

0.55 AI-EFLOPSの計算インフラストラクチャを支える 超グリーンAIデータセンタ

高野 了成^{1,a)} 三浦 信一^{1,2} 杉田 正¹ 小川 宏高¹ 松岡 聡^{3,2}

概要:我々は世界最大規模の人工知能処理向け計算インフラストラクチャである AI 橋渡しクラウド (ABCI) を構築した。本報告では ABCI を設置する AI データセンタのコンセプトと設計について報告する。本 AI データセンタでは、最新のスーパーコンピュータにおける冷却技術のコモディティ化をコンセプトとして、高密度サーバ実装に対応した冷却性能 (水冷及び空冷合わせて 70kW/ラック) と耐震性能、及び計算・ストレージ能力の拡張性の実現を目標とした。本データセンタは、サーバラック、冷却設備、および電源設備を一体化したクーリングポッドによるモジュール構造を採用しており、2018 年 7 月時点で 48U ラック 90 基分のサーバ収容能力と 3.2MW の冷却能力を有する。

1. AI データセンタの目的

深層学習に代表される人工知能技術では、モデルを大量のデータを用いて訓練することが推論性能ひいてはサービスの向上に寄与する。したがって、訓練フェーズにどれだけの計算能力を活用できるかが産業競争力に直結するため、計算インフラの大規模化・高性能化に対する要求が増大している。今後さらに増加する人工知能・ビッグデータ処理の需要に対応するため、計算インフラを収容するデータセンタの高度化・省エネルギー化は社会的な課題になっている [1]。一方で、米国 SUMMIT [2] のような最新のスーパーコンピュータ等 HPC システムにおいても、従来の計算科学シミュレーションのみならず、ビッグデータ解析や機械学習処理も指向したシステムが登場し始めている。すなわちデータセンタと高性能計算システムの両領域で培われたソフトウェア・ハードウェア技術が融合する機運が高まっている。

産業技術総合研究所 (以下、「産総研」という) では、上記のような背景の中、我が国の人工知能技術開発を加速するオープンで世界トップクラスの高速計算インフラとして、AI 橋渡しクラウド (以下、「ABCI」という) [3][4][5] を整

備している。ABCI の構築にあたっては、人工知能処理向けに構築された計算機システムを収容するための建物及び付帯設備である『AI データセンタ』も新たに構築した。AI データセンタの目的は次のとおりである。(1) 1ラックあたり消費電力70kWに耐える高密度実装を実現する。現在商用化されている高密度 GPU サーバは、1U サイズあたり 2 CPU, 4 GPU を搭載する構成が可能であり、NVIDIA Tesla クラスの GPU を搭載した場合の定格電力は 2kW 程度となる。1ラックあたり 30~40 台のサーバを収容すると、1ラックあたりの消費電力は 70kW に達する。AI データセンタには、このような高密度のサーバ機器に耐えうる電力容量、冷却能力や床耐荷重が求められる。(2) 超グリーンな運用を実現する。大規模計算能力を賄うための電力供給能力だけでなく、高温循環水による水冷、ホットアイルコンテインメントによる空冷の効率化等の省電力技術の導入と設備運用効率化により、年間平均で PUE 1.1 程度での運用を目指す。(3) HPC システムからデータセンタへの技術移転を実現する。(1) と (2) の目的を HPC システムに特化した技術ではなく標準サーバ及び標準 EIA ラックに搭載可能なコモディティ技術を用いて実現することで、商用データセンタ等への速やかな技術移転を可能にする。データセンタの新設には一般的に 3~5 年要すると言われているが、AI データセンタの設計のみならず、運用に関わるデータも可能な限りオープン化し、参照可能にすることで、人工知能やビッグデータ活用の需要に素早く応えるインフラの高度化・短期構築を目指す。

本報告では、上記の AI データセンタの構築について述べる。本報告の構成は次のとおりである。2 節では、近年

¹ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 産総研・東工大 実社会ビッグデータ活用 オープンイノベーションラボラトリ

AIST-Tokyo Tech Real World Big-Data Computation Open Innovation Laboratory (RWBC-OIL), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

² 国立大学法人 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

³ 国立研究開発法人 理化学研究所 計算科学研究センター
Center for Computational Science, RIKEN

a) takano-ryousei@aist.go.jp

のデータセンタの動向とその問題点について述べる。3節では、産総研が構築を進めている ABCI の概要について簡単に述べ、ABCI を支える産総研 AI データセンタ棟の設計と構築について4節で述べる。5節では、その構築を通して得られた知見について議論する。最後に6節でまとめと今後の予定について言及する。

2. 既存データセンタの問題点

1980年代のスーパーコンピュータや大型計算機システムでは、発熱量の大きい ECL ロジックを採用しており、液冷や液浸による冷却技術が活用されていた。特に CRAY リサーチ社が開発した Cray-2 では、フロリナートを用いた液浸技術が利用されていた。一方、1990年代以降のスーパーコンピュータの性能向上は、CMOS ロジックベースのマイクロプロセッサ、PC クラスタ等のコモディティ技術を導入することで達成され、空冷でも十分に冷却可能な熱密度になった。しかし、空冷ではラックあたり 10kVA が冷却限界であり、近年の GPU に代表されるアクセラレータ技術や高密度実装技術の進展により、空冷のみでは十分な冷却能力が得られなくなりつつある。

このような背景から現在の TOP500 [6] の上位を占めるような HPC システムでは、京コンピュータ [7]、Oakforest-PACS[8] および TSUBAME3.0 [9] のように直接水冷と間接水冷（空冷）を組み合わせたハイブリッド冷却システムを採用することが一般的になっている。これらの多くのシステムでは、主要な熱源であるプロセッサ部分のみをウォータブロック方式による直接水冷を行い、他のコンポーネントを間接水冷とすることで、高い冷却性能とメンテナンス性を実現している。一方、京コンピュータや Oakforest-PACS が圧縮機を用いて冷却水を生成するに對して、TSUBAME3.0 では、冷却塔を用いたフリークーリングシステムを用いて冷却水を生成することで、冷却に必要な消費電力の削減も実現している。さらに、一度は廃れた液浸冷却についても、TSUBAME-KFC [10] や ZettaScaler [11] によって採用され、再び注目を集めている。最新の研究では、油やフルオロカーボン系もしくはハイドロフルオロエーテル系の絶縁性の優れた液体を用いた液浸冷却技術の研究が進められており、高い冷却性能と省エネルギー性能を得ることができていることが示されている。一方で、直接的な液浸冷却においては、メンテナンス性の低下や設置重量の増加、および設置床面積の増加などの問題があり実用段階には至っていない。そのため相変化冷却など新たな冷却技術にも注目が集まりつつある。

一方、特に日本の商用データセンタでは、上記のような冷却技術の導入はまだ進んでいない。現状では、1ラックあたりで 2kVA から 6kVA の空冷がほとんどであり、最新のデータセンタでも 8kVA から 10kVA が上限である。また、冷却ドア導入による 1ラック 30kVA への対応が検討さ

れている段階である。このような状況の原因として、データセンタ内への冷却水の引込みに対して、顧客側の強い忌避感があることに加え、旧態依然のデータセンタ設計指針から脱却がなされていないため、水冷システムに関する設計・運用のノウハウがデータセンタに不足しているためだと考えられる。

今後のデータセンタ市場を牽引する要素として、クラウドサービスの普及の他、IoT、人工知能、FinTech など新たな需要が見込まれている。これらの需要に対応した最新のデータセンタ（さくらインターネット石狩 DC [12]、データドック長岡 DC [13]、IDC フロンティア白河 DC [14] など）の設置も進んでいるものの、2016年のガートナー調査によると日本企業の 36%がデータセンタの老朽化やキャパシティ不足を最優先課題に挙げており、全般的には早晚対応が必要な状況である [15]。このような背景から、我々は HPC システムで採用されている最先端の冷却技術をコモディティ技術で実現し、さらにはデータセンタ事業者に技術移転することで、人工知能技術を活用した産業競争力の底上げを目指す。

3. ABCI の概要

AI 橋渡しクラウド (ABCI) は、平成 28 年度第 2 次補正予算「人工知能に関するグローバル研究拠点整備事業」の一環として、産総研が東京大学柏 II キャンパスに整備した、わが国の人工知能技術開発を加速するオープンで世界トップクラスの高速計算基盤であり、理論ピーク性能は 0.55 AI-EFLOPS, 37 PFLOPS を誇る [5]。HPL 実効性能は 19.88 PFLOPS, 12.05 GFLOPS/W を達成し、2018 年 6 月現在、TOP500 において世界 5 位および国内 1 位、Green500[16] において世界 8 位にランキングされている。

ABCI の設置にあわせて、電力・冷却関連の付帯設備、高圧受電設備、SINET5 への 100Gbps 接続等を整備した AI データセンタ棟を新たに建設した。一般的にデータセンタ事業では、将来の需要を見込んで建物等の設備を整備し、その後複数のサーバシステムを導入・運用・廃棄というサイクルで運用する。ABCI では、データセンタ事業への技術移転を意図して、表 1 に示すとおり、ABCI のシステム本体と付帯設備、建物を独立に設計し調達した。この際、サーバシステムと付帯設備の界面が重要になる。本 AI データセンタは、ラック、バスダクト、及び水冷配管を提供し、これに對して、システムベンダがサーバ等の機器を設置、配線・配管する方針とした。AI データセンタ棟は 2018 年 1 月末に竣工、付帯設備は同年 3 月末、ABCI システムは同年 6 月末に納品され、現在 8 月の運用開始に向けて準備を進めている。なお、AI データセンタ棟の詳細は 4 節にて述べる。

ABCI は、おもに Intel Xeon Gold 6148 2 基と NVIDIA Tesla V100 4 基を搭載する富士通社製計算ノード

表 1 ABCI システムと AI データセンタ棟の界面

	ABCI システム	AI データセンタ
基本要素	高性能計算システム, ストレージシステム, ネットワークスイッチ	クーリングポッド, ラック
電気設備	パワーディストリビューションユニット (PDU)	高圧受電設備, バスタクト, UPS
水冷設備	ラック内クーリングディストリビューションユニット (CDU)	冷却塔, チリングユニット, ポンプ, 配管
空冷設備	-	ファンコイルユニット (FCU)

PRIMERGY CX2570 M4 1088 台からなる高性能計算システムと, DDN 社製の 22PB の容量を持つ大容量ストレージシステムから構成される。高性能計算システムは 32 ラック (ラックあたり 32 台の計算ノードを収容), 大容量ストレージシステムは 4 ラックから構築される。これらに加えて, ネットワークスイッチ, その他サーバが存在し, ラック総数は 41 となる。HPL 実行時における計算ラックの最大消費電力は 70kW 弱であり, システム全体の設計最大消費電力は 2.4MW 弱である。

4. AI データセンタ棟の設計と構築

ABCI の実現にあたっては, 電力消費量や設置スペースにも配慮しつつ, 省エネルギー性に優れ, 将来のシステム拡張にも耐えられる新たな AI データセンタ棟をゼロから設計し, 設置することとした。また, 初期導入時に様々なアーキテクチャの計算機システムの提案を受け入れ可能にするとともに, 将来のシステム強化も踏まえ, 次のような設計指針を設定した。

- EIA 規格 19 インチラック (幅 700mm 以上, 奥行き 1,200mm 対応, 48U) が 100 台以上設置可能であること
- データセンタ全体で最大 4MW の配電と冷却に対応可能なこと
- ラックあたり 70kW の配電と冷却が行えること

AI データセンタ棟は東京大学より柏 II キャンパスの土地を借地し建設することとなった。このことより, 必要最小限の土地面積に建設することが求められた。加えて, 施設整備に当たっては, 産総研のみならず東京大学の規則も適用される。このような, 設計指針と制約条件に基づき, AI データセンタ棟を構築した。

4.1 データセンタ建屋

データセンタ棟の建設にあたっては, 今後の技術移転を見据え, 建設期間の短縮と建設コストの削減を目標とし, 簡易的な構造物とすることとした。データセンタ棟の外観を図 1 に示す。



図 1 AI データセンタ棟 外観

より高い床耐荷重を実現するため, 平屋建てとした。現状のサーバは, 実装密度の向上や液体を用いる冷却機構, および金属部品の増加などにより, 重量が増加している。具体的には, 1m³ あたり 1,000kg 程度の重量であるが, 今後も重量の増加が続くことが懸念されている。このため計算設備を地上階に設置し, 直接地盤により荷重を支える設計にした。また, 一般的なデータセンタにはフリーアクセスフロアが敷設され, 配線・配管などが床下に収納されているが, 同様の理由で, フリーアクセスフロアは設置しない。このように, 床耐荷重に十分留意した構成をとることで, 1m³ あたり, 2t の床耐荷重を実現した。

一方, フリーアクセスフロアを採用しなかったため, すべての配線・配管はラック上部に設置することとした。また, 4.2 節で述べる冷却設備の一部分もラック上部に設置することとしたため, 天井までの高さを高くすることとなった。これにより, 床面より天井部まで 6m の高さを確保することとした。

また, 将来的な設備設置の自由度を向上させるため, ピラーレス構造とするため, その障害になりうる 2 階部は設置していない。

このような構成にすることで, 19m×24m の限られた床面積中に, 幅 750mm 奥行き 1,200mm の 48U 19 インチラックを 144 台収容可能にした。ただし, 初期導入段階では 90 台の導入に留め, 残りのスペースについては将来の拡張スペースとしている。

柏市環境保全条例の騒音規制基準を満たす必要があった。特に, AI データセンタは, 敷地境界近くに設置されることに加え, 冷却設備は 24 時間稼働を続けるため, これらの騒音については留意が必要であった。また東京大学においては, 機器・設備が直接見えないよう外観に留意する規則となっている。これらの条件を満たすため, 屋外付帯設備設置エリアは防音壁で囲い, 敷地境界線における騒音規制値と外観上の問題を同時に解決した。

以上により, AI データセンタ棟の構造は, 鉄骨造平屋建てとし, 延べ床面積 592.47m², 軒高 8.350m, 高さ 9.185m の準耐火建築物となった。592.47m² のサーバ棟と 513.74m²

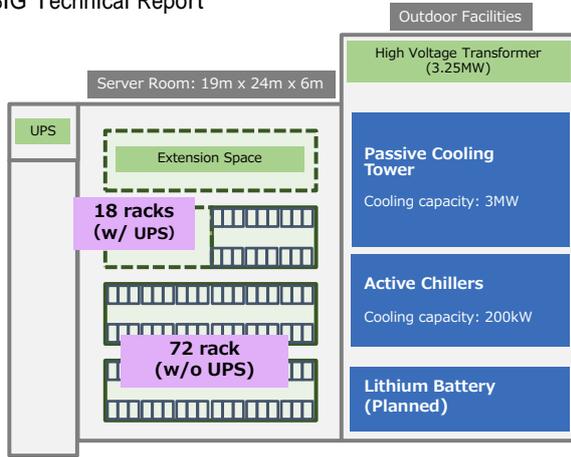


図 2 AI データセンタ棟のレイアウト

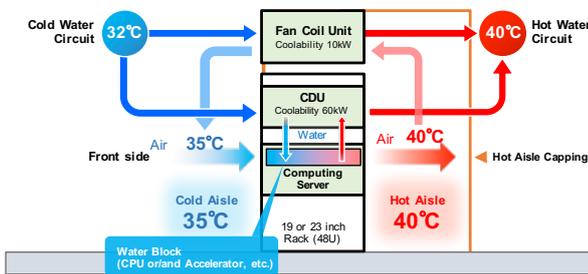


図 3 ラックと冷却装置の概要

の屋外付帯設備設置エリアを持つ。図 2 に AI データセンタ棟のレイアウトを示す。

4.2 冷却設備

現在の一般的なデータセンタにおける冷却能力は、ラックあたり 10kW が限度であり、これを HPC システムのようなラックあたり 50kW 以上とするためには、大きな技術的チャレンジが必要である。2 節で触れたとおり、HPC のシステムでは、主な発熱源であるプロセッサ部をウォータブロックにより冷却する直接水冷方式と、それ以外の部品を水冷によって冷却された空気を用い冷却する間接水冷方式を組み合わせた構成となっていることが多い。これに加えて、液浸冷却も検討したが、2 節に示した運用上の制限以外にも、液浸冷却に対応する機材は一般的ではないため、調達コストの増大を招くことになる。そこで、AI データセンタでは、サーバの冷却を HPC システムで多く用いられている直接水冷方式と間接水冷方式のハイブリット構成をコモディティのデータセンタに適用するべく設計を行った。

図 3 に、ラック冷却設備の概要を示す。直接水冷部はサーバ内に大量の熱を発生するプロセッサ部分等にウォータブロックを取り付け冷却する。一般にプロセッサ部分の冷却水は、冷却水の漏洩や詰まりなどに備え、純水等を用いる。この冷却水はクーリングディストリビューションユニット (CDU) を介し、建物外で冷却された冷却水との熱交換が行われる。この時、建物外から供給される冷却水は、

表 2 柏地区 気象データ

	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
乾球温度 (°C)				
最大	38.93	36.29	36.62	36.9
最低	-3.8	-3.5	-2.89	-2.02
湿球温度 (°C)				
最大	27.52	26.12	27.22	26.7
湿球 27°C 以上				
計測点数	19	0	2	0
最大持続時間	140 分	0 分	10 分	0 分

約 32°C であり、これが熱交換後約 40°C 近くにまで上昇し、再度建物外で冷却される。AI データセンタでは、便宜上この冷却水回路を高温循環水回路と呼ぶ。ウォータブロックだけで取り切れない残熱は、サーバ内に設置されたファンによりサーバ後方にある高温区画に空気として排出される。高温区画の空気は、ラック上部に設置されたファンコイルユニット (FCU) によって冷却され、低温区画に戻され、再度サーバの冷却に使用される。この時、FCU に供給される冷却水も、CDU と同じ高温循環水回路から供給される約 32°C の冷却水となる。そのため、低温区画は約 35°C 程度となり、これを用いてサーバが冷却される。AI データセンタでは、ラックあたりの水冷部分を 60kW、空冷部分を 10kW 相当として設計した。実際には AI データセンタとしては FCU と各ラック 1 系統ずつの高温循環水回路をバルブ止めで提供し、それ以降の CDU からサーバまでの水冷設備は、システムに合わせて導入されることを前提にした。

また、吸気温度が 25°C を要求するストレージ機器、ネットワーク機器などのために、17°C 程度の冷却水を供する冷却水回路も用意する。AI データセンタでは便宜上この冷却水回路を中温循環水回路と呼ぶ。この中温水回路の冷却水をラック前面に設置された水冷コイルドアに供給し、ラック内を 25°C に維持することも計画している。

サーバの冷却の為に、比較的高温 (32°C) の冷却水を用いた理由として、冷却塔を用いたフリークーリングを実現することが挙げられる。湿球温度において、27°C 以下の条件を満たすことが可能であれば、冷却塔は 32°C 以下の水を供給することが可能になり、これによりフリークーリングを実現できる。東京大学柏 II キャンパスにおいて本条件を満たすことを確認するために、近接した東京大学柏キャンパスにおける 2013 年から 2016 年までの気象データを用いた。気象データについては Live E! プロジェクト [17] より提供いただいた。表 2 に気象データから得られた結果を示す。気象データより、湿球温度が概ね 27°C を下回っており、年間を通して 32°C 以下の水を供給することが可能であることがわかった。一時的に 27°C を超過する場合も存在しているが、計測数と持続時間が許容可能であると判断し、チリングユニットによる冷却のバックアップシステム



図 4 屋外冷却設備 (左:チリングユニット, 右: 冷却塔)

を構築せず、冷却塔のみによるフリークーリングでシステムを構築することとした。冷却塔を用いた高温循環水回路の冷却能力は、データセンタ全体で3MWとなり、将来の拡張を見据えて1MW分の冷却塔設置スペースも確保した。また、中温水回路の冷却のために、200kWのチリングユニットを用いた冷却設備も別途用意した。

4.3 電源設備

今回の ABCI の導入に当たっては、最大で3MW級の機器が導入される見込みであった。この前提のもとで、別途隣接地に建設される研究棟と合わせて3.25MWの受電をすることとなった。また、将来的な拡張として、大容量リチウムイオン電池を用いた系統連系も計画し、ピークシフトのみならず、パワーアシストを行うことで、システム全体で最大4MWの給電が可能になるよう検討もしている。

AIデータセンタでは、この受電した電力を変電設備によって交流3相4線式420Vへと変電したのちに、データセンタ内部に給電する。設計開始当初においては、直流高電圧給電(HVDC)の導入も検討されたが、対応機器が限定されることによるコスト増大が懸念されるとともに、コストに対して得られる効果が小さいことから断念した。交流3相4線式420Vとすることで、单相240V級としても利用できることから、高圧化による配電ロスの低下と配線コストの削減を実現するとともに、幅広い機器に対応することも可能になった。

AIデータセンタにおいて整備した電源設備の概要を図5に示す。狭いサーバ室の電源取り回しなどを考慮し、AIデータセンタではバスダクトを用いて配電する。各ラックの上部に2系統のバスダクトを用意し、各ラックに導入されるシステムに合わせてタップアウトすることとした。これにより分電盤等の設置スペースの節約と、配電の自由度を向上させた。

一般的なデータセンタと同様に、AIデータセンタでは、UPSによる電源バックアップも用意した。ただし、サーバの消費電力は非常に大きく、これらの消費電力に見合うと

だけのUPSの整備は、非現実的である。また前述のように、将来的には大容量のリチウムイオン電池を導入する経路があるため、これを利用することでUPSの代替することも検討している。このようなことから、UPSはストレージのための短時間のバックアップ専用とし、200kVA 10分の保持とし、大容量リチウムイオン電池導入時には、このリチウムイオン電池と連携して使用することとした。

4.4 クーリングポッド

4.2節に示したように、AIデータセンタは低温区画において約35°C、高温区画において約40°Cとなり、厳密な温度管理が重要になる。そのため、低温区画と高温区画を明確にアイソレーションする必要がある。加えて、4.1節に示したように、本データセンタの配線・配管はすべてラック上部に配置する。これらの配線・配管の支持材も必要となる。これらの条件を鑑み、図6に示す構造の、クーリングポッドを設計し、温度区画の設定と配線・配管の支持、および冷却設備を配置した。

AIデータセンタでは、1つのクーリングポッドは18ラック2列計36ラックから構成され、ラック上部にFCUが設置されている。FCU1台の冷却能力は30kWであり、3ラックごとにFCUを設置することで、ラックあたりの平均10kWの冷却能力を提供する。また、クーリングポッド内部には、電源配電用のバスダクトと、高温循環水回路・中温循環水回路が配管されている。クーリングポッド内は簡易的な2階構造となっており、この2階構造を利用することで、メンテナンス性の高さを実現している。なお、クーリングポッドの設計に当たっては、日本の地震を考慮した設計となっている。このクーリングポッドにより、高温区画・低温区画を確実にアイソレーションすることにより、高い冷却効率を実現する。実際に構築されたクーリングポッドの外観を図7に示す。

4.5 環境監視

サーバ室内および屋外において下記の項目をモニタリングしている。

- 各ラック内、高温区画、低温区画の温度・湿度
- 高温循環水および中温循環水の温度・流量
- 分電盤およびポンプの消費電力
- 漏電、漏水等の警報情報
- 屋外気象センサ (風向、風速、温度、湿度、気圧、降水強度、降水量)

これらの情報を ABCI の運用ログと関連づけることで、運用の最適化を実現する。

5. 既知の問題

ABCIの運用は8月開始の予定であり、実運用を通しての実証については改めて報告する。ここでは、システムの

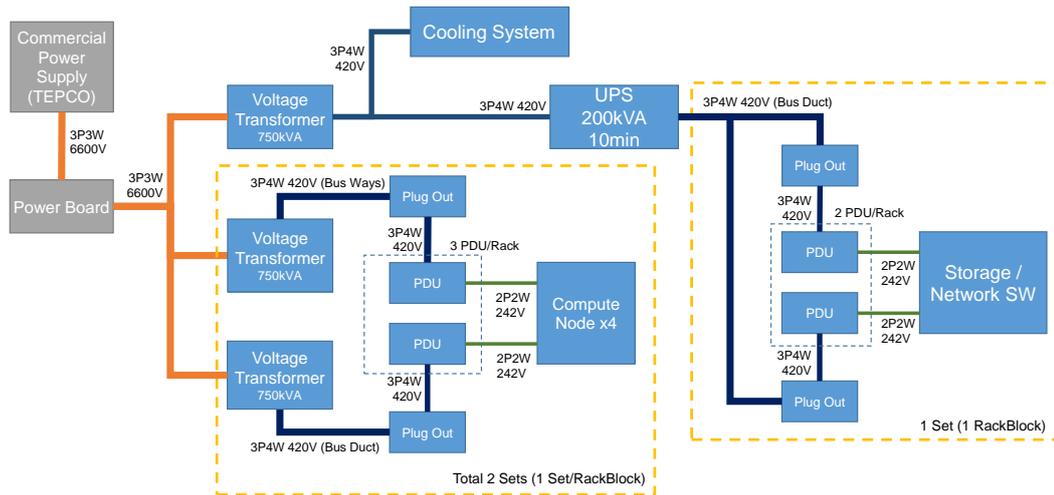


図 5 電源設備の概要

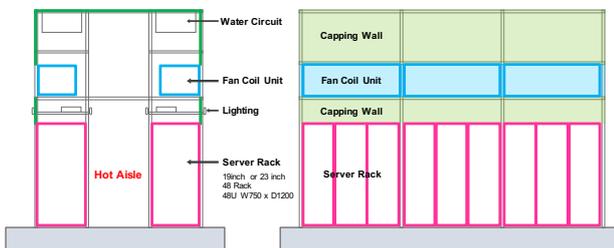


図 6 クーリングポッドの構造



図 7 クーリングポッド外観

導入を通して現時点までに判明している問題点を挙げる。

(1) FCU と配管の位置関係

クーリングポッドは、床から天井に向けて、ラック、FCU、配管の順に配置されている。FCU のメンテナンス性、煙突効果による FCU の効率、配管とラック間のホース長を考慮すると、FCU と配管を逆に配置する方がメリットが大きい。

(2) クーリングポッドの断熱

4.4 節で述べたとおり、効率的な冷却には高温区間と低温区画を隔離し、FCU が十分に機能することが重要である。現在は鉄製のクーリングポッド自体から熱が伝導してしまうため、断熱等の措置が必要である。

(3) クーリングポッドとストレージエンクロージャの干渉
ラック最上部のストレージエンクロージャの蓋がクーリングポッドと干渉するため、蓋が完全に開かず、ディスク交換作業に支障がある。

(4) 建屋のコスト

設計施工一体での調達となったことから、初期の想定よりも重厚なつくりとなった。

6. まとめ

本報告では、人工知能開発向け計算インフラストラクチャである ABCI を支える AI データセンタの設計と構築について述べた。ABCI の構築にあたっては、データセンタ事業者への技術移転を念頭に、システム一括ではなく、計算システム、建物、付帯設備を独立に調達するという挑戦的な試みを実施し、本年の 8 月に運用が開始されるに至った。今後は、AI データセンタの設計に加え、運用から得られたデータや知見についてもオープンにする。これと並行して、強化学習等の人工知能技術を AI データセンタに自己適用することで、データセンタの運用を最適化する技術を研究開発する [18]。これらの運用・研究開発成果のフィードバックを受けて、AI データセンタの参照設計を提案し、本設計を国内外のデータセンタ・計算基盤センタへ技術移転を目指す。

謝辞 ABCI と AI データセンタ棟の設計・構築に関わった、富士通、富士古河 E&C、大和リース、東京工業大学、及び産総研関係者の多大な尽力に感謝する。

参考文献

[1] ミック経済研究所：データセンター市場と消費電力・省エネ対策の実態調査【2012 年度版】(2012).
[2] Oak Ridge National Laboratory: SUMMIT, <https://www.olcf.ornl.gov/olcf-resources/compute-systems/summit/> (2018).
[3] 産業技術総合研究所：ABCI Homepage, <https://abci.>

- ai/ (2018).
- [4] 小川宏高, 松岡 聡, 佐藤 仁, 高野了成, 滝澤真一朗, 谷村勇輔, 三浦信一, 関口智嗣: AI 橋渡しクラウド- AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - の構想, 情報処理学会研究会報告, pp. 1-7 (2017).
 - [5] 小川宏高, 松岡 聡, 佐藤 仁, 滝澤真一朗, 高野了成, 谷村勇輔, 三浦信一, 関口智嗣: 世界最大規模のオープン AI インフラストラクチャ AI 橋渡しクラウド (ABCI) の概要, 情報処理学会研究会報告 (2018).
 - [6] Strohmaier, E., Dongarra, J., Simon, H. and Meuer, M.: The TOP500 List, <https://top500.org/> (2018).
 - [7] 前田秀樹, 久保秀雄, 島森 浩, 田村 亮, 魏 杰: スーパーコンピュータ「京」のシステム実装技術, 雑誌 FUJITSU, Vol. 63, No. 3, pp. 265-272 (2012).
 - [8] 東京大学情報基盤センター: Oakforest-PACS スーパーコンピュータシステム, <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/ofp/service/index.php> (2018).
 - [9] 松岡 聡, 遠藤敏夫, 額田 彰, 三浦信一, 野村哲弘, 佐藤 仁, 實本英之, Aleksandr, D.: HPC とビッグデータ・AI を融合するグリーン・クラウドスパコン TSUBAME3.0 の概要, 情報処理学会研究会報告, pp. 1-6 (2017).
 - [10] Endo, T., Nukada, A. and Matsuoka, S.: TSUBAME-KFC: A modern liquid submersion cooling prototype towards exascale becoming the greenest supercomputer in the world, *IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2014)*, pp. 360-367 (2014).
 - [11] ExaScaler Inc.: ZettaScaler-2.0, <http://www.exascalr.co.jp/> (2018).
 - [12] さくらインターネット: 石狩データセンター, <http://ishikari.sakura.ad.jp/> (2018).
 - [13] データドック: 長岡データセンター, <https://www.datadock.co.jp/> (2018).
 - [14] IDC フロンティア: 白河データセンター, <https://www.idcf.jp/datacenter/shirakawa/> (2018).
 - [15] 経済産業省: 平成 29 年度我が国におけるデータ駆動型社会に係る基盤整備 (我が国のデータ産業を巡る事業環境等に関する調査研究) 報告書, <http://www.meti.go.jp/press/2018/06/20180601004/20180601004-1.pdf> (2018).
 - [16] Feng, W. and Scogland, T.: The Green500 List, <https://www.top500.org/green500/> (2018).
 - [17] 江崎 浩, 砂原 秀樹: Live E! : ~ 活きた地球の環境情報 ~ デジタル環境情報の中で自律的な生成 / 流通 / 加工 / 共有に向けて: 1. Live E! プロジェクト: 活動趣旨とその主な成果, 情報処理, Vol. 58, No. 3, pp. 206-207 (2017).
 - [18] 滝澤真一朗, 高野了成, 松岡 聡: 大規模データセンター運用最適化フレームワーク構築に向けて, コンピュータシステムシンポジウム (ポスタ) (2017).