

核電廠運轉及除役期間材料及非破壞檢測 評估研究計畫期末報告

國家原子能科技研究院

中華民國 113 年 12 月

目 錄

	頁次
一、 依據.....	1
二、 預定完成工作項目及實際執行情形.....	1
三、 計畫成果簡介.....	2
四、 經費使用狀況.....	8

圖目錄

圖 1 試片 C 與 H 電化學實驗與重量損失實驗腐蝕速率比較圖	5
圖 2 電化學實驗(a) 1.75wt%與(b) 3.5wt%電位與電流關係圖	6
圖 3 冷加工量與腐蝕速率關係圖	7

表目錄

	頁次
表 1：各查核點之查核項目	1
表 2：績效指標執行情形	2
表 3 各項經費使用表(單位:千元).....	8

一、 依據

本期末報告係依據「核電廠運轉及除役期間材料及非破壞檢測評估研究」計畫(以下簡稱本計畫)勞務採購案契約第五條第一項第二款辦理，報告內容包含預定完成工作項目及實際執行情形，研究成果與經費使用狀況。

二、 預定完成工作項目及實際執行情形

表一為契約計畫書內各查核點之查核項目，期末查核為 10 至 12 月之工作項目，表二為針對契約要求之績效指標之執行情形，依契約規定為三篇研究報告與兩篇論文發表，實際完成三篇研究報告與三篇論文發表，詳細資料如附件。

表 1：各查核點之查核項目

月份	工作進度	狀態
4	<ol style="list-style-type: none">蒐集並彙整現有的核電廠建物設施的劣化相關的防治經驗與事件報告。完成碳鋼電化學腐蝕試片製備。完成冷加工碳鋼試片製備。	達成
5-7	<ol style="list-style-type: none">完成一篇研究報告初稿以提供國內電廠建物老劣化管制之參考。建立模擬除役環境電化學腐蝕實驗參數。碳鋼重量損失腐蝕實驗進行500小時以上。	達成
8-9	<ol style="list-style-type: none">蒐集並彙整國際間應用於檢測核電廠建物老劣化之最新非破壞檢測技術發展。完成碳鋼電化學腐蝕實驗速率計算。完成冷加工碳鋼重量損失腐蝕實驗速率計算。	達成
10-12	<ol style="list-style-type: none">完成一篇研究報告以建議國內電廠建物老劣化監控之有效的檢測方式。完成子項計畫二與三研究報告一篇	達成

表 2：績效指標執行情形

項目	績效指標	量化值 (達成值/目標值)	備註
A	論文	3 篇 / 2 篇	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 呂文豐，113年度防蝕工程年會暨論文發表會(附件一) ➢ 裴廣智，2024 World Conference on Non-Destructive Testing (附件二) ➢ 裴廣智，2024 World Conference on Non-Destructive Testing (附件三)
B	研究報告	3 篇 / 3 篇	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 「核電廠除役過渡期間冷加工碳鋼腐蝕行為研究」(附件四) ➢ 「水晶河3號核電廠混凝土圍阻體脫層破壞之檢測處理方法觀察」(附件五) ➢ 「國際間應用於核電廠建物老劣化檢測之最新非破壞檢測技術發展」(附件六)

三、計畫成果簡介

子項計畫一

子項計畫一主要為研析最新國際核電廠建物材料之劣化防治經驗、非破壞檢測技術，提出應用於建物之有效檢測方式、建議判讀程序、評估方法及管制關鍵要項。研析成果撰寫為兩篇研究報告，題目分別為「水晶河3號核電廠混凝土圍阻體脫層破壞之檢測處理方法觀察」與「國際間應用於核電廠建物老劣化檢測之最新非破壞檢測技術發展」，以下為摘要兩篇研究報告之重點結論：

一、「水晶河3號核電廠混凝土圍阻體脫層破壞之檢測處理方法觀察」：

1. 水晶河3號一案中採用的檢測技術主要有四：脈衝響應檢測(IR)、透地雷達檢測(GPR)、敲擊回音檢測(IE)，還有破壞性檢測即鑽心取樣分析再加上內視鏡目視檢測(Boroscopic Inspection)。由於核電廠相當重

視結構完整性，很少採用鑽心取樣類的檢查模式。不過本案在圍阻體牆體上共做了約 84 筆鑽心取樣，在扶壁#3 和#4 間的問題區域就進行約 48 個鑽心取樣。透過內視鏡檢查，可確認裂縫，並評估其寬度(見圖 5.1)。對於裂縫寬度，其他非破壞檢測方式是無法有效測量的。

2. 對國內電廠來看，在除役階段的建物其切除工程或因安全需求(如地震或火災後)暫時性的建物整修補強工程，相關土木非破壞檢測技術，都有其需求。正如 NRC 的看法，對這些因子「尋而未見」比「未尋而見」要好得多。建物切除工程對預力解壓後的混凝土結構是否有把握，是否會造成不預期崩裂，則建議於解壓前進行預力結構體的數值模擬分析，以確認適當的解壓順序或解壓範圍，避免預力結構於解壓後造成局部的應力集中。

二、「國際間應用於核電廠建物老劣化檢測之最新非破壞檢測技術發展」：

1. 本報告從介紹世界非破壞檢測大會(WCNDT)開始，觀察非破壞檢測技術的學術發展和實際應用。第 20 屆 WCNDT 在韓國仁川的松島國際會展中心舉行，本次參展廠商約 240 家，論文及專題約 950 篇報告。本文第二章將論文及專題之分類及篇數加以分析，一窺目前主要學術發展領域及消長動向。
2. 本報告第三章將由參展設備型態來看未來發展趨勢，運用拓撲結構理論和延時設計做成具掃描功能之陣列探頭(Array)，加上快速資料處理及成像運算，可大幅簡化判讀難度，這也為 AI 應用及自動化檢測建立入門捷徑。對檢測條件困難的位置，非接觸式(Air-Coupled/Laser UT)、遠距檢測(GW)或銲接即時檢查及監測的發展，也足以令人期待。先進材料的發展要能具備實用價值，品質控管和異狀檢出的對應技術是必要條件。因此對新材料如複合材料及航太/國防工業材料，或對非線性材料及材料在力學非線性部位之應用，非破壞檢測技術的測試開發是目前各國科研單位重要的技術服務項目。

3. 本報告第四章則透過介紹 ASME B&PV Code Section XI 之 IWL 沿革及相關案例和美國 Wolf Creek 電廠執行延役維護法規之「結構監測巡視」相關作業，來介紹核電廠過去二十五年對建物老劣化進行健康檢查及監測的做法和需求技術。傳統檢查及監測以目視檢測為主，由責任技師負責研判及簽署報告。若遇到表面無法探知的情況，則指揮運用非破壞檢測技術。本文第五章則對會場展示之土木非破壞檢測之最新設備與技術，特別是針對核電廠建物結構狀況，做深入介紹及討論。
4. 在今年大會學術領域中，有一門近期發展的學門，名為結構健康監測及預後健康管理，Structural Health Monitoring (SHM) & Prognostics Health Management (PHM)。結構健康監測的目的主要是透過土木非破壞檢測相關技術來量化混凝土結構劣化之現狀，而預後健康管理 (PHM)則是透過量化數據來預測結構劣化速率及未來狀況，並提出符合經濟效益之維持或者延壽之作業方式。對現行除役的核設施，ASME IWL 及 Wolf Creek 維護法規之「結構監測巡視」，畢竟已是二、三十多年前的作法，現階段整合非破壞檢測技術之 SHM 及 PHM，未來將有其施行之需要，且可達到監測數據量化效果，進而評估結構的安全性，亦可滿足核安管制的需求。

子項計畫二

子項計畫二為利用電化學腐蝕試驗的方式進行碳鋼的腐蝕速率計算以及壽命評估工作，並與重量損失腐蝕試驗所得到的結果進行對比，以驗證電化學腐蝕試驗的可靠性。電化學腐蝕實驗使用之碳鋼材料為 A106 B，參考前期計畫所量測的除役過渡階段水環境下碳鋼的腐蝕速率驗證電化學腐蝕試驗的可靠性，並用驗證後的電化學參數進行冷加工碳鋼電化學腐蝕速率量測，結果與重量損失腐蝕實驗接近，代表電化學腐蝕實驗量測推估的腐蝕速率是可靠的。如圖 1 電化學實驗結果推論參數 1.75wt% 氯化鈉電解液以及掃

描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時後穩定的腐蝕速率，而 3.5wt% 氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時前的腐蝕速率。並且由冷加工碳鋼電化學實驗量測電壓與電流關係圖 2 觀察到電位高於腐蝕電位 (約-0.7V) 後，相同電位時冷加工越高的電流越大，這代表在碳鋼發生局部腐蝕(例如：間隙腐蝕，伽凡尼)電位提升的狀況下，冷加工量越高，腐蝕速率越快，因此碳鋼易發生局部腐蝕的區域(例如:焊道區域，碳鋼與不銹鋼接觸的區域等)，如同時發生冷加工，管制標準須比單純冷加工更嚴格，尤其在焊道附近常伴隨冷加工的發生。

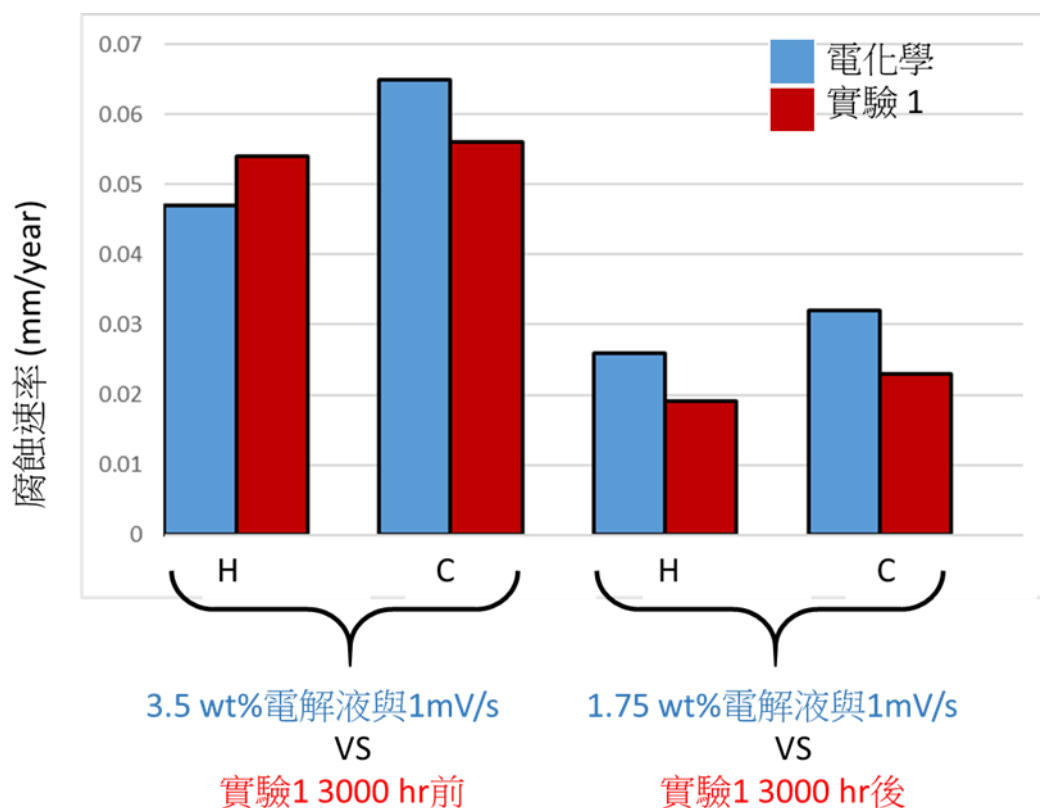


圖 1 試片 C 與 H 電化學實驗與重量損失實驗腐蝕速率比較圖

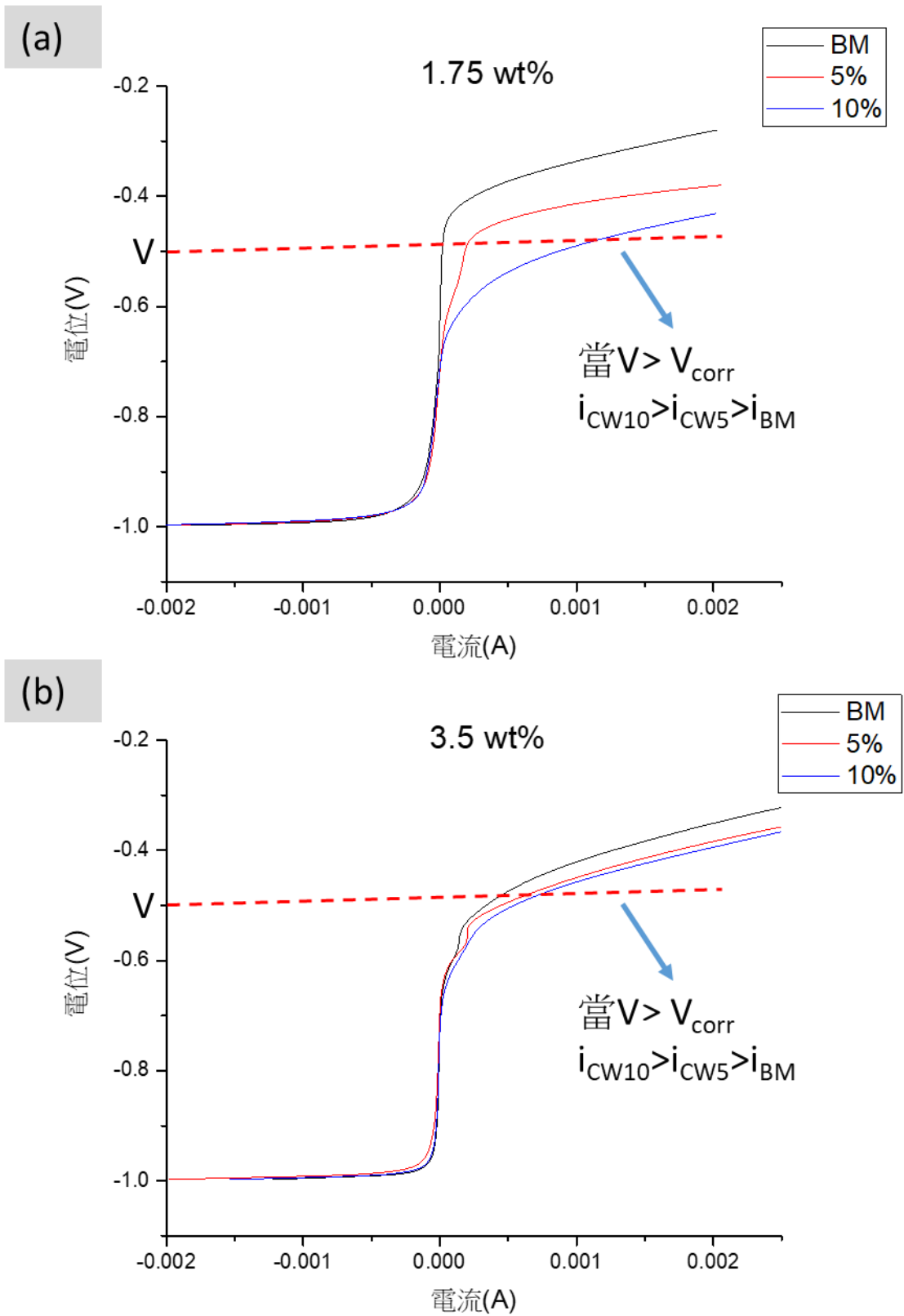


圖 2 電化學實驗(a) 1.75wt%與(b) 3.5wt% 電位與電流關係圖

子項計畫三

子項計畫三為探討除役過渡階段環境下冷加工對碳鋼的影響並計算其腐蝕速率，提出影響該材料腐蝕情形之關鍵要項。由除役過渡階段水環境下重量損失實驗結果計算的腐蝕速率如圖 3 所示，BM(沒有冷加工)、CW5%(冷加工量厚度縮減 5%)與 CW10%(冷加工量厚度縮減 10%)的腐蝕速率分別為 0.04 mm/year、0.046 mm/year 與 0.048mm/year，碳鋼冷加工量越高，腐蝕速率越快，每增加 10%冷加工量，腐蝕速率約增加 20%。冷加工造成的缺陷使氧與鐵更容易擴散，為冷加工加速腐蝕速率的主因之一，另一個原因為產生殘留應變，殘留應變與殘留應力正相關，當腐蝕裂縫前端殘留應變越高，氧化層越易破損崩壞造成腐蝕裂縫生長速率增加。由以上實驗結果得知冷加工會加速碳鋼腐蝕，因此在可能發生冷加工區域的碳鋼管材需有更嚴格的管制標準，越小管徑的碳鋼管材通常會有較大的冷加工量，管制標準也須比大管徑的碳鋼管材更嚴格。

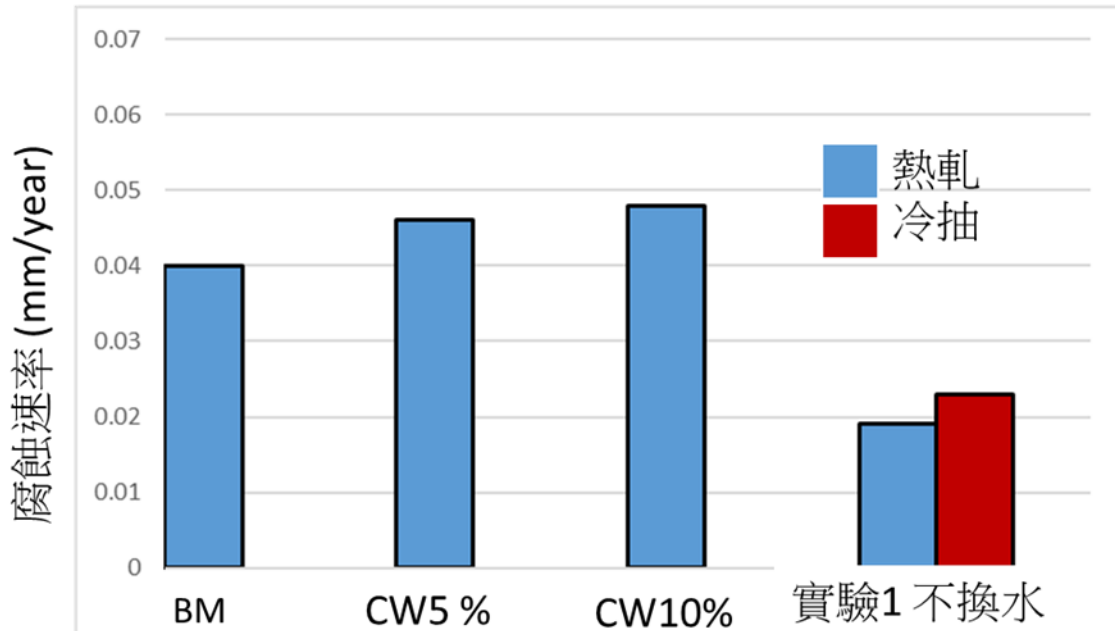


圖 3 冷加工量與腐蝕速率關係圖

四、 經費使用狀況

表 3 為統計至 11 月底之經費使用狀況，目前使用 3773 千元(不包含管理費 253 千元)，本計畫總經費為 4371 千元。

表 3 各項經費使用表(單位:千元)

子項計畫	人事費	設備使用與維護費	材料費	差旅費	其他
1	935	實驗機台維修:281	參考規塊與檢測試片 275	1	0
2	312	實驗機台維修:114	實驗耗材:116	125	0
3	623	實驗機台維修:280 資料庫:560	實驗耗材:87	120	ICGEAC會費 與證照費
總計	1870 / 2103	1235 / 1266	478 / 487	190 / 195	69 / 69

附件一



電廠除役過渡階段碳鋼管材腐蝕行為研究

呂文豐*¹、陳泰丞¹、黃俊源¹、蔡坤釗¹

¹ 國家原子能科技研究院 材料研究所

The Corrosion Behavior of Carbon Steel Pipes Materials Used at Nuclear Power Plants Between Deactivated and Decommission Processes

*通訊作者：wflu@nari.org.tw

摘要

碳鋼(carbon steel)廣泛應用於沸水式(boiling water reactors, BWRs)核能發電廠之反應爐飼水管路、冷卻水壓力邊界組件、輔助系統與控制棒驅動系統等，腐蝕(corrosion)是除役過渡階段碳鋼材料破損主要原因之一，相較於不銹鋼 Cr 含量很低，無法形成有效的氧化保護層。本研究為利用 A106 B 管材進行模擬除役過渡階段靜水環境之腐蝕實驗，以利管制單位管制除役過渡階段之核電廠。測試三組實驗：(一)實驗(1)模擬除役過渡階段完全沒有水流動的狀況，冷抽(C)與熱軋(H)試片腐蝕速率分別為 $23 \mu\text{m}/\text{year}$ 與 $19 \mu\text{m}/\text{year}$ ；(二)實驗(2)模擬除役過渡階段固定時間使水流動的狀況，冷抽(C)試片之腐蝕速率為 $11 \mu\text{m}/\text{year}$ ；(三)實驗(3)為模擬管路中水沒有充滿的狀態，熱軋(H)試片分為 a(空氣)、i(介面)與 w(水中)試片腐蝕速率分為 $9 \mu\text{m}/\text{year}$ 、 $93 \mu\text{m}/\text{year}$ 與 $88 \mu\text{m}/\text{year}$ 。總結實驗(1)至(3)的實驗結果，碳鋼在實驗(3)空氣與水介面區域腐蝕速率最快，而在實驗(2)模擬固定使水流動的狀況腐蝕速率最慢。實驗(3)碳鋼在靜置水中腐蝕速率主要受溶氧量與離子濃度影響，溶氧量為 1 至 6 ppm 等級時，離子濃度對腐蝕速率之影響大於溶氧量，且離子濃度越高腐蝕速率越快。

關鍵詞：碳鋼、腐蝕、核電廠

Abstract

Carbon steel is widely used in boiling water reactors (BWRs), which corrosion is one of the main causes of material degradation during the decommissioning transition phase. This study simulated corrosion experiments of carbon steel A106 B pipes in a static water environment, which illustrated the decommissioning transition phase. The study includes three sets of experiments. First, simulates a condition with no water flow during the decommissioning transition phase. The corrosion rates for cold drawn and hot rolled specimens were $23 \mu\text{m}/\text{year}$ and $19 \mu\text{m}/\text{year}$, respectively. Second, simulates a condition with fixed-time water flow during the decommissioning transition phase. The corrosion rate for the cold drawn specimens was $11 \mu\text{m}/\text{year}$. Third, simulates a condition where water does not completely fill the piping. The corrosion rates for hot rolled specimens were $9 \mu\text{m}/\text{year}$ in air, $93 \mu\text{m}/\text{year}$ at the air-water interface, and $88 \mu\text{m}/\text{year}$ underwater. In summary, the corrosion rate of carbon steel in static water is mainly influenced by the dissolved oxygen content and ion concentration. When the dissolved oxygen levels are between 1 to 6 ppm, higher ion concentrations lead to faster corrosion rates.

Keywords: Carbon Steel; Corrosion; Nuclear Power Plants.

1. 前言

碳鋼(carbon steel) (A105、A106、A53 等)廣泛應用於沸水式(boiling water reactors, BWRs)核能發電廠之反應爐飼水管路組件、冷卻水壓力邊界管路組件、輔助系統與控制棒驅動系統等。碳鋼主要成分是鐵與碳，碳含量小於 1.5 wt.%，其顯微組織主要為波來鐵(Pearlite)與肥粒鐵(Ferrite)，波來鐵為肥粒鐵與雪明碳鐵(Cementite)組成，組成多寡由 C 含量決定。碳鋼因為 Cr 含量很低，所以無法形成有效的氧化保護層，即使在一般大氣環境下也容易發生腐蝕且絕大部分均勻腐蝕[1-2]，如果是在大氣中或是水環境中含有 SO_2^{2-} 、 Cl^- [1]的情況下，更會加速腐蝕[3-4]。碳鋼抗腐蝕性較差，但是其價格相對於不銹鋼便宜許多，且機械強度與延展性佳，所以在一些溫和的環境時還是會使用碳鋼，如果碳鋼要使用在易腐蝕環境，會鍍上保護層增加其抗腐蝕能力，如鍍鋅、鍍鋁鎂鋅等。

核一廠在除役過渡階段雖然沒有運轉，但是相關組件不會立刻拆除，需要在水環境下放置數年，為確保在放置期間材料不會因破損而導致放射性物質外洩，需要探討與研究其可能破損的材料與機制，進而提供原能會管制參考之資料。在核一廠停役後，反應爐心溫度降至約 40 °C 以下，壓力下降至一大氣壓，在這種環境下，抗腐蝕質較不銹鋼等材料差之碳鋼更容易受腐蝕損傷，所以本研究主要研究碳鋼材料。為了研究碳鋼在核電廠中的損傷模式，本研究經由 CODAP (Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme)資料庫[5]，整理出歷年來世界各地核電廠碳鋼破損之資料，結果顯示 A106 B 為核電廠廣泛使用但發生破損事件較多的碳鋼材料，所以本研究使用 A106 B 作為碳鋼損傷之研究材料。A106 B 材料在核電廠發生破損的機制有腐蝕(corrosion)、沿晶應力腐蝕龜裂(IGSCC)、疲勞(fatigue)、沖蝕(erosion)、流動加速腐蝕(flow accelerated corrosion, FAC)、微生物腐蝕(microbiological influenced corrosion)與其他。考慮到除役過渡階段機組停止運轉狀態下，其中一些機制發生機率下降許多，例如無運轉時應力影響因素下降，應力腐蝕龜裂、疲勞或可排除，且在靜置水的狀況下沖蝕與流動加速腐蝕亦可排除。在停役後溫度會下降到室溫附近，會造成微生物腐蝕的影響機率增加，但是因為是密閉環境微

生物進入會比較困難，所需時間會比較長，但是只要發生微生物腐蝕會比一般腐蝕更嚴重，腐蝕速率更快，且會促進沉積物孔蝕(under deposit pitting)狀況的發生[6]。由以上資料的總結，我們推論電廠停役後最易發生的破損模式為腐蝕，而腐蝕有分為一般腐蝕(均於腐蝕)、伽凡尼腐蝕(Galvanic)、孔蝕與間縫腐蝕(crevice corrosion)，而一般腐蝕佔電廠中碳鋼破損之最大比例。我們再進一步整理分析 A 106 B 在電廠發生腐蝕之組件與使用時間(圖 1)，發現在 Service Water System 發生腐蝕的事件最多，而且大部分使用時間在 30 年內就會發生。核一廠已經運轉 40 年，因此停止運轉後溫度壓力下降，碳鋼很可能在存放期間發生破損事件。

本研究主要為利用 A106 管材進行模擬除役過渡階段各種可能靜水環境之腐蝕狀況的實驗。實驗結果可以得到相關腐蝕速率數據與其機制，以利管制單位管制除役過渡階段之核電廠。

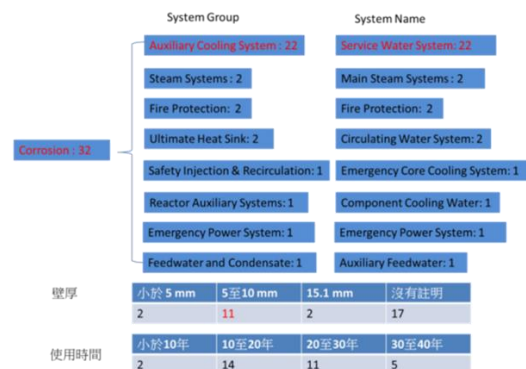


圖 1. CODAP A106 B 腐蝕破損資料[5]

2. 實驗流程

本實驗所使用的材料為兩種不同製程之管狀 A106 B，一種製程為冷抽試片代號為 C，另一種製程為熱軋試片代號為 H，其尺寸規格如表 1 所示。A106 B 為低碳鋼，其碳含量依 ASTM 規範須小於 0.3 wt %，經輝光放電光譜儀(Glow Discharge Optical Emission Spectrometry)成分分析結果如表 2 所示，其元素成分組成皆符合 ASTM 規範。A106 B 碳鋼金相依照標準金相流程製備，並利用 10 % HNO_3 與 90 % methanol 腐蝕液在室溫腐蝕約 60 秒。A106 B 冷抽(C)與熱軋(H)之試片在放入靜水腐蝕實驗環境前，利用電子掃描顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)

觀察材料表面缺陷，利用能量散射光譜儀 (Energy Dispersive Spectrometers, EDS) 分析表面成份分析，利用 X 射線光電子能譜儀 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 分析腐蝕氧化物，利用電子背向散射繞射技術 (EBSD, Electron Backscatter Diffraction) 分析冷加工所造成殘留應變與晶界組成分佈之改變。

A106 B 冷抽(C)與熱軋(H)之管狀材料切割加工成 5 mm 長度之管狀試片，並利用砂紙將表面研磨至 # 1000，然後量測試片重量後放上試片架上(圖 2)，再依據試片取出之先後編號。試片放在試片架上固定好後放入高壓釜，並注入去離子水，維持水環境溫度 45°C。設計三組實驗分別模擬電廠在除役過渡階段之可能水環境：實驗(1)為模擬除役過渡階段完全沒有水流動的狀況；實驗(2)為模擬固定時間會讓水流循環的狀況；實驗(3)為模擬管內水沒充滿的狀況。三組實驗詳細的實驗條件為表 3 所示，該三組實驗仍然在進行當中。實驗(1)與實驗(2)高壓釜為充滿水的狀態，實驗(1)放入冷抽與熱軋試片各 20 片(代號為 1C 與 1H，依取出順序編號 1 至 20)，實驗(2)放入冷抽的試片 16 片(代號為 2C，依取出順序編號 1 至 16)。實驗(3)為模擬水沒有充滿的情況，所以高壓釜內水沒有充滿，水的介面如圖 2 所示，因為水會稍微蒸發流失所以水的介面會有些許之改變，試片架有三層試片，最上一層接觸環境為空氣(代號 a，依取出順序編號 1 至 6)，中間為一半泡在水裡的介面試片(代號 i，依取出順序編號 1 至 6)，最下層完全泡入水中(代號 w，依取出順序編號 1 至 6)。實驗取出之試片經由超音波震盪後量測其重量損失，利用光學顯微鏡觀察試片表面裂縫缺陷，並利用 SEM 與 XPS 進行表面氧化物分析。

表 1. A106 B 尺寸規格

製程	代號	等級	壁厚 (mm)	外直徑 (mm)
冷抽	C	B	2.77	21.3
熱軋	H	B	5	32

表 2. A106 B 成份組成

wt %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
ASTM A106 GR.B	≤ 0.30	≥ 0.10	0.29 ~ 1.06	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.40	≤ 0.15	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.08
廠商 1 (冷抽 C)	0.19	0.22	0.43	0.016	0.002	0.002	0	0	0	0
量測 C	0.15	0.17	0.43	0.015	0.003	0.05	0.02	0.02	0.02	0.001
廠商 2 (熱軋 H)	0.19	0.22	0.44	0.013	0.014	0.015	0.002	0.019	0.013	
量測 H	0.21	0.17	0.39	0.013	0.006	0.02	0.01	0.02	0.005	0.001

表 3. 實驗模擬條件

實驗編號	試片編號	實驗條件	取出時間	實驗時間 (hr)
實驗 1	C:20 H:20	不換水 (45°C)	約 2 個月 取出 1 片	21000
實驗 2	C:16	約 1 個月換水 (45°C)	約 2 個月 取出 2 片	12000
實驗 3	a:6 i:6 w:6	界面腐蝕行為觀察 不換水(45°C)	約 3 個月 取出 1 組	12500



圖 2 實驗試片架設與實驗(3)之水的介面高度

3. 結果與討論

3.1 實驗母材之金相

本實驗所使用之 B 冷抽(C)與熱軋(H)試片金相如圖 3 所示，其中黑色區域為波來鐵，白色區域為肥粒鐵(Ferrite)，冷抽試片晶粒比較狹長而熱軋晶粒比較接近等軸晶，晶粒的差別為製程加工溫度與加工量不同所造成。利用 SEM 分析試片是否有製程時所造成之缺陷裂縫，圖 4 與圖 5 分別為冷抽(C) 與熱軋(H)試片靠近外壁與內壁的

SEM 區域放大圖，從圖中可以發現冷抽(C)與熱軋(H)試片外壁並沒有觀察到裂縫缺陷，冷抽(C)內壁裂縫缺陷數目比熱軋(H)試片多且最長的裂縫超過 $100\ \mu\text{m}$ ，但大部分缺陷在 $10\ \mu\text{m}$ 以下，熱軋(H)試片內壁除了裂縫缺陷較少外，最長裂縫不超過 $50\ \mu\text{m}$ 。除了藉 SEM 觀察表面缺陷外，也同時以附加在 SEM 儀器上的 EBSD 與 EDS 進行表面裂縫缺陷分析，圖 6 與圖 7 分別為冷抽(C)與熱軋(H)之 EBSD 與 EDS 的分析結果，由晶粒方位分佈圖可以得知裂縫為穿晶與沿晶之混合，從 EDS 分析結果得知裂縫區域有著氧化物為鐵的氧化物。為了分析缺陷裂縫是否受殘留應變影響，利用 HKL Chanel 5 軟體分析 EBSD 資料得到 Kernel Average Misorientation (KAM, 圖 8), KAM 值與殘留應變為正相關，所以從圖九中可以觀察到冷抽(C)內壁的殘留應變高於與熱軋(H)試片，造成的原因為冷抽試片的製程溫度較低，因此有更高的殘留應變，這也是造成冷抽試片裂縫缺陷較多與較長的原因[7-10]。

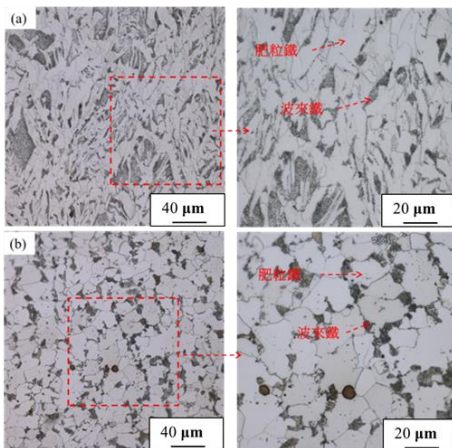


圖 3 試片金相(a)冷抽,(b)熱軋

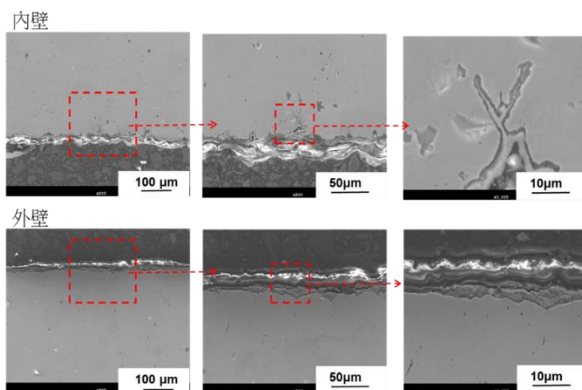


圖 4 冷抽(C)SEM 圖

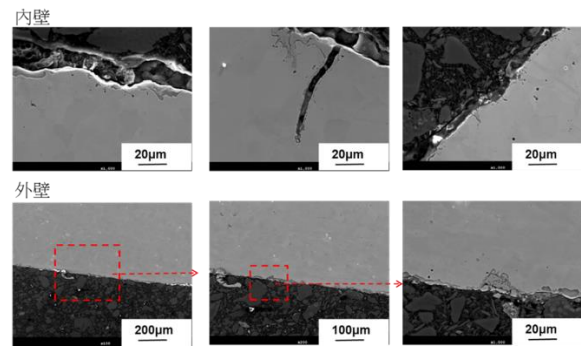


圖 5 熱軋(H)SEM 圖

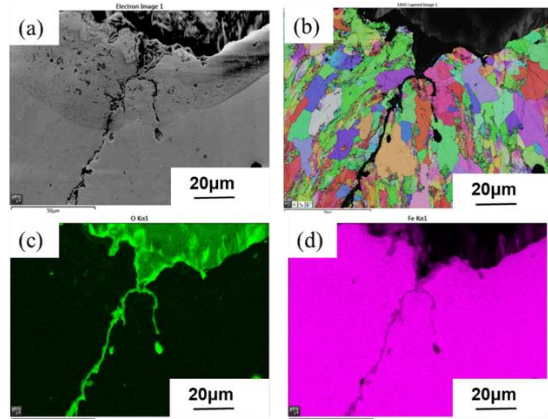


圖 6 冷抽試片內壁 EBSD 與 EDS 圖:(a)SEM 圖,(b)EBSD 晶粒方位圖,(c)EDS 氧分布圖,(d)EDS 鐵分布圖

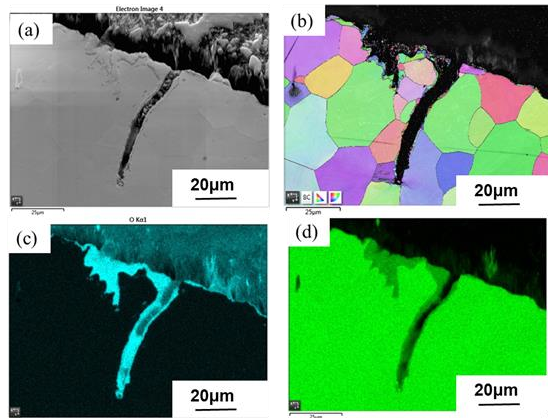


圖 7 熱軋試片內壁 EBSD 與 EDS 圖:(a)SEM 圖,(b)EBSD 晶粒方位圖,(c)EDS 氧分布圖,(d)EDS 鐵分布圖。

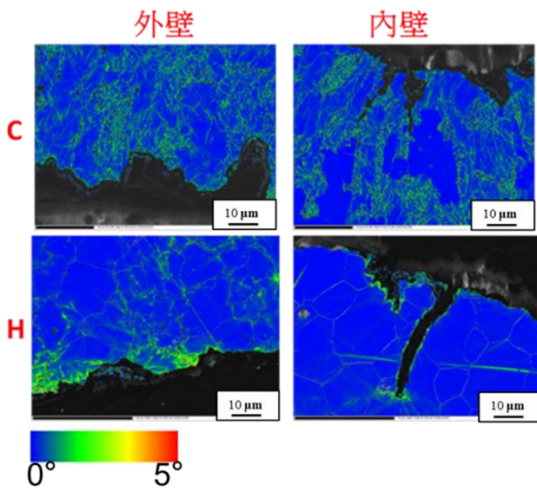


圖 8 冷抽(C)與熱軋(H)KAM 圖

3.2 水流動對腐蝕速率的影響

實驗(1)為模擬電廠沒有讓水循環的環境，試片取出後利用超音波震盪器把表面氧化物清洗後量測重量，計算單位面積重量損失並繪製與時間關係圖 9，從單位面積重量損失與時間關係圖中可以觀察到腐蝕速率分為三階段，在 stage 1 時約在 1100 小時前，因為表面沒有氧化物保護腐蝕速率較快，在轉換成 stage 3 前會經過約 1000 小時的 stage 2 轉換區，在進入 stage 3 後腐蝕速率明顯較 stage 1 慢。Stage 3 的腐蝕速率為接近實際狀況的腐蝕速率，實驗時間越久腐蝕速率越穩定。利用直線擬合 Stage 3 趨勢線的斜率可用以計算腐蝕速率，腐蝕速率冷抽(C)與熱軋(H)在 stage 3 分別為 $23 \mu\text{m}/\text{year}$ 與 $19 \mu\text{m}/\text{year}$ ，在 stage 1 則分別為 76 (冷抽)及 $85 \mu\text{m}/\text{year}$ (熱軋)。實驗(2)為模擬電廠固定時間讓水流循環，其中水中溶氧量會高於實驗(1)之溶氧量，其單位面積重量損失與時間關係如圖 10。與實驗(1)相同其腐蝕速率分為三階段，最重要的為經過長時間後穩定的 Stage 3 腐蝕速率。實驗(2) Stage 3 腐蝕速率為 $11 \mu\text{m}/\text{year}$ ，其腐蝕速率低於實驗(1)之腐蝕速率。

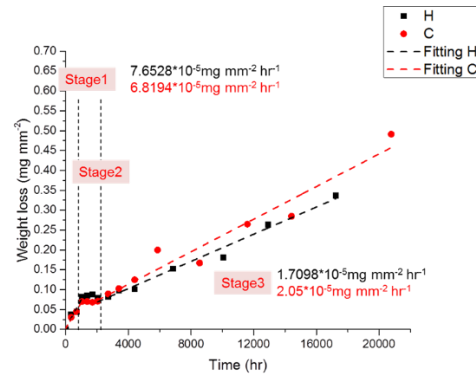


圖 9 實驗(1)重量損失 VS 時間圖

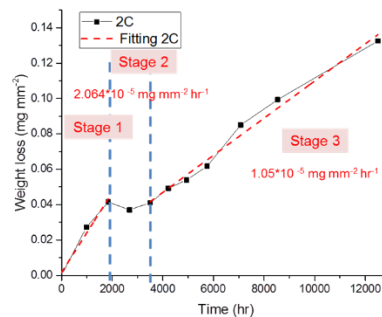


圖 10 實驗(2)重量損失 VS 時間圖

3.3 半浸水試片之腐蝕速率

實驗(3)為模擬水在碳鋼管內沒有填滿的狀態，目的為觀察其介面區域腐蝕狀況。試片取出後清洗前與清洗後如圖 11，目視檢查發現 i 試片介面區域腐蝕狀況比其他區域嚴重。空氣中的試片 a 與 i 試片介面區域的氧化物經清洗後無法去除，而水中試片 w 與 i 試片水中區域氧化物經清洗後大部分被去除，這代表介面區域形成的氧化物與空氣中相似，但與水中不同，之後也由 EDX 與 XPS 結果證明。實驗(3)各試片單位面積重量損失與時間關係如圖 12，其腐蝕速率沒有像實驗(1)與(2)分為三個階段，其中介面腐蝕試片 i 其腐蝕速率最快，空氣中試片 a 腐蝕速率最慢。介面區域腐蝕速率較快的原因如圖 13，在空氣與水的介面因為水的表面張力的影響，在碳鋼表面形成一層水的薄膜(圖 13(a))，由 Yamashita 等人研究發現水薄膜層厚度在 $10 \mu\text{m}$ 附近腐蝕速率最快(圖 13(b))[11]，進而造成介面區域腐蝕比較嚴重之狀況。實驗(3)試片 a、i 與 w 的腐蝕速率分別為 $9 \mu\text{m}/\text{year}$ 、 $93 \mu\text{m}/\text{year}$ 與 $88 \mu\text{m}/\text{year}$ 。介面試片 i 腐蝕速率 $93 \mu\text{m}/\text{year}$ 為試片

整體腐蝕速率，包括一部分水中腐蝕速率，以圖 14 的面積比率方式來計算介面區域的腐蝕速率為 $102 \mu\text{m}/\text{year}$ 。

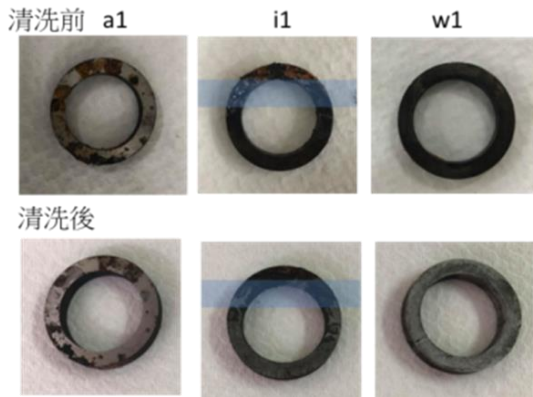


圖 11 實驗(3)試片清洗前後

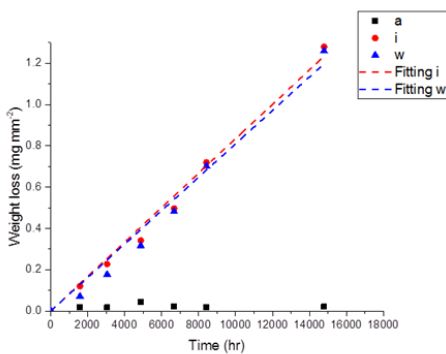


圖 12 實驗(3)重量損失 VS 時間圖

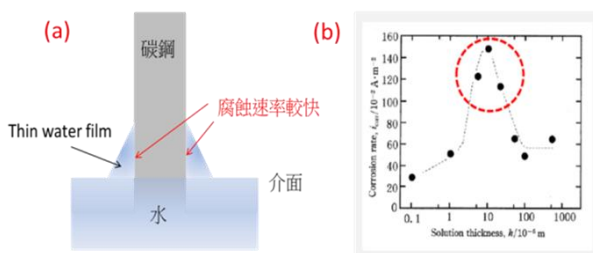


圖 13 介面腐蝕機制(a)示意圖，(b)水膜厚度與腐蝕速率之關係圖[8]

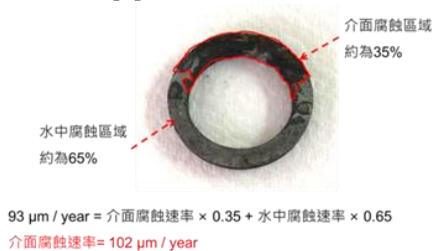


圖 14 介面區域腐蝕速率計算

綜合實驗(1)、(2)與實驗(3)在水中的試片(w)的腐蝕速率與相關實驗參數整理如表 4，碳鋼在靜置水中腐蝕速率主要受溶氧量與離子濃度影響，離子濃度與水中電導率相關，離子濃度越高電導率越高，量測水中電導率代表離子濃度高低，利用量測數據比較其相互間對腐蝕速率之影響。實驗(2)為模擬固定時間讓水流循環的環境，溶氧量最高且離子濃度最低，雖然溶氧最高但是腐蝕速率最慢，因此研判離子濃度對腐蝕速率也有很重要之影響。比較實驗(1)與(2)，實驗(2)的溶氧量遠高於實驗(1)，相反的離子濃度遠低於實驗(1)，且腐蝕速率比較慢，因此研判在溶氧量為 1 至 6 ppm 等級時，離子濃度對腐蝕速率之影響大於溶氧量且離子濃度越高腐蝕速率越快。比較實驗(1)與實驗(3)，離子濃度接與溶氧量實驗(3)高於實驗(1)，因此研判當離子濃度與溶氧量越高，腐蝕速率越快。因此如果核電廠在除役過渡階段讓水流循環擾動，避免碳鋼管路腐蝕產物堆積離子濃度提高，將有效的降低碳鋼管路之腐蝕速率。

表 4. 各實驗腐蝕速率比較

	腐蝕速率 ($\mu\text{m}/\text{year}$)	氧濃度 (ppm)	電導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
實驗 1(不換水)	H: 19(中)	0.8(低)	40.3
實驗 2(換水)	11(慢)	6至1.7之間(高)	0.4至22.3(低)
實驗 3(介面)	w: 88(快)	2.2(中)	60.8

金屬氧化物對腐蝕速率有顯著的影響，分析腐蝕試片表面氧化物的組成有助於幫助了解碳鋼腐蝕行為。圖 15(a)與(b)分別為實驗(3)的 i2 試片介面區域與實驗(1) H14 試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析結果，由圖 15(a) SEM 分析得到 i2 的氧化物有兩種不同微結構，其中非結晶狀比較鬆散的氧化物經由 EDS 分析成份接近為 FeOOH 或 Fe_2O_3 ，而微結構比較緊密的氧化物經由 EDS 分析為微 Fe_3O_4 ，圖 15(b) H14 的表面氧化物微結構形貌只有比較緊密的 Fe_3O_4 。為了佐證 EDS 成分分析結果，利用 XPS 分析表面氧化物，從分析結果圖 16 觀察到 H14 試片氧化物在 Fe_3O_4 有一明顯的峰值，而 i2 試片峰值則是落在 FeOOH 與 Fe_2O_3 區域，由此結果可以佐證 EDS 成分分析。試片 i2 介面區域因為氧濃度充足，在氧充足的環境比較容易形成 FeOOH 或 Fe_2O_3 ，而相反在氧氣不充足的環境

的 H 14 試片則容易生成 Fe_3O_4 [12]。

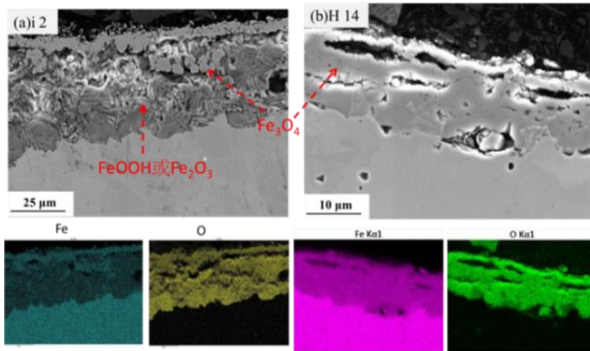


圖 15 (a)i2 與(b)H14 表面氧化物 SEM 與 EDS 分析

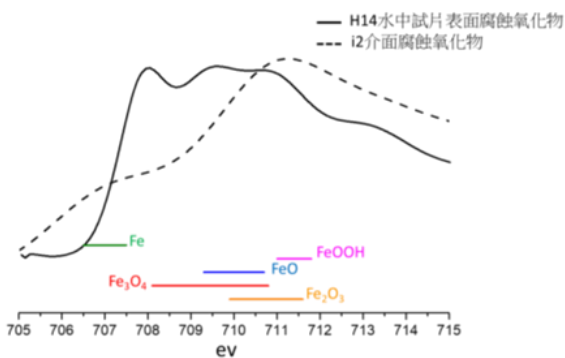


圖 16 XPS 表面氧化物分析

4. 結論

本實驗總結如下：

碳鋼 A106 B 在 45°C 靜置水的環境下腐蝕速率：(一) 實驗(1) 模擬除役過渡階段完全沒有水流動的狀況，冷抽(C)與熱軋(H)腐蝕速率分別為 $23 \mu\text{m}/\text{year}$ 與 $19 \mu\text{m}/\text{year}$ ；(二) 實驗(2) 模擬除役過渡階段固定時間使水流動的狀況，冷抽(C)腐蝕速率為 $9.8 \mu\text{m}/\text{year}$ ；(三) 實驗(3) 為模擬管路中水沒有充滿的狀態，完全浸泡在水中的熱軋(H)試片 w 腐蝕速率為 $88 \mu\text{m}/\text{year}$ 。

實驗(3)三組試片 a、i 與 w 的腐蝕速率分別為 $9 \mu\text{m}/\text{year}$ 、 $93 \mu\text{m}/\text{year}$ 與 $88 \mu\text{m}/\text{year}$ ，介面試片腐蝕速率最快。介面試片 i 介面區域腐蝕最為嚴重，該區域之腐蝕速率約為 $102 \mu\text{m}/\text{year}$ 。

碳鋼在靜置水中腐蝕速率主要受溶氧量與離子濃度影響，溶氧量為 1 至 6 ppm 等級時，離子濃度對腐蝕速率之影響大於溶氧量且離子濃度越高腐蝕速率越快。

實驗(3)試片 i2 介面區域氧濃度充足，比較容易形成

FeOOH 或 Fe_2O_3 ，而相反的在實驗(1)氧氣不充足的環境的 H 14 試片則容易生成 Fe_3O_4 。

本實驗設計三組不同實驗分別模擬電廠除役過渡階段碳鋼可能之腐蝕環境，其中在靜置水的條件下腐蝕速率最慢的為實驗(2)模擬固定時間讓水流循環的實驗，因此建議核電廠固定時間讓水流循環避免使局部離子濃度過高將有效減緩碳鋼之腐蝕速率。腐蝕速率最快為實驗(3)的介面 i 試片，且 i 試片在空氣與水交界的區域腐蝕最為嚴重，因此建議核電廠在除役過渡階段應特別留意沒有充滿水的碳鋼管路介面區域之減薄情形。

致謝

本研究承蒙核能安全委員會研究經費支助，特此致謝，計畫名稱：核電廠運轉及除役期間材料及非破壞檢測評估研究。

參考文獻

- [1] M. A. Rodríguez, Corrosion control of nuclear steam generators under normal operation and plant-outage conditions: a review. *Corros Rev* 38(2020) pp.195–230.
- [2] B. M. Gordon, Non-environmentally assisted cracking corrosion concerns affecting life extension of light water reactors, *Corrosion* 2013 69(2013) pp.1039-1046.
- [3] A. R. Mendoza, F. Corvo, Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel, *Corrosion Science* 41(1999) pp. 75-86.
- [4] M. Morcillo, B. Chico, I. Diaz, H. Cano, D. de la Fuente, Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review, *Corrosion Science* 77(2013) pp. 6-24.
- [5] Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme (CODAP), <https://www.oecd-nea.org/codap>.
- [6] D. Starosvetsky, R. Armon, J. Yahalom, J. Starosvetsky, Pitting corrosion of carbon steel caused by iron bacteria, *International Biodeterioration & Biodegradation* 47 (2001) pp.79–87.
- [7] S. A. Park, S. A. Park, J. G. Kim, Y. S. He, K. S. Shin and J. B. Yoon, *Phys.Met. Metallogr.*, 115(2014), pp.1285–1294.



- [8] W. Ozgowicz, A. Grajcar and A. Kurc-Lisiecka, in Corrosion Behavior of Cold-Deformed Austenitic Alloys, INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [9] D. CLOVER, B. KINSELLA, B. PEJCIC and R. DE MARCO, The influence of microstructure on the corrosion rate of various carbon steels, Journal of Applied Electrochemistry (2005) 35:139–149.
- [10] D. Dwivedi, K. Lepkova, T. Becker, Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods, RSC Adv, 7(2017), pp.4580-4610.
- [11] Y. Masato, N. Hiroo, Corrosion Potential and Corrosion Rate of Low-Alloy Steel under Thin Layer of Solution, J. Japan Inst. Met. Mater, 61, 8(1997), p721-726.
- [12] Review of the corrosion performance of selected metals as canister materials for UK spent fuel and or HLW - Appendix B, Materials Science and Engineering for Energy Systems 6 (2011) pp.82–90.

附件二

To Evaluate the Degradation of Heat Damaged Cement Mortar Specimens after Curing Using Non-Linear Ultrasound Technique

Kuang-Chih PEI ^{1*}, Yu-Cheng KAN ², Yu-Ju LIN ¹ and Jian-Jhou Lee ¹

¹ National Atomic Research Institute, Taoyuan City, Taiwan

² Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology, Taiwan

*Contact: kcpei@nari.org.tw or kuangchihpei@yahoo.com.tw

Abstract

In this research, Non-linear Ultrasound (NLU) technique was used to evaluate the degradation on heat damaged cement mortar specimen behaving explicit nonlinear. Mortars of Portland cement type I (or normal cement, NC) were chosen to mold the specimens with water cement ratios of 0.4, 0.5 and 0.6, and size of 5x5x5cm-cube and 5x5x2cm-brick. The specimens were grouped for heating at different temperatures (30, 200, 300, 400, 600, 800°C for 24 hours) to create degradations of different levels. After curing process in water for 28 days, mechanical property tests were carried out on each cube to get its stress-strain relation and strength. NLU tests were conducted on the brick specimens. The RITEC SNAP System with 250kHz/transmit and 500kHz/receive transducers was used to conduct the measurement of harmonics. The obtained amplitudes in spectrum of fundamental, 2nd and 3rd harmonics (A_1 , A_2 and A_3) and the amplitudes due to the background nonlinearity by facility (A_{01} , A_{02} and A_{03}) were analyzed to approach the nonlinear parameters for each specimen, such as the β and γ . The $[(A_{01}-A_1)/(A_{03}/A_{01}^3-A_3/A_{13})]$ and $[(A_{01}-A_1)/(A_{02}/A_{01}^2-A_2/A_{12})]$ were applied as a nonlinear characteristic index to mark the quality of the microstructure of material, which could be related to the durability and workability of the material. The results showed a promised quantification method using NLU. Extended application can be expected.

Keywords: Non-linear Ultrasound, Nonlinear parameters, Cement Mortar, Heat damage, Microstructure

1. Introduction

The defects arising out of environmental degradation, dynamic loading or material processing were concerned about when the recent use of high performance or safety related structures. Most damaged or aging materials behaved explicitly nonlinear and could be shown in stress-strain diagrams by traditional loading test. Since the defects, pores or plastic deformation in microstructure mainly created this character, to measure or quantitate the nonlinearity could be regarded as a possible diagnosis method of the material before fracture. Furthermore, if the non-destructive method (NDT) was developed, the life-span monitoring could be carried out by the repeatable detections on the same object.

Theoretically, stress wave should not be distorted when passing through an ideal elastic medium, where nonlinearity was absent. However, nonlinearity existed in most materials, and caused the distortion in wave propagation. The change of longitudinal ultrasonic wave by propagating through the object material could be measured through the spectrum analysis on the received ultrasonic signals. It could be a measurable nonlinearity. The nonlinear stress-strain relation: $\sigma = E(\epsilon - 1/2\beta\epsilon^2 + 1/3\gamma\epsilon^3 + \dots)$ and the finite amplitude method were introduced to develop the nonlinear ultrasound technique (NLU), where the σ , ϵ , E , β , γ were the stress, strain, Young's modulus, 2nd and 3rd order nonlinearity parameters respectively[1~5]. The longitudinal wave in the material can be represented as: $\rho(\partial^2 u/\partial t^2) = \partial\sigma/\partial x$. After the strain-displacement relation $\epsilon = \partial u/\partial x$ was introduced into the stress-strain relation and the higher order items were omitted, the nonlinear wave equation in terms of u became:

$$\rho \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right) = E \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} \right) \left[1 - \beta \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right) + \gamma \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

After neglecting the attenuation in material, an approximate solution of displacement u matching the boundary condition could be shown as [1,2,3]:

$$u(x, t) = A_1 \cos(kx - wt) + \frac{\beta}{8} k^2 A_1^2 x \cos 2(kx - wt) + \frac{\gamma}{24} k^3 A_1^3 x [\cos 3(kx - wt) + 3 \cos(kx - wt)]$$

Where A_1 , A_2 , and A_3 were the amplitudes in spectrum of the fundamental harmonic, the 2nd harmonic and the 3rd harmonic, respectively. The k was wave number per meter (i.e. fundamental frequency f / wave or phase velocity V_p); z was thickness of specimen and w was $2 \pi f$. Both A_2 and A_3 were variables dependent by A_1 . The nonlinearity parameters β and γ could be shown as [1,2,6]:

$$\beta = \frac{8A_2}{zk^2 A_1^2} \quad \gamma \cong \frac{32A_3}{z^2 k^4 A_1^3} \quad (2)$$

A high-power tone burst was introduced into the target material to create wave propagation with sufficiently large strain amplitude for NLU test. The produced tone burst was a group of ultrasonic waves with modulating waveform and certain frequency, usually same as the main frequency of transmitter. The applied single-frequency tone burst waves would be distorted when propagating through the specimen. The higher frequency harmonics could be revealed through the spectrum analysis on the received wave signal. The obtained harmonic amplitudes provided information to search the higher order nonlinearity parameters.

Ultrasonic test (UT) for inspecting defects or material properties was to measure certain features or coefficients of wave signal based on linear theory. It was known that UT is sensitive to gross or opens defects but less sensitive to distributed micro-defects or degradation. By contrast, NLU technique was based on nonlinear theory to analyze the harmonic change of the wave passing through the target material. The obtained results could be used to evaluate the distributed defects or weakness within the medium, as well as the microstructure change like fatigue. In previous studies [1,7,8,9], NLU could be used for the flaws evaluation of the range from 1 μ m~1nm depending on the main frequency of the chosen transducer (i.e. the fundamental harmonic). Metals were frequently studied for its familiar mechanical properties, and the mostly used frequency range was about 2M~20MHz.

In this study, high porous composite material of cement-mortar-type was for the NLU evaluation. Since the material was brittle, rough and weaker in tensile strength, the parameters β and γ of mortar could be much more visible than those of metals. However, the distributed pores causing the large parameters, also caused a high decay rate in wave propagation. Therefore, RF tone burst of lower frequency had to be considered. The RITEC SNAP System with 250kHz transmit transducer was to produce single-frequency tone burst waves and to conduct the measurement (see Fig.1). The results indicated that the NLU test in lower frequency range was able to apply on nonlinearity detection for concrete/ceramic type composites or skeletal type materials.

2. Preparation for Experiment

2.1 Background of Material and Preparation for Experiment



Fig. 1. The settlement of NLU technique for cement mortar specimen inspection

Cement was composed of four minerals, dicalcium silicate (C_2S), tricalcium silicate (C_3S), tricalcium aluminate (C_3A), tetracalcium aluminoferrite (C_4AF), and a few minor components. Cement mortar was formed by mixing cement, sand and water. After the hydration process, the mixture of calcium-silicon-hydrate (C-S-H, about 55% of the volume), calcium hydroxide crystal (CH, $10\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ in diameter, about 20% of the volume) and calcium aluminate hydrate would be molded till hardening. The air content in mortar could be up to 15% of volume, which caused noticeable porosity [11].

In this experiment, heat damage and water cement ratio controlling were two ways to make different degradation in specimen. Since the C-S-H began decomposing when the heating temperature rose to and over 200°C , the strength of concrete/cement mortar (f'_c) started to decrease. When the temperature was over 400°C , the mismatched expansion of aggregate and cement paste would cause more cracks. The quartz in fine aggregate would have a crystalline phase transformation at 573°C . The crack due to the volume change would increase sharply and reduce the strength. The CH in mortar started to decompose at about 580°C , where CH was the secondary source of the strength. Only about 20% of the Young's modulus (E) was kept when over 500°C . The microstructure collapsed after 600°C . More than half of the strength (f'_c) would be lost at 800°C . In addition to the heat damage, the cement mortar of higher w/c ratio could be more porous but lower in mechanical properties. Where the w/c ratio was measured and controlled during the mortar mixing. [12~15]

However, the heat damage was not irreversible. Self-healing would happen when the damaged specimens were under curing process or full saturation. The cracks or broken microstructure could be improved by the saturated water mixing with the remaining un-hydrated cement or the decomposed calcium. The mortar with lower w/c ratio usually kept more un-hydrated cement after hardening.

The pores within the mortar were about $10\mu\text{m}\sim 10\text{nm}$ in diameter [11] and the contented air could shield and scatter the incident stress wave. To overcome this obstruction, the mortar specimens were produced and cured under full saturation to remove the air. The longitudinal ultrasonic wave would pass the water content pores but keep its nonlinear presentation. In this experiment, UT with 1MHz transducer was available in the wave speed measurement on the saturated specimen of 2cm thickness; the 250kHz and 500kHz probes were surely available for the NLU tests. In the both methods, water was used as the couplant.

Specimens of three water cement ratios (w/c= 0.4, 0.5 and 0.6) were grouped and heated at six different temperatures (30, 200, 300, 400, 600, 800°C) for 24 hours to create degradations of different levels (see Fig.2). There were 18 groups of three $5\times 5\times 5\text{cm}$ cube specimens for loading tests, and 18 groups of six $5\times 5\times 2\text{cm}$ brick specimens for NLU tests. Specimens of the same

group were produced in the same condition. After curing in water for 28 days, loading tests were carried out to obtain the stress-strain relation and strength of each cube; the NLU tests were conducted on the saturated bricks keeping wet all the time.



Fig. 2. Experiment design and specimen preparation for NLU

2.2 Measurement

In this study, RITEC SNAP System with a duplexer filter kit (see Fig.1 and 3) was used for measurement. A ten-cycle RF burst of 250 kHz sine-wave, produced by square wave modulation and through a set of filters and attenuators, would be output to the transducer for detection. The above probe contained a $\phi 38\text{mm}$ piezoelectric element of dominant frequency 250kHz. On the other side of specimen, a 500kHz probe (Fig.1) was attached for clear observation in higher frequency domain. The obtained waveform (see example in Fig.3) was zoned for Fast Fourier Transform (FFT) and harmonic analysis. The PC connected to SNAP, functioning as user interface and data processor, could display the spectrum with amplitudes and precise frequencies of fundamental (1st), 2nd, 3rd, or even more harmonics (see Fig.4).

It was noted that the parameters β and γ should be dimensionless in the nonlinear wave equation (Eq.1); thus, the amplitude unit of A_1 , A_2 , and A_3 should be length (nm). In order to calculate the β and γ , the conversion from the displayed reading on UT oscilloscope (unit of Volt.) to the real displacement of waveform had to be known. However, it might need other measurement like laser vibrometer technique to solve the problem, but were not addressed here [1]. Since the probe and power were same for all tests; the k and z could be measured for each specimen, the obtained results were still available to analyze the trend of nonlinearity (see Eq. 3).

$$\beta = \frac{8A_2}{zk^2 A_1^2} \propto \frac{A_2}{A_1^2} \quad \gamma \cong \frac{32A_3}{z^2 k^4 A_1^3} \propto \frac{A_3}{A_1^3} \quad (3)$$

2.3 Harmonic Analysis for the Background Nonlinearity Due to Equipment

Nonlinearity due to transducers, couplant and system could be fairly stable on the harmonic generation experiment if all the measurements were well controlled and the equipment was same. Through particular NLU tests, in which the transmitter directly docked the receiver using water as couplant, the background amplitudes of 1st, 2nd, 3rd or more harmonics by the above

installations could be displayed. During this experiment, a series of NLU tests were interspersed to obtain the amplitudes, which were the A_{01} , A_{02} and A_{03} shown in Fig.5.

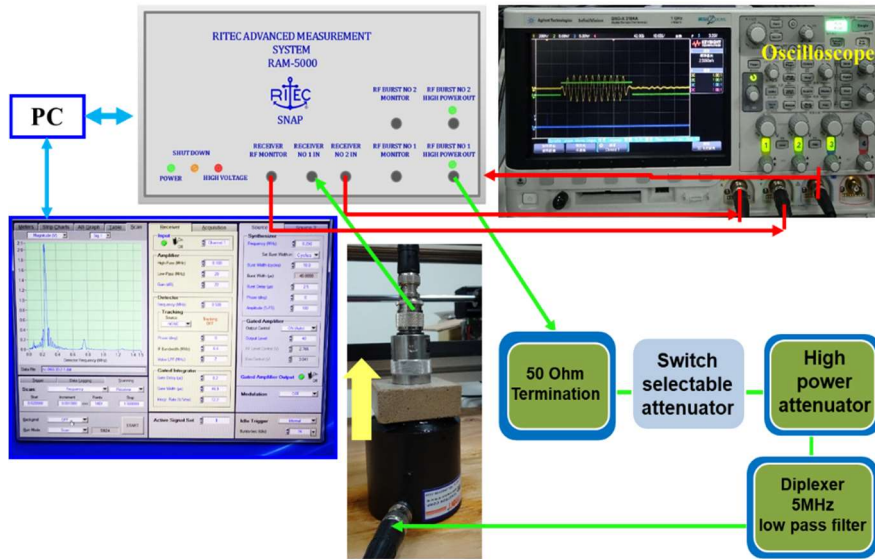


Fig. 3. SNAP System, transducers and oscilloscope were set up for NLU test

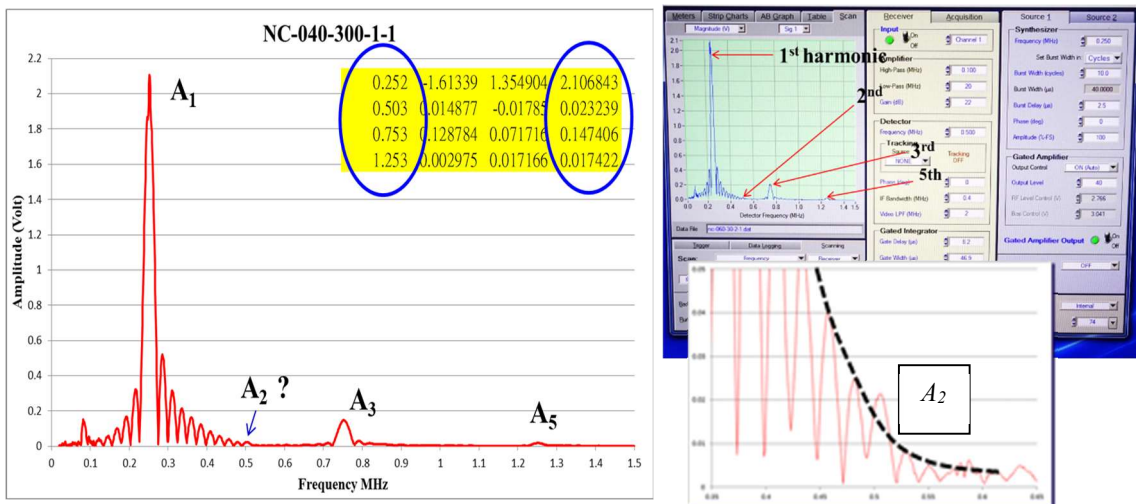


Fig. 4 FFT for harmonic analysis were displayed

The 250kHz probe would usually generate pulse waves containing a fairly stable and large fundamental harmonic and a smaller third harmonic, which could be clearly displayed through FFT analysis. Since the above docking detection was unlikely to cause attenuation, the background amplitudes A_{01} and A_{03} should be higher than most A_1 and A_3 obtained in general NLU detections. The frequency of 2nd harmonic was close to 500kHz, and its amplitude was quite low. The A_{02} , due to the background nonlinearity caused by the sidelobes of fundamental harmonic and equipment/probe/couplant, was not explicit like the A_{01} and A_{03} in spectrum. In Fig.5, the distributions of $[A_{01}, (A_{02}/A^2_{01})]$ and $[A_{01}, (A_{03}/A^3_{01})]$ could indicate the deviation of the experiment system. The average of all A_{01} was 2.192; A_{02} was 0.024; and A_{03} 0.357, and the coefficient of variation (CV) of A_{01} , A_{02} and A_{03} were 0.94%, 11.67% and 8.72% respectively. The average of obtained (A_{02}/A^2_{01}) was 0.00507 and (A_{03}/A^3_{01}) 0.0338, and the CV were 10.16% and 7.08%. The averaged A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{02}/A^2_{01} and A_{03}/A^3_{01} would be used to figure out the harmonic amplitudes caused by the specimen itself (see Fig.6).

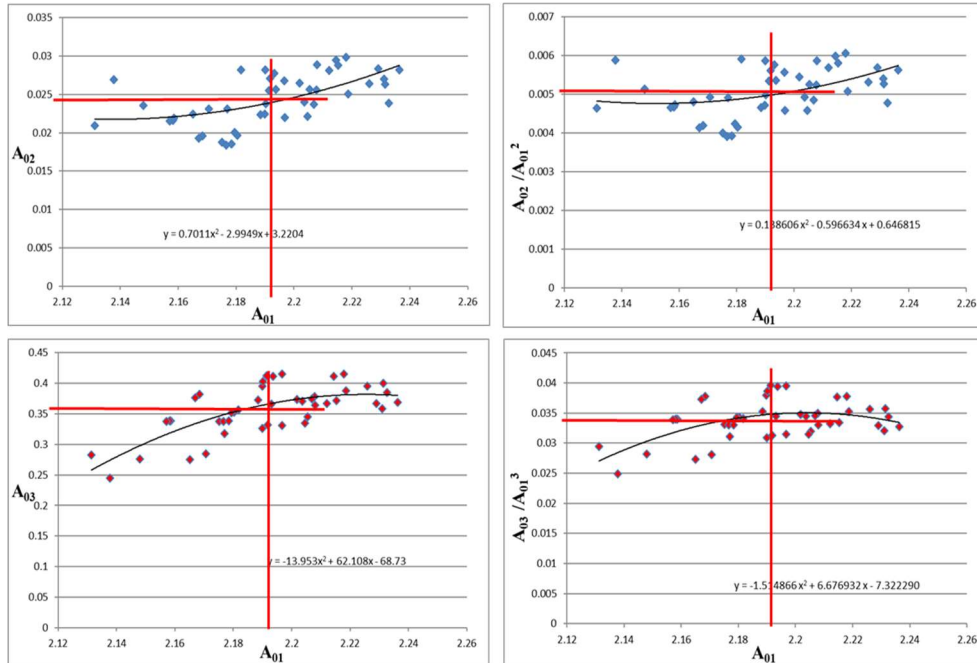


Fig. 5 The background amplitudes A_{01} , A_{02} , A_{03} and obtained parameters (A_{02}/A_{01}^2), (A_{03}/A_{01}^3)

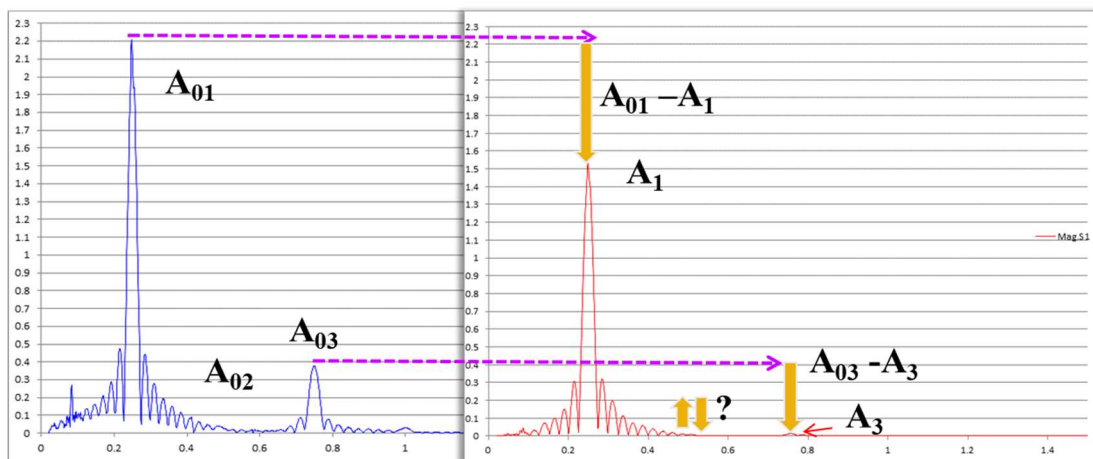


Fig. 6 The nonlinearity caused deduction from background amplitudes A_{01} , A_{02} , A_{03}

3. Experiment Case Study

3.1 Loading Tests for Heat Damaged Cement Mortars

In this study, specimens of three water cement ratios (0.4, 0.5 and 0.6) were heated at six different temperatures (30, 200, 300, 400, 600, 800°C) to create different degradations. The loading test results on cube specimens of every group were averaged and shown in Fig.7. The solid curves in the charts were for presenting the cement mortars of different w/c ratio. The dot lines indicated the possible trends of the remaining strength and E if no curing proceeded (see 2.1). The damaged specimens could be improved by self-healing, the saturated water mixing with the remaining cement or the decomposed calcium. However, the condition of recovery was unpredictable.

In Fig.7, the remaining strengths (f'_c) of mortar specimens were mostly higher than the possible trend lines (the dot lines) figured in 2.1, and the strengths of all w/c ratio mortars rose noticeably by heat damage at 400°C. It is speculated that a notable amount of dehydrated and decomposed C-S-H at this stage might be rehydrated at later curing. However, the self-healing could no longer maintain the strength when over 600°C. Some irreversible fractur or lots of cracks decreased the f'_c . The strength would approach the dot lines at 800°C. After curing, the Young's modulus (compression) increased significantly on the specimens of heat damage over 300°C. After re-hydration at curing, most heated mortars became more brittle and harder. Only the specimen group of w/c ratios 0.6 and heat damage at 800°C lost both the strength and stiffness.

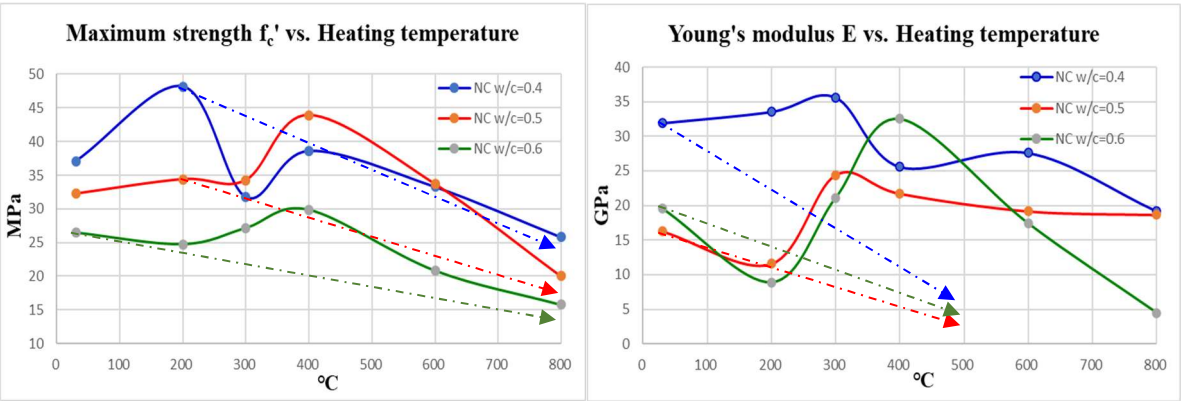


Fig. 7 The remaining strength and E of three mortars after heating and curing

3.2 P-Wave Speed of Heat Damaged Mortars

The P-wave speeds (V_p) of brick specimen were obtained using UT detection; the group averages were charted for the following analysis. The left chart in Fig.8 revealed that the V_p curves of w/c=0.4, 0.5 and 0.6 mortars followed the top-down order in velocity, regardless of the heat damage temperature. The wave speeds of all mortars at heat damage of 400°C noticeably rose like the f'_c in Fig.7. Generally, a cement mortar with higher w/c ratio would be more porous but lower in mechanical properties including the wave speed.

Theoretically, $V_p = [E_d(1-\nu)/(\rho(1+\nu)(1-2\nu))]^{1/2}$, where ρ was the density; ν the Poisson's ratio; and E_d the dynamic modulus of elasticity. The right chart in Fig.8 showed the averaged $E_0^{1/2}$ of the cube specimen group. The E_0 was the initial elasticity modulus close to E_d , which was

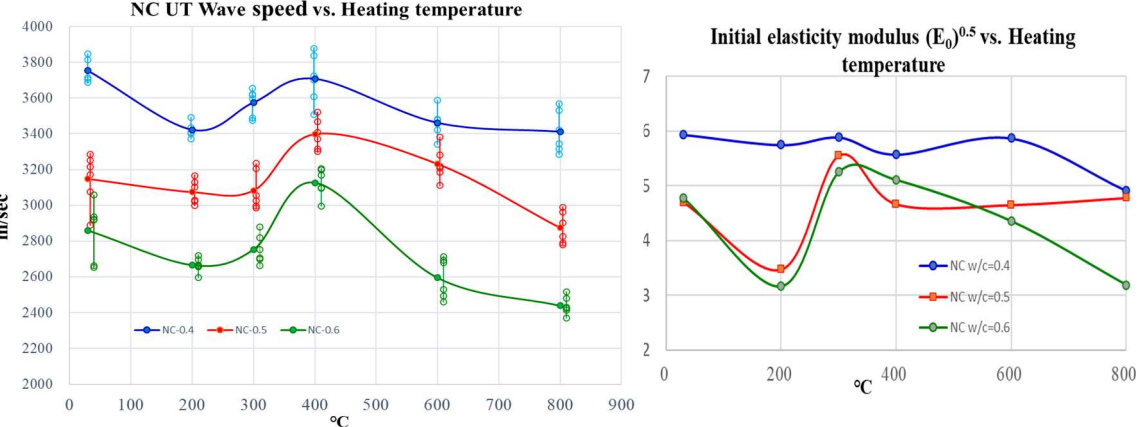


Fig. 8 V_p and $E_0^{1/2}$ of mortars of w/c=0.4, 0.5 and 0.6 at all heating temperatures

obtained by figuring the stress-strain curves of loading tests. Even though the specimen shape was different from the brick one and the loading test had some uncertainty, the top-down order was mostly similar to the V_p . However, the varying degrees of degradations by heat damage did not result in the trend of V_p like w/c ratio. The V_p by detection seemed less discriminative on the heat damage of specimen after curing and self-healing.

3.3 NLU Test : Results of Fundamental Harmonic Analysis

Since the thickness z and k (Eq.3) of each brick specimen could be accurately measured, the amplitude of fundamental (1st) harmonic in each NLU test could be adjusted by normalizing z to 20mm to eliminate specimen deviation and make better comparison. The obtained A_1 , relating to the wave displacement on the probe surface, could display the remaining energy of the ultrasound wave passing through the saturated specimen. The saturated voids or pores in microstructure would cause wave attenuation, and make difference between A_{01} and A_1 . Fig. 9 showed the A_1 of specimen groups under different heating temperatures and of different w/c ratios. The three average A_1 curves were close to each other at the heat damage under 400°C. The curves of the w/c= 0.5 and 0.6 groups dropped deeply at heat damage of 600°C. At this stage, the CH in mortar started to decompose and the microstructure began to collapse. The self-healing or re-hydration in curing might be short for the recovery. But the w/c= 0.5 and 0.6 curves rose back at 800°C. It demonstrated that the uncertainty of the self-healing was hard to predict.

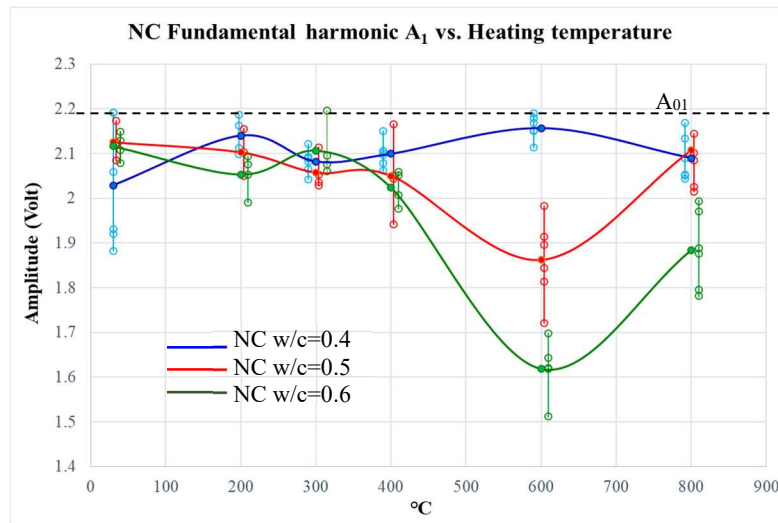


Fig 9. The average A_1 vs heating temperature curves of different w/c ratios

3.4 NLU Test : Results of Second Harmonic Analysis

In order to eliminate the specimen deviation and facilitate subsequent comparison, the obtained amplitude of 2nd harmonic could be corrected by normalizing the measured z to 20mm. The obtained A_2 was a variable dependent on A_1 ; so A_2/A_1^2 was derived to establish independent parameter. The nonlinear parameter β relating to the A_2/A_1^2 was quite sensitive to the micro-level dislocation in most metals. But in this study, the β of cement mortar might correspond with some other fracture behaviours different to the metal, such as closed flaws, shear cracks, cracks by crystalline phase transformation, or plastic deformation.

In the left chart of Fig.10, A_2/A_1^2 curves had a downward trend when the heating temperature raised. Their contrariety with heat damage behaviours indicated the existence of A_{02} , the 2nd

order background nonlinearity due to the couplant/experiment facilities and fundamental harmonic sidelobes (see 2.3). In the right chart, the $|A_{02}/A_{01}^2 - A_2/A_1^2|$ s, related to the 2nd order nonlinear parameters, were displayed according to the heat damage temperatures and w/c ratios. Since the displayed scale of average amplitude A_2 was smaller, about 1/5 of A_3 or 1/123 of A_1 , the caused large divergence and uncertainty in A_2/A_1^2 of the specimens in same group should be noticed.

The curves of w/c=0.5 and 0.6 specimen groups showed an upward trend at 600°C. The CH decomposition and the microstructure breakdown could be the reasons to increase the nonlinearity. The specimens of w/c= 0.4 behaved stably at all heat damage temperatures. The mortar had less porosity but might contain more un-hydrated cement, which could re-hydrate at curing for self-healing.

The fracture and degradation mechanisms due to heat damage, w/c ratio and produce process were quite complicated, but the nonlinear feature of the voids caused by them could be quantifiable. In Fig.11, the $|A_{02}/A_{01}^2 - A_2/A_1^2|$ of all specimens were displayed to reveal the common feature for the quantification. The distribution of $[(A_{01}-A_1), |A_{02}/A_{01}^2 - A_2/A_1^2|]$ of 91 specimens could point out the correlation between the 2nd order nonlinearity and the attenuation at wave transmission. When both the $(A_{01}-A_1)$ and $|A_{02}/A_{01}^2 - A_2/A_1^2|$ increased, the degradation became more serious or the material was more porous. The mortar of lower w/c ratio could be less porous, and might be more uniform during the heating process in oven. The specimens of

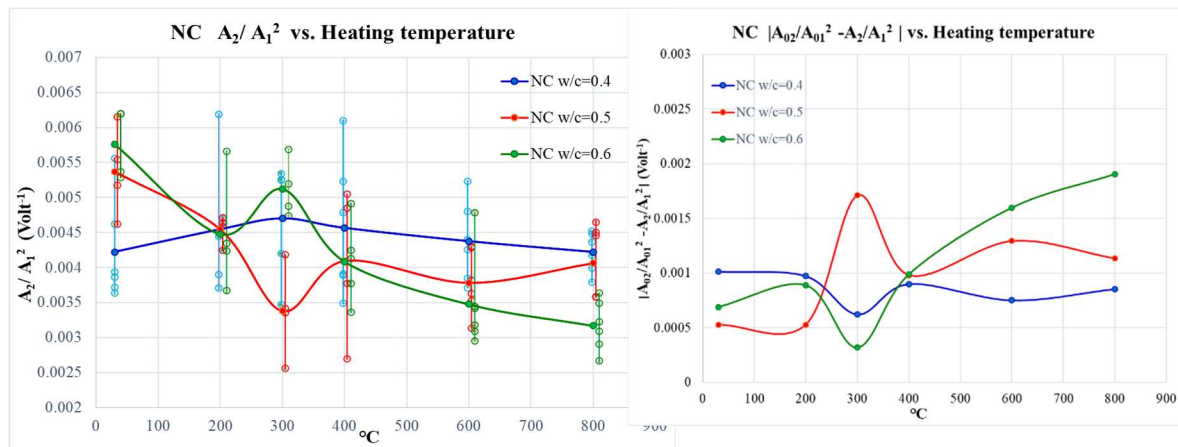


Fig 10. The 2nd order nonlinearity A_2/A_1^2 and $|A_{02}/A_{01}^2 - A_2/A_1^2|$ changed by heating temperature

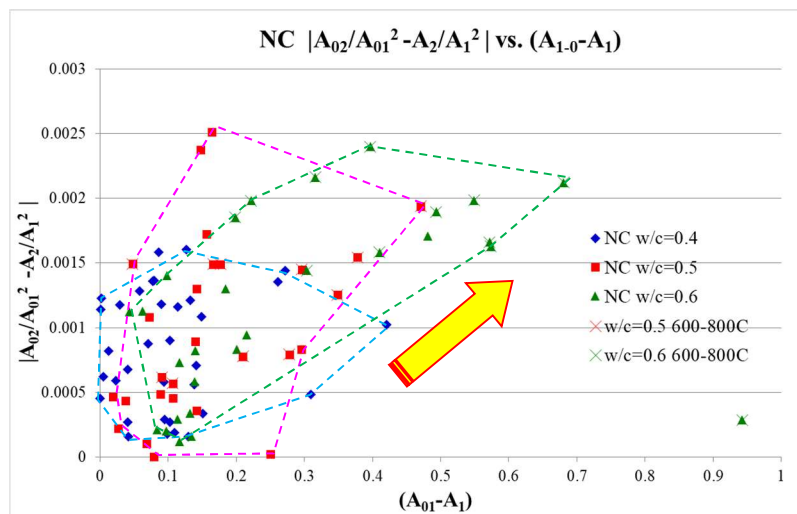


Fig. 11 $[(A_{01}-A_1), |A_{02}/A_{01}^2 - A_2/A_1^2|]$ distribution of heat damaged specimens with different w/c ratio

three w/c ratios, 0.4(blue points), 0.5(red) and 0.6(green), distributed from the bottom-left to top-right in figure, reflecting the rationality of the index.

3.5 NLU Test : Results of Third Harmonic Analysis

The 3rd order nonlinearity parameter γ was rarely discussed for metallic material, but could be important when evaluating the nonlinear characteristics of porous material or some non-metallic composite materials. The obtained 3rd harmonic amplitudes were first adjusted for the specimen deviation. The corrected A_3 was a variable dependent on A_1 , thus A_3/A_1^3 was derived to establish independent parameters (see Eq. 2). The A_3/A_1^3 relating with the γ was able to evaluate the damage or degradation of cement mortar.

In the left chart of Fig.12, the revealed trend of A_3/A_1^3 disagreed with the possible trend of heat damage in microstructure. Therefore, the A_{03} , a 3rd harmonic amplitude mostly due to some background nonlinearity created by the transmitter and couplant/experimental system (see 2.3), had to be considered and used for adjustment. In the right chart, the $(A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)$ derived from the NLU test result was to estimate the 3rd order nonlinearity of the specimen. When the heat damage temperature was below 400°C, the un-hydrated cement contents in all type of mortars directed a fine self-healing during the curing. The $(A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)$ group averages of the w/c=0.5 and 0.6 rose highest at 600°C, corresponding with the damage in specimens. The CH decomposition started at about 600°C, and should be serious at about 800°C. However, re-hydration of the decomposed CH and un-hydrated cement reduced the $(A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)$ of 800°C specimens, whose 3rd order nonlinearity performed close to or lower than the 600°C ones. The w/c=0.4 groups behaved still steadily. The mortar with less porous but more un-hydrated cement were the possible factors.

Since the 3rd harmonic were mainly generated by the 250kHz transmitter, the decreases on amplitudes of both of fundamental and the 3rd harmonics could quantitatively reveal the voids/pores decaying the wave propagation. The 3rd harmonic was at about 750kHz. Its response could be more sensitive to micro-pores or -voids. Fig.13 showed the $[(A_{01}-A_1), (A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)]$ of all specimens by the colour points in coordinate. When the point close to the origin, the material approached linear, or contained less nonlinearity of the voids/pores/defects. Contrarily, when both the $(A_{01}-A_1)$ and $(A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)$ tended to increase, the material was more porous or more serious in degradation. In Fig.13, the specimen distribution of different w/c ratios seemed to follow the above regularity.

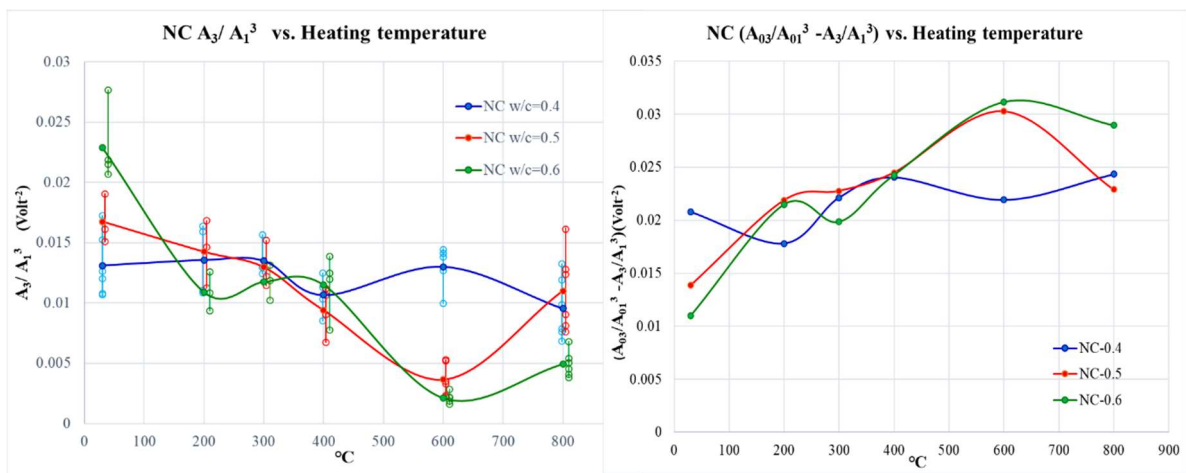


Fig 12. The trend of 3rd order nonlinearity A_3/A_1^3 and $(A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)$

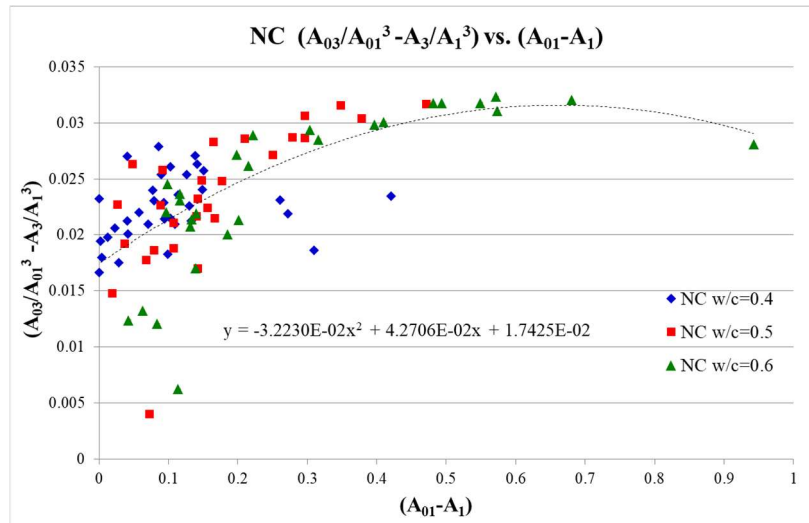


Fig. 13 The distribution of $[(A_{01}-A_1), (A_{03}/A_{01}^3 - A_3/A_1^3)]$ of specimens

3.6 NLU Test : Coefficient of Variation of The Handmade Difference on Specimens

In the experiment, each group of specimens (with the same w/c ratio and heat damage temperature) were cast with the same lump of mortar under the same lab environment. However, the process of molding mortar into brick-shaped specimens and the heating in oven could not keep the exactly same. The difference in produce process, or quality, could be displayed through the analysis on A_1 and A_3/A_1^3 of specimens in the same group. The ultrasonic source to create A_1 and A_3 were directly generated by 250kHz transmitter, so the A_1 and A_3 could be more stable than A_2 . The Standard Deviation (SD) for A_1 and A_3/A_1^3 of the same group of specimens (4 to 6 bricks) would be used to check the quality control.

In the left chart of Fig.14, the SDs of A_1 were mostly below 0.1; only one group (w/c=0.4 at 30°C) was considerably higher than the others. This group of specimens had not been heated in the oven; therefore, the discrete performance of the production quality could be from the difference on hand-made pouring and tamping. The 3rd harmonic frequency was about 750kHz; which was more sensitive to the smaller voids/pores. In the right chart, most SDs of A_3/A_1^3 groups were below 0.003; the SDs of two groups (A_3/A_1^3 of w/c=0.5/ 800°C and w/c=0.6/ 30°C) were slightly high. The results showed most groups of specimens had some fairly control in quality. This analysis indicated that the quality control could be quantified through NLU test.

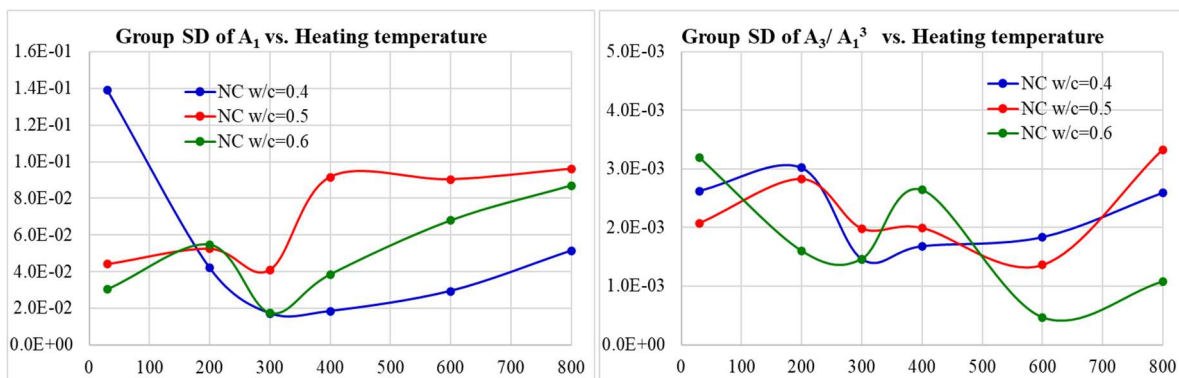


Fig. 14 The coefficient of variation of group specimens for A_1 and A_3/A_1^3

4. Conclusions

The cement mortars used on NLU detection in this study was a kind of porous composite with obvious nonlinearity. Some of the nonlinear behaviour would be out of the previous understanding of metallic materials. Through the NLU spectrum analysis on the variation (or decrease) of harmonic amplitudes, nonlinear characteristics due to the distributed defects, pores or voids within the specimen could be fairly quantified. The $[(A_{01}-A_1), |A_{02}/A_{01}^2-A_2/A_1^2|]$ and $[(A_{01}-A_1), (A_{03}/A_{01}^3-A_3/A_1^3)]$ of each specimen were charted in coordinate to arrange its nonlinear status of damage. The development could be applied as an index in nonlinear characteristic to mark the quality of the microstructure of material, also a hint about the material durability and workability.

The background nonlinearities A_{02}/A_{01}^2 and A_{03}/A_{01}^3 due to the system, low-frequency transducers and water couplant were considered in this study. The coefficients of variation of A_{02} , A_{03} , A_{02}/A_{01}^2 and A_{03}/A_{01}^3 were still noticeable even though the NLU tests had been controlled well. The most possible reason was noted that the viscosity of water could have 20% change when the temperature varied from 20°C to 30°C. In addition to the change in room temperature, the temperature of coupling water on the 250kHz probe would rise due to its high-power. The loss or increase of viscosity would affect the nonlinear presentation when the ultrasonic wave transmitted in and out of the specimen. Thus, the temperature control for the coupling water or other couplant should be considered in the NLU tests.

In this study, the cube and brick specimens of three different w/c ratios were heated at different temperatures for 24 hours to create different degradations. However, the self-healing and re-hydration during the next 28-day curing would recover some of the damaged microstructures, and could disturb the known heat damage presentation. The saturation process was to keep water contenting within the distributed pores or voids, thus the experiments using 250kHz and 1MHz probes for NLU and UT tests could be carried out. If the pores or voids in specimen were full of non-aqueous liquid or the water filling process for saturation could be shortened to suppress the self-healing, the NLU results might well approach the different heat damages. Furthermore, if the saturated cube specimen could be directly used in NLU test, then the ASTM loading test could be directly applied on the same specimen for a more reasonable comparison. The above consideration may be used in the future study.

This article could demonstrate the application of NLU using low-frequency probes; and its effectiveness in detecting nonlinear characteristics of non-metallic composites. Following this experiment, NLU tests on another high porous material, the low-activated high alumina cement mortar (HAC), will be shown. The test results of NC and HAC mortars will be discussed and compared in the near future.

References

- [1] Krishnan Balasubramaniam, "Understanding of Materials State and its Degradation using Non-Linear Ultrasound (NLU) Approaches," . report AOARD-094129, AFOSR, Tokyo, Japan, 3-7, Jan., 2011.
- [2] RITEC SNAP System, instruction by J RITEC, Inc., pp.16.
- [3] Thompson R. B. and Tierston H. F., "Harmonic Generation of Longitudinal Elastic Waves," Journal of Acoustic Society of America, Vol. 62, No.1,1977.
- [4] R. Truell, C. Elbaum and B. B. Chick, Ultrasonic Methods in Solid State Physics, New York: Academic Press, 50-52, 1969.

- [5] Cristian Pantea, Curtis F. Osterhoudt, Dipen N. Sinha, "Determination of acoustical nonlinear parameter of water using the finite amplitude method," *Ultrasonics*, vol. 53, pp.1012-1019, 2013.
- [6] Breazeale, M. A. and Philip, J., "Determination of Third Order Elastic Constants from Ultrasonic Harmonic Generation Measurements," *Physical Acoustics*, 17, edited by W. P. Mason and R. N. Thurston, Academic Press, New York, 1-60, 1984.
- [7] A. Hikata, B. B. Chick and C. Elbaum, "Dislocation Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves," *Journal of applied physics*, vol. 36, No. 1, pp.229-236, 1965.
- [8] J. Y. Kim, L. J. Jacobs and J. Qu, "Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves," *Acoustical Society of America*, vol. 120, No. 3, pp.1266-1273, 2006.
- [9] Che-Hua Yang, "Nonlinear Ultrasound for Nondestructive Evaluation/Testing," presentation material, National Taipei University of Technology, June 26, 2012.
- [10] Shan-Yan Wu, "Assessment Steel Fatigue Damage by Nonlinear Ultrasonic Technique," master thesis, July, 2014.
- [11] Chao-Lung Hwang, *The Property and Behavior of Concrete (混凝土性質與行為)*, 詹氏書局, 1997
- [12] Czermin, Wolfgang, "Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers," English Edition, 1980.
- [13] Bei-Jazair and J.M. Mistion, "The Hydration of Cement Paste Using the Semi-iso Thermal Method of Derivation Thermogravimetry," *Cement and Concrete Research*, vol. 10, pp.361-366.
- [14] J.F. Shen, S.T. Chen and Y.S. Twu, "Evaluation of the Fire Temperature Imposed on Concrete by the Ignition Loss Method," *The First Japan Symposium on Heat Release and Fire Hazard*, Tsukuba, ppII-7~12, 1993.
- [15] S.T. Chen, *建築物火害及災後安全評估法*, Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, 1999.

附件三

To Monitor Fracture Behaviors in Four-Point Cyclic Bending Tests of Low-Activated High Alumina Concrete and Standard Concrete RC Beams Using Acoustic Emission Technique

Kuang-Chih PEI ^{1*}, Yu-Cheng KAN ² and Jian-Jhou Lee ¹

¹ National Atomic Research Institute, Taoyuan City, Taiwan

² Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology, Taiwan

*Contact: kcpei@nari.org.tw or kuangchihpei@yahoo.com.tw

Abstract

In this study, acoustic emission monitoring (AE) was used to observe and evaluate the mechanical behavior of two kinds of RC beam members, made of low-activation concrete and normal concrete, by general four-point bending test and cyclic four-point bending test. During the loading, acoustic emissions due to cracking, shearing, rubbing, de-bonding or interlocking could be monitored and recorded using a real-time high sampling rate DAQ system and proper sensors; besides, beam displacement, cracking situation and loading were also measured simultaneously. The experiment goals included: (1) to observe the damage mechanisms of the beams under bending test and their corresponding AE performance; and (2) to observe the material fracture and corresponding AE in the beams under the cyclic bending test of 0.5Hz (periodic dynamic condition). After experiments, the fracture history of the beam under general loading test could be revealed through the comparison for the chronicled AE signal density and load/strain data. The damage on beam under the cyclic test could be analysed through the chronological comparison for the cumulative sum of AE signal counts obtained for different test periods and stages. Both the irreversibility on fracture mechanism (affected by the Kaiser effect) and the “remainder toughness” could be discussed through the quantitative analysis on AE characteristics for two different beams. They might relate to the durability and toughness of material for beam.

Keywords: Acoustic Emission Technique, low-activation concrete, cyclic four-point bending test, Kaiser effect

1. Introduction

Reinforced concrete (RC) is a composite material with complex micro-properties. Under loading, the flaws, crack tips, or rebar-concrete bonding interface in specimen would be prone to stress concentration. When cracking or fracture occurred, acoustic emission (AE) would accompany. AE of frequency below 20kHz could/might be received by human hearing; most of them were from noticeable cracking damage, peeling, or debonding. Such fracture often occurred at the end-period of destruction. AE of frequency over 20kHz belonged to the ultrasonic domain beyond the auditory. The possible causes were initial cracking, friction by crack extension/closing, or the separation, interlocking and wear between rebar and concrete. They might produce acoustics of frequency up to 100kHz. The AE events were diverse and rich, but only could be recorded and analysed through certain monitor equipment. AE occurred when the material was fracturing, and the wave source was close to the inside destruction hot zone. Therefore, the analysis and comparison for the AE event chronicle during the destruction could be a quantitative study to explore the internal fracture. [1]- [4].

The motive of this research was to explore the difference of material properties between low-activated high alumina concrete (LAC) and normal concrete (NC) through some loading test and AE detection on beam specimen. The loading tests carried out in this study included: general four-point bending test and cyclic four-point bending test at 0.5Hz. The compressive strength, splitting strength and elastic modulus of the two materials were obtained through the mechanic tests and shown in Table 1 [5]. The workability and strength of beam would be

evaluated through the above test results; the difference in durability and micro-properties could be revealed by the AE monitoring and further quantitative analysis.

Table 1. The mechanical properties, yielding strength P_y and ultimate strength P_u of beam members

Concrete type	28-day Compressive strength, MPa	Splitting strength, MPa	Modulus of elasticity, GPa	Yielding strength P_y , kN	Ultimate strength P_u , kN
NC	38.5	2.73	18.9	198 (P_{y-NC})	270 ($1.36P_{y-NC}$)
LAC	56.5	4.19	27.4	173 (P_{y-LAC})	224 ($1.29P_{y-LAC}$)

2. AE Monitor and Analysis

The AE monitor equipment used here was specially assembled for RC materials. It was known that the stress P-wave speed in concrete was about 3000~4600m/s. Because the grain size of coarse aggregate in and high porosity of concrete could decay the ultrasound wave propagation, the receivable and identifiable range of frequency for AE in concrete might be under 150kHz, corresponding wavelength was about 2~3cm, just larger than the allowed maximal grain size of aggregate. The received AE event by sensor were formed as some type of oscillation signal, which could be digitized and recorded by qualified DAQ system and sensors. Where a NI-based DAQ system with four 800kHz/16bits digital channels was suitable for this feature. The sensors used here were with built-in amplification and filtering functions (40db Gain; Preamplifier); whose main response frequency was about 150kHz.

In this study, AE signal density record [1-4] was used to quantitatively describe the fracture or cracking along the bending test period. Where the AE density was the count number per unit time (like second) of signal oscillations higher than the set threshold value. The value was decided for each experiment or sensor according to the background noise and noise intensity. The threshold setting could enhance identification for AE events and prevent the noise being counted. The AE signal density chronicles for all sensors could be graphed with the obtained loading/strain data from the test. The fracture mechanism close to the sensor areas during the loading could be revealed detailly.

AE signal monitor for most loading test was less than 30 minutes. However, the cyclic four-point bending test in this research could be lengthy. The continuous monitor for the full experiment might be over 3 hours, and would be a problem to handle and display the huge AE data (3.2M data/sec.). In this article, the cumulative sum (CS) for counting AE signal oscillation numbers was used to display the mechanism for continuous fracture in the cyclic test. The CS values chronicled for each loading stage in experiment was graphed in a semi-logarithmic chart as the cumulative sum line (CS line) of AE, which could represent the damage cumulated within that stage or certain cyclic test. In addition, the wear caused by cyclic loading could be quantified through the analysis on CS line, and the stability on CS line could assess the change of material in durability.

AE occurring on the beam specimen under cyclic loading/unloading would be affected by Kaiser effect. Whose situation was less or even rare AE events when re-loading, revealing the non-reversibility nature of material for fracture. When the specimen was loaded to "a certain load," unloaded and re-loaded, the produced AE events were significantly reduced during the re-loading, because the fully developed fracture would not be reversible and could not be damaged again. When the re-loading was close to or exceeded the previous "certain load," there would be a quite AE events generating because of new damage (cracking) happening.

However, there were two quantities revealing the material properties. One was that the irreversible situation for material damage (Kaiser effect) could be evaluated through AE

analysis after the cyclic loading test. Secondly, some material portion that had not been fractured during the previous cyclic loading test could be discovered in the following loading test. The AE events under Kaiser effect, or the so called “remaining destructible quantity,” would be discussed later.

3. Research Method, Experiment Plan and AE Sensor Configuration

In this experiment, two LAC and two NC beams were built according the reinforced concrete (RC) design shown in Figure 1. The general four-point bending tests were firstly carried out on LAC and NC beams with AE monitoring. Through these tests, the yielding strengths (P_y or the P_{y-NC} and P_{y-LAC}) and ultimate strengths P_u of two beams would be obtained and used to set the 0.5Hz cyclic bending tests. Because of the differences on beam due to the fabrication, the upper limit for the cyclic loading in test had to be conservative to prevent quick destruction due to overloading. The upper limit would be gradually raised stage by stage according to the known P_y .

The procedure for the cyclic four-point bending experiment were designed as:

Stage One:

loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (1st to 5th cycles/ 0.1 to $0.8P_y$)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (6th to 10th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (11th to 100th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (101st to 1000th cycles)→unloading→

Stage Two:

loading to $1.0P_y$ →unloading→cyclic loading (1st to 5th cycles/ 0.1 to $1.0P_y$)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (6th to 10th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (11th to 100th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (101st to 1000th cycles)→unloading→

Stage Three:

loading to $1.1P_y$ →unloading→cyclic loading (1st to 10th cycles/ 0.1 to $1.1P_y$)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (11th to 100th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (101st to 1000th cycles)→unloading→

Stage Four:

loading to $1.2P_y$ →unloading→cyclic loading (1st to 10th cycles/ 0.1 to $1.2P_y$)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (11th to 100th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (101st to 1000th cycles)→unloading→

Stage Five:

loading to $1.3P_y$ →unloading→cyclic loading (1st to 10th cycles/ 0.1 to $1.3P_y$)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (11th to 100th cycles)→unloading→loading to $0.5P_y$ →unloading→cyclic loading (101st to 1000th cycles)→unloading→loading to $1.4P_y$ →unloading

When carrying out the $0.5P_y$ loading tests in above stages, the strains at certain points on beam would be continuously measured. The cyclic loading test would stop if the beam was broken or seriously damaged, so would the experiment and AE monitoring. However, the general bending test in the final of stage 5 concluded the LAC beam experiment. Whose loading was up to $1.32P_{y-LAC}$ (228.83kN), already yielding but not approaching the ultimate. AE monitoring and signal recording would be real-timely executed throughout the entire experiment (including the unloading periods).

The configuration of the four AE sensors was shown in Figure 2. Sensor 1 and 4 were close to two sides of the beam at which shear cracking were prone to occur. Sensor 2 and 3 were placed near the middle section of the beam. Flexural cracking could happen there.

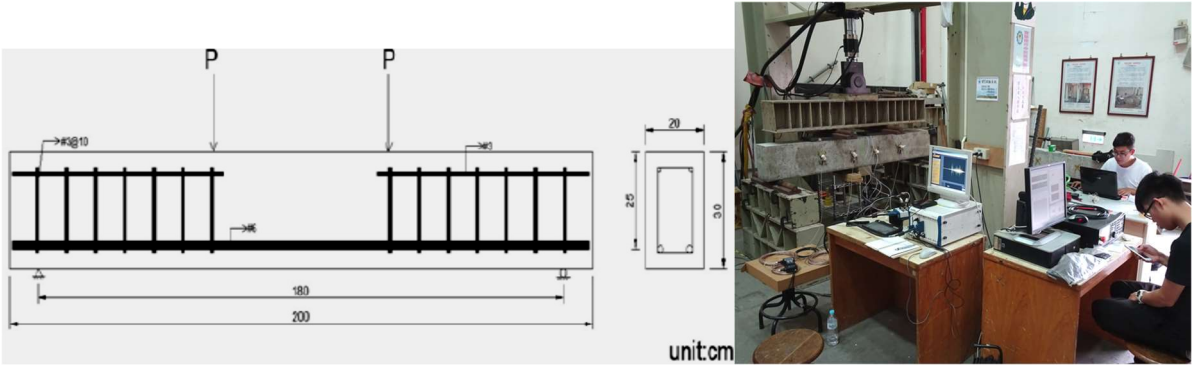


Fig. 1 Reinforcement design for beams and site configuration

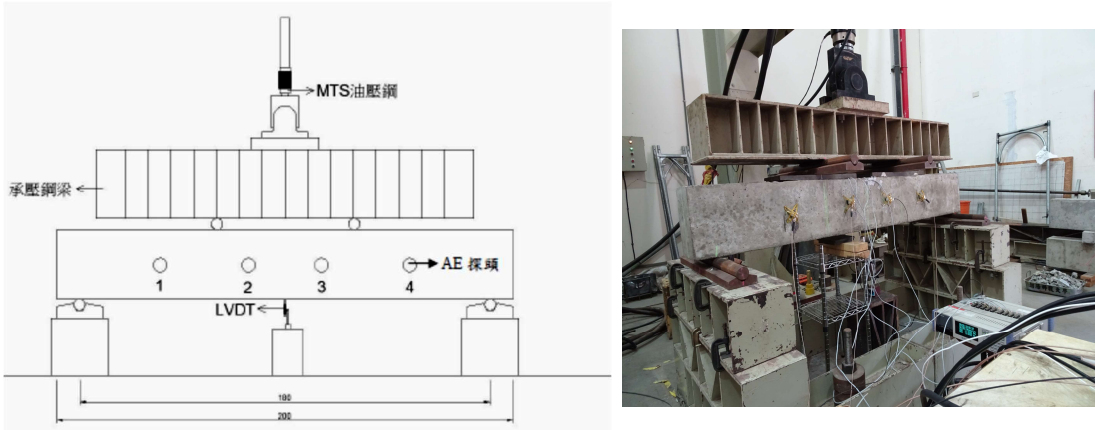


Fig. 2 Configuration of four AE sensors on site

4. Results and Discussion

4.1. AE Performance and Failure Behavior of Two Kinds of Beams in General Four-point Bending Test

The results of bending tests and AE monitoring on NC and LAC beams could be chronicled as the load/strain and AE signal density history, and drawn together under the same time axis. They were shown in Figure 3 for NC test and Figure 4 for LAC.

In the NC beam test, the initial crack occurred at 34 second when the loading was about 27.3kN. From 34 to 100 second (27.3~88.7kN), the AE signal density lines for sensor 2 (purple) and sensor 3 (green) revealed that the flexural cracking dominate the development of damage. During the period of 100 to 220 second (88.7~189kN), the AE density lines for sensor 4 (red) and sensor 1 (blue) rose, indicating that shear cracking continued the damage. During the 220 to 240 second period, the shear cracking and its AE no longer developed significantly; the beam was yielding at the strength of 189~198kN. According to the stress-strain diagram, P_{y-NC} was 198kN and the ultimate strength P_{u-NC} was 270kN at 487 second. At this moment, the AE density line for sensor 2 rose again, indicating that the destruction by compression happened at the middle-upper area of the beam, where was the so-called pressure zone.

In Figure 4, the initial crack on LAC beam occurred at 31 second and the loading was 39.4kN. The AE density lines for sensor 2 and sensor 3 revealed that the flexural cracking dominated the fracture during 31 to 80 second (loading at 39.4~96.4kN). After 80 second, the response of the sensor 3 was still large, meaning that the fracture area close to this sensor continuously developed till the buckling. At the period from 98 to 109 second, the AE density lines for sensor 4 and sensor 1 rose. The cracking on both sides of the beam dominated the development of damage, but was not exactly the shear cracking according to the direction and location of the cracks shown in the figure. At the period from 160 to 175 second, the cracks on both sides of beam no longer developed significantly; the beam was under yielding at this stage. The yield strength P_{y-LAC} was about 171~179kN. According to the stress-strain diagram, P_{y-LAC} was 173kN and the ultimate strength P_{u-LAC} was 224kN (at 317 second). When the AE density line for sensor 2 rose again, some compression damage occurred near the pressure zone. This study would use the strengths and AE monitoring data obtained in the four-point bending tests for the aforementioned beams, such as the yielding strengths, P_{y-NC} and P_{y-LAC} , in the subsequent cyclic four-point bending tests, as the basis to set the upper limit of cyclic loading or other test loading.

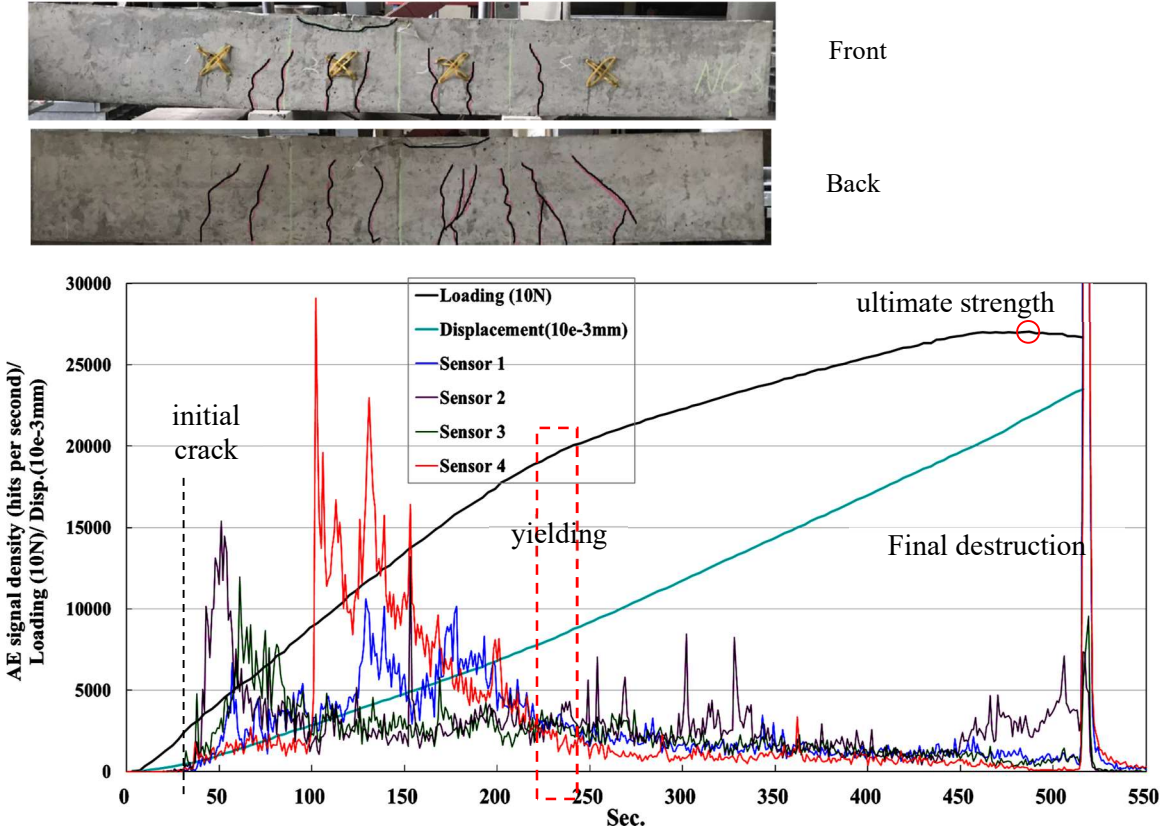


Fig. 3 Destruction of NC beam and the chronicle chart for AE signal density and loading/strain of the four-point bending test on NC beam

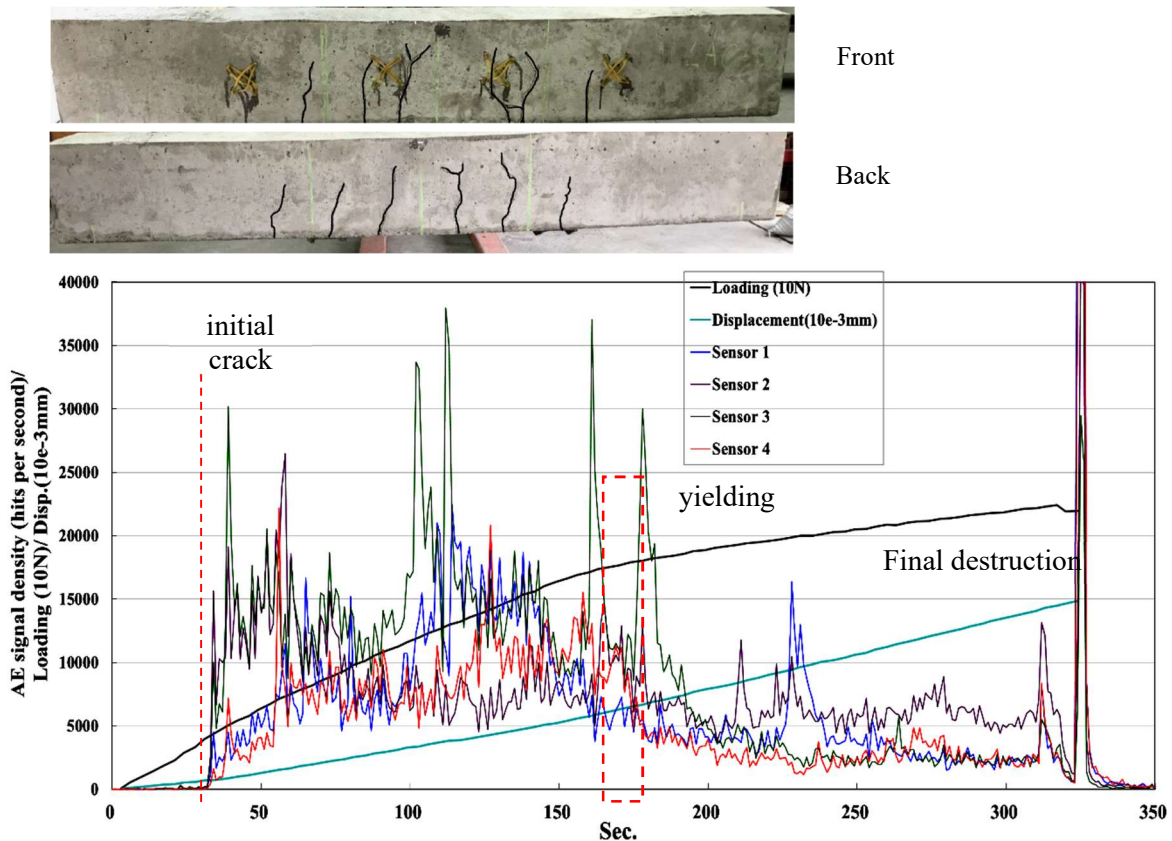


Fig. 4 Destruction of LAC beam and the chronicle chart for AE signal density and loading/strain of the four-point bending test on LAC beam

4.2 AE Performance and Failure Behavior of Two Kinds of Beams in 0.5Hz Cyclic Four-point Bending Experiment

4.2.1 NC Beam Experiment

The loading parameters were decided according to the obtained yielding strength (P_{y-NC} 198kN in Sec 4.1) and the experiment procedure shown in Sec 3.1 for carrying out the cyclic tests on NC beam. In this study, the AE signal oscillations were counted and cumulated to create the CS lines for each cyclic loading test in each stage. CS line could quantify the cumulate damage on certain period due to loading, unloading or cyclic loading; and would return to zero after unloading. Since the CS line could have great differential between the summations for different loading period, the semi-logarithmic chart was suitable for displaying.

Figure 5 shows both the CS lines (upper chart) and the AE signal density lines (bottom chart) of Stage One, which lasted about 2900 seconds. The semi-logarithmic chart was adopted to present the CS lines; could display the count numbers in different orders of magnitude. In this figure, the cumulative counts on CS lines for the first and subsequent three $0.5P_{y-NC}$ direct loading tests showed the peak values decreased from the order of 10^6 to 10^4 . The damage also shifted from the middle section of beam (green/purple line) to the sides of beam (blue/red line). In the cyclic tests, AE signal density lines gradually decreased and flattened. The AE counts of cycle became close, revealing that the material wear or mechanical friction due to the cyclic deformation and displacement dominated a slow but continuous damage, rather than cracking or crack extension. The average signal density within the flatten segment of CS line could be known from its slope. Where sensor 1 (blue line) was 1363 hits/sec; sensor 2 (purple line) 1166

hits/sec; sensor 3 (green line) 1089 hits/sec; and sensor 4 (red line) 859 hits/sec. The presentation of AE in cyclic loading of this stage was keeping stable. Figure 6 shows the CS lines of Stage Two, which lasted about 2900 seconds. In this stage, the initial loading test had a load increase from 0.5 to 1.0Py-NC, resulting a sharp AE increase at about one order of magnitude in cumulative count number. The CS lines at the subsequent three 0.5Py-NC direct loading tests kept decreasing to the order of 10^3 . From the slopes of flatten segment in CS line, the average signal densities were: sensor 1 / 1601 hits/sec; sensor 2 / 523 hits/sec; sensor 3 / 303 hits/sec; and sensor 4 / 2090 hits/sec. In this stage, the cyclic loading tests still kept stable; the AE due to the cyclic deformation mainly occurred near the sides of beam.

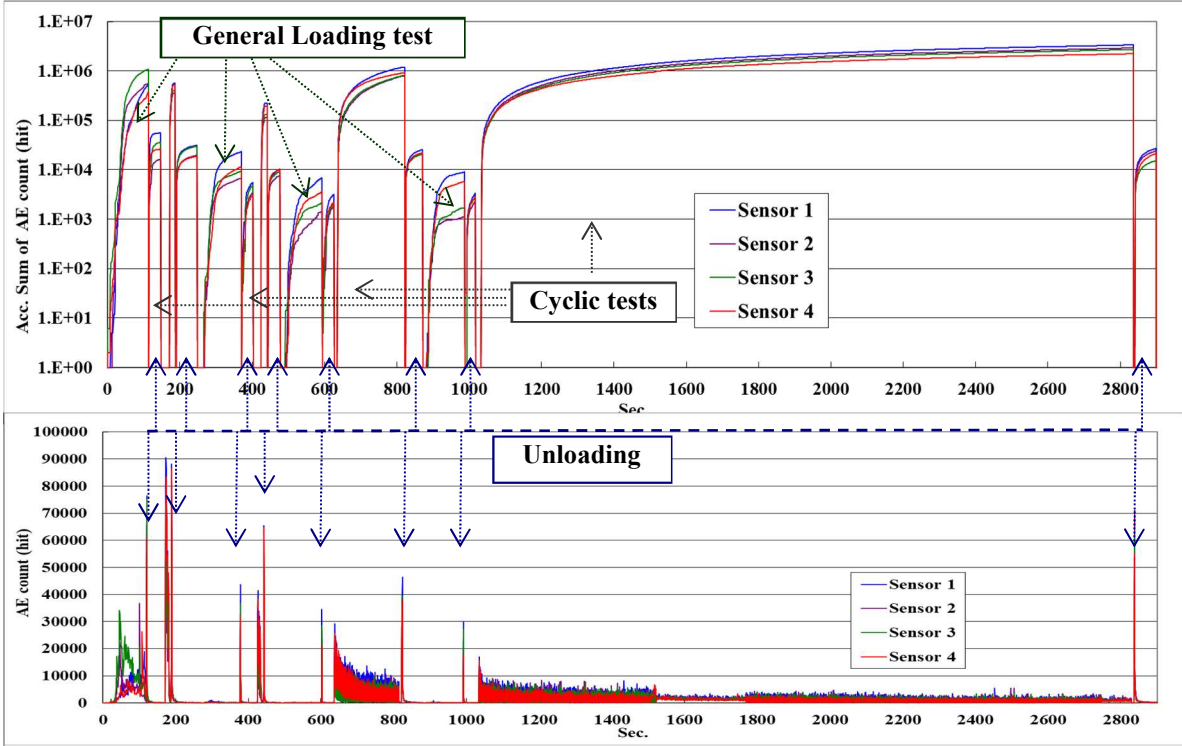


Fig. 5 The CS lines (up) and AE signal density lines (bottom) of Stage One in experiment for NC

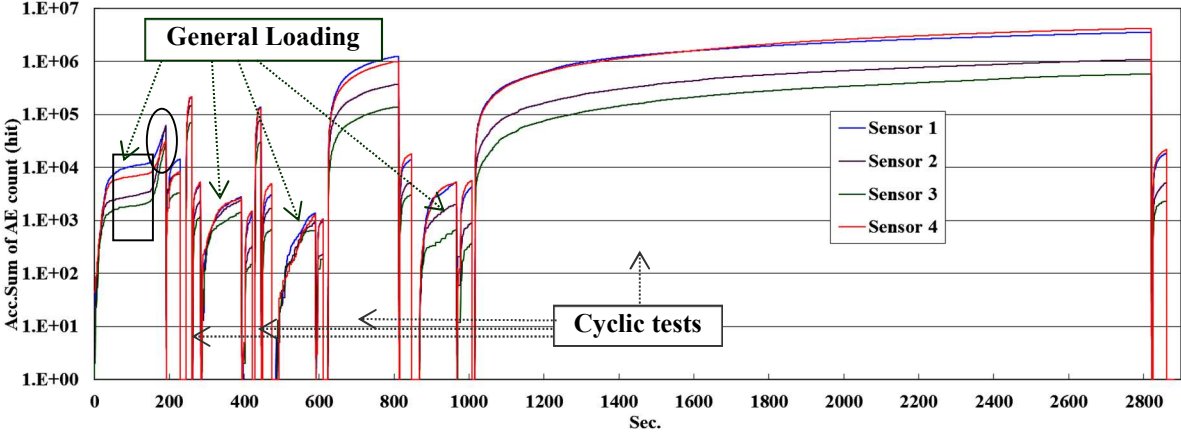


Fig. 6 The CS lines of Stage Two in experiment for NC beam

Figure 7 shows the third stage of the experiment, which lasted about 2800 seconds. The initial loading test had a load increase from 1.0 to 1.1 P_{y-NC} , also resulting the CS lines with sharp rise at about one order of magnitude. Within the rising period, the fracture on sides of beam (shear cracking, blue and red lines) no longer developed significantly. The beam was yielding with the strength near 203~207kN (1.03~1.05 P_{y-NC} , 221~227sec.). The peak-values of CS line at subsequent two direct 0.5 P_{y-NC} loading tests kept close to 1600, even lower than the peak-values at the followed unloads. The cyclic loading tests here kept stable as the previous two stages. The CS lines of the sensors near the sides (blue/red line) were obviously one magnitude order higher than the ones for detecting the middle section (green/purple line). According to the slopes of CS lines, the average signal densities at the flatten sections were: sensor 1 / 2307 hits/sec; sensor 2 / 399 hits/sec; sensor 3 / 219 hits/sec; and sensor 4 / 2501 hits/sec.

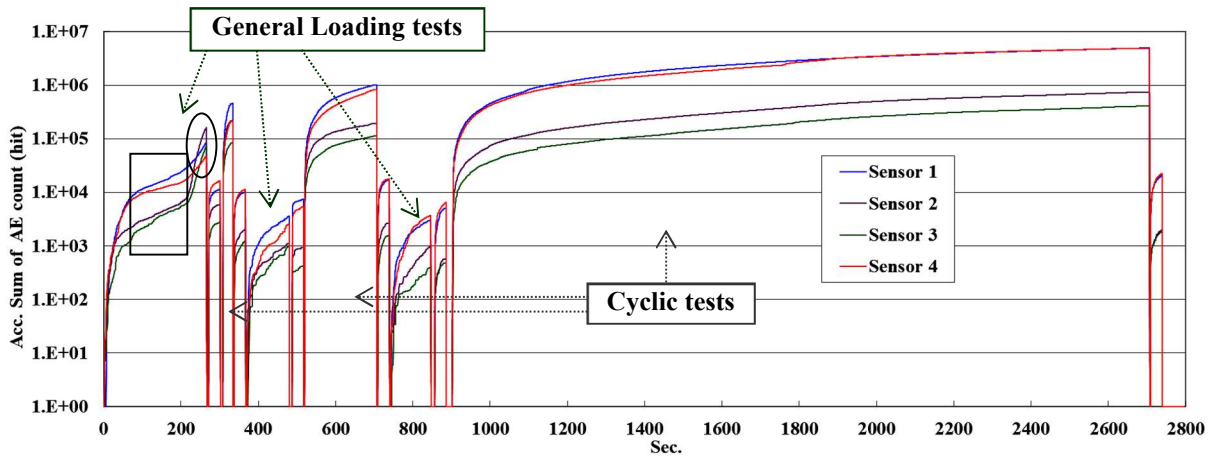


Fig. 7 The CS lines of Stage Three in experiment for NC beam

Figure 8 shows the fourth stage of this experiment, which lasted about 2600 seconds. At the end of this stage, significant fracture occurred on the beam and stopped the cyclic test at the 941st cycle. The cracks on the broken beam were shown on the photo for illustration. In this stage, the initial loading test had a load increase from 1.1 to 1.2 P_{y-NC} , also resulting the CS lines with sharp rise from 500~1000 to about 10^5 , almost two order of magnitude. The CS line peak-values at subsequent two 0.5 P_{y-NC} loading tests were about 500~1300, lower than any previous 0.5 P_{y-NC} test in this experiment. In the cyclic tests, the CS lines of the sensors near the middle of beam (green/purple line) rose significantly at the end period of test. The AE density in chart also verified the compression damage occurred near the pressure zone at the last 200 seconds. From the slopes of the CS lines, the average signal densities in the stable flatten sections were: sensor 1 / 1644 hits/sec; sensor 2 / 471 hits/sec; sensor 3 / 212 hits/sec; and sensor 4 / 1817 hits/sec. But when close to the final destruction: sensor 1 / 1697 hits/sec; sensor 2 / 4431 hits/sec; sensor 3 / 4332 hits/sec; and sensor 4 / 1658 hits/sec. Where the average AE densities of sensor 2 and 3 obviously rose.

4.2.2 LAC Beam Experiment

Not like the Stage One and Two of NC beam experiment (Sec 4.2.1), the cyclic tests of 1st to 5th cycle and 6th to 10th cycle would be combined to simplify the procedure in LAC beam tests. The followed test setting would refer to the yielding strength P_{y-LAC} of 173kN according to the test results in 4.1.

Figure 9 shows the CS lines (upper chart) and AE signal density lines (bottom chart) of Stage One, which lasted about 2430 seconds. The CS lines was plotted on semi- logarithmic

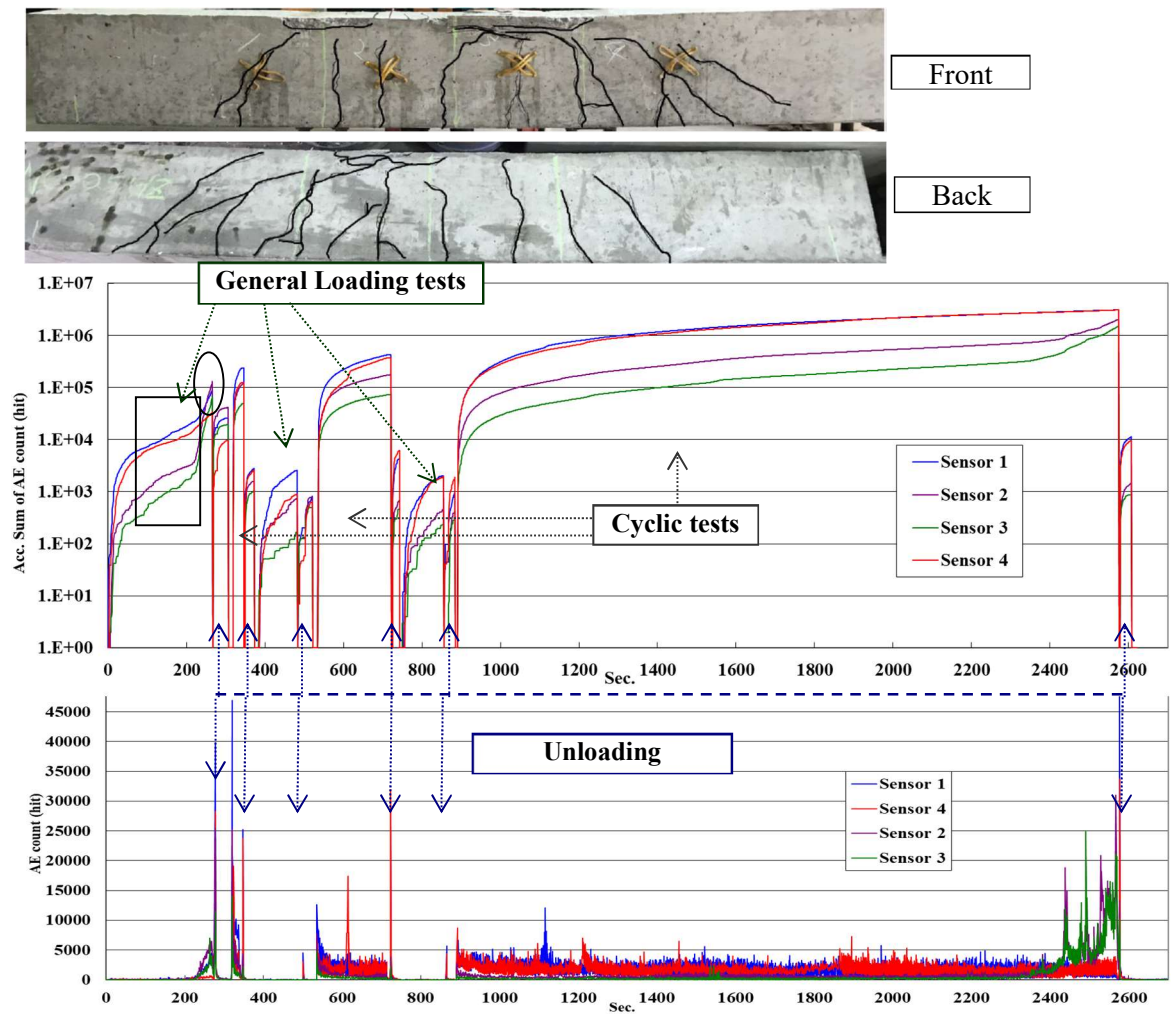


Fig. 8 The CS lines (up) and AE signal density lines (bottom) of Stage four in experiment for NC beam. The final Destruction occurred at 2400~2600 sec.

coordinate chart to present their large variation in magnitude. In this figure, the cumulative counts on CS lines for the first and subsequent two loading tests revealed a reduction about two orders of magnitude, from the order of 10^5 to 10^3 . The damage areas were shifted from the middle of the beam specimen (green/purple line) to one side of beam (blue line). But the signal density on the other side (red line) kept low, indicating that the fracture on this beam unevenly developed. From the slope of the CS lines, the average signal densities on the flatten sections were: sensor 1 (blue line) was 1390 hits/sec; sensor 2 (purple line) 1443 hits/sec; sensor 3 (green line) 1191 hits/sec; and sensor 4 (red line) 514 hits/sec. Overall, the cyclic loading tests kept stable.

Figure 10 shows the CS lines and AE signal densities of the second stage, which lasted about 2550 seconds. The initial loading test had a load increase from 0.5 to 1.0Py-LAC, resulting a sharp rise on the CS lines from 500~1000 to 40000~60000, more than one order of magnitude. The peak-values on CS lines at the subsequent two 0.5Py-LAC loading tests kept low at about 500~1200. Where Kaiser effect dominated the above performance. The damage development in previous stage had already shifted from the middle to one side of the beam specimen. But in this stage, the AE occurring on the other side (red line) of beam kept increasing, reflecting the damage by flexural cracking did change to shear cracking. The slopes of the CS lines, also the average signal densities, on the flatten sections were: sensor 1 / 1733 hits/sec; sensor 2 / 1215

hits/sec; sensor 3 / 754 hits/sec; and sensor 4 / 1020 hits/sec. The CS lines on cyclic loading tests presented stable.

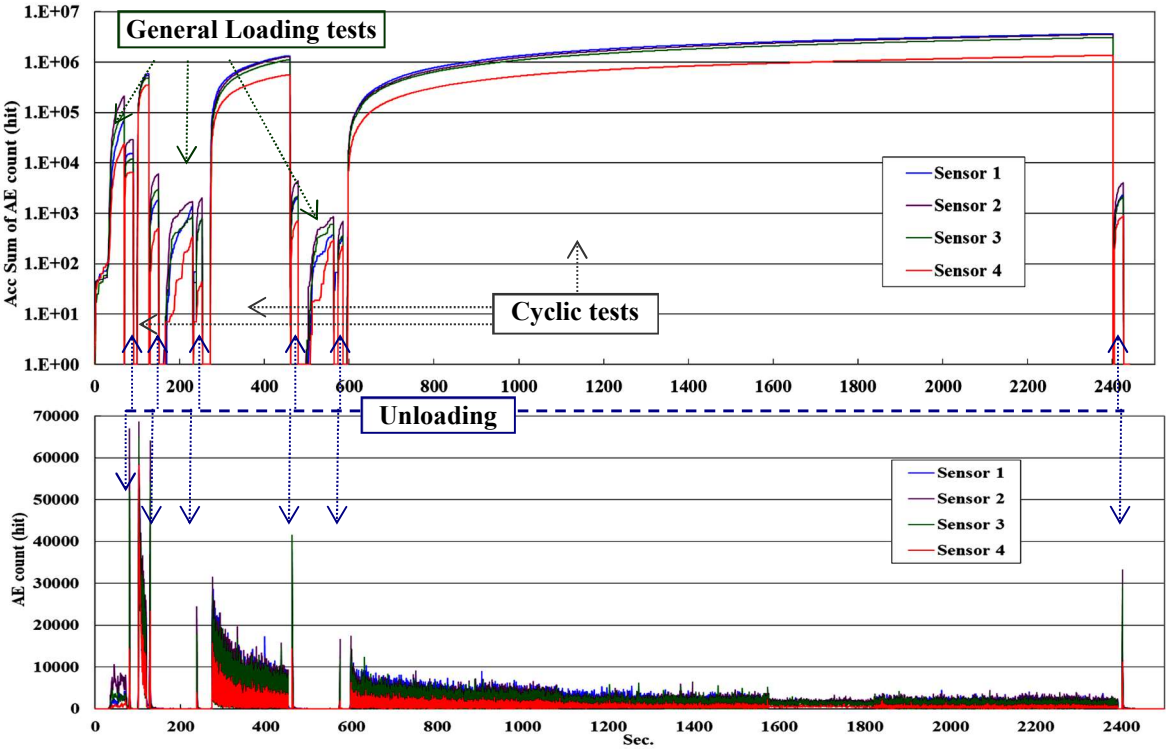


Fig. 9 The CS lines and AE signal density lines of Stage One in experiment for LAC beam

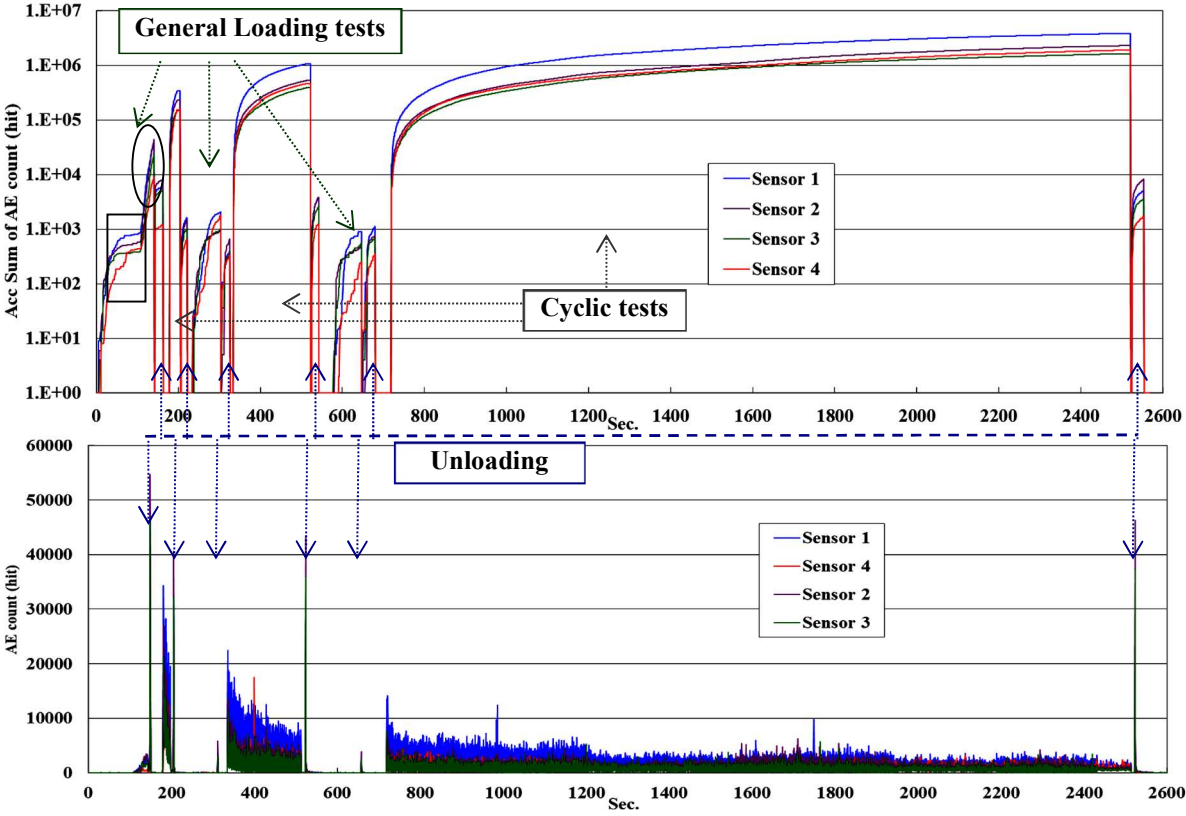


Fig. 10 The CS lines (up) and AE signal density lines (bottom) of Stage Two for LAC beam

Figure 11 shows the third stage of the experiment, which lasted about 2530 seconds. The initial loading test had a load increase to 1.1Py-LAC, also resulting a sharp rise on CS lines after 1.0Py-LAC. The CS line peak-values at subsequent two 0.5Py-LAC loading tests occurred at the subsequent decompressions, indicating that the AE due to crack-opening were less than due to crack-closing friction. The CS lines development showed the overall fractures on beam sides being more than those on the middle of beam. The signal densities on both beam sides became close, indicating that the shear cracking finally developed evenly. From the slopes of the CS lines, the average signal densities of the flatten sections were: sensor 1 / 405 hits/sec; sensor 2 / 167 hits/sec; sensor 3 / 198 hits/sec; and sensor 4 / 497 hits/sec. The CS lines on cyclic loading presented stable, but the above averages dropped sharply comparing with the previous stages.

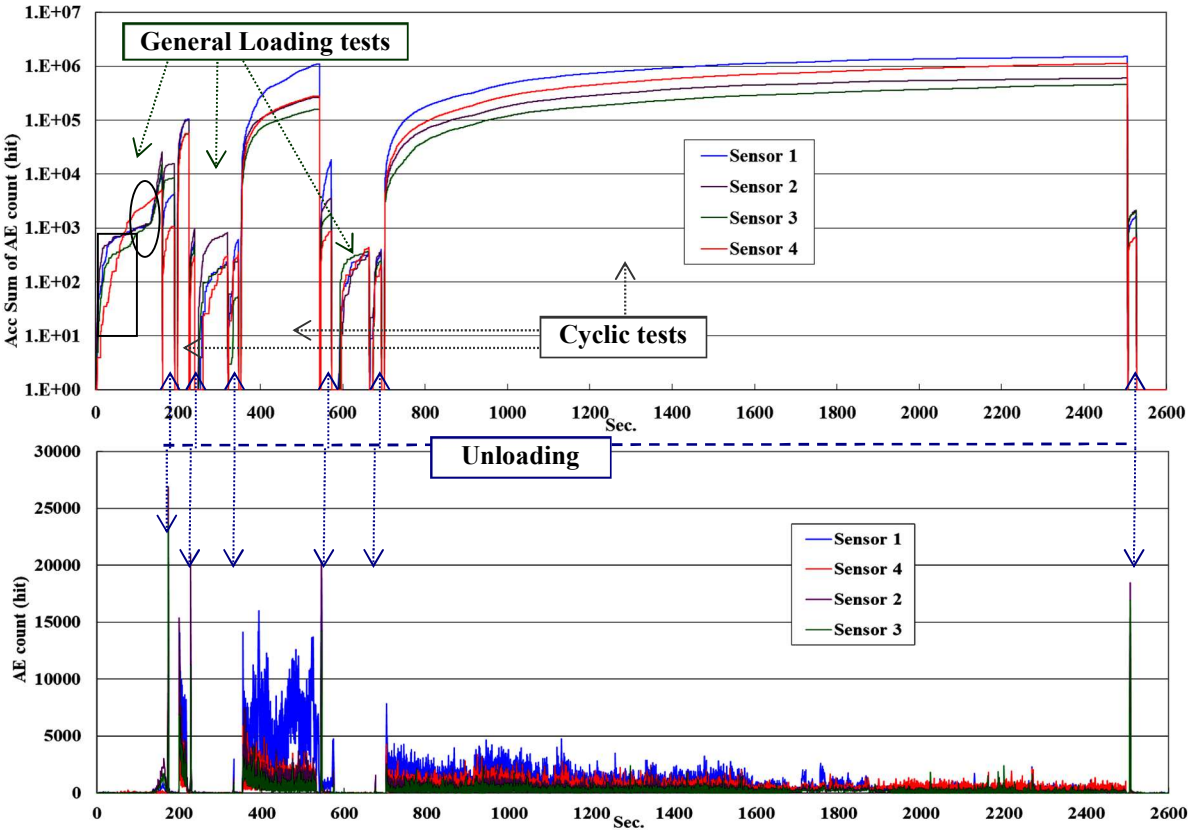


Fig. 11 The CS lines (up) and AE signal density lines (bottom) of Stage Three for LAC beam

Figure 12 shows the Stage Four of the experiment, which lasted about 2530 seconds. The initial loading test had a load increasement to 1.2Py-LAC, also resulting a sharp rise on CS lines (159~180 sec.). The CS line peak-values at subsequent two 0.5Py-LAC loading tests kept close to 300~400. The cyclic tests presented stable before 2250 seconds. After that, the AE signals increased. According to the CS lines of the sensors near the beam sides, the red and blue lines were close; the cracking on beam sides still dominated the damage development evenly. From the slope of the CS lines, the average signal densities of the flatten sections were: sensor 1 / 383 hits/sec; sensor 2 / 145 hits/sec; sensor 3 / 177 hits/sec; and sensor 4 / 385 hits/sec. Which were similar to the third stage. But after 2300 sec., the slopes of the CS line went high: sensor 1 / 885 hits/sec; sensor 2 / 263 hits/sec; sensor 3 / 270 hits/sec; and sensor 4 / 806 hits/sec. However, the germination of burst seemed under control after 2400 seconds.

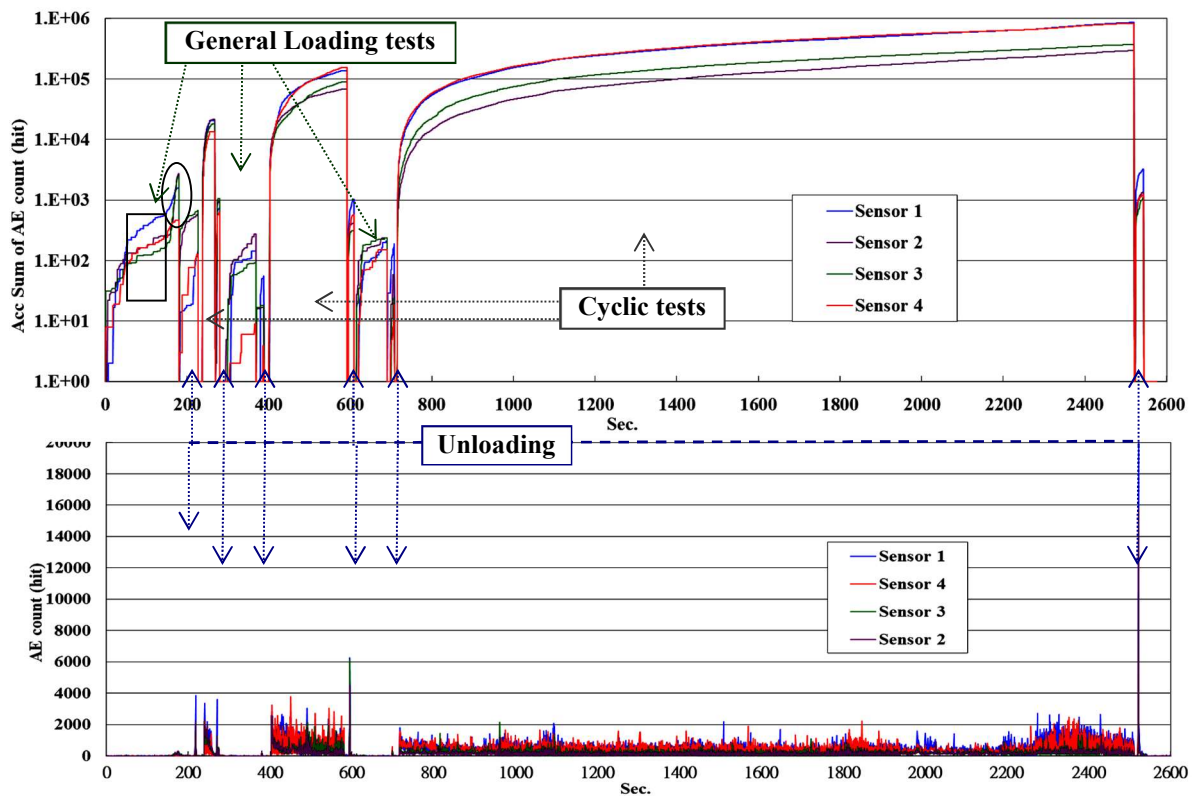


Fig. 12 The CS lines (up) and AE signal density lines (bottom) of Stage Four for LAC beam

Figure 13 shows the fifth stage of this experiment, which lasted about 2830 seconds, including the final loading test to 229kN (planned to $1.4P_{y-LAC}$). The initial loading test had a load increase to $1.3P_{y-LAC}$, resulting a steep rise on CS lines after the $1.2P_{y-LAC}$ (185~225 sec.) at about two orders of magnitude. The CS lines for sensors near the middle of beam (green and purple lines) rose significantly during the stage initial period, indicating that some new damages formed in this area. The CS lines at the cyclic test revealed that fracture mainly occurred on the beam sides, but was slightly unstable on the middle section of beam (green and purple lines) during the initial period of cyclic test. From the slope of the CS lines, the average signal densities of the flatten sections were: sensor 1 / 305 hits/sec; sensor 2 / 100 hits/sec; sensor 3 / 197 hits/sec; and sensor 4 / 326 hits/sec. The fracture in this stage seemed under control like the previous stages. In the final test of this experiment, the loading under displacement control could not increase to $1.4P_{y-LAC}$ but stop at 229kN (could be the ultimate loading). There was still some steep rise on the CS lines. However, no final breakage occurred on the beam. Since the cyclic loading tests of 1000 cycles in each stage should be sufficient to trigger off most of the possible bending/shearing damages due to the certain loading, through analysing the CS lines and AE signal density lines on the initial direct loading tests of all stages, the Kaiser effect performance and gradual destruction behaviour of NC and LAC could be more clearly observed. Which will be discussed in detail later.

5. Conclusion and Discussion

In 4.2, the ultimate strength P_{u-NC} of NC beam obtained in cyclic test processes was about 238kN ($1.2P_{y-NC}$); the P_{u-LAC} of LAC beam was more than 229kN. But it could be under the influence of the previous cyclic loading to find the yielding strength for beam using stress-strain

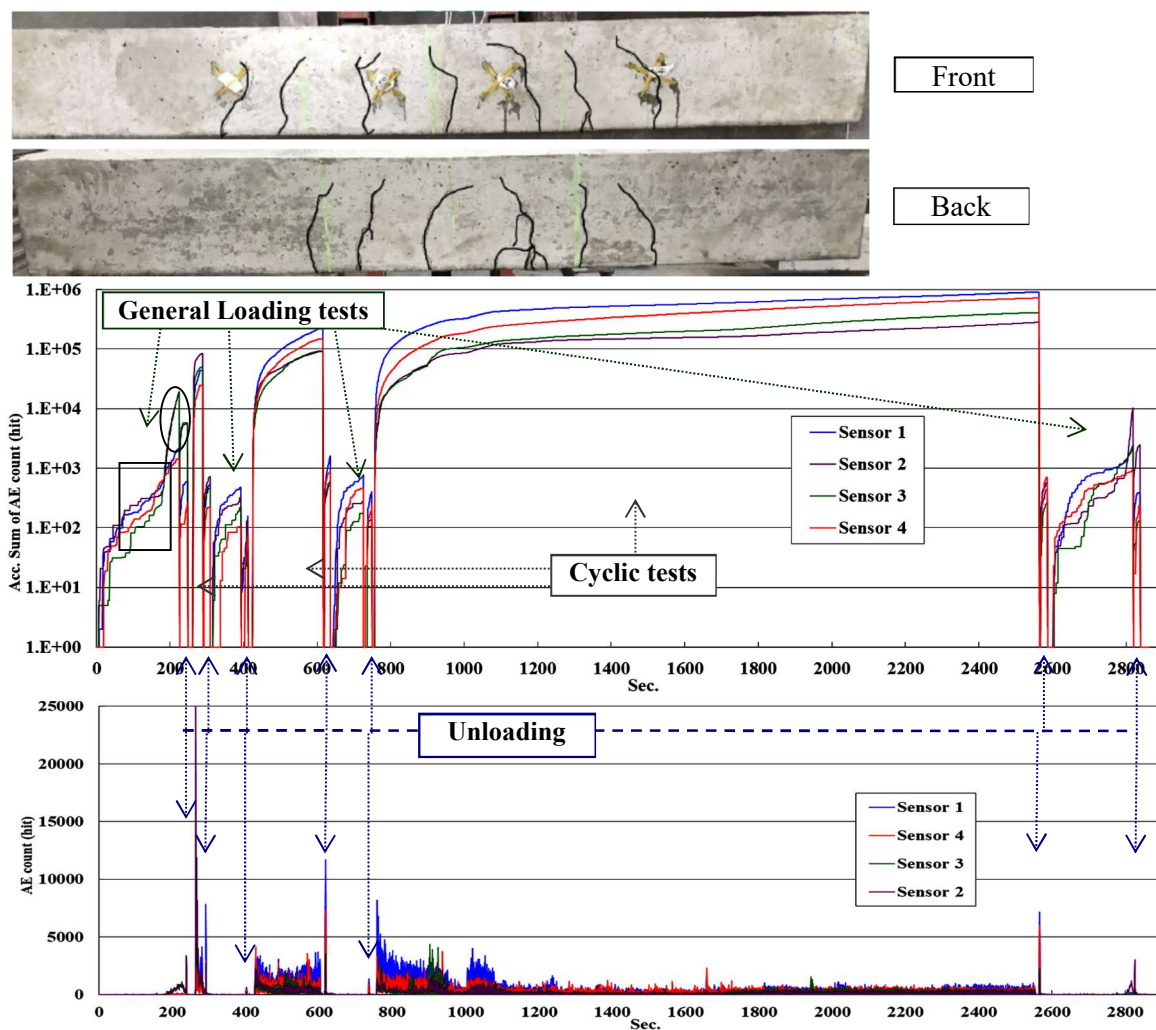


Fig. 13 The CS lines (up) and AE signal density lines (bottom) of final stage in experiment for LAC beam. The cracks occurred on the beam were shown on the photos.

diagram. The aforementioned yielding period usually began when the shear cracking (and their AE) on beam sides had ceased. According to the AE density history of the initial loading tests, the yielding strengths of NC and LAC beams would be 175~180kN and 180~190kN, respectively. Comparing with the yielding and ultimate strengths in 4.1 (NC:198kN/270kN and LAC:173kN/224kN), the NC beam in 4.1 could be too strong, while the LAC beam performed somehow weaker. Although quality control might be imperfect when producing these beams, AE monitory was able to reveal the microscopic mechanism and chronicle of fracture occurring on the beams.

However, to continuously collect and stably store the huge AE data in cyclic loading tests was a challenge. Even through, continual monitory could hold the consistency of peripheral conditions for experiment, such as the signal reception and sensors coupling, etc., was helpful to dispel the doubts about the data comparison with or without normalization. Like the initial loading tests in all stages, with the load ranges of 0~0.5Py, 0~1.0Py, 0~1.1Py, 0~1.2Py and 0~1.3Py (NC beam only to 1.2Py, LAC beam 0~229kN), they could be directly analysed. The irreversible damage happening before and after the Kaiser effect could be observed, like the case of LAC beam as shown in Fig. 14.

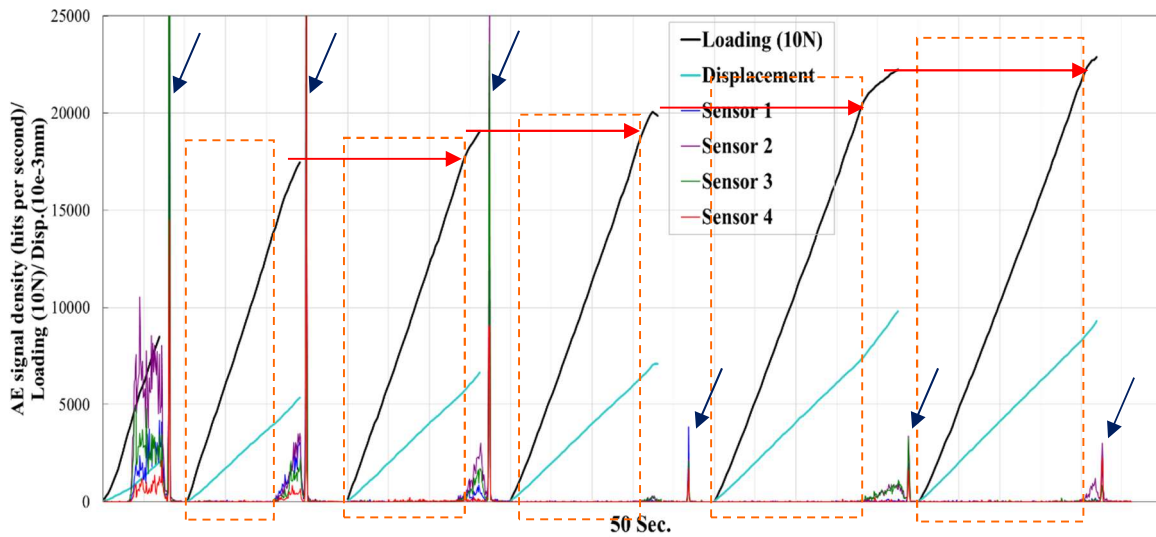


Fig. 14 The initial loading tests on LAC beam, with the loading ranges of $0\sim 0.5P_y$, $\sim 1.0P_y$, $\sim 1.1P_y$, $\sim 1.2P_y$, $\sim 1.3P_y$ and $\sim 229\text{kN}$. Where the range of Kaiser effect were framed by dash-lines, and the unloading were pointed by arrows.

Table 2 and 3 list the Cumulative Sum value (CS values) for each initial direct loading test in 4.1 and 4.2, which could provide an overview for the damage development. In these tables, the loading tests with range of $0\sim 0.5P_y$ had been carried out for all beams. Although the CS values of this range were not enough to reveal the material difference, it could be noticed that the higher CS value on the NC beam for cyclic process (see 4.2) indicated its weaker strength. The direct loading tests in 4.1 could be divided into four divisions for AE analysis: $0\sim 0.5P_y$, $0.5\sim 1.0P_y$, $P_y\sim P_u$ and $P_u\sim \text{Fail}$. The proportion (%) of CS value for each division and sensor, using the CS value for entire test as the denominator, could be obtained and listed in Table 2. These proportions could quantify the damage situation near the certain sensor for each division. The above expression could also normalize the deviation caused by different sensor. In Table 2, the CS proportions of $0\sim 0.5P_y$ from the sensors near the middle section of beam were higher than those from the beam sides, indicating that the damage was dominated by flexural cracking. However, the situation was changed in the range of $0.5\sim 1.0P_y$; the CS proportions of the beam sides went higher. It seemed that the fracture was mainly dominated by shear cracking. Within the range of $P_y\sim P_u$, both beams had exceeded the yielding state. When the compression zone on the upper middle section of beam began damaging, the CS proportions close to the beam middle were increasing. Overall, the analysis could point most fractures with AE occurring within the $0.5\sim 1.0P_y$ range, then the failure within the $P_y\sim P_u$. This trend might be to foresee the circumstance of subsequent cyclic loading tests at various stages.

Table 3 lists the CS values for the initial direct loading tests before the cyclic experiment in all stages. The result of the $0\sim 1.0P_y$ loading test in Stage 2 would be affected by the 1000-cycle loading of $0.1\sim 0.8P_y$ in previous stage, and the CS value would drop significantly. The $0\sim 1.1P_y$ test in the beginning of the third stage was affected by the previous cyclic loading of $0.1\sim 1.0P_y$. The same situation occurred in the subsequent stages. Except for the earliest test in first stage, all the above initial loading tests included the loading ranges of the previous cyclic test (the part being affected by Kaiser effect) and of increased loading. The proportion (%) of CS value for $0\sim 0.8P_y$ part within the $0\sim 1.0P_y$ test could be counted using the CS value of entire $0\sim 1.0P_y$ test as the denominator. Following the same process to obtain Table 4, Kaiser effect could be quantified for observation through the proportions. When the proportion was small, the fracture development of concrete near the sensor was saturated under the cyclic loading range.

Contrarily, the high CS proportion might reveal some “remainder toughness” of material or component still holding within this loading range. And this quantity might reflect the residual energy providing the toughness of the component.

The Kaiser effect on middle section of NC beam was obvious, and gave a quite low CS proportions (2.77~8.97%), or said a low “remainder toughness” after the cyclic test. This phenomenon could reflect the little toughness provided by opening-closing mechanism of the flexural cracking, and by limited region for tensional crack extension. However, Kaiser effect on beam sides was some deficient. About 21.46~44.59% of the remainder (or AE) portions could be released after the previous 1000-cycle loading. Most damages on beam sides were from the friction by shear cracking due to the cyclic displacement. Even through sufficient Kaiser effect occurred on the middle section of NC beam, the CS values for the loading over 1.0Py rose high and the increasement could be by some damage or plastic deformation within the pressure zone of beam. In the experiment for LAC beam, Kaiser effect was clear on the middle section but deficient on the sides, like the NC beam. The CS values for the tests of loading at/over 1.1Py dropped sharply. Since these values, also the denominators, were too small, some CS proportions in Table 4 would be enlarged. When the loading at/over 1.3Py, the CS values for at the beam middle rose significantly, revealing some new compressional damage happening within the pressure zone.

The gradual decrease and flattening on AE signal density in the later of cyclic loading test indicated that the AE hit number per cycle became stable. The approaching number, also the average AE signal density or the slope of CS line, could be used to quantify the mechanical wear or friction caused by cyclic deformation/displacement. When the slope went down, less wear/friction occurred. The slope closed to some fixed value expressed the cyclic wear/friction tending regular. The flatten slopes demonstrated in 4.2 would be listed in Table 5. Except the cyclic test of 0.1~0.8Py and the test period close to the destruction on NC beam (the last 60 cycles), the CS line slope for beam side were usually higher, revealing the friction mostly occurred near the beam sides rather than at middle section. The slopes in LAC beam tests exhibited a relatively small, meaning less wear/friction happened in LAC. In conclusion, the durability of NC and LAC components could be quantified/evaluated using the slope of CS line.

The slope of flattening section in Table 5 could be regarded as AE signal density caused by regular wear/friction during the cyclic test. The CS line of entire cyclic test could be corrected by subtracting the part of cumulative sum by regular wear/friction, obtained by multiplying the period time and the slope. The corrected CS values listed in Table 6 could quantify the damage excluding regular wear/friction for better view on main fracture mechanism.

In Table 6, the corrected values of the three periods: 0-10 cycles, 11-100 cycles, and 101-1000 cycles in the cyclic tests, were listed for comparison. Although the 0~10-cycle period was only 1% of the total cycle number, the corrected CS values of the first 10 cycles were quite large, and some of them even exceeded the values of the rest 990 cycles period. It revealed that the fracture damage mostly happened in the first few cycles in the test. The final destruction on the NC beam in the cyclic test could be traced back, which was at about 100~120 cycles (204~240 seconds) before the failure. More AE by compressional fracture were recorded through the sensors on middle section of beam.

This research attempted to deal with more complicated experimental procedures and lengthy cyclic loading tests, and to quantify and compare their AE characteristics. The obtained AE monitory results could indicate: microscopic damage development on beam specimens, Kaiser effect, “remainder toughness” of material or component after cyclic loading, and performance of wear/friction during cyclic test. Many microscopic differences between NC and LAC concrete could be revealed through the AE monitoring and analysis.

Table 2. The CS value and its proportion (%) for each division/sensor analyzed in Sec. 4.1

Sensor	NC beam (P_{y-NC} 198kN)				LAC beam (P_{y-LAC} 173kN)			
	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side
0.0~0.5Py	212720 16%	370666 27%	334235 30%	266033 18%	254757 13%	548968 24%	549992 20%	230036 14%
0.5~1.0Py	680391 52%	361758 26%	356599 32%	963183 66%	1067224 54%	767983 34%	1472346 54%	920870 56%
Py~ Pu	369219 28%	557146 40%	386830 35%	214209 15%	592146 30%	936859 41%	674912 25%	451398 27%
Pu~ Fail	54722 4%	109007 8%	25769 2%	26498 2%	61033 3%	28235 1%	15265 1%	45007 3%
Total	1317052	1398577	1103433	1469923	1975160	2282045	2712515	1647311

Table 3. The CS values for the initial direct loading tests in all stages before the cyclic test

Sensor	NC beam (P_{y-NC} 198kN)				LAC beam (P_{y-LAC} 173kN)			
	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side
The initial direct loading tests in all stages (Sec. 4.2)								
0.0~0.5Py	543241	554187	1076323	373519	71884	215887	99513	24662
0~1.0Py	57758	62117	28496	31566	41039	43484	23742	9068
0~1.1Py	84412	160744	72404	47743	10379	25446	15346	5106
0~1.2Py	95986	131940	67398	33809	1597	2715	2465	462
0~1.3Py					2171	19151	19040	1475
0~1.4Py					2495	10403	2345	921

Table 4. The proportion of CS value for the division under previous cyclic test loading (Kaiser effect part) in the initial direct loading test (the denominator)

CS division of Kaiser effect / entire test	Proportion of CS value (NC beam)				Proportion of CS value (LAC beam)			
	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side
0~0.8/0~1.0Py	21.46%	5.63%	8.00%	24.83%	3.09%	1.99%	2.53%	5.46%
0~1.0/0~1.1Py	35.33%	5.26%	8.97%	37.66%	27.79%	10.01%	12.39%	69.96%
0~1.1/0~1.2Py	22.61%	2.77%	3.25%	44.59%	62.43%	15.84%	19.92%	91.13%
0~1.2/0~1.3Py					46.38%	8.84%	11.84%	55.12%

Table 5. The CS line slope of flattening section (average AE signal density) of each stage

cyclic loading	The flatten slopes on CS lines (NC beam)				The flatten slopes on CS lines (LAC beam)			
	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side
0.1~0.8Py	1363	1166	1089	859	1390	1443	1191	514
0.1~1.0Py	1601	523	303	2090	1733	1215	754	1020
0.1~1.1Py	2307	399	219	2501	405	167	198	497
0.1~1.2Py	1644	471	212	1817	383	145	177	385
0.1~1.3Py					305	100	197	326
the last 60 cycles	1697	4431	4332	1658				

Table 6. The corrected CS values of the different cycle periods for NC and LAC beam

Sensor	Corrected CS values (NC beam, $P_y=198\text{kN}$)				Corrected CS values (LAC beam, $P_y=173\text{kN}$)			
	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side	#1 side	#2 mid.	#3 mid.	#4 side
0.1~0.8P_y cor. CS	2589569	1835264	1842434	2114694	5297870	2477870	2283850	1241906
0~10 c.	736726	436093	498912	678204	554916	503798	460667	338379
11~100 c.	941361	577682	601407	754269	1074490	1021827	884823	461457
101~1000 c.	911482	821489	742115	682221	3668464	952245	938360	442070
0.1~1.0P_y cor. CS	1917583	629959	211852	1364519	1776181	618135	650546	480581
0~10 c.	308270	216593	95054	301907	304471	205572	133410	133897
11~100 c.	945980	272214	83506	624720	749499	305517	249857	276955
101~1000 c.	663333	141152	33292	437892	722211	107046	267279	69729
0.1~1.1P_y cor. CS	1762003	353831	166991	908707	1886297	627132	270459	464847
0~10 c.	405070	210298	80105	163226	94823	95608	51444	46066
11~100 c.	588580	121148	72789	373724	1018912	235153	121869	189469
101~1000 c.	768353	22385	14097	371757	772562	296371	97146	229312
0.1~1.2P_y cor. CS	655286	1402712	1209628	158831	246704	91430	122129	228632
0~10 c.	205953	107896	45328	88720	13136	18783	14762	5826
11~100 c.	131115	91392	34925	47674	68778	41616	57934	85569
101~1000 c.	318218	1203424	1129375	22437	164790	31031	49433	137237
0.1~1.3P_y cor. CS					555241	253631	158450	236171
0~10 c.					37613	82297	45941	18129
11~100 c.					164964	72749	57880	88032
101~1000 c.					352664	98585	54629	130010

References

- [1] Pei, K.C et al, "A Preliminary Study on the Fracture Behaviors of Reinforced Concrete Slabs by Monitoring the Load Test Using Acoustic Emission Method," Journal of The Chinese Institute of Civil And Hydraulic Engineering, 21(2), 2009, pp.155-168.
- [2] Pei, K.C et al, "Acoustic Emission Monitoring on the Fracture Behaviors of RC and Light RC Structural Elements in the Load Tests," In: CECAR5 (The 5th International Civil Engineering Conference in the Asian Region) Sydney, Australia, 8-12 Aug., 2010.
- [3] Pei, K.C et al, "A Preliminary Study on the Bond Failure of Large Size Rebars in Beam during Bending test Using Acoustic Emission Monitory," 22th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2013.
- [4] Pei, K.C, "Using AE Technique to Monitor the Fracture Behavior in Shaking Table Tests of a Scale-down Mockup of Nuclear RC Structure," 19th WCNDT, 2016.
- [5] 林文祥, 低活化性混凝土 RC 梁構件之靜態及動態撓曲行為研究, 碩士論文, 朝陽科技大學營建工程系, 2017年10月。

附件四

The Corrosion Behavior of Cold-Worked Carbon Steel Pipes Materials Used at Nuclear Power Plants Between Deactivated and Decommission Processes

Wen-Feng Lu, Kun-Chao Tsai

Abstract

Carbon steels are widely used in boiling water reactors (BWRs) as components like feeding water piping, cooling water pressure boundary piping, auxiliary systems, and the driving systems of control rods. Corrosion is one of the main causes of steel degradation during the decommissioning transition phase. Moreover, cold work processes (e.g., rolling, bending, or heat-affected zones near welds) cause the corrosion rate to increase. This study utilized cold-worked A106 B piping to conduct weight loss corrosion experiments and electrochemical corrosion tests to simulate the static water environment during the decommissioning transition phase. It was aimed to provide insights for regulatory agencies managing nuclear power plants during this phase. The weight loss corrosion experiments showed corrosion rates of 0.04 mm/year, 0.046 mm/year, and 0.048 mm/year for specimens with 0%, 5%, and 10% cold worked specimens, respectively, indicating that the higher level of cold work will lead to a fast corrosion rate. Residual strain caused by cold work, which not only accelerates the breakdown of the oxide layer of steels, but also increases the corrosion rate. Electrochemical tests suggested that a 1.75 wt% sodium chloride electrolyte solution with a scan rate of 1 mV/s yields the corrosion rates, which was similar to the stabilized corrosion rates observed in the weight-loss experiments after 3000 hours. In contrast, a 3.5 wt% sodium chloride electrolyte solution with the same scan rate yields corrosion rates which matched those observed in the weight-loss experiments within the initial 3000 hours.

Keywords: A106, Cold work, Corrosion, Decommission processes

National Atomic Research Institute

核電廠除役過渡期間冷加工碳鋼腐蝕行為研究

呂文豐、蔡坤釗

摘要

碳鋼(carbon steel)廣泛應用於沸水式(boiling water reactors, BWRs)核能發電廠之反應爐飼水管路、冷卻水壓力邊界組件、輔助系統與控制棒驅動系統等。腐蝕(corrosion)是除役過渡階段碳鋼材料劣化主要原因之一，且碳鋼材料受冷加工(例:滾壓、彎曲或焊道附近熱影響區)影響，將加速其腐蝕效應。本研究為利用冷加工 A106 B 管材進行模擬除役過渡階段靜水環境之重量損失腐蝕實驗與電化學腐蝕實驗，以利管制單位管制除役過渡階段之核電廠。重量損失腐蝕實驗測得冷加工量 0%，5%與 10%試片的腐蝕速率分別為 0.04 mm/year、0.046 mm/year 與 0.048mm/year，冷加工量越高，腐蝕速率越快。冷加工所造成的殘留應變使碳鋼氧化層更易崩壞，為加速碳鋼腐蝕速率主因。電化學實驗結果推論參數 1.75wt%氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時後穩定的腐蝕速率，而 3.5wt%氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時內的腐蝕速率。

關鍵字：A106、冷加工、腐蝕、核電廠除役。

目 錄

1. 前言	1
2. 實驗流程	11
3. 結果與討論	18
4. 結論	34
參考文獻	36

表目錄

表 1：CODAP A106 B 孔蝕與間縫腐蝕整理	5
表 2：四年前期計畫五組重量損失腐蝕實驗整理	8
表 3：A106 B 尺寸規格	12
表 4：A106 B 成份組成	12
表 5：冷加工試片	12
表 6：電化學腐蝕實驗參數	13

圖目錄

圖 1	CODAP 資料庫碳鋼材料整理分析.....	2
圖 2	CODAP 資料庫碳鋼 A106 B 腐蝕事件整理.....	3
圖 3	局部腐蝕局部陰陽極現象.....	5
圖 4	三價鐵氧化物還原溶解現象.....	5
圖 5	核電廠碳鋼伽凡尼腐蝕位置.....	6
圖 6	金屬合金 VS SCE 腐蝕電位表.....	6
圖 7	碳鋼鍍層破損發生伽凡尼腐蝕位置.....	7
圖 8	單位面積重量損失與時間關係圖.....	9
圖 9	碳鋼腐蝕速率.....	9
圖 10	介面腐蝕機制(a)示意圖 (b)水膜厚度與腐蝕速率之關係圖	10
圖 11	重量損失(WL)腐蝕實驗與電化學腐蝕實驗(PD, EIS)比較	11
圖 12	C 與 H 冷鑲埋電化學試片.....	13
圖 13	HCW 管材線切割製備冷加工板材.....	13
圖 14	HCW 冷加工電化學試片.....	14
圖 15	電化學實驗電極接線圖.....	14
圖 16	恆電位儀 AutoLab Pastet 30.....	15

圖 17	塔弗法量測腐蝕電流與腐蝕電位.....	15
圖 18	腐蝕速率計算公式.....	16
圖 19	試片架與實驗試片.....	17
圖 20	壓力釜與恆溫控制系統.....	17
圖 21	塔弗方程式(Tafel equation).....	19
圖 22	碳鋼陰極與陽極電化學反應.....	19
圖 23	塔弗直線區(Tafel region).....	20
圖 24	改變掃描速率 VS (a)腐蝕速率與(b)腐蝕電位.....	21
圖 25	改變腐蝕液濃度 VS (a)腐蝕速率與(b)腐蝕電位.....	21
圖 26	碳鋼冷加工試片金相.....	23
圖 27	KAM 與殘留應變分佈圖.....	24
圖 28	單位面積重量損失 VS 時間圖.....	24
圖 29	冷加工量與腐蝕速率關係圖.....	25
圖 30	實驗(1)單位面積重量損失 VS 時間圖.....	25
圖 31	(a)電化學 1.75wt% 與重量損失實驗腐蝕速率； (b) 腐蝕 電位與冷加工量關係圖.....	26
圖 32	(a)電化學 3.5wt% 與重量損失實驗腐蝕速率； (b) 腐蝕 電位與冷加工量關係圖.....	27
圖 33	試片 C 與 H 電化學實驗與重量損失實驗腐蝕速率比較圖	28

圖 34	電化學實驗(a) 1.75wt%與(b) 3.5wt%電位與電流關係圖	29
圖 35	BM 試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析	31
圖 36	CW5%試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析	31
圖 37	CW10%試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析	32
圖 38	CW5% 3500 小時(a)殘留應變(b)Fe(c)O 分佈圖	32
圖 39	CW10% 3500 小時(a)殘留應變(b)Fe(c)O 分佈圖	33

1. 前言

台灣核一廠目前在除役階段，相關組件會有一段過渡時期在停機運轉的環境下放置數年，為確保在放置期間材料不會因破損而導致組件材料完整性破損，需要探討與研究相關組件可能發生劣化的材料與相關機制，進而提供核安會管制參考之資料。在核一廠除役階段反應爐心溫度降至約 40°C 以下，壓力下降至一大氣壓，在這種環境下核電廠最可能會發生腐蝕破損的材料主要為抗腐蝕性質較差之碳鋼(carbon steel)，主要原因為碳鋼 Cr 與 Ni 含量低，無法形成有效的氧化保護層，即使在一般大氣環境下也容易發生腐蝕^[1-2]，如果在大氣中或是水環境中含有 SO_2^{2-} ， Cl^- ^[1]離子的情況下，更會加速其腐蝕速率^[3-4]。碳鋼廣泛應用於沸水式(boiling water reactors, BWRs)核能發電廠之反應爐飼水管路、反應爐冷卻水壓力邊界管路組件與控制棒驅動系統等。碳鋼使用在核電廠常見的型號有 A105、A106、A53 等，其顯微組織主要為波來鐵(Pearlite)與肥粒鐵(Ferrite)，波來鐵為肥粒鐵與雪明碳鐵(Cementite)組成且範圍多寡由 C 含量決定。

整理各國核電廠組件運轉經驗、劣化與老化研究計畫(CODAP, Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme)的資料顯示，截至 2024 年 10 月底，碳鋼組件共計有 1731 件發生劣化的案例^[5]。在全部的碳鋼劣化案例中，A106 B 總共發生 277 件破損劣化事件，為案例較多的碳鋼材料，因此本研究選擇使用 A106 B 作為碳鋼劣化之研究材料。整理 CODAP 資料庫 A106 B 材料在核電廠發生劣化的機制如圖 1 所示，有腐蝕(Corrosion)、沿晶應力腐蝕龜裂(IGSCC)、疲勞(Fatigue)、沖蝕(Erosion)、流動加速腐蝕(Flow accelerated corrosion, FAC)、微生物腐蝕(Microbiological influenced corrosion, MIC)與其他。考慮到除役過渡階段機組停止運轉狀態下，其中一些劣化機制將不易發生，例如無運轉時應力影響

因素下降，應力腐蝕龜裂，疲勞劣化可排除，且在靜置水的狀況下沖蝕與流動加速腐蝕亦可排除。在停役後溫度會下降到室溫附近，容易發生微生物腐蝕，微生物腐蝕會比一般腐蝕更嚴重，腐蝕速率更快，且會促進沉積物孔蝕 (Under deposit pitting) 狀況的發生^[6]。由以上資料的總結，我們推論核電廠停役後最易發生的劣化機制為腐蝕，而腐蝕有分為均勻腐蝕與伽凡尼腐蝕 (Galvanic)、孔蝕與間縫腐蝕 (Crevice corrosion)，而均勻腐蝕在電廠碳鋼腐蝕劣化案例中比例最高。再進一步整理分析 A 106 B 在電廠發生腐蝕之組件與使用時間(圖 2)，發現在廠用水系統發生腐蝕的事件最多，而且大部分使用時間在 30 年內就會發生。核一廠已經運轉 40 年，雖然停止運轉後溫度壓力下降，但碳鋼很可能在除役過渡階段存放期間發生腐蝕劣化事件。

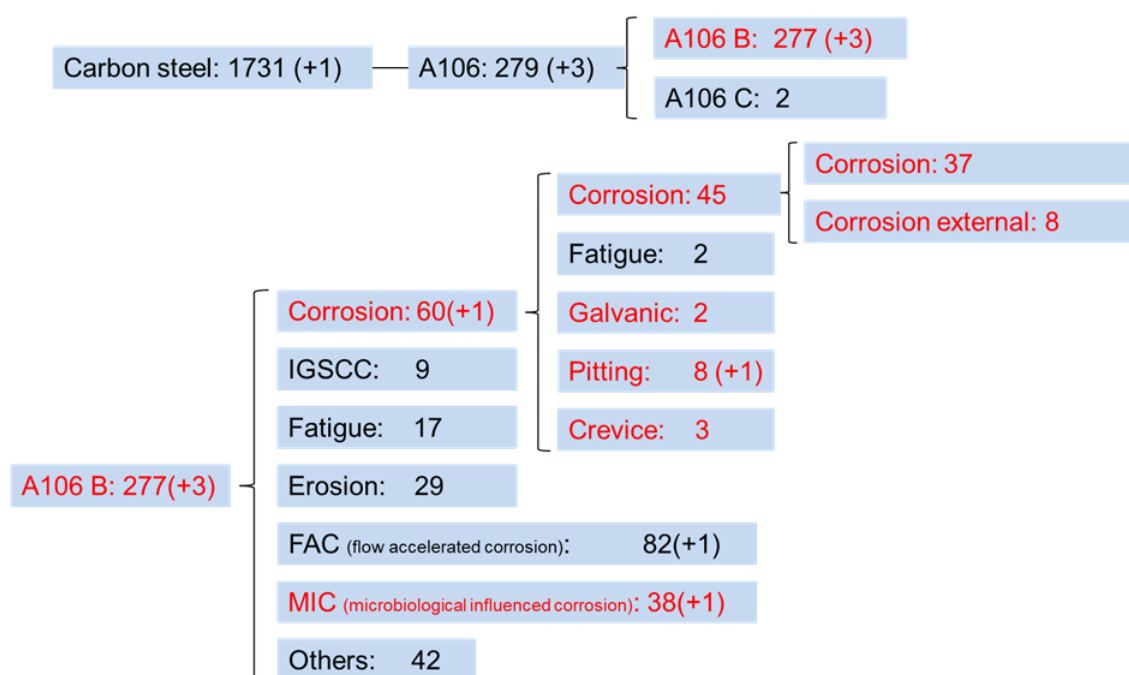


圖 1 CODAP 資料庫碳鋼材料整理分析

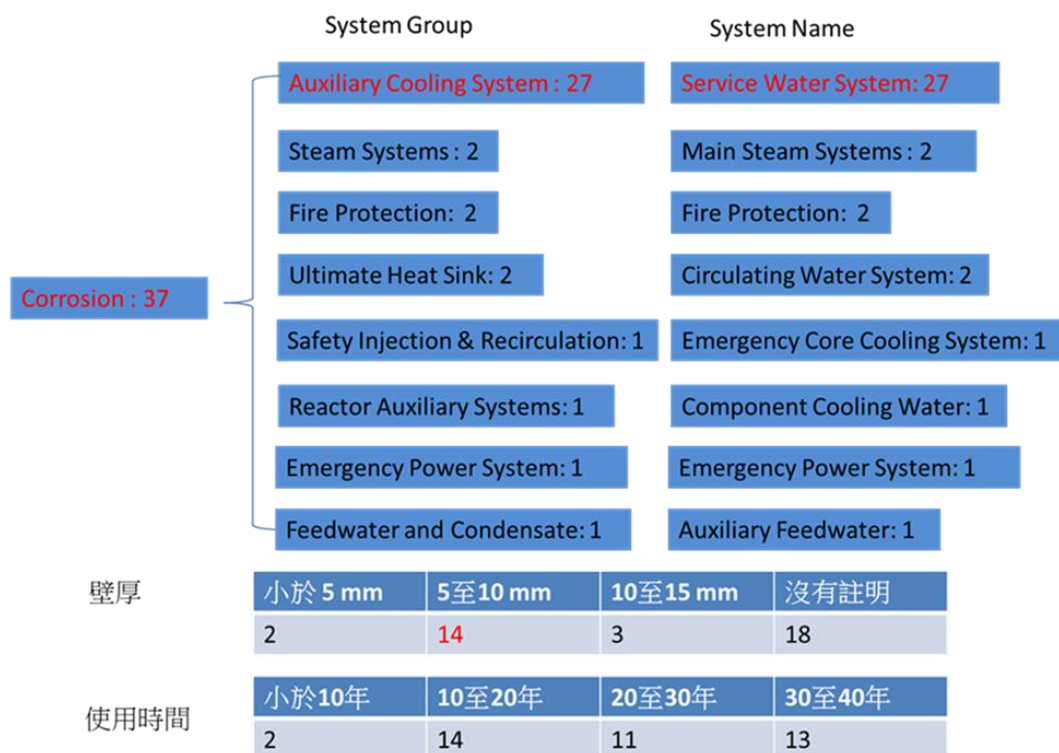


圖 2 CODAP 資料庫碳鋼 A106 B 腐蝕事件整理

由上述分析結果推測核一廠除役過渡階段靜置水環境，碳鋼最可能發生均勻腐蝕，少部分為局部腐蝕(例如：孔蝕與間隙腐蝕等)。雖然核電廠碳鋼劣化案例中局部腐蝕案例只佔少數，但是其腐蝕速率比均勻腐蝕速率更快且更難被檢測，只要局部腐蝕發生，碳鋼將更快造成劣化破損。依據文獻造成碳鋼局部腐蝕機制有三種^[7]：(1)局部鈍化層破損崩落；(2)碳鋼表面濕潤不均勻所造成表面局部污染物溶解，進而造成局部陰陽極現象(圖 3^[8])；(3)從有氧變成無氧環境轉變過程中所導致三價鐵氧化物還原溶解現象(圖 4^[9])。由 CODAP 資料整理出孔蝕(Pitting)與間縫(Crevice)腐蝕如表 1，案例 2329 為上述局部腐蝕機制(1)，案例 4966 與 5268 局部腐蝕機制(2)造成，其他除了 4504 與 4825 資料內沒有敘述破損肇因外，皆為機制(3)所造成。案例 2329 與 4504 因為發生溫度過高，沒有符合除役過渡階段的條件，案例 4825 為在柴油環境下也與靜置水不符合，案例 4966、2346 與 4058 為外管壁破損。

案例 5268、5270 與 5215 使用的環境在湖水室溫，比其他破損案例更接近核一廠除役過渡階段室溫水環境。而其中 5270 與 5215 為在 A106 B 焊件缺陷發生局部腐蝕現象，這代表在室溫靜置水的環境下，碳鋼 A106 B 局部腐蝕破損現象容易發生在焊件附近，其可能原因為焊件附近有焊接後的缺陷與殘留應力會加速局部腐蝕^[10-11]。除上述孔蝕與間縫腐蝕外，伽凡尼腐蝕也是除役過渡階段可能會發生局部腐蝕之一種，整理 CODAP 資料顯示核電廠碳鋼材料發生伽凡尼腐蝕主要為碳鋼管路末端與不銹鋼材料(例如:閘門、法蘭、焊道等)接觸的區域(圖 5)。圖 6^[12]為金屬材料對飽和甘汞電極(SCE: saturated calomel electrode)腐蝕電位，當兩種不同腐蝕電位的金屬材料接觸時，電位較低的會加速腐蝕而較高的則減緩腐蝕，不銹鋼標準電位範圍在-0.4~-0.6V 之間高於碳鋼-0.6~-0.8V，因此碳鋼會形成陽極加速腐蝕。電廠發現碳鋼伽凡尼腐蝕後主要解決方法有(1)更換成相同材料避免產生電位差；(2)鍍上保護層隔絕導電介質接觸。避免伽凡尼腐蝕最好的方法就是更換成相同的材料，但是因為材料使用或成本的限制無法更換材料，這時鍍上保護層亦可以阻斷伽凡尼腐蝕，缺點是如果保護層破損使碳鋼接觸到外界的導電介質就會發生伽凡尼腐蝕(圖 7)。CODAP 資料顯示碳鋼材料發生伽凡尼腐蝕一共 20 件，近十年只有 3 件，最近的一件碳鋼伽凡尼腐蝕案例 5231 發生時間在 2020 年，破損的材料為使用 50 年的鍍鋅碳鋼管路螺紋接口。依據以上資料得知核電廠近年發生碳鋼伽凡尼腐蝕的案例極少，主要是因為電廠避免不同的金屬材料相接觸，以及碳鋼大部分會鍍上保護層。

表 1：CODAP A106 B 孔蝕與間縫腐蝕整理

案例	破損機制	使用環境	肇因分析
2329	孔蝕	環境溫度為 93°C	局部保護層破裂加水流沖蝕
4504	孔蝕	環境溫度為 180°C	原因不明
4966	孔蝕	管外壁	覆蓋區域提供泥土中的氯離子與硫酸鹽與碳鋼的反應
4825	孔蝕	使用環境為 柴油	原因不明
2346 4058	間隙腐蝕	管外壁銲接處	銲道熔融不完全所造成的縫隙，水聚集停留在縫隙內所引發之局部腐蝕
5215	間隙腐蝕	承插管件銲接處， 湖水室溫	銲道熔融不完全或是夾雜物造成縫隙所引發之局部腐蝕

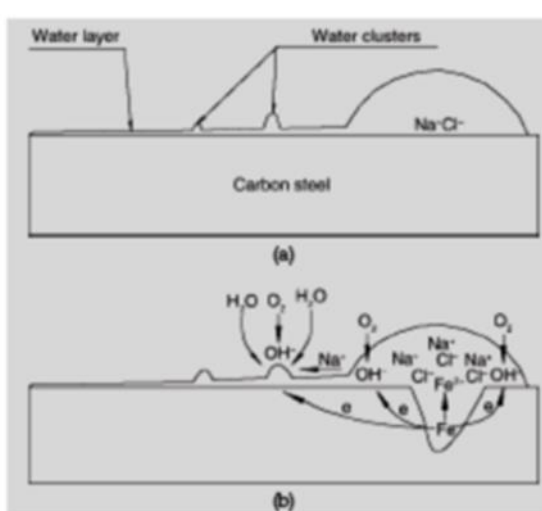


圖 3 局部腐蝕局部陰陽極現象

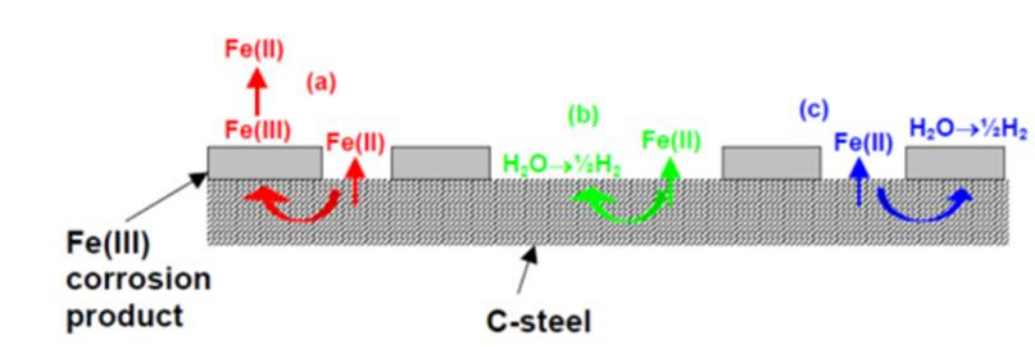


圖 4 三價鐵氧化物還原溶解現象

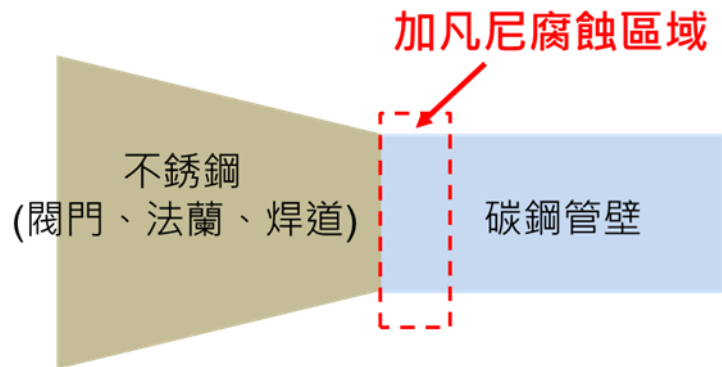


圖 5 核電廠碳鋼伽凡尼腐蝕位置

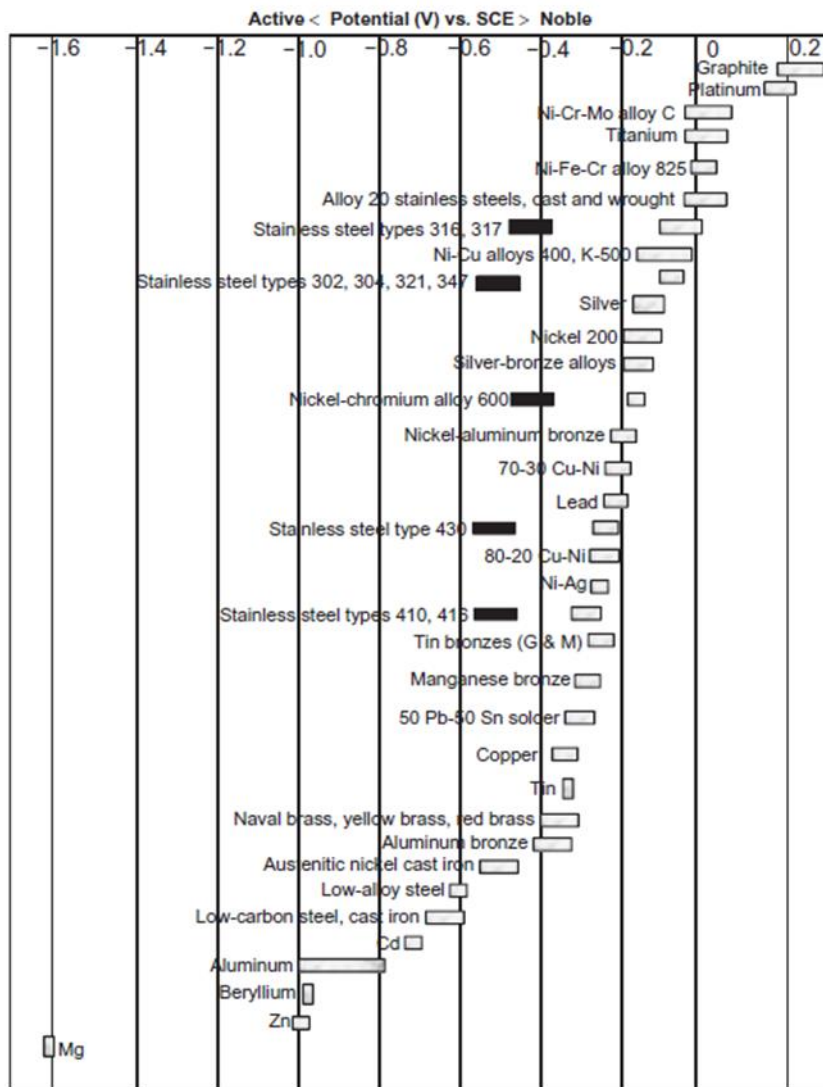


圖 6 金屬合金 VS SCE 腐蝕電位表

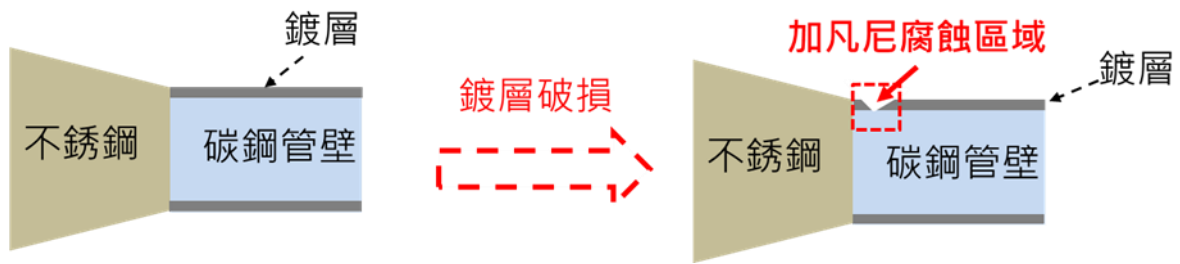


圖 7 碳鋼鍍層破損發生伽凡尼腐蝕位置

本計畫子項計畫二與三為參考國原院材料所執行核安會四年中程計畫(109-112 年)「核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究」的子項計畫「核電廠運轉及除役階段材料維護與防治策略研析」之研究。該項四年期計畫研究主要為模擬核電廠除役過渡階段各種水環境下的碳鋼重量損失腐蝕實驗，實驗得到碳鋼管材之腐蝕速率可作為除役階段核電廠管路定期檢測及維護上的重要參考依據。本所執行前期四年計畫共進行五組重量損失腐蝕實驗(表 2^[13-16])，實驗環境為一大氣壓，溫度 45°C 靜置水環境，每組實驗時間約 5000 至 20000 小時。實驗 1 至 3 主要為模擬電廠在除役過渡階段各種水環境碳鋼均勻腐蝕：實驗 1 為模擬除役過渡階段完全沒有水流動的狀況；實驗 2 為模擬固定時間會讓水流循環的狀況；實驗 3 為模擬管內水沒充滿介面的腐蝕狀況，實驗結果量測損失重量繪製單位面積重量損失與時間關係圖(圖 8)並計算穩定後的腐蝕速率(圖 9)，從實驗結果得知腐蝕速率最慢的為實驗 2 模擬固定時間讓水流循環的實驗，因此建議核電廠固定時間讓水流循環避免使局部離子濃度過高將有效減緩碳鋼之腐蝕速率；腐蝕速率最快為實驗 3 的介面試片，且介面試片在空氣與水交界的區域腐蝕最為嚴重，主要造成原因如圖 10，在空氣與水的介面因為水的表面張力的影響，在碳鋼表面形成一層水的薄膜(圖 10 (a))，由 Yamashita 等人研究發現

水薄膜層厚度在 $10\ \mu\text{m}$ 附近腐蝕速率越快(圖 10(b))^[17]，進而造成介面區域腐蝕比較嚴重之狀況，因此建議核電廠在除役過渡階段特別留意沒有充滿水的碳鋼管路介面區域之減薄情形。實驗 4 模擬除役過渡階段 A106 B 管材焊件缺陷局部間隙腐蝕狀況，實驗結果發現在除役過渡階段的靜置純水環境下碳鋼焊件間隙腐蝕現象很難發生。實驗 5 利用熱浸鍍鋅的 A106 B 管材進行模擬除役過渡階段靜置水環境碳鋼鍍鋅層破損之腐蝕實驗，實驗結果發現鍍鋅碳鋼試片鍍層破損區域腐蝕速率在均勻腐蝕範圍，沒有發生局部腐蝕效應。

表 2：四年前期計畫五組重量損失腐蝕實驗整理

實驗編號	試片	實驗條件	取出間隔	實驗時間 (hr)	實驗目的
實驗 1 (結束)	C: 20 (20) H: 20 (20)	不換水(45°C)	約兩個月 取出一片	21000	模擬沒有水流循環的環境
實驗 2 (結束)	C: 16 (16)	約一個月換水 (45°C)	約二個月 取出兩片	12000	模擬固定時間使水循環的環境
實驗 3 (結束)	a: 6 (6) i: 6 (6) w: 6 (6)	介面腐蝕行為觀察 不換水(45°C)	約三個月 取出一組	12500	模擬破鋼管內水沒充滿
實驗 4 (結束)	i: 6 (6) w: 6 (6)	管材與銲道缺陷介面腐蝕研究(45°C)	約兩個月 取出一組	11500	模擬破鋼管材與焊件缺陷腐蝕速率
實驗 5 (結束)	試片 C 鍍鋅	不換水(45°C)	約 14 天 取出一片	5000	模擬碳鋼保護層破損之局部腐蝕

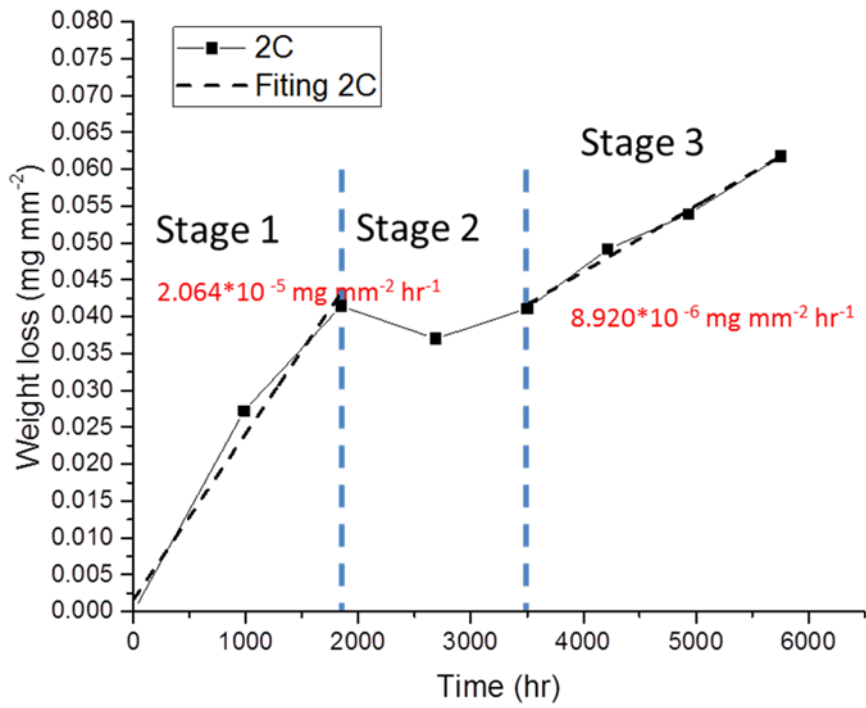


圖 8 單位面積重量損失與時間關係圖

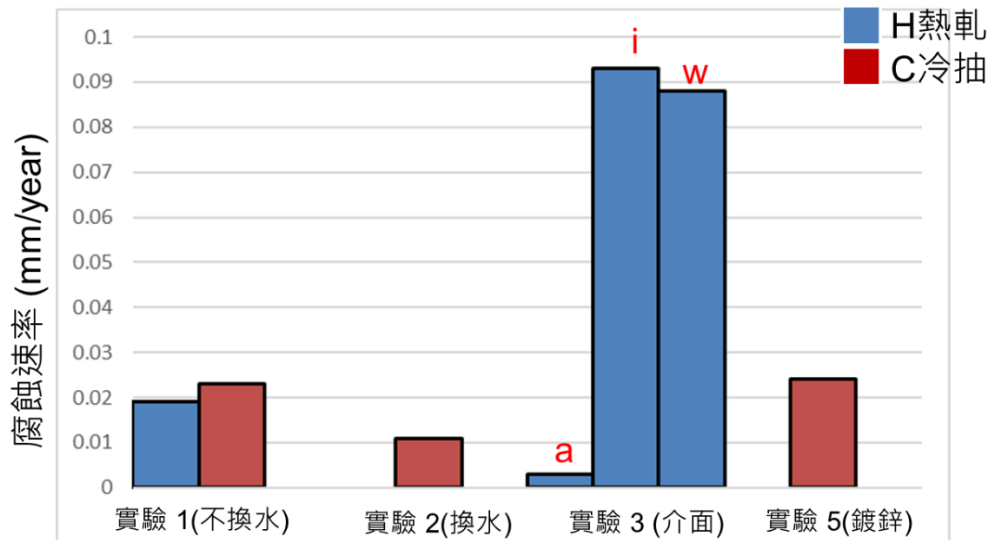


圖 9 碳鋼腐蝕速率

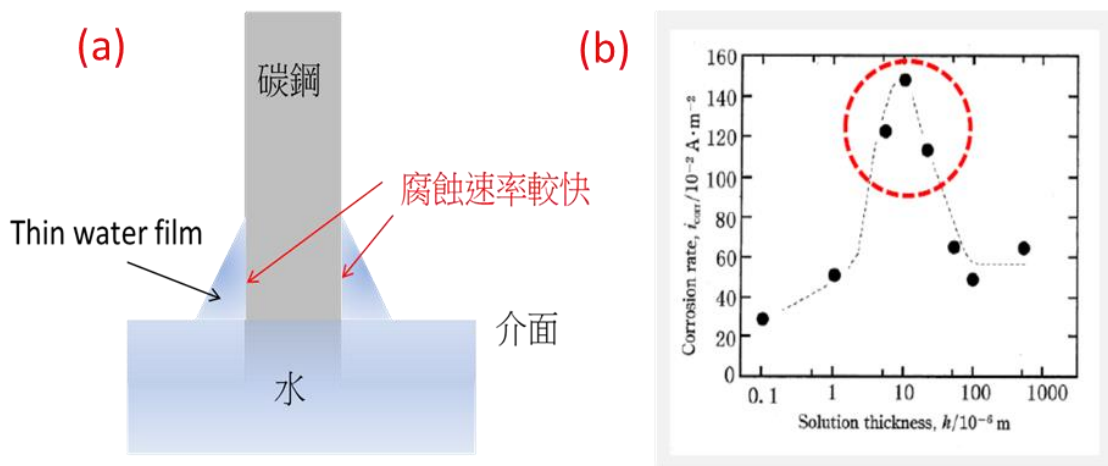


圖 10 介面腐蝕機制(a)示意圖 (b)水膜厚度與腐蝕速率之關係圖

四年前期計畫利用重量損失腐蝕實驗得到碳鋼在除役過渡階段各種水環境下的腐蝕速率，但是實驗時間需約 5000 至 20000 小時的時間，為了可以更快量測更多不同除役過渡狀態下金屬材料的腐蝕速率，需要建立另一套腐蝕實驗系統。電化學腐蝕實驗可以在短時間內量測其腐蝕速率，且由文獻得知碳鋼材料利用電化學腐蝕試驗的方式與重量損失腐蝕實驗計算腐蝕速率的數值是接近的且趨勢一致(圖 11)^[18]。子項計畫二主要為建立適合除役過渡階段水環境的電化學腐蝕實驗系統，並利用電化學腐蝕試驗的方式進行碳鋼的腐蝕速率計算以及壽命評估工作，並與重量損失腐蝕試驗所得到的結果進行對比，以驗證電化學腐蝕試驗的可靠性。子項計畫三則持續模擬除役過渡階段靜置水環境下重量損失的腐蝕實驗，主要探討冷加工對碳鋼的影響並計算其腐蝕速率，主因為碳鋼材料受冷加工(例:滾壓、彎曲或焊道附近熱影響區)影響會產生缺陷與殘留應變造成材料本身的抗腐蝕性下降 [18-21]。

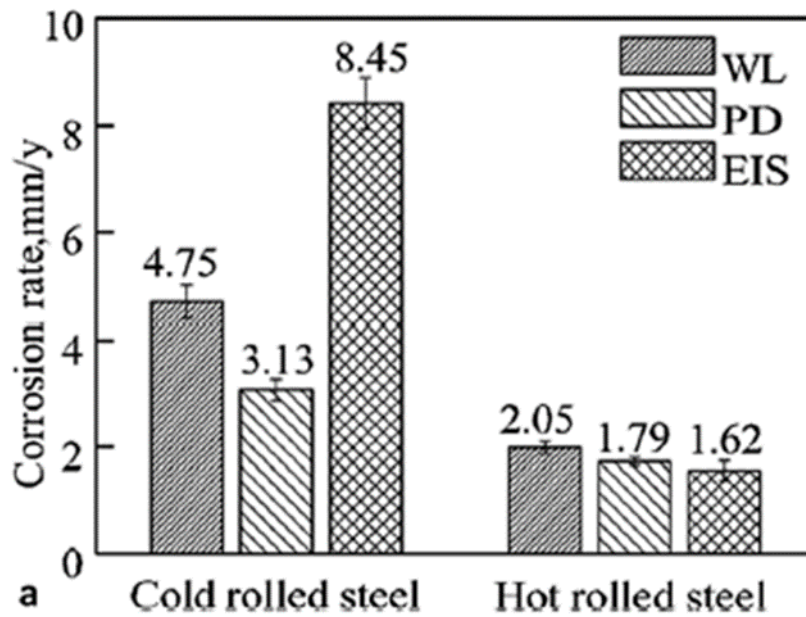


圖 11 重量損失(WL)腐蝕實驗與電化學腐蝕實驗(PD, EIS)比較^[18]

2. 實驗流程

子項計畫二電化學腐蝕實驗所使用的材料如表 3 為三家廠商提供之管材 A106 B，廠商 A 與 B 提供的管材與前期計畫實驗 1 所使用的材料相同，廠商 A 管材製程為冷抽代號為 C，廠商 B 管材製程為熱軋代號為 H，廠商 C 管材用作製備冷加工試片，其製程為熱軋代號為 HCW。A106 B 為低碳鋼，其碳含量依 ASTM 規範須小於 0.3 wt %，三種管材成分組成結果如表 4 所示，其元素成分組成皆符合 ASTM 規範。代號 C 與 H 之管狀材料線切割成 5 mm 長度之管狀試片，然後把金屬鎳線焊接在試片上並鑲埋在環氧樹脂製備成電化學試片(圖 12)。代號 HCW 管材利用線切割機切割成 70 x 50 x 7 mm 板材(圖 13)，再利用冷滾機滾壓厚度減少 5~10%(表 5)，冷加工後的板材再切割成 20 x 20 x 4.7 mm 的腐蝕試片後再製備電化學試片(圖 14)。電化學試片進行腐蝕實驗前會利用砂紙將表面研磨至 #1000，並參考 ASTM

G3 電化學實驗架設之流程進行實驗，電極接線如圖 15 所示，利用恆電位儀 AutoLab Pastet 30(圖 16)進行動電位極化法(potentiodynamic)之電化學腐蝕實驗。電化學腐蝕實驗的參數如表 6 所示，主要為改變掃描速率與電解液濃度，測得電壓與電流關係圖，然後利用程式把電壓與電流關係圖轉換成電壓與 log 電流關係圖，並使用塔弗法得到腐蝕電流與腐蝕電位(圖 17)，量測之腐蝕電流可以利用圖 18 之公式換算成碳鋼腐蝕速率。

表 3：A106 B 尺寸規格

A106 B	製程	代號	壁厚(mm)	外直徑(mm)	附註
廠商 A	冷抽	C	2.77	21.3	與實驗1相同
廠商 B	熱軋	H	4.5	32	與實驗1相同
廠商 C	熱軋	HCW	15.9	141	冷加工試片

表 4：A106 B 成份組成

wt %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
ASTM A106 GR.B	≤ 0.30	≥ 0.10	0.29 ~ 1.06	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.40	≤ 0.15	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.08
廠商 A	0.19	0.22	0.43	0.016	0.002	0.002	0	0	0	0
廠商 B	0.19	0.22	0.44	0.013	0.014	0.015	0.002	0.019	0.013	0
廠商 C	0.18	0.19	0.40	0.013	0.005	0.02	0.01	0.01	0.006	0

表 5：冷加工試片

試片代號	冷加工量(%)	試片厚度(mm)
BM	0	7
CW5%	5	6.65
CW10%	10	6.3

表 6：電化學腐蝕實驗參數

	實驗參數
掃描電位範圍	-1.0至0V
掃描速率	0.1mV/s, 1mV/s, 10mV/s
電解液(氯化鈉)	3.5wt%, 1.75wt%, 0.875wt%

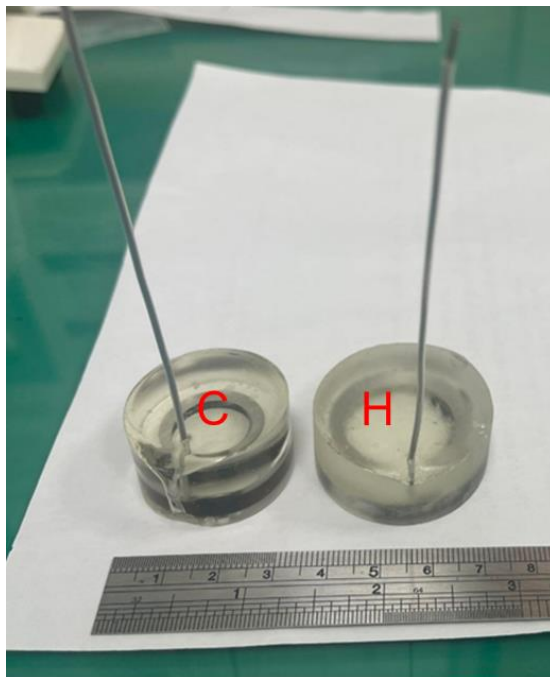


圖 12 C 與 H 冷鑲埋電化學試片

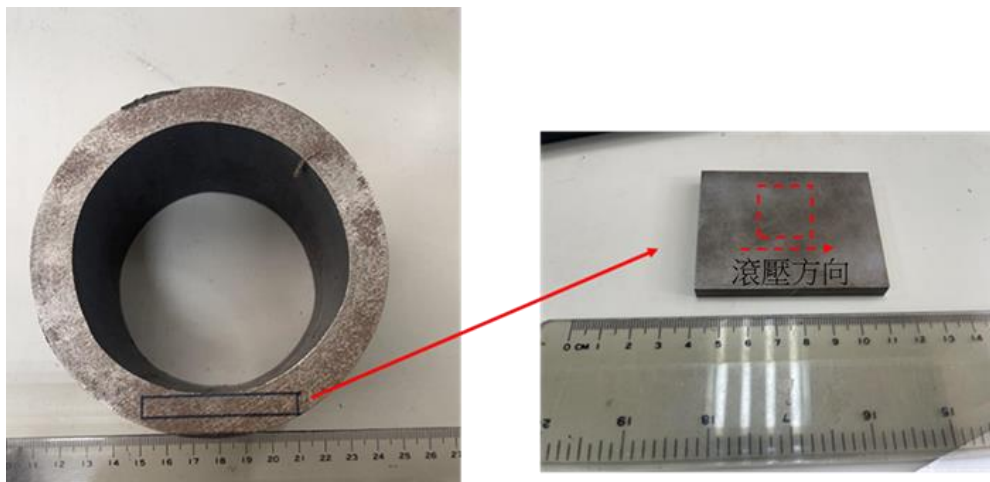


圖 13 HCW 管材線切割製備冷加工板材

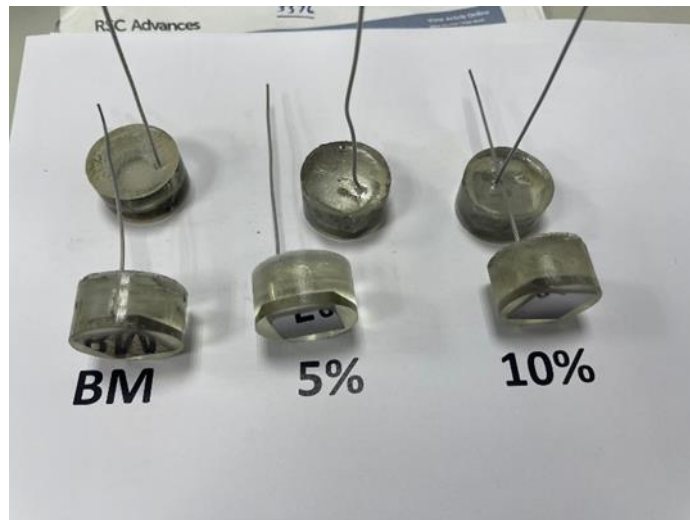


圖 14 HCW 冷加工電化學試片

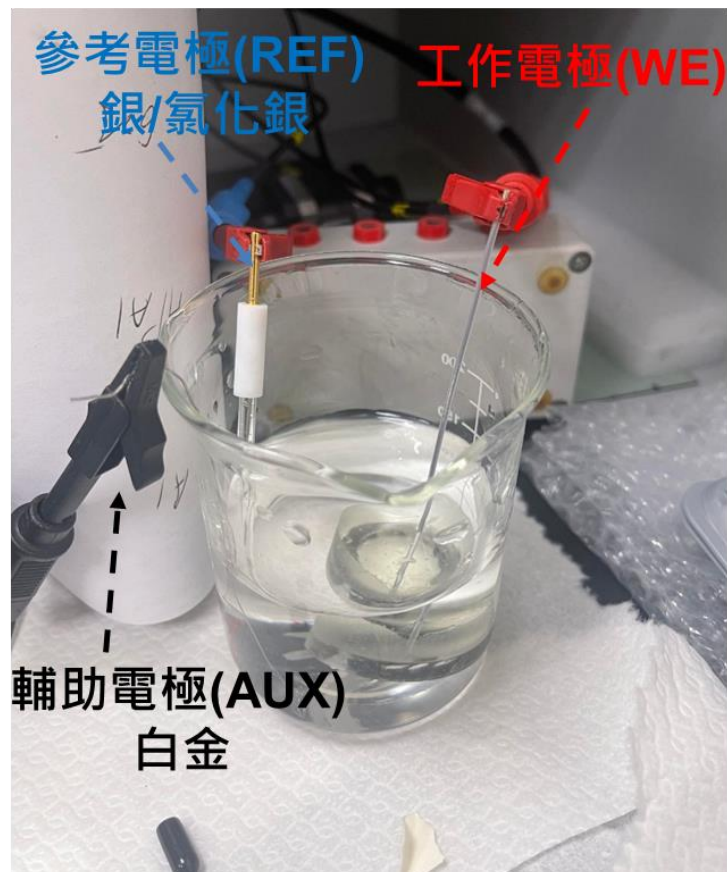


圖 15 電化學實驗電極接線圖

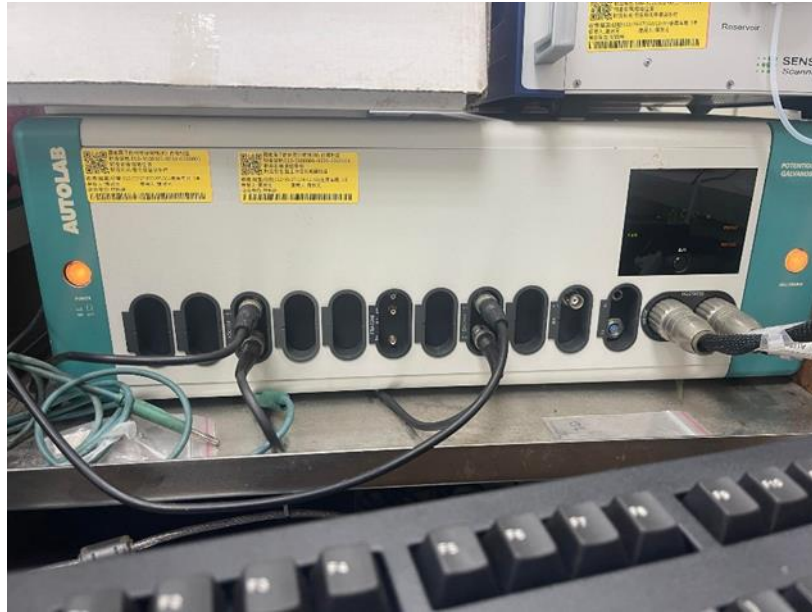


圖 16 恆電位儀 AutoLab Pastet 30

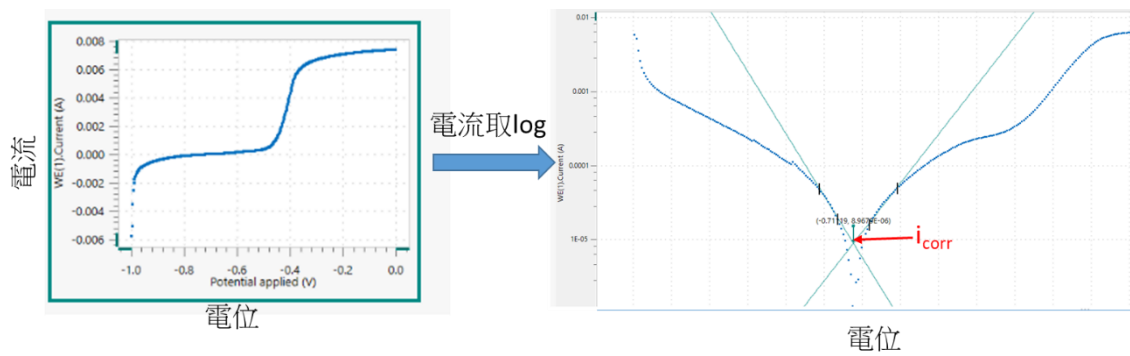


圖 17 塔弗法量測腐蝕電流與腐蝕電位

$$m = \frac{Ita}{nF}$$

$$r = \frac{m}{tAD} = \frac{ia}{nFD}$$

$$r = 0.00327 \frac{ia}{nD} \text{ mm/yr}$$

m:腐蝕反應的重量

I:電流安培

a:原子重量

t:時間

F:法拉第常數

A:反應面積

D:密度

n:腐蝕反應的價數

$M = M^{n+} + ne^-$,

i:電流密度 I/A

圖 18 腐蝕速率計算公式

子項計畫三冷加工碳鋼重量損失腐蝕試片與冷加工電化學腐蝕試片相同(表 5)，利用電子掃描顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)附屬設備電子背向散射繞射技術 (EBSD, Electron Backscatter Diffraction)分析冷加工所造成殘留應變分佈之改變。冷加工試片金相依照標準金相流程製備，利用 10 % HNO₃ 與 90 % methanol 腐蝕液在室溫腐蝕約 60 秒。重量損失腐蝕試片在進行實驗前先利用砂紙將表面研磨至 #1000，然後量測試片重量編號後放在試片架上(圖 19)。試片放在試片架上固定好後放入高壓釜(圖 20)，並注入去離子水，維持水環境溫度 45°C。實驗每間隔約一個月的時間取出一組(BM, CW5%, CW10%)試片，取出之試片依照 ASTM G1 機械法^[22]去除表面氧化物後量測重量，並利用 SEM、能量散射光譜儀(Energy Dispersive Spectrometers, EDS)與 EBSD 分析腐蝕試片。



圖 19 試片架與實驗試片



圖 20 壓力釜與恆溫控制系統

3. 結果與討論

圖 21 為氧化還原反應電位與電流關係的塔弗方程式(Tafel equation)，以 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$ 為例子 (圖 21)，當氧化反應電流密度(i_a)等於還原反應電流密度(i_c)時的電流為平衡電流密度(i_0)，此時的電位為平衡電位，高於平衡電位時 i_a 大於 i_c 發生氧化反應，相反的低於平衡電位則發生還原反應。如圖 22 本實驗碳鋼電化學陰極反應為 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ ，陽極反應主要為 $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ，腐蝕反應發生時氧化反應電流密度等於還原反應電流密度，此時的電流為腐蝕電流(i_{corr})，電位則為腐蝕電位(V_{corr})，本實驗電解液中鈉與氯離子不參與氧化還原反應，只負責電荷傳導。實驗中儀器所測得的電流值(i_{app})為氧化電流與還原電流的差值(圖 23(a))^[23]，圖 23(b)^[23]為電位與 \log 電流關係圖，圖中虛線為塔弗方程式，實線點線圖為實際量測值，當掃描電位離開腐蝕電位後，實線的點線圖會出現與虛線塔弗方程式相符的線性區域，該線性區域稱為塔弗直線區(Tafel region)，在該直線區內實際量測的電流值約等於氧化反應或還原反應電流。利用氧化反應與還原反應塔弗直線區的直線交點為腐蝕電位與腐蝕電流(圖 23(b))，依照以上原理利用軟體測得腐蝕電流(圖 17)，利用腐蝕電流代入圖 18 公式求得腐蝕速率，碳鋼 97%以上為鐵，直接用鐵的數值代入計算腐蝕速率($\text{Fe}: a=55.8, D=7.87 \text{ g/cm}^3, n=2$)^[24]。圖 24 為管狀電化學試片 C 與 H 改變掃描速率在 3.5 wt% 氯化鈉溶液所得到之腐蝕速率，該腐蝕速率隨掃描速率變快而增加，冷抽試片腐蝕速率高於熱軋與重量損失腐蝕實驗 1(表 2)趨勢相符。掃描速率為 0.1 mV/s 的腐蝕速率冷抽與熱軋腐蝕速率幾乎一致，辨識效果不如 1mV/s 與 10 mV/s，但 10 mV/s 的腐蝕速率與重量損失腐蝕實驗 1 相差較多，所以選擇掃描速率 1mV/s 比較接近於重量損失腐蝕實驗 1 的腐蝕速率。圖 25 為管狀電化學試片 C 與 H 固定掃描速率 1mV/s，改變電解液濃度測得的腐蝕速率，腐蝕速率隨電解液

濃度下降而降低，實驗結果得到電解液濃度 1.75wt % 比較接近於重量損失腐蝕實驗 1 的腐蝕速率。由以上電化學實驗結果得到碳鋼圓管電化學試片以 1.75wt 氯化鈉電解液，掃描速率 1mV/s 量測的腐蝕速率與模擬除役過渡階段水環境下的重量損失腐蝕實驗接近。

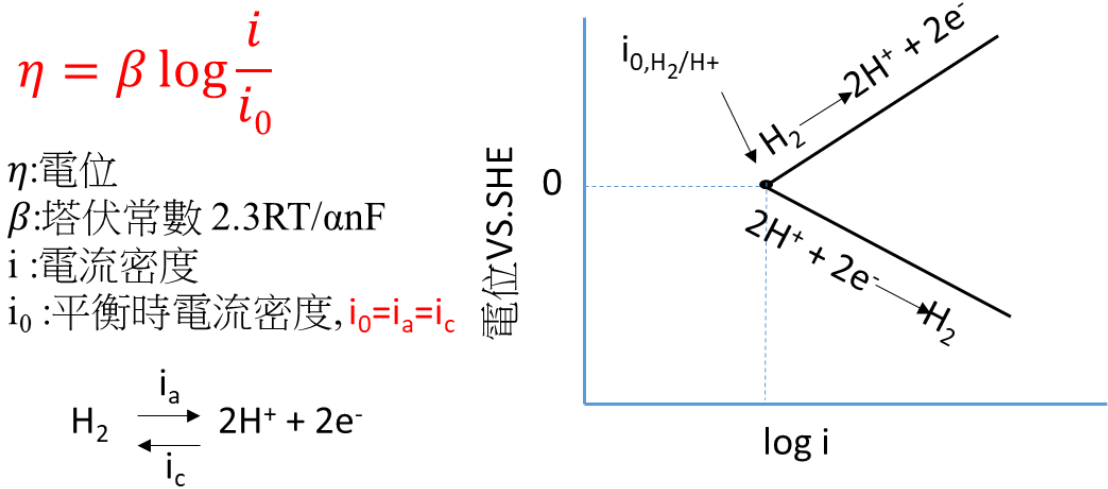
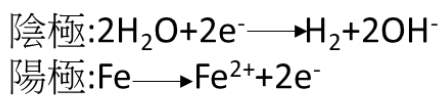


圖 21 塔弗方程式(Tafel equation)



E_{corr} : 腐蝕電位
 i_{corr} : 腐蝕電流
 $i_{\text{corr}} = i_a = i_c$

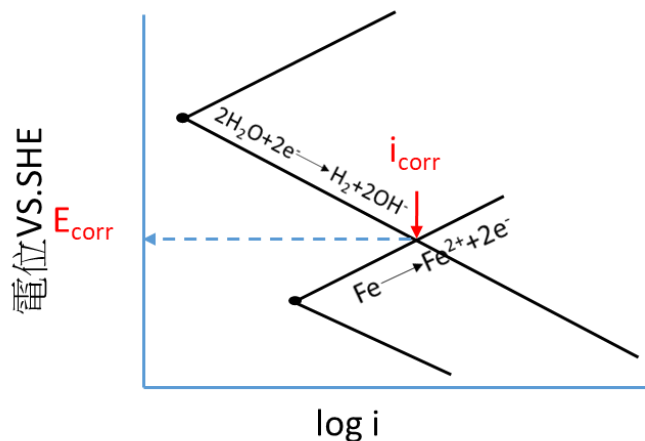
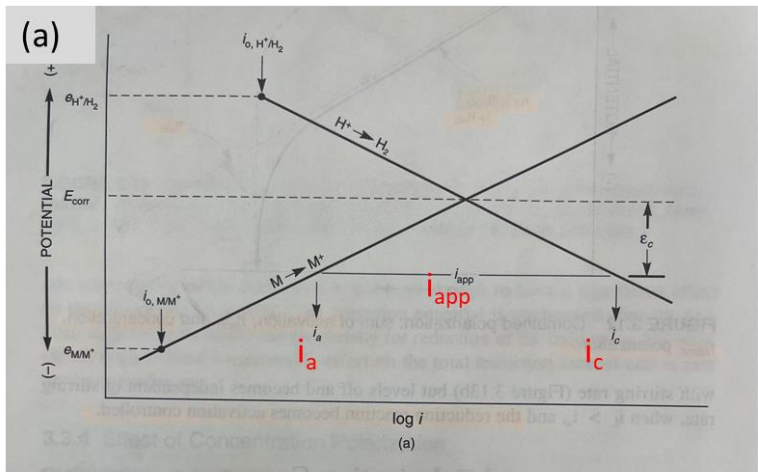


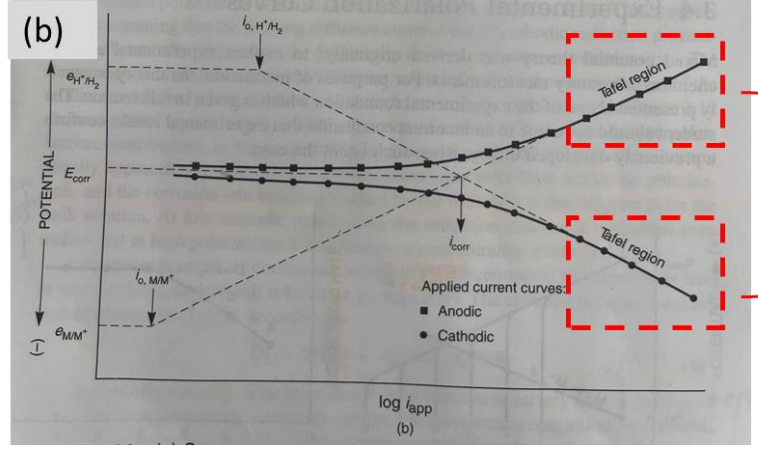
圖 22 碳鋼陰極與陽極電化學反應



i_{app} : 實際測得電流

當 $i_c > i_a$
 $i_{app,c} = i_c - i_a$

當 $i_a > i_c$
 $i_{app,a} = i_a - i_c$



塔弗直線區

當 $i_a \gg i_c$
 $i_{app,a} \approx i_a$

當 $i_c \gg i_a$
 $i_{app,c} \approx i_c$

圖 23^[22] 塔弗直線區(Tafel region)

3.5 wt% 氯化鈉(C與H圓管試片)

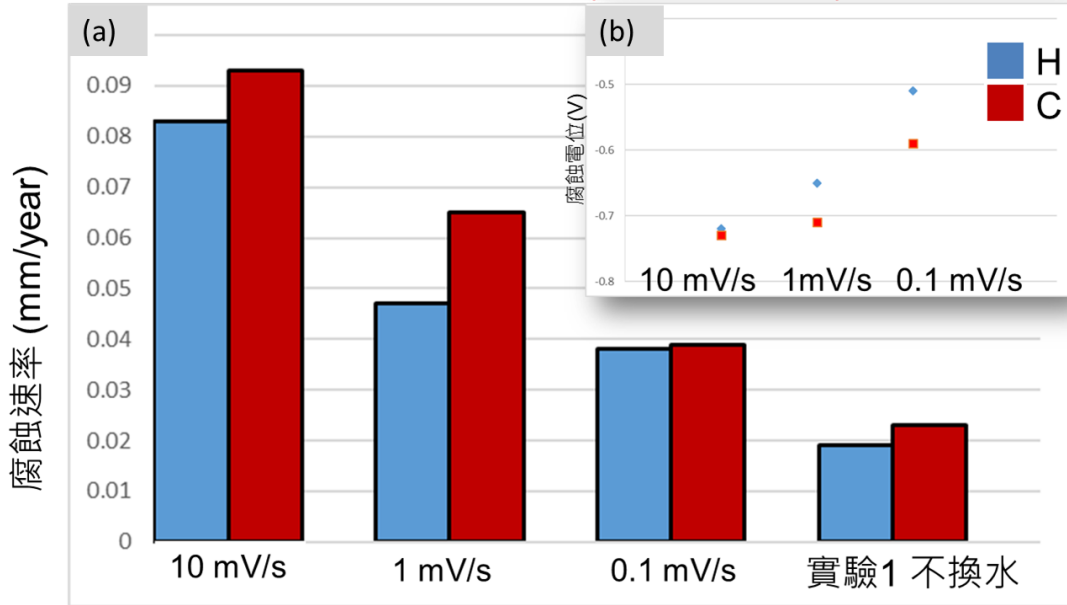


圖 24 改變掃描速率 VS (a)腐蝕速率與(b)腐蝕電位

1 mV/s(C與H圓管試片)

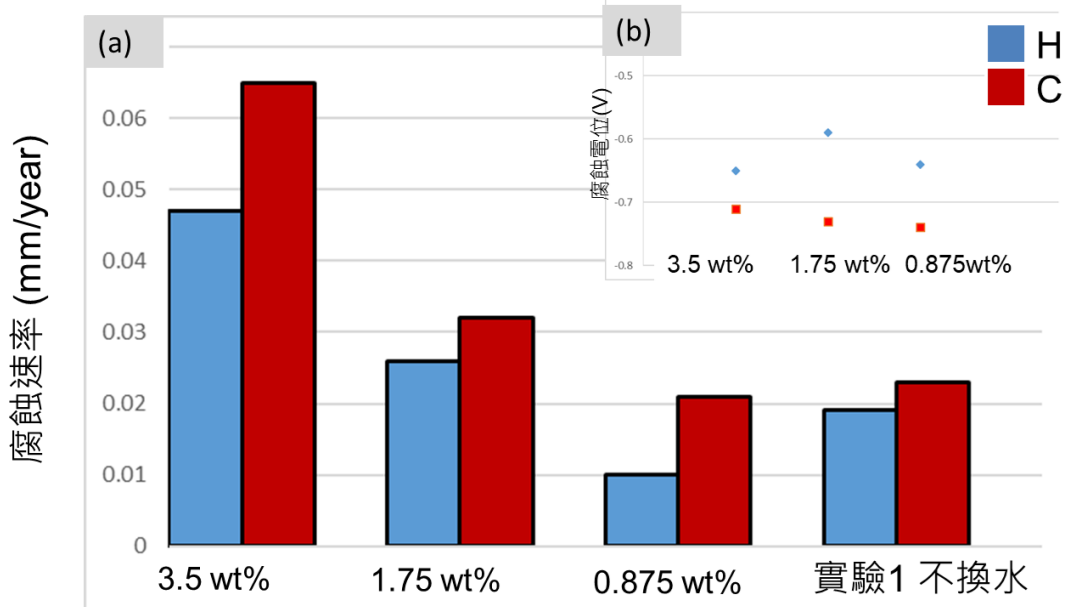


圖 25 改變腐蝕液濃度 VS (a)腐蝕速率與(b)腐蝕電位

本實驗所使用之碳鋼(HCW)冷加工試片金相如圖 26 所示，其中黑色區域為波來鐵(Pearlite)，白色區域為肥粒鐵(Ferrite)，金相無法明顯看出冷加工量所造成的影響。冷加工試片利用 EBSD 分析，再利用 HKL Chanel 5 軟體分析 EBSD 資料得到 Kernel Average Misorientation (KAM)與殘留應變分佈圖(圖 27)，由圖中觀察發現冷加工量越高，殘留應變量明顯變高。重量損失腐蝕實驗的冷加工碳鋼試片約間隔一個月取出一組試片(BM, CW5%, CW10%)，試片取出後清洗去除表面氧化物清後量測重量並計算單位面積重量損失，圖 28 為單位面積重量損失與時間的關係圖，圖中虛線為直線擬合的結果，該線斜率為單位時間面積的重量損失，再除以碳鋼密度可得到腐蝕速率(單位時間減少厚度= 單位時間面積重量 / 密度)。由以上公式計算的腐蝕速率如圖 29 所示，BM、CW5%與 CW10%的腐蝕速率分別為 0.04 mm/year、0.046 mm/year 與 0.048mm/year，碳鋼冷加工量越高，腐蝕速率越快，每增加 10%冷加工量，腐蝕速率約增加 20%。比較前期四年計畫實驗 1 的碳鋼重量損失實驗(圖 30^[13])發現腐蝕時間約在 1500 小時前腐蝕速率較快，因為表面沒有氧化層保護以及溶液內溶氧度較高，在過約 3000 小時的後腐蝕速率明顯減緩並隨著實驗時間越久腐蝕速率越穩定，此時腐蝕速率為接近實際狀況的腐蝕速率。由於本實驗目前進行時間約為 3500 小時，利用 3500 小時內的數據點直線擬合計算的腐蝕速率預測會比以 3000 小時後的數據點直線擬合計算的腐蝕速率快，以實驗 1 的數據推估可相差到 2 至 3 倍。利用電化學腐蝕實驗量測冷加工碳鋼腐蝕速率與重量損失實驗比較如圖 31，電化學參數使用 1.75wt%氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測。由圖中得到電化學量測冷加工試片的腐蝕速率略高於沒有冷加工的試片，但相較於重量損失實驗的腐蝕速率低，造成原因為選用電化學該參數是以實驗 1 碳鋼穩定後腐蝕速率去比較，因此該參數測得的腐蝕速率可能接近

冷加工碳鋼穩定後的腐蝕速率。電化學實驗固定掃描速率 1mV/s 改變電解液濃度至 3.5wt% 量測冷加工碳鋼試片與重量損失實驗比較如圖 32，由圖中得到電化學量測的腐蝕速率隨冷加工量增加而提高，且腐蝕速率與重量損失的腐蝕速率接近。由圖 32 電化學實驗結果得知 3.5wt% 氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的冷加工碳鋼腐蝕速率接近於 3500 小時重量損失腐蝕實驗之腐蝕，再利用此組參數量測的 C 與 H 試片之腐蝕速率與前期計畫實驗 1 的 3000 小時前的腐蝕速率比較如圖 33，從圖中可以觀察到 1.75wt% 氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時後穩定的腐蝕速率，而 3.5wt% 氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時前的腐蝕速率。圖 34 為碳鋼冷加工試片電化學實驗儀器所量到的電位與電流關係圖，圖中(a)與(b)氯化鈉電解液濃度分別為 1.75wt% 與 3.5wt%，掃描速率為 1mV/s，圖中可以觀察到電位高於腐蝕電位(約-0.7V)後，相同電位時冷加工越高的電流越大，這代表在碳鋼發生局部腐蝕(例如:間隙腐蝕，加凡尼)電位提升的狀況下，冷加工量越高，腐蝕速率越快。

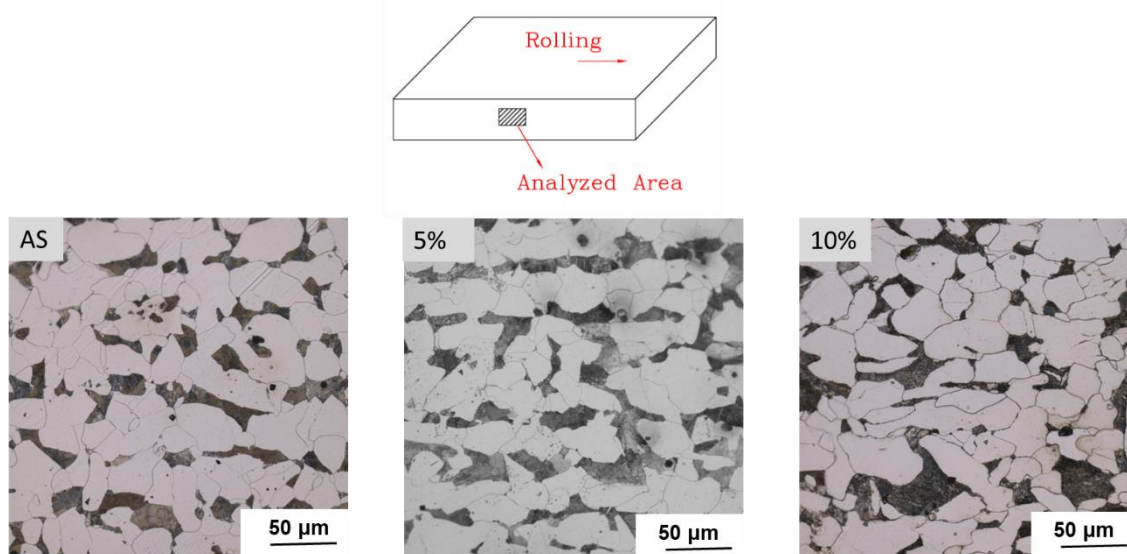


圖 26 碳鋼冷加工試片金相

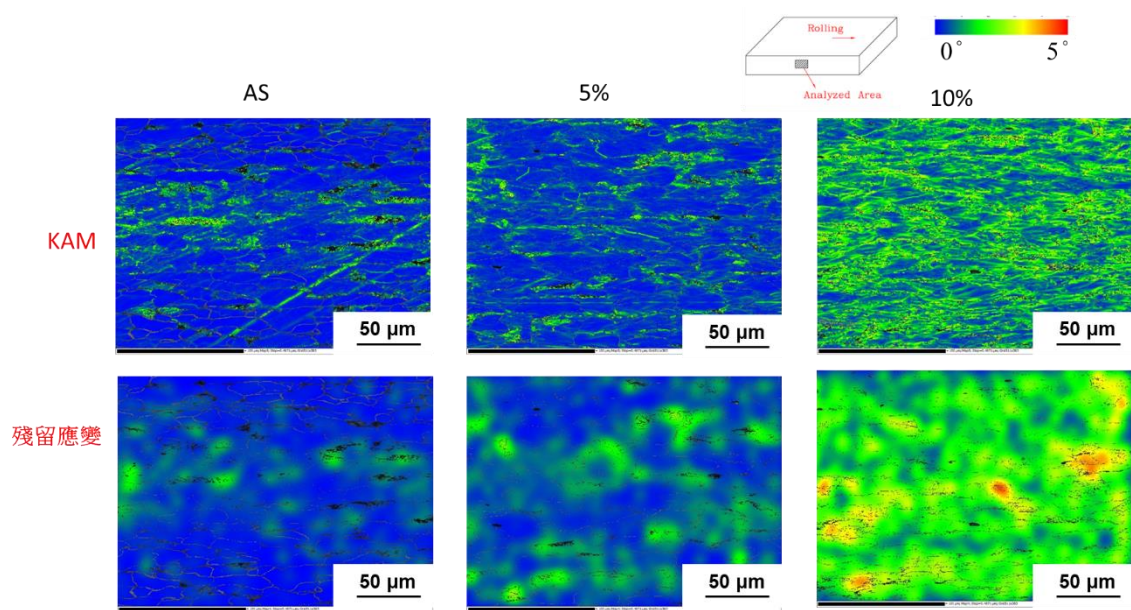


圖 27 KAM 與殘留應變分佈圖

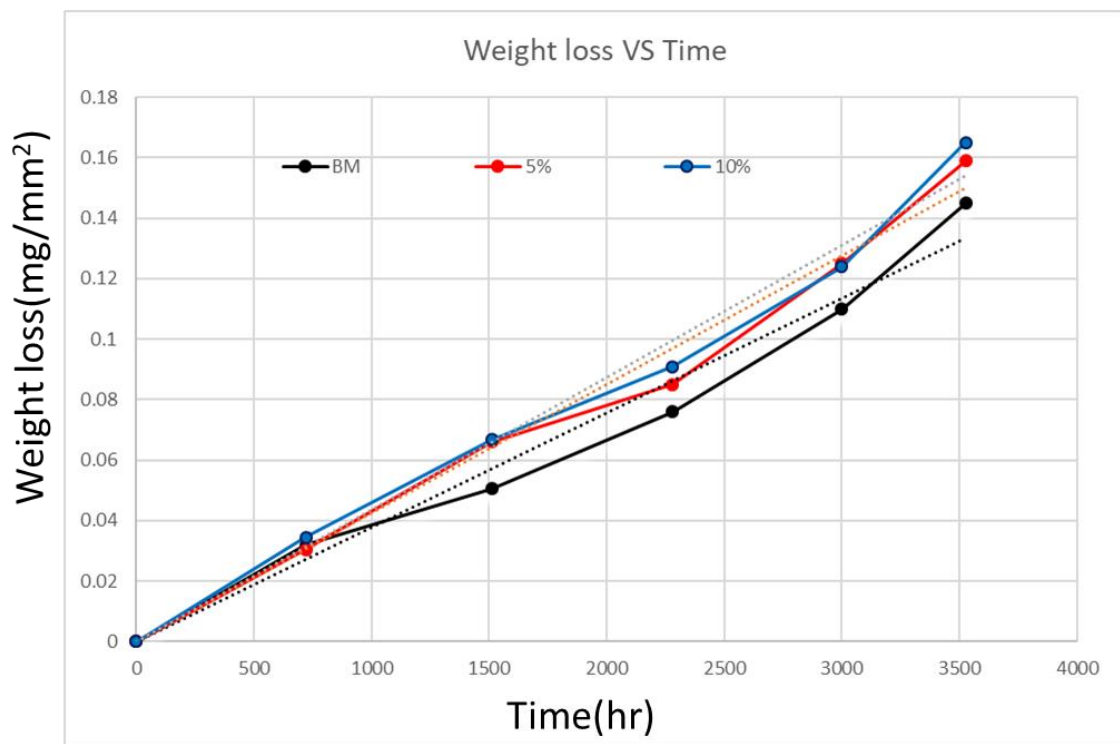


圖 28 單位面積重量損失 VS 時間圖

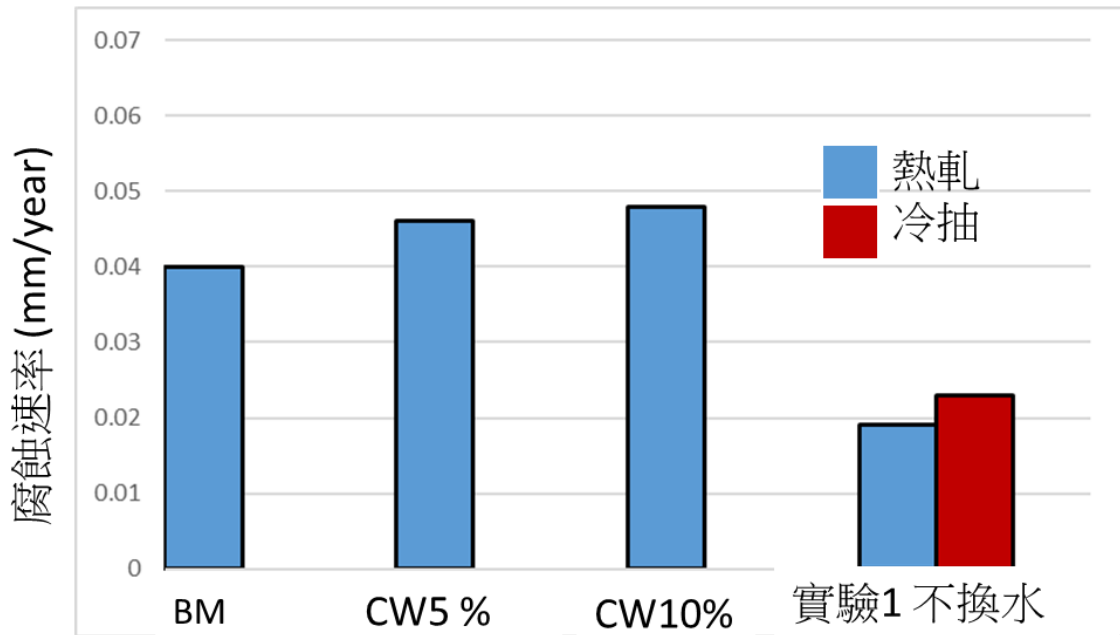


圖 29 冷加工量與腐蝕速率關係圖

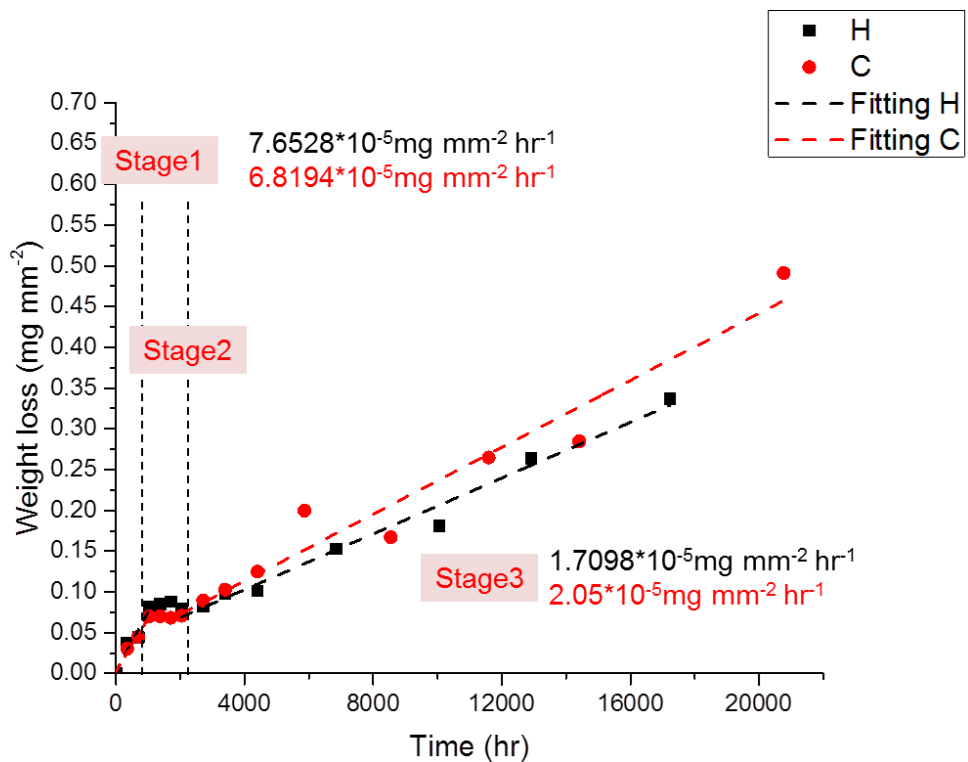


圖 30^[13] 實驗(1)單位面積重量損失 VS 時間圖。

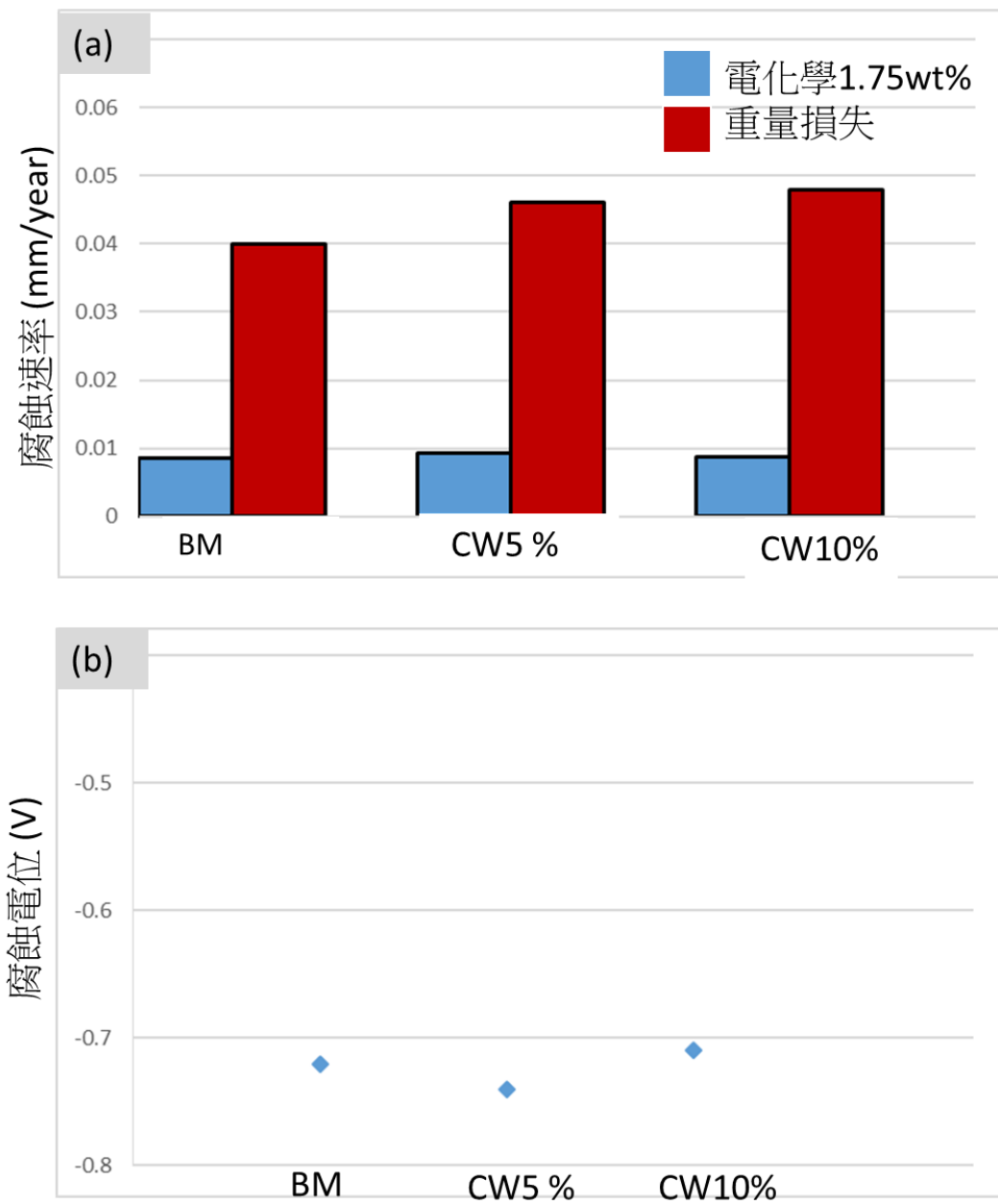


圖 31 (a)電化學 1.75wt% 與重量損失實驗腐蝕速率；

(b) 腐蝕電位與冷加工量關係圖

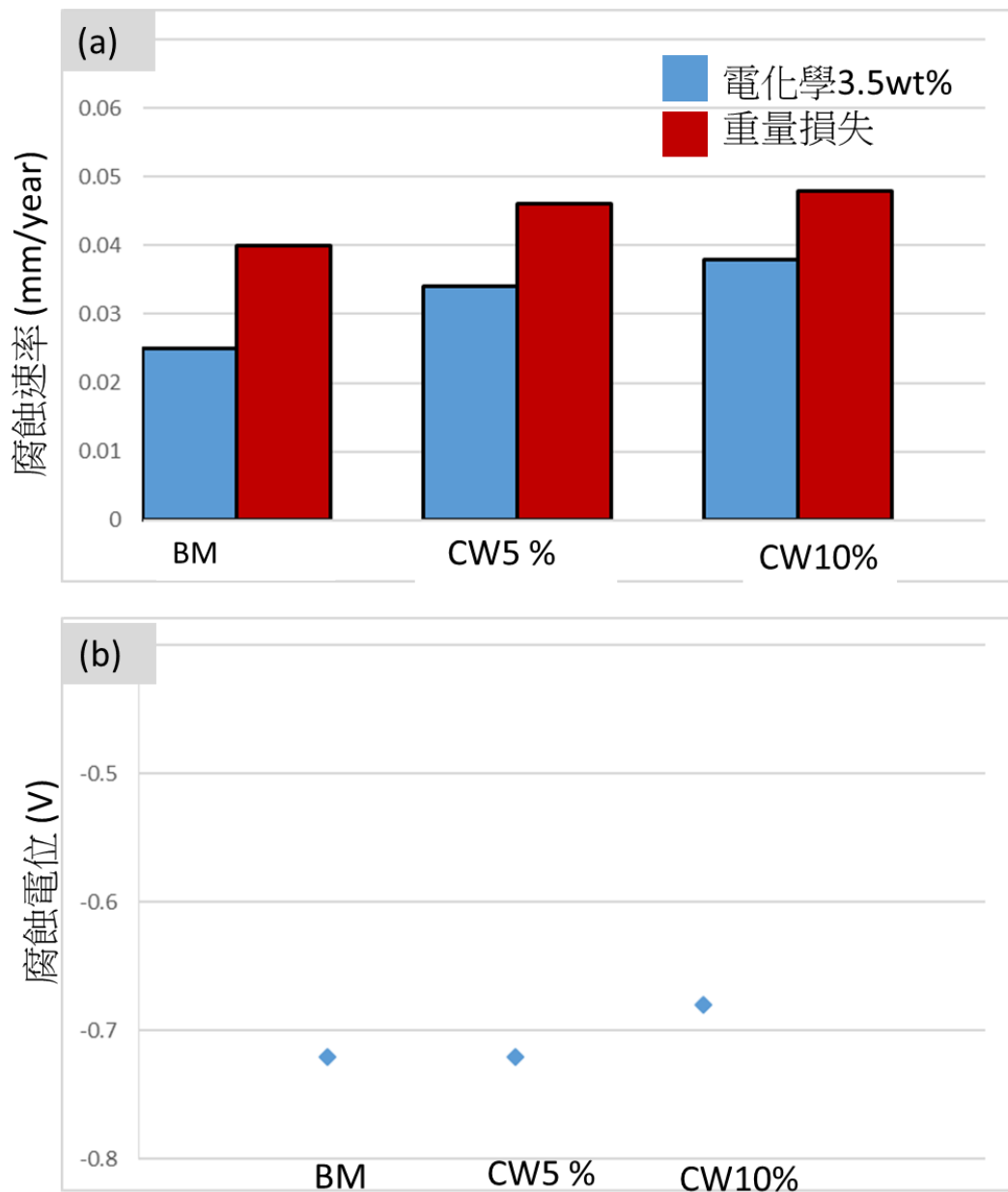


圖 32 (a)電化學 3.5wt% 與重量損失實驗腐蝕速率；

(b) 腐蝕電位與冷加工量關係圖

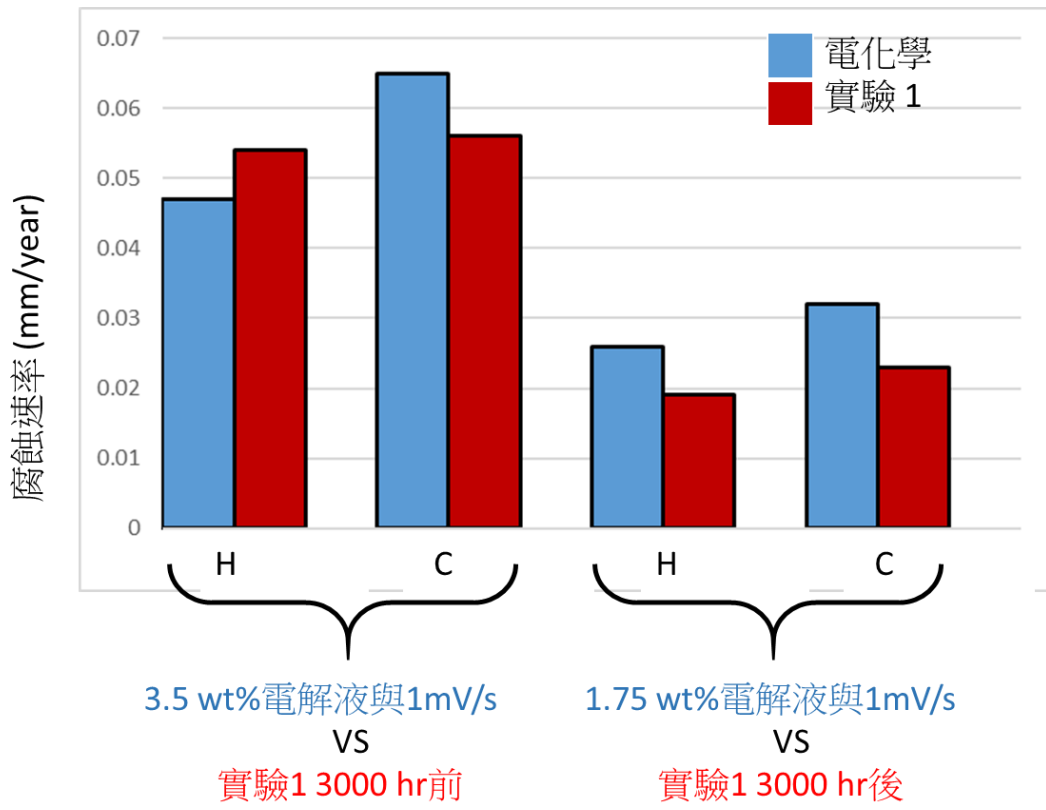


圖 33 試片 C 與 H 電化學實驗與重量損失實驗腐蝕速率比較圖

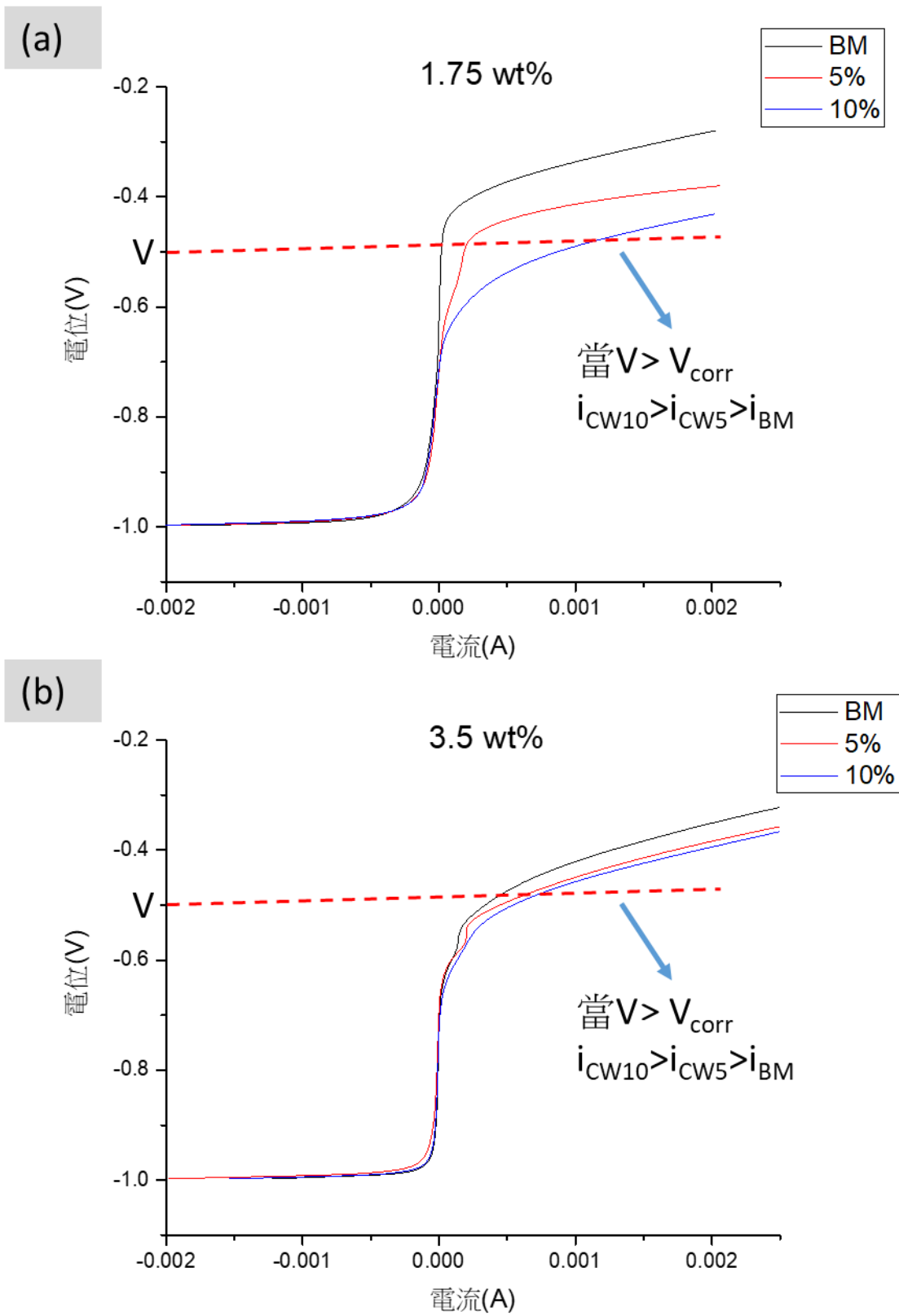


圖 34 電化學實驗(a) 1.75wt%與(b) 3.5wt%電位與電流關係圖

金屬氧化物對腐蝕速率有顯著的影響，分析腐蝕試片表面氧化物的組成有助於幫助了解碳鋼腐蝕行為。圖 35、36 與 37 分別為 BM、CW5%與 CW10%試片 SEM 與 EDS 表面分析結果，由圖中可以發現碳鋼表面會覆蓋鐵的氧化層，氧化層隨著腐蝕時間增加變厚且緻密，腐蝕時間 2000 小時後，氧化層厚度持續維持在 5 至 10 μm 左右，這也解釋碳鋼腐蝕速率開始時會較快，逐漸放緩後維持一固定腐蝕速率。冷加工造成的缺陷使氧與鐵更容易擴散^[25-26]，為冷加工加速腐蝕速率的主因之一，另一個原因為產生殘留應變，殘留應變與殘留應力正相關，當腐蝕裂縫前端殘留應變越高，氧化層越易破損崩壞造成腐蝕裂縫生長速率增加^[27-28]。圖 37 與 38 為利用 EBSD 與 EDS 分析碳鋼表面殘留應變與氧化層，圖 38 為 CW5%腐蝕 3500 小時試片，從圖 38(a)發現碳鋼與氧化層接觸的區域殘留應變較小，再由圖 38(b)與(c)EDS 發現碳鋼表面完整覆蓋約 8 μm 氧化層。圖 39 為 CW10%腐蝕 3500 小時試片，圖 39(a)白色方框內碳鋼與氧化層接觸的區域殘留應變明顯高於其他區域，並且由圖 39(b)與(c)EDS 發現白色方框內碳鋼表面的氧化層已經脫落，白色方框外殘留應變較小的區域則完整覆蓋約 5-10 μm 氧化層。由以上分析驗證冷加工所造成的殘留應變越高，氧化層越容易崩壞，進而導致材料抗腐蝕性下降。

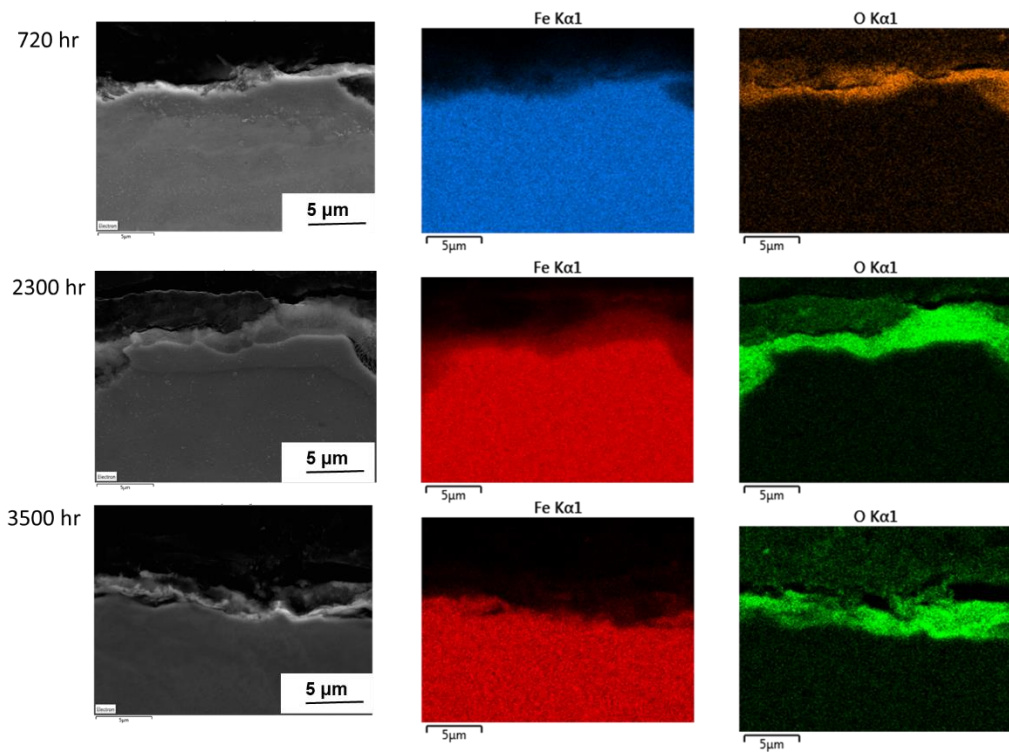


圖 35 BM 試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析

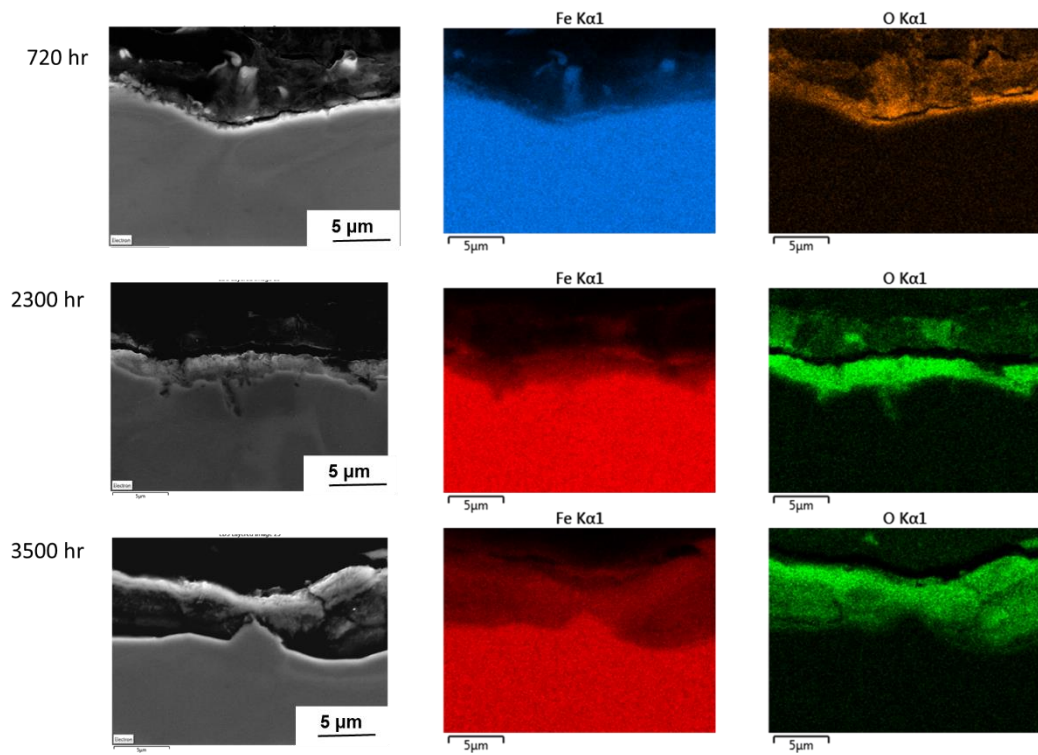


圖 36 CW5% 試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析

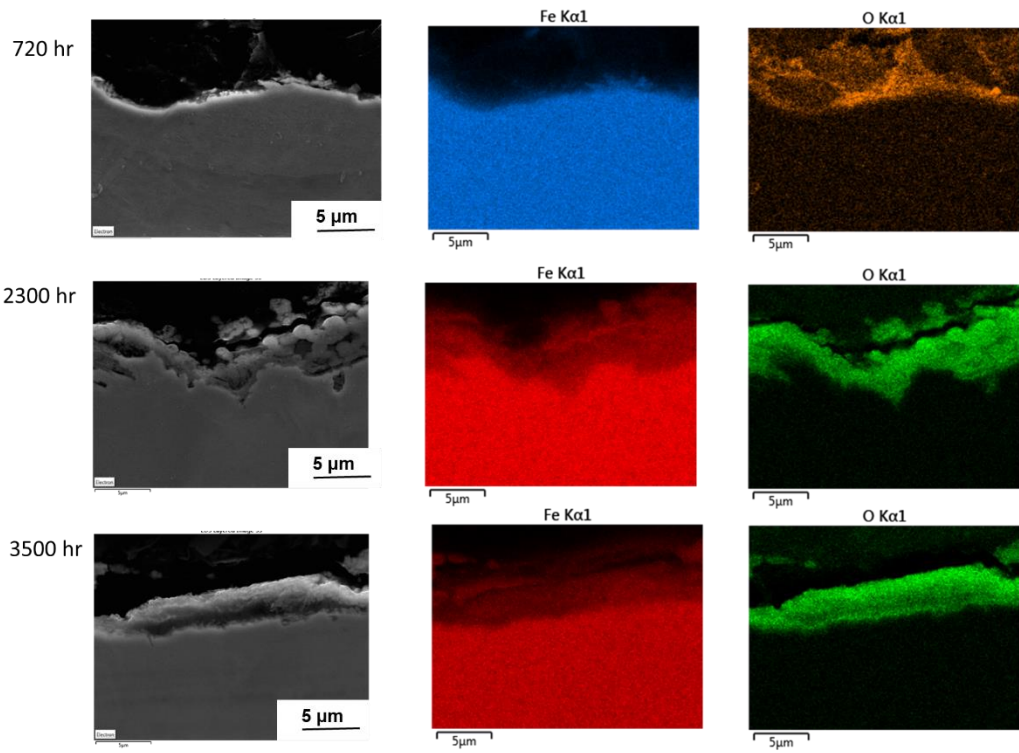


圖 37 CW10%試片表面氧化物 SEM 與 EDS 分析

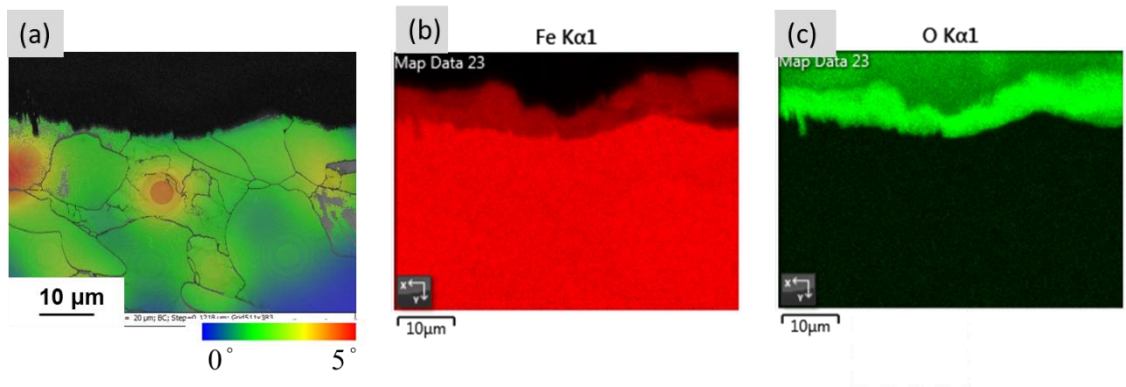


圖 38 CW5% 3500 小時(a)殘留應變(b)Fe(c)O 分佈圖

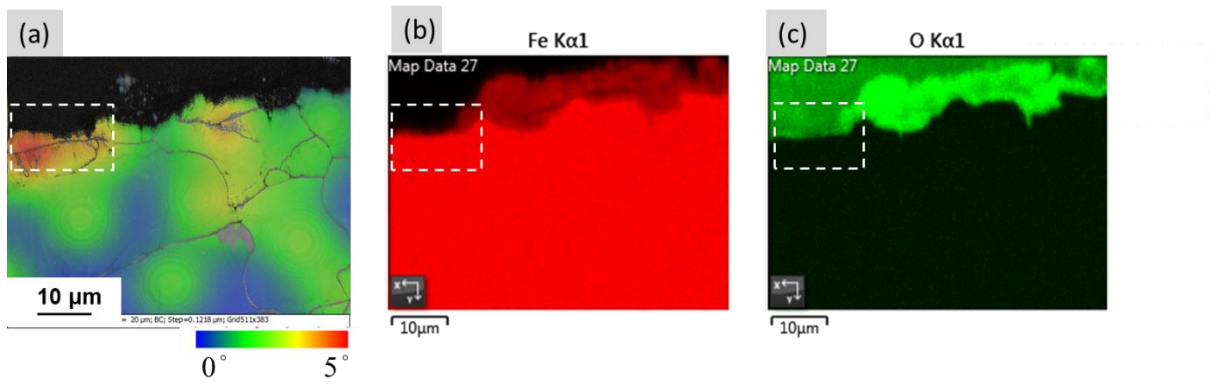


圖 39 CW10% 3500 小時(a)殘留應變(b)Fe(c)O 分佈圖

4. 結論

本篇研究報告重點整理如下：

- (1) 電化學實驗結果推論參數 1.75wt% 氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時後穩定的腐蝕速率，而 3.5wt% 氯化鈉電解液以及掃描速率 1mV/s 量測的碳鋼腐蝕速率接近於重量損失腐蝕實驗時間 3000 小時前的腐蝕速率。
- (2) 由冷加工碳鋼電化學實驗量測電壓與電流關係圖觀察到電位高於腐蝕電位(約-0.7V)後，相同電位時冷加工越高的電流越大，這代表在碳鋼發生局部腐蝕(例如：間隙腐蝕，伽凡尼)電位提升的情況下，冷加工量越高，腐蝕速率越快。
- (3) 模擬除役過渡階段的冷加工碳鋼重量損失實驗顯示，碳鋼冷加工量越高，腐蝕速率越快，每增加 10% 冷加工量，腐蝕速率約增加 20%。
- (4) 冷加工造成碳鋼腐蝕速率增加的主因有(1)冷加工所造成的缺陷使氧與鐵更容易擴散；(2)冷加工所造成的殘留應變使碳鋼氧化層更易崩壞，進而導致材料抗腐蝕性下降。

本研究參考前期計畫所量測的除役過渡階段水環境下碳鋼的腐蝕速率驗證電化學腐蝕試驗的可靠性，並用驗證後的電化學參數進行冷加工碳鋼電化學腐蝕速率量測，結果與重量損失腐蝕實驗接近，代表電化學腐蝕實驗量測推估的腐蝕速率是可靠的。因此藉由電化學腐蝕實驗可以快速量測不同型號或不同冷加工量之碳鋼腐蝕速率，提供管制單位在評估碳鋼材料在除役過渡階段壽命的參考依據。由碳鋼重量損失實驗測得冷加工造成的腐蝕速率增幅為每增加 10% 冷加工量腐蝕速率約增加 20%，在可能發生冷加工區域的碳鋼管材需有更嚴格的管制標準，越小管徑的碳鋼管材通常會有

較大的冷加工量，管制標準也須比大管徑的碳鋼管材更嚴格。由冷加工碳鋼電化學實驗量測電壓與電流關係圖觀察到如碳鋼在局部腐蝕(例如:間隙腐蝕，伽凡尼)的電位提升狀況下，提高冷加工量將明顯增加腐蝕速率，因此碳鋼易發生局部腐蝕的區域(例如:焊道區域，碳鋼與不銹鋼接觸的區域等)，如同時發生冷加工，管制標準須比單純冷加工更嚴格，尤其在焊道附近常伴隨冷加工的發生。

參考文獻

1. M. A. Rodríguez, Corrosion control of nuclear steam generators under normal operation and plant-outage conditions: a review. *Corros Rev* 38(2020) pp.195-230.
2. B. M. Gordon, Non-environmentally assisted cracking corrosion concerns affecting life extension of light water reactors, *Corrosion* 2013 69(2013) pp.1039-1046.
3. A. R. Mendoza, F. Corvo, Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel, *Corrosion Science* 41(1999) pp. 75-86.
4. M. Morcillo, B.Chico, I. Diaz, H. Cano, D. de la Fuente, Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review, *Corrosion Science* 77(2013) pp. 6-24.
5. Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme (CODAP), <https://www.oecd-nea.org/codap>. 2024/2/21.
6. D. Starosvetsky, R. Armon, J. Yahalom, J. Starosvetsky, Pitting corrosion of carbon steel caused by iron bacteria, *International Biodeterioration & Biodegradation* 47 (2001) pp.79-87.
7. Review of the corrosion performance of selected metals as canister materials for UK spent fuel and or HLW - Appendix B, *Radioactive Waste Management in UK*
8. Zhang, J., J. Wang, and Y. Wang. 2005. Micro-droplets formation during the deliquescence of salt particles in atmosphere. *Corrosion* 61, p1167-1172.

9. King, F. 2007. Overview of a carbon steel container corrosion model for a deep geological repository in sedimentary rock. Nuclear Waste Management Organization Technical Report, NWMO TR-2007-01.
10. Lijin Dong, Qunjia Peng, En-Hou Han, Wei Ke, Lei Wang, Stress corrosion cracking in the heat affected zone of a stainless steel 308L-316L weld joint in primary water, Corros. Sci. 107 (2016) 172–181.
11. Wen-Feng Lu, Jiunn-Yuan Huang, Tung-Yuan Yung, Tai-Cheng Chen, Kun-Chao Tsai, Effects of dendrite axis and fusion boundary on stress corrosion cracking of ER 308 L/SS 304L welds in a high-temperature water environment, International Journal of Pressure Vessels and Piping 179 (2020) 103940.
12. H.P. Hack, Evaluating Galvanic Corrosion Corrosion, Fundamentals, Testing and Protection (ninth ed.), ASM Handbook, Vol. 13A, ASM, Metals Park OH (1987), pp. 562-567.
13. 核電廠除役過渡階段碳鋼 A106 靜水環境腐蝕行為研究，INER-15492，呂文豐。
14. 電廠除役過渡階段碳鋼管材與焊件腐蝕行為研究，INER-16210，呂文豐、陳泰丞。
15. 電廠除役過渡階段碳鋼焊件間隙腐蝕行為研究，INER-16815，呂文豐、陳泰丞、蔡坤釗。
16. 電廠除役過渡階段靜置水環境下碳鋼鍍鋅層破損對腐蝕行為之影響呂文豐、陳泰丞、蔡坤釗。

- 17.** Masato, Y., Hiroo, N. Corrosion Potential and Corrosion Rate of Low-Alloy Steel under Thin Layer of Solution, *J. Japan Inst. Met. Mater*, 61, 8(1997), p721-726.
- 18.** S. A. Park, S. A. Park, J. G. Kim, Y. S. He, K. S. Shin and J. B. Yoon, *Phys. Met. Metallogr*, 115(2014), pp.1285–1294.
- 19.** W. Ozgowicz, A. Grajcar and A. Kurc-Lisiecka, in *Corrosion Behavior of Cold-Deformed Austenitic Alloys*, INTECH Open Access Publisher, 2012.
- 20.** D. CLOVER, B. KINSELLA, B. PEJCIC and R. DE MARCO, The influence of microstructure on the corrosion rate of various carbon steels, *Journal of Applied Electrochemistry* (2005) 35:139–149.
- 21.** D. Dwivedi, K. Lepkova, T. Becker, Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods, *RSC Adv*, 7(2017), pp.4580-4610.
- 22.** Standard Recommended Practice for Preparing Cleaning and Evaluating, ASTM Designation G1-88, ASTM Committee Standards.
- 23.** Denny A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, Ch.3, pp94.
- 24.** Standard Guide for Corrosion Tests in High Temperature or High Pressure Environment, or Both, ASTM Designation G1-11, ASTM Committee Standards.
- 25.** S. Lozano-Perez, K. Kruska, I. Iyengar, T. Terachi and T. Yamada: *Corros. Sci.* 56 (2012) 7885.
- 26.** H. Mehrer: *Diffusion in Solids*, (Springer) Ch31, pp. 547552.

27.Zhanpeng Lu, T. shoji, Y. Takeda Y. Ito, A. Kai, N. Tsuchiya, Corros. Sci. 50 (2008)625–638 .

28.F.P. Ford, Corrosion 52 (1996) 375.

附件五

Condition Assessment Techniques for Delamination Failure at the Concrete Containment of NPP Crystal River #3

by

Hung-Chang Hu and Kuang-Chih Pei

Abstract

The Crystal River #3 PWR unit on the west coast of Florida was shut down in September 2009 for refueling operations. During the shutdown period, it was also planned to replace the old steam generators (SG). This replacement will enable the reactor to meet operating needs before the operating license expires and the renewal extension period ends. The reactor containment was a three-dimensional post-tension concrete cylinder with a steel lining to prevent leakage, followed by a massive concrete wall and a concrete dome as the pressure boundary. The concrete walls are lined with circular tendon sleeves containing steel tendons that prestress the concrete walls to resist internal expansion pressures during the LOCA incident. However, when a passage opening was cut into the side wall of containment, the decompression, due to the removal of the prestressed steel tendons and the opening, caused a considerable area of lamellar cracking in the concrete wall. In order to obtain the scope of impact for decision-making, the owner uses a number of civil non-destructive testing technologies. This report will conduct a discussion of the used Condition Assessment Techniques to serve as a reference for the use of domestic nuclear facilities.

Keywords: Delamination Failure, NPP Containment, civil non-destructive testing technologies.

National Atomic Research Institute

水晶河 3 號核電廠混凝土圍阻體脫層破壞之檢測處理方法觀察

胡弘昌 裴廣智

摘 要

位於佛羅里達州西海岸的水晶河 3 號(Crystal River #3)壓水式核反應器機組於 2009 年 9 月停機以進行燃料棒更換(refueling)作業。在停止運轉期間，也計劃更換舊的蒸汽產生器(steam generators)，此次蒸汽產生器更換可使反應器能在目前運轉執照到期以及延役期間結束前滿足運轉需求。

水晶河 3 號核電廠反應器圍阻體為一帶有鋼襯的三維後拉式預力混凝土圓柱體。圍阻體內表面有 0.475 吋鋼襯構成防止洩漏，其後是巨積混凝土牆體和混凝土圓頂作為壓力邊界。混凝土牆體中佈有圓形鋼腱套管，內含鋼腱，這些鋼腱對混凝土牆體施加預應力，以便抵抗 LOCA 事故期間可能出現的內部膨脹壓力。

然而，當在混凝土圍阻體側壁上切開通道開口以便更換蒸汽產生器時，預力鋼腱切除減壓以及通道開口造成混凝土牆體相當廣面積的層狀開裂(脫層)。業主為求了解影響範圍以進行後續決策，採用多項土木非破壞檢測技術及鑽心取樣評估。本篇報告將針對其所用的檢測技術(Condition Assessment Techniques)進行深入探討，以俾國內核設施相關使用之參考。

關鍵字：層狀開裂、反應器圍阻體、土木非破壞檢測技術。

國家原子能科技研究院

目錄

1. 前言 [1, 2, 3].....	1
2. 狀況描述.....	3
2.1 水晶河 3 號核電廠反應器圍阻體 [1, 2, 3].....	3
2.2 水晶河 3 號核電廠現場 SGR 狀況 [1, 2, 3].....	7
2.3 圍阻體側壁裂縫發現及評估 [1].....	9
2.4 NRC 派遣之裂痕檢查小組的發現及評估 [1, 4].....	12
2.5 後續討論 [1, 2, 3, 4].....	14
3. 應力波相關之檢測技術.....	16
3.1 敲擊回音檢測原理及依據規範 [5].....	16
3.2 敲擊回音檢測設備說明.....	23
3.3 脈衝響應檢測 [7].....	29
3.4 水晶河 3 號核電廠採用的檢測技術應用.....	30
4. 透地雷達檢測.....	35
4.1 透地雷達檢測之發展和應用 [8, 9, 10].....	35
4.2 透地雷達檢測原理及 B-/C-scan 成像.....	37
4.3 B-scan/C-scan 影像成像原理.....	43
4.4 透地雷達檢測系統組成、檢測規劃及檢測環境.....	46
4.5 水晶河 3 號核電廠採用的 GPR 檢測技術應用 [1].....	56
5. 討論與報告結論 [1].....	58
參考文獻.....	60

附圖目錄

圖 1.1	水晶河 3 號核電廠之壓水式反應器及廠房	2
圖 2.1	水晶河 3 號反應器圍阻體結構的簡化側視圖	4
圖 2.2	水晶河 3 號反應器圍阻體結構的側視圖面和幾何資料	5
圖 2.3	照片顯示 1972 年 11 月下旬建廠期間的設備進出口	5
圖 2.4	原設計的 SG 換裝作業.....	6
圖 2.5	在原進出口上方圍阻體牆體和襯裡切一面積 25×27 英尺開口	6
圖 2.6	圍阻體牆體上混凝土清除作業.....	7
圖 2.7	圍阻體牆體混凝土開口作業.....	8
圖 2.8	圍阻體牆體混凝土開口各階段作業圖	8
圖 2.9	鋼鍵套管和內襯之間的混凝土牆體存有垂直裂縫	9
圖 2.10	鋼鍵套管和內襯之間混凝土垂直裂縫的大致位置	10
圖 2.11	圍阻體牆體上鑽心取樣.....	10
圖 2.12	脫層區域顯示狀似蝴蝶.....	11
圖 2.13	藍線為因開口而解壓移除的水平鋼鍵，而紅線仍保持張力	11
圖 2.14	潛在可能原因評估之逐日工作結果.....	13
圖 3.1	水晶河 3 號核電廠採用之敲擊回音檢測設備	17
圖 3.2	水晶河 3 號核電廠之敲擊回音檢測.....	17
圖 3.3	水晶河 3 號核電廠採用之脈衝響應檢測設備	18
圖 3.4	水晶河 3 號核電廠採用之脈衝響應檢測	18
圖 3.5	敲擊回音檢測原理.....	19
圖 3.6	程序 A—P 波波速量測之探頭及敲擊源配置	20
圖 3.7	ASTM C1383 PROCEDURE B 探頭中心與敲擊位置之規定	21

圖 3.8	敲擊後所得之頻譜.....	21
圖 3.9	主機系統：訊號擷取模組及檢測控制/訊號分析筆電	25
圖 3.10	位移規探頭共有三種型式：圓筒探頭(左下)、槍把式探頭(右下) 與波速量測雙探頭(上)	25
圖 3.11	圓柱試件敲擊配置及所得訊號展示.....	26
圖 3.12	採用 PISTOL GRIP TRANSDUCER 之圓柱試件敲擊配置及所得訊號..	27
圖 3.13	採用 PISTOL GRIP TRANSDUCER 敲擊牆體後所得訊號展示	27
圖 3.14	採用波速量測雙探頭，版件經敲擊後所得訊號展示	28
圖 3.15	混凝土圍阻體及其六個扶壁作為水平預力鋼鍵錨定基礎	32
圖 3.16	脈衝響應法初篩結果之脫層區域.....	32
圖 3.17	脈衝響應法初篩結果.....	33
圖 3.18	在圍阻體牆體上的鑽心位置(綠圓點及紅圓點).....	33
圖 3.19	在牆體上的鑽心位置(綠圓點表示正常及紅圓點表示脫層).....	34
圖 3.20	在牆體脫層區域，脈衝響應檢查和鑽心取樣結果可互為認證	34
圖 4.1	透地雷達檢測原理 ^[8,9,12]	36
圖 4.2	三維斷層式 GPR 檢測 ^[13,20]	37
圖 4.3	時變電場下會產生之二種電流效應 ^[19]	41
圖 4.4	B-SCAN 之訊號成像原理 ^[18,19,22]	44
圖 4.5	平行測線佈置 ^[23]	45
圖 4.6	以切片方式呈現不同深度之檢測斷層圖像 ^[24,25]	46
圖 4.7	透地雷達檢測系統組成.....	47
圖 4.8	透地雷達訊號擷取及儀控單元.....	47
圖 4.9	GPR 無罩式天線及現場淺地質檢測配置(MALA 提供)	48
圖 4.10	50MHZ GPR 拖曳天線及現場檢測(MALA 提供).....	49

圖 4.11	100MHz GPR 天線及現場檢測配置.....	50
圖 4.12	250MHz GPR 天線及現場檢測配置.....	50
圖 4.13	500MHz GPR 天線及現場檢測配置.....	51
圖 4.14	800MHz GPR 天線及現場檢測配置.....	51
圖 4.15	1GHz GPR 天線及現場檢測配置	51
圖 4.16	1.6GHz 及 2.3GHz GPR 天線.....	52
圖 4.17	3D 陣列式透地雷達天線(MALA 提供).....	53
圖 4.18	3D 陣列式透地雷達系統及載具(MALA 提供).....	53
圖 4.19	GPR 探孔天線及現場檢測配置(MALA 提供).....	54
圖 4.20	GPR 天線及無人機載具配置(MALA 提供).....	55
圖 4.21	水晶河 3 號核電廠採用的透地雷達檢測設備	56
圖 4.22	水晶河 3 號核電廠現場透地雷達檢測	56
圖 5.1	鑽心取樣，並透過內視鏡檢查確認裂縫	59

附表目錄

表 4-1 透地雷達常用介電常數與對應電磁波傳速度 ^[13,29,34,36]	39
--	----

1. 前言 [1, 2, 3]

位於佛羅里達州西海岸的水晶河 3 號(Crystal River #3)壓水式核反應器機組(見圖 1.1)於 2009 年 9 月停機以進行燃料棒更換(refueling)作業。在停止運轉期間，也計劃更換舊的蒸汽產生器(steam generators, SG)。同時，美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)也正在審查業主申請的運轉執照以便能再延役 20 年。此次蒸汽產生器更換可使反應器能在目前運轉執照到期以及更新延役期間結束前滿足運轉需求。

水晶河 3 號核電廠反應器圍阻體為一帶有鋼襯的三維後拉式預力混凝土圓柱體建物。圍阻體內表面有 0.475 吋鋼襯，構成防止洩漏邊界。其後是巨積混凝土牆體和混凝土圓頂作為壓力邊界。混凝土牆中佈有圓形鋼腱套管，內含鋼腱，這些鋼腱對混凝土牆體施加預應力，以便抵抗冷卻水流失事故(Loss-Of-Coolant Accident, LOCA)事故期間可能出現的內部膨脹壓力。

然而，當在混凝土圍阻體側壁上切開通道開口以更換蒸汽產生器時，預力鋼腱切除減壓以及通道開口造成混凝土壁體相當廣面積的層狀開裂。業主為求得影響範圍以進行後續決策，採用多項土木非破壞檢測技術及鑽心取樣評估。本案例中採用的檢測技術主要有四：脈衝響應檢測(Impulse Response, IR)、透地雷達檢測(Ground Penetrating Radar, GPR)、敲擊回音檢測(Impact Echo, IE)，還有破壞性檢測即鑽心取樣分析再加上內視鏡目視檢測(Core Bores Examination & Boroscopic Inspection)。本篇報告將針對其所用的檢測技術(Condition Assessment Techniques)進行深入探討，以俾國內相關核設施可參考使用。

該廠業主(Duke Energy Florida)於多次嘗試修復受損圍阻體後，證實成本過高而難以成功。工作人員於 2011 年 5 月 29 日從反應器完成燃料組件卸載，並移轉至用過燃料池。在最後一次維修嘗試失敗後，該公司決定永久關閉該設施。2013 年 2 月 5 日，該公司宣布此反應器永久關閉，並進入退役狀態。

本文中第二章將介紹水晶河 3 號核電廠反應器圍阻體、現場蒸汽產生器修理更換作業(Steam Generator Replacement, SGR)狀況、可能肇因，及評估計畫概述。第三章將介紹應力波相關之檢測技術，即敲擊回音檢測與脈衝響應檢測，第四章則介紹電磁波相關之檢測技術，即透地雷達檢測。第五章將針對國內電廠應用作簡單討論與報告結論。



圖 1.1 水晶河 3 號核電廠之壓水式反應器及廠房

2. 狀況描述

2.1 水晶河 3 號核電廠反應器圍阻體^[1, 2, 3]

水晶河 3 號核電廠之壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)，係由 Babcock & Wilcox 設計，NRC 於 1976 年 12 月 3 日核發運轉執照。電廠於 2009 年 9 月 26 日停機進行該廠第 16 次燃料更換，同時計劃在暫停期間更換蒸汽產生器(SG)。原有 SG 已損耗以致效率不彰，自二十多年前美國開始更換第一台電廠 SG 以來，已有許多壓水反應器都進行此項作業。

反應器圍阻體為一具有鋼襯的三維後拉式預力混凝土圓柱體建物。圍阻體內表面有 0.475 吋鋼襯構成界面防止洩漏，其後是 42 英吋厚的巨積混凝土牆體和 36 英吋厚的混凝土圓頂。混凝土牆中佈有 5.25 英吋直徑的圓形鋼腱套管，有水平和垂直兩向，鋼腱則在金屬套管內。這些張力鋼腱會對混凝土牆體施加預壓應力，以便抵抗 LOCA 事故可能出現的內部膨脹壓力。美國一半以上運轉中的壓水式反應器都採用此種圍阻體設計。

圖 2.1 及 2.2 顯示了水晶河 3 號反應器圍阻體結構的簡化側視圖及幾何資料。反應器的兩側是兩個較大的蒸氣產生器。右側蒸汽發生器前面是穩壓器。圍阻體牆體垂直部分是一個直徑約 137 英尺的圓柱體。圖 2.3 照片顯示 1972 年 11 月下旬建廠期間的設備進出口(equipment hatch)，其為一圓形開口。此時圍阻體部分尚未完成混凝土澆築，故而可見嵌入混凝土中的金屬鋼筋和水平鋼腱套管（開口兩側垂直的一排白點）。

原設計的 SG(參考圖 2.4)預期能在反應器 40 年的運轉壽命下維持運作，然而原設備進出口並不夠大，未來除役時是無法將其完整移除，原定須將分割成幾段後再自進出口取出。但也由於設備進出口太小，如要更換

蒸汽產生器進行延役，亦將無法完整無損地置入，且分割拼裝亦非選項。故而替代計畫即在原設備進出口上方的圍阻體混凝土牆和襯裡上切開一個約面積 25x27 英尺的開口，如圖 2.5 所示。

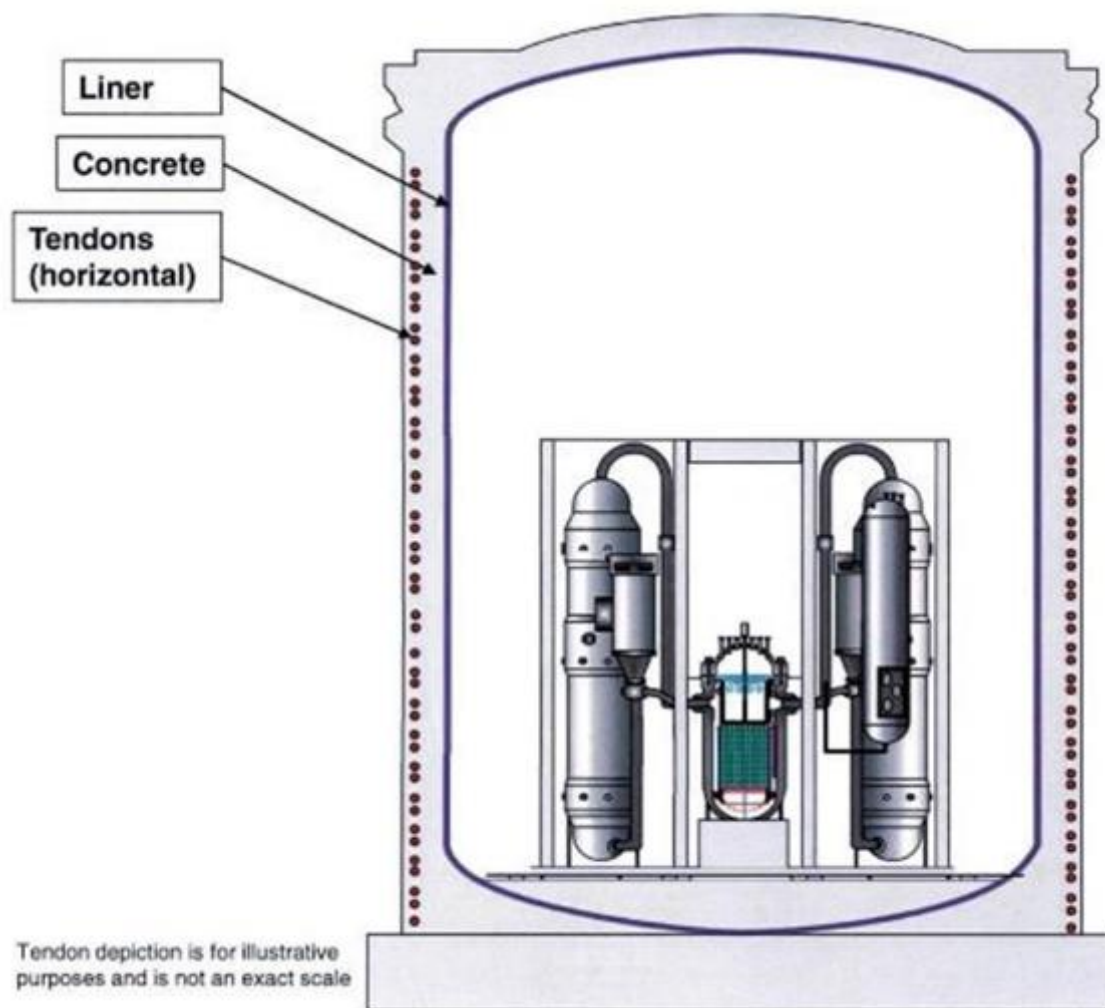


圖 2.1 水晶河 3 號反應器圍阻體結構的簡化側視圖

CR3 Containment Dimensions

Dimension	Value
Containment Outside Dimension (OD)	137 ft 0.75 in
Dome Thickness	36 in
Basemat Thickness	12 ft 6 in
Liner Thickness	0.375 in
Wall Thickness	42 in
Buttress Wall Thickness	5 ft 10 in
Vertical & Hoop Conduit OD	5.25 in
# of Vertical Tendons	144
# of Tendon Hoops	94
# of Tendons per Hoop	3
# of Prestressed Dome Tendons	123

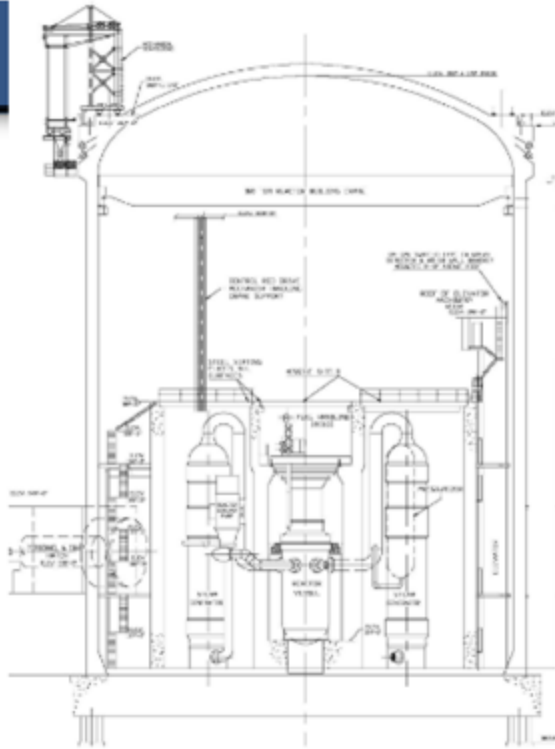


圖 2.2 水晶河 3 號反應器圍阻體結構的側視圖面和幾何資料



圖 2.3 照片顯示 1972 年 11 月下旬建廠期間的設備進出口



圖 2.4 原設計的 SG 換裝作業



圖 2.5 在原進出口上方圍阻體牆體和襯裡切一面積 25×27 英尺開口

2.2 水晶河 3 號核電廠現場 SGR 狀況^[1, 2, 3]

2009 年 9 月 25 日晚上 7 點 03 分，業者開始降低反應器功率，進入停機狀態以換裝燃料。9 月 26 日中午 12 點 29 分關閉反應器，經過冷卻後於下午 4 點 51 後進入換裝燃料模式，並在七分鐘後圍阻體牆體切割作業承包商獲授權開始作業。較早的工序包括放鬆並移除圍阻體牆體上待切割區域的水平鋼鍵。

9 月 30 日開始使用高壓水(壓力高達每平方英尺 25,000 磅)切割並清除圍阻體牆體上 8 英尺寬及 6 英尺高的測試區域混凝土。混凝土全區移除作業(參考圖 2.6、2.7 及 2.8)始於 10 月 1 日凌晨 4 時 30 分，施工人員亦安裝一個碎礫滑槽來運走挖除的混凝土和切割用水。

10 月 2 日凌晨 5 時左右，由於碎礫滑槽堵塞導致流水溢出，混凝土切割和清除工作隨之暫停。施工人員注意到，水從圍阻體牆體新開口下方和右側的裂縫中流出。對此意外的瀑布(waterfall)調查發現，鋼鍵套管和內襯之間的混凝土存在有垂直向裂縫。



圖 2.6 圍阻體牆體上混凝土清除作業



圖 2.7 圍阻體牆體混凝土開口作業

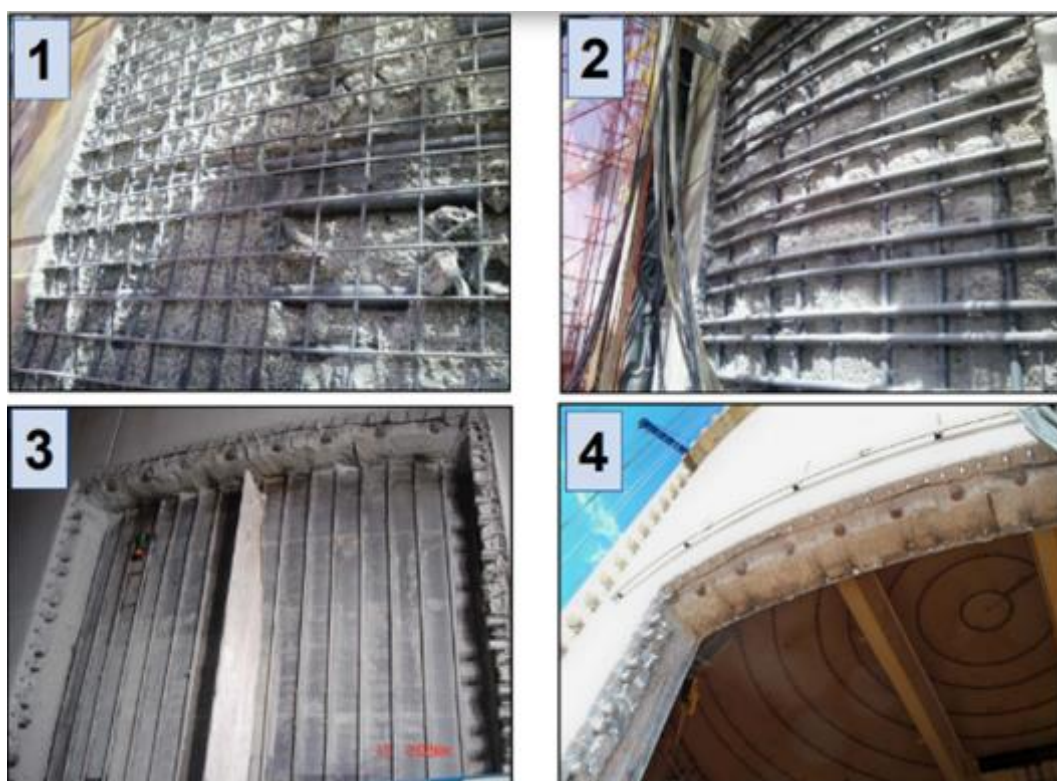


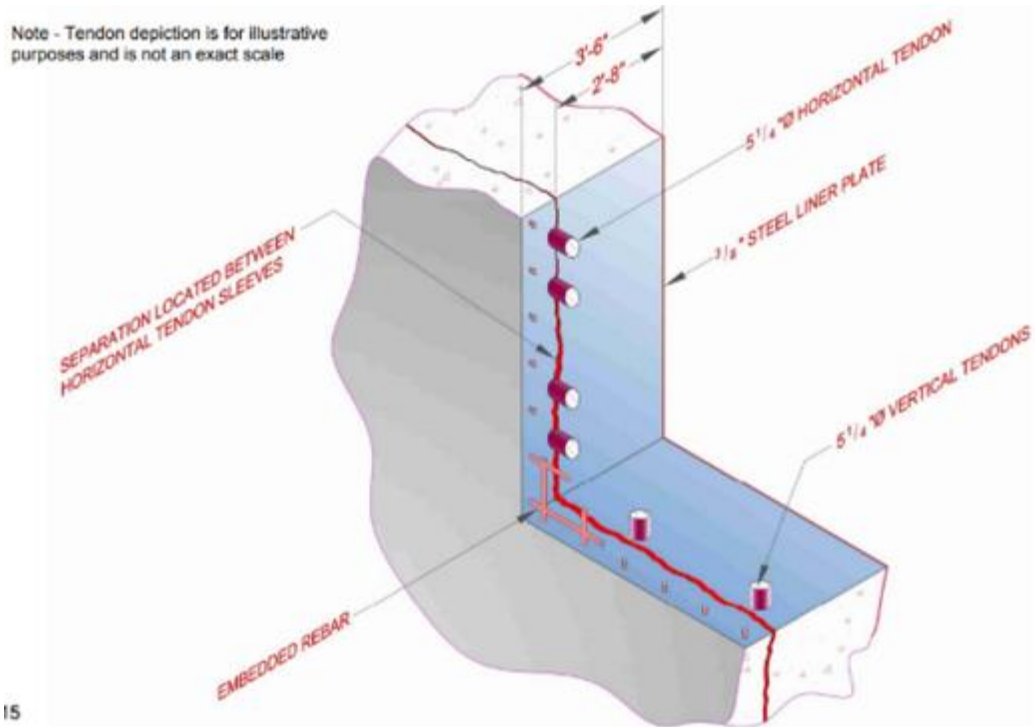
圖 2.8 圍阻體牆體混凝土開口各階段作業圖

2.3 圍阻體側壁裂縫發現及評估^[1]

10月2日凌晨5時左右，由於碎礫滑槽堵塞導致流水溢出，流水亦從圍阻體牆體新開口下方和右側的裂縫中流出。對此意外水流進行調查發現，鋼鍵套管和內襯之間的混凝土存在有垂直裂縫。其非微小裂縫，沿著圍阻體牆體方形開口的四個邊緣都可以看到。是為混凝土缺陷中所稱的脫層(delamination) (參考圖 2.9 及 2.10)。



圖 2.9 鋼鍵套管和內襯之間的混凝土牆體存有垂直裂縫



15

圖 2.10 鋼鍵套管和內襯之間混凝土垂直裂縫的大致位置

施工人員在圍阻體牆體上做數十個鑽心取樣(參考圖 2.11)，並輔以脈衝響應檢測，以繪製出脫層範圍。圖 2.12 顯示脫層區域狀似蝴蝶(The Butterfly Defect)，遠超出蒸汽產生器更換(SGR)開口周圍的裂縫區域。圖 2.13 中還以藍色顯示因開口切除而解壓移除的水平鋼鍵，而仍保持張力的鋼鍵則以紅色顯示。



圖 2.11 圍阻體牆體上鑽心取樣

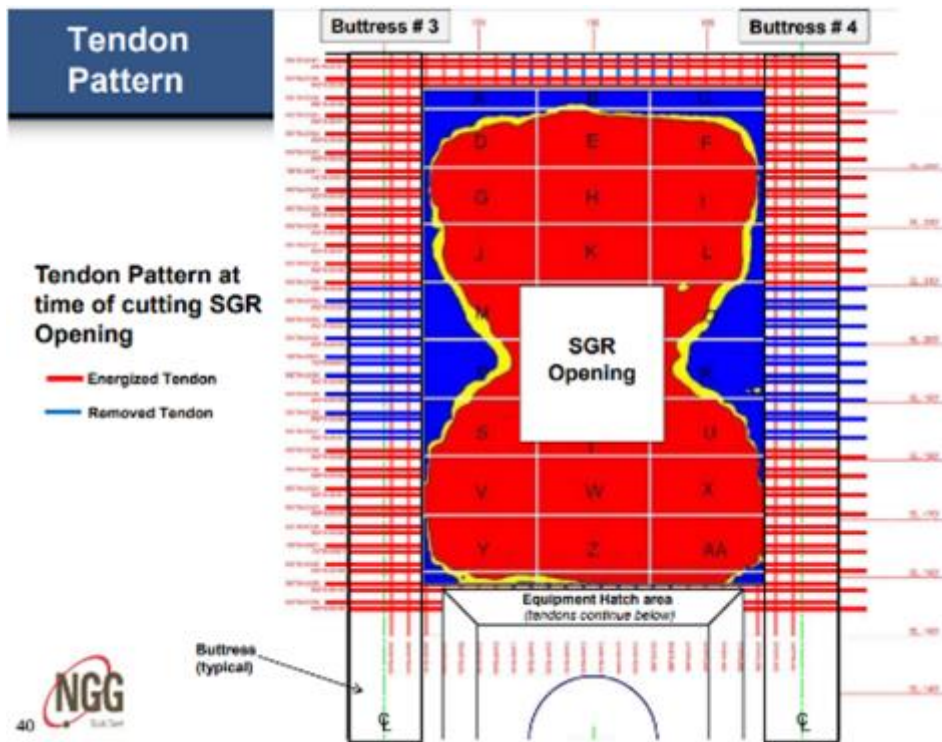


圖 2.12 脫層區域顯示狀似蝴蝶

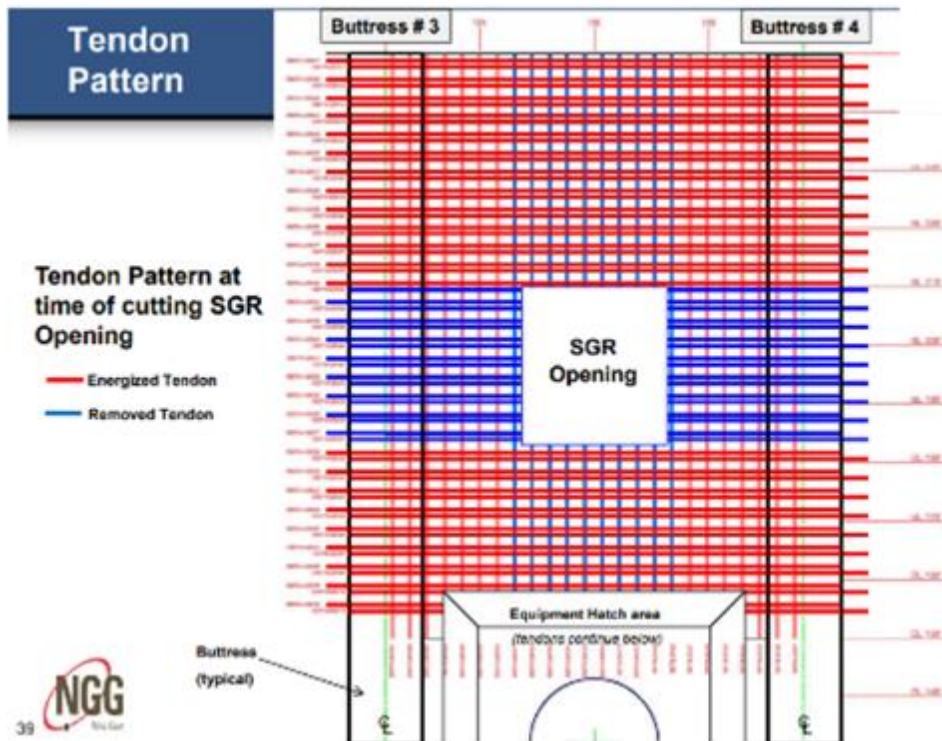


圖 2.13 藍線為因開口而解壓移除的水平鋼鍵，而紅線仍保持張力

2.4 NRC 派遣之裂痕檢查小組的發現及評估^[1, 4]

NRC 於 2009 年 10 月 13 日成立特別檢查小組前往水晶河 3 號並調查圍阻體損壞情況。由於反應器已關閉，損壞並未立即造成安全隱患。但 NRC 意識到，隨著其他電廠也執行切除圍阻體和反應器頂蓋以更換蒸汽產生器相關作業，此類損壞可能會成為系統性風險之關切重點。此外，NRC 也需了解損壞程度，以確保圍阻體在反應器重啟之前是已確實恢復。

NRC 團隊報告又稱，在最初拉緊鋼鍵大約一年後，水晶河 3 號圍阻體即出現了混凝土脫層現象。1976 年 4 月電工人員在圍阻體圓頂外表面鑽孔以錨定其正在安裝之管道時，發現在某些區域之錨點無法固定。經調查發現，混凝土脫層區域直徑約 105 英尺。脫層影響 36 英吋厚混凝土圓頂間約 15 英吋範圍，層間最大間隙約有兩英吋寬。圓頂之內、外表面均無明顯裂縫，但工作人員回報說，當走過圓頂脫層區域時，會有「彈動感」(springiness)。劣化的混凝土最後被移除並更換為標準而沒有彈動感的混凝土。

類似的案例也發生在 1970 年 6 月佛羅里達州土耳其角核電廠和 1994 年 5 月印度凱加核電廠 2 號反應器廠房施工期間，即是圍阻體混凝土脫層現象。

對於混凝土開裂的原因，電廠業主組成一個團隊來確認 2009 年秋季發生裂縫的原因。團隊列出了 75 個潛在可能原因，然後對每個可能原因進行評估。其中 67 個原因事證不足而被屏除，其餘八個可能原因被認定為導致脫層的共同相關原因—且缺一不可(至 2009.11.9)。11 月 17 日的評估原因減為七項。分別為：對局部區域高應力混凝土設計不足、混凝土營建施工不佳、混凝土材料使用不佳、化學或環境因素造成老化、乾縮/潛

變/沉陷、混凝土-鋼鍵互動匹配不足、圍阻體切割作業不佳、運轉事故(後移除不採)。(參考圖 2.14)

水晶河 3 號圍阻體的設計比其他大多數電廠在設計上承受更高應力。圍阻體中所用的混凝土符合設計規範，但其應力餘裕則比正常情況少得多。在切開蒸汽產生器更換開口之前，鋼鍵解壓順序會導致局部應力升高，惡化原設計和材料狀況，從而導致開裂。

在 NRC 特別檢查小組調查後，NRC 沒有實施任何制裁。該小組確定，反應器是在進入「更換燃料棒」模式(Refueling mode)之後，圍阻體才發生損壞。在更換燃料模式下，圍阻體完整性並非必需。在該模式下，設備出入口大部分時間都是開放的，因此在大開口上方的圍阻體牆體損壞部分並不違反監管要求。

然而，當在混凝土圍阻體側壁上通道開口切開，以進行蒸汽產生器更換之時，預力鋼鍵切除減壓會在通道開口造成混凝土壁體相當廣面積的層狀開裂。本案經評估後，確知修復圍阻體損壞所需之成本過高，電廠業主最後決定在其原運轉執照到期之前，即永久關閉該設施。

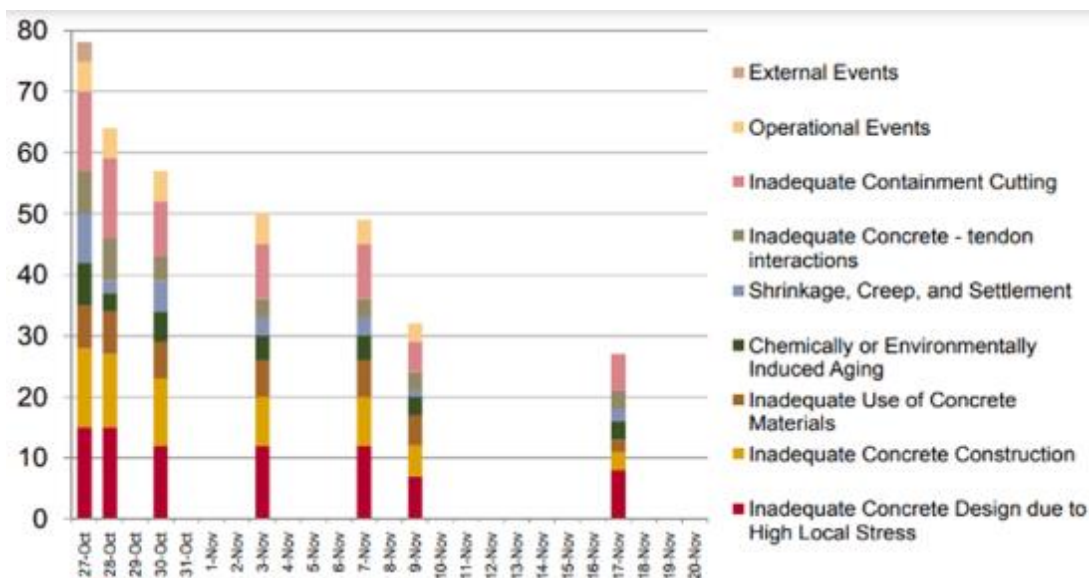


圖 2.14 潛在可能原因評估之逐日工作結果

2.5 後續討論^[1, 2, 3, 4]

NRC 的一般通訊程序(Generic Communications program)是向電廠業主傳達運轉經驗之方式。該程序使用資訊通知(Information Notices)來提供相關安全問題之警告及更新，並使用一般信件和公告來要求業主，採取防止常見問題波及反應器整體安全之措施。雖然 NRC 就水晶河 3 號所遇問題向業主發出資訊通知之情形並非不尋常，但 NRC 在本案中並非如此通知。NRC 在其網站上確實發布了有關該問題之訊息，並在 2010 年 3 月的年度監管訊息會議上介紹了派往該廠的特別檢查小組。

NRC 核能監管研究辦公室於 2015 年 11 月發布了 NUREG/CR-7208，「後張法研究」(Study on Post Tensioning Methods)。雖然並非關於水晶河 3 號混凝土脫層原因之研究論文，但其對預埋後拉式鋼鍵束在拉緊時對混凝土結構產生的應力分析提供了相當多之見解。

該廠業主曾多次嘗試修復受損的混凝土圍阻體，然事實證明並沒有成功。與此努力過程，工作人員於 2011 年 5 月 29 日完成從反應器移轉燃料組件並卸載至用過燃料池之工作。在另一次維修失敗後，該公司決定永久關閉該設施，而非承擔再次嘗試維修的成本和結果之不確定性。2013 年 2 月 5 日，該公司宣布該反應器永久關閉，並將過渡至退役狀態。

NRC 派遣一個特別檢查小組來調查水晶河 3 號混凝土劣化之原因和改善措施，儘管該問題對處於更換燃料模式下的反應器並沒有不利安全之影響。如果 NRC 不這樣做或延遲行動，任何對反應器安全運轉不利影響的潛在因子都有可能被忽略。雖然沒有明示這樣的暗示，但對這些因子「尋而未見」比「未尋而見」要好得多。此外，監管機構無法清楚地了解混凝土劣化原因，從而無法就修復之有效性做出明智決定。如果 NRC 遲遲未能獲得相關認知，電廠重啟可能會被延遲，亦或者會在缺乏 NRC 獨

立核實電廠是否已恢復適當安全條件下而重啟電廠。前者會帶給業主過度之經濟負擔；後者會給工作人員和公眾帶來過度的風險負擔。但本案 NRC 的行動對工廠的安全進行適當監督，而業主在修復成本的考量下決定永久退役而非修復。

在 Bradley P. Dolphyn 的博士論文中(Laminar Cracking In Post-Tensioned Concrete Nuclear Containment Buildings, 2016)，亦針對水晶河 3 號混凝土圍阻體脫層進行建模及數值實驗分析。將材料機械性能發展設定為溫度和時間之函數，納入對應模型的有限元素模擬分析中，以便了解模型對熱應力和後預力的反應。與模型實驗的結果類似，熱應力的模擬確定不足以導致混凝土開裂。然而，當對代表模型載荷的雙軸預力載荷進行建模擬時，水平和垂直鋼鍵套管重疊區域的應力集中遠超過了混凝土的抗拉強度，顯示在這些位置將可能有裂紋萌生。當後預張力荷載增加到水晶河 3 號之預力混凝土圍阻體(Prestressed Concrete Containment, PCC)所使用的程度時，過度張應力的區域顯著增加，並沿著鋼鍵套管邊緣連續地延伸。該文結果顯示，可能在 2009 年發現層狀裂縫之前，水晶河 3 號 PCC 中的鋼鍵套管周圍就已經存有裂縫。

基於上述研究回顧，近期水晶河 3 號採用的檢測技術(Condition Assessment Techniques)，確可以了解混凝土圍阻體劣化狀況。

3. 應力波相關之檢測技術

在水晶河3號核電廠採用的檢測技術中，敲擊回音檢測(Impact Echo, IE)和脈衝響應檢測(Impulse Response, IR)的檢測物理量是應力波或所謂暫態應力波^[1]。其中敲擊回音檢測是用於確認脫層裂縫深度(參考圖 3.1 及 3.2)，而脈衝響應檢測主要用於確認脫層裂縫之存在與否(參考圖 3.3 及 3.4)。

3.1 敲擊回音檢測原理及依據規範^[5]

將應力脈衝(excitation)導入彈性結構體中，會激發彈性結構體產生往復式振動，其振動頻率即為該彈性結構體之自然頻率(共振頻率)。理論上，彈性結構體之自然振動頻率有無限多個，因敲擊脈衝具特定之中心頻域，故所激發的往復式振動往往多存在於此特定頻域範圍。混凝土結構體之振動行為是由多個自然頻率之振態所組合，在結構體中被激發之共振波動，其共振頻率及振態模式(Mode shape)與結構體之幾何狀態與剛性有關。

在混凝土表面利用小鋼珠或鐵鎚等為起振器，敲擊產生暫態應力波動(應力脈衝)傳入混凝土內部，當應力波遇到內部界面(如空洞、蜂巢、裂縫或脫層等不連續面)或另側混凝土表面(如結構背側或底板底面)，則會產生來回反射及共振，當反射波傳回到敲擊表面時，會產生表面位移及加速度，利用安置在敲擊源附近混凝土表面上之位移規或加速規探頭，可接收來回振動之時間域訊號，而這個訊號包含多個振態模式。(參考圖 3.5)

敲擊回波採用頻譜分析法(頻域法)，即利用檢別出來之共振頻率判斷混凝土內狀況。但混凝土為非均質材料，除砂漿體之外，內含大小不等之骨材、氣孔、泌水、空洞、蜂窩等，而不同材質之界面都會造成應力波之

反射。敲擊回波檢測法之首要課題在於如何檢出有影響之瑕疵如空洞、蜂窩或裂縫，同時避開骨材、氣孔及泌水等材料因素造成之干擾。



圖 3.1 水晶河 3 號核電廠採用之敲擊回音檢測設備



圖 3.2 水晶河 3 號核電廠之敲擊回音檢測



圖 3.3 水晶河 3 號核電廠採用之脈衝響應檢測設備



圖 3.4 水晶河 3 號核電廠採用之脈衝響應檢測

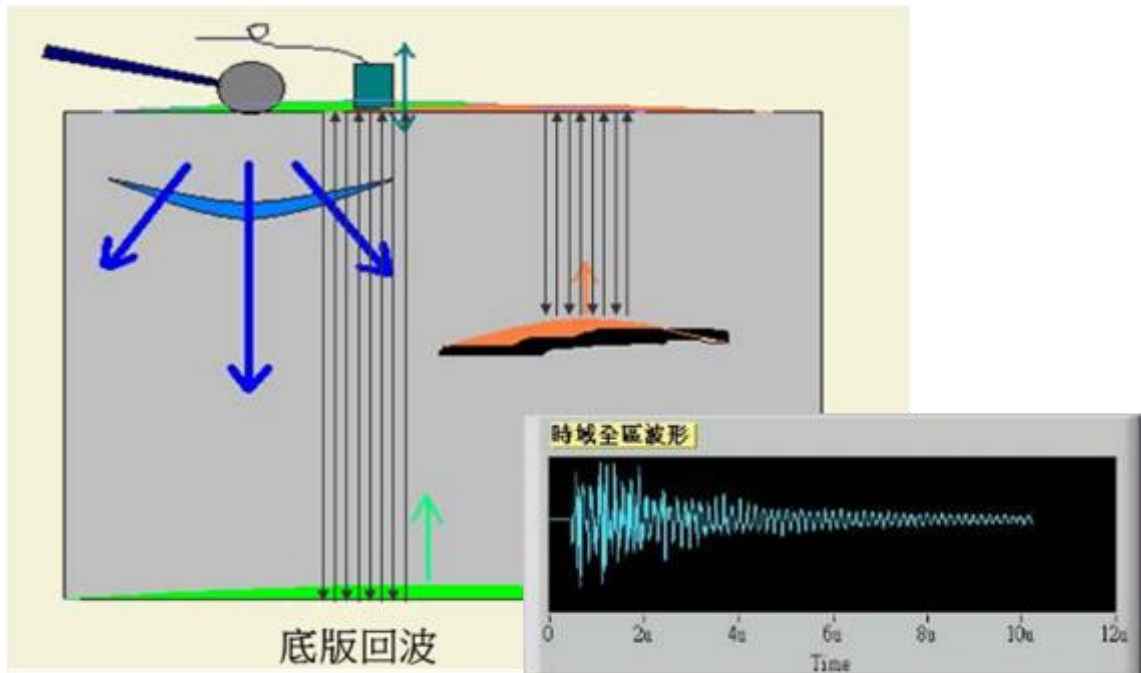


圖 3.5 敲擊回音檢測原理

敲擊回音檢測目前可依據的主要規範為 ASTM-C1383^[6] “Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method”。此規範之施用對象為混凝土材質之版、鋪面、橋面版、牆或其他版狀之結構物，檢測之施用目的為測厚。在水晶河 3 號一案中，則用於探測脫層到牆面的深度，即脫層深度。本檢測規範中包括兩個相依程序：程序 A:P 波波速量測(P-Wave Speed Measurement)及程序 B:敲擊回波檢測(Impact-Echo Test)。每一點位檢測必須完成上述二程序，方能推知版厚或脫層裂縫深度。

在進行程序 A—P 波波速量測時，探頭及敲擊源依圖 3.6 方式配置，測點所在位置之混凝土表面須乾燥，並移除量測 P 波波速之波傳路徑附近之表面灰塵及附著殘物。如混凝土表面太過粗糙，會影響探頭端接觸，可進行磨平，清除粉塵後再行量測。程序 A 量測之標的為敲擊產生之 P

波由探頭 1 傳到探頭 2 之歷時 t ，由於兩探頭間距離 H 為已知或量測確定，藉此求出波傳速度(H/t)。

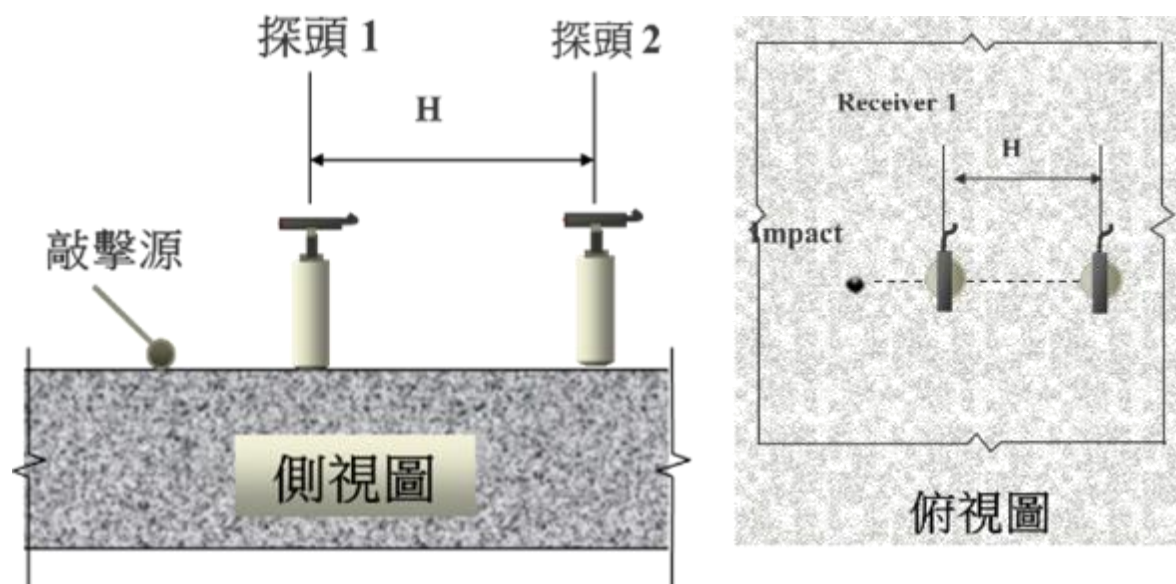


圖 3.6 程序 A—P 波波速量測之探頭及敲擊源配置

程序 B—敲擊回波檢測，係以暫態應力波（敲擊混凝土表面產生之 P-wave 應力脈衝）測得混凝土結構標的測點上之應力波反應頻譜（Amplitude Spectrum），反應頻譜可用於評估測點正下方附近（即檢測方向）混凝土之狀況及完整性（Performance and Integrity）。由於混凝土次表面之粗骨材及非均質效應，可能影響反應頻譜約 30kHz 以上區域之判讀，故建議依本程序檢測之混凝土元件，所得之應力波反應頻譜其適用分析深度或受檢元件厚度需大於 6cm（其造成的頻譜訊號範圍約在 30kHz 以下）。

測點所在位置之混凝土表面要求需滿足前文所述。在配置上，需符合 ASTM C1383 Procedure B 之規定，即探頭中心位置與敲擊位置相距不得大於 0.4 倍之混凝土版厚，本程序建議兩點位置相距約 3~6cm，以滿足判

讀深度大於 6cm 之一般需求(參考圖 3.7)，檢出對象為敲擊後所得之頻譜(參考圖 3.8)。

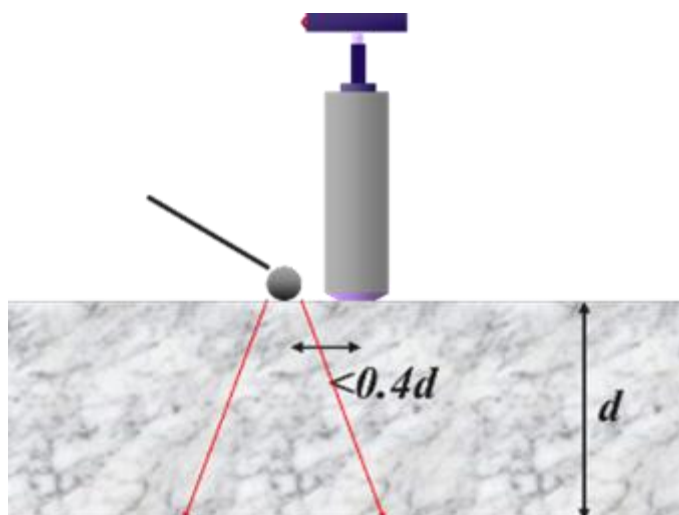


圖 3.7 ASTM C1383 Procedure B 探頭中心與敲擊位置之規定

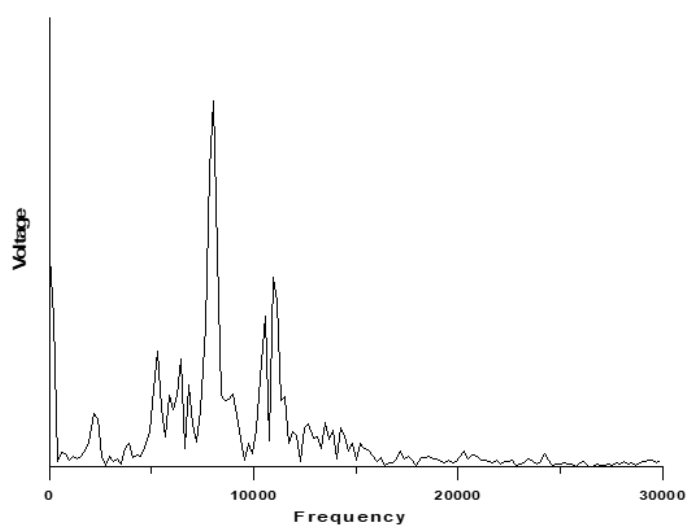


圖 3.8 敲擊後所得之頻譜

除前述程序 A 量測 P 波波速之外，如已知受檢測結構物之厚度或版厚 d ，經敲擊後激發共振波動，並能得知版厚 d 對應之共振頻率 f ，由公式波速 C_p /頻率 $f = \lambda = 2d$ ，可推得在混凝土內波傳速度 C_p 。通常結構物厚度(或版厚)對應之共振頻率 f 常在頻譜上之較低頻的位置(因為沒有其他裂縫/界面訊號會比結構物厚度更深)，訊號辨識容易。此外又由於版面

界面大而反射較大，故訊號亦比較明確。 C_p 之大小與混凝土之楊氏係數(E)、柏松比(ν)及單位重(ρ)有關，波傳速度 C_p 越快，E 值及單位重越高，藉此也可推估混凝土之勁度。

如已知受檢測結構物之混凝土波傳速度 C_p ，經敲擊後激發共振波動，可得結構物內部界面/瑕疵/空洞等對應之共振頻率 f_a 、 f_b 、 f_c 等，由上述公式可推得對應之深度 d_a 、 d_b 、 d_c 等，藉此推估混凝土內部之完整性與瑕疵/空洞等之深度位置。

應力波頻譜分析除可用於構件幾何形狀分析(如版厚、樁長)及應力波波速測量之外，尚可用於評估構件內部空洞、裂縫、蜂窩等混凝土完整性問題，但可視為難度及不確定性較高之檢測分析作業。構件內部之空洞、裂縫或蜂窩，如瑕疵有方向性，則「敲擊源與探頭位置之選定」相形會非常重要，正確之敲擊位置可激發內部瑕疵產生較大之響應。

現場混凝土表面狀況直接影響檢測之有效性，不論是何種敲擊檢測，測點位置之選訂應注意：欲放置探頭及進行敲擊之位置，其混凝土表面需平整堅實，不可有鬆軟、孔洞、白華、析晶、剝離等現象；混凝土表面如有油漆覆蓋，則需確認油漆與混凝土表面沒有脫層或分離，油漆沒有鬆軟變質，以確保敲擊之接觸狀況良好，探頭得以與混凝土表面充分密合。混凝土表面下如有粉光層(約 1~2cm 厚)，需確認不得有剝離現象。如已知某位置混凝土近表面下方(約 3~6cm)有預埋水電管線或其他預留孔洞，除非該管線孔洞即為待測空洞，否則該位置不適合設定測點放置探頭及進行敲擊，以避免較深層回波訊號被屏蔽。

如待測混凝土表面有上述等不適合檢測之狀況，又無法就近另選合格測點時，則可視結構物斷面狀況、結構物功能及業主意願進行必需之混凝土表面前處理，磨平或打除欲進行檢測位置混凝土表面上之附著物(如

油漆、白華或剝離等)，清除粉塵後再行量測。進行之相關敲擊回波檢測時，均要記錄測點環境狀況、前處理辦法及可能邊界效應影響，並於報告中列出。

3.2 敲擊回音檢測設備說明

本院於 2018 年新購之敲擊回音檢測系統，係符合 ASTM-C1383 規範要求之設備。其中包括主機系統及位移規探頭組，本文中將說明規範要求、設備內容及相關測試結果。

1. 本所設備皆為美國 Impact-Echo Instruments 出品設備。
2. 敲擊回音檢測主機系統包括兩部分：(A)訊號擷取及藍芽無線傳輸模組，及(B)檢測控制/訊號分析筆電及藍芽接收模組(圖 3.9)。根據 ASTM C1383 建議規格，DAQ 卡中每個訊號通擷取道之訊號擷取頻率宜在 500kHz 以上，本案設備之兩個通道之訊號擷取頻率為 2MHz。ASTM C1383 建議 DAQ 卡訊號電壓範圍至少 $\pm 2.5V$ 及 12-bit 之解析度，本院設備之兩個通道之訊號電壓範圍可至 $\pm 5V$ ，解析度為 14-bit。已達 ASTM C1383 建議之設備訊號品質規格。由於現今訊號擷取設備發展迅速，要達到 ASTM C1383 的建議品質並非難事。
3. 本院設備中之位移規探頭共有三種型式：Cylindrical Transducer (圓筒探頭)、Pistol Grip Transducer (槍把式探頭)與 Dual-Head Wave Speed Transducer(波速量測雙探頭)，共三具(圖 3.10)。三式位移規探頭端部需能貼合待測物表面以偵測表面波傳起伏，其訊號表現則在之後測試方法及結果說明中展現。

4. 本院設備在敲擊回音檢測主機系統及位移規探頭組之訊號通聯上，具現場 200m 的無線傳輸能力。這有助於檢測現場管理，檢測施作和訊號處理不必同擠一處或施工梯架上。



圖 3.9 主機系統：訊號擷取模組及檢測控制/訊號分析筆電



圖 3.10 位移規探頭共有三種型式：圓筒探頭(左下)、
槍把式探頭(右下)與波速量測雙探頭(上)

敲擊回音檢測範例中，最容易說明檢測相關理論及訊號表現的就是圓柱試體。為求確認 Cylindrical Transducer、訊號擷取、藍芽無線傳輸及人機界面之功能性，最簡易的測試方法採用 $15\Phi\times 30\text{cm}$ 圓柱試體，檢視 30cm 柱深(底面回波)之時域訊號、頻域訊號及頻率表現。案例中所用的圓柱其應力波波速約為 3800m/sec，均質性高，且目視觀察並無瑕疵。本次測試之參數設定如下：擷取頻率為 1MHz，擷取點數為 2048，訊號電壓範圍則設定為 $\pm 2\text{V}$ 。圓柱試件經敲擊後，配置及所得訊號展示如圖 3.11，由於應力波在柱深方向形成往復暫態共振，故時域視窗有往復波式，並在頻域視窗中展現主要頻率。實驗建議重複進行 3 次以上，以顯示設備重複實驗之穩定性符合預期及所示規格。

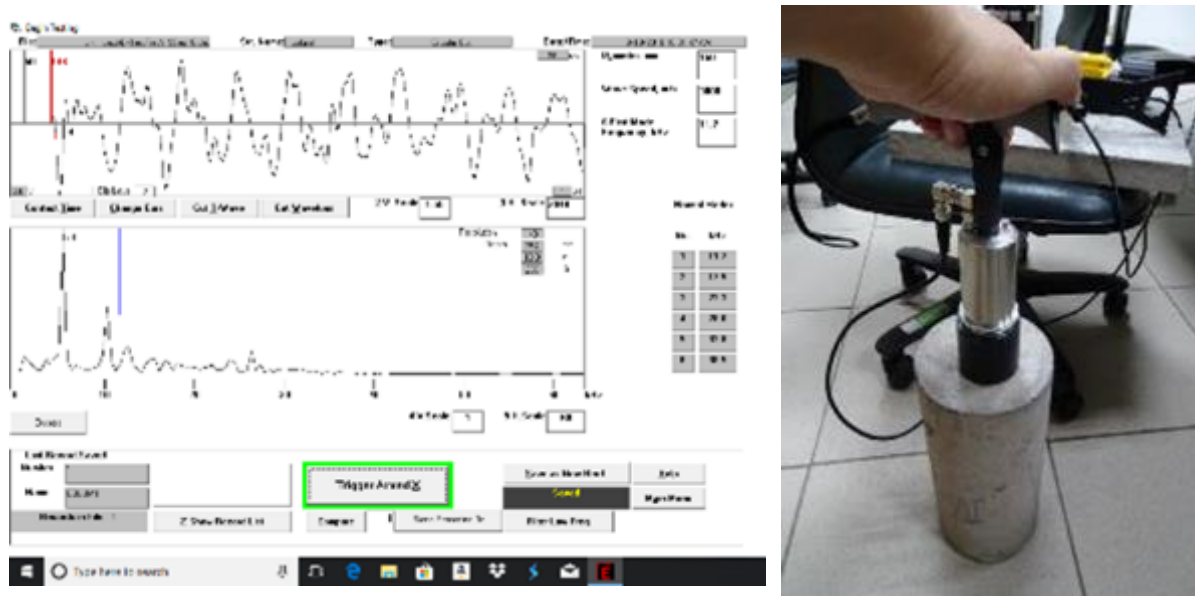


圖 3.11 圓柱試件敲擊配置及所得訊號展示

另一測試是採用 Pistol Grip Transducer，也可確認、訊號擷取、藍芽無線傳輸及人機界面之功能性。測試方法如前，採用同一圓柱試體(圖 3.12 配置)，測試之參數設定亦如之前，期能檢視探頭擷取所得之柱深時域訊號、頻域訊號及頻率表現。經敲擊後得訊號展示如圖 3.12。

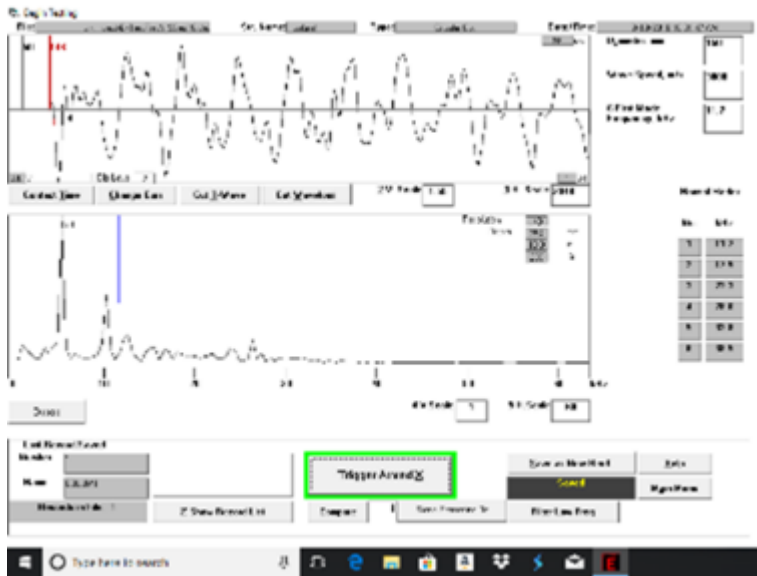


圖 3.12 採用 Pistol Grip Transducer 之圓柱試件敲擊配置及所得訊號

對 Pistol Grip Transducer，另種測試方法係採用一 25cm 厚牆體，檢視牆厚之時域訊號、頻域訊號及頻率表現。該牆體之應力波波速約為 3340m/sec，目視觀察表面並無瑕疵。本次測試之參數設定如下：擷取頻率為 1MHz，擷取點數為 2048，訊號電壓範圍則設定為±2V。牆體經敲擊後所得訊號展示如圖 3.13，由於應力波在牆厚方向形成暫態共振，並在頻域視窗中展現主要頻率。

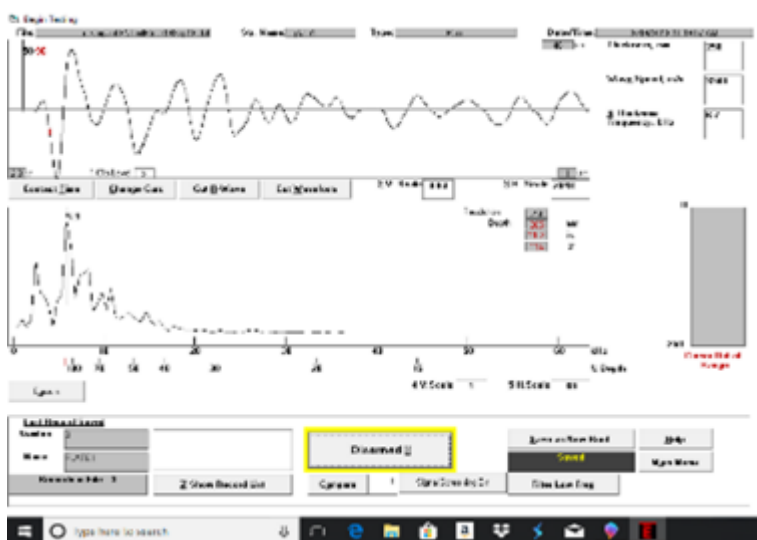


圖 3.13 採用 Pistol Grip Transducer 敲擊牆體後所得訊號展示

如要依規範量測混凝土元件之波傳速度，可採用 Dual-Head Wave Speed Transducer(波速量測雙探頭)，測試範例係採用 35×35×3.5cm 版件，檢視 30cm 間距雙探頭波到時段之時域訊號表現，同時計算區間波速。該版件目視觀察並無瑕疵。本次測試參數設定:擷取頻率為 1MHz，擷取點數為 2048，訊號電壓範圍則設定為±2V。版件經敲擊後所得訊號展示如圖 3.14，透過應力波傳在兩探頭波到之時間差及雙探頭 30cm 間距計算區間波速，版件應力波波速約為 3368m/sec。

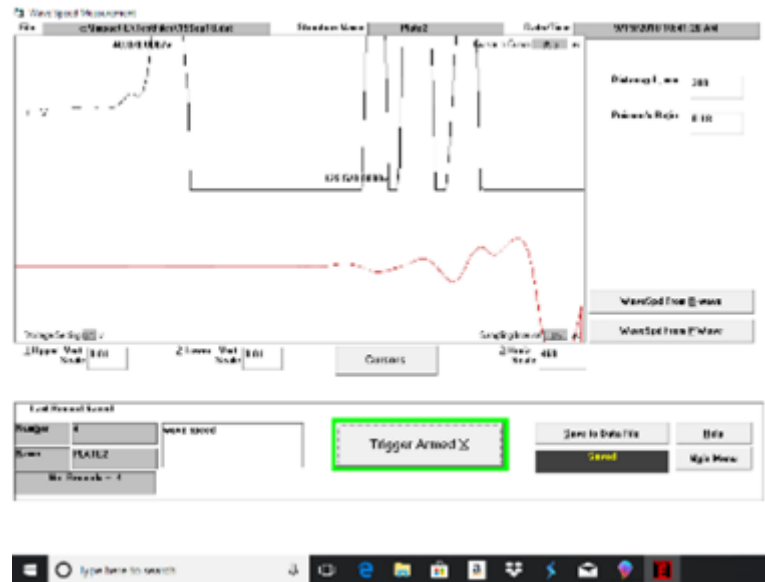


圖 3.14 採用波速量測雙探頭，版件經敲擊後所得訊號展示

3.3 脈衝響應檢測^[7]

應用脈衝響應法檢測評估混凝土版之狀態，目前可依據的主要規範為 ASTM-C1740-2010 或 C1740-2016，“Standard Practice for Evaluation the Condition of Concrete Plate Using the Impulse-Response Method” 或「脈衝響應法評估混凝土板狀態標準規範」。此規範之施用對象為混凝土版、路面、橋面、牆壁或其他混凝土版結構的狀況，此方法也適用於具有覆蓋層的版結構，例如具有瀝青或波特蘭水泥混凝土覆蓋層的混凝土橋面。這種檢測法可用來定位脫層或固結不良的混凝土，也可用於定位支撐不良的區域或地面承重板下方的空隙。脈衝響應法旨在快速篩選結構，以識別需要更詳細調查異常狀況的潛在位置。在水晶河 3 號一案中，則用於大區域的混凝土脫層區域初步篩選。

檢測所得之結果係用於比對待測結構元件中某測點的混凝土品質或支撐條件，與同一元件中其他測點的品質或條件；或用於比對結構元件與相同幾何形狀的另一個元件中同一位置測點。至於要如何確認及闡釋脈衝響應的訊號結果，則透過侵入式探測（鑽孔或鑿除混凝土）或鑽心取樣來進行。

由於混凝土的老劣化條件、澆築批次間之變異和實際固結情況之差異，結構元件中各測點的混凝土特性可能有所不同，因此在版件上相同版厚之各測點所量出的移動性(mobility)和動態強度(dynamic stiffness)可能有所不定。此外須注意版的彎曲剛度與材料的彈性模數成正比，但也與厚度的三次方成正比。因此，厚度變化對移動率的影響會比彈性模數變化的影響更大。檢測時錘擊的有效影響半徑限制了混凝土構件的最高可檢測厚度，在實際應用狀況下，設備適用之厚度多小於 1m。

如應用在高速公路鋪面檢測，檢測結果可能會受到交通噪音或在結構上正常車流移動產生的低頻結構振動影響。然而，這些噪音的間歇性或可允許在車流期間對結構相鄰部分進行檢測。透過工程研判來確認檢測所得響應是否受到交通引起振動之影響。

懸吊(掛)版上的沉重荷載可能會經由不同振動模態之頻率和形狀改變而影響到測試結果。待測物表面上的雜物碎片也可能會造成干擾，收到尖銳衝擊和響應量測。

此檢測法不適用於當有機械設備(鑿岩槌、鐵鎚發聲、機械清掃機等)正衝擊結構並產生振動之情況。此外，此檢測法也不適用於有電噪聲(electrical noise)下之環境，發電機或其他電源所產生之電噪聲可被資料擷取系統收錄而造成誤判。又如對結構元件旁側或直接覆在結構元件上方的待測版件進行測試，由於元件將強化待測版件之勁度並導致移動性降低，此檢測法亦無法表現版內狀況。

3.4 水晶河 3 號核電廠採用的檢測技術應用

在水晶河 3 號核電廠的現場檢測中，先對圍阻體壁體區域進行全區脈衝響應檢測(Impulse Response, IR)。此法可進行全區快速篩選，主要是識別混凝土有無較大範圍的脫層反應。但需知鋼鍵套管亦是空洞區，所謂較大範圍的脫層自然需要能提供明顯大於套管響應的訊號。此外對壁體內鋼鍵套管的定位亦需掌控，進行敲擊時儘量避開鋼鍵套管。這項定位作業，將有賴進行透地雷達檢測確認之(見下文第四章)。脈衝響應檢測是為能更詳細調查異常狀況潛在位置的先期作業。當確認內部脫層範圍及可能邊界後，敲擊回音檢測可用於確認脫層的裂縫深度和走勢，另可透過侵入式探測，如鑽孔、鑿除混凝土或鑽心取樣，來確認脈衝響應及敲擊回音檢測的訊號結果。

水晶河 3 號核電廠圍阻體為後拉式預力混凝土圓柱體建物，有六個扶壁(buttrass)作為水平預力鋼鍵之錨定基礎，如圖 3.15 所示。根據脈衝響應法初步篩選結果，混凝土脫層區域分布在扶壁#3 和扶壁#4 間之牆體，也就是開口工程所在區域。圖 3.16 紅色部分顯示脈衝響應法初篩結果之脫層區域，藍色部分則沒有發現脫層，而黃色區域則是可能之過渡區。由報告顯示，圍阻體牆體都已進行脈衝響應檢查(參考圖 3.16 及 3.17)。

至於要如何確認脈衝響應的訊號結果，水晶河 3 號則採用鑽心取樣方式來調查脫層區域或的脈衝響應異常位置。圖 3.18 及 3.19 顯示在圍阻體牆體的鑽心位置(綠圓點及紅圓點)，綠圓點則是鑽心取樣後沒有發現脫層異狀，而紅圓點則是發現脫層。圖 3.20 則顯示牆體脫層的確證區域，脈衝響應檢查和鑽心取樣結果可互為認證。

在本案中，敲擊回音檢測則用於脫層深度之探測，而脫層深度對裂縫修補作業相當重要。其涉及到鑽孔和灌注環氧樹脂(Epoxy)等膠合劑的深度和工法，當然也可預估修補作業的成本和成效。電廠業主可據此修復受損圍阻體，然而最終並沒成功。

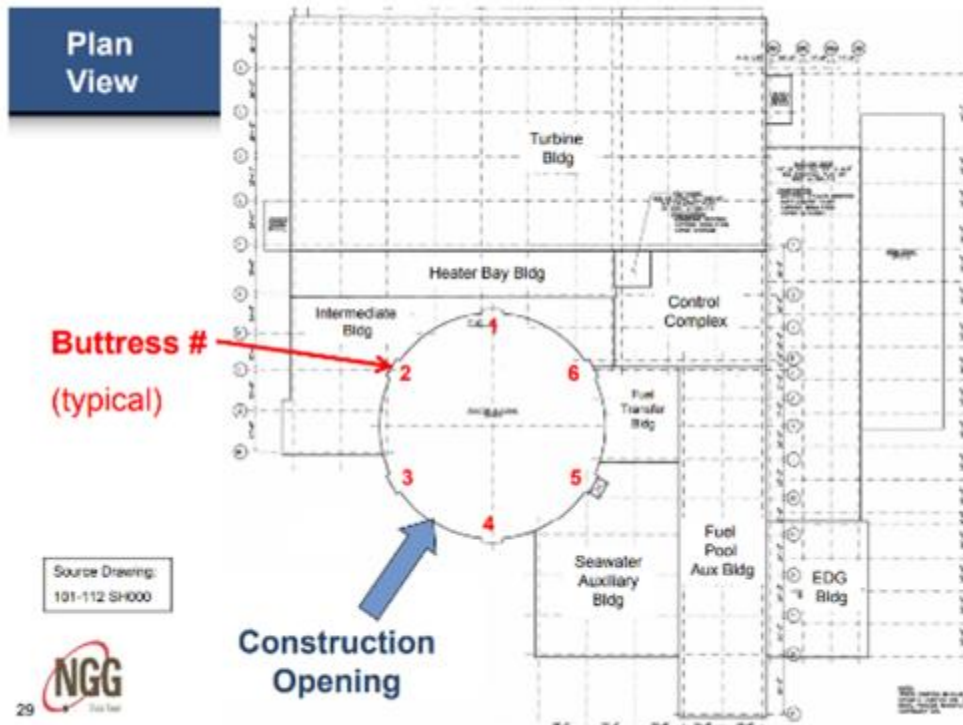


圖 3.15 混凝土圍阻體及其六個扶壁作為水平預力鋼鍵錨定基礎

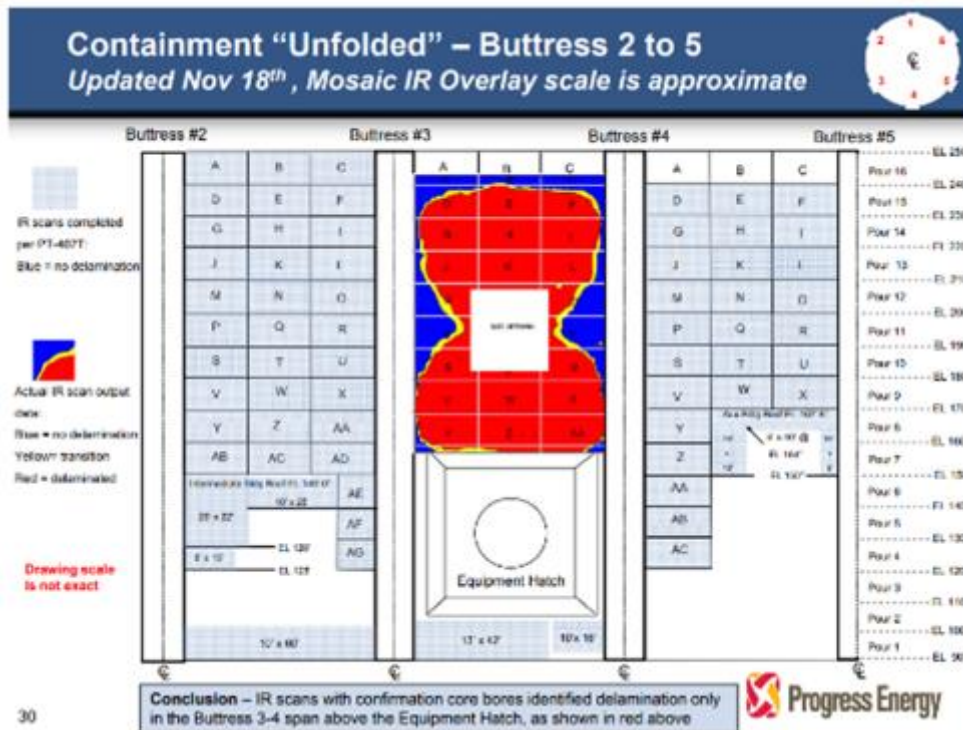


圖 3.16 脈衝響應法初篩結果之脫層區域

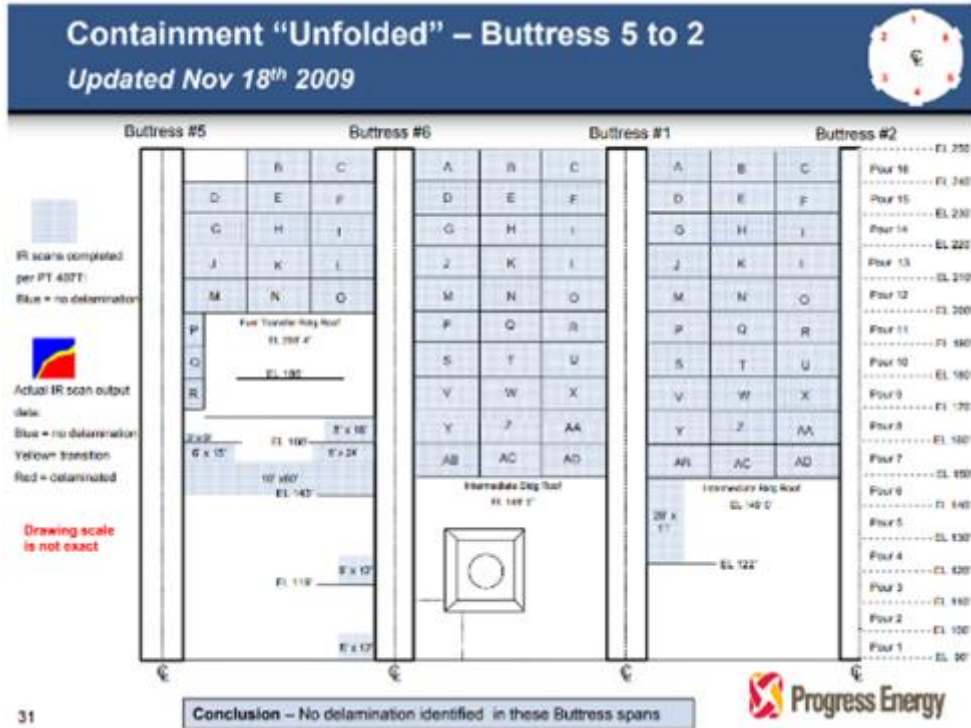


圖 3.17 脈衝響應法初篩結果

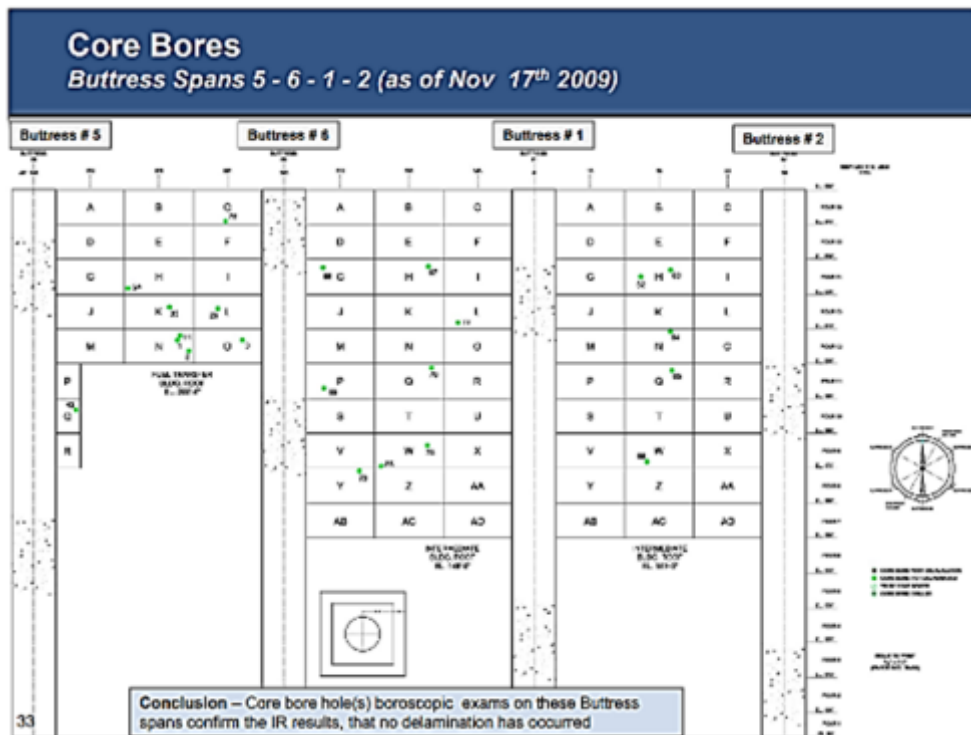


圖 3.18 在圍阻體牆體上的鑽心位置(綠圓點及紅圓點)

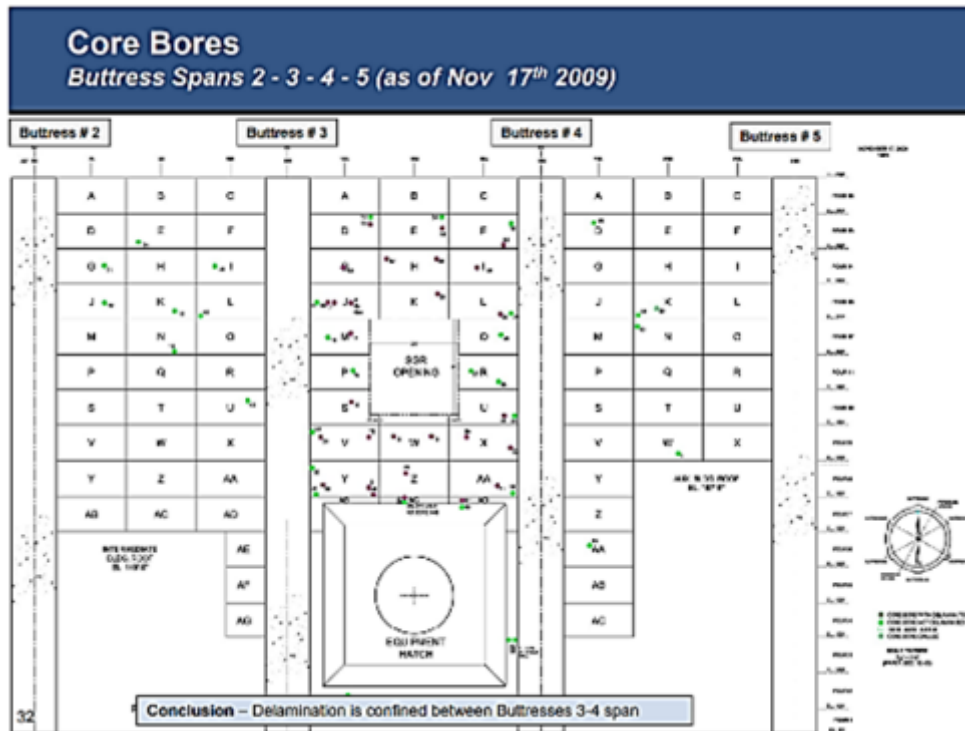


圖 3.19 在牆體上的鑽心位置(綠圓點表示正常及紅圓點表示脫層)

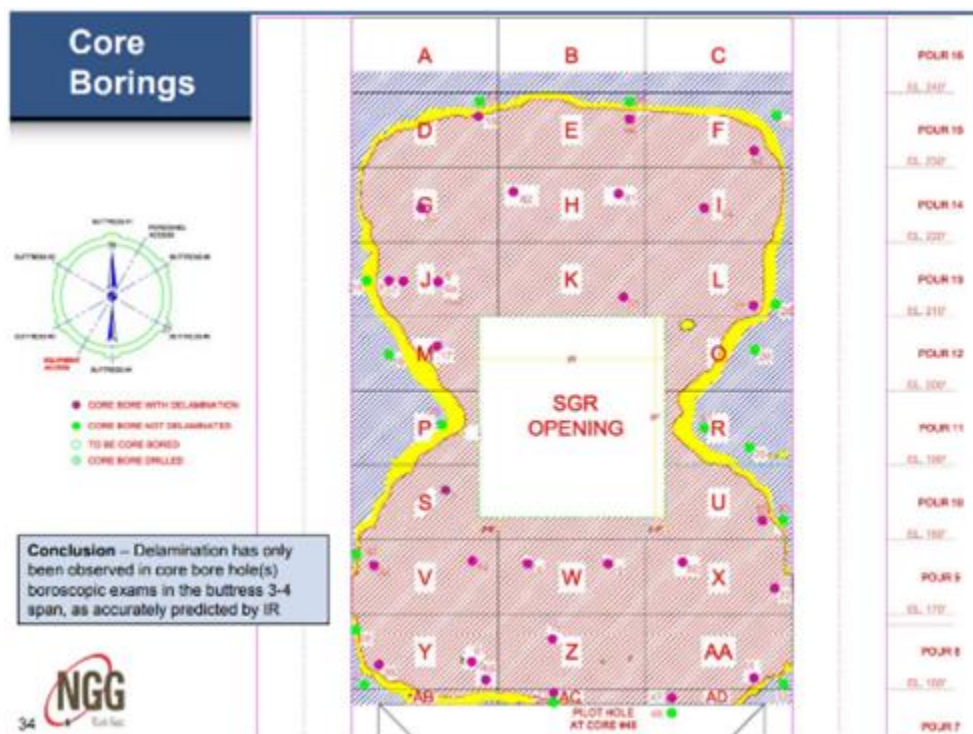


圖 3.20 在牆體脫層區域，脈衝響應檢查和鑽心取樣結果可互為認證

4. 透地雷達檢測

在水晶河 3 號核電廠採用的脫層檢測技術中，還有透地雷達檢測 (Ground Penetrating Radar, GPR)。透地雷達檢測主要是用於確認鋼鍵套管及鋼筋在牆體中的確實位置。由於牆體內分佈有 5.25 英吋直徑的鋼鍵套管(除了鋼鍵外，內存有空洞或油膏)，套管有水平向和垂直向，其交會處將有 10.5 英吋的空間，這種幾何條件會影響脈衝響應法的檢測判讀，故需要用透地雷達檢測結果來提供研判背景資料。這也是比較合理的檢測規劃。

4.1 透地雷達檢測之發展和應用^[8,9,10]

透地雷達檢測技術(Ground Penetrating Radar)，簡稱 GPR，其應用原理類似航空雷達偵測飛機位置，係利用入射電磁脈波(雷達波)遇到不同電性之異材界面或物體即產生全反射或部分反射回來之物理現象，產生可鑑別之回波訊號(參考圖 4.1)。經有系統之施測與接收後，對整組訊號進行影像處理、濾波及判讀分析，藉以了解受檢區域或物體內部之特性與層次^[11,12,18,19]。

運用電磁波(雷達波)探測地下結構物之構想，可溯至 1930 年代末期，早期主要運用在軍事偵察及淺層礦脈探勘方面。至 1960 年代，低頻雷達已被成功地運用在南、北極冰層厚度探測上。爾後由於各種不同中心頻率及脈衝型態之天線相繼開發問世，其使用領域乃逐一擴大到土木營建工程、環保偵測、乃至於考古等方面，均有不錯成果。我國透地雷達檢測技術研究可溯自 1992 年，由工研院能資所及中央大學引進，最初用於淺層地球物理探勘(Geophysical Prospecting)，爾後又用在工程建前/後調查、環保污染偵測、河床探勘乃至於考古等領域，亦具成果^[13,14,15,16,17]。

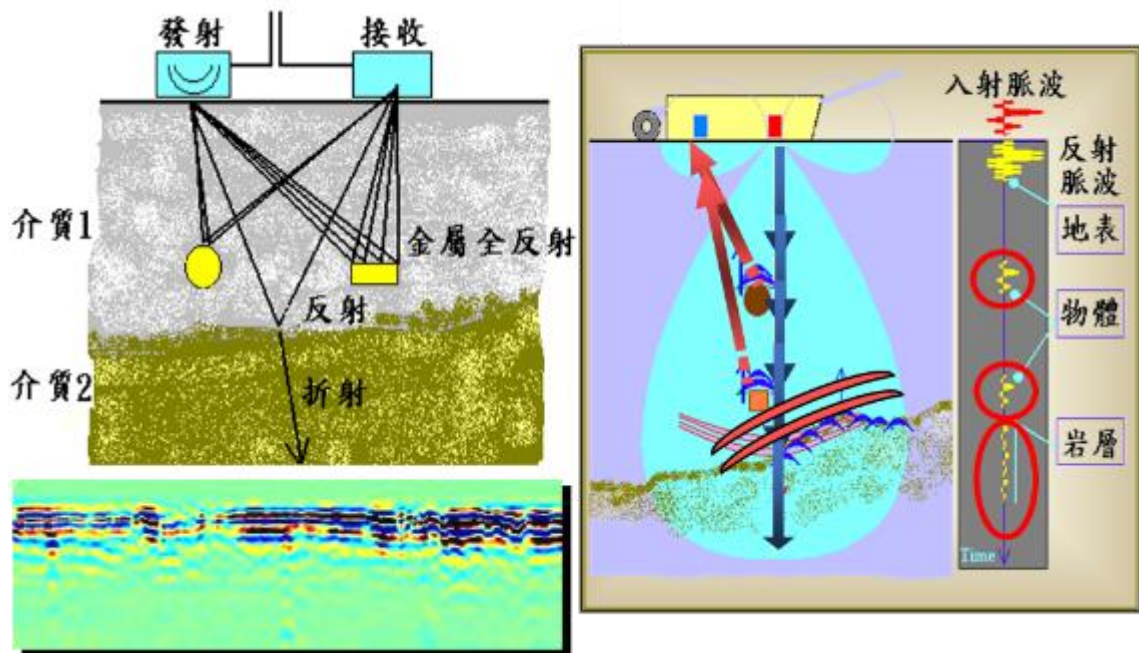


圖 4.1 透地雷達檢測原理[8,9,12]

目前透地雷達檢測技術的發展成熟，過去已成功地運用在地下管線偵測、結構物檢測、混凝土內鋼筋狀況偵測及機場道面基礎鋪面偵測等方面[8-18]，由二維的圖面判讀，更進一步提昇至「三維透地雷達檢測技術」(C-scan 檢測)，並配合使用成像軟體，建立類似醫療使用之電腦斷層掃描 (CT Scanner)，可獲得切片式的檢測圖像或三維圖像(如圖 4.2)。

透地雷達檢測技術在國內土木、大地及河海工程方面主要應用有：

1. 偵測(鋼筋)混凝土構件內部之管線、空洞、鋼筋、鋼鍵或其他異物；
2. 偵測地下結構物、地下管線、空洞及沉陷位置；
3. 偵測道路或機場跑滑道之鋪面/基礎完整性及厚度量測；
4. 量測隧道襯砌或地下連續壁之RC厚度、完整性、包泥/包水及掏空狀況偵測；
5. 偵測淺層地基或河堤基礎之掏空狀況；
6. 淺層地質、地下水位及淺層破碎岩盤之評估；

7. 淺河床深度量測及沖刷狀況評估[7]；

8. 鋼筋腐蝕行為等[23]。

相關檢測案例可參考：透地雷達檢測技術應用(1)：原理、訊號分析及檢測規畫；透地雷達檢測技術應用(2)：檢測實例討論及透地雷達檢測技術應用(3)機場檢測實例討論(裴廣智,2022~2023)三份報告[8, 9, 10]。

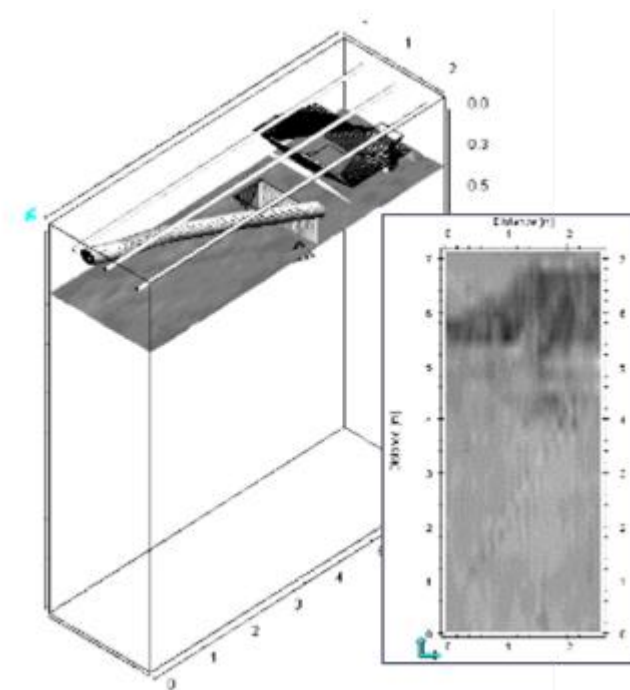


圖 4.2 三維斷層式 GPR 檢測[13,20]

4.2 透地雷達檢測原理及 B-/C-scan 成像

透地雷達檢測原理係利用 10M~2500MHz 中心頻率之電磁脈波（雷達波）穿入地層、構造物或被探測區域，電磁脈波在穿越不同電性介質之界面時會產生反射脈波(參考式 4-1，入射脈波繼續深入)，反射脈波經天線(antenna)收錄形成訊號，故每一根天線探頭在每一測點收錄一段時間之訊號為稱為一掃描線(trace，或 A-scan)，藉由收錄不同點位之多組脈波掃描訊號，經成像處理可形成較易解讀之圖面可用於解釋被探測標的之剖面

狀態。上述多組脈波訊號收錄方式即為所謂掃描(scan)，透地雷達常用展示的掃描方式有二：即所謂 B-scan 和 C-scan。

反射脈波與入射脈波之訊號比大小(A_2/A_1 即反射係數)與不同電性介質之介電常數差異程度有關，其公式如下：

$$\gamma = (\epsilon_1^{0.5} - \epsilon_2^{0.5}) / (\epsilon_1^{0.5} + \epsilon_2^{0.5}) = A_2/A_1 \quad (\text{式4-1})$$

γ 代表反射係數； A_1 :代表入射波之振幅； A_2 :代表反射波之振幅；

ϵ_1 、 ϵ_2 代表上、下層之介電常數(Relative Permittivities 相對電容率)。

上式介電常數(相對電容率) $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ，其中 ϵ 為材料電容率； ϵ_0 為真空電容率。其相關之電磁波波速公式如下：

$$\text{電磁波波速} = \text{光速} / (\text{介電常數})^{0.5} \quad (\text{式4-2})$$

反射脈波之傳遞時間則與物件異材界面所在深度 d 成正比，如下式

$$t = 2d/V \quad (\text{式4-3})$$

t ：反射訊號傳遞時間； d ：物件異材界面深度； V ：電磁波速

電磁波在真空狀態下之波速約為 $300\text{m}/\mu\text{s}$ ($\mu\text{s} = 10^{-6}$ 秒，即為光速，一般記作 c ，為 $299,792,458\text{m/s}$)，而真空或乾燥空氣之自由空間電容率以 ϵ_0 表之，其值為 8.8542×10^{-12} ，電容率之單位為安培²*秒⁴*公斤⁻¹*米⁻³(亦或法拉·米⁻¹)。真空或乾燥空氣之介電常數(即相對電容率)則設為 $\epsilon_r = \epsilon_0/\epsilon_0 = 1$ 。其他不同介質之介電常數則是相對於真空電容率之比值，即 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 。

當電磁波穿過不同介質時，波速會因不同材料之介電常數 ϵ_r 而為之改變(參考公式 4-2)。例如一般混凝土之介電常數約在 6~11 之間，由公式 2-2 推得混凝土內電磁波傳速度約在 $90 \sim 120\text{m}/\mu\text{s}$ 間(μs 為 10^{-6} 秒)，其中不確定範圍可能來自於骨材、級配、水合或含水狀況(參考表 4-1)。

表4-1 透地雷達常用介電常數與對應電磁波傳速度^[13,29,34,36]

介質材料	介電常數 ϵ_r (相對)	波速 m/ μ s
空氣	1	300
淡水	81~82	33
混凝土	4~10(乾~濕)	95~150(濕~乾)
黏土質土	4~16(乾~濕)	74~150(濕~乾)
砂	3-6~20-30(乾~飽和)	55~150(濕~乾)
花崗岩	4~7	113~134(濕~乾)
石灰岩	7~16	75~113
濕玄武岩	8	106
墾殖土	15	77
碳氫化合物	1.5~3.5	160~245
瀝青	4~7	110~148
凍土層	4~8	106~150
冰	3~4	150~173
氧化鋁(晶體)	9	100
石英	3.9	152
聚四氟乙烯樹脂+E 玻璃布 (複合材)	2.6	186

透地雷達鑑別之可行性取決於標的物與介質材間之介電常數差異，其檢測範圍或深度則受電磁脈波傳遞行為所束。電磁脈波在材料中之傳遞行為可透過 Maxwell 方程式量化表現，經推導得電磁波波動方程式^[25,26]：

$$\nabla^2 E = \mu \sigma (\partial E / \partial t) + \mu \epsilon (\partial^2 E / \partial t^2) \doteq \mu_0 \sigma (\partial E / \partial t) + \mu_0 \epsilon (\partial^2 E / \partial t^2) \quad (\text{式4-4})$$

$$\nabla^2 H = \mu \sigma (\partial H / \partial t) + \mu \epsilon (\partial^2 H / \partial t^2) \doteq \mu_0 \sigma (\partial H / \partial t) + \mu_0 \epsilon (\partial^2 H / \partial t^2) \quad (\text{式4-5})$$

其中：E 為電場強度(electric field intensity V/m)、H 為磁場強度(magnetic field intensity A/m)、t 為時間、 ϵ 為電容率、 σ 為導電率及 μ 為

磁導率。由於一般材料之磁導率相當接近真空狀況之磁導率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)，故多可以 μ_0 簡化取代。多數介質材料之電性變化(差異)較磁性變化為大，透地雷達電磁脈波傳遞受介質電性影響較大，即式 4-4 所表示之電場傳播行為，故在檢測應用上也取電性鑑別度之優勢而為之。

介質在電磁脈波(時變電場)影響下，會產生二種電流效應，其一是傳導電流，即介質內自由電子之移動，如式 4-4 中等號右側之第一項(σ 為導電率)；其二是位移電流，電荷藉由物質分子間極化方式傳遞(參考圖 4-1 左)，如式 4-4 中等號右側之第二項(ε 為電容率)。而式 4-4 等號右側之第二項與第一項之量級比 MR 值(magnitude ratio)_[26]，則可做為介質材料在時變電場交變頻率 ω 下之電性指標：

$$MR = \varepsilon (\partial^2 E / \partial t^2) / \sigma (\partial E / \partial t) = (\varepsilon \omega^2 E) / (\sigma \omega E) = 2\pi f (\varepsilon / \sigma) \quad (\text{式4-6})$$

MR 之大小反應傳導電流(MR 趨極小)與位移電流(MR 遠大於 1)之消長，可做為雷達脈波傳遞和成像條件之指標。

以透地雷達常見之探測對象來看(參考表 4-1)，電容率 ε 之量級約在 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 之間，而一般土石之導電率 σ 量級約為 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 之間，則 ε / σ 之量級估在 $10^{-4} \sim 10^{-11}$ 間(如檢測對象為金屬礦體，則導電率量級約為 $10^3 \sim 10^1$ 間，則 ε / σ 之量級估在 $10^{-8} \sim 10^{-15}$ 間)。當時變電場交變頻率 f 不高時，MR 趨極小，此時電磁波傳遞(即時變電場作用下)會造成在待測介質內之自由電子在介質中移動(即形成傳導電流)。透地雷達採用之電磁脈波頻率量級多在 $10^7 \sim 10^9$ 之間，對一般導電率偏低的土石介質或導電率極低的混凝土而言或可控制 MR 遠大於 1，此時只有位移電流發生在待測介質。

在導電率極低之介質內，電磁脈波之時變電場會導致極性物質極化，透過極化方式傳遞電荷，由於位移電流不涉及自由電子移動，故其能量損

耗相當低(參考圖 4.3 之左)。反之當介質具某種程度之導電性，其內之自由電子在時變電場作用下會產生移動 (即傳導電流，圖 4.3 之右)，然而電子移動則會受到原子核正電荷之曳引以致有能量損耗產生，即所謂電阻 (ρ 電阻率 $\Omega\cdot m$)。由於電阻影響，在介質內之傳導電流效應會造成電磁脈波能量之耗損，進而造成脈波消失。故而電磁脈波之耗損主要決定於介質之導電率，高導電率會造成高損耗及低 MR 值，而低導電率介質其內部受雷達脈波影響所產生之位移電流遠大於傳導電流，即控制 MR 遠大於 1，此時脈波能量損耗較少。

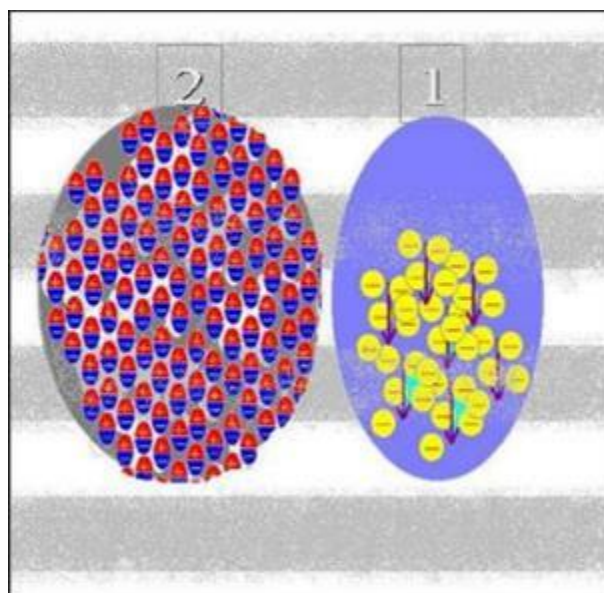


圖 4.3 時變電場下會產生之二種電流效應^[19]

一般透地雷達施測環境多非實驗室控制下環境，而造成檢測重複性變異之最大問題就在於土石介質之導電率，該導電率會受乾濕氣候影響而變，此外，土石材料之介電常數也因含水量多寡而變。故經驗上，不同時間所做的現場透地雷達掃描圖面必不相同。當導電率過高如 $\sigma > 10^{-2} S/m$ ，則視為透地雷達難以施測環境(此時 MR 之量級約在 $10^2 \sim 10^{-3}$ 之間)，其檢

測深度不佳甚至無法穿透介質。導電率 σ 約在 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ S/m 之間(此時 MR 之量級約在 $10^7 \sim 10^{-3}$ 之間)，是透地雷達或可施測的環境，透過天線脈波頻率之選配(讓 MR 遠大於 1)或能達成需求之檢測深度。當導電率 $\sigma < 10^{-7}$ S/m，則為透地雷達較佳之「絕緣材料」施測環境(此時 MR 之量級約在 $10^7 \sim 10^2$ 之間)，通常會有極佳之檢測深度^[36]。

除上述導電率及 MR 或可用於量化評估透地雷達施測環境，電磁波之波傳範圍受限於能量傳遞損耗，即探測介質之衰減常數亦多用於顯示施測環境優劣，可以下式表示：

$$\text{衰減常數 } \alpha = 1.69(\sigma/\epsilon_r^{0.5}) \quad (\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (\text{式4-7})$$

衰減常數中，介質導電率 σ 及介電常數 ϵ_r 大小決定介質造成之傳遞損耗，導電率 σ 與介質中自由電子之數量有關。一般土石之導電率量級約為 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 之間，相形之下相對介電常數 ϵ_r 量級約在 $10^2 \sim 10^0$ 間，可推論衰減常數之變化係由導電率主導。

除上述透地雷達施測環境會客觀影響電磁脈波傳遞距離外，透地雷達天線所提供之脈波能量自是影響波傳距離之主觀因素。在真空中電磁波的能量與頻率成正比，但在耗能之介質中，消耗能量亦與頻率成正比。由於透地雷達天線操作多採攜帶式電源(電池)，提供之能量大致固定，即供不同頻率天線之能量亦差不多，其造成之結果則反映在波傳距離上。低頻天線之波傳距離或有效探測深度(距離或厚度)較長，而高頻天線則反之。

本節對透地雷達檢測之原(物)理背景做說明，但在現場檢測時，土石介質的導電率及介電常數多半不知，更遑論衰減常數。其會影響的不只是檢測深度，介電常數不詳則會影響對標的物的深度判定。在無充分現地調查資料下，如檢測深度可及，則透地雷達對平面位置的檢測可信度較好，但由於介電常數不詳，無法估算電磁波速(式 4-3)，則對深度判定須作保

留。例如混凝土、花岡岩盤及大部份乾燥地層多屬於低損耗介質，由其較低之介電常數可推知電磁波速約在 $130\sim 150\text{m}/\mu\text{s}$ 之間，其對深度判定上可能有 10% 左右的偏差，對現場檢測而言，這種偏差相較其他環境影響尚可接受。純水(或極乾淨的水源)和冰則由於自由電子不多，其極性分子亦屬於低損耗介質，故探測深度大，但是由於介電常數差異，電磁波速分別為 $33\text{m}/\mu\text{s}$ 及 $150\sim 173\text{m}/\mu\text{s}$ ，即對深度(或如冰層厚度)判定上則是 1 公尺和 5 公尺的不同。又如鐵礦砂或富含氧化鐵等紅土類之高導電度材料；及富含電解質之海水和地下水(或地表水)，會形成自由電子或離子在介質/液體中移動，其屬於電磁波之高損耗介質，其探測深度極淺甚至於無。

檢測現場如有作鑽心取樣或有深度確知的地下物，如能安排測線經過該取樣位置或地下物上方，或透過傳回之脈波訊號反推該區域之電磁波速及相對介電常數，其對透地雷達在附近測線之深度定位上有所助益。

4.3 B-scan/C-scan 影像成像原理

B-scan(二維剖面掃描)之訊號成像原理係利用直行檢測動線與地下待測物固定位置之幾何關係而建立。沿直線移動之天線等距逐點探測，每一點位向下之雷達脈波主波瓣(main lobe)探測可收錄一筆回波時域訊號(一段時間之訊號，亦可稱之為該點之 A-scan 結果，也是一條掃描線 trace)。根據 4-3 式，直線等距逐點探測時，其脈波波束寬度範圍內標的物反射回波成像結果可在 B-scan「時域訊號—位置」二維影像圖中產生一半雙曲線(half-hyperbola)之待測物訊號(參考圖 4.4)。由圖中待測物半雙曲線訊號之頂點位置以及訊號傳遞時間，可確定待測物之平面位置及假設波速下之概估深度(理論上確實深度另可透過分離式探頭及同中點法(common middle point, CMP)_[36]求得)。檢測現場如有調查參考圖面或鑽探報告，亦可透過標明部分之地層異質界面深度或混凝土內鋼筋/管線之設

計位置，進一步反算估計出對應地層或混凝土之介電常數，並藉此推斷圖面其他檢測標的或異常部位之「較正確」深度。

B-scan 之訊號成像圖又稱雷達波剖面圖，是透地雷達檢測最基本產出，用以對待測物位置或地下狀況進行研判。而施測時之測線長度與測線方向單位長度之測點設定數量則攸關剖面圖之可判讀性及圖面解析度。前述待測物半雙曲線反射訊號頂點可用於標定待測物位置，但如測線長度不足以展現曲線及其頂點，則無法確定待測物之平面位置。至於測線長度足夠與否則與待測物深度有關，當待測物越深則所需之測線長度越長，如此沿測線測點位置所造成的反射訊號距離差異才足以看出半雙曲線及其頂點。圖 4.4 中也顯示當待測物越深時曲線越趨平緩，頂點位置亦越不明顯。至於單位測線長度之測點數量設定則與測線方向之解析度有關，測點數量越高則圖面連續性較佳，但也有可能影響到檢測速率。

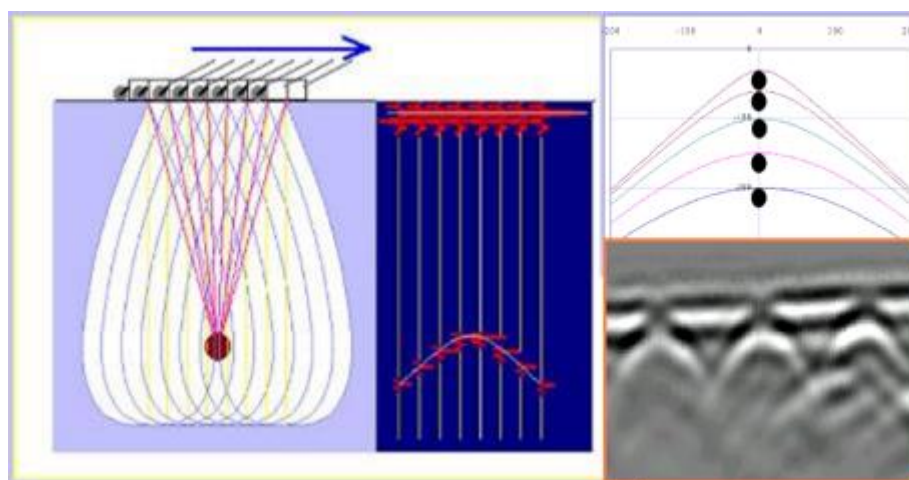


圖 4.4 B-scan 之訊號成像原理^[18,19,22]

C-scan(三維掃描)訊號成像原理是由檢測區域內等間隔逐點 A-scan 訊號所合成。實務上多利用 B-scan 等測點距之逐點探測，針對檢測區域表面規畫平行等間隔之逐線探測，組合所有 B-scan 中逐點之 A-scan trace 訊號進一步合成。多個平行等距之 B-scan 直行測線，較易滿足 C-scan 之

測點佈建作業方便性（圖 4.5）。C-scan 訊號成像可滿足探測一個檢測區域下方待測物件三維位置及深度之需求，可將訊號視覺化而具立體觀感，故又名「三維斷層式透地雷達檢測技術」[11,13,14]。

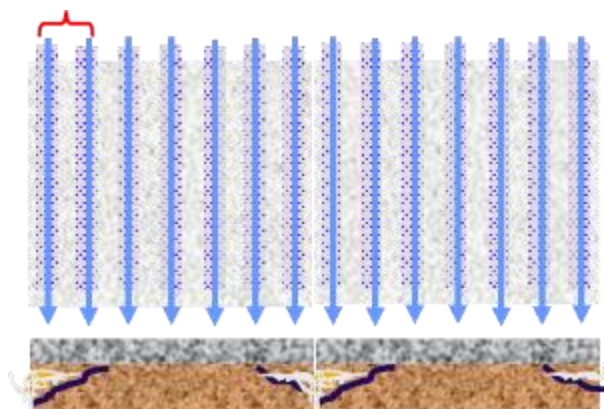


圖 4.5 平行測線佈置[23]

「三維斷層式透地雷達檢測技術」類似自動超音波(AUT)之 C-scan 檢測(全體積檢測)，本項技術能有效綜合多條平行(等距)測線 GPR 檢測資料，透過內插法處理檢測數據，建立檢測區域下方立體空間各位置之對應時域資料，這些資料可以三維斷層圖面方式展現不同深度切面或其他側切面之訊號反映（參考圖 4.6）。如此可將地下結構物或連續物件，以較具幾何辨識意義之方式展現，滿足工程實務上直接辨識標的物位置及形狀之需求，資料可讀性獲得極大之改善。

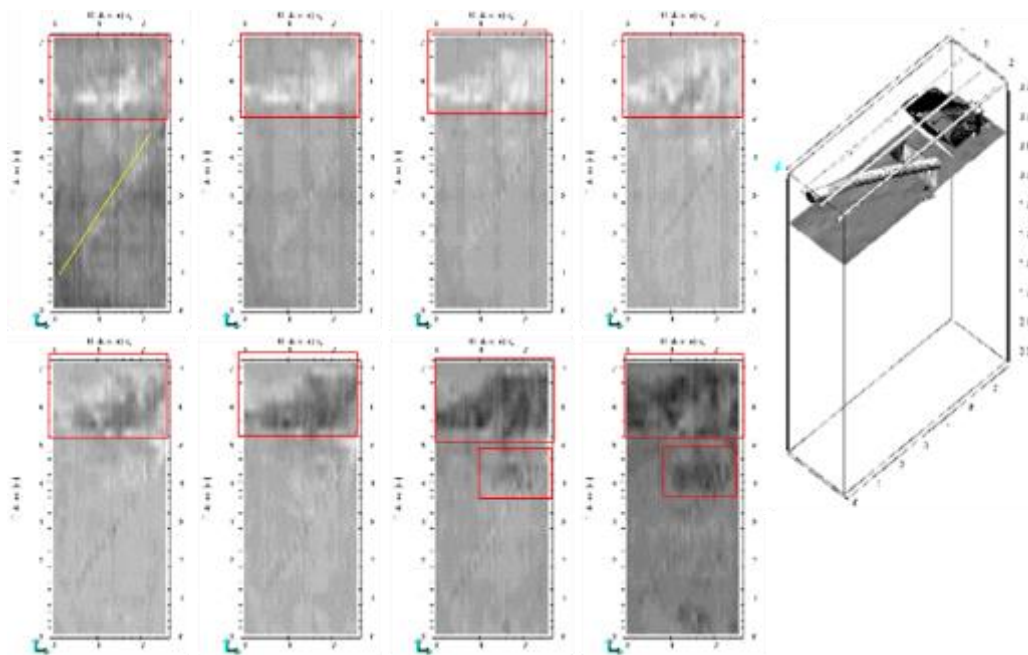


圖 4.6 以切片方式呈現不同深度之檢測斷層圖像[24,25]

然而三維技術所產生之圖面影像仍是由透地雷達反射脈波即 A-scan 訊號所合成，並非真實照像或 X 光檢測成像後的影像處理。故脈波 A-scan 訊號所遇到的問題，也會影響成像。例如由不同深度物件或介面的反射回波，多少會伴隨各自 A-scan 訊號的反復波形，特別是金屬材質管線物件受時變電場影響造成之震盪電流會形成訊號之強烈尾波簾幕。對 C-scan 成像之影像觀察，亦會有相當大的屏蔽影響。故執行透地雷達反檢測及判讀時，特別在訊號成像及對應標的物體之判定上，仍需根據工程、材料與電性相關資料，比對 B-Scan 影像之訊號消長，進行驗證確認。

4.4 透地雷達檢測系統組成、檢測規劃及檢測環境

在過去約莫 30 年之商用透地雷達檢測系統發展，從早期單機-天線人力推或拖行檢測，發展至多天線車載檢測，甚至搭配無人機由空域掃描，其應用逐步擴增。雖然進展如是，也並非單機-天線人力檢測方式就瀕臨淘汰，重點是受制於檢測環境條件，故仍有相當大的需求。不論上述方法

如何，透地雷達檢測系統之組成依其功能性，由檢測端到使用者可分成下列幾個部分(見圖 4.7)：分別為雷達天線(單一或多天線)、測距或定位器、天線—擷取/儀控單元間訊號傳輸(光纖)線、訊號擷取及儀控單元(見圖 4.8)，及人機介面(筆記型電腦顯示器及儀控軟體)。

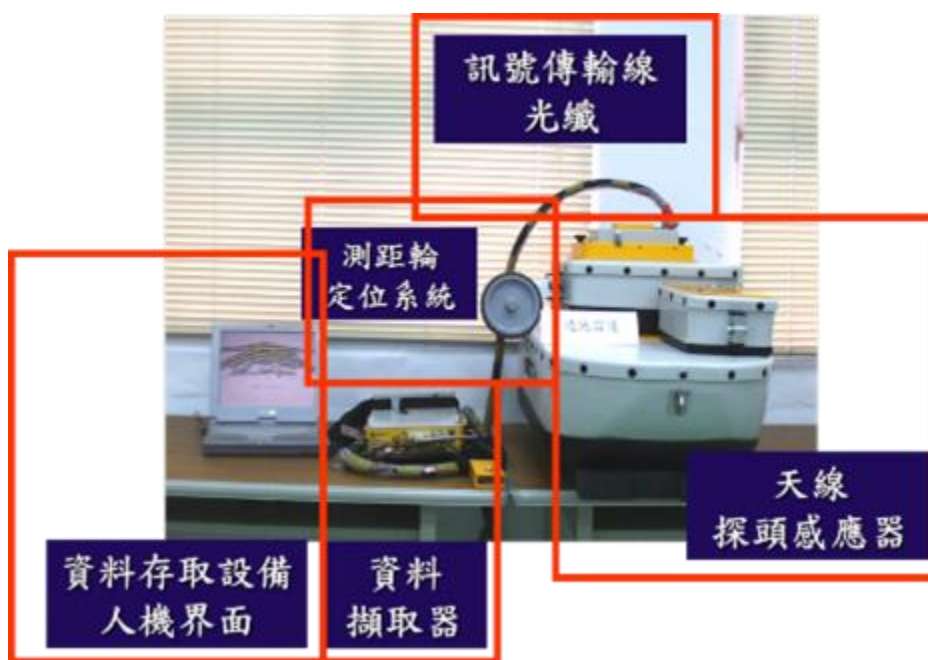


圖 4.7 透地雷達檢測系統組成

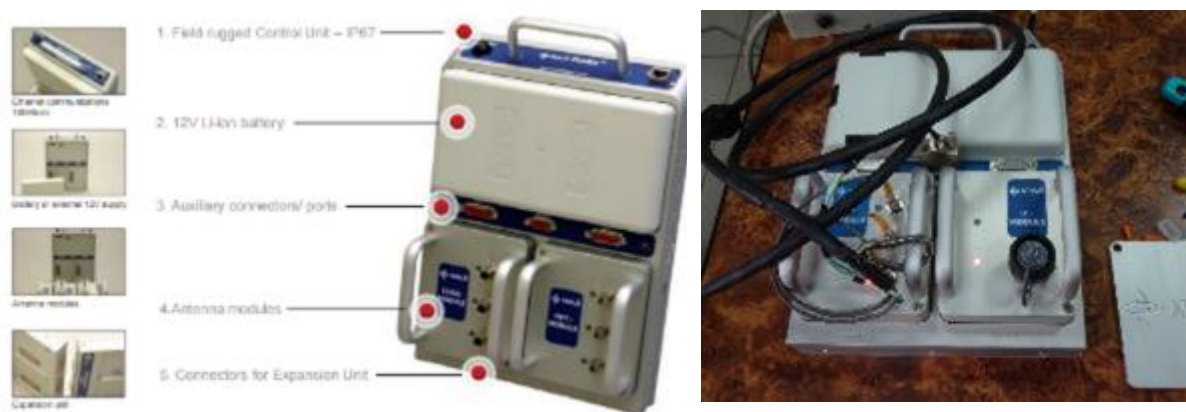


圖 4.8 透地雷達訊號擷取及儀控單元

當檢測現場及受測材料狀況不明時，使用者會依受測區域環境及鑑別程度需求而採(試)用不同中心頻率之雷達天線。故在雷達天線及訊號傳輸兩方面，部分透地雷達硬體設備會提供這方面之換裝彈性。如檢測對象及鑑別程度需求固定，不少系統亦會以單機整合方式，設計便利之機型以方便現場操作。

透地雷達常用之電磁脈波天線多為定向式天線，每種天線所發射之雷達波均有一特定頻寬及中心頻率，如同超音波檢測中不同頻率型式之探頭。天線收發兩端距離亦隨中心頻率不同而異，通常頻率越低之天線，天線收發兩端距離越遠，如為全罩式天線則設備亦越大。低頻如 50MHz 以下者多採用收發兩端等距分離式之設計(見圖 4.9, 4.10)。全罩式天線發波時最高增益之電磁波束區(beam or main lobe) 通常在天線正下方，天線外罩設計可抑低天線在其他方向上之副瓣(side lobe)電磁波溢漏，以及外在干擾對溢漏電磁波造成之未知訊號。

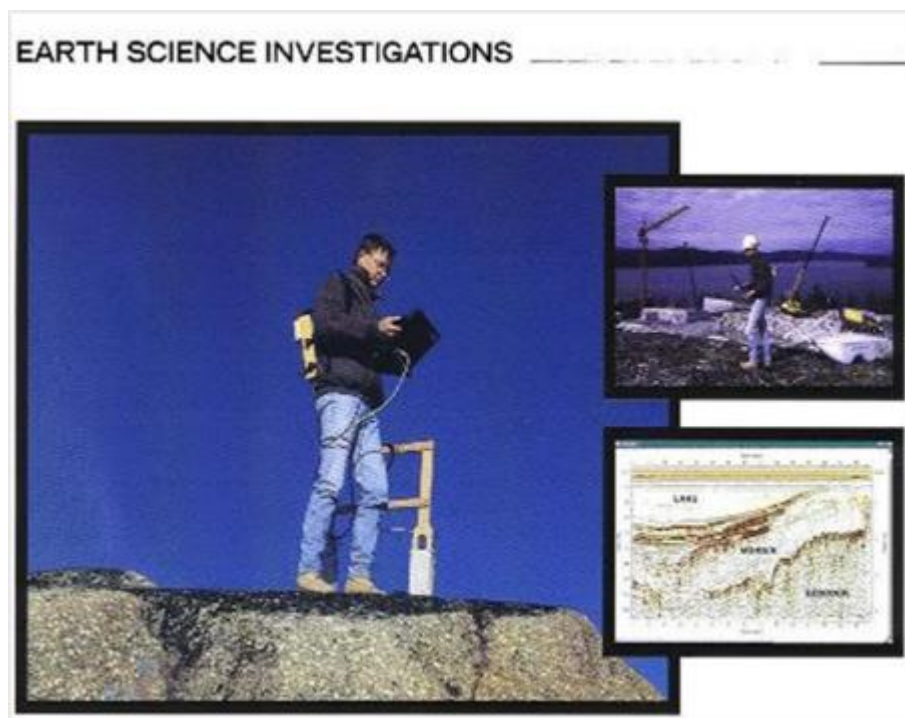


圖 4.9 GPR 無罩式天線及現場淺地質檢測配置(Mala 提供)



圖 4.10 50MHz GPR 拖曳天線及現場檢測(Mala 提供)

在土木工程或淺地層探測中較常使用之天線中心頻率係由 25~2500 MHz，檢測解析度隨頻率增加而漸佳，但如天線輸出功率相近，則探測深度會隨頻率增加而減少。以本文檢測中所採用之雷達天線(瑞典 MALÅ GeoScience)為例，其在台灣現地環境中的檢測深度經驗值建議如下：

1. 100MHz以下非全罩式天線適用於淺層地質及地表植被土層之探測(見圖4.9，4.10)。
2. 100MHz~500MHz之全罩式天線適用探測10m深度內(無導電地質)之淺層地質，在富含地下水區域中，地下水位以下1~2m左右深度為限之上方異質介面或地下物(參考圖4.11，4.12)。
3. 500MHz~800MHz之全罩式天線適用探測深度約1.5~2m內(無導電地質)地下水位以上之地下構工、管線、道路鋪面/級配、RC牆或版構造缺陷等，構工構造或內鋼筋會屏蔽其後(下)方訊號而影響探測(見圖4.13，4.14)。

4. 1GHz之全罩式天線(見圖4.15)適用進行混凝土結構完整性檢測，如樑、柱、牆、版、隧道壁體、岩石壁體等，探測深度約在1m，但結構內鋼筋會屏蔽其後方訊號而影響探測深度。
5. 1.5GHz~2.3GHz之全罩式天線(見圖4.16)適用於結構元件材料之完整性檢測，結構材料可為混凝土、岩石、木材等，探測深度約在0.3~0.5m。材料中裂縫如有含水，其異質介面反應較為明顯。



圖 4.11 100MHz GPR 天線及現場檢測配置



圖 4.12 250MHz GPR 天線及現場檢測配置



圖 4.13 500MHz GPR 天線及現場檢測配置



圖 4.14 800MHz GPR 天線及現場檢測配置



圖 4.15 1GHz GPR 天線及現場檢測配置



圖 4.16 1.6GHz 及 2.3GHz GPR 天線

除上述型式外還有收發端分離式天線(separable antennas)，其在現場檢測應用較少，主要可用於待測物區域地層之電磁波速量測，亦即區域相對介電常數量測。其可用之量測方法有二：CMP 法(common middle point method, 中點法)_[26]及 WARR 法(wide angle reflection and refraction, 廣角反射/折射法)。但由於現場淺層地表常因不同土質、回填、乾濕、地下水等因素而有介電常數差異，在單一測線上這些差異對待測對象之深度評估時常有影響，故在實際應用上因其檢測取點不足而仍有其限制。這個問題恐怕要在近期多頻道系統或多探頭天線發展成熟後或可解決，在進行檢測時對測點上之介電常數差異需能隨時檢出反饋以校正深度評估。

除 MALÅ 設備外，觀察近期(2015 年)可能發展之微脈波檢測，其檢測理論或與透地雷達相似，脈波頻率約在 40GHz 以上，主要用於非金屬類複合材料之缺陷檢測，探測解析度可能是 mm 級。

透地雷達訊號擷取及儀控單元是數位化收錄類比訊號及控制擊發脈波之機構。由於電磁脈波頻率高，訊號擷取能量則攸關收錄訊號品質，而數位化後訊號在筆電上之存取耗時則會影響到檢測進行速度。近年透地雷達檢測發展，不論是單機-天線操作或是多頻道-多天線系統發展，均受

惠於擷取(DAQ)速度及數位存取技術之大幅進步，因而推進至多天線同步檢測、陣列天線檢測(圖 4.17)及車載高速檢測等應用領域(見圖 4.18)。



圖 4.17 3D 陣列式透地雷達天線(Mala 提供)



圖 4.18 3D 陣列式透地雷達系統及載具(Mala 提供)

測距器(輪)是傳統透地雷達測點定位之工具，同時也用於制動脈波發射進行 A-scan 掃描。測距器通常連接在天線載具之滾輪軸端上，在進行 B-scan 檢測時依測點設定分佈距離，例如每 2cm，透過測距器輪轉量控制每推進 2cm 則會發射一組雷達脈波(通常可設定 1 至 128 次入射脈波)，透過疊加處理完成一筆 A-scan 掃描。通常地面磨擦不均會造成滾輪轉量誤差，但透過滾輪維護及檢測前現地校正，測距器誤差宜控制在 2% 以下。測距器亦有連接在鍊繩或馬達軸上以作測點定位，主要用在深孔地質節理探勘(borehole testing)或垂直岩壁完整性偵測(見圖 4.19)，也有用於河床探測^[7]。

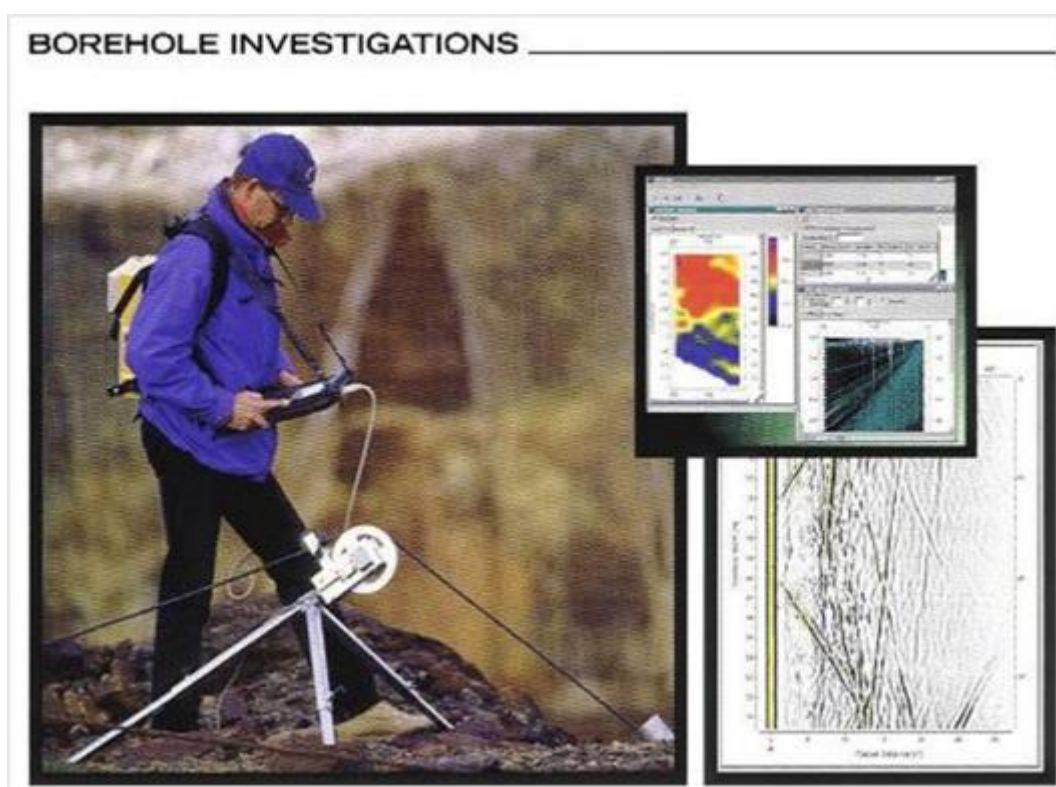


圖 4.19 GPR 探孔天線及現場檢測配置(Mala 提供)

目前直接利用 GPS 控制測點至 cm 級精度尚不能保證不受環境干擾及速度效益，故傳統測距器仍為主要選項。但亦有設備系統透過 GPS 及現場無線定位器合組加快定位效能，主要是應用於大區域檢測時之測線

丈量及定位，或用於無人機載具檢測配置(見圖 4.20)，其與圖資系統之整合，對檢測結果展現當極具效果。



圖 4.20 GPR 天線及無人機載具配置(Mala 提供)

4.5 水晶河 3 號核電廠採用的 GPR 檢測技術應用 [1]

在水晶河 3 號核電廠脫層檢測採用的技術中，透地雷達檢測(參考圖 4.21 及 4.22)主要是應用於確認鋼鍵套管及鋼筋在牆體中的確實位置，此外還有了解鋼筋的分布狀況。



圖 4.21 水晶河 3 號核電廠採用的透地雷達檢測設備



圖 4.22 水晶河 3 號核電廠現場透地雷達檢測

針對脫層部份，透地雷達是不太能檢出裂縫的。但確認鋼鍵套管及鋼筋在牆體中的位置確實必要，除有助於脈衝響應法的檢測判讀外，在進行鑽心取樣的測點選址上，也須避開套管及鋼筋。此外，圍阻體牆體屬於巨積混凝土結構，在當年施工澆置時，為求散熱(水化熱)以免開裂，牆體內埋有多條冷卻水用的金屬管路，澆置完工後管路也多留在牆體內，這多少也對鑽心取樣的施作會有影響，故 GPR 檢測探知亦有必要。

5. 討論與報告結論^[1]

水晶河 3 號一案中採用的檢測技術主要有四：脈衝響應檢測(IR)、透地雷達檢測(GPR)、敲擊回音檢測(IE)，還有破壞性檢測即鑽心取樣分析再加上內視鏡目視檢測(Borosopic Inspection)。由於核電廠相當重視結構完整性，很少採用鑽心取樣類的檢查模式。不過本案在圍阻體牆體上共做了約 84 筆鑽心取樣，在扶壁#3 和#4 間的問題區域就進行約 48 個鑽心取樣。透過內視鏡檢查，可確認裂縫，並評估其寬度(見圖 5.1)。對於裂縫寬度，其他非破壞檢測方式是無法有效測量的。

對國內電廠來看，在除役階段的建物其切除工程或因安全需求(如地震或火災後)暫時性的建物整修補強工程，相關土木非破壞檢測技術，都有其需求。正如 NRC 的看法，對這些因子「尋而未見」比「未尋而見」要好得多。建物切除工程對預力解壓後的混凝土結構是否有把握，是否會造成不預期崩裂，則建議於解壓前進行預力結構體的數值模擬分析，以確認適當的解壓順序或解壓範圍，避免預力結構於解壓後造成局部的應力集中。

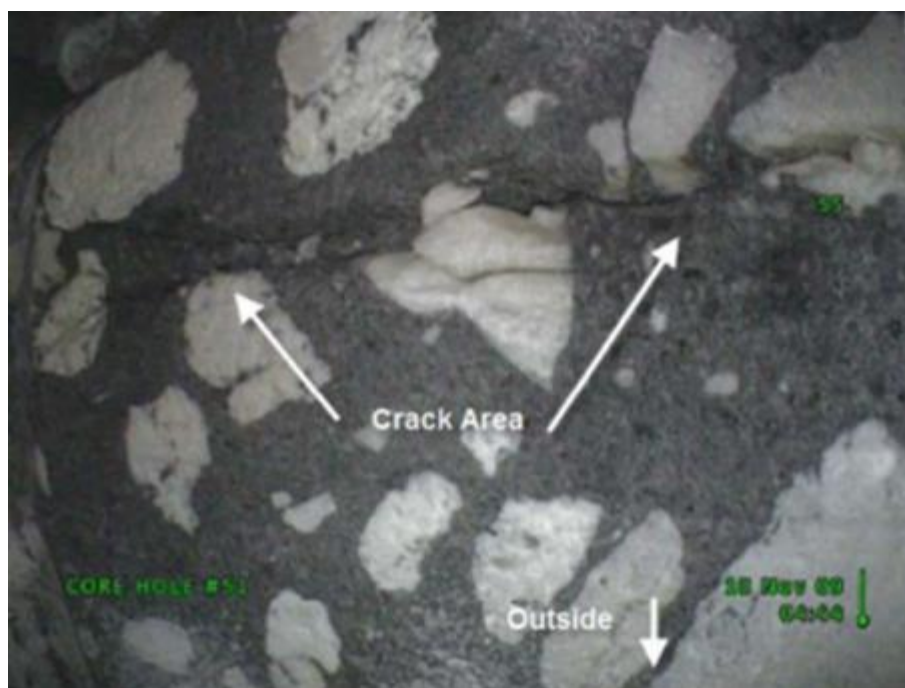


圖 5.1 鑽心取樣，並透過內視鏡檢查確認裂縫

參考文獻

1. “Crystal River #3 Containment Delamination Update,” Progress Energy, Nov. 20, 2009
2. “Crystal River Unit 3 Nuclear Generating Plant,” <https://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/cr3.html>, Jul , 2024.
3. “Breaking Containment at Crystal River 3,” <https://blog.ucsusa.org/dlochbaum/breaking-containment-at-crystal-river-3/>, Aug. 30, 2018
4. Bradley P. Dolphyn, “Laminar Cracking in Post-Tensioned Concrete Nuclear Containment Buildings,” Dissertation, Georgia Institute of Technology, May 2016.
5. 裴廣智，林東威，「土木工程非破壞檢測教育訓練－敲擊回波檢測法（初級）」，2002年2月。
6. ASTM-C1383, "Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.”
7. ASTM-C1740-2010 or C1740-2016, “Standard Practice for Evaluation the Condition of Concrete Plate Using the Impulse-Response Method, ” <https://www.astm.org/c1740-16.html>.
8. 裴廣智，「透地雷達檢測技術應用(1)：原理、訊號分析及檢測規畫」(INER-15934)，核能研究所報告，2021.9.27
9. 裴廣智，「透地雷達檢測技術應用(2)：檢測實例討論」(INER-16055)，核

- 能研究所報告，2021.10.19
10. 裴廣智，「透地雷達檢測技術應用(3)：機場跑/滑行道檢測實例討論」(INER- 16984)，核能研究所報告，2023.3.22
 11. Cheng, David K. “Field and Wave Electromagnetics,” Addison-Wesley, 1989.
 12. Peyton Z. Peebles Jr., “Radar Principles,” John Wiley & Sons Inc., 1998.
 13. 楊潔豪、董倫道，「透地雷達探測技術」，第一屆公共工程非破壞檢測技術研討會，1999年3月。
 14. Chiang, Chine-Chung, “Georadar Investigations in Geotechnical Engineering,” Proceeding of the 5th Far-East Conference on Nondestructive Testing, Kenting, pp.443-450, Nov. 8-11, 1999.
 15. 楊潔豪，「透地雷達法在土木檢測上的應用(I)」，第二屆公共工程非破壞檢測技術研討會，2001年6月。
 16. 倪勝火、陳敬寬、林宏明、施議傑、彭瑞國，「透地雷達在空洞檢測之應用(I)」，第二屆公共工程非破壞檢測技術研討會，2001年6月。
 17. 陳彥彰，葉惠中等，「以地雷達量測河川斷面」，農業工程學報第58卷第2期，2012年6月。
 18. 裴廣智，「透地雷達檢測技術在地下物偵測上之應用」，2001大地工程非破壞檢測研討會，台中霧峰朝陽科技大學，2001年5月18日。
 19. 裴廣智，「透地雷達檢測技術在土木工程上之應用及實例」，非破壞性檢測之新技術及應用研討會，台灣營建研究院，高雄，2001年7月11日。

20. 裴廣智、趙今荃等，「中正機場 EC 跑滑道透地雷達檢測檢測結果初步分析報告(上、下冊)」，核能研究所報告，INER-A0183，2002。
21. 裴廣智，「中正機場跑滑道鋪面基礎狀況透地雷達檢測」(“Using 3-Dimensional GPR Image Inspection for Evaluating Road Structure of Taxiway in C.K.S. Airport”)，核能研究所 91 年報，2002 年 12 月。
22. 裴廣智，林東威，「透地雷達檢測技術在公共工程上之應用及實例」，92 年度核能學會暨學術研討會，2003 年 12 月。
23. 裴廣智、胡榮豐、林東威，「三維透地雷達檢測技術在公共工程上之應用及實例」中華民國第八屆破壞科學研討會，2004。
24. 裴廣智、徐鴻發、林東威，「透地雷達檢測斷層影像處理技術之工程應用及實例」中華民國第十二屆非破壞檢測技術研討會，2004。
25. 裴廣智、鄭家齊、林東威、干裕成、胡弘昌，「乾點式低頻超音波與高頻透地雷達在混凝土 C-scan 檢測之應用及比對實例」，第十三屆非破壞檢測技術研討會，桃園大溪，2006 年 4 月。
26. Kuang-Chih Pei, Chia-Chi Cheng, Tong-Wei Lin, “On Evaluating The RC Plate Containing Epoxy- Repaired Delaminating Using C-Scans of DPC UT And High-Frequency GPR,” 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC10 東亞結構工程研討會論文), pp609-614 Aug. 3~5, Bangkok, Thailand, 2006.
27. 裴廣智、鄭家齊，「透地雷達檢測在機場跑道測厚輔助及完整性評估之應用」，第十四屆非破壞檢測研討會(南投日月潭)，2008。

28. 裴廣智，「透地雷達檢測技術在土木工程應用及實例」，第八屆(2013)公共工程非破壞檢測技術研討會論文集，台南，2013年11月7~8日。
29. MALA GeoScience Co., “RAAMAC/GPR Software Manual,” V2.28, 1997.
30. MALA GeoScience Co., “Easy 3D User Manual”, 2002.
31. MALA, “GroundVision Software Operating Manual v. 2.1”
32. MALA GeoScience 介紹, <http://www.allstartech.com.tw/>, Jul, 2024.
33. 陳炳煌，「透地雷達電磁波物理參數與腐蝕鋼筋行為之研究」，博士論文，(指導教授 李錫霖，張奇偉)，中華大學，2009年7月。
34. Maxwell's equations, https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations, Jul, 2024.
35. 透地雷達相關理論介紹, <https://rportal.lib.ntnu.edu.tw/bitstream/20.500.12235/101123/2/401602.pdf>, Jul, 2024.
36. Ground Penetrating Radar, <https://gpg.geosci.xyz/content/GPR/index.html>, Jul, 2024.
37. Motoyuki Sato, “Fundamentals of GPR Data Interpretation,” Tohoku University, Jan, 2001.
38. Boxcar function, https://en.wikipedia.org/wiki/Boxcar_function, Jul, 2024.
39. FIR Filter Design by Windowing: Concepts and the Rectangular Window, <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/finite-impulse-response-filter-design-by-windowing-part-i-concepts-and-rect/>, Jul, 2024.

40.GPR-SLICE brochure, GPR Imaging software, www.GPR-SURVEY.com, Jul ,
2024.

附件六

The latest international development of non-destructive testing technology used in the detection of aging and deterioration of nuclear power plant buildings

by

Hung-Chang Hu and Kuang-Chih Pei

Abstract

This article is mainly obtained from the on-site information collection and compilation of Dr. Kuang-Chih Pei's participation in 2024 World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT). It can be used to understand the latest non-destructive testing technology used in nuclear power plant buildings for aging and degradation detection. This report will introduce: the background and important indicators of WCNDT, main academic development areas in 2024, future development trends, health inspection of aging buildings, monitoring technology, etc., explained in chapters. In addition, a visit to the WCNDT equipment exhibition venue was also conducted to analyze and explain new equipment trends. In this article and appendix, Subsection IWL in ASME B&PV Code Section XI and the "Engineering Structural Monitoring Walkdowns " in Maintenance Rule of Wolf Creek Power Plant (American) were referred to illustrate the evaluations, regulations and standards in the past 30 years for examining structural degradation. They could demonstrate the possible timing and scope to use the introduced technologies.

Keywords: WCNDT, nuclear power plant building, aging and degradation inspection.

National Atomic Research Institute

國際間應用於核電廠建物老劣化檢測之最新非破壞檢測技術發展

胡弘昌 裴廣智

摘 要

本文主要取材自裴廣智博士參加 2024 世界非破壞檢測大會(20th World Conference on Non-Destructive Testing, 簡稱 WCNDT)的現場蒐集資料整理, 可藉以了解國際間應用於核電廠建物老劣化檢測之最新非破壞檢測技術。文中將介紹: WCNDT 的背景和重要指標、2024 主要學術發展領域、未來發展趨勢、建物老劣化健康檢查及監測技術等, 並分章節說明。此外亦就 WCNDT 設備展場之參觀訪問, 對新的設備趨勢提出分析說明。除了介紹新的檢測方式, 對近三十年核設施土木建物常用的劣化評估方式、法規和參考標準, 文中及附錄亦以 ASME B&PV Code Section XI 中之 Subsection IWL 及美國 Wolf Creek 電廠維護法規之「結構監測巡視」做為案例, 以說明所介紹的檢查及監測相關技術之可能應用時機及範圍。

關鍵字: 世界非破壞檢測大會、核電廠建物、老劣化健康監測及檢測。

國家原子能科技研究院

目錄

1. 前言-WCNDT 的背景和重要指標.....	1
2. 2024 主要學術發展領域.....	4
2.1 總論	4
2.2 超音波檢測	6
2.3 人工智慧和 NDE 4.0.....	9
2.4 渦電流檢測	10
2.5 新興領域-太赫波檢測 ^[13]	12
2.6 觀察	14
3. 由參展設備型態來看未來發展趨勢.....	15
3.1 陣列探頭與成像運算	15
3.2 空氣耦合探頭之應用	16
3.3 即時線上點銲分析與銲道自動檢測系統.....	18
3.4 檢測方案及顧問服務	20
3.5 觀察	20
4. 電廠建物老劣化檢查及監測可參考之法規與經驗.....	21
4.1 Section XI 之 IWL 沿革及相關案例	21
4.2 美國 Wolf Creek 電廠維護法規之「結構監測巡視」相關案例	25
4.3 建物老劣化健康檢查及監測技術之可能應用範圍.....	28
5. WCNDT 展示之建物老劣化健康檢查及監測技術介紹	29
5.1 發展方向	29
5.2 應力波檢測之相關最新設備	29
5.3 透地雷達檢測之之相關最新設備	39

6. 結論、討論與對國內電廠運轉及除役監管之建議.....	44
參考文獻.....	46
附錄 1.....	49
附錄 2.....	52

附圖目錄

圖 1-1_松島國際會展中心及展場狀況	2
圖 1-2_WCNDT 之展場平面圖 ^[1]	3
圖 2-1_本屆發表論文/專題共約 950 篇，分類可得表列 20 項。	5
圖 2-2_超音波檢測專題論文約 242 篇，細項分類如表。	7
圖 2-3_人工智慧(AI)和 NDE 4.0 領域論文約 101 篇，分類如表。	10
圖 2-4_渦電流檢測和電磁感應檢測領域論著約 68 篇，分類如表。	11
圖 3-1_陣列探頭用壓電晶片，壓電晶片上的切割槽用以分隔獨立起振及收訊單元。	15
圖 3-2_應用陣列探頭偵測內部雕刻壓克力試塊，透過計算成像後之表現。	16
圖 3-3_空氣耦合探頭透過機器手臂進行穩定檢測	17
圖 3-4_分析系統及埋有超音波探頭之鋸頭	18
圖 3-5_鋸道自動檢測系統	19
圖 3-5_SPD 系統發現應力異常區域.....	19
圖 5.1_DPC 探頭構造及收發原理示意圖	31
圖 5.2_採用 DPC 技術之波速量測儀 UK1401	31
圖 5-3_DPC 探頭產生音場之方向特性圖.....	32
圖 5-4_新式表面縱波波速量測儀 UK1401 及操作	33
圖 5-5_各式陣列探頭和低頻探頭	34
圖 5-6_4×8 陣列探頭	34
圖 5-7_4×12 陣列探頭	35
圖 5-8_透過無線傳輸可將 2D 或 3D 資訊傳入筆電彙整	35

圖 5-9_將 2D 或 3D 資訊傳入筆電彙整成斷層圖面	36
圖 5-10_敲擊回波檢測用速度規探頭，主要適用於程序 B。	38
圖 5-11_超音波檢測設備，透過三種模式，檢查混凝土內部品質。	38
圖 5-12_Proceq 混凝土結構檢測適用之天線種類	40
圖 5-13_Proceq 會場展示之高頻天線	40
圖 5-14_Proceq 會場展示之高頻天線(2).....	41
圖 5-15_Proceq 會場展示之低頻陣列天線	42
圖 5.16_Proceq 低頻陣列變頻天線，有 35~50 頻道，500~3000MHz。	42
圖 5.17_Proceq 低頻陣列變頻天線圖之天線功能及設備條件	43

1. 前言 - WCNDT 的背景和重要指標

世界非破壞檢測大會(World Conference on Non-Destructive Testing)簡稱 WCNDT，是由國際非破壞檢測委員會(The International Committee for Non-Destructive Testing， ICNDT)主辦的一項國際性學術會議，其目的在促進非破壞檢測技術的科學發展和實際應用。WCNDT 每四年舉辦一次，已經有近 70 年的歷史，是非破壞檢測領域中最重要且最具影響力的會議之一。第 20 屆 WCNDT 於 2024 年 5 月 27 日至 31 日在韓國仁川的松島國際會展中心(Songdo Convensia)舉行，由韓國非破壞檢測學會(KSNT)承辦^[1]。

松島國際會展中心(Songdo Convensia)地上三層，展場無柱設施，面積 17,021 平方米，建築面積 117,163 平方米。四個展廳可容納多達 900 個展位和 20,000 人，會議設施則擁有 35 間會議室。第 20 屆 WCNDT 使用到會展中心的所有會議室，包括 Premier Ballroom 和 Grand Ballroom。展廳(1+2+3)總面積 12581 平方米，容納 352 個展位。同時，海報會議、午餐會和展示會也均設在展場內(參考圖 1-1 及 1-2)。

由於非破壞檢測是生產線的發展指標，由於產品或建製物的品質控管均有賴檢測(察)來做實質掌控。每四年一次的 WCNDT，每次展示和研究成果正可反映產業界的發展近程。例如 17th WCNDT(2008 上海)，展現中國在產業發展的企圖心。19th WCNDT(2016 慕尼黑)，則宣告高速自動化檢測之發展和人工智慧的前身-輔助判讀的發展，而 NDT 4.0 之概念也由此展現(強調資訊透明度、技術支援以及自主/分散的判讀決策)。由於 COVID 的關係，20th WCNDT(原定 2020 仁川)延至 2024。本屆大會的主題是「非破壞檢測技術：創新、挑戰和未來」，將圍繞非破壞檢測技術在航空航太、能源、交通、

建築、醫療等領域的應用展開討論，同時也將探討非破壞檢測技術與人工智慧、物聯網、大數據等新興技術的結合和發展，反映產業近程內容中正大幅加入人工智慧 AI 成分於非破壞檢測技術。同時也看到非破壞檢測的設備廠商也有明顯的板塊轉移。

本次會展參展廠商約 240 家，論文及專題約 950 篇報告，共進行 149 場次。本文第二章將由論文及專題之篇數及分類一窺目前主要學術發展領域及消長，第三章將由參展設備型態來看未來發展趨勢，第四章則介紹建物老劣化健康檢查及監測技術，及其在核電廠建物檢查上的可能應用。第五章將做綜合討論，第六章則對國內電廠業者及管制機構之方案建議。

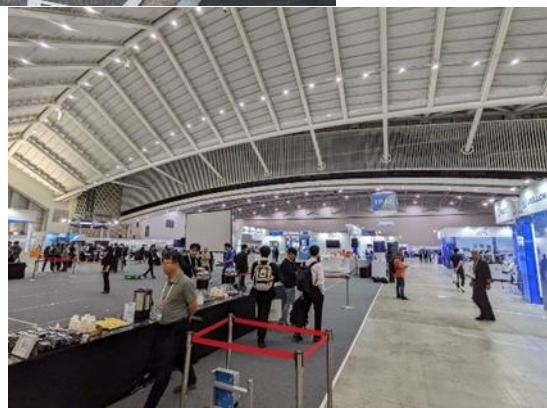
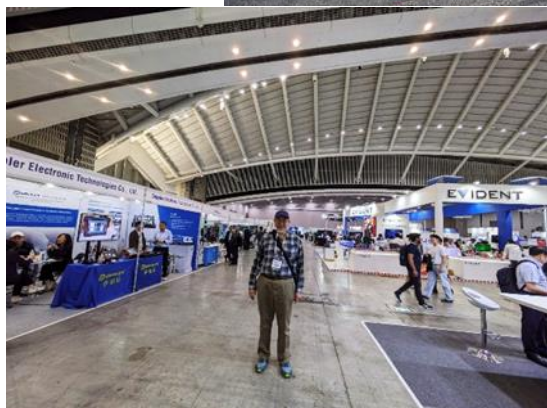


圖 1-1_松島國際會展中心及展場狀況

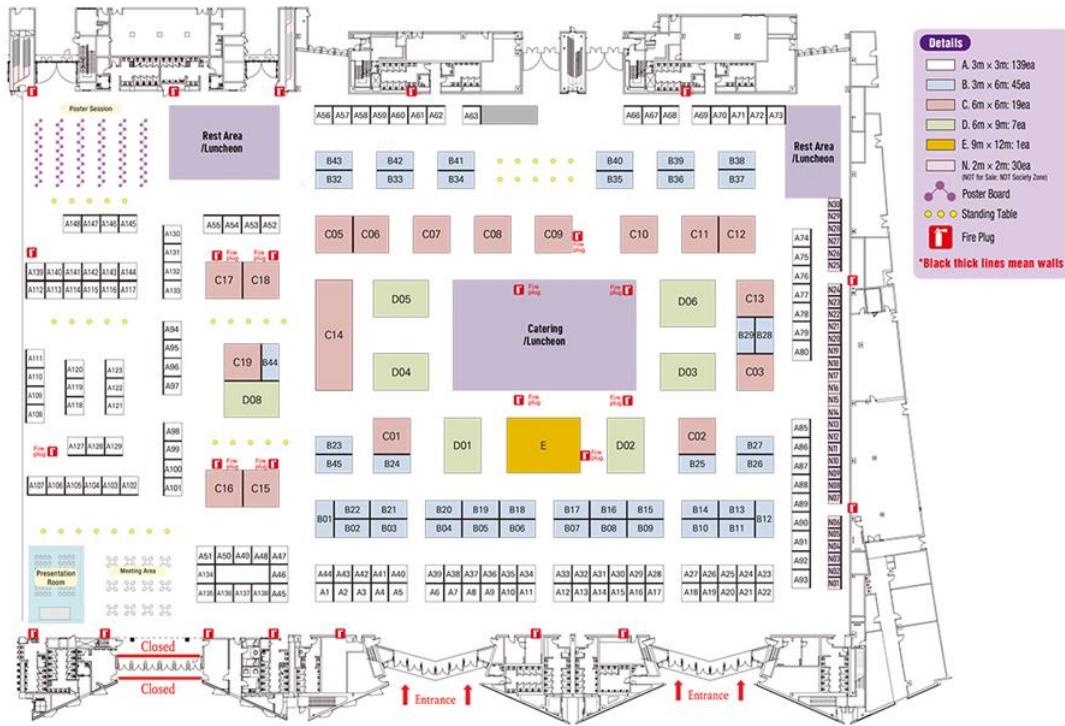


圖 1-2_WCNDT 之展場平面圖 [1]

2. 2024 主要學術發展領域

2.1 總論

本屆發表之論文及專題約 950 篇，共進行 149 場次。如特別加以分類，可表列 20 項如下(以篇數多寡排序，見圖 2-1)：

1. 超音波檢測(Ultrasonic)
2. 人工智慧(AI)和 NDE 4.0
3. 渦電流檢測(Eddy Current)和電磁感應檢測(Electromagnetics)
4. 結構健康監測及預後健康管理(Structural Health Monitoring (SHM) & Prognostics Health Management(PHM))
5. 數位射線照相及電腦斷層攝影 (Digital Radiography(DR) & Computed Tomography(CT))
6. NDT 可靠度(Reliability)及能力驗證(performance demonstration(PD))
7. 材料特性(Material Characterization)
8. 音射檢測法(Acoustic Method)
9. 交通設備及設施(Transportation)
10. 土木基礎設施(Civil Infrastructures)
11. 紅外線熱影像(InfraRed Thermography)
12. 航太及國防(Aerospace & Defense)
13. 發電設施及油氣設施(Power Plants & Oil & Gas)
14. 積層製造/3D 列印(Additive Manufacturing)
15. 光學及目視系統 Optics & Vision Systems
16. 太赫波檢測 (Terahertz)
17. 藝術及文化遺產(Art & Cultural Heritage)

18. 振動及狀況監測(Vibration & Condition Monitoring)
19. 一般與先進項目(General & Advanced)
20. 建模與演算法(Modeling and Algorithm)。

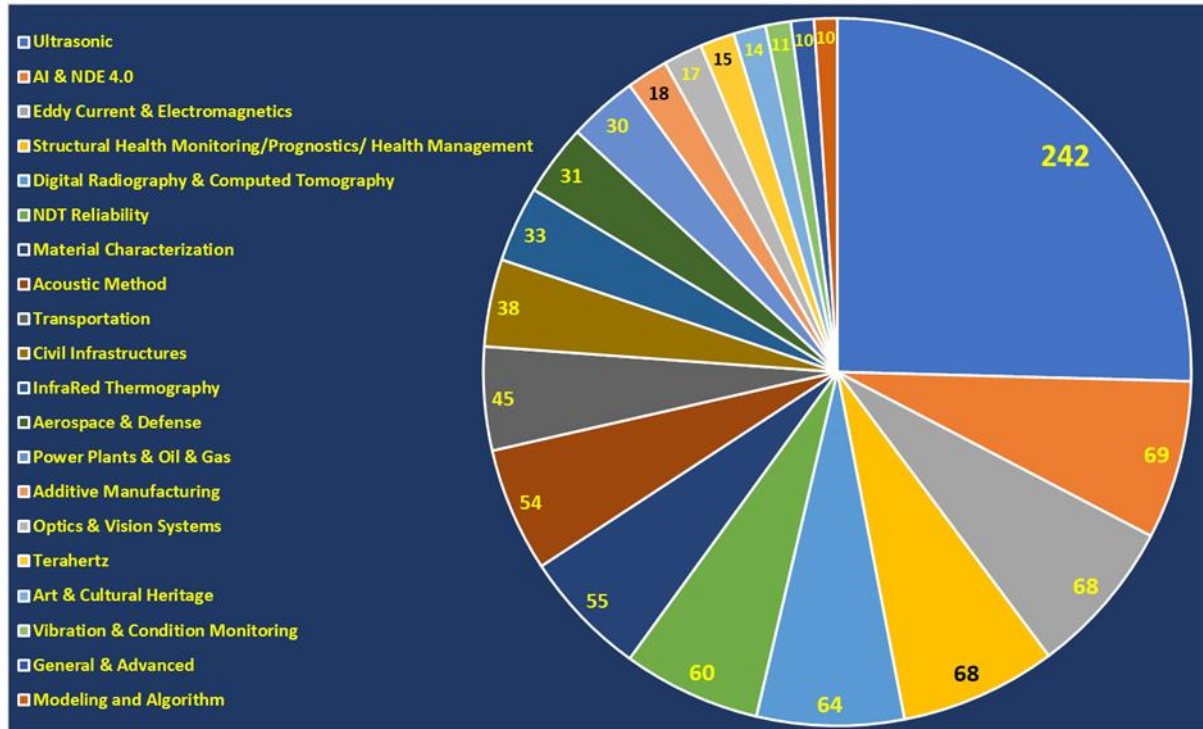


圖 2-1_本屆發表論文/專題共約 950 篇，分類可得表列 20 項。

在 20 個項目中，以超音波檢測、渦電流檢測、射線照相檢測及音射檢測為當下主要技術研究領域。這也是傳統應力波、電磁及射線(光學)三種物理量之應用研究。在 NDT 技術整合方面，人工智慧(AI)/NDE 4.0 及結構健康監測/預後健康管理這兩項是近期發展顯學。相較在上屆慕尼黑大會上，只有 NDE 4.0 及結構健康監測這兩個名詞有出現過。在應用發展上，除交通、土木、電力設施/油氣設施等傳統領域外，航太及國防也從過去密而不宣的研究領域轉而放諸發表。

在新興領域方面，太赫波檢測(或太赫茲(成像)非破壞檢測 Terahertz nondestructive evaluation) 係為一種應用太赫波頻域電磁輻射進行檢測、分

析及評估之技術，可用以評估材料、元件或系統的性質^[2,3]，特別是在絕緣材料和複合材料的分析及品質控制^[2,4]上。後有專節說明。

本院發表的兩篇論著中，“To Evaluate the Degradation of Heat Damaged Cement Mortar Specimens after Curing Using Non-Linear Ultrasound Technique”^[5]是屬於超音波檢測領域中的非線性超音波(UT Nonlinear)。而“To Monitor Fracture Behaviors in Four-Point Cyclic Bending Tests of Low-Activated High Alumina Concrete and Standard Concrete RC Beams Using Acoustic Emission Technique”^[6]則是屬於音射檢測法(Acoustic Method)。

2.2 超音波檢測

在所有論著分項中，超音波檢測(Ultrasonic)領域約占四分之一篇數，可顯示超音波仍是目前檢測研究之主流方法。在超音波檢測中，根據不同的應用和方法又可細分如下(以篇數多寡排序，見圖 2-2)：

- A. 陣列超音波檢測(UT-PA)
- B. 導波檢測 (UT-GW)
- C. 一般超音波檢測 (General UT)
- D. 超音波建模分析(UT Modeling)
- E. 雷射超音波檢測(Laser UT)
- F. 超音波檢測之人工智慧應用(AI Ultrasonic)
- G. 非線性超音波(UT Nonlinear)
- H. 非接觸式超音波(UT Non-Contact)
- I. 結構健康之超音波監測(SHM Ultrasonic)
- J. 醫療及生計用非破壞性超音波技術 (Nondestructive Ultrasound Techniques in Medicine and Biology)
- K. 能源工業用超音波檢測 (UT Energy)

L. 焊接用超音波檢測 (UT Welding)

M. 航空及自動化超音波檢測 (UT Aviation & Automation)

N. 其他綜合

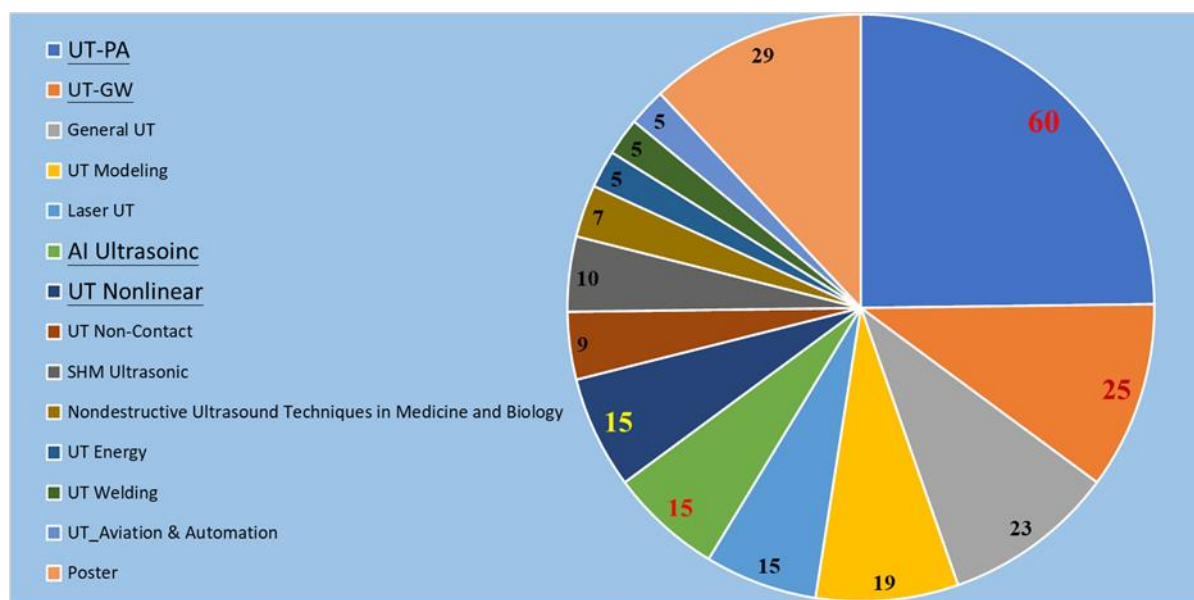


圖 2-2_超音波檢測專題論文約 242 篇，細項分類如表。

在上述細部分項中，陣列超音波檢測(UT-PA)又約占四分之一，顯示陣列超音波檢測是目前應用研發之重要方向。在過去十年，陣列超音波不論在設備價格及檢測人員能力方面，皆有長足進步，陣列探頭的產製亦非再由歐美大廠獨佔。陣列超音波檢測產生之二維或三維成像表現，也對未來 AI 自動化/生成式判讀發展更具可應用條件。

分項第二名是導波檢測，其主要應用優勢是在管線或軌道之遠距或大面積檢測。過去笨重的環繞式陣列探頭相當不便(參考裴廣智之 INER-13256「地下管線完整性維護方案研析(一) 國內外現況及背景資料」[7]，及 INER-13792「地下管線完整性維護方案研析(二) 導波檢測技術介紹」[8])，新式設備在功率效能及方便性上，已與十年前表現不同，也可進行長期監測作業。

本屆研討會中，在非接觸式超音波(UT Non-Contact，包括氣耦式探頭 air-coupled ultrasonic testing)及雷射超音波檢測(Laser UT)方面，新型設備輕量化發展迅速。非接觸式檢測主要適用於有接觸障礙之檢測標的，其探頭頻率相對較低，而其先天問題是在克服環境雜訊及檢測配置障礙上，故在訊雜比提升上，是關注焦點。在發展新領域部分，超音波檢測之人工智慧應用(AI Ultrasonic)、非線性超音波(UT Nonlinear)、航空及自動化超音波檢測 (UT Aviation & Automation)，三者發展值得關注。

本院在非線性超音波(UT Nonlinear)領域之發表論著中[5]，發展該技術來鑑別具明顯非線性特徵之熱損水泥砂漿試件，期能拓展非線性超音波技術(NLU)在孔隙材料上定量鑑別非線性特徵之能力。實驗採用波特蘭 I 型水泥(NC)，並以三種水灰比砂漿澆製抗壓試體及磚型 NLU 試件。將試件分組並在六種不同溫度下(30~800°C)加熱處理 24 小時以產生不同程度熱損，之後再進行水中養護 28 日。完成養護後進行力學試驗以求其應力-應變關係及破壞強度等機械特性。NLU 檢測則用磚型試件進行，實驗採用 250kHz 發送超音波音頻脈衝波群導入試件，並由隔試件對接之 500kHz 接收探頭收錄分析，RITEC 系統經接收後進行諧波測量。分析可得頻譜中基頻、二倍頻及三倍頻諧波之振幅 A_1 、 A_2 及 A_3 。由實驗系統非線性因素所引起之背景諧波振幅 A_{01} 、 A_{02} 及 A_{03} ，可由配合之對接檢測頻譜分析得出。經推算差異可得出試件非線性參數(如 β 和 γ)之趨勢值。文中亦應用由上述振幅值推導之參數座標來量化表現材料之非線性程度。初步結果顯示 NLU 技術對多孔隙類型材料之微觀結構損害或劣化方面，可進行鑑別度較佳之定量檢測。

2.3 人工智慧和 NDE 4.0

人工智慧(AI)和 NDE 4.0 領域是以 69 篇論著發表居次，但如將分派在各領域發表的論著歸納計入，則躍升為 101 篇。這是在過去八年內從無到有、迅速竄升的領域，其也影響了檢測設備之發展版圖。(以篇數多寡排序，見圖 2-3)

在人工智慧和 NDE 4.0 領域之細部分項中，不論在不同檢測方法或是應用對象上，幾乎是全面性的均勻發展。根據不同應用及方法又可細分如下：

- A. 人工智慧、動態、機動電腦斷層檢查(AI, 4D & Robot CT)
- B. 人工智慧、動態、機動電腦斷層檢查之建模及演算法(AI, 4D & Robot CT/Modeling and Algorithm)
- C. 自動化檢測(Automated Inspection)
- D. 人工智慧強化技術(AI Enhancing Techniques)
- E. 人工智慧在製造業/自動化之應用(AI_Manufacturing & Automation)
- F. 人工智慧狀況監測(Condition AI Monitoring)
- G. 人工智慧電廠(Power Plants AI)
- H. 人工智慧在 X-ray 及商用化之應用(AI X-ray & Commercialization)
- I. 目視檢測之人工智慧應用(Optical NDT with AI)
- J. NDE 4.0-Past, Present, and Future
- K. 超音波檢測之人工智慧應用(AI Ultrasonic)
- L. 渦電流檢測自動化之人工智慧應用(AI Eddy Current & Automation)
- M. 結構健康監測之人工智慧應用(SHM/NDT on AI)
- N. 預後健康管理之人工智慧應用(PHM with Ad. AI)
- O. 其他(Poster)

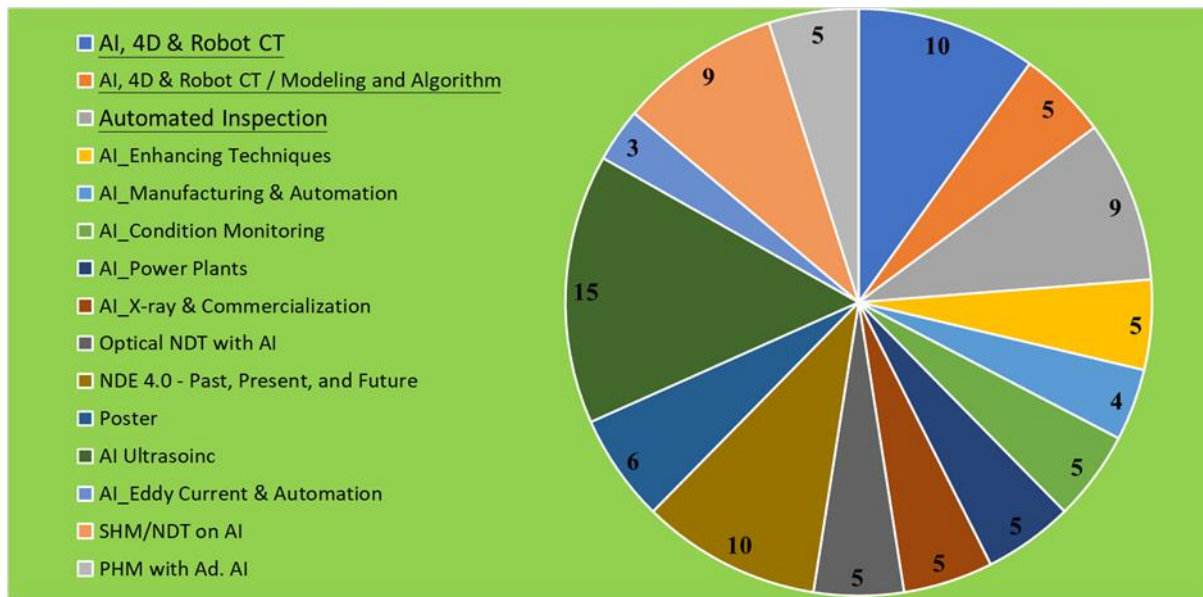


圖 2-3_人工智慧(AI)和 NDE 4.0 領域論文約 101 篇，分類如表。

在人工智慧和 NDE 4.0 的發展中，用於訓練 AI 的資料庫及處理大量資料的處理器是發展重點。在資料庫方面，筆者根據相關計畫經驗^[9,10,11]認為：採用適當去標籤化、正確完成專家判讀結果、代表性及數量足夠的「優質」NDE 數據是建立(訓練)AI 模型的重要因子，其攸關 AI 模型「落地」(實際)應用及使用者的信心程度。但因為專業數據資料需經年累月方能形成，而所謂「優質」NDE 數據又需要在完整的品保及品管系統要求下方能建置保存，而發展機器學習(ML)常面臨的障礙也就是缺乏合適的數據資料。

2.4 渦電流檢測

渦電流檢測(Eddy Current, ET)和電磁感應檢測(Electromagnetics)是位列論文數量第三的重點檢測方法。在細部分項中，根據不同應用及方法又可細分如下(見圖 2-4)：

- A. 進階渦電流檢測應用(Advanced ECT Applications)
- B. 特別應用(Special Application of ET)
- C. 渦電流建模分析(ECT Modeling)

- D. 渦電流檢測在航太領域之應用(ECT for Aerospace Applications)
- E. 脈衝渦電流檢測 (Pulsed Eddy Current Inspection)
- F. 強化渦電流檢測技術(Enhancing Eddy Current Techniques)
- G. 特別研究(Specific ECT Research)
- H. 渦電流陣列檢測(Eddy Current Array Testing)
- I. 渦電流檢測之耦合與分離(Coupling and Lift-off on ECT)
- J. 人工智慧及自動化渦電流檢測(AI Eddy Current & Automation)
- K. 電磁感應檢測(Electromagnetic NDT)
- L. 電磁感應檢測研究(Researches of Electromagnetics)
- M. 其他(Poster)

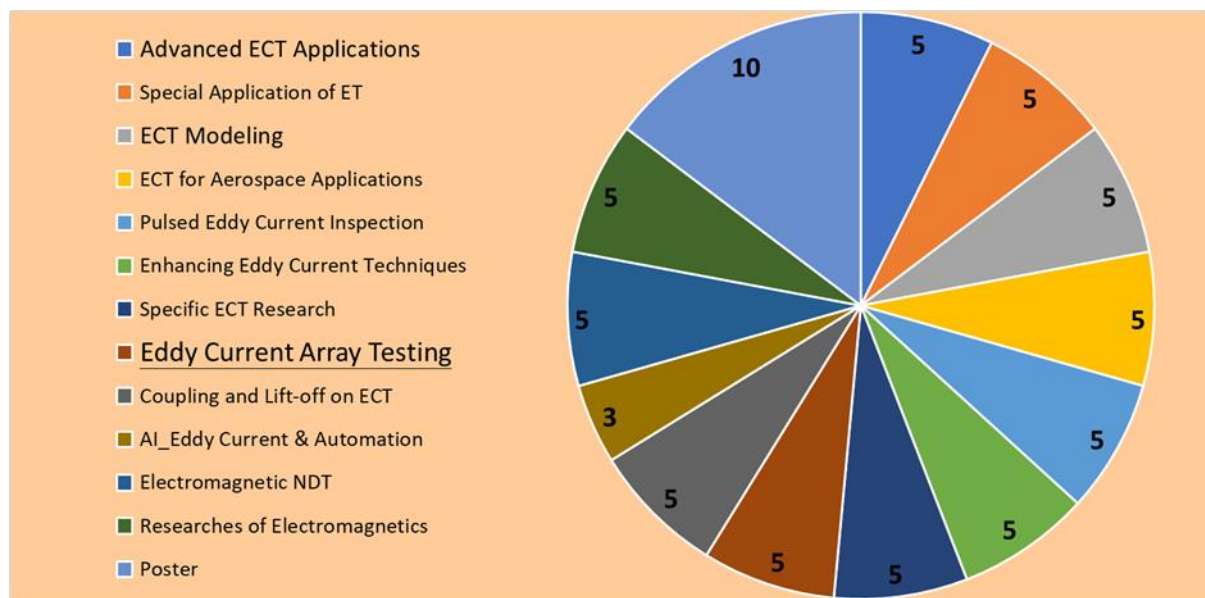


圖 2-4_ 渦電流檢測和電磁感應檢測領域論著約 68 篇，分類如表。

渦電流檢測是目前一種廣泛應用且易於解釋缺陷的技術，亦可用於厚度以及導電率之測量。ET 作為工業應用的非破壞檢測技術主要來自二戰期間的德國，Friedrich Förster 將渦電流技術應用於工業用途，主要用於測量導電率和分類鐵合金成份之設備^[12]。透過測量線圈中之阻抗變化來量化對象

之導電率、導磁率以及缺陷。渦流檢測的兩個主要應用是表面檢查和管道檢查。表面檢測廣泛用於航空航天工業，也用於石化工業。該技術非常靈敏，即便是非常密合的裂縫也可以被檢出，而表面渦電流檢測可以在鐵磁性和非鐵磁性材料上進行。

常規渦電流管道檢查通常限於非鐵磁性材料^[12]，常用於檢查核能電廠蒸氣產生管路或是發電廠和石油工業的熱交換管線。管壁的坑洞損害或腐蝕可被檢出，但是不宜測量缺陷尺寸。飽和渦電流檢測的探頭包含渦電流線圈以及磁鐵，其透過外加磁場至磁飽和來抑制磁導率的變化。這種檢測適用於部份鐵磁性材料，諸如鎳合金、二相合金和肥粒鐵鉻鉬不鏽鋼之類的亞鐵磁性材料。飽和渦電流技術之應用取決於材料的滲透性、管厚度和直徑。遠場渦電流檢測是對於碳鋼管的一種方法，這種方法對於壁面的損失很敏感，但是對於小坑洞和裂縫則不靈敏。傳統渦電流檢測係使用固定頻率之正弦交流電流來驅動探頭，而脈衝渦電流檢測則使用階躍函數的電壓來驅動探頭。使用階躍函數電壓之優點是一個脈衝就包含了一定頻域，因此只要一個脈衝就可以測量電磁響應。由於渦電流的滲入深度取決於勵磁頻率，因此一次就能透過時間函數查看訊號強度以獲得一組滲入深度之資訊，並能顯示靠近線圈距離更遠之缺陷或其他特徵。

渦電流陣列和傳統的渦電流檢測工作原理基本上相同。渦電流陣列技術提供了以電子方式驅動多個線圈之陣列，以拓撲結構的特殊排列方式能夠產生吻合於目標缺陷的分佈圖。

2.5 新興領域-太赫波檢測^[13]

在新興領域方面，太赫波檢測或太赫茲(成像)非破壞檢測 (Terahertz nondestructive evaluation) 係為一種應用太赫波頻域(0.1T~10THz)電磁輻射

所進行之檢測、分析及評估的技術，可用以評估材料、元件或系統之性質和異常，特別是在絕緣材料分析和品質控制上。在製藥、生物醫學、安全、半導體製程、材料科學及航空/太空等行業中多有應用。太赫波檢測可進行多層結構體的檢查，並能識別異物、夾雜物、粘脫分層、機械衝擊破壞、熱損傷異常和水或液壓流體的侵入。實際應用上其可有效檢查塗料與被覆處之分層、偵測陶磁與複合材料的缺陷、半導體晶片封裝後之內部斷線檢查、3D晶片封裝是否完好、藥物膠囊成品內部有無破損，以及斷層掃描畫作與手稿的物理結構等。

不同波段的電磁波和特定物質都會有特殊之交互作用，例如說可見光就會和人眼之柱狀/錐狀細胞有互動，因而可感知可見光波段。太赫茲波段對應之電磁波波長為 $3\text{mm}\sim 30\mu\text{m}$ ，約介於微波和可見光之間，因此也稱為毫米波或次毫米波。據此波長，太赫波有三個物理性特點：可辨識化學分子、表層透視和不會對生物體造成破壞。太赫波幅可辨識特定鏈長之化學分子，故可應用在藥品分析、毒品或蛋白質等種類之分子鑑別上。此外，太赫波可穿透表層到達淺層內部，故可應用於安檢，可檢出固體，液體和氣體差異。太赫波有別於 X 光之高能量，易把分子中的電子擊出而游離，因而會引發生物成分中分子不穩定或不正常的化學反應。反之，太赫波的光子能量很小，故無法破壞生物分子，故對生物體相對較安全。

太赫波的應用發展可能是未來一重要項目。在本次研討會中，有進一步發展之趨勢。

2.6 觀察

由本屆發表之論文及專題來分析，下列幾個議題是所有檢測技術的共同發展方向：

1. 陣列化(Array)
2. 非接觸式(Air-Coupled/Laser UT)或遠距檢測(GW)
3. 快速資料處理及成像運算
4. AI 應用及自動化
5. 非線性材料、複合材料及航太/國防工業材料方面
6. SHM & PHM 的應用

其對應的相關學研科目約是：

1. 拓撲結構(Topology)
2. 噪音分析/分類及導波理論
3. 資料處理及成像理論
4. AI 理論、程式及軟硬體
5. 材料非線性理論、複合材料理論、應力波非線性表現
6. 材料及機構劣化管理

這些議題預估將反映在未來各領域產業上。

3. 由參展設備型態來看未來發展趨勢

3.1 陣列探頭與成像運算

陣列探頭之設計與製造原本是歐美設備大廠的不傳之密，本次展覽則發現已有被亞洲廠商取代之勢。圖 3-1 照片為現場展示之陣列探頭用壓電晶片。壓電晶片上的切割槽用以分隔獨立起振及收訊單元。陣列探頭是可以根據客戶端需求和檢測標的做客製化及最佳化設計。

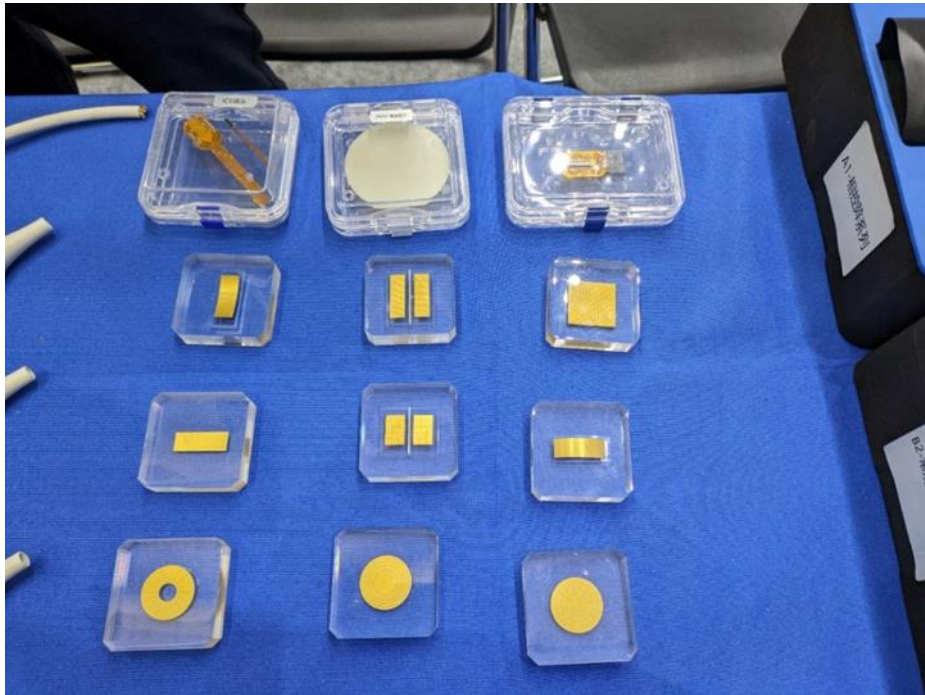


圖 3-1_陣列探頭用壓電晶片，壓電晶片上的切割槽用以分隔獨立起振及收訊單元。

應用陣列探頭進行檢測，所得資料量體相當大，接下來的成像表現需有極佳的系統處理及運算能力，這是目前歐美設備廠競相發展之區塊。圖 3-2 照片顯示應用陣列探頭偵測有內部雕刻之壓克力試塊，再透過計算後在螢幕成像之表現。過去相關內部刻蝕缺陷可能會形成不可辨識的訊號群，甚至會被視為雜訊，透過成像運算，人工刻蝕可明顯完成符合原件之成像。

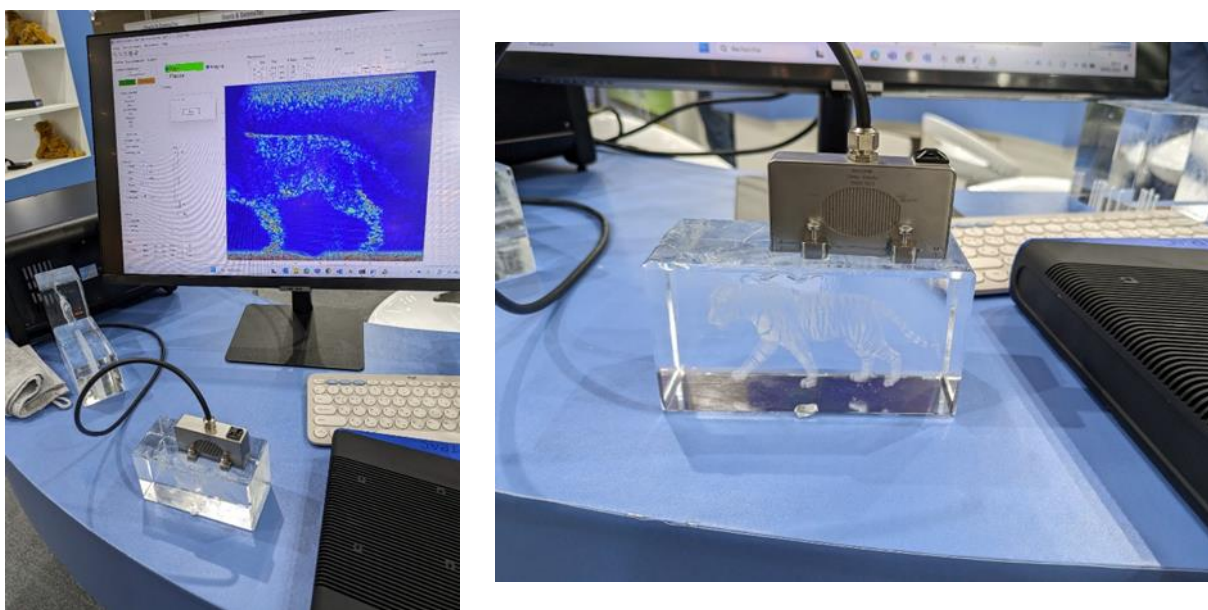


圖 3-2_應用陣列探頭偵測內部雕刻壓克力試塊，透過計算成像後之表現。

3.2 空氣耦合探頭之應用

本屆研討會中，在非接觸式超音波(UT Non-Contact)及雷射超音波檢測(Laser UT)方面的發展頗受矚目。非接觸式檢測主要適用於有接觸障礙的檢測標的，例如標的之表面溫度過高或有製程清潔無塵需求等。空氣耦合之先天問題是在於需克服波傳環境雜訊及檢測配置障礙等方面。故在訊雜比提升上，是關注焦點。此外，空氣耦合探頭多為高功率低頻率探頭，穩定的高功率超音波設備也為必要。圖 3-3 照片展示空氣耦合探頭透過機器手臂在事件兩側進行穩定檢測。

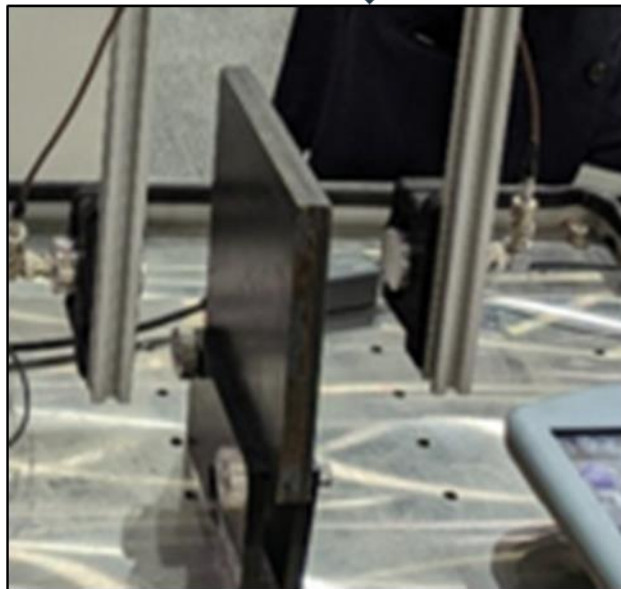


圖 3-3_空氣耦合探頭透過機器手臂進行穩定檢測

3.3 即時線上點銲分析與銲道自動檢測系統

銲接即時分析可強化銲接品質，特別是在融合區域控制上。現場展示之即時線上點銲分析系統及埋有超音波探頭之銲頭(Real-Time Integrated Weld Analyzer)，即為適用在生產線上之點銲自動化檢測設備[14]。圖 3-4 照片展示系統及埋有超音波探頭之銲頭。透過超音波檢測點銲溶池大小，特別是在融合區域控制上來確定銲接品質，可在如汽車裝配廠內迅速完成檢查。



圖 3-4_分析系統及埋有超音波探頭之銲頭

在銲道自動檢測系統方面，會場還展示一種 SPD 系統(如圖 3-5)，其檢測所利用的物理條件是磁彈性效應 (Magnetoelastic Effect)，是針對鐵磁性材料在機械應力(應變)作用下，材料磁性會隨之改變的現象來反應銲道的應力異常區域，正如 SPD 為 Stress Position Detector。SPD 載具可沿銲道自走，檢測資料可透過無線傳輸送回主機，可評估銲道異常區域，再決定是否要做細部超音波檢測或修整(如圖 3-6)。



圖 3-5_ 銲道自動檢測系統

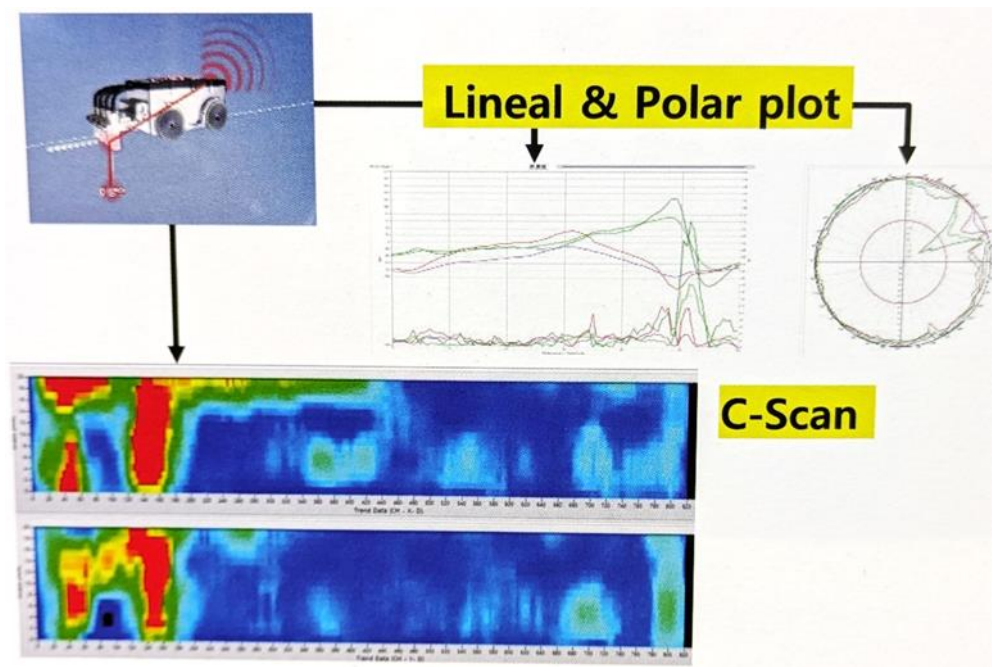


圖 3-5_ SPD 系統發現應力異常區域

3.4 檢測方案及顧問服務

本次展場除設備之外，另有英(BINDT)、加(CINDE)、美(EPRI)、德(DGZfP)、印(ISNT)、韓(KAERI/KRISS)及南非(SAINDT)等國之非破壞檢測學會或研究機構設立展位，以展示其能承攬委託研究及問題處理方案等顧問服務。

非破壞檢測在工業製程及產線品管方面，不可或缺，但建置自動化檢測或客製化檢測，則需強力的研究團隊，針對待測品項，進行測試實驗：包括檢測方法確認、材料性質分析、標準規塊及實驗規塊設計製作、設備及探頭設計建置、可靠度實驗分析、檢測程序書的建製、操作人員能力驗證等，如需產線自動化則還有機電設備建置及輔助判讀系統開發等工作項目。研究對象小從管線元件大至工業產線，團隊需整合學術分析及設備廠商，方可能完成務實建置。

3.5 觀察

縱觀實務面上，設備技術之發展趨勢有：

1. 亞洲國家檢測設備產品的質與量進步快速，也伴隨價格下降；
2. 亞洲國家檢測自動化/載具設備之質與量正在發展；
3. 歐美/日本設備大廠正(已)進行業務版圖轉移或公司併購，設備產品則發展持平；
4. 歐美檢測數位化、資料處理及 AI 產品發展快速，但價格不斐；
5. 歐美檢測方案及顧問服務正在發展。

4. 電廠建物老劣化檢查及監測可參考之法規與經驗

核電廠建物面對老劣化而需進行之狀況檢查及監測，主要的建物對象多是超過三十年以上的老建物或待延役續用的建物(40~80年)。而營運中之核電廠建物如特別需檢查及監測，多是因為天災外力破壞或是因應法規更新之需求。本章用“Section XI 之 IWL”和電廠維護法規之「結構監測巡視」兩相關案例來觀察傳統上核電廠建物/結構面對老劣化所需進行之建物健康檢查及監測。檢查及監測後如需做進一步狀況研判來決定處理方式，則才要用到相關非破壞檢測。

4.1 Section XI 之 IWL 沿革及相關案例

美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)過去曾公佈 32 件報告(至 1996 年)顯示核能電廠鋼版圍阻體及混凝土鋼襯版有腐蝕現象，約占營運中核電廠總數之四分之一，另有 34 件報告(至 1996 年)顯示後拉預力式混凝土圍阻體之鋼腱有老劣化現象，約為此類設計核電廠總數之二分之一。

鑑於上述發生之老劣化問題，及劣化速度會隨延時而加速等考量，NRC 於 1996 年 8 月 8 日針對該國商業運轉中之核電廠發佈指示(61FR41303)，要求營運中各廠須在五年內(2001 年 9 月 9 日前)依 ASME B&PV Code Section XI 中之 Subsection IWL (Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Plants) 及 Subsection IWE (Requirements for Class MC and Metallic Liners of Class CC Components of Light-Water Cooled Plants) 1992 年版及其附錄內容，完成一次圍阻體混凝土、後拉式預力鋼腱、鋼版圍阻體及混凝土鋼襯版之檢查。此後，NRC 於 1999 年 9 月 22

日 10CFR50.55a 附錄內，將 IWL 及 IWE 列入核電廠營運中檢測計畫項目 (In-Service Inspection program, ISI)，以確保圍阻體完整性。

1996 年 10 月國內核管會議上，亦要求國內電廠需參考 NRC 之 IWL 規定擬定檢測計畫。台電核發處於 2000 年 8 月起對其下三座核電廠展開 IWL 相關目視檢測工作，承攬公司為 BCP Technical Services, Inc.。所有核電廠之現場作業於民國 2001 年底完成，並作成報告。在核三廠部分，圍阻體混凝土之現場 IWL 目視檢測執行主要時程是在 2001 年 9 月 24 日至同年 11 月 21 日期間。未來將依規定，列入 ISI 作業，每五年檢查一次。

由於 1996~2001 期間之 IWL 相關目視檢測係美國 NRC 首次要求施作，當年國內外並無確實經驗可供依循。台電曾委託交通大學土木系進行「核能電廠安全有關結構體老化/劣化之準則研擬」計畫，蒐集 IWL 法規及相關混凝土調查導則、規範及資料，以為正式作業之準備。該案於 1997 年 12 月完成報告，報告中將 IWL 條文、IWL 引用之美國混凝土協會 ACI 201.1R 導則（包括導則中之名詞標準定義）及 ACI 318 等相關規範完成中文化說明，同時收錄混凝土老化/劣化之各種機制說明、評估判斷及管理方式等資料。該案成果有助於對後續 IWL 相關目視檢測工作之範圍界定與了解。

根據 IWL 法規，圍阻體混凝土檢測範圍主要以「人員可接近之混凝土表面」(Accessible surface)為對象，其中所謂「混凝土表面」係指開放表面—即不包括被鋼襯、基礎材料、回填材料及貼附埋設之版材所包覆之區域，也不包括被廠區固定設備、管線所遮覆之區域。此外，在核三廠首次 IWL 檢測中，筋根廊道(tendon gallery)之側牆面及地版並不屬檢測範圍，但鋼腱座所在之頂版則是檢查範圍。在「人員可接近~」之界定上，不包括少部分特殊位置及角度，檢測人員無法安全抵至、又無法用望遠鏡檢查之區域，這些區域之混凝土完整性則由專責工程師另行評估。

IWL 相關目視檢測以 VT-3C 之要求為基準，其目視環境條件中，待測表面之照度不得小於 550Lux；在進行一般直接目視檢測時，眼與標的物之距離須小於 4ft.(1.2m)。部分照度足夠之區域，在專責工程師之判斷下，根據檢測現場狀況需求，可採用輔助設備如望遠鏡等以達成同樣之距離效果。

VT-3C 目視檢測結果須清楚表明混凝土之狀況及損害情形，其主要依據係文獻 American Concrete Institute Publication ACI 201.1R-68 中所示之各種損傷狀況及定義，至於有紀錄必要(recordable)之損傷規模條件，其要求則依據 ACI 349.3R。

在檢測人員資格上，IWL 法規亦有訂定，分專責工程師(Responsible Engineer)及檢測人員。依據 IWL-2320 規定，專責工程師須為註冊專業技師(Registered Professional Engineer)，其須對核電廠反應器廠房設計及施工規範有詳實了解，並負責依規定提檢測計畫、檢測人員訓練計畫、負責督導檢測作業、評估檢測結果等工作。在檢測人員資格方面，依據 IWL-2310 規定，由專責工程師進行訓練，且須符合 IWA-2321 要求。

在首次 IWL 檢測中，並未就預力鋼腱周圍承壓混凝土版之裂縫，進行目視檢測及記錄，但此一部分工作則在稍早之「台電第三核能發電廠包封容器預力系統營運期間檢測之第一號機第十五年度檢測工程」完成執行。核三廠採用之 ASME 1999 Addenda，其中 Section XI 之 IWL-3221.3(d) 對 Tendon Anchorage Areas 之接受標準為：crack in the concrete adjacent to the bearing plates do not exceed 0.01in. in width。如未達接受標準，則需依 IWL-3300 進行分析評估(Evaluation)，並完成評估報告後陳核管制單位。

而 IWL-3310 Evaluation Report 中規定報告內容需包括：

- (a) 造成未達標準之肇因；
- (b) 檢核同廠區其他機組是否有雷同之未達標準狀況；

- (c) 圍阻體混凝土未達標準之現存問題，在未完成修復之狀況下是否可暫為接受(繼續營運)；
- (d) 如需修復/更換，其程度、方法及完工時間；
- (e) 後續檢查之程度、種類及頻率。

在上述說明中，核電廠建物所進行之狀況檢查及監測所參考之法規有：

1. ASME B&PV Code Section XI 中之 Subsection IWL (Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Plants);
2. ASME B&PV Code Section XI Subsection IWE (Requirements for Class MC and Metallic Liners of Class CC Components of Light-Water Cooled Plants);
3. IWL 相關目視檢測 VT-3C 之檢測要求基準;
4. American Concrete Institute Publication ACI 201.1R-68;
5. Report on Evaluation and Repair of Existing Nuclear Safety-Related Concrete Structures ACI 349.3R;
6. 依據 IWL-2320 規定，專責工程師資格;
7. 依據 IWL-2310 規定檢測人員資格，且須符合 IWA-2321 要求;
8. ASME 1999 Addenda，其中 Section XI 之 IWL-3221.3(d) 對 Tendon Anchorage Areas 之接受標準;
9. IWL-3310 Evaluation Report 中規定之報告內容。

4.2 美國 Wolf Creek 電廠維護法規之「結構監測巡視」相關案例

美國 Wolf Creek 核電廠在進行延役換照時，根據其電廠維護法規行政指引 MR-007，訂定「結構監測巡視」判定程序。本程序書係制定電廠有關結構、被動組件與土木工程設施定期巡視之履行與文件紀錄必要條件。過去也曾為國內電廠制定程序書時參考採用。「結構監測巡視」程序書適用於維護法規涵蓋的結構、被動組件與土木工程設施。結構監測巡視會將標的物加以評估及分類，主要分有 A、B、C、D 及 E 五類，其定義及說明如下。

A 類：可接受，未劣化

- A.1 當檢查之標的構件並未顯示劣化跡象時採用。
- A.2 此類別之結構構件並無顯著劣化，因此不需額外措施。

B 類：可接受，首次觀察發現有輕度劣化

- B.1 在前一次檢查並未發現有輕度劣化，先前亦未記錄有性能改善需求(PIR 內)或請修單(WR)之輕度劣化。
- B.2 本質上屬於輕度，檢查者或評估者之結論為：劣化情況目前並不會損及結構，而使其無法執行指定功能。結構可繼續在 10 CFR 54.21(a)(2) (non-safety-related criteria)條件之下進行監測。
- B.3 即使此結構項目持續依照相同的劣化速率甚或更為加速劣化，仍不至會損及結構，致使其無法執行其指定功能。
- B.4 劣化項目之狀況預期並不會改變，因此 B 類項目並不需要進一步措施。
- B.5 此類結構之劣化似乎已有持續一段時間之傾向，並已進一步被列為 B.1 類。此類項目將透過後續定期檢查來監測，但除了定期檢查之外，此類項目不需再有進一步措施。

C 類：可接受，後續視察時有輕度劣化

- C.1 在前一次檢查期間已被觀察到，或已記錄在先前的請修單或性能改善需求中的輕度劣化現象，但該劣化自前次檢查後，並未再有顯著劣化。
- C.2 類似於「B」類、本質上仍屬於輕度的劣化，且檢查者或評估者的結論為：劣化情況目前並不會損及結構，而使其無法執行指定功能；且即使此結構項目持續依照相同的劣化速率或者更加速劣化，仍不至於損及結構，致使其無法執行指定功能。結構可繼續在 10 CFR 54.21(a)(2)之下監測。
- C.3 劣化項目之狀況不預期會有所改變，因此不需要進一步的措施。
- C.4 此類項目的劣化似乎已有持續一段時間之傾向，並已進一步被列為 C.1 類。由於此類項目之劣化不預期會有所改變，且 C.1 類項目將透過後續定期檢查來監測，因此不需再有進一步的措施。

D 類：劣化但可接受

- D.1 該劣化現象如坐視不管，可能進一步再劣化，以至可能損及結構，致其無法執行指定功能。
- D.2 檢查者或評估者的結論為：該劣化現象目前不致損及結構，而使其無法執行指定功能。該結構將持續在 10 CFR 54.21(a)(2)項下監測。
- D.3 就此類項目而言，將會依據程序書 AP 16C-006 發出通知，決定適當之矯正措施。此措施可能要求進行修理、或要求額外評估、或證明其可以繼續運轉而不需其他矯正措施。

E 類：重要劣化

- E.1 結構劣化的程度已無法符合設計基準，或結構已劣化至必須在下次正常定期評估之前就要處理，否則將無法符合設計基準。該結構應該考量予以列入 10 CFR 54.21(a)(1)(safety-related criteria)之下監測。

E.2 對於此類項目而言，將會依據程序書 AP 16C-006 發出通知，決定適當的矯正措施。

上述 10 CFR 54.21 原文請參考附錄第 1 節。

結構監測巡視之基準檢查，是指結構、被動組件與土木工程設施的首次巡視。而可接受準則，係指巡視結果、監測結果或觀察結果所藉以比對之標準，以評估結構、被動組件與土木工程設施是否符合既定性能要求。

結構監測巡視不及之區域有分：無法接近的區域及永久無法接近的區域兩方面。

正常情況下無法接近的區域，包括：

1. 結構或結構組件位於水下的部分；
2. 高輻射區；
3. 若無特殊設備，將使人員處於極度安全危害下的區域；
4. 需要特殊設備方能進入的區域。(指有混凝土孔道的地洞)

而永久無法接近的區域則有：

1. 結構或結構組件位於地下的部分；
2. 結構或結構組件被其他永久結構包封的部分。

如何決定結構的安全的重要性：若結構本身容納、支撐或保護任何高安全重要的系統或組件，則該結構應考量視為高安全重要性，除非經維護法規審查小組(Maintenance Rule Expert Panel, MREP)記錄為否。又結構本身容納、支撐或保護任何低安全重要的系統或組件，則該結構應考量視為低安全重要性，除非經維護法規審查小組(MREP)記錄為否。若結構本身並未容納、支撐或保護任何經確立屬於維護法規範圍內的設備，則可排除在本程序的監測要求之外。

電廠結構監測的基準檢查係為必須執行，以建立維護法規範圍內的電廠結構之起始標準點。繼續檢查的頻率將依據 MREP 所決定的結構安全分類而定。此決定是依據結構本身所容納的設備而定，亦即若結構本身容納高安全重要設備，則結構將會考量為高安全重要。Wolf Creek 電廠維護法規訂定高安全重要結構每 5 年檢查一次，低安全重要結構則每 10 年檢查一次。遇有非尋常之事件如火災、水災、地震活動等，應針對受影響區域進行檢查。

現有的土木檢測計畫中也包括對鋼筋的檢視、電廠吊車與水牆的檢測，因此現有的電廠檢測/測試計畫，均有許多檢測措施可以適用於維護法規內的結構。基本上必須採用目視檢查的方式，決定結構的整體狀況，除非是判定屬於 D 類或 E 類項目所需的評估，否則本程序並不要求對結構組件進行大範圍評估。

Wolf Creek 電廠維護法規之工程構件分類導則請詳見附錄第 2 節。

4.3 建物老劣化健康檢查及監測技術之可能應用範圍

在上述案例中，由 1996 年至現行土木檢測計畫基本上須採用目視檢查的方式以決定結構的整體狀況，除非是被 IWL 判定需做進一步評估改善，或是「結構監測巡視」判定屬於 D 類或 E 類項目，需做進一步評估，否則既有程序中並不要求對結構組件進行深度評估。

然而這些評估須由專責技師進行，由專責技師決定所需之檢測資料以利評估。

5. WCNDT 展示之建物老劣化健康檢查及監測技術介紹

5.1 發展方向

目前已知國內、外核電廠曾採用的土木非破壞檢測技術主要有四^[15]：敲擊回音檢測(Impact Echo, IE)、脈衝響應檢測(Impulse Response, IR)、透地雷達檢測(Ground Penetrating Radar, GPR)，還有破壞性檢測即鑽心取樣分析再加上內視鏡目視檢測(Core Bores Examination & Boroscopic Inspection)。其中敲擊回音檢測(IE)和脈衝響應檢測(IR)的檢測物理量是應力波或所謂暫態應力波，敲擊回音檢測可用於確認表面裂縫深度及內部脫層裂縫深度，而脈衝響應檢測則可用於確認脫層裂縫之存在與否。

透地雷達檢測(Ground Penetrating Radar, GPR)主要是用於確認牆體中鋼筋及鋼鍵套管的位置。這種幾何條件會影響應力波脈衝的檢測判讀，故也需要 GPR 檢測結果來提供背景研判資料。本次大會展出之相關受矚目設備中，主要有 Acoustic Control Systems 的應力波檢測系列設備和 Proceq 的 GPR 檢測系列設備，將分別介紹如後。

5.2 應力波檢測之相關最新設備

在土木非破壞檢測領域中，本次會展中 Acoustic Control Systems 的應力波檢測設備系列值得觀察。本院過去也採用該系列設備，特別是乾點式(DPC)探頭發展之應用設備。

應力波傳行為往往受到介質材料的力學性質影響而有不同之表現，利用並量化量測波傳行為，進而推估材料力學特性或內部幾何狀況，是為各式應力波檢測技術之主要目標。在混凝土材料上常見之應力波相關非破壞檢測主要有：超音波檢測、敲擊回波檢測，及音射檢測等，其中除音射檢測是

屬於被動監測方式之外，其他方法多具備主動起振機制。超音波檢測技術在混凝土材料上之應用已有相當長的時間，因混凝土之多孔隙及高衰減特性，故多採用高功低頻類型探頭(100kHz 以下)。以傳統探頭製作技術及導入功率要求來看，無可避免的將有大探頭直徑之要求，然而其在現場使用時，常因表面粗糙等耦合困難因素，或超音波入射及接收點位置確認模糊，以致檢測之重複性與再現性易受爭議。

「乾點式低頻超音波探頭技術」早期係由俄國 Moscow Scientific Industrial Association (MSIA) 旗下之科技公司 Acoustic Control Systems, Inc.(ACS) 開發製作，其研發成員則為原 MSIA 之 "SPECTRUM" 計畫人員^[16]。"SPECTRUM" 之計畫目標為針對金屬、複合材料、加工及天然非均質材料，開發音波或音射檢測相關技術及設備。本院曾於 2003 年起應用該探頭及設備至今，目前該公司已是德國公司。

DPC 探頭技術係利用 PZT 晶體壓電效應產生應力波，透過錐狀尖端，即所謂觸點(wear tip)，將應力波傳入混凝土內部，由於探頭觸點遠小於混凝土中超音波波長(一般約為 40mm)，因此可視為點接觸而不需要耦合劑耦合。

在構造上^[16]，DPC 探頭內部擁有兩個對稱壓電單元，每個壓電單元則由多股壓電晶體組成，當導入兩壓電單元之電壓為同振幅同相位時，兩單元的變形將推動觸點在垂直方向上產生振動，經由觸點將超音波縱波能量垂直導入受測體。當導入兩塊壓電單元之電壓為同振幅反相位，兩單元之反向變形將扭動觸點，並於檢測面上產生切線方向之振動，經由觸點可將「摩擦振動」形成之超音波橫波能量導入受測體，檢測面上則會有表面縱波形成。在接收超音波時，觸點之變位將帶動兩壓電單元變形，進而產生各自之電位差，根據其相位及大小反推振幅及波式(參考圖 5-1)。應用此技術原理，ACS

早年已發展出多種適用於混凝土檢測之低頻 DPC 探頭及周邊設備(如圖 5-2)。

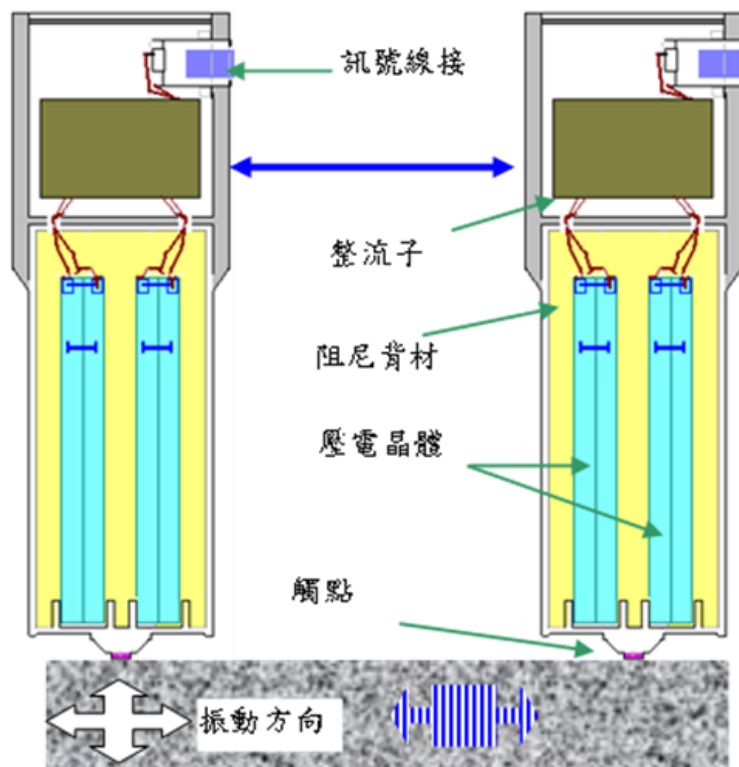


圖 5.1_DPC 探頭構造及收發原理示意圖



圖 5.2_採用 DPC 技術之波速量測儀 UK1401

觀察圖 5-3 觸點在檢測面振動導入受測體之各種超音波波式能量分佈，可知 DPC 探頭於檢測面切線方向之摩擦振動會在受測體近表面區域產生最大之縱波能量（圖 5-3b 沿切線方向 90-270 度），同時探頭雙晶體對表面縱波亦具較高之靈敏度。運用此一特性，使用兩個切線方向振動與接收之 DPC 探頭，固定其間距(如圖 5-1 配置)，可測定縱波在受測體表面傳遞時間並換算為縱波波速。本文所使用之 UK1401(如圖 5-2)即是以此原理開發而成之輕便型表面縱波波速量測儀^[16]。

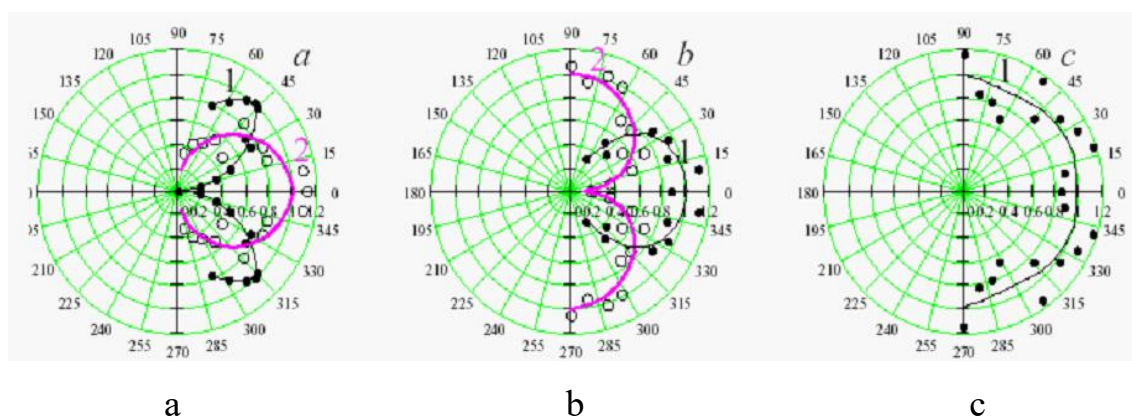


圖 5-3_DPC 探頭產生音場之方向特性圖，0°方向為檢測面法線方向，黑線 1 代表橫波在各角度之能量分佈，紅線 2 代表縱波。a.當 DPC 探頭在 0-180°方向振動導入之超音波音場分佈；b. DPC 探頭在 90-270°方向摩擦振動導入之超音波音場分佈；c.同 b 之探頭振動，但在垂直紙面方向之超音波音場分佈。(德國柏林 BAM(Federal institute for Materials Research and Testing)所測得之方向特性圖，本文經 ACS 同意摘用)

DPC 探頭技術亦可做陣列式組合，形成聯合功率較大之探頭，亦可運用拓撲結構理論和延時設計做成具掃描功能之陣列探頭。陣列探頭可針對混凝土、石材、複合材料、加工及天然非均質及高衰減材料，進行 A、B 及 C-scan 檢測。本院過去使用之量測儀，其陣列探頭由 24 隻 DPC 探頭依 4x6 陣列方式組成，陣列探頭經由 24 隻觸點將超音波之疏-壓振動能量導入受測體，各別點波源經疊加後形成加強干涉之縱波波式向檢測方向傳遞^[17]。陣

列探頭屬低頻探頭，透過輸出控制可調整其頻率(約 20~150kHz)。此外，量測儀亦可透過多次疊加平均方式加強訊雜比。

圖 5-4 為會展所示之新式表面縱波波速量測儀 UK1401，由於混凝土波速和抗壓彈性係數間存有彈性力學之理論關係，而抗壓彈性係數又和抗壓強度會因不同種類之混凝土而存有各式經驗公式關係，故新式設備還可提供抗壓強度評估。過去本院在執行相關檢測時，即用類似方式提出抗壓強度評估。圖 5-5 為會展所示之各式陣列探頭和低頻探頭。



圖 5-4_新式表面縱波波速量測儀 UK1401 及操作



圖 5-5_各式陣列探頭和低頻探頭

DPC 探頭技術亦可做陣列式組合，運用拓撲結構理論和延時設計做成具掃描功能之陣列探頭。圖 5-6 為 4x8 陣列探頭，圖 5-7 則為 4x12 陣列探頭，中心頻率約 10~100kHz，其探測深度約可至 3m，透過無線傳輸可將 2D 或 3D 資訊傳入筆電彙整成斷層圖面(見圖 5-8、5-9)。




圖 5-6_4x8 陣列探頭



圖 5-7_4x12 陣列探頭

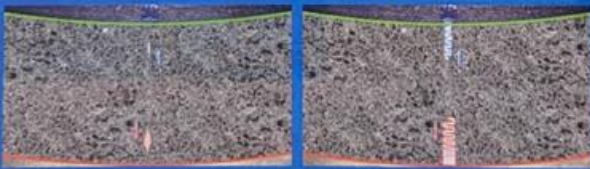
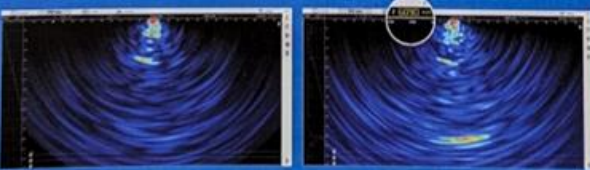


圖 5-8_透過無線傳輸可將 2D 或 3D 資訊傳入筆電彙整



A1040 MIRA

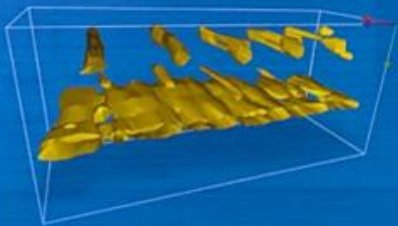
Regular BOOSTING

Technical features

- High transmission power through the intelligent pulse control
- Signal-to-noise ratio improvement up to 25 dB
- Consistent spatial resolution over the inspection range
- Adaptive analog gain control

PORTABLE HIGH-END ULTRASONIC TOMOGRAPH FOR REINFORCED CONCRETE TESTING



- Extraordinary penetration depth
- Outstanding near-field and far-field resolution
- New generation of wear-proof DPC transducers

Visualization by INTROVIEW®

- Integral assessment using 3D imaging
- Novel crack sizing functionality

圖 5-9_將 2D 或 3D 資訊傳入筆電彙整成斷層圖面

在敲擊回音檢測方面，敲擊回音檢測目前可依據的主要規範為 ASTM-C1383_[18] “Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method”。此規範之施用對象為混凝土材質之版、鋪面、橋面版、牆或其他版狀之結構物，檢測之施用目的為測厚。本檢測規範中包括兩個相依程序：程序 A：P 波波速量測(P-Wave Speed Measurement)及程序 B：敲擊回波檢測(Impact-Echo Test)。每一點位檢測必須完成上述二程序，方能推知版厚或脫層裂縫深度。在程序 A 方面，目前已有 UK1401 可求得。在程序 B 上，於待測物表面利用小鋼珠或鐵鎚等為起振器，敲擊產生暫態應力波動(應力脈衝)傳入混凝土內部，當應力波遇到內部界面(如空洞、蜂巢、裂縫或脫層等不連續面)或另側混凝土表面(如結構背側或底版底面)，則會產生來回反射及共振，當反射波傳回到敲擊表面時，會產生表面位移及加速度，利用安置在敲擊源附近混凝土表面上之位移規或加速規探頭，可接收來回振動之時間域訊號，而這個訊號包含多個振態模式。利用頻譜分析法(頻域法)求得應力波反應頻譜(Amplitude Spectrum)，反應頻譜可用於評估測點正下方附近(即檢測方向)混凝土之完整性狀況(Performance and Integrity)。由於混凝土次表面之粗骨材及非均質效應，可能影響反應頻譜約 30kHz 以上區域之判讀，故建議依本程序檢測之混凝土元件，所得之應力波反應頻譜其適用分析深度或受檢元件厚度需大於 6cm (其造成的頻譜訊號範圍約在 30kHz 以下)。

圖 5-10 為會展所示之敲擊回波檢測用速度規探頭，主要適用於程序 B，以取得應力波反應頻譜。圖 5-11 為超音波檢測設備，透過三種模式，檢查混凝土內部品質。上述檢測設備都具備輕便及無線傳輸等特點，可大幅減少現場人力。在核設施檢測中，亦可減少輻射暴露的風險。



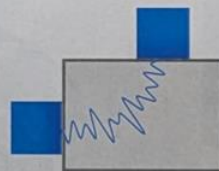
圖 5-10_ 敲擊回波檢測用速度規探頭，主要適用於程序 B。



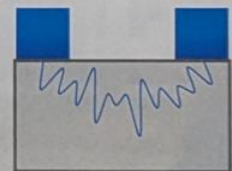
Available
measurement
modes



Direct thru-transmission



Indirect thru-transmission



Surface thru-transmission

圖 5-11_ 超音波檢測設備，透過三種模式，檢查混凝土內部品質。

5.3 透地雷達檢測之之相關最新設備

透地雷達檢測技術(Ground Penetrating Radar)，簡稱 GPR，其應用原理類似航空雷達偵測飛機位置，係利用入射電磁脈波(雷達波)遇到不同電性之異材界面或物體即產生全反射或部分反射回來之物理現象，產生可鑑別之回波訊號。經有系統之施測與接收後，對整組訊號進行影像處理、濾波及判讀分析，藉以了解受檢區域或物體內部之特性與層次^[19,20,21]。目前新式設備系統透過 GPS 及現場無線定位器組合可加快定位效能，主要是應用於大區域檢測時所需之測線丈量及定位，或用於無人機載具並與圖資系統整合檢測，對檢測結果展現極具效果。在 RC 結構檢測部分，高頻透地雷達可與乾點式超音波檢測組合，能互補其檢測盲點^[17]，透過自動化檢測亦使 C-scan 檢測或多面檢測更趨簡易，RC 結構之斷層或透視成像，亦為可行。

面對核設施常見之巨積混凝土結構，圖 5-12 顯示 Proceq 適用之天線種類^[22]。目前新式天線多採用變頻，圖表中天線頻率分別由 200M 至 6000MHz，這可對檢測不同深度的需求強化其對焦表現。圖 5-13 及 5-14 為會場展示之高頻天線。除偵測(鋼筋)混凝土構件內部之管線、空洞、鋼筋、鋼鍵或其他異物之外，透地雷達檢測技術在國內土木、大地及河海工程方面主要應用有：

1. 偵測地下結構物、地下管線、空洞及沉陷位置；
2. 偵測道路或機場跑滑道之鋪面/基礎完整性及厚度量測；
3. 量測隧道襯砌或地下連續壁之 RC 厚度、完整性、包泥/包水及掏空狀況偵測；
4. 偵測淺層地基或河堤基礎之掏空狀況；
5. 淺層地質、地下水位及淺層破碎岩盤之評估；
6. 淺河床深度量測及沖刷狀況評估。

Proceq Ground Penetrating Radars



GP8800
[Product page](#)

Features
Radar technology Stepped-frequency continuous-wave (SFCW) GPR
Modulated frequency range 400 – 6000 MHz
Penetration depth 65 cm / 25.6 in



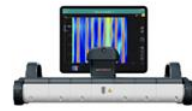
GP8000
[Product page](#)

Features
Radar technology Stepped-frequency continuous-wave (SFCW) GPR
Modulated frequency range 200 – 4000 MHz
Penetration depth 150 cm / 60 in



GP8000 Lite
[Product page](#)

Features
Radar technology Stepped-frequency continuous-wave (SFCW) GPR
Modulated frequency range 200 – 4000 MHz
Penetration depth 80 cm / 31.5 in



GP8100
[Product page](#)

Features
Radar technology Stepped-frequency continuous-wave (SFCW) GPR
Modulated frequency range 400 – 4000 MHz
Penetration depth 80 cm / 31.5 in

圖 5-12_Proceq 混凝土結構檢測適用之天線種類



圖 5-13_Proceq 會場展示之高頻天線



圖 5-14_Proceq 會場展示之高頻天線(2)

核設施除巨積混凝土結構外，還有埋地管線、附屬地下結構等土木建物，其所需的 GPR 檢測天線是屬較低頻範圍，圖 5-15 及 5-16 為會場展示之低頻陣列天線，該展示天線可有 35~50 頻道之天線，變頻有分 500~3000MHz 及 70~750MHz 兩種，應可提供探地檢測不同深度之對焦需求。陣列天線之拓撲結構理論和延時設計可簡化上層物件的屏蔽，而更能做深層探知。新式設備具有衛星定位(1~5cm)及無線傳輸功能，一次到底的測線檢測資料可透過軟體縫圖展現。圖 5-17 為天線功能及設備條件，惟設備重量和電池續航力是筆者所注意的，對其現場操控及組裝之便利性，使用者需加考慮。

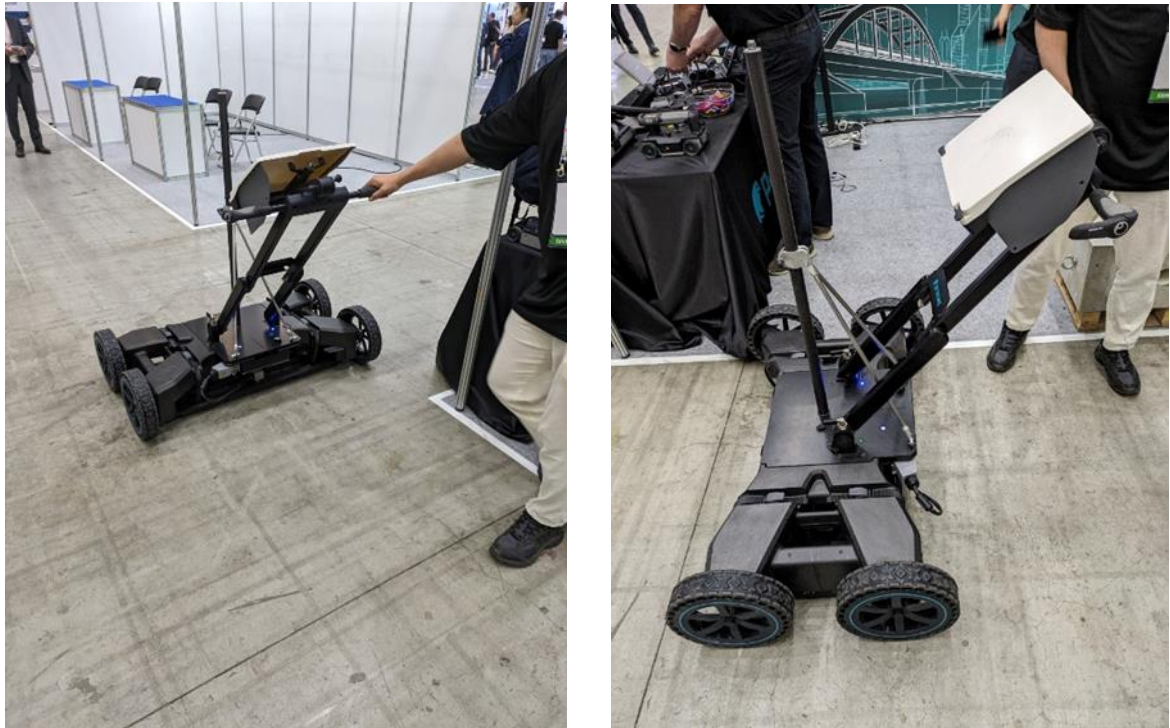


圖 5-15_Proceq 會場展示之低頻陣列天線



圖 5.16_Proceq 低頻陣列變頻天線，有 35~50 頻道，500~3000MHz。



GS9000

FC CE UK

HW Specs



GS9000

GX1 array module	GX2 array module
500-3000 MHz	30-750 MHz
35 + 15 channels 2.5 cm spacing	11 channels 7.5 cm spacing

Dimensions
45Kg
72 x 118 x 44 cms

Up to
27,500 scans/m
5,000 points / linear m

Powered by

45W Power bank

Wireless

optional USB-C

Real-time 3D accuracy

SSR included
NTRIP compatible
1-5 cm
Total station compatible

圖 5.17_Proceq 低頻陣列變頻天線圖之天線功能及設備條件

6. 結論、討論與對國內電廠運轉及除役監管之建議

本文從介紹世界非破壞檢測大會(WCNDT)開始，觀察非破壞檢測技術的學術發展和實際應用。第 20 屆 WCNDT 在韓國仁川的松島國際會展中心舉行，本次參展廠商約 240 家，論文及專題約 950 篇報告。本文第二章將論文及專題之分類及篇數加以分析，一窺目前主要學術發展領域及消長動向。

本文第三章將由參展設備型態來看未來發展趨勢，運用拓撲結構理論和延時設計做成具掃描功能之陣列探頭(Array)，加上快速資料處理及成像運算，可大幅簡化判讀難度，這也為 AI 應用及自動化檢測建立入門捷徑。對檢測條件困難的位置，非接觸式(Air-Coupled/Laser UT)、遠距檢測(GW)或銲接即時檢查及監測的發展，也足以令人期待。先進材料的發展要能具備實用價值，品質控管和異狀檢出的對應技術是必要條件。因此對新材料如複合材料及航太/國防工業材料，或對非線性材料及材料在力學非線性部位之應用，非破壞檢測技術的測試開發是目前各國科研單位重要的技術服務項目。

本文第四章則透過介紹 ASME B&PV Code Section XI 之 IWL 沿革及相關案例和美國 Wolf Creek 電廠執行延役維護法規之「結構監測巡視」相關作業，來介紹核電廠過去二十五年對建物老劣化進行健康檢查及監測的做法和需求技術。傳統檢查及監測以目視檢測為主，由責任技師負責研判及簽署報告。若遇到表面無法探知的情況，則指揮運用非破壞檢測技術。本文第五章則對會場展示之土木非破壞檢測之最新設備與技術，特別是針對核電廠建物結構狀況，做深入介紹及討論。

觀察 ASME B&PV Code Section XI 之 IWL 和 Wolf Creek 電廠的檢查方式，當時距今約 25 年，土木工程相關的非破壞檢測才發展不久，可用工具不多。責任技師根據目視檢測，例如由表面白華、風化、龜裂、剝落來評估建物混凝土老劣化狀況，又可由表面裂縫方向及寬度研判建物結構之承載、受力、沉陷、變形或是鋼筋鏽蝕膨脹等損壞情形。這些多是定性化分析，透過每五年或十年的例行檢查，方能建立定量化基準。然而隨著責任技師的更迭，目視檢測的主觀認定不見得一致，對所謂的定量化的呈現會有疑慮。

隨著土木非破壞檢測相關技術發展，對混凝土材料、建物及結構的老劣化或損壞，已有相當完備的定量化方式。混凝土表面的電性、表面縱波速等可用於觀察表面劣化情形及影響深度。對混凝土結構內部的狀況可透過陣列超音波及陣列 GPR 來偵測定位，可用於分析結構弱化的程度。這些資訊過去只能靠責任技師的經驗判斷，目前可透過檢測更為定量化。

在今年大會學術領域中，有一門近期發展的學門，名為結構健康監測及預後健康管理，Structural Health Monitoring (SHM) & Prognostics Health Management (PHM)。結構健康監測的目的主要是透過土木非破壞檢測相關技術來量化混凝土結構劣化之現狀，而預後健康管理(PHM)則是透過量化數據來預測結構劣化速率及未來狀況，並提出符合經濟效益之維持或者延壽之作業方式。對現行除役的核設施，ASME IWL 及 Wolf Creek 維護法規之「結構監測巡視」，畢竟已是二、三十多年前的作法，現階段整合非破壞檢測技術之 SHM 及 PHM，未來將有其施行之需要，且可達到監測數據量化效果，進而評估結構的安全性，亦可滿足核安管制的需求。

參考文獻

1. 20th WCNDT Program Book, <https://20thwcndt.com/>
2. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/太赫茲非破壞檢測>
3. “Terahertz NDE for aerospace applications, Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization,” Anastasi, R F, et al., World Scientific Publishing, ISBN 978-981-270-409-2, pp. 279–303, May 2007
4. “Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system,” Ospald, Frank, Wissem Zouaghi; Rene Beigang, Matheis Carster, Optical Engineering, 53 [2015-08-24]. doi:10.1117/1.OE.53.3.031208, 16 December, 2013. (原始內容存檔於 2015-11-19) .
5. “To Evaluate the Degradation of Heat Damaged Cement Mortar Specimens after Curing Using Non-Linear Ultrasound Technique (A20191022-0323),” Kuang-Chih PEI, Yu-Cheng KAN, Yu-Ju LIN and Jian-Jhou Lee, 20th WCNDT, Songdo Convensia, Incheon, Korea, 27-31 May, 2024 (第二十屆世界非破壞檢測大會，仁川)(NARI-17899)
6. “To Monitor Fracture Behaviors in Four-Point Cyclic Bending Tests of Low-Activated High Alumina Concrete and Standard Concrete RC Beams Using Acoustic Emission Technique (A20191028-0420),” Kuang-Chih PEI, Yu-Cheng KAN and Jian-Jhou Lee, 20th WCNDT, Songdo Convensia, Incheon, Korea, 27-31 May, 2024 (第二十屆世界非破壞檢測大會，仁川) (NARI-17897)

7. 裴廣智，「地下管線完整性維護方案研析(一) 國內外現況及背景資料」(INER-13256)，2017.9.13
8. 裴廣智，「地下管線完整性維護方案研析(二) 導波檢測技術介紹」(INER-13792)，2018.4.23
9. 裴廣智，「EPRI 速悉提要：發揮人工智慧效能於非破壞評估」(INER-16597)，2022.9.21
10. 裴廣智，「支撐版附近之蒸汽產生器管渦電流檢測訊號分級作業之機器學習方法」(NARI-17636)，2024.6.19
11. 張佐民、董曉明、裴廣智、李朱育、盧洛霏，「應用 AI 人工智慧判讀渦電流檢測瑕疵訊號之辨識系統開發」，第 20 屆非破壞檢測技術研討會(高雄，台灣) 2020 年 10 月 22-23 日。(INER-15454)
12. <https://zh.wikipedia.org/wiki/渦電流檢測>
13. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/太赫兹无损检测>
14. <https://www.tessonics.com/products/>
15. “Crystal River #3 Containment Delamination Update,” Progress Energy, Nov. 20, 2009
16. 裴廣智、林東威、干裕成、鄭家齊、江支弘、徐鴻發，「乾點式低頻超音波在混凝土波速檢測之應用及實例」，中華民國第十二屆非破壞檢測技術研討會，2004。
17. 裴廣智、鄭家齊、林東威、干裕成、胡弘昌，「乾點式低頻超音波與高頻

透地雷達在混凝土 C-scan 檢測之應用及比對實例」，第十三屆非破壞檢測技術研討會，2006.4，桃園大溪。

18.ASTM-C1383, "Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method."

19.裴廣智，「透地雷達檢測技術應用 (1)：原理、訊號分析及檢測規畫」(INER-15934)，核能研究所報告，2021.9.27

20.裴廣智，「透地雷達檢測技術應用(2)：檢測實例討論」(INER-16055)，核能研究所報告，2021.10.19

21.裴廣智，「透地雷達檢測技術應用(3)：機場跑/滑行道檢測實例討論」(INER- 16984) ，核能研究所報告，2023.3.22

22. <https://www.screeningeagle.com/>

附錄

1. 10 CFR 54.21 Contents of application—technical information.

Each application must contain the following information:

(a) *An integrated plant assessment (IPA).*

The IPA must—

(1) For those systems, structures, and components within the scope of this part, as delineated in § 54.4, identify and list those structures and components subject to an aging management review. Structures and components subject to an aging management review shall encompass those structures and components—

(i) That perform an intended function, as described in § 54.4, without moving parts or without a change in configuration or properties. These structures and components include, but are not limited to, the reactor vessel, the reactor coolant system pressure boundary, steam generators, the pressurizer, piping, pump casings, valve bodies, the core shroud, component supports, pressure retaining boundaries, heat exchangers, ventilation ducts, the containment, the containment liner, electrical and mechanical penetrations, equipment hatches, seismic Category I structures, electrical cables and connections, cable trays, and electrical cabinets, excluding, but not limited to, pumps (except casing), valves (except body), motors, diesel generators, air compressors, snubbers, the control rod drive, ventilation dampers, pressure transmitters, pressure indicators, water level indicators, switchgears, cooling fans, transistors, batteries, breakers, relays, switches, power inverters, circuit boards, battery chargers, and power supplies; and

(ii) That are not subject to replacement based on a qualified life or specified time period.

- (2) Describe and justify the methods used in paragraph (a)(1) of this section.
- (3) For each structure and component identified in paragraph (a)(1) of this section, demonstrate that the effects of aging will be adequately managed so that the intended function(s) will be maintained consistent with the CLB for the period of extended operation.

(b) *CLB changes during NRC review of the application.*

Each year following submittal of the license renewal application and at least 3 months before scheduled completion of the NRC review, an amendment to the renewal application must be submitted that identifies any change to the CLB of the facility that materially affects the contents of the license renewal application, including the FSAR supplement.

(c) *An evaluation of time-limited aging analyses.*

(1) A list of time-limited aging analyses, as defined in § 54.3, must be provided.

The applicant shall demonstrate that—

(i) The analyses remain valid for the period of extended operation;

(ii) The analyses have been projected to the end of the period of extended operation; or

(iii) The effects of aging on the intended function(s) will be adequately managed for the period of extended operation.

(2) A list must be provided of plant-specific exemptions granted pursuant to 10 CFR 50.12 and in effect that are based on time-limited aging analyses as defined in § 54.3. The applicant shall provide an evaluation that justifies the continuation of these exemptions for the period of extended operation.

(d) *An FSAR supplement.*

The FSAR supplement for the facility must contain a summary description of the programs and activities for managing the effects of aging and the evaluation of time-limited aging analyses for the period of extended operation determined by paragraphs (a) and (c) of this section, respectively.