

高性能コールドプレートとスパコン “京” 冷却へ搭載

サーマルテック事業部 益子 耕一¹・杉原 伸一²・小林 哲也³・高橋 真⁴・松田 将宗⁵
フジクラタイランド 堀内 康洋⁶

Advanced Cold Plate and Application to the Super-computer “KEI” Cooling

K. Mashiko, S. Sugihara, T. Kobayashi, M. Takahashi, Y. Horiuchi, and M. Matsuda

近年、データセンタやスパコンの消費電力が増大し、性能だけでなく、効率的な冷却方式が求められるようになった。大規模な設備では、効率的な冷却方式として水冷方式が見直されてきた。我々はスパコンの高性能・効率的な冷却モジュールとして、マイクロチャンネル構造を用いたコールドプレート技術を開発し、スパコン“京”のシステムボードに搭載する水冷ユニットを実用化した。高性能達成（世界一の計算速度）とCPUの消費電力低減化にも貢献することができた。今後は、本技術と実績をもとに、スパコン以外の電子機器、産業機器の冷却へも適用を図っていく。

In these years, effective cooling solutions with high performance were required especially in data-centers and super computers because of the huge and ever-increasing power consumption in these applications. Water cooling systems have also been considered in the cooling of large scale computers. We have been developing an advanced cold plate technology with high performance and effective cooling for super computer. In collaboration with hardware designers of computers, we completed the water cooling unit which is assembled on system board of super computer. The cold plate units contributed an effective cooling the CPUs to an advanced super computer, which was awarded as the fastest super computer in the world. From now on, we will continue to improve and apply this cooling technology to not only super computers but also other electric and industrial products.

1. ま え が き

スパコンやデータセンタ内サーバの冷却において、データ処理の高速化に伴い、従来の空冷方式ではホットスポット発生の問題と、冷却に必要な電力使用量の増加が指摘されている。図1に、データセンタ内サーバ室冷却における空冷式冷却システムを示す。CPUはファン空冷構造のヒートシンクで冷却され、ラックから排熱された熱は、サーバ室内の空調機で冷却され、循環される。効率的に冷却するために、空調機で冷却された空気は、床下からラック配列のコールドアイルへ流れるようになっている。ヒートシンクは大きな伝熱面が必要となり、スペース制限から冷却の限界がある。また、ホットスポット部を冷却するために、大きな風量も必要となり、ファンや空調機の電力使用量が増加してしまう。一方、水冷方式の冷却システムを図2に示す。水冷方式では効率的でコンパクトな冷却が可能となり、従来の空冷方式から水冷方式が見直されるようになった。

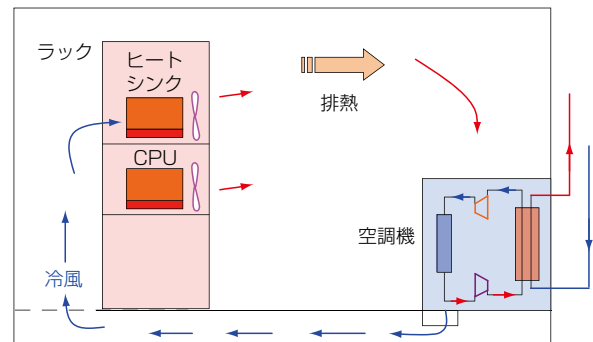


図1 空冷方式冷却システム
Fig. 1. Air cooling system.

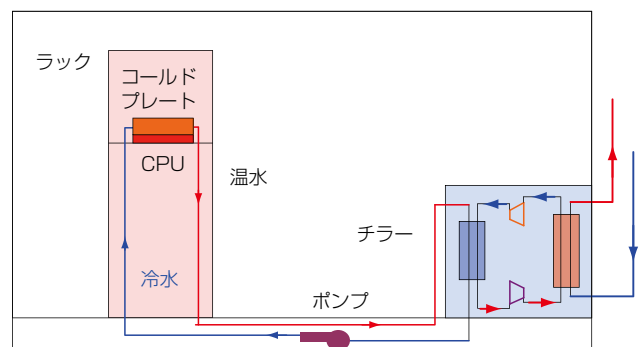


図2 水冷方式冷却システム
Fig. 2. Water cooling system.

1 サーマルテック事業部開発部長
2 (株)青森フジクラ金矢社長
3 サーマルテック事業部製造技術部長
4 サーマルテック事業部技術グループ長
5 サーマルテック事業部開発部
6 フジクラタイランド (Fujikura Electric Thailand Ltd)

表 1 に、空冷方式と水冷方式との特長の比較を示す。空冷方式は、水冷設備や配管が不要のため、設備の設置や増設が容易である。一方、水冷方式は、高い冷却性能だけでなく、省エネ性・高密度実装という面でも優れている。また、CPUを低い温度に冷却できることから、CPUの性能、信頼性が改善される効果がある。

2. コールドプレートの構造と設計

2.1 マイクロチャンネル用いたコールドプレートの構造

CPU冷却には高性能コールドプレート（以下“CP”）が必要で、そのためには、CP内の伝熱面にマイクロチャンネルを用いた構造を開発した。図 3 に、マイクロチャンネル伝熱面の写真を示す。伝熱面にマイクロチャンネル構造を用いたCPは、限られたサイズで伝熱面を最大限に大きく取れ、且つ圧力損失も小さい特長がある。そのため、高性能でコンパクト化が可能となる^{1),2)}。図 4 に、マイクロチャンネル伝熱面を用いたCP構造と冷却の原理を示す。

冷却水は片側の管を經由してCP内へ流入し、その後CP内の端部マニフォールド部からマイクロチャンネル溝部へ流入する。このフィン部で熱交換される。

2.2 コールドプレート内部の熱伝達率と熱抵抗^{4),5)}

冷却水入口温度基準のコールドプレートの熱抵抗 R_t は、以下の(1)式で定義されている。尚、各部の温度位置は図 4 に示す。

ここで、 Q ：CPUの発熱量（W）、 T_b ：CPベース底面温度（℃）、 T_{wi} 、 T_{wo} 、 T_{wm} 、 T_f ：冷却水入口温度、出口温度、中間温度、伝熱フィン表面温度、 R_{cp} 、 R_{sp} 、 R_f ：CP熱抵抗（℃/W）、CPUとCPベース間の拡散熱抵抗（℃/W）、マイクロチャンネルフィンの熱抵抗（℃/W）、 A_f 、 ϕ_f ：それぞれマイクロチャンネルフィンの伝熱面積（ m^2 ）、フィン効率とする。

$$R_t = (T_b - T_{wi}) / Q = (T_{wo} - T_{wi}) / 2 Q + R_{cp} \quad \dots(1)$$

ここで、

$$R_{cp} = R_{sp} + R_f \quad \dots(2)$$

$$R_f = 1 / (A_f \phi_f a_w) \quad \dots(3)$$

また、伝熱面が並行フィン形状の場合、フィンと冷却水の間熱伝達率 a_w （ $W/m^2\text{℃}$ ）は以下の式で表される。尚、 λ ：冷却水の熱伝導率（ $W/m\text{℃}$ ）、 L ：伝熱面長さ（m）、 R_e 、 P_r ：レイノルズ数、プラントル数とする。

$$a_w = 0.664 (\lambda / L) (R_e)^{1/2} (P_r)^{1/3} \quad \dots(4)$$

ところで、コールドプレートの設計において、設計条件（冷却水流量、熱抵抗等）から必要伝熱面積が求められるが、マイクロチャンネル部のフィン厚さ、ピッチ、サイズ、そして高さのパラメータがある。図 5 に、マイクロチャンネル（フィン高さ 3.5 mm、厚さ 0.5 mm の場合）のフィンギャップと流速及び熱伝達率の関係を示す。この図に示す計算結果では、流量 $F_w = 1.0$ L/min でフィンギャップ 0.4 mm の場合に、熱伝達率は 1300（ $W/m^2\text{℃}$ ）が得られることが分かる。また、流量が少なくなっても熱伝達率は 1000（ $W/m^2\text{℃}$ ）程度の値が得られる。

表1 空冷方式と水冷方式との特徴比較

Table 1. Comparison between air cooling and water cooling of server cooling system.

	空冷方式	水冷方式
長所	設備設置や増設が容易.	高性能冷却, 高密度実装
	水冷配管が不要.	省エネ性
短所と課題	冷却モジュールのスペース大	冷却水設備, 配管が必要.
	ホットスポット, 冷却性能限界	結露防止, 漏水対策



図3 マイクロチャンネル伝熱面の写真
Fig. 3. Photo of micro-channel heating surface.

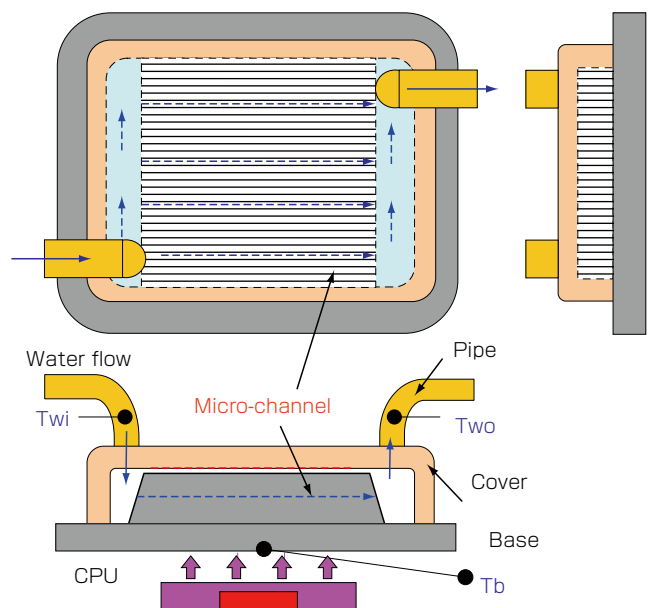


図4 マイクロチャンネル伝熱面を用いたCP構造図
Fig. 4. Schematic of cold plate structure with micro-channel.

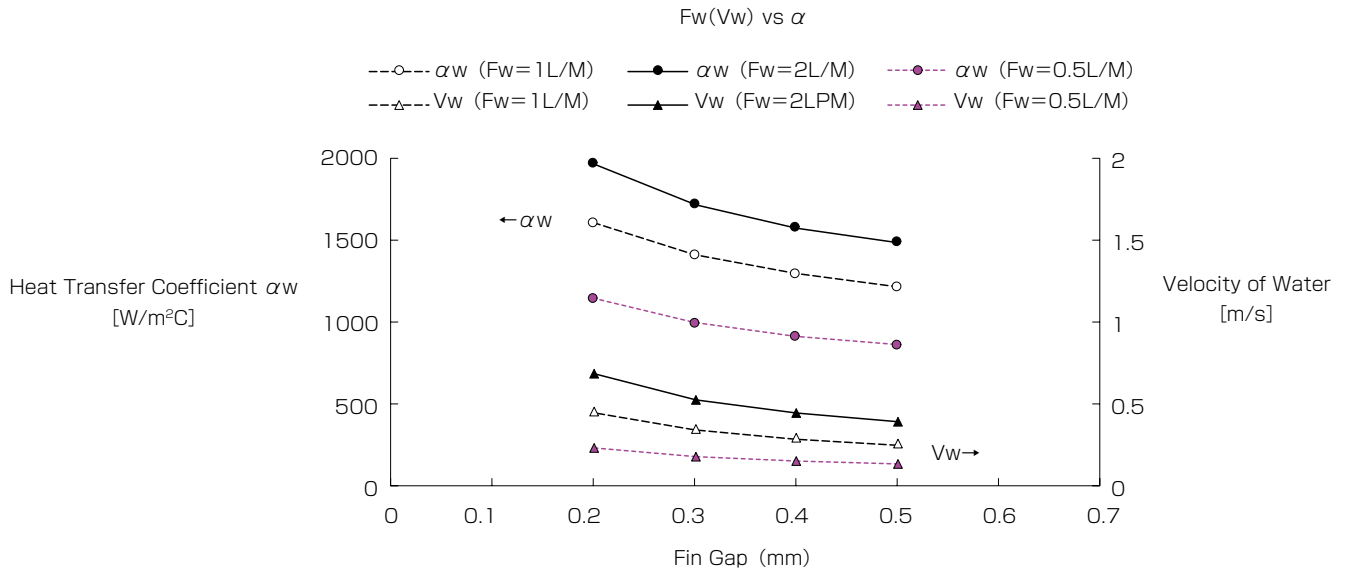


図5 マイクロチャンネルのフィンギャップと流速及び熱伝達率の関係
 Fig. 5. Relation among fin gap of micro-channel, velocity of cooling water, and heat transfer coefficient.

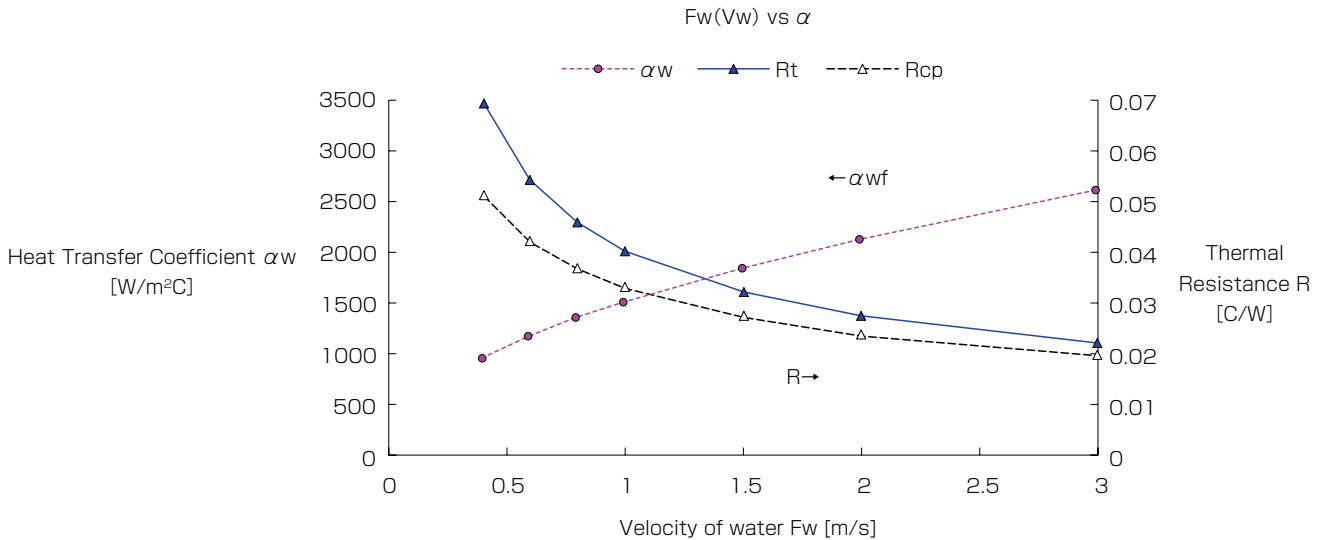


図6 冷却水流速に対する熱伝達率及びCPの熱抵抗
 Fig. 6. Relation among velocity of cooling water, heat transfer coefficient, and thermal resistance.

一方、図7にマイクロチャンネル内の冷却水流速に対する熱伝達率及びCPの熱抵抗を示す。流速が速くなるにつれて、当然ながら熱伝達率は大きくなり、CP熱抵抗も小さくなるが、その反面、圧力損失も大きくなることから、設計時にはこの点を考慮する必要がある。また冷却水の流速が2 m/s以上となる場合、エロージョンなども懸念されることがある点を配慮する必要がある。

尚、各マイクロチャンネル溝での冷却水の流速ができるだけ均等であることが必要である。そこで、流体シミュレーションを用いて、冷却水の流量1 L/minの場合での各溝部の流速を計算した結果を図7に示す。今回の形状では流速がほぼ均一になっていることが確認できる。流速が均一になるかどうかの要因として、溝幅、溝枚数(フィン幅)、フィン長さに関係すると考える。

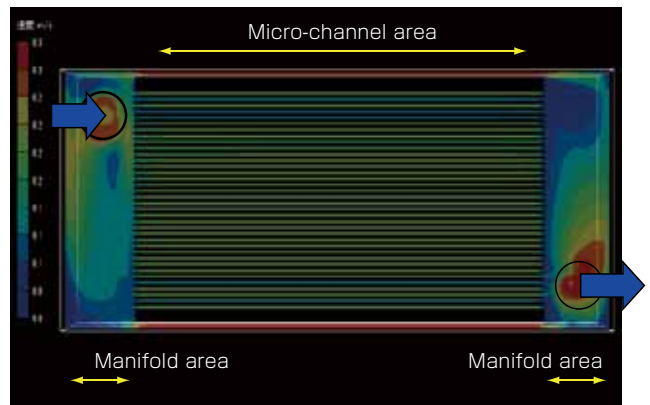
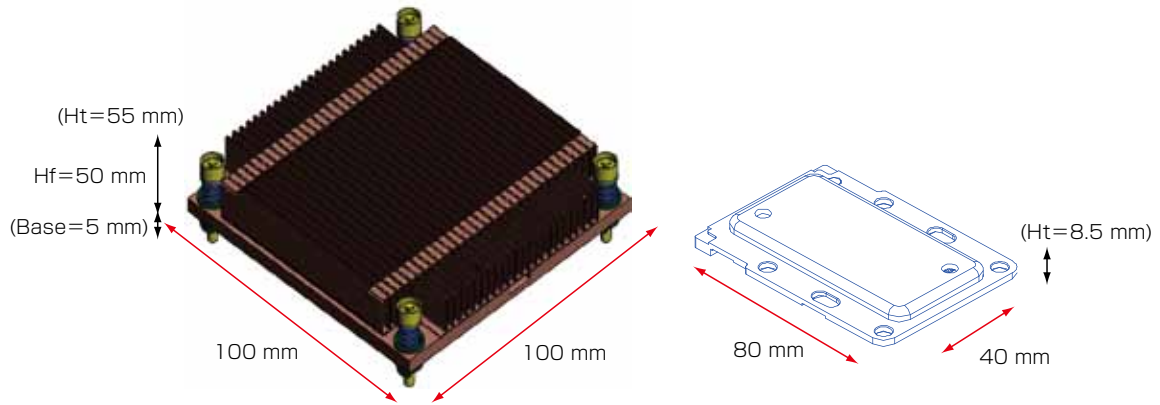


図7 マイクロチャンネル内部の流速分布シミュレーション
 Fig. 7. Simulation of hydrodynamic flow inside of micro-channel.



項目		空冷		水冷		比率 (空冷/水冷)
フィンエリア (L×W)	cm	10.0×10.0		8.0×4.0		—
フィン高さ	cm	5		0.35		—
フィン部容積	cm ³	500		11.2		45
フィン厚さとピッチ	mm	0.5	2	0.5	0.9	—
伝熱面積	m ²	0.5		0.022		23
冷却水量 (Fw)	L/min	900	(600-1200)	1	(0.5-2.0)	900
冷却水流速 (Vw)	m/s	3	(2-4)	0.3	(0.15-0.6)	
熱伝達率	W/m ² C	30	(25-37)	1500	(1050-2050)	0.020
フィン部熱抵抗 Rf	C/W	0.08		0.039		2.1
流体温度上昇熱抵抗 dT/2Q	C/W	0.028		0.007		4.0
全熱抵抗 Rt	C/W	0.108		0.046		2.3

図8 空冷方式と水冷方式との冷却モジュールサイズ比較
Fig. 8. Estimated comparison of water cooling module with air cooling.

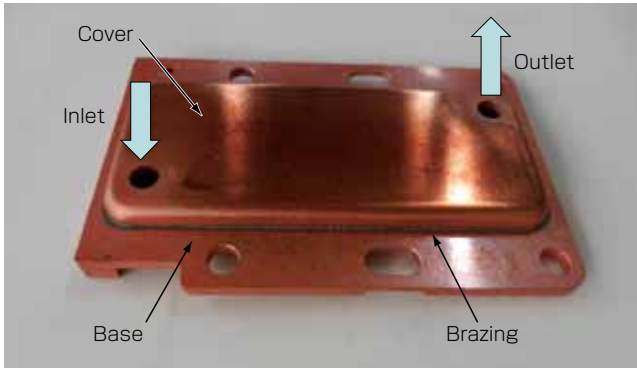


図9 マイクロチャンネル伝熱面を用いたCP写真
Fig. 9. Photo of a Cold plate with micro-channel.

2.3 空冷方式と水冷方式での冷却モジュール比較⁵⁾

空冷方式と水冷方式での各々の冷却モジュールの性能と大きさを比較検討した。図8に、空冷方式ヒートシンクと水冷方式CPで100W冷却モジュールのサイズを試算した結果を示す。空冷の場合、許容される風量とノイズの範囲から、その熱伝達率 a_a は概ね30(W/m²C)程度である。一方、水冷の場合、図4に示したように熱伝達率 a_w は1500(W/m²C)程度が得られる。つまり、水冷方式では空冷方式に比べて50倍の熱伝達率が可能となり、その結果、冷却モジュール自体のサイズを1/45と小さくでき、また熱抵抗も小さくできることになる。

3. スパコンCPU冷却用CPユニットの開発・量産技術

3.1 冷却要求仕様と高信頼性CPの開発と特性⁵⁾

スパコン冷却モジュールの要求仕様(熱抵抗 0.05℃/W以下、1MPaの耐圧強度)に対応するため、マイクロチャンネル伝熱面を用いたCPを開発した。図9に、コールドプレート外観写真を示す。コールドプレート部品は冷間鍛造で製造し、伝熱フィン用マイクロチャンネルの製作は、特殊な加工方式を採用した。本CPでは冷却水の最大圧力1MPaに対する強度が必要で、マイクロチャンネルフィン上部はCP用カバー内面に接合すべく、そのロウ付け技術を開発した。また、冷却水の供給管もCPカバーにロウ付けされた構造で、冷却水リークの信頼性対策からホース接続やガスケットシール部を無くした設計構造である。従来品に比較して、このCPにおいては熱性能だけでなく、冷却水の圧力強度やリークに対する信頼性を改良した。

図10に、冷却水量を変えた場合のCP単体の熱性能の計算値と実験値を示す。計算値と実測値と比較してみると、流量が1.0L/min以下の場合には実測値の方が僅かに良いことが判る。計算値は均質な流速の値であるが、実験値はCP構造上から、銅管から流入する入口部付近は噴流になっており、これにより熱伝達率がアップして熱抵抗を下げていると推定する。

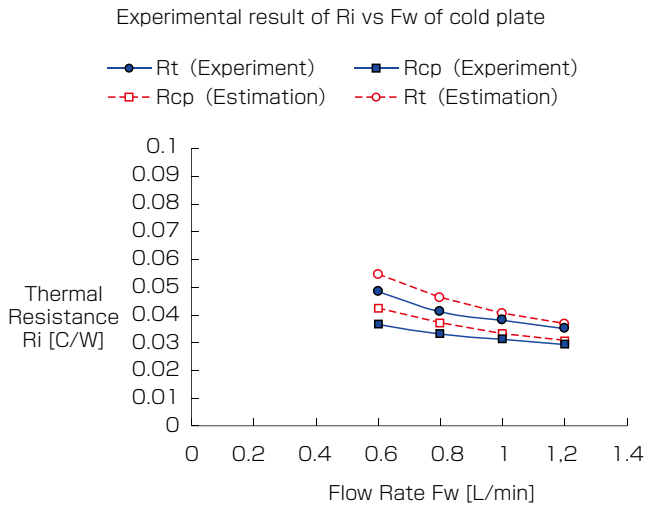


図10 冷却水量を変えた場合の冷ドプレート単体の熱性能（計算値と実験値）
Fig. 10. Experimental results of relation between flow rate and thermal resistance of the cold plate comparing with estimated values.

図11には冷却水量を変えた場合の熱性能と圧力損失（測定値）の関係を示す。ここで、 ΔP 、 ΔP_{cp} 、 ΔP_{in} 、 ΔP_{out} は各々、パイプ配管も含めたCP全体、CP内フィン部、パイプ配管を含む入口側、出口側圧力損失(kPa)を示す。実験の結果、流量0.8 L/minにおいて、圧力損失 ΔP は約4.0 kPa、熱抵抗0.04 °C/Wの測定結果が得られた。流量が増加するにつれて、熱抵抗は低減するが、一方、圧力損失も増加することになる。

3.2 水冷ユニットの実装構造

システムボードに実装可能とするための水冷ユニットの部品構成を図12に示す。CPUとICC冷却用の複数のCPを銅管で接続した構造である。それぞれを並列2系統の配管系統で連結し、冷却水は、マニフォールドに取り付けられた部品（カブラ）と接続して給排される構造である。

この水冷ユニットの開発に当たり、以下のような課題があり、これらをスパコン設計者らとともに解決した。

① CPを接続する銅管の変形強度とCP位置の変形防止（配置確保）

複数のCPとそれらを接続した銅管からなる水冷ユニットは、製造検査工程やシステムボードへ実装するときに、形状が確保され、容易に変形しないことが必要ある。そのため、銅管のロウ付けは炉中ロウ付けでなく、大気ロウ付けとした。その後の工程においては、図13に示すような固定板へ組み付けて、変形を防止している。

② CPを接続する銅管の熱応力緩和

複数のCPとそれらを接続する銅管及びマニフォールドはロウ付け構造としたが、熱応力を緩和するために、図13に示すような曲げ形状を盛り込んだ⁶⁾。

③ 高信頼性の検査工程

CPユニットの品質確保・信頼性を図るため、CP部品

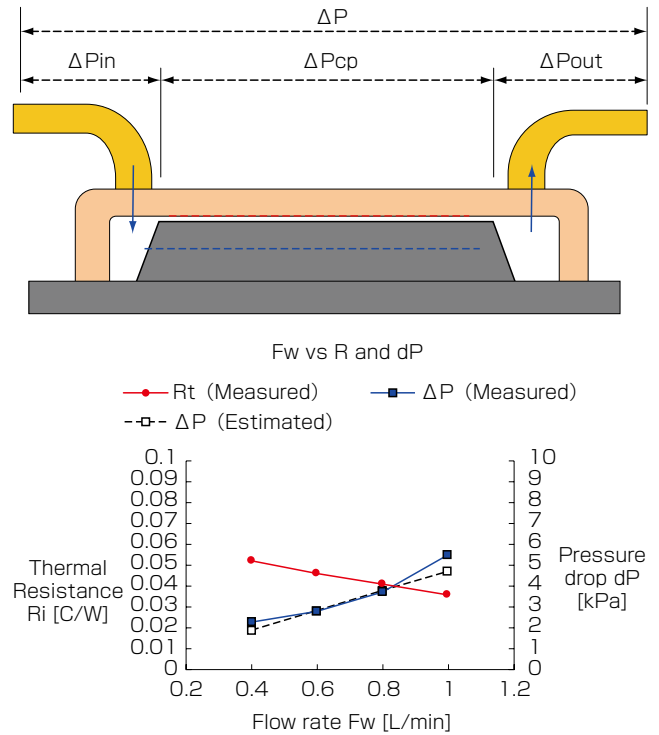


図11 冷却水量を変えた場合の熱性能と圧力損失（測定値）の関係
Fig. 11. Experimental results of relation between flow rate and pressure drop of the cold plate.

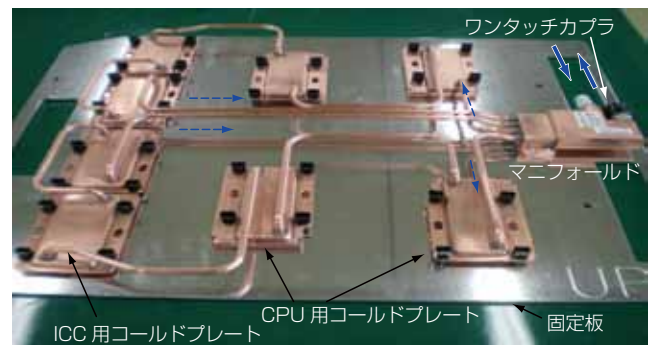


図12 水冷ユニットの部品構成
Fig. 12. Composition of cooling unit.

製造やロウ付け工程では自動化設備を導入した。検査工程では、耐圧試験だけでなくヘリウムリーク検査工程も採用した。また、冷却水量に対する圧力損失の検査工程を含めた。

④ システム実装時におけるシステムボードへ組立て作業性向上（取り外し、実装作業）

CPユニットを着脱容易なファスナー部品で固定板へ固定する。取外し作業時は、専用のハンドリング治具を用いて、CPユニット全体を取外し移動作業を容易にした。

最終的に、本スパコンプロジェクト計画に対応するために、生産能力、品質、納期などの量産体制の確立が必要で、これらを満足する量産体制（製造技術、工程、検査設備）を整備した。

図 13 に、CPユニットを実装したスパコンラックの写真を示す。1 ラックに 30 枚のシステムボードが搭載され、各々のボードの端部に冷却水の配管が接続されている。システム全体の評価結果で、CPU温度を 30℃と、従来の空冷方式に比べて格段に低く抑えることができた。また、CPUの消費電力も低減でき、信頼性も向上できたことが報告されている⁶⁾。本CPユニットは世界最速の計算処理能力を達成したスパコン“京”に貢献できた。

4. む す び

マイクロチャンネル構造を採用したコールドプレートを開発、量産納入することができた。今後も電子機器や産業機器などの用途に応じた製品開発を行い、本技術の適用拡大を図りたいと考える。最後、本件名の量産体制・納入にご協力頂いた関係者、タイ洪水時に、国内製造の支援者に深く感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 益子耕一：「電子機器冷却用サーマルテクノロジー」, フジクラ技報, 第123号, pp.71-76, 2012年Vol.2
- 2) M. Mochizuki, et al.: “Advanced Micro-channel Vapor Chamber For Cooling High Power Processors” , InterPACK 07, 2007
- 3) Y. Horiuchi, et al.: “Micro Channel Vapor Chamber for High Heat Spreading” , 10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008
- 4) K. Mashiko, et al.: “Application of Micro-channel Fin of Liquid Cooling System and Vapor Chamber”, InterPACK 09, 2009
- 5) K. Mashiko, et al.: “Application of Cold Plate Units with Micro-channel for Cooling Electronics” , InterPACK 13, 2013
- 6) 塚本俊之ほか：京にみる冷却技術, 伝熱, 2013年7月, P.21-26



図13 CPユニットを実装したスパコンラック
Fig. 13. Rack of super computer equipped cold plate units.