

環境にやさしい縦型自冷冷却器／ ヒートパイプ式冷却器「パワーキッカー®」

Environment-Friendly Self-Cooling Vertical Cooler Based on Heat Pipe “POWER KICKER®”

高橋 武志*
Takeshi Takahashi

小西 和弘*
Kazuhiro Konishi

素谷 順二*
Jyunji Sotani

菊地 孝行*2
Takayuki Kikuchi

磯貝 悟*3
Satoru Isogai

木村 裕一*3
Yuichi Kimura

概要 電力変換用の電力デバイスなどには機能保持のために効率の良い冷却器が使用されてきている。近年は、冷却器として高性能な特性とこれに加え特に設置空間の省スペース性と地球環境にやさしい（オゾン破壊や地球温暖化への影響が少ない）冷却器が望まれている。このため、これまで高発熱デバイスの放熱冷却器には一般にフロンや代替フロンを使用した冷却器が多く使用されてきたが、これらに代わる縦型自冷冷却器（パワーキッカー）をT社と共同で開発し実用化に成功したのでここに紹介する。

1. はじめに

近年、エレクトロニクスの発展により、電力変換用のデバイスが高性能化して大電力・大容量用のデバイスが容易に使用できるようになってきたことから、電鉄用の変電所などでも電力変換用の素子として、GTOサイリスタ、IGBT、ダイオード等の大容量半導体素子が使用されてきている（写真1）。また、変電所などの場合にはデバイス用の放熱器は保守やメンテの負荷を低減する目的から自然空冷方式（自冷方式）が一般に採用されている。このような中で電鉄用の変電所などの用途では、電力変換用デバイスの発熱が大きいため、デバイス機能保持のためフロンまたは代替フロンを使用した沸騰冷却器が一般的に使用されていた。しかし、近年はフロン規制の問題、地球温暖化などへの配慮の意識も高くなり地球環境にやさしい冷却器の使用が期待されている。

当社では、電力変換素子の冷却器として電鉄車両以外の各種分野でもヒートパイプ式冷却器（パワーキッカー：半導体などの高発熱素用ヒートパイプ式冷却器）をこれまでも多く納入し実績を有してきたが、これらに加えて更に電鉄変電所向けの電力デバイス（遮断機など）用の冷却器として地球環境にやさ

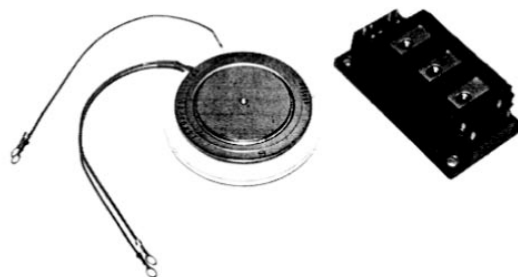


写真1 電力変換素子
Flat type thyristor and power conversion module.

しく設置スペースの少ない縦型自冷冷却器（ヒートパイプ式冷却器）をT社と共同で開発した。この縦型自冷冷却器（パワーキッカー）の特長、実施例、最近の動向などについて報告する。

2. 電鉄用の変電システムにおける 従来の電力変換素子用冷却器

日本の鉄道の場合には、軌道上の電鉄車両へのモータ駆動用（主電源）及び照明など（補助電源）の電力供給、及び電鉄車両から回生（電鉄車両の駆動モータによる発電）した電力を受けなどの送受電が行われているが、これら送受電による各種電力変換などの管理が電鉄用の変電所で行われている。このため変電所には交流変電システム、直流変電システムなどの各種電力をトータル的に管理して電鉄車両に電力を安定供給するための設備が設置されている（図1）。

* 電装・エレクトロニクスカンパニー
エレクトロニクス・コンポーネント事業部 サーマル・電子部品部
*2 岡野電線（株）
*3 研究開発本部 環境エネルギー研究所

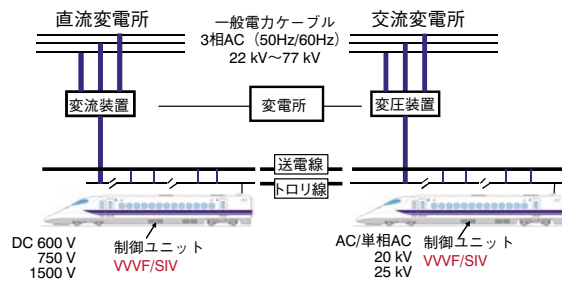


図1 日本における電鉄用変電管理システム
Power control system in substations for electric railways in Japan.

電鉄用の変電所では、大容量の電力変換デバイスが多くの設備に使われているが、この電力変換デバイスの機能維持のためにはそれに見合う高性能の冷却器が要求されることから、一般的にタンク浸漬型沸騰式冷却方式を採用した冷却器が多く使用されている（図2）。この沸騰式冷却器は高発熱デバイスを冷却するために素子をタンク内の絶縁媒体に埋没させて直接素子を冷媒で冷却するもので、この絶縁媒体に多量のフロンや代替フロンが使用されている。このほかにデバイスの冷却方法として個別フィン冷却器やヒートパイプ冷却器も使用されている。これら冷却方式の違いによる比較を表1に示す。

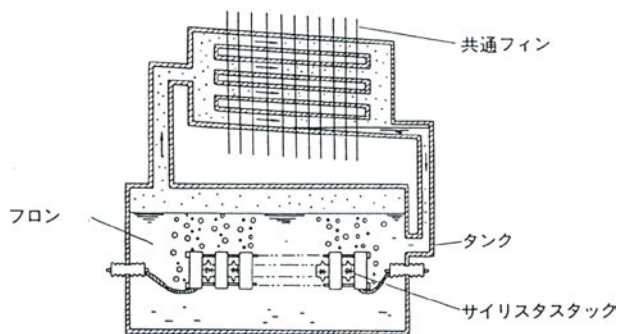


図2 従来のフロンタンク沸騰冷却構造概念図（正面断面図）
Schematic of conventional cooling system based on Freon evaporation in tank.

表1 電鉄用冷却器の比較
Comparison of heatsink structures for electric railway substations.

	沸騰冷却器	個別フィン冷却器	ヒートパイプ冷却器
構造			
サイズ	大きい	大きい	小さい
重さ	重い	重い	軽い
作動液	フロンまたは代替フロン	フロンまたは代替フロン	代替フロンまたは水
信頼性	低い	低い	高い（個別冷却のため）

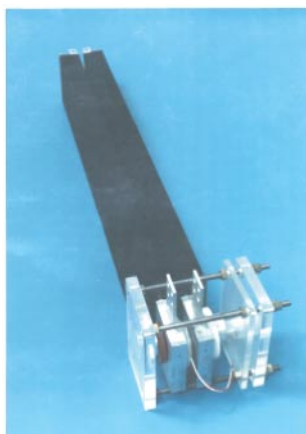
3. ヒートパイプ式冷却器の電鉄分野への適用

動力を必要とせず保守が容易であることからヒートパイプ式冷却器の適用が早くから検討されており、一部の变電所では既に作動冷媒に水を用いた自然冷却式のヒートパイプ冷却器（パワーキッカー）が実用化されている。これまでのヒートパイプ冷却器の使用法は、左右2台のヒートパイプ式冷却器で1つの電力変換素子（GTOなど）を挟む配置にして素子からの発熱をブロックで受熱し、ブロックに埋設されたヒートパイプを介して放熱部の冷却フィンで放熱する構造が採られている。このような構造からヒートパイプ方式冷却器は、環境にやさしいことに加え素子の冷却が個別冷却方式になることから信頼性の観点で冗長性が高く、浸漬タンク式のものとは異なり素子の保守、交換を容易に行うことができる点が特長である。

また、これまでのヒートパイプ冷却器の設置はフィンからの自然対流による放熱効果を考慮して、水平面からの傾きを約3°から5°程度にした横置設置方式が一般に採られてきた（写真2）。写真の例は発熱量500 Wで熱抵抗0.06 K/Wの性能を有するものであり、放熱部の長さは1000 mmである。更に熱抵抗が0.04 K/Wの場合には1500 mmの長さのものもある（写真3）。



(a) パワーキッカーが搭載された変電装置
Power equipment for substation.



(b) 横型設置タイプのパワーキッカー（放熱部長さ1000 mm）
POWER KICKER assembly for horizontal installation.

写真2 横型パワーキッカー及びその使用例
Applications of POWER KICKER.

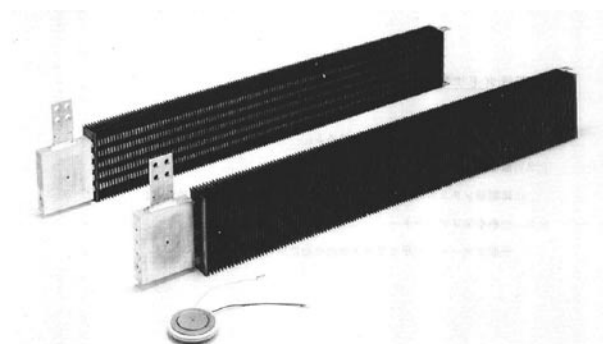


写真3 横型設置タイプのパワーキッカー（放熱部長さ1500 mm）
POWER KICKER unit for horizontal installation.

4. 縦型自冷冷却器（ヒートパイプ式冷却器）の開発

地球環境にやさしく保守性が容易なうえに長期信頼性のある横型設置式のヒートパイプ放熱器は以前より納入実績としてあったが、この横型設置式の場合には放熱フィン部が長くなることから、どうしても設置のための空間（スペース）が必要になる。したがって従来の主流である沸騰冷却器などの他冷却方式の既存品の置き換えや、新規の場合も設置スペースで制限などがある場合にはこれまでの横型設置式のヒートパイプ式放熱

器をそのまま使用できないなどの課題があった。このため、

- 1) 横型設置方式のヒートパイプ式冷却器と同等の性能を有したもの
- 2) 設置スペースを最小で実現するため、ヒートパイプを縦に配置して、コンパクトになるヒートパイプ冷却器にすること

をコンセプトとした放熱器をT社と共同で開発した。

この開発と実用化に当たっては設計上、

- 1) ヒートパイプ自身における熱抵抗を小さくすること
- 2) 放熱部（フィン部）での熱抵抗を小さくすること

で課題解決のための検討と評価を踏まえ実用化した。特に、ヒートパイプ式冷却器の場合、全体の熱抵抗のうち放熱フィン部の占める熱抵抗の割合が大きい点があったが、冷却器として設置した際の限られた少ない面積でも自冷式に適したフィン形状・フィンピッチなどの対策を講じることにより開発コンセプトの目的にかなう冷却器を開発することができた（写真4）。

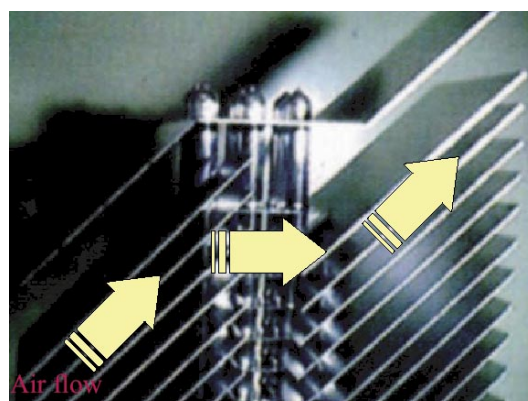


写真4 縦型自冷冷却器のフィン形状
Fin configuration of self-cooling cooler.

また、縦型自冷放熱器の場合の冷却方法の概念を図3に示す。ヒートパイプを立てた状態でも、開発した斜めのフィンを放熱部に設けることにより通風が容易となり自然対流の流れを効率よく行わせることができたことで、従来の横型設置式のヒートパイプ冷却器とほぼ同等の冷却性能にすることができた。これによって、設置面積は当社比で約1/2以下の設置スペースが実現できるようになった。

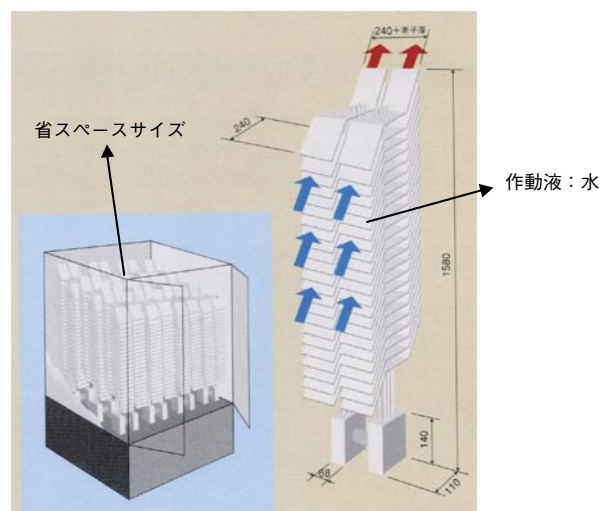


図3 縦型自冷冷却器の冷却方法
Principle of self-cooling vertical cooler POWER KICKER.

5. 縦型自冷冷却器の基本冷却特性

縦型自冷冷却器は標準機種として3機種を設定している。縦型自冷冷却器の基本的な使用法は、横型設置タイプのヒートパイプ式冷却器と同様に、1発熱素子に対し左右2つのヒートパイプ式冷却器でのペア仕様(1素子2HP)で、発熱負荷300 W、500 W、800 Wの対応品がある(写真5)。これらの概略仕様を表2に示す。



写真5 縦型自冷冷却器の外観
Appearance of self-cooling vertical cooler
POWER KICKER.

表2 標準機種の仕様
Standard specifications of self-cooling vertical cooler
POWER KICKER.

機種	負荷 (W)	サイズ	熱抵抗値 K/W (ペア値)
		ブロック寸法×フィン寸法×全長 (mm)	
A	300	(140×110×68)×(120×242)×850	0.12
B	500	(140×110×68)×(120×242)×1155	0.072
C	800	(140×110×68)×(120×242)×1580	0.044

縦型自冷冷却器の標準機種の冷却基本特性は型式試験の実施により、

- 1) 定常熱抵抗特性
 - 2) 過渡熱抵抗特性
 - 3) 低温起動特性
- が評価されている。

縦型自冷冷却器の基本冷却特性の熱評価方法の概要を以下に記す。冷却器の性能評価は実使用に準じた熱評価とし、下記の手順と要領で行った(図4)。

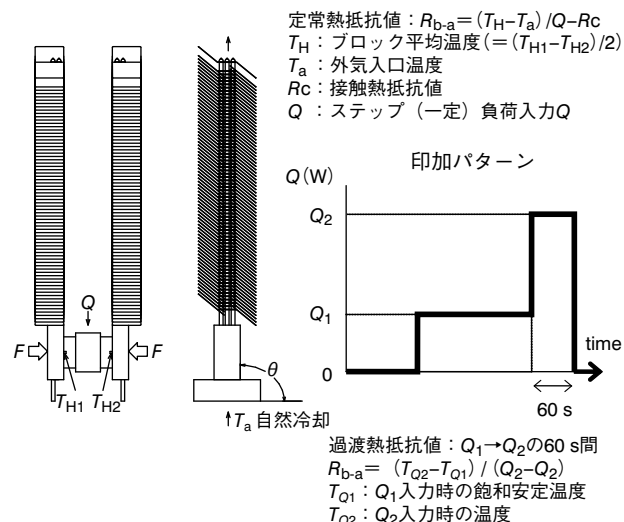


図4 縦型自冷冷却器の熱特性評価方法
Evaluation method for thermal characteristics of
POWER KICKER.

- 1) 素子と縦型自冷冷却器との組み合わせと設置方法：

1素子2HP冷却器を垂直に設置した(HP冷却器をペアにした)状態で素子の代わりに素子形状を模擬したヒータを取り付けたブロック(ヒータブロック)を使用して、このヒータブロックに所用の熱量(Q)を印加する。

- 2) ブロック上昇温度(ΔT)の測定と算出：

ヒータブロックには温度を測定するために熱電対が取り付けられており、外気入口温度と同時にヒータブロックの温度を測ることで、ブロックの上昇温度 ΔT =ヒータブロック部の温度-外気入口温を算出する。

- 3) 熱抵抗値(R)の定義と算出：

この時の熱抵抗値を $R = \frac{\Delta T}{Q} - R_c$ で定義する。(ここで R_c は冷却器の当たり面とヒータブロック面との実験的に決まる接触熱抵抗値)

- 4) この時、熱負荷の印加方法として

①熱負荷 Q を一定のステップ入力で印加した場合の熱抵抗の特性を定常熱抵抗特性と言い、飽和した安定値を定常熱抵抗値と定義する。

②負荷 Q_1 で安定した状態から Q_2 に変わった場合の短時間(30 sまたは60 s)での過渡的な熱抵抗を過渡熱抵抗特性と言い、所定時間後の熱抵抗を過渡熱抵抗値と定義する。

電力変換素子の実使用の場合には、印加としては定常入力と過渡入力での組み合わせでの使用となることからこの定常熱抵抗特性と過渡熱抵抗特性が冷却器としては、重要な特性となっている。

縦型自冷冷却器の標準機の定常熱抵抗特性と過渡熱抵抗特性を図5に示す。

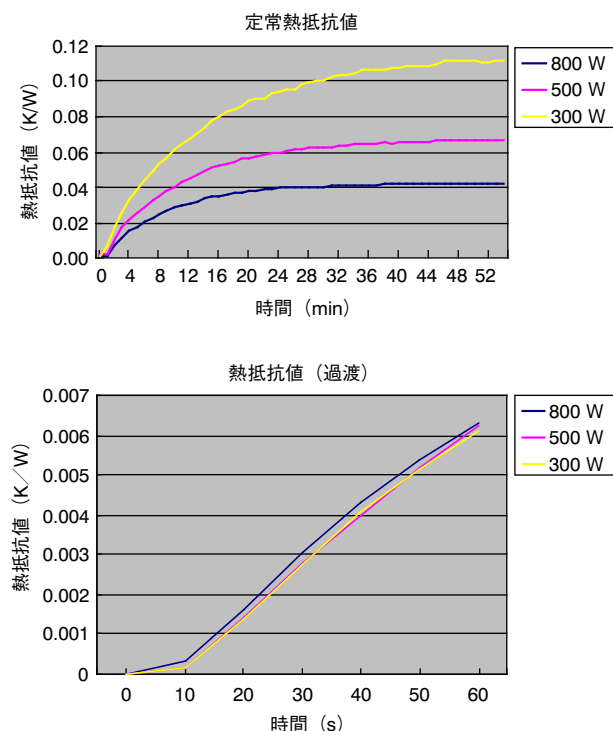


図5 縦型自冷冷却器の冷却特性
Cooling performance of POWER KICKER.

また、これらの定常及び過渡特性のほかに、低温での起動特性も重要になっている。ヒートパイプの作動媒体として水を使用していることから外気温が 0°C 以下の低温になると作動液が凍ってしまい、ヒートパイプとして作動しなくなる現象が発生する可能性がある。このため、外気温度が低温になった場合(冬季)にヒートパイプとして作動できるかの確認として、低温作動の確認と特性についての評価も必要になる。

標準機の低温起動確認の例を図6に示す。この例ではCタイプの800 Wの場合のもので外気温が -5°C の状態に保った状態で熱性能を評価したもので低温起動特性を示している。標準機の場合ヒートパイプの作動媒体は水であるが、低温での起動特性は本例のように外気温が -5°C 以上であれば作動液が水でもスムーズに立ち上がることが確認されている。これより外気温度が低くなると作動液としての水が凍結してスムーズな立ち上げができなくなり、冷却器としては働かなくなってしまう。しかし、最近では各種改善の結果、 -5°C より更に温度が低い(例 -15°C)低温外気の仕様条件の場合にもヒートパイプ側で工夫をすることで、低温での起動が可能になってきている。

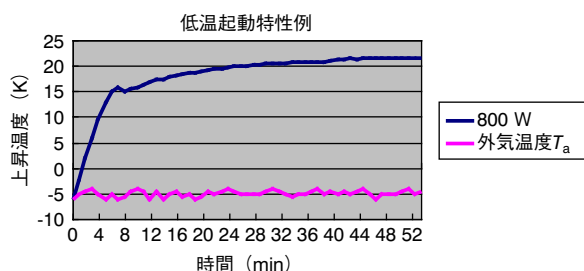


図6 縦型自冷冷却器の低温起動特性
Start-up characteristics at low temperatures.

6. 縦型自冷冷却器(ヒートパイプ式冷却器)の実施例

縦型自冷ヒートパイプの実施例について以下に説明する。電鉄変電用の直流受変電システムのシリコン整流器、遮断機などではシリコン整流素子を使用されている(写真6)。

これらの素子の冷却のために縦型自冷ヒートパイプ冷却器の標準機種800 W対応用のCタイプが使用されている。ヒートパイプ冷却器としての構成部材は、Niめっきを施した銅ブロックに15.88 mmの径で6本の耐食表面処理(すずめっき)を施した1600 mmの長さのヒートパイプを有し、放熱部にはフィンが74枚有した構成になっている。フィン部については長期的な使用と防食の目的から黒アルマイトを施したものとしている。



写真6 縦型自冷冷却器の搭載事例
Power controller for electric railways using POWER KICKER.

7. 最近の縦型自冷放熱の動向と絶縁型縦型自冷冷却器の開発

沸騰式冷却器に代わるヒートパイプ式の縦型自冷冷却器については、開発後からこれまで多くの納入実績をいただき現在に至っている。最近の動向としては冷却器としての安全性の面から絶縁性の要求が高くなってきている。従来のタンク浸漬型沸騰式冷却器の場合はフロンや代替フロンに浸漬する方法であり、素子部とフィン部(冷却部)の間で絶縁性が確保されているため、ヒートパイプ式の縦型自冷冷却器についても同様な絶縁機能を持った、より安全性の高い冷却器の潜在的な需要がある。

ヒートパイプ冷却器を使用して絶縁を取る場合には、電力変換素子間に絶縁板(窒化アルミ)を挟む構成を採ることが一般的である。しかし、絶縁板の挿入による方法では熱抵抗が増え全体として放熱性が悪くなることと万一絶縁板が割れた場合に絶縁低下を招く危惧がある。より安全で、コンパクト性を実現するため、絶縁作動液を使用した絶縁型ヒートパイプ冷却器はこれまで多くの実績があったが、作動媒体として水のような非絶縁作動媒体を用いたものは絶縁性の確保が困難とされ、これまでは実用化がされていなかった。しかし作動媒体を水にしてヒートパイプ自身を絶縁タイプにした縦型自冷冷却タイプの冷却器を開発して世界初の製品を具現化した。

ヒートパイプの作動媒体を水としたままヒートパイプ自身で絶縁を取ることで絶縁板を使用する際の危惧を無くした絶縁型縦型自冷冷却器(縦型自冷冷却器の改良品)が一部の電鉄変電所の設備に使用され始めている。

8. 縦型自冷冷却器の特長

縦型自冷冷却器は、これまで横型設置方式で培ったヒートパイプ式放熱器の実績を踏まえて開発した冷却器であるが、これまでの特長をまとめると以下ようになる。

(1) 環境への配慮

作動媒体として水を使用しており、フロンや代替フロンなど使用せず地球環境にやさしい冷却器になっている。

(2) コンパクト(省スペース)化

横型設置方式のヒートパイプ冷却器に比べると従来比で1/2以下の設置スペースを実現している。

(3) 保守性の向上

ヒートパイプ自身が動力を必要としない伝熱デバイスのため、ヒートパイプ自身の保守は容易である。

(4) 信頼性・安全性の配慮と向上

発熱素子は個別冷却方式を採用することにより冗長性があり信頼性が高くなっている。また、特殊フィンを採用した縦型設置の構造と新技術を活用することで、作動媒体が水のヒートパイプ冷却器に絶縁性を持たせることができ従来に無い高い安全性が実現できる。

9. おわりに

本報では、縦型自冷冷却器(ヒートパイプ式冷却器パワーキッカー)の製品の概要について紹介した。省スペースと地球環境にやさしい製品が要求されてきている昨今の状況の中で、今回の製品は、従来には無い新しいニーズ対応のために多くの課題があったが新しい製品として市場に提供することができた。今まで以上に使いやすくご使用いただくための多くの開発課題によって、我々は新規製品と一緒に新しい独自の固有技術を生み出すこともできた。これは我々開発・技術者にとって大変大きな喜びでもある。今後、より良い製品を供給できるよう更なる市場のニーズに応える努力をしていきたい。

末尾ながら縦型自冷冷却の開発・実用化に当たっては、多くの方々からのアドバイスとご指導をいただきながら製品の開発と製品化をすることができました。関係各位の方々には本紙を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 村瀬，ほか：「電気絶縁型ヒートパイプ式サイリスタ冷却器“パワーキッカー E”」，古河電工時報，No.84，(1989)，129.
- 2) 木村，ほか：「電気鉄道機器へのヒートパイプ式冷却器の応用」，平成3年電気学会産業応用部門全国大会，(1991)
- 3) 村瀬，ほか：「電鉄車両用電気絶縁型ヒートパイプ式電力半導体冷却器“パワーキッカー E”の開発」，古河電工時報，No.91別冊，(1992)，88.
- 4) 「パワーキッカー」カタログ，No.S-065351.5ss
- 5) 村瀬：「熱のハイウエー “ヒートパイプ” 電気機器への応用」，電気学会雑誌，**111**(1991)，37.
- 6) 実用ヒートパイプ(第2版)，日本ヒートパイプ協会(編)