本来、溶接継手の品質要求とこれにもとづく非破壊検査の判定基準は、使用条件、設計条件に応じてきめられるべきもので、画一的にきめることには問題がある。

最近では、放射線検査以外の超音波探傷法、磁粉探傷法、マグネトグラフィーなどが研究、応用されるようになってきており、溶接部の評価はどのような検査手段（またはその組合せ）を用いて、どのような検査条件で、どのような判定基準（管理技法の導入を含む）で行なうのが最適であるかの追究が大きな問題となってきている。この方面の研究は強力に推進される必要があり、また実際に世界各国で行なわれているようである。

現状としては、わが国と米国では放射線検査が圧倒的であり、これに対してヨーロッパ諸国では超音波検査もひろく採用されているようである。ソ連では、パイプラインの溶接部は主としてマグネトグラフィーによって検査されている。

9 溶接補修

検査の結果不合格となった溶接継手は、廃棄するかまたは補修しなければならない。パイプの溶接では、一般に外側からしか溶接できず、逆に欠陥は内面にできやすいので、欠陥の除去および補修溶接には細心の注意が必要である。

諸外国では、同一個所に2回以上の補修溶接を許さない例がかなりある。これは、パイプでは溶接部の切断除去が容易なこともあろうが、根本的には、正規の作業をすればほとんど不合格にならないように、品質要求、溶接工程能力、検査の間のバランスがよくとれているからであろう。

わが国の高圧ガスパイプラインなどでは、2回までの補修溶接を認めている。

海底配管工事における溶接について*

黒田 太郎** 綱島 巖*** 山谷弥太郎**

The Welding for Submarine Pipe Laying*

by Taro Kuroda**, Iwao Tsunashima*** and Yataro Yamaya**

1. は し が き

配管工事のうち、とりわけ海底配管工事における溶接は、溶接配管後の補修が非常にむずかしいため、継手部溶接品質は、工場溶接と同等の高品質が要求され、その検査も当然厳しい要求となる。本報では、一昨年ならびに昨年完成した「京葉シーバース海底配管工事」と「日本海石油㈱海底配管工事」の経験から、配管工事の溶接と検査につきとりまとめたので御参考に供したい。

京葉シーバースは東京湾の千葉県市原市海岸に出現した石油コンビナートの原油受入れ用に設計され、輸送のコストダウンをはかるうえから、20万トン級以上のタンカーの2隻同時接岸可能なシーバース（海上埠頭）を姉崎沖 7 km、水深 20 m のところに建設されることになったものである。当社はこの京葉シーバースから五井、姉崎の石油精油所まで口径 48B (1219.2 φmm)、長さ延べ約 20 km の鋼管海底布設の設計、施工を担当した。

口径の大きい点、布設延長の点でも日本では初めての経験で、かつ世界でも口径 40" 以上、長さ 2 km 以上では初めての工事（小口径で延長の長い海底配管は数多い）であり工法の選定に当っては慎重を期した。

日本海石油㈱は硫黄含有量の少ないミナス原油を富山湾沖合 3 km、水深 20 m の地点に15万トン級タンカーの着船できるシーバースを設置、陸上タンクまでを海底埋設の配管によって、揚油する計画を実施することになった。これは、最近、亜硫酸ガスによる大気汚染が社会問題化されている折から、公害防止の面からも、注目を浴びている。確かにミナス原油は例えば、カフジ原油に比べ、硫黄分が十分の一以下と非常に少なく、脱硫装置を必要としないが、パラフィン分が多く、流動点が 35°C、常温での管内輸送が不可能である。流動点の高い場合の各種流体輸送方式の中から、保守管理、経済性、万一の場合の安全性も検討し、二重管による循環方式が考案され、二重管内管に加熱流体、本管にミナス原油を流すこととした。さらに送油中の温度降下を防ぐため①工事中の諸条件に耐え、②長期間保温効果が信頼でき、

* 原稿受付 昭和45年7月13日

** 新日本製鉄(株) Nippon Steel Corp.

*** 正 員 新日本製鉄(株) Member, Nippon Steel Corp.

図—1 京葉シーバース海底配管工事略図 日本海石油株式会社海底配管工事略図

表—1

工事名称	種別	管径	延長	最終試験圧力	工期
京葉シーバース 海底配管工事	富士ライン	48インチ	6,900m	25 kg/cm ² 72 H	43. 1月～43. 6月
	共同ライン	"	10,100	"	43. 3月～43. 5月
	丸善専用ライン	"	2,300	"	42.11月～43. 6月
日本海石油 海底配管工事	三重式	内管	12	7 kg/cm ² 12 H	44. 3月～44. 7月
		本管	38	25 kg/cm ² 24 H	
		外管	42	4 kg/cm ² 1 H	

③経済的であることから保温材としてグラスファイバークラフトを用い、その保護のための鋼管(外管)を用いることとして、最終的に三重管となったものである。

図—1に工事略図、表—1に工事諸元を示す。

2. 鋼 管

使用鋼管の本管はいずれも溶接性のよい SM41 A を用いた。鋼管の諸元を表—2に示す。

使用溶接棒は衝撃値の良い低水素系を用いた。また、溶接工については、JPIC 種1級資格者を従事させた。日本海石油株式会社海底配管工事の場合、本管のグラスファイバークラフト保温および本管と外管との二重管加工は工場内で行ない、積雪時の保護を施したうえ出荷した。

3. 溶 接 法

採用した溶接方法は表—3のとおりである。

3.1 京葉シーバース海底配管工事

京葉シーバース海底配管工事では、表—3のごとく、布設船工法と浮遊曳航法とを使いわけた。これはシーバースの竣工時に各ライン共完成していなくてはならないという工期的要素からきたものである。

(1) 布設船工法は布設船上で ① 18 m 長の素管を3本継ぎ 54 m 管とし、②これを海中部分と継ぎ、布設船が 54 m ずつ移動することによって布設を続けてゆくものであって原則として平面上の直線部分に適用され

る。布設工程の管理上、① 18 m 長の3本継ぎ(溶接2口)と② 18 m×3=54 m 管と海中部分との継ぎ(溶接1口)のおおのの溶接接合作業の短縮と両者のマッチングが焦点となり、荒天時を除き1日(54 m×4口=216 m)の布設を目標として溶接接合方法の検討を行ない、各種実験のあと表—3のごとくになった。

即ち、① 18 m 長の素管の3本継ぎ(溶接2口)、54 m 管の作成は、ロールガンと電動ターニングローラーの接合ライン上で、

初 層: 鋼管固定裏波手溶接(2名半円ずつ上進法)

2・3層: 鋼管回転、全自動サブマージトマーク溶接とし、(18 m+18 m=36 m) 管を造り、これをロールガン上で縦送りし、(36 m+18 m=54 m) と1口ずつ行い、接合部の非破壊検査および外面接合部塗覆装を別ラインとした。従って、素管どうしの吊込み、心出し、仮付け、および縦送りも含めた 54 m 管1本の接合時間は

$$\frac{216 \text{ m/日}}{54 \text{ m/本}} = 4 \text{ 本/日}, \quad \frac{24 \text{ 時間}}{4 \text{ 本/日}} = 6 \text{ 時間/本}$$

と1本当たり6時間以下が要求され、回転溶接1口当たり3時間以下で仕上げることを主眼とした。

2, 3層は連続全自動サブマージトアーク溶接によって同径心線とし、開先形状が手溶接用V開先であるので特に3層目のアンダーカット発生防止に留意した。つまり、第一にセンターずれのないようセンターならいとし、第二に巾広のビードを作るよう電圧を上げ、溶込

表-2. 鋼管諸元

使用場所 仕様細目		日本海石油 (株)			
		京葉シーバース	内 管	本 管	外 管
寸 法		1219.2 ϕ $\times$ 12.7 $\times$ 18.000	318.5 ϕ $\times$ 10.3 $\times$ 12.000	965.2 ϕ $\times$ 10 $\times$ 12.000	1066.8 ϕ $\times$ 12 $\times$ 12.000
材 質		JIS G 3106 SM 41A	JIS G 3151 STPG Sch 40	JIS G 3106 SM 41A	JIS G 3101 SS 41
溶接材	自動溶接芯線	Mn 系 4.0 ϕ	—	Mn 系 4.0 ϕ	Mn 系 4.0 ϕ
	自動溶接溶材	12 $\times$ 150 メッシュ	—	—	—
	手 溶 接 棒	JIS D 4316, D 4310	—	JIS D 4316, D 4301	JIS D 4316, D 4301
成 型		キョツケン式スパイラル	ERW	キョツケン式スパイラル	キョツケン式スパイラル
溶 接		サブマージドアーク溶接	高周波抵抗溶接	サブマージドアーク溶接	サブマージドアーク溶接
寸法公差	外 径	± 2.4 mm	$\pm 1\%$	± 2 mm	± 2 mm
	厚 さ	+15%, -0	$\pm 10\%$	+2 mm, -0	+2 mm, -0
	管 長	+60 mm, -0	+24 mm, -0	+20 mm, -0	+20 mm, -0
	真 円 度	± 6 mm 以下	—	-0.3% D (D : 外径)	$\pm 0.3\%$ D (D : 外径)
管形	真 直 度	1/1000 以下	—	1/1000 以下	1/1000 以下
	角 度	30° +5° -0	30° +5° -0	30° +5° -0	30° +5° -0
端状	ルーフユース	1.6 $\pm$ 0.8 mm	2.4 mm 以下	1.6 $\pm$ 0.8 mm	1.6 $\pm$ 0.8 mm
ビード平滑処理		内面 50 mm 外面 200 mm	内面 0.6 mm 以下	内面 50 mm	内面 50 mm
コイル 継ぎ		管端より 100 mm 以上はなす	—	管端より 100 mm 以上	—
外観検査	溶 接 部	キズ, ワレ等有害な欠陥なし	内面 0.6 mm 以下	キズ, ワレ等有害な欠陥なし	キズ, ワレ等有害な欠陥なし
	母 材 部	深さ肉厚の12.5%こえないもの	—	深さ肉厚の12.5%以下	深さ肉厚の12.5%以下
溶接部検査	ヘ コ ミ	深さ 3 mm 長さ 外径 1/2 以下	—	深さ 3 mm 以下 長さ 1/2 D 以下	深さ 3 mm 以下 長さ 1/2 D 以下
	超 音 波	板厚の20%のUノッチから 得たエコーの1/2以下	—	—	—
溶接部検査	X 線 透 視	JIS Z 2341 2 級以上	—	JIS Z 2341 2 級以上	JIS Z 2341 3 級以上
	X 線 透 過	全数 Z-2341 2 級以上	—	—	—
	アーク スタート	全個所 "	—	全個所 Z 2341 2 級以上	同 左
	コイル継ぎ	T 字全数 "	—	T 字全数 Z 2341 2 級以上	T 字全数 Z 2341 3 級以上
機械試験	母 材 引 張	管50本に1コ JIS-Z-2201 5号とする	—	600 m に1コ JIS-Z-2201 5号とする	600 m に1コ JIS-Z-2201 5号とする
	溶接部引張	" " JIS-Z-3121 1号	—	300 m に1コ JIS-Z-3121 1号とする	300 m に1コ JIS-Z-3121 1号とする
	溶接部曲げ	" 2コ JIS-Z-3124 による	—	300 m に2コ JIS-Z-3124 とする	300 m に2コ JIS-Z-3124 による
水 圧 試 験		35.5 kg/cm ²	100 kg/cm ²	24 kg/cm ²	21 kg/cm ²
塗 覆 装		コールドロール エナメル, ガラス クロス 1 重巻	—	タールエポキシ	コンクリート・コーティング

表-3 溶接方法

工 事 名 称	布 設 工 法		管の状態	溶接場所	電 源	溶 接		
						1 層	2 層	3 層
京葉シーバース 海底配管工事	布 設 船		固定 回転	船上	A.C. セネ レーター	手溶接	手溶接 全自動	手溶接 全自動
	浮 遊 曳 航		固定	"	"	"	手溶接	手溶接
日本海石油(株) 海底配管工事	海 底 曳 航	内 管	"	陸上	A.C.	"	"	"
		本 管	"	"	"	"	"	"
		外 管	"	"	"	"	"	"

みを深くせず、ビードの巾広化を図った。布設船上の回転溶接条件を表-4 に示す。

回転溶接部は、風雨時にそなえオーニングを備えたが、18 m 素管の吊込み時および 54 m 接合管吊出し時にクレーンを使用するため、取はずしが必要で、可動式

としたが、降雨の激しい場合、雨しぶき等のため作業中止も生じ、改良の余地がある。溶接機器、溶接材の乾燥等の管理も海洋上を考慮して、標準を厳密に定めた。

②54 m 管と海中管との接合。54 m に仕上げられた鋼管と海中管との接合は船上の傾斜した布設ライン上で心

表一 4 布設船工法回転管溶接条件

ルートギャップ (mm) 2.5~4.0

(実測値)

オフセット (mm) 0 ~2.5

ビード番号	溶 接 材	電 流 (A)	電 圧 (V)	速度 (mm/min)
1	JIS-D-4316 溶接棒 3.2φ	90~110	—	50
2	ワイヤー フラックス Mn 系 4.0φ 12×150メッシュ	350~400	31~36	200
3	ワイヤー フラックス Mn 系 4.0φ 12×150メッシュ	380~450	35~38	200

出し, 固定され, 初層, 2, 3 層すべて2名半円ずつの上進法手溶接である。管固定, 手溶接の本接合では, 溶接後の外観および非破壊検査, 接合部外面塗覆装および布設船の 54 m の移動, 次の 54 m 管の吊込みを含めた1サイクルを6時間以下とし, 1日4口, 216 m の布設長さを確保することを目標とした。固定溶接作業上の問題点は, 気象, 海象条件による心出し, 仮付け時間のバラツキであった。溶接部は丁度布設船船橋の下に内蔵し, 回転溶接部よりは風雨に対し若干防備が固い。布設船上の固定溶接条件を表一5に示す。

布設船上の溶接接合作業は次の(2)で述べる浮遊曳航法用の④長管製作と⑤布設船が直接沖合にて溶接接合と同時に布設していく作業とに区分される。布設船工法

は後者であって, 前者の長管製作とは管端をキャップ等でシールした 300 m 以上の長尺管を, 泊地内で布設船を利用して, 海上に浮べながら造ってゆき, 一定期間泊地に係留しておくものである。地上仮設, 敷地確保の点から適当な係留泊地があれば海底管布設にとってメリットのある工法となる。図一2, 図一3に布設船利用区分を示す。また表一6に布設船の就業状況の一例を示す。

長管製作の例でみると, 就業71日で溶接616口, 布設10217 m で, 1日当り8.7口(回転5.9口, 固定2.8口), 144 m 沖合布設の例では就業25日で溶接293口, 布設長5234 m であり, 1日当り平均11.7口(回転7.8口, 固定3.9口), 210 m 沖合布設が, 泊地内長管製作に比べすべての点で優れているのは, 海象条件の差と作業管理

表一 5 京葉シーバース固定管溶接条件

ルートギャップ (mm) 2.5~4.0

(実測値)

オフセット (mm) 0 ~3.5

ビード番号	溶接棒規格	溶接棒径(mm)	溶接棒長(mm)	電 流 (A)	速度(mm/min)
1	JIS-D-4316	3.2	400	90~110	45~50
2	"	4.0	"	120~140	50
3	"	4.0	"	120~150	50

図一 2 布 設 船 (長管製作)

図-3 布設船 (布設船工法)

表-6 布設船就業状況 (一例)

		長管製作 (泊地内)	布設船工法 (沖合現地)
期 間		43.2.9~4.26	43.4.29~5.28
就業 日数	○	17 (24.0%)	3 (12.0%)
	△	31 (43.6%)	21 (84.0%)
	×	23 (32.4%)	1 (4.0%)
	計	71 (100.0%)	25 (100.0%)
不就業日数		7	4
溶接 口数	回転	420	196
	固定	196	97
	計	616	293
布設 (製作) 延長		10,217 m	5,246 m
一作業 日当り量	溶接 回転	5.9	7.8
	口数 固定	2.8	3.9
	計	8.7	11.7
	延長	114.0 m	210.0 m

注 ○ 24時間フル稼働
△ 18時間以上稼働
× 18時間未満稼働

(標準化と熟練)の進歩による違いと思われる。泊地内長管製作時は表-6にも明らかなごとく、春先の関東地方の強い西風の影響を直接受ける東京湾東岸の海象条件の厳しさを示しており、24時間フル稼働日は確かに沖合12%に対し、丁度倍の24%と泊地内の条件を示してはいるが、1日18時間(75%)以上の稼働日は、逆に沖合が泊地内に比べ倍に近い84%を占めていることが特徴的であり、1日18時間未満の稼働日数となると、泊地内長管製作時は32%に達したのに、現地布設時は1/8の4%にすぎない。

接合時間のバラツキに対しては、

①心出し：鋼管の真円度、端面直角度、外周公差

②溶接：開先形状(ベベル角度、ルートギャップ)管体ラミネーション、電源の安定、天候、溶接工個人差

③X線検査：装置、フィルムの段取、現像・濃度の管理

④塗覆装：塗覆装の乾燥

等が原因となり易く、自動化、半自動化の工夫により解決されよう。

(2) 浮遊曳航法

この方法は、クレーン船と溶接台船を用いて①泊地内長管(今回は主として $378\text{ m} + 378\text{ m} = 756\text{ m}$)を造る作業(シーバース部立上り管などの接合も含め)を前提とし、②布設現地へ長管を曳航し、溶接台船上で浮上させた既設管と曳航長管とを接合していくものである。従って溶接条件は、布設船上と溶接台船上の違いはなく、初〜3層とも2名半円ずつの上進手法溶接で表-5のとおりである。ただ、接合サイクルは、浮上させた既設管および曳航された長管とも台船に心出し、固定前に、管端保護等の目的で取付けられたキャップの取はずし等が加わるので、おのずと長くなる。既設管吊上げ、台船セットから、接合、台船撤去までの接合サイクルでは最短4.7時間、最大8.8時間であった。図-4に浮遊曳航法の溶接配置を示す。

3.2 日本海石油(株)海底配管工事(三重管工事)

日本海石油(株)海底配管工事では、海底曳航法を採用し、溶接接合は表-3に示したようにすべて手溶接である。海底曳航法は前述の布設船工法、浮遊曳航法に比べ、管路の延長上に長管の製作および曳航のスペース、機材、進水設備を必要とする。しかし、三重管加熱保温方式の本工事では

図-4 浮遊曳航法

- ①三重管の接合が複雑で溶接, 検査に長時間を要する (海上接合は不利)
- ②海上作業が安全な期間が短い (5~7月の3カ月)
- ③布設ラインが直線であり, その延長に長さ300m, 巾100mの陸上ヤードがとれる。
- ④汀線付近に障害物がなく, また海底の不陸も少ない。
- ⑤布設ラインの延長が3000mで海底曳航でじゅう分曳出せる長さである。

図—5 海底曳航法

といった理由から決ったものである。海底曳航法の略図を図—5に示す。

陸上ヤードで単管25本を溶接接合, 300mの三重管を10本造り, 300m ずつ進水布設していくもので, 三重管の断面は図—6に示すとおりである。また溶接条件は, 表—7, 表—8に示すとおりであって

	材 質	寸 法
内 管	STPG 38	318.5φ×10.3t
本 管	SM 41 A	965.2φ×10t
外 管	SS 41	1066.8φ×12t
サポートリブ	SS 41	t=16 300×350

図—6 日本海石油㈱三重管構造

表—7 日本海石油㈱内管, 本管溶接条件

ルートギャップ (mm)	(内管) 3.0~3.5	
	(本管) 2.5~3.5	
		(実測値)
オフセット (mm)	(内管) 0 ~1.0	
	(本管) 0 ~2.0	

ビード番号	溶接棒規格	溶接棒径(mm)	溶接棒長(mm)	電 流 (A)	速度(mm/min)
1	JIS-D-4316	3.2	400	90~110	50
2	"	4.0	"	120~140	55~60
3	"	4.0	"	120~140	"

表—8 日本海石油(株)外管溶接条件

ルートギャップ (mm)	2.5~4.0	
		(実測値)
オフセット (mm)	0 ~2.0	

ビード番号	溶接棒規格	溶接棒径(mm)	溶接棒長(mm)	電 流 (A)	速度(mm/min)
1	JIS-D-4316	3.2	400	90~110	50
2	JIS-D-4316 又は JIS-D-4301	4.0	"	120~140	55~60
3	"	4.0	"	130~150	55~60

①内管 318.5φ×10.3 1名

②本管 965.2φ×10.0 2名

③外管 1066.8φ×12.0 2名

それぞれ軸方向には管端で 250 mm ずらせて接合。

いずれも一層目裏波で、手溶接上進法で行なった。なお内管と本管とを結ぶサポートリブの隅肉溶接は 140～240 A でアンダーカットの出ないように留意した。

4. 溶接部非破壊検査方法

溶接部非破壊検査は、その検査対象、寸法、形状、条件によって当然使い分けられる。今回は、放射線透過試験方法のうち ①X線透過検査、② γ (ガンマー Ir¹⁹²) 線透過検査ならびに③超音波探傷検査を採用した。因みに三者の比較を表-9に示す。

表-9より明らかなように、取扱い易さからいうと、超音波探傷検査が第一であろう。ただし、①装置のトラブルが起き易い。②検査結果を記録として残しにくい。という欠点も否めない。これらをカバーする対策が必要である。

4.1 京葉シーバース海底配管工事

(1) 布設船工法における布設船上の溶接部検査は、回転管、固定管ともに 200 kVp 連続焦点の X線装置を使用し、X線透過検査を実施した。フィルムは感度 ASA 100、特別寸法 3 $\frac{1}{8}$ "×22" (500 mm) を使用し、全周同時撮影で実施した。透過度計は JIS-Z-2341 の 2F-1。検査判定基準は JIS-Z-2341 の 2級以上を合格とするが、ブローホール、スラグ巻込みについては、板厚方向に薄い 3級は施主検査員の判断により合格とする場合もあった。ワレ、融合不良、溶込不良についてはすべて不合格とした。布設船上の X線透過方法の略図を図-7に示す。

(2) 浮遊曳航法においては 300 mm もしくは 700 m 以上の長管どうしの溶接接合のため、X線透過検査

図-7 布設船工法 X線透過装置

がむずかしく、超音波斜角探傷検査で実施した。合否判定規準作製にあたっては、テストピースを作り、X線透過検査と超音波斜角探傷検査とで比較検討し、極力同一規準による検査となるよう努めた。超音波探傷検査方法の特性として、線状欠陥、面状欠陥に対しては敏感であるが、球状欠陥については鈍感である。溶接品質上から線状欠陥、面状欠陥は有害なものであるが、球状欠陥については疲労強度上はともかく、引張り、曲げ等については特に大きくない限り、あまり問題にならない。検査方法の特性、強度的な問題の両方を考慮のうえ、線状欠陥、面状欠陥については検査もれのないように注意した。表-10に超音波探傷の諸元と判定規準を示す。点状欠陥については、50 mm 範囲内にエコー高さ 50% 以上のものが 5 個以上検出された場合は不合格とした。

表 - 9

	X 線 検 査	γ 線 検 査	超 音 波 探 傷
長 所	<ul style="list-style-type: none"> ○フィルムが鮮明で判定がしやすい。 ○記録が残る。 	<ul style="list-style-type: none"> ○装置が比較的軽い。 ○記録がのこる。 ○中径管が比較的単時間で撮影できる。 ○装置のトラブルがない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○装置が軽い。 ○作業管理区域がせまい。
短 所	<ul style="list-style-type: none"> ○装置が重い。 ○作業管理区域が比較的広い。 ○装置のトラブルがある。 	<ul style="list-style-type: none"> ○作業管理区域が広い。 ○フィルムが X 線に比し鮮明でない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○記録がのこらない。 ○熟練度が欠陥検出におおきくひびく。 ○装置のトラブルがある。
作 業 性	普 通	良 い	非 常 に よ い
費 用	普 通	やや 安 い	普 通

表-10 超音波探傷判定規準

プローブ移動距離 (mm)	0~9	10~15	15~25	25以上
エコー高さ(%)				
0~25	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁
26~50	A ₄	B ₂	B ₃	C ₁
51~80	B ₄	B ₅	C ₂	C ₃
81以上	B ₆	C ₄	C ₅	C ₆

合格: A, B 不合格: C

探 傷 器 KRAUT KRA-MER USK 5 M

探 触 子 KRAUT KRA-MER MWB 70

感度試験片 NDI STB A 2 (4φ×4)

探 傷 感 度 感度試験片で50% (1S)

4.2 日本海石油(株)海底配管工事

(1) 内管および本管の溶接部検査方法

日本海石油㈱海底配管工事の溶接部検査方法については、三重管構造上X線透過検査ができなかったため、放射線源カプセルを内管内に挿入し撮影する方法をとった。放射性線源としては、Ir (イリジウム) 192 を使用し、まず①内管を全周同時撮影し、つぎに 250 mm 移動し、②本管を全周同時撮影した。γ (ガンマ) 線はX線に比べ波長が $10^{-10} \sim 10^{-12}$ cm と短いため透過能が大で、内管厚さ 10.3mm, 本管厚さ 10.0mm であったが十分な撮影ができた。

フィルムはX線透過と同様の ASA 100, 寸法 $3\frac{1}{8}'' \times 12''$ を使い、判定規準は JIS-Z-2341 により2級を目標とし、欠陥のうち、ブローホール、スラグ巻込みについては3級以上を合格とした。図-8に Ir (イリジウム) 192 の透過方法の略図を示す。

(2) 外管の溶接部検査方法

図-8 Ir¹⁹² (γ線) 透過検査装置

表-11 超音波探傷判定規準

プローブ移動距離 (mm)	0~9	10~15	16~25	25以上
エコー高さ(%)				
0~25	A	A	B	C
26~50	A	B	C	D
51~70	B	C	D	E
71以上	C	D	E	F

合格: A, B, C 不合格: D, E, F

三重管の外管溶接部検査については京葉シーバースの浮遊曳航法と同様、超音波斜角探傷で実施した。使用機器、判定規準作製方法もほぼ同様である。表-11に判定規準を示す。点状の欠陥については、50 mm 範囲内にエコー高さ50%以上のものが5個以上検出された場合、不合格とした。

5. 溶接部非破壊検査結果

5.1 京葉シーバース海底配管工事

京葉シーバースでは、3.1, 4.1で示したように継手部全周を布設船上ではX線透過検査、溶接台船上で

図-9 布設船間転管撮影内訳

表-12 布設船回転管溶接撮影内訳 (発生率: %)

等級	欠陥	発生率	無欠陥	ブローホール	バイビング	非方向性 形状雑多スラグ	直線状 スラグ	融合不良
1		71.6	59.0	9.4	2.7	0.3	0.2	—
2		14.5	—	6.3	5.1	0.9	2.2	—
3		6.7	—	1.6	1.4	0.5	3.2	—
4		3.0	—	0.4	0.2	0.1	0.8	1.5
5		0.5	—	—	—	—	0.2	0.3
6		3.7	—	0.1	—	—	0.2	3.4
			59.0	17.8	9.4	1.8	6.8	5.2

は超音波探傷検査と検査方法を使いわけた。

(1) 布設船上の54m管作成のための回転管溶接部については $3\frac{1}{8} \times 22$ 寸法のフィルムを全周8枚でX線透過撮影し、フィルム数約5000枚に達した。フィルム撮影結果の内訳を表-12および図-9に示す。

合格率は92.8%となっている。なお3級についてみると融合不良、溶込不足、ワレ等の欠陥は全くなく、スラグ巻込みが多いが、手直しの対象とはなっていない。

不合格欠陥として融合不良が多いが、これは裏波溶接に使用している溶接棒が低水素系であるため、ビードが凸型となり、2層溶接前にグラインダーにより、なめらかに処理しておくのであるが、処理不良によりこのように多発している。また、スラグ巻込みについても、2層目に直線状のスラグ巻込みが多く、裏波溶接後の手入れの悪さが目立った。今後十分注意を要する。

(2) 布設船上固定溶接部についても $3\frac{1}{8} \times 22$ フィルム全周8枚でX線透過撮影し、フィルム数2300枚余となった。撮影結果の内訳を表-13、図-10に示す。

合格率98.5%であった。

次に、固定溶接部は全層上進手溶接のため位置の優位

表-13 布設船固定溶接部撮影内訳(発生率: %)

級	1	2	3	4	5	6
発生率	71.0	20.8	6.7	1.0	0	0.5
A	10.0	2.0	0.4	0.1	—	—
B	9.7	2.3	0.4	0.1	—	—
C	8.2	3.1	1.0	0.2	—	—
D	6.5	3.8	1.8	0.2	—	0.2
E	7.1	3.5	1.7	0.1	—	0.2
F	9.7	2.3	0.4	—	—	—
G	9.8	2.2	0.4	0.1	—	0.1
H	10.0	1.6	0.6	0.2	—	—

図-10 布設船固定溶接部撮影内訳

差について調べてみた。まず、フィルム位置を図-11で参照されたい。図-12、図-13に位置別合格率、図-14、図-15に位置別不合格率を示す。

図-11 固定溶接・フィルム位置図

図-12 布設船固定溶接部合格内訳

図-13 布設船固定管等級分類

図-14 布設船固定溶接部不合格内訳

図-15 布設船固定管不合格率

表-12と表-13とを比較すると、回転溶接合格率92.8%, 固定溶接合格率98.5%と圧倒的に固定溶接部の結果が良い。この主原因は、まず電源に起因する問題である。即ち、電源が他の船上機器の電源と同一であるため、これらの使用による電圧変動を、サブマージトアーク溶接機が敏感に応答したことによる。次に、溶接条件の変化に、サブマージトアーク溶接は手溶接のように敏感に適応出来ない。第三に、外面にコールドロールエナメルガラスクロス塗覆装が施されているので、ターニングローラー上で円滑に回転しにくい。以上のような今回特有の問題が解決でき、層間手入りを完全に行なえば、回転溶接の品質が、当然手溶接よりも良くなると考える。また、表-13と図-12、図-13から溶接位置別の品質がわかる。当初から予想されたように、鋼管継手底部、D, Eの位置の品質が劣っている。欠陥別にはブローホール70%, スラグ巻き込み30%で、回転溶接のような融合不良は全くみられなかった。

(3) 浮遊曳航法における溶接台船上の超音波探傷に

ついては、検査カ所63口、手直しカ所は1口。合格率98.3%である。手直し部の欠陥はスラグ巻き込みであった。

5.2 日本海石油(株)海底配管工事(三重管)

日本海石油㈱の三重管手溶接部の検査は4.2で示したように、①内管、②本管はIr(イリジウム)192のr(ガンマ)線透過検査、③外管は超音波探傷検査となっている。

(1) 内管は図-16のようにフィルムをセットし、 $3\frac{1}{8}'' \times 12''$ 、全周4枚で撮影、フィルム数約1000枚となった。撮影結果の内訳を表-14、図-17に示す。

合格率97.4%となった。

表-15に欠陥分類を示した。5, 6級に融合不良、溶込み不足があるが、これは溶接工の技量欠陥と思われる。このような有害欠陥を出している溶接工が同一人であり裏波溶接の経験の浅いことが判明し、除外した。

(2) 本管は図-18のようにフィルムをセットし、 $3\frac{1}{8}'' \times 12''$ 、全周12枚で撮影、フィルム数約3000枚となった。撮影結果の内訳を表-16、図19に示す。

合格率98.5%と非常に高い。

表-17に欠陥分類を示した。無欠陥62.0%とブローホ

図-16 内管溶接・フィルム位置図

表-14 内管(固定管)溶接撮影内容
3級以上合格(発生率: %)

級	1	2	3	4	5	6
発生率	76.9	18.3	2.2	1.2	0.7	0.7
A	19.0	4.9	0.5	0.1	0.3	0.2
B	18.9	4.7	0.6	0.4	0.2	0.2
C	18.8	4.8	0.6	0.6	0.1	0.1
D	20.2	3.9	0.5	0.1	0.1	0.2

表-15 内管欠陥別分類(発生率: %)

無欠陥	ブローホール	パイピング	非方向性形状 雑多スラグ	直線状 スラグ	融合不良	溶込み不足
44.0	4.1	7.4	3.2	2.2	0.5	1.6

図—17 内 管 撮 影 内 訳

図—18 本管溶接・フィルム位置図

ール28.6%とで全体の90%強を占めている。次いで、パイピング4.9%, スラグ巻込みの順となる。

(3) 外管の超音波探傷検査結果は表—18, 図—20のとおりである。

合格率84.1%で, 検査カ所287カ所, 検査延長約 1100 m の内訳を示している。なお, この合格率を γ (ガンマ) 線検査で使用した $3\frac{1}{8}'' \times 12''$ フィルムに換算すると, 98.2%となった。従って, 外管の溶接品質も, 内管, 本管と同等であったことを示している。超音波探傷検査で

図—19 本 管 撮 影 内 訳

表-16 本管(固定管)溶接撮影内訳
3級以上合格(発生率: %)

級	1	2	3	4	5	6
発生率	78.6	17.5	2.4	0.6	0.3	0.6
A	6.2	1.9	0.1	—	0.1	—
B	6.9	1.3	0.1	—	—	—
C	6.5	1.2	0.2	0.2	0.1	0.1
D	7.1	1.1	0.2	—	—	—
E	6.6	1.3	0.4	—	—	—
F	5.5	1.8	0.5	0.2	0.1	0.3
G	5.6	2.1	0.1	0.2	—	0.1
H	7.0	1.2	0.1	—	—	—
I	7.0	1.2	0.1	—	—	—
J	7.1	1.2	0.1	—	—	—
K	6.7	1.5	0.1	—	—	0.1
L	6.4	1.7	0.1	—	—	—

表-17 本管欠陥別分類(発生率: %)

無欠陥	ブローホール	パイピング	非方向性形状 雑多スラグ	融合不良	溶込不足
62.0	28.6	4.9	3.3	0.6	0.6

表-18 外管等級別分類(発生率: %)

A	B	C	D	E	F
75.7	4.9	3.5	6.3	6.6	3.0

A, B, C 合格 D, E, F 不合格

図-20 外管溶接超音波探傷等級

検出された欠陥の種類は、探傷結果からある程度予想はできるが断定はできないので、表-19に示す欠陥分類は、不合格と判定され、手直しのためガウジングの際に判明した結果による(図-21)。

一番多い欠陥は半分近いブローホールであるが、このほとんどはパイピングであった。スラグ巻込みは直線状が主体であった。また、当初の予測どおり、融合不良、溶込不足は確実にとらえている。以上の結果から、やはり、球状欠陥検出に比し、線状、面状欠陥の検出が確実

表-19 外管欠陥別分類(発生率: %)

ブローホール	スラグ巻込	融合不良	溶込不足
44.6	2.7	13.5	39.2

図-21 外管溶接欠陥

であることが示されている。

現在までの配管溶接部の検査は、記録が残らないということで超音波探傷検査はあまり用いられなかったが、この結果から、判定規準、検査作業管理等を含む運用面の配慮により、放射線透過検査と同程度の期待をし得ると思う。

6. あとがき

一般の陸上布設の配管は、それが地中埋設であれ、架設であれ、布設位置における溶接接合後の応力のほとんどは、管内流体によるもの、土被り土圧もしくは積雪、風圧等自然条件によるものが主体である。一方海底配管においては、溶接接合後すぐに布設作業が行なわれ、外部応力がかならず作用する。これは場合によっては相当大きな応力となる。従って特に大口徑、長距離の海底配管布設に当っては、管路の選定、工法の選択、海象、気象の綿密な調査と把握といった総合力を発揮しうるか否かが工事を成功させる鍵となる。同時に最も重要なことは、鋼管の品質および現場継手溶接の信頼性をいかに確保するかということになる。本稿で紹介した海底配管において、いずれも SM41A を採用したのは、このように布設時応力および、厳冬期の低温に対する考慮である。鋼管の品質としては、母材の材質、溶接部の形状および内質欠陥の管理、管端ベベル部および管体の寸法、外觀形状、水圧試験、機械試験値等が把握されねばならない。殊に最近の傾向としては、API の規格を満足するだけでなく、より厳密な品質管理を必要とする場合が多い。つまり管一本毎に溶鋼番号、圧延番号をも含む管理が要求され、管体の溶接補修に対する管理も非常に念

入りになってきた。これも管路の大型化と共に万一事故の起った場合のリスクを考えれば、当然の成行ではある。製管時の溶接部オンライン非破壊検査の精度に対する期待もますます高まりつつある。殊に溶接部の超音波探傷は、日進月歩の様相を呈している。工場製作時の検査能力を現場継手溶接部の品質保証に、いかに適用していくかがひとつの課題であろう。

現場継手溶接部の品質保証には、施工速度の要素を見逃せない。ひとつには鋼管の管端ベベル部の品質において、①ラミネーションの有無、②ベベル形状、③管端直角度等の管理が工場に要求されると共に現場搬入までの管端保護が大切になって来る。つぎに現場継手溶接法の選択において、今後低酸素系の溶接棒の他に、①自動化、半自動化の方向、またアメリカで広く採用されている②高セルローズ系の手溶接棒の使用がある。前者は施工

速度の点で、後者は品質保証の点で、いずれも今後つめてゆく課題を残している。現時点では、溶接工の養成を含めて体制を整えるのが問題となる。

溶接部の非破壊検査については、先に触れた超音波探傷の適用をより実用的につめることがもっとも要求されよう。海底配管の溶接継手部には、放射性検査の適用しえない部分が工法上必ず生ずる。放射性検査とあわせて、検査機能の異なる超音波探傷検査も含む非破壊検査の信頼性の精度を上げることは、今回の工事を通じて、もっとも痛感されたことである。

海底配管工事はいわゆる総合力をいかに発揮するかにかかっている。が、目的はあくまで布設配管が永なり、油なりの流体を安全に輸送することであり、管路の品質保証はひとつに継手溶接部の品質にかかっている。

CO₂ 半自動による海底パイプラインの溶接*

高 木 健 治**

CO₂ Semi-Automatic Welding Method for Submarine Pipelines*

by Kenji Takagi**

「現代における海底パイプライン敷設工事は、19世紀における鉄道建設工事にほどにデンジャラスなものである」ということを何かの本で読んだ記憶があるが、たしかに海底パイプラインの敷設には大きなリスクが伴う。敷設時の潮流や波浪がパイプを破壊する危険である。

したがって、海底パイプライン敷設工事に特に要求されることは敷設速度である。波の穏やかな日にすばやく敷設し海底に埋設してしまうことである。

ブラウンルート社やマクダモット社など国際的な海底パイプライン建設会社の敷設速度の一例をあげると、1日およそ1マイル(1.6 km)である。これは24"φ×0.462" t (610 mmφ×12 mm t) のパイプの例であるが、この速度だと10 km クラスのパイプラインも1週間で敷設が完了する。短期間に作業を完了することは危険を回避するだけでなく、建設費を低減する。海底パイプラインの敷設作業には専用の敷設作業船のほか、クレーン船、アンカーボート、海中掘削船その他の作業船からなる船団が従事するがその使用料だけでも膨大である。短期間に敷設することが鍵たるゆえんである。

1日1.6 km といえば1本の単管長12 m として約133本、海底パイプライン工事は一般に1日24時間フル稼働であるから継手1ヶ所当りの平均所要時間は約11分となる。実際には心出し—溶接—X線検査—塗覆装—モルタルコーティングなどの作業が各作業ステージで流れ作業式に行なわれ、約7～8分に1本の割で敷設されている。

ここに述べた例は敷設船工法の場合である。海底パイプラインの敷設工法にはほかにもたとえば浮遊曳航法や海底曳航法などがあり、地形、潮流そのほかの条件によって選択するが、本報告ではもっとも普遍的な敷設船工法の場合について述べる。

1. 溶接方法の選択

敷設船上で行なう作業は、大別するとつぎのごとくなる。

- a) パイプ配列
- b) 心出し
- c) 溶接
- d) X線検査

* 原稿受付 昭和45年7月2日

** 正 員 日本鋼管工事(株) Member, Nippon Kokan Koji