

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.6 (1974) No.4

日鉱一川鉄間海底パイプラインの施工

Construction of Submarine Pipeline between NIKKO and KAWATETSU

河本 清(Kiyoshi Kawamoto) 白砂 秀夫(Hideo Shirasuna) 金野 春幸(Haruyuki Konno)

要旨：

この海底パイプラインは水島港を横断し、日本鉱業（株）より対岸の川崎製鉄（株）に低硫黄の LPG、ミナス重油、C重油の3種類の燃料を輸送するために計画され、昭和48年10月に完成した延長1000mの燃料輸送ラインである。このパイプラインの設計と施工について概略を報告する。本パイプラインは6B2本と10B1本で、この計画の特色はわが国では初めてLPGを海底パイプラインで輸送すること、高流動点流体であるミナス重油を無保温で輸送することである。このため、これらの安全を裏付するために、大規模な落錘実験および輸送流体の温度降下についての実験等を行った。また敷設位置が水島港の入口であることから1日の航行船舶400隻を数え、航行船舶の安全確保が作業計画を立てる上の基準となり、そのため海底曳航法を採用し、また海上作業については船舶関係者との自主調整を基調として管理した。

Synopsis：

Planned for transporting LPG, Minas oil and C-oil from Nippon Mining Co. situated on the opposite side of Mizushima Works, this submarine pipeline across Mizushima port in a total length of 1000m was completed in October 1973 for the operation of Mizushima Works. This report outlines some features of the designing and execution of the pipeline. Made of 2 pieces of 6-inch diameter and 1 piece of 10-inch diameter pipes, the pipeline is the nation's first submarine LPG transporting system and uses non-heating system for Minas oil known for its high-fluidity point. In order to safeguard this operation, a series of extensive experiments were conducted using the drop-weight tests and the fluid temperature drop tests. Furthermore, considering the fact that the laying site of the pipeline is at the entrance of Mizushima port where a total daily navigating ships amounts to some 400, certain safety assurance measures for these navigating ships called for a standard for the construction plan. For this reason, the submarine towing method was employed and all the works on the ocean was performed in voluntary regulation with shipping parties concerned.

本文は次のページから閲覧できます。

日鉱一川鉄間海底パイプラインの施工

Construction of Submarine Pipeline between NIKKO and KAWATETSU

河 本 清*

Kiyoshi Kawamoto

白 砂 秀 夫**

Hideo Shirasuna

金 野 春 幸***

Haruyuki Konno

Synopsis:

Planned for transporting LPG, Minas oil and C-oil from Nippon Mining Co. situated on the opposite side of Mizushima Works, this submarine pipeline across Mizushima port in a total length of 1000m was completed in October 1973 for the operation of Mizushima Works. This report outlines some features of the designing and execution of the pipeline.

Made of 2 pieces of 6-inch diameter and 1 piece of 10-inch diameter pipes, the pipeline is the nation's first submarine LPG transporting system and uses non-heating system for Minas oil known for its high-fluidity point. In order to safeguard this operation, a series of extensive experiments were conducted using the drop-weight tests and the fluid temperature drop tests.

Furthermore, considering the fact that the laying site of the pipeline is at the entrance of Mizushima port where a total daily navigating ships amounts to some 400, certain safety assurance measures for these navigating ships called for a standard for the construction plan. For this reason, the submarine towing method was employed and all the works on the ocean was performed in voluntary regulation with shipping parties concerned.

1. ま え が き

近年、世界的な石油需要量の増加に伴ない、これを確保するために海洋石油資源の開発が急ピッチに進められつつある。いっぽう、輸送コストの低減を図るために海上輸送方法の合理化が進められてきた。そこで海底パイプラインを利用して輸送することが、これらの要求に応える最も安全

で経済的な輸送方法として脚光を浴びるようになった。

ここに報告する海底パイプラインは、日本鉱業(株)が当社水島製鉄所に低硫黄燃料であるLPG、ミナス重油、C重油の3種の燃料を輸送するために企画したもので、この決定に至るまでには、ほかの輸送方法であるタンクローリ、橋梁添加、地上配管等についてのケーススタディを行い最も安全で経済的な輸送ルートとして決定した。この海

* 開発営業部パイプライン開発室課長

*** 開発営業部パイプライン開発室

** 開発営業部パイプライン開発室掛長

底パイプラインは大型船舶の航行の最も頻繁な航路を横断し、水島港の海底に埋設された約1 000mの3条の燃料輸送ラインで、LPGの海底パイプラインとしてはわが国では初めてのケースである (Fig. 1 参照)。

この工事は昭和45年に具体化され、その後基本計画に基づき、立地条件、施工条件の調査検討を進めるいっぽう、大規模な落錐実験¹⁾、輸送流体の温度降下、および熱伝達実験²⁾など数多くの実験を行うとともに、さらに権威者の意見および指導を受けるなどその設計については細心の配慮を行った。また、施工についても航行船舶の影響の最も少ない海底曳航法を採用し、海上作業の管理については、海上保安署の指導のもとに船舶関係者とたび重なる協議を行い、両者の間に自主調整要領を設定し作業の安全管理を行った。

いっぽう、昭和47年6月石油パイプライン事業

法が公布されたが、設計のための技術基準が制定されていなかったため設計検討に予想以上に長時間を要したが、昭和47年4月浚渫工事に着手し、昭和48年10月全工事を完成し関係者立合いのもとに無事通液を開始した。

この報告は、この海底パイプラインの設計、施工にあたり多くの難問題に遭遇し、これを打開するために行った数多くの実験と技術の導入の主なものを紹介するとともに、本工事の設計と施工について概略を紹介する。

2. 概 要

本海底パイプラインは、日本鉱業㈱水島製油所で精製された燃料を対岸の当社水島製鉄所および共同火力㈱に供給するために、その輸送ルートとして計画されたもので、この輸送計画はLPG

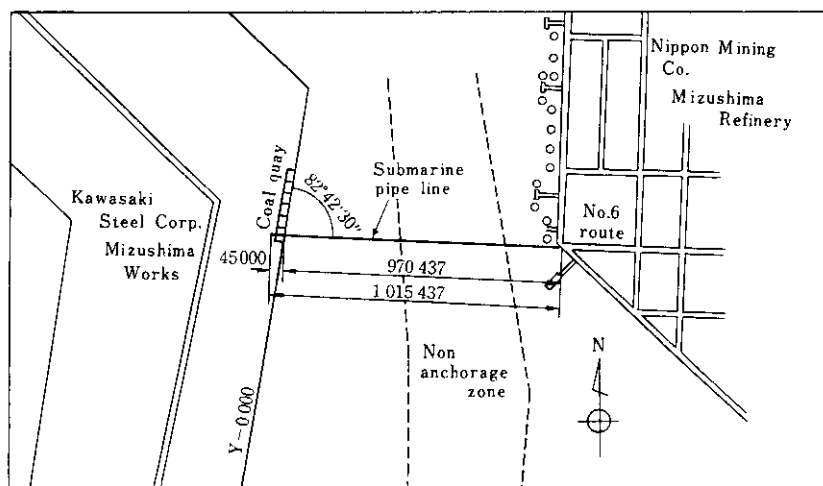


Fig. 1 Submarine pipeline laying site

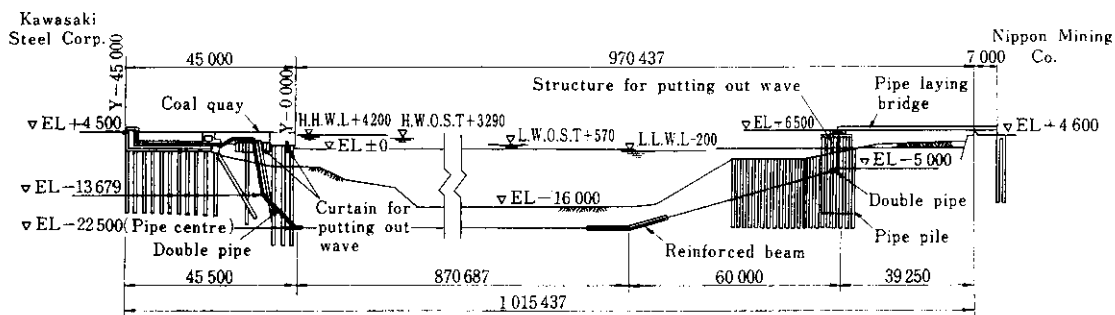


Fig. 2 Submarine pipeline vertical section

15万t/年(将来30万t/年)、ミナス重油3万kl/月、C重油7万kl/月の3種の燃料を輸送するた 合 々のものであり、輸送ルートは陸上部と海底部をせ延長約5kmで、おのおの燃料ごとに輸送するために3条のパイプラインが敷設された。このうち海底部は約1kmである。

また、本海底パイプラインのプロフィールは日本鉱業(株)水島製油所の第2原油栈橋の南側の護岸より配管橋を介し、航路幅380m、水深-16mの水島本航路を横断し、さらに幅300mの泊地および川鉄石炭岸壁泊地100mを横断し岸壁内に立上り、配管トンネルを通り、陸上パイプラインに結ばれている (Fig. 2 参照)。

海底埋設パイプの土被り厚さは落錘実験¹⁾の結果より決定した。また、立上り部は地震、波浪に対処し、鋼管矢板による補強および消波工を施工した。

本パイプラインの実施にあたり、特に配慮した点は、敷設ルートが過密航路を横断することから、航行船舶の安全を最優先とした安全管理体制をしき、海上作業の管理にあたったことである。

本海底パイプラインの建設工事の作業フローチャートは Fig. 3 のとおりである。

まず、施工は浚渫工事より開始し、浚渫は大型グラブ船で行ったが、航行船舶の安全を考え、航路部は夜間を原則とし、可航幅を確保するために同時1隻に制限され、1日の浚渫量は平均1000m³程度で、作業日数は手待ち、故障を含め150日以

上を要した。次に浚渫溝内に流入した浮泥をニューマポンプにて除去し、敷砂をホッパーバージよりトレミーパイプを介し浚渫溝底に投入し、グレーダー船にて表面の不陸整正を行った。

いっぽう、陸上プレハブヤードで約180mに製作された長尺管3条を固定バンドで締結し、対岸に設置された15tのウインチで進水架台上を5回にわたり曳出し、海底部850mを敷設した。その後、海底ベンド管および両岸の立上り管の接合を行い、重量調整用フロートの撤去およびパイプの位置確認、全線の耐圧気密テストを行い、陸上パイプとの繋ぎ込みが終り全配管工事を完了した。その後検査を行い、敷設パイプの正常を確認したあと、敷設パイプの塗覆装を傷つけないように砂または砂礫にて入念に埋戻しを行い、グレーダー船で表面を仕上げし、音響測深機で水深の確認を行ったうえ、全海上工事を完了した。その後、機器調整のテストおよび官庁立合いの全線耐圧気密テストを行ったのち、昭和48年10月18日関係者立合いのもと無事送油を開始した。

3. 設 計

3.1 基本設計

敷設ルートは3つのルートが候補に上げられたが、航行船舶の頻繁な航路を横切ることと、使用鋼管が小径管であることから、海底曳航法を採用

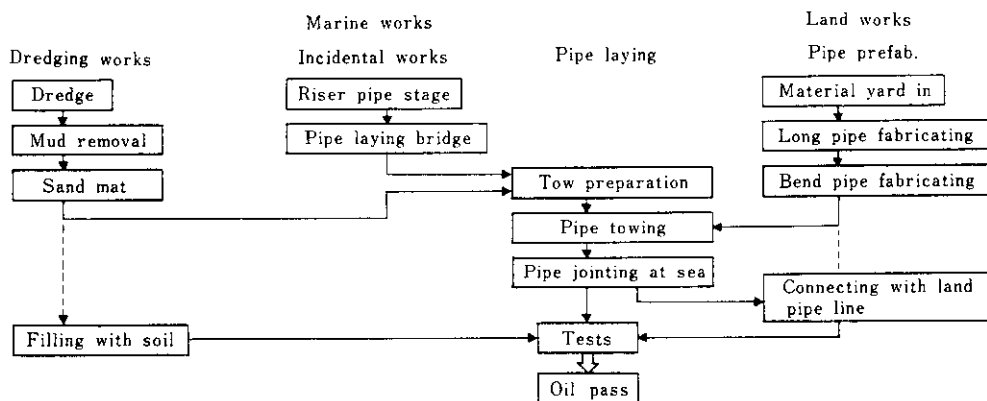


Fig. 3 Pipeline works flow chart

することが得策であると判断し、日鉱側6号道路に長尺管製作ヤードおよび進水軌条をとり、これを延長し川鉄側石炭岸壁に上陸するラインが海底部最短距離であることと、日鉱側第2原油栈橋南側が船舶の離着棧の影響を比較的受けないこと、および川鉄側石炭岸壁内に立上ることが将来計画に制約されないことから最も安全なルートとして採用された。

また、輸送管はLPG、ミナス重油、C重油と3種の物性の異なった流体を輸送することから、6B、6B、10Bの3本を使用し、日鉱側は護岸より40mの地点に立下り、架台を設置し、陸上との間に配管橋で結び、川鉄側は石炭岸壁の内に立上り、岸壁背面のカルバートを経て陸上ラインと結ぶようにした。海底部の土被り厚は、水島港の将来の増深計画と投錨に対する安全を考え4～6mとした。また、輸送管の防食対策として、外面コールタルエナメルガラスクロス2重巻の上、外部電源法にて電気防食を行った。

3.2 設計条件

設計条件および管体諸元はTable 1のとおりである。

3.3 設計概要

3.3.1 管体

海底埋設管には内圧としての流体圧力と外圧としての土圧、水圧のほかに、投錨による衝撃荷重、輸送管の温度変化による影響、地震力等が考えられるが、本件のミナス重油の場合、高流動点流体であり、これを無保温で輸送することから、輸送温度が80°Cとなり、そのため、パイプ敷設時(8°C)と通油開始時との間に温度差が生じ、油送管に大きな温度応力(軸方向圧縮応力)が発生することになる。そこで、これらの諸条件を考慮し、海底部に使用する鋼管をTable 1のように決定した。

また、両岸立上り点付近は、摩擦抵抗が不足することから埋設管が撓動し、曲管部に応力集中が起るものと判断し2重管構造にして補強するとともに、飛末帯における腐食に対し本管の保護を

兼ねさせた。さらに、重油管については断熱材を充填し保温効果を持たせるようにした。

また、日鉱側立下り点より60mの地点には海底

Table 1 Design condition and pipe elements

	L.P.G	L.S.C	M.S.C
Pipe dia.	6B	6B	10B
Quantity	1 branch	1 branch	1 branch
Total length	1 000m	1 000m	1 000m
Fluid	Butane	Minas oil	C oil
Design pressure	20kg/cm ² G	17kg/cm ² G	17kg/cm ² G
Design temperature	40°C	80°C	70°C
Material	STP G42 sch80	API 5LX X60sch80	API 5LX X56sch40
Allowable stress			
Base stress $\sigma_a = 0.4\sigma_y$	1 000kg/cm ²	1 688kg/cm ²	1 568kg/cm ²
Thermal stress $\sigma_t = 1.15\sigma_a$	1 150	1 941	1 803
Short-term stress $\sigma_o = 1.7\sigma_a$	1 700	2 870	2 666
Horizontal seismic intensity	0.2		
Design wave height	1.5m		
Design wind velocity	60m/sec		
Submarine water temperature	8°C (Before filling)		
Tidal level	H.H.W.L EL+4 200 H.W.O.S.T EL+3 290 L.W.O.S.T EL+ 570 L.L.W.L EL- 200		
Tidal current	EL-15,000 0.7Kt		
Submarine ground	EL-13 000below $N=0 \phi=0 C=1t/m^2 K_h=0$ EL-13 000above $N=50 \phi=40 C=0 K_h=6kg/cm^2$		
Coating	Inside : Non-coating. Outside : Enameling of coal tar epoxy (thickness: 200 μ), besides, coal tar enamel and winding double sheet of glasscloth (thickness: 6mm)		
Thickness of filling soil	4.0m		
Filling soil	Sand and gravel		
Electric anti-corrosion	Outside electric method		

N : Standard penetration test value

ϕ : Internal frictional angle of soil

C : Cohesion of soil

K_h : Soil reaction

の条件から曲管を設けたが、この曲管についても同様の理由から箱桁で補強した。

3.3.2 埋設管の土被り

航路を横断しパイプラインを埋設する場合は、その位置を航行する最大船舶の錨を使用して投錨、走錨試験を行い、この結果を基準とし、さらに諸条件を考慮して埋設パイプの土被りを決定するよう石油パイプライン技術基準では指導しているが、本海底パイプラインでは原位置での実験が計測管理等の面において非常に困難であることから、海底実験との相似性を保持するよう配慮しながら10B鋼管を使用して陸上で落錘実験¹⁾を行った。

実験結果より、埋設管が土被り3mの砂礫に埋設されていると、20万t級の航行船舶の投錨にたいしても十分安全であることが確認された。また、この場合の埋設管の発生応力は、20万t級の船舶の使用錨を18tとし、その衝撃荷重を陸上に等価換算すると、約2.0mの自然落下荷重となり、それによると、Fig. 4のように、円周方向応力 $\sigma_\theta \approx 340 \text{ kg/cm}^2$ 、軸方向応力 $\sigma_a \approx 500 \text{ kg/cm}^2$ となった。また、落下位置がわずかにずれると発生応力は急激に減少することも確認された。また、落錘の地表面への貫入量は最大で1.4m 全体的には1.0m以下となった。以上の実験結果から海底埋設パイプの土被りは設計必要値として3m、それに施工上の誤差を見込み4mとし、使用材料は砂礫を使用することにした。

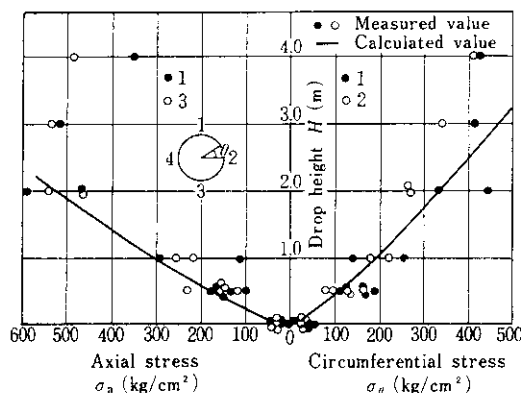


Fig. 4 Relation between dropping height and generated stress in pipe

3.3.3 配管立上り部の構造

兩岸立上り部は鋼管杭によるラーメン構造の架台を設置し、この内部に立上る構造とした。川鉄側の立上り地点は石炭岸壁内であるため、船舶の衝撃、地震時の地盤の変位差による配管への影響が少なく、護岸貫通部は直接パイプが接触しないようにゴム製のシール材でシールし、岸壁の振動がパイプに伝達しないようにした。

また、兩岸とも支持架台の周囲は流木、小型船舶に対する保護および波圧の低減を目的として、保護柵および消波設備を設けた。

3.3.4 地震に対する配慮

地震時の埋設管の挙動に関しては、いまだ解明されていない点が多いが、最近、この件に関する多くの実験および研究報告²⁾が発表されている。

一般に地震時の埋設管の挙動は地盤の歪みに起因するところが大いといわれており、その歪みの要因として次の3つのケースが考えられる。

- (1) 深さ方向の地震波（実体波：P波、S波）の伝播に起因する歪み
- (2) 地表面に沿って伝播する地震波（表面波：R波、L波）による歪み
- (3) 地盤の不均一に起因する歪み

本工事では、実体波（この場合S波）による地盤の歪みによる埋設管の発生応力について検討した。

- (a) 設計基盤面における標準水平震度 K_0

岡山気象台過去70年の観測記録をもとにして、 $\log n$ (n : 地震発生回数) と $\log a$ (a : 地震加速度) の関係より設計加速度を求めると 140gal となる。したがって標準水平震度 K_0 は約 0.143 となるが、ここでは道路橋耐震設計指針³⁾に示されている岡山県地方の標準水平震度 0.15 を採用した。

- (b) 表層地盤

砂礫層（埋戻し層） $N \approx 10$ とすると、剪断弾性波（S波）の伝播速度 V_s は、金井の式 $V_s = 19N^{0.61}$ より求めると 85m/sec となり、表層地盤（埋戻し層）の厚さ 5m であることから、表層地盤の固有周期 T は 0.3sec となり、地盤の変位振幅 U_0

=0.39cm となった。

(c) 埋設管の発生応力(軸方向応力)

$U_h=0.39\text{cm}$, 地盤の反力係数 $K=10\text{kg/cm}^2$
(敷砂)より地盤の地震歪みによる埋設管の応答は10Bのとき $\sigma_x=42\text{kg/cm}^2$, 6Bのとき $\sigma_x=34\text{kg/cm}^2$ となった。

管の埋設地盤が砂礫層で良質であることから、埋設管に発生する応力は数値的に小さい値となった。

表面波については通常、実体波に比べ波長が長く加速度も小さいことから、加速度平衡を視点とする耐震設計では検討を省略してきたが、パイプラインのような広範にまたがる構造物が軟弱地盤に埋設される場合は、地盤変形が大きくなることもあるので、埋設管への変位応答等、地震応答解析についての研究が今後の課題となるものと考えられる。本工事では埋設地盤がかなりよいことから、影響が少ないと判断し検討を省略した。

次に地盤の不均一に起因する歪みの影響については、水島港海底部の土質は第4期洪積層の均一な硬質砂礫層であるが、EL-13mまでは軟弱粘土層であり、その境界部の地盤の地震時の挙動差が埋設管の立上り部に悪影響があると判断し、これを避けるために川鉄側は砂礫層から直接立上り、日鉱側は鋼管矢板を打設して軟弱土層を遮断し、立上り部に地盤からの影響ができるだけ少くなるよう配慮した。そのほか兩岸立上り部および地上配管については設計震度 $K_h=0.2$ を採用し、震度法にて耐震設計をした。

また、送油中の地震対策としては兩岸部に地震計を設置し、40galの地震に対し自動的に緊急遮断弁が閉止し、送油が停止するようになっている。なおそのための安全管理については十分配慮している。

3.3.5 重油の凝固に対する配慮

マイナス重油のような流動点の高い油を輸送する場合は、ウォームアップおよび停止時の管閉そくを防止するため、電気、スチーム等の熱源で加熱するか、保温材で断熱するのが一般的である。しかし、海底管は敷設後の補修がきわめて困難であり、また耐水性で耐圧強度の高い経済的な保温材

がなく、メンテナンス上問題点が多い。

このため、輸送流体の温度降下実験により確認した結果より、C重油を使用し、循環回路にてプレヒータリングすることにより輸送可能となること、また、輸送停止後もある程度自然放置が可能であることから、加熱、保温は行わないこととした(立上り部のみ粒状パーライトで保温)。

また、LPG、重油ラインともPIGシステムを設け、ワックス除去および保安検査時の管内ブローに備えている。

4. 施 工

4.1 施工条件

パイプラインの敷設位置が水島港の入口付近であることから、20万t級超大型船をはじめ大小1日400隻の航行船舶を数え、埋設パイプの安全はもとより、施工時の安全、特に航行船舶の安全確保が施工計画を立てる上で最も重大な要素となった。海上作業を計画するにあたり、海上保安署の指導のもとに船舶関係者より入出港船舶の予定表を入手し、船舶の動向を常に把握しながら、実態に即した配船および作業時間の管理を行った。

特に航路部と日鉱側についてはさらに船舶関係者との間の連絡系統を明確にし、自主調整要領に従い作業管理を行うようにした。航路部は航行船舶のいないときを原則とし、日鉱側については船舶の離着舷のいないときとした。また、日鉱側にて火気を使用することは厳禁されているので、止む得ない場合についても作業船は着舷船から30m以上離し、作業船にはガス検知器をセットして、ガスの有無を検知しながら作業管理を行うようにした。

4.2 土木工事

4.2.1 浚渫工事

(1) 土質条件

海底地盤は、EL-13m付近までは軟弱なシルト層で、EL-13m以深は第4期洪積層の硬質砂礫で、EL-18m付近に約1mm程度の硬質粘土層

を有する N 値50以上の地層からなっている。

(2) 浚渫断面

浚渫底面幅は管の曳航敷設から有効幅4mが必要であり、この有効幅4mを確保するためには施工誤差等を考慮すると9mは必要である。また、浚渫法勾配は崩れ込み等を考え1割2分とし、土被り厚さは、落錘実験の結果より必要値を3mとし、施工誤差および安全性から4~6mを考慮し、



Photo. 1 Bredying ship

さらに、水島本航路の将来の増深計画(E L-18m)を考え、浚渫断面を Fig. 5 のようにした。

(3) 施工方法

浚渫方法および機種の選定は、直線性を保持しながら管敷設線をライン浚渫すること、また、地盤が非常に硬い砂礫層であることなどを踏まえ、敷設線にて試験掘を行った結果から、大型グラブ船が最も有効適切な浚渫機械であることを確認し、使用バケットを重量29t、容積10m³としたが、さらに、浚渫能力を高めるために荷重を添加し重量を37tとした。

浚渫船団は、大型グラブ船に500~700m³の底開きバージ2~3隻を組合せた船団とし、約2km離れた埋立用地に排土した。

作業は航行船舶への影響度によりA工区~E工区の5工区に分け作業を進め、特に航行船舶の影響を受けるC工区(航路部)については夜間とし、A、B工区については船舶の離着棧のないときに作業を行うようにした(Fig. 6 参照)。

(4) 施工実績

浚渫計画は試験掘の実績から1日平均浚渫土量を1000m³とし浚渫土量15万m³から所要日数150日を設定したが、実際には作業中断日数があるので172日となった。しかし、作業中断日数43日を

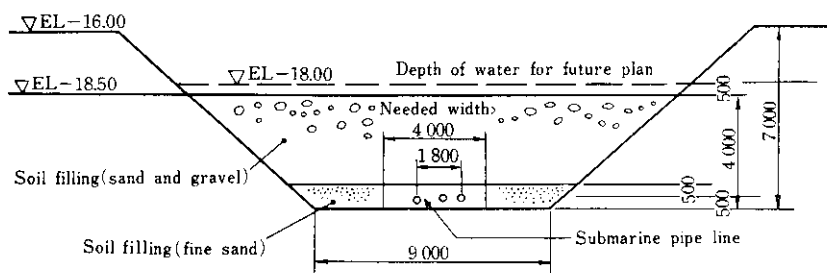


Fig. 5 Planned dredge section

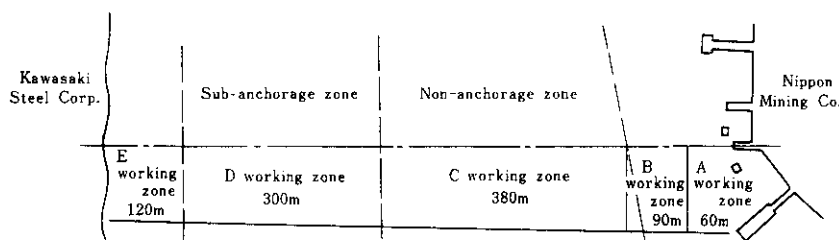


Fig. 6 Dredging zone

Table 2 Detail of working days

Compulsory working days	Working	Repair	Waiting for navigating ships	Changing ship	Waiting for sounding	Rough weather	Holidays	Others	Total
129	89	18	3	3	2	2	9	3	129
	68.9%	14.0%	2.3%	2.3%	1.6%	1.6%	7.0%	2.3%	100%

Table 3 Working hours and actual working hours

Working days	Working	Dredging	Anchor changing	Barge changing	Removing
89	1 071h	874h	59h	39h	99h
	12 h/day	10 h/day	0.7 h/day	0.4 h/day	1.1 h/day
	—	81.5%	5.5%	3.7%	9.3%

Table 4 Dredging results

		Soft sand and gravel	Hard sand and gravel	Silt soil
Plan		59 000m³	59 000m³	33 000m³
Result	Soil amount	60 000m³	55 000m³	35 000m³
	Number of days	33	44	16

除く実働日数 129 日について考えると、1 日平均浚渫土量は約 1 200m³となる。Table 2, Table 3, Table 4 に浚渫工事の実績を示す。

4.2.2 浮泥除去工事

浚渫後数ヶ月放置されたので、周辺の航路等から海底堆積物が流入し、浚渫溝底に 50~100cm の浮泥が堆積した。この浮泥が埋設パイプに悪影響があるものと判断し、これを除去するために排土能力の高いニューマポンプ（イタリア、シルシー社製）を使用した（Fig. 7 参照）。

このニューマポンプは従来のサンドポンプと異なり、大気および水圧を利用して揚土を圧縮空

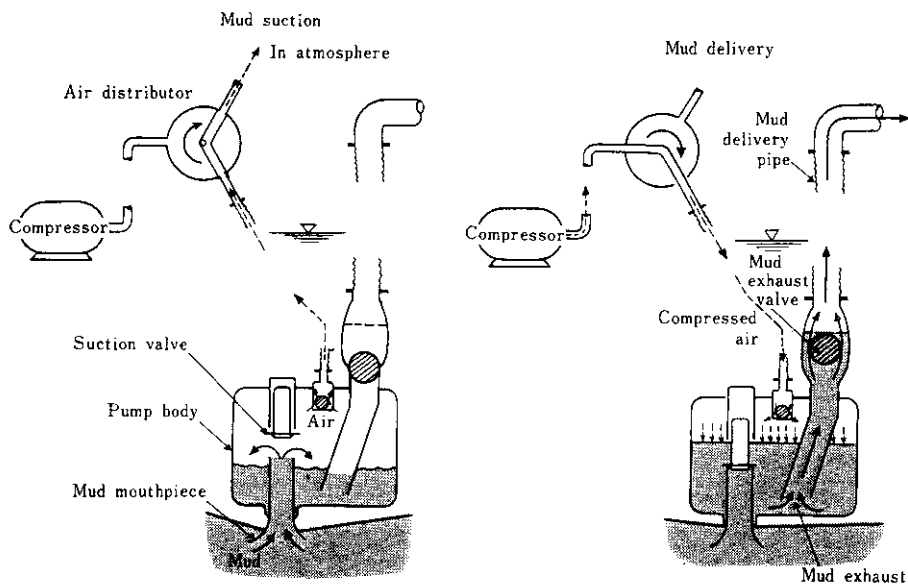


Fig. 7 Pneumatic pump system

Table 5 Details of working days

Compulsory days	Working results			Non working days		
	Working days	Total working hours	Actual working hours	Sounding	Repair	Rough weather, etc
39	25	239 h	159 h	2	7	5
	64.1%	9.6h/day	6.4h/day	5.1%	18.0%	12.8%

Table 6 Details of working days

(per actual working hour m³/hr)

	Average	Maximum
Muddy water	410	500
Mud	41	50

気を利用して排土を行うものであり、海底に堆積した泥土を高速度で除去することが可能である。また、深度に対する適応性も在来のポンプ船に比べるとはるかにすぐれている。しかし実際は浚渫底面の不陸が大きいこと、浮泥の堆積層の厚みが小さいこと、一般の起重機船に装備したため定速コントロールが困難であったことなどにより、そのポンプの能力を十分に発揮することができなかった。本工事におけるニューマポンプの実績を Table 5, Table 6 に示す。

4.2.3 敷砂工事

浚渫底面の不陸を修正し、敷設パイプの安定を

良くするために浚渫溝底に敷砂を施工した。敷砂は500~1 000m³ 積みのガット船にて海砂（粗砂）を搬入し、浚渫溝上にセットしたホッパーバージに移し、トレミー管を介して浚渫溝底に投入した（Fig. 8 参照）。投入された砂の天端の凹凸をできるだけ少なくするためにホッパーバージを移動し投入量を調整した。砂の投入量は約18 000m³ で30日を要した。砂の投入完了後、投入された砂の表面の不陸を修正するために Fig. 9 に示すグレー

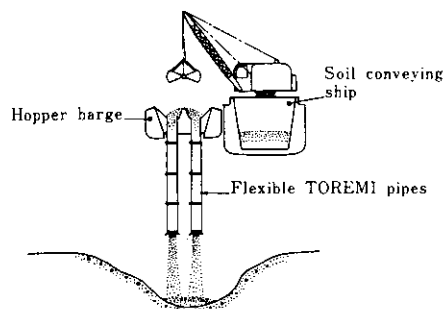


Fig. 8 Execution of sand cushion

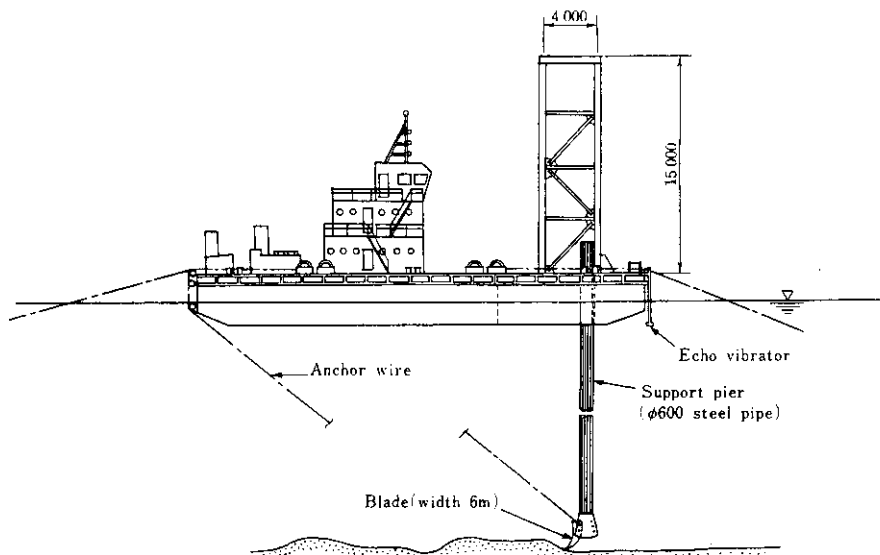


Fig. 9 Grader ship figure

ダー船を使用した。

グレーダー船は、作業台船にセットされた30mの支持柱の先端に幅6mの排土板を取付けたもので、このアームを10cmきざみに上下して深度を設定し、アンカーワイヤーの操作によりトロールし、海底面の不陸をならすようになっている。

Table 7, Table 8 はグレーダー船による敷砂ならしの実績を示す。

Table 7 Results of sand cushion levelling

Compulsory days	Working results			
	Working days	Total working hours	Actual working hours	Levelling length
12	7	95 h	60 h	875 m
	58.3%	13.6 h/day	8.6 h/day	125 m/day

Table 8 Cycle of levelling process

One progress of levelling		Width 6.0 m × length 100 m (max 150 m)	
Area of occupied sea surface		300 m × 200 m	
Levelling times of one process		6~8 times (average 7 times)	
Levelling speed		5 m/min	
Cycle time of one process		7 h	
Cycle time	Cast anchor		90 min
	Go forward	20 min × 7 times	140 min
	Go back	15 min × 7 times	105 min
	Weigh anchor (Six anchors)		60 min
	Others		25 min

Table 9 Results of filling sand

Compulsory days	Working days	Working results		
		Total working hours	Actual working hours	Filling soil amount
16	11	80 h	53 h	11 890 m ³
	68.8%	7.3 h/day	4.8 h/day	1 080 m ³ /day

Table 10 Working results of sand filling

Compulsory working days	Working days	Waiting days for levelling	Waiting days in port	Holidays	Quantity of filling sand
82	52	11	10	9	87 500 m ³
	63.4%	13.4%	12.2%	11.0%	1 680 m ³ /day

4・2・4 埋戻し工事

埋設管の土被り厚さは、落錘実験の結果より最小3m必要であることが確認されたが、さらに安全性を考慮して日鉱側は5mに、航路部は4mに、川鉄側は6mとした。

埋戻し手順は、まずパイプの塗覆装を傷つけないように、パイプの上面50cmまで保護砂を施工した。保護砂完了後、埋戻し土圧によって埋設パイプに異常な応力が発生しないように、中央より両岸に向って砂礫にて埋戻しを行った。埋戻し方法は、海面の汚濁防止および投入土砂の拡散防止等に特に留意し、さらに、投入土砂が浚渫溝の所定位置に落下するようにするために、トレミーパイプ付きのホッパーバージを使用した。ガット船(500~1000m³)にて搬入された砂、または、砂礫は浚渫溝上にセットされたホッパーバージに移され、トレミーパイプを通して埋設パイプに無理な応力が発生しないよう、また大きい不陸を作らな

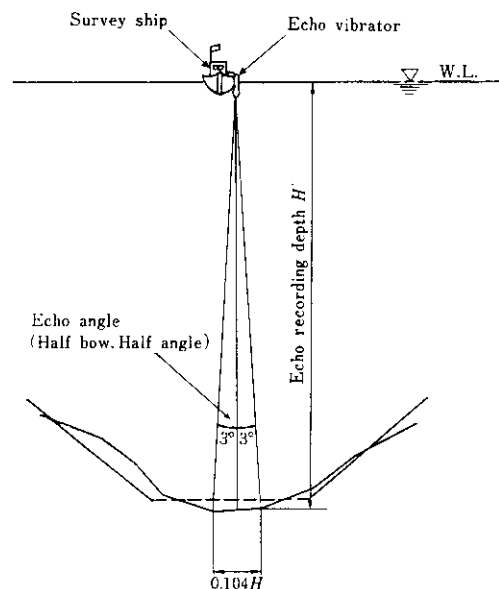


Fig. 10 Echo sounding

Table 11 Pipe standard or dimensions

	Standard	Tensile strength	Yield point	Outside diameter	Thickness (mm)
LPG pipe	STP G42	≥42.0	25.0	6B	11.0
C oil pipe	API 5 LX X 56	≥49.9	39.2	10B	9.3
Minas oil pipe	API 5 LX X 60	≥52.7	42.2	6B	11.0

いように埋戻しを行い、ホッパーバージの誘導は陸上のトランシットおよび船上の六分儀で行い、砂礫の投入量は常に音響測深機で測深しながら土量計算を行い調整した。埋戻し完了後、グレーダー船にて表面を仕上げた。Table 9, Table 10は埋戻しおよび天端均しの実績を示す。

4.2.5 測 深

浚渫、浮泥除去、敷砂、埋戻しの各工事における水深の測定はすべて音響測深機を使用し、一部レッド測深を併用した (Fig. 10 参照)。

4.2.6 護岸補強および立上り架台工事

地震時の地盤の挙動差が、埋設パイプの立上り部に悪影響をおよぼすものと考え、日鉾側護岸前面に鋼管矢板 ($\phi 812.8 \times 22\text{m}$) を打設し、護岸と遮断した。また、兩岸立上り部には鋼管杭 ($\phi 700$) を各4本打設し、頭部をHビームで固め埋設パイプの立上り部の受け架台とし、さらに、その外側に鋼管杭 ($\phi 700$) を4本打設し、パイプスクリーンを設置し消波工とした。

日鉾側の鋼管矢板および鋼管杭の打設作業は、第2原油栈橋に船舶の離着棧のないときを選び、さらに火気使用については特に注意し、ガス検知器、警報ブザー等を設置し、使用灯光器は防爆にするなど作業管理に慎重な配慮を行った。

4.3 配管工事

4.3.1 輸送管

(1) 規格

輸送体はLPG、ミナス重油、C重油の3種類で、それぞれの条件に応じ輸送管の寸法および材質をTable 11のようにした。使用パイプの許容誤差をTable 12に、機械的性質をTable 13に示す。

(2) 塗覆装

防食塗覆装としてコールタルエナメルガラスクロス2重巻を採用する。

工場での塗覆装

- i) 下地処理, グリットブラスト法
- ii) 下地塗装, P.O.FコートNo.1, 400 μ
- iii) コールタルエナメル塗覆装 6 mm以上
(ガラスクロス2重巻)
- iv) ホワイトウォッシュ塗布

Table 12 Allowable error of used pipes

	Outer diameter (%)	Plate thickness (%)	Length (mm)
LPG pipe	±1.0	+15 -12.5	+80 - 0
C oil pipe	±0.75	+15 -12.5	+80 - 0
Minas oil pipe	±0.75	+15 -12.5	+80 - 0

Table 13 Mechanical properties of pipes used

	Tensile strength (kg/cm ²)	Yield point (kg/cm ²)	Elongation (%)	Flattening (mm)
LPG pipe	46.7	27.3	39.7	Good
C oil pipe	61.4	41.7	31.2	Good
Minas oil pipe	65.5	46.6	33.9	Good

(3) 曲げ加工

曲げ加工は高周波曲げ方法にて行った。

4-3-2 作業基準

(1) 溶接方法

本パイプラインを実施するにあたり、種々の溶接方法を検討した結果、以下の理由から、1層目を TIG 溶接、2層目以降を低水素系の溶接棒を使用することにした。

- ① 裏波が確実であること
- ② ビグ通しを行うことから裏波があまり大きく出ないこと
- ③ 母材が高張力鋼で特に炭素当量が大きいこと
- ④ 溶接時の水素の混入が少ないこと

また、溶接手順は Fig. 11 のように行い、溶接条件は Table 14 のとおりに設定した。さらに、高張力鋼であることから溶接部を 50°C 以上に予熱するとともに、層間温度も 50°C 以上を保つようにした。

(2) 現場塗覆装

使用材料および仕様は工場塗覆装と同様であるが、まず、塗装に先立ち塗布面の錆、塵芥等を除去し、塗装直前に $50^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ に塗布面を加熱し、タールエポキシの硬化を早めるようにした。タールエポキシの塗布後ひきつづきコールタールエナ

メルガラスクロス 2 重巻の塗覆装を実施した。ここで注意を払ったことは、エナメルは溶融温度の管理と、ガラスクロスのエナメルとのなじみ、およびガラスクロスの吸湿についてである。

(3) 検査

(a) 放射線検査

溶接部の放射線検査は、継手の全線について γ 線透過検査による 2 重壁撮影を行った。判定基準は、JIS Z3104 による第 1 種、第 2 種の欠陥とも 2 級以上を合格とした。

(b) 耐圧気密試験

試験は窒素圧により耐圧試験および気密試験を同時に行い、試験圧力を設計圧力の 1.5 倍とした。圧力保持時間は陸上ヤードでの組立ブロックについては約 1h、海底敷設管および全線については 24h とした。

(c) 塗覆装検査

塗覆装検査は目視検査およびホリデーディテクター、20 000 V によるピンホールの確認と微厚計による膜厚検査を行った。

4-3-3 陸上プレハブ

(1) ヤードの設置

海底曳航法でパイプを敷設する場合は、曳航に先立ち、所要長尺管および立上り管を陸上ヤードで組立てておく必要がある。そこで、本工事で

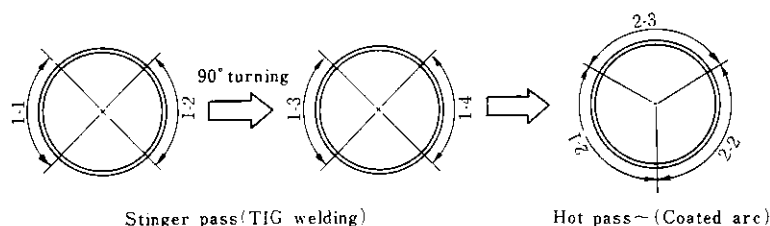


Fig. 11 Welding sequence

Table 14 Welding condition

Pass	Welding rod	Groove shape	Current (A)	Voltage (V)	Remarks (l/m)
1	TGS-50 (1.6φ)		90~120	20~28	Shield gas Ar 6~10
After 2	KS-76 (4.0φ)		90~170	20~28	—

は、パイプラインの延長上の日鉱場内の道路を使用して長さ200mの長尺管ヤード(**Photo. 2**参照)を設置した。ヤードの長さは曳航日数と立地条件によって決定されるが、今回は直線部850mを5組に分け、176m 4組と143m 1組の長尺管を製作した。

また、海底ベンド管および両岸立上り管の製作ヤードは、クレーン船の吊込み作業の可能な呼松航路側の護岸沿に設置した。

ヤードには曳航用台車軌条のほか、溶接用ローラー架台、長尺管集積架台を設置し、溶接機、塗覆装用プロパン等は台車に乗せ作業効率を高めるようにした。

(2) 長尺管製作手順

(a) 単位管の組立て

11mの単位管を溶接ローラー上に配列し、配列されたパイプをチェーンブロックおよび簡単なアウトークランプを使用し、所定のルートギャップおよび目違いに納まるように開先き合せを行い、以下前記した作業基準にしたがい、溶接、溶接検査、塗覆装、塗覆装検査、耐圧気密検査の順に作業を進めた。

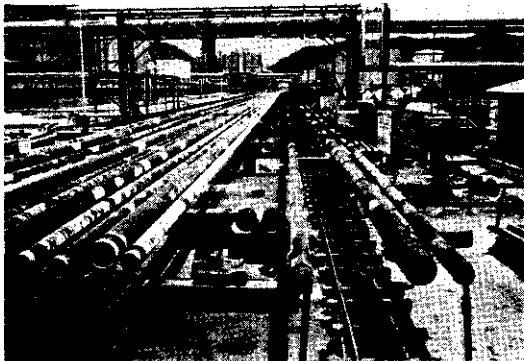


Photo. 2 Pipe prefabricating yard

(b) 立上り管の製作

立上り管はベンド部の応力集中に対する補強と輸送管の腐食を保護するため2重管にした。また、重油管については保温の目的でその空間部に粒状パーライトを充填するようにした。そこで、まず、高周波管曲げ機で曲げ加工した曲げ管と直管を配管図にしたがい配列し、全姿勢による溶接、検査、塗覆装(POF 3層塗布)を完了後、外管を同様に施工し、空間部に粒状パーライトをバキューム方式で充填し、POF、コールトールエナメルガラスクロス塗覆装を行い、塗装検査を行ったうえ、立上り管を仕上げ、同様に6本を製作した。

(c) 海底ベンド管

立上り管の場合と同様輸送管の組立てを行い、POF塗装を行ったあと、補強ボックスの取り付け、溶接検査、ボックスの気密検査、塗覆装、塗覆装検査を完了し、3本の海底ベンド管を製作した。

(3) 製作実績

176mの長尺管を前記した溶接要領にしたがい、11mの単位管を接合し製作したが、その溶接部を γ 線による透過検査を行った結果、Table 15のように、冬期の気象条件にもかかわらず、JIS Z3104による2級以上の合格率が98.5%と予想以上の好成績を修めた。また、耐圧気密検査および塗覆装検査においても全く欠陥がなく、立上り管および海底ベンド管についても同様好成績を修めることができた。

4.3.4 曳航

(1) 作業条件

管の敷設は、航行船舶に最も影響の少ない海底曳航法を採用し、曳出される管が航路部で計画水

Table 15 γ inspection results of straight pipe

Inspection sheets	Pass sheets	Detail of defects					
		Non-defect sheets	1 kind		2 kind		Retake sheets
			1 class	2 class	1 class	2 class	
720	709	664	25 sheets	16 sheets	1 sheet	3 sheets	11
	98.5%	92.2%	3.6%	2.2%	0.1%	0.4%	1.5%

深 MP-16m より出ないような進水曲線を設定した。さらに、航行船舶のスクルーカーレントによって敷設管が移動、または浮上しないように砂袋を用意した。なお、海上作業全般については船舶関係者との自主調整を基調とし管理を行い、特に曳航ワイヤーの展延、およびフロートの撤去時には、海上保安署の協力を得て一部船舶の航行を規制するなど行政指導を受けた。

(2) 曳航要領

曳航は対岸に設置した15t 曳ウインチで3条のパイプを同時に曳出すようにした。3条のパイプには10mごとに固定バンドを取付け、所定の間隔を保つようにし、さらに水中でのパイプの重量を調整するために20mごとに1ヶ所 360kgのフロートを取付けた。また、海底面との摩擦により塗覆装が損傷しないようにパイプ下面に2つ割りの塩ビ管を取付けた。

(3) 曳航前作業

前記の作業条件とパイプの発生応力が許容応力内に納まるようにローラー支点の高さおよび間隔を定め、進入斜路の曲線を設定した。このため、護岸法線より50mの区間は配管橋よりローラーを吊り下げ支点とし、さらに海底に達するまでの間に3ヶの水中ローラーを設置し、護岸より約160mの間を進水斜路とした。

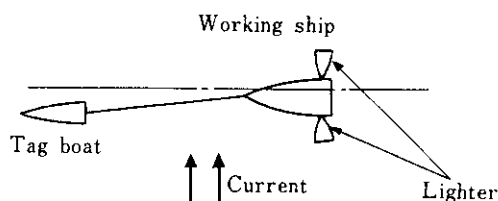


Fig. 12 Wire towing

Table 16 Towing cycle process

Working items	Needed hours (h)	Total hours (h)
Towing	1.0	1.0
Line up and welding	2.5	3.5
Inspection welding parts	3.5	7.0
P.O.F coating	2.5	9.5
Coal tar enamel coating	2.0	11.5

次に、パイプを曳航するためのワイヤー ($\phi 40\text{mm}$ -500m, $\phi 25\text{mm}$ -700mの連結したもの)を対岸の曳航用ウインチを起点とし、日鉱側に向かって、未明、航行船舶の少ない時を見計らって Fig. 12 の要領で展延を行った。ワイヤーの展延には約 1 h 30 min を要したが、完了後、ダイバーで確認した結果、正常な位置に納まっていることが確認された。

(4) パイプの曳航

プレハブヤードで製作された長尺管を進水軌条の台車上に移し、固定バンド、塩ビ管を取付けたあと、パイプの先端に先に展延したワイヤーを取付け、対岸のウインチにより曳き出し、配管橋の下でフロートを取付けながら、進水する直前にパイプの先端が進水ソリを取付けた。以上の準備を終え、翌朝4時、朝もやを破りトランシーバーの合図で対岸の曳航用ウインチによりワイヤーが巻き取られ、毎分3mのゆっくりした速度で曳航が開始された。曳航を開始し、次の曳航管の曳航を開始することができるまでの時間は Table 16 のとおりである。曳航は早朝より実施し、接合、検査、塗覆装の工程を1日の作業とし、全曳航に5日を要した。この間、曳航パイプの安全を確保するために、船舶のスクルーカーレントに対するパイプの安全を確保するために、海上保安署の協力を得て護岸より200mの区間を航行禁止区域とした。

4-3-5 海上接合

海上接合は4隻の作業船と1隻の溶接台船、な



Photo. 3 Pipe jointing on welding barge

らびに、曳船と通船を使用して行われた。3隻の起重機船で海底敷設パイプの端部120mを浮上させ、溶接台船上に管端を固定した。いっぽう、120t吊クレーン船で仮設ヤードで組立てた海底ベンド管、および立上り管を吊り込み、海上溶接現場に曳航し、溶接台船上に固定し、海底管との溶接接合を行った。溶接台船上の接合作業は付近航行するタグボート、およびフェリーボートの波の影響により溶接台船が動揺し、開先き合せに難行し、固定台の補強、比較的可撓性の良い6B管より接合するなどくふうした。また、立上り管、海底ベンド管とも長さが50m近いものとなり、吊り荷重が大きくなったため、吊点の塗覆装は硬質のエポキシ塗料をガラスクロスとともに塗布し、また、吊点の支圧面積を広げ、塗覆装が破損しないように配慮した。海上接合作業は、最初に海底ベンド部を施工し、次に川鉄側立上り部を行い、最後に日鉦側立上り部を施工した。立上り管接合敷設のサイクルタイムはTable 17のとおりである。

Table 17 Riser pipe laying cycle

	Needed hours (h)	Total hours (h)
Fitting up wire	2.0	2.0
Surfacing	1.0	3.0
Put together groove face	2.0	5.0
Welding	1.5	6.5
Inspection of welding parts	3.5	10.0
Coating	4.5	14.5
Sinking	1.5	16.0

4.3.6 敷設位置の確認

敷設パイプの直線性および深度の確認は、従来は音響測深機、レット、竹ブイ等が用いられてきたが、本工事ではパイプが小径であること、深度が大きいことなどで水位計を用いてパイプの深度および3本のパイプの傾斜などを測定した。

この水位計の精度は読取值で $\pm 0.2\%$ であるが、実測値においては $\pm 8\text{ cm}$ の誤差が予想される。なお測定結果から敷設深度はMP-23.1~21.7mで

あることが確認された。また、3条のパイプの傾斜はほとんど認められなかった。

4.3.7 耐圧気密試験

両岸立上り部の接合が完了し、敷設パイプの位置を確認してから、海底部約1000mの3条のパイプの耐圧気密試験を、窒素ガスによりそれぞれの設計圧力の1.5倍の圧力で24h放置して実施した。さらに、埋戻し完了後、全線にわたり官庁立合いのもとに耐圧気密試験を行い、諸計器の検査を受け全工事を完成した。

5. む す び

本工事は航行頻繁な航路を横断すること、海底地盤が硬質砂礫層であることなど、また、ニューマポンプ船、グレーダー船、ホッパーバージ等国内では最初の機種を使用するなど、相当な難工事であった。しかしながら水島海上保安署ならびに岡山県水島港湾局の適切な指導、協力のもとに航行船舶との自主調整を行うなど、万全の安全対策をたて無事故で全工事を完成することができた。また、本工事において開発したニューマポンプ船、グレーダ船等はヘドロ浚渫、浚渫手直しなど今後の港湾工事、および、海洋工事においても大いに活躍するものと期待される。

いっぽう、設計面においても、パイプライン技術基準が制定されていなかったということ、全国的に石油パイプラインの安全性が問題になっている時期に遭遇したことなどにより、熱応力、投錨による応力、地震応力等について十分検討するとともに、安全設備については関係官庁と慎重な検討を加えた。

本パイプラインの実施にあたり特に設計面で検討を加えたことは以下のとおりである。

(1) 船舶の投錨

20万t級船舶のアンカーを対象とする落錘実験を行った。

(2) 地震対策

権威者の意見および指導を受けながら、現地気象台が過去70年間に観測した地震記録を参考にし、埋設管の検討を行うとともに、特に立上り部

の安全を重要視し鋼管矢板で補強した。

(3) 消波工

立上り管および架台の波浪による被劣破壊を防ぐために立上り部に消波工を設置した。

(4) 保安設備

異常時に備え、パイプラインの安全を確保するため、流量計、圧力計、感震器、緊急シャ断弁、減圧弁などを設置し、管理センターで自動的にコントロールできるようにした。

施工面において特に検討した点は以下のとおりである。

(1) 航行船舶に最も影響を与えない海底曳航法を採用した。

(2) 隣接水域の海図補正を行い、可航幅を広げた。

(3) 船舶関係諸社（関係企業、船舶代理店、水先人会）との間に航行船舶の安全確保と作業の円滑な進捗を図るために自主調整を行った。

(4) 港則法に基づき、航行海域の一部について航行規制を行う行政指導を受けた。

(5) 超大型船舶のスクルーカレントによる敷設パイプの浮上についての検討を行った。

(6) その他海洋汚濁防止法等公害防止関係法に基づいて、浚渫および埋戻し土砂の扱い、特に浮泥の処理について慎重な配慮を行った。

以上設計、施工について簡単に紹介したが、この報告が今後の海底パイプラインの設計、施工について一助となれば幸いである。

最後に本工事にあたり、計画当初から終始ご指導およびご協力いただいた岡山県港湾課、水島港湾局、ならびに水島海上保安署の関係各位に厚くお礼を申しあげるとともに、日本鉱業㈱の関係各位の温かいご指導と、施工にあたり協力していただいた川崎重工業㈱、鹿島建設㈱、浜中海底管工事㈱の関係者に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 河本清：川崎製鉄技報，6（1974）1，78
- 2) 三谷禮次，河本清，菅真司，三井津勝之：配管，9（1974）6，27
- 3) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針
- 4) 桜井彰雄，高橋忠，栗原千鶴子，矢島浩：地震時土の歪より見た埋設パイプラインの耐震性，電力中央研究所技術研究所研究報告，Na69 087
- 5) 中山亘，金井寅：ウインドラスのブレーキ容量決定の一考案，船舶技術，（1969），58
- 6) S.Timoshenko；材料力学下巻，1，〔コロナ社〕