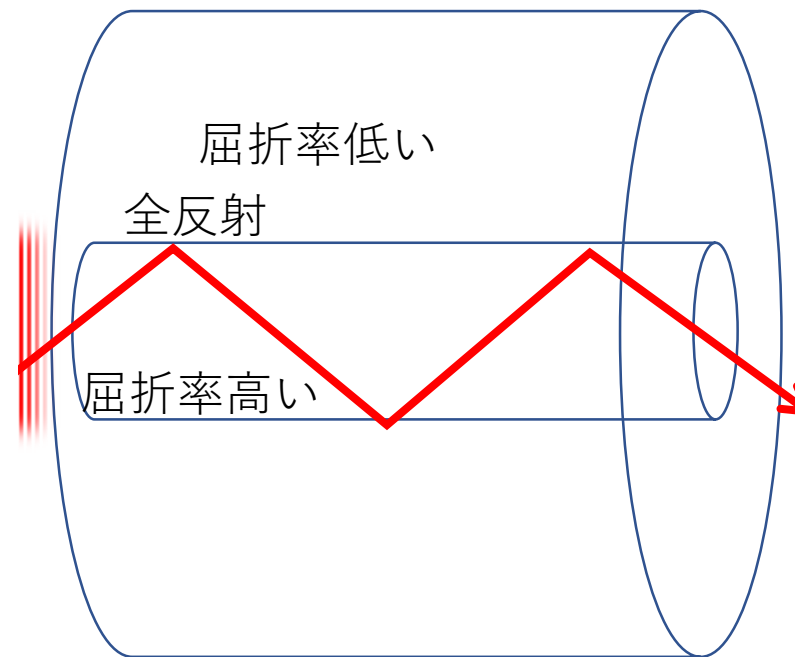
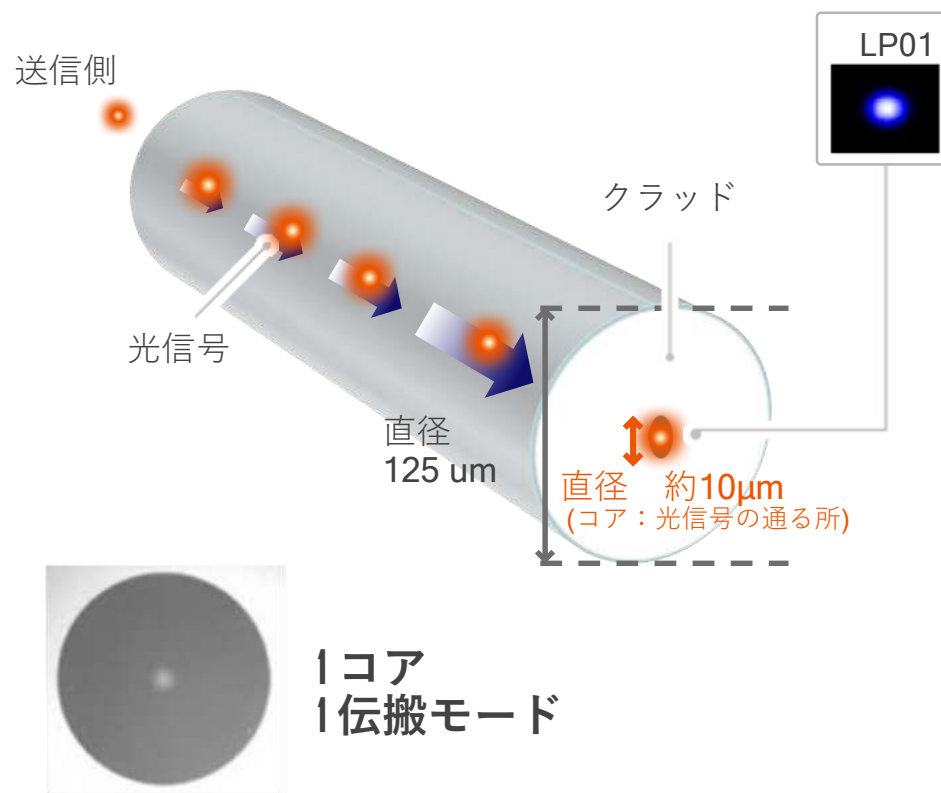


# 大容量光海底ケーブルシステム伝送技術の 最新動向と展望

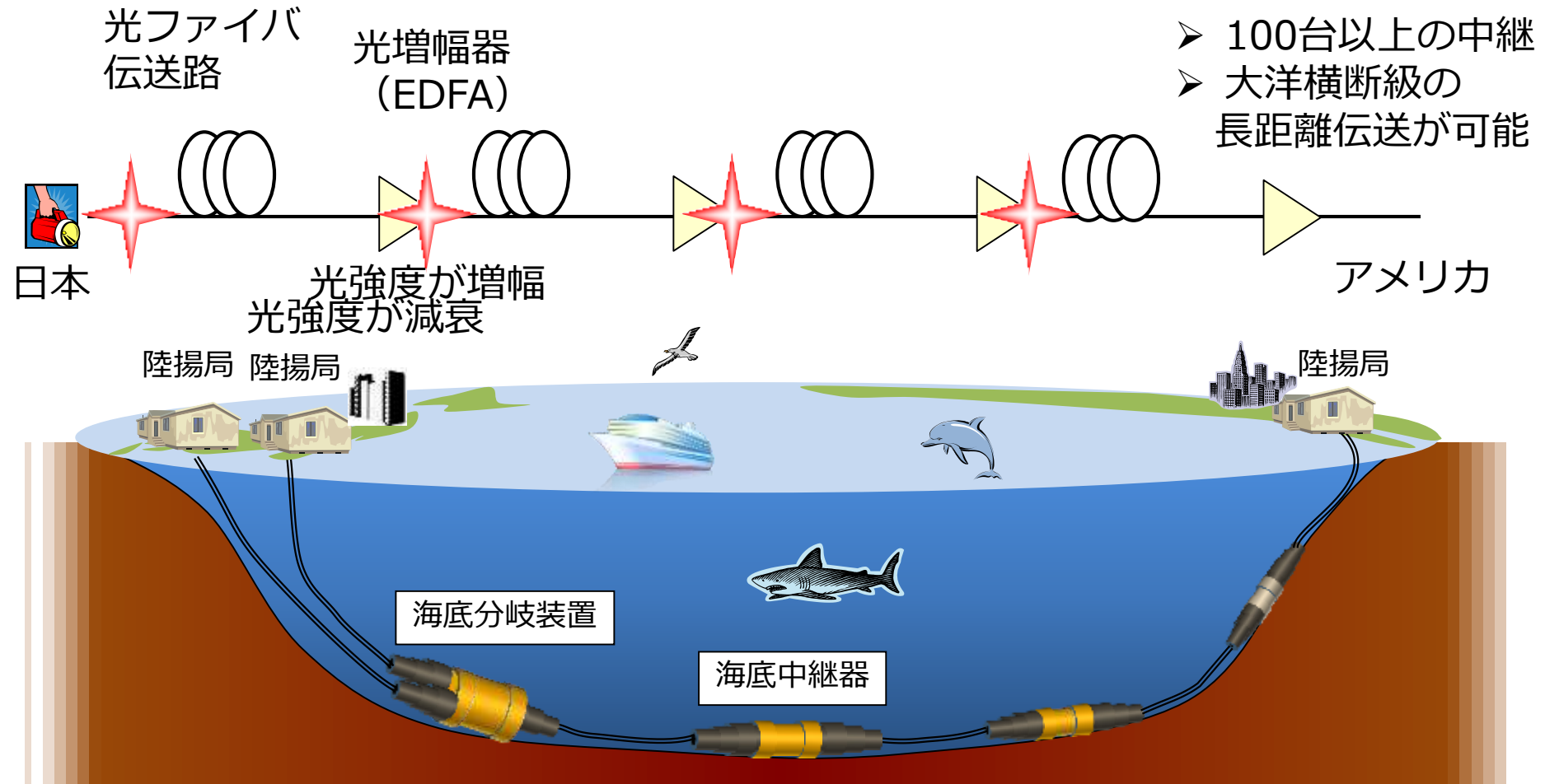
(株)KDDI総合研究所  
高橋 英憲

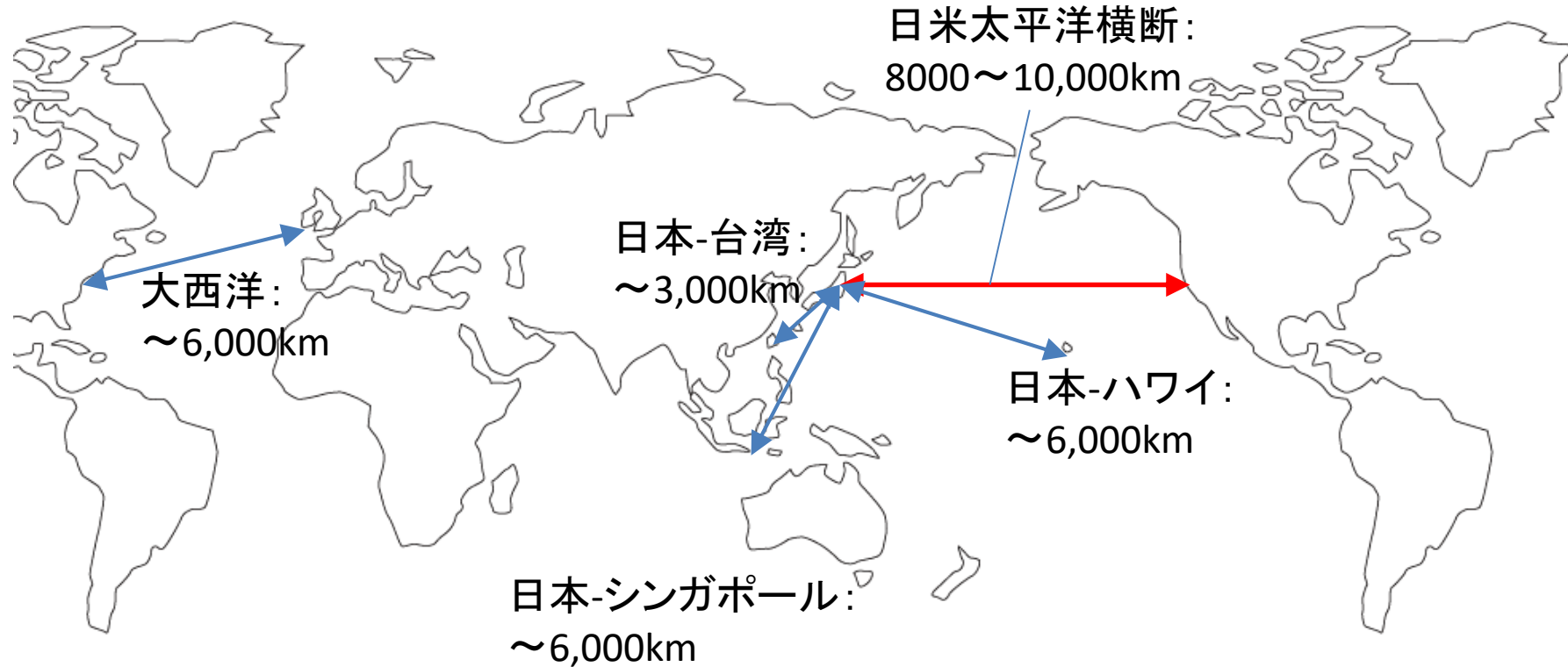
※KDDI(株)  
グローバルネットワーク・オペレーションマネジメント部  
海底ケーブルグループ兼務

## 単一コア・シングルモードファイバ(SMF)



## ◆ 長距離光ファイバ伝送技術の特徴：光増幅器（EDFA）による中継伝送





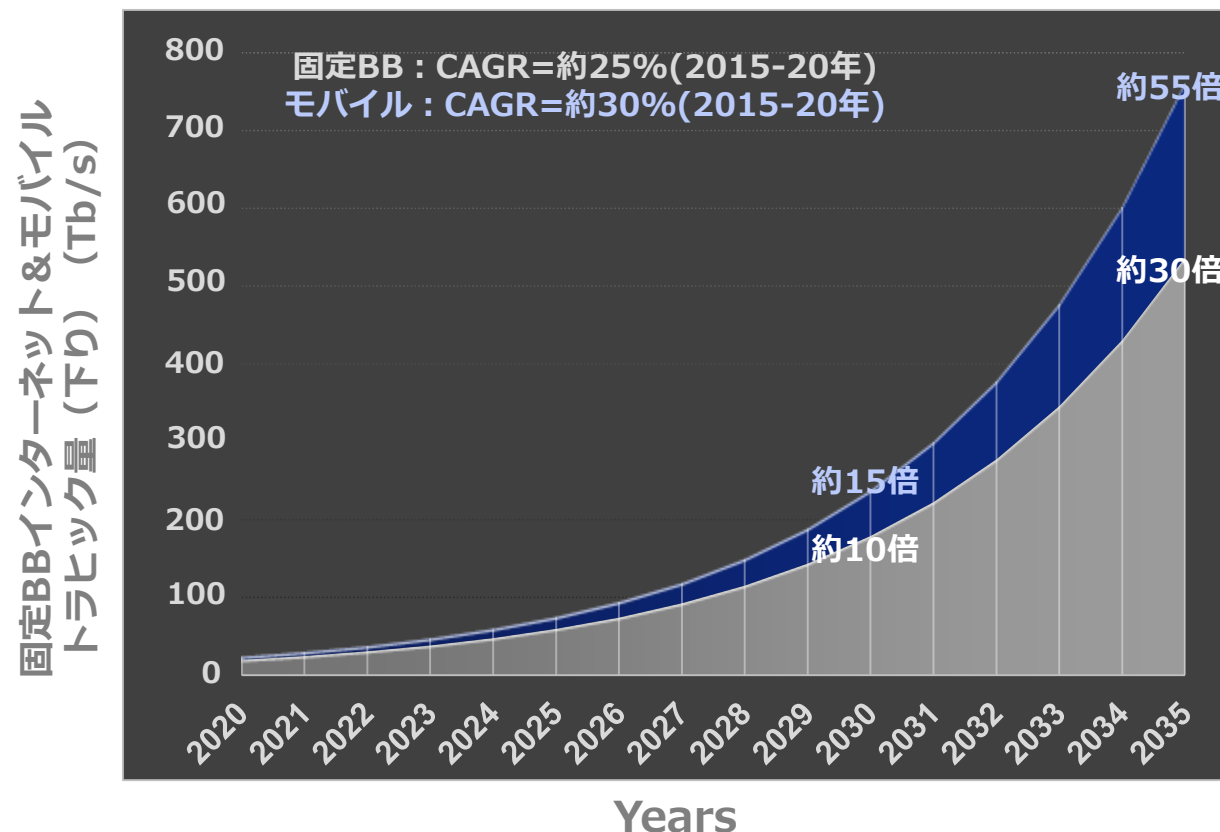
その他

新潟-ロシア: ~1,000km

三重-沖縄、北海道-千葉: ~2,000km

太平洋横断：もっとも伝送距離が長いクラス

## IPトラフィック：年間約30%の伸び（2035年には30倍以上）



### モバイルの進化

5G/B5G

- ・ VOD
- ・ゲーミング

+

### VR/ARの進化

- ・メタバース

### クラウド・IoTの進化

- ・自動運転
- ・MEC
- ・センシング

Source: 総務省我が国のインターネットにおけるトラフィック集計  
[https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban04\\_02000182.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000182.html)

## ■ 超長距離伝送技術：衛星通信と海底ケーブル

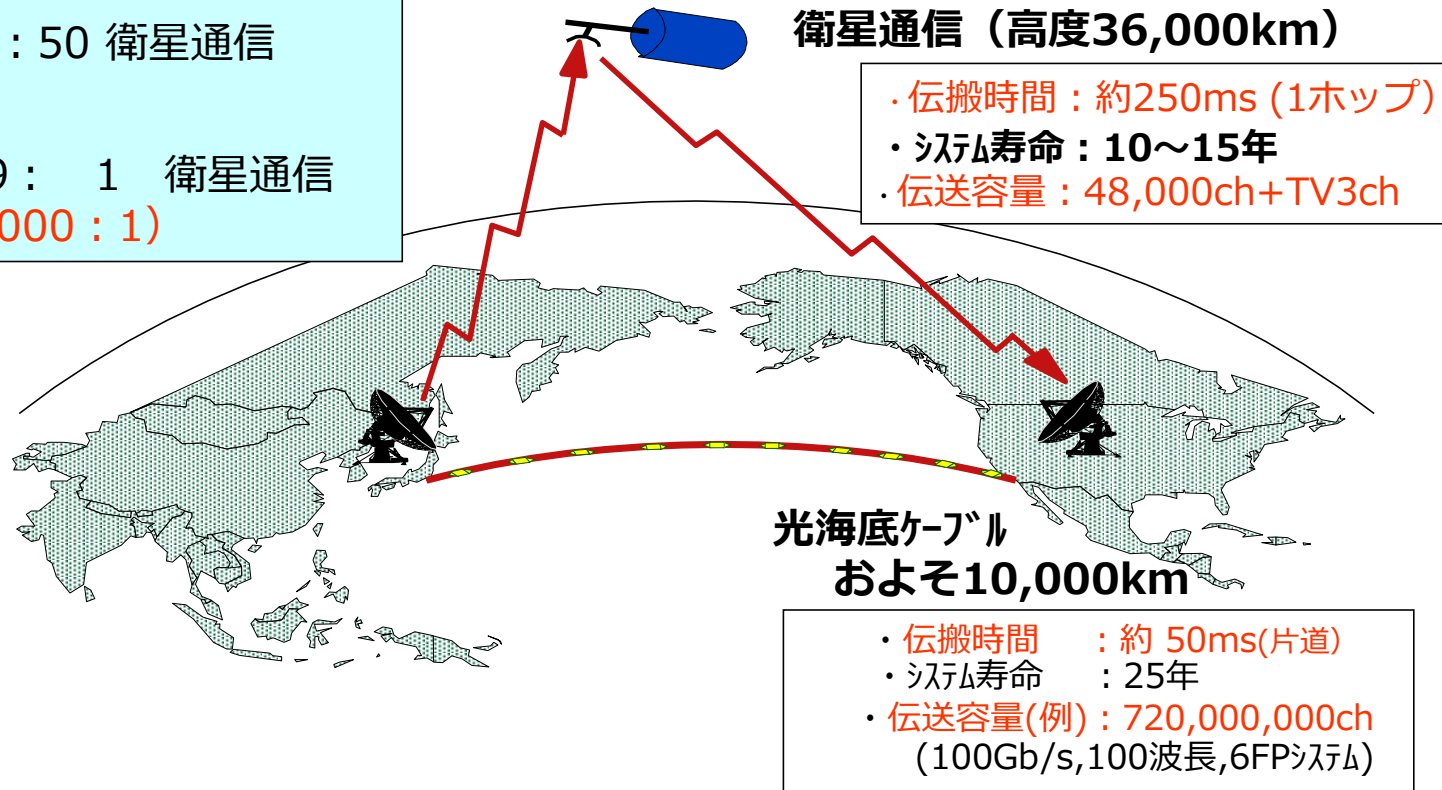
衛星通信と海底ケーブルの今昔

<1995年頃>

海底ケーブル 50 : 50 衛星通信

<現在>

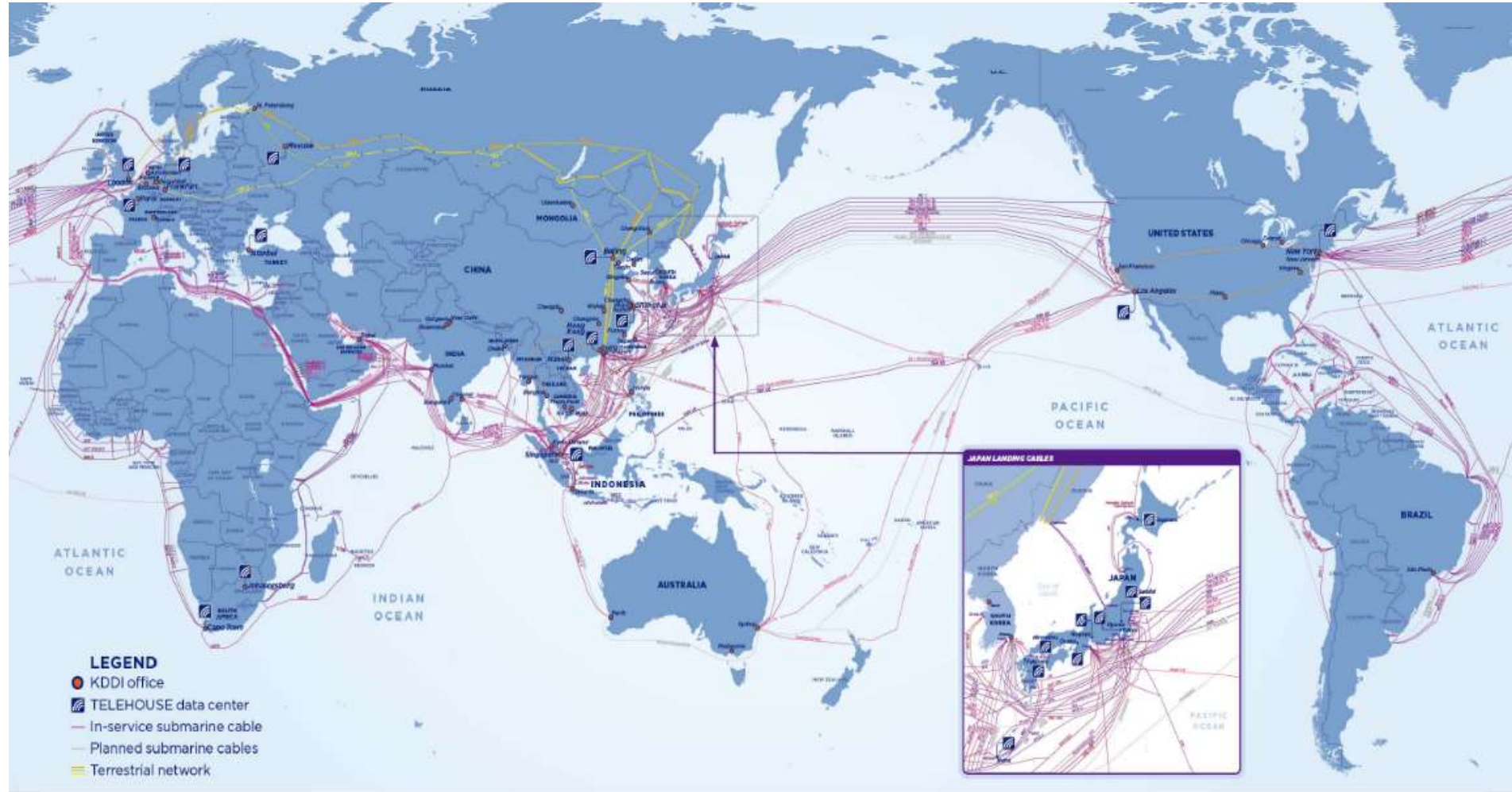
海底ケーブル 99 : 1 衛星通信  
(容量は> 1000 : 1)



衛星は移動体・同報(放送)へ  
海底ケーブルは大容量伝送へ

# 世界の光海底ケーブルシステム

## ■Number of submarine cable ~year of 2021: 486 [1]

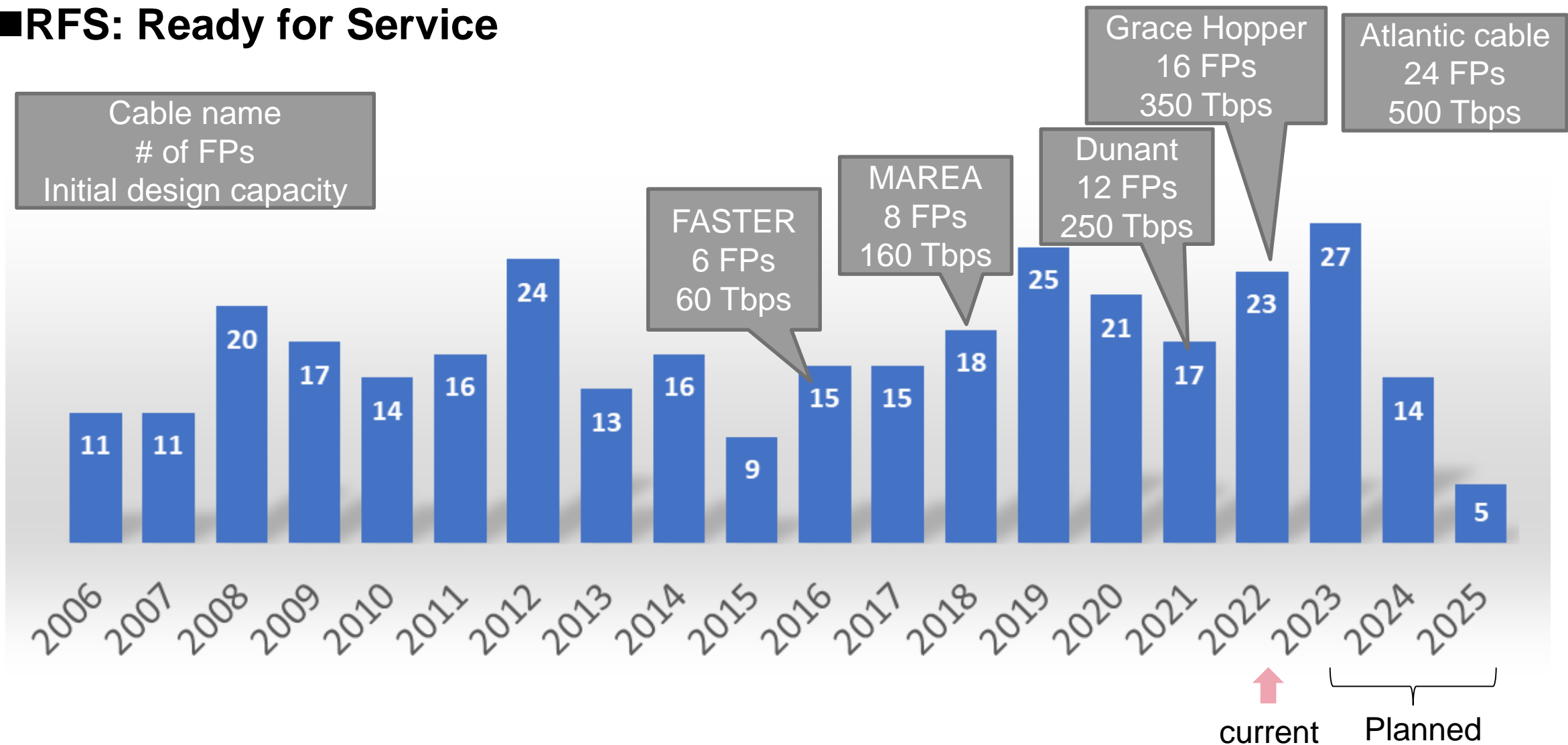


[1] TereGeograpy, Submarine cable map 2022



# 運用開始年別の建設数(from 2006 to 2025)

## ■RFS: Ready for Service



Source: Counted at Submarine cable map, TeleGeography



# 太平洋横断ケーブル“FASTER”(2016年6月)

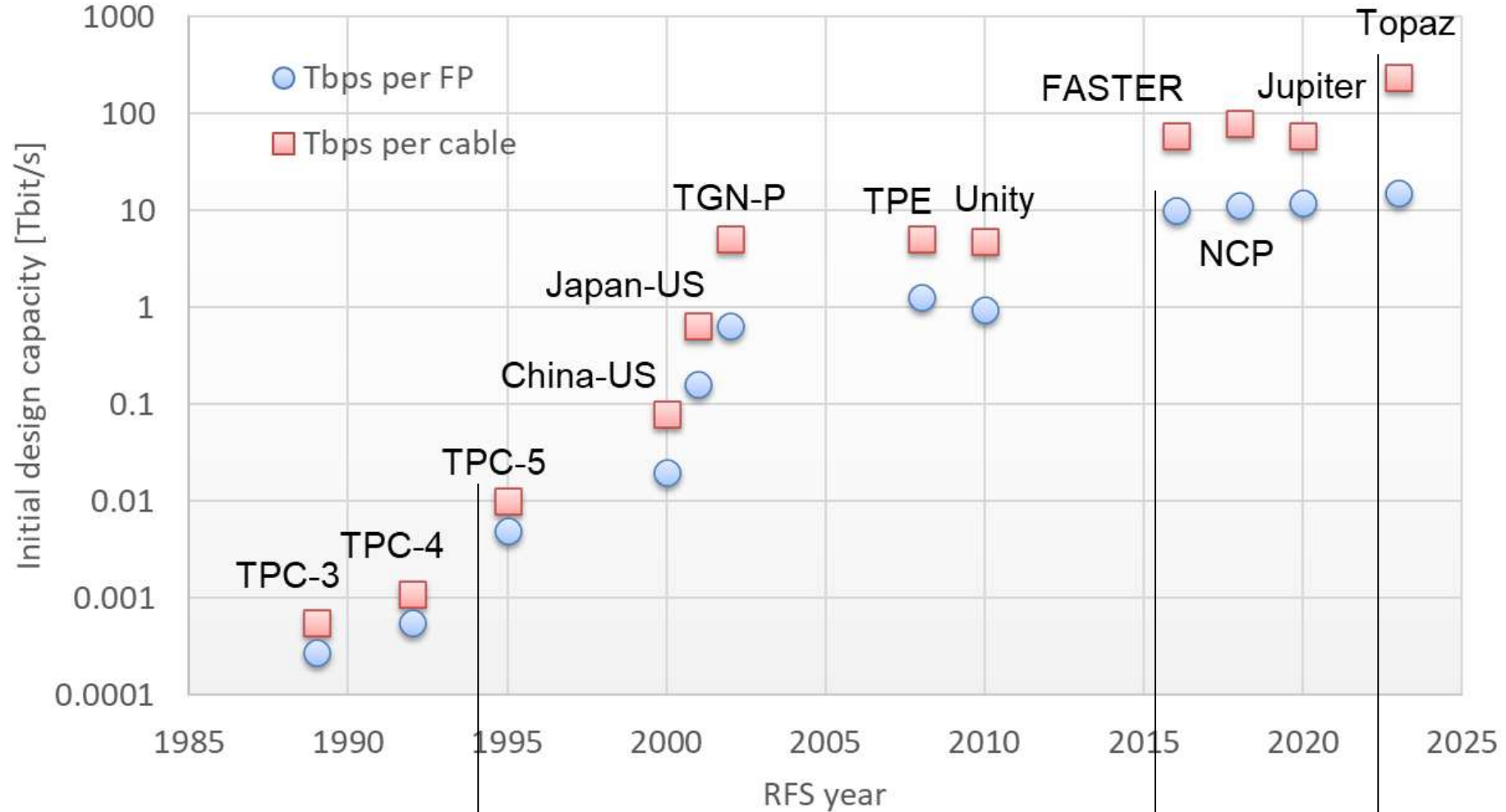


- |             |   |
|-------------|---|
| 1) ネットワーク構成 | 日本～米国   |
| 2) 運用開始     | 2016年6月   |
| 3) 初期設計容量   | <b>60Tbps</b>   |
| 4) 総延長      | 約9,000km  |
| 5) 共同出資者    | KDDI (日本)、China Mobile International (中国)<br>China Telecom Global (中国)、Google (米国)<br>SingTel (シンガポール)、Global Transit (マレーシア) |
| 6) システム供給者  | NEC (日本)  |

# TPC-1とFASTERの比較

	TPC-1	FASTER	比較
<b>建設時期・期間</b>			
運用開始年	1964年6月	2016年	52年後
建設期間	約2.5 年	約2年	
<b>技術面</b>			
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	60Tbps 電話 <b>7.2億</b> 回線分	(64kbps換算) 約 <b>560万倍</b>
<b>費用面</b>			
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	43円	約535万分の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5000分の1	<b>約5350万分の1</b>

# 光海底ケーブルシステムの伝送容量の変遷



光中継器:  
受信方式:  
ファイバペア数

Regenerator

直接受信

Up to 8 FPs

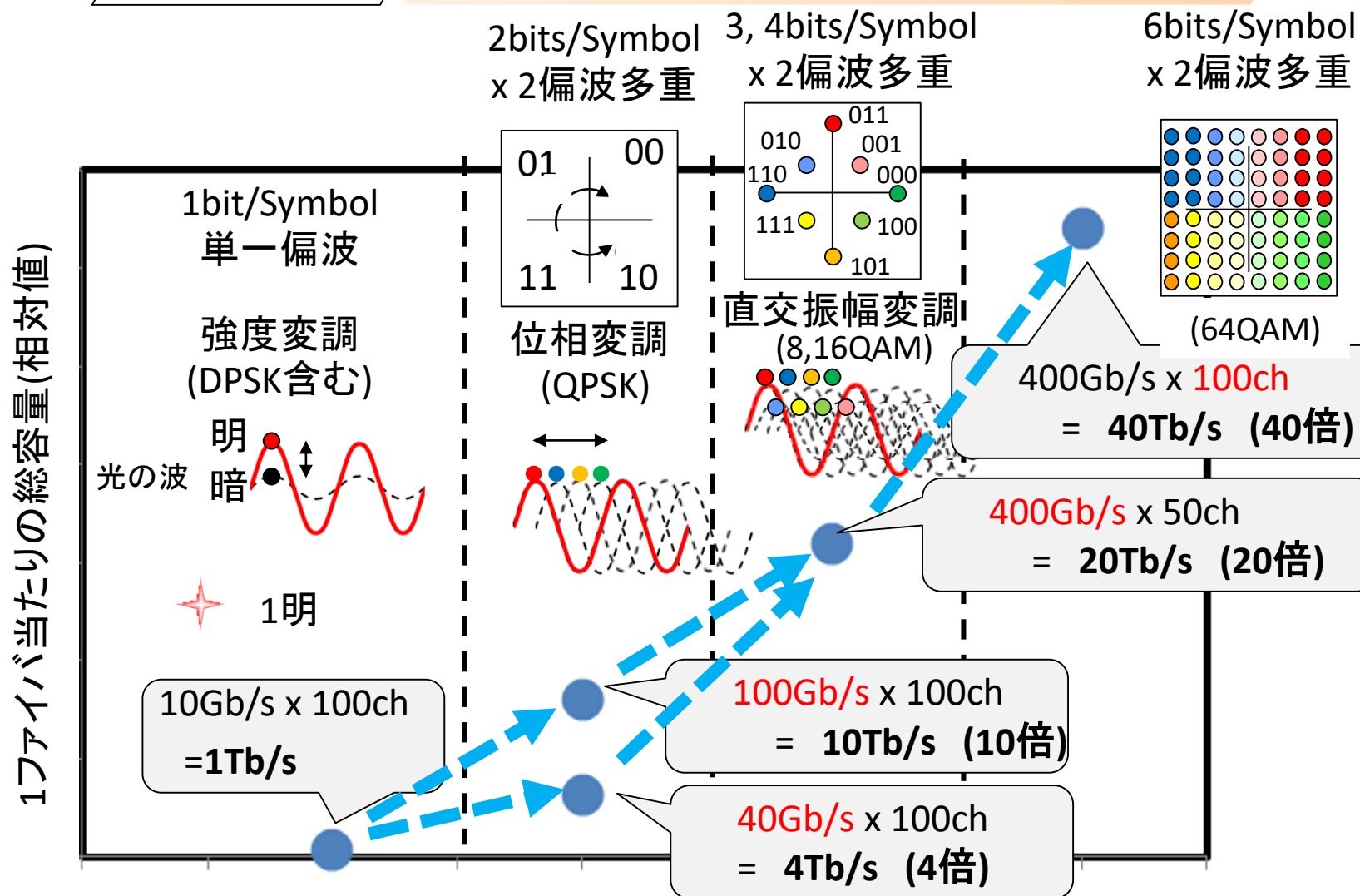
EDFA (& WDM)

デジタルコヒーレント

Over 12 FPs

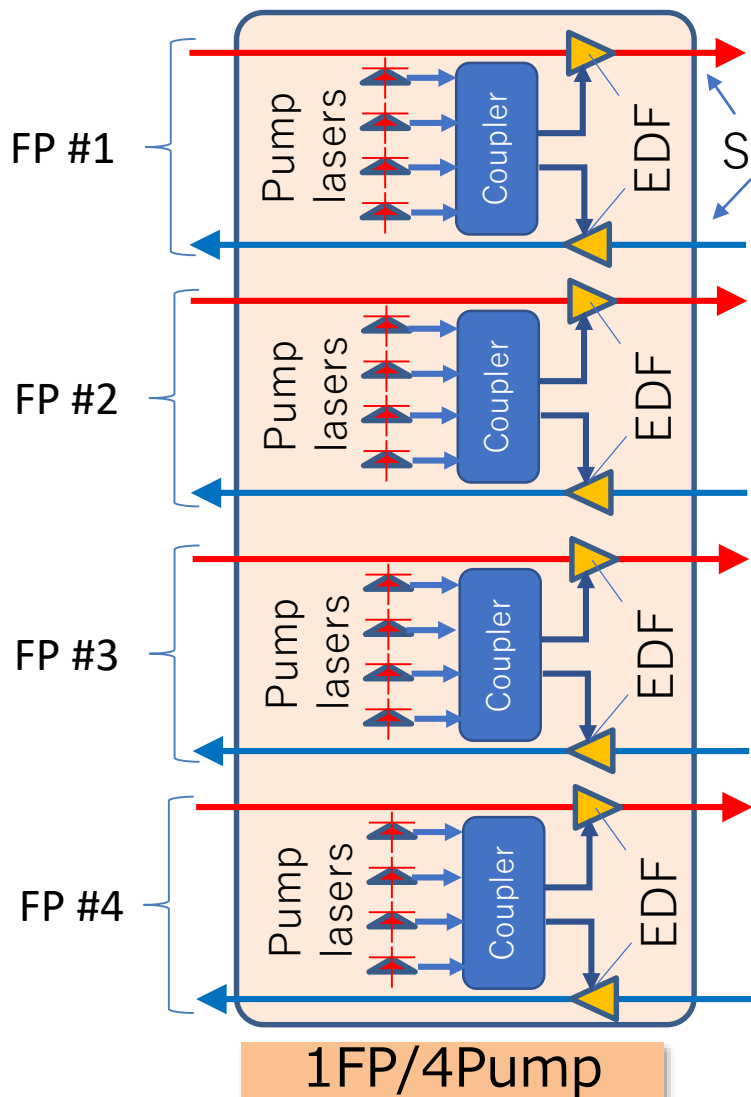
～2010年

デジタルコヒーレント

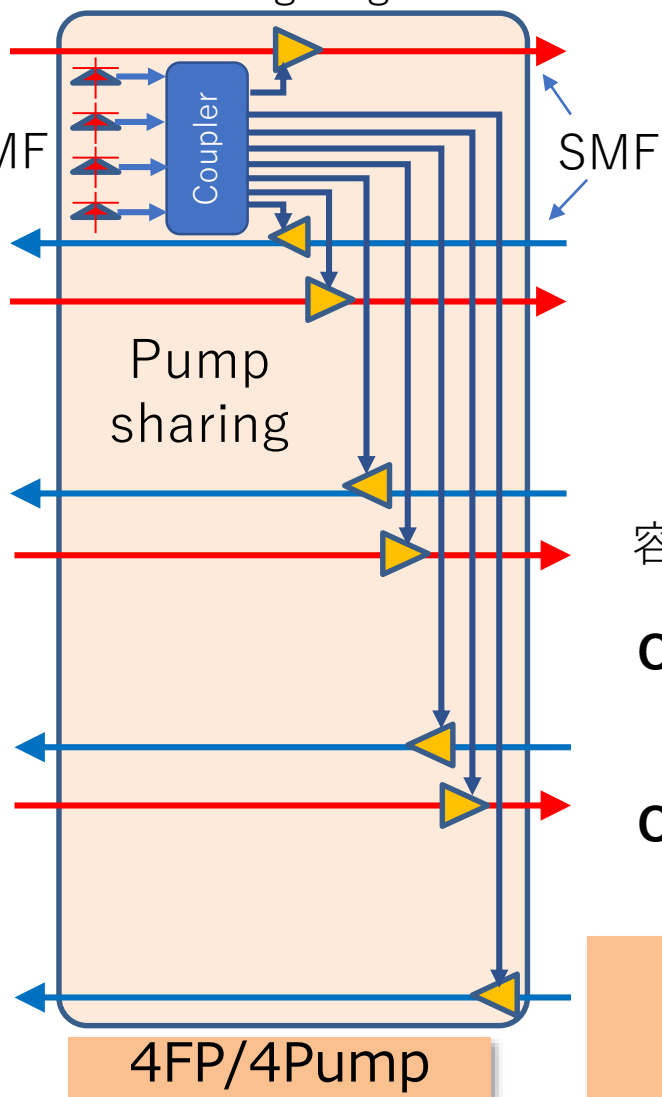


※さらに  
Probabilistic  
Constellation  
Shaping (PCS)など  
に発展

従来構成



“Submarine” SDM  
still considering single core fibers



## Point #1:

- 複数FPにポンプ光をシェアする  
部品減少・過剰損失の低減
  - ASN社は「SDM1」と表現

## Point #2:

- 電力制限下でのシャノン限界  
の特徴を利用

$$C = N \times B \times 2\log_2(1 + SNR)$$

容量

コア数

信号雑音比S/N

Case#1: SNRを4倍に (high-QAM)

$$C_1 = N \times B \times 2\log_2(1 + 4SNR) \text{ (log)}$$

Case#2: コア数を4倍に (low-QAM)

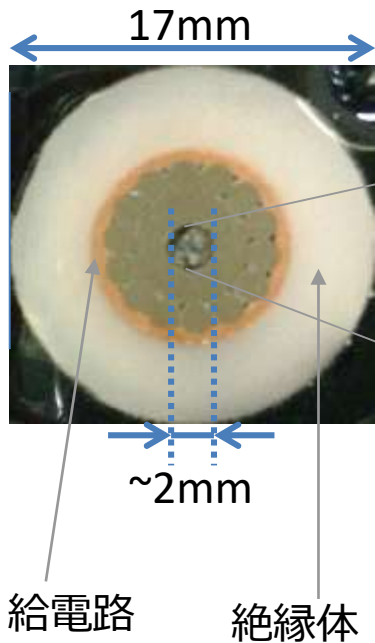
$$C_2 = 4N \times B \times 2\log_2(1 + SNR) \text{ (linear)}$$

$$C_1 < C_2$$

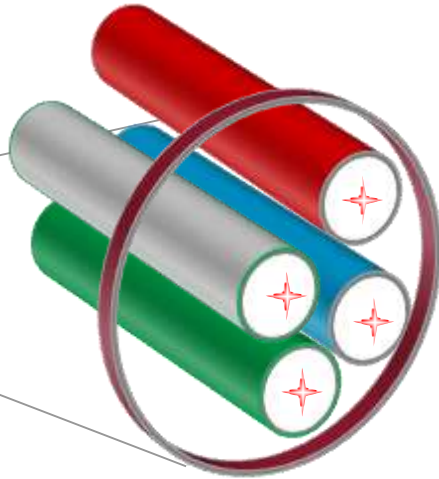
低いQAMと多くのコアの組み合わせ

# 多芯化（多コア化）の流れ（推測）

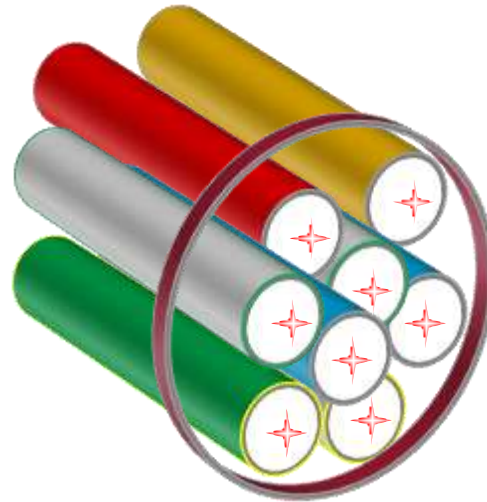
LWケーブル断面図



過去～最近まで



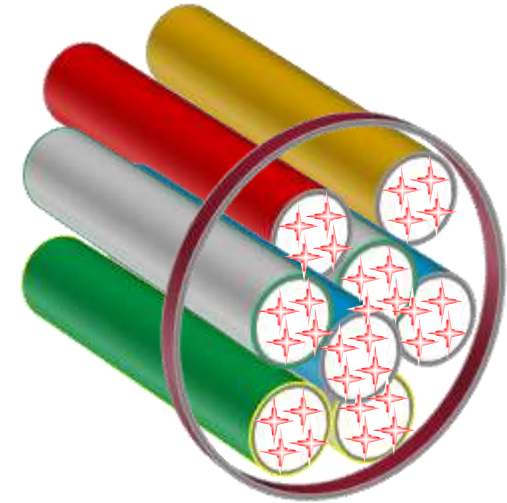
最新“High fiber count cable”[1]



同一の内径内:  
6 FPs => 12 FPs  
大内径の場合(20mmφ)  
8 FPs => 16 FPs

更なる本数増加へ

Near future:  
Multicore fiber  
(MCF) cable



ケーブル内のファイバ数が限界に達してから、同一断面積内のコア数を増加させる方法  
又はコア数当たりが低コストになる場合

[1] S. Fujihara, “High Fiber Count Cable for SDM,” SubOptic2019, OP14-3, 2019.

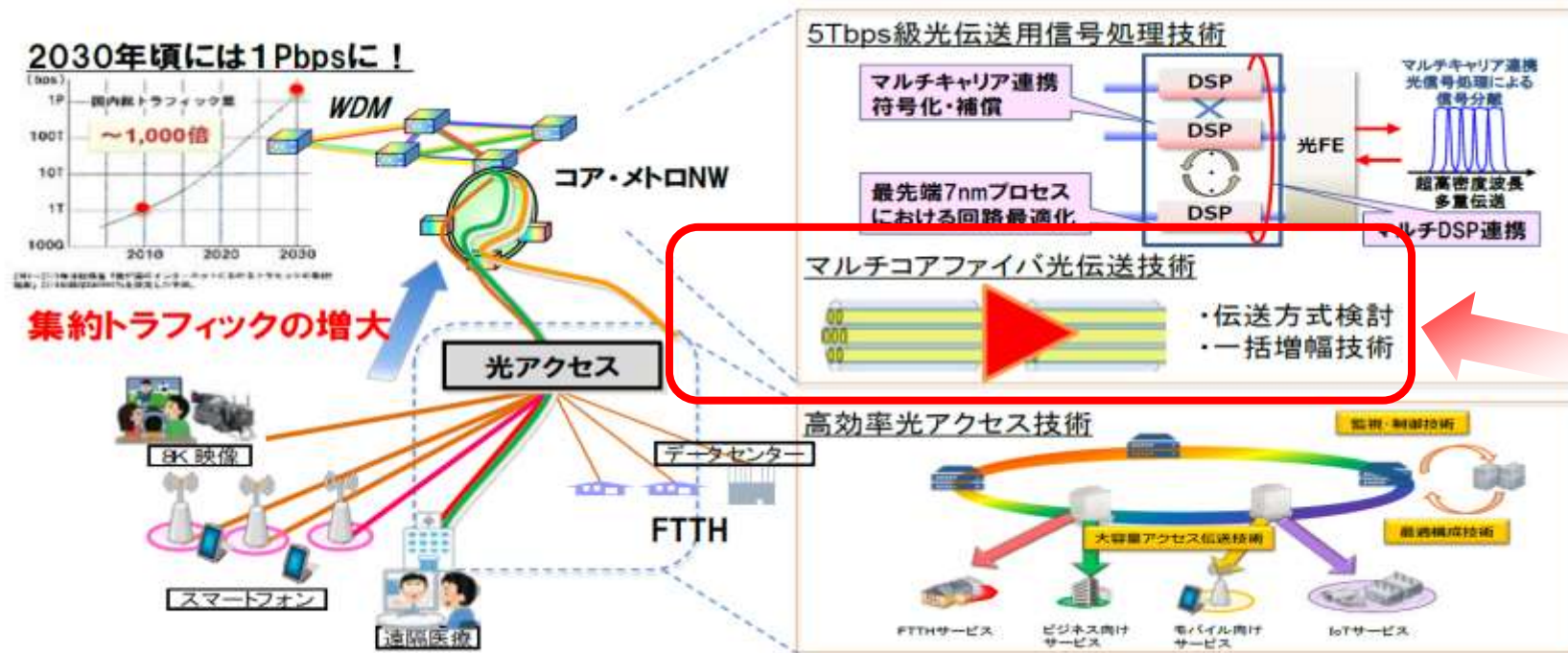


## ■ 新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発(2018) [1,2]

### (2) マルチコア大容量光伝送システム技術

⇒ 海底ケーブルに関する研究開発を実施

期間：2018年度～2021年度



受託組織 [2]:

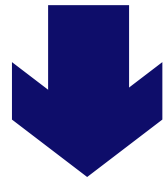
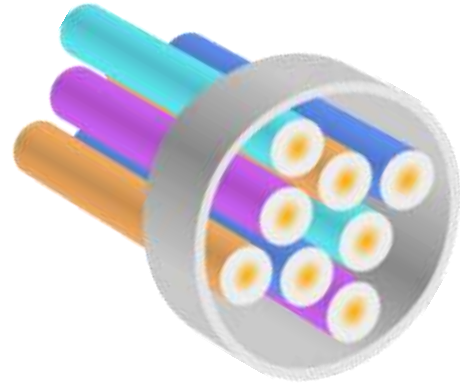
- 東北大学
- 住友電工
- 古河電工
- 日本電気
- オプトクエスト
- KDDI総合研究所

[1] [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000544575.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000544575.pdf) , [2] [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000556831.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000556831.pdf)

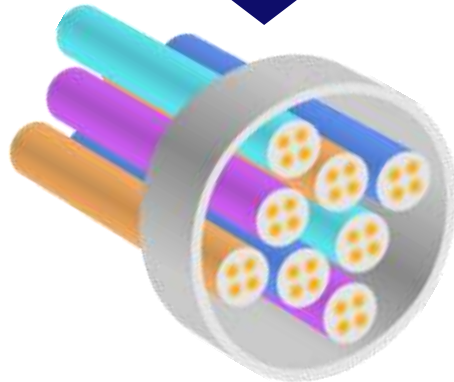


# マルチコアファイバを収容した光海底ケーブルの開発

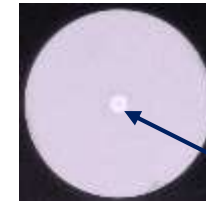
LW(Light Weight)  
ケーブル (17mm径)



標準クラッド径 (125μm) の  
4コアファイバを用いた場合



シングルコアファイバケーブル(現状)

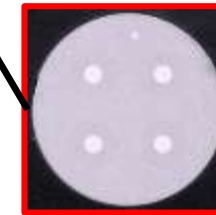


32心 × 1コア = 32コア

コア

クラッド径125μm  
(被覆込み250μm)

マルチコアファイバケーブル



32心 × 4コア = 128コア

クラッド径125μm  
(被覆込み250μm)

[https://jpn.nec.com/press/202110/20211004\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202110/20211004_01.html)

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

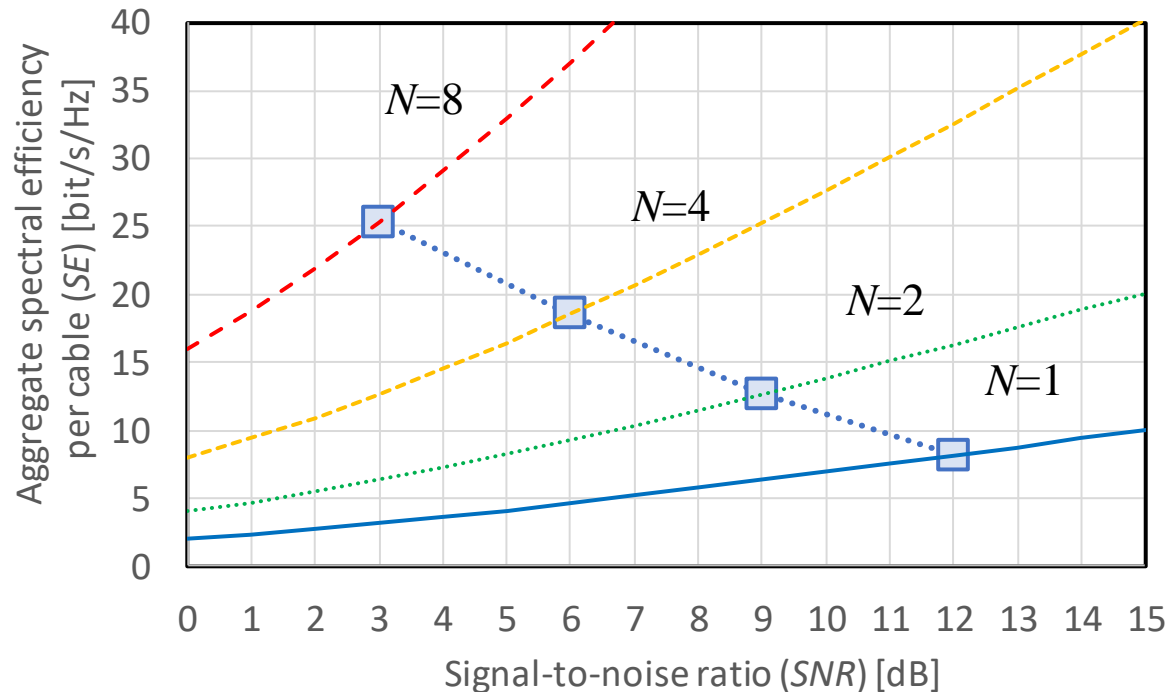
## ■The ultimate aggregate spectral efficiency $SE$ given by the Shannon limit

$$SE = \left( \frac{C}{B \times FR} \right) = N \times 2 \log_2(1 + SNR)$$

$C$ : cable capacity,  $B$ : bandwidth,  $FR$ : spectrum occupancy ratio,

$N$ : total number of fiber cores,  $SNR$ : signal-to-noise ratio

## ■ $SNR$ is in inverse proportion to $N$ in a constant-power-supply condition



- Pros: Low SNR means low power per signal, so nonlinearity tends to be negligible for the capacity-optimize cable [1,2,3]
- Cons: The effectiveness of capacity increment is 容量増加は飽和傾向に

For sustainable growth:  
利用可能な電力を増加させる必要性

[1] E. Mateo et al., SubOptic2019, OP8-4 (2019). [2] M. Bolshtyansky et al., SubOptic2019, OP18-1 (2019).

[3] E. Mateo et al., OECC/PSC2019, MB1-1 (2019).



KDDI Research