

当社サーバ用チップ冷却技術の変遷と動向

熱ソリューション部技術グループ
電子部品事業部
熱ソリューション部
熱ソリューション部技術グループ
熱ソリューション部開発1グループ

齋藤 祐士¹
大江 敦史²
富塚 稔瑞³
シン ランディーブ⁴
松田 将宗⁵

The evolution and trends of our server chip cooling technology

Y. Saito, A. Oe, T. Tomitsuka, R. Singh, and M. Matsuda

スマートフォンなどの増加による情報処理量の増大に伴い、2010年代後半より、クラウド化でより効率的なハイパースケールデータセンターの拡大が進んでいる。サーバは、CPUの性能向上とともに発熱量が増え、より高性能の冷却装置が用いられてきた。さらに、最近の生成AI技術の拡大に伴い、AIサーバに搭載されるCPU/GPUの高性能化が顕著に進展している。これに伴いそれらの発熱量が著しく増加し、これらのチップ冷却が、注目されている。ここでは、当社の従来および現在のサーバチップ冷却技術・製品と今後のサーバチップと冷却技術のロードマップに対する当社の取り組みを報告する。

With the increasing volume of information processing due to the rise of smartphones and other devices, the expansion of hyperscale data centers, which are more efficient through cloud computing, has been progressing since the late 2010s. Servers have generated more heat as CPU performance has improved, leading to the use of more powerful cooling systems. Furthermore, with the recent expansion of generative AI technology, the performance of CPUs/GPUs installed in AI servers has improved significantly. This has resulted in a substantial increase in the heat generated by these components, and cooling these chips is attracting attention. This report describes our conventional and current server chip cooling technologies and products, as well as our efforts toward the future roadmap for server chips and cooling technologies.

1. ま え が き

現在、データセンター（以降、DC）は、水道、電気、ガスにならぶ社会インフラストラクチャ（以降インフラ）の一つであるデジタル・インフラとなり、日常生活に欠かせないものとなっている。このため、DCを支える重要な構成要素であるサーバは、大量に使用されるとともに24時間365日止まることなく稼働している。これを成り立たせるには、サーバへの電力供給、サーバの冷却およびセキュリティが保たれなければならない。DCの課題ともなっている。サーバの冷却は、サーバの部品の中でもっとも発熱するCPU / GPUのチップの冷却が重要であり、チップの発熱量、許容温度、冷却条件、冷却スペースにより対応する

冷却技術・製品が変わってくる。また、DCの役割によって必要なサーバおよび使用されるチップも変わってくる。DC、サーバおよびチップの変遷やDCの現在の課題からサーバ冷却に関わる状況を示す。

図1にDCの技術・形態およびCPU/GPUの発熱量の変遷を示す。2010年～2022年の間は、プロセスノードの微細化によりチップ性能は向上しているが、発熱量は、ほぼ一定から微増で、専らWEB、メール、データベースを管理するCPUを中心とした汎用サーバが、エンタープライズDC、ハイパースケールDC（以降HSDC）に使用されている。2022年以降は、生成AIの拡大に合わせNVIDIAが、より高性能のGPUを毎年リリースし、これに合わせて発熱量が急激に増加している。これらのチップを用いたAIサーバ（GPUサーバ）で構成したAIデータセンター（以降AIDC）を構築あるいは、エンタープライズDCおよびHSDCの中にAIサーバで構成したAIクラスタ（GPUクラスタ）を構築している。

1 熱ソリューション部技術グループ エキスパート（博士（学術））
2 電子部品事業部 事業部長
3 熱ソリューション部 部長
4 熱ソリューション部技術グループ（博士（学術））
5 熱ソリューション部開発1グループ

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
クラウド	クラウドコンピューティング	インターネットで必要な時に必要な分だけITリソース（サーバやネットワーク機器など）を利用する仕組み
HSDC	ハイパースケールデータセンター Hyperscale Data Center	数千台から数十万台規模のサーバを効率的に運用するために設計された、超大規模なデータセンター
サーバ		ネットワークを通じて他のコンピュータ（クライアント）からの要求（リクエスト）に対し、データや機能を提供する役割を持つコンピュータ
生成AI		学習した膨大なデータを元に、テキスト、画像、プログラムコード、音声などの新しいコンテンツを自ら作り出すことができる人工知能
AIサーバ		生成AIなどの人工知能の学習や推論（実行）に特化した、極めて高い処理能力を持つサーバ
DC	データセンター Data Center	サーバやネットワーク機器などのIT機器を安全に設置・運用することに特化した専用施設(建物)
デジタル・インフラ		現代社会の経済活動や生活を支えるデジタルの土台。主な構成要素は、計算・保存基盤、通信ネットワーク、データ・ソフト基盤、セキュリティ基盤
プロセスノード		半導体の製造工程における回路の細かさ（加工精度）を示す指標
汎用サーバ		特定の用途に限定されず、OSやアプリケーションを入れ替えることで、メール、WEB、ファイル管理など様々な業務に使い回せる多目的コンピュータ
エンタープライズDC	エンタープライズデータセンター	特定の企業が自社のビジネスやシステムを動かすために、自社専用（または自社占有）で所有・運営するデータセンター
AIDC	AIデータセンター	生成AIなどの高度なAIモデルを動かすために必要な「膨大な計算処理」に特化した最新鋭のデータセンター
AIクラスタ		多数の高性能なAIサーバを高速なネットワークで連結し、あたかも「一台の巨大なコンピュータ」として機能させるシステム
GPUクラスタ		多数のGPU（画像処理装置）を高速なネットワークで連結し、巨大な計算リソースとして統合したシステム
ラック	サーバラック	サーバやネットワーク機器、ストレージなどを効率よく、安全に収納するための棚
液冷ループシステム		AIサーバやデータセンターで発生する強烈な熱を、液体（冷却水など）を循環させて効率的に運び出す一連の仕組み

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
フリークーリング		冬場や中間期の「低い外気温」をそのまま利用して、チラーを用いずサーバーなどのIT機器を冷却する仕組み
一次ループ		液冷対応のデータセンターにおいて、施設全体を巡る大きな冷却水の循環ライン
二次ループ		CDU（熱交換ユニット）から各サーバー内のチップ（GPU/CPU）までを繋ぐ、冷却水の循環ライン
CDU	Coolant Distribution Unit	液冷システムにおいて「施設側の冷却水」と「サーバー側の冷却液」の間で熱を受け渡し、循環をコントロールする装置
CP	コールドプレート Cold Plate	サーバー内のCPUやGPUなどの発熱体に直接取り付け、熱を液体に逃がすための金属製の部品
HS	ヒートシンク Heat Sink	CPUやGPUなどの発熱する部品に密着させて、熱を空気中に逃がす（放熱する）ための金属製の部品
HP	ヒートパイプ Heat Pipe	「液体の蒸発と凝縮」を利用して、熱を極めて高速に移動させる管（パイプ）状のデバイス
スタックフィン		薄い金属板（フィン）をホチキスの針のようにパチパチと積み重ねて（スタックして）固定した構造のもの
メインフレーム		企業の基幹業務（銀行の勘定系、保険の契約管理、鉄道の座席予約など）を支えるために設計された、超高性能・超高信頼の大型コンピュータ
ブレードサーバ		薄い板状のサーバ（ブレード）を、専用の「筐体（シャーシ）」に差し込んで運用する高密度なサーバシステム
VC	ベーパーチャンバー Vapor Chamber	「ヒートパイプ」を板状に広げた構造を持つ、薄型・高効率な放熱部品
MCM	マルチチップモジュール	複数の半導体チップ（ダイ）を一つのパッケージ（基板）の上にまとめ、あたかも一つの大きなチップであるかのように動作させる技術や製品
ダイ		半導体チップの本体（中身）
TDP	熱設計電力 Thermal Design Power	コンピュータのチップ（CPUやGPU）がフル稼働した際に発する「熱量の最大値」をワット（W）で表した数値
DLC	直接液冷 Direct Liquid Cooling	サーバー内の熱を発する部品（GPUやCPU）に、液体（冷却水など）を循環させる部品を直接取り付け、冷やす方式
二相DLC	二相直接液冷 Two-phase Direct Liquid Cooling	冷却液がチップの熱を奪う際に「液体から気体へと蒸発（相変化）」する性質を利用して冷却する、極めて効率の高い次世代の液冷方式
浸漬液冷		サーバーなどのIT機器を、電気を通さない特殊な液体（不活性液体や専用のオイル）の中に丸ごと沈めて冷やす冷却方式

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
ウィック		ヒートパイプやベイパーチャンバーの内壁に施された「毛細管構造」
U		サーバラックやそこに収める機器の高さを表す単位 1U=1.75インチ(約44.45mm)
インピンジング流れ		ノズルから噴出させた流体（空気や液体）を、対象物の表面に垂直または斜めに直接ぶつけることで生じる流れ
チップレット		1つの大きなチップ(モノリシック)で作っていた機能を、小さな機能単位のチップ(ダイ)に分割して製造し、後から1つのパッケージ上で繋ぎ合わせる設計手法
エロージョン		配管や部品の内部を流れる液体（冷却水など）によって、金属などの材料表面が物理的に削り取られてしまう現象

図2にDCの消費電力の変遷を示す^{1,2,3)}。2010年～2020年にかけて、情報量の増加によってDCの情報処理量が増加しているが、クラウド化の進展でエンタープライズDCより、より効率の高いHSDCへの転換でDCの消費電力が増加せずに済んでいる¹⁾。一方、2020年以降は、HSDCへの転換も済んだこともあるが、専ら生成AIの拡大がDC消費電力の増加につながり、特に米国のDCの5大集中エリアでは、電力の確保が深刻となっている。このため、さまざまな電力確保の施策とともに省エネとして、DCの冷却を空冷から液冷への変更が進められている。文献⁴⁾には、ラックおよびサーバの冷却を空冷から液冷に変えると電力消費量が半分以上と試算されており、この省エネ効果は大きい。また、図3にDCの液冷ループシステムを示すが、このシステムでチラーを用いずに冷却塔のみによるフリークーリングができれば、大幅な省エネが可能となる。フリークーリングでは、外気温度で、一次ループの低温冷媒温度は左右されるため、サーバを冷却する二次ループの低温冷媒温度を45℃のように高く設定し、フリークーリング時間延伸の方向に進んでいる。また、排水温度がより高いと排熱利用が容易となり、利用されればさらに省エネ効果が増す。一方、チップ冷却の冷却水（低温冷媒）温度が高くなるので、コールドプレート（以降 CP）は、より高性能なものが必要となる。

これまでにサーバ用チップ冷却に関わると考えられるDCの技術・形態およびチップの変遷ならびにDCの抱える課題からサーバ用チップ冷却に関わる状況を述べてきた。これ以降、サーバ用チップ冷却技術と製品について生成

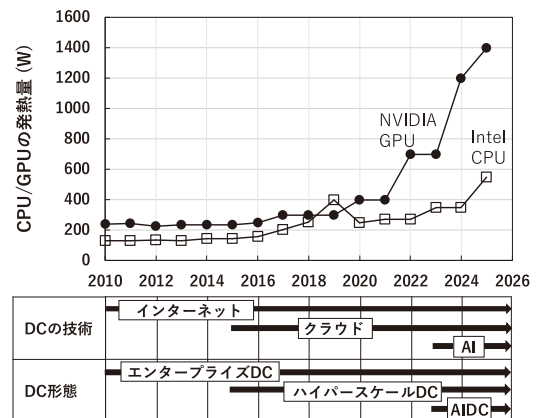


図1 DCの技術・形態およびCPU/GPUの発熱量（TDP）の変遷

Fig.1. Changes in DC technology, configuration, and CPU/GPU heat generation (TDP) .

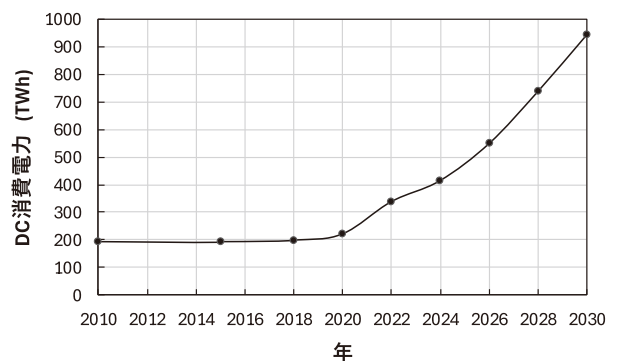


図2 DCの消費電力の変遷と推測

Fig.2. Changes and estimations of DC power consumption.

AIの拡大によりGPU発熱量が増加する前の2010年～2020年の期間、次に2020年から2025年の期間および2026年以降は、WEBのチップ情報を元に当社の開発状況・方向を述べる。

2. 2010年～2020年のサーバ用チップ冷却技術・製品

この期間のDCに使用されているサーバは、CPUが用いられた汎用サーバであり、その上位モデルの発熱量は130～250 Wである。冷却は空冷で、使用されていたヒートシンク（以降HS）を図4に示す。高密度HSは、CPUが接触する銅ベースに、これ以前のアルミ押し出しヒートシンクのフィンピッチよりかなり小さい2 mm前後のフィンピッチで、厚さ0.2～0.4 mmの薄肉アルミニウムあるいは薄肉銅の高密度フィンが接合（半田接合や機械接合）されている。これらの高密度HSは、130～170 W程度を冷却できる。それ以上の発熱量のものには、ヒートパイプ式ヒートシンク（以降HP・HS）が用いられた。チップ上に高密度HSが置かれ、その銅ベースから複数のヒートパイプがチップから離れたスペースのある場所に置かれたアルミニウムあるいは銅のスタックフィンに接合されている。ヒートパイプで熱をスタックフィンに運び放熱面積を増やし熱性能向上が図られている。

また、この期間に、チップ発熱量の大きいスーパーコンピュータ、メインフレームや冷却スペースの小さなブレードサーバのようなチップ冷却が厳しい製品に、より高性能の冷却技術・製品を顧客と開発し供給した。ここで、開発した冷却技術および製品が、現在の発熱量が急増したチップの冷却に応用されている。空冷では、ベーパーチャンバーHS（以降VCHS）、液冷では、直接液冷のCPであり、より高性能の冷却技術・製品を持つことができた。図5にブレードサーバ用VCHS、図6にメインフレーム用冷却ユニット、図7にスーパーコンピュータ用CP組立品⁵⁾を示す。図5のブレードサーバ用VCHSは、ブレードサーバシャーシ幅が、1 U (44.45 mm) より小さい30 mm前後のため、フィン高さを大きくできず、冷却に必要なフィン面積を得るには、フィンベース面積（ヒートシンクのベース面積）を大きくとる必要がある。高密度HSは、ベースが熱伝導率の良い銅であるが、チップからフィンのベース全面に熱を拡散するには、チップとフィンベースとの面積比が大きく、拡散熱抵抗が高いため、この部分をVCに変えることにより、拡散熱抵抗を低減することができる。図6には、メインフレーム用冷却ユニットとしてVCHSとCP組立品を示している。VCHSは、1000 W前後のマルチチップモジュール（以降

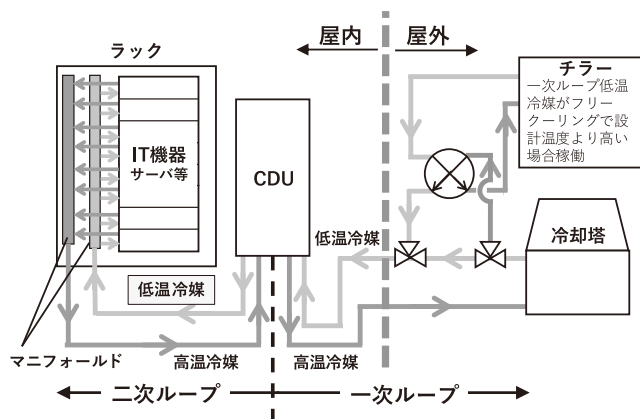


図3 DC液冷ループシステム

Fig.3. DC liquid cooling loop system.



図4 ヒートシンク

Fig.4. Heat sink.

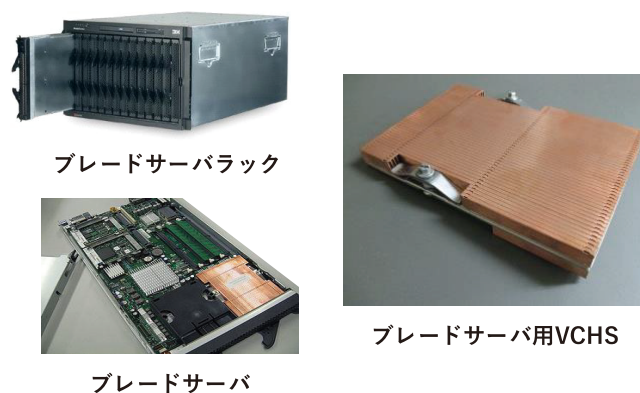


図5 ブレードサーバ用VCHS

Fig.5. VCHS for blade server.

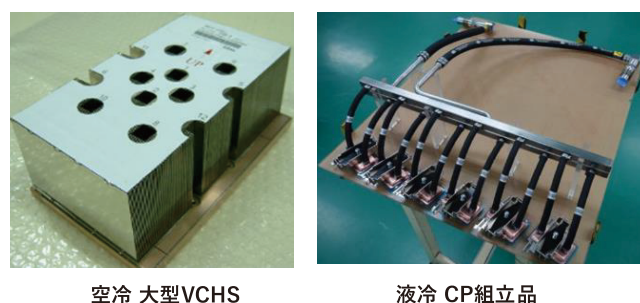


図6 メインフレーム用冷却ユニット

Fig.6. Cooling unit for main frame.

MCM) を空冷で冷却するため、巨大なヒートシンクが必要となるが、ブレードサーバと同様にMCMからフィンのベース全体 (150 mm×320 mm) へ効率良く熱を拡散するのにVCが用いられている。CP組立品は、VCHSが使用されていたメインフレームの数世代後の後継機種に使用された。図7は、当社の最初の量産CP組立品であった。

3. 2020年～ 2030年のサーバ用チップ冷却技術・製品

この時期は、GPUにより生成AIが活用できることが明確となり、NVIDIAが、生成AIに適したGPUの開発・リリースを毎年行うと表明し、GPUの大幅な性能向上の一方で発熱量も増加している。また、2026年以降も同様に進むと考えられている。HSDC企業がこぞって生成AIを取り込むため、DCにAIサーバの導入を図り、HSDC内にAIクラスターを設けるあるいはAIDCの構築を図っている。また、GoogleをはじめHSDC企業は、AIチップを自主開発しているが、当分NVIDIAのGPUが主流であると考えられる。こ

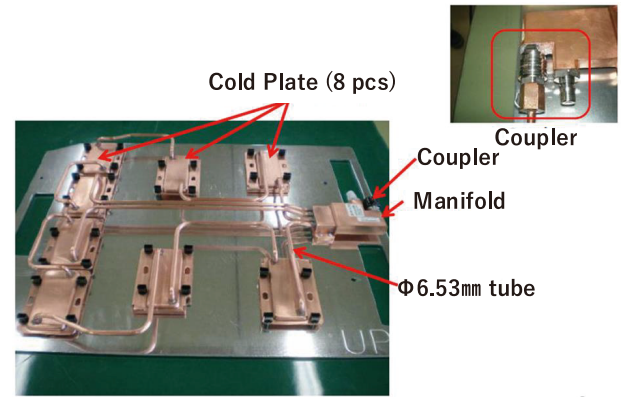


図7 スーパーコンピュータ用CP組立品

Fig.7. CP assembly for supercomputer.

の期間のNVIDIA GPUの仕様および冷却方式を表1に示す。これらの仕様は、公表、公表からの推測および技術動向からの推測の情報をまとめたものであり、実際と異なる可能性があることをご了承願いたい。次にこの期間を2020年～現在の2025年と将来の2026年以降に分けて、冷却技術・製品を説明する。

表1 NVIDIA GPUの仕様と冷却方式

Table 1. NVIDIA GPU specifications and cooling methods.

GPU 名	Ampere	Hopper	Blackwell	Blackwell Ultra	Rubin	Rubin Ultra	Feynman	Feynman Ultra
プロセス ノード	TSMC 7nm N7 (7nm)	TSMC 4N (5nm)	TSMC 4NP (5nm)	TSMC 4NP (5nm)	TSMC N3 (3nm)	TSMC NP3 (3nm)	TSMC A16 (1.6nm)	TSMC A16/A14 (1.6/1.4nm)
ダイ数	1	1	2	2	2	4	8	3D スタッキング
ダイ面積/個 (mm ²)	826	814	約800	約800	約800	約800	約800	—
TDP (W)	400 x 1.7 --> 700	x 1.7 --> 1200	x 1.7 --- 1400	-----> 2300	x 1.7--> 4000	x 1.7--> 6800		> 6800
ラック	DGX A100 Rack	DGX H100 Rack	GB200 NVL72	GB300 NVL72	Vera Rubin NVL72	Vera-Rubin Ultra NVL72, Kyber NVL144	Post-Kyber Architecture	—
ラック発熱量 (kW)	32.5	40.8	120	120～140	140～200	600(Kyber)	1000	>1000
冷却方式	空冷	空冷/直接液冷	直接液冷	直接液冷	直接液冷	直接液冷/二相 直接液冷試用	二相直接液冷	二相直接液冷 & 浸漬液冷
採用年	2020	2022	2024	2025	2026E	2027E	2028E	2029E

3. 1 2020年～2025年のサーバ用チップ冷却技術・製品

この期間のGPUチップは、表1に示されているように Ampere (400 W) 空冷, Hopper (700 W) 空冷/直接液冷, Blackwell (1200 W) 直接液冷, およびBlackwell Ultra (1400 W) 直接液冷であり、冷却方式が空冷から液冷へと

移行している。これらのチップの冷却技術と製品を示す。Ampereの発熱量400 Wの冷却は、サーバのシャーシ高さに応じて空冷ユニットが異なる。図8に1～2 U用と3 U以上のサーバに使われるHP・HSを示している。ここで、RHEタイプHP・HSは、図4に示したものより高性能である必要がある。そこで、フィン部分は、サーバ幅一杯を使

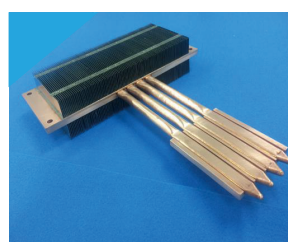
用しフィン面積を増やすが、このスペースは、ある程度チップより離れた位置になる。また、この部分に熱を運ぶヒートパイプは、チップの直上に配置されるためチップサイズで、ヒートパイプ本数が制限される。これらのヒートパイプは、チップからフィン部分までの比較的長い距離を制限された本数のヒートパイプで熱を運ぶため、従来のヒートパイプに比べ最大熱輸送量が大きなヒートパイプが必要となる。このヒートパイプには、スマートフォン用極薄ヒートパイプで開発した最大熱輸送量を向上させた技術⁶⁾に加え、新しいウィック構造を採用してさらに熱輸送量を増加したヒートパイプが使用されている⁷⁾。タワータイプHP・HSは、RHEタイプHP・HSに比べフィン面積が大きく取れ、ヒートパイプが垂直に配置されているため、ヒートパイプの最大熱輸送量も大きく400 W程度の冷却には、問題ない。

Hopperの発熱量700 Wの冷却は、1～2 Uのサーバは、RHEタイプHP・HSの改善では対応できず液冷を使用することとなる。液冷には、浸漬液冷と直接液冷（以降DLC）があるが、高発熱量チップの冷却には、DLCのCPが適しているため、当社はCPを選択している。3 U以上のサーバには、タワータイプHP・HSでは熱性能が不足するものがでてくる。生成AIが拡大する前の既存のDCの大部分では、空冷をベースに冷却インフラが設計されており、また、DCのインフラは約20年の寿命を通常、想定しているため、空冷の延長が強く望まれている。これに対応するため、3D-VCが開発された。図9にタワータイプHP・HSと3D-VCの比較を図10に3D-VCを示している。3D-VCは、タワータイプHP・HSの銅ベース部分をペーパーチャンバー（以降VC）としてフィンと接続する凝縮管をVCに接続させ、内部の蒸気および凝縮した液をVCベースと凝縮管の間を直接移動できる構造により、熱抵抗を低減させ熱性能を向上させている⁸⁾。一方、1～2 Uの液冷には、図11に示しているマイクロチャンネルコールドプレート（以降MCCP）を使用している。無酸素銅を材料としたマイクロチャンネル（以降MC）をもつベースとカバーをロウ付けで接合すると同時にMCの先端をカバーに接合する構造で、MCとカバーの間のバイパスフローを防ぐとともに内部圧力規格（IEC62368-1）も満足する。

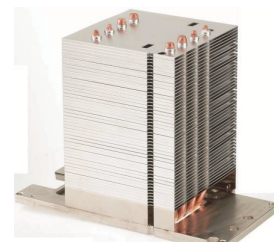
BlackwellおよびBlackwell Ultraの発熱量は、1200 Wおよび1400 Wで、液冷のMCCPで冷却できる。CPによる除熱量Q（W）は、次の式で計算される。

$$Q=h \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

ここで、h：熱伝達係数（W/（m²・℃））、A：伝熱面積（m²）、ΔT：温度差（=Tc-Twi）（℃）、Tc：発熱体表面



1～2U用
RHEタイプHP・HS



3U用～
タワータイプHP・HS

図8 ヒートパイプ式ヒートシンク（HP・HS）

Fig.8. Heat pipe type heatsink (HP・HS) .

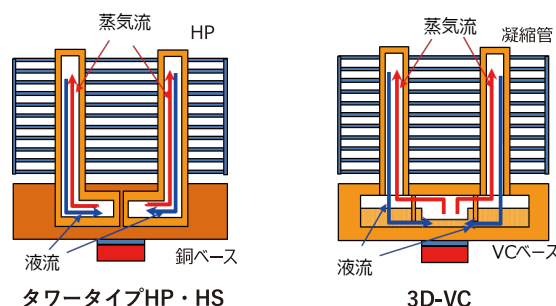


図9 タワータイプHP・HSと3D-VC構造比較

Fig.9. Comparison of tower type HP・HS and 3D-VC structure.

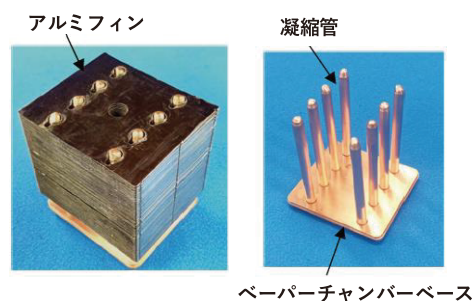


図10 3D-VC

Fig.10. 3D-VC.

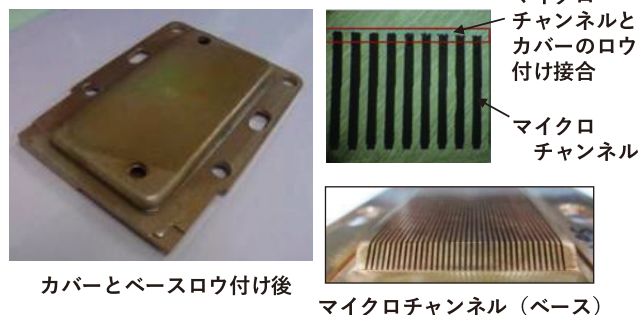


図11 マイクロチャンネルコールドプレート

Fig.11. Microchannel cold plate.

温度 (°C), T_{wi} : 冷却水入口温度 (°C)

Blackwell, Blackwell Ultraは, Hopper (700 W) に比べ発熱量が増えており, 除熱量を増やす必要がある. 除熱量を増やすには, (1) 式より, ①熱伝達係数の向上, ②伝熱面積の拡大, 温度差を大きくするため, ③冷却冷媒入口温度の低減が考えられる. ここでは, 冷媒流量増加, 冷却冷媒温度低減などのシステム系の運転条件変更による除熱量増加手段を除いたCP構造による除熱量増加手段を考える. ①の熱伝達係数の向上には, 流路の流れ方向に沿って温度境界層が厚くなり熱伝達係数が減少するが, (i) 流路にスリットや突起などを設置し, 温度境界層の破壊で熱伝達係数を回復する. (ii) 流路パターンを変えることにより発熱密度の高い部分の流速を上げ, 熱伝達係数を増加させる⁹⁾. あるいは, (iii) 発熱面に対して垂直に冷却水の流れ, 発熱面に衝突させるインピンジング流れで熱伝

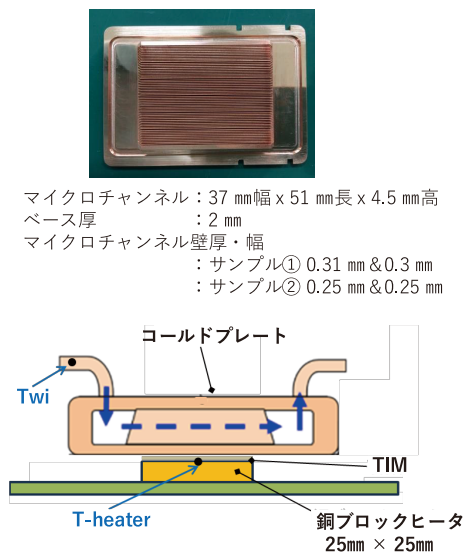


図12 試験装置とサンプル仕様

Fig.12. Test equipment and sample specifications.

3. 2 2026年～2030年のサーバ用チップ冷却技術・製品

この期間のGPUチップは, 表1にRubin (2300 W) 直接液冷, Rubin Ultra (4000 W) 直接液冷/二相直接液冷試用, Feynman (6800 W) 二相直接液冷, Feynman Ultra (>6800 W) 二相直接液冷 (以降二相DLC) & 浸漬液冷と記載しているが, Feynman Ultraは, まだ名前が公表されておらず, 仮の名前としてここ数年のNVIDIAの名前の付け方にあわせてFeynman Ultraとした. これらの4つのGPU情報はWEBサイトの公表情報からの推測や技術動向からの推測

達係数を増加させる¹⁰⁾ などがある. ②の伝熱面積の増加は, MC幅, 壁厚さを小さくする手段が一般的である. 例として図12に試験装置とサンプル仕様, 図13にMCピッチの熱性能への影響を示す. ここで図13に使用されている熱抵抗 R は, 図12に示されているT-heater (ヒータ表面温度) と T_{wi} (冷媒入口温度) の温度差を Q (ヒータ入力) で除して求められる. MC壁厚を0.31 mmから0.25 mm, MC幅を0.3 mmから0.25 mmに変えたMCCPサンプルと比較し, 1.6 L/min の流量で, 熱抵抗が0.0022 K/W (15%) 低減し, 圧力損失が1.4 kPa増加する結果であった. 上述したようなCPの内部構造により熱抵抗が低減するが, その一方, 図13に示されたように圧力損失が増える傾向にあり, 両者のバランスをとって開発・設計する必要がある.

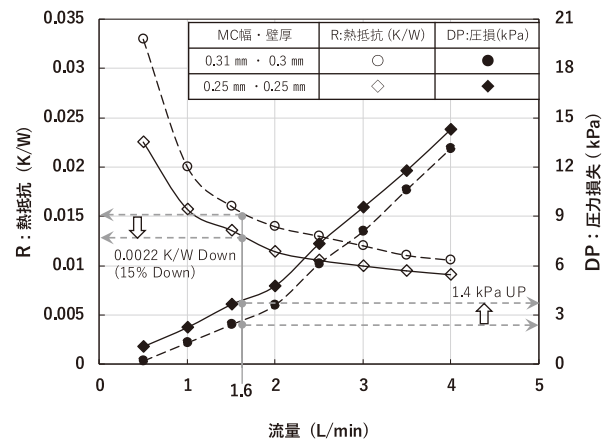


図13 マイクロチャンネルピッチの熱性能への影響

Fig.13. Impact of microchannel pitch on thermal performance.

をまとめた. ここでGPUパッケージのTDPは, AmpereからBlackwellまで, プロセスノードが変わるたびに約1.7倍となっており, このトレンドを用いFeynmanまでTDPを推測した. Feynman Ultraは, プロセスノードのみならずチップ構造も変わる可能性があるので, FeynmanのTDP以上とした. また, Feynman Ultraの冷却方式は, DCの現状の課題やサーバの冷却装置の開発内容を鑑みて二相DLCおよび二相DLCと浸漬液冷の組み合わせと推測した.

Rubin (2300 W) DLC, Rubin Ultra (4000 W) DLC/二相DLC試用と考えているが, Blackwell Ultraの1400 Wか

ら、Rubinは900 W（ダイ当たり450 W）、Rubin Ultraは2600 W（ダイ当たり650 W）と発熱量が増える可能性があるため、直接液冷のCPの性能を向上させる必要がある。先に記載した除熱量を増やす手段の組み合わせた構造の中で、MC幅と壁厚の微細化が開発項目となっている。また、これらのGPUとほぼ同時期に開発されているAIチップの発熱量も同程度であるとともにチップレットが採用されているため、図14に示されるようなパワーマップを持つチップとなっている。ここで、色が濃いものが、より発熱密度の高いものを示しており、発熱密度の高い（高性能）チップを狭い範囲に配置されるため、冷却ソリューションは、より難しくなっている。当社は、MCの内部構造の最適化を図るとともにより高性能CPである積層コールドプレート（以降 MLCP）を提案している。図15にMLCPの構造例を示す。Manifold sheetと Channel sheetの組み合わせで3次元流路を形成している。図16にこの流路の流れの一例を示す。Manifold sheetの流路を冷却液の流れ方向に進みながら、Channel sheetでManifold sheetの隣の流路に複数の横流路を通じて移動する。これを繰り返して冷却水の出口に導かれる。また、この流れにより温度境界層が壊れ高い熱伝達率を保つことができる。さらに、MLCPの構造上、図14に示したパワーマップに対して高発熱密度の部分に集中的に冷却水を分配することやその部分の流速を増すやインピンジング流路で熱伝達係数を向上させるなどMLCPは、設計の柔軟性を持ち、最適化を図ることができる。図17に同じサイズのMCCPとMLCPを試作して熱抵抗および圧力損失を測定、比較した結果を示す¹¹⁾。1.6 L/minの冷却水流量で、熱抵抗が20%の向上、圧力損失が10%増加の結果である。MCCPは、現在の加工限界のMC幅0.15 mm、壁厚0.15 mmであり、内部構造の改善による熱抵抗低減は見込めない。一方、MLCPは、圧力損失が10%増加するが、この程度の圧力損失の増加であれば、熱抵抗低減を重視するとのことで、次機種はMLCPで検討が進んでいる。

また、3D-VCと同様にCPの銅ベース部分をVCにすることによって発熱体のサイズに対してCPの熱交換部分（MCあるいはML）を大きくとってもベース部分の拡散熱抵抗が銅ベースよりも小さいので、高性能のCPを提供できる。図18にVCCPのイメージ図を示す。

2026年1月に開催されたCESの基調講演でNVIDIAのCEO：Jensen Huang がVera Rubin AIプラットフォームは、最大45℃の冷却水温度で稼働できることを明言した。これは、Blackwell, Blackwell UltraのAIプラットフォームであるGB200およびGB300も、最大45℃の冷却水温度で稼働できており、チラーを用いないフリークーリングで

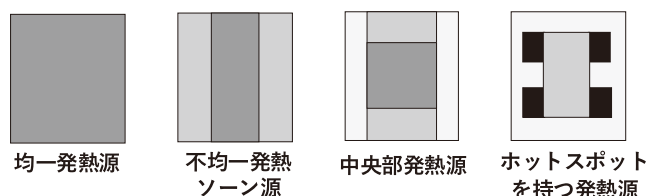


図14 パワーマップ

Fig.14. Power map.

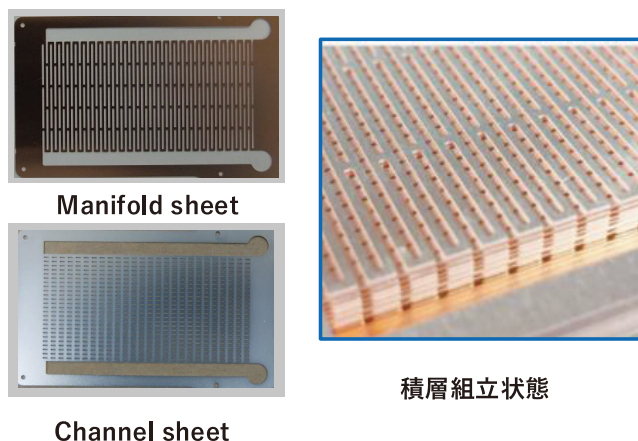


図15 MLCP内部構造

Fig.15. MLCP internal structure.

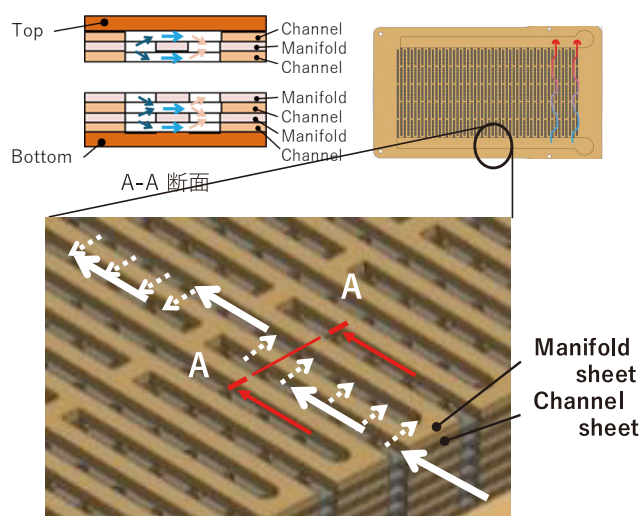


図16 MLCP内部流れ

Fig.16. MLCP internal flow.

DCの消費電力低減に大きく貢献する。特にHSDCは、今後も最大45℃の冷却水温度あるいは、フリークーリングが使用できる条件の冷却水温度が設定されることとなり、今後、さらに高性能のCPが必要となってくる。

次に、Feynman (6800 W)とFeynman Ultra (>6800 W)の冷却は、先に記述したように二相DCLと二相DLCと浸漬液冷の組み合わせを推測している。図14に示したようにダイ内の局所箇所（コア部分）における発熱量の増加（高発熱密度）は単相DLCで冷却できないレベルに到達すると予想されている¹²⁾。また、FeynmanおよびFeynman Ultraのラック構成は、現在のラック（GB300 NVL72）より高密度実装されたKyberラック構成と同じと考えた場合、Kyberラックは、ブレードサーバ（幅25 mm～27 mm）を最大18台1シャーシに収め、2シャーシの構成であり、ブレードサーバには、CPU1個とGPU2個を組み合わせたAIプラットフォームが2セット設置される可能性が高い。ここで、Feynman GPUの発熱量6800 W、CPUの発熱量を約500 W（Grace CPUと同等と考えた）とすると、ブレードサーバには、CPU2個、GPU4個があり、発熱量は28.2 kWとなる。単相DCLでは、1 kWの冷却に必要な流量は1.5 L/minと言われており¹³⁾、ブレードサーバにあるAIプラットフォーム2セットを冷却するのに42.3 L/min必要である。エロージョンが生じない流速1.5 m/sの配管径は、約26 mm（配管肉厚0.8 mm）となり、幅25～27 mmのブレードサーバの中に配置することは、無理である。また、ブレードサーバ内の2セットのAIプラットフォームへブレードサーバの外のラック共通マニフォールドより、それぞれが必要とする流量21.15 L/minを供給する場合の配管径は、約19 mm（配管肉厚0.8 mm）となる。これも幅25～27 mmのブレードサーバ内に配置することは、困難である。冷却上および配管レイアウトの問題から、単相流れより熱伝達率が高く、液流量が小さくて済む二相DCLが使用されると推測した。

図19に予備試験として単相DLCと二相DLCとの比較を行った結果を示す¹⁴⁾。この試験は、PFAS問題の前に実施されたもので、二相DLCにはノベック7000が、単相DLCには、水が使用され同じ形状のMCCPであるが、二相DLCのMCCPの内部には銅粉がコーティングされている。単相DLCと二相DLCの比較を単相DLCでは、流量に対して熱抵抗の変化が小さくなり始める流量の1.6 L/minと二相DLCでは、ほぼ一定の熱抵抗値の中で極小値を示す流量0.3 L/minで行う。単相DLCでは、熱抵抗 0.029 K/W、圧力損失14 kPaに比べ、二相DLCは、熱抵抗 0.02 K/Wと31%低減、圧力損失 2 kPaと1/7に低減しており、二相DLCの利点を確認することができた。現在は、図20に示すような二相DLC CPの蒸発部の最適化を図るため試作、評価中であ

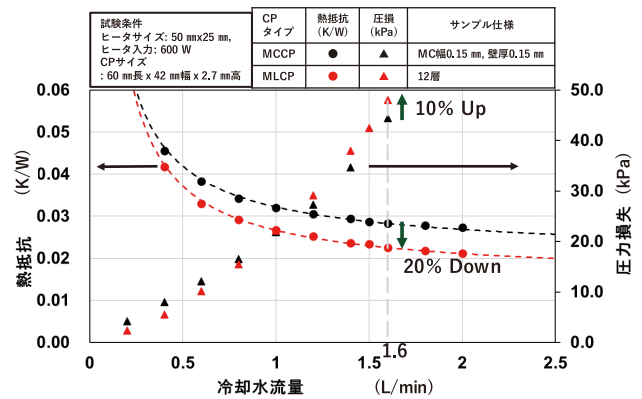


図17 MLCPとMCCPの比較

Fig.17. Comparison of MLCP and MCCP.

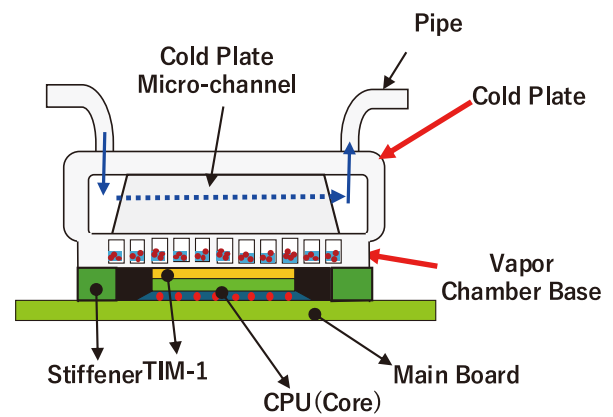


図18 ベーパーチャンバークールドプレート

Fig.18. Vapor chamber cold plate.

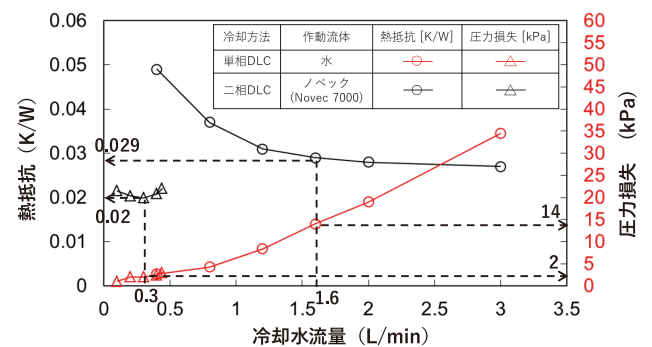


図19 単相DLCと二相DLCとの比較

Fig.19. Comparison of single-phase DLC and two-phase DLC.

る。現在は、当社が単独で開発を進めているが、米国では二相DCLシステムとしてそれぞれの構成製品を持つメーカーと大学が協力した研究が進んでおり¹⁵⁾、実用化に向かっている。当社もシステムの中で開発する必要がある、システムを持つパートナーとの協業を進めて行く。

4. むすび

近年の生成AIに係るチップの性能向上に伴い発熱量が急速に増加しており、AIサーバの冷却が重要となっている。また、AIサーバが、DCに大量に設置されているように、サーバは、その時代のDCの目的に応じたものが設置されてきた。ここでは、DCに設置されるサーバとそこに使用されるチップの冷却技術について当社の過去、現在そして数年先の技術、製品について状況を解説した。図21にサーバチップ冷却への当社の冷却技術を用いた製品をまとめたものを示す。3D-VC、MLCPが製品を立上げ中であり、開発中のものがVCCPと二相CPであり、今後ますます社会インフラとして重要となるDCに設置されるAIサーバの冷却を支える製品の供給と開発をおこなっていく。

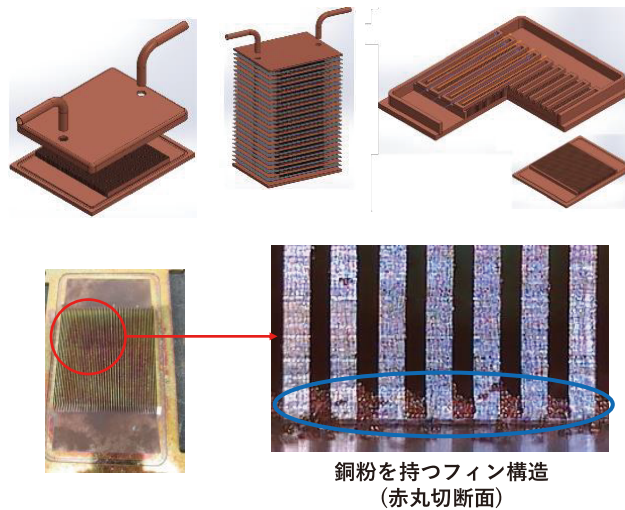


図20 蒸発部検討用コールドプレート

Fig.20. Cold plate for evaporation section study.

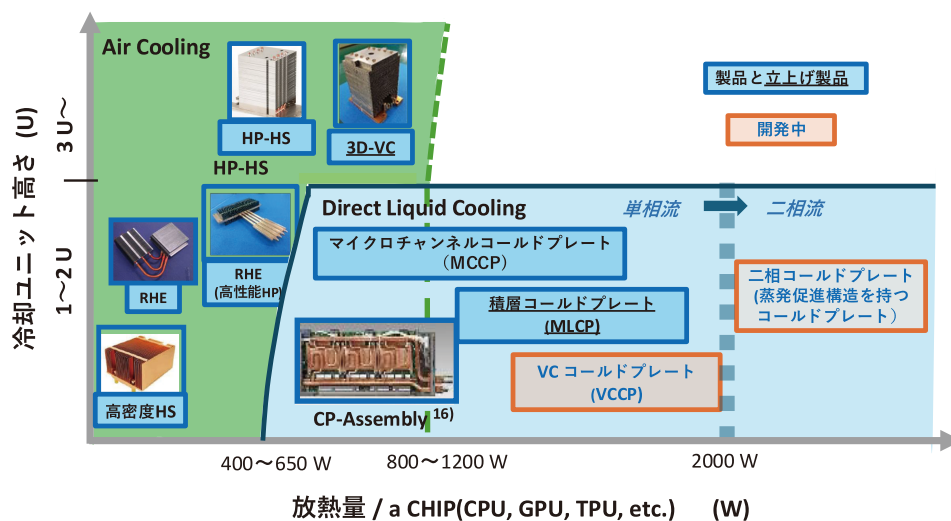


図21 当社のサーバ用チップ冷却技術ロードマップ

Fig.21. Our server chip cooling technology roadmap.

参考文献

- 1) E. Masanet, et.al.: "Recalibrating global data center energy-use estimates," Science, Vol.367, Issue 6481, pp.984-986, 2020
- 2) IEA: "Data Centers and Data Transmission Networks Analysis," World Energy Outlook Special Report, 2024
- 3) IEA: "Global DC electricity consumption 2022 base case and Executive Summary," Energy and AI 2025, Mar 2025
- 4) 魏 杰:「エレクトロニクス機器の熱設計 スパコンの熱設計」, 伝熱, Vol.59, No.249, pp.16-21, 2020
- 5) 前田ら:「スーパーコンピュータ「京」のシステム実装技術」, FUJITSU, Vol.63, No.3, pp.265-272, 2012
- 6) 齋藤, 小糸:「ヒートパイプ研究の最前線 超薄型ヒートパイプ／超薄型ベーパーチャンバー」, 伝熱, Vol.64, No.266, pp.7-15, 2025
- 7) M. S. Ahamed et al.: "High Performance Heat Pipe Development for Data Center Cooling," Joint 21st IHPC and 15th IHPS, 2023
- 8) 齋藤:「ヒートパイプ研究の最前線 ヒートパイプの応用／実用例」, 伝熱, Vol.64, No.266, pp.38-43, 2025
- 9) 江口ら:「スーパーコンピュータ「富岳」のシステム実装技術」, 富士通テクニカルレビュー, 2020-No.3, pp.26-33, 2020
- 10) G. S. Lyon: "Fluid heat exchanger configured to provide a split flow," US8746330B2, 2014
- 11) M. Matsuda et al.: "Thermal Performance of Transient Liquid Phase Diffusion Bonded Multi-Layer Cold Plate," 23rd IEEE conference, pp.53-59, 2024.
- 12) D. Kulkarni et al.: "White paper: Pumped 2P refrigerant-based direct liquid cooling (DLC) technology for next generation AI clusters with high TDP accelerators," Open Computer Project, Feb. 14, 2025
- 13) ASERAE Technical Committee: "Liquid Cooling Guidelines for Datacom Equipment Centers, Second Edition," ASHRAE, Chapter4 and 5, 2014
- 14) M. Matsuda et al.: "Two Phase Closed Loop Cooling System with a Pump," ITHERM 2016, pp.1002-1006, 2016
- 15) A. Heydari et al.: "Green Refrigerant-Based Compact Hybrid System for Ultra-Efficient and Sustainable HPCs Cooling," COOLERCHIPS kickoff meeting, Oct. 18 & 19, 2023
- 16) 富士通株式会社: 「White paper: Fujitsu supercomputer PRIMEHPC FX100 次世代技術への進化」, <https://www.fujitsu.com/downloads/JP/archive/imagip/jhpc/primehpc/primehpc-fx100-hard-ja.pdf>, p.2, 2014