

外加電流式自動控制電位陰極防蝕法

葉江榮 蔡茂雄 邱明義 廖財昌

(電力研究所)

1. 前言

臺灣屬於亞熱帶地區，全年氣候高溫多濕，對材料的腐蝕作用強烈；本公司核能第三發電廠位於恒春的南灣，使用海水為冷卻水，海水的導電率為 $20 \sim 25 \Omega\text{-cm}$ ，雖無環境污染情形，電廠設備不論在地上、地下、或海水中，都遭受到腐蝕問題。

緊急供水用海水抽水機房，共裝有迴轉欄污柵四座，自民國 72 年起陸續裝設，迄今約已兩年。由於海水溶氧的自然腐蝕，及結構材料的複雜，已造成碳鋼支架的嚴重腐蝕，鋼材表面呈現凹陷，赤銹斑斑。尤其是凸出邊緣部份，多處腐蝕剝落，呈鋸齒狀。

本防蝕研究計劃係由核能發電工程處於 72 年提出，由電力研究所設計實施。

2. 腐蝕理論及防蝕對策

2-1 腐蝕的原因

腐蝕 (corrosion) 係金屬受到環境的影響藉化學或電化學反應所造成的破壞性侵害。物理原因所造成的破壞，如侵蝕 (erosion)、擦傷 (galling)、磨耗 (wear) 等一般不稱為腐蝕。在某些場合，物理破壞可能和化學侵蝕同時發生，例如腐蝕侵蝕 (corrosionerosion)、腐蝕磨耗 (corrosion wear)、磨損腐蝕 (fretting corrosion) 等。

在中性或接近中性的水中，正常溫度下，鐵的腐蝕必須有氧溶解在內才能發生。在飽和空氣的水中，最初腐蝕速率可能達到 100 mdd 左右，經數天後當氧化鐵膜形成而造成氧擴散的障壁 (barrier) 後，腐蝕速率則逐漸減慢下來，穩定狀態的腐蝕速率一般為 $10 \sim 25 \text{ mdd}$ 。自電化學而言，任何金屬的表面為電極的組合，金屬體使電極短路 (如圖 1)，周圍的水溶液作為氧化還原反應之離子傳送介質。此時電位較高的陰極 (“-” 極) 發生還原反應，電位較低的陽極 (“+” 極) 發生氧化反應，這就是一般所稱的局部作用電池 (local-action cells)。例如，鐵在水溶液中的腐蝕反應為：

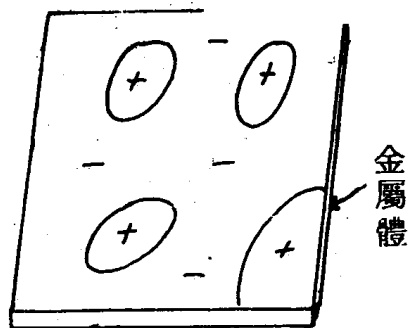
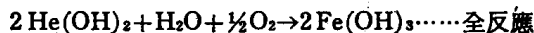
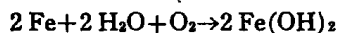
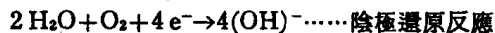
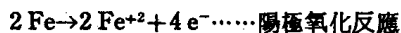


圖 1 放大的金屬表面，顯示局部作用電池



由於鐵腐蝕氧化而使金屬轉換為腐蝕生成物。只要金屬表面保持乾燥，就不產生局部作用電流，腐蝕的現象就不會發生。

在室溫下鐵在飽和空氣的水中，氯化鈉濃度對腐蝕的影響情形如圖 2。初期腐蝕速率首先隨鹽濃度增加而增加，達到 3% 以後開始減少，當達到飽和時 (26% NaCl)，其腐蝕速率較在蒸餾水中還小。其理由為氧的溶解擴散作用控制了整個氯化鈉濃度的腐蝕速率，因氧在水中的溶解度隨鹽的濃度增加而減少，這足以解釋在較高的氯化鈉濃度下腐蝕速率降低，而最初上升的原因顯然與腐蝕鐵上形成擴散障壁銹膜防蝕性質的改變有關，形成高導性的水溶液。

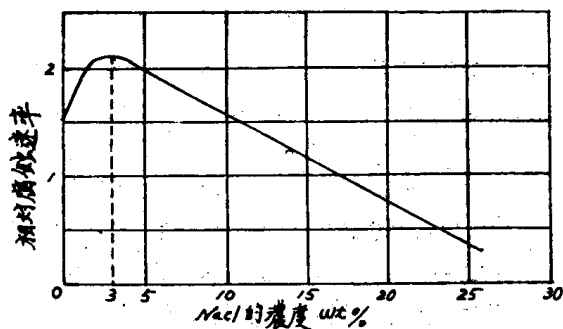


圖 2 在室溫下充滿空氣的食鹽水溶液對鋼鐵的腐蝕情況

迴轉攔污柵的結構支架 (Frames) 使用材料為碳鋼，傳動鏈條為鋁青銅 (Aluminum Bronze)，過濾網為 Monel，扣鏈齒輪為鎳基合金；這些金屬合金在海水中各具不同之腐蝕電位 (如表 1)，以海水為介質，金屬導體為電子回路，形成一閉路電池，放電腐蝕。結構體的合金中，以碳鋼的電位為最低 (active)，形成共同陽極，放出電子而溶解腐蝕，如下列反應



其他三種合金電位皆較碳鋼為高 (noble)，形成陰極，吸收碳鋼放出的電子而受到保護。在整座結構體中，碳鋼除了有溶氧腐蝕外，另有犧牲陽極的作用，故其腐蝕速率特別高。

表 1. 海水中金屬之自然電位
(飽和甘汞基準電極)

金 屬 名 稱	電位 v	金 屬 名 稱	電位 v
白金	+0.33	活性鎳	-0.24
金	+0.18	鋁青銅	-0.26
不銹鋼 (18Cr-8Ni-3Mo)	-0.04	黃銅 (60Cu-40Zn)	-0.27
銀	-0.06	活性不銹鋼 (18Cr-8Ni)	-0.28
不銹鋼 (18Cr-8Ni)	-0.08	鎳	-0.46
Monel (67Ni-30Cu)	-0.10	鉛	-0.50
Cupro Nickel (70Cu-30Ni)	-0.13	銅、鎳銀 or	-0.45
青銅 (Sn 6~10)	-0.14	鋅	-0.61
黃銅 (65Cu-35Zn)	-0.15	鋁	-0.78
鋁	-0.17	鋁	-0.78
炭鋼	-0.20	鋅	-1.07
標準氫電極	-0.24	鎂	-1.60

2-2 可行之防蝕對策

在海水中之鋼鐵結構物，由於海水的溶氧量及含鹽量加上海水流速 (如圖 3)，造成鋼鐵結構物的快速腐蝕。要減少其腐蝕，一般可分為四種方法，即：

- (1) 改用耐蝕性金屬或合金。
- (2) 實施防蝕塗裝或表面鍍金處理。
- (3) 添加抑制劑或除氧氣及電解質。
- (4) 施行陰極防蝕。

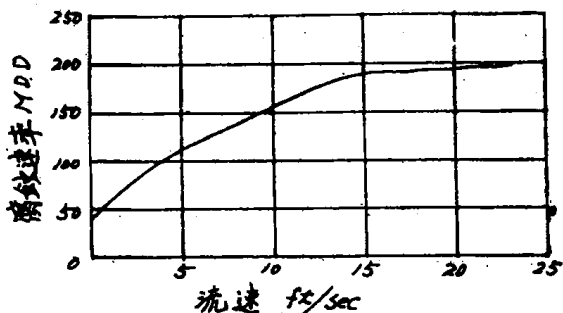


圖 3. 常溫海水鋼鐵腐蝕速率與流速的關係

以上四項中，第 (1) 項因耐蝕材料昂貴，不適合使用，第 (2) 項現場施工不易，且無法長久使用，第 (3) 項使用之冷却海水量甚大，不可能實施化學處理。第 (4) 項為電氣化學方法，所需費用不高，防蝕效果明確，施工維護較簡單，為海水中鋼鐵結構物防蝕最佳的途徑。

2-3 陰極防蝕法之原理

陰極防蝕法有兩種，即 (1) 犧牲陽極法及 (2) 外加電流法。前者係利用自然電位較低的金屬 (如鎂、鋁、鋅等) 做為陽極與被保護的金屬體偶合 (couple) 在一起，使被保護體的自然電位下降，當電位降到防蝕電位時，被保護體就不再腐蝕。

外加電流法係使用一外加直流電源，其正極接到一輔助陽極 (可用適當金屬或非金屬導體組成)，負極接到被保護體，經過一電解質介體導通電流來達成極化防蝕的目的，如圖 4 所示。

觀察金屬體在水溶液中之表面狀況 (如圖 1 所示)，顯示局部作用電池之存在，如果藉外加電流使陰極極化，則陰極之電位逐漸降低。當陰極極化電位低於腐蝕電位而到達陽極之開路電位時，則兩電極間沒有電位差存在，即不發生腐蝕電流。如此，腐蝕作用就停止；此為金屬陰極防蝕之基本原理。

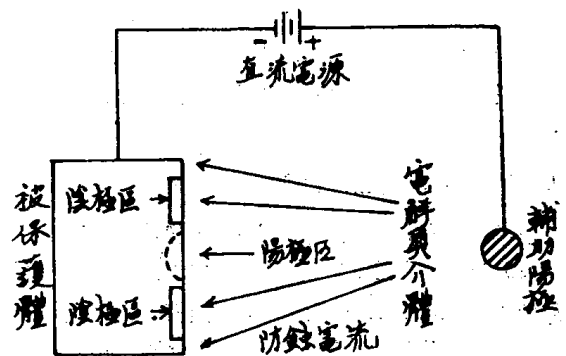


圖 4. 外加電流陰極防蝕原理

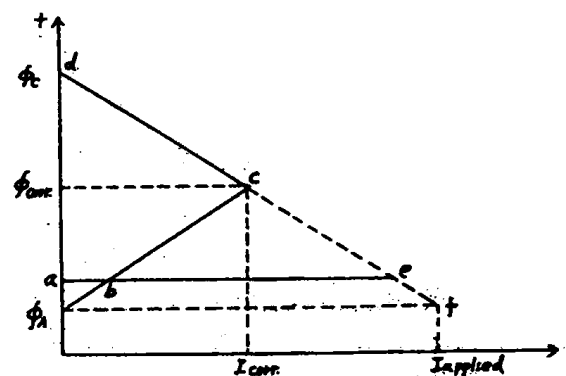


圖 5. 以極化圖形說明陰極防蝕之原理

ϕ_A ：陽極之開路電位

ϕ_0 ：陰極之開路電位

ϕ_{corr} ：腐蝕電位或稱自然電位

I_{corr} ：腐蝕電流

$I_{applied}$ ：外加電流或完全保護之電流

因此，只要持續通以直流電流，使金屬體的電位保持在其陽極的開路電位，金屬便不再發生腐蝕，陰極防蝕理論之極化圖形如圖 5 所示。

設金屬已被極化而略為超過陽極之開路電位 ϕ_A ，則腐蝕速率仍然為零，所多加的電流並無益處，反而可能引起金屬的氫脆化 (Hydrogen Embrittlement) 不良現象。所以，在實用上加電流值應保持接近理論上之最低值，也就是使防蝕電位保持在 ϕ_A 。如果外加電流低於完全保護所需之電流，仍然可獲得相當程度之保護。例如在圖 5 中，外加電流為 be ，則腐蝕電位自 ϕ_{corr} 移到 a ，腐蝕電流自 I_{corr} 減到 ab ；當外加電流 be 增加時，電位 a 向 ϕ_A 移動，腐蝕電流 ab 也逐漸變小，當 a 與 ϕ_A 重合時，腐蝕電流 ab 變為零，也就是所加的直流電流達到理論防蝕電流值。

3. 現場調查

同樣的結構體在不同的腐蝕環境下，所受的腐蝕情況相異，於設計防蝕系統之前，必需先進行現場實況調查，本研究現場調查數據，分述於後：

3-1 迴轉攔污柵的結構狀況

被保護體的結構形狀為狹長方塊，體長 3.25 公尺，寬 1.65 公尺，井深 19 公尺，最高水位深度 12.9 公尺，最低水位深度 10.1 公尺；由動態運轉的濾網與固定支架組成，當有雜物堵塞濾網時，就迴轉逆洗，迴轉速度大約每分鐘 3 公尺。圖 6 及圖 7 為迴轉攔污柵之構造略圖。

迴轉攔污柵的構成材料計有四種金屬體，其固定支架 (Frame Structure) 為碳鋼，鏈條 (Traveling Chain) 為鉛青銅 (Al Bronze)，過濾網 (Filter Net) 為孟涅合金 (Monel Metal)，扣鏈齒輪 (Sprocket pulley) 為鎳基合金。

3-2 海水水質

核三廠位於臺灣南端恒春海邊，其取用之海水水質良好，未受工業污染。民國 73 年間取海水測其電阻率為 20~25 Ω -cm，硫化物含量甚微，均在 10 ppb 以下。

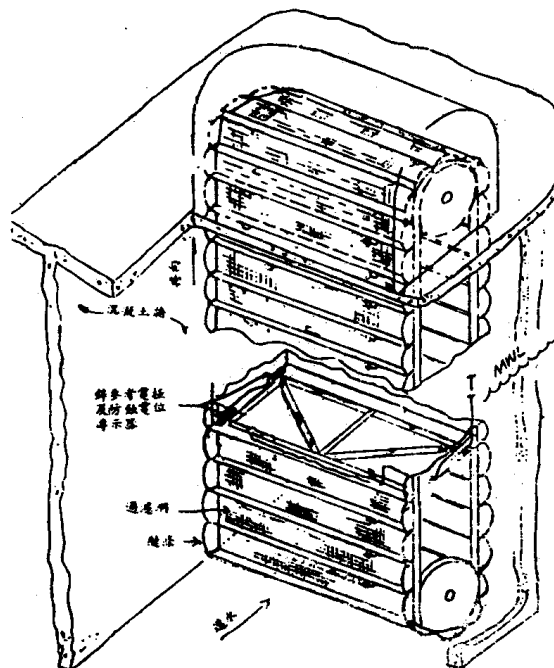


圖 6. 核三廠迴轉攔污柵之構造正視圖

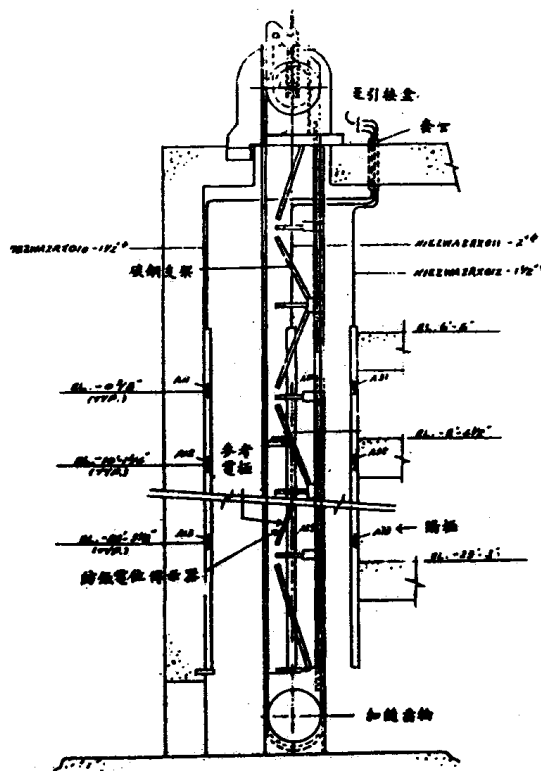


圖 7. 核三廠迴轉攔污柵之構造側視圖

3-3 攔污柵結構體金屬的自然電位

實測所得攔污柵構造金屬在海水中的混合自然電位為

$$-340 \text{ mV (vs SCE)}$$

相當於

$$-410 \text{ mV (vs Cu-CuSO}_4\text{)}$$

有關自然電位測試工作之考慮事項及實測數據，簡述於下：

本迴轉攔污柵係多種材料結構體。因此，所測到的自然電位係各種金屬間之混合電位。自動控制電源系統之設計上，用為自動控制依據之防蝕電位，必需於設計之先，以臨時參考電極，針對攔污柵各點，作移動式之測量；然後由所測各點電位中，經分析選取最典型值，供做控制之用。

3-4 雜訊干擾狀況

由於核三全廠高低壓電力設備之接地系統分佈面甚廣，有時可能因雜散電流 (Stray Current) 流經參考電極與被保護結構物間，導致形成雜散訊號。此種雜訊通常為低頻者，而在具有高頻源之地點，有時高頻訊號將經由各種耦合方式，耦合至防蝕電位檢出回路中。此兩種雜訊皆有可能對電路控制造成影響。因此，不但需對結構物之自然電位予以測定，且需觀察有否雜散信號存在其中。本攔污柵於測量自然電位同時，以 TEKTRONICS 466 OSCILLOSCOPE 觀測雜散信號之波形。其掃描時間由 $2 \text{ ms} \sim 1 \mu\text{s}/\text{div}$ ，涵蓋高頻至低頻，經測定觀察結果顯示並無任何可虞之雜訊干擾。實際觀測之防蝕電位雜訊干擾信號情況，如圖 8 所示。

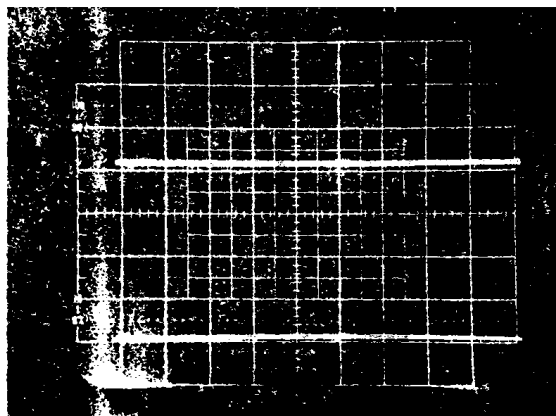


圖 8 以示波器觀測防蝕電位雜散干擾信號

4. 防蝕系統的設計

4-1 犧牲陽極防蝕法

迴轉攔污柵浸在海水中的表面積約 223 平方公尺，如果採用鋁犧牲陽極 ($500 \times 100 \times 100 \%$) 防蝕法，所需陽極數量可依下列方式估計：

$$\text{鋁陽極的表面積：} 500 \times 100 \times 100 \% = 0.2 \text{ m}^2$$

每支重 31 公斤，耐用年限 2 年。

假設鋁陽極有效防蝕面積比為 1:40 (陽極:陰極)，由於海水流速為 7 ft/sec ，腐蝕速率增加 3~4 倍 (如圖 3)，則估計所需陽極數量為

$$223 \text{ m}^2 \div 0.2 \text{ m}^2 \div 40 = 28$$

$$28 \times (2 \sim 4 \text{ 倍}) = 100 \text{ 支}$$

因而如選擇採用犧牲陽極法防蝕，則將增加負荷重量 3,100 公斤導致迴轉攔污柵沖洗時驅動電力之無謂消耗損失。

至於鋁陽極的裝配使用方法，一般採用直接焊接於被保護表面，陽極焊接完成後，結構體的極化相當緩慢，一般需 20 天才極化完全，而達防蝕效果。然而，當迴轉攔污柵轉動逆洗時，原先在空氣中的結構體轉入海水中，在海水的部份轉到空氣中，此時因環境的改變，犧牲陽極無法立即供應較大的防蝕電流，結構體無法受到完全保護，只能依賴較小的電流慢慢進行極化防蝕。

再者，自經濟的立場評估而言，鋁陽極每公斤以臺幣 120 元計算，則共需 36 萬元 ($3,000 \text{ 公斤} \times 120 \text{ 元/公斤} = 360,000 \text{ 元}$)。自動控制室外加電流法只需要 26 萬元 (電控部份 14 萬元，陽極 12 萬元)，其使用年限可達 10 年以上。

綜合上述各點而言，對迴轉攔污柵使用犧牲陽極法防蝕較為不理想。

4-2 自動控制式外加電流防蝕法的優點

鑑於迴轉攔污柵的形狀為狹長方塊體，保護電流分佈要均勻，因此選用體積小 ($20 \% \phi \times 300 \text{ mmL}$)，重量輕 (424 克) 的鍍白金鈦陽極 9 支，平均分佈於被保護體的內外 (如圖 7) 供放出防蝕電流，使被保護體得到均勻的防蝕電流。

計算浸在海水中的固定結構體面積約為 97 平方公尺，迴轉部份的表面積約為 200 平方公尺；經常浸在水中部份約佔 $\frac{44}{70}$ 。

防蝕面積合計為 223 平方公尺。

計算式：

$$97 \text{ m}^2 + 200 \text{ m}^2 \times \frac{44}{70} = 223 \text{ m}^2$$

以水流速度 7 呎/秒，部份碳鋼被覆絕緣，並且設定防蝕電流密度為 0.2 A/m^2 ⁽¹⁾，則總防蝕電流為 44.6 A。計算式：

$$223 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ A/m}^2 = 44.6 \text{ A}$$

電源裝置控制系統設計條件如下：

輸入：AC 110V

輸出：DC 12V 60A (可調)

應用自動控制式外加電流法防蝕，電源一開始就以較高的電流密度供應，因為此時被保護體尚未陰極極化，電控部份可依照設計（可以手調控制電流輸出），供應防蝕電流；當被保護體陰極極化後，輸出的電流會慢慢下降，僅保持足夠的電流來維持防蝕需求。從一開始到穩定下來，只要 3 小時，爾後，俟陰極極化生成物慢慢生成，所需的防蝕電流也跟著慢慢減小。防蝕系統在正常使用期間，腐蝕環境一有改變，如水溫、鹽份、污染物或被保護體的變動，防蝕電流則可依其實際要求而自動增減，保持理想的防蝕效果。綜合其優點可歸納如下：

- (1) 可調整陽極位置或主回路電阻，使被保護體得到一均勻的防蝕電位分佈。
- (2) 可因需要快速修正所需的防蝕電流。
- (3) 不受水溫、流速、鹽份或被保護體的變化影響，隨時可保持防蝕效果。
- (4) 設計使用年限可達 10 年以上。
- (5) 隨時提供防蝕資訊。

4-3 鍍白金鈦陽極特性及加工處理

陽極材料有多種，性能略如表 2 所示，由於保護體的形狀狹長 ($1.7 \times 3.3 \times 19 \text{ M}$)，周圍又被水泥密封，只留進出口，陽極的放置點只限於結構體內，又需使用多支陽極其電流分布才能均勻，使用年限要高到 10 年以上，故選用性能優越體積小的鍍白金鈦陽極，其規範說明於圖 9 內，白金電極在海水中允許之輸出電壓為 0~12 V DC，單位面積之放電電流強度為 $540 \sim 3200 \text{ A/m}^2$ ⁽⁴⁾。

表 2 各種陽極之放電電流密度及壽命⁽⁵⁾

外加電流陽極材質	海水中典型放電電流密度 (Amp/m ²)	消耗量 gms / amp-yr
Pt - 6% Sb - 1% Ag	160 ~ 220	15 ~ 86
Pt - 6% Sb - 2% Ag	160 ~ 220	13 ~ 25
白金 (覆於鈦、鉍或鈮上)	540 ~ 3200	0.01
石墨	10 ~ 40	230 ~ 450
Fe-14.5% Si-4.5% Cr	10 ~ 40	230 ~ 450
磁性氧化鐵 Fe ₃ O ₄	10 ~ 40	20 ~ 150

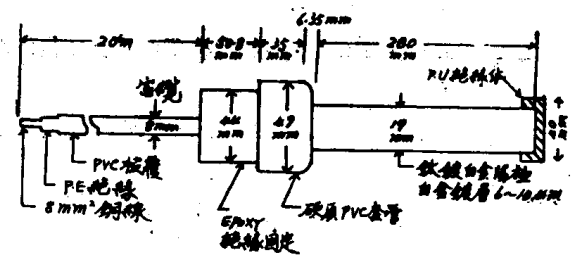


圖 9 鍍白金鈦陽極略圖

鍍白金鈦陽極在正常使用狀況下，其壽命與電流密度本身材質、使用環境……等諸多因素有關。其中最值得重視的二項，係運轉時電壓大小及其品質。所謂電壓之大小，即指陽極放電端點與結構物間之閉路電壓，一般均以不超過 12V 為原則，依陽極製造方法而異。而所謂電壓之品質，即指該電壓是否為純直流。亦即該直流電壓有否包含交流成分 (A. C. Component) 而言，而交流成分乃由漣波 (Ripple) 所形成。漣波之大小與整流之方式，負載之大小關係密切。電壓太高極易使白金膜穿孔，而 Ripple 太大，則極易加速白金膜損耗，兩者均將造成陽極壽命之急劇縮短，故在設計上需特予注意。惟 Ripple 在 100 Hz 以下時，無論使用 3 相或單相全波電流，並不會顯著增加白金膜的溶化率⁽⁴⁾。

操作電壓之大小，由電源變壓器輸出電壓大小，電壓調整率，整流回路，及線路壓降計算上，全面妥予考慮，才能設計出適當電壓。而 Ripple 大小之設計，則需視所供防蝕電流，由輕載至重載間變化之範圍，妥予設計。

一般防蝕電流控制之方式有固定整流式，SCR 自動控制式、高頻遮斷自動控制式。而 Ripple 之消除方法亦各有不同。茲以本研究中所使用 SCR 控制式之漣波電路討論之。在本工程中，由於需應付防蝕電流在輕重載間急速變化，故使用 LC 抗流線圈 (CHOKE Coil) 漣波電路。

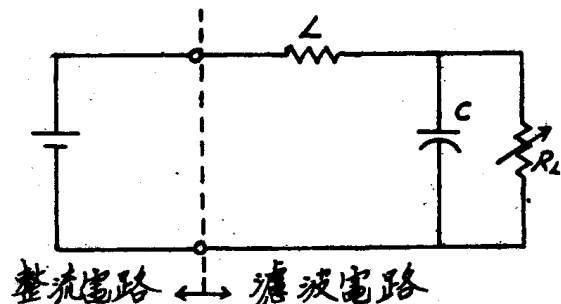


圖 10 漣波電路示意圖

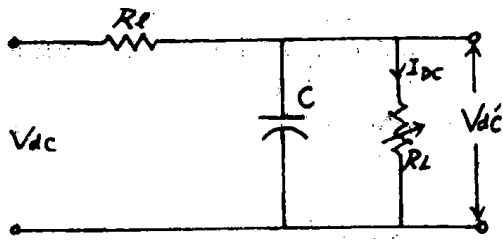


圖 11. 等效直流電路圖

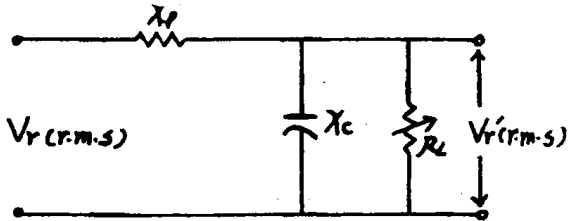


圖 12. 等效交流電路

其中

L : 濾波電感線圈 (Henry)

C : 濾波電容 (PF)

R_L : 陽極與陰極間之電阻 (Ω)

R_f : L 之直流電阻 (Ω)

X_c : C 之電容抗 (Ω)

V_m : 交流輸入電壓峰值 (V)

V_{dc} : 整流而未濾波之電壓值 (V)

I_{DC} : 陽極總放電電流量 (A)

V_{dc}' : 濾波後之電壓值 (V)

V_r : 未濾波前之漣波電壓 (Vr. m. s.)

V_r' : 濾波後之漣波電壓 (Vr. m. s.)

由圖 10、11 以 SCR 全波導通時 (重載時) 討論之，其相互關係如下：

$$V_{dc}' = V_{dc} - I_{dc} R_L$$

$$V_{dc}' = \frac{R_L}{R_f + R_L} \cdot V_{dc}$$

此時 R_f 包含引接至陽極之引線，及陰極回流引線之總電阻。

由圖 12 等效交流電路

$$X_s = \sqrt{X_c^2 + R_L^2}$$

$$V_r'(rms) = \frac{X_c}{X_f + X_s} \cdot V_r(rms)$$

if $X_1 \gg R_L \gg X_c$ ，則由 Fourier Series 分析其二次諧波之部份 $\rightarrow$

$$V_r = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{3\pi} \cos 2\omega s + \dots$$

$$\text{可得 } V_r'(rms) = \frac{X_c}{X_1} \cdot V_r(rms) = \frac{\frac{1}{2} \omega c}{2 \omega L} [0.707(0.424 V_m)]$$

$$\therefore V_r'(rms) \approx \frac{530000}{L \cdot C} V_m$$

由 N.A.C.E 所發布之實驗報告顯示，通常若漣波之頻率愈高，則陽極之損耗愈快。故使用高頻遮斷自動控制式，較 SCR 自動控制式，對陽極之損耗率高了將近一倍。

由於漣波電壓應小於何值，方不致對陽極構成損害，目前並無權威性之報告。故目前本系統儘使漣波電壓降至最低。經示波器測定，在防蝕電流隨時變化之狀況下，其漣波最大值約 50 mv 左右，如圖 13 所示。

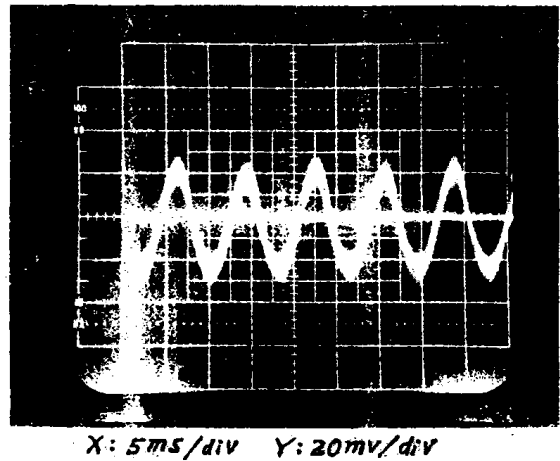


圖 13. 由示波器觀測漣波之最大值

鈦鍍白金陽極目前在國內未有生產，故經由核工處透過顧問公司介紹外購；已於六月底運至現場，由電研所技術人員發現包裝不妥當，陽極與導線連接處，只有類似煤焦膏的絕緣，外包 PVC 管，頂部再用 Epoxy 固定 PVC 管與導線 (如圖 14)。而所用的 Epoxy 固化不完全，此情況在海水中運作，很容易造成絕緣不良，放電腐蝕而斷線，經洽商後已於 8 月中全數運抵研究所，作絕緣改善處理。



圖 14. 外購鈦鍍白金陽極結構

4-4. 參考電極

由於自動控制式外加電流陰極防蝕系統所用參考電極需永久性的浸在海水中運轉使用，一般實驗室中所使用的標準半電極（如 SEC, Ag/AgCl 等）不適合採用。概

各種基準半電極都含有特定化學藥品的內部溶液（Filling Solution），該溶液的濃度穩定，電極電位才能穩定。長年浸在海水中使用時，由於離子滲透作用，內部溶液濃度將受影響，電極電位亦隨著改變，而致不堪使用。各種基準電極之電位如表 3 所示。

表 3. 各種基準電極之電位（金屬防蝕技術便覽）

電極之種類	電極之構成	標準氫電極基準 (V)		飽和甘汞電極 $E^{\circ} 25^{\circ}\text{C} \text{ (V)}$
		$E^{\circ} 25^{\circ}\text{C}$	dE/dt	
飽和甘汞	Hg/Hg ₂ Cl ₂ , 飽和 KCl	0.242	-0.76×10^{-3}	0
1N 甘汞	Kg/Hg ₂ Cl ₂ , 1N KCl	0.280	-0.24×10^{-3}	+0.039
海水甘汞	Hg/Hg ₂ Cl ₂ , 人工海水	0.296	-0.28×10^{-3}	+0.054
飽和氯化銀	Ag/AgCl, 飽和 KCl	0.196	-1.10×10^{-3}	-0.046
海水氯化銀	Ag/AgCl, 人工海水	0.250	-0.62×10^{-3}	+0.009
飽和硫酸銅	Cu/CuSO ₄ , 飽和 CuSO ₄	0.316	$+0.90 \times 10^{-3}$	+0.074

註：電極電位 $E = E_{\circ} 25^{\circ}\text{C} + (t - 25) dE/dt$ t : 液溫 ($^{\circ}\text{C}$)

本系統使用鋅參考電極，以高純度鋅（99.99%以上）熔鑄成型大小形狀為 $20\% \phi \times 100\% L$ 的圓柱體，經與 3 C-2 V 同軸電纜相接後，置於多孔的 PVC 套管內，底部以石膏固定，外部以 Epoxy 絕緣樹脂液灌注密封，（如圖 15）使用壽命預測達 10 年以上。

純鋅電極在清淨的海水中，具有穩定的自然腐蝕電位 $-1025 \pm 10\text{mV}$ (Vs. SCE)，如圖 17 所示。因此電位係鋅金屬之自然電位，如海水不受硫化物污染，電位變動就不大，通常在 10 mV 以內。實用上以它為基準來測試他種金屬的電位，圖 16 所示者為美國電力研究所 (EPRI)

所提供，多件冷凝器水箱實施陰極保護系統中，所使用各種參考電極所佔比例情形。臺電電廠的陰極保護裝置，所用的參考電極與美國電廠所用的情況接近。

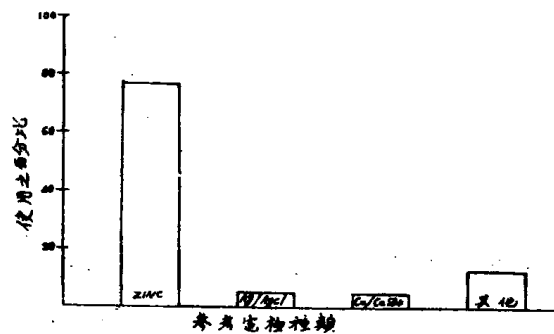


圖 16. 各種電極使用在陰極保護系統的分配情形

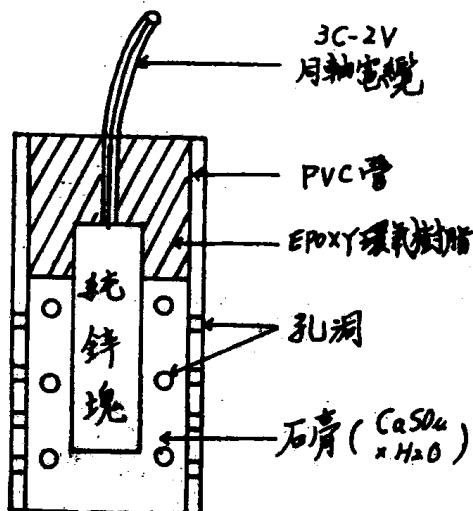


圖 15. 永久性鋅參考電極構造圖

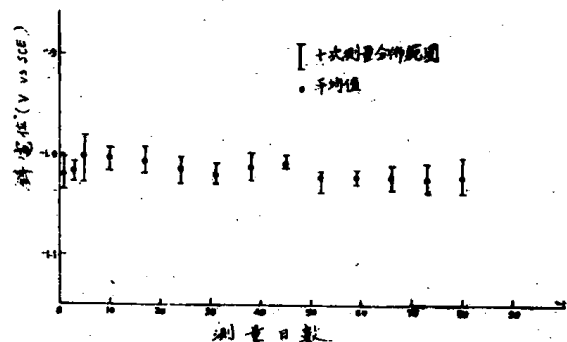


圖 17. 鋅電極在未污染海水中之自然電位 (Vs. SCE)

本防蝕設計使用的鋅參考電極選擇低水位線下一公尺的地方安裝（如圖 18 所示），以便隨時與被保護體的防蝕電位同時引入自動控制電路中，以控制所需的防蝕電流值。



圖 18. 鋅參考電極與信號傳示器的安裝情形

4-5 防蝕電位信號傳示器

本欄污槽的形狀是狹長方體，欲取得其防蝕極化電位時，假如仿效一般防蝕工程，從結構體上方引接，則所取得信號勢必誤差甚大，且不穩定一般引起測試電位不正確的主要原因是由於 $I \cdot R$ 電位降所引起的。當結構體的表面接受防蝕電流時，各部份的小電流匯集成總電流，從底部向上流動，而形成引起 $I \cdot R$ 電位降的 $I \cdot R$ ，乃結構體的電阻。為消除 $I \cdot R$ 的干擾，特設計並製造「電位信號傳示器」（如圖 18 所示），裝置於參考電極旁邊，則所取得的被保護體極化電位即為正確值。此極化電位與參考電極電位之間產生一電位差，根據此電位差值可瞭解結構體的真實防蝕狀況。

4-6 鍍白金鈦陽極的安裝

由於可利用的空間不大，又須避免陽極與結構體碰撞及防止短路事故，設計容納陽極用之 $4'' \phi$ PVC 套管，管壁鑽 $1'' \phi$ 的圓孔，孔與孔之間隔為 $2\frac{1}{2}''$ ，以供陽極所放電流流出。陽極頂端以 PU 絕緣體封住，以防止白金鍍膜磨擦損害而從 PVC 套管頂端放入陽極。每支 PVC 套管內安置 3 支陽極，最底部的一支置於 EL. -27 呎，中間一支置於 EL. -21 呎，上方一支置於 EL. -5 呎。每支陽極分別經由其導線懸掛放入，當拉出陽極導線至引接盒（Pulling Box）時，預留 3 公尺的長度，以便日後調整陽極位置之用。每座迴轉欄污槽共需 9 支陽極，分裝於 3 支 PVC 套管內，如圖 7 所示。

5. 自動控制電源裝置

自動控制電源裝置由主電路配電箱及控制電路配電箱組合而成，其盤面均設有開關設備及監視用儀表，其外形及內部之構造如圖 19、圖 20 所示。

5-1 主電路

主電路由電源變壓器、開流體、濾波電感、濾波電容、分流器等所構成。交流電源經由電源變壓器、開流體之適當降壓，整流後再由電感器及電容器之濾波作用而得純直流之防蝕電流。為使整臺迴轉欄污槽之每個部份能夠均勻獲得防蝕電流，除充分考慮陽極之數目及位置之外，電流之正極及負極亦配合陽極之數目各分出三個端子，正極為 A_1, A_2, A_3 ；負極則為 C_1, C_2, C_3 。主電路如圖 21 所示。

電源變壓器為單相，二次側之電壓為 $12V-0-12V$ ，一次側則設有多組分接頭可視實際之需要，接在最適當的電壓端子，二次側之額定電流則以結構物在極化之前所需之最大防蝕電流作為設計之條件。

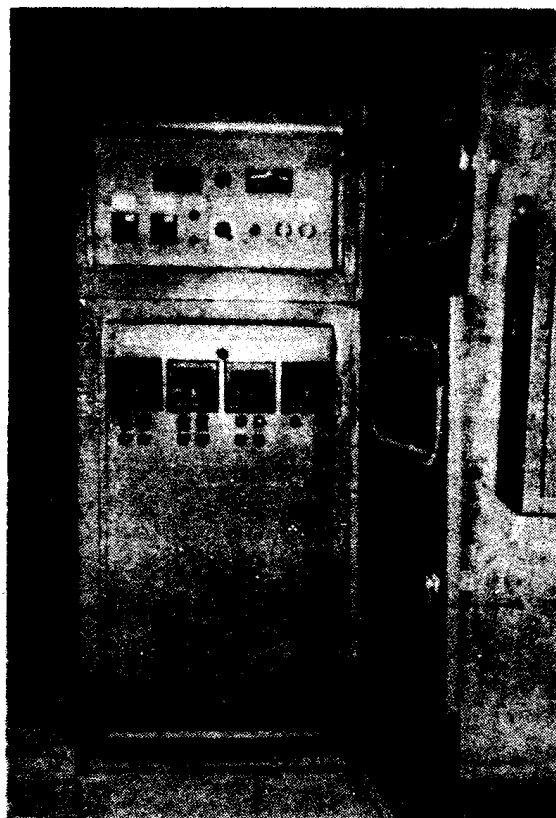


圖 19. 自動控制電源裝置（上部為控制電路配電箱，下部為主電路配電箱）

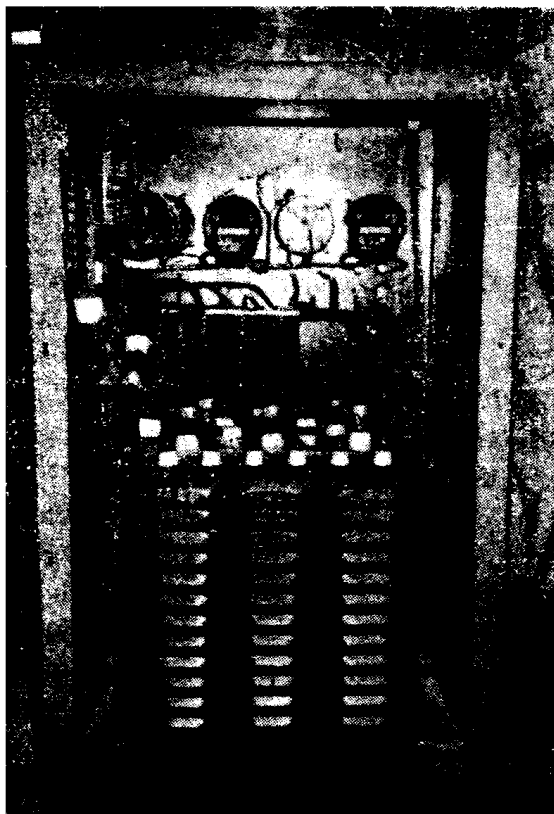


圖20. 主電路配電箱之內部構造

額定一次電壓：75V-110V-150V-180V-220V 多

組分接頭

額定二次電壓：12V-0-12V 中間抽頭

額定二次電流：60A

防蝕電流並非經常保持在一定值，必須跟據結構物之極化程度及其周圍狀況之變化而變化，開流體在電路上除具整流之功能外並可控制其觸發角度而調整防蝕電流之大小。

本系統採用中間抽頭之全波整流方式其輸出之直流電壓平均值為半波時之2倍，設其值為 E_s 時

$$\text{則 } E_s = 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} E \sin \theta d\theta$$

其中

E ：交流電壓之有效值

θ ：相位角

又陽極與結構物間之電阻為 R 時，防蝕電流 I_a 則為

$$I_a = \frac{E_s}{R} = \frac{\sqrt{2} E}{\pi R} (1 + \cos \alpha)$$

濾波回路包括電容器組及電感器，電容器組由多個電解電容並聯而成，電感器則設置在電源變壓的鐵箱內，其末端經由套管拉到箱面。圖23說明電源變壓器之端子符號及配置，其中 L_1 , L_2 為濾波電感器之二端。

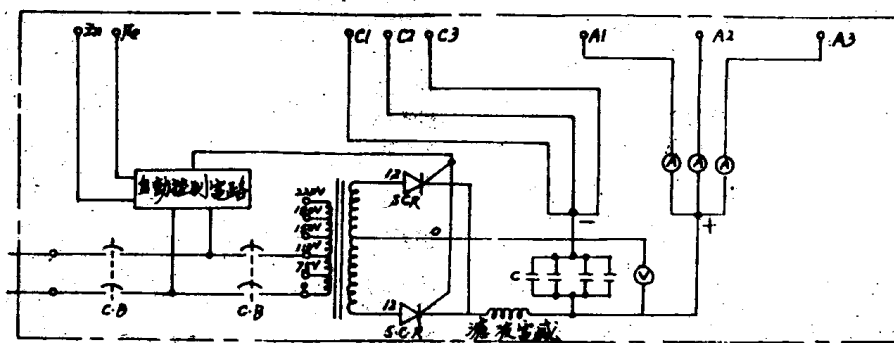


圖24. 主電路圖

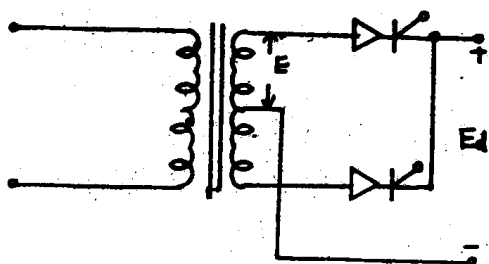


圖22. 中間抽頭之全波整流

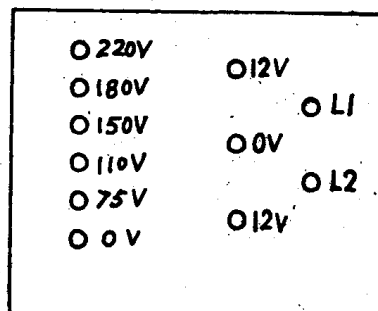


圖23. 電源變壓器之端子符號

5-2. 控制電路

控制電路可從整面之切換開關 (Change Over Switch) 來選擇「手動」或「自動」。當選擇「手動」時，控制電路上的功能是可利用設置於整面的微調可變電阻 (Potential meter) 來調整閘流體之觸發角度，藉以控制防蝕電流之大小。若選擇「自動」時，則能依據結構物之電位及環境之條件，完全自動控制防蝕電流之大小而使結構物之防蝕電位經常保持在所希望之設定值。

本控制電路是屬閉路控制系統 (Closed-loop Control System)，亦稱之為回饋控制系統 (feed-back control system)，基本構成如圖 24 所示，其中控制量 (controlled variable)、操作量 (manipulated variable) 分別指防蝕電位及防蝕電流而言，在設計上閘流體之激發角度決定於回饋與設定值間之偏差，激發角度越小，防蝕電流就越大。換言之，二者之間有了偏差，防蝕電流就由於激發角度之變化而不斷地被修正，直到二者一致為止。

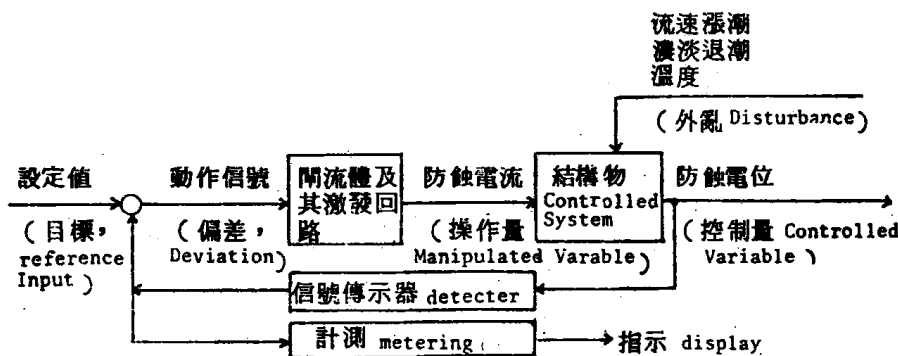


圖 24 回饋控制系統

圖 25 為整個控制電路之方塊圖。為力求控制上的精確及可靠，從信號傳示器來之信號，除用同軸電纜外，還接有 DC/DC 轉換器 (Transducer) 以達到阻抗隔離，突波防護，雜訊消除之目的。同軸電纜最大之功能雖然是消除雜訊，但亦可避免長久浸於海水之中，水份滲透到內部導體部份而造成信號之失真。

除了監視電壓，電流用之數位式電表之外，還裝有一臺可設定電表 (Setting meter)，在此電表之中心處設有一個三點式之切換開關，左右二側各有一個可微調電阻。將切換開關切換到左邊位置時，可利用左側之微調電阻設定所要的過保護電位值，其操作方法是一邊旋轉微調電阻一邊目視顯示器 (display) 之顯示值直到顯示值為我們所要之電壓值為止。將切換開關切換到中間位置時，顯示器

之顯示值則為結構物之真正防蝕電位。若切換到右邊時與上述之左方之情形完全相同，唯所設定的是不足保護電位值。

5-3 配管與配線

核能電廠內的一切設備都必須充分考慮到安全問題之故。本系統所有之配線均埋置於金屬管之內。陽極則裝設在 $4'' \phi$ 之塑膠管內，套封之後而浸於海水之中，在塑膠管上取適當間隔鑽以 $1'' \phi$ 之圓孔以釋放防蝕電流。塑膠管共有三支，每支均安裝有三支陽極。同時塑膠管之上端固定一個引線盒 (Pulling Case) 用以接續欲引至陽極之導線，各引線盒再分別配金屬管到引線箱 (Pulling Box)。圖 26、圖 27 分別為引線盒及引線箱之構造。

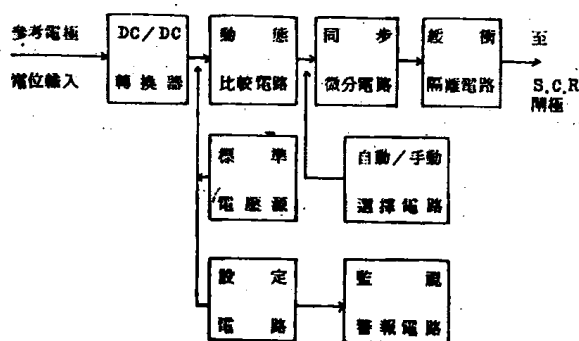


圖 25 控制電路方塊圖



圖 26 引線盒

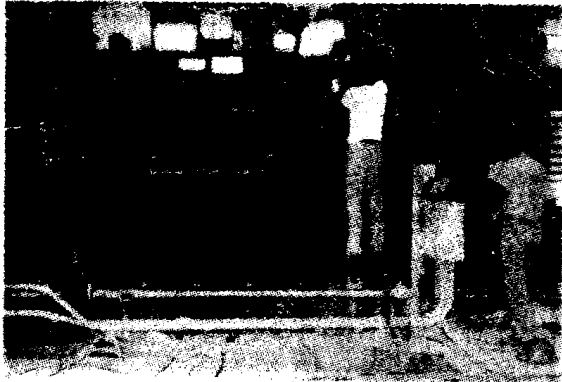


圖27. 引線箱



圖28. 接線箱

為了配合現場的施工，在主回路配電箱與引線箱之間，特別設置了一個接線箱 (Connection Box) 如圖 28 所示。由於旋轉欄污棚內裝有九支陽極之故，接線箱內把分成三路之正極再細分成九個分路，且各分路均串上監視電流用的分流器 (Shunt)。

接線箱內之分流器利用錳銅線自製而成，錳銅線是錳約 12%、鎳約 4%，其餘則為銅的一種合金，其最大的

優點是電阻溫度係數非常的小，約為 $(3\sim10)\times10^{-6}$ 左右，可以說它的電阻值幾乎不受溫度之影響。電阻係數值則在 $40\sim50\mu\Omega\cdot cm$ 左右，圖 29 為錳銅線分流器之外形，是屬於一種四端子型的低電阻。

整個配線與配管系統如圖 30 所示。

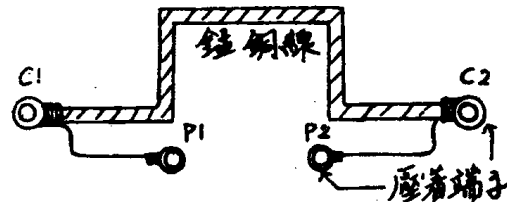


圖29. 錳銅線分流器

5-4. 本電路系統設計功能之特徵

- (1) 動態式控制，隨時比較，可隨時控制防蝕電位於 $\pm 0.5\%$ 範圍內。
- (2) 因動態反應迅速，適用於防蝕電流密度瞬變之場所。
- (3) 具手調方式強迫極化之功能，可減少設計容量。
- (4) 防蝕電位可依不同程度的需要，作適當之調整。
- (5) 被保護物之電位與參考電極間之電位差，其輸入部分經高阻抗隔離，防止雜訊干擾及突波侵襲，完全不影響參考電極測值。
- (6) 閘流體控制，避免過保護或保護不足，並節省電力。
- (7) 使用 IC 電路不易損壞，穩定性高。

6. 防蝕系統竣工後之試運轉情形

本防蝕系統經過周詳計劃之後，完成設計，提出設計書，由電力研究所提供詳細資料，核校處製圖，核三施工處施工。電源控制迴路部份則由電力研究所製作提供，按裝之後實施通電極化試運轉。

當啓用電源通電後，信號傳示器傳來結構體與鋅參考電極的電位差，此電位差與防蝕電位設定值比較，而輸出所需要的電流值；此時由於結構體尚未受到保護，所需的防蝕電流值較大，全力輸出 48A，持續此電流約 2 小時，極化電位緩慢下降，接近預先設定值，同時輸出電流也逐漸減小。經 3 小時後，極化電位已降至設定值，防蝕電流保持在 20A 左右。自此以後，防蝕電位保持不變，而防蝕電流依然緩慢減小，此時結構體表面慢慢生成極化產物。試運轉極化狀況，如圖 31 所示。

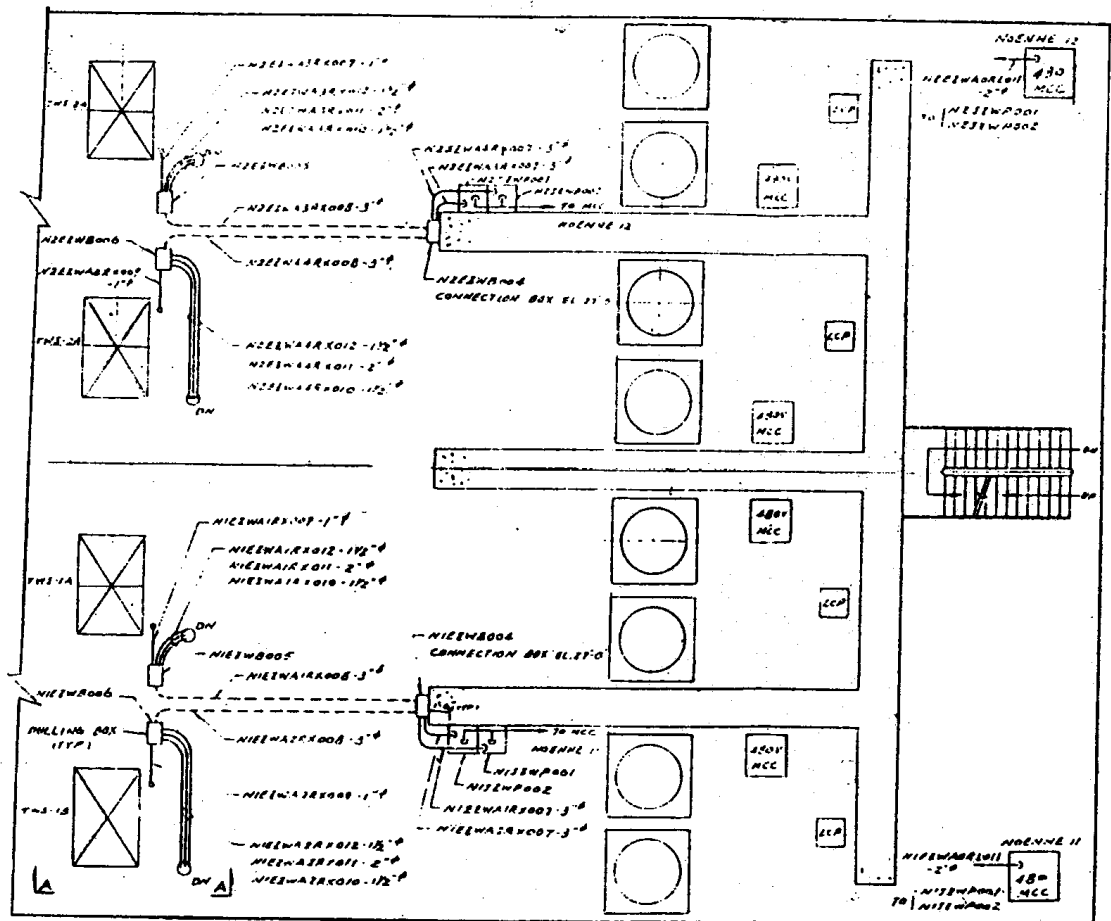


圖30. 配管與線配系統圖

迴轉欄污柵因雜物堵塞，阻止水流時，需要迴轉清洗，此時原先在海水中接受電流保護的結構體迴轉到空氣中，原先在空氣中尚未受保護的金屬，則轉入海水中受保護，同時欄污柵轉動時，激動水流，為保持防蝕電位於設定值，此兩種因素構成防蝕電流需求量的增加。欄污柵迴轉五分鐘內，供應電流由 15A 提高到 45A，如圖 32 所示。當欄污柵停止迴轉後，電流即緩慢減弱。整個過程中，所觀察的防蝕電位始終保持在設定值。

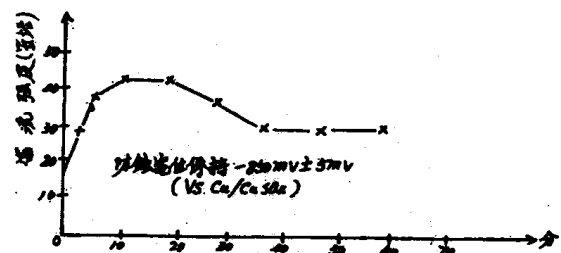


圖32. 欄污柵開始迴轉時為保持防蝕效果，電源控制回路及時反應，保持固定防蝕電位

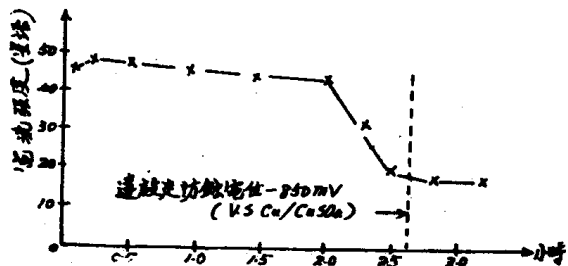


圖31. 迴轉欄污柵未轉動時自動控制電源裝置開始通電極化與時間的關係

7. 陰極防蝕系統運轉效果之檢討

7-1 防蝕效果偵測結果

以銅—硫酸銅參考電極從結構體的頂端放入結構體的四周及中間，外接高內阻抗 (10^{10} 歐姆以上) 電錶，測量結構體不同深度及四周角落的防蝕電位，發現水面下方 5 公尺的範圍，防蝕電位都合乎設定值的要求，底部結構體有保護不足的現象。經調整陽極位置後，約經半個月，再

度測量各點的防蝕電位，分布範圍在 $-850 \sim -900 \text{ mV}$ (Vs. Cu/CuSO_4) 之間，可見已達到完全防蝕效果⁽³⁾。

7-2 防蝕效果的評估基準

一般的防蝕效果評估，可經由所測得的防蝕電位值據以判斷⁽¹⁾⁽²⁾。在中性的環境中，鋼鐵的防蝕電位約在 -850 mV (Vs. Cu/CuSO_4)，銅及銅合金則為 -430 mV ，不銹鋼與鉛合金與鋼鐵相同。在有硫酸鹽還原細菌繁殖的場所，鋼鐵的防蝕電位在 -950 mV ，即可達成防蝕目標。

8. 結 論

為防止核三廠緊急供水系統迴轉欄污柵之腐蝕，經電力研究所與核能技術處及核三施工處通力合作，設計自動控制式外加電流陰極防蝕系統，每機組裝設九支鍍白金鈦電極，進行防蝕工作，經半年試運轉的結果，證實達到預期之防之蝕效果，綜合結論如下：

(1) 核三廠冷卻海水雖未受工業污染，然迴轉欄污柵由四種不同金屬材料所構成。形成流電腐蝕效應 (Galvanic Corrosion Effect)，使電位最位之鋼鐵結構材料，發生銹蝕凹陷剝落現象。

(2) 經分析比較使用犧牲陽極法與外加電流法的優劣結果，證實使用外加電流法較經濟有效，且使用年限高達五倍以上。

(3) 本研究採用自動控制式外加電流防蝕系統，使用動態式 SCR 自動控制電路，使受保護的防蝕電位可隨時視實際需要而設定，不受腐蝕環境的變化或欄污柵是否迴轉，而有所改變；不僅可防止過保護不良現象，同時可以避免電力的浪費，而節省能源。

(4) 裝置信號傳示器，使參考電極與與被保護體之間的電位差，能準確的測出，避免 IR 電位降的干擾。

(5) 每機組使用鍍白金鈦陽極九支，均勻分布於結構體的內外，進行放電流給結構體，達到全面防蝕的目標。

9. 致 謝

本研究承蒙核能技術處機械課的支援，並蒙核三施工處電務課的通力合作，得以順利完成，謹此致謝。

參 考 資 料

1. RJCHARD M. VENNETT, et al, Design of the Cathodic Protection System for Conoco's North Sea Murchison Platform, Materials Performance, (February 22-30, 1983).
2. 花田政明「電氣防蝕法の手順と問題點」，防蝕技術，Vol. 19, No. 2 1970, p. 74, p. 77.
3. 葉江榮等「深澳電廠冷卻海水進水口鋼板槽陰極防蝕之研究」，臺灣電力公司電力研究所編號 8303(1983)
4. M. A. WARNE and P. C. S. HAYFIELD: Platinized Titanium Anodes for Use in Cathodic Protection, Materials Performance, March, 1976.
5. Recommended Practice Corrosion Control of steel, Fixed offshore Platforms Associated with Petroleum production: NACE Standard RP-01-76 (1983 Revision) Item No. 53105.
6. 本篇轉載於台電工程月刊第 443 期 74、7。