

長距離光海底ケーブル通信システムの研究開発： 背景、経緯、現状、将来に向けて

秋葉 重幸

元(株)KDDI研究所 代表取締役所長

内容

☆ 最近の話題

☆ 海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへ

☆ 光海底ケーブルの特徴

☆ 長距離伝送システムの研究開発:

- ・光再生中継から光増幅、そして波長多重システムへ

☆ 最新の光海底ケーブル状況:

- ・デジタルコヒーレント、多芯化・空間多重システムへ
- ・グーグル・メタ(FB)の台頭

☆ まとめ

内容

☆ 最近の話題

☆ 海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへー

☆ 光海底ケーブルの特徴

☆ 長距離伝送システムの研究開発：

- ・光再生中継から光増幅、そして波長多重システムへ

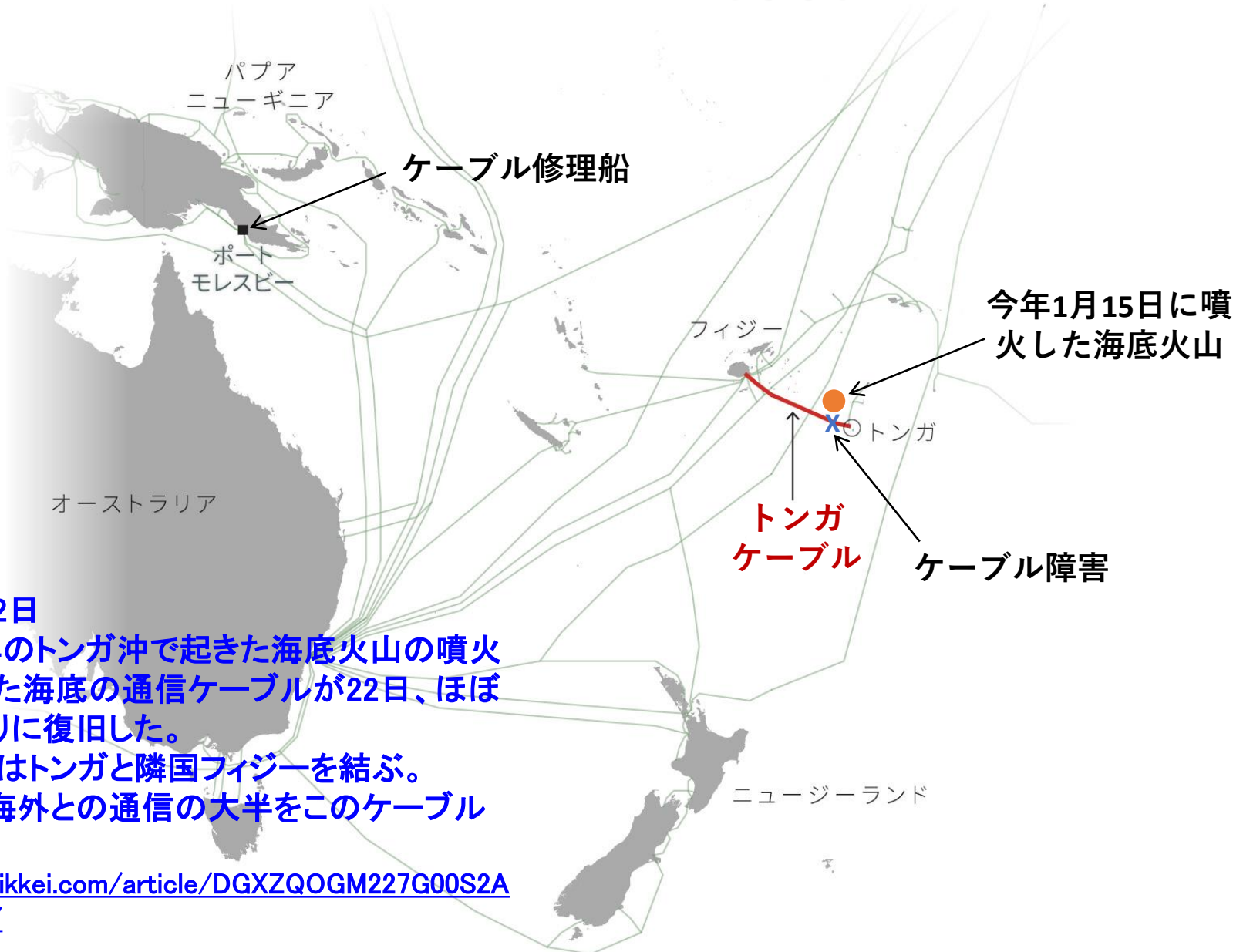
☆ 最新の光海底ケーブル状況：

- ・デジタルコヒーレント、多芯化・空間多重システムへ

- ・グーグル・メタ(FB)の台頭

☆ まとめ

トンガケーブルの障害



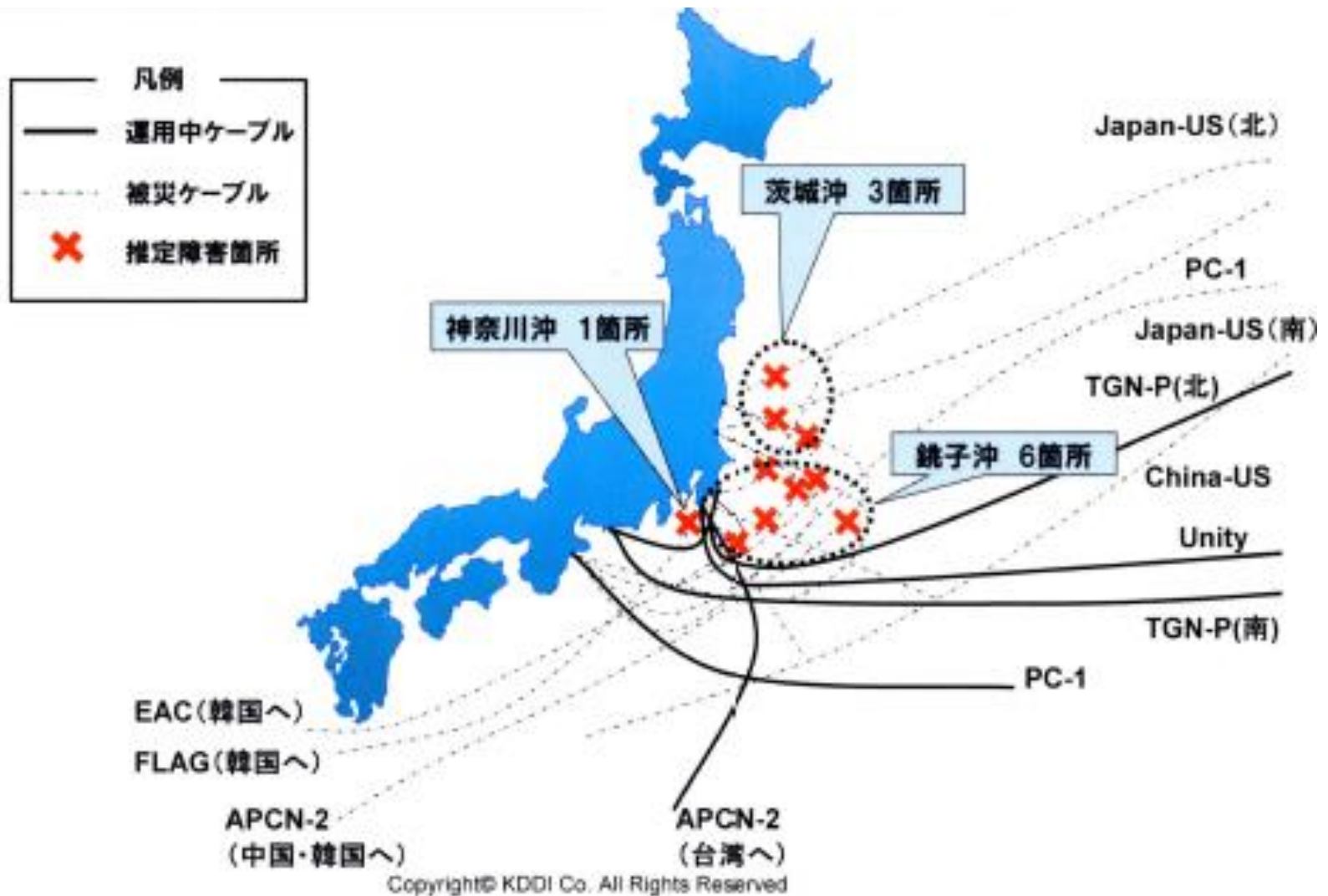
2022年2月22日

- ✓ 南太平洋のトンガ沖で起きた海底火山の噴火で損傷した海底の通信ケーブルが22日、ほぼ5週間ぶりに復旧した。
- ✓ ケーブルはトンガと隣国フィジーを結ぶ。
- ✓ トンガは海外との通信の大半をこのケーブルに頼る。

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGM227G00S2A220C2000000/>

<https://jp.reuters.com/article/tonga-graphic-idJPKBN2JU05Z>

東日本大震災での光海底ケーブル障害



デジタル田園都市スーパーハイウェイ

- ✓ 運用開始：1999年4月1日
- ✓ 日本一周幹線：5,800km
- ✓ 支線：延べ4,500km
- ✓ 陸揚局数：17
- ✓ 伝送容量：100Gbps



Japan Information Highway



岸田文雄首相は12月6日、第207臨時国会の所信表明演説で、**日本を周回する海底ケーブル「デジタル田園都市スーパーハイウェイ」**を今後3年程度で完成させると表明した。日本中どこにいても高速大容量の通信サービスを使えるようにする。

内容

☆ 最近の話題

☆ 海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへ

☆ 光海底ケーブルの特徴

☆ 長距離伝送システムの研究開発:

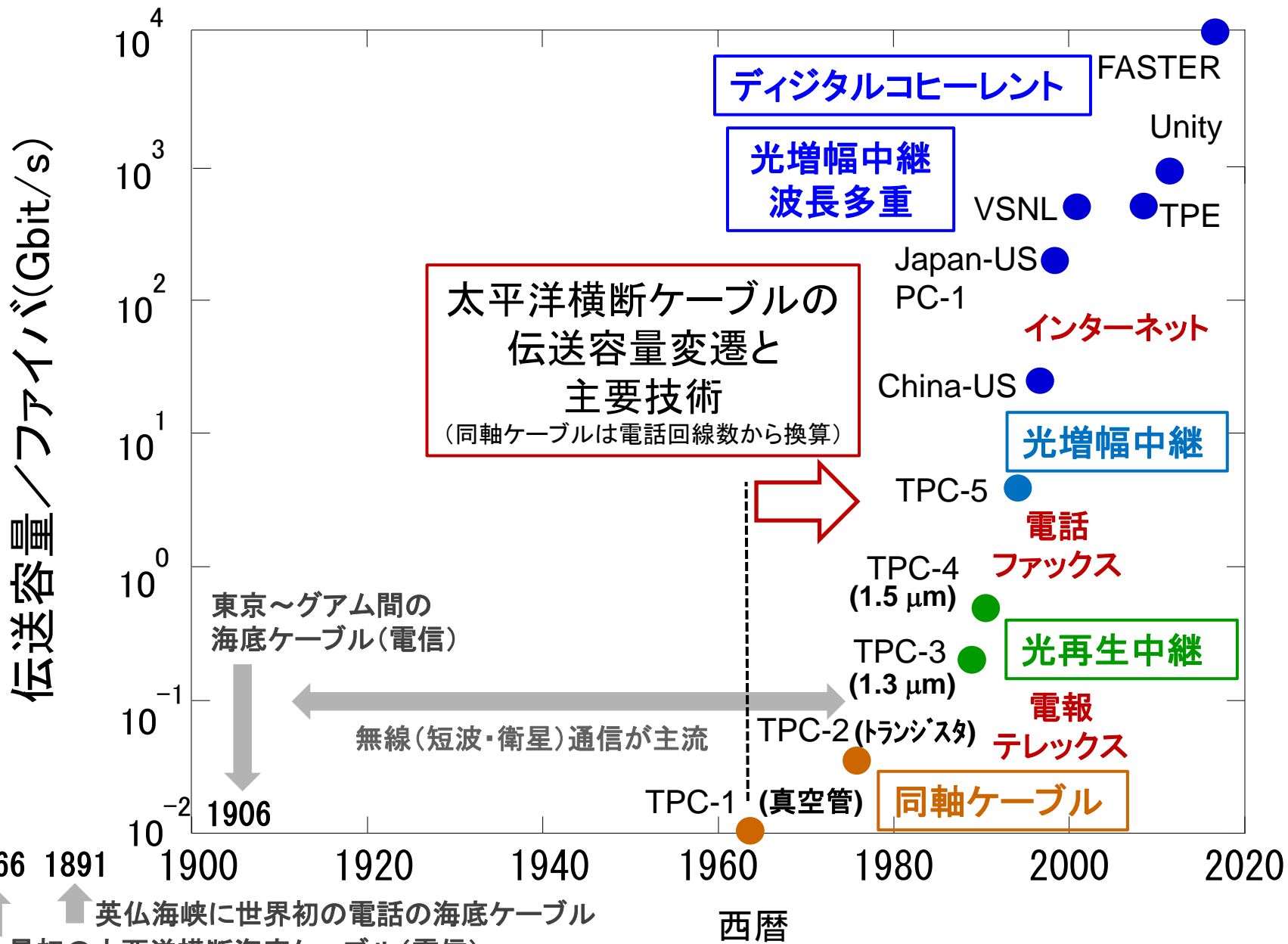
- ・光再生中継から光増幅、そして波長多重システムへ

☆ 最新の光海底ケーブル状況:

- ・デジタルコヒーレント、多芯化・空間多重システムへ
- ・グーグル・メタ(FB)の台頭

☆ まとめ

海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへー



光ケーブルの総延長: およそ地球30周分

—2019年12月のTIME&SPACE誌(KDDI発行)より—

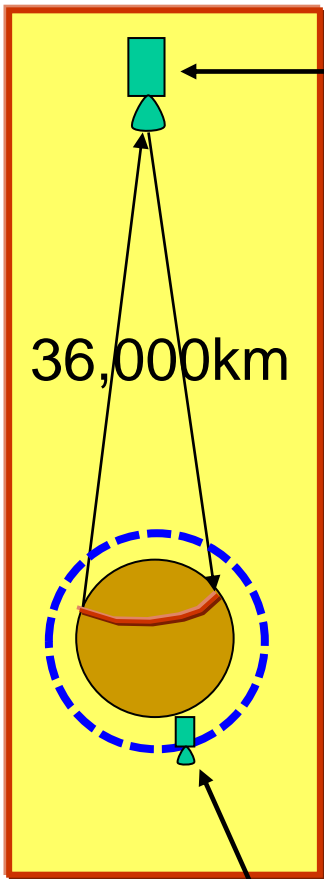


TIME&SPACE by **KDDI**

<https://time-space.kddi.com/au-kddi/20191226/2802>

光海底ケーブル通信と衛星通信との比較

実際のスケール



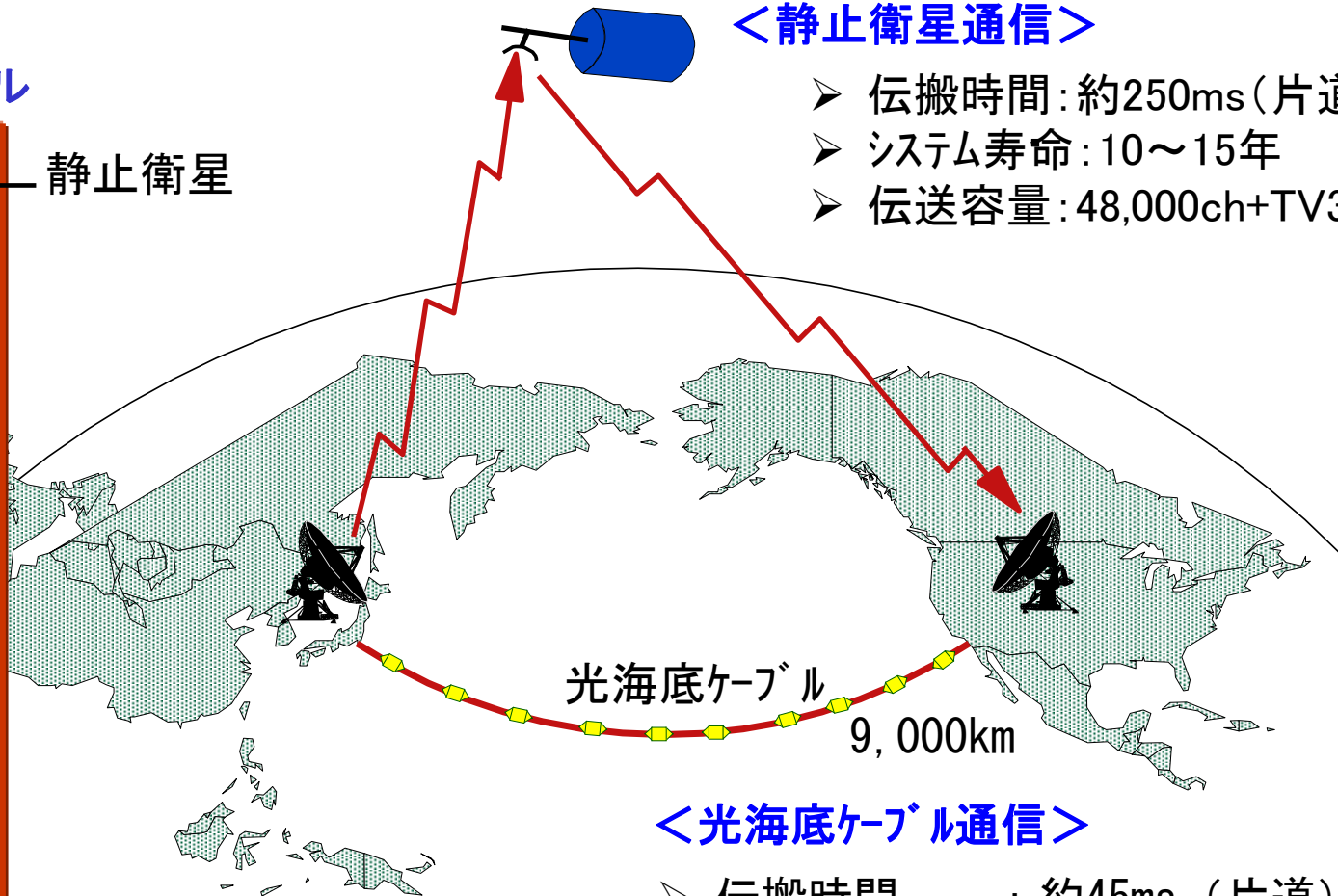
静止衛星

36,000km

低軌道衛星 (SpaceX社のStarlinkなど)

<静止衛星通信>

- 伝搬時間: 約250ms (片道)
- システム寿命: 10~15年
- 伝送容量: 48,000ch+TV3ch



光海底ケーブル

9,000km

<光海底ケーブル通信>

- 伝搬時間 : 約45ms (片道)
- システム寿命 : 25年
- 伝送容量 (例) : 80,000,000ch
(10Gb/s, 128波長, 4FPシステム)

内容

☆ 最近の話題

☆ 海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへー

☆ 光海底ケーブルの特徴

☆ 長距離伝送システムの研究開発：

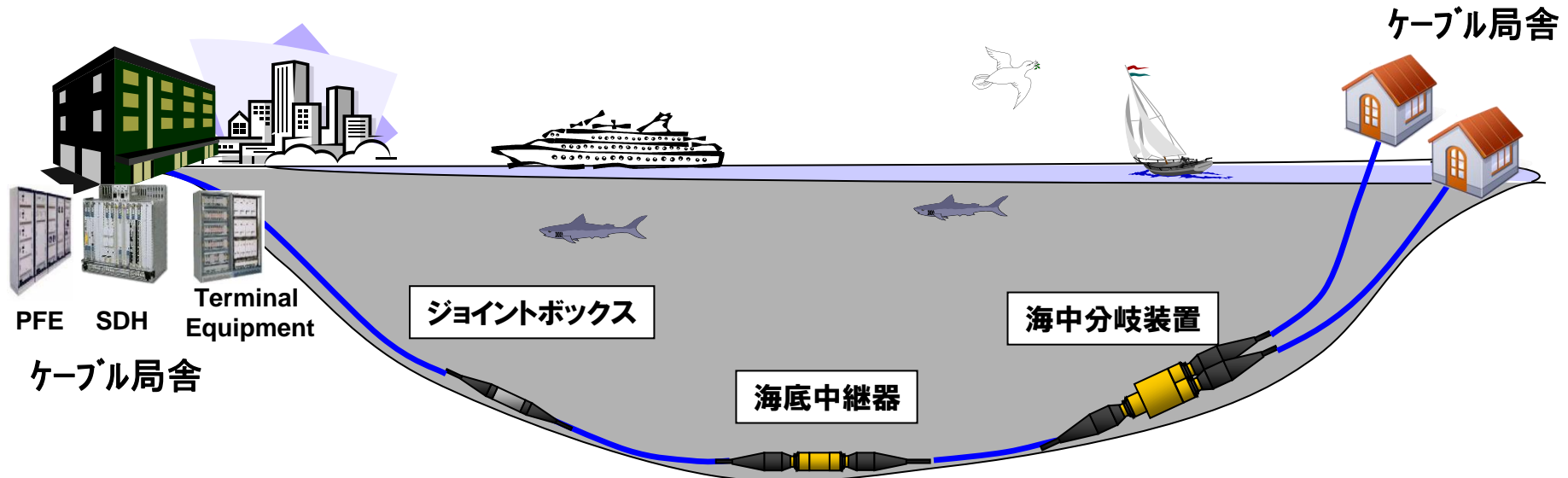
- ・光再生中継から光増幅、そして波長多重システムへ

☆ 最新の光海底ケーブル状況：

- ・デジタルコヒーレント、多芯化・空間多重システムへ
- ・グーグル・メタ(FB)の台頭

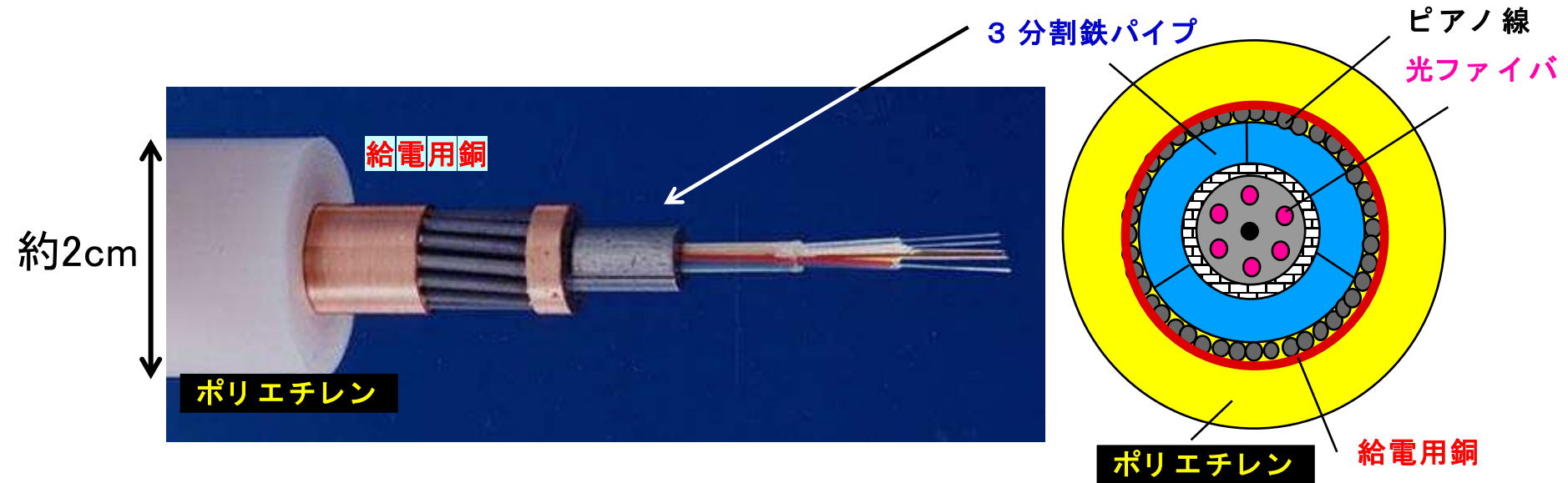
☆ まとめ

光海底ケーブルシステムの特徴



- ◆ 圧力：800気圧（水深8,000m）、張力：7～8t
 - ・耐圧ケーブル・中継器、耐張力ケーブル
- ◆ 超高信頼性
- ◆ 特性劣化要因（雑音・波長分散・偏波分散・非線形）の累積
 - ・長距離光増幅システムで顕著

光海底ケーブルの内部構造



◆ 給電: 1万V以上

- ・陸揚げ局から一定電流を供給
- ・ケーブルの直流抵抗: $0.7 \Omega / \text{km}$ (給電導体: 銅)
- ・(9,000kmシステムでは $6,300 \Omega$ 、1A給電の場合、電圧降下=6,300V)

◆ ファイバの心線数: 10芯程度

内容

☆ 最近の話題

☆ 海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへー

☆ 光海底ケーブルの特徴

☆ 長距離伝送システムの研究開発：

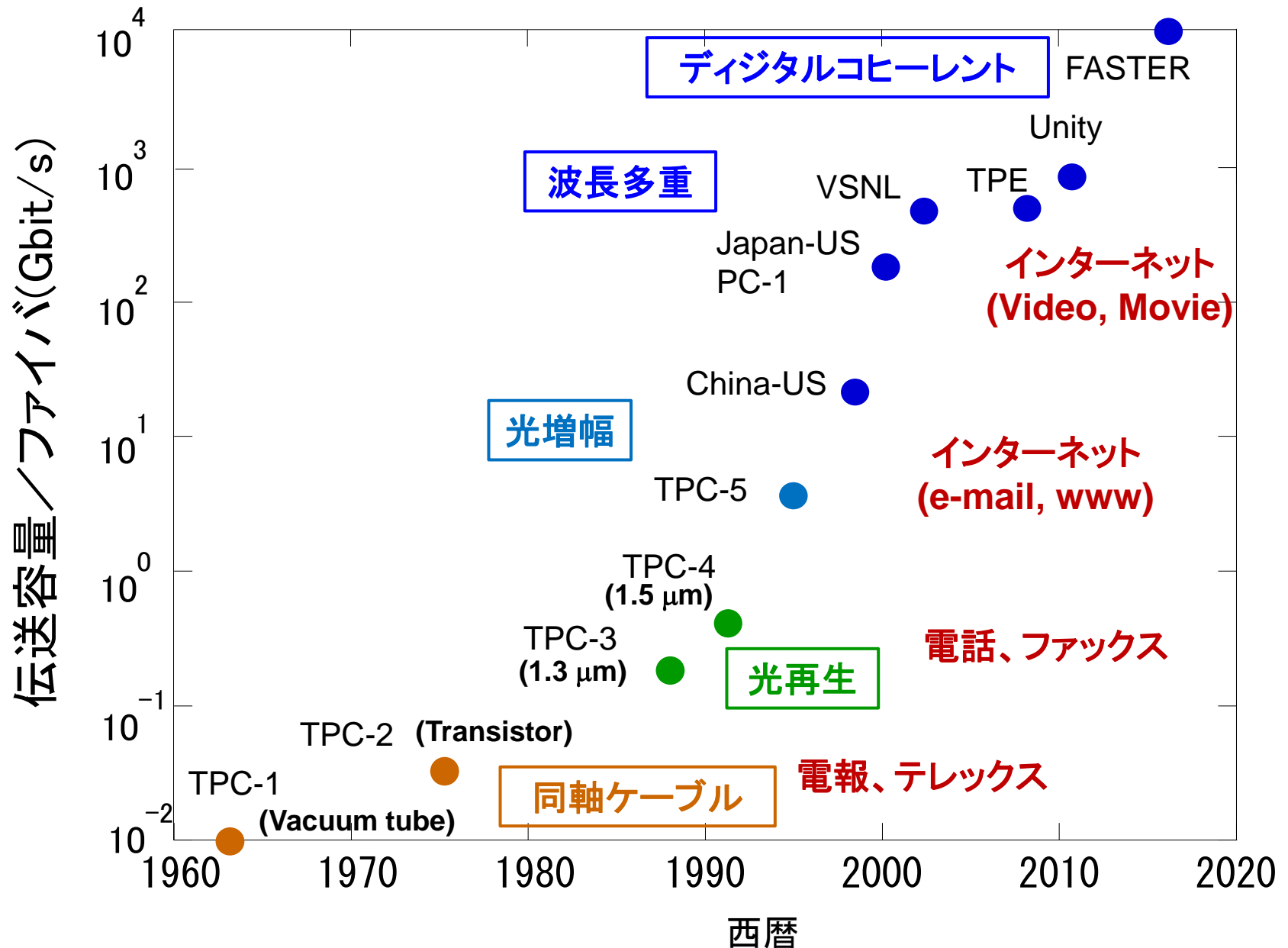
- ・光再生中継から光増幅、そして波長多重システムへ

☆ 最新の光海底ケーブル状況：

- ・デジタルコヒーレント、多芯化・空間多重システムへ
- ・グーグル・メタ(FB)の台頭

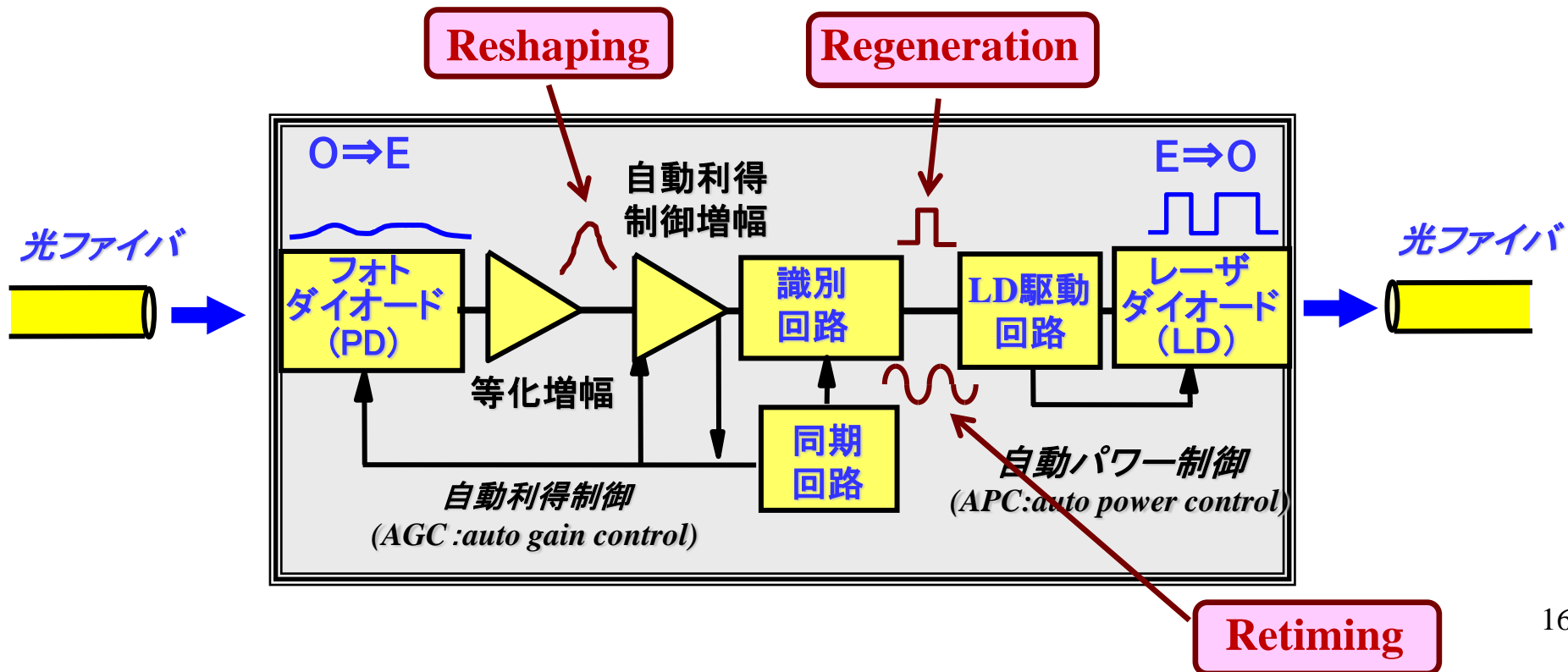
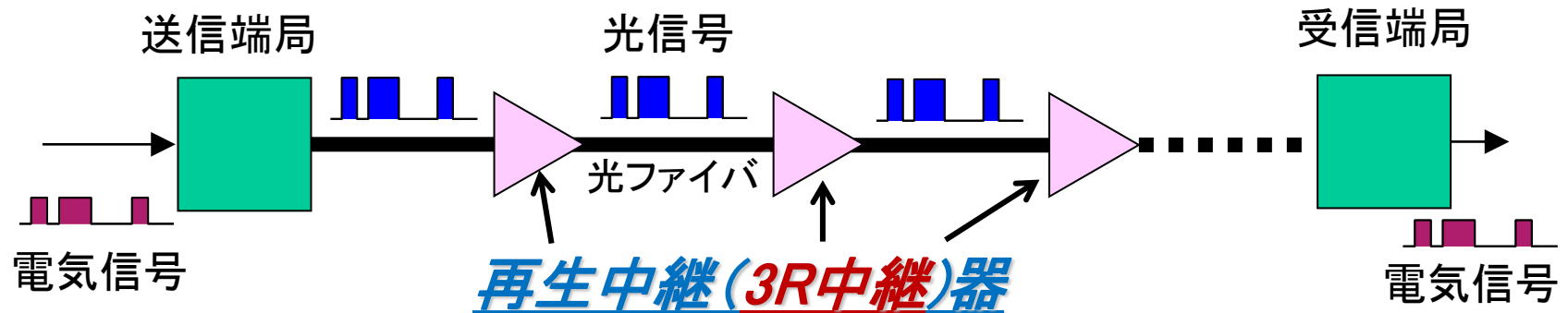
☆ まとめ

太平洋横断海底ケーブルの伝送容量

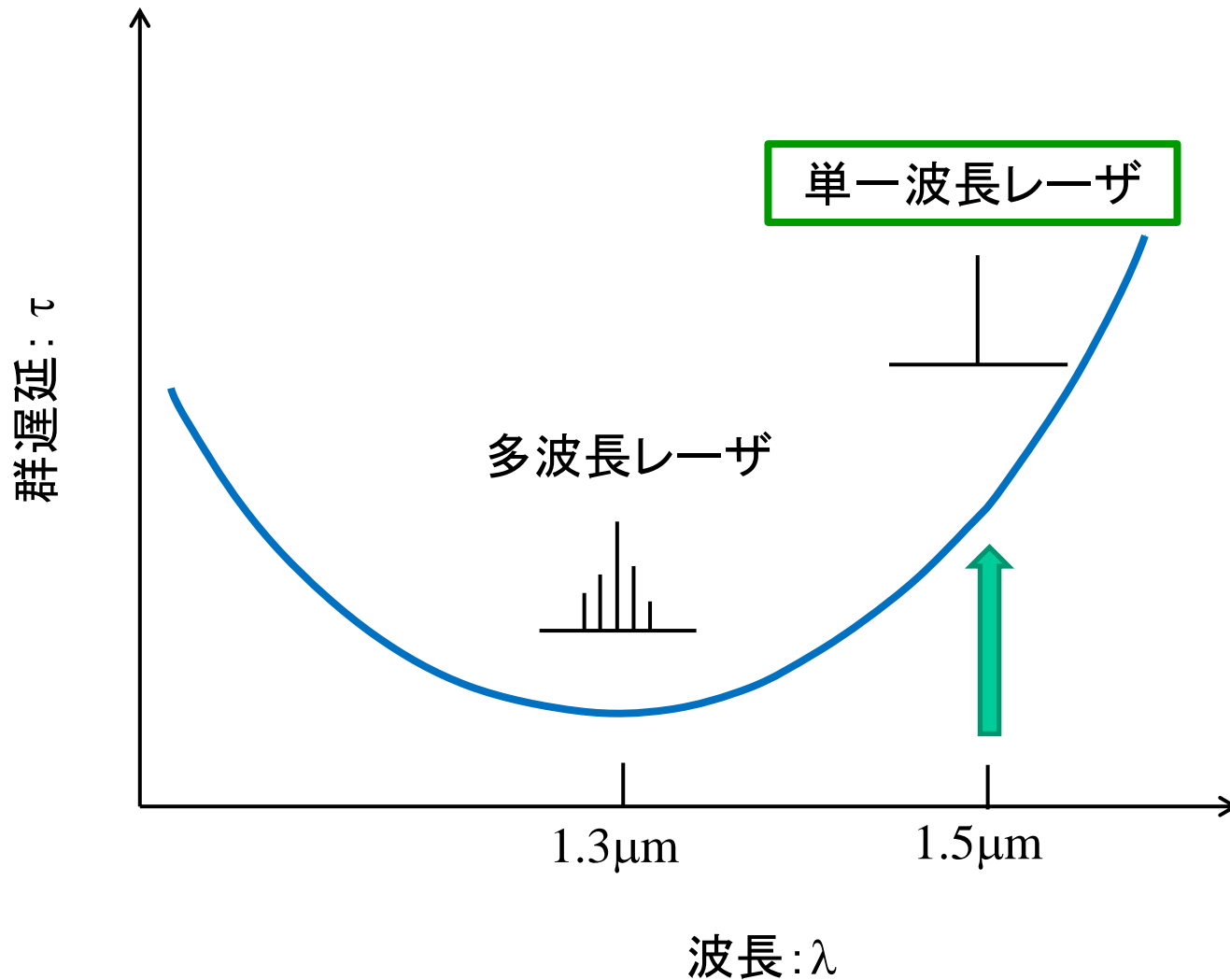


再生中継(3R中継)器

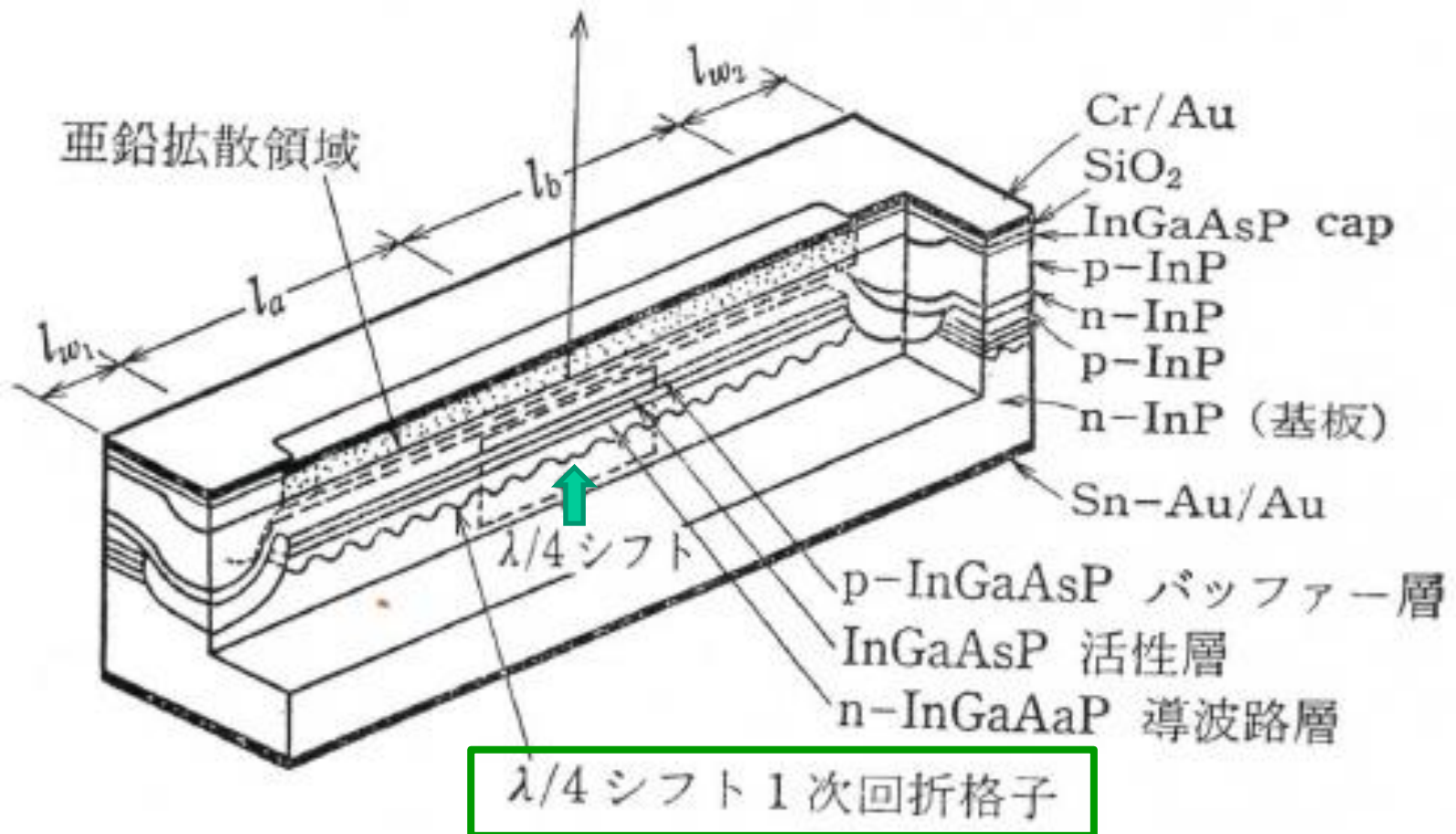
OEO(光・電気・光)変換



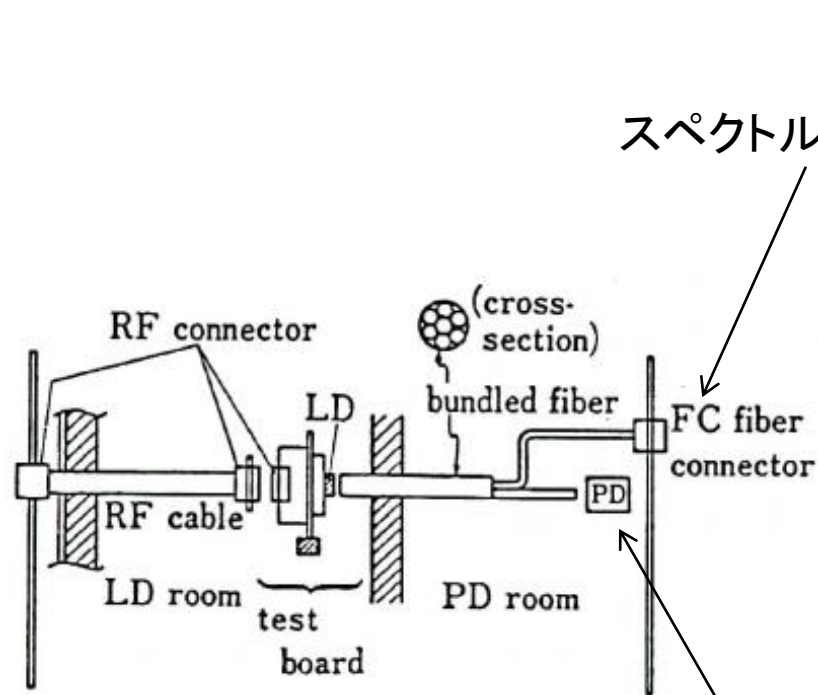
標準的な単一モード光ファイバの群遅延特性



1.55 μm 帯単一波長半導体レーザ

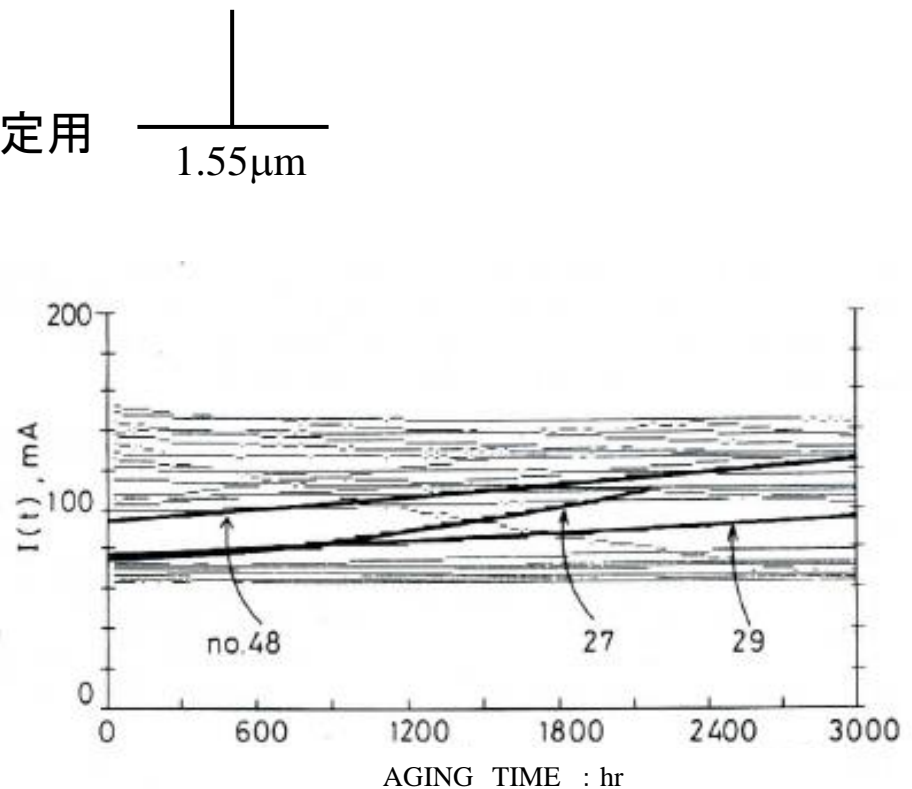


信頼性試験: 安定な出力特性 (独自の寿命試験装置)



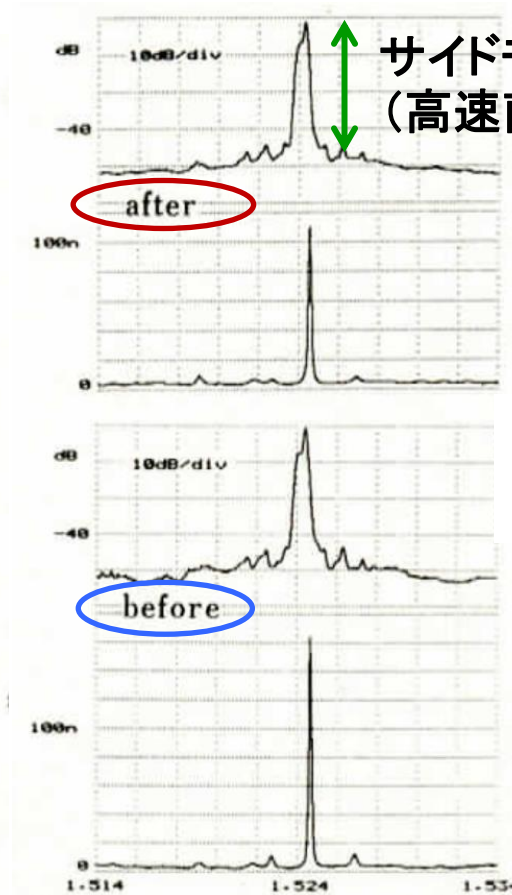
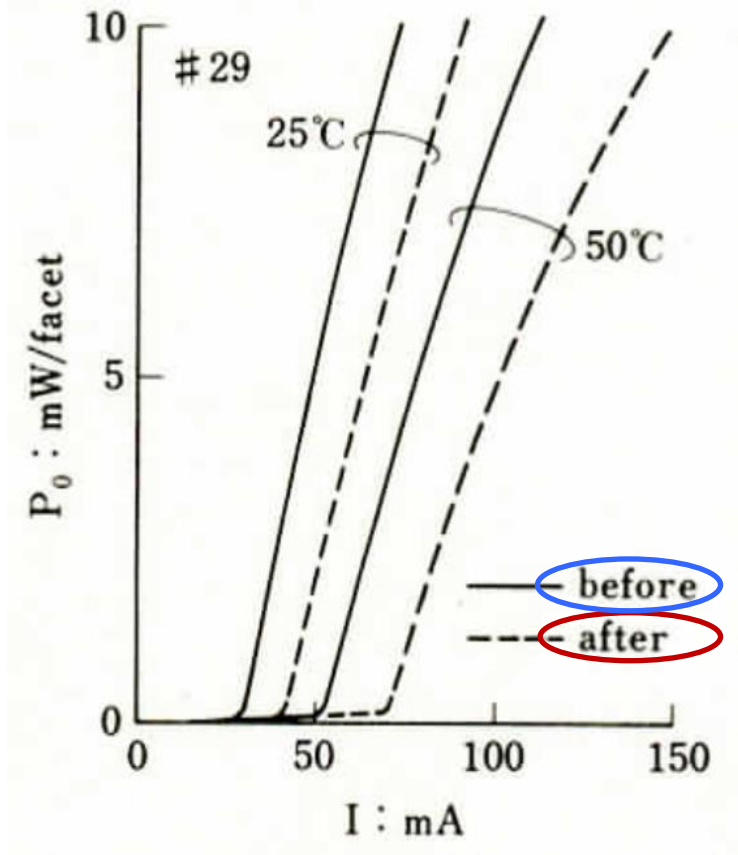
出力とスペクトルを同時に測定
するための特殊な寿命試験装置

出力測定用
フォトダイオード



光出力を一定に保った時の電流値

信頼性試験: 安定な単一波長特性(I)

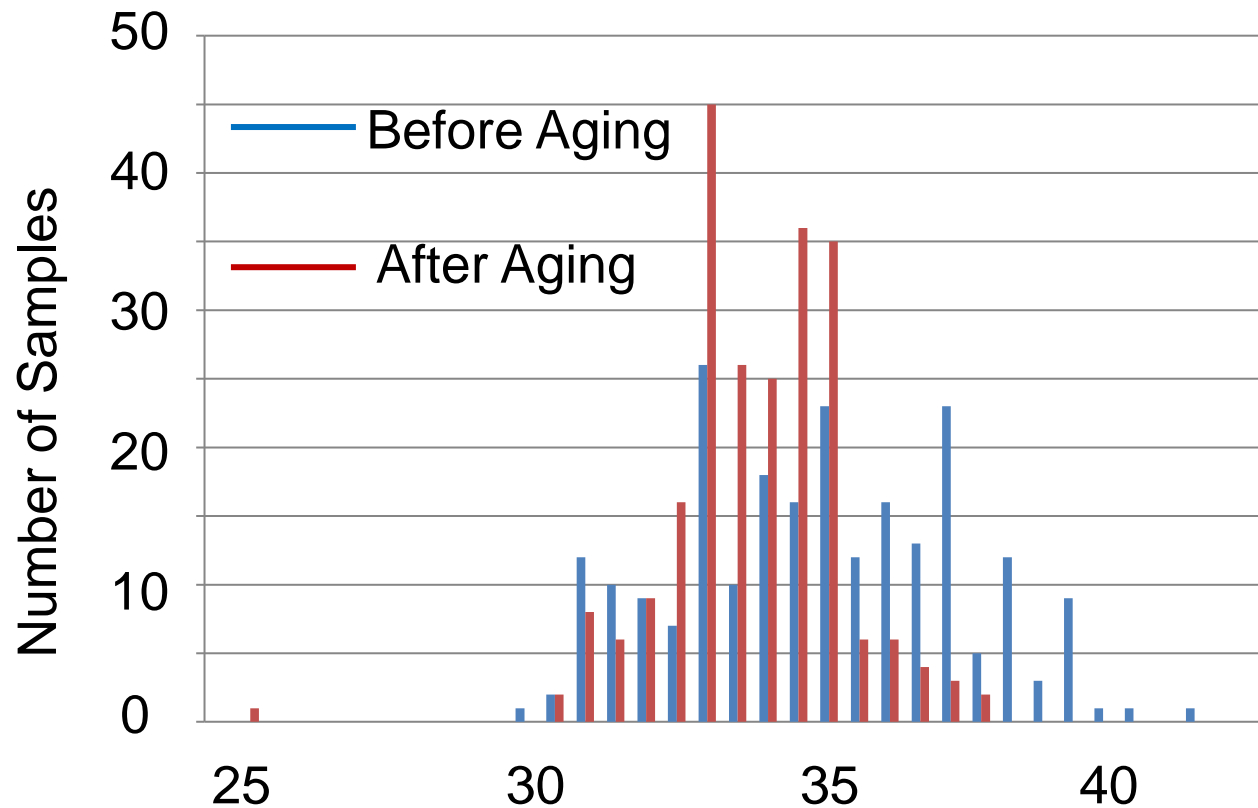


サイドモード抑圧比
(高速直接変調時)

劣化しても
単一波長特性を維持

上: 高速直接変調時
下: 発振閾値以下

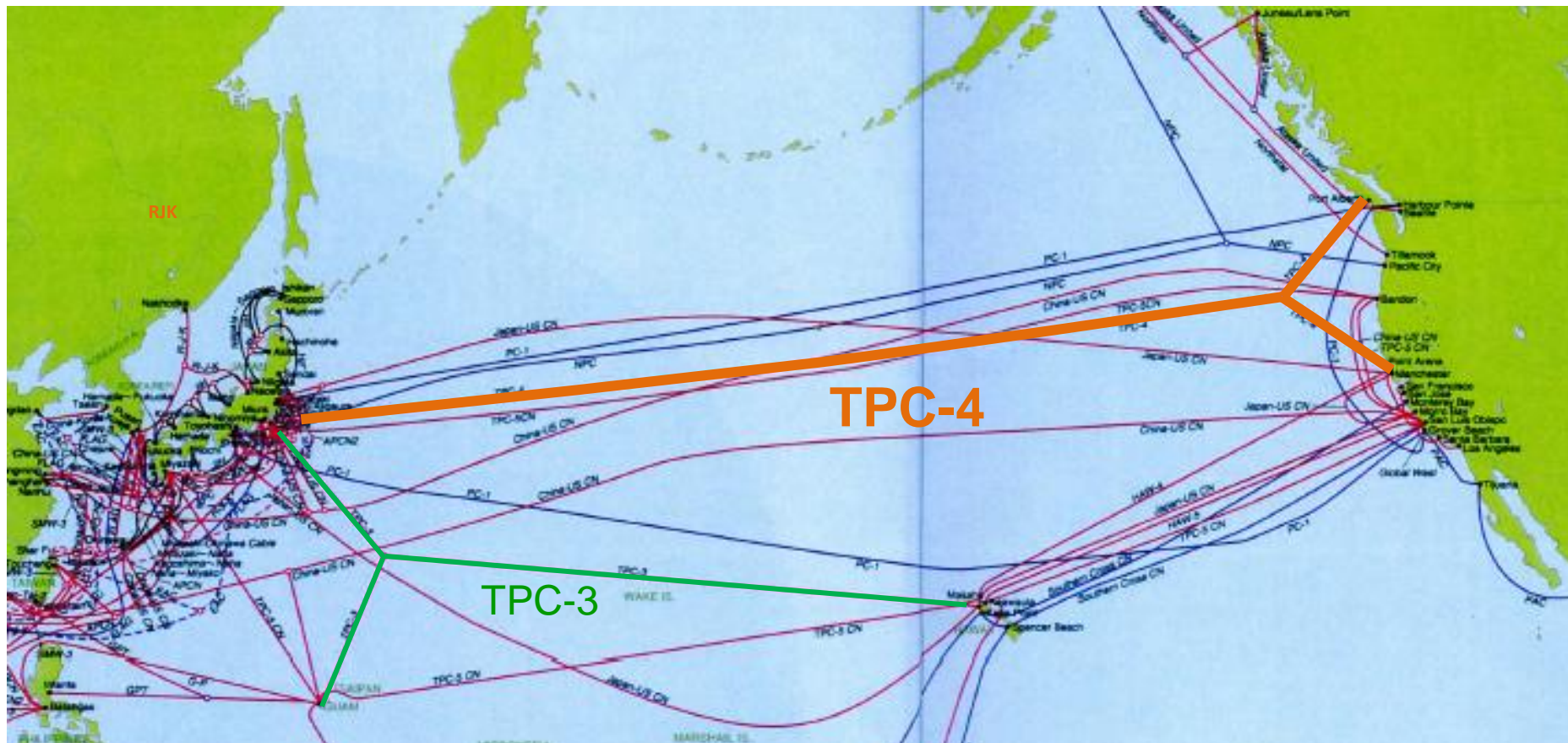
信頼性試験: 安定な単一波長特性(II)



Side Mode Suppression Ratio (SMSR) : dB

サイドモード抑圧比(単一波長安定性)

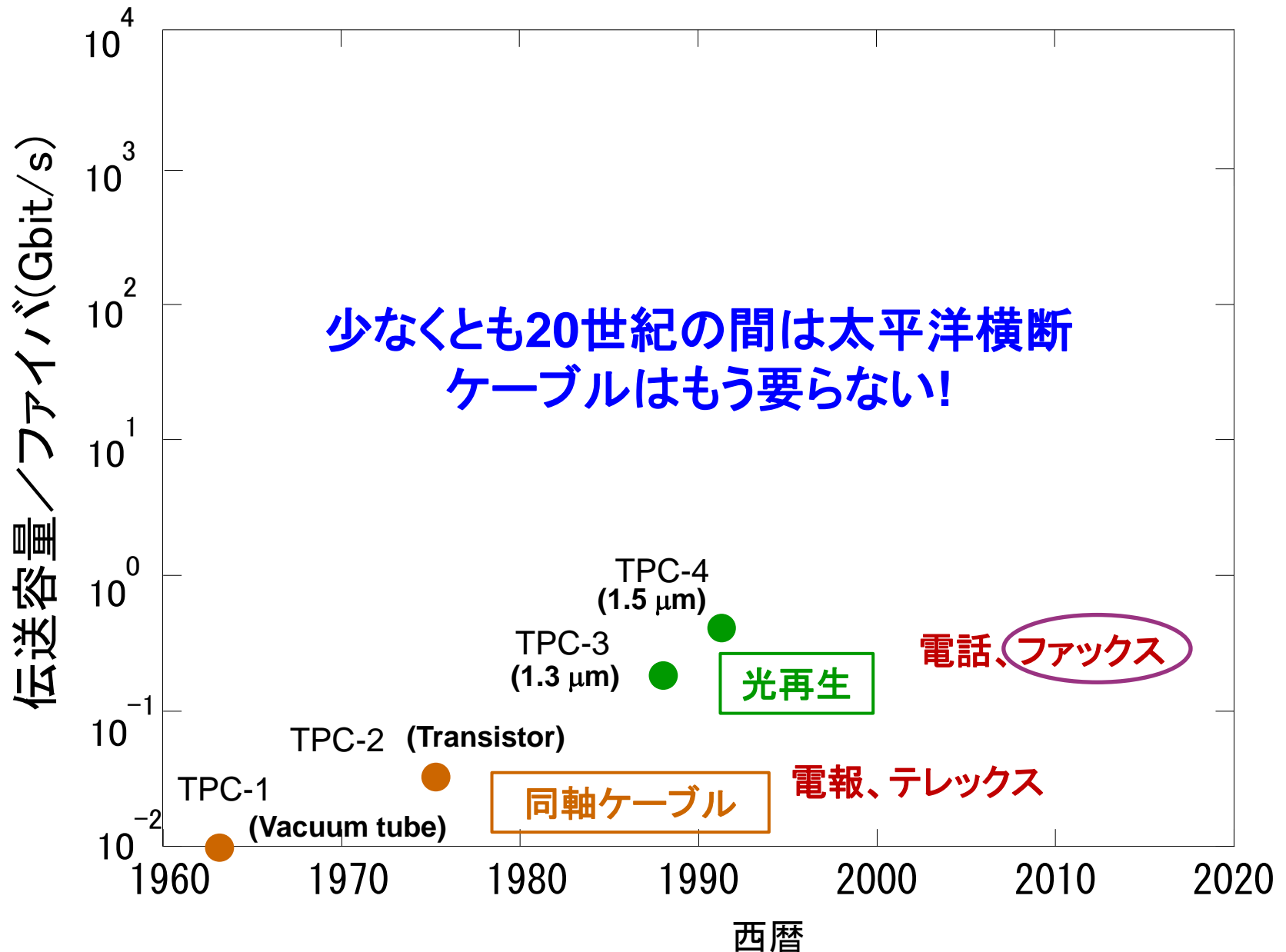
1.55 μm 帯単一波長半導体レーザを用いた Trans-Pacific Cable 4 (TPC-4)



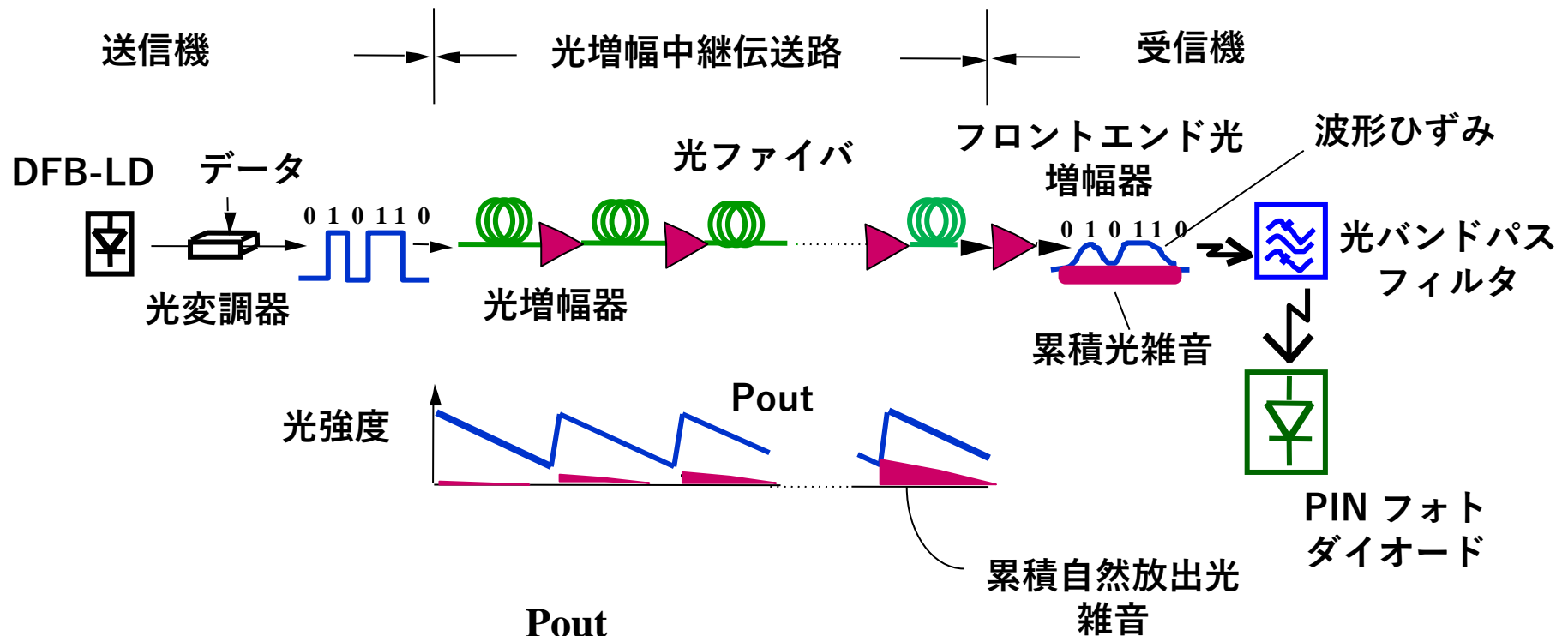
中継間隔: 138 km (TPC-3: 50 km 1.3 μm 帯多波長半導体レーザ)

ビットレート: 560 Mb/s (TPC-3: 280 Mb/s)

太平洋横断海底ケーブルの伝送容量



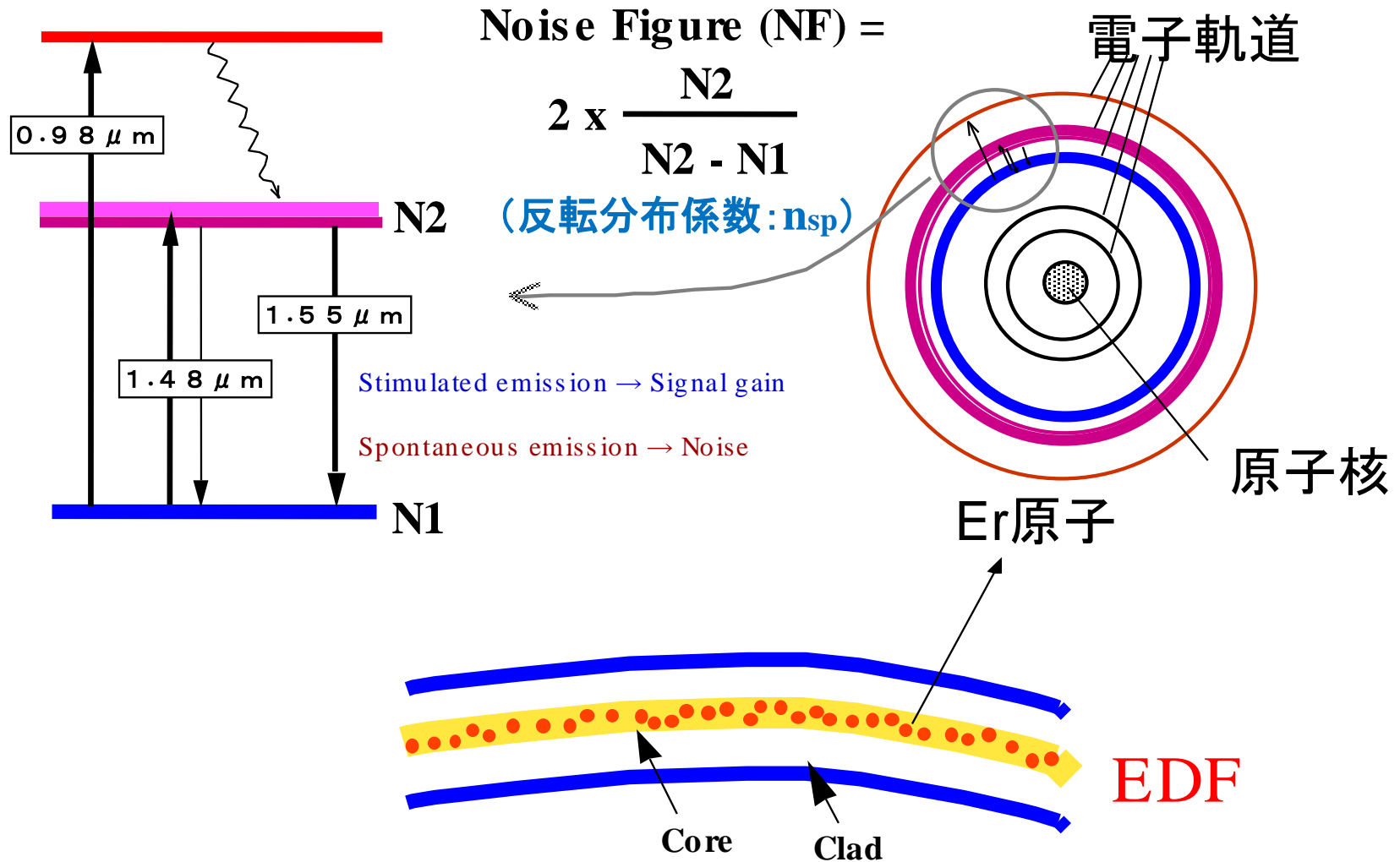
光増幅器多中継伝送システム



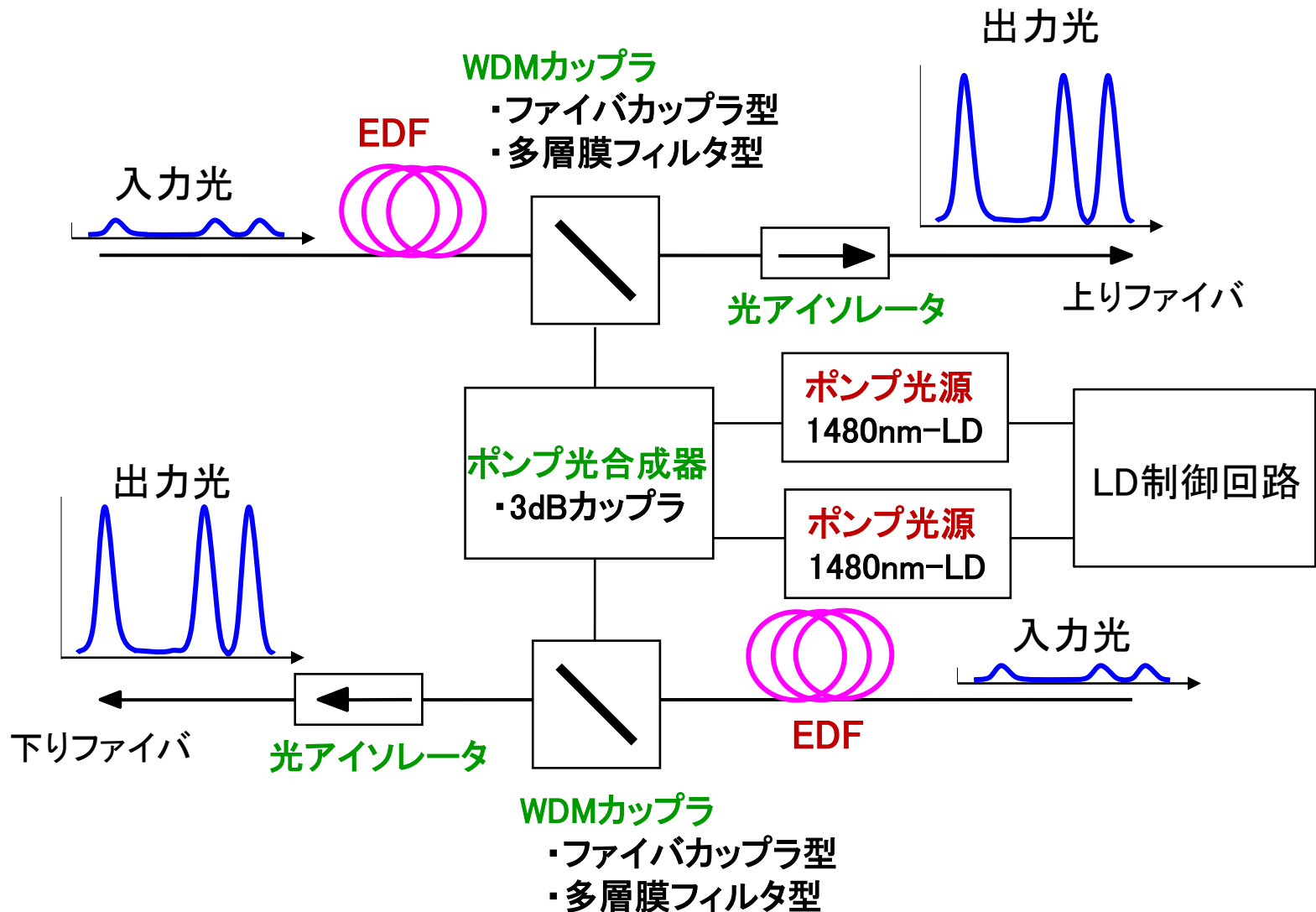
$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{out}}}{\text{Gain} \cdot \text{NF} \cdot h \nu \cdot \Delta \nu \cdot N_{\text{amp}}}$$

Pout: 中継器光出力、Ggain: 中継器利得、NF: 中継器雑音指数
h: プランク定数、 ν : 光周波数、 $\Delta \nu$: 受信帯域幅、Namp: 増幅器台数

Erドープファイバ(EDF)



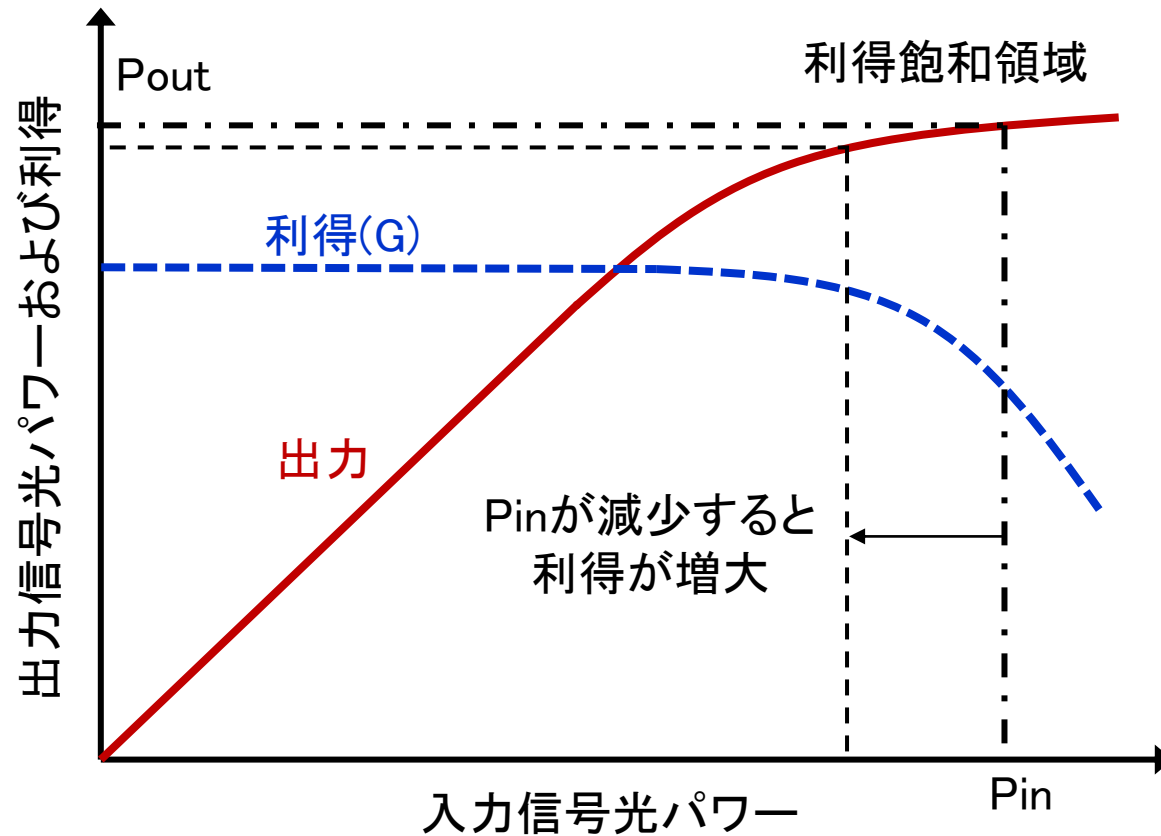
Erドープファイバ増幅器(EDFA)の構成



光増幅長距離システム設計のポイント

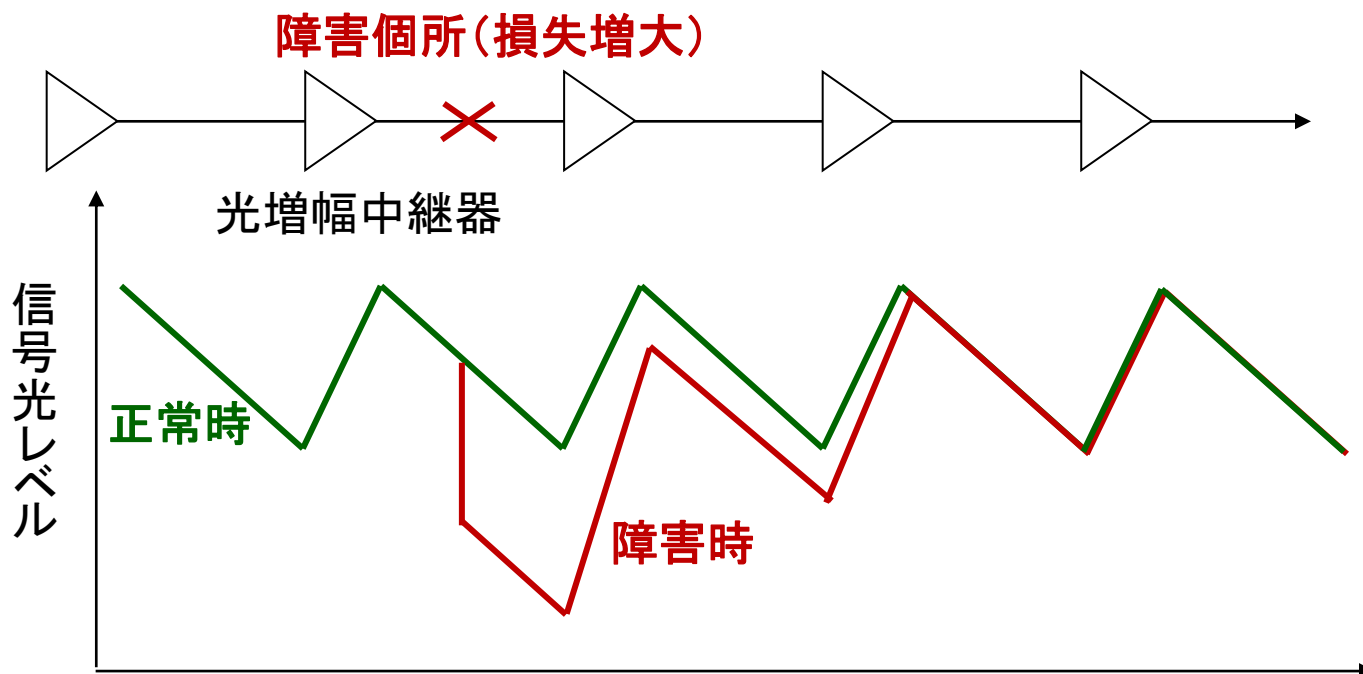
- ✓ EDFAの最適設計(利得特性、雑音特性)
- ✓ 利得飽和領域での動作
- ✓ ケーブル障害点の特定技術(OTDR)
- ✓ 中継器故障の原因特定
- ✓ フェージング現象への対応

Erドープファイバ増幅器(EDFA)の増幅特性

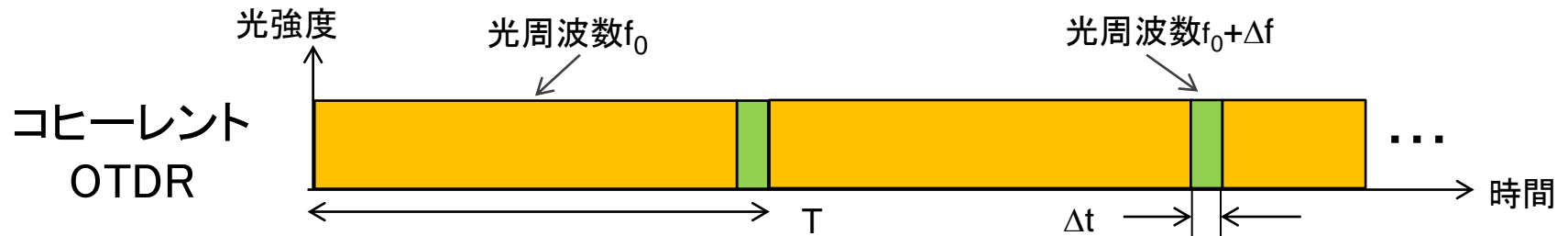
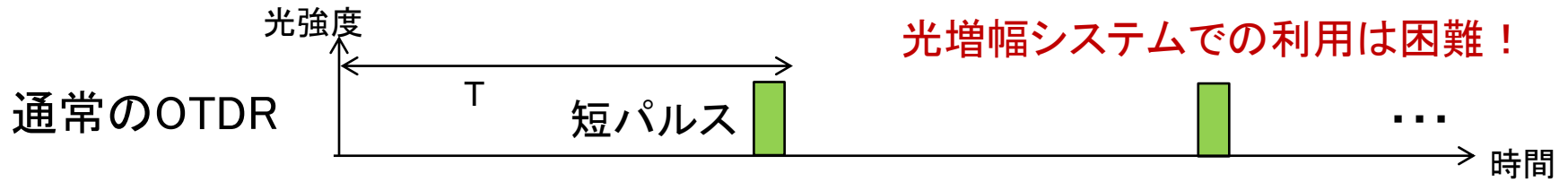


EDFA 多中継システムにおける自己修復機構

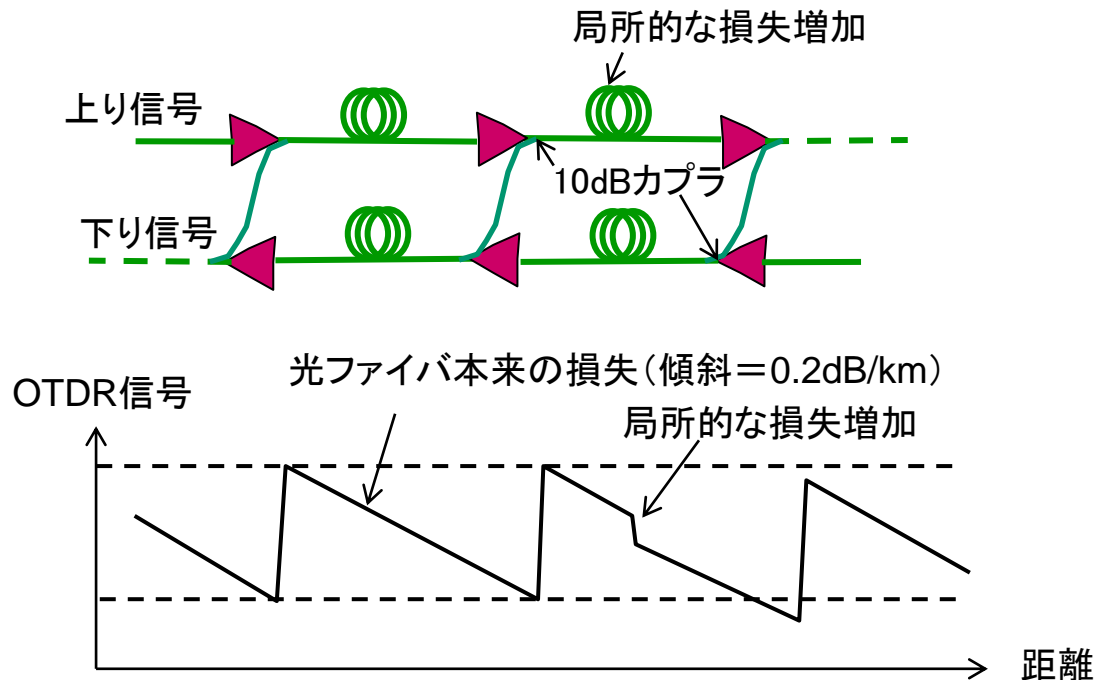
障害が生じてても、多中継後には光出力レベルは規定値まで回復する



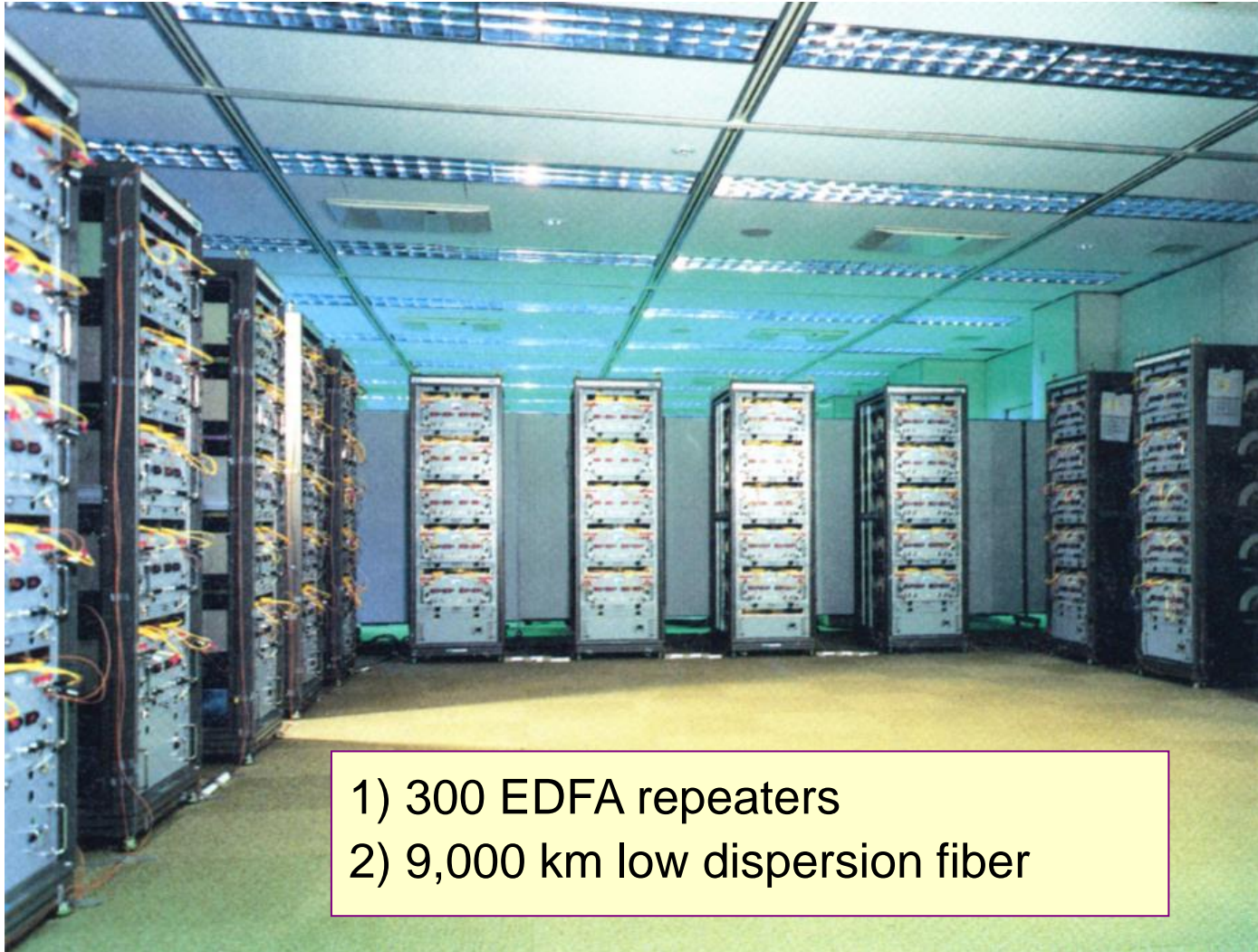
光海底ケーブルの障害点測定:コヒーレントOTDR



OTDR: Optical Time Domain Reflectometry

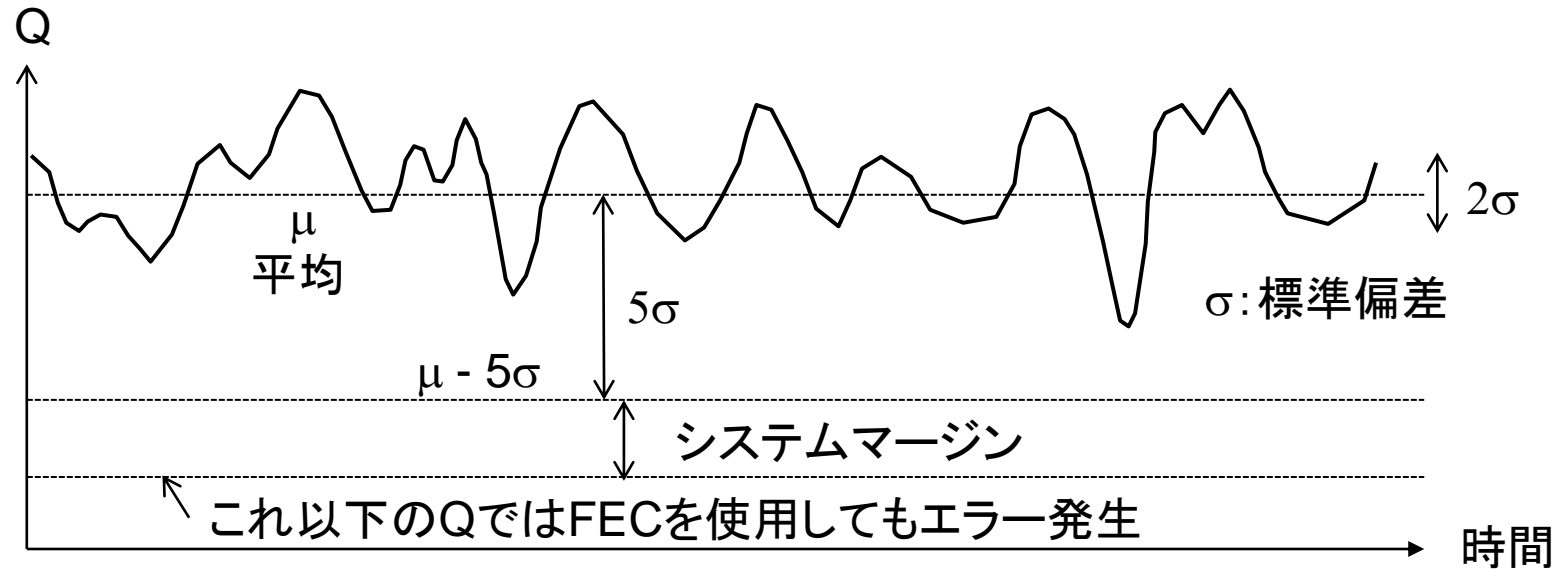


システム開発と特性確認のための 9,000 km テストベッド



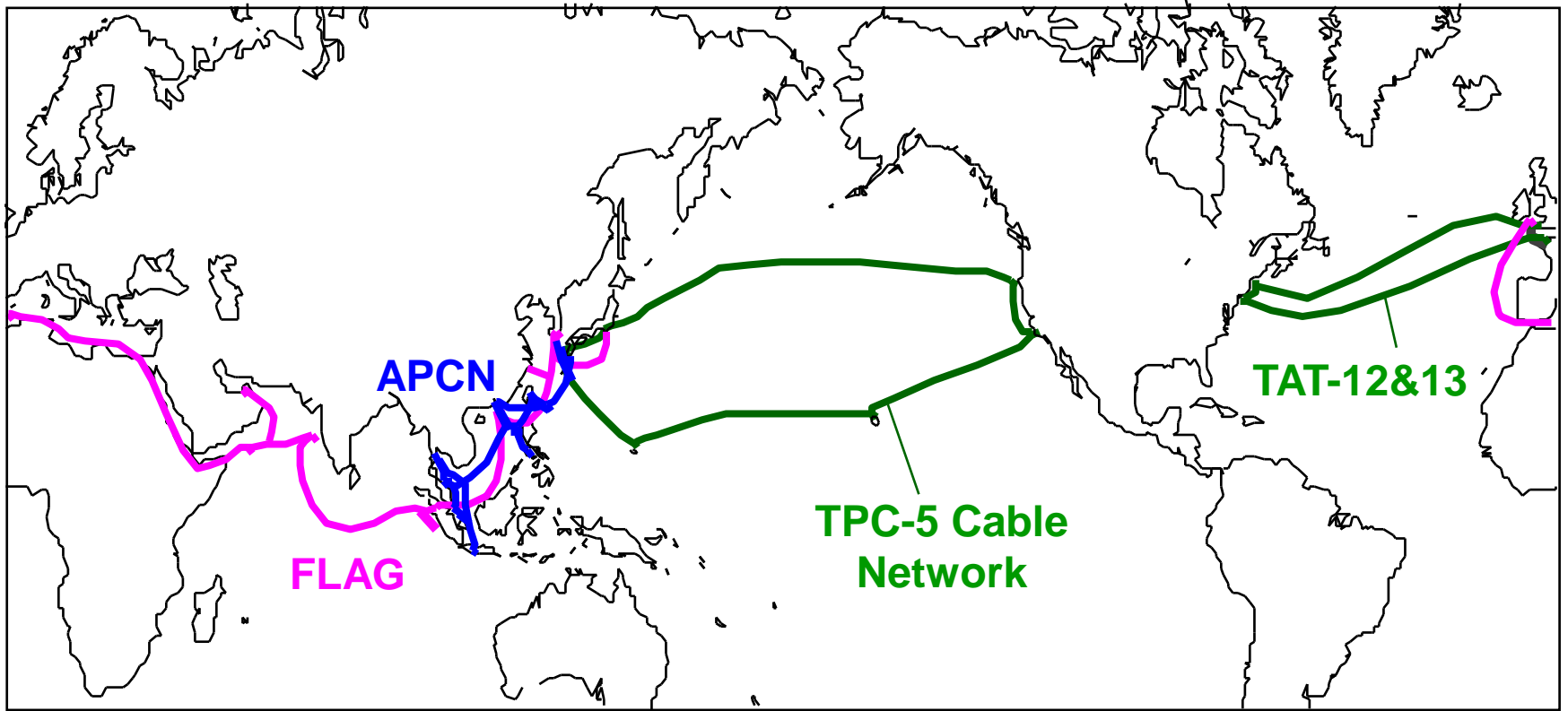
- 1) 300 EDFA repeaters
- 2) 9,000 km low dispersion fiber

長距離伝送に特有の伝送特性時間変動(フェージング)



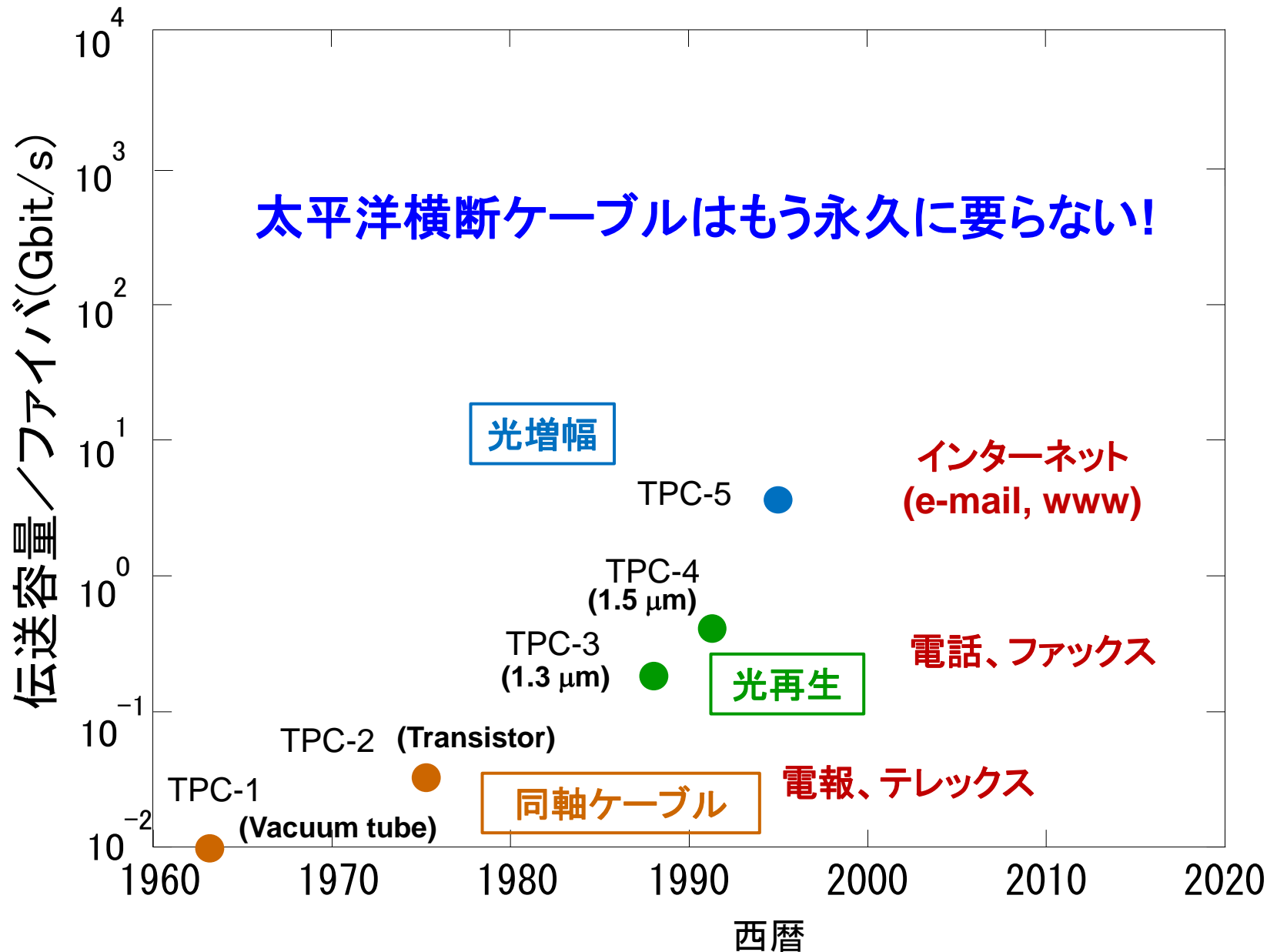
許容エラー率: 1年間の3秒間 $\rightarrow 10^{-7} \rightarrow$ 統計的に $\mu - 5\sigma$ に相当

第1世代光増幅海底ケーブルシステム

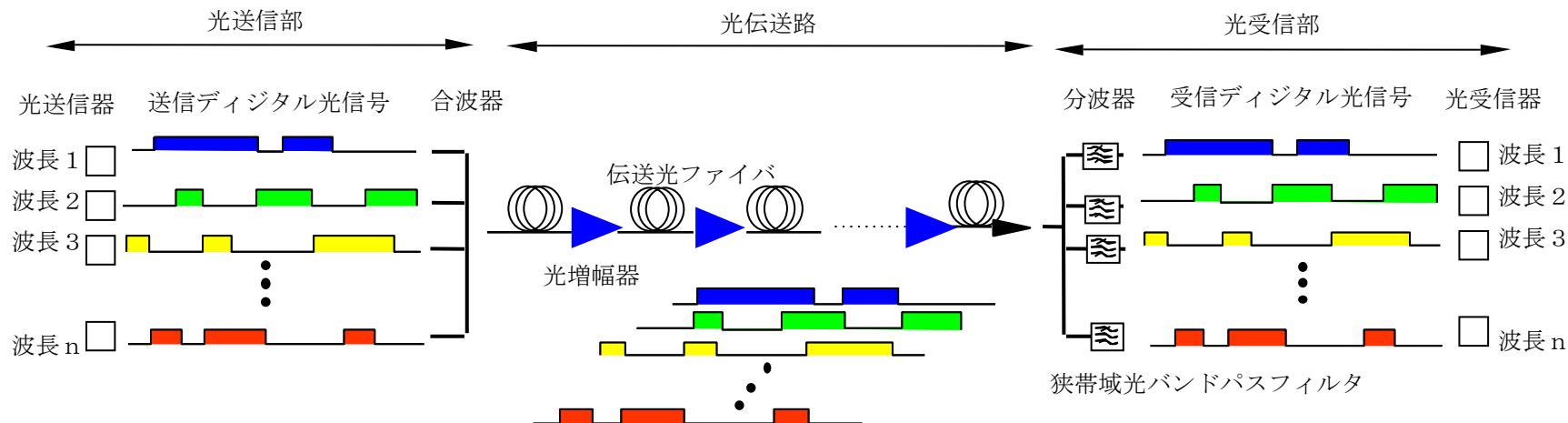


- 1) Bit rate : 5 Gb/s
- 2) Service in : 1995 – 1998

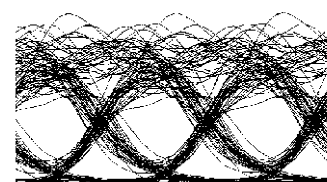
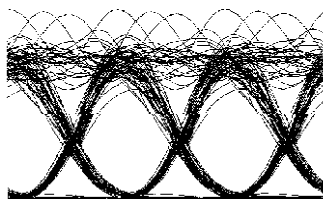
太平洋横断海底ケーブルの伝送容量



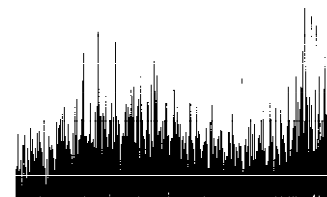
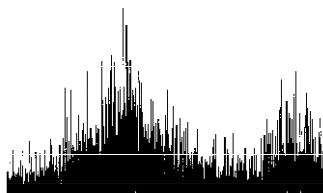
波長多重(WDM)光増幅システム



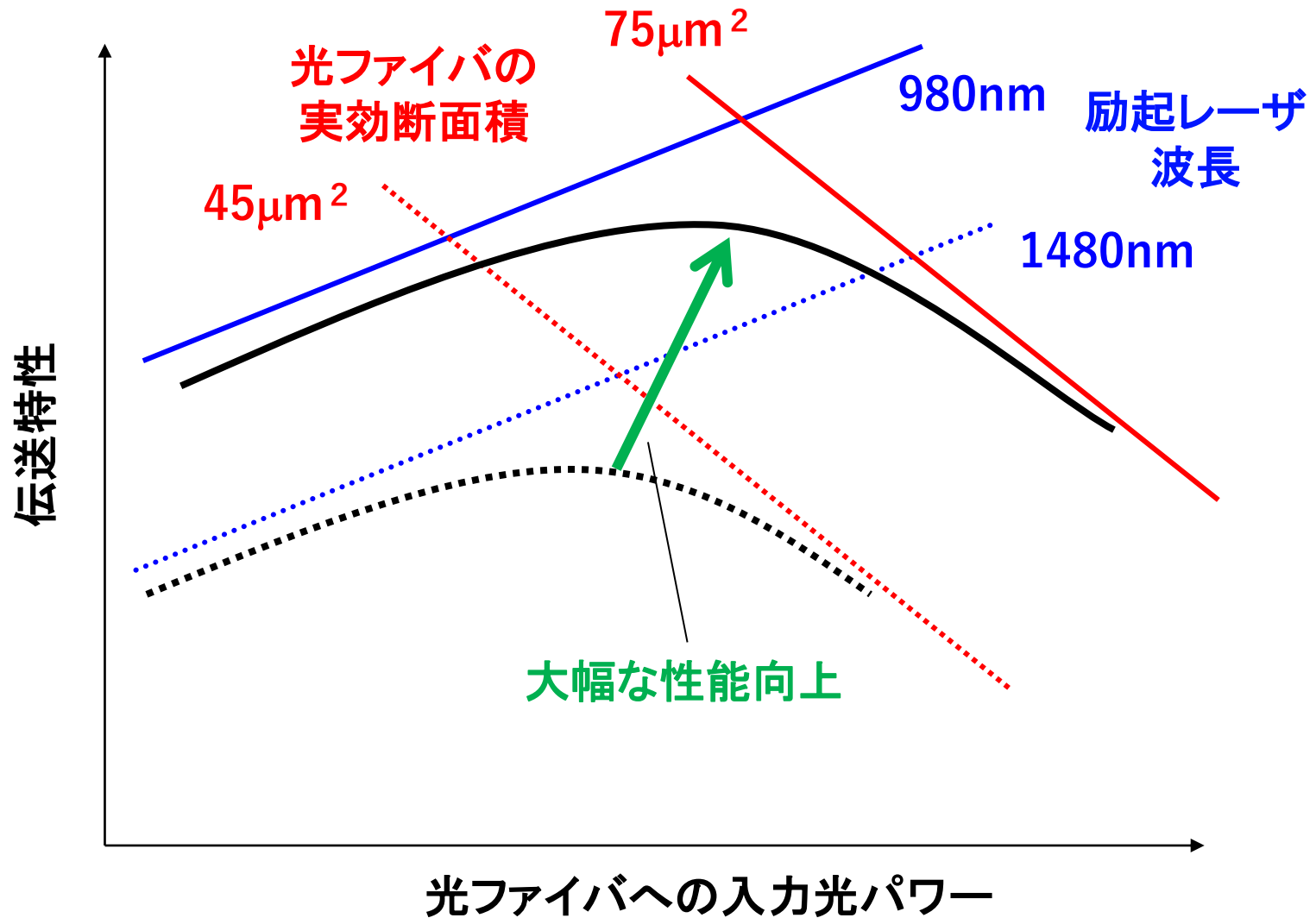
Eye Diagram



Optical Spectrum

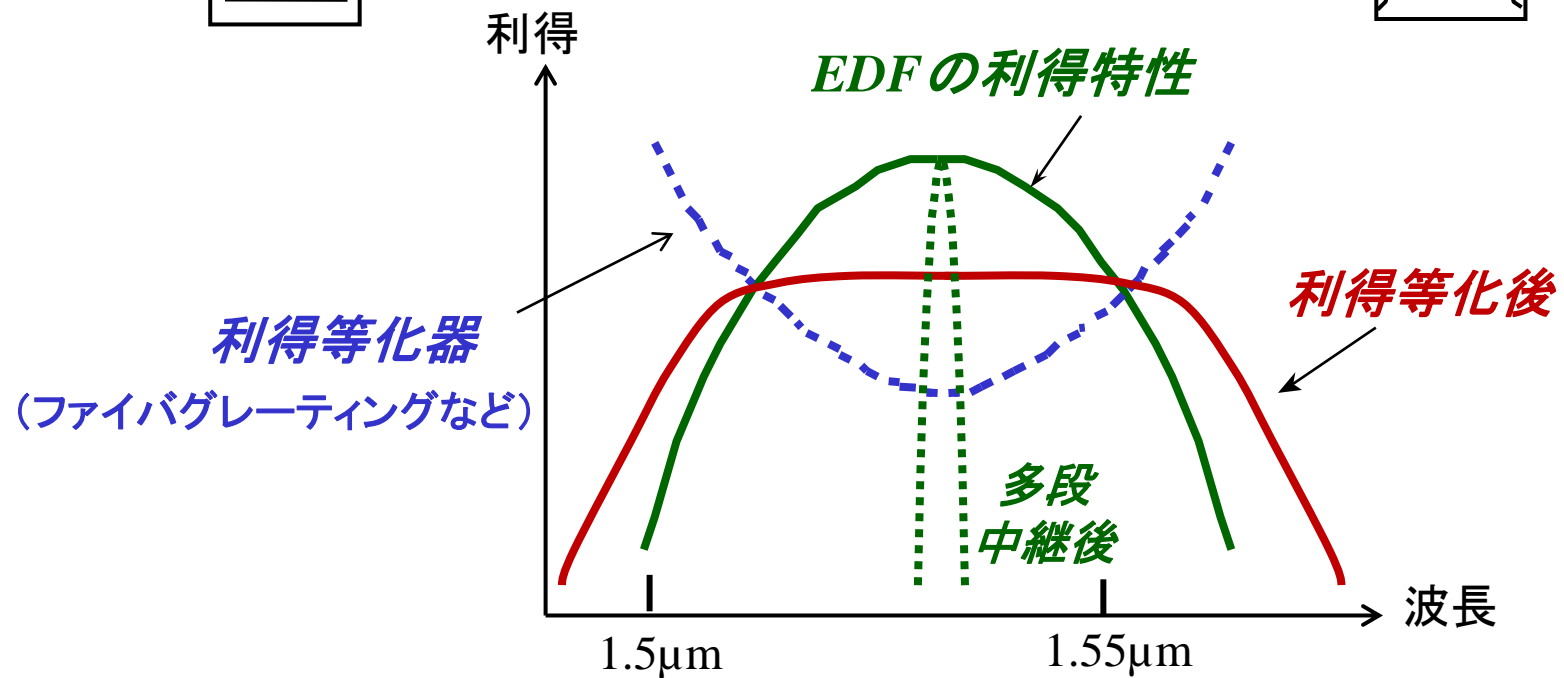
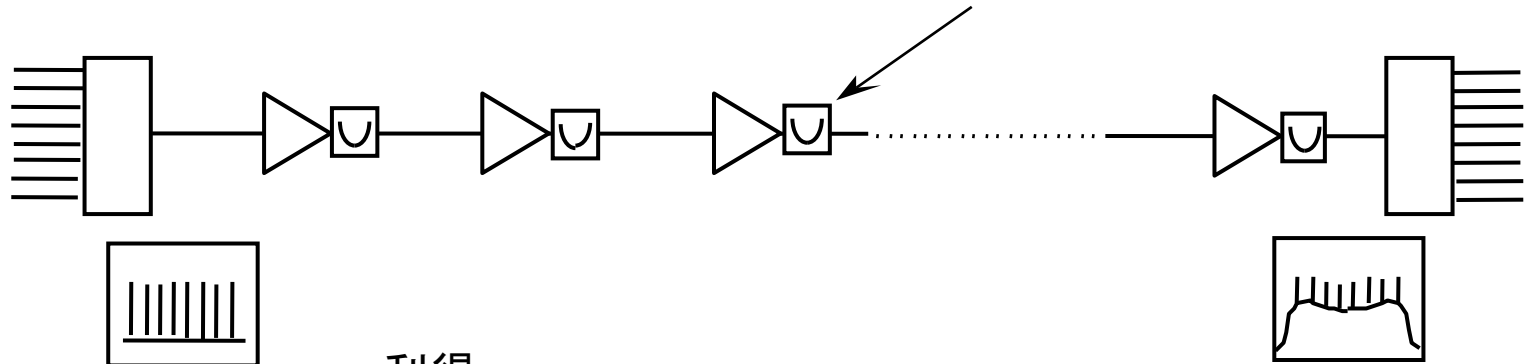


低雑音光増幅器と大口径光ファイバによる大幅な特性改善

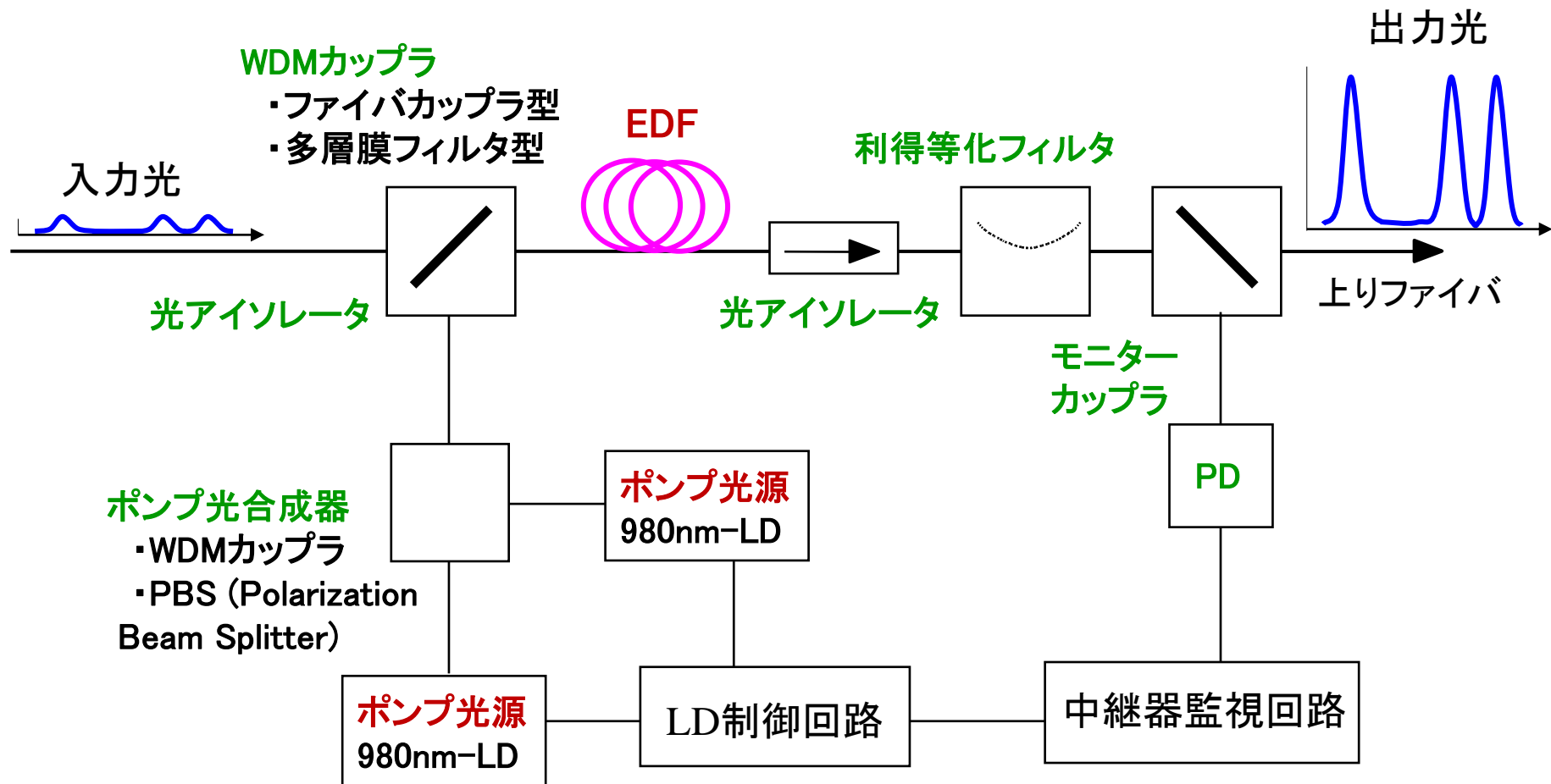


利得等化器

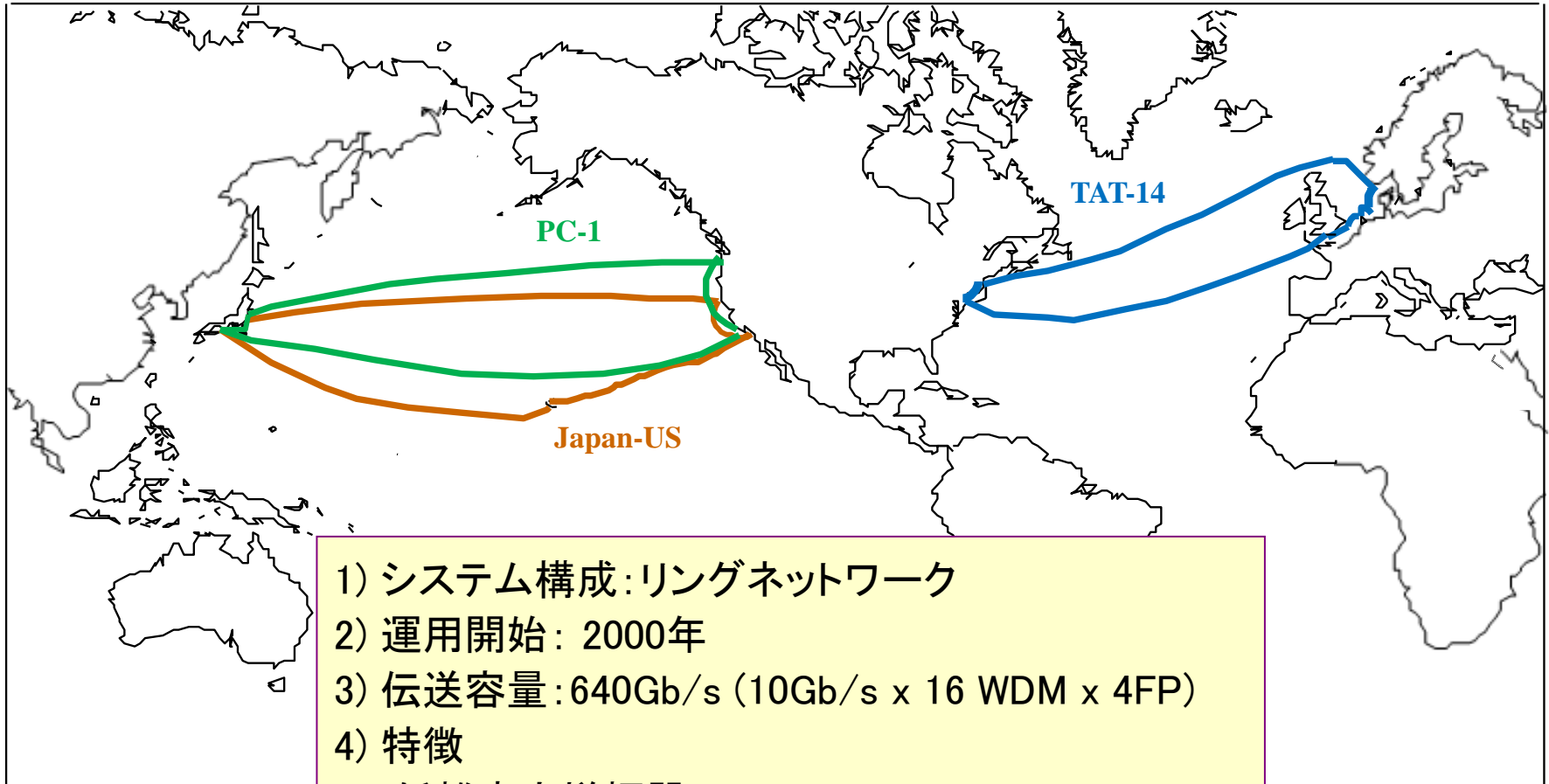
多中継後でも広帯域増幅特性を維持するために
利得特性の逆特性をもつ等化器



Erドープファイバ増幅器(EDFA)の構成

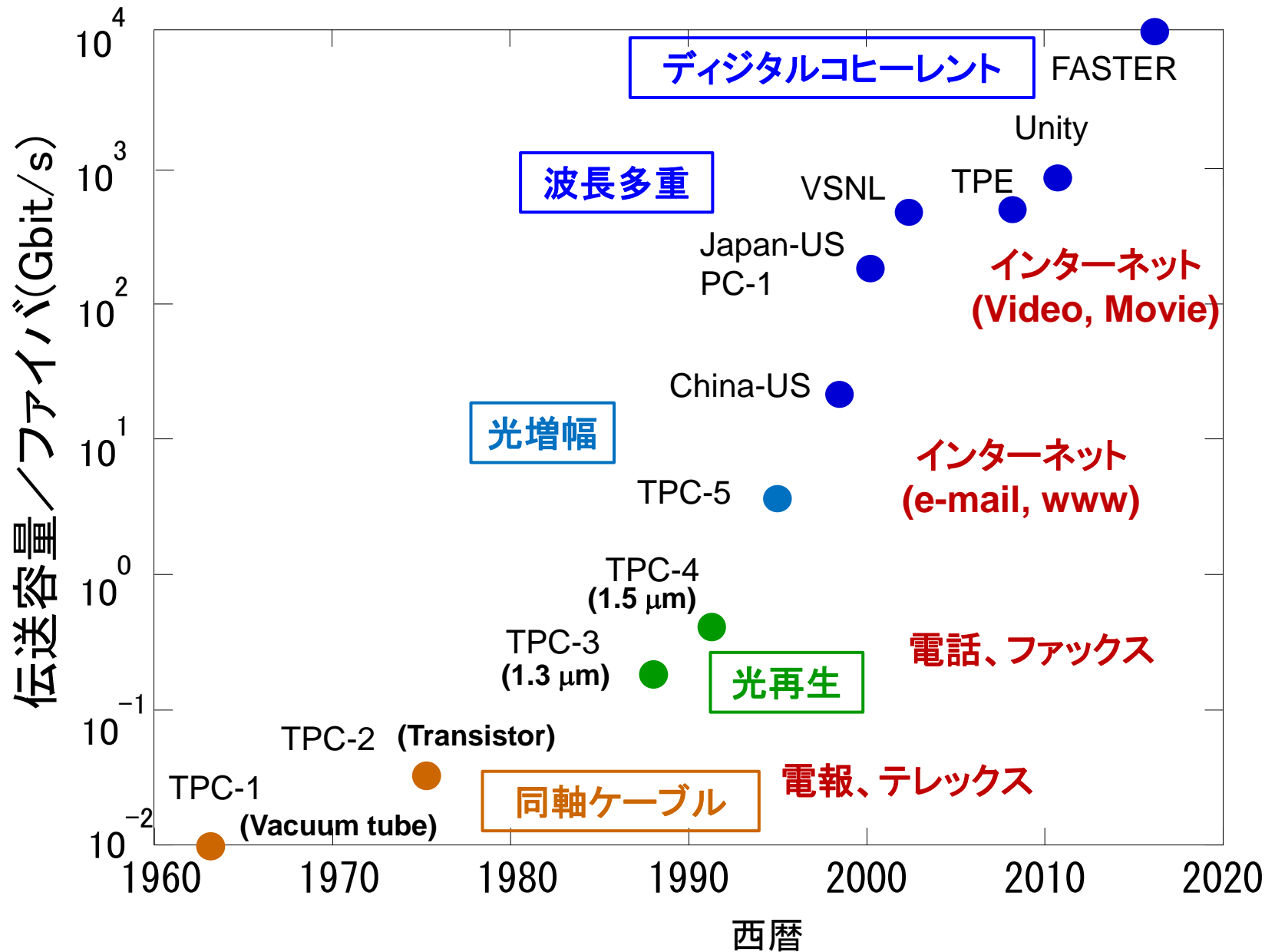


波長多重と光増幅による 大容量光海底ケーブルネットワーク



- 1) システム構成: リングネットワーク
- 2) 運用開始: 2000年
- 3) 伝送容量: 640Gb/s (10Gb/s x 16 WDM x 4FP)
- 4) 特徴
 - 低雑音光増幅器
 - 大口径光ファイバ
 - 位相変調 RZ パルス
 - 10 Gb/s ネットワークプロテクション

太平洋横断海底ケーブルの伝送容量



Unity Cable System Utilizing Sophisticated Dispersion Management

Design Capacity : 4.8Tbps
No. of Fiber Pairs : 5 FP
Capacity per FP : 10Gbps x **96 WDM**
Service in : 1Q 2010

Modulation : **10Gbit/s RZ-DPSK**

Fiber : **Dispersion managed fiber**
(Dispersion mapping optimized for DPSK)



内容

☆ 最近の話題

☆ 海底ケーブル100年 一同軸から光ファイバへー

☆ 光海底ケーブルの特徴

☆ 長距離伝送システムの研究開発：

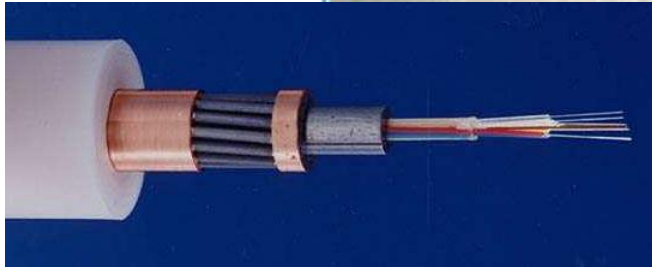
- ・光再生中継から光増幅、そして波長多重システムへ

☆ 最新の光海底ケーブル状況：

- ・デジタルコヒーレント、多芯化・空間多重システムへ
- ・グーグル・メタ(FB)の台頭

☆ まとめ

ケーブル敷設船の底にあるケーブルタンク



1本のファイバでできるだけ伝送容量を増やしたい！
1本のケーブルにできるだけファイバ本数を増やしたい！



光増幅、WDM、デジタルコヒーレント、多芯化、マルチコアファイバ

FASTER : Digital Coherent System

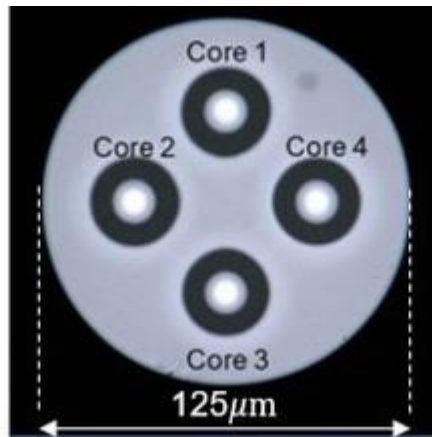


- 1) Configuration : Japan~US
- 2) Service in : 2016
- 3) Capacity : 60Tb/s
(**100Gb/s x 100 WDM x 6FP**)
- 4) Total length : 9,000km
- 5) Cost : US\$300 million

<共同出資者>

KDDI (日本)
China Mobile International (中国)
China Telecom Global (中国)
Global Transit (マレーシア)
Google (米国)
Singtel (シンガポール)

マルチコアファイバを用いたケーブル



現在の標準ファイバと同じ口径
(125μm)の4コアファイバ



商用段階

古河電工とKDDI総研、海底ケーブル用のマルチコア光ファイバーを開発
通常の光ファイバーと同様の外形サイズで低損失かつ低干渉を実現

2020年11月30日

<https://k-tai.watch.impress.co.jp/docs/news/1292008.html>

NEC、OCC、住友電気工業の3社、海底ケーブルの伝送容量拡大に向け、マルチコアファイバーを収容したケーブルを開発

2021年10月5日

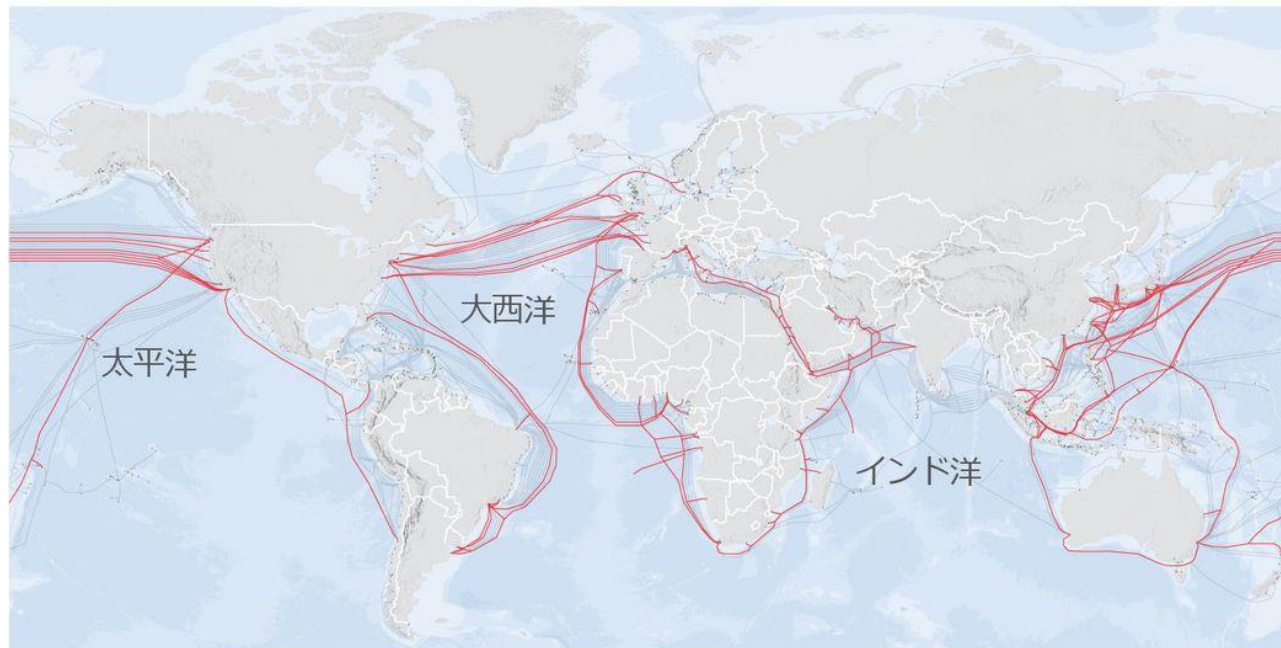
<https://cloud.watch.impress.co.jp/docs/news/1355736.html>

米巨大ITの海底ケーブル出資拡大、支配ここにも 大手4社の伝送量は全体の66%、本腰の敷設はまだこれから

2022 年 1 月 18 日
WSJ

海底ケーブルシステム（計画中を含む）

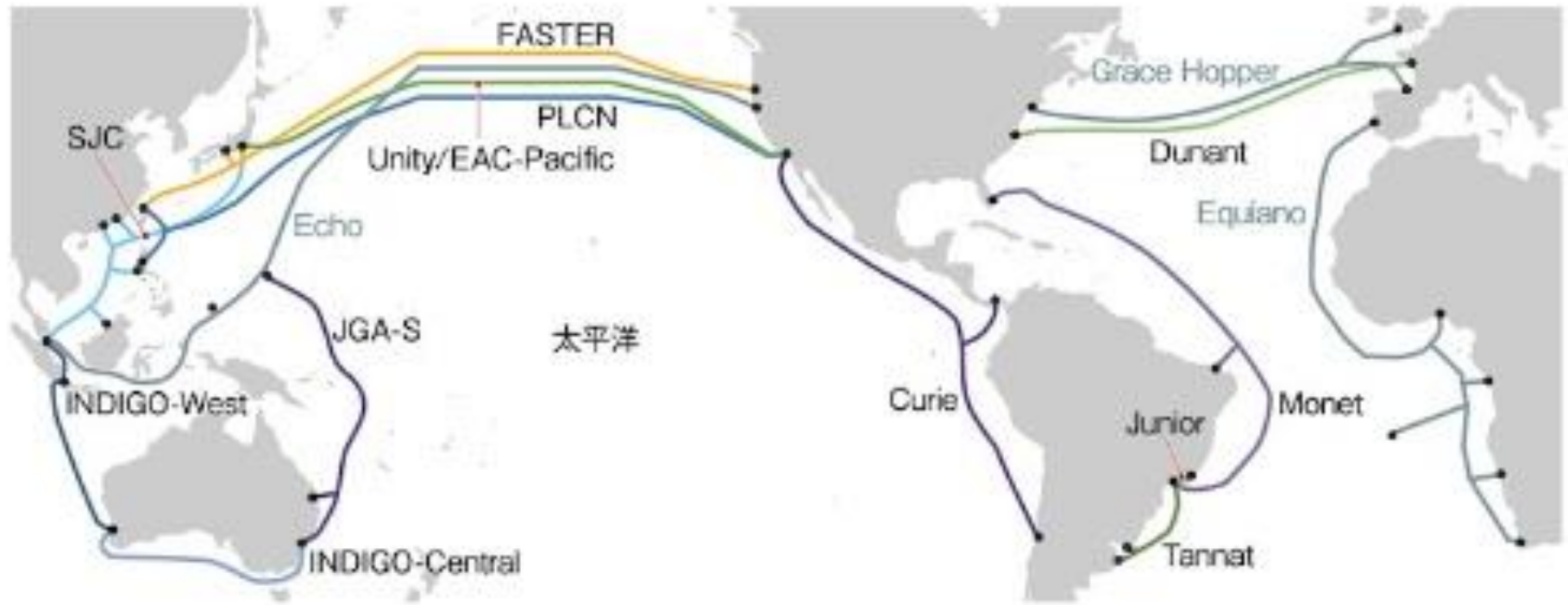
■ アマゾン、グーグル、メタ、マイクロソフトが出資するケーブル



出所：テレジオグラフィ

- ✓ IT大手の海底ケーブル敷設への参入は、他社所有のケーブルを利用するコストの増大がきっかけだった
- ✓ 現在ではとどまるところを知らぬ大容量データ伝送の需要が後押ししているという。

米グーグルが出資する主な海底ケーブル



米国ロサンゼルスと中国香港を直結する計画だった「PLCN」

PACIFIC LIGHT CABLE NETWORK

© 2016 TE CONNECTIVITY / TE SUBCOM. ALL RIGHTS RESERVED.

PLCN: 香港↔ロサンゼルス(日本通過)
144Tb/s (24Tb/s × 6ファイバペア)
開通: 2019年予定

DEEP WATER
BAY

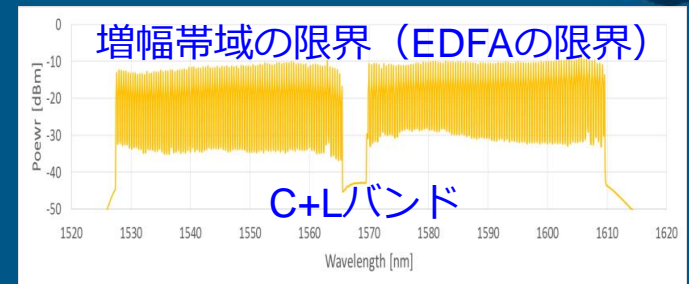
12,900km

LAX

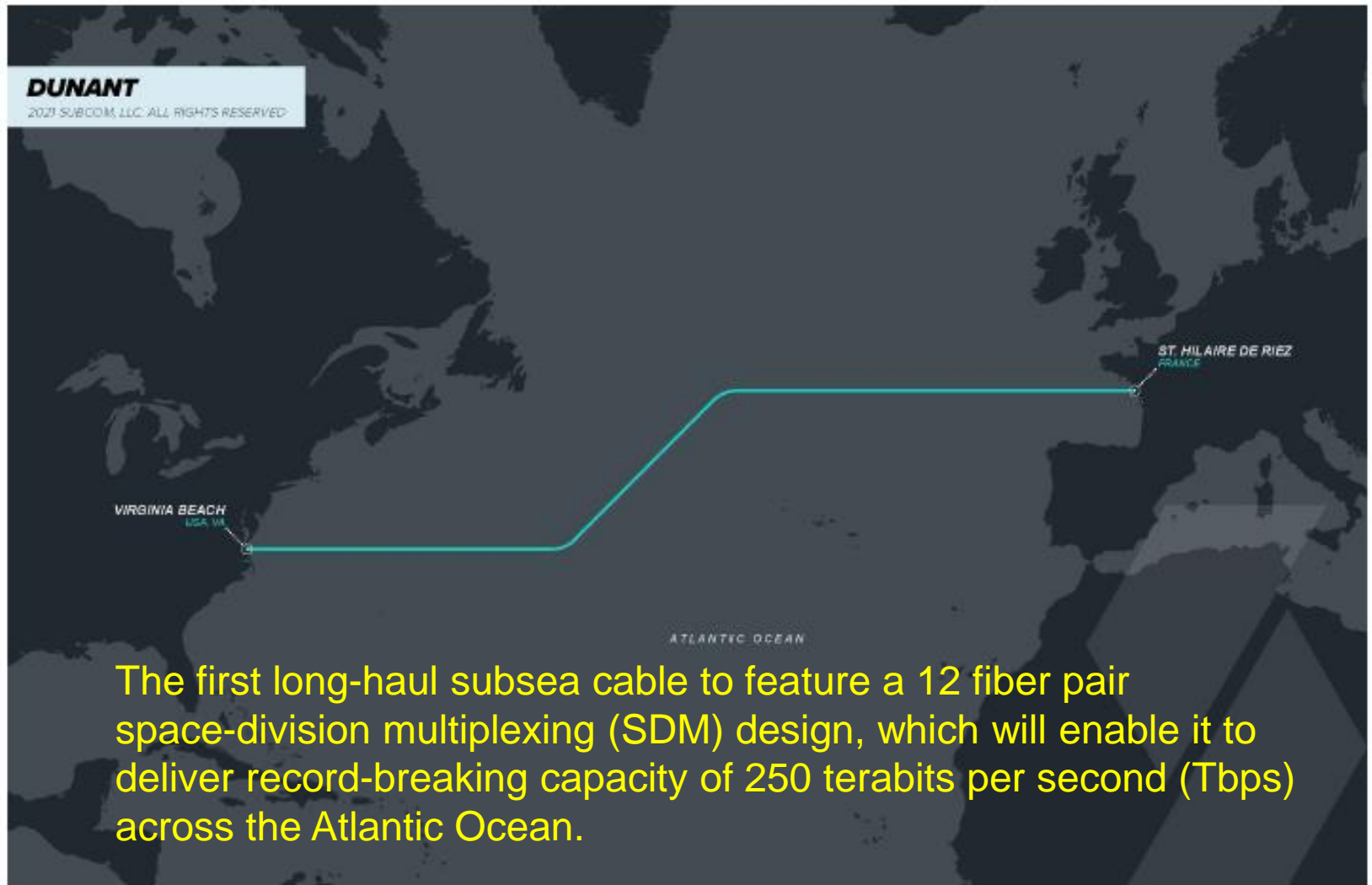
ケーブルオーナー:
Facebook, Google



ロサンゼルスー台湾、フィリピンへと変更



Dunant Submarine Cable System

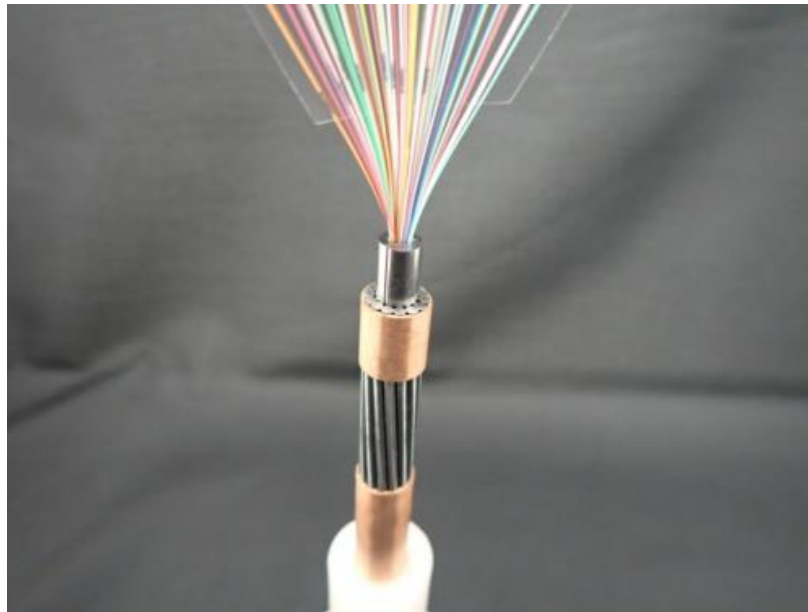


メタ(Facebook)も積極的

NEC、欧州と米国を結ぶ光海底ケーブルの建設を開始

～24ファイバーペアを採用し、長距離光海底ケーブルで世界最大容量を実現～

NECは2021年10月8日、欧州と米国を結ぶ北大西洋横断海底ケーブルの供給契約を米Facebook（フェイスブック）と締結し、建設を開始したと発表した。同ケーブルはフェイスブックが計画・運用し、NECが建設を担う。2023～2024年ころに運用開始する計画だ。



24ファイバペア（48心）

最大500テラビット／秒

（出所：NEC）

Hawaiki Cable

The main trunk of Hawaiki cable system is 100% owned and constructed by Hawaiki Submarine Cable LP (HSC LP), headquartered in Auckland, New Zealand.

In October 2016, Amazon AWS purchased capacity in the Hawaiki cable system, making it AWS' first investment in an international submarine cable system

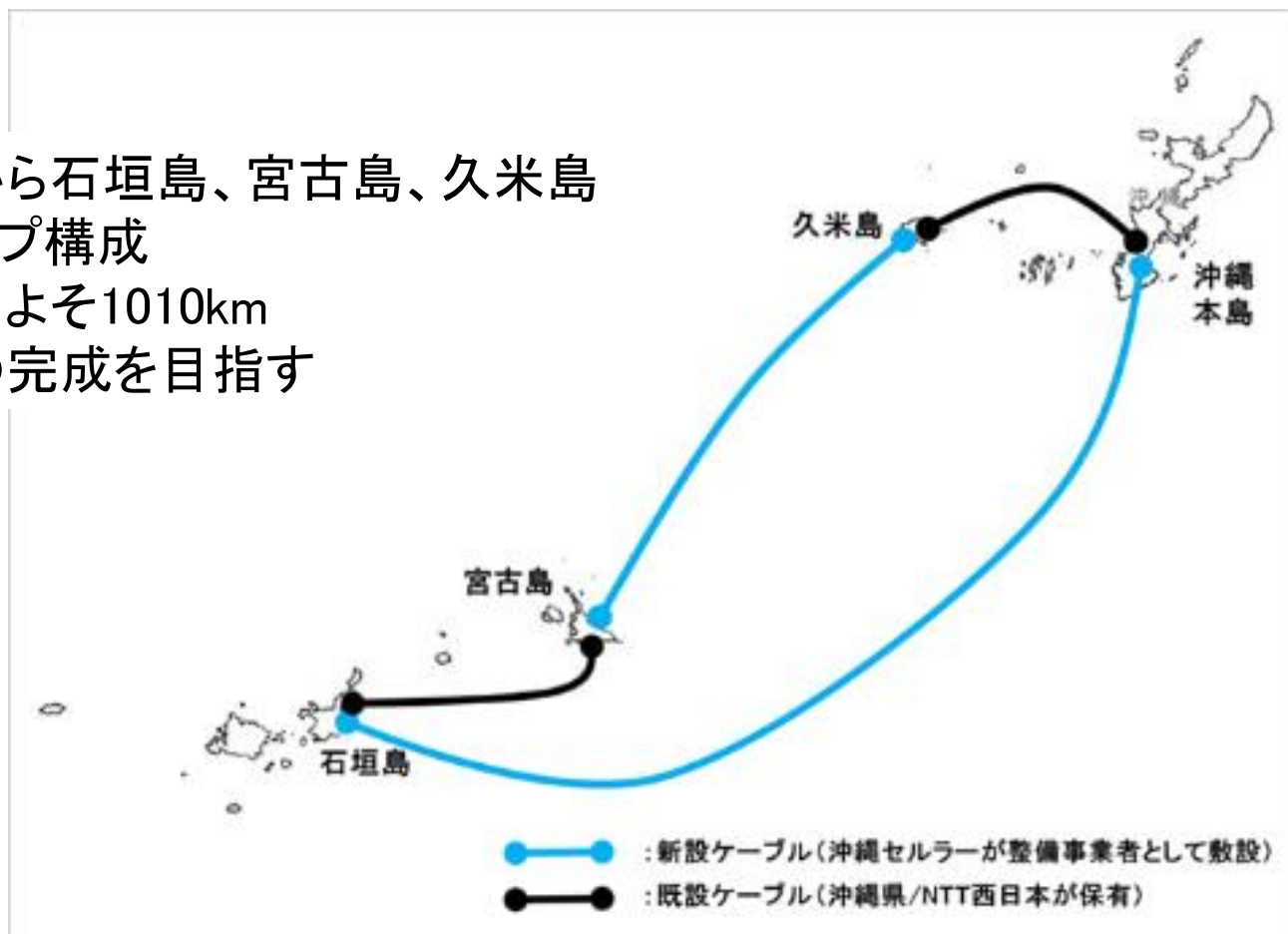
Ready for Service in July 2018

- Australia to Hawaii, 2 fiber pairs, 20Tbps
- New Zealand to Hawaii, 1 fiber pair, 10 Tbps
- Hawaii to Hillsboro, 3 fiber pairs, 30 Tbps
- Australia to New Zealand, 1 fiber, 12 Tbps
- Branching Unit to American Samoa, 2 fiber pairs, 100-200Gbps
- Branching Unit to New Caledonia (Tomoo Cable), 2 fiber pair, up to 2Tbps per fiber pair.

光海底ケーブルを共同整備へ —沖縄エリアの通信インフラ強靱化—

ソフトバンクは、沖縄セルラーとNTT西日本の2社と沖縄エリアの通信インフラ整備を共同で行う基本協定を締結(2022年 1月12日)

- 沖縄本島から石垣島、宮古島、久米島を結ぶループ構成
- 総延長はおよそ1010km
- 2023年夏の完成を目指す



北海道と秋田県をつなぐ光海底ケーブル

NTTコミュニケーションズ、KDDI、楽天モバイル、ソフトバンクの4社は、北海道と秋田県を結ぶ光海底ケーブルを建設することに合意し、共同建設協定を締結した。



今回敷設のルートイメージ

完成予定は2023年末。

光海底ケーブルネットワークシンポジウム

リアル&オンライン ハイブリット開催

第2回 光海底ネットワークシンポジウム

～ 未来の光海底ネットワークに向けて ～

日 時

2021年10月8日（金）12:30 ～ 18:00

会 場

早稲田大学 西早稲田キャンパス 63号館 05会議室
オンライン《Zoomウェビナー》

申込方法

事前登録をお願いいたします。

https://us02web.zoom.us/webinar/register/WN_RzD4FToZQC6m0-QjgkhXmw

申込締切

2021年10月6日（水） 会場定員は100名までです。

アイデア募集

学生からの海底ケーブルに関するアイデアを募集します。優秀なアイデアに対して表彰させていただきます。
応募要領はOSNウェブサイト (<https://osn-sym.wixsite.com/website-3>) をご参照下さい。

参加無料



プログラム

■イントロダクション

12:45 「激動の光海底ケーブルビジネス」
OSN研究会 共同代表 新納 康彦

■講演

13:00 “Submarine networks for scaling cloud networks- A Google perspective”
Google Director of Network Technologies Dr. Vijay Vusirikala

13:45 「ケーブルシップの現状」
NTT-WEM シニアアドバイザー 小森 強 氏

14:05 「新ケーブル船 KDDI ケーブルインフィニティ」
KCS シニアアドバイザー 安楽 孝明 氏

14:25 「光海底ケーブル最前線」
ソフトバンク グローバル事業本部 キャリア事業統括部 グローバル事業部部長 石井 宏司 氏

15:10 ～ 15:30 休憩（コーヒープレーク）

15:30 「光海底ケーブルネットワーク動向」
NEC 海洋システム事業部 上席マーケティングエキスパート 時間 幹能 氏

16:15 「量子コンピューター時代の通信の保護」
KDDI 総合研究所 執行役員 清元 晋作 氏

16:45 「光海底ケーブルより速い衛星通信」
東京工業大学 地球インクルーシブセンシング研究機構 研究員 樋口 敏夫 氏

17:05 「データセンターと国際政治」
JPCERT コーディネーションセンター 国際部長 小宮山 功一朗 氏

■クロージング

17:45 優秀アイデア表彰、次回「光海底ネットワークシンポジウム」について
OSN研究会 共同代表 秋葉 重幸

<https://osn-sym.wixsite.com/website-3>

まとめと今後の展望

- ☆ 光海底ケーブル:グローバルネットワークの主役に
- ☆ しばしばメディアに取り上げられる:災害対策や安全保障の観点
- ☆ 光再生中継、光増幅、波長多重:
 - ・大容量化、日米間を直結する光海底ケーブル、リングネットワーク
 - ・この間、大容量を必要とするグローバル通信の新たなニーズが続出
- ☆ デジタルコヒーレント、多芯化(48ファイバ)、マルチコアファイバ
 - ・デジタルコヒーレント光伝送 → $\sim 10\text{Tb/s}$ / ファイバ(最新システム)
 - ・マルチコアファイバ伝送 → $\sim 100\text{Tb/s}$ / ファイバへ(実用段階)
- ☆ グーグル、メタ等が台頭、通信キャリアの役割も依然として重要