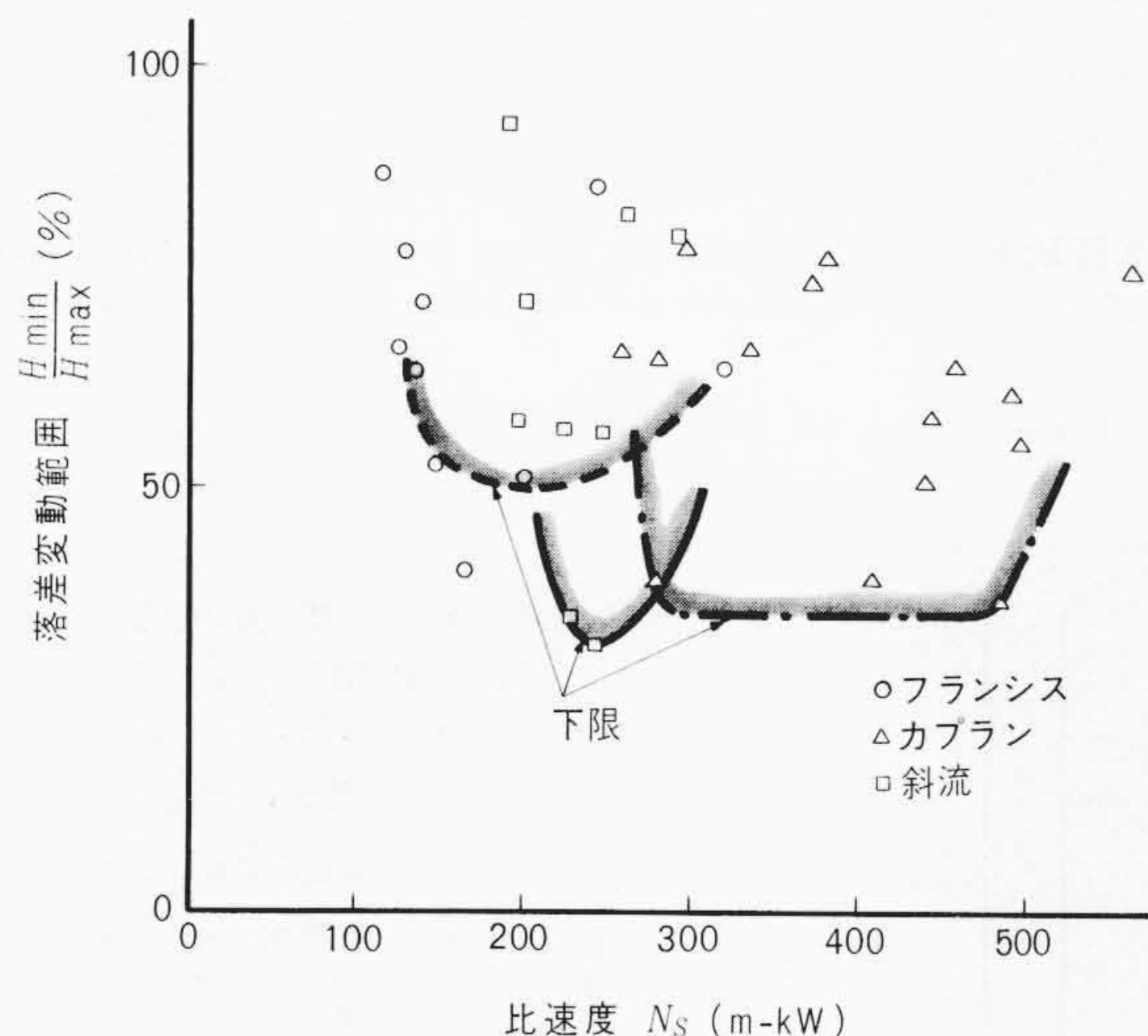


図3 水車落差変動範囲実績 表2, 3, 4に示すフランシス, カプラン, 斜流水車の落差変動範囲をグラフにした。各水車の許容運転下限がわかる。
 Fig. 3 Variable Head Range of Water Turbine

4 落差変動範囲の大きい斜流水車計画上の問題点

ダムの仕様から落差変動範囲が規定され、初期投資も含めた経済的判定から水車機種が決定されるわけであるが、中落差の水車として斜流水車を選定した場合、計画上の問題点となる事項について述べる。

4.1 落差変動範囲

図4は早明浦発電所44,000kW斜流水車の目玉曲線と運転範囲を示したもので、横軸は流量、縦軸は落差である。

効率 η は最高効率点に対する割合を示している。図4から実用上の最高落差に相当する洪水時落差、基準落差、最低落差の運転点がわかるが、斜流水車の運用としては理想的な運転範囲といえる。一方、さらに運転範囲を広げたい場合は次の事項が問題となる。まず最高落差を上げる場合は、ケーシング、スピードリング、カバーなどの固定部の強度とランナ強度を増す必要がある。特にランナの強度に関しては疲労強さも考慮せねばならないので、落差が増大すると翼厚が増大する。落差変動範囲が大きく、比速度 N_s の比較的大きい斜流水車では、翼幅を大きくとらねばならないので、落差を高くすると特に翼付根部の厚みが増し、流体特性とのかねあいが問題となる。早明浦の水車で洪水時落差100mをさらに上げることはむずかしい。もっとも100m付近の落差のみを使用

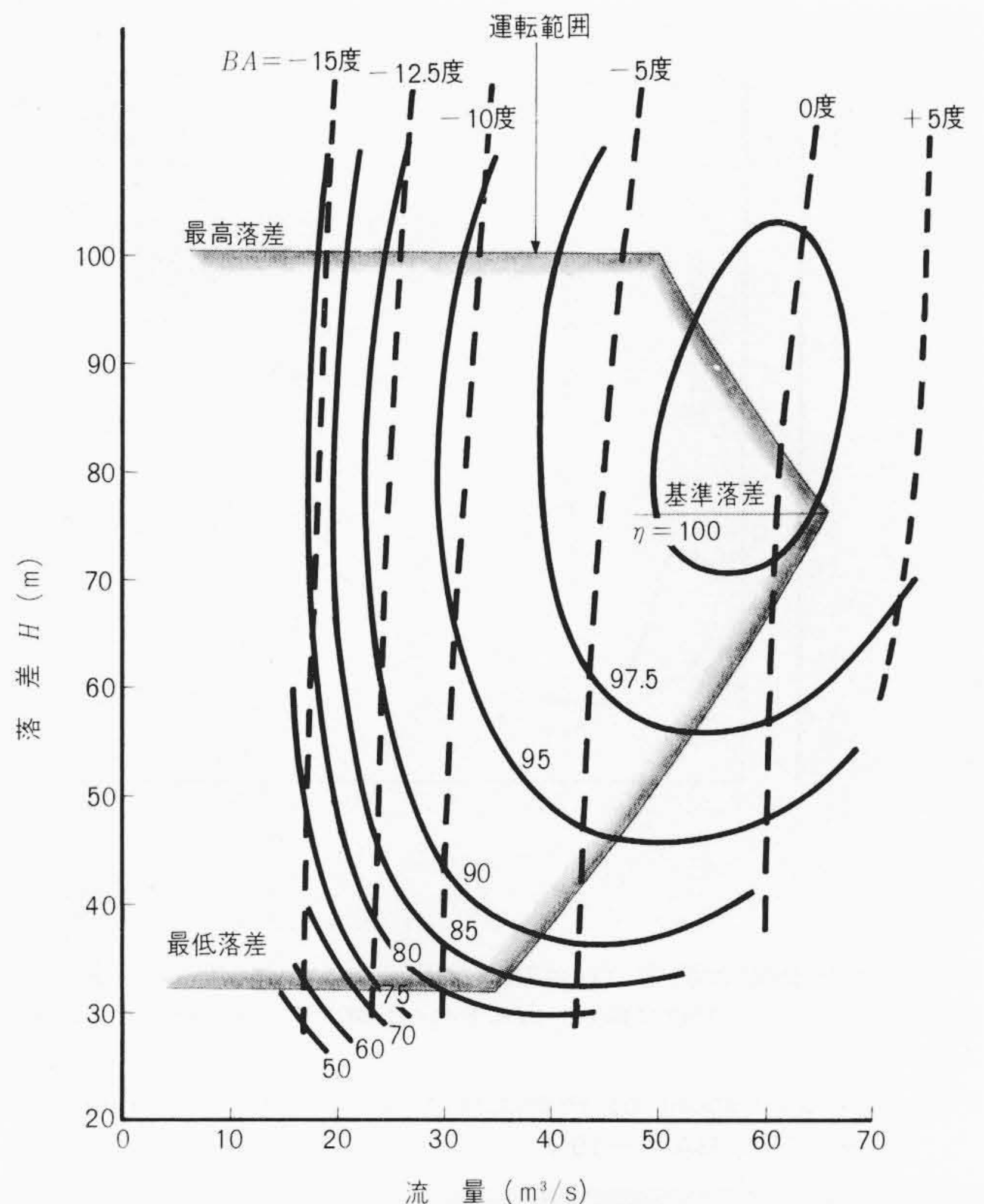


図4 早明浦発電所44,000kW斜流水車運転範囲 早明浦発電所納め44,000kW斜流水車の等効率曲線上に運転範囲を表示した。ただし、効率は最高効率に対するパーセンテージで表示。

Fig. 4 Operation Range of 44,000kW Diagonal Flow Turbine Supplied to Sameura Power Station

し、したがって比速度が小さい水車の場合は、羽根幅を小さくとれるので強度的に楽になる。

低落差運転は、取水口からの空気吸入を招かなければ、より低い落差でも運転は可能である。早明浦発電所の定常負荷運転を考えると図4で27.5m程度までは運転可能と考えられるが、低落差時の問題として次に述べる起動時の振動が考えられるので、一般にはモデル試験などにより確認試験を行なって後に決めるべきである。

4.2 水車起動時の振動

斜流水車の起動時にしばしば問題となる事項は、水車ランナボスの下部に発生するランナホールのために、水車に衝撃的な力が作用し起動時の運転状態を悪化させることである。早明浦発電所のように落差変動範囲が大きく、かつ洪水時の落差で機器の計画を行なう場合、羽根付根部は厚くなりランナブレードを全閉の状態で起動することは困難となる。そこで起動時のブレード角度を何度に設定すべきかが問題となる。早明浦ではブレード角度 $BA=-15$ 度と -12.5 度の2種類についてモデルによる起動時の振動特性試験を行なった。図5は $BA=-15$ 度で基準落差76m相当の水圧脈動特性を、図6は $BA=-15$ 度で最低落差32m相当の水圧脈動特性を示したものである。また図7は $BA=-12.5$ 度で基準落差76m相当の水圧脈動特性を、図8は $BA=-12.5$ 度で最低落差32m相当の水圧脈動特性を示したものである。図5は横軸にガイドペーン開度、縦軸に試験落差の水圧脈動の絶対値と、試験落差に対する割合(%)を示している。

無負荷ガイドペーン開度7.5%のとき、ドラフトパイプ部の水圧脈動は4.6%、ケーシング入口部は2.5%である。ブレード角度は全閉ではないので、ブレードチップにはすきまがあ

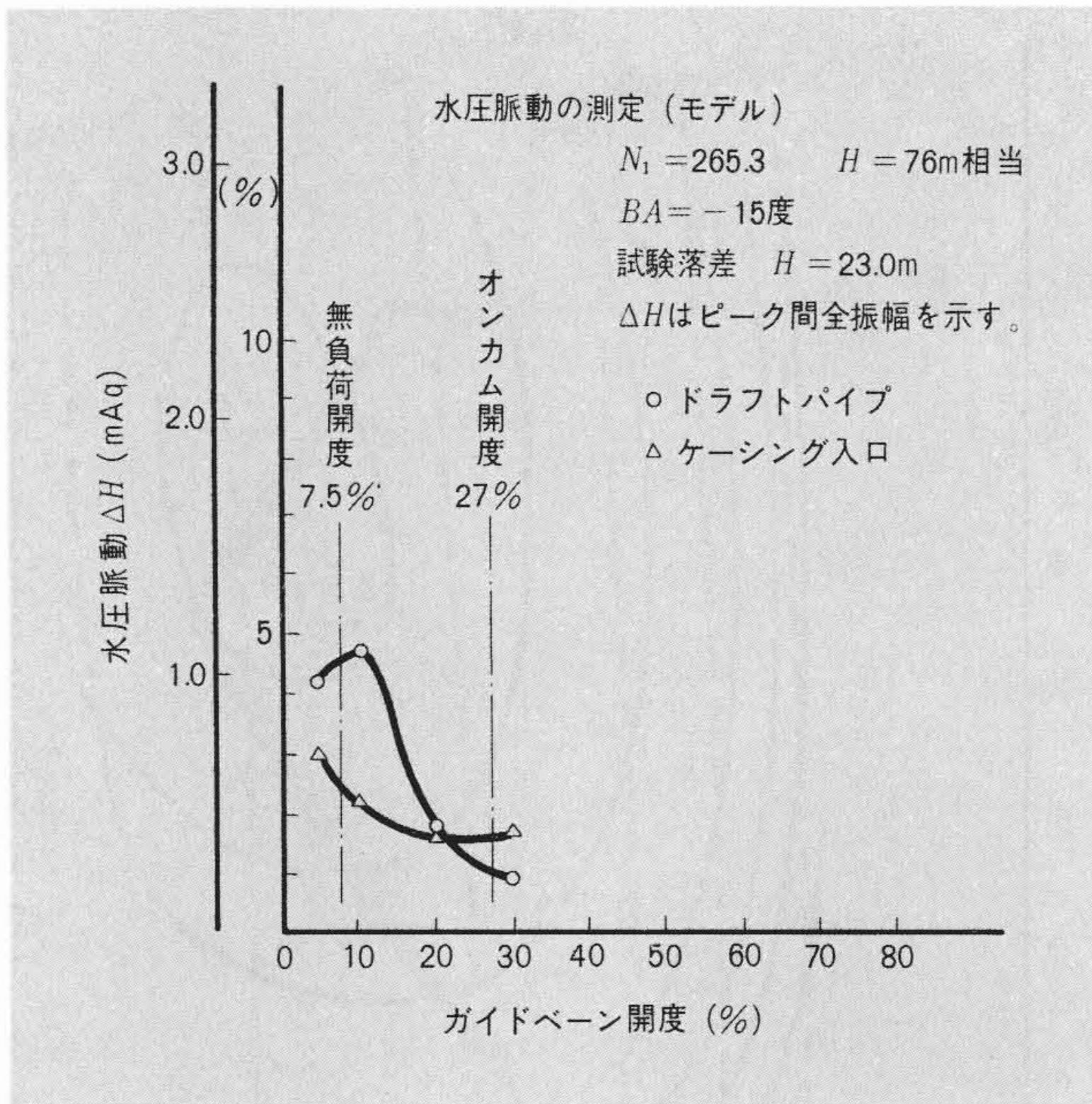


図5 水圧脈動の測定 ($H=76\text{m}$ 相当, $BA=-15^\circ$) $H=76\text{m}$ 相当の運転で, $BA=-15^\circ$ に保ち, ガイドベーン開度を変化させたときの水圧脈動を示す。

Fig. 5 Measurement of Pressure Fluctuation (Equivalent to $H=76\text{m}$, $BA=-15^\circ$)

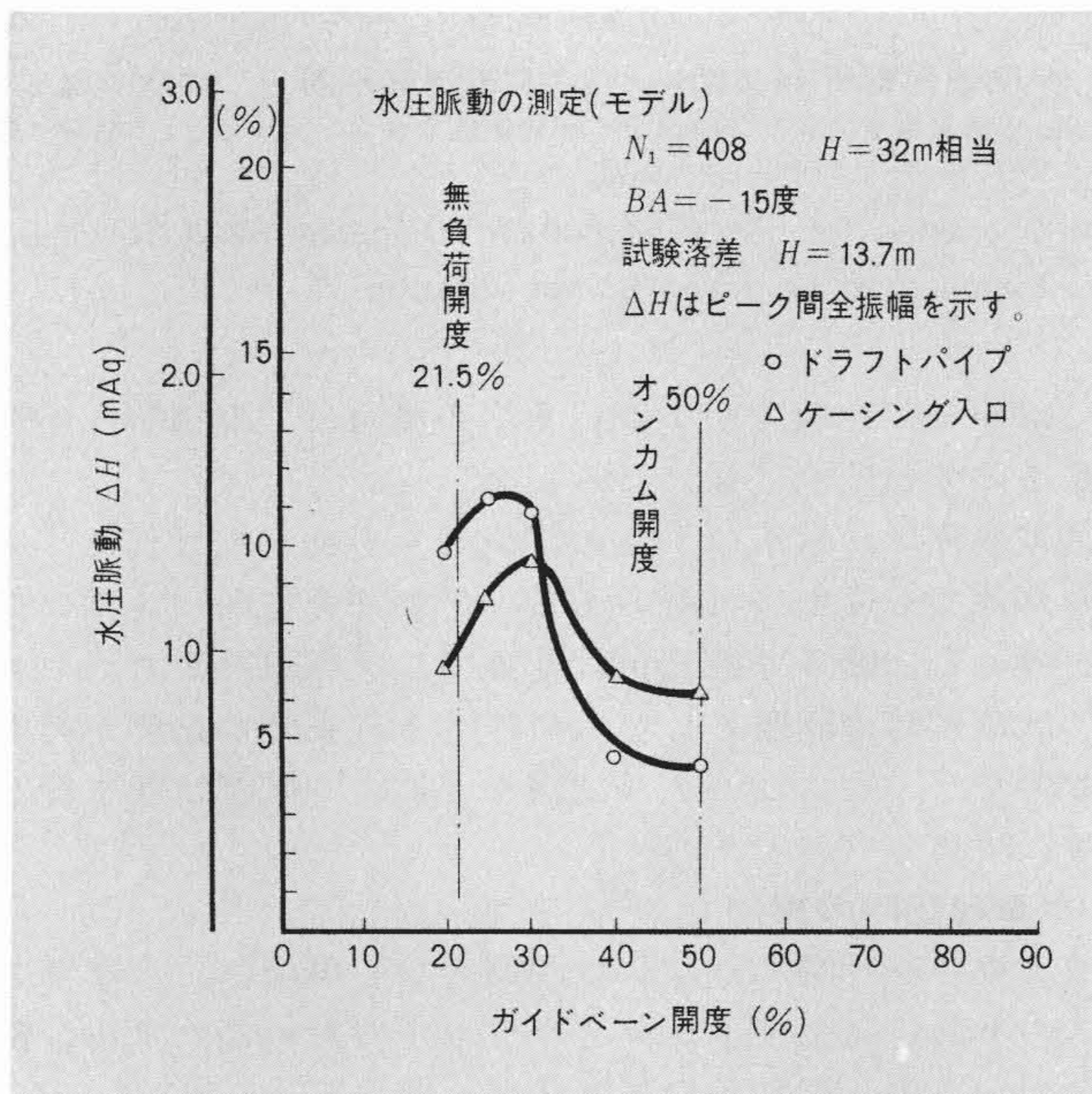


図6 水圧脈動の測定 ($H=32\text{m}$, $BA=-15^\circ$) $H=32\text{m}$ 相当の運転で, $BA=-15^\circ$ に保ち, ガイドベーン開度を変化させたときの水圧脈動を示す。

Fig. 6 Measurement of Pressure Fluctuation (Equivalent to $H=32\text{m}$, $BA=-15^\circ$)

り, したがって $BA=-15^\circ$ で最適効率運転を行なわせる オンカム関係になるにはガイドベーン開度は27%まで開かねばならない。このときの水圧脈動はドラフトパイプで1%, ケーシング入口で1.6%である。一方, 落差76mで, 起動時ブレード角度を -12.5° と大きくとった場合は, 図7のように起動時のドラフトパイプ水圧脈動は8.5%あり, 負荷をとってガイドベーン開度を開いてゆき, オンカム開度37%に至る過程において10.8%に達する。この現象は, 前述したようにランナブレードが大きくなりすぎて, ブレードとガイドベーンの最適関係から大幅にずれるために, ランナ後流のホワールが強大になり, 水圧脈動を助長するためである。一般に運転にさ

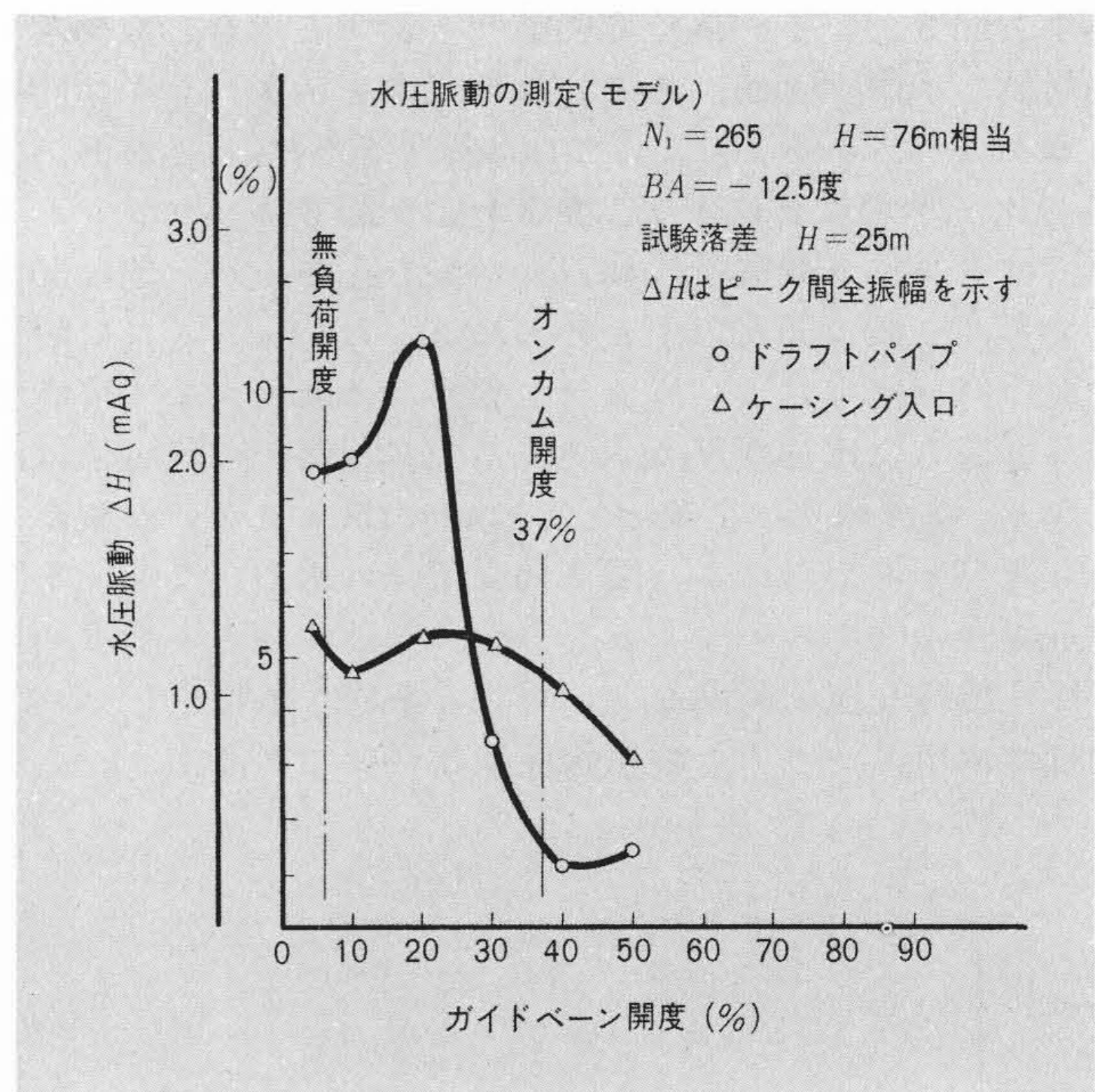


図7 水圧脈動の測定 ($H=76\text{m}$, $BA=-12.5^\circ$) $H=76\text{m}$ 相当の運転で, $BA=-12.5^\circ$ に保ち, ガイドベーン開度を変化させたときの水圧脈動を示す。

Fig. 7 Measurement of Pressure Fluctuation (Equivalent to $H=76\text{m}$, $BA=-12.5^\circ$)

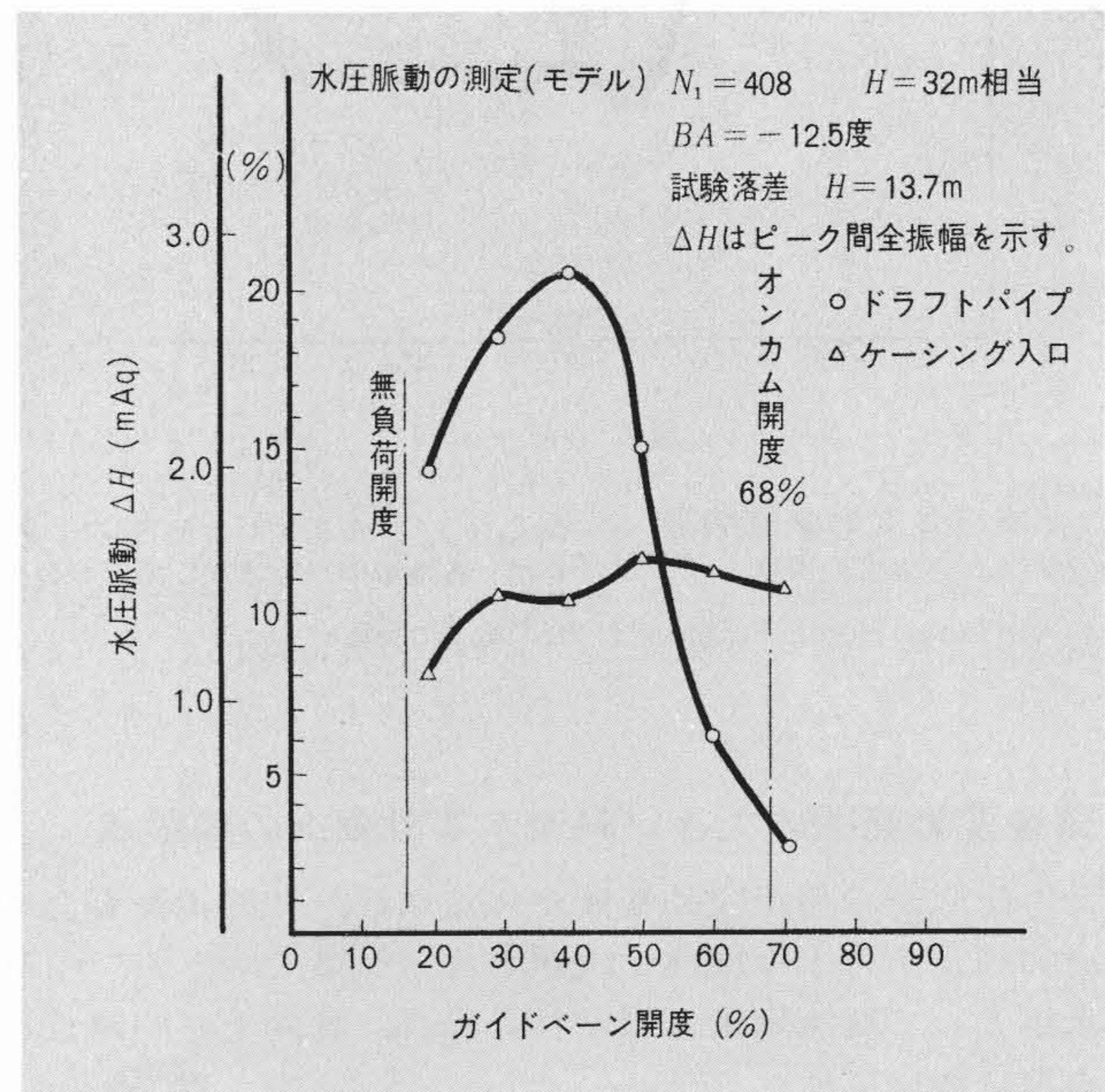


図8 水圧脈動の測定 ($H=32\text{m}$, $BA=-12.5^\circ$) $H=32\text{m}$ 相当の運転で, $BA=-12.5^\circ$ に保ち, ガイドベーン開度を変化させたときの水圧脈動を示す。

Fig. 8 Measurement of Pressure Fluctuation (Equivalent to $H=32\text{m}$, $BA=-12.5^\circ$)

しつかえない水圧脈動は, 基準落差に対し5%以下が望ましく, したがって $BA=-12.5^\circ$ の起動開度は不適當であり, $BA=-15^\circ$ が望ましいことがわかる。

図6より最低落差時, $BA=-15^\circ$ 時のドラフトパイプ水圧脈動は, 最大で11.2%あるが, 76m時に換算すると $11.2 \times \frac{32}{76} = 4.7\%$ となり, 起動にはさしつかえないことがわかる。一方, $BA=-12.5^\circ$ のときは図8よりドラフトパイプの水圧脈動は最大で20.5%となり, 76m時に換算しても8.6%となり起動ブレード角度として採用することは不適當である。

早明浦実機運転結果では, モデル試験で行なった上記落差の水圧脈動を計測していないが, 落差38m時の水車軸振れの

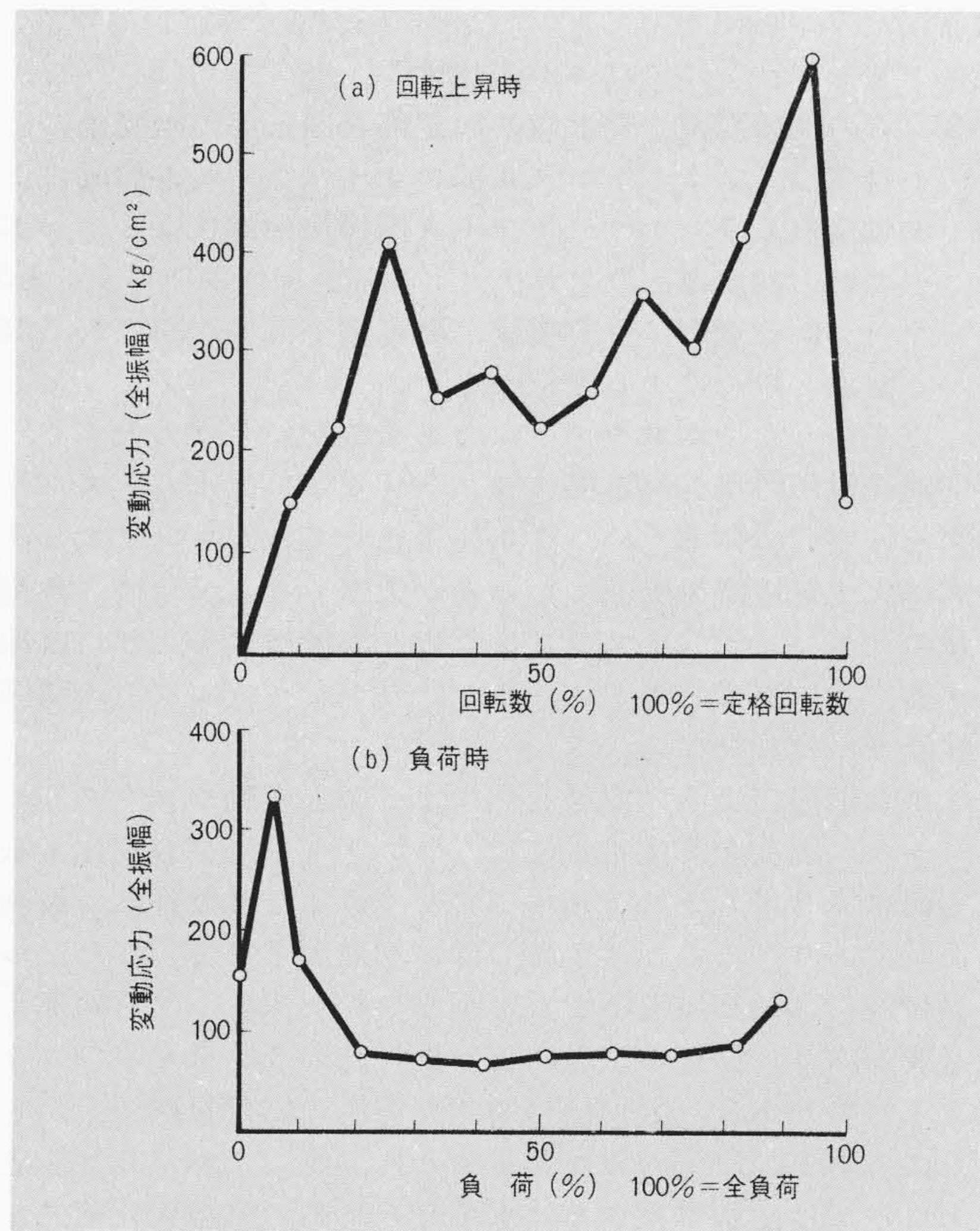


図9 類似斜流ポンプ水車の水車運転時変動応力測定例
類似斜流ポンプ水車の水車運転時におけるランナブレードの変動応力を示す。
定常運転時に比べ、水車起動時および小負荷時の変動応力は大きい。

Fig. 9 Example of Fluctuation Stress Measurement of Similar Diagonal Flow Pump-turbine

測定は、無負荷時の最大振幅で $0.03 \sim 0.04 \text{ mm}$ 、負荷 $8,500 \text{ kW}$ 時に 0.02 mm であり、静かな起動といえる。一方、起動時の振動特性はブレードの疲労強度に関係する。図9は類似斜流ポンプ水車の変動応力測定例を示したもので、(a)は回転上昇時のブレード付根変動応力である。回転上昇時にはガイドベーンからの高圧水流がブレードに衝突し、流れの様相も非定常なので変動応力は大きくなる。回転が規定回転に達すると定常な流れとなり、変動応力も小さくなる。

ここで水車を並列し負荷をとった場合のブレード変動応力は(b)に示すとおりである。測定例では10%以下の負荷で変動応力が大きい、回転上昇時の変動応力に比べると小さい。負荷時の変動応力の大きい範囲は、起動ブレード角度におけるオフカム運転の領域であり、オンカムになれば変動応力も小さくなり安定した運転となる。

早明浦発電所では、実機試験落差 38 m 時の起動ブレード角度 -15° のとき、ガイドベーン開度 40% において初めてオンカムとなるが、ドラフトホワール音およびピット内騒音から判断して、ガイドベーン開度 30% 程度まではホワールが発生し、ブレードの変動応力も全負荷時よりも大きいと考えられる。いずれにしても起動時の振動およびランナ強度は密接な関連を有しており、製作者の立場としては十分な事前検討が必要である。実機を運転してみて、起動時に振動が発生し、これを避けるためにブレード付根を切削加工し、起動ブレード角度を小さくした例なども知見するが、かかる事態は絶対に避けねばならない。落差変動範囲が広くなればいっその配慮が必要となる。

4.3 ランナサーボモータ内蔵の問題点

ランナサーボモータをランナボスの中に内蔵すれば、水車製作上のコスト低減にある程度寄与するが、そのために運転

上問題を生じることがあってはならない。この問題は水車と発電機を含めた全体の軸系の問題としてとらえられるが、水車単独で考えた場合、水車軸受位置からランナの水力中心に至る距離と、主軸直径の寸法比から比較することができる。図10は斜流水車の例を示したものであるが、横軸はランナ基準径 D_1 を、縦軸は上記の数字 H/d_1 を示している。 H/d_1 が大きいということは、水車軸受位置が高いところにあり、それだけ揺れやすいことを示している。図11は早明浦の水車ランナに衝撃荷重を加えたときの軸振れの計算結果を示したものである。ランナ部分はいちばん振れるが、水車主軸の実測軸振れが 0.04 mm 程度なので、ランナ部の振れは 0.20 mm 以下となり片側 1.5 mm のランナシールギャップに対し十分な余裕を有することがわかる。たとえ水車軸受位置が高くても、水流の外乱が小さければ実用上さしつかえない。したがって斜流水車にあっては、水車起動時の振動を小さくする問題に帰着するわけである。

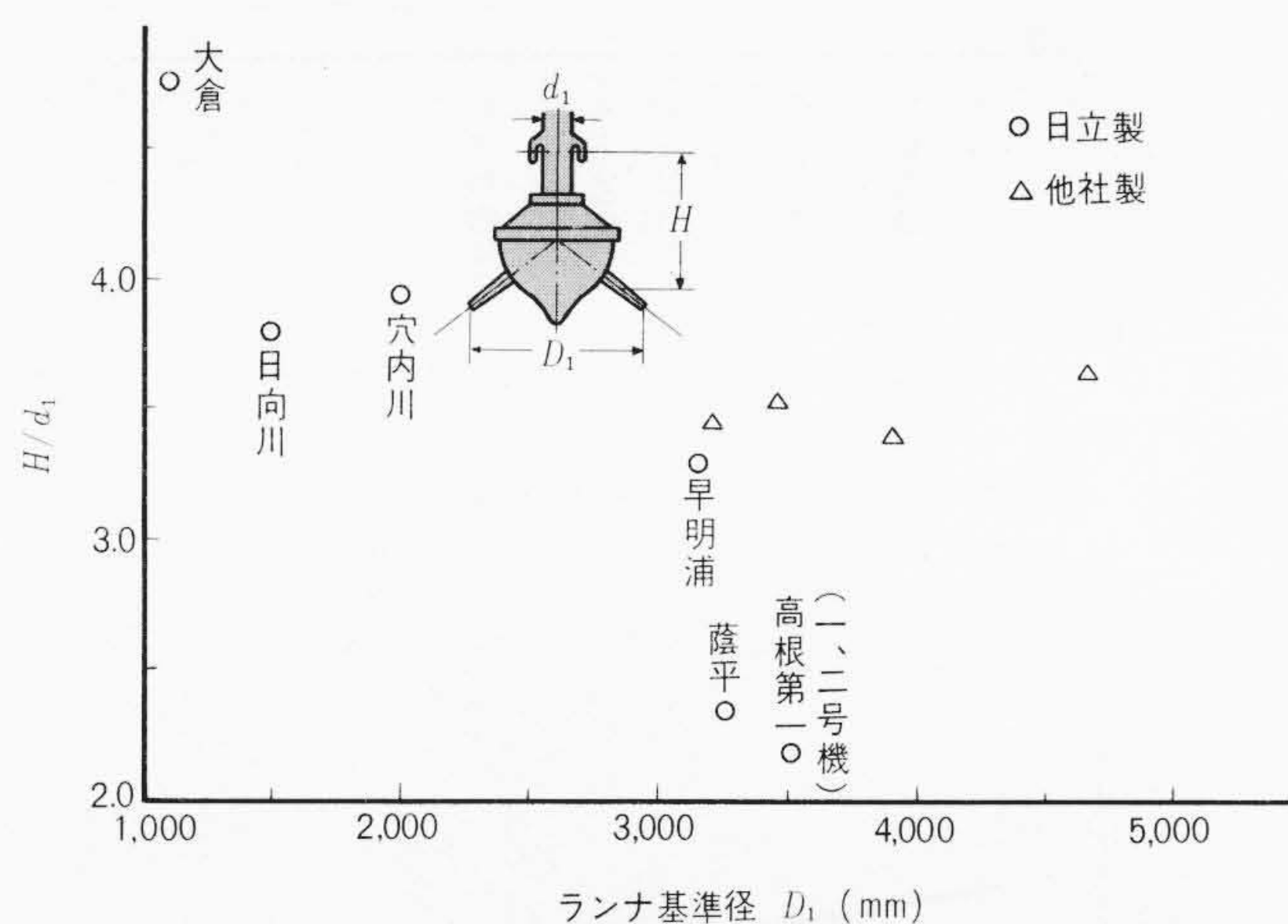


図10 ランナ・オーバハング 運転中の斜流水車のランナ・オーバハングを示す。水車メタルからブレード水圧作用点までの距離 H と主軸軸端径 d_1 の比で示す。 H/d_1 が大きいほどオーバハングは大きい。

Fig. 10 Over-hung of Runner

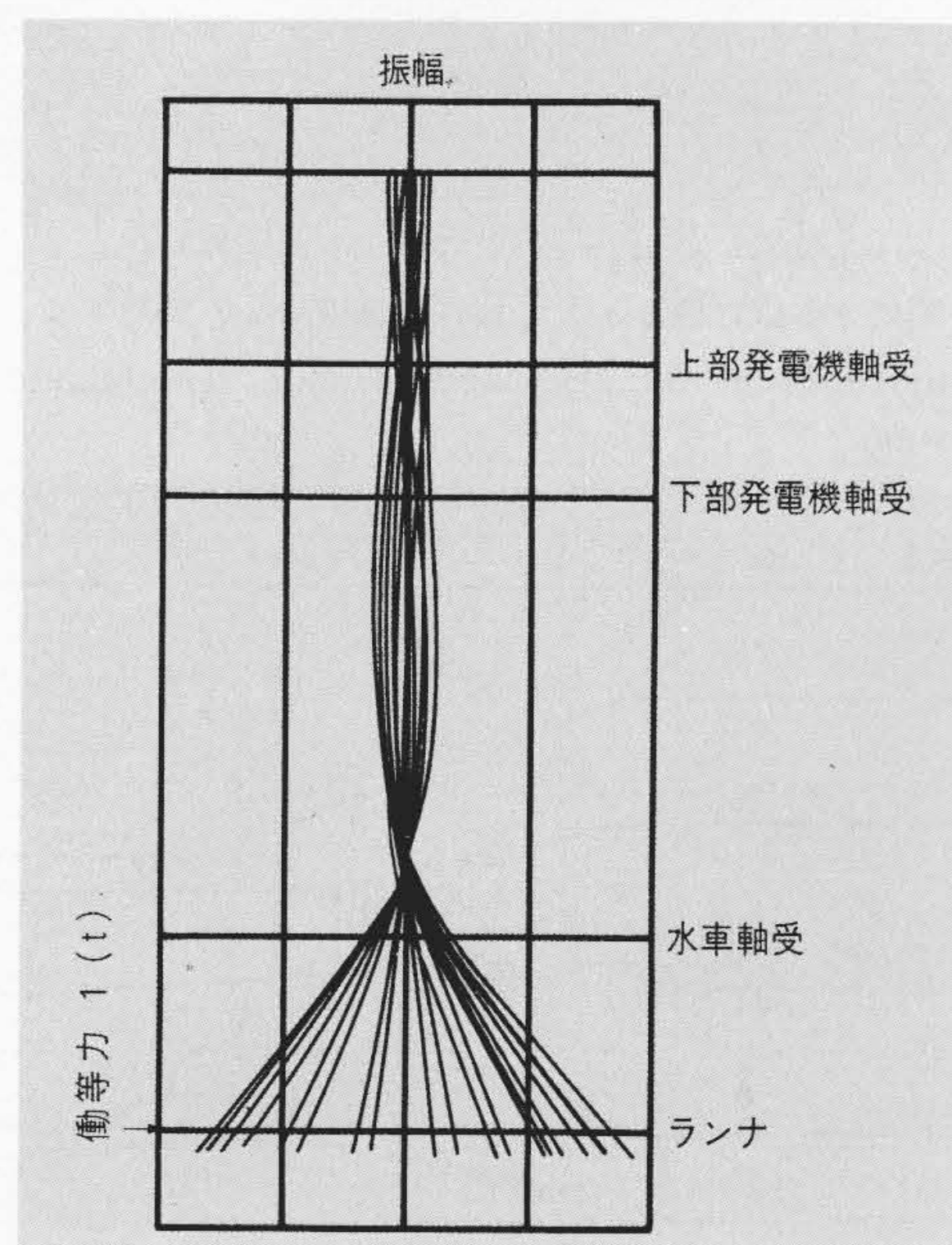


図11 早明浦水車軸振れ特性 衝撃力 $(1-t)$ をランナ水圧作用点に加えたときの水車-発電機の軸振動計算結果

Fig. 11 Amplitude of Shaft Vibration of Turbine and Generator Supplied to Sameura Power Station

4.4 ランナギャップ

図12は早明浦発電所ランナペーン外周間げき変化の計算値と実測値の対比を示したものである。計算条件としては落差100m、負荷44,000kWを設定し、実測は落差38m、負荷8,500kWで行なっている。ランナギャップに影響を与える要素としては次の事項が考えられる。

- (1) 水スラストによる変位：水車主軸、ランナサーボモータ、発電機主軸、コンクリートバレルの高さが変化する。
- (2) 室温変化による主軸変位：水車主軸、発電機主軸、コン

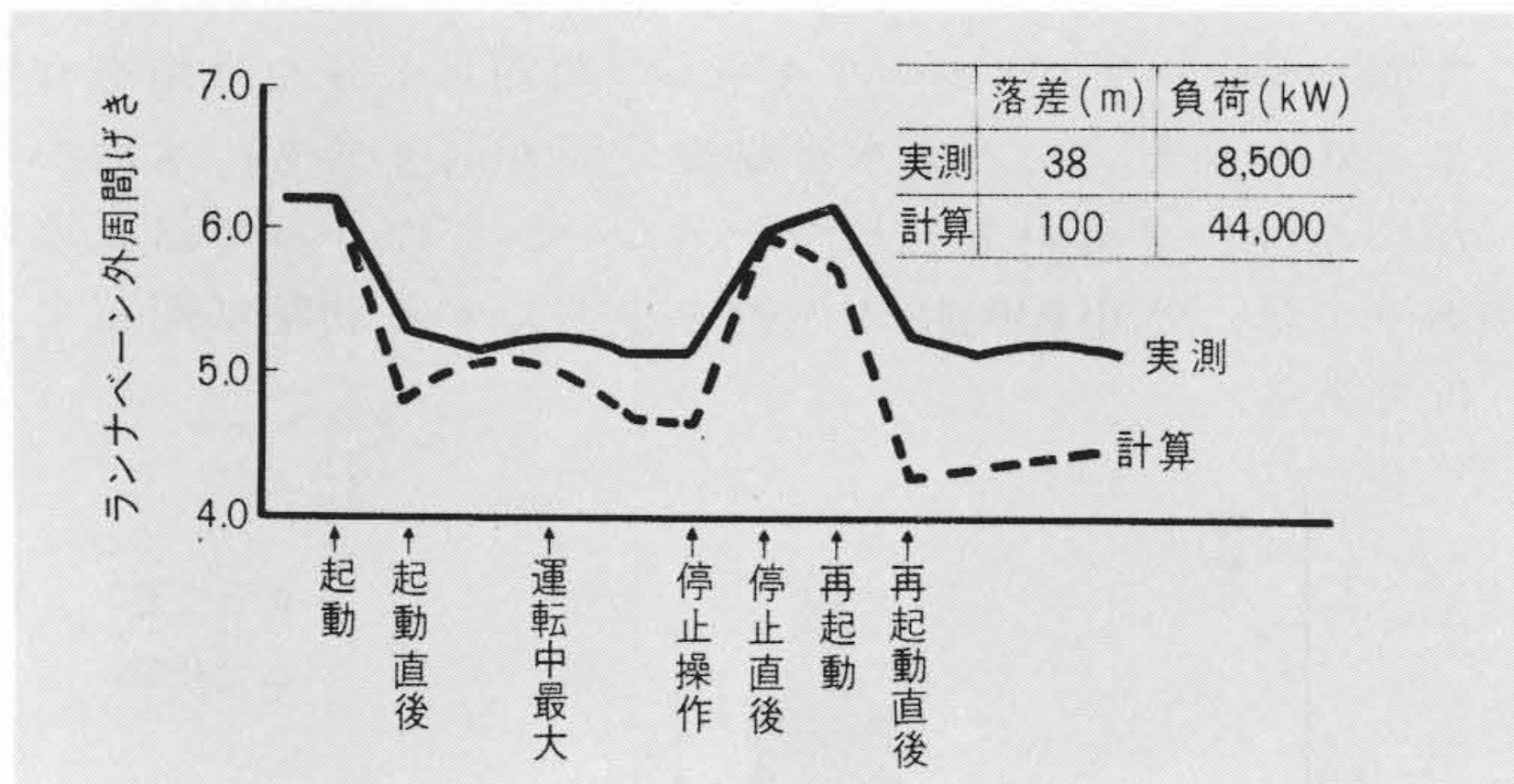


図12 ランナペーン外周間げき ランナペーン外周とディスチャージリングの間げき。計算と実測の対比

Fig. 12 Operation Gap Between Runner Blade and Discharge Ring

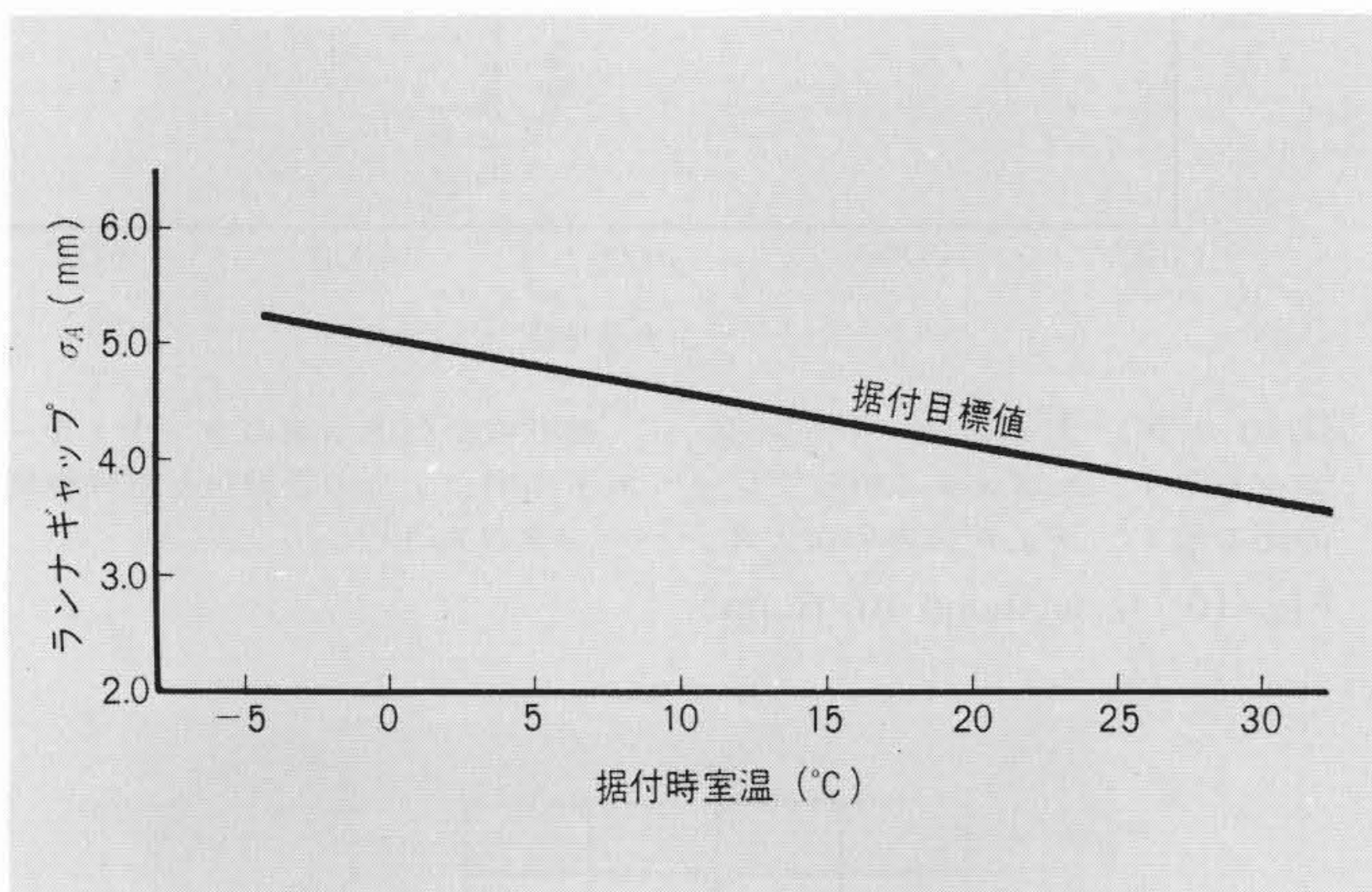


図13 ランナブレード据付ギャップ ランナブレードとディスチャージリングの間げきの据付値を示す。据付時室温により調整する。

Fig. 13 Installation Gap Between Runner Blade and Discharge Ring

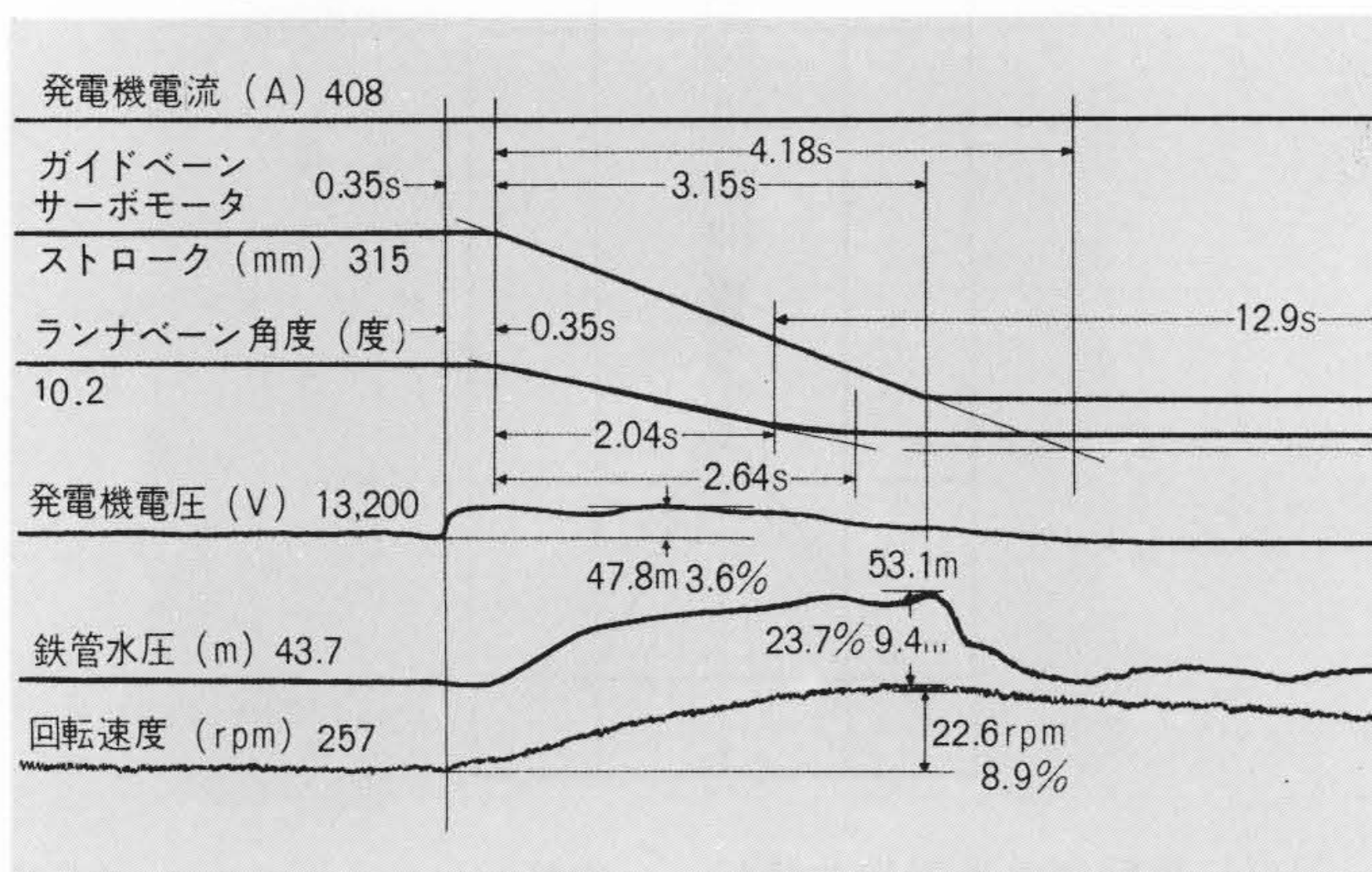


図14 しゃ断負荷8,640kW 負荷しゃ断試験結果 落差H=38m時の負荷しゃ断試験結果を示す。

Fig. 14 Test Result on Load Rejection at 8,640kW

クリートバレルの高さが変化する。

- (3) その他の変位：発電機の固定部と回転部の温度差による主軸変位、スラストメタル部のオイルフィルム形成による主軸変位、ランナサーボモータ内操作油温によるサーボモータ軸方向変位、ランナサーボモータ操作油圧による変位、ランナ回転変形による変位、発電機下部軸周囲の入気温度と室温との差による変位などがある。

以上のうちで水スラストによる変位がいちばん大きく、早明浦発電所の場合発電機スラストメタルにピボットスプリングを使用しているため、従来使用されてきたキングスベリ式に比べ発電機軸受部のたわみが大きくなる。今後、負荷容量の大きいピボットスプリングは、斜流機にもしばしば採用することになると考えられるが、ランナギャップとの関係で注意せねばならない。

また前述のように室温変化によっても主軸やコンクリートバレルの温度が変化するので、ランナギャップも変化する。室温により最もランナギャップが小さくなる条件は、最高室温時であり、このとき主軸の伸びが最大となる。したがって据付時には最高室温時でも安全なランナギャップを確保する必要がある。据付時室温により据付時のランナギャップを変える必要がある。図13は早明浦発電所の据付目標値を示したものである。以上からわかるように、ランナギャップ設定にあたっては、水車室または水車ピット内の室温変化範囲を知る必要があり、これは顧客から製作者に示されるべき仕様の一つと考える。

また発電所完成後しばらくの間はランナギャップが小さくなる傾向があり、これはケーシング上のコンクリート全体が沈下するためと認識される。沈下量は発電所の土木工事により異なるが、日立の斜流水車の過去例によると完成後1年以内に0.5~1.0mmの沈下量を考えねばならない。したがって据付時において上記の値程度ランナギャップを広げて設置すべきと考えられる。

4.5 負荷しゃ断

図14は負荷しゃ断試験結果を示したものである。早明浦発電所は早明浦ダムの工事が一部未完のため、落差38m、負荷8,640kWの試験までを行なった。

斜流水車の負荷しゃ断時にしばしば問題となる事項は、鉄管水圧の異常水圧脈動であり、このために $\frac{1}{4}$ 負荷しゃ断を行なった場合に水圧が保証値にはいらない例がしばしばある。この現象はガイドペーンの閉鎖時間に比べ、ランナペーンの閉鎖時間が長いために、負荷しゃ断時の運転軌跡がランナペーン角度の大きいところで無拘束速度に達するためである。これを防止するためには、ガイドペーンとランナペーンの閉鎖時間がほぼ同時($\frac{1}{4}$ 負荷で)になるように設定すればよい。ランナペーンサーボの配圧弁は大きくなるが、水圧脈動低減の効果は大きい。

5 結 言

電源開発株式会社早明浦発電所納め44,000kW斜流水車は、落差変動範囲の大きい水車の代表的例と考えられるが、本水車を参考として斜流水車の落差変動範囲の選定、水車起動時の振動、ランナサーボをボスに内蔵させたときの問題、ランナギャップ、負荷しゃ断などについて述べた。本論文が今後の斜流水車採用計画の一助になれば幸いである。

終わりに本機製作にあたり、貴重なご意見、ご協力を賜った電源開発株式会社の関係各位に対し厚くお礼申し上げます。