



離島地區太陽能熱水系統使用水質影響評估

財團法人成大研究發展基金會助理研究員/范愷軍
國立成功大學航空太空工程系教授/張克勤

關鍵字：太陽能熱水系統、結垢、侵蝕、自來水、地下水

摘要

在台灣，影響太陽能熱水系統使用壽命的主要原因，除了颱風吹襲損害外，水質影響是另一重要因素，而在沿海及離島地區水質侵蝕問題更是顯著。水質的問題可分為結垢和侵蝕二種，特別是後者對於熱水系統的破壞尤其嚴重。考量到如何有效改善或預防離島地區太陽能熱水系統因水質影響進而產生結垢或侵蝕之情況，本文選取了簡單且容易被應用之Langelier Saturation Index (LSI)、Ryznar Stability Index (RSI)、Puckorius Scaling Index (PSI)及Larson-Skold Corrosive Index (LSCI)指數，進行水質結垢及侵蝕傾向評估。其中LSI、RSI及PSI指數主要為評估水中離子結垢能力，同時以結垢能力判斷金屬構件被侵蝕的可能性；而LSCI指數，為估算水中氯離子及硫酸根離子濃度總和對應鹼度之比值，探討金屬構件受到水質侵蝕的傾向大小。透過本文離島地區太陽能熱水系統使用水源之水質結垢及侵蝕傾向評估研究，所得成果可提供離島地區在太陽能熱水系統安裝規劃及材質選用時之參考。

經由本文結垢及侵蝕傾向指數評估研究結果顯示，澎湖縣自來水及地下水雖有結垢可能性，但因水中氯鹽濃度高，太陽

能熱水系統受侵蝕影響風險將高於結垢問題；金門自來水及地下水水質評估結果，顯示有侵蝕傾向；而在連江縣自來水水質評估顯示亦有侵蝕傾向。根據調查顯示離島地區太陽能熱水系統目前多採用銅及304不鏽鋼材質，而離島地區自來水及地下水氯鹽濃度普遍高於使用材質在熱水溫度達到80°C時之抗侵蝕能力。因此透過本文結果，建議在離島地區之太陽能熱水系統，至少需選用316不鏽鋼，或選擇抗侵蝕能力更加之材質，才能有效減緩或抵抗金屬構件受侵蝕之問題。

一、前言

在台灣，因全年日照量充沛，極為適合安裝太陽能熱水系統(熱水器)。同時政府為了鼓勵國人安裝太陽能熱水系統，先後在民國75年~80年、89年起至今實施補助獎勵作業，根據財團法人成大研究發展基金會(太陽能熱水系統推廣獎勵受託機構)2012年資料顯示(財團法人成大研究發展基金會，2012^[1])，台灣的太陽能熱水系統安裝密度高居世界第五，就普及程度來看，目前平均每100個登記戶口，就有3.6個家庭選擇使用太陽能熱水系統。

太陽能的使用主要分為光電和光熱兩大部分，其中太陽能熱水系統是目前太陽



能熱運用最成功的範例，其原理為利用集熱器(如平板式或真空管式)，將太陽輻射能轉換成熱能，再將熱能運用於水的加熱作用(張克勤等人，2010)^[2]。國內常見太陽

能熱水系統以加熱循環方式可分為：自然循環式及強制式，此兩種加熱循環系統之示意圖可見圖1，(成大能源研究中心網頁，2009)^[3]。

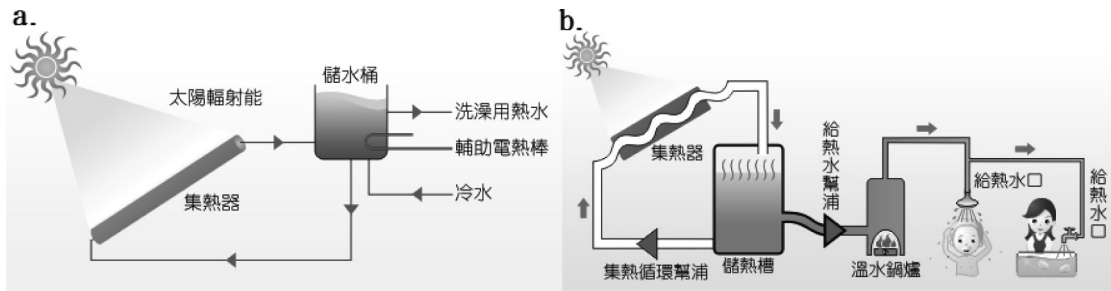


圖1 a.為自然循環式；b.為強制式

太陽能熱水系統的構造主要是由集熱器、儲水桶、管路和控制系統等四部份構成。

集熱器為太陽能熱水系統的心臟，主要功能是将太陽能輻射能轉換成熱能，再傳給循環工作流體，其組成包含吸收板、吸收管、面蓋及外框。吸收板一般的材料為銅板，鋁板或不鏽鋼板，也有使用有機聚合體製成者。吸收管多為銅管或不鏽鋼管製成，內部直徑平均為11.7 mm(外徑12.7 mm)，管內流體一般都直接用水作為工作流體，但亦有使用其它流體作為傳熱媒介者，內部流體之平均自然循環流量為0.02 kg/s.m²(流速3.38 cm/s)，若為強制循環則流量介於0.06~0.1 kg/s.m²(流速10.14~16.9 cm/s)之間。因此，熱水在太陽能熱水系統滯留時間遠比一般瓦斯熱水器內部熱水滯留時間長。

一般儲水桶多使用不鏽鋼製成，分內桶及外桶兩部分，內桶為熱水儲存處，外桶為保護作用，且在內、外桶之間填塞隔熱材料進行保溫作用。一般可分立式、臥式兩種，其結構大致相同，在台灣夏季時，系統內部水溫最高可達攝氏70~80℃，高於一般家用瓦斯熱水器使用熱水溫度。

而連接管路的配置，依不同裝設環境、系統及需求而異，較常用的材質為銅管與PB管。同時集熱器與儲水槽之間的管

路與往浴室之管路，必須要有保溫功能，常需要外覆絕緣材料。

控制系統包括溫度控制及時間控制，可依所選定時間控制儲水槽內水溫。大部分家用太陽能熱水系統如單獨使用時，都裝有輔助電熱器，可在日射量不足時，輔助加熱達到所需溫度。在太陽能熱水系統內部會接觸工作流體(水)的部分包含：集熱器之吸收管，儲水桶及連接管路。

二、太陽能熱水系統使用水質影響

在台灣，影響太陽能熱水系統使用壽命的主要原因，除了颱風吹襲損害外，水質影響是另一重要因素(李清安等人，2004^[4]；張克勤等人，2010)，而在沿海及離島地區水質侵蝕問題更是顯著。水質的問題可分為結垢和侵蝕二種，特別是後者對於熱水系統的破壞尤其嚴重。一般正常使用之國內太陽能熱水系統內部工作流體溫度最高可達攝氏70~80℃，當流體溫度(初始為環境溫度)隨著太陽熱能加熱升高，結垢及侵蝕影響程度也會隨之升高，系統內部流體自然循環時流速僅3.38 cm/s，也是增加系統結垢及侵蝕風險之重要因子。圖2為一般太陽能熱水系統常見結垢及侵蝕現象。在圖2中，a部分為管路碳酸鈣結垢堵塞造成系統無法正常運作；b部分為儲水桶桶蓋焊接處附近有孔蝕現象，其材質為不鏽鋼304，量測最大孔蝕孔徑大於1 mm；c部分為集熱板



管路(不鏽鋼304)焊接處，因侵蝕漏水嚴重

進而吸收板(鋁)有大量結垢現象。

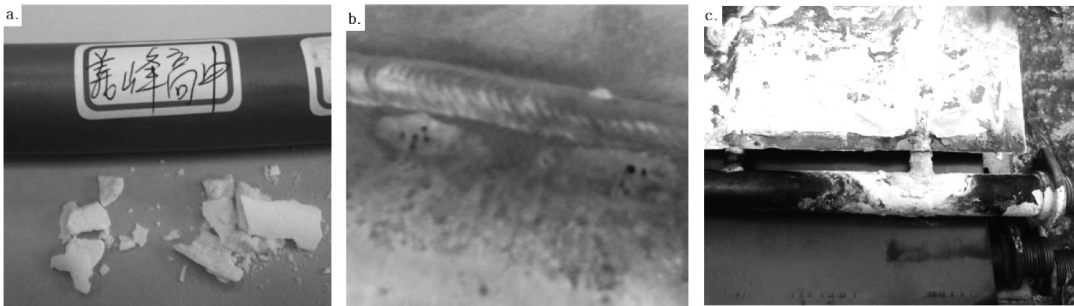


圖2 a.為管路結垢(碳酸鈣)；b.為儲水桶焊縫旁孔蝕；c.為集熱板侵蝕結垢

2.1 水質與結垢關聯

結垢問題對於太陽能熱水系統的影響雖不似侵蝕來得快且明顯，但日積月累會讓降低熱傳效率，甚至於嚴重到阻塞管路內水流的行進，無形中縮短使用年限。已知結垢形成主要原因為溶解物之過飽和現象，當水中鹽類在特定環境下溶解度超過極限進而發生沉澱之現象，而微垢之生成可隔絕管內壁與流體直接接觸，對侵蝕有一定預防及保護能力，但若結垢現象嚴重則會影響系統熱傳遞效能及阻塞流體行進通道。根據Seneviratne的報告(Seneviratne, 2007^[5])指出次要影響結垢形成之相關因子包含：流體溫度的上升、水化學的變化、系統壓力變化，流速改變及流體行進通道之幾何形狀。

平日用水來源中常見結垢物有：碳酸鈣 CaCO_3 (calcium carbonate)，磷酸鈣 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (calcium phosphate)，硫酸鈣 CaSO_4 (calcium sulphate)和矽酸鹽 SiO_4^{4-} (silicates)等，同時此類結垢物在水中之溶解度會隨著溫度之升高而減少。在台灣太陽能熱水系統使用水源中(自來水或地下水)常見結垢物為碳酸鈣(CaCO_3)，例如圖2a中之結垢樣本，透過X光繞射儀(X-ray Diffraction, XRD)分析獲得其礦物相為文石(主要成分為碳酸鈣)。

2.2 水質與侵蝕關聯

結垢問題可透過水質過濾或除垢技術進行改善，但侵蝕問題為不可逆之過程，

目前為太陽能熱水系統推廣最大瓶頸。根據以往的調查顯示(李清安等人, 2004; 張克勤等人, 2010)，國內安裝太陽能熱水系統時，若使用地下水做為熱水系統的水源時，系統受侵蝕破壞問題(孔蝕)比起使用自來水來的相對常見，且主要集中在本島沿海地區及離島(包含澎湖、金門及連江縣)等地，尤其離島地區之自來水或地下水中氯鹽濃度普遍高於本島，系統受侵蝕情況比本島更為突出，因此離島地區在太陽能熱水系統材質選擇上，會建議挑選抵抗氯鹽侵蝕較強的構件。常見應用於太陽能熱水系統之金屬構件材質有：不鏽鋼、銅及鋁等，以下簡單描述此三種金屬與水質侵蝕關聯：

(1) 不鏽鋼

現今太陽能熱水系統之多數儲水桶及部分集熱板是使用不鏽鋼材質，不鏽鋼是鉻(Cr)和鎳(Ni)含量較高之合金，不鏽鋼的耐侵蝕性是由於鋼中有足夠量的鉻，在表面成一層薄又致密且具有附著力的鈍化膜(氧化鉻， Cr_2O_3)，當不鏽鋼的鈍化膜受到侵蝕破壞時，不鏽鋼就會發生均勻侵蝕或局部侵蝕。透過本文調查太陽能熱水系統受侵蝕情況，發現侵蝕破壞問題主要為儲水桶之焊縫附近孔蝕現象(圖二b)，其次為吸接管焊接處侵蝕情況(圖二c)。

在2011年Parrott and Pitts 研究報告所述(Parrott and Pitts, 2011^[6])，不鏽鋼焊接後，在由高溫緩慢冷卻過程，會使得焊縫旁銹



與碳形成碳化鉻(chromium carbide)，進而造成焊縫旁貧鉻，使得因鉻形成的鈍化膜更容易受到侵蝕破壞，形成明顯的局部侵蝕，而氯離子的存在會加速其侵蝕速度。在不鏽鋼儲水桶上發現的孔蝕和應力侵蝕應與溶液中氯離子有強烈的關聯存在，其侵蝕機制為電化學(氧化還原反應)作用，氯離子的存在對不鏽鋼的鈍態有直接的破壞作用，造成孔蝕(圖3，Kopeliovich, 2012^[7])或局部表面位置受侵蝕作用加上應力作用而受到破壞(應力侵蝕)。

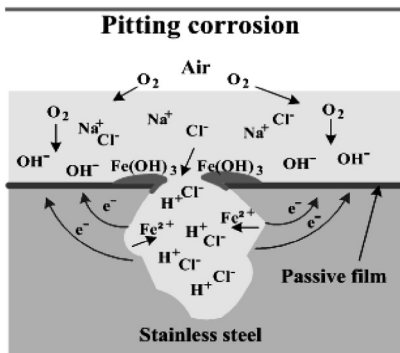


圖3 孔蝕機制(Kopeliovich, Dmitri, 2012)。

表1為黃新平及黃春梅於2006年(黃新平及黃春梅, 2006^[8])整理之304與316不鏽鋼及含鉻20、鎳18、鉬6的合金，在不同溫度情況下，對於氯離子濃度之侵蝕界限，其環境設定為在溶液pH值為7。根據表1中所述，在台灣，太陽能熱水系統最高溫度大約70~80 °C，在假設使用水源pH值為7條件下，以不鏽鋼作為構件時，建議使用水源中氯離子濃度在35 mg/L以下可選用304不鏽鋼；氯離子濃度介於35至130 mg/L則選用316不鏽鋼；如氯離子濃度高於130 mg/L者，建議選用含鉻、鎳及鉬元素比率較高之合金或鈦合金。

(2) 銅和銅合金

太陽能熱水系統中，銅常應用為吸收板或吸收管之材質，尤其以銅管作為吸收管應用最常見。

根據羅正貴及聞荻江在2005年研究指出(羅正貴及聞荻江, 2005^[9])：銅在淡水中

表1 氯離子濃度對不同材料之侵蝕界限

溫度 °C	氯離子含量 mg/L (ppm) 溶液, pH值 = 7 (min)					
	304不鏽鋼		316不鏽鋼		合金20、18、6	
	小於以下值不侵蝕	大於以下值肯定侵蝕	小於以下值不侵蝕	大於以下值肯定侵蝕	小於以下值不侵蝕	大於以下值肯定侵蝕
100	12.0	21.0	50.0	85.0	450.0	740.0
95	14.4	24.0	55.0	95.0	534.6	893.3
90	15.7	26.7	62.0	105.0	668.4	1100.0
85	17.7	31.0	72.0	120.0	855.1	1400.0
80	20.5	35.0	81.0	130.0	1080.0	1870.7
75	23.3	41.0	95.0	160.0	1336.6	2400.0
70	27.0	47.2	105.0	190.0	1700.0	3100.0
65	32.0	54.6	115.0	210.0	2300.0	4100.0
60	37.5	64.7	140.0	240.0	3050.0	5300.0
55	43.4	75.0	175.0	300.0	4070.0	7000.0
50	52.0	86.0	201.0	330.0	5400.0	9300.0
45	61.0	103.0	250.0	410.0	7800.0	13000.0
40	71.3	120.0	290.0	505.0	10000.0	18500.0
35	85.0	150.0	340.0	615.0	14000.0	29000.0
30	103.0	180.0	410.0	750.0	20000.0	42756.3
25	125.9	210.0	540.0	950.0	34000.0	70000.0
20	150.0	250.0	650.0	1150.0	**	**
15	190.0	320.0	830.0	1600.0	**	**
10	228.0	420.0	1050.0	2050.0	**	**

*: 合金20、18、6為含鉻20、鎳18、鉬6的合金，相當於ASTM的S31254和Avesta Sheffield的254SMO。(黃新平及黃春梅, 2006)

有較高的耐侵蝕性，在工業熱交換水系統中，隨二氧化碳、溶解氧含量的增加或pH值的減小，銅的侵蝕速率增加，而氯離子的存在會加劇銅的侵蝕現象。

銅合金材料在常被應用在冷卻水系統的熱交換器上，在銅合金表面會形成自然氧化膜(氧化亞銅, Cu₂O)，因其穩定性而能保護金屬表面的進一步氧化。但水中氯化物、硫酸鹽、pH值、總溶解固體及溶氧，會降低氧化膜保護能力而加速銅或銅合金的侵蝕情況(Gallegos et al., 2005^[10])，而添加一定比率元素(鋁，鋅，錫，鐵和鎳等)的銅合金，其侵蝕速率將低於純銅。

(3) 鋁和鋁合金



太陽能熱水系統發展早期，碳鋼、銅、不鏽鋼、鋁及鋁合金經常被作為太陽能熱水系統結構材料，而碳鋼因其耐侵蝕性較差而漸被淘汰。鋁和鋁合金因其良好的導熱能力、延展性、韌性佳及重量輕等優點，而被廣泛應用於太陽能熱水系統。鋁和鋁合金在中性溶液或接近中性溶液(pH值介於4~8之間)中容易鈍化生成鈍化膜(Al₂O₃或Al₂O₃·nH₂O組成)，使他們具有良好的耐侵蝕性。然而當溶液中含有活性陰離子，例如氯離子(Cl⁻)時，鋁和鋁合金的鈍化膜很容易被破壞，從而導致局部侵蝕，特別是點蝕(Liang and Zhang, 2006^[11])。

2.3 水質影響評估方法

考量到如何有效改善或預防太陽能熱水系統因水質影響進而有結垢或侵蝕之情況，我們可以在系統安裝前採取水樣進行水質分析，透過結垢及侵蝕指數進行水質影響評估(Langelier, 1936^[12]; Ryznar, 1944^[13]; Larson and Skold, 1958^[14]; Carrier, 1965^[15]; Puckorius, 1983^[16]; Degremont, 1991^[17]; Seneviratne, 2007; Prisyazhniuk, 2007^[18]; Gacem et al., 2012^[19])。目前國外研究常用結垢及侵蝕指數包含：Langelier Saturation Index (LSI)、Ryznar Stability Index (RSI)、Puckorius Scaling Index (PSI)及Larson-Skold Corrosive Index (LSCI)等。其中LSI、RSI及PSI是以估算碳酸鈣飽和度來評估水質之結垢與侵蝕傾向；而LSCI指數是透過氯離子及硫酸鹽濃度兩者濃度總和和鹼度之比值，來評估冷卻水對低碳鋼及鋼之侵蝕能力。

本文應用結垢及侵蝕指數探討國內離島地區(澎湖、金門及連江縣)太陽能熱水系統使用水源(自來水及地下水)水質之結垢及侵蝕傾向關聯，所得結果可提供安裝商及用戶在未來太陽能熱水系統安裝規劃及材質選用時參考。

三、結垢及侵蝕傾向指數介紹

在離島地區，一般正常使用之太陽能熱水系統內部工作流體溫度於夏天時最高可達攝氏70~80 °C，因此文中進行指數評估時若需考慮溶液溫度，將假設為攝氏80

°C。

3.1 LSI指數

Langelier Saturation Index (LSI)為Langelier於1936年首先提出用於估算水中碳酸鈣飽和指數的方法(Langelier, 1936)，可做為評估水中碳酸鈣結垢能力及侵蝕傾向之用。美國Carrier空調公司於1965年將LSI指數值作出完善的定義，同時已被廣泛的應用(Rafferty, 2000)^[20]，詳見表2 (Carrier, 1965)。LSI指數對於侵蝕傾向評估結果可作為參考，但不是絕對，例如侵蝕和溶液中溶氧及氯離子濃度有直接關聯，但LSI指數估算時並未使用到溶氧及氯離子濃度等參數。De Zuane 在其Handbook of drinking water quality一書中提出Langelier Saturation Index (LSI)之簡化經驗公式如下(De Zuane, J., 1997)^[21]：

$$LSI = pH - pH_S \quad (1)$$

pH為溶液中測的氫離子活度；pH_S為飽和碳酸鈣溶液中的氫離子活度。

$$pH_S = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (2)$$

其中：

A = (log₁₀(TDS) - 1)/10；TDS為mg/L。

B = (-13.12 log(C + 273)) + 34.55；溫度為°C。

C = (log₁₀(硬度)) - 0.4；硬度為mg/L as CaCO₃。

D = log(鹼度)；鹼度為mg/L as CaCO₃。

表2 LSI指數定義

Langelier Saturation Index, LSI (Carrier, 1965)	
LSI 值	意義
2.0	有結垢現象，無侵蝕。
0.5	輕微的結垢和侵蝕現象。
0.0	碳酸鈣溶解度處於剛好飽和狀態，有孔蝕之可能發生。
-0.5	輕微侵蝕現象，無結垢產生。
-2.0	有嚴重侵蝕現象。

3.2 RSI指數

Ryznar Stability Index (RSI)為Ryznar於1944年以水中碳酸鈣飽和度為基礎，針對碳酸鈣結垢程度完成的指數估算方法(Ryznar, 1944)，其評估原理近似LSI指數但



所得結果比LSI指數較為靈敏，可做為評估水中碳酸鈣結垢能力及侵蝕傾向之用。美國Carrier空調公司於1965年將RSI指數值作出完善的定義，詳見表3 (Carrier, 1965)。RSI指數估算方程式如下：

$$RSI = 2(pH_S) - pH \quad (3)$$

pH為溶液中測的氫離子活度；pH_S為飽和碳酸鈣溶液中的氫離子活度，估算方法同方程式(2)。

表3 RSI指數定義

Ryznar Stability Index (Carrier, 1965)	
RSI 值	意義
4.0 - 5.0	嚴重結垢現象。
5.0 - 6.0	輕微的結垢現象。
6.0 - 7.0	可能有些微結垢和侵蝕發生。
7.0 - 7.5	輕微侵蝕現象。
7.5 - 9.0	有嚴重侵蝕現象。
> 9.0	侵蝕嚴重到失去控制。

3.3 PSI指數

Puckorius Scaling Index (PSI) 為Puckorius於1983年，修改RSI指數評估方法，認為在評估溶液的侵蝕與結垢傾向時，需加入水的緩衝能力及碳酸鈣沉澱最大數量(Puckorius, 1983)，因此估算使用的pH值應該是溶液中平衡的氫離子活度(pH_{eq})，而非儀器測得的氫離子活度(pH)。當估算所得PSI指數值小於6時，代表溶液內碳酸鈣溶解度過飽和有結垢傾向，隨著值越低則結垢越嚴重；當PSI值等於6時，代表溶液達到穩定狀態；當PSI值遠大於6時，值越大，侵蝕情況越顯著。

$$PSI = 2(pH_S) - pH_{eq} \quad (4)$$

pH_{eq}為溶液中平衡的氫離子活度；pH_S為飽和碳酸鈣溶液中的氫離子活度，估算方法同方程式(2)。且pH_{eq} = 1.465 · log₁₀[鹼度] + 4.54，為平衡的氫離子濃度，非測得濃度。

3.4 LSCI指數

侵蝕之定義是指當金屬化合物(材料)，因受到環境影響而降低結構強度造成破壞或損毀之現象。LSCI指數為Larson及Skold收集美國五大湖水域水質資料整理所得之一簡易侵蝕評估方法(Larson and Skold,

1958)，雖被認為未考慮到例如鹼度或緩衝能力等影響侵蝕行為為因子，且被質疑其在其他地區之適用性，但直至今目前尚是被廣泛提到之簡易評估方法(Seneviratne, 2007; Prisyazhniuk, 2007; Ghali, 2010^[22])。2010年Ghali在其專書內也提到，在冷卻水對鋁合金的孔蝕問題判斷時，LSCI指數可作為侵蝕可能性評估使用(Ghali, 2010)。

太陽能熱水系統主要結構材質銅、鋁及不鏽鋼等，其侵蝕問題與水中陰離子(如氯離子及硫酸鹽等)有明顯關聯，因此本文使用LSCI指數作為侵蝕評估方法有相當之參考性。

LSCI指數主要作為在常溫下，評估冷卻水對低碳鋼及鋼之侵蝕能力，而太陽能熱水系統因使用最高溫度會達到攝氏70~80°C，LSCI估算使用參數為常溫下水質數據，因此建議在未來應用指數結果時採取更高標準的方式來參考。評估方程式如下(Larson and Skold, 1958)：

$$LSCI = \frac{C_{Cl^-} + C_{SO_4^{2-}}}{C_{HCO_3^-} + C_{CO_3^{2-}}} \quad (5)$$

其中：C代表濃度mg/L，Cl⁻為氯離子、SO₄²⁻為硫酸根離子、HCO₃⁻為碳酸氫根離子、CO₃²⁻為碳酸根離子。

LSCI值數定義如下：當LSCI小於0.8時，代表氯離子和硫酸鹽不會影響金屬表面自然生成之保護膜；LSCI值介於0.8~1.2之間時，代表氯離子和硫酸鹽會阻礙金屬表面保護膜生成，可觀測到金屬侵蝕之發生；當LSCI大於1.2，隨著評估指數增加，可觀測到金屬侵蝕情況之加速。

四、離島地區結垢及侵蝕傾向評估

在台灣本島地區自來水水質穩定，各項水質分析數據皆低於國內飲用水法規規定，太陽能熱水系統使用水源，除少部分是使用地下水外，因侵蝕造成之損壞案例較少見。而離島地區包含自來水及地下水水質氯離子濃度普遍偏高，太陽能熱水系統受侵蝕造成之損壞案例相對高於本島。因此本文專注於離島地區系統使用水源之水質結垢及侵蝕傾向評估工作，選取自民



國99年至101年水質資料進行評估工作，研究結果可作為國內離島地區太陽能熱水系統安裝規劃及材質選用時之參考依據。

研究使用之水質結垢及侵蝕傾向評估指數中，LSI、RSI及PSI指數主要為評估水中離子結垢能力，同時以結垢能力判斷金屬構件被侵蝕的可能性；而LSCI指數，為估算水中氯離子及硫酸根離子濃度總和對應鹼度之比值，探討金屬構件受到水質侵蝕的傾向大小。當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況將趨於明顯。

4.1 澎湖縣

表4為使用台灣自來水事業處2010及2011年公告澎湖各淨水場自來水水質年度平均數據(台灣自來水公司99及100年度水質年報^[26,27])，進行結垢及侵蝕傾向評估之結果，以各淨水場為單位，在此未列出台灣自來水事業處水值原始數據。

根據表4台灣自來水事業處2010及2011

年公告澎湖各淨水場自來水水質年度平均數據之結垢及侵蝕傾向評估結果。除成功淨水場99年度LSI、RSI、PSI指數與LSCI指數結論相近，自來水水質皆是有較高偏於侵蝕傾向之外。99及100年度其他淨水場LSI及RSI指數顯示偏於結垢；PSI指數顯示有輕微侵蝕傾向；而LSCI指數大多遠高於1.2，意謂自來水水質有較高侵蝕問題。

表4結果會有所矛盾之原因，本文認為LSI、RSI、PSI指數是以碳酸鈣飽和度觀念來評估溶液中結垢可能性及因結垢而具有的一定防侵蝕能力。其中PSI指數在估算時，除考慮到碳酸鈣飽和度之外，尚有考慮到水中真正溶液的緩衝能力，使用的pH值為溶液中平衡的氫離子活度，而非儀器測得之pH值，使得PSI指數結果在此比LSI及RSI更接近實際現實結果。而LSCI指數是以氯鹽及硫酸鹽濃度之總和與鹼度之比值，有考慮到氯鹽及硫酸鹽對材料之侵蝕問題，及鹼度與結垢之關聯。

表4 台灣自來水事業處澎湖水質數據結垢及侵蝕傾向評估

品項/淨水場	成功淨水場		望安淨水場		七美淨水場		西嶼淨水場	
	99年度	100年度	99年度	100年度	99年度	100年度	99年度	100年度
LSI	-0.71	0.15	0.27	1.01	1.06	0.89	0.17	0.36
RSI	7.95	7.17	6.70	5.96	5.47	5.79	7.17	6.91
PSI	7.56	7.49	6.69	6.79	5.47	5.87	7.10	6.92
LSCI	5.34	2.60	4.00	4.47	2.47	1.77	1.83	1.84
品項/淨水場	吉貝淨水場		白沙淨水場		林投加壓站		馬公海淡廠	
	99年度	100年度	99年度	100年度	99年度	100年度	99年度	100年度
LSI	1.47	1.61	0.04	1.28	0.56	0.77	0.44	0.72
RSI	5.39	5.20	6.79	5.16	7.00	6.68	7.19	6.69
PSI	6.10	6.06	6.06	4.81	8.23	7.84	8.40	7.68
LSCI	2.56	3.12	1.54	0.98	3.65	2.41	3.71	2.15

注：當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況趨於明顯。

表5為成功大學選取澎湖太陽能熱水系統使用水源為自來水之用戶進行水質採樣分析，並進行結垢及侵蝕傾向評估之結果，在此以各鄉鎮為單位。因成功大學在2010~2012年期間水質分析項目未進行硫酸鹽分析，故進行LSCI指數評估時未考慮硫酸鹽濃度，所得LSCI指數為低估值，未來參考應用時需放大評估結果。

由表5中LSI及RSI指數顯示偏於結垢；PSI指數顯示有輕微侵蝕傾向；而白沙鄉、湖西鄉、西嶼鄉及馬公市LSCI指數顯示接近或高於1.2，有較高侵蝕問題。評估結果與表4近似，再根據表5氯鹽分析結果，氯鹽濃度普遍高於130 mg/L，因此本文推論在澎湖縣使用自來水做為太陽能熱水系統水源時，將有較高侵蝕傾向之疑慮。



表5 成功大學澎湖自來水水質數據結垢及侵蝕傾向評估

採水日期	990909	1000712	1010215	1010424	990330	1010424	1010424	1011002
品項/鄉鎮	白沙鄉	白沙鄉	湖西鄉	湖西鄉	西嶼鄉	西嶼鄉	馬公市	馬公市
總鹼度,mg/L	261	280	20	54	135	107	52	20
pH值	8.5	8.29	7.6	8.26	8.24	6.91	8.02	7.41
氯鹽,mg/L	297	328	95.2	129	239	178	134	147
硫酸鹽,mg/L	**	**	**	**	**	**	**	**
總溶解固體量,mg/L	909	969	206	308	539	522	341	328
總硬度,mg/L	213	203	37.3	62.9	19.4	177	213	43.6
HCO ₃ ⁻ ,mg/L	253.31	274.86	19.91	53.00	132.74	106.91	51.44	19.94
CO ₃ ²⁻ ,mg/L	7.53	5.04	0.07	0.91	2.17	0.08	0.51	0.05
LSI	2.23	2.02	-0.48	0.82	0.66	0.19	1.09	-0.62
RSI	4.05	4.24	8.56	6.62	6.92	6.53	5.84	8.66
PSI	4.47	4.41	9.72	7.80	7.50	5.92	6.81	9.62
LSCI	1.14	1.17	4.76	2.39	1.77	1.66	2.58	7.35

注：**代表未進行分析此項目；當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況趨於明顯。

表6為成功大學2010~2012年期間，選取澎湖太陽能熱水系統使用水源為地下水之用戶進行水質採樣分析，並進行結垢及侵蝕傾向評估之結果。分析區域包含白沙鄉及湖西鄉兩地，LSI、RSI、PSI指數評估結果，顯示兩地地下水水質有結垢傾向；

而LSCI評估時未包含硫酸鹽濃度，所得結果會有所低估，根據LSCI評估結果顯示地下水有稍高侵蝕傾向。兩地地下水中氯鹽濃度皆高於130 mg/L，因此本文推論在澎湖縣使用地下水做為太陽能熱水系統水源時，可能會有較高侵蝕傾向之疑慮。

表6 成功大學澎湖地下水水質數據結垢及侵蝕傾向評估

採水日期	990610	1010424	990908	1010704
品項/鄉鎮	白沙鄉	白沙鄉	湖西鄉	湖西鄉
總鹼度,mg/L	126	210	201	120
pH值	8.4	7.27	8.4	7.61
氯鹽,mg/L	270	371	171	247
硫酸鹽,mg/L	**	**	**	**
總溶解固體量,mg/L	4300	1370	833	1330
總硬度,mg/L	43.6	333	152	209
HCO ₃ ⁻ ,mg/L	122.97	209.62	196.24	119.52
CO ₃ ²⁻ ,mg/L	2.90	0.37	4.63	0.46
LSI	1.05	1.08	1.87	0.97
RSI	6.29	5.11	4.66	5.66
PSI	7.08	4.44	5.15	5.69
LSCI	2.14	1.77	0.85	2.06

注：**代表未進行分析此項目；當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況趨於明顯。



4.2 金門縣

金門縣自來水廠水質分析時，未進行鹼度及硫酸鹽分析(金門縣自來水廠，2012^[28])，而鹼度為各種結垢及侵蝕傾向評估重要參數，因此在此未使用金門縣自來水廠水質分析結果進行指數分析。表7為成功大學選取金門太陽能熱水系統使用水源為自來水之用戶進行水質採樣分析，並進行結垢及侵蝕傾向評估之結果。

表7中金沙鎮、金城鎮、金寧鄉及烈嶼鄉之LSI、RSI、PSI指數評估，顯示自來水水質有微高侵蝕傾向，與LSCI結果對照亦相近；但金湖鎮LSI、RSI、PSI指數評估，顯示自來水水質有微高結垢傾向，而LSCI結果卻顯示有較高侵蝕傾向，其原因

為金湖鎮之鹼度及硬度濃度偏高造成LSI、RSI、PSI指數偏於結垢傾向，但金湖鎮氯鹽濃度亦較高(見表7)，因此使得LSCI指數偏大，有較高侵蝕傾向。表8為成功大學選取金門太陽能熱水系統使用水源為地下水之用戶進行水質採樣分析，並進行結垢及侵蝕傾向評估之結果。根據成功大學分析結果顯示金門地下水氯鹽濃度普遍高於35 mg/L而低於130 mg/L。各鄉鎮地下水水質之LSI、RSI、PSI指數評估，顯示地下水水質有較高侵蝕傾向，與LSCI結果對照亦相近。因此本文推論在金門縣使用自來水及地下水做為太陽能熱水系統水源時，可能有稍高侵蝕傾向之疑慮。

表7 成功大學金門自來水水質數據結垢及侵蝕傾向評估

採水日期	1010906	1010907	1010328	1010503	990723	1010607	1000804	1000929	1000804	1010801
品項/鄉鎮	金沙鎮	金沙鎮	金城鎮	金城鎮	金湖鎮	金湖鎮	金寧鄉	金寧鄉	烈嶼鄉	烈嶼鄉
總鹼度,mg/L	32	30	40	26	65	74	6	26	88	32
pH值	7.43	7.8	6.91	6.34	8.4	7.36	7.13	6.27	7.22	6.23
氯鹽,mg/L	36.1	18.3	148	44.5	441	203	35.6	40.6	21.3	41.7
硫酸鹽,mg/L	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
總溶解固體量,mg/L	149	145	321	153	764	668	143	154	606	259
總硬度,mg/L	43.6	19.8	65.7	34	161	157	29.9	12.9	157	37.8
HCO ₃ ⁻ ,mg/L	31.91	29.79	39.97	25.99	63.38	73.83	5.99	25.99	87.85	31.99
CO ₃ ²⁻ ,mg/L	0.08	0.18	0.03	0.01	1.50	0.16	0.01	0.00	0.14	0.01
LSI	-0.37	-0.37	-0.64	-1.66	1.41	0.42	-1.55	-2.15	0.36	-1.65
RSI	8.16	8.53	8.20	9.65	5.58	6.52	10.24	10.56	6.50	9.53
PSI	8.85	9.63	8.22	9.38	6.79	6.60	11.69	10.22	6.33	9.02
LSCI	1.13	0.61	3.70	1.71	6.80	2.74	5.94	1.56	0.24	1.30

注：**代表未進行分析此項目；當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況趨於明顯。

4.3 連江縣(馬祖)

根據連江縣自來水廠提供之水質數據(連江縣自來水廠，2012^[29])，自來水廠在99年度未進行pH值分析，100及101年度未進行鹼度分析，因此資料不足，無法進行結垢及侵蝕傾向評估分析，但已知連江縣各鄉鎮自來水中氯鹽濃度普遍介於35 mg/L與130 mg/L之間。因此連江縣之結垢及侵蝕傾向評估將採用成功大學分析結果，但因現

今連江縣裝設太陽能熱水系統尚不普遍，故只先進行南竿鄉水質分析數據探討。

表9為成功大學選取連江縣太陽能熱水系統使用水源為自來水之用戶進行水質採樣分析，並進行結垢及侵蝕傾向評估之結果，其中LSI及RSI指數顯示偏於結垢；PSI指數顯示有輕微侵蝕傾向；而LSCI指數高於1.2，認為自來水水質有較高侵蝕問題。



表8 成功大學金門地下水水質數據結垢及侵蝕傾向評估

採水日期	990303	1010328	990302	1010410	1010504	990120	990818	990318	1010801	990128	1010606	1010801	1000720	1010320
品項/鄉鎮	金沙鎮	金沙鎮	金城鎮	金城鎮	金城鎮	金湖鎮	金湖鎮	金湖鎮	金湖鎮	金寧鄉	金寧鄉	金寧鄉	烈嶼鄉	烈嶼鄉
總鹼度,mg/L	24	29	28	28	32	12	68	35	26	4	8	6	110	83
pH值	6.68	7.33	7.15	6.41	6.67	5.62	7	7.06	5.95	5.34	4.44	4.65	6.81	7.02
氯鹽,mg/L	33.5	50	133	57.8	41	47.6	89.8	60.4	165	19.3	44.5	27.4	72.2	37.6
硫酸鹽,mg/L	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
總溶解固體量,mg/L	126	171	358	365	185	220	373	220	780	141	302	275	349	263
總硬度,mg/L	35	51.7	89.3	83.2	23.8	35.6	142	66.3	217	53.5	47.8	53.7	141	31.8
HCO ₃ ⁻ ,mg/L	23.99	28.93	27.96	27.99	31.98	12.00	67.93	34.96	26.00	4.00	8.00	6.00	109.93	82.91
CO ₃ ²⁻ ,mg/L	0.01	0.06	0.04	0.01	0.01	0.00	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.08
LSI	-1.33	-0.44	-0.43	-1.20	-1.40	-2.71	0.00	-0.53	-1.31	-3.27	-3.95	-3.81	0.02	-0.52
RSI	9.34	8.21	8.01	8.81	9.47	11.03	6.99	8.12	8.57	11.88	12.34	12.27	6.76	8.07
PSI	9.46	8.86	8.50	8.56	9.39	10.53	6.77	8.38	7.91	11.79	10.91	11.24	6.04	7.74
LSCI	1.40	1.72	4.75	2.06	1.28	3.97	1.32	1.73	6.35	4.83	5.56	4.57	0.66	0.45

注：**代表未進行分析此項目；當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況趨於明顯。

已知連江縣各鄉鎮自來水中氯鹽濃度普遍介於35 mg/L與130 mg/L之間，因此本文推論在連江縣使用自來水做為太陽能熱水系統水源時，可能會有稍高侵蝕傾向之疑慮。而連江縣太陽能熱水系統使用用戶，目前尚未有使用水源為地下水之樣本分析資料，將於未來進行更多水質採樣分析，提供連江縣太陽能熱水系統安裝商及用戶參考。

五、結論

離島地區太陽能熱水系統受水質侵蝕造成之損壞案例相對高於本島，因此急迫需要有一簡單及容易估算之評估方法，來判斷需選用何種金屬材質或構件組成之太陽能熱水系統，以達到系統能抵抗或減緩受水質侵蝕之影響。本文以簡單之結垢及侵蝕傾向評估指數研究結果及水中氯離子濃度，推論使用水質對系統之影響，同時做出離島地區未來太陽能熱水系統材質選用之建議。

5.1 澎湖縣

澎湖縣台灣自來水事業處自來水水質資料評估結果顯示，99及100年度其他淨水場LSI及RSI指數顯示偏於結垢；PSI指數顯示有輕微侵蝕傾向；而LSCI指數大多遠高於1.2，認為自來水水質有較高侵蝕問題。成功大學選取澎湖太陽能熱水系統使用水

表9 成功大學連江縣自來水水質數據結垢及侵蝕傾向評估

採水日期	1000719	1000720	1010717	1010717
品項/鄉鎮	南竿鄉	南竿鄉	南竿鄉	南竿鄉
總鹼度,mg/L	57	51	38	60
pH值	7.79	7.97	7.68	7.7
氯鹽,mg/L	208	217	148	122
硫酸鹽,mg/L	**	**	**	**
總溶解固體量,mg/L	504	486	369	360
總硬度,mg/L	131	124	123	43.6
HCO ₃ ⁻ ,mg/L	56.64	50.51	37.81	59.69
CO ₃ ²⁻ ,mg/L	0.33	0.44	0.17	0.28
LSI	0.67	0.78	0.37	0.14
RSI	6.45	6.41	6.94	7.42
PSI	7.13	7.34	7.77	7.98
LSCI	3.65	4.26	3.90	2.03

注：**代表未進行分析此項目；當LSI<0、RSI>7.5、PSI>6及LSCI>0.8時，使用水質對系統金屬構件之侵蝕情況趨於明顯。

源為自來水之用戶進行水質採樣分析及評估結果，LSI及RSI指數顯示偏於結垢；PSI指數顯示有輕微侵蝕傾向；而白沙鄉、湖西鄉、西嶼鄉及馬公市LSCI指數顯示接近或高於1.2，有較高侵蝕問題。澎湖縣白沙鄉及湖西鄉，LSI、RSI、PSI指數評估顯示地下水有結垢傾向；而LSCI評估結果顯示



地下水有稍高侵蝕傾向，且地下水中氯鹽濃度皆高於130 mg/L。

比較台灣自來水事業處及成功大學在澎湖縣自來水水質及評估結果，LSI及RSI指數顯示自來水有結垢之可能性，但PSI指數及LSCI指數認為有侵蝕傾向。而自來水或是地下水中氯鹽濃度普遍偏高於130 mg/L，若根據表1建議，本文建議在澎湖縣使用水源為自來水或是地下水之太陽能熱水系統，至少需選用316不鏽鋼，或選擇抗侵蝕能力更加之材質，如含鉻、鎳及鉬元素比率較高之合金或鈦合金，才能有效減緩或抵抗金屬構件受侵蝕之問題。

5.2 金門縣

金門自來水水質LSI、RSI、PSI指數評估，除金湖鎮之外，皆顯示自來水水質有微高侵蝕傾向；而LSCI結果顯示金門自來水水質有較高侵蝕傾向。而根據成功大學分析結果顯示金門自來水及地下水氯鹽濃度普遍高於35 mg/L而低於130 mg/L，少數高於130 mg/L。在金門太陽能熱水系統現有使用材質，大部分選用材質為304不鏽鋼，若根據表1建議，則至少需選用316不鏽鋼或抗侵蝕能力更加之材質，才能減少目前太陽能熱水系統在金門因侵蝕而受損之問題。

5.3 連江縣(馬祖)

成功大學至今只有南竿鄉分析數據，其LSI、RSI指數顯示偏於結垢，PSI指數顯示有輕微侵蝕傾向，而LSCI指數遠高於1.2，因此由LSCI指數結果認為自來水水質有較高侵蝕問題。現有水質數據顯示自來水氯鹽濃度接近130 mg/L，因此建議未來在連江縣推廣太陽能熱水系統時，可選用316不鏽鋼或抗侵蝕能力更加之材質，才能有效避免未來太陽能熱水系統因侵蝕而受損之問題。

致謝

本文承蒙經濟部能源局委辦「太陽能熱利用推廣應用與獎勵補助作業計畫」（計畫編號：102-D0303）之經費支持，在此特於誌謝。

參考文獻

1. 財團法人成大研究發展基金會，2012年10月，用太陽能供熱水有效降低油料負擔，畜產報導，148期，第36-37頁。
2. 張克勤、鍾光民、李清安，2010年，科學發展，446期，pp. 44-51頁。
3. 成大能源研究中心網頁，2009，http://solar.rsh.ncku.edu.tw/t01_principle.php。
4. 李清安、張克勤、李聰盛、鍾光民，2004，國內太陽能熱水系統使用水質分析，太陽能及新能源學刊，第9卷第1期，pp.18-22頁。
5. Seneviratne, M., 2007. A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities, Elsevier, 400 pages.
6. Parrott, R., Pitts, H., 2011. Chloride stress corrosion cracking in austenitic stainless steel – recommendations for assessing risk, structural integrity and NDE based on practical cases and a review of literature, Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive.
7. Kopeliovich, D., 2012. Pitting Corrosion, Pitting Corrosion. Subs Tech. Web. <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pitting_corrosion>.
8. 黃新平及黃春梅，2006，循環冷卻水中氯離子對板換材料選擇的影響，石油化工設計，23(2)，44-46。
9. 羅正貴，聞荻江，2005，銅的侵蝕及防護研究進展，武漢化工學院學報第27卷第2期。
10. Gallegos, A.A., Martinez, S.S., Ramirez Reyes, J.L., 2005. Evaluation of Water Corrosivity Using a Corrosion Rate Model for a Cooling Water System, Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 8, 133-142.
11. Liang, C.H., Zhang, W., 2006. Pitting Corrosion Mechanisms and Characteristics of Aluminum in Solar Heating Systems, Journal of the Chinese Chemical Society, 53, 313-318.
12. Langelier, W.F., 1936. The analytical control of anti-corrosion water treatment, JAWWA, 28, 10, 1500-1521.
13. Ryznar, J.W., 1944. A new index for determining the amount of calcium carbonate scale formed by water, JAWWA, 36, 472-494.
14. Larson, T.E., Skold, R.V., 1958. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron, Illinois State water survey, Champaign, IL, 43-46, ISWS C-71.
15. Carrier Air Conditioning Company, 1965. Handbook of Air Conditioning System Design. McGraw-Hill Books. New York.
16. Puckorius, P., 1983. Getting A Better Reading on Scaling Tendency of Cooling Water, Power, September.



17. Degremont, 1991. Water Treatment Handbook, sixth edition, distributed by Lavoisier Publishing, Paris.
18. Prisyazhniuk, V.A., 2007. Prognosticating scale-forming properties of water, Applied Thermal Engineering, 27, 1637-1641
19. Gacem, Y., Taleb, S., Ramdani, A., Senadjki, S., Ghaffour, N., 2012. Physical and chemical assessment of MSF distillate and SWRO product for drinking purpose, Desalination, 290, 107-114.
20. Rafferty, K., 2000. Scaling in geothermal heat pump systems, Geo-Heat Center Quart. Bull., 21, 11-15
21. De Zuane, J., 1997. Handbook of drinking water quality, 2nd ed., New York : Van Nostrand Reinhold.
22. Ghali, E., 2010. Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys understanding, performance, and testing, Hoboken, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, pp. 103-104.
23. Ilevbare, G. O., 2006. Effect of Sulfate on the Passive and Crevice Corrosion Properties of Alloy 22 in 4 M Sodium Chloride, Corrosion, 62, 4, 340-356.
24. Pisigan, R.A., Singley, J.E., 1984. Evaluation of water's corrosivity using Langelier index and relation to corrosion rate models, Proc., Corrosion/84, National Association of Corrosion Engineers, New Orleans, Paper No. 149.
25. Imran, S., Dietz, J., Mutoti, G., Taylor, J., Randall, A., 2005. Modified Larsons Ratio Incorporating Temperature, Water Age, and Electroneutrality Effects on Red Water Release, Journal of Environmental Engineering, 131, 11, 1514-1520.
26. 台灣自來水公司，2010，99年度水質年報，中華民國100年12月。
27. 台灣自來水公司，2011，100年度水質年報，中華民國101年12月。
28. 金門縣自來水廠網頁資料，2012，http://www.kinmen.gov.tw/Layout/sub_E/index.aspx?frame=99。
29. 連江縣自來水廠，2012，發文索取資料。