

大洋横断有中継光海底ケーブルシステムの建設技術

米山 賢一・佐久山 洋・萩沢 瑛

要 旨

海底ケーブルシステムに求められる要求は、大容量化・長距離化・多地点接続など、年々高度化してきています。業界最先端の大容量、かつ大洋横断規模の超長距離海底ケーブルシステムを実現するためには、最先端の光信号技術を実際のシステム設計・建設にいかにして導入・実現していくかが重要な鍵となります。大容量・超長距離海底システムのシステム設計、機器製造、システム組立からシステム建設に至るまでの建設技術について紹介します。

キーワード

●海底ケーブル ●システム ●システム建設 ●利得等化 ●分散等化

1. はじめに

インターネット環境による画像配信の急増やインターネット環境の高速化に伴い、通信トラフィックの需要は年々増え続けています。国際通信のトラフィック需要を支えるため、長距離光信号伝送システムの大容量化技術が研究・開発され、最新技術を適用した光海底ケーブルが次々と計画・建設されています。

2. 海底ケーブルシステム建設のプロセス

図1は海底ケーブルシステム建設のプロセスの一例です。海底ケーブルシステムは、システム設計、機器設計・製造、海底ケーブルと海底中継器を結合した海底プラントの組立・

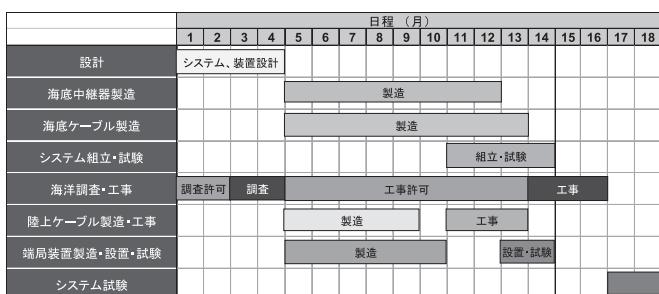


図1 海底ケーブル建設のプロセス

試験、敷設船による海底プラントの建設、端局装置の設置、陸上線路の建設、そしてシステム試験といったプロセスを経て建設されます。海底ケーブルの建設には、設計から建設までに、小規模なものでもおよそ1年、大規模なものは2年もの歳月を要します。

3. システム設計

海底ケーブルシステムのシステム設計には、海底プラント設計、光信号性能設計、給電設計、監視ネットワーク設計、及び各種（海洋、陸上、局舎内）工事設計があります。

3.1 海底プラント設計

建設する海底ケーブルのルート情報及び海図情報に基づいて、海底プラントのシステム構成図（Straight Line Diagram : SLD）を作成します。海底ケーブルが敷設される水深や地質状況により、適用する海底ケーブルの種類を決定し、SLDに反映します。図2は海底ケーブルの種類と適用水深を示した一例です。SLDには海底中継器の位置やケーブル接続（JB : Joint Box）、陸上ケーブル長も記載します。海底中継器を配置する間隔（以下、中継間隔）は光信号の伝送性能に影響するため、光信号性能設計により決定します。SLDは海洋調査結果や工事順序などを反映して、逐次更新していきます。

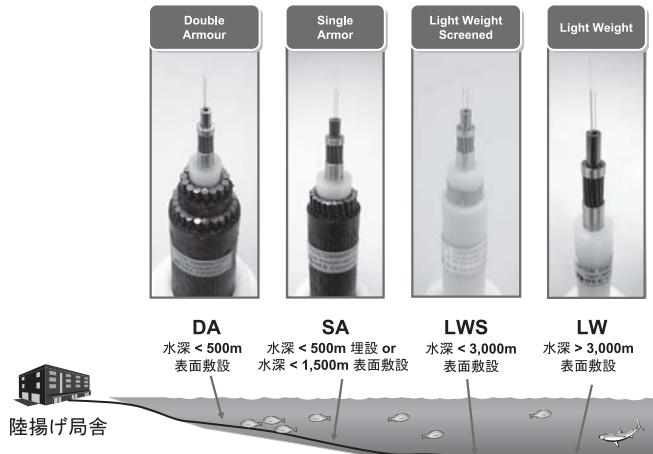


図2 海底ケーブルの種類と適用水深

3.2 主信号性能設計

SLDに記載されたケーブル長に基づいて、光信号の性能設計を行います。現在は10Gbps光信号を波長多重した方式が主流であり、ケーブル長、光ファイバ損失、海底中継器出力・雑音指数 (Noise Figure : NF)、波長多重数、10Gbps光送受信機性能、光信号を伝送することによる品質劣化 (伝送ペナルティ)、機器・システムの製造マージン、耐用年数における修理マージンなどを考慮して光信号の性能設計を行います。ここで、要求される伝送品質、製造・修理マージンを確保するために、海底中継器の中継間隔を調整します。中継間隔を短くすると、光信号の信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio : SNR) が良くなりマージンが確保できますが、中継器台数が増えてシステムコストが高くなります。したがって、所要の

表 主信号性能設計 (パワーバジェット) の一例

項目	数値
システム長	9,000km
10Gbps信号多重数	96波
1 伝送性能理論値 (Q計算値)	16.0dB
2 伝送ペナルティ、安定度	3.2dB
3 機器・システムの製造マージン	1.6dB
4 修理マージン	1.4dB
5 システムマージン	1.0dB
6 システム性能限界 (1-2-3-4-5)	8.8dB

システムマージンが確保できる範囲で、最も長い中継間隔を選択する必要があります。

表は、10Gbps×96波、9,000kmシステムの光信号性能設計 (パワーバジェット) の一例です。光信号設計には、信号品質を表す指標として海洋システム業界で標準的に使用されているQ値 (Q value) を使用します。

3.3 給電設計

陸揚げ局舎に給電装置を設置し、海底ケーブル内の給電線を通して海底中継器に電力を供給します。海底プラントには多数の海底中継器が直列に接続されて、給電装置から1.1Aの定電流で電力を供給します。海底ケーブルの抵抗値は、およそ0.8Ω/kmで、これに海底中継器の電圧降下、陸揚げ地間の地電位差 (地域によるが約0~0.3V/km) や、スペア中継器・スペアケーブルを挿入した場合の電圧降下を加味すると、システム長9,000km、4ファイバペアのシステムで約11kVの給電電圧が必要です。

システムの両端の局に給電装置をそれぞれ設置し、一方をプラス、他方をマイナス給電することで、おののの給電装置が所要電圧の半分ずつを供給する双方向給電の冗長構成を採ります。一方の給電装置に故障が生じて修理をする間も、他方の給電装置が全所要電圧を供給する (片端給電) ことでシステムの運用を続けることができます。

3.4 監視ネットワーク設計

海底ケーブルシステムの各陸揚げ局にはシステム・装置をモニタする監視装置が設置されます。各局の監視装置同士は、光海底端局装置 (Submarine Line Terminating Equipment : SLTE) の10Gbps光信号のオーバーヘッドを利用したオーダーワイア回線を通して結ばれており、互いの局の装置状態をモニタすることができます。

図3は海底ケーブルシステムの監視ネットワーク構成の一例です。局内に設置したルータに監視装置のサーバとクライアント端末が接続され、ルータを10Gbps SLTEのオーダーワイアチャンネルに接続することで、対向局のルータ及び監視サーバ、クライアントなどと接続します。陸揚げ局と遠地の遠隔監視局とを専用線やネットワークで結ぶことで、遠隔監視局のクライアント端末からも各陸揚げ局及び海底プラント

システム及び建設技術

大洋横断有中継光海底ケーブルシステムの建設技術

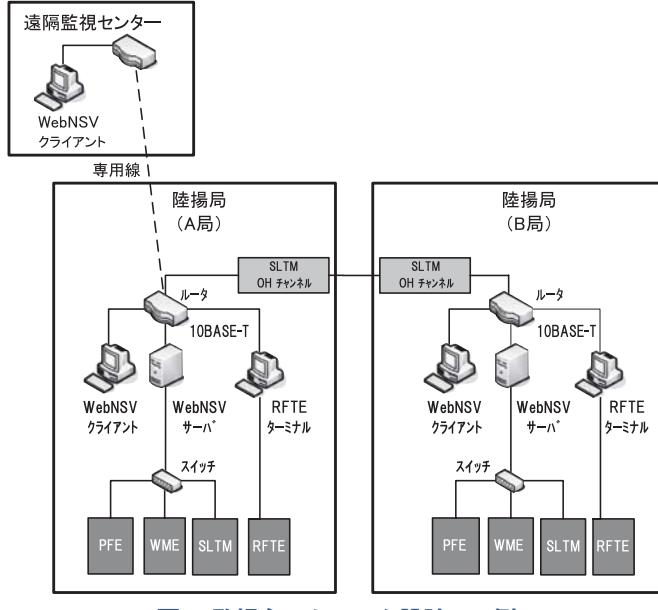


図3 監視ネットワーク設計の一例

の状態をモニタすることができます。

4. 海底プラントの詳細設計とシステム調整技術

大容量・超長距離の海底プラントには、多中継においても波長多重信号をレベル低下なく均一に伝送するための高精度の利得等化技術と、高密度の波長多重信号を伝送ペナルティなく超長距離伝送するための分散マネジメント技術が必要になります。

4.1 利得等化技術

10Gbps×96波、9,000kmシステムの場合、28nmの光増幅帯域を有する海底中継器を約130台直列に接続することになります。システム全体に要求される増幅帯域内の利得平坦度はおよそ8dBですから、海底中継器の利得平坦度は極めて厳しい精度が要求されます。また、海底ケーブルの光ファイバの損失にもわずかに波長依存性があり、この影響も無視できなくなります。したがって、海底中継器の増幅帯域の形状を設計する際に、光ファイバ損失の波長依存性を考慮して、1中継区間での増幅帯域が平坦になるように設計します。

海底中継器及び海底ケーブルは、利得平坦度の製造上の精

A) 利得等化の概念図

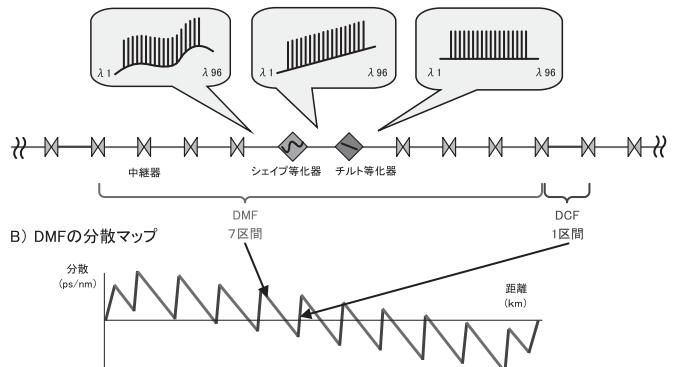


図4 海底プラントの利得等化と分散マネジメント

度に限界があり、実際のシステムでは製造誤差が累積するため、9,000kmシステムに期待される利得平坦度を実現することは困難です。そこで、海底中継器と海底ケーブルを接続して海底プラントを組み立てる工程において、利得等化器を挿入して、累積した利得平坦度のズレを補正していきます。

図4 A)に利得等化の概念図を示します。利得等化器には、累積した増幅帯域のうねりを補正するシェイプ等化器と増幅帯域内の傾きを補正するチルト等化器があります。シェイプ等化器は、海底中継器の増幅帯域の利得形状からあらかじめシミュレーションにより設計・製造し、適切な中継数ごとに挿入します。チルト等化器は、実際に製造した中継器及びケーブルの特性に基づいて、適切な傾きのシェイプ等化器を選択して挿入します。

4.2 分散マネジメント技術

図4 B)に10Gbps×96波、9,000kmシステムに適用する分散マネジメントファイバ (Dispersion Managed Fiber : DMF) の分散マップの一例を示します。1中継区間に内にプラスの波長分散値を有する光ファイバとマイナスの波長分散値を有する光ファイバを組み合わせることで1中継区間の分散値がややマイナスになるように設計しています。多中継により累積したマイナス分散は数中継ごとに設けた分散補償区間で補正します。

ここで、光ファイバの分散値にも、1中継区間にごとに厳しい製造精度が要求されます。そこで、光ファイバピースの選別や組み合わせを実施し、かつ1中継区間の線長調整を行うことで要求の精度を実現しています。多中継による製造誤差の累

積は、数十中継ごとに分散調整区間を設けて補正します。

5. システム組立・試験

NEC山梨で製造した海底中継器を、北九州にあるOCCの海底ケーブル工場に運び、海底中継器と海底ケーブルを接続して海底プラントを組み立てます。このとき、以下の性能試験を実施し、敷設船に積み込む前に海底プラントが設計どおりの性能であることを確認します。

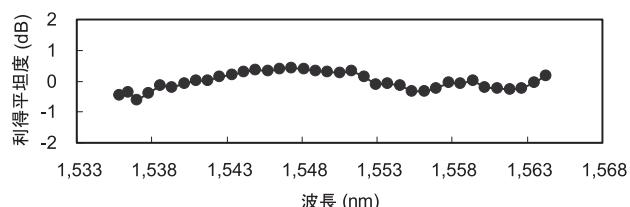
- ・給電線の絶縁試験、給電時の電圧降下
- ・光ファイバトレースの測定 (C-OTDR)
- ・光ファイバの波長分散
- ・利得平坦度
- ・光スペクトラム、光SNR (Signal to Noise Ratio)

第4項に記載した利得等化器の挿入や分散補償の調整も本工程において実施します。

海底中継器の利得平坦度は中継器の温度により微妙に変化するため、高精度が要求される超長距離システムの場合は海底中継器を恒温槽で覆い、海底と同じ温度に保った状態でシステム試験を実施します。

図5に実際に構築した9,000kmシステムの一部約5,800km分の利得平坦度並びに分散値のデータの一例を示します。このデータは、海底プラントが設計どおり極めて精密にでき上がっていることを示しています。

A) システムの利得平坦度(一例)



B) システムの分散マップ(一例)

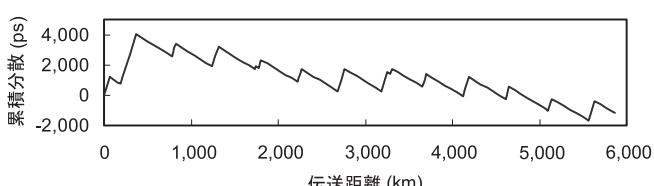


図5 製造した5,800km海底プラントの特性例

6. システム建設・コミッショニング試験

海底プラントを敷設船で敷設している最中も、定期的に絶縁抵抗、電圧降下、光ファイバトレース、光SNRを測定し、敷設中に海底プラントの損傷がないかどうかを確認します。

陸揚げ局舎への端局装置設置、ビーチマンホールから陸揚げ局舎までの陸上ケーブルの敷設は、海底プラントの敷設と平行して行われます。

海底プラントの敷設が完了すると、陸上ケーブル、端局装置とを接続して、以下のシステム試験を実施します。

- ・海底プラントの絶縁抵抗、電圧降下
- ・光SNR、Q値 (エラーレート)
- ・監視ネットワーク試験 (警報、モニタなど)
- ・長時間安定度 (Q値、警報)

このシステム試験の完了をもって、建設した光海底ケーブルが顧客に引き渡されます。

7.まとめ

海底ケーブルシステムは、海底ケーブルの製造を開始すると、海底プラントの組立・試験から敷設船への積み込み、敷設に至る一連の工程を連続で行うため、作業の中断は納期やコストに影響を与えます。そのため、システムの設計段階から各機器やケーブルの仕様、海底プラント組立時の各種補正手法を入念に計画し、製造・建設の実行に移していきます。上記で紹介した設計・組立・建設・試験の工程を経て、高品質の海底ケーブルシステムをタイムリーに提供していくことが可能となります。今後も、高品質を維持しつつ、最先端技術を導入していくことで、海底ケーブル業界をリードするグローバルリーディングカンパニーとして、国際・国内の海底ネットワーク構築に貢献してまいります。

執筆者プロフィール

米山 賢一
ブロードバンドネットワーク事業本部
海洋システム事業部
グループマネージャー

萩沢 瑛
ブロードバンドネットワーク事業本部
海洋システム事業部
主任

佐久山 洋
ブロードバンドネットワーク事業本部
海洋システム事業部
グループマネージャー