

# プロジェクト研究開発成果詳細説明

## システム化技術

2022年5月17日

技術研究組合光電子融合基盤技術研究所



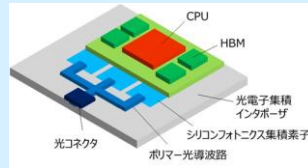
## 2-2システム化技術

### ②光エレクトロニクス実装システム化技術の開発

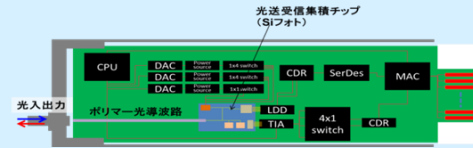
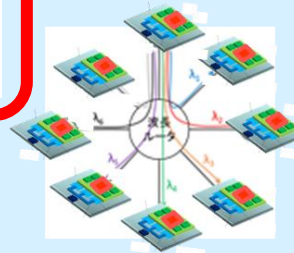
#### 2-2-1 情報処理システム化技術

#### 2-2-2 情報通信システム化技術

光電子融合  
サーバボード



ラックスケール並列分散システム

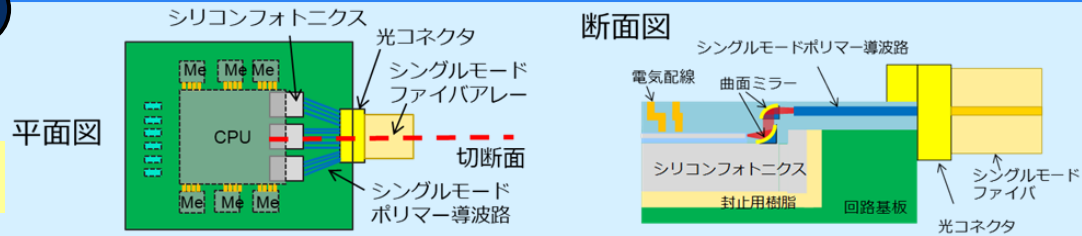


2-3

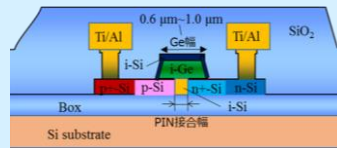
国際標準化

## 2-1デバイス・実装技術

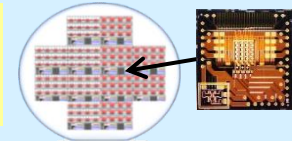
#### 2-1-3 光実装技術



#### 2-1-1 デバイス技術



#### 2-1-2集積化 プロセス技術



### ①光エレクトロニクス 実装基盤技術の開発

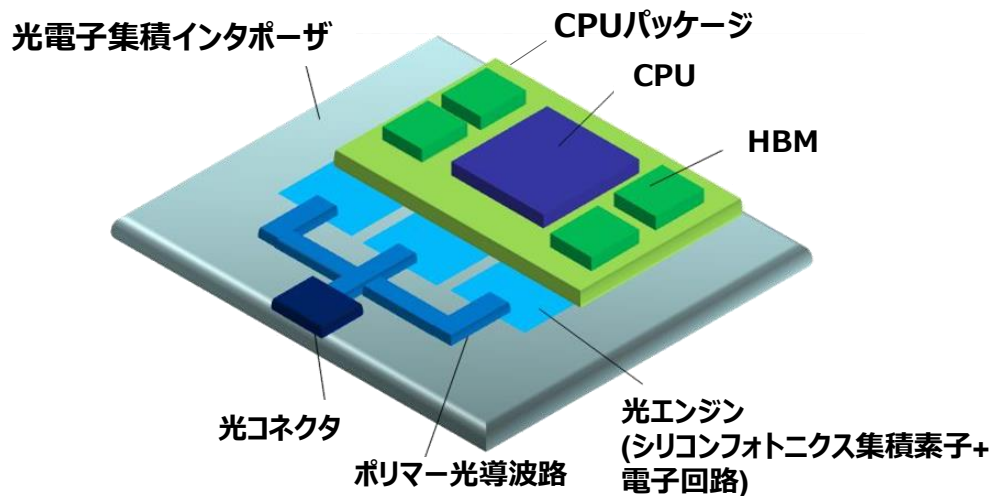
### 1.革新的デバイス技術

### ③成果普及

## 2021年度最終目標：

光電子融合サーバボードのプロトタイプを試作して良好な伝送品質を持つ10Tbps伝送可能なCPU間インターコネクットのシステム化技術確立する。

### 光電子融合サーバボード



シリコンフォトニクス素子の伝送容量

112Gbps/レーン×16波長多重  
×送受(2)  
⇒ **3.6Tbps**

CPU当たり3個のシリコンフォトニクス素子

3.6Tbps × 3 ⇒ **10Tbps**

## (2) 開発計画

公開

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度上期	2021年度下期
光電子融合サーバボード	サーバボード基本構造設計・動作実証	10Tbpsに向けたプロトタイプ構造設計		10Tbpsに向けたプロトタイプ動作実証	
			基本構造の改良試作	システム搭載IFの決定	
シリフォト集積素子実装技術	集積素子実装技術確立		10Tbpsに向けた高密度実装構造の設計	10Tbpsに向けた高密度実装構造の確立	
高密度電気配線技術	電気配線基本設計		10Tbpsに向けた高密度電気配線構造の設計	10Tbpsに向けた高密度電気配線構造の確立	
冷却技術	冷却技術確立		10Tbpsサーバボード冷却構造の設計	10Tbpsサーバボード冷却技術の実証	
光配線技術	光配線技術確立		光配線反射抑制構造の設計	反射抑制技術の確立	

各技術成果を集約

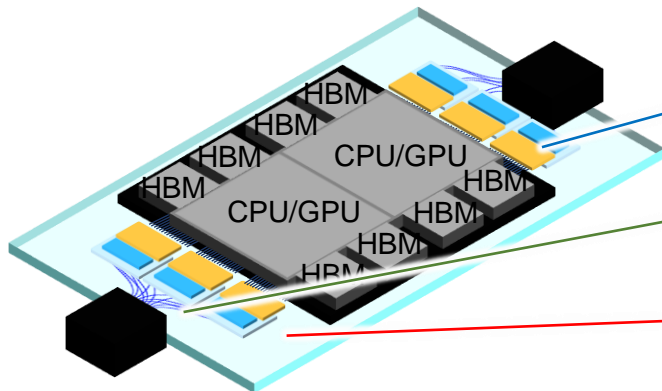
### (3) アプローチ、特徴技術

開発課題（10 Tbps伝送可能な光電子融合サーバボード実現に向けて）

1. CPU近くに配置しても安定に動作するWDM合分波器技術
2. 光配線の高密度形成と損失や反射が小さい良好な光信号品質の確保
3. 112 Gbps高速電気伝送技術の確立
4. 既存のサーバシステムへ実装可能な構造

#### アプローチ

1. フィードバック制御を用いた温度変動耐性が高い多波長WDMの適用
2. ガラス基板上へのポリマー導波路と低損失光コネクタ技術の開発
3. 高密度実装と高速伝送を両立するガラスインターポーザの利用
4. 既存のサーバシステムに光電子融合サーバボードを実装して動作検証



光電子融合サーバボード

課題1. WDM合分波器適用と高精度制御  
⇒アプローチ1

課題2. 良好な光信号品質の確保  
⇒アプローチ2

課題3. 112 Gbps電気信号の品質確保  
⇒アプローチ3

課題4. 既存システムへの実装可能な構造  
⇒アプローチ4



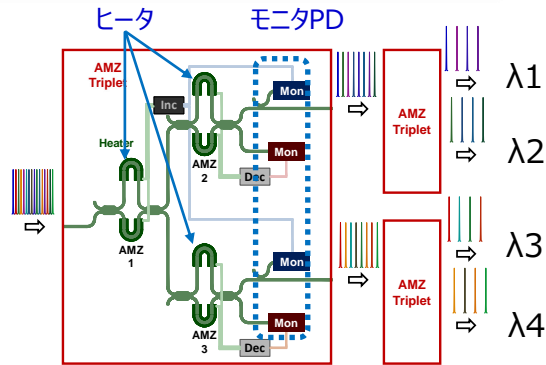
既存サーバ

# (4) 成果 I (WDM技術)

## ◆ 光電子融合サーバボード実現に向け自律制御WDM技術確立

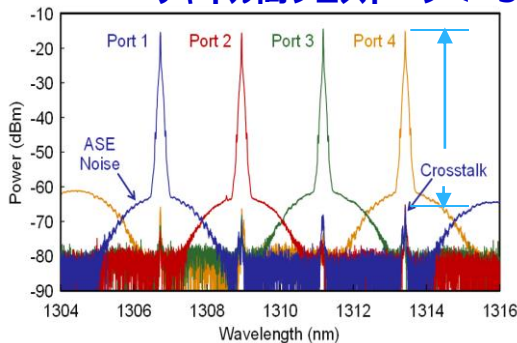
- ・ヒータとモニタPDのフィードバック制御による環境温度無依存シリフォト合分波技術
    - ⇒ 製造ばらつき、擾乱を補償し、超低雑音（クロストーク<-50dB）を実現
    - ⇒ 4波長WDM光エンジンを試作し、トランシーバレベルでのWDM動作実証
- サーバ近傍で動作可能な高い温度変動耐性を実証**

### 自律制御シリコンフォトニクス分波器



4波長分波器の構成

チャンネル間クロストーク< -50dB

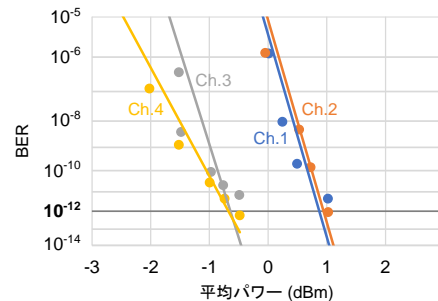
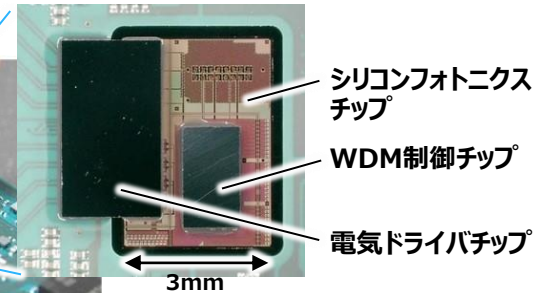
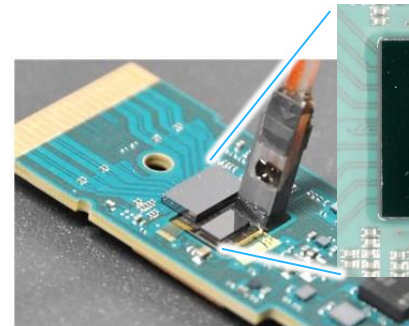


4波長透過特性

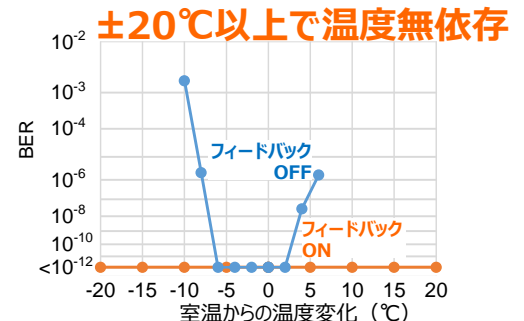
OFC2021  
ECOC2021  
で成果発表

### 4波WDM光エンジン

WDM光エンジン  
試作



WDM25Gbpsエラーフリー動作



WDMフィードバック制御の効果

## (4) 成果Ⅱ (低損失光配線技術)

## ◆ ガラス基板上へのシングルモード光配線技術を確立

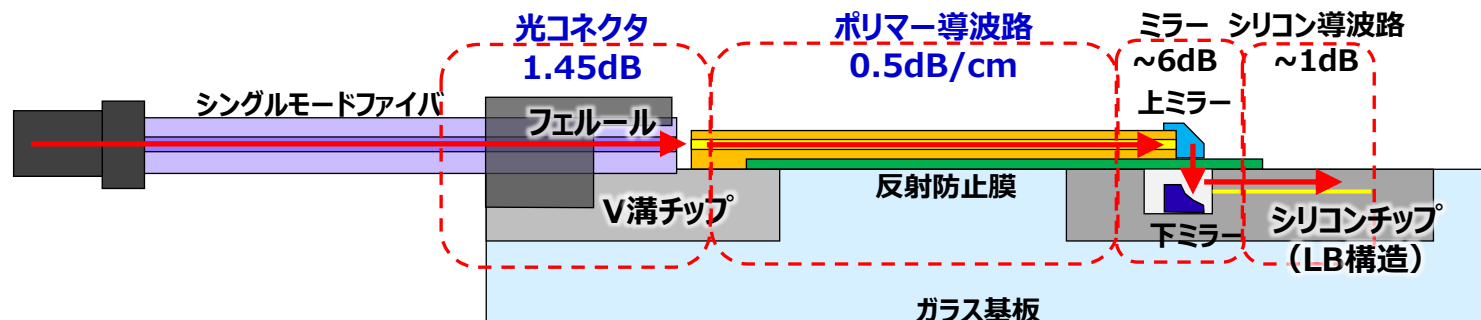
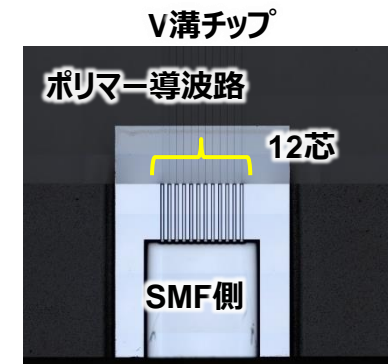
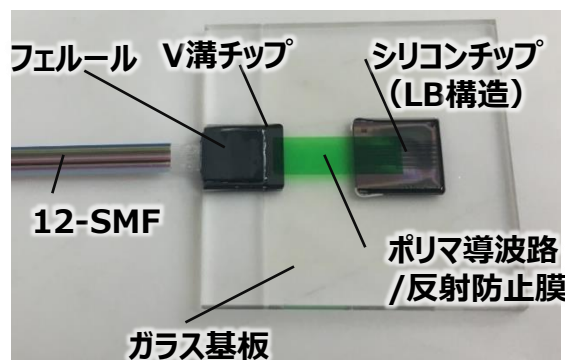
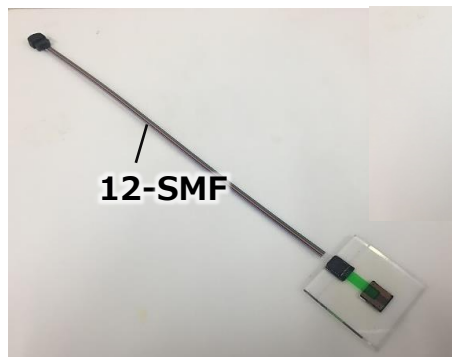
・ガラス基板上にポリマー導波路と上下ミラーを形成。V溝を有する光コネクタと接続したループバック構造の試作

⇒ ポリマー導波路：伝搬損失 $<0.5\text{dB/cm}$

⇒ 温度無依存12芯光コネクタ：平均損失 $<1.45\text{dB}$ 、温度変動 $<0.005\text{dB}/^\circ\text{C}$

ガラス基板上的良好な光信号伝送特性の確保

Photonics West 2022発表



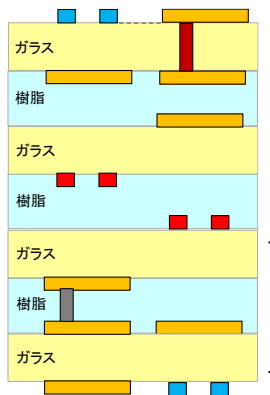
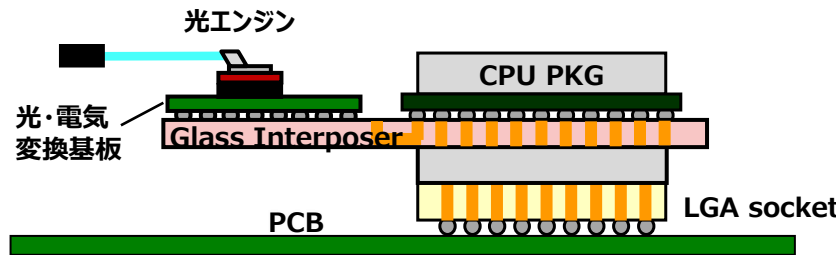


# (4) 成果Ⅲ (ガラスインターポータ技術の開発)

公開

- ◆ ガラス基板による高速電気伝送可能なインターポータ技術を確立
    - ・ ガラス基板上に光エンジンと富岳採用CPUを近接実装する構造を決定
    - ・ 実際にインターポータとして4層ガラス基板 (Cu配線は8層) を試作
      - ⇒ 反りが小さく、剛性に優れたガラス基板によるマルチチップ実装を実現
      - ⇒ 樹脂基板より低損失で、超高速伝送 (112Gbps) が可能なことを実証
- ### 高密度マルチチップ実装と高速伝送特性を両立

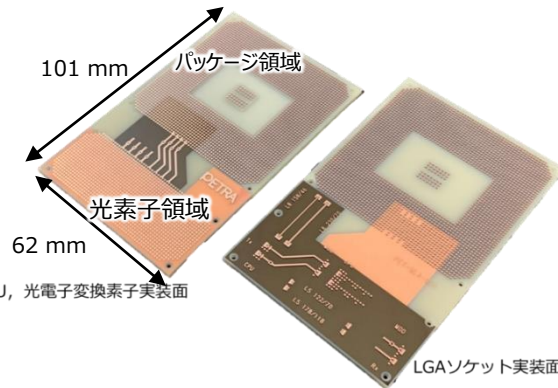
ガラス基板を用いた  
インターポータ構造



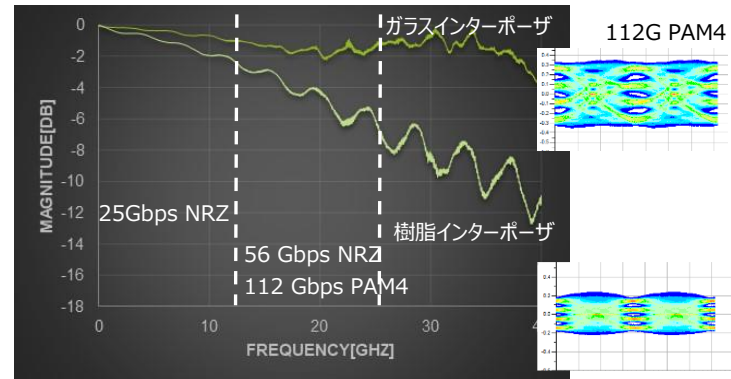
ガラス基板の層構造

サーバ実証用

高速動作実証用



試作したガラス基板インターポータ

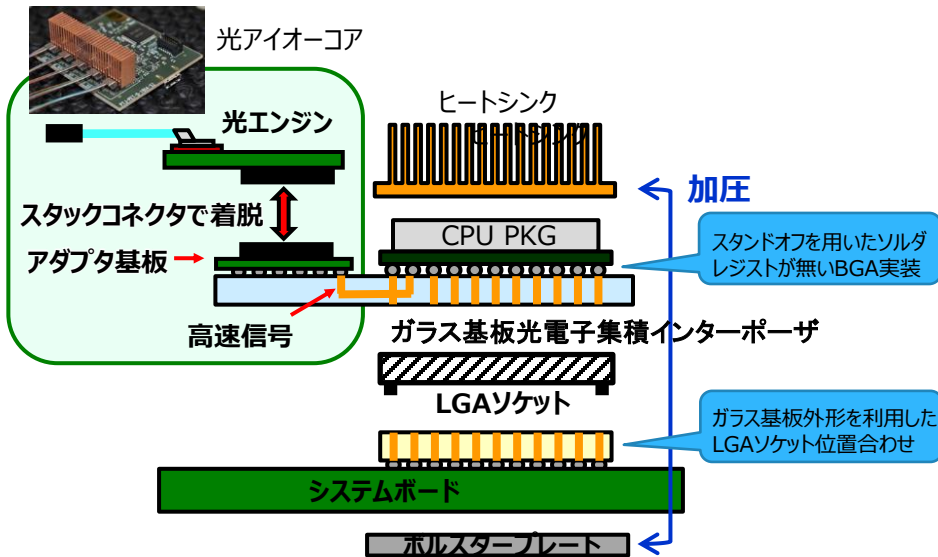


ガラス基板の112Gbps高速電気伝送特性の確認

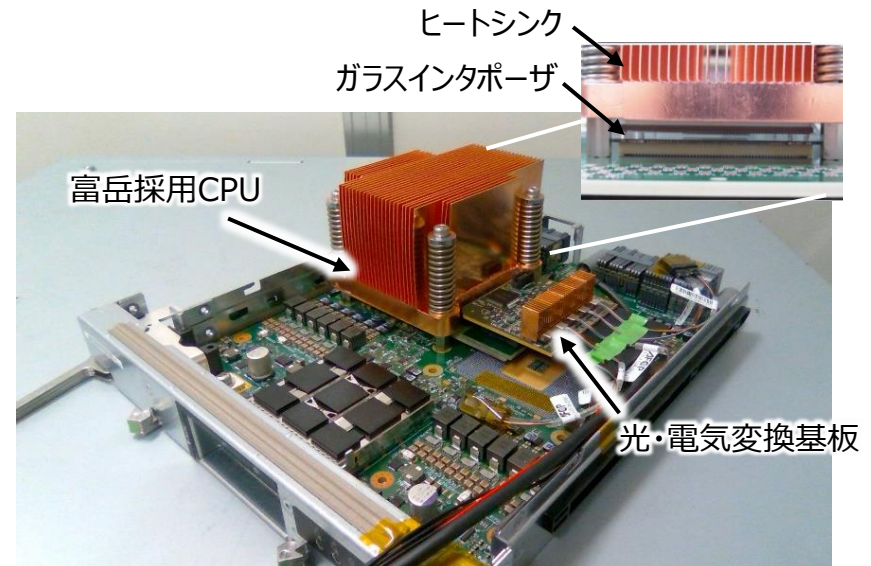
## ◆ 光電子融合サーバボードの高密度実装技術を確立

- ・ガラス基板の採用により、光エンジンと富岳採用CPU実装時の反りを解消  
⇒ CPUと光エンジン (100Gbps=25G×4ch) 5台の近接配置を達成  
→ 距離~2cm、Near-packaged Optics技術の実現
- ・LGAソケットを介したサーバボードへの実装  
⇒ ガラス基板外形を利用した高精度アライメント、LGAで応力を吸収  
⇒ ヒートシンクとボルスタプレートにより、冷却とLGA加圧の兼用構造を開発

## 既存サーバへの実装技術を確立



光電子融合サーバボードの実装



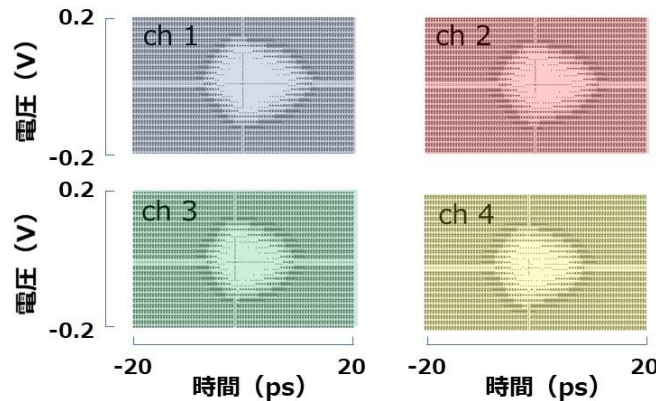
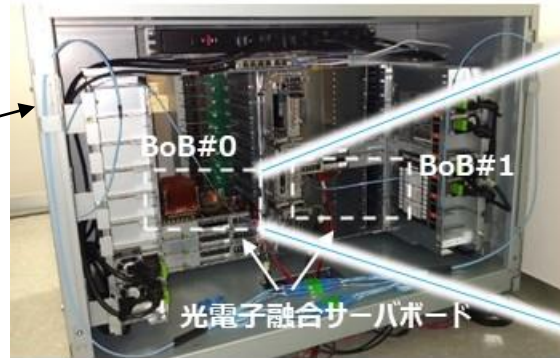
試作した光電子融合サーバボード

# (4) 成果 V (サーバシステムによる光電子融合サーバボード 伝送)

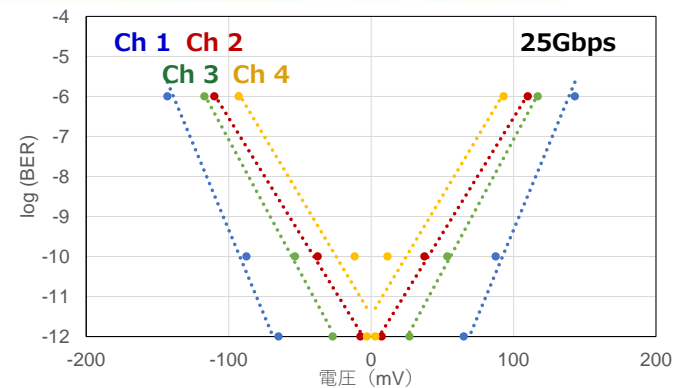
## ◆ 光電子融合サーバボードによるCPU間インターコネクトを実証

- ・2台の光電子融合サーバボードを評価用サーバシステムのシェルフに実装
- ・富岳採用CPUからの100Gbps (25G×4ch) 電気信号を光信号に変換し、対向疎通を実現

評価用サーバシステムのシェルフに光電子融合サーバボードを実装



富岳採用CPU間100Gbpsインターコネクト動作確認  
(BER測定によるアイ開口評価)



BERの振幅電圧依存性

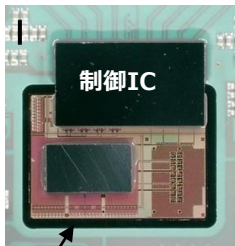
# (4) 成果 VI (10Tbps動作に向けた展開)

◆ 温度無依存WDM技術による多波長化スケーラビリティ実証

- ・4波、16波、32波、64波WDM分波器を試作し、実測とシミュレーションで動作確認
- ・112Gbps×16波WDMチップをガラス基板光電子集積インターポーザ上にマルチチップ実装し10Tbps伝送が実現

## 4波分波器

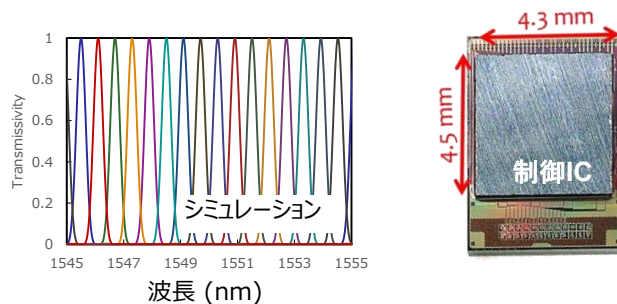
モニタ受光器と制御ICによる自動制御型WDM合分波チップの開発



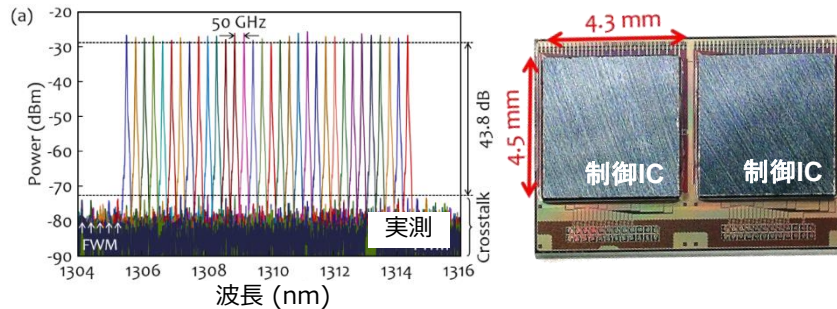
シリフトWDMチップ (5mm x 7mm)

OFC2021、ECOC2021発表

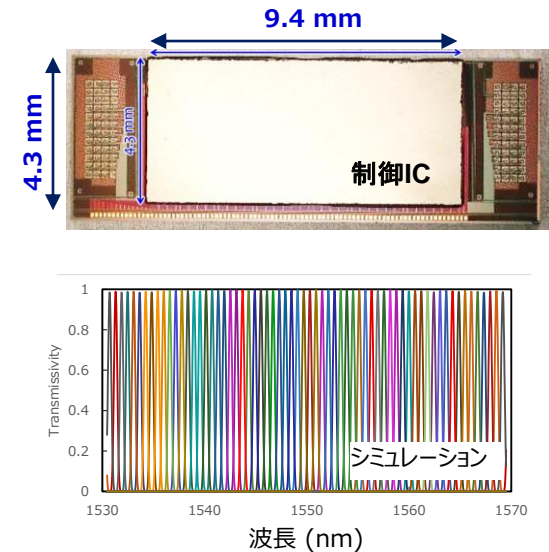
## 16波長分波器



## 32波長分波器



## 64波分波器



-44dB以下の超低クロストークを実現  
OFC2022ポストデッドライン論文報告

## (5) 目標の達成度

公開

テーマ	2021年度末最終目標	主な成果状況	達成度
2.2.2.2 (f-1)①光電子融合サーバボード	光電子融合サーバボードのプロトタイプを試作して良好な伝送品質を持つ10Tbps伝送可能なCPU間インターコネクットのシステム化技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"><li>・高速特性と剛性に優れたガラス基板と光エンジンを組み合わせた集積光インターポーザを搭載した光電子融合サーバボードを試作、サーバ試作機に実装してサーバ間100Gbps伝送を実現した。</li><li>・環境温度変化の影響を受けない自律制御型波長多重フィルタ技術を開発し、16波長動作により光電子融合サーバボードの10Tbps動作が可能であることを示した。 。波長多重フィルタは64波動作までのスケールビリティを確認した。</li></ul>	○



# (1) 開発目標

公開

## 2021年度最終目標：

消費電力の少ない光電子集積インターポーザ技術と波長多重技術を用いた接続技術を組み合わせた光電子融合サーバボードを試作し、試作機とシミュレーションを用いてサーバ電力量を30%削減可能であることを示す。

並列分散処理  
アプリケーション

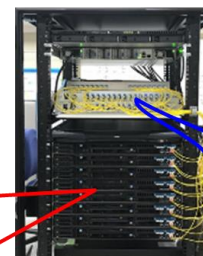
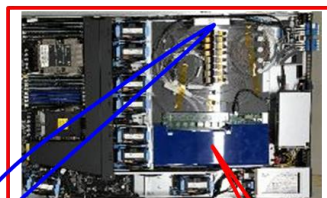
```
#define LEN 1024 //Default number of data to comm.
#define MPI_TYPE MPI_DOUBLE //MPI Data type
typedef double c_datatype; //C Data typ
/*#define MPI_TYPE MPI_INT //MPI Data type
typedef int c_datatype; //C Data type*/

void OptMPI_Allreduce(c_datatype *buff_s, c_datatype *buff_r,
MPI_Datatype my_type, MPI_Op my_op, MPI_C
{
int size, rank, i, n_block, i_scat, l_req, r_rank, s_rank, f_disp;
MPI_Comm_rank(my_world, &rank);
MPI_Comm_size(my_world, &size); // "size" is the number o
MPI_Request *r_req = malloc(sizeof(MPI_Request) * size);
MPI_Request *s_req = malloc(sizeof(MPI_Request) * size);
```



サーバ・システム

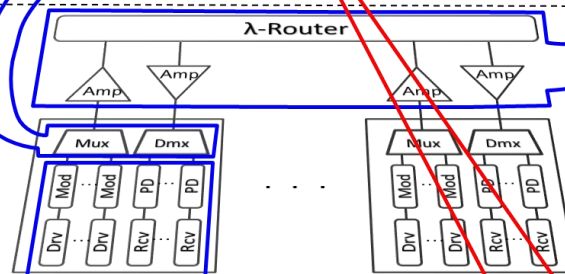
リンク&ルーティング  
(レイヤ2&3)



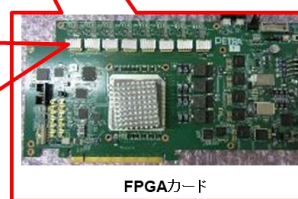
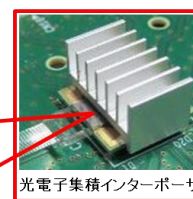
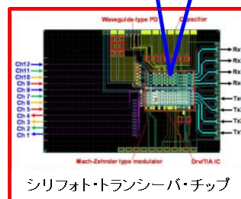
光電子融合サーバボード

ラックサーバ

波長多重ルーティング  
ネットワーク  
(レイヤ1)



デバイス



## (2) 開発計画

公開

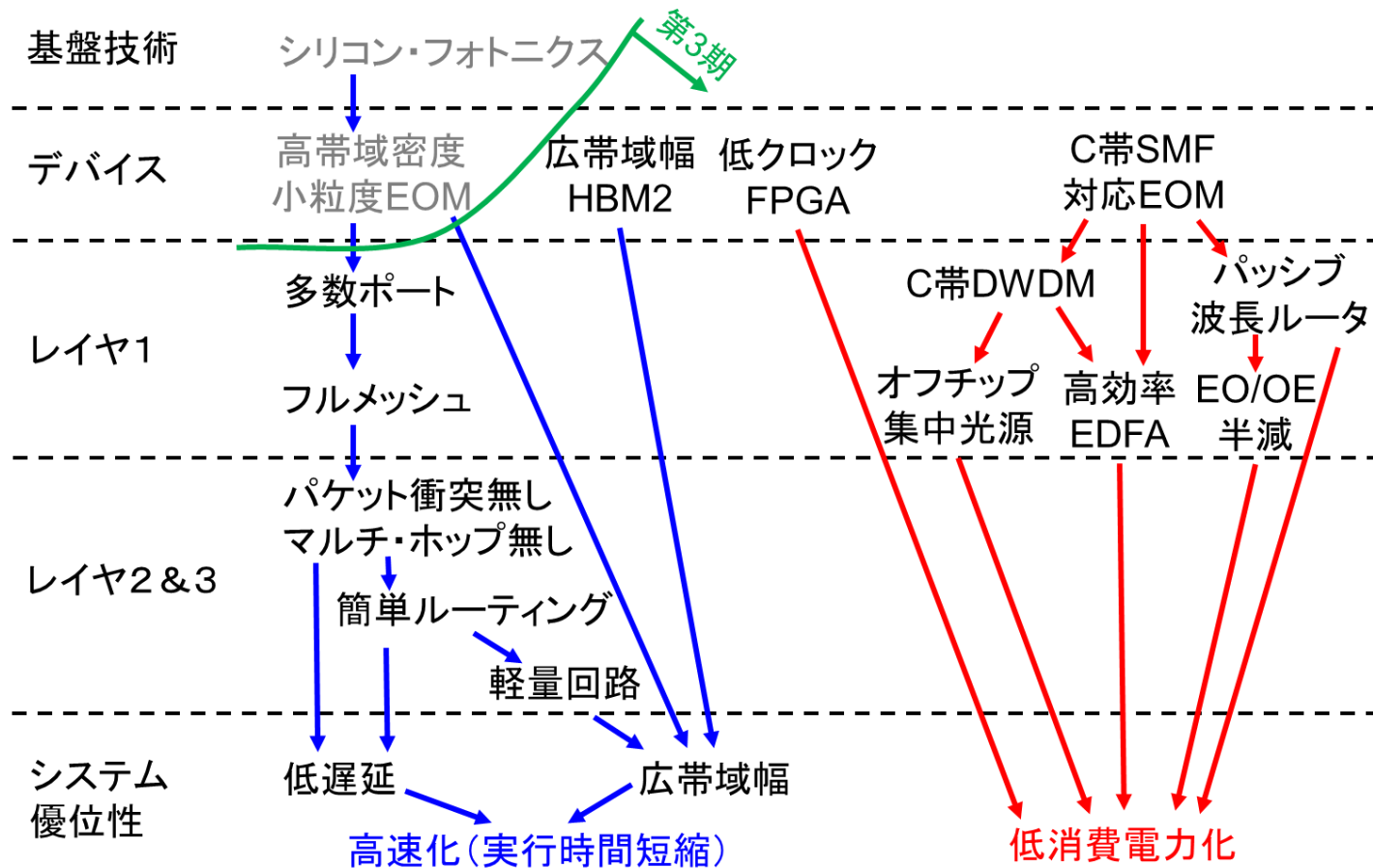
	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度上期	2021年度下期
サーバ／アプリケーション	ベンチマーク・アプリ選定	アプリ高速化	デモ・アプリ絞込み	デモ・アプリ実装	デモ実施
	並列分散処理 検証環境構築	アルゴリズム改良	ライブラリ実装・評価		
ネットワーク・アーキテクチャ (レイヤ2 & 3)	FPGAカード1次設計	FPGAカード1次試作・評価	FPGAカード2次設計	FPGAカード2次試作・評価	
	NW制御仕様検討	分散スイッチ設計	集合通信動作検証	集合通信高速化	
波長ルーティング・ネットワーク (レイヤ1)	シミュレーション環境構築	光リンク設計	光リンク課題抽出	波長多重動作検証	
デバイス	デバイス仕様検討	デバイス課題抽出	光集積回路試作評価	ルータボード試作評価	



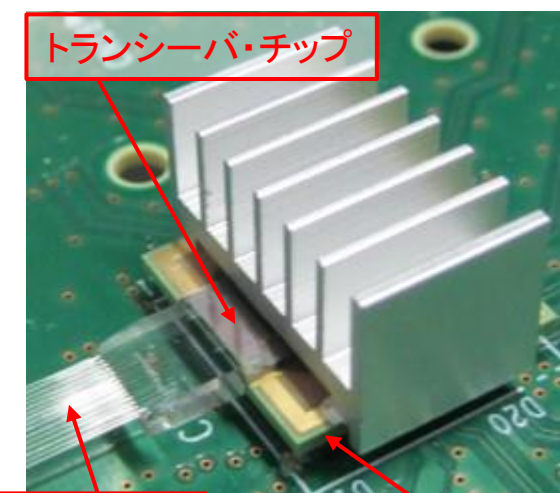
### (3) アプローチ、特徴技術

公開

- ◆ 目標 : サーバの消費電力量 ( 電力 × 時間 ) の 30% 削減
- ◆ アプローチ : 基盤技術からシステムまでの協調設計により、ハードウェアの低消費電力化とアプリケーションの実行時間短縮を同時に実現し、ワークロード単位の消費電力量を削減する



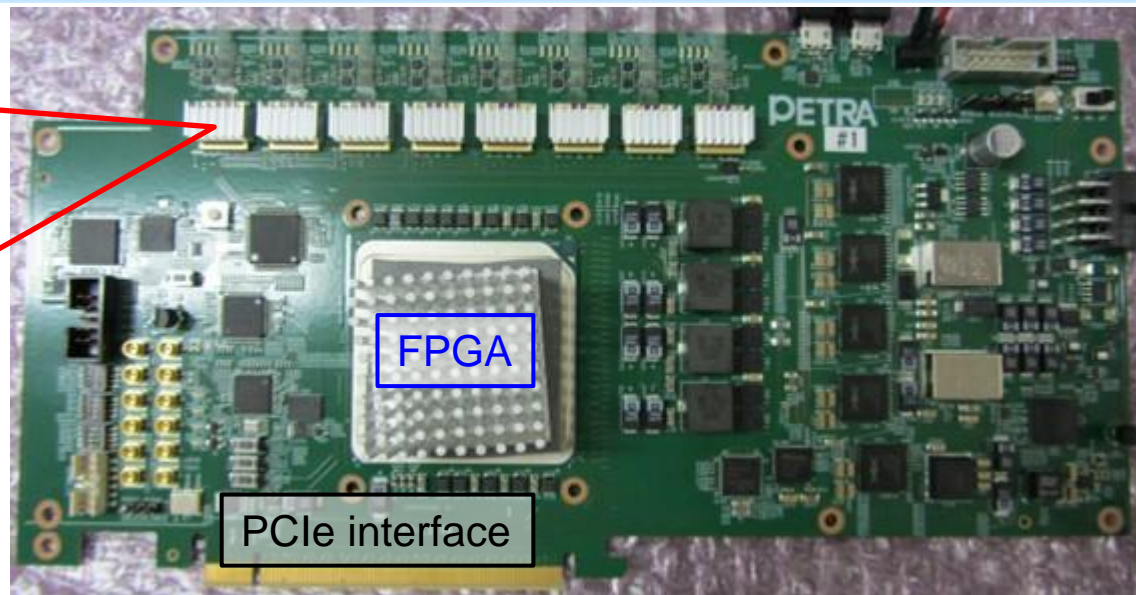
トランシーバ・チップ



12芯SMF

インターポーザ基板

光電子集積インターポーザ



カスタムFPGAカード

## ■ Embedded Optical Module (EOM)

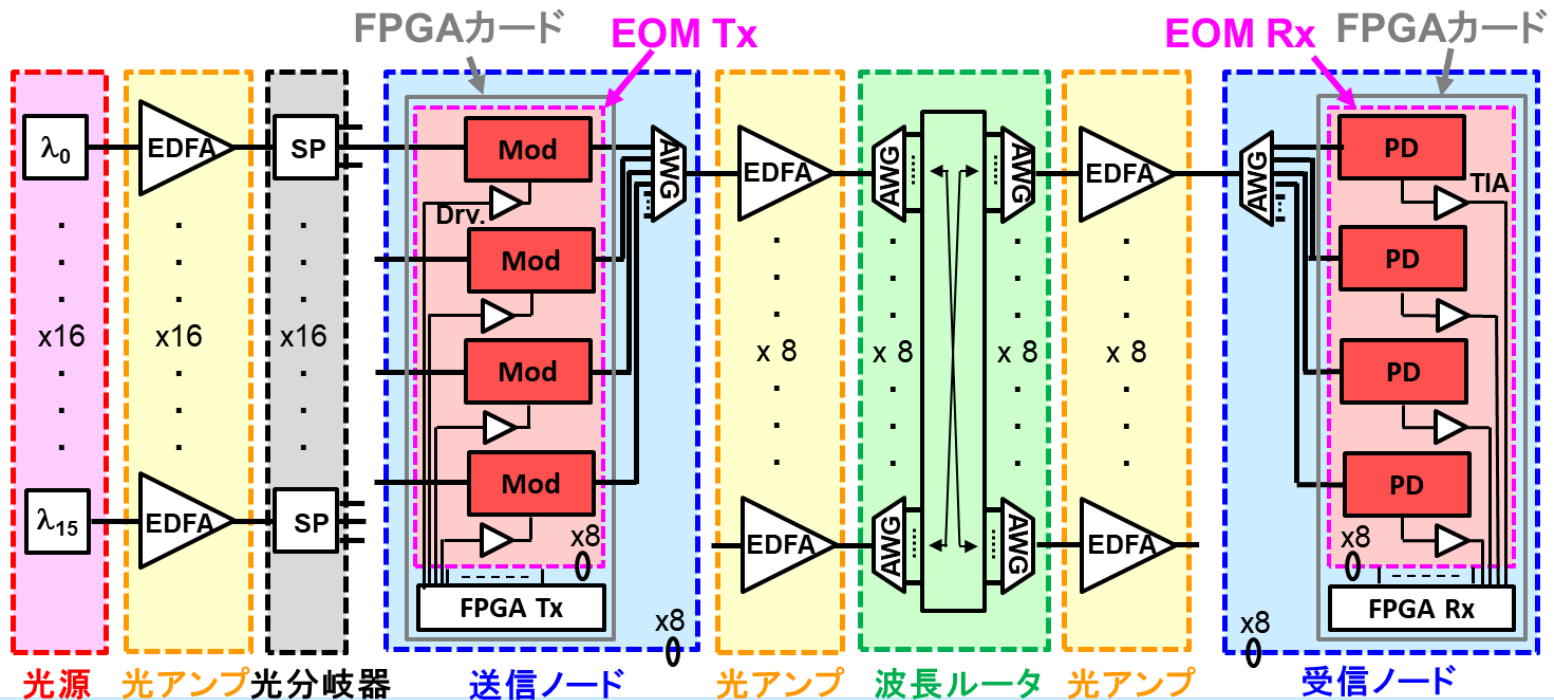
- シリフォト・トランシーバ・チップ、Onboard-opticsフォーム・ファクタ
- 高帯域密度: 100 Gbps (25 Gbps × 4 ch.) / 12 × 12mm<sup>2</sup>
- C-band-DWDM対応、12芯シングルモード・ファイバ接続
- ソケットを介してFPGAカードに着脱可能

## ■ FPGAカード

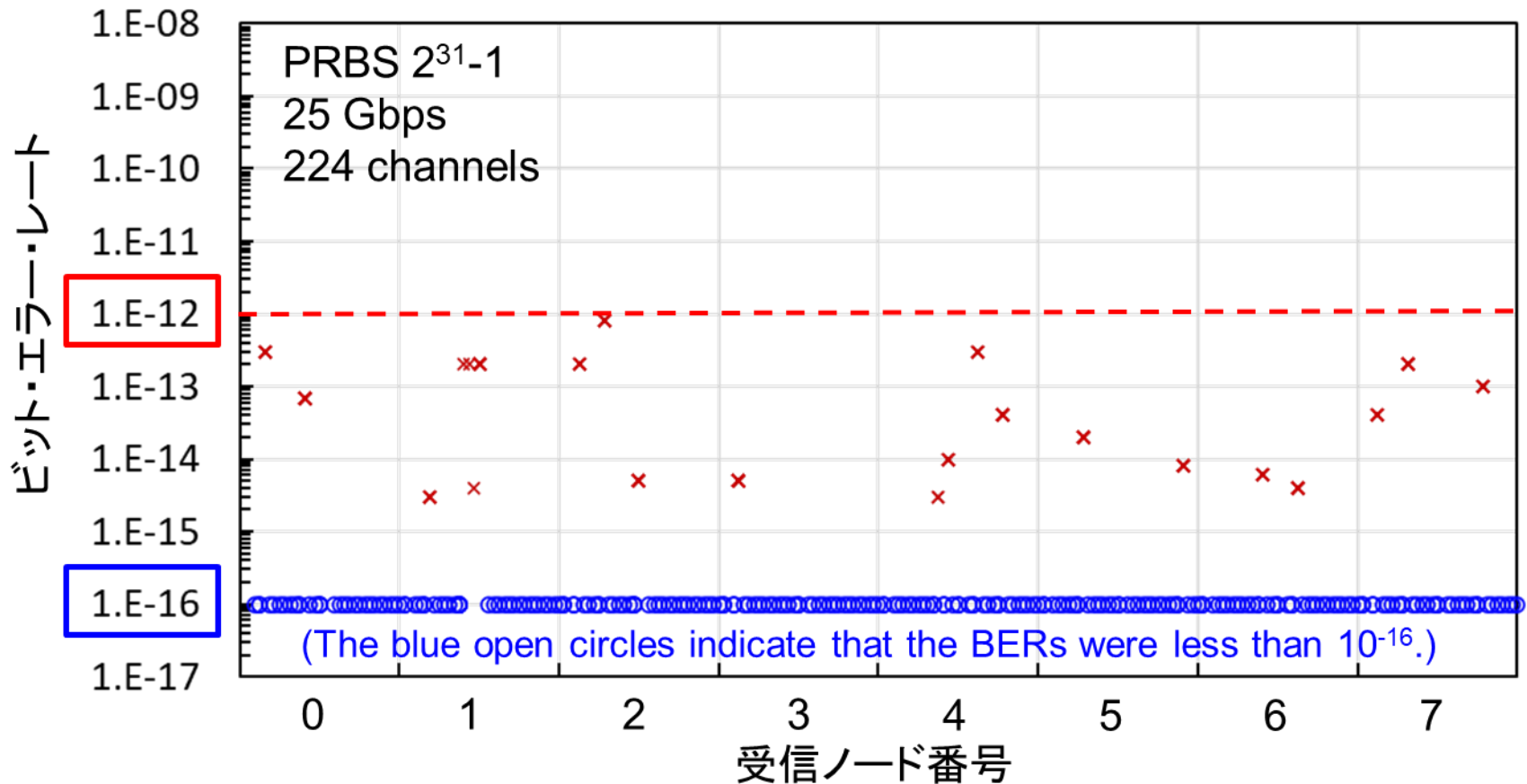
- 広帯域メモリHBM2を搭載 ⇒ 819 Gbpsのメモリ帯域
  - 高帯域密度EOMを8個搭載 ⇒ 800 Gbpsのネットワーク帯域
- ↔ バランス  
最大33台とフルメッシュ接続可能

# (4) 成果 II (レイヤ1): 波長ルーティング・ネットワークの構成 公開

- **オフチップ波長多重光源**  
⇒ 集中管理により、高精度波長制御、高エネルギー効率、高信頼性
- **C帯EDFA光アンプ** ⇒ 高エネルギー効率、低ノイズ
- **波長ルータ** ⇒ パッシブ・デバイス(消費電力無し、EO/OE変換無し)
- **送受信ノード以外の全コンポーネントがビット・レート、変調方式に無依存**  
⇒ 送受信ノード(トランシーバ)の世代交代に対応可能



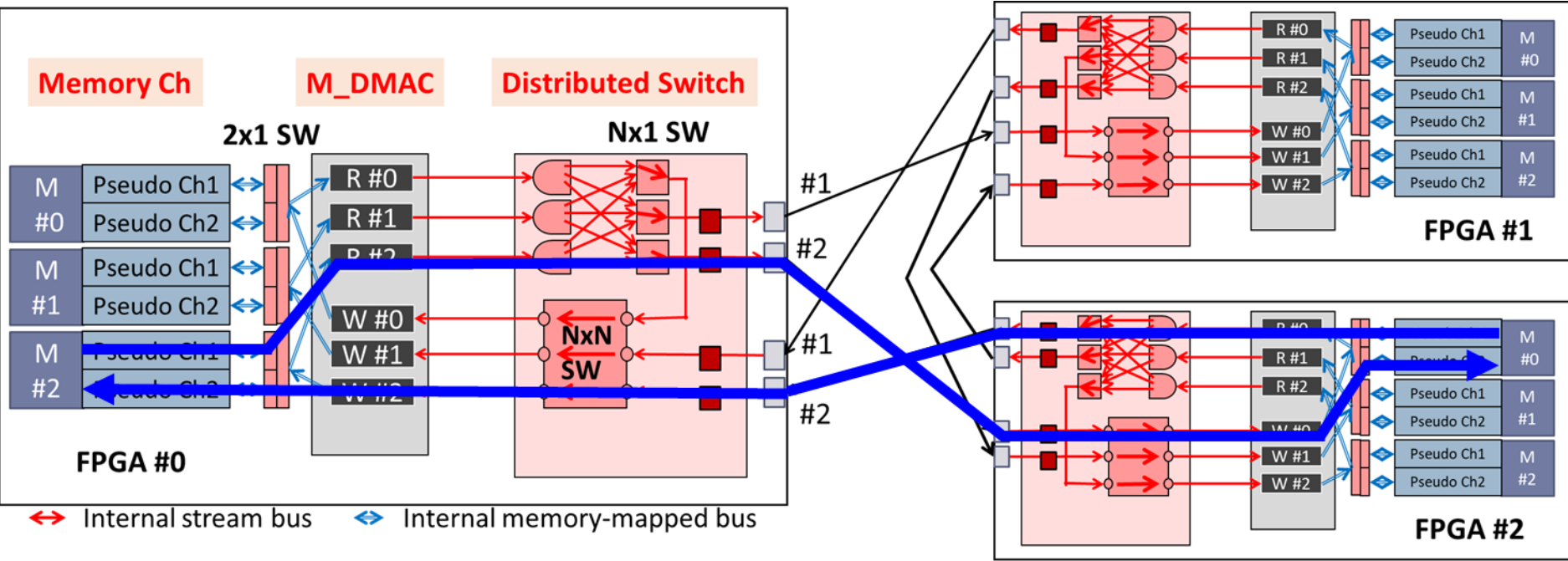
## (4) 成果 II (レイヤ1): 波長ルーティング・ネットワークのエラー・フリー動作実証



8台のFPGA間を接続する全チャンネル(25Gbps × 224ch)で、  
**BER <  $10^{-12}$**  を確認(その内の91%は、測定限界以下のBER <  $10^{-16}$ )  
⇒ トータル帯域 5.6Tbpsのエラー・フリー動作を実証  
⇒ (電気・光共に)高い信号品質と高い均一性を実証

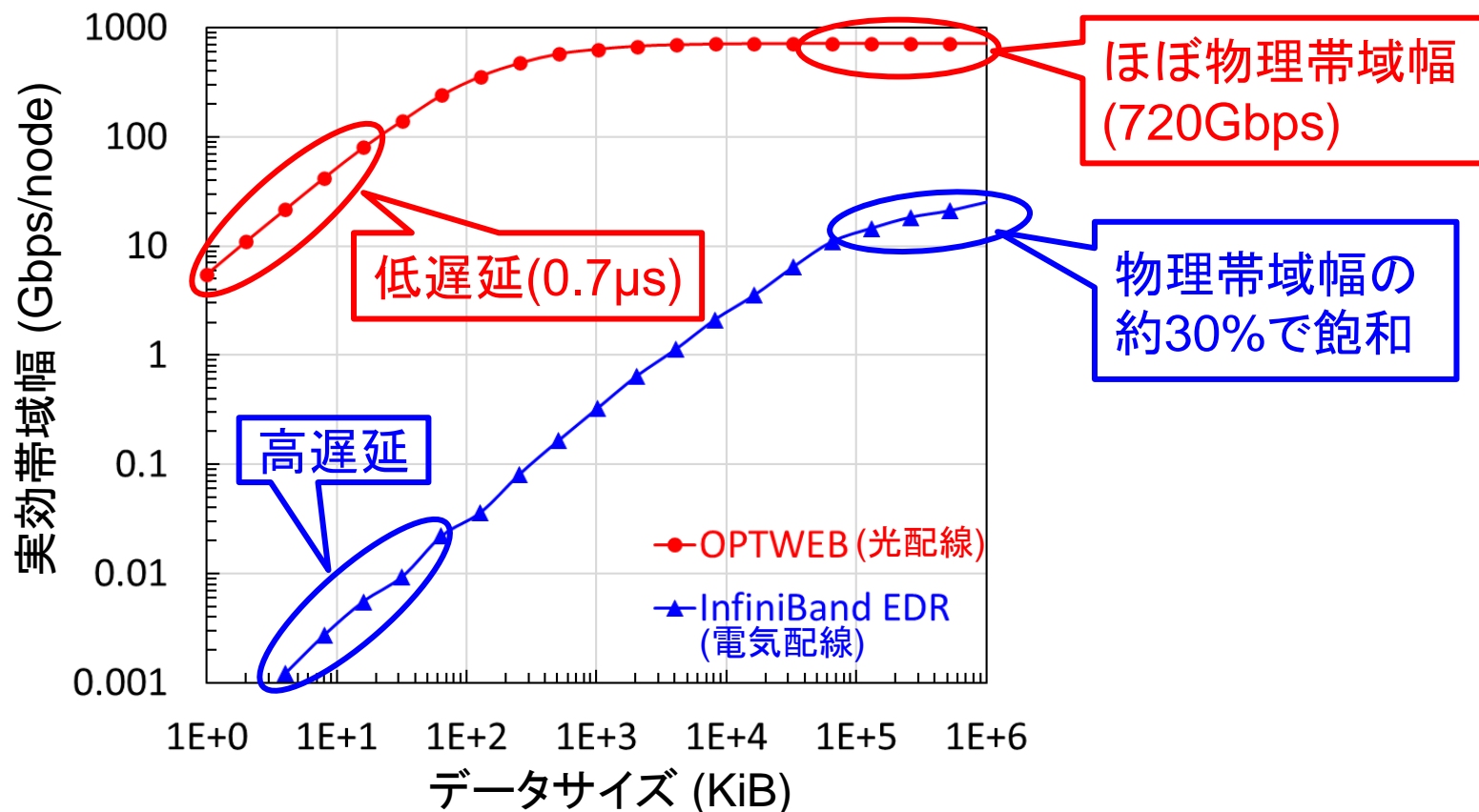
# (4) 成果Ⅲ (レイヤ2 & 3): ネットワーク・アーキテクチャ OPTWEB

- FPGA間のmemory-to-memoryの常時接続専用パスを構築
- **例えば、FPGA #0のmemory #2とFPGA #2のmemory #0を直結**
- FPGA間のリモート・ダイレクト・メモリ・アクセス(RDMA)を実現



3台のFPGA間をOPTWEBで接続した場合の構成(実際は8台間を接続)

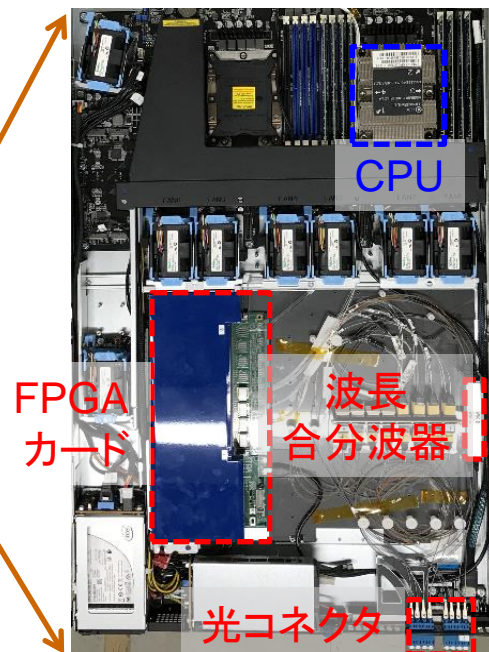
# (4) 成果Ⅲ (レイヤ2 & 3) : 8ノード間高速alltoall通信の実証 公開



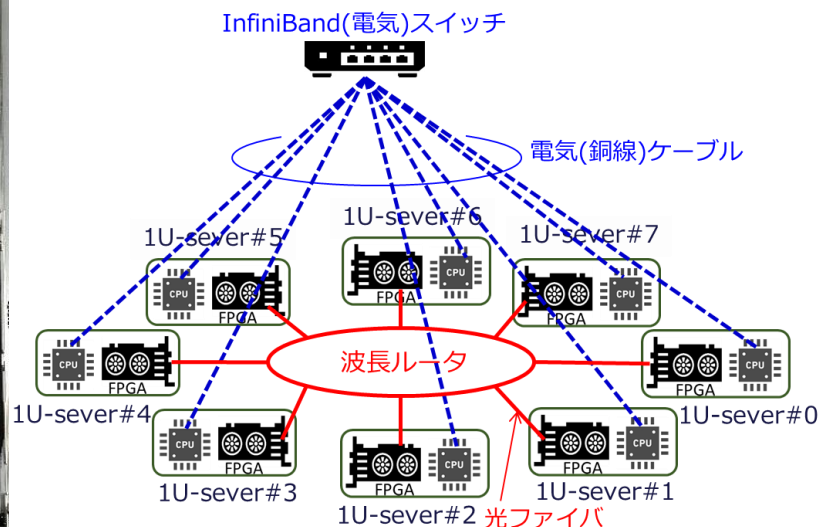
- (実効帯域幅) = (データサイズ) / (通信時間)
- (通信時間)  $\approx$  (遅延時間) + (データサイズ) / (物理帯域幅)
- OPTWEB: フルメッシュ・ネットワーク + 簡単なネットワーク制御
  - ⇒ 小さなデータに対して: 低遅延 ⇒ 比較的広い実効帯域幅
  - ⇒ 大きなデータに対して: ほぼ物理帯域幅に近い実効帯域幅

# (4) 成果IV(サーバ): 8ノード・ラックサーバ・システム

公開



光電子融合サーバボード

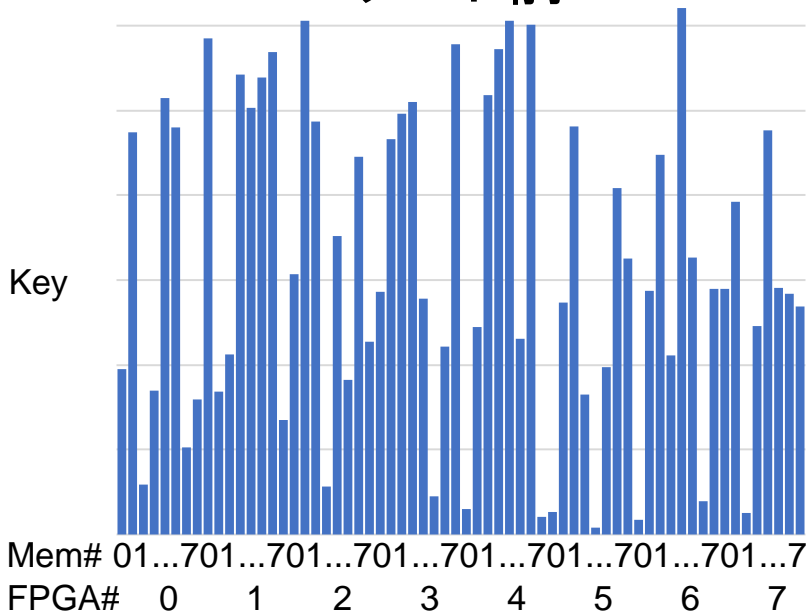


8ノード間の電気/光接続

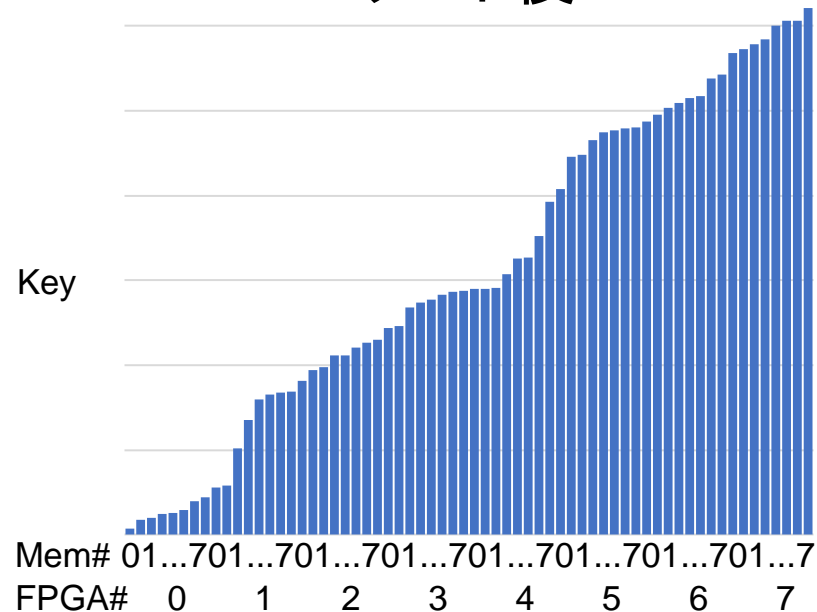
- 各光電子融合サーバボード(1Uサーバ)にCPUとFPGAカードを搭載
- CPU間は、電気配線(100-Gbps DACケーブル + InfiniBand EDR)で接続
- FPGA間は、光配線(波長ルーティング & OPTWEB)で接続
- 16波長多重 ⇒ 1Uサーバのフロントパネルの光コネクタ数を1/16に削減  
⇒ 空冷の気流を妨げない

- 8ノード・ラックサーバ・システムに並列分散ソータを実装
- 32bit整数キーを8台のFPGAの8ヶ所のメモリ領域にランダムに格納
- 4bitソート×8回で、32bitのソーティング処理
- 各ソートは、パイプライン処理により、1回のメモリアクセス(Read/Write)
- グローバルソートのAlltoall通信は、波長ルーティング+OPTWEBで高速化

### ソート前



### ソート後

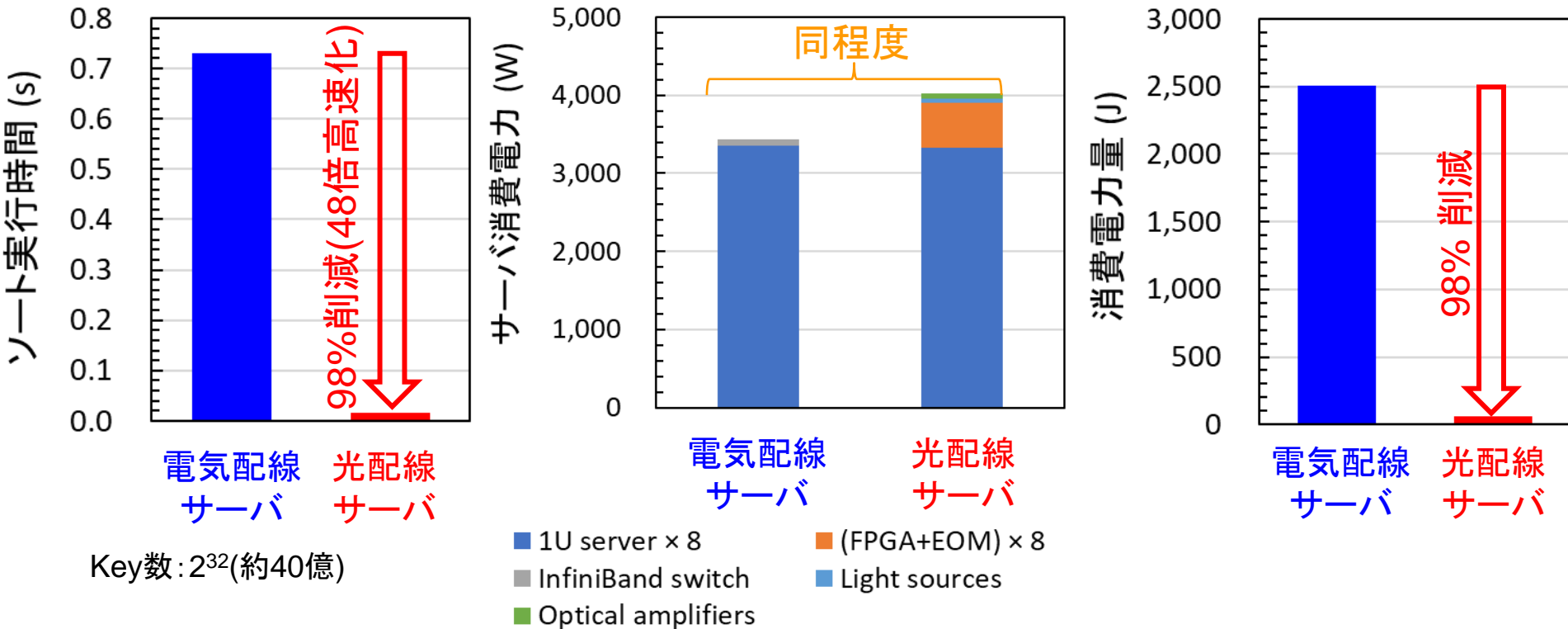


## ソート処理のイメージ



# (4) 成果Ⅳ(サーバ/アプリ): 消費電力量評価

公開



- 光配線サーバにより、電気配線サーバに比べて、ソート実行時間の98%削減(48倍の高速化)を実証
- 光配線サーバと電気配線サーバの消費電力は、ほぼ同じ
- 光配線サーバにより、電気配線サーバに比べて、消費電力量(実行時間×消費電力)の98%削減を実証

## (5) 目標の達成度

公開

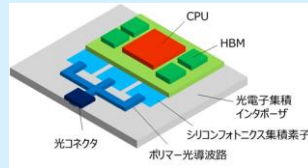
テーマ	2021年度末最終目標	主な成果状況	達成度
2.2.2.2 (f-1)② ラックスケール 並列分散 システム	消費電力の少ない光電子集積インターポータ技術と波長多重技術を用いた接続技術を組み合わせた光電子融合サーバボードを試作し、試作機とシミュレーションを用いてサーバ電力量を30%削減可能であることを示す。	消費電力の少ない光電子集積インターポータ技術と波長多重技術を用いた接続技術を組み合わせた光電子融合ラック・サーバ・システムを試作し、試作機と <b>その上で動作する分散サーバ</b> を用いてサーバ電力量を <b>98%</b> 削減可能であることを <b>実証した</b> 。	◎

## 2-2システム化技術

### ②光エレクトロニクス実装システム化技術の開発

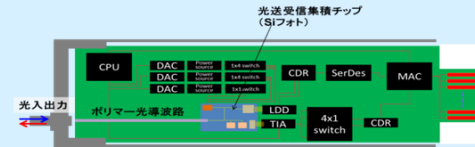
#### 2-2-1 情報処理システム化技術

光電子融合  
サーバボード



ラックスケール並列分散システム

#### 2-2-2 情報通信システム化技術

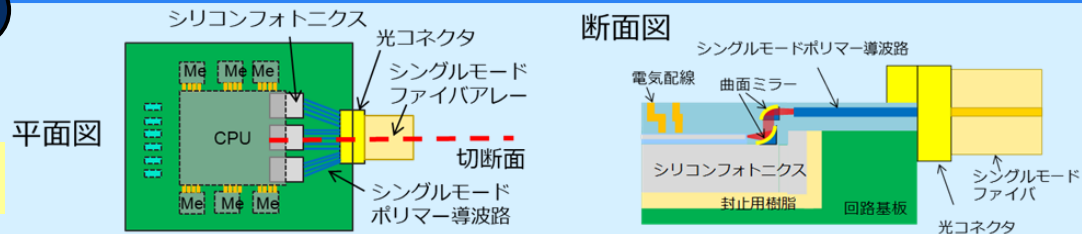


2-3

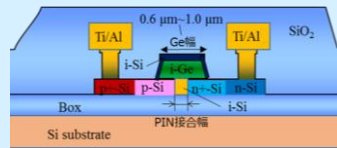
国際標準化

## 2-1デバイス・実装技術

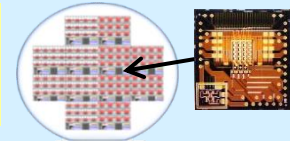
#### 2-1-3 光実装技術



#### 2-1-1 デバイス技術



#### 2-1-2集積化 プロセス技術



### ①光エレクトロニクス 実装基盤技術の開発

### 1.革新的デバイス技術

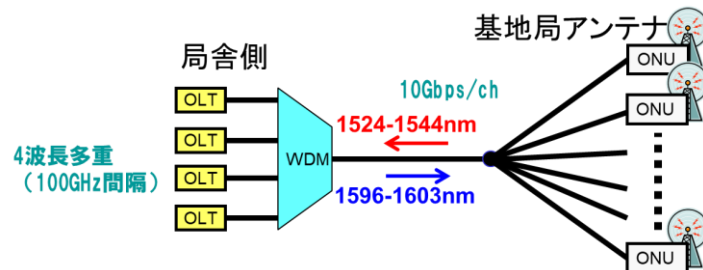
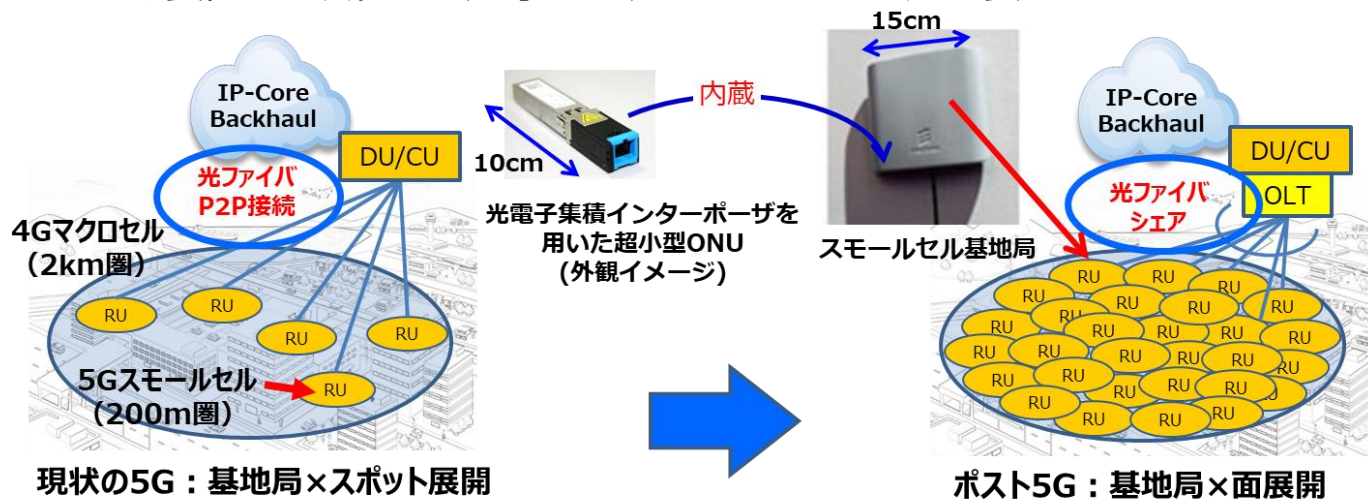
### ③成果普及

# (1) 開発目標

## 2021年度最終目標：

光電子集積インターポーザを用いた一芯双方向波長多重トランシーバを搭載することにより、光加入者端末装置を10 cm×2 cm×2 cm以下のサイズに小型化するための実装技術を開発する。

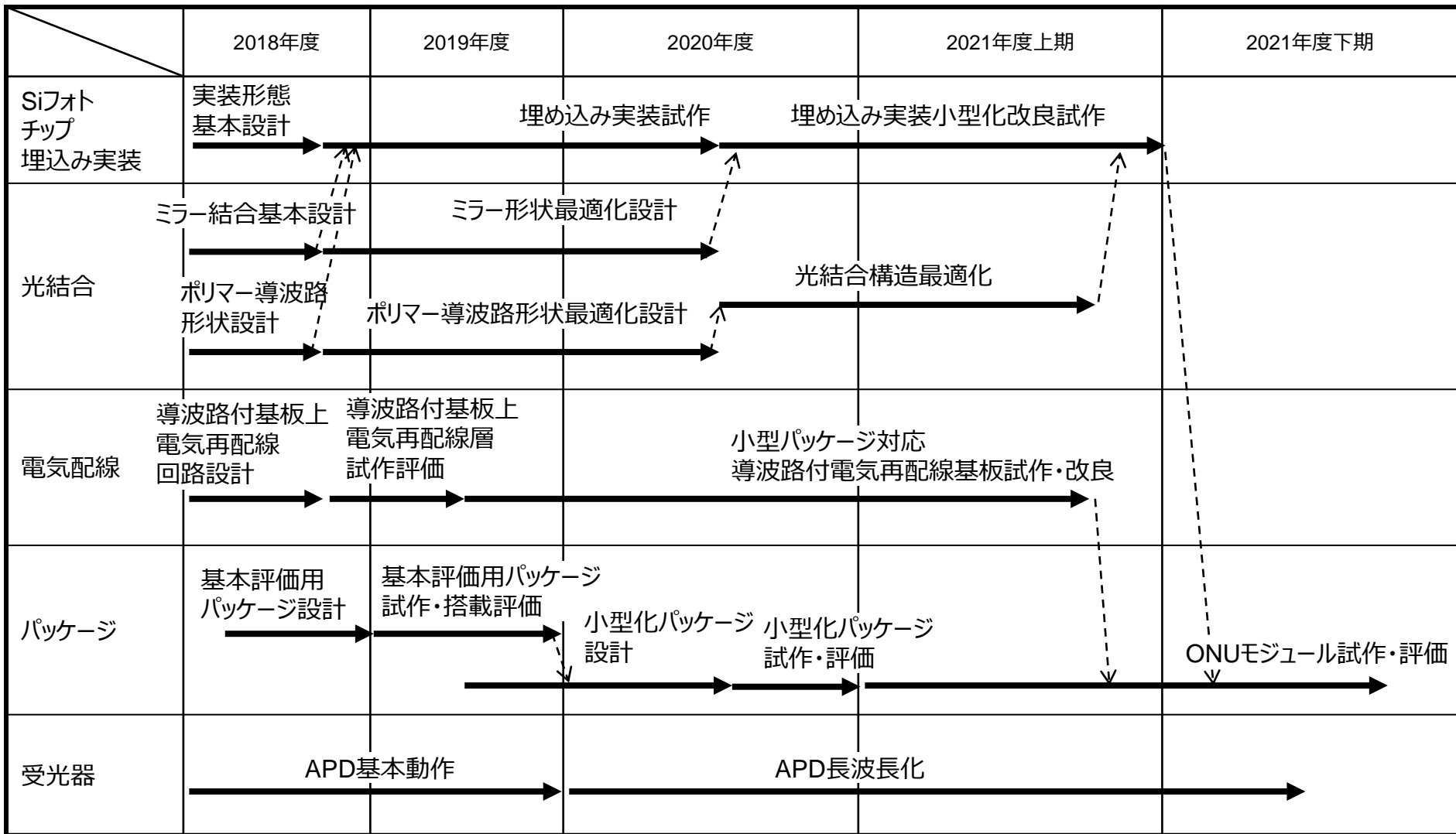
- 5Gネットワークでは基地局エリアが細分化（スモールセル）。面的にサービス展開する「ポスト5G」では従来の4Gに比べて約100倍の基地局アンテナが必要。基地局装置は一層の小型化が求められる。
- 多数の基地局アンテナの接続にTWDM-PONを用いて光ファイバをシェアすることにより設備コストを削減。小型化する基地局装置に内蔵できる超小型の光トランシーバが必要。



TWDM-PON構成を用いた基地局アンテナ接続網

## (2) 開発計画

公開

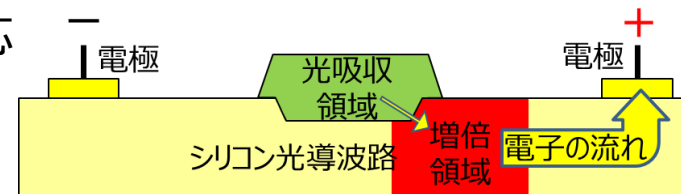


#### 開発課題

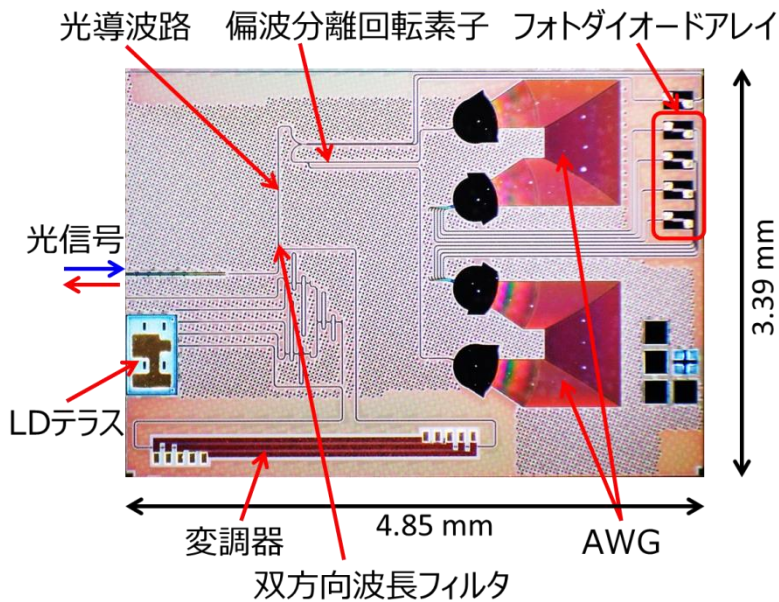
- 光ファイバー通信網を通ってくる光信号は不定偏波 ⇒ 偏波無依存受信
- 多分岐に伴う信号光減衰 ⇒ 高感度受信
- ONUを5Gスモールセルアンテナに内蔵 ⇒ 小型実装

#### アプローチ

- TWDM-PON用光回路
  - 上り下り各4波長多重の送受信機能をシリコンフォトニクス技術により集積
  - 偏波ダイバーシティによる偏波無依存受信
- アバランシェフォトダイオード(APD)導入による高感度化
  - TWDM-PONの規格が求める受信感度-28dBmに対応
  - シリコン導波路ベースの横型APD
  - 長波長(~1600nm)まで高感度
- 光電子集積インターポーザを用いたONU小型化実装
  - 光送受信集積チップを電気回路基板に埋め込んで一体化
  - ポリマーミラーを用いた低損失で偏波無依存の光結合構造を開発

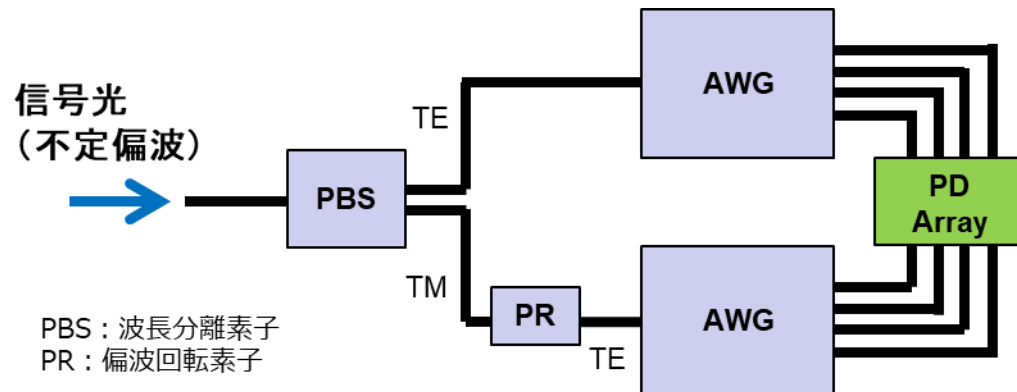


## ■ TWDM-PON 集積チップ

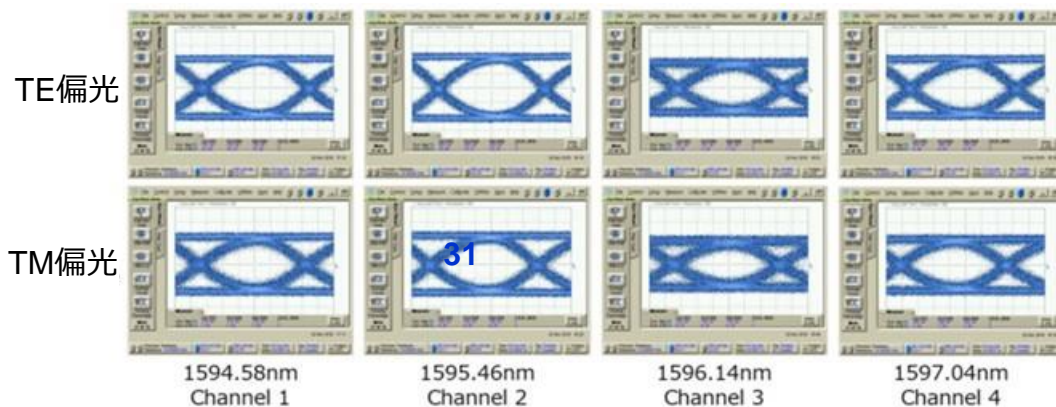


TWDM-PON集積チップ

2019年7月 プレスリリース



偏波ダイバーシティ構成

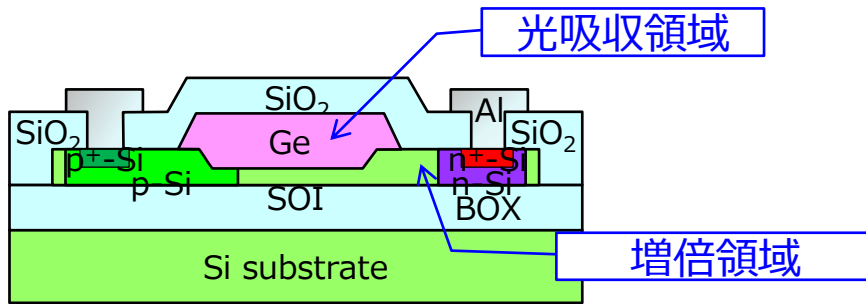


10Gbps×4波長受信波形 (偏波無依存)

H. Ono, et al., OECC 2019, WD3-3

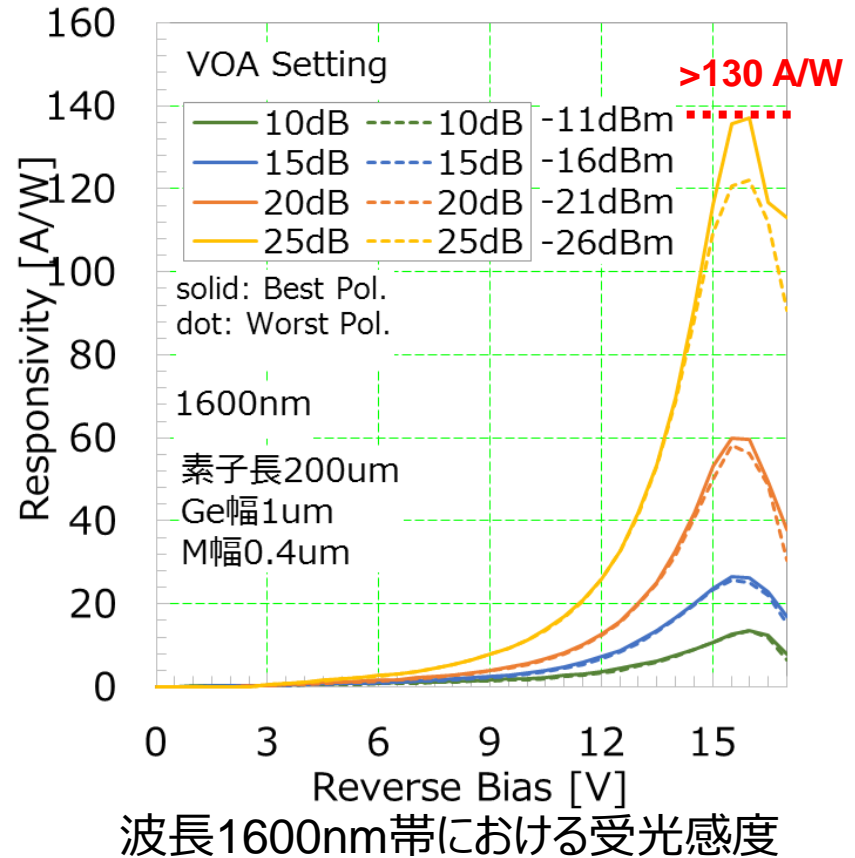
- 偏波ダイバーシティによる4波長偏波無依存受信 ⇒ 偏波無依存を実現

## ■ 横型SAM-APD



横型SAM-APDの断面構造

- 波長1600nm付近で高感度を得るために、
- ・電極による吸収損を受けない横型p-i-n接合
  - ・光吸収領域と増倍領域を分離したSAM構造



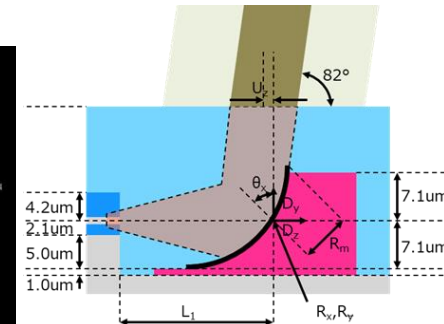
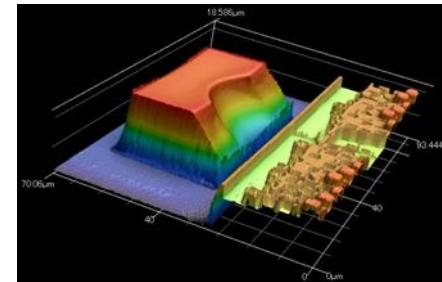
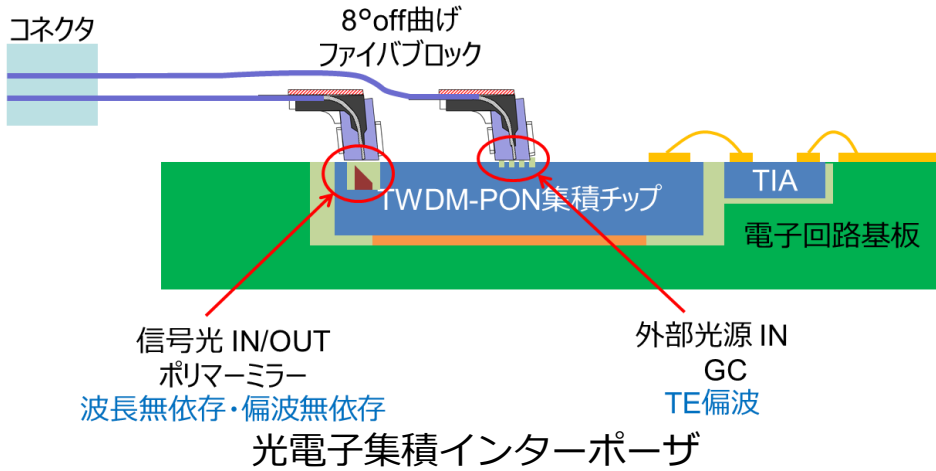
## 2019年3月 プレスリリース

- ・受光感度 ~130A/W (世界最高)  
⇒ 受光器の高感度化を実現  
最小受信感度 -22dBm (BER=10<sup>-3</sup>)
- ・高周波数応答10GHz以上

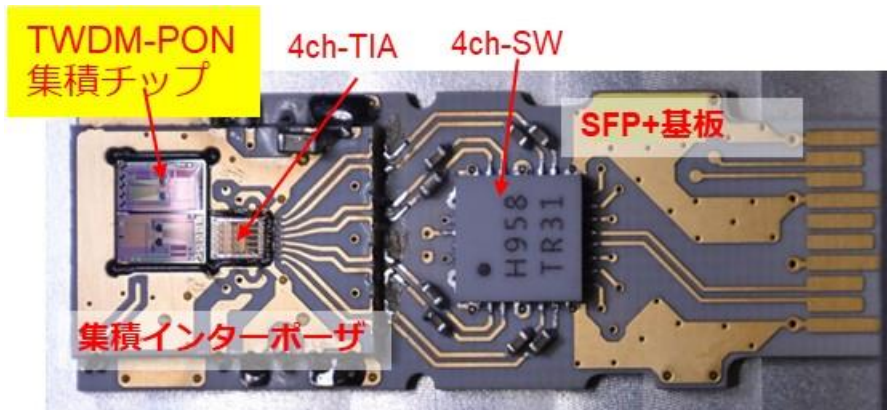


# (4) 成果Ⅲ (光電子集積インターポーザを用いた小型化実装) 公開

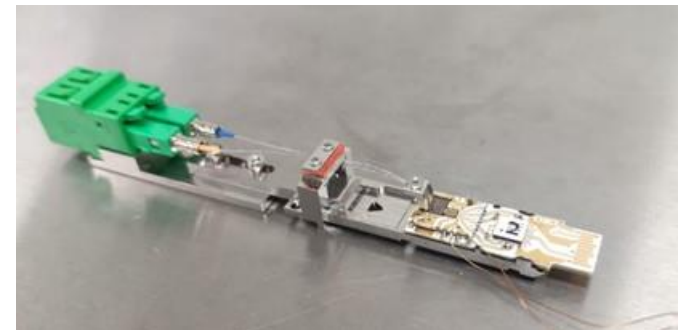
## ■ 光電子集積インターポーザを用いた光トランシーバモジュール試作



ポリマーミラー



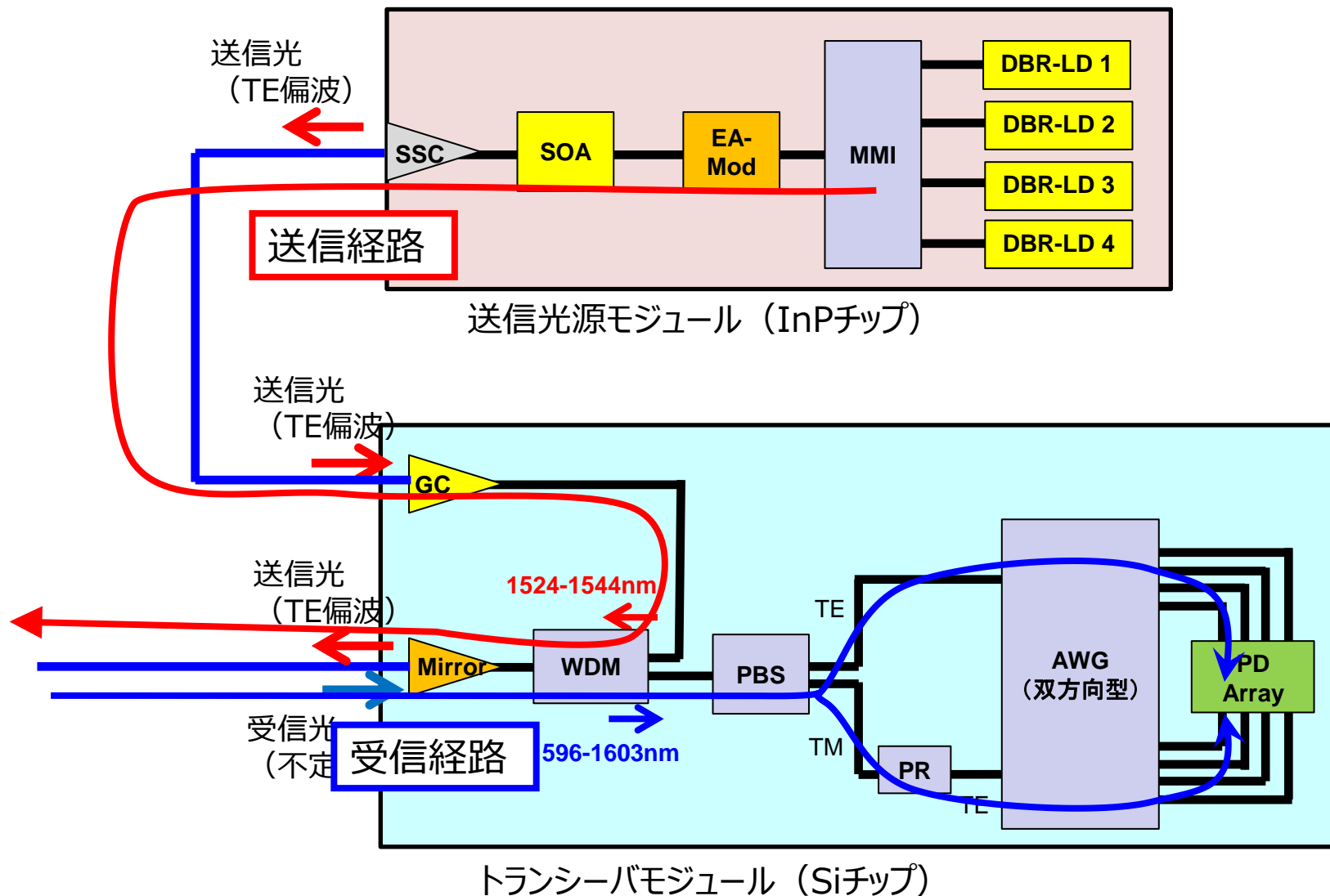
光電子集積インターポーザ on SFP+基板



ONU用モジュール

⇒ 光結合部の偏波無依存化、10cm×2cm×2cmの小型化のための技術を確立

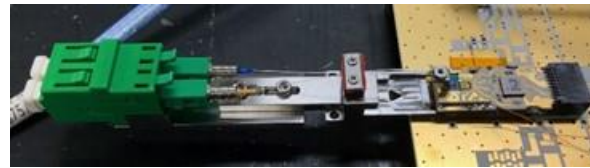
## ■ 光トランシーバモジュールの構成



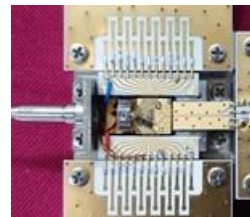
■ 光トランシーバモジュールの動作評価系



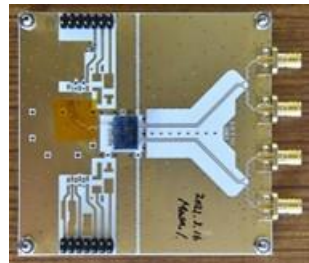
評価系全景



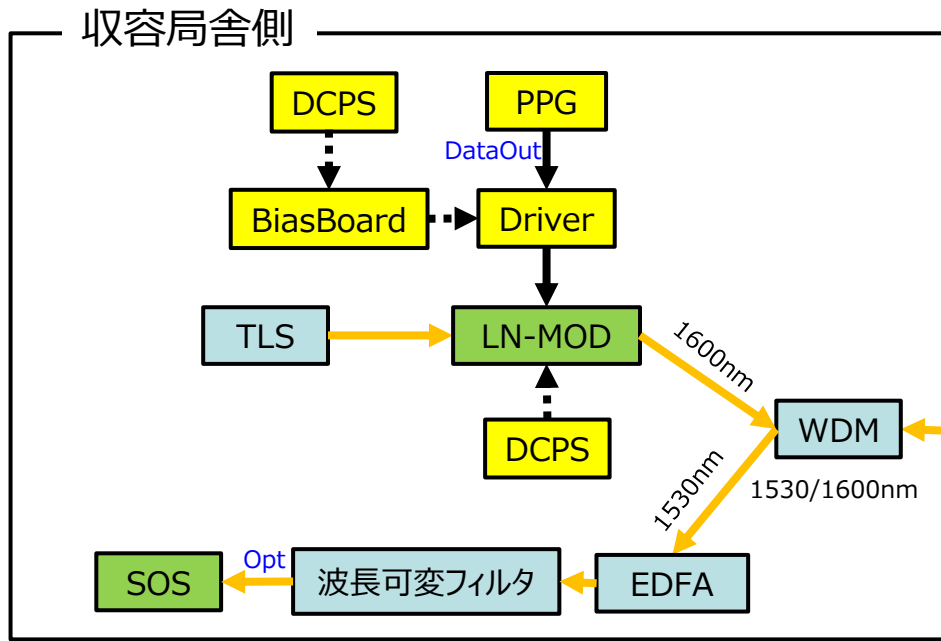
トランシーバモジュール



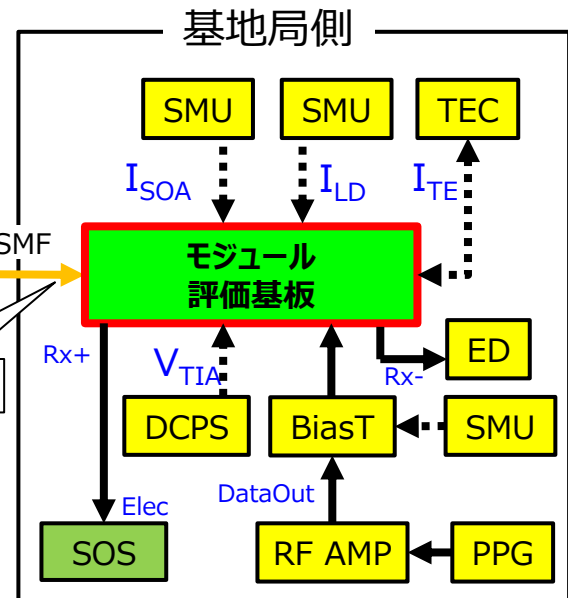
送信光源モジュール



評価基板



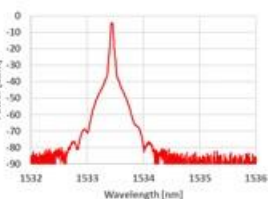
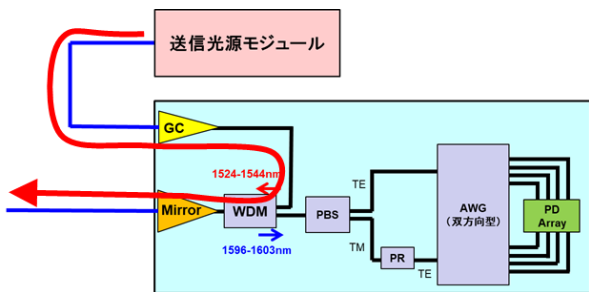
- TLS : 波長可変光源
- DCPS : 直流電源
- SMU : 電圧電流発生測定器
- ED : エラーディテクタ
- PPG : 波形発生器
- SOS : サンプルオシロスコープ
- TEC : 温度制御器



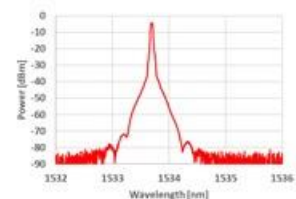
→ 光ファイバ → RFケーブル → DCケーブル

■ モジュール評価結果

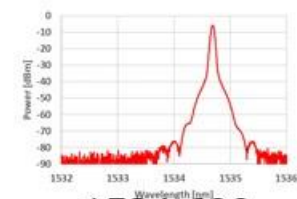
● 上り送信評価



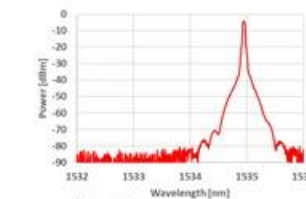
1533.440 nm



1533.695 nm

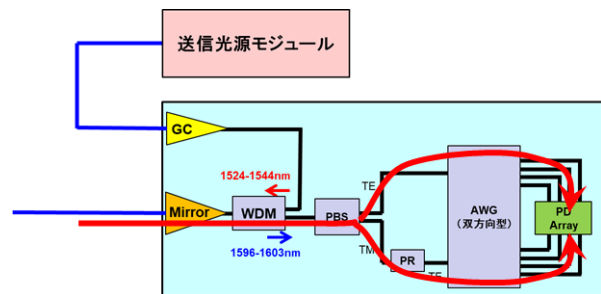


1534.690 nm



1534.950 nm

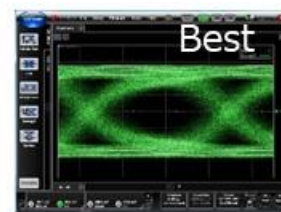
● 下り受信評価



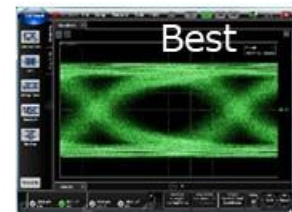
1602.3 nm



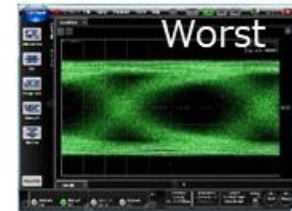
1603.1 nm



1603.9 nm



1604.7 nm



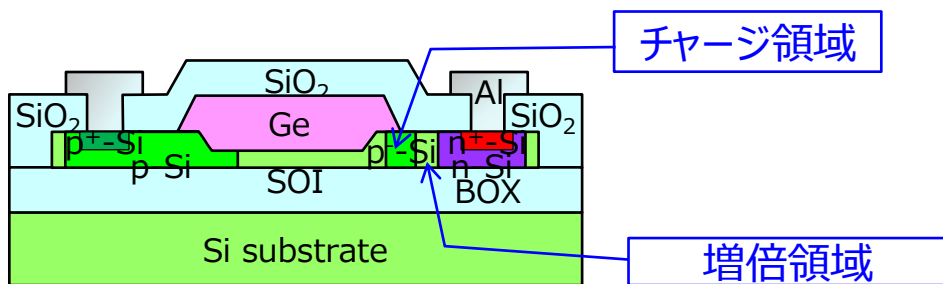
## ■ TWDM-PON規格に対するPD受光感度目標値

		挿入損
トランシーバ最小受光感度(dBm) 規格値	-28	
ファイバ結合損(ミラー)(dB)		3
導波路損失(1dB/cm × 10mm導波)(dB)		1
WDM1フィルタ挿入損(dB)		0.5
PBS, PR挿入損(dB)		0.5
AWG挿入損失(dB)		1.5
PD 最小受光感度 (dBm) 目標値	-34.5	

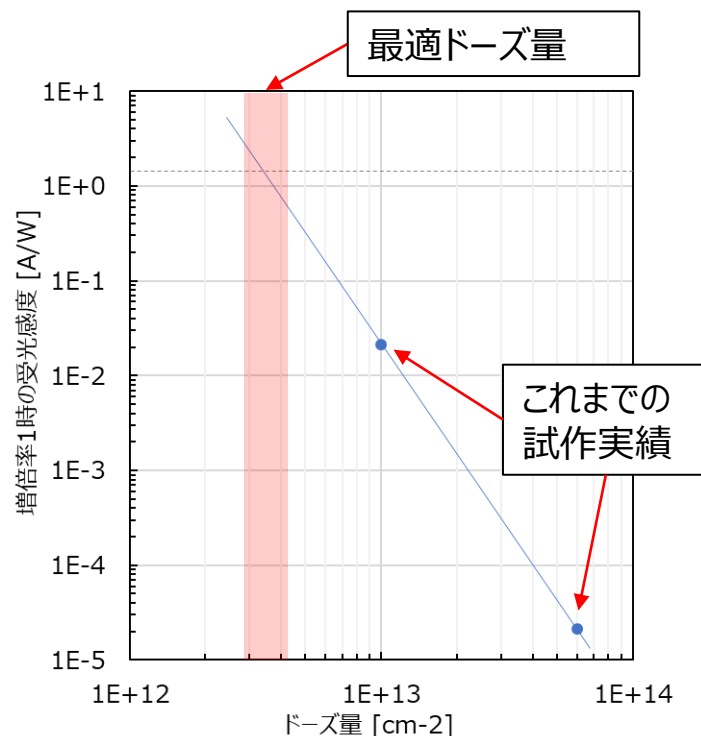
- ✓ TWDM-PONの規格で要求されるトランシーバ最小受信感度達成するためには、APD単体での最小受信感度は-34.5dBmが必要
- ✓ これまでの試作実績は、横型SAM-APDで得た-22dBm

## ■ PD最小受信感度改善の見通し ～SACM-APDの導入と構造最適化

- ✓ TWDM-PONの仕様条件 (波長～1600nm、10Gbps) では、APD単体での最小受信感度は理論的に-37dBmまで改善可能
- ✓ 増倍領域に隣接するチャージ領域を備える、SACM構造を導入



横型SACM-APDの断面構造



SACM-APDチャージ領域ドーズ量と増倍率M=1時の受光感度相関

- ✓ SACM-APDのチャージ領域のドーピング最適化によりTWDM-PON規格の要求感度が実現できる見通し

## (5) 目標の達成度

公開


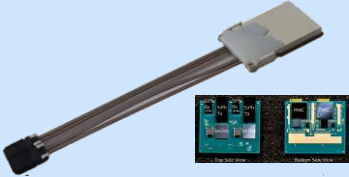
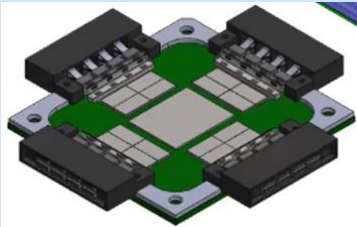
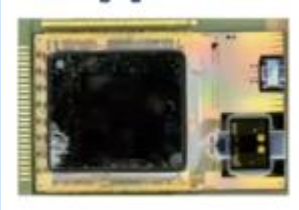

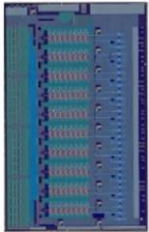
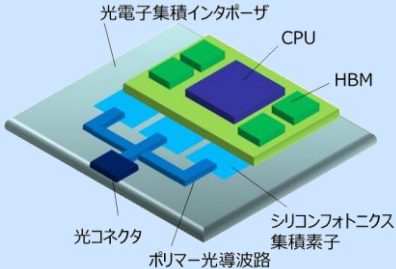
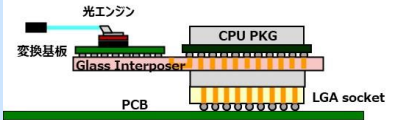
テーマ	2021年度末最終目標	主な成果状況	達成度
2. 2. 2. 2 (f-2)情報通信システム化技術	光電子集積インターポーザを用いた一芯双方向波長多重トランシーバを搭載することにより、光加入者端末装置を10 cm × 2 cm × 2 cm以下のサイズに小型化するための実装技術を開発する。	<ul style="list-style-type: none"><li>・TWDM-PON集積チップを試作して、10Gbps × 4波長の光送受信動作及び偏波無依存受信動作を実証した。</li><li>・バットジョイント型APD導入により受光器の高感度化を実現した。⇒130A/W</li><li>・シリコンフォトニクス技術により小型化した光電子集積インターポーザを搭載したサイズ10cm × 2cm × 2cmのパッケージに収容できる光トランシーバモジュールを試作して、上り下り各4波長多重、10Gbpsの一芯双方向送受信動作、及び偏波無依存受信動作を実証した。</li></ul>	○

# (ご参考)ベンチマーク



# (6) ベンチマーク(システム化技術)


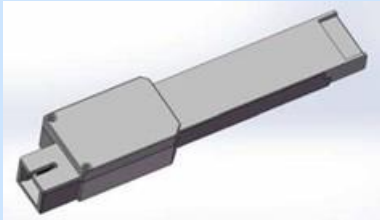
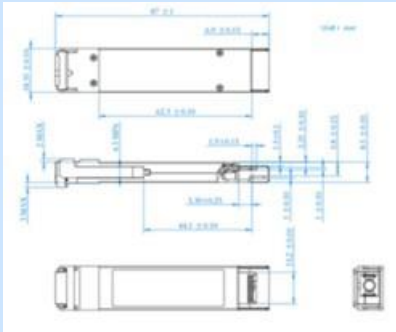
公開

	Intel	Cisco	Ayar Labs	PETRA
構造	<p>Optical Co-packaged switch</p>  <p>1.6Tbps CPO module</p> 	<p>Optical Co-packaged switch</p>  <p>3D Integrated Silicon Photonics Packaging Platform</p> 	<p>SoC In-Package</p>  <p>Optical I/O Chiplet</p> 	 <p>光電子集積インタポーザ CPU HBM シリコンフォトニクス集積素子 ポリマー光導波路 光コネクタ</p>  <p>光エンジン 変換基板 CPU PKG Glass Interposer PCB LGA socket</p>
帯域幅	1.6 Tbps 106.25Gbps × 16 lane	25.6 Tbps 400Gbps × 64port	2.56 Tbps 106Gbps × 24port	10.8 Tbps 112Gbps × 16λ × 3port × 2
サイズ 伝送密度	モジュール: 25 × 22 mm <sup>2</sup> 64 Gbps/mm	モジュール: 89 × 50 mm <sup>2</sup> 256 Gbps/mm	チップ: 5.5 × 8.9 mm <sup>2</sup> 288 Gbps/mm	インターポーザ: 62 × 101 mm <sup>2</sup> 173 Gbps/mm
消費電力 電力効率	~30 W 19 mW/Gbps	~70 W 2.7 mW/Gbps	~13 W 5 mW/Gbps	~20 W 2 mW/Gbps
光源	光源内蔵	外部光源	外部光源	外部光源

# (6) ベンチマーク(ラックスケール並列分散システム)

公開

	従来の電気配線サーバ	PETRAが開発した光配線サーバ
ネットワーク構成		
プロセッサ	CPU (Intel Xeon Gold)	FPGA (Intel Stratix10 MX)
ノード間配線	Direct attach copper (DAC) cable	Single mode fiber (SMF)
ノード間ハブ	InfiniBand EDR (Mellanox SB7800)	波長ルータ
物理帯域幅	100 Gbps/node	800 Gbps/node
ソート実行時間	0.731 秒	0.015 秒
サーバ消費電力	3427.0 W	4018.5 W
消費電力量	2503.5 J	60.7 J

	PETRA(本開発)	A社(Preliminary)	B社(Preliminary)
			
サイズ	H2cm x W2cm x D10cm	H1cm x W2cm x D11cm	H1cm x W2cm x D9cm
構造 (送信側)	4波長アレイレーザ	波長可変レーザ	波長可変レーザ
構造 (受信側)	PDアレイ+波長分波フィルタ	PD+波長可変フィルタ	PD+波長可変フィルタ
波長切り替え 時間	< 1ms	送信: 0.5s 受信: 1s	送信: 1s 受信: 1s