二相ステンレス鋼の海水熱交への使用とその問題

水 野 誠*

*日本金属工業株式会社

Applications of Duplex Stainless Steel to the Seawater Heat Exchanger Tube

Makoto Mizuno*

*Nippon Metal Industry Co., Ltd.

High chromium austeno-ferritic duplex stainless steel NTK R-4 has been widely used as the heat exchanger tube in main steam condensers of ships and seawater heat exchangers of chemical plants for eight years. In this paper, relations between the corrosion failure rate FR on the heat exchangers using NTK R-4 tube and their designs, structures, maintenances and service conditions (seawater velocity, and temperature and pressure in a shell side) were investigated respectively.

Forms of the corrosion failures encountered in some heat exchangers were related to their service conditions. They have been caused through a hot spot corrosion and a crevice corrosion under the corrosion product. The adequate service conditions for NTK R-4 heat exchanger, a cooler and a condenser, were defined according to the value $t(^{\circ}\text{C}) \times p(\text{kg/cm}^2)$ in their shell side conditions. It was concluded that keeping the seawater velocity at least 1.5 m/sec, a sterilization of sea-organisms by chlorine and excluding the trash entering into the heat exchanger were required for this tube.

1. ま え が き

ステンレス鋼にとって、最も苦手な腐食環境と言えは第一に塩化物の多い高温の環境を挙げねばならない。四方海に囲まれたわが国においては、海上はもとより陸上においても、冷却水をはじめ種々の工業施設に海水を利用することが多い。著者は 1950 年代より耐海水ステンレス鋼を開発すべく努力してきた。その結果、1965 年高クロム二相ステンレス鋼**を工業的に製造可能な新しいタイプの耐海水用鋼 (NTKR-4) として開発した。

本鋼種も本格的に使用されてから 8 年余りを経過したが、この間に日本工業規格に採用され、SUS 329 J1 として世に知られるようになった。そこで使用中に発生した事故、対策等を総括し、今後の本鋼種の使用に対し皆様の参考に供したい。

今回検討の対象としたのは、陸上、海上における熱交 (コンデンサーとクーラー) の伝熱管における事故および対策である。しかしながら同じようなコンデンサーであっても、型式、設計、運転条件等が異なる。また使用者

側の企業秘密等によりわれわれの立入れぬその他多くの問題もあり、情報不足のため十分に意を尽した説明ができなかったことは残念であった。

本報告は、1975 年 10 月時点でのとりまとめである。

2. 研究、開発の概要

著者らの行った高クロム含モリブデン二相ステンレス鋼の研究は、すでに学協会誌に報告してきたので重複を避けたい^{1)~6)}。これらの研究においても明らかなように、クロム、モリブデン含量が非常に多くならないと、耐孔食性、耐すきま腐食性等に関し、完璧なものは得られない。このような成分のステンレス鋼は、当時の製造技術では製造が非常に困難であると同時に実用鋼としてコスト高にすぎるきらいがあった。そこで、実用性を考慮し現在の NTKR-4 に決定した。われわれは、これでも若干のすきま腐食が発生することは承知していたが⁶⁾、米国における火力発電所の海水冷却コンデンサーの総合調査結果⁷⁾にある 7 基の 316 製コンデンサー、並びに別に 50,000 本の 316 鋼管の使用報告⁸⁾に見られるように、適切な管理の下で使用されるならば、316 ですらかなりの可能性があることを知り、さらに高度の耐食性を有し、経済的にも大差のない NTKR-4 は十分に使用できるものとして製造試験に踏み切った。表 1 に NTKR-4

* 〒229 相模原市大山町 1-30 (1-30, Oyama-cho, Sagamihara 229, Japan)

** オーステナイト組織とフェライト組織が数十パーセントの比率で混り合い両者にはない新しい特性の得られたステンレス鋼。

表1 NTK R-4の該当規格と化学組成

該当規格

NTK R-4.....JIS G4303~07(1972) SUS329J1

但し、下記成分範囲に示すとおり、SUS329J1に包含されるが、独特の成分構成である。

成分範囲(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
NTK R-4	≤0.03	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	4.00 ~6.00	23.00 ~26.00	1.00 ~2.50	添 加
SUS329J1	≤0.08	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	3.00 ~6.00	23.00 ~28.00	1.00 ~3.00	

の成分範囲を示す。

さらに NTKR-4 の溶接引技管を製造し、火力発電熱交モデルテスト、化学工場における海水熱交クーラーテスト等を実施し、良好な結果が得られたので火力発電誌に発表した⁹⁾。このような経過をへて、1969 年より伝熱管として実用装置での使用を開始した。

3. 海水熱交換器使用結果

表2に本報告の対象となったコンデンサー、クーラー

表2 NTK R-4管使用の横型熱交換器一覧表(台数)

(d)	(c)	(a) ≤100		100~500		≥500	
		(b) コンデンサー	クーラー	コンデンサー	クーラー	コンデンサー	クーラー
≤100	<1.5	2	4	5	3	3	3
	≥1.5	3	4	9	6 *	38**	—
100 ~200	<1.5	4	0	1	0	—	1
	≥1.5	—	2	—	—	3	—
≥200	<1.5	2	1	—	—	—	—
	≥1.5	1	—	—	—	—	—

上表以外に条件不明の熱交9台がある。

(a): 伝熱面積(m²), (b): 器種, (c): 海水流速(m/sec)

(d): シェル側温度(°C), *印: U字熱交を含む

**印: 船舶用復水器

の型式、諸元等を示す。この表であきらかなように、大別して陸上、すなわち化学工業用熱交と海上、すなわち船舶用熱交(復水器)にわけられる。しかも後者は、すべて石川島播磨重工業株式会社(以下 IHI と記す)の製作によるものであるのに対し、前者は使用内容、型式等がすべて異なり、事故発生も大である。したがって今回の調査も、陸上が中心となった。もっとも船舶用復水器も初期に若干のトラブルが生じたが、後述のごとく適切な処置によりその後は問題が起らなかった。

調査の対象とした期間は、1969 年 3 月使用開始より 1975 年 10 月までで、化学工業用 66 台、船舶用 38 台についてである。

3.1 伝熱管実績調査について

前述のごとく運転中の装置の追跡調査は、企業秘密もありなかなか困難であったが、協力して下さったユーザーのご厚意により、それらの内 66 台については表3に示すような調査項目による一覧表を作ることができた。表3のうち、(A)/(B)は事故発生管の比であるが、事故発生率として示した(A)/(B)×100/Mは、事故率を事故発生までの月数で割ったものでFR値⁷⁾と称した⁸⁾。また

* FR 値は、Failure rate の略で、事故発生率を発生までの時間で除したものである。今回は時間として月数を用いた。

表3 実績調査表の一例

熱交 No.	運転開始 年 月	洩れ発生 確認年月	発生迄の 経過月数 (M)	洩れ 本数 (A)	熱交管 数 (B)	(A)/(B)	事 故 率 (A)/(B)×100× $\frac{1}{M}$
〇〇	44/11	46/5	18 +19	3 0	1200	3/1200	0.0139 0.0068

寿命区分と調査年月				使 用 条 件					
(A) 50/10 運転中	(B) ○年○月 後明 不	(C) 撤 去 年月日	(D) 其 他	シェル側		海水側 流 速 (m/sec)	管内壁 温 度 (計算)	熱交の 種 類	管内汚 れ生物 その他
				温 度 (°C)	圧 力 (kg/ cm ²)				
—	47.12 OK	—	—	84/37	3.7	2.0	—	41 クーラー L-L	汚 れ 大

熱交自体の寿命として L(A) 以下 4 区分とした。すなわち L(A) は 1975 年 10 月まで運転中のもの、L(B) は途中まで確認以後不明のもの、L(C) は事故のため廃却されたもの、L(D) は追跡できなかったものである。管内流速は管内閉塞などで設計値と異なるように思われたが、1 台しか実測できなかったので止むなく設計値によった。実測したものは L(C) に属するものであったが、設計値 1.7 m/sec に対し 0.6 m/sec であった。その他海水中の酸素濃度、滅菌、硫酸第一鉄の使用などは一部の情報しか得られず、使用できなかった。

このようなまとめを行なった結果、表 4 に示すように、L(C) すなわち極く短期間 (1 年以内) に漏洩事故により使用不能となった熱交が異常に多く 13 台に達し、これらの原因究明と対策の必要性が痛感された。

表 4 熱交66台の寿命区分と事故発生率分布

区分	FR 値 (範囲)					FR 値 $\bar{x}$	台数
	>1.0	1.0 ~0.1	0.1 ~0.01	0.01 ~0.001	0		
L(A)	—	—	2	2	20	0.0058	24
L(B)	—	5	4	1	14	0.0621	24
L(C)	9	4	—	—	—	3.243	13
L(D)	—	—	—	4	1	—	5

3.2 伝熱管漏洩促進因子について

表 3 で得られた情報により、熱交寿命と操作条件の間に何らかの相関があるのではないかと推定に基づき調査を行った。

i) コンデンサー、クーラーの寿命区分並びに FR 値

表 2 に示したように、今回の調査の内には気-液コンデンサー、気-気クーラー、液-液クーラーの 3 種類が含まれているが、表 5 に見られるように L(C) に関しては圧倒的にコンデンサーが多く、その FR 値も甚だ大きい。一方船舶用コンデンサーでは、ほとんど事故が発生していない。

表 5 4 寿命区分別のコンデンサー、クーラーの台数と FR 値計

区分	器種 コンデンサー (台数)	クーラー (台数)	不明 (台数)
L(A)	15 (0.098)	6 (0.042)	3
L(B)	6 (0.296)	15 (1.378)	3
L(C)	12 (43.42)	1 (1.625)	0
L(D)	0	2	3

() 内は FR 値計

ii) シェル側温度と海水流速と FR 値

FR 値に対し、シェル側温度と海水の流速は当然大きな影響を与えるものと思われたが、図 1 に示すように明白な相関関係は得られなかった。しいて言えば、流速の遅いものとシェル側温度の高いものに、FR 値が高い傾向があるが、この因子だけでは十分といえない。

図 1 NTKR-4 海水熱交の FR 値とシェル側入口温度-海水流速との関係

iii) シェル側圧力と FR 値

表 6 に熱交シェル側の圧力を便宜上 1.5 kg/cm² を界

表 6 熱交の器種およびシェル側圧と FR 値の関係

器種	FR 値 (範囲)						FR 値		台数
	100~10	10~1	1~0.1	0.1 ~0.01	0.01 ~0.001	0	(計)	($\bar{x}$)	
高 圧 コン サ デ ー	2	6	3	2	—	1	42.226	3.0162	14
低 圧 ク ー ラ ー	—	1	4	1	1	4	3.0029	0.273	11
高 圧 コン サ デ ー	—	1	1	2	2	13	1.59	0.0837	19
低 圧 ク ー ラ ー	—	—	—	1	—	12	0.042	0.0032	13

表 7 熱交の諸特性と寿命区分

種類 台数 諸特性	高 圧		低 圧	
	コンデンサー	クーラー	コンデンサー	クーラー
	14	11	19	13
L (A)	1	2	14	4
L (B)	2	8	4	9
L (C)	11	1	1	0
FR	3.0162	0.273	0.0837	0.0032
FR 零台数	1	4	13	12
圧力(kg/cm ²)	13.51	11.32	0.55	0.76
温 度 (°C)	98.78	106.45	98.05	80.7
流速(m/sec)	1.25	1.06	1.41	1.58

表 8 NTK R-4海水熱交の工場別平均事故発生率

工場名	高 圧		低 圧		不 明	FR	熱交器種とFRとの対応
	コンデンサー	クーラー	コンデンサー	クーラー			
	(台)	(台)	(台)	(台)	(台)		
A	—	—	8	—	—	0.0122	あり
B	3	1	3	1	1	1.8412	あり
C	1	—	—	—	—	11.475	あり
D	—	—	3	—	2	0.2984	あり
E	2	—	2	—	—	0.1874	
F	4	—	2	1	—	1.4294	あり
G	—	—	1	7	—	0.0082	あり
H	—	—	—	—	1	0.	
I	4	3	—	2	—	0.5865	あり
J	—	5	—	3	3	0.1079	
K	—	—	—	—	1	0.	
L	—	1	—	—	—	0.	
M	—	—	—	—	1	0.	

として高圧、低圧にわけて FR 値との関係を示した。ここでは、明らかに高圧系と低圧系の間に差が認められる。

さらにこれらの分類による装置寿命と熱交特性とを対比すると表 7 のようになり、温度、海水流速の外に圧力が大きな因子であることがわかった。また観点を変えて工場別の事故発生率をしらべても、ほとんどの事故に圧力を考慮する必要のあることがわかった。この関係を表 8 に示す。

3.3 事故発生に関与した諸因子の関係

以上のことより伝熱管に対し一定量以上の伝熱量が存在した場合に、極めて事故発生率が高くなることが予測できる。そこで、著者らが入手できた一般的な情報の内、圧力と温度とに着目し、海水流速と $t(^{\circ}\text{C}) \times P(\text{kg/}$

図 2 NTKR-4 海水熱交の シェル側の温度・圧力および海水流速との関係

cm²) との関係図を作り、これに事故発生率とクーラー、コンデンサーの層別を行なったのが図 2 である。

このような大胆な操作によって始めて事故に対する一つの概念が得られた。

すなわち、海水流速 1.5 m/sec 以上、 $t \times p < 100$ の領域では、1 件を除いて事故は発生していない（これを領域 I とする）。またその逆に海水流速 1.5 m/sec 以下 $t \times p > 100$ の領域（領域 IV とする）では、ほとんどの装置が致命的な事故を起こしている。そしてその中間に領域 II と III が存在する。

おそらくわれわれがさらに多くの情報、すなわち熱交換器にはいる気体、液体等の性質、たとえば比熱、露点時の熱収支等を知り、さらに海水の汚染度、生物付着量等を入手できたら、より明確な区分を行ない得たであろうことが、 $t \times P$ などという極めて大胆なパラメーターで、このような分類ができたことから推測し得る。

3.4 船舶用コンデンサーについて

今まで事故の多かった化学工業用熱交換器について述べてきたが、船舶用コンデンサーは、図 2 における分類では領域 I に属し、誠に当を得た設計であったといえ

表 9 48万トンタンカー復水器要目(IHI社)

タービン	常用出力	45,000 HP
冷 却 水	冷 却 水 量	15,200 t/hr
	管 内 流 速	1.94 m/sec
冷 却 管	材 質	NTK R-4
	製 作 法	自動アーク溶接・引抜
	外 径 × 厚 さ	19φ × 1.0 t mm
	全 本 数	5,560 mm 9,600 本
管 板	材 質	NTK R-4
	寸 法 枚 数	4,050 × 3,130 × 25 t mm 2 枚
水 室	材 質	ネオプレンライニング鋼板

表10 IHI社の船舶用復水器の製作実績(単位:艘)

年度	冷 却 管 材 質			合計
	アルミブラス	70Cu-30Ni	ステンレス鋼	
昭和45年	10	1	2	13
46年	13	0	3	16
47年	7	0	9	16
48年	2	0	14	16
49年	2	0	10	12
計	34	1	38	73

る。ただし初期において海洋性微生物付着防止装置を使用しなかった5基に異常に多量の生物が発生成長し、管を閉塞し事故を起こした例がある。銅合金に比べステンレス鋼は、極めて生物の成長に適しているようで、海水を使用する際の生物対策は非常に重要な問題であることを知った。生物発生は船舶用復水器のように外洋で使したもの特に多いが、滅菌を行ったものについての事故発生はゼロである。ここに代表的な船舶用復水器の諸元を表9に、また表10に今まで搭載された船舶の状況を示す。

4. 事故発生管の調査

NTKR-4の海水熱交換管としての事故を、熱交本体の使用期間を中心に調査結果を述べてきたが、次に伝熱管自体の事故の起こり方に観点を移し考察したい。

著者らが事故熱交のパイプを入手し、調査し得たものは22台であり、調査内容は表11に示すようなものである。表11のうち腐食型式とあるのは、孔食の進行状態により分類したもので、A^o、A、B、Cの4種類とし

た。すなわち、A^o……孔食の発生なし、A……ビットの発生を認む、B……貫通孔+数個のビットの発生あるもの、C……貫通孔+多数のビット発生である。

4.1 管の貫通孔発生位置

表12に調査熱交における貫通孔発生位置を示した。また図3に熱交断面の漏洩管の位置、図4に長手方向の貫通孔発生位置の分布を示す。

また、管のビット発生位置は、調査できたものについて

表12 NTK R-4海水熱交に生じた腐食型式と発生位置(熱交台数)

腐食型式	ノズル直下	ノズルから1m周辺	全面ビット	ビットなし	不明
A ^o	—	—	—	4	—
A	—	1	2	—	—
B	5	2	—	—	1
C	6	2	—	—	—
計	11	5	2	4	1

図3 横型海水熱交フローティング側断面における漏洩管位置

表11 事故管調査表の一例

熱交No.	ユーザ熱交名	調査月日	事故本数 総本数	シェル側 温度	シェル側 圧力	海水 流速	生物
〇〇	〇〇	1971〇〇 (Report No.)	56 122	140 (°C)	7 (kg/cm²)	1.0 (m/sec) 以下	不明

運転経過	貫通孔位置	チューブ内面孔食発生状況	管内堆積物 その他	腐食型式
1970.11.末 開始 1971.3. 洩れ	ノズル直下 上側		黒茶緑色のスケール固着 孔の近くに赤茶色土状塊あり 分光, X線分析	C

図4 貫通孔発生位置分布

てはすべて管の上部にかざられていた。

以上のことから明らかなように、ピットはプロセス流体入口部(ノズル)の直下に最も多く、少なくとも1m以内に発生し入熱量の大きい個所に集中している。またバッフル位置も極めて重要で、バッフル位置に孔食の発生しなかったのは1台だけであった。

管内の腐食状況は、写真1および2に示すようなB型C型のものが多く、さびこぶの下にピットが発生している。特にB型については、他の孔食事故例ではあまり見られないものである。

海水温度: 90℃
 " 圧力: 14kg/cm²
 " 流速: 1.69 m/sec (実測 0.6 m/sec)
 コンデンサー, FR値: 0.375, 5ヶ月後発生
 貫通孔: 内面約6.0×7.0mm
 外面約1.0mmφ

写真1 上記条件により発生したB型腐食の一例

写真2 $t \times p = 950$, 海水流速 0.8 m/sec の使用条件で発生したC型腐食の一例

4.2 管内の汚染状態

熱交内には海水中の浮遊物であるプラスチックフィルム、木材、海草、各種海洋生物は勿論のこと、ヘドロ状の物質が混入し、非常に悪影響を及ぼしていた。また、前述のように、熱交内で成長する貝類の影響も激しい。化学工場の場合であっても、調査のため水室を開くとわずか数ヶ月の間に、バケツに何杯も貝、海草等運び出すといったケースが多かった。その一例を写真3に示す。また、図5に熱交内堆積状態の一例を示す。B-B'面の堆積部はノズル下の高熱部と対応するものであり、流速の低下、熱伝達の不足等が事故をいっそう加速したことを示す。

また管内には生物が付着することがあり、写真4にこれを示す。なお管内に付着したヘドロ状の堆積物も、ひどいものでは内径 16.6 mmφ の管の内壁に片側 3 mm におよぶ層状の堆積物があり、有効断面が 64% まで減少していたものもあった。こうなると、漏洩事故もさることながら、熱交としての機能、特に熱効率にとって大きな問題となる。

貝 Znに付着したスケール

写真3 海水熱交の水室より採取した堆積物

図5 熱交管板における貝・海草類の堆積状態

写真4 管内の生物付着状況

×1.5

このような操作は、従来銅合金系の熱交で習慣的に行なわれてきたものの踏襲であり、現在使用されているすべての海水熱交で再検討されるべきことであろう。

4.3 対 策

以上の調査結果より

i) 熱交設計上の問題点としては、ノズル直下およびその周辺 1 m の範囲内に、なるべく高温流体が局部集中しないようにする。またバフフルプレートはこの位置にこないようにする。

ii) 従来の海水取入口にある海洋浮遊物対策は不十分なものが多く、より完全なものとする。

iii) 滅菌設備を付けてその効果を確認しなければならない。

以上のことなどが挙げられる。

5. モデル熱交による事故再現実験

4 の調査によって、NTKR-4 の伝熱管の孔食は、熱点腐食によるものであるといえよう。そこで、実験室的にこれを再現すべく検討を行なった。

5.1 実験方法

図 6 に実験装置を示す。

図 6 海水循環式モデル熱交によるホットスポット試験装置

図 7, 図 8 に熱点腐食を再現させるために用いた熱源である銅製スリーブと、ホットスポット用ヒーターの構造を示した。

また、実験条件は表 13 に示す。

図 7 銅製スリーブ加熱帯の略図

図 8 ホットスポット用ヒーターの略図

表13 モデル熱交による熱点腐食試験条件

1. 供 試 管 19φ×1.2t×200L, 150L mm
2. 加 熱 電熱ヒーター
3. 管内条件 海水温度 50°C
4. 諸 条 件 " 流速 1.2m/sec

	ホットスポット*			スリーブ*	
	h ₁	h ₂	h ₃	S ₁	S ₂
伝 熱 面 積 cm ²	1	1	1	52	52
発 熱 量 kcal	14.8	30.5	62.1	604	1260
伝 熱 量 kcal/m ² hr	148,000	305,000	621,000	116,000	243,000
ΔT°C (100%)	9.7	19.8	40.8	7.7	16.0
" (80%)	7.8	15.8	32.6	6.2	12.8

()内は効率 * : 図 6 参照

5. 壁面温度

管外表面を熱電対により測温し、次式により管内壁面温度を推定した。

$$\Delta T = \text{管外壁面温度} - \text{管内壁面温度} \\ = \text{伝熱量} \times \text{管の伝熱抵抗}^*$$

* : 0.000096 m²·hr·deg/kcal を採用

5.2 実験結果

熱電対により管外壁温度の経時変化を測定し、これに

図9 管内壁温度(推定値)の経時変化

より管内温度を推定して図9を作図した。

30日経過後、これらの供試管を割り内面を調査したところ、異常な温度上昇を与えた S_2 、 h_3 の管の上部にさびこぶの発生が見られ、これを酸洗するとさびこぶの下には、深さ0.5と0.35mmに達する腐食が見出された。孔食の生じた場所は、 h_3 においては加熱部の直下、 S_2 では、スリーブの海水流れ方向の末端に近い部分であった。これらの結果を表14に示す。また腐食形状は、4に示した分類でB型(ただし貫通に至らず)と判定された。この状況を写真5で示す。

以上の実験によって、今まで調査してきた伝熱管の事故が、ほぼ熱点腐食に帰因するものであることが明らかになったと思われる。

表14 モデル熱交によるNTK R-4管のホットスポットコロージョンの発生状況

	ホットスポット**			スリーブ**	
	h_1	h_2	h_3	S_1	S_2
初期設定温度(°C)	55	66	85	74	83
1ヶ月後の温度(°C)*	56	71	150	82	130
腐食状況	なし	なし	孔食	なし	孔食
生成物	なし	なし	黒色	なし	黒色
侵食深さ(mm)	0	0	0.5	0	0.35
スケール付着量(mg/cm ²)	少	少	—	少	1:10.9 F18.5
厚さ(mm)	—	—	—	—	0.20~ 0.22

*: 推定値

**: 図6参照

写真5-1 ホットスポット部の管内面

写真5-2 ホットスリーブ部の管内面

すなわち、伝熱管の一部に高温流体の集中部が起こり、管壁温度が上昇して特に管の上部に腐食が発生し腐食孔の上にさびこぶが固着し、その下部にすきま腐食が形成される。これが腐食速度を促進したと推定できよう。

6. 熱交寿命と腐食型式

3に示した熱交寿命領域と図2と図5で示した腐食形態との関連を見ると図10のようである。

すなわち領域ⅠはA°&A、ⅡはA&B、ⅢはB、ⅣはB&Cと区分される。ただし、この区分は極めて概念的なものであり、個々には例外もある。たとえば、適切な防食管理を行なったものは、シェル側の温度、圧力が高く $t \times p = 1650$ なるUチューブ型熱交で海水流速1.6 m/secの条件下において、無事故のまますでに2年余を経過しているものがある。

また、対策を行なったものでは、領域ⅢでもAのものもある。したがってこれらの区分は、今後より使用範囲拡大の方向へ修正できるものと考えられる。

7. 腐食対策後の事故発生率

3 で述べた熱交のうち、L(C) はその後使用されなかったものであるが、L(A)、L(B)、に関しては、その後も流速増大、生物減菌、作業の安定化等の対策を行って運転した。それらの熱交の対策後の事故発生率を表 15 に示す。

表 15 NTK R-4海水熱交の腐食対策後の状況

調査 区分 熱交 No.		対 策 前		対 策 後				FR 値
				第 1 回		第 2 回		
		経 過 月 数	事 故 本 数	経 過 月 数	事 故 本 数	経 過 月 数	事 故 本 数	
L (A)	1	32	10	29	0	—	—	0.0031
	2	32	2	29	0	—	—	0.0009
	3	10	7	20	2	14	5	0.0936
	20	14	3	12	1	12	1	0.0420
L (B)	1	18	3	19	0	—	—	0.0139
	2	24	51	19	0	—	—	0.1771
	6	19	3	26	0	—	—	0.0208
	7	19	8	26	0	—	—	0.0804
	12	20	2	12	0	—	—	0.0081
	13	3	29	15	0	—	—	0.5607
	14	4	19	16	0	—	—	0.2040
	15	3	20	9	0	8	0	0.4141
	16	13	1	2	0	—	—	0.1672
	17	4	1	2	0	—	—	0.0272

このように、対策後はほとんど事後が発生していない。L(B) のうちには、初期数ヶ月間に L(C) と同程度の事故発生率を示したものもあるが、その後にまったくといってよいほど事故発生を止めていることが注目に値する。同時に従来銅合金を使用していた所を、ステンレス鋼のような鉄合金に切り換える際の適切な防食技術の必

要性を示している。

このことは、プラントテストのむずかしさにも通じるもので、アルミ黄銅熱交の一部伝熱管を NTKR-4 にさしかえた時の実験では、ほとんど腐食の発生が見られていない。

これは i) 挿入個所が熱点腐食をうける所でなかった。ii) 生物減菌が十分に行われていた。iii) あるものは pH、溶存酸素濃度等まで完全に制御されていた。等のことが挙げられ、設計者も著者らもこれらの要因の重大さを初期には気付かず見落してしまった結果である。

8. ま と め

二相ステンレス鋼 NTKR-4 を海水熱交の伝熱管として使用した結果を調査し、できるだけ綿密に解析した。

その結果、特に事故から多くの貴重な情報が得られた。

1) 熱交事故は、熱点腐食による局部的腐食生成物の発生、成長、固着により誘発されたすきま腐食によるものである。

2) したがって、熱点腐食を生じさせぬための対策として

i) 生物発生を無くすること

ii) 海水中浮遊物の流入をふせぐこと

iii) 冷却海水の流速を速め、設計値として 1.5 m/sec 以上にする。

3) NTKR-4 熱交使用領域としては、熱交の型式により異なるが、圧力 p (kg/cm²) × 度温 t (°C) に関し、今回の調査によれば

i) コンデンサー: $p \times t$ を略 60 以下にする。

ii) クーラー: $p \times t$ を略 100 以下にする。

の結果が得られた。しかし、この領域は生物対策を中心とする防食技術により拡大されることを知った。

4) 伝熱管の貫通孔発生位置は極めて特定な個所に限られ、設計、防食上の対策を要する。

5) 稼働中の銅合金系熱交に NTKR-4 を挿入してプラントテストを行なう際は、挿入位置に関しては慎重な配慮が必要である。

以上のような点に留意すれば、事故対策後の事故発生が激減していることから、NTKR-4 が十分海水熱交の伝熱管として使用できるという結論を得た。

終わりに当って、この報告の基礎をなす情報を提供下さった IHI 関係者各位ならびに、各ユーザの皆様方のご厚意をはじめ、情報の収集、作成に当たられた日金工研究部の諸君に謝意を表すると同時に、日金工会長故宮代彰氏に心から感謝する。まさにこの稿を脱する時、氏の訃報に接した。氏は日本工業の発展のためのみを念じてこられた方で、NTKR-4 の工業化に対して常に力強い激励と援助をされた。この報告ができたのも誠に氏の力

図 10 管内面腐食形態分布図

あつてのことであつた。本報を霊前に捧げここに冥福を祈る。

文 献

- 1) 水野 誠: 鉄と鋼, **46**, 1024 (1960).
- 2) 塚本富士夫, 矢ヶ崎 汎: 鉄と鋼, **47**, 542 (1961).
- 3) 原田憲二, 杉本正勝, 鎌田善博: 日本金属学会誌, **29**, 367 および 372 (1965).
- 4) 水野 誠, 鈴木隆志: 日本金属学会々報, **8**, 716 (1969).
- 5) 金子 智, 鎌田善博, 原田憲二, 水野 誠: 化学工学, **33**, 1041 (1969).
- 6) 水野 誠, 原田憲二, 永吉寛二: 化学工学, **8**, 834 (1971).
- 7) 石坂誠一編: 伝熱管材料調査報告書, 電気化学協会 (1969).
- 8) Trans. ASME, J. Eng. for Power, 87 Series A, Oct., p. 401 (1965).
- 9) 水野 誠: 火力発電, **21**, 337 (1970).