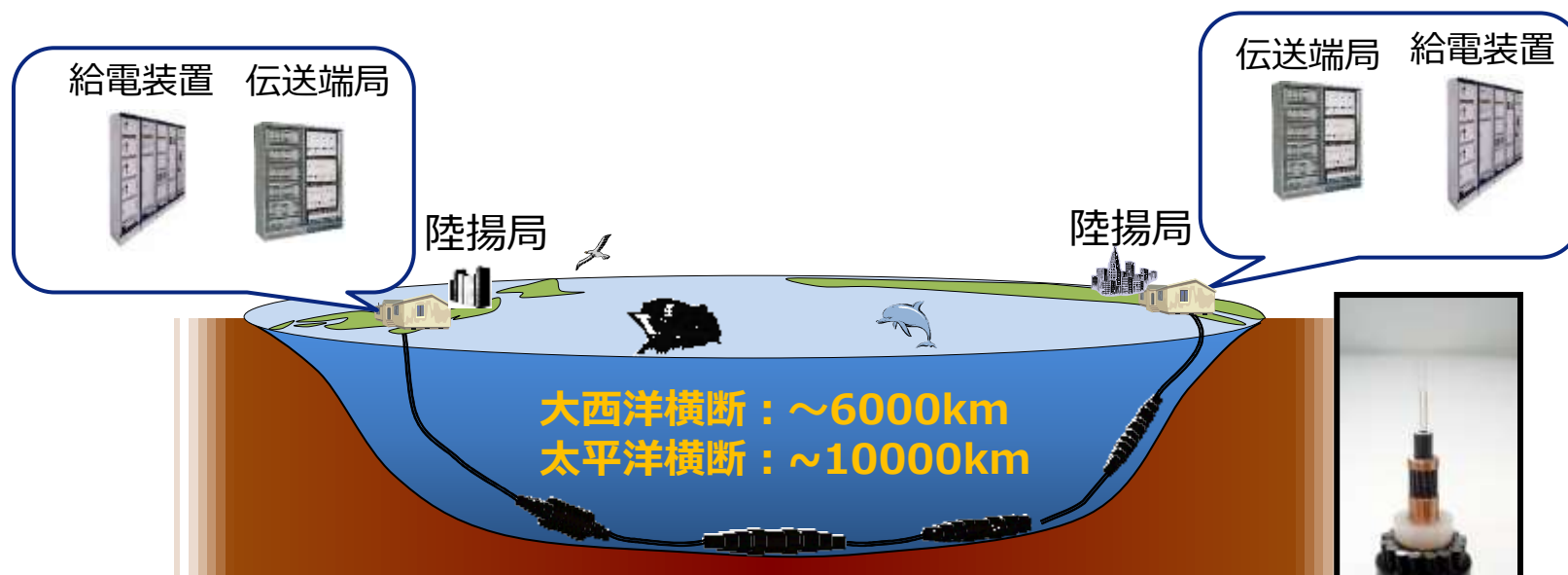


光海底ケーブルシステム伝送技術 の最新動向

森田逸郎

KDDI総合研究所

- **光海底ケーブルシステムの概要**
- **光海底ケーブルシステムの主要要素技術**
- **今後の技術動向**
- **まとめ**



ケーブル



中継器

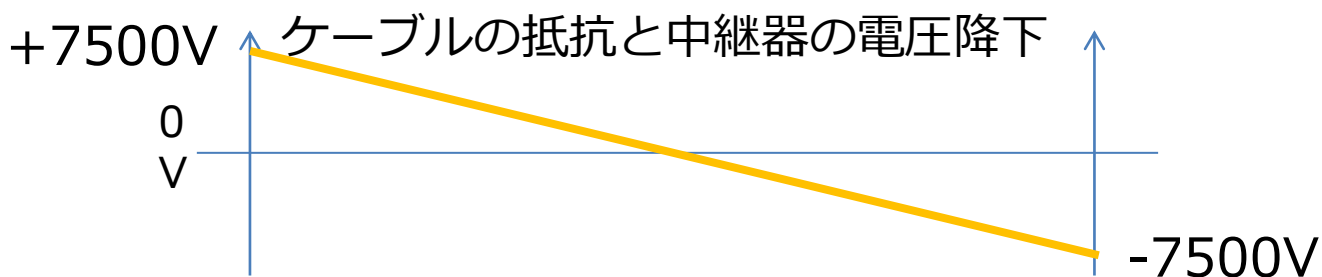
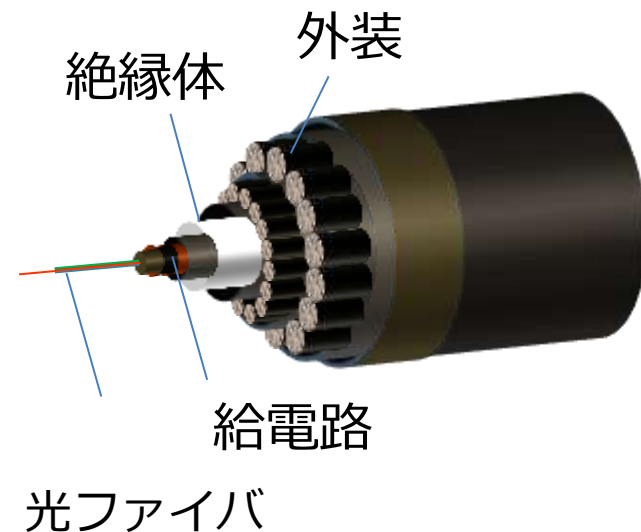
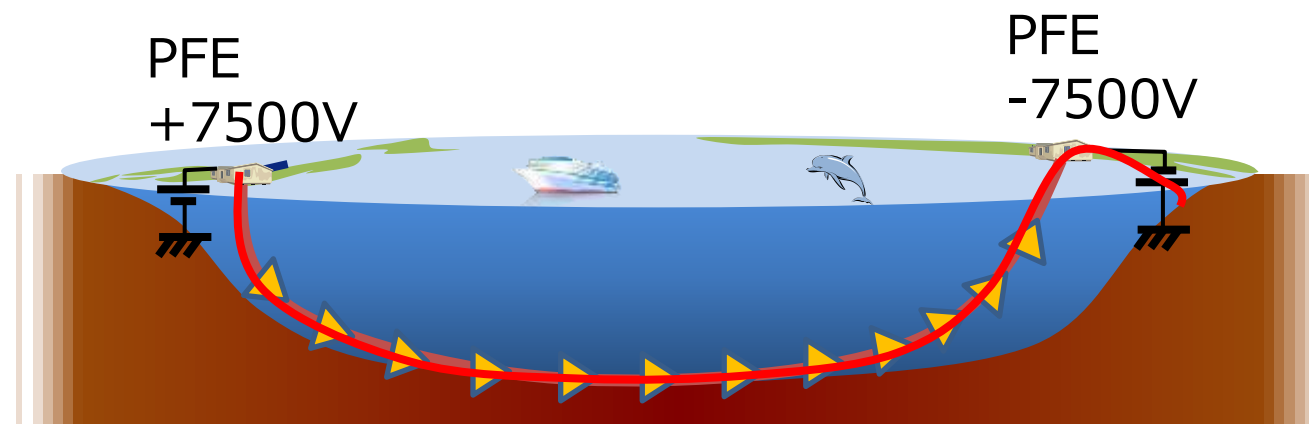
- 制限要因
- 1) 空間 (ケーブル、中継器)
 - 2) 電力 (給電装置, ケーブル抵抗)



ファイバ当りの伝送容量の拡大が重要

光海底ケーブルシステムの給電技術

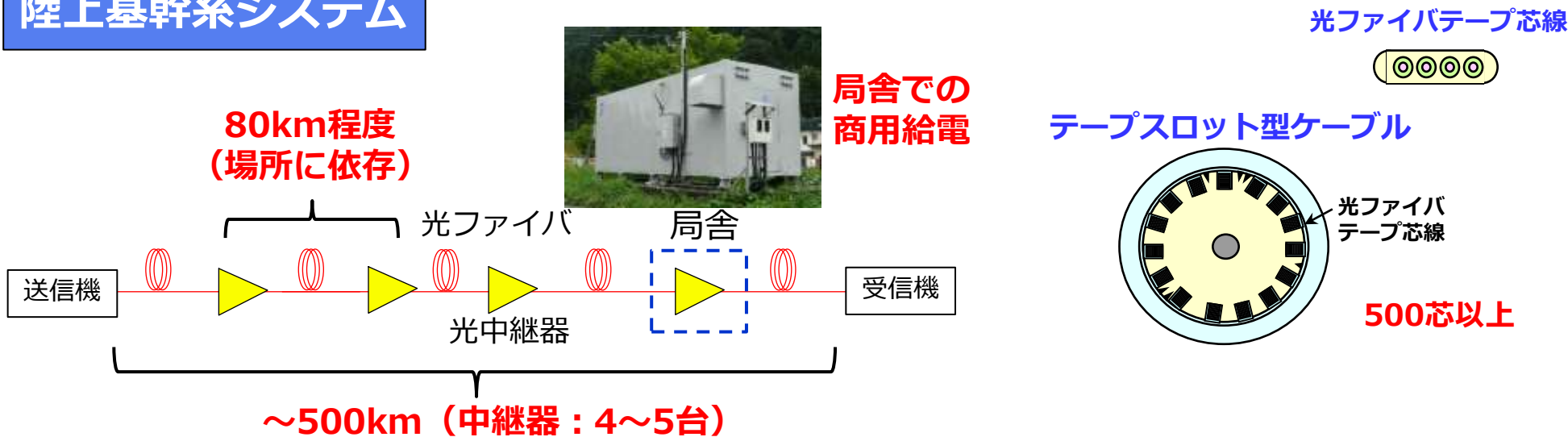
- 両端の陸揚局に設置される給電装置 (Power feeding equipment, PFE) からすべての海底中継器に給電
- 例：総電圧が15,000V必要なケーブルシステムの場合



通常は両端から半分ずつ給電

陸上システムと海底システムの主な違い

陸上基幹系システム



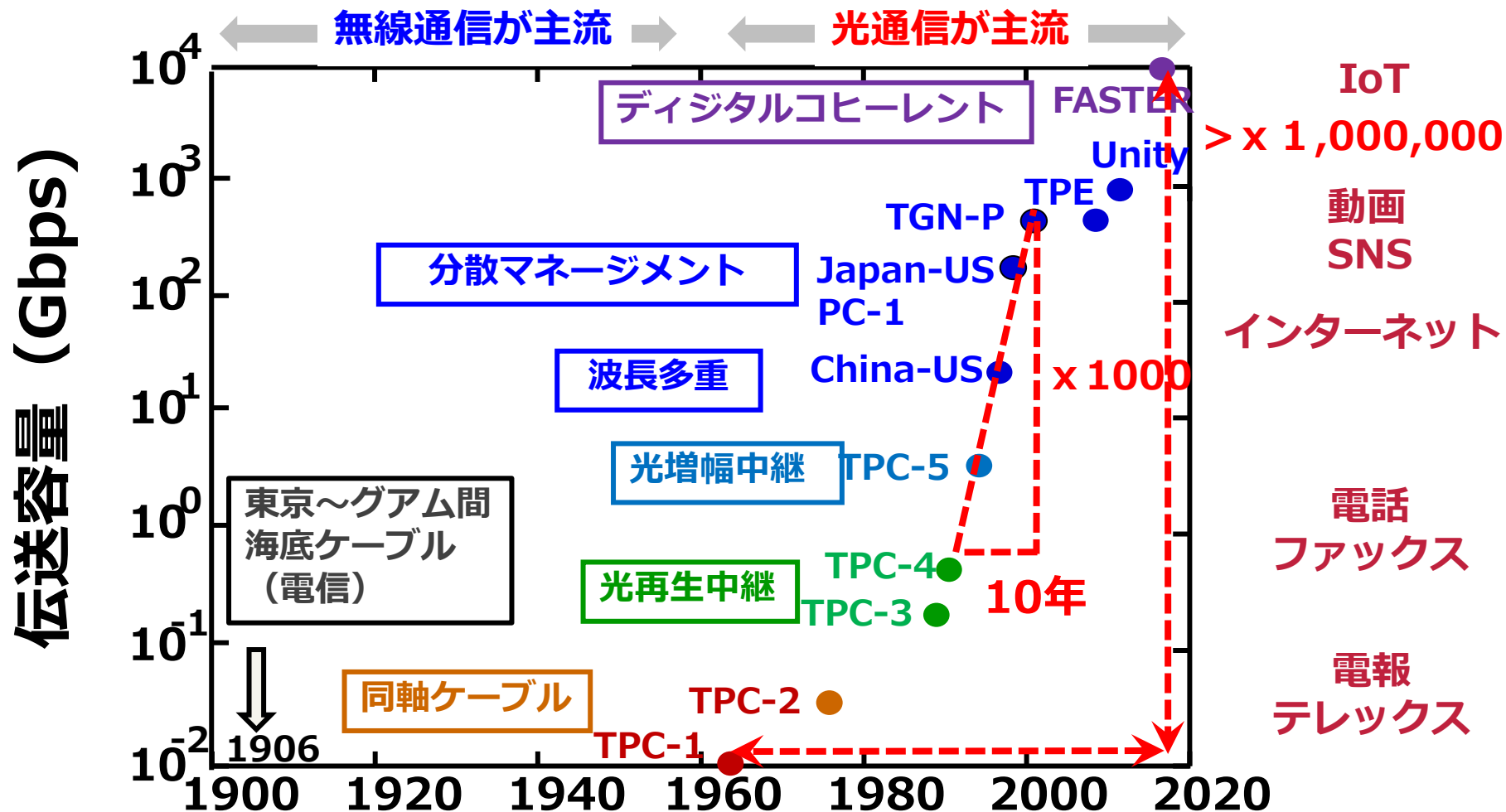
大洋横断海底ケーブルシステム



- 給電：1万V以上
 - 両端(または片端)の陸揚げ局から、一定電流を供給
- 圧力：800気圧(水深8000m)、張力：7~8 t
 - 耐圧ケーブル・中継器
- 超高信頼性
- ファイバの心線数：20芯程度
- 特性劣化要因の著しい累積(雑音等)

海底ケーブルの伝送容量の推移

半世紀で100万倍 (10^6) 以上、10年で1000倍 (10^3) の容量拡大

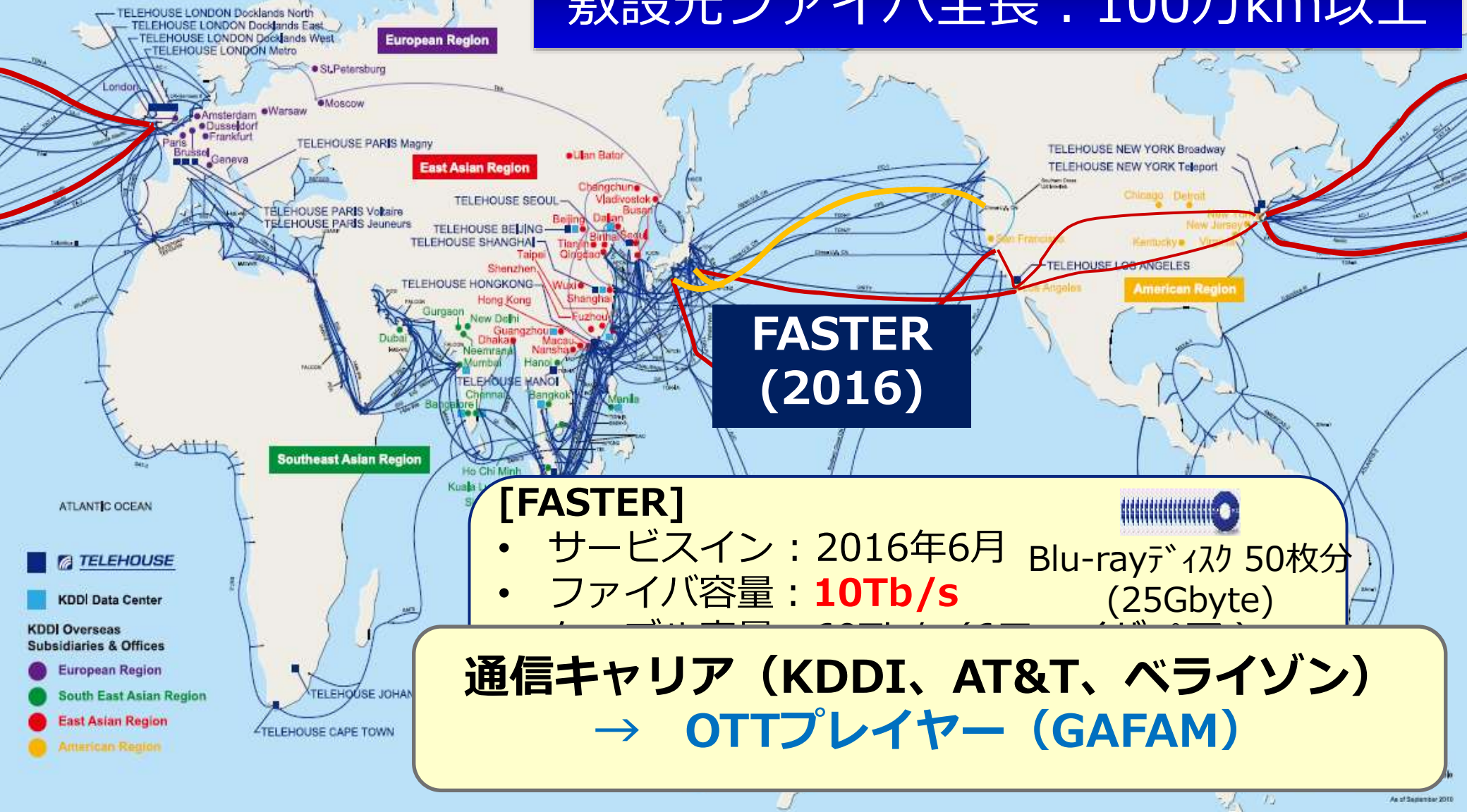


TPC-1とFASTERの比較

	TPC-1	FASTER	比較
建設時期・期間			
運用開始年	1964年6月	2016年6月	52年後
建設期間	約2.5年	約2年	
技術面			
伝送媒体	同軸ケーブル	光ファイバ	
長さ	約14,600 km TPC-1 & HAW-1	約9000 km	0.6倍
初期設計伝送容量	電話128回線	60Tbit/s 電話9.4億回線分	(64kbps換算) 約734万倍
費用面			
建設費用	297億円(TPC-1)	306億円	1.03倍
電話1回線当たり	2.3億円	32円	約720万分の1
(当時の大卒初任給)	約2万円	約20万円	10倍
大卒初任給 対 電話1回線建設費	約11,500倍	約0.00016倍	約7200万分の1

光海底ケーブルネットワーク

敷設光ファイバ全長：100万km以上



FASTER
(2016)

[FASTER]

- サービスイン：2016年6月 Blu-rayディスク 50枚分
- ファイバ容量：**10Tb/s** (25Gbyte)

通信キャリア (KDDI、AT&T、ベライゾン)
→ OTTプレイヤー (GAFAM)

PLCN (Pacific Light Cable Network)

- ファイバ容量 : 24Tbit/s
- ケーブル容量 : 144Tbit/s (24Tbit/s x 6FP)
- システム長 : 12800km (~~香港~~-LA) → 台湾、フィリピン
- 出資社 : Google, Facebook, PLDC
- 商用開始 : 2019年 → 2020年

■光海底ケーブルシステムの概要

■**光海底ケーブルシステムの主要要素技術**

■今後の技術動向

■まとめ

太平洋横断システムFASTERの実現技術

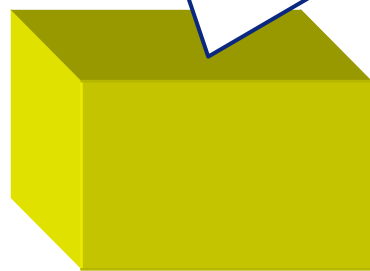
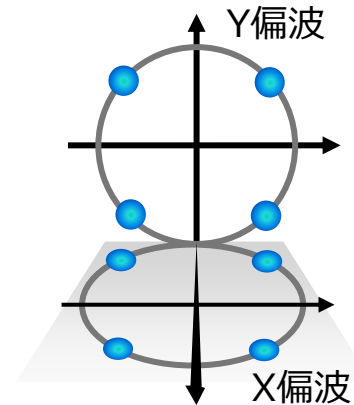
100Gbit/s偏波多重QPSK、デジタルコヒーレント受信

40GHz間隔100チャンネル多重

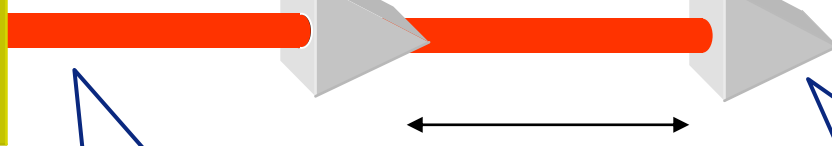
→ **ファイバ容量 : 10Tbit/s**

周波数利用効率 : 2.5bit/s/Hz

軟判定LDPC

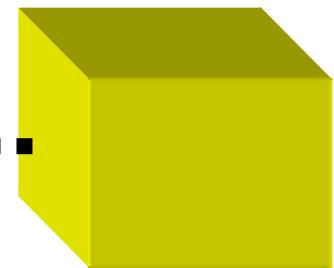


光送信端局



~60km

CバンドEDFA
帯域30nm
980nm励起



光受信端局

低損失・低非線形正分散ファイバの均一伝送路

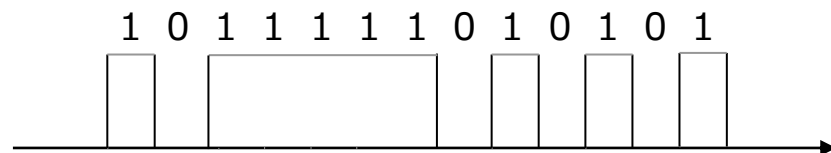
$A_{eff} : 130\mu m^2$ 、純シリカコアファイバ

変調方式の変遷(1)

チャネル
伝送速度
[bit/s]

2.5/5 Gbit/s → 10 Gbit/s

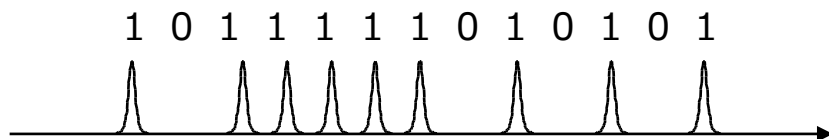
NRZ-OOK



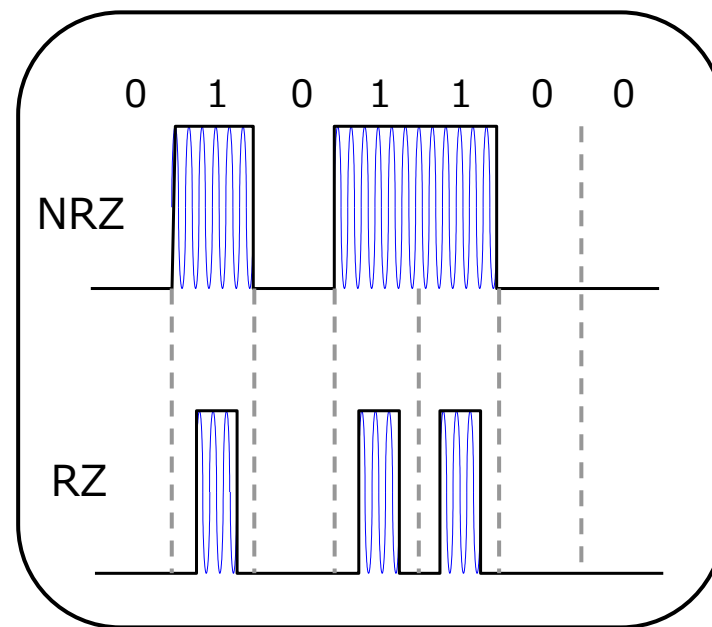
各パルスが受ける非線形光学効果の影響はデータパターンによる



RZ-OOK



各パルスが受ける非線形光学効果の影響を均一化



変調方式の変遷(2)

チャンネル
伝送速度
[bit/s]

2.5/5 Gbit/s

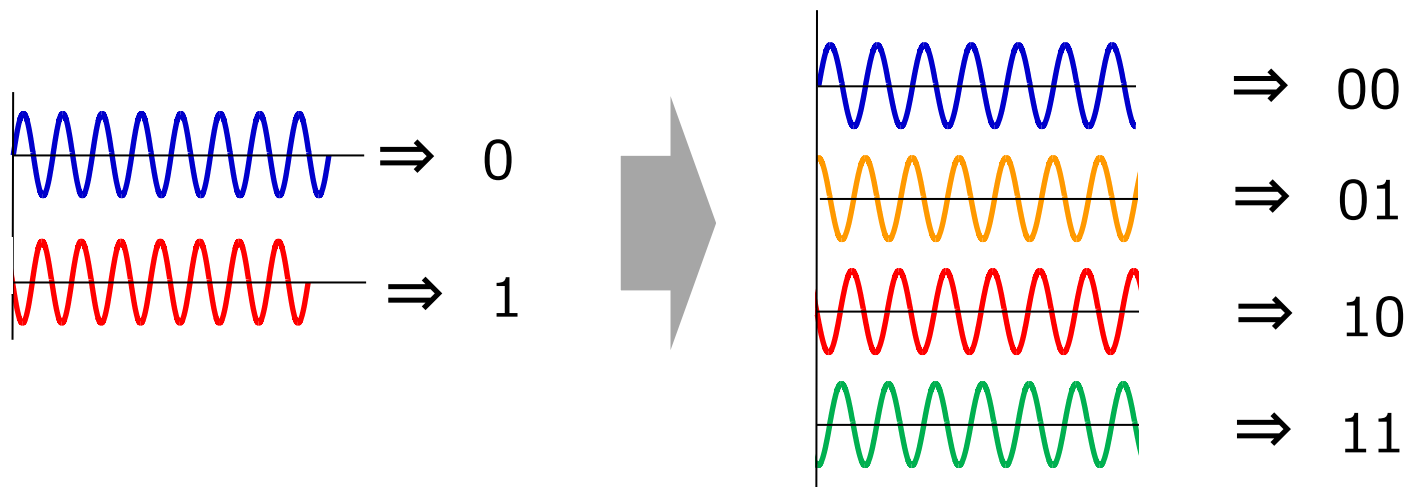
10 Gbit/s

40 Gbit/s

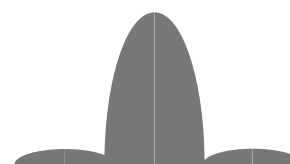
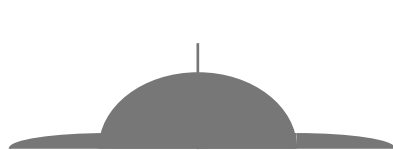
100 Gbit/s

変調信号の多値化

・ 位相状態 : BPSK (0, π) \rightarrow QPSK (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$)



1シンボルで2ビット伝送 \rightarrow シンボル速度 : 半減



信号帯域幅 : 半減
 \rightarrow 高密度波長多重

チャンネル
伝送速度
[bit/s]

2.5/5 Gbit/s

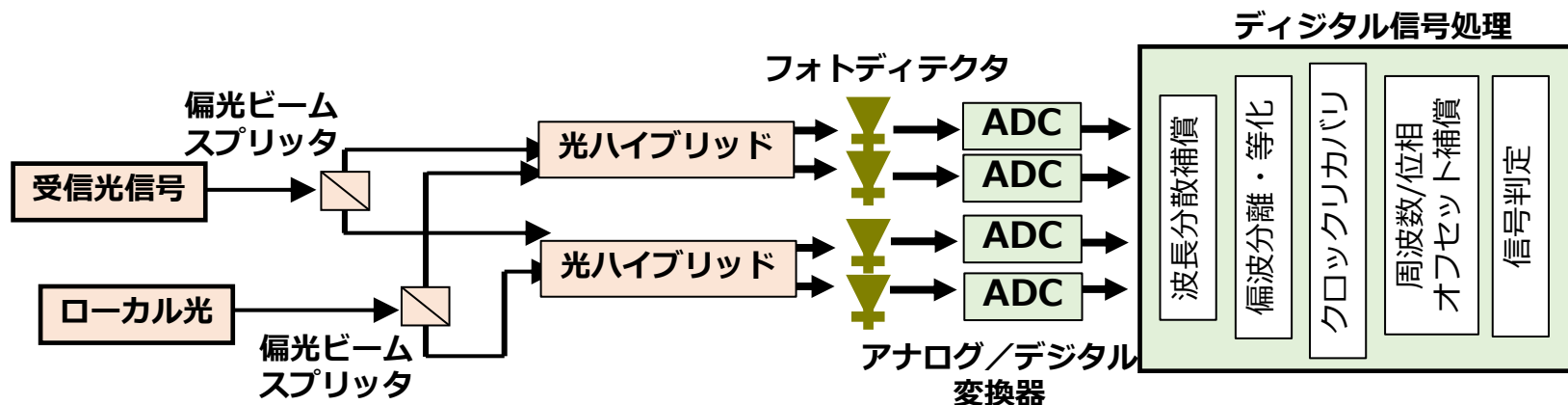
10 Gbit/s

40 Gbit/s

100 Gbit/s

デジタルコヒーレント受信

- 光信号の振幅と位相の検出



デジタル信号処理 (DSP) により、受信信号とローカル光の同期を実現
各種劣化要因 (波長分散、偏波モード分散等) をDSPで補償

偏波ダイバーシティ構成+MIMO信号処理による偏波分離 → 偏波多重の導入

(1) 第1世代：リードソロモン符号

冗長度：7% → FEC利得：5.8dB

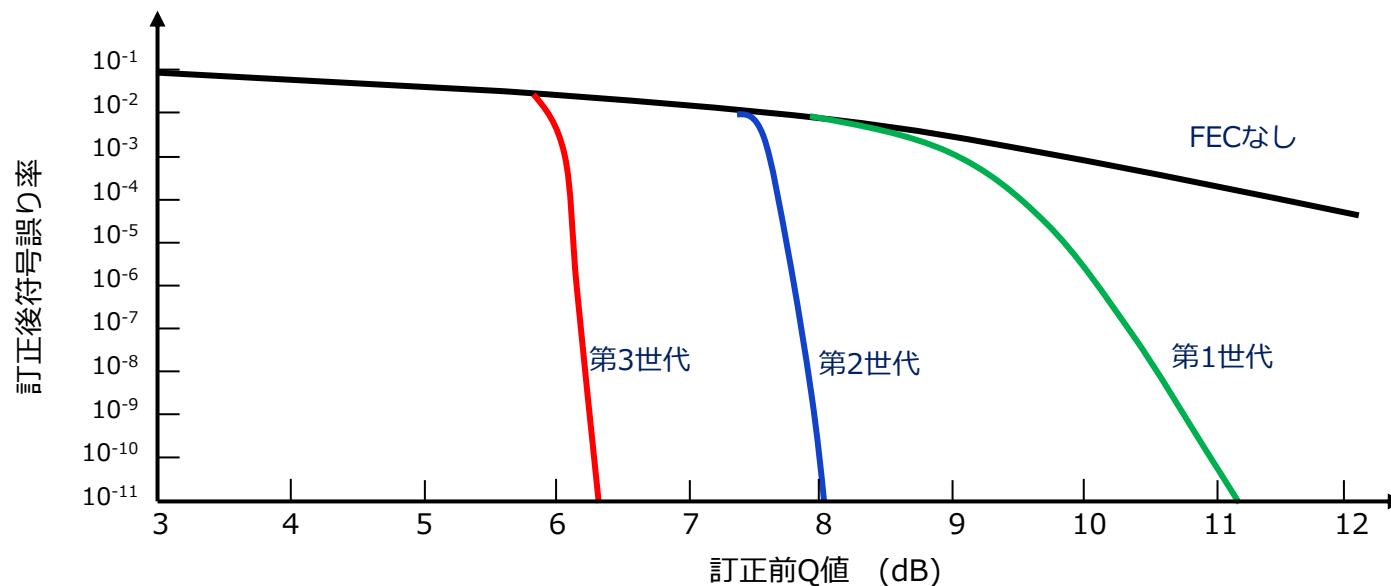
(2) 第2世代：接続符号、反復復号

冗長度：20%程度 → FEC利得：8～9 dB

(3) 第3世代：軟判定

ブロックターボ符号、LDPC

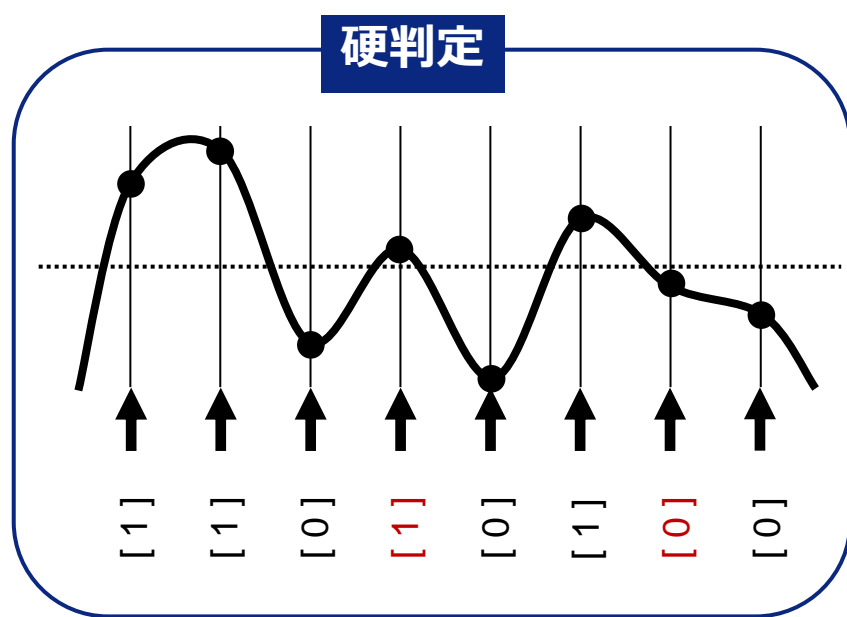
冗長度：20～25%程度 → FEC利得：10 dB以上



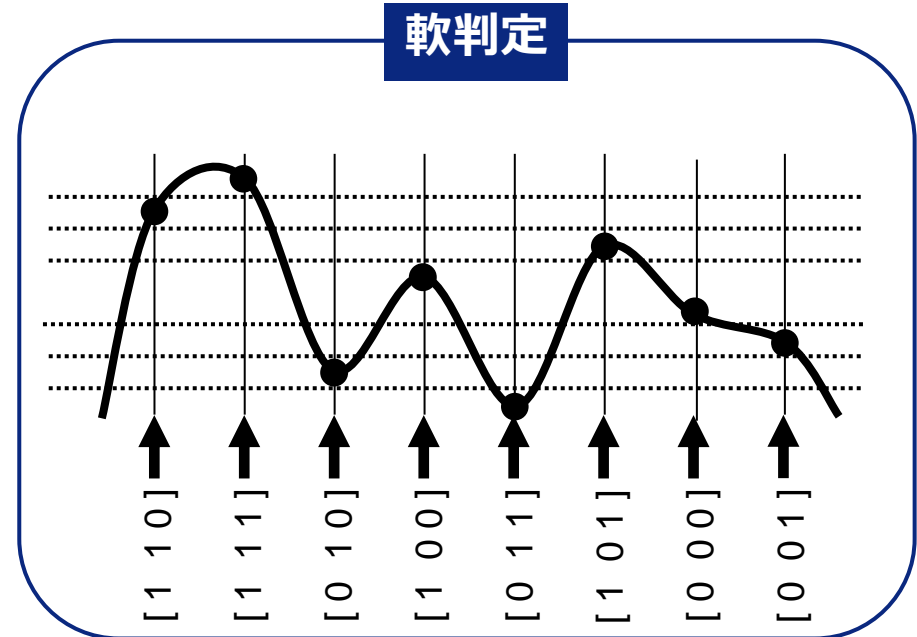
第3世代誤り訂正符号

ブロックターボ符号、LDPC

冗長度：20~25%程度 → FEC利得：10 dB以上



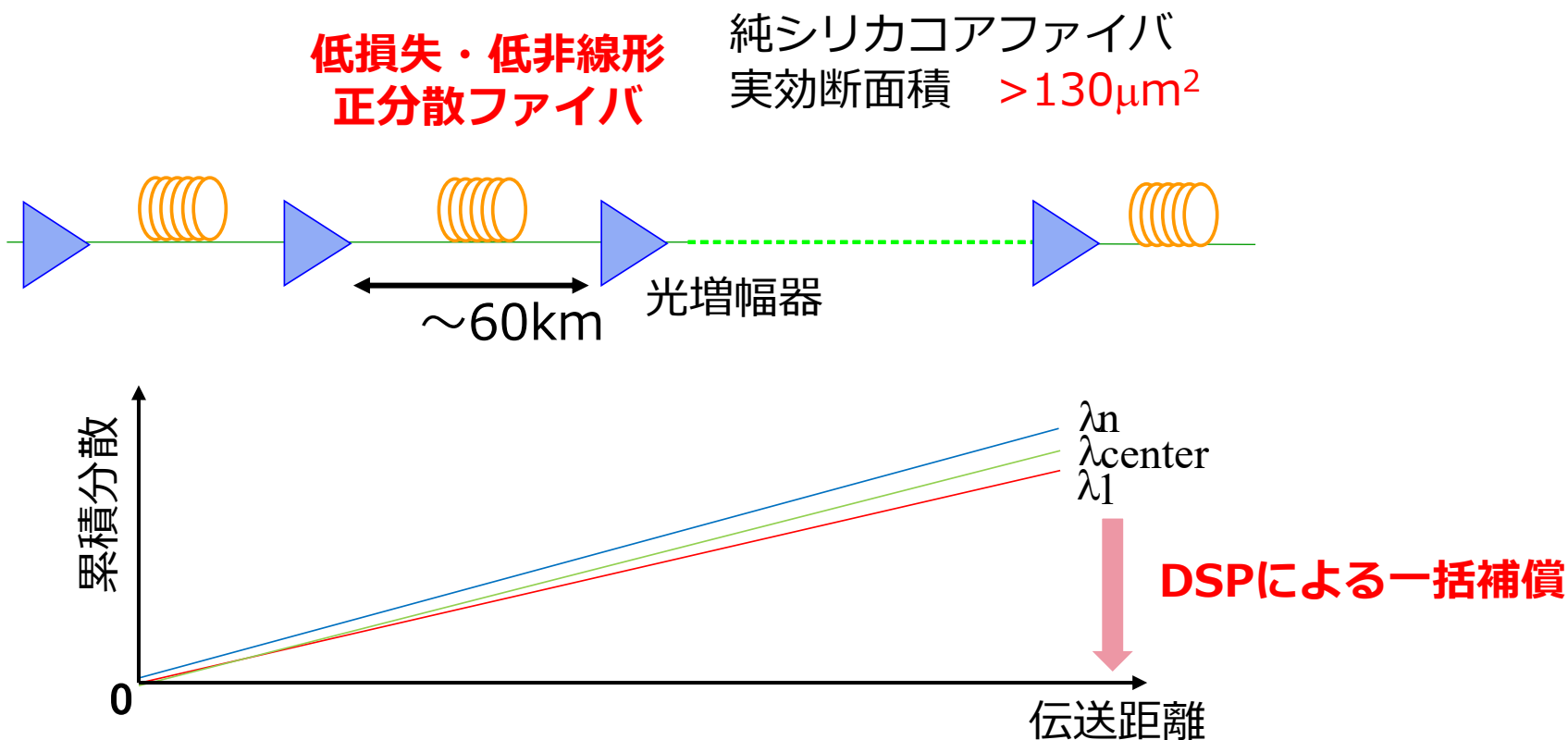
1つの閾値により0/1を判定



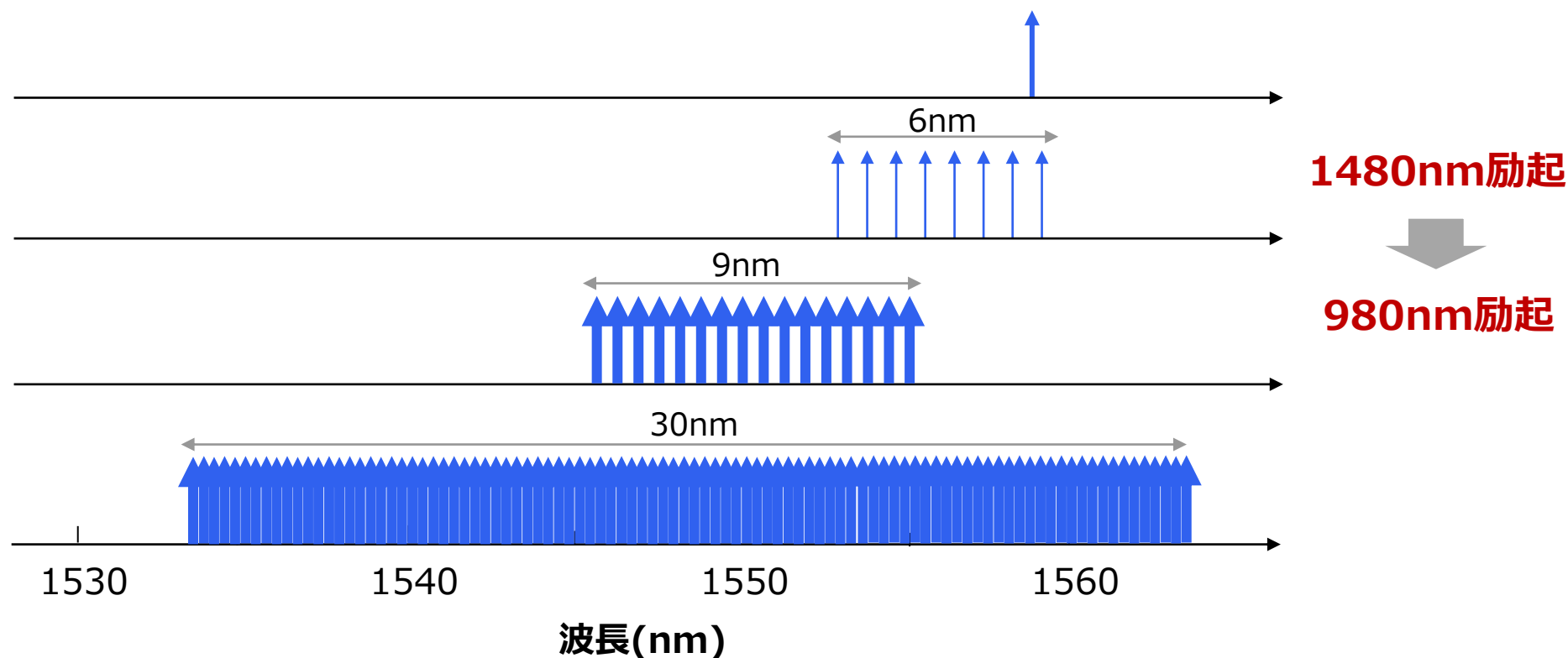
複数の閾値により0/1の信頼度を含めて判定

40Gbit/s以上の高速波長多重伝送システムに導入

- 単一種類の光ファイバで伝送路を構成
- 累積波長分散はデジタルコヒーレント受信器により一括補償



- (1) 単一波長
- (2) 2.5Gbit/s-8WDM 約6nm
- (3) 10Gbit/s-16WDM 約9nm
- (4) 10/100Gbit/s-100WDM 約30nm

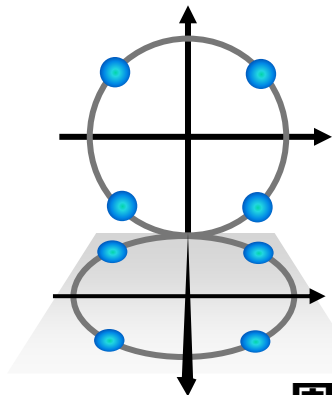


光増幅器の広帯域化だけでなく、伝送路（損失、波長分散）の広帯域化も必要

容量拡大技術(1) - 多値化 -

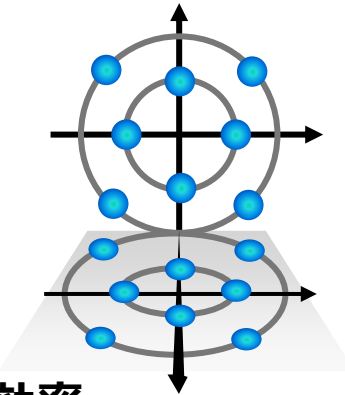
変調方式の多値化による周波数利用効率の向上

偏波多重QPSK



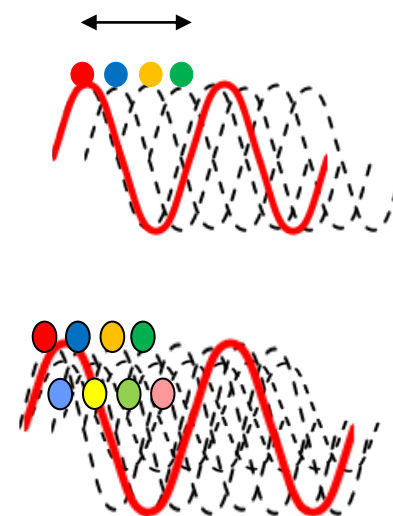
2.5bit/s/Hz

偏波多重8QAM



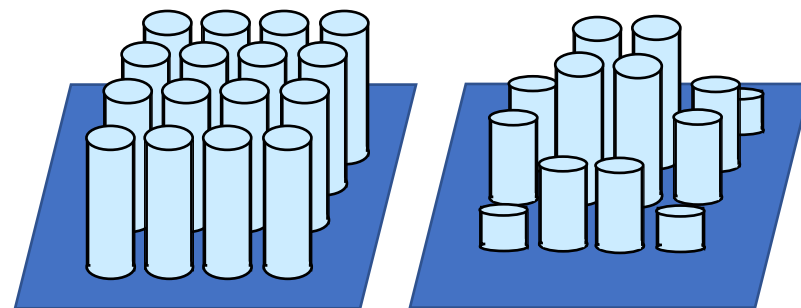
4.0bit/s/Hz

→ 1.6倍の容量拡大



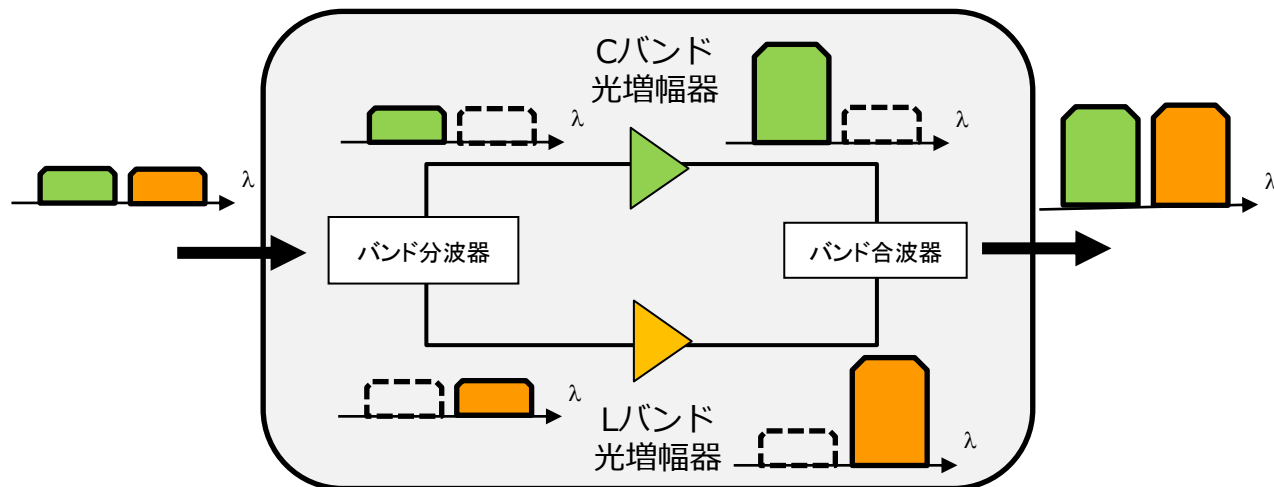
FASTERケーブルを用いたフィールド試験により実現性を確認

※オフライン処理実験では、PS-64QAM信号を用いて、6.0bit/s/Hzまでの周波数利用効率向上の可能性を確認



PS: Probabilistic Shaping

Cバンド → C+Lバンドへの帯域拡大



太平洋横断ケーブル PLCN Pacific Light Cable Network

- ファイバ容量 : 24Tbit/s
- ケーブル容量 : 144Tbit/s (24Tbit/s x 6FP)

■光海底ケーブルシステムの概要

■光海底ケーブルシステムの主要要素技術

■今後の技術動向

■まとめ

さらなる容量拡大に向けて

- 継続的な容量拡大の要求 → 1Pbit/s級ケーブルが2030年前に必要 (Facebook)
- 光海底ケーブルは電力に制限
→ **多芯化によるケーブル容量の拡大**

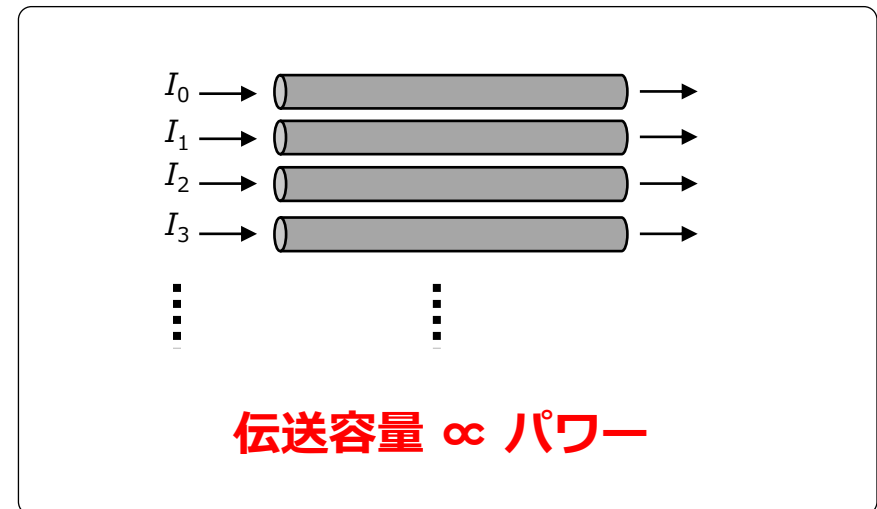
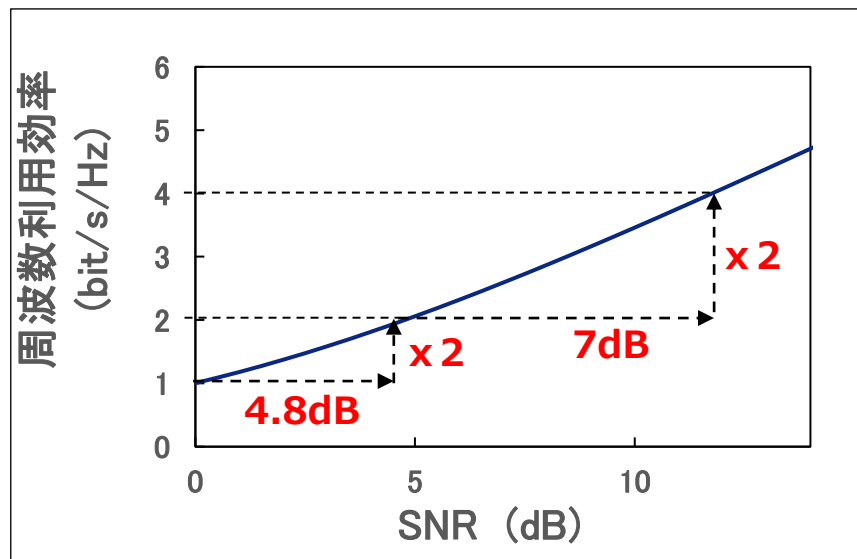
シャノンリミット: $C = N \cdot W \log(1 + SNR)$

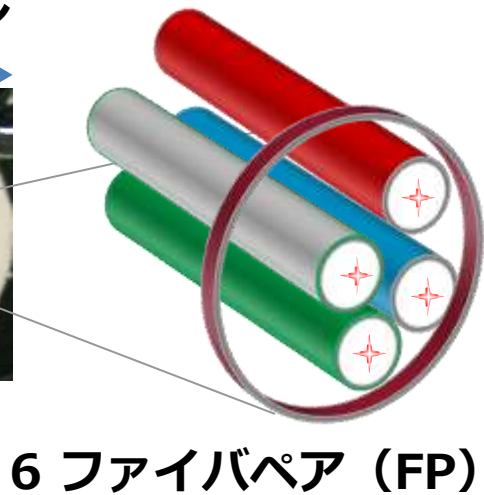
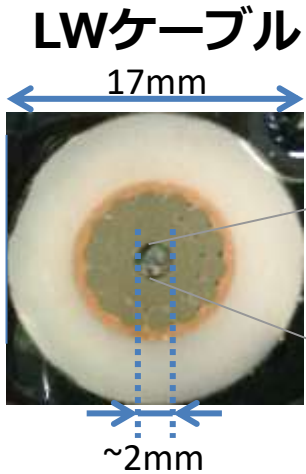
N : 空間チャンネル数

W : 帯域幅

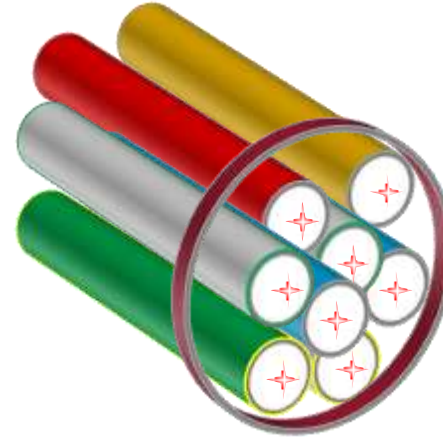
SNRの増加

W と N の増加





多芯化 [1]

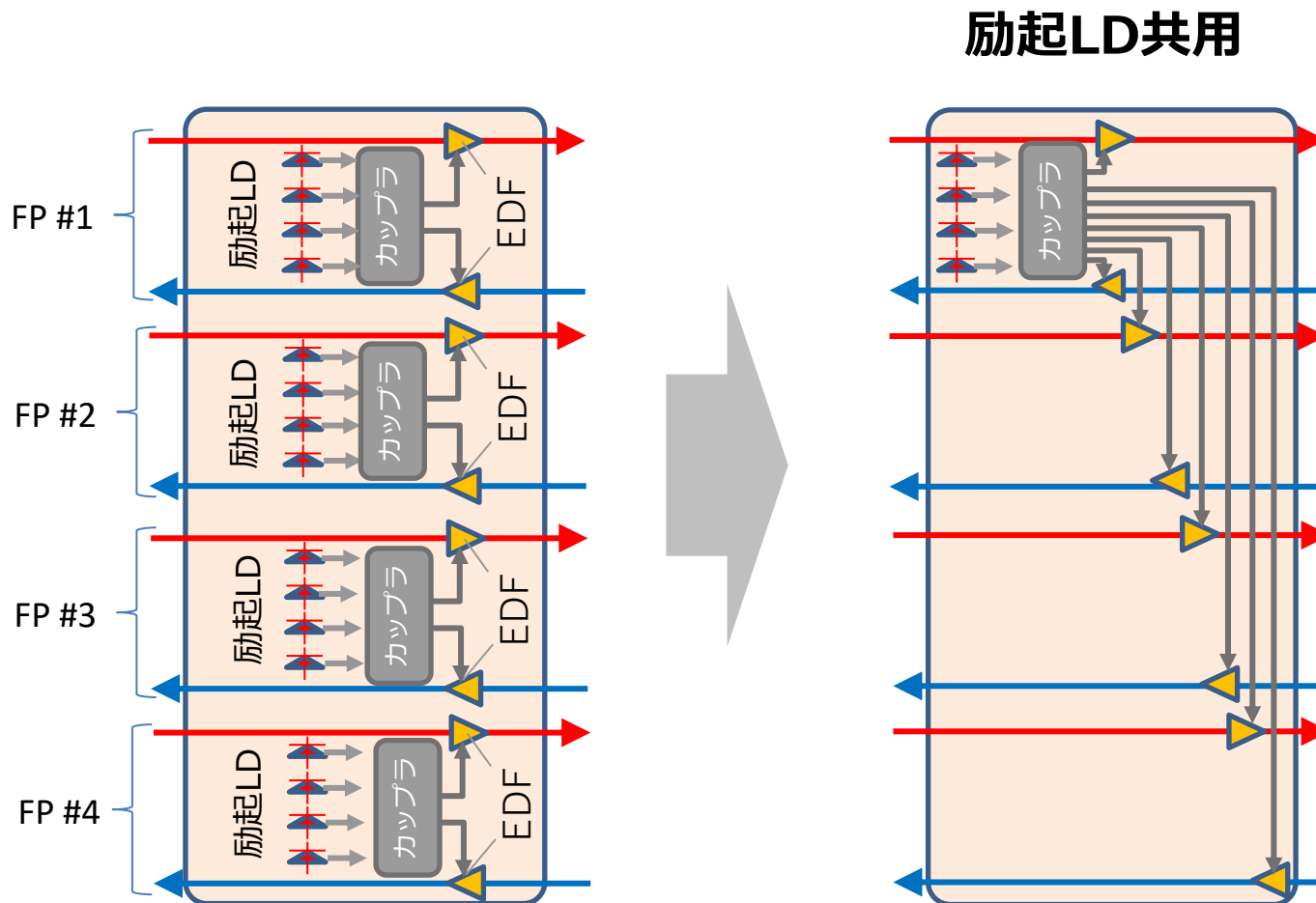


同一径ケーブル
6 FP => 12 FP
太径化 (20mmφ)
12 FP => 16 FP



20 FP 以上 [2, 3]

[1] S. Fujihara, "High Fiber Count Cable for SDM," SubOptic2019, OP14-3, 2019.
[2] https://www.subcom.com/documents/2019/High_Fiber_Count_Manufacturing_Updates_SubCom_16SEPT2019.pdf
[3] https://www.nec.com/en/press/202001/global_20200115_02.html



励起LD共用

励起LDの共用

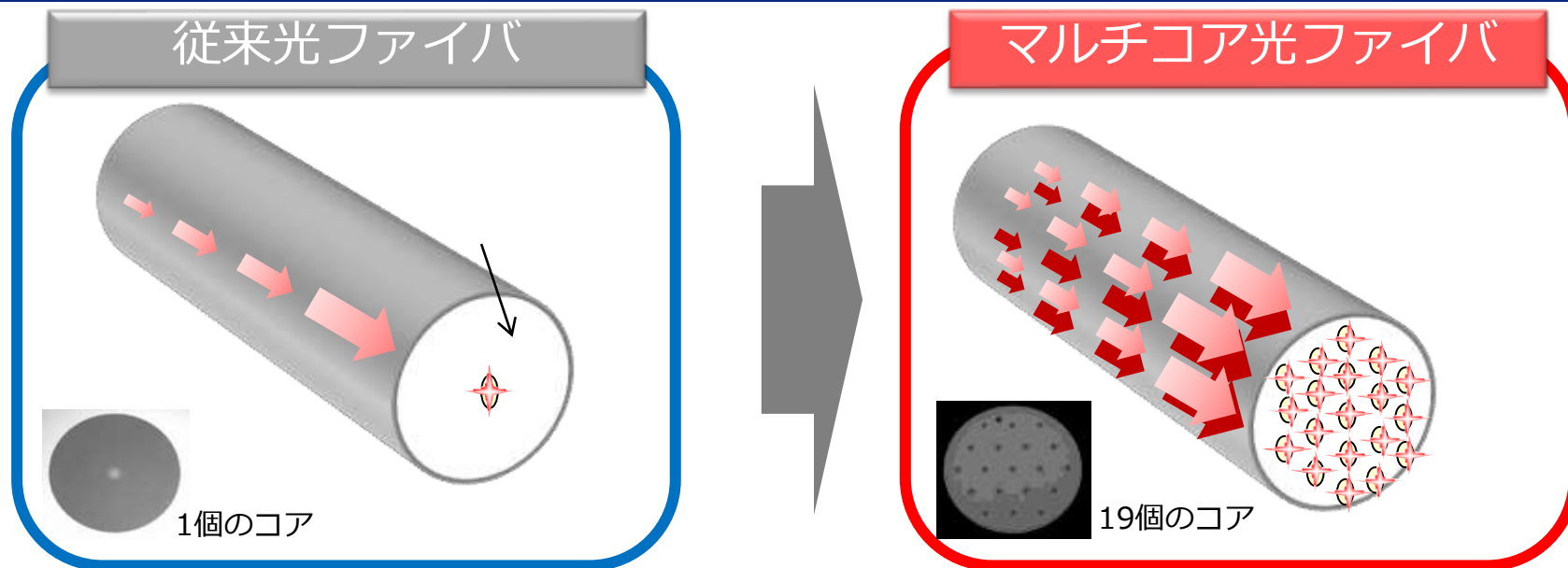
→ 部品数、過剰損失の低減

SDM(Space Division Multiplexing) : 多芯ケーブル + 励起LD共用

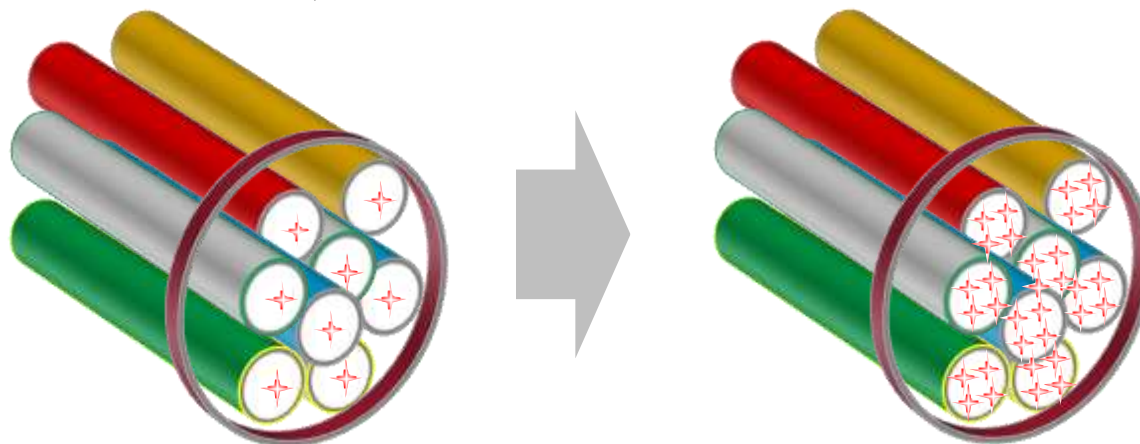
大西洋横断ケーブル Dunant

- ファイバ容量 : 20.8Tbit/s
- ケーブル容量 : 250Tbit/s
(20.8Tbit/s x **12FP**)
- システム長 : 6400km (米仏)
- 出資社 : Google
- 供給社 : Subcom
- 商用開始 : 2020年

マルチコアファイバによるさらなる大容量化

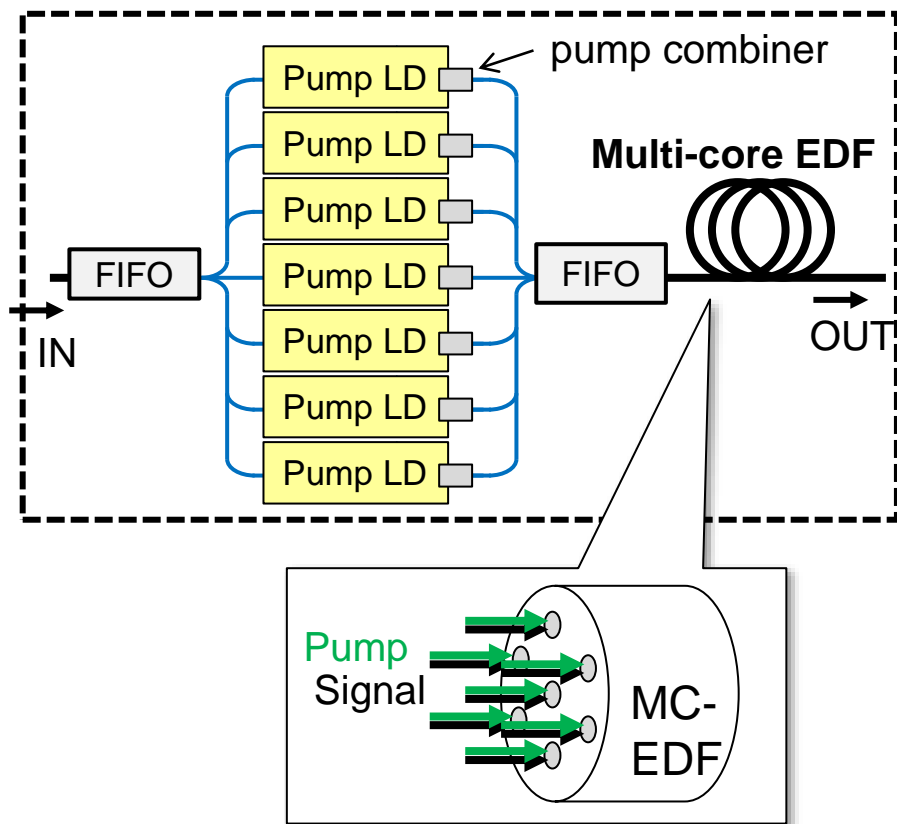


例えば、標準クラッド径 (125 μ m)の4コアファイバを用いた場合

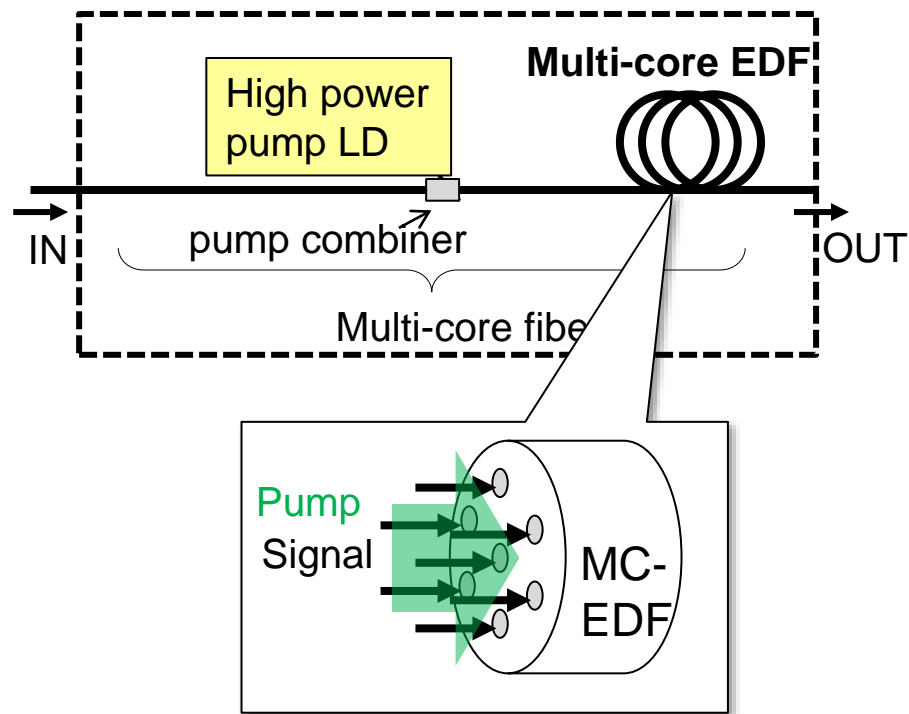


ケーブル構造を変えずに伝送路数（コア数）を4倍に拡大可能

個別励起

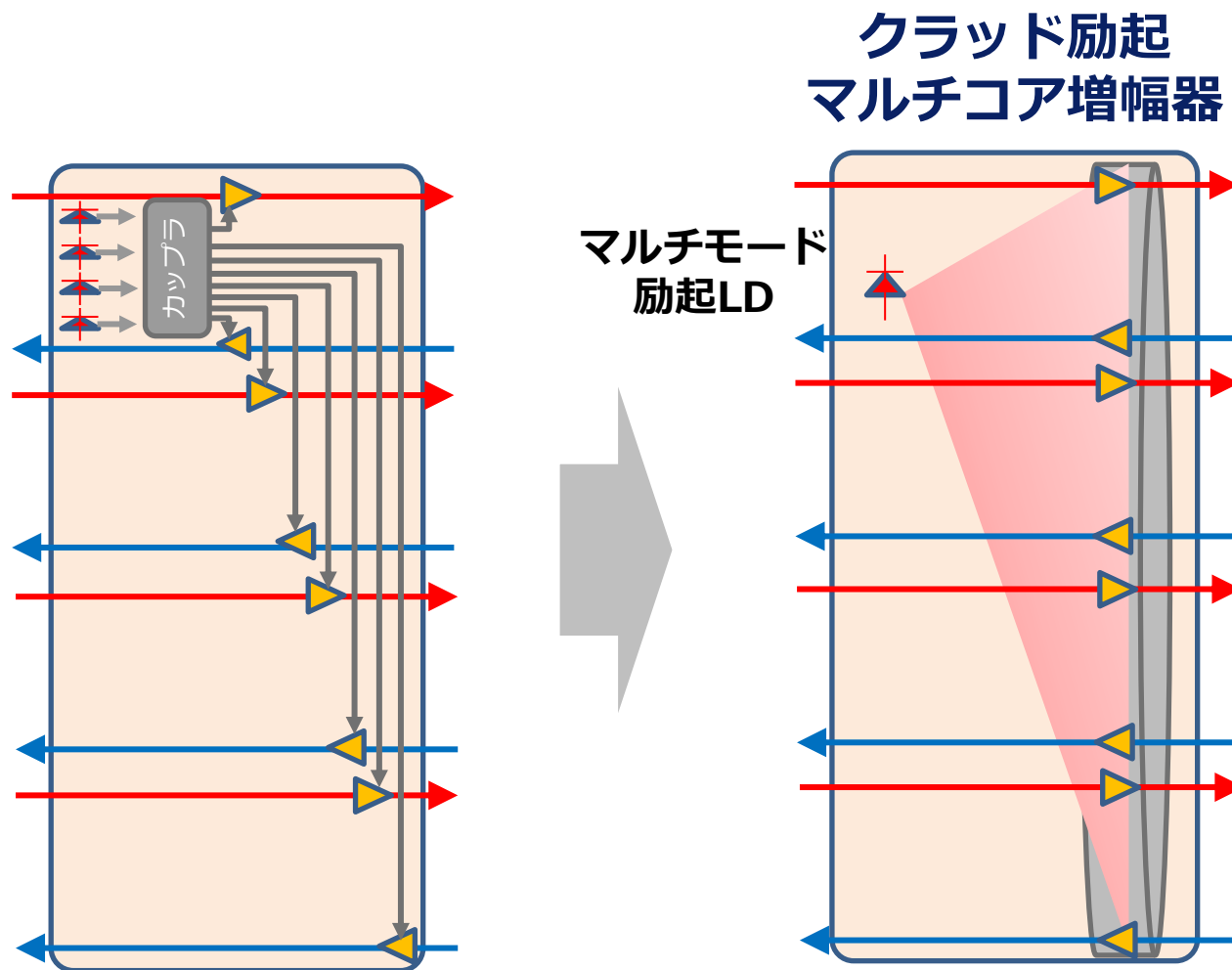


クラッド一括励起



光増幅器の集積化による高効率化

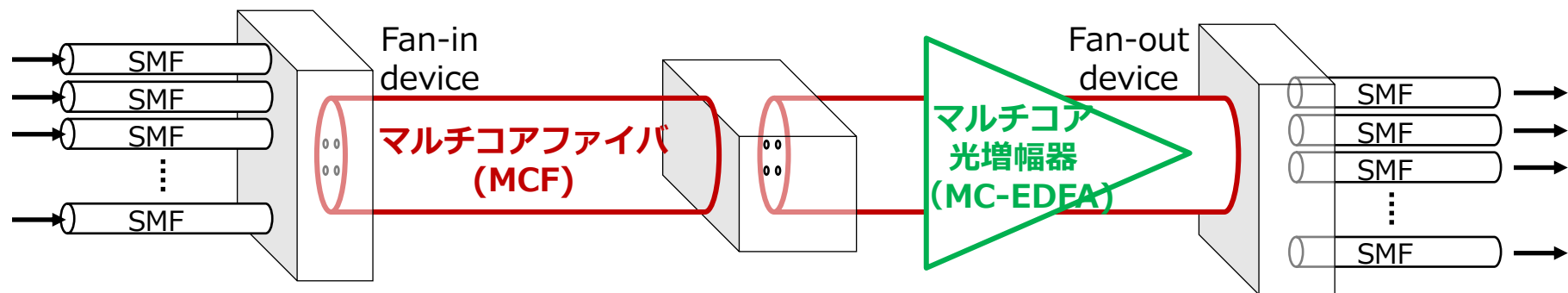
単一LDによる一括励起 → 消費電力の低減



2018~21年度 マルチコア大容量伝送システム技術に関する研究開発

KDDI総合研究所, NEC, 住友電工, 古河電工, オプトクエスト, 東北大

マルチコアファイバを中心とした空間分割多重 (SDM) 型大容量光中継伝送システムの基盤技術の確立



空間多重型光ファイバの方式検討

- 結合・非結合マルチコアファイバファイバの長距離伝送性能比較(~10000km)と評価技術の確立

空間多重型光中継器の方式検討

- 結合型・非結合型の両方式の電力効率などの性能比較と基盤技術確立

マルチコア光伝送システムの要素基盤技術開発

- マルチコアファイバの海底ケーブル試作とケーブル化後の性能予測
- 空間多重型高密度光デバイスの開発

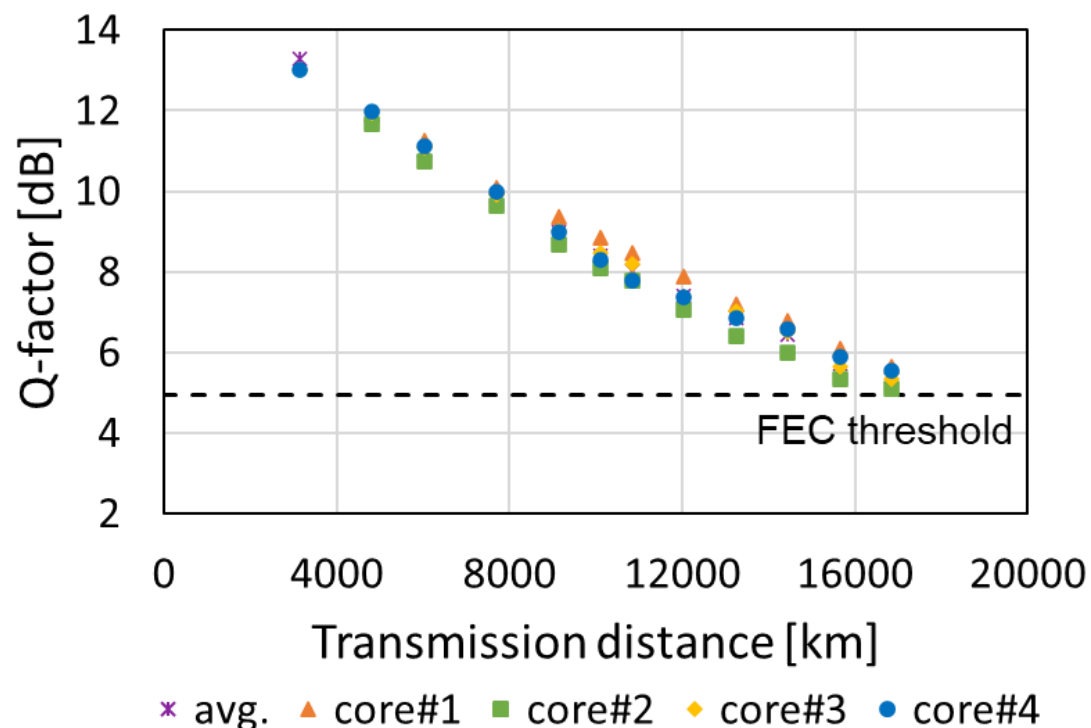
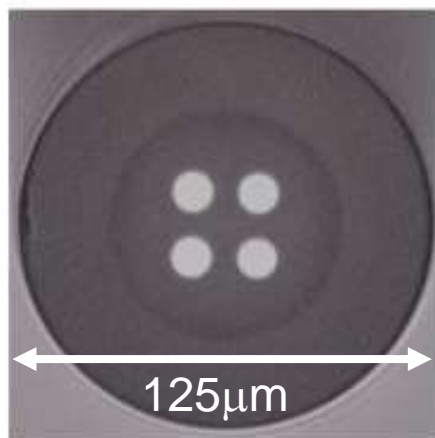


4コアファイバを用いた長距離伝送

標準クラッド径の4コアファイバを用いた長距離伝送

24Gbaud 偏波多重QPSK信号の16波長多重伝送

→ 伝送距離 > 16,000km



12/7にECOC2020@オンラインで発表予定 (Mo2E.4)

- **光海底ケーブルシステムの技術変遷**
 - 各種技術の導入による**30年で約10万倍の大容量化**
 - 最新技術の太平洋横断ケーブル：FASTER
ファイバ容量：10Tbit/s (100Gbit/s x 100WDM)
 - 多値化、広帯域化（C+Lバンド）による大容量化
- **今後の技術動向**
 - 多芯化による大容量化
 - マルチコアファイバの導入

謝辞



本研究の一部は、総務省研究開発委託「**新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発 課題 II マルチコア大容量光伝送システムの研究開発**」の助成を受けて行われました。

KDDI
KDDI Research

目次

第1章 長距離通信技術の変遷

- 国際通信の100年
- 陸上光通信システムと光海底ケー...

第2章 光ファイバ通信システム

- 光ファイバ
- 長距離通信用半導体レーザー
- 光変調器
- フォトディテクタ
- 誤り訂正符号
- 光中継技術

第3章 再生中継方式による長

- 光再生中継伝送
- 光再生中継器
- 1.3 μ m帯半導体レーザーを用いた光
- 1.5 μ m帯光海底ケーブルTPC-4
- 高ビットレート化における再生中

第4章 光増幅中継方式による

- 光増幅
- 光増幅多中継伝送システム
- システム開発
- 光増幅システムの特徴
- TPC-5ケーブルネットワーク
- TPC-5以降の開発に向けて⁽⁷⁾

第5章 非線形性を考慮した分散制御方式による高速・長距離光ファイバ通信システム

- 10Gbit/s, 9,000km NRZ光信号伝送
- 光ソリトン伝送方式
- 分散制御(マネージド)ソリトン伝送方式
- 20Gbit/s太平洋横断システム設計
- 40Gbit/s, 10,000km伝送
- RZ光信号と非線形性を考慮した分散マネージメントの一般化

第6章 波長多重方式による長距離大容量光ファイバ通信システム

- 波長多重システム概要
- 10Gbit/s, 16WDM大洋横断光海底ケーブルシステム
- 10Gbit/s DWDMによるテラビット長距離伝送システム
- 40Gbit/s, WDMによるマルチテラビット長距離伝送システム
- 商用太平洋横断光海底ケーブル

第7章 デジタルコヒーレント方式による長距離大容量光ファイバ通信システム

- デジタルコヒーレント方式の概要
- デジタルコヒーレント方式を用いた光海底ケーブルシステム: FASTER
- デジタルコヒーレント方式を用いた光海底ケーブルシステムの大容量化

第8章 空間多重光伝送技術

- 光ファイバの伝送容量限界
- 空間多重光伝送方式の概要
- マルチコアファイバを用いたSDM伝送
- マルチモードファイバを用いたSDM伝送
- マルチコア・マルチモードファイバを用いたSDM伝送

