

中小容量水車改修における新技術

New Technical Concepts in Rehabilitation of Existing Hydraulic Turbines

最近のエネルギー危機は、水力発電の重要性と有用性を再認識させている。中小容量発電地点の見直しによる新規開発とともに、既設機の改修による新鋭化は、最も手早く経済的に増加発電量を得られるため、重要な課題と考えられるようになった。50年以上稼動した使用限界に近い水車が、日立製作所の納入した水車全数の中で40%、467台に達しており、より効率良くかつ保守性の良い機械へ置き換えるために、種々の方策が要望されている。

本稿は、水車改修に当たり開発、適用された新技術のうち、性能回復、新形構造、経年劣化の評価などを中心として紹介する。これらの技術は、経済化を目指して検討が進められている中小水力開発のための標準機種にも十分適用が可能である。

伊藤栄郎* Hideo Itô
吉川次雄* Tsugio Yoshikawa
井原一男** Kazuo Ihara
佐藤正二** Shôji Satô

1 緒言

最近の石油供給の不安定により、我が国でも水力資源再開の促進が国家施策として積極的に取り上げられ、揚水を主とした大容量発電所の新規開発とともに、中小容量水力発電所の開発も推進されつつある。中小容量水力の問題点はその経済性にあり、目下その方策について種々検討が加えられているが、その中でも既設機の改修による新鋭化・高効率化は経済的かつ短期間に追加エネルギーを生み出す手段として極めて有効である。

従来、既設機の改修は単に原型への復元と考えられてきたが、最近の緊迫しつつあるエネルギー情勢や発電所無人化指向により、機器の高効率化、機能や信頼性の向上、保守の容易さなどがよりいっそう要求されるようになり、単なる補修だけではなく新方式の開発と適用による対応を迫られることとなった。

日立製作所はつとにこの点に着目し、日立機材工業株式会社の水力部門を発足させて、これら中小水力の改修に要求される機動力のある技術陣と製造設備の集約を行ない対応を図ってきたが、本稿では両者が緊密な連携の下に開発した新技術のうち代表例を紹介して、今後の水車改修計画の参考に供したいと考える。

2 既設水車の改修動向

図1に、日立製作所が製作した水車の累計台数及び出力の年度別による増加割合を示す。1980年末で念願の発電容量50,000MWを達成したが、これは単機容量の増大化に負うところが大きく、50年以上の稼動を意味する1930年以前に既に総台数の約40%に当たる467台(このうち90%はフランシス水車)が製作された。●○はスクラップアンドビルドによる改修済み又は改修計画中のもので、既に稼動40年以上のものも耐用年数を超えて老朽の範囲に入り、部分的な修理だけでは限界にきていることを示している。一方、我が国の未開発包蔵水力量は約31,000MW、2,340地点が予測されている¹⁾が、そのうち1万kW以下が実に上記地点数の82.5%を占めており、落差の範囲からみるとこのうちの80%以上がフランシス水車領域、残りがプロペラ形水車領域である。改修での新技術は、

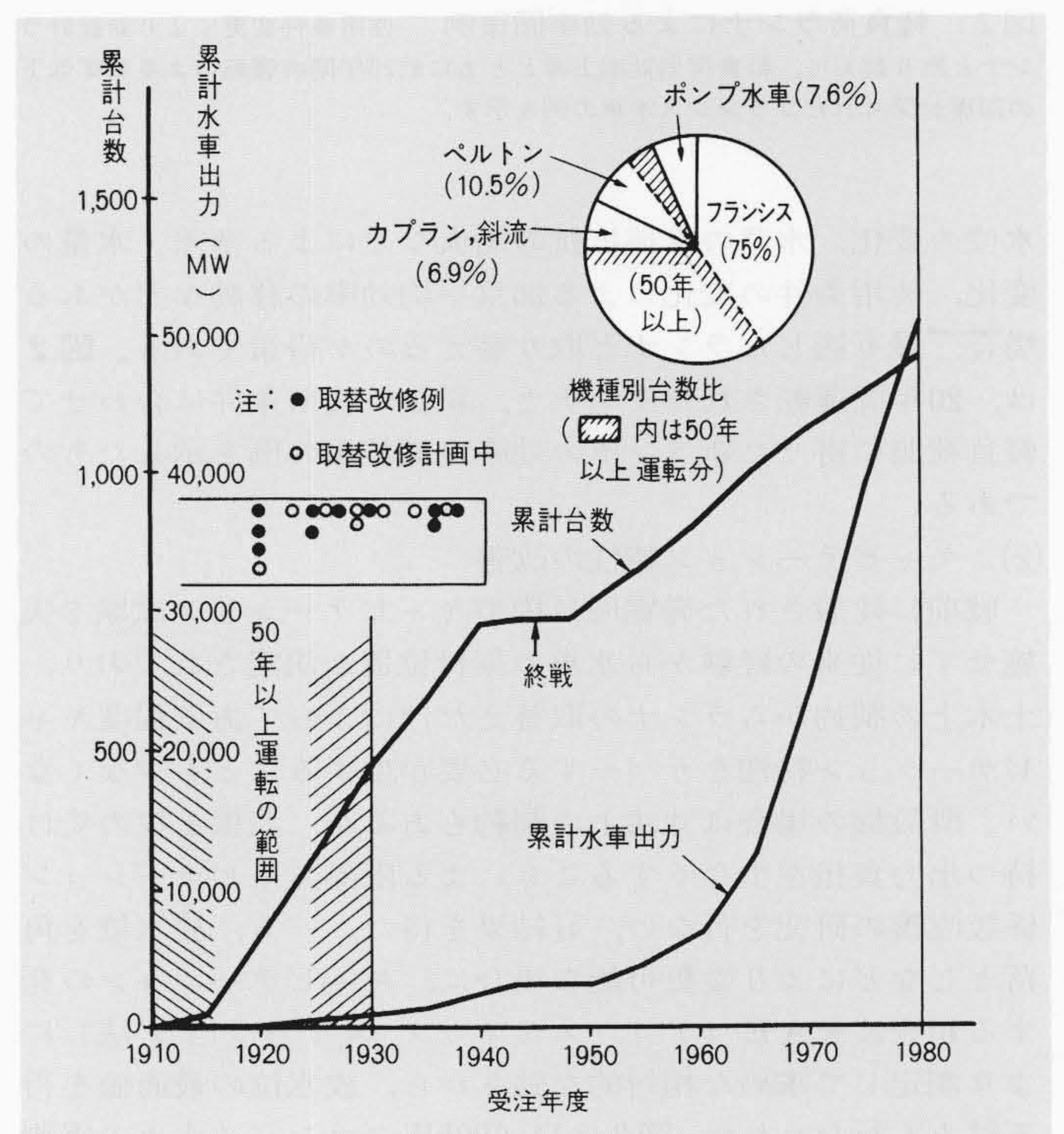


図1 日立水車製作記録 1930年以前に総台数の40%(467台)が製作され、50年以上運転されている。実績からみて1940年以前が老朽更新の対象になりつつある。

これから新設されるこれら中小容量機の設計にも適用が可能で、経済化や信頼性の向上に資することができる。

3 改修における新技術

3.1 特性上の問題

(1) 効率の回復

中小容量機は仕様、条件の変化により効率が低下した状態で使われている場合が少なくない。例えば、侵食や壊食による経年劣化、放水庭の土砂たい積や河川の開発による流況や

* 日立製作所日立工場 ** 日立機材工業株式会社足崎工場

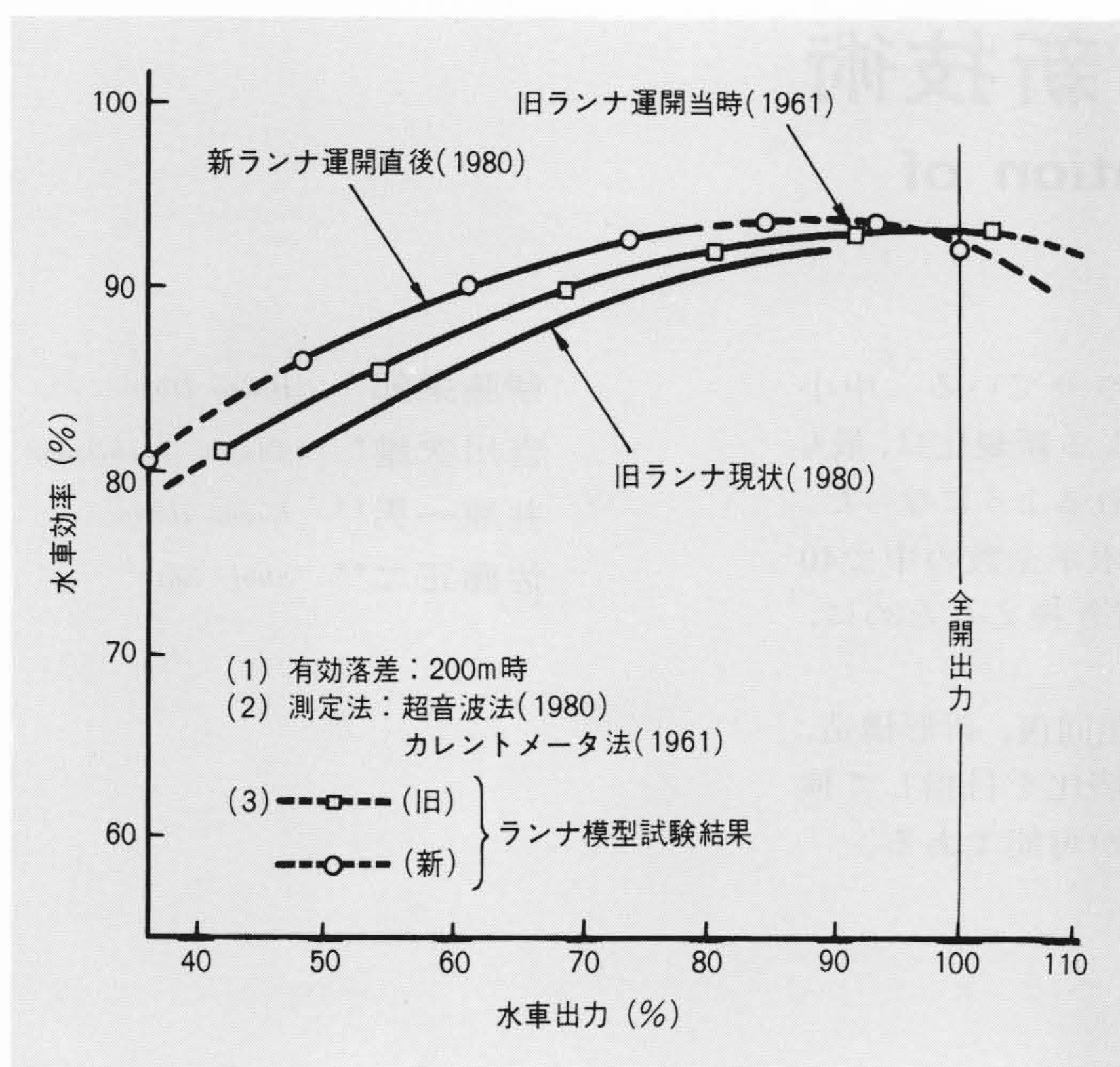


図2 軽負荷ランナによる効率回復例 使用条件変更により新設計ランナと取り替えて、軽負荷側効率上昇とともに約20年間の運転による効率低下の回復が図られたフランシス水車の例を示す。

水位の変化、水路の摩擦抵抗の増大などによる落差・水量の変化、使用条件の変化による加重平均効率の移動などがある場合、最も適したランナと取り替えるのが得策である。図2は、20年間運転されたランナと、新しい使用条件に合わせて軽負荷側に寄せた新ランナの効率実測結果の例を示したものである。

(2) キャビテーション特性の改善

戦前に建設された発電所は模型キャビテーション試験を実施せずに従来の経験から水車の据付位置が決定されており、土木上の制約からランナの取替えだけによってある程度キャビテーション特性をカバーする必要性が生ずることも少なくない。既設機の場合は寸法上の制約もあるが、羽根1枚の受け持つ出力負担を少なくすることによる限界キャビテーション係数改善の研究を行ない、好結果を得た。一方、放水位を角落としなどにより変更可能な場合に、キャビテーションの発する超音波をAE（アコースティックエミッション法）により測定して求めた相対的な強さから、放水位の最適値を得る試みも行なわれた。図3は11,000kWフランシス水車の実測例で、実機は放水位を0.8m上げて限界キャビテーション係数に対して余裕をもたせるとともに、相対キャビテーション強さを全開出力時で従来よりも約30%下げ得ることを確認した。

侵食や壊食に対しては長寿命化を図るために耐潰食材料の研究も同時に行なわれている。また経年劣化に対しては溶接補修などにより対策が施されるが、電気学会で設定された修理限界指標²⁾を参考とし、特に修理回数については、変形、熱履歴の積み重ねを考慮すると、一般的には3回が限度と考えられている。

3.2 構造上の新技術

(1) 油循環軸受の自蔵式への改造(回転油槽軸受)

油をポンプで上油槽へ送り、自然流下により軸受へ給油する油循環形が古くから使われているが、給排油・給排水系統が必要で、軸受温度や振動面で不安定な場合もあり、保守上の問題点の一つとなっていた。最近では信頼性・保守性の優れた油自蔵式軸受が望まれているが、この方式へ改造を行なう

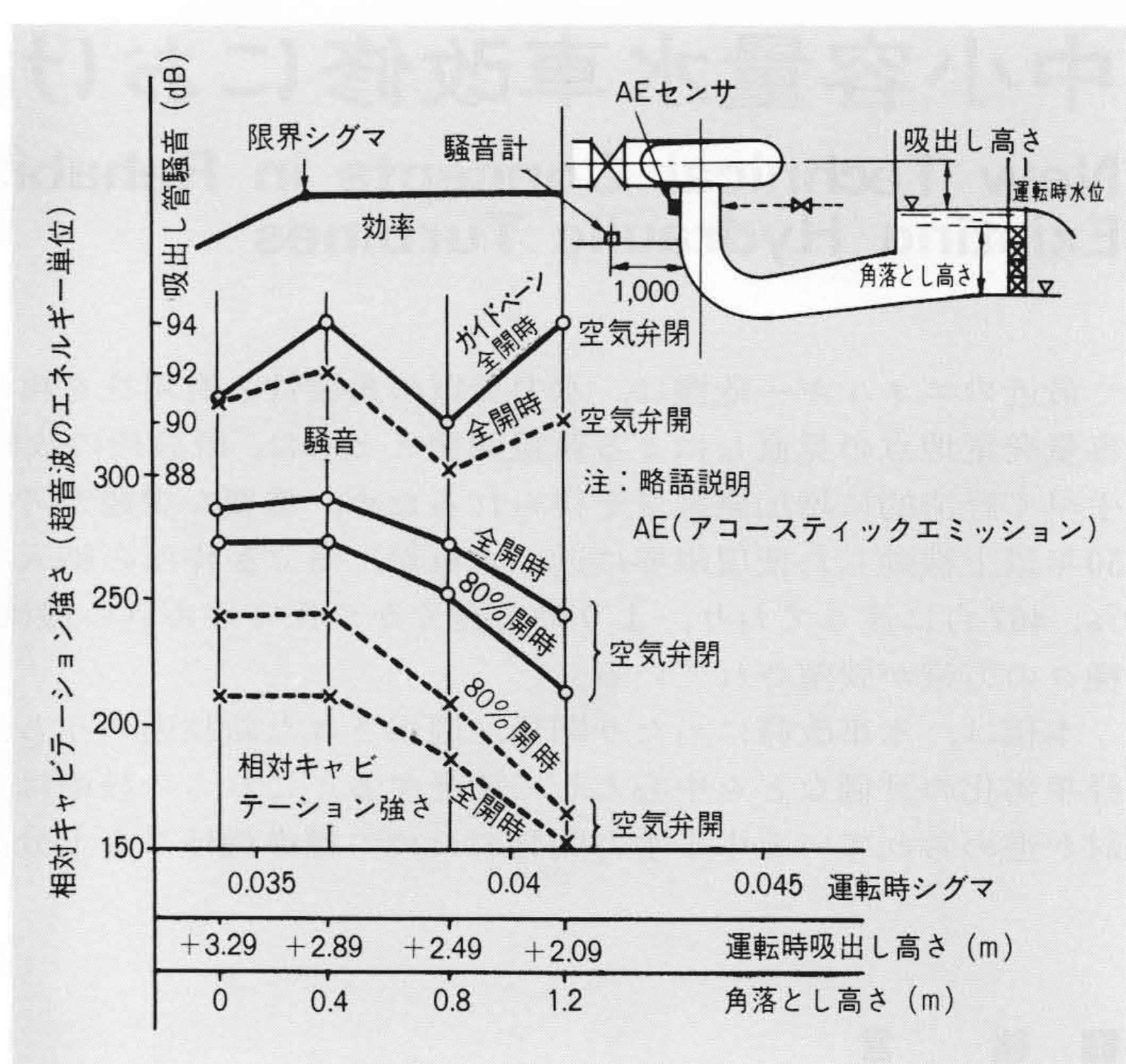


図3 放水位変化と相対キャビテーション強さ 11,000kWフランシス水車で試みられた、AE法による相対キャビテーション強さが放水位により変化する状況を示す。実機は騒音なども勘案して角落とし0.8m、空気弁を開にセットされた。

ためには主軸にスカートを必要とし、主軸の新製やスカートの溶接取付けなどが行なわれてきた。今回旧主軸をそのまま使うことのできる回転油槽式新軸受構造を開発し、8,500kWフランシス水車に適用して、昭和54年春以来好調に運転中である。回転油槽式の場合、回転の上昇とともに油が油槽の外壁内面にはり付き内周側が油切れとなるため、外周側から油を軸受へもどすスクープ式が試みられてきたが、回転の低い起動・停止時に採油効果が落ちるなどの問題があった。日立製作所ではこの点を改良し、回転数に関係なく油面をほぼ一定に維持し給油が確実に行なえる機構を開発して、模型により確認し実機に適用した。なお、この構造では、油槽内に冷却管を設置すれば油の攪拌により高い熱貫流率が得られて冷却水量の低減が可能であり、また回転油槽の外壁にファンを取り付けて良好な空冷効果を期待できるので、自冷式軸受としても使用できることを実機で確認した。図4(a)、(b)に構造及び試験結果の一例を示す。

(2) 自冷式軸受

冷却水の確保と水処理、給排水装置、保護装置などが水力発電所の建設、保守上予想以上の障害となっている。信頼性、保守性の優れた油自蔵式軸受の発熱量と油槽からの放熱量のバランスをとることにより〔図5(a)〕、油冷却のための熱交換器や冷却水管を設けることなく安定した軸受温度を保持することができれば、そのメリットは大きい。発熱量低下や負荷容量改善に対する軸受パッド形状の研究とともに、放熱量の増加や冷却効果上昇による軸受の自冷化のための種々の工夫が検討されている。図5(b)は6,710kW水車に適用された自冷式油自蔵軸受の構造例で、熱い油の循環を良くし、上カバーの一部と兼用された油槽を下面の水で冷却するなどの設計が採用された。回転ヒートパイプを利用して軸受を自冷化した横軸水車も採用され運転中である。

(3) 水潤滑軸受

カプラン水車の水中グリース軸受に代わり、水を使用した水潤滑軸受の開発と実機適用結果については既に報告済みであるが³⁾、以後7発電所、11台に適用して実績も種々積み重ね

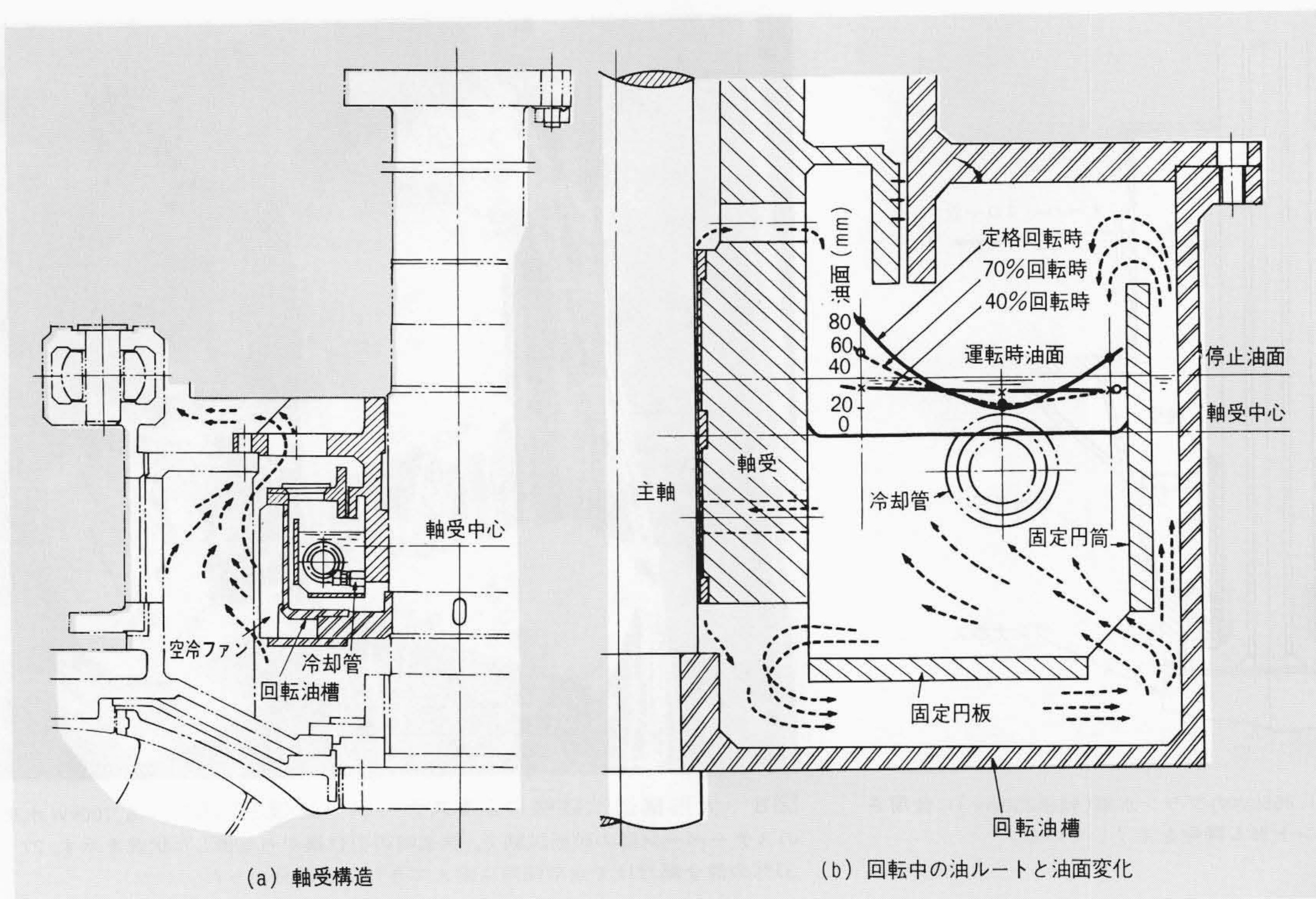


図4 回転油槽軸受の構造及び回転中の油ルートと油面変化 (a) 油槽の回転により、油が外壁にはり付くのを防ぎ、一定油面を保つため固定円板及び円筒を配置した。(b) 油槽内の油の流れがスムーズで、運転油面が回転数を変えてもほとんど変化せず、軸受の油切れを起こすことがない。

られている。

(a) 静圧軸受方式

静圧軸受方式は軸受面に加圧水を強制給水し、この部分の静圧により軸受負荷能力を得るもので、比較的大形かつ高荷重に適用される。この方式では、軸受面に常に静圧を維持するために一定圧力をもった多量の清水を必要とし、かつ低落差機では必要な給水圧力を得られにくい欠点がある。

ったが、図6に示すように、清水をポンプにより閉回路中に循環させて、漏水分だけを補給する方式を開発し、最近では一般に使用されている。

(b) 動圧軸受方式

軸と軸受間の相対すべりにより、くさび状水膜を形成させ、水膜圧力により軸受荷重を支持する方式である。この方式によると給水圧力及び量は少なくて済み、自蔵式とす

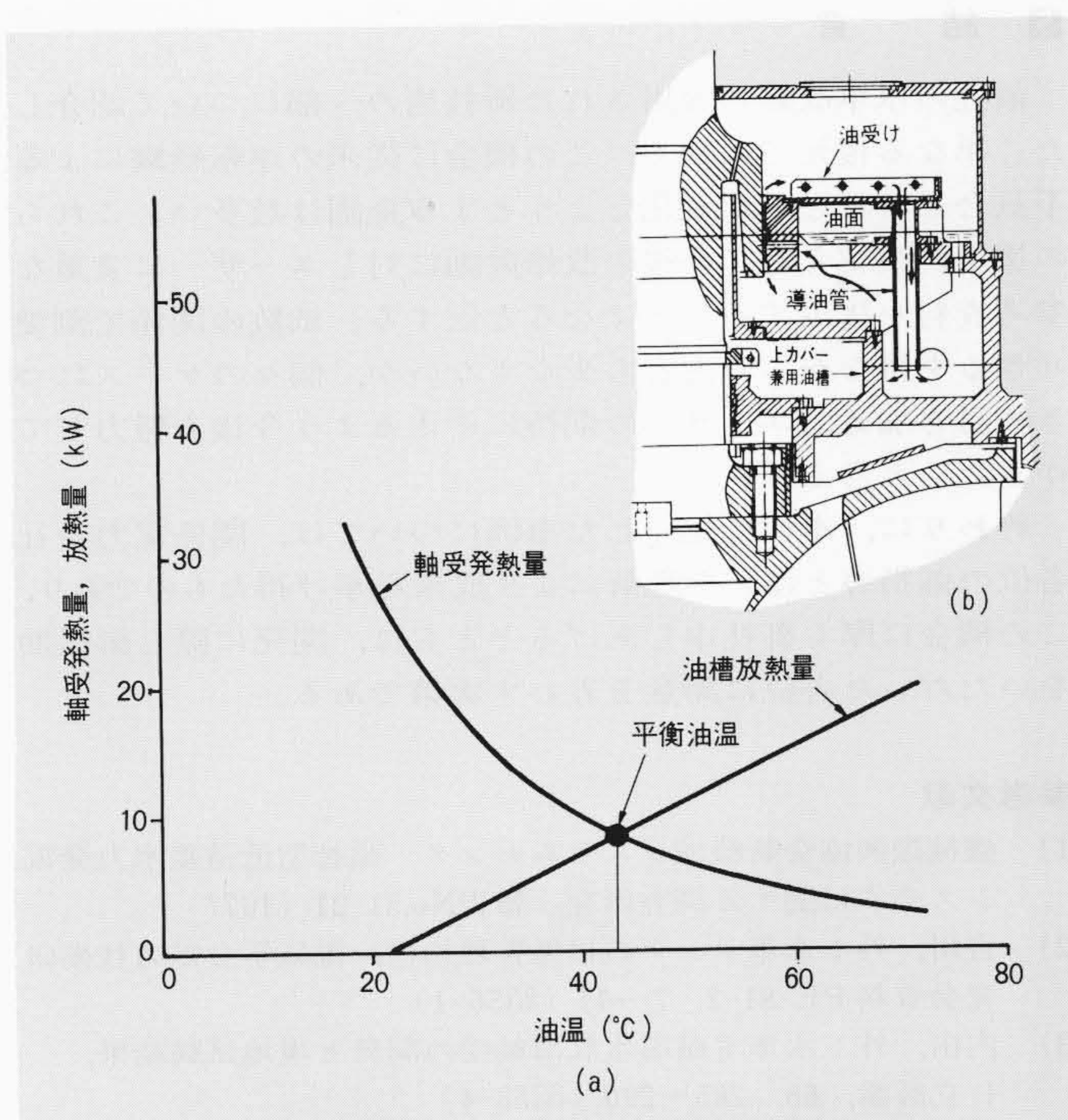


図5 自冷式油自蔵軸受 (a) 軸受発熱量と油槽からの放熱量の交点が平衡油温で、軸受温度はこれに1~3度加算すればよい。(b) 6,710kW水車に適用された自冷式軸受の断面構造を示す。導油管により熱い油を落下させ、上カバー兼用油槽の下面の流水で冷却する。

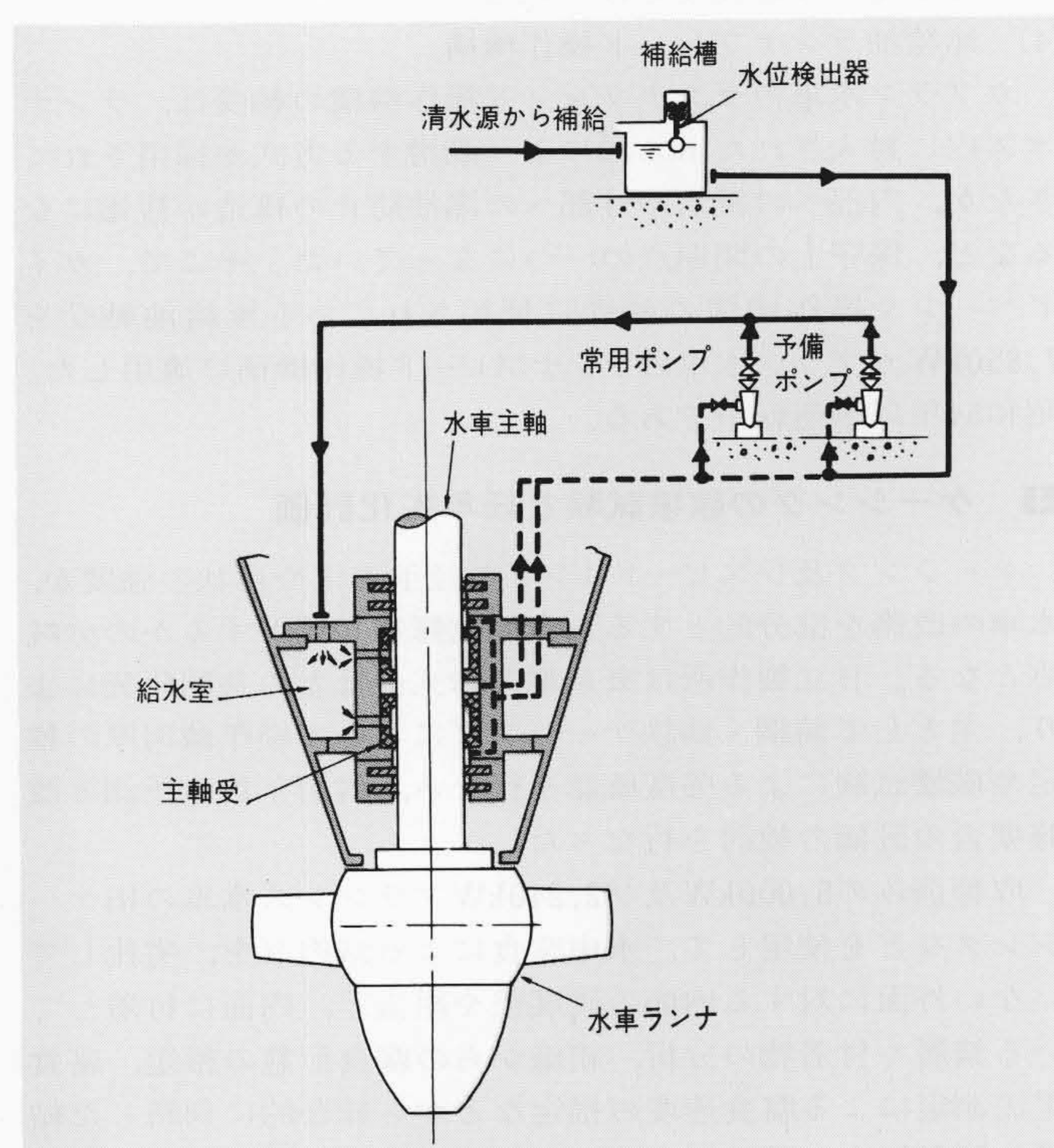


図6 静圧式水潤滑軸受の閉回路式給排水系統例 潤滑用清水の給水源確保が困難な場合や、低落差で給水圧力がとれない場合、加圧ポンプによる閉回路循環給水方式が便利である。別に小さい補給槽を設けて漏水を補充する。

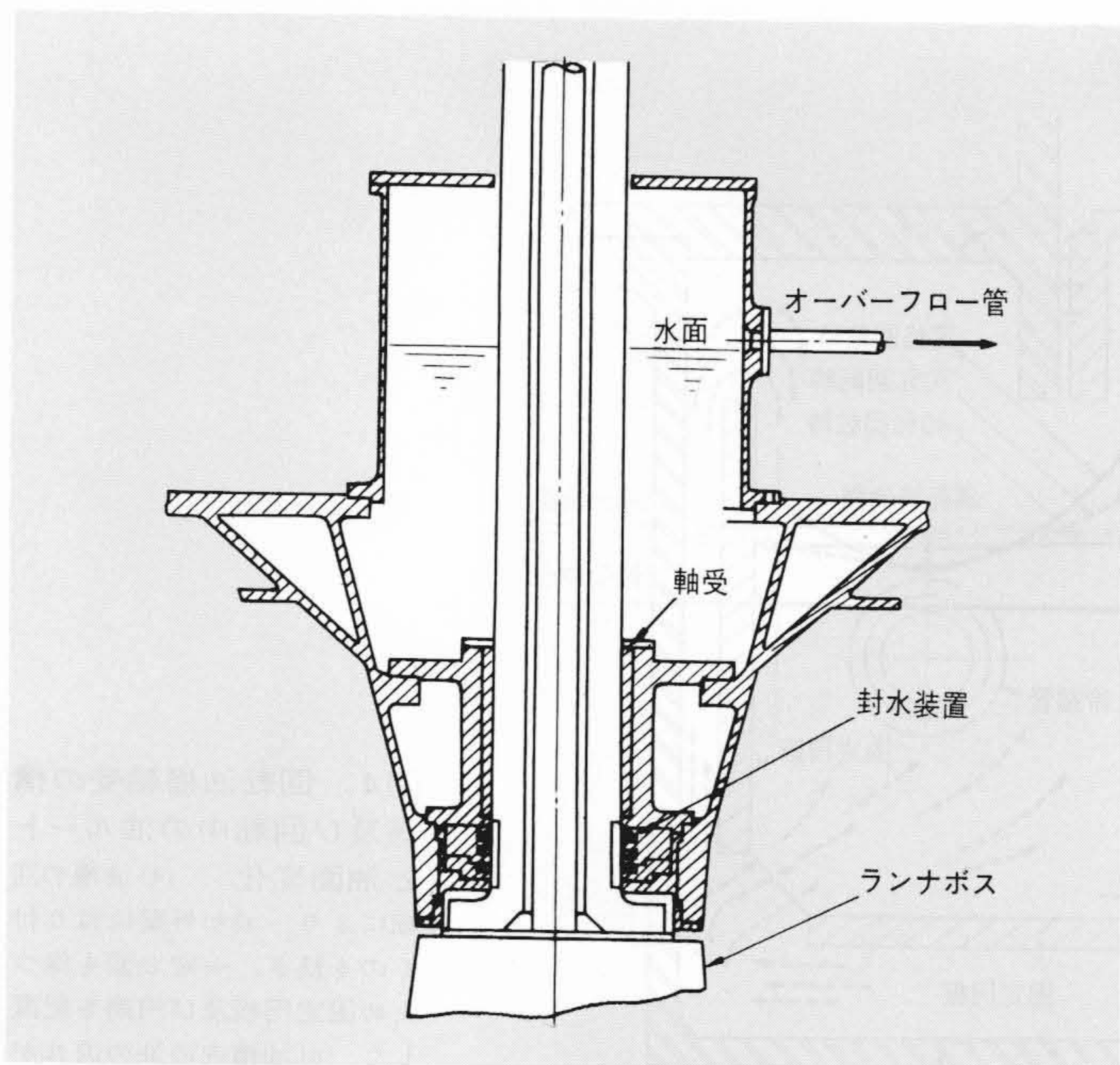


図7 水自蔵形動圧軸受 1,265kWカプラン水車(軸径250mm)に使用された円筒形軸受例を示す。セグメント形も開発を完了している。

ることも可能であるが、水の粘度が小さく、形成される水膜圧力が小さいため、比較的低速で軸径300mm以下の小容量の領域で使用される。図7は1,265kWカプラン水車(軸径250mm)に使用され、好結果を得ている水自蔵式円筒形動圧軸受を示すもので、パッドの形状や固定は膨潤による影響を最少とするよう配慮されている。更に、主としてフランス水車用として、構造、調整を更に単純化した無調整式セグメント形水自蔵軸受(封水装置兼用)の開発も進め、実用化への見通しを得た。本軸受の開発は、軸受及び封水装置の軽量・小形化、部品点数の削減などにより経済化を図ることができると期待されている。

(4) 無給油ランナブレード操作機構

カプラン水車のランナブレード操作機構の軸受は、ランナボス内に封入されたボス油により潤滑する方式が採用されてきたが、内部への浸水や外部への漏油防止の構造が複雑になるなど、保守上の問題点の一つになっていた。そこで、ガイドベーンや操作機構の軸受に使用されている無給油軸受を7,850kWカプラン水車のランナブレード操作機構に適用した。昭和54年以来運転中である。

4 ケーシングの破壊試験と経年劣化評価

ケーシング及びスピードリングの経年劣化や現状の強度が、水車の改修を部分的とするか全面改修を必要とするかの分岐点となる。日立製作所は東京電力株式会社との共同研究により、主として鋳鋼・鋳鉄ケーシングについて経年減肉厚の推定や破壊試験による強度確認を行ない、耐用年数の予測と改修要否の評価の検討を行なった。

取替済みの5,000kW及び2,240kWフランス水車の旧ケーシングなどを使用して、水中腐食による減肉厚を、劣化していない外面に対する内面の硬度差や組織差、内面に付着している錆層や付着物の分析、組織からの腐食形態の推定、腐食電流測定による腐食速度の推定などから総合的に判断した結果、50年以上の運転で1～3mmと少なく、水質が正常であれば摩耗減量の点からは問題ないと考えられた。

一方、6,700kW水車用鋳鋼ケーシングを使い大形試験機に

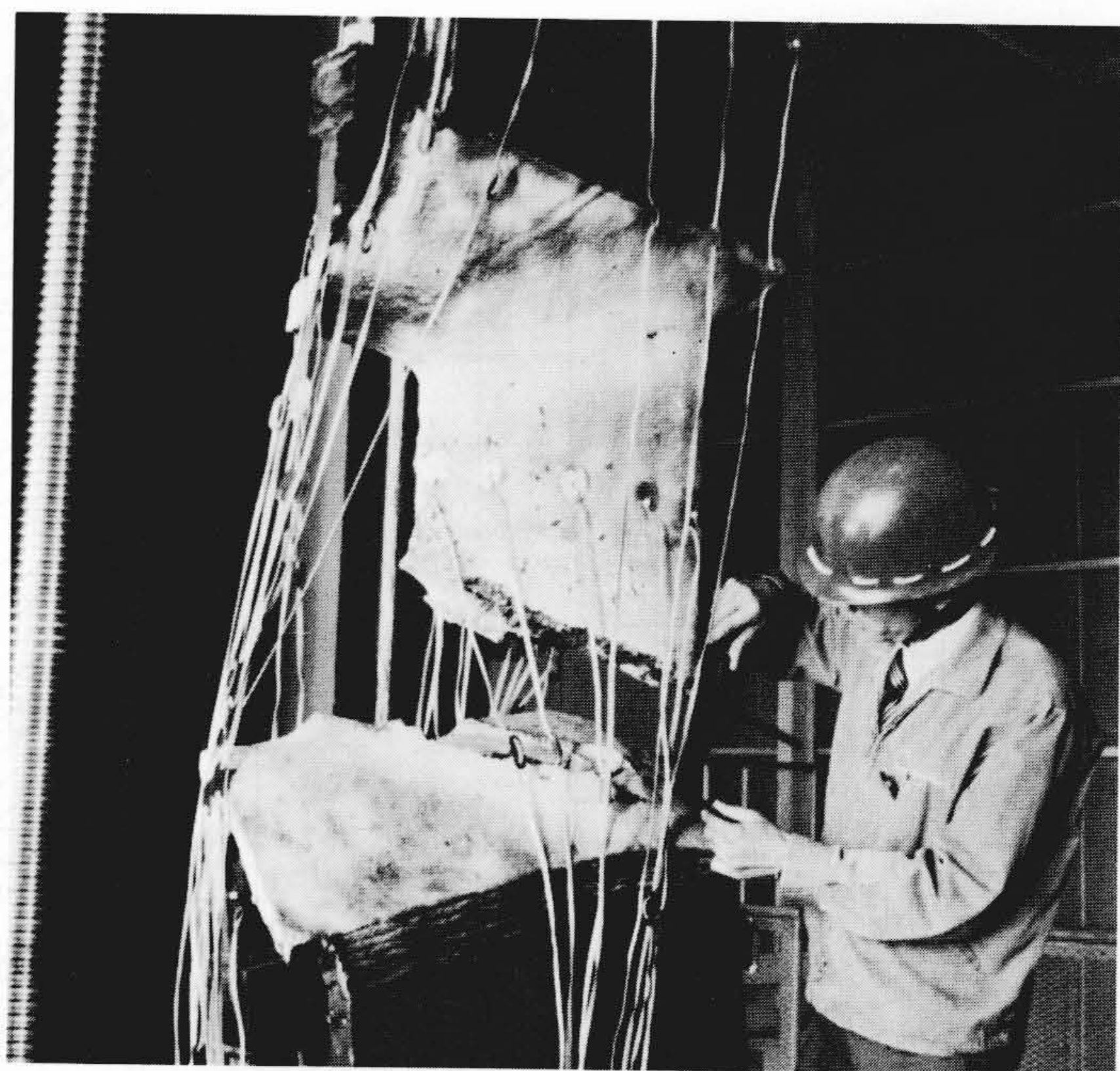


図8 大形構造試験機によるステーベーン破断試験 6,700kW水車のステーベーン部の破断試験で、鋳造時の引け巣から切断した状況を示す。27～37%の健全部だけで永年使用に耐えてきたことが分かった。

よるステーベーン部の引張り試験及び疲労試験を行なったところ、付根部で明らかに鋳造時の引け巣による大きな欠陥から破壊し、欠陥を除いた残存断面積は27～37%にすぎないことが分かった。この欠陥をき裂とみなして破壊力学の手法^{4),5)}から検討した結果、最近の進歩した非破壊検査技術を駆使することにより余寿命の予測が可能の見通しが得られた。

古い鋳鋼又は鋳鉄ケーシングは、鋳造技術の未熟によりこのように大きな欠陥を内蔵し、金属組織はやや粗く、切欠き靱性に乏しく、疲労に対する余裕が少ない場合があることに留意する必要があるだろう。

5 結 言

最近の水車改修に適用された新技術の一部について紹介した。単なる復元ではなく、この機会に従来の運転経験による不具合を修正し、新鋭化しようとする企画は数多い。これらの適用例の紹介が、今後の改修計画に対しユーザーに貴重な参考資料を提供することになると信ずる。紙数の関係で割愛せざるを得なかった内容も少なくないが、個々のケースにつき検討を加え、ユーザーの期待にそえるよう今後も努力してゆきたいと考える。

終わりに、本稿で紹介した事例については、関係電力会社各位の御指導と温い御理解により成果を挙げ得たものであり、この機会に厚く御礼申しあげるとともに、開発に際し御援助をいただいた各位に謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 機械振興協会新機械システムセンタ：福祉型低落差水力発電システムに関する調査研究，報告No.51-21 (1977)
- 2) 吉川，外：水車ランナの損傷管理指標，電気学会電力技術研究会資料PE-81-2，7～11 (昭56-1)
- 3) 内田，外：水車主軸用水潤滑軸受の開発と現地試験結果，日立評論，66，285～290 (昭53-4)
- 4) 伊藤，外：水車の強度設計と検査，ターボ機械，70，652～660 (昭55-11)
- 5) 岩崎，外：大型モデルによる発電機器の強度信頼性検討，日立評論，59，12，965～970 (昭52-12)