

大水深用深層水取水管の開発

Development of The Flexible Pipe for Extra Deep Sea

石井 健一¹・矢木橋清智¹・山口 卓見²・高松 研²

Kenichi ISHII, Kiyotomo YAGIHASHI, Takukumi YAMAGUCHI and Migaku TAKAMATSU

Abstract

Flexible pipes are increasingly used to draw up deep ocean water currently attracts many peoples attention as a new resource in the field of marine product industry and others. One of the most important requirements for the flexible pipes to apply in extra deep sea is how to reduce their own weight. Last year, we developed a light weight flexible pipe constructed with composite armor wires and installed on the sea bed over the depth of 600m. This paper describes the process of the development of the lighter pipe required for extra deep sea.

Key Words: Deep ocean water, flexible pipe, wire armor

1. はじめに

海洋深層水は低温、清浄で栄養分が豊富な熟成された海水であり、最近では養殖漁業を始め、医療用、食品用等として各種の用途が広がりつつある。また、深海に眠る無尽蔵な冷熱資源としての大規模な用途開発も期待されている。このたび弊社では大水深海域向けに大口径深層水取水管を開発し、現地での布設工事を終了した。本プロジェクトは国内の深層水開発としては3番目となるが取水海域が600mの大水深であること、日量1万トン以上の大量取水を行うことが特筆される。このために新たにパイプの軽量化と大口径化を進めた。パイプを深海まで一連続長のまま長尺布設する場合、自重や潮流によりパイプ上部に加わる過大な張力や曲げモーメント、捻りモーメントに十分耐え得るよう検討する必要がある。軽量で機械強度に優れた外装構造の設計が大きなポイントとなった。また、布設の際にパイプが台船のシーブを通過したり船上の制動装置を通過する時に発生する側圧で座屈破壊しないよう布設機材の検討と共にパイプ側圧強度が重要な検討課題となった。本報告ではパイプの設計及び製造概要、機械特

性に関する評価検討結果、布設工事の概要について述べる。

2. 取水管の構造設計及び製造プロセス

2.1 内 管

深層水取水管の内管材料には断熱性、可撓性、耐食性等の利点があるプラスチックを用いる。プラスチックは管内面にスケール等の汚れが付着し難く、金属イオンや環境ホルモンが流出する可能性が低いので深層水の清浄性を維持出来る。表-1は内管用材料の候補とされる各種プラスチックの特性に関する比較表である。各種の要求機能に対して最もバランス良い特性を示し、水道用配管や長距離海底送水管用として以前から使用実績が多いポリエチレンが深層水取水管用としても最適と考えている。

表-2は通常、送水管用として使用している硬質ポリエチレンの一般物理特性である。

取水管の内径、肉厚については取水量と許容損失水頭、送水距離等を考慮して設計される。(1)式はこれらパラメータの関係を示すヘーゼンウイリアムスの式である。

¹古河電気工業(株)研究開発本部 (〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通6番地)

²古河電気工業(株)電力事業部海洋課 (〒140-0002 東京都品川区東品川4丁目13番地14号)

表-1 管路用プラスチック材の一般特性

要 求 機 能	管路用プラスチック材				
	ポリエチレン管	PVC管	ナイロン管	ポリブデン管	FRP管
断熱性	○	○	○	○	○
製造性	長尺成型性	○	○	△	△
	端末加工性	○	△	△	○
機械特性	耐内圧強度	○	○	○	◎
	可撓性	○	○	○	×
	長期耐久性	○	×	○	△
低圧力損失	○	○	○	○	△
耐食性・耐薬品性	○	△	◎	○	△
耐候性	◎	△	△	○	△
経済性	○	◎	×	△	×

表-2 送水管用ポリエチレンの基本特性

項目		単位	性能
熱抵抗	固有熱抵抗	°C・cm/W	350
	表面放散熱抵抗	°C・cm/W	700
密度		g/cc	0.94
硬度			40 at 20 °C
引張特性	破断強度	MPa	26 at 20 °C
	伸び	%	800 at 20 °C
弾性係数		MPa	125 at 20 °C
線膨張係数		1/°C	2×10^{-4}
耐寒性			-15 °C以下で異常なし
熱間クリープ特性			40 °C 40 年相当で異常なし

$$Q=24065CD^{2.63} (h/L)^{0.54} \dots\dots\dots(1)$$

ここに Q：送水量 C：流速係数
 D：パイプ内径 h：許容摩擦損失水頭
 L：管路長

通常、損失水頭に応じて内管肉厚を増減することで対応するが極端に肉厚が増えると材料コストを増大させる一方で可撓性が損われ、布設や輸送コストにも影響する。このため肉厚については通常、内管径の10%程度に設定し、耐内圧強度が不足する場合は内管上に内圧補強帯を巻いたり外装線により適正な補強効果が得られるようにしている。内管は図-1に示すように管成型機により必要長を無接続で連続押し出し成型する。溶融状態で押し出された管が変形しないように複数配置された冷却水槽内を

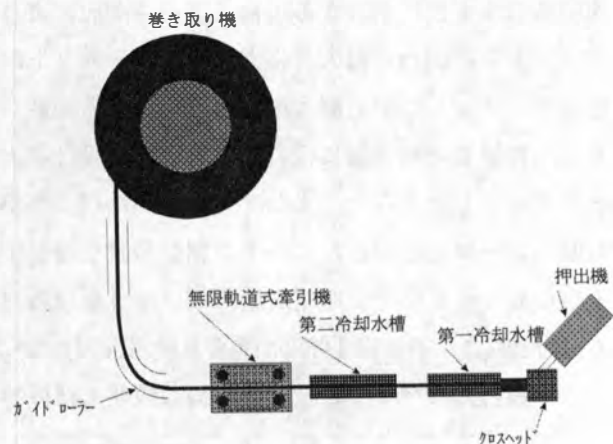


図-1 内管押し出し工程

通過させて冷やし、引き取り装置（キャタピラ）によってターンブルと称する巻き取り装置に一連続で巻き取る。

2.2 外 装

長尺の取水管を深海に布設するためには布設時の張力、側圧対策ならびに長期使用期間中に受ける流体力や外傷に対する防護のため外装が不可欠である。但し深海向けの場合、外装を設けることによってパイプ総重量が増え、布設時の張力や側圧を著しく増加させることのないよう外装構造の軽量化や高強度化を考慮する必要がある。今回は幾つかの外装構造について試設計し、海中における取水管の静的挙動や静的挙動についてのシミュレーションや疲労解析を行い表-3に示すように外装鉄線の一部を厚肉のプラスチックで被覆した構造を選定した。今回の布設条件の場合、一重外装構造で問題無いが更に大水深のケースでは二重外装によるトルクバランス型の軽量構造とする必要もある。

外装工程を図-2に示す。巻き取り機から引き出されたポリエチレン内管はこれを防護するための座床層を形成するポリプロピレンヤーンの巻き付け工程を経て外装機に導かれる。外装機は写真-1に示

表-3 取水管構造表度

	材質	サイズ [m]
内 管	ポリエチレン	320×10^{-3}
外 装 線	低炭素鋼	8×10^{-3}
	ポリエチレン被覆鉄線	鉄線径 2×10^{-3} 外径 8×10^{-3}
仕上外径	$\phi 350 \times 10^{-3} \text{ m}$	
水中重量	24.65 kg/m	

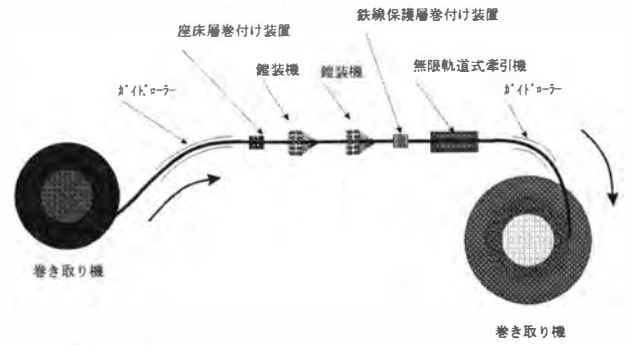
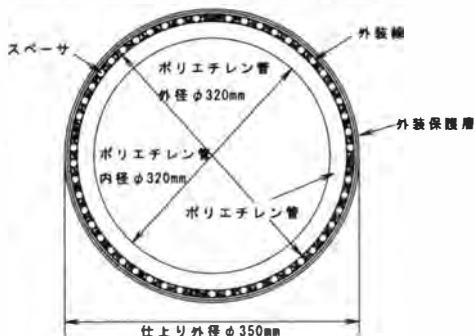


図-2 外装巻き工程

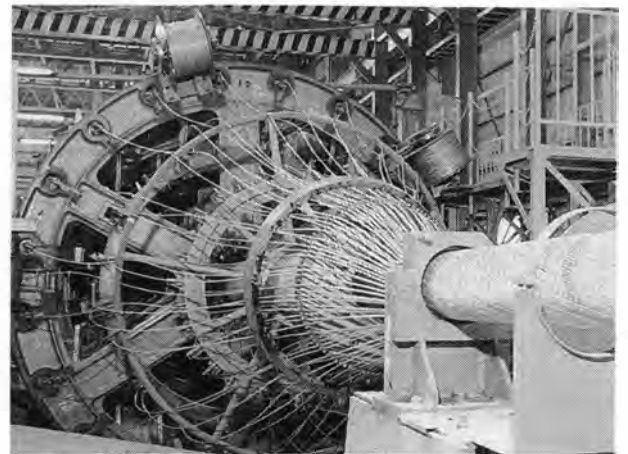


写真-1 外装機

す外観の籠形の回転設備で多数の外装線を内管上に一気に巻き付けていく。外装機は2機配置され、1機目と2機目のケージを逆回転させることによって交互に2重外装構造とすることも可能である。外装を施したパイプは外装保護用の座床層を設けて引き取り装置によって巻き取り機まで導かれる。

3. 機械特性

3.1 基本特性

取水管の布設システム設計の際に必要とされる基本定数である曲げ剛性、縦剛性、捻り剛性を試作パイプを用いて測定した。測定結果を表-4に示す。それぞれ設計値とほぼ合致し、これらの定数を用い

表-4 取水管基本定数

項目	単位	数値
曲げ剛性	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2$	1×10^8
縦剛性	kN	2.5×10^7
捻り剛性	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2 / \text{deg}$	1.5×10^8

てパイプの深海布設時に発生する各応力について解析した結果は許容レベル内にあり、実布設の際に問題無いことを確認した。

3.2 側圧特性

今回、採用された布設方式の場合、布設船上に搭載された自己回転型のターンテーブルからパイプが繰り出され、制動装置内面を通過する際、パイプ断面には4方向からの集中的な側圧荷重が加わる。また、パイプが船尾のシーブを通過して海中に落とし込まれる際、パイプ断面には3方向からの側圧荷重が加わる。それぞれの側圧荷重に対してパイプが損傷を受けないよう慎重な検討を行った。4点集中型及び3点集中型の側圧によるパイプ各点の径変化と曲げモーメント分布については円管の歪エネルギー理論を用いて以下のように算出した。

【4点圧縮モデル】

径変化

$$D_v = \frac{WR^3}{EI} \cos \phi \left[\frac{1}{2} \{ (\pi - 2\phi) \cos \phi + 2 \sin \phi \} - \frac{4}{\pi} \right]$$

$$D_H = \frac{WR^3}{EI} \cos \phi \left[\cos \phi + \phi \sin \phi - \frac{4}{\pi} \right]$$

モーメント

$$0 \leq \theta \leq \phi$$

$$M = \frac{WR}{\pi} \cos \phi [2 - \pi \sin \phi \cdot \cos \theta]$$

$$\phi \leq \theta \leq \pi - \phi$$

$$M = \frac{WR}{\pi} [2 - \pi \sin \theta \cos \phi]$$

$$\pi - \phi \leq \theta \leq \pi$$

$$M = \frac{WR}{\pi} [2 + \pi \sin \phi \cdot \cos \theta]$$

【3点圧縮モデル】

径変化

$$D_v = \frac{W \cdot R^3}{EI} \left[-\frac{2}{\pi} (\cos \phi + 1) + \frac{1}{2} \{ (\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi \} \right]$$

$$D_H = \frac{W \cdot R^3}{EI} \left[-\frac{2}{\pi} (\cos \phi + 1) + \frac{1}{2} (\sin \phi + 2 \cos \phi) \right]$$

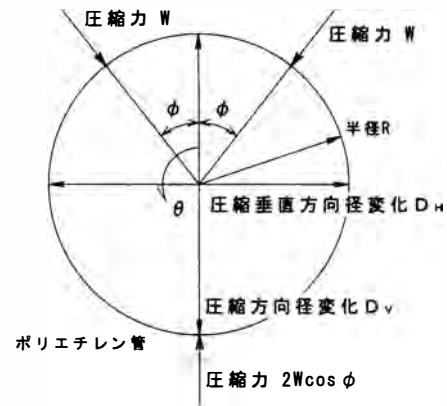
モーメント

$$0 \leq \theta \leq \phi$$

$$M = \frac{WR}{\pi} [1 + \cos \phi - (\pi - \phi) \sin \phi \cdot \cos \theta]$$

$$\phi \leq \theta \leq \pi$$

$$M = \frac{WR}{\pi} [1 + \cos \phi - (\pi - \phi) \sin \phi \cdot \cos \theta - \pi \sin(\theta - \phi)]$$



試作パイプを用いて測定した側圧変形量と解析結果は図-3に示すように良く一致した。そこで布設の際にはこのような側圧解析法によりパイプに加わる最大曲げモーメントや最大曲げ応力を求め、ポリエチレン内管の許容降伏応力内に収まるように布設機材の装備を進めた。即ち3点圧縮時の許容側圧は約3.5トン/mであることから安全率も考慮して布設船のシーブ径は8m以上とした。また、4点圧縮時の許容側圧は約10トン/mであるので安全率も考慮して制動装置の有効長を4m以上とした。

3.3 抗張力特性

取水管が布設船より深海に繰り出される際、布設船のシーブ面で取水管に発生する引張り力と曲げの重畳応力に耐え得るかを確認するため、海底電力ケーブルの評価試験法に準じて引張り曲げ試験を実施した。写真-2に示すように直径7mのシーブ面に沿わせて最大張力30トン、最大側圧7.5トン/mの履歴を繰り返し加えたが特に異常は生じることなく十分な抗張力特性を有することが確認された。

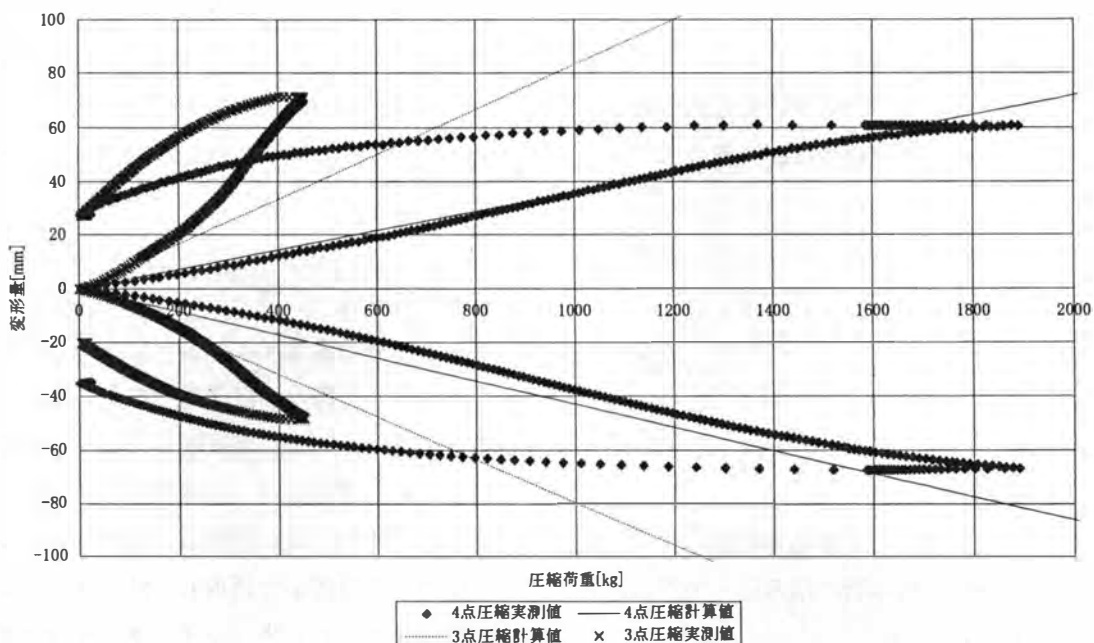


図-3 側圧変形量



写真-2 抗張力試験状況

た、以下にその概要について述べる。



4. 布設工事

4.1 布設ルート調査

ルート調査は取水管の陸上揚陸点と取水口設置地点の間の障害箇所を避けながら最短で結ぶ効率的なルートを選定するために行われる。障害箇所とは海底に極端な起伏や段差が生じている場所であり、可撓性に優れたパイプであっても出来るだけこれを避け、平坦なルートへの布設を目指す必要がある。

4.2 布設手順および工法

深層水取水管の布設工事手順は次のように行われ

(1) 布設船の選定・ぎ装

布設船の選定には船上での取水管の巻き取り方法が大きく係わる。従来、巻き取り方法としてはコイル取りとターンテーブル取りの2種類がある。前者の場合、取水管1巻き毎に1回転の捻りを加えて巻き取る方法であり、後者の場合には捻りが加わらない巻き方である。特に大口径のパイプでは曲げ剛性、捻り剛性が大きくなり、コイル取りが困難となるためターンテーブル方式の採用が望ましい。取水管の輸送長、重量、ターンテーブル径等を考慮して適正な布設船を選定する必要がある。ターンテーブル以外の主なぎ装設備としては以下のものがある。

a) 張力把持装置（キャタピラブレーキ）

取水管布設時の荷重や速度をコントロールする装置であり、取水管を適正な力で把持しながら布設船の移動速度に合わせて繰り出す機能を有する。

b) クローラークレーン

最終端の取水口を吊り降ろしたりする荷役設備。

c) ウインチ

布設船からアンカリングしたワイヤを巻き取り、船を移動させるための設備。

(2) 回航・船積み

備船地においてぎ装した布設船は取水管出荷工場まで回航し、布設船に取水管を積み込んで更に、布設地域まで回航する。

(3) 陸揚げ

通常、取水管の布設は陸上側から開始する。布設船は水深の許す限り陸側近くに接近させ、取水管にフロートブイを取り付けて海面に浮かべながら揚陸地点まで引き上げる。

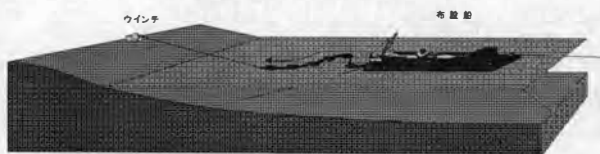


図-4 取水管陸揚げ概念図

(4) 取水管布設

取水管の布設方式としてはアンカリング工法が多く採用されている。アンカリング工法とは、まず、布設船の前方にアンカーを打設し、アンカリングワイヤを布設船上のウインチで巻き取ることで船

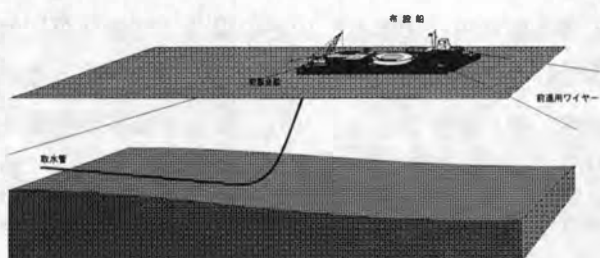


図-5 取水管布設概要図

を徐々に推進させていく方法である。船の前進と共に取水管を海底に落とし込んでいく。布設中には常時、取水管の張力や入水角を監視し、キャタピラブレーキを操作して海中における取水管のカテナリカーブを適正な状態に維持する。

(5) 取水口沈設

取水管の沖合側端末には取水口を取り付け、これを沈設させる。取水口は深層水と共に海底の土砂を吸い上げないように海底面から数mの高さの海中に口を向けて設置させる必要があり、慎重な作業を要する。取水管端末に接続した取水口はクレーンにて船尾の所定位置まで誘導し、沈設用ウインチワイヤと接続する。その際、ウインチワイヤ先端には自動切り離し装置を取り付ける。

布設船を前進させながら沈設用ウインチワイヤを繰り出し、取水口を海底付近に設置する。その後、音波式切り離し装置を作動させ、沈設用ワイヤを回して布設作業を全て終了する。取水管端末が張力把持装置を離れてから着底するまでの手順において最大張力が発生するので細心の注意が必要となる。

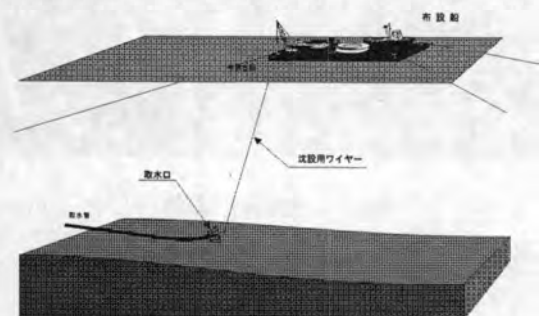


図-6 取水口沈設作業概要図

4.3 防護工事

浅海部に布設された取水管については波浪や潮流による影響を避けるため十分な防護対策を要する。取水管の安定性を維持するために深海部では軽量化が重要であるのとは逆に、防護管等を被せて水中重量を増加させる対策も検討される。海底地質が砂の場合にはウォータージェット埋設による防護対策が適している。



写真-3 防護管施工例

4.4 取水試験

出荷時取水管内には水を封入し、僅かに加圧した状態で輸送および布設までを行う。布設がほとんど終了し、取水口をクレーンで吊り上げて海中に沈設する直前に末端の盲フランジが開放され、管内の水海水とが接触する。取水口を海底に設置した後、取水管上端のバルブを開放して、ポンプアップし、取水量の確認試験を実施する。

5. 今後の課題

現在、深層水ビジネスについては多くの注目を集めており、その用途開発が一段と進むにつれて立地海域は国内はもちろん海外にまで広く及ぶ可能性がある。そこでそれぞれの立地条件に適応するパイプの新構造、新布設システム、新布設機材についての開発課題が増えていくものと予想される。今後取水



写真-4 2重外装パイプモデル

海域の深海化も更に進むものと考えられるので布設時の張力や側圧の軽減対策についてパイプ構造と布設設備の両面から検討していく必要がある。外装についても益々重要な役割を果たすことになり、特に布設時張力による内管の捻れ破損を防止するために今後、コントラヘリカルタイプの2重外装管等が登場することも考えられる(写真-4)。これらについて低価格で信頼性の高い製品を提供することも重要であると考えている。

6. おわりに

以上、大水深用深層水取水管の開発内容の一端について報告した。本開発に際していろいろ御指導御協力頂いた関係者各位に厚く御礼申し上げます。

(2000. 2. 29 受付)