

深海底から日本列島の未来を探る技術

境界領域における電気・情報系技術の役割

東京大学生産技術研究所

(有)マリン・エコ・テック

白崎 勇一

深海底から日本列島の未来を探るため 大きな役割を演じている 主要な電気・情報系関連技術

光通信ケーブルネットワーク技術

計測制御技術：水中ロボット、自動操船

水中超音波技術

- (1)高精度海底測量：マルチナロービーム測深システム
- (2)流速分布：ドップラソナー
- (3)水中音響測位
- (4)水中音響通信
- (5)探査ソナー

高精度測位技術：衛星航法 GPS 1980代末

1

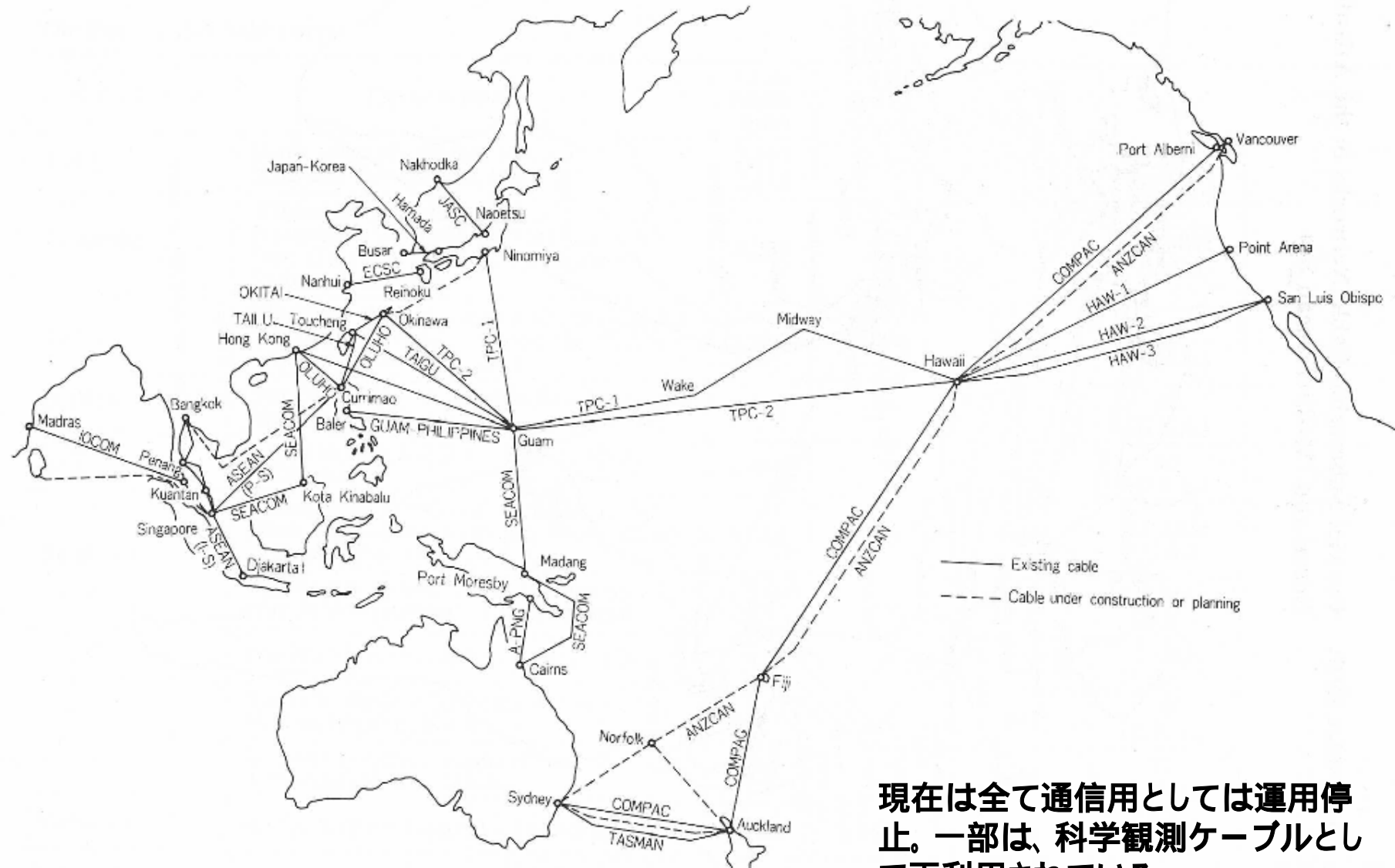
通信用光海底ケーブル技術

海洋地球科学観測ケーブルネットワークのベースとなる技術

常に最先端技術が導入されてきた分野

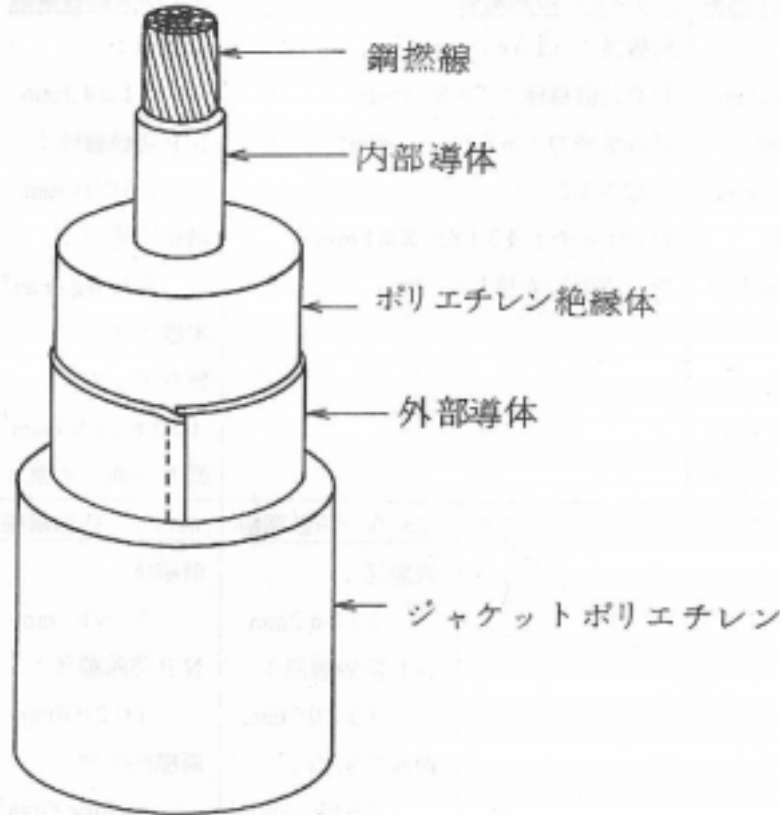
海底調査技術、測位技術
造船技術、水中ロボット技術
超高速光通信技術、IT技術

太平洋・東南アジア海域における海底同軸ケーブル

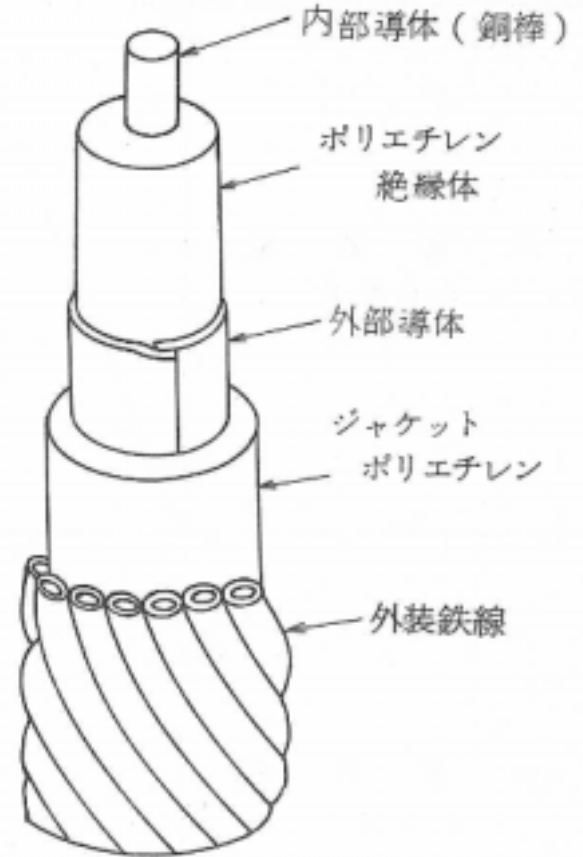


現在は全て通信用としては運用停止。一部は、科学観測ケーブルとして再利用されている。

海底同軸ケーブルの構造

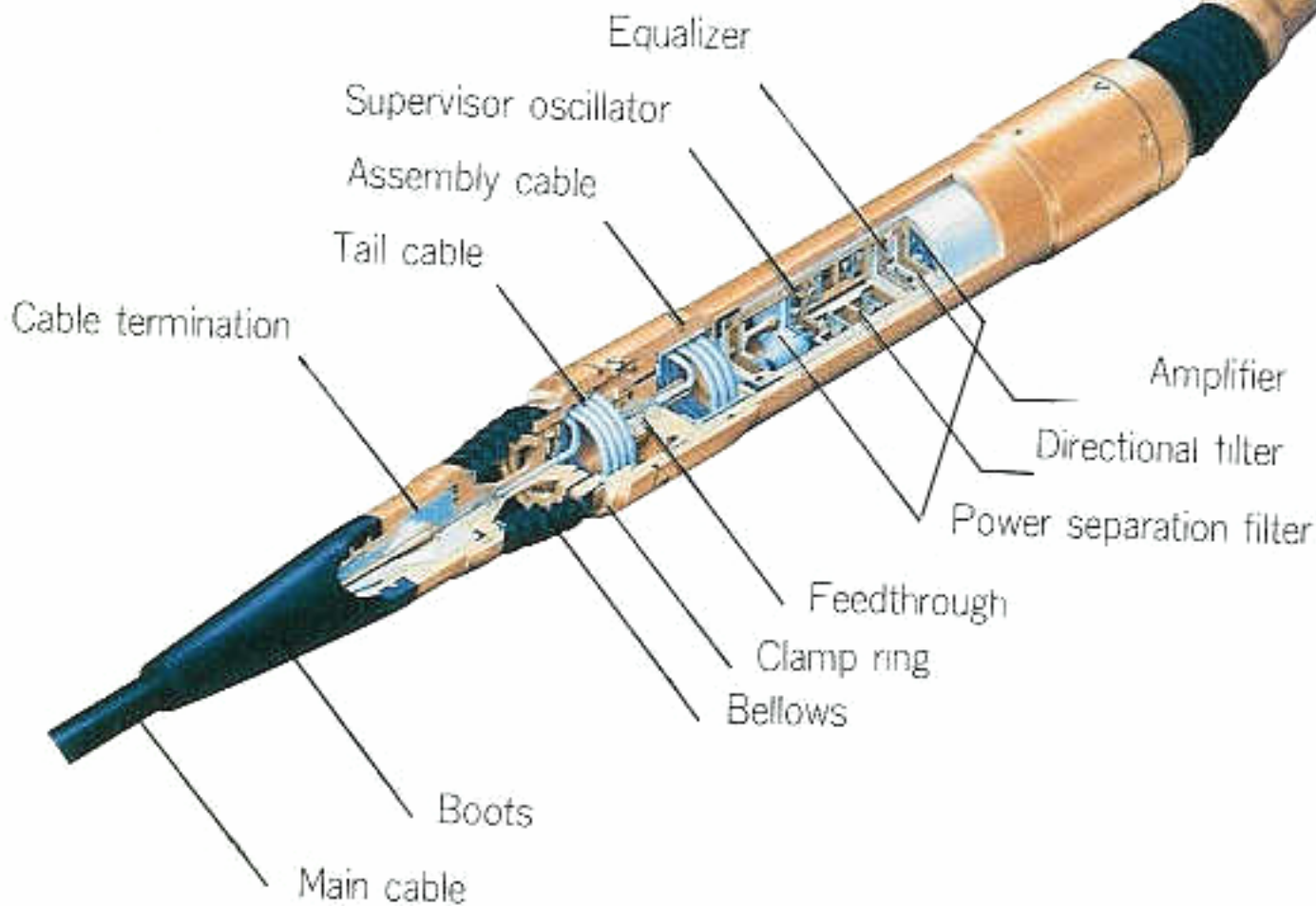


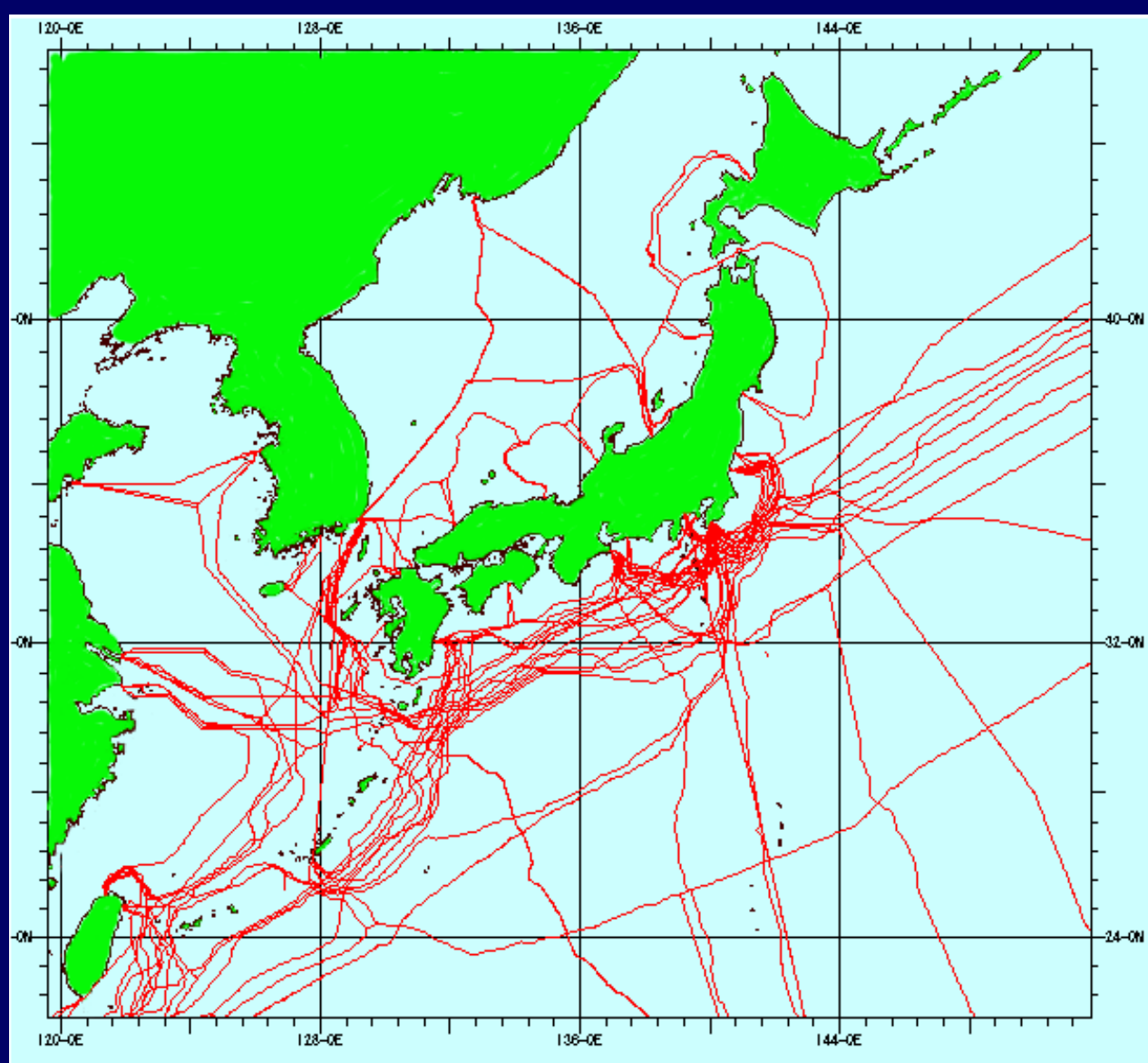
無外装ケーブル



一重外装ケーブル

海底同軸ケーブルの海底中継器

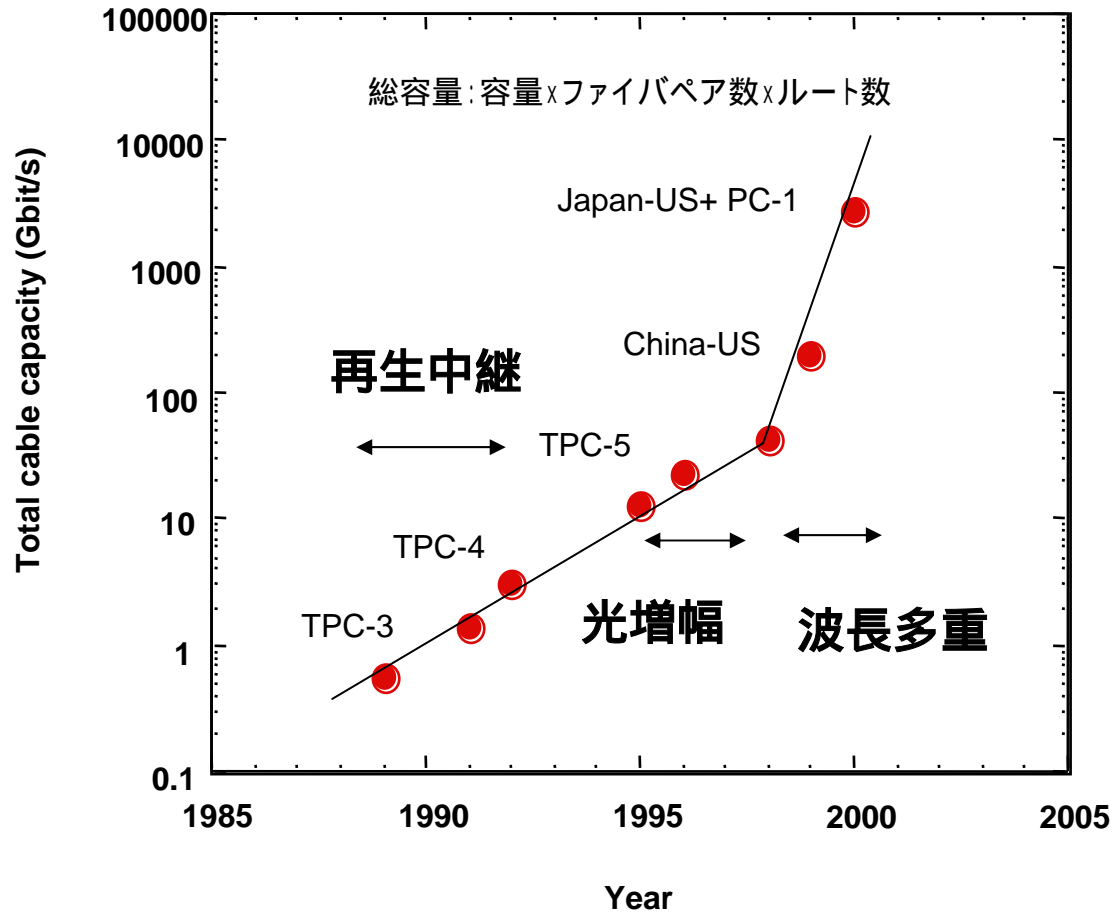




日本周辺に敷設されている光海底ケーブル網(2001)

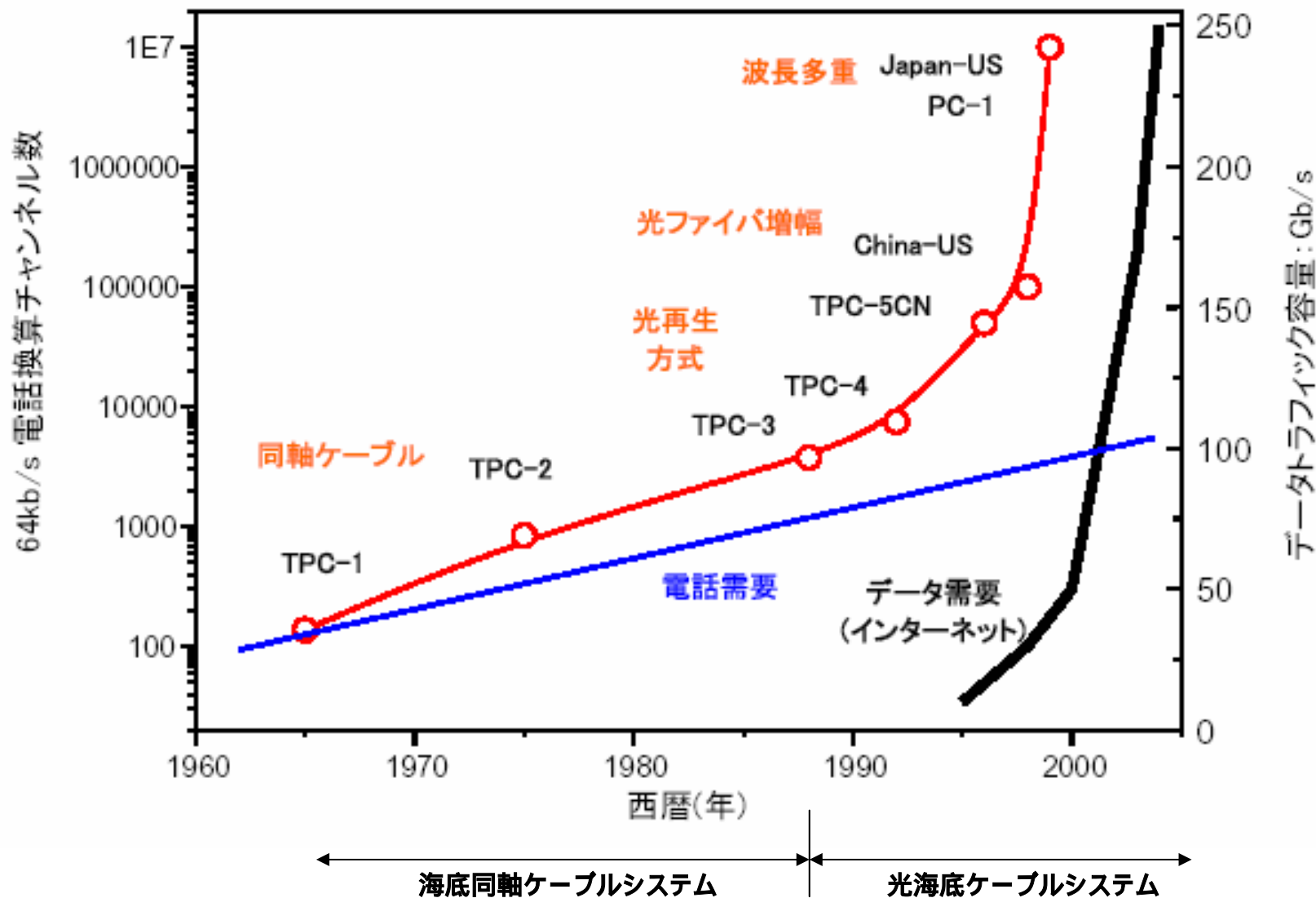
光海底ケーブルの大容量化の推移

- 海底ケーブル総容量:10年で約1000倍!
- 2000年 :1Tb/s*以上



*1Tera bit/s: 10^{12} bit/s (1兆bit / 秒、1200万回線)

太平洋横断海底ケーブルの伝送容量変化と需要の動向



光海底ケーブル通信を支える技術

光通信技術: 超広帯域、超長距離、超高信頼

海底調査技術: 海底地形測量、底質調査等

マルチナロービーム、サイドスキャンソナーによる調査
パイプロコアラによる底質調査, XBTによる水温調査

高精度測位技術: NNSS, GPS, DGPS

造船技術:

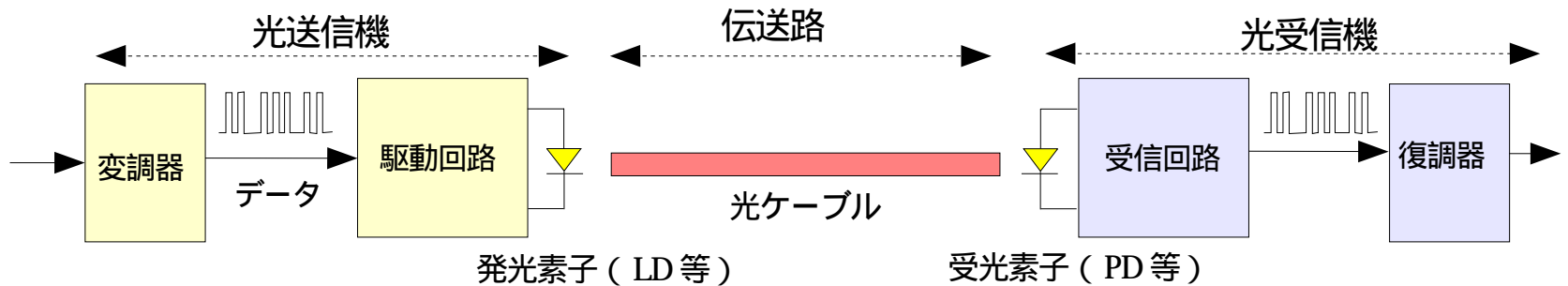
自動ケーブル敷設システム、ダイナミックポジショニング

水中作業技術:

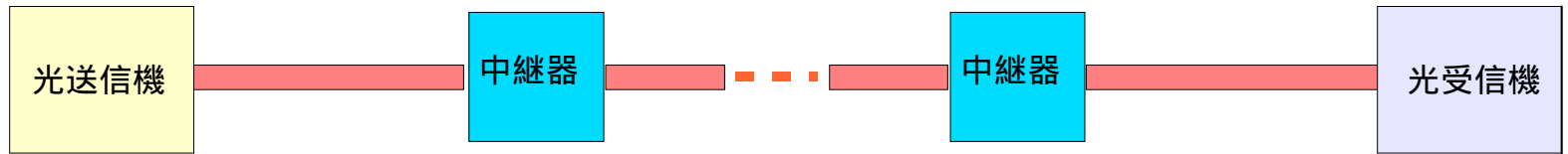
水中ロボット (ROV, AUV) によるケーブル保護、修理

これらは、国内では、最も早い時期に海底ケーブル分野で導入された

光通信システムの基本的な構成

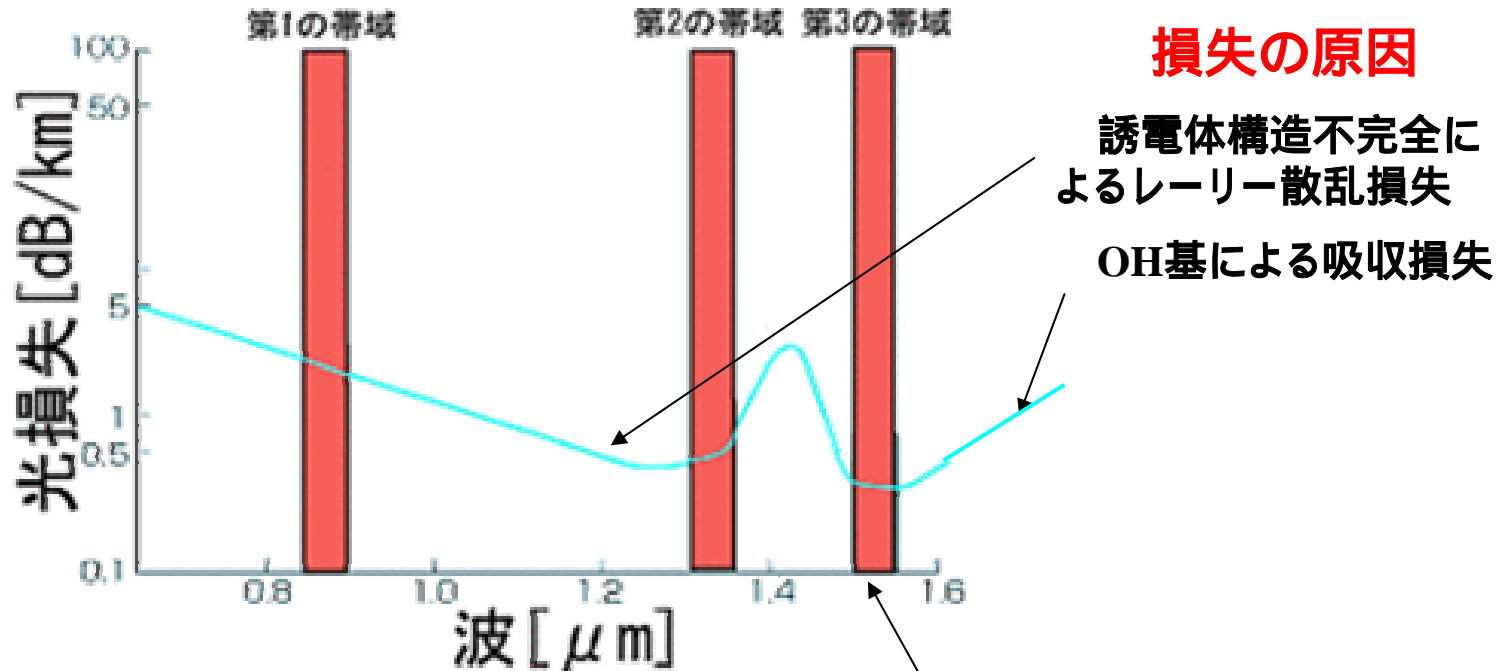


長距離伝送の場合には、光信号を増幅する中継器を挿入する



中継器の方式： 再生中継方式
光増幅方式

光ファイバが持って生まれた損失特性



損失の原因

誘電体構造不完全によるレーリー散乱損失

OH基による吸収損失

1.55 μ mで0.2dB/km

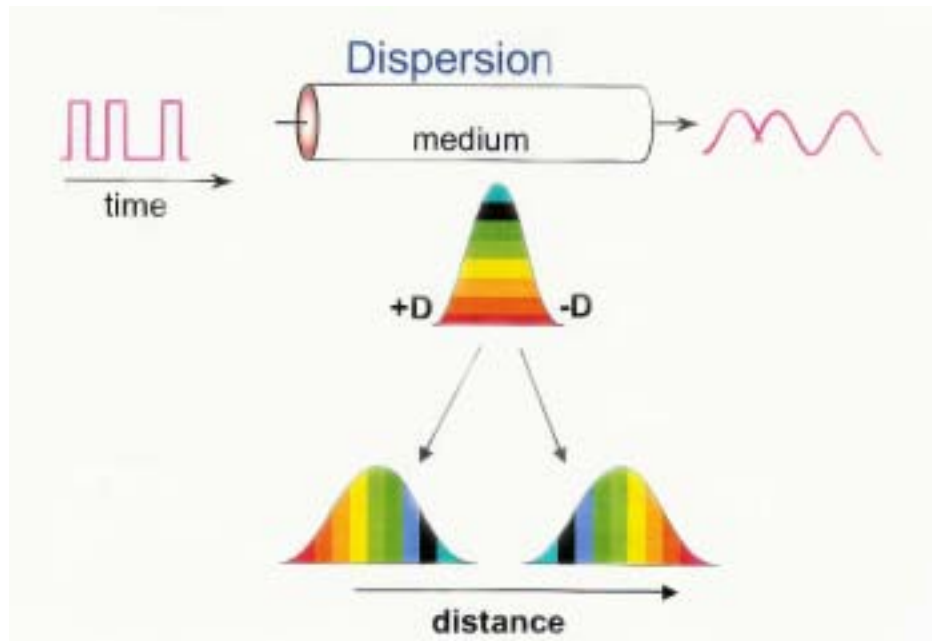
(1km 伝搬後の損失 8 %)

光ファイバーの伝送特性: 伝送帯域

伝送帯域が広い データ通信速度が速い

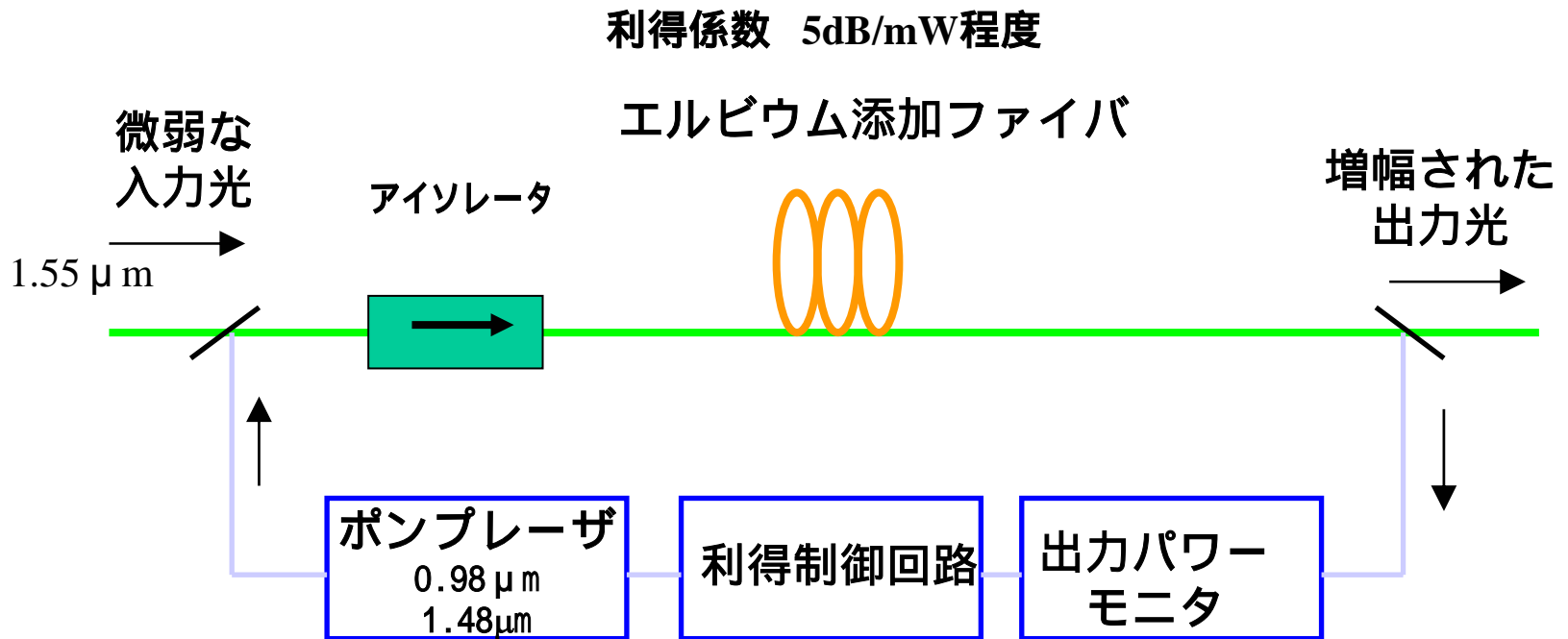
伝送帯域が制限される主な要因(シングルモードファイバの場合)

波長分散: 光ファイバの材料の性質(材料分散)とコアの構造(構造分散)によって生じる波長ごとの光の速度の変化により発生



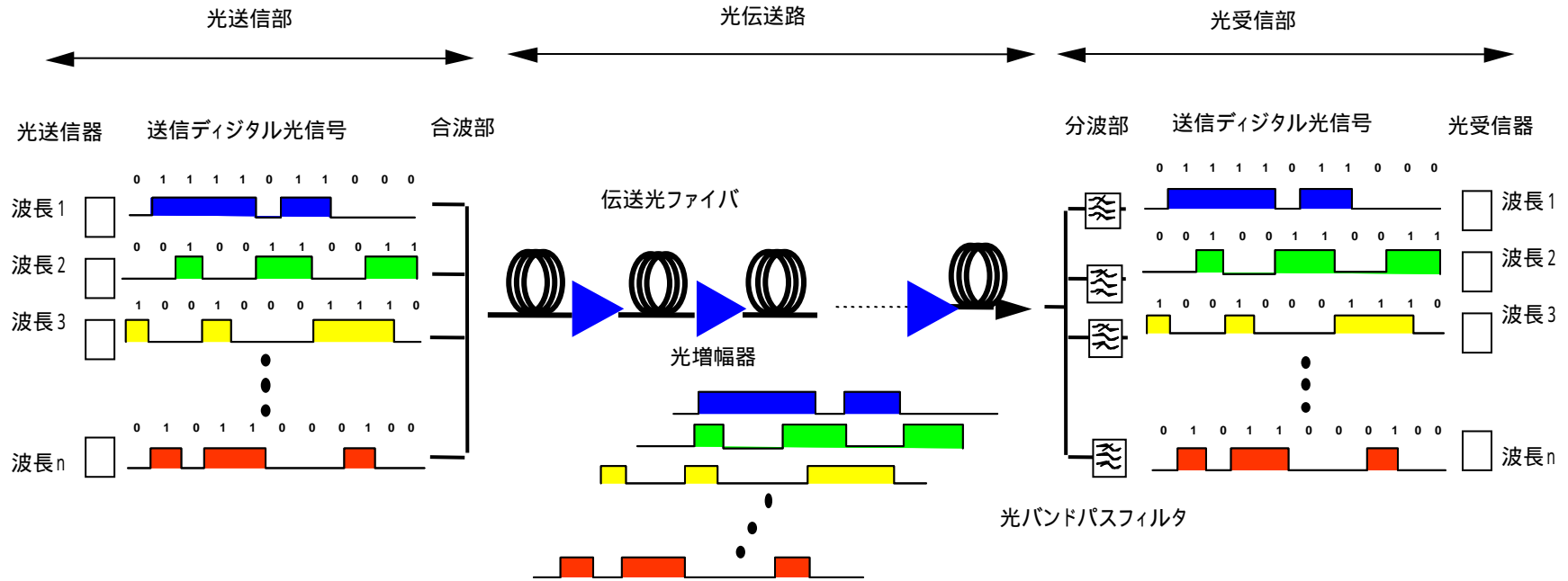
光増幅方式(光アンプ)

システム構成がシンプル
光信号のままで増幅するため広帯域
波長多重技術と組み合わせた超広帯域通信の実現



波長多重 (WDM) システム

超広帯域通信



波長チャンネル間隔: 0.4nm、使用波長の全域: 400nm 1,000チャンネル多重
 1波長チャンネル当たり40Gbpsで伝送する 40Tbpsの超大容量光通信
 DVD映画2時間分は4.7GB (約40Gb) であるから、1,000枚のDVDの情報を
 太平洋を越えた相手国に、およそ一秒間で伝送できる能力

海底ケーブル通信が陸上ケーブル通信と 何が異なるのか？

使用環境：海中

長期間(20年間)設置される

高い水圧(最大800気圧)を常時受ける

金属を腐食させる海水中に設置される

超長距離通信：

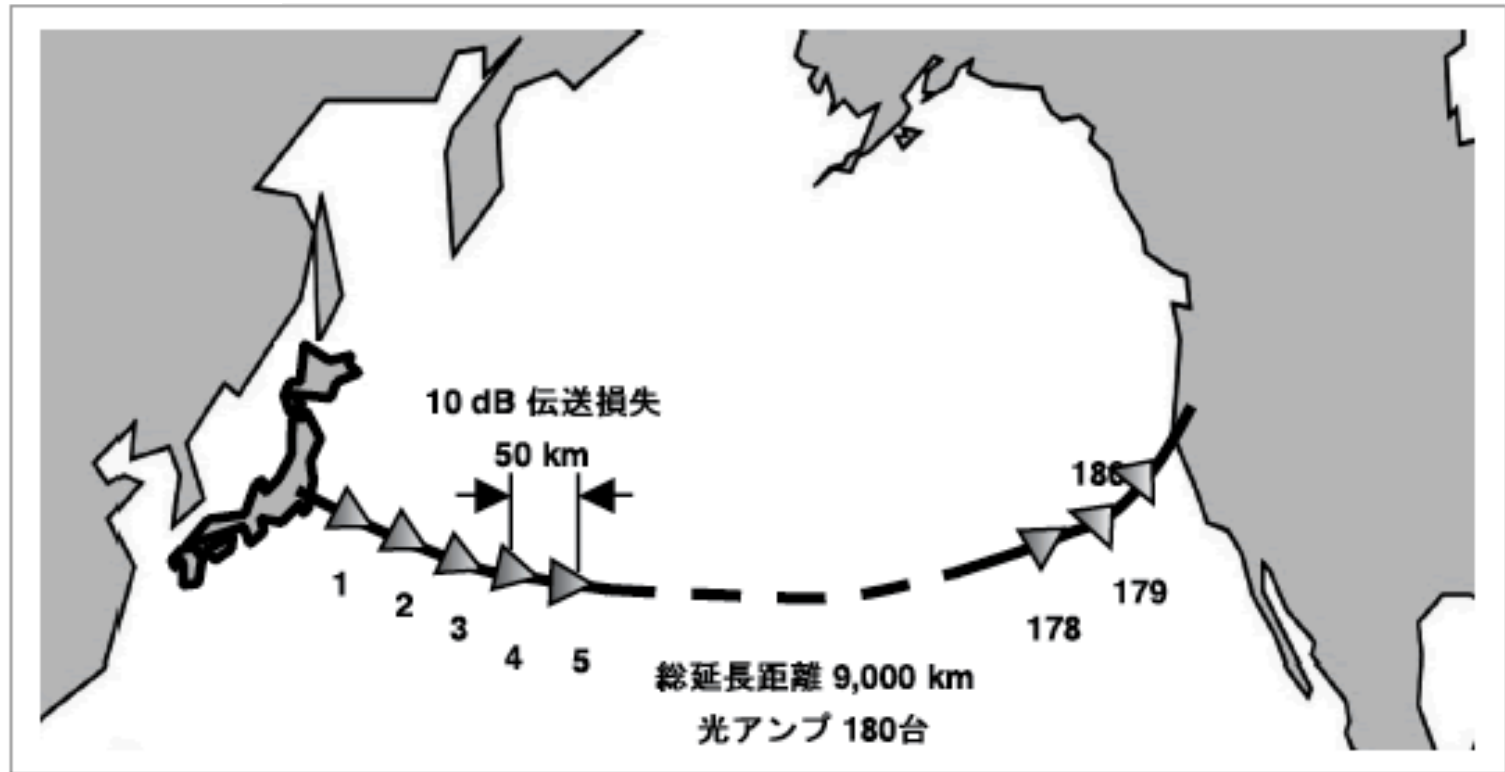
太平洋横断の場合は、ケーブル全長は9,000km

高信頼度の要求：

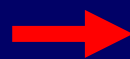
修理は簡単ではない(技術的&経済的に)

太平洋を横断する海底ケーブルでは、180台もの中継器が必要となる(中継間隔50kmの場合)

太平洋横断海底ケーブル用中継器

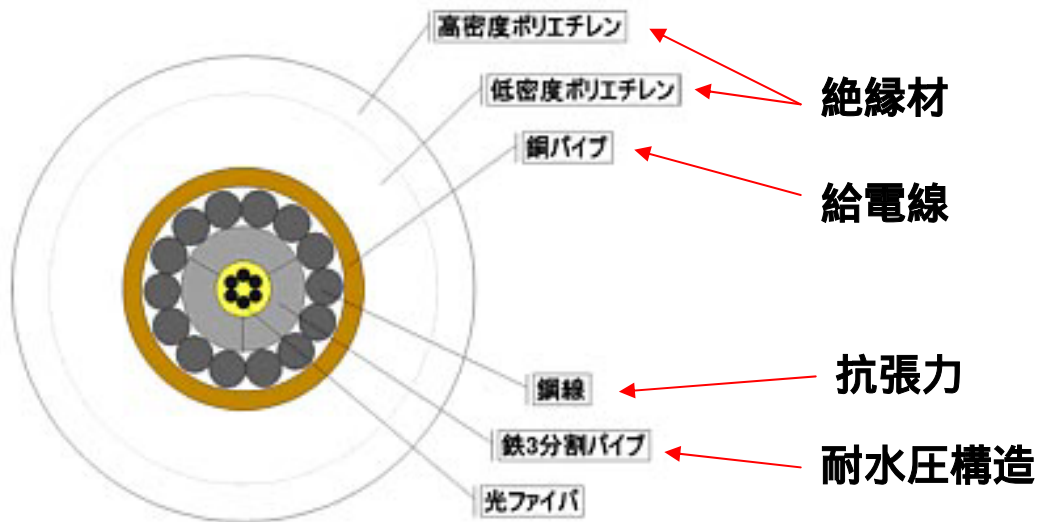


多数の中継器が直列に
接続されているシステム



個々の中継器の特性のバラツキを少なくする
個々の中継器の信頼性を高くする

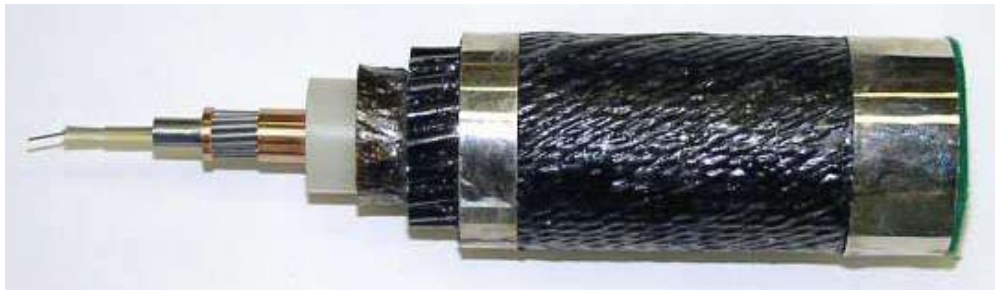
光海底ケーブルの種類と構造



無外装光海底ケーブル(深海用)



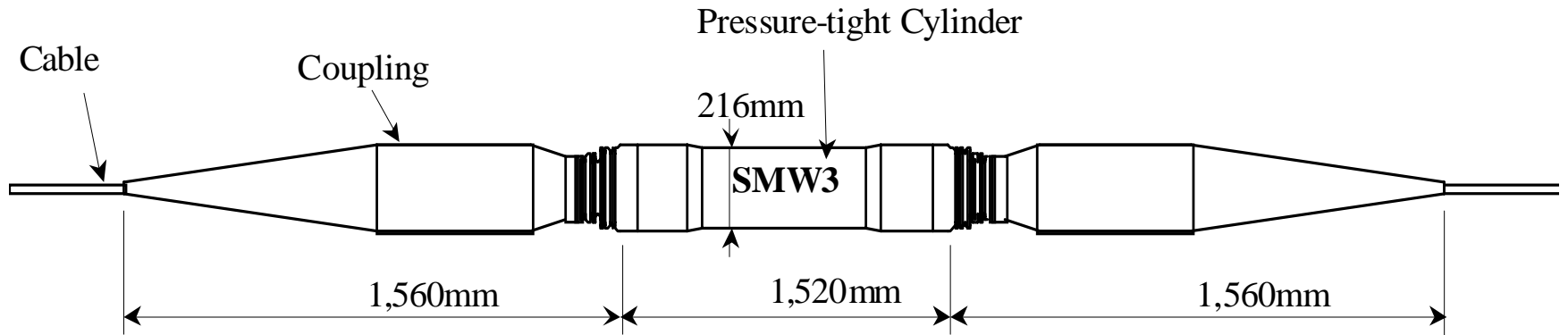
2重外装光海底ケーブル
(水深数10m以浅)



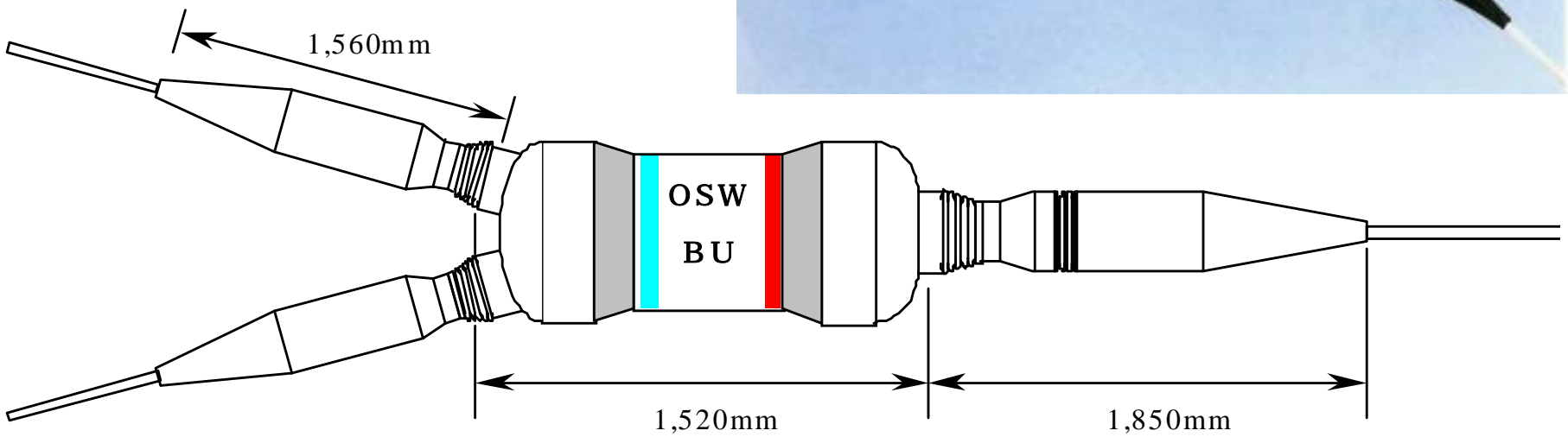
一重外装光海底ケーブル(水深1500m以浅)

海底中継器

40～50km毎にケーブルの間に挿入し、光信号を増幅する

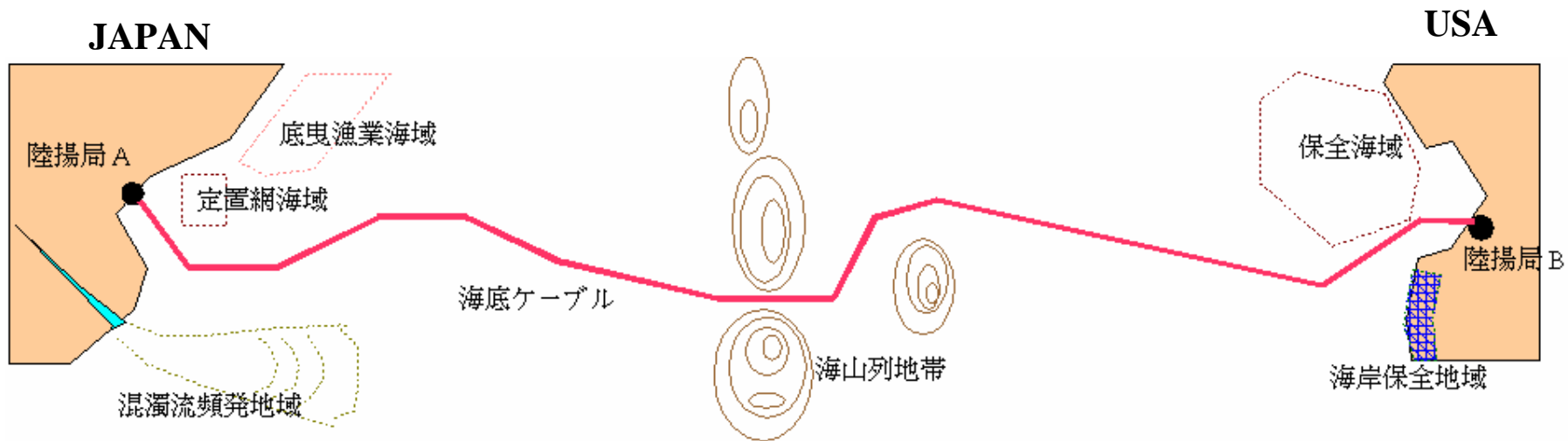


最大適用水深： 8,000m
筐体材料： ベリリウム銅合金
カップリング： ジンバル機構



海中分岐装置

海底ケーブルを敷設するとは？

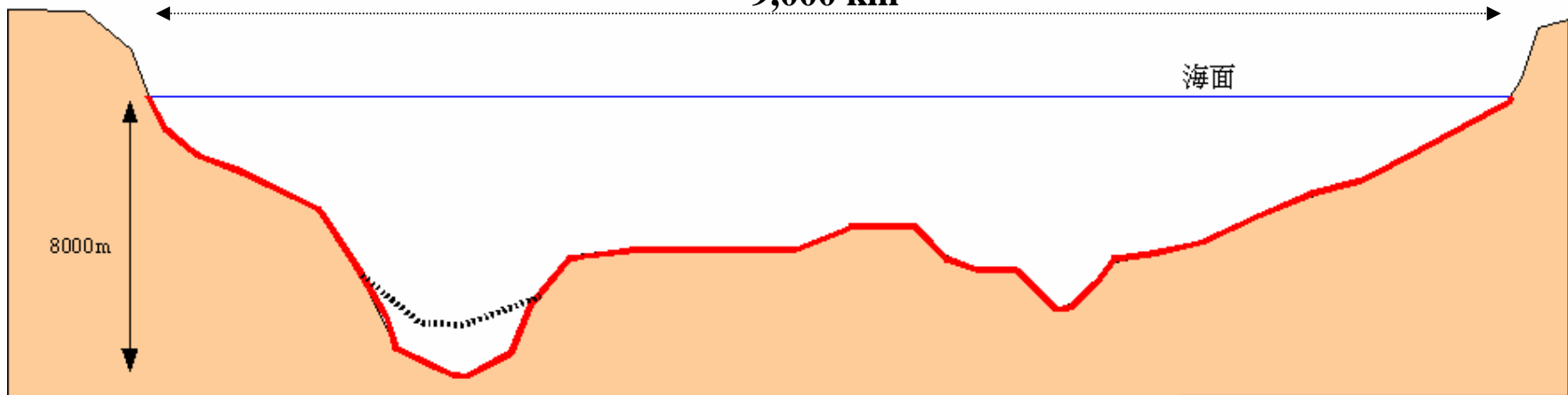


9,000 km

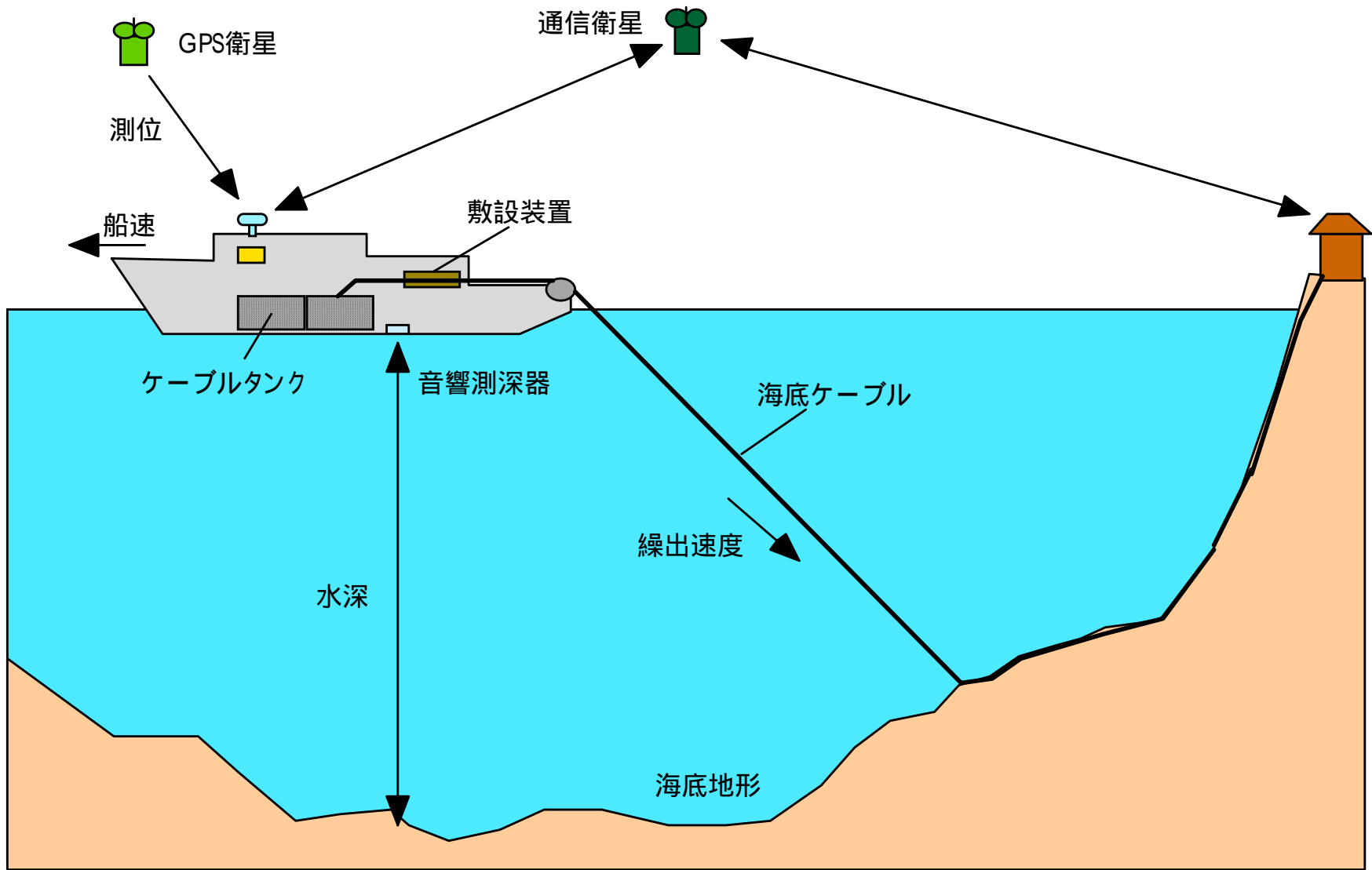
海面

8000m

日本海溝



海底ケーブルの敷設技術



ケーブル敷設船の特徴

耐候性・耐氷性

ケーブルタンクを有する

優れた操船性

(ダイナミックポジショニング)

精密なスラックコントロール

リニアケーブルエンジン、

ケーブル接続機能

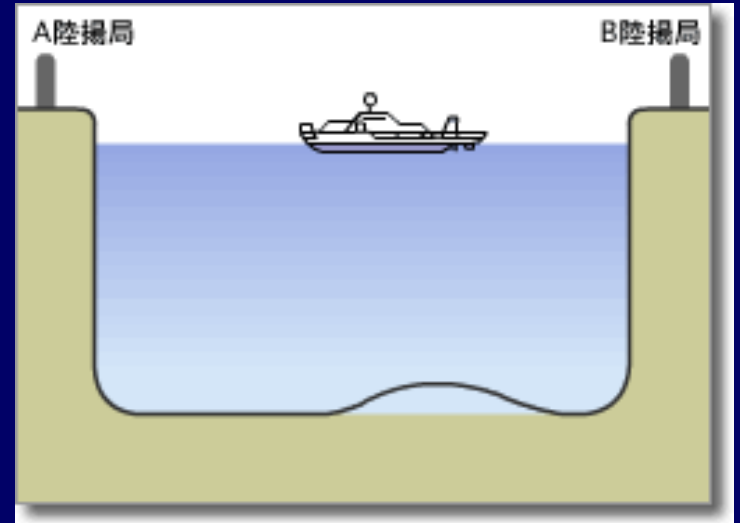
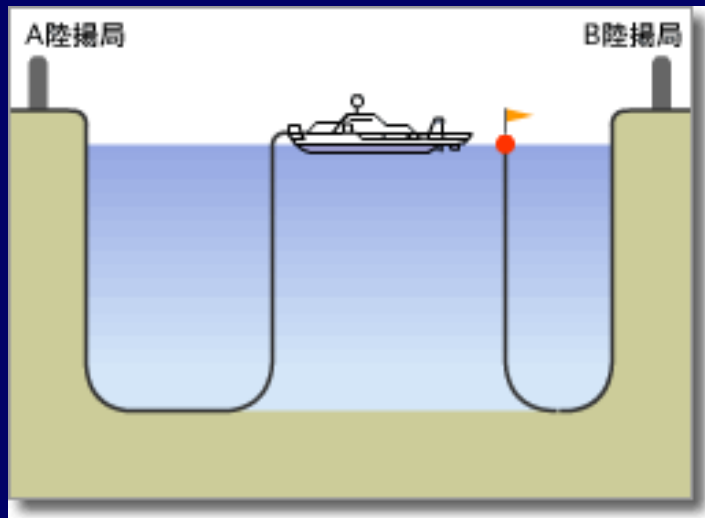
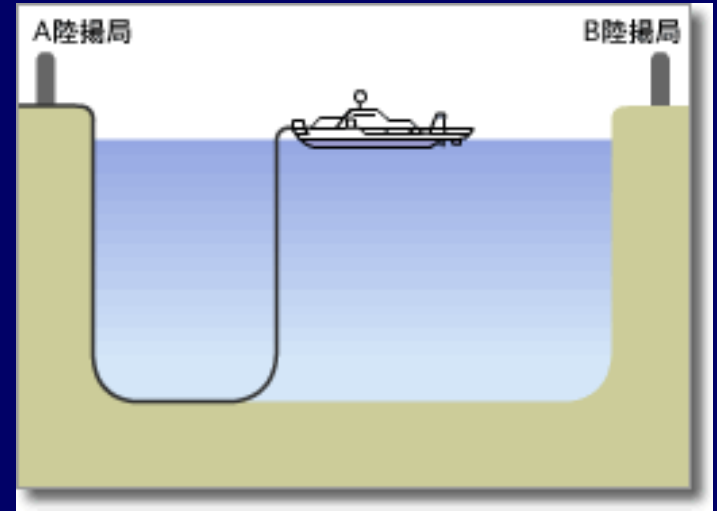
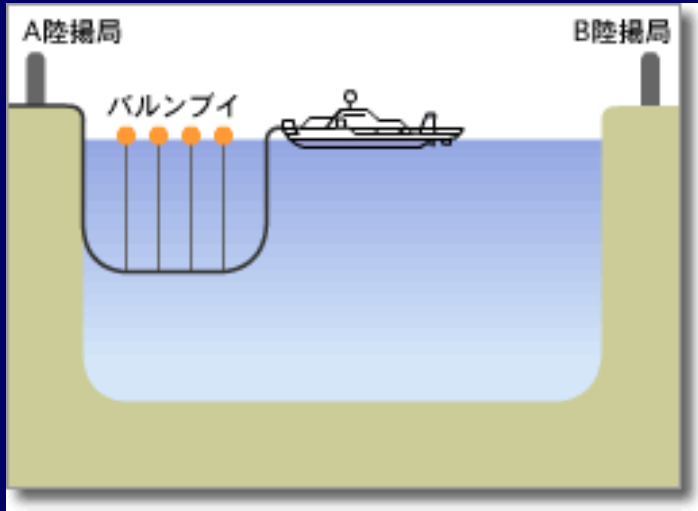
バウシーブあるいは

スターンシーブ

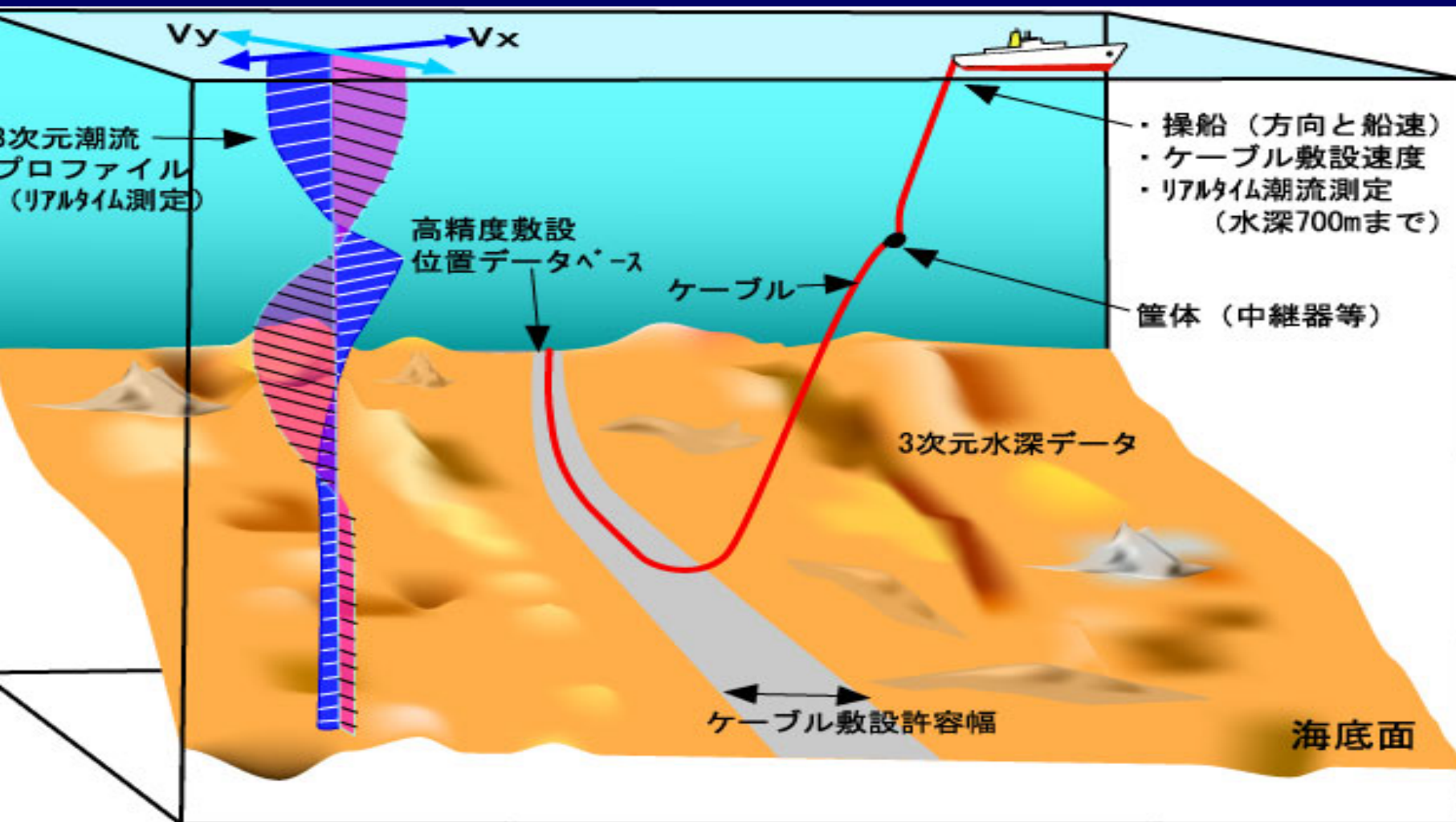
(ケーブル繰り出し用)



海底ケーブルの敷設手順

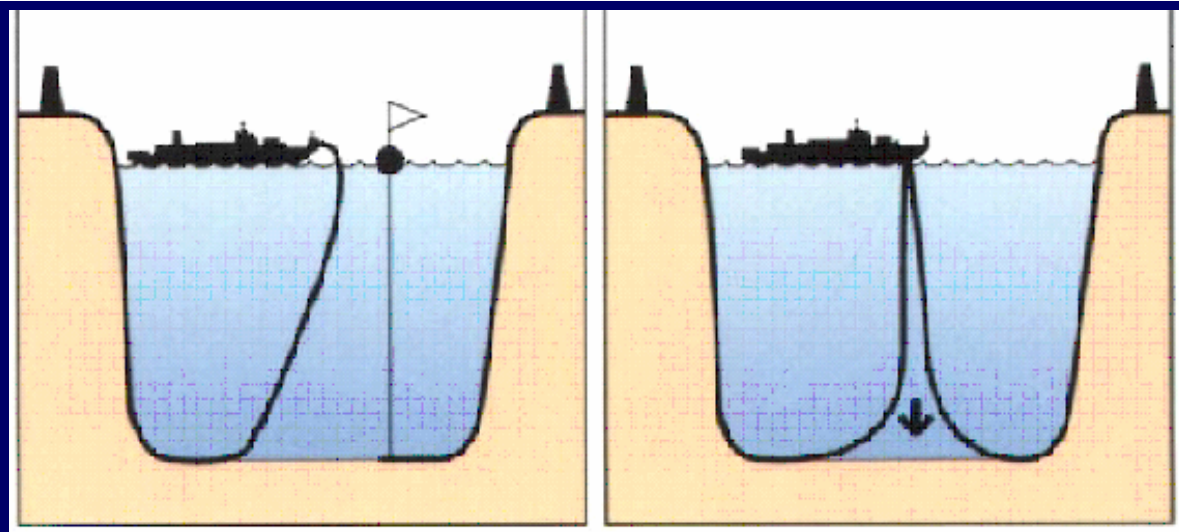
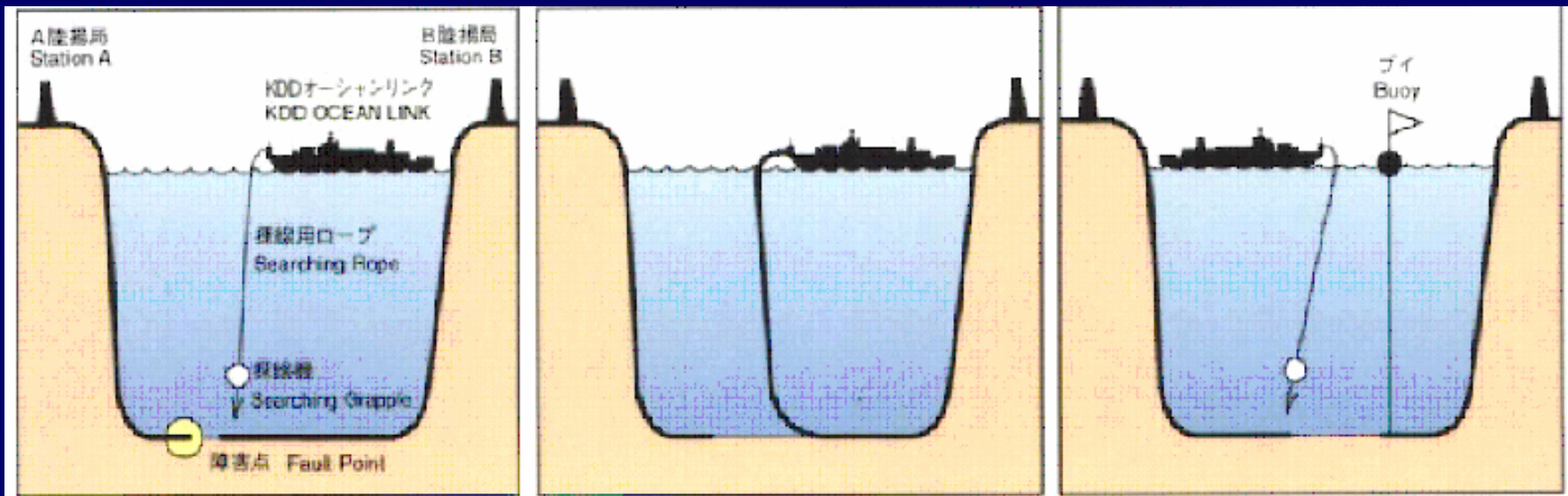


敷設支援システムによる海底ケーブルの敷設



海底ケーブルの修理手順

埋設されていない海底ケーブルの伝統的な修理方法



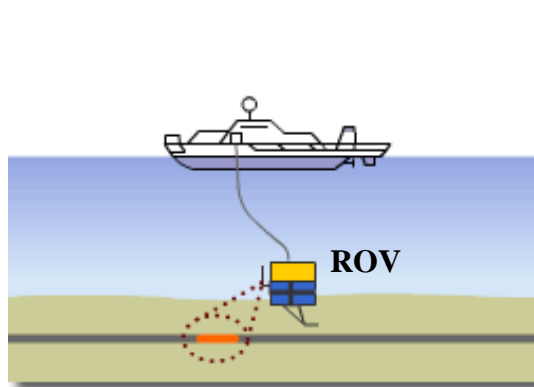
海底ケーブルの探線に使用する専用アンカ



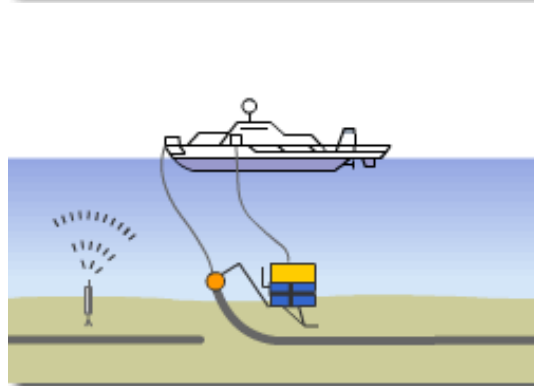
グラップネルアンカ

探線された海底ケーブル

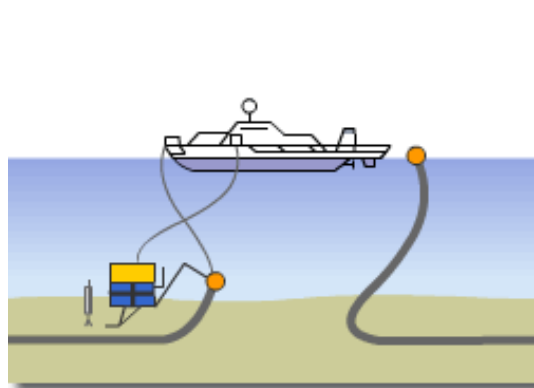
ROVによる埋設ケーブルの修理方法



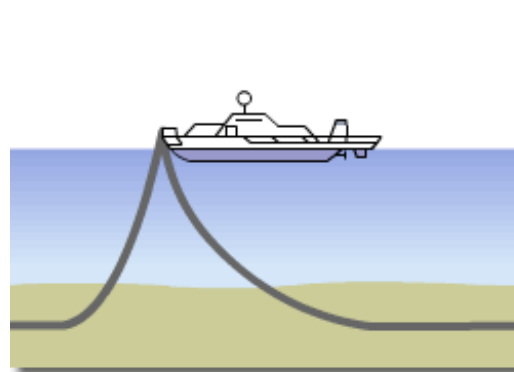
1) 降下～探査



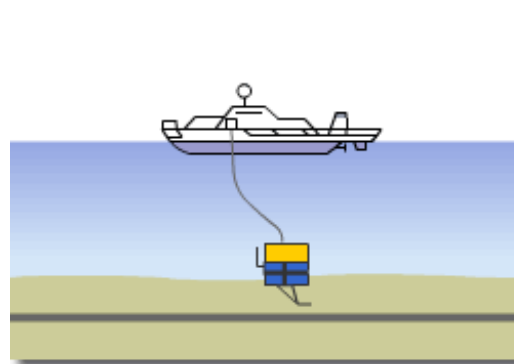
2) 掘出～切断
～引き揚げ



3) 探査～掘出
～引き揚げ



4) 割入れ修理



5) 再埋設

使用する工具

掘出・埋設: ウォータジェット掘削装置
切 断: 油圧カッタ
引 揚: 油圧ケーブルグリッパ

光海底ケーブルの埋設・点検・修理では 水中ロボットが活躍

ROV (遠隔操縦式の有索式水中ロボット)

数十mより深い海域(2500mまで)での作業

ROV: Remotely Operated Vehicle

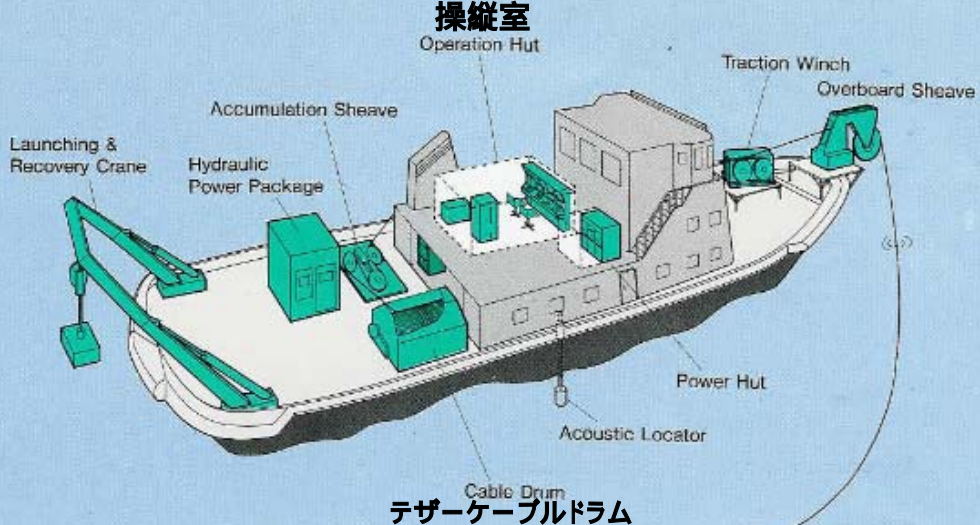
AUV (自律航行式の無索水中ロボット)

10mより深い海域での調査

AUV: Autonomous Underwater Vehicle

但しロボットが苦手な場所では、

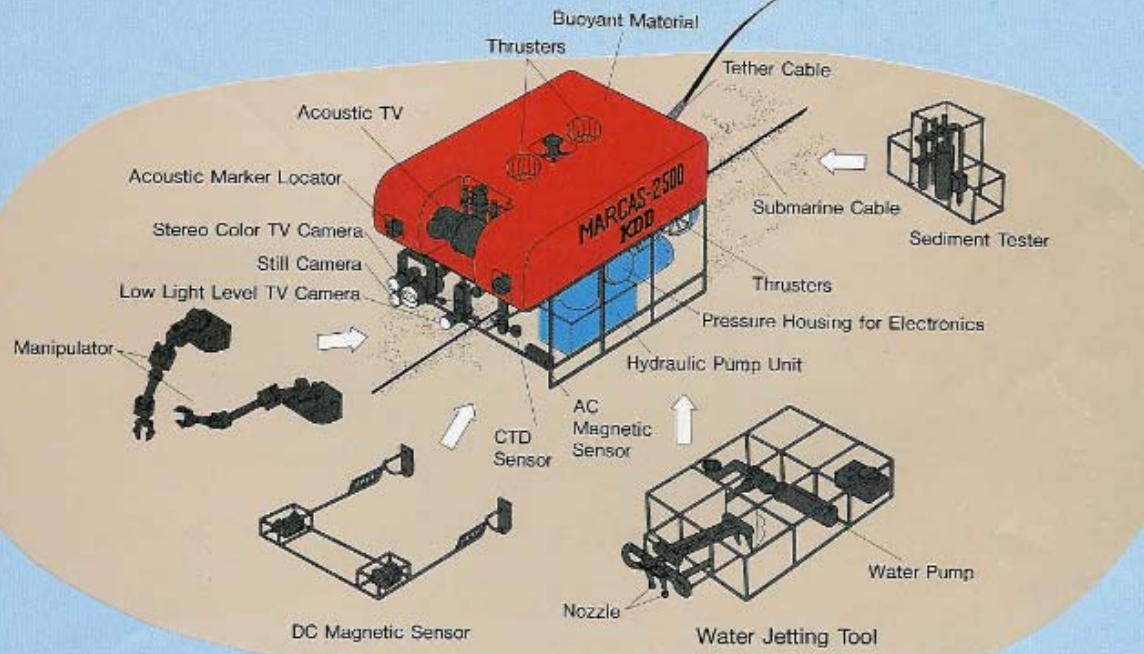
ダイバー 汀線から10m以浅の海域での作業



テザーケーブルドラム



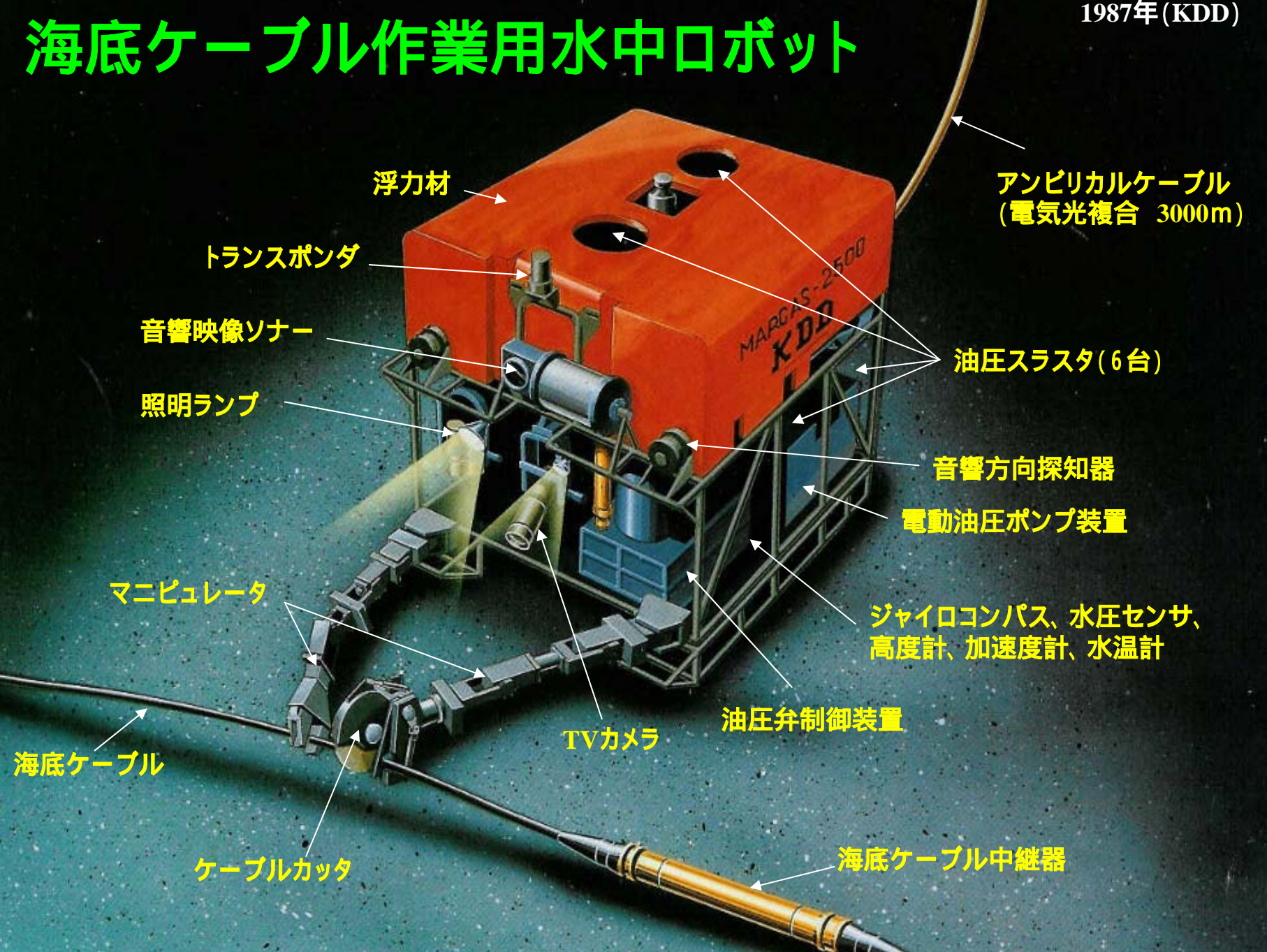
操縦室



潜水ロボット本体

ROV (有索式遠隔操縦型水中ロボット) の構成

海底ケーブル作業用水中ロボット



浮力材

トランスポンダ

音響映像ソナー

照明ランプ

マニピュレータ

海底ケーブル

ケーブルカッタ

TVカメラ

油圧弁制御装置

ジャイロコンパス、水圧センサ、
高度計、加速度計、水温計

電動油圧ポンプ装置

音響方向探知器

油圧スラスト(6台)

アンビカルケーブル
(電気光複合 3000m)

海底ケーブル中継器

海底ケーブル作業用大型ROV MARCAS-III

最大使用水深	2,500m
寸法・重量	長さ 4.45m 幅 3.7m 高さ 2.8m 15トン(空中)
パワー	600kw 電動モータ
走行性能	3.0ノット(前後) 2.0ノット(上下) 1.5ノット(横)
最大埋設深度	3.0m (海底質による)
搭載機器	マニピュレータ2基 ウォータジェット掘削装置 TVカメラ 6台 水中ライト10台 超音波ソナー 高度計 水圧計



光海底ケーブル調査用の無索式水中ロボット



ミッション

- 海底ケーブル敷設状況撮影
- 埋設深度測定
- 障害点探査
- 海底面撮影
- 海底起伏測量

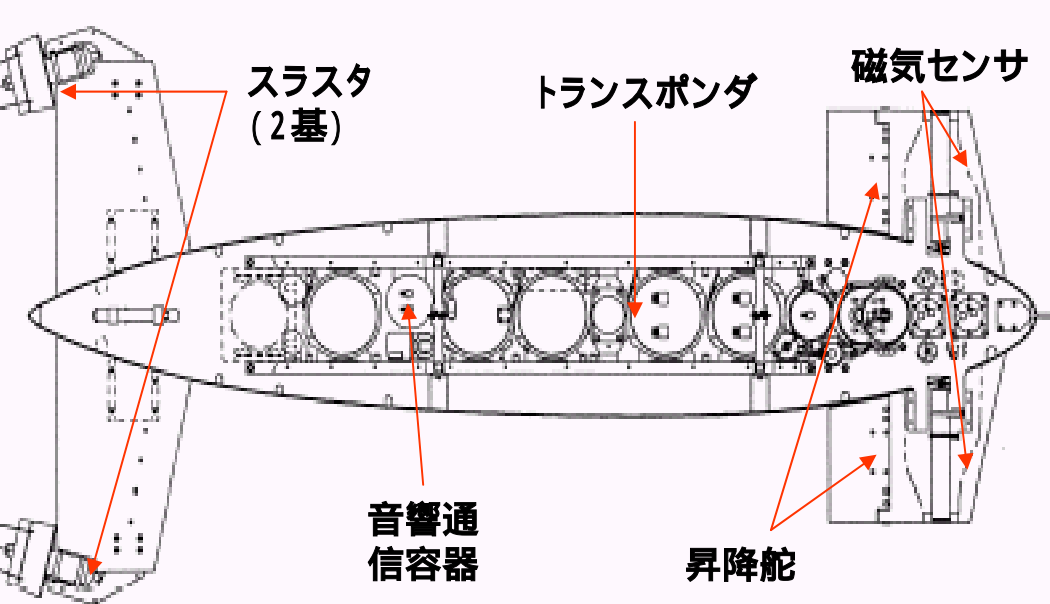


AQUA EXPLORER 2000

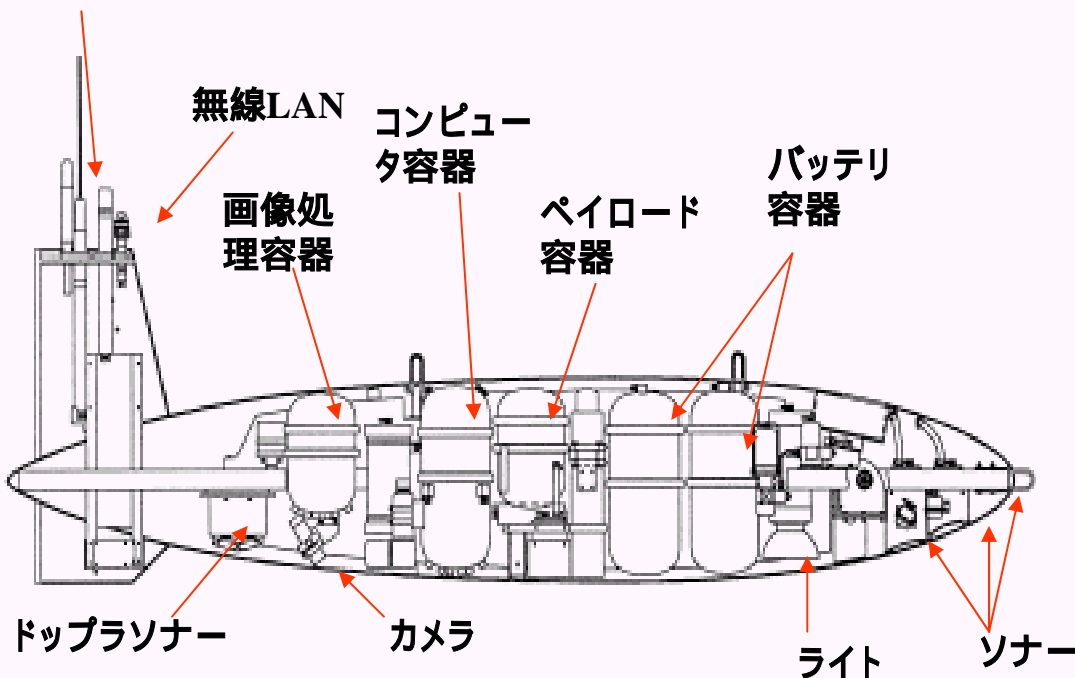
AE2000の構造図

主要目

寸法:	3.0 L/1.3 W/ 0.9 H m
空中重量:	300 kg
潜航深度:	2000 m
最大速力:	3ノット
航続時間:	16時間
動力源:	リチウムイオン二次電池
搭載機器:	水圧計・方位計 高度計 磁気センサ TVカメラ ボトムプロファイラ ドップラソナー



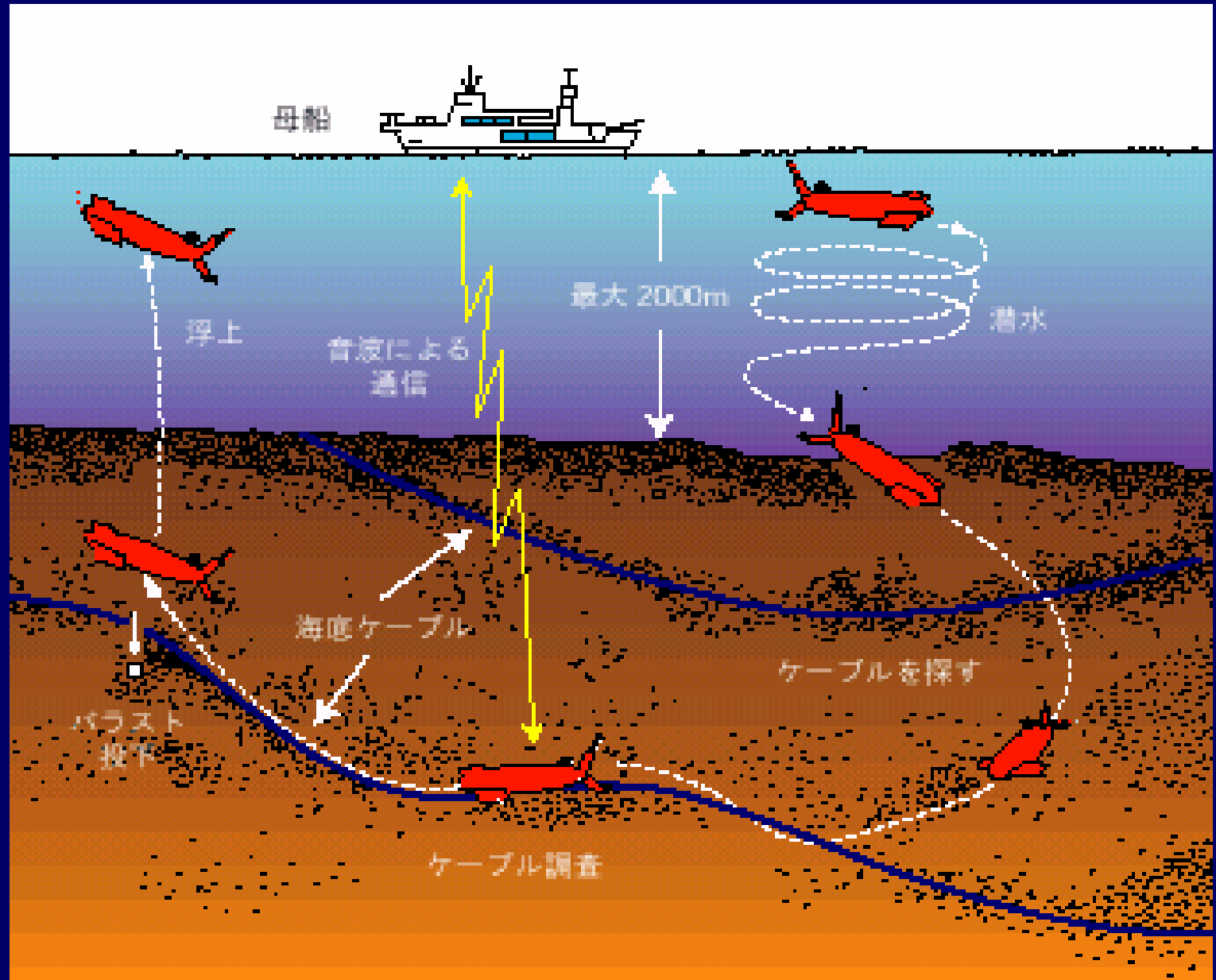
ラジオビーコン・フラッシャ





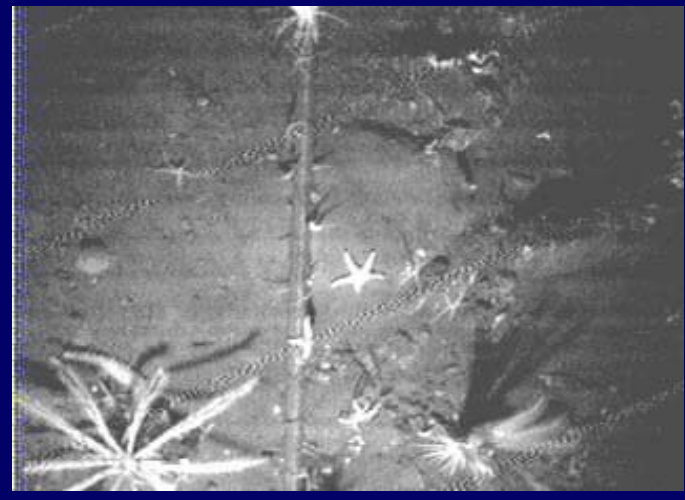
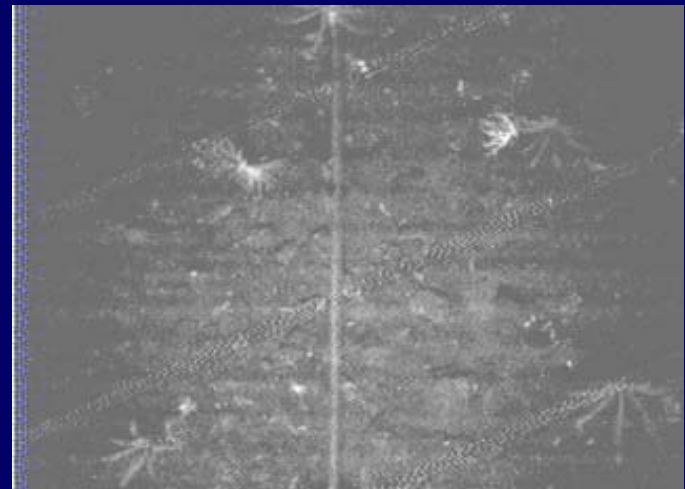
AE2000の船上監視・制御装置の構成

AE2000の運用概念図

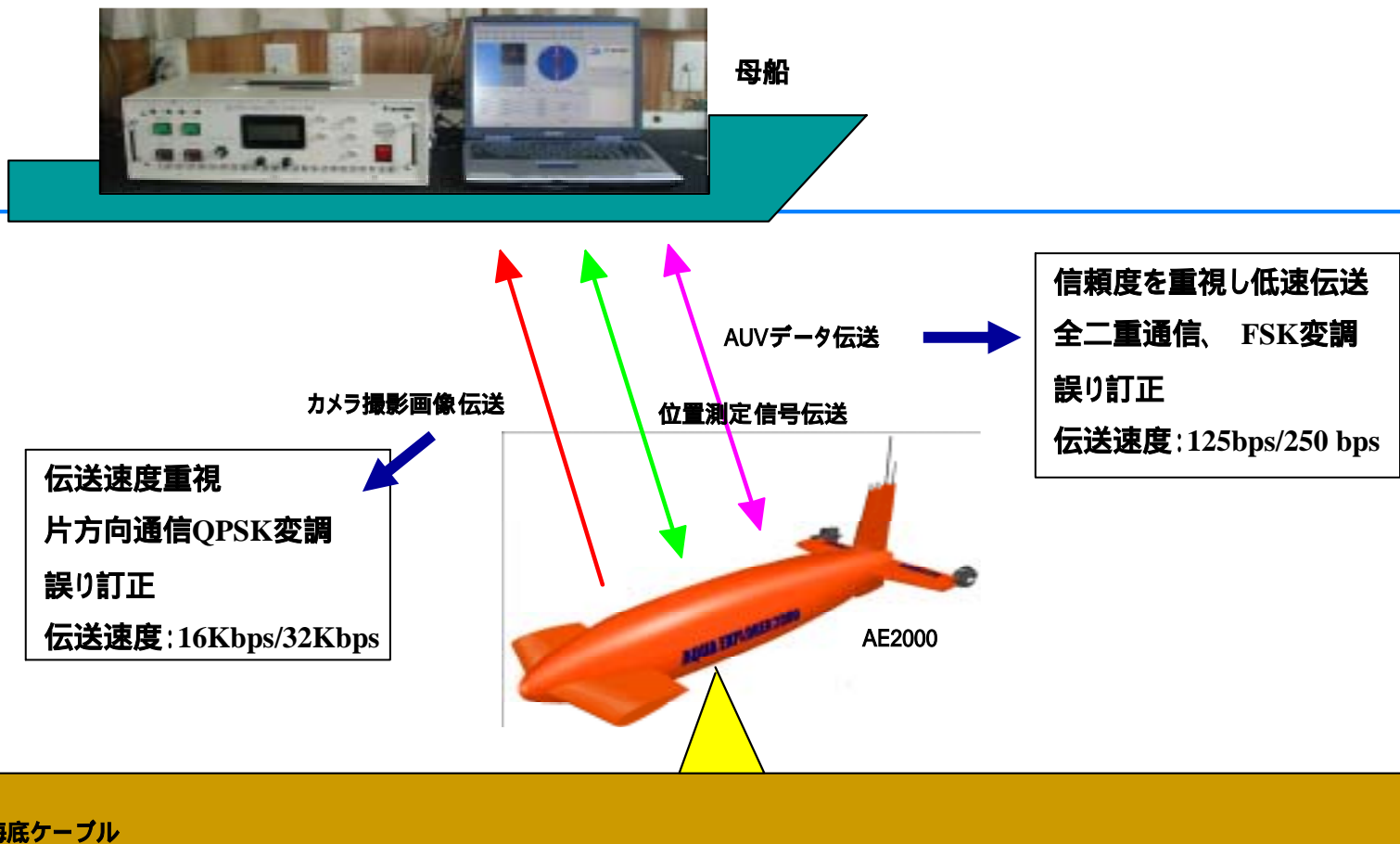


AUVによる光海底ケーブル調査例

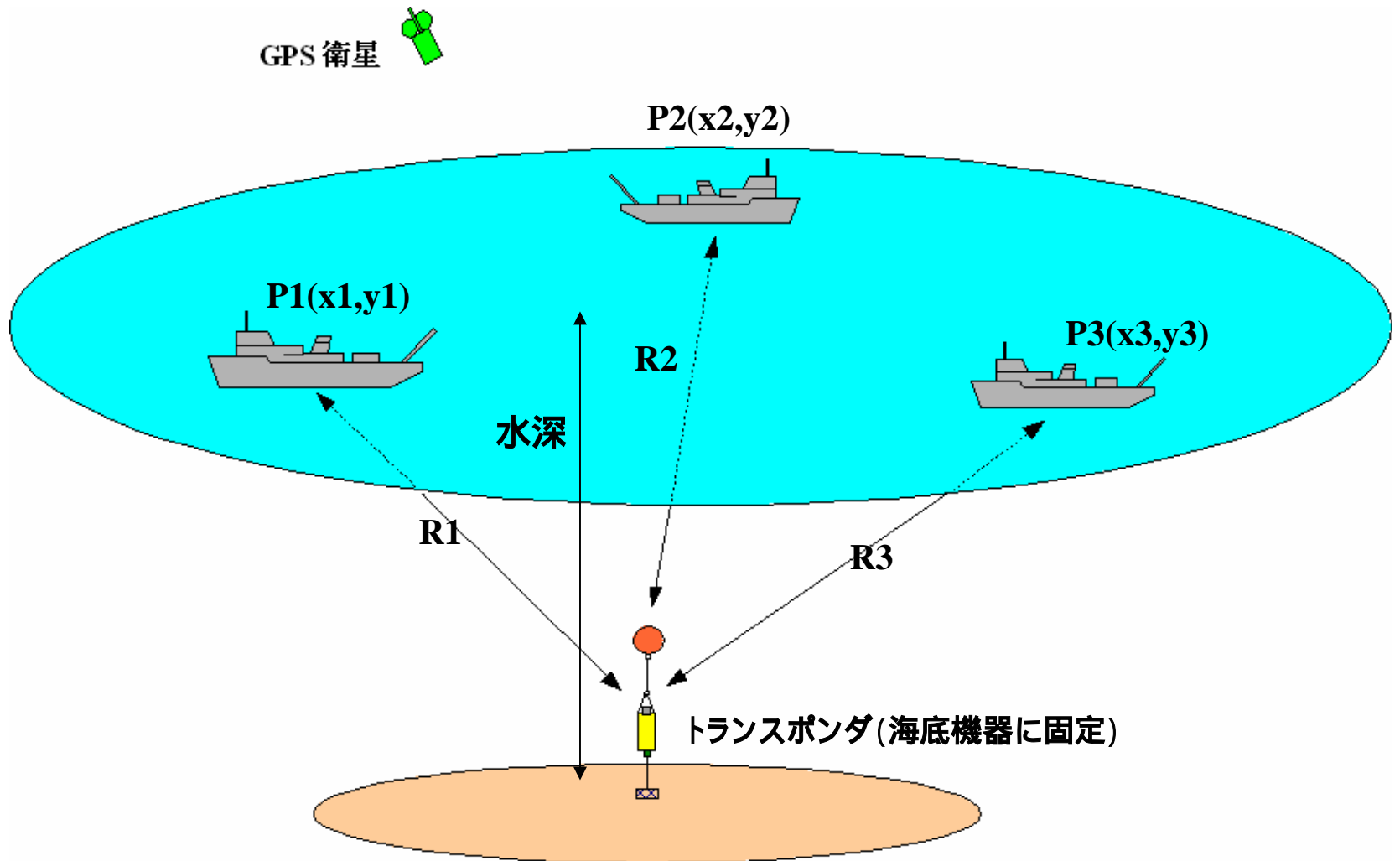
(新潟沖:水深400m)



水中音響データ通信(水中ロボットと母船間)

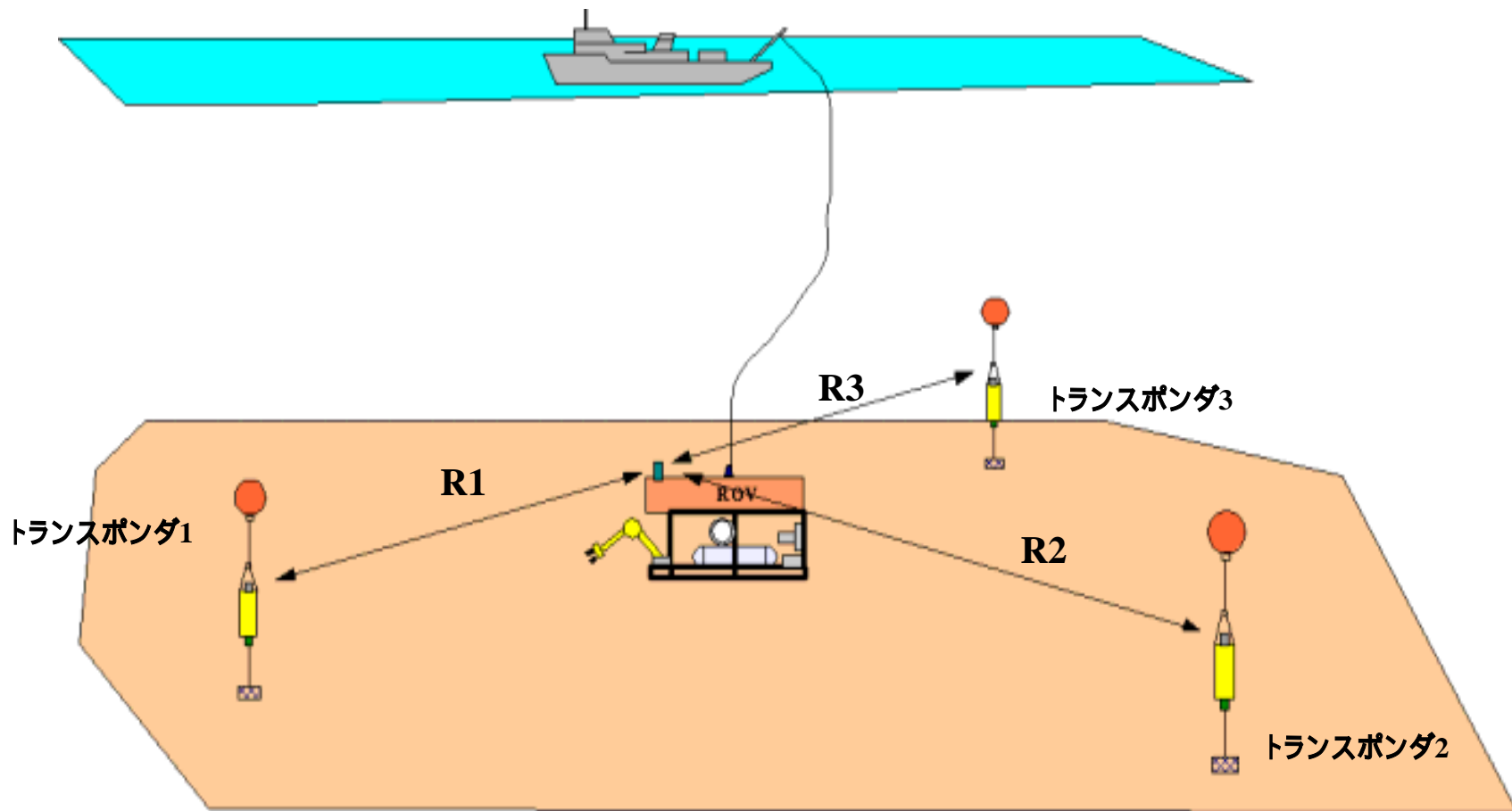


水中に設置した機器の位置を測る方法



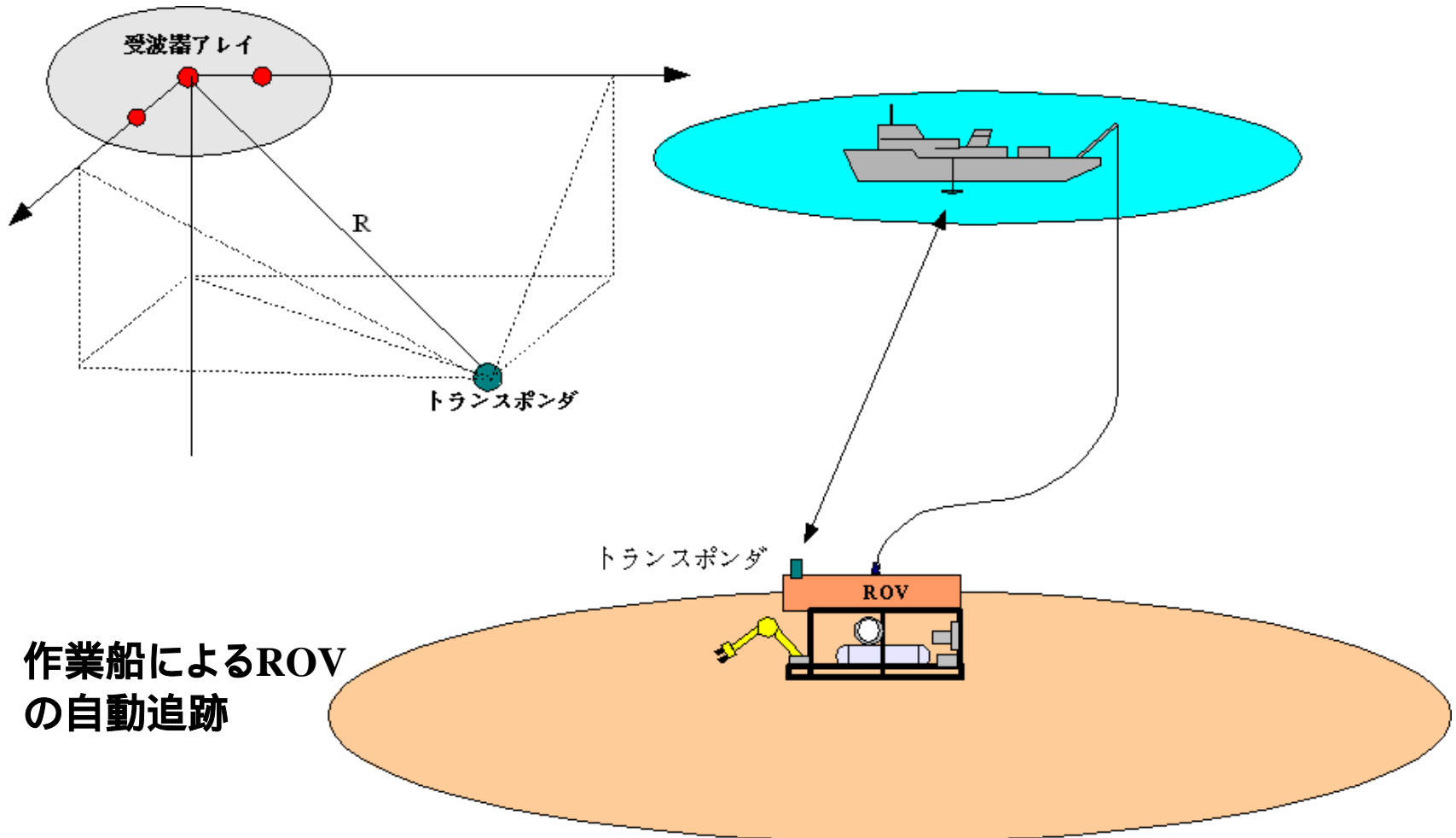
水中で移動する機器の位置を測る方法

その1: Long Base Line方式



水中で移動する機器の位置を測る方法

その2: SSBL(Super Short Base Line)方式

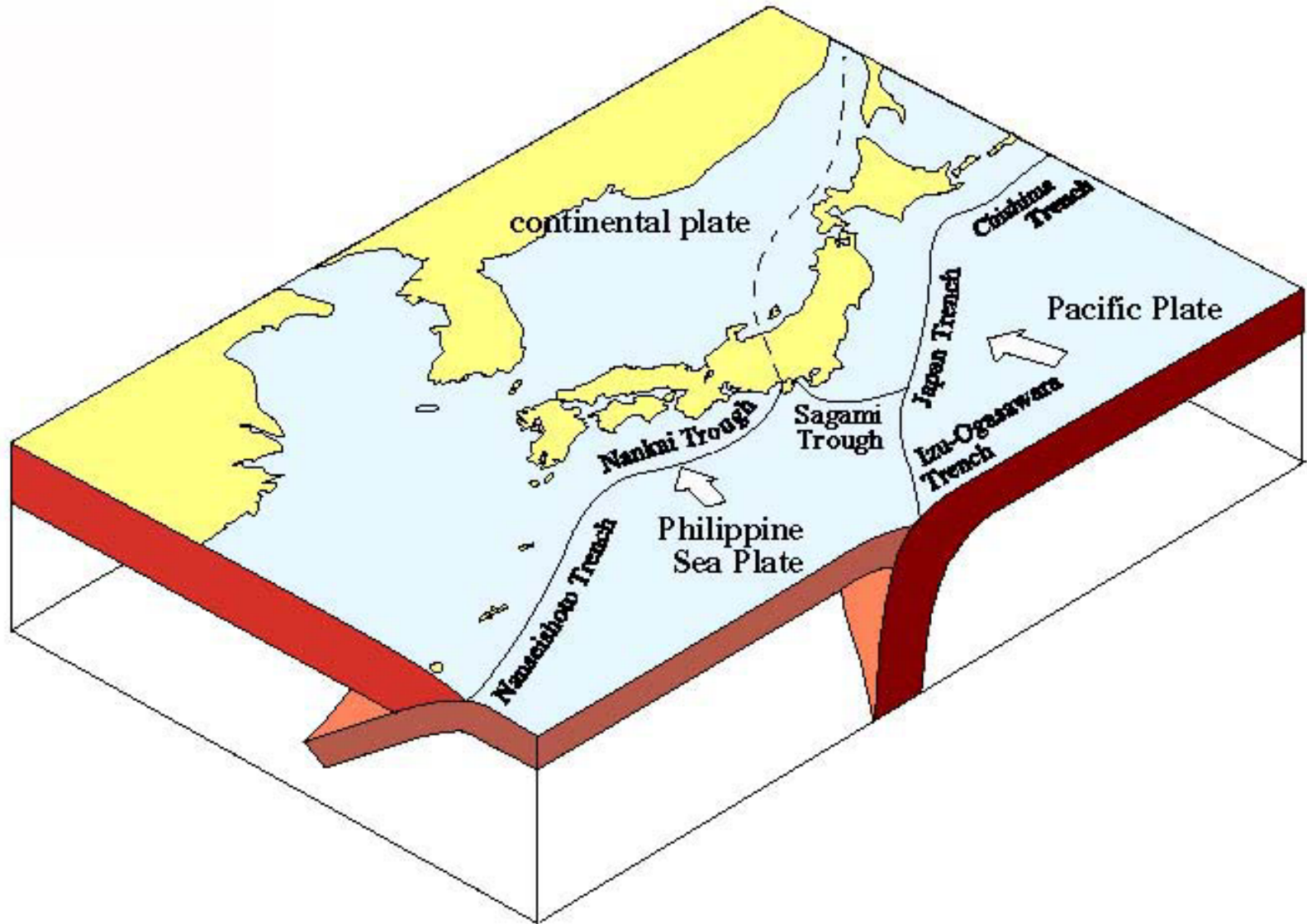


2

次世代の 海洋地球科学観測ケーブルネットワーク ---海洋から地球の未来を探る---

21世紀の地球環境問題の解明に
欠かせないインフラとして、日・米・欧
で研究開発が進められている

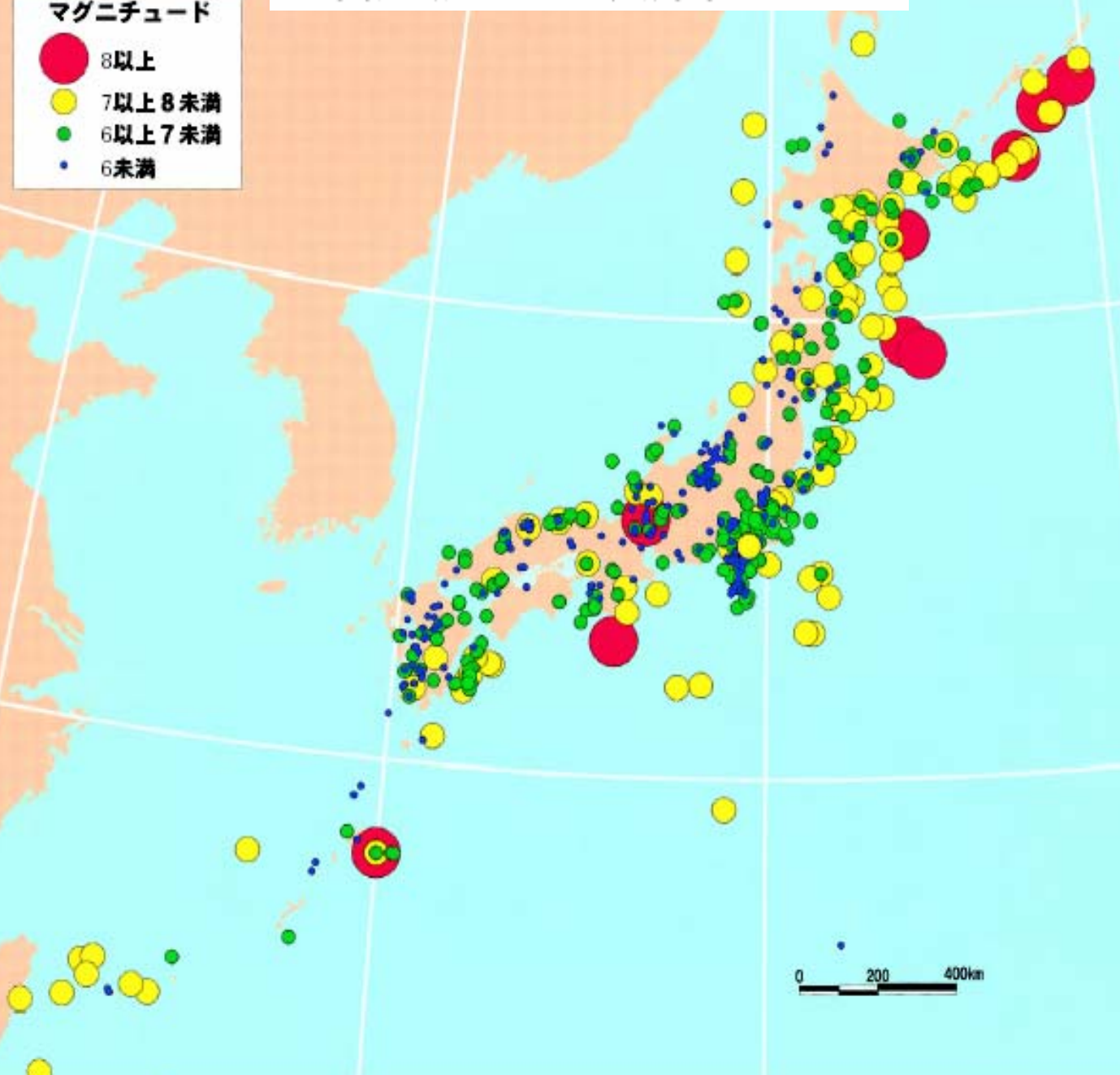
日本列島周辺の海洋プレート



■ 日本付近の被害を伴った地震の分布図 (1885~2003年)

マグニチュード

- 8以上
- 7以上 8未満
- 6以上 7未満
- 6未満



巨大地震の大部分は、プレート境界のある海域で発生している

地震研究や防災のため、
海域での観測が必要

我が国の 海底地震観測ケーブル

長期観測機器を海底に設置することにより、陸上では捉えられない地殻変動や微小な地震を観測し、プレートのひずみや、地下のマグマ活動の推定に役立っている。

専用ケーブル(主に地震・津波観測)

気象庁: 東海沖、房総沖

防災科研: 相模湾

東大地震研: 伊豆東方、三陸沖

JAMSTEC: 室戸沖、釧路・十勝沖

初島沖(多目的観測)

再利用ケーブル(地電位差観測用)

マンテル構造観測用: TPC-1, TPC-2

JASC, Okinawa

海流流量観測: 日中, 日韓, 沖台, OLU,

福島・今別, 九州・壱岐,

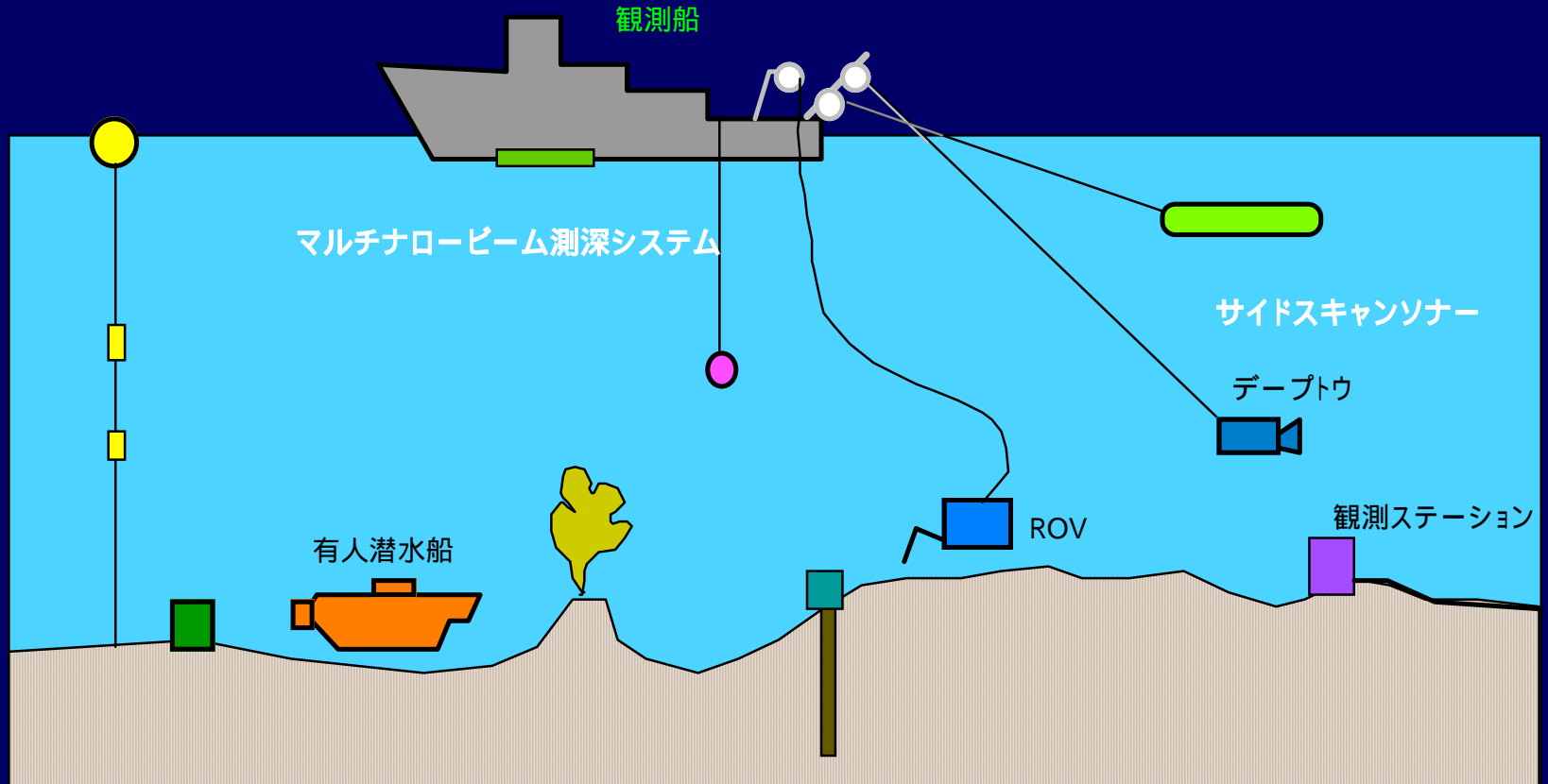


**巨大地震、大津波、火山噴火
異常気象、地球温暖化、
海洋汚染、生物生態系異常**

**地球環境システムの変動過程を総合的に
理解し、将来の環境変動可能性とその影
響を探る必要性**

**地球表面の7割を占める海域で
の観測が不可欠**

現在の海中・海底を観測するための手段



問題点: 広域にわたり、精密な観測をリアルタイム、長期間、連続的に行うことができない

従来は

地震・津波観測を主とした専用ケーブル

観測センサは組み込み型

水中コネクタ技術、水中ロボット技術

光通信技術、IT技術、センサ技術

多目的・多様な観測に対応
観測センサは海底接続型
観測センサはIP機器
観測網は拡張自在

ARENA計画(日本)、ORION-NEPTUNE計画(米・加)、ESONET計画(欧州)

多目的・多様な観測に対応
観測センサは海底接続型
観測センサはIP機器
観測網は拡張自在



わが国で行われた先駆的な技術開発

VENUS計画 (1995-1999)

VENUS Project

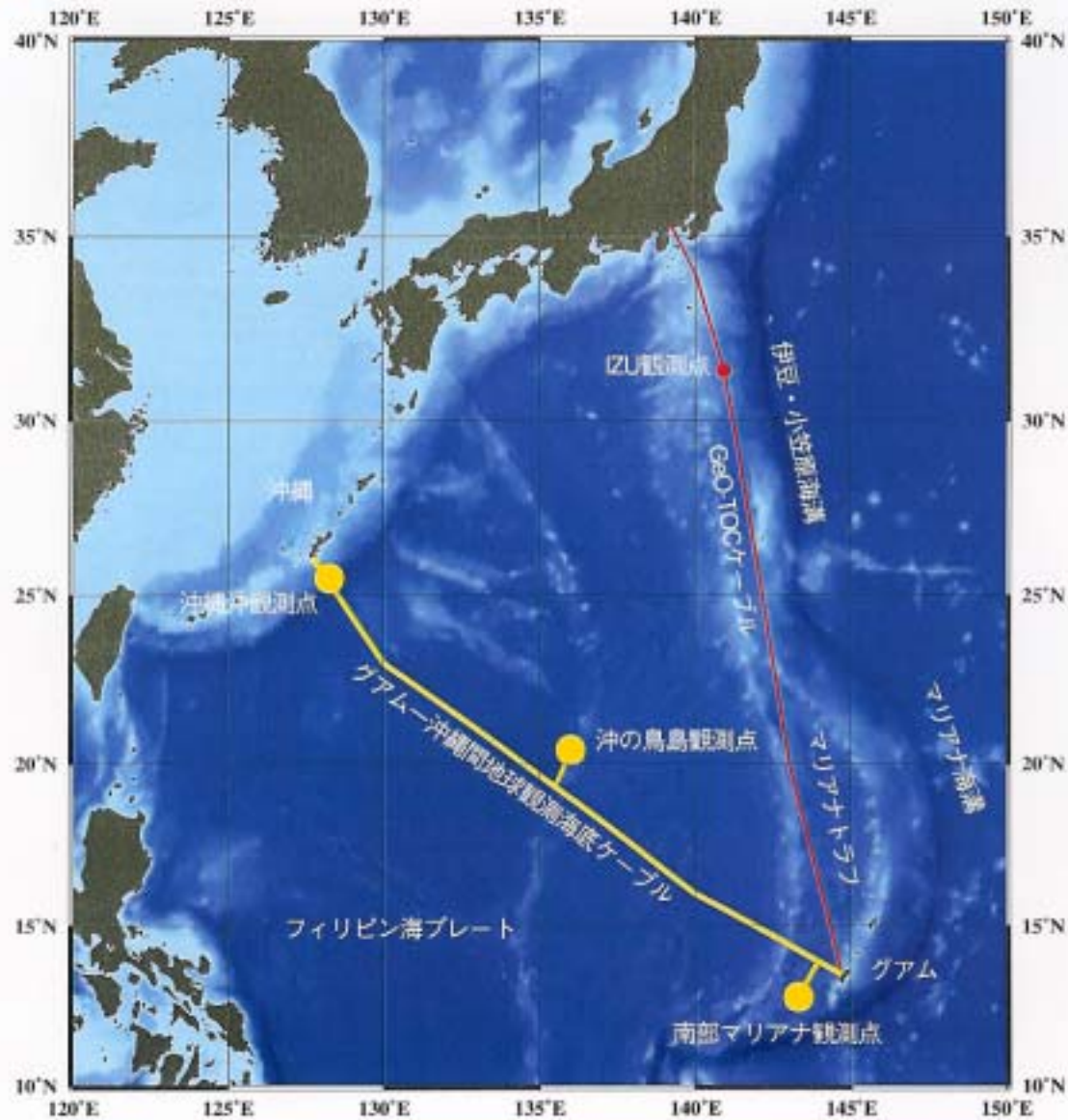
(Versatile Ecomonitoring Network by Undersea-cable System)

海底ケーブルを用いた地震等多目的地球環境モニターネットワーク
の開発に関する研究

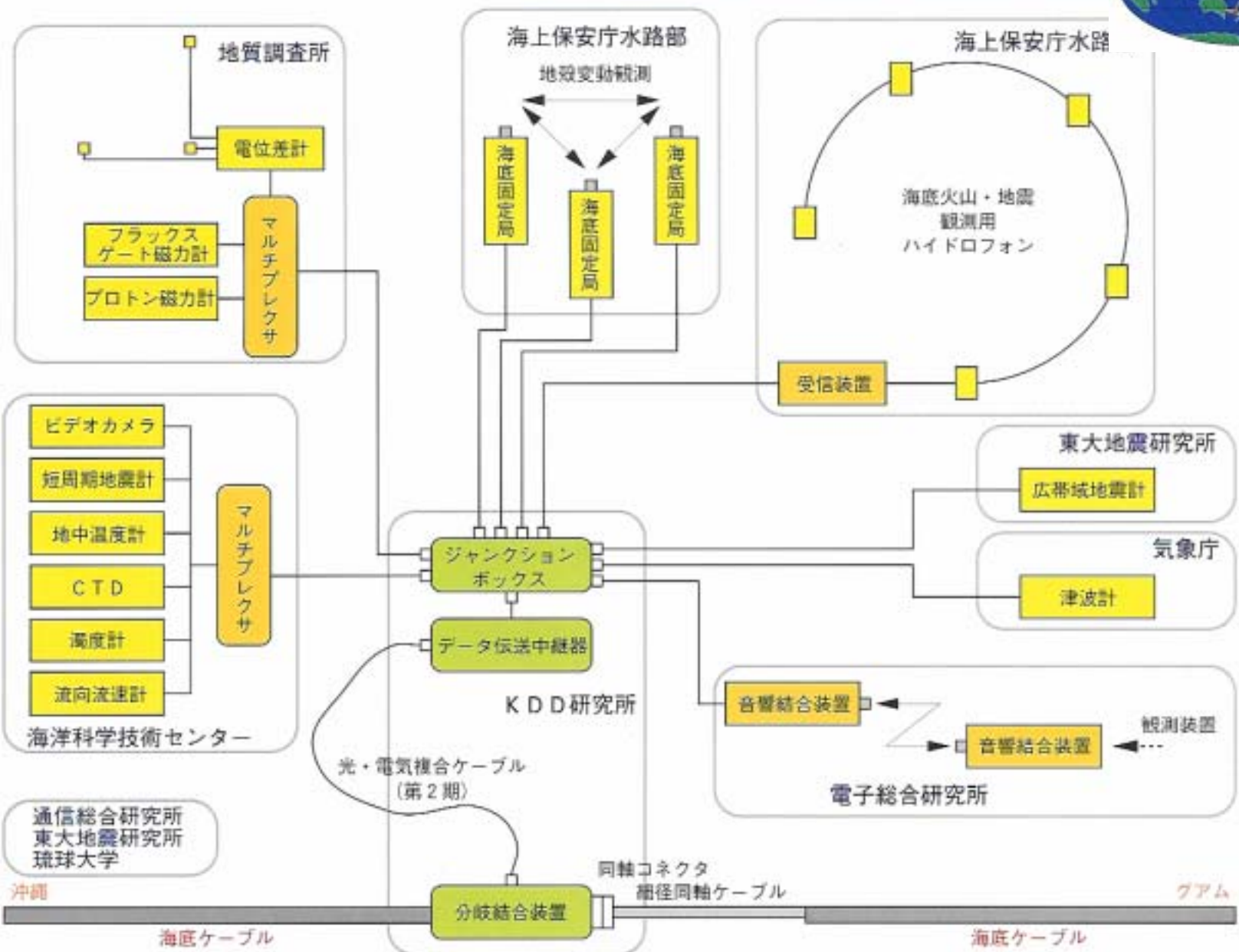
科学技術庁の科学技術振興調整費総合研究課題(H7-H12)

運用停止したTPC-2の沖縄-グアム間を再利用し、
将来を見据えた、
まったく新しい方式の海底観測システムを構築する
技術を開発する。

このプロジェクトが、次世代の観測ネットワーク実現の可能性を示唆したことで、欧米の地球科学研究者を刺激し、アメリカ・カナダでNEPTUNE計画を立ち上げるきっかけとなった。



運用停止した国際
通信用海底ケーブル
(TPC-2)を利用した
VENUS計画



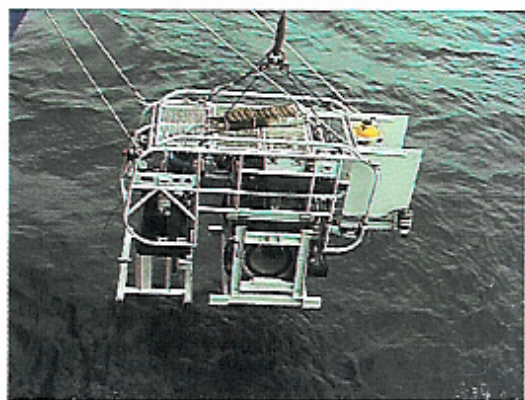


写真1 曳航体と展張装置

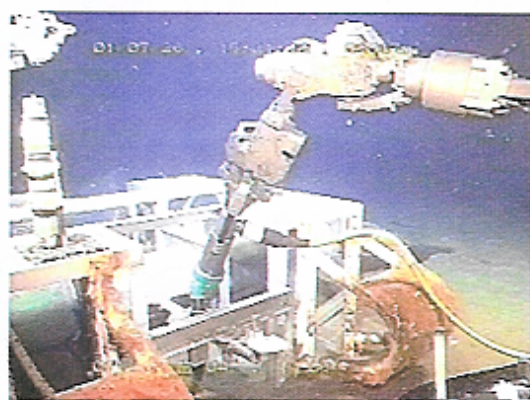


写真2 分岐装置と細径ケーブルの接続

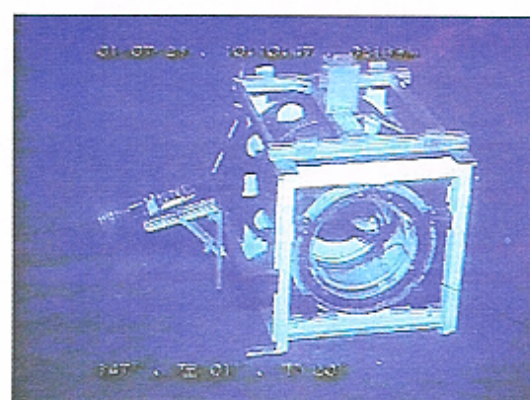


写真3 観測点に置かれた展張装置

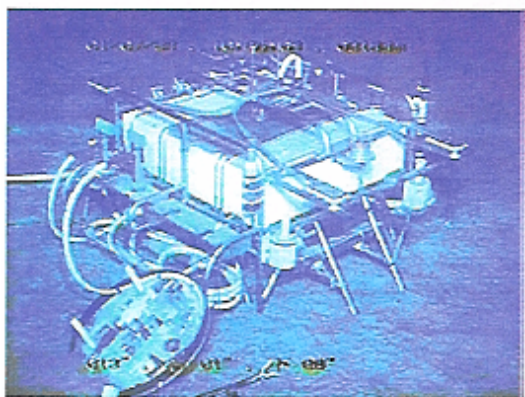


写真4 ジョイントマックス

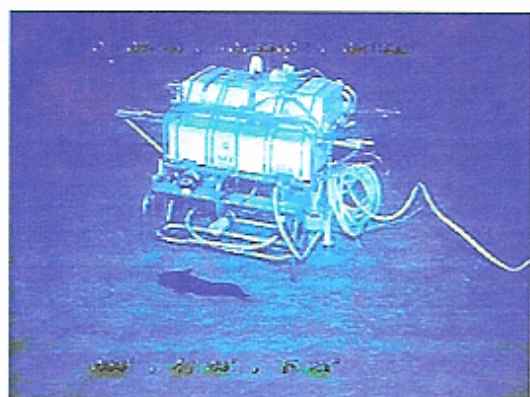
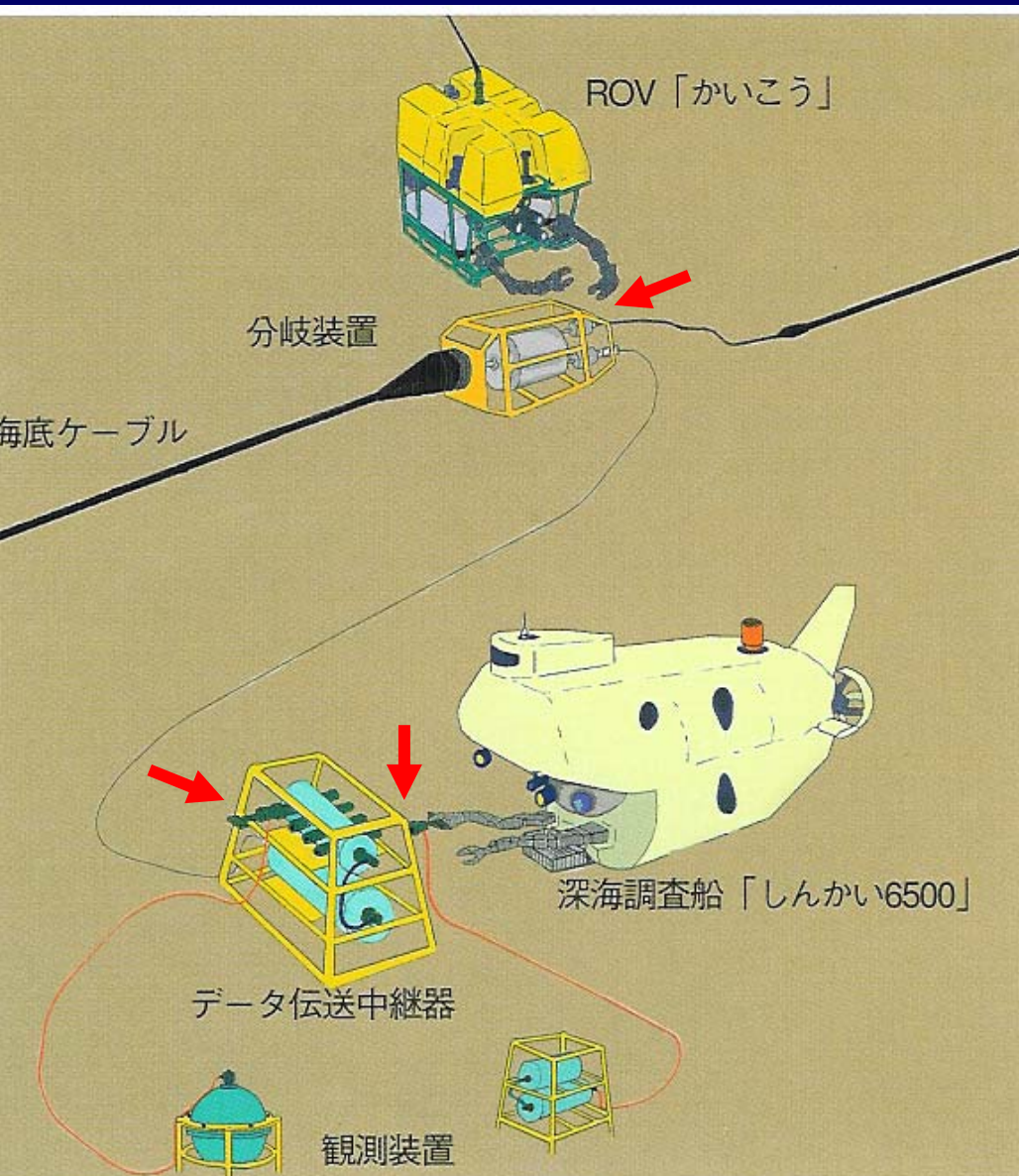


写真5 バッテリー装置



写真6 広帯域地震計

VENUS計画のねらい

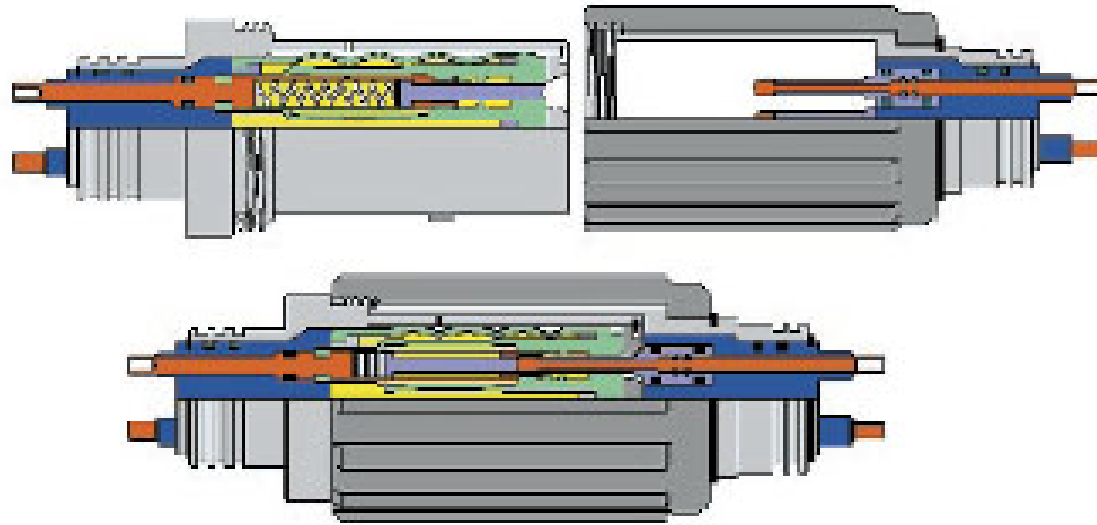


海底で必要な観測機器を
観測ケーブルに接続すること
で、多目的な観測を実現
する。

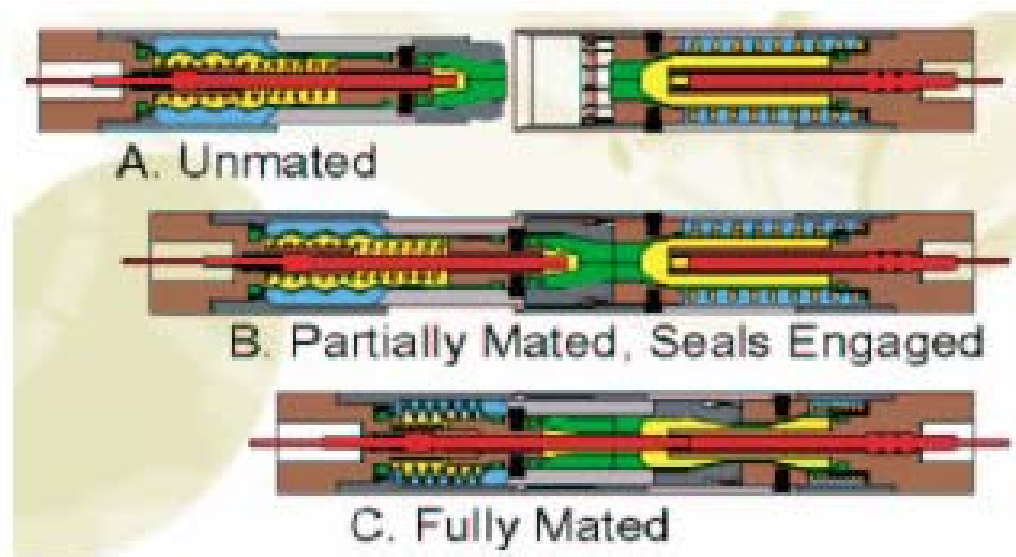
研究者の要望に応じて
新規開発の観測器の接続
故障観測器の交換

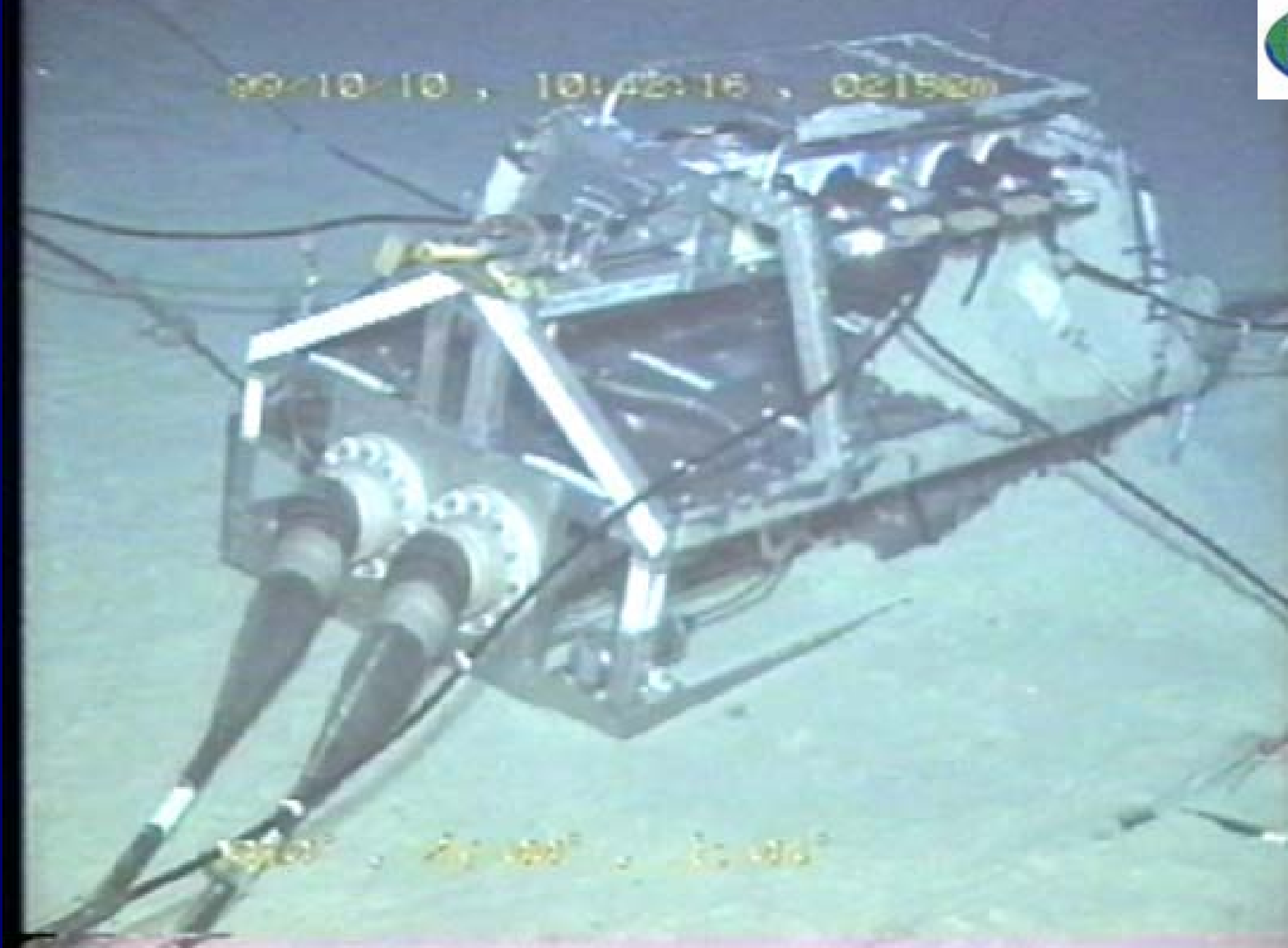
水中着脱できる
コネクタとは？

水中着脱式
電気コネクタ

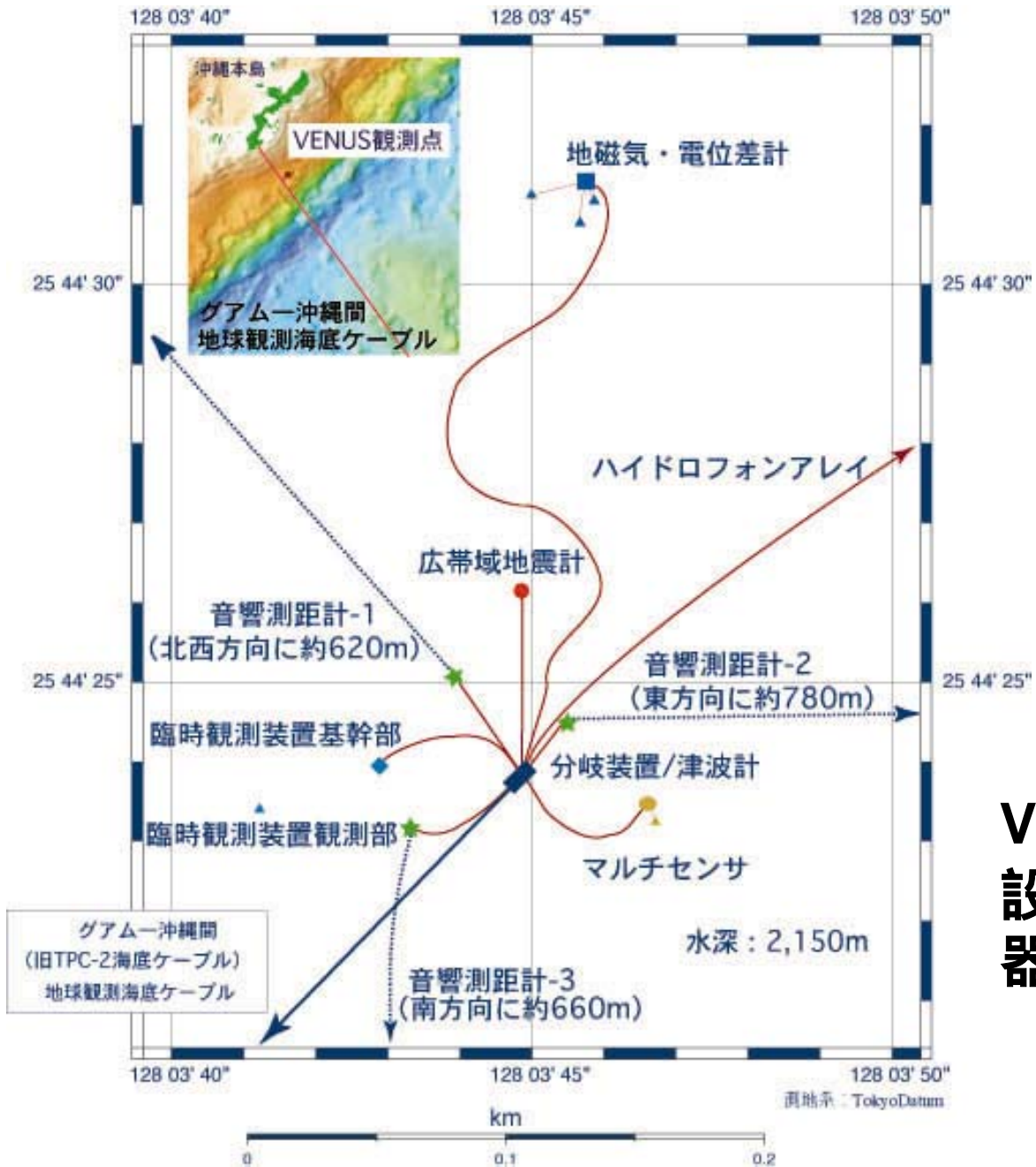


水中着脱式
光コネクタ





9台の観測機器からの信号伝送ケーブルが全て接続された
状態の分岐装置 (1999.9)



VENUSケーブルに 設置された各観測機 器の配置図

21世紀の海洋地球科学研究に
ブレークスルーをもたらすもの



広域で、多様な観測を、長期間
リアルタイムで連続観測できる
インフラ



海底観測ケーブルネットワーク

海洋を総合的に観測する意義

- ・ **気候変動、地球温暖化、海洋汚染等の地球環境変動過程の理解と変動予測**
海潮流や深海流による物質移動や熱移動の長期観測
- ・ **巨大海底地震の研究と、適切な地震・津波防災対策**
海底地震発生帯での精密なプレート挙動観測
- ・ **生命科学およびバイオテクノロジーの新しい展開**
深海の高温高圧下の特殊な環境で生存する生物や微生物の研究
- ・ **将来のエネルギー源として有望なメタンハイドレードの採掘方法の研究**
採掘に伴うメタンハイドレードの挙動などの観測

ARENA 計画

(Advanced Real-Time Earth monitoring Network in the Area)

とは？

日本列島周辺海域に、
最近の光海底ケーブル技術と海底観測技術、
海底作業技術をベースとした、

広域・長期間・連続・リアルタイム観測
を実現する

次世代の科学観測用海底ケーブルネットワーク
を構築する

Feasibility Studyのために想定したARENA観測ネットワーク

総ケーブル長: 3600 km

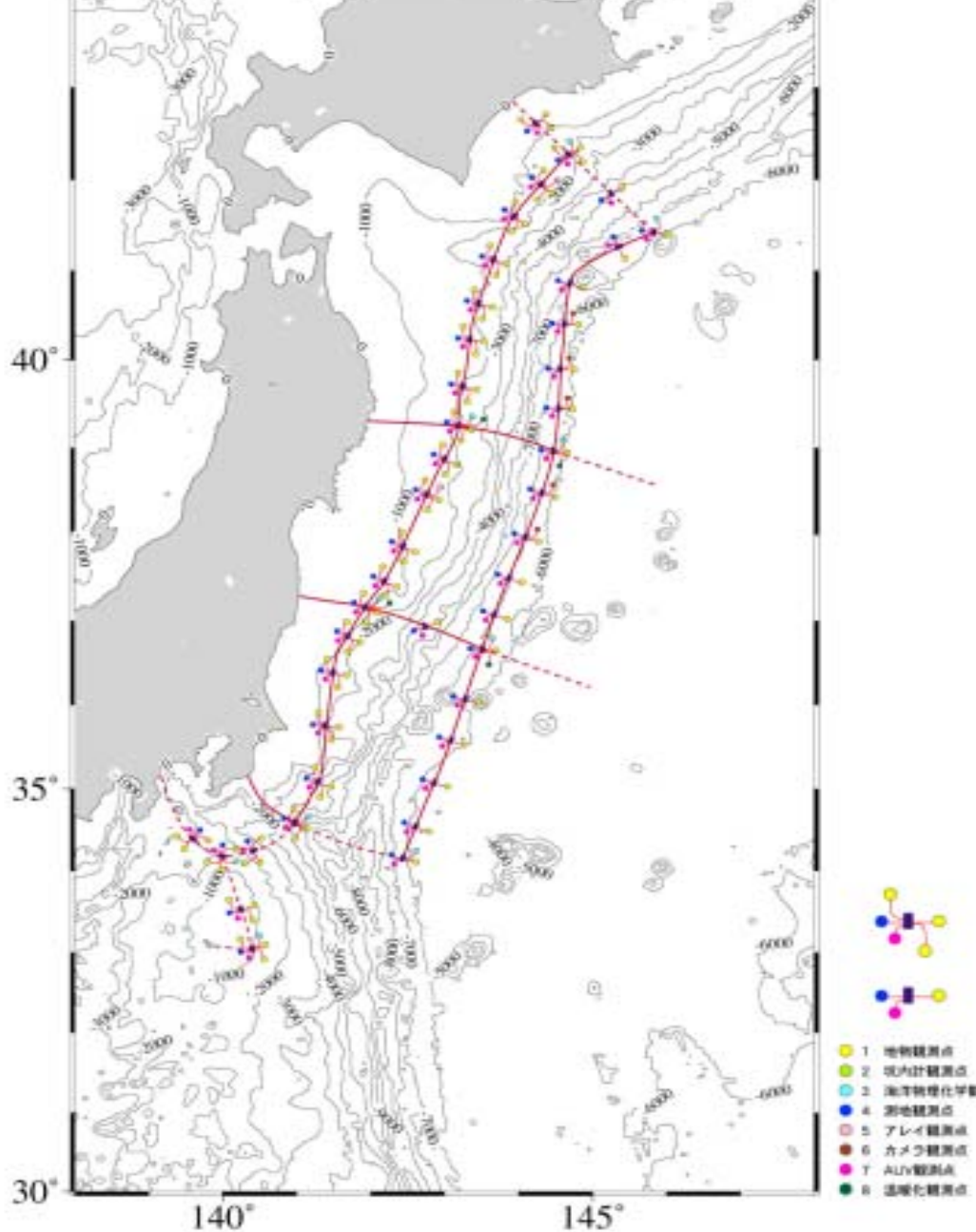
観測ノード間隔: 50 km

ノード総数: 66

総データ量: 2 Gbps

所要電力: 18.2 KW

時刻精度: 1 μ s



技術検討対象としたARENA観測ネットワーク

1. 観測点設置水深 最大6000 m

2. 観測点の種類

地球物理観測点 132

坑内計測観測点 2

海洋物理化学観測点 10

測地観測点 43

アレイ観測点 2

カメラ観測点 2

温暖化観測点 4

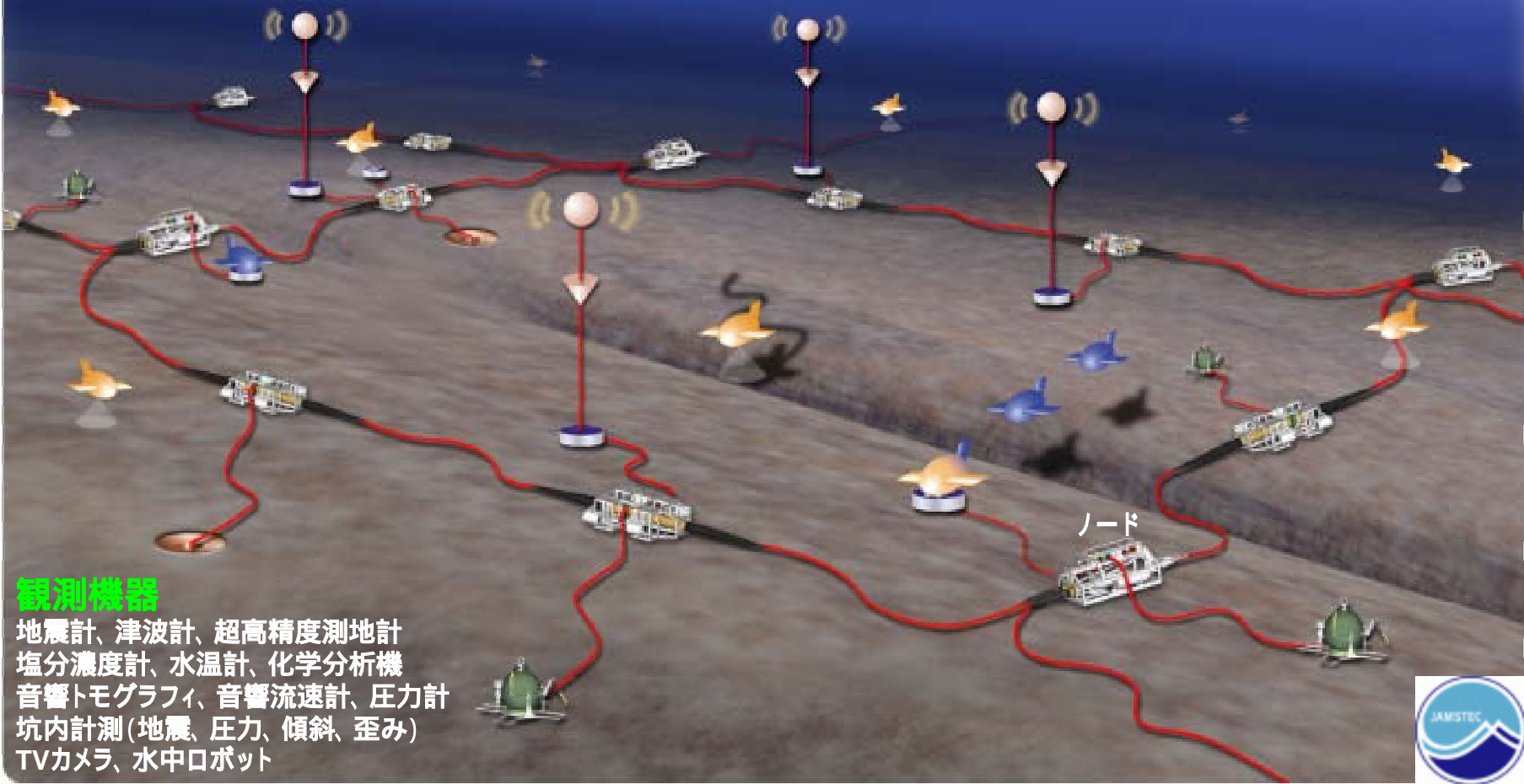
AUV観測点 10

3. センサの種類 50種類

4. 全データ量 約2 Gbps (映像データを除くと約5 Mbps)

5. クロック ネットワーク内における時刻精度 1 μ S

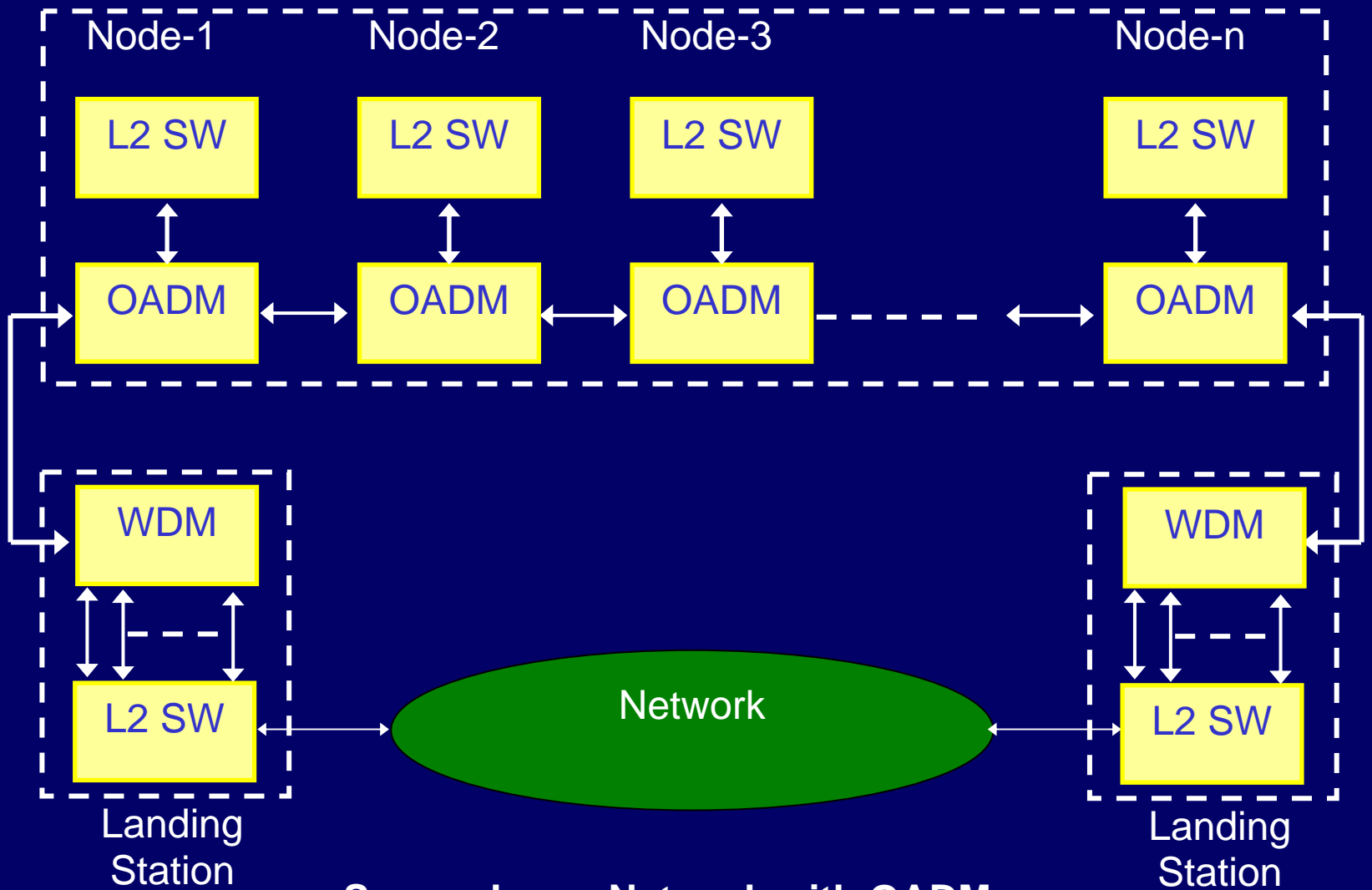
海底に構築する海洋地球観測ネットワークの構成イメージ



観測機器

地震計、津波計、超高精度測地計
塩分濃度計、水温計、化学分析機
音響トモグラフィ、音響流速計、圧力計
坑内計測(地震、圧力、傾斜、歪み)
TVカメラ、水中ロボット

Underwater Network



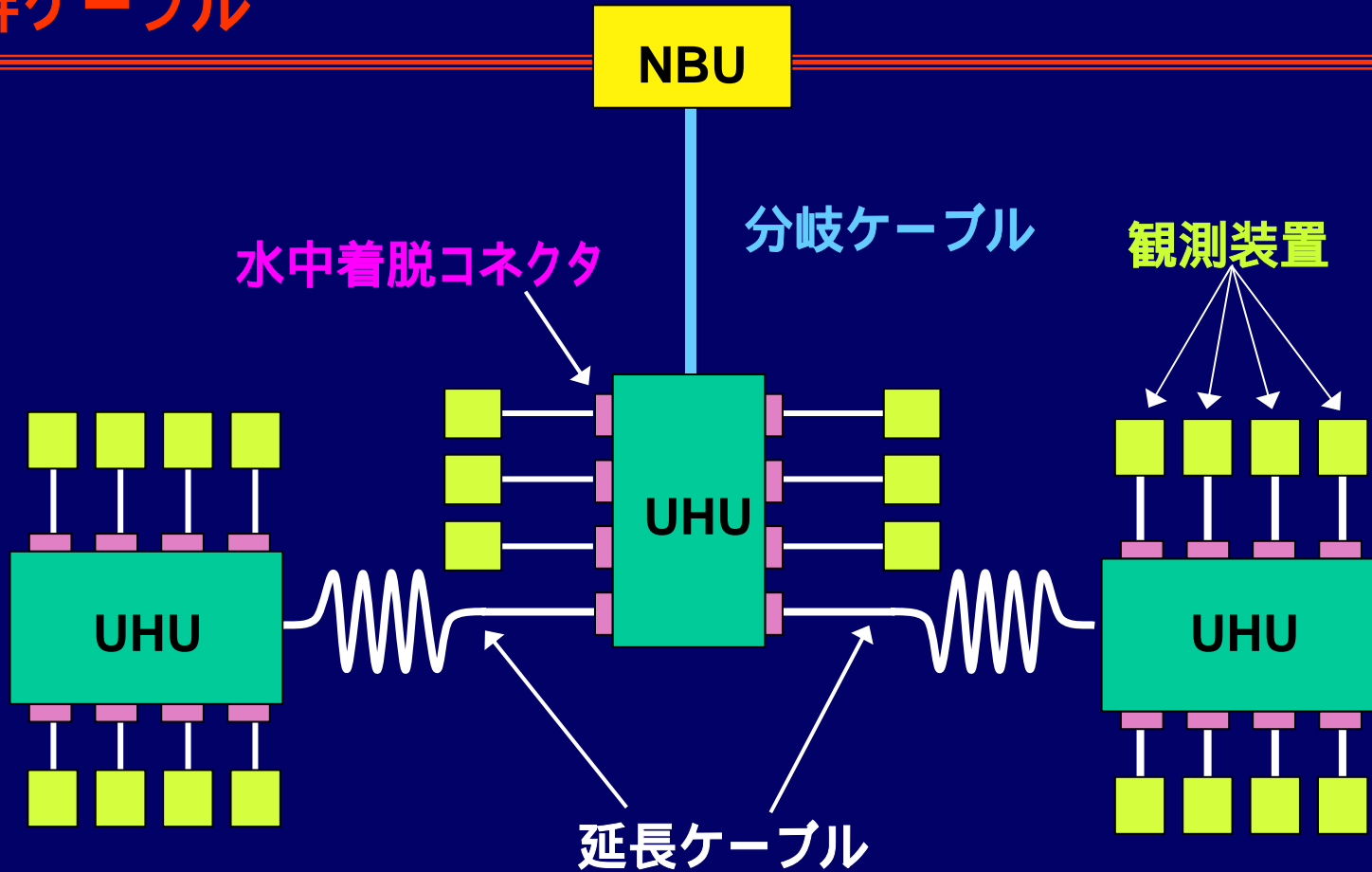
Sensor Layer Network with OADM

L2 SW : Level 2 Ethernet Switch

OADM : Optical Add/Drop Multiplexer

WDM : Wavelength Division Multiplexer

基幹ケーブル

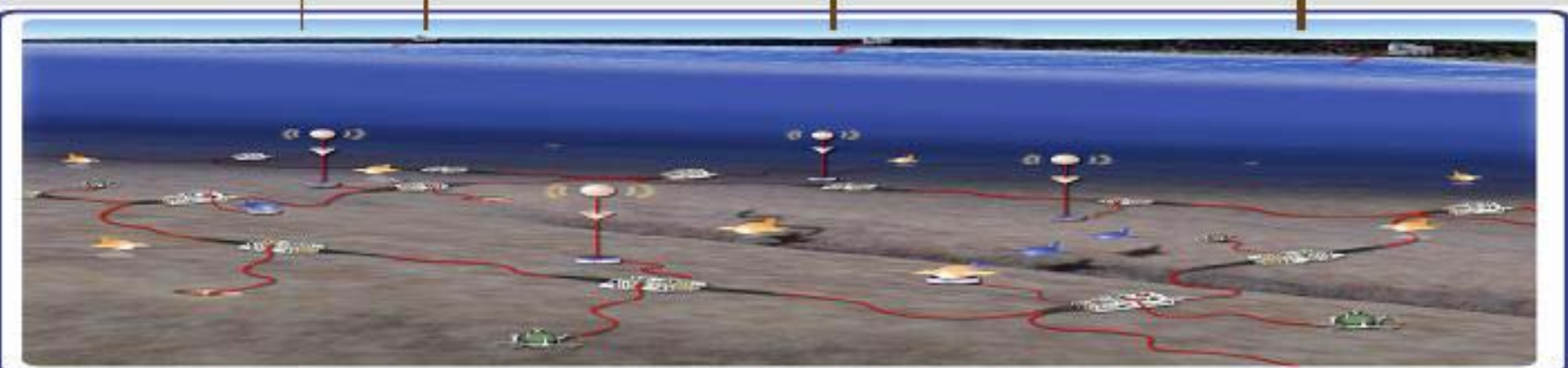
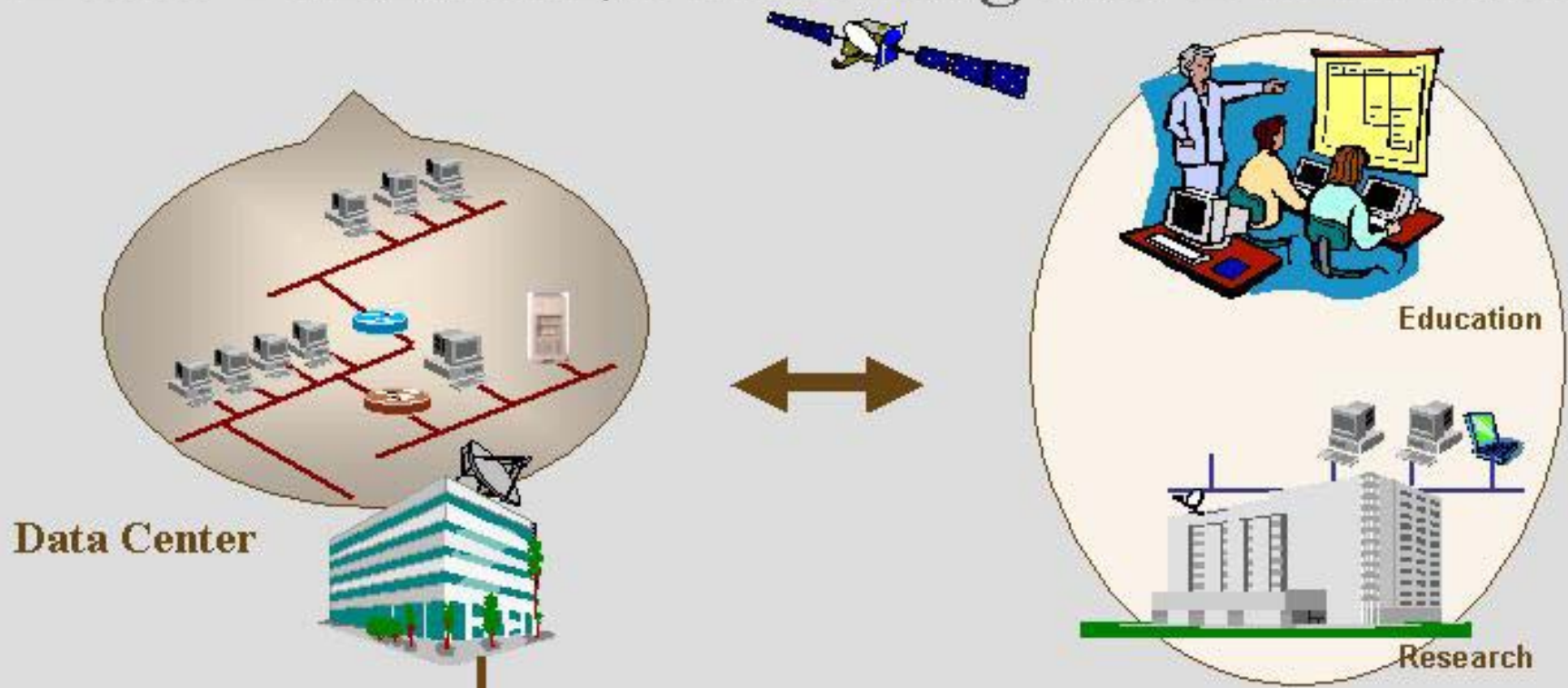


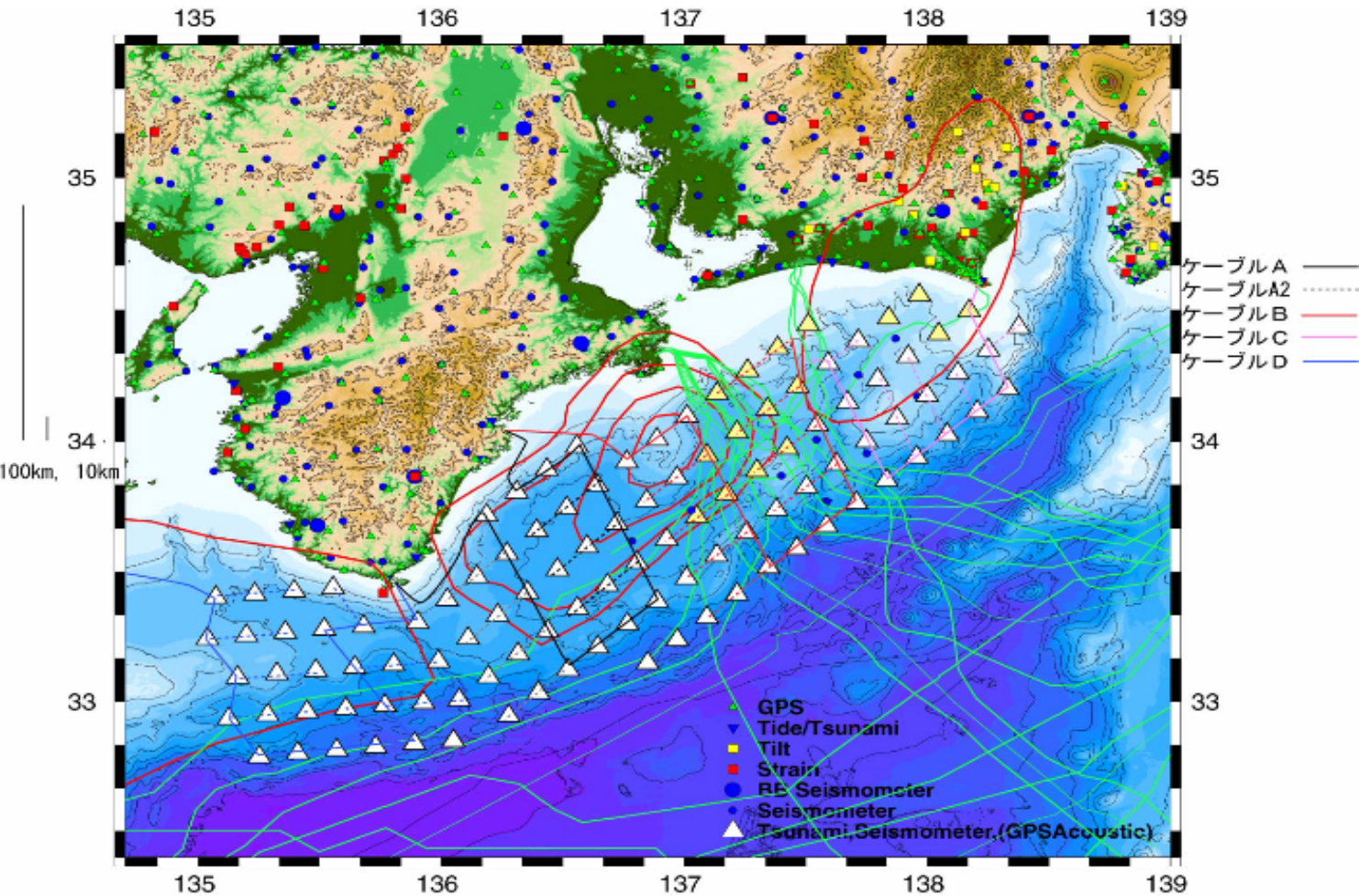
NBU : ノード分岐装置

UHU : 水中ハブ装置

観測ノードの構成

Data Utilization, Processing and Disclosure





**紀伊半島沖の東南海域に高密度の海底観測網の構築が
 H18～H21に実施される予定(文部科学省予算による)**

国内外の研究の動向

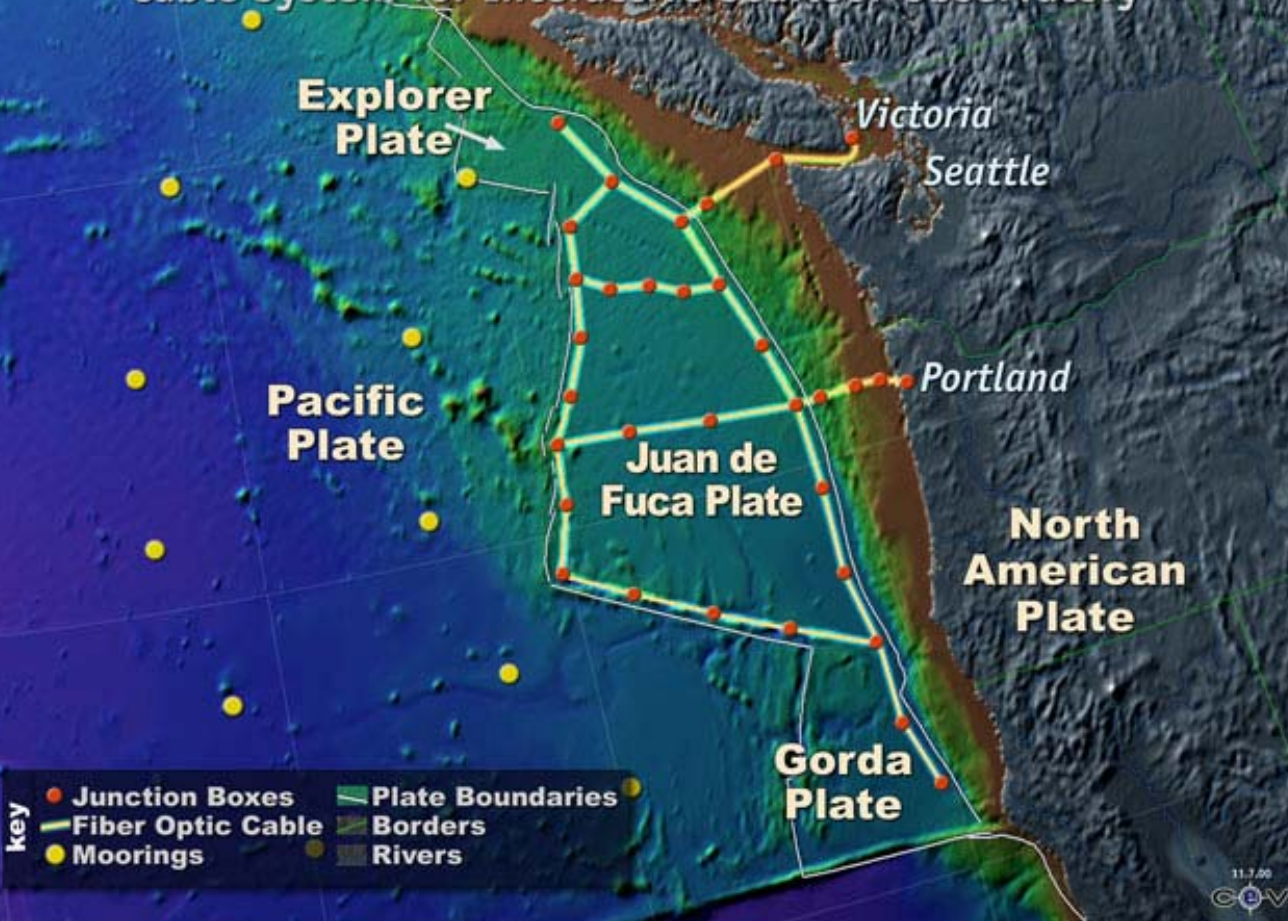
世界の主要な次世代海洋地球観測システム計画

- 1 . NEPTUNE プロジェクト(米国・カナダ 2006)
- 2 . MARS プロジェクト(米国 2005)
- 3 . VENUS プロジェクト(カナダ 2005)
- 4 . ESONET プロジェクト(欧州 2006)
- 5 . ARENAプロジェクト(日本 2006)

()内は、具体的に予算実行が開始された年

ARENAプロジェクトには、大学、研究機関、民間企業から、本申請代表者と分担研究者を含む、40名以上の研究者が参加して約1年間フィージビリティスタディを行い、その成果を技術白書としてまとめた。

Cable System for Interactive Seafloor Observatory



総ケーブル長: 3000km

ノード間隔: 100km

ノード数: 30

システム総電力: 100kW

データ伝送速度: 10Gbps

時刻精度: 1 μ s

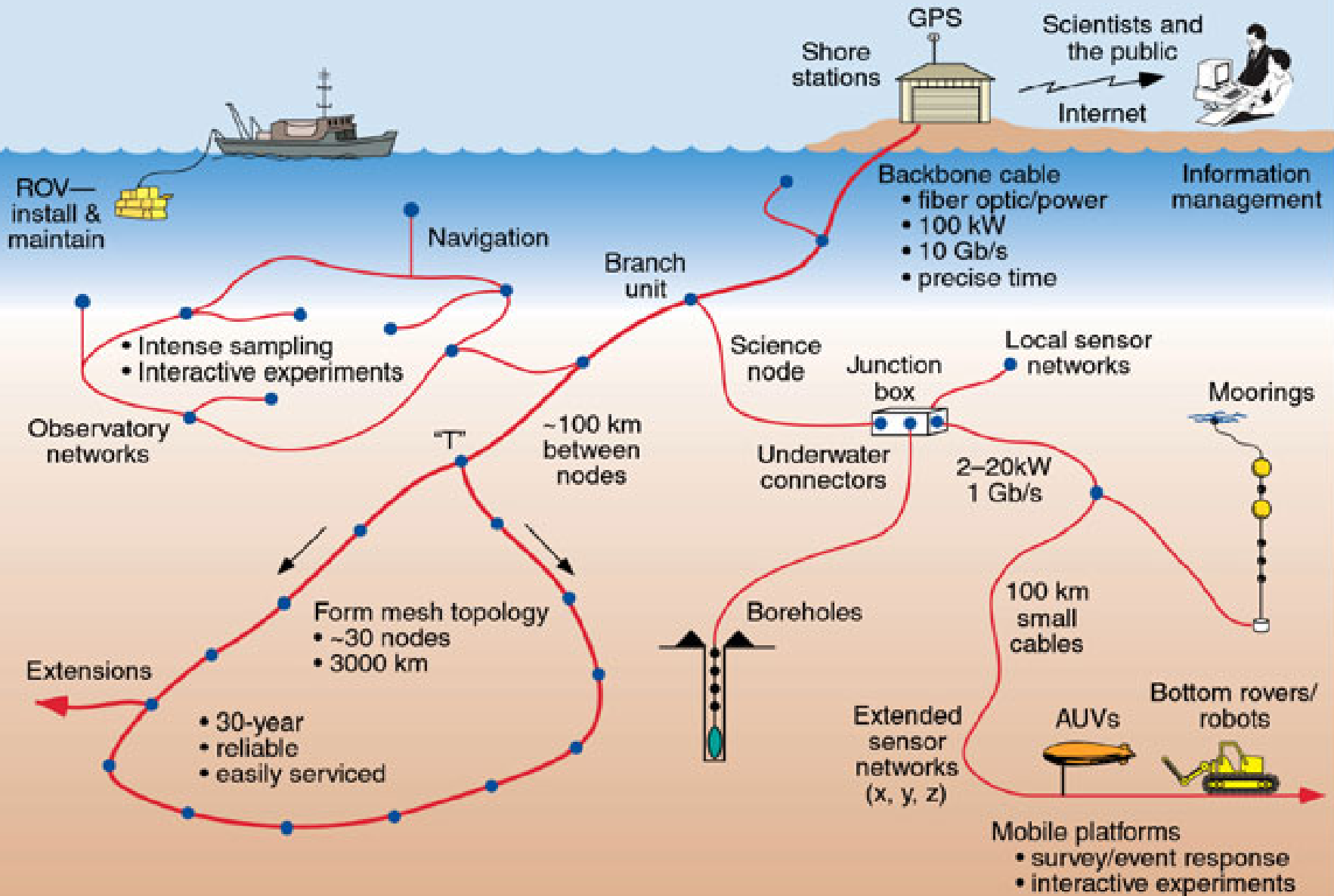
NEPTUNE Project

建設コスト: \$ 250million

運用コスト: \$ 10 - 15million/year

2005年 - 2007年: 設置予定、2006年より一部運用開始

NEPTUNE Essential Elements



欧州各国による次世代の海洋地球観測 ネットワーク計画

参加国

イギリス、フランス、ドイツ、イタリア、
ポルトガル、オランダ、ノルウェー、
アイルランド、ギリシャ



The European Sea Floor Observatory Network

まとめ

深海底から日本列島の未来を探る技術 境界領域における電気・情報系技術の役割

1. 計測技術を大切に！

相手を知らなければ何事も始まらない。

2. 異分野の研究者・技術者とコミュニケーションを！

謙虚に、貪欲に。常識は非常識かも。

3. つまらない仕事というものは無い！

面白く仕事するには、工夫・努力が必要。