

# インドネシア SSWJ (サウススマトラ・ウエストジャワ) ガスパイプラインプロジェクト (フェーズ1) における海底パイプライン建設工事

堀 越 健 次・石 橋 基 之・久 納 淳 司

インドネシアの南スマトラと西ジャワを結ぶ 102 km の海峡横断パイプラインは、浅瀬部から深海部に対応した各種海底パイプライン敷設技術が必要とした。さらに、20 年間の連続使用に耐えうる、高い技術的信頼性が求められ、現在の海底パイプライン設計・施工技術の粋を集めて建設する必要があった。本報告書は、本工事で採用した設計・施工に関する技術的特記事項を述べるものである。

キーワード：海底パイプライン、プッシュプル工法、敷設船工法、自動溶接、浚渫、ポストトレンチング

## 1. はじめに

インドネシアは、東南アジアにおける石油・天然ガスの主要な生産国であり、日本を中心として多くの天然ガスを輸出してきた。しかし、インドネシア国内のエネルギー需要の高まりに応じて、輸出を中心としていた天然ガスを国内で使用する政策を進めることになった。そのため、インドネシアガス公社（以下 PGN）により天然ガスの生産地であるスマトラ島から工業地帯のあるジャワ島を 813 mm の大口径のパイプラインで結び日量最大 275 MMSCF (Million Metric Standard Cubic Feet per Day) の天然ガスを輸送するパイプライン幹線網の建設工事が計画された。

この建設工事は、図-1 に示すように、813 mm × 270 km の陸上輸送パイプライン (CP-1)、813 mm × 102 km の海底輸送パイプライン (CP-2)、406 mm × 40 km の需要家への供給用のパイプライン (CP-4) 及び輸送ガスの昇圧用コンプレッサー施設 (CP-5) からなる設備である。そのファイナンスには、JBIC を通じて日本の特別円借款が適用された。本報告書は、このパイプライン幹線網の基幹となる海底パイプライン (CP-2) の建設工事の報告書である。

## 2. 工事概要

本工事は、スマトラ島とジャワ島を結ぶ 813 mm × 102 km の海峡横断パイプラインの調査・設計・調達・施工・試運転までのフルターンキー工事であり、その概要を表-1 に示す。また、本工事の特徴として、以下のものがあげられる。



図-1 SSWJ フェーズ1 工事の全体図

表-1 SSWJ 海底パイプライン工事概要

契約形態	施主	インドネシアガス公社 (PGN)
	元請	新日本製鐵(株)
	工事契約形態	フルターンキー契約
工事内容	工期	契約開始日から 21.5 ヶ月 (目標として 15 ヶ月の短工期で行う)
	海底パイプライン	813 mm × 100 km
	陸上パイプライン	1 km × 両岸 = 2 km
設計条件	パイプライン検査施設	2 箇所
	設計圧力	7.24 MPa
	設計流量	275 MMSCFD
	設計温度	48.9 deg.C
	設計寿命	20 年間
	水深	0 m ~ 73 m
	設計最大波高	Hmax = 8.96 m, T = 11.69 sec
設計最大潮流	Vmax = 1.25 m/sec	

- ①陸上立ち上がり部から最大水深 73 m の沖合いに建設されるため、浅瀬部から深海部まで敷設できる海底パイプラインの総合建設技術を必要とした。
- ②天然ガス需要家の要求により 15 ヶ月の非常に短工期を求められた。
- ③ガス輸送パイプラインは、一度天然ガスの輸送を開始すると、20 年間の設計寿命の間、連続使用し続け、ガス中断を極力最小化するような非常に高い技術的信頼性を求められた。

### 3. 海底パイプラインの設計

本海底パイプラインは、20 年の連続使用に耐えうる高い信頼性を確保するため、北海等の厳しい海象条件で使用され、かつ多くのパイプラインプロジェクトの設計基準として採用されているノルウェーの船級協会の基準 DNV-OS-F101（以下、DNV）に基づいて設計された。主要な設計項目とその概要を以下に述べる。

#### (1) パイプラインのルート調査と選定

パイプラインの適正なルートを選定する上での基本的な考え方は、海底地盤の起伏が激しい区間、断層やガス溜まり等の不安定な地盤、あるいは金属の埋設物が想定される磁性の高いところや施工上難易度の高い（岩盤掘削など）箇所を極力避け、可能な限り始点と終点を直線で結ぶことである。

そのためにまず、パイプライン全線にわたり、幅 2 km 区間を水深測量、音波探査及び磁気探査を行い、海底起伏、海底地盤表面の状態、海底地質の分布データを得た。その後、一定間隔でドロップコアや原位置でのボーリングを行い、土質サンプルの採取と土質試験により、正確な地盤データ（地質構造、強度、液状化データ）を得た。

この調査測量により、計画ルートで一部起伏の激しい海底地盤が発見された（図-2）。起伏が激しい区間では図-3 に示すように、パイプに局所的な反力と曲げ応力が発生するとともに、フリースパンでは潮流による振動が発生し、疲労寿命が問題となる。そこで、土質調査により得られた海底地盤データ（1 m ピッチの水深データと地盤の非線形バネ）を使い、有限要素解析プログラムによりパイプラインの発生応力が許容値以内であること、また、発生するフリースパンが潮流により振動しないことを確認した。

さらに、海岸線付近で発見された硬い岩盤層では、施工時に敷設船が使用しているアンカーが地盤に埋まらず、敷設船の係留安定性が問題となる。また、硬質

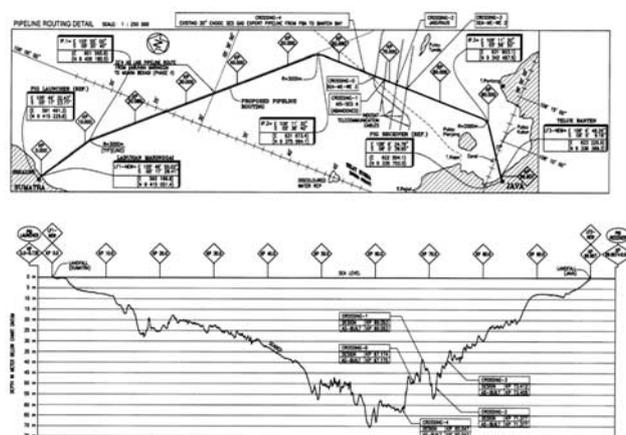


図-2 パイプラインのルート図と断面図

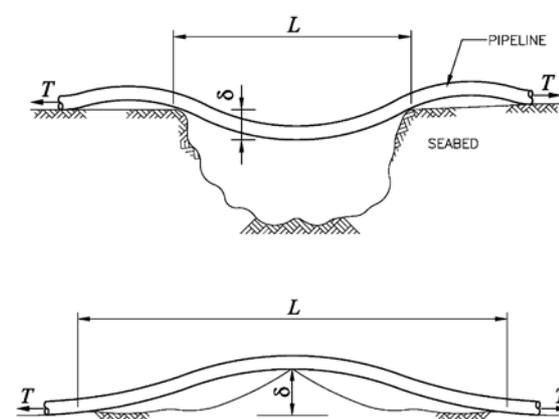


図-3 フリースパンの例

地盤ではパイプラインを埋設するための浚渫作業が困難となり、工程の遅延をもたらす。従って、固い岩盤層を避けるため局所的にパイプラインのルート変更を行った。また、本パイプラインルート上には、508 mm 径の既設パイプラインと 3 本の埋設されたテレコムケーブルがあり、磁気探査により正確な位置出しを行い、パイプライン施工前にコンクリートのサポートを設置することで、直接既設パイプラインとの接触を避けるよう計画した。

上記の調査と技術検討をもとに、3 箇所のカーブを有する総延長約 102 km のパイプラインルートを選定した。なお、本パイプラインルートは、国際航路と交差している（図-2）。

#### (2) 稼働時におけるパイプラインの強度設計

##### (a) 設計条件

パイプラインの設計には、流送物（ガス）による内圧力、温度、パイプの重量などの稼働時荷重、波浪、潮流、地震力、水圧などの環境荷重や敷設時にパイプ

ラインに作用する張力、曲げなどの施工時荷重を考慮する必要がある。

#### (b) パイプラインの板厚設計

DNVに基づき、施工時から稼働時までの全ての荷重条件に耐えうる、必要板厚を設計した結果、稼働時荷重と環境荷重が支配的である浅瀬部では19 mm、一方、最大水深73 mを含む深海部では施工時に作用する外圧力（水圧）によりパイプラインが座屈しないよう22 mmの板厚が必要であった（表—2）。

表—2 パイプラインのデータ

外径	812.8 mm
板厚	19.05 mm, 水深 30 m 以下
	22.22 mm, 水深 30 m 以上
降伏応力	450 MPa
製管場所	新日本製鐵(株)君津製鉄所
製管方法	UOE 鋼管
鋼重総計	42,000 ton
パイプ総数	8,500 本
防食塗装	3LPE (3層, ポリエチレン)
コンクリート厚	109 mm, 水深 30m 以下
	61 mm, 水深 30m 以上
コンクリート総重量	80,000 ton
コーティング場所	インドネシア/バタム島

### (3) 海底パイプラインの安定計算と防護/埋設設計

#### (a) 波浪や潮流

20年間の稼働中に想定される最大暴風波浪（100年期待値）や潮流に対するパイプラインの安定性を確保するため、重量コンクリートコーティングを施した（パイプ重量を増加させ、波浪や潮流作用時に十分な摩擦力で安定性を保つ）。安定計算の結果、水深30 m以浅では、波浪の影響が大きく109 mm厚、波浪の影響が比較的少なくなる水深30 mから最大水深73 mまでは61 mm厚のコンクリートが必要であった（表—2）。

また、インドネシアの基準により、防護と十分な安定性を確保するため、砕波の影響を受けると考えられる水深13 m以浅は海底面下3 mにパイプラインを埋設した（土被り2 m）。

#### (b) 漁船及び大型船の投錨や走錨検討

海岸沿岸部では、漁業活動が活発であり、使用される漁船の調査・分析を行い、想定される最大漁具による動的な衝撃力に対して、パイプラインの強度検討を行った。その結果109 mm厚のコンクリートにより衝撃力を吸収でき、パイプライン本体には影響がないことが確認できた。また、本パイプラインは国際航路と

交差しているため、大型船による投錨と走錨が懸念された。定量的に危険度を分析するため、通行頻度と投錨確率に対する危険度解析、及び、投錨・走錨時のパイプライン強度解析とその実験を行った。その結果、投錨や走錨の頻度は確率的には非常に小さいものの、パイプラインの将来的な安全性を確保するためには、砕石と岩による防護が必要であるとの結論を得た。

## 4. 海底パイプラインの施工

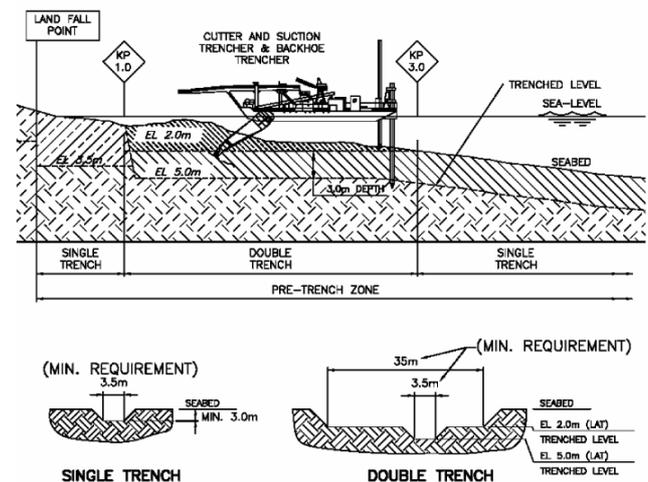
### (1) 施工方法

全長102kmの海底パイプラインの施工は、ジャワ、スマトラ両岸の浅瀬部（各7 km程度、水深7 mまで）とその間を結ぶ深海部（88 km程度、水深7 mから73 mまで）の3つに大きく区分できる。

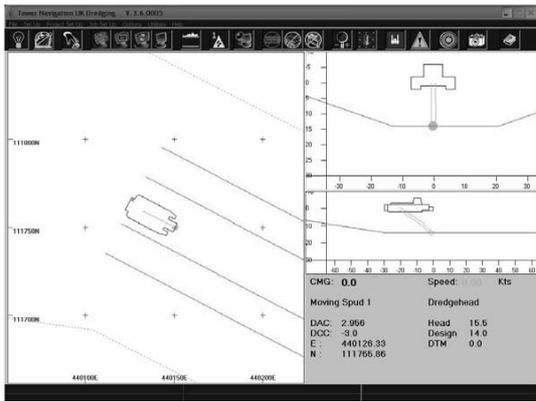
本パイプラインの施工では、プレトレンチング（パイプ敷設前の浚渫）、浅瀬部敷設、深海部敷設、ポストトレンチング（パイプ敷設後の浚渫）、パイプライン検査工事と多くの海底パイプライン敷設技術を採用したが、その概要を以下に述べる。

### (2) プレトレンチング（パイプ敷設前の浚渫）

現場作業はまずジャワ側沿岸部のプレトレンチングから開始した。プレトレンチングは、パイプライン埋設用の溝（ボトム部で3.5 m幅の溝を海岸線から4.3 kmまで）と浅瀬部敷設船が海岸へ接近するための溝（ボトム部で35 mの幅の溝を海岸線より1 km～3 kmまで）の2通りを浚渫した（図—4）。浚渫にはカッターサクションをを用いた。長く幅の狭い溝を正確に浚渫するため、及び環境への影響を最小限にするた



図—4 プレトレンチング

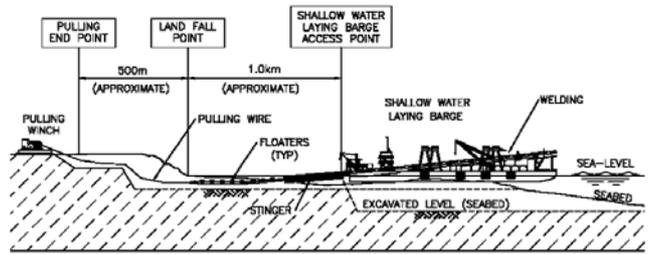


図一五 浚渫時のリアルタイム浚渫管理画面

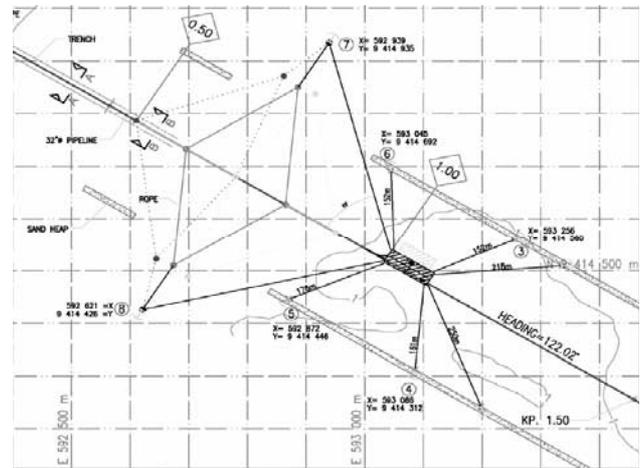
め、DGPS（軍事衛星を用いた位置測量システム）による正確な位置測量と浚渫船・カッターヘッドの位置・傾きをセンサーで管理することで余掘りを最小化した。また、必要な掘削範囲をリアルタイムモニタに映すことにより、浚渫船のオペレーター室で集中管理ができた（図一五）。その結果、ジャワ側 = 30 万 m<sup>3</sup> とスマトラ側 = 40 万 m<sup>3</sup> の掘削をそれぞれ約 2 ヶ月から 3 ヶ月の短工期で達成できた。

### (3) パイプライン敷設（浅瀬部）

プレトレンチング終了後、ジャワ側から浅瀬部の海底パイプライン敷設を行った。敷設船は、85.3 m × 27.4 m の台船に 20 トンテンショナー（張力導入装置）、溶接ステージ（3 箇所）、クレーン等を配置したもので、2 m の水深まで入り込めるものを用いた。ジャワ側では海岸線から 1 km にこの敷設船を配置し、陸上の溝へと向けてプッシュプル工法で敷設を開始した。プッシュプル工法とは、事前浚渫された溝の端部に設置されたウィンチからメッセンジャーロープを敷設船まで渡し、陸上のウィンチで引き込むと同時に船上のテンショナーで押し出すことでパイプラインを敷設する工法である。パイプラインには浮力タンクを取り付けて浮かせるため、ウィンチやテンショナーは最小限の力を加えるだけでパイプラインを陸上へと引き込むことができるのが本工法の特徴である。パイプライン先端が陸上部の溝の端部まで着いたところで、浮力タンクを取り外してパイプラインを沈め、その後、敷設船を前進させながら海岸線から残り 6 km まで敷設を行った（図一六、七）。この工法により、ジャワ側とスマトラ側の浅瀬部のパイプライン敷設をそれぞれ、約 1.5 ヶ月で行った。



図一六 浅瀬部のパイプライン敷設（側面図）



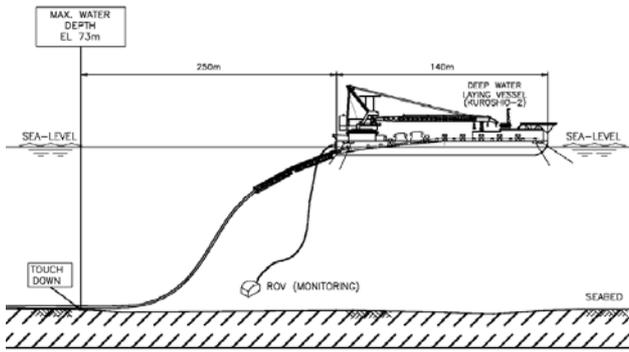
図一七 浅瀬部のパイプライン敷設（平面図）

### (4) パイプライン敷設（深海部）

#### (a) 敷設船工法

深海部のパイプラインは当社の作業船『第二くろしお（Kuroshio-2）』を用いて、敷設船工法にて敷設した。敷設船工法は、パイプの溶接設備、溶接後の検査装置、現場溶接部の防食コーティング設備、最大水深 73 m に大口径・重量パイプ（1 トン/m）を安全に敷設するためのテンショナーとパイプ支持装置（スティングー）を備えた海底パイプライン敷設専用作業船である（図一八、写真一1）。また、作業船の位置管理は DGPS システムを用いてリアルタイムに行い、また 8 点の係留アンカーの打設位置もタグボートに搭載した DGPS システムにて管理する。

施工手順として、すでに敷設しているジャワ側の浅瀬部パイプラインを海岸線から約 7 km の地点で作業船の溶接ステージまで引き上げ、スマトラ側に向けてパイプラインを敷設した。本パイプラインはスンダ海峡の途中で最大水深となり（約 73 m）、その後スマトラ側に向けて浅くなる。最大水深部では敷設時のパイプ発生応力を許容値以内に管理するため、長さ 80 m のスティングーと最大張力 70 トンを作用させて敷設中のパイプラインの安全性を確保した。



[第二くろしおの諸元]

- L × B × H ; 140 × 34 × 9.5m
- 係留設備 ; 8点係留 (12ton デルタフリッパーアンカー)
- テンショナー能力 ; 最大公称能力 = 75 × 2 = 150ton

図-8 第二くろしおによる深海部のパイプライン敷設



写真-1 『第二くろしお (Kuroshio-2)』

敷設したパイプラインの位置管理は Remote Operated Vehicle (ROV) に搭載した、作業船の DGPS と連動する位置測量システムにてリアルタイムに行った。最も水深の深い地点で、作業船の後方約 250 m 地点でパイプラインが海底に着底しており、定期的に ROV を投入してパイプラインの位置と着底状況を確認しながら正確な敷設を行った (図-8)。

(b) 大径極厚パイプの自動溶接

大径極厚パイプの溶接には工程短縮と高品質な現場溶接を目的として自動溶接を採用し、作業船上に合計 4 ステージを設置した (図-9)。また、溶接部の非破壊検査には、従来の X 線検査が主流であったが、検査時間の短縮、高精度、及び作業員の安全性確保を目的として、溶接欠陥の位置、高さ、長さを正確に特定できる自動超音波検査 (AUT) を採用した。さらに、溶接欠陥の判定基準として、パイプラインに実際

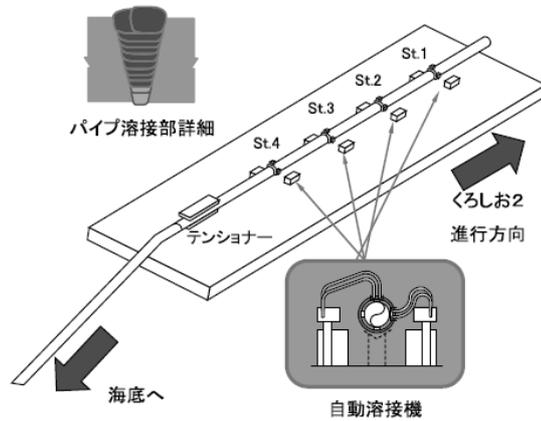


図-9 作業船“第二くろしお”上のレイアウト概略

に発生する応力 (ひずみ) から許容溶接欠陥サイズを特定する Engineering Critical Assessment (ECA) 手法を採用した。これにより、最大敷設速度として 200 Joints/日 (約 2.4 km/日) を達成した。

(c) 既設パイプラインとケーブルとの交差

パイプラインの中程には、3 本のテレコムケーブルと、1 本の既設パイプライン (508 mm) がすでに敷設されており、本パイプラインと交差する箇所には幅 = 7m のコンクリート製のサポートを交差部前後に設置し、本パイプラインをブリッジさせ既設ラインとの干渉を回避した (図-10)。

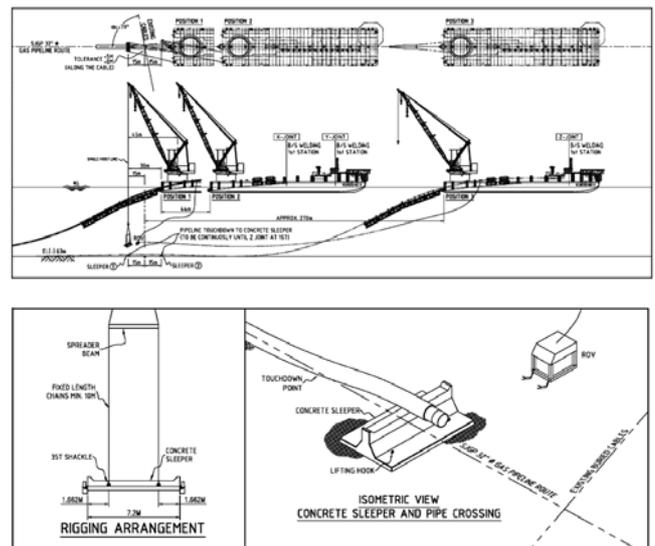


図-10 既設ケーブルとパイプラインとの交差部における施工

サポートの設置にはダイバーレスの施工法を採用し、Remote Operated Vehicle (ROV) にて設置位置の管理及び吊り具の回収を行うことで、迅速かつ高い安全性を追求した。

(d) 洋上接合

88 km のパイプライン敷設終了後、その対岸であるスマトラ側の海岸線から約 7km の地点で浅瀬部のパイプラインと深海部のパイプラインを洋上で接合した(図-11)。洋上接合は、大口径・重量パイプに 3 トンフローター (6 個) と 50 トンウィンチ (6 台) でパイプを水平に吊り上げ、洋上にて溶接を行う工法である。なお、吊り上げ中のパイプに過大な応力が発生しないように、パイプ応力解析に基づいた各吊り点の水深管理を水深計にて行った。

上記、88km のパイプ敷設、クロッシング及び洋上接合の全作業を約 2 ヶ月の短工期で達成した。

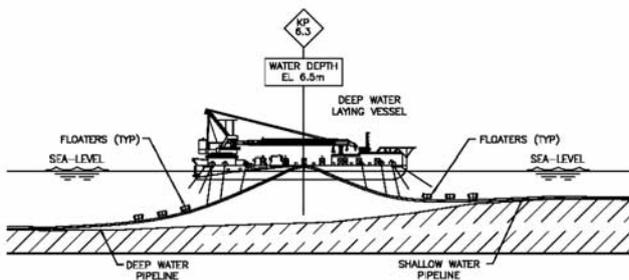


図-11 第二くろしおによる洋上タイイン施工

(5) ポストトレンチング (パイプ敷設後の浚渫)

深海部のパイプライン敷設と一部並行して、水深 5m から 13m の区間にポストトレンチングによりパイプラインを海底面下 3m (土被り 2m) まで埋設した。これは、水平距離に直すとジャワ側で 9.5 km, スマトラ側で 8.4 km であった。ポストトレンチングの工法は、パイプラインをまたぐ形でスレッド (そり) と呼ばれる鋼構造物を被せ、スレッドに仕込まれたノズルから高压水を噴出させることでパイプライン周りの土を吹き飛ばし、パイプラインを土中に沈めこむ工法である (図-12)。スレッドは、その前方に位置する作業台船のウィンチに繋がっており、このウィンチを巻き取るによりパイプラインに沿って土を飛ばしながら移動する。この工法を用いてジャワ側では、比較的土質が軟らかかったこともあり、約 1.5 ヶ月、スマトラ側では、粘着力の高い粘土であり、約 3 ヶ月の工期を要した。

(6) パイプライン検査工事

(a) ピグテストと水圧テスト

パイプラインの敷設と埋設完了後、パイプ内部のクリーニングと形状確認 (95%内径確保) のため、ピ

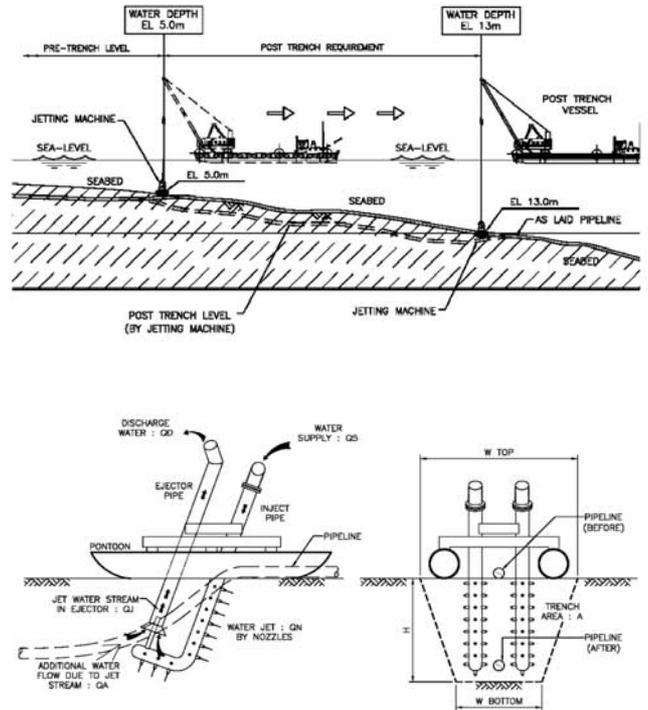


図-12 ポストトレンチングのしくみと施工

グ検査を行った。検査ピグは、クリーニングピグ 2 個、ゲージピグ 2 個の計 4 個で用い、ピグ押しには海水 5 万トンと 20 トンの腐食防止剤を使用した。腐食防止剤は、海洋生物環境に配慮した生物分解可能なものを選定し、事前にインドネシアの政府機関による試験を行い、その安全性を確認した。

ピグ検査によってパイプラインの形状に問題がないことが確認された後、パイプライン全線の水圧テストが行われた。水圧テストは設計圧力の 1.15 倍である 8.13 MPa で 24 時間圧力を保持し、漏れのないことを確認した。

(b) 排水とドライイング

水圧テスト後、管内を排水し、塩分を排除するために清水と露点温度零下 40 度の乾燥空気 で 7 個のピグを押し、最初の 3 個はそれぞれ清水 100 トンずつで押し、最後のピグを乾燥空気 で押し、海水を完全に排水後、バキュームドライイング法でパイプラインの乾燥を行った。ジャワ、スマトラの両側からバキュームポンプでパイプライン管内の空気を抜き、真空状態にすることでパイプ内の残留水を強制蒸発させ、管内を乾燥させ、所定の露点温度零下 15 度を達成した。その後はパイプライン内に不活性ガスとして窒素が封入された。

上記パイプライン検査工事を約 2 ヶ月の工期で行った。

## 5. おわりに

最後のパイプライン検査工事終了後、2007年3月にガスインが行われ、天然ガスの輸送・操業が始まった。現場での施工は、プレトレンチングを開始してから約13ヶ月の短工期を達成することができた。

JCMIA



### 【筆者紹介】

堀越 健次 (ほりこし けんじ)  
新日鉄エンジニアリング(株)  
海洋・エネルギー事業部  
海外プロジェクト部  
オフショアオペレーション室  
プロジェクトマネジャー



石橋 基之 (いしばし もとゆき)  
新日鉄エンジニアリング(株)  
海洋・エネルギー事業部  
海外プロジェクト部  
オフショアオペレーション室  
現場代理人



久納 淳司 (くのう じゅんじ)  
新日鉄エンジニアリング(株)  
海洋・エネルギー事業部  
海外プロジェクト部  
オフショアオペレーション室  
主任技術者

## 建設の施工企画 2005年バックナンバー

平成17年1月号(第659号)～平成17年12月号(第670号)

1月号(第659号)  
建設未来特集

6月号(第664号)  
建設施工の環境対策特集

10月号(第668号)  
海外の建設施工特集

2月号(第660号)  
建設ロボットとIT技術特集

7月号(第665号)  
建設施工の環境対策—大気環境特集

11月号(第669号)  
トンネル・シールド特集

3月号(第661号)  
建設機械施工の安全対策特集

8月号(第666号)  
解体・再生工法特集

12月号(第670号)  
特殊条件下での建設施工機械特集

4月号(第662号)  
建設機械施工の安全対策特集

9月号(第667号)  
専門工事業・リースレンタル特集

■体裁 A4判  
■定価 各1部840円  
(本体800円)  
■送料 100円

5月号(第663号)  
災害復旧・防災対策特集

### 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>