

第3回

光通信システム (アクセス・ データセンタネットワーク)

講義スケジュール(1)

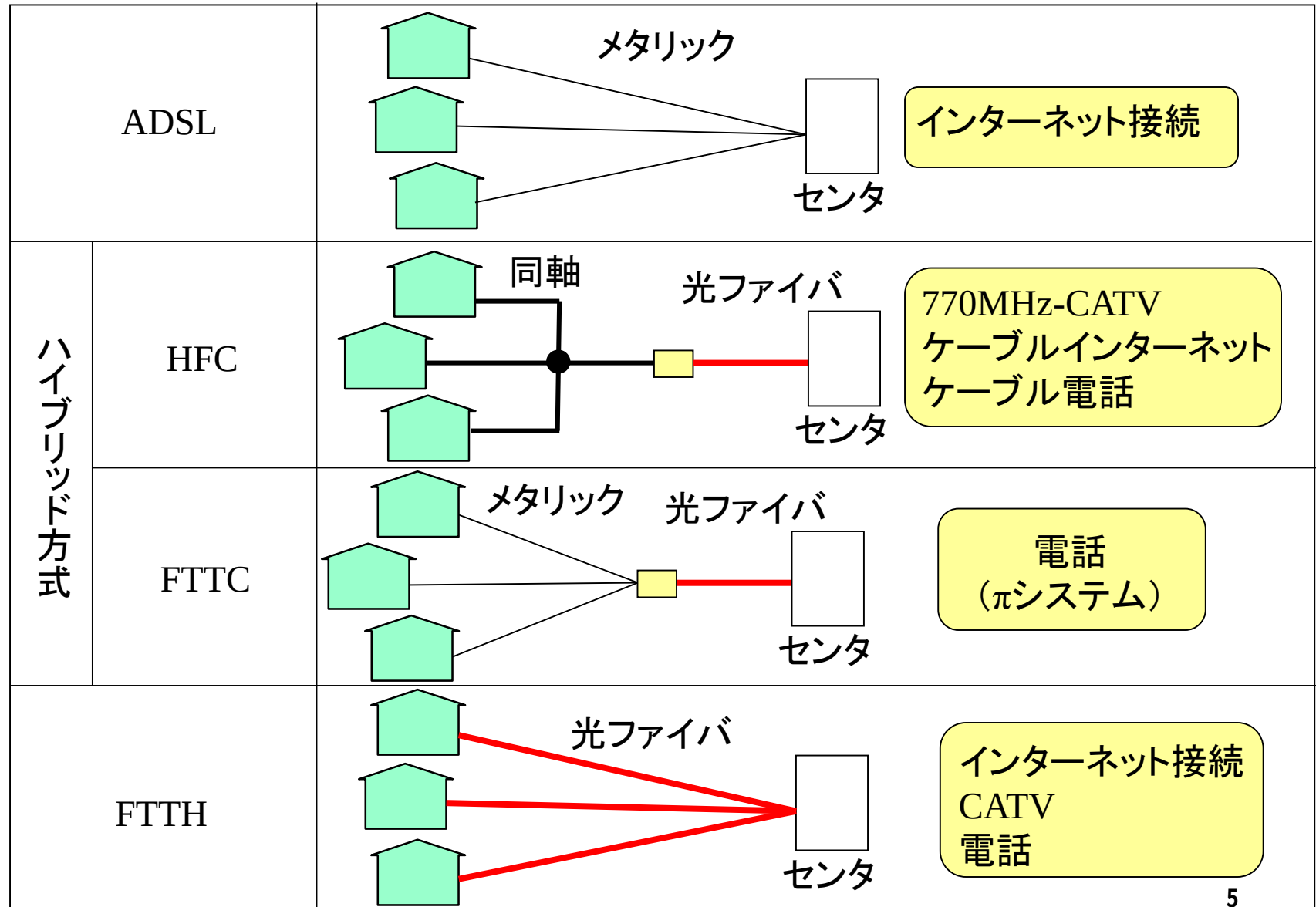
植之原	日付	教科書	内容
第1回	11/29	OCW-i掲載資料(第1回)の精読と理解	光通信システム(基礎的なこと)
第2回	12/ 3	OCW-i掲載資料(第2回)の精読と理解	光通信システム (長距離海底系, コア・メトロ系)
第3回	12/ 6	OCW-i掲載資料(第3回)の精読と理解	光通信システム (アクセス系・データセンタネットワーク系)
第4回	12/10	OCW-i掲載資料(第4回)の精読・PN符号の説明	光変調符号
第5回	12/13	OCW-i掲載資料(第5回)の精読・信号の数式・スペクトル表現	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第6回	12/17	OCW-i掲載資料(第6回)の精読・機能ブロックの理解	光変復調技術 (デジタル・コヒーレント関連技術)
第7回	12/20	OCW-i掲載資料(第7回)の精読・波動方程式の解法・モードの理解	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第8回	12/24	OCW-i掲載資料(第8回)の精読・分散と帯域の関係式	ファイバの伝送特性(分散・分散伝送限界)

講義スケジュール(2)

小山	日付	教科書	内容
第9回	1/7	OCW-i掲載資料(第9回)の精読・分散補償の概念の理解	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	1/10	OCW-i掲載資料(第10回)の精読・動作原理の説明	光増幅器
第11回	1/17	OCW-i掲載資料(第11回)の精読・ビット誤り率の計算	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/21	OCW-i掲載資料(第12回)の精読・ビット誤り率の相対比較	ビット誤り率 (コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/24	OCW-i掲載資料(第13回)の精読・WDMの性能的課題	波長多重(WDM)伝送 (分散マネジメント技術)
第14回	1/28	OCW-i掲載資料(第14回)の精読・WDMの変調方式による性能差の理解	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	1/31	OCW-i掲載資料(第15回)の精読・理解	光スイッチング技術・ 最新の光通信関連技術

光アクセスシステム (FTTH)

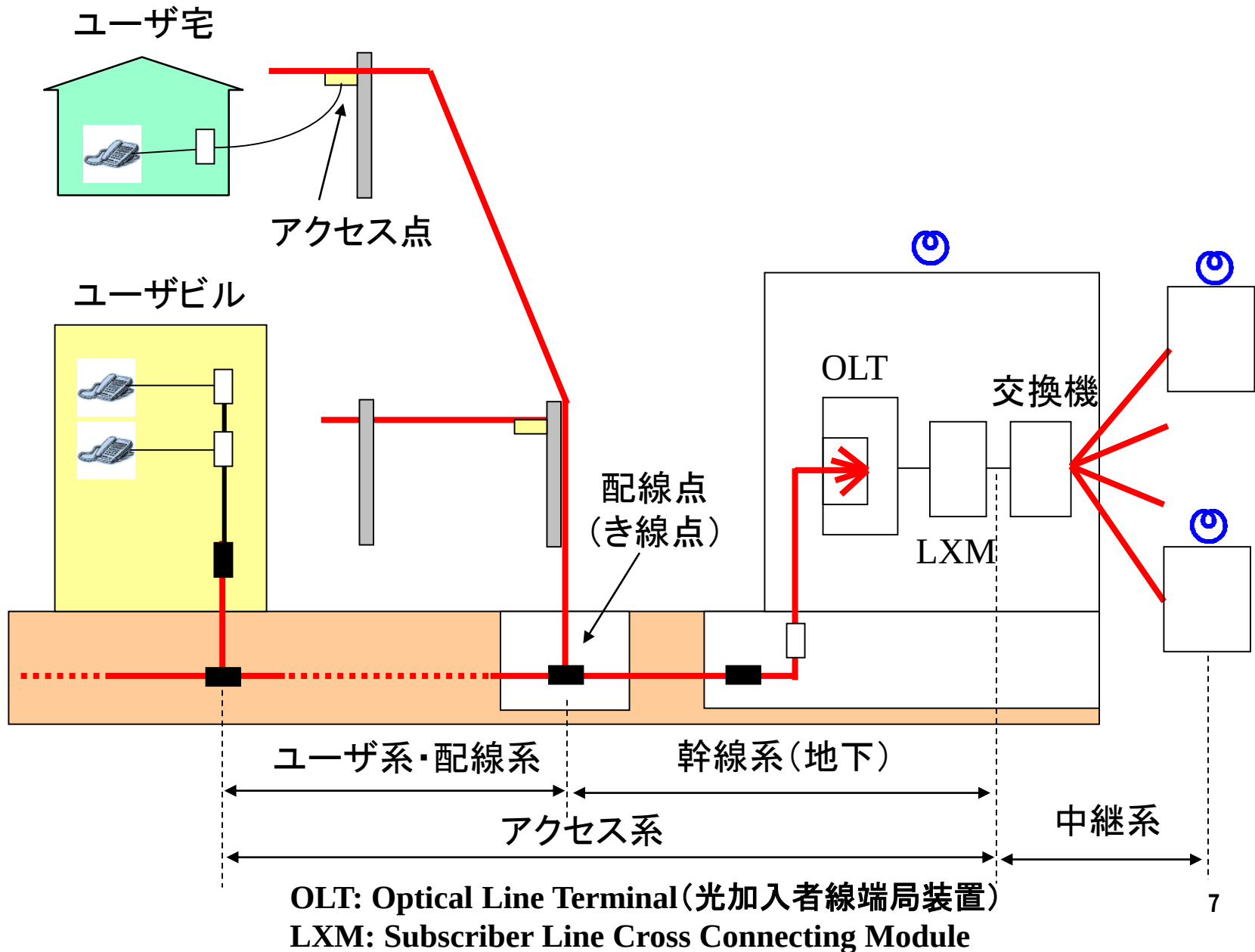
アクセスネットワークのトポロジー (物理的配線構成)



光双方向伝送方式 (上り・下りの伝送方式)

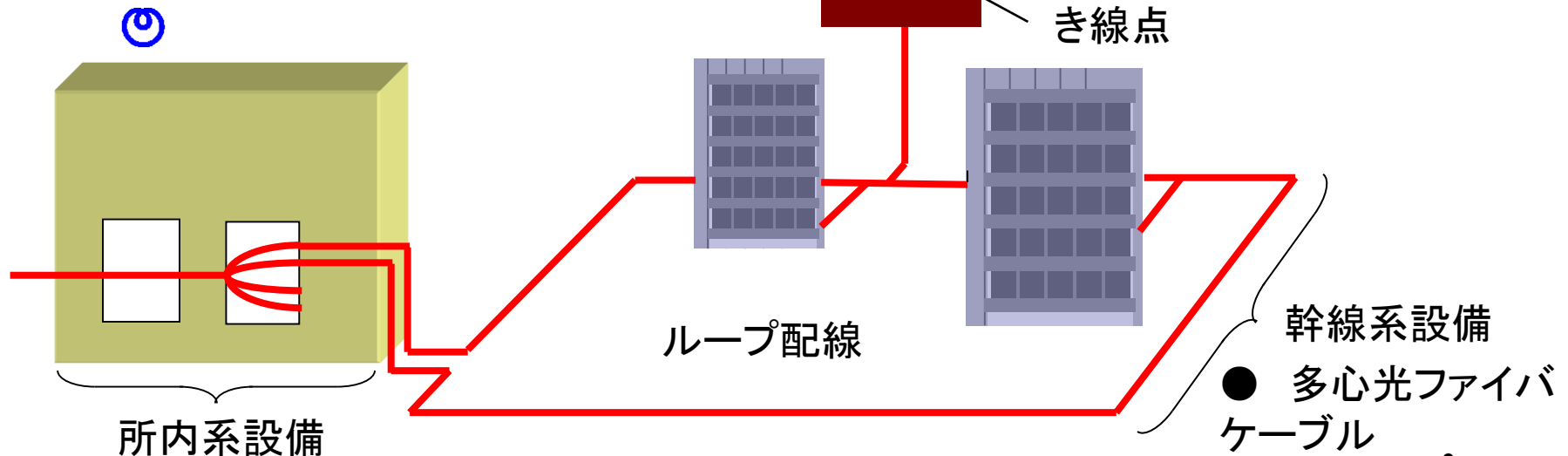
方式	方式イメージ	利点	欠点
TCM	バースト周期ごとに繰り返す	・光ファイバ心数が少ない ・サービスを波長に割り当てたWDM伝送が可能 下り(downstream) : センター → ユーザ 上り(upstream) : ユーザ → センター	・伝送速度が情報伝達速度の2倍必要 ・伝送距離が制限される
WDM	WDM 素子	・光ファイバ心数が少ない ・伝送距離の制限が少ない	・サービスごとの波長割り当てを行うと、波長数が必要
SDM		・サービスを波長に割り当てたWDM伝送が可能 ・伝送距離の制限が少ない	・光ファイバ心数が2倍必要

アクセスネットワークの基本構成



光アクセスネットワークの配線形態

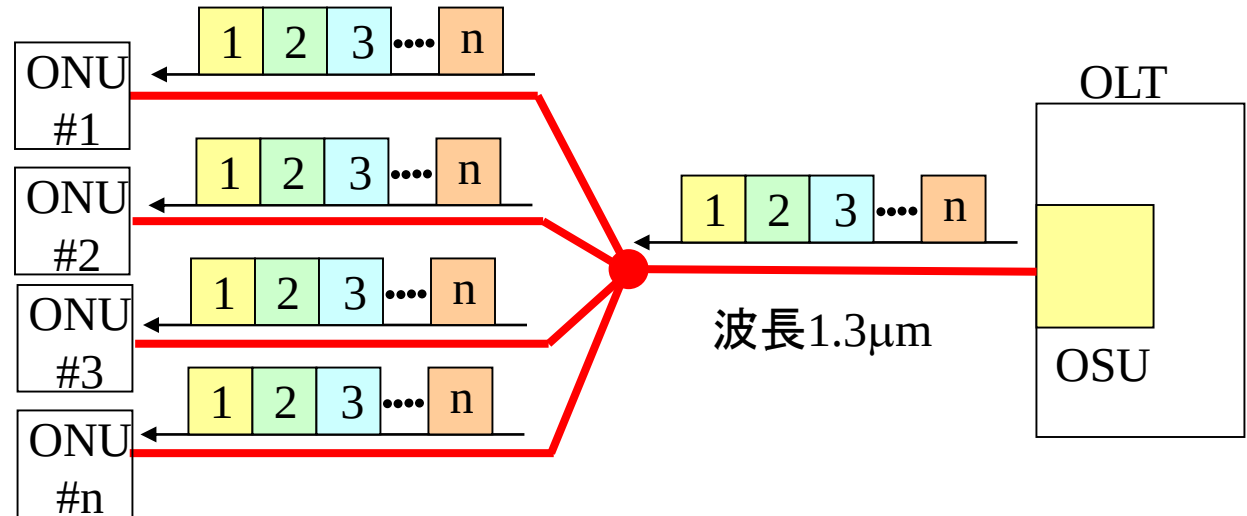
- 自己支持型緩み付き
光ファイバケーブル
- 架空用光クロージャ
- 架空集合ドロップ
光ファイバ
- 架上
スプリッタ



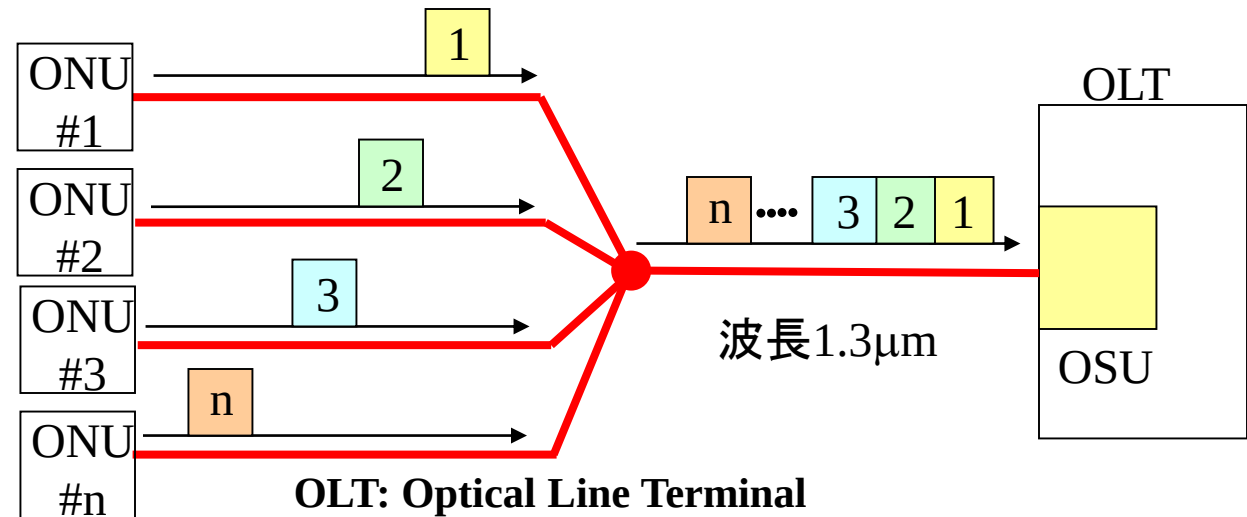
2018年度 光通信システム

PON(Passive Optical Network)システムのOLT～ONU間 信号伝送イメージ(TDM/TDMA)

下り(OLT→ONU) :
TDM伝送



上り(ONU→OLT) :
TDMA伝送



OLT: Optical Line Terminal

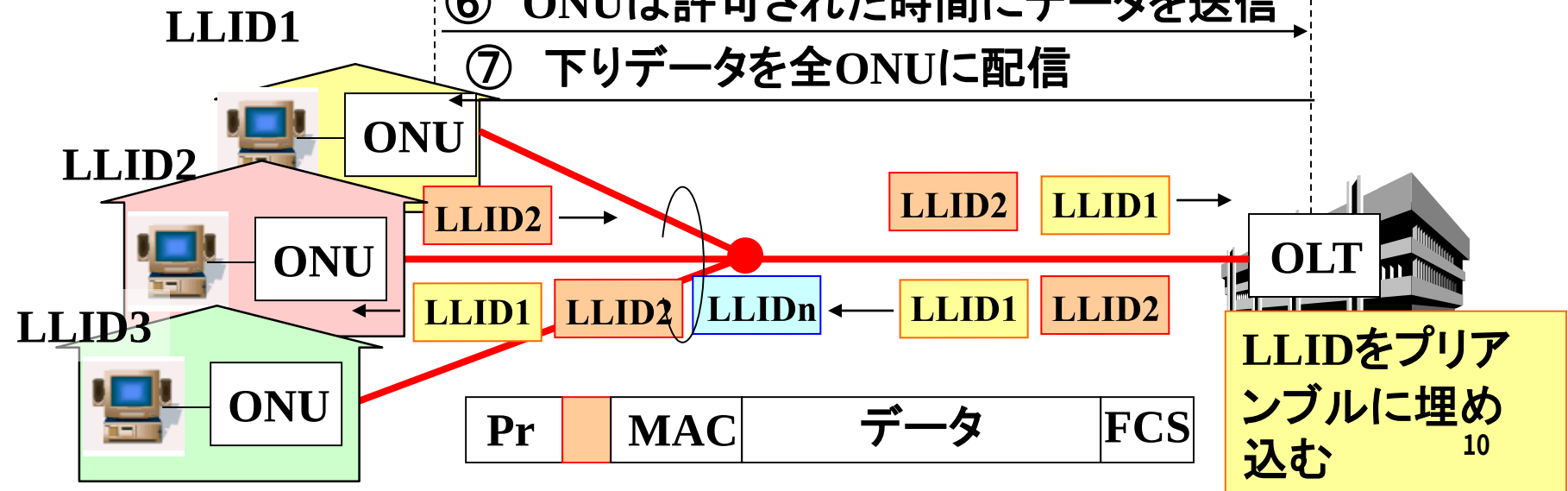
OSU: Optical Subscriber Unit

ONU: Optical Network Unit(光加入者線終端装置)

EPON (Ethernet PON) の伝送制御技術

シェアードアクセス技術に似ているが、可変長のMACフレームを扱う点が異なる。

- ① ブroadcastでOLTが定期的に新しいONUを確認
- ② 新しいONUが応答
- ③ OLTが応答にかかった時間でONUの距離を測定。
LLID (Logical Link ID) を割り当てる。
- ④ ONUは送信したデータ量をOLTに通知
- ⑤ OLTは他のONUの要求を見てONUに送出開始時間と
時間幅を通知。OLTは伝送遅延を計算してONUに通知。
- ⑥ ONUは許可された時間にデータを送信
- ⑦ 下りデータを全ONUに配信



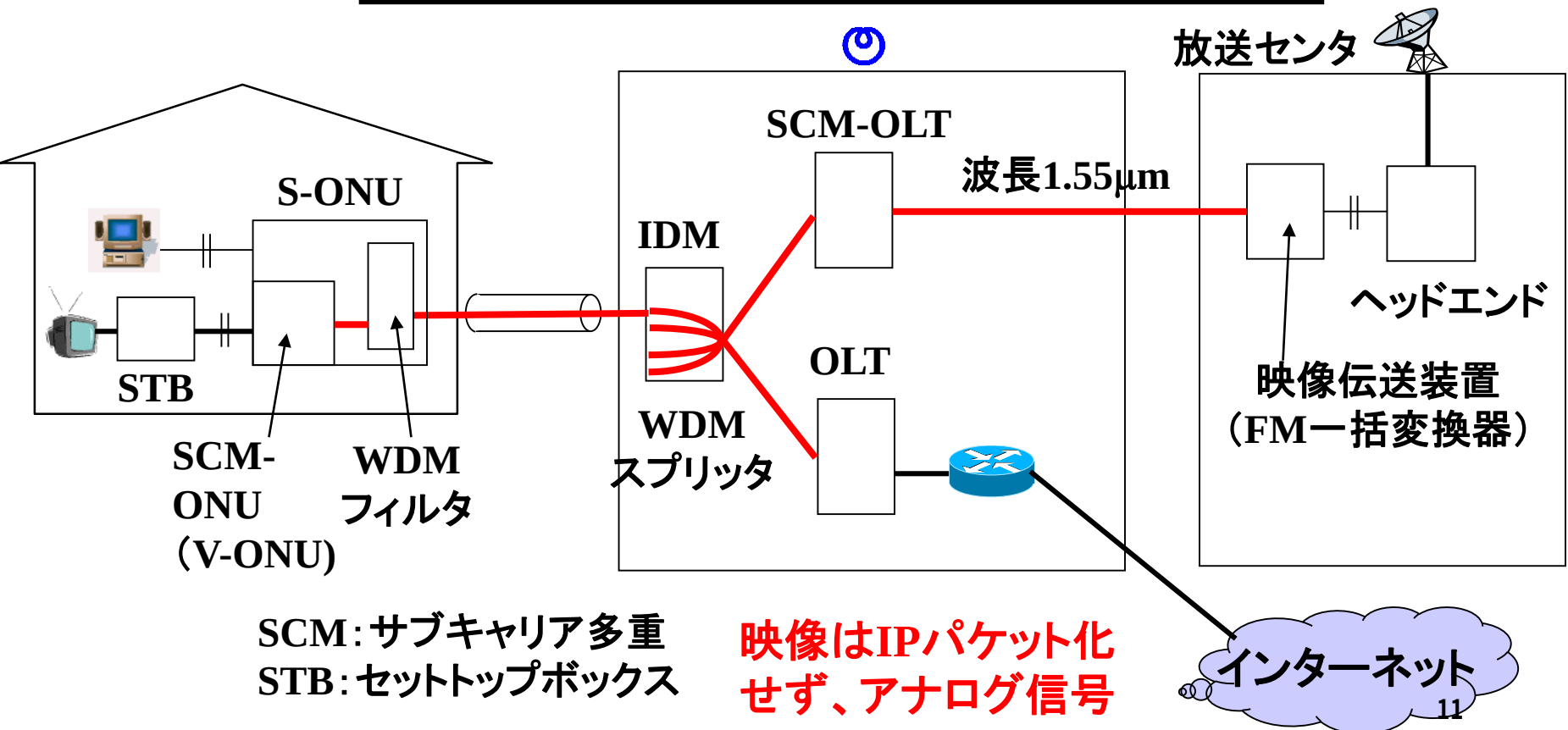
3波多重の通信・放送サービス

オプティキャストのFTTH放送サービス

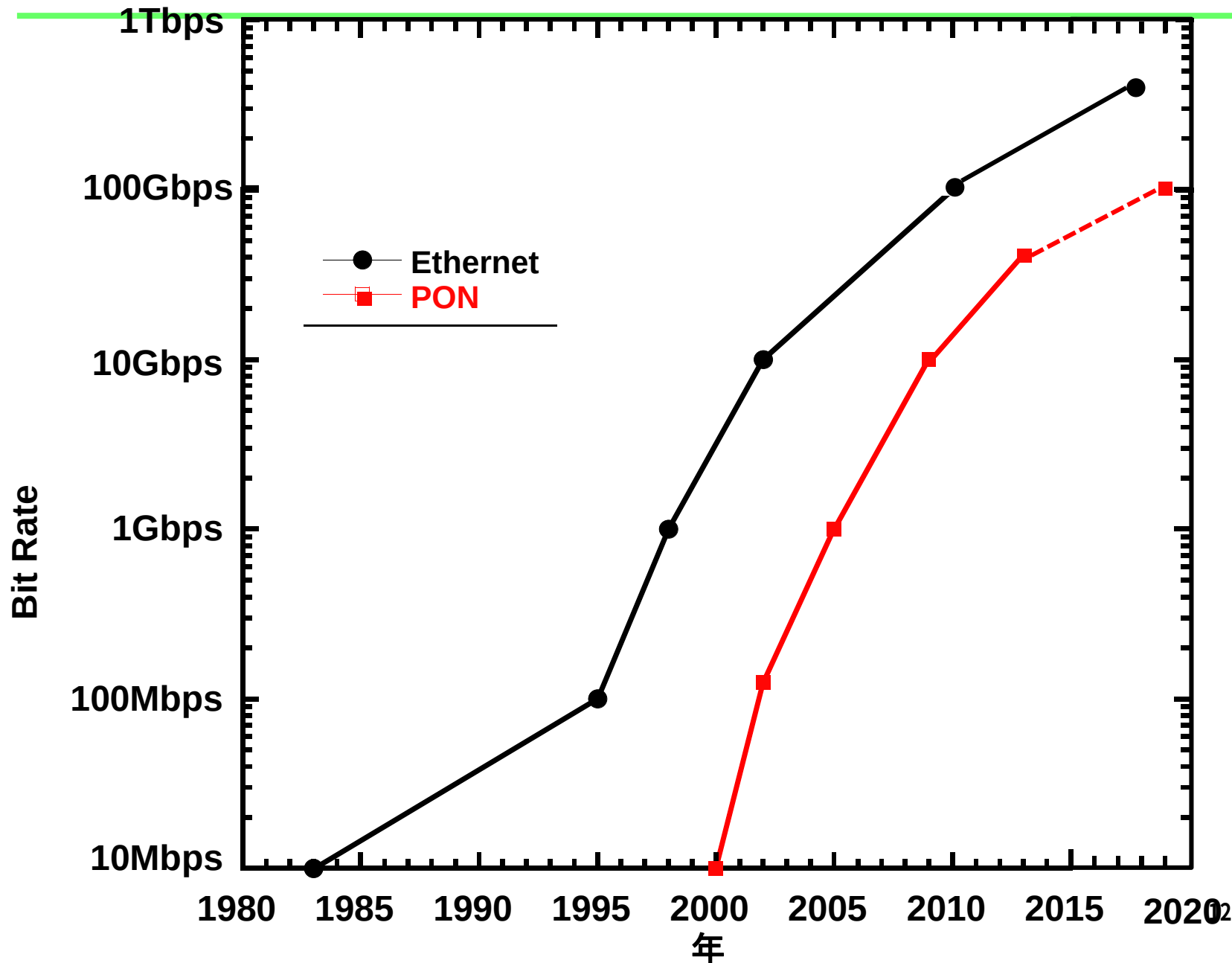
標準仕様

伝送距離	標準7km(最大20km)
PDS区間分岐数	32
使用波長	通信系1.49 μ m(下り)1.3 μ m(上り) ／映像系1.55 μ m

NTT映像通信網
サービスを利用



PONシステム高速化のロードマップ



● 10G光デバイス技術

- 高出力DFBレーザ／EA変調器／半導体光増幅器(SOA)
- 高感度APD
- 波長配置

● 10Gバースト光送受信技術

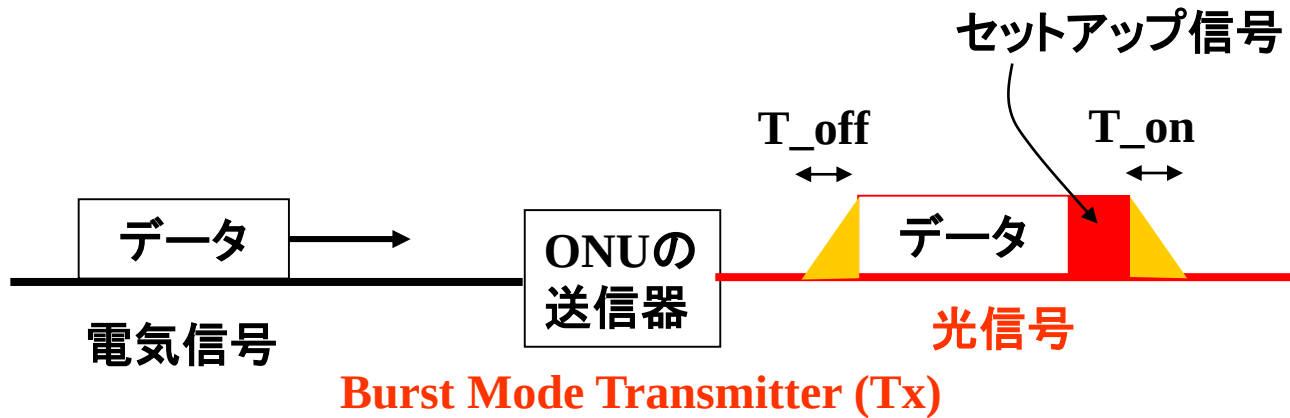
- バーストLDドライバ
- バースト受信プリアンプ／リミッタ
- 位相同期回路(CDR)

● Transport Controlレイヤ制御技術

- フレームフォーマット
- Dynamic Bandwidth Allocation
- 二重切替制御
- FEC

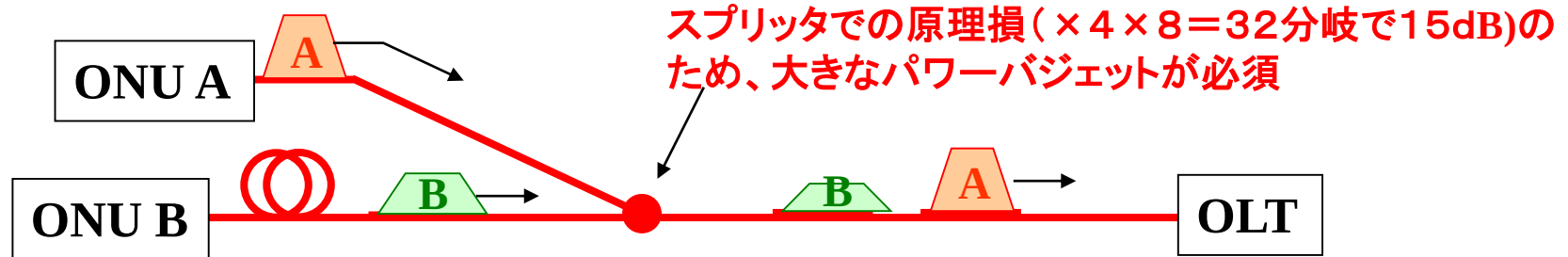
PONの物理レイヤ技術(1)

ONUのバースト・モード送信器

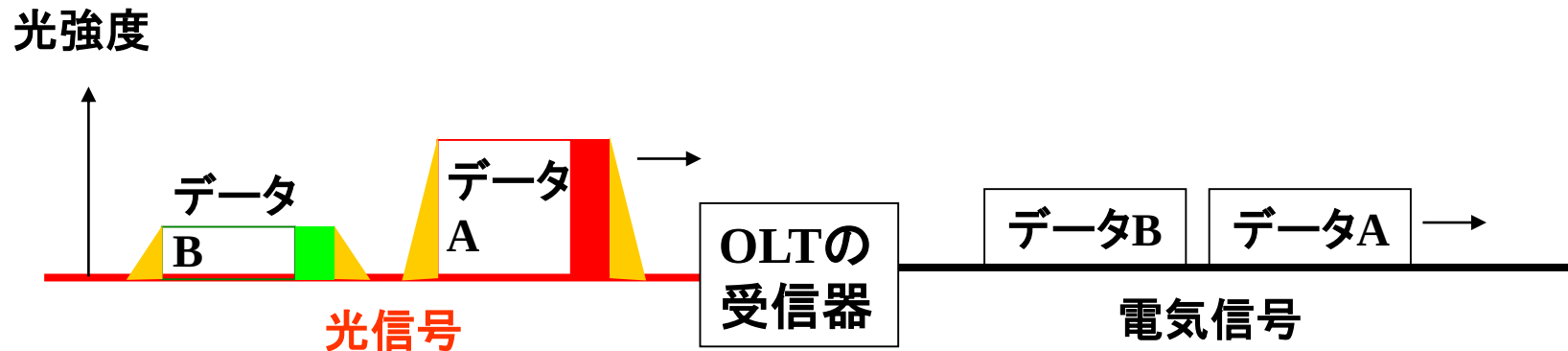


- T_{on} , T_{off} (遷移時間):
異なるONUからの上り信号間の影響抑制のため、確実な消光を目的
- セットアップ信号:
OLT受信器が受信準備できるための規則的なパターン送信

PONの物理レイヤ技術(2) OLTのバースト・モード受信器



- 異なる距離・送信パワー差などによりONU間の信号強度に差が発生
- 同レベルの電気信号に等化(自動利得等化、Auto-Gain Control, AGC)
- セットアップ信号を読み取りながら、クロック抽出・同期確立



Burst Mode Receiver (Rx)

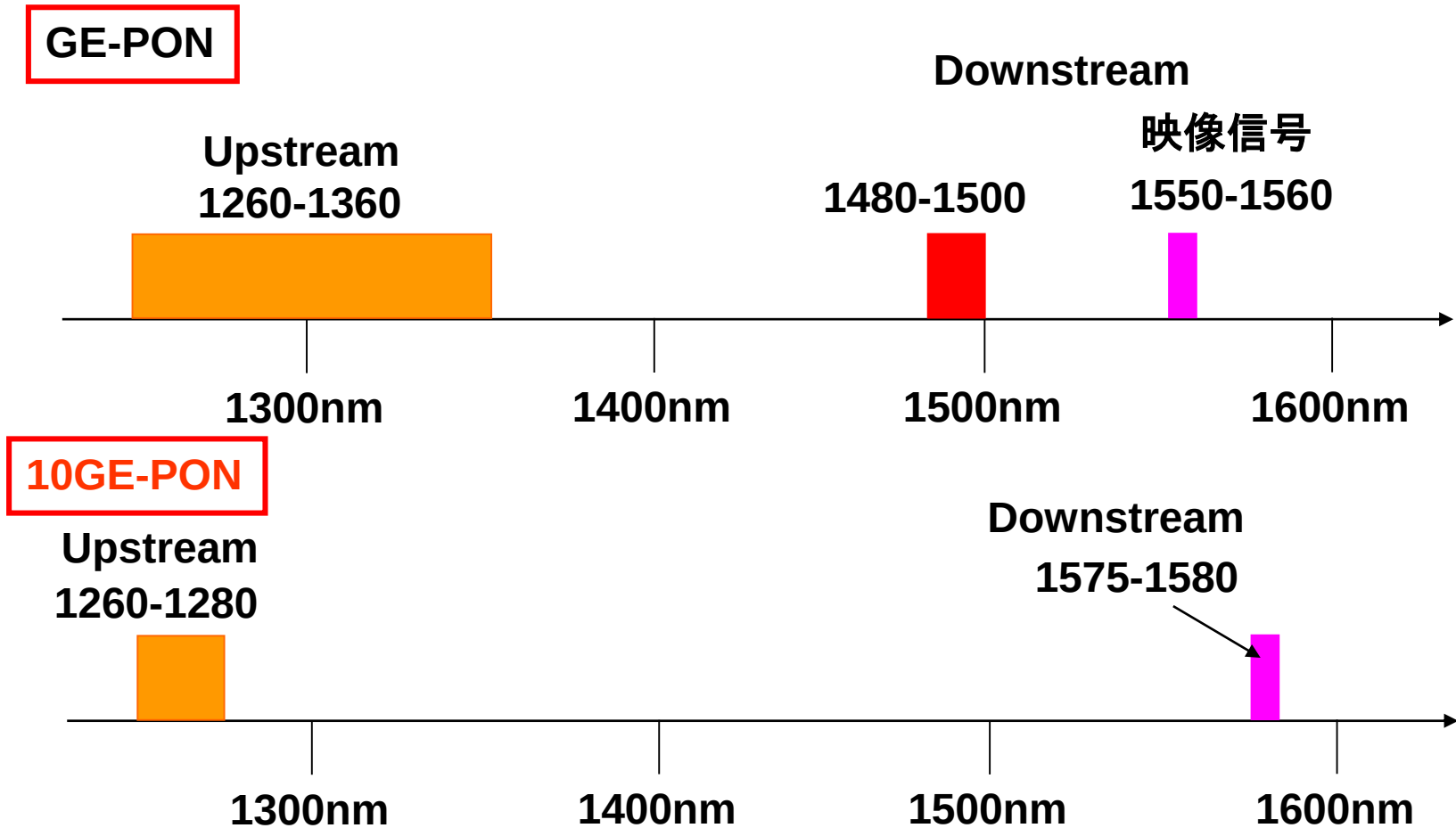
10GE-PON仕様(Draft2.2)

下り／上りとも10.3125Gbps(下り10.3125Gbps,上り1.25Gbpsの非対称PRX仕様もあり)

項目	Downstream (下り)			Upstream (上り)		
	PR10-D	PR20-D	PR30-D	PR10-U	PR20-U	PR30-U
送信器	EML			DML		
波長(nm)	1575-1580			1260-1280		
Tx出力(dBm)	+2～ +5	+5～ +9	+2～ +5	-1～ +4	-1～ +4	+4～ +9
消光比(dB)	9(Tx出力Upで6dBに緩和可)			6		
受信器	PIN w/FEC	PIN w/FEC	APD w/FEC	APD w/FEC		
受信感度(dBm)	-20.5	-20.5	-28.5	-24	-28	-28
最大損失(dB)	20	24	29	20	24	29
ペナルティ(dB)	1.5			3.0		

10GE-PON波長配置

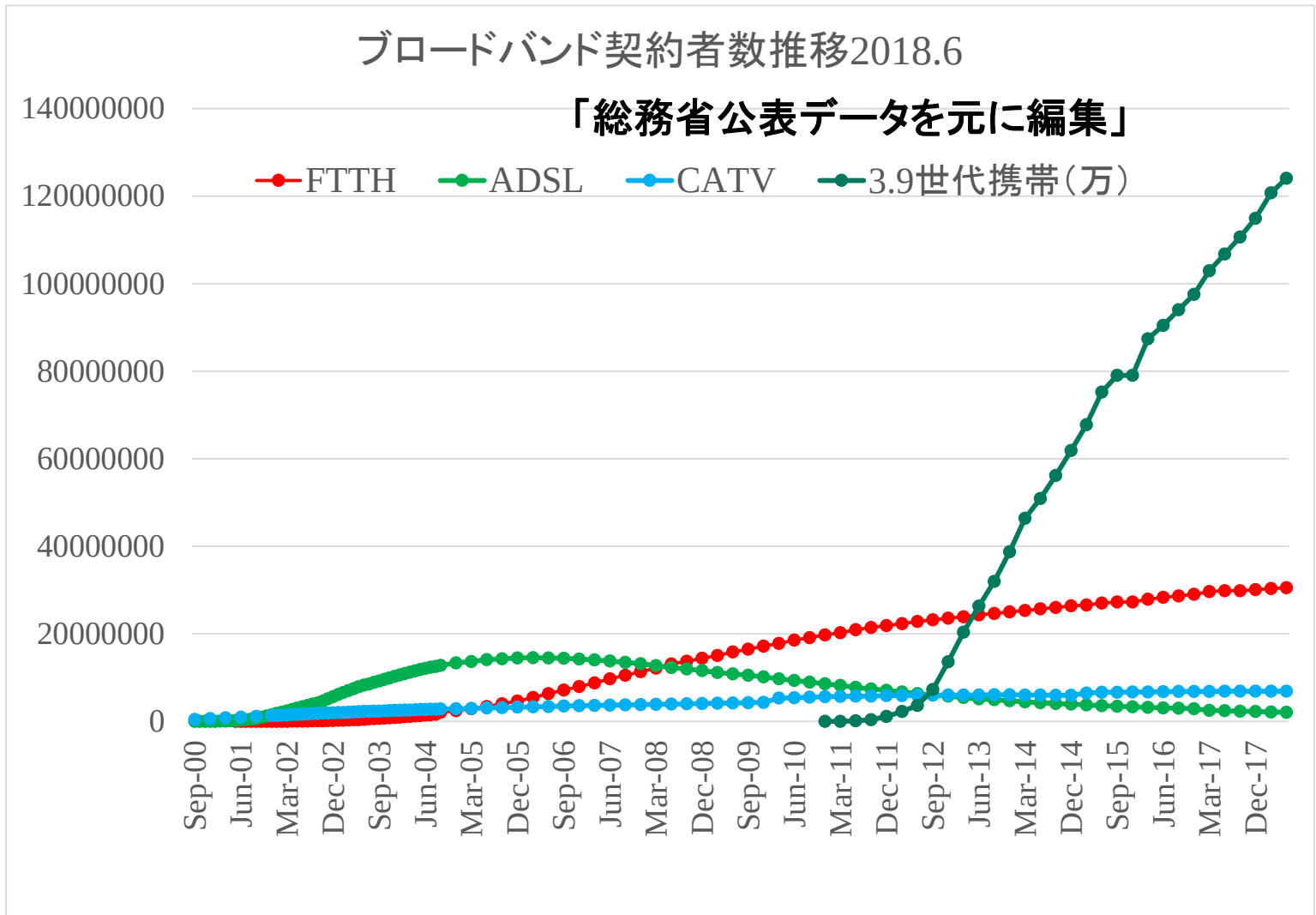
- GE-PONからのマイグレーションを考慮して決定



光通信ネットワークの高速化を喚起する モバイル通信の高速化

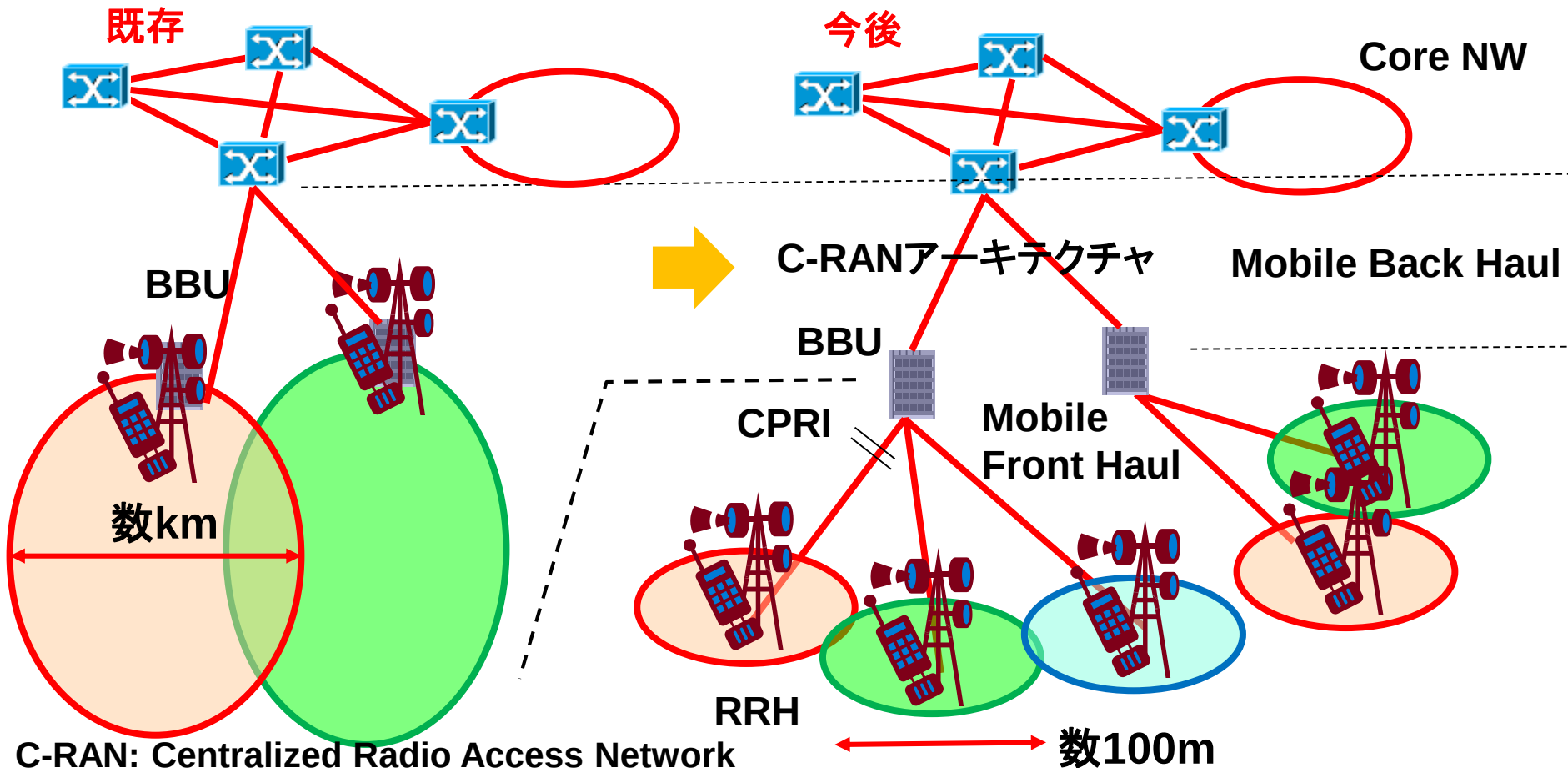
高速無線端末の増大に対応可能な無線インフラへの適用重要性の増大

加入者数



- 4K/8K高精細映像の普及(片方向映像配信、双方向通信、監視映像)
- コネクテッドカーなどのIoT端末の多数接続普及
- 遠隔医療・手術、高齢者支援ロボットの普及

次世代モバイルネットワークへのPON技術応用



C-RAN: Centralized Radio Access Network

BBU: Base-Band Unit, RRH: Remote radio Head, CPRI: Common Public Radio Interface

- 基地局にベースバンド処理を集約、アンテナ局で無線変換処理機能のみを分担



- ・緊密なセル間協調が可能となり、スモールセル化と親和性大
- ・光ファイバの低損失性による高速・長距離伝送性能が活きる
- ・光増幅器の重要性

CPRI: 無線信号をデジタル化して伝送するためのインタフェース仕様

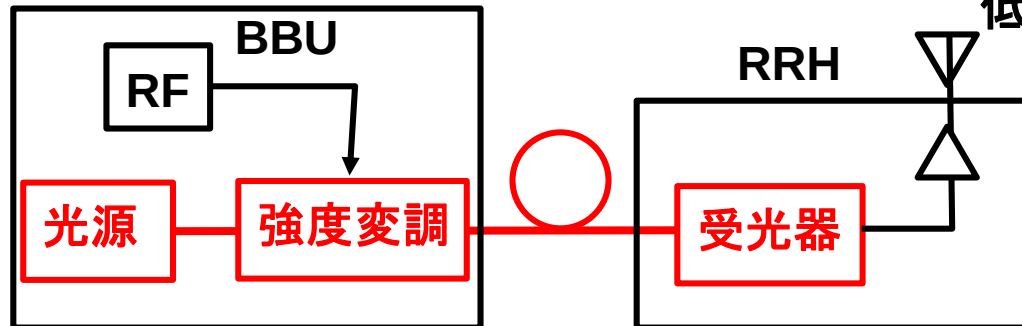
LTE下り150Mbps端末速度に対して、2.4Gbps CPRI転送速度が必要。

$$\begin{aligned} & 20[\text{MHz}] \times 15[\text{sample width}] \times 1.536[\text{over sampling}] \times 2(\text{I/Q}) \times 16/15(\text{control OH}) \\ & \times 10/8(8\text{B}10\text{B} \times 2(2 \times 2\text{MIMO})) \\ & = 2.47576[\text{Gbps}] \end{aligned}$$

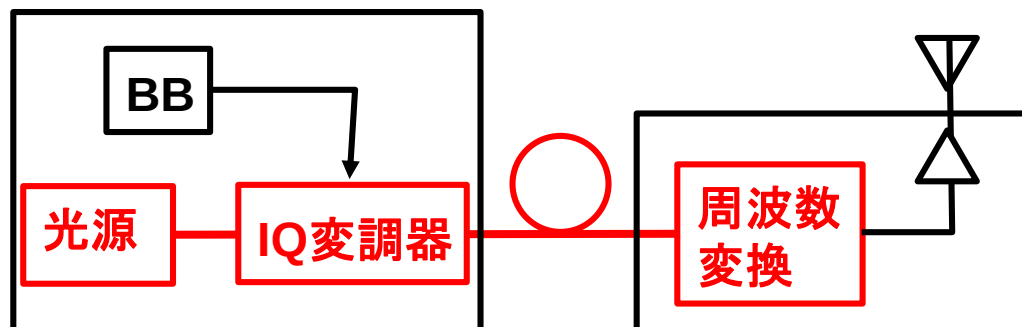
➡ **CPRI転送速度～端末速度の16倍**
5G(端末速度10Gbps程度)に対しては、100Gbps級CPRIが求められる。

低速化の検討もあり

**Radio over Fiber
(RoF)方式**



**フルコヒーレント
方式**



NG-PON2システム要件(国際標準)

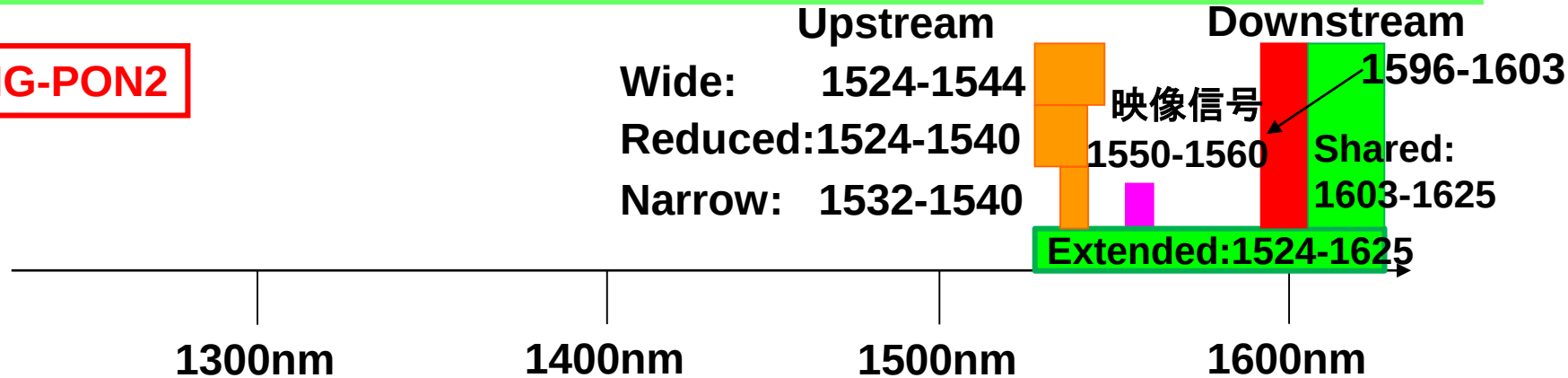
TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexing-PON)

システム要件2013年3月にITU-T G.989.1として合意
 物理層仕様はG.989.2として2014年12月承認。
 伝送コンバージェンス層G.989.3は2015年7月完了。

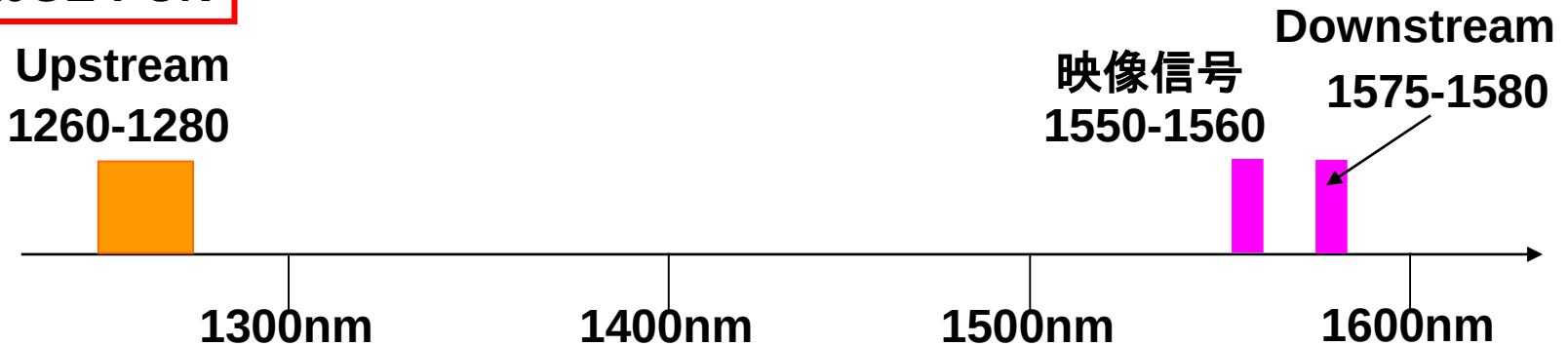
項目	要求条件
下り伝送容量	40Gbps (10Gbps×4波) 10Gbps (2.5Gbps×4波)
上り伝送容量	40Gbps (10Gbps×4波) 10Gbps (2.5Gbps×4波)
伝送距離・分岐数	40kmで256分岐以上 ダイナミックレンジ =ファイバ伝搬損失[dB/km]×距離[km]+10log₁₀(1/分岐数)
波長配置	Wide: 上り 1524-1544nm Reduced: 上り 1524-1540nm Narrow: 上り 1532-1540nm 下り: 1596-1603nm
Point-to-Point WDM overlay	Shared spectrum: 1603-1625nm Expanded spectrum: 1524-1625nm
オプション	8波多重

NG-PON2波長配置

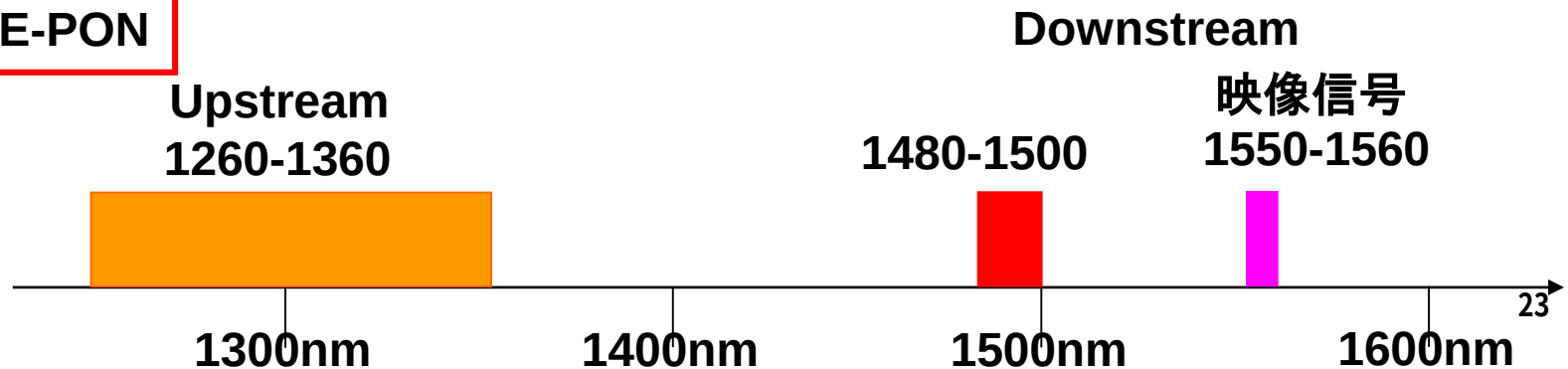
NG-PON2



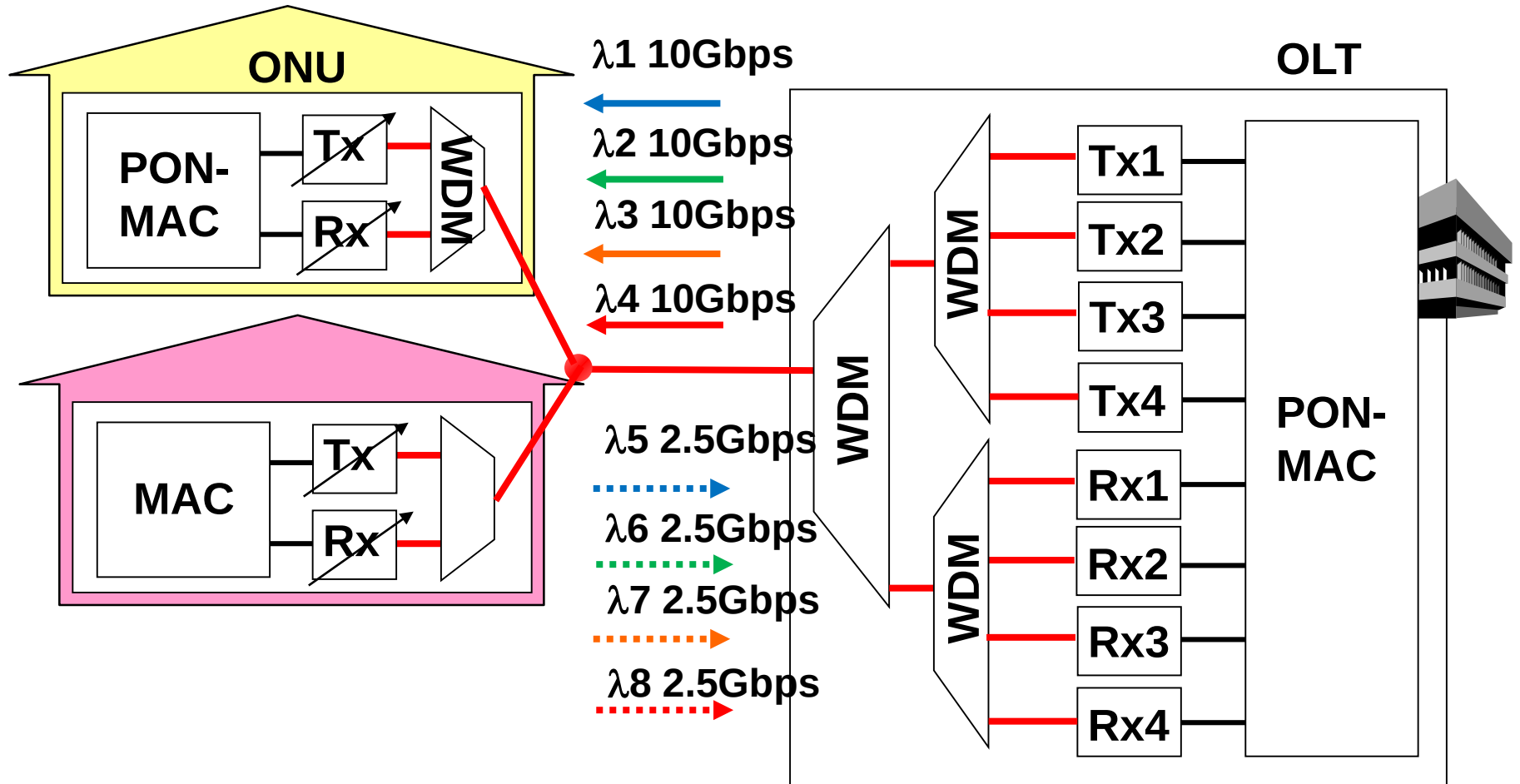
10GE-PON



GE-PON



TWDM-PONの構成



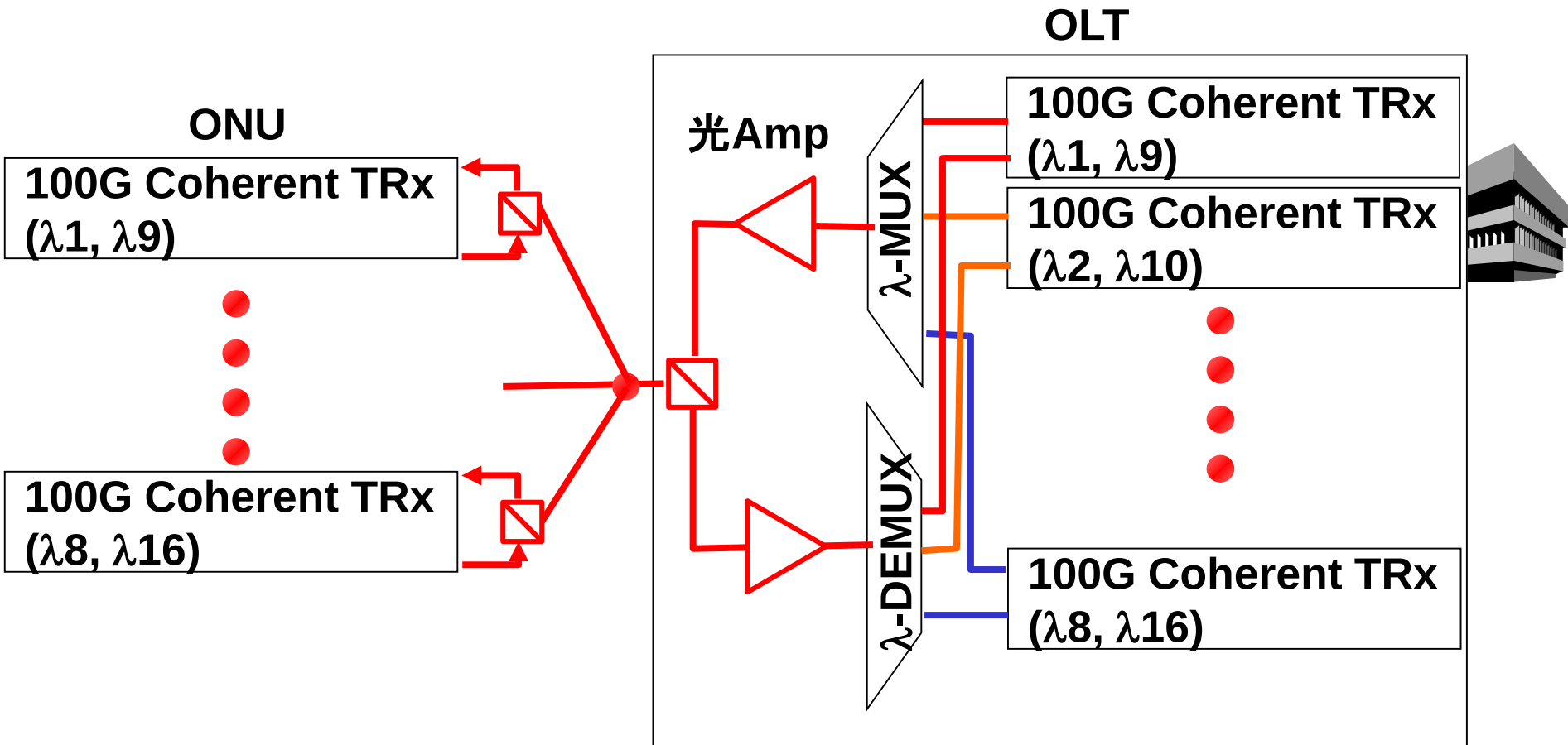
100Gbps級PONシステムの標準化動向

IEEE 802.3caにて100GE-PONの標準化検討開始（2015年12月）。
2019年4月合意を目指す。

項目	100G-EPON	100GコヒーレントPON
100Gあたりの波長数	4 25G×4	1 100G×1
ONUあたり 光フィルタ	複雑なフィルタが 必要	不要
最大損失 (パワーバジェット)	29.0dBは やや困難	29.0dB以上
消費電力	温度制御が 必要なため大	低消費電力DSPにより 低消費電力化可能

100Gbps級PONシステム構成例

- 100Gbps : NRZ-DP-QPSK
- 8波多重のイメージ



データセンタ・ネットワーク

データセンタ(Data Center, DC)とは？

● 代表例

Google, Amazon, Facebook, Microsoft, Akamai, YouTube, ...
(ハイパー・ジャイアントとも呼ばれる。世界のインターネット・トラフィックの30%とも言われ、さらにその77%がDC内トラフィックと言われている)
これらの事業者のサービスをOTT(Over The Top service)とも呼ぶ。

● 構成

- ・多数のサーバをラックに収容
- ・サーバラックをネットワークで束ねてクラスタを構成

● 使われ方

- ・クラウドサービスをホストする環境
- ・1つのデータセンタを1台のコンピュータとして使うこともある

● 規模

- ・コンテナ型: <サーバ数千台
- ・大規模: >数万台

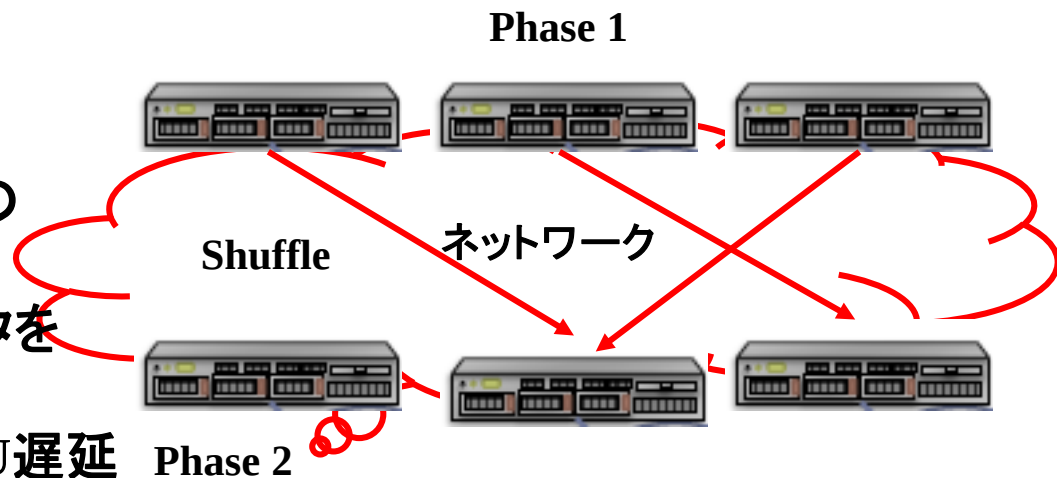
● サーバ間の連携により多量のデータを処理

(例) サーチエンジンのバックグラウンド

- ・Phase 1: 収集したWebのキーワードを識別
- ・Shuffle: 対応するサーバにデータを転送
- ・Phase 2: データベースを更新

● サーバ間のデータ転送が処理のボトルネックの可能性

- ・帯域不足: 処理に必要なデータを取得する時間の遅延
- ・その他、ディスクアクセス・CPU遅延



- スケーラビリティの確保

数10万台～数100万台のサーバの接続を可能とすること。

- 通信性能の確保

アプリケーションの要求する広帯域・低遅延の性能を実現すること。

- 耐故障性の確保

故障が発生しても、性能を維持すること。

- 消費電力の低減

サーバの低消費電力化の進展により、ネットワークの消費電力の低減も必要となってきた。

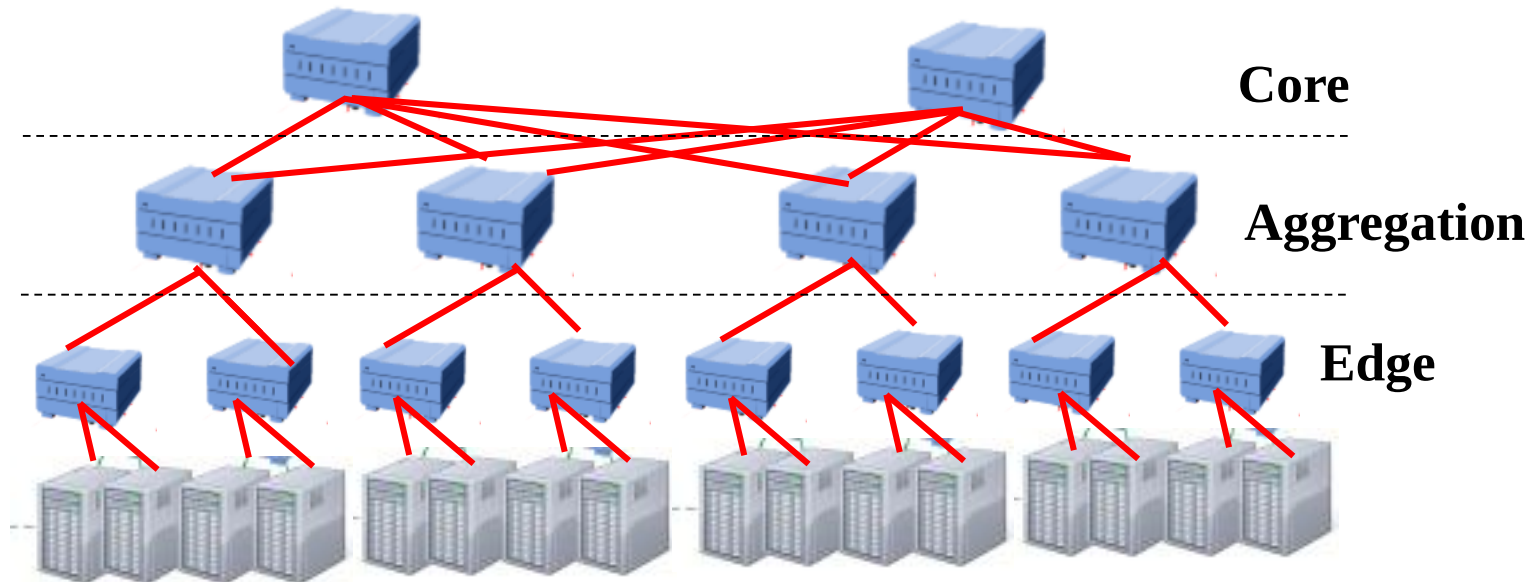
- コストの低減

従来のデータセンタ・ネットワークの構成

● 課題

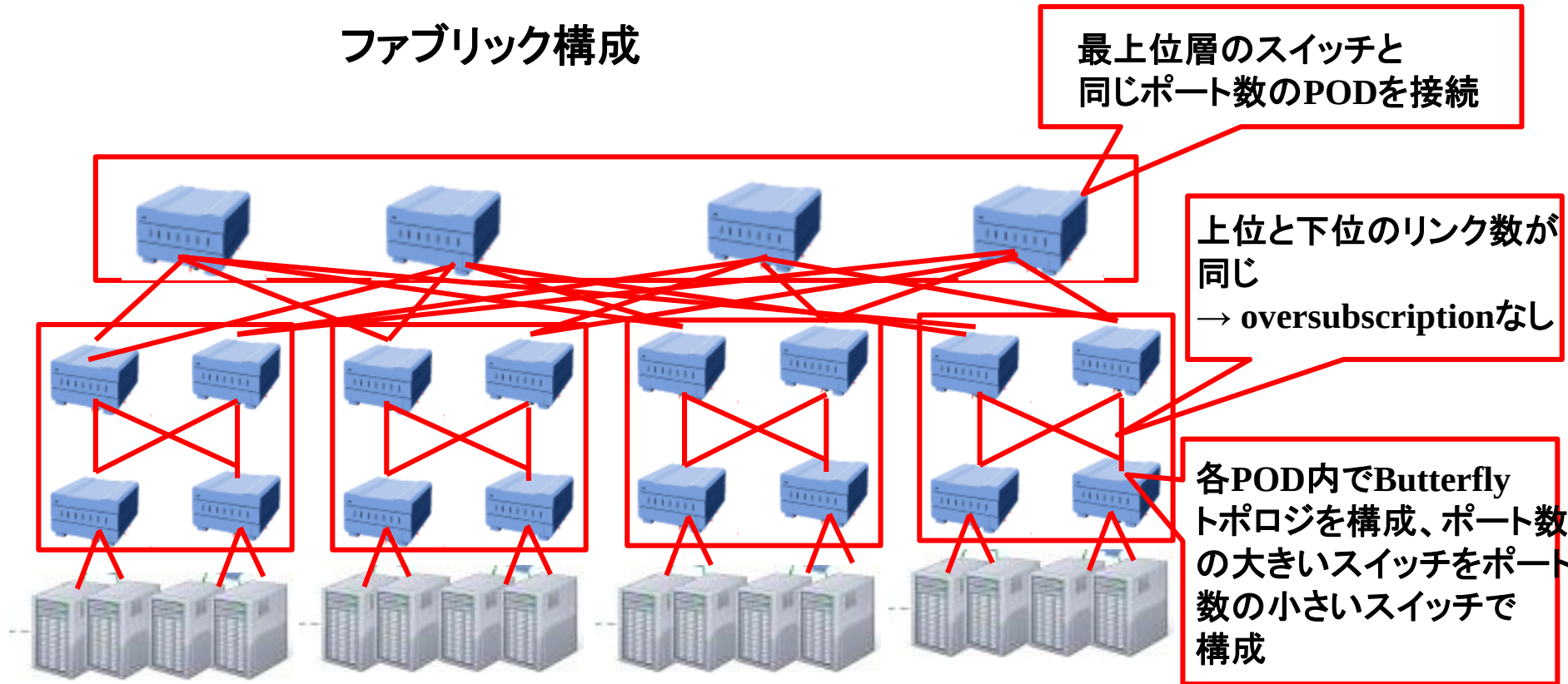
- Oversubscription による帯域制限
- スケーラビリティの問題:
ポート数の大きなスイッチの消費電力大、階層数を増やすとスイッチ数増大

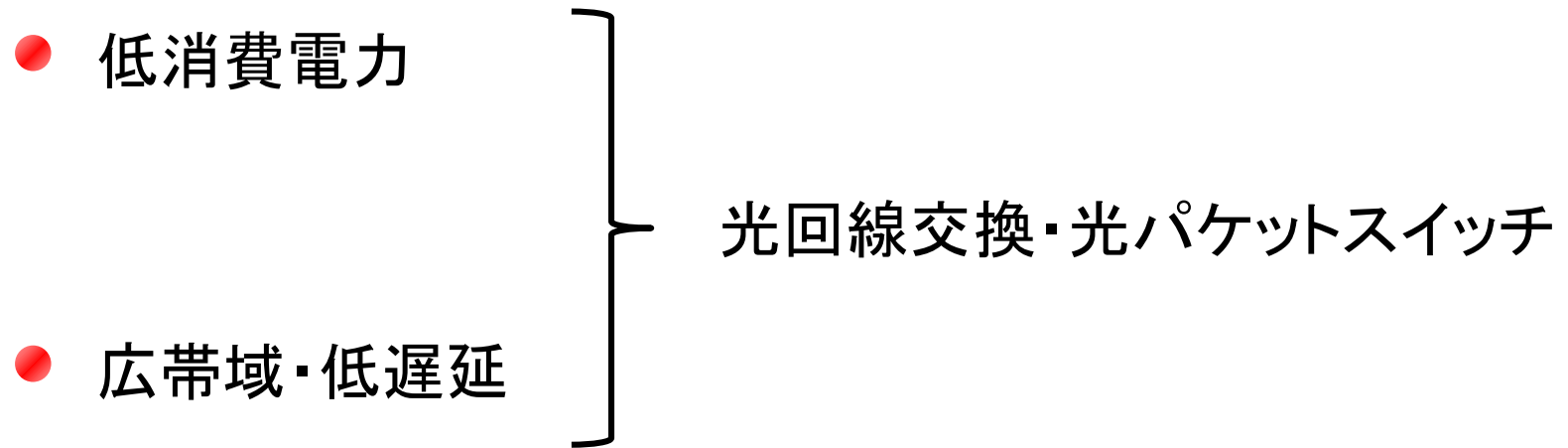
ファット・ツリー構成



新たなデータセンタ・ネットワークの構成

ファブリック構成





光インターコネクション

- プリント基板内の電気信号の高速化(> GHz)により、伝送できる距離が極端に短くなってきた。
(例) スーパーコンピュータの1 IF >20Gbps ➡ 数cm
 - 電磁雑音の影響増大 ➡ 基板設計の負担増大
- >GHzの領域で誘電損失が支配的に >2GHzでの損失影響回避の困難

Necessity of Optics into Data Center

Average growth rate of data traffic (U.S.) : $\times 45\%/yr$

Cf. Node growth : $\times 30\%/yr$ (After R. Ho et al., OFC2011, OTuH1)

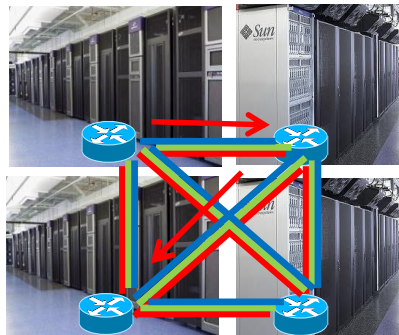
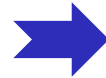
➡ Growth of bandwidth within PCs required

Issues in Electronics

- Loss of wires
- Signal crosstalk
- Power increase
(repeater, pre-emphasis)

Merits in Optics

- Low loss
- No crosstalk
- Low consumption power



IP packets

To further develop Data Center performance,

- ① Optical Interconnection promising due to merits mentioned above.
- ② Optical packet switch (OPS) expected due to
 - Low latency
 - Fine granularity
 - Statistical multiplication possible
(High network efficiency)

Ethernetの基本仕様

Ethernet光仕様比較

100Base-X		1000Base-X		10GBASE-R/W/X		
300m	500m	5km	82m	300m	10km	40km
	3.125Gbps × 4 (WWDM)			10GBASE-LX4		
	10.3125Gbps (Serial)		10GBASE-SR		10GBASE-LR	10GBASE-ER
	9.95328Gbps (Serial)		10GBASE-SW		10GBASE-LW	10GBASE-EW
	1000Base-SX	1000Base-LX				
100Base-FX						
1310nm-WGLD	850nm-VCSEL	1310nm-WGLD	850nm-VCSEL	1310nm-WGLD		1550nm-WGLD
SMF/MMF	MMF	SMF	MMF	SMF 38		

Ethernetの標準規格仕様(1)

(10M~10Gbps)

標準名	10Base-T	100Base-TX	100Base-FX	1000Base-SX	1000Base-LX	1000Base-T	10GBase-T
伝送速度	10Mbps	100Mbps	100Mbps	1.0Gbps	1.0Gbps	1.0Gbps	12.8Gbps
伝送路上の伝送速度	10Mbps	125Mbps	125Mbps	1.25Gbps	1.25Gbps	1.25Gbps	800Mbps
最大伝送距離	100m	100m	320m	550m	550m(MMF) 5km(SMF)	100m	100m
媒体制御	CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA/CD	全二重／CSMA/CD	全二重／CSMA/CD	全二重／CSMA/CD	
符号化方式	マンチェスタ符号	NRZ/MLT-3	NRZI	NRZ	NRZ	4D-PAM5	16値PAM
PCS符号化方式	なし	4B5B	4B5B	8B10B	8B10B	8B1Q4	64B65Bを16値PAMにマッピング
伝送媒体	UTP CAT3/4/5	UTP CAT5	MMF	MMF (850nm VCSEL)	MMF SMF (1310nm FP-LD)	e-CAT5	CAT6a/7

Ethernetの標準規格仕様(2)

(10Gbps)

標準名	10GBase-SR	10GBase-LR	10GBase-ER	10GBase-SW	10GBase-LW	10GBase-EW	10GBase-LX4
伝送速度	10.0Gbps	10.0Gbps	10.0Gbps	9.2857 GbZps	9.2857 GbZps	9.2857 GbZps	2.5Gbps × 4
伝送路上の伝送速度	10.3125 Gbps	10.3125 Gbps	10.3125 Gbps	9.95328 Gbps	9.95328 Gbps	9.95328 Gbps	3.125Gbps × 4波
最大伝送距離	33m(MMF) 300m (新型MMF)	10km	40km	33m(MMF) 300m (新型MMF)	10km	40km	300m(MMF, 新型MMF) 10km(SMF)
媒体制御	全二重	全二重	全二重	全二重	全二重	全二重	全二重
符号化方式	NRZ	NRZ	NRZ	NRZ	NRZ	NRZ	NRZ
PCS符号化方式	64B66B	64B66B	64B66B	64B66B +WIS	64B66B +WIS	64B66B +WIS	8B10B
伝送媒体	MMF 新型MMF	SMF	SMF	MMF 新型MMF	SMF	SMF	MMF 新型MMF SMF
波長	850nm	1310nm	1550nm	850nm	1310nm	1550nm	1275/1300/ 1325/1350nm
レーザ	VCSEL	FP-LD	DFB-LD	VCSEL	FP-LD	DFB-LD	特になし

物理レイヤの伝送方式(光ファイバ使用)

サブレイヤ	100Base-FX	1000Base-SX/LX	10GBase-S/L/E(R, W)/LX4
MAC	平行信号(バイト単位) MACフレーム ↓ 4ビット・平行 100Mbps 0 1 1 0 4B5B符号化	平行信号(バイト単位) MACフレーム ↓ 8ビット・平行 1000Mbps 0 0 0 0 0 1 0 1 8B10B符号化	平行信号(バイト単位) MACフレーム ↓ 64ビット・平行(R) 8ビット・平行(X) 64B66B符号化(R, W) 8B10B符号化(X)
PCS	125Mbps 0 1 1 1 0 ↓	1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 ↓ 10ビット・シリアル	66ビット・シリアル(R, W) 10ビット・シリアル(X) ↓
PMA	NRZI符号化	NRZ符号	WIS: OC-192フレーム化(W) NRZ符号
PMD	125Mbps NRZI符号(光)	光信号 1250Mbps	光信号 10.3125Gbps(R) 9.95328Gbps(W) 3.125Gbps × 4波(X)

100G/40GbE標準化動向

● IEEE802.3baにて2010年6月標準化

距離	媒体	40GbE	100GbE
40km	SMF	_____	100GBASE-ER4 4波×25.78125G 1296~1309nm (5nm間隔)
10km	SMF	40GBASE-LR4 4波×10.3125G 1271~1331nm (20nm間隔)	100GBASE-LR4 4波×25.78125G 1296~1309nm (5nm間隔)
100m	MMF(OM3)	40GBASE-SR4 4心×10.3125G 840~860nm	100GBASE-SR10 10心×10.3125G 840~860nm
10m	Copper	40GBASE-CR4 4心×10.3125G	100GBASE-CR10 10心×10.3125G
1m	Backplane	40GBASE-KR4 4×10.3125G	_____

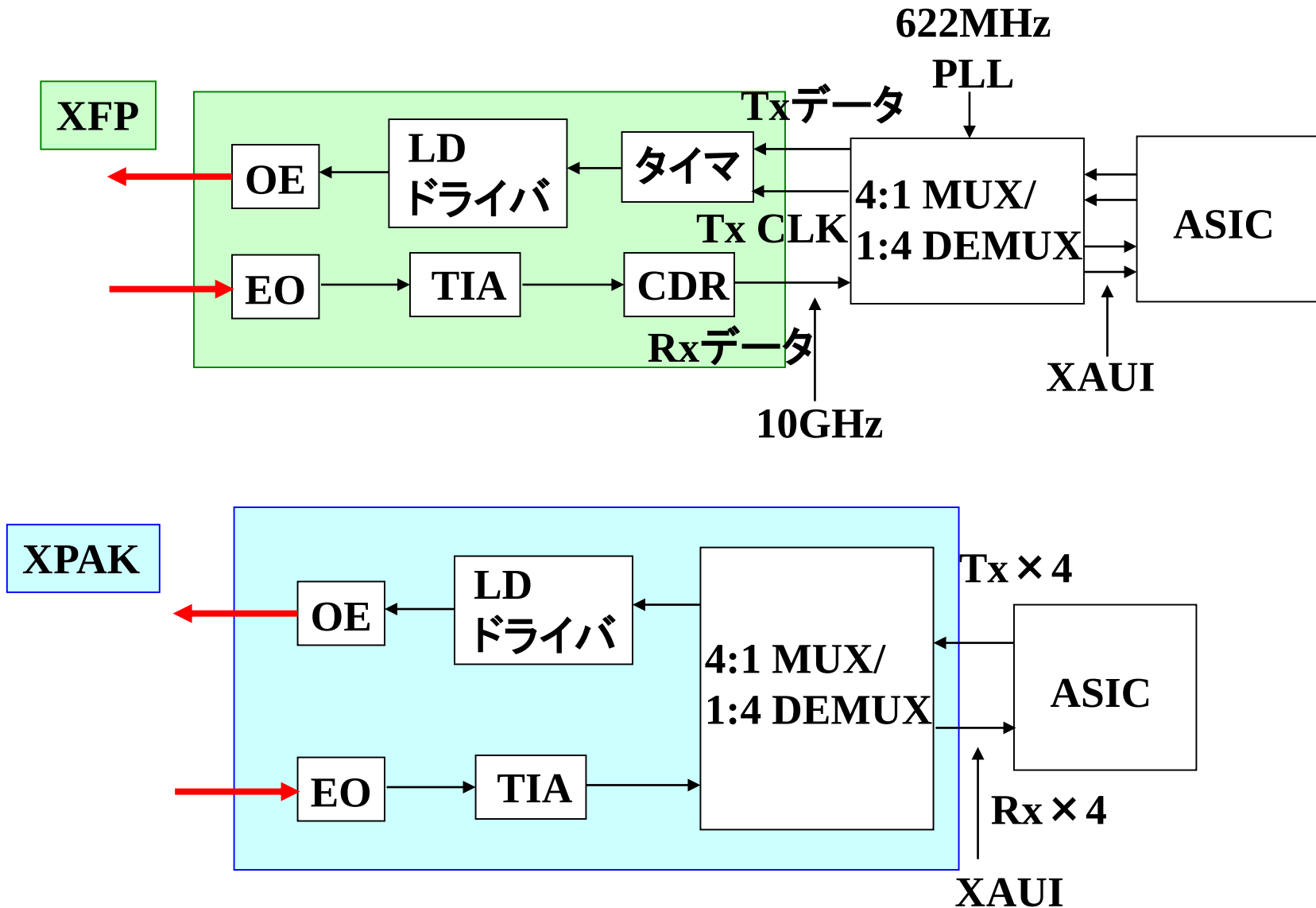
● 2011.4 IEEE 802.3 Industry Connections Ethernet Bandwidth Assessment Ad Hoc 結成
→ 今後は400G or 1Tbit Ethernetに向けて議論が進む

各種10GbE用トランシーバ・モジュールの比較

MSA: Multi-Source Agreement

名称	参画する主な メーカー	サイズ	電気IF	用途
XENPAK	Agere, Agilent	$17.4 \times 36 \times 115.2\text{mm}^3$	XAUI	10GbEなど
XPAK	Infineon, Intel, Picolight	$13.4 \times 39.5 \times 83.8\text{mm}^3$	XAUI, SIF-4	10GbE, OC-192
XFP	Finisar, JDS, Innovation Core SEI, E2O Comm.	$10.2 \times 17.8 \times 58.4\text{mm}^3$	XFI	10GbE, OC-192

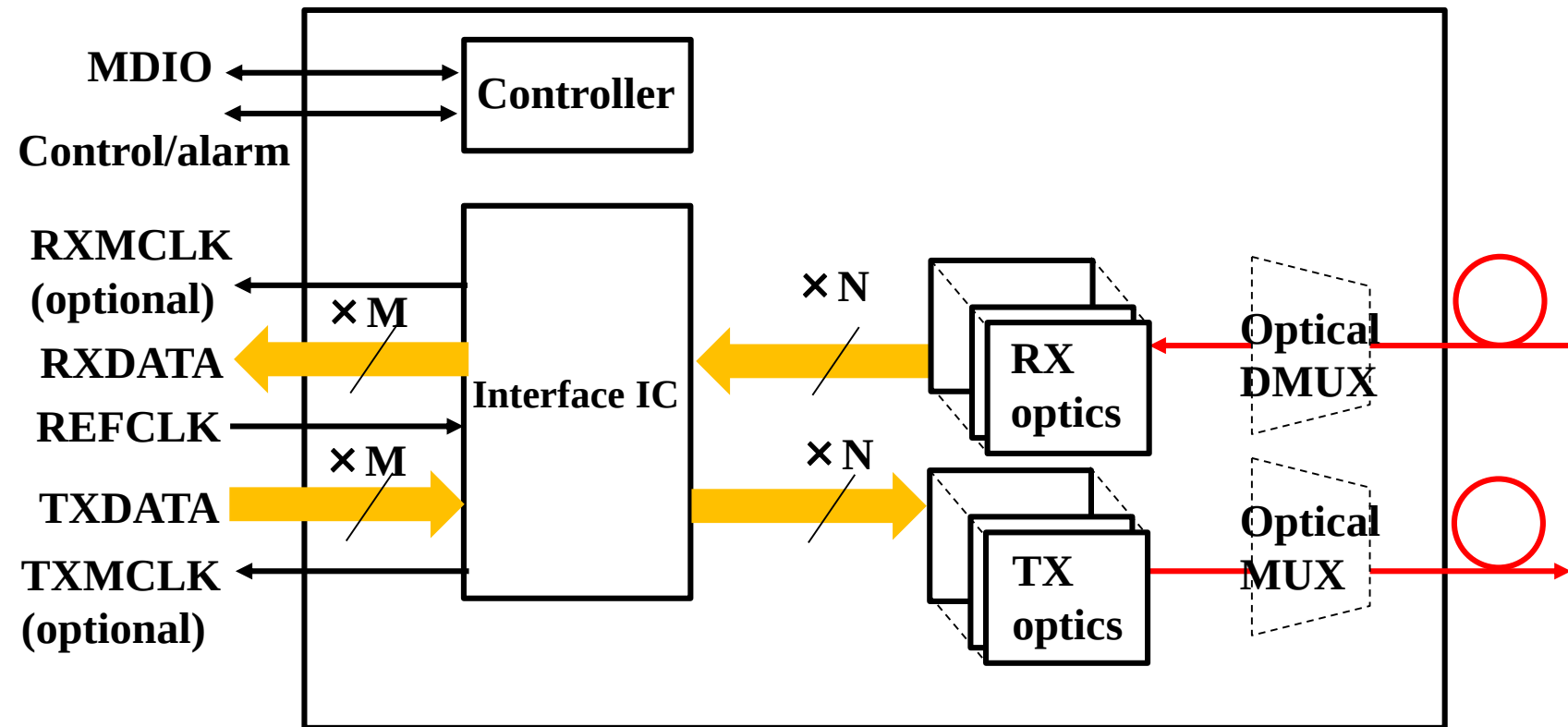
MSA (XFP, XPAK)の内部構成



CFP MSAブロックダイアグラム

J. Anderson, and M. Traverso, IEEE Commun. Mag., vol.48, No.3, pp.535-540 (2010).

CFP MSA : 100G Form-Factor Multi-Source Agreement



送受信モジュールの要求体積推移

100GbEモジュールを例に

CFP

CFP2

CFP4

	CFP	CFP2	CFP4
サイズ	$82 \times 145\text{mm}^2$	$40 \times 110\text{mm}^2$	$21.5 \times 92\text{mm}^2$
消費電力	32W	11W	$< 5\text{W}$

近年のインターネットの傾向

- 近年のインターネットはモバイルがトラフィック増の要因
- 大容量データの量が増加
- サーバ性能: $\times 100\%$ / 2年の増加
($\times 40 \sim 50\%$ / 年, インターネットトラフィック増加率と同程度)
- データセンタのトラフィック増大



100Gbpsを超える高速LANインタフェースへの要求増大

200/400GbE PMD標準化動向(2017.12時点)

IEEE802.bs 2017.12標準化完了

PMD	媒体	並列数×レート	多重化	変調速度 (baud)	変調 方式
100m	MMF	16×25Gbps	16ハ°ラレル MMF	400GBASE-SR16 25G	NRZ
500m	SMF	4×50Gbps	4ハ°ラレルSMF	25G	PAM4
		4×100Gbps	4ハ°ラレルSMF	400GBASE-DR4 50G	PAM4
2km	SMF	4×50Gbps	4波長WDM	25G	PAM4
		8×50Gbps 4×100Gbps (4波長×50Gbaud(PAM4))	8波長WDM	400GBASE-FR8 25G	PAM4
10km	SMF	4×50Gbps	4波長WDM	25G	PAM4
		8×50Gbps	8波長WDM	400GBASE-LR8 25G	PAM4

の検討が進む