

CPO ドータボードの放熱設計

Thermal Design for CPO Daughter Board

平澤 壮史^{*1}
Takeshi Hirasawa西崎 健将^{*2}
Kensho Nishizaki長島 和哉^{*2}
Kazuya Nagashima那須 秀行^{*2}
Hideyuki Nasu

〈概要〉

AIやクラウドサービスの普及に伴い、データセンタではスイッチ間通信にテラビット級の帯域が求められている。しかし、従来のプラグブル光モジュールは電気インターフェース損失や消費電力増大により性能限界に近づいており、CPO (Co-Packaged Optics) の導入が不可欠である。CPOはオプティクスとLSIを単一パッケージ基板上に実装し、大容量化と低消費電力化を実現するが、スイッチASIC (Application-Specific Integrated Circuit) を囲む構造により発熱対応が課題となる。本研究ではラック内設置を前提に、空冷および水冷方式による光トランシーバとスイッチASICの冷却成立性を検討し、特に水冷方式において有効な冷却性能が得られることを実証した。

1. はじめに

次世代データセンタにおいて、CPOの採用は不可欠である。近年、AIやクラウドサービスの急速な普及に伴い、サーバ間通信の帯域幅要求は飛躍的に増加している。従来のプラグブル光トランシーバでは、スイッチASICと光モジュール間を電気信号で接続する構成が一般的であった。しかし、長距離の電気配線による高速化は信号損失や消費電力の増大を招き、電力効率や通信遅延の面で限界が顕在化している。特に、スイッチASICの処理能力が世代ごとに向上し、テラビット級のスループットを実現するためには、ラック内を電気回路で構成する従来方式では対応が困難となりつつある。

この課題を解決する技術として、オプティクスとLSIを単一パッケージ基板上に統合する混載実装技術であるCPOが注目されている¹⁾。光トランシーバはスイッチASICの周囲に近接配置され、電気配線を最短化することで信号損失を低減し、高速通信を効率的に実現できる²⁾。さらに、電気インターフェースの短縮により消費電力を大幅に低減できる点は、データセンタの運用コスト削減や電力逼迫の解決にも寄与する³⁾。

しかし、光トランシーバの実装には複数の技術的課題が存在しており、その中でも冷却は最も重要な要素の一つである。スイッチASICと光素子が高密度に実装される光トランシーバは、高速通信を実現する一方で、熱的な負荷が大きい。スイッチASICは数百ワット規模の電力を消費し、今後さらに発熱量の増大も予測される。これに対し、光素子は温度変動に対して

敏感であり、動作温度の上昇は光源の信頼性低下を引き起こすため、適切な熱設計が不可欠である。

さらに、生成AIの普及などによりデータセンタ全体の冷却要求は増大しており、従来の空冷方式では対応困難となりつつある。このため、液冷などの新たな冷却技術の導入が進められている⁴⁾。光トランシーバおよびスイッチASICにおいても液冷システムの適用が現実的となりつつあるが、その性能を最大限に発揮するためには、スイッチASICの発熱増大を前提とした冷却構造の検討が必要である。

そこで、本研究では、50-Gbaud PAM4×16 チャンネルの超小型光トランシーバおよび、51.2 Tb/sの帯域幅を有するスイッチASICを想定し、それぞれの発熱条件を考慮した冷却構造の検討を行った。光トランシーバの消費電力は6.4 Wと見積もられ、最高温度50℃以下での動作維持が求められる。加えて、CPO Transceiver Collaboration Guidance Document⁵⁾によると、51.2 Tb/sの帯域幅を有するスイッチASICの最大消費電力は900 Wと想定されており、最高温度70℃以下を目標とした設計が必要である。

なお、本研究において検討したスイッチASICおよび光トランシーバは、拡張性や設計自由度の向上を考慮し、ドータボード上への搭載を前提とした。そのプリント基板寸法は100 mm×100 mmである⁶⁾。

2. 空冷冷却の検討

2.1 空冷冷却方式の基本設計検討

従来のサーバにおいて一般的に採用されている空冷方式について検討する。電子機器の空冷冷却には、押出ヒートシンクが広く用いられている。押出ヒートシンクは、アルミケーキ材を

^{*1} 研究開発本部 エレクトロニクス研究所^{*2} 研究開発本部 フォトニクス研究所

部署名は2026年3月時点の所属を記載しています。

ダイスから押し出し、所定の長さに切断して形成されるものであり、放熱面に複数枚のフィンを用意する構造である(図1)。アルミニウム合金の熱伝導率は約200 W/mKであり、受熱部からフィンへの熱伝達は主としてこの材料特性に依存する。

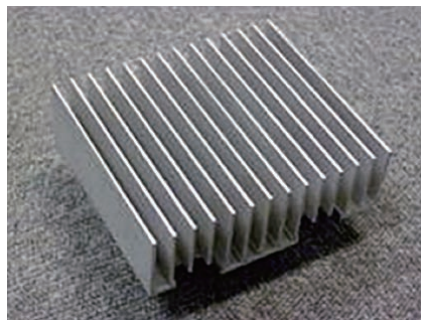


図1 押出ヒートシンク⁷⁾
Extrusion heatsink.

強制空冷を行った場合、ベース部およびフィン内部には温度勾配が生じやすく、フィン先端部の温度が低下する。その結果、フィン全体を有効に活用した放熱が難しく、熱交換効率の向上には限界がある。また、フィン厚のさらなる低減やフィンピッチの狭小化によって放熱面積を拡大しようとする、製法上の制約が問題となる。

これらの制約を回避する手法として、板金加工により形成したフィンベース板にカシメ・ロウ付けによって組立てる方法もある。しかしながら、この場合においても使用材料の熱伝導率に起因する制約は本質的に変わらず、冷却性能の改善は限定的である。

この課題に対し、高効率な空冷を実現する方法として、相変化を利用したヒートパイプやベーパーチャンバを組み込んだヒートシンクが有効である。これらのデバイスは、銅などの容器(コンテナ)に水などの作動液を封入し、内部をデバイス温度に対応した飽和蒸気圧で平衡させる構造を持つ。この構造により、通常の固体伝熱では得られない高い等価熱伝導率を実現される。

ヒートパイプは受熱部から放熱部への効率的かつ均一な熱輸送に適しており、ベーパーチャンバは広い面積への熱拡散に優れている。これらを組合せ、さらにプレス加工フィンを採用することで、フィン全体を効率的に放熱に寄与させることが可能となる。

本研究では、まずヒートパイプとベーパーチャンバを組合せたヒートシンク構造について、熱解析を用いて成立性を検証した。

2.2 空冷ユニットの検討

ここでは、比較的スペースに余裕のある4Uユニット(高さ178 mm、幅483 mm)への搭載を想定した冷却構造について検討を行った。図2に示す冷却デバイスの構成では、スイッチASICをベーパーチャンバに直接接触させ、その上部に中央部を曲げ扁平加工を施したヒートパイプを複数本、並列に配置している。ヒートパイプの両端部は折り曲げてU字型フィンに圧入する構造とした。また、圧入する位置を千鳥配置とすることで、隣接するヒートパイプ間の熱干渉による局所的なフィン温度の上昇を低減している。

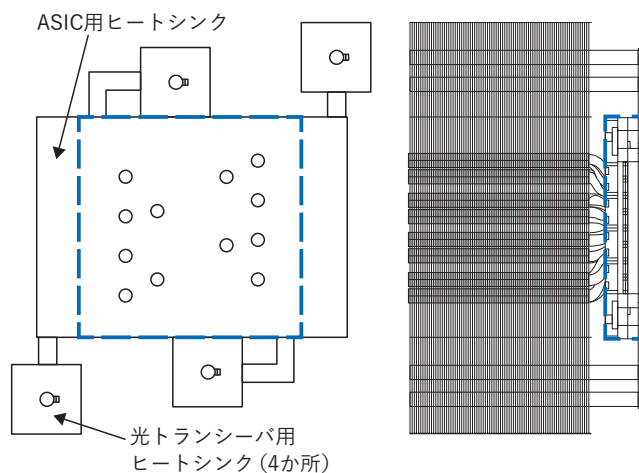


図2 4Uユニットヒートシンク(破線がドータボードサイズ)
4U unit heatsink (the daughter board is surrounded by a dotted line).

光トランシーバは、スイッチASICを囲むように直線状に配列され、各デバイスの発熱量は比較的小さい。この配置を考慮し、放熱フィンにはスイッチASIC用ヒートシンクの周囲に配置されることから、各辺にヒートパイプを用いたヒートシンクを配置する構成が適切であると判断した。受熱部では、光トランシーバの底面側にヒートパイプを配置し、放熱部では、設置場所をスイッチASIC用のヒートシンクと干渉しない位置までヒートパイプを延伸して垂直に立て、そこに圧入したフィンを設置する構成とした。

この構成で熱解析を実施した結果、環境温度40℃で風速6 m/sの条件下において、スイッチASICの温度は69℃、光トランシーバは64℃となることが確認された。

本解析の結果、スイッチASICは目標温度を下回ることが示されたものの、以下の課題が明らかとなった。

①受熱部の熱抵抗低減の限界

熱源サイズが小さいため、これ以上の受熱部熱抵抗の大幅な低減は困難であり、フィン面積を増加させても光トランシーバに対して目標温度50℃以下の達成が難しい。

②必要風量の確保が困難

風速6 m/sを実現するためには、約12 m³/minの風量が必要となるが、ユニット内でこの風量を確保することは、現実的ではない。

③サイズ・重量の制約

ドータボードに搭載可能なサイズや重量を実現することが困難で、実装性に課題がある。

以上の理由から、本研究では空冷方式の採用は困難であると判断し、水冷方式の冷却構造の検討へと方針を切り替えた。

3. 水冷冷却の検討

水冷冷却方式のサーバーラックでは、スイッチASICや光トランシーバを冷却する系統(二次冷却水)と、吸収した熱を建屋外へ放出する系統(一次冷却水)は、CDU(Coolant Distribution Unit)を介して分離されている。CDUを用いることで、一次側の高圧・大流量の影響が二次側に及ぼすことを防ぎつつ、ユニット単位で流量や温度を柔軟に制御することが可能となる。また、

二次側において機器交換などの作業が発生した場合でも、一次側に配置された広範囲な設備へ影響を与えることなく、局所的な対応が可能である。さらに、二次冷却水には一次冷却水と異なる冷媒を使用することもでき、冷却方式の自由度が高い。

以上の理由から、本研究では、ラック内においてスイッチASICおよび光トランシーバをそれぞれ独立してCDUに接続し、各機器に対して最適な流量条件を個別に設定可能であることを前提として検討を行った。

図3にスイッチASIC用のコールドプレートを示す。本コールドプレートは水密構造を確保するため、ベースとカバーの間にOリングを挟み、ネジにより締結する構造とした。ベースは発熱部に直接接触する部位で、内部には冷媒との効率的な熱交換を行うためのフィンを設けている。材質は高い熱伝導率を有する純銅を採用した。一方、カバーについては機械的強度を重視しSUS材を用いている。

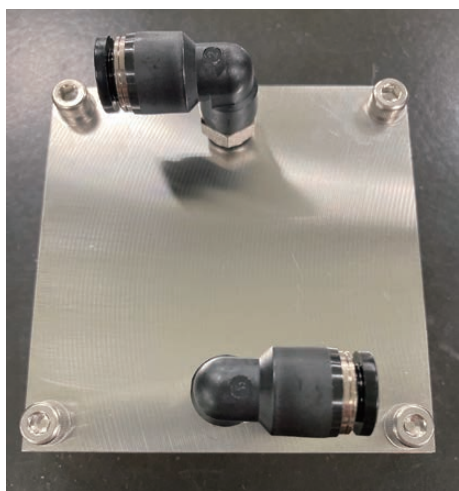


図3 スwitch ASIC用コールドプレート
Cold plate for switch ASIC.

冷却性能を最適化するうえで、流路設計は極めて重要である。スイッチASIC用コールドプレートのベースにおいて、内容積全体にフィンを設置して冷媒との熱交換面積を増大させた場合、冷媒が流入部近傍のフィン間に偏って流れる偏流が生じやすく、フィン全体で効率的な熱交換が行えなくなるおそれがある。そのため、流入部および流出部には適切な空間を確保し、全ての流路に対して均一な流量が供給されるよう配慮する必要がある。一方で、空間の確保はフィン面積の減少を伴うため、熱交換性能とのバランスを取ることが求められる。

また、フィン形状の設計も冷却性能に大きく影響する。水冷は空冷と比較して熱伝達率が約2桁高く、優れた熱交換性能を有する一方で、熱源に近いフィン根本からフィン先端にかけて急激な温度低下が生じやすい。この結果、フィン先端では十分な熱交換が行われない場合がある。したがって、水冷では空冷以上にフィンの厚みと高さの最適化が重要となる。これらの点を考慮し、熱解析によって温度分布を確認しながら設計することで、本研究ではコールドプレートの性能最適化を図っている。

図4に光トランシーバ用コールドプレートを示す。光トランシーバはスイッチASICを四方から取り囲むため、この配置に合わせて水路は矩形管状とし、流入口および流出口を対角位置

にそれぞれ1か所ずつ設けた。本構成では、2辺ずつの流路に冷媒が並列に流れる構成となる。流路を一周させる構成と比較すると、流入口から流出口までの流路長が約半分となり、流路幅は2倍となるため、圧力損失の低減が可能である。この設計により、必要な流量をより少ないポンプ電力で確保でき、システム全体のエネルギー効率向上が期待できる。

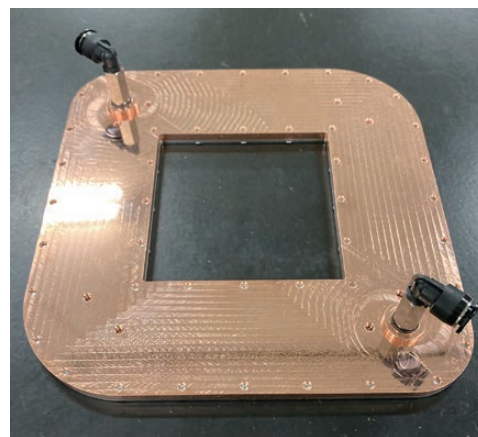


図4 光トランシーバ用コールドプレート
Cold plate for optical transceiver.

4. 評価システムの構築

4.1 スwitch ASIC発熱の模擬方式

スイッチASICを模擬するため、55 mm角の発熱面を持つヒータブロックを用いた。本ヒータブロックは純銅製であり、内部にセラミックヒータを組み込んだ構造とした。また、側面から発熱面中央に向けて孔を設け、シース型熱電対を挿入することで、ブロック温度を測定可能としている。

ヒータブロックは、ドータボードを模した基板上にネジ止め固定し、セラミックヒータを基板とヒータブロックの間に挟み込む形で設置した。コールドプレートは熱伝導グリスを介して取り付けるが、単純にネジのみで基板に締結した場合、締結荷重が不均一となり、ヒータ面の1辺を支点として傾くことで、熱的接触不良が生じるおそれがある。

そこで、ネジとコールドプレートの間にバネを介在させ、バネを所定の長さまで圧縮することで一定の締結荷重を確保した。この構造により、荷重中心が確実にヒータ発熱面内に位置し、安定した熱的接触を実現している。さらに、基板裏面には金属製プレートを設置し、ネジをこのプレートに固定することで、締結時に生じる応力による基板の破損を防止している。

4.2 光トランシーバ発熱の模擬方式

光トランシーバは、一列あたり8個が直線状に整列する構成を想定した。基本的には、各トランシーバの発熱を模擬するため、それぞれに対応するセラミックヒータを熱源として配置している。一方、前述のとおり、冷媒は4辺を2列で流れる流路構成となっており、各列における冷媒温度分布は、流入口から流出口に向かって類似した傾向を示すことが予想される。

また、流入口と流出口を入れ替えることで、同一の辺においても、温度分布を上流側または下流側に設定することが可能である。この特性を利用し、評価システムでは1辺のみについて、

光トランシーバごとの温度分布を詳細に測定できる設計とした。

一方、残り3辺については、一列分の光トランシーバの発熱をロードヒーター本で再現する簡易構成を採用した。これにより、実験系を簡素化しつつ、全トランシーバにわたる温度分布の把握を可能としている。

4.3 測定評価系構成

測定評価系の概略図を図5に、ドータボード部の構成を図6に示す。冷媒には純水を使用し、チラーにより温度管理された冷媒を各コールドプレートへ供給する構成とした。冷媒供給温度は30℃に設定し、空調管理された環境下で結露が発生しない条件とした。また、各コールドプレートへの供給配管には流量計を設置し、それぞれのコールドプレートに供給される流量を個別に調整可能としている。

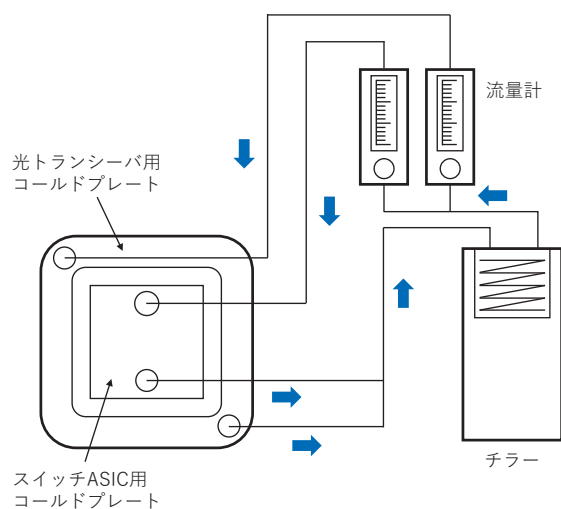


図5 測定評価系概略図
Schematic of evaluation system.

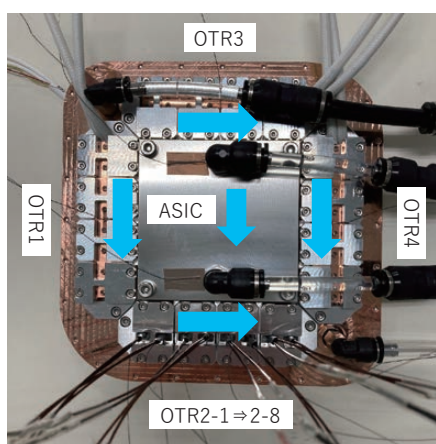


図6 ドータボード部
Evaluation system for daughter board.

また、測定評価系における冷却能力を最大限に確保するため、以下の点を考慮して設計を行った。

- ・配管長を可能な限り短縮すること
- ・配管径を拡大し、圧力損失を低減すること
- ・評価システムをチラー内ポンプと同じ高さに設置すること
- ・配管の局所的な屈曲を避け、穏やかな曲率を維持すること

加えて、測定開始前には冷媒を一定時間循環させ、特にコールドプレート内に残留する空気を十分に排出することで、安定した冷却性能が得られるようにした。

4.4 評価結果

試験条件を表1に示す。スイッチASICに対する試験結果を図7に示す。流量1.0 L/minの条件において、スイッチASICの温度は70℃以下に抑えられており、比較的低流量でも十分な冷却能力を有することが確認された。さらに、これらの測定結果は設計段階で実施した熱解析結果とも良好に一致しており、本コールドプレートが設計どおりの熱性能を発揮していることが示された。

表1 スイッチASIC試験結果
Test results of switch ASIC.

流量 (L/min)	中心温度 (℃)	解析値 (℃)
2	59.9	58.1
1	68.2	66.8
0.5	80.7	79.3

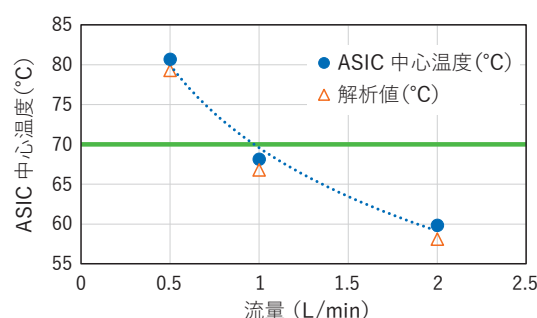


図7 スイッチASIC試験結果
Test results of switch ASIC.

表2および図8に、光トランシーバの試験結果を示す。流量0.4 L/minの条件において、ケース最高温度は50℃となっており、光トランシーバについても低流量で十分な冷却が可能であることが確認された。

表2 光トランシーバ試験結果
Test results of optical transceiver.

流量 (L/min)	最高温度 (℃)
1	45.3
0.5	48.2
0.25	52.8

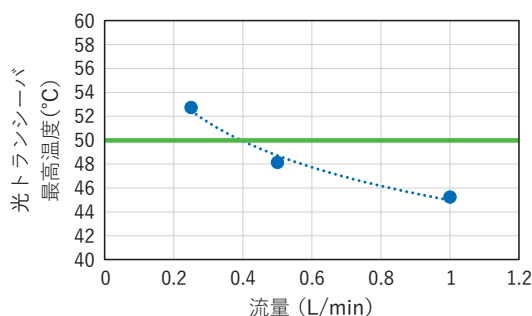


図8 光トランシーバ試験結果
Test results of optical transceiver.

表3 光トランシーバの温度(下流側測定結果, 冷媒の流れ2-1⇒2-8)
Individual temperatures of the optical transceiver (downstream-side measurement results, coolant flow from 2-1 to 2-8).

OTR流量 (L/min)	OTR inlet	OTR 1	OTR 2-1	OTR 2-2	OTR 2-3	OTR 2-4	OTR 2-5	OTR 2-6	OTR 2-7	OTR 2-8	OTR 3	OTR 4	OTR outlet
1	29.9	38.9	41.0	41.6	41.6	43.8	42.4	45.3	42.1	43.5	40.3	43.2	34.3
0.5	30.6	40.7	43.6	44.1	44.3	46.5	45.3	48.2	45.1	46.5	42.2	46.3	37.6
0.25	31.6	43.4	47.5	48.1	48.5	50.9	49.8	52.8	49.8	51.4	44.9	51.0	42.8

光トランシーバ部の個別温度測定結果を**表3**に示す。0.5 L/minの条件では、すべての熱源温度が50℃以下に抑えられており、OTR2-1から2-8までの温度差は5℃以下であった。ただし、温度分布の傾向については留意が必要である。冷媒は流路を流れながら各部の熱を吸収するため、冷媒温度は下流に向かって単調に上昇し、それに伴い発熱体温度も同様に上昇することが想定される。しかし、本結果では、OTR2-1からCPO2-8にかけて、必ずしも単調な温度上昇は確認されなかった。

これは、中央部に位置する発熱源が冷媒温度の影響に加え、両側に隣接する発熱源からの熱的干渉を受けるのに対し、両端に位置する発熱源(OTR 2-1および OTR 2-8)は隣接する発熱源が片側のみであるため、その影響が相対的に小さく、温度上昇が抑制されたためである。この結果、最も下流に位置するOTR 2-8が必ずしも最高温度とはならない。

なお、コールドプレートの流入口と流出口における冷媒の温度差は、流量0.5 L/min時に7℃であり、水の比熱容量および流量から計算される理論的な温度上昇と一致することから、本測定結果の妥当性が確認された。

最後に光トランシーバに近接配置されているスイッチASICの発熱影響を評価するため、スイッチASICを停止した状態との平均温度を比較した結果を**表4**に示す。その結果、スイッチASICの作動有無による光トランシーバの温度差は1℃以下であり、発熱の影響は極めて限定的であることが確認された。

表4 スイッチASICの発熱の有無による光トランシーバの温度差
Temperature difference of the optical transceiver with/without switch-ASIC heating.

流量 (L/min)	光トランシーバ平均温差 (℃)
1	0.0
0.5	0.2
0.25	0.8

5. おわりに

本研究では、50-Gbaud PAM4×16チャンネルの超小型光トランシーバおよび、51.2 Tb/sの帯域幅を有するスイッチASICを想定し、冷却構造の設計および評価を行った。その結果、スイッチASICと光トランシーバを分離して水冷冷却を行う構成とすることで、現実的な流量条件で十分な冷却性能を確保できることを確認した。また、スイッチASICの発熱が光トランシーバの温度に与える影響は極めて限定的であることも明らかとなった。

本研究で得られた知見が、次世代データセンタにおける高効率冷却技術の発展に寄与することを期待する。

謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)による委託研究(JPJ012368C00101)の支援を受けて得られたものである。ここに記して、NICTならびに共同研究者各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 那須秀行: “Co-packaged opticsへ向けたポリマー光導波路技術の新展開,” エレクトロニクス実装学会誌, 25巻, 2号, p.151, 2022.
- 2) 吉田航, 長島和哉, 西崎健将, 米山翔, 那須秀行: “Co-Packaged Optics用超小型VCSEL トランシーバと高密度電気プラグブルインターフェースを用いた評価ステーションの開発”, 古河電工時報, 第144号, pp. 8-14, 2024.
- 3) RAZDAN, Sandeep; TRAVERSO, Matt; TORZA, Anthony. Co-Packaged Optics Integration for Hyperscale Networking. IEEE Electronics Packaging Society eNews, August 2023.
- 4) 古河電工, ニュースリリース “データセンタ向け水冷モジュール製造工場の拡張(2025年11月10日)”
https://www.furukawaelectric.com/release/2025/fun_20251110.html (参照日: 2026年1月23日)
- 5) CPO Transceiver Collaboration, “Co-Packaged Optics Assembly Guidance Document”, v.1.0, May 2020.
- 6) K. Takahashi, K. Miura, H. Nakajima, N. Soya, S. Torimitsu, Y. Ishige, K. Nagashima, H. Nasu, and S. Fukutomi, “Design of CPO Daughter Board with FPGA and 25-Gbaud x 16-Channel Ultra-Compact Optical Transceivers”, ICSJ2022, 01-04, Nov. 2022.
- 7) 古河電工, カタログ “トータルサーマルソリューション 放熱・冷却部品” <https://www.furukawaelectric.com/product/catalogue/pdf/thermal.pdf> (参照日: 2026年1月23日)