

MPLS Japan 2024

海底ケーブルの技術動向

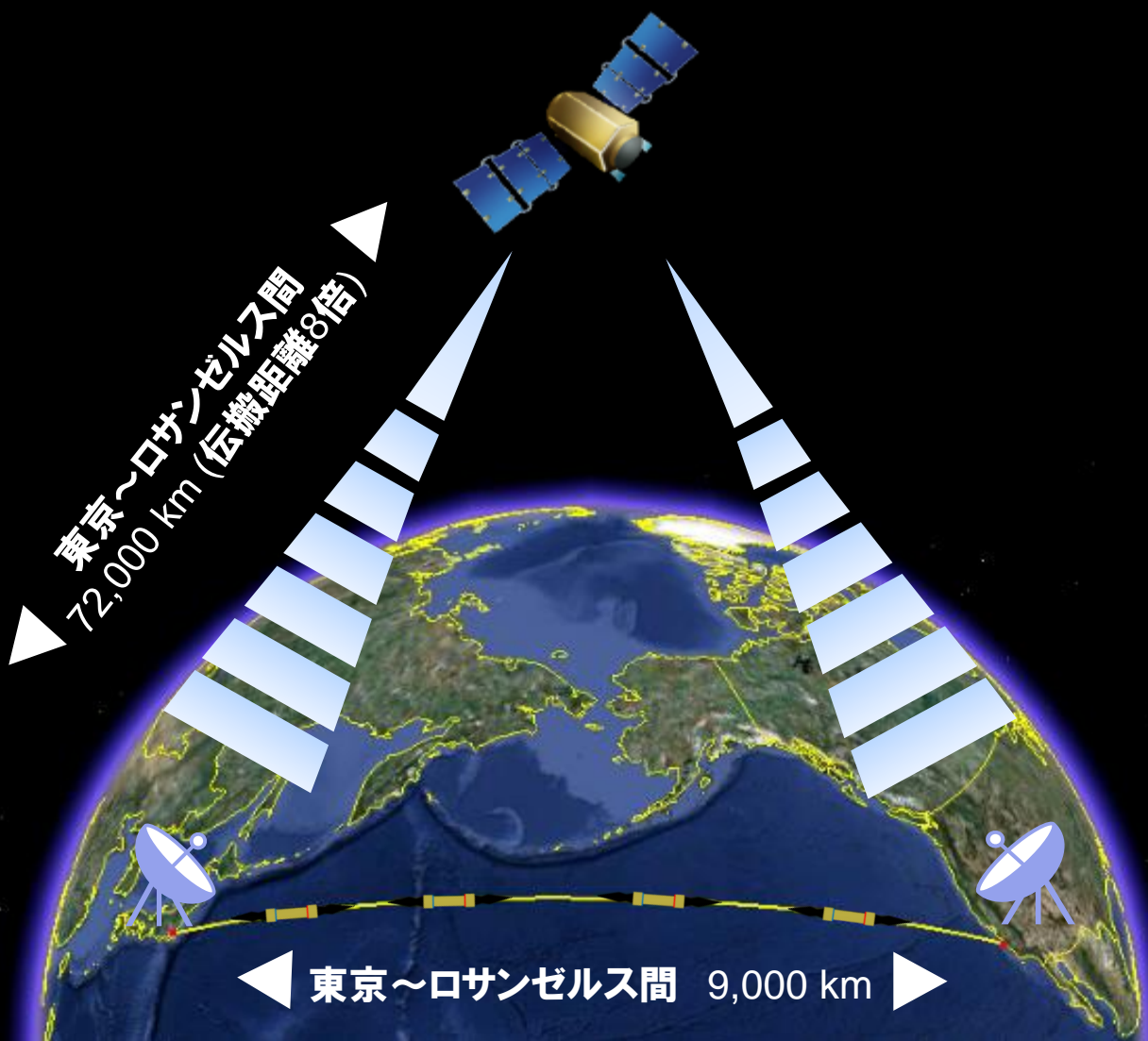
日本電気株式会社
海洋システム事業部門
三野 勝幸

発表内容

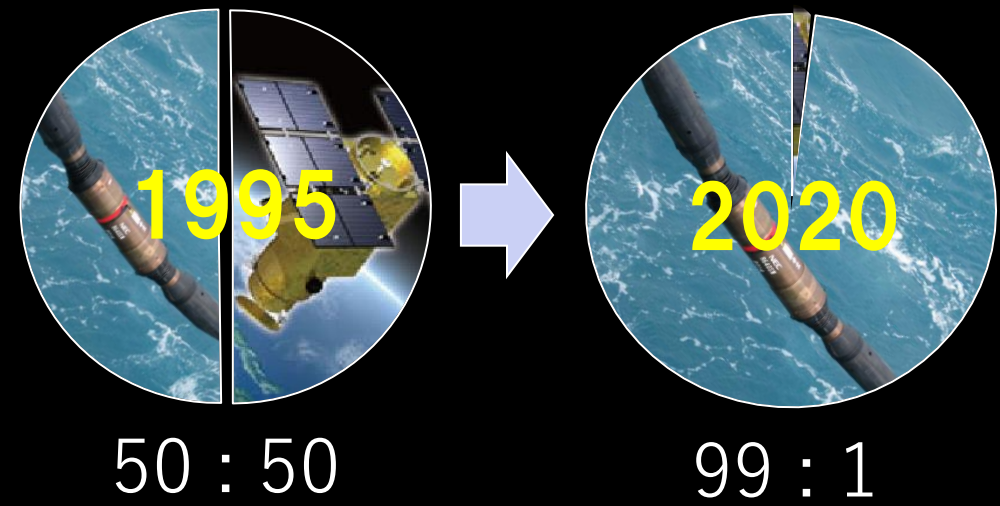
1. 海底ケーブル業界の動向
2. 海底ケーブルシステムの概要
3. 海底ケーブルシステムの技術動向
4. まとめ

1. 海底ケーブルの動向

海底ケーブル通信と衛星通信との比較

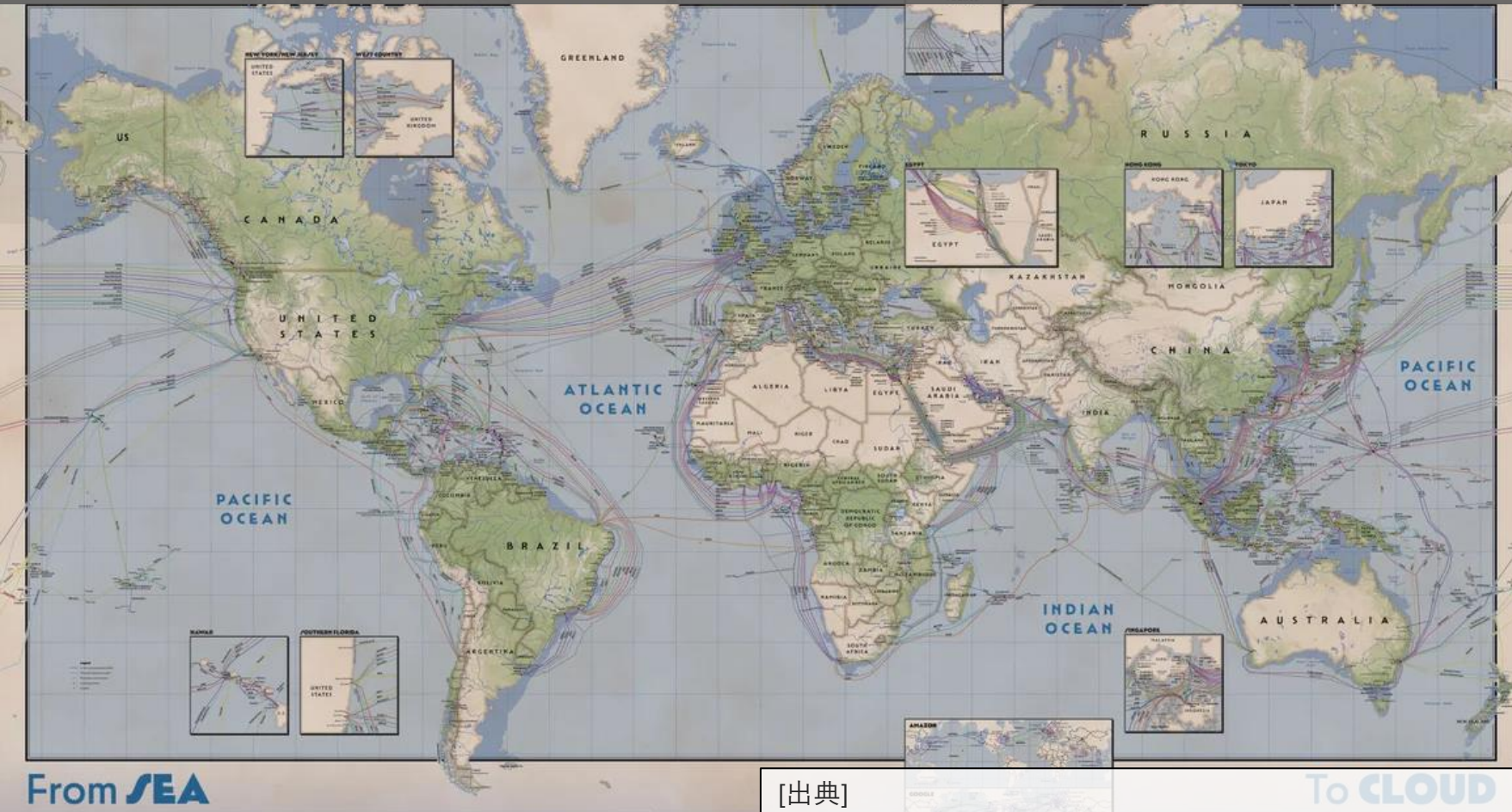


現在は、大陸間通信の99%を
海底ケーブルが担う



光海底ケーブルマップ

世界中で500本以上, 総延長約140万キロメートル



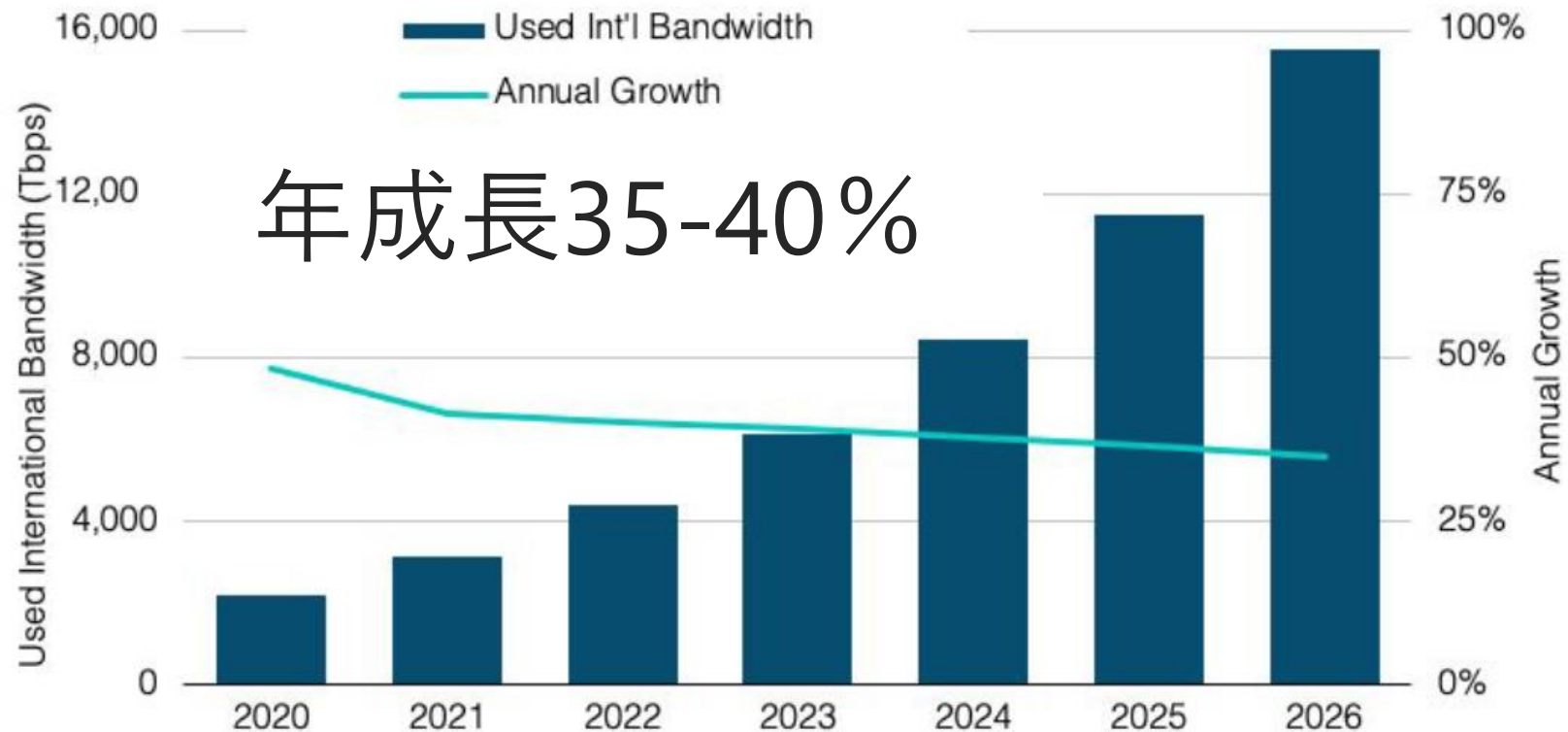
[出典]

<https://blog.telegeography.com/this-is-not-a-drill-the-2024-submarine-cable-map-is-here>
<https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>

国際通信帯域需要（2020 – 2026年）

通信サービスのグローバル化, 動画コンテンツ, クラウドサービスの普及などを背景に拡大

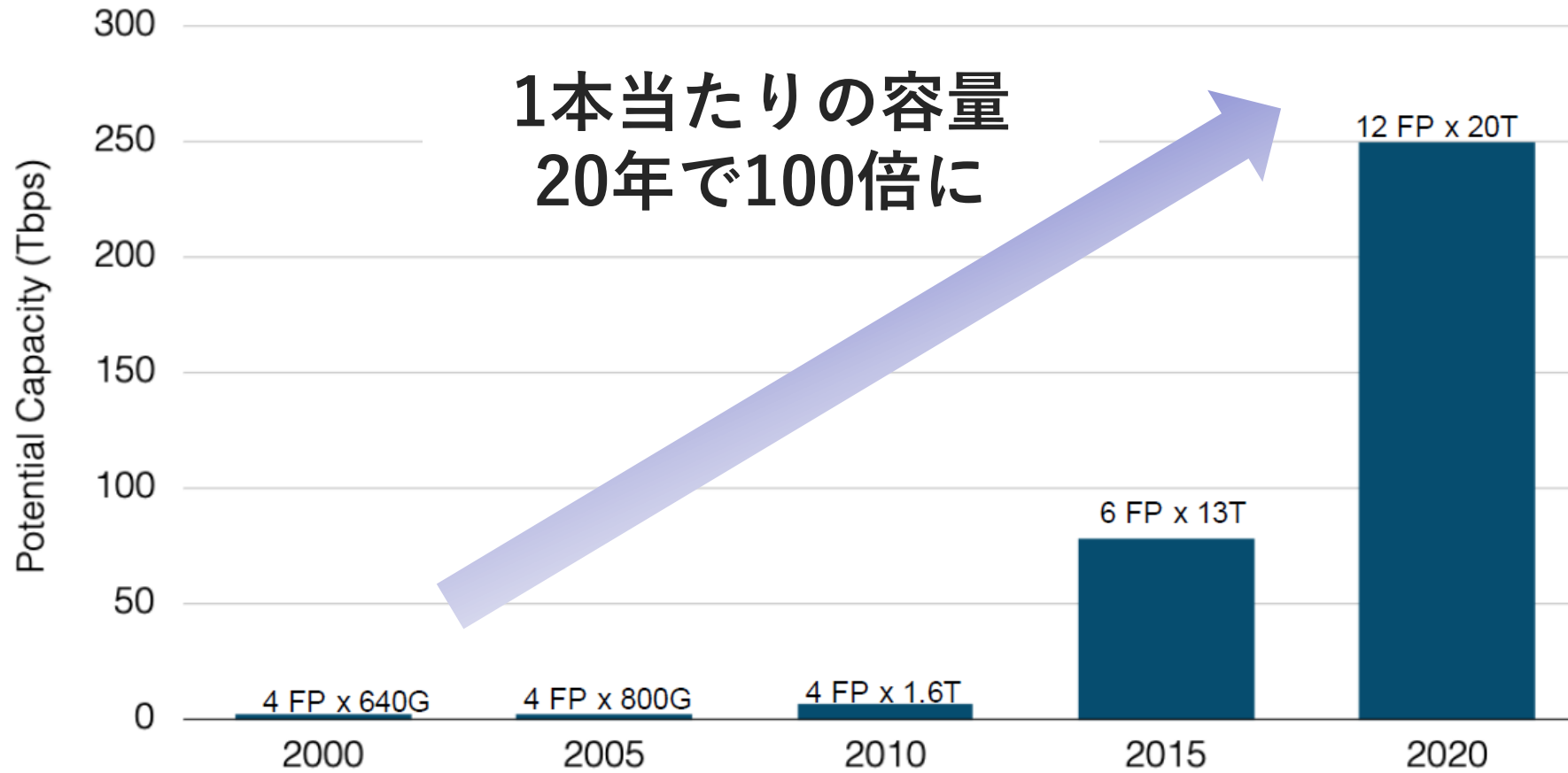
Used International Bandwidth, 2020-2026



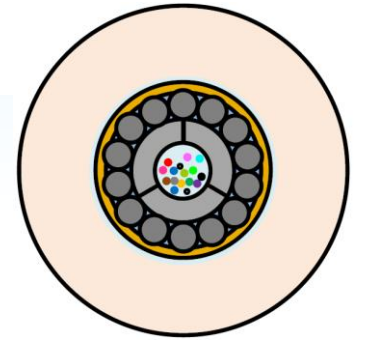
出典：TeleGeography

海底ケーブルの急速な大容量化 (1/2)

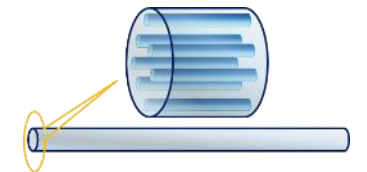
Typical Original Design Capacity of Transoceanic Cables



FP: Fiber Pair (ファイバペア数)



ケーブル断面図

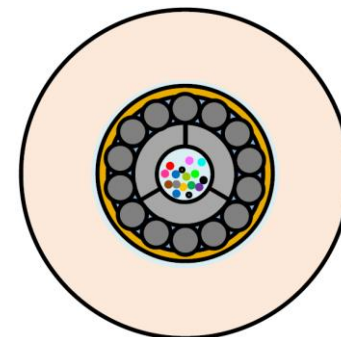
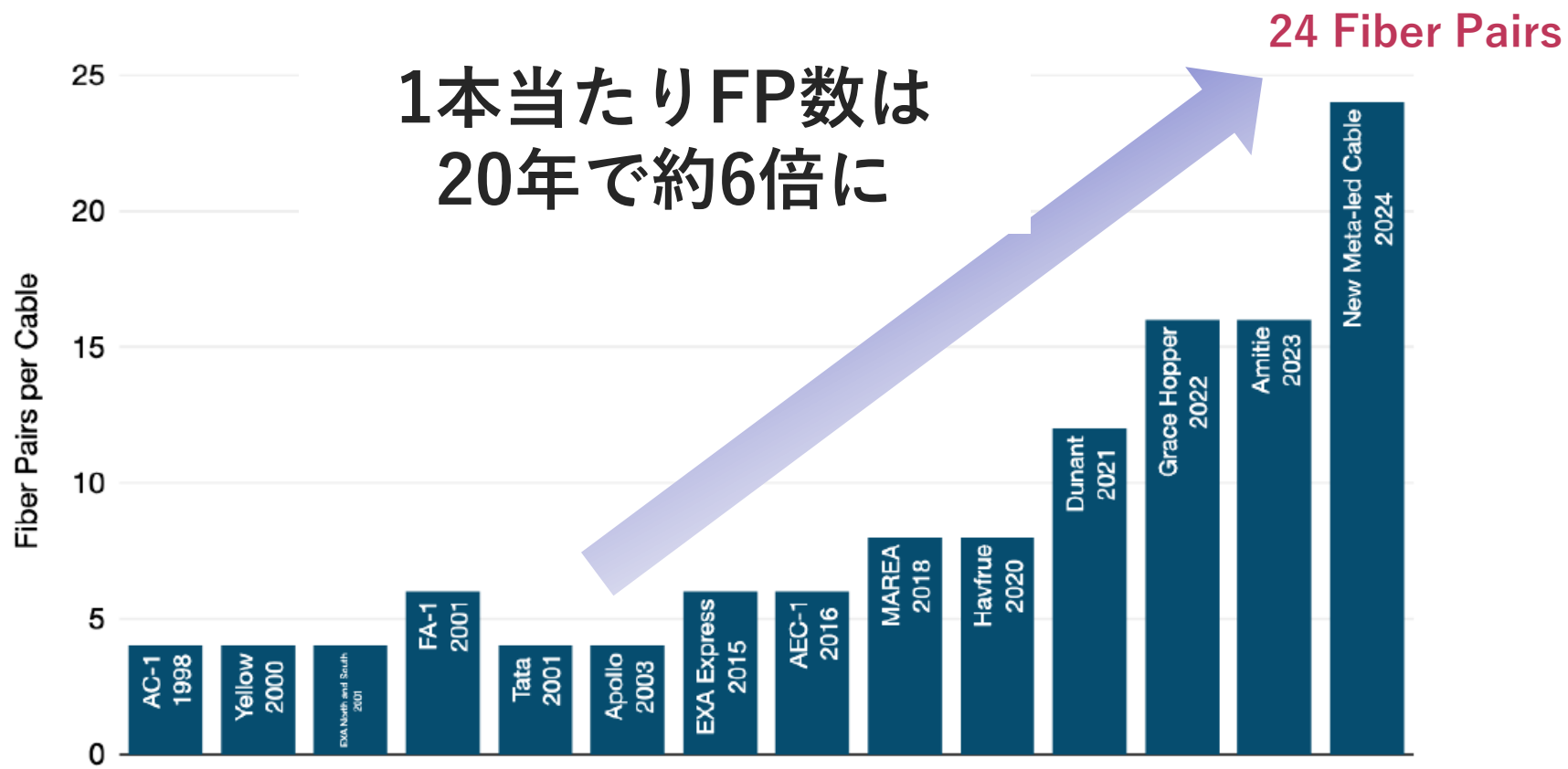


1本の海底ケーブル
に複数FPが収容

出典：TeleGeography

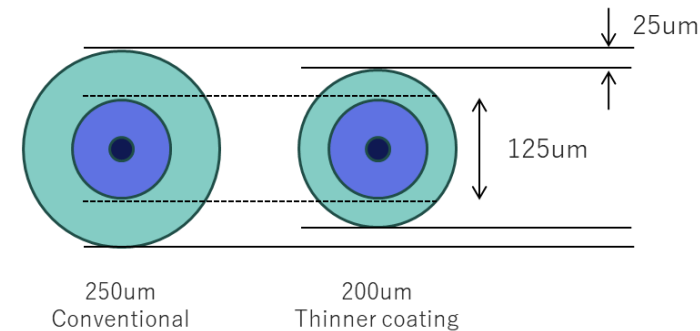
海底ケーブルの急速な大容量化 (2/2)

Fiber Pair Count in Trans-Atlantic Cables



ケーブル断面図

ファイバの細径化
250um ⇒ 200um



FP: Fiber Pair (ファイバ ペア数)

出典: TeleGeography

2. 海底ケーブルのシステム概要

光海底ケーブルシステムの特徴と構成要素

長距離

太平洋横断級の超長距離伝送
(~16,000km)

大容量

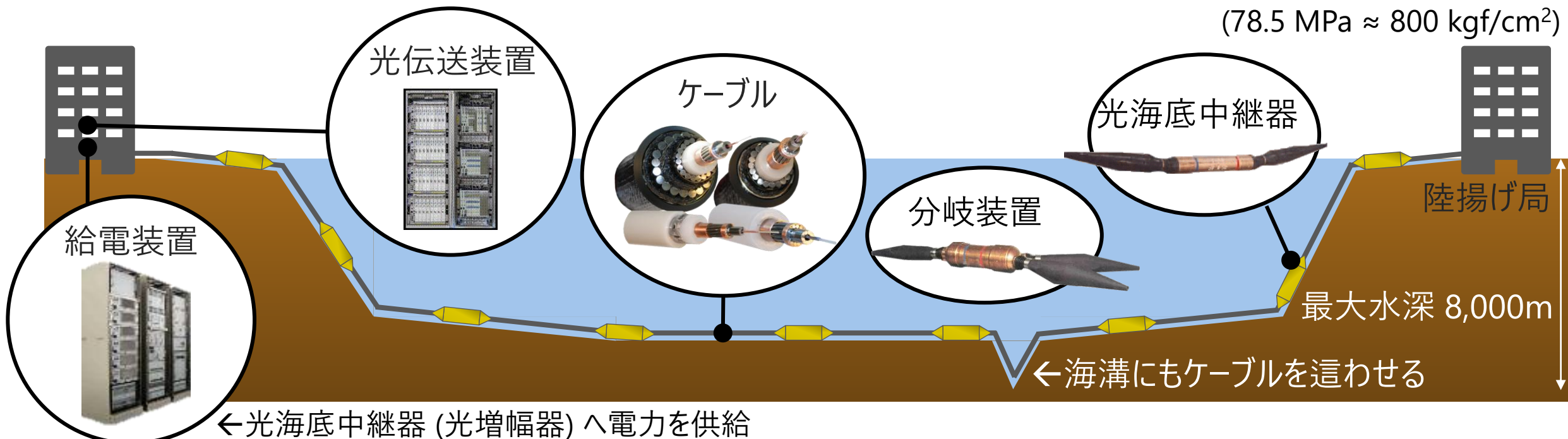
ペタビット級の伝送容量
(~0.5Pb/s)

長期寿命

システム設計寿命: 25年

高信頼

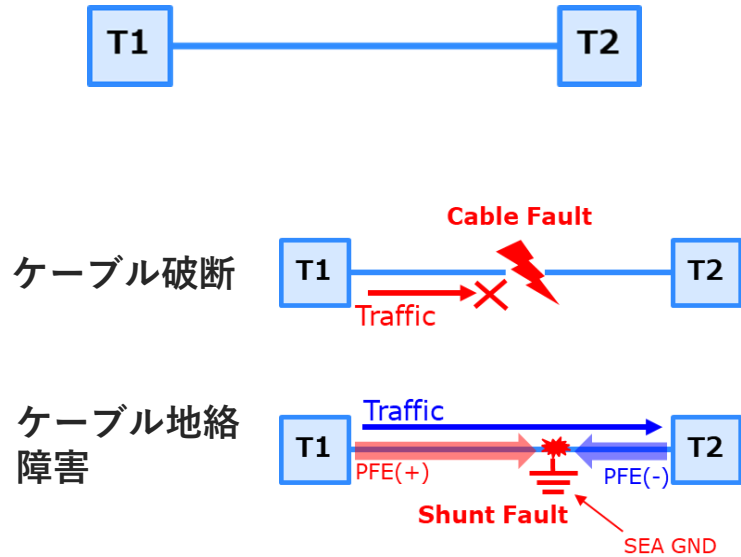
回線断時間: 5分/年
備船修理: 1~3回未満/25年
最大水深8,000mの高耐圧
(78.5 MPa \approx 800 kgf/cm²)



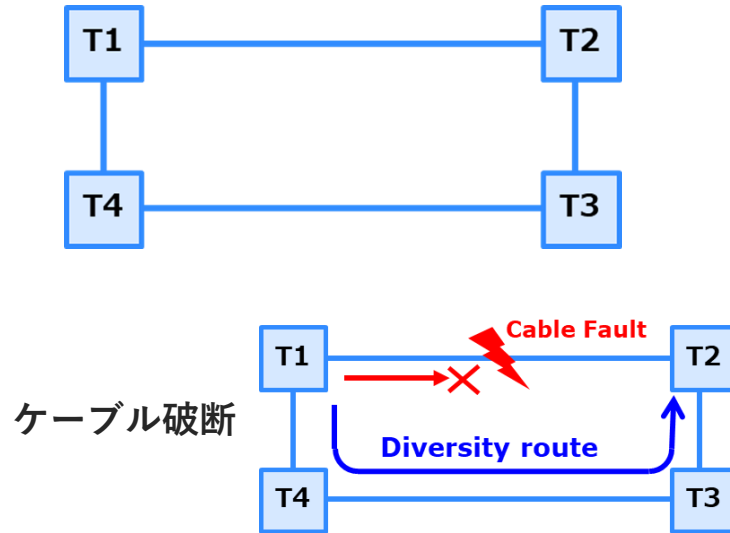
←光海底中継器 (光増幅器) へ電力を供給

海底ケーブルのネットワークトポロジー

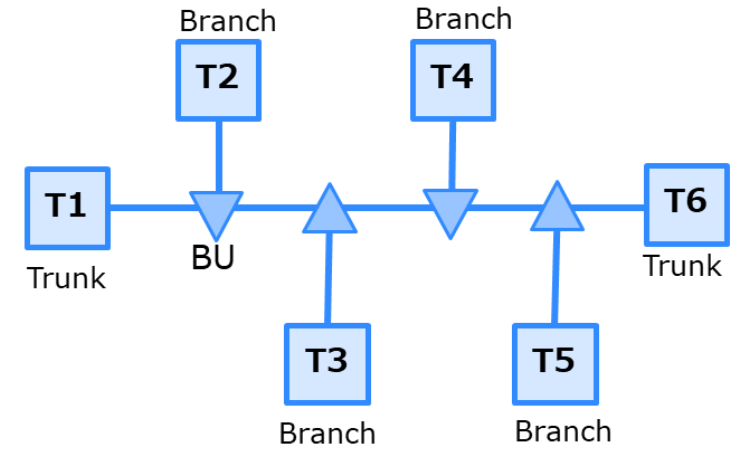
Point-to-point



Ring



Fishbone(バス型)



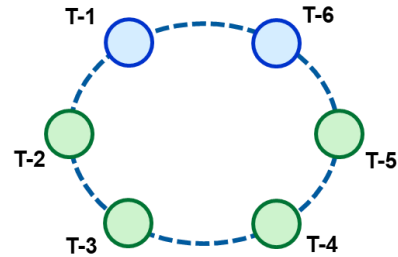
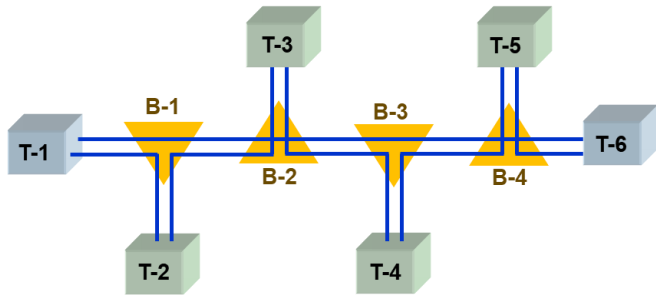
現在の海底ケーブルで広く採用

| | Point-to-point | Ring | Fishbone |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| 可用性 (Availability) | ケーブル破断時にトラフィック全断 | ケーブル破断時も迂回ルートによりトラフィック維持可能 | ケーブル破断時に、他セグメントのトラフィックは維持可能 |
| フレキシビリティ | 伝送容量: 固定 コネクティビティ: 固定 | 伝送容量: 固定 コネクティビティ: 固定 | 伝送容量: 分岐装置(BU)により変更可能 コネクティビティ: 分岐装置(BU)により変更可能 |
| コスト | 基準 | Pont-to-pointのN倍 | Ring型より低コスト |

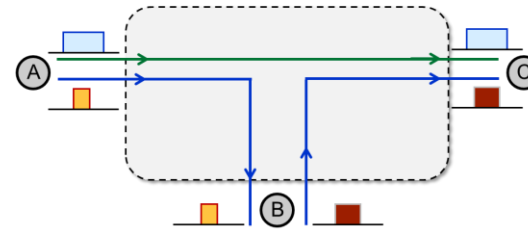
トラフィックトポロジー

ファイバベースのトラフィックトポロジー

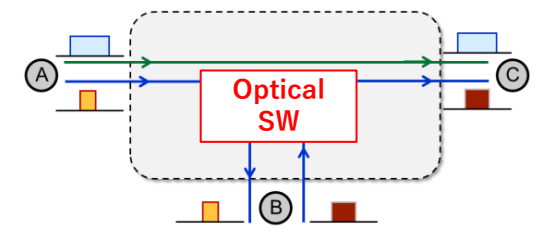
Architecture



ファイバ分岐装置

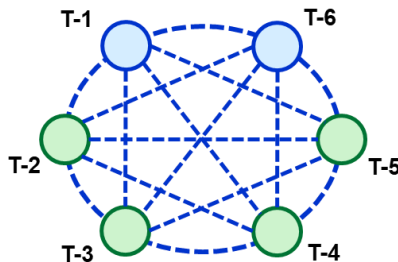
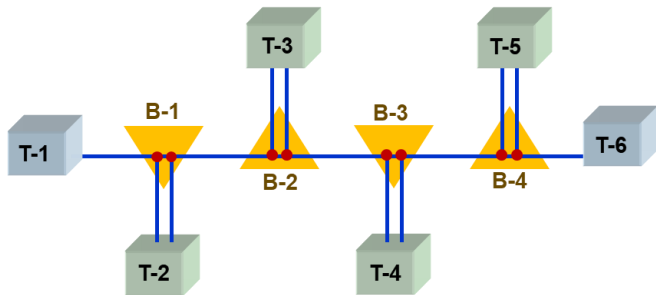


光スイッチ型分岐装置

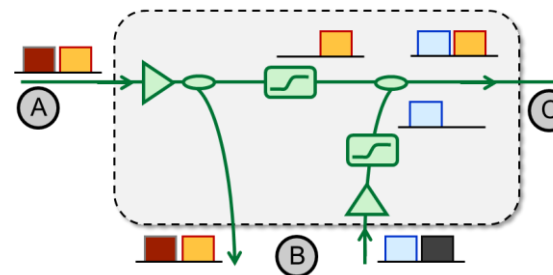


波長帯域ベースのトラフィックトポロジー

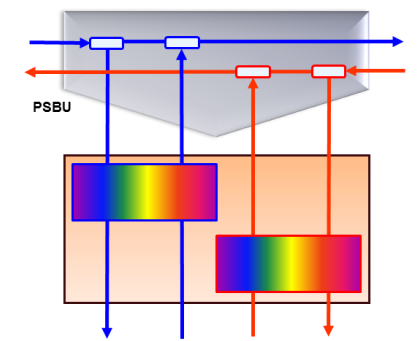
Architecture



固定ROADM分岐装置

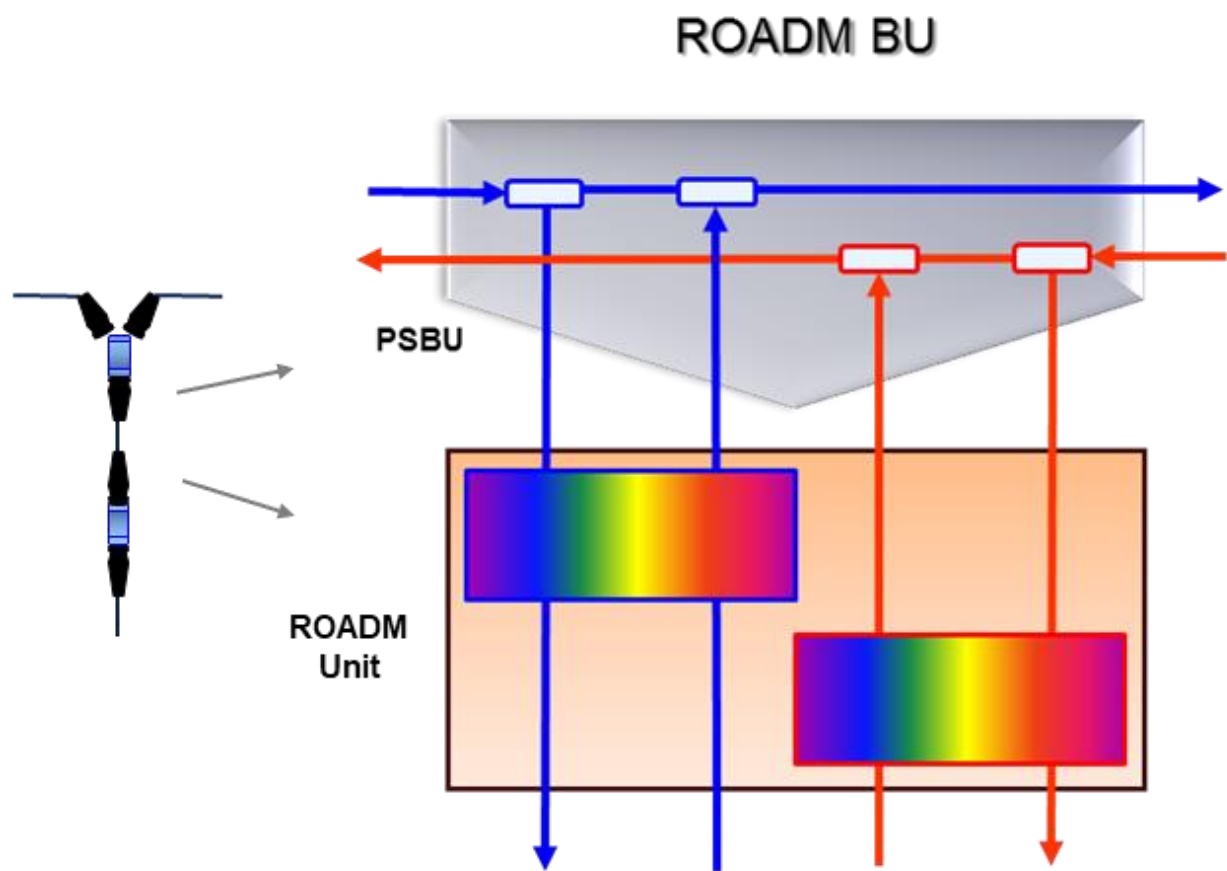


ROADM分岐装置



Reconfigurable OADM (ROADM)

波長選択スイッチ(WSS)による波長Add/Drop比率の切替

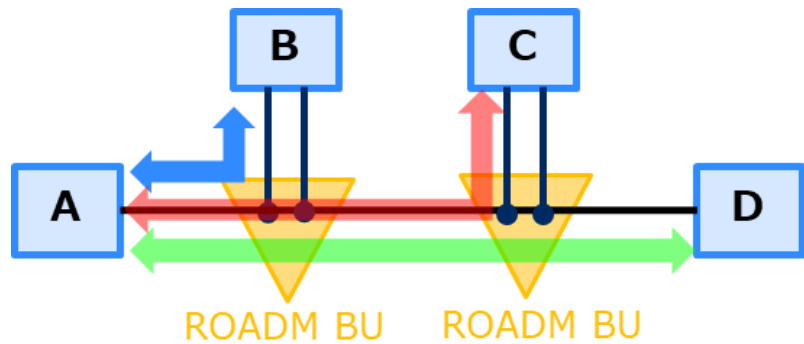


WSS : Wavelength Selective Switching

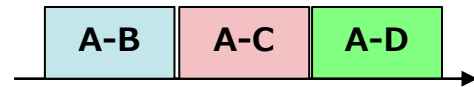
- TrunkとBranchで任意の波長Add/Drop比率に変更可能
- 光スペクトル調整機能
- Add/Drop比率、光スペクトル調整の設定は、陸上端局装置からのコマンド信号により実施

ROADMによる海底ケーブルのフレキシビリティ

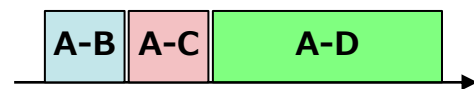
フレキシブルな伝送容量配分



Capacity Allocation1

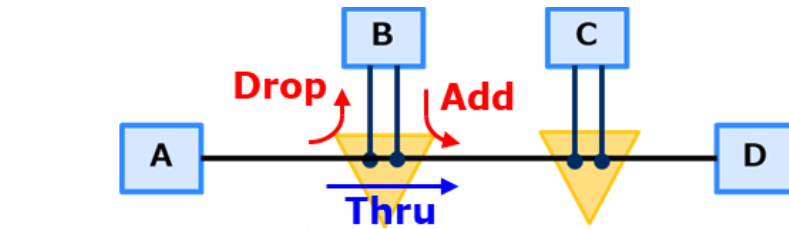


Capacity Allocation2



ROADMのAdd/Drop比率設定変更により、Trunk/Branchの伝送容量をフレキシブルに変更可能

柔軟なコネクティビティ



ROADM BU(B)

100% Trunk Thru

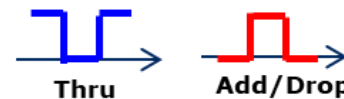


ROADM BU(C)

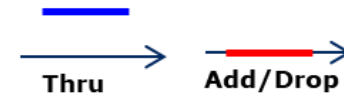
100% Trunk Thru



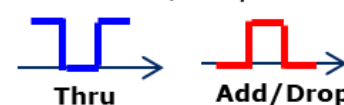
Add/Drop



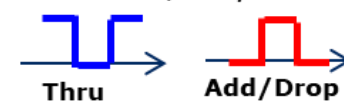
100% Trunk Thru



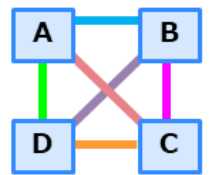
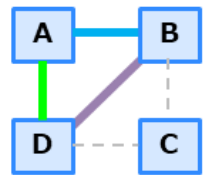
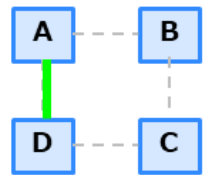
Add/Drop



Add/Drop

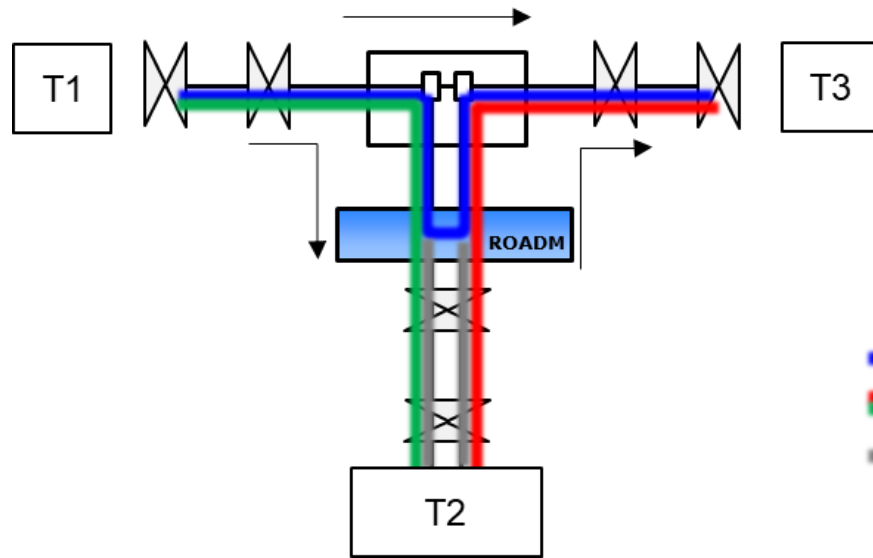


Connectivity



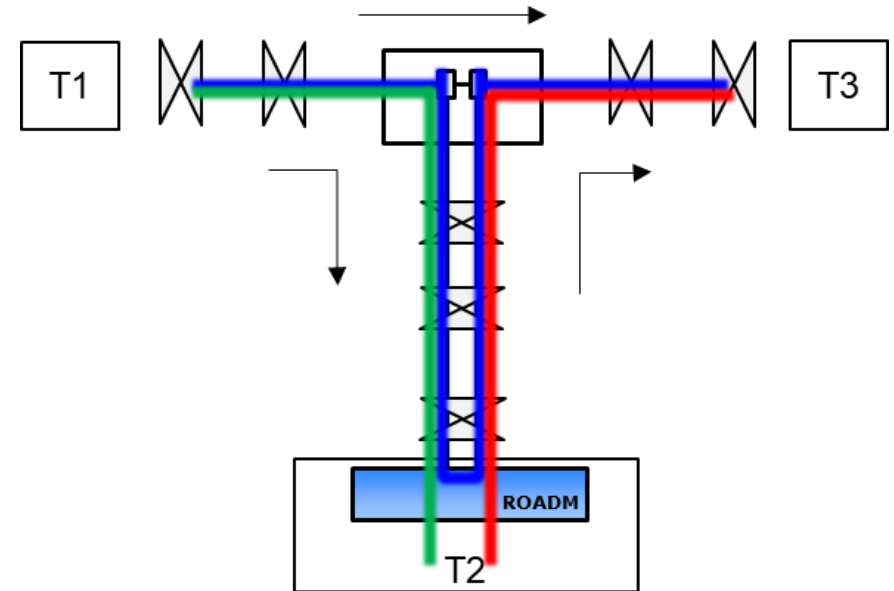
コネクティビティオプション: Wet ROADM vs Dry ROADM

Wet-ROADM



■ Trunk traffic
■ Branch traffic
■ Dummy light

Dry-ROADM



◆ Wet ROADM

- T1 – T3(Trunk)間の遅延最小化
- T1 – T3(Trunk)間のOSNR最大化
- トランク間トラフィックのプライバシー確保

◆ Dry ROADM

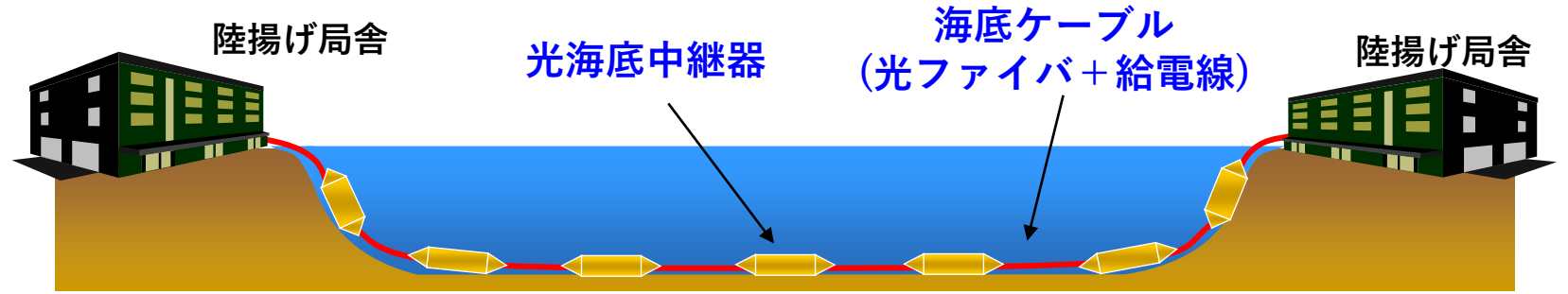
- 機器/設置/保守の低コスト化,
- T1 – T3(Trunk)間の遅延/OSNRは
Wet ROADMと比較してビハインド

3. 海底ケーブルシステムの技術動向

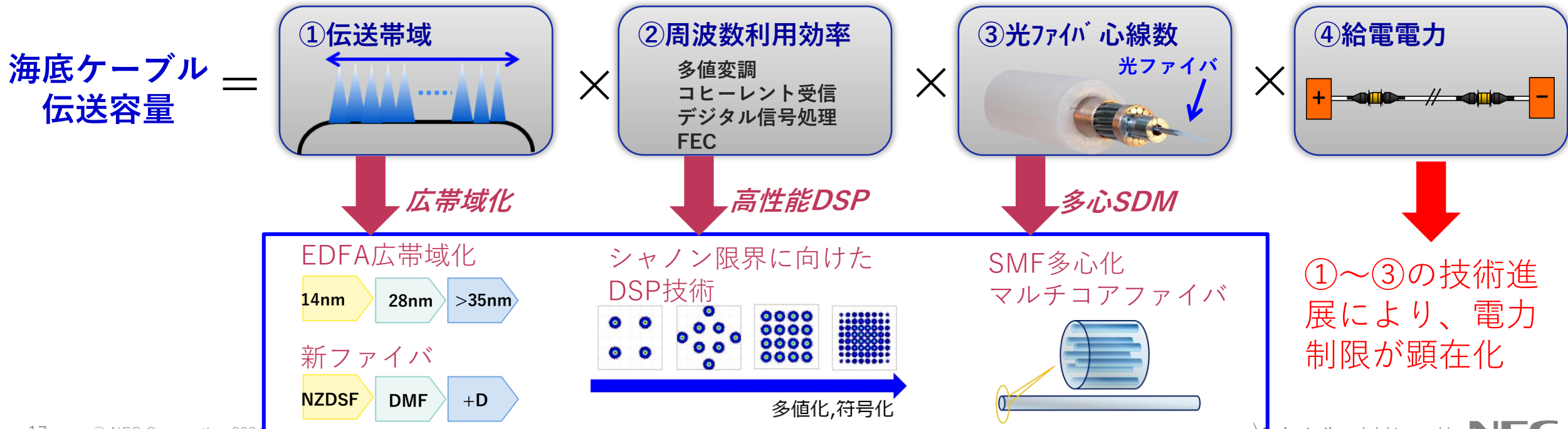
海底ケーブルシステムの伝送容量の主な制限要因

◆ 伝送容量の主な制限要因

- ①伝送帯域制限
- ②周波数利用効率制限
- ③光ファイバ心線数制限
- ④給電電力制限



- これまでは①～③が支配的であったが、技術開発の進展により伝送可能容量が飛躍的に向上
- ④電力が深刻な制限要因として顕在化。



海底ケーブルシステムの大容量化における課題

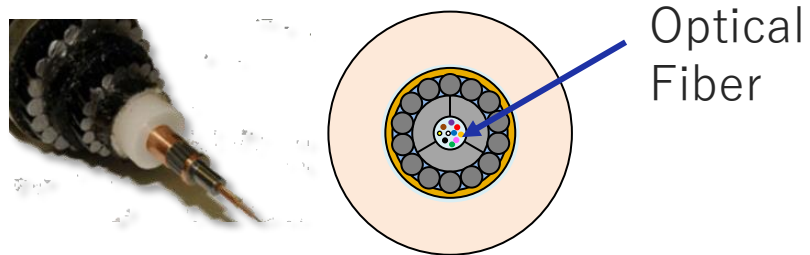
◆ 海底ケーブルシステム特有の技術課題

- **給電電力リミット**：陸上に設置する給電装置(PFE)から海底光中継器(光アンプ)へ供給する電力からくる制限



- **空間リミット**：海底ケーブル・海底光中継器に収容する光ファイバ・光アンプのための実装スペースからくる制限（構造、取り扱い、ケーブル敷設等）

海底ケーブル構造上のファイバ数制限

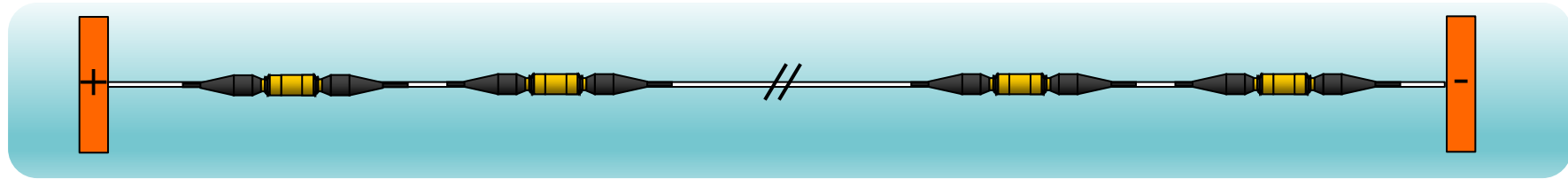


海底光中継器筐体内の光アンプ数制限



給電能力リミット下でのケーブル伝送容量最大化

- ◆ 給電装置の給電能力の範囲内で、海底ケーブルの伝送容量を最大化



- ◆ 給電制限化で伝送容量を最大化するには、SDM技術が有効
 - Capacity/fp(SNR/fp) から Capacity/cable(Fiber pair/cable)へ

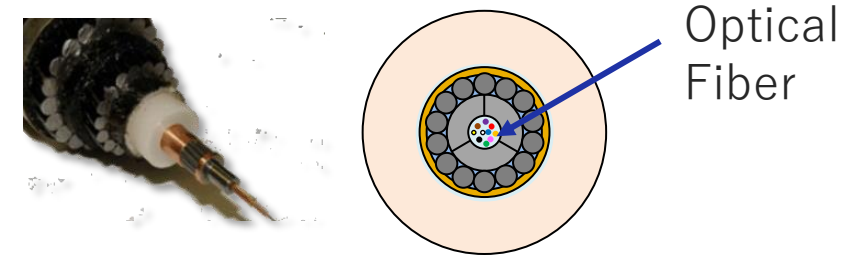
$$\text{ケーブル伝送容量} = 2 \times B \times \underline{N_{FP}} \times \log_2(1 + \underline{SNR})$$

FP数を2倍にするとCapacityは2倍
SNRを2倍にするとCapacityは1.2-1.3倍

空間リミットへの対策 (マルチコアファイバ)

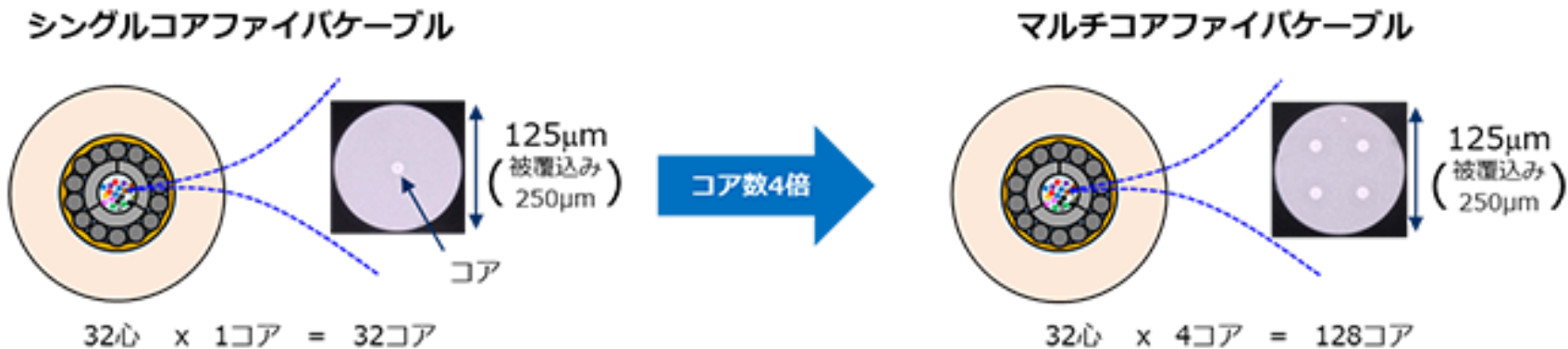
◆ 海底ケーブル特有の制限項目：空間リミット

- **空間リミット**：海底ケーブル構造、製造、取扱い、敷設 (ケーブル敷設船のスペース)等の制約に起因
- 現在、24FPケーブルが商用化されているが、現行の光ファイバ前提での更なる大幅なファイバ心数増加は困難

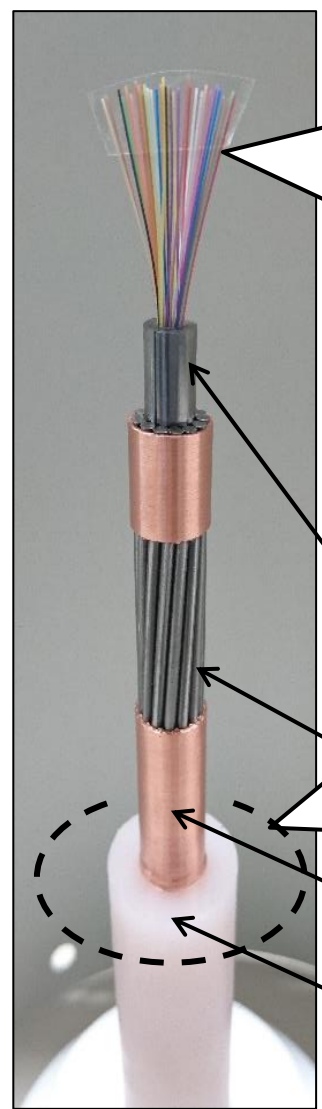


◆ **マルチコアファイバ**：現在の海底ケーブル構造を維持したまま、光伝送路数(コア数)を増加することが可能

- マルチコアファイバがシングルコアファイバと同等な伝送品質を実現できれば、海底ケーブル大容量化のための空間リミットを克服することが可能。



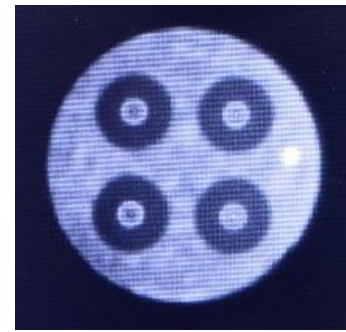
非結合型マルチコアファイバケーブルの試作



OCC SC520 (LW)

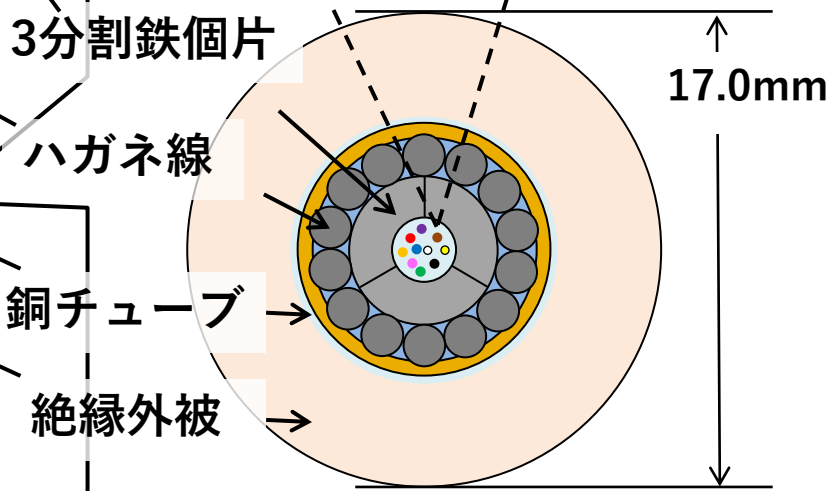
非結合型4コアファイバ

| | |
|------------------|--------------------|
| ファイバ外径 (被覆込み) | 250 μm |
| クラッド径 | 125 μm |
| コアピッチ | 45 μm |
| 実効断面積 | 77 μm ² |
| 光損失 (1550 nm) | 0.177 dB/km |
| 波長分散 (1550 nm) | 21.7 ps/nm/km |
| 偏波モード分散 | 0.058 ps/√km |
| 総コア間クロストーク(コア平均) | -62.7 dB/km |



SC520 Light Weightケーブル

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 外径 | 17 mm | |
| ケーブル長 | 15.2 km | |
| 心数 | 4-core UC-MCF | 8 |
| | SMF | 24 |
| コア数 | (8 × 4 + 24 × 1) 56 | |



非結合型4コアファイバのケーブル化前後の特性比較

- ◆ 光ファイバがケーブル化後にどのような特性を示すかを把握することはシステム設計において需要。
- ◆ 試作した非結合型4コアファイバの特性をケーブル化前後で比較し、性能差を確認した。

非結合型4コアファイバ ケーブル化前後性能差

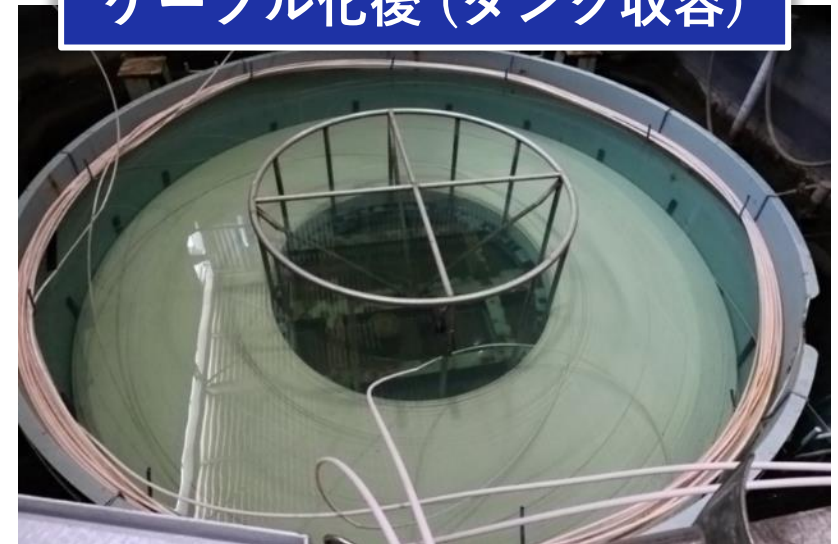
| | |
|-------------------|--------------------------------|
| 光損失 (1550 nm) | 0.0001 dB/km |
| 波長分散 (1550 nm) | -0.009 ps/nm/km |
| 波長分散スロープ (1550nm) | -0.0085 ps/nm ² /km |
| 総コア間クロストーク | 1.45 dB |

- ◆ **光損失、波長分散**については**大きな差は見られなかった**。
- ◆ **コア間クロストーク**については、ファイバの曲げ径が大きくなることでコア間の実効的な屈折率差に変化が生じた結果、変動が見られたものと考えられる。

ケーブル化前 (ボビン巻)

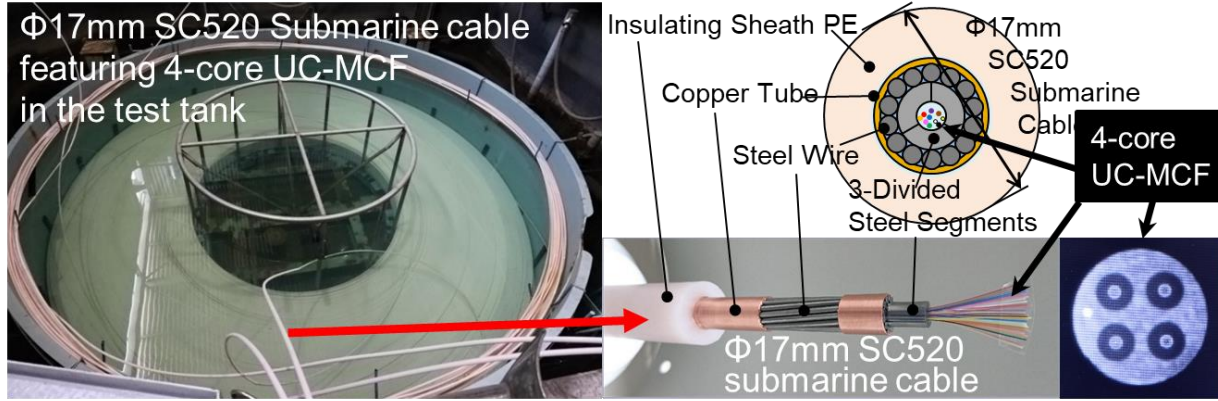


ケーブル化後 (タンク収容)

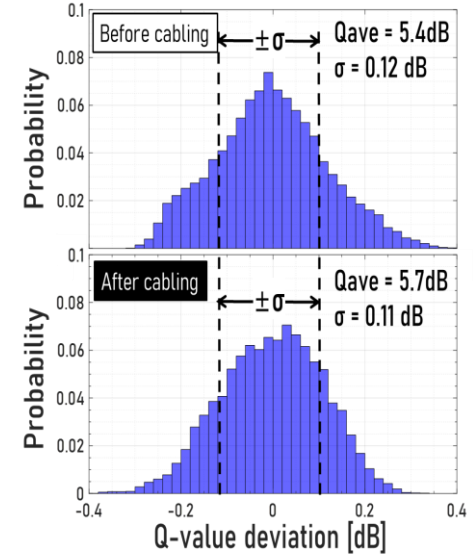
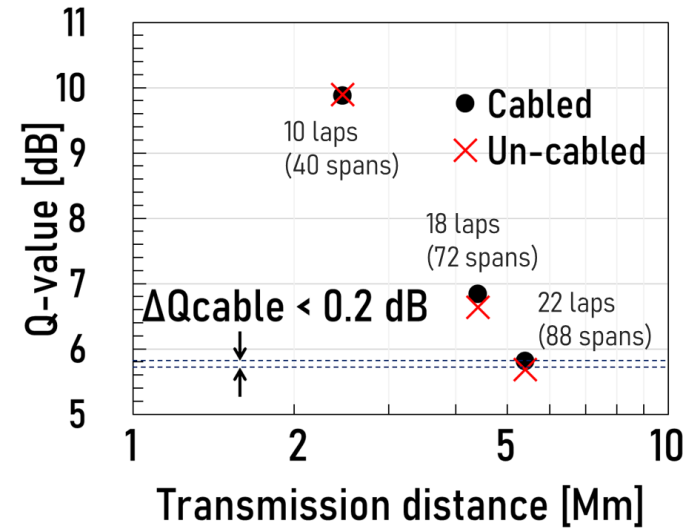


マルチコア試作ケーブルの伝送性能

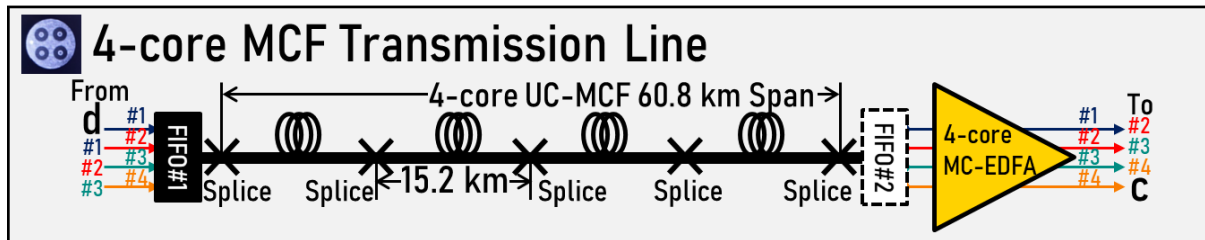
非結合4コアMCFケーブルプロトタイプ



伝送評価結果



伝送試験系



開発した試作ケーブルを用いて5350km伝送試験を実施し、良好な伝送特性を検証

マルチコアファイバを適用した海底ケーブルシステム例

プロジェクトへの適用開始

TPU Cable System

台湾・フィリピン・カリフォルニアを結ぶ太平洋横断ケーブルにMCFを適用



<https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/delivering-multi-core-fiber-technology-in-subsea-cables?hl=en>

6 © NEC Corporation 2024



NEC (日本電気株式会社)

いま・@

\Googleの海底ケーブル🌐を敷設します！

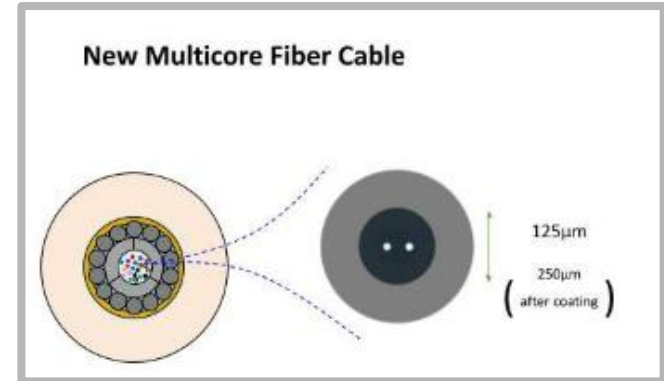
<https://cloud.google.com/blog/topics/inside-google-cloud/whats-new-google-cloud?hl=en>

#Google が発表したアメリカとアジアを結ぶ #海底ケーブル TPU、実は NECが敷設しています！

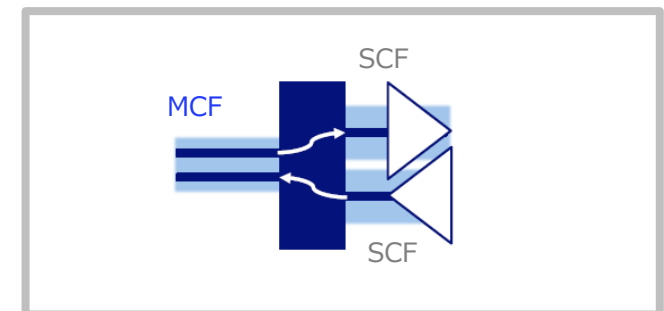
カリフォルニアと台湾・フィリピンを結ぶTPUは2025年に開通予定。この地域の伝送容量の拡大とGoogleサービスの品質向上が期待されます👍

いいね! コメントする シェアする

非結合型2コアファイバ適用



FIFO(Fan in/out)を介して従来の海底装置(シングルコア)と接続



マルチコアファイバの融着技術

◆ マルチコアファイバ融着機的主要要件

■ ファイバ回転調整機能(θ 軸)

■ 低接続損失

< 0.1 dBの接続損失を実現 [2]

■ コアの識別

2つの候補

1) **Side View:**

Pros: コア調整時間が短い (150秒 [2])

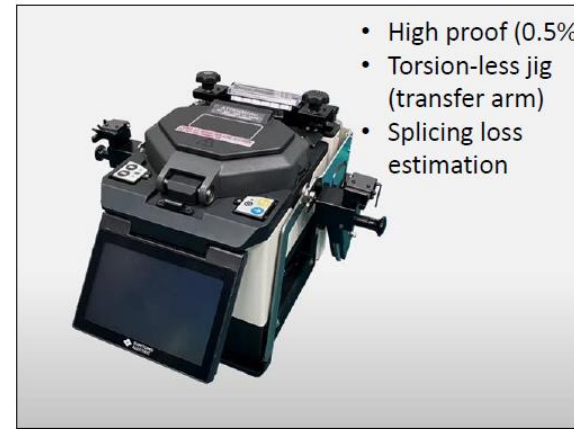
Cons: 自動調整によるコアの誤識別の可能性

2) **End View:**

Pros: コア識別性が高い

Cons: コア調整時間が長い (300秒: 試作機実績)

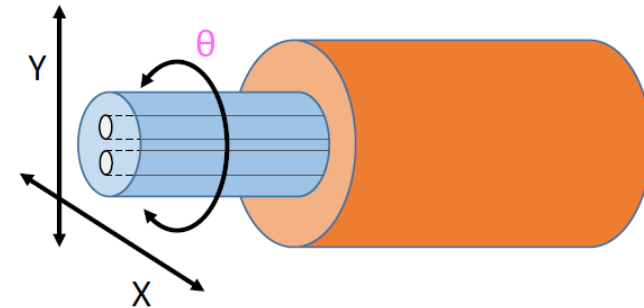
(参考) シングルコアファイバ用融着機



Onboard Splicer
(By courtesy of SEI)



FITEL® S185 Fusion Splicers



[2] T. Fujii, et al., OFC2023, Th2A.10

マルチコア海底光中継器の課題

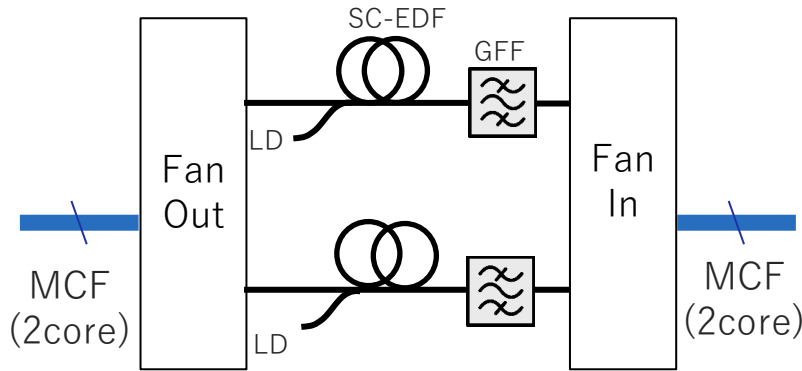
◆ 海底光中継器の筐体サイズ制限

- **SC-EDFA+FIFO** : MCFケーブル対応海底光増幅方式に適用
ただし、光アンプに必要な部品点数がコア数に比例して増大(実装制限)
- **大容量MCF海底光中継器には、部品の小型化、高集積化、高密度光増幅方式の確立が不可欠**

Submarine Repeater

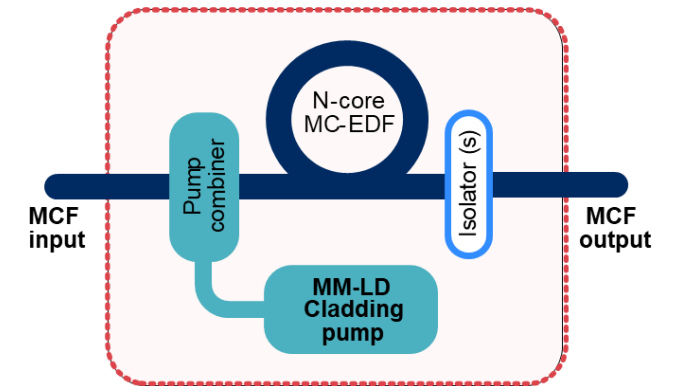


シングルコア光アンプ + FIFO



LD : Laser Diode
SC-EDF : Single-Core Erbium Doped Fiber
MCF : Multi Core Fiber
GFF : Gain Flattening Filter

マルチコア光アンプ



4. まとめ

まとめ

- ◆ 海底ケーブルは国際通信を支える重要なネットワークインフラであり、更なる大容量化が期待されている
- ◆ ROADM技術によりネットワーク構成もフレキシブルなっている
- ◆ 海底ケーブル大容量化への制限要因に対して、マルチコアファイバが有力候補
- ◆ 海底ケーブルにマルチコアファイバの適用が開始され、普及にむけて今後の取り組みが必要

MCF量産化技術、高密度・高効率増幅器技術、ファイバ融着接続技術の確立、標準化等

\Orchestrating a brighter world

NEC