

水車軸受冷却への回転ヒートパイプの応用

Application of Rotating Heat Pipe to Cooling System of Hydraulic Turbine Bearings

水力発電所の軸受などの冷却水は、一般に河川から直接取水しているため給水装置の障害が多く、保守上の隘路となっており、冷却装置の不要な自冷式軸受が保守の面から強く望まれている。これにこたへ、横軸中小容量水車軸受の冷却に回転ヒートパイプを利用して効率良く軸受の発熱を輸送し、水車吸出し管の流水で冷却する方式を開発した。本論文は、その研究の経過と実証試験の結果について紹介したものである。

本回転ヒートパイプの特長は小径長尺であることで、可視実験による作動流体の流動観察や熱特性実験により、蒸発側にサーモエクセルE[®]を採用すれば優れた熱特性が得られることを明らかにした。更に、実用化検討のため、関西電力株式会社中村発電所の水車(485kW, 900rpm)実機に適用し、所期の成果を取めた。

杉本 修* Osamu Sugimoto
石坂 忍* Shinobu Ishizaka
伊藤栄郎** Hideo Itô
吉川次雄** Tsugio Yoshikawa
中山 恒*** Wataru Nakayama
大塚吉則**** Yoshinori Ôtsuka

1 緒 言

水力発電所では、軸受などの冷却に多量の水を必要とするが、河川水中の落葉や土砂のため、ストレーナなどの給排水設備の故障が多く、予想以上に保守上の問題を派生させている。これの対策として軸受の自冷構造化が検討されているが¹⁾、関西電力株式会社と日立製作所は、ヒートパイプの極めて優れた熱輸送効率に着目し、従来図1に示すような冷却構造をもつ横軸中小容量水車のスラスト軸受の冷却に、回転ヒートパイプを利用した自冷式軸受の基礎研究と実証試験を共同で行なった。

回転ヒートパイプにより輸送された熱の冷却は、密閉された発電所建屋の気温や騒音、安全性などを考慮すれば、空冷方式よりは水車の吸出し曲管を流れる水流による自己水冷方式が望ましく、したがって、その直径に比べ極めて長い回転ヒートパイプの熱伝達特性、水車軸とヒートパイプ間の接触熱抵抗など多くの解明すべき問題があり、実験室での基礎的研究を行なうとともに実物水車を対象として実用化に対する

検討を行ない、実証試験に入ったものである。現在までに得られた研究成果の一部をここに報告し参考に供したい。

2 回転ヒートパイプの熱特性

2.1 回転ヒートパイプの原理と特徴

ヒートパイプを回転機械に挿入し、回転部の放熱を促進するアイデアは従来も考えられ²⁾、熱伝達特性の実験的研究や内部流動の理論的研究^{3),4)}が行なわれてきた。従来の回転ヒートパイプの構造は、図2(a)に示すように作動媒体が封入される内部は凝縮液の戻りを容易にするために壁面にテーパが設けられ、遠心力の分力で液流れを駆動している。

しかし、本研究で対象とするように長い回転軸を通して熱を輸送するような場合は、テーパ角度が小さくなって遠心力効果が期待できず、また内面にテーパを設ける加工も難しいなど実用性に欠けると考えられる。

このような理由から図2(b)に示すような細長直管のヒートパイプの適用を考え、その作動原理と熱特性について調べた。内径が比較的小さい直管形状のヒートパイプでは、作動媒体の流動には重力の作用が大きいことが予想され、実際の観察結果もこれを裏付けている(図3)。このような流動状態下での回転ヒートパイプの熱特性は、過去にはほとんど知られていない。

2.2 作動流体

ヒートパイプに封入する作動媒体は、(1)使用温度範囲、(2)熱伝達特性、(3)管材料との適合性、(4)安全性、(5)価格などを考慮して決める必要がある。更に、水車軸への適用に際しては、相当の長期間にわたって性能低下のおそれがないことが要求される。

作動媒体と管材料との関係については、従来から研究が行なわれてきており^{5),6)}、また日立製作所でも長期にわたる確認試験を実施した結果から、銅の容器に純水及びフロン113を封入する組合せを選択し、これらの組合せについて熱伝達特性を知るための実験を行なった。以下に、今回実機で採用した純水封入の場合について述べる。

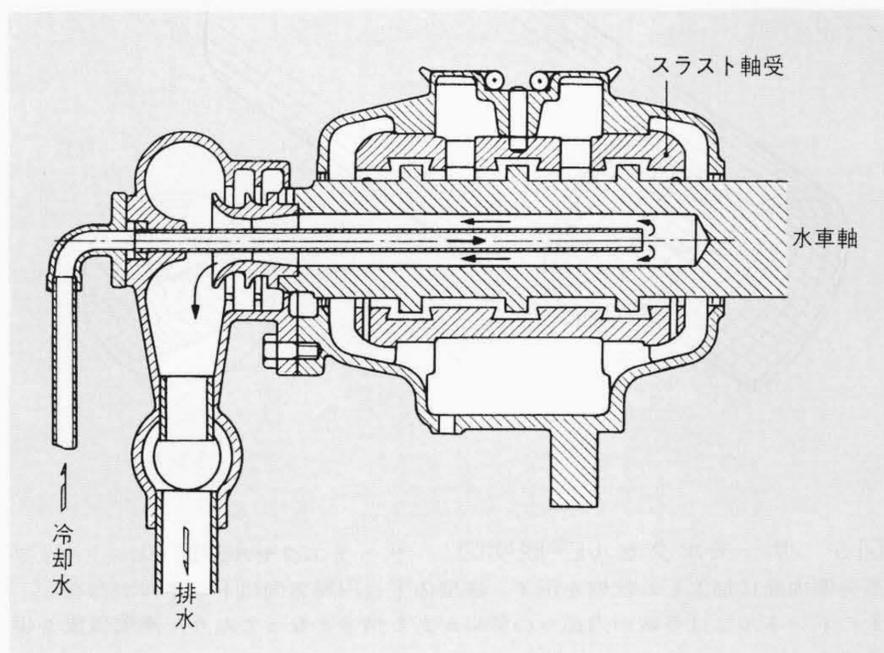


図1 従来の軸受冷却構造 従来使用されてきた横軸水車スラスト軸受の冷却方式を示す。軸受発熱部にあけた水車軸内孔に水を循環し冷却する。

* 関西電力株式会社 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所機械研究所 工学博士 **** 日立製作所機械研究所

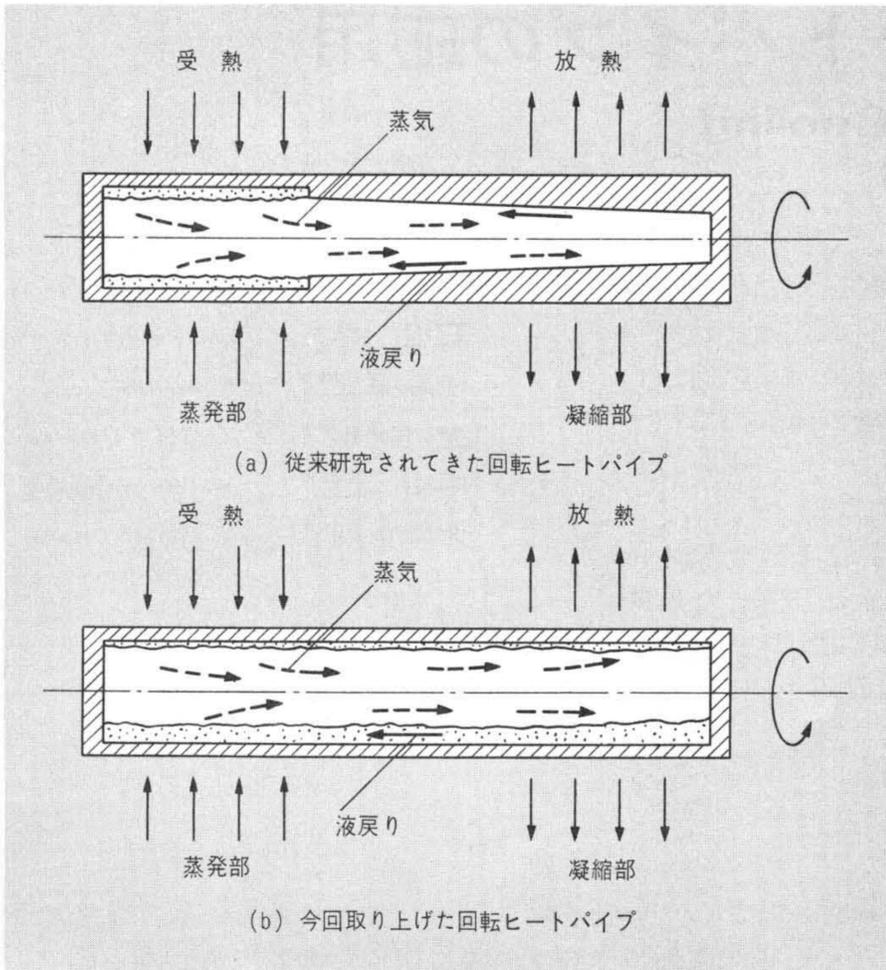


図2 回転ヒートパイプの説明図 (a) 蒸発部には液だめがあり、凝縮部からの液戻りには内面に設けたテーパによる遠心力の分力を利用する。(b) 内面にはテーパがなく、回転軸に挿入しやすい。液戻りには重力を利用する。

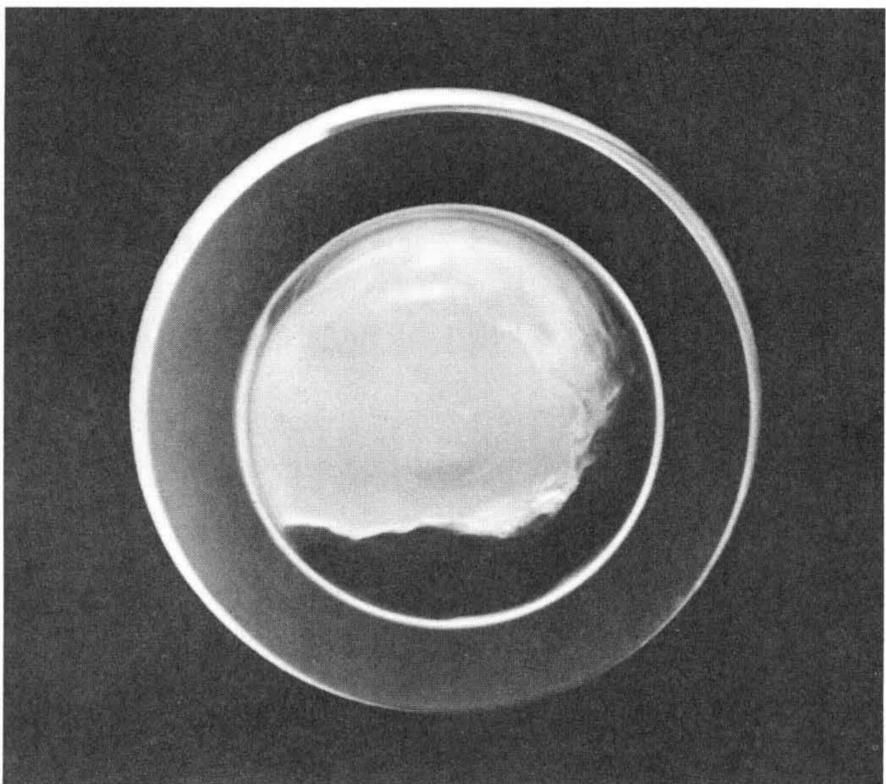


図3 回転ヒートパイプ内部流動状況 900rpmで回転中の回転ヒートパイプ内部の状況を示す。

2.3 回転ヒートパイプの熱特性

2.3.1 実験装置及び方法

熱伝達特性を求める基礎実験装置は、供試ヒートパイプ寸法を全長1,080~480mm、内径37~20mmの範囲で選択できるように構成した。実験装置の概要を図4に示す。なお、実験は回転数150~1,500 rpm、作動媒体封入量はヒートパイプ容積の10~40%の範囲で行なった。

2.3.2 沸騰面の熱伝達特性

蒸発面の熱伝達特性を表わすには、管内の蒸気温度とヒートパイプの表面温度との差(過熱度)を横軸にとり、熱流束を縦

軸にとったグラフを用いるのが一般的である。実験は平滑面の場合と沸騰伝達促進用の表面構造であるサーモエクセルE®(図5)^{7),*)}面の場合につき行なった。図6に平滑面の沸騰熱伝達特性とサーモエクセルE®面のそれを対比して示す。

サーモエクセルE®面は熱流束が変化しても過熱度はほとんど変わらず、これは熱負荷の大小によらずヒートパイプ壁面温度を低く保つことができることを意味しており、非常に有効な特性を示している。

2.3.3 凝縮面の熱伝達特性

図7に平滑面の凝縮熱伝達特性を示す。凝縮伝熱面にも伝熱促進のための構造を設けた場合も実験したが、性能はむしろ平滑面のほうが優れていた。これは、ヒートパイプ内部の状況が図3に見られるように、管底部はもちろん、壁面も液膜におおわれる状態になっており、平滑面のほうが液流れに

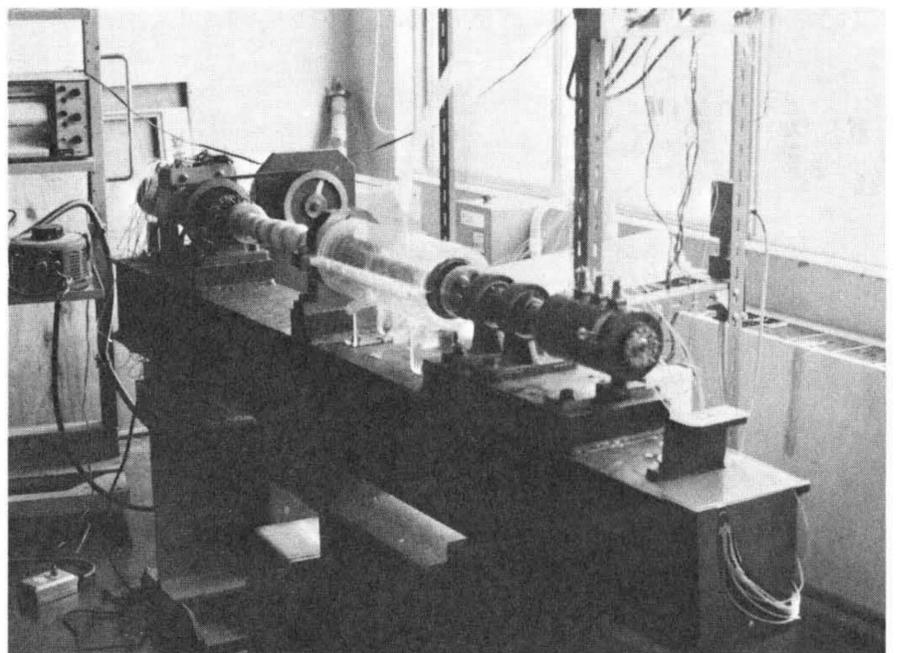


図4 実験装置の概要 回転ヒートパイプの熱伝達特性の測定に用いた実験装置の概要を示す。

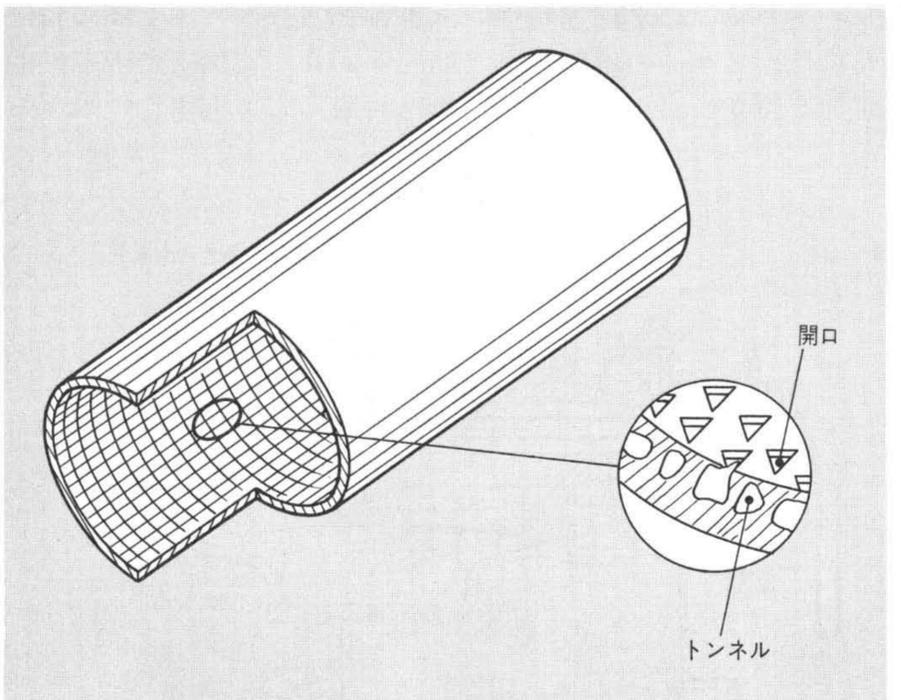


図5 サーモエクセルE®説明図 サーモエクセルE®面をヒートパイプ蒸発側内面に加工した状態を示す。表皮の下に円周方向にトンネルが存在し、そのトンネルには多数の内部への開口がある構造となっており、沸騰現象を促進する。

※) サーモエクセルE®とは、日立製作所と日立電線株式会社が共同して開発した高性能伝熱面(蒸発側面)の商品名称である。

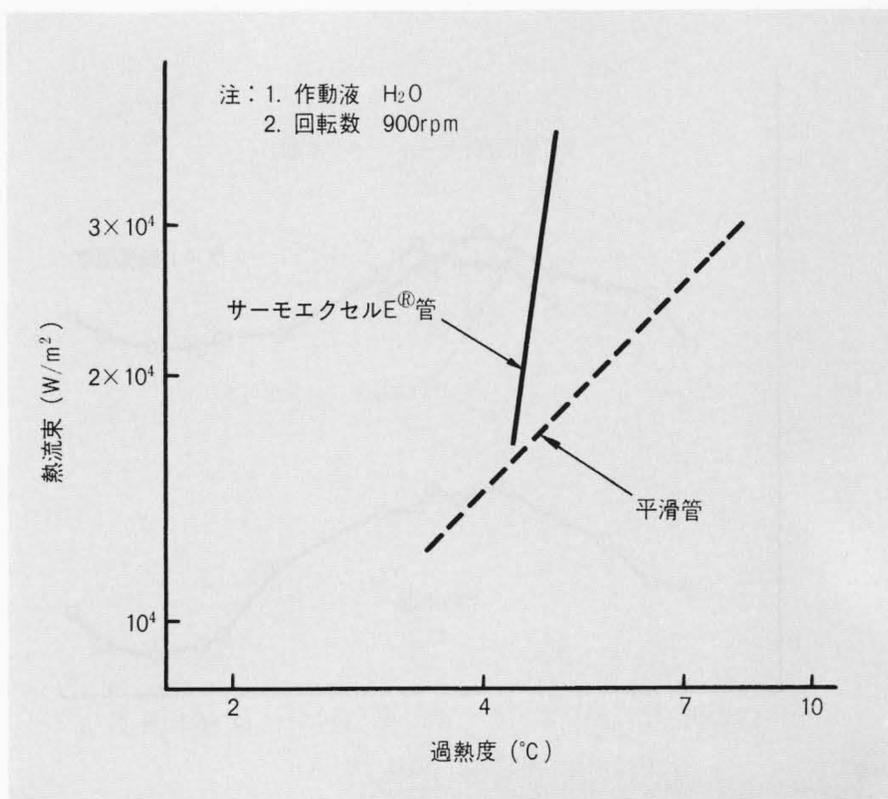


図6 沸騰面熱伝達特性 サーマエクセルE[®]管は熱負荷の大きい場合に有効である。

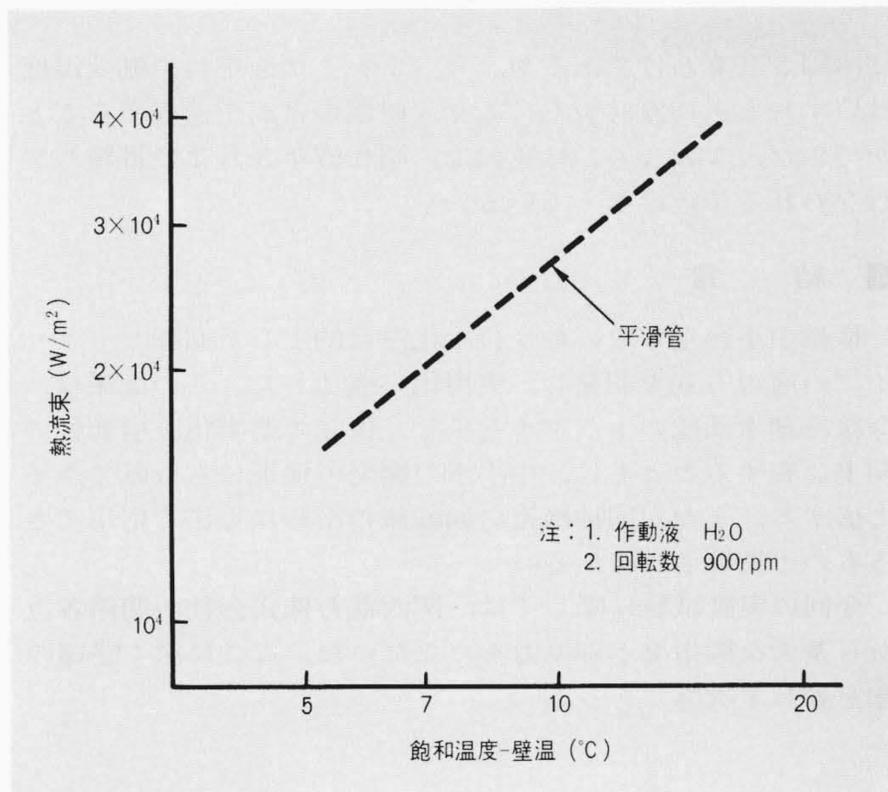


図7 凝縮面熱伝達特性 900rpmでの凝縮面熱伝達特性を示す。

対する流動抵抗が少ないためと思われる。

2.3.4 ヒートパイプ表面温度分布

作動状態での回転ヒートパイプの表面温度分布測定結果例を図8に示す。沸騰・凝縮現象を利用するヒートパイプは、対流熱伝達の場合と異なり、管内の蒸気温度は一様となる特徴がある。それとともに、管壁温度も蒸発部、凝縮部のそれぞれの部分で一様になる傾向が見られる。

3 実機水車への適用

実機水車スラスト軸受の冷却は、前述のように水車軸中心に穴をあけ、その中にスラスト軸受部から水車吸出し曲管部までの長さの回転ヒートパイプを挿入し、水流により行なう方式とした(図9)。実機適用対象機としては、関西電力株式会社中村発電所2号機水車を選定し軸受温度特性を検討した。同水車の仕様及びヒートパイプ熱容量は表1に示すとおりである。

3.1. 熱モデル

図10は、回転ヒートパイプを実機水車に適用した場合の軸受冷却に関する熱輸送をモデル化して示した説明図である。

軸受発熱面に発生した熱は、一部大気へ放熱されるが、大部分は水車軸へ伝達され、軸内の伝導抵抗 R_1 、ヒートパイプ外壁との接触熱抵抗 R_{si} 、ヒートパイプ銅管の伝導抵抗 R_2 を経てヒートパイプ内部へ伝達される。ヒートパイプ内部では、前章に述べたように、沸騰面熱抵抗(過熱度 R_{ei})、内部蒸気の温度降下(R_{HP} …ほぼ0に近い)、凝縮面熱抵抗 R_{co} を経て放熱側の軸へと移送される。放熱側での熱は、加熱側とは逆にヒートパイプ銅管の伝導抵抗 R_3 、接触熱抵抗 R_{so} 、軸の伝導抵抗 R_4 、境膜熱抵抗 R_{oo} を経て冷却水流 T_o へ放熱される。

水車用軸受は使用最高温度に規制(一般には $T_s \leq 65^\circ\text{C}$)があり、かつ冷却水の水温も最高を見込む(一般には $T_o \leq 25^\circ\text{C}$)必要があるところから、ヒートパイプの適用に際しても全温度差($T_s - T_o$)は、この制約内でなければならない。この観点

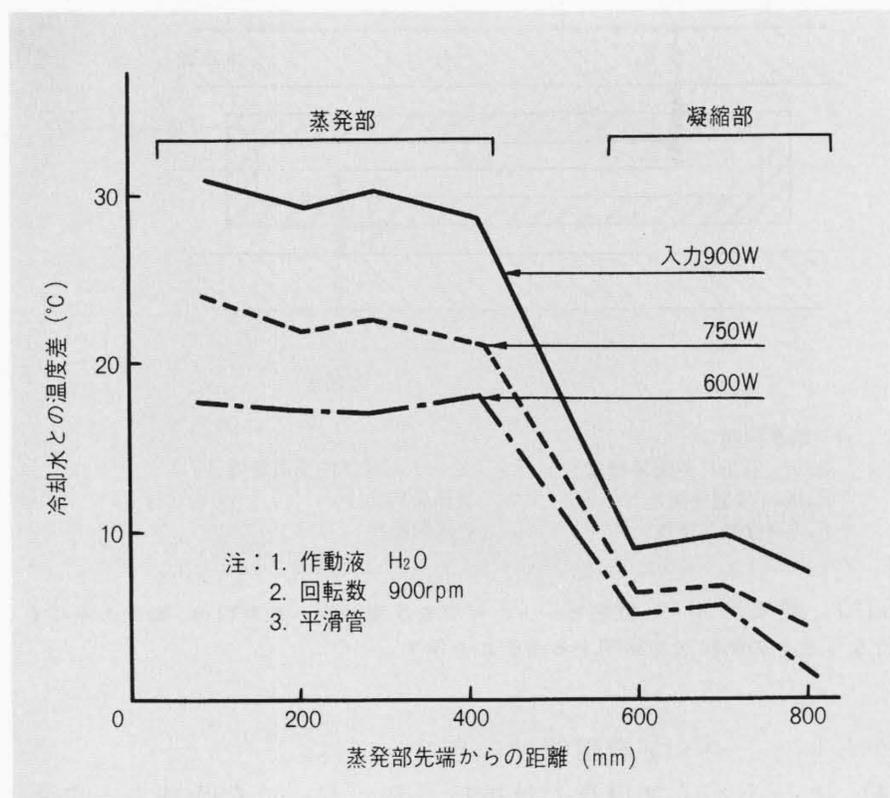


図8 回転ヒートパイプ表面温度分布 900rpmで回転中の回転ヒートパイプの表面温度分布を示す。蒸発部、凝縮部ともにほぼ一様の温度になるのが特徴である。

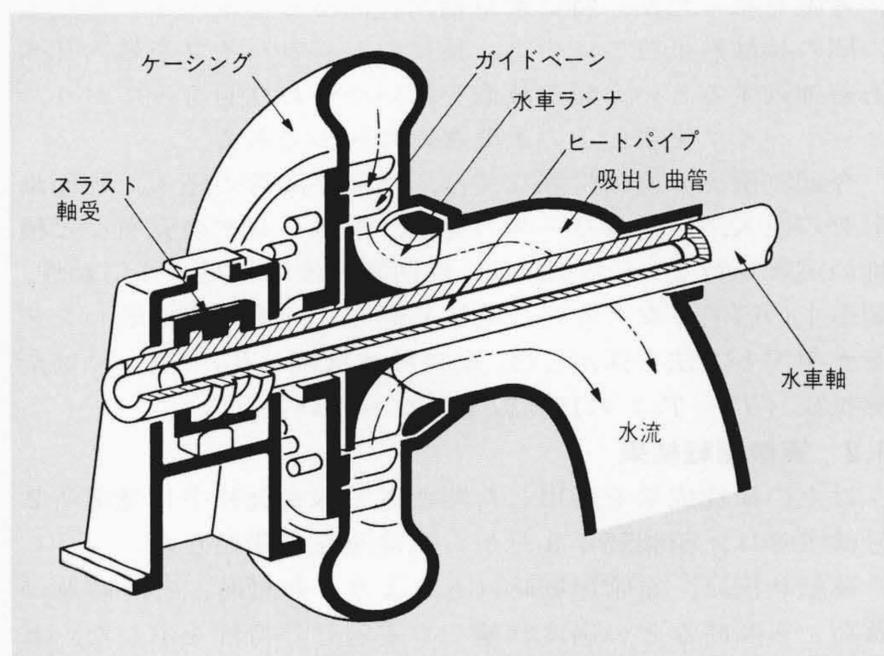


図9 回転ヒートパイプを組み込んだ水車 スラスト軸受で発生した熱を、水車軸内孔に挿入した回転ヒートパイプにより、吸出し曲管部の水流に放熱する。

表1 関西電力株式会社中村発電所水車仕様及びヒートパイプ仕様
実証試験機である関西電力株式会社中村発電所の水車仕様と同機に適用されたヒートパイプの設計値、構造仕様を示す。

項	目	仕 様	
水 車	形 式	HF-1RS	
	出 力	485kW	
	落 差	109.2m	
	回 転 速 度	900rpm	
回 転 熱 容 量	熱 容 量	1,000W	
	寸 法	外 径	38mm
		内 径	33mm
		全 長	1,500mm
	構 造	蒸 発 部	サーモエクセルE [®] 面
		凝 縮 部	平滑面
作 動 流 体		純 水	

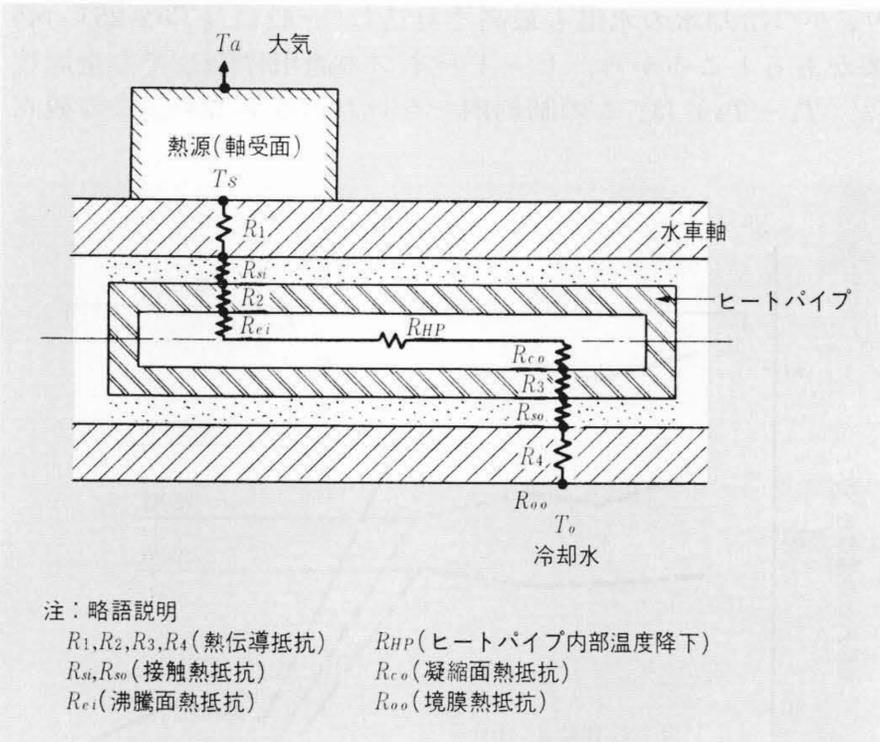


図10 熱モデル 回転ヒートパイプを水車軸内へ取り付け、軸受の冷却を行なうときの熱輸送を説明するモデルを示す。

- からヒートパイプ適用設計に当たっては、
- (1) ヒートパイプ自身の熱抵抗 (R_{ei}, R_{co}) を低減すること (今回は蒸発部にサーモエクセルE[®]を、凝縮部に平滑管を採用して効果を挙げた)。
 - (2) 熱流束をできるだけ小さくすること。
 - (3) 接触熱抵抗を低減すること。

に考慮を払ったが、特に水車軸内孔面とヒートパイプ外壁との間の接触熱抵抗の減少は、長尺のヒートパイプを軸内孔へ密着挿入するという製造技術と深いかかわりをもっており、ヒートパイプ実用化上の重要課題の一つである。

今回実機への適用に際しては、外面平滑管の圧入、外面歯形管の圧入、伝熱グリースの充填、溶融ハンダの充填など種の実験を行ない、熱抵抗値、長期間の使用に対する信頼性、製造上の容易さなどを総合的に判断して、低融点溶融ハンダを充填する方法を採用した。全接触熱抵抗 ($R_{si} + R_{so}$) は全熱抵抗 ($T_s - T_o$) の15%以下となっている。

3.2 実機運転結果

以上の研究成果を適用した関西電力株式会社中村発電所2号機水車は、昭和55年3月から試験運転を開始した。

運転状況は、定常運転時はもとより、起動時、停止時及び負荷しゃ断時などの過度状態でも安定した特性を示した。ヒートパイプ適用機(2号機)と従来形冷却方式(1号機)との軸受温度の変化状況を図11に示す。従来形直接水冷却方式に比べて、ヒートパイプを介した場合は更に多くの熱抵抗を経

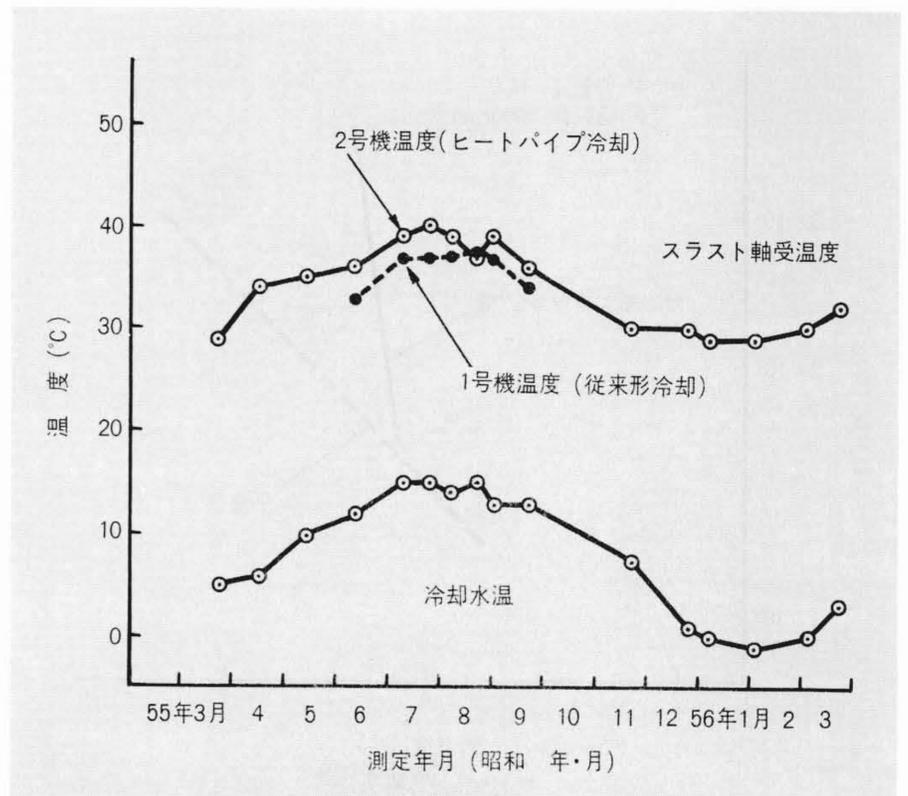


図11 軸受温度実測値 関西電力株式会社中村発電所のスラスト軸受温度の実測値を示す。温度測定時の各号機の負荷 (=軸受発熱量) は同一ではないので、本図はおよその傾向を示す。

て冷却されるわけであるが、ヒートパイプ適用時の軸受温度はいずれも当初設計値内にあり、所期の目的を達成することができた。なおこの試験運転は、昭和57年3月まで継続して行なわれる予定になっている。

4 結 言

横軸中小容量水車の軸受自冷化を目的とした回転ヒートパイプの適用方式を開発し、実用化に成功した。この成果は、今後冷却水システムのトラブルを排し、保守の簡素化、信頼性の向上に資するとともに、中小水力開発の促進にも貢献できると信ずる。また、同種構造の回転機の冷却にも広く応用できるものと期待されている。

今回の実証試験に際しては、関西電力株式会社の関係各位から多大な御指導と御協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 伊藤, 外: 中小容量水車改修における新技術, 日立評論, 63, 6, 401~404 (昭56-6)
- 2) V.Gray: The Rotating Heat Pipe-A Wickless, Hollow Shaft for Transferring High Heat Fluxes, ASME Paper 69-HT-19 (1969)
- 3) P.Marto: Performance Characteristics for Rotating, Wickless Heat Pipes, Proc. 2nd Heat Pipe Conf.
- 4) T.Daniels et al.: Theoretical and Experimental Analysis of Non Condensable Gas Effects in a Rotating Heat Pipe, Proc. 2nd Int. Heat Pipe Conf.
- 5) W.Münzel: Compatibility Tests of Various Heat Pipe Working Fluids and Structural Materials at Different Temperatures, Proc. 3rd Int. Heat Pipe Conf.
- 6) G.Pittinato: Hydrogen Gas Generation in Water Heat Pipes, Jour. of Eng. Materials and Technology, Vol. 100 ('78)
- 7) 中山, 外: 高性能伝熱面「サーモエクセル」, 日立評論, 57, 8, 637~640 (昭50-8)