
超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム 技術開発プロジェクト

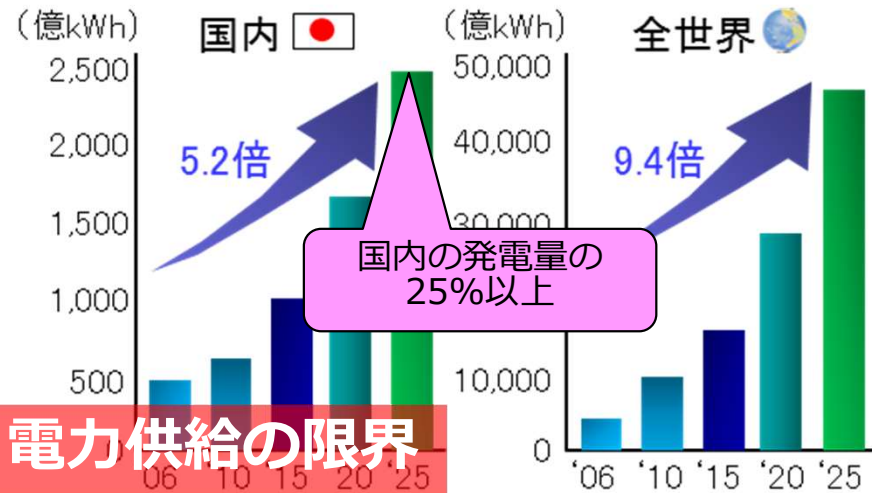
－ 概要 －

2022年2月10日

プロジェクトリーダー
東京大学特任教授
荒川 泰彦

プロジェクト提案 時のスライド(2012年)

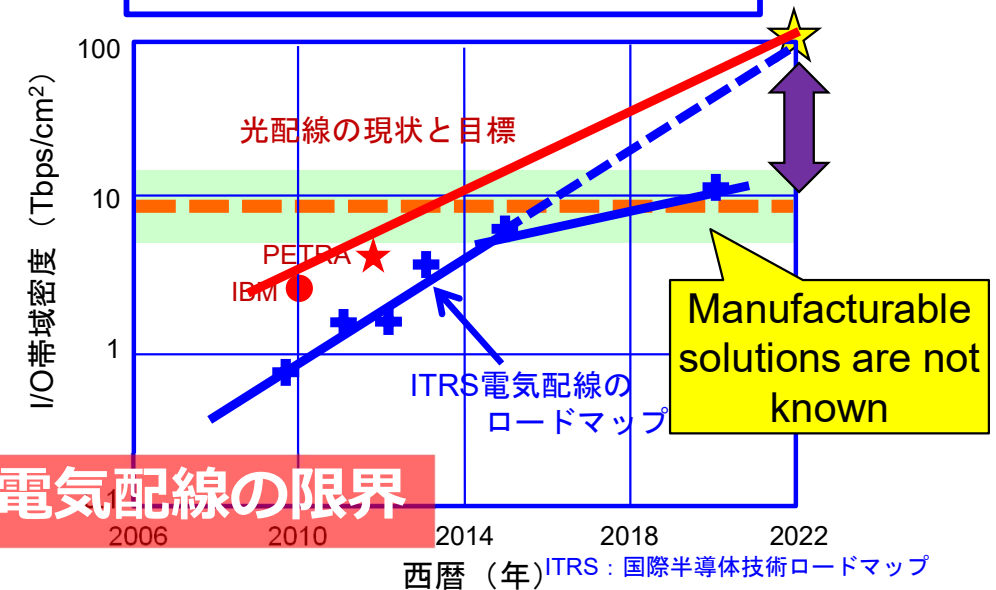
IT機器消費電力の激増



電力供給の限界

(出典) グリーンIT推進協議会 (2009)

配線の小型高速化の要求



電気配線の限界

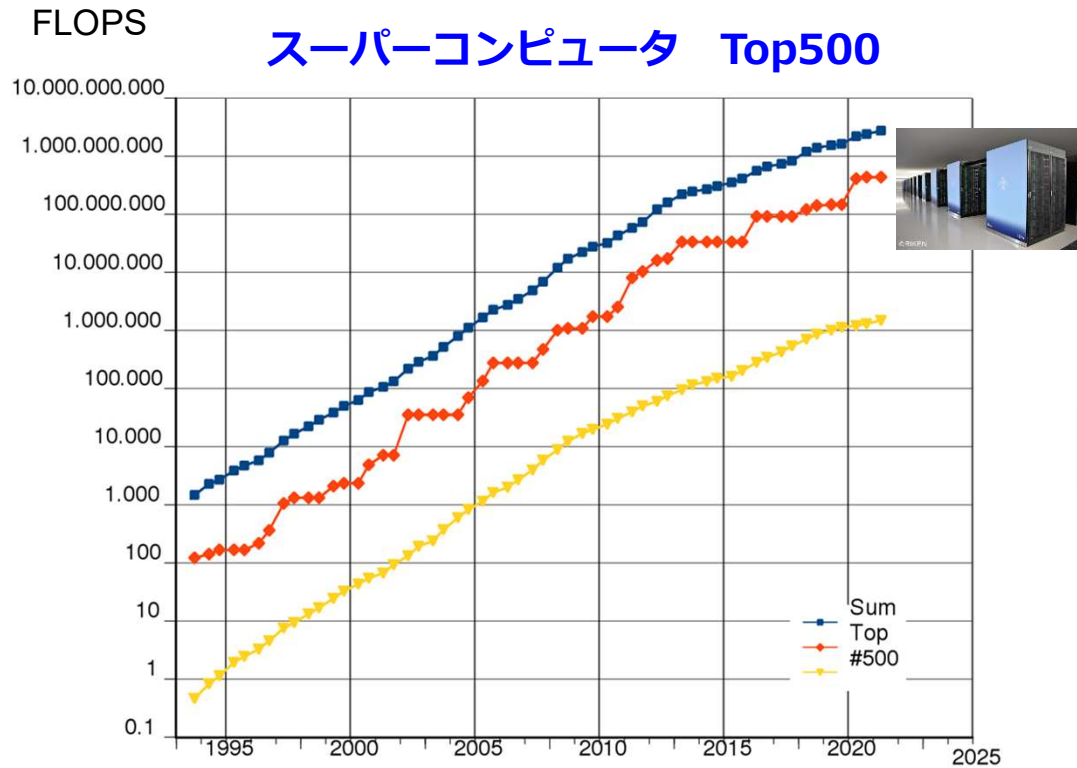
西暦 (年) ITRS: 国際半導体技術ロードマップ

これらの限界を打破するため、

- ➔ 光技術の導入による情報機器技術のパラダイム転換が急務
- ➔ 電気技術と光技術、それぞれの特徴を最大限に活かす為の実装技術・システム化技術の構築が不可欠
- 光配線技術と電子回路技術を融合させた光エレクトロニクス実装システム基盤技術を確立し、システムレベルでの光配線技術の有効性を世界に先駆けて示すとともに、その事業化への道を拓く

今日でもこれらの問題意識に大きな変化はなく、むしろ危機感が高まっている

プロジェクト発足から10年を経て



<https://ja.wikipedia.org/wiki/TOP500>



http://www.gazonindia.com/cloud_computing.html

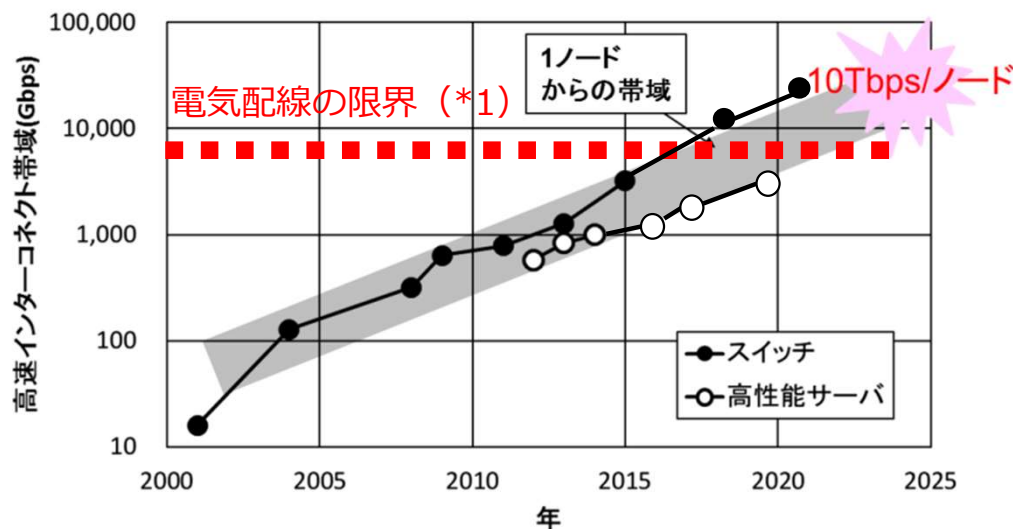
- コンピュータ性能は~1000倍/10年で成長
- コスト、ビット当たりの消費電力、CPU間の伝送帯域帯域密度がキー

コンピューティングにおけるネットワーク／配線への性能要求は益々高まっている

コンピューティングパワー増大に伴う課題

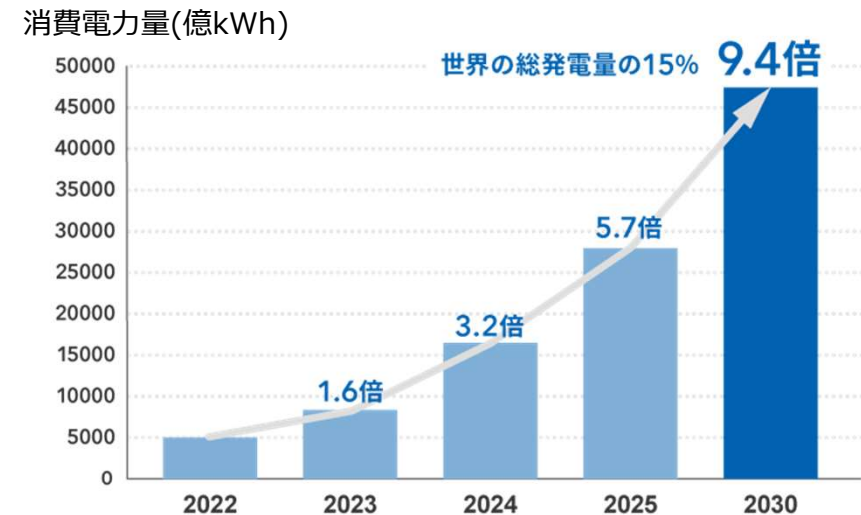
- 最近のデータ量の増加とAI技術の進歩は、コンピューティングパワーの増大を必要とする
- LSIの処理速度の増大により、インターコネクタ帯域は増え続け、大容量LSIのインターコネクタ帯域トレンドは、2025~2030年には、**10Tbps超の帯域**が必要とすることを示す
- データセンターの消費電力量も年々増大

大容量LSIのインターコネクタ帯域トレンド



(*1) : BGA数と伝送速度限界(28GBaud)から推定

データセンターのエネルギー消費量予測 (世界)



(https://www.tdk.com/ja/featured_stories/entry_015.html)

データセンターの消費電力の大半は、サーバなどのIT機器と冷却のための空調の消費電力

超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発

- ◆ 経済産業省未来開拓プロジェクトとして実施
- ◆ 経済産業省直執行（2012年度）、NEDOプロジェクト（2013年度以降）
- ◆ 研究期間：2012年9月～2022年2月（予算総額 225億円）
- ◆ プロジェクトリーダー：荒川泰彦特任教授（東京大学）
- ◆ 受託機関：PETRA

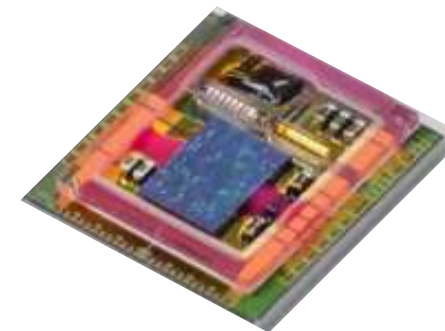
概要

- ◆ 光電子融合技術を活用し、**光と電気の変換回路（光トランシーバ）**を中心に開発
- ◆ 信頼性の高いプロセス技術を構築し、光トランシーバを搭載した高性能・高機能システムの低消費電力化を実現
- ◆ これらの社会実装により、エレクトロニクス産業の活性化に幅広く貢献

参加機関（第三期）

- ◆ PETRA（沖電気工業、産業技術総合研究所、日本電気、光産業技術振興協会、富士通、古河電気工業、三菱電機）
- ◆ 東京大学、京都大学、東京工業大学、横浜国立大学、早稲田大学（共同研究実施機関）

光I/Oコア

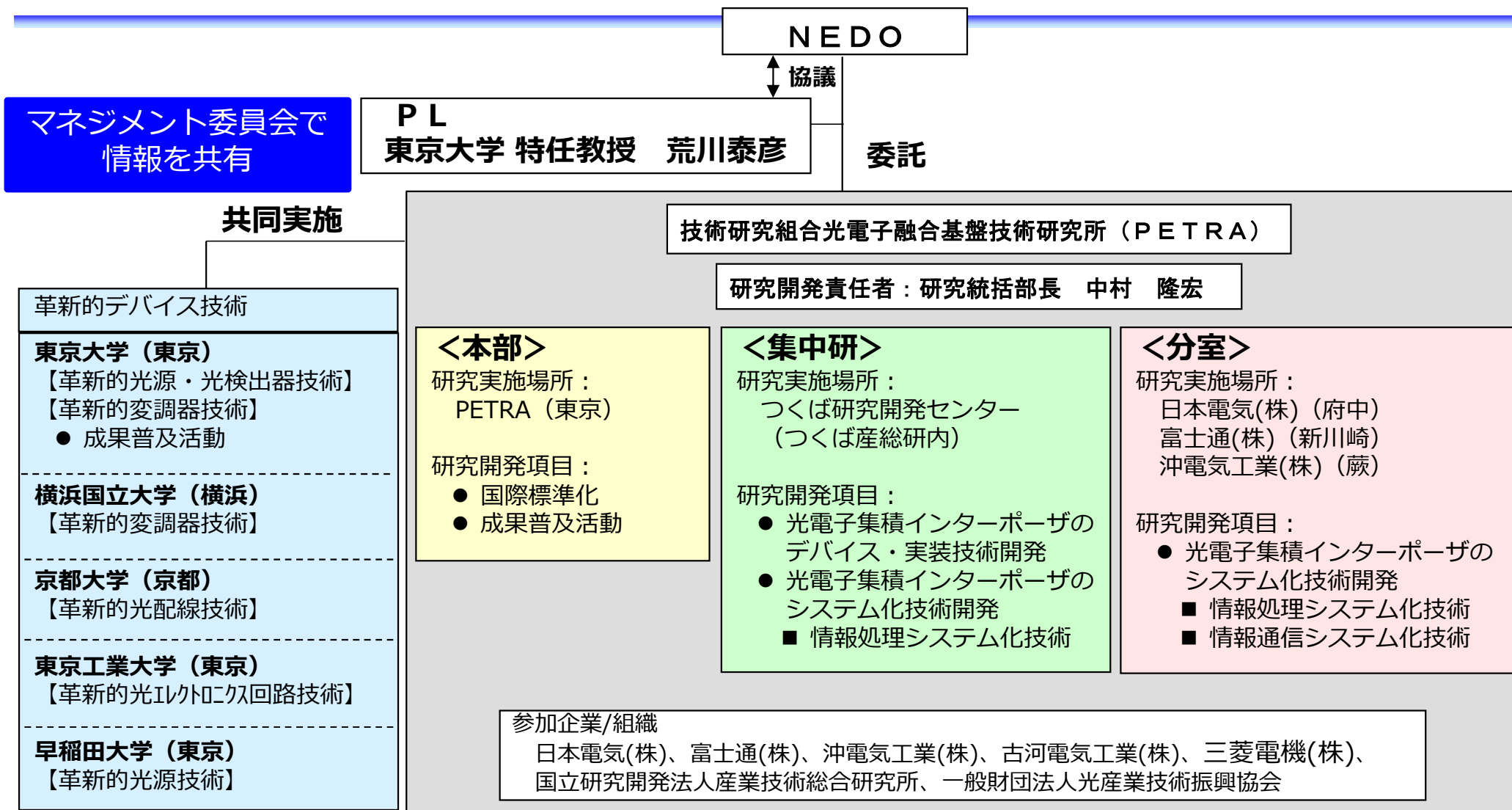


システム化実証技術



サーバシステムでの
消費電力量30%低減の実証

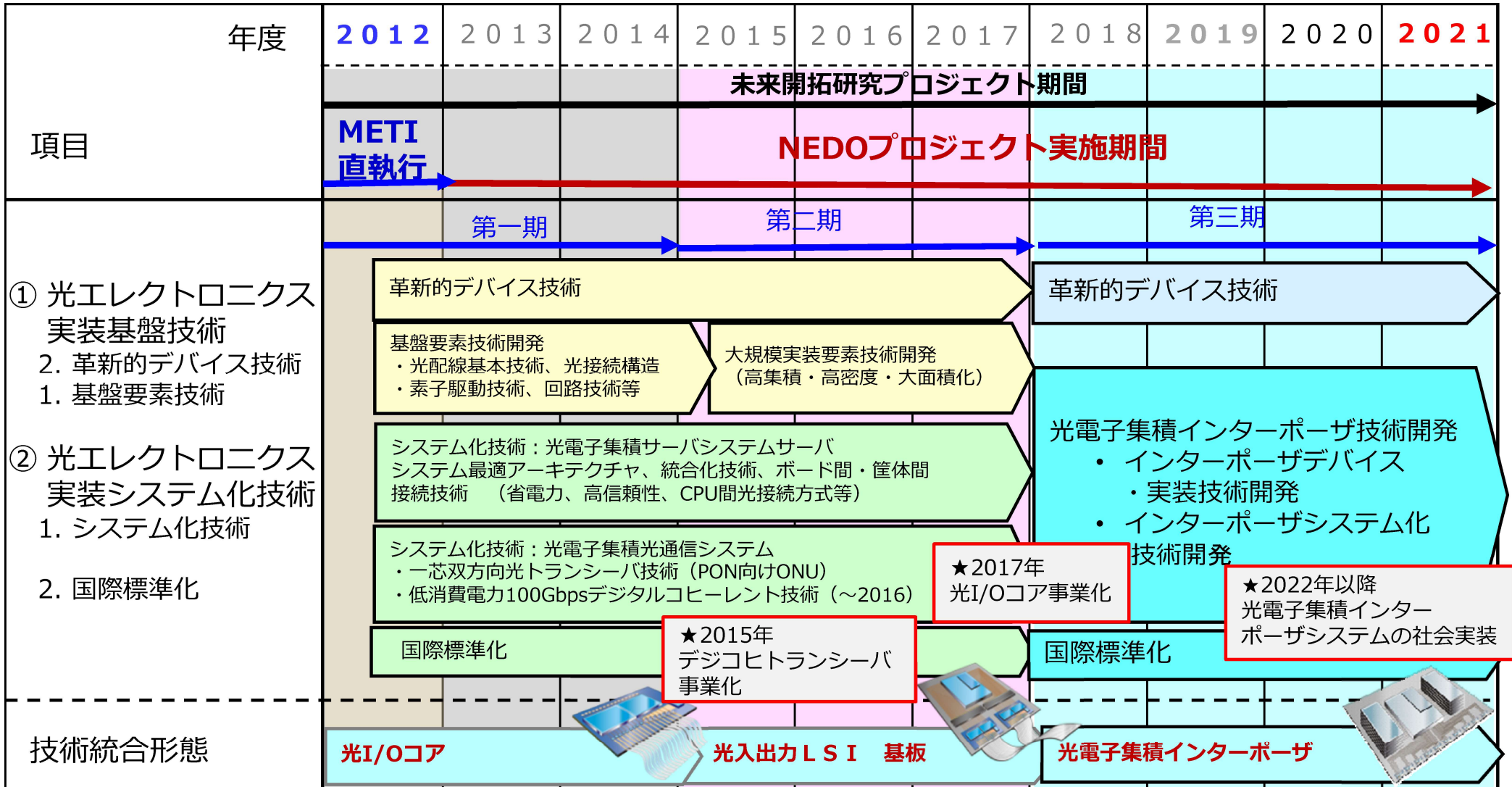
研究開発の実施体制(第三期)



- ✓ 組合員企業の研究者が集中研に結集、基盤技術であるデバイス・実装技術を開発
- ✓ 組合員企業の分室で実用化・事業化に向けたシステム化技術を開発
- ✓ 持続的高性能化に向けた革新的デバイスの開発は、大学と共同実施

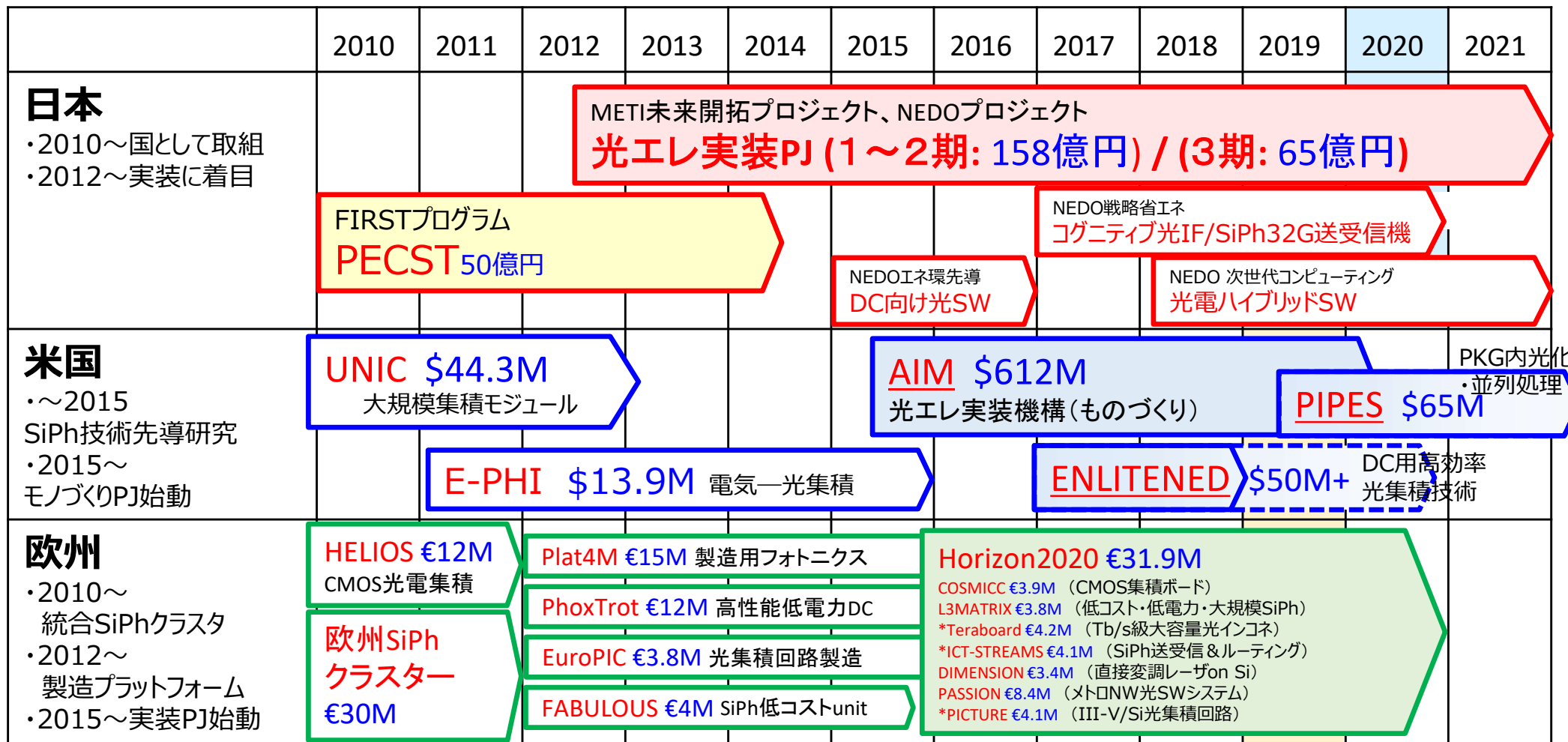
光エレクトロニクス実装PJの研究計画

- ◆ プロジェクトは3期に分割して実施
- ◆ デジコヒトランシーバと光I/Oコアの事業化をプロジェクト実施期間中に達成



光エレクトロニクス 世界の国プロ等の動向

日本は実装技術のグローバル開発を先導



- ◆ 日本: 実装主体のPJの先駆け
- ◆ 米国: 技術開発で先導
- ◆ 欧州: 国家間連携を主導

	日本 (PETRA)	米国 (AIM、PIPES)	欧州 (Horizon2020)
目標値	容量 : 10Tbps 消費電力: 1mW/Gbps (～2022/3)	容量 : 100Tbps 消費電力: 1mW/Gbps (～2022/12)	容量 : 2Tbps 消費電力: 2mW/Gbps コスト : 0.2€ /Gbps

内閣府最先端研究開発支援プログラム (FIRST)

- ◆ 2010年、30 課題の一つとして光電子融合技術開発が採択
- ◆ PETRAが研究支援機関
- ◆ 経済産業省未来開拓プロジェクトが研究開発成果を継承

内閣府報告書より抜粋 <https://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/followup/15.pdf>

FIRST荒川プロジェクト
「フォトンクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発」

助成額: 44.9億円 258
研究支援担当機関: (技組)光電子融合
基盤技術研究所(PETRA)

Photronics Electronics Convergent System Technologies (PECST)

<中心研究者>

荒川泰彦: 東京大学生産技術研究所／教授

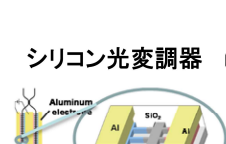


1980年 東京大学大学院博士課程修了
同生産技術研究所講師
1981年 同生産技術研究所助教授
1993年 同生産技術研究所教授
1998年 同先端科学技術研究センター教授
2006年 同ナノ量子情報IT研究機構長
2008年 日本学術会議会員、現在同第三部長

<主な受賞歴>
江崎玲於奈賞(2004)、IEEE William Streifer賞(2004)、藤原賞(2007)、産学官連携功労者内閣総理大臣賞(2007)、紫綬褒章(2009)、IEEE David Sarnoff賞(2009)、C&C賞(2010)、Welker賞(2011)、OSA Nick Holonyak賞(2011)

<研究成果>

(1)世界最高性能の精巧な要素技術の開発


シリコン上量子ドットレーザー シリコン光変調器 ゲルマニウム受光器

(2)光と電子を融合したシリコンフォトニクス集積回路(目標伝送密度10テラbps/cm²)実現




10Tbps/cm² (プロジェクト目標)

○1年前倒しで、目標性能を上回る30Tbps/cm²を達成、オンチップサーバ実現に向けたブレークスルーとして位置付けられる。

○電熱問題、消費電力問題を解決して、事業化へ(経産省の未来開拓技術プロジェクトへ引き継ぐ)

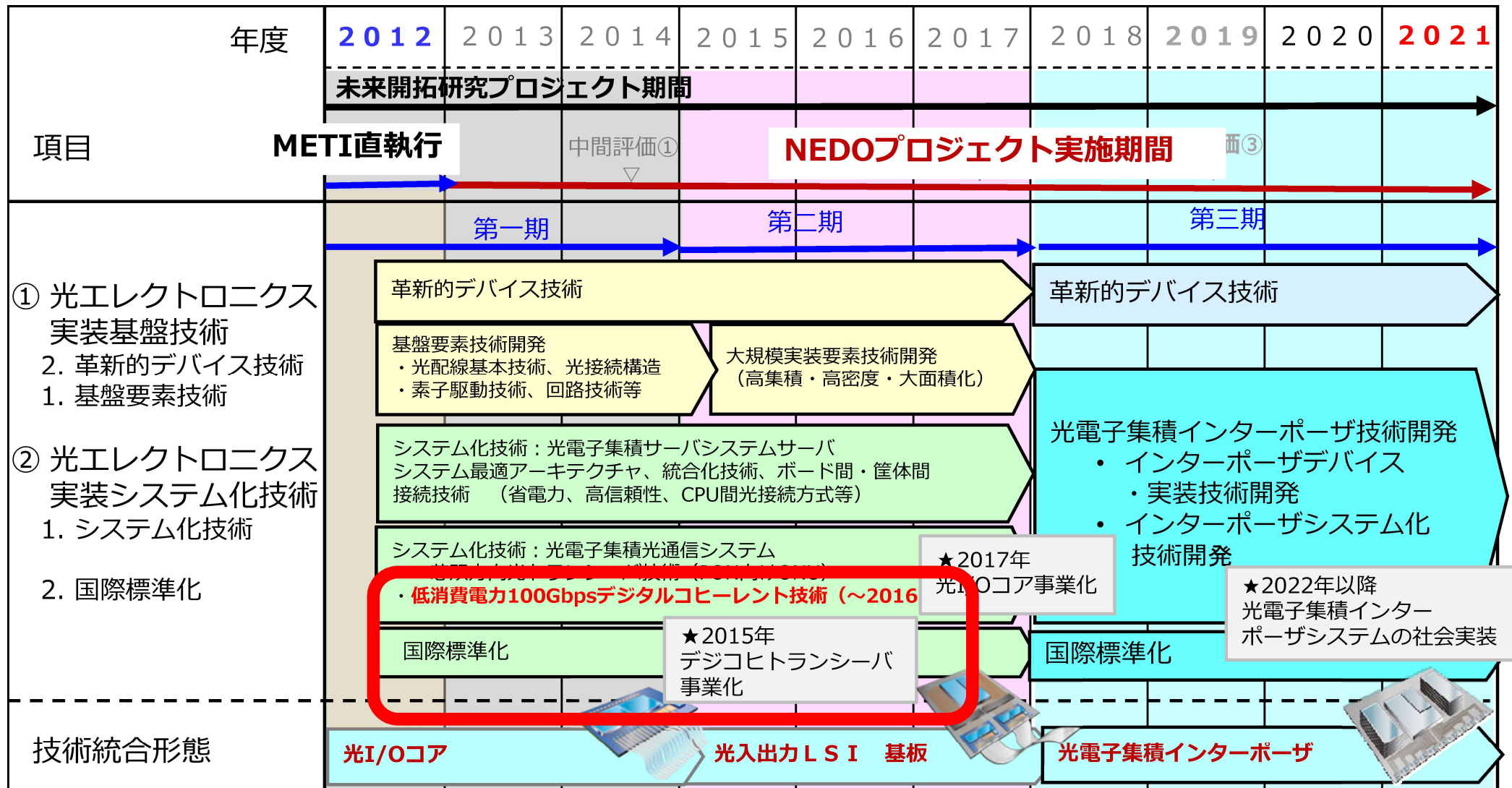
<研究概要>

電子と光子の融合で、半導体集積回路の限界を超える!

○光源搭載型シリコンフォトニクス回路で10テラbps/cm²の高密度伝送方式(現状の100倍)を実現し、オンチップサーバを目指す(2025年頃)

○“革新的技術の探究”と“システムの実証”を両立させ、最先端技術の先駆的研究と同時に、実社会に貢献する成果を創出する

光エレクトロニクス実装PJの研究計画



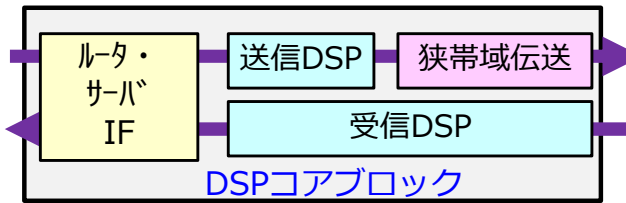
100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ

◆目的：

100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバにおいて消費電力を約30W程度まで低減できる技術を実現し、事業化を実現する

・低電力DSP-LSI

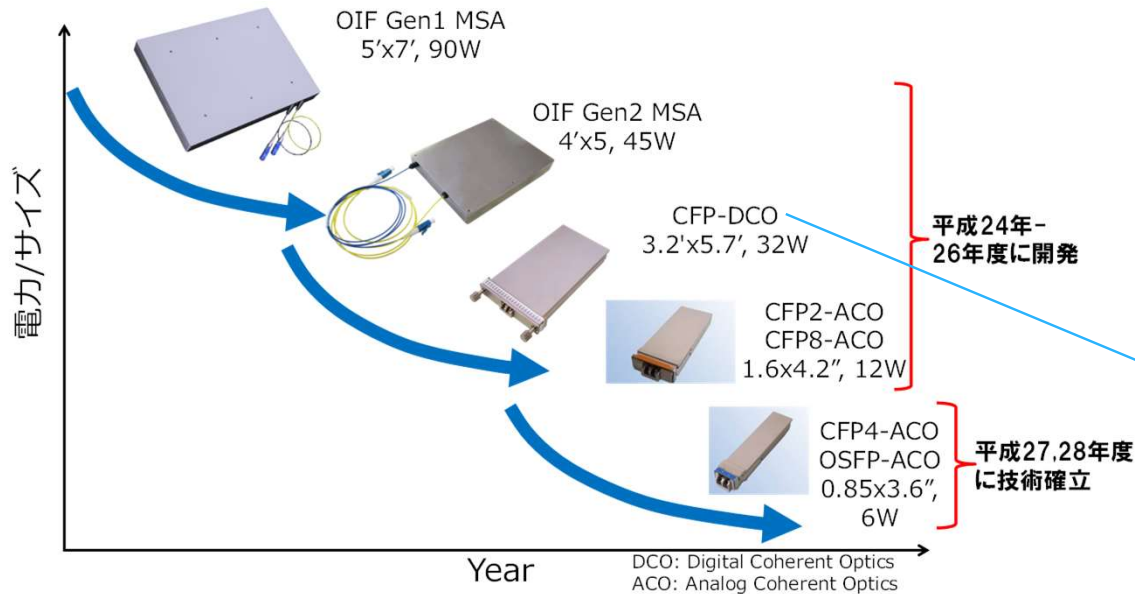
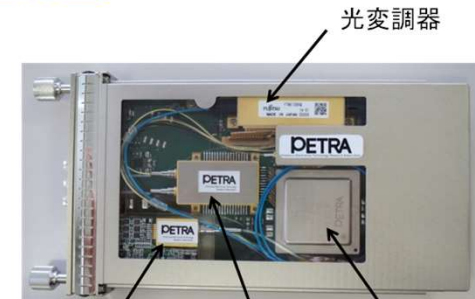
ルータ・サーバ 機器間インターフェース技術、狭帯域化伝送技術、低電力化技術を統合し、20nm CMOSプロセスを用いた低電力DSP-LSIを試作。20Wの低電力性能を確認



DSP-LSI
31x31mm²
150Mゲート

・CFP-DCO

DSP-LSIと小型光受信デバイスを用い、従来比で容積1/2以下の小型化と従来比1/3となる低消費電力(30W)を実現



デジタルコヒーレントトランシーバの事業化

- ◆ NELは低電力DSP-LSI・光送受信デバイスを2015年1月から事業化を開始
- ◆ FOCは4×5インチMSA、CFP-DCOデジタルコヒーレントトランシーバは2015年1月から、CFP2-ACOトランシーバは2015年9月から事業化を開始

NELでの 事業成果

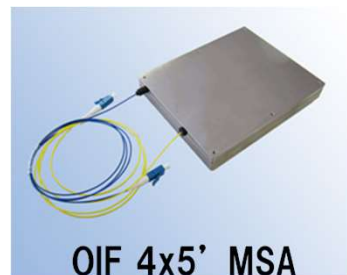


低電力DSP-LSI

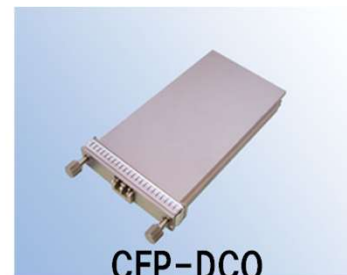


光送受信デバイス

FOCでの 事業成果



OIF 4x5' MSA

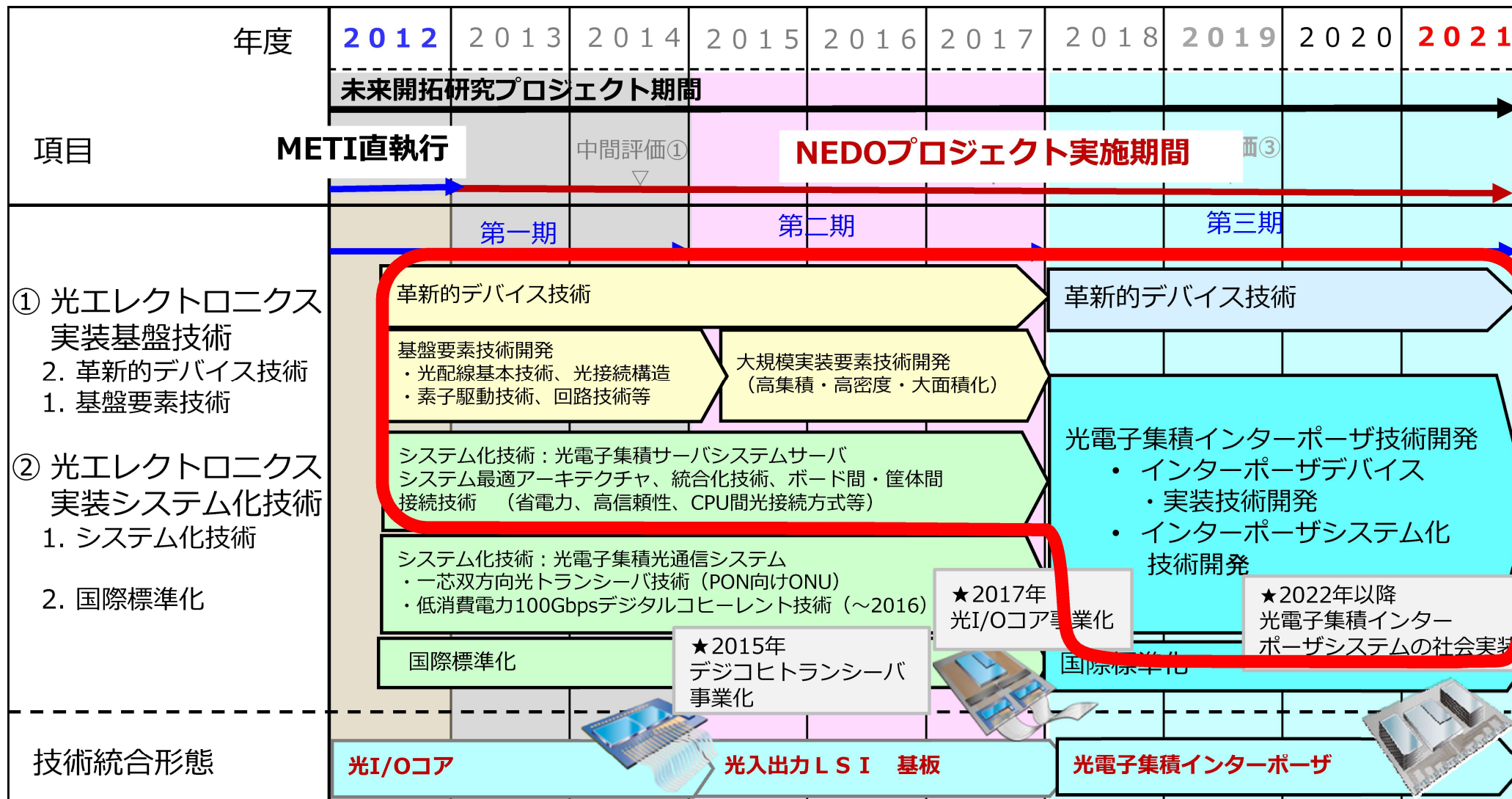


CFP-DCO



CFP2-ACO

光エレクトロニクス実装PJの研究計画



光配線の進展と本プロジェクトの成果

従来



サーバへの光配線適応

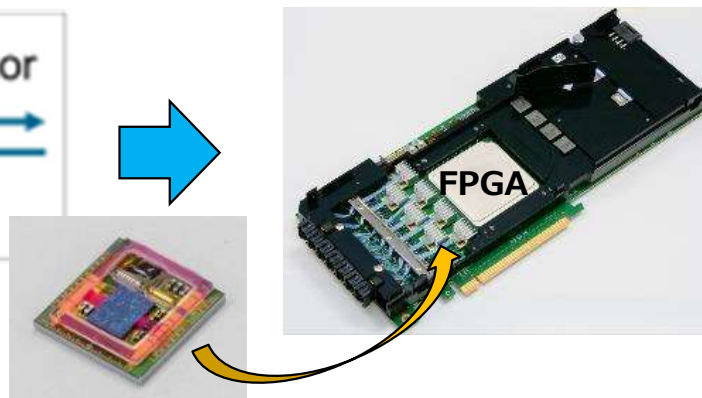


データセンタ、HPC等で実用化

PETRAで開発 (第1期、第2期)

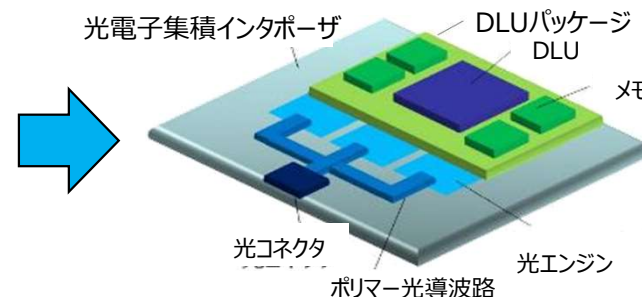


FPGAボードへの光I/O適応



アイオーコア社で光I/Oコアを実用化、NECPFでFPGAボードの製品化

PETRAで開発 (第3期)



組合員企業で製品化計画中

光配線の進展と本プロジェクトの意義

従来



サーバへの光配線適応

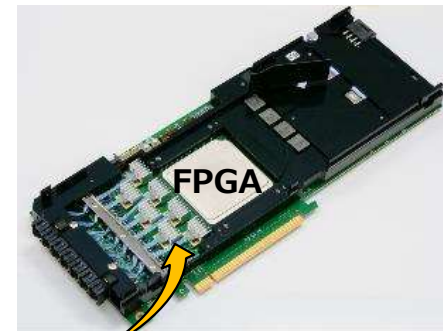


データセンタ、HPC等で実用化

PETRAで開発 (第1期、第2期)

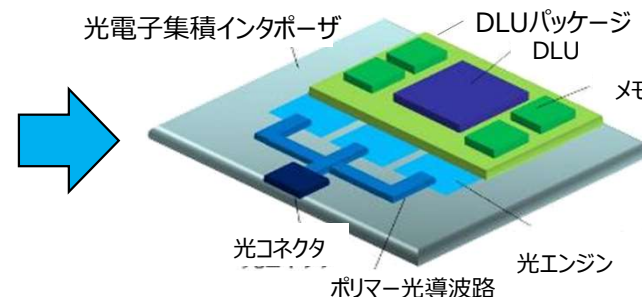
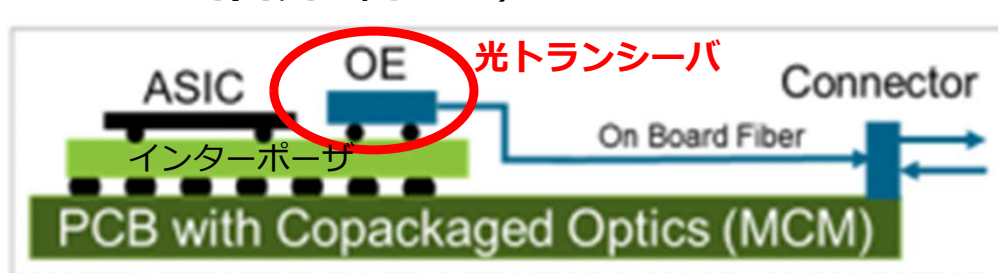


FPGAボードへの光I/O適応



アイオーコア社で光I/Oコアを実用化、NECPFでFPGAボードの製品化

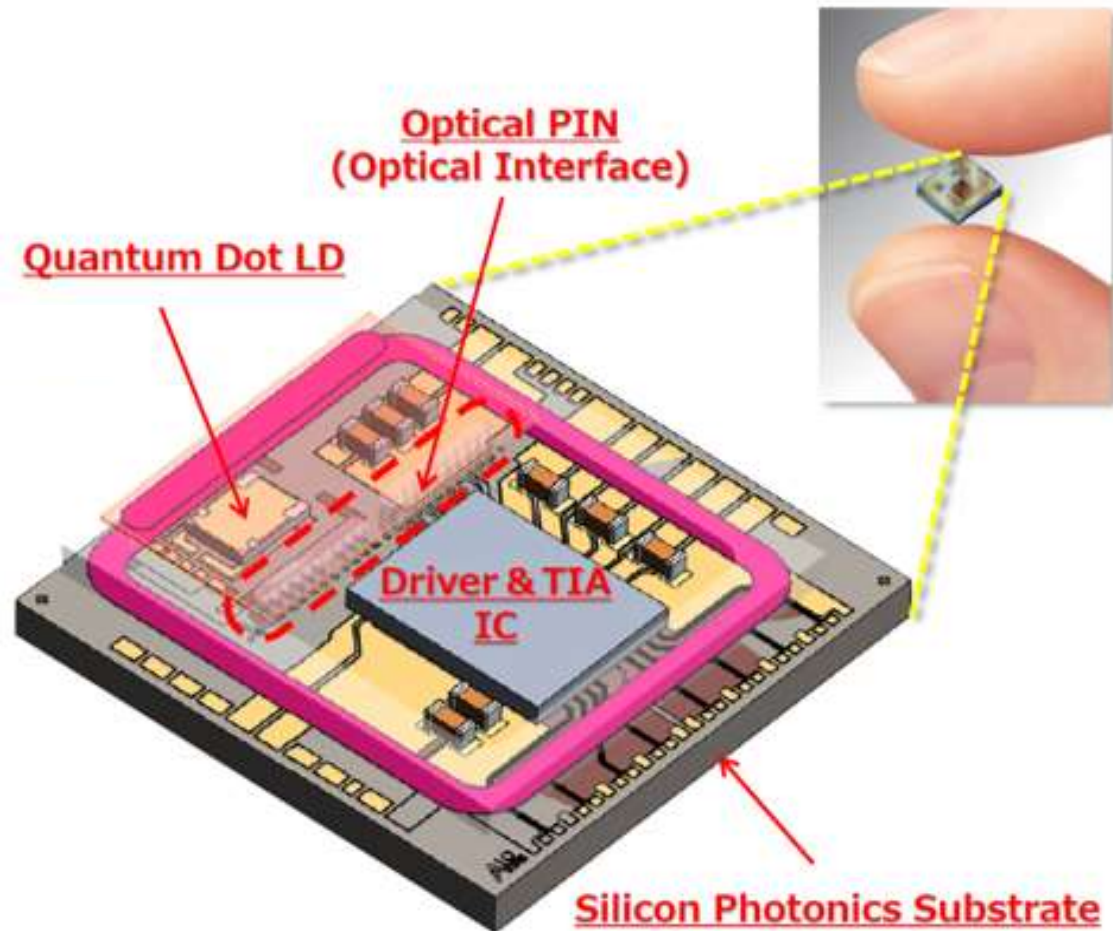
PETRAで開発 (第3期)



組合員企業で製品化計画中

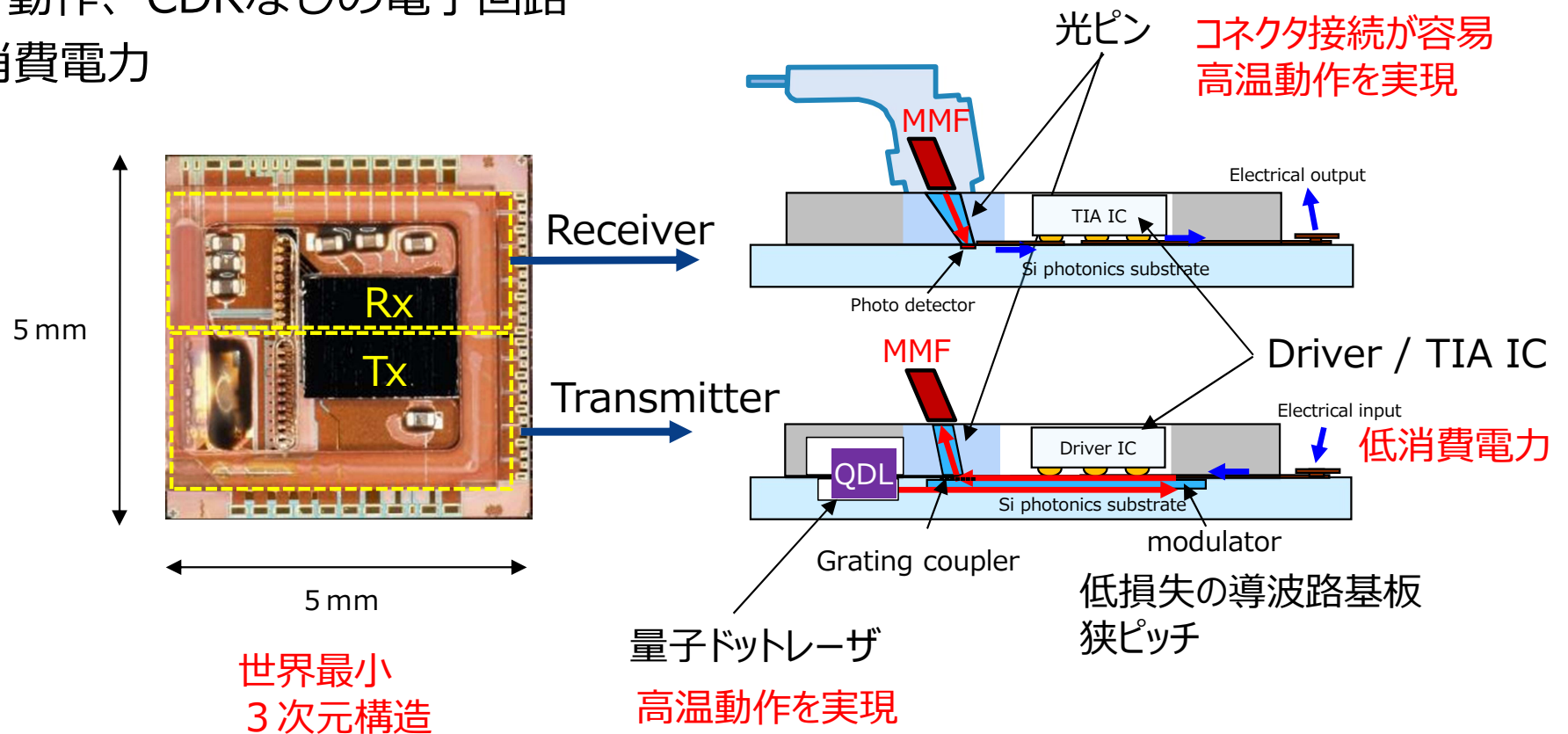
光I/Oコアの開発（第2期までの成果の代表例）

- ◆ 世界最小の光トランシーバを実現
- ◆ デザイン、設計技術、製造技術が相互に連携
- ◆ デバイス技術のみならず、実装技術にも注力
- ◆ 特許、意匠、ノウハウなど30以上の知的財産権を確保



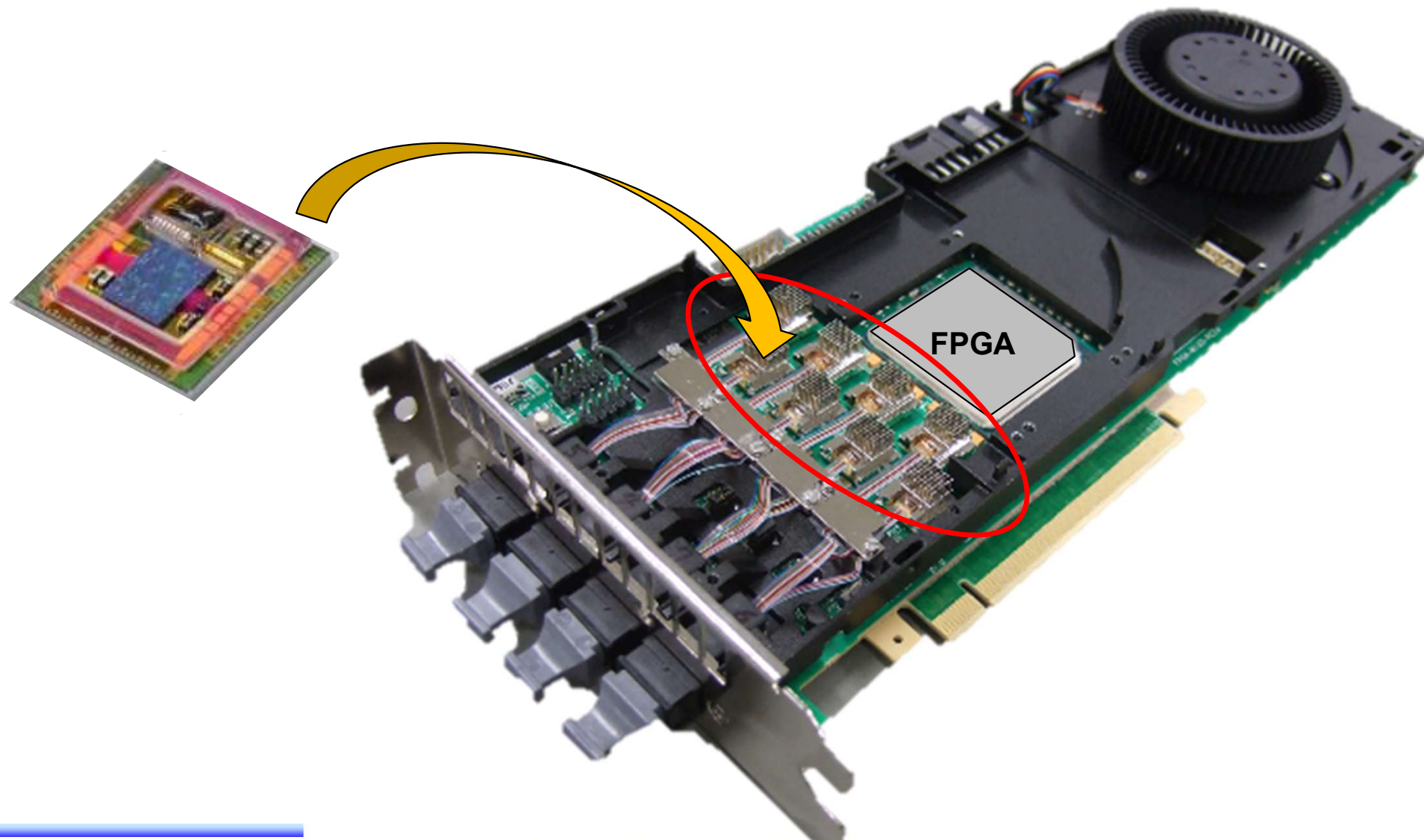
光I/Oコアの技術

- ◆ すべての送受信機能を5mm角のシリコンチップに三次元集積
 - ☞ 超小型・高密度パッケージ
- ◆ 100°C超動作可能な量子ドットレーザの採用
 - ☞ 高温動作、高信頼性
- ◆ 光ピンの採用により高トレランスなパッシブ実装実現
 - ☞ 高い生産性、低コスト
- ◆ 1W以下動作、CDRなしの電子回路
 - ☞ 低消費電力



光I/Oコアの応用例 – FPGAアクセラレータ –

- ◆ FPGAアクセラレータボード Up+Downで1.6Tbps
(25Gbps×4line×(Tx8ch+Rx8ch))
- ◆ 世界最高速の入出力を実装したFPGAアクセラレータボード



アイオーコア(株)：経産省認可の研究組合として初の分割会社

- 商号：アイオーコア株式会社（英文名：AIO Core Co., Ltd.）
- 資本金：100百万円（@2020年3月31日）
- 設立時資産：PETRA所有知財の一部を継承取得
- 設立日：2017年4月17日
- 事業内容：光I/Oコアの生産・販売
- 顧客：米国、欧州、中国の通信/コンピュータ大手と商談中
- 光I/Oコアの特徴



16:10 アイオーコア(株)代表取締役社長
福田秀敬氏

- ✓ 世界で最も、**高速**、**小型**、**低消費電力**、**低コスト**、**高温動作**の光トランシーバ
- ✓ 世界トップレベルの性能に加えて製造原価を大幅に低減、競合より**3~5割以上安価**な製品を実現可能

光I/Oコア

量子ドットレーザ
光ピン(光IF)

ドライバー/TIA
TGV(電気IF)

装置間

大規模ルータやスイッチなどの
伝送装置間や
放送機器間との接続

性能	
伝送容量	25Gbps x 4ch
消費電力	7mW/Gbps
動作温度	-40°C~85°C
光IF接合精度	±10μm

基板間

LSI間

光配線の進展と本プロジェクトの意義

従来



サーバへの光配線適応



データセンタ、HPC等で実用化

PETRAで開発 (第1期、第2期)



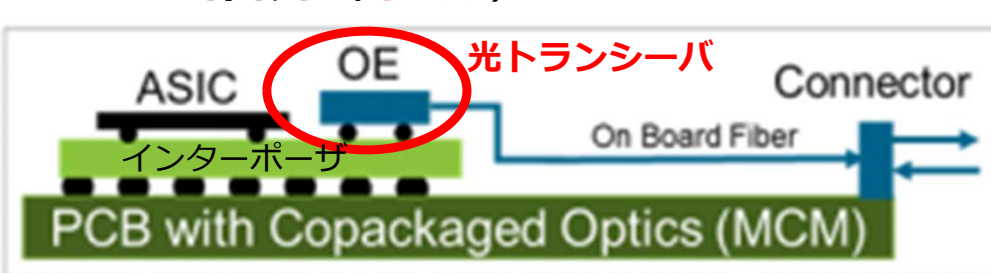
FPGAボードへの光I/O適応



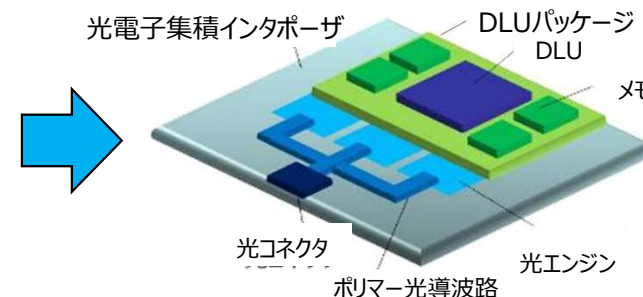
アイオーコア社で光I/Oコアを実用化、NECPFでFPGAボードの製品化

光I/Oコア

PETRAで開発 (第3期)

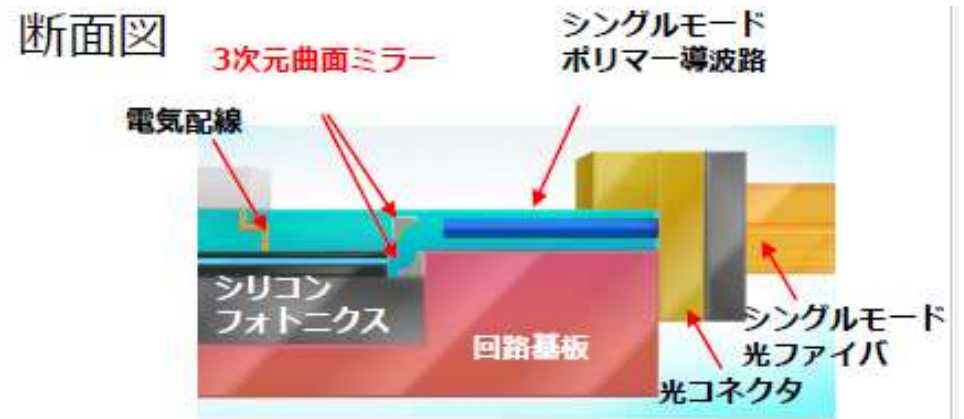
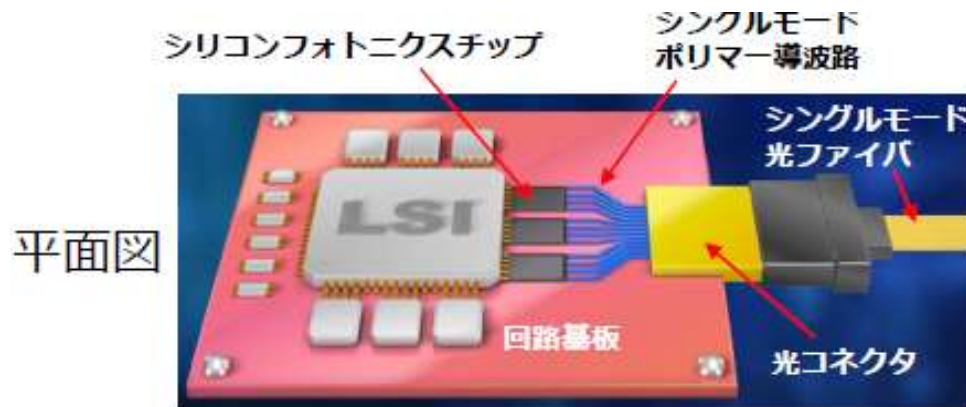


光電子集積インターポーザ



組合員企業で製品化計画中

光電子集積インターポーザに向けたデバイス実装技術開発



10Tbps/ノードの光電子集積インターポーザ

1シリコンフォトニクスチップ当たり 112Gbps x 16波 x 送受(2) = **3.6Tbps**



1 LSI 当たり 3シリコンフォトニクスチップで、3.6Tbps x 3 ≐ **10Tbps**

第一期の技術目標

第二期

第三期

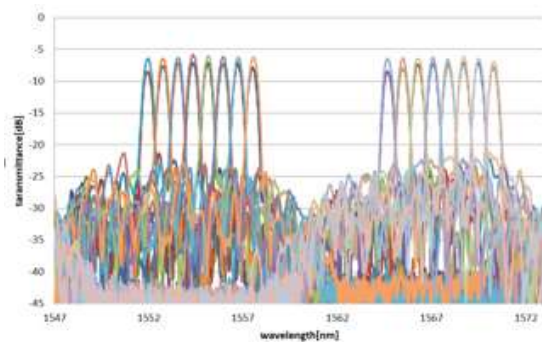
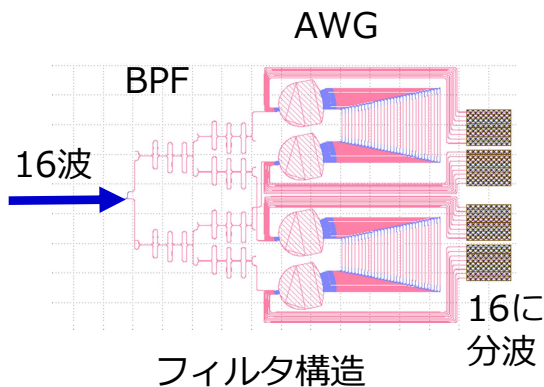
デバイス 技術 開発	高速デバイス	28Gbps/Si変調器	56Gbps/PAM4	112Gbps/56GBaud + PAM4
	低電力デバイス	5mW/Gbps /Si変調器	3mW/Gbps /高性能材料 (SiGe)変調器	1mW/Gbps /小型導波路埋込型 SiGe変調器
	波長多重デバイス	4波長/アレイ導波路型回折 格子 (AWG) (素子)	8波長/AWG(素子)	16波長/AWG+バンドパスフィルタ (集積回路)
実装 技術 開発	光の入出力	10μmレベル目合わせ精度/ グレーティングカップラ+縦型ポリマー導波路		20Tbps/mm²/ 3次元ミラー+横型ポリマー導波路
	電気配線構造	平面構造		インターポーザ構造

デバイス技術の最終成果

16波長多重フィルタ

—10Tbps/ノードに向けて—

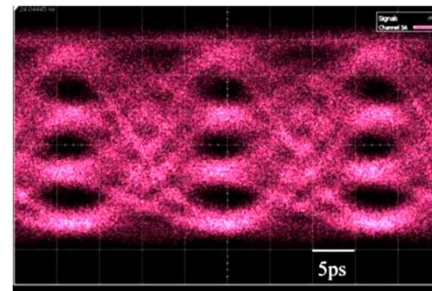
初段で大きな波長括りで合分波した後、AWGで細分化する16波長多重フィルタを開発し、波長分波を確認



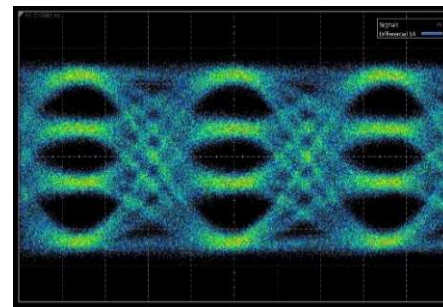
112Gbps光・電子回路

—10Tbps/ノードに向けて—

高速動作の光変調器/受光器とそれを駆動する電子回路を開発し、112Gbps動作を確認



GeSi電界吸収型光変調器の112Gbps光変調波形



Ge受光器とアンプ電子回路の実装構造の112Gbps電気受光信号

小型電界吸収型変調器

—1mW/Gbpsに向けて—

EA変調器向けCMOS駆動/アンプ回路を設計し、駆動電圧の低減と22nmノードの適用により、シミュレーションにより1mW/Gbpsに目途

消費電力 (シミュレーション)
(mW/Gbps)

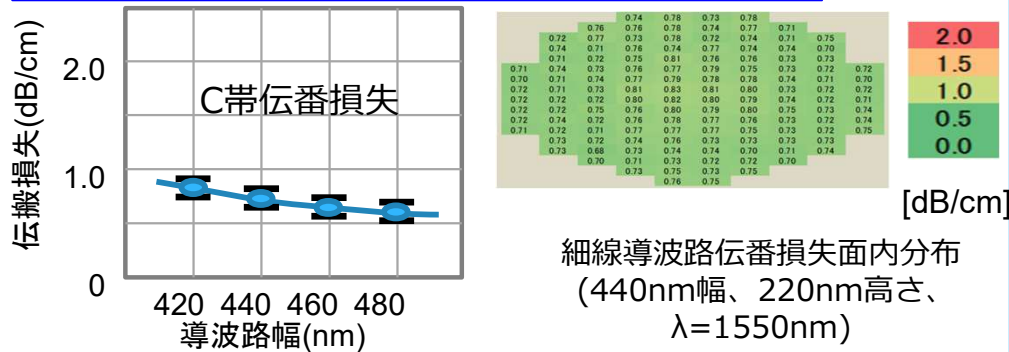
	第二期 28nm (MZ光 変調器)	第三期 22nm (EA光 変調器)
駆動回路	2.1	0.27
アンプ回路	3.5	0.66
合計	5.6	0.93

集積化プロセス技術・光実装技術の最終成果

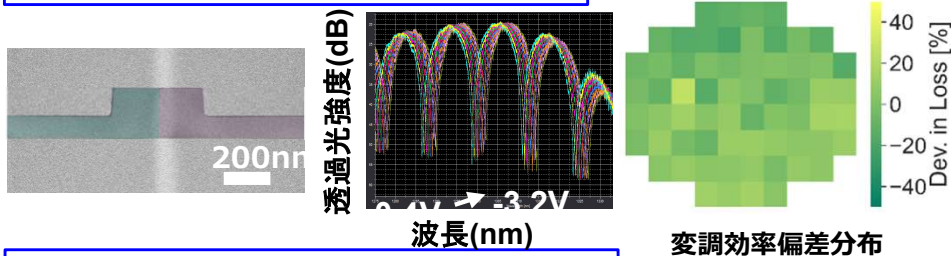
シリフォト集積化プロセス —プロジェクト成果の**社会実装**に向けて—

- ✓ シリフォト集積プロセス技術の300mm一貫試作ファンドリへの展開

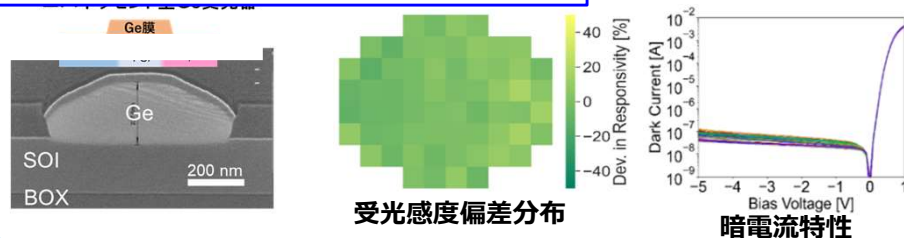
導波路：ラフネス低減で**世界最高の損失特性**



変調器： **高均一な変調特性**

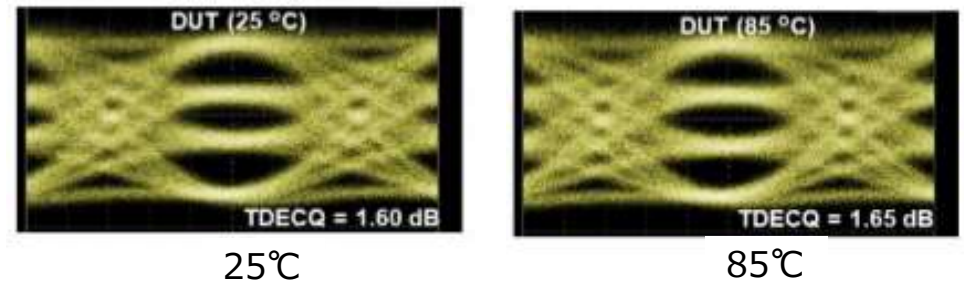
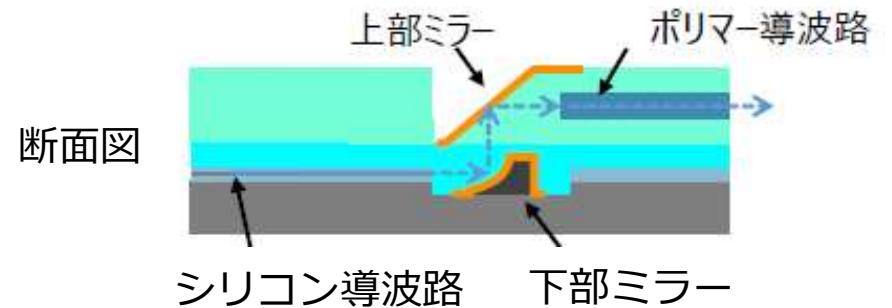


受光器： **高均一な感度特性を実証**



三次元ポリマミラー形成 —**20Tbps/mm²**に向けて—

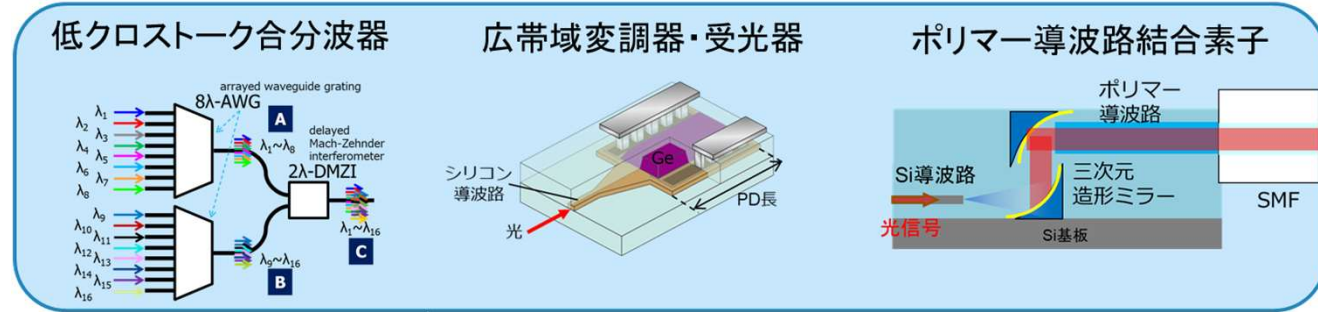
- ✓ シリコン導波路とポリマー光導波路の異種導波路接続技術として、3次元曲面ミラーを開発し、**20Tbps/mm²**に相当する高密度光接続構造を実現
- ✓ **温度無依存性**を実証



112Gbps光伝送波形

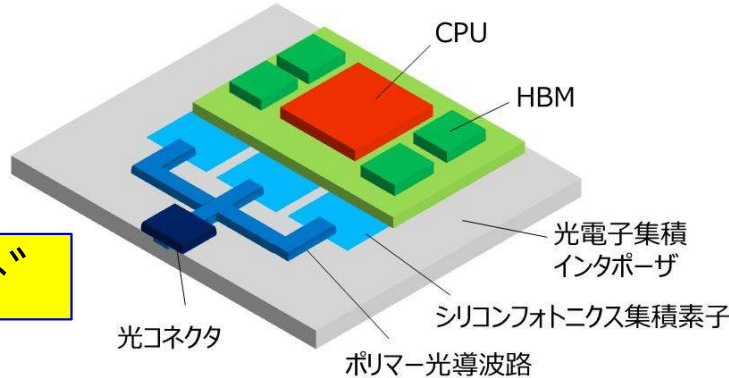
光電子集積インターポーザを搭載したシステム化技術開発

光電子集積インターポーザのデバイス・実装技術



情報処理システム化技術

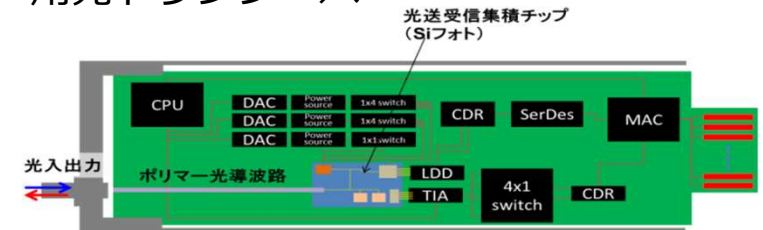
光電子融合サーバボード



10Tbps/ノード

情報通信システム化技術

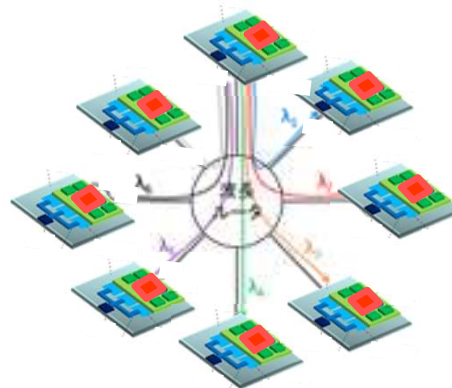
5Gモバイルのsmall cellアンテナ用光トランシーバ



10x2x2cm以下の小型化

情報処理システム化技術

ラックスケール並列分散システム

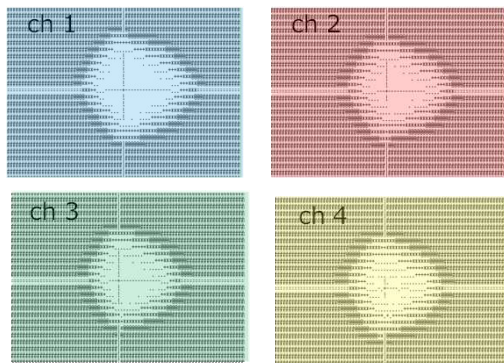
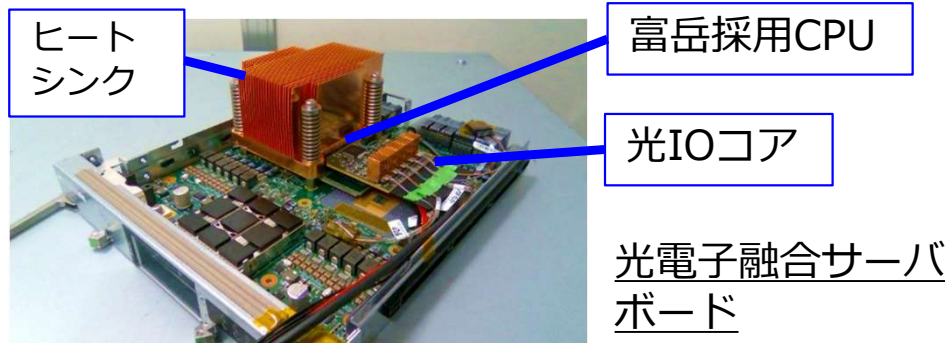


消費電力量 3 割削減

光電子融合サーバボード搭載の情報通信システム（最終成果）

光電子融合サーバボード —10Tbps/ノード—

- ✓ 富岳採用CPUを搭載した光電子融合サーバボードをスパコン試作システムに実装し、100Gbps（25Gbps x 4ch）伝送を確認
- ✓ 波長多重技術と組み合わせることで10Tbps/ノードの見通し



サーバ間光伝送特性
(アイパターン)

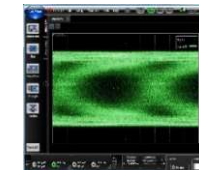
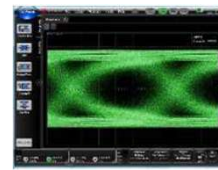
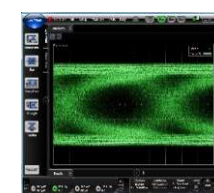
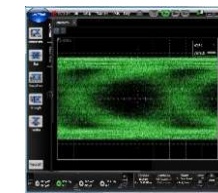
情報通信システム

—5Gモバイル用小型光トランシーバ—

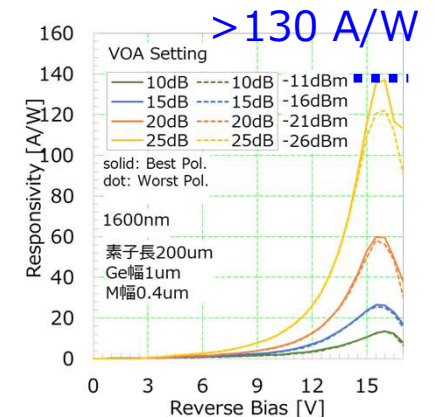
- ✓ シリフォトによりスモールセルアンテナ用光トランシーバを10x2x2cm以下に小型化
- ✓ 4波多重と高感度受信器（APD）により小型・大容量伝送を実現



小型光トランシーバモジュール



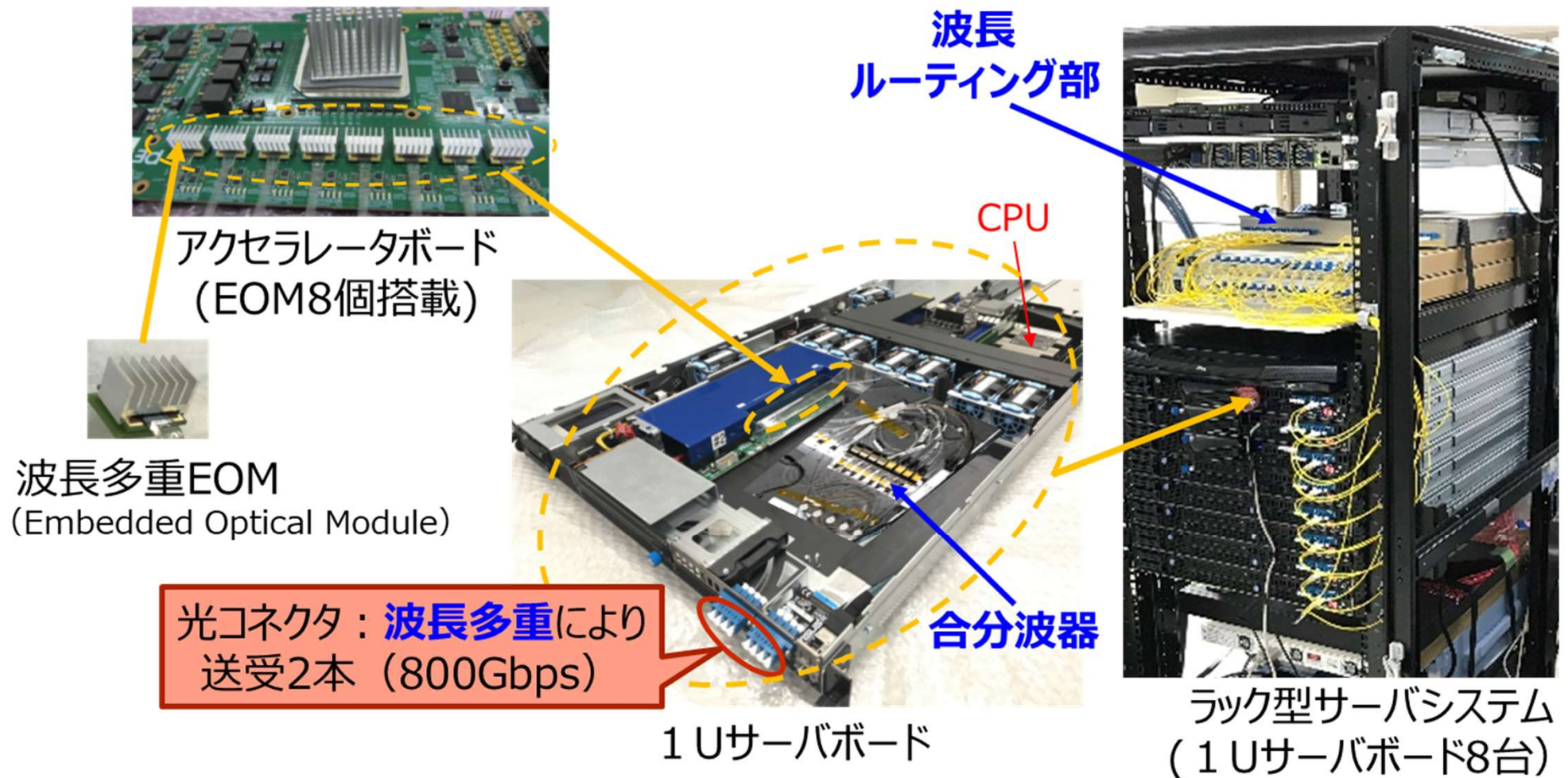
4波多重の受信特性
(アイパターン)



波長1600nm帯における
受光感度

ラックスケール並列分散システム（最終成果）

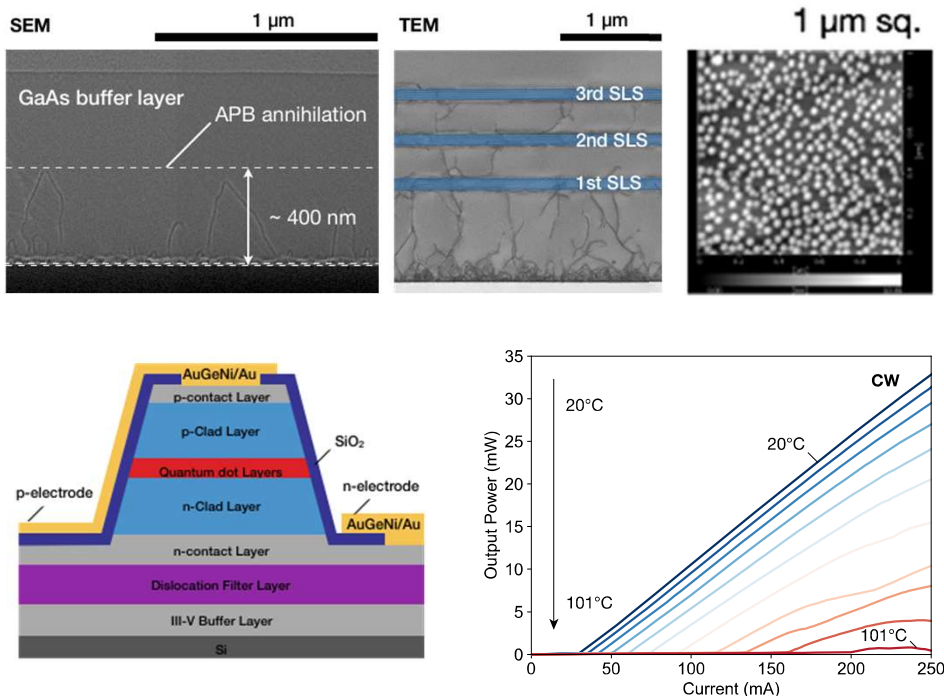
- ◆波長多重や波長ルーティングなどの光接続技術を用いて、全サーバボード間を結合した光電子融合ラック型サーバシステムを開発
- ◆電気スイッチを介した従来のデータ伝送方式と比べ、計算速度を一桁以上高速化し電力量30%以上を削減



革新的デバイス技術の代表的最終成果

シリコン基板上直接成長量子ドットレーザの実現

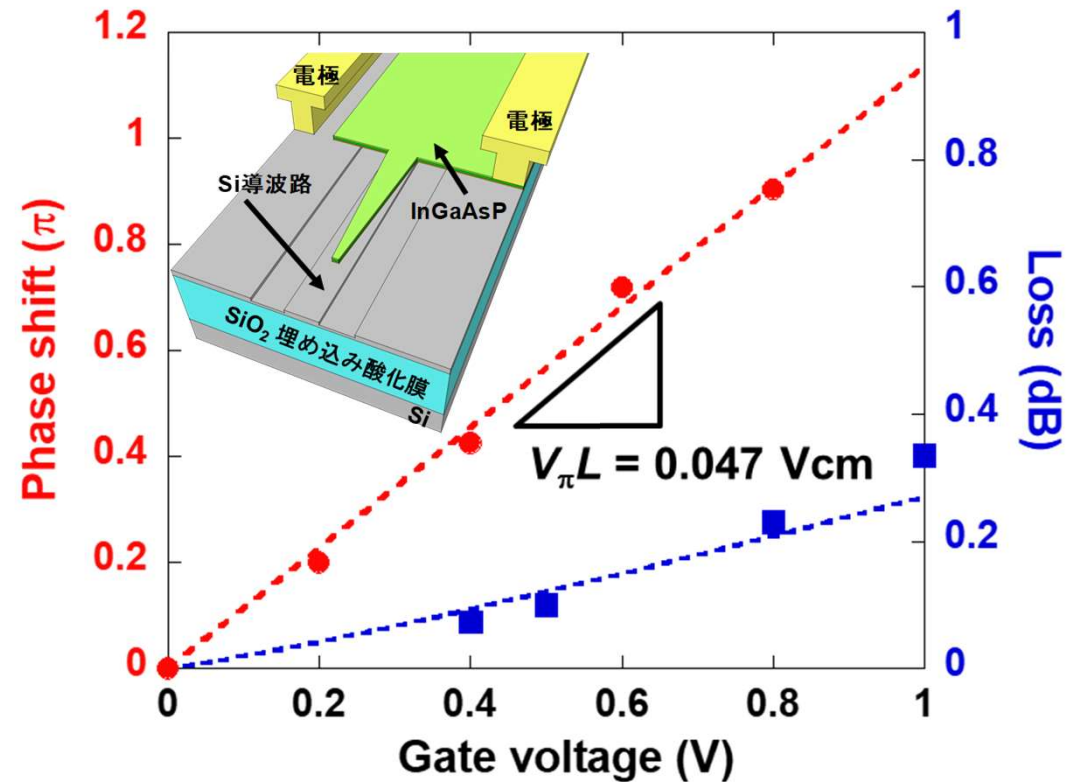
- シリコン (100) 基板上に全MBEによる直接成長量子ドットレーザの実現に成功
- 100 °C 以上の高温連続波動作を実現



J. Kwoen et al. Opt. Express **26** 9 11568 (2018)
 J. Kwoen et al. Opt. Express **27** 3 2681 (2019)
 J. Kwoen et al. Opt. Express **29** 18 29378 (2021)
 J. Kwoen et al. Electron. Lett. **57** 14 567 (2021)

III-V/SiハイブリッドMOSキャパシタを用いた超高効率光変調器の実現

- III-V層への電子蓄積による光変調を世界初実証
- Si変調器の10倍の効率、1/10の光損失を実現



Nature Photonics, vol. 11, no. 8, pp. 486–490, Jul. 2013

将来の光電子集積サーバ搭載用光源技術・光変調器技術を確立

成果の実用化・事業化に向けた取組と見通し

第一期、二期の成果の事業化

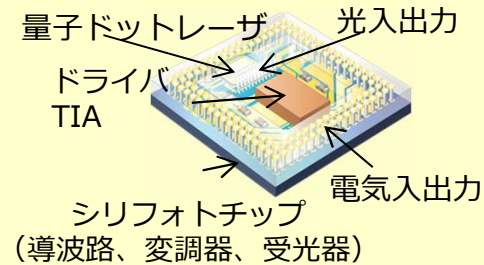
- ⇒PETRAの一部を分割し新会社化
- ⇒新会社が組合員企業と連携して事業化

第三期の成果

- ⇒技術開発成果を用いて組合員企業による事業化

光I/Oコア

- ・サイズ5×5mmの25Gbps/chの光トランシーバを実現



富士通：次世代サーバ

HPCシステム、データ分析を活用したDXサービス事業



NEC：AI基盤向けHPC/ラックサーバ

HPCやラックサーバ領域において光接続FPGAアクセラレータを組み込み、性能向上、コスト削減によりシェア向上を狙う



アイオーコア株式会社 (AIO Core Co., Ltd.)

- ・事業内容：光I/Oコア技術を承継し、生産・販売
- ・設立日：2017年4月17日

OKI：5Gモバイル向けTWDM-PON ONU

スモールセルアンテナに組み込み可能な超小型ONU



組合員企業

- ・事業内容：光I/Oコアを集積化し大容量LSIを光接続
- ・組合員企業にて製品化に着手

シリフォト設計・プロセス統合プラットフォームの構築

- ✓ 手戻りがなく短期間でシリフォトチップ製造を可能とするプロセスと設計を統合したプラットフォームを構築
- ✓ 組合員企業/アイオーコア社に展開し、低コストでシリフォトチップ供給が可能となるプラットフォームとして活用する

まとめ

- ◆ 本研究開発プロジェクトでは、光配線技術と電子回路技術を融合した光エレクトロニクス実装システム基盤技術を確立し、システムレベルでの光配線技術の有効性を実証するとともに、その事業化への道を拓いた
- ◆ 注力技術として
 - シリコンフォトニクス超小型光I/Oコア
 - 変調器、受光器、光源、波長多重光回路などの基盤デバイス技術
 - シリコンフォトニクス集積化プロセス技術
 - シリコンフォトニクスを活用したシステム化技術
 - 量子ドットレーザや新型変調器などの革新的デバイス技術を開発
- ◆ 製品化を目指した技術開発の推進により、光トランシーバの分野において、研究開発フェーズから事業フェーズへの橋渡しを達成
- ◆ 本研究開発プロジェクトの成果が、デジタルトランスフォーメーションおよびグリーントランスフォーメーションの統合的发展に活用されることを期待する

PETRA