

**核二廠一號機緊急寒水系統 A 冷凝器  
銅管破管事件查證報告**

**行政院原子能委員會**

**核能管制處**

**中華民國九十四年一月**

# 目 錄

一、前言.....	1
二、系統及大修維護作業說明.....	1
三、銅管破漏情形.....	2
四、事件原因.....	3
五、相關問題討論.....	5
六、電廠之改善措施.....	11
七、本會管制措施.....	13
八、結論與建議.....	14

附件

# 核二廠一號機緊急寒水系統 A 冷凝器銅管破管 事件查証報告

## 一、前言

核二廠一號機 EOC-17 大修期間，機械課維護人員於 10 月 7 日下午進行緊急寒水系統例行巡視時，發現已經大修維護測試，並於 9 月 27 日恢復可用之緊急寒水系統（Emergency Chilled Water System）A 之寒水機 1VC13A 冷媒壓力指示僅約 20PSI，而冷媒液位觀測窗上已無法判讀出液位（實際上係因海水已侵入冷媒系統，液位超出觀測窗之可視範圍），乃申請掛卡檢查。經檢查發現冷媒已流失，而寒水冷凝器 274 冷凝銅管中共有 48 支（包含 1 支原已因破漏而塞管者）銅管有破孔。電廠抽換新管並重新執行測試後，於 10 月 20 日恢復可用，但於 10 月 27 日復發現冷媒液位異常，經檢查又有 7 支銅管洩漏，電廠以塞管處理。

由於以往核二廠從未發生類似之大量破漏之情形，為對事件之全貌有更清楚之了解，故就一號機緊急寒水系統 A 之冷凝銅管破漏情形、本次大修之維護測試作業、故障之可能肇因、電廠採取之措施，以及相關問題之檢討等事項進行查證。

## 二、系統及大修維護作業說明

### （一）系統說明

核二廠每部機組設有緊急寒水系統 A/B 兩串支系統，該系統於事故時提供緊急爐心冷卻系統泵室、爐心隔離冷卻系統泵室、管路及電氣穿越器室、主控制室/控制廠房電氣開關室等安全系統區域冷卻空調系統之冷卻水，維持前述區域適當之空間溫度，以確保安全系統正常運作。

每個支系統包括壓縮機、寒水冷卻器（COOLER）、寒水冷凝器（CONDENSER）、冷媒膨脹槽、寒水泵及相關管閥設備，系統管路流程如附件一。寒水機運作方式為利用寒水冷卻器將由各廠房空間冷卻系統

回流之寒水經寒水冷卻器以冷媒冷卻降溫，吸熱後之汽化冷媒經壓縮機加壓升溫後，送至寒水冷凝器，再與管側緊急海水系統之海水作二次熱交換，凝結之液態冷媒則經節省器（flash economizer）再降溫，流至寒水冷卻器殼側。壓縮機第二級進口則吸取節省器上方未凝結之冷煤，增加降溫效率。冷凝器管側由分隔板隔成上下兩部分，冷卻海水由下層進入，至另一端後由上層流至出口管路；冷媒則經壓縮機由冷凝器中間之側上方進入。冷凝器銅管外壁為有冷卻片以增加熱交換有效面積，依設計規範，銅管材質為符合 ASME SB-539 CA-706 之銅鎳合金銅管。寒水冷凝器管側之海水進出口隔離閥平時係保持在全開位置，管內充滿靜止之海水，但只要緊急海水泵起動，冷凝器管側海水即會流動。

## （二）大修維護作業

緊急寒水機大修維護作業係依程序書 710「緊急寒水機維護手冊」執行，其維護內容分 A/B 級兩種，前者項目包括週邊設備如冷凍器、冷凝器、壓縮機馬達主機；後者則不含壓縮機馬達主機。本次大修為執行 B 級保養，維護內容包括檢查冷卻器及冷凝器銅管是否有破裂，檢查方式為將冷媒回收至儲存槽後，於冷媒側加壓查漏及冷凝器銅管執行水壓試驗查漏，確認無異常後抽真空除濕，確認真空達到所訂標準後即將冷媒回充，並交由值班人員進行測試。本次大修相關維護測試及後續確認洩漏問題之時程整理如附件二。

## 三、銅管破漏情形

10 月 7 日及 27 日兩次洩漏之銅管數目分別為 47 支及 7 支，其分佈位置如附件三，破漏銅管破漏情形彙整如下（附件四）：

- （一）皆集中在回水管下層之 5 排內。
- （二）破漏點散佈在第一及第四銅管支撐板間，端板至支撐板間則未發現破孔（兩端板間共有 4 只支撐板）。
- （三）每支管之破孔數目約 1~4 只，少數破孔可由肉眼直接辨識。
- （四）銅管外觀並無磨耗或異物衝擊之痕跡。

(五) 經 ECT 檢查其材質為純銅 (ASME SB-359 編號 122)，而非設備規格所列之 90-10 銅鎳合金 (ASME SB-359 編號 706)。

#### 四、事件原因

冷媒流失原因為殼側之冷媒壓力平時為 90~110psig，較海水側之靜水壓 20psig 及運轉壓力 45psig 為高，故冷媒即由破孔之冷凝器銅管滲漏至海水側，待冷媒逐漸流失，管側與殼側壓力接近時，海水即進入殼側，殘餘氣態冷媒則持續洩漏，終至完全流失。

有關銅管洩漏之肇因，經電廠委託電力綜合研究所分析，推論破孔之機制為管內表面保護膜被破壞之後，初期先由氯離子主導發生孔蝕 (pitting) 作用，之後在流體沖蝕與腐蝕同時引發之加成效應之下使蝕孔以較快之速率加大及加深，最後產生破洞。電廠對本次事件初步報告及電力綜合研究所肇因分析初步報告如附件五、六 (肇因分析報告尚未定案，台電公司仍審查中)。綜合核二廠及台電公司電力綜合研究所對薄化穿孔之形成機制與肇因推論，整理如下：

##### (一) 經檢查後可排除之因素：

1. 由銅管外觀冷卻片皆完整，且以目視檢查冷凝器殼側內部，並未發現結構受損或異物，故可排除冷媒側異物撞擊銅管，導致破孔之因素；
2. 銅管支撐板處無洩漏，且外壁目視檢查外觀良好無振動磨耗現象，故並無振動之問題；
3. 銅管之破洞係由管內往外形成，故亦可排除冷媒化性異常造成之腐蝕穿孔。
4. 金相組織檢查未發現有晶粒變形或雜質與缺陷，故應無製造缺陷問題。

##### (二) 銅管發生蝕穿破孔之機制及可能因素有：

1. 海水中之淤泥沉澱造成金屬離子濃度分部不均，形成濃度差電池效應，造成表面氧化銅保護膜破壞；硬水中的雜質如碳酸氫鹽、硫酸

- 鹽亦能破壞表面保護膜。
- 2.由銅管蝕孔內之腐蝕生成物有極為明顯之 Cl 含量，故研判保護膜破壞後，氯離子在金屬表面形成 CuCl 腐蝕生成物，進而水解成為 Cu<sub>2</sub>O，而發生孔蝕，此為銅管孔蝕之主要因素。
  - 3.流速之影響：流速愈快，除了增加腐蝕性元素之供給量，使得腐蝕速度增快，同時易造成金屬表面保護膜破壞或剝離，發生皮膜剝離地方成為陽極而加速腐蝕。
  - 4.海水中含有其他固體物，如海生物、砂石、碎物等，當流速過大時可能於腐蝕生成物周圍形成亂流狀態，使管壁受到強烈的沖蝕作用而加速薄化穿孔，此可由較大蝕孔表面相對光滑，顯示受到沖蝕之結果。
  - 5.錯用不耐沖腐蝕之銅管，亦造成蝕穿之時間提早。

(三) 破管分佈集中在出口側(分隔板上方)之下方五排銅管，可能係因海水流動中，比重較大之雜質(砂、泥、貝類等)，易於下緣位置沈積加速沖蝕，且殼側冷媒係由冷凝器分隔板上方之側邊進入，較高之溫度亦使腐蝕速率較快。

(四) A 串較早發生蝕穿之原因為 A 串海水側運轉之時間較長。

雖然台電公司僅就部分銅管進行分析檢測，但對於上述有關管路薄化穿孔成因之推論，應仍具一定參考價值。某些因素，如製造缺陷之原因或可因其為同一製造批次而排除之；附件六肇因分析報告圖 17 所述袋狀之孔蝕，最終極可能發展成為圖 14 之腐蝕凹坑，故其所發現之孔蝕及蝕穿現象可能為洩漏銅管之普遍情形。不過，對於水壓試驗後短期即再發現洩漏問題，台電公司報告認為是沖腐蝕聯合效應造成，但並未提出明確之證據與理論基礎加以證實；再者，電廠認為 A 串先發生蝕穿係因運轉時間不同所致之說法，亦未提供量化數據以佐證。以上疑問將於下節再討論。另外，雖然肇因分析報告 6.2 中提及於電子顯微鏡下觀察蝕孔邊緣並扭曲變形情形，但因未就破孔處之進行剖面檢查，故尚無法完全排除因管內突壓而造成破孔之可能。

## 五、相關問題討論

### (一) 水壓試驗後短期即再發生洩漏之問題探討

依附件二所載該台緊急寒水機於此次大修之相關作業時程，冷凝器銅管於執行 1000psig 水壓試驗及抽真空試驗後，並未發現洩漏，表示理論上管壁應有一定厚度，何以這些銅管在數天內即薄化穿孔？對於這個問題，可以從兩方面來釐清，首先我們先從發生洩漏之可能時間，以確認是否確實是短時間發生穿孔；若是，則再就其穿孔之機制進行探討。

#### 1. 發生洩漏之可能時間：

經查大修前及大修維護期間之維護運轉紀錄，包括維護課每個月例行 PM 紀錄顯示冷媒壓力正常；另依程序書 710 內容，於寒水冷凝器之管側洩水後，冷媒回收前，需以冷媒偵檢器於管側量測是否有冷媒洩漏，紀錄顯示並未發現有洩漏；寒水機於 9 月 15~22 日陸續完成水壓試驗及查漏、抽真空等作業，水壓試驗壓力高達 1000PSIG，較平常運轉壓力 2.5~3 KG/cm<sup>2</sup> 高出許多，其加壓持續時間約 10 餘秒；之後殼側需加氮氣 45psig 持續 24 小時，其壓降幅度需小於 0.05 吋汞柱；最後再將殼側抽真空，其標準為 29.8 吋汞柱，以上紀錄皆顯示符合標準（附件七）。理論上顯示當時冷凝器銅管應無破孔問題，否則前述測試應無法達成。再者本次大修並未填充冷媒，表示冷媒在大修前並未發生洩漏。

10 月 7 日發現洩漏後於次日執行之水壓試驗查漏，則可驗證水壓試驗執行之確實性。在 9 月 23~27 日開始陸續進行之維護後運轉測試及可用性測試紀錄顯示冷媒及壓力皆正常（附件八），但由於若洩漏極小，可能無法造成液位明顯變化，故不排除冷媒在此時開始發生微漏。

雖然依前述資料仍無法確知發生洩漏之起始點，但研判洩漏應發生在 9 月 22 日維護作業後。不過，以上有關經水壓試驗合格顯示當時冷凝器銅管應無破孔問題之說法，仍需澄清水壓試驗及抽真

空方式是否確實可測出微漏？水壓試驗對於已薄化之蝕孔是否有可能造成負面作用？因水壓試驗本身即為一破壞性試驗，而純銅本身延展性佳，當薄化之蝕孔因應力而變形，是否導致厚度更薄，雖不致達破裂穿孔之程度，但造成破孔之時間提前；或者因蝕孔極小，但因持壓時間僅 10 餘秒，無法觀察到壓力之變化。前者由於台電公司並未就破孔處之進行蝕孔斷面檢查，故無法確認是否有應力變形之情形；後者則仍待進一步了解。

## 2.短時間穿孔之機制

若洩漏在 9 月 22 日維護作業後發生，而如台電公司所述係因沖腐蝕聯合作用在數天之內將殘餘厚度侵蝕穿孔，則其侵蝕率是否合理？針對此問題，我們嘗試從系統運轉紀錄推測管壁薄化進行之時間及理論分析角度來探討：

### (1)系統運轉紀錄：

由於單純腐蝕之速率應較為緩慢，而在海水流動之下，沖腐蝕速率將較快，故推估銅管開始加速薄化之時間應自管側海水流動，即 ECW 系統運轉開始。根據附件九所載大修期間 ECW 系統 A 運轉紀錄，緊急海水系統管路於 9 月 22 日三值開始充水，並於 9 月 23 日上午 9 時許起動 ECW 泵，至 10 月 7 日 9 時左右因檢修 RHR A 系統閘門而停止運轉為止，期間緊急寒水系統海水管路即因 ECW A 進行本身或支援系統測試及 RHR 停機冷卻模式運轉而在流動狀態。而由幾個較大破孔之尺寸研判，開始穿孔滲漏時間最慢應在 10 月 7 日 9 時 ECW A 停止運轉之前，故其薄化到穿孔時間初估在 13 天以內；第二次薄化之時間則為由 10 月 19 日三值銷卡測試，至 10 月 23 日 17 時左右 ECW A 停止運轉為止（因 10 月 7 日寒水機冷凝器海水側已洩水，於 10 月 19 日 16 時 30 分方銷卡充水），其間約 4 日左右，此時間似乎頗短，而於 10 月 27 日方發現洩漏，可能係滲漏量不大，且在靜水狀態下之腐蝕亦以某種速率進行。雖然 10 月 27 日所發現之 7 支銅管於塞管後

仍留在冷凝器內，無法得知其蝕孔大小，但由第二次洩漏之時間推測即使通過水壓試驗，仍可能在數日內蝕穿。

## (2)理論分析：

台電公司以應力觀點，推算在 1000psig 水壓下可能之管壁厚度。經計算在均勻薄化情況下（即厚度一樣），於 1,000psi 水壓試驗時，其不會發生破穿之最小厚度為 0.273mm（管壁原公稱厚度為 0.889mm）。再以簡化之球型蝕孔形狀分析，在 0.15mm 厚度下，其 1000psig 所產生應力尚低於可承受之應力值，而若蝕孔口徑與深度比愈小，因其所受應力更小，其不會破穿之厚度應較 0.15mm 更小，故該報告推論在 1000psi 水壓試驗時，其蝕孔底部不會發生破穿之最小殘餘厚度應在 0.15 mm 以下（附件十）。此一說法雖因其分析所假設之蝕孔形狀為對稱之球型，可能會低估因形狀產生之應力集中效應，但由樣本蝕孔實際形狀尚屬平緩，與其分析之形狀相近，該結論仍可作為參考。至於沖蝕率方面，台電公司提出相關文獻說明在超過「臨界速度」時，其沖腐蝕率會急速上升，依附件六表四所載目前錯用之 CA-122 純銅管與原規範 CA-706 銅鎳合金管之臨界速度分別為 4.4/14.7ft/sec，而目前緊急寒水機冷凝器海水流量在 RHR 熱交換器運轉與未運轉時之流量估計分別為 6.06/12.98ft/sec，對一號機目前使用之純銅管而言，海水流速皆已超出其臨界速度，故沖腐蝕率會較高；而暴露於相同條件下之海水，純銅之腐蝕率亦較銅鎳合金為高，故認為是因沖腐蝕造成穿孔。以上說法基本上仍為定性之推論，並無量化數據加以證實，尚待更深入之分析。

雖然目前仍無法就現有資料證實其短期內蝕穿之合理性，但就理論與實際結果來看，確實有某些因素造成此一現象，海水流速、雜質沖擊、溫度效應、紊流等皆有可能，只是目前之調查或肇因分析仍無法明確解釋及證實其機制為何。而由兩次發現洩漏之情形，顯示即使水壓測試結果正常，仍無法確保銅管不會在短時間內發生

洩漏。

## (二) A/B 串運轉時間差異

由於一號機 A/B 兩台皆使用純銅管，對於何以 A 台已發生破孔，而 B 台則無此現象，是否與其運轉時間之差異有關？故亦就此進行探討。一般 ECW 系統運轉時機包括執行運轉規範規定之功能測試（包括其支援系統如 D/G 或緊急寒水系統之測試）或機組停機時執行 RHR 停機冷卻時之運轉。平時系統之功能測試部分，兩串之測試頻次及時間因規定一樣，故並無差異；大修期間部分，經查 92 年一號機 EOC-16 大修 ECW 系統 A/B 串之運轉時數統計，如附件十一，A 串運轉時間約 33.6 天，B 串則約 30.5 天，兩者之運轉時間差異不大，至於運轉期間因故停機時之運轉情形，運轉值班人員一般會優先使用 A 串，經統計 86~92 年機組因急停或停機檢修之時間大約 30 天，與一次大修停機運轉之時間相仿，再考量 78 年換管之後至 85 年之運轉時間，A 串之運轉時間確實可能較 B 串為多。

## (三) 其他支系統銅管之狀況

### 1. 一號機部分：

根據電廠調查，目前一號機寒水機 A 台冷凝器冷凝銅管與規範不同材質者仍有 191 (240-49) 支；B 台部份經於 10 月 20 日以 ECT 檢測，初步判定其與 A 台一樣，除下方 4 排 34 支銅管外，其餘 240 支銅管材質皆為純銅，其管路薄化情形尚待檢測。至於 78 年時一號機曾進行之大規模換管作業，由於目前並未查出紀錄記載，故並不清楚其原因。

### 2. 二號機部分：

經電廠於 12 月 16、17 日機組停機期間以 ECT 方式檢測，二號機部分之冷凝器銅管材質皆為符合規範之銅鎳合金。另檢測其薄化情形，結果 A 台有兩支管薄化率超過 50%，已以塞管處理；B 台則無超過 50% 之情形，檢測結果如附件。經比較 A/B 台冷凝器銅管之塞管及薄化狀況，結果如下（附件十二）：

- (1)在一號機 EOC-17 發生冷煤流失事件時，二號機 A 台有 11 支銅管塞管；B 台則無塞管，一號機 B 台亦無塞管。
- (2) 二號機於 12 月停機期間以 ECT 檢測結果，薄化率超過 20%之銅管數目，A/B 台分別為 47/12 支，且 A 台有 2 支薄化率為 64%，超過 50%，故以塞管處理，此兩支分別位於分隔板上部第一層及下部之第五層。
- (3)薄化銅管分佈位置於上下層之比例約為 2：1，主要仍集中在靠近分隔板之五層內，銅管薄化程度與其所在位置則無關聯。

依檢測結果，二號機 A 台薄化情形較 B 台為多，此或許可解釋何以一號機 A 台較早發生穿孔洩漏之現象。至於穿孔銅管集中於分隔板附近之原因，台電公司報告中所述應屬猜測，欠缺理論與實際流體數據佐證，故僅供參考。此外，雖然二號機所使用者為合乎規格之銅管，但仍難免有薄化之情形，未來若將以 ECT 方式檢測，並適時塞管或換管，應可有效避免銅管洩漏之發生。

#### (四) 錯用不合規範之銅管問題

有關本案中未使用合於規範之銅鎳合金銅管之問題，寒水機早期係外包由原廠家開立公司進行維護工作，於 84 年以後方由電廠委由國內包商進行維護。經查維護紀錄，原廠家於 78 年(#1 機 EOC-6)大修期間，曾進行該部機兩台緊急寒水機冷凝器銅管之換管工作，研判當時即使用純銅銅管。此顯示電廠當時在外包工作之品管上有所疏失，電廠雖認為可能是早年電廠維護及管制人員經驗不足，致未能即時發現所致。但由 92 年 9 月一號機發生 D/G 護套水冷卻器海水管路 PE 內襯因外包廠家施工不良脫落造成冷卻不足之事件看來，電廠對類似外包工作似乎過度依賴廠家之作業能力，而忽略其作業品質之管控，電廠應全面檢討，以確保外包工作之作業品質。

#### (五) 水壓試驗壓力問題

程序書 710 對冷凝銅管水壓試驗之測試壓力為 1000PSIG，而管側海水運轉壓力約為 2.5~3 KG/cm<sup>2</sup>，設計壓力為 150PSIG。由於水

壓試驗為一破壞性測試，一般出廠時會執行設計壓力 1.5 倍之水壓試驗，不過，廠家對銅管之測試證明所載之測試壓力亦為 1000PSIG（附件十三），電廠維護人員亦說明以往廠家技師皆以 1000PSIG 進行測試。電廠於 93 年 12 月核管會議之簡報資料中說明將檢討水壓試驗之適切性。以本案之經驗，水壓試驗應係適用於均勻厚度管壁或管路法蘭接縫密封之洩漏測試，至於腐蝕非均勻薄化情形，則需以其他檢測方式為之。

#### (六)其他系統是否有類似問題

核二廠類似冷卻系統有 RHR 熱交換器及 D/G 護套水冷卻器，RHR 熱交換器所使用之銅管材質為 ASME SB-359 編號 715，銅鎳比 70/30 之合金管，且其與緊急寒水器銅管不同之處在於其運轉時間較少(海水側隔離閥平時為關閉)，並於運轉後會以淡水沖洗殼側，故應較無腐蝕之問題，但經長期運轉之後，電廠似應注意銅管是否亦有薄化情形(雖然 RHR 熱交換器海水側運轉時，其輻射偵測器會偵測到異常之輻射而發現洩漏，但發現洩漏後將衍生輻射及系統功能之問題，造成處理上之困擾)。D/G 護套水冷卻器則與緊急寒水器之運轉情況較為相近，主要亦是於大修期間以水壓查漏，且若洩漏，並無監測機制提早發現，電廠應檢討是否會有類似問題及採取適當措施之必要性。

#### (七)冷媒流失對安全度之影響

冷媒流失將造成緊急寒水系統不可用，依目前運轉規範規定，緊急寒水系統於大修停機期間雖不須可用，不過，由於部分由緊急寒水系統冷卻之安全系統於大修期間仍須維持可用，以未來核二廠將採用之 ITS 內容，緊急寒水系統之可用時機應視其支援系統之可用時機而定，故目前規定是否合理，尚有待討論。

電廠於 10 月 7 日獲知冷媒流失時，以大修安全度分析工具評估其對安全度之影響，分析結果 CDF 由  $2.19 \times 10^{-10}/\text{hr}$  變為  $6.59 \times 10^{-10}/\text{hr}$ ，其仍遠低於限值  $1.149 \times 10^{-7}/\text{hr}$ （附件十四）；若運轉中發

生洩漏，導致不可用，由於運轉規範允許檢修之時限為 3 天，加上停機時限為 1.5 天，依本會核研所建立之核二廠顯著性評估工具(目前測試中，尚未正式使用)計算其造成之 CDF 變化量為  $7.47 \times 10^{-7}$ ，屬於綠色狀態 ( $< 10^{-6}$ )。

## 六、電廠之改善措施

電廠於 10 月 7 日及 10 月 27 日發生後，其處理及改善措施分如附件五及附件十五，綜合兩次洩漏之改善措施如下：

### (一) 短期措施：

1. 10 月 7 日發現洩漏之銅管已更換為新管 (共 49 支，其中 47 支為新發現之銅管，1 支為原塞管之舊管，另一支為誤抽之銅管)，寒水機亦依程序書進行 A 級保養，並執行相關測試。
2. 針對 1VC-13A/B 冷凝器尚未更換純銅管部分共 191 支，開立 NCD 評估及追蹤管制。
3. 在冷凝器銅管破損確實原因未明確前，已提 PCN 修定程序書 252 「控制廠房巡視表」，增列值班人員每四小時巡視緊急寒水機冷媒液位並記錄之項目。若發現有管子破漏情形，則以塞管方式處理。
4. 定期測試 ECW PUMP 及相關系統 (RHR 熱交換器，柴油機，緊急寒水機)時，須確實再確認緊急海水系統排氣 (venting) 完成，以避免因壓力波造成銅管損壞。
5. 10 月 27 日再發生 7 支銅管洩漏後，對於同屬上層其他 13 支未更換之純銅管亦進行預防性塞管，以防止在運轉期間再破管。同時針對塞管後對冷凝器冷凝效率之影響進行評估，結果認為仍在可接受範圍。
6. 檢討 710 程序書，評估冷凝器銅管除水壓測試外之檢測方式如以

ECT 檢測，以加強監控緊急寒水機冷凝器銅管之可靠性。

7.為減少管路沖蝕，電廠一號機目前於起動 ECW 時皆將 RHR 熱交換器流程開啟，以降低至寒水系統之海水流量（二號機則因考量目前銅管狀況尚佳，且此一措施將增加 RHR 熱交換器海水側沖洗時除礦水之使用量，故未比照辦理）。同時，於 93 年 12 月下旬，經討論後決議將須起動 ECW 系統之相關偵測試驗合併同時執行，以降低海水系統運轉時間。

## （二）長期措施：

電廠將準備足量符合規範之冷凝器銅管備品，以便下次大修時，將材質不符之銅管全面更換為合格之新管。目前庫存 90-10 之銅鎳合金銅管約餘 30 支，其他尚有近 1000 支相同尺寸之銅管，經抽樣以 ECT 檢測確認其材質亦為 90-10 之銅鎳合金，不過因該批備品之倉管資料並無法確認是否為同型之備品（兩者之配件規範及統一編號不同），故電廠目前正計劃委託核研所進行檢証作業，以確認其材料及機械特性符合要求，估計時程約需 3~5 月。

基本上，電廠已採取迅速保守之措施，以使系統恢復可用，及確保系統之可用性；在肇因未明及純銅銅管位更換前，則採取加強監視措施，以儘早偵知銅管可能之洩漏。經過 10 月 27 日之檢修後，截至目前為止，各台冷媒液位監視結果皆未再發現有異常變化，顯示銅管完整性良好。但在一號機 B 台之薄化狀況並不清楚，無法確定在 95 年初大修換管前是否亦會發生洩漏之情況下，故有必要加強監測。但有關冷媒液位之監視措施，於研提之初，僅訂出下限，並未考慮冷媒完全流失後因海水流入冷卻器時，

液位亦會上升之因素，經提醒電廠後，電廠已於現場冷媒液位觀測窗上標示出上下限值。而於 12 月初詢問值班巡視人員如何觀測時，每人之觀測角度及方位並不一致，此將影響到觀測結果，可能造成無法及時發現冷媒液位異常之變化；而且目前巡視紀錄中之合格液位標準為 1~3 格，值班之紀錄皆僅打勾表示正常，站在及早偵知之觀點，似宜改參照機械課每週巡視時之做法，紀錄觀測之液位刻度，以作趨勢之研判。以上問題經提醒電廠後，電廠將就巡視之觀測方式及紀錄進一步檢討。

另對於以 ECT 方式檢測部分，雖然有其優點，但其受限於檢測技術之適用範圍因素，對於端板及支撐板部分之銅管可能無法檢測，故此區域電廠仍應尋求適當之檢測方式。

## 六、本會管制措施

本會駐廠人員於 10 月 7 日獲知本事件後，即回報本會，並密切追蹤電廠之處理作業。本會於 10 月 11 日發視察備忘錄 KS-會核-93-35-0 請電廠盡速查明肇因及提出因應措施，並將本案列入一號機 EOC-17 大修再起動之管制項目（附件十六）。電廠於提出初步之原因及因應改善措施，並說明確實之肇因將進一步分析後提出。本會審查後認為肇因雖仍需時間確認，但電廠已針對可能之因素採取預防改善及監視措施，機組運轉安全得以有效確保，故同意台電公司提出之說明及後續措施，並要求其儘速完成肇因分析作業。

本會於 12 月 23 日核管會議中亦請核二廠就本次事件之發生原因，處理經過及改善措施等進行報告，以了解本案相關問題及後續措施執行情形，並藉此機會將本案之經驗回饋至其他電廠。該次會議中，本會亦提醒

核電廠，對於本案例中包商錯用材料及 92 年一號機 D/G 護套水冷卻器海水管路襯裡脫落事件所顯示電廠對外包作業施工品質管控上之問題，請電廠確實檢討。

## 七、結論與建議

本次事件雖造成安全冷卻系統不可用，但在電廠即時處理並採取適當改善及監視措施之下，並未對機組安全運轉造成影響。雖然如此，本案顯示電廠在某些作業上仍有待改進之處。綜合相關資料及調查結果，可獲致以下結論：

- (一) 對於銅管洩漏之肇因，初步可確認與管路沖腐蝕造成蝕穿有關，但因分析檢測之銅管數目不多，及並未就破口斷面進行檢測分析，故亦不排除尚有其他因素；一號機 A 串發生洩漏之原因應為錯用純銅銅管及 A 串某些特殊因素所致。但對於短時間內蝕穿之機制，尚無明確之證據與理論基礎加以證實。
- (二) 雖然肇因仍有部分未明，但電廠已採取若干因應改善措施，對冷媒液位之監視措施，應為發現異常洩漏之適當作法，各台緊急寒水機冷媒亦未再發現有洩漏情形。不過，目前由值班人員定期巡視之措施，仍應檢討其對現場冷媒觀測之方式及角度，及紀錄實際之冷煤液位刻度，以確保達到及早偵知洩漏之目的。
- (三) 未來一號機若能依計劃於下次大修時換管，及二號機採用 ECT 方式檢測薄化狀況，適時採取塞管或換管措施，將可有效避免發生類似之洩漏。此外，端板及支撐板部分之銅管可能無法以 ECT 方式檢測，針對此區域電廠仍應研議適當之檢測方式。
- (四) 電廠應評估目前 RHR 熱交換器及 D/G 護套水冷卻器長期運轉之後，其銅管是否亦有類似薄化情形，並視評估結果採取必要之因應措施。

(五) 本案中包商錯用材料與 92 年一號機 D/G 護套水冷卻器海水管路襯裡脫落事件類似，均屬電廠對外包作業施工品質管控上之問題，電廠應確實檢討。

以上結論 (二) ~ (五) 項之問題，已發注意改進事項，請電廠檢討改善。

註：1. 本報告附件因篇幅過多，故從略。

2. 若對本報告內容有任何疑問，請洽本會張欣科長，

電話：(02) 22322130。