曳行白金クラッド陽極を用いた就行船の電気防食*

Cathodic Protection of an Active Ship Using a Trailing Platinum-Clad Anode

H. S. Preiser and F. E. Cook**

Corrosion, Vol. 13, No. 2, 125t~131t (1957) Feb.

緒 言

電気防食法の電流分布は若干の要素に左右されるが、その中で重要なのは有効電位差、陽極および陰極形状、距離、電解質の伝導度等である。就行船の船体下部に電気防食方式を計画するときに防食技術者は船体取付用陽極を用いて均一な電流密度を得ることに苦勞する。大洋の海水が一定の高伝導度を持っていることは良好な電流分布を得るのに好都合である。防食技術者は陽極の形状と有効電位差については広範囲に調節できるが陽極と陰極の間隔に関しては大きな制限を受ける。

使用概略

電流分布の問題を改善するためにいろいろの陽極形状と配置が試みられた。その一つは 30 個の亜鉛陽極 ($12'' \times 6'' \times 1\frac{1}{4}''$) を工廠の曳船に広い間隔で取付けたものでこの配置は船体表面に平均した電位を与えることを示した¹⁾。もう一つは Mg 陽極 (亜鉛より有効電位差大) をビルジキールに集めて船体と絶縁して取付け加減抵抗を通して結線しこれを調節して電流出力が船体に対して均等な分極を合理的に起させるようにした^{2), 3)}。他の研究者達は高電位強電流陽極を使用することによって電流分布を拡げることに成功した。それは陽極のおおの側に数 ft にわたり拡がっている電気絶縁物に取付けられた^{4), 5)}。比較的少数の陽極が船体に沿って広い間隔で取付けられた。この絶縁物は船体からある限定された距離だけ陽極を移動するのと同じ効果を持つ。Shepard と Graeser⁶⁾ は陽極と陰極の距離が増加するに従って接地抵抗が対数的に増大することを明らかにした。曲線は陽極と陰極の距離が陽極直径の 500 倍以上になると漸近線的に一定抵抗値に近づくことを示す。一般的に絶縁物はわずかに陰極と陽極を隔てるだけであり直径の 500 倍に比べればはるかに少ない。ゆえに絶縁物は陽極のすぐ傍にある陰極での高い電流密度を減じ電流消費を減ずるけれども、形の不規則な陰極に対する最適電流分布は陰極から陽極を遠く離して置くことによってのみ得られる。他の重要な事柄は陽極形状について直径と長さの割合が遠方に設置された陽極の接地抵抗減少の大きな要素となることである。長さ 48in, 直径 $\frac{1}{4}$ in (比 196

: 1) の陽極は Dwight の式によって計算したときに約 0.2Ω の遠隔地に対する接地抵抗を持つ。

技術的困難

以上述べたうち今日用いられているすべての方法はいずれもなんらかの電気防食方式として技術的な困難を持っている。大量の流電陽極は嵩が張るので経費もかさむ上に船に無駄な重量と摩擦抵抗を増す。Mg 陽極の出力を抵抗で調節することは陽極腐食率を減じ従って貴重な陽極材料を無駄に消耗する。高電位陽極は一般に完全な塗膜を破壊しそのために船体防食電流所要量を増す。高電位陽極の周囲に電気絶縁物を使うことは、たとえ適当に行われたとしても費用と時間がかかる。一般に船体取付電気防食方式は船が乾船渠にある間に船に適した多数の陽極を取付ける必要がある。この方式では就役中の検査や保守が簡単にできないで面倒な上に費用もかかるから恐らく不可能に近い。

困難の克服

船体電気防食法の装置と保守の困難性は実施法の変化と同時に曳行陽極の使用により克服することができる。船体から陽極を適当に離し、軽い流線型高性能の 1 本の陽極にまとめると、陽極を船体から十分離れた距離に曳行し、遠隔点に対する接地抵抗を得ることができる。これは本質的に船体のすべての部分に均一な電流通路を作る。Edison⁷⁾ はそのような陽極の設計を試みたが適当な物質がなかったため成功しなかった。白金クラディングの知識と特殊ケーブル封緘技術がある現在では簡単な高性能の曳行不溶性陽極は可能でありかつ実際である。

曳行陽極の説明

曳行陽極は長さ 48 in で銀貨合金棒に 90-10 白金-パラジウム合金クラッドを施したものである。他の物質も銀の代りに用いられるかもしれない。陽極の主要部分は $\frac{1}{4}$ in の直径を有するがその一端で直径が $\frac{1}{2}$ in まで次第にひろがる。

このひろがった端に導線を取付けた上絶縁を完全にして流線型に仕上げた。陽極棒の他の端は銀鍍を適当につけた白金合金のゆびぬき状の冠を押し込み、その接合を十分に保護するためにポリエステル樹脂スリーブをゆびぬき状の冠の上にかぶせた。厚さ 5mil のクラッド陽極は 3% 食塩水中で陽極的に高い電流を 24hr 通じ 48hr

* 訳者 花田政明・玉利昭一 日本防蝕工業株式会社

** Bureau of Ships, U.S. Navy Department

濃硝酸に浸し試験され絶対に孔があかないことが確かめられた。第1図は陽極装置とケーブル封緘剤の解説図で

第1図 曳行白金クラッド陽極

第2図 白金クラッド陽極の全貌
成型ゴムケーブル結合に注意

第2図は陽極全体の写真である。ケーブルは PVC で被覆した長さ約 200ft の柔軟な単線であり銀棒に銀で鍍付けして接着する。連続的な激しい使用に対しては鉄心絶縁銅ケーブルがより型銅線に代用されるであろう。結合点でケーブルと白金クラッド棒の上を流線型の PVC ゴム封緘剤を用いて成型する。封緘剤はそれからポリエチレンテープか酸素、塩化物に対する抵抗物質でつまれる。ここに記載した実験のために封緘剤は順次 PVC 成型ゴム膜でおおった成型エポキシ樹脂で作られている。200ft の電線の抵抗を含む (0.2Ω) 陽極棒の遠方に対する計算総接地抵抗は 0.4Ω 程度でありそれは使用中の陽極電流出力一有効電圧図によって確かめられた。急に動いたりねじれたり浮動したりせず滑かに引張れる曳行陽極を得るために設計にはかなりの考慮が払われた。陽極棒の ft 当りの重さをケーブルの ft 当りの重さに近づけその断面で急激な変化をしないように設計することによって曳行ケーブルの延長線に陽極が取付け得るならば、それは一定船速に対して一定の深さで曳行され船の速度が変れば新しいきまった深さをとるであろう。ケーブル

の結合点は流線形にできているから水はこの円筒に添って滑らかに流れ、流れの方向がふらついてばたばたするようなことがない。

第3図 曳行白金クラッド陽極に対する電流出力一有効電圧

初期の実験

1955年2月就行工廠曳船 Y. T. B. 366 に対し曳行白金陽極を用いて最初の試験が行われた⁹⁾。この実験にとって不幸にも曳船の船尾に正常に取り付けられた亜鉛陽極が 1955 年 1 月に更新され通電前船体の電位は平均約 -0.78V であった。この船に対し曳行陽極から通電した結果は船渠で船体を -0.85V に分極させるためにはわずか 2.1A でよく 12ノットで航行中は 4.2A 必要とすることを示した。 -0.85V の電位は完全防食の水準として任意に選んだものである。実際の場合には -0.82V までの分極が適当である。Y. T. B. 366 は水線下の面積約 $1,800\text{ft}^2$ であり約 90ft^2 の Mn 青銅プロペラを持つ。曳行陽極から通電するに先だって最初の船体電位データが相当な分極を示したためにこの試験は適当と思われるなかった。再び未分極船を用いて試験を行う準備がなされた。

最近の実験

1955年10月初期、他の船が実験を繰返すために用いられた¹⁰⁾。この実験船は全長 64ft、船幅 18ft で全荷重吃水 6ft 2in である。その水線下の面積は $1,065\text{ft}^2$ と算定され Mn 青銅プロペラの面積は 21.8ft^2 である。船は 1954年に海軍コールドプラスチック系塗料で最後に塗装されドックでの観察では底部に中位の汚損が見られた。

装 備

船には 4 本の銀-塩化銀基準電極を用意した。2 本の固定円盤型基準電極はパイプ支持物に吊し 1 本は右舷側前方にもう 1 本は左舷側船尾に固定した。なお 2 本の曳行基準電極を船尾に 50ft ケーブル導線をつけて装備した。第4図は二つの型の使用基準電極の外観を示す。曳行陽極は 200ft のケーブル導線で船尾に取付けた。第5図は基準電極と曳行陽極との装置略図である。基準電極の導線は選択スイッチにつながれそれは順次に電位差計に接続された。曳行白金クラッド陽極は大容量の可変抵

第4図 円盤(左)と曳行(右) Ag-AgCl 基準電極

第5図 曳行白金クラッド陽極の配置図

抗器を通じて船舶用直流発電機に接続した。

ドック試験

第1回試験：1955年10月6日予備試験を行った。試験の目的は遠方に設置した白金クラッド陽極から流れる電流に対して船の分極反応と復極反応の時間を決定することであった。船体の最初の電位は -0.62 V であった。 4.6 V の有効電圧で 10 A の電流が船から 200 ft 離れた曳行陽極から供給された。 30 min で船体の閉路電位は -0.85 V になった。そして電流を切ったときは速かに低下した。第6図はこれらの電位-時間図である。 10 A の

電流を流すと船体は急速に分極反応を起しそれは供給電流があたりまえに必要とする以上であることを示した。ここに示すように一時的な分極が得られ陽極からの電流が切られたときは船体の速かな復極が起った。

第6図 曳行白金陽極を用いた予備実験、船体電位-時間図

第2回試験：1955年10月10日他のドック試験を行った。この試験の目的は静止状態において船体を -0.82 V の開路電位まで分極させるために必要な電流を決定することであった。船はすべての陸上動力と外部電話回路と切り離すことにより電気的に絶縁された。ドックで船の停泊にマニラロープとキャメル（ロープ防げん材）が使用された。最初の船体電位の検査は第5図に示したように船体の周りのいろいろな場所で行われた。第1表は種々の場所で測定された船体の電位を示し平均約 -0.67 V である。船体電位で観察された一様性は船体あるいは船体に取付けてある残留亜鉛によってプロペラが部分的に分極したことを示す。曳行陽極は再び船体から約 200 ft 離し、電線をドックの杭に固定することによって水中に垂直に浮した。水の試料を取り分析した。結果は $\text{pH } 7.5$ 、比重 1.025 (77°F) 塩分 3.7% を示した。比抵抗は 52°F で $25.5\ \Omega\text{-cm}$ と計算された。今回は約 10 hr にわたり注意深く電流を調節し 6 A で船体の開路電位が -0.85 V に保たれることを見出した。航行中に記録された時間-電位図（船首と船尾電極の平均）は第7図に示した。このドック試験では船舶用発電機始動方式による蓄電力を用いた。静止船を -0.82 V の開路分極電位に

第1表 ドック試験 船体電位

陽極深さ	種々の位置での電位の読み											
	船首	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	船尾	P ₅	P ₄	P ₃	P ₂	P ₁
水面	0.66	0.68	0.69	0.68	0.68	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66
6ft	0.66	0.66	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
12ft	0.66	0.67	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.67	0.68	0.67	0.67	0.67

注) 検査時間午後9時15分 1955年10月10日 海水比抵抗 $25.5\ \Omega\text{-cm}$ (52°F) 基準電極 Ag-AgCl ⊖ 記号省略

第2表 海上試験船体電位

陽極深さ	種々の位置での電位の読み											
	船首	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	船尾	P ₅	P ₄	P ₃	P ₂	P ₁
水面	0.72	0.72	0.72	0.74	0.73	0.71	0.69	0.72	0.73	0.72	0.73	0.70
6ft	0.74	0.72	0.74	0.73	0.73	0.71	0.70	0.72	0.73	0.73	0.72	0.71
12ft	0.74	0.73	0.74	0.73	0.73	0.71	0.71	0.72	0.73	0.73	0.72	0.71

注) 検査時間午前10時35分 1955年10月11日 海水比抵抗 23.3Ω-cm (53.5°F) 基準電極 Ag-AgCl ⊖ 記号省略

第7図 曳行白金クラッド陽極を用いた最後のドック試験における船体電位-時間図

維持するための所要電流は 5A 程度である。電流が切れたときに起るゆるやかな復極は分極の時間が増大するときに船体に持続性の分極膜ができることを示す。船体電位は船体に密接に取付けられた基準電極で測定された。遠方の基準電極の読みは 50mV だけ高い電位を示す。曳行陽極から電流が流れるとき約 75ft は離れた 2 本の基準電極間での値は海水中的の回路において 0.05V の IR 降下を示しこれは近傍と遠方の基準電極間の差異として説明される。同じ差異は航行試験中にも記録された。

海上試験

ドック試験の電流は翌日午前 7 時に切り海上試験の準備をした。陽極は船舶用発電機配電盤に再び直接接続した。午前10時30分船は約 5mile 沖に停泊した(すなわち風にまかせ漂流だけはしないように静止状態を保った)。そこでは水深約 200ft であった。船は漸次復極したが 3.5hr の期間陽極から電流を流さなかったが船体の完全な復極は認められなかった。新しい系列の試験を行うに先だち他の船体電位検査を停泊状態で行った。それは第2表に掲げた。海水の試料を採取し分析した。比抵抗は 53.3°F で 23.3Ω-cm である。

試験の目的: 試験は船体から遠距離に取付けられた曳行陽極の有効電圧と電流出力間の関係を測定するために行われた。曳行陽極は船の発電機に接続しキールの下、船尾から 150ft に懸垂した。電流は 1.0 から抵抗器の最大容量の 47A まで変化し第3図はその結果である。曲線の大部分は直線でありその勾配は陽極抵抗に等しい。

2V 程度の陽極逆電圧に打勝つまで電流は流れないことに注意せねばならぬ。更に曲線の上端が平になるのは陽極での激しい泡立ち(酸素と塩素)によってガス膜の抵抗を生じたためであろう。曳行白金クラッド陽極で得られる実際の最大電流の決定は行わなかった。

結論: 電流出力は本質的に直線的でありこの試験の 18V の範囲で V 当り平均約 2.5A であった。30min を費したこの試験の間、船体の開路電位は約 -0.70~-0.89V に上昇した。電流をそれから 5A に落とし 1hr 保った。船体の電位は -0.80V で一定に維持されそれは第2回のドック試験の結論を更に強固にした。次に船体電位に影響があるかどうかを調べるために陽極の深さを 150ft の深さから水面まで 5min 間隔で 50ft おきに変えた。短い期間陽極と陰極の距離が変化したが生じた電流出力、有効電圧、船体電位には変化が認められなかった。明らかに船体と陽極の距離に対する船体電位分布の変化を調べるために長期間の試験が必要である。

航行中試験

試験目的: 試験は -0.82V の防食電位を維持するための所要電流に対する船速の影響を決定するために行われた。航行船について一連の電位、電流測定を行った。そのデータは第8図に示す。陽極は 200ft 後方に、2 本の基準電極は 50ft 後方に曳行した。時間0minで出発し約5Aの電流で3ノットのときに平均 -0.79V の船体電位を維持した。4min 後船速を6ノットに増した。電流は変化しなかった。次の 19min 間開路電位は -0.79 から -0.77V に低下した。速度はそのとき9ノットに増したが4minの間電力損失によって -0.735V に低下した。電力が回復して電流は 9A に増し 21min 保った。船体電位は船尾で -0.75V 船首で -0.80V、平均 -0.775V に上昇した。電流を再び 15A に増加した。10min 後船首電位は -0.85V に上昇し船尾で -0.80V になった。-0.825V の平均電位が第8図に示してある。それから電流を切り速度は9ノットに維持した。約 50min 間に船体電位は平均 -0.685V に落ちた。船体を更に復極させるために導線を逆につないだ。船体を陽極とし曳行白金棒を陰極とした。2min 後逆電流を 15A 流した。導線を再び正常状態につないだ。開路電位は平均 -0.665V

(1) 5.1A-3ノット	(6) 15.3A-9ノット	(10) 15.2A-9ノット
(2) 5.1A-6ノット	(7) 0.0A-9ノット	(11) 19.5A-9ノット
(3) 0.0A-6ノット	(8) 15.5A-9ノット	(12) 19.5A-6ノット
(4) 5.1A-9ノット	(9) 9.9A-6ノット	(13) 9.9A-6ノット
(5) 9.3A-9ノット	(9) 0.0A-9ノット	(14) 9.9A-3ノット
		(15) 0.0A-8ノット

第8図 曳行白金陽極を用いた航行試験 種々の状態に対する船体電位-時間図

に落ちた。それ以上の復極は次の6min間では認められず船速は9ノットに維持し電流は流さなかった。電流は再び15Aを適用した。14min後船体電位は平均 -0.745V に上昇した。それから電流を 19.5A にあげ6min経過後船体電位は平均 -0.785V に達した。船を6ノットの速度に低下させると電流 19.5A で電位は -0.845V に上昇した。電流を約 10A に減らすと6min間で平均電位は -0.81V に落着いた。速度を3ノットに減らし電流は 10A に保った。この結果船体電位は6min以内に -0.83V に

上昇した。種々の速度で船体開路電位を -0.82V に維持するための所要電流値を第9図に示した。

結論：既に分極している船では速度9ノットで分極を維持する

第9図 曳行白金クラッド陽極を用いたとき船速に対する船体分極所要電流概略値

るために必要な電流は静止船に対して必要な電流の2倍強である。9ノットの速度で航行中の船を分極させるに必要な電流は(静止時は分極せず)静止状態下での分極に必要な電流の3倍を要する。曳行陽極と曳行電極は9ノットまでの速度では急な変動をしたり振動することなく満足に動作した。47Aまでの電流出力で使用するときには目に見えるような陽極の消耗は起らなかった。

総括と結論

曳行白金陽極は港や海上で比較的簡単に小さな船の陰極防食に能力を示した。船体の均一な分極は静止船にお

いて 5A の電流出力でまた9ノットで航行中のときには 12A で達成される。白金陽極は使用中きれいに保たれ電流出力と有効電圧間の直線的関係によって明らかのようにその表面に抵抗皮膜は形成されない。就役状態下の白金陽極曳行の容易さと高い操作電流量のためにこの型式を容易にもっと大きな船に応用できる。

論 議

曳行白金クラッド陽極は軍艦と商船への適用を考えるべきである。それは碇泊所における高速軍艦の作業や機動には適しないが特務艦や商船には役立つ。曳行白金クラッド陽極の電流出力の上限はその大きさと利用できる有効電圧によってのみ規制される。これは就行船に対して知られている最小の費用でもっとも応用のきく電気防食法でありかつその装置と保守が比較的簡単であるように思う。 100A の電流量の曳行陽極電気防食の費用は(大洋航行貨物船を防食する能力がある)1000ドルを超えない。同容量の船体取付陽極を用いた場合は少なくとも10倍以上の費用がかかる。白金陽極の寿命は機械的破壊を除いて船の就役寿命より長いと予想される。

将来の計画

将来の海上試験ではもっと大きな速い船に対して、大きな船体面積の分極における陽極効果と高速での陽極曳行特性を確かめようと計画している。この試験がうまくゆけば船体に適当に取りつけられたパイプから陽極を曳行し自動的に引き上げ得るように計画を進める予定である。

文 献

- 1) B.H. Tytell et al : *J. Soc. Naval Engrs*, 701-704 (1956) Nov.
- 2) L.J. Waldron et al : The Performance of a Cathodic Protection System on the USS SUMNER (DD 692). Dec. 1953-Jan.1955, NRL Report 4635, 30 Sept. 1955
- 3) L.J. Waldron & M.H. Peterson : The Performance of a Cathodic Protection Systems on the USS INGRAHAM., (DD 694). Dec. 1953-Jan.1955, NRL Report 4636, 30 Sept. 1955.
- 4) E.E. Nelson : The Cathodic Protection System on the USS AMBERJACK (SS 522). Mar. 1953 to Feb. 1955, NRL Report 4525, 6 May 1955.
- 5) K.N. Bernard et al : *Corrosion*, 9, 246-250 (1953) Aug.
- 6) E.R. Shepard et al : *Corrosion*, 6, 362 (1950) Nov.
- 7) T.A. Edison : Process & Arrangement for Protecting Ship Bottoms by Means of Electricity. Ger. Pat 57293, 14 Sept. 1890; Eng. Pat. No.13971, 5, Sept. 1890.
- 8) L. Pote : Tables for Computing the Equilibrium Configuration of a Flexible Cable in a Uniform Stream. Taylor Model Basin Report 687, Mar. 1951.
- 9) R.C. Whitman : "Trailing Platinum-clad Anode, Dockside and Underway Tests," Portsmouth Naval Shipyard, Technical Report No.T-548, Feb. 1955
- 10) D.E. Lincoln : *ibid*, Technical Report No.T-548. Supplement 1, Nov. 1955.
- 11) I.D. Gessow : *Corrosion*, 12, 101t (1956) Mar.