

本講演の要点・見どころ

第3回講義

次世代の光パケットスイッチ技術の展望

講義の要点

IOWN・光電融合技術の現状と、URLLCサービス向けの低遅延保証型IPスイッチの要求条件。

CPOを活用して実現する、AWGと波長可変レーザ等を適用した光パケットスイッチの構成。

ここが見どころ！

光機能デバイスによるIOWN技術と、CMOS半導体によるTDM技術を融合した光パケットスイッチ。

Beyond 5Gの実現に有効な「光と電子技術」の融合

光技術による「伝送」と電子技術による「処理」
⇒光と電子の緊密な結合「光電融合型技術」

IOWN構想の発表（2019年5月）
(Innovative Optical and Wireless Network)

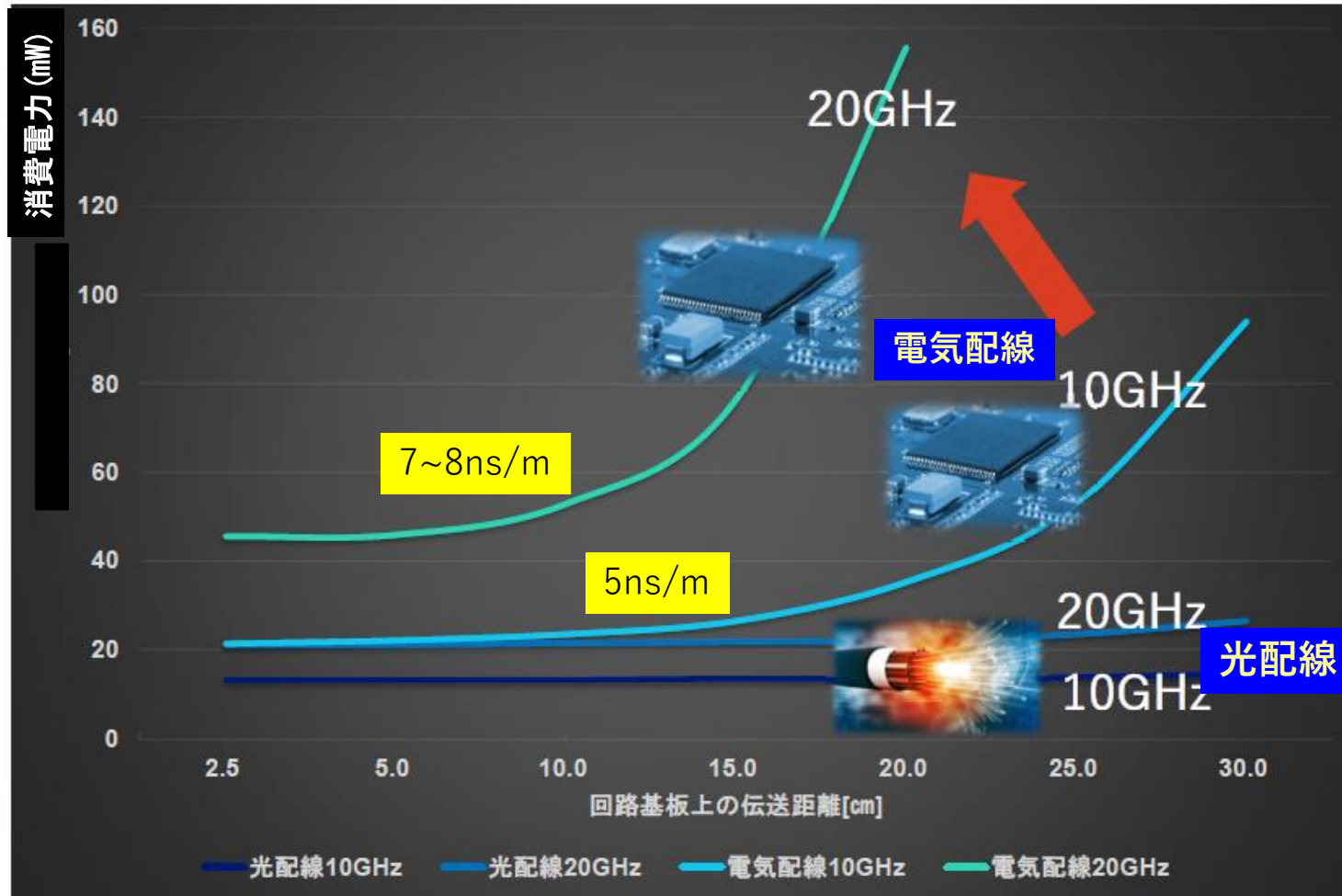
光技術による「伝送」



電子技術による「処理」



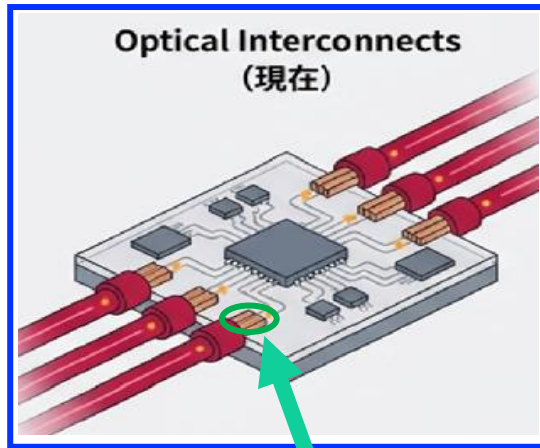
回路基板上での電気配線と光配線の距離別消費電力



出典: NEDO 光エレクトロニクスシンポジウム資料(2015.6)

IOWNの目指すオール光回路の実装(→**超低消費電力化**)

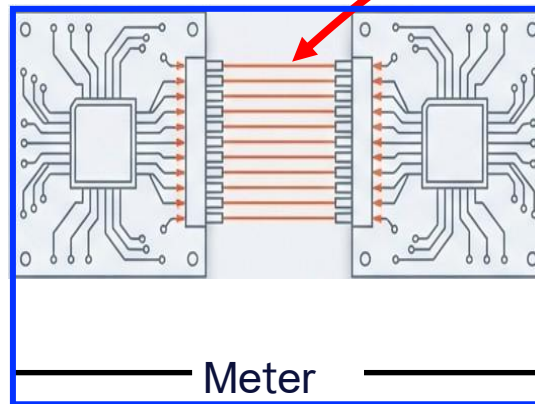
光ケーブルによる
ラック間の接続



O/E変換, E/O変換

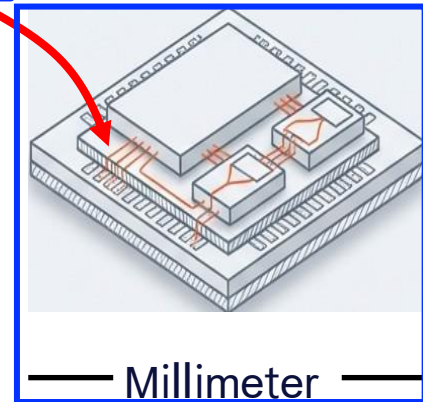
パッケージ間での光通信

Board-to-Board



パッケージ内での光通信
チップ内での光通信

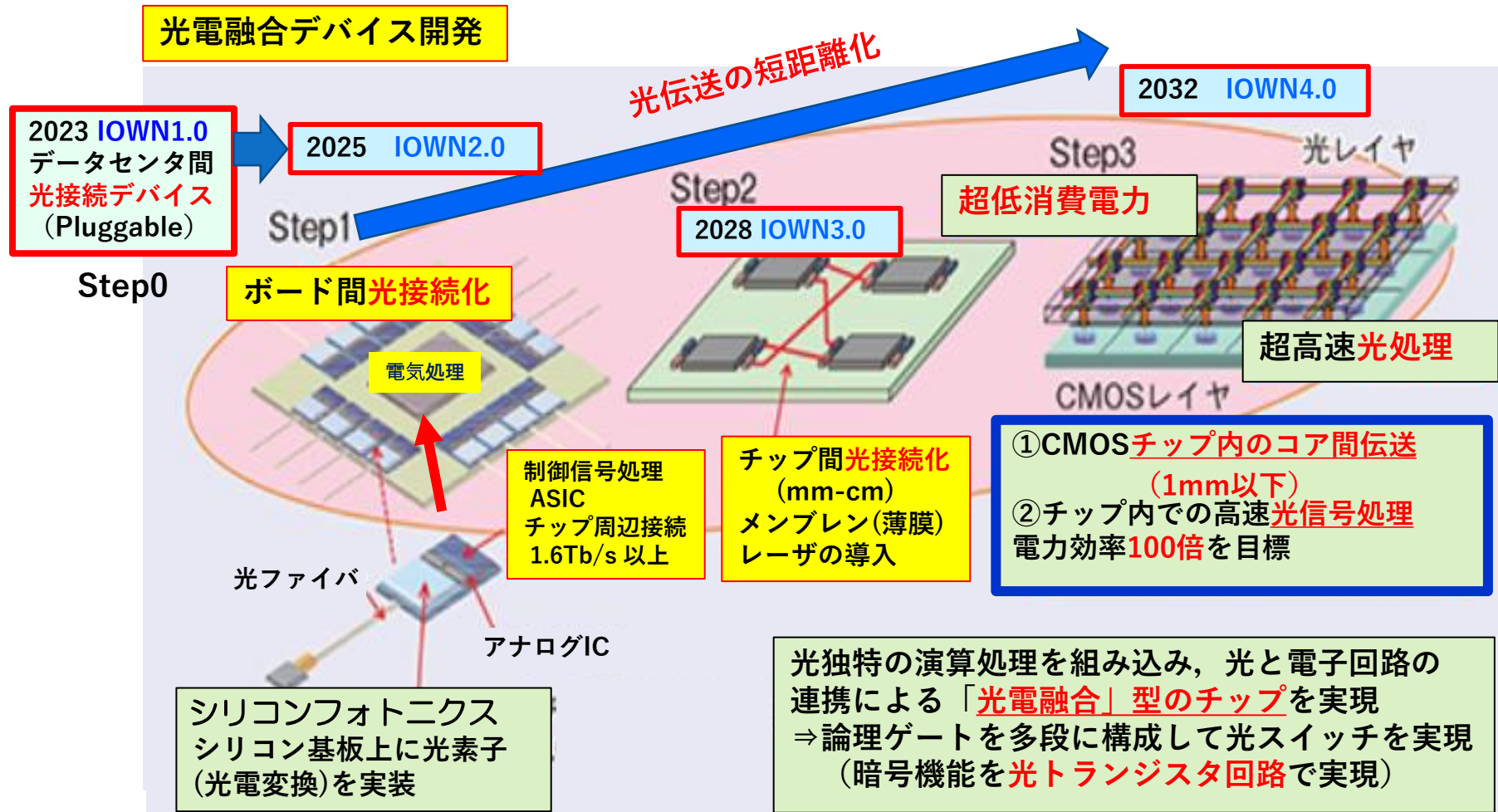
Chip-to-Chip/ Intra-Chip



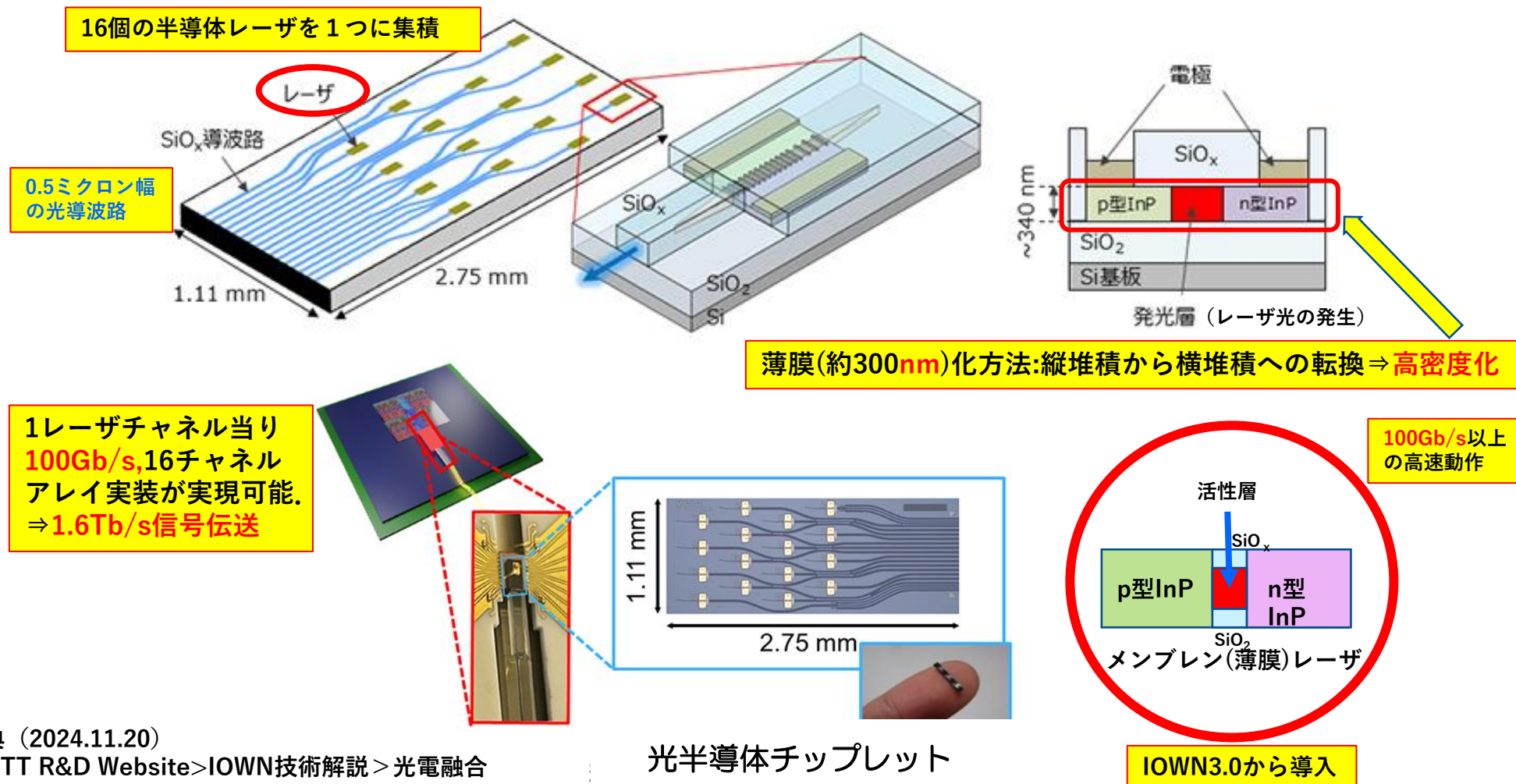
光配線

パッケージ内では、伝送距離が短くなるほど、消費電力とサイズの制約が厳しくなる。半導体上に、薄膜で小型・低容量の光機能素子や電気回路のチップセットを開発し、相互を**光配線**で接続することにより**CPO** (Co Packaged Optics) 基盤を開発⇒**IOWN**の一つの目標である超**低消費電力化**に貢献。

IOWNの研究開発上のステップのイメージ



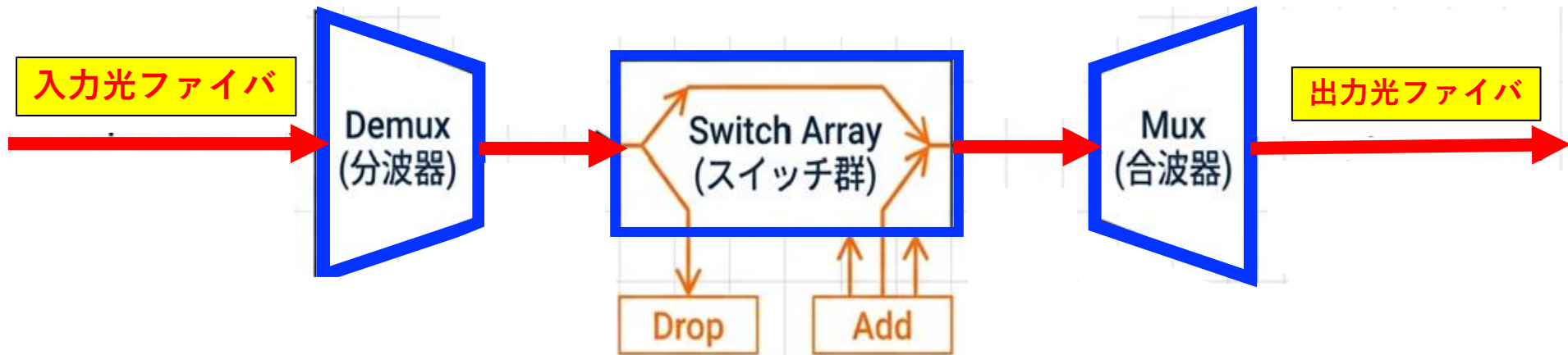
メンブレン(薄膜化)化合物半導体上の高密度レーザ実装



出典 (2024.11.20)

: NTT R&D Website>IOWN技術解説>光電融合

システム実装：ROADMと光クロスコネク



ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer):

- 波長ごとに「通過(Through)」と「分岐挿入(Add/Drop)」を動的に切替。
- 32波長モジュール性能: 挿入損失 **0.76 dB** / 消光比 **>72 dB**。

OXC (Optical Cross Connect):

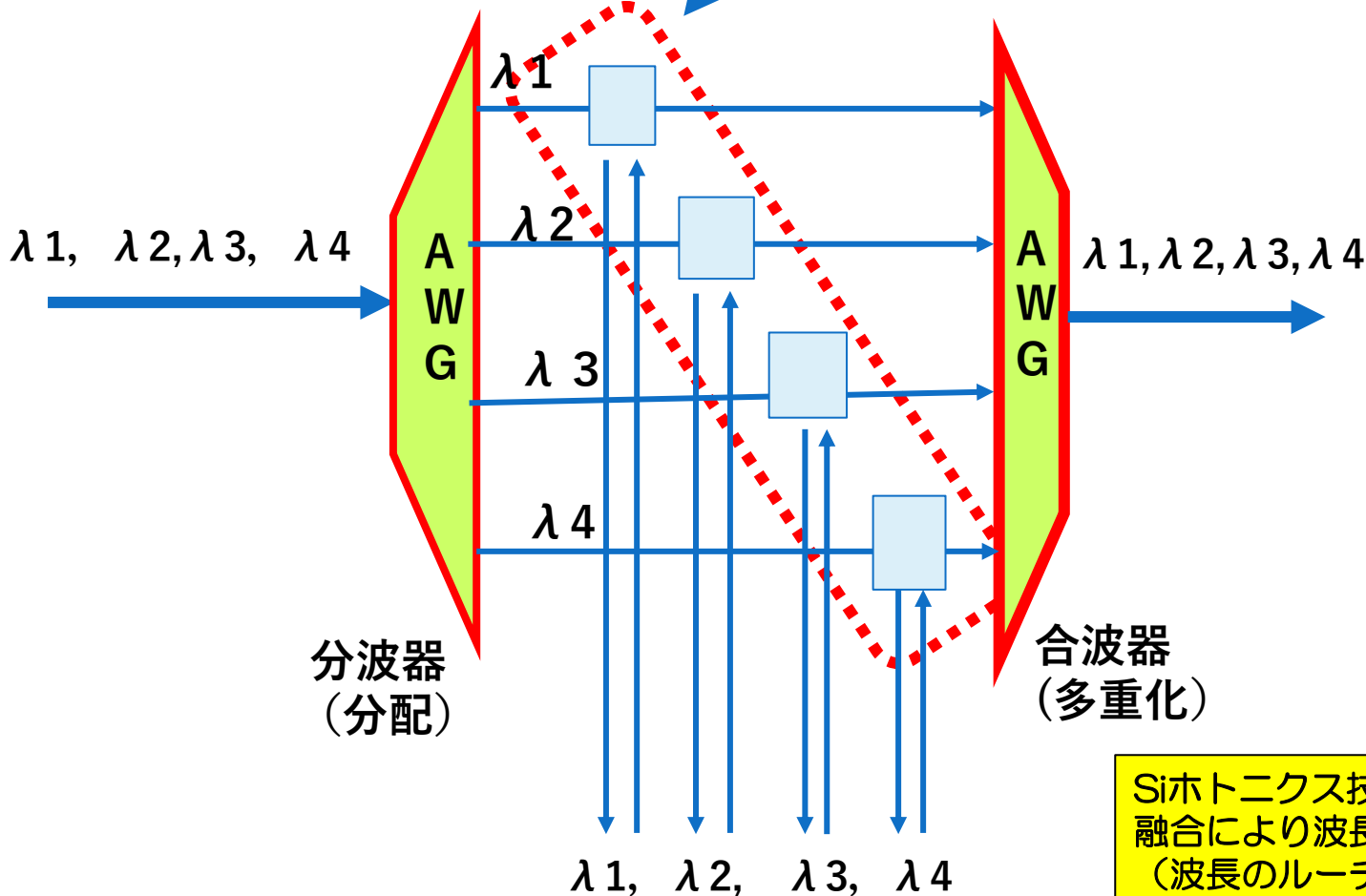
- 電気変換なし(Optical Bypass)で経路切替。
- 低遅延フォトニックネットワークの中核技術。

ROAMの具体例

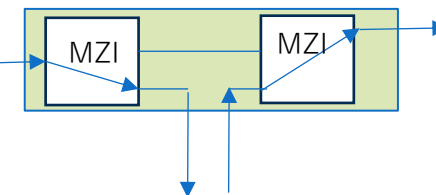
MZIの組み合わせにより
2つの送受信モードが波
長多重伝送路上で実現

集積化された光部品と
して1チップで実現。

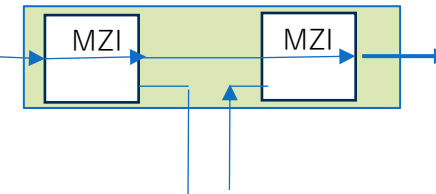
切り替え機能をもつ
MZI組み合わせパターン



(送受信の併用モード)



(送新データの通過モード)



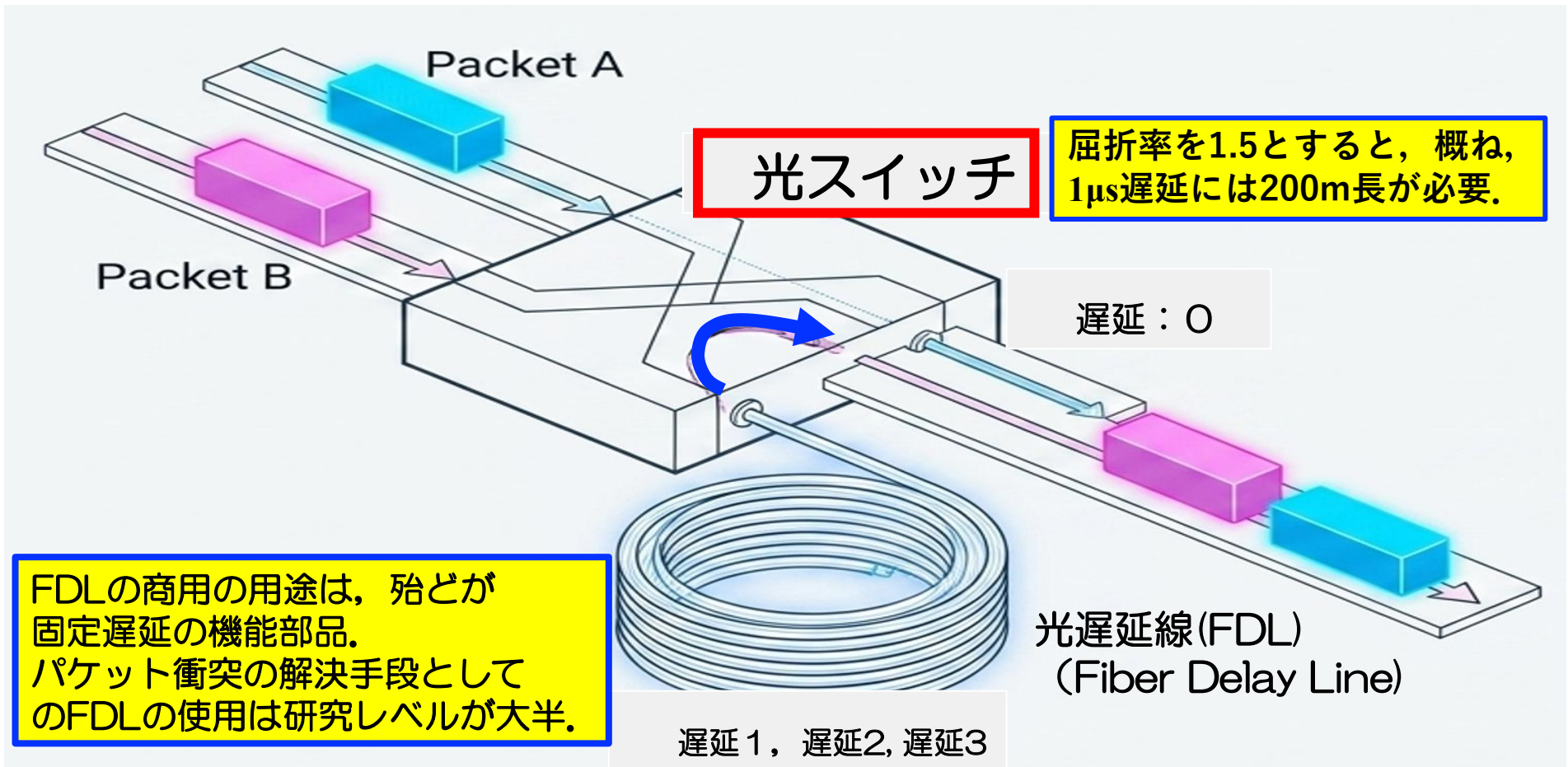
Siホトニクス技術とメンブレン（薄膜）技術の
融合により波長単位でのルーチング実現例
(波長のルーチング処理用の光部品の集積化)

現状の光スイッチにおける課題

- (1) 光伝送路上でのパケットの多重化を異なる回線間で実現。
- (2) 異なる入力線上のパケットが、同一の出力ポートでの衝突を回避する方式の実現

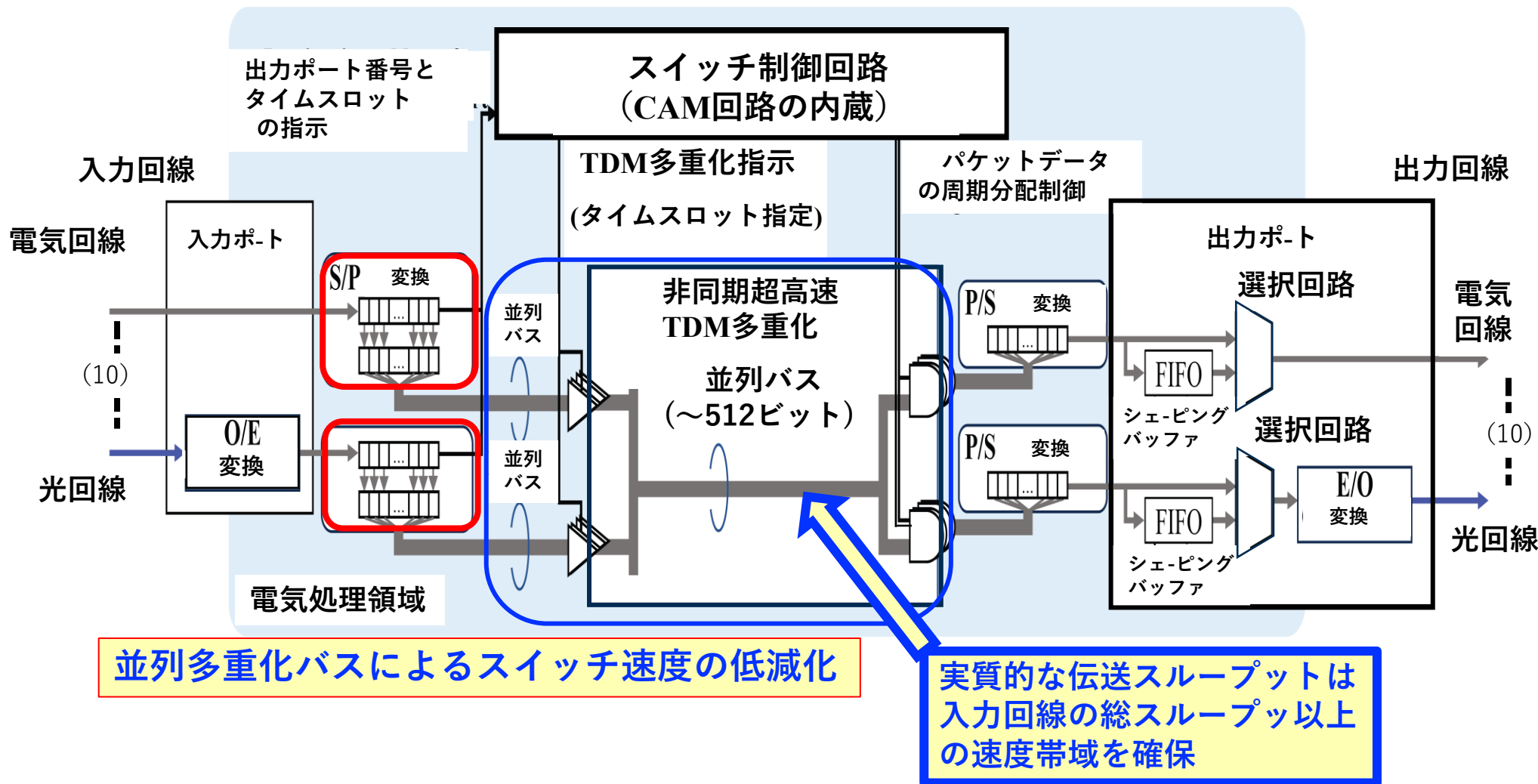


現時点での解決策：各種の異なる長さの遅延線を配備

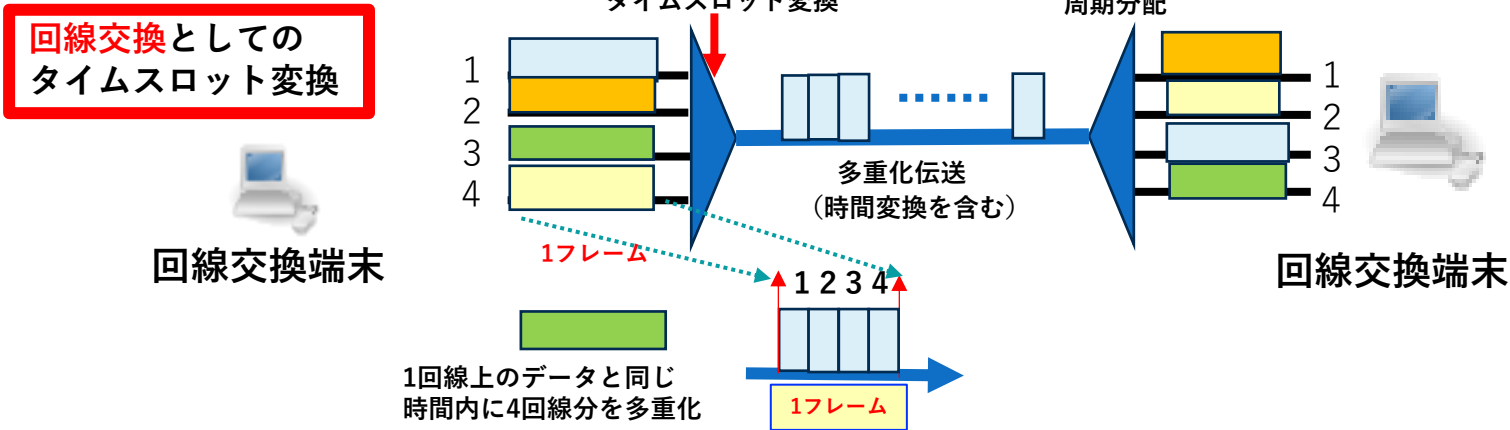


非同期超高速多重バス・スイッチを活用したURLLC通信

非同期で入力される可変長パケットの遅延時間保証を実現



遅延時間保証パケットスイッチの原理(コネクションレス)



**パケット交換 (バス・スイッチのみ
超高速のタイムスロット変換：位相調整)**

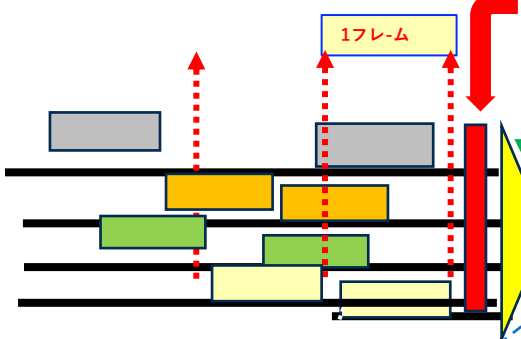
伝送路上はパケット伝送 (可変長も可能)

位相変換用ダブルバッファ

パケット端末



1
2
3
4



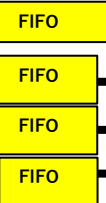
タイムスロット変換 (疑似回線交換)

1 2 3 4

1フレーム

(時間変換を含む)

周期分配



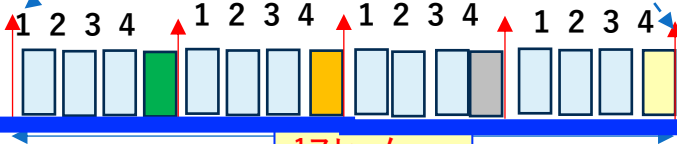
パケット端末



1
2
3
4

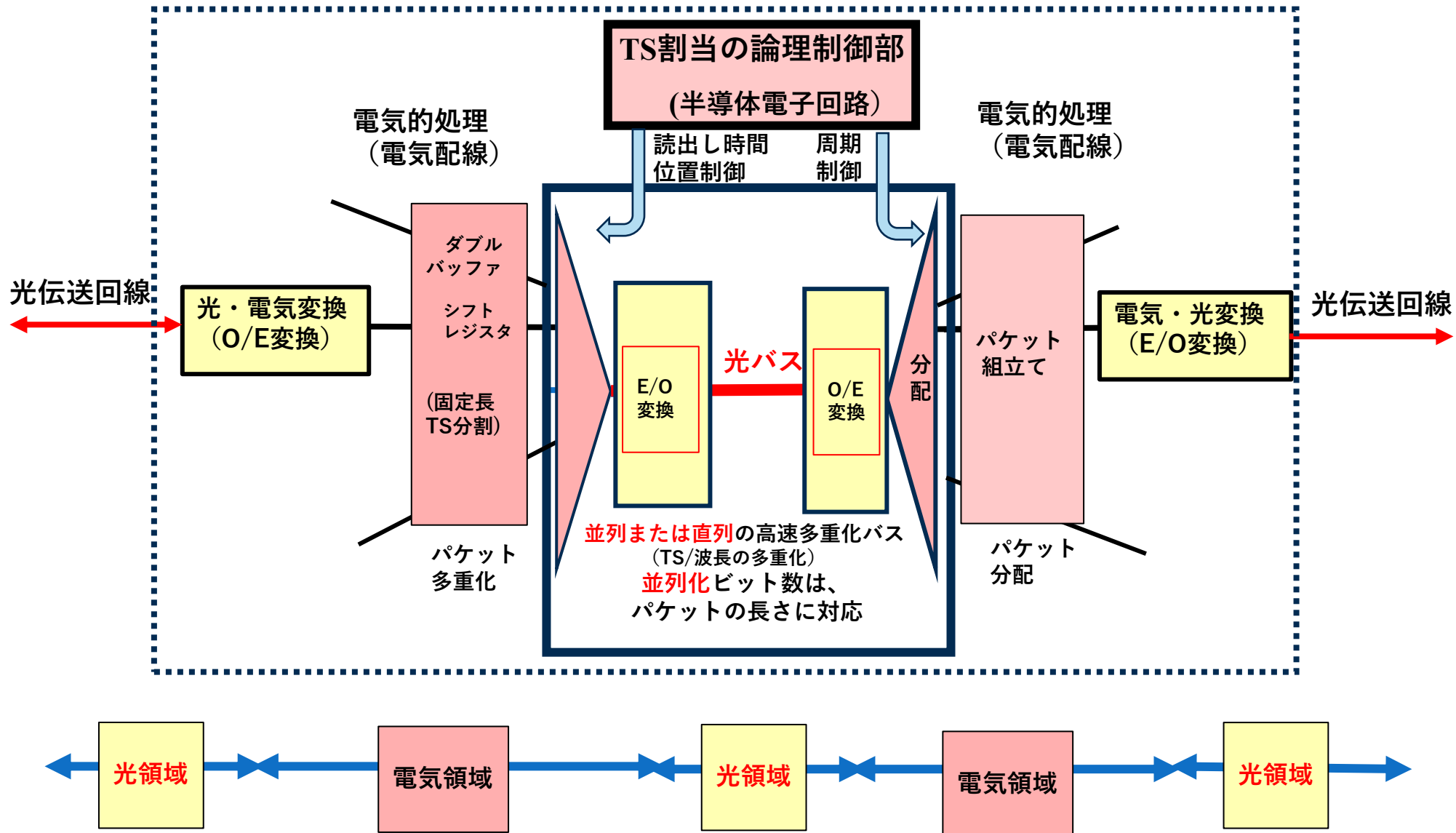
ノンブロッキング条件
1フレーム上に $4 \times 4 = 16$
の-slot数の割り当て

1回線から #4回線までのパケットが # 1回線に
集中する場合の多重回線上的slot割り当ての例

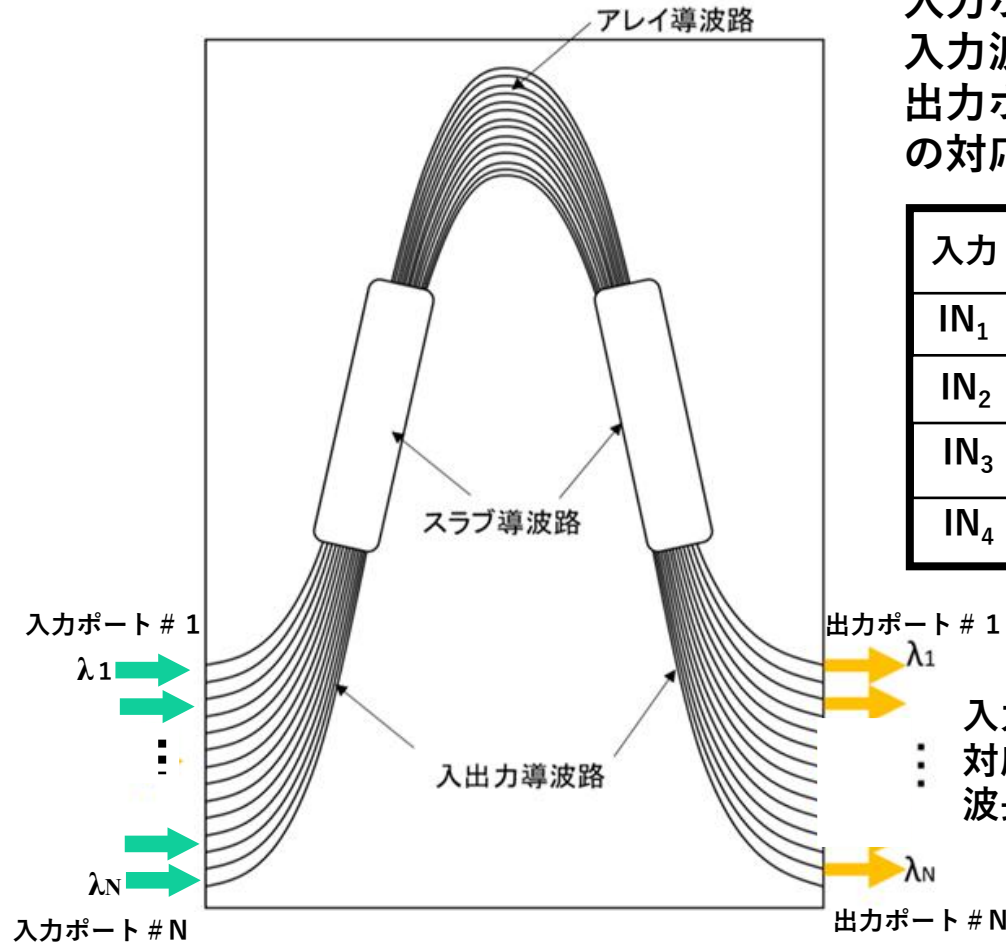


高速多重(TDM)バスの光化によるスイッチ構成例

コネクションレス型IPスイッチ



AWG(アレイ導波路回折格子) のルーチング原理



入力ポート IN1~IN4と
入力波長($\lambda_1 \sim \lambda_4$)および
出力ポート(OUT1~OUT4)
の対応関係表

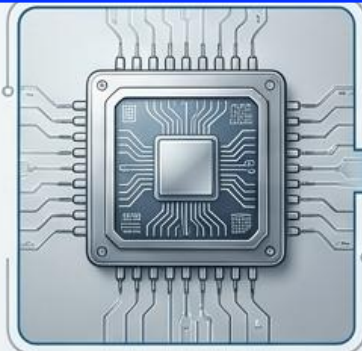
入力	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
IN ₁	OUT ₁	OUT ₂	OUT ₃	OUT ₄
IN ₂	OUT ₂	OUT ₃	OUT ₄	OUT ₁
IN ₃	OUT ₃	OUT ₄	OUT ₁	OUT ₂
IN ₄	OUT ₄	OUT ₁	OUT ₂	OUT ₃

入力ポート毎に出力ポート
対応に使用可能な異なる
波長種別を随時、選択する。

光電融合技術を活用した光パケットスイッチの構成要素

電気領域

電氣的タイムスロット制御
(TS Control)



入出力ポート番号とTS位置を照合し、位相をシフト。

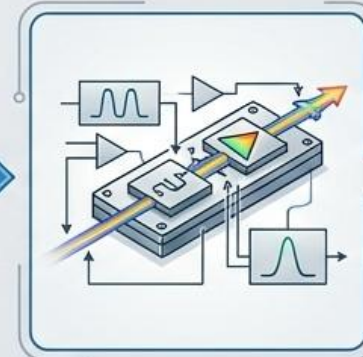
光領域

可変波長レーザ
(Tunable Laser)



宛先ポートに対応する波長(色)をナノ秒単位で瞬時に切り替え発光。
(電流の信号変化により光波長を可変制御)

変調器+半導体光増幅器
(EAM + SOA)



光信号の変調と波形整形(3R機能)。

アレイ導波路回折格子
(AWG)

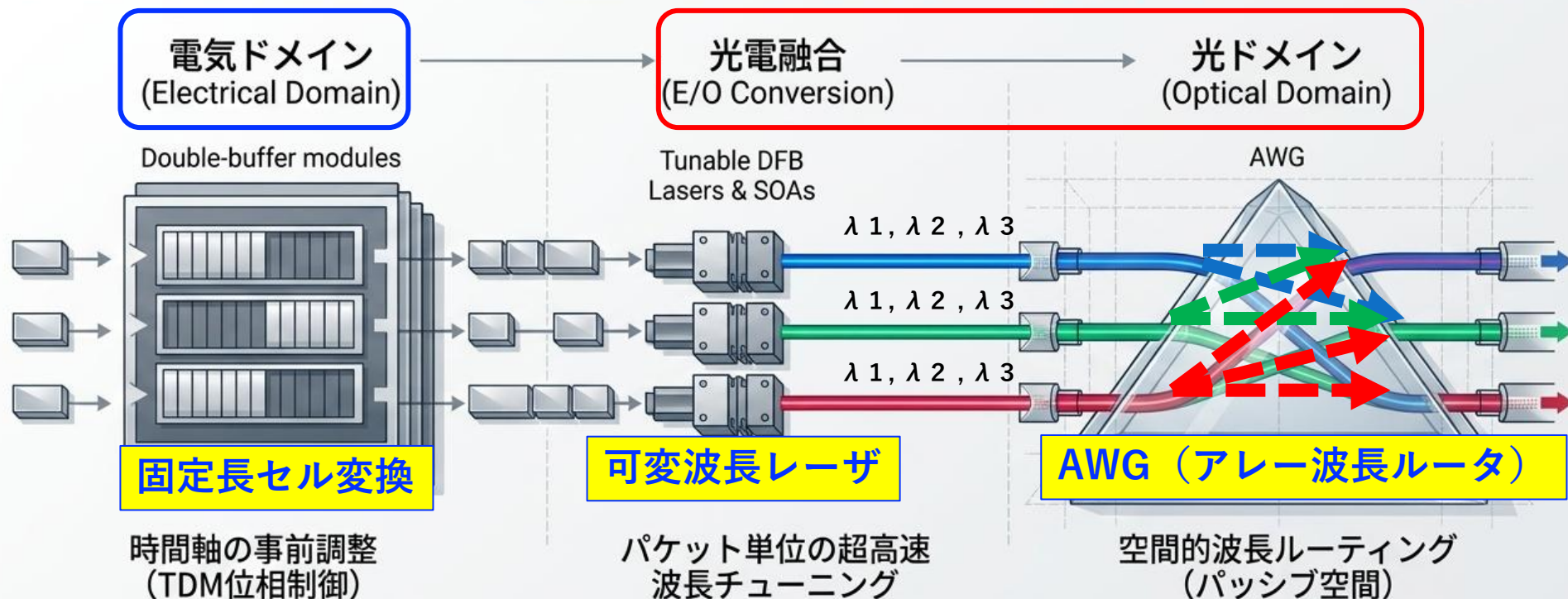


波長に応じたパッシブブルーティング。



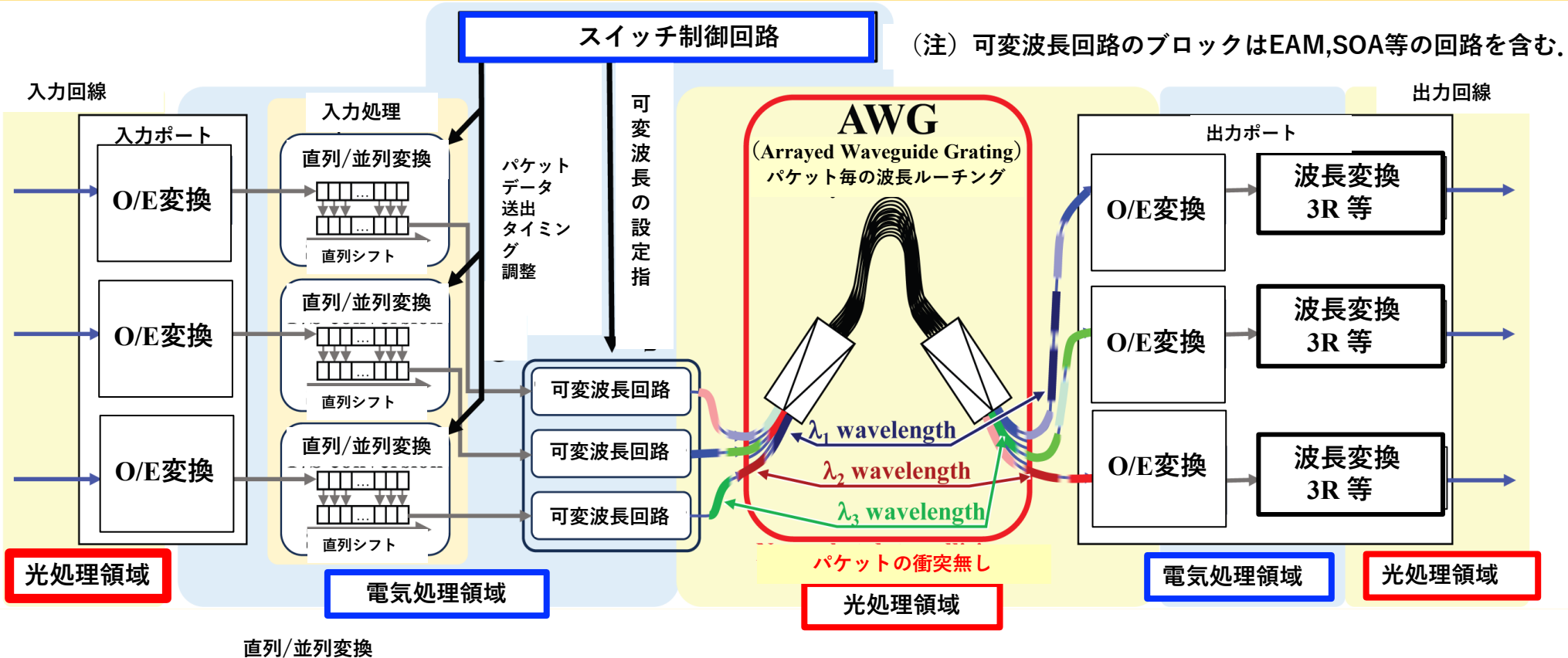
O/E/O変換のオーバーヘッドを解消。電氣的処理を入力段の前処理のみに限定し、以降は光のまま経路を切り替える(波長ルーティング)。

ブレイクスルー：TDM×AWGによる「競合ゼロ」スイッチ



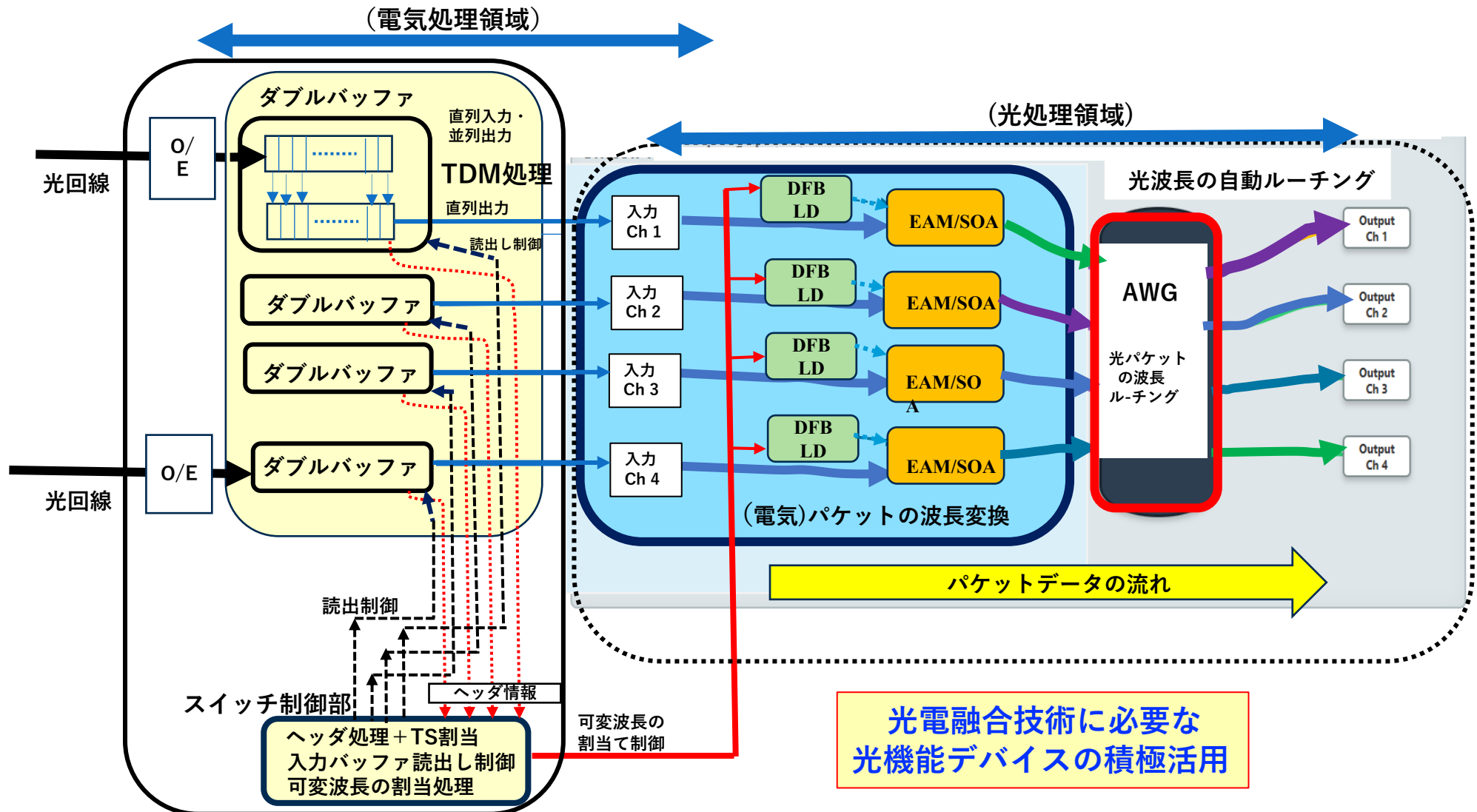
入力段での電氣的な排他的タイムスロット割り当て (TDM) と、AWGの物理的な波長ルーティング (WDM) を融合。光ドメインでの内部パケット衝突を構造的に完全に排除する。

光電融合技術を活用した**光パケットスイッチ**のアーキテクチャ
(コネクションレスタイプで、常時遅延時間保証が可能)



5 GにおけるURLLCサービスへ適用が可能

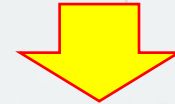
波長ルーチング用光パケットスイッチの構成法



コネクションレス型の光IPスイッチの評価

内部は電子回路/
バッファメモリ

光波長スイッチ



項目	従来型IPルーター	従来型光回線スイッチ	提案：コネクションレス型 光IPスイッチ
ルーティング方式	ストア&フォワード	波長予約（回線交換）	TDM + WDM （波長 + AWG）
遅延の性質	予測不能 （Jitter大）	固定 （低遅延）	確定的・超低遅延 （ $<1\mu\text{s}$ ）
リソース効率	共有バッファに依存	低い （波長占有）	極めて高い （内部超多重化）
URLLCへの適合性	不適合	帯域浪費・ スケーラビリティ難	完全適合 （Tbps超へ拡張容易）

コネクションレス通信の「利便性」と、回線交換通信の
「確定的遅延」を両立する唯一のアーキテクチャ。

1Gbpsで32バイト（＝256ビット）のショートパケットの継続時間は256 ns
（2パケット長の64バイト長を考慮した場合は、 $512\text{ns} < 1\mu\text{s}$ ）

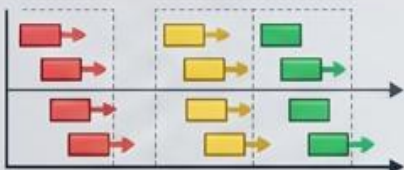
近未来の光パケットスイッチ構成

(パケット長の種別毎にAWGを分離し、個々のネットワークスライス毎のQoS品質制御)

6Gに向けたURLLCに適切なスイッチアーキテクチャ

入力側の前段のバッファ内のヘッダ解析により、後段のバッファからの読み出し時間位置調整を事前実施。

電気ドメインでの「位相事前調整」



パケット送出前に空きタイムスロットを割り当て、光ドメインでの衝突を物理的に排除します。

電気ドメイン(制御)

— ショート/ロング/ミドルの分離処理
請求項2・3ではパケット長を判別し、専用のバスとバッファで独立して処理します。



光ドメイン(高速配送)

衝突フリーレーン
とBest Effortレーン分離

AWGによる
自律的な波長ルーチング
宛先ごとに波長を切り替える
ことで、複雑な制御なしに目的
のポートへ瞬時に配送します。



確定的遅延
(マイクロ秒以下)の保証

光RAMを不要とし、バッファ待ちによる
遅延変動(ジッタ)をゼロに抑えます。

出側伝送路
への分配

独立した入力経路と
波長種別の割り当て
各種別で異なる波長と経路を使用
し、AWG内部での多量化効率と
スケーラビリティを極限まで高めます。

種別間の干渉(ブロッキング)を完全排除
ロングパケットの処理が、URLLCに不可欠な
ショートパケットの遅延に影響を与えません。

請求項ごとの構成要素と進化の比較

項目	請求項1 (基本構成)	請求項2 (高度化)	請求項3 (完成形)
対象パケット	全パケット 共通処理	ショート/ロング 分離	ショート/ミドル ロング分離
TDMバス構成	単一の 共通バス	独立した 2系統のバス	独立した 3系統のバス
波長割り当て	宛先ポート に依存	宛先 × パケット種別 に依存	宛先 × パケット種別(3種) に依存

通信技術の変遷の経緯：らせん状の進化サイクル

6G以降

Step 3 (螺旋の一番上)



【再物理化】IOWN (2030s-)
ソフトウェアの遅延限界を打破するため、
論理制御を「光の物理特性 (光セル)」
へと再実装。

進化
(Evolution)

Step 2 (螺旋の中間)



【再抽象化】MPLS / IP / 5G
(2000s-2020s) IPパケットとソフト
ウェア制御、仮想化・スライシング
による論理ネットワークの極致。

NGN/4G ⇒ 5G

進化
(Cycle)

Step 1 (螺旋の一番下)



【抽象化】ATM (1990s)
音声とデータを「セル」という論理単
位に抽象化。ハードウェア実装。

ATM(B-ISDN)

進化
(Evolution)

サイクル
(Cycle)

ご清聴を，どうも有難うございました。

皆さんの積極的なご質問を期待します。

宮保憲治

E-Mail: miyaho@mail.dendai.ac.jp

東京電機大学 名誉教授