

光通信システムの実用化への挑戦 を振り返って

三木 哲也

2023.7.6



私の研究・実用化の経歴

1970年～	アナログ回線によるデジタル伝送 同軸ケーブルLDC-400M伝送の研究	日本電信電話公社 (NTT) 入社 電気通信研究所 時分割伝送研究室
1974年～	光ファイバ伝送の調査を開始	基幹伝送研究部光ファイバ伝送GIに参画
1976年～	光ファイバ伝送の設計・実験	光伝送研究室発足
1978年～	F32M/F100M方式の現場試験	
1980年～	F32M/F100M方式の商用化	本社技術局伝送部門
1982年～	可変容量伝送、光LANの研究	伝送方式研究室長
1986年～	(研究管理業務、FTTHの検討)	通信網推進研究部長、研究開発本部
1990年～	光アクセス: FTTHの実用化	伝送処理研究部長
1992年～	(光通信全般、FTTHの推進)	光ネットワークシステム研究所長
1995年7月～	フォトリックネットワークの研究	電気通信大学教授
2008年3月		定年

初期の光ファイバ伝送の研究・実用化 (1974年～)



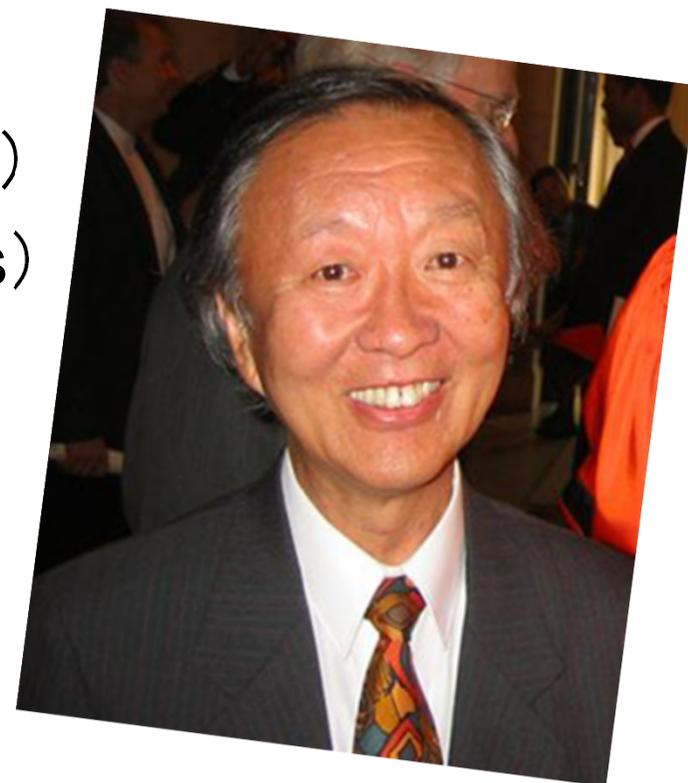
1970年代のNTTと伝送分野の状況

- 積滞解消(1978年)・全国自動即時化(1979年)の達成に邁進
- NTTの次世代目標:テレビ電話サービス、データ通信サービス
- 目標達成に向けた研究所の主要テーマ
 - ・ テレビ電話:広帯域化1,000倍の実現 → 大容量伝送の研究・実用化
 - ・ データ通信:独自コンピュータの実現 → DIPSの研究・実用化
- 大容量伝送の研究・実用化
 - ・ 同軸ケーブルによるアナログ伝送: **C-60M方式**、CS-200M方式
 - ・ 同軸ケーブルによるデジタル伝送: **DC-400M方式**
 - ・ 準ミリ波デジタル伝送: **20L-P1方式 (20GHz帯・400M)**
 - ・ ミリ波デジタル伝送: **W-40G方式 (40~80GHz帯・電話30万回線)**
 - ・ 超伝導同軸ケーブルによるデジタル伝送の研究

光通信に関する研究状況（1970年前後）

○ 世界の状況

- ・1966年：K.C.Kao 光ファイバ論文を公表
- ・1970年：光ファイバ実現：20dB/km（Corning）
- ・1970年：LD室温連続発振（Bell Laboratories）
- ・1970年代初期：低損失化が進む；4～6dB/km
- ・1973年頃：光ファイバ製造技術の主流2方法
 - ・外付けCVD法（コーニング社）
 - ・内付けCVD法（ベル研究所）



○ 日本の状況

- ・1970年代初期：空間伝送による光通信の研究が主流
- ・1971年：NTT茨城研究所で光ファイバの研究開始
- ・1973年頃：日本での光ファイバの損失：10dB/km程度
- ・1974年：半導体レーザー（DFB-LD）の単一モード発振成功（日立）

光ファイバ通信の研究開始

- ・伝送研究部に光ファイバ通信研究グループ発足(1974年)
- ・基礎研究部の意見:光通信の実用化は時期尚早

伝送系の分類			光ファイバの特徴					光伝送による可能性	
適用領域	既存の伝送媒体	アナログ(A), デジタル(D)の別	ガラス	細径	無漏話 無誘導	低損失	広帯域		
市外	長距離回線	同軸ケーブル, マイクロ・準ミリ波, ミリ波	D		○		○	○	◎ 経済化 ○ 大容量化
	短距離回線								
市内	局間中継線	ペアケーブル	A	D		○	○		◎ 局舎間無中継化 ○ 経済化
	加入者線	広帯域ペアケーブル 超細心同軸ケーブル	A	D	○	○	○	○	◎ 省資源化 ◎ サービスの多様化 ○ 無中継化
局内伝送	ペアコード 同軸コード	A	D		○	○			◎ 配線スペースの縮小

論文執筆: 三木, 小山, 木村, 岡野, “光ファイバ伝送方式の検討および方式設計上の問題点”, 研究実用化報告, Vol.24, No.9, pp.1973-1988 (1975).

NTT最初の光通信の実用化・商用化

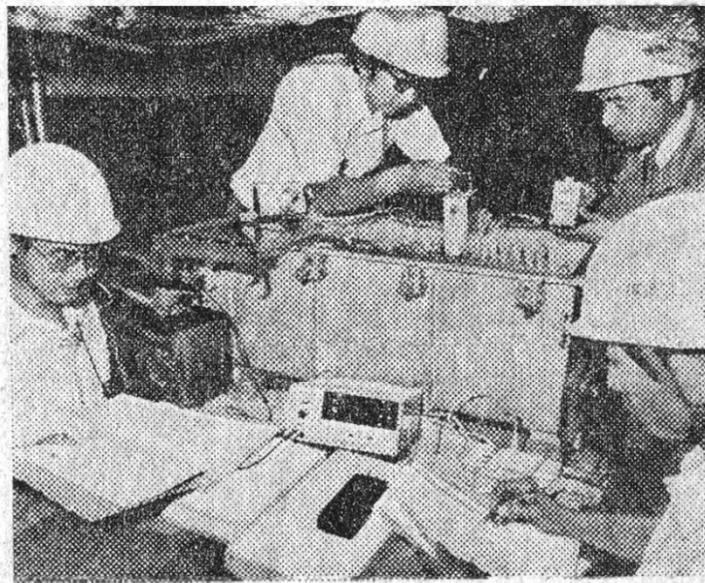
開始年	1976年	1978年	1980年	1981年
研究開発 ステップ	所内実験 (研究)	第1次現場試験 (実用化)	第2次現場試験 (実用化)	商用試験 (商用化)
光伝送方式	32Mbps	32Mbps 100Mbps 映像伝送(PFM)	6Mbps 32Mbps 100Mbps 映像伝送(PFM)	F-32M方式 F-100M方式
光波長(μm)	0.85	0.85	0.85 1.3	0.85 1.3
光ファイバ種別	SI	GI (60/150μm)	国際標準GI (50/125μm)	
中継距離(km)	8	6.5 ~ 8	0.85μm: 9~12 1.3μm: 18~21	0.85μm: 10 1.3μm: 15

PFM: Pulse Frequency Modulation SI: Step Index GI: Graded Index

主役の座へ 「光通信」前進

世界最高の技術

低コスト化が課題



マンホール内で光ケーブルの入念なテストが続けられている

電電公社は、公衆通信回線に光ファイバーケーブルを使った本格的な実験に成功した。数年前まで、電の通信といわれた光通信も、これで将来の通信の主役が確実になった。(一画)

光通信は極めてたくさんのお客を収める可能性のあることが早くから指摘されてきたが、その実現を妨がらなくてはならぬのは、光を導くのに適した通信線がなかなか得られなかったからだ。

だが近年になって、光が長距離でも、途中での衰えやひずみが極めて少ない、極低損失の通信線の開発が急速に進んだ。これは、特殊な石英で作られた一種のガラス線で、光ファイバーと呼ばれるものである。

光ファイバーの最大の特色は伝

送帯域が広いことである。従来わずか十分の一以下という細いガラス線一本だけで数万回線の音声通信が可能という、極めて広い通信容量を持っている。

なかでも、わが国の光ファイバー技術の発展はめざましく、極低損失の世界のチャンピオン・データを取次ぎと書き換えている。この技術力が、こんどの実験の成功をもたらした。

今回の実験では、光ファイバーについても、最新の技術は使われなかった。光ファイバーは、初期に開発されたグレイデッド型と呼ばれるものが使われたし、半導体レーザーも、発振する光の波長がやや短く、光ファイバー内の損失が低く、使いやすいものだった。実験もこれに合わせて、市内の交換局間という比較的短距離で行われ、中継器を約五ヶ所間隔に置いて

をはじめ、高い物案内、広告など各種情報をふんだんに送れるようになる。

こうした宅内端末への光ファイバーの適用は、生活映像情報システム開発協会が、奈良県東生駒地区をモデルに実験に取り組むとしていた。海外国も加入者網への適用の研究を熱心に進めている。

加入者網に広く導入するには、まず光ファイバーのコストが極めて低くなること、また複雑な変換動作の可能な高性能の変換器(コンバーター)が安くできること、未編配線の接続技術が容易にできること(現在は顕微鏡を見ながらファイバー心線を接続する)などが要求される。

こうした要求にこたえられるかどうか、光通信の最大の関門であろう。また、既設の銅線ケーブルから光ファイバーケーブルへどう移行すればよいかといった課題もある。これらの課題に、電電公社がどうこたえていくが注目されることである。

(鹿子木昭記者)

敷設した光ファイバケーブルの特性

表 2 光ファイバの伝送特性

(波長 : 0.85 μm)

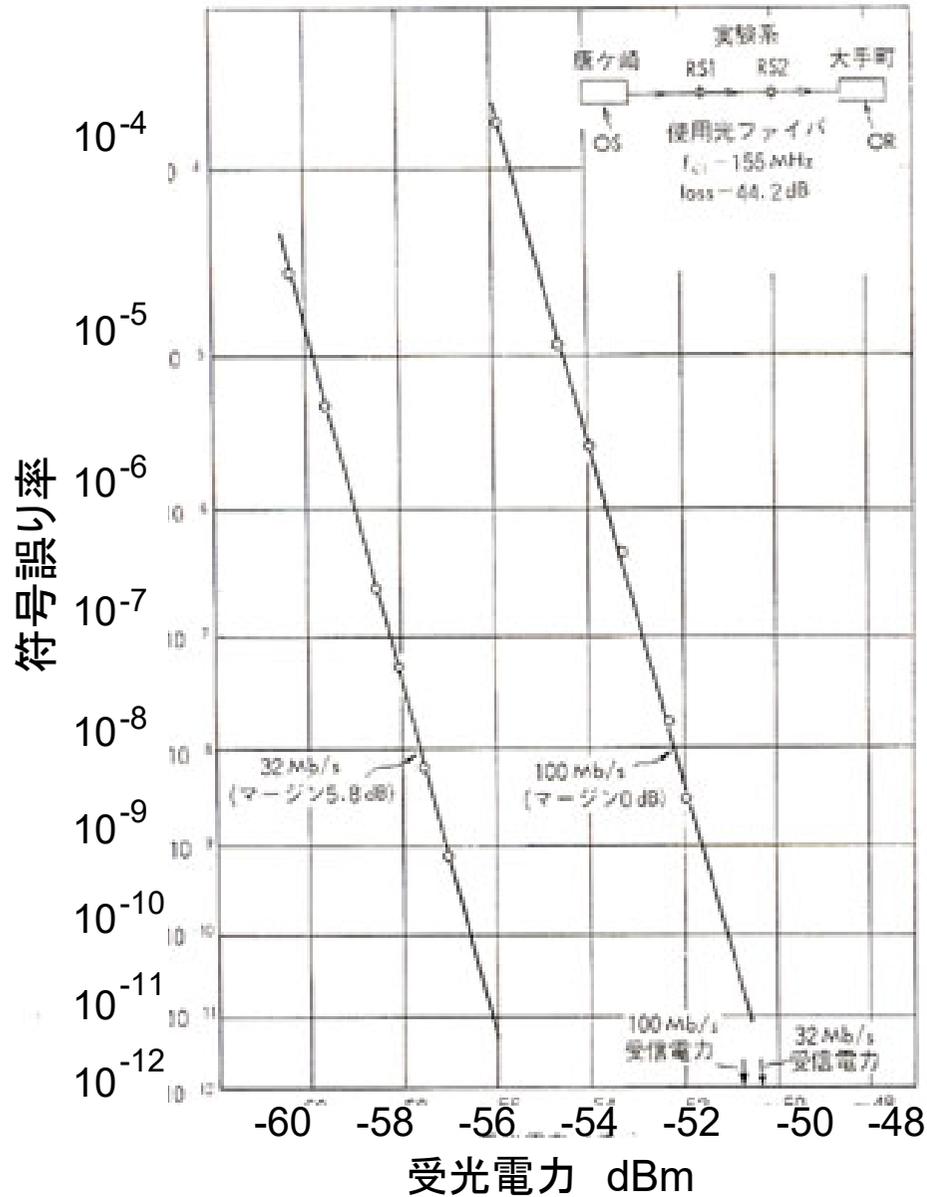
項 目	仕 様	期待値 (区間平均*)	実績値 (平均**)
損 失	<4.5 dB/km(目標値)	4.0 dB/km	2.8 dB/km
接続損失	—	0.3 dB/point	0.2 dB/point
ベースバンド帯域	>250 MHz·km	500 MHz·km	800 MHz·km
帯域の距離依存係数 r	—	0.75	0.65 以下

* 1 中継区間での特定の心線特性を 1 km の特性に換算した。

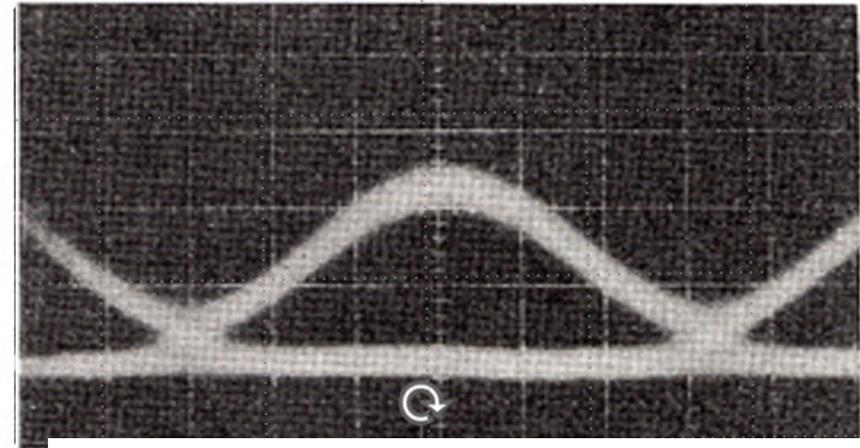
** 測定した全サンプルの平均値。

出典：三木, 江川 米田, 関本, “32Mb/sおよび100Mb/sデジタル光ケーブル伝送方式”,
研究実用化報告, Vol.28, No.9, pp.1823-1848 (1979).

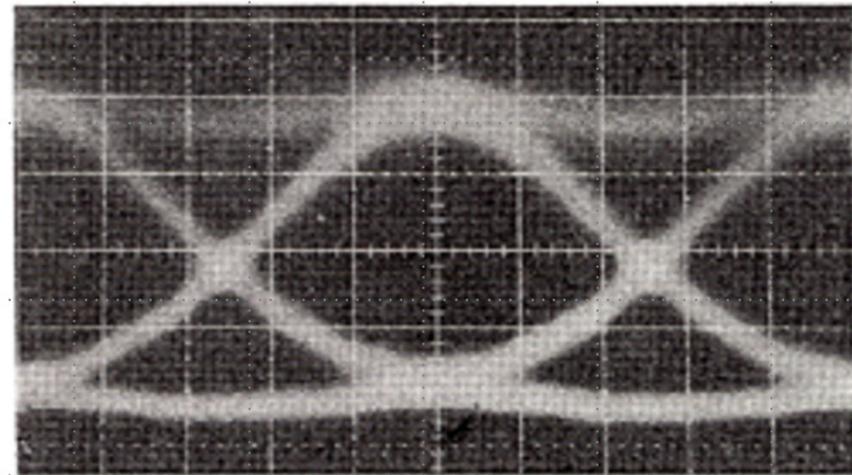
第1次現場試験で得られた伝送特性



14.1km無中継伝送でのデジタル伝送特性

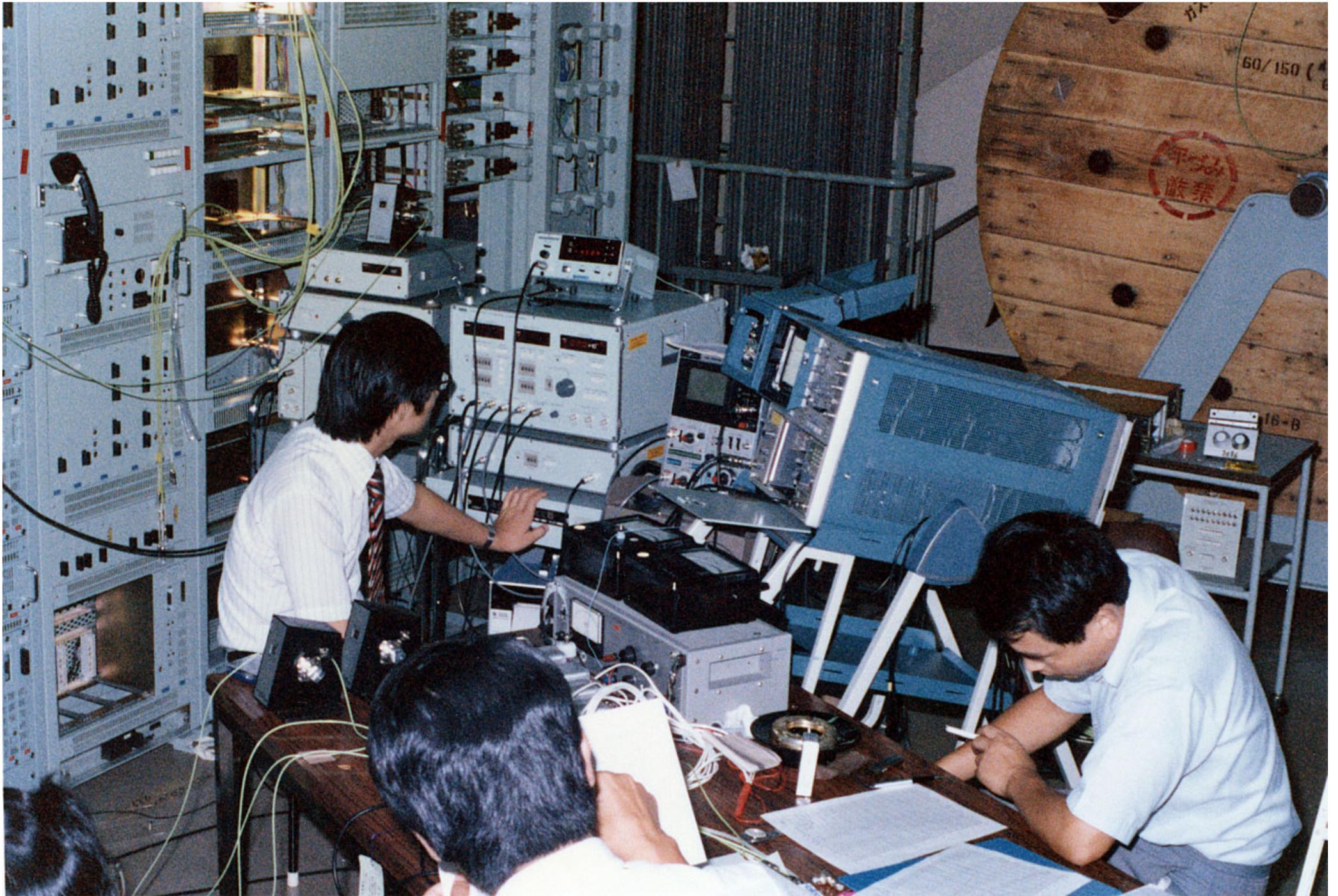


32Mbps伝送
H:5nS/div



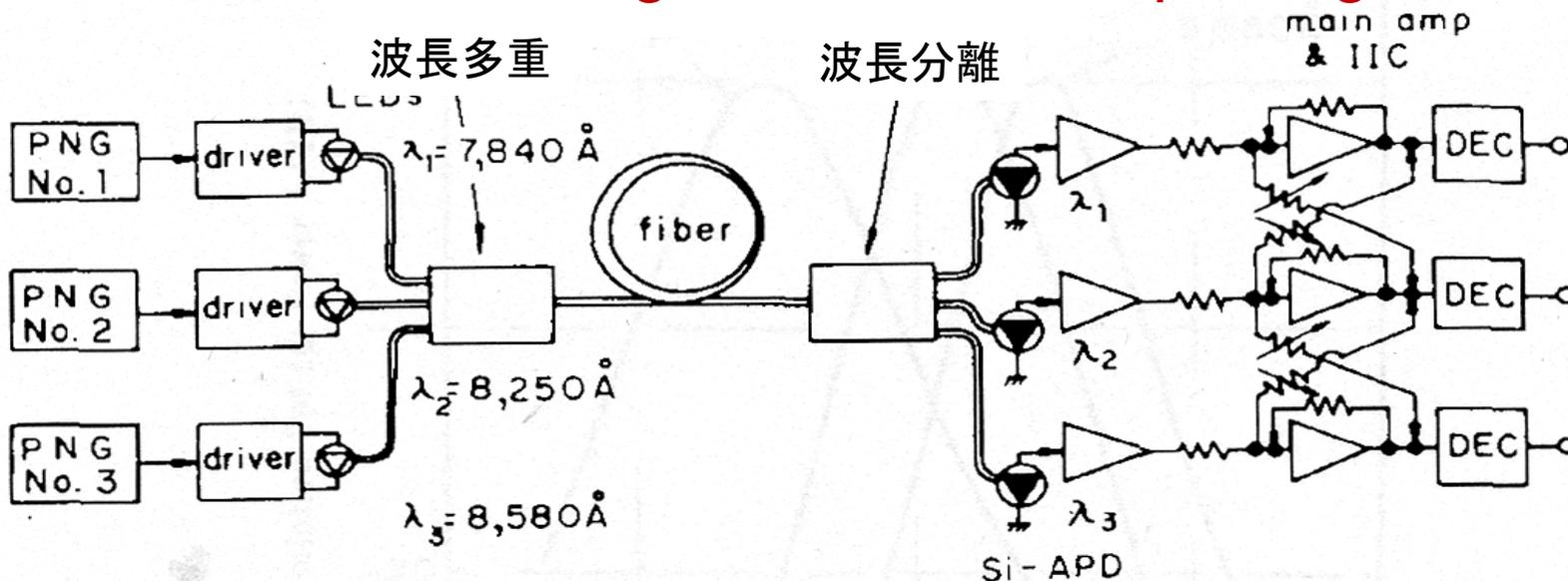
100Mbps伝送
H:2nS/div

VADファイバ8.4km区間での光受信波形



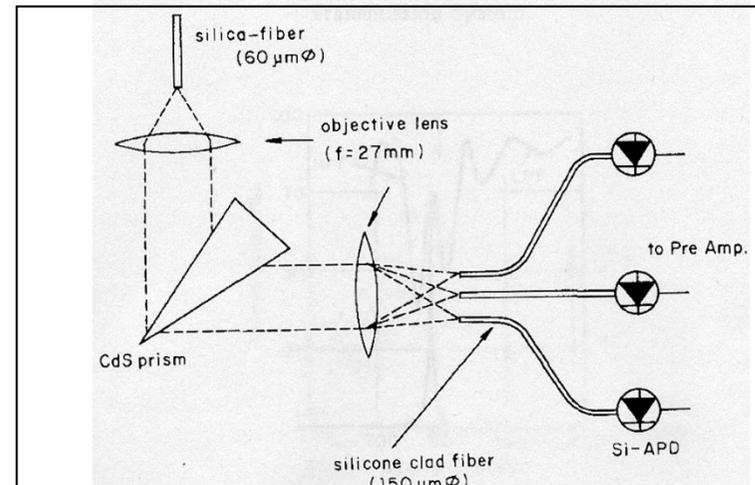
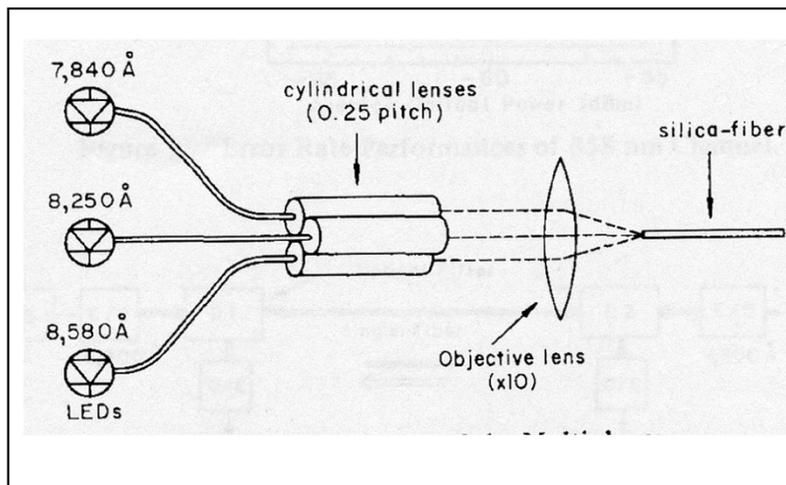
世界で最初の光WDMの実験 (1977)

WDM: Wavelength Division Multiplexing



波長多重

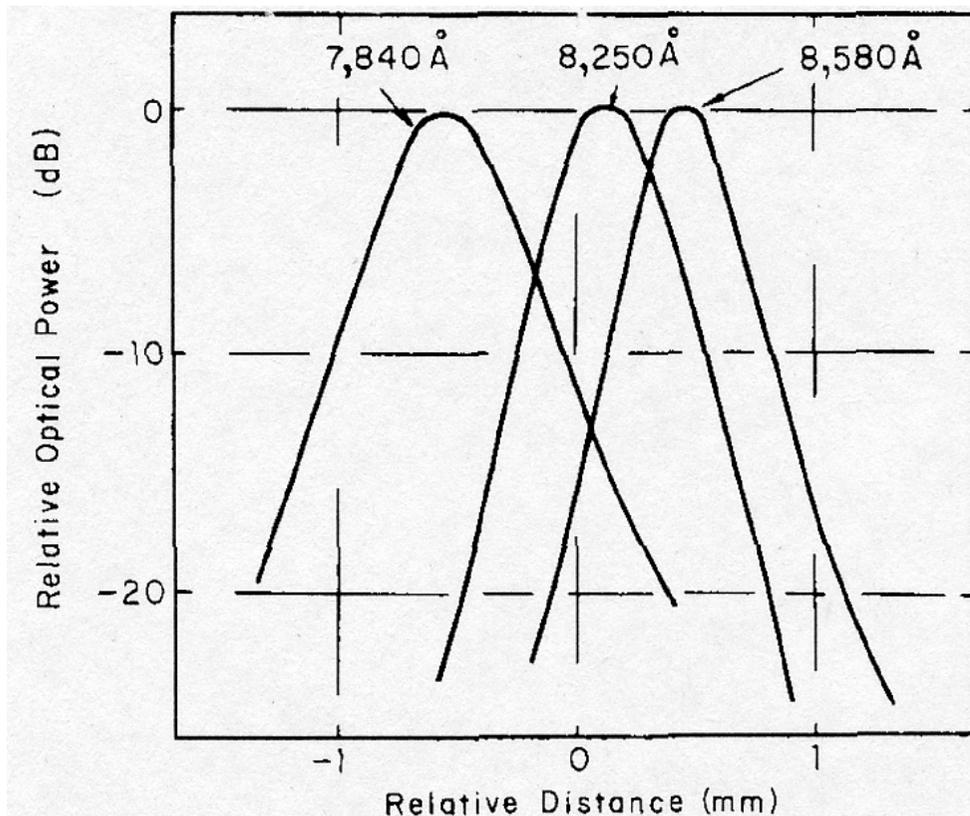
波長分離



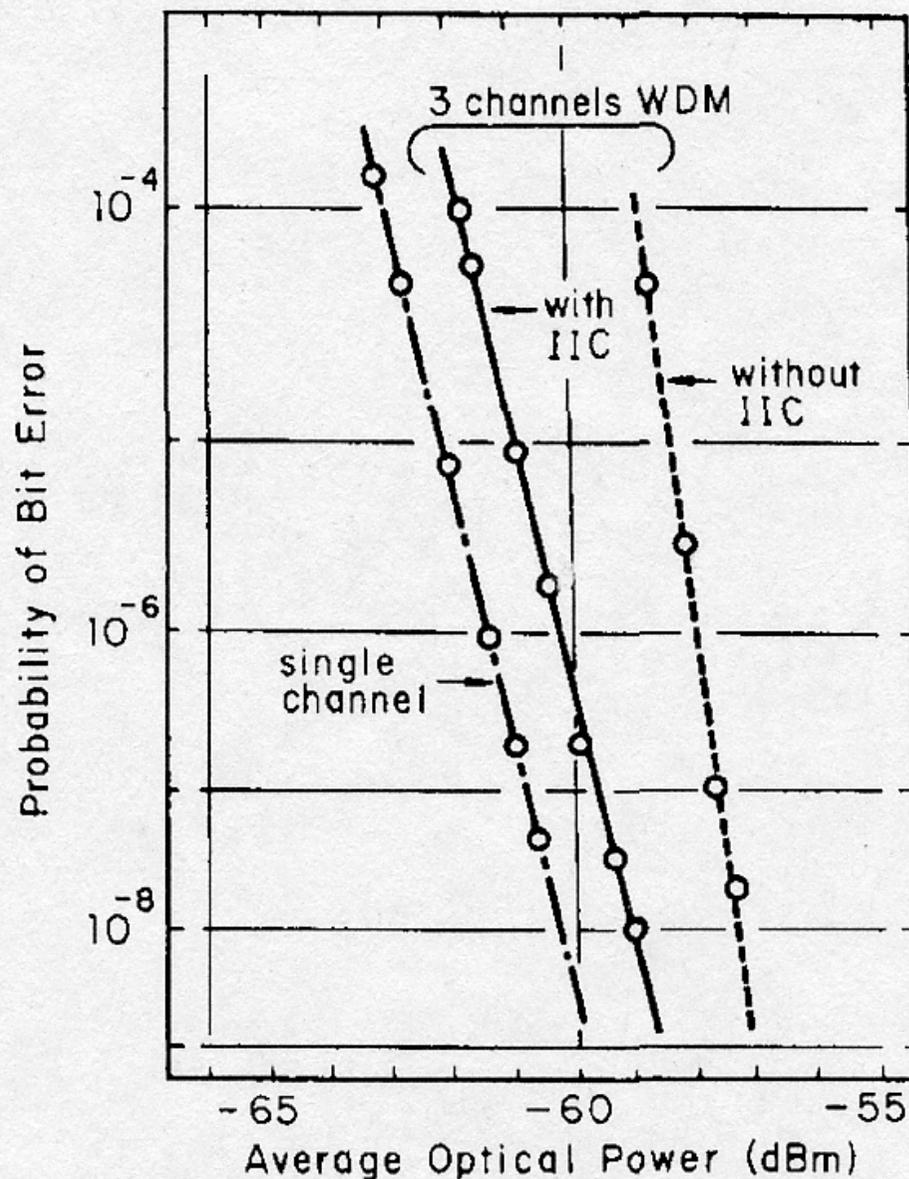
論文発表: T.Miki, H.Ishio, Viabilities of the Wavelength-Division-Multiplexing Transmission System Over an Optical Fiber Cable, IEEE Trans. on Communications, COM-26, No.7, pp.1082-1087 (1978).

光WDM の伝送実験結果

送信光スペクトル



受信符号誤り率

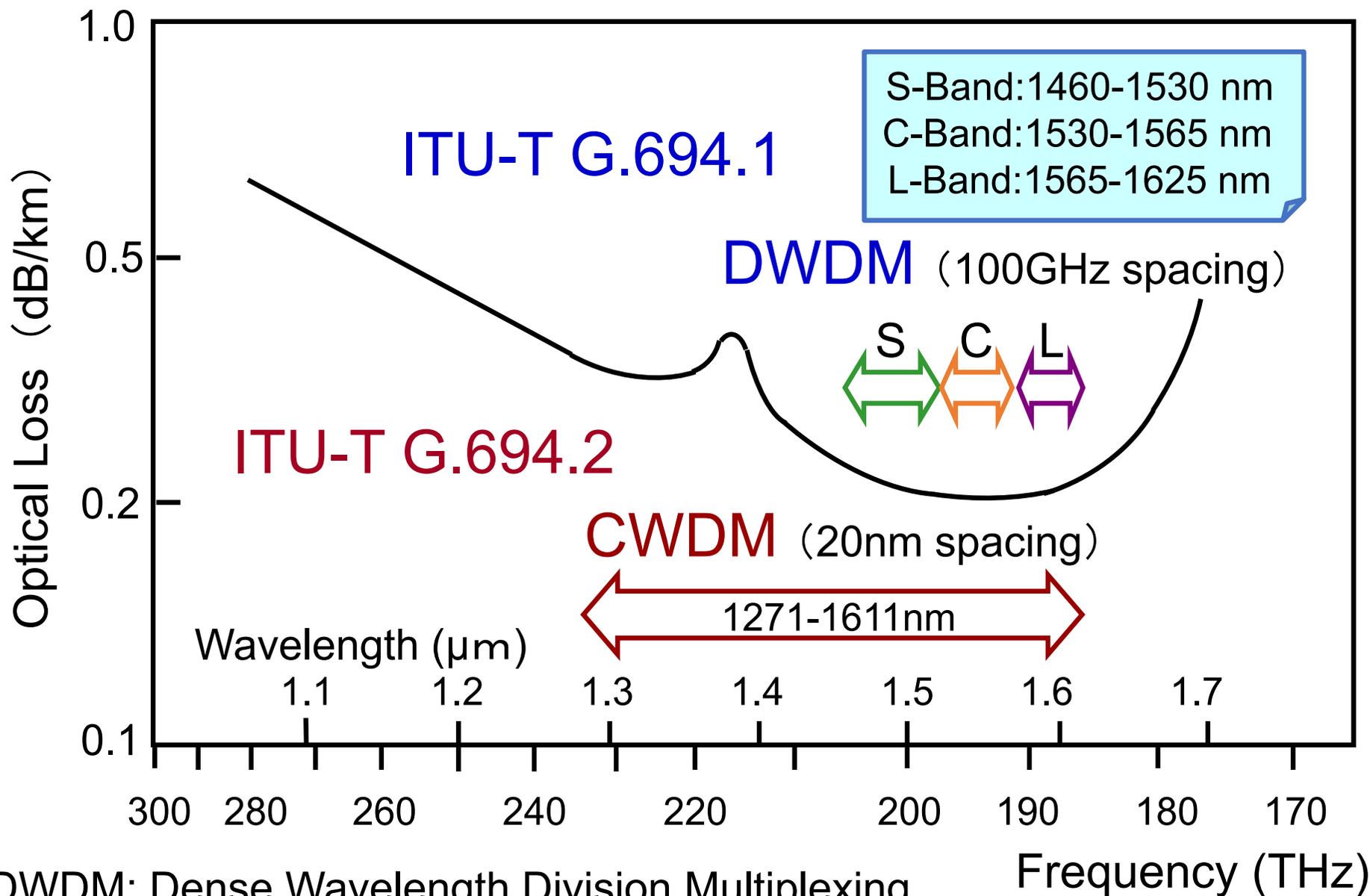


波長(3波長):

0.784mm, 0.825mm, 0.857mm

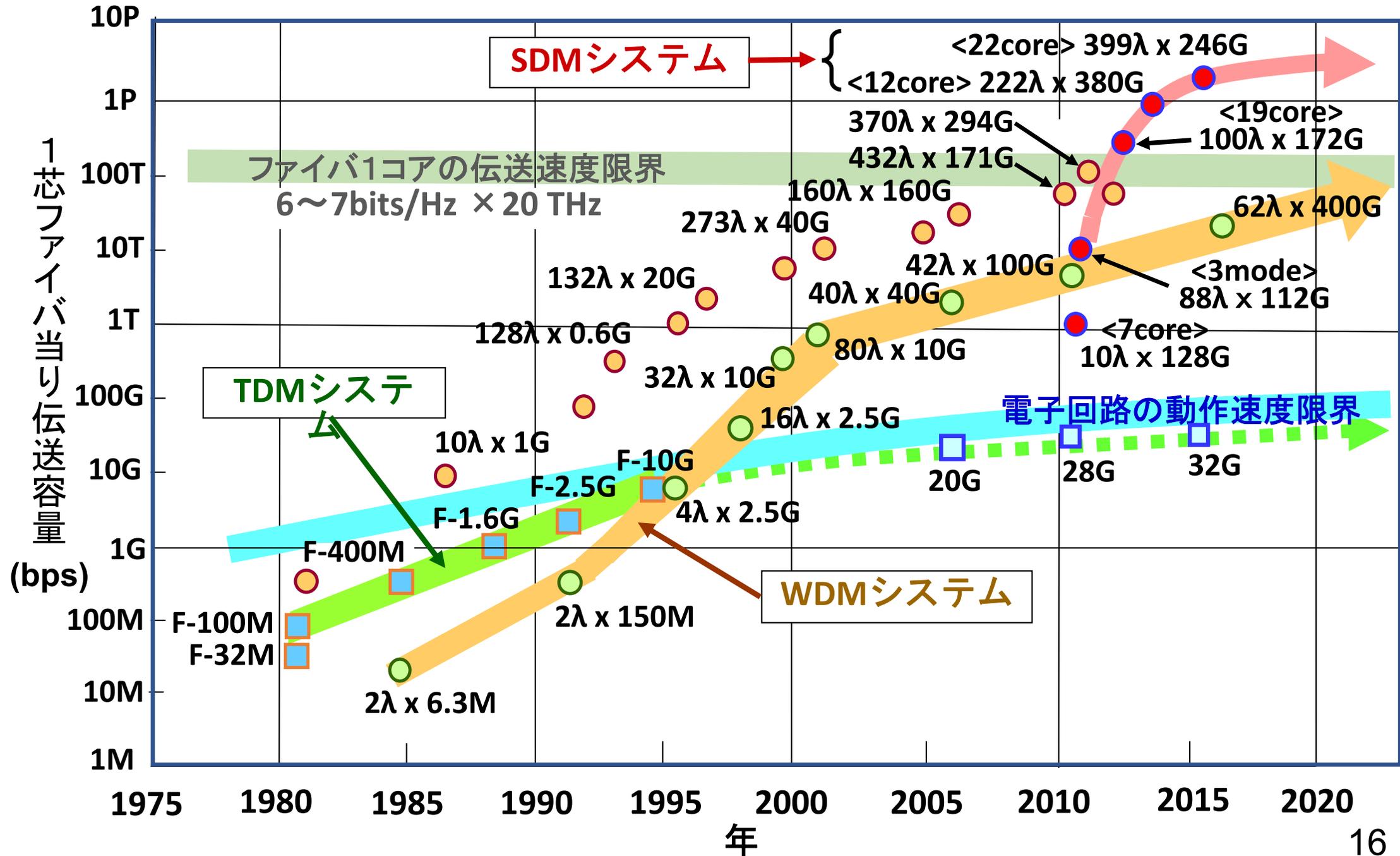
伝送速度／波長: 8.192 Mbps

WDM伝送の国際標準化



DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing
 CWDM: Course Wavelength Division Multiplexing

光伝送技術の発展



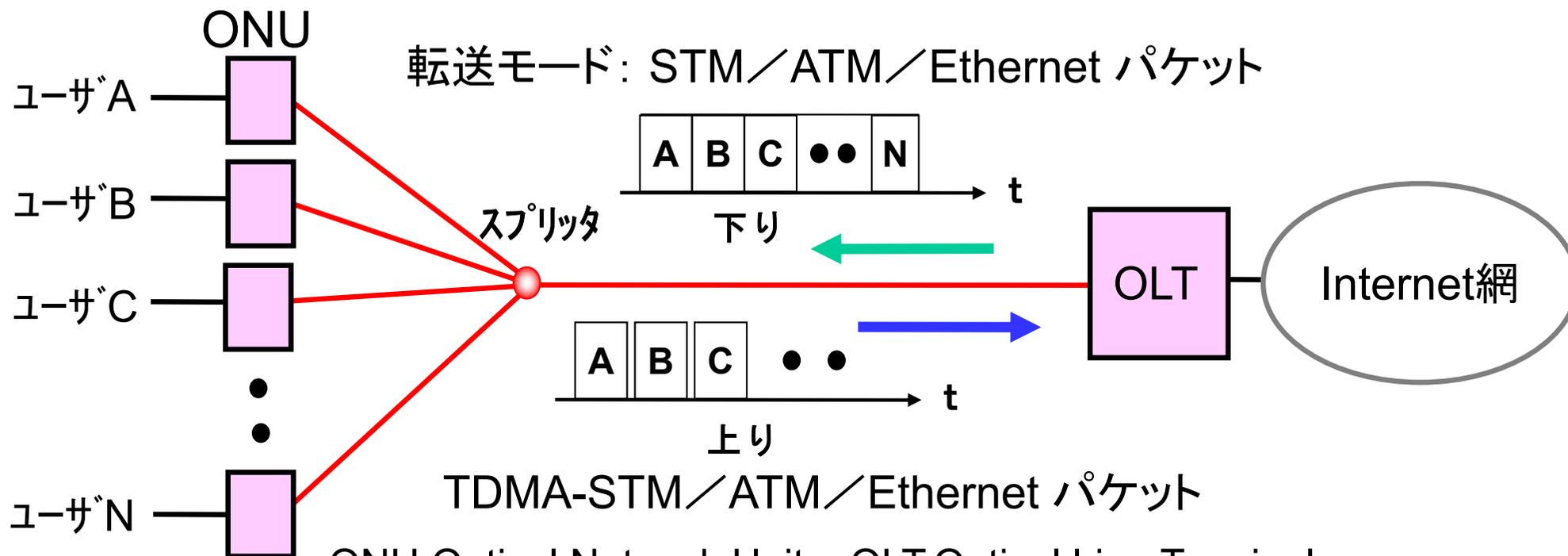
光アクセス：FTTH実用化への挑戦 (1986年～)



PDS (Passive Double Star) 方式の研究・実用化 (1986 ~)

低コスト化

- ・実経費の低減:
装置価格、工事費、運用費の低減
- ・多重化による低減:
共用によるユーザ当たり費用の低減

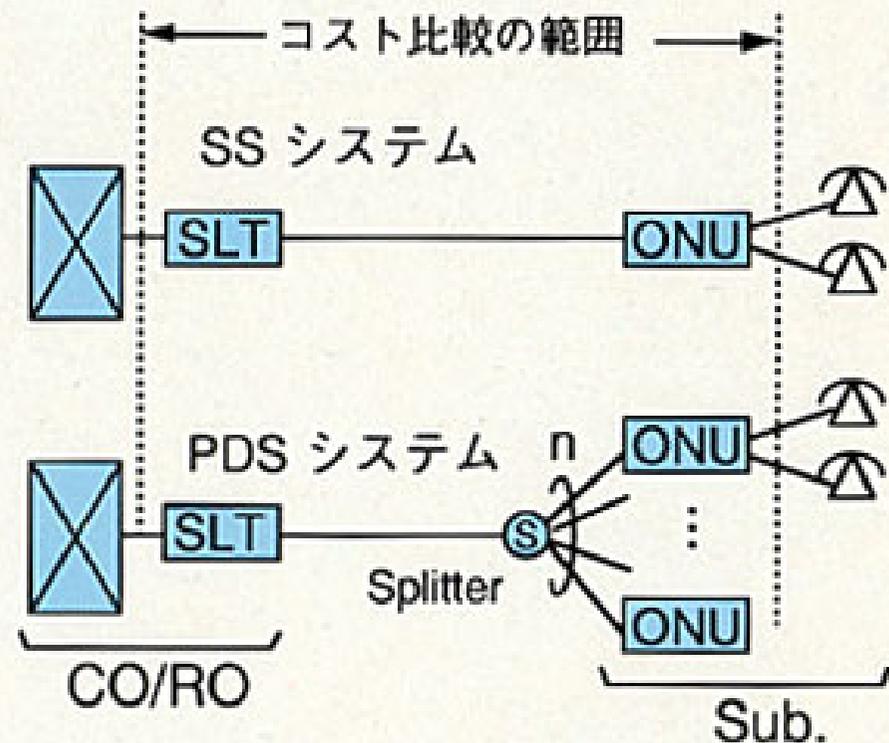
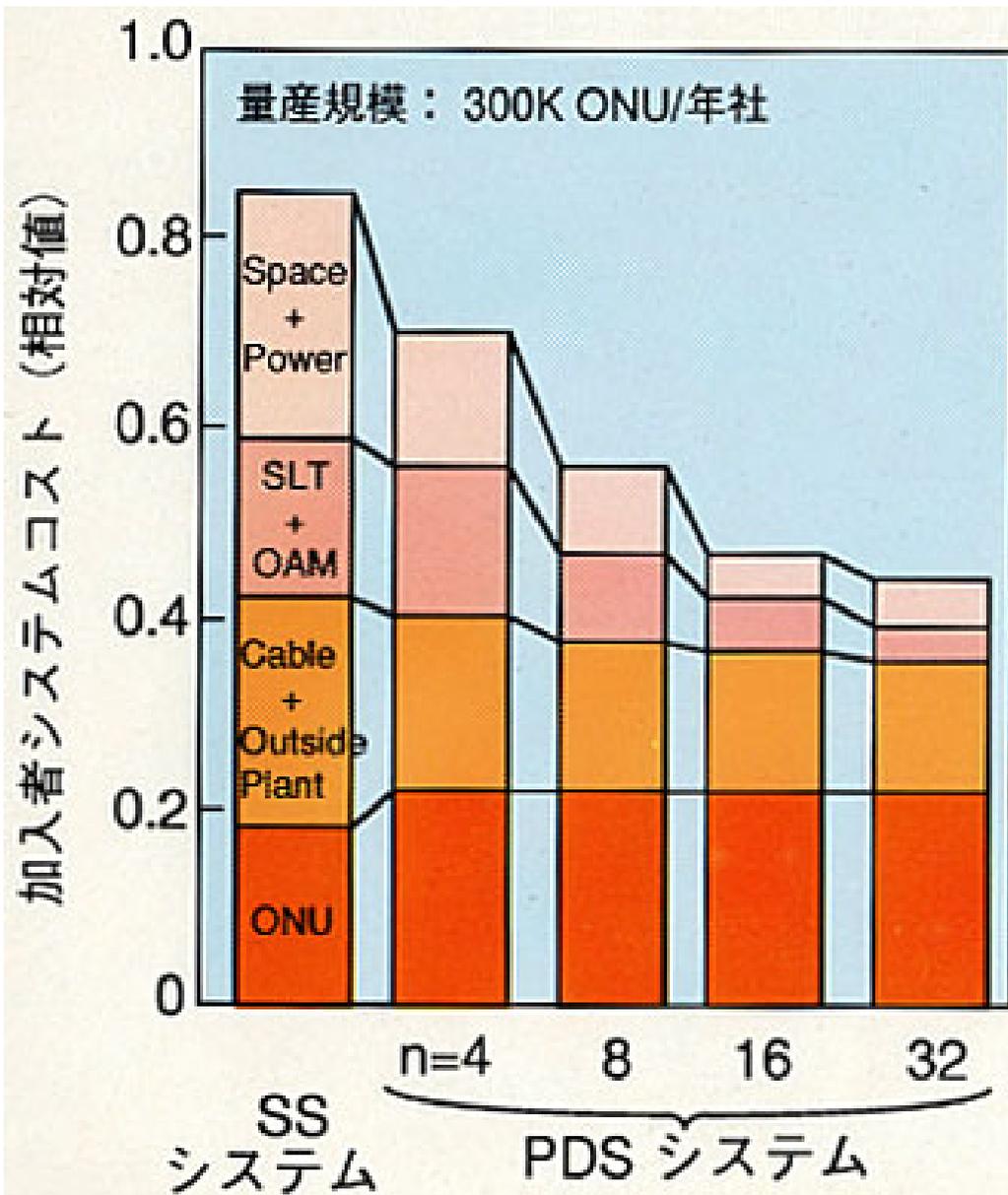


ONU:Optical Network Unit OLT:Optical Line Terminal

TDMA:Time Division Multiplex STM:Synchronous

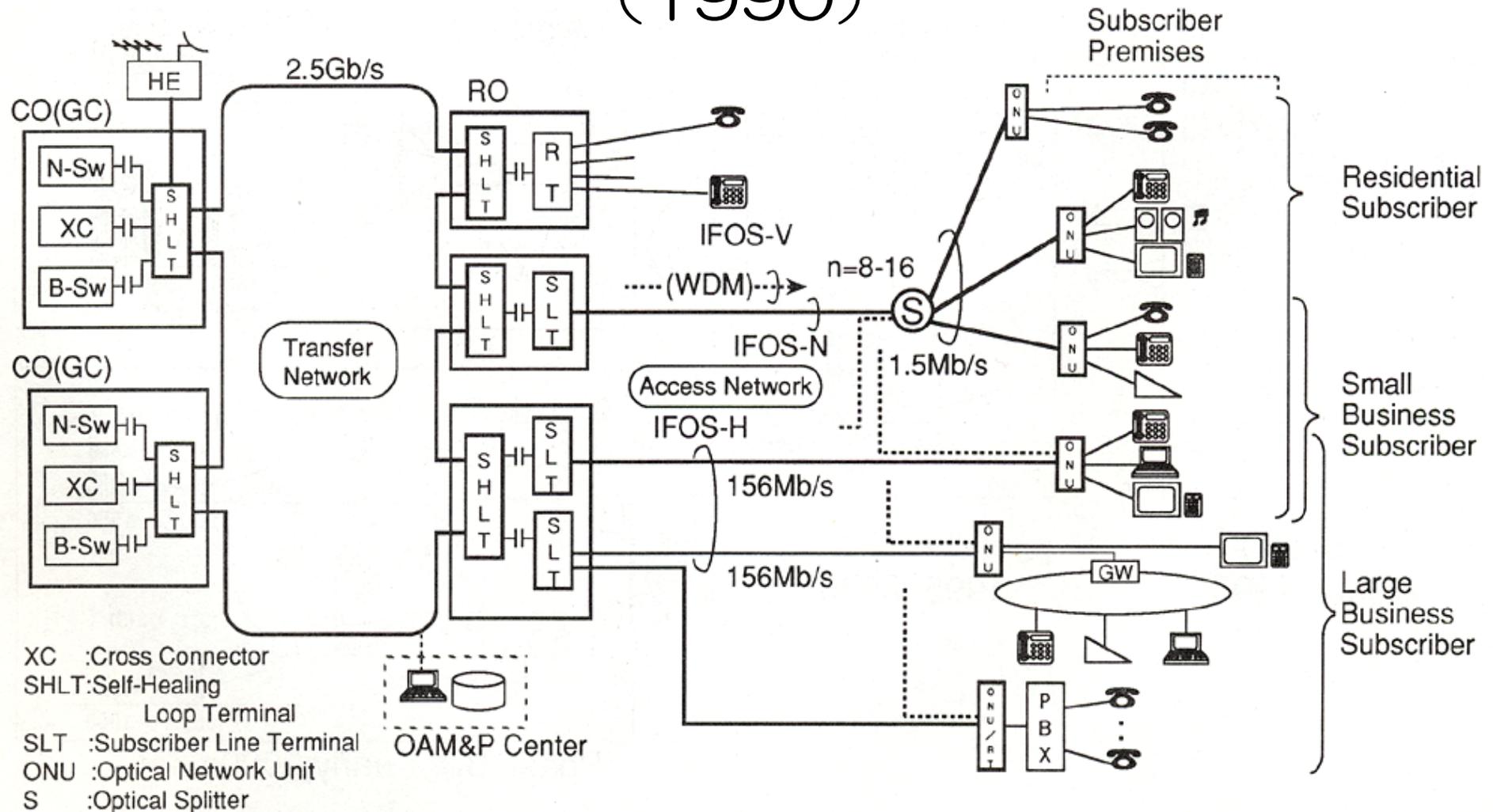
STM:Synchronous Transfer Mode ATM:Asynchronous Transfer Mode

PDS 方式とSS方式のコスト比較 (1995年頃を想定)



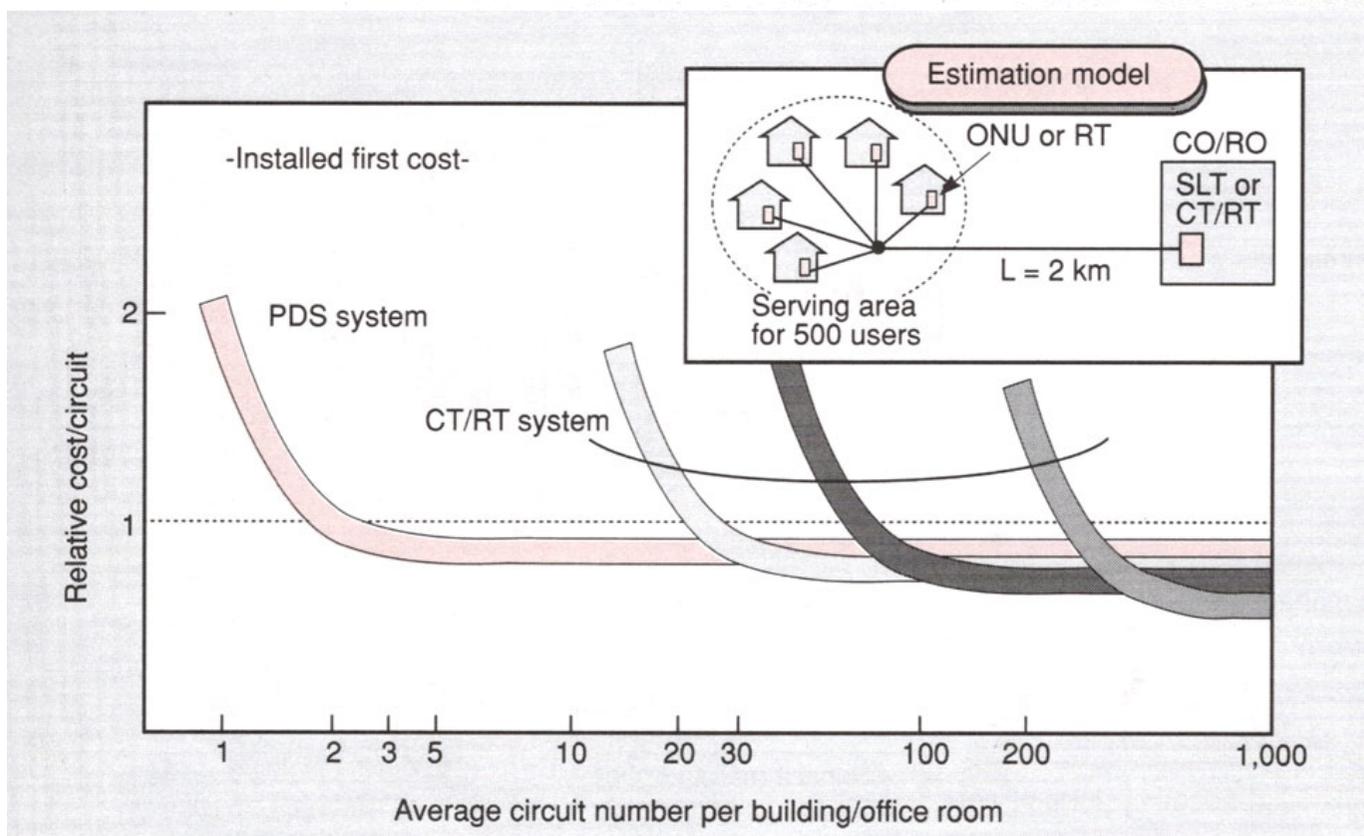
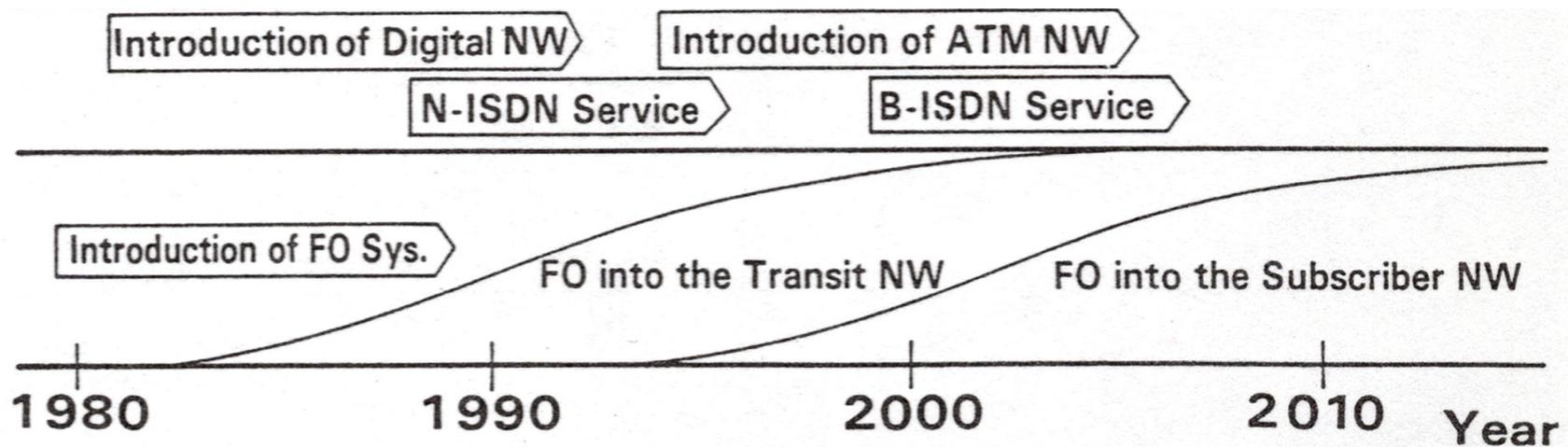
創設費
引き落とし：架空
ONUインターフェース：2B+D

光アクセスネットワークの基本アーキテクチャ (1990)



論文発表: T.Miki, "Fiber-Optic Subscriber Networks and Systems Development", IEICE Trans., Vol.E-74, No.1, pp.93-100 (1991)

NTT加入者網への光アクセス導入プラン（1991）



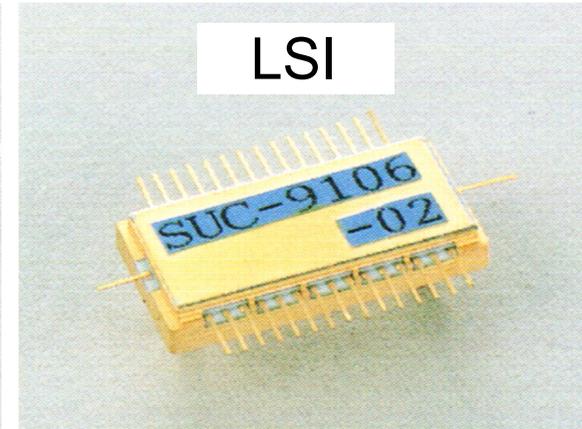
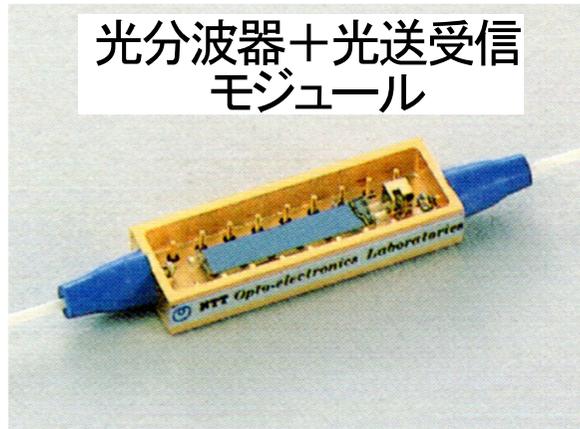
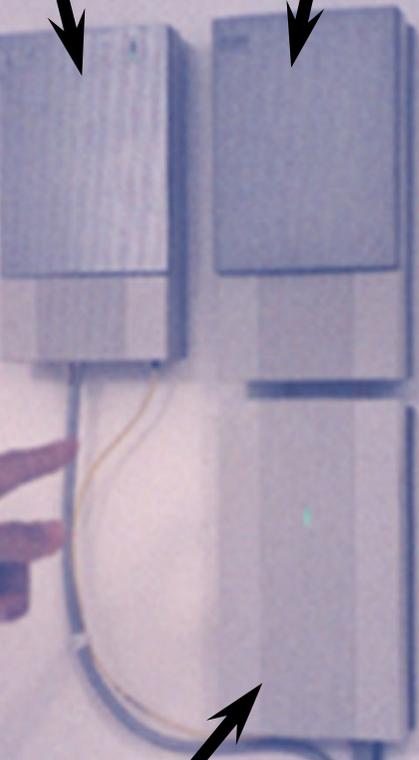
試作ONU (Optical Network Unit)

ケーブルテレビ用

電話・データ用

光分波器+光送受信
モジュール

LSI



電源

ONU



FTTH実験用ハウスによる実証実験（1993）



Telco Meetingによる国際標準化

- 背景
- FTTHの最大の課題は低コスト化
 - 規格統一による量産効果 → 国際標準化が不可欠
 - 国際活動の仲間作り → IEEE ComSocの技術委員会を利用

- IEEE主催のFTTHワークショップを開催
- 国際標準化を議論Telco Meetingをワークショップ後に開催

1st London in May 1990

2nd San Diego in Nov 1990

3rd Tokyo in 1991

4th Versailles in 1992

5th Montreal in 1993

6th Kyoto in 1994



Telco Meetingの様相 (1995京都会合)

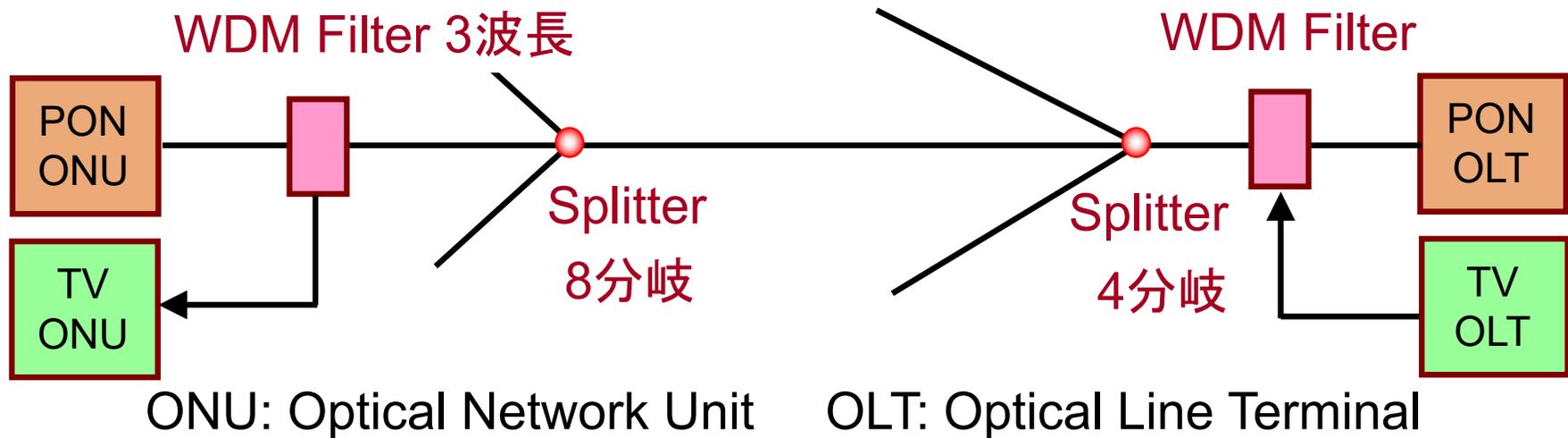
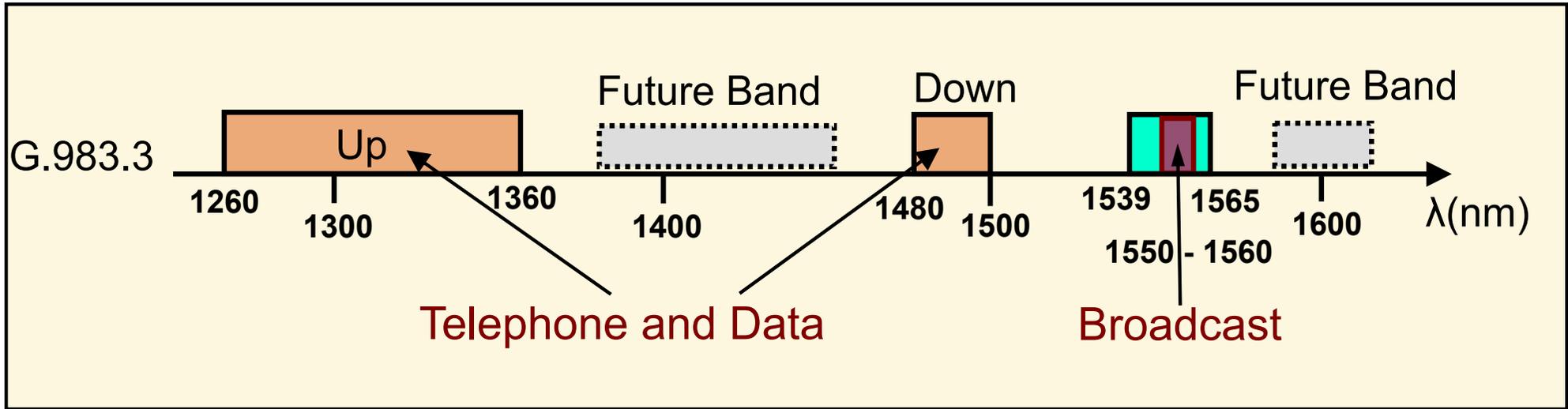
Telco Meetingメンバー組織:

British Telecom, France Telecom, Deutsche Telekom, Telecom Italia,
Bell Canada, Bell Communication Research, NTT Laboratories

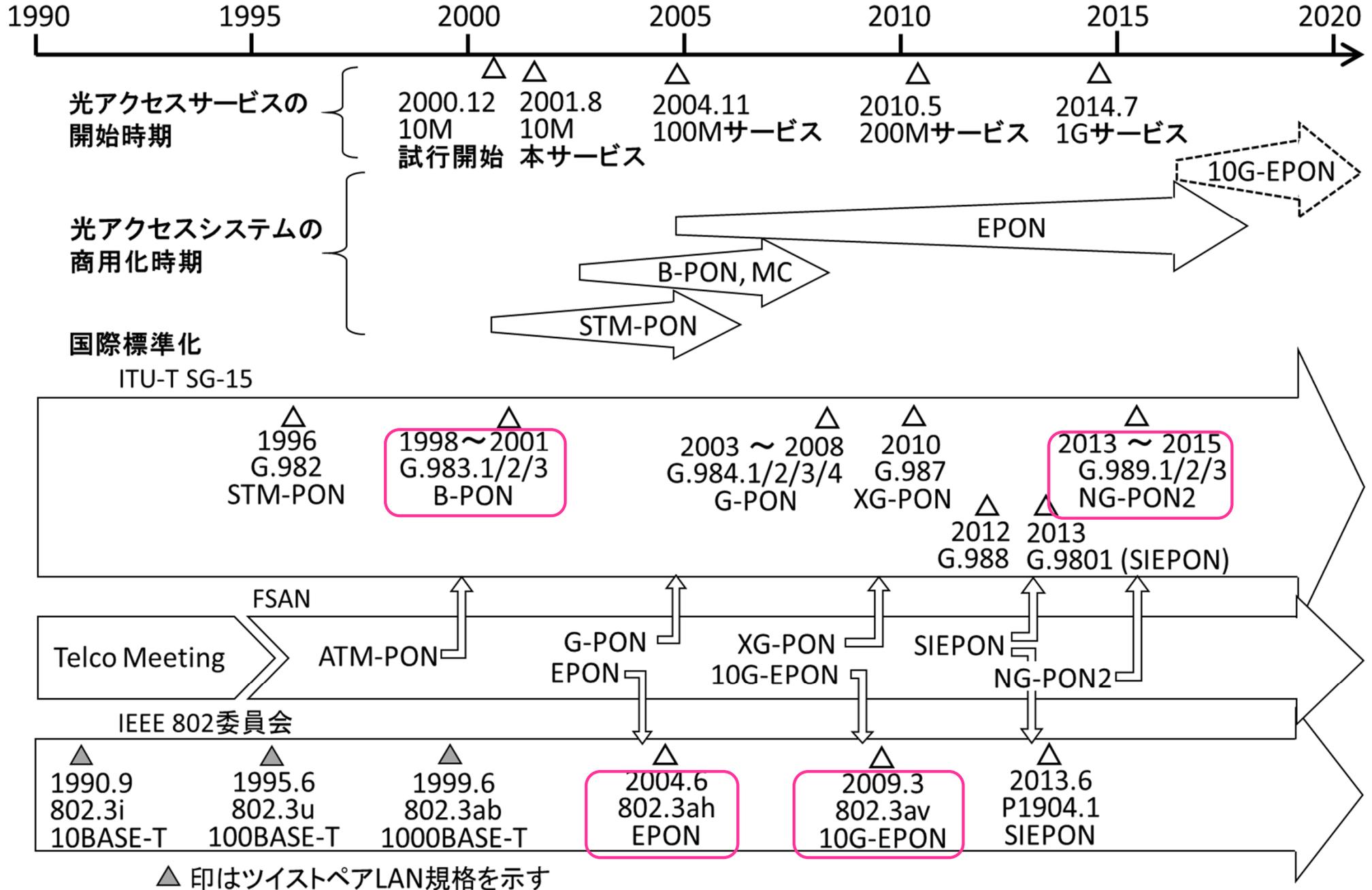


FTTHの国際標準：PON方式

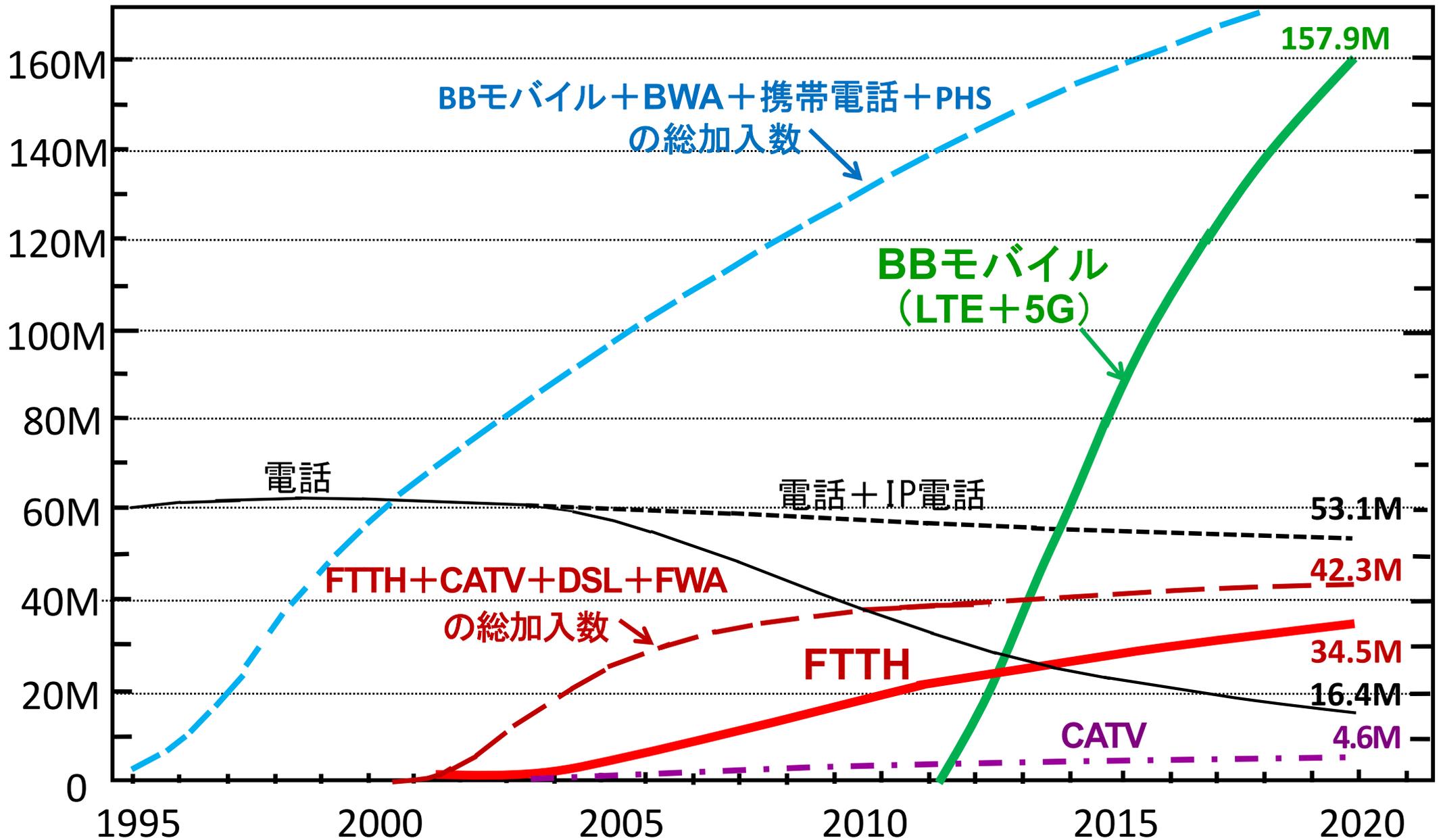
Triple Play : 電話, インターネット, CATV



光アクセスの国際標準化の経過

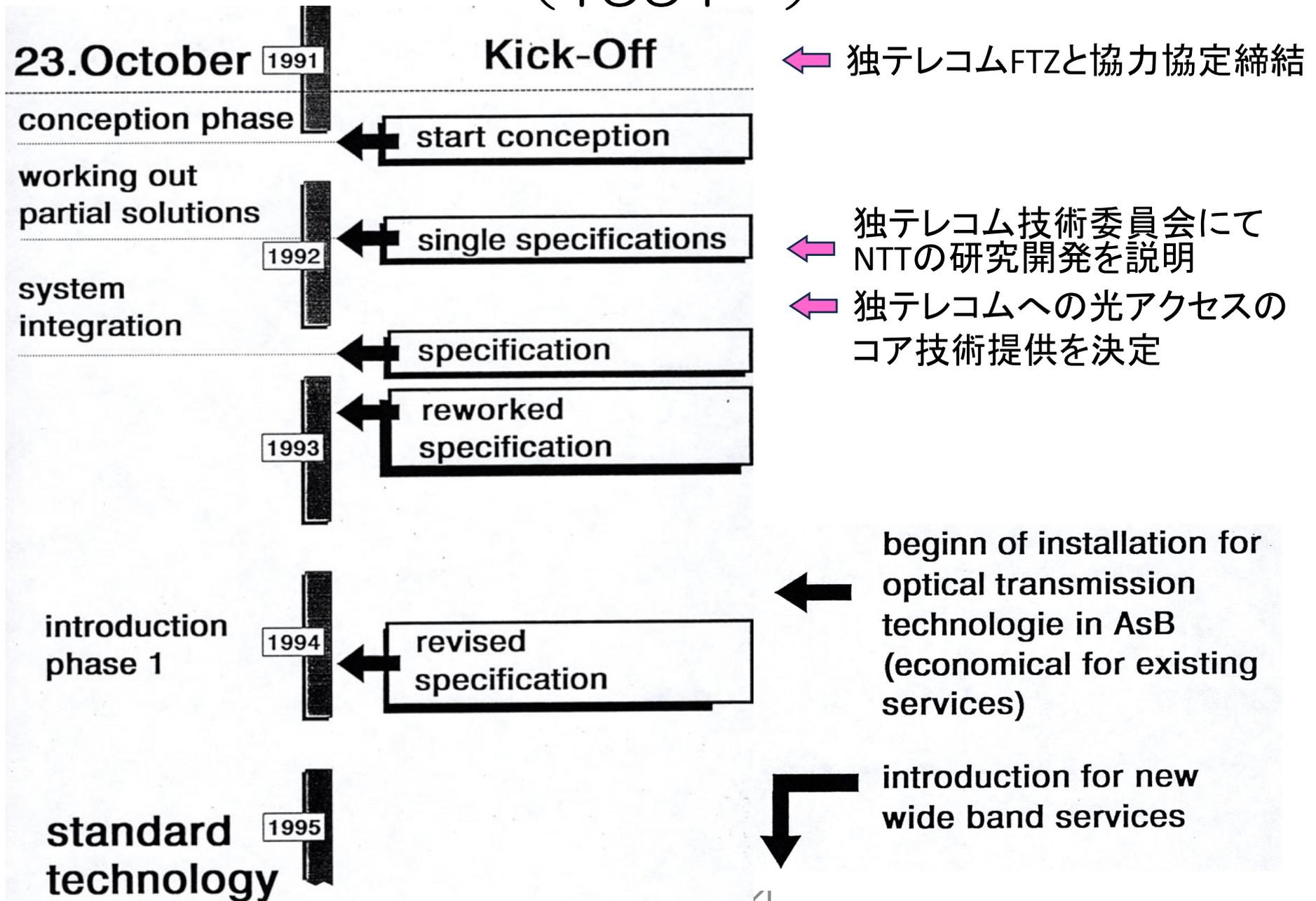


情報通信サービスの契約者数の推移



出典: 総務省「電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表」
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000184.html

ドイツテレコムの光アクセス導入計画への協力 (1991~)

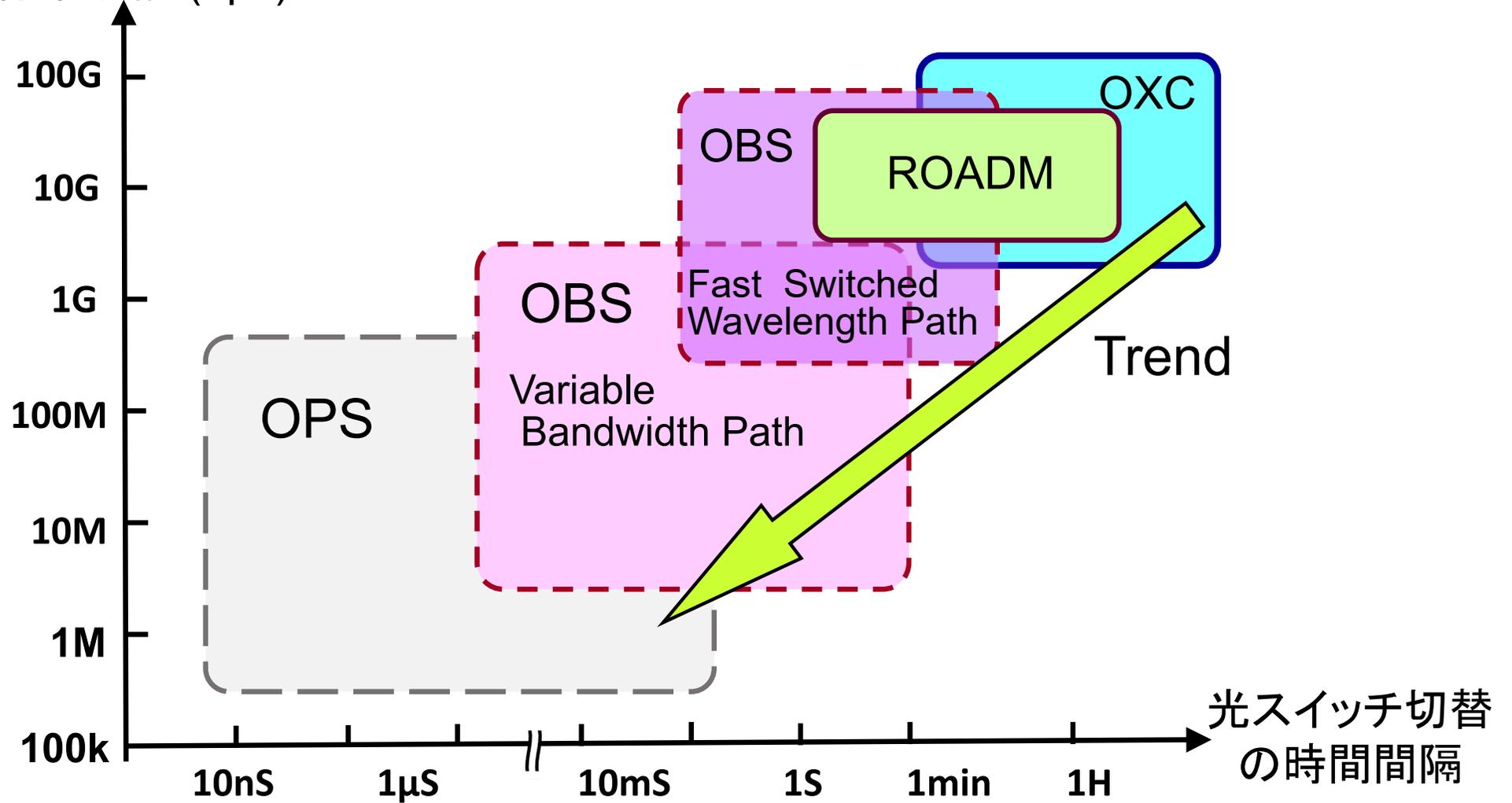


フォトニックネットワークへの挑戦 (1996年～)



フォトニックネットワークに必要な光スイッチ技術

光回線帯域幅 (bps)



OBS: Optical Burst Switch

OXC: Optical Cross Connect

OPS: Optical Packet Switch

ROADM: Reconfigurable
Optical Add Drop Multiplexer

2005年ごろ描いたネットワーク構造

Contents Networking and Processing

- <著作権管理>
- <プライバシー管理>
- <コンテンツ利用管理>
- <コンテンツ処理制御>
- <情報セキュリティ制御・管理>

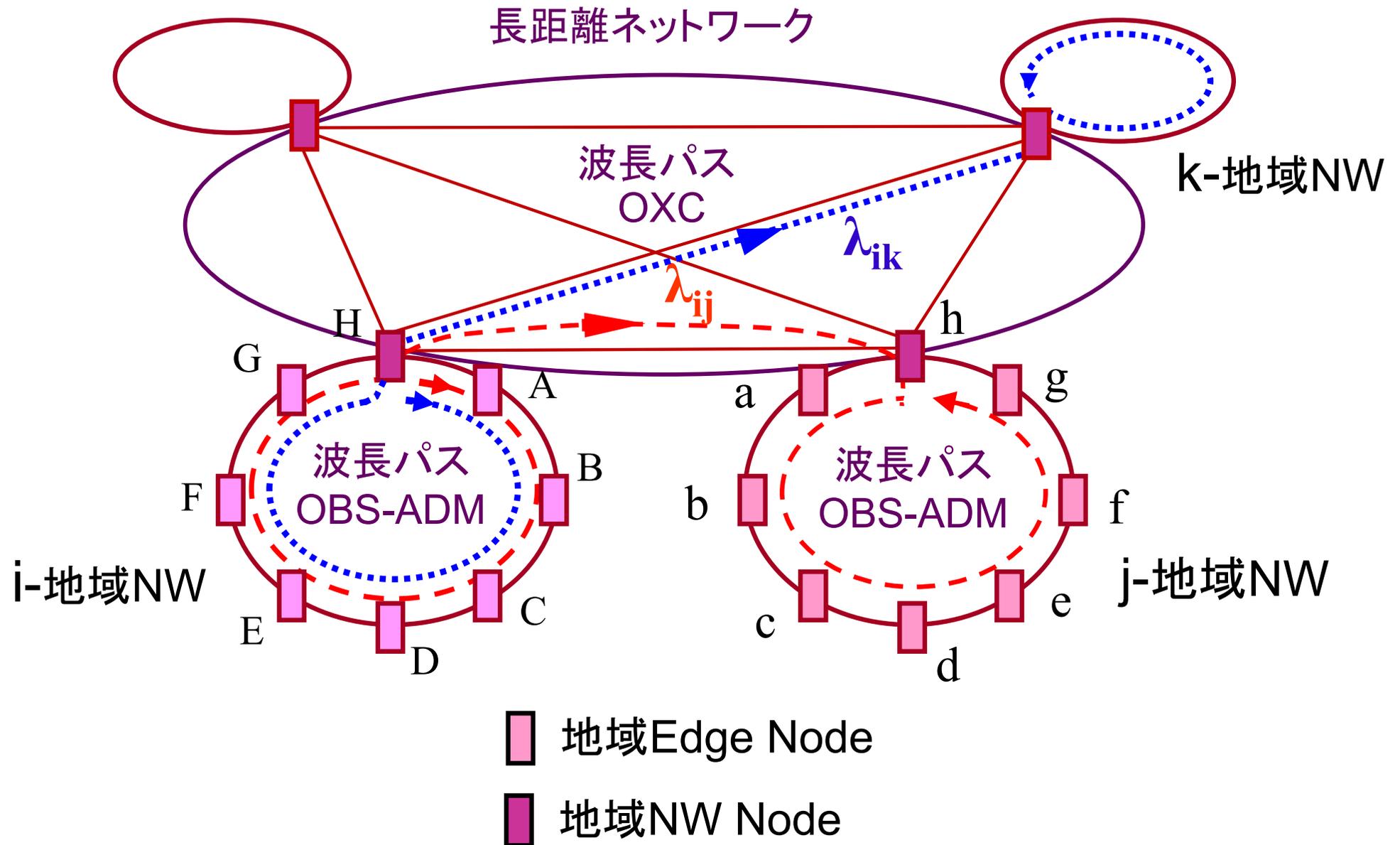
- <メンバー管理>
- <接続管理>
- <情報フロー制御・管理>

Information Networking

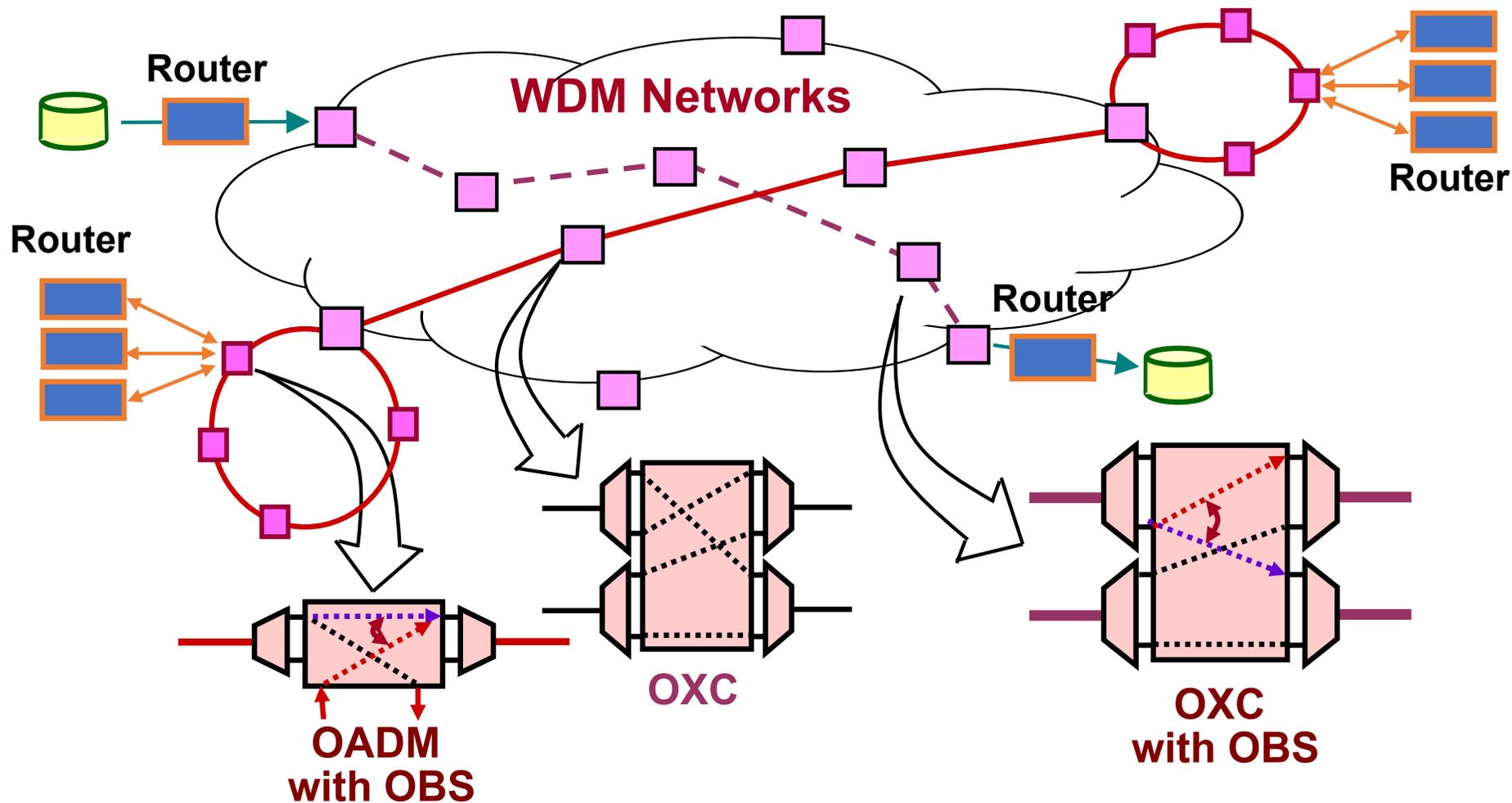
Network Platform

- <加入者・課金管理>
- <トラフィック制御・管理>
- <設備建設・保守>

提案した光バーストスイッチ方式（1996年～）



光バーストスイッチの構成



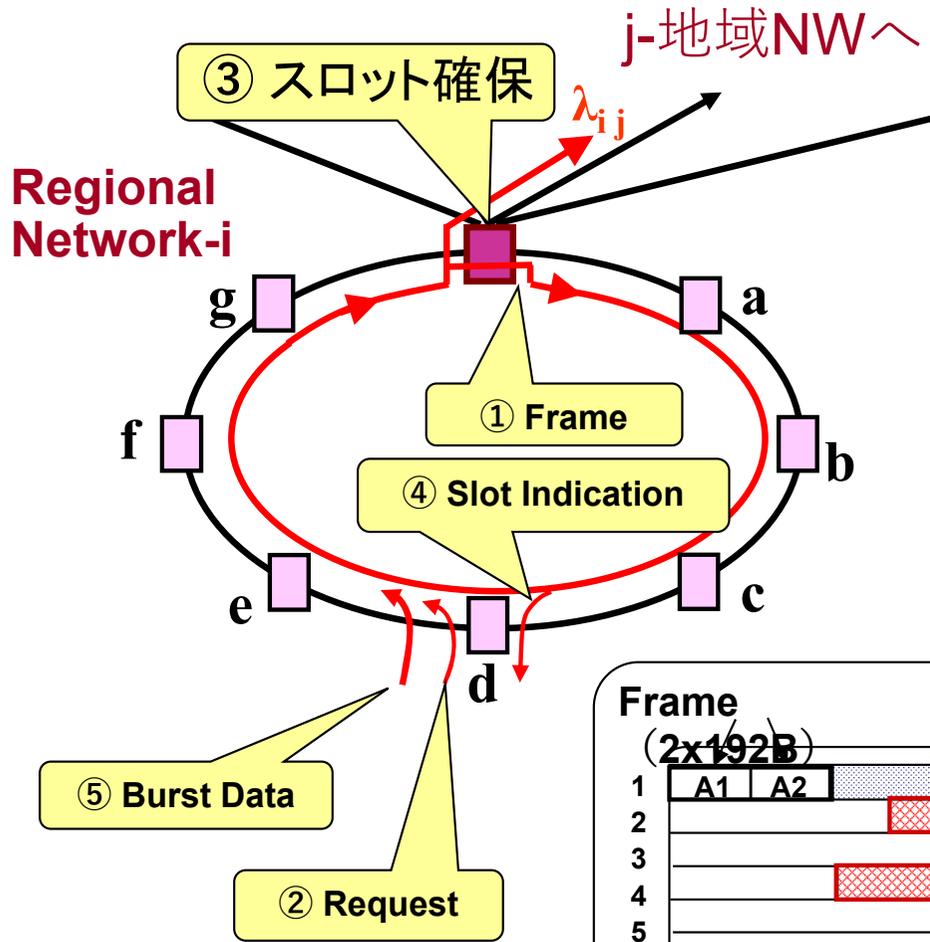
Dynamic Bandwidth Path

- Fast OADM Switching
- Burst Size: 100nS~数 μ S

Fast Switched Burst Path

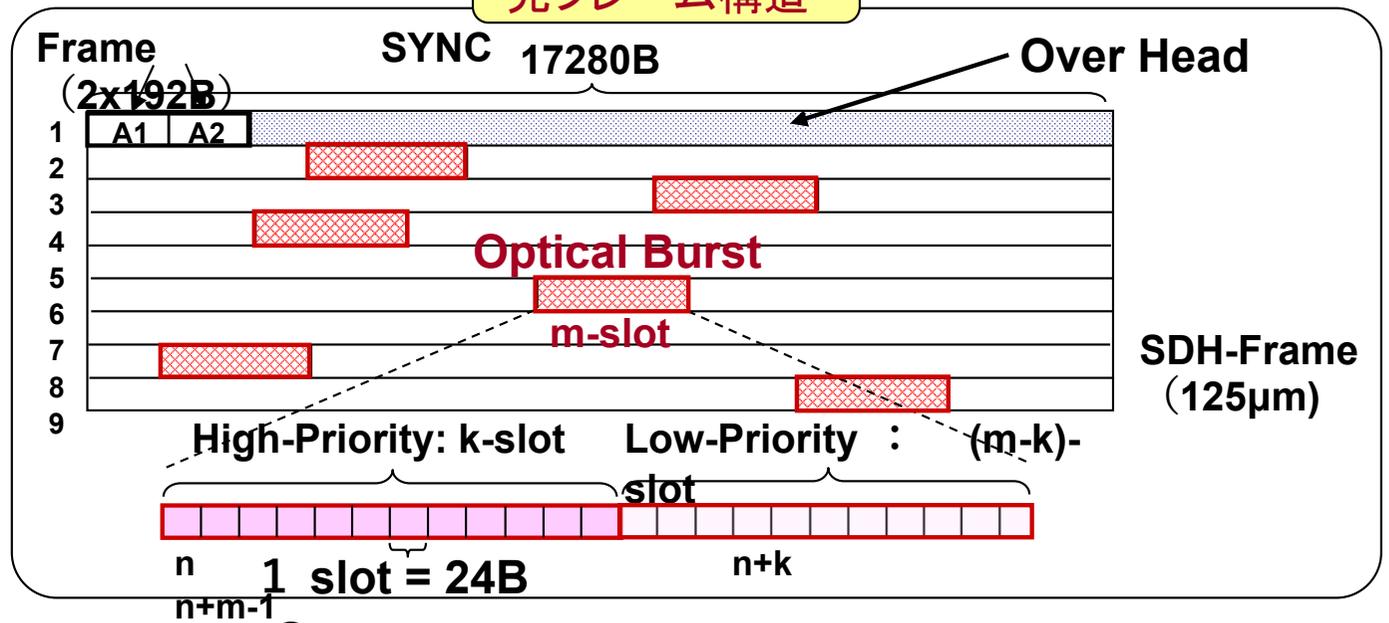
- Fast OXC Switching
- Burst Size : 100mS~数S

光スイッチによる光バースト多重



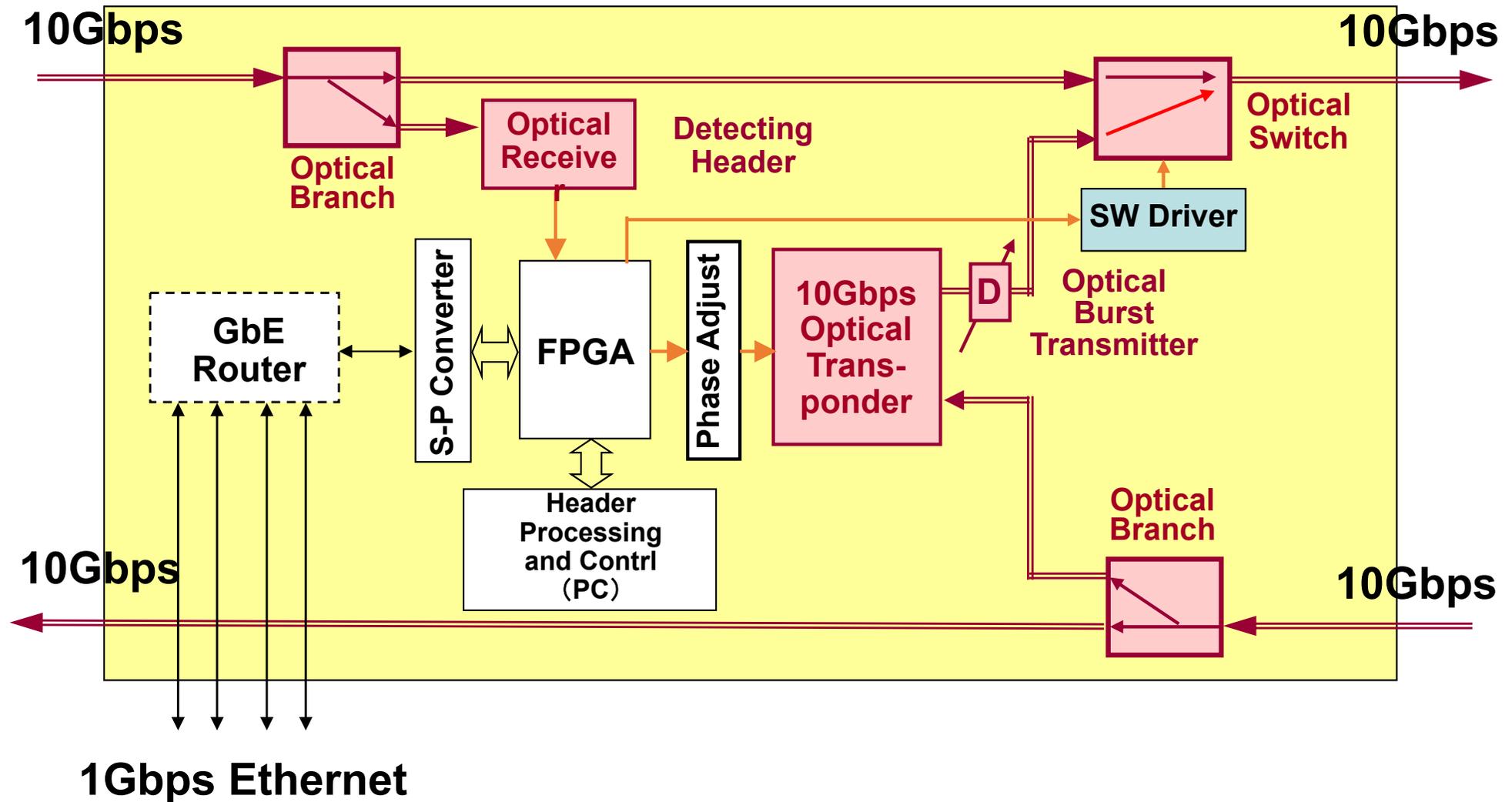
■ : 地域NW Node
 □ : 地域Edge Node

光フレーム構造



光エッジノードのブロックダイアグラム

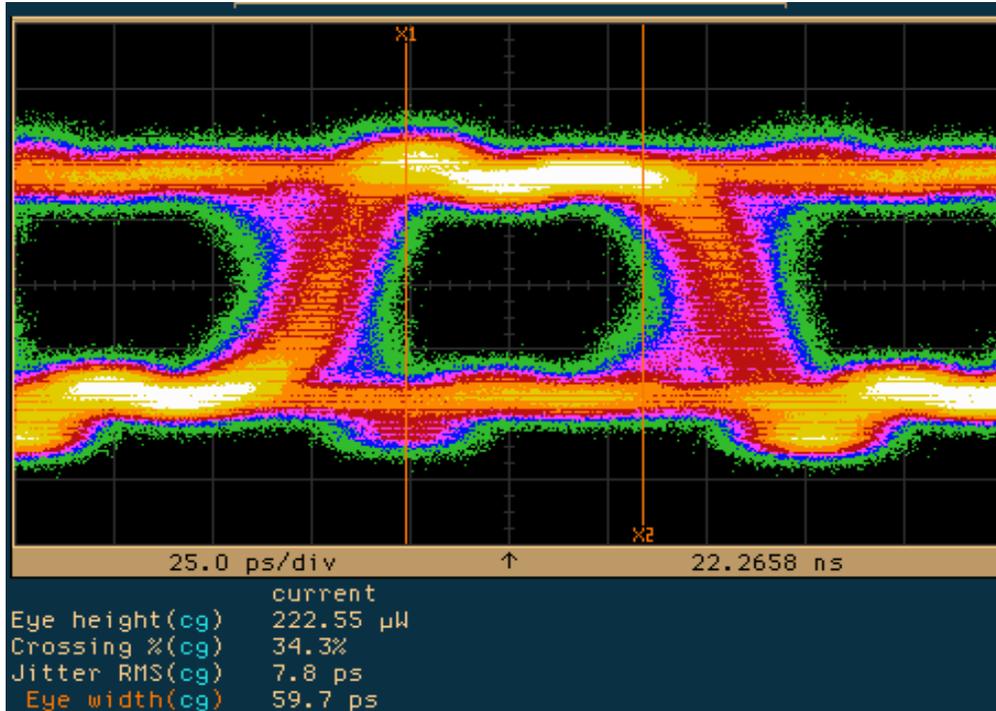
OBS Add-Drop Multiplexer Node



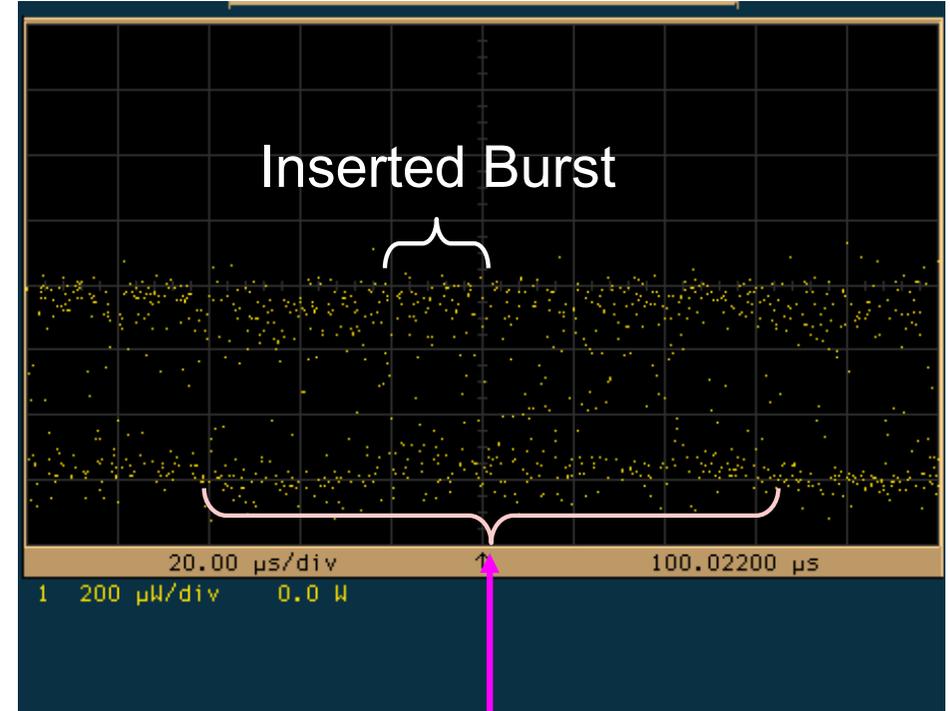
試作した光エッジノードの動作

10Gbps 光伝送のアイパターン

光バーストスイッチ部の動作

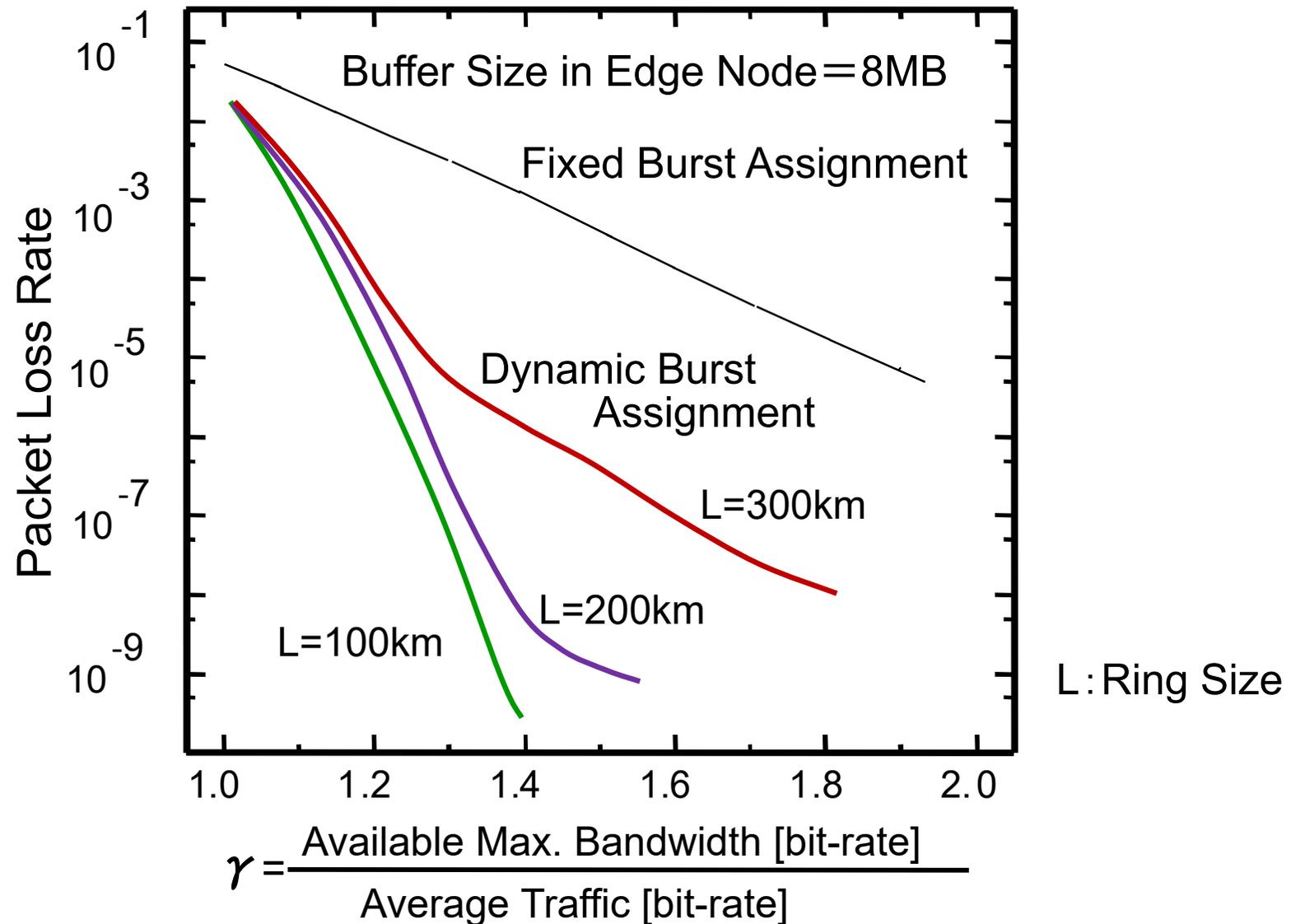


25 ps/div

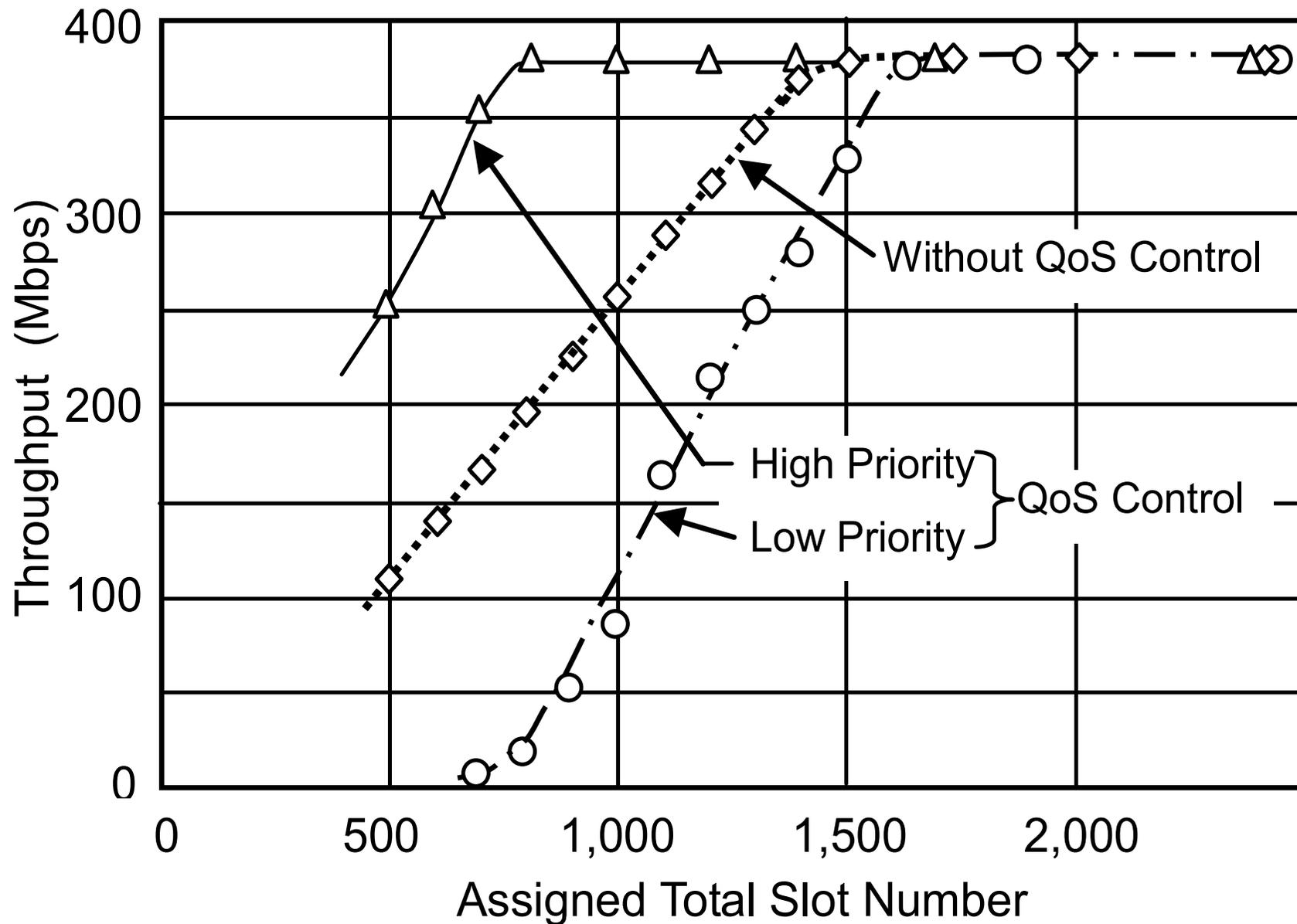


1 Frame Period
(125 μ m)

試作したDynamic Bandwidth Path Networkの トラフィック負荷に対するパケット損失特性

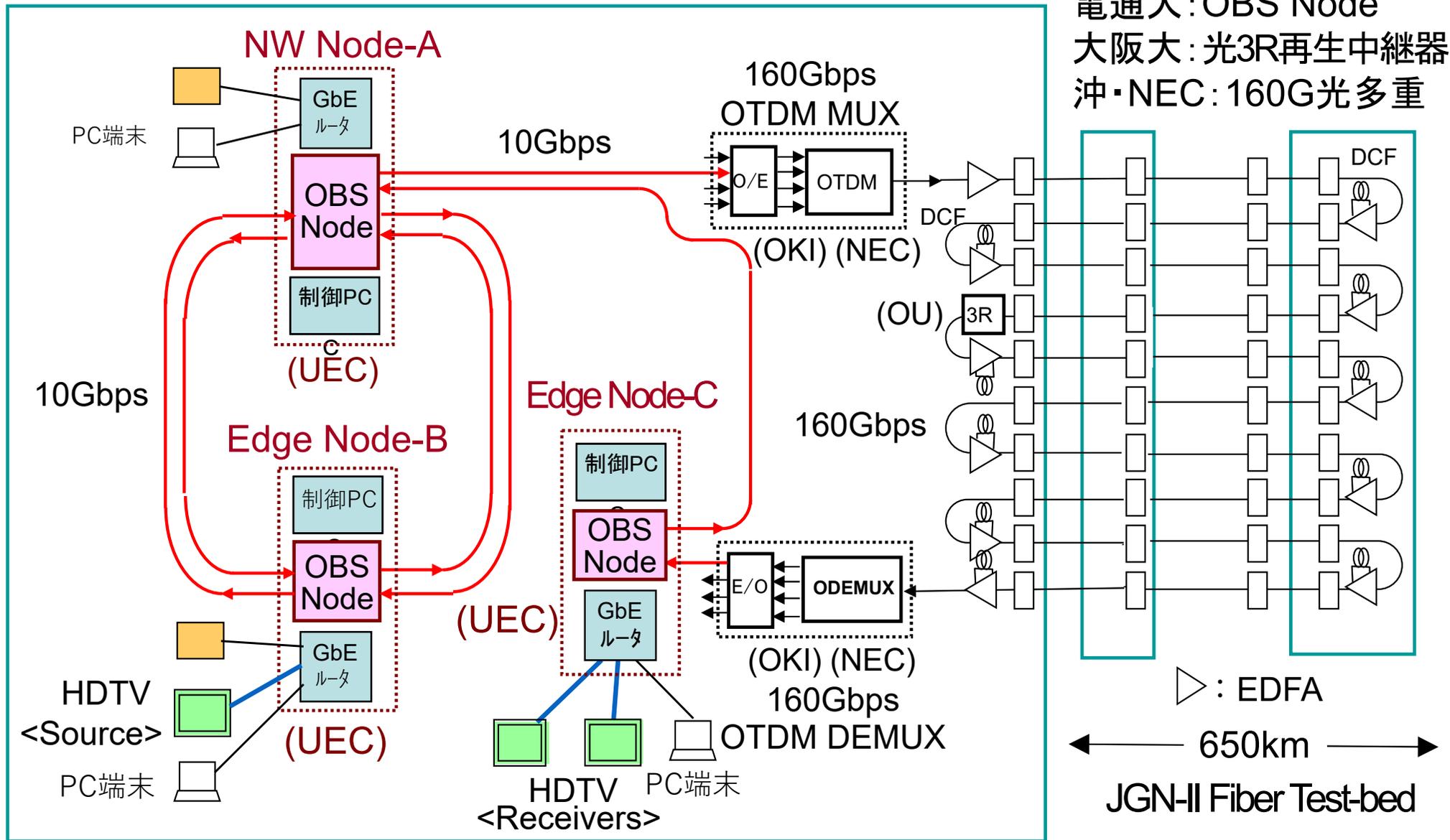


QoS優先度制御の特性

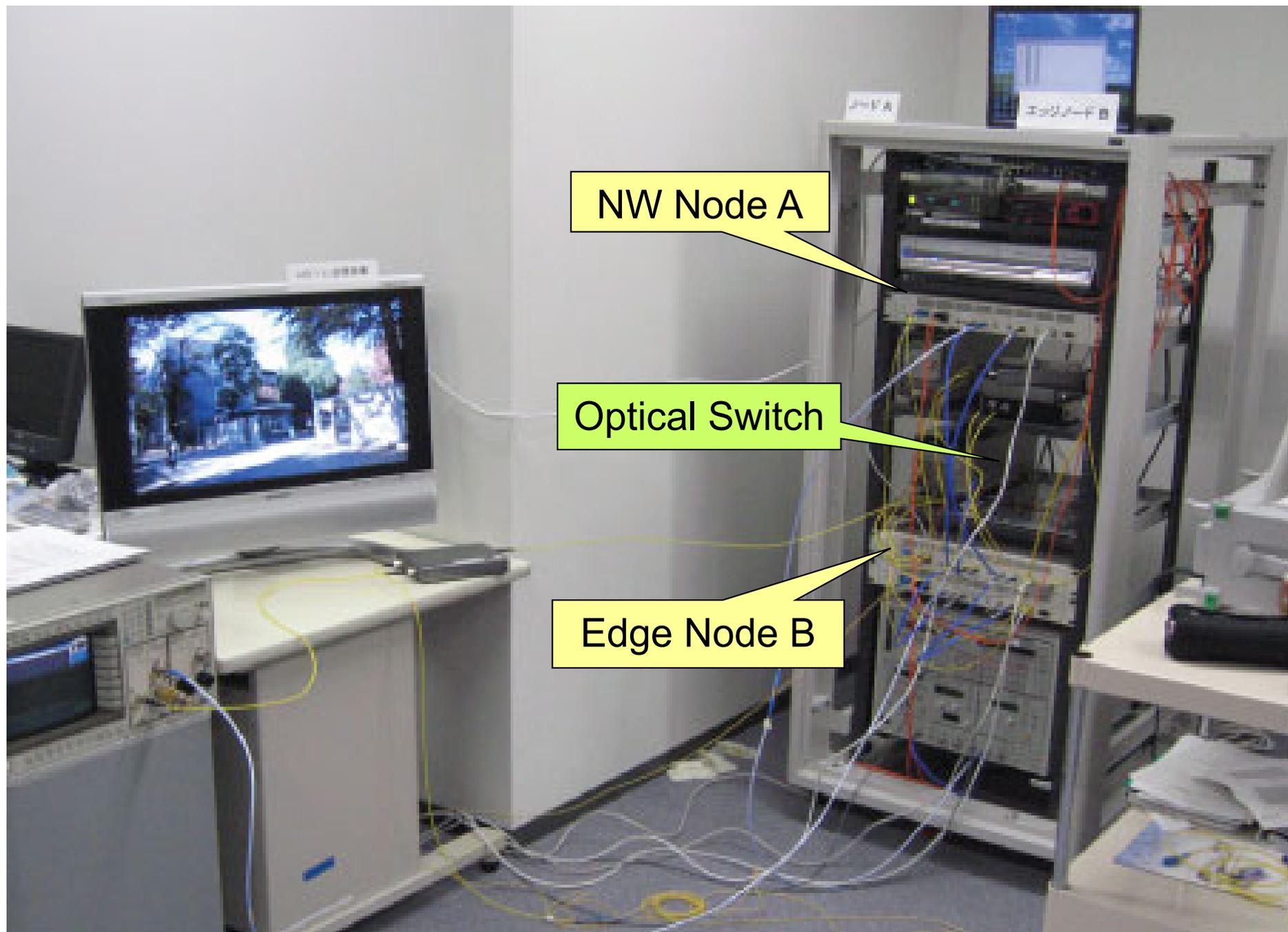


けいはんなNICT光通信テストベッドでの実験

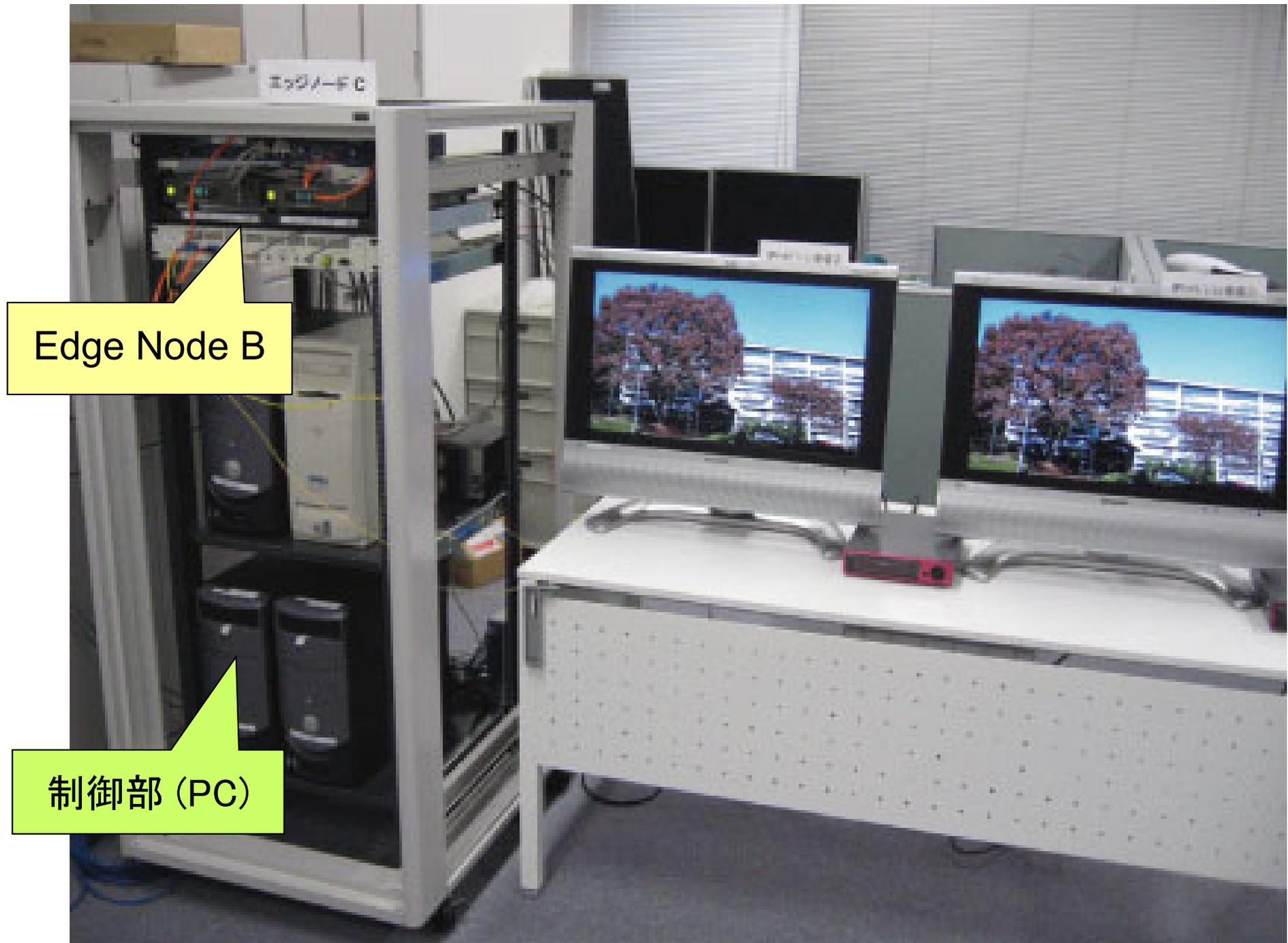
2005年12月9日～16日



NICT光通信テストベッドでのOBSノード実験装置



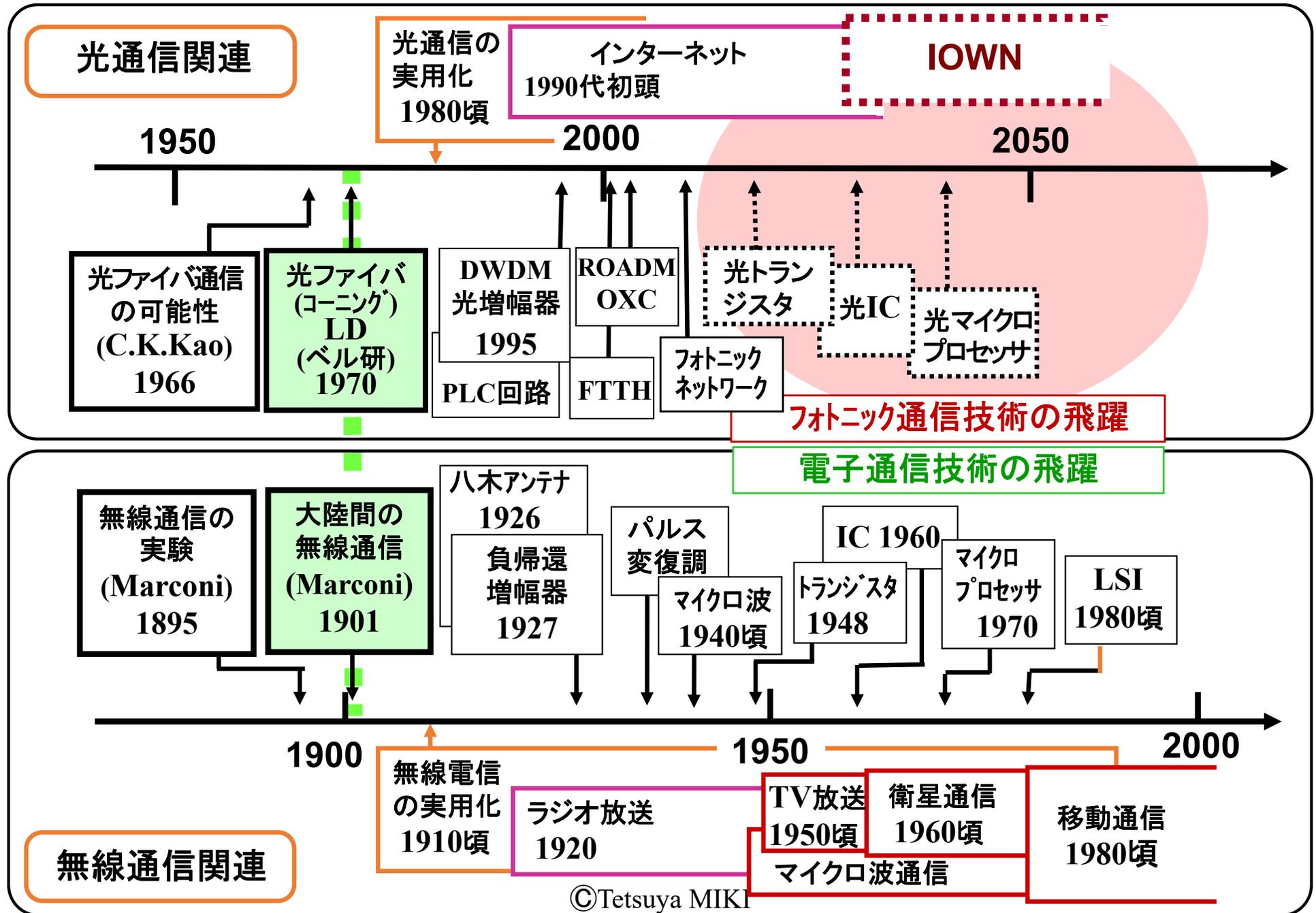
OBSネットワーク実験でのHDTV伝送



けいはんなNICTテストベッドでの実験風景



光・フォトニック通信技術の発展（電子通信技術との対比）

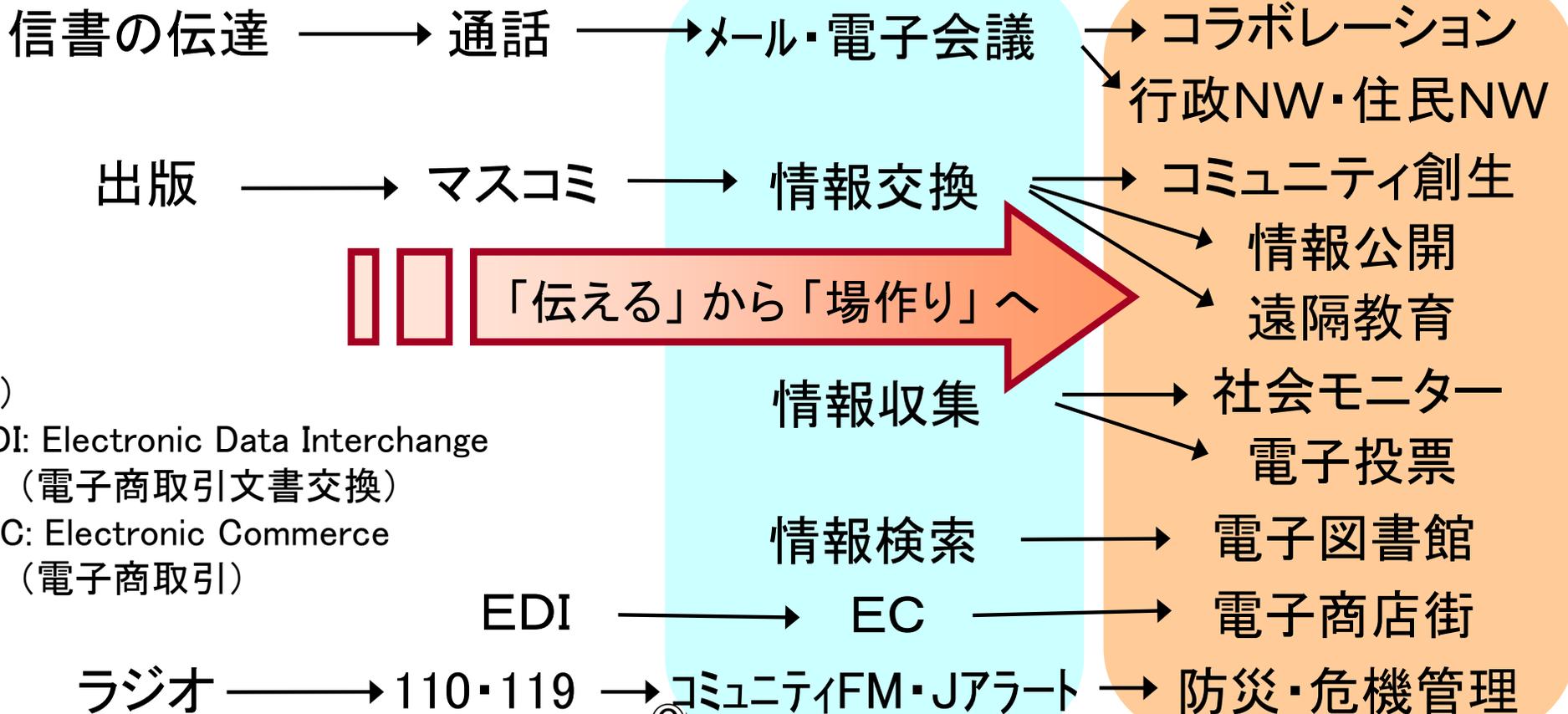
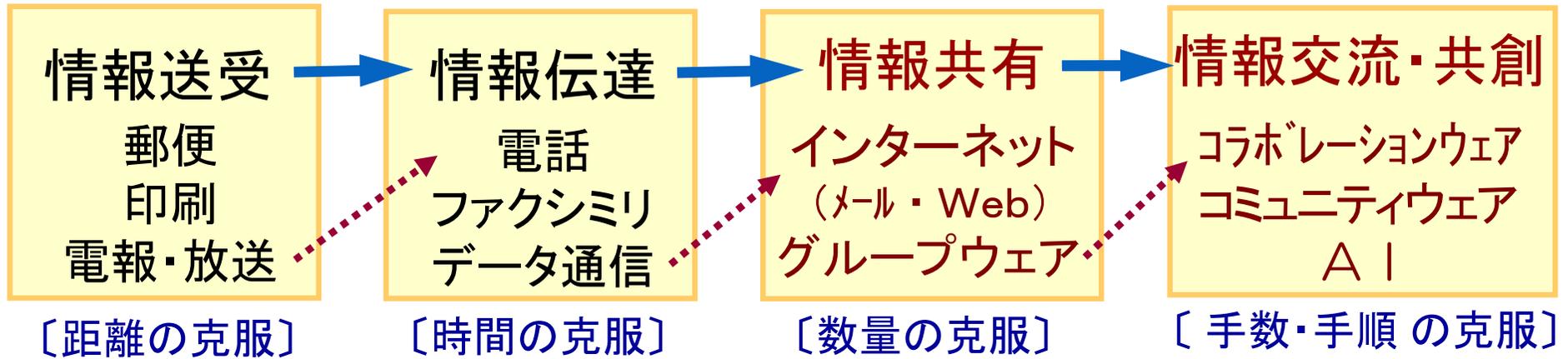


蛇足

これからの情報通信



ICTの質的变化・発展：情報交流・共創メディアへ



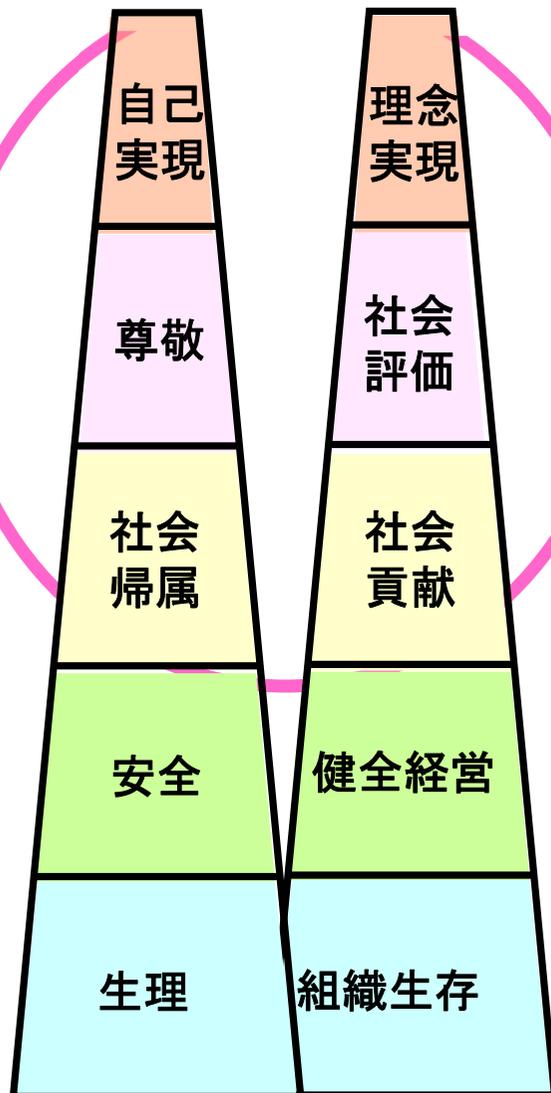
(注)
 EDI: Electronic Data Interchange
 (電子商取引文書交換)
 EC: Electronic Commerce
 (電子商取引)

EDI → EC

Well-beingに寄与する情報通信は？

マズローの欲求5段階

(個人) (組織)



Well-being

情報コンテンツ層の構造化

情報通信3階層モデル

情報コンテンツ層 Information Contents Layer	情報内容の格付け・認証 情報の所有・利用の制御・管理 情報内容の制御・管理
情報ネットワーク層 Information Networking Layer	情報メディアの形成(発信・受信・加工) 情報流通の制御・管理(フィルタリング) 情報メディアのセキュリティ確保
ネットワーク基盤層 Network Infrastructure Layer	情報伝達の品質・安全性・信頼性 目的とする端末間での情報伝達 物理的な情報信号の伝達

?

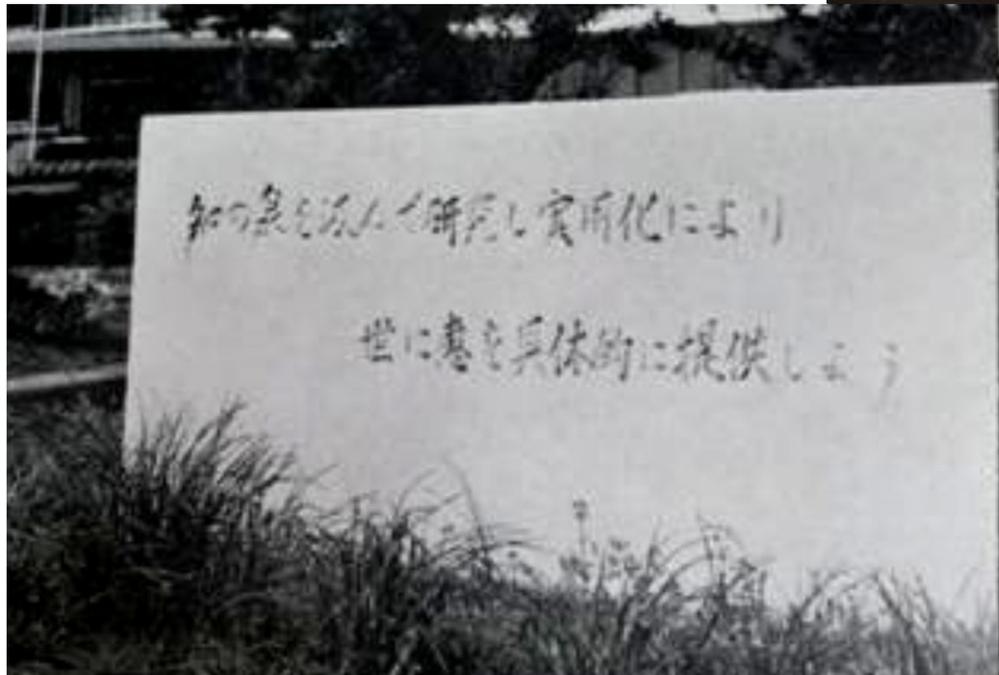
OSI 7階層モデル

Presentation Layer
Session Layer
Transport Layer
Network Layer
Data Link Layer
Physical Layer

Well-beingに通じる吉田五郎の言葉



入社当時の電気通信研究所
(1976年)



知の泉を汲んで研究し実用化により世に
恵みを具体的に提供しよう

初代研究所長 吉田五郎

ご清聴ありがとうございました

