



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.201903_33(1).0003

無氧銅在不同濕度條件之大氣腐蝕 Atmospheric Corrosion of Oxygen-Free Copper under Various Relative Humidity

陳仁宏^{*1}、董曉明¹、劉冠麟¹

J. H. Chen^{*1}, H. M. Tung¹, G. L. Liu¹

中文摘要

高純度無氧銅具良好腐蝕抗性，被考慮作為用過核燃料最終處置之廢棄物罐容器。銅廢棄物罐製造及裝載完成後，運送至最終處置場所封存前，處於暴露大氣環境時期。本研究探討無氧銅於乾淨室內空氣但不同溼度條件之腐蝕行為，選定 30°C 絕對溼度(29 g/m³)分別調整至相對溼度 28%RH、45%RH、73%RH 等三種條件進行長時間暴露實驗。定期取出實驗試片進行測量重量變化、記錄表面狀態、XRD 分析腐蝕產物、以及 SEM 觀察表面形態等項目。結果顯示 28%RH 及 45%RH 皆在臨界相對濕度以下，未有明顯腐蝕現象，但是 73%RH 條件下則呈現顯著腐蝕行為，主要腐蝕產物為緻密性氧化亞銅(Cu₂O)為主。

關鍵詞：無氧銅、廢棄物罐、大氣腐蝕、相對溼度。

Abstract

The oxygen-free copper has been considered as a canister material to dispose the spent nuclear fuels, due to its superior corrosion resistance. After the container has been fabricated and also the spent fuel has been encapsulated, the copper canisters will be transported to the geologic repository and disposed. From the initial fabrication and encapsulation to the final repository, however, the canister will be exposed to indoor air for a period of time. The purpose of this study was to investigate the corrosion behavior of the oxygen-free coppers exposed to indoor air with various levels of relative humidity. Three conditions of 28%RH, 45%RH, and 73%RH respectively, adjusted from the absolute humidity at 30°C, 29 g/m³, were chosen for a long term exposure. Specimens with different exposure time were examined by weight change, photographing, XRD, and SEM. The results showed that specimens with 28%RH and 45%RH revealed slow corrosion

收到日期：108年7月26日

修訂日期：109年10月28日

接受日期：109年11月20日

¹核能研究所核子燃料及材料組

¹ Institute of Nuclear Energy Research, Nuclear Fuels and Materials Division

*聯絡作者：jhchen@iner.gov.tw

rate, indicating the both environments still below the critical relative humidity. For the 73%RH specimens, on the other hand, they presented significantly high corrosion rate, and the major corrosion product was copper(I) oxide (Cu_2O).

Keywords: Oxygen-Free Copper; Canister; Atmospheric Corrosion; Relative Humidity.

1. 前言

伴隨核電的發展與應用，用過核燃料產量與放射性廢料亦隨著使用時間而逐漸累積增加，因此，如何有效率地妥善處理成為核電後端重要的議題。依據世界各國研究與驗證，主要國家如美國、加拿大、瑞典、德國、日本、芬蘭等國，認為深層地質處置是長期安全處置高放射性廢料的最佳方案^[1]。廢棄物罐是高放射性廢棄物與地質處置環境隔離的重要屏障，主要功能是防止容器內部的放射性廢棄物洩漏到周圍環境。因此廢棄物罐選用的材料必須能長期在處置環境下有良好抗蝕性，以維持其屏障功能完整性^[2]。

早從 1978 年瑞典的研究報告指出^[3]，銅材適合作為深層地質處置場廢棄物罐的罐體材料，後續的研究更進一步掌握銅材於處置場環境的腐蝕特性^[4,5]，認為適當的罐體厚度設計足以維持使用壽命達 10 萬年~100 萬年，並於此期間內能有效維持其屏蔽功能。另依據歐盟在 COBECOMA 專案計畫內容^[6]，針對系列潛在可能的廢棄物罐材料的腐蝕行為進行了詳細的探討，列出關鍵的腐蝕因素，其中大氣腐蝕項目是銅材需考慮的腐蝕機制之一；緣起於廢棄物罐製造完成開始裝載用過核燃料後，短時間內即應載運至處置場完成封存，但是瑞典 SKB 報告評估^[7]，指出於極端情況下有可能拖延至二年時間才完成處置作業，在此期間廢棄物罐暴露於室內大氣條件下，因此有必要進行大氣腐蝕之研究評估。

大氣腐蝕主要考慮的參數為空氣中的相對濕度及有害污染物含量如 SO_2 , NO , CO_2 , HCl , O_3 , H_2S , 及氯化物與各種有機酸等，因此大氣環境依污染物含量程度低至高分為四大類：鄉村、城市、

工業區、及海洋環境^[8,9]。在鄉村區域的空氣是最乾淨等級，污染物極少，主要腐蝕因子是水氣，通常要達到臨界相對濕度值(Critical Relative Humidity)才會有明顯腐蝕作用，對於乾淨空氣的臨界相對濕度是 70%RH，此臨界值隨污染物含量增加而降低，約在 50%~70%範圍間變化^[7,8]。本研究主要探討不同相對濕度條件下無氧銅的大氣腐蝕行為，實驗室地點位在龍潭郊區，屬於乾淨室內空氣環境，分別設定 28%RH、45%RH、73%RH 由低至高的相對濕度參數，以了解相對濕度高低對無氧銅大氣腐蝕之效應。

2. 實驗步驟

2.1 試片準備

依據 ASTM B170 Grade 1 規範要求，無氧銅的銅含量為 99.99%以上，以及氧含量要求 5ppm 以下，其餘化學成分要求規範列於表 1 內。本研究使用的高純度無氧銅購自日本三菱伸銅株式會社，其化學成分檢測值均符合 ASTM B170 Grade 1 要求，詳如表 1 所示。

試片尺寸需考慮精密電子天平樣品座大小與重量限制，以及易於表面積計算；將厚度 1mm 板材切割成 15mm×10mm×1mm 之長方體試片。所有試片表面研磨至 SiC 砂紙#2400 條件，以獲得相同初始表面狀態，再經清洗及乾燥程序，最後以可顯示至微克(μg)等級之 6 位數電子天平(METTLER TOLEDO)，量測記錄實驗前重量。

2.2 恆溫恆濕暴露實驗

參考深層地質處置場的環境溫度約為 30°C^[7]，以及台灣長年的溼熱氣候，選定 30°C 的絕對溼度

無氧銅在不同濕度條件之大氣腐蝕

值 29 g/m^3 為實驗參數;使用恆溫恆濕控制箱,分別調整至 $35^\circ\text{C}73\%\text{RH}$ 、 $45^\circ\text{C}45\%\text{RH}$ 、及 $55^\circ\text{C}28\%\text{RH}$ 等三種濕度條件之室內空氣環境,暴露時間達 1 個月、3 個月、6 個月、9 個月、12 個月時,分別取出進行重量變化測量及其他材料特性檢驗。實驗試片編號、實驗條件、與暴露時間之規劃,如表 2 所示。

2.3 腐蝕後試片觀察分析

取出完成預定暴露時間的試片後,分別進行

腐蝕後重量測量、外觀變化照相、X-光繞射分析、及掃描式電子顯微鏡觀察等工作。試片重量測量使用 6 位數 METTLER TOLEDO 精密電子天平,可測至微克(μg)等級;試片外觀以 Nikon SMZ800 低倍率立體顯微鏡進行照相記錄;X-光繞射儀(XRD)係使用 BRUKER D2 PHASER 進行腐蝕物種類分析;掃描式電子顯微鏡(FE-SEM:HS-4800)含能譜分析(EDS),用來觀察腐蝕生成物形態特徵及分析成分元素。

表 1 無氧銅化學成分。

Table 1 Chemical compositions of oxygen-free copper.

元素	ASTM B170 Grade 1	檢測值
Cu (%)	min. 99.99	99.99
Sb (ppm)	max. 4	< 1
As (ppm)	max. 5	< 1
Bi (ppm)	max. 1	< 1
Cd (ppm)	max. 1	< 1
Fe (ppm)	max. 10	< 1
Pb (ppm)	max. 5	< 1
Mn (ppm)	max. 0.5	< 0.1
Ni (ppm)	max. 10	< 1
O (ppm)	max. 5	< 1
P (ppm)	max. 3	< 1
Se (ppm)	max. 3	< 1
Ag (ppm)	max. 25	< 11
S (ppm)	max. 15	< 2
Te (ppm)	max. 2	< 1
Sn (ppm)	max. 2	< 1
Zn (ppm)	max. 1	< 1

*日本三菱伸銅株式會社檢測

表 2 無氧銅在不同相對濕度條件之室內空氣暴露實驗規劃。

Table2 Test matrix for indoor air corrosion of oxygen-free copper under various levels of relative humidity.

實驗條件	實驗時間						
	1 個月	3 個月	6 個月	9 個月	12 個月		
35°C73%RH	U1	U3	U6	U9	U9-1	U12	U12-1
45°C45%RH	T1	T3	T6	T9	T9-1	T12	T12-1
55°C28%RH	S1	S3	S6	S9	S9-1	S12	S12-1

3. 結果與討論

3.1 外觀與重量變化

三組實驗條件及各個暴露時間的試片外觀，如表 3 所示。明顯地看出三組條件中的 28%RH 及 45%RH，腐蝕時間從 30 天至 365 天仍具有銅金屬光澤外觀，表示此二條件為低於臨界相對濕度，因而外觀上未顯示出明顯腐蝕狀態。另一組 73%RH 條件之試片，則顯現隨腐蝕時間增長而失去外觀金屬光澤。在腐蝕 180 天後，完全覆蓋暗紅色腐蝕產物，並間或出現綠色腐蝕產物。此結果說明 73%RH 條件會產生明顯腐蝕現象，其條件已經超過臨界相對濕度。

各實驗條件下腐蝕後重量變化，如表 4 所示。所有條件下腐蝕實驗結果皆呈現重量增加模式，顯示銅材與環境作用後，於表面產生不會剝落的緻密性腐蝕產物。重量增加的趨勢與試片外觀變化互為匹配。73%RH 條件之試片，從初始 30 天及 90 天的增重已是另外二個低相對濕度條件的 10 倍以上，腐蝕 180 天出現綠色產物以後，其間差異又急遽增加為 100 倍以上。再度驗證 73%RH 是已經超過臨界相對濕度的條件。另一方面，28%RH 及 45%RH 條件的增重只隨腐蝕時間緩慢增加，亦對映試片外觀仍保有金屬光澤現象。

3.2 腐蝕產物

以 XRD 分析腐蝕產物時，只有 73%RH 嚴重腐蝕條件的試片才測量到有腐蝕產物訊號，相對緩慢腐蝕之 28%RH 及 45%RH 條件的試片，僅測

量到銅材晶體繞射訊號，而無法測量到腐蝕產物訊號。因此，XRD 分析只顯現 73%RH 條件的試片，其結果如圖 1 所示。圖 1(a)顯示腐蝕實驗前、腐蝕 30 天、腐蝕 90 天、腐蝕 180 天、腐蝕 270 天、及腐蝕 365 天之 XRD 結果比較；圖 1(a)之結果顯示腐蝕 30 天及 90 天僅產生氧化亞銅，但是在 180 天後，除氧化亞銅外亦出現氯氧化銅之腐蝕產物，此結果符合表 3 內所示之試片外表觀察的結果。圖 1(b)則為腐蝕 365 天 XRD 分析鑑定腐蝕產物為氧化亞銅 (Cu_2O) 及氯氧化銅 ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$)。

3.3 腐蝕速率

依據表 4 所顯示各個實驗條件之重量增加與腐蝕時間的數據，繪圖分析其腐蝕速率，結果如圖 2 所示。腐蝕速率分為二類，圖 2(a)為 73%RH 條件之重量增加與腐蝕時間關係圖，其結果顯現之趨勢為線性關係，亦即銅材腐蝕量與暴露於 73%RH 空氣的時間成正比例關係；圖 2(b)為 45%RH 與 28%RH 條件下腐蝕速率之結果，此二條件的腐蝕速率較符合拋物線關係式，即銅材腐蝕速率會隨腐蝕時間增長而趨緩之現象。

評估及設計銅材廢棄物罐所需厚度時，需要估算在處置期間各階段的腐蝕損耗量，因此在大氣腐蝕階段內的銅損耗量，可藉實驗數據來估算其損耗程度。依據 ASTM G31 對金屬腐蝕速率提供計算式如下：

$$\text{Corrosion rate (micrometers per year; } \mu\text{m/y)} = (K \times W)/(A \times T \times D) \quad (1)$$

where:

$$K = 8.76 \times 10^7$$

T = time of exposure in hours

A = area in cm^2

W = mass loss in g

D = density in g/cm^3

依據上述計算式(1)，需獲得實驗材料參數如暴露時間及試片表面積，如表 4 所列，純銅密度(D)為 8.96 g/cm^3 ，再依主要腐蝕產物(Cu_2O)中銅與氧所占比例，進而由表 4 中氧增加的重量，轉換為銅的耗損量後，由式(1)計算三種相對濕度條件之腐蝕速率敘述如下。

Cu_2O 分子量 = 143.09 g/mol

Cu 所占比例 $127/143.09 = 0.888$

O 所佔比例 $16/143.09 = 0.112$

各條件暴露 365 天之二組增重數據所對應的銅損耗重量分別為 73%RH=23.395 mg 和 8.991 mg、45%RH=0.246 mg 和 0.198 mg、28%RH=0.111 mg 和 0.103 mg。

獲得所有參數後，依式(1)計算銅材在各條件的大氣腐蝕速率如下：

(一) 73%RH 條件腐蝕速率 = $2.9 \sim 7.5 \mu\text{m/y}$

(二) 45%RH 條件腐蝕速率 = $0.063 \sim 0.078 \mu\text{m/y} = 63 \sim 78 \text{ nm/y}$

(三) 28%RH 條件腐蝕速率 = $0.033 \sim 0.035 \mu\text{m/y} = 33 \sim 35 \text{ nm/y}$

上述結果與瑞典 SKB 報告所稱^[7]，銅的二人大氣腐蝕損耗量小於 1 微米(μm)之結論作比較時，本項實驗結果顯示只有在小於臨界相對溼度條件下，45%RH 及 28%RH，才有相同結論。但在超過臨界相對溼度條件下，73%RH，則顯示相對高

的腐蝕速率，此時銅在二年的大氣腐蝕可能達 15 微米之多。

3.4 腐蝕物形態

掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察腐蝕產物形態及特性 X 光能譜(EDS)分析成分元素之結果示於圖 3~圖 6。圖 3 為暴露 30 天觀察初始腐蝕情況；結果顯示 73%RH 條件已觀察到腐蝕產物散佈在表面 如圖 3(a)所示 相對於圖 3(b)與 3(c) 45%RH 與 28%RH 條件之試片表面特徵仍為最後砂紙研磨刮痕，未觀察到任何腐蝕產物。圖 3 觀察之結果與表 4 重量變化趨勢之結果是一致的。



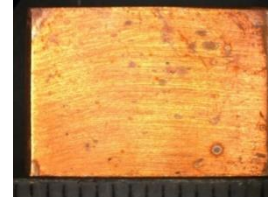
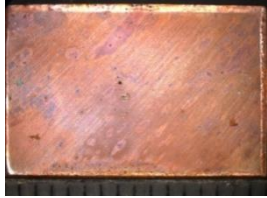


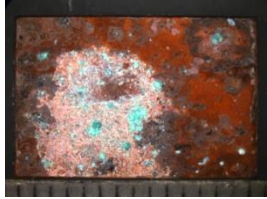
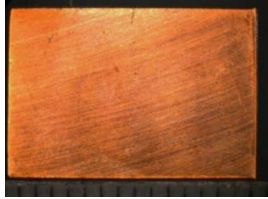

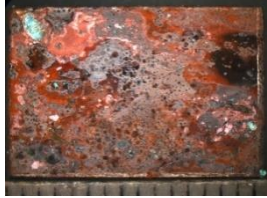
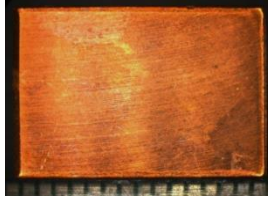

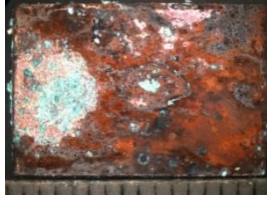
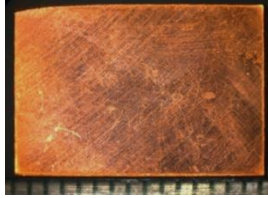
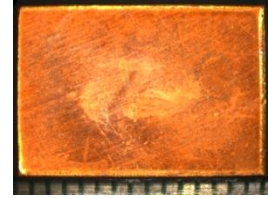
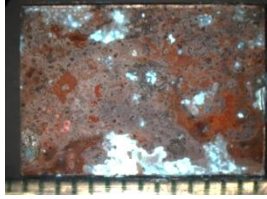


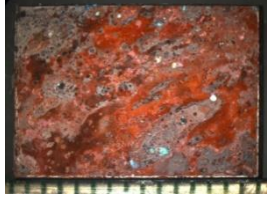


進一步觀察 73%RH 條件腐蝕 90 天試片如圖 4 所示。此時腐蝕產物已完整覆蓋表面，以 EDS 分析其元素成分，顯示腐蝕產物主要成分元素為銅與氧，其定量分析銅與氧原子數比例接近 2:1，符合 XRD 分析結果，圖 1(a)，腐蝕產物應為氧化亞銅(Cu_2O)。

腐蝕 365 天的試片表面形態如圖 5 所示。圖 5(a)為 73%RH 條件在大部分暗紅色區域的腐蝕產物形態，腐蝕產物呈現平坦完全覆蓋表面狀態，也未發現有裂紋在其間或剝落現象，可推測腐蝕產物是屬於附着性良好與緻密的氧化層。對比於 45%RH 與 28%RH 條件的圖 5(b)與 5(c)，僅觀察到有零散少量的腐蝕物出現，初始狀態的研磨刮痕仍是其主要特徵。

由於 XRD 分析 73%RH 條件試片在 180 天後出現氯氧化銅($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$)之腐蝕產物，因此特別觀察腐蝕 365 天表面有明顯綠色區域之試片(U12)，如圖 6 所標示，經觀察發現此選定腐蝕物呈大片狀態，邊緣有捲起樣態，可推測其易於剝落。再以 EDS 分析此片狀物主要元素除銅與氧外，尚有氯(Cl)元素出現，此 EDS 分析結果符合 XRD 鑑定的氯氧化銅腐蝕產物的存在。

表3 無氧銅試片隨腐蝕時間之外觀變化。

Table3 Appearance of oxygen-free copper after indoor air corrosion with different exposure time.

	35°C 73%RH	45°C 45%RH	55°C 28%RH
30 天			
90 天			
180 天			
270 天			
270 天-1			
365 天			
365 天-1			

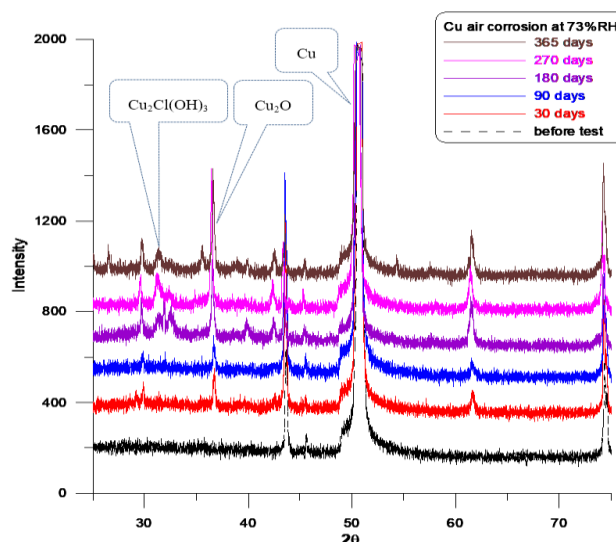
無氧銅在不同濕度條件之大氣腐蝕

表 4 無氧銅在不同相對濕度室內空氣腐蝕後之重量變化。

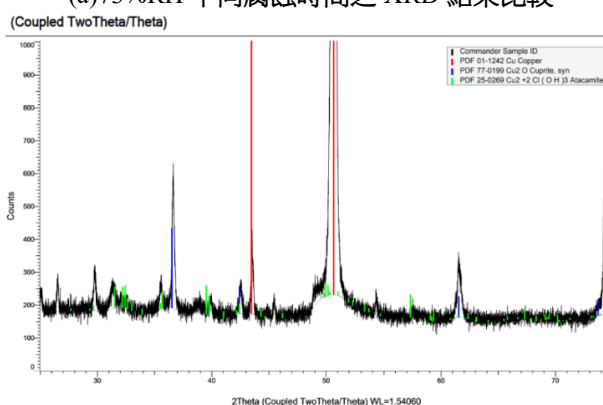
Table 4 Mass gain of oxygen-free copper after indoor air corrosion with different relative humidity.

腐蝕時間	35°C 73%RH	45°C 45%RH	55°C 28%RH
	mg (mg/dm ²)	mg (mg/dm ²)	mg (mg/dm ²)
30 天	0.041 (1.171)	0 (0)	0.004 (0.114)
90 天	0.068 (1.943)	0.002 (0.057)	0.005 (0.143)
180 天	1.438 (41.086)	0.017 (0.486)	0.009 (0.257)
270 天	1.395 (39.857)	0.018 (0.514)	0.008 (0.229)
	3.326 (95.029)	0.018 (0.514)	0.011 (0.314)
365 天	2.945 (84.143)	0.031 (0.886)	0.014 (0.400)
	1.134 (32.400)	0.025 (0.714)	0.013 (0.371)

*試片表面積=0.035dm²



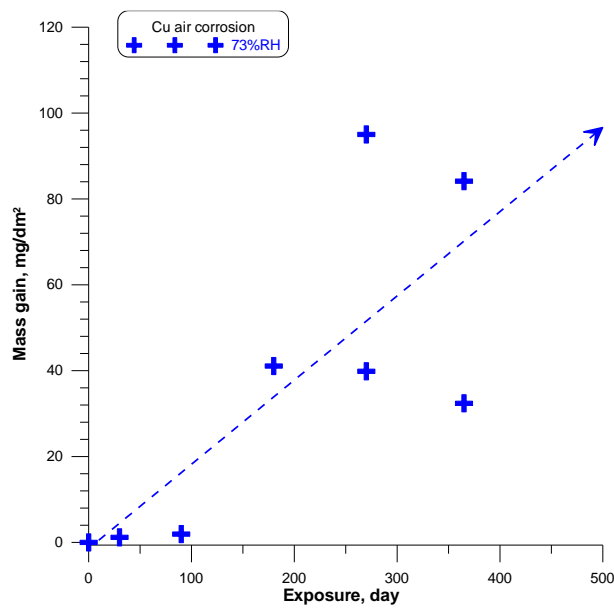
(a) 73%RH 不同腐蝕時間之 XRD 結果比較



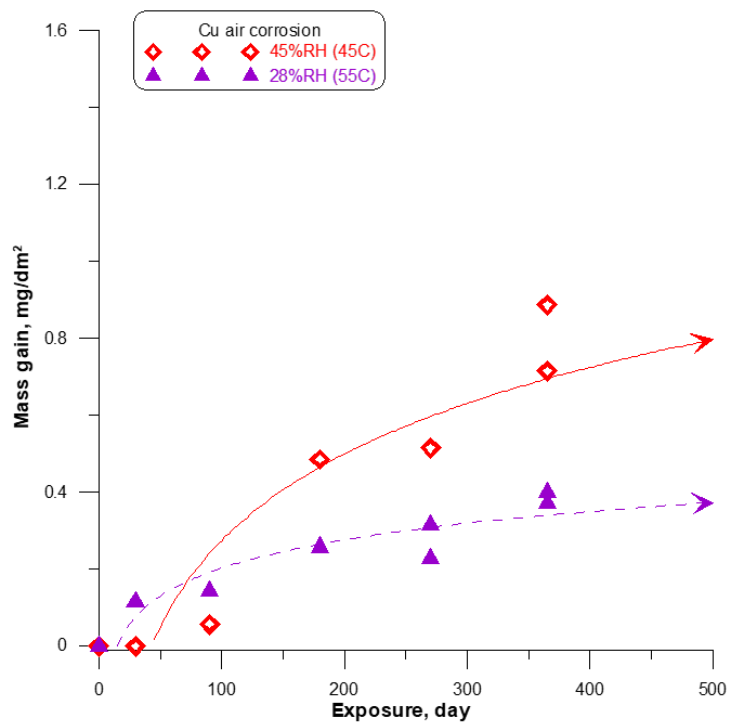
(b) 73%RH 腐蝕 365 天之腐蝕物分析

圖 1 無氧銅在 35°C 73%RH 條件下室內空氣腐蝕時間與 XRD 分析結果之比較。(a)不同腐蝕時間下 XRD 結果，(b) 分析 365 天 XRD 結果為 Cu₂O 與 Cu₂Cl(OH)₃。

Figure 1 XRD analysis of the oxygen-free copper under the condition of 73%RH indoor air corrosion with different exposure time. (a) XRD results of different exposure time, (b) identification of corrosion products of the 365 days corrosion; showing Cu₂O and Cu₂Cl(OH)₃.



(a) 35°C 73%RH 條件

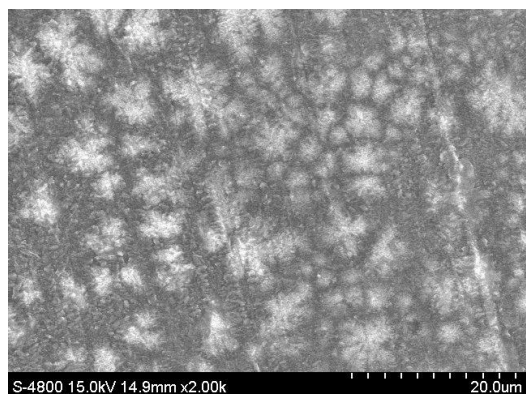


(b)45°C 45%RH 條件及 55°C 28%RH 條件

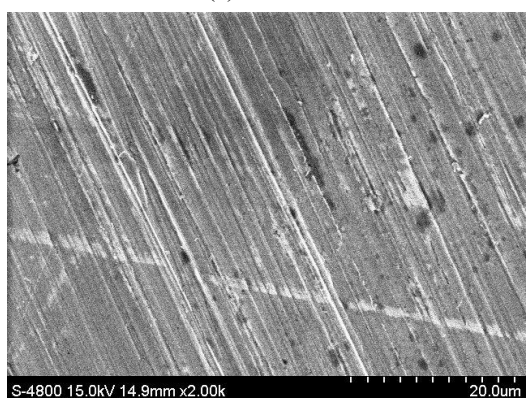
圖 2 無氧銅在不同相對濕度條件下室內空氣腐蝕時間與重量增加之關係圖。(a) 35°C 73%RH 條件，(b) 45°C 45%RH 條件及 55°C 28%RH 條件。

Figure 2 Mass gain dependence of exposure time for the oxygen-free copper in indoor air corrosion. (a) under condition of 35°C 73%RH, (b) under both conditions of 45°C 45%RH and 55°C 28%RH.

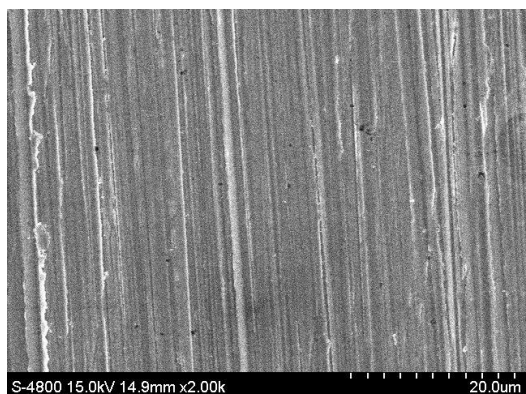
無氧銅在不同濕度條件之大氣腐蝕



(a) 73%RH



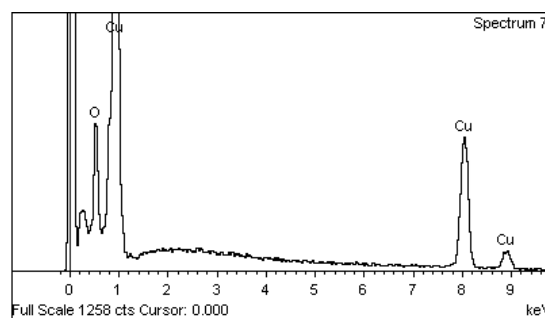
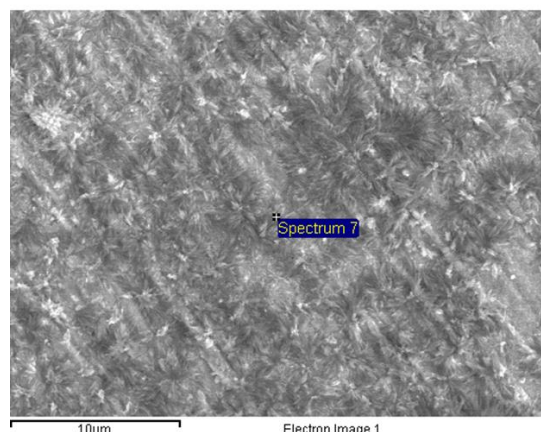
(b) 45%RH



(c) 28%RH

圖 3 腐蝕 30 天試片表面形態。(a) 73%RH 已有腐蝕產物散佈在表面，(b) 45%RH 無腐蝕現象，(c) 28%RH 無腐蝕現象。

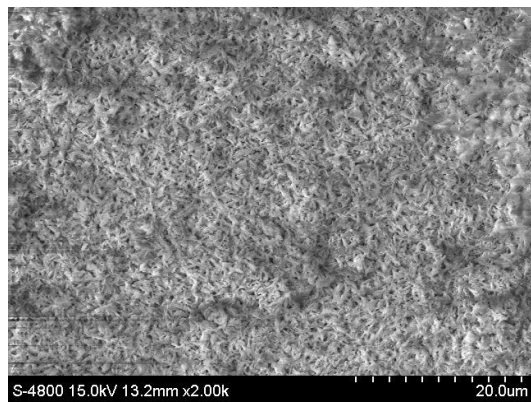
Figure 3 Surface morphology after 30 days exposure. (a) corrosion product observed at the condition of 73%RH, (b) and (c) presenting no corrosion at the both condition of 45%RH and 28%RH.



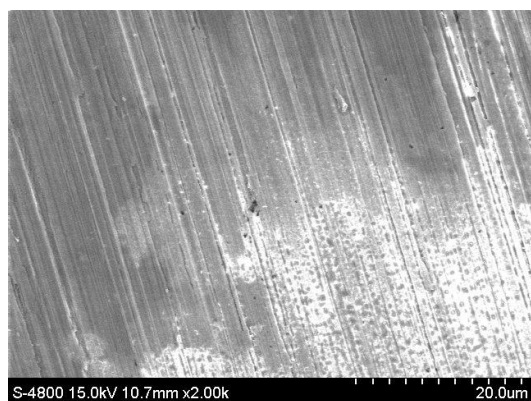
Element	Weight%	Atomic%
O K	12.13	35.42
Cu K	87.87	64.58
Totals	100.00	

圖 4 腐蝕條件 73%RH 暴露 90 天後之表面形態及 EDS 分析結果。

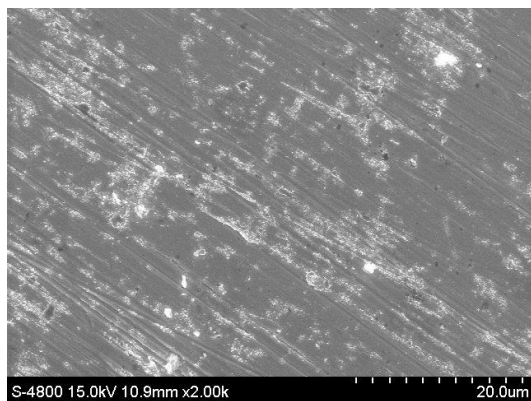
Figure 4 Surface morphology of specimen after exposure of 90 days at the condition of 73%RH, and the EDS analysis of the corrosion product.



(a) 73%RH

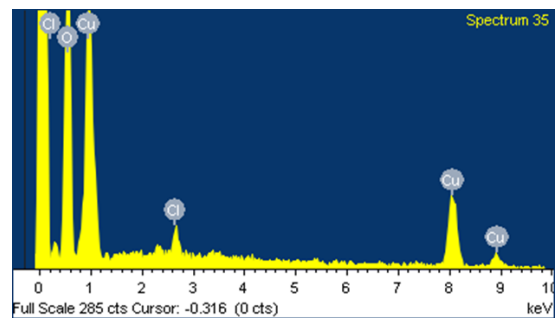
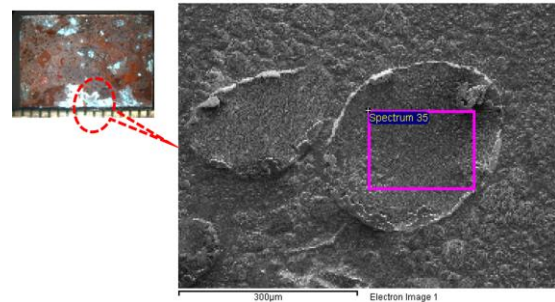


(b) 45%RH



(c) 28%RH

圖 5 腐蝕 365 天表面形態，(a)73%RH 條件，
 (b) 45%RH 條件，(c) 28%RH 條件。
 Figure 5 Surface morphology after exposure of 365 days, (a) 73%RH, (b) 45%RH, (c) 28%RH.



Element	Weight%	Atomic%
O K	42.21	73.81
Cl K	2.14	1.68
Cu K	55.66	24.51
Totals	100.00	

圖 6 腐蝕條件 73%RH 於 365 天後之特定腐蝕物 EDS 分析顯示有氯元素。
 Figure 6 EDS analysis on the selected area showing element of chlorine.

3.5 討論

參考交通部運輸研究所臺灣技術研究中心，對台灣大氣腐蝕因子調查與腐蝕環境分類之探討^[10]，將台灣地區大氣腐蝕環境分為 C1、C2、C3、C4、C5 五個等級；C1 表示腐蝕性非常低，C2 表示腐蝕性低，C3 表示腐蝕性中等，C4 表示腐蝕性高，C5 表示腐蝕性非常高。其中銅的最初第一年腐蝕速率 在最低的 C1 等級腐蝕速率為 $\leq 0.1 \mu\text{m}/\text{y}$ ，最高的 C5 等級腐蝕速率為 $2.8 \sim 5.6 \mu\text{m}/\text{y}$ 。本實驗條件為 28%RH 與 45%RH 的腐蝕速率符合 C1

腐蝕性非常低環境，但是實驗條件為 73%RH 的腐蝕速率則落在 C5 腐蝕性非長高的環境。說明本研究採用鄉村地區室內空氣條件，屬於乾淨空氣等級，預期銅的腐蝕速率皆應為非常低的等級，可是結果卻顯示乾淨室內空氣需搭配低的相對濕度條件，低於臨界相對濕度，其腐蝕環境才符合 C1 非常低腐蝕性環境；若室內空氣處在高相對濕度條件時，高於臨界相對濕度，其腐蝕環境急遽變為 C5 非常高腐蝕性環境。

探討高於臨界相對濕度時，73%相對濕度條件下，其腐蝕速率急遽增高的因素，推測可能是氯離子的存在；因為從 73%RH 條件腐蝕 365 天後試片，XRD 鑑定腐蝕產物中有氯氧化銅 ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$)，及 EDS 分析綠色片狀區域顯示氯元素反應。然而同樣的室內空氣但低相對濕度條件時，其腐蝕產物卻無氯元素存在，因此，合理推測氯離子在高濕度條件下具有加速腐蝕的效應。

4. 結論

1. 無氧銅試片在乾淨室內空氣暴露一年後，於 28%RH 與 45%RH 低相對溼度條件下外觀仍呈現金屬光澤，代表此兩條件在臨界相對濕度以下，因而無顯著腐蝕現象。但是 73%RH 條件則已超過臨界相對濕度值，表面明顯地佈滿暗紅色氧化亞銅(Cu_2O)腐蝕產物，另發現高濕度條件下暴露 180 天後，逐漸出現綠色腐蝕產物，XRD 鑑定為 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 。
2. 28%RH 與 45%RH 條件屬臨界相對濕度以下的環境，其腐蝕速率近似拋物線型態，以最低相對濕度條件 28%RH 計算銅年損耗率為 33~35 奈米，次低相對濕度條件 45%RH 則約為二倍損耗率。但是，高相對濕度條件 73%RH 已超過臨界相對濕度，其腐蝕增量與暴露時間在第一年試驗區間略呈線性正比關係，其年腐蝕速率，約為臨界相對濕度以下條件之

100~200 倍高，估計銅年損耗量為 2.9~7.5 微米。

3. 高相對濕度環境 73%RH 呈現較高腐蝕速率現象，其原因除了因為其相對濕度超過臨界值，此外氯離子存在也是重要因子，導致產生較鬆散的綠色腐蝕產物 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ ，其餘主要腐蝕產物仍為緻密的氧化亞銅(Cu_2O)。

參考文獻

- [1] "Overview of European concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion.", Bennett, D. G., and R. Gens., *Journal of Nuclear Materials*, 379.1-3 (2008), pp.1-8.
- [2] "Container materials for the storage and disposal of nuclear waste." , King, Fraser., *Corrosion*, 69.10 (2013), pp.986-1011.
- [3] Swedish Corrosion Institute. "Copper as Canister Material for Unreprocessed Nuclear Waste—Evaluation With Respect to Corrosion." Swedish Nuclear Fuel Supply Company, 1978.
- [4] "Progress in the understanding of the long-term corrosion behaviour of copper canisters.", King, Fraser, Christina Lilja, and Marjut Vähänen., *Journal of Nuclear Materials*, 438.1-3 (2013) , pp.228-237.
- [5] Werme, Lars, Patrik Sellin, and Nils Kjellbert. "Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects.", No. SKB-TR--92-26. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1992.
- [6] Kursten, B., et al., "COBECOMA, state-of-the-art document on the corrosion behaviour of container materials.", European Commission,

contract no. FIKW-CT-20014-20138, Final report (2004).

- [7] King, Fraser, et al. , "Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository.", No. SKB-TR--01-23. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2001.
- [8] "Atmospheric corrosion of materials.", Syed, S., Emirates Journal for Engineering Research, 11.1 (2006) , pp.1-24.
- [9] "Atmospheric corrosion of copper and silver.", Rice, D. W., et al., Journal of the Electrochemical Society, 128.2 (1981) , pp. 276-284.
- [10] "臺灣大氣腐蝕因子調查與腐蝕環境分類之探討.", 邱永芳、陳桂清、柯正龍、羅建明，防蝕工程，地二十七卷第一期，2013年，第19~30頁。