

中・小水力発電設備の最近の技術

Recent Technology for Small Hydroelectric Power Generation Equipment

中・小水力発電設備での最大の課題は、信頼性を確保しながらいかに建設費を低減するかにあるが、日立製作所は単品の原価低減はもとより、保守性の向上や年間発生電力量の増大、更には土木費低減への寄与などを含めて総合的にユーザーのメリットとなる新技術の開発に努めている。

本論文では、このような中・小水力発電設備での日立製作所の技術的特徴を、実績をベースに紹介する。

和田 毅彦* Yukihiro Wada
酒井 功一* Kōichi Sakai
奥山 武史** Takeshi Okuyama

1 緒 言

水力発電は、クリーンで循環可能なエネルギー源であるが、経済的な大容量地点はこれまでにほとんど開発され、現在我が国の未開発包蔵水力のうち開発可能な水力地点は20 MW以下の中・小水力がほとんどとなっている。しかし、石油危機以降、これら水力の再開発が強く望まれているが、立地条件の悪さとあいまって中・小水力は寸法効果が期待できないため建設費が割高となり、これが開発の大きな障害となっている。このように、水力発電を取り巻く環境は必ずしも容易なものではないが、水力への期待は依然として大きなものがある。

最近の水力発電開発の特徴をまとめると、(1) 水力発電所自体の小規模化、(2) S&B(スクラップ アンド ビルド)計画の増加、(3) 遊休施設の利用増加、などであり、水力発電設備に対する考え方も変わってきている。ここでは、最近の中・小水力発電機器に関する標準化、簡素化、合理化手法及び新技術の概要について述べる。

2 水 車

中小水力発電設備では、発電所建設から運開までのトータルコストをいかに最小限にするかがキーポイントとなっている。

そのためには、(1) 機器の標準化、(2) 機器の簡素化及び保守性の向上、(3) 土木設備費低減への貢献、(4) 最適機種を選定と水車効率の向上、(5) 老朽水車の寿命診断手法の確立、などをいかに有効に達成するかが重要である。このうち、(5)については別論文で紹介されているので、ここでは主として(1)～(4)について、以下、日立製作所の経験をベースに最近の技術について紹介する。

2.1 機器の標準化

機器の標準化については、最適機種選定図表、主要寸法、主要諸元、更には構造に至るまでの一連の標準化が完成している。図1に横軸フランシス水車の標準化構造例を示すが、平行形スピードリングによる構造の簡略化、高Ni 13Cr鋳鋼ラ

ンナの採用によるランナライナの省略及び耐キャビテーション性能の向上、しゅう(摺)動部分に対する無給油軸受の採用によるグリース給油の省略、シーリングボックスタイプの主軸封水装置、自蔵自冷式軸受の採用による給水系統の簡略化などがその主なものである。

2.2 機器の簡素化及び保守性の向上

これらは前項の機器の標準化とも密接に関連しているが、以前にもましてその重要性は大きくなっている。主なものとして、給水系統の簡素化、圧油系統の簡素化、状態機器監視システムなどを挙げることができる。

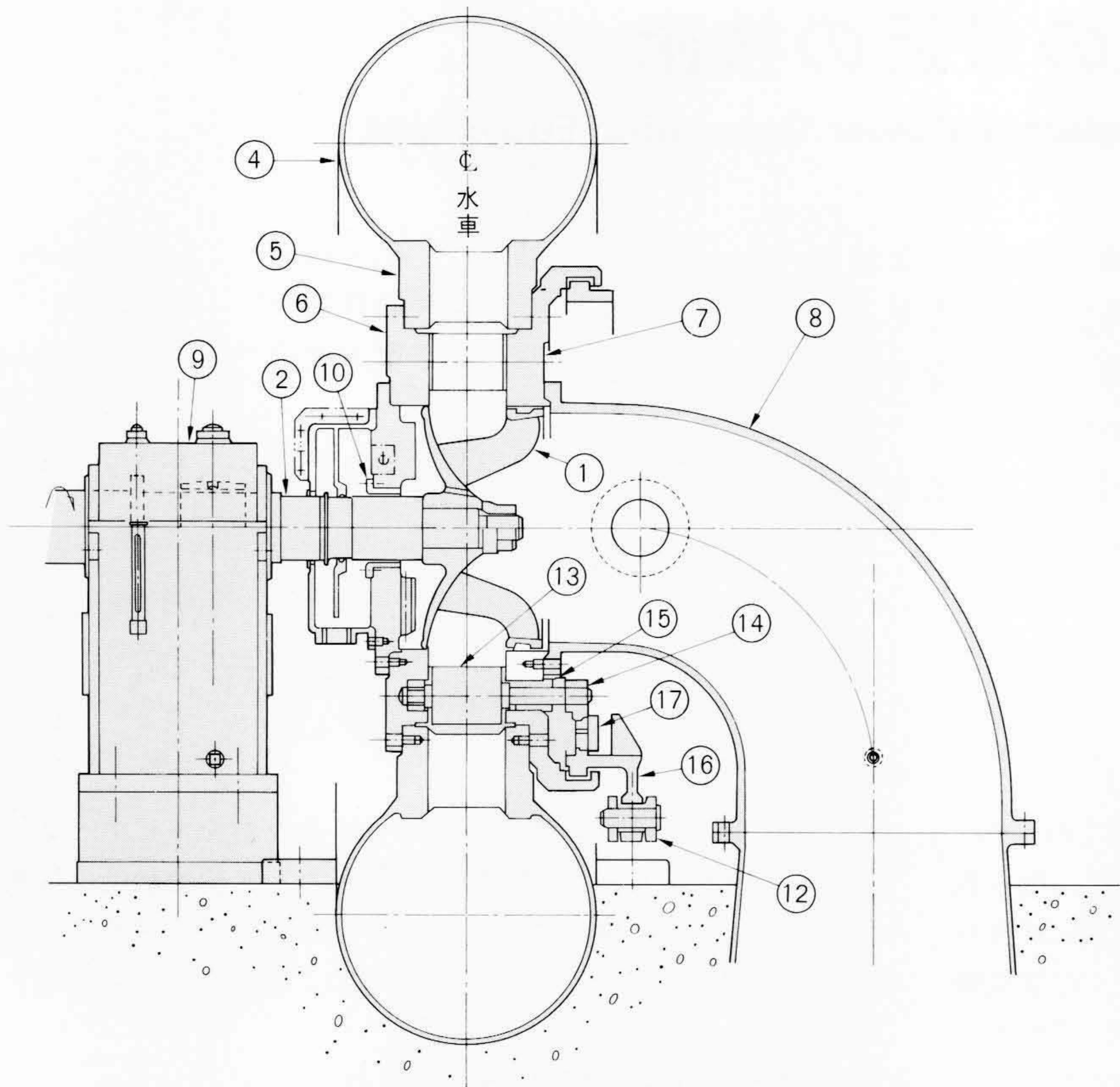
(1) 冷却水系統

水力発電所から冷却水設備をなくすことは設備の簡素化、建屋の縮小化などの直接的経済性のほかに、冷却水系にかかわる障害停止の要因を排除できるという点でも重要である。横軸のフランシス水車では、図2に示すような使い分けによって既に6発電所(他にペルトン水車4発電所)で発電機をも含めての完全無冷却水化を実現している。これは、複流水車の軸受部では、粘性ポンプを利用した新形ジャーナル軸受の採用、出力が1,000 kW以下の小容量の単流水車では、冷媒に水を用いた回転ヒートパイプの採用、出力が1,000 kW以上の軸受荷重がある程度大きな単流水車に対しては、強制循環オイルクーラ方式を採用するなど、細かな技術の積み重ねで実現したものである。また、縦軸のフランシス水車でも軸受周速で大体13 m/sまでは上カバー兼用の油槽下面から流水で冷却する方式を採用することによって冷却水の省略を実現し、既に約20発電所で大きな効果を挙げている。

一方、封水装置については、横軸フランシス水車では基本的にはカーボン繊維パッキンを用いたグランドパッキン方式を使用し、その締めしろを含めた据付調整を適正に行うことによって無給水封水装置の実現は可能であると考えている。

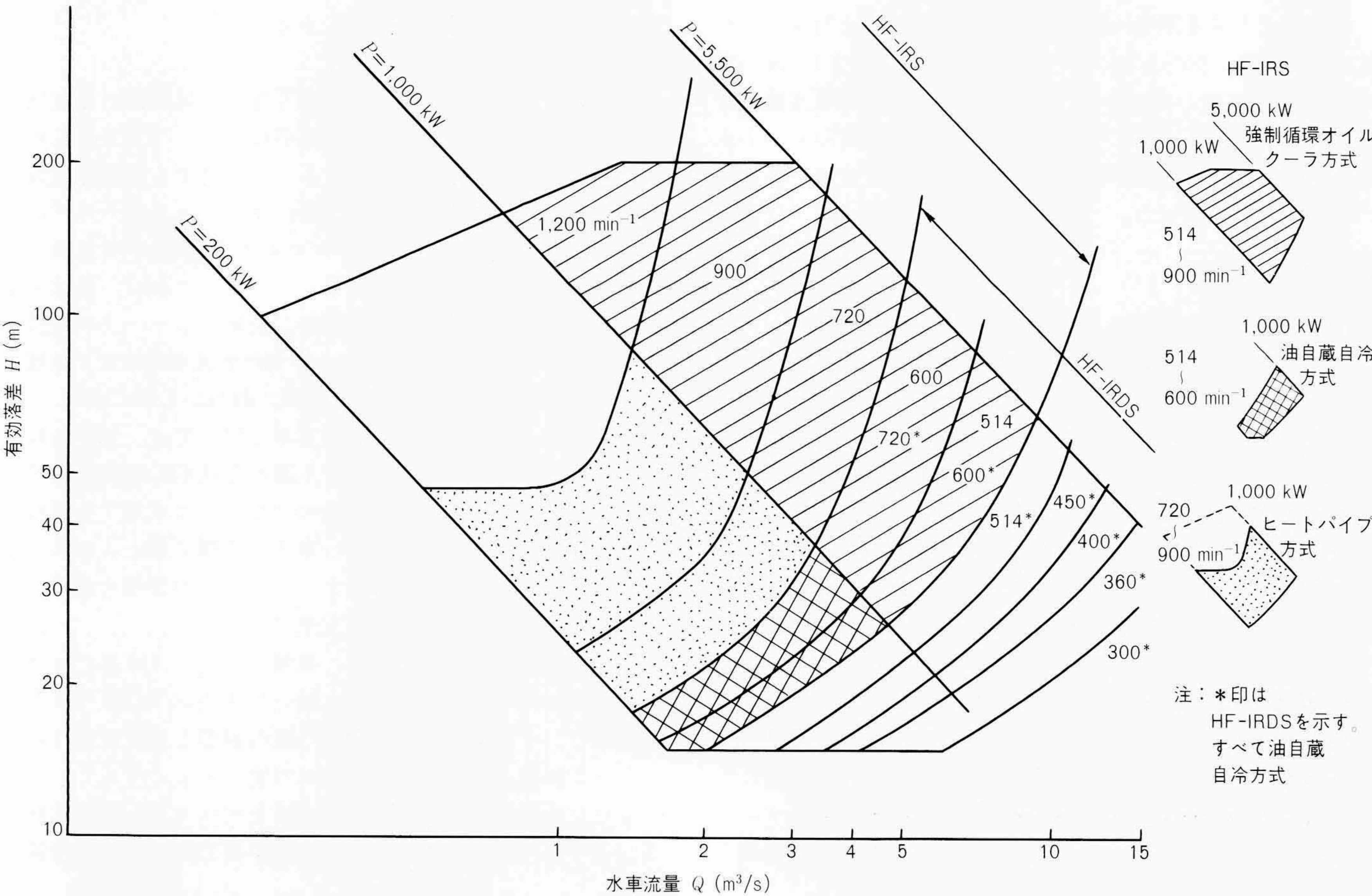
また、セラミックスなどの新素材をベースとした封水性能及び保守性の面で優れた清水不要の平面形の主軸封水装置の

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所大みか工場



No.	部 品 名	標 準 材 質
1	ランナ	5Ni13Crステンレス鋳鋼
2	主 軸	鍛 鋼
3	キ ー	鍛 鋼
4	ケーシング	鋼 板
5	スピードリング	鋼 板
6	上カバー	鋼 板
7	下カバー	鋼 板
8	吸出管	鋼 板
9	主軸受	鋼板及びホワイトメタル
10	主軸封水装置	鋼板及びホワイトメタル
11	メタルケース	鋼 板
12	サーボモータリンク	鋼 板
13	案内羽根	13Cr鋳鋼
14	案内羽根レバー	鋳 鋼
15	ブッシュ	無給油軸受
16	ガイドリング	鋼 板
17	案内羽根リンク	鋼 板

図 1 横軸フランシス水車の標準化構造例 平行形スピードリング，高Ni 13Cr鋳鋼ランナ，自蔵自冷式軸受などが主な特徴である。



注：略語説明 HF-IRS (横軸単流フランシス水車)，HF-IRDS (横軸複流フランシス水車)

図 2 横軸フランシス水車の軸受冷却方式 横軸フランシス水車では，ほとんどの領域で軸受の水なし化を実現している。

開発が現在進行中である。この方式によって漏水量の低減、土砂含有水利用可能など封水性能の向上が確認されており、現在耐久性について現地試験によって検証中である。

(2) 圧油系統の簡素化

圧油系統の簡素化に関連して最初に実現されたのは、案内羽根及び入口弁などのしゅう動部分の無給油軸受化、更には水車主軸への水潤滑軸受の適用であり、これらは既に実用化されて久しい。最近では可動翼水車のランナボス内の無給油化の例が増加している。これは、図3に示すようにランナボス内のしゅう動部は無給油軸受とステンレス軸の組合せとし、非しゅう動部は耐水性に優れたタールエポキシペイントによる塗装を施し、ランナボス内には自由表面を持つ清水を充満させ内圧の上昇を防止するよう考慮した構造となっている。このランナボス内無給油化については、既に7発電所に対して適用され好調な成績を収めている。

また、最近では中・小水力発電所では案内羽根あるいは入口弁操作のサーボモータを油圧式でなく電動式とする方式が一般化しつつある。更に、ペルトン水車のデフレクタや可動翼水車のランナベーン操作にも電動式サーボモータの適用が検討されている。また、従来の減速形に代わる直動形の電動サーボモータも開発されている。これは、保守を要するブラシがないブラシレス直流電動機をパワーシリンダ部に組

み込むことによって減速機を省略したもので、そのために減速形に比べてコンパクト化、効率の向上、騒音の低下、制御性・信頼性の向上、部品点数の減少などの効果がある。油圧式案内羽根サーボモータと電動式サーボモータとの比較を図4に示す。同図に示すように、電動式とすることによってバッテリー及びAC・DCコンバータなどの電気にかかわる部品が追加されるものの、圧油にかかわる部品がすべて省略され、システムとしてはかなり簡素化される。

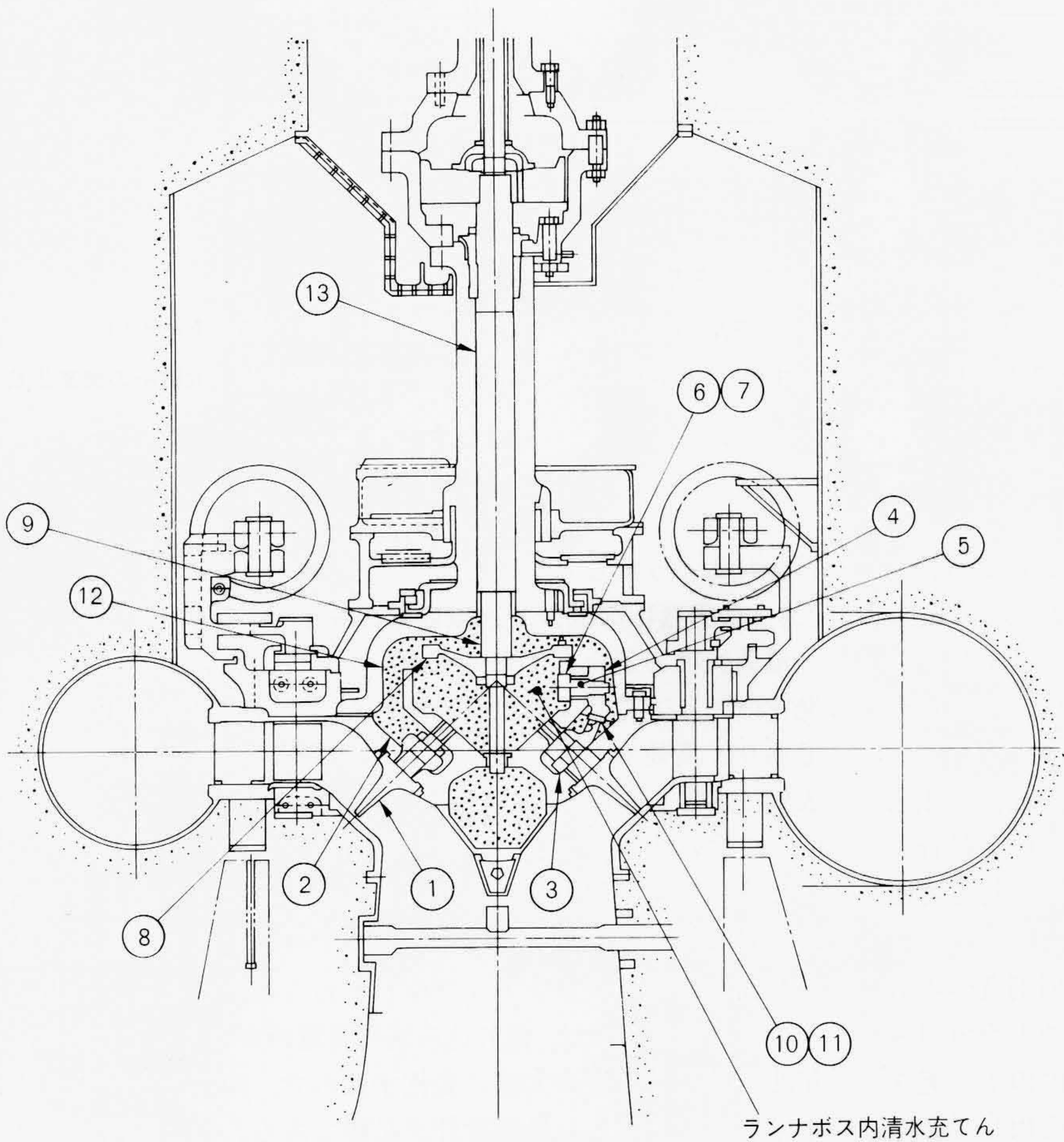
この電動サーボモータは、現在では水車出力で最大20 MWまでは対応可能であり、既に8発電所(うち直動形6発電所)に適用し好調に運転を続けている。

2.3 土木設備費低減への貢献

トータルコストミニマムの観点から土木設備費低減へ寄与できるものの例として、機器寸法の縮小(例えば横軸フランシス水車の2軸受化)による建屋のコンパクト化やペルトン水車でのデフレクタ放流、並入による余水路の省略あるいは流れの詳細な解析や実験をベースにしたドラフトチューブの小形化、浅底化などを挙げることができる。

(1) 横軸フランシス水車の2軸受化

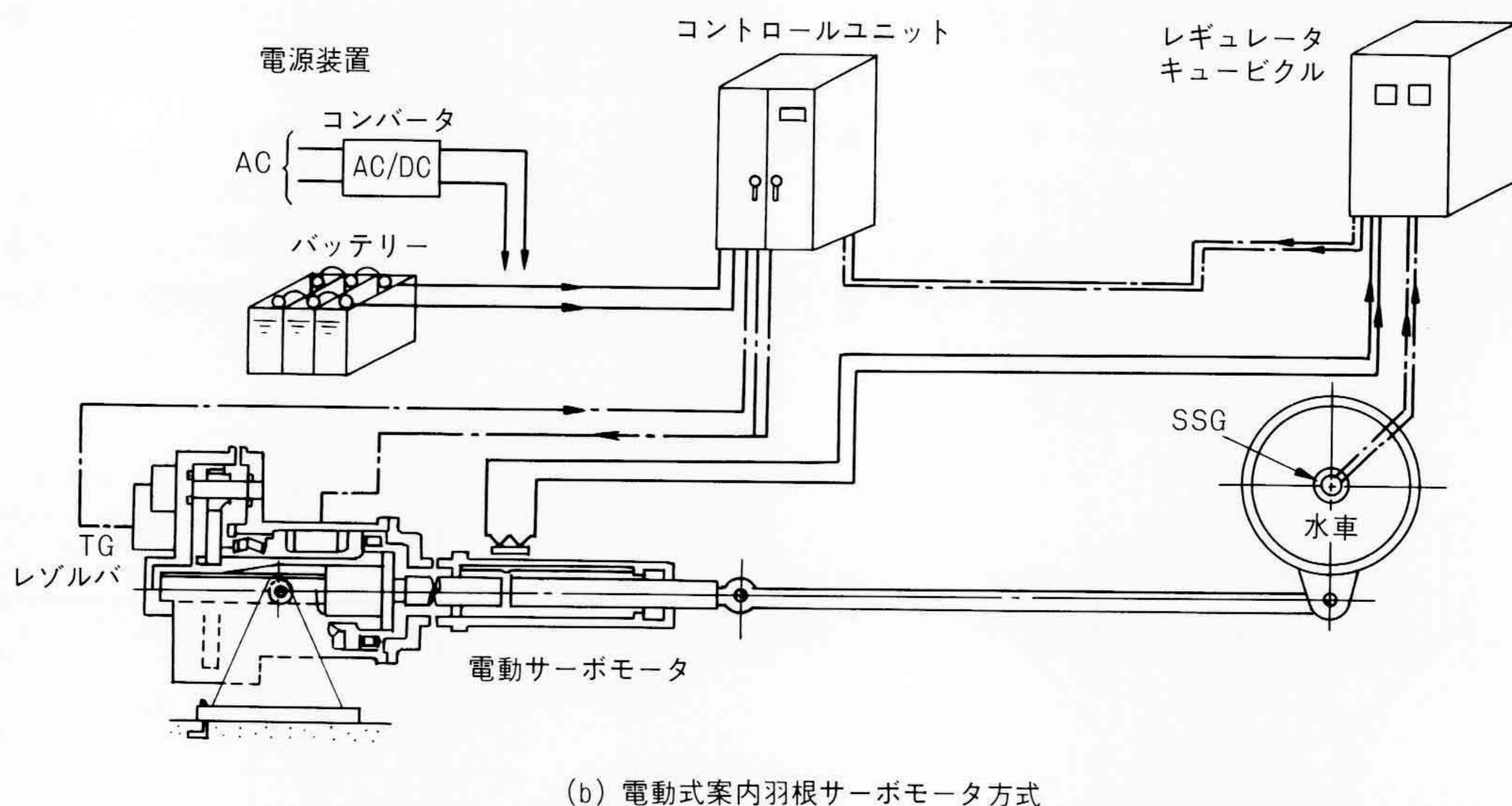
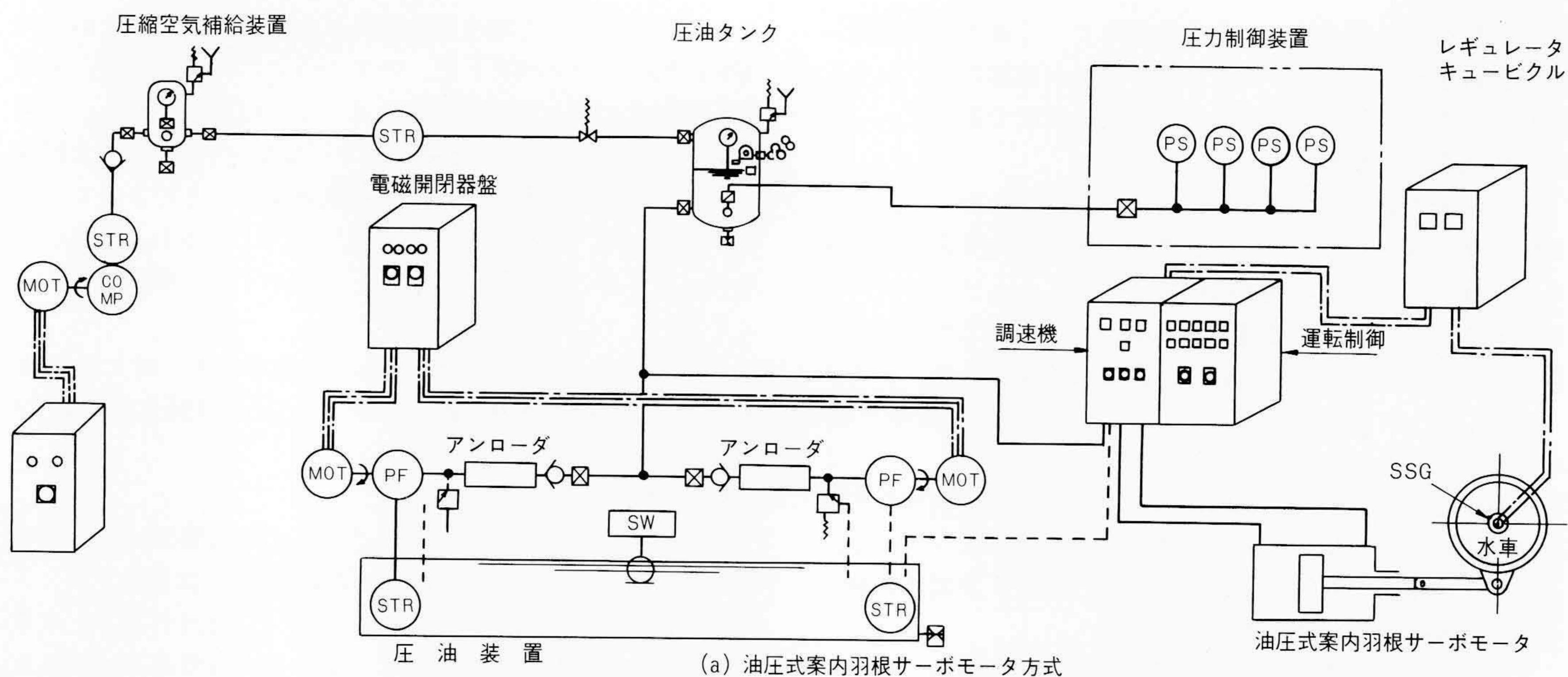
横軸フランシス水車の2軸受化については、フライホイールを省略することによって軸受数の低減を図るものである。この場合、負荷遮断時の速度上昇が問題となるが、許容ΔNの



ランナボス内部品材質・さび止め方法

No.	部 品 名	材 質	さび止め処理
1	ランナベーン	高Ni13Crステンレス	—
2	ランナボス	SC-46	タールエポキシペイント
3	ランナベーンレバー(1)	SCS-1	—
4	ランナベーンレバー(2)	SCS-1	—
5	スピンドル	SCS-1	—
6	リンク	SUS403HP	—
7	ピン	SUS403B	—
8	クロスヘッド	SM41A	タールエポキシペイント
9	操作ロッド	SUS403B	—
10	スライダブロック	500SP1-SL401	無給油軸受
11	スライダブロックピン	SUS403B	—
12	ランナボス上カバー	SC46	タールエポキシペイント
13	主軸	SF55A	同 上
ボス内ランナ操作機構各部軸受		500SP1-SL401	無給油軸受

図3 可動翼水車のランナボス内無給油化実施例 ランナボス内の無給油化によって潤滑油流出によるトラブルポテンシャルがなくなり、保守性の面で大きなメリットがある。



注：略語説明 PS (圧力開閉器), STR (ストレーナ), SSG (スピードシグナルゼネレータ), PF (圧油ポンプ), SW (開閉器), TG (タコゼネレータ)

図4 油圧式と電動式(直動式)案内羽根サーボモータの比較 電動サーボモータの採用によって圧油系統一切が省略でき、発電所の簡素化及び保守性の面で大きなメリットがある。

上昇によって対応する場合が多い。このような2軸受横軸フランシス水車については、既に多数の実績があり大きな成果を挙げているが、そのほとんどで負荷遮断時の速度上昇が無拘束速度となる、いわゆる無拘束速度設計あるいはそれに近いものとなっている。

(2) ペルトン水車の余水路省略に伴うデフレクタ放流、並入についてはまだ試験的な検討の段階であるが、詳細な総合シミュレーションを含む机上検討を行った結果、十分対応可能であるとの結論が得られている。

(3) ドラフトチューブの小形化、浅底化は土木掘削費への貢献が大きいものの一つであるが、その検討には多大の労力を要する。最近ではコンピュータの発達により精度のよい実在流体の解析が可能になりつつあり、その手法を適用してケーシングからドラフトチューブまでの各コンポーネントの詳細な流れ解析を行うことによって、最適化を図ることが盛んに

行われるようになっている。

2.4 最適機種の選定と水車効率の向上

最適機種の選定と水車効率の向上とは、換言すれば、その発電所の年間発生電力量が最大になるような構成とすることであり、高効率モデルのラインアップや可変速水車はその代表例である。

(1) モデルのラインアップ及び軽負荷ランナ

まず年間発生電力量を最大とするためには、どのような落差流量に対しても最適機種、最適モデルで対応できるように広範囲な機種のラインアップをしておく必要がある。一方、中小水力発電所では、流れ込み式の発電所がほとんどであり、年間を通して流量が大幅に変化するので、同じフランシス水車でも流況に応じた最適設計が必要である。特に国内では秋季、冬季の渇水期間が長いので、大流量域よりも小流量域での効率を向上させたほうが年間発生電力量の増大に寄与する

場合が多い。このいわゆる軽負荷ランナの開発によって、最高効率をほとんど犠牲にすることなく軽負荷側の効率を大きく向上させ、年間発生電力量を従来のものに比べて大幅に増大させることができた。

(2) 水車効率の向上

最近ランナも含めたケーシングからドラフトチューブまでのポテンシャルだけでなく、粘性流れによる流れ解析も可能になりつつあり、最適流水面形状決定の完全CAD (Computer Aided Design) 化、CAE (Computer Aided Engineering) 化に大きく前進している。このような流体解析技術を最大限に応用することによって、最近では水車全体の性能予測もかなりの精度で可能になっている。

乱流解析による案内羽根周りの流れ状況の一例を図5に示すが、このような流体解析技術の進歩によって、水車のリハビリテーションに対してもランナ交換前後の特性検討、ランナあるいはその他流水面の最適プロファイルの検討がモデル試験前にタイムリーにできるようになっている。

3 発電機

発電機は定格容量、回転速度、立軸、横軸などの主要な仕様が駆動機である水車の選定によって決まる。加えて、その発電所特有の要求があり、例えば冷却水の確保が困難である場合などがある。このような発電所には、出口管通風形の発電機を採用し、かつ軸受にも風冷を採用して発電所の完全無冷却水化を図るなどの対応が必要であり、いろいろな要素技術の開発が重要である。

発電機の要素技術の変遷を図6に示す。高品質化、高信頼性を主体に開発されてきた絶縁技術、軸受技術に加えて、中・小水力発電所の特徴的な要求である無冷却水化、無圧油・無圧縮空気化、小形・軽量化に対応した技術開発が進められている。

3.1 冷却水系統

立軸水車発電機のスラスト軸受の無冷却水化可能範囲を図7に示す。無冷却水化、すなわち風冷化の範囲は冷却効率の向上、軸受発生損失の低減が基盤となっており、前項で述べた粘性ポンプ、回転ヒートパイプは冷却効率向上の技術である。スラスト軸受では、荷重バランスのよい日立ピボットスプリング支持、冷却性能のよい台形断面軸受の採用によって小形化を図り、低損失化を可能にしている。なお、軸受の管理温度を従来の65℃よりも高くして風冷化の範囲を拡大する場合もあり、この場合は、軸受の油膜厚さなどの性能は計算によって確認した上で採用しており、信頼性の確保には万全を期している。

3.2 油圧、圧縮空気系統

水車の無給油軸受化、電動サーボモータの採用とともに、発電機のブレーキを電磁力操作方式とすることによって、油圧、圧縮空気の設備をなくす試みが行われている。ブレーキ方式としては、バンドブレーキ、ディスクブレーキ及び押しつけ式ブレーキがあり、種々検討した結果、保守性に優れる押しつけ式の電磁ブレーキを開発実用化した。この電磁ブレーキは、ブレーキシューの摩耗によるストロークの変化があ

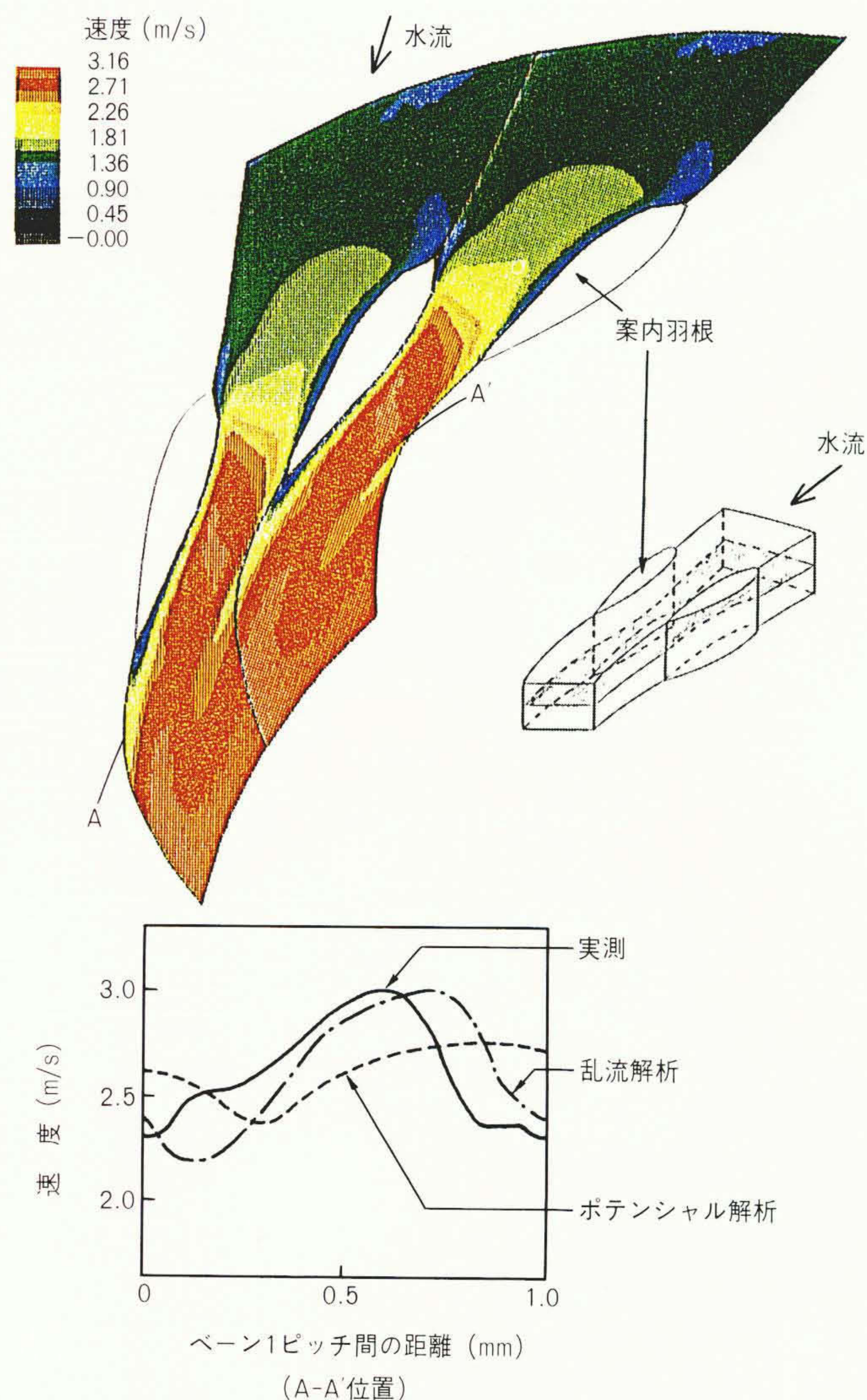


図5 乱流解析による案内羽根周りの流れ状況 このような乱流解析を行うことによって、流水部形状のより正確な評価が可能になる。

っても押しつけ力が変化しない設計になっている。

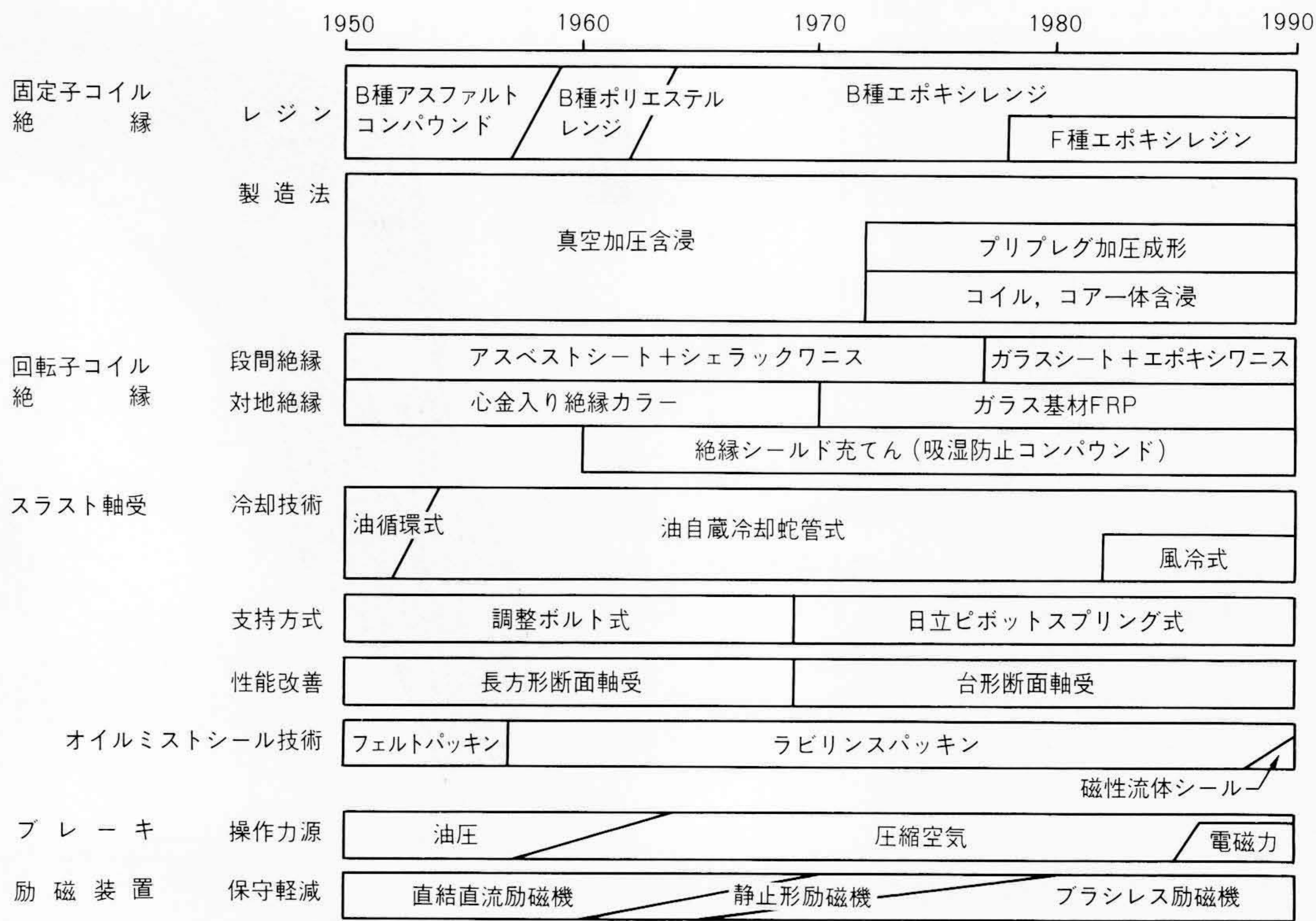
3.3 保守の省力化

保守省力化の技術としてブラシレス発電機が開発、採用されてから20年以上が経過し、この間に適用範囲が徐々に拡大されてきた。ブラシレス発電機の納入実績は80台を超え、容量60 MVAの発電機が運転されている。また、回転整流器素子の技術の進歩によって高耐電圧、大電流の素子が使用されるようになり、高い信頼性を確保しながら適用範囲の拡大を可能にしている。関連技術として、非接触形の界磁地絡検出リレーや素子故障検出リレーが開発、実用化されている。

軸受油槽からのオイルミストの漏れ防止は、保守上の問題点の一つであった。従来、軸貫通部にはラビリンスパッキンを用いていたが、供給空気圧力の調整が必要であった。この軸貫通部に新素材である磁性流体を用いて完全密封シールを行う方法が研究開発され、実機に組み込まれ実証試験が行われている。磁性流体シールの構造を図8に示す。

3.4 発電機の小形・軽量化

発電機の小形・軽量化は、発電所の建屋の縮小、クレーン設備の軽減などトータルコストの低減に有効である。F種絶縁



注：略語説明 FRP (ガラス繊維強化プラスチック)

図6 発電機要素技術の推移 中・小水力発電機に適用される小形・軽量化、省保守化の技術が開発され実用化されている。

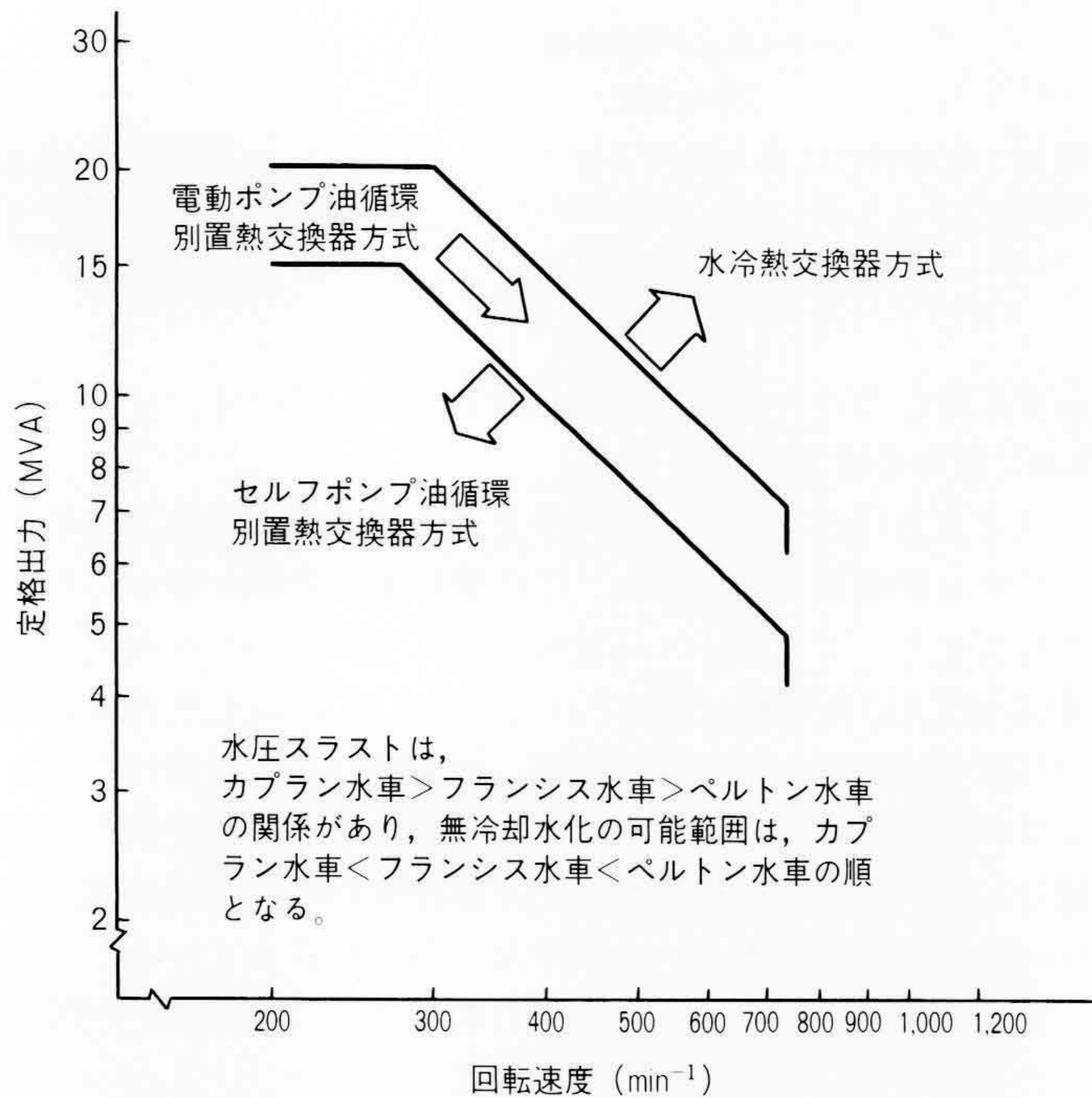


図7 立軸機、スラスト軸受の無冷却水化の範囲 フランシス水車駆動、軸受温度75℃の例を示す。

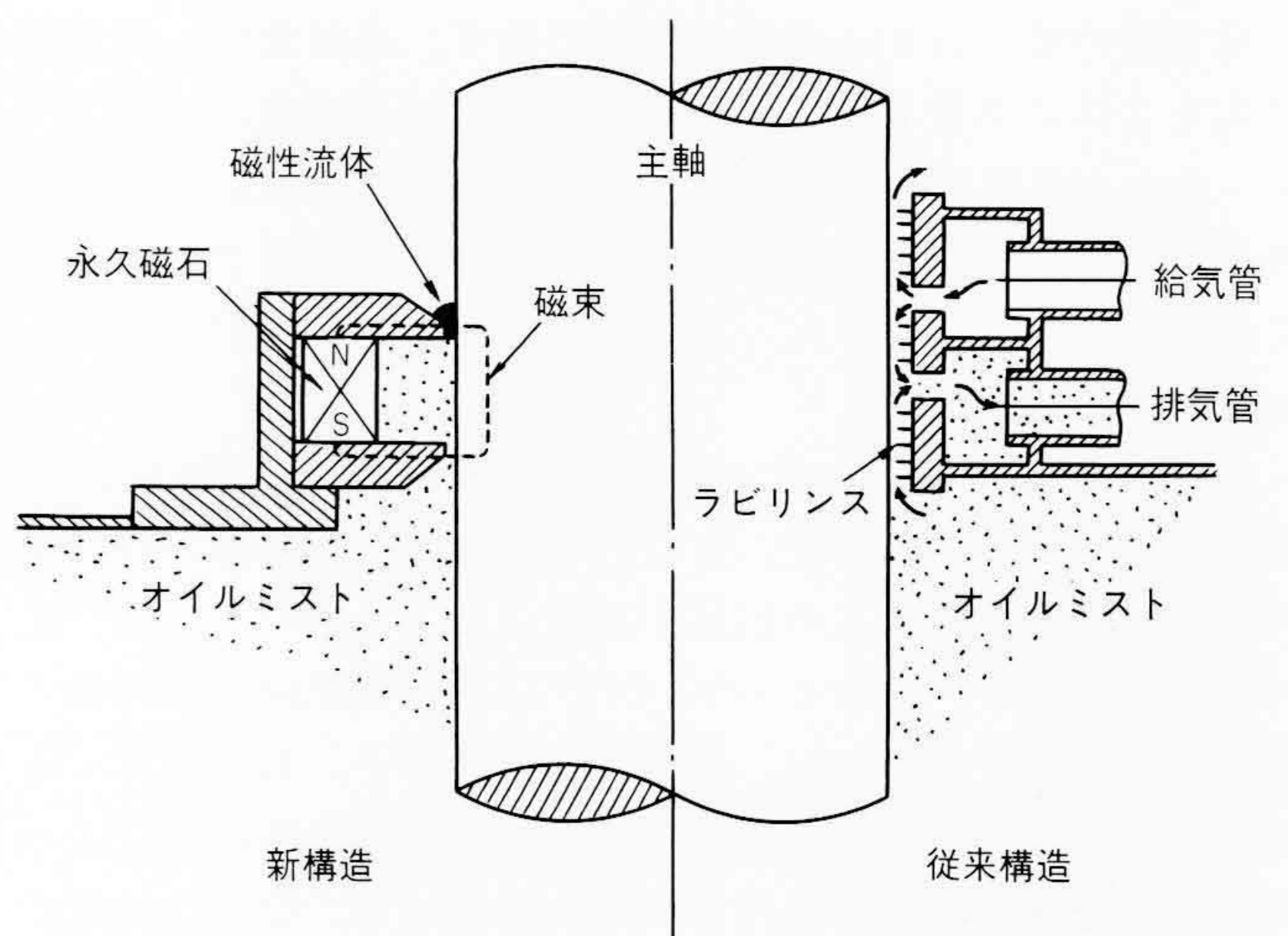
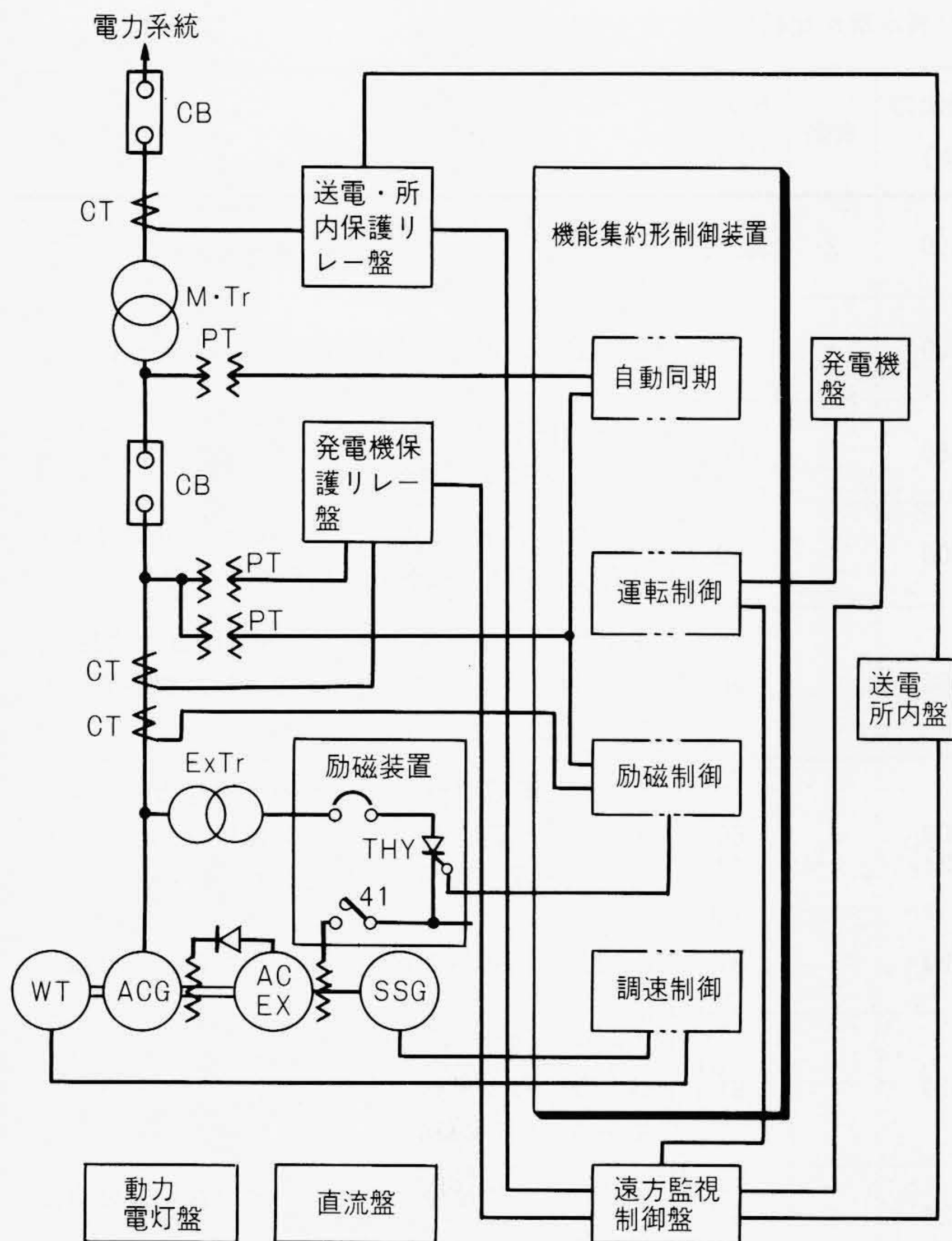


図8 磁性流体によるオイルミストシール 軸の周りのすき間を磁性流体でふさぎ、完全なシールを実現している。

の採用は発電機の小型・軽量化を可能にするが、負荷遮断時の速度上昇率や水圧上昇率の制限から発電機に求められる「はずみ車効果」が小型・軽量化を阻害する例が多かった。最近では発電機の「はずみ車効果」は、固有値として速度上昇に

は制限を加えない例もあり、総合的な小型・軽量化の試みがなされる気運になってきた。水車の電動サーボモータの適用範囲拡大は、限られた操作力による案内羽根閉鎖時間の延長と関連して負荷遮断時の上昇速度が、より無拘束速度に近づく点について注目する必要がある。従来から発電機や水車は機械応力については無拘束速度に耐える設計としていたが、軸受及びその冷却については、回転速度と時間について十分



注：略語説明

ACEX (交流励磁機) MTr (主要変圧器) 41 (界磁開閉器)
ACG (交流発電機) PT (計器用変成器)
CB (遮断器) SSG (速度信号発信器)
CT (計器用変流器) THY (サイリスタ素子)
ExTr (励磁用変圧器) WT (水車)

図9 機能集約形制御装置構成図 水力発電所の制御をマイクロコンピュータによって集約制御する。

な検討が必要である。更に、所内補機動力源の周波数上昇は補機の過負荷、遮断につながるため、所内電源の分岐点についての配慮が必要である。

4 制御機器

中・小水力発電設備は一般に遠方制御、随時監視が行われており、制御装置の高信頼度化、運転、保守の簡易化が望まれている。このため日立製作所では蓄積された制御技術と著しく進歩発展を遂げたエレクトロニクス技術とを駆使し、各種制御を一つのマイクロコンピュータで実行させる機能集約形制御装置を開発して昭和59年以来5台を納入し、順調に運転中である。ここでは、この機能集約形制御装置の概要について述べる。

4.1 機能集約形制御装置の基本的考え方

(1) 保護と制御の分離

発電所の機器損傷や事故波及の防止を目的とする保護機能が、制御機能の不具合により阻害されることがないように完全に分離する。



図10 機能集約形制御装置 運転制御、自動同期、励磁制御、調速機制御などの制御機能を一つのキュービクルで実現した装置正面写真を示す。

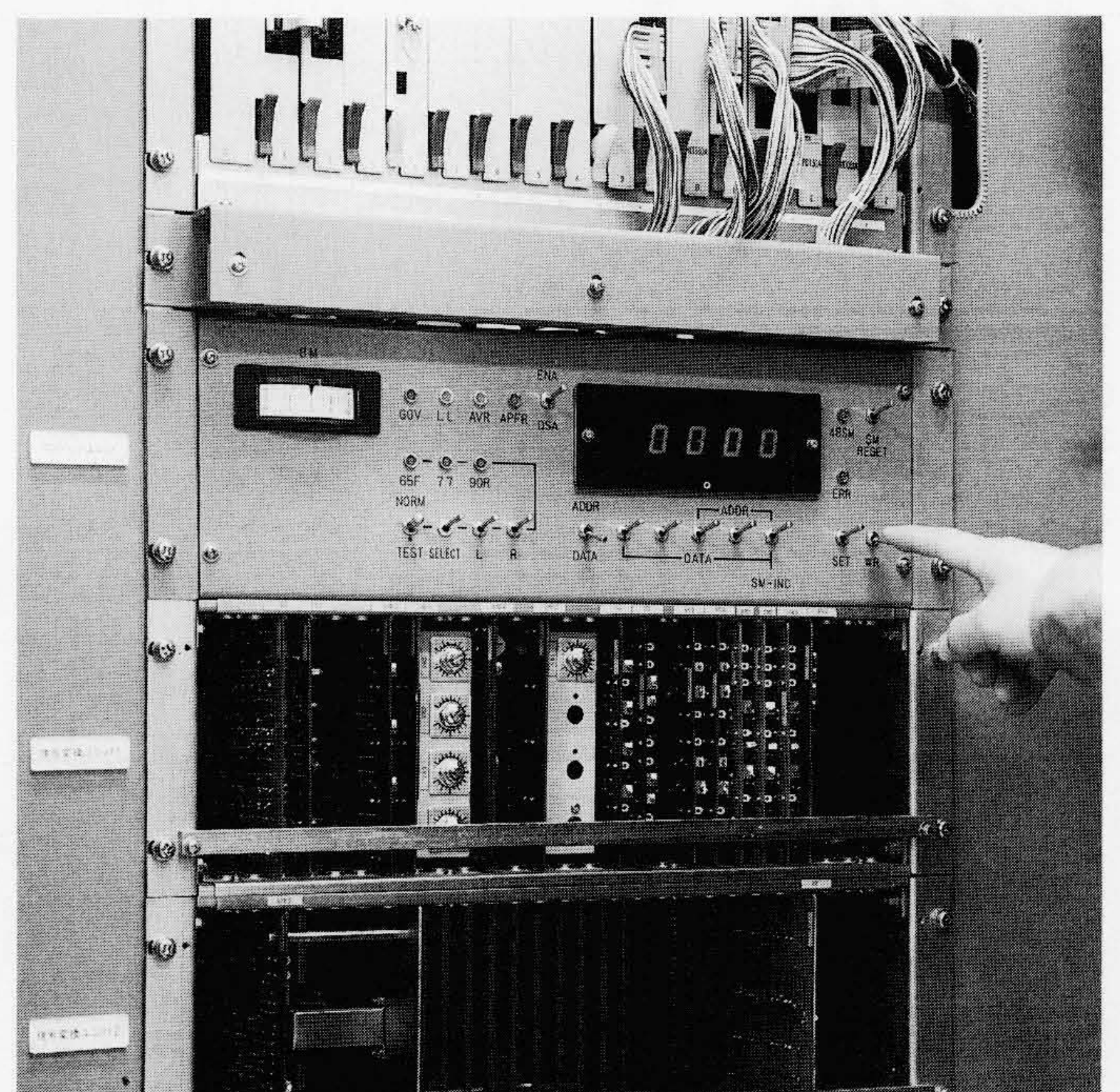


図11 メンテナンスコンソール 各種設定変更、渋滞箇所の表示、その他を本パネルで実現できる。

表Ⅰ 最近の中・小水力発電機器納入の主な例 最近では低落差の可動翼水車が比較的多くなっている。

納入先	発電所名称	水 車			回転速度 (min ⁻¹)	発電機出力 (kVA)	台数	納入年 (昭和)	特 記 事 項
		形式	出力(kW)	落差(m)					
東京電力株式会社	塩 川	VF	4,212	25.2	214.3	4,500	2	59, 60	S & B, 自冷式水車軸受, 油循環風冷式発電機軸受
米 国	FRIANT-KERN	HK	19,620	36.0	180	18,400	1	60	世界最高落差・大容量S形チューブラ水車
大阪府水道局	村 野	HS	375	12.56	600	480	1	60	上水道配管内設置S形チューブラ水車, 水潤滑カーボン軸受, 誘導発電機
石 川 県	新丸山	HF	3,200	83.75	720	3,300	1	60	ブラダ形アキュムレータ, 2軸受, 油循環風冷式軸受, F種絶縁機能集約形制御装置
山 形 県	温海川	HF	1,100	35.5	600	1,100	1	60	電動サーボモータ, 2軸受, 油自蔵自冷式軸受, NR設計, ブレーキレス, F種絶縁, 機能集約形制御装置
中国電力株式会社	間野平	VK	9,900	46.1	360	10,000	1	60	S & B, 既設フランシス水車3台をカプラン水車1台に改造, ランナベーン無給油軸受化, 水車主軸水潤滑軸受, 実物センタリング
日本海発電株式会社	熊野川	VD	7,200	140.0	720	7,300	1	61	国内最高落差斜流水車, 平面形主軸封水装置
中部電力株式会社	鳥 並	HK	1,230	16.9	400	1,310	1	61	S & B, S形チューブラ水車, ブラダ形アキュムレータ, ランナベーン操作用外部設置形サーボモータ, F種一体, 注入絶縁
中部電力株式会社	松川第3	HF	600	64.55	720	620	1	61	S & B, 水車軸受にヒートパイプ採用, 油自蔵風冷軸受
東京電力株式会社	穂 積	HF	4,100	60.32	600	4,000	1	61	S & B, 冷却水完全省略, 油自蔵自冷式軸受, 状態監視システム
九州電力株式会社	白水滝	HP	4,300	421.0	600	4,600	1	62	S & B, 油自蔵風冷式軸受, 状態監視システム, 機能集約形制御装置
中部電力株式会社	池之俣	HF	2,570	160.0	900	2,600	1	62	S & B, ベルトン水車2台をフランシス水車1台に改造, 電動サーボモータ, 電磁ブレーキ
山 梨 県	下釜口	HF	1,900	143.0	1,000	1,900	1	62	冷却水完全省略, 電動サーボモータ, 2軸受油循環風冷式軸受, NR設計, ブレーキなし
富 山 県	大長谷第4	HP	2,800	164.7	300	2,750	1	63	ニードル, デフレクタ電動サーボモータ化, 2軸受, 油自蔵風冷式軸受, 電磁ブレーキ, 偏心ロータリバルブ, 機能集約形制御装置
中部電力株式会社	小 坂	VF	9,520	130.0	514	9,700	2	63	S & B, 立軸フランシス水車電動サーボモータ, 電磁ブレーキ, 偏心バタフライ弁, 機能集約形制御装置
中部電力株式会社	鳥居川第3	HF	2,210	133.3	720	2,230	1	63	S & B, 完全冷却水省略, 電動サーボモータ, EJガバナ, 2軸受風冷式軸受, 電磁ブレーキ
群 馬 県	奈良俣	VF	12,800	133.3	600	13,000	1	64	変落差大, 油自蔵自冷式水車軸受, 立軸フランシス水車電動サーボモータ, 電磁ブレーキ
東北電力株式会社	実 川	HF	8,500	165.9	1,000	8,700	1	66	電動サーボモータ, 油循環風冷式軸受

注：略語説明 S & B(スクラップ アンド ビルド)

(2) 制御機能の集約

発電所の運転・停止制御のほかに、AVR(自動電圧調整制御)、GOV(調速機制御)、自動同期制御などの制御は、1台のマイクロコンピュータで実現する。

(3) 電源の二重化

制御電源の不具合は、即発電システムのダウンにつながるおそれがある。特に回転機の制御をつかさどっており、直流電源の喪失は界磁喪失、及びGOV機能の喪失につながり重大な事故へ波及するおそれもあるので、直流電源と交流電源の2入力電源を採用する。

(4) 励磁部の分離

励磁装置のサイリスタのON・OFF、及び界磁開閉器などのノイズ発生源となる部分と、制御の心臓部となるマイクロコンピュータ部は分離して別キュービクルとする。

4.2 システム構成

機能集約形装置の構造を図9に、正面観を図10に示す。

本システムは、

- (1) 運転制御、自動同期、励磁制御、GOVなどの制御機能を一面に収納しているので、機器装置間のケーブルの削減ができる。
- (2) 盤の据付面積の大幅な削減ができる。
- (3) 据付工事の期間が短縮できる。
- (4) 設定器はソフトウェア化され、マイクロコンピュータに内蔵されており、接触部を大幅に削減し高信頼化されているなどの幾多の特長を持っている。

4.3 機能集約形制御装置の機能

本装置の主な機能は次に述べるとおりである。

(1) 励磁制御

保守の合理化を考慮して、ブラシレス励磁方式を主体としている。自動電圧調整の基本機能のほか、APFR(力率一定制御)、過電流制限、過励磁制限の付加機能がある。励磁電源変圧器、サイリスタ、界磁開閉器は機能集約形制御装置とは別置きとし、ノイズ、サージの影響をなくしている。

(2) 調速機制御

調速機制御装置はPID(比例・積分・微分)方式とし、速度検出はSSG(Speed Signal Generator)を採用している。性能は電気共同研究会規定のY級相当であり、水位調整機能、電動サーボインタフェース機能を付加することもできる。なお、付加制限機能は、電気式リミッタ方式である。

(3) 自動同期制御

自動同期制御の基本機能である電圧調整、せん(揃)速制御、同期投入制御などの高速処理を内蔵している。

(4) 運転制御

運転・停止の制御、事故停止時の事故処理を行う。シーケンスの渋滞監視により不具合箇所の早期発見を可能としている。

(5) メンテナンスコンソール

図11に示すメンテナンスコンソールは運転状態表示のほかに、各種設定器及び定数の変更が十進数で容易に行える機能を備えるとともに、渋滞箇所の表示及び各種のデータ計測もできるようになっている。

5 最近の納入例

最近納入又は製作中の代表的な中・小水力発電所の仕様と特徴を表1にまとめて示す。本稿で言及したように冷却水省略、操作油省略などの保守性の向上に力点が置かれていることが分かる。

6 結 言

今後建設される水力発電機器については、立地条件の悪さとあいまって単機容量がますます小容量化するために、経済性が最重要課題となる。そのような状況下で、本稿で述べた標準化、簡素化、保守性向上などの諸技術はその中心的役割を担っており、ますます一般化していくものと思われる。本稿が中・小水力発電設備の計画にいささかでも役立てば幸いである。

自由曲面上の最短経路決定法

日立製作所 矢島敬士・佐々木良一・他2名
電気学会論文誌C 107-7, 681~688 (昭62-7)

近年、多自由度ロボットの導入により、3次元物体の高速かつ高精度加工への道が開けつつある。従来、3次元物体の加工としては、規定曲面(球面、平面など)から成る物体の加工が中心であった。しかし、近年規定曲面の組合せでは構成できない、いわゆる自由曲面を持った物体(以下、ワークと呼ぶ。)を対象とした加工が、自動車産業などで求められている。一方、自由曲面を持つワークの設計・製作に不可欠な自由曲面の構成技術が近年確立されつつある。自由曲面はその形状表現の柔軟さから、各方面で利用される方向にある。

上記ニーズに対処するため、穴空け加工などには汎用的に用いられるPTP(Point to Point)制御法での工具経路決定法を、規定曲面から自由曲面に拡張した。従来、PTP制御は、作業位置が規定曲面ワーク上に離散的に存在し、作業順序が指定されている場合に採られてきた。PTP制御法の自由曲面への拡張には、制御の高速化

が重要である。自由曲面を対象とした加工は、レーザ装置など高価な加工装置を利用する精密加工現場で行われることが多い。このため、トータルコスト低減の立場から加工時間の短縮化、特に作業点間の工具移動時間の最小化が重要である。工具移動時間最小化の一方式として、本論文では、作業位置間の工具移動経路の最短化を図る方式を提案した。

提案した最短経路決定手法は、設計現場で大形計算機を用いて、オフラインで工具経路を設計する際に利用される。手法の対象は、自由曲面表現法のなかでも広く利用されているベジエ曲面(Bezier Surface)である。ベジエ曲面は、曲面の情報がすべて制御点と呼ばれる形状決定点に集約されているため、形状構成の際デザイナーの直感と曲面形状が結び付きやすいという特徴がある。

提案手法は、自由曲面上の2加工点間の、「自由曲面に沿った」最短工具経路を与え

る。最短工具経路は、最短条件としてのオイラー方程式から構成される境界値問題の解として得られる。ワーク形状に凹部がある場合には、提案手法で求めた「自由曲面に沿った経路」よりも、凹部を短絡した経路のほうが短い。この問題を解決するため、ワークを包含する非凹のベジエ曲面を構成し、この非凹ベジエ曲面に提案手法を適用する。非凹ベジエ曲面は、ワークの凹部の(ベジエ曲面の)制御点を移動することによって構成される。

本手法の特徴は、(1) 厳密な最短経路に対して、経路長が約0.1%増加程度の工具経路が得られる。この経路は従来法に対して20~30%の経路長短縮となっている、(2) ワーク形状に凹部がある場合も、凹部を短絡した最短経路が求められる、(3) 最短工具経路として、滑らかな曲線が得られる、(4) 経路決定時間は大形計算機で7分程度である、という点にある。

回転倉庫と固定倉庫を結合した自動倉庫システムの運用方式の提案

日立製作所 都島 功・三森定道・他1名
電気学会論文誌C 107-9, 843~849 (昭62-9)

近年、Factory Automation化が活発に推進されている。自動倉庫はその重要な構成要素であるが、各注文に応じてパレットから必要個数の製品(品目)を取り出すピッキング作業は人手に頼らざるを得ず、しかも多くの人手を要している。ある報告では、倉庫作業の分析の結果、ピッキング作業に要する時間が全作業時間の30~40%に達していることが少なくないと述べている。そのため、ピッキング作業の効率向上が自動倉庫システムの最大の課題となっている。これに対し、高効率ピッキング運用方式を導入した、新しい自動倉庫システムを提案する。

設備構成としては、棚を回転させ、製品をピッカーのもとに搬送する、アクセスタイムの短い回転倉庫と、それにパレットを

供給する、アクセスタイムの長い固定倉庫(固定棚からクレーンにより入出庫されるため、これを固定倉庫と呼ぶ。)から成る。なお、設備費、運転費の面から、回転倉庫は小容量でなければならない。

ピッキング効率を向上するには、ピッキングすべき回転倉庫の棚がピッカーの前に来るまでの待ち時間を低減することである。そのため、ある注文でピッキングされたパレットが先の注文で再度ピッキングされる場合には、それをアクセスタイムの短い回転倉庫に残しておくという基本的な運用が考えられる。しかし、提案システムでは回転倉庫を小容量とするため、再度ピッキングされるパレットをすべて回転倉庫上に残すことはできず、その容量制約のもとで再度ピッキングされるまでの時間を低減する

必要がある。その実現のため、(1) 事前に分かっている注文内容のデータを利用し、処理順序として近い注文間ほど共通品目が多くなるように注文処理順序を決定する運用と、(2) 決定された注文処理順序のもとで、回転倉庫上には近い将来再度ピッキングされるパレットが格納されるように回転倉庫から固定倉庫へ戻すパレットを決定する運用を提案する。

また、提案システムにより実現されるピッキング効率と、その効率に影響を与える注文、回転倉庫、固定倉庫の特性パラメータの関係をシミュレーションによって明らかにする。更に、固定倉庫だけから成る従来システムとの比較で、提案システムにより高いピッキング効率が達成できることを示す。