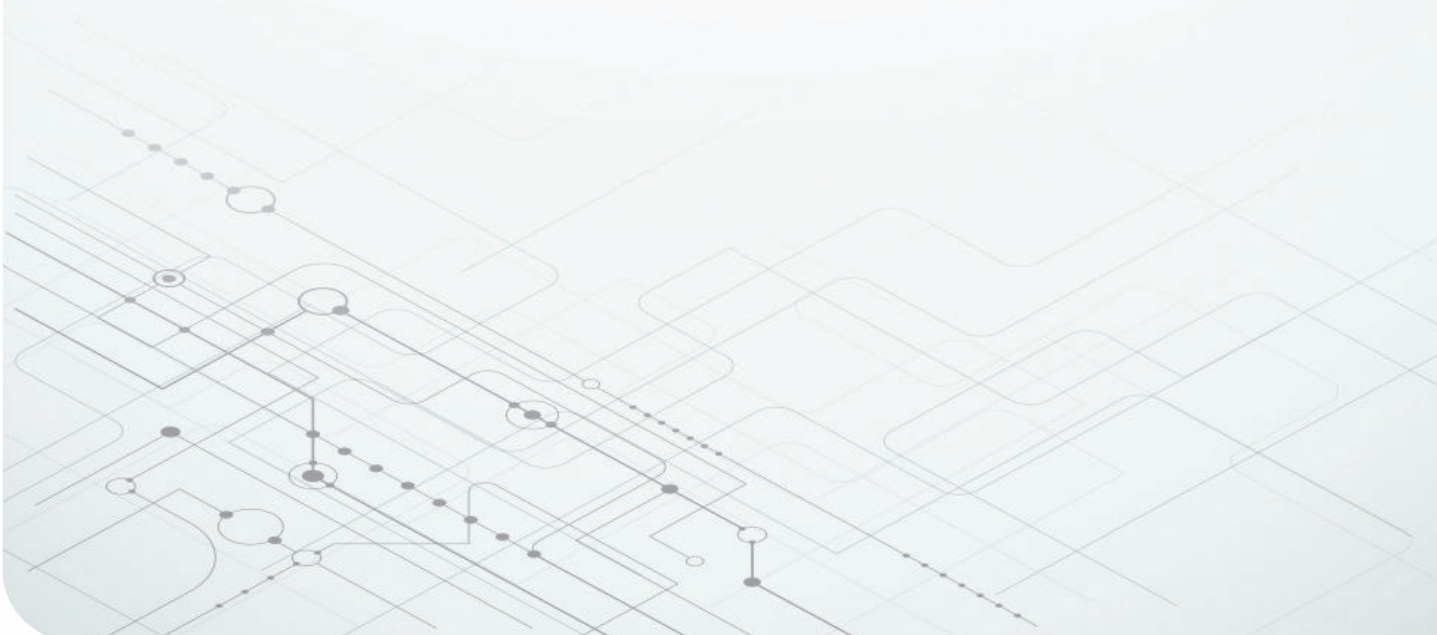


AI データ センターの熱管理の進化



David Stout
Systems engineer
Building automation - Data center thermal management





概要

- **熱負荷の上昇:** 人工知能 (AI) 用データ センター ラックの電力密度は、約 5kW から 100kW 以上に増加しており、一部の AI クラスタは 1.5MW に達すると予想されています。
- **冷却アーキテクチャの進化:** ラックの電力密度が 100kW を超えるのに伴い、データセンターは空冷から液冷、液浸冷却へと移行しています。
- **予測熱管理:** サーバートレイ レベルの液体流量制御とエッジ AI ベースのセンサ フュージョンは、データセンターでの液漏れをより迅速に検出し、障害を予測するのに役立ちます。

概要

データ センター内のコンピューティング ラックの電力レベルは、大規模言語モデルやその他の AI ワークロードに必要とされる、より高度な中央演算装置 (CPU) と画像処理装置 (GPU) のアーキテクチャによって増大しています。その結果、熱管理の重要性も増しています。

熱管理システムの主な役割は単純で、不要な場所から熱を吸収し、安全に分散できる場所に移動するというものです。コンピューティング ラックの熱が上昇する中、ラック内のプロセッサを許容可能な温度範囲内で動作させるには、パフォーマンスを最適化するためのさまざまな熱管理手法が必要になります。このホワイト ペーパーでは、電力レベルの上昇に合わせて温度管理システムがどのように進化してきたかの概要を説明します。また、そう遠くない将来の電力レベルに対処するうえで必要になると考えられる熱管理システムについても述べます。

関連記事:「[データ センターの発する熱はこれまで以上に増大しています。冷却を管理する必要があります](#)」

コンピューティング ラックの電力レベルとそれによって生じる熱量を視覚化する方法の一つは、一般家庭に見られる木材やガスを燃焼させる従来の暖炉とラックを比較することです。通常このような暖炉は、コンピューティング ラックとほぼ同じ設置面積で、約 10kW に相当する熱量を発生します。一般的なエアコン システムであれば問題なく処理できる負荷です。ただし、50kW ラックの電力レベルになると、同じ面積に暖炉を 10 台設置するようなものです。これだけの熱負荷になると、空冷では室温を制御できませ

ん。1.5MW ラックともなれば、同じ面積に 150 台の暖炉があることに相当するため、データセンターの熱管理は大きな課題となっています。幸いなことに、液冷であれば、同じ体積の空気と比較して 3,000 倍の熱吸収能力を持っています。

図 1 は、冷却における課題がいかに急激に増大しているかを示しています。過去、現在、将来のラック電力レベル、それらの処理が可能なアーキテクチャ、各アーキテクチャがその限界に達する時点を記載しています。AI データセンターのラック電力密度は、およそ 5kW から 100kW 以上にまで上昇しています。現時点で、一部の AI クラスタはラックあたり 200kW に近づいており、今後数年の間には最大で 1.5MW のレベルに達すると予測されています。冷却アーキテクチャが空冷から液冷に移行しているのは、そのような増大ペースに対応するためです。

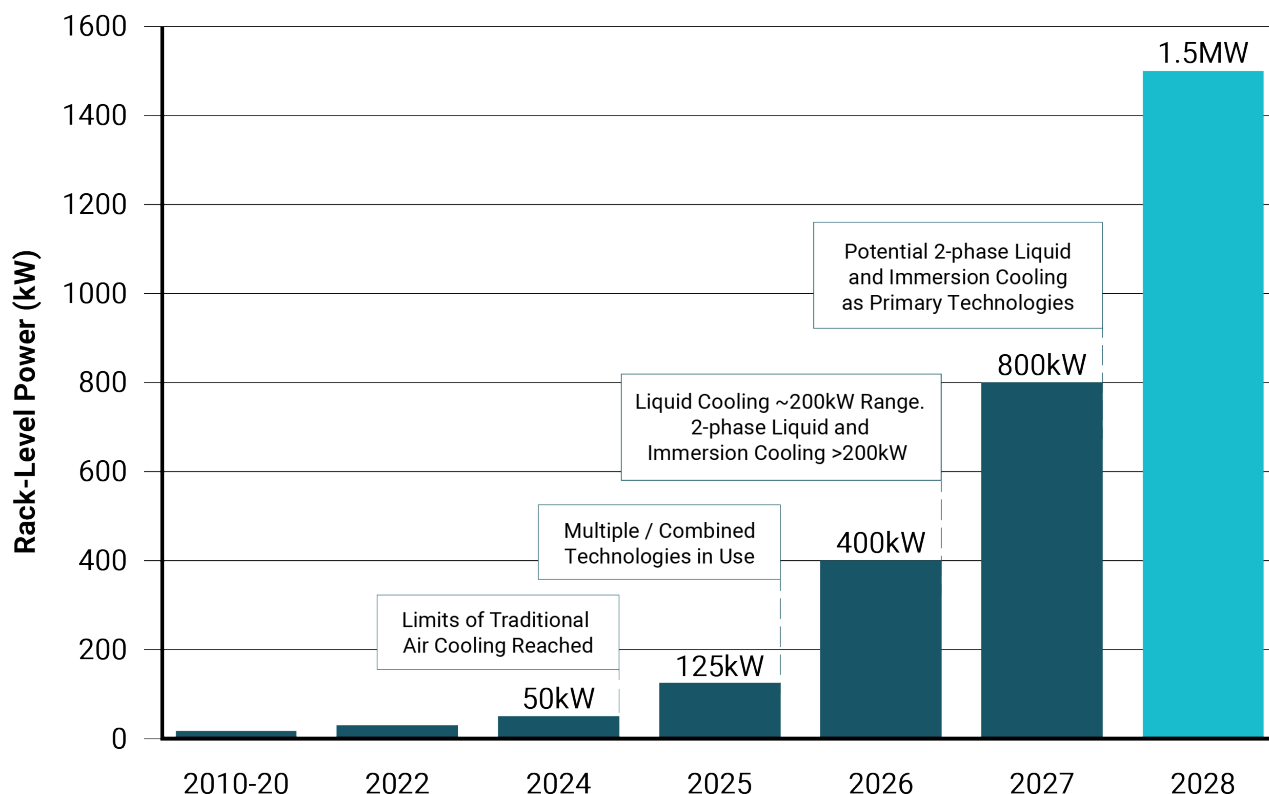


図 1. ラックレベルの電力予測と冷却テクノロジー

現代の熱管理アーキテクチャの比較

液体冷却は将来の熱管理の方向性を示していますが、業界内では今後も複数の技術の組み合わせが活用されると考えられます。エンジニアは、最先端の液体冷却システムを AI コンピューティング専用のラックに採用し、標準的なワークロードには他のアーキテクチャで対応するのが一般的です。

データセンターには、ラックの電力密度対応能力を高める目的で、主に 3 つの空冷アーキテクチャが存在します。各アーキテクチャにおける、コンピューティング ラック内で発生する熱を吸収する媒体と、データセンターから熱を排出するための媒体について説明します。

空気対空気冷却

空気対空気冷却アーキテクチャは、一般家庭の空調システムと同様の仕組みで動作します。ただし、データセンターでは、冷却された空気がコンピューティング ラックを通して循環し、発生した熱を吸収する仕組みになっています。その空気の熱が冷たい冷媒を含むコイルを通過する際に吸収され、冷却された空気が再び循環します。冷媒によって吸収した熱が屋外に移動され、そこで環境に放出されます。また、圧縮、凝縮、蒸発処理により再度冷却されます。この過程は、熱吸収、熱転移、熱放出、冷却のサイクルとしてまとめることができます。空気の流れを制御するために、ラックは通常高層階に取り付けられ、背中合わせに配置されて、冷気の通路と暖気の通路を形成します。

電力レベルが上昇すると、暖気通路を封鎖し、熱せられた空気があふれ出ないようにして、コンピュータ ルーム用の AC ユニット (CRAC) によって制御される冷気通路の温度上昇を防ぎます。コンピュータ ルームのエア ハンドラー (CRAH) は、気化コイル内の空気の流れと冷媒への熱の伝達を管理します。熱負荷が増大する場合には、サーバー ファンの空気流量を増加させることに加え、ブロワ ファンと気化コイルを大型化する必要が生じます。20kW ~ 50kW のラック電力範囲 (コンピュータ ルーム内のすべてのラックが同仕様と仮定) では、効率と運用に関する要件として、異なる熱伝達方式が必要になります。

空気対液体冷却

空気対液体冷却アーキテクチャでは、空気対空気冷却アーキテクチャと同じ方法が使用されますが、図 2 に示すように、後部ドアの熱交換器 (RDHX) が追加されます。RDHX の目的は、コンピューティング ラック内を移動する空気から冷たい液体に熱を伝達すると同時に、通過する空気も冷却することです。RDHX はアクティブまたはパッシブで利用できます。つまり、交換器を通過する空気の流れを補助するための追加のファンが存在する場合と、存在しない場合があります。

冷却水分配ユニット (CDU) は、RDHX から熱を吸収した液体を循環させ、冷却塔、ドライ クーラーなどを使用して環境に熱を放出し、循環用に液体を冷却するポンプを使用して屋外に熱を移動します。CDU には通常、コンピューティング ルームを流れる液体を屋外に流れる液体 (一般的には施設の配水系) から分離する熱交換器が備えられています。こうした分離により、屋外で使用されるものとは異なり、コンピューティング ルームではさまざまな種類の液体を使用することができます。

電力レベルが上昇するにつれて、吸熱媒体として空気を使用することがボトルネックとなり、発生源となるコンポーネントから直接熱を吸収できるコールド プレートへの移行が求められるようになってきています。

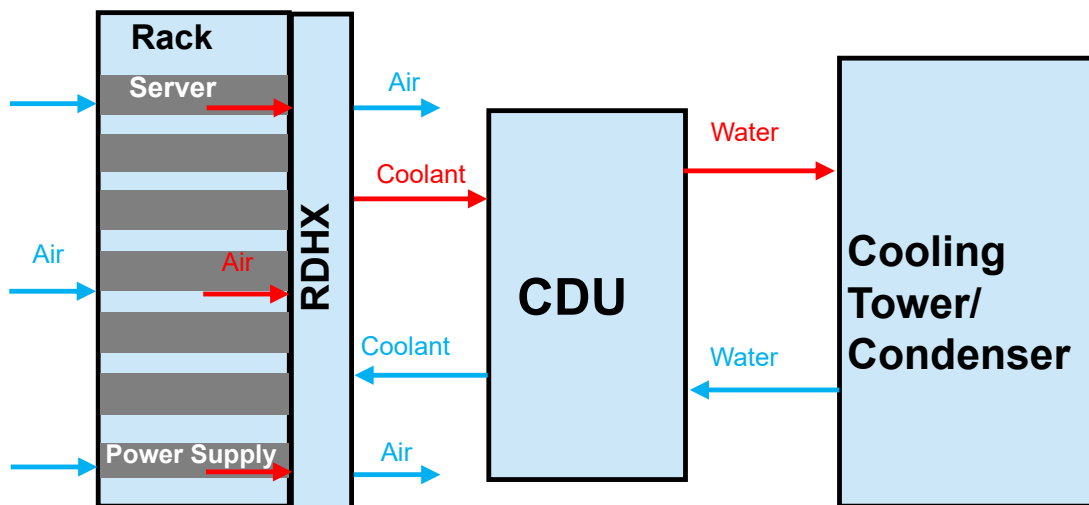


図 2. 空気対液体冷却アーキテクチャ

液体対空気冷却

コールドプレートにより熱吸収が大幅に改善するため、熱伝達に必要な空気流量が削減され、従来の CRAC/CRAH ユニットで空気を介した熱伝達を継続できます。図 3 に示すように、液体対空気冷却アーキテクチャでは、CDU とアクティブ RDHX を組み合わせた放熱ユニット (HDU) が採用されています。HDU では、CDU がコールドプレートを通して液体を循環させます。コールドプレートはラック全体を通じて熱源に対して取り付けられ、熱の発生場所にできるだけ近い場所で熱を吸収します。液体はアクティブ RDHX を通って流れ、コンピュータ ルーム内の冷気がファンによってコイルを通過します。その際に空気に熱が伝達され、暖気通路に流れ込みます。HDU は、電力レベルに応じて、ラック内、ラック列内、ラック側面に配置できます。

電力レベルが 150kW ~ 200kW の範囲に上昇すると、やはり空気を使用した熱伝達が困難になるため、近年は液体対液体アーキテクチャが広く普及しています。

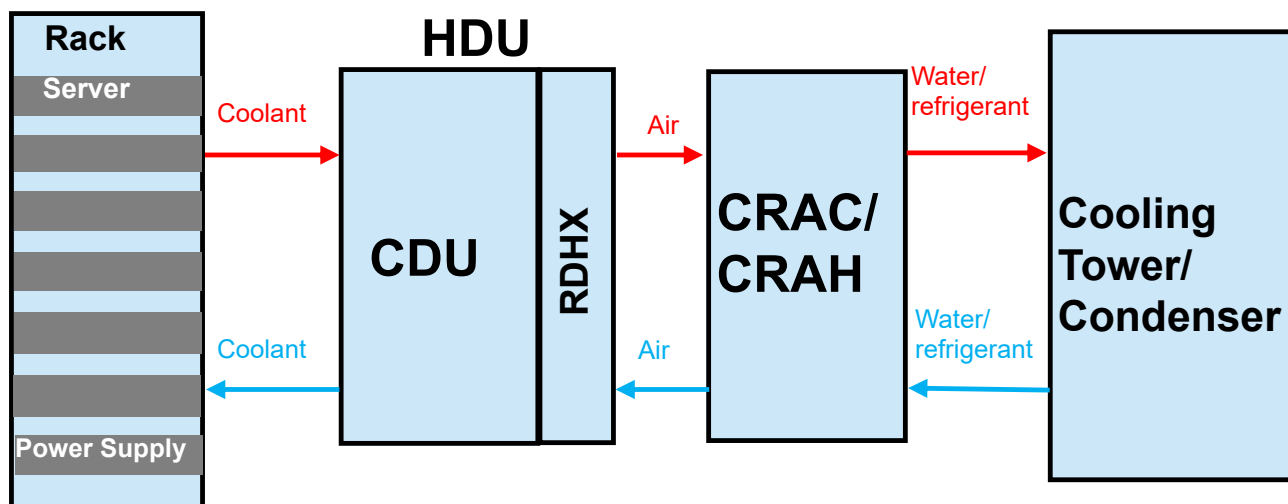


図 3. 液体対空気冷却アーキテクチャ

エンジニアは、放熱特性に加えて、施設の要件も考慮する必要があります。空気対液体アーキテクチャでは、施設の冷却水用インフラストラクチャと、ホワイトスペース全体を対象とした大規模な配管が必要です。一方、液体対空気アーキテクチャは、既存の水冷システムがない施設でも機能するため、古いデータセンターの改修に適したオプションとなります。空気対液体、液体対空気、液体対液体アーキテクチャが、現在使用されている熱管理システムの大部分を占めています。

液冷技術の進化

図 4 に示す液体対液体アーキテクチャでは、直接チップ冷却プレートで熱源から熱を吸収し、冷却水分配ユニット (CDU) で液体を循環させます。また、液体から別の液体に熱を伝え、ホワイトスペースから屋外に熱を放出します。

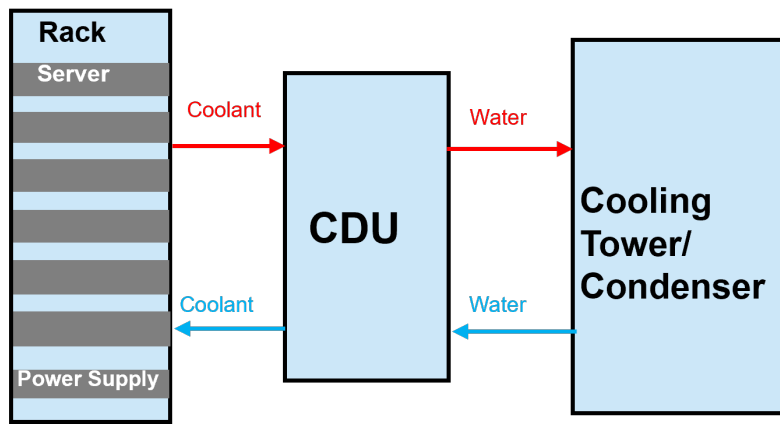


図4. 液体対液体冷却アーキテクチャ

CDU は液体対液体冷却アーキテクチャにおいて最も重要なコンポーネントです。流体の流れを維持して熱を効果的に吸収し、コンポーネントを意図された温度範囲内に維持します。CDU 内部の熱交換器も同様に重要です。コールドプレートからの熱を吸収する、不純物が少なく比熱の高い液体を、屋外の冷却システムで使用される施設の水から分離する必要があります。

液漏れセンシングの必要性

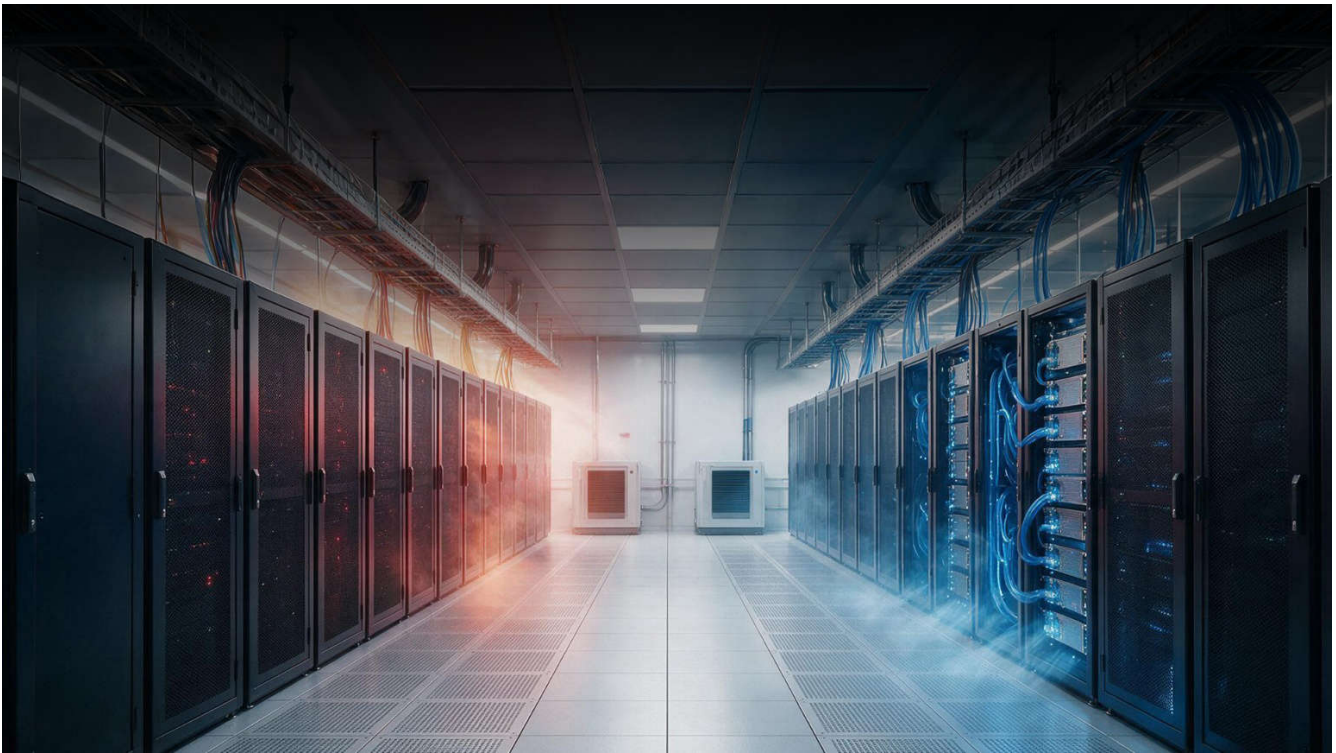
液体が電子部品に非常に近接した状態で導入される場合、液漏れセンシングが非常に重要になります。液漏れ検出はそれ自体が重要ですが、検出の信頼性を高めることと、トリガの誤発生を抑えることも重要です。これはサーバーの稼働時間を大きく左右する要素であるためです。現行のラック仕様においては、センサが液漏れを検出した際に液体の流れを止めるオンオフバルブが使用されています。これは技術者が液漏れ元を見つけて修理するまでラック全体を停止するものです。最も一般的な種類の液漏れセンサとして、湿度の検出が可能な耐水ローブがありますが、精度に問題がある他、設置の際も部品等に挟まれる場所を避け、急角度で曲げないようにする必要があります。エンジニアは、微小な液漏れを検出する湿度センサや静電容量式液漏れセンサなどの代替案を研究しています。

CDU レベルで液漏れに対処するというアプローチもあります。1 つの方法としては、CDU を再構成し、システム内に液体を押し込むのではなく、陰圧によって引き込むというものが挙げられます。この場合、穿孔や接続部の緩みの発生時に、液体が漏出するのではなく、空気を中に吸引する効果があります。また、非導電性の液体を使用して、液漏れによる問題が発生した場合でも、導電性の短絡を防ぎ、高価な機器を守るという方法もあります。

液浸冷却

液浸冷却を使用すると、冷却プロセスがさらに簡素化され、専門家が予測する今後のラック電力レベルの上昇に対応できます。このアーキテクチャでは、従来のラックを水平に向け、非導電性の液体を満たした容器 (金属フレームは含まない) に浸すことで、液漏れによるダウンタイムの可能性を完全に排除します。通常、液浸タンクでは熱交換器と液体を循環させる小型ポンプが統合されます。従来のラックの側面にある集配管や配管が不要になるため、このアーキテクチャでは面積効率が非常に高くなります。

CDU にはポンプと熱交換器が組み込まれるため、機能が単体で完結します。液浸冷却は、直接チップ冷却よりも約 2 ～ 3 倍の効率で熱を吸収できるため、施設内の水が初めから冷えている寒冷地でもデータセンターを運用できるようになります。ラックの電力レベルが中程度であれば、外部冷却塔が不要になる可能性もあります。



AI データ センターでの冷却に関する今後の傾向

冷却システムを最大 1.5MW の電力レベルに対応できるように構築するには、ほぼ確実に液体対液体アーキテクチャか液浸冷却アーキテクチャに依存することになります。どちらの技術も二相式冷却に変換できます。この冷却方式では、冷媒などのフッ素系誘電体を低温で蒸発させることで、熱吸収と伝達効率が向上し、これらのアーキテクチャの実用可能な期間を伸ばすことができます。

他の傾向としては、電力密度の増加への対応と、制御システムの応答性の向上の 2 つが見込まれます。

- サーバートレイ レベルで液体の流れを制御することで、GPU と CPU のダイ温度をより細かく制御し、液漏れが発生した場合でも、ラック内の他の場所でサーバーの稼働時間を最大限に伸ばすことができます。
- エッジ AI コンピューティングでは、センサ フュージョンによってすべてのシステム センサをまとめて監視および処理することで、応答時間の短縮とレイテンシの低減を実現します。その結果、個別のセンサやパラメータの監視では捉えきれないわずかな変化を捕捉できます。エッジ AI コンピューティングは、液漏れ検出の信頼性改善、速度の向上、重要な機械部品の予防保守など、さまざまな分野に活用できる可能性があります。

このような傾向を総合的に考慮すると、データ センターのオペレータは、障害が発生する前に問題について明確に把握できるようになることが期待されます。冷却システムは、状況を検知して問題を予測し、自動的に調整する方向に進展すると考えられます。熱管理は、事後に対処するものではなく、データ センターの運営において積極的に取り組む項目となっていくでしょう。

まとめ

各冷却アーキテクチャは、同じコア コンポーネントを複数共有しています。温度センサは、温度を制御する上で重要な役割を果たします。それぞれのシステムに採用されるファン、ポンプ、コンプレッサ、電子バルブに電力を供給するモーター制御も同様に重要です。マイコンとマイクロプロセッサは、すべての機能を連動させます。これらは、冷却システムが必要とする半導体の数例にすぎません。また、テキサス インストルメンツは、アーキテクチャに関わらず、冷却システムのあらゆる層に対処するアナログ テクノロ

ジーと組み込みプロセッシング製品を提供する体制を備えています。このような冷却アーキテクチャで使用される特定の製品分野の詳細については、「その他の資料」セクションを参照してください。

著者について

David Stout は、テキサス インスツルメンツのデータ センターの熱管理を含む、建物オートメーション システムを専門とするシステム エンジニアです。産業用半導体市場向けに、アナログ、ミックスド シグナル、無線周波数の各回路やシステムの設計で 30 年以上の経験を積んできました。ルイジアナ州立大学で電気工学の学士号を、テキサス大学ダラス校で電気工学の修士号を取得しています。

その他の資料

データ センターの熱管理システムに関連する TI の製品カテゴリをご覧ください。

- [インバータ、可変周波数ドライブ向け GaN 電力段](#)、ファン、ポンプ、コンプレッサ、電子バルブ向け[モータードライバ](#)をご確認ください。
- 液漏れ検出と温度監視に適した[温度センサ](#)や[その他のセンサ](#)、[高精度 A/D コンバータ](#)をご確認ください。
- 冷却サブシステムを調整し、応答性を向上させる[マイコンとマイクロプロセッサ](#)の詳細をご確認ください。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月