

九州電力株式会社大平発電所納め

256,000kW ポンプ水車の現地試験結果

Field Test Results of 256,000kW Pump Turbine for the Ohira Power Station, Kyushu Electric Power Co.

世界最高揚程546mの本格的な1段500m級揚水発電所として、鋭意設計、製作、据付、試験を進めてきた九州電力株式会社大平発電所納め256,000kWポンプ水車が、このほど現地試験を無事終了した。ここに、電源開発株式会社沼原発電所の製作実績を踏まえた1段500～600m級高落差ポンプ水車及び発電電動機の設計、製作技術が確立した。性能において、ポンプ水車の高落差における水圧振動の低減を図り、更に実揚程ポンプ試験で水圧脈動が 10^7 回以上繰り返される運転を実施した。実機の構造は、ケーシングに初めて80kg/mm²高張力鋼を、ランナには5Ni13Cr鋳鋼と鑄造性の優れた材質を使用して、強度上の合理化を図った。現地試験の結果は、ポンプ性能、水車性能ともに満足できる結果が得られた。

吉田威彦* Takehiko Yoshida
 蜂谷武雄** Takeo Hachiya
 新田貞夫** Sadao Nitta
 横山俊昭** Toshiaki Yokoyama

1 緒言

全揚程546mを有する九州電力株式会社大平発電所（以下、大平発電所と略す）⁽¹⁾納め256,000kWフランシス形ポンプ水車1号機は、**図1**の揚程推移に示すように、1段500mの壁を破った沼原発電所⁽²⁾⁽³⁾を上まわる世界最高落差（高揚程）の大容量ポンプ水車である。この高落差・大容量機の開発に当たっては、約2年8ヶ月にわたり九州電力株式会社と協同

研究を行ない、種々の模型試験によるポンプ水車の性能開発、高落差（高揚程）における水圧振動、水撃作用、それに伴う振動などの検討を行なった。特にこのポンプ水車については、実揚程模型試験を実施して1段高落差高揚程ポンプ水車の運転における安全性の向上に努めた。また主要部品に対しては、応力解析を行ない機器の強度検討を行なうとともに、構造面では設計水圧が800mと高圧のため、ケーシングに初めて80kg/mm²高張力鋼を使用するなど新技術を導入する一方、各製造過程ではこれに対処するため、検査確認を実施し、信頼性の向上に努めた。

本発電所の1号機は、昭和50年3月現地試験を終了した。ここに本発電所のポンプ水車の運転特性について報告する。

2 発電所の概要⁽¹⁾

大平発電所は熊本県八代郡坂本村に位置し、球磨川水系五木川支流の内谷川に高さ64mのロックフィルダムを築造して、有効容量 $3.96 \times 10^6 \text{m}^3$ の上部貯水池とし、また球磨川水系支流の油谷川に高さ82mのロックフィルダムを築造して有効容量 $3.68 \times 10^6 \text{m}^3$ の下部調整池とし、その間を約3,400mの水路及び水圧鉄管で連絡して、上部ダムの取水口から約1,800mの地点に設けた地下発電所で、最大使用水量 $124 \text{m}^3/\text{s}$ 、最高有効落差512mを利用して最大出力500MWを発電する純揚水式発電所である。

図2に大平発電所の水位仕様を、**図3**に同発電所の据付断面図を、**図4**に256,000kWポンプ水車ランナの組込作業を、また**図5**にポンプ水車の工場組立状況をそれぞれ示す。

3 ポンプ水車の性能開発

3.1 模型試験

大平発電所用の高落差・高速ポンプ水車の性能開発に当たっては、ポンプ水車の各種模型性能試験を行なった。流量、効率特性、入力特性、合わせて最大輸送寸法となるランナ径と主機寸法を小さくすること、及び発電電動機とのバランスをも考慮し、回転速度を400rpmと決定した。4種類の模型

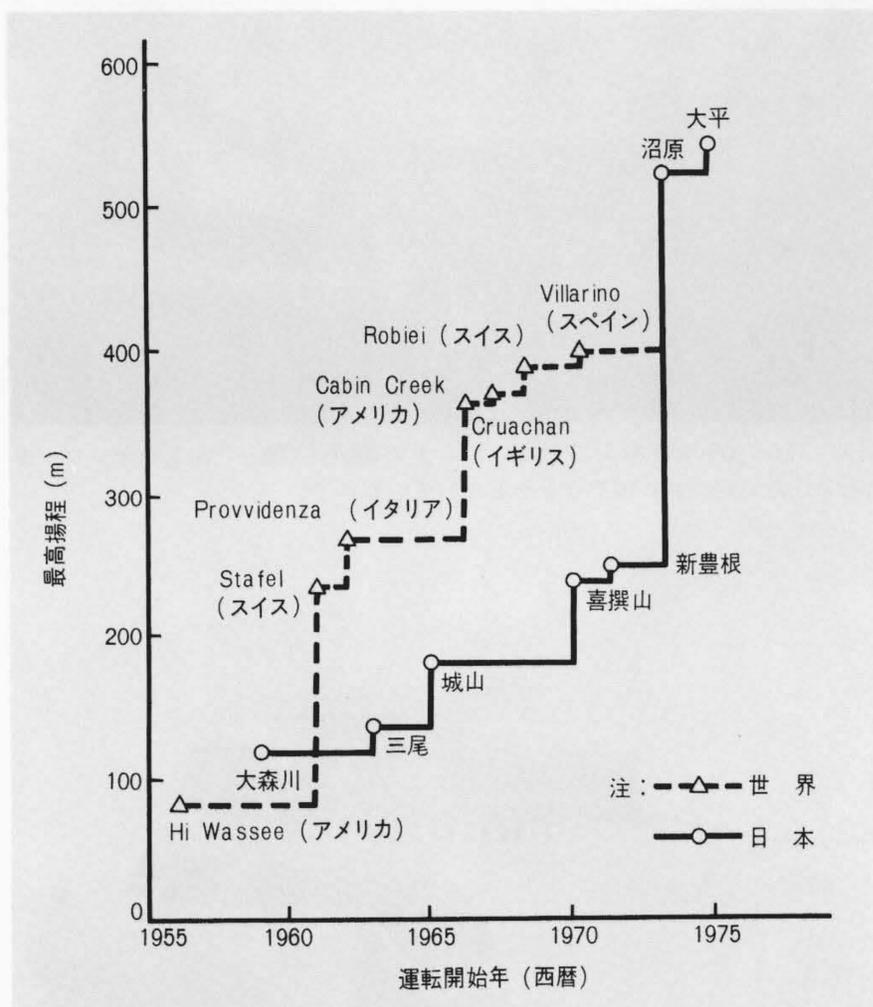


図1 高落差ポンプ水車の揚程推移(単段フランシス形ポンプ水車) 九州電力株式会社大平発電所は、500mの壁を破った沼原発電所をしのご世界最高揚程のポンプ水車である。

* 九州電力株式会社工務部 部長代理 ** 日立製作所日立工場

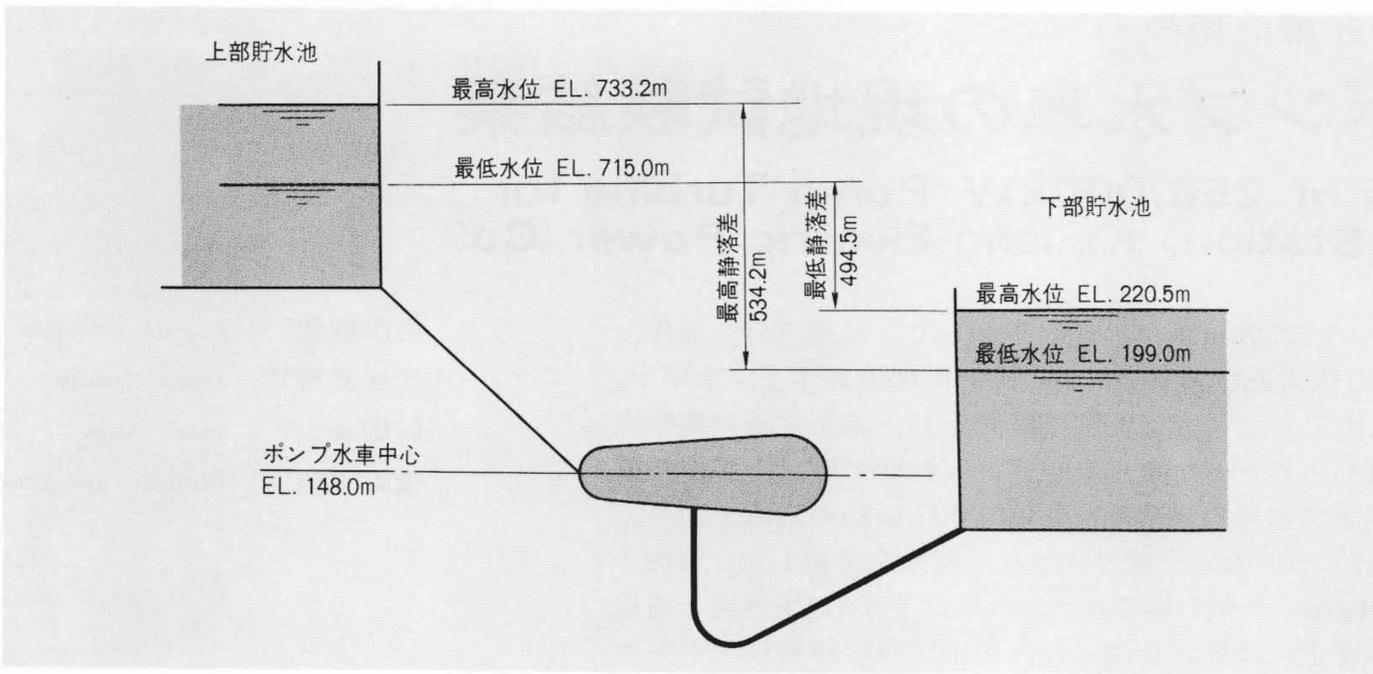


図2 大平発電所水位仕様
上、下貯水池の水位差を示し、最高落差は500mを超える上部ダムと下部ダムの間を、長さ約3,400mの水路で連絡している。

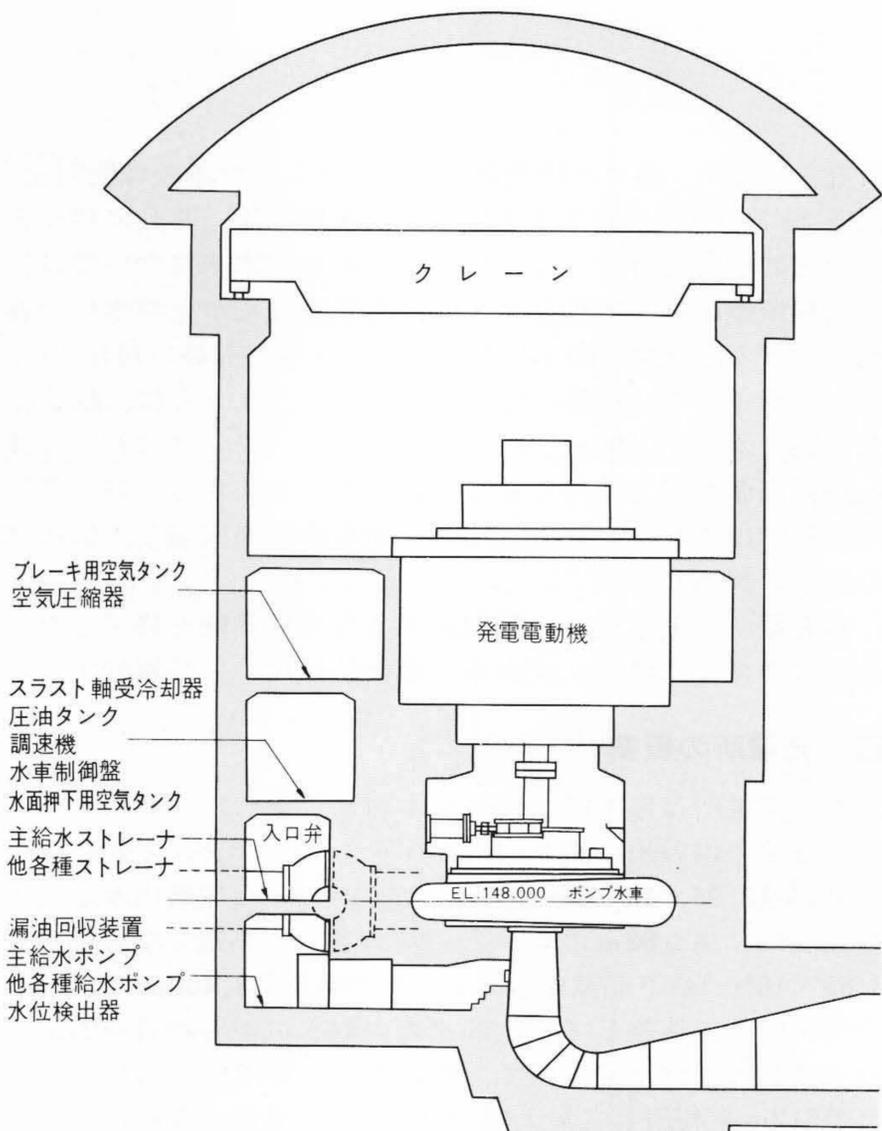


図3 大平発電所据付断面図 発電所の建屋は地下式で、地表より約400mの所に構築され、概略寸法は長さ82m、幅22m、高さ45mで、地下発電所への搬入路は長さ約700mのトンネルで結ばれている。

より効率特性、水車軽負荷側運転特性、ポンプ キャビテーション特性及び水車とポンプの入・出力関係を考慮し、総体的に最も性能の優れたモデルを採用した。

3.2 キャビテーション特性

ポンプ運転時のキャビテーション特性は、効率の低下（揚水量、揚程低下）を来す臨界キャビテーション係数と、更に実際には、実物ランナのキャビテーション壊食などは揚水量、効率が大きく低下しなくても起こる場合があるので、羽根面に発生するキャビテーション気泡の崩壊の条件の両方によって検討された。本ポンプ水車は高落差機であるため、ランナ



図4 256,000kW ポンプ水車ランナの組込作業 高落差ポンプ水車のため、飲口幅の狭い偏平ランナとなっている。

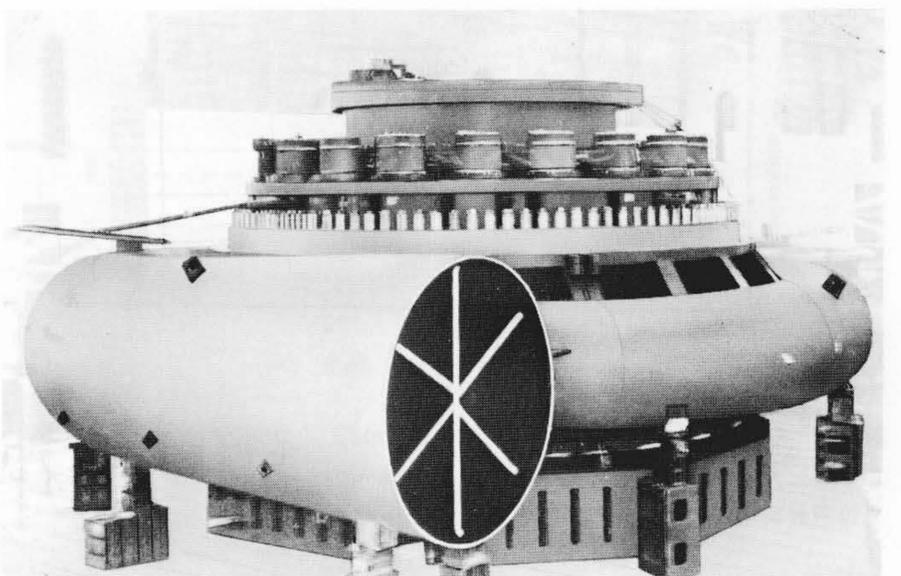


図5 ポンプ水車の組立状況 ポンプ水車を工場組立し、取付関係及び主要寸法の確認を行なった。

内の流速も大であり、キャビテーション特性には特に留意する必要がある。そのため、ランナのキャビテーション気泡ができる限り少なくなるよう、ランナ内流れ解析計算プログラム“FLANPT”⁽⁴⁾により、キャビテーション発生限界を精密に計算してポンプ入口羽根先端形状を決定し、模型キャビテーション試験で羽根面キャビテーション気泡の観察を行ない、これを低減することができた。

3.3 振動特性

実機ポンプ水車が現地で運転される場合、定常運転時特に水車軽負荷運転時の吸出し管に発生するホワールによる水圧脈動、騒音に注意する必要がある。水車軽負荷時及びポンプ高揚程時における軸振れ、その他の構造振動を軽減するため模型試験による振動特性の改善を行なった。

またランナコーンについては模型による振動試験を行ない、既に電源開発株式会社(池原, 長野, 沼原)及び中国電力株式会社(水殿)などの各発電所用ポンプ水車において、運転特性の良好なことが実証されている形状を適用することにした。

3.4 実揚程ポンプ試験

揚程 546m の実揚程試験を実機の約 $\frac{1}{10}$ の模型により、ランナを約 8,000rpm で駆動し、揚程と吸出し高さが水圧振幅と構造振幅に及ぼす影響を実験的に究明して、実機揚水運転の信頼性を予測し確認した。更に水圧脈動で 10^7 回以上繰り返される運転を実施して、ランナ、案内羽根の疲労強度の確認を行なった。

4 構造及び強度上の特徴

主な構造上の特徴は次に記すとおりである。

(1) ランナ

本ポンプ水車のランナは、外径約 5m で羽根枚数は 7 枚である。入口の幅は、扁平なため、ランナ材質には铸造性、溶接性、更に耐キャビテーション性、及び水中疲労強度に優れている 5Ni13Cr 铸鋼を使用し、これを一体構造としている。

(2) ケーシング

設計水圧が 800m と高圧のため、水車ケーシングとして初めて、胴板に 80kg/mm² 高張力鋼のケーシング最大板厚 55mm の 5 分割、現地溶接一体構造としたため、模型による強度の確認試験を実施し、実機についても現地水圧試験を行なって、強度、安全性、及び信頼性を確認した。

(3) 主軸封水装置

主軸封水装置は、定常運転時の漏水と空転時の漏気を抑制するものであるが、本発電所のように、押込深さ(P)と周速(V)が高く PV 値が 1,660m²/s と高圧・高周速のため、実機の $\frac{1}{2}$ のモデルにより構造及び封水機能の改善を行なった。これにより、耐摩耗性に優れた 3 段セグメント形パッキン構造(材質:カーボン及び樹脂)を採用することで、長期にわたる正常な運転が行なえることが確認された。

5 ポンプ水車現地運転特性

表 1 にポンプ水車の仕様を示す。

5.1 メタルならし運転

本ポンプ水車の軸受には、12セグメントから成るセグメント形メタルを採用している。メタルならし運転結果は、水車方向及びポンプ方向で行なわれ、全く異常は認められず軸受温度も安定した結果が得られた。図 6 に、無負荷で行なわれた水車方向のメタルならし運転結果を示す。

5.2 水車運転特性

最高、基準有効落差のいずれにおいても、模型試験結果よ

表 1 ポンプ水車仕様 最高全揚程 546m, 設計水圧 800m のため、ランナ材質 5Ni13Cr 铸鋼, ケーシング胴板に 80kg/mm² 高張力鋼が使用された。

項目	単位	仕様		
発電所名	—	大平		
顧客	—	九州電力株式会社		
台数	—	1*		
回転速度	rpm	400		
水車運転	最大出力	kW	256,000	
	最高有効落差	m	512	
	基準有効落差	m	490	
	最低有効落差	m	467	
ポンプ運転	最大入力	kW	275,000	
	最高全揚程	m	546	
	最低全揚程	m	510	
寸法・構造ほか	ランナ	最大径	mm	4,840
		分割数	個	1
		材質	—	5Ni13Cr 铸鋼
		構造	—	铸造
	主軸	軸径	mm	1,000
		長さ	mm	5,050
		材質	—	SF
	ケーシング	入口径	mm	2,150
		最大幅	mm	11,405
		材質	—	80HT + 60HT

注: * 1号機=日立製作所製, 2号機=他社製

りの換算特性は、全案内羽根開度領域で満足できる結果が得られた。図 7 に開度—出力特性を示す。

また高落差領域における水車運転時の振動、騒音は小さく、部分負荷についても振動、騒音とも良好で、給気による振動防止は不要であることが確認された。

5.3 ポンプ起動特性

本発電所のポンプ起動は、起動用として発電電機と直結して設けられた誘導電動機により起動する方式を採用している。また起動方式は、入口弁全閉状態で排気し、入口弁 30% 開で案内羽根開操作することにより、ポンプ起動時の締切運転を短縮するとともに、締切時に発生する機器振動を防止している(特許申請中)。

5.4 ポンプ空転損失

ポンプ起動に際しては、起動用電動機の容量を低減するために、圧縮空気によってランナ室内の水をランナ下端部より更に約 2m 下まで押し下げて、空転始動するいわゆる空転起動方式をとっている。ケーシングへの給水を完全にシャ断し、案内羽根上・下端及びシャッタ部よりの漏水を抑止すれば、ポンプ水車の空転トルクは 2~3MW に低下するが、逆に空転中にランナ室内の圧縮空気がケーシングに流入し、揚水開始時支障を来すおそれがある。このため、入口弁をバイパスしたケーシングへの漏水補給管には、オリフィス形の 3 段絞りを設け、ケーシング水圧と吸出し管圧力差を 3~5m に保持して、空転時にケーシングへの圧縮空気流入を防止するとともに、案内羽根よりの漏水を最小にして空転損失を抑制している。定格回転速度 400rpm において、ランナ外周速度が約 100m/s となるため、従来手法のランナバンド排水弁だけでは、案内羽根よりの漏水を排水することは不十分であり、更にラ

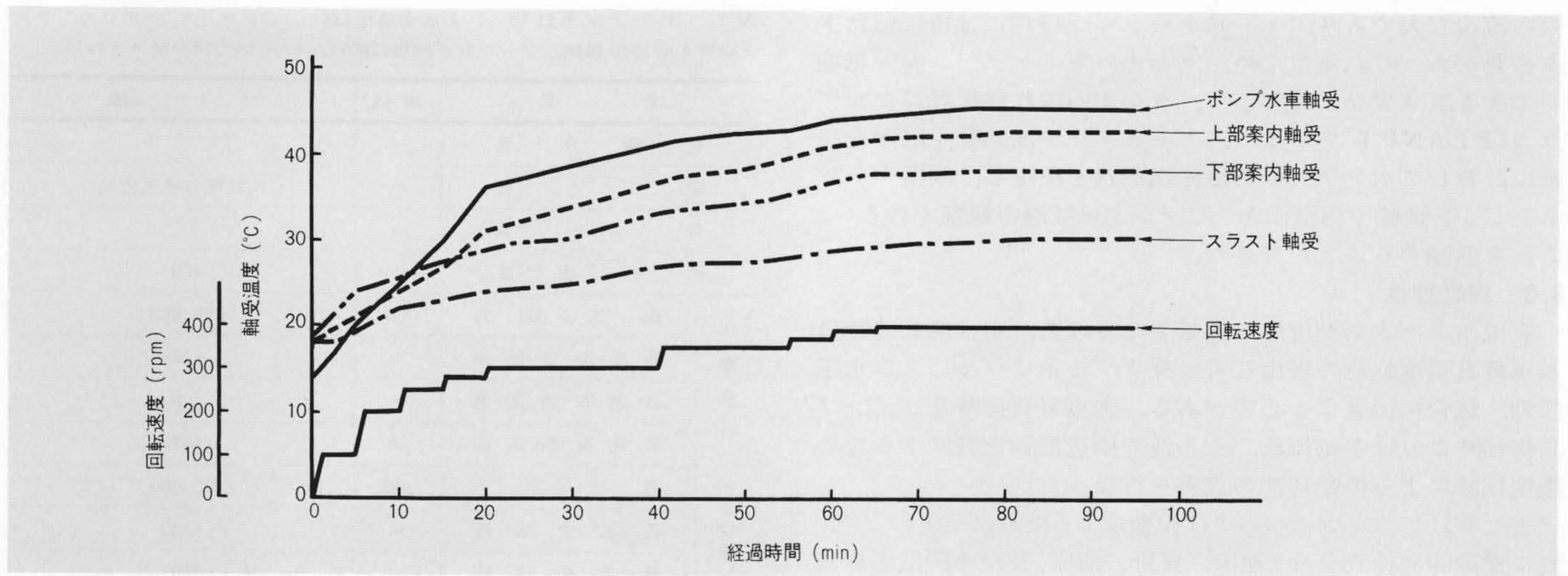


図6 メタルならし運転結果(水車方向) 定格回転速度が400rpmと高速のため、段階的に昇速した。

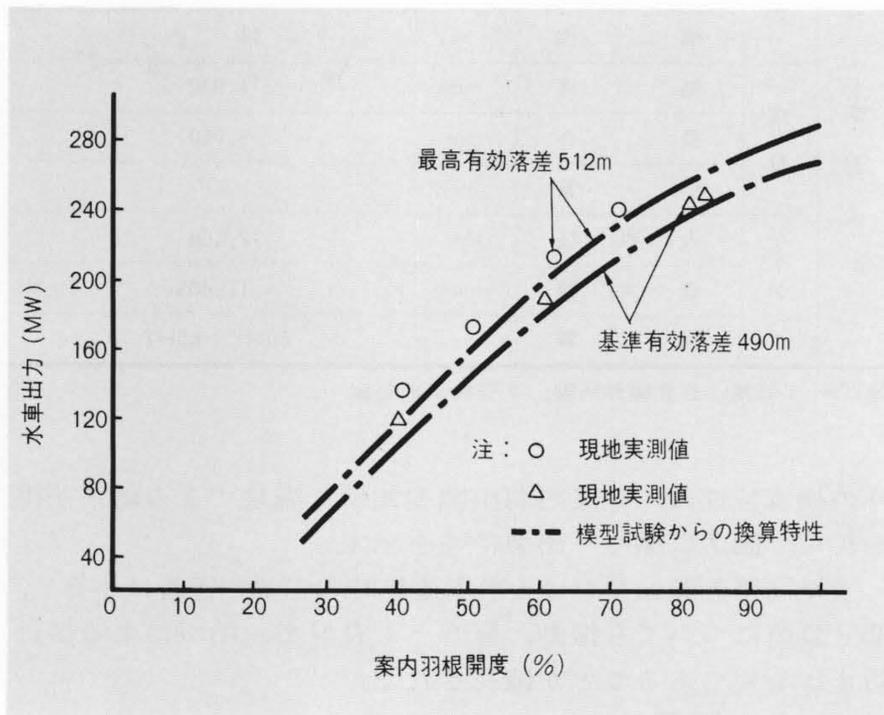


図7 水車運転特性 出力試験は十分保証を満足する結果が得られた。

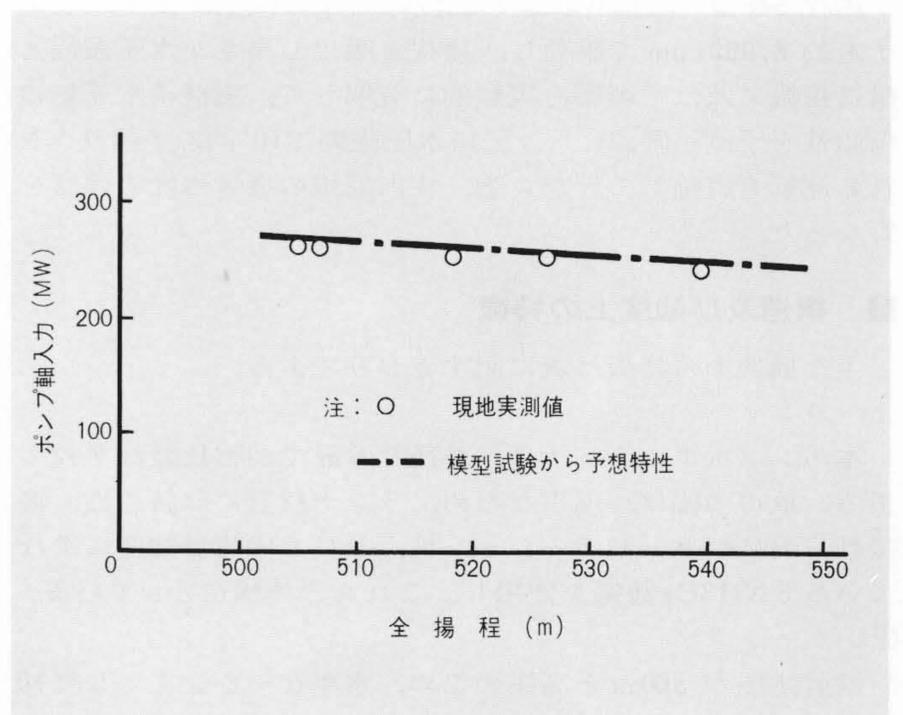


図8 ポンプ運転特性 軸入力は模型試験からの予想特性に近い。

ランナ外周と案内羽根間に上カバー排水弁を設けて、空転損失の減少に対処した(特許申請中)。空転時、ランナ室内の温度は、ポンプ空転損失の増加により上昇度合が大きくなるが、上述の二重排水弁の効果により小さく抑えることができた。本発電所は、5分間の揚水待機運転を行なうので、ランナ外周及び中間シール部には、温度検出器を設けてある。

5.5 ポンプ運転特性

ポンプ運転特性は、図8に示すように軸入力は予想特性を下まわり、運転状態は良好であった。

5.6 水車負荷しゃ断・ポンプ入力しゃ断特性

図9は基準落差における負荷しゃ断時の実測オシログラムを、図10は低揚程における入力しゃ断時の実測オシログラムである。負荷しゃ断時及び入力しゃ断時における鉄管水圧、回転速度は、いずれも許容値内であり異常振動は認められなかった。

5.7 水スラスト測定試験

水スラストは、発電電動機のスラスト軸受設計の基礎となるもので、その値を正確に予想することは、近年、ますます大容量・高落差化する水車及びポンプ水車にとって、極めて

重要である。本発電所において、発電電動機下部エンド ブラケットのたわみによる測定方法で、水圧スラストの測定を行ない図11, 12に示す結果を得た。更に、ランナ背圧室と吸出し管を接続する管路に設けたバランス弁、ランナ背圧室と側圧室を接続する管路に設けた連通弁の開度調整を行ない、スラスト試験を実施したが、いずれも水圧スラスト低減に効果があった。しかし本発電所の場合は、バランス弁、連通弁とも全閉状態で、定常運転時はもちろん負荷しゃ断、ポンプ起動、入力しゃ断などの過渡時においても水スラストは許容値に入ることが確認されたので、最終的にバランス弁、連通弁は保守の便を考慮して系統を単純化するためこれを全閉とした。

6 結 言

大平発電所用ポンプ水車の運転特性並びに構造、運転制御について概要を述べた。揚程510~546mと1段500mの壁を破った本ポンプ水車は、今後更に高落差・大容量化していく揚水発電設備の主役として活躍するものとする。本稿が今後の高落差・大容量揚水発電所の建設並びに運用の一助ともな

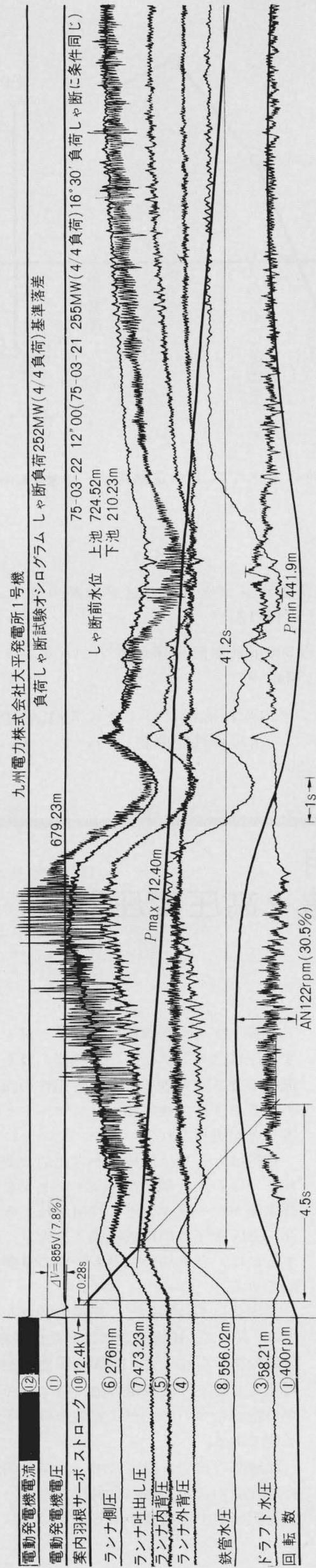


図9 負荷しゃ断試験オシログラム 水圧上昇及び速度上昇は、いずれも許容値以下であり、下部サージタンクがあるため、ドラフト水圧変動は小さい。

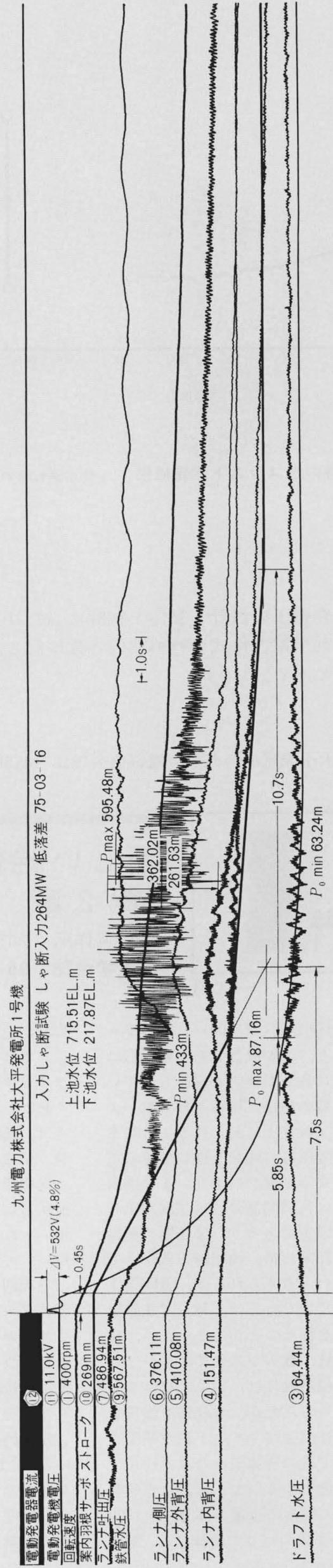


図10 入力しゃ断オシログラム 鉄管水圧の変動が最小となるように、案内羽根閉鎖時間を設定している。

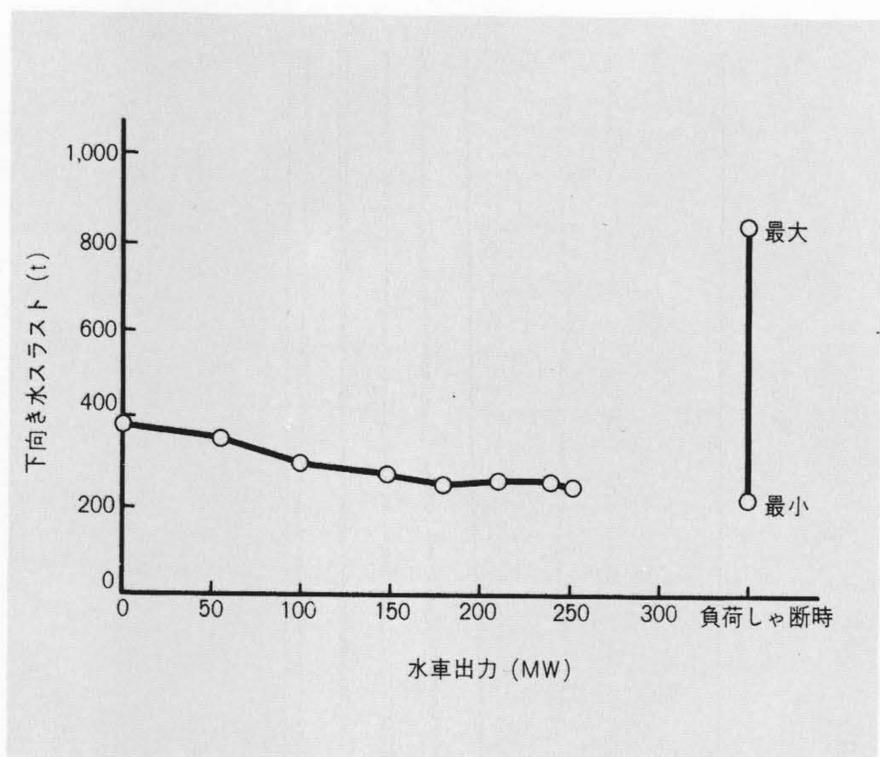


図11 水車運転時の水スラスト測定結果 定常運転時の水スラストは、400t以下である。

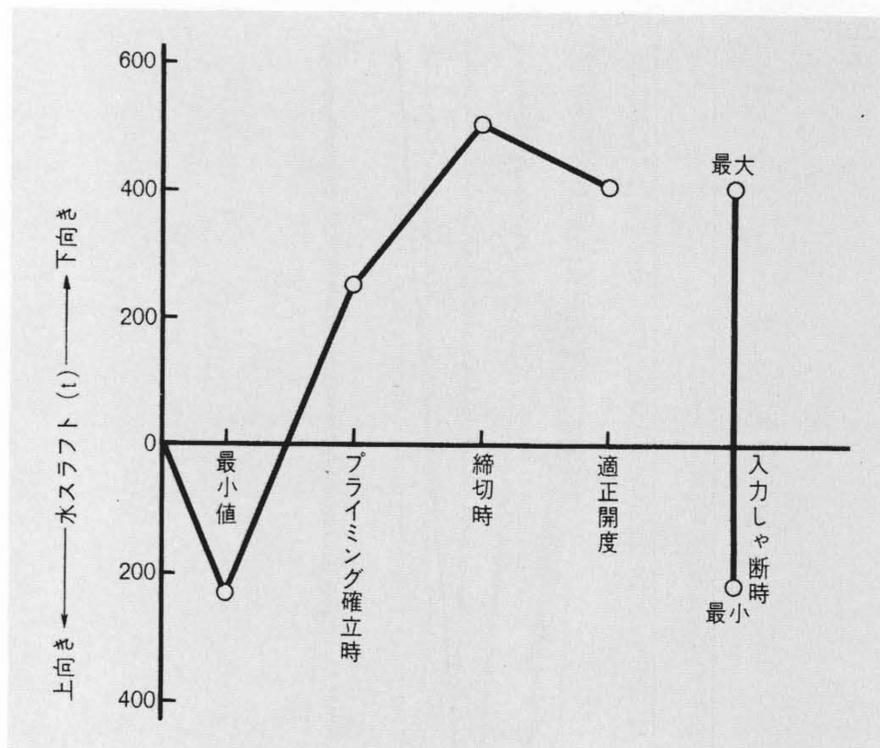


図12 ポンプ運転時の水スラスト測定結果 定常運転時の水スラストは約400tである。

れば幸いである。

終わりに、本発電所の設計・製作・試験に当たり貴重な指針を与えられた九州電力株式会社の関係各位に対し、厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

(1) 吉田ほか：「大平発電所の概要」電気協会雑誌（昭50-4）

(2) 田高ほか：「高落差ポンプ水車現地試験結果の解析」日立評論 55, 1181（昭48-12）
 (3) 田高ほか：「1段500m世界最高落差ポンプ水車」ターボ機械 第2巻第4号（昭49-9）
 (4) 岡田ほか：「ランナ内流れ解析プログラム“FLANPT”を応用した水車、ポンプ水車の性能開発について」ターボ機械 第3巻第4号（昭50-7）



新しい絶縁材料とその応用
 (第2章 機器絶縁 A. 超々高圧変圧器)

日立製作所 加子泰彦・堤 泰行
 電気学会誌 95-5, 392 (昭50-5)

UHV送電は世界的に1,000~1,500kVが考えられており、主要機器である変圧器についても、既に各所で検討が進められている。UHV変圧器の絶縁に要求される第一の条件は、まず試験電圧に耐え得ることであるが、500kV変圧器の開発を機に部分放電の重要性に対する認識が高まり、1分間耐圧試験のほかに長時間部分放電試験が実施されることは確実であろう。変圧器の絶縁は、今後とも従来の紙、油絶縁方式から変わることはないと考えられるが、UHV変圧器を開発するに当たっては、輸送寸法制限以内に変圧器を作ることができるよう、材料、構造の改質、改善が必要である。

高圧リード線絶縁には、古くはワニスクロスなどが用いられたが、含浸性を改善するために現在は高強度クラフト紙が使用され、更にリード線の導体表面の電界緩和には、導電紙を使用する例もある。また巻線よりの口出部の構造の複雑な部分、及び500kV以上のリード線のバリヤ絶縁には、紙成

形品が使用されるであろう。

コイル締付け及び電界緩和に用いられるクランプリングは、漂遊損による局部過熱を起こしにくい材質を選ぶ必要がある。例えば、機械的に強いFRPの表面に導電紙を巻く構造などがよい。

巻線端部には、従来クラフト紙の端を短冊状に切って折り曲げたL形リング絶縁が用いられていたが、最近は紙成形品などを用い、寸法、構造の安定化を図っている。

巻線間絶縁に使用される絶縁筒には、従来はプレスボードの接着絶縁筒などが使用されていたが、部分放電特性、寸法安定性などを改善するため、厚手プレスボードの採用、接着方式の改善などが実用化されてきた。

巻線絶縁には、クラフト紙が用いられているが、UHV変圧器に対しては、インパルス破壊の強さ及び熱伝導率の改善が望ましい。密度を上げることは一つの方法であるが、作業性とのバランスが重要である。

巻線を支え、巻線端部絶縁の一部を構成する絶縁ブロックは、絶縁性能のほかに機械的な強さが大きく、寸法安定性の高いものが要求され、強圧縮プレスボードや強化木などが実用されている。

絶縁油としては、従来から鉱油が使用されているが、近年アルキルベンゼンなどの合成油がケーブルなどに採用されてきており、UHV変圧器用に破壊強さを大きく改善するには、合成油の開発も一つの重要な方向である。

油中には不純物などの絶縁の弱点が存在する。従って、絶縁破壊には当然面積効果、体積効果が存在する。UHV変圧器の絶縁を対象として、今後多量の油、特に長ギャップの特性について、更に実験値の積上げが必要である。

絶縁部の接着、固定に用いる接着剤には接着性能のほか、油の含浸特性の良いものを選択使用する必要がある。