

日本船舶振興会昭和52年度補助事業
“船舶の構造・性能に関する基礎的研究”

研究資料 No. 284

第146研究部会

諸管材料腐食に関する調査研究

報告書

昭和53年3月

社団法人

日本造船研究協会

本調査研究は、船舶の補修工事費に占める諸管材料の腐食によるものの割合が非常に大きいことに鑑み、その工事費節減を図るため具体的な腐食対策確立および推奨仕様作成の基礎資料を得る目的で昭和48年度より5ヶ年計画（1年延長）で実施した。

本報告書は最終年度にあたり、実管テスストリグによる通水テスト、および新造船就航時からの長期に亘る追跡調査のほか、5ヶ年の研究成果の総合解析を行ない、諸管材料の腐食対策、推奨仕様についてとりまとめたものである。

は　し　が　き

本報告書は、日本船舶振興会の昭和52年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として日本造船研究協会が第146研究部会においてとりまとめたものである。

第146研究部会委員名簿

(敬称略、五十音順)

部会長	佐山昭彦(川崎汽船)	植田昭二(三菱重工業)
幹事	岩田昌男(大阪商船三井船舶)	陣駒美登(佐世保重工業)
	島本幸次郎(三菱重工業)	住中栄枝(山下新日本汽船)
	須永正人(川崎重工業)	福垣敦男(三菱重工業)
	平田栄(三井造船)	山下淳二(ジャパンライン)
	山崎啓司(日本钢管)	吉田真(日本郵船)
	望月峻右(石川島播磨重工業)	渡辺精三(日立造船)
委員	植田靖夫(船舶技術研究所)	内堀利也(日本防食工業)
	翁長一彦(船舶技術研究所)	賀田秀夫
	北野三夫(出光タンカー)	久野忠一(川崎製鉄)
	小林豊治(科学技術庁)	小吹泉(佐野安船渠)
	坂田薰(笠倉機械製作所)	坂本進(日本ペイント)
	佐武二郎(住友金属工業)	佐藤義一(函館ドック)
	重野隼太(中川防食工業)	諫訪部伝司(神東塗料)
	瀬尾正雄	染矢博文(三保造船所)
	竹田征雄(日本海事協会)	西岡正美(造船工業会)
	前田直昭(新日本製鉄)	宮下尚明(住友重機械工業)
	森川卓(日本船主協会)	

目 次

1. まえがき	1
2. 52年度実施状況報告	2
2.1 新造船就航時からの追跡調査研究	2
2.1.1 調査目的	2
2.1.2 調査対象船および調査実施経過	2
2.1.3 調査内容	2
2.1.4 調査結果	4
2.1.5 調査結果の考察	14
2.2 実験室基礎研究	31
2.2.1 試験方法	31
2.2.2 試験結果	33
2.2.3 考察	34
2.2.4 まとめ	36
2.2.5 参考文献	36
3. 総合とりまとめ	78
3.1 諸管材料の現状	78
3.2 腐食発生の現状	90
3.2.1 概要	90
3.2.2 損傷発生に至る使用期間および発見経緯	90
3.2.3 管系統別腐食状況および管仕様と腐食状況	90
3.2.4 管材質と腐食状況	93
3.2.5 系統別腐食状況のまとめ	93
3.2.6 異種金属接触による腐食状況	94
3.3 腐食対策	94
3.3.1 設計条件	94
3.3.2 管材料	99
3.3.3 曲げ・フランジ取付	102
3.3.4 表面処理	105
3.3.5 管系装置	107
3.3.6 環境	109
3.4 諸管材料の推奨仕様	114
3.4.1 推奨仕様	114
3.4.2 解説	115
3.5 資料図表(実験室基礎研究)	120
3.5.1 海水流速および温度	120
3.5.2 異種金属接触腐食	121
3.5.3 シーム部の腐食	121
3.5.4 亜鉛メッキおよびアルミメッキ	121

3.5.5 被覆材欠陥部の腐食	122
3.5.6 ベント部の腐食	122
3.5.7 フランジ部近傍の腐食	122
3.5.8 耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性	122

1 まえがき

船舶の補修工事費の内で管装置の腐食に起因するものの割合は大きく、その節減は船の経済性向上に大きな意義を有する。諸管材料の腐食は原因が複雑であるため、過去何回かの実態調査、実験・研究にもかかわらず、その成果が実船に有効に反映できる段階に至っていない。第146研究部会は上記必要性に応えるため、日本造船工業会機関部会および日本船主協会工務専門委員会の提唱により「諸管材料腐食に関する調査研究」を目的として、昭和48年度より当初4ヶ年の継続事業として発足した。以来、船会社、造船会社および関連会社協力のもとに活動を続けてきた。本年度（昭和52年度）は当初の4ヶ年計画を1年延長した第5年目最終年度にあたる。

調査、研究は当初の方針に従い4年間下記の3項目に分けて実施した。

- (1) 就航船のアンケートによる実態調査および開放調査研究
- (2) 新造船就航時からの追跡調査研究
- (3) 実験室基礎調査研究

第4年度目昭和51年度は上記のうち特に実管テストとして鉄鋼メーカーが開発中の耐溝状腐食性電縫钢管について耐食性の調査を実施した。この実験結果からある程度の結論が得られることを期待したが通水期間が短かく充分な腐食量を定量できず、結論を導くに至らなかった。従って実験を更に1年間延長し、本年度は新造船追跡調査のほかに前年度に引き続いて海水循環テストリグによる耐溝状腐食性電縫钢管の耐食性調査、ベンド部の腐食、フランジ接合部の腐食および被覆材欠陥部の腐食調査を実施した。

これらの成果は以下本文第2章に記述した。また5年間の諸調査、実験・研究の成果に基づいた総合とりまとめを第3章に記述した。通算5年間の長期に亘る調査、研究の成果が当初の目的をほぼ達成し得たことは誠に喜ばしいことで調査に御協力いただいた関係各位に深甚なる感謝の意を表わすと共に本成果が実船に有効に反映され諸管材料の信頼性向上ひいては経済性向上に寄与することを念願するものである。

2. 昭和52年度実施状況

2.1 新造船就航時からの追跡調査研究

2.1.1 調査目的

諸管材料腐食に関する調査研究の一環として、48年度に就航が予定された新造船3隻に各種試験片を装備し、52年度まで開放調査を含む追跡調査を4ヶ年に渡って実施し、各試験片の腐食状態の違いを調査した。この結果から各仕様の腐食に対する傾向を知ることを目的とした。

2.1.2 調査対象船および調査実施経過

表 2.1.1 調査対象船および実施経過

船名 (船主)	船種 (主機)	建造、調査造船所	就航、調査時期	経過月数	主要航路
赤石丸 (大日海運)	24型 CHIP 16PC2-2V 8,000PS	日本钢管建造 钢管鶴見	昭和48年9月就航	—	
		常石造船	昭和49年10月	13ヶ月	日本— 北米西岸
		钢管清水	昭和50年10月	25ヶ月	
		尾道造船	昭和51年9月	36ヶ月	
			昭和52年9月	48ヶ月	
太栄丸 (共栄タンカー)	231型 OIL (T33,000PS)	石川島播磨建造	昭和48年12月就航	—	
		IHI相生	昭和49年11月	11ヶ月	日本—PG
		IHIシンガポール	昭和51年1月	25ヶ月	
		IHIシンガポール	昭和52年11月	47ヶ月	
ジャパンコスモス (ジャパンライン)	270型 OIL (T36,000PS)	三井造船建造	昭和49年1月就航	—	
		三井由良	昭和50年8月	19ヶ月	日本—PG
		三井由良	昭和51年7月	30ヶ月	
		三菱シンガポール	昭和52年7月	42ヶ月	

2.1.3 調査内容

(1) 海水系統部品に対する防食亜鉛の効果調査

ゴム系ライニングを施した海水系統における部品の腐食に対する防食亜鉛の効果を調査する目的で、冷却海水ポンプおよび海水弁に、保護亜鉛を設けたものと設けないものについて腐食進行状況の比較調査を行なった。

(2) 海水系統管材料の腐食調査

② 常用海水系統における塗装管の腐食

常用海水系統にタルエポキシ塗装鋼管、亜鉛メッキ鋼管および無塗装鋼管の試験片を装備し、その腐食状態の違いを調査した。また亜鉛メッキ鋼管および無塗装鋼管には溶接部の腐食状況を調査する目的で試験片中央に突合せ溶接継手を設けた。

⑤ 常用海水系統における銅合金管の耐海水腐食性

常用海水管系に銅合金管、鋳鉄ピースおよび亜鉛メッキ鋼管の試験片を装備し、その腐食状態の違いを調査した。

⑤ 常用海水系統におけるアルミメッキ鋼管の耐海水腐食性

常用海水系統にアルミメッキ鋼管の試験片を装備し、その腐食状態を調査した。

⑥ 常用海水系統における継目無鋼管と電縫钢管の耐海水腐食性

常用海水系統に亜鉛メッキ継目無鋼管および亜鉛メッキ電縫钢管の試験片を装備し、その腐食状態を調査した。

(3) 蒸溜水系統管材料の腐食調査

蒸溜水系統に亜鉛メッキ鋼管の試験片を装備し、その腐食状態を調査した。

(4) 暴露甲板上管材料の腐食調査

暴露甲板上の蒸排気管にアルミメッキ鋼管の試験片を装備し、外面の腐食状態を調査した。

表 2.1.2 試験片装備一覧表

No.	試験項目	試験内容	試験片区分	各船の試験片装備個数			
				K丸	L丸	M丸	
1	海水系統部品に対する防食亜鉛の効果の調査	ゴム系ライニングを施した海水管系内の部品について保護亜鉛を取りつけた場合の防食効果の調査研究	ボンブ	保護亜鉛なし	—	—	1
			ボンブ	保護亜鉛あり	—	—	1
			弁	保護亜鉛なし	—	1	1
			弁	保護亜鉛あり	—	1	1
2	海水系統管材料の腐食調査	a 塗装防食の効果の調査研究	タールエポキシ	市販1	1	1	
			塗装ビース	内作1			
			無塗装ビース	—	3	3	
			亜鉛メッキビース	—	3	3	
		b 銅合金管の腐食の調査研究	亜鉛メッキ溶接ビース	3	—	—	
			銅合金ビース	2	2	2	
			F C ビース	1	1	1	
		c アルミメッキ鋼管の腐食の調査研究	防食ビース	2	2	2	
3	蒸溜系統管材料の腐食調査	亜鉛メッキ鋼管の蒸溜水による腐食性の調査研究	アルマ加工管直管	3	3	3	
			アルマ加工管曲管	1	—	—	
4	暴露甲板上管材料の腐食調査	暴露甲板上、蒸排気管の防食性の調査	継目無鋼管ビース	3	3	3	
			電縫钢管ビース	3	3	3	
計				20	28	30	

各試験片の装備位置を、図 2.1.1 ~ 2.1.7 に示す。

2.1.4 調査結果

(1) 海水系統部品に対する防食亜鉛の効果調査

海水ポンプにおける調査結果を表2.1.3に、海水弁における調査結果を表2.1.4に示す。

ゴム系ライニング海水管系統の海水ポンプ青銅ケーシングに設けられた保護亜鉛は約3ヶ月程度で消滅していた。

M丸42ヶ月間の調査期間では、保護亜鉛を設けなかったM1ポンプ、保護亜鉛を装備したM2ポンプとともに、目視による限りポンプケーシング、インペラなどに腐食はなく良好な状態を示していた。従って保護亜鉛の有無による差は認められなかった。ポンプケーシングの腐食減量を知る目的で42ヶ月経過時に肉厚計測を行なったが、写真判定から考えられる腐食減量に比較し、肉厚計測誤差が大きく、データとして採用できる結果は得られなかった。

M丸M1冷却海水ポンプケーシング内面の新造時および42ヶ月経過後の状況を写真2.1.1に示す。

海水弁出入口フランジに取付けた保護亜鉛はL丸では11ヶ月経過時点での入口側が約50%，出口側が約45%減少した。一方M丸では19ヶ月経過時には寸法的にはほとんど減少しておらず、海水接触部が白く変色していた。42ヶ月経過時点でも保護亜鉛は残存していた模様であるが減少量はデータとして確認できなかった。

M丸の保護亜鉛を装備した弁と装備しない弁については、いずれも弁桿、弁体等に目立った腐食は認められなかつた。弁押え、弁桿、弁体の重量変化についても顕著な差は見られなかつた。

また弁箱内面のライニングについては、L丸にて47ヶ月経過時に一部ふくれ亀裂が発生しているが、M丸では良好な状態を保っている。

表2.1.3 海水ポンプの腐食調査結果

船名	管材質	海水ポンプ仕様			経過日数	腐食状況
		名称	要目	材質		
M丸	SGP-E 合成ゴム	M1 冷却海水ポンプ (保護亜鉛なし)	480 m ³ /h t 25 m 1770 rpm	ケーシング：青銅 インペラ： 18Cr 12Ni Mo ステンレス鋼	19 30 42	非常に良好 異常なし 腐食なく良好 インペラ吸込側に タール状付着物
		M2 冷却海水ポンプ (保護亜鉛装備)		マウスリング： 鉛 青銅 シャフト：18Cr8Ni ステンレス鋼	19 30 42	亜鉛59.9%は全く 無くなっていた。 亜鉛3ヶ月程度で 無くなつた。 腐食なく良好 亜鉛なし
	被覆					

表 2.1.4 海水弁の腐食調査結果

船名	試験片 管系材質	亜鉛装備箇所	使用 条件	温度	流速 m/s	経過 月数	腐食状況
L丸	LO 冷却器入口弁 弁箱: 鋳鉄 トリム: 青銅 管系: SGP-E 合成ゴム被覆	弁入口側 フランジ 航海時	常温	海水 常温	2.8	11	弁内全面赤錆軽微 亜鉛減少量 入口側 50g 出口側 45g
						25	異常なし
						47	弁箱ライニングの流れ方向片側にゴムライニングふくれ亀裂あり、亀裂は新しく内面金属地には腐食なし。
M丸	M1 冷却海水ポンプ 入口弁 弁箱: 鋳鉄 トリム: 青銅 管系: SGP-E 合成ゴム被覆	保護亜鉛なし 常 用	常温	海水 常温	2.7	19	非常に良好。ゴムライニング部に貝の付着有り。
						42	良好。 弁箱内面ゴムライニング良好。 重量(㌘) 完成時 調査時 差引 弁押え 729 700 -29 弁桿 5,620 5,700 +80 弁体 18,050 18,150 +100
						19	非常に良好。亜鉛海水接触部は白く変色しているが寸法的には減少は無い。
						42	良好。弁箱内面ゴムライニング良好。 保護亜鉛は残存していた。 重量(㌘) 完成時 調査時 差引 弁押え 729 800 +71 弁桿 5,620 5,800 +180 弁体 18,050 18,000 -50
						19	良好。弁箱内面ゴムライニング良好。 保護亜鉛は残存していた。 重量(㌘) 完成時 調査時 差引 弁押え 729 800 +71 弁桿 5,620 5,800 +180 弁体 18,050 18,000 -50

(2) 海水系統管材料の腐食調査

調査結果の詳細は表 2.1.5 に示す。

(3) 常用海水系統における塗装管の腐食

タールエボキシ塗装管約4年間の使用結果、K丸に装備した試験片の内面は赤褐色の堆積物で覆われていたが、塗装膜は健在であり、膜厚減少も認められなかった。

一方L丸ではフランジから片側の長さ50mm、もう一方は長さ10mmおよび中央部の長さ100mmにわたり、程度は軽いがあげた腐食が発生している。また試験片を二分割した時に長さ約80mmにわたり、半円筒状に塗膜が剥離したが、金属面は錆の発生もなく全く健全であった。

M丸では19ヶ月経過時より局部的な塗膜のふくれが報告されていたが、約4年経過時では5～10mm径のあばた腐食が一部に発生している。管母材の腐食程度は軽い。あばた腐食部の母材最大腐食量は亜鉛メッキ鋼管の試験片とほぼ同じ程度の値となっている。

K丸、L丸、M丸の試験片の腐食状況を写真2.1.2～2.1.4に示す。同じ系統に装備した亜鉛メッキ鋼管の試験片では0.27～0.44mm/year、無塗装鋼管では0.69～1.0mm/yearの母材最大腐食速度が見られた。また無塗装鋼管の下流に設けた亜鉛メッキ鋼管の試験片は、上流側に設けた試験片に比較し腐食が非常に少ないことがM丸の調査結果から推定される。写真2.1.7に上流側および下流側に設けた試験片の腐食状況を示す。

また、亜鉛メッキ鋼管および無塗装鋼管の試験片に設けた、中央突合せ溶接部はいずれの試験片も溶接部もしくはその周辺が集中的に腐食されており、この部分の最大腐食速度は0.8～1.0mm/yearであった。

K丸に装備した試験片の突合せ溶接部の腐食状況を写真2.1.5に、M丸に装備した試験片の突合せ溶接部断面の腐食状況を写真2.1.6に示す。

亜鉛メッキ鋼管試験片の亜鉛メッキは、約4年間でK丸、M丸ともほぼ消滅している。

(⑤) 常用海水系における銅合金管の耐海水腐食性

銅合金管については、K丸に装備した試験片の一部赤銅色の変色が生じた他は全て良好な耐食性を示した。

同じ系統に装備した亜鉛メッキ鋼管の試験片はいずれも全面に腐食が見られ、母材の最大腐食速度は0.38～0.72mm/yearと塗装鋼管と組合せられた場合より大きい値が出ている。L丸およびM丸では母材の電縫鋼管シーム部に溝腐食が明確に出ている。銅合金管の下流に装備されたK丸の亜鉛メッキ鋼管試験片の銅合金管側フランジ根本部の腐食は著しい。

鋳鉄ピースについてはK丸、L丸とも黒鉛化腐食が見られ、腐食程度は著しい。K丸、L丸に装備した鋳鉄ピースの腐食状況を写真2.1.8～2.1.9に示す。またL丸に装備した試験片の腐食状況を図2.1.8に示す。

(⑥) 常用海水系におけるアルミメッキ鋼管の耐海水腐食性

アルミメッキ鋼管は全て良好な耐腐食性を示し4年経過後のメッキ付着率も100%であった。また孔食の発生も4年間の調査期間では報告されていない。アルミメッキ鋼管の試験片を装備した管系はK丸、L丸、M丸とも亜鉛メッキ鋼管を使用している。

(⑦) 常用海水系における継目無鋼管と電縫鋼管の耐海水腐食性

K丸では電縫鋼管シーム部に溝腐食が認められたが、L丸、M丸では認められていない。

K丸ではいずれの試験片もあばた腐食が発生しており、最大腐食速度は0.39～0.42mm/yearとなっている。溝腐食は約4年間の腐食深さ0.4mm程度でありあばた腐食に比較すると腐食減量は少ない。

一方、L丸の約2年間の経過およびM丸の約4年間の経過では、継目無鋼管、電縫鋼管とともに腐食程度は軽微であり、最大腐食速度は0～0.28mm/yearとなっている。

(3) 蒸溜水系管材料の腐食調査

調査結果の詳細は表2.1.6に示す。

試験片の亜鉛メッキは、L丸、M丸とも約2年間でほとんど消滅し、メッキ付着面積率は0～12%となっている。

M丸の約4年間の調査結果では、腐食程度は軽微であった。

(4) 暴露甲板上管材料の腐食調査

調査結果の詳細は表2.1.7に示す。

甲板上の蒸排気系統に装備したアルミメッキ鋼管の試験片は、4年間の調査期間では発錆も無く、内面外面とも極めて良好な結果を示している。

表 2.1.5 海水系統管材料の腐食調査結果

船名	管 系	使用条件	温 度 $m./s$	流 速 $m./s$	試 驗 片	経過月数 月	母材最大 腐食量 mm	母材最大 腐食速度 $mm/year$	メッキ付着 面積 %	腐食状況 その他
K 丸	海水サービスピンドル出口管 STPG 38-E (Sch 40) 亜鉛メッキ 100 A	常 用	海 水 常 温	2.40	STPG 38-E (Sch 40) 亜鉛メッキ後中央部 突合せ溶接	1.5	0.08	0.06	9.8	全周にわたり突合せ溶接部が一定 の幅で集中的に腐食 異物の堆積なし
						2.7	1.0	0.44	4.0	全面赤褐色の付着物 錆こぶ
						4.8	1.1	0.27	2	全面赤褐色の付着物、孔食あり 溶接ビード部最大腐食 0.8 mm/year
L 丸	海水サニタリーポンプ出口管 STPG 38-E (Sch 80) 亜鉛メッキ 50 A	常 用	海 水 常 温	1.49	STPG 38-E (Sch 80) 亜鉛メッキ後中央部 突合せ溶接	1.1	0.4	0.43	8.5	突合せ溶接部が全周にわたり一定 の幅で集中的に腐食 異物の堆積なし
						2.5			9.3	全面かっ色のスケール付着
M 丸	海水サービスピンドル出口管 STPG 38-E (Sch 40) 亜鉛メッキ 150 A	常 用	海 水 常 温	1.58	STPG 38-E (Sch 40) 無塗装中央部突合せ溶 接	1.9	1.1	0.69	—	中央部の一部と管端部にあはた腐 食あり。塗膜の健全部は試験片 2 分割時半円状にハクリしたが金属 地は全く健全
						4.2	3.5	1.00	—	全面赤褐色の付着物 溶接ビード部最大腐食 1.0 mm/year

船名	管系	使用条件	流速 m/s	試験片	経過月数 月	母材最大 腐食量 $mm/year$	母材最大 腐食速度 $mm/year$	メッキ付着 面積 $%$	腐食状況	その他
				S T P G 3 8-E (S ch 4 0) 亜鉛メッキ	4.2	1.1	0.31	0	シーム部溝状腐食あり	
				S T P G 3 8-E (S ch 4 0) タールエボキシ塗装	4.2	0.26	0.07	0	全面腐食、堆積物多い 無塗装管の上流に裝備	
				S T P G 3 8-E (S ch 4 0) アルミニウムプラス管	4.2	1.2	0.34	95	全面赤さび発生、表面良好 無塗装管の下流に裝備	
K丸	海水サニタリー管系 S T P G 3 8-E (S ch 4 0) 亜鉛メッキ 40A	常 用	海水常温	1.68	4.8	0.08	0.02	—	5 ~ 10 μm 径のあはた腐食、 塗装膜厚減 13.3 $\mu m / 42$ 月 部分的にふくれ発生	
				S T P G 3 8-E (S ch 4 0) 亜鉛メッキ	4.8	0	0	—	銅鉄ビースの上流に裝備	
				銅鉄ビース	4.8	2.88	0.72	—	極く一部に赤銅色の変色 銅鉄ビースの下流に裝備	
L丸	海水サニタリーポンプ出口管 S T P G 3 8-E (S ch 8 0) 亜鉛メッキ 50A	常 用	海水常温	1.49	4.7	0	0	—	アルミニウム管下流に裝備、 上流側の腐食特にフランジ根本が 著しい	
				S T P G 3 8-E (S ch 8 0) 亜鉛メッキ	4.7	1.6	0.38	0	黒鉛化腐食がみられ腐食は著しい 減量 708.4 / 6352.59 / 48ヶ月 177 g / year	
									全長にわたり赤褐色のスケール 両端フランジから約 30 mm の長さ で黒鉛化した管の堆積あり	
									管は全面腐食、電縫部は最大 2 mm の深さの溝腐食 亜鉛メッキは管の端部にわずか残	

船名	管系	使用条件	温度 °C	流速 m/s	試験片	経過月数 月	母材最大腐食量 mm	母材最大腐食速度 mm/year	ノッキ付着率 %	腐食状況	その他
					錆鉄ピース					黒鉛化した錆が最大約 15 mm堆積している程度でほとんど消失	
M丸	STPG 38-E (Sch 40) 亜鉛メッキ 126A	海水冷却海水入口管	航海時	海水常温	1.93	4.7	3.1	0.79	—	減量 2.5 Kg / 47ヶ月 0.64Kg/year	
K丸	STPG 38-E (Sch 80) 亜鉛メッキ 40A	海水サニタリーポンプ出口管	常用	海水常温	1.68	STPG 38-E (Sch 80) 亜鉛メッキ 錆鉄ピース	4.2	1.89	0.54	0	全面に腐食発生スケール付着 シーム部溝食あり 試験片回収出来ず
L丸	STPG 38-E (Sch 80) 亜鉛メッキ 60A	空気圧縮機冷却海水出口管	常用	海水常温	0.45	STPG 38-E (Sch 80) 亜鉛メッキ 錆鉄ピース	1.1	0	0	1.00	アルミニウム皮膜は残存し健全であった。孔食なし 孔食あり 全般的にメッシュ皮膜は残存
M丸	STPG 38-E (Sch 80)	空気圧縮機冷却海水出口管	常用	海水常温	2.0	STPG 38-E (Sch 40) アルミニウム	1.9	0	0	1.00	メッシュ皮膜減少量 100 μ 赤錆が全面に付着、表面良好

船名	管 系	使用条件	温 度	流 速 m/s	試 験 片	経過月数 月	母材最大 腐食量 μ	母材最大 腐食速度 $\mu/year$	メッキ付着 面積 %	腐食状況 その他の 記述
	亜鉛メッキ 60A					1.9	0	0	100	赤錆が全面に付着 メッキ厚減少量 30 μ
						4.2	0	0	100	赤錆が全面に付着 19ヶ月の試験片と大差なし メッキ厚減少量 70 μ
K丸	主機空気冷却器海水出口管 STPG 38-E(Sch 40) 亜鉛メッキ 100A	航海時	43°C	2.36	継目無鋼管 STPG 38-S(Sch 40) 亜鉛メッキ	1.3	2.21	2.04	60	表面あばた腐食 表層局所あばた腐食
						2.3	1.27	0.66	75	赤褐色の堆積物 メッキ消失部に孔食
						4.8	1.68	0.42	50	メッキ消失部に孔食
					溶接鋼管 STPG 38-E(Sch 40) 亜鉛メッキ	1.3	1.4	1.29	90	表面あばた腐食 溝腐食なし
						2.5	1.8	0.62	40	表面あばた腐食 溝腐食なし
						2.3	1.24	0.65	45	赤褐色の堆積物あり メッキ消失部に孔食 溝腐食なし
						4.8	1.56	0.39	65	赤褐色の堆積物あり 溝腐食あり 深さ 0.4 mm
L丸	ターボ発電機L.O.冷却器 STPG 38-E(Sch 40) 亜鉛メッキ	海水出口管 常 用	海 水 常 温	1.1	継目無鋼管 STPG 38-S(Sch 40) 亜鉛メッキ	1.1	0	0	100	褐色のスケール付着 腐食極めて軽微
						2.5	0	0	90	
						4.7				

船名	管系	使用条件	温度 m/s	流速 m/s	試験片	経過月数 月	母材最大 腐食量 mm	母材最大 腐食速度 mm/year	ノック付着 面横 %	腐食状況	その他
125 A					溶接鋼管 STPG 38-E(Sch40) 亜鉛メッキ	1.1	0	0	100		
						2.5	0	0	70	褐色のスケール付着 シーム部腐食なし	
						4.7					
M丸	ターボ発電機 冷却海水出口管 125 A	常 用	海水常温	1.6	溶接鋼管 STPG 38-S(Sch40) 亜鉛メッキ	1.9	0	0	95	赤褐色スケール付着 局所ふくらみ	
						1.9	0.4	0.25	70	内面良好、局部的にあばた腐食	
						4.2	0.58	0.17	0	小さいあばた腐食	
					溶接鋼管 STPG 38-E(Sch40) 亜鉛メッキ	1.9	0.45	0.28	※ 0	シーム部腐食なし	※メッシュ減少率の大きさな理由不明
						1.9	0.40	0.25	95	シーム部腐食なし	
						4.2	0.19	0.05	0	シーム部腐食なし	

表 2.1.6 蒸溜水系統管材料の腐食調査結果

船名	管 系	使用条件 温 度	流 速 m/s	試 験 片	経過月数 月	母材最大 腐食量 mm	母材最大 腐食速度 $mm/year$	メッキ付着 率 %	腐食状況	その他の 事項
L 丸 SGP-E 亜鉛メッキ	造水装置蒸溜水出口管	航海時 20°C	0.38	SGP-E 亜鉛メッキ	1.1	0	0	100	メッキ厚減少量 72 μ	全面褐色スケール付着 亜鉛メッキほとんど消滅
					2.6	0	0	1.2		
					4.7					
M 丸 SGP-E 亜鉛メッキ 40A	造水装置蒸溜水出口管	航海時 20°C	0.8	STPG38-E(Sch40) 亜鉛メッキ	1.9	0	0	9.5	フランジ溶接部のみ全周にわたる 局部腐食	全面にわたり多少腐食 全面にわたり多少腐食 墨状のもの付着
					1.9	0.61	0.39	0		
					4.2	0.69	0.20	0		

表 2.1.7 暴露甲板上管材の腐食調査結果

船名	管 系	使用条件	温 度 ℃	流 速 m/s	試 験 片	経過月数 月	母材最大 腐食量 mm	母材最大 腐食速度 $mm/year$	メッキ付着 面 %	腐食状況	その他
L 丸	係船ウインチ用蒸気管 STPG 38-E(Sch40)	間欠	165	—	STPG 38-E(Sch40) アルミメッキ	14			100	メッキの剥離なし 赤錆なし	
	アルミメッキ					36					
M 丸	係船ウインチ用排気管 STPG 38-E(Sch40)	間欠	100	—	STPG 38-E(Sch40) アルミメッキ	14			100	メッキの剥離なし 赤錆なし	
	アルミメッキ					36					
DCuT 2-H 80A	係船ウインチ用蒸気管	間欠	165	—	STPG 38-E(Sch40) アルミメッキ	19			100	良 好	
						42	0	0	100	メキ厚(内側 外側) 160→80 μ 200→120 μ	外面多少黒ずんでいるが腐食なし 内面腐食なし
DCuT 2-H 100A	係船ウインチ用排気管	間欠	100	—	STPG 38-E(Sch40) アルミメッキ	19			100	良 好	
						42	0	0	100	メキ厚(内側 外側) 200→160 μ 220→140 μ	外面多少黒ずんでいるが腐食なし 内面腐食なし

2.1.5 調査結果の考察

(1) 海水系統部品に対する保護亜鉛の効果

海水ポンプケーシングに設けた保護亜鉛は約3ヶ月程度で消滅したが、約4年間の調査期間では保護亜鉛を設けなかった海水ポンプであっても、ケーシング（青銅）やインペラ（ステンレス鋼）に腐食は認められず、保護亜鉛の効果を確認するに至らなかった。

M丸海水弁出入口に設けた保護亜鉛は42ヶ月経過時点でも残存した模様であるが、取付方法が図2.1.1に示す状態であるため、表面に堆積物が付着した場合有効に作用していたか否かに疑問がある。保護亜鉛を設けた弁と設けなかった弁いずれについても弁体、弁棒等に顕著な腐食は認められず、約4年間の調査期間では海水弁に対する保護亜鉛の効果を確認するに至らなかった。

(2) 海水系統管材料の腐食調査

② 常用海水系統における塗装管の腐食

L丸約4年間の使用経過であばた腐食および剥離が報告されているが、これは試験片が50Aという細い管であり、塗装施工面に問題があり、塗膜の密着性が悪かったのではないかと思われる。K丸100Aの試験片は約4年間の使用期間を通じ健在であり、M丸150Aの試験片ではあばた腐食が一部に発生したもの腐食程度は軽く、タールエボキシ塗装管は、施工面に問題がなければ、少なくとも4年程度は良好な防食効果を示すと考えられる。

亜鉛メッキ钢管および無塗装钢管の突合せ溶接部は、周囲にわたり局部腐食が顕著に発生しており、海水管系統での突合せ溶接継手の採用は、腐食上大きな問題があることが指摘できよう。

亜鉛メッキ钢管のメッキ付着面積率は1～2年経過時点では50～70%であるが、4年程度ではほとんど0～10%になると思われる。

⑤ 常用海水系統における銅合金管の耐海水腐食性

銅合金管は良好な耐食性を示すといえよう。

銅合金に近接して設けられた鋳鉄ピースおよび亜鉛メッキ钢管フランジ根本部はガルバニック腐食と考えられる激しい腐食を呈すると思われる。

⑥ 常用海水系統におけるアルミメッキ钢管の耐海水腐食性

K丸、L丸、M丸における調査結果では、アルミメッキ钢管の試験片は良好な結果を示し、実験室に於ける調査結果に見られた孔食が発生しなかった。この理由としては、いずれも亜鉛メッキ钢管を用いた系統に試験片を装備した為、アルミメッキ钢管にとって相対的に有利な条件となった可能性が考えられる。

⑦ 常用海水系統における継目無钢管と電縫钢管の耐海水腐食性

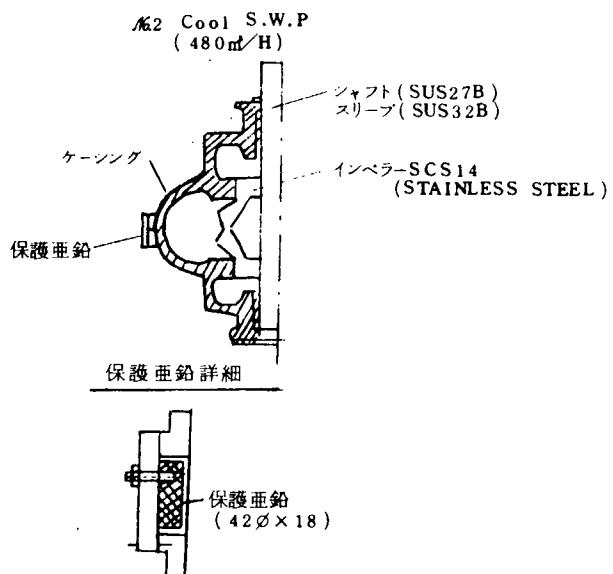
4年間の調査結果では亜鉛メッキの防食効果が働いている為か、使用温度条件が高いK丸の試験片を除いて、電縫钢管に溝腐食の発生が見られなかった。しかしながら、銅合金管下流に装備した亜鉛メッキ钢管や、塗装钢管と組合せて用いた無塗装钢管など腐食の著しい試験片ではいずれも顕著なシーム部溝腐食が認められている。以上から、さらに腐食程度が進むに従ってシーム部溝腐食が問題になってくるものと考えられる。

(3) 蒸溜水系統管材料の腐食調査

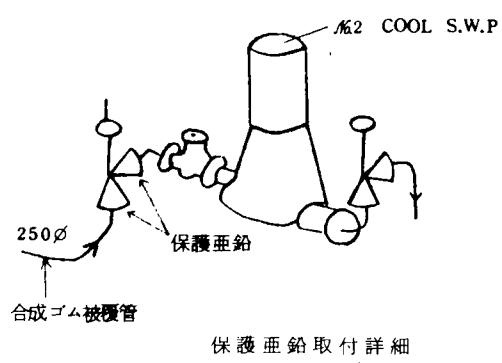
蒸溜水系統の亜鉛メッキ钢管のメッキ付着面積率は2年間程度で0～10%となっており、海水系統の場合に比較してメッキ減少速度は大きいと思われる。

(4) 暴露甲板上管材料の腐食調査

アルミメッキ钢管は甲板上配管材料として少くとも4年間は良好な耐腐食性を示すと考えられる。

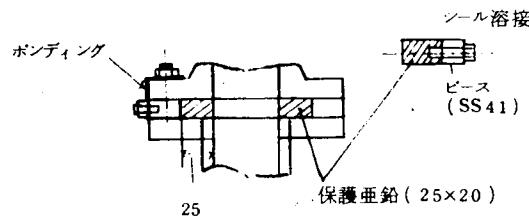


M丸：M2冷却海水ポンプケーシングに
保護亜鉛を取付けた。



M丸：M2冷却海水ポンプ入口弁の両端
フランジに保護亜鉛を取付けた。

保護亜鉛取付 詳細



L丸：主L.O. 冷却器
海水入口弁の両端
フランジに保護亜
鉛を取付けた。

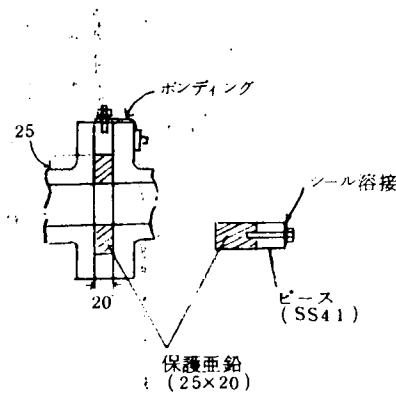
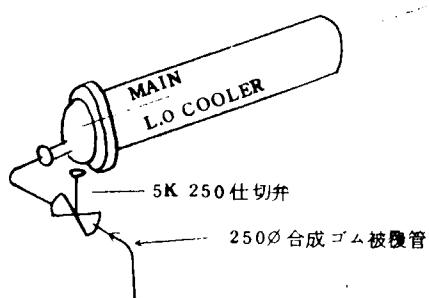
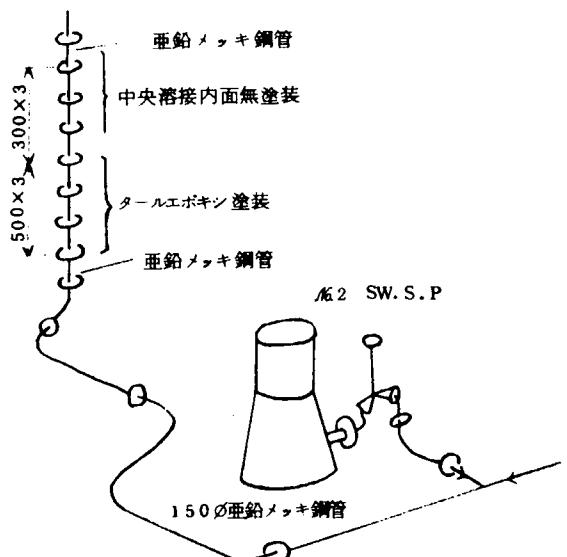
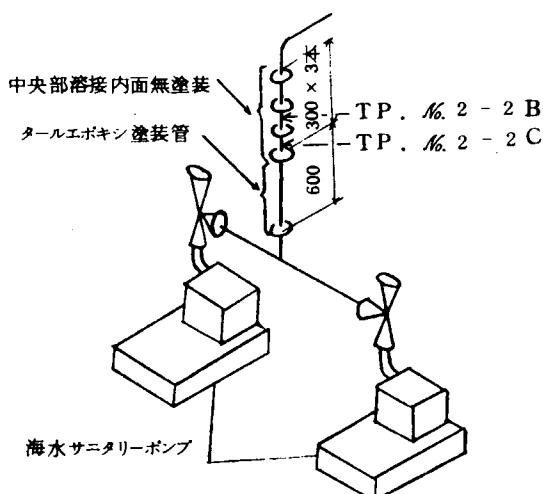


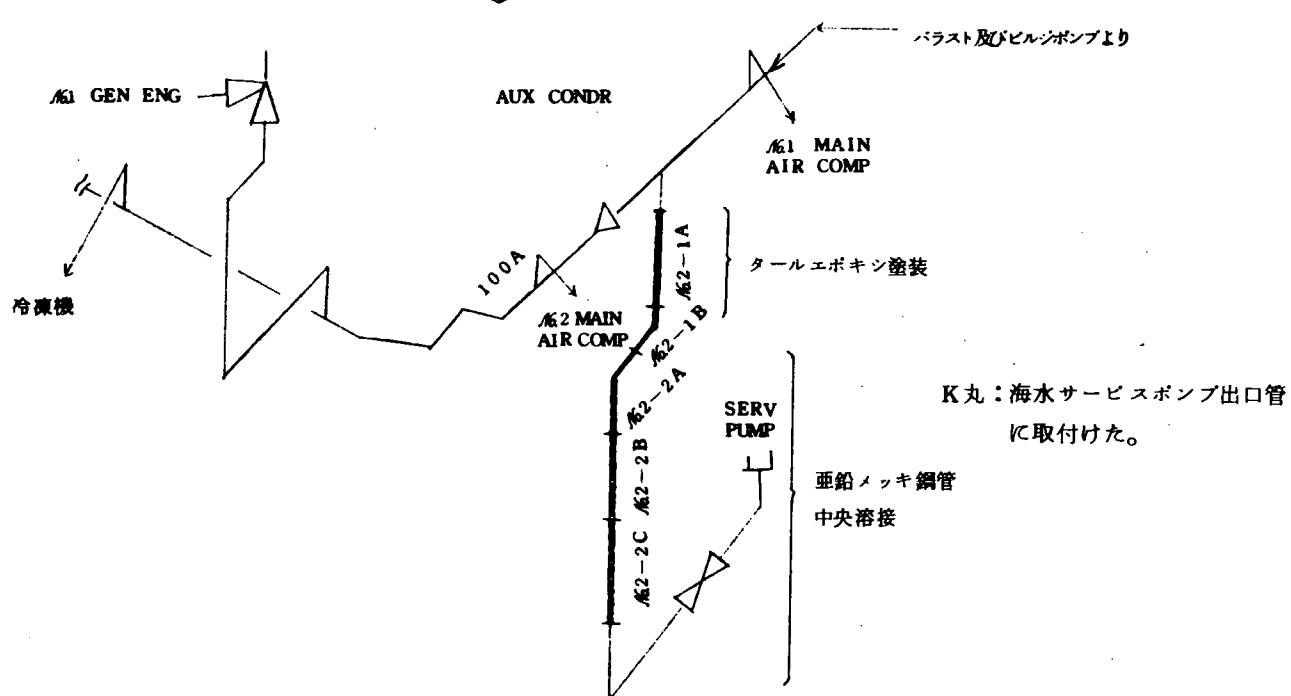
図2.1.1 ポンプおよび弁に取付けた試験片装備状態（保護亜鉛）



M丸：海水サービスポンプ出口管
に取付けた。

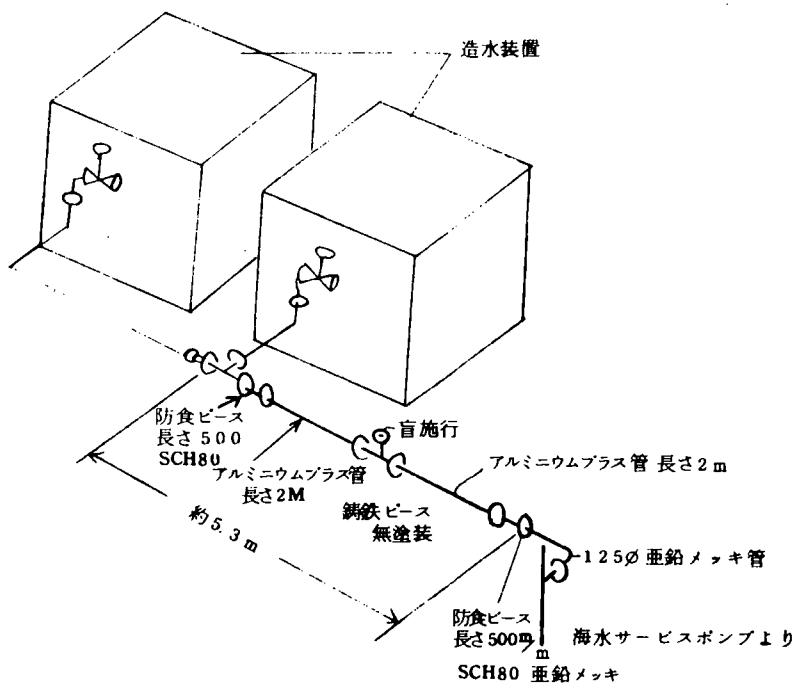


L丸：海水サニタリーポンプ出口管
に取付けた。

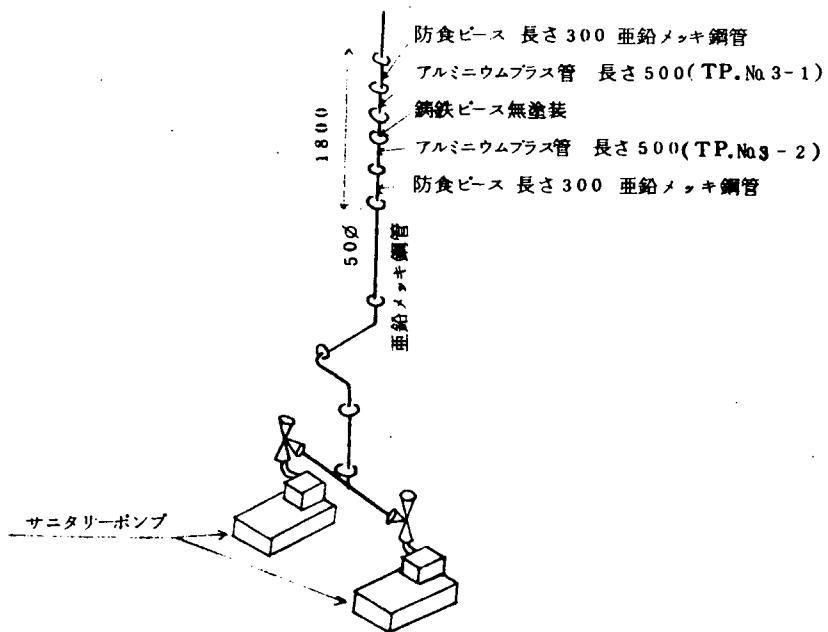


K丸：海水サービスポンプ出口管
に取付けた。

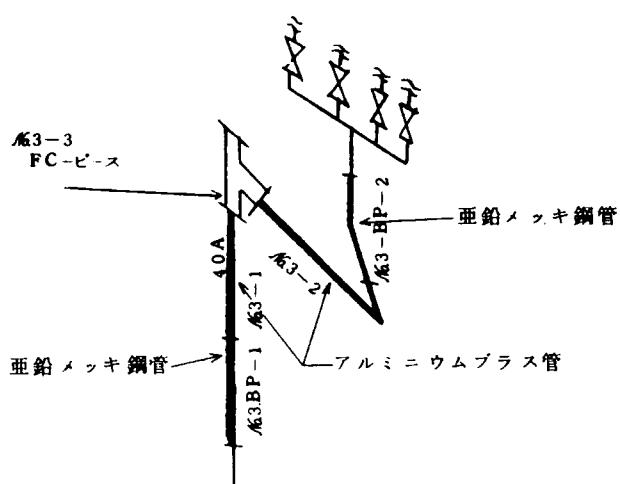
図 2.1.2 海水管系に取付けた試験片の装備状態（タールエポキシ管，中央部溶接鋼管）



M丸：造水装置冷却海水入口
管に取付けた。

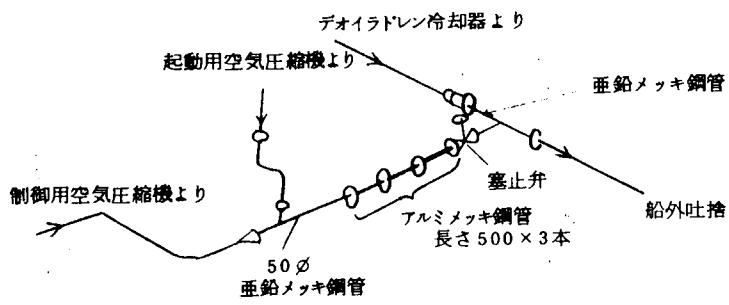


L丸：サニタリーポンプ出口管
に取付けた。

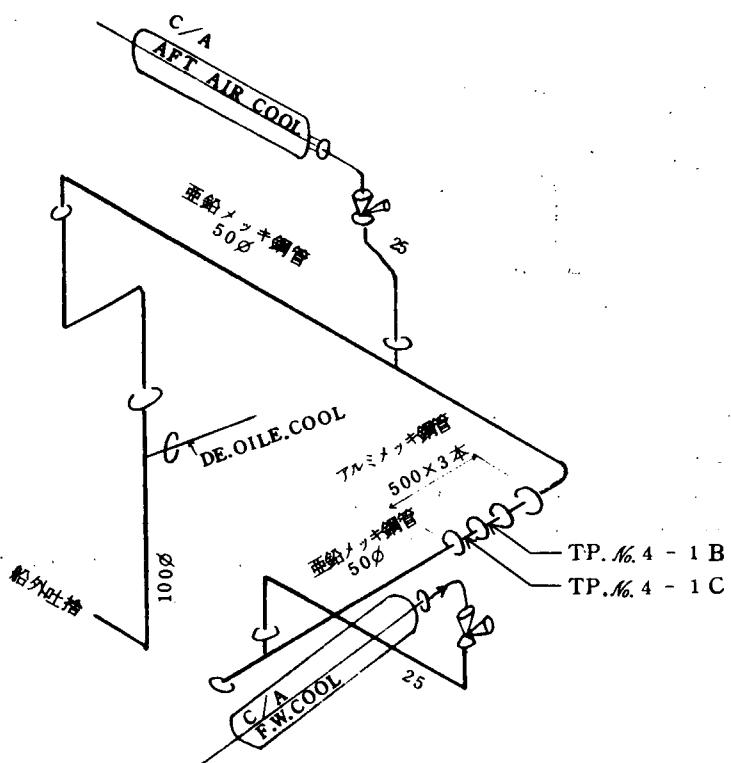


K丸：サニタリーポンプ系に取付けた。

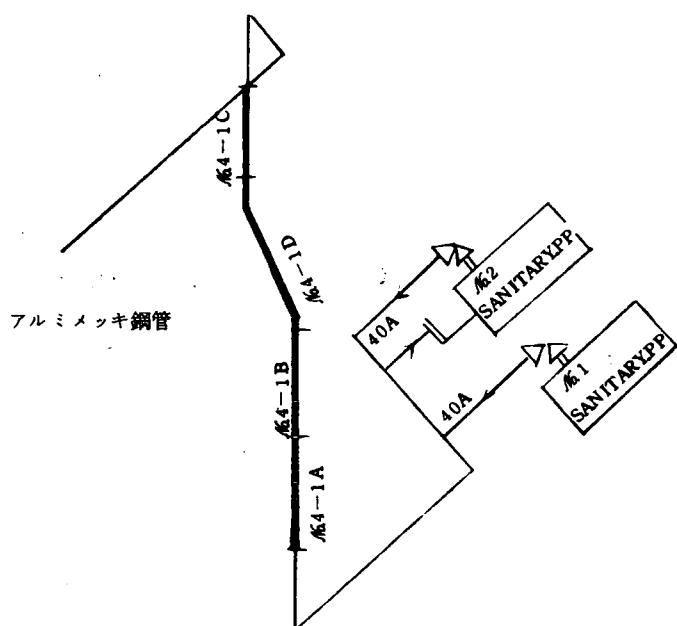
図 2.1.3 海水管系に取付けた試験片の装備状態（アルミニウムプラス管）



M丸：空気圧縮機冷却海水出口管
に取付けた。

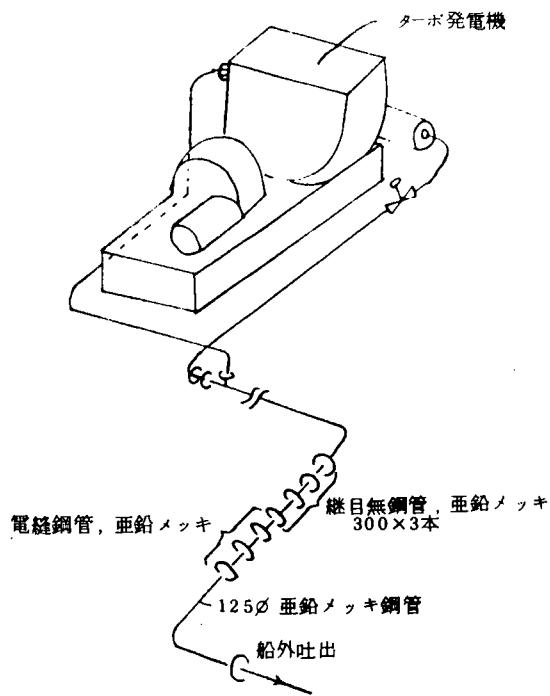


L丸：空気圧縮機冷却海水出口管
に取付けた。

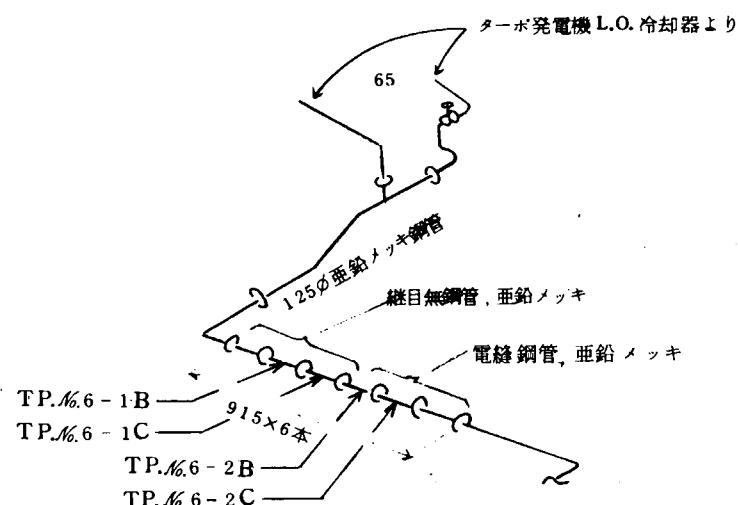


K丸：サニタリーポンプ出口管に
取付けた。

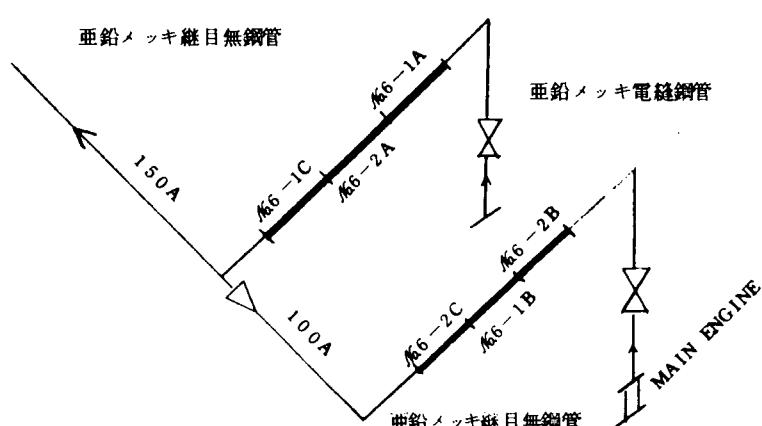
図 2.1.4 海水管系に取付けた試験片の装備状態（アルミメッキ鋼管）



M丸：ターボ発電機冷却海水出口
管に取付けた。



L丸：ターボ発電機L.O. 冷却器
冷却海水出口管に取付けた。



K丸：主機械空気冷却器冷却海水
出口管に取付けた。

図 2.1.5 海水管系に取付けた試験片の装備状態（亜鉛メッキした継目無鋼管、電縫钢管）

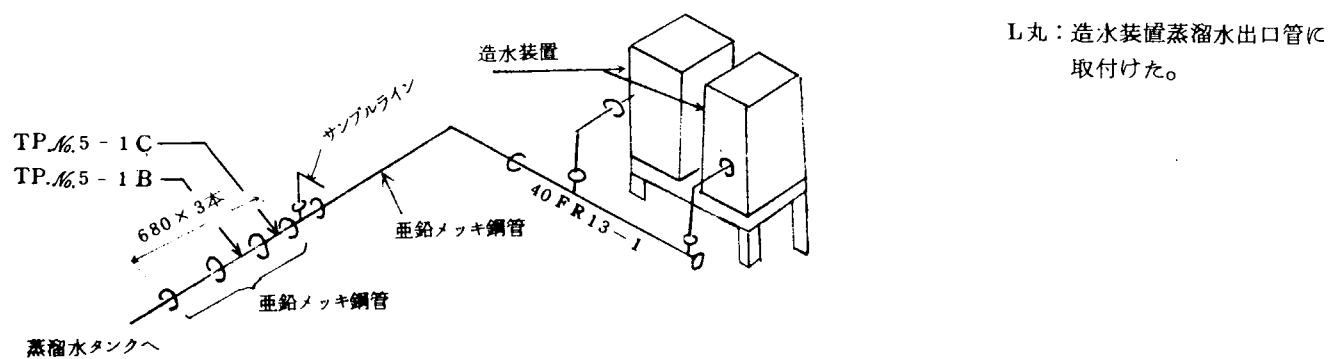
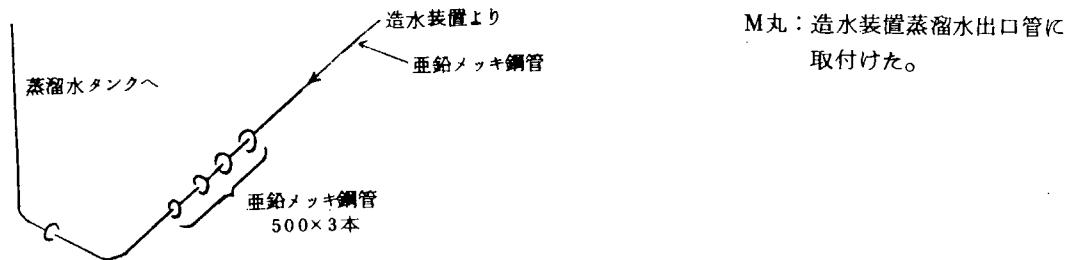
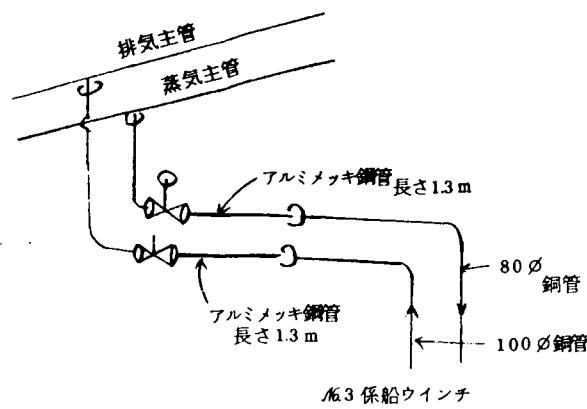
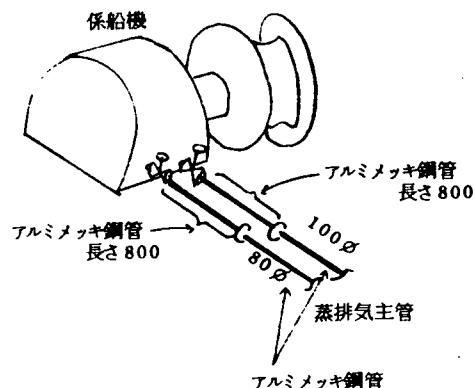


図 2.1.6 蒸溜水管系に取付けた試験片の装備状態（亜鉛メッキ鋼管）



M丸：係船ウインチ蒸排気管に
取付けた。



L丸：係船ウインチ蒸排気管に
取付けた。

図 2.1.7 甲板上蒸排気管系に取付けた試験片の装備状態（アルミメッキ鋼管）

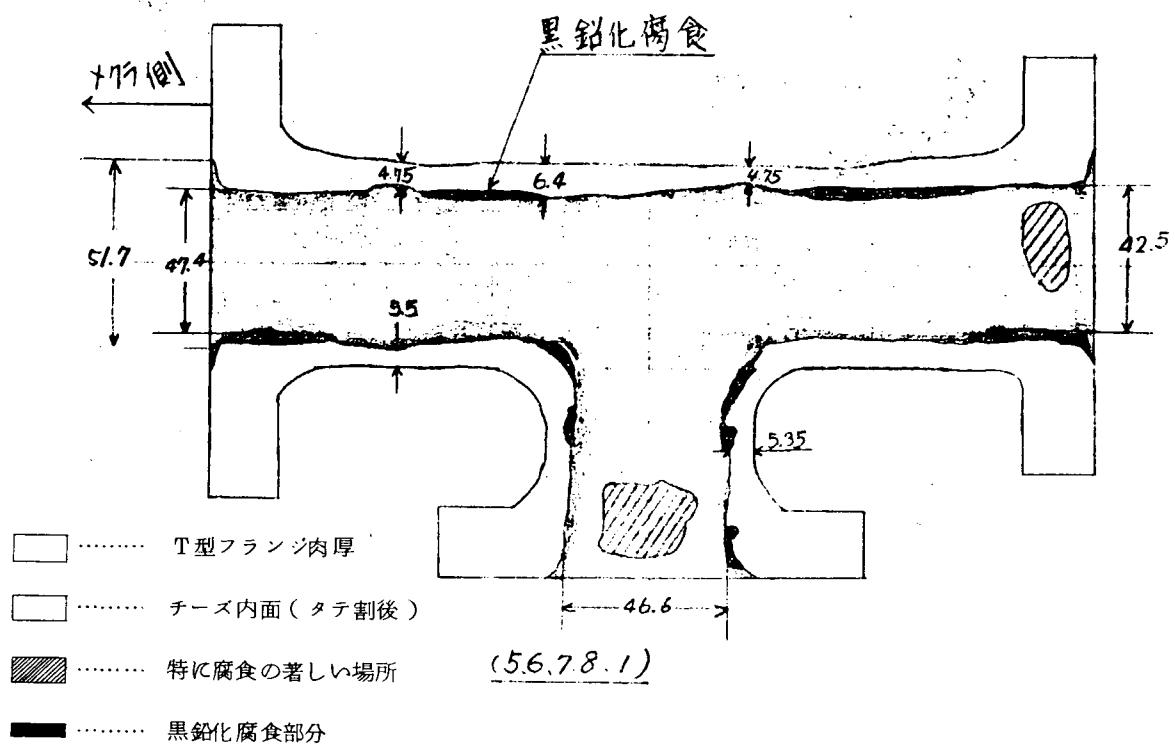
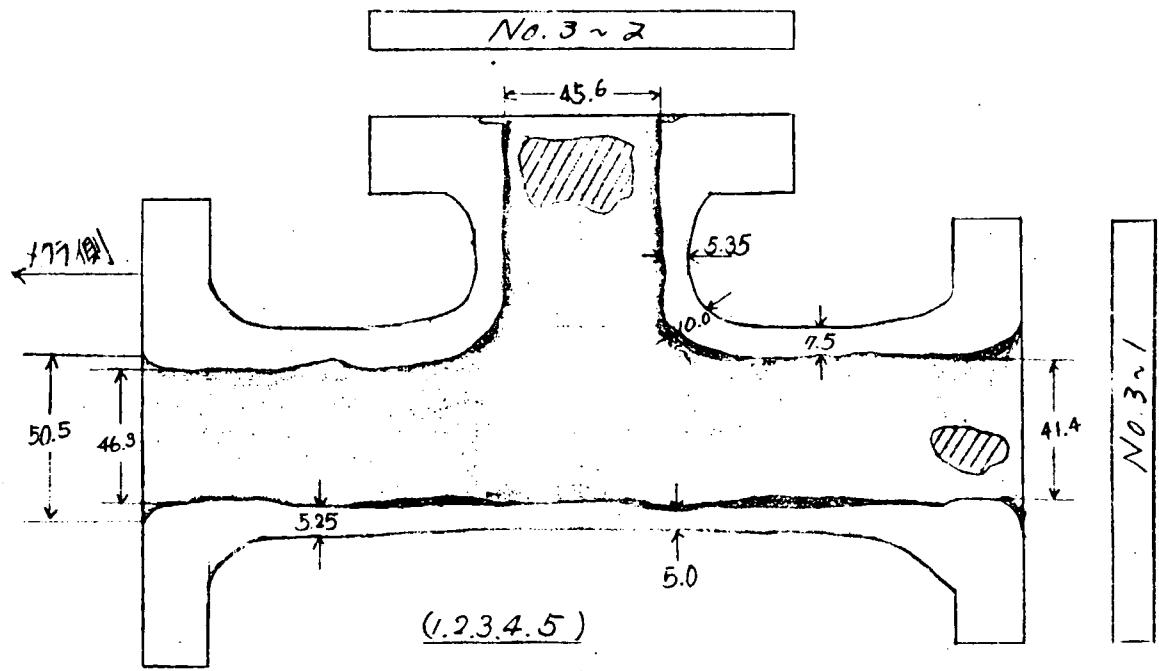
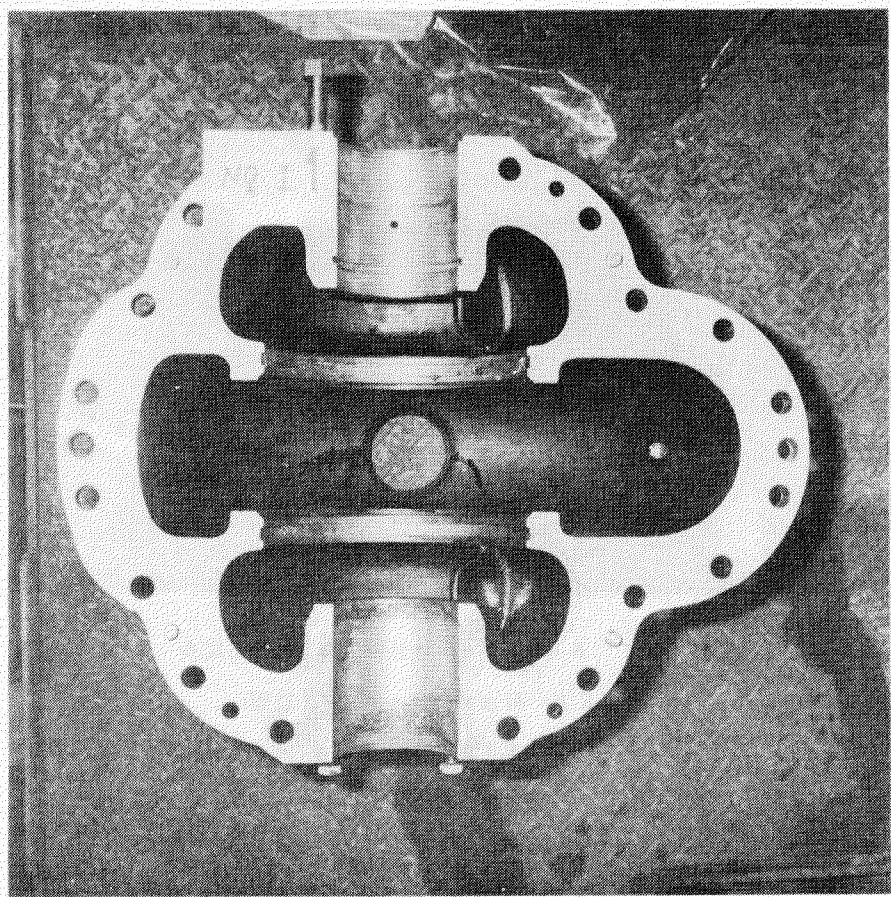
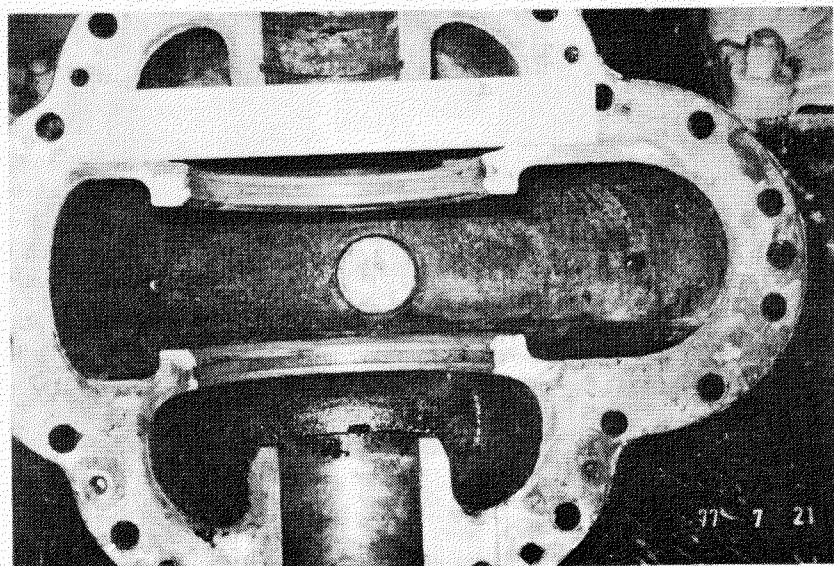


図 2.1.8 K丸铸铁 T ピースの腐食状況



(新造時)



(4ヶ月経過)

写真 2.1.1 M丸 M1 冷却海水ポンプケーシング内面

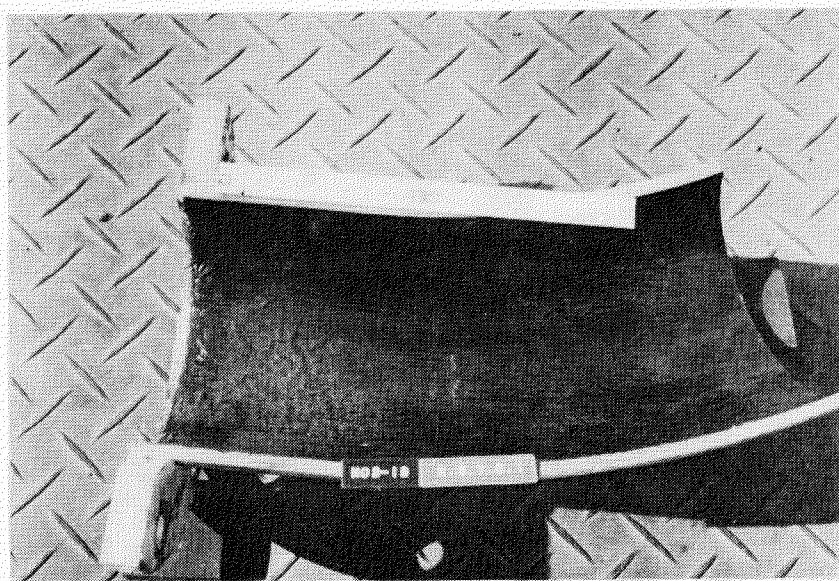


写真 2.1.2 タールエポキシ塗装管の海水による腐食

K丸 海水サービスポンプ出口管

4.8ヶ月経過

塗膜は健在である

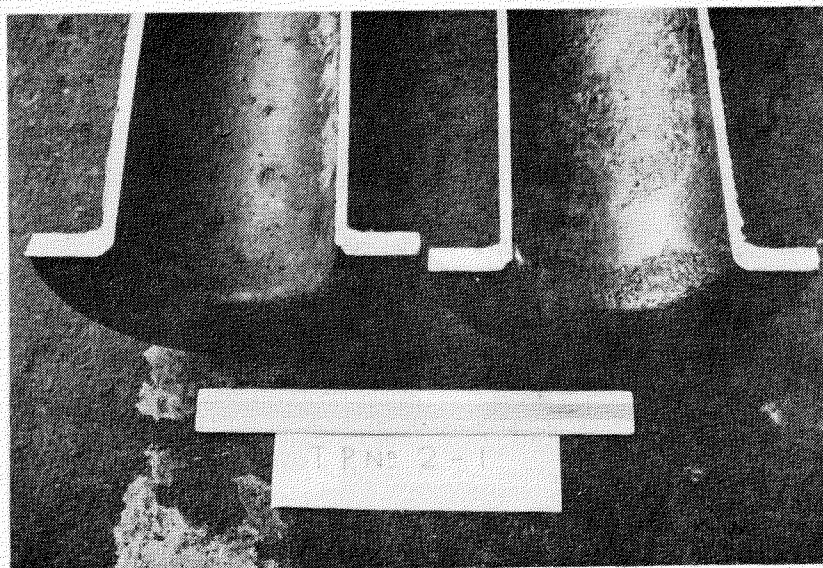
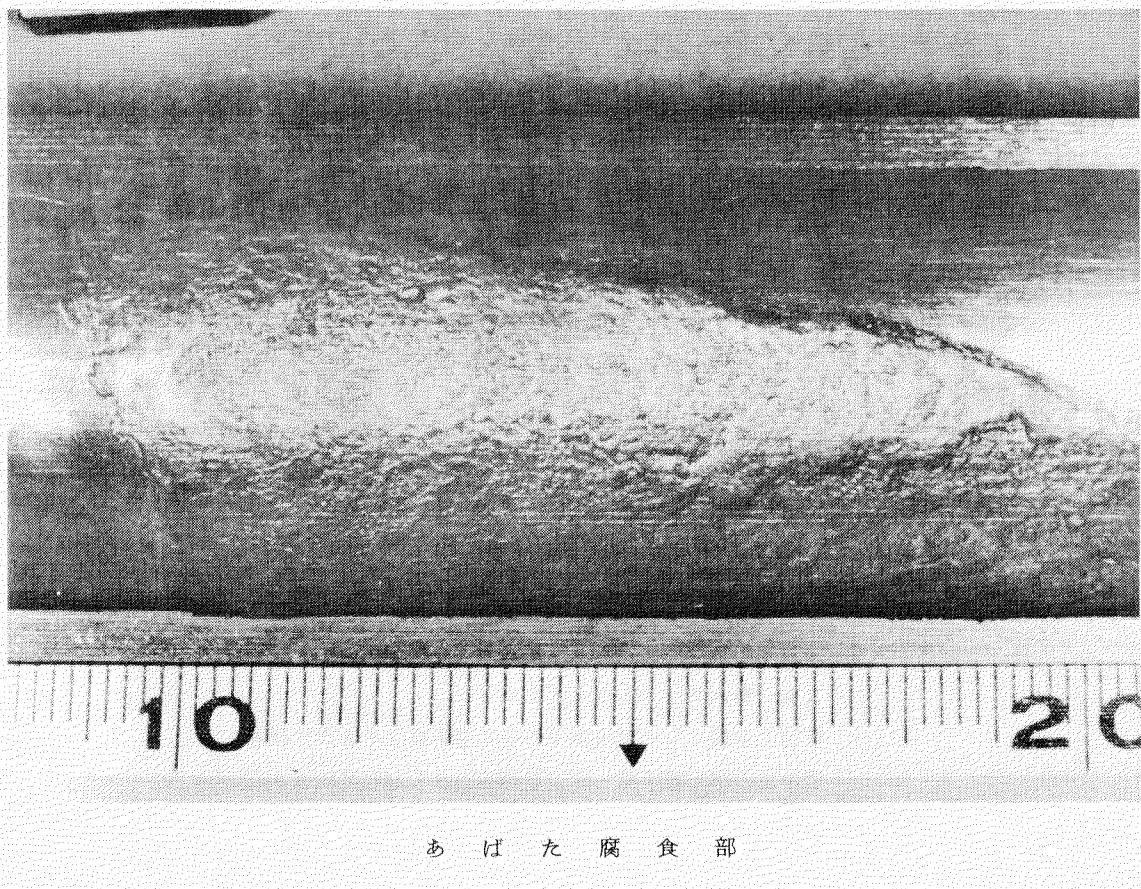


写真 2.1.3 タールエポキシ塗装管の海水による腐食

M丸 海水サービスポンプ出口管

4.2ヶ月経過

あばた腐食が一部に発生している



あ ば た 腐 食 部

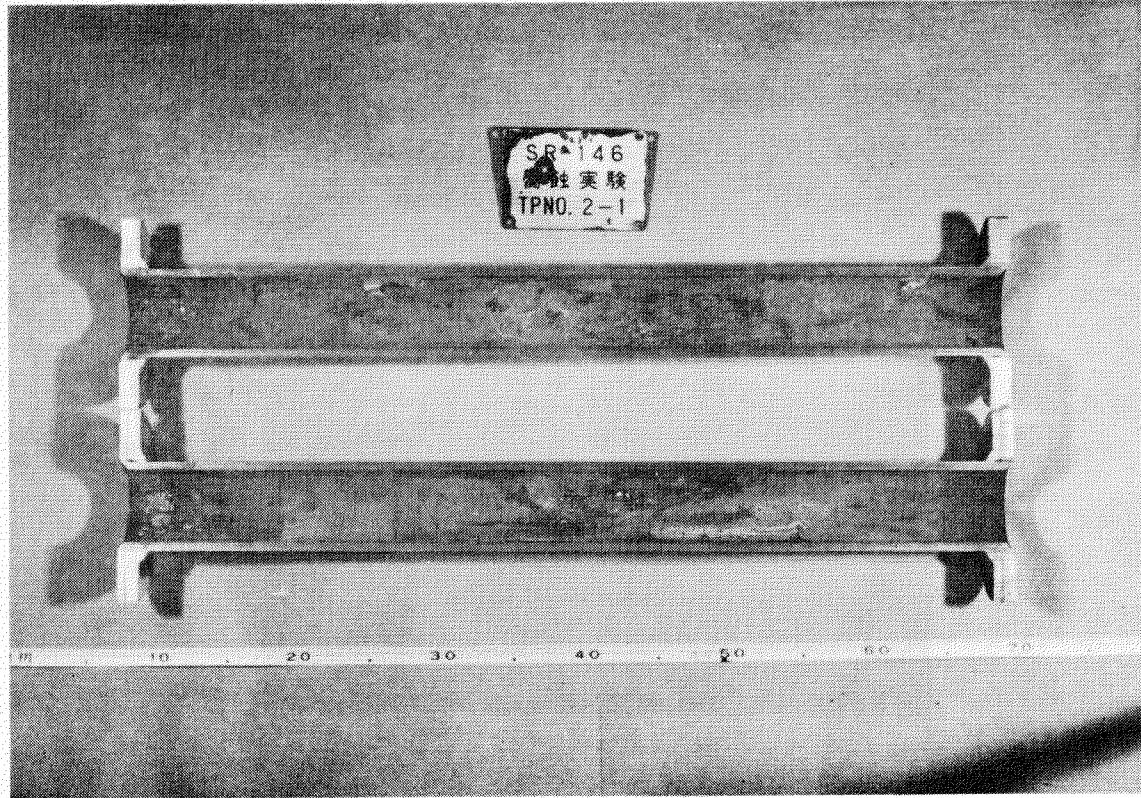


写真 2.1.4 タールエポキシ塗装管の海水による腐食

L丸 海水サニタリポンプ出口管

47ヶ月経過

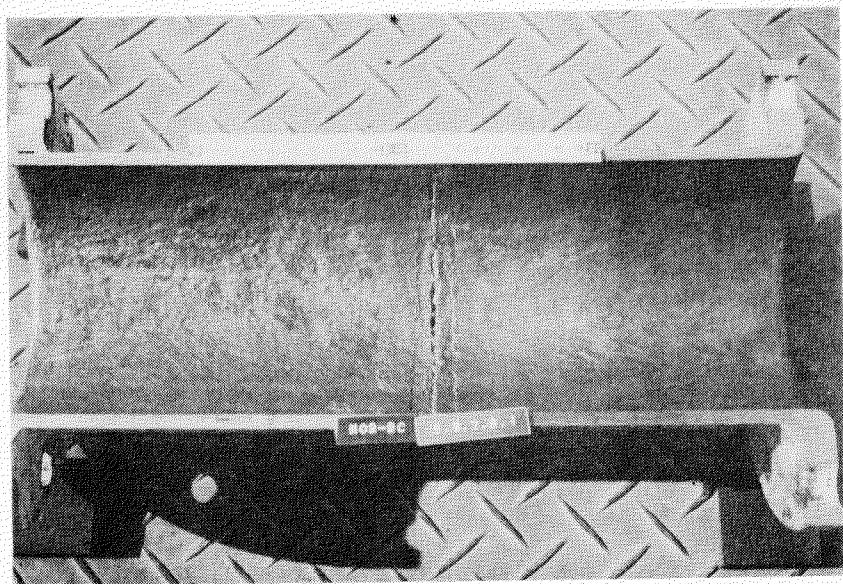


写真 2.1.5 突合せ溶接部の海水による腐食

K丸 海水サービスポンプ出口管

管材：亜鉛メッキ電縫鋼管（中央部溶接）4.8ヶ月経過

管中央の溶接継手部 ビードの中心から左右に約20mm
の巾で集中的に腐食が発生している。
また孔食が散見される。シーム部溝腐食は認められない。

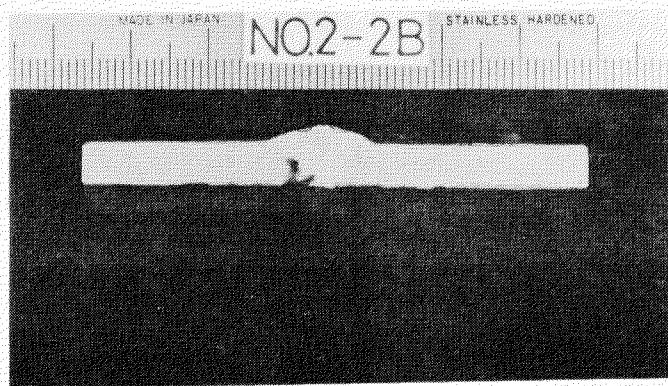


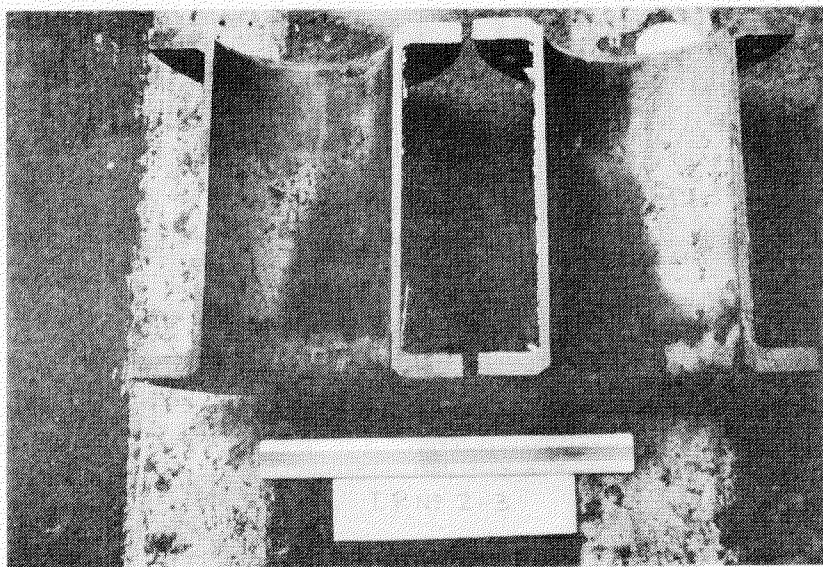
写真 2.1.6 突合せ溶接部の海水による腐食

M丸 海水サービスポンプ出口管系

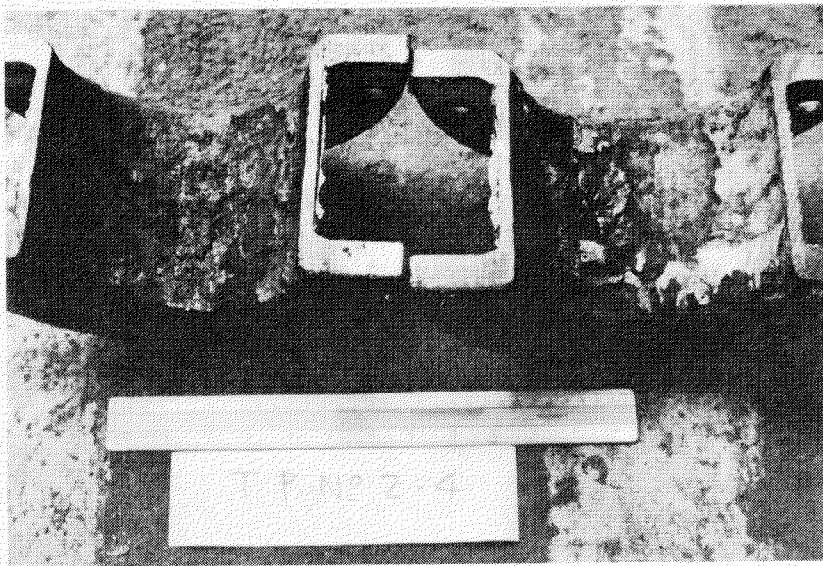
管材：無塗装 電縫鋼管

4.2ヶ月経過

溶接継手部に非常に深い孔食が進行している。



無塗装管の下流に設けた試験片



無塗装管の上流に設けた試験片

写真 2.1.7 亜鉛メッキ鋼管の海水による腐食

M丸 海水サービスポンプ出口管系

4.2 ケ月経過

無塗装管の下流に設けた亜鉛メッキ管はほとんど腐食されていない。

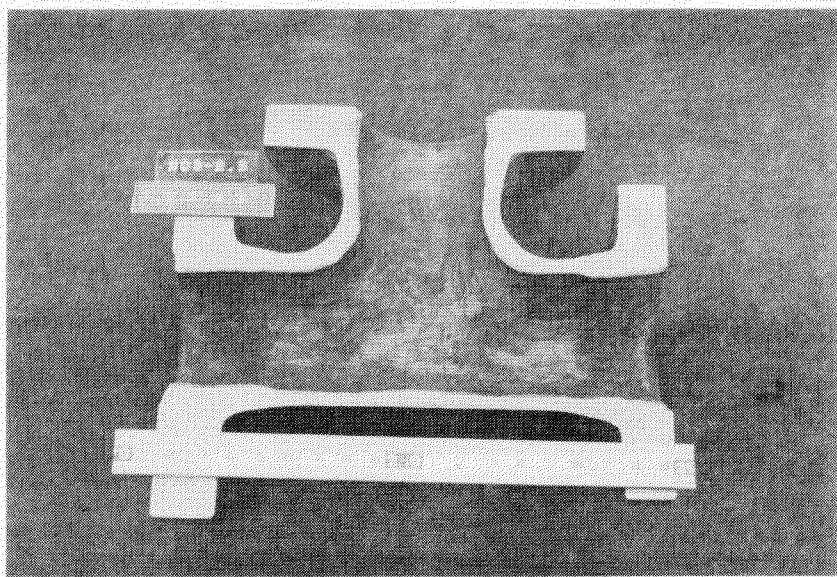


写真 2.1.8 銅合金管試験片と共に装備した鉄鉄ピースの海水による腐食
K丸 海水サニタリー管系
4 8ヶ月経過
黒鉛化腐食がみられ腐食は著しい
詳細は図 2.1.1 参照

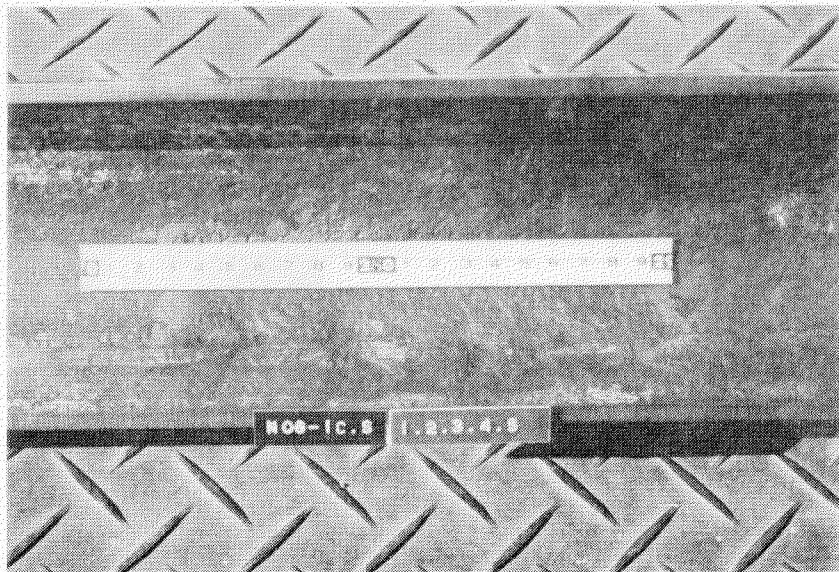
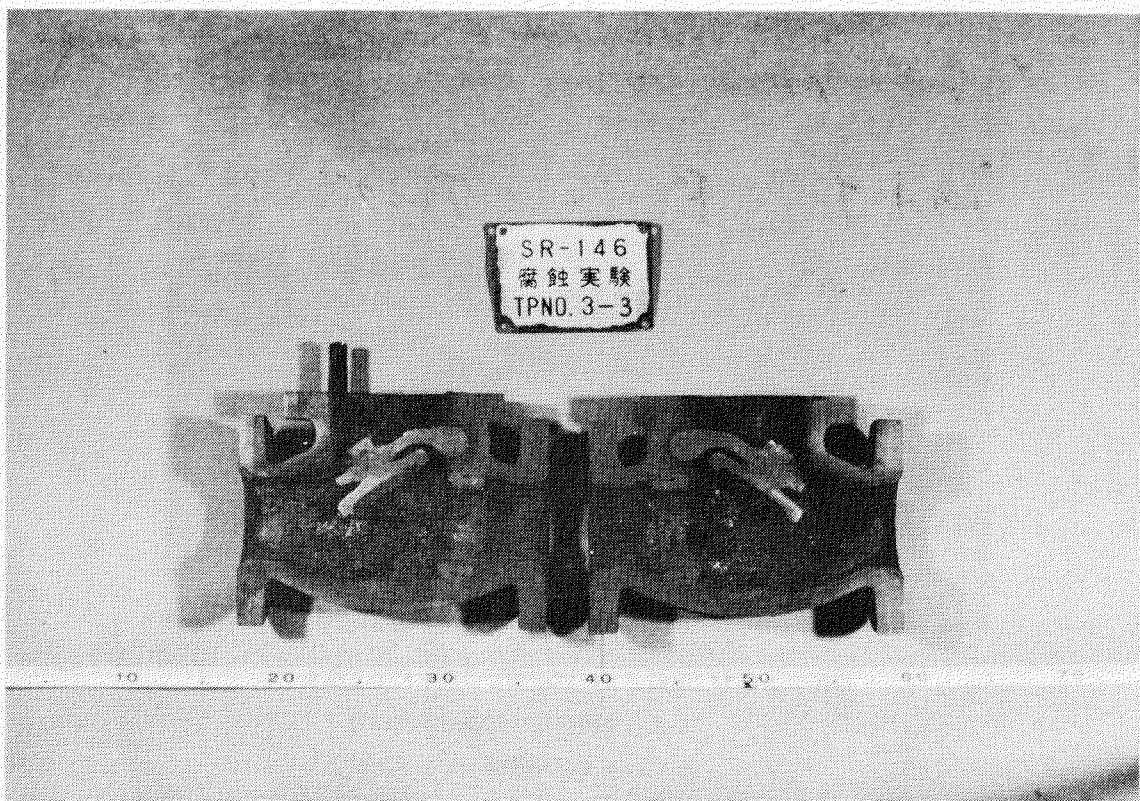
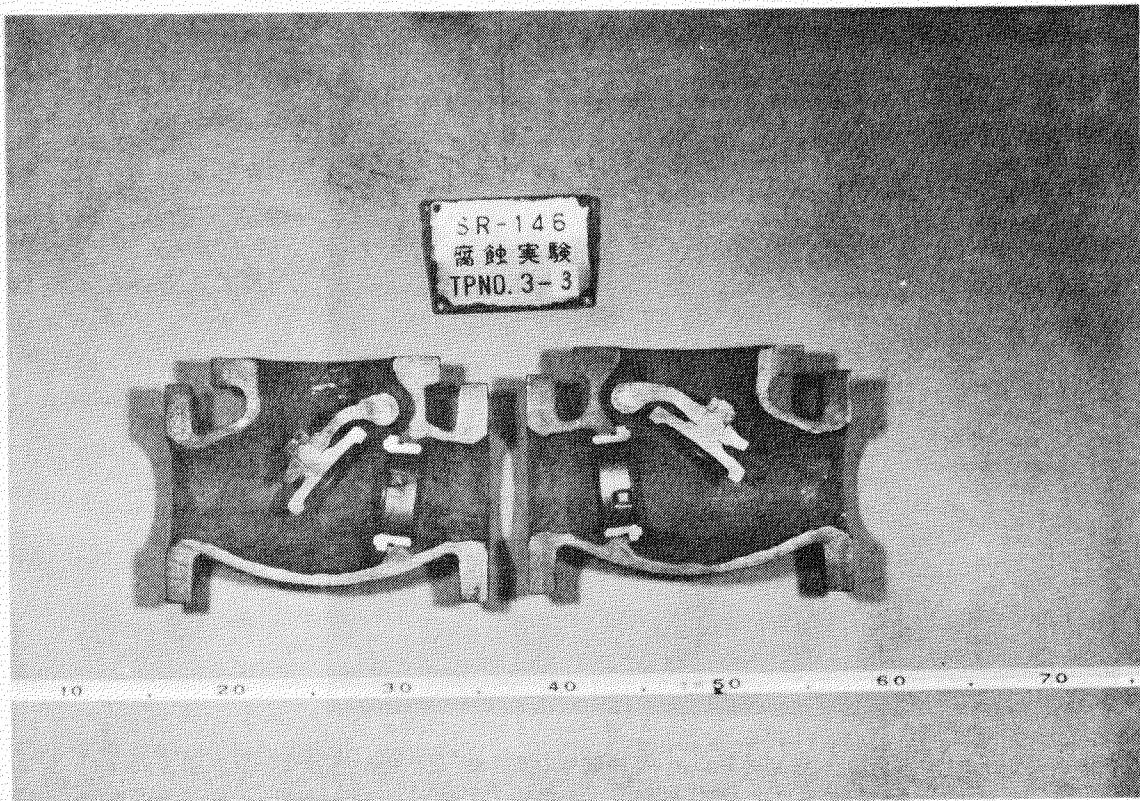


写真 2.1.10 亜鉛メッキ継目無鋼管の海水による腐食
K丸 主機空気冷却器海水出口管
4 8ヶ月経過



(酸 洗 後)



(酸 洗 後)

写真 2.1.9 銅合金管試験片と共に装備した鋳鉄ピースの海水による腐食

L丸 海水サニタリーポンプ出口管 47ヶ月経過

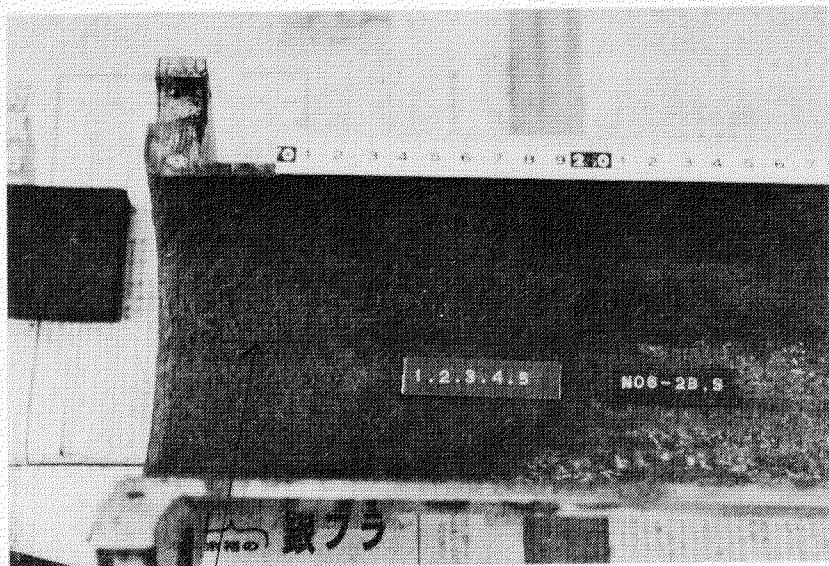


写真 2.1.1.1 亜鉛メッキ電縫鋼管の海水による腐食

K丸 主機空気冷却器海水出口管

4~8ヶ月経過

電縫部溝腐食が見られる。

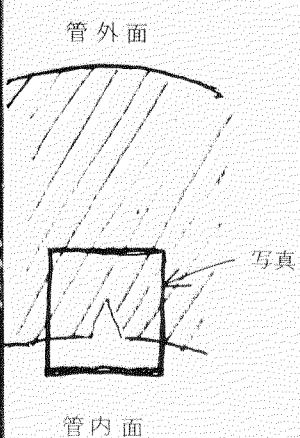
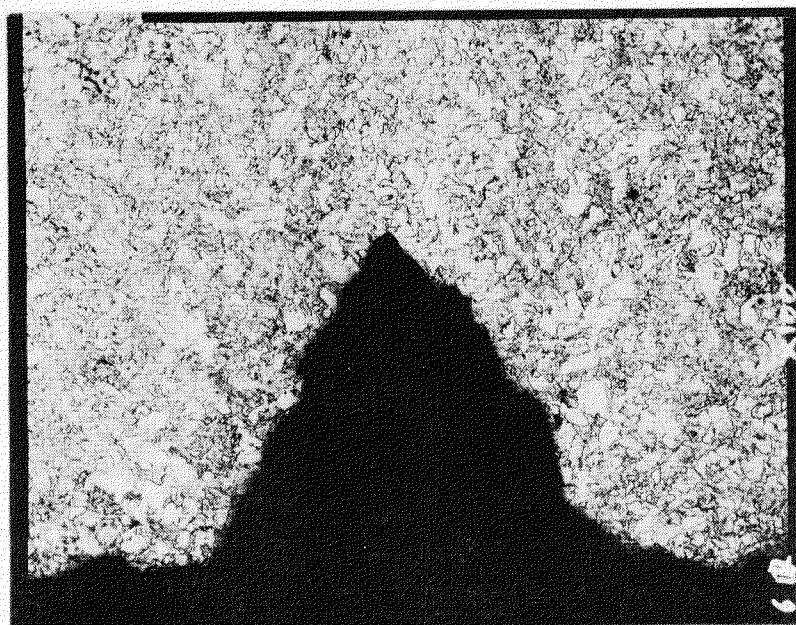


写真 2.1.1.2 電縫鋼管の溝腐食

K丸 主機空気冷却器海水出口管

亜鉛メッキ電縫鋼管シーム部断面の

顕微鏡写真(100倍)

4~8ヶ月経過

2.2 実験室基礎研究

実船における諸管材料の腐食は多くの因子が複雑に作用して生じている。これらの因子としては、流速、温度、異種金属接触、電縫溶接、メッキ膜厚さ、被覆材の欠陥などがあげられる。そこで、海水中における炭素鋼管の腐食速度におよぼすこれらの因子の影響を実験室試験により定量的に把握し、具体的な腐食対策のための基礎的データを提供するために、下記項目について、昭和49年度、昭和50年度および昭和51年度の3ヶ年に亘って調査研究を行なってきた。すなわち

(1) 回転翼車型試験機による実験

- ・ 海水中におけるメッキ鋼管の寿命、異種金属接触腐食および電縫シーム部の腐食におよぼす流速の影響（昭和49年度¹⁾）
- ・ 海水中におけるメッキ鋼管の寿命、異種金属接触腐食および電縫シーム部の腐食におよぼす温度の影響（昭和50年度²⁾）
- ・ 耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性調査（昭和51年度）³⁾

(2) 実管テスト

- ・ 電縫鋼管、鍛接鋼管、亜鉛メッキ鋼管およびアルミメッキ鋼管のベント部およびフランジ部の腐食調査（昭和50年度²⁾および昭和51年度³⁾）
- ・ 無機系および有機系被覆材欠陥部の腐食調査（昭和51年度³⁾）
- ・ 耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性調査（昭和51年度³⁾）

昭和51年度の調査の結果、実管テストにおいては、短時間の試験結果から結論を出すのはむずかしいことが明らかになつたので、昭和52年度も実管テストを継続して行ない最終的な結論を出すことになった。

2.2.1 試験方法

実管テストに用いた海水管腐食試験装置は、すでに昭和50年度の報告書²⁾に述べたように、4系統の試験管ラインとこれに付属した分岐管、給水ポンプおよび30 tonの貯水タンクからなつておる、海水は貯水タンクから給水ポンプ、分岐管を経て試験管ラインに入り、再び貯水タンクにもどす海水循環方式がとられている。海水の汚染および温度上昇を防ぐために、貯水タンクに常時三菱重工業(株)長崎研究所深堀支所の沖合（長崎港外）から自然海水が約10 ton/Hrの速度で供給されている。参考までに海水管腐食試験装置の外観を写真2.2.1に示しておく。

(1) ベント部およびフランジ部接合部の腐食調査

昭和50年度から継続してきた試験であるが、その試験条件は下記のとおりである。すなわち

(1) 供試材：表2.2.1参照

(2) 試験管種類：電縫鋼管、鍛接鋼管、亜鉛メッキ鋼管、アルミメッキ鋼管。

(3) 試験管径および流速：SGP 80 A (流速 1.9 m/sec)

SGP 65 A (流速 2.9 m/sec)

SGP 50 A (流速 4.9 m/sec)

(4) ベント部曲げ角度：45度、90度、180度

(5) ベント部曲げ半径：2D, 5D (D：試験管外径) ただし曲げ角度180度の場合は2Dのみ。

(6) フランジ形状：差込フランジおよび開先フランジ(図2.2.1参照)

(7) フランジの食い違い：0 mm, 2.5 mm(図2.2.1参照)

(8) パッキンのバリ：0 mm, 5 mm(図2.2.1参照)

(9) 試験期間：昭和50年9月1日～昭和52年11月20日(約26.5ヶ月)途中、耐溝状腐食性電縫管取付、タンク清掃、ポンプ故障および修理のため、給水ポンプは約2ヶ月半停止した。

(10) 海水温度：33～10°C

(iv) 肉厚測定器: K R A U T K R A M E R 社製超音波厚み計 DM-1 (プローブ径 10 mm ϕ)

(v) 肉厚測定位置: 図 2.2.2 参照

通水テスト終了後つぎの要領で試験管の腐食状況を調査した。

(i) 肉厚測定 (超音波厚み計)

(ii) 酸洗前腐食生成物付着状況写真撮影 (フランジ部切断, 2分割切断, カラーおよびモノクロ写真)

(iii) 酸洗。3% HCl + 0.6% イビット 1 L 中に 16 時間浸漬後中和, 洗浄, 防錆。

(iv) ブラッシング: 亜鉛メッキ鋼管およびアルミメッキ鋼管。ただし 3% HCl + 0.6% イビット 1 L に 5 分浸漬後
ブラッシングした。

(v) 膜厚測定 (Kett 電磁厚み計)

(vi) 酸洗後腐食状況写真撮影

(vii) 直管部およびフランジ部の断面写真撮影

(viii) メッキ膜付着状況写真撮影

(2) 被覆材欠陥部の腐食調査

昭和 51 年度から継続してきた試験であるが、その試験条件は下記のとおりである。

(1) 被覆材の種類: 亜鉛メッキ, アルミメッキ, タールエポキシ塗装, ゴム系ライニング, 樹脂系ライニング

(2) 試験管: 65A × SCH 40 × 680 L (流速 2.9 m/sec)

(3) 欠陥の製作要領: 表 2.2.2 参照, 欠陥の位置は流入口から約 50 mm の位置 (水平管下側) であった。

(4) 試験期間: 昭和 51 年 7 月 12 日～昭和 52 年 11 月 20 日 (約 16.5 ヶ月), 途中ポンプ故障のため給
水ポンプは約 1 ヶ月半停止した。

通水テスト終了後欠陥部の写真撮影および断面写真撮影によって、欠陥部の腐食状況を調査した。

(3) 耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性調査

昭和 51 年度から継続してきた試験で、日本钢管㈱, 住友金属工業㈱, 川崎製鉄㈱および新日本製鉄㈱から提供し
て頂いた 8 種の耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性を調査した。その試験条件は下記のとおりである。

(1) 供試材: 表 2.2.3 参照

(2) 試験管種類: 耐溝状腐食性電縫鋼管 8 種, 比較材として鍛接鋼管および普通電縫鋼管。試験管ラインへの挿入方
法は昭和 51 年度報告書参照³⁾

(3) 試験管の管径および流速: 65A SCH 40 (流速 2.9 m/sec)

(4) ベンド部曲げ角度: 45 度, 90 度, 180 度

(5) ベンド部曲げ半径: 2D, 5D (D; 試験管外径)。ただし曲げ角度 180 度の場合は 2D のみ。

(6) フランジの形状: 差込フランジおよび開先フランジ

(7) フランジの食い違い: 0 mm, 2.5 mm

(8) パッキンのバリ: 0 mm, 5 mm

(9) 試験期間: 昭和 51 年 7 月 12 日～昭和 52 年 11 月 20 日 (約 16.5 ヶ月), 途中ポンプ故障および修理等
のため、給水ポンプは約 1 ヶ月半停止した。

(10) 海水温度: 33～10 ℃

(11) 肉厚測定器: K R A U T K R A M E R 社製超音波厚み計 DM-1 (プローブ径 10 mm ϕ)

(12) 肉厚測定位置: 図 2.2.2 参照。

通水テスト終了後つぎの要領で試験管の腐食状況を調査した。

(i) 肉厚測定 (超音波厚み計)

(ii) 酸洗前腐食生成物付着状況写真撮影 (フランジ部切断, 2分割切断, カラーおよびモノクロ写真)

- (iii) 酸洗。3% HCl + 0.6% イビット 1 L 中に 16 時間浸漬後中和、洗净、防錆。
- (iv) プラッシング
- (v) 酸洗後腐食状況写真撮影
- (vi) 電縫部およびフランジ部の断面写真撮影

2.2.2 試験結果

(1) ベンド部およびフランジ部の腐食調査

(i) 普通電縫鋼管および鍛接鋼管について

普通電縫鋼管および鍛接鋼管の腐生成物付着状況を写真 2.2.2 に示すが、パイプ内面は全面に亘って 1~5 mm 厚さの赤褐色の腐生成物で覆われていた。写真 2.2.3 に酸洗後の钢管内面の状況を示すが、電縫钢管のシーム部は明らかに溝状に腐食していた。

超音波厚さ計による肉厚減測定結果を表 2.2.4、表 2.2.5 および図 2.2.3 に示す。これらの図表から、つぎのこととが明らかである。すなわち、

- (1) 電縫钢管と鍛接钢管の平均肉厚減の差は小さく、平均腐食速度は 0.25 mm/year 程度である。
- (2) 曲げ半径が 2D~5D あれば、曲げ角度の平均肉厚減におよぼす影響は小さい。
- (3) 流速が 1.9 m/sec ~ 4.9 m/sec (管径 80 A ~ 50 A) の範囲にあれば、流速の平均肉厚減におよぼす影響は小さい。
- (4) フランジ近傍の平均肉厚減は他の部分よりやゝ大きい傾向が認められ、フランジ近傍の平均腐食速度は 0.30 mm/year 程度である。

一方、諸管系統で問題になる腐食は平均肉厚減で表示される全面腐食量より局部的な腐食である。溶接钢管の場合、シーム部の溝腐食とフランジ近傍の局部的な腐食が問題になる。

シーム部の断面写真を写真 2.2.4 に、フランジ近傍の断面写真を写真 2.2.5 に示す。

シーム部の断面写真から求めた溝腐食深さを表 2.2.6 および表 2.2.7 に、ポイントマイクロメーターで求めたフランジ近傍の最大腐食量を表 2.2.8 に示す。これらの結果をまとめて図 2.2.4、図 2.2.5 および表 2.2.9 に示す。これらの図表からつぎのこととが明らかである。すなわち、

- (1) 電縫钢管の溝腐食深さは 1.87 mm/year に達するものもあり、電縫钢管の場合、フランジ近傍の局部腐食よりも溝腐食の方が激しい。
- (2) 電縫钢管の溝腐食深さは、直管-曲り部-フランジ部の順に大きくなっている。
- (3) 鍛接钢管のシーム部にも 1.0 mm/year 程度の溝腐食が生じることがあるが、鍛接钢管の場合、フランジ近傍の局部腐食速度も 0.8 mm/year に達する。
- (4) フランジシール溶接部の腐食は差込フランジの方が、開先フランジよりも激しい傾向がある。(写真 2.2.5 参照)

(ii) 亜鉛メッキ钢管およびアルミメッキ钢管について

亜鉛メッキ钢管およびアルミメッキ钢管の腐生成物付着状況を写真 2.2.6 および写真 2.2.7 に示す。管内面は両者とも薄い赤褐色の腐生成物で覆われていたが、アルミメッキ钢管の場合、白色のスケール(アルミニウム水酸化物と思われる)が局部的にふくれた状態になっていた。亜鉛メッキ膜は全ての管についてまだ残っていた。

超音波厚さ計による肉厚減測定結果は表 2.2.4 および表 2.2.5 に、KETT 式電磁膜厚計による膜厚減測定結果は表 2.2.10 に示されているが、これらの結果からつぎのこととが明らかである。すなわち、

- (1) 亜鉛メッキ钢管の場合、亜鉛メッキ膜減少速度は最大で 72 μ /26.5 ヶ月 (33 μ /year) であった。
- (2) アルミメッキ膜は剝離し易く、アルミメッキ膜厚減は亜鉛メッキ膜厚減より大きかった。

他方、アルミメッキ钢管の場合、写真 2.2.8 に示すように、アルミメッキ膜が完全に消失し、母地そのものが貢

通しているものもあった。

(2) 被覆材欠陥部の腐食調査

被覆材欠陥部の表面状況を写真 2.2.9 に、欠陥部の観察結果を表 2.2.11 に示す。通水テスト後切断した欠陥部の断面状況を写真 2.2.10 に示す。

これらの結果および前項の結果からつぎのことが明らかである。すなわち、

- (イ) 亜鉛メッキの場合、外面溶接等の欠陥が生じていても、その欠陥部が集中的に腐食することはない。
- (ロ) 通常のアルマーラー加工の場合、欠陥があればその部分が集中的に腐食する恐れがある。
- (ハ) タールエポキシ塗装の場合、欠陥部が腐食するおそれがある。
- (ヘ) ゴム系ライニングおよび樹脂系ライニングの場合、外面溶接等の欠陥が生じてもその欠陥部が集中的に腐食することはない。

(3) 耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性調査

8種の耐溝状腐食性電縫鋼管、普通電縫鋼管および鍛接鋼管の腐食生成物付着状況を写真 2.2.11 に示すが、鋼種間の付着状況の差を見出すことは出来なかった。

超音波厚さ計による肉厚減測定結果を表 2.2.12 および表 2.2.13 に、平均腐食速度を図 2.2.6 に示す。これらの結果から、B 1 鋼（熱処理された炭素鋼）を除き、平均腐食速度は 0.3 mm/year であることがわかる。

一方、前述したように諸管系統で問題になる腐食は平均肉厚減で表示される全面腐食量よりも局部的な腐食であり、耐溝状腐食性電縫鋼管の場合もそれはシーム部の溝腐食とフランジ近傍の局部的な腐食である。

写真 2.2.12 に酸洗後のフランジ近傍の腐食状況を、写真 2.2.13 に直管内面の状況を、写真 2.2.14 にシーム部の断面写真を、写真 2.2.15 にフランジ近傍の断面写真を示す。

シーム部の断面写真から求めた溝腐食深さおよびポイントマイクロメータで求めたフランジ近傍の最大腐食量をそれぞれ表 2.2.14、表 2.2.15 および図 2.2.7、図 2.2.8 に、これらの結果をまとめて表 2.2.16 および表 2.2.17 に示す。

これらの結果からつぎのことが明らかである。

- (イ) シーム部の溝腐食深さが鍛接鋼管のそれと同等もしくは少ない鋼種は A 2 (0.2 Cu - Low S), A 3 (Low S + 0.01 REM), A 4 (0.2 Cu - 0.05 Ti) および B 4 (Low S) の 4 鋼種である。
- (ロ) これら 4 鋼種の最大腐食速度は 1.38 ~ 0.21 mm/year の間にある。

2.2.3 考 察

海水ライン系統の種々な管の腐食は多くの因子によって生じているが、本試験研究においては、電縫鋼管、鍛接鋼管、亜鉛メッキ鋼管、アルミメッキ鋼管および 8 種の耐食性鋼管について実際にパイプラインを作成し、3 ケ年に亘って実管テストを行なってきた。また現在すでに一部の船舶で使用されている被覆材に欠陥が生じた場合、その欠陥部の腐食がどのように進行するかについての調査も行なった。

以下に各鋼種の腐食挙動について検討を加える。

(1) 電縫鋼管

前述したように、電縫鋼管の腐食で問題になるのはシーム部の溝腐食である。この溝腐食の進行速度は本実管テストにおいても 1.87 mm/year にも達している。また熱処理された電縫鋼管 (B 1) は 16.5 ヶ月の通水テストでシーム部が数ヶ所貫通しており、この時の溝腐食速度は 3.85 mm/year にも達している。この溝腐食がどのような機構で生じるのかについて (1) 溶接部と母材部との組織の差 (2) 溶接部における非金属介在物の濃縮 (MnS の周囲あるいは MnS 自身がマトリックスに較べて速やかに溶解する) によるものだとする説もある⁴⁾ が、現在この腐食の原因が明確にされている訳ではない。

写真 2.2.2 から明らかなように、この溝腐食はかなり厚い腐食生成物で覆われていてもシーム部に選択的に生じて

おり、また熱処理によってもこの溝腐食を防止できずかえって促進する可能性もあることは注目する必要がある。

この溝腐食の進行速度は、前年度の回転翼車型試験機による試験結果(40°C海水、6ヶ月)では、流速の増大につれて大きくなっていたが、本実管テストでは流速の影響、フランジの形状の影響を見出すことはできなかった。これは、厚い腐食生成物で覆われていることおよび温度が低いことによると推定されるが、明確なことはわからない。

フランジ近傍の局部腐食および曲り等の腐食におよぼす影響については鍛接鋼管の項で検討を加える。

(2) 鍛接鋼管

鍛接鋼管においても、シーム部の溝腐食は写真2.2.4に示したように生じるが、その進行速度は電縫鋼管に比較すれば小さい。鍛接鋼管の場合は、表2.2.8に示したように、フランジ近傍の局部腐食が問題になる。この局部腐食速度は約0.8mm/year程度(最大0.92mm/year、表2.2.16参照)であるが、平均腐食速度約0.3mm/yearから較べると3倍程度の大きな値となっている。鍛接鋼管を裸のまま使用する場合、この局部腐食速度を小さくすることが大きな課題であるが、前述したようにフランジ形状※、バッキンばり、食い違い等を変えて局部腐食速度を著しく小さくすることは出来ないようである。したがって、現状では鍛接鋼管を裸のまま使用する場合、フランジ近傍は約0.8mm/year程度(最大0.92mm/year)の速度で腐食が進行すると考えた方が良いようである。

曲げ半径が2D～5D、流速が1.9m/sec～4.9m/sec(管径80A～50A)の場合、曲げ角度および流速の腐食速度に及ぼす影響を明確にすることは出来なかった。しかしながら写真2.2.5から明らかのように、曲げ部および直管部においてもフランジ近傍部とほぼ同様な局部腐食が認められ、その腐食速度もフランジ近傍部と同じ約0.8mm/year程度と考えられる。

なお、平均腐食速度におよぼす流速、フランジ形状、曲げ角度等の影響が小さいのは、厚い腐食生成物が付着しているためと考えられる。(図2.2.9参照)

(3) 亜鉛メッキ鋼管

裸の炭素鋼管の防食方法としての亜鉛メッキは、本実管テストの結果では、有効であることを示している。亜鉛メッキの膜減少速度は本実管テストでは最大でも33μ/yearであり、昭和49年度の回転翼車型試験機による試験結果(約25μ/3months)と較べて非常に小さな値となっている。

この原因として、海水を一部循環しているため、鉄の水酸化物が亜鉛メッキ表面に付着していること。試験期間が長期になったため、腐食速度が低下したこと等が考えられる。

一方、亜鉛メッキ膜厚減に対して、ISOのTechnical Committee ISO/TC 8 "Ship-building"⁵⁾は図2.2.10に示すグラフを示しているが、本実管テストおよび回転翼車型腐食試験結果からみて余りにも大きすぎるようである。

他方、公表された亜鉛メッキ膜減少速度⁶⁾は10～25μ/yearなので、本実管テストの結果はほぼ妥当のようである。

従って、亜鉛メッキ膜(膜厚100μ、表2.2.18参照)の寿命は本実管テストのような条件下では3～4年と考えるのが妥当のようである。

(4) アルミメッキ鋼管

写真2.2.15に示すように、アルミメッキ膜が完全に密着している部分ではすぐれた耐食性を示したが、部分的にメッキ膜の剥離が生じ、その部分が集中的に腐食する現象が生じた(表2.2.19参照)。

本実管テストに用いたアルミメッキ浴は甲板上蒸排気管用のAl-Si系の浴であったことによるのかもしれないが、アルミメッキ材の耐海水性は良くないという報告⁷⁾もあるので、アルミメッキの前処理、メッキ浴への鉄などの不純物の侵入等について今後検討を要する。

注)※ フランジシール溶接部の腐食量については定量的な値を出すことは出来なかつたが、写真2.2.5から明らかのように、開先フランジの方が差込フランジより望ましいようである。

(5) 耐溝状腐食性電縫鋼管

シーム部の溝腐食深さが、鍛接鋼管と同等かもしくは少ない鋼種は A 2 (0.2 Cu - Low S 系), A 3 (Low S + 0.01 REM 系), A 4 (0.2 Cu - 0.05 Ti 系) および B 4 (Low S 系)^{*} の 4 鋼種であった。これらの鋼種の溝腐食深さは 0.87 ~ 0.11 mm/year であったが、フランジ近傍の局部腐食速度は 1.38 ~ 0.21 mm/year であった。

従ってこれらの 4 鋼種は溝腐食に対してはかなりの耐食性を有する材料であるが、フランジ近傍の局部腐食に対しては、鍛接鋼管がかかえているのと同じ問題を有しているようである。

鍛接鋼管は大径管や肉厚の厚い管の継手性能に問題を有しているようであるが、これらの 4 鋼種は熱処理を必要とすること、および大量に使用されないとコスト高になること等の問題があるようである。

(6) 被覆材欠陥部

前述したように、外面溶接等によって欠陥が生じた場合、欠陥部が集中的に腐食しない被覆材は亜鉛メッキ、ゴム系ライニングおよび樹脂系ライニングであった。亜鉛メッキの場合、欠陥の大きさが小さい場合はまわりの亜鉛メッキ膜によって電気化学的に防食されるが、ゴム系ライニングや樹脂系ライニングではライニングそのものの電気化学的な防食効果は期待できないので、欠陥が大きい時は裸の鋼管とは同じような腐食挙動をとるものと思われる。

2.2.4 まとめ

昭和 52 年度の実管テストにおいては、昭和 51 年度にひきつづき、

- (1) ベンド部およびフランジ接合部の腐食(試験期間 26.5 ヶ月)
- (2) 被覆材欠陥部の腐食(試験期間 16.5 ヶ月)
- (3) 耐溝状腐食性電縫鋼管の腐食(試験期間 16.5 ヶ月)

の調査を行なった。その結果つぎのこととが明らかになった。すなわち、

- (1) 電縫鋼管の溝腐食深さは 1.87 mm/year に達し、熱処理条件によってはこの速度は更に大きくなることがある。
- (2) 鍛接鋼管のシーム部にも 1.0 mm/year 程度の溝腐食が生じることがあるが、フランジ近傍の局部腐食量も 0.8 mm/year (最大 0.92 mm/year) に達する。
- (3) アルミメッキ鋼管の場合、局部的な腐食が生じることがあるが、亜鉛メッキの防食効果は有効で、亜鉛メッキ鋼管のメッキ膜(膜厚 100 μ)の消耗寿命は 3 ~ 4 年と考えられる。
- (4) 耐溝状腐食性電縫鋼管 8 種のうち、鍛接管と同等かそれ以上の耐溝状腐食性を示した鋼種は A 2 (0.2 Cu - Low S 系), A 3 (Low S + 0.01 REM 系), A 4 (0.2 Cu + 0.05 Ti 系) および B 4 (Low S 系) の 4 種であった。これらの鋼種のフランジ近傍の局部腐食量は 1.38 ~ 0.21 mm/year であった。
- (5) 外面溶接等の欠陥があった場合、欠陥部が集中的に腐食しない被覆材は亜鉛メッキ、ゴム系ライニングおよび樹脂系ライニングであった。

2.2.5 参考文献

- 1) 日本造船研究資料 M228
- 2) ibid M243
- 3) ibid M263
- 4) 例えば、小若、長野：金属材料 Vol. 17, M7, 48 (1977)
- 5) ISO/TC 8/SC 5 : " Sea Water Directives for Reducing Corrosion " (Nov. 1975)
- 6) L. L. Shreir : Corrosion Vol. 2 14:36 (1976) Newness-Butterworths
- 7) J. C. Hudson et al : J. I. S. I. Vol. 154, 229 (1946)

注)※ B 2 と B 4 は同じ Low S 系であるが、B 2 には 1.27 mm/year の溝状腐食が認められた。

表 2.2.1 供 試 材 (パイプ)

供 試 材	製 作 要 領	製 作 場 所
電 縫 鋼 管	SGP-80A-EG	日本パイプ 株
	SGP-65A-EG	
	SGP-50A-EG	
鍛 接 鋼 管	SGP-80A-B	住友金属工業 株
	SGP-65A-B	
	SGP-50A-B	
アルミメッキ管	素 材：電縫鋼管 メッキ方法：溶融アルミメッキ	滲透工業 株
亜鉛メッキ管	素 材：電縫鋼管 メッキ方法：溶融亜鉛メッキ	有田工業 株

表 2.2.2 被覆材欠陥部の製作要領

被覆の種類	欠陥の種類	管外面溶接肉盛	溶接後補修	人工切傷	人工欠陥
Zn メッキ (目標膜厚 100 μ)			<ul style="list-style-type: none"> メッシュキズ損部をワイヤブラシで清掃後、シンクリッヂペイント2回塗り。 		
Aℓ メッキ (目標膜厚 100 μ)	溶接条件	<p>溶接棒：D 4316 3.2φ 溶接電流：120A 溶接速度：170mm/min</p>	<ul style="list-style-type: none"> メッシュキズ損部をワイヤブラシで清掃後、ウレタン塗料(レタンGPブライマ)(関西ペイント)を4時間間隔、5回塗り。 膜厚：200～230μ 		
タルエボキシ塗料 [ビューラック 203 CF(免)] 〔田工業〕2回塗装 (目標膜厚 250 μ)			<ul style="list-style-type: none"> ワイヤブラシによる下地処理後初期塗料と同一塗料を所定膜厚まで刷毛塗り。 (2回) 	<ul style="list-style-type: none"> 傷の深さ：0.25～0.27mm 使用刃物 カッターナイフ 	
ネオフレンライニング (目標膜厚 1.5 mm)			<ul style="list-style-type: none"> エボキシ塗装接合面 ライニング材 	<p>△刃面角：13～16° △万物のかたさ：870～890 HV</p>	
ポリエチレンライニング (目標膜厚 1 mm)	溶接条件	<p>溶接棒：D 4316 3.2φ 溶接電流：120A 溶接速度：170mm/min</p>		<p>第一高周波線に依頼。</p>	

注) * ————— は調査実施せず。

表 2.2.3 供試材の成分系

鋼種	符 号	成 分 系	熱処理の有無
耐 溝 状 腐 食 性 電 縫 鋼 管	A 1	Low, S	有
	B 1	炭素鋼	有
	A 2	0.2Cu - Low, S	有
	B 2	Low, S	有
	A 3	Low, S + 0.01REM	無
	B 3	Low, S + 0.01REM + 0.2Cu + 0.2Ni	無
	A 4	0.2Cu - 0.05Ti	有
	B 4	Low, S	有
比較 材	I	普通電縫钢管	無
	J	鍛接钢管	無

表 2.2.4 直管部および曲り管部の肉厚減測定結果

(超音波厚さ計クラウトクラーマ社 D メータによる) (単位: mm / 26.5 months)

肉 厚 減 測 定 管 径	直 管 ※1					曲 り 管 ※2					
	測 定 値				平均 値	曲げ角度 45 度		曲げ角度 90 度		曲げ角度 180 度	
	曲げ半径	曲げ半径	曲げ半径	曲げ半径		2 D	5 D	2 D	5 D		
電 縫 管	80A	0.525	0.65	0.60	0.525	0.575	0.675	0.658	0.433	0.658	0.608
	65A	0.55	0.55	0.60	0.50	0.55	0.542	0.475	0.592	0.633	0.45
	50A	0.575	0.425	0.60	0.45	0.513	0.408	0.583	0.317	0.517	0.467
鍛 接 管	80A	0.775	0.40	0.625	0.60	0.60	0.75	0.625	0.508	0.742	0.442
	65A	0.475	0.575	0.625	0.425	0.525	0.50	0.442	0.575	0.467	0.621
	50A	0.275	0.55	0.525	0.55	0.475	0.542	0.633	0.433	0.558	0.392
Zn メ ッ キ 鋼 管	80A	0.075	0.175	0	0.038	0.072	-0.033	-0.038	0.008	0.025	0.004
	65A	0.025	0.05	0.025	0.075	0.044	0.008	-0.029	-0.025	-0.075	-0.021
	50A	-0.063	-0.025	0.075	0.05	0.009	-0.05	-0.20	0.025	-0.071	0.054
Al メ ッ キ 鋼 管	80A	0.05	0.25	0.075	0.20	0.144	-0.10	-0.013	-0.20	-0.025	0.017
	65A	-0.075	-0.025	-0.025	0.175	0.013	-0.2	-0.108	-0.133	-0.05	0.033
	50A	0	0.1	0.075	-0.1	0.019	-0.117	-0.125	0.017	0.029	0.058

※1 直管の肉厚減測定位置は、図 2.2.2 の直管の符号 3 の位置である。

※2 曲り管の肉厚減測定結果は、図 2.2.2 の曲り管の曲り部(符号 3, 4, 5.)の肉厚減の平均値である。

(単位: mm/26.5months)

表2.2.5 フランジ近傍の肉厚減測定結果(クラウトクレーマ社Dメータによる)

材 料 管 径 フランジから の距離*	差込みフランジ				開先フランジ				平均 値	
	喰い違いなし		喰い違いあり		喰い違いなし		喰い違いあり			
	パッキンなし	パッキンあり	パッキンなし	パッキンあり	パッキンなし	パッキンあり	パッキンなし	パッキンあり		
流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流入側	流入側	
電 線 管	50 A 5.0 1.75	0.45 0.30 0.35	0.63 0.60 0.60	0.58 0.45 0.55	1.00 0.80 0.90	0.83 0.55 0.43	1.00 0.65 0.55	0.80 0.58 0.58	0.83 0.78 0.78	
接 管	6.5 A 5.0 1.75	0.48 0.50 0.50	0.70 0.60 0.60	0.85 0.53 0.53	0.63 0.58 0.58	0.78 0.63 0.55	0.78 0.60 0.50	0.78 0.73 0.73	0.78 0.73 0.73	
鍛 管	5.0 A 5.0 1.75	0.45 0.45 0.48	0.35 0.35 0.58	0.55 0.55 0.55	0.40 0.45 0.40	0.53 0.53 0.33	0.70 0.70 0.63	0.40 0.48 0.48	0.53 0.49 0.49	
Zn メ タ ル 管	8.0 A 5.0 1.75	0.63 0.53 0.53	1.00 0.75 0.73	0.80 0.80 0.85	0.70 0.70 0.70	1.08 0.95 0.95	0.90 0.90 0.90	0.98 0.80 0.80	0.63 0.63 0.63	
A ₁ メ タ ル 管	5.0 A 5.0 1.75	0.13 0.15 0.05	-0.03 -0.03 -0.05	-0.10 -0.10 -0.05	-0.13 -0.13 -0.05	-0.05 -0.05 -0.05	-0.10 -0.10 -0.05	-0.04 -0.04 -0.04	0.50 0.50 0.50	
A ₂ メ タ ル 管	5.0 A 5.0 1.75	0.19 0.15 0.05	-0.19 -0.15 -0.05	-0.10 -0.10 -0.05	-0.18 -0.18 -0.13	-0.05 -0.05 -0.05	-0.06 -0.06 -0.05	-0.04 -0.04 -0.04	0.05 0.05 0.05	

※ 剤定位置は図2.2.2参照。

フランジから175mmの位置とは、フランジ面から175～822mm離れた位置(直管部)を指す。

表 2.2.6 溝腐食深さ

(26.5 months)

管径	管形状	電縫鋼管				鍛接钢管			
		試験前肉厚 (mm)	試験後肉厚 (mm)	肉厚減 (mm)	腐食速度 (mm/year)	試験前肉厚 (mm)	試験後肉厚 (mm)	肉厚減 (mm)	腐食速度 (mm/year)
80A	直管部	4.05	1.86	2.19	0.99	4.25	3.11	1.14	0.52
	曲管部	4.05	1.73	2.32	1.05	4.25	2.02	2.23	1.01
	フランジ部	4.05	1.76	2.29	1.04	4.25	2.77	1.49	0.67
65A	直管部	3.70	1.90	1.76	0.80	4.13	2.94	1.19	0.54
	曲管部	3.70	1.65	2.05	0.93	4.13	2.70	1.44	0.65
	フランジ部	3.70	1.35	2.36	1.07	4.13	2.18	1.95	0.88
50A	直管部	3.45	1.57	1.88	0.85	3.77	2.53	1.24	0.56
	曲管部	3.45	1.56	1.89	0.86	3.77	2.39	1.38	0.62
	フランジ部	3.45	0.92	2.53	1.15	3.77	2.60	1.17	0.53

表 2.2.7 フランジ近傍の溝腐食深さ

(26.5 months)

フランジ	管径	電縫鋼管				鍛接钢管			
		試験前肉厚 (mm)	試験後肉厚 (mm)	肉厚減 (mm)	腐食速度 (mm/year)	試験前肉厚 (mm)	試験後肉厚 (mm)	肉厚減 (mm)	腐食速度 (mm/year)
差込 フランジ	80A	4.05	1.76	2.29	1.04	4.25	2.77	1.48	0.68
	80A	4.05	1.94	2.11	0.96	4.25	—	—	—
	65A	3.70	1.61	2.09	0.95	4.13	2.18	1.95	0.88
	65A	3.70	2.07	1.63	0.74	4.13	3.72	0.41	0.18
	50A	3.45	0.92	2.53	1.15	3.77	2.60	1.17	0.53
開先 フランジ	80A	4.05	1.77	2.28	1.03	4.25	2.96	1.29	0.58
	80A	4.05	—	—	—	4.25	3.23	1.02	0.46
	65A	3.70	1.35	2.36	1.07	4.13	—	—	—
	65A	3.70	1.70	2.00	0.91	4.13	—	—	—
	50A	3.45	1.56	1.89	0.85	3.77	3.49	0.28	0.13

表 2.2.8 フランジ近傍の最大腐食量

(26.5 months)

管 径	フ ラ ン ジ 種 類	電 縫 鋼 管				鍛 接 鋼 管				
		試験前 肉 厚 (mm)	試験後 肉 厚 (mm)	肉 厚 減 (mm) year	腐食速度 (mm/ year)	試験前 肉 厚 (mm)	試験後 肉 厚 (mm)	肉 厚 減 (mm)	腐食速度 (mm/ year)	
80 A	差込フランジ	バリ, 噴い 違ひなし	3.92	2.63	1.29	0.58	4.19	2.47	1.72	0.78
		パッキンバリ	3.92	2.16	1.76	0.80	4.19	3.24	0.95	0.43
		噴い違ひ	3.92	2.66	1.26	0.57	4.19	3.16	1.03	0.47
	開先フランジ	バリ, 噴い 違ひなし	3.92	1.42	2.50	1.13	4.19	2.89	1.30	0.59
		パッキンバリ	3.92	1.82	2.10	0.95	4.19	2.82	1.37	0.62
		噴い違ひ	3.92	2.45	1.47	0.67	4.19	2.63	1.56	0.71
50 A	差込フランジ	バリ, 噴い 違ひなし	3.50	2.39	1.11	0.50	3.71	2.67	1.04	0.47
		パッキンバリ	3.50	2.41	1.09	0.49	3.71	2.65	1.06	0.48
		噴い違ひ	3.50	2.80	0.70	0.32	3.71	2.84	0.87	0.39
	開先フランジ	バリ, 噴い 違ひなし	3.50	2.39	1.11	0.50	3.71	2.97	0.74	0.34
		パッキンバリ	3.50	2.66	0.84	0.38	3.71	2.79	0.92	0.42
		噴い違ひ	3.50	2.55	0.95	0.43	3.71	3.06	0.65	0.29

表 2.2.9 実管テスト試験結果(まとめ)

(mm/year)

試験期間	鋼管の比較		管形状の影響			フランジ形状の比較			流速の影響 (フランジ部)						
	電 縫	鍛 接	直 管	曲 り 管	フ ラン ジ 部	差込フランジ		開先フランジ		80 A		65 A		50 A	
						電縫	鍛接	電縫	鍛接	電縫	鍛接	電縫	鍛接	電縫	鍛接
26.5ヶ月	0.97 $\pm \alpha$	0.67	0.71	0.85	0.89	0.97	0.47	0.97	0.53	1.01	0.57	0.92	0.53	1.00	0.33
	0.61	0.50	0.34	0.43	0.45	0.54	0.50	0.68	0.49	0.78	0.60	—	—	0.44	0.40
	0.26	0.26	0.24	0.24	0.27	0.25	0.26	0.29	0.27	0.30	0.32	0.29	0.26	0.23	0.22
16.5ヶ月	1.57	0.64	—	—	—	1.26	0.75	1.87	0.54	—	—	—	—	—	—
	0.85	0.71	—	—	—	1.03	0.92	0.66	0.51	—	—	—	—	—	—
	0.26	0.20	—	—	—	0.24	0.31	0.28	0.21	—	—	—	—	—	—

* D メータ測定値 (最大腐食量の平均値)

** 断面写真

*** ポイントマイクロメーター (除シーム部)

表 2.2.10 膜厚減測定結果 (Kett電磁厚み計による) (単位 μ /26.5months)

材料	管径	差込フランジ						開先フランジ						平均値	
		喰い違いなし				喰い違いあり		喰い違いなし				喰い違いあり			
		パッキンバリなし		パッキンバリあり		パッキンバリなし		パッキンバリなし		パッキンバリあり		パッキンバリなし			
		流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側		
zn メッキ鋼管	80A	46	64	21	-13	-23	39	24	8	-6	30	60	19	22.4	
	65A	27	32	-14	-42	-3	-1	-8	-11	-23	16	10	72	4.6	
	50A	44	26	16	21	11	38	15	29	46	31	14	21	2.6	
A1 メッキ鋼管	80A	15	59	剥離 80	剥離 96	84	81	62	45	84	53	47	剥離 121	68.9	
	65A	-1	剥離 50	42	30	剥離 83	42	19	48	剥離 8	剥離 21	24	剥離 33	33.3	
	50A	30	19	37	91	剥離 37	剥離 2	12	68	4	88	剥離 9	42	36.6	

測定位置は図 2.2.2 参照

表 2.2.11 被覆材欠陥部の腐食状況 (通水期間 1.6.5ヶ月)

	符号	欠陥の種類	腐食観察結果
zn メッキ材	A	管外面溶接肉盛	○ 溶接部の裏側は zn メッキ膜が消失しているが母材は健全であった。
	B	同上補修	○ 塗料は一部剥離しているが母材は健全であった。
	C	人工切傷	○ ×印の人工切傷あとをみつけることが出来るが母材は健全であった。
A1 メッキ材	D	管外面溶接肉盛	○ 異常は認められなかった。
	E	同上補修	○ 塗料が浮上がり、一部剥離して、白い厚いスケールで覆われていたが、母材は健全であった。
	F	人工切傷	○ 人工切傷が見出せない程白色と黄色の混在したスケールで覆われており、母材は健全であった。
タル エ塗 ボ装 キシ 材	G	管外面溶接肉盛	○ 塗膜が剥離した部分の母材が約 0.5 mm 深さ腐食していた。
	H	同上補修	○ 異常は認められなかった。
	I	人工切傷	○ 人工切傷部のみ約 0.5 mm 深さ腐食していた。
ラ ネ イ オ ニ ブ ン レ グ ン 材	J	管外面溶接肉盛	○ ネオブレンライニングが盛上がってすきまがあるが母材はうすい赤錆で覆われていたが大きな腐食は認められなかった。
	K	同上補修	○ 異常は認められなかった。
	L	人工切傷	○ 人工切傷部のみ約 0.2 mm 深さ腐食していた。
	M	人工欠陥 (オーバーラップ)	○ オーバーラップ部にすきまがありうすい赤錆で覆われていた。
ボ ラ リ イ エ ニ チ ン レ グ ン 材	N	管外面溶接肉盛	○ ポリエチレンライニングが盛上がってクラックが発生し内部は空隙になっていたが母材は健全であった。
	O	同上補修	○ 異常は認められなかった。
	P	人工切傷	○ 管内面膜が剥離して母材全面に赤錆が発生していた。
	Q	人工当傷	○ 当てキズ部が少し剥離してすきまがあったが母材は健全であった。

表2.2.12 耐溝状腐食性電縫鋼管の肉厚減測定結果
(クラウトクラーマ社Dメータ)

(単位:mm/1.65months)

肉厚減測定結果 符号	直	管				曲り管				全測定点平均値	
		測定値		※1 平均値	直管 平均値	※2 曲げ角度45度		曲げ半径 2D	曲げ角度90度		
		曲げ半径 2D	曲げ半径 5D		直管 平均値	曲げ半径 2D	曲げ角度90度				
A 1	Low, S 热處理有	0.43	0.44	0.18	0.26	0.33	0.33	0.63	0.47	0.45	
B 1	炭素鋼熱処理有	0.58	0.78	0.55	0.70	0.65	0.61	0.85	0.87	0.59	
A 2	0.2Cu-Low, S 热処理有	0.15	0.58	0.24	0.26	0.31	0.37	0.63	0.23	0.33	
B 2	Low, S 热処理有	0.43	0.33	0.38	0.50	0.41	0.40	0.38	0.26	0.31	
A 3	Low, S+0.01REM 热処理無	0.33	0.34	0.33	0.43	0.36	0.33	0.36	0.40	0.34	
B 3	Low, S+0.01REM 热処理無 +0.2Cu+0.2Ni	0.65	0.48	0.53	0.40	-0.52	0.45	0.55	0.62	0.54	
A 4	0.2Cu+0.05Ti 热処理有	0.58	0.40	0.31	0.38	0.42	0.43	0.68	0.45	0.48	
B 4	Low, S 热処理有	0.35	0.40	0.44	0.28	0.37	0.35	0.48	0.37	0.28	
I	電縫鋼管	0.38	0.48	0.36	0.31	0.38	0.40	0.30	0.50	0.21	
J	電縫鋼管	0.36	0.38	0.13	0.29	0.26	0.68	0.34	0.43	0.14	
平均値		0.42	0.46	0.35	0.38	0.40	0.39	0.55	0.45	0.36	
										0.41	
										0.40	

注 ※1. 測定位置は、図2.2.2の直管の符号3の位置である。
※2. 測定結果は、図2.2.2の曲り管の曲り管の符号3(符号3, 4, 5)の肉厚減の平均値である。

表2.2.13 フランジ近傍の肉厚減測定結果
(超音波厚み計クラウトクラーマ社Dメータによる)

符号	※フランジからの距離 名 称	差込フランジ				開先フランジ				平均 値	
		喰い違ひなし		喰い違ひあり		喰い違ひなし		喰い違ひあり			
		流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側		
A 1	Low, S	5.0 mm	0.20	0.213	0.7	0.45	0.313	0.238	0.413	0.738	0.148
B 1	炭素鋼熱処理有	5.0	0.67	0.875	0.63	0.7	0.513	0.775	0.7	0.571	0.463
A 2	0.2Cu-Low, S	5.0	0.113	0.213	0.438	0.363	0.225	0.225	0.513	0.588	0.538
B 2	熱 处 理 有	1.75	0.175	0.088	0.375	0.588	0.213	0.25	0.488	0.25	0.25
A 3	Low, S+0.01REM	5.0	0.163	0.35	0.338	0.30	0.375	0.40	0.375	0.50	0.288
B 3	Low, S+0.01REM +0.2Cu+0.2Ni 熱 处 理 無	5.0	0.525	0.525	0.55	0.625	0.413	0.438	0.325	0.825	0.63
A 4	0.2Cu-0.05Ti	5.0	0.188	0.438	0.375	0.313	0.313	0.538	0.525	0.325	0.325
B 4	熱 处 理 有	1.75	0.400	0.425	0.40	0.213	0.388	0.375	0.588	0.513	0.367
1	電 橋 鋼 管	5.0	0.213	0.275	0.388	0.25	0.388	0.45	0.400	0.363	0.475
J	鍛 接 鋼 管	1.75	0.225	0.163	0.363	0.35	0.400	0.425	0.175	0.338	0.55
		5.0	0.338	0.263	0.175	0.25	-0.125	0.75	0.625	0.275	0.35
		1.75	0.113	0.263	0.375	0.225	0.75	0.563	0.463	0.4	0.4

* 測定位置は図 2.2.2 参照

フランジから 1.75 mm の位置とはフランジ面から 1.75 ~ 8.22 mm 離れた位置 (直管部) を指す。

表 2.2.14 耐溝状腐食性鋼管の溝腐食深さ(フランジ近傍) (16.5 months)

フランジ	項目	耐溝状腐食性鋼管								比較鋼管	
		A 1	B 1	A 2	B 2	A 3	B 3	A 4	B 4	I	J
差込 フランジ	試験前肉厚 (mm)	4.95	5.20	5.20	5.20	5.45	5.10	5.30	5.35	5.10	4.50
	試験後肉厚 (mm)	2.63	1.85	4.57	3.66	4.85	3.33	4.10	4.62	3.37	3.47
	肉厚減 (mm)	2.32	3.35	0.63	1.54	0.60	1.77	1.20	0.73	1.73	1.08
	腐食速度 (mm/year)	1.69	2.44	0.46	1.13	0.44	1.29	0.87	0.54	1.26	0.75
開先 フランジ	試験前肉厚 (mm)	5.10	5.30	5.05	5.20	5.35	5.30	5.35	5.40	4.95	4.60
	試験後肉厚 (mm)	3.61	2.36	4.21	3.45	4.30	3.85	5.22	4.74	2.38	3.89
	肉厚減 (mm)	1.49	2.94	0.84	1.75	1.05	1.45	0.13	0.66	2.57	0.71
	腐食速度 (mm/year)	1.08	2.14	0.61	1.27	0.76	1.05	0.11	0.49	1.87	0.54

表 2.2.15 耐溝状腐食性鋼管 フランジ近傍の最大腐食量(除シーム部) (16.5 months)

フランジ	項目	耐溝状腐食性鋼管								比較鋼管	
		A 1	B 1	A 2	B 2	A 3	B 3	A 4	B 4	I	J
差込 フランジ	試験前肉厚 (mm)	5.00	5.10	5.00	5.10	5.20	5.20	5.20	5.10	5.00	4.00
	試験後肉厚 (mm)	4.01	3.70	4.09	4.17	4.29	4.02	4.91	4.47	3.58	2.74
	肉厚減 (mm)	0.99	1.40	0.91	0.93	0.91	1.18	0.29	0.63	1.42	1.26
	腐食速度 (mm/year)	0.72	1.02	0.66	0.68	0.66	0.86	0.21	0.46	1.03	0.92
開先 フランジ	試験前肉厚 (mm)	5.00	5.10	5.00	5.00	5.20	5.10	5.20	5.10	5.00	3.90
	試験後肉厚 (mm)	3.88	3.26	3.10	4.60	3.64	3.77	4.60	4.09	4.09	3.20
	肉厚減 (mm)	1.12	1.84	1.90	0.40	1.56	1.33	0.60	1.01	0.91	0.70
	腐食速度 (mm/year)	0.18	1.34	1.38	0.29	1.13	0.97	0.44	0.73	0.66	0.51

表 2.2.16 耐溝状腐食性鋼管実管テスト結果(16.5ヶ月)

(mm/year)

		耐溝状腐食性钢管								比較钢管	
		A 1	B 1	A 2	B 2	A 3	B 3	A 4	B 4	I	J
* シーム部腐食(フランジ部バリなし、喰い違いなし、流入側)	差込フランジ	1.69	2.44	0.46	1.13	0.44	1.29	0.87	0.54	1.26	0.75
	開先フランジ	1.08	2.14	0.61	1.27	0.76	1.05	0.12	0.49	1.87	0.54
	平均	1.39	2.29	0.54	1.20	0.60	1.17	0.49	0.52	1.56	0.65
** 最大腐食(フランジ部バリなし、喰い違いなし、流入側)除シーム部	差込フランジ	0.72	1.02	0.66	0.68	0.66	0.86	0.21	0.46	1.03	0.92
	開先フランジ	0.81	1.34	1.38	0.29	1.13	0.97	0.44	0.73	0.66	0.51
	平均	0.77	1.18	1.02	0.46	0.90	0.92	0.33	0.60	0.85	0.72
*** 平均腐食(全長)	直 管	0.24	0.44	0.27	0.29	0.24	0.33	0.31	0.25	0.29	0.19
	曲 管	0.36	0.51	0.25	0.24	0.28	0.35	0.31	0.27	0.23	0.20
	フランジ部	0.26	0.49	0.31	0.28	0.2	0.35	0.29	0.29	0.27	0.23

*：断面写真から測定

**：ポイントマイクロメーターで測定

***：クラウトクレーマ社製Dメーターで測定

表 2.2.17 耐溝状腐食性電縫钢管の腐食状況

符号	溝状腐食状況	フランジ溶接部腐食状況
A 1	電縫部に線状の腐食が認められ、さらに同部に点状の深い腐食が認められた。	全数の溶接デボ部に腐食が認められ、ボンド部の約半数に腐食が認められた。
B 1	電縫部に線状の深い腐食が認められ、貫通部が数箇所認められた。	同 上
A 2	曲管部の電縫部に線状の浅い腐食が認められた。その他あばた状の局部腐食が認められた。	同 上
B 2	電縫部に線状の腐食が認められ、さらに点状の深い腐食が認められた。	全数の溶接デボ部に腐食が認められ、ボンド部に腐食が少し認められた。
A 3	曲管部の電縫部に線状の腐食が認められ、さらに同部に点状の深い腐食が認められた。 その他あばた状の局部腐食が認められた。	同 上
B 3	曲管部の電縫部に線状の浅い腐食が認められ、さらに同部に点状の深い腐食がところどころ認められた。 その他あばた状の局部腐食が認められた。	溶接デボ部の腐食およびボンド部の腐食が少し認められた。
A 4	曲管部の電縫部に点状の深い腐食がところどころ認められた。 その他あばた状の局部腐食が認められた。	同 上
B 4	電縫部に線状の浅い腐食が認められ、さらに同部に点状の深い腐食がところどころ認められた。	同 上
普通電縫钢管	電縫部に線状の深い腐食が認められた。	全数の溶接デボ部に腐食が認められ、ボンド部の約半数に腐食が認められた。
鍛接钢管	鍛接部に線状の浅い腐食が認められた。 その他あばた状の局部腐食が認められた。	同 上

表 2.2.18 試験前亜鉛メッキ膜の厚さ (Kett 膜厚計による) (単位 μ)

管 径 \ メッキ膜	最 高 厚 さ	最 低 厚 さ	平 均 厚 さ
80 A	165	60	109.2
65 A	135	60	86.2
50 A	115	65	84.2
全 管	165	60	93.2

表 2.2.19 アルミメッキ鋼管腐食(母材を腐食したもの)

管 径 \ 腐食箇所	管 内 面		フランジ端
	電 縫 部	その他の部分	
80 A (流速 1.9 m/s)	8 本	1 本	6 本
65 A (流速 2.9 m/s)	3 本	2 本	1 本
50 A (流速 4.9 m/s)	3 本 (内 1 本は貫通)	2 本	6 本
全 管	14 本	5 本	13 本

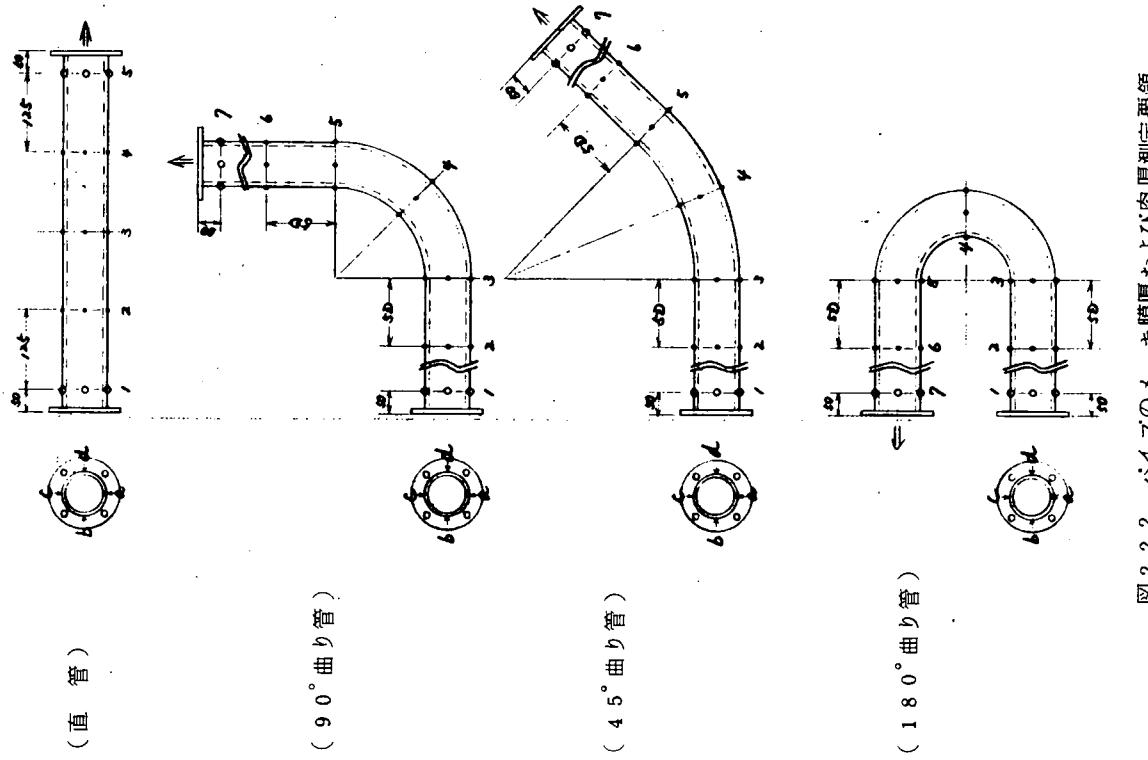


図 2.2.1 フランジおよびバックキンの試験条件

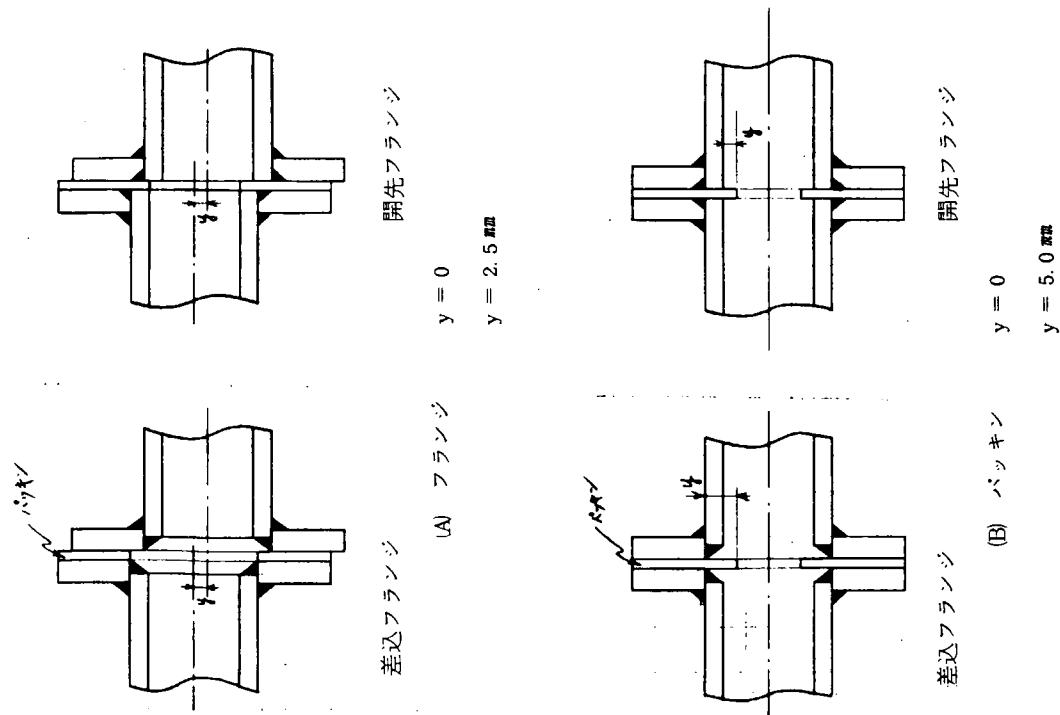


図 2.2.2 ハイブのメッシュキ膜厚および肉厚測定要領
・メッシュキ膜厚および肉厚測定個所
• 肉厚測定個所

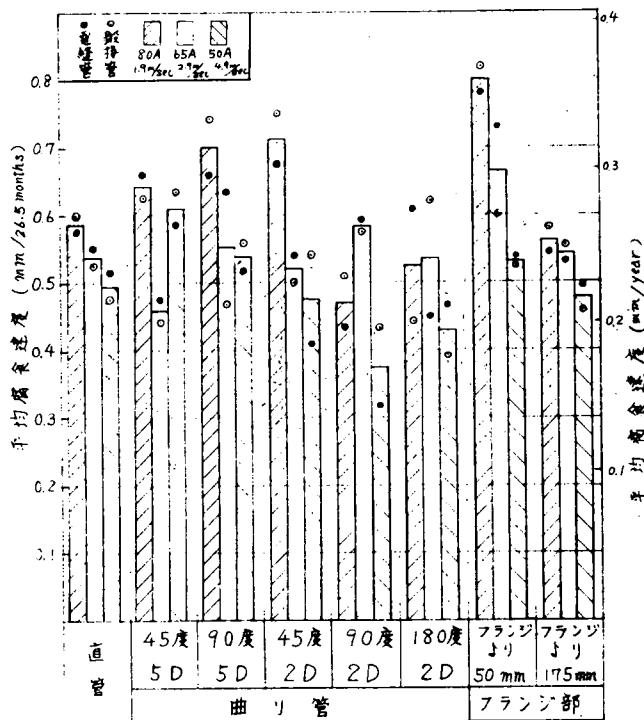


図 2.2.3 電縫管および鍛接管の平均腐食速度（超音波厚さ計による。）

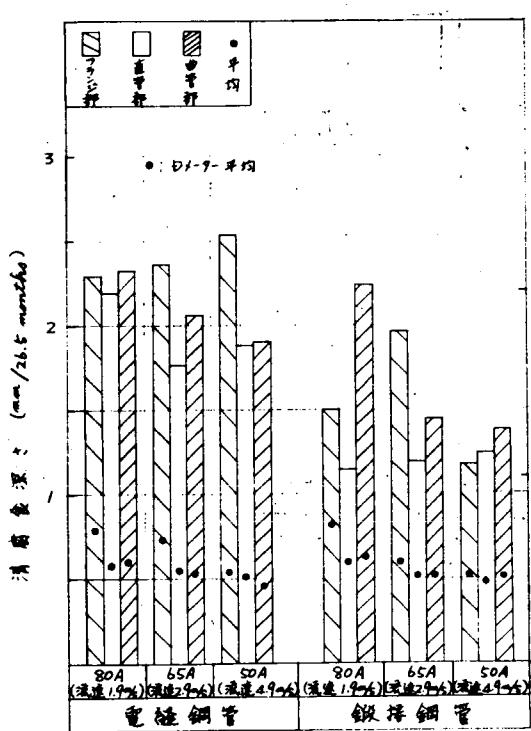


図 2.2.4 腐食深さ

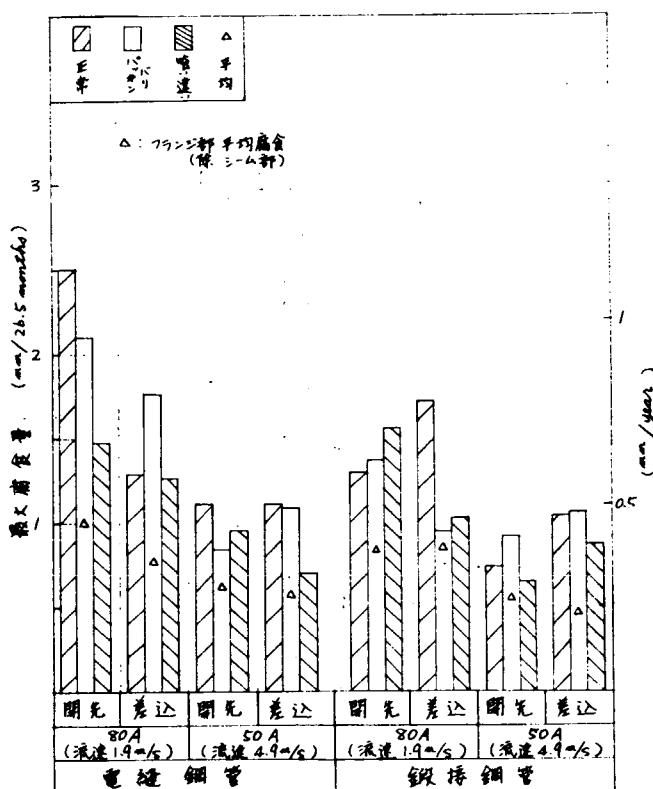


図 2.2.5 フランジ近傍の最大腐食量

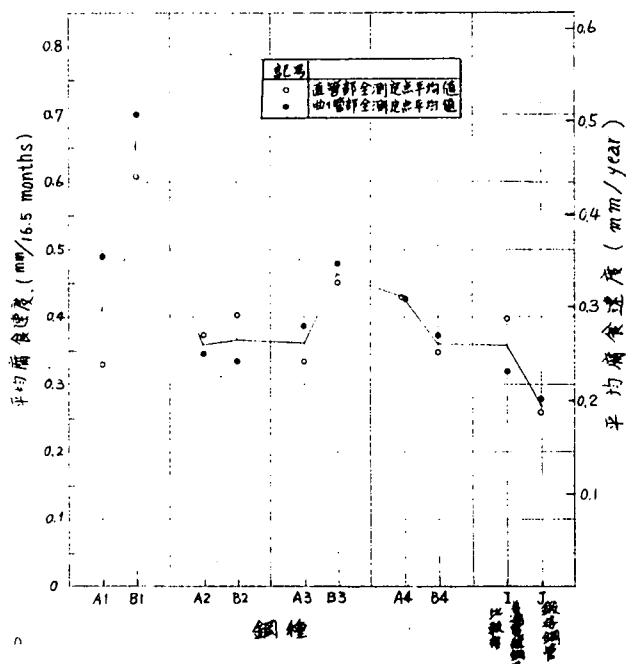


図 2.2.6 実管テストによる耐溝状腐食性電縫钢管の肉厚減

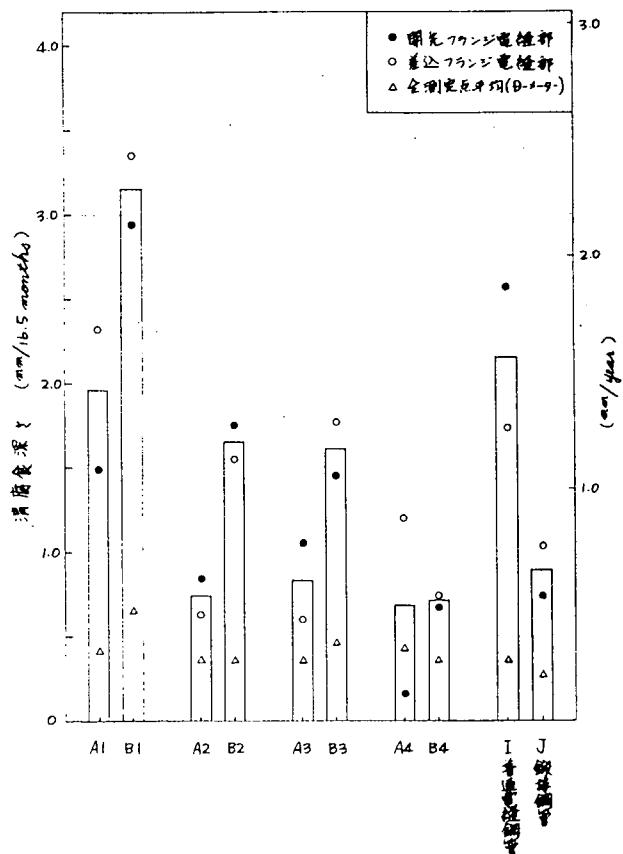


図 2.2.7 実管テストによる耐溝状腐食性電縫钢管の流入側近傍の溝腐食深さ

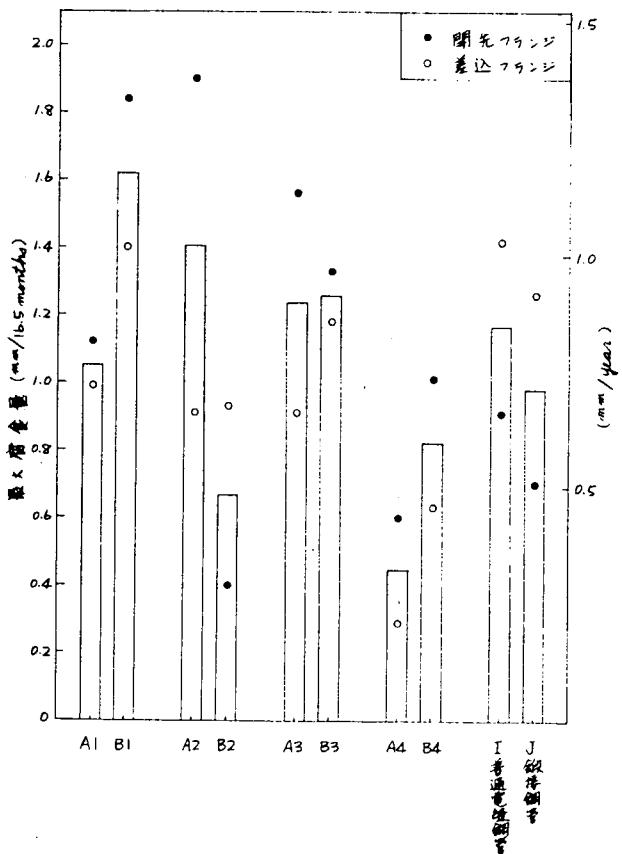


図 2.2.8 実管テストによる耐溝状腐食性電縫钢管の流入側フランジ部近傍の電縫部を除く最大腐食量

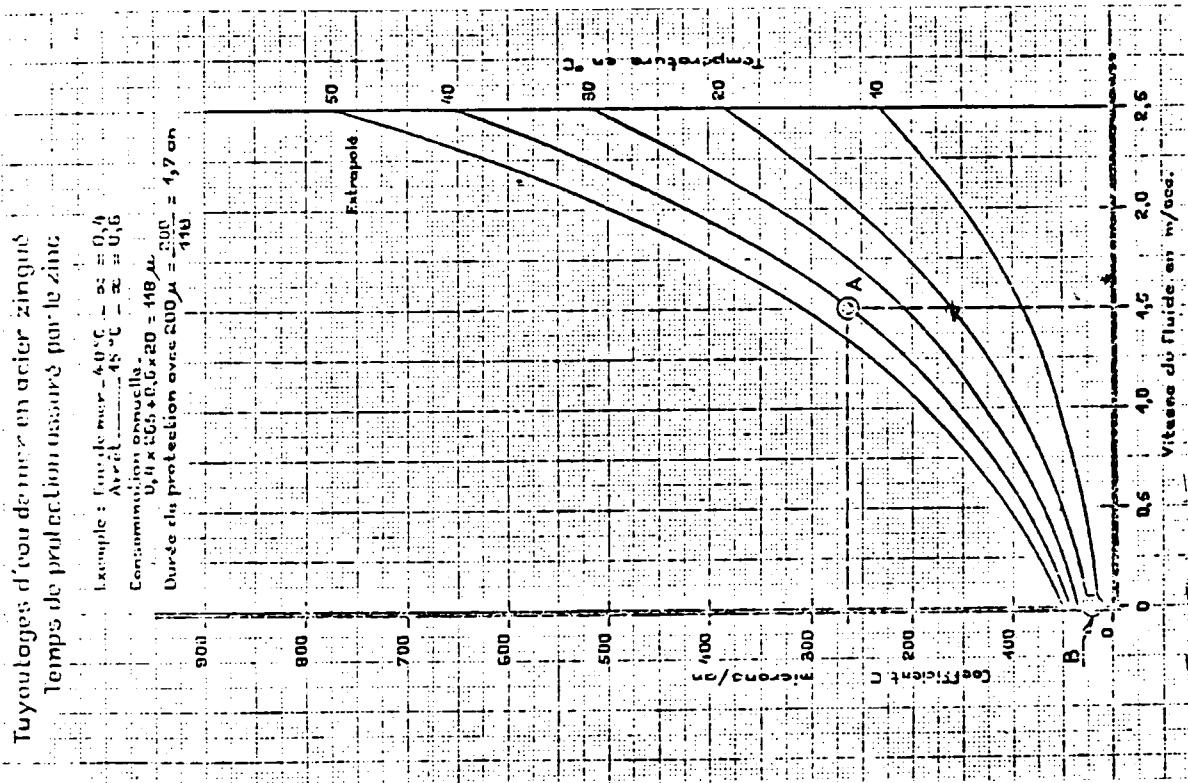


図 2.2.10 亜鉛メッキ膜厚減と流速の関係

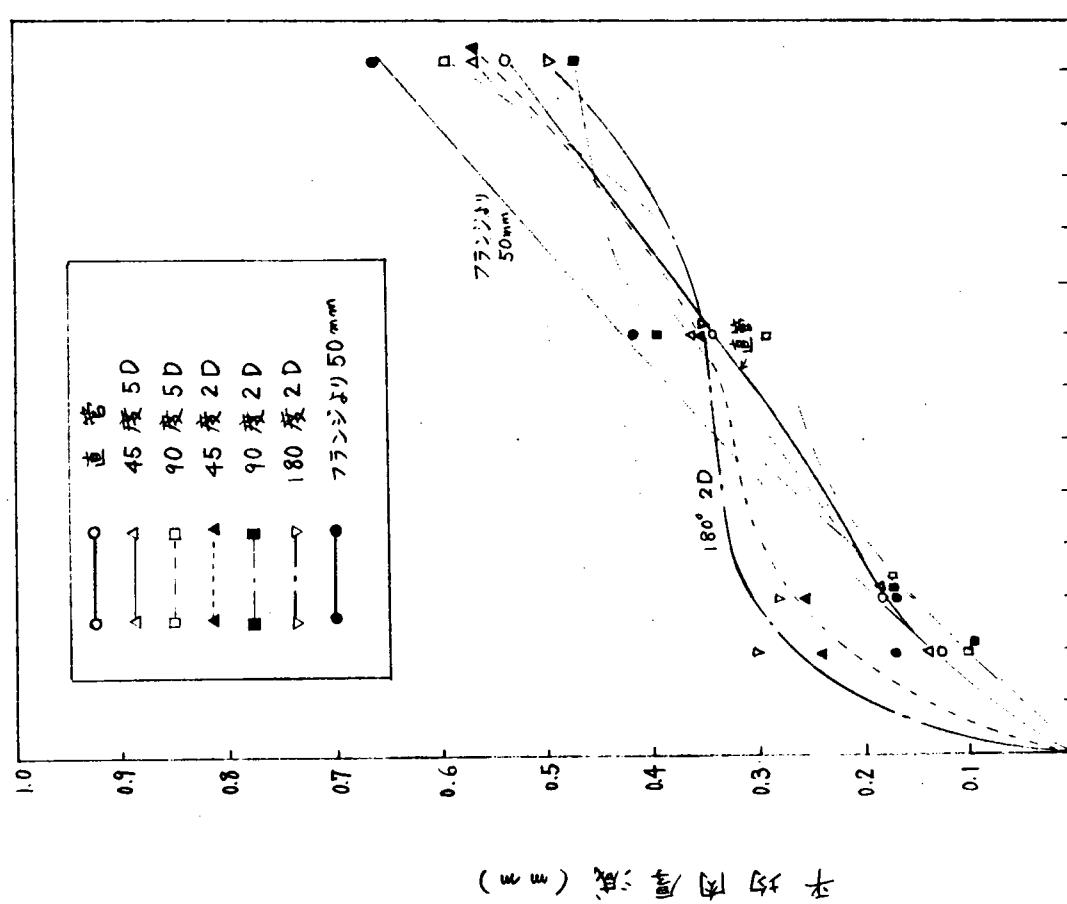


図 2.2.9 実管テストによる肉厚減の経時変化
(6ヶ月のデータには耐海水腐食性電縫管のデータも含まれている)

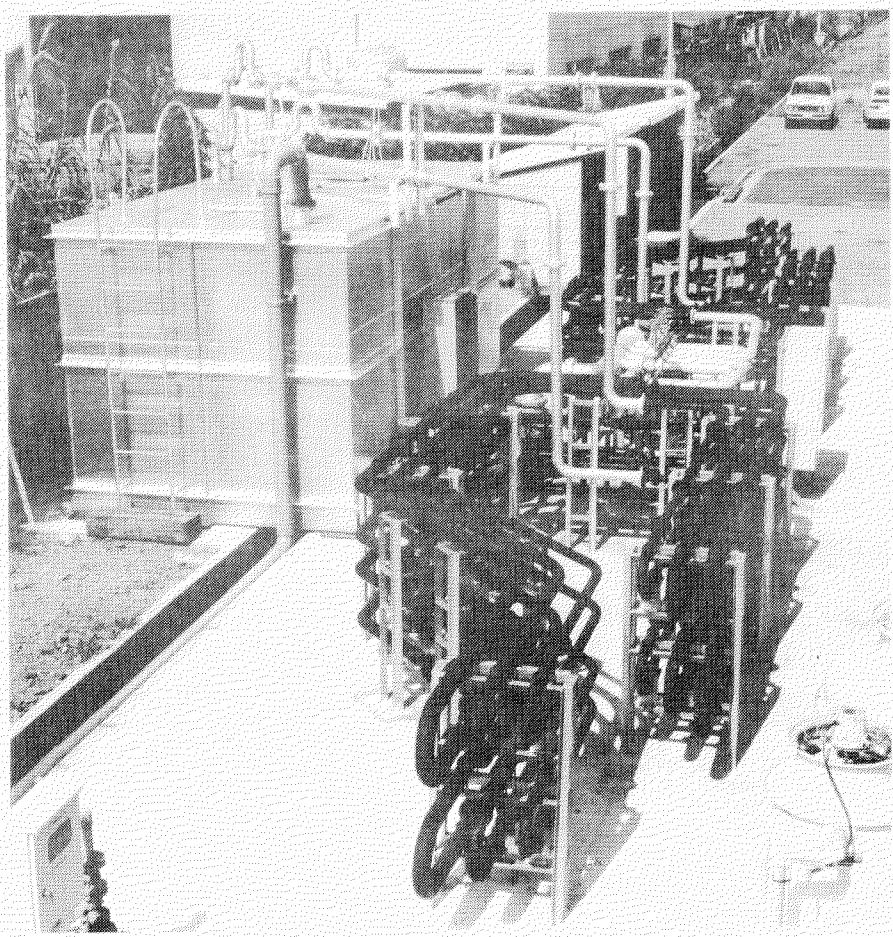


写真 2.2.1 海水管腐食試験装置外観

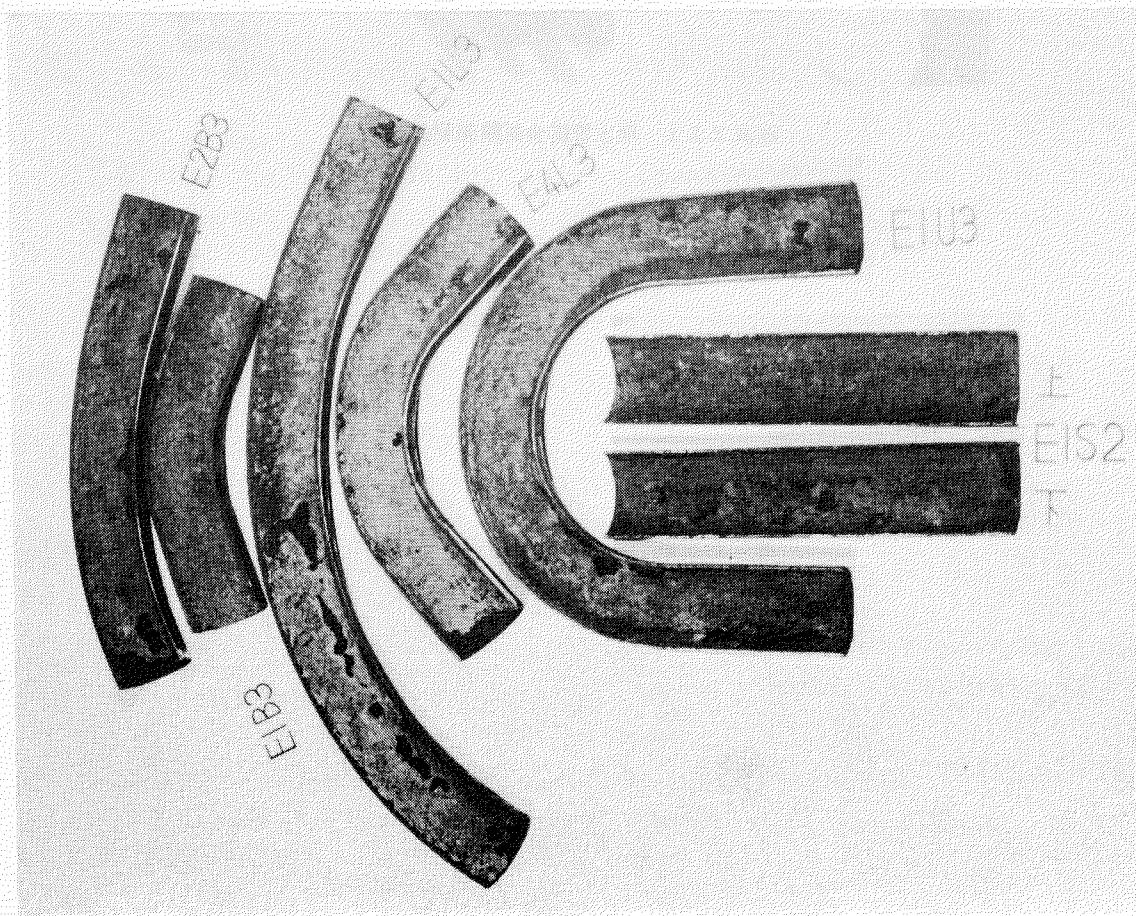
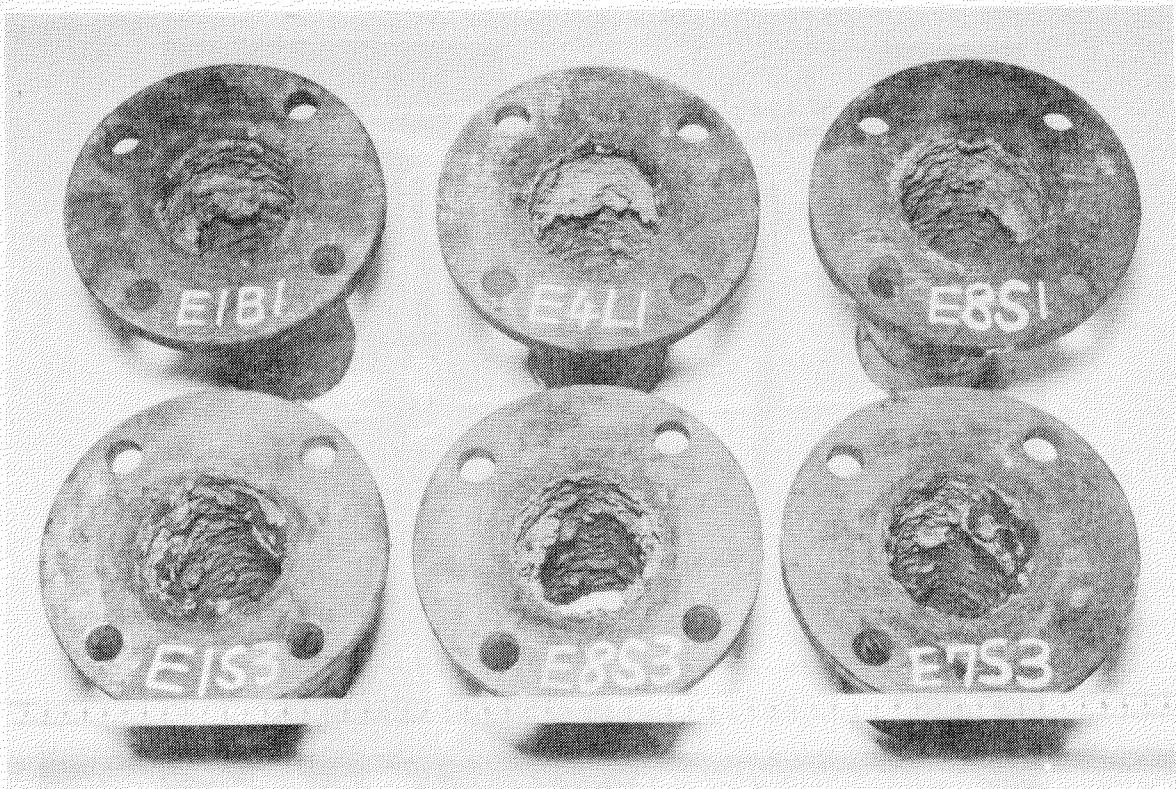


写真 2.2.2 普通電縫鋼管の腐食生成物付着状況

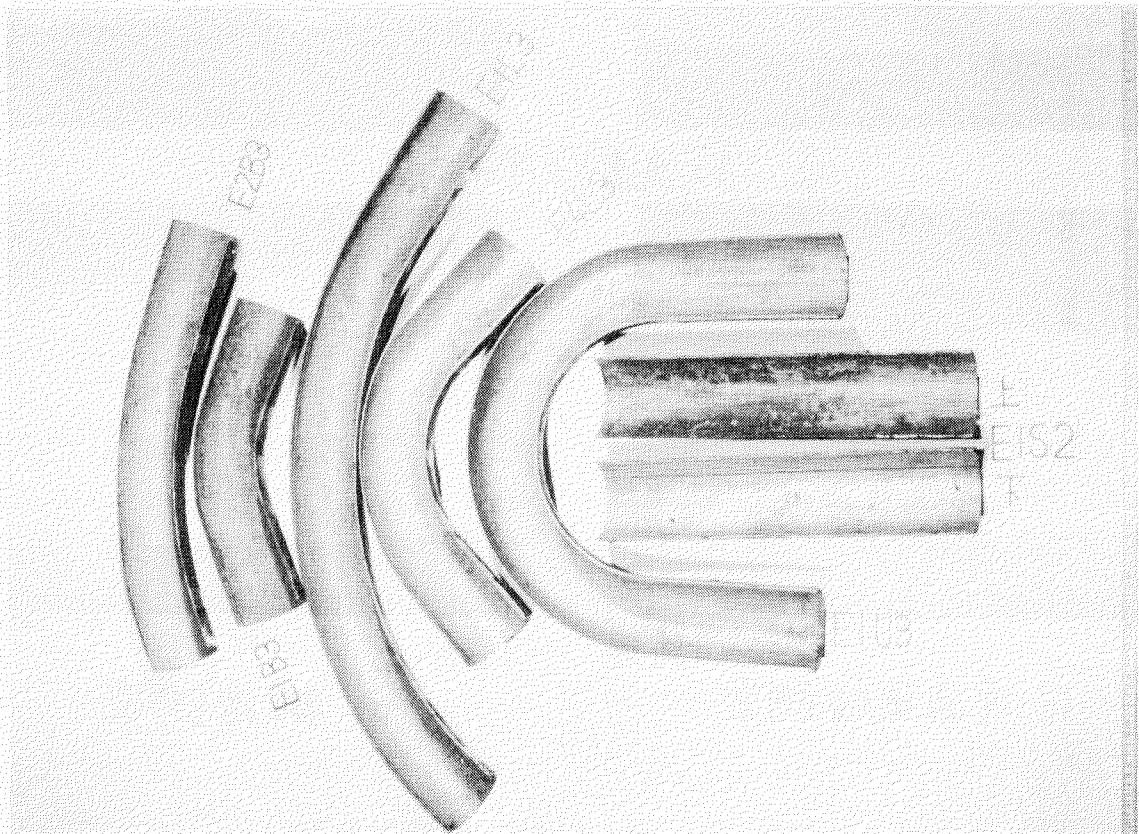
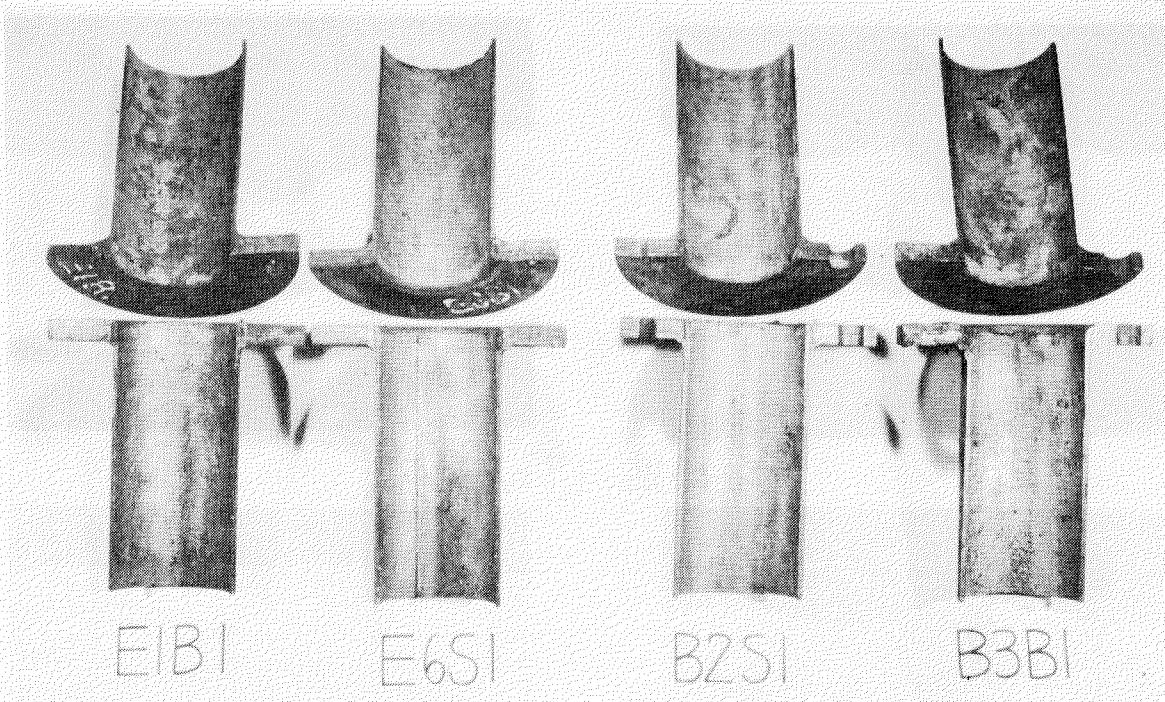
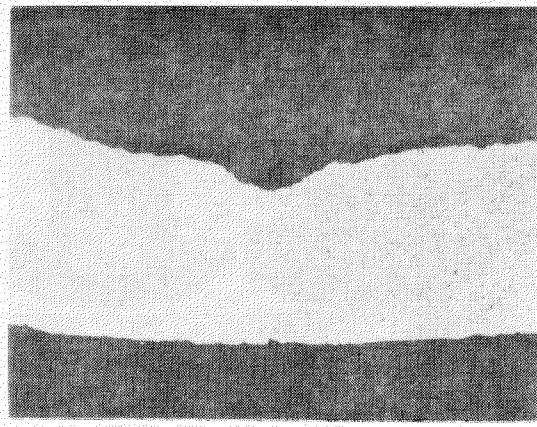
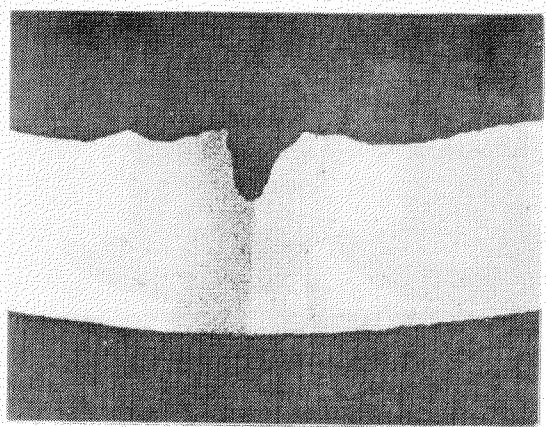
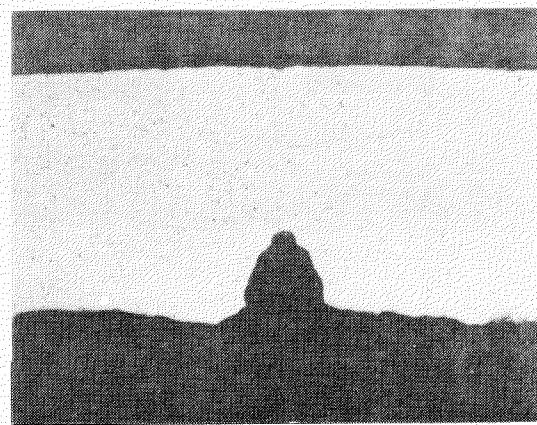
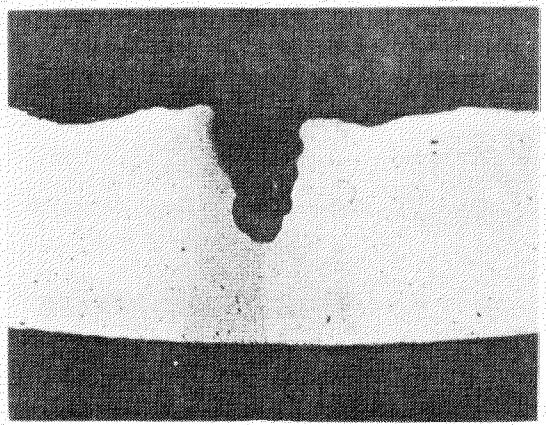


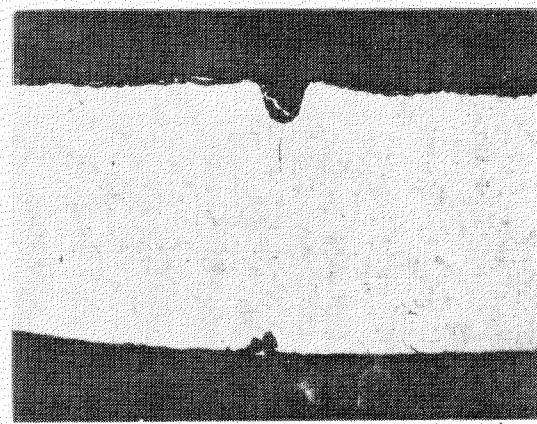
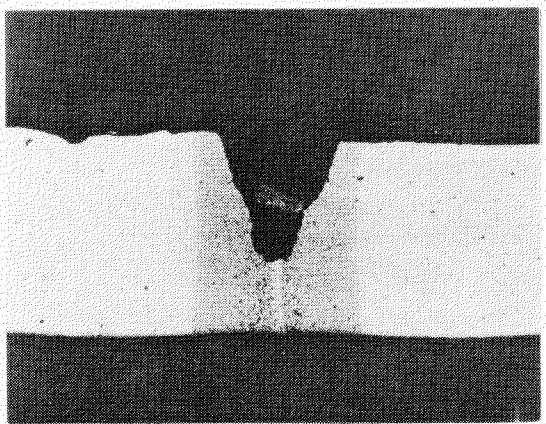
写真 2. 2. 3 酸洗後の鋼管内面状況



a) 流速 1.9 m/sec.



b) 流速 2.9 m/sec.



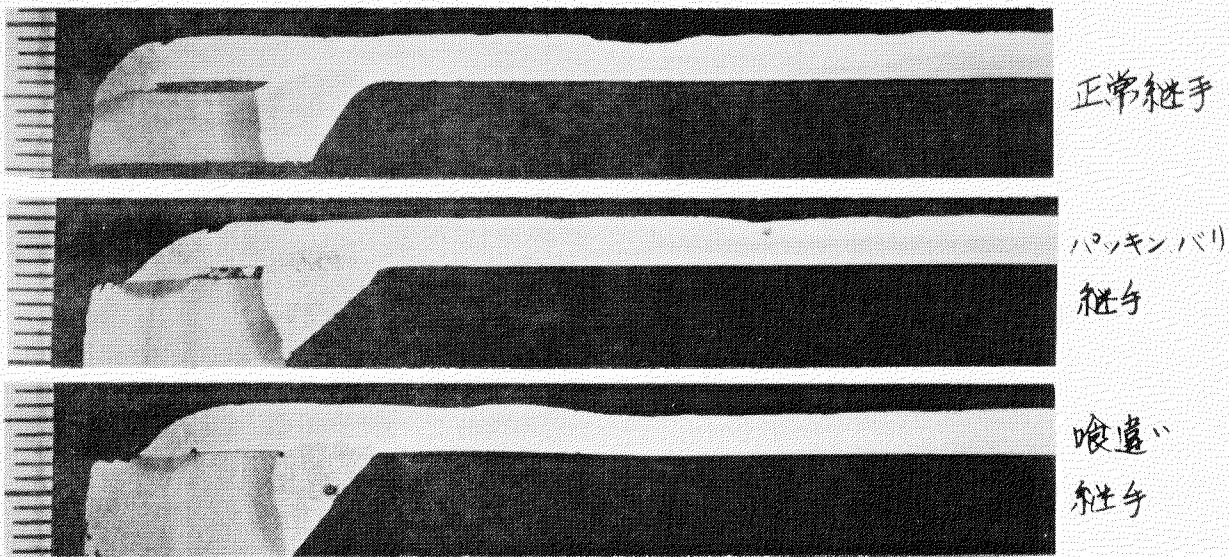
c) 流速 4.9 m/sec.

ⅰ) 普通電継鋼管

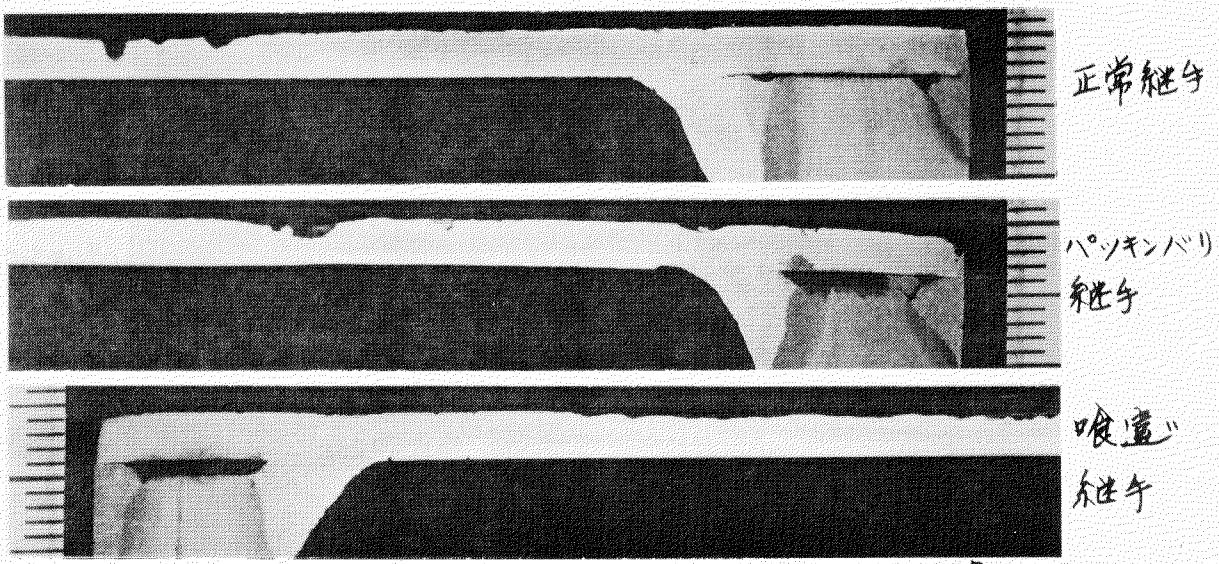
ロ) 鍛接鋼管

0 0.1 mm

写真 2.2.4 シーム部の腐食状況（通水期間 26.5 ヶ月）



a) 差込フランジ



b) 開先フランジ

0 0.5 mm

写真 2.4.5-1 フランジ部腐食状況（通水期間 26.5 ケ月）

（普通電縫鋼管 80 A 流速 1.9 m/sec, 流入側）

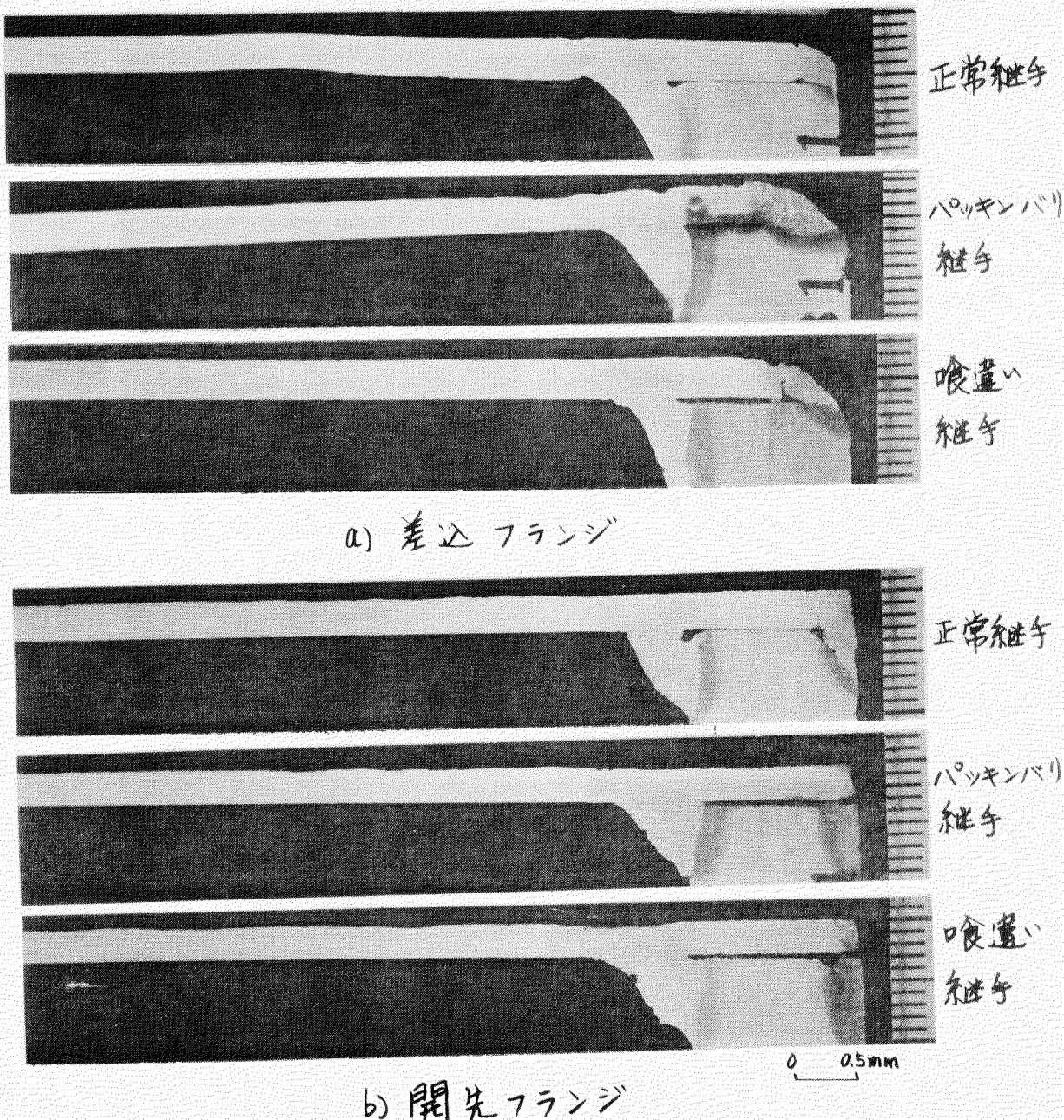
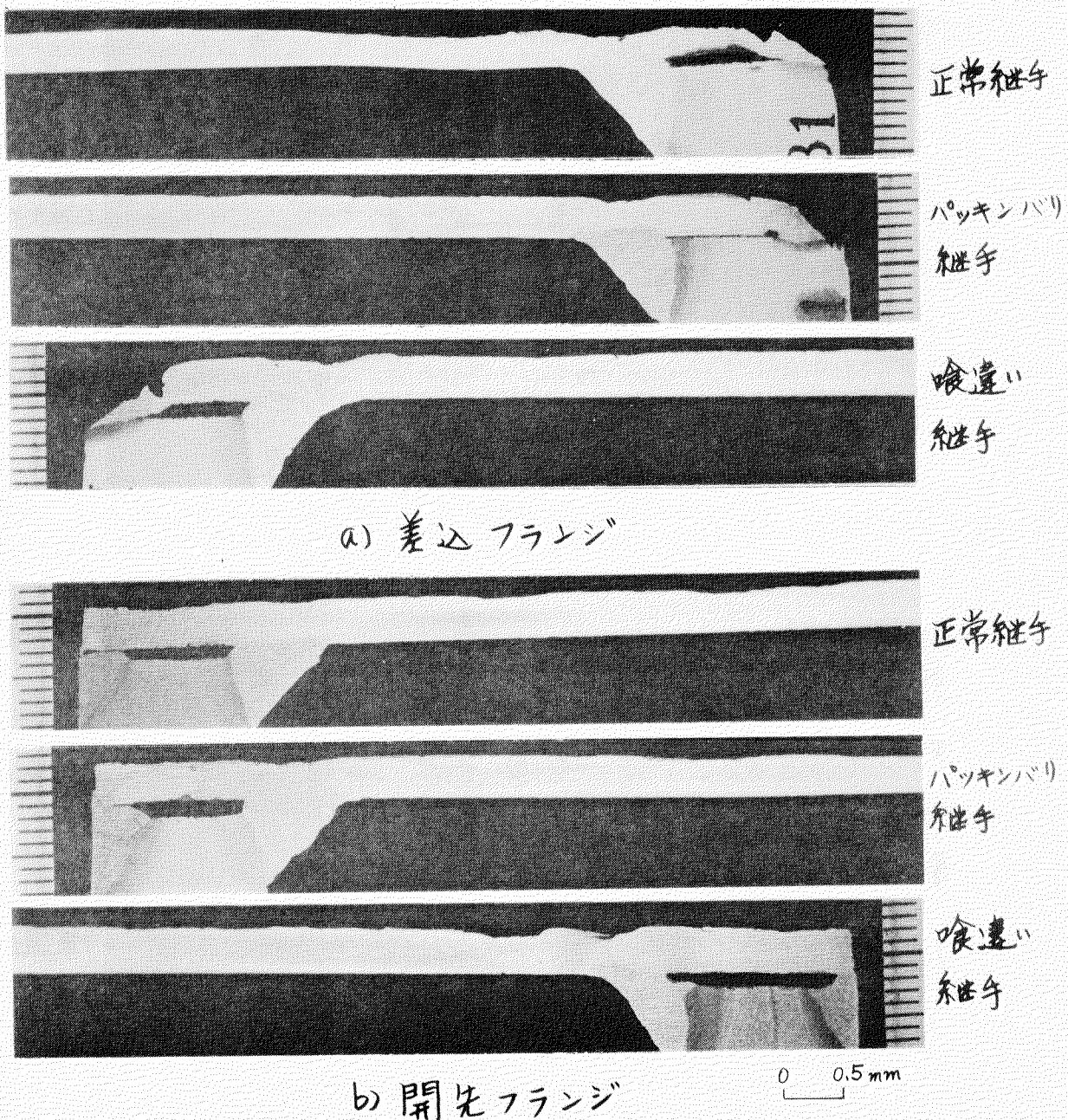
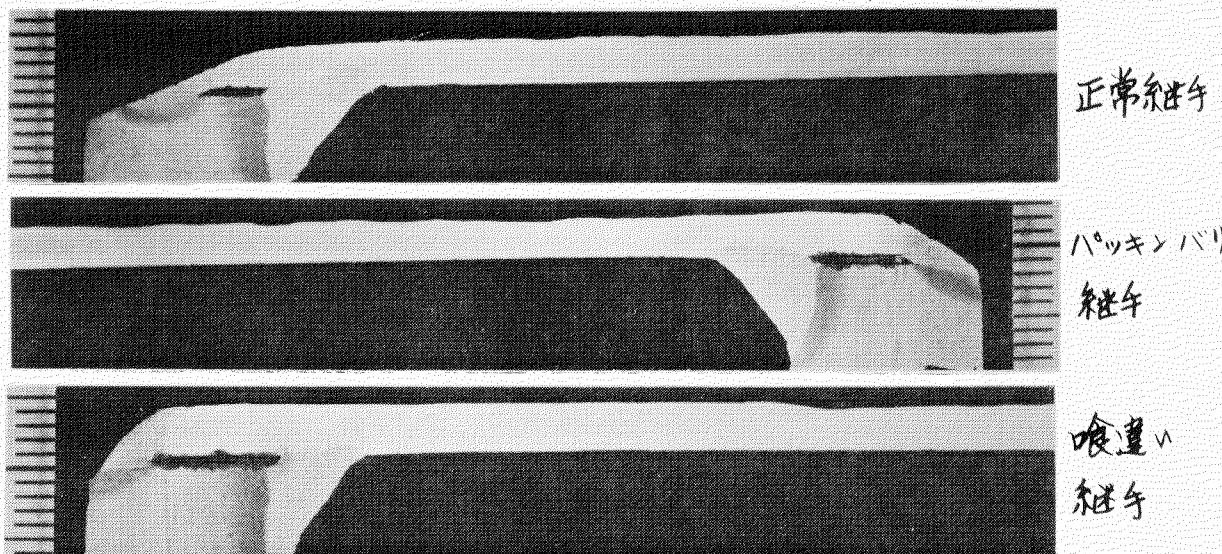


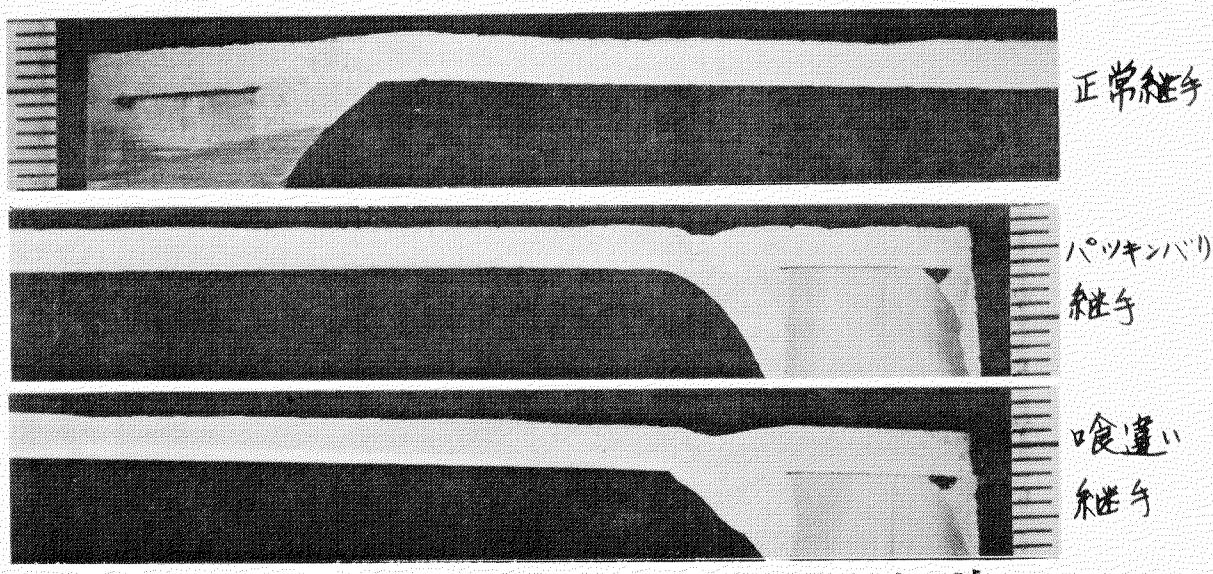
写真 2.2.5-2 フランジ部腐食状況(通水期間 26.5ヶ月)

(普通電縫鋼管 50A, 流速 4.9m/sec, 流入側)





a) 差込フランジ



b) 開先フランジ

0 0.5mm

写真 2.2.5-4 フランジ部腐食状況（通水期間 26.5ヶ月）

（鍛接鋼管 50A, 流速 4.9 m/sec, 流入側）

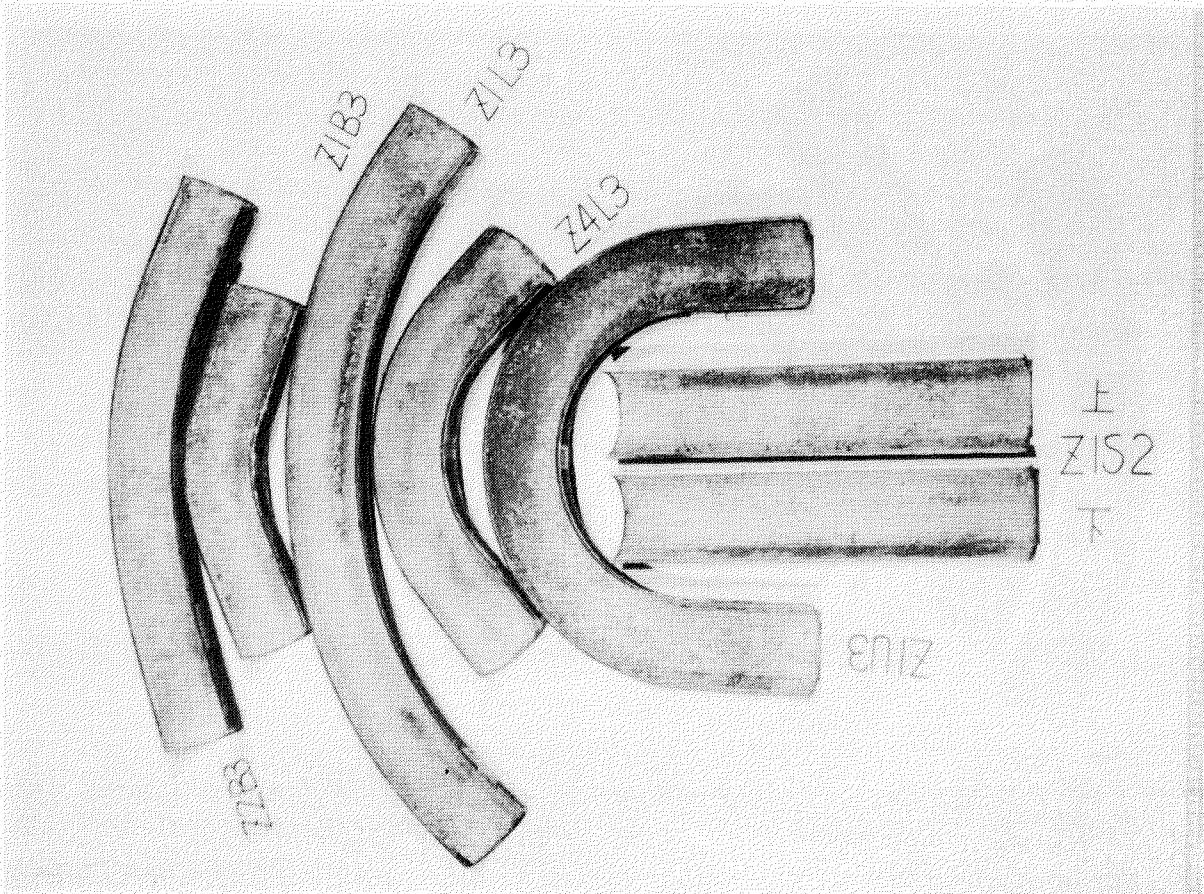
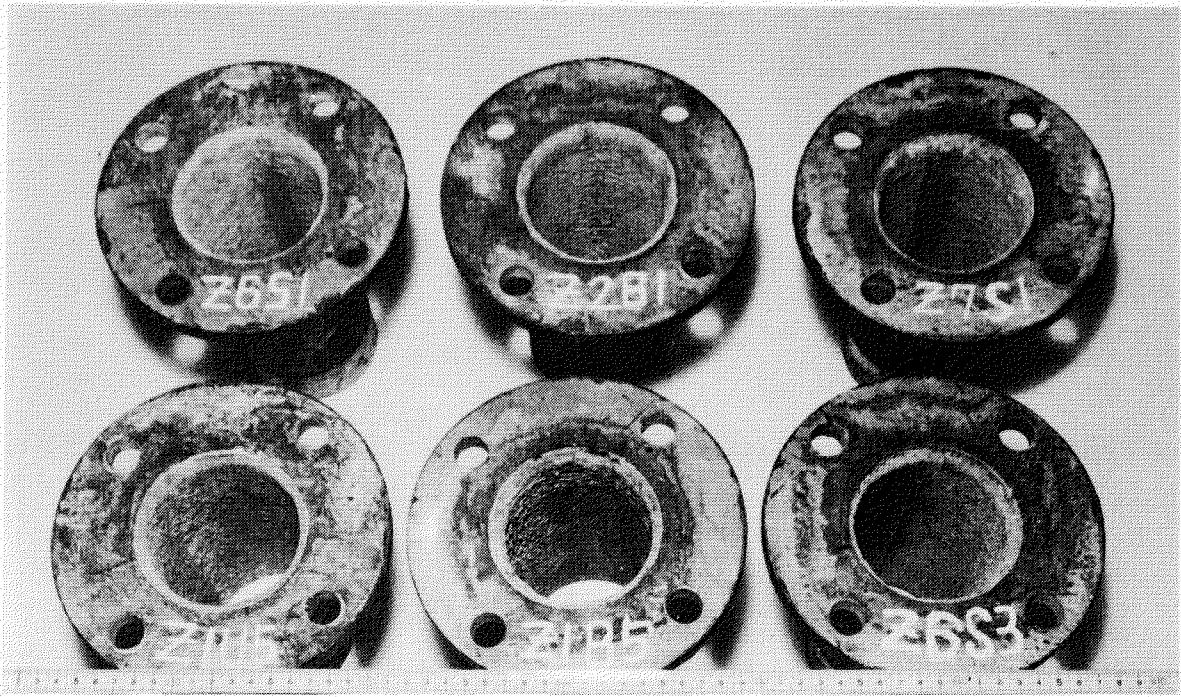


写真 2.2.6 Zn メッキ鋼管の腐食生成物付着状況

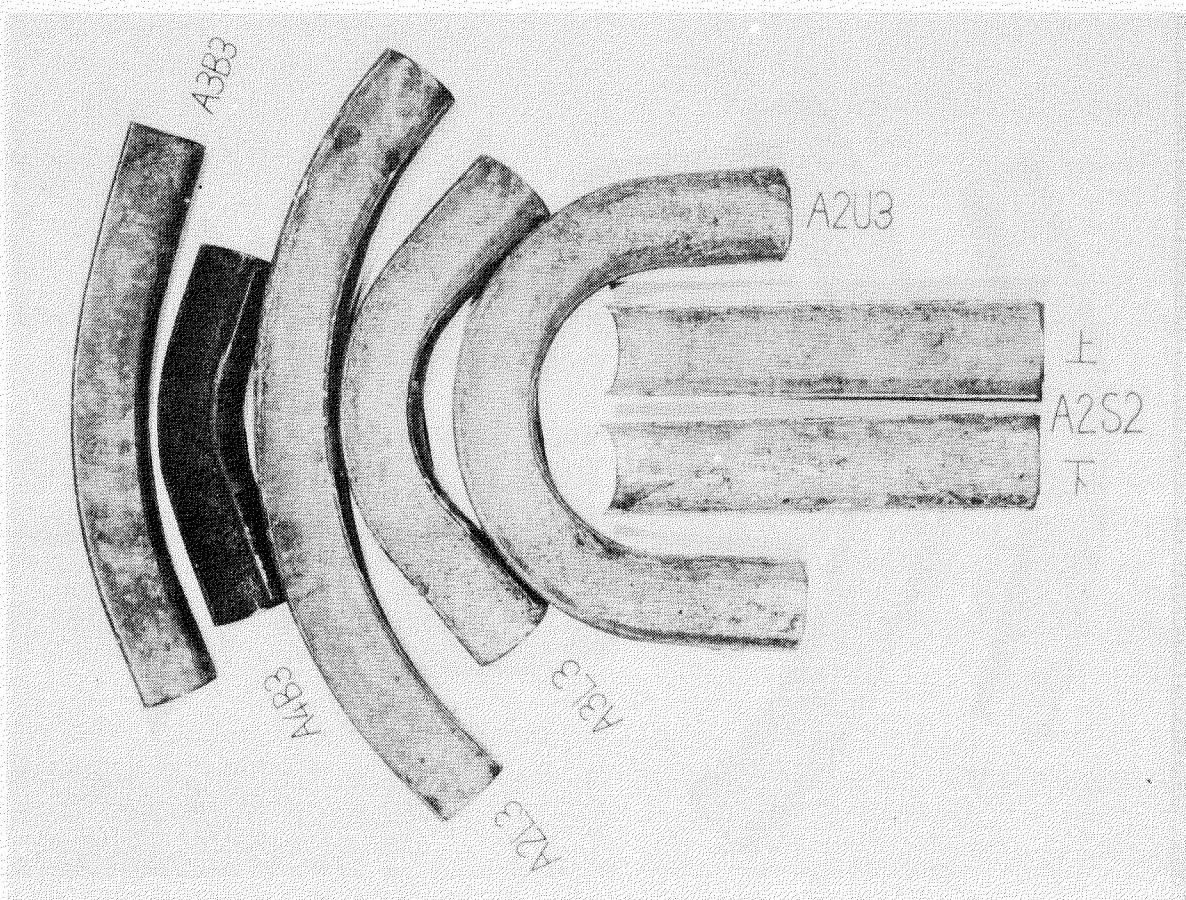
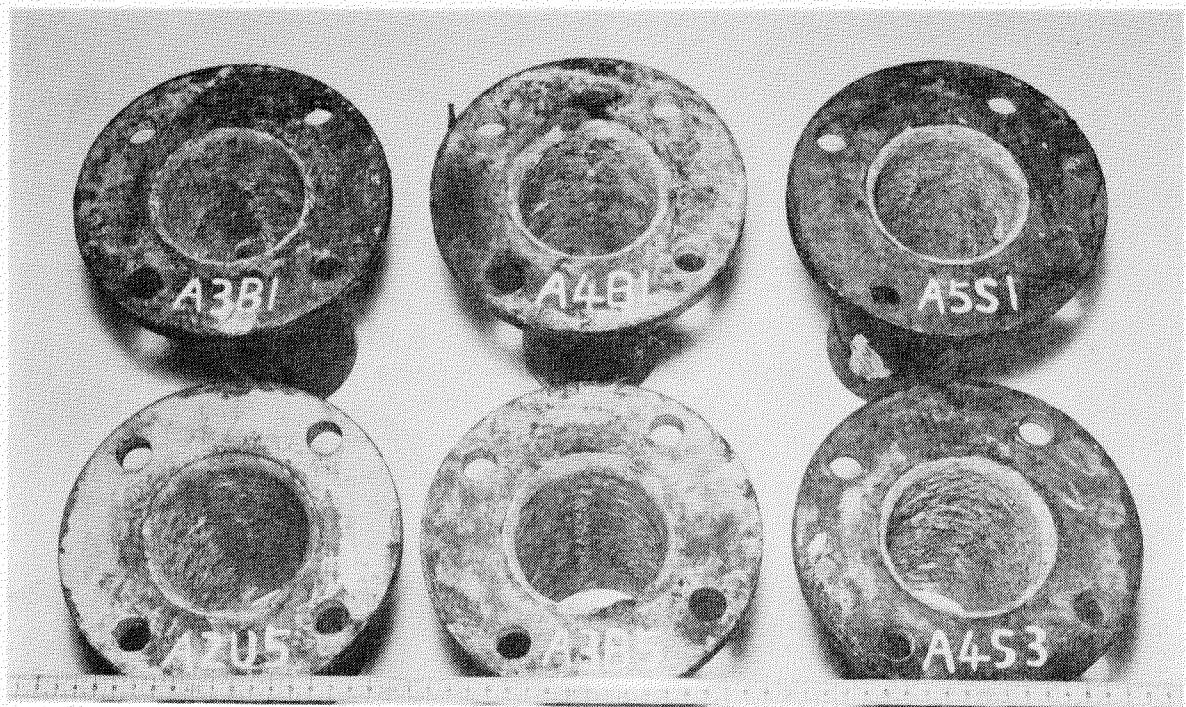


写真 2.2.7 A1 メッキ鋼管の腐生成物付着状況

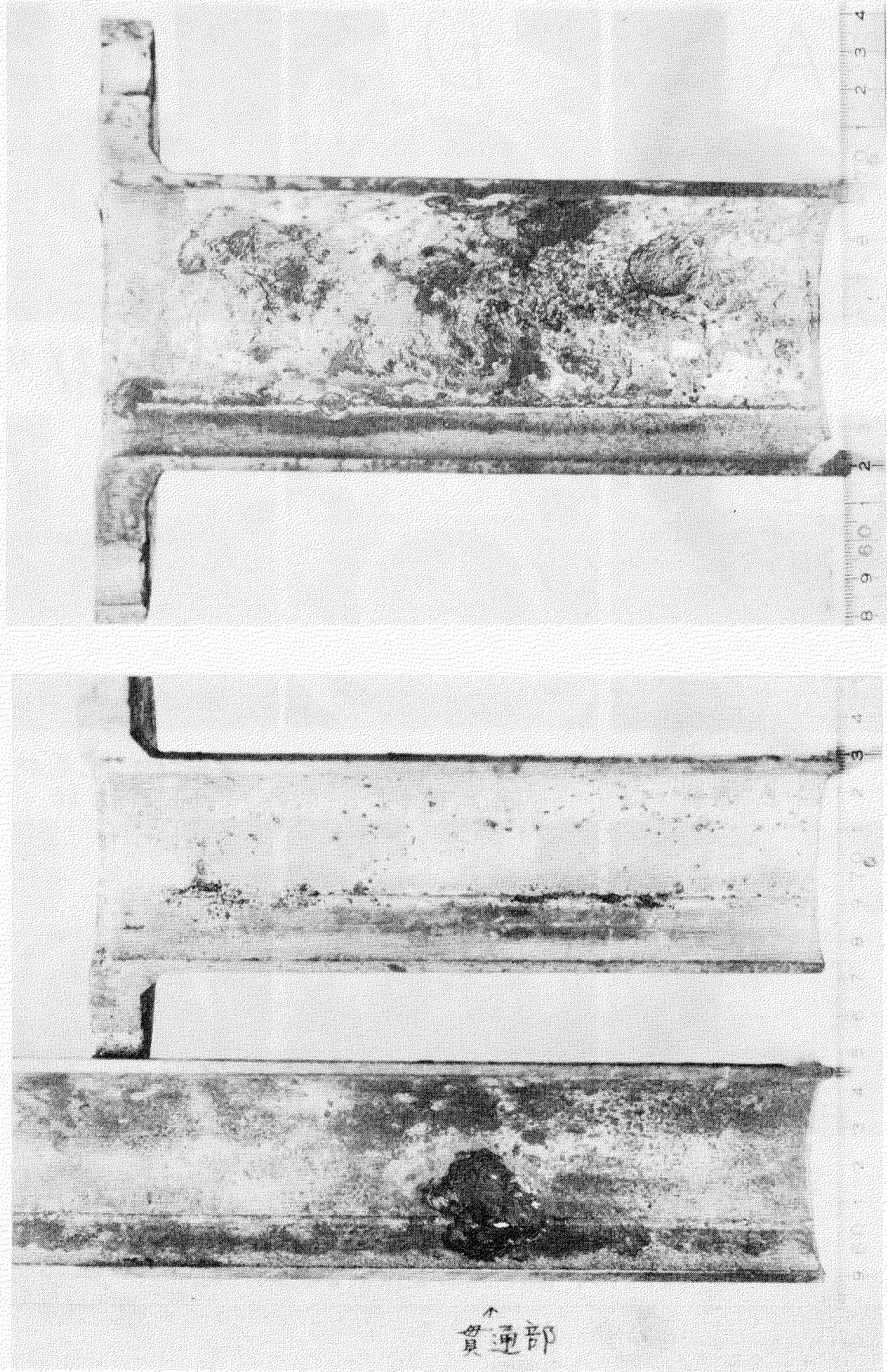
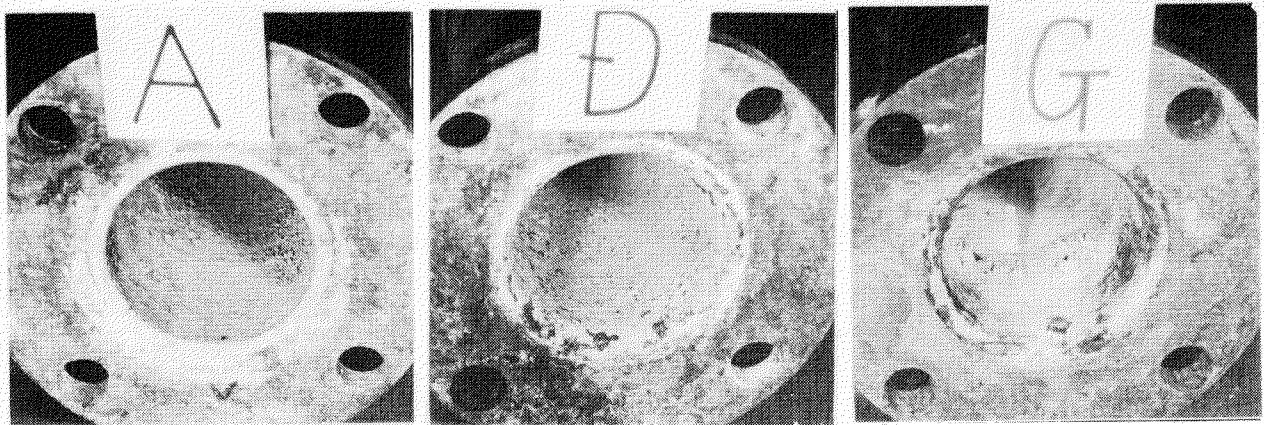


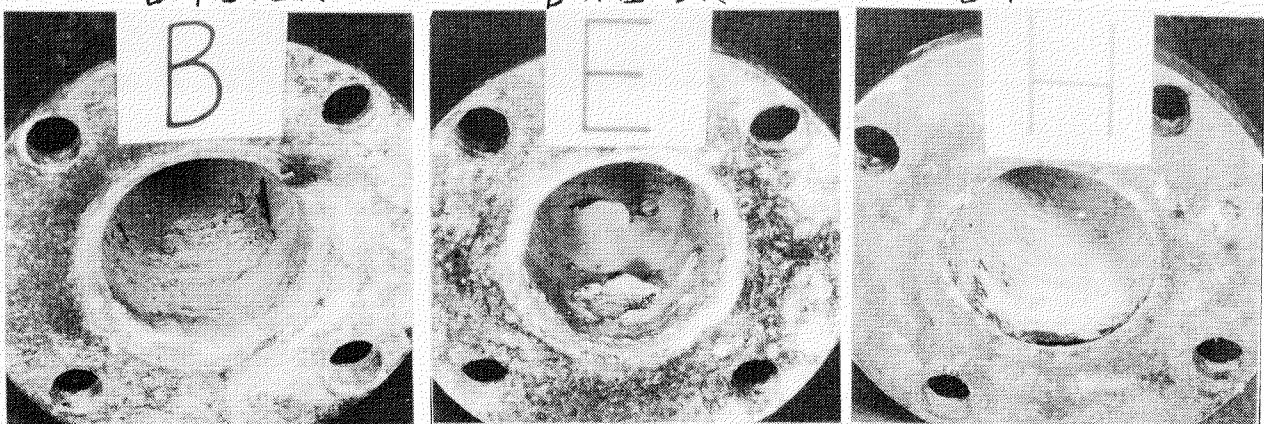
写真 2.2.8 A1 メッキ材の腐食状況



Zn メッキ材
管外面溶接

Al メッキ材
管外面溶接

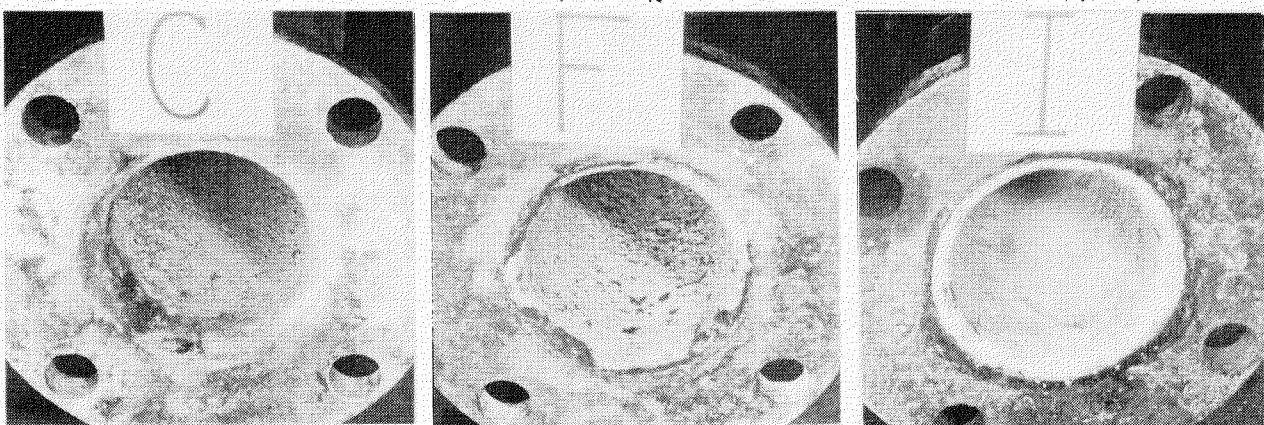
タルエポキシ塗装材
管外面溶接



Zn メッキ材
同上補修

Al メッキ材
同上補修

タルエポキシ塗装材
同上補修



Zn メッキ材
人工切傷

Al メッキ材
人工切傷

タルエポキシ塗装材
人工切傷

写真 2.2.9-1 被覆材欠陥部の表面状況(通水期間 16.5ヶ月)

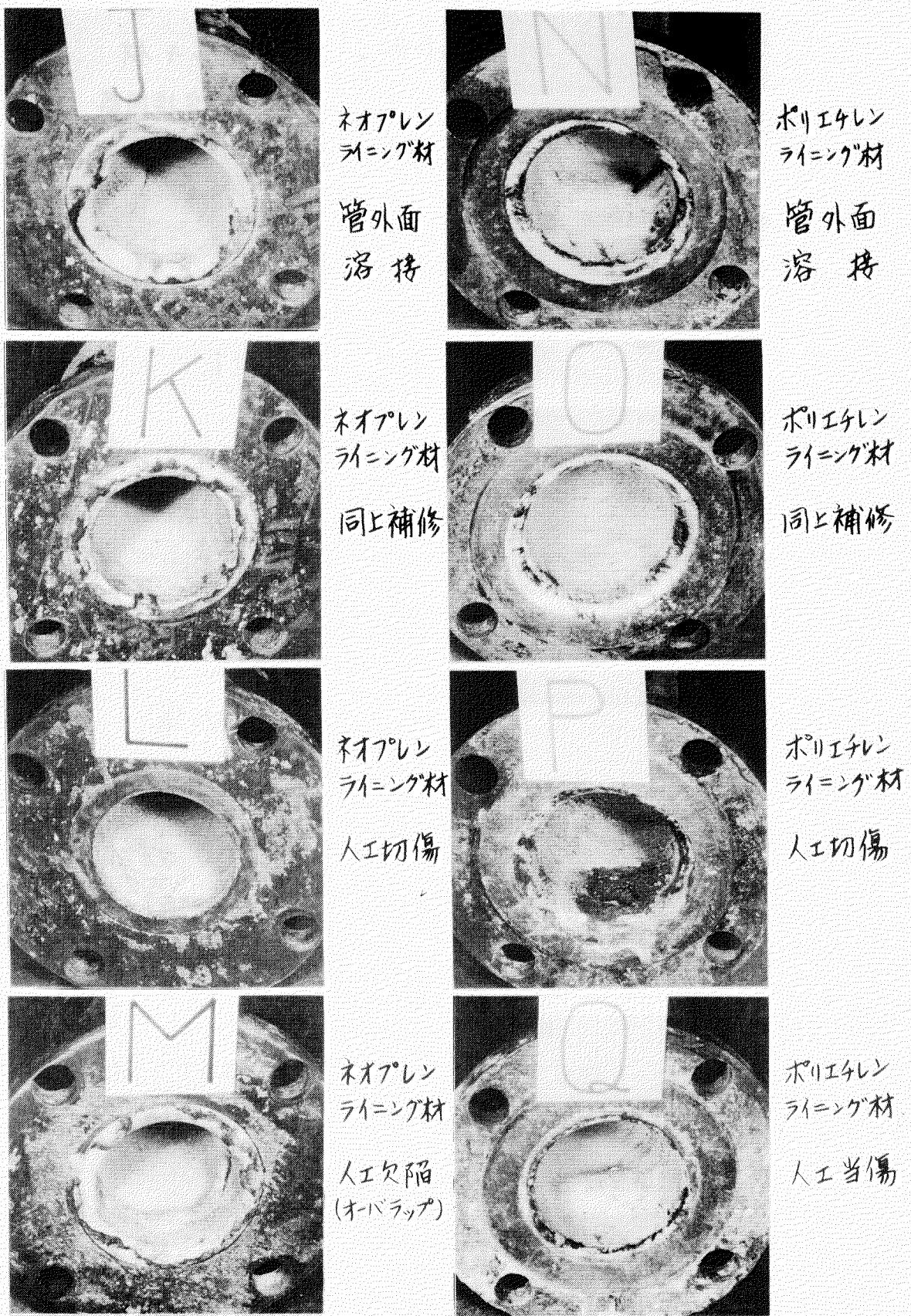
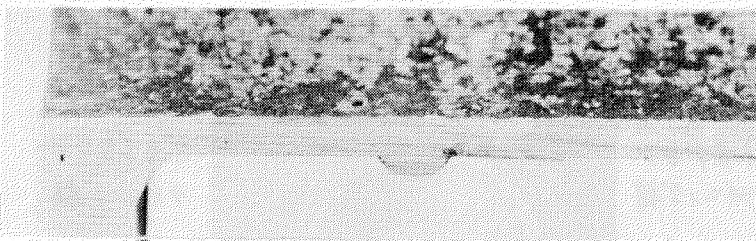


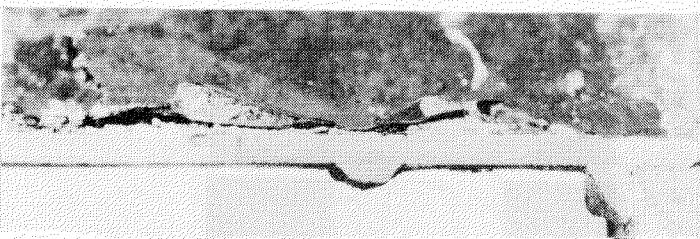
写真 2.2.9-2 被覆材欠陥部の表面状況（通水期間 16.5 ケ月）



Znメッキ材

管外面溶接肉盛

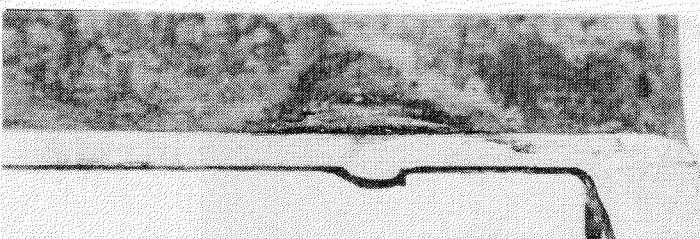
A



Alメッキ材

管外面溶接肉盛後補修

E



ターレエボキシ塗装材

管外面溶接肉盛

G



ネオプレンライニング材

人工切傷

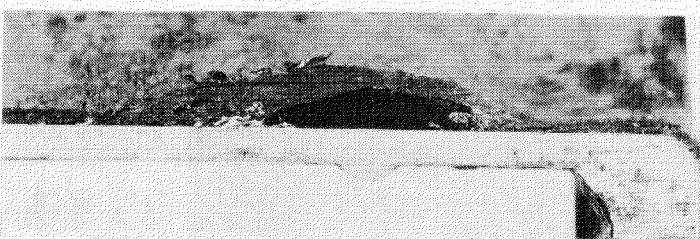
L



ネオプレンライニング材

人工欠陥(オーバラッフ)

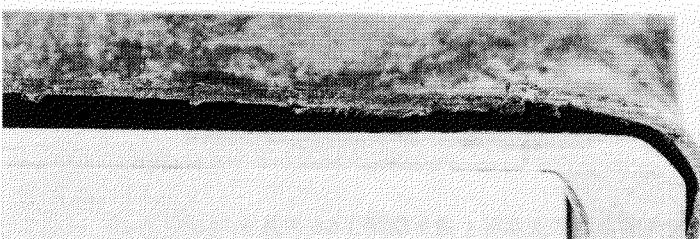
M



ポリエチレンライニング材

管外面溶接肉盛

N



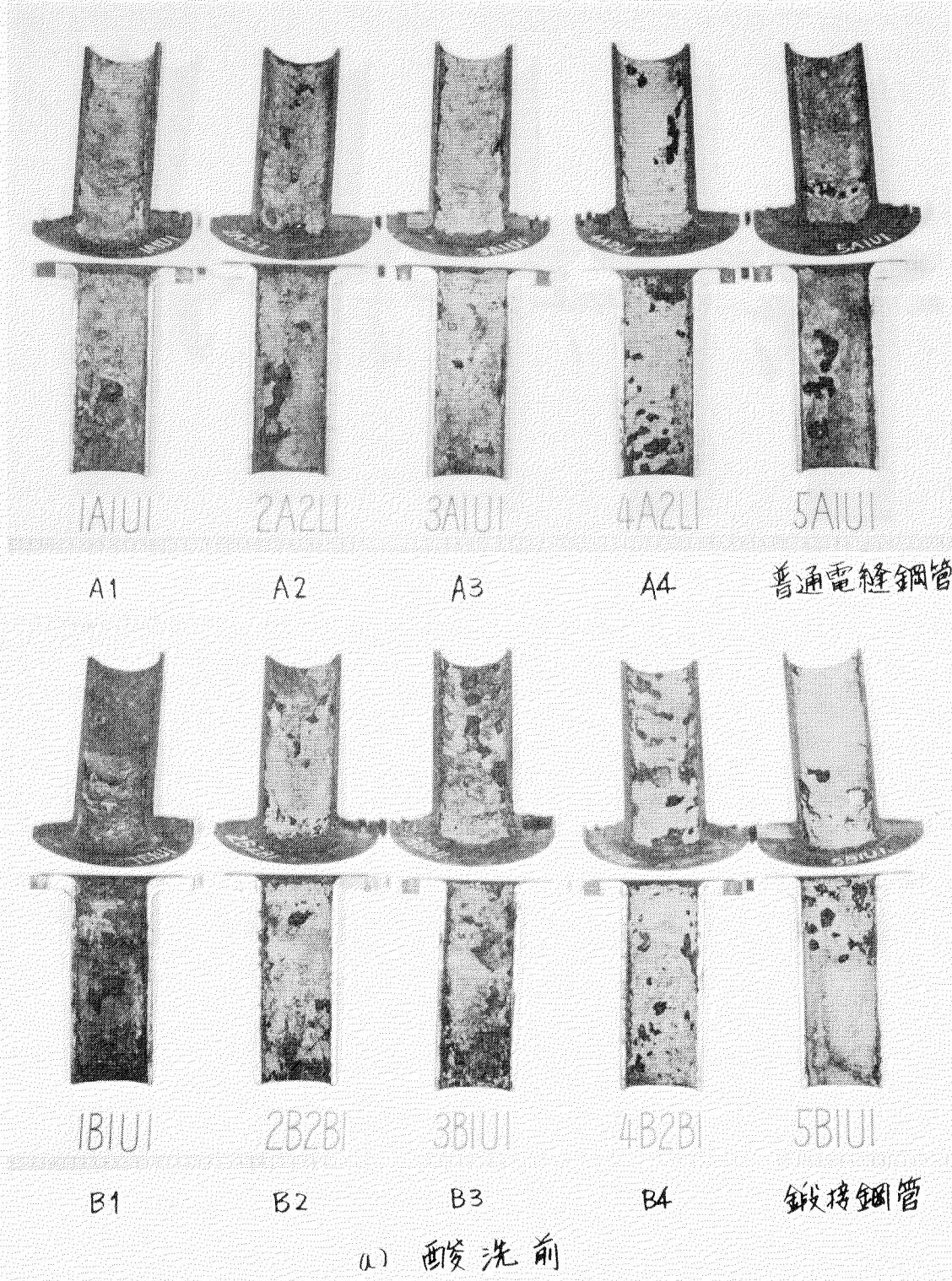
ポリエチレンライニング材

人工切傷

P

X |

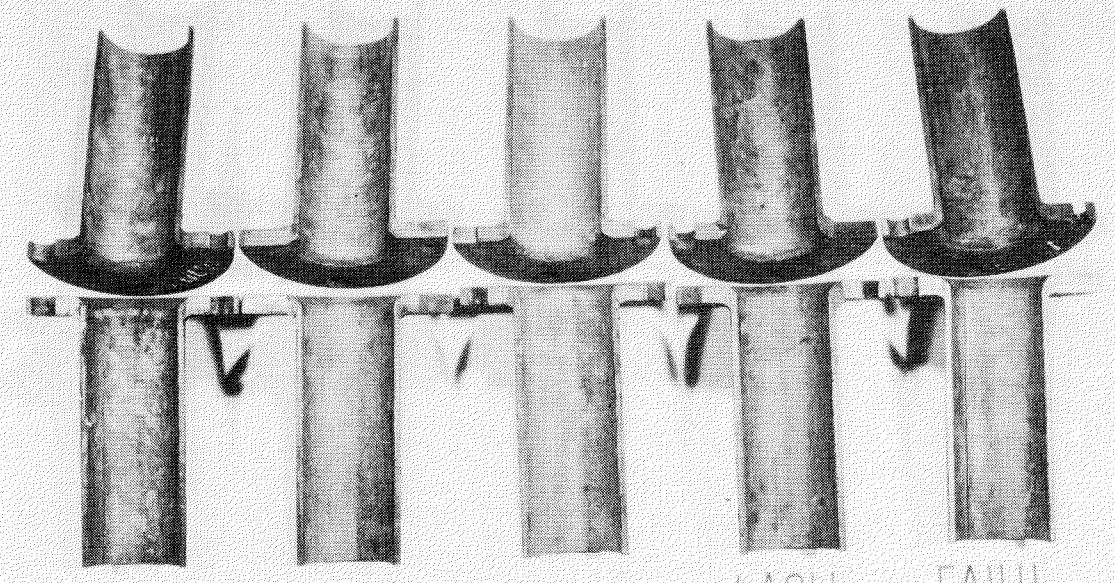
写真 2.2.10 被覆材欠陥部の腐食断面状況 (16.5ヶ月)



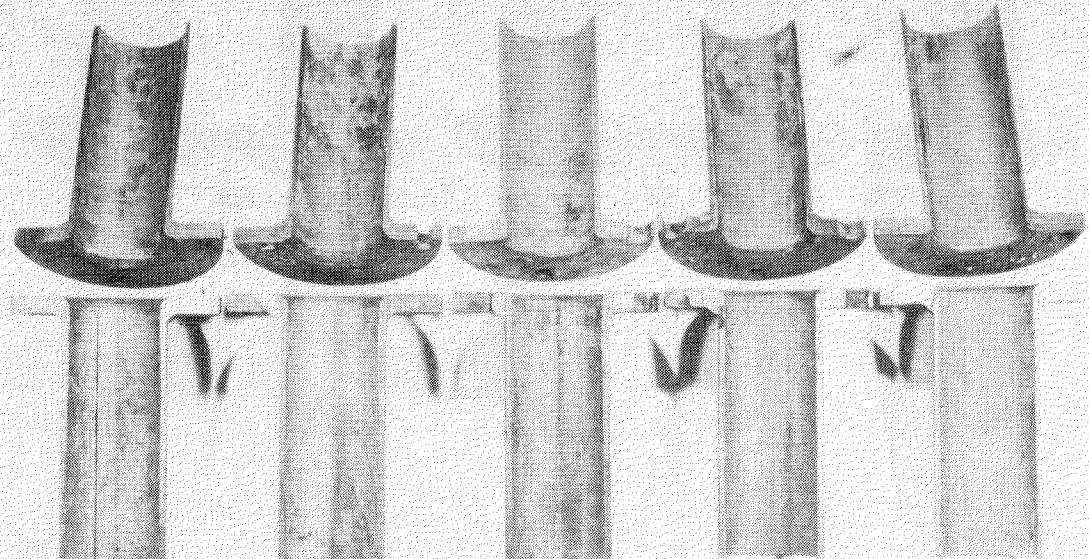
(a) 酸洗前

写真 2.2.1-1 耐溝状腐食性钢管, フランジ部の腐食状況

(差込フランジ, 正常接手, 流入側, 通水期間: 16.5ヶ月)



A1 A2 A3 A4 普通電極鋼管



B1 B2 B3 B4 鍛接鋼管

b) 酸洗後

写真 2.2.1.2 耐溝状腐食性钢管 フランジ部の腐食状況

(差込フランジ, 正常接手, 流入側: 通水期間: 16.5ヶ月)

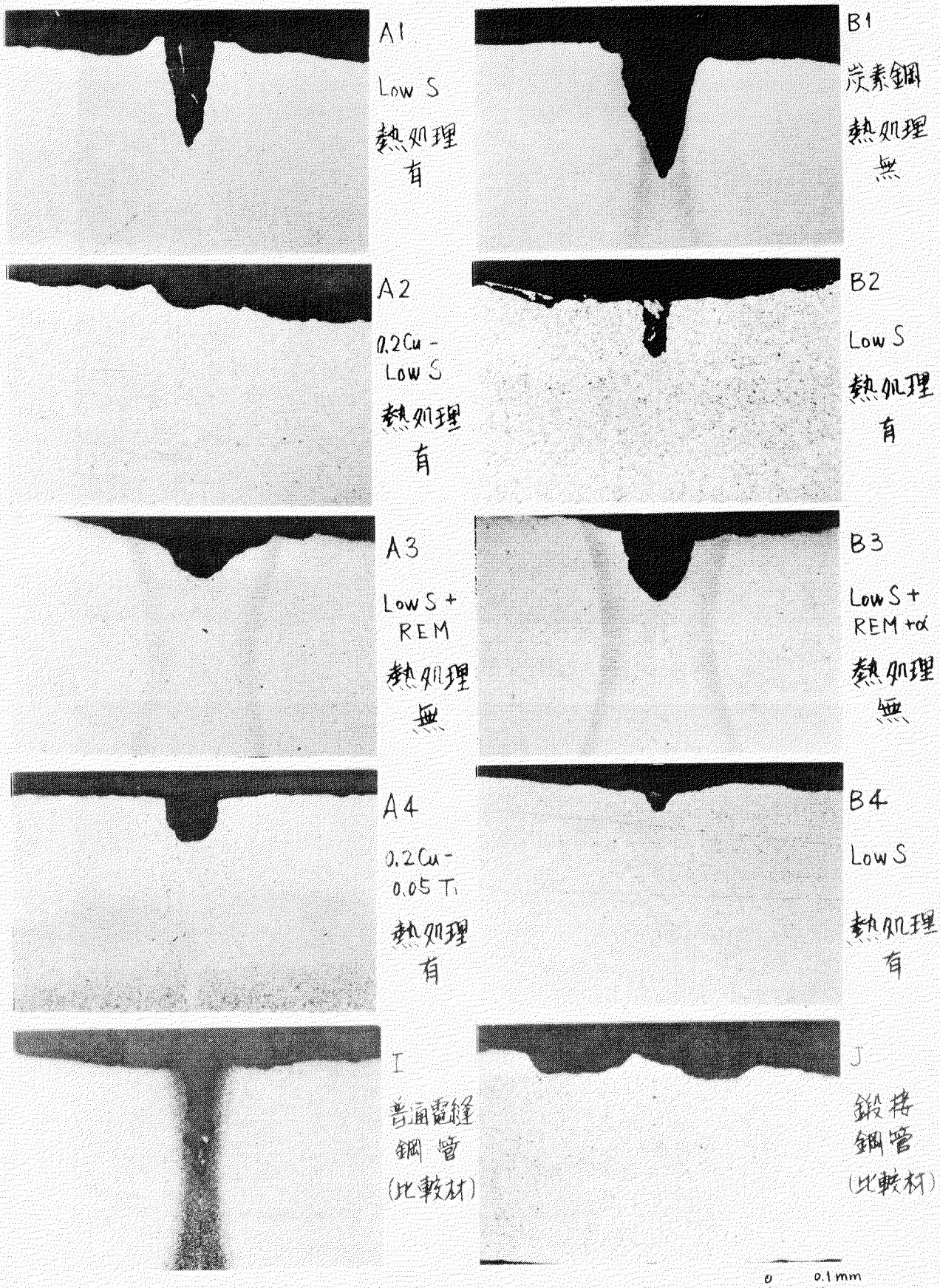
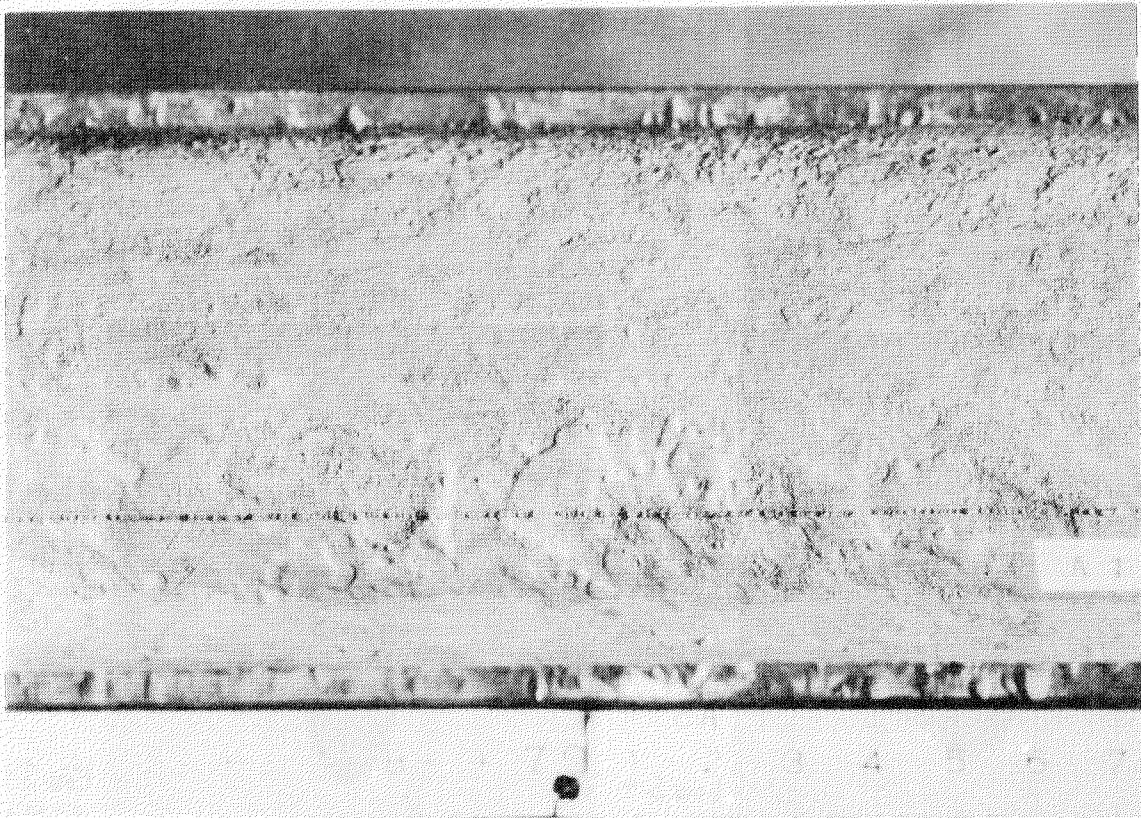
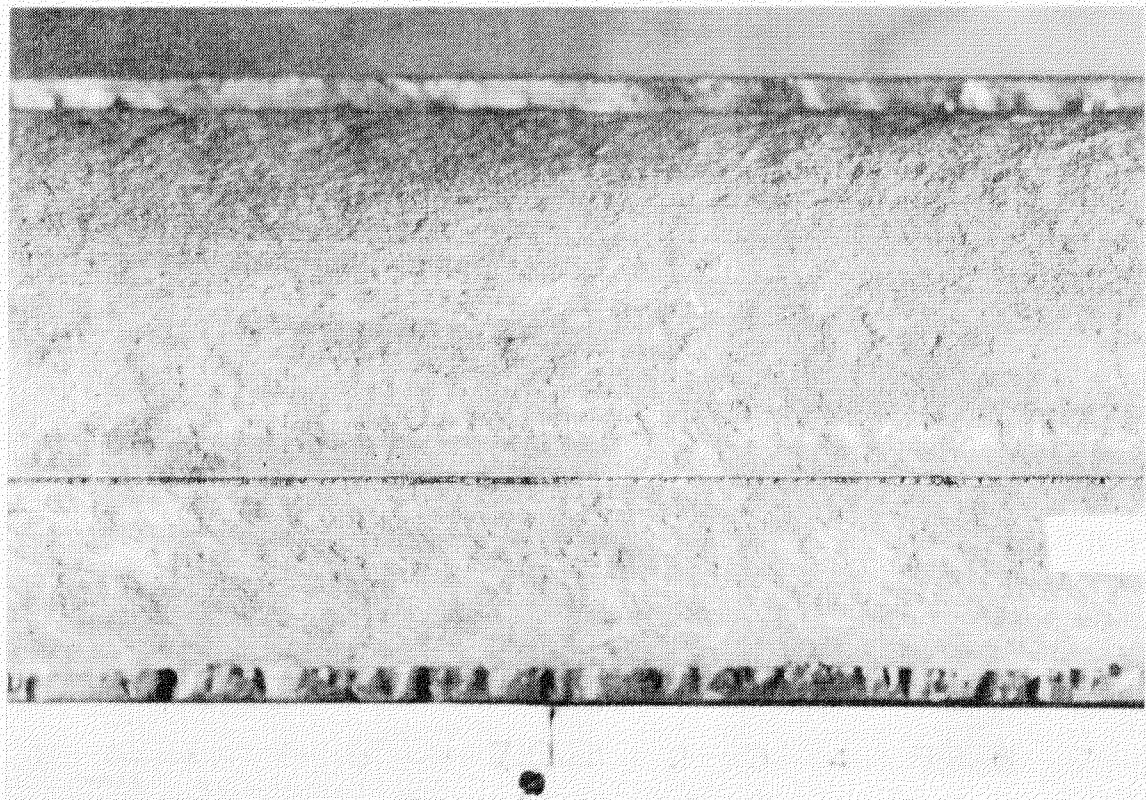


写真 2.2.1-3 シーム部の腐食状況一例(通水期間 16.5ヶ月)

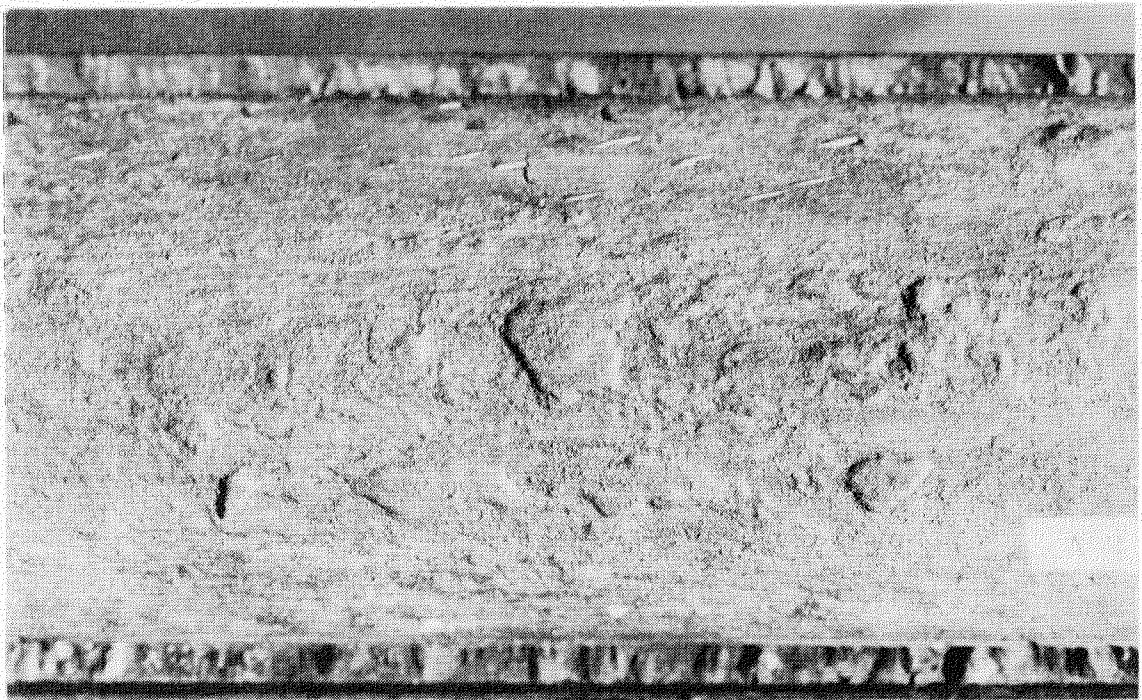


A |

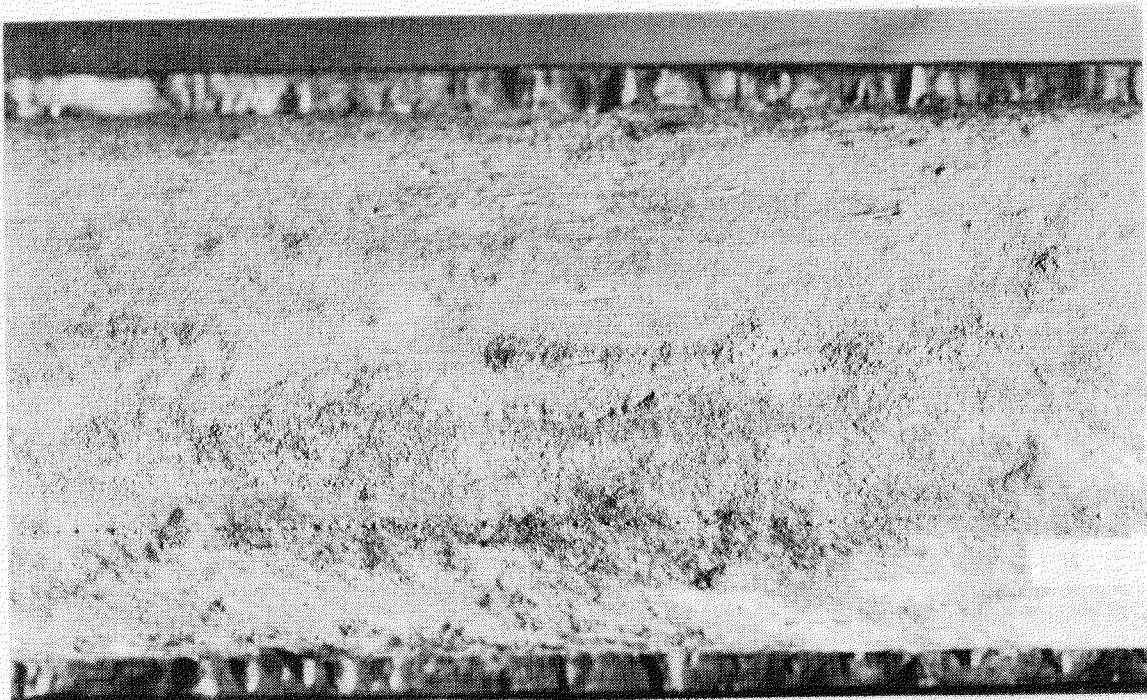


B |

写真 2.2.1-4-1 耐溝状腐食性電縫鋼管直管部管内面腐食状況
(16.5 ケ月試験)

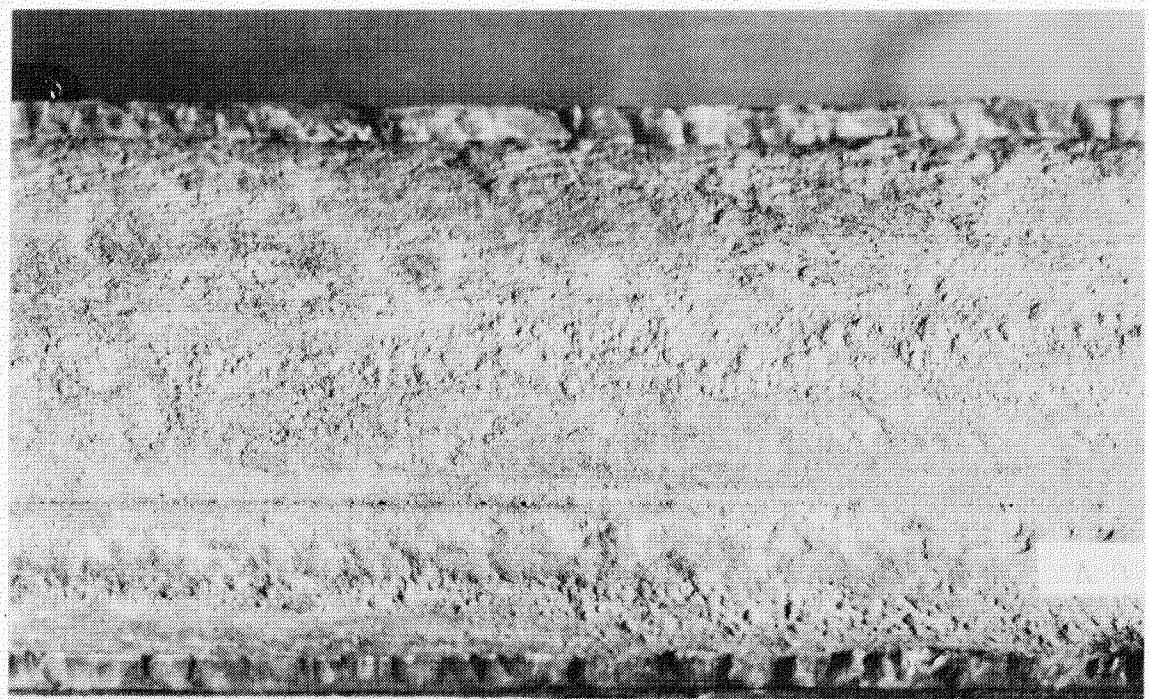


A 2

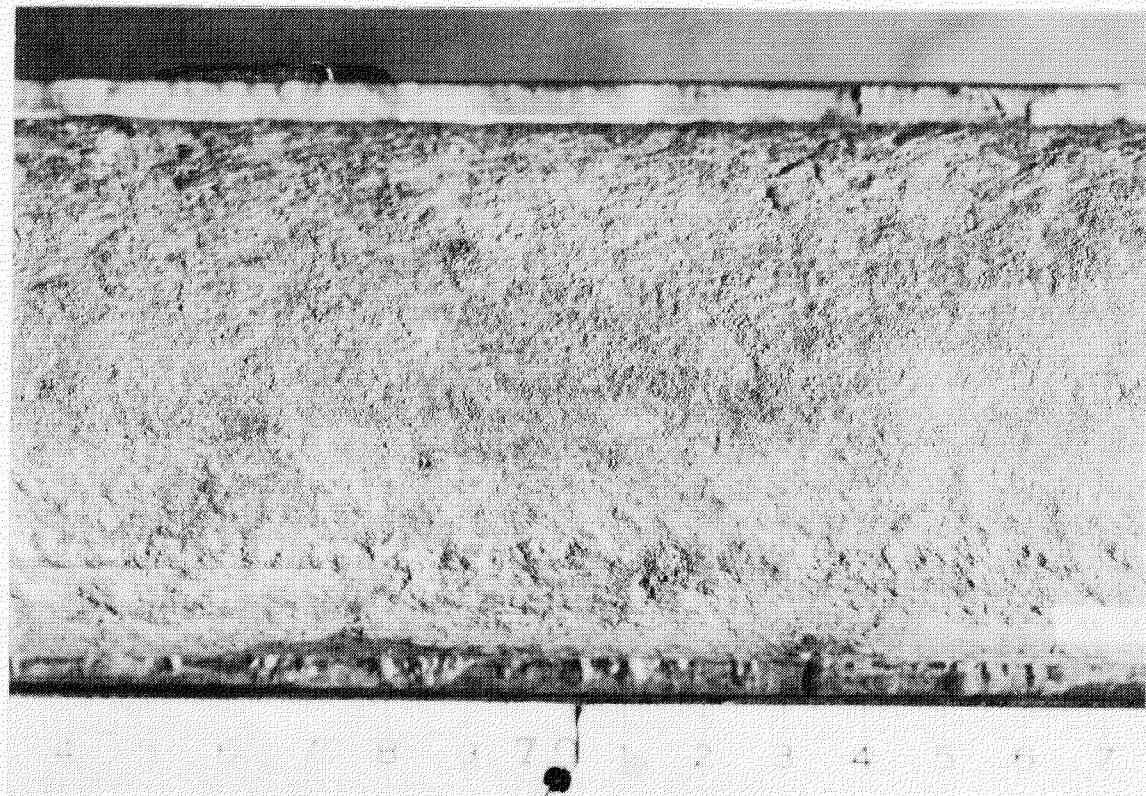


B 2

写真 2.2.1 4-2 耐溝状腐食性電縫鋼管直鋼部管内面腐食状況
(16.5 ヶ月試験)



A 3

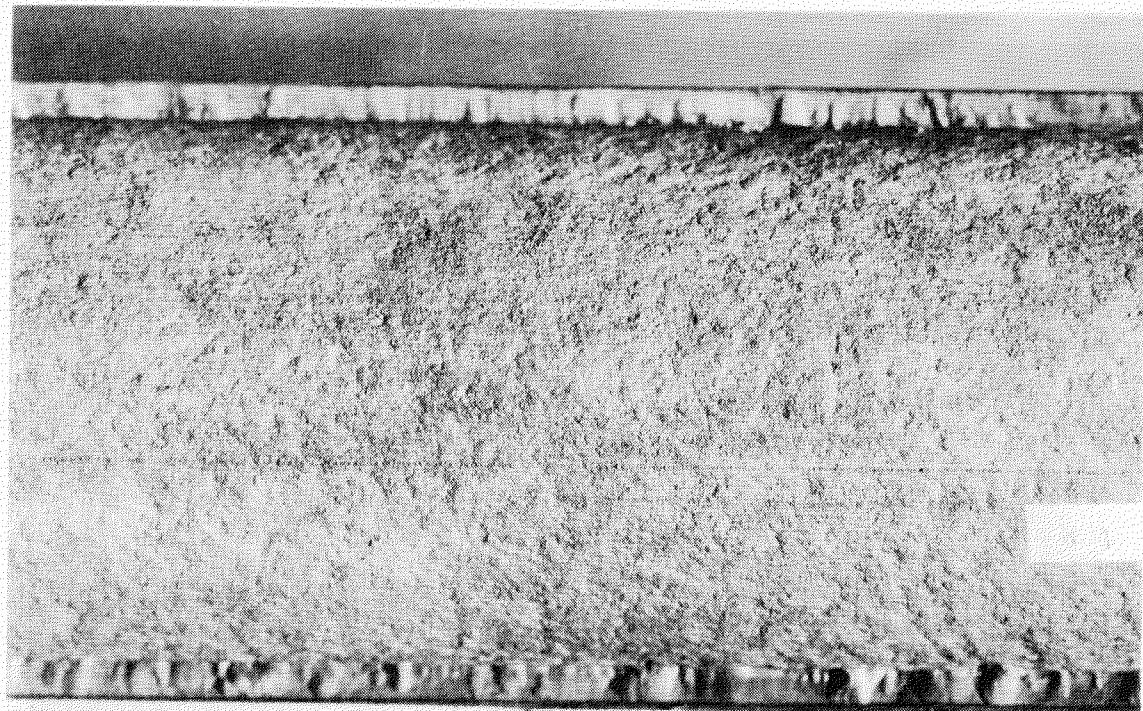


B 3

写真 2.2.1 4 - 3 耐溝状腐食性電縫鋼管直管部管 内面腐食状況
(16.5 ケ月試験)

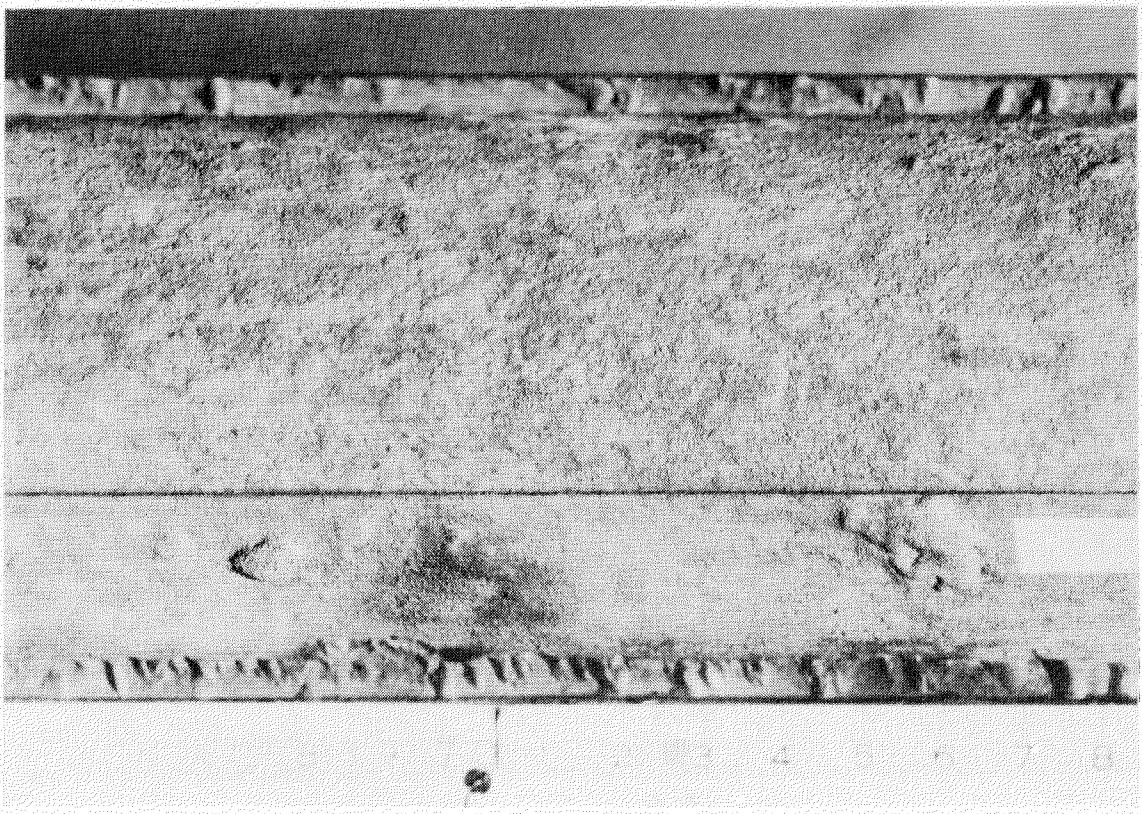


A4

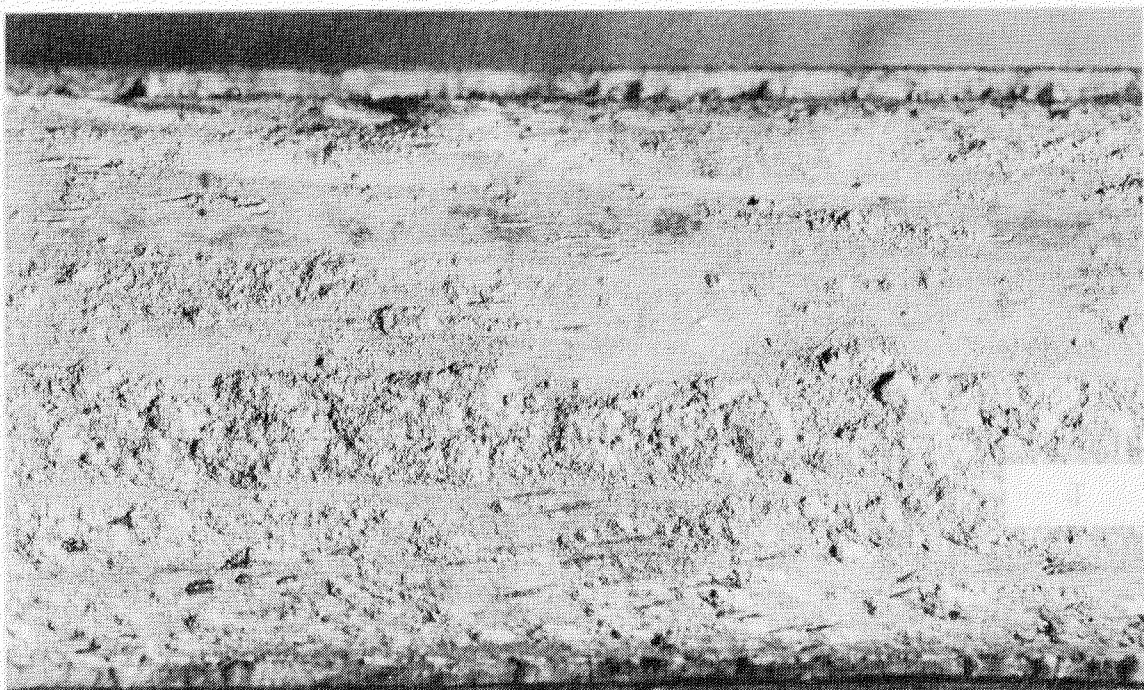


B4

写真 2. 2.1.4-4 耐溝状腐食性電縫鋼管直管部管内面腐食状況
(16.5ヶ月試験)

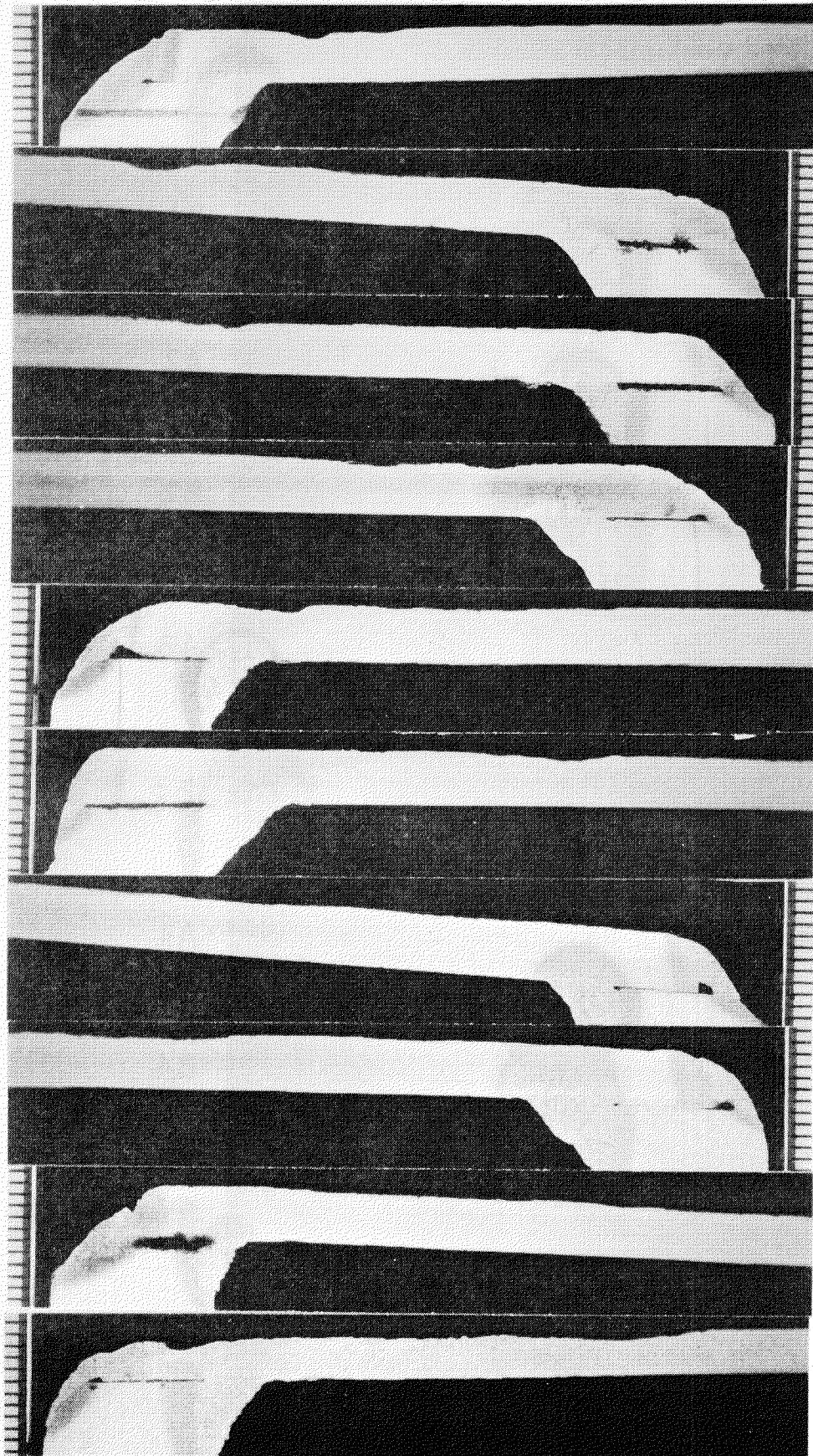


普通電縫鋼管



鍍接鋼管

写真2.2.14-5 比較材直管部管内面腐食状況(16.5ヶ月試験)



A1

B1

A2

B2

A3

B3

A4

B4

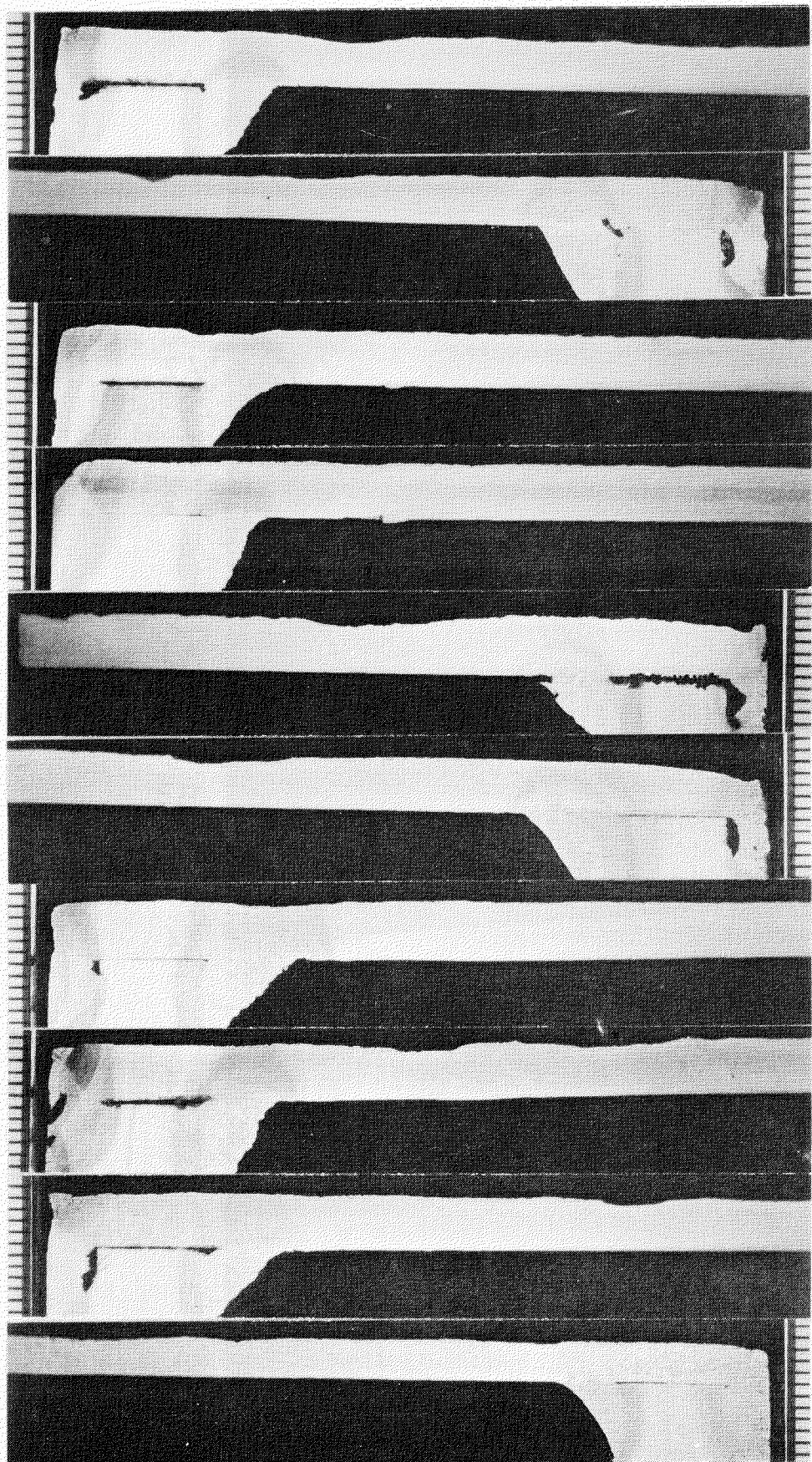
普通電縫鋼管

鍛接鋼管

(× 2)

写真 2.2.15-1 耐溝状腐食性钢管, フランジ部の腐食状況

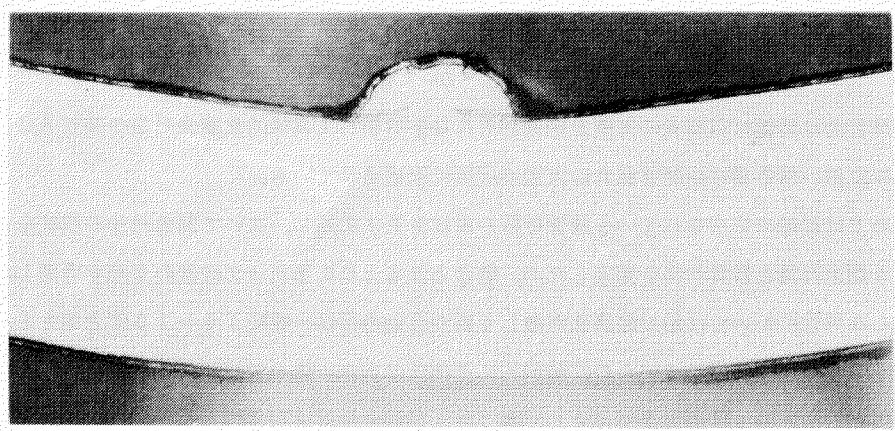
(差込フランジ, 正常継手, 流入側) (通水期間 16.5 ケ月)



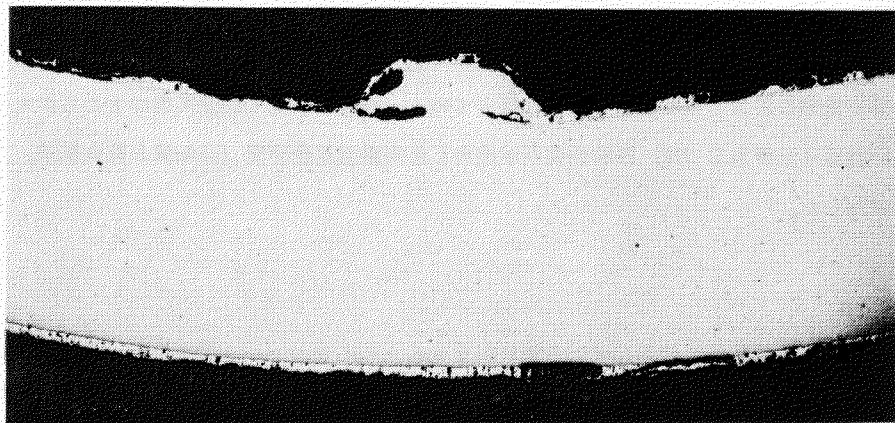
(× 2)

写真 2.2.15-2 耐溝状腐食性钢管, フランジ部の腐食状況

(開先フランジ, 正常継手, 流入側) (通水期間 16.5 ケ月)



a) Zn メッキ



b) Al メッキ

0 0.1 mm

写真 1.6-1 メッキ部の残存状況（通水期間 26.5 ケ月）



0 0.1 mm

写真 2.2.1.6-2 Al メッキ鋼管の腐食部断面

（通水期間 26.5 ケ月）

3 総合とりまとめ

まえがき

本調査、研究の最終目的は諸管材料腐食の実態を把握しそれらを解析して具体的な腐食対策の確立と最適仕様の追求を行なうことにある。各年度毎の報告書には諸管腐食の実態が詳細に記述されている。

この総合とりまとめでは船舶に使用されている諸管材料の現状を先ず記述し、次いで腐食発生の現状をわかりやすくとりまとめた。更に必要な腐食対策と推奨仕様を策定したが、総合とりまとめにあたっては次の2点を考慮した。

- (1) 技術革新の盛んな現代においては船の陳腐化が激しく船の有効寿命は一般に10~15年と考える。船の寿命がつきても諸管材が全く腐食せずに残置しているのは経済的に不均衡である。従って諸管材の寿命は半永久的である必要はないと考えるので、本章においては鋼管を対象とし、銅、および銅合金管は対象外とした。
- (2) 鋼管の寿命として10年を目標とし、10年が難しい管系では少なくとも8年間はメンテナンスフリーを確保することを標準とした。

海水水管系の防食対策が確立するとポンプ、弁、熱交換器等主として銅合金系機器の防食がクローズアップし重要になってくる。本章ではこれ等装置類の防食対策は簡単な記述に終っている。今後の研究・調査に待つところが大きい。

尚本章に引用した諸数値は三菱重工（株）長崎研究所が担当した実験室基礎研究（回転翼車腐食試験、実管テスト）の成果を整理したものを使用した。

3.1 諸管材料の現状

船会社、造船会社で現在標準的に使用している管材料を知るためにアンケート調査を行った。船会社、造船会社各11社から回答を得、集計結果をまとめ表3.1.1表3.1.2に示した。電縫鋼管と鍛接鋼管の使い分けは、一社のみ65%以上が電縫鋼管、50%以下が鍛接鋼管である他は全て125%以上が電縫鋼管、100%以下が鍛接鋼管である。これは鋼管の入手面から区分されているものと思われる。

アンケート結果から目立つ点を各統計毎にまとめると次の通りである。

1) 10Kg/cm²以下の蒸気およびドレン系統

蒸気およびドレン管は同一管材が使われ、船会社一社を除き全てSGPである。なお、今回のアンケート調査では特に回答を求めなかったが、FOタンク内ヒーティングコイルはSTPG-EあるいはSのSch 40と注記の上回答されたものが4件ある。

2) 甲板蒸排気系統

この系統は暴露部に布設されるため管外面の腐食と間欠使用のための管内面の発錆による復水の汚損の両面に対し考慮が払われている。使用管材はSTPG-E(Sch 40)にアルミメッキしたものが大多数を占めているが、船会社の回答の中に蒸排気管共に銅管使用が1件、蒸気管のみ銅管使用が2件あった。

3) 雜用清水系統

この系統は機関室内および居住区内に布設されており、従来から鋼管内面の発錆による赤水に対する苦情が聞かれる系統である。使用管材はSGPに亜鉛メッキが殆んどであるが、居住区内は塩ビ管としている回答がかなりある。又船会社の回答中居住区に至る機関室内鋼管に樹脂被覆をしている例が1件ある。

4) 溫清水系統

この系統には殆んど銅管が使用されている。

5) 冷却清水系統

SGPに亜鉛メッキしたものが殆んどである。ただし、冷却清水に防錆剤を添加する場合は亜鉛メッキしない。

6) 蒸留水系統

S G P, 銅管, 銅合金管および塩ビ管が使用されている。S G Pの場合の管内面処理は無処理, 亜鉛メッキ, 樹脂ライニングと多種の方法が取られている。

7) 海水系統

冷却海水, サニタリー, 消防, バラスト, ビルジおよび雑用海水各系統についてアンケート結果を見ると, 管材は電縫鋼管, 処理は冷却海水系統は200φあるいは250φ以上の口径に対しゴム系ライニングあるいは樹脂系ライニング, それ以下の口径に対し亜鉛メッキであり, その他の海水系統は全口径亜鉛メッキというのが主流となっている。管の内厚はライニング管の場合S G P, 亜鉛メッキの場合はSch 40以上というのが殆んどである。

電縫钢管の電縫部の溝状腐食が問題になっていることから現在の標準仕様として何らかの対策がなされているか興味のもたれる点であるが, 今回の回答の中で海水管系統に継目無鋼管を標準仕様としているのがいくつかあった。しかしその適用区分については各社各様であった。回答単位毎に適用区分をまとめたのが表3.1.3である。

又ビルジ・バラスト系統では管の通過個所により管の内厚を選定し外面の腐食対策を重視している例がある。

8) ソイルドレン系統

この系統の管内厚は船級協会規則により規定されておりSch 80以上の電縫钢管に亜鉛メッキしたものが多い。なお, 奥水より上部については内厚を落しS G Pに亜鉛メッキしているという回答が造船所側に多い。

9) 甲板機器用油圧系統

この系統は暴露部, 非暴露部の両方に布設されているため腐食対策面から仕様差があるのでないかと推測し区別してアンケートしたが1~2の例を除いて同一仕様となっている。甲板機械駆動油圧管は高圧系統のため厚肉钢管が使われている。遠隔操作弁作動油圧管, 制御用油圧管に銅管あるいは銅合金管, 鋼管と銅合金管の混入が多い。又暴露部にステンレス钢管が使われている例もある。又処理については钢管の場合外面にT E塗装を行っているという回答が船会社側に多い。

表3.1.3 海水系統の亜鉛メッキ管に継目無鋼管を使用している例

系 統	回 答	A	B	C	D	E	F
冷却海水	○	○	○	○	○	○	
サニタリー		○	○		○		
消防		○	○			○	
バラスト			○				
ビルジ		○	○				
雑用海水		○	○				

10) イナートガスドレン系統

この系統は強い酸性流体が流れるため充分な腐食対策を要する系統である。回答を見ると全くS G PあるいはS-T P Gにゴム系ライニング又は樹脂系ライニングがなされている。

表 3.1.1 標準管材及び処理調査表(その1) — 造船所

回答群 項目	1				2				3												
	口 径	管 材	処 理	社 数	口 径	管 材	処 理	社 数	口 径	管 材	処 理	社 数									
10K以下の蒸気	125以上	SGP-E	—	5社	125以上	SGP-E	—	1社	全口径	SGP-E	—	2社									
	100~15	SGP-B			100以下	SGP-B															
					20以下	DCuT															
同上蒸気ドレン	各社蒸気系統と同じ																				
甲板蒸気 (暴露部)	全口径	STPG-E Sch 40	アルミメッキ	4社	全口径	STPG-E Sch 40	耐熱 ペイント	2社	全口径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	2社									
甲板排気 (暴露部)	同 上				同 上				1社	同 上											
雑用清水	全口径	SGP-B or PVC	SGPの場合 亜鉛メッキ	2社	※1 全口径	SGP-B B s T or PVC	SGPの場合 亜鉛メッキ	1社	全口径	SGP-E	—	1社									
温清水	全口径	DCuT	—	6社	※2 全口径	SsT or SGP-B	SGPの場合 亜鉛メッキ	1社	20以上 CuT2	—	—	1社									
冷却清水	125以上	SGP-E	亜鉛メッキ	6社	全口径	SGP-E	—	1社	65以上 SGP-E	亜鉛メッキ or 亜鉛メッキ無し (防錆剤投入の 場合)	1社										
	100以下	SGP-B					亜鉛メッキ	1社	50~15 SGP-B												
蒸留水	全口径	DCuT	—	2社	全口径	BST	—	1社	全口径	SGP-B	亜鉛メッキ	3社									
冷却海水	250以上	SGP-E	ネオブレン ライニング	2社	全口径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	全口径	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ	1社									
	200~65	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ																		
	50以下	STPG-E Sch 80																			
	125以上	SGP-E	ポリエチレン ライニング	1社	100~65	SGP-E	亜鉛メッキ (但し甲板機 械用冷却海 水を示す)	1社	250以上 SGP-E	ネオブレン ライニング	1社										
	100~40	SGP-B																			
	32~15	STPG-S Sch 80																			
サニタリー	250以上	SGP-E	ネオブレン ライニング	1社	全口径	SGP-B & PVC	亜鉛メッキ	1社	全口径	SGP-B	亜鉛メッキ	1社									
	200~65	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ																		
	50以下	STPG-E Sch 80																			
	125以上	SGP-E	ポリエチレン ライニング	1社	100~65	SGP-E	亜鉛メッキ	1社	全口径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社									
	100~40	SGP-B																			
	32~15	STPG-S Sch 80																			
消防管	125以上	SGP-E	亜鉛メッキ	5社	全口径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	2社	350以上 STPY t=9.5	亜鉛メッキ	1社										
	100以下	SGP-B							300以下 STPG-E Sch 40												
バラスト	125以上	SGP-E	亜鉛メッキ	3社	400以上 t=1.27	STPY	亜鉛メッキ	1社	400以上 STPY t=1.27	亜鉛メッキ	1社										
	100~15	SGP-B			350以下	STPG-E Sch 40			350~65 STPG-E Sch 40												
		STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ (ラストタンク内)	1社				50以下 STPG-E Sch 80													
		STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ (その他タンク内)																		

4				5				6				7															
口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数												
65 以上	SGP-E	—	1社	125 以上	SGP-E	—	1社	65 ~20	STPG-S Sch 40	EOT内 HEAT COIL 亜鉛メッキ (他二重底内) H/C	1社																
50 ~15	SGP-B			100 ~15	STPG-E Sch 40																						
125 以上	SGP-E	アルミメッキ	1社	125 以上	SGP-E	アルミメッキ	1社	全口径	STPG-E Sch 40	※ タンカーのみ アルミメッキ (外側)	1社																
100 ~15	SGP-B			100 以下	STPG-E Sch 40				SGP-E																		
同 上				同 上				同 上				125 以上	SGP-E	耐熱 ペイント	1社												
												100 以下	SGP-B														
125 以上	SGP-E	亜鉛メッキ	2社	50 ~15	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	全口径	SGP-B	亜鉛メッキ	3社	注 ※1 SGP … 機関室の雑用 BST … DOMESTIC USE PVC … 居住区内															
100 以下	SGP-B			SGPの場合 亜鉛メッキ	50 ~15	STPG-E Sch 40																					
全口径	SGP-B or DcuT	SGPの場合 亜鉛メッキ	2社				1社					注 ※2 BST … DOMESTIC USE SGP … 機関室の雑用															
125 以上	SGP-E		—	1社																							
100 以下	SGP-B																										
全口径	SGP-E	亜鉛メッキ	1社	100 ~40	SGP-B	SGPの場合 内部のみ ポリエチレン ライニング	1社	65 以上	SGP-E	亜鉛メッキ	1社	注 1社回答なし															
				32 以下	DcuT	50 ~15		SGP-B																			
350 以上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	1社	350 以上	STPY	ネオブレン ライニング	1社	250 以上	SGP-E	ポリエチレン ライニング	1社	250 以上	STPG-E Sch 40	ネオブレン ライニング	1社												
300 以下	STPG-E Sch 40			300 ~200	SGP-E	亜鉛メッキ		200 ~65	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ																	
				150 ~65	STPG-E Sch 40			50 以下	STPG-S Sch 80																		
350 以上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	1社	全口径		STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ (海水)	1社	100 以上	SGP-E	亜鉛メッキ	1社	125 以上	SGP-E	亜鉛メッキ	2社											
300 以下	STPG-E Sch 40			全口径		SGP-E	亜鉛メッキ (清水)		90 以下	STPG-E Sch 40			100 以下	SGP-B													
													注 1. 冷却海水に同じ 5社 2. 雜用清水に同じ 2社 3. 雜用海水に同じ 1社														
350 以上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	1社	全口径		STPG-S	亜鉛メッキ	1社	100 ~65	SGP-E	亜鉛メッキ	1社	注 1. 冷却清水に同じ 5社 2. 冷却海水に同じ 3社														
300 以下	STPG-E Sch 40			全口径		SGP-E	亜鉛メッキ		50 以下	STPG-E Sch 40																	
350 以上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	2社	350 以上	STPY $t=9.5$	亜鉛メッキ	1社	250 以上	STPY	亜鉛メッキ	1社		SGP-E STPG-E Sch 40 STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ (通過場所 により管 厚を使い 分ける)	1社												
300 以下	STPG-E Sch 40			以下				200 以下	STPG-E Sch 40																		

回答群 項目	1				2				3			
	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数
ブルジ	125以上	SGP-E	亜鉛メッキ	3社	全口径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	2社	400以上	STPY	亜鉛メッキ	1社
	100~15	SGP-B							350~65	STPG-E Sch 40		
		STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ (プラスチック内)	1社					50以下	STPG-E Sch 80		
		STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ (その他タンク内)									
雜用海水	125以上	SGP-E	亜鉛メッキ	2社	125以上	SGP-E	ポリエチレン	1社	400以上	STPY	亜鉛メッキ	1社
	100~15	SGP-B			100~40	SGP-B	ライニング		350~65	STPG-E Sch 40		
	全口径	SGP-E	亜鉛メッキ	1社	32~15	STPG-S Sch 80	亜鉛メッキ		50以下	STPG-E Sch 80		
ノイルドレン	吃水下	STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ	4社	吃水下	STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ	2社	吃水下	STPG-S Sch 80	亜鉛メッキ	1社
	吃水上	SGP-E			吃水上	STPG-E Sch 40			吃水上	SGP-E		
甲板機械 駆動油圧管	暴露部	STPT-S Sch 80 or Sch 160	—	1社	暴露部	STPG-S Sch 40 or Sch 80	—	5社	全口径	STS-S Sch 160 or Sch 80	—	2社
	非暴露部				非暴露部							
遠隔操作弁 作動油圧管	暴露部	BsTF	—	3社	STS-S or BsTF	—	1社	—	STS-S Sch 80	—	1社	
	非暴露部											
	SUS 304 or BsTF	—	1社	タンク外	STS-S Sch 80	—	1社	—				
	SUS 316 or BsTF			タンク内	BsTF							
制御用油圧管		BsTF	—	4社	全口径	DcuT	—	4社		STS-S Sch 80	—	1社
イナートガス 海水ドレン	125以上	SGP-E	ゴム ライニング	4社	125以上	SGP-E	ポリエチレン ライニング	1社	250以上	SGP-E	ゴム ライニング	2社
	100以下	SGP-B			100以下	SGP-B			200~125		ポリエチレン	
									100以上	SGP-B	ライニング	

4				5				6				7			
口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数
350 以上	STPY $t=12.7$	亜鉛メッキ	1社	350 以上	STPY $t=9.5$	亜鉛メッキ	1社	250 以上	STPY	亜鉛メッキ	1社	SGP-E B STPG-E Sch 40 STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ 通過場所 により管 厚を使い 分ける	1社	
300 以下	STPG-E Sch 40			300 以下	STPG-E Sch 40			200 以下	STPG-E Sch 40						
(注) バラストに同じ 8 社															
350 以上	STPY $t=12.7$	亜鉛メッキ	2社	350 以上	STPY $t=9.5$	亜鉛メッキ	1社	250 以上	STPY	亜鉛メッキ	1社	250 以上	SGP-E	ネオブレン ライニング	1社
300 以下	STPG-E Sch 40			300 以下	STPG-E Sch 40			200 以下	STPG-E Sch 40			200 以下	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ	
(注) 1. バラストに同じ 7 社 2. 冷却海水に同じ 2 社															
吃水 下	STPG-E Sch 40	—	1社	乾舷 甲板下	STPG-E Sch 80 STS Sch 160	亜鉛メッキ	1社	タンク 内	STPG-E Sch 80以上	亜鉛メッキ	1社	全口径	STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ	1社
吃水上	SGP-E			乾舷 甲板上	SGP-E			タンク 外	SOP-E						
(注) 肉厚は圧力により決定															
主管	STPG-S Sch 80	—	1社	タンク 外	STPG-S	—	1社	DcuT	—	1社	DcuT or SUS	—	1社	—	1社
枝管	DcuT			タンク 内	BsTF										
(注) 作動油圧管と同じ 5 社															
200 以上	BsTF or DcuT 2	—	1社	ゴム ライニング	1社	全口径	SGP-E	ポリエチレン ライニング	1社	全口径	STPG-E $t=$ $\max 12.7$	ネオブレイ ライニング	1社	—	—
150 ~125				ポリエチレン ライニング											
100 以下	SGP-B														

表 3.1.2 標準管材及び処理調査表(その2) — 船会社

回答群 項目	1				2				3			
	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数
10K以下の蒸気	全口径 (15~500)	SGP-E	—	5社	125 以上	SGP-E	—	1社	20 以上	SGP	タンク加熱管 はSTPG Sch 80	1社
					100 以下	SGP-B			15	DcuT		
同上蒸気ドレン	全口径	SGP-E	—	6社	125 以上	SGP-E	—	1社	20 以上	SGP	—	1社
					100 以下	SGP-B			15 以下	DcuT		
甲板蒸気 (暴露部)	全口径	STPG-E Sch 40	アルミメッキ	4社	全口径	DcuT	—	3社	全口径	STPG-E Sch 80	アルミメッキ	1社
甲板排気 (暴露部)	全口径	STPG-E Sch 40	アルミメッキ	3社	全口径	DcuT	—	1社	全口径	KST-338 Sch 40 又は STPG-E Sch 40	—	1社
		STPG-E Sch 80										
雑用清水	全口径	SGP-E 又は (SGP-B)	亜鉛メッキ	6社	全口径	PVC 又は SGP-E	—	3社	全口径	PVC	—	1社
温清水	全口径	DcuT	—	全社								
冷却清水	全口径	SGP-E	亜鉛メッキ	7社	全口径	SGP-B	亜鉛メッキ	1社	125 以上	SGP-E	亜鉛メッキ (防錆剤添加 の場合はメ ッキしない)	2社
									100 以下	SGP-B		
蒸留水	全口径	DcuT	—	3社	全口径	PVC	—	2社	全口径	SGP-E	亜鉛メッキ	2社
冷却海水	65 以上	SGP-E 又は STPG-E	ポリエチレン コーティング又 はネオブレン ライニング アルマ-加工	1社	250 以上	SGP-E	ポリエチレン コーティング	1社	250 以上	SGP-E	ネオブレン ライニング	1社
					200 ~65	STPG Sch 40	亜鉛メッキ		200 以下	STPG-E	亜鉛メッキ	
	50 以下	STPG-S Sch 80	又は 亜鉛メッキ		50 以下	STPG-S Sch 80						
	350 以上	STPY41	ネオブレン ライニング	1社	350 以上	SGP t=7.9	ポリエチレン ライニング	1社	50 以上	SGP-E	高周波 ライニング	1社
		SGP-E			300 ~100	SGP	40 以下		STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ		
	200 以下	STPG-E	亜鉛メッキ	1社	80 ~65	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ					
					50 ~15	STPG-S Sch 80						
サニタリー	50 以上	SGP-E	亜鉛メッキ (清水使用の場合) (PVCを多用する)	1社	上甲板 より下	STPG-E	亜鉛メッキ	1社	全口径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社
					上甲板 より上	PVC				清水サニタリ SGP-E	亜鉛メッキ	
	40 以下	STPG-E Sch 40	高周波 ライニング 亜鉛メッキ	1社	350 以上	SGP t=7.9	ポリエチレン ライニング	1社	全口径	P.V.C 又は SGP-B	亜鉛メッキ (サニタリー 系統は海水 を使用)	1社
					300 ~100	SGP						
					80 ~65	STPG-S Sch 40						
					50 ~15	STPG-S Sch 80						

4				5				6				7			
口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数
25 以上	STPG-E	—	1社	15 以上	STPG-E Sch 40	—	1社	350 以上	STPY 41 Sch 80	—	1社	100 ~15	SGP-B	—	1社
15	DcuT1							300 ~15	SGP-E						
25 以上	STPG-E	—	1社	125 以上	SGP-E	—	1社	100 ~15	SGP-B	—	1社				
15	DcuT1			100 以下	STPG-E Sch 40										
250 以上	STPY	アルミメッキ	1社	100 以上	SGP-E	アルミメッキ	1社	全口径	SGP-E	アルミメッキ	1社				
200 以下	STPG-E			80 以下	SGP-B										
250 以上	STPY	アルミメッキ (1社は 外側のみ)	2社	100 以上	SGP-E	アルミメッキ	1社	全口径	SGP-E	アルミメッキ	1社	主 管 Sch 40	—	1社	
200 以下	STPG-E			80 以下	SGP-B							枝 管 DcuT			
機 関 室 内		居住区に 至るまで ポリエチ レンライ ニング機 関室亜鉛 メッキ	1社												
100 ~15	SGP-B														
居住区 全口径	PVC又は COPPER	—													
全口径	STPG-E	—	1社												
全口径	SGP-B	—	1社	全口径	SGP	但し造水器～ 蒸留水タンク間の管は DcuT又は ポリエチレン ライニング	1社	全口径	SGP	スミコート 又は ポリエチレン ライニング	1社	25	SGP-B	ポリエチレン コーティング	1社
MARINE GROWTH PPEV ※ STPG-E ポリエチレンライニング				400 以上	STPY-41 t=7.9以上	ゴムライニング 又は コート	1社	350 以上	STPY-41	1社	550 以上	STPY-41	亜鉛メッキ 又はポリラ イニング又 はネオブレ ンライニング	1社	
250 以上	STPY t=1.27	200 以上	SGP-E	250 以上	STPG-S			500 ~125	SGP-E 又はSGP-B						
200 ~65	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	50 以上	STPG-E	亜鉛メッキ	1社	65 以上	STPG-S	亜鉛メッキ	100 ~65	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	
50 以下	STPG-E Sch 80			40 以下	Sch 40			15 以上	Sch 40		50 以下	STPG-S Sch 80			
250 以上	SGP	ネオブレ ンライニング	1社	200 以上	SGP-E	ポリエチレン コーティング	1社								
200 ~50				150 ~125	STPG-385 Sch 40										
40 ~15	STPG Sch 80	亜鉛メッキ		100 ~15	SGP-B	亜鉛メッキ									
65 以上	STPG-S Sch 40	—	1社	500 以下	SGP-E 又は (SGP-B)	亜鉛メッキ	2社	250 以上	STPY t=1.27	亜鉛メッキ	350 以上	STPY 41	ネオブレ ンライニング	1社	
50 以下	STPG-S Sch 80	—						200 ~65	STPG-E Sch 40		300 ~250	SGP-E			
								50 以下	STPG-E Sch 80		250 以下	STPG-E	亜鉛メッキ		
													計		
													1. 冷却海水に同じ4社		
													2. 冷却淡水に同じ1社		

回答群 項目	1				2				3			
	口 径	管 材	処 理	社 数	口 径	管 材	処 理	社 数	口 径	管 材	処 理	社 数
消 防 管	6 5 以 上	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ	2社	全 口 径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	2社	全 口 径	SGP-E (又は SGP-B)	亜鉛メッキ	4社
	5 0 以 下	STPG-S Sch 80										
バ ラ ス ト	全 口 径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	2社	5 0 以 上	STPG-E Sch 40	—	1社	6 5 以 上	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ	1社
					4 0 以 下	STPG-E Sch 80			5 0 以 下	STPG-S Sch 80		
	2 5 0 以 上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	1社	I.N.TK P/R SUC	SC42	—	1社				
	2 0 0 以 下	STPG-E Sch 80			そ の 他	STPG Sch 80	亜鉛メッキ					
					全 口 径	STPG Sch 40	亜鉛メッキ					
ビ ル ジ	全 口 径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	2社	6 5 以 上	STPG-S Sch 40	—	1社	6 5 以 上	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ	1社
					5 0 以 下	STPG-S Sch 80			5 0 以 下	STPG-S Sch 80		
	2 5 0 以 上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	1社	タンク 内	STPG Sch 80	亜鉛メッキ	1社				
	2 0 0 以 下	STPG-E Sch 80			そ の 他	STPG Sch 40						
雜 用 海 水	全 口 径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	6 5 以 上	STPG-S Sch 40	—	1社	6 5 以 上	STPG-S Sch 40	亜鉛メッキ	1社
					5 0 以 下	STPG-S Sch 80			5 0 以 上	STPG-S Sch 80		
	2 5 0 以 上	STPY $t=1.27$	亜鉛メッキ	1社			亜鉛メッキ	1社	3 5 0 以 上	STPY 41	ネオブレン ライニング	1社
	2 0 0 ~ 6 5	STPG-E Sch 40			全 口 径	SGP			3 0 0 ~ 2 5 0	SGP-E		
	5 0 以 下	STPG-E Sch 80							2 5 0 以 下	STPG-E	亜鉛メッキ	
ソ イ ル ド レン	全 口 径	STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ	2社	全 口 径	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	上 甲 板 下	STPG-E Sch 80	亜鉛メッキ	1社
									上 甲 板 上	STPG-E Sch 40 又はPVC		
	吃 水 下 5 0 以 上	STPG- Sch 80	亜鉛メッキ	1社	舷 外 排 水	STPG Sch 80	亜鉛メッキ	1社	船 外 ビ ー ス	SM 41A	外板に同じ	1社
	吃 水 上 1 2 5 ~ 2 5	SGP-E			そ の 他	SGP			そ の 他	SGP-E	亜鉛メッキ	
甲 板 機 械 駆 動 油 圧 管	—	STPT-S	1社	暴 露 部	STPG-S Sch 80 ~ Sch 40	アルミメッキ 外面T/E	2社	—	B s T F D e u T - 1	--	1社	
		STPT-S Sch 80~160			非 暴 露 部	—						

4				5				6				7				
口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	
65 以上	STPG-E Sch 40	亜鉛メッキ	1社	250 以上	STPY	亜鉛メッキ	1社	125 以上	SOP-E	高周波 ライニング	1社					
50 以下	STPG-E Sch 80			200 以下	STPG-E			40 ~15	SGP-B	亜鉛メッキ						
125 以上	SGP-E	亜鉛メッキ	2社	400 以上	STPY41	亜鉛メッキ C.O.T内 (Cは銹鋼 使用が多 い)	1社	全口径	SCH-CF	C.O.T.B.A.T ポンプ室内	1社	500 以下 又はB	SGP-E 又はB	亜鉛メッキ	1社	
100 ~15	SGP-B	亜鉛メッキ		350 ~65	STPG-E Sch 40			400 以上	STPY41	亜鉛メッキ	1社	80 以上	STPG-S Sch 80	亜鉛メッキ	(F.O.T内)	
				50 以下	STPG-E Sch 80			350 以下	STPG-E	(上記以外)		65 以上	STPG-S Sch 160			
												50 以上	STPG-S Sch 80	(二重底内)		
125 以上	SGP-E	亜鉛メッキ	2社	400 以上	STPY41	亜鉛メッキ	1社	250 以上	STPY41	亜鉛メッキ	1社	500 以下 又はB	SGP-E 又はB	亜鉛メッキ	1社	
100 ~15	SGP-B	亜鉛メッキ		350 ~65	STPG-E Sch 40			200 以下	STPG-E	亜鉛メッキ		80 以上	STPG-S Sch 80	亜鉛メッキ	(F.O.T内)	
				50 以下	STPG-E Sch 80							65 以下	STPG-S Sch 160			
400	STPY41	ネオブレン ライニング	1社	400 以上	STPY41	亜鉛メッキ	1社		PVC	居住区内	1社	500 以下	SGP-E (又は SGP-B)	亜鉛メッキ	1社	
350 ~15	STPG-S	亜鉛メッキ		350 ~65	STPG-E Sch 40											
200 以上	SGP-E	ポリエチレン コートイング	1社	50 以下	STPG-E Sch 80											
150 ~125	STPG Sch 40	亜鉛メッキ														
100 ~15	SGP-B															
吃水 下	STPG-S Sch 120 又は Sch 80	亜鉛メッキ	1社	150 以上	STPG-E	亜鉛メッキ	1社	250 以上	STPY41	亜鉛メッキ	1社		SGP	亜鉛メッキ	1社	
吃水上	SGP-B 又は SGP-E	亜鉛メッキ		100 以下	PVC	—		200 以下	STPG-E	亜鉛メッキ	1社		又は PVC	—		
高压側	使用圧力に より STPG-S Sch 40, 80,160	外面T/E	1社	压力部	STPG-S Sch 40	暴露部 亜鉛メッキ 外面	1社	40K 以下	STPG-S Sch 80	※ 暴露甲板 上は STPG	1社	25 以上	STS-38 Sch 160 又は STPG-38 Sch 40	—	1社	
低压側	STPG-E Sch 40 以上	压力部 以外		STPG-E Sch 40	T/E×2			20K 以下	STPG-E Sch 40				20 以下	BSTF		
								10K 以下	SGP-E※							

回答群 項目	1				2				3			
	口 径	管 材	処 理	社 数	口 径	管 材	処 理	社 数	口 径	管 材	処 理	社 数
遠隔操作弁 作動油圧管	—	BsTF	—	2社	全 口 径	A ℓ Brass (C)	—	1社	2 5	A ℓ Brass	—	1社
	暴露部	SUS又は BsTF	—	1社	主 音	UP.DK SUS 302 非 STPG 暴露部 Sch 80	—	1社				
	非 暴露部	BsTF又は STPG	—		校 管	IN.TK SUS 316 UP.DK DcuT 非暴露部 STPG.Sch 80	—					
制御用油圧管		BsTF	—	2社	全 口 径	DcuT -1 又は A ℓ - Brass(C)	—	1社	暴 露 部	SUS	—	1社
	タンク内 その 他	BsTF DcuT	—	1社					非 暴 露 部	STPG		
イナートガス 海水ドレン	—	STPG-E	ポリエチレン ライニング	1社	全 口 径	STPG-E Sch 80	ポリエチレン ライニング	1社	全 口 径	STPG-W Sch 40	ポリエチレン コーティング	1社
	250 以 上	SGP	ゴム ライニング	1社	350 以 上	STPY41	ポリエチレン ライニング	1社	350 ~ 300	SGP-E	ネオブレン ライニング	1社
	200 以 下	PVC	—		300 以 下	SGP-E	ポリエチレン ライニング		65	SUS	—	

4				5				6				7					
口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数	口径	管材	処理	社数		
高圧側	STPG-E Sch 80	外面 T/E	1社	暴露部 非暴露部	STS-S Sch 80	亜鉛メッキ 外面 T/E × 2	1社	40K	STPG-S Sch 80	暴露部 は外面 T/E × 2	1社	主 管 Bs TF		—	1社		
低圧側	STPG-E Sch 40							20K	STPG-E Sch 40			暴露部 及タンク内 Bs TF					
								10K 以下	SGP-E			その他 KST338					
高圧側	STPG-E Sch 80	外面 T/E	1社	暴露部 非暴露部	STS-S Sch 80	亜鉛メッキ 外面 T/E × 2	1社	40K	STPG-S Sch 80	同 上	1社	UP.DK-SUS 302		—	1社		
低圧側	STPG-E Sch 40							20K	STPG-E Sch 40			IN.TK SUS 316					
—	SGP-E							10K 以下	SGP-E			UP.DK DcuT					
350 ~300	STPY41	ゴム ライニング	1社	100 以上	SGP-E	ゴム ライニング	1社	300 以上	SGP-E	ネオブレン ライニング	1社	250 以上	SGP-E	ゴム ライニング	1社		
65 以下	SUS 32			100 以下	SGP-B	ポリエチレン ライニング		100 以下	SGP-B			200 以下	SGP-E	ポリエチレン コーティング			
		Hypalon Super coat Scrubber drain pipe	1社														
		Sealed drain pipe															

3.2 腐食発生の現状

3.2.1 概要

船舶諸管材料腐食に関する調査研究の一環として数十隻の調査船について4ヶ年にわたり、諸種の項目に関してアンケート調査を行なった。即ち損傷発生期間、その発見の経緯、個所（系統、配管、場所、部位その他）、配管仕様（管材質、管体処理等）、腐食状況（形態、程度、範囲その他）、外部状況その他諸項目に対するアンケートを実施した。

また就航船を対象として「就航船の開放調査要領」にもとづき調査を行ない、管系統、管仕様と腐食形態、亜鉛メッキ鋼管の系統別腐食速度の比較、甲板上蒸排気管の発錆速度比較その他項目についての調査測定を行なった。

本節においては前述の諸データを基にして諸管材料腐食の現状についての考察を試みた。以下にその内容を述べることにする。

3.2.2 損傷発生にいたる使用期間および発見経緯

使用期間に関する4ヶ年間の累計を表3.2.1 また発見の経緯については表3.2.2に示す。

表3.2.1 損傷発生にいたる使用期間

使 用 期 間	損 傷 件 数	比 率
0 ~ 12ヶ月	13件	1.8%
~ 24〃	14〃	2.0〃
~ 36〃	81〃	11.5〃
~ 48〃	195〃	27.5〃
~ 60〃	122〃	17.3〃
~ 72〃	134〃	19.0〃
~ 84〃	82〃	11.6〃
~ 96〃	19〃	2.7〃
97ヶ月 ~	47〃	6.6〃

表3.2.2 損傷発見の経緯

発 見 経 緯	件 数	比 率
破 孔	305件	43.9%
漏 洩	380〃	54.8〃
膨 出	5〃	0.7〃
開 放 時	4〃	0.6〃

損傷事故の発生は就航後3~4年経過してから多発するようになりまたその発見は破孔、漏洩によるものが殆んどであることがわかった。

3.2.3 管系統別腐食状況および管仕様と腐食状況

管系統別損傷件数（表3.2.3）管体処理と損傷件数（表3.2.4）管系統別管仕様と腐食状況（表3.2.5）および各系統の腐食速度（表3.2.6）を以下に示す。

表3.2.3 管系統別損傷事故件数（アンケート4ヶ年の累計）

管 系 統	損 傷 件 数	比 率
① 主補冷却海水系統	384 件	57.0 %
② ①以外の常用海水（サニタリー等）系統	135 " "	20.0 "
③ ①②以外の海水（ビルジ、バラスト）系統	28 "	4.2 "
④ 甲板上蒸排氣系統	67 "	9.9 "
⑤ 甲板上作動及び制御用油圧系統	33 "	4.9 "
⑥ 蒸溜水系統	13 "	1.9 "
⑦ その他の系統	14 "	2.1 "
	676 "	100.0 "

表3.2.4 管内外面処理と損傷件数（アンケート4ヶ年の累計）

処 理 内 容		損 傷 件 数	比 率
内 面	無 処 理	182 件	29.2 %
	亜 鉛 メ ッ キ	424 "	67.8 "
	アルミメッキ	0 "	0 "
	ゴムライニング	10 "	1.6 "
	そ の 他	9 "	1.4 "
外 面	無 塗 装	56 "	7.8 "
	亜 鉛 メ ッ キ	406 "	56.2 "
	アルミメッキ	2 "	0.3 "
	ラ ギ ン グ	31 "	4.3 "
	塗 装 そ の 他	227 "	31.4 "

表3.2.5 管系統別管仕様と腐食状況（開放調査結果）

管 系 統	管 仕 様	調査件数	腐 食 形 態 の 分 類
① 主・補冷却海水系統	合 成 ゴ ム 被 覆	3 件	良 好
	亜 鉛 メ ッ キ 鋼 管	10 "	腐食大 破孔件数…… 3
	鋼 管 (ベ ア)	1 "	シ - ム 部 破 孔
② ①以外の海水系統 (サニタリー等)	合 成 ゴ ム 被 覆	0 "	-
	亜 鉛 メ ッ キ 鋼 管	11 "	腐食軽微 但し局部で腐食大 破孔件数…… 4
	鋼 管 (ベ ア)	0 0 "	-

③ ①②以外の海水系統 (ビルジ・バラスト等)	亜鉛メッキ鋼管	10 件	良好 溶接補修施行件数……1
	钢管(ペア)	0 //	-
④ 甲板上蒸排気系統	アルマ一加工管	3 //	良好
	亜鉛メッキ管	2 //	管外面……腐食大 管内面……良好
	钢管(ペア)	2 //	管外面……腐食大 孔食破孔件数……1
	銅管	2 //	良好
⑤ 甲板上作動及び制御用油圧系統	钢管 (外面塗装のみ)	5 //	管外面発錆あるも良好
⑥ 蒸溜水系統	亜鉛メッキ鋼管	3 //	良好
	銅管	0 //	-
⑦ その他の系統	-	-	-
計		52 //	破孔による新替管……10件

表 3.2.6 亜鉛メッキ鋼管の年度別腐食速度比較表

調査年度	① 主補冷却海水系統		② ①以外の常用海水系統		③ ①②以外の海水系統 (ビルジ・バラスト)	
	平均腐食速度	最大腐食速度	平均腐食速度	最大腐食速度	平均腐食速度	最大腐食速度
S48年度	0.22	0.40	0.13	0.27	0.03	0.16
S49年度	0.29	0.43	0.14 (0.57)	0.45 (1.05)	0.10 (0.23)	0.28 (0.83)
S50年度	0.39 (0.78)	0.77 (1.57)	0.21	0.43	0.29	0.60
S51年度	0.37	0.64	0.21	0.41	0.11	0.29

注) 平均腐食速度および最大腐食速度の数値は全調査船の平均値である。また() 数値はその時点における最大値である。

以上の結果をまとめるとつきのごとくになる。

損傷例の多いのは常時海水を使用する管系統で冷却海水管及び常用海水管系で内面よりの腐食による破孔、また蒸排気管及び作動制御用管系など曝露環境下におけるものの外面よりの腐食に起因する損傷も目立っている。

管仕様(防食処理)と損傷事故との関係については亜鉛メッキ鋼管の事故例が多い、これはその使用量が多いことにも原因はあるが、海水中における亜鉛の耐食性に影響されているものと推察される。またアルミメッキは甲板蒸排気管外面に適用して効果をあげている。ゴムライニングも良好な結果を得ている。

3.2.4 管材質と腐食状況

諸管材の材質として最も広く使われているのは電縫、鍛接及び継目無鋼管などの炭素鋼管である。これらの腐食状況をみると材質的には電縫钢管が多く使われているので当然のこととして腐食件数(71.4%)も多い、また個所的には電縫部、フランジ溶接部などの溶接部に腐食が多い。場所的には主として弁、ポンプ、クーラーへの接続管(異種金属接触)及び主管より直角に分岐する枝管の入口側(乱流による影響)に発生している。

亜鉛メッキ钢管の腐食状況を表3.2.7に示す。

表3.2.7 亜鉛メッキ钢管の腐食状況(開放調査結果)

腐食発生個所	腐食状況	腐食の推定要因	備考
フランジ溶接部	溶着金属がアバタ腐食 →脱落状態	乱流、異種金属接触 金属組織の差異等	フランジ面溶着金属のアバタ腐食 34件 フランジ面溶着金属の脱落 4件
エルボ溶接部	孔食又は溝食→破孔	乱流 金属組織の差異等	エルボ溶接部の破孔 11件 エルボ溶接部の孔食溝食 3件
管シーム部	溝食→破孔	乱流 金属組織の差異等	管シーム部破孔
継目無鋼管製エルボ と電縫钢管との接続 管	継目無鋼管製エルボ…良好 エルボへの接続管(電縫钢管) …アバタ腐食及びシーム部溝 食→孔食	乱流 金属組織の差異等	管シーム部破孔

3.2.5 系統別腐食状況のまとめ

各管系統別の腐食状況のまとめを表3.2.8に示す。

表3.2.8 管系統別腐食状況のまとめ

系 統		腐 食 状 況
① ②系統 海水を常時使用する 系統	内面	シーム部、フランジ溶接部、エルボ溶接部及び異種金属接続部などに溝食、アバタ腐食が集中し、短期間で破孔にいたるケースが多い。
	外面	亜鉛メッキのみで良好な結果
③ 系統 海水を間欠的に使用する 系統	内面	亜鉛メッキのみで一応良好な結果
	外面	亜鉛メッキのみで良好な結果
④ 系統 曝露部における蒸排気系 統	内面	海水系統に比し、腐食速度が小さく、特に問題はない
	外面	ペアメタル、亜鉛メッキ又は塗装という形式では耐久性が小さく、標準寿命に大分およばずに新替えというケースもしばしばみられた。アルミメッキ管は比較的良好な成績をおさめている。

⑤ 系統 曝露部における 作動、制御用油圧系統	内面	腐食に関しては特に問題はない
	外面	管外面よりの腐食による破孔例が多い、④系統に比して温度条件が良好なので塗覆 装による防食処理が適当である
⑥ 系統 蒸溜水系統	内面	特に破孔事故の例はないようである。但し蒸溜水の汚れ防止の問題はある。
	外面	特に問題はない

3.2.6 異種金属接觸による腐食状況

就航船の開放調査研究によると異種金属接觸に起因すると考えられる事故が数多くみられた。破孔発生管系としてはクーラ、ポンプに接続する管系で、また発生個所としてはクーラ、ポンプに接続する管のフランジ溶接部及びシーム部である。これらの原因を推定するとクーラー及びポンプの部品材に銅合金が使用されていること、管内流速及び形状の関係で乱流の発生が予想されることなど、これらの因子が選択的に局部に集中して腐食が起ったものと考えられる。

3.3 腐食対策

3.3.1 設計条件

船舶の配管系統に使用される管材料は船級協会規則、その他関連の法則にしたがうと共に流体の性質、その温度、圧力等により種々選択されている。中でも腐食による漏洩、侵水等の事故の多い海水系統、甲板蒸気排気系統及び蒸留水系統に対しては耐食材料あるいは管表面の防食処理の採用等の対策に関して慎重な検討を要する。

本節では適正な設計条件を設定することによって、配管の保守点検、新替を最小頻度に押え、管材料の腐食を起因とする船舶の運航障害の発生を抑制し、船舶の経済性の向上を図ろうとするものである。

一般に配管材料の寿命は船体部及び機器部の寿命と同様約10~15年であることが望ましいとされているが、実船のアンケート及び開放調査、さらに実験によれば、腐食損傷報告の最も多い連続通水の海水系統においては最大腐食速度が非常に大きく腐食形態も局部腐食の傾向が大であることが判明しており、1~2年で破孔にまで至る例も相当数報告されている。

したがって全ラインにわたって10~15年間無損傷を期待することは困難であり、船の一生のうち部分的に一度は補修、新替は止むを得ないものと許容し、最小の必要耐用年数を8~10年と設定し、基本的な耐用年数として標準8年、目標10年を定めることとする。

管内厚の腐食代の算定においては腐食代を t (m/m)、実験により求めた腐食速度を v_0 ($mm/year$)、必要耐用年数をNとすると、

$$t = v_0 \times N \quad \dots \quad (3.3.1)$$

上式の t が管内厚算定時の肉厚余裕分よりも小さい値であれば耐用年数は理論上満足されることになる。参考としてNK規則における管肉厚計算式を考えると、

$$P = 200S(T - a) / D \quad \dots \quad (3.3.2)$$

ここで P : 許容圧力 (Kg/cm^2) D : 管外径 (mm)

T : 管肉厚 (mm) S : 定 数

a : 鋼管に対し、外径 25 mm以下に対しては 1.5%

" 以上 " 2.0%

(3.3.2) 式における "a" の値が管肉厚減少分を表わしており、腐食代と考えても矛盾はないものと思われる所以この値を基準として腐食速度の許容値を設定するものとする。

(1) 流速の影響及び適正流速

管内流速の腐食速度に対する影響は管素材の種類によって異なることが一連の調査研究により明らかである。図 3.1 に回転翼車試験より得られた各種鋼管の腐食速度を示す。図より明らかなように普通炭素鋼及び鍛接鋼管の平均腐食速度に対する流速の影響がほとんど無視し得る程度であるのに対し電縫鋼管の最大腐食速度に対しては流速のちがいが大きく影響し、非常に大きな値を示している。これは管素材により腐食形態が異なり継目無鋼管及び鍛接鋼管が管壁全周にわたってほぼ均質であることから全面腐食と考えられるのに対し、電縫鋼管の腐食形態は実船のアンケート及び解放調査、さらに実験結果において見られる如く特有の電縫鋼管シーム部の溝食であり局部腐食であるためと思われる。電縫鋼管のこの特徴的な腐食形態は管製造過程において発生するメタルフローの影響、非金属介在物の影響及び金属組織差の影響等によるものと考えられ、これらにより電縫鋼管の腐食は電縫部分に集中し、腐食速度は大きな値を示すものと思われる。

したがって電縫鋼管の腐食代の算定においては (3.3.1) 式の v_0 に各流速における電縫部の最大腐食速度を用いることが適当であるものと思われる。

管素材として耐溝状腐食性電縫鋼管を使用する場合にはシーム部の腐食速度の値によって普通電縫鋼管と同程度を考えるべき種類と鍛接鋼管と同程度と考えられるものまで、品質のばらつきが大きいのでその都度慎重な検討を要する。すなわち管材の耐用年数の算定においては (3.3.1) 式の v_0 の値として通水実験によって得られた各鋼種のそれぞれの最大腐食速度を用いればよいと思われる。

管素材が継目無鋼管あるいは鍛接鋼管の場合は管素材自体の顕著な弱点が存在しないので管材の耐用年数の算定においては (3.3.1) 式の v_0 の値として平均腐食速度を用いることが可能である。

制限流速については造船学会の資料¹⁾ によると管内流速標準として各造船所とも $2 \sim 3 \text{ m/sec}$ と設定している。この時の海水温度を 40°C とすると必要耐用年数として設定した 8 年間に對し算定腐食代は電縫鋼管を何ら腐食対策を施行することなく連続通水の海水系統に使用する場合、約 24.0 mm となり腐食代のみで実際に使用されている管肉厚を越えた値となる。継目無鋼管の場合は約 2.0 mm となり NK 計算式の "a" の値を満足している。

I S O の腐食問題に対する調査報告書²⁾ において上記の制限流速は 1.5 mm とする様提唱されているが、この流速での算定腐食代は電縫鋼管の場合約 12.0 mm となる。流速 3.0 m/sec の時と比較して腐食代は $1/2$ になるが絶対値は現状の管肉厚を大きくオーバーしている。したがって電縫鋼管の場合には管内流速を下げる事が根本的な腐食対策とはなり得ないものと考えられる。

また実船における配管系では一般に管材の両端に管フランジが溶接によって装着される。管フランジ溶接部は溶接施行後、焼鈍処理されることはほとんどなく溶着金属部、母材熱影響部及び母材部と金属組織の異なる 3 つの部分が存在する。これらは管素材には関係なく必ず存在する。

管フランジ溶接部の腐食の発生はすきま腐食、乱流腐食等の相乗的影響によるものと考えられ、腐食形態は実船における開放調査結果及び実管テストの結果から明らかな様に電縫鋼管のシーム部近傍の腐食形態に類似して溝状腐食になっている。したがって配管系の耐用年数は管素材が電縫鋼管の場合にはシーム部及びフランジ溶接部、継目無鋼管及び鍛接管の場合にはフランジ溶接部の最大腐食速度によって決定されると考えるのが妥当と考えられ先に設定した 8 年間の耐用年数に対して必要とされる管肉厚は前述した電縫鋼管素材に対する値と同程度と推定される。これらは実験にもとづいた値であるが実船に装備した場合には異種金属接触、乱流の発生等により、さらに大きな値となることが予想される。

以上より、連続通水の海水系統配管の耐用年数は管フランジ溶接部及び電縫鋼管シーム部の最大腐食速度によって決定され、その値は各温度管内流速において実験により求められている。

管内流速の設定については各社共、社内標準を制定しているが内容的には J I S 流速標準と大差ない値となっている。J I S F 7101にて制定されている船舶機関室管内流速標準は図 3.3.1-3 に示すように一般用渦巻ポンプ吸込・吐

出管共に口径によって $2.0 \sim 3.0 \text{ m/sec}$ の範囲内とされ一般に計画時の最大流速が JIS 標準値以下となる様に配管口径を決定している。基本的な考え方として設定した 8 年間の耐用年数を鋼管素材を無処理のまま、管内流速を制限することで維持するためには最大腐食速度を $2.0 / 8 = 0.25 (\text{mm/year})$ 以下に押える必要がある。その時の管内流速は 0.5 m/sec 以下とすることが要求される。これは JIS の標準に対して流速では $1/4 \sim 1/6$ となり口径では $2 \sim 2.5$ 倍程度、コスト的には 2.5 ~ 3.5 倍となることが予想される。

従って、すべての鋼管を連続通水の海水系統に使用する場合管素材を無処理とし腐食対策として管内流速を制限することは管口径が非常に大となり、スペース的にも経済的にも有利とは言えず、管内流速は JIS 流速標準に準じて配管抵抗・静水頭等を考慮して決定し、腐食対策

としては管素材の種類に関係なく、ポリエチレンあるいはネオブレンライニングを施行することにより、管素材と海水との直接接触を遮断する方法が最も有効で確実であるものと考えられる。

一方、間欠通水の海水系統については通水実験は行っていないが実船における開放調査およびアンケート調査結果より損傷件数は連続通水の海水系統に比較して非常に少なく（4年間にわたりて 48 件の調査件数のうち損傷 5 件）実船開放調査より求めた腐食速度も連続通水系統と比較して約 $1/4$ 程度となっている。間欠通水の海水系統としては消化、ビルジ、バラスト系統が考えられるが、これらの系統の通水時間は船舶の全運航時間に対して $5 \sim 10\%$ 程度であるので残り $95 \sim 90\%$ の時間中、管内は静止海水と考えられる。よって間欠通水の海水系統配管の腐食は単なる海水浸漬時（管内流速 = 0.0 m/sec ）を想定して耐用年数を予測しても大きな誤差はないであろう。したがって、この系統については通水時間が短いのでライニング等の特別な防食処理は実施せず、初期防食の目的で亜鉛メッキ程度とし口径の決定は JIS 管内流速標準を基準とするものとして問題はないであろう。

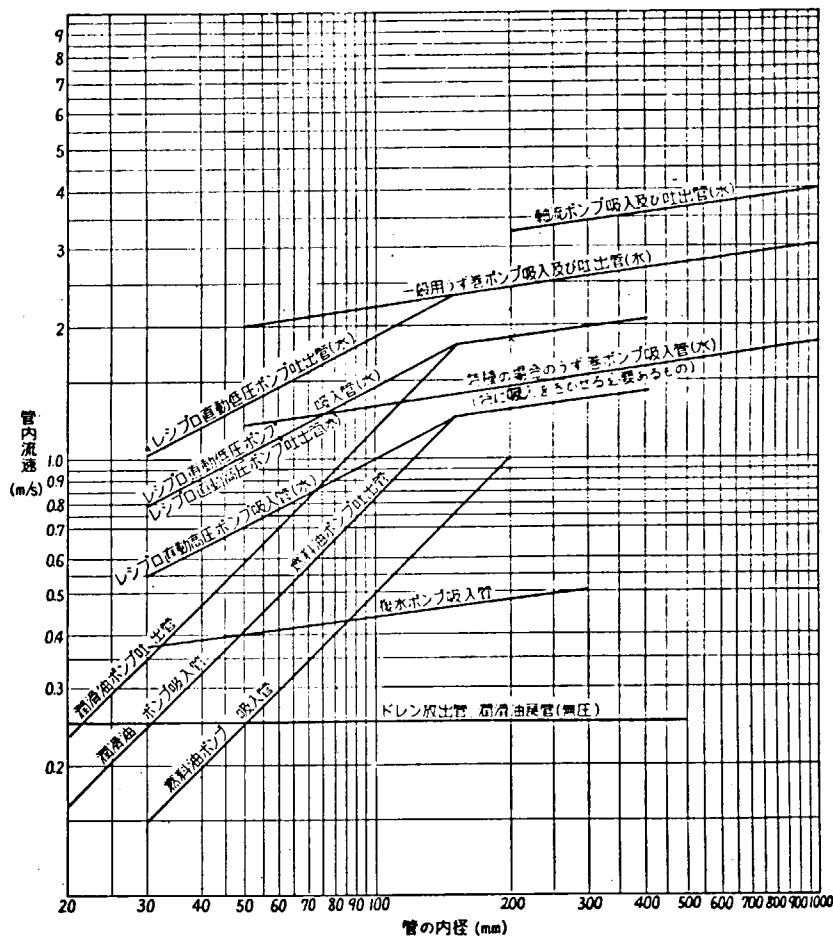


図 2.3.1-3 水・油管内流速標準

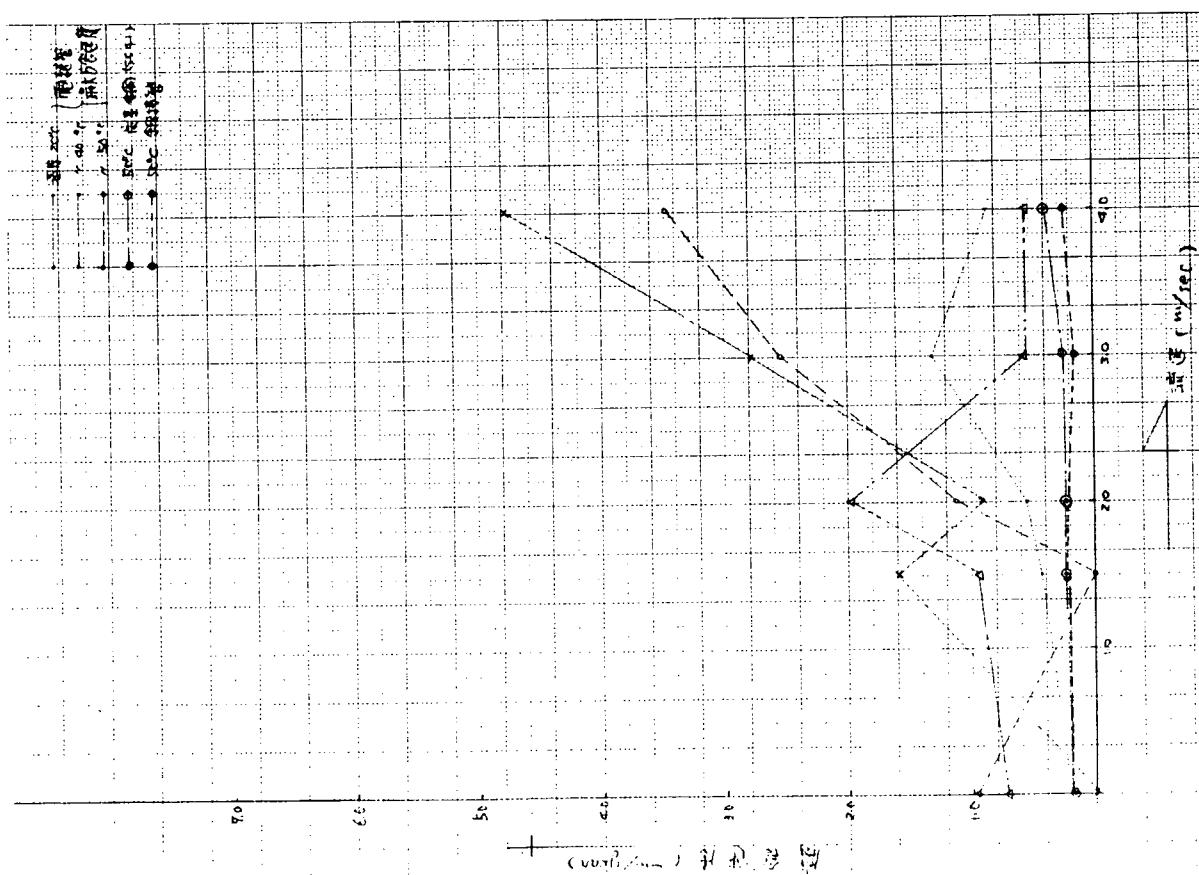


図 3.3.1-1 電線鋼管の最大腐食速度（他の材質との比較）

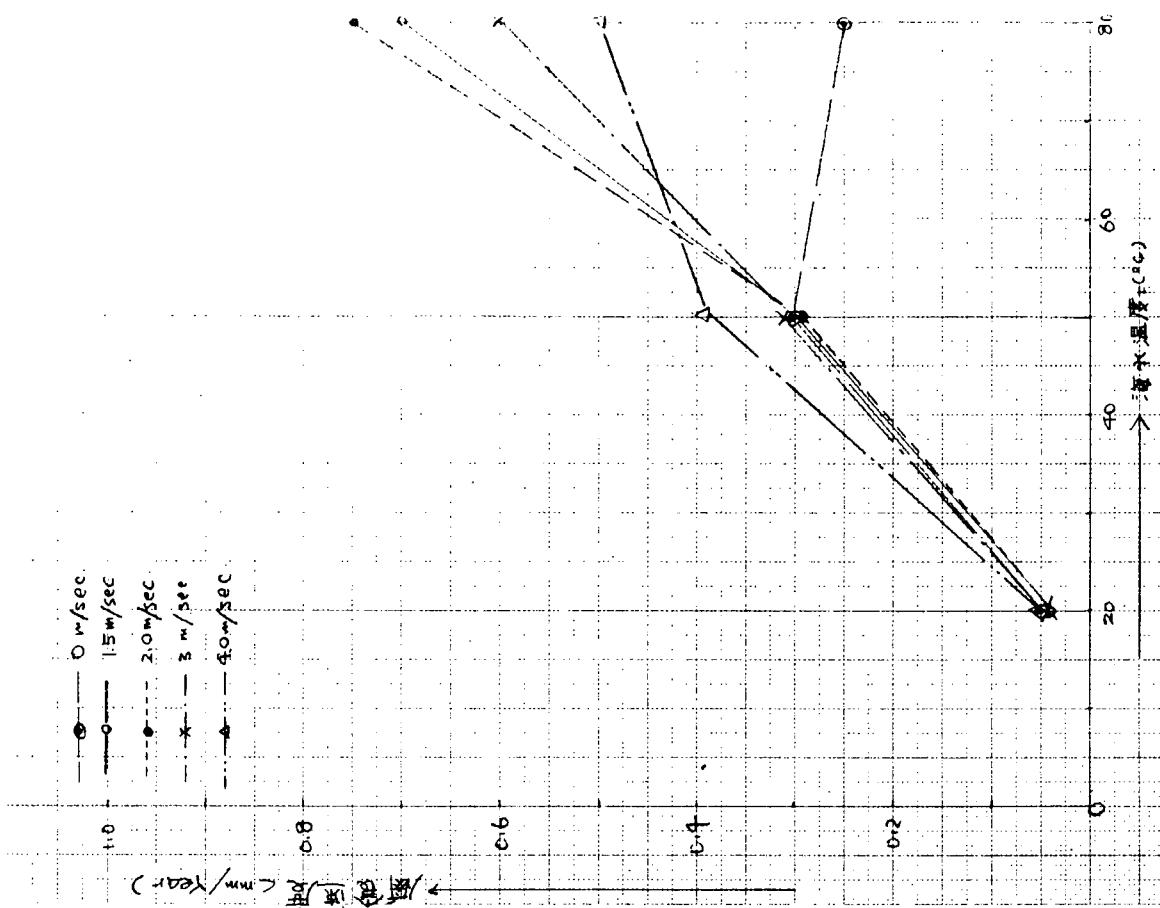


図 3.3.1-2 継目無鋼管の腐食速度

(2) 流体温度の影響

管系の耐用年数を決定する主要因子たる最大腐食速度に対する流体温度(海水温度)の影響は図3.3.1-1で明らかな如く、海水温度40℃の時に最大値を示す傾向が見られ50℃、80℃の時はむしろ40℃よりも小さい値を示している。これは実験期間の相異にもよるものと思われるが、現在までに得られたデータより判断して海水温度40℃の時の腐食速度を用いて腐食代の予測値を算出することは妥当なものと思われる。

最大腐食速度に対する流体温度(海水温度)の影響は以上の通りであるが、平均腐食速度に対しては実験により図3.3.1-2の通りの結果が得られている。この平均腐食速度は最大腐食速度に比較して小さく鋼管の耐用年数に直接的に影響を及ぼすものではないが、温度の影響は流速のそれよりも大であるので、海水温度については充分に注意して設計に反映させる必要がある。

一方、メッキ膜厚減少速度に対する海水温度の影響は明確に認められ防食、防錆処理としてのメッキの有効寿命を決定する主たる因子となり得る。次表に各流速、各流体温度におけるメッキ膜厚減少速度を示す。

表3.3.1-2. 連続通水海水系統のメッキ膜厚減少速度(実験期間3ヶ月)

	海水温度(℃)	メッキ膜厚減少速度(mm/year)	期待寿命(メッキ膜厚100μの場合)* (年)
アルミメッキ管	80	0.05	2.0
	50	0.02	5.0
	20	0.015	6.0
亜鉛メッキ管	80	0.17(流速0m/sec)~0.35(流速4m/sec)	0.6~0.3
	50	0.10(")"~0.14(")")	1.0~0.7
	20	0.03(")"~0.08(")")	3.3~1.2

* 本表中のメッキ膜厚は実船の調査結果より最大100μ程度、通常50~60μである。

上の表より明らかのようにアルミメッキは亜鉛メッキと比較して同一膜厚にて長期にわたっての防食効果が期待出来る。しかし、アルミは溶融温度が高く、(約660℃)熱影響によって鋼管素材の加工寸法精度を低下させるという施工上の欠点があり、船舶における使用実績は甲板上蒸気排気管系を除いて従来はほとんど見られなかつたが、最近機関室内の配管に施行された例もある。又、通水実験結果の一部にはアルミメッキの局部剥離が見られ、その結果、鋼管の局部腐食発生も懸念される。この原因はメッキ施工上の問題、あるいは下地処理の問題とも考えられるがはっきりしたことはわからない。

一方亜鉛メッキは亜鉛の性質上、膜厚が増加すると加工性が著しく悪化するためメッキ膜厚は一般に50~60μ程度である。したがって長期間にわたっての防食効果は期待出来ないが、短期間の防食、防錆効果は大であること。又、下地処理が簡単であり、複雑な管形状、長尺物についても施行が容易であること、施行コストも比較的安価であること等により、艤装期間中の防食等の目的で実船においても広く採用されている。

配管系に亜鉛メッキ鋼管を採用する場合には特に亜鉛の自己溶出性も考慮して施工目的はあくまでも初期防食であり、防食効果は長期的なものではないことを充分に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 第109艤装研究委員会資料
- 2) ISO/SC5 (M.V. 1975)

3.3.2 管 材 料

船舶の配管系統に使用される管材料は、関連法規、船級協会規則ならびに各系統の使用条件によって決定されるが、鋼管の製法により、電縫鋼管、鍛接鋼管および継目無鋼管に分類できる。

これ等の鋼管は、適用される管系統の重要度と耐用年数に応じて経済性を検討の上、ライニング、コーティングまたは亜鉛メッキなどの防食処理を施工の上使用されている。

配管系統における腐食発生の要因は、使用環境、管材料、配管形状工作方法、使用条件など多岐にわたるが、海水系統の電縫鋼管にみられる溝腐食のごとく、素管の材料組織に起因する腐食の割合が大きいため、管材料の選定には注意を要し、防食方法の適用とともに十分検討する必要がある。

本節では、各钢管の海水系統における腐食の傾向と防食処理の関係について述べる。なお、参考に各钢管の市場価格を図3.3.2-1に示す。図より明らかのように、電縫および鍛接配管用钢管（ガス管）は、他の钢管に対して重量比で約1/1.1～1/2.5、価格比で約1/1.3～1/3.5の値となっている。

(1) 電縫钢管

電縫钢管は、巾広帶鋼板を成型機によって管状に曲げ、その継目を電気抵抗溶接または電気誘導によって溶接製造されるもので、JISでは、配管用炭素钢管（電縫ガス管）および圧力配管用钢管について規定している。いずれも安価なため低圧系統に広く採用されているが、配管用炭素钢管についてはカーボン含有量の規定がなく、溶接性に対する信頼性が低いため、日本海事協会では使用系統を10Kg/cm²以下に制限している。

電縫钢管は、海水系統に使用されるとシーム部に溝腐食が選択的に発生する特徴を有することが、就航船の実績調査および多くの実験結果によって明らかにされている。

溝腐食の原因は、管素材の母材部とシーム部における金属組織の不連続および電位差ならびに硫化マンガン系化合物に起因するものと言われている。

管母材部は圧延およびレベラー加工により仕上げられた金属組織（ソルバイト組織）であるのに対し、シーム部は溶接後の焼純の有無により、ウェッジマン組織または結晶粒の粗大なソルバイト組織となるが、いずれの場合も母材部とシーム部との間に不連続を生じており、結晶粒界に腐食発生の可能性が大きい。⁽¹⁾

さらに、シーム部は母材部より卑な電位を示すが、メタルフローが管外面に露出し、メタルフローに沿って分布する硫化マンガン系の介在物が、電縫溶接の際の急熱急冷によって、その周囲に腐食しやすい部分を伴うため、この部分に腐食が選択的に集中するものと推定される。⁽²⁾

溝腐食の進展は平均腐食速度に対してきわめて大きい値を示し、回転翼車型腐食試験機による実験結果（3ヶ月間）によれば、海水温度20°Cの場合平均腐食速度は0.03～0.06mm/yearで鍛接钢管の腐食速度（0.03～0.08mm/year）と大差がないのに対し、溝腐食は最大0.64mm/yearとなり、平均腐食速度の約8～20倍に達している。

回転翼車型腐食試験機による実験結果の一例を下表に示す。

海水温度 °C	流速 (m/sec)	溝腐食の深さ (mm/y)	試験期間 (月)
20	4	約0.64	3
50	4	約3.6	3
40	4	約4.6 (5.2)	190日

() 内は
最大腐食速度を示す。

また実管テスト（試験期間16.5ヶ月、海水温度33～10°C、流速1.9～4.9m/sec）の結果によれば、溝腐食の深さは、平均腐食減量0.26mm/yearに対し、1.57mm/yearの値を示している。

就航船のアンケート調査においても、溝腐食による電縫鋼管の破孔は全海水破孔管の約70%を占め、常用海水系統に対しては、有効な防食方法が必要なことを示している。

実験結果では溝腐食の腐食速度は流速の影響が大きいことを示しているが、管内流速の制限によって腐食速度を抑制する方法は、前節で述べたとおり、管内流速をJIS標準の約1/4~1/6以下、すなわち管口経を2~2.5倍にする必要があり、スペース的にも経済的にも不適当である。したがって、常用海水系統に使用される電縫鋼管の耐用年数を延長するためには、樹脂系またはゴム系ライニングなどによる管内面の防食が不可欠と考えられる。

一方、消火、ビルジバラストなどの間欠通水系統に対しては使用頻度の点から流速の影響を無視して差支えなく、初期防食を目的とした亜鉛メッキの施工で防食上問題ないと思われる。

電縫鋼管の材料組織の改善に関しては、各鉄鋼メーカーで研究が進められている耐溝状腐食性電縫鋼管の早期開発と実用化が期待されるが、当部会で実施した耐溝状腐食性電縫鋼管供試材の耐食性に関する調査結果をつぎに示す。

(a) 供 試 材

鋼種	符 号	成 分 系	熱処理の有無
耐溝状腐食性電縫鋼管	A 1	Low. S	有
	B 1	炭素鋼	有
	A 2	0.2 Cu-Low. S	有
	B 2	Low. S	有
	A 3	Low. S + 0.01 REM	無
	B 3	Low. S + 0.01 REM + 0.2 Cu + 0.2 Ni	無
	A 4	0.2 Cu-0.5 Ti	有
	B 4	Low. S	有
比較材	I	普通電縫鋼管	無
	J	鍛接鋼管	無

(b) 試験条件

試験期間：16.5ヶ月

流速：2.9 m/sec

海水温度：33~10°C

(c) 調査結果

- (1) 鋼種間に腐食状況の顕著な差は認められなかった。
- (2) これ等の平均腐食速度はB 1を除き約0.3 mm/yearの値を示した。
- (3) シーム部の溝腐食が鍛接鋼管と同等もしくは小さい値を示した鋼種はA 2, A 3, A 4およびB 4の4鋼種であった。
- (4) これ等の4鋼種の溝腐食深さは0.87~0.11 mm/year, フランジ近傍の局部腐食は1.38~0.21 mm/yearであった。

(2) 鍛接鋼管

鍛接鋼管は、帯鋼から成型鍛接ロールによって円形に成型鍛接される。JISでは、配管用炭素鋼管(鍛接ガス管)として規定されているが、呼び経125以上は製造されていない。

日本海事協会では電縫ガス管との区別をしていないため、使用圧力10 kg/cm²以下の系統に使用できるが、使用範

團に関し、さらに細かい制限規定を設けている船級協会もあるので注意を要する。

鍛接鋼管は、海水系統に使用される場合も電縫鋼管に激しい選択腐食は発生せず、シーム部の腐食は母材部と同程度に進展するものと考えられる。就航船の開放調査では、シーム部よりもフランジと管の溶接部、エルボとの突合せ溶接部など、管加工時に熱影響を受けた部分に腐食が集中する傾向を示している。これは、管素材に顕著な不均一組織が存在しないため、熱影響によって組織に変化を生じた溶接部に腐食が集中するものと考えられる。

実管テストによれば、試験期間が短い場合（4ヶ月間）は、管製造時に形成されたと推定される管内面の凹凸と、管厚の変動が認められたが、シーム部の溝腐食は発生していない。

一方、長期間の実管テスト（約26.5ヶ月間）では、電縫鋼管に比べて腐食速度は小さいが、シーム部に溝腐食（約1mm/year）の発生が認められた。

鍛接鋼管の腐食形態は、通常全面腐食と考えられるが、上述のごとく溝腐食が発生する場合があるので注意を要する。

回転翼車型腐食試験機による実験結果（190日間）によれば最大腐食速度は、海水温度40°C、流速4m/secの場合、約1.7mm/yearの値を示し、電縫鋼管の約1/3となるが、製造管経が小さく、管厚も小さいため、常用海水系統に使用する場合は、電縫鋼管同様ライニングの施工が望ましい。

(3) 継目無鋼管

継目無鋼管は、通常熱間仕上げ管が使用されている。熱間仕上げ管は、加熱される鋼塊からせん孔機によって中空素管に製造され、マンドレルミル、プラグミルなどによって長尺管に伸長圧延された後、製品寸法に仕上げられるもので、いずれの系統にも使用できる。

JIS規格には、圧力配管用鋼管、高圧配管用鋼管および高温配管用鋼管が規定されているが、船舶の一般系統には、圧力配管用鋼管が使用され、溶接性と経済性に優れた第2種(STPG38・S)の管厚sch.40およびsch.80が多用されている。

継目無鋼管は製法上管素材の組織が均一で電縫鋼管のシーム部にみられる海水中の溝腐食が起きないため、局部腐食の発生は少ないものと推定され、その耐食性は炭素鋼の場合と大差がないと思われる。

炭素鋼の実験結果による平均腐食速度は海水温度20°C、流速4m/secの場合0.04mm/yearで、電縫鋼管（0.06mm/year）および鍛接鋼管（0.08mm/year）より若干優れた耐食性を示している。

従って、常用海水系統に対して継目無鋼管を採用する場合は、亜鉛メッキの施工で防食上問題ないと考えられるが、フランジ溶接部における局部腐食に注意を払うとともに、管寿命とコストを検討の上管厚を決定すべきである。

参考文献

- (1) 岡田 実、鈴木 春義；溶接冶金、溶接雙書4巻
- (2) 加藤 忠一、乙黒 靖男、門 智；電縫鋼管に生じる溝食について、防食技術23(1974)

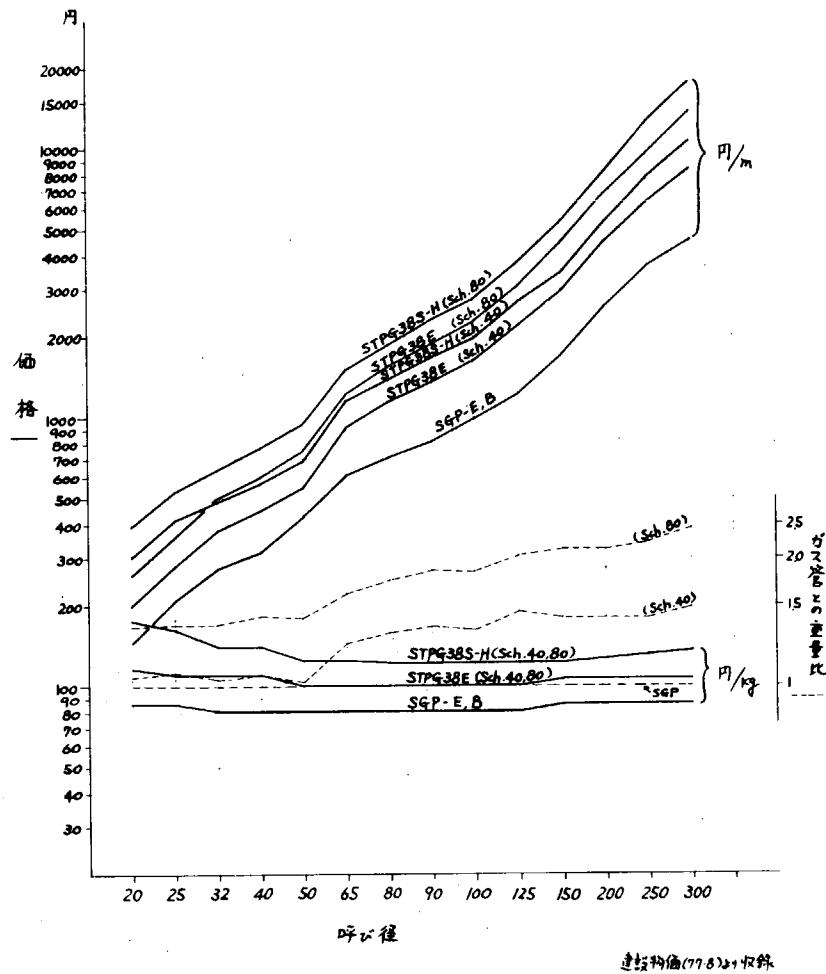


図 3.3.2-1 鋼管価格表

3.3.3. 曲げ、フランジ取付

(1) 曲 げ

管系の腐食発生に及ぼす要因として、配管形状の影響は考慮すべき問題であると思われる。つまり曲りによる流路の変化に伴って発生すると考えられる乱流、渦流はエロージョンの発生原因と考えられる。4年間にわたる就航船のアンケートによる実態調査及び開放調査の結果によると管の曲り部における腐食の発生は、配管系全体における腐食発生件数の約20%を占めていることが判明した。曲げ角度、曲げ半径と肉厚減量との関係は実管の通水実験により求められており、表3.3.3.1にその結果を示す。

表より電縫管、鍛接管共に曲げ角度曲げ半径と管内厚減少速度との間に一定の傾向を認めることは出来ない。これは肉厚減量が0.3mm前後の値であるのに対し、超音波厚さ計の測定精度が±0.1mm程度であること、及び実験の性格上、計測値自体に相当のばらつきが予想されること、さらに臨界レイノルズ数Re_cが通常2,300であるのに対し、各口径におけるレイノルズ数がそれぞれ約 2.3×10^5 , 2.8×10^5 , 3.7×10^5 程度であり、いずれも乱流域の値を示していること等が混在して、明確な傾向を得ることが出来なかったものと推定される。また、実際の配管系において問題となるのは全面腐食ではなく、局部腐食であり、通水実験においても電縫管シーム部、フランジ溶接部の局部腐食があらわれる。これは管材の金属組織が溶接の熱影響を受け、さらに乱流及び曲りによる流れの乱れの影響が相乗的に作用したためと推定される。したがって曲りによる乱れを防止すること、すなわち曲げ半径を大きくすることは圧力損失を減少させると共に、防食としても効果が期待できる。¹⁾ ISOの腐食問題に対する調査報告書によると、管曲り部は管径の3倍以上の半径を有するよう提唱されているが配管系の設計においては可能な限り曲げ半径を大きく

とることが望ましい。

表 3.3.3-1 曲り管部の内厚減少量計測結果 (mm/year)

実験期間 16ヶ月 / 26.5ヶ月

管 系	管 内 流 速 (m/sec)	曲げ 角 度 45°		曲げ 角 度 90°		曲げ角度 180° 2D
		曲げ半径 2D	曲げ半径 5D	2D	5D	
電 縫 管	80A	1.9	0.29/0.31	0.25/0.30	0.20/0.20	0.26/0.30
	65A	2.9	0.26/0.25	0.32/0.22	0.30/0.27	0.23/0.29
	50A	4.9	0.16/0.18	0.32/0.26	0.20/0.14	0.29/0.23
鍛 接 管	80A	1.9	0.35/0.34	0.32/0.28	0.14/0.23	0.42/0.19
	65A	2.9	0.27/0.23	0.22/0.20	0.29/0.26	0.22/0.21
	50A	4.9	0.35/0.25	0.33/0.29	0.23/0.20	0.29/0.25

使用計測器：超音波厚さ計クラウトクレマー社D メーター

(2) フランジ取付

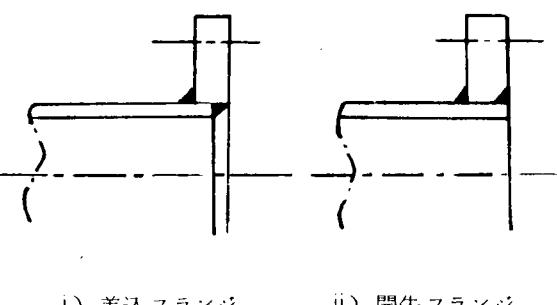
フランジ取付による管材腐食に対する影響は、フランジ取付の寸法誤差により喰いちがいを生ずるか、あるいはパッキンバリが張り出すことにより、管内流れに乱れが生じ、エロージョンの発生を促進させることにあるものと思われる。実船において、どの程度、これらの取付誤差が存在しているかは明確ではないが、存在する場合に具体的にどのような影響があるのかを明確にするため実管テストを行った。

(a) フランジ形状の相違による腐食形態のちがいについて

差込みフランジと開先フランジとを装着した場合の管材の腐食形態は、就航船開放調査結果より明らかなように

両者の差異は認められない。実管テストの結果においてもフランジ近傍の腐食速度について一定の傾向は見られない。

むしろフランジ面の溶着金属の腐食については開先フランジの方が差込みフランジと比較して腐食が少ないことが就航船開放調査において報告されている。これは、二種類のフランジ形状のちがいにより、溶着金属が直接海水に接する場合とそうでない場合の腐食環境のちがいにもよるものと推定される。

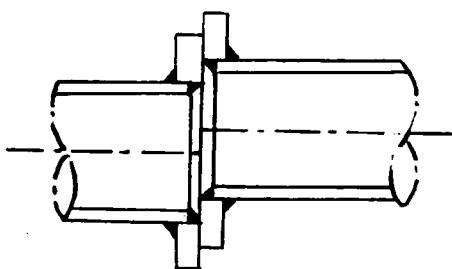


差込みフランジの場合、溶着金属より発生した腐食が進展して貫通、破孔に至る場合も見られるところから腐食対策として開先フランジを採用することは有効であるものと思われ、コストの関係を検討して採否を決定すべきである。

(b) 嘉いちがいについて

フランジ取付に喰いちがいを生じた場合は管内流れを乱す要因と考えられる。人為的に喰いちがいを生じさせて、通水実験を行った結果、約16ヶ月及び26.5ヶ月の通水期間では一定の傾向は見られない。この原因としては実験の性格上、計測値自体に相当のばらつきが予想されること、計測制度によるばらつきがある程度予想されること、

および実験を行った各口径共すでに乱流域と考えられ、喰いちがいにより発生する流れ内の乱れが喰いちがい近傍に特に集中するということはないためと推定される。



すなわち実験を行った流速範囲内において、実験に供した程度の喰いちがいでは特に腐食を促進するということはないが、実船においては喰いちがい部に海洋生物等の異物の堆積に起因する腐食の発生が考えられるので配管機器時にはこのような喰いちがいの生じないよう充分注意しなければならない。

(c) パッキンバリの影響について

パッキンバリが何らかの原因で管内に張り出した場合には、前記フランジの喰いちがいと同様に流れを乱す原因の一つになるものと考えられる。通水実験結果を表 3.3.3-2 に示す。

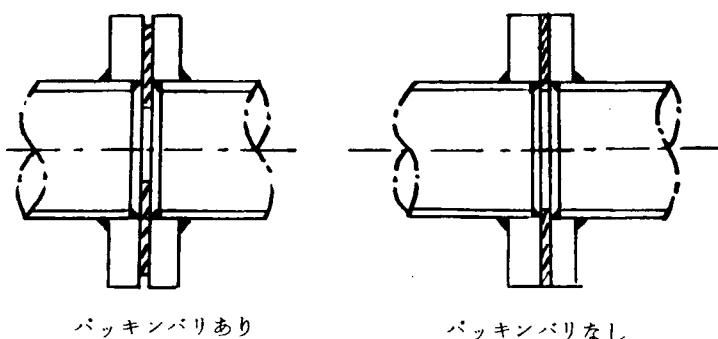
表 3.3.3-2 フランジ近傍の肉厚減量測定結果 (フランジより mm の POINT) mm/year

(実験期間 16 ヶ月 / 26.5 ヶ月)

材質 口 径	差込フランジ				開先フランジ				
	パッキンバリなし		パッキンバリあり		パッキンバリなし		パッキンバリあり		
	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	流出側	流入側	
電 縫 管	80A	0.23/0.20	0.32/0.29	0.23/0.45	0.25/0.38	0.34/0.41	0.41/0.45	0.38/0.36	0.62/0.38
	65A	0.45/0.22	0.29/0.32	0.36/0.33	0.34/0.38	0.27/0.25	0.41/0.35	0.34/0.29	0.60/0.68
	50A	0.18/0.16	0.36/0.20	0.29/0.25	0.29/0.25	0.26/0.22	0.36/0.33	0.40/0.24	0.29/0.23
鍛 接 管	80A	0.34/0.29	0.29/0.45	0.45/0.34	0.31/0.33	0.36/0.32	0.49/0.49	0.42/0.41	0.38/0.44
	65A	0.19/0.38	0.03/0.26	0.17/0.18	0.27/0.25	0.33/0.29	0.29/0.32	0.18/0.18	0.39/0.32
	50A	0.30/0.24	0.23/0.31	0.20/0.24	0.23/0.13	0.34/0.23	0.30/0.26	0.06/0.22	0.17/0.31

上の表より明らかな如く、2.3の反例も見られるが、全般的な傾向としてパッキンバリのある管の方がパッキンバリのない管よりも $0 \sim 0.25 \text{ mm/year}$ の範囲で腐食減量が大きい。前述のフランジの喰い違いに特定の傾向が見られなかったのに対して、パッキンバリがある場合に一定の傾向が認められた原因としては喰い違いが流路の不連続として考えられるのに対し、パッキンバリの場合は明らかに流路面積の縮小であること、さらにフランジの喰いちがい量が 2.5 mm であるのに対し、パッキンバリの張り出し量が 5 mm であることも原因と考えられる。 50A の SGP の場合管内通過面積 A_1 は 2198 mm^2 、パッキンバリが周囲に 5 mm 張り出した場合は 1445 mm^2 であり、面積比は約 66% となる。この程度の断面積比の不連続により発生する管内流れの乱れは管材腐食に対して影響を及ぼすものと推定される。実際に船内において施行される配管内に前述の如き大きな障害物が存在する可能性は極めて小さいと思われるが、上述の影響を避けるため配管工作、組立時には充分注意をしなければならない。

3.3.4 表面処理



船舶の配管系統に使用される管材料は、関連法則、船級協会規則ならびに各系統の使用条件によって決定されるが、適用される管系統の重要度と耐用年数に応じて経済性を検討の上、ライニング、メッキあるいは塗装などの防食処理を施工し使用されている。しかし使用箇所によっては、有効な防食性を示していないところもあり、適

正使用を考える必要がある。過去、4年間、船舶の各系統におけるライニング、メッキおよび塗装の防食処理鋼管の腐食状況を調べると同時に基礎的な実験を行なってきた。

本節では、実船のアンケート及び開放調査さらに実験によるライニング、メッキ及び塗装の防食性能について述べる。

(1) ライニング

船舶の配管系統に使用されるライニングの種類としては数多くあると思われるが、当部会で取り上げたライニングとしては、合成ゴムライニングと樹脂ライニングの2種類であった。

これらのライニングを施工した配管でも全く損傷がないとは言えず、4ヶ年のアンケートの結果では約1.6%の比率で損傷事故が発生している。(表3.2.4参照)

(a) 合成ゴムライニング

ネオブレンライニングを施工した钢管については、就航船での開放調査及び実管テストでの結果から、その保護作用持続性を検討した。

就航船による調査の結果、連続及び間欠海水系統における合成ゴムライニング管は、調査件数3件あり、いずれも損傷皆無で良好であった。ただし、1隻のみ調査対象管以外の箇所でネオブレンライニングのフクレ及び剥離事故が発生していたことが報告されている。この剥離の原因として、施工時における薬液の配合あるいは施工欠陥ではないかと考えられている。

実管テストの結果によるとネオブレンライニングの外面溶接等の欠陥があっても欠陥部が特に集中的に腐食するということはない。が、人工切傷のような欠陥がライニング材を切断し鋼材まで達していると裸钢管とほぼ同じような腐食挙動をとるようである。(表2.2.11参照)

(b) 樹脂ライニング

樹脂ライニングに人工欠陥を作り、この部分の腐食性を実管テストによって試験した結果、合成ゴムライニング钢管同様の腐食挙動を示した。(表2.2.11参照)

以上のことから、合成ゴムライニング及び樹脂ライニングを施工した钢管は、ライニング材の施工時における薬液の配合不良あるいは密着不良等がないように施工に当って十分配慮する必要があると思われる。すなわち、上記のような欠陥があると局部的なフクレあるいは全面的な剥離が発生する恐れがある。

これらのライニング材による防食は、鉄鋼と腐食性環境との遮断によるものであるため、切傷等によって鋼材まで達する欠陥があると裸钢管とほぼ同じような腐食挙動をとることになる。

このように、ライニング材の欠陥が皆無とは言えないが船舶における連続および間欠海水系統での防食処理としては、現在、最も有効な表面処理方法であると考えられる。

(2) メッキ

船舶の配管系統で防食処理鋼管として最も多く使用されているのが亜鉛メッキ鋼管であり、損傷件数も又、最も多く、4ヶ年のアンケート結果によると管内面側損傷が67.8%，管外面側損傷が56.2%といずれも半数以上の損傷件数となっている。(表3.2.4参照)

これに比べてアルミメッキ鋼管は、使用件数も少ないが、損傷件数は、わずかに0.3%であった。就航船の開放調査結果でもアルミメッキ鋼管は、甲板上の蒸排気系統のみの使用であったが、いずれも良好な状態であったと報告されている。

(a) 亜鉛メッキ

就航船における海水系統で使用されている亜鉛メッキ鋼管の亜鉛メッキ層は、2~4年の就航でほとんどが消滅しており、母材が著しく腐食されていた。亜鉛メッキ鋼管の破孔漏洩は、調査管中、25.8%と高い発生件数を示している。

亜鉛メッキ材の腐食速度は、海水環境の温度上昇および流速の上昇につれて、著しく大きくなる。例えば、回転翼車型腐食試験機による実験の結果では、温度20°Cから80°Cに上昇することによって流速4m/secの時、腐食速度が約5倍に増加することが報告されている。

亜鉛メッキ材は、亜鉛と母材(鉄鋼)との電位差により、亜鉛が犠牲陽極となって溶出することで母材が防食される。このため、亜鉛メッキ務に少々の欠陥(管外面溶接あるいは人口切傷等)あるいは剥離、溶出により母材が析出していても発錆は生じ難いのが普通である。

亜鉛メッキ材が青銅あるいはアルミプラス等と組合される場合には亜鉛(メッキ層)と鉄(母材)との電位差以上に電位差が大きくなり、亜鉛メッキ材の腐食が促進されることが実験によって確認されている。

就航船の開放調査における蒸留水系統の亜鉛メッキ鋼管は、良好なものと亜鉛メッキ層の剥離が著しいものとがあった。蒸留水の場合、海水に比べ電気伝導度が小さく、液抵抗が大きいため亜鉛メッキ層が犠牲陽極として作用する範囲が著しく狭くなることと、蒸留水温度が60°C以上になると亜鉛と鉄の自然電位列の順位が逆転することが知られている。このことから、蒸留水系統での亜鉛メッキ鋼管で亜鉛メッキ層が残存しているにもかかわらず赤錆(鉄錆)が発生することがある。

(b) アルミメッキ

海水系統および甲板上の蒸排気系統でのアルミメッキ鋼管は、3~4年の就航後においてもアルミメッキ層が十分残存し、保護作用を有していることが新造船の追跡調査で報告されている。又、回転翼車型腐食試験機による実験の結果においてもアルミメッキ材の方が亜鉛メッキ材に比べて良好であり、アルミメッキ膜厚100μの場合、水温が50°C以下での寿命は5年以上と推定される。

実管テストによるアルミメッキ鋼管は、フランジ近傍で剥離が生じ、亜鉛メッキ鋼管の同箇所に比べ密着性が悪い結果を示したが、本実管テストに用いたアルミメッキ鋼管のメッキ前処理あるいはメッキ浴中の不純物の混入等によるメッキ不良が原因と考えられる。

以上の結果、亜鉛メッキは連続あるいは間欠海水系統での長期防食は望めず、短期防食(1~2年間)の表面処理方法を考えるべきである。一方、アルミメッキは、海水系統および甲板上の蒸排気管外面において、5年以上の防食が可能であると思われる。

(3) 塗装

塗装の種類は、その目的性質によって多岐にわたるが、当部会で取り上げたのは、配管内面のタルエポキシ塗装のみであり、就航船では対象管がなく新造船追跡調査における2件と実管テストのみであった。

新造船追跡調査における海水系統での42ヶ月後の結果は、5~10mm径のアバタ状および局部的なフクレ発生と対象管半割り後、密着性がなく皮状に剥離を起していた。(表2.1.5参照)又、実管テストで行なった人口欠陥

部は、母材が著しく腐食を生じていたことが報告されている。

すなわち、タルエポキシ塗装は、亜鉛メッキ材あるいはアルミメッキ材のように電気化学的な作用による防食ではなく、環境遮断による防食のため、塗膜欠陥あるいは長年月の経時変化（塗膜劣化）により、環境遮断の効果がなくなれば裸鋼管に近い腐食挙動をとるものと思われる。このことから、塗装の場合、顔料、溶剤等の配合、下地処理および塗装時の施工に特に注意をし、適正膜厚をつくる必要がある。しかし、タルエポキシ塗装による海水系統での長期防食は難しく、初期防食による母材の寿命延長が目的と考えられる。

参考文献

(1) G. Schikorr; Trans. Electrochem. Soc.; Vol. 76 (1939)

P. 247~258

(2) C. F. Bonilla; Trans. Electrochem. Soc.; Vol. 87 (1945)

P. 237~253

3.3.5 管系装置

(1) 一般注意事項

(a) 配管と管系装置の腐食におよぼす影響

配管と機器類および管系装置に発生する腐食は、異種金属の組合せによる接触腐食、配管内の過大流速、乱流および渦流によって誘起されるエロージョン、コロージョンなど、相互の関係に起因するものが多い。このため、配管と管系装置に対する設計と防食方法の適用は、使用環境および条件に関する検討とともに、相互の腐食におよぼす影響についても十分配慮しなければならない。

(b) 腐食発生系統と発生個所

就航船の実績調査によって明らかなどおり、腐食発生事故の80%は常用海水系統の3~7ヶ年を経過した鋼管のシーム部および管継手の溶接部にみられ、残りは間欠通水の海水系統、甲板蒸排気系統および蒸留水系統などの配管に生じている。

従って海水系統の配管に対しては、管材料の選定と溶接部の防食に注意を要するが、管内流速、配管形状についても腐食を速進させない配慮が必要である。

管継手の溶接部に対しては、溶接時の溶け込み不良やアンダーカットの防止、開先フランジの採用などによって、腐食の軽減をはかるべきである。

なお、甲板蒸排気系統ならびに蒸留水系統に対しては、4年間の実船調査によって、アルマ加工鋼管および銅管がそれぞれ優れた耐食性を示すことが実証されており、コスト面を検討の上、これ等の管材料を採用することが望ましい。

(c) 過大流速、乱流および過流の防止

(i) 過大流速

流速の腐食に対する影響と適正流速については設計条件の項で詳しく述べたが、過大流速は配管自体の腐食を促進するばかりでなく、機器類の主要部品に対するエロージョン、コロージョン発生の原因となるので注意を要する。

海水系統の配管は分配枝管方式が採用されるため、計画と継装中および就航後の使用条件の相違によって、管内流量が変化し、過大流速の発生を招きやすい。

各ラインの配管口径は種々の使用条件を検討の上決定し、配管設計終了後、配管抵抗の再チェックによって、管内流速がJIS標準(2~3 m/sec)の範囲にあることを確認すべきである。

(a) 乱流と渦流

配管内の乱流と渦流の存在は腐食を誘発する要因となるため、管装置はベンド、絞りなどの設計に注意を要する。このため、曲げ管の曲げ半径と曲げ角度の関係、フランジ接合部における喰い違いの影響などについて実管テストによる調査を試みたが、これ等の因子と鋼管の腐食減量の間には一定の傾向を認めることができなかった。

図 3.3.5-1 に電縫鋼管の曲げ管および直管に対する腐食減量の経時変化を示す。図より明らかのように、曲げ管は 4 ~ 6 ヶ月では曲げ角度および曲げ半径の影響がみられるものの、試験期間が長期にわたる場合はこれ等の影響が小さくなることを示している。

一方、管シーム部やフランジ溶接部には、実船の報告例と同様の局部腐食（最大 1.87 mm/year）が認められたが、金属組織の電位差、介在物などの腐食要因に、乱流による影響が相乘的に作用したものと推定される。

実験結果からは、乱流と腐食の間に一定の傾向を把握し得なかったが、乱流の機器類その他におよぼす影響を考慮し、管装置の設計は、曲げ管の曲げ半径をできるだけ大きくするとともに直角枝管や異形フランジの使用を極力配止するなど、細かい配慮が望まれる。

(2) 異種金属の接触腐食

(a) 機器類接続管の腐食と対策

就航船の開放調査によれば、海水系統の機器類に接続された電縫鋼管のシーム部および溶接部の腐食が著しい。

これ等の接続鋼管は、弁、ポンプ、クーラーなどの銅合金部品よりも卑なる電位を有するため、防食材（流電陽極材）および亜鉛メッキの消失後、管内面が陽極腐食を起こすものと考えられ、特に、材料組織に欠陥を有し、電位の卑となるシーム部や溶接部が乱流などの影響によって溶解し、局部腐食に進展するものと推定される。

一方、機器類に使用される銅合金材料は、海水との接触面に形成される保護被膜の存在によって耐食性が向上する性質を有し、適当な被膜が形成されるまでは、乱流下でエロージョンを起こしやすい傾向がある。従って、機器類に接続される鋼管は、管内面の自然腐食による、鉄イオンの供給によって、銅合金部品の耐食性に対する副作用効果をおよぼしているものと想定され、継目無鋼管の使用と管内厚の増加によって、耐用年数の延長をはかることが好ましい。

(b) ライニング管の採用と犠牲管および防食材の設置

海水系統の配管にライニング管が使用され、鉄部分が存在しない場合は、鉄イオンによる防食効果が期待できなかったため、銅合金部品はそれ自体の耐食性に依存しなければならない結果、使用環境および使用条件が苛酷な場合に、耐食寿命の低下や腐食の発生を招くおそれがある。従って、ライニング管を採用する場合は、機器類入口および配管ライン中に、保護亜鉛、純鉄などの防食材（流電陽極材）および犠牲管の設置を検討する必要がある。

保護亜鉛については、実船調査の結果、その効果は認められたが、防食効果と寿命の関係など明確なデータは得られなかった。

犠牲鋼管についても定量的な効果に関する実験結果がなく、その大きさは使用環境によって変化するため、相当長大なものと要すると考えられる。ISO の腐食問題に対する調査報告書⁽¹⁾によれば海水系統における防食材は最小 0.3 m または管径の 3 倍以上の長さとするよう提唱されているが、使用条件および被防食材の表面積に応じて検討を要する。

配管系統に対する防食対策は、配管のグレードアップによって、ポンプクーラーなどに二次被害を誘発させないよう十分検討の上決定すべきである。

(3) 管系装置のメインテナンス

海運界では、船舶の大型・高速化による輸送の効率化と自動化の発展に伴う省力化が著しく、管系装置に対する信頼性の向上と、保守点検の簡易化が一層重要になりつつある。

管系装置については、防食方法の改善によって漏洩事故の防止をはかるとともに、漏洩による重大事故を誘発させ

ない管装置を計画し、漏洩箇所の発見と応急処置を安全迅速に行なえるよう設計すべきである。

船舶、特に機関室の管装置は、他装置との関連が深く、複雑となるため、立体配管による空間スペースの有効利用、海水配管の単独パッセージ化、取外し容易な管割と点検アクセスの設置など、配管計画において十分検討することが望ましい。

参考文献

- (1) ISO/TC 8/SC 5; "Sea Water Directives for Reducing Corrosion" (1975)

3.3.6 環境

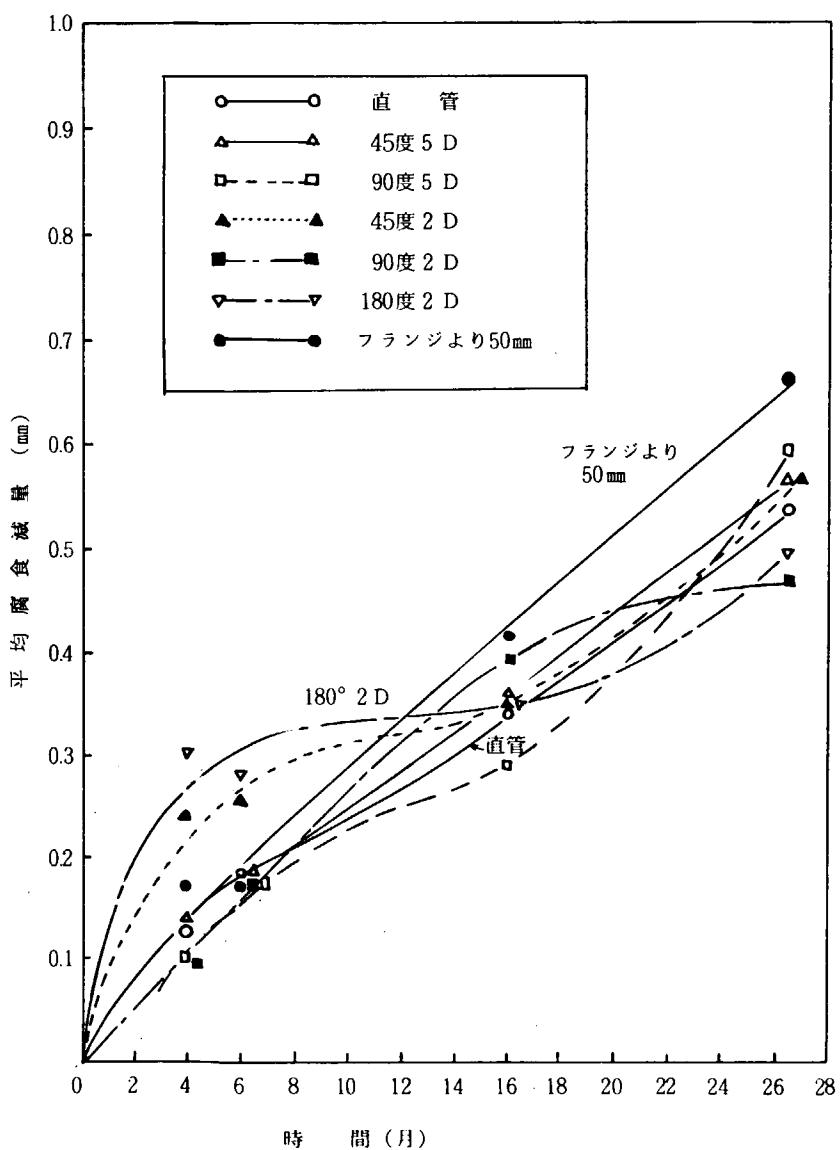


図 3.3.5-1 実管テストによる腐食減量の経時変化
(6ヶ月のデータには耐溝状腐食性電線管のデータも含まれている)

実船の配管系統に起る腐食を含む損食、擦傷および摩耗等による状態については、前章までに述べた通りであり、本章では、実船の①主補冷却海水系統、②①以外の常用海水系統(サニタリー等、③④⑤以外の海水系統(ビルジ・バラスト等)、⑥甲板上蒸・排気系統、⑦甲板上作動及び制御用油圧系統、⑧蒸留水系統および⑨その他の系統の配管鉄鋼の腐食に及ぼす一般的な環境因子を述べる。

ここで腐食とは、金属がそれを取囲む環境によって化学的あるいは、電気化学的反応過程を経て損傷されることを言う。

取上げた腐食環境は、以下に示す条件である。

- 1) 海水による腐食
 - a) 溶存酸素の影響
 - b) pHの影響
 - c) 温度の影響
 - d) 流速の影響
 - 2) 清水による腐食
 - 3) 蒸気による腐食
- (1) 海水による腐食
海水環境における炭素

鋼の腐食は、海水中に溶存する酸素の還元反応による腐食が主体と考えられるが、他にも腐食におよぼす海水環境

の種々の条件として PH_1 , Cl 濃度, 温度および流速などが挙げられるので, 以下に溶存酸素と共にこれらの影響について述べる。

a) 溶存酸素の影響

水溶液における炭素鋼の腐食は, 酸素の還元反応が律速のため腐食速度は溶存酸素に依存する。すなわち図 3.3.6-1 および図 3.3.6-2 に見られるように炭素鋼の腐食速度は溶存酸素の濃度に比例する。

溶存酸素は塩濃度(汚染度)に逆比例することが知られているが図 3.3.6-3 に示すように NaCl 濃度が 5%までは溶存酸素に関係なく炭素鋼の腐食はむしろ液の電気伝導度に依存する。しかし NaCl 濃度が 5%以上では溶存酸素濃度に比例するようである。

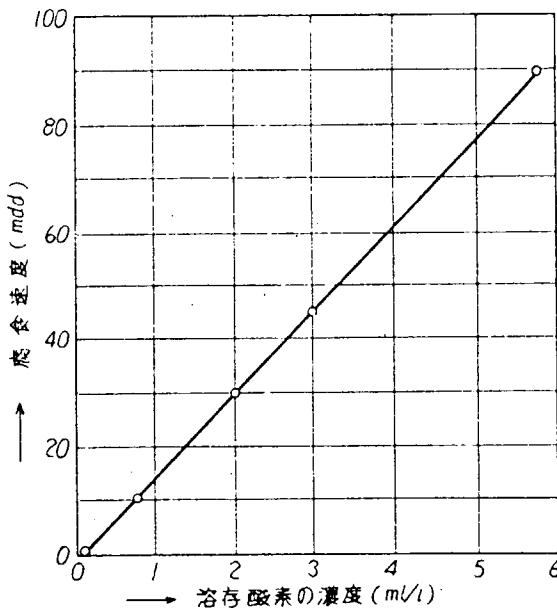


図 3.3.6-1 軟鋼の腐食に対する酸素濃度の影響⁽¹⁾

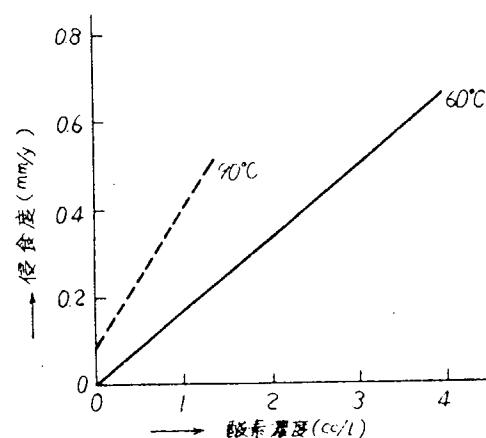


図 3.3.6-2 鋼の侵食度と酸素濃度との関係⁽²⁾

(注) 溶液は 165 ppm の CaCl_2 を含み

ゆっくり動いている。腐食速度は

25°Cで 48 時間の試験で求めた

ものである。

実際海水環境では、乾湿交互のはげしい場所が、酸素の供給から最も腐食されることが図 3.3.6-4 からわかる。

b) PH の影響

海水の PH は、通常 7.5 ~ 8.4 であるのに汚染海水では、7 以下になる場合もある。低 PH 海水による炭素鋼の腐食について表 3.3.6-1 および図 3.3.6-5 に示すような実験結果がある。すなわち、 $\text{PH} 8 \sim 3$ の間は小さい腐食速度であるが、 $\text{PH} 2$ 以下になると酸性海水での水素還元律速による急激な腐食速度を示している。 PH が 7, 8, 9 とアルカリ性側によつて、腐食速度は小さくなることが図 3.3.6-6 によってわかる。

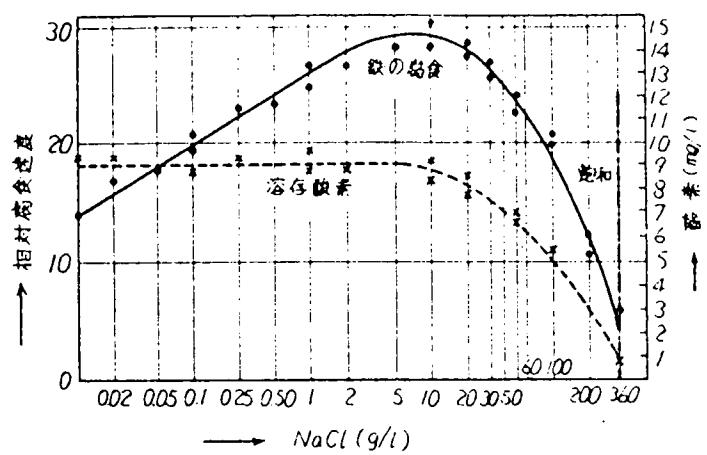


図 3.3.6-3 鉄の腐食に及ぼす食塩濃度の影響 (75°F)⁽³⁾

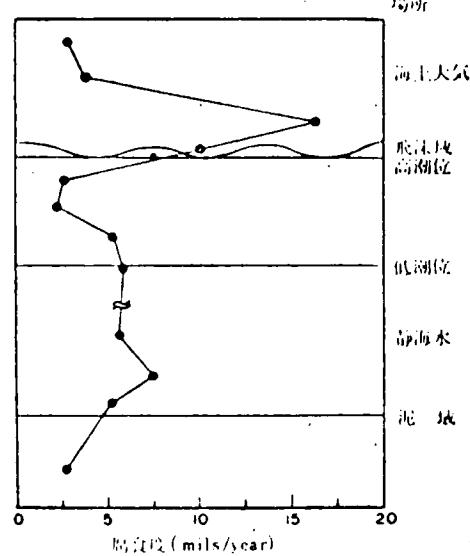


図 3.3.6-4 海における軟鋼の腐食と場所の関係⁽⁴⁾
(B. B. MORTON)

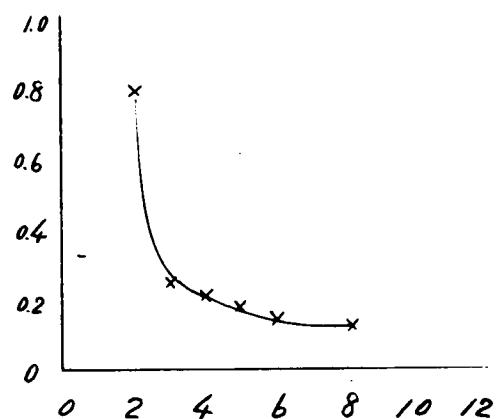


図 3.3.6-5 炭素鋼の腐食における pH の影響⁽⁵⁾

表 3.3.6-1 低 pH 海水による炭素鋼の腐食⁽⁵⁾

PH	腐食速度 (mm/y)	腐食速度の比較*
8.2	0.127	1.00
6	0.148	1.17
5	0.184	1.45
4	0.216	1.70
3	0.260	2.05
2	0.795	6.26

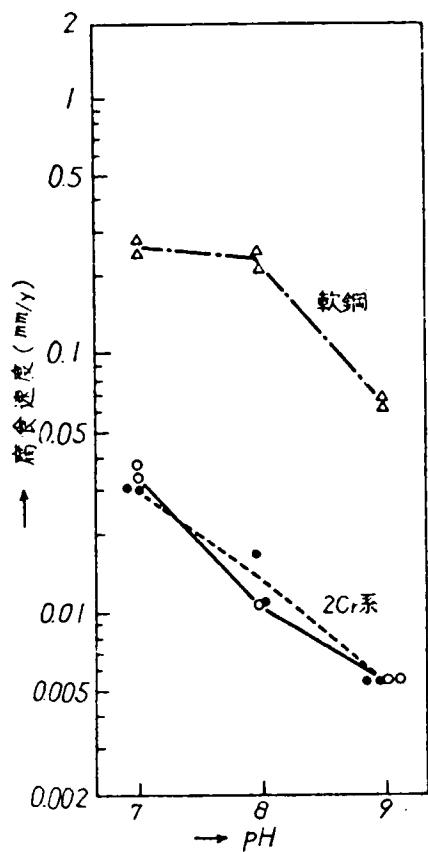


図 3.3.6-6 鋼の腐食に及ぼす PH の影響⁽⁶⁾
(人工海水 125°C, 脱気 2 m/s)

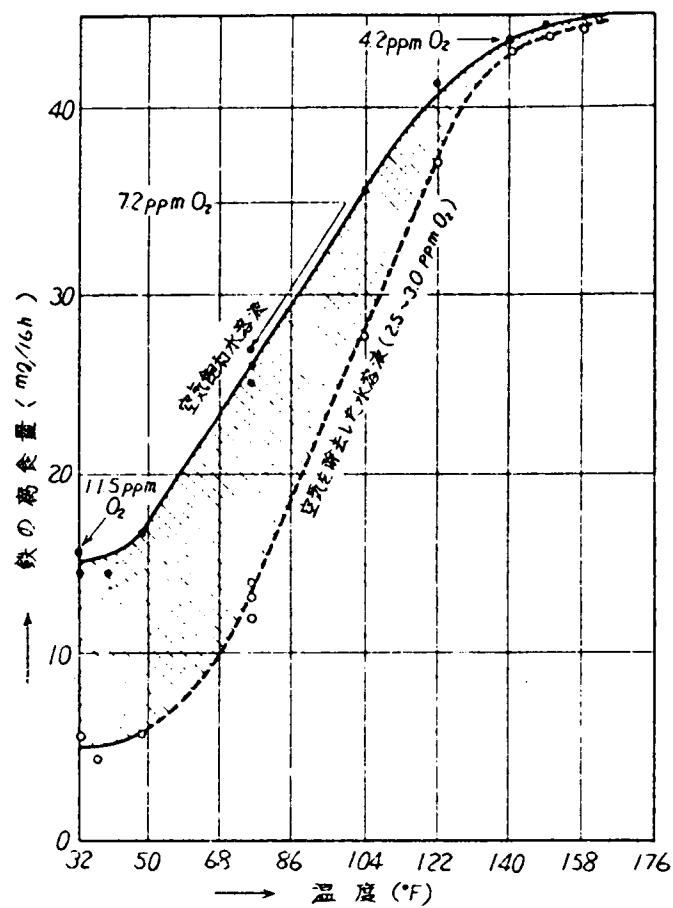


図 3.3.6-7 3% 食塩水中における鉄の腐食に及ぼす温度
と空気吸込みの影響 (A. Hache) (3)

(c) 温度の影響

炭素鋼の腐食におよぼす海水温度の影響は、溶存酸素の減少と化学反応速度の増大とのかねあいによってきまり、温度と腐食速度との関係は、図 3.3.6-7 に示す通りである。

(d) 流速の影響

海水流速の増大は、溶存酸素の供給増大を伴ない炭素鋼の腐食速度は当然ながら増大する。流速と炭素鋼の腐食速度の関係を図 3.3.6-8 および図 3.3.6-9 に示す。

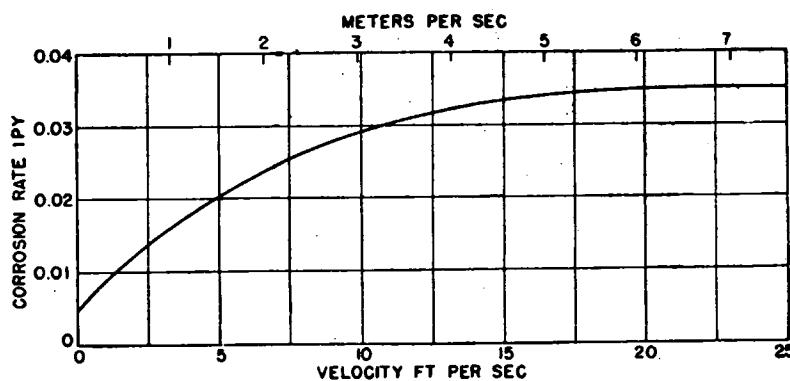


図 3.3.6-8 海水中の鋼の侵食度と水速との関係⁽⁷⁾
試験温度：約 23°C
(試験期間：36 時間)

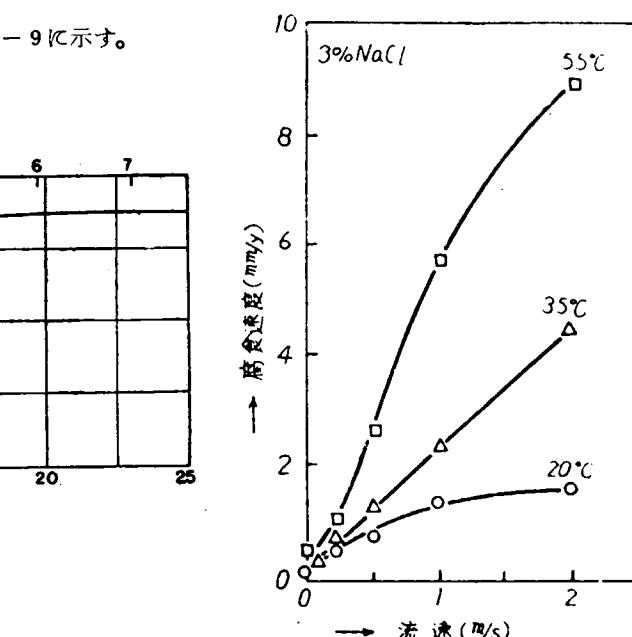


図 3.3.6-9 3% NaCl 中における軟鋼の腐食に及ぼす
流速、温度の関係⁽⁸⁾
(試験期間：15 日間)

(2) 清水による腐食

清水による腐食も海水同様、酸素等の復極剤成分の還元反応によるものと思われる。よって溶存酸素、PH、温度および流速の影響は上述した海水環境と同じ傾向にあるが清水中に含まれるマグネシウム塩やカルシウム塩等の硬質性分は、金属表面に析出し防食すると考えられており海水に較べて腐食量はやゝ少ない⁽⁷⁾と言われている。

(3) 蒸気による腐食

鋼材の蒸気による腐食は、乾燥蒸気と湿潤蒸気によって異なり、乾燥蒸気の腐食は、500°C以上の高温域でないと腐食は生じないため、当部会での対象管系統に当てはまらず問題がない。また、湿潤蒸気の場合でも大量の空気を含まない時は、それ程大きな腐食は示さない。したがって、配管内で蒸気とドレンの混在によるウォーター・ハンマーおよび蒸気流速による機械的消耗による損傷が考えられる。

蒸気による腐食ではないが、蒸排気系統の管外面の腐食に注意する必要があり、特に、甲板上の配管は腐食が著しい。甲板上の蒸排気管外面は、波に洗われたり、シブキがかゝり加温されているため海水が濃縮される。海水の濃縮物は、潮解性があるため蒸気が通らない時は湿った状態になる。すなわち、甲板上の蒸排気管外面は、海水の乾湿交互の状態にあるため、腐食は非常に大きく錆の層状剥離を起している。

参考文献

- (1) H. H. Uhlig ; Corrosion and Corrosion Control, (1963) P. 81
- (2) 福谷英二 ; 防食技術, Vol. 19, No. 10 (1970) P. 417~427
- (3) F. N. Fink ; Office of Saline Water, U.S.A., 8, 10 (1960)
- (4) 下平三郎 ; 日本海水学会誌, Vol. 22, No. 2 (1968) P. 163~177
- (5) 濱尾正雄 ; 日本造船研究協会研究資料 No. 117 (1970)
- (6) 小若正倫, 長野博夫 ; Chemical Economy & Engineering Review, Vol. 4, No. 6 (1972) P. 51
- (7) H. H. Uhlig ; Corrosion Handbook, (1948) P. 391
- (8) 小若正倫, 鮎川光夫, 長野博夫 ; 住友金属, Vol. 21, No. 2 (1969) P. 185~196

3.4 諸管材料の推奨仕様

3.4.1 推奨仕様

本節では当部会の一連の調査研究を基に、諸管に要求される最小の必要耐用年数を8～10年と想定し、標準8年、目標10年間腐食による配管系統の損傷を最少頻度に押える為の推奨仕様を策定した。一般に配管系の管仕様は、管寿命・保守点検・新替に要する労力と費用、運航障害発生に対する危険性、および初期投資額などに対して総合的な評価をした上で決定されるべきものであるが、船舶の補修工事費の内で管装置の腐食に起因するものの割合が大きい現実に照らし合せて、上記必要耐用年数を確保することが先ず必要であるとの観点から検討した。また当部会の実験研究結果では明確に判定できない仕様については、海運造船各社が標準的に採用している仕様の中から、腐食対策上より実状に即した仕様を推奨仕様とした。機関室内油管等腐食が8～10年の管寿命に対し大きな影響を持たぬと思われる系統は検討対象より外した。

諸 管 材 料 の 推 奨 仕 様

系 統	口 径	管 材	処 理	備 考
10K以下の蒸気、ドレン	全 口 径	SGP-E 又は SGP-B	-	船級によっては圧力系統に鍛接管を使えぬ事に注意を要する。
暴露部甲板蒸気、排気	全 口 径	SGP-E 又は SGP-B	アルミメッキ	全 上 船級によっては甲板上にアルミメッキの使用が問題となる事に注意を要する。
常用海水 冷却海水 雑用海水 サニタリ-	呼び径 20A以上 の全口径	SGP-E 又は SGP-B	ゴム糸または 樹脂系ライニング	
間欠使用海水 ビルジ バラスト 消 防 管	サニタリ-系統の 居住区内 全 口 径	PVC (塩ビ管) SGP-E 又は SGP-B		
			亜鉛メッキ	

甲板上作動および制御用 油圧	全 口 径	鋼 管	外 面 塗 装	
		圧力レベルに応じて選定	(タールエポキシ)	
蒸 溶 水	呼び径 20A 以上 の全口径	SGP-E 又は SGP-B	樹脂系ライニング	
イナートカス海水ドレン	呼び径 20A 以上 の全口径	SGP-E 又は SGP-B	ゴム系または樹脂 系ライニング	
冷却清水 } 雑用清水	全 口 径	SGP-E 又は SGP-B	なし又は 亜鉛メッキ	防錆剤添加の場合 は亜鉛メッキをし ない。

注 o 銅および銅合金管は推奨仕様の対象外とした。

o 15A 以下の細管は対象外とした。

3.4.2 解説

(1) 10K 以下の蒸気ドレン系統 (非暴露部)

諸管材料の現状調査アンケートの結果によると、燃料タンク内ヒーティングコイル以外については、大部分の海運・造船会社は標準として、SGPを表面処理なしで使用している。

就航船のアンケートによる実態調査および開放調査による結果からも、蒸排気管の内面腐食に関しては特に問題は提起されていない。

以上から 8~10 年の耐用年数を考えた場合、圧力 10 kg/cm^2 以下の蒸気およびドレン系統に対しては、配管用炭素鋼管 (SGP) を内面処理をほどこさずで使用することで十分であろうと考えられる。SGP 管は現在の供給市場から呼び径 125A 以上は電縫钢管 SGP-E、呼び径 100A 以下は鍛接钢管 SGP-B を採用することが多い。但し NK 以外の船級によっては圧力系統に鍛接钢管の使用が許されない場合があるので注意を要する。

(2) 暴露部甲板蒸気排気

就航船のアンケートによる実態調査の結果によると、本系統の損傷発生件数は、海水系統について大きな値となっている。

就航船の開放調査研究では 4 年間にわたり、ペアーメタル钢管、亜鉛メッキ钢管、耐熱ペイント塗装钢管、アルミメッキ钢管、銅管など延べ 44 件の腐食状況調査を行なったが、この結果、管仕様がペアーメタルの場合、管外面の腐食は大きく、平均腐食速度は $1.06 \sim 1.37 \text{ mm/year}$ (研究資料 No. 243・50 年度報告書 16 頁) となり、4 ケ年の調査期間を通して調査対象管 2 本のうち 1 本は使用期間 70 ヶ月で新替の必要が生じた。

亜鉛メッキ钢管についても管外面が激しく腐食し、やはり使用期間 70 ヶ月で調査対象管 2 本のうち 1 本の新替を行なっている。

耐熱ペイント塗装钢管については調査件数が 1 件しか報告されていないが、保守困難な個所に顕著な腐食が発生していた。

アルミメッキ钢管および銅管については 4 ケ年の調査期間を通じて良好な結果が得られている。

従ってアルミメッキ钢管は、甲板蒸気排気管の外表面処理仕様としては良好な耐腐食性を持つと考えられる。

しかし、アルミは溶融温度が高く（約660°C）熱影響によって鋼管素材の加工寸法精度を低下させるという施工上の欠点および、海水系統に用いた場合に、亜鉛メッキに比較し寿命は長いが孔食の発生の危険性があることなどから、従来は直管部分の多い甲板上蒸気排気管系を除いては、あまり使用実績は見られない。

諸管材料の現状調査アンケート結果では、海運、造船2社のうち15社がアルミメッキ鋼管、2社が亜鉛メッキ鋼管、2社が耐熱ペイント塗装鋼管、3社が鋼管を使用している。アルミメッキ鋼管の管材としてはSTPG-E (Sch 40) が大多数を占めているが、SGPを使用しているものも5社あった。

アルミメッキ管を使用する場合、腐食対策の面からは電縫鋼管（SGP-E）で十分使用に耐えると考えられる。

従って推奨仕様としては全口径を、アルミメッキの配管用炭素鋼管（SGP-E及びSGP-B）とする。但しNK以外の船級によっては、圧力系統に鍛接鋼管を使うこと。タンカ-等の甲板上にアルミメッキ鋼管を使う事が認められない場合があるので注意を要する。

(3) 常用海水系統（冷却海水、雑用海水、サニタリー）

就航船のアンケートによる実態調査結果によると、4ヶ年累計の配管系統の腐食による損傷（破孔、漏洩）全体の約80%を占める件数が冷却海水およびその他常用海水系統に集中している。

就航船の開放調査研究の結果、これらの損傷はフランジ溶接部、エルボ溶接部、電縫钢管シーム部および異種金属接続部などに集中して発生する様相を呈しており、これらの個所は著しく腐食が進行し破孔に至る調査管も多くみられられた。

就航船の損傷例は主として亜鉛メッキ鋼管に発生しており、実験室基礎研究の結果でも、亜鉛メッキの寿命は長くても3~4年、電縫钢管シーム部溝腐食の腐食速度は1.87 mm/yearと報告されており、8~10年の使用期間を考えた場合には、Sch. 40程度の厚さの管材を使用しても損傷に至る可能性が大きいことが示唆されている。

就航船の開放調査結果では、破孔の多くが電縫钢管シーム部の溝腐食や、フランジ溶接部のあばた腐食に起因している事実から、非常に大きな管腐食速度に対して管肉厚を決定する必要があることになり、現実に使用されている管肉厚とかけ離れた値となるので、8~10年の耐用年数を考慮する限り、亜鉛メッキ電縫钢管の使用は推奨できないことになる。

継目無钢管および開先フランジ（3.3節参照）を採用した場合には、選択的に腐食される部分を減ずることができるので、実験室基礎研究の実管テスト結果から得られた冷却海水系統フランジ近傍部の腐食速度0.8 mm/yearを基に耐用年数を推定することができよう。耐用年数を10年とした場合、亜鉛メッキは約3年で消失すると考えられるのでその後の7年間に對して、この最大腐食速度を用いて管腐食減量を考慮すると、NK規則の計算式（3.3.1節参照）により表3.4.1のような管肉厚が求められる（但し許容圧力は5kg/cm²、定数S=7.6を使用した。）

この結果呼び径125A以上はSch 40、100~65AはSch 80、50~25AはSch 160に相当する管肉厚が必要となる。

表3.4.1 冷却海水管必要肉厚（亜鉛メッキ継目無钢管使用の場合）

管呼径	必要肉厚	適合規格管
400 mm	6.9	
350	6.8	
300	6.6	
250	6.4	STPG-38-S Sch 40
200	6.3	
150	6.1	
125	6.0	

100	60		STPG-38-S Sch 80
90	59		
80	59		
65	58		
50	58		STPT-38 Sch 160
40	58		
32	57		
25	57		

$$\text{必要肉厚} = T - a + \text{腐食代} = \frac{5 \times D}{200 \times 7.6} + 5.6 (\text{mm})$$

しかしながら、本系統に関してはかなりの厚肉管でも局部腐食による損傷例も多く本質的にはゴム系もしくは樹脂系ライニング管などの採用により、管素材と海水との直接接触を遮断する方法が実際的と考えられる。

諸管材料の現状調査アンケートの結果によると、表面処理に関しては呼び径 200A あるいは 250A 以上の口径に対しゴム系あるいは樹脂系ライニング。それ以下の口径に対し亜鉛メッキという仕様が主流となっている。管材についてはライニング管の場合は SGP、亜鉛メッキ管の場合は STPG-E (Sch. 40) が殆んどである。呼び径 250A～200A 以上でライニング管を採用している例が多いのは、従来樹脂系もしくはゴム系ライニングの安定した処理可能範囲が 250A～200A 以上であったことに原因していると思われるが、現在では呼び径 20A 以上で処理可能なライニングも存在している。

以上より呼び径 250A 以上の推奨仕様を、ゴム系もしくは樹脂系ライニングを施した SGP することは問題無いと思われるが、呼び径 200A 以下に亜鉛メッキ鋼管を推奨する場合には継目無鋼管を使用することが望まれ。さらに腐食代を十分にとる為には Sch 80 及び Sch 160 等の厚肉管を使う必要があり、使用管種が増大するばかりでなく腐食対策としても十分ではなく、価格的にも必ずしも有利ではない。

以上から当部会としては呼び径 15A 以下を除き、常用海水系統の全口径に対してゴム系もしくは樹脂系ライニングを施した SGP 管を推奨仕様としたい。

冷却海水系統以外の常用海水系統（雑用海水、サニタリー系統）についても、就航船の開放調査研究の結果から、管腐食速度は冷却海水系統に比較して多少小さいと考えられるが、腐食による損傷発生件数は非常に多く腐食対策としての推奨仕様は冷却海水系統と同じ考え方を探ることにする。

また居住区内のサニタリー系統など管強度が重要視されない部分には塩ビ管の使用が推奨されよう。

最近、冷却海水全系統にライニング管等を使用した場合冷却器チューブもしくは BO弁体等の腐食が亜鉛メッキ鋼管を使用した場合に比較して著しく進展する事例が多く報告されているので、冷却器直前の保守新替容易な場所にペアースティールの犠牲管を設けるか、あるいは防食用純鉄板を設ける等の対策が推奨される。また管口径が大きく保守新替が困難となる場合には鉄イオン発生装置などの装備も検討する必要があろう。

(4) 間欠使用海水系統（ビルジ、バラスト、消防管）

就航船のアンケートによる実態調査結果によると同じ海水管系統でも、常用海水系統ではアンケート対象船 1 隻 1 年間当たり平均約 7.9 件の損傷が発生しているのに對し、ビルジ、バラスト系統では 1 隻 1 年当たり平均 0.4 件程度の損傷発生率となっている。

就航船の開放調査結果からは表 3.4.2 に示すように冷却海水系統と比較すると、ビルジ、バラスト系統では腐食速度が明らかに少ないことが認められる。

また調査対象管の腐食程度は軽微であり、4年間の調査数48件のうち破孔に至ったものは5件であるが、このうち4件までがポンプ付ヘッダー・パイプ方式を採用している調査管の電縫管シーム部であった。

従ってこれら特殊部分を除いてはビルジ・バラスト系統で破孔に至った損傷例は非常に少ないと考えられるので、管腐食減量を推定するには就航船の開放調査研究によって得られたビルジ・バラスト系統の管最大腐食速度を目安にすることができよう。

この最大腐食速度を用いて8～10年間の耐用年数を考慮した必要管肉厚をNK規則の計算式で求めると配管用鋼管(SGP)で十分であるとの結果になる。

以上から配管用钢管(SGP-E又はSGP-B)を本系統の管材料の推奨仕様とすることができよう。

また初期防食の目的では良好な防食効果が期待できるので亜鉛メッキ処理をほどこすことが推奨される。

直接海水に接する管系統では電縫钢管シーム部の腐食が顕著なので、本来継目無钢管の採用が好ましいが、経済性も考慮合せると間欠使用海水系統では電縫钢管の採用がより現実的であると考えられる。従って現在各钢管メーカーで開発の行なわれている耐溝腐食性電縫钢管の成果については十分検討して行く必要がある。当部会で行なった実管通水試験では従来の電縫钢管に比較して、耐溝腐食性が改善された結果が出ているので、今後経済性・市場性をも考慮して採用を検討する必要があろう。

表3.4.2 冷却海水管と間欠使用海水管最大腐食速度(就航船の開放調査研究51年度報告書(研究資料No.263))

P14,18より) 単位mm/year

調査年度	主補冷却海水系統	その他常用海水系統	左記以外の海水系統 (ビルジ・バラスト)
S48年度	0.40	0.27	0.161
S49年度	0.48	0.45	0.282
S50年度	0.77	0.43	0.589
S51年度	0.64	0.41	0.291
平均	0.56	0.39	0.33

また亜鉛メッキ管ではポンプ吸入管などの異種金属接続部や流れに乱れの生じ易い部分では著しい腐食の発生が懸念されるので、これら特定の部分に対して厚肉管の採用もしくは保守新替が容易な短管を設けるなどの配慮が望ましい。

(5) 甲板上作動油および制御用油圧系統

就航船のアンケートによる実態調査結果では全損傷発生件数の約5%がこの系統で発生しているが、就航船の開放調査結果では管外面塗装のみの钢管であっても、腐食程度は軽微であった。比較的腐食の著しかった調査例は、風浪に直接さらされるものあるいは海水・雨水の滴下する環境に取付けられていると想定されるものだったので、取付位置・周囲環境が重要な要因となっている。

従って配置等に十分の配慮を払えば、この系統では8～10年の寿命を考える限り腐食は大きな問題とはならないと考えられる。

しかしながら、諸管材料の現状調査アンケート結果は表3.4.3のようになっている。

表 2.4.3 甲板上作動油および制御用油管材料の現状

管材	甲板機械 駆動油圧管	遠隔操作弁 作動油圧管	制御用油圧管
鋼管もしくは銅合金管 (B s T F o v D c u T)	1 社	9 社	13 社
銅・銅合金管もしくは ステンレス管	-	3 社	-
ステンレス鋼管 (S U S)	-	1 社	2 社
钢管 (S T P G S T P S S T S)	18 社	8 社	4 社

作動油・制御油系統では銅合金管・钢管を標準として使用しているものも多いが、必ずしも腐食対策の観点のみではなく比較的小口径管が多く使われるので、配管工事の容易性や油圧系統に異物等の侵入の危険性を減ずる目的でも使用されているものと考えられる。

当部会の推奨仕様としては、腐食対策の観点から要求される仕様としてタールエボキシ塗装钢管とし、钢管の管材は系統の圧力レベルにより最適なものを選定することにする。

(6) 蒸留水系統

新造船就航時よりの追跡調査の結果から、蒸留水系統に亜鉛メッキ钢管を用いた場合、亜鉛メッキ層の減少量は海水管系に用いられる場合に比べて、かなり大きい傾向を示した。

しかしながら、就航船の開放調査結果によると、亜鉛メッキ消失後も管内面の腐食は少なく、腐食の進展が観察されない程度のものが大部分を占め、腐食速度は 0.1 mm/year 程度であった。

諸管材料の現状調査アンケート結果は表 3.4.4 のようになっている。

表 3.4.4 蒸留水系統管材料の現状

管材	回答会社数	
銅又は銅合金管	6 社	
銅又は樹脂系ライニング管 (S G P)	2 社	小計
樹脂系ライニング管	1 社	11 社
塩ビ管	2 社	
亜鉛メッキ钢管 (S G P)	7 社	小計
無処理钢管 (S G P)	1 社	8 社

この結果によると半数以上の会社が钢管・樹脂系ライニング管などの採用による腐食対策をほどこしている。

就航船のアンケートによる実態調査の結果によると、就航後の経過年数が増すに従って損傷発生率が増加する傾向が出ており、何らかの腐食対策をほどこすことが望ましい。

推奨仕様としては、樹脂系ライニング管もしくは銅合金管の採用が考えられるが、経済性から樹脂系ライニング管

を推奨する。管材は配管用炭素鋼管（S G P）とする。

(7) イナートガス海水ドレン

諸管材料の現状調査アンケートの結果によると、回答 21 社全てが樹脂系もしくはゴム系ライニング管を採用している。またライニング管の管材は大部分配管用炭素鋼管 S G P を使用している。

就航船のアンケート調査では特に調査対象として注目しなかったことから、これら管材の腐食実績に対する情報は得られていないので上記のように一般的に使用されている管材料を推奨仕様とする。

(8) 冷却清水維用清水

諸管材料の現状調査アンケートの結果によると、調査対象とした海運造船各社の全てが配管用炭素鋼管（S G P）を使用している。また大半のものが亜鉛メッキ処理を標準的に採用している。

冷却清水中に防錆剤を投入する場合には、局部的に溶解して亜鉛が析出し障害を生ずる等の懸念がされて居り、亜鉛メッキ処理の採用については腐食対策以外の面から検討される必要がある。

腐食対策の推奨仕様としては亜鉛メッキを処した配管用炭素鋼管（S G P - E 又は S G P - B）を考える。

3.5 資料 図表（実験室基礎研究）

昭和 49 年度から 4 ヶ年間に亘って行なってきた実験室基礎研究の結果得られた鉄鋼の海水中における腐食に関する基礎的データーを腐食因子ごとに分けて以下に記載する。

3.5.1 海水流速および温度

鉄鋼の海水中における平均腐食速度に及ぼす流速および温度の影響を図 3.5.1 に、試験期間の平均腐食速度に及ぼす影響を図 3.5.2 に示す。

これらの図からつきのことが明らかである。すなわち

(1) 平均腐食速度に及ぼす流速の影響は、短時間側では流速の増加につれて大巾に平均腐食速度は増加しているが、試験期間が長くなり 16 ヶ月以上では、平均腐食速度に及ぼす流速の影響は小さくなり、流速が $1.9 \text{ m/sec} \sim 4.9 \text{ m/sec}$ の範囲では平均腐食速度は約 0.25 mm/year ^{※1} になっている。

(2) 回転翼車型の試験結果（試験期間 3 ヶ月～6 ヶ月）では、平均腐食速度におよぼす温度の影響は非常に大きく、温度が 20 ℃ から 50 ℃ に上昇すると平均腐食速度は約 8 倍になっている。

一方、電縫鋼管のシーム部の溝状腐食深さに及ぼす流速および温度の影響を図 3.5.3 に示す。図 3.5.3 から明らかのように、シーム部の溝状深さは、温度が 40 ℃ 付近に極大点があり、また流速が大きい程深くなっている。

他方、フランジ近傍の最大腐食量を図 3.5.4 に示すが、流速が $1.9 \sim 4.9 \text{ m/sec}$ の範囲にあれば流速の最大腐食量におよぼす影響は小さいが、細対値で比較すれば最大腐食速度は平均腐食速度よりも大きく $0.3 \sim 1.2 \text{ mm/year}$ になっている。

亜鉛メッキ膜厚減におよぼす流速と温度の影響を図 3.5.5 に、試験期間の影響を図 3.5.6 に示す。図 3.5.5 には ISO の Technical Committee ISO/TC 8 の提案したデータ³⁾ も合せて示している。

図 3.5.5 から明らかなように、亜鉛メッキ膜厚減は流速および温度が上昇するにつれて大きくなっている。とくに温度が 80 ℃ になると亜鉛メッキ膜は極端に早い速度で溶解している。この現象に関して蒸溜水における亜鉛の腐食速度におよぼす温度の影響として表 3.5.1⁴⁾ が知られており、本研究結果もこれと対応していると思われる。^{※2}

亜鉛メッキ膜厚減におよぼす流速の影響も短時間側では顕著であるが、試験期間が長期になると流速の影響は小さくなり、約 $10 \mu/\text{year}$ の値になっている。この値は、公表された亜鉛メッキの膜厚減の値⁴⁾ $10 \sim 25 \mu/\text{year}$

注) ※ 1. 海水に浸漬した場合（流速 = 0）の炭素鋼の平均腐食速度は 0.15 mm/year 程度²⁾ といわれており、

流速が 1.9 m/sec 以下の場合には平均腐食速度におよぼす流速の影響はあるのかもしれない。

表 3.5.1 亜鉛の腐食速度におよぼす温度の影響⁴⁾ (蒸溜水中, 15日間)

温 度 (°C)	腐 食 速 度 ($mm/year$)
20	0.020
50	0.071
55	0.38
65	3.05
75	2.34
95	0.31
100	0.12

からみれば、やゝ小さいが、本実管テストの26.5ヶ月試験の結果最大膜厚減として $3.3\mu/year$ という値が得られているので、本実管テストのような試験条件では亜鉛メッキ膜の寿命（膜厚 100μ ）は3～4年と考えるのが妥当のように考えられる。

3.5.2 異種金属接触腐食

回転翼車型腐食試験装置により得られた、銅合金との結合面積比を $1/1$ にした場合のデーターを図3.5.7に示す。

図3.5.7から明らかなように、銅合金と結合された炭素鋼および鍛鉄の腐食速度は、流速および温度が上昇するにつれて大きくなっているが、温度の影響が極めて大きく、海水温度が 20°C から 50°C に上昇することによって腐食速度は5～10倍に上昇している。

また、単独試験片と結合試験片の腐食量を比較すると、結合試験片の腐食速度は単独試験片の2～4倍になっている。

3.5.3 シーム部の腐食

図3.5.8においては、電縫鋼管のシーム部の溝状腐食深さは、流速の増加につれて大きくなっていたが、図3.5.8に示す実管テストの結果では、流速の影響はあらわれていない。これは、管内面が厚い腐食生成物で覆われていたためと思われるが、流速が更に増大したり、或いは乱流等によって腐食生成物が除去されるような環境下では、このシーム部の溝状腐食は更に早い速度で進行すると思われる。

実管テストでは普通電縫钢管で $1.57 mm/year$ 、熱処理された電縫钢管で $3.85 mm/year$ の最大溝状深さが得られていることから、海水ライン系統に電縫钢管を裸のままに使用することは中止した方が良いと考える。

図3.5.8から明らかなように、鍛接钢管においてもシーム部が選択的に腐食する現象が生じているが、電縫钢管に比較すればその程度は小さく $1 mm/year$ 以下である。

なお、電縫钢管のシーム部の溝状腐食の発生の機構はまだ完全に解明されていない。^{5) 6)}

3.5.4 亜鉛メッキおよびアルミメッキ

メッキ膜厚減についての試験結果はすでに3.5.1項に記述したので、ここではアルミメッキについて述べる。

アルミメッキ材に関する回転翼車型腐食試験結果を図3.5.9に示すが、アルミメッキの耐食性は明らかに亜鉛メッキよりもすぐれている。しかしながら、2.2項で詳細に述べたように、実管テストではアルミメッキ膜は局部的に剥離しその部分が集中的に腐食し、1ヶ所ではあるが貫通していた。

本実管テストに用いたアルミメッキ浴は甲板上蒸排気管用のAl-Si系浴であったことによるのかもしれないが、ア

注) ※ 2. 昭和51年度の報告書で述べたように、温度が 80°C になると、亜鉛メッキ膜が残存しているにもかかわらず、素地がピット状に腐食する現象が認められた。

7)
ルミメッキ材の耐海水性は良くないという報告もあるのでアルミメッキの前処理、アルミメッキ浴成分の影響等について検討することが必要と思われる。

3.5.5 被覆材欠陥部の腐食

実管テストによる被覆材欠陥部の腐食に関する試験結果を表3.5.2に示す。

表3.5.2から明らかなように、外面溶接等によって欠陥が生じた場合、欠陥部に集中して腐食が生じない被覆材は亜鉛メッキ、オオブレンライニングおよびポリエチレンライニングであった。しかしながら、ネオブレンライニングやポリエチレンライニングの場合、ライニング自身による電気化学的な防食効果は期待できないので、ライニングに欠陥があり、且つ銅合金などの貴な金属と接触している時は欠陥部に集中して腐食が生じるおそれがあるので充分な注意が必要である。

3.5.6 ベンド部の腐食

平均腐食速度に及ぼす曲りの影響を図3.5.10に示すが、試験期間が26ヶ月になると、曲り角度、曲げ半径の平均腐食速度に及ぼす影響は小さくなっている。

しかしながらシーム部の溝状腐食深さ（表3.5.3参照）からみれば、電縫鋼管および鍛接鋼管とともに曲管部の腐食深さが直管部よりも10～20%大きくなっている。

したがって、曲げ半径が2D（D：外径）以上あれば、ベンド部の腐食速度は直管部とほぼ等しいか10～20%大きいと結論できそうである。

3.5.7 フランジ部近傍の腐食

図3.5.10から明らかなように、フランジ部近傍の平均腐食速度は直管部より大きい。また表3.5.3から明らかなようにシーム部の溝状腐食深さもフランジ部近傍の方が大きい。

他方、図3.5.4にフランジ近傍の最大腐食量を示したように、フランジ形状の違い、パッキンバリの有無、フランジ喰い違いの有無が最大腐食量におよぼす影響はほとんど認められなかった。

しかしながら2.2項で述べたように、フランジのシール溶接部の腐食量について定量的なデータを得ることはできなかつたが、シール溶接部の腐食形態をみた場合、開先フランジの方が差込みフランジより望ましいようである。

3.5.8 耐溝状腐食性電縫鋼管の耐食性

図3.5.12に8種の耐溝状腐食性電縫鋼管の溝状腐食深さを示す。この図から、シーム部の溝状腐食深さが鍛接鋼管と同等かもしくは少ない鋼種は

A 2 (0.2 Cu-Low S系)

A 3 (Low S+0.01REM系)

A 4 (0.2Cu-0.05 Ti系)

A 4 (Low S系)

であった。

これらの鋼種の溝状腐食深さは0.11～0.87mm/year、最大腐食速度は0.21～1.38mm/yearであった。

参考文献

- 1) H. H. Uhlig: Corrosion Handbook (1948) 391, John Wiley & sons
- 2) T. H. Rogers: Marine Corrosion (1968) 75, George Newnes Ltd
- 3) ISO/TS/SC05 "Sea Water Directives for Reducing Corrosion" (Nov 1975)
- 4) L. L. Shreir: Corrosion Vol. 1 (1976) 4-150, Newnes-Butterworths
- 5) 加藤・乙黒・門:「電縫鋼管に生じる溝食について」防食技術 Vol. 23 (1974) 385
- 6) 例えは小若・長野:「金属材料」Vol. 17, No. 7 (1977) 48
- 7) J. O. Hudson et al: J. I. S. I. Vol. 154 (1946) 229

表 3.5.2 被覆材欠陥部の腐食状況

(通水期間 16.5ヶ月)

被覆材の種類	符号	欠陥の種類	腐食観察結果
亜鉛メッキ材	A	管外面溶接肉盛	○溶接部の裏側は、亜鉛メッキ膜が消失しているが母材は健全であった。
	B	同上補修	○塗料は一部剥離しているが母材は健全であった。
	C	人工切傷	○×印の人工切傷あとをみつけることが出来るが母材は健全であった。
アルミメッキ材	D	管外面溶接肉盛	○異常は認められなかった。
	E	同上補修	○塗料が浮上がり、一部剥離して、白い厚いスケールで覆われていたが、母材は健全であった。
	F	人工切傷	○人工切傷が見出せない程白色と黄色の混在したスケールで覆われており、母材は健全であった。
タルエボキシ塗装材	G	管外面溶接肉盛	○塗膜が剥離した部分の母材が約 0.5 mm 深さ腐食していた。
	H	同上補修	○異常は認められなかった。
	I	人工切傷	○人工切傷部のみ、約 0.5 mm 深さ腐食していた。
ネオブレンライニング材	J	管外面溶接肉盛	○ネオブレンライニングが盛上がってすきまがあるが、母材はうすい赤錆で覆われていたが大きな腐食は認められなかった。
	K	同上補修	○異常は認められなかった。
	L	人工切傷	○人工切傷部のみ約 0.2 mm 深さ腐食していた。
	M	人工欠陥(オーバーラップ)	○オーバーラップ部にすきまがあり、うすい赤錆で覆われていた。
ポリエチレンライニング材	N	管外面溶接肉盛	○ポリエチレンライニングが盛上がってクラックが発生し内部は空隙になっていたが、母材は健全であった。
	O	同上補修	○異常は認められなかった。
	P	人工切傷	○管内面膜が剥離して、母材全面に赤錆が発生していた。
	Q	人工当傷	○当てキズ部が少し剥離して、すきまがあったが母材は健全であった。

表 3.5.3 溝状腐食深さ

(試験期間 26.5 months)

管径	流速 (m /sec)	管形状	電縫钢管				鍛接钢管			
			試験前肉厚 (mm)	試験後肉厚 (mm)	肉厚減 (mm)	腐食速度 (mm/year)	試験前肉厚 (mm)	試験後肉厚 (mm)	肉厚減 (mm)	腐食速度 (mm/year)
80A	1.9	直管部	4.05	1.86	2.19	0.99	4.25	3.11	1.14	0.52
		曲管部	4.05	1.73	2.32	1.05	4.25	2.02	2.23	1.01
		フランジ部	4.05	1.76	2.29	1.04	4.25	2.77	1.49	0.67
65A	2.9	直管部	3.70	1.90	1.76	0.80	4.13	2.94	1.19	0.54
		曲管部	3.70	1.65	2.05	0.93	4.13	2.70	1.44	0.65
		フ部	3.70	1.35	2.36	1.07	4.13	2.18	1.95	0.88
50A	4.9	直管部	3.45	1.57	1.88	0.85	3.77	2.53	1.24	0.56
		曲管部	3.45	1.56	1.89	0.86	3.77	2.39	1.38	0.62
		フランジ部	3.45	0.92	2.53	1.15	3.77	2.60	1.17	0.53

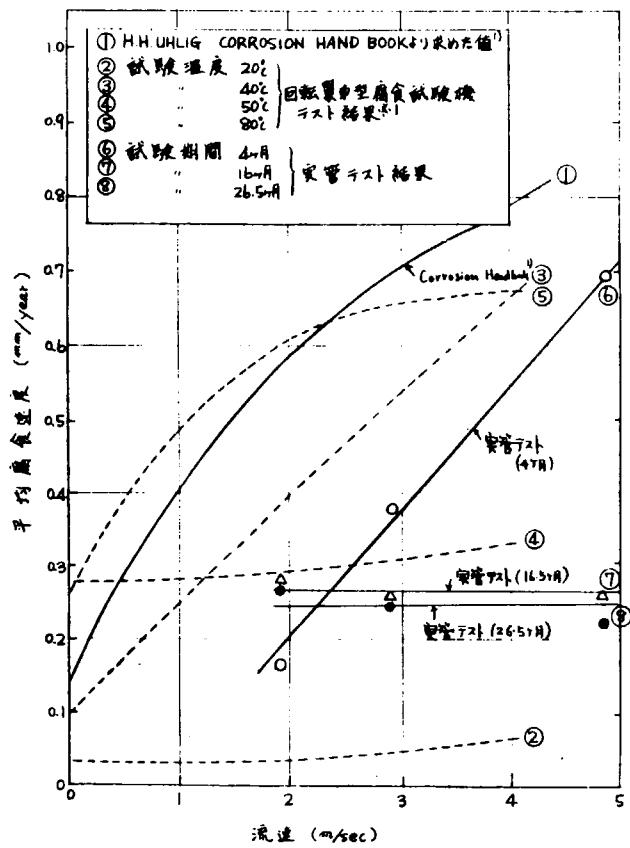


図 3.5.1 平均腐食速度に及ぼす流速と温度の影響

注) * 1 回転翼車型試験機の試験期間は③40
 $^{\circ}\text{C}$ (6ヶ月)を除いて全て3ヶ月である。

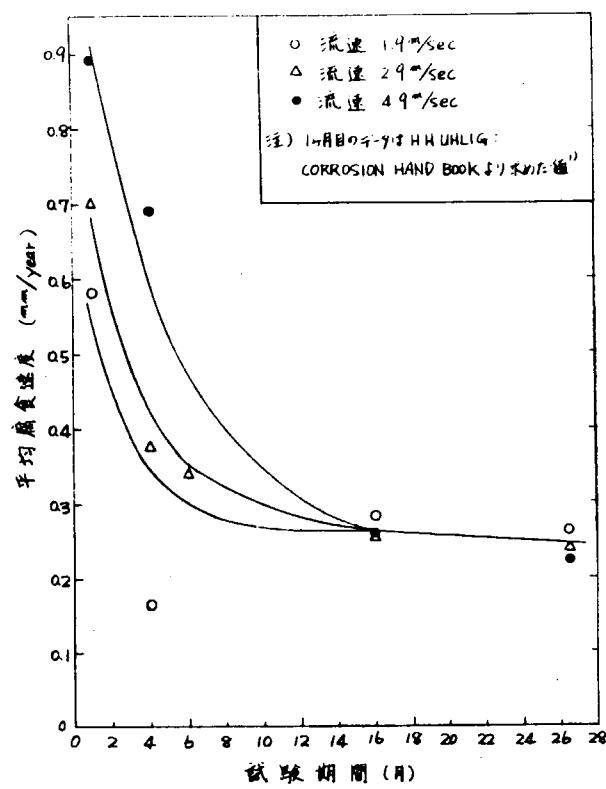


図 3.5.2 平均腐食速度の経時変化

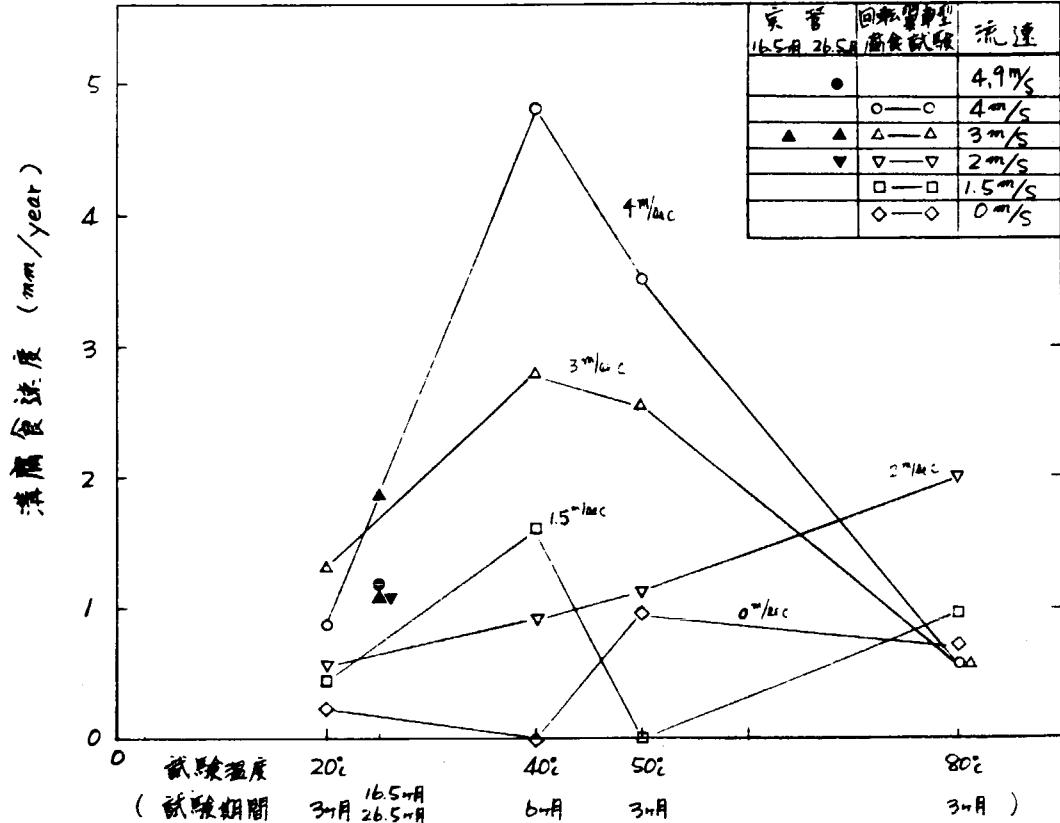
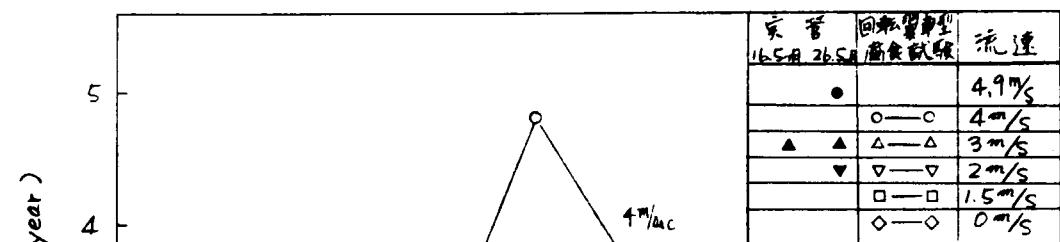


図 3.5.3 試験温度と溝状腐食速度の関係

(回転翼車研腐食試験機による………海水中)

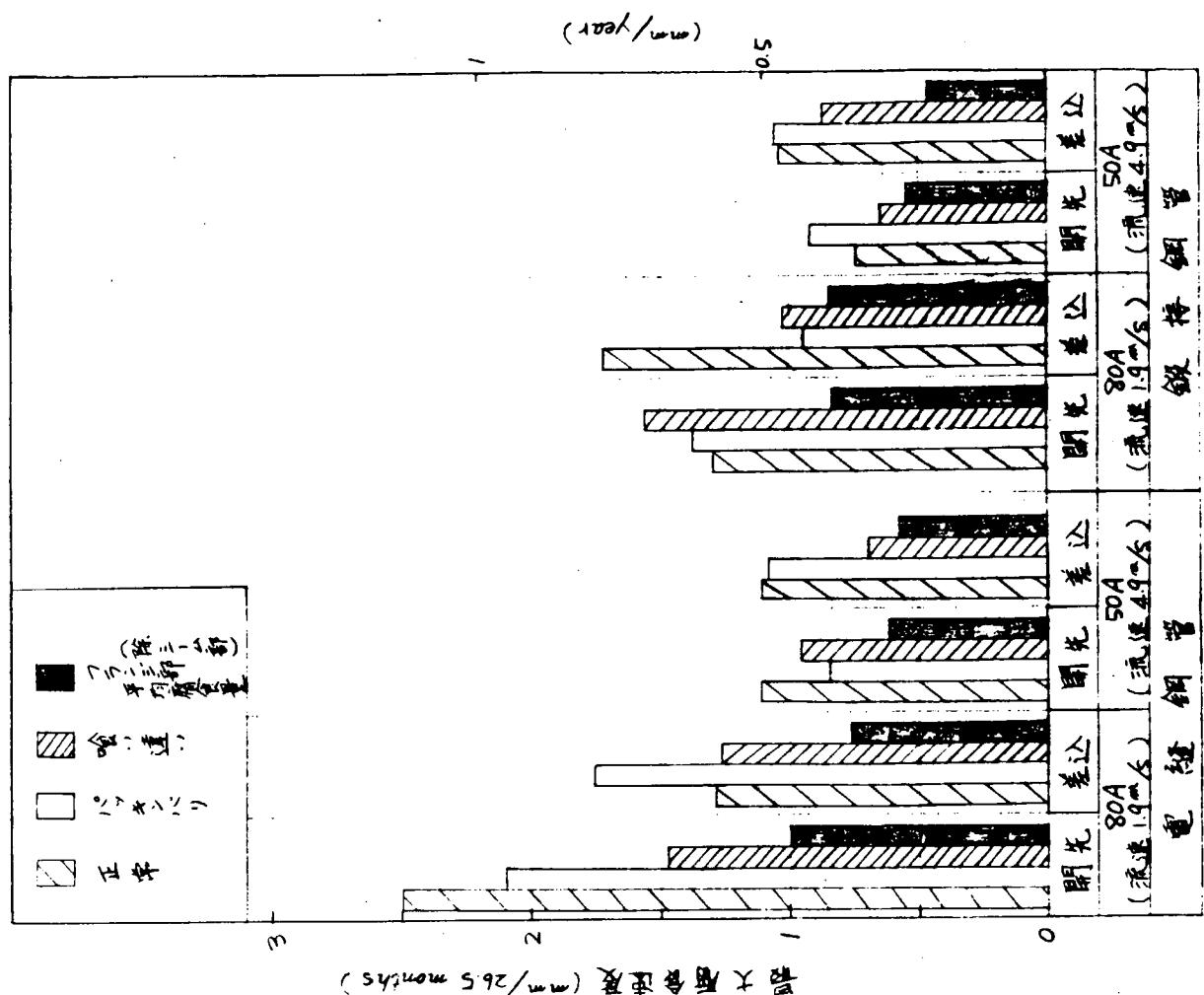


図 3.5.4 フランジ近傍の最大腐食量

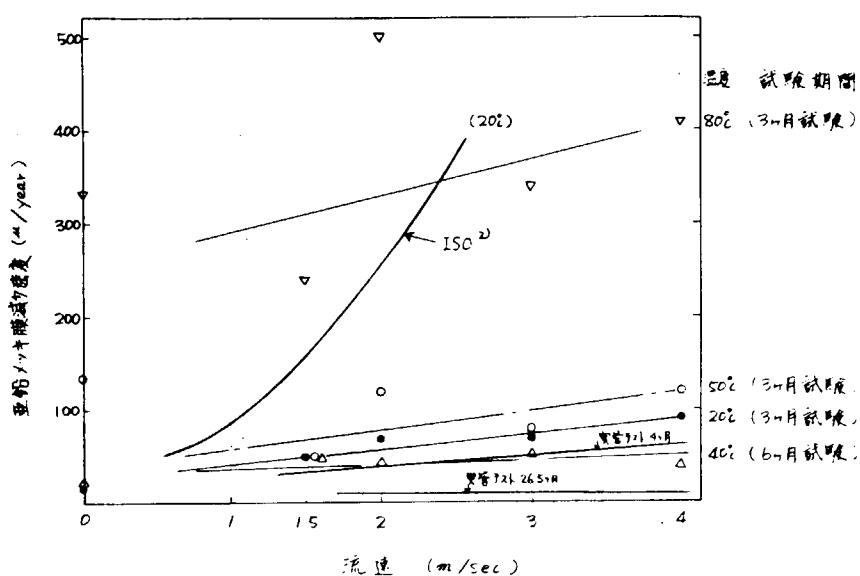


図 3.5.5 亜鉛メッキ腐食速度(回転翼車型試験機による) メッキ厚 100 μ

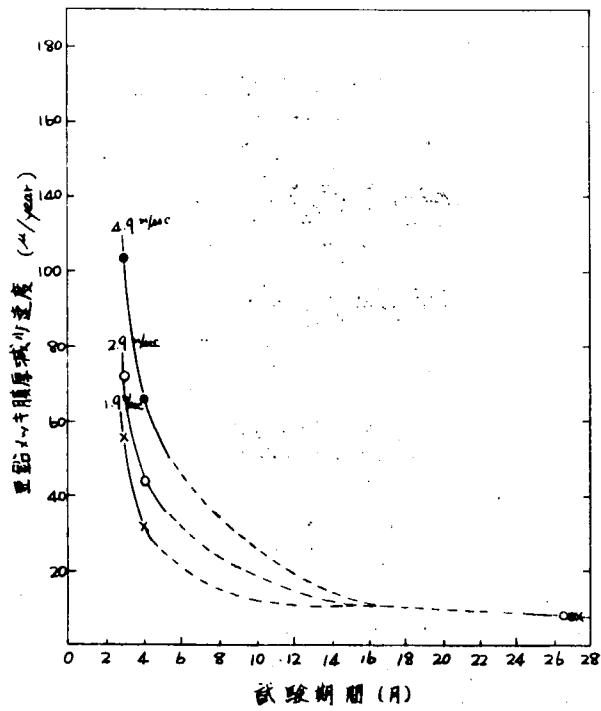


図 3.5.6 亜鉛メッキ膜厚減速度に及ぼす試験期間の影響

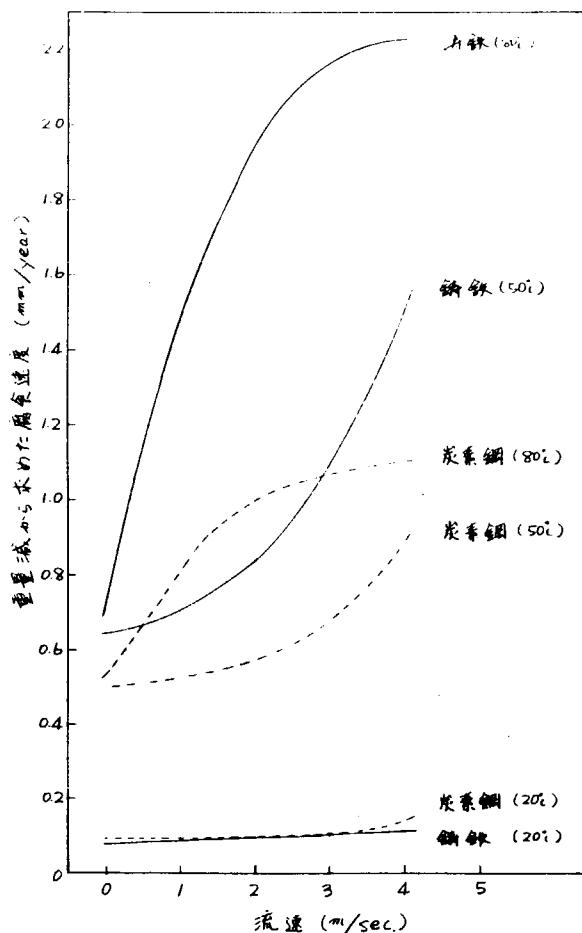


図 3.5.7 銅合金と結合された炭素鋼および錆鐵の腐食
(回転翼車型試験機による。結合面積比 1 / 1)

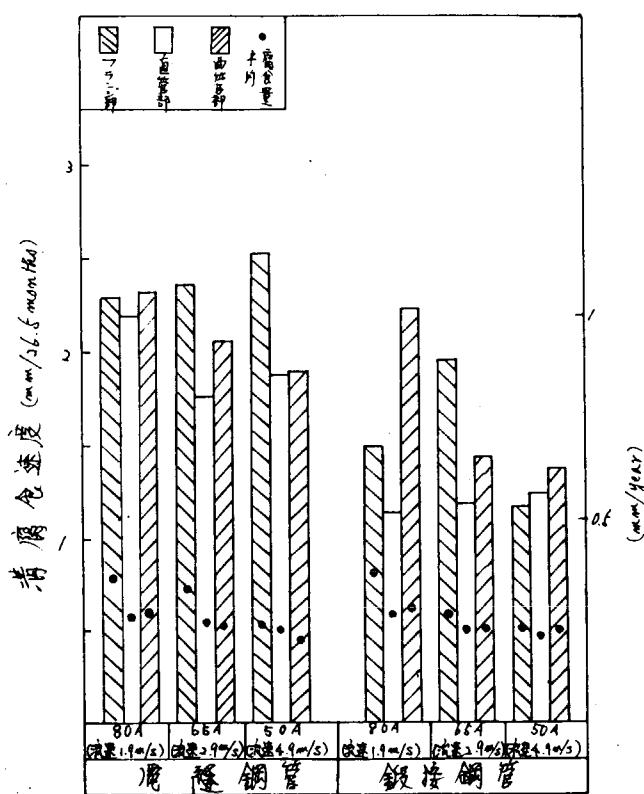


図 3.5.8 溝状腐食深さ(実管テスト)

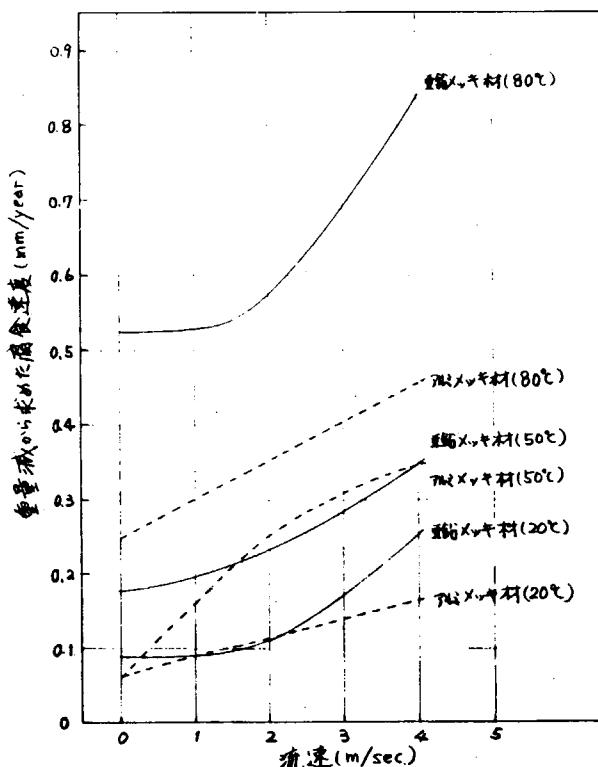


図 3.5.9 銅合金と結合された亜鉛メッキ材および
アルミメッキ材の腐食(回転翼車型腐食試
験機による。(結合面積比 1 / 1)

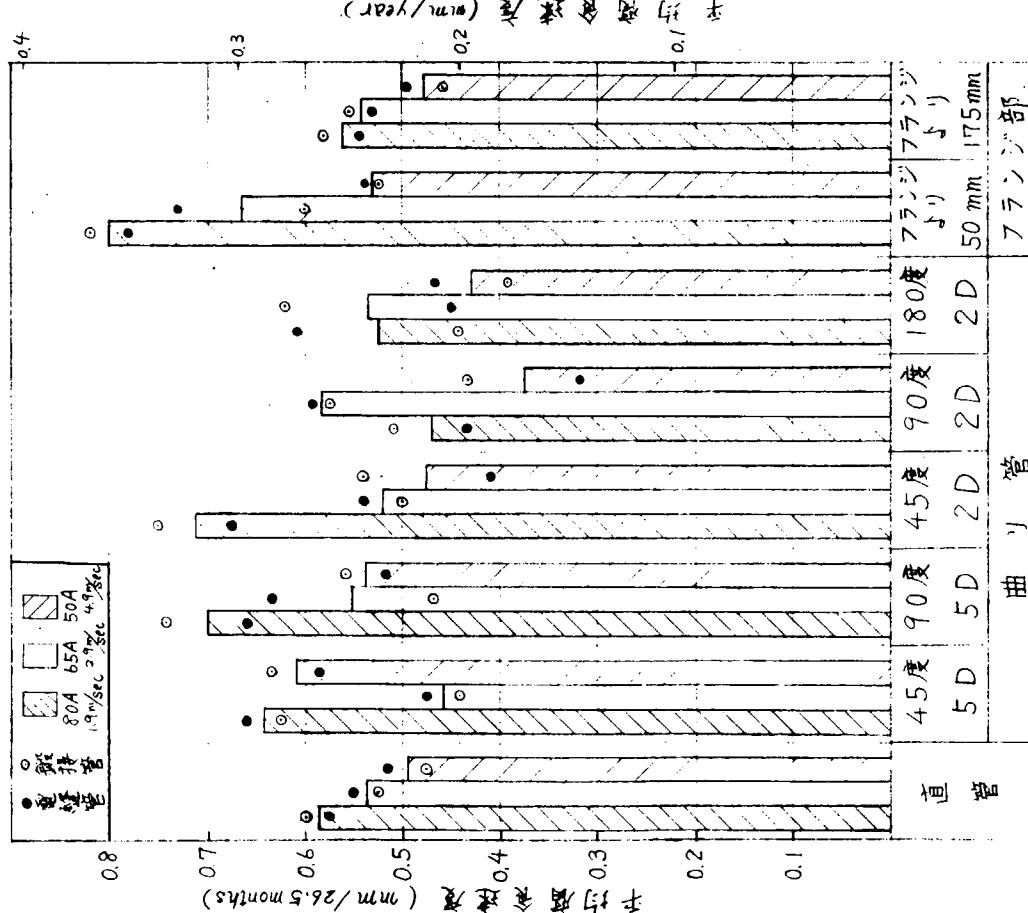


図 3.5.10 電縫管および鍛接管の平均腐食速度（超音波厚さ計による。）

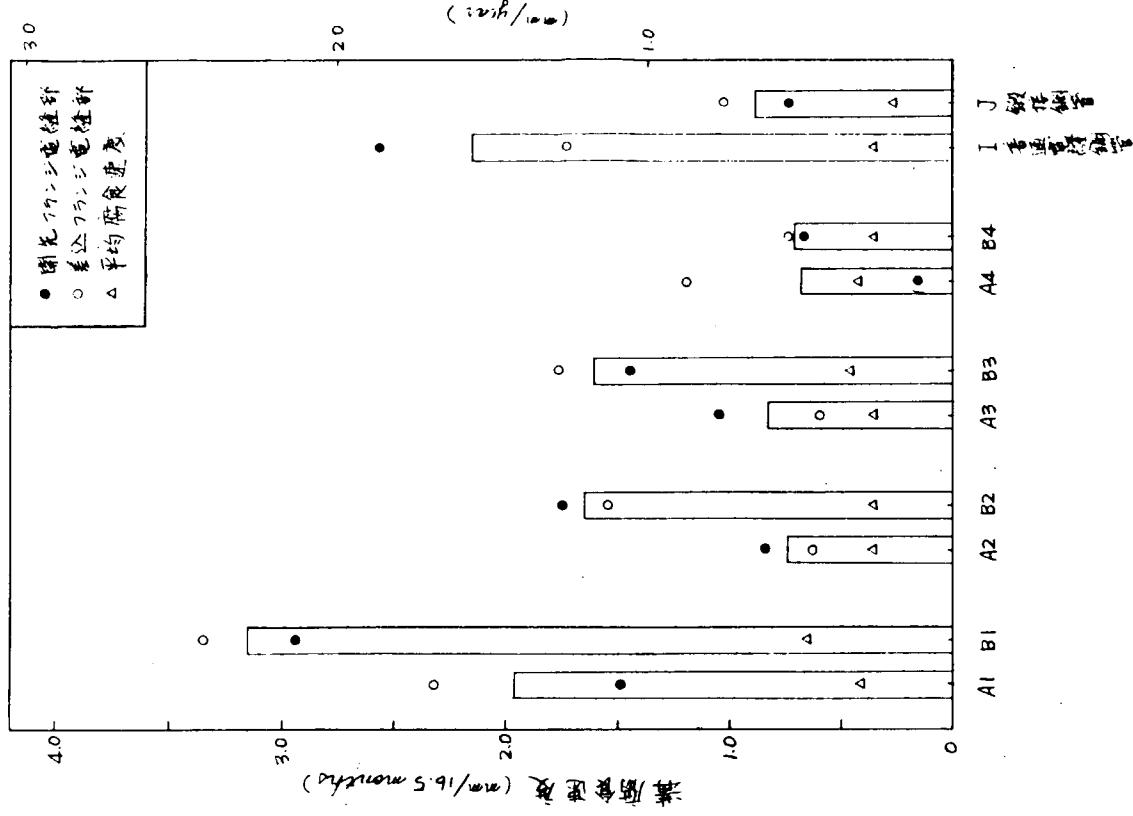


図 3.5.1-1 実管テストによる耐溝状腐食性電線鋼管の流入側フランジ部
近傍の溝状腐食深さ