

# 海底油管的陰極防護工作

黃文照

## 一、序 言

海底管路的安置，主要是供給鄰接內陸邊緣的島嶼水  
源，以及停泊在海處運油船原油的裝卸用途，或者用於通  
過海峽，供給對岸之工廠氣體或油料原料。在日本，許多  
主要的大規模的原油輸送的油管是安置在海底。

在 1952 至 1953 年，日本首先將陰極防護系統應用  
於海底管路，自從陰極防護工作開始被使用後的情況，管  
路間的裝置較易保持良好狀態，因為當時管子的直徑僅約  
 $4^{\text{B}}$  至  $10^{\text{B}}$ ，管子的最大延伸只可以達到  $200\sim 300\text{m}$ ，大規  
模的工程長度不過是  $3000\text{m}$ 。雖然在現在而言，只是個  
小規模工程，但却帶給外國工程師知道如何去注意管路裝  
置的方法和外部塗裝的技術基礎。當要籌劃陰極防護系統  
仍有很多障礙，如需要多小的假設被保護電流，必須從外  
國的文獻得知，像陽極的佈置法和電位的分配，均要經過  
各種不同情形的模型試驗。後來由於石油工業和大型油船  
的發展海底油管裝置方法改進，於今，大規模安置的油管  
有  $48^{\text{B}}$  ( $1200\phi\text{mm}$ )，且長度達  $10\text{km}.$ 。

同時以下列的方法應用於大規模海底油管的裝置，已  
經普遍被採用，如浮懸式推底法和平底船層法，雖然安置  
管路的承造商到目前沒有幾家。

現在由於陸地的地面上都充滿了管路，期望將來許多  
大規模海底管路的安置能與大洋的利用發展齊頭並進（應  
多利用海底的通路）。較大，較具規模的管路，趨於更重要的  
地位，對於防蝕所以，我們在工業上預防腐蝕方法之  
研究，必須多加運用與探討。

如果本文有助於裝置海底管路之工作，作者將感到無  
限榮幸。

## 二、籌劃和裝置陰極防護系統的概要

假設應用陰極防護系統於海底管路時，首先必須選擇  
方法，並考慮各種不同的個別情況，以決定採用流  
電陽極系統或外加電流系統，當決定採用何種方式後，保  
護電流需計算出來，然後再計劃防蝕系統的裝置。

### A. 防蝕方法的選擇

現在一般人在經濟觀點上主張用外加電流法較能活用  
大規模的構造物，而流電陽極較適用於小規模的構造物。  
其實決定防蝕方法，不能僅以經濟觀點，因為必須顧慮

因素所形成的影響力，另外介紹一個鋁基陽極，可做大規  
模構物的經濟的流電陽極系統。

表一，表示選擇方法，首先慎重的考慮因素和所要的  
系統關係。例如：使這管路長又大，且有良好的外層，而  
其他鄰近的管路可能會有不良的影響，除非在海底裝有電  
極，承建商不得不應用流電陽極系統，則較外加電流系統  
所維持的費用更經濟些，雖然，在開始裝置的費用是高了  
一些，這是必然的。

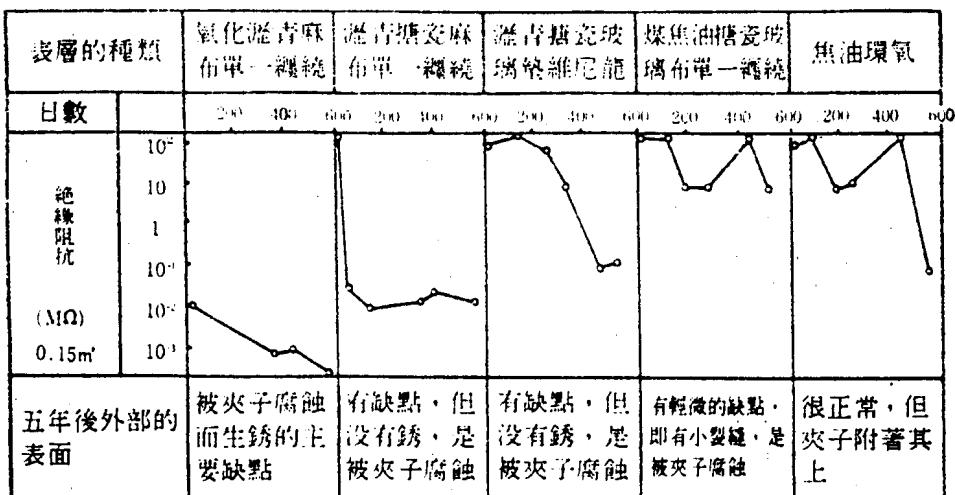
自從目前管路的尺寸逐漸變大以後，許多其他的管路  
也盡可能被限制有限的海中發展，如果該區域被填滿外加  
電流系統的應用更加困難，且有對流電流陽極大量採用的  
趨勢，這與焦油環氧漆的外層相同。

表 1 防蝕系統因素的選擇

	流電流陽極系統	外加電流系統
從經濟的立場而言		
管路的尺寸	小	大
裝置工程的預算	多	小
從技術立場而言		
既長且大的管路	具有不好的外層	具有良好的外層
其他鄰近的管路	存在	沒有存在
港灣主要的許可	不可達成	可達成

### B. 保護電流密度

保護電流密波變更的需要量，是依管路安置周圍的腐  
蝕性而定，係對管路表面和覆蓋層和管子壁的厚度而言。  
最具影響力的因素是裝置後表層的狀態，在裝置過程中加  
任何損害於表層時，不論損害是如何程度，都會減少相當  
量的絕緣效果，所以在籌劃防蝕系統前，要先計算出管路  
裝置的方法所需要的保護電流量。這種工程相當的困難，  
這要靠承建商的技巧與經驗，以及假設外層裝置後的情況  
而定。無論如何，要使假設正確是很難的，因為需要很多  
的經驗，而且在經過一段時間之後，必須考慮到表層絕緣  
電阻減少的可能性。圖一，是由日本電氣大學的電氣防蝕  
研究委員會，經過長期在表層試驗所完成的結果。由該圖  
得知，塗上煤焦油基或焦油環氧基的表層比塗上瀝青基的  
表層所得的效果為佳。



圖一：各種表層物質經過一段時間絕緣電阻變化（在海泥中）

在流電陽極系統的陽極被分散的架在延伸的管路上面，作保護的電流密度是極有價值。表 2 在過去的經驗中經常被採用，然而外加電流系統中的保護電流密度是要經過計算的，因為外加能力對一個地方而言是有限的，它必須考慮到管路的情況，再根據的 Pritula 公式求得之。

表 2 流電流陽極系統中海底管路的保護電流密度

表層種類	在海水中	在海泥中
暴露的（未經油漆）	100mA/m <sup>2</sup>	20 mA/m <sup>2</sup>
瀝青麻布	5-8mA/m <sup>2</sup>	3-5mA/m <sup>2</sup>
煤焦油搪瓷玻璃布	3-5mA/m <sup>2</sup>	1-3mA/m <sup>2</sup>

Pritula's 公式

$$E_a = E_m \cdot \cosh \sqrt{r \cdot g} \times l \dots \dots \dots (1)$$

$$I_a = E_a \cdot \tanh [\sqrt{r \cdot g} \times l] / \sqrt{r/g} \dots \dots \dots (2)$$

Ea = 在排流點上電位的改變(V)

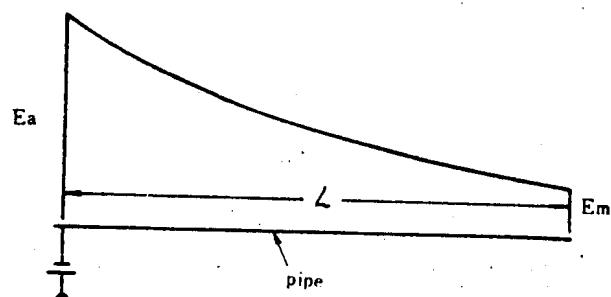
Em = 在管末端電位的改變(V)

r = 管子的電阻(Ω/km)

g = 管子外部表面電導係數(Ω/km)

l = 管子的長度(km)

Ia = 需要的保護電流(A)



上列公式，證明需要的保護電流是要受管子外部表面的電導係數 "g" 很大的支配。"g" 的重要性就如表 3 所示，它是要依表層的損害程度而定，但是很難從始至終在裝置的工程中得到損害度的正確數值，所以，必須在可能範圍內，考慮到安全的因素。

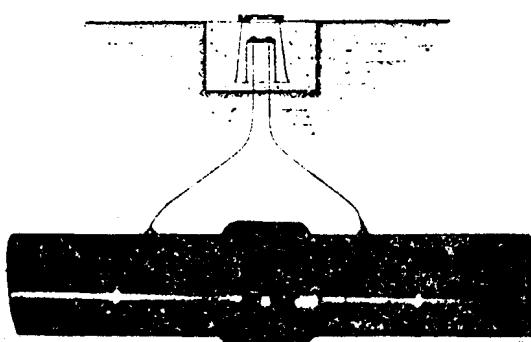
表 3 表層、比電阻和電導係數的關係

外 表	表面損害度	比電阻 ( $\Omega \cdot m$ )	"g" — 電對係數 ( $\mu\Omega/cm^2$ )
最 好 的	無		0 ~ 100
好 的	非 常 輕 微		100 ~ 400
中 等 的	輕 微		400 ~ 2,000
壞 的	相 當 大 的 面 積		2,000 ~ 20,000
較 壞 的	值 得 注 意 的		20,000 ~ 200,000
		$\leq 300$	> 200,000
		300 ~ 1,000	100,000 ~ 200,000
最 壞 的	暴 露 的 (表層的痕跡)	1,000 ~ 1,500	40,000 ~ 100,000
		5,000 ~ 10,000	20,000 ~ 40,000
		10,000 ~ 50,000	4,000 ~ 20,000
		50,000 ~ 100,000	2,000 ~ 4,000
		100,000 以上	1,000 ~ 2,000

為了要保護管路的某個範圍，應先計算出需要的保護電流，若有其他不需要受到保護部分，必須用絕緣接頭予以絕緣，通常絕緣接頭均附蓋在陸地邊的接板。或附着在港灣碼頭或停泊的浮標上。照片 1 表示一個常用凸出狀的絕緣接頭照片 2 表示一個 PROCHIND 接頭，該接頭可用高壓的地下管路、豎板與浮標間應用橡膠管絕緣。

#### C. 流電流陽極系統

棒狀或板狀的鋁合金陽極，或鋅合金陽極在海水中才可使用，通常都用焊接或螺絲或捲條等方法固定於管子。照片 3 表示板狀鋁合金陽極焊接於管子上的例子，照片 4 表示棒板鋅陽極緊栓於管子上。



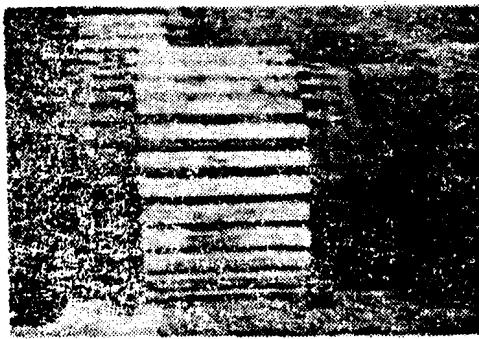
照片 2 PROCHIND 頭



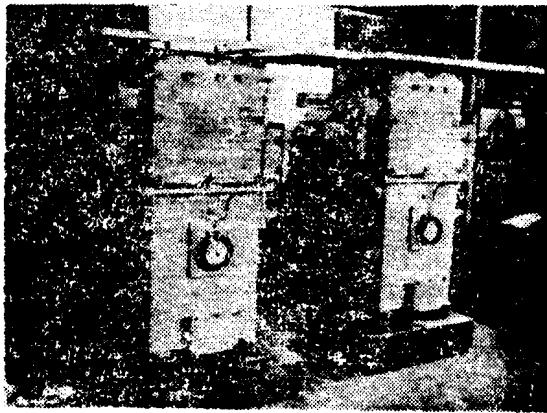
照片 1 凸出狀的絕緣接頭



照片 3 板狀鋁合金陽極焊接於管上



照片 4 棒板鋁陽極緊栓於管上



照片 5 戶外防爆式整流器

栓上的每塊陽極或每單位陽極所流出的電流可根據上述的公式(3)和(4)求得這些陽極應以均一的距離裝置於管路上，在很多情況下，陽極都被裝在焊點上，而導致管路表層可能遭受到一些小損害。因此，在計劃裝置陽極環的位置時，一定要先知道管長的複雜性，大部分在裝置陽極環時，外層都引用水泥。所以設計的陽極高度應和水泥在同一的厚度，且裝置的距離在 300 至 600 公尺之間。

### 流出電流的計算公式

$$\log I_{36} = 0.727 \log A + \log \Delta E - 1.78 \dots \dots \dots (3)$$

$I_{36}$ =在  $36\Omega \text{-cm}$  比電阻所流出的電流(A)

$\Delta E$  = 有效電位差 (0.2V 的鋅和鋁)

$I_p$  = 在  $9\Omega \text{-cm}$  比電阻所流出的電流(A)

$\rho$ =比電阻( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$A = \text{陽極表面積} (\text{cm}^2)$

陽極的使用壽命約為 20 年至 30 年，可由公式(5)求得，鋁陽極的價值是 2,300 安培一小時，鋅陽極是 740 安培一小時。

$$T = \frac{Ah \times W}{I \times 8.760} \times 0.85 \dots\dots\dots (5)$$

T = 陽極使用壽命 (年)

Ah=陽極有效電量(安培一小時/公斤)

$W =$  陽極重 (公斤)

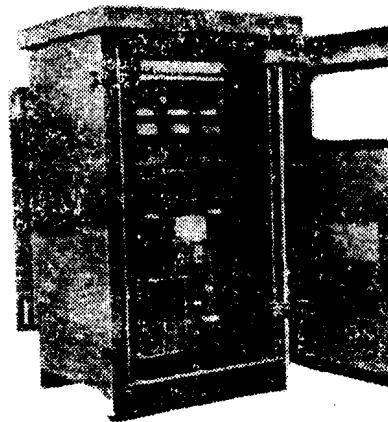
I = 陽極輸出電流 (安培)

#### D. 外加電流系統

外加電流系統是依據日本電氣設備工業標準所制定的第 248 條款而加以籌劃、裝置。構成外加電流系統的主要成分有直流電源單位，電極和金屬線。

### (1) 直流電源單位

接地電阻的計算是根據公式(6)求得，如果有兩根以上的電極，平行的裝置在一起，則因為會相互干擾，而增加電阻，所以必須先將接地電阻預留一些範圍。



照片6 空冷式矽整流器

$$R = \frac{\ell}{2\pi L} (2.3 \log \frac{8L}{D} - 1) \dots \dots \dots (6)$$

$R$  = 接地电阻( $\Omega$ )

$$\rho = \text{比電阻} (\Omega \cdot \text{cm})$$

L=電極長(cm)

D=電極直徑(cm)

照片 7 表示磁鐵電極 ( $58\phi \times 810\text{mm 長}$ )，照片 8 表示含高矽鑄鐵電極 ( $240\phi \times 1000\text{mm 長}$ )，磁鐵電極是在本身圍繞石墨粗粉組成的回填之和炭渣達  $200\phi \times 1,000\text{mm 長後}$ ，再垂直地埋入地下水位之下，而高矽鑄鐵電極是水平地安置在海底，並須考慮海底管路電流的分配時電極必須離開管路 100 公尺。

電極的消耗比是  $0.1\text{kg/A.yr.}$ ，所以希望電極使用壽命的加長，除非每塊電極的輸出電流可以加大。



照片 7 磁鐵電極



照片 8 高矽鑄鐵電極

當硒或矽整流器的使用，如直流電源單位時，使用空冷式或防爆式裝置的選擇是要依據環境而定，照片 5 表示戶外防火爆式的矽整流器，照片 6 表示空冷式的矽整流器。根據 Pritula's 公式，輸出電流大約比估計值大百分之十，且電位的決定需考慮到，由於電極的接地電阻。金屬線的電阻和可估計的水分解電位，所產生的電位降，通常總量不會超過 40 伏特。

### (2)電極

防蝕的物質有磁鐵礦和含高矽的鑄鐵，都可供做電極。通常大尺寸的高矽鑄鐵電極，是用於海底裝置；而小尺寸的磁鐵電極則用於陸地的地面下的裝置。電極與標準尺寸只有兩三種，所以如果電流大或土壤比電阻高的地方，為使其能得到適當的輸出電流和接地電阻，必須先考慮增加陽極的數量。

### (3)金屬線

金屬線是根據日本電氣裝置工業標準的條款、設計和裝置，而用在普通電氣工程上，就如同金屬線從直流電源裝備連接到管子或電極上，如果是這樣，則在直流電源裝備和電極間金屬線的絕緣處理，必須特別的注意，尤其是在金屬線的支點和電極鉛線的連接點部份。

## 三、流電流陽極系統應用的例子

### A. 板狀陽極

這是個管路外徑 785.4mm，長 17.5km，表層塗上  $500\mu$  厚，焦油一環氧的情形，用平底船層法裝置的，以管路外層僅塗以油漆，而無水泥表層而言。使用板狀陽極可便於使陽極密接附着於管子，如照片 9 所示。



照片 9 船上塗以油漆之管子使用板狀陽極  
ALAP

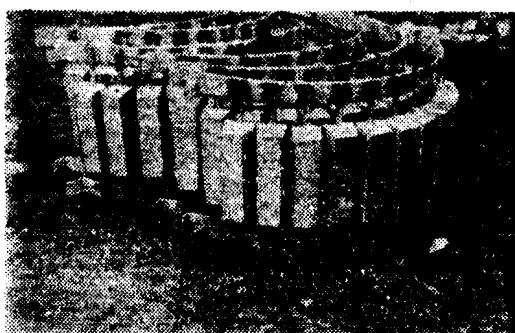
該陽極被裝在距離甲板 54m 的管子的焊點上，管子在安裝到海底之前要先以焦油環氧漆塗在外層。325 塊，寬 280mm，厚 50mm，長 1,500mm 的鋁陽極(ALAP)可產生了  $3mA/m^2$  的保護電流密度，每塊陽極所產生的輸出電流約為 400mA，使用壽命約 20 年，朝向陸地的管子的絕緣都製成凸緣狀的絕緣接頭，然而朝向海的管路和浮標間的絕緣都製成橡皮管。

當管路電位的測定結果，在裝置工程完成後，海底的部份已達到  $-820mV$  的防護狀況(對飽和的甘汞電極)。

### B. 陽極圈

這是個  $268(660.4\phi mm)$  2,700 公尺長管路，該管塗裝着 4mm 厚的煤焦油搪瓷玻璃布，並塗上 60mm 厚的水泥表層，因為它們有好的性質，所以避免表層遭受較小的損害，每一圈包含着 26 塊的棒狀鋅陽極 ZAP， $(37mm + 53mm) \times 53mm \times 425mm$  長，有  $2mA/m^2$  的保護電流密度，每圈由兩個部分所組成，如照 10 片中，將陽極焊成帶狀，且在每個陽極的背面塗上焦油一環氧外層，然後兩部分再用螺絲拴牢在管子上，陽極帶和管子亦可用火焊，使其緊密相連，這重陽極圈可保護管路 20 年。

#### 四、外加電流應用的例子



照片10 焊接成帶狀之板狀陽極ZAP

##### A. 未塗裝的管路

這是個  $24^B$  ( $609.6\phi\text{mm}$ )900 公尺長未經塗裝管路的情況，包括朝向陸地提升管的軸承樁，這種管子在裝置時，並未塗上保護表層，因為在開始時即被使用陰極防護系統。

保護電流需要量可根據已知管子外部表面的電導係數  $50,000\mu\Omega/\text{m}^2$  代入 Pritula's 公式求之，直流電源單位的容量是  $36V \times 40A$ ，包括軸承樁的電流。當電源單位裝在槽場附近時，要使用防爆式的硒整流器，這種設備要裝上兩根一組，總共五組的磁鐵電極，每一組要垂直的埋在槽場前的路面下 4.5 公尺的地方，且要遠離管路 150 公尺圖 2 表示管路和陰極防護系統的安裝。

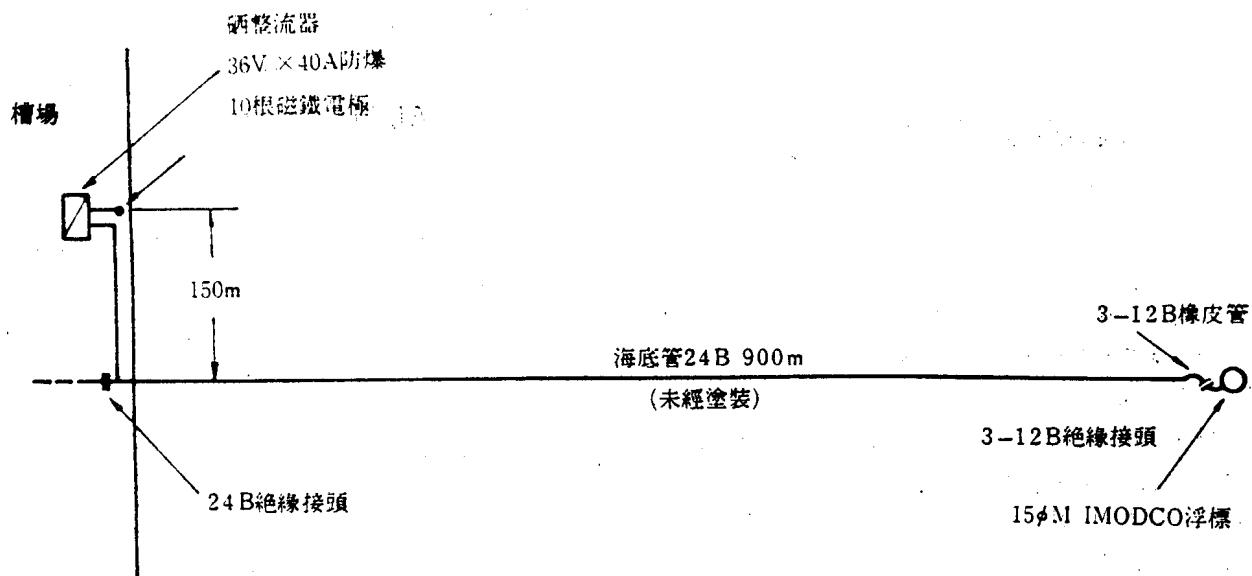


圖 2：海底管路(未經塗裝)陰極防蝕的應用例子

朝向陸地的絕緣接頭為凸緣狀，管子末端和浮標的絕緣是用橡皮管，不銹鋼的末端被焊在朝陸地的絕緣接頭的任何一邊，以測量其電位並證實保護的效果。然而管子盡頭朝海處有一條  $50\text{mm}^2\text{RN}$  的鋼索沿着橡皮管被拉到終點盒子裡，此盒是裝在浮標的內部中心。

當管路電位的測定結果，在裝置工程完成後，所以證實該管路已經有良好的防護電位，朝陸地上為  $-830\text{mV}$ ，朝海的盡頭為  $795\text{mV}$ ，根據 Pritula's 公式，從電位值倒算回去，可以得到管子外部表面的電導係數為  $44,300\mu\Omega/\text{m}^2$ 。

$\mu\Omega/\text{m}^2$ 。

如果電極裝在槽場的附近，則一部分的防護電流會流進槽底盤，而在管路的絕緣接頭發生干擾，在此種情況下，其干擾可用鋅接地電池，所做的絕緣接頭予以適當的防止。

##### B. 用水泥保護表層的管路

被保護的管路：

該管是由  $12^B$ ,  $38^B$ ,  $42^B$  管子所製成的三重管路，其具有  $63.4\text{mm}$  厚的水泥表層，但只有  $42^B$  ( $1,067\phi\text{mm}$ )

管子才是被防護的管子。

計劃標準：

保護電流需要量——大約 150A，可根據 Pritula's 公式的管路外部表面電導係數  $50,000 \mu\text{V}/\text{m}^2$  計算出來，該值與未塗裝的管子一樣，因為水泥表層，被視為沒有絕緣。

電壓需要量——60A，大約是電極接地電阻 44V 的電位降和大約是由於金屬線電阻所產生 10.5V 的電位降，和約 5V 的分解電位和其他總和。

直流電源：

防火爆式矽整流器， $60\text{V} \times 90\text{A} \times 2\text{Sets}$ ，被裝在工廠中。

電極：

高矽鑄鐵電極——12 根沿着海岸線，水平的埋在地下 3 公尺處。

金屬線：

$60\text{mm}^2\text{CV}$  的鋼纜包在水泥槽中，並同時埋於地面上。

絕緣接頭：

朝陸地的為凸緣狀，而朝海的為橡皮管。

電流試驗：

通入 123A 的電流，則管路朝陸地的電位為  $-1,600\text{mV}$  而朝海的電位為  $-980\text{mV}$ ，達到良好的保護狀況，倒算管子外部表面的電導係數得  $57,000 \mu\text{V}/\text{m}^2$ ，意指水泥表層沒有絕緣，故可視為未經塗裝的裸管子。

管路和陰極防護系統的裝置如圖 3，即使管子在朝陸地的電位為  $-1,160\text{mV}$ ，在朝海的電位為  $-1,000\text{mV}$  的良好防護狀況下，經過半年後，管子對電流的活動會減低，只有 72A。

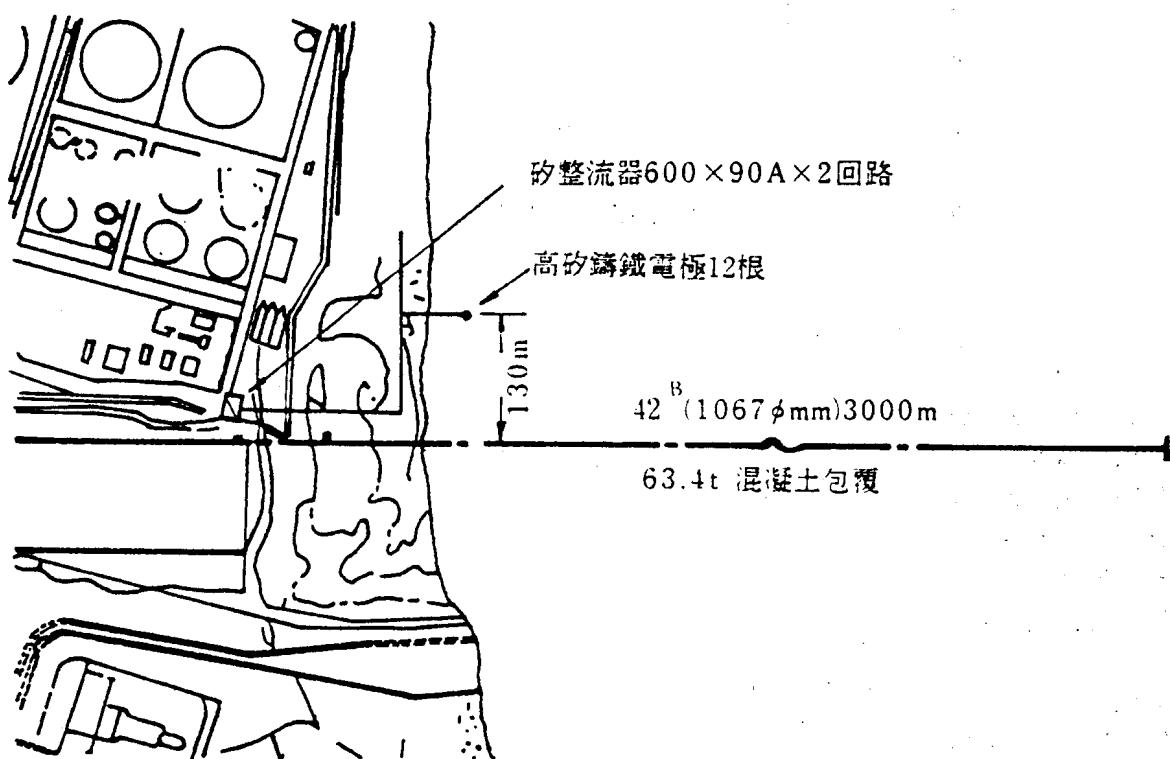


圖 3：海底管路和陰極防蝕系統裝置（混凝土包覆）

C. 用表層的管路

被保護的管路：

一支  $30\text{B}(762\phi\text{mm})$ ，長 5,600 公尺，用煤焦油搪瓷玻璃布單一纏繞表層的管路，該管路以浮懸法裝置。

計劃標準：

保護電流需要量——約 140A，可用管子外部表面的

電導係數  $20,000 \mu\text{V}/\text{m}^2$  求得，在裝置工程時，要顧及表層可能有相當的損害。電位需要量—— $36\text{V}$ ，計算時要顧及，較小的土壤比電阻和低的電極接地電阻。

直流電源：

空冷式○整流器， $36\text{V} \times 60\text{A} \times 3\text{sets}$  裝在供作幫浦的電源室中。

**電極：**

磁鐵電極——60根，以兩根線狀垂直的埋在槽場中4公尺深的地面上，要遠離管路500公尺。

**金屬線：**

50mm<sup>2</sup>/30VV的銅纜，沿着厚油接收管，無遮蓋的裝置着。

**絕緣接頭：**

朝陸地處為凸緣狀，朝海處為橡皮管。

**電流試驗：**

通入12A的電流，則朝陸地處有-1,040mV的電位，朝海處有-1,030mV的電位，而使管路帶有良好的防護狀況，計算管子外部表面的電導係數得 $150\mu\Omega/m^2$ ，意指在裝置過程時，表層幾乎沒有遭受損害。

當管子外部表面的電導係數為 $150\mu\Omega/m^2$ 時，表層的情況非常良好，亦即是需要的保護電流不必超過1A。實際上，12A的電流已經足夠了，所以大部分的電流都流到靠近電極的槽底盤處。如果是這樣，則電極需在緊靠槽邊的位置埋入，因為電極會干擾到位置的情況和結果，但是因為在槽底盤有相當大的接地部分，而電流很小，我們為避免有嚴重干擾的可能性，通常我們都裝鎂陽極於地面上，以防止這種干擾。圖4表示管和陰極防護系統的裝置

D. 用表層的管路：

被保護的管路：

一支48B(1,219.3φmm)，長7,150單尺，用煤焦油搪瓷玻璃布做單一纏繞表層的管路，該管以浮懸法裝置。

計劃標準：

保護電流需要量——41.5A，可用管子外部表面的電導係數 $5,000\mu\Omega/m^2$ 求得。

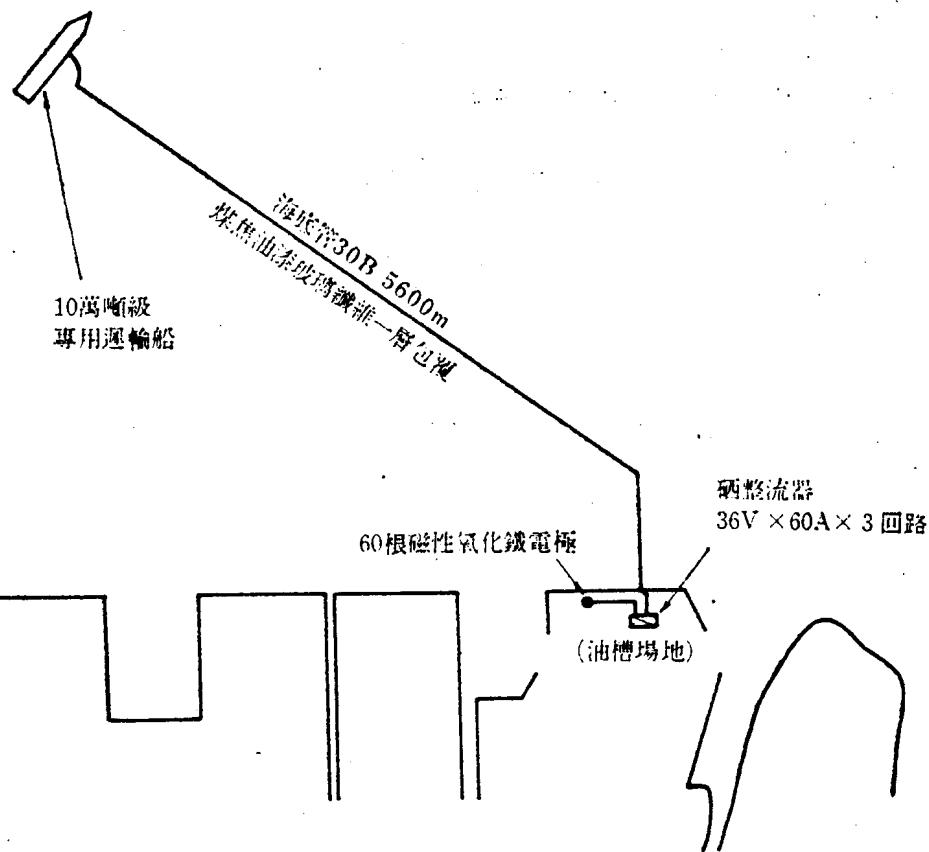


圖 4：海底管線陰極防蝕系統例子（塗裝包覆管）

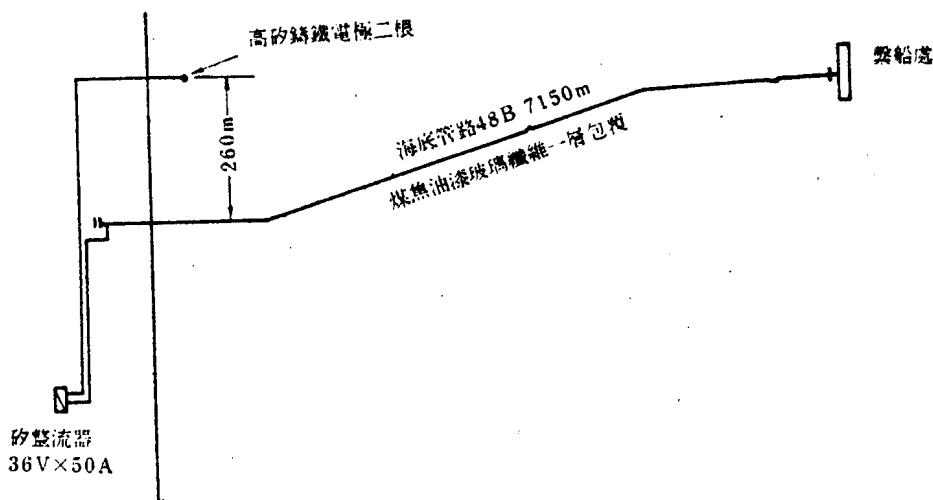


圖 5：海底管線陰極防蝕系統之裝置例子（有塗裝包覆）

電位需要量——36V，計算時要顧及低的電極接地電阻，因為電極是被裝在海底。

**直流電源：**

防爆式矽整流器，36V × 50A

**電極：**

高砂鑄鐵電極——2根，裝在海底遠離管路260公尺

**金屬線：**

60mm<sup>2</sup>CV 的鋼纜包在水泥槽後面裝置。

#### 絕緣接頭：

在朝陸地的提升管和朝海盡頭的碼頭提升管，均用凸臺狀接頭。

#### 電流試驗：

通入 50A 的電流，則朝陸地處有一,170mV 之電位，朝海盡處有 -860mV 的電位，而使管路帶有良好的防護狀況，計算管子外部表面的電導係數得  $6,570 \mu\Omega/m^2$ ，該值接近符合最初的計劃值。

圖 5 海底管路和陰極防護系統的裝置。

前面所述為每個各別的海底管路在各種情況下，陰極防護的應用例子。表 4 是包括種應用的主要資料摘要，根據此表格所例，可以看出裝置工程較困難的趨勢，管路安置下去後，不論外層的種類或何種裝置的方法，管子外部表面的電導係數會變得愈來愈差，這也許是管子經裝置後，以電導係數受工程時損害的影響，在設法海底管路的陰極防護系統時，很難根據上述的影響來決定適當的電導係數，因此要求足夠安全的因素是必需的，則保護電流不致發生不足的現象。

表 4 選擇應用主要資料摘要

例予 N <sub>o</sub>	管 直徑×長度 (B) (m)	表 層	管予裝置的 方法	管予外部表面的 電導係數( $\mu\Omega/m^2$ )
1	10×500 10×500	瀝青麻布單一纏繞 未經塗裝	浮 懸 法	26,600
2	10×2,900(2) 4×2,900 8×1,330	瀝青玻璃纖維單一纏繞	浮 懸 法	20,400
3	10×2,000	煤焦油搪瓷玻璃布雙層纏繞+水泥灰表層	推 底 法	43,700
4	24×900	未經塗裝		44,700
5	32×1,150	瀝青搪瓷玻璃墊維尼龍布雙層纏繞	浮 懸 法	40,000
6	48×2,500	煤焦油搪瓷玻璃布單一纏繞	浮 懸 法	17,600
7	48×7,150	煤焦油搪瓷玻璃布單一纏繞	浮 懸 法	6,570
8	42×3,000	水泥表層	平底船層法	57,400
9	30×5,600	煤焦油搪瓷玻璃布單一纏繞	浮 懸 法	150
10	30×5,500 12×5,000(2)	PRICOFL 帶單一纏繞		2,900

## 五、結論

今天，在海底管路中應用陰極防護系統分方法，是普遍的被採用，但在應用陰極防護系統時常被誤解為僅作表層陰極防護的預備防蝕，或誤解只顧管路裝置，而不注意表層的任何損害，所以要特別保護表層，以減少其損害的可能性。

很顯然的，假使已經花了一筆很大的經費，去做了一條又長尺寸又大的海底管路，可能會因為一個微小的腐蝕孔，而不能使用或有洩漏或溢出的情形發生，這不但會有大量的損失，而且有危險，所以必需盡其所有能做好海底管路的防蝕工作。

譯者：臺北工專助教

原文：中川防蝕工業株式會社岡本勝群著