

國立臺灣大學工學院機械工程學系研究所

博士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation



含隨機缺陷電廠結構與設備元件之  
數值模擬與力學分析

Numerical Simulation and Mechanics Analysis of  
Structural and Equipment Components with Random  
Defects in Power Plants

林書睿

Lin, Sue-Ray

指導教授：吳文方 博士

Advisor: Wu, Wen-Fang, Ph.D.

中華民國 107 年 1 月

January 2018





國立臺灣大學博士學位論文  
口試委員會審定書

含隨機缺陷電廠結構與設備元件之數值模擬與力學分析  
Numerical Simulation and Mechanics Analysis of Structural and  
Equipment Components with Random Defects in Power Plants

本論文係林書睿君 (D01522015) 在國立臺灣大學機械工程學系  
完成之博士學位論文，於民國 107 年 1 月 19 日承下列考試委員審查  
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

吳文方

(簽名)

(指導教授)

錢立榮

丁凱

吳金城

譚秋成

阮正宗

黃美嬌

系主任

(簽名)

## 誌謝

這一路走來實在倍感艱辛，其中的滋味，好的壞的，還是要嚐過才知道。首先感謝 吳文方指導老師從開始到最後的指引，不論是工作上的或是學業上的，真的不是光看、光聽就能瞭解老師的用心，真的要切身經歷後才知道老師傳授的智慧經驗。在此，同樣再次感謝碩士班指導老師 陳正宗教授，沒有先前老師對學生的扎根，怎麼可能又走出這一段。

感謝各位口試審查委員的建議與指引，當然也要特別感謝核研所機械系統專案主持人 黃金城博士與 丁鯤副校長在工作上的提攜與照顧，讓我從工作上學習、應用以及發揮至學術上。另外也要感謝台電公司 翁炯立博士、張漢洲博士以及謝揚正先生的鼎力支持與鼓勵；在崗位上的長官與同事更不用說，要感謝的人實在在這一頁寫不完，如 康龍全博士、俞君俠博士、陳建忠博士、周雄偉博士、程貴仁博士等，還有彭正球先生(廠長)、蔡柏軍先生、鍾君勵先生、呂明憲先生、林佳宏先生、林獻洲先生(實驗室學長)、林晉宇先生、吳思穎小姐、楊佩穎小姐等，沒有他們在工作上的協助，若同時兼併課業的壓力，我想應該很難完成。

最後感謝家人的支持，兩個小朋友志宸與志庭的聽話懂事，讓我覺得要當一個榜樣才是真正的價值所在！其他沒有寫進誌謝的人，不是我忘記，確實是這段時間有點趕，真的很對不起，所以在此表示我的歉意。

林書睿 敬誌 於 2018 年 2 月 8 日

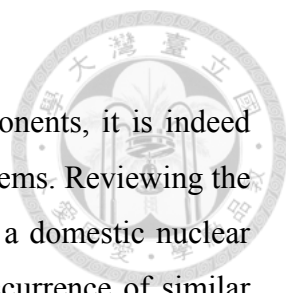
## 摘要

針對電廠結構與設備元件而言，隨機缺陷難免出現。然而，此類結構力學性能之完整性評估是相當棘手的問題。回顧 2012 年我國某一核電廠反應器壓力槽支撐裙板螺栓之斷裂事件，雖螺栓已經更換，坊間仍然存在修復後再次發生類似事件的疑慮。人們也擔心，假使同樣或類似事件再度發生，該支撐裙板是否仍然具備足夠的安全承載能力。如何以定量化且科學、不偏向的方式說服大眾，即是本研究之主要考量與目的。緣此，本研究提出一種合理可行的有限元素數值分析模型，處理需要考量大量隨機數據、雖簡化、但有效率且準確之力學分析，並結合統計檢定等相關學理處理分析結果。該結果既符合力學分析原理，也將不確定性所引致之風險納入考量，而達到前述本研究之目的。事實上，前述核電廠反應器壓力槽支撐裙板螺栓斷裂之力學分析也出現在美國電力研究院所出版的組件檢測導則中。該導則主要針對電廠反應器爐內組件無法檢測到的區域進行力學分析與檢測建議，但該分析保守假設裂紋具對稱性且穿壁，致使結構強度降低，並未探討裂紋隨機出現的問題。為改善該項保守假設，本研究採用前述所提模型與方法，另為較為合理的分析，並適當驗證分析結果。

綜觀電廠的安全評估問題，不單只是系統結構組件上的力學問題，對於安全至關重要的電氣電子設備也同樣存在類似的問題：隨機缺陷。美國核管會曾發佈對相關設備進行環境驗證的導則，但大多數以電氣設備較為完整，雖也曾針對含半導體電子構裝元件設備的物理失效機制進行一系列的研究，認為其若架設在溫和環境，也須證明其可正常運作而不致影響電廠設備安全運轉，但電子設備不斷推陳出新，規範導則則卻無法符合潮流，監測或儀控設備的核心元件在物理失效問題上僅能仰賴半導體設計廠商的數據，反觀目前大部分對此類電子構裝元件的可靠度研究中，則都是以完整、不含缺陷的構裝體為出發點考量，對於疲勞壽命的評估，往往忽略製程上所導致的缺陷問題。本研究延續前半部份一些理念，引用合理簡化模型的概念，配合經由數值實驗、力學公式所推導的模擬含空孔無鉛錫球之等效圓柱體及通式，將不同類型空孔在錫球內部以及隨機含空孔錫球在全域電子構裝元件分佈位置模擬出來，藉以評估其在加速環境下之疲勞壽命分佈，且引用適當的加速因子模型，推估其在電廠環境下的壽命，提供此類主動元件在維護上的參考。

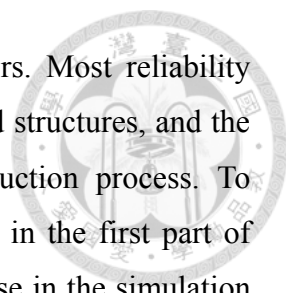
**關鍵詞：**隨機缺陷、有限元素模型、電子構裝元件、疲勞壽命、等效圓柱體

## Abstract



As random defects presenting in a system or electronic components, it is indeed quite difficult to solve such structural integrity and mechanical problems. Reviewing the anchor-bolt failure event of reactor pressure vessel support skirt in a domestic nuclear power plant in 2012, at that time there were doubts about the reoccurrence of similar incidents thereafter although the loosen bolts have been replaced. If the failure event of anchor bolts reoccurred, the question whether there is still enough tightening capacity to ensure safety of the whole system remains. Aiming to convince the public in an appropriate and quantitative manner that is not extremely conservative, this research begins with a proposed finite element model that handles a large number of random events and improves the efficiency of the analysis. Statistical tests and other related assessments to deal with such a random problem are also proposed. In fact, such a problem also appears in guidelines issued by the Electric Power Research Institute (EPRI), which is aimed at analyzing the undetectable area of the reactor pressure vessel should support (the two inner and outer circular weldments aside the support plate). However, the overall assessment is merely based on the assumption of symmetric through-wall cracks to reduce the structural strength for conservative reasons. The possible issue on random events is not explored. In this study, an improved analysis in consideration of random fracture anchor bolts is proposed to improve the treatment of cracked support plate. The efficiency method is verified with a large number of random events. It also shows in this dissertation that the proposed analysis for the discrete structures can also be applied to the continuous structures.

In the viewpoint of safety assessment on power plants, the random defects problem not only belongs to the mechanical issue of systems, structures and components, but also occurs on safety related electrical and electronic equipment. In fact, the US Nuclear Regulatory Commission (USNRC) has issued guidelines for environmental qualification for electrical and electronic equipment, but with little mentioning about the microprocessor-based equipment, despite a few studies on the physical failure of semiconductor-based equipment have been carried out in non-nuclear industry. Those guidelines considered that even under mild environments, such equipment should function normally without affecting the safe operation of power plants. However, the new type of microprocessor-based equipment, especially those used for monitoring and instrumentation continues to develop but its failure only relies



on the testing or analyzing data from semiconductor manufacturers. Most reliability studies of the electronic packaging are based on assuming integrated structures, and the evaluation of fatigue life often ignores defects induced in production process. To improve the shortcomings, the concept of rational model proposed in the first part of this dissertation is adopted, and an equivalent general formula for use in the simulation of lead-free solder ball containing void is derived in the second part of the dissertation. The formula results in simplified equivalent cylinders to replace solder balls containing random voids for use in the finite element simulation of packages. The fatigue life distribution of a package used in electrical or electronic equipment is determined under an accelerated environment. Its life under the normal operation of power plant can also be obtained. The result is also helpful for the maintenance of a power plant.

**Keywords:** Random defects, Numerical finite element model, Electronic packaging structure, Fatigue life, Equivalent cylinder

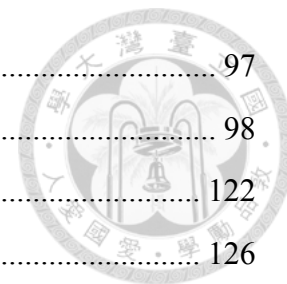
# 目 錄



口試委員會審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iii
Abstract .....	iv
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景、動機與目的 .....	1
1.2 研究流程 .....	4
1.3 論文架構 .....	5
本章參考文獻 .....	6
第二章 錨定螺栓在各種不同斷裂機率下所衍生最大軸向力評估法 .....	7
2-1 前言 .....	7
2-1 螺栓斷裂機率討論 .....	9
2-1-1 以再斷裂機率討論 .....	9
2-1-2 直接以斷裂根數進行統計分析 .....	9
2-3. 分析模型的建立與驗證 .....	10
2-3-1 建立快速的分析模型 .....	10
2-3-2 驗證 .....	14
2-4. 分析統計 .....	17
2-5 小結 .....	20
本章參考文獻 .....	21
第三章 焊道含隨機多穿壁裂紋之爐心側板支撐平板機率評估法 .....	23
3-1 前言 .....	23
3-2 有限元素模型及評估法 .....	25
3-3 數值驗證 .....	29
3-4 隨機裂紋分析與機率評估描述 .....	31
3-5 小結 .....	35
本章參考文獻 .....	36
第四章 從安全重要電氣設備至安全相關數位電子設備環境驗證規範與導則一探	

討半導體電子構裝元件於加速環境下熱疲勞分析評估 .....	38
4-1 前言 .....	38
4-2 環境驗證(Environmental Qualification)於重要安全電氣設備之相關規範彙整 .....	43
4-2-1 Regulatory Guide 1.89 之補充說明(驗證引用之 NUREG-0588 Part I 及 IEEE-323-1974) .....	45
4-2-2 Regulatory Guide 1.97(對儀控設備功能要求的導則) .....	49
4-2-3 Regulatory Guide 1.209 (具有對電子設備環境驗證要求的導則) .....	50
4-3 從物理機制失效模式探討具微處理器電子設備之環境驗證 (NUREG/CR-6479) .....	53
4-3-1 電子設備元件老劣化機制 .....	53
4-3-2 NUREG/CR-6479(具微處理器設備之環境驗證技術基礎) .....	56
4-3-3 加速測試彙整與 IC 電子構裝疲勞壽命評估 .....	57
4-3-4 基於位置類別的數位儀控系統設備驗證方法 .....	61
4-4 半導體微處理器電子構裝元件數值分析評估 .....	66
4-4-1 假設性驗證案例 .....	66
4-4-2 模型建立 .....	70
4-4-3 分析結果及壽命評估 .....	72
4-5 小結 .....	75
本章參考文獻 .....	76
本章附錄 安全相關電氣設備或系統(R. G. 1.89) .....	80
第 5 章 含製程引致隨機孔洞晶圓級電子構裝加速環境試驗之數值模擬 .....	81
5-1 前言 .....	81
5-2 含缺陷錫球之數值實驗 .....	84
5-2-1 數值實驗模型建立 .....	85
5-2-2 模擬含空孔之實體錫球 .....	85
5-2-3 等效圓柱體模擬 .....	89
5-3 等效通式建立 .....	90
5-4 數值實驗結果 .....	93
5-5 等效圓柱體全域分析模型建立 .....	96

5-6 疲勞壽命統計分析評估與加速因子 .....	97
5-6-1 含隨機缺陷之無鉛錫球(等效圓柱體)統計評估 .....	98
5-6-2 加速因子 .....	122
5-7 小結 .....	126
本章參考文獻 .....	129
第六章 結論與建議 .....	132
6-1 結論 .....	132
6-2 未來展望 .....	135
本章參考文獻 .....	135



## 圖 目 錄

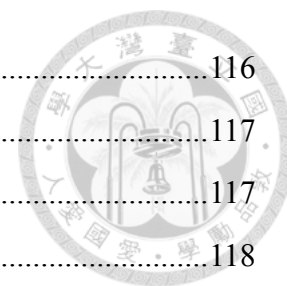


圖 1-1 機率風險評估研究進程[1].....	3
圖 1-2 摘自美國核管會數位控制儀控系統訓練教材[8].....	4
圖 2-1 沸水式反應器壓力槽支撐裙板內外側錨定螺栓位置與結構組態.....	8
圖 2-2 支撐裙板與載板之分析模型.....	11
圖 2-3 於內外壁施加力偶(向上及向下集中力).....	12
圖 2-4 樑元素模型.....	12
圖 2-5 兩組模型(樑元素 v. s. 實體元素)斷裂 8 根下的結果顯示.....	15
圖 2-6 螺栓斷裂 8 根，純彎矩施加角度從 $0^{\circ}$ ~ $360^{\circ}$ 每度計算螺栓最大軸向力.....	17
圖 2-7 不同隨機事件數目與平均最大軸向力.....	18
圖 2-8 不同斷裂根數與平均最大軸向力.....	19
圖 2-9 建立隨機斷裂事件的應用程式(自行開發).....	19
圖 2-10 最大軸向力區間中，樣本最大軸向力出現次數.....	20
圖 2-11 平均最大軸向力區間 717003.0~723260.0 lb.....	20
圖 3-1 爐心側板與側板支撐結構組態.....	23
圖 3-2 爐心側板支撐之焊道位置.....	25
圖 3-3 有限元素模型及模擬腳板之假設性保守裂紋.....	27
圖 3-4 將 H8 與 H9 焊道分割成 360 個離散的元素.....	27
圖 3-5 Inconel 600 鎳基合金之應力應變曲線 [1].....	28
圖 3-6 焊道 H8 及 H9 上的模擬裂紋.....	29
圖 3-7(a) Case 1: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷.....	33
圖 3-7(b) Case 2: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷.....	33
圖 3-7(c) Case 3: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷.....	33
圖 3-7(d) Case 4*: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷(*參考表 3 註記).....	34
圖 3-7(e) Case 5**: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷(**參考表 3 註記).....	34
圖 3-7(f) Case 6: 以 FEM 模型進行 360 度搜尋最小的安全餘裕(多裂紋).....	34
圖 3-7(g) Case 7***: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷(多裂紋)(***參考表 3 註記).....	35
圖 3-8 最大軸向力(螺栓)的機率分佈密度函數(PDF).....	35

圖 4-1 數位儀控系統配置示意圖 (圖片來源: [17]) .....	41
圖 4-2 數位儀控系統-人機介面(控制室) (圖片來源: [17]) .....	42
圖 4-3 伺服器層級之儀控設備(Computer-based instrumentation and control systems) (圖片來源: [17]).....	42
圖 4-4 微處理器在一般失效的驗證架構.....	60
圖 4-5 (a) 一般電廠配置示意圖 (b)環境分類.....	63
圖 4-6 單晶圓級電子構裝技術之 IC 晶片 .....	66
圖 4-7 二維剖面尺寸示意圖 .....	69
圖 4-8 晶元電子構裝之元件組態 .....	69
圖 4-9 1/4 對稱單晶圓級晶片分析模型 .....	70
圖 4-10 溫度循環負載示意圖 .....	71
圖 4-11 熱循環負載(4 Cycles) .....	72
圖 4-12 放大 60 倍之變形及產生最大潛變等效應變的錫球位置 .....	74
圖 4-13 潛變等效應變歷時變化.....	74
圖 5-1 扇外型晶圓級構裝 (FO-WLP: Fan-Out Wafer Level Packaging) [6].....	83
圖 5-2 典型覆晶球柵陣列 FCBGA 構裝斷面結構示意圖[7].....	84
圖 5-3 空孔形成類型[10] .....	84
圖 5-4 放大 20 倍之總位移量向量圖 .....	86
圖 5-5 僅含單顆錫球的電子構裝體模型 .....	86
圖 5-6 (a) 左圖: 邊界條件 (b)右圖: PCB 上的樑束制條件 .....	87
圖 5-7 (a)變位圖-顯示束制位置(b)在遠離固定束制邊的空孔(c)接近束制端的空孔(d) 中間位置 .....	88
圖 5-8 空孔位置與束制位置之影響比較.....	89
圖 5-9 等效圓柱體熱膨脹係數乘子通式之變數定義.....	91
圖 5-10 含中央空孔之無鉛錫球.....	91
圖 5-11 含中心空孔圓 .....	92
圖 5-12 (左側) 不含空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變;(右側)不含空 孔實體模型(N).....	93
圖 5-13 (左側)含 A 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變;(右側) 含 A 類型空孔實體模型 .....	94

圖 5-14 (左側)含 B 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 B 類型空孔實體模型 .....	94
圖 5-15 (左側)含 C 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 C 類型空孔實體模型 .....	94
圖 5-16 (左側)含 D 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 D 類型空孔實體模型 .....	95
圖 5-17 (左側)含 E 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 E 類型空孔實體模型 .....	95
圖 5-18 (左側)含 F 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 F 類型空孔實體模型 .....	95
圖 5-19 所有含空孔類型實體及不含空孔等效圓柱體模型潛變等效應變 .....	96
圖 5-20 等效圓柱體全域模型 .....	96
圖 5-21 實體無鉛錫球、1/4 等效圓柱與全域等效圓柱於潛變等效應變比較圖 .....	97
圖 5-22 100%含各類型空孔錫球隨機事件建立(空孔類型出現機率不等) .....	99
圖 5-25 50% A 類型空孔錫球計算結果(圖 4-3 隨機配置) .....	100
圖 5-26 100%含各類型空孔錫球隨機事件建立(空孔類型出現機率相等，Case 1) .....	101
圖 5-27 Case 1 最大潛變等效應變歷時(前三組事件之結果) .....	101
圖 5-28 100%各類型空孔隨機事件建立(高 CTE 乘子高出現機率，Case 2) .....	103
圖 5-29 Case 2 最大潛變等效應變歷時(前三組事件之結果) .....	103
圖 5-30 100%各類型空孔隨機事件建立(低 CTE 乘子高出現機率，Case 3) .....	104
圖 5-31 Case 3 最大潛變等效應變歷時(前三組事件之結果) .....	104
圖 5-32 50%各類型空孔隨機事件建立(左側的 N 代表完整錫球) .....	107
圖 5-33 50%各類型空孔隨機事件建立(高 CTE 乘子高出現機率，Case 4) .....	107
圖 5-34 50%各類型空孔隨機事件建立(低 CTE 乘子高出現機率，Case 5) .....	108
圖 5-35 最後一次熱循環下具有最大潛變等效應變之全域變形 .....	108
圖 5-36 最後一次熱循環下具有最大潛變等效應變之全域變形側視圖 .....	109
圖 5-37 Case 5 具有最大潛變等效應變之含空孔錫球位置 .....	109
圖 5-38 Case 1 疲勞壽命之常態機率圖法 .....	114
圖 5-41 Case 2 疲勞壽命之常態機率圖法 .....	116

圖 5-42 Case 2 疲勞壽命之對數常態機率圖法 .....	116
圖 5-43 Case 2 疲勞壽命之韋伯機率圖法 .....	117
圖 5-44 Case 3 疲勞壽命之常態機率圖法 .....	117
圖 5-45 Case 3 疲勞壽命之對數常態機率圖法 .....	118
圖 5-46 Case 3 疲勞壽命之韋伯機率圖法 .....	118
圖 5-47 Case 4 疲勞壽命之常態機率圖法 .....	119
圖 5-48 Case 4 疲勞壽命之對數常態機率圖法 .....	119
圖 5-49 Case 4 疲勞壽命之韋伯機率圖法 .....	120
圖 5-50 Case 5 疲勞壽命之常態機率圖法 .....	120
圖 5-51 Case 5 疲勞壽命之對數常態機率圖法 .....	121
圖 5-52 Case 5 疲勞壽命之韋伯機率圖法 .....	121
圖 5-53 10%各類型空孔隨機事件建立(高 CTE 乘子高出現機率, 45%).....	122
圖 5-54 均勻亂數取樣－拉丁超立方體取樣(Latin Hypercube Sampling, LHS)[27] .....	128

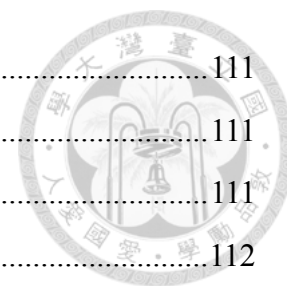


## 表 目 錄



表 2-1 錨定螺栓在 Faulted + SSE 組合下的承載負荷[2].....	11
表 2-2 驗證模型所採用之設計負荷[3].....	14
表 2-3 樑元素模型所需調整之純彎矩.....	15
表 2-4 不同 Load Case 下各模型最大軸向力計算值.....	16
表 2-5 模型驗證：不同樣本下各模型計算螺栓最大軸向力的結果.....	16
表 2-6 模型驗證：斷裂 8 根螺栓的角度位置.....	16
表 2-7 產生最大軸向力彎矩施加角度判斷公式之結果值.....	17
表 2-8 斷裂 7 根螺栓設計負荷為故障條件(Case 2)統計結果.....	18
表 3-1 設計負荷.....	28
表 3-2 案例 5~7 在 H8 及 H9 焊道的裂紋分佈位置.....	30
表 3-3 驗證案例.....	31
表 4-1 對安全至關重要及安全相關設備環境驗證引用規範分類表.....	41
表 4-2 環境驗證規範、導則與工業標準內容彙整.....	44
表 4-3 半導體元件在時間相關之失效機制.....	58
表 4-4 參考 NUREG/CR-6479 環境分類表之驗證要求.....	65
表 4-6 材料機械性質[32].....	67
表 4-7 95.5Sn3.9Ag0.6Cu 無鉛錫球潛變方程式之材料參數[32].....	69
表 4-3 Modified Coffin-Manson 疲勞壽命公式參數.....	72
表 4-4 假設之 C 類環境條件及計算之加速因子與熱循環次數.....	73
表 5-1 等效圓柱體材料機械性質.....	90
表 5-2 等效圓柱體配合通式(5-2)之模擬數值實驗.....	93
表 5-2 Modified Coffin-Manson 疲勞壽命公式參數.....	98
表 5-3 佔整體 50%A 類空孔 3 種隨機事件與 100%全為 A 類的分析結果.....	99
表 5-4 Case 1-100%皆有空孔(各類型空孔出現機率相等, 1/6).....	100
表 5-5 Case 2-100%皆有空孔(各類型空孔隨機出現機率, 高 CTE 乘子高出現機率) .....	102
表 5-9 統計彙整表.....	110
表 5-10 Case 1 常態分布統計檢定量.....	111

表 5-11 Case 1 對數常態分布統計檢定量 .....	111
表 5-12 Case 1 韋伯分布統計檢定量 .....	111
表 5-13 Case 2 常態分布統計檢定量 .....	111
表 5-14 Case 2 對數常態分布統計檢定量 .....	112
表 5-15 Case 2 韋伯分布統計檢定量 .....	112
表 5-16 Case 3 常態分布統計檢定量 .....	112
表 5-17 Case 3 對數常態分布統計檢定量 .....	112
表 5-18 Case 3 韋伯分布統計檢定量 .....	113
表 5-19 Case 4 常態分布統計檢定量 .....	113
表 5-20 Case 4 對數常態分布統計檢定量 .....	113
表 5-21 Case 4 韋伯分布統計檢定量 .....	113
表 5-22 Case 5 常態分布統計檢定量 .....	114
表 5-23 Case 5 對數常態分布統計檢定量 .....	114
表 5-24 Case 5 韋伯分布統計檢定量 .....	114
表 5-25 假設之 C 類環境條件及計算之加速因子與熱循環次數 .....	124
表 5-26 採用 Norris-Landzberg 加速因子模型計算之加速因子與熱循環次數 .....	125



## 第一章 緒論



### 1.1 研究背景、動機與目的

如何將確定或不確定因素所導致的結果定量化一直是工程界常遇到的問題，科學及統計學則是面對此問題的堅強後盾，而藉由量化資訊與技術經驗等規範法則的執行、研判，即為確保預期功能正常發揮的程序，並可更進一步剖析假設性失效帶來的風險，同時提供適切的防範措施與作為。事實上，這些一連串的過程一直不斷地在現實生活中重現，從圖 1-1 的歷史進程來看[1]，包含工安意外事故的發生、相當多風險相關的研究以及工程規範導則不斷的更新與發展，逐漸形成一套安全評估與維護的架構，而對於如何解決不確定因素所造成的工程問題則是本研究最初始的動機。

從 2012 年我國核電廠反應器壓力槽支撐裙板螺栓斷裂事件開始[2]，相關的肇因分析、修復設計積極地進行，但當時也存在著若修復後再次發生類似事件的疑慮，有些人士甚至質疑該支撐系統結構在部分螺栓斷裂情況下是否仍具有足夠的安全承載能力。對於此類不確定性之螺栓隨機斷裂問題，本研究即思考如何以定量、適當且不過於保守的力學分析方式，建構合理且簡化的數值分析模型，以利模擬大量隨機事件，同時搭配有效率的分析方法，找尋一定信心水準區間的分析結果，以達成隨機問題定量化研究的目標。

在美國電力研究院所出版與組件檢測導則有關的沸水式反應器壓力槽與爐內組件計畫(Boiled Water Reactor Vessel and Internals Project, BWRVIP) 中，其 BWRVIP-38 報告針對核電廠反應器爐心側板支撐內外兩組環狀焊道，提出一些力學分析與檢測的建議[3]。由於該兩處焊道因噴射泵的阻隔導致無法檢測，但其又為爐內安全至關重要組件，故該報告將無法檢測區域視為保守的穿壁裂紋。但問題在於這些區域又具對稱性，其所評估出來的殘餘結構強度是否保守、抑或是僅是降低結構原始設計強度難免遭人質疑，主要在於其並未探討可能出現隨機穿壁裂紋的問題。有鑑於此，本研究思考若能藉由模擬大量隨機事件的統計結果、尋找有效率處理大量隨機事件的方法，必定更可說服管制單位及電廠持照業主對於該等結構組件帶傷(含缺陷)運轉是否仍能確保安全的要求同時，也可驗證對於環狀

結構，運用第二章對於螺栓陣列離散系統的處理方法，於此爐心側板支撐焊道連續結構的模型之適用性。

在規範要求方面，可依據 ASME B&PV Codes, Section XI, Appendix C [4]所定義極限負荷的章節，配合其對允許裂紋之安全餘裕要求，即可推估裂紋範圍比例下的結構安全可靠度。

綜觀核電廠的安全評估，不單純只是系統結構組件上的力學問題，對於安全至關重要的電氣電子設備也同樣存在類似的問題：隨機缺陷。美國核管會曾發佈核電廠電氣電子設備之環境驗證導則[5]，但大多數以電氣設備，如電動閥、電纜等較為完整，雖也曾針對電子數位儀控設備(包含監測、量測設備)之含半導體微處理器電子構裝元件的物理失效機制進行一系列研究[6]，認為其若架設在溫和環境，亦須證明其可正常運作而不致影響電廠設備安全運轉[7]。但隨著電子工業的發展，相關設備遵循著摩爾定律(Moore's law)不斷推陳出新，如圖 1-2 摘自於美國核管會數位控制儀控系統訓練教材[8]，傳統電廠主要的儀控元件如該圖左側，而現今半導體技術的進展則呈現右側之圖。從電廠安全管制的角度而言，目前所引用的法源依據，可能無法代表其在實務上對電子設備能有效監管，亦即，規範可能過時而來不及更新。具安全相關之電子監測或儀控設備的核心元件在物理失效問題上，卻僅能仰賴半導體元件設計廠商的測試或分析數據。反觀目前大部分對此類微處理器電子構裝元件的可靠度研究中，大多以構裝元件具有完整錫球(引腳)作為分析對象，而電子構裝元件的壽命主要取決於錫球結構的完整性，亦即所謂的壽命評估皆是從設計廠商的角度來評估問題，其往往忽略製程導致的缺陷問題，況且在製程中則可能造成隨機缺陷的現象，而其是否對疲勞壽命的變異性帶來重要的影響，應也是需探討的課題之一。本研究有鑑於此，思考若能引用前述合理簡化模型的概念，將隨機空孔缺陷在錫球內部以及含空孔錫球在全域電子構裝元件隨機分佈的位置模擬出來，藉以評估其在加速環境下之疲勞壽命分佈，且引用適當的加速因子模型推估電子構裝元件在電廠環境下的壽命，定可提供該類主動元件(有別於系統結構之被動組件)在維護上的參考。

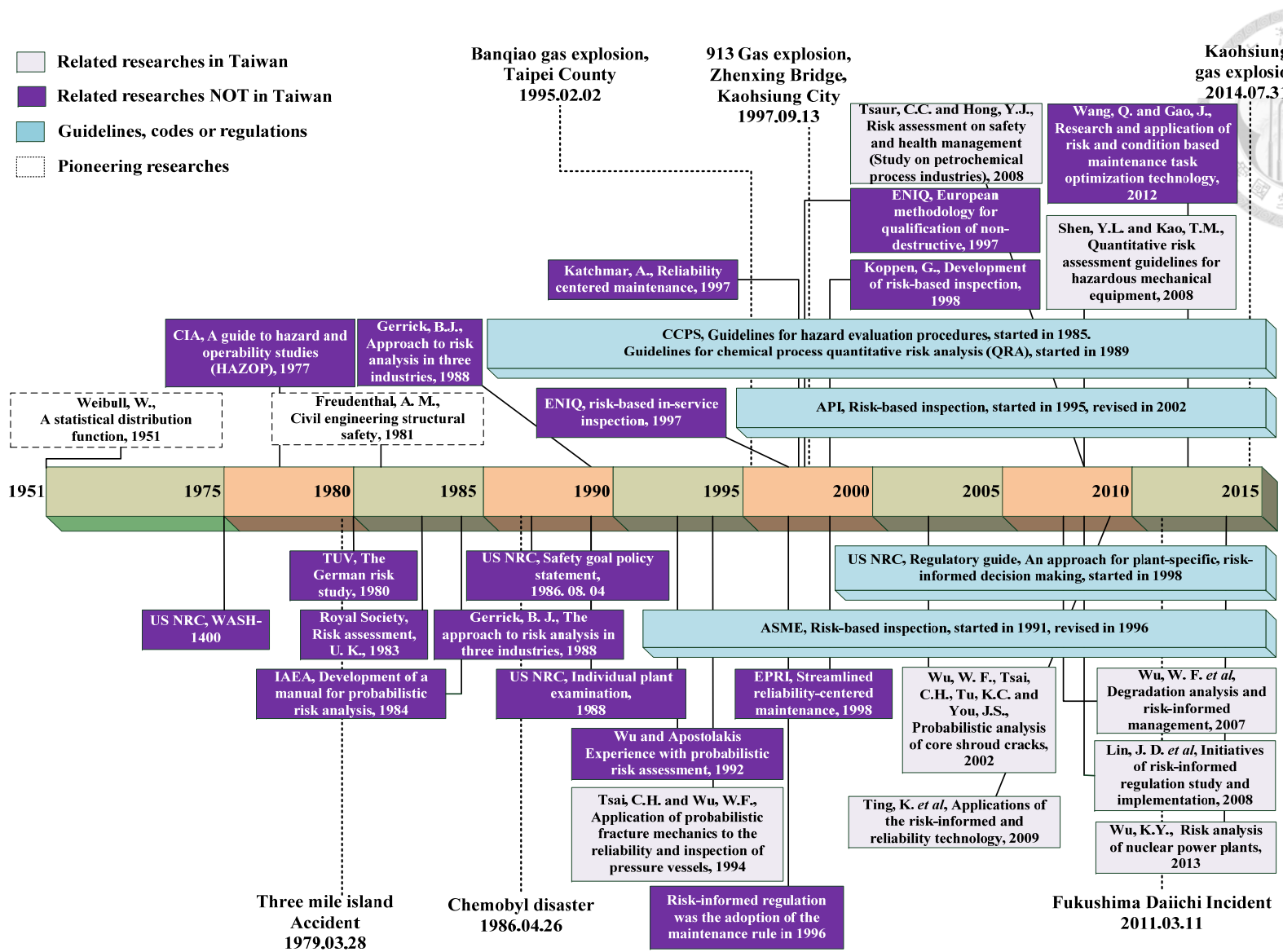


圖 1-1 機率風險評估研究進程[1]



Figure 1-83 Field Programmable Gate Array Illustration

圖 1-2 摘自美國核管會數位控制儀控系統訓練教材[8]

## 1.2 研究流程

本研究期望開發一套力學分析方法以運用於各種具有不確定因素的工程問題中，然而，每個工程問題都有其獨特性，唯有藉由不斷剖析各個問題解決方法的細節與流程，方可歸納出較具一致性的處理架構。本論文第二章及第三章將介紹含隨機缺陷系統結構組件的力學評估流程，在第四章則是彙整美國核管會所發布對電氣及電子設備的導則及相關研究報告，並由此歸納其對電子設備中含半導體微處理器的電子構裝元件在環境驗證的規範及評估方法，並藉由此進行一假設性案例的分析。而由第四章的分析經驗及相關的研究文獻，可探討對含隨機缺陷的電子構裝元件在加速環境下疲勞壽命的影響，對此不確定性的問題，在第五章同樣以數值模型的簡化到樣本空間之事件建立評估方法：採用等效圓柱體搭配熱膨脹係數通式，對含缺陷錫球的電子構裝元件進行全域分析，完成一系列不確定性工程問題的分析流程。

本研究各章節所探討的結構組件及設備元件，在具有隨機缺陷的情況下，其缺陷型態的樣本空間相當龐大(比例、位置或數量)。因此，如何將含缺陷結構的模擬分析模型合理的簡化，並且反映出具有缺陷與不含缺陷，或不同缺陷類型間的差異，這是本研究主要的課題。其次探討單一樣本空間事件的求解效率問題，最

後則是應用隨機程序(Random Process)程式的開發，其亦必須能客觀反映樣本空間可能的情況。



### 1.3 論文架構

本論文主要分為六章，各章標題、簡要內容及其間的關聯性如下。

- 第一章 緒論：主要說明研究背景、動機與目的，也說明研究流程與本論文的架構。
- 第二章 錨定螺栓在不同斷裂機率下所衍生最大軸向力之評估方法：主要是2012年電廠螺栓斷裂事件的後續探討，將提出簡化的力學分析模型並驗證模型分析結果，同時也開發一個能快速搜尋環形離散結構斷面最弱軸的方法，而藉由自行開發之隨機螺栓斷裂建模軟體程式，建立大量隨機事件，以進行後續統計分析與評估。
- 第三章 爐心側板支撐平板焊道含隨機且多個穿壁裂紋之機率力學評估方法：先介紹美國電力研究院對爐心側板支撐平板的評估方法與檢測建議，指出該評估方法的缺點，並提出考量隨機裂紋的評估模式，同時也規劃出以可靠度為依據的評估概念與流程。本章將第二章的概念應用在環形連續體上，再次證實所提方法的可用性。
- 第四章 從安全重要電氣設備至安全相關數位電子設備環境驗證導則—探討半導體電子構裝元件於加速環境下熱疲勞分析評估：主要探討半導體微處理器電子構裝元件在環境驗證下的物理失效機制問題，並以一個新式電子構裝元件在加速熱循環環境下的力學分析為案例，探討其壽命分佈與可靠度。如同前述兩章所探討的結構組件(屬被動組件—老劣化狀況隨環境影響)，此類電子構裝元件雖屬主動元件(元件本身運作造成老劣化現象)，但所應用的力學分析方法並無明顯不同。
- 第五章 考量錫球含有隨機空孔(缺陷)電子構裝加速環境試驗之數值模擬：本章主要評估電子構裝體的疲勞壽命，如同前面二、三章一樣，其係結構體中含有隨機缺陷的力學問題。本章藉由數值實驗、力學公式所推導的模擬，提出一可模擬各類型之含空孔無鉛錫球之等效通式，可迅速將錫球內部含隨機空孔的力學行為模擬出來，藉以評估構裝體在各

種不同加速環境下之疲勞壽命分佈與可靠度。

第六章 結論與建議：總結各章研究結果，彙整本論文研究結論，並對未來可行研究方向提出建議。



### 本章參考文獻

- [1] W. F. Wu, S. R. Lin and J. S. You, "Risk-Based Inspection and Maintenance in Process Plants and Their Practices in Taiwan," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 39, No. 4, p. 392-403, 2016.
- [2] 台灣電力公司，核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓破壞力學及疲勞評估報告，2012年6月。
- [3] EPRI, BWR Vessel and Internals Project, BWR Shroud Support Inspection and Flaw Evaluation Guidelines, (BWRVIP-38), EPRI TR-108823, September 1997.
- [4] ASME, ASME B&PV Codes, Section XI, Nonmandatory, Appendix C, Evaluation of Flaws in Piping, 2007 Version.
- [5] USNRC, Regulatory Guide 1.89, Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants, Revision 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, June 1984.
- [6] Korsah, K. et al., Technical Basis for Environmental Qualification of Microprocessor-Based Safety-Related Equipment in Nuclear Power Plants, NUREG/CR-6479, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, January 1998.
- [7] USNRC, Regulatory Guide 1.209, Guidelines for Environmental Qualification of Safety-Related Computer-Based Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, March 2007.
- [8] USNRC Technical Training Center, Digital Instrumentation & Control Training, E-114, 2007.

## 第二章 錨定螺栓在各種不同斷裂機率下所衍生最大軸向力評估法



### 2-1 前言

沸水式反應器(Boiled Water Reactor, BWR)壓力槽支撐裙板內外側各有 60 根錨定螺栓，位置與結構組態[1]，如圖 2-1 所示，其主要功能在於防止反應器壓力槽橫向滑動，屬反應器載板(Pedestal)與裙板緊密接合的重要組件[2]，在兩者間傳遞負荷並將反應器穩固座落於反應器廠房土木結構上，因此錨定螺栓之結構完整性將影響反應器在各種運轉狀態下之支撐狀況[3]。

對大多數 BWR 電廠而言，錨定螺栓的材質均使用 ASTM A540 等級之低合金鋼[4, 5]，此類高強度螺栓常被使用於穩固結構組件上，在相關老劣化管理導則報告中曾提及，該類螺栓若其降伏強度大於或等於 150 ksi，建議應檢監測其是否有裂紋[6]。因該高強度螺栓具有受到應力腐蝕龜裂(Stress Corrosion Cracking)之潛在疑慮。而應力腐蝕龜裂的成因在多數文獻中亦有提及，主要三個因素為：材料、腐蝕環境以及應力[7]。就腐蝕環境而言，在反應器壓力槽底部，雖無直接接觸水汽之影響，但在結構建造初期不慎將水汽鎖入螺牙間隙中，在長期處於拉張應力的螺栓而言，即有可能處於上述三個主要應力腐蝕因素中。此外，預拉螺栓鎖緊力的過程中，施工品質差異性，同樣可能導致細微裂紋的產生。

基於上述對於錨定螺栓可能發生初始裂紋(Initial Crack)的機制，加上運轉期間螺栓承受荷載後其內力的交替變化，疲勞因素導致裂紋的成長並造成斷裂，對系統上任何一根錨定螺栓而言，都是具有獨立性且相同的機會造成。

此外，以機率破壞力學評估結構完整性的角度來看，針對反應器內部組件，如爐心側板(Core Shroud)、反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel)或管路，已有相當多相關的研究與討論[8, 9, 10]，大多經由材料試驗結果以及電廠運轉經驗做為樣本，配合可能的暫態荷載進行評估，或由線彈性破裂準則[11]驗證結構之完整性。但在評估壓力槽支撐裙板錨定螺栓群而言，本質上則與前述之評估對象有系統連續性與離散性的差異，若能以前述的方式進行對單根螺栓的評估再推廣至整體裙板螺栓群，或許是一種較完整性的方法，但對於離散的螺栓系統而言，經由裂紋與材料試體樣本斷裂韌性分布的計算模式[12]可能較不具有效益，因需先討論支撐裙板上所有螺栓的可能裂紋分布，其次再經過大量計算及參數考量，如研判預緊力的下降或螺栓是否已達斷裂無法承受外力的狀況，另一個方面即是考慮已全喪

失或半喪失功能之螺栓位置分布，之後才能藉由有限元素分析以判定系統的結構安全性。

因此依據上述的觀點，在本章中提出一種較簡易及快速結構完整性之評估方法，直接以保守的假設斷裂機率，即假設螺栓已完全斷裂，配合隨機亂數的方式獲得內圈已完全斷裂螺栓分布的位置，剩餘之螺栓與外圈 60 根螺栓視為一組隨機事件，在各隨機事件中先獲得使螺栓具有最大軸向力時的固定彎矩施加角度，藉由有限元素分析軟體 ABAQUS 計算各樣本最大軸向力，最後則由統計 T 分配法 (Student's T-Distribution)，推估 95% 信心水準下整體裙板螺栓群承受荷載後，其單根受力最嚴重螺栓可能具有之平均最大軸向力區間。

藉由此可能平均最大軸向力區間，配合各種安全性檢覈規範(如 ASME B&PV Codes, Section III, NF [13])可提供機組是否繼續運轉之參考依據，如此可避免直接假設斷裂螺栓互相緊鄰，因而計算過於保守之螺栓最大軸向力，嚴重則造成不必要之停機。最後回到二項式定理推估螺栓斷裂的機率，在任何假設螺栓斷裂速率 (Failure Rate) 下，即使計算出發生的機率相當低，亦可結合此評估法說明事件發生後螺栓可能的受力狀態。

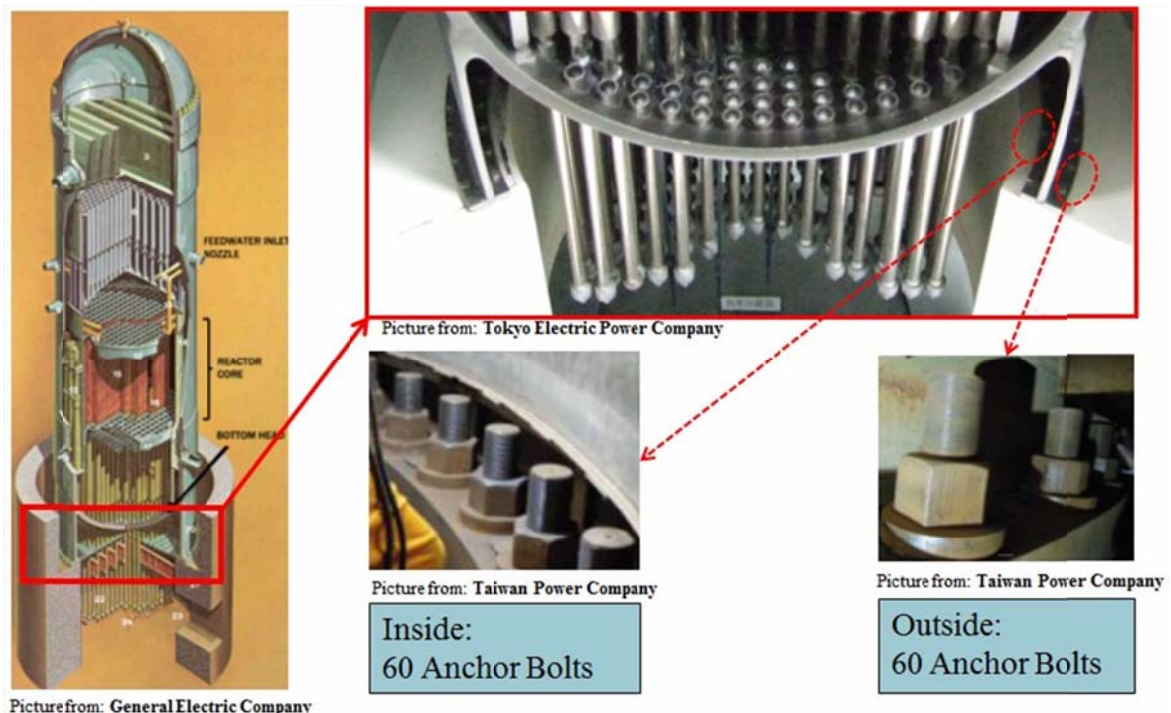


圖 2-1 沸水式反應器壓力槽支撐裙板內外側錨定螺栓位置與結構組態



## 2-1 螺栓斷裂機率討論

一般而言，核電廠若發生錨定螺栓斷裂事件，可由兩種完全斷裂機率的計算方式加以延伸推估未來再發生之可能性。

### 2-1-1 以再斷裂機率討論

先以實際發生的狀況做為單一事件，獲得螺栓斷裂(失效)率(Failure Rate)，其次再以二項式分配推估往後每年可能發生再斷裂的機率。例如，假設某電廠運轉20年後發現支撐裙板內壁側錨定螺栓共60根螺栓中斷裂5根，外側則無發現斷裂螺栓，其後約一年再次發生斷裂螺栓根數的機率可藉由統計學之二項式分配公式計算如下：

$$C_n^{55} \left(\frac{5}{60} \times \frac{1}{20}\right)^n \times \left(1 - \frac{5}{60} \times \frac{1}{20}\right)^{(55-n)} \quad (2-1)$$

其中，

n：其後一年發生斷裂之錨定螺栓根數。

由上式(2-1)可知，螺栓同時再斷裂根數越多，發生機率越低，但仍無法確定即使發生後，剩餘螺栓的最大內力是否仍可保有結構之完整性，特別是僅由斷裂根數討論。

### 2-1-2 直接以斷裂根數進行統計分析

依據前節以斷裂根數評估方式討論，假設螺栓在發生斷裂後遂進行修復作業，假設環境因素造成斷裂的機制仍未改變，而為保守起見，新修復的螺栓採用相同的螺栓斷裂速率，其後約一年再次發生斷裂螺栓根數的機率亦可藉由統計學之二項式分配公式計算如下：

$$C_n^{60} \left(\frac{5}{60} \times \frac{1}{20}\right)^n \times \left(1 - \frac{5}{60} \times \frac{1}{20}\right)^{(60-n)} \quad (2-2)$$

其中，

n：其後一年發生斷裂之錨定螺栓根數。

同樣由公式(2-2)可知，螺栓同時再斷裂根數的發生機率相當低，同樣仍無法確定即使發生後，剩餘螺栓的最大內力是否仍可保有結構之完整性，特別是僅由斷裂根數討論。

基於上兩節螺栓斷裂機率的說明，本章提出一種較簡易及快速結構完整性之評估方法，直接以保守的假設斷裂機率(螺栓斷裂根數/裙板內壁側螺栓總數)，配

合隨機亂數的方式獲得內圈斷裂螺栓分布的位置，剩餘之螺栓與外圈 60 根螺栓視為一組隨機事件，在各隨機事件中藉由斷裂位置計算面積二次矩，此二次矩為彎矩施加角度(變數)的函數，對其變數一次微分後可獲得使螺栓具有最大軸向力時的固定彎矩施加角度，將此計算出的角度，配合有限元素分析軟體 ABAQUS，建立一組簡易的樑元素模型(BEAM Element Model)，同樣考慮螺栓預緊力的效應以及等效之最大的運轉設計荷載，計算各樣本最大軸向力，最後則由統計 T 分配法，推估 95%信心水準下整體裙板螺栓群承受荷載後，其單根受力最嚴重螺栓可能具有之平均最大軸向力區間。

本評估法配合二項式定理計算出的螺栓斷裂機率，完整說明反應器支撐裙板內壁側螺栓在發生各種完全斷裂機率下，其可能造成剩餘螺栓平均最大軸向力的大小，由此平均最大軸向力再進行法規規範的檢覈，藉此可歸納出兩點安全上的意見：1、發生再斷裂的機率極低；2、即使發生再斷裂，95%信心水準下整體裙板螺栓群承受荷載後，其單根受力最嚴重螺栓可能具有之平均最大軸向力區間可由本評估法計算出。

### 2-3. 分析模型的建立與驗證

為求得反應器支撐裙板內壁側錨定螺栓在各種完全斷裂機率下的平均最大平均軸向力，內壁側錨定螺栓群在隨機亂數篩選下將形成不同的完全斷裂位置分布，組件剩餘的螺栓群定義為一組隨機事件，每組隨機事件均須進行一次運轉設計荷載下的內力計算，如此大量的運算，必須採用快速且準確的計算模式，方可達到最有效益的評估方式，以下將說明如何由三維的支撐裙板分析模型簡化至樑元素模型，此外，由斷裂位置的二次面積矩快速計算出最大軸向力的彎矩施加角度的方式，也將提出詳細之說明，最後則選取部分計算結果加以驗證。

#### 2-3-1 建立快速的分析模型

沸水式反應器壓力槽支撐裙板之位置與結構組態可參考圖 2-1 所示，錨定螺栓在各種運轉狀態(Service Level)下之支撐狀況，可由三維的支撐裙板分析模型計算出，而反應器壓力槽的運轉設計最大負荷如表 2-1 所列，最大的負荷暫態為損壞條件(Faulted Condition) 加上安全停機地震值(Safe Shutdown Earthquake, SSE)，其中傾倒彎矩(Overturning Moment,  $M_{TOTL}$ )、垂直上昇力(Vertical Upward Force,  $V_y$ )及壓

力槽周向熱引均佈彎矩(Thermal-induced Circumferential Moment of Circumference based on Mean Diameter of RPV Skirt,  $M_C$ )三者會造成錨定螺栓拉應力，而垂直上昇力係指安全釋壓閥(Safety Release Valve)沖放所造成的向上拉力。

因此，考慮上述設計負荷的作用方式及位置，一般的合理的有限元素分析模型將會如圖 2-2 的形式建立，該模型考慮了裙板與載板的接觸及摩擦係數 $\mu$ 。裙板在承受純彎矩(傾倒彎矩)的作用下，裙板模型的高度並無絕對的重要性，純彎矩施加位置則是在裙板上橫截面的耦合參考點(Coupling Reference Point)。另外兩組力則同樣施加在裙板橫截面上，垂直上昇力是以均佈載重的方式施加，周向熱均佈彎矩則是採用力偶(Force Couple)的方式，對裙板壁 60 個等分點施加向上及向下的集中力，如圖 2-3 所示。

表 2-1 錨定螺栓在 Faulted + SSE 組合下的承載負荷[2]

項次	名稱	符號	值
1	傾倒彎矩	$M_{TOTL}$	3125000 <i>in-kips</i>
2	最大剪力	$H_{TOTL}$	6275 <i>kips</i>
3	扭矩	$M_T$	241412 <i>in-kips</i>
4	垂直上昇力	$V_y$	890 <i>kips</i>
5	反應器壓力槽平均半徑上圓周熱引徑向剪力 (Thermal-induced Radial Shear of Circumference based on Mean Diameter of RPV Skirt)	$H_C$	40 <i>kips/in</i>
6	壓力槽周向熱引均佈彎矩	$M_C$	325 <i>in-kips/in</i>
7	摩擦係數(裙板法蘭與基座)	$\mu$	0.35

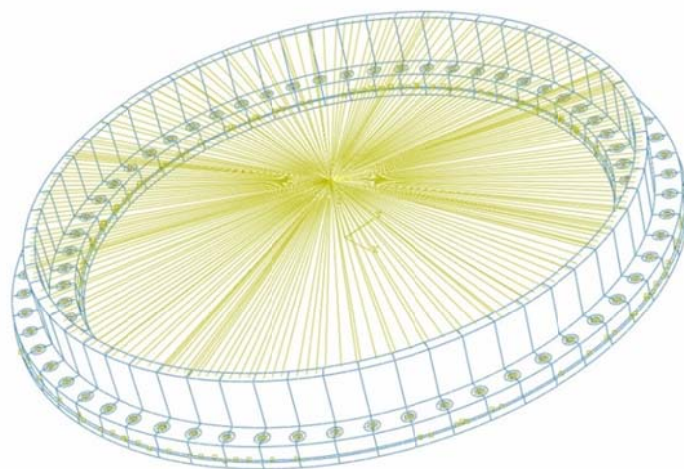


圖 2-2 支撐裙板與載板之分析模型

在建立大量隨機事件前，前述的模型設定方式若直接進行計算，必定會花費相當大的時間及計算資源，尤其是計算牽涉到接觸力學時，收斂的時間往往過長。因此，建立一組快速且準確的分析模型就顯得相當重要，由於關鍵點在於求取運轉設計負荷下的螺栓內力，裙板與載板則可以簡化的剛體模擬，而傾倒彎矩、垂直上昇力及壓力槽周向熱均佈彎矩這三組主要的外力，直接假設一個單一的純彎矩作用於一組樑元素模型，如圖 2-4，使其對螺栓的拉力影響等效於裙板、載板及螺栓群實體元素模型(Solid Element Model)的分析。

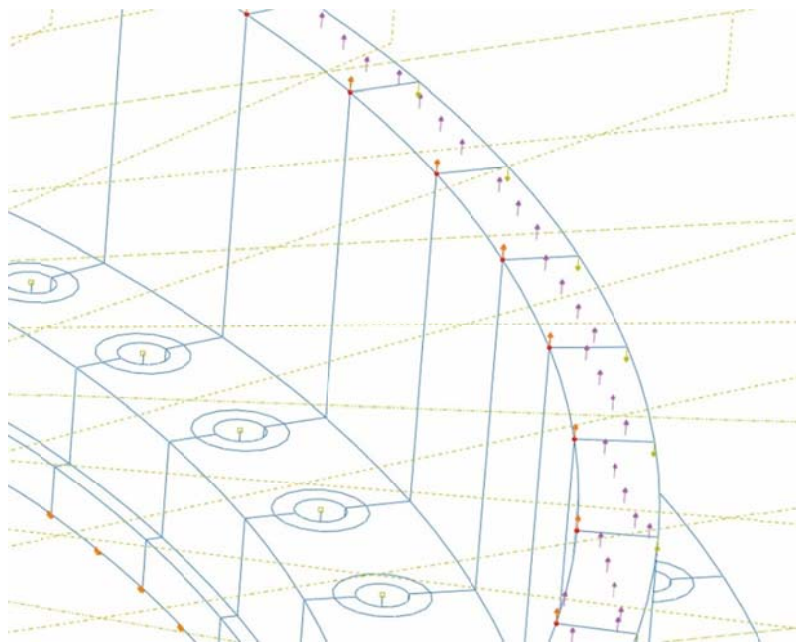


圖 2-3 於內外壁施加力偶(向上及向下集中力)

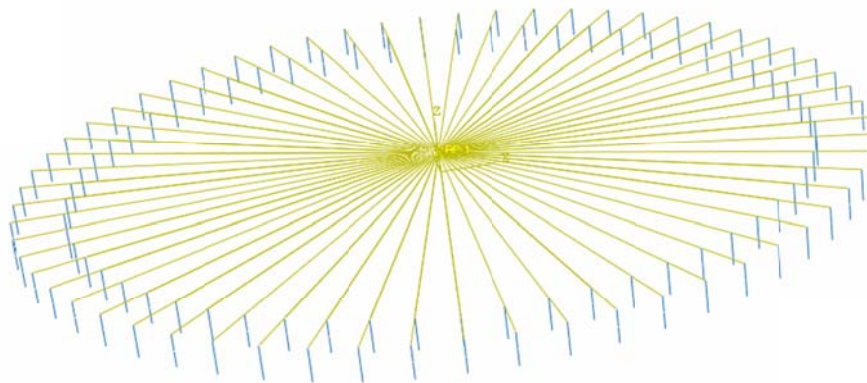


圖 2-4 樑元素模型



在下小節的驗證中，將說明由無斷裂螺栓的實體元素模型作為計算結果值的基準，調整樑元素模型的純彎矩負荷，計算出接近相等的軸向力結果，再將此等效彎矩施加於含已斷裂螺栓的樑元素模型，其與相同斷裂狀況的實體元素模型比較，計算結果誤差低於 5.0%。

本評估法的另一項重點則是在於：如何快速尋找產生最大軸向力的彎矩施加角度的方式，與一般對於計算面積二次矩的方式有所不同，本評估法是以支撐裙板內壁側完全斷裂螺栓位置進行計算，彎矩施加角度為此二次矩的主要變數，對此含變數之面積二次矩進行一次微分，當一次微分值等於零時，便可獲得四組可能的方向；其公式如下表示：

$$I(\theta) = \sum_{i=1}^N [R \sin(A_i - \theta) + h]^2; \quad (2-3)$$

其中，

$I(\theta)$  為面積二次矩；

$N$  為螺栓斷裂根數；

$R$  為內壁側螺栓群圓心至環形支撐裙板圓心距離；

$A_i$  為斷裂螺栓位置角度，即環形支撐裙板圓心角；

$h$  為中性軸偏移量。

經過一次微分後，並令微分等於零，上式化為：

$$\frac{dI}{d\theta} = \sum_{i=1}^N [-R^2 \sin(2A_i - 2\theta) + Rh \cos(A_i - \theta)] = 0; \quad (2-4)$$

上式再藉由和角公式簡化：

$$\begin{aligned} \frac{dI}{d\theta} = & -R^2 \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \sin(2A_i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N \sin(2A_i)]^2 + [\sum_{i=1}^N \cos(2A_i)]^2}} \cos 2\theta - \frac{\sum_{i=1}^N \cos(2A_i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N \sin(2A_i)]^2 + [\sum_{i=1}^N \cos(2A_i)]^2}} \sin 2\theta \right] - \\ & 2Rh \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \cos(A_i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N \sin(A_i)]^2 + [\sum_{i=1}^N \cos(A_i)]^2}} \cos \theta - \frac{\sum_{i=1}^N \sin(A_i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N \sin(A_i)]^2 + [\sum_{i=1}^N \cos(A_i)]^2}} \sin \theta \right] = 0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

上式將  $R$  及  $h$  視為與  $\theta$  無關的函數，再次簡化為：

$$\frac{dI}{d\theta} = -R^2 [\sin(A^* + 2\theta)] - 2Rh [\cos(B^* - \theta)] = 0; \quad (2-6)$$

或



$$\frac{dl}{d\theta} = -R^2[\text{Sin}(A^* + 2\theta)] - 2Rh[\text{Cos}(B^* + \theta)] = 0 ; \quad (2-7)$$

其中， $A^*$ 、 $B^*$ 為(3)式經和角公式化簡後所得的角度值。

令上式 $\text{Cos}(B^* - \theta)$ 或 $\text{Cos}(B^* + \theta)$ 以及 $\text{Sin}(A^* + 2\theta)$ 等於零，即可找出面積二次矩最大及最小值，經數值試驗發現，主要關鍵是要先找出 $\text{Cos}(B^* - \theta)$ 為零或 $\text{Cos}(B^* + \theta)$ 為零的角度值，而由 $0^\circ \sim 360^\circ$ 搜尋中可找出4組方向。故每組隨機事件可能最多建立4組(最少2組)分析模型，再經由計算結果篩選出最大值。

### 2-3-2 驗證

表 2-1 列出支撐裙板錨定螺栓在最嚴重的狀況下的設計負荷，針對螺栓承受拉力的設計負荷，本節再列出其他可能的設計負荷以供驗證，表 2-2 則是列出驗證所使用的設計負荷，這些負荷將先經由無斷裂螺栓的實體有限元素模型(含支撐裙板及載板)作為計算螺栓軸向力結果值的基準，其次再調整樑元素模型的純彎矩負荷，由於純彎矩施加在耦合的參考點上，其效果如同設定裙板為剛體，所有外力作用的能量將直接傳到螺栓，使得螺栓的受力過大，因此，作用的純彎矩必須經過調整，但主要使其螺栓軸向力的計算結果趨近於實體有限元素模型，表 2-3 列出純彎矩的調整值，表 2-4 則是列出兩種模型在無斷裂螺栓的狀況下，各自計算出螺栓最大軸向力的結果。

表 2-2 驗證模型所採用之設計負荷[3]

案例(Cases)	設計負荷	螺栓預力 (kips)
Case 1 故障條件+安全停機地震 Faulted Condition + SSE	1. 傾倒彎矩: ● $3.125 \times 10^9 \text{ lb-in}$ 2. 安全釋壓閥向上拉昇力: ● $-352 \text{ lb/in}^2$ 3. 周向熱引均佈彎矩: ● $897710 \text{ lb (Couple Force)}$	680
Case 2 故障條件 Faulted Condition	1. 傾倒彎矩: ● $2.312 \times 10^9 \text{ lb-in}$ 2. 安全釋壓閥向上拉昇力: ● $-352 \text{ lb/in}^2$	680
Case 3 正常/異常條件 Normal/Upset Condition	1. 傾倒彎矩: ● $1.156 \times 10^9 \text{ lb-in}$ 2. 周向熱引均佈彎矩: ● $368080 \text{ lb (Couple Force)}$	680

其次則是驗證含斷裂螺栓的兩種模型，任意取三組樣本進行驗證，斷裂根數分別為 6、8 及 9。斷裂 6 根的設計負荷為正常/異常條件(Normal/Upset Condition)，斷裂 8 根的設計負荷為故障條件+安全停機地震(Faulted Condition + SSE)，斷裂 9 根的設計負荷為故障條件(Faulted Condition)。計算結果列於表 2-5，圖 2-5 則是取斷裂 8 根下的結果顯示，兩種模型斷裂螺栓的角度列於表 2-6。由表 2-7 可以發現，此種模型簡化的方式確實可以達到良好的效果，在不同的負荷條件或螺栓斷裂不同根數下，最大的誤差始終不會超過 5%。

表 2-3 樑元素模型所需調整之純彎矩

模型	樑元素模型 純彎矩 (lb-in)
Case 1 故障條件+安全停機地震	$2.0833 \times 10^8$
Case 2 故障條件	$7.3397 \times 10^7$
Case 3 正常/意外條件	$1.4563 \times 10^7$

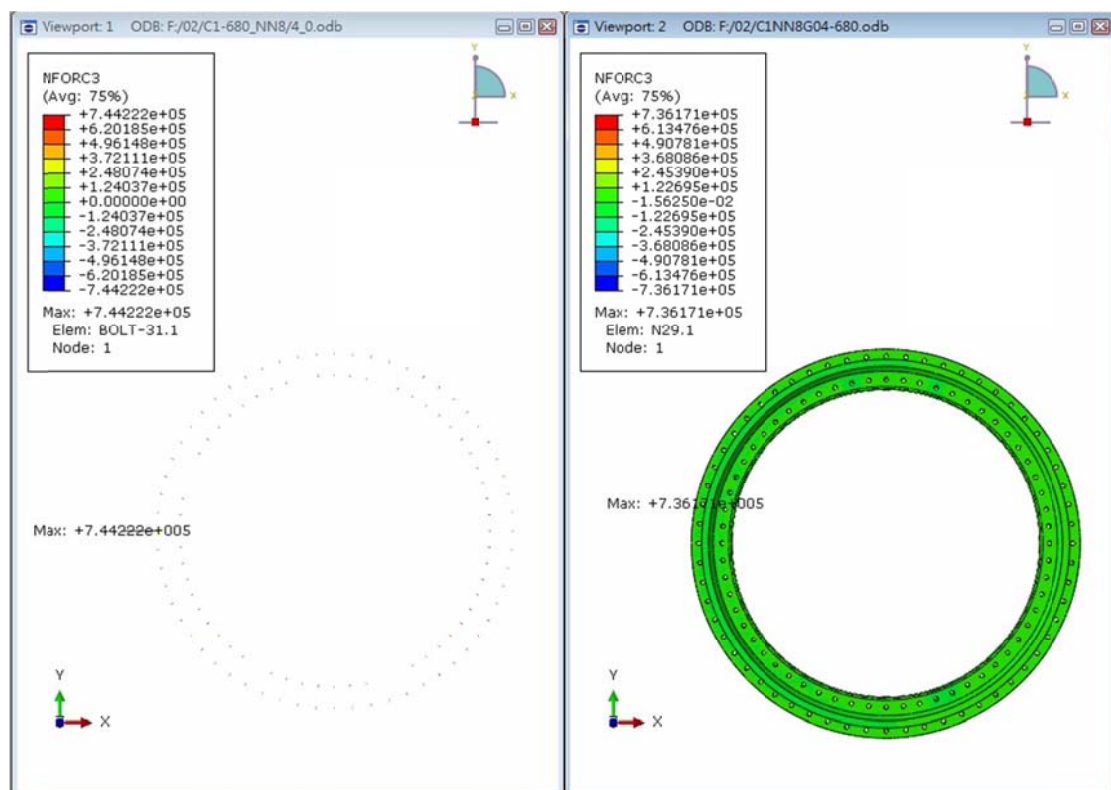


圖 2-5 兩組模型(樑元素 v.s. 實體元素)斷裂 8 根下的結果顯示

最後則是驗證樑元素模型在純彎矩作用下，施加彎矩的角度依據前小節公式(2-4)的計算，是否可使螺栓產生最大軸向力。同樣利用斷裂 8 根螺栓的樑元素模型，斷裂角度同樣採用表 2-8 所列的位置，而後採用 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 每一度施加同一荷載(純彎矩)，圖 2-6 顯示彎矩施加的角度變化下，最大軸向力的大小同樣隨之改變，表 2-9 則是列出前小節公式(2-4)的計算結果，藉由該式將會產生四組角度，而各角度產生一組模型，模型經計算後，最後再由排序找出最大軸向力(最後結果落在 $88^{\circ}$ 的位置)。

表 2-4 不同 Load Case 下各模型最大軸向力計算值

案例 \ 模型	樑元素模型*	實體元素模型* (裙板、載板)
	最大軸向力 (lb)	最大軸向力 (lb)
Case 1 故障條件+安全停機地震	$7.1248 \times 10^5$	$7.1229 \times 10^5$
Case 2 故障條件	$6.9145 \times 10^5$	$6.9136 \times 10^5$
Case 3 正常/意外條件	$6.8228 \times 10^5$	$6.8191 \times 10^5$

\*模型內無斷裂螺栓

表 2-5 模型驗證：不同樣本下各模型計算螺栓最大軸向力的結果

案例 \ 模型	樑元素模型	實體元素模型 (裙板、載板)	誤差 (%)
	最大軸向力 (lb)	最大軸向力 (lb)	
Case 1 斷裂 8 根螺栓	$7.4422 \times 10^5$	$7.3617 \times 10^5$	1.09
Case 2 斷裂 9 根螺栓	$7.2540 \times 10^5$	$7.0192 \times 10^5$	0.55
Case 3 斷裂 6 根螺栓	$6.9452 \times 10^5$	$6.8167 \times 10^5$	1.89

表 2-6 模型驗證：斷裂 8 根螺栓的角度位置

編號	1	2	3	4	5	6	7	8
角度 *(度)	72	102	156	162	180	240	288	294

\*以平面 X 軸為角度 $0^{\circ}$ 的起點，逆時針方向旋轉之圓心角定義螺栓位置

表 2-7 產生最大軸向力彎矩施加角度判斷公式之結果值

斷裂 8 根螺栓	計算角度 $\theta$ (度)	$\text{Sin}(A^* + 2\theta)$	$\text{Cos}(B^* - \theta)$	$\text{Cos}(B^* + \theta)$
樑元素模型 1	<b>88</b>	0.837	<b>-0.001</b>	-0.068
樑元素模型 2	92	0.753	0.068	-0.001
樑元素模型 3	268	0.837	0.001	0.068
樑元素模型 4	272	0.753	-0.068	-0.001

A\*與 B\*為和角公式計算後所得之角度，而因和角公式可能有正負的差異

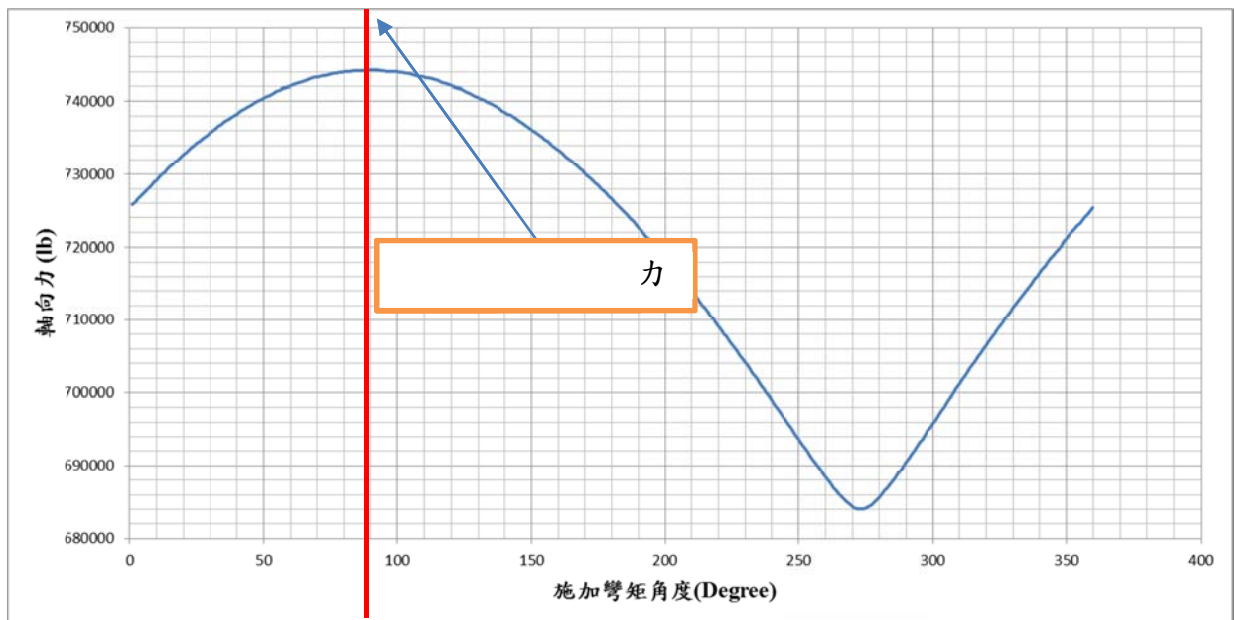


圖 2-6 螺栓斷裂 8 根，純彎矩施加角度從  $0^\circ \sim 360^\circ$  每度計算螺栓最大軸向力

#### 2-4. 分析統計

在進行反應器支撐裙板內側壁螺栓斷裂之最大軸向力分析統計前，必須先確認每次的隨機事件是否足夠，若不足的隨機事件數，將無法確實反映實際大多數的可能狀況，因此，同樣任意採用一種狀況加以驗證；假設螺栓斷裂根數為 5 根，承受設計載重為故障條件 (Case 2)，以 2.2 小節所定義的樣本進行分析驗證，從隨機事件數 50~400 個，每增加 50 個樣本統計一次平均值，圖 2-7 可發現隨著事件數的增加，平均最大軸向力在同一條水平值上下小幅震盪，因此，為確保計算時間及資源維持良好的效益，樣本數取 100 組即可。

其次針對斷裂根數從 1 根到 10 根進行平均最大軸向力的計算，圖 2-8 顯示三種設計荷載下，螺栓平均最大軸向力在斷裂根數變化下的改變。同樣再任意取出一組進行更深入的統計，而本分析則應用程式建立隨機亂數的事件，如圖 2-9。採用斷裂 7 根螺栓，在設計負荷為 Faulted Condition (Case 2) 下，圖 2-10 列出了個別最大軸向力區間隨機事件出現的次數，其次對其進行初步的平均值及變異數的統計並列於表 2-10，最後藉由統計 T 分配的方法，計算出整體支撐裙板螺栓群系統在斷裂 7 根的狀況下，有 95% 的信心水準可說明，該系統平均最大軸向力區間 717003.0~723260.0 lb，如圖 2-11 所示，此區間之最大值可做為後續規範評估的參考值。

表 2-8 斷裂 7 根螺栓設計負荷為故障條件(Case 2)統計結果

項目	軸向力(lb)
樣本最大軸向力之最大值	769490.0
樣本最大軸向力之最小值	694860.0
樣本最大軸向力間距	74630.0
樣本平均最大軸向力	720131.0
樣本最大軸向力標準差	15767.1

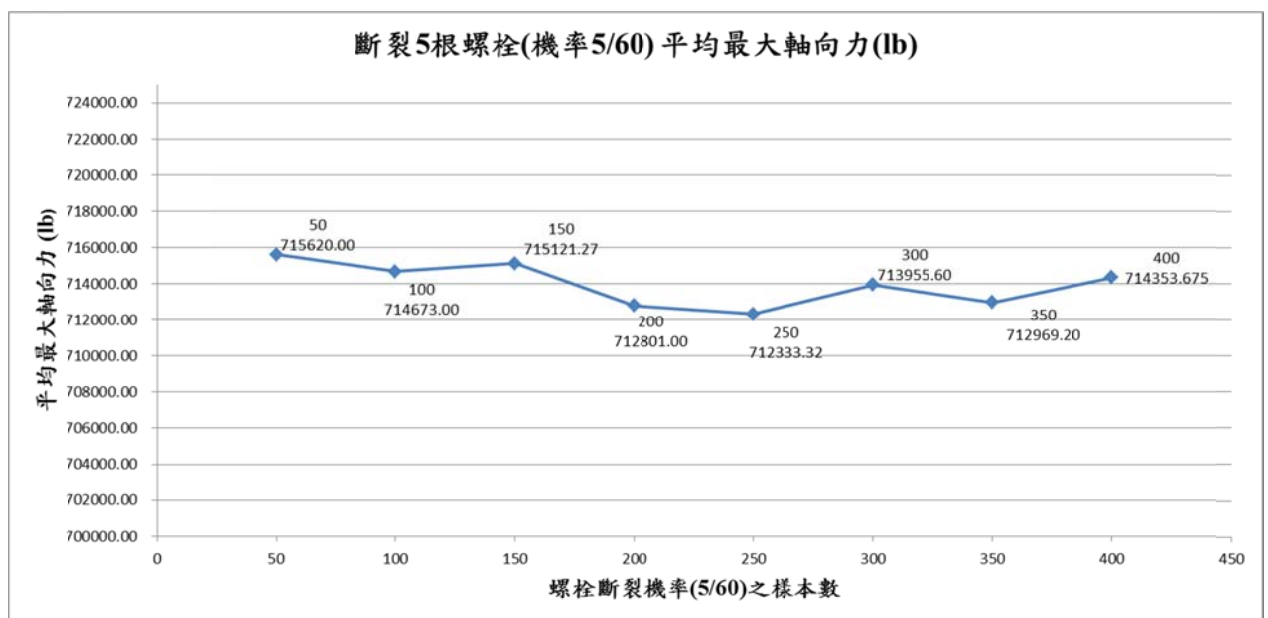


圖 2-7 不同隨機事件數目與平均最大軸向力

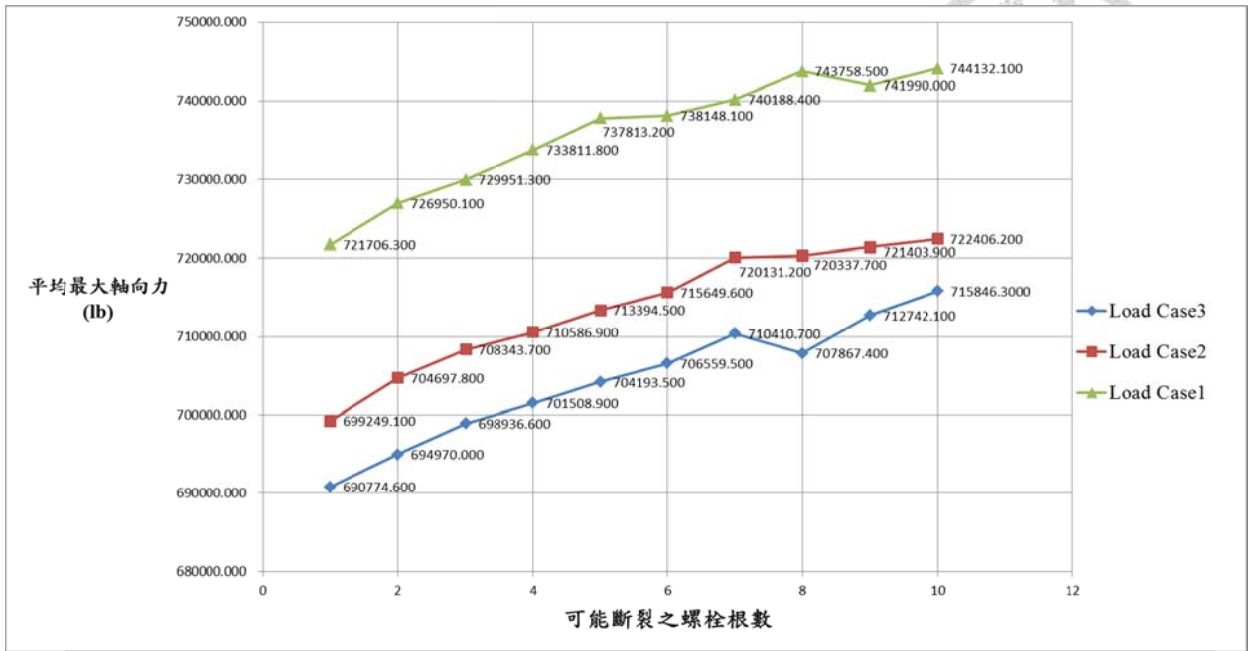


圖 2-8 不同斷裂根數與平均最大軸向力

Monte Carlo Method (RPV Skirt Bolts)

輸入機率: 0.0567 | 取樣數: 100 | 完整螺栓(根數): 60

所有樣本清單:

```

53-0.52996826171875
53-0.854327350578125
54-0.28076833984375
55-0.813751220703125
56-0.433807373046875
57-0.92510986328125
58-0.23419189453125
59-0.296600341796875
60-0.0645751953125
end

```

統計結果:

- 第 98 組的第 35 種 共計 324 種, 角度 = 204.0
- 第 98 組的第 44 種 共計 325 種, 角度 = 258.0
- 第 98 組的第 46 種 共計 326 種, 角度 = 270.0
- 第 98 組的第 52 種 共計 327 種, 角度 = 306.0
- 第 99 組的第 21 種 共計 328 種, 角度 = 120.0
- 第 99 組的第 43 種 共計 329 種, 角度 = 252.0
- 第 100 組的第 11 種 共計 330 種, 角度 = 60.0
- 第 100 組的第 12 種 共計 331 種, 角度 = 66.0
- 第 100 組的第 24 種 共計 332 種, 角度 = 138.0
- 第 100 組的第 33 種 共計 333 種, 角度 = 192.0

統計每次可能斷裂根數:

- 91: 0.042725 -> 3
- 92: 0.053131 -> 2
- 93: 0.044373 -> 3
- 94: 0.018158 -> 2
- 95: 0.054626 -> 1
- 96: 0.008270 -> 4
- 97: 0.023621 -> 4
- 98: 0.005349 -> 5
- 99: 0.030548 -> 2
- 100: 0.011414 -> 4

斷裂螺栓所在角度:

- 3, 270.0
- 4, 306.0
- 第 99 組
- 0, 120.0
- 1, 252.0
- 第 100 組
- 0, 60.0
- 1, 66.0
- 2, 138.0
- 3, 192.0

模擬區域內斷裂根數:

2	246.0 -> 138.0-1, 2
1	246.0 -> 192.0-1, 3
第 100 組	第 3 受拉區斷裂螺栓
4	318.0 -> 138.0-2, 2
3	318.0 -> 192.0-2, 3
2	第 4 受拉區斷裂螺栓
1	192.0+180 -> 192.0-3, 3

最大角度(度)列表:

- 每種螺栓力區-3: 138.0-2, 0; 192.0-2, 1
- 最大角度: 75.000 From B-Cof(180)
- 每種螺栓力區-4: 192.0-3, 0
- 最大角度: 102.000 From B-Cof(180)

最大慣性矩:

- 每種螺栓力區-3: 1.000 小於零 75.000 B-Cof(180); 1.598 k-in
- 每種螺栓力區-4: 1.000 小於零 102.000 B-Cof(180); 1.000 k-in
- 最大彎矩作用角度 -> 40.794

建立 FEM Model 及執行:

- 位置預覽力 [kip]: 680.0
- Moment [kip-in]: 115600000
- 執行分析

圖 2-9 建立隨機斷裂事件的應用程式(自行開發)

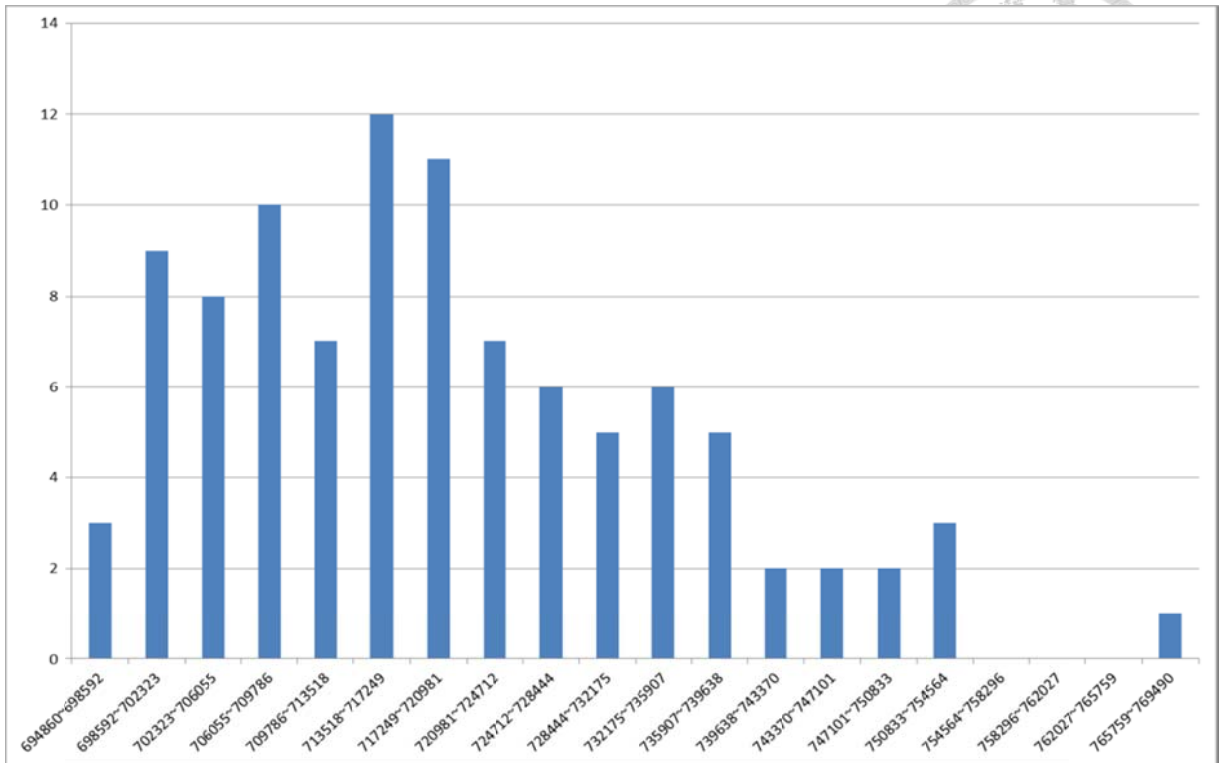


圖 2-10 最大軸向力區間中，樣本最大軸向力出現次數

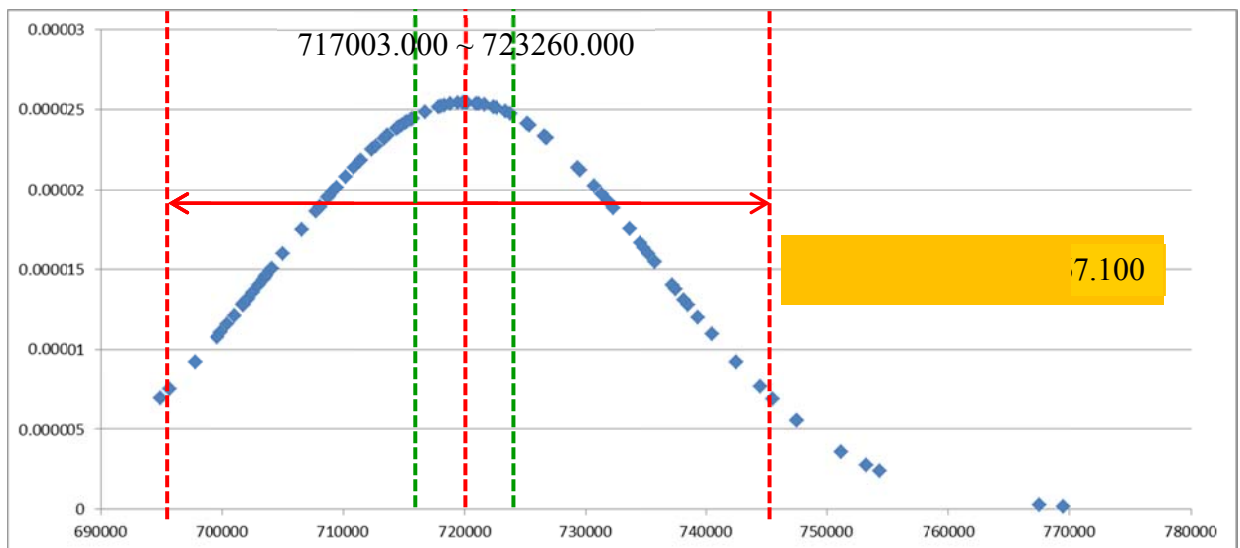


圖 2-11 平均最大軸向力區間 717003.0~723260.0 lb

## 2-5 小結

本章所提出的評估法主要是基於說明在求得反應器支撐裙板內壁側螺栓完全斷裂的二項式分配機率下，雖然發生同時再斷裂的機率極低，但假使發生，在 95%

信心水準下，剩餘螺栓可能出現的平均最大軸向力區間可由本評估法獲得，藉由此區間的最大值可進行一系列的法規安全檢覈，以確保結構完整性，不需再強調發生再斷裂的螺栓根數有極低的機率，因為此並不能保證結構是否具有可繼續運轉的條件，若以極端的方式作定量的評估；也就是假設所有完全斷裂的螺栓相鄰並計算其剩餘的螺栓的最大軸向力，此結果將過於保守，可能導致不必要的停機修復，造成電廠無謂的損失。

本評估法中另一項特點，可快速直接搜尋到最大軸向力之固定純彎矩施加方向，此對環形離散系統(螺栓環形排列)的評估將有相當大的效益，未來可應用於環形連續系統上，如含多裂紋的管件上，同樣以離散的面積二次矩推估最大內力之純彎矩施加方向，如此可再評估其斷裂物理參數J積分，藉由該物理量計算管線安全的餘裕。

本方法的下一個階段，則是考慮在環狀連續體離散化後的適用性，同樣可快速評估其極端負荷值，另外可研究相關之可靠度評估方案，找出最適切之維護方案。

### 本章參考文獻

- [1] Taiwan Power Company, Containment Internals Reactor Pedestal Liner Plate Section and Details, Drawing No. C-342 Sh. 2.
- [2] Taiwan Power Company, Final Safety Analysis Report of Kuosheng Nuclear Power Station, 16th Edition, 2007.
- [3] 台灣電力公司，DNS-ES-100-101，核二廠 2 號機 EOC-21 反應爐支撐裙板錨定螺栓結構安全分析報告，2012. (In Chinese)
- [4] Taiwan Power Company, Final Safety Analysis Report of Kuosheng Nuclear Power Station, 16th Edition, 2007.
- [5] ASTM, ASTM Standards, A540/A540M-11, Standard Specification for Alloy-Steel Bolting for Special Applications, vol. 01.01, 2007 Edition.
- [6] USNRC, NUREG-1801, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Revision 2, Aging Management Program (AMP) XI.M18, December 2010.
- [7] Y. F. Cheng, Stress Corrosion Cracking of Pipelines, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 2013.
- [8] W. F. Wu, C. H. Tsai, K. C. Tu, and J. S. You, "Probabilistic analysis of core

- shroud cracks, Nuclear Engineering and Design,” Vol.214, p.103-112, 2002.
- [9] T. L. Dickson, M. T. EricksonKirk, “The Inclusion of Inner Surface Breaking Flaws in Probabilistic Fracture Mechanics Analysis of Reactor Vessels Subjected to Planned Normal Cool-Down Transients, ASME Pressure Vessel and Piping Division Conference, Paper Number: PVP2008-61392, U. S., July, 2008.
- [10] J. S. You, W. F. Wu, “Risk-Based Prevent Maintenance Policies for Power Plants.” Journal of Engineering, National Taiwan University, Vol. 87, p. 15-26, 2001. (In Chinese)
- [11] ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix G, 2004 Edition
- [12] P. M. Besuner, A. S. “Tetelman, Probablistic Fracture Mechanics,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 43, No. 1, p. 99-144, Auguest, 1977.
- [13] ASME, ASME B & PV Codes, Section III, Division 1, Subsection NF, 1989 Edition.



### 3-1 前言

由前章的反應器壓力槽支撐裙板螺栓斷裂問題的探討，相同的概念亦可引用在沸水式反應器之爐心側板支撐 (Core Shroud Support) 結構的多裂紋評估上；此系統組件為與前章不同的是：其為一圓筒殼連續體，主要功能在於支撐許多爐內組件，例如爐心底板、噴射泵(Jet Pump)系統、爐心側板、頂部導架、爐心噴灑系統以及側板頂部之蒸汽分離乾燥系統，其詳細的配置如圖 3-1 所示。除了提供爐心橫向支撐外，同時亦支撐燃料束重量，於地震與其他動態負荷(如安全釋壓閥沖放、停機、啟動等)下限制燃料橫向位移。發生再循環管線破管冷卻水喪失(Loss-Of-Coolant Accident, LOCA)事件時，側板支撐結構成為爐心冷卻水邊界的一部份，對於沸水式反應器(BWR)電廠而言，此邊界維持爐心 2/3 溢滿能力。鑒於上述安全功能，側板支撐結構是維持沸水式反應器安全運轉的重要組件，美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)則於 1997 年針對側板支撐提出相關建議之檢測與評估導則[1]，供電廠參考。

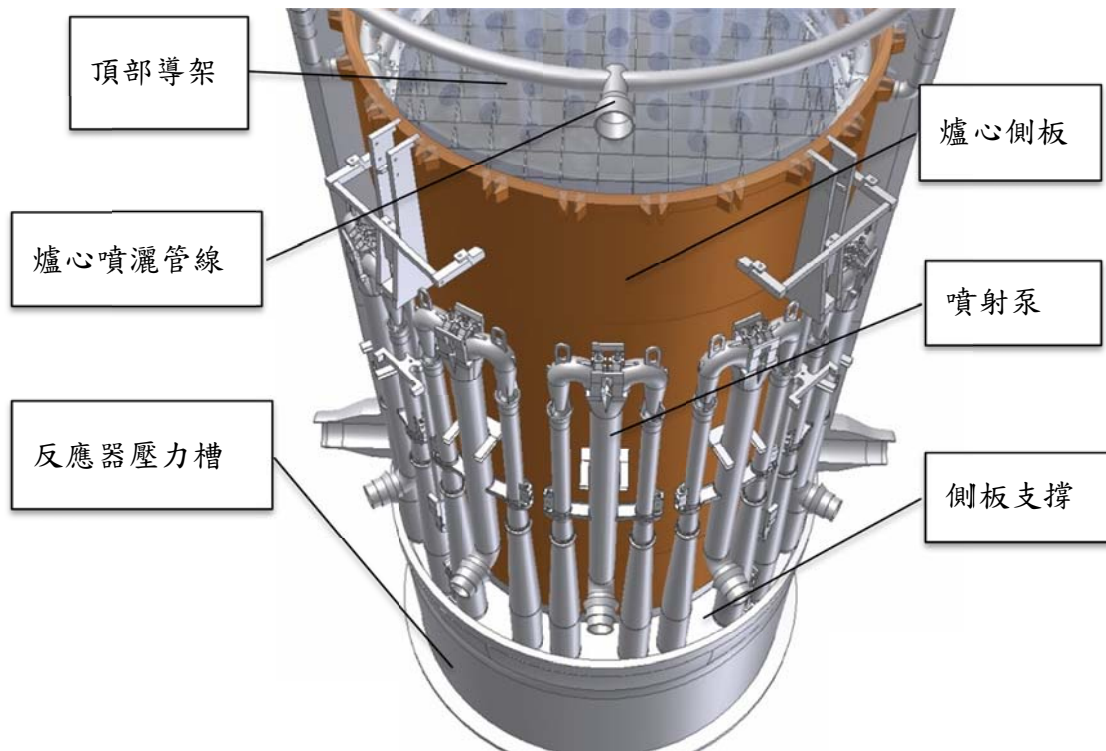


圖 3-1 爐心側板與側板支撐結構組態

在國內，為確保沸水式反應器爐心側板支撐的焊道(編號 H8 及 H9，如圖 3-2 所示)結構完整性，參考了美國電力研究院所出版的有關結構彈塑性崩潰分析的評估導則[1]。編號 H8 的焊道主要銜接了爐心側板與水平的支撐板(亦即其支撐了噴射泵系統)，而編號 H9 焊道則是為銜接支撐板與反應器壓力槽的焊道；另外值得一提的是，雖然編號 H10 以及 H12 同樣也是屬於重點焊道，但這些焊道卻不易檢測，也因此 EPRI 並未應用評估來提出檢測建議[1]。為了比較驗證 EPRI 的研究結果，本章研究的重點同樣也是僅針對 H8 及 H9 焊道，對於 H10 與 H12 焊道亦無特別考慮。圖 3-1 列出了側板支撐的三維模型圖及焊道位置側視示意圖，在此保守分析中，假設兩個焊道都具有多個穿壁裂紋，設計薄膜應力及彎矩應力視為主要負荷作用於 H7 焊道上，該焊道在導則中視為銜接爐心側板與側板支撐平板的組件分界。在數值分析的材料設定上，爐心側板、側板支撐腳板等組件為 Inconel 600 鎳基合金[2]。支撐平板與反應器壓力槽為 SA-533 低合金鋼[3]。而在機械性質之線彈性方面主要依據 Inconel 600 鎳基合金的特性，而在塑性範圍則是忽略其應變硬化的效應。

對於劣化範圍(裂紋分佈)的假設，在 EPRI 評估導則建議於無法檢測區皆假定為裂紋貫穿壁厚。根據電廠設計分析報告[4]，由於在支撐平板上有 10 組噴射泵擴散管阻隔，無法詳細檢測相關位置之焊道劣化情形，基於此因素，其採用分析模型之裂紋與完整區域的分布是對稱的。而這對結構完整性的假設評估或許是較為保守，但在觀念上僅是降低結構原始設計強度。故本章則提出以另一角度評估支撐平板的結構完整性，藉由隨機程序模擬 H8 以及 H9 在各種可能劣化狀況，主因如下：第一，從材料老劣化的角度而言，電廠組件在高中子通量環境運轉多年下，鎳基合金材料在承受應力、爐水腐蝕環境下仍有應力腐蝕效應(Stress Corrosion Cracking, SCC)存在的可能[5-7]；其次，製造上可能的微小初始裂紋，均有機會在側板與其相鄰組件於運轉期間的交替應力作用下，產生疲勞裂紋成長，故於焊道上任何位置皆有可能具有相同的劣化機會。而在負荷的設定方面，本章的方法同樣是將異常運轉下之負荷，施加於不同劣化範圍之有限元素模型，進行彈塑性分析，同時等比例放大設計負荷值，直到獲得崩潰負荷值。在分析過程中，本章亦提出一個提高分析效率的方法，直接藉由離散化的劣化分佈，快速計算出分析斷面弱軸，藉此確定外在彎矩負荷的作用方向，以獲得最小崩潰負荷。如此，樣本空間中，每次事件(相同劣化範圍比例之隨機劣化分佈)僅需計算兩次即可完成；最

後可依統計方法計算 H8 與/或 H9 焊道在不同劣化分佈所得崩潰負荷及其信心水準區間。

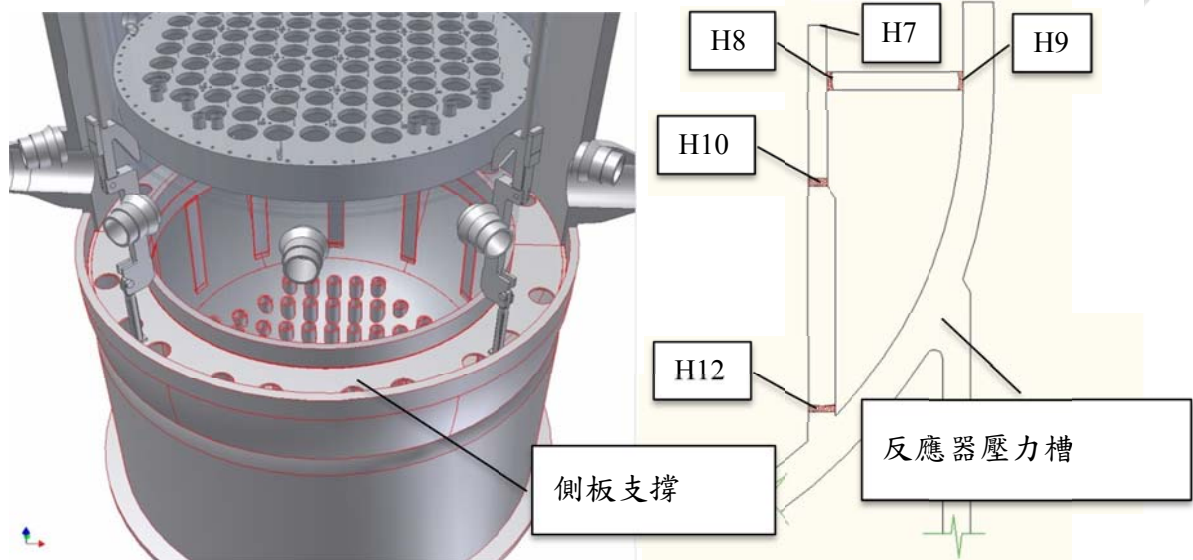


圖 3-2 爐心側板支撐之焊道位置

此外，EPRI 評估導則建議可根據其保守分析評估結果，可執行最小之檢測範圍(大於 10%)，也就是不需進行可檢測區之全面檢測，而根據檢測方法，執行再檢測週期為 6 年一次，但不得超過 10 年一次。藉由隨機程序之評估結果，合理規劃最佳的檢測週期方案，若依據可靠度工程原理[8]，建構在不同劣化範圍下，可評估其符合 ASME 法規要求安全餘裕流程參考，藉此討論評估導則[1]的檢測建議與可行之檢測週期方案。

### 3-2 有限元素模型及評估法

依循評估導則[1]的評估方式模擬 H8 及/或 H9 焊道劣化現象，並考量檢測發現裂紋之隨機性，同時保守假設每一足部結構與上圓筒殼間之 H10 焊道以及底部焊於壓力槽底蓋內壁之 H12 焊道(如圖 3-2)發生劣化，焊道兩側各有 25% 的穿壁裂紋，如圖 3-3 所示。分析模擬過程於 H10 及 H12 焊道龜裂面施加接觸條件，亦即承受拉張負荷時，僅 50% 的焊道斷面負擔負載；承受壓縮負荷時，則 100% 的焊道斷面承擔壓力負載。

模擬之支撐平板包含不同材質(316L 不鏽鋼)的人孔蓋板，且基於保守因素，

不考慮噴射泵系統的勁度影響，因此支撐平板上有 20 個圓形開孔。將這兩個焊道位置細分為圖 3-4 所示之 360 等分，以便詳細模擬焊道開裂狀態。其次，在材料特性設定方面，主要也是參考 EPRI 的評估導則，如圖 3-5 的材料特性；而為避免在分析時造成分析負荷加載增量(Load Step Increment)瞬間發散，故於塑性區域給予極小之切線斜率，其值假設為材料彈性係數之 0.1%，如圖 3-5 虛線部分所示。表 3-1 為側板支撐結構於各運轉條件承受之負荷值[4]，除了壓差負荷，其他負荷組合則以水平力、垂直提昇力、彎矩力集中力方式施加於數值模型圓筒殼頂部之參考點(Reference Point)上。

當 H8 和 H9 兩組焊道具有多個穿壁裂紋時，該評估方法的另一個關鍵點在於快速尋找水平支撐板環形截面的最弱中性軸。從承載能力的角度來看，外加彎矩和其他負荷作用在側板支撐結構上的最弱的軸向時，其將會導致最大的內力驅使結構造成塌陷，此最小的外力通稱為崩潰外力。在數值分析中，施加在最弱中性軸上的彎矩與其他負荷與設計負荷成比例的逐漸增加，當達到數值模型無法收斂前則停止，此時的相應外加負荷被定義為崩潰負荷。

根據圓形斷面二次面積矩及考慮被裂紋涵蓋的元素節點在圓心角的位置，該式可被改寫如下式所列：

$$I(\theta) = \sum_{i=1}^N [R \sin(A_i - \theta) + h]^2 + \sum_{j=1}^M [R^* \sin(A_j^* - \theta) + h]^2 \quad (3-1)$$

相關的參數可參考圖 3-4，而其中  $I(\theta)$  為二次面積矩； $N$  及  $M$  代表內外圈被裂紋涵蓋的節點數； $R$  及  $R^*$  則是代表 H8 和 H9 在支撐結構上的內外半徑， $A_i$  與  $A_j^*$  則為節點的極座標(圓心角)；而  $h$  則是代表中性軸的偏移量。為了簡化代數計算， $R^*$  可以用  $t$  的比例參數表示 H9 的半徑( $R^* = tR$ )，藉由對面積矩的一次微分並使其等於零，公式(3-1)可改寫為如下式：

$$\begin{aligned} \frac{dI}{d\theta} = & \sum_{i=1}^N [-R^2 \sin(2A_i - 2\theta) + Rh \cos(A_i - \theta)] \\ & + \sum_{j=1}^M [-t^2 R^2 \sin(2A_j - 2\theta) + tRh \cos(A_j - \theta)] = 0 \end{aligned} \quad (3-2)$$



因為  $R$  與  $h$  不是  $\theta$  的函數，故上式又可簡化為：

$$\frac{dl}{d\theta} = -R^2[\sin(C^* + 2\theta)] - 2Rh[\cos(D^* + \theta)] = 0 \quad (3-3)$$

其中  $C^*$  與  $D^*$  是由公式(3-2) 採用三角複角公式所計算出的參數。在公式(3-3)中， $h$  屬不為 0 的值，而是使  $\cos(D^* + \theta) = 0$ ，則外加彎矩負荷施加的最弱軸方向即可決定出。由此可知，公式(3-3)可直接找出最弱軸的方向角，外在的最小崩潰負荷(彎矩主導)可藉由在此方向上逐漸增加倍數的設計負荷找出，也避免了用 Trial and error 方式搜尋外力負荷彎矩施加方向，對於要計算出大量隨機事件的結果，此方法是極具效率的。

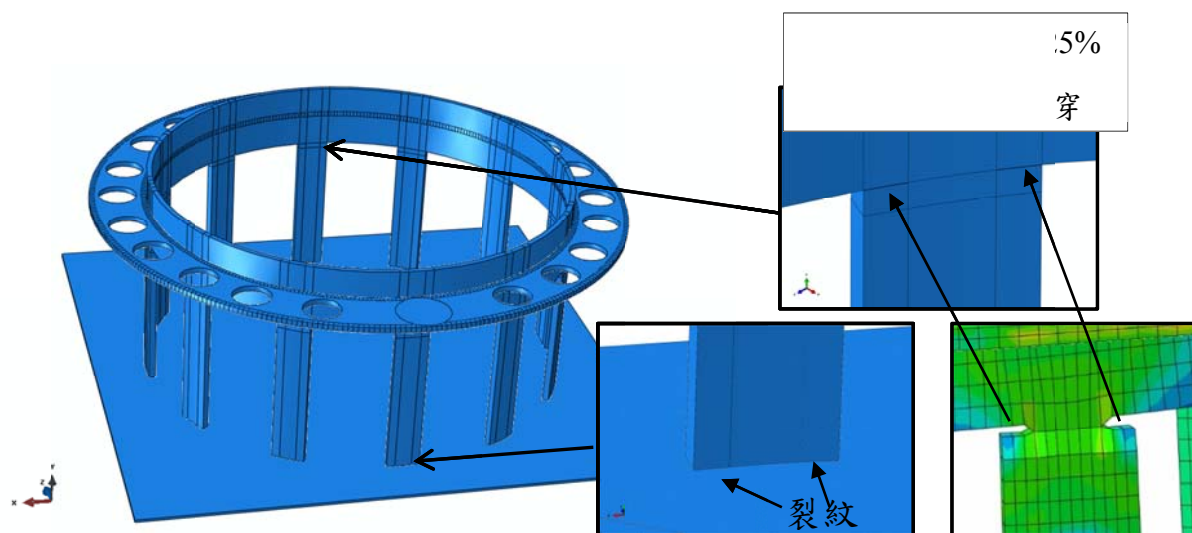


圖 3-3 有限元素模型及模擬腳板之假設性保守裂紋

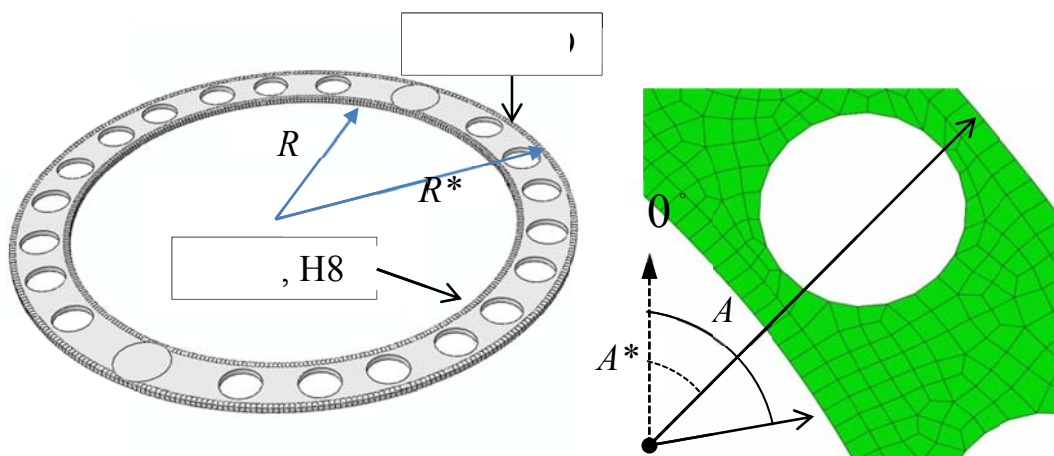


圖 3-4 將 H8 與 H9 焊道分割成 360 個離散的元素

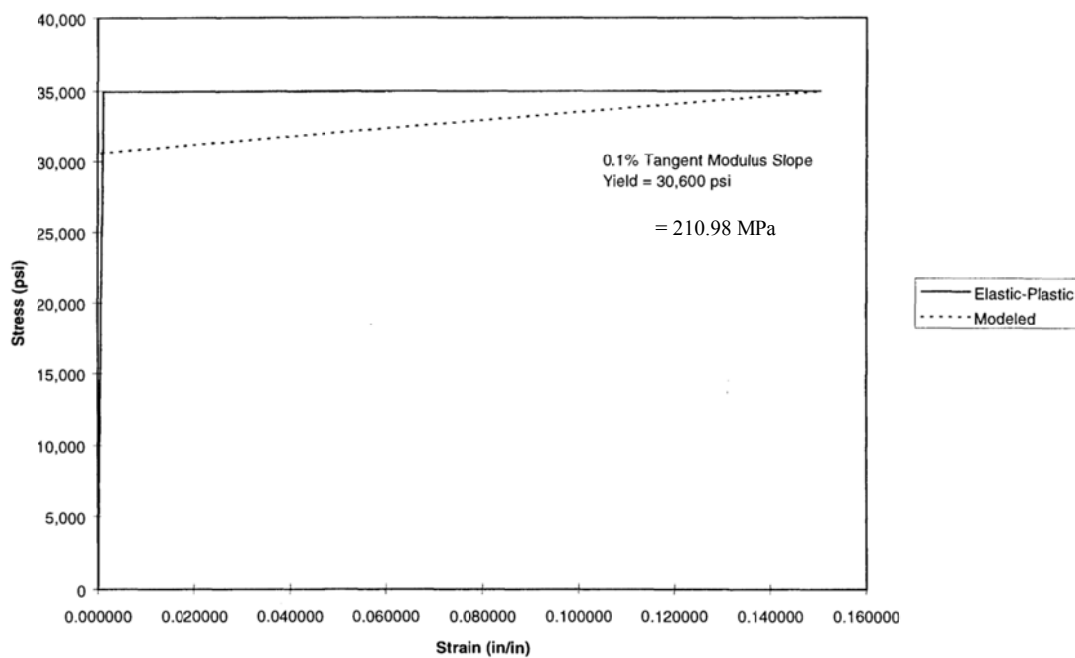


圖 3-5 Inconel 600 鎳基合金之應力應變曲線 [1]

表 3-1 設計負荷

負荷條件	內外壓差( $P_1 - P_2$ ) <i>psi (MPa)</i>	集中力( $H$ ) $10^3 lb$ $(10^3 kg)$	彎矩( $M$ ) $10^3 in-lb$ $(10^3 m-kg)$	向上昇力( $V_{LO}$ ) $10^3 lb$ $(10^3 kg)$
設計條件	47.5 (0.33)	1,200 (544.31)	144,000 (1,656.90)	-690 (-312.98)
緊急條件	34 (0.23)	2,400 (1,088.62)	288,000 (3,313.79)	-493 (-223.62)
故障條件	57 (0.39)	2,400 (1,088.62)	288,000 (3,313.79)	-826 (-374.67)

在引用公式(3-3)時必須注意:該式是無法直接推斷彎矩施加的受壓或受拉側,當最弱軸找到後,仍需藉由有限元素分析的結果來區分。在分析中,根據 ASME B&PV Codes, Section XI, Appendix C 的建議,位在中性軸壓縮側的裂紋,是可以排除影響安全評估的;另外需要指出的是,上面決定的最弱中性軸的方向是偏離實際線性彈性假設。在分析中,假設橫截面受到施加载荷的固定值,在開始時確實是線性彈性的,然而當負載逐漸增加直到獲得崩潰負荷時,可能存在偏離所假設的彈性塑性行為,這種狀況應該是造成模型驗證誤差的原因之一,這些差異通過實例證明並不重要,在下節將列出驗證的結果。

### 3-3 數值驗證

驗證的方法主要是比較由公式(3-3)所計算出來的最弱軸方向，以及由有限元素模型配合試誤分析法(Trial-and-error Analysis)求得最小崩潰負荷，本章列出7種在H8及H9焊道可能的裂紋分佈進行驗證。首先在Case 1方面，先以單一裂紋來直接研判是最快也是最容易的，其次，所規劃的六組驗證案例則是假設在H8與H9焊道上具有隨機多裂紋，而在此七組案例中，最後三組Case 5到7主要是採用EPRI導則[1]所提的方法，也就是依據其提出的裂紋範圍、比例當作參考，其中，EPRI的裂紋分佈是暗示著該兩處焊道無法檢測的位置(噴射泵架設位置)，我們同樣依循此方式建立新的檢覈基準，也加入了隨機的因素。如圖3-6(a)，Case 5是假設側板支撐結構H8焊道發生劣化，假設劣化範圍百分比為68.9%，而H9焊道則無發現裂紋，相反的情況如圖3-6(b)，Case 6是H8焊道無劣化情形，H9則發現多組裂紋。最後第7組則是第5與6兩處裂紋分布的整合，5、6兩組的裂紋範圍對應如表3-2所示。

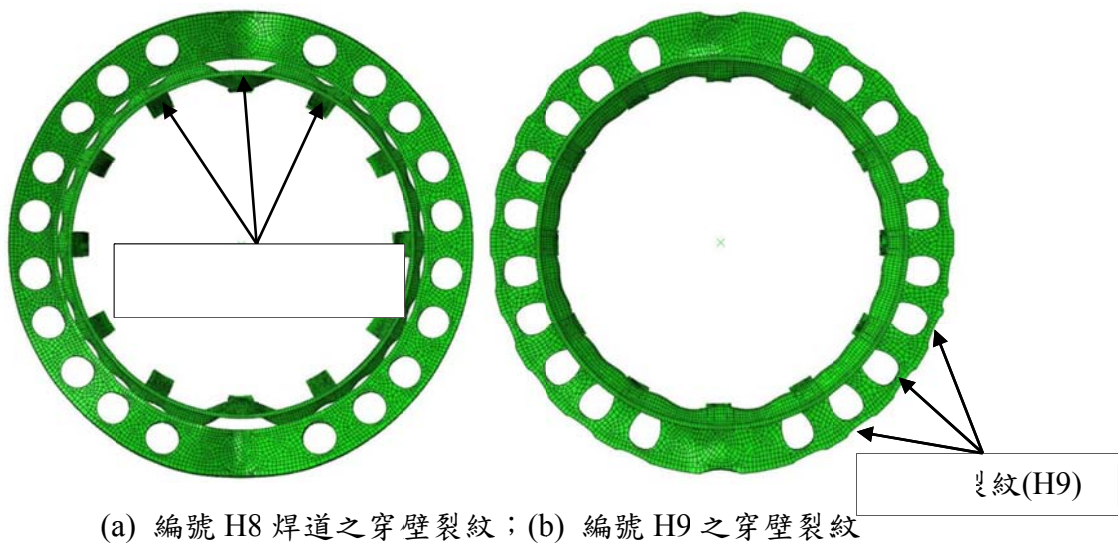


圖 3-6 焊道 H8 及 H9 上的模擬裂紋

表 3-3 列出了最弱軸方向的結果和每種假設裂紋分佈的最小崩潰負荷與其對應的安全餘裕，圖 3-7 則是更詳細的安全餘裕對角度的變化圖。再更進一步解釋：圖 3-7 為有限元素法數值分析的結果，這是不同於 EPRI [1]在導則中使用的方式。在一般的情形下，由於單一或多穿壁裂紋(Multiple Through-wall Cracks, MTCs)的不

規則分佈 (以隨機的方式設定)，於計算過程中須找出最弱的中性軸所導致之外在最小崩潰負荷，並由此可獲得最小的安全餘裕。然而，以試誤的方式測試，外力的方向則必須以每 10 度環繞整圈變化，這表示著每個案例必須執行 36 次的完整計算。而在驗證案例中，藉由比對引用公式(3-3)的結果，所有的誤差範圍具有 0~0.175% 的差異，從數值模擬的觀點來看，如此微小的誤差是可接受的；然而，從圖 3-7 的結果來看，這些差異確實造成了最小安全餘裕不是在最低點就是在第二低點的位置，表 3-3 則列出相關的數值結果。在圖 3-7 (e) 以及 3-7(g) 中，出現了數個相等值得最小餘裕。而第二最低點也就指的是第二低的安全餘裕，以公式(3-3)與試誤法方法的比較，雖然在 Case 4、5 和 7 中存在著一定程度的差異，但這些差異對我們上述關於安全餘裕的結論並不會造成關鍵的影響，且由於材料設定趨近於完美彈塑性的假設，這些數值結果也是會反映出與模擬真實狀況(材料設定若採用實驗數據)的差異，因為整體的分析概念都是源自於保守評估。

表 3-2 案例 5~7 在 H8 及 H9 焊道的裂紋分佈位置

23 cracks in H8				25 cracks in H9			
Crack ID	Crack ranges	Crack ID	Crack ranges	Crack ID	Crack ranges	Crack ID	Crack ranges
1	0°~12°	14	216°~226°	1	0°~5°	14	175°~185°
2	22°~32°	15	230°~240°	2	18°~27°	15	198°~207°
3	36°~46°	16	244°~254°	3	33°~42°	16	213°~222°
4	50°~60°	17	258°~268°	4	48°~57°	17	228°~237°
5	64°~74°	18	272°~282°	5	63°~72°	18	243°~252°
6	78°~88°	19	286°~296°	6	73°~77°	19	258°~267°
7	92°~102°	20	300°~310°	7	78°~87°	20	273°~282°
8	106°~116°	21	314°~324°	8	93°~102°	21	288°~297°
9	120°~130°	22	328°~338°	9	103°~107°	22	303°~312°
10	134°~144°	23	348°~360°	10	108°~117°	23	318°~327°
11	148°~158°			11	123°~132°	24	333°~342°
12	168°~192°			12	138°~147°	25	355°~360°
13	202°~212°			13	153°~162°		

在上述的驗證案例研究中，從公式(3-3)的引用與 FEM 數值結果的比較，兩組焊道同時有多裂紋的案例，差異甚至小於單焊道有裂紋或是較少的裂紋分佈。然而，在實際情況下，如果考慮到不確定性並要求結構完整性/可靠性評估工作，在大量的運算下若引用公式(3-3)的方法確實可以更具效率，且從另一個角度來說，也只有從不確定性和隨機性來探討可能焊道上的裂紋分佈，才能評估爐心側板支

撐結構的定量可靠性。



表 3-3 驗證案例

Cases	裂紋範圍	公式(3-3) 結果 (彎矩方向 t)	FEM Results shown in Figure 7 (剪力方向)	FEM weak axis (彎矩方向)	餘裕	誤差 (餘裕) %
Case 1 (Fig. 7(a))	1 crack in H8: 80°~100°	0° or 180°	270°	0° or 180°	3.09	0.0
Case 2 (Fig. 7(b))	3 cracks in H8: 20°~50°, 90°~120°, 340°~350°	147.92° or 327.92°	240°	150° or 330°	3.00	~0.0
Case 3 (Fig. 7(c))	3 cracks in H9: 20°~50°, 90°~120°, 340°~350°	147.92° or 327.92°	240°	150° or 330°	2.96	~0.0
Case 4 (Fig. 7(d))	3 cracks in H8: 12°~17°, 135°~152°, 201°~224° 2 cracks in H9: 80°~112°, 200°~215°	58.71° or 238.71°	310°	40° or 220°	2.975	~0.168*
Case 5 (Fig. 7(e))	See Table 2	61.38° or 241.38°	30°, 180°, 210°, 360°	120°, 270°, 300°, 90° or 300°, 90°, 120°, 270°	2.945	~0.170**
Case 6 (Fig. 7(f))	See Table 2	0° or 180°	270°	0° or 180°	2.99	~0.0
Case 7 (Fig. 7(g))	See Table 2	0° or 180°	210°, 330°, 360°	300°, 60°, 90° or 120°, 240°, 270°	2.86	0.175***

\*(2.98-2.975)/2.975; 第二低點, 剪力施加方向為 330° (Eq. (3-3) result-90°=328.71°).

\*\* (2.95-2.945)/2.945; 第二低點, 剪力施加方向為 330° (Eq. (3-3) result-90°=331.38°).

\*\*\* (2.865-2.86)/2.86; 第二低點, 剪力施加方向為 330° (Eq. (3-3) result-90°=270°).

### 3-4 隨機裂紋分析與機率評估描述

ASME 法規 Section XI 附錄 C[9]針對含單一周向裂紋之圓筒殼結構斷面, 提供極限負荷分析計算公式, 決定龜裂斷面於負載作用下之結構餘裕; 但對多裂紋斷面並無類似公式, 一般需透過數值分析以決定結構餘裕。例如, 對含多裂紋爐心側板斷面, 在不了解龜裂斷面最脆弱方位角情形下, EPRI 於檢測建議報告[10] (BWRVIP-76-A)中, 針對含多裂紋之爐心側板評估與側板支撐評估導則[1], 將負荷逐一施加於斷面不同方位角, 再依循 Section XI 附錄 C 之極限負荷分析精神, 計算對應之安全餘裕, 最後以其中最小值作為龜裂斷面之安全餘裕。

本章除同樣可依據極限負荷(源自於 ASME B&PV Codes, Section XI, Appendix C [9])的概念,不同於爐心側板支撐評估導則[1]的假設性裂紋位置(無法檢測區域),採用隨機裂紋分佈位置進行斷面結構安全餘裕的評估。由於樣本空間極為龐大,隨機變數的參數可為裂紋與完整區域的比例,其次則為在該比例下裂紋分佈的位置;此與前一章反應器壓力槽支撐裙板螺栓斷裂的評估方式是一致的。

藉由亂數生成充分之事件數,而後對各組事件快速搜尋支撐側板圓形斷面弱軸方向,以此方向逐漸施加等倍數設計彎矩與其水平垂直之剪力,直至數值模型無法收斂為止,每組事件便可計算出最小崩潰力,最後進行樣本空間的最小安全餘裕(最小崩潰力/設計負荷)平均值、標準差、統計檢定及信心水準區間之計算等。圖 3-8 為根據參考文獻[11]的方式,也就是第二章所述,藉由隨機事件(前章是假設螺栓斷裂 7 根)建構出最小崩潰力機率密度函數  $f(x)$ 。本章亦可定義出裂紋比例,藉由分佈的適配性(如卡方檢定)決定最佳的分配,歸納出各裂紋比例下的可能之分佈:如標準常態分佈、對數常態分佈或韋伯分佈,而根據 ASME 規範所要求安全係數,其可靠度  $R$  如下式所列:

$$R = P_{\text{prob}}\{X \geq k\} = 1 - \int_0^k f(x)dx; \quad (3-4)$$

其中,  $f$  為最小安全餘裕的機率密度函數,而  $X$  為最小安全餘裕之變數,  $k$  則為 ASME 所定義之允許(要求)標準。

從公式(3-4)中,其物理意義在於:在某種裂紋的比例(範圍)下,爐心側板支撐在規範所要求的結構完整性(最小安全餘裕)可靠度,而同樣亦可獲得標準化的可靠度曲線(橫軸為劣化比例,縱軸為可靠度);此外,藉由橫軸換成運轉時間( $t$ , 在某時刻下對應之劣化比例),可提供電廠進行維護週期研判或豁免檢測之參考依據,達到安全與成本平衡下的目標。

上述所提及對於結構最小安全餘裕的可靠度建立方法雖未在本章列出算例,但以方法論的方式自上一章結合,對於連續體離散化後,亦可適用於大量的事件統計評估。

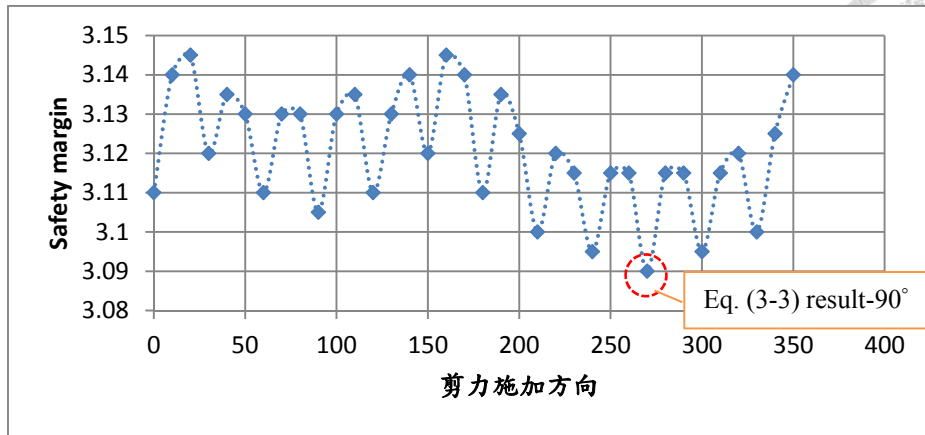


圖 3-7(a) Case 1: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷

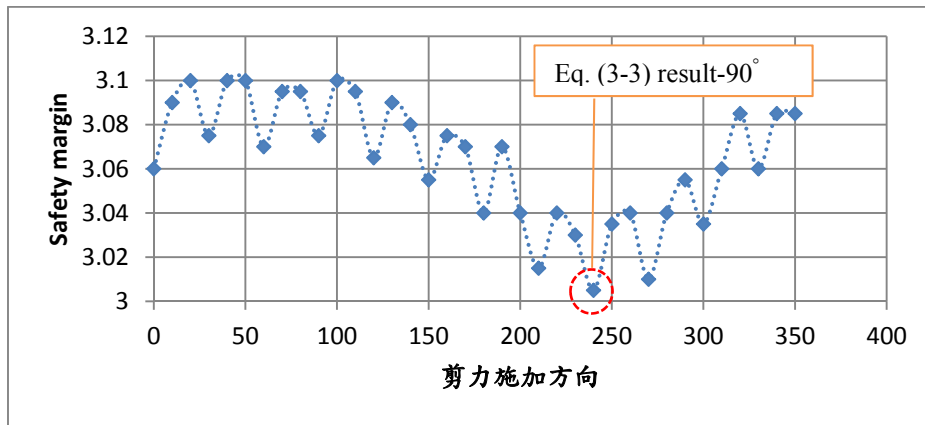


圖 3-7(b) Case 2: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷

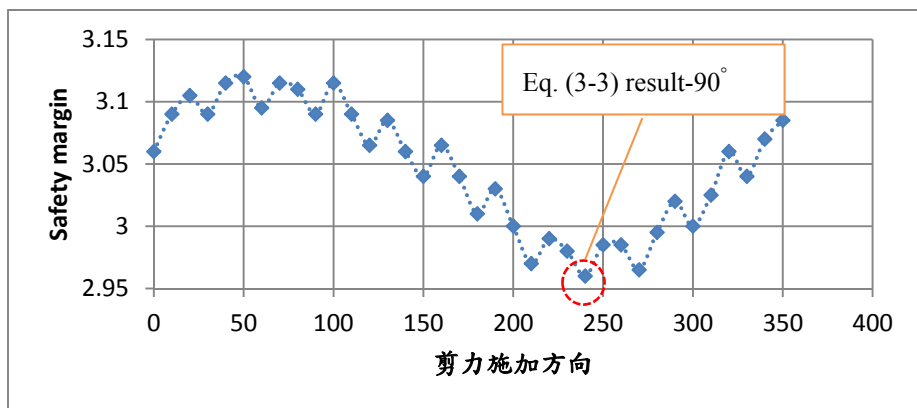


圖 3-7(c) Case 3: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷

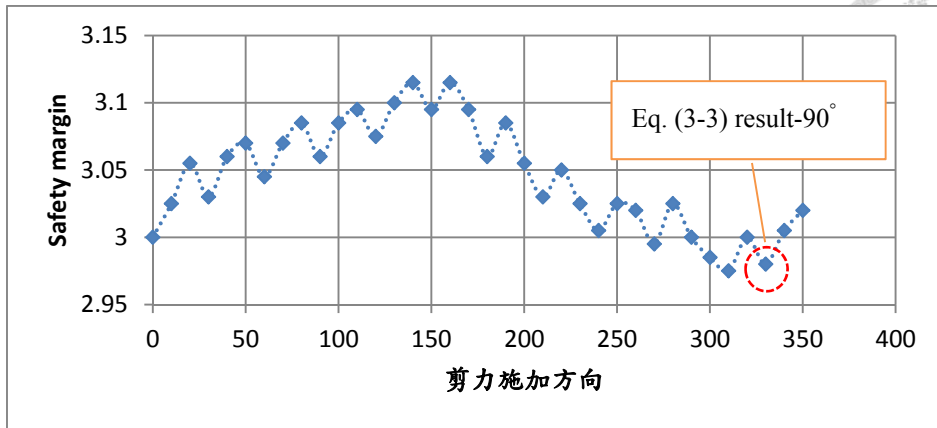


圖 3-7(d) Case 4\*: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷(\*參考表 3 註記)

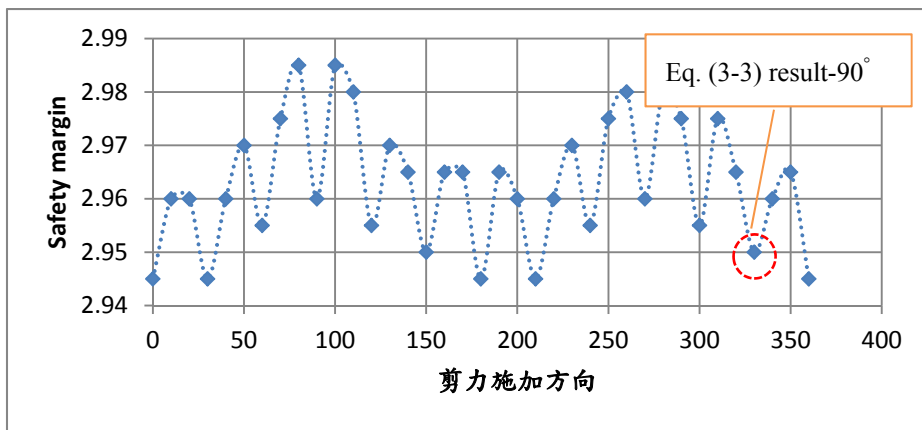


圖 3-7(e) Case 5\*\*: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷(\*\*參考表 3 註記)

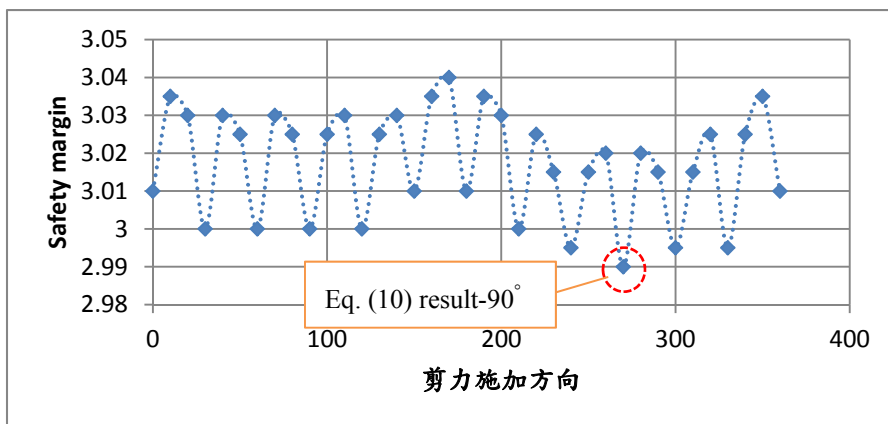


圖 3-7(f) Case 6: 以 FEM 模型進行 360 度搜尋最小的安全餘裕(多裂紋)

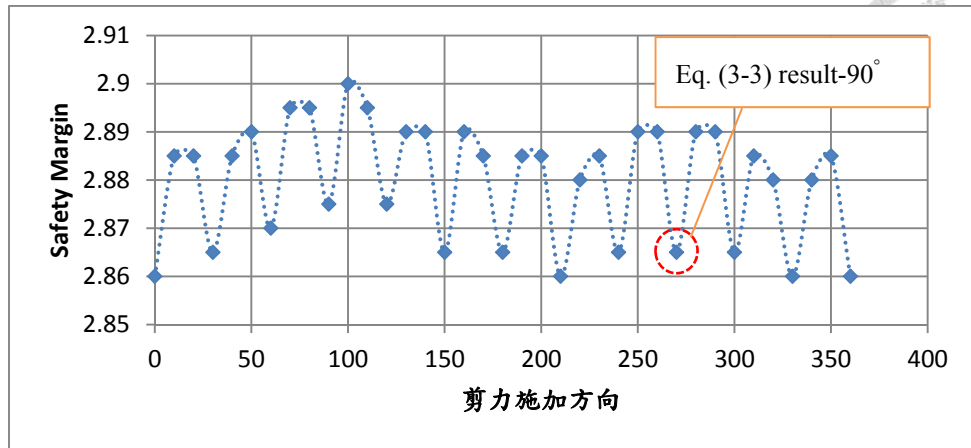


圖 3-7(g) Case7\*\*\*: 搜索具有多裂紋支撐板的最小崩潰負荷(多裂紋)(\*\*\*參考表 3 註記)

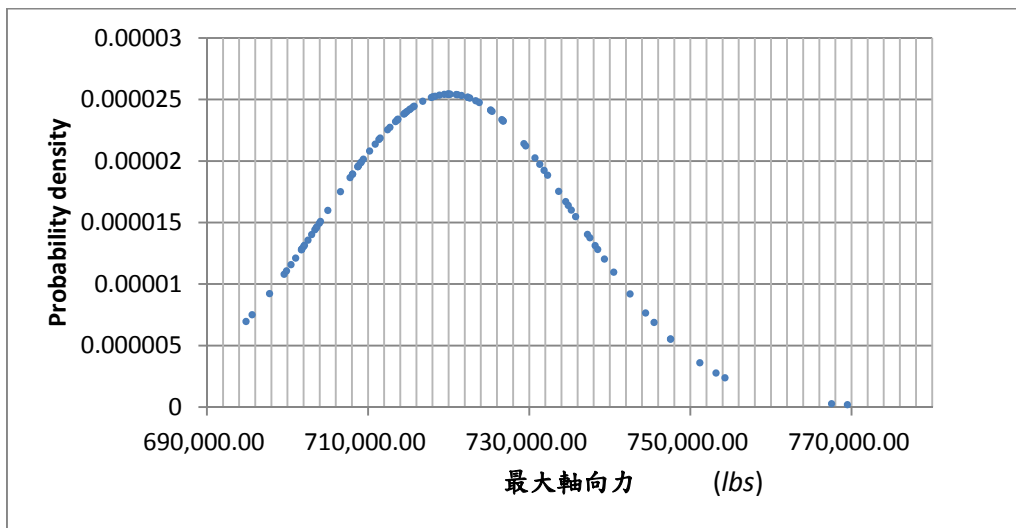


圖 3-8 最大軸向力(螺栓)的機率分佈密度函數(PDF)

### 3-5 小結

本章參考美國電力研究院對爐心側板支撐檢測評估導則，提出了另一種結構完整性評估的方案，藉由隨機裂紋分佈取代了以假設對稱裂紋分佈，不同於美國電力研究院所出版的評估導則，因該導則所提出的方式僅是降低原始設計強度，對於可能發生的實際劣化情況並未考慮。故參考本章所提出的方法並配合可靠度的觀念，可提供較具說服力的檢測方案。

本章的另一個貢獻則是聚焦在如何快速搜尋圓形斷面弱軸的技巧上，與前章的

不同點在於，此次的分析對象是連續壁體，藉由有限元素法節點離散的特點，成功的將前章的概念引入。且經過數值實驗的驗證，可大量減少分析時間及提高效率，此方式可應用於各種環形結構上的斷面分析，例如，前章所提之反應器支撐裙板螺栓、爐心側板焊道，甚至應用於風力發電機塔架法蘭強度的評估上。

### 本章參考文獻

- [1] EPRI, BWR Shroud Support Inspection and Flaw Evaluation Guidelines, BWR Vessel and Internals Project, BWRVIP-38, EPRI TR-108823, Palo Alto, CA, September 1997.
- [2] The Japan Steel Works, Ltd., Quality Control Records for Chinshan No. 1 Reactor Pressure Vessel, Doc. No. JQCR-69002, Vol. 2, p. 74–85, May 1972.
- [3] EPRI, Evaluation of Crack Growth in BWR Nickel Base Austenitic Alloys in RPV Internals, BWR Vessel and Internals Project, BWRVIP-59-A, EPRI TR-1014874, Palo Alto, CA, 2007.
- [4] The Japan Steel Works, Ltd., Sizing Calculation for Shroud Support Structure, Spec. No. NCL-69226, Rev. 6, May 1972.
- [5] T. S. Bulischeck, D. V. Rooyen, “Effect of environmental variables on the stress corrosion cracking of Inconel 600 steam generator tubing,” Nuclear Technology Vol. 55, No. 2, p. 383–393, 1981.
- [6] L. R. Bandy, R. Roberg and R. C. Newman, “Low temperature stress corrosion cracking of Inconel 600 under two different conditions of sensitization,” Corrosion Science, Vol. 23, No. 9, p.995–1006, 1983.
- [7] USNRC, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, NUREG-1801, Revision 1, Vol. 1~2, 2005.
- [8] C. E. Ebeling, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering,

McGraw-Hill Inc., New York, 1997.

[9] ASME, ASME B&PV Codes, Section XI, Nonmandatory Appendix C, Evaluation of Flaws in Piping, 2007 Version.

[10] EPRI, BWR Core Shroud Inspection and Flaw Evaluation Guidelines, BWR Vessel and Internals Project, BWRVIP-76-A, EPRI TR-1019057, Palo Alto, CA, 2009.

[11] S. R. Lin, W. F. Wu, "Estimation of maximum axial force of anchor bolts in consideration of random bolt failures," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 131, No. 7, p. 52–59, 2015.



## 第四章 從安全重要電氣設備至安全相關數位電子設備環境驗證規範與導則一探討 半導體電子構裝元件於加速環境下熱疲勞分析評估



### 4-1 前言

本章的主要內容在於闡述目前國外對於安全至關重要(Important to safety)及安全相關(Safety-related)之電氣、電子設備在環境驗證(Environmental Qualification)規範與導則的說明與應用，目的在於說明其對於電廠設備驗證相關管制作為之趨勢及議題發展。從美國核管會(USNRC)所出版之最新的研究進展說明報告：NUREG-1925 第三版的第 13 章 (Research Activities, Chapter 13, Digital Instrumentation and Control and Electrical Research Digital Instrumentation and Control Research Program) 中[1]，可獲得相關的最新之研究訊息。在整體方面來看，其最新之重點研究方案領域：(1)數位系統的安全相關議題，(2)數位系統資安(Security)方面議題，(3)資訊管理方面議題，(4)運轉執照要求項目等。而所正在進行的研究計畫領域內容，又以技術審查導則、支援管制(審查)接受標準之系統訊息、評估工具、方法、標準化以及知識管理方面的措施，其中在研究訊息第 1002 號 (Research Information Letters-1002, RIL-1002) 中[2]，提及數位系統錯誤模式的識別，目前是從軟體層面錯誤模式(Software Fault Modes and Effects Analysis, SFMEA)來執行，但也述及目前仍未有適當合理的技術基礎支持 SFMEA 結果的研判，面對龐大且複雜的數位邏輯，其可執行之效益性則是有待商榷；同樣也在 NUREG/IA-0254[3]也闡述了相關的問題，如硬體的失效模式(Failure Mode)之規模相較於數位複雜邏輯的錯誤(Fault)是非常小的。

在 1994 年出版之 NUREG/CR-5904 的報告曾對安全相關之具有微處理器的電子設備(Microprocessor-based Electric Equipment，如圖 4-1~4-3)提出看法，由於其具特殊的功能性和驗證(Qualification)問題，應用於模擬這些電子設備的傳統測試和評估方法可能無法完全解決此數位電子設備相關之驗證議題。除此之外，此種設備所架設的位置，於電廠所處的環境若屬於溫和環境影響者(Mild Environment: 一種環境條件下的影響，在任何時候都不會比電廠正常運轉期間之環境條件所造成的影響更加明顯嚴重，包括預期的運轉情況)，這些電子設備是不需考慮在 Regulatory Guide 1.89 修訂第 1 版(以下均以此版討論) [4]以及 IEEE 323-1974[5]中所定義的設計基準事故(Design-Basis Accident, DBA)條件下之環境驗證，但是在

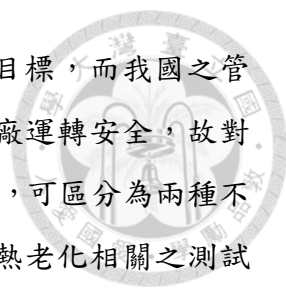
10CFR50.55a(h)(2), “Protection and safety systems” [6]中則有提及：具有保護功能、監控之電子(電氣)設備須符合 IEEE 279-1971 或 603-1991 規定的標準。也就是嚴重事故發生下以及後設計基準事故(Post- Design-Basis Accident)條件中，該種設備(即使處在溫和環境)仍須發揮預期功能，但在當時卻無完善、且具有管制單位認可的驗證準則，證明此種設備是否符合上述之基本要求。

故於 2007 年 USNRC 鑑於此議題並提出相關方面的導則：Regulatory Guide 1.209, “Guidelines for environmental qualification of safety-related computer-based instrumentation and control systems in nuclear power plants” [7]，此導則的目的是指引如何確保或驗證這些設備的功能，即使設備位於溫和環境中。因此，在 Regulatory Guide 1.209 中，列出各種可行之驗證方案，以使具有半導體微處理器的電子數位儀控設備可以在所有預期的運轉條件下發揮其安全相關功能。其中，在此導則亦有引述了遵循 10CFR50.49[8]的導則 Regulatory Guide 1.89；代表同樣具運算及輸出入功能(Computer-Based)之儀器設備，若架設在嚴苛的環境下，就必須採用 Regulatory Guide 1.89 的驗證標準，設備若在溫和環境下就可參考 Regulatory Guide 1.209 所提供的導則，如表 4-1 分類。

USNRC 於 Regulatory Guide 1.209 同意美國電力研究院 EPRI-TR-107330 報告中的方案[9]；特別的是，該報告採用了可程式化數位邏輯控制(Programmable Logic Controllers, PLCs)的評估方法，此方案不但可應用於電子數位設備處在電廠溫和環境影響之位置，並涵蓋了更廣泛的評估，如系統作業平台(Platform)、篩選、設備採購，驗證，和品保(Quality Assurance)等，但此項評估方案是建構在系統軟體層面上，也就是軟體(作業系統、平台軟體以及應用輸出軟體)與硬體(通訊設備)間的搭配作業[10]。

Regulatory Guide 1.209 中，也有從物理機制觀點(力學角度)所提出之驗證評估方案，也就是本章所要討論的重點；此與失效模式(Failure Modes)之研判應屬於最基本的層級，在該導則亦列出 NUREG/CR-6479[11]此篇有關具有半導體微處理器電子設備在環境驗證中的技術基準，其從外界的壓力源對硬體設備的影響的方向作進一步的探討，此與一般電氣零組件如(電纜、接頭以及保險絲座等)具有較一致性的概念。

縱觀上述的內容，核電廠對安全至關重要及安全相關之電氣、電子設備運轉前皆需經驗證合格且符合相關規定，並確認其於正常運轉、預期運轉事件及假想



設計基準事故環境下，仍能執行安全功能或不影響安全功能之目標，而我國之管制單位將核子設施設備驗證列入安全檢驗要項，藉以確保核電廠運轉安全，故對於核能電廠安全至關重要(及安全相關)設備環境驗證方面之應用，可區分為兩種不同的評估方向：第一、基礎物理機制：在電氣設備驗證及加速熱老化相關之測試與分析評估方法方面，主要以 Arrhenius Model 作為研判、評估指標之依據[12]，在具有半導體微處理器相關的電子設備，其若具有較先進的電子構裝架構者，則可參考引用 NUREG/CR-6479 所提出的 Eyring Model，配合 Modified Coffin-Manson 疲勞壽命評估式作為研判、評估指標之依據，即目前半導體產業界常使用之測試與分析評估方法[13]。第二、韌體、軟體方面之邏輯研判：此應用在數位儀控系統之電子設備(一樣定義為具有半導體微處理器之電子設備)，如前所述，也就是採用 PCLs 方案，SFMEA 方法則是從軟體執行層面歸納其錯誤模式。

本章首先就針對一般電氣設備零組件在環境驗證議題下所採用之規範進行概略性的介紹，隨後的章節則是參考電子數位儀控系統相關導則 Regulatory Guide 1.209 及 NUREG/CR-6479 引述之內容：從物理機制探討數位儀控系統設備中具有半導體微處理器電子構裝之失效模式及驗證建議，最後則假設若電子設備之關鍵元件具有最先進微處理器，屬於晶圓層級電子構裝者(Fan-out wafer level packaging) [14]，其在符合聯合電子設備工程協會(Joint Electron Device Engineering Council, JEDEC)所訂定之 JESD 22-A104 加速熱環境條件下[15]，進行數值分析並藉由結果計算其熱疲勞壽命，此壽命評估的目的是視為設備驗證或失效之研判指標之一。當一大型數位儀控設備或監檢測儀器執行驗證時，首先可從硬體層面進行確認或研判電子構裝元件(微處理器)在物理機制上是否產生老劣化現象之可能性，若已具有分析及測試驗證確認後，可將之排除並執行下一階段驗證程序評估，畢竟對數位儀控設備而言，判斷整體性之物理老劣化、軟體錯誤或失效，其驗證程序規模並不小；另外，藉由瞭解目前國內電子產業發展的趨勢[16]，亦可提供管制單位對電廠使用相關電子設備驗證審查之參考。假設電廠在剩餘使用年限、除役過渡期間或除役中，部分安全相關之電子設備如檢測或監視系統所採用之晶片若應用此最新式的構裝技術，其驗證相關的議題亦可從此分析中獲得參考訊息。本章最後一節則提出相關的結論與建議，主要從探討硬體方面對核電廠重要安全(及安全相關)設備環境驗證相關審查，完成一系列之架構整理以供參考。

表 4-1 對安全至關重要及安全相關設備環境驗證引用規範分類表

分類	設備零組件	架設位置	環境驗證條件	引用導則及標準
電氣設備的環境驗證	如本章附錄	圍阻體內	嚴苛環境	R. G. 1.89 IEEE 323-1974
		圍阻體外	溫和環境	不須驗證、定期維護
電子設備的環境驗證	伺服器層級 (數位儀控系統)	圍阻體外	溫和環境	R. G. 1.209 IEEE 323-2003
	微處理器層級 (介面卡、監測設備及無線訊號 傳輸卡等)	圍阻體內	嚴苛環境	R. G. 1.89 IEEE 323-1974
		圍阻體外	溫和環境	R. G. 1.209 IEEE 323-2003
	半導體層級 (晶片、電子構裝)	圍阻體內	嚴苛環境	R. G. 1.89 IEEE 323-1974
圍阻體外		溫和環境	R. G. 1.209 IEEE 323-2003	

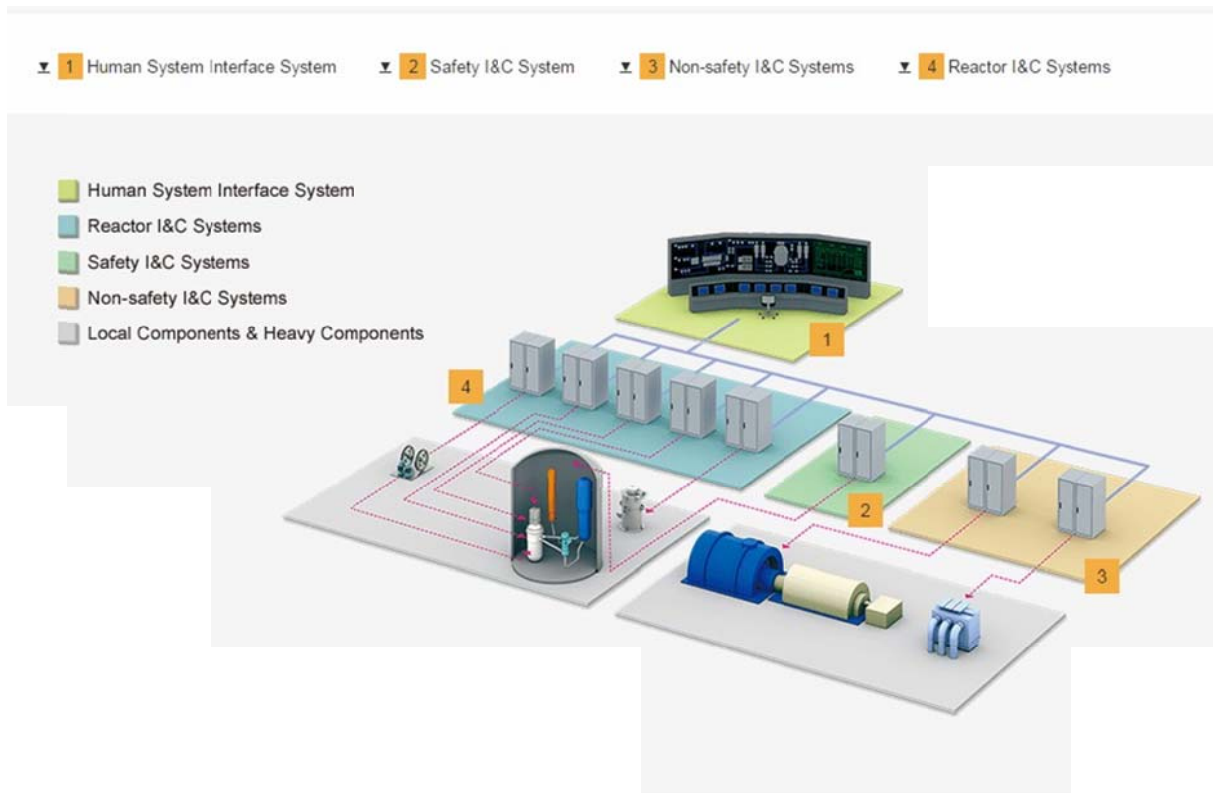


圖 4-1 數位儀控系統配置示意圖 (圖片來源: [17])



圖 4-2 數位儀控系統-人機介面(控制室) (圖片來源: [17])



圖 4-3 伺服器層級之儀控設備(Computer-based instrumentation and control systems)  
(圖片來源: [17])

#### 4-2 環境驗證(Environmental Qualification)於重要安全電氣設備之相關規範彙整

首先，先定義何謂「檢證(Dedication)」、「驗證(Qualification)」以及「驗證壽命」，依據我國核能同級品零組件檢證作業及驗證機構認可管理辦法[18]中指出，「檢證」是指經技術評估及允收程序，以證實商業級零組件之特性與核能級產品零組件關鍵特性相當之作業。「驗證」可說是「環境驗證」，是指針對某廠牌型號的零組件或設備在執行操作環境下，其所需的各種測試評估的過程，「驗證壽命」則是指驗證過程中測試評估組件在某操作環境條件的可使用期程[19]。

其次，再從評估對象加以說明，在執行核電廠重要安全設備環境驗證前，依據前述的定義，首先要瞭解設備或零組件在執行操作時，設備本身承受長時間之循環壓力源(Stressors)所造成的老化效應(Aging Effects)；除此之外，其所架設之位置在周遭環境是否有對其材料性質組成產生更顯著之劣化(Degradation)影響，故設備之材料性質與環境效應的影響先必須做系統性的歸納，方可採行適當的評估方式(如加速熱老化試驗)或參數(如活化能)引用，瞭解其使用評估之適切性。

而在國內核電廠重要安全設備於環境驗證的主要法源依據，主要依循美國聯邦法規 10CFR50.49 內所引述的相關內容，此規範名稱即為核電廠對安全至關重要電氣設備之環境驗證(Environmental qualification for electrical equipments import to safety for nuclear power plants)，內容開宗明義即要求對安全重要之電氣設備均應建立環境驗證計畫(Environmental Qualification program, 一般均稱 EQ program)。故可藉由 EPRI 編列之報告[20]瞭解有關電氣設備零組件的老劣化機制(Mechanisms of Aging Degradation)，而在該報告屬電氣設備者分類為聚合物劣化(Polymer Degradation)以及電氣設備劣化(Electrical Equipment Degradation)，在電氣設備劣化的內容中，對半導體微處理器元件劣化的機制亦有作簡略的說明，而其失效通常是電氣因素造成，通常是由通電或放電形成過大應力產生(約估 60%)，老劣化則是由電與熱應力影響所造成。

以下的各小節將針對安全至關重要及安全相關之電氣、電子設備環境驗證相關的規範與導則做簡要的說明，表 4-2 為環境驗證規範、導則與工業標準內容對應章節之彙整，藉此瞭解針對設備及其所安裝位置執行之驗證，與其所對應的法源依據與管制認可的程序導則。

表 4-2 環境驗證規範、導則與工業標準內容彙整



法源依據 10CFR50.49 (1983 年發布)				
項次	項目	IEEE 323-1974	NUREG-0588(R1) 1981.1 發布	Regulatory Guide 1.89(R1)1984.6 發布
1	環境驗證參數(DBE) 10CFR50.49(e)	5.Principles of Qualification 6.Qualification Procedures and Methods	第 1 項設計基準事件的驗證 參數主要分為五項	對 50.49(d)Environment Condition 補充說明
2	驗證方法 10CFR50.49(f)	5.Principles of Qualification 6.Qualification Procedures and Methods	測試、運轉經驗或分析(以上 三擇二亦可)	C.3 Type test procedure 補充說明
3	餘裕 10CFR50.49(e)(8)	6.3.1.5 Margin	依次為(1)溫度、(2)壓力、(3) 輻射、(4) 電壓、(5)頻率、(6) 時間、(7)瞬態狀況及(8)振動	C.4 Margin 補充說明
4	老化 10CFR50.49(e)(5)	6.3.3, 6.3.4 以及 6.3.5 Aging	同左, 以及考量聯合效應	C.5 Aging 補充說明(認可加速熱 老化試驗 Arrhenius 公式)
5	驗證文件 10CFR50.49(a) 10CFR50.49(d)	8.Documentation	參考 IEEE-323-1974 (8)	C.7 驗證文件之要求



#### 4-2-1 Regulatory Guide 1.89 之補充說明(驗證引用之 NUREG-0588 Part I 及 IEEE-323-1974)

在 Regulatory Guide 1.89 中明定三種類別的安全至關重要電氣設備是必須進行驗證，依次為：(1)安全相關電氣設備(Class 1E, 定義於 IEEE 323-1974)，(2)非安全相關電氣設備(Non-Class 1E)若在某種可能的環境條件下失效，將導致安全相關設備無法正常運作，(3)事故後的監視設備；而不需驗證的部分如在 10CFR50.49(c)內所引述：(1)設備動態及耐震能力，(2) 保護安全至關重要設備不受天然災害及外部事件影響之設備，(3)位於溫和環境的對安全至關重要設備驗證。其次，在 10CFR50.49(e)(5)中說明樣式測試(Typing Test)是要能驗證設備可經歷自然老化或人為（加速）老化至壽期結束為前提，且能更進一步考慮所有明顯的劣化可能對設備的功能產生影響的因素。在該導則中也提供了兩種可引用的方向：(1)可藉由 Arrhenius theory 評估指標(推估驗證壽命)，(2)一些設備可能僅能藉由運轉經驗，且無法藉由相關加速測試獲得其至壽限的狀況，而其在設計基準事故期間可能導致功能失效，故可藉由監控、測試(其他種類)和維護的方式執行。另外，執行驗證時也須考量的一些事項諸如：(1)圍阻體外的設備受到環境影響通常比其內部環境影響低，(2)有輻射源屏蔽的設備通常會比直接暴露於輻射源的設備接受較少的輻射劑量(意指若兩個架設位置若皆與輻射源等距)，(3)保護設備初期作動所需的時間較事故發生期間監控設備運作時間短，和(4)考慮保護設備(用於減緩在設計基準事故下，對安全至關重要設備的影響)是否在冷卻水喪失事故(Loss-Of-Coolant Accident, LOCA)或高能管路破裂(High Energy Line Break, HELB)承受更嚴重的環境。

最後該導則述及：許多研究已經明確指出，有機化合物的抵抗輻射能力大於最低受損門檻值  $10^4$  rads (雷得:Roentgen Absorbed Dose; 單位質量物質接受輻射之平均能量)，並且暴露在稍高於門檻值仍能保持功能。故對於有機材料若暴露在低於  $10^4$  rads 是可通過輻射驗證，這是透過既有的測試數據或操作經驗所證實；然而，對於電子元件，有研究已經顯示以稍低的劑量就會導致金屬氧化物之半導體元件失效故障，因此，電子元件的輻射驗證可能具有較低的暴露門檻值，由此可知，USNRC 認為具半導體微處理器之設備即使在溫和的環境下，是否不需進行對輻射項目的驗證仍有所顧慮(該導則改版是 1983 年)。

USNRC 在此導則認可了 IEEE 323-1974 年版所提供對 Class 1E 設備的驗證程序，



該工業標準亦可應用於 10CFR50.49(b)(1)所定義之設備，而這些程序可用於確認設備之安全功能是否達到要求，相關的設備則列於該導則的附錄 A(本章附錄)內，對 10CFR50.49(b)(2)定義的非安全相關設備(失效將影響安全相關設備運作)則列於附錄 B，其認定的方式在該附錄中是以範例加以說明。10CFR50.49(b)(3)所指的設備，可參考 Regulatory Guide 1.97, rev.3[21]的相關說明。

以上的內容主要簡單引述 Regulatory Guide 1.89 對電氣設備執行環境驗證的大致方向，執行細節的說明分列於下面各小節，並以 NUREG-0588 的內容為主，輔以相應之 Regulatory Guide 1.89 作為補充，同樣亦可參考表 2-1 的彙整。

#### 4-2-1-1 環境驗證參數

在 10CFR50.49(d)及 IEEE 323-1974 的 6.2 小節中，闡述了設備及其電氣規格皆需滿足 DBA 環境測試，並且訂出測試的環境參數，而在該導則則補充了對驗證參數的一些考量，由此可先回到在 NUREG-0588 報告[22]的內容，在報告中(國內電廠僅需參考範疇 I 的部分)，第 1 項 DBA 的驗證參數主要分為五項，這些驗證參數依次分列如下：

1. 圍阻體內的溫度與壓力狀況，假設冷卻水喪失事故；引用事故之時間相關的壓力溫度，計算質量與能量釋放率的方法可參考 NUREG-0588 的附錄 A (Regulatory Guide 1.89 的附錄 C 較新)。
2. 圍阻體內的溫度與壓力狀況，假設主蒸汽管斷裂事件(Main Steam Line Break, MSLB)；同第一項補充之說明。
3. 化學噴灑(Chemical Spray)效應；在 Regulatory Guide 1.89 則是要求必須考慮圍阻體內的噴灑系統運作所造成的效應，其中除了化學物質噴灑系統外，亦須考量水噴灑系統所造成的效應(導致溫度與壓力的變化)。
4. 圍阻體內外輻射照射狀況；在 Regulatory Guide 1.89 則是提出了八點補充說明，而附錄 D 中列出了 BWR(沸水式反應器)與 PWR(壓水式反應器)的輻射劑量分佈值(分別列出 Alpha 與 Beta 等值)。
5. 圍阻體外的環境狀況；在 Regulatory Guide 1.89 則是補充：可減緩管路斷裂所導致後果或可使設備安全停機的電氣設備，其驗證須符合預期之環境條件。



#### 4-2-1-2 環境驗證方法

在 NUREG-0588 報告中第 2 項(Qualification Methods)所列的項目主要參考 IEEE 323-1974(6)的內容，採用這些方法是可確認對安全至關重要設備在 DBA 發生及發生後仍能維持其安全功能，而在第 2 項的第 1 小節(驗證方法的選用)第 1 款則直接說明驗證方法必須確定符合 IEEE 323-1974 年版的要求，其餘各條款之重點簡述如下：

1. 不接受分析代替測試數據，除非(a)測試的組件是由於尺寸大小的限制，(b)部分提供類型測試數據支持分析假設並得出結論。
2. 處在 DBA 的環境條件下，測試時間應與設備可操作的時間訂定一基準，失效準則與安全餘裕可參考規範(如 IEEE 323-1974 6.7)；
3. 老化效應應考量機械與電流通產生之應力。
4. 驗證測試的條件若不是採用 DBA 的條件，是允許可符合現場實際運轉狀況的條件；然而，必須附加實際現場運轉的歷史紀錄、部分藉由分析所得的結果等。

在 Regulatory Guide 1.89 於 C.3 的部分(Regulatory Position)則是補充說明如下：

- A. 電氣設備若可能浸入水中操作或其他因素，測試應通過在浸沒條件下進行，藉此以證明浸水期間的可操作性。測試時間若比所需持續時間短，利用結果數據外插之值應該一併檢覈。
- B. 電氣設備若位於一個壓力快速變化的地區，驗證時應考量該區域之最大相對濕度，藉以證明設備密封和蒸汽屏障可防止水分滲入設備，達到設備維持功能性之需求。
- C. 電氣設備驗證的參數(例如溫度，壓力，輻射)應該接近實際操作環境之條件，以確保測試條件可準確地反應測試設備所在之環境特性。
- D. 在電氣設備的性能範圍內，應驗證設備在操作前、中以及後的性能特性。連續性的監測是避免遺漏設備執行其安全功能時突然產生瞬時故障的情形；然而，對於長期測試，監測可以使用合理的周期間隔方式進行。
- E. 在驗證模擬事件測試中，應納入代表操作環境條件之啟動化學或水噴灑系統情境，此時的壓力和溫度條件方可符合實際狀況。
- F. 環境驗證之輻射測試可採用鈷-60 或銫-137 做為  $\gamma$  輻射源。



### 4-2-1-3 環境驗證餘裕

同樣在 NUREG-0588 報告中第 3 項說明了餘裕的認定，此處在 IEEE 323-1974(6.3.1.5) 中針對了 8 種環境因子應應用於樣式測試相關的條件中，依次為(1)溫度、(2)壓力、(3)輻射、(4) 電壓、(5)頻率、(6)時間、(7)瞬態狀況及(8)振動，在 Regulatory Guide 1.89 於 C.4 (Regulatory Position)的部分則是補充說明除時間的餘裕外，其他皆必須符合 10CFR50.49(8)的要求，隨後的內容則提出相關的說明。

### 4-2-1-4 老化效應

接下來在 NUREG-0588 報告中第 4 項提出了 EQ 計畫內老化的效應是必須要考慮的，而在 IEEE 323-1974(6.3.3)中說明了老化效應的評估方法應注意的事項；例如，設備零組件在加速熱老化評估壽限時，其運轉受到的振動因素也是導致失效的原因等，在 Regulatory Guide 1.89 於 C.5 的部分主要補充了 4 點，依次說明如下：

- A. 若在驗證前確定考量聯合效應(Synergistic Effects)，則應在驗證計畫中加以說明，協同效應是指輻射劑量率效應(Dose-rate Effect)，原因在於輻射劑量和溫度上升先後之次序不同所造成的影響。
- B. 使用條件下設備的預期運轉操作溫度應考慮熱老化。Arrhenius 法是可接受的熱老化加速評估法，其他老化方法應根據具體情況再加以進行評估。
- C. 驗證測試所使用的老化加速率和活化能以及其基礎應完整定義、合理性證明以及記錄。
- D. 可接受定期監測和測試計畫，藉以解決不確定之因素造成設備老劣化，這些計畫的結果可作為修改設備的壽限（或驗證壽命）的依據，並應納入維護和更新計畫。

以上的內容主要是以 Regulatory Guide 1.89 作為主要的補充參考對象，基本上對於驗證程序與方法仍是以 IEEE 323-1974 年版為主，NUREG-0588 報告為 NRC 先期(早於 Regulatory Guide 1.89)對電氣設備之環境驗證審核管制的立場，其後便制定出 10CFR50.49(1983 年後)，而後於 1984 年 6 月訂出 Regulatory Guide 1.89 且沿用至今。故可知半導體微處理器元件在當時的技術，僅強調在輻射的因素可能影響到電子設備較為明顯，且電廠儀控設備的設計大部分採用類比訊號系統。



#### 4-2-2 Regulatory Guide 1.97(對儀控設備功能要求的導則)

此導則不論是在第 3 版(1983 年)或是第 4 版(2006 年)主要皆是對電廠儀控、監測系統如何滿足 10CFR50, Appendix A 規定之事故後的功能要求;在 10CFR 50 Appendix A 中規定核電廠應提供:(1) 適足的儀器去監測 DBA 發生後的各項變數及系統參數,以確保核電安全,(2) 控制室可使事故發生後將核電維持在安全狀態,控制室外的儀控設備應具備斷然熱停機(Prompt Hot Shut-down)能力,(3) 輻射監測設備以有效監測事故發生後可能引起輻射外洩的圍阻體氣體、LOCA 流體排放路徑及電廠環境輻射活性。該導則相關內容涵蓋的規定或補充說明主要是針對儀控監測系統的功能要求,故本節簡述該導則對環境驗證有關的說明如下:

1. 所需儀控、監測儀器之功能必須能夠承受事故狀態下的環境,在事故發生的期間仍能發揮作用(此即環境驗證目的)。
2. 所有事故條件下的正常儀表功能可提供指示、記錄和提供事故過程中某些變數的歷時反應(此處指監測儀器應具備此種功能)。

在該導則表 1 (Design and qualification criteria for instrumentation), 第一行之第一項即規定了設備驗證(Equipmental Qualification)的要求與方法導則,而在表 1 的橫列則是代表驗證標準(Criteria)的類別,這三種不同的類別是根據其對特定測量變數的重要性進行的分級方式:第 I 類標準是具最嚴格的要求,適用於關鍵(量測)變數,第 2 類標準是低於第 1 類標準的要求,一般適用於指定系統運轉狀態的儀表,第 3 類標準是確保(可偵測) 現有高規格之儀器仍在運作,其可適用於備份或診斷,也用於現在電廠儀控系統仍不支援之更高規格儀器。

其中,可讓人注意的是:第 1 類與第 2 類之驗證標準必須符合上一節所述之 Regulatory Guide 1.89 以及 NUREG-0588 報告所引述的內容,第 3 類則不須;這也隱含了在當時(1983 年)第三版導則對微處理器設備所持之保留態度,畢竟 Regulatory Guide 1.89 是應用於嚴苛環境的導則,電廠對先進的數位電子設備不可能設置於該種環境中,且在溫和環境下又不須驗證。

其次,在第 4 版中直接提及了對於電廠事故監測系統在觀念想法和方法上持續不斷的演進。另外又闡述:鑑於其規定的性質,Regulatory Guide 1.97 的第 3 修訂版迅速成為事故監測的標準後,ANSI / ANS-4.5-1980 和 IEEE 497-1981 便不再視為標準引用。儘



管如此，Regulatory Guide 1.97 的修訂版第 3 版卻又屬於過時的導則，因為該導則並無提供現代數位技術的先進儀器儀表系統的設計標準導則；然而，在 USNRC 立場說明的第六項中提及：如果 USNRC 的規定引用的工業標準或規範包含了 IEEE 497-2002 標準中的第 2 條款，持照業者和申請者就必須遵守該規範中所規定的準則或標準。同樣地，如果 USNRC 已經在導則中列出所允許引用的規範或標準，該規範或標準將構成了符合導則中之管制要求的可接受方案。相對地，如果引用的規範或標準既不被 USNRC 納入規定也沒有被導則引用，持照業主和申請者可以考慮並適當合理使用已參考之規範或標準中的訊息，就可符合當前的管制要求。

故在此處，可推測 USNRC 對傳統及先進數位監控設備的立場，若電廠仍採用設計初期的系統，則驗證須符合前版次導則之要求，採用先進數位系統，或許可考慮下節所述的導則(Regulatory Guide 1.209)當作驗證的導則參考。

#### 4-2-3 Regulatory Guide 1.209 (具有對電子設備環境驗證要求的導則)

如第 4-1 節之前言所述，USNRC 對安全至關重要相關之具有微處理器的電子設備在驗證上是採用與其他電氣設備同樣等級之國家標準，且參考了健全的工程評估技術，藉以確保數位電子設備能在適當的環境下進行運作，由此評估技術期盼可驗證數位電子設備在溫和環境的可靠性，因此，此導則不但認可 IEEE 323-2003 年版[23]作為驗證參考依據，且引入了 NUREG/CR-6479 作為評估技術的基礎，此亦為本章所要提及的重點。

然而，從另一方面來看，對於 Regulatory Guide 1.89 及 IEEE 323-1974 這些電氣設備的驗證標準，其限制了所驗證對象範圍，主要驗證的環境指的是嚴苛的條件狀況，等同排除了 10CFR50.49(c)中所定義的溫和環境的設備驗證，而在核能電廠屬於溫和的環境下，是否可能影響此類敏感之數位電子設備運作，故這些設備即使在電廠溫和影響環境下亦是需要證實其功能性不受影響。

再從這些具微處理器的電子設備或系統的獨特性來看，這些特性皆是必須考慮在驗證過程中：包括功能(軟體層面)和硬體方面。類比和數位設備之間的一個顯著差異就是功能密度越高者，就可能偏向使用具有微處理器的數位儀控系統。由於單晶片(Single Chip) 的功能性不斷擴大，許多與安全相關的設備更換成具有微處理器的多功能模組，另一個區別在於具有微處理器的儀控系統代表循序功能的執行方式與類比模組的基本



平行處理相比：對於仰賴結合多組系統，每個系統都有獨自(離散)的功能，再藉由數位傳輸正確或錯誤的數據整合行為；代表數位儀控系統的功能對環境潛在壓力源具有累積性影響，這點對驗證是重要的考量。

從硬體的角度來看，類比和先進數位系統之間的一個顯著差異在於不同積體電路(Integrated Circuit, IC)技術對輻射耐受性。在歷史上類比技術用於核電廠的是屬於離散式雙極元件(Discrete Bipolar Devices)，先進的數位系統則傾向使用金屬氧化物半導體(Metal Oxide Semiconductor, MOS)技術，特別是低耗能晶片(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)的技術；MOS 元件對輻射的門檻值(Threshold)通常低於雙極(類比)設備，然而，由於 MOS 技術在其他領域的技術優勢是首選的(如更高的輸入阻抗、更少的製程加工步驟、更好的溫度穩定性和較低的噪音)。商用的 MOS 元件對電離劑量(Ionizing Doses)非常敏感，反而其對中子能量密度相對不敏感。

類比和先進數位系統之間的另一個顯著差異來自於：數位技術演變的潛在影響，特別是 IC 晶片級的密度和複雜程度越來越高時，導致以往不太可能的故障機制變得更多；例如，目前巨型積體(Very Large Scale Integration, VLSI)電路的複雜程度上，電子遷移可能成為金屬引線互連和/或層間接觸的重要問題，通常設計為承載超過  $105 \text{ A} / \text{cm}^2$  的電流密度，相當於普通家用電器 4000 A 以上的電流。VLSI 的製造商通常會強調在高溫和高電流下進行設備的可靠性測試，但其他參數的聯合效應可能會導致另外種類的失效機制；例如半導體元件中的介電層失效(Dielectric Breakdown)。

驗證設備安全之目標是避免安全系統在執行其安全功能時造成可能的失效，由數位儀控系統獨特的功能和硬體特性來看，驗證導則應明確規定注意事項，這些特殊考量是來自於工業界所遵循之工程經驗，儘管如此，USNRC 仍以簡明和避免不確定性的方式制定了此一導則(Regulatory Guide 1.209)，並建議保留設備之驗證記錄及採用其所認可之最適當的標準。此導則並不傾向(但也無排除)為數位儀控系統建立在溫和環境下的合格驗證壽命，但仍強調對於安全相關的數位儀控系統的驗證，應要能證明其在指定的環境及承受操作壓力源下，發揮應有的安全功能。

#### 4-2-3-1 NRC 於 Regulatory Guide 1.209 的立場與看法

IEEE 323-2003 標準是適用且符合安全相關的數位儀控系統在電廠溫和環境的驗證



導則，該標準也適用於以下的例外和補充：

1. 對於安全相關的數位儀控系統的環境驗證，樣式測試是首選方法；選擇採用 IEEE 323-2003 的第 6.1.5.1 節所述之運轉(操作)條件，應根據實際的環境條件；而樣式測試可能是製造商的產品測試，其採用適當的操作條件並考慮聯合效應而記錄該產品之性能。USNRC 不考慮第 6.2.1.2 節中對於老化說明(導則)的適用性，因為其缺乏對微處理器老化機制的重要資訊。
  - 補充說明 IEEE 323-2003 之第 6.2.1.2 節內容：若設備有明顯的老化機制，驗證計畫應考量該機制。老化為驗證計畫的一部分，樣品老化狀況的調整可以在設計基準事件測試之前透過測試解決，故設備若沒有明顯的老化機制，老化的條件則不是必需(在驗證時)考慮的，另外，用於解決老化的技術可能會影響於驗證的條件下，且正在進行之設備維護要求(影響兩種結果：驗證與維護)。
2. 若有適當的理由，IEEE 323-2003 允許省略驗證計畫在 6.3.1.1 節的要素和在 6.3.1.7 中對於溫度環境條件的測試順序，驗證測試應在數位儀控系統實際運行的情況下進行，包含軟體及診斷偵錯設備(或軟體)同時執行。安全相關的數位儀控系統的測試，應執行系統所有能完成安全相關功能的部分，包含其操作過程部分，或因故障導致影響安全相關功能的部分。驗證測試也應確認數位介面的反應，並驗證系統的設計是否適應環境的潛在影響，雖然測試整體安全相關數位儀控系統是較佳的方式，但對一個整體系統的樣式測試並非那麼有實用性。
3. 對於安全相關的數位儀控系統在溫和環境中操作方面，USNRC 提出對 IEEE323-2003 的第 7.1 節提出引用例外之說明：溫和環境中的驗證應有選擇性的去符合 7.2 節中的導則，這是根據實際現場環境的條件。對於記錄的保存，應在一個可易於查核的位置，以便必要時可順利進行審查及使用。(IEEE323-2003 7.1 及 7.2 節是規範溫和與嚴苛環境下的驗證紀錄要求)
4. Regulatory Guide 1.89 是提供電氣設備在嚴苛環境中的驗證導則，且依循 10 CFR 50.49 的要求，安全相關之數位儀控系統若安裝在此嚴苛的環境中，本導則 (Regulatory Guide 1.209)的立場是同樣認可 Regulatory Guide 1.89 作為嚴苛環境的驗證導則。



由以上對 Regulatory Guide 1.209 所整理的相關內容來看，NRC 對先進數位電子設備的驗證保持了適當的彈性，也就是不嚴格要求一定要執行何種特別的項目(在溫和環境下的驗證壽命)，也不認為何種設備在較適當的環境下就可以排除驗證(Regulatory Guide 1.89 要求就不是如此；電氣設備(或零組件)若裝置在嚴苛環境下就須依照 Regulatory Guide 1.89 導則執行環境驗證，溫和環境下就不需執行)。設備若經由某種程序證明可達到確保安全相關功能，且在架設的環境下能正常發揮其安全功能，相信此即滿足管制上的要求，但執行某種測試程序獲得符合其相關要求的證明之前，還是要引用適當且被認可的法源依據作為執行此種測試程序的根據。但此處仍須強調：光是僅有數值分析驗證是不會被管制單位認可的，必須有測試或運轉經驗其一或二加以佐證。故下節的 NUREG/CR-6479(微處理器的驗證技術基礎)雖然是 1998 年發佈，但也正是迄今 NRC 仍未覺得其為失效過時的參考依據，另外，在 NUREG/CR-6741(2001 年發行)再次歸納相關的議題。

#### 4-3 從物理機制失效模式探討具微處理器電子設備之環境驗證(NUREG/CR-6479)

在 20 世紀末，USNRC 就已意識到未來數位儀控系統在電廠的應用會更加廣泛，而在設備中的微處理器可能會帶來與類比式儀控系統全然不同的環境驗證議題。因此，在當時便啟動了「先進儀器與控制系統驗證」計畫；該計畫研究項目的目標是(1)確認數位科技具有與環境-應力相關的獨特故障模式，以及其對安全系統之潛在影響，以及(2)利用這些研究結果進行導則導則的技術基礎。故以下各小節將簡述當時研究結果(從 NUREG/CR-6479 的觀點)以及現今關於微處理器(半導體晶片構裝)相關技術之發展。

##### 4-3-1 電子設備元件老劣化機制

在電廠環境中電氣和電子電路的老化機制，是指輻射、濕氣和溫度對電子設備材料以及對電路運作之影響效應，而材料脆化或軟化、機械性質變化、顏色、腐蝕、材料開裂或重量的變化等劣化情形，則可能會導致絕緣的惡化、介電材料的變化、電阻的增加等特徵。

在輻射影響方面，誠如本章 4-2-1 節對 Regulatory Guide 1.89 所述，研究顯示金屬氧化物之半導體電子元件若暴露在較低的輻射劑量(門檻值  $10^4$  rads)下就可能造成故障失效。因此，對電子元件而言，其輻射驗證可能具有較低的輻射暴露門檻值(無法通過



要求標準)。另一方面，多年來經設計改良，IC 元件對輻射敏感性有顯著的改善，並且有效的數據顯示溫和環境中的輻射劑量水準可能遠低於門檻值，以下則簡要說明半導體元件對游離輻射(Ionizing Radiation)敏感性的影響。

一般而言，半導體電子構裝元件若暴露在全劑量游離輻射下，可能直接導致劣化損傷，而另外兩種失效則是軟體錯誤(Soft Errors)和位移損傷(Displacement Damage)。移位損傷主要是由中子引起的，游離輻射損傷則是由  $\gamma$  和 x 射線造成，因為中子屬相對較重(比電子重 1840 倍)的不帶電粒子，當其與半導體晶格內的原子產生碰撞，不僅是使電子或分子從原本在晶格的位置移開，更佔據了晶體間隙內的位置，而軟體錯誤是指與物理缺陷無關的設備隨機故障。在 IC 構裝材料中，存在天然放射性雜質  $\alpha$ -粒子(例如，鈾或鈾)，軟體錯誤則是由這些放射性元素的粒子所引起的。

測量半導體電子構裝元件的輻射門檻值方法，是需確定其開始產生不安定(Upset)的程度，不安定這一詞是具有超過容忍度的含義；例如，一個輻射不安定的判斷邏輯：是指門檻值對應於輻射源所散發出的輻射劑量率，超過了產生雜訊的最低限度。MOS 元件的門檻值輻射水準通常低於雙偶極技術，儘管如此，MOS 是 IC 元件的首選技術，如上一章(2.3 節)所提之優點；但是，很多類似的 MOS 元件在 1 *krads* 的游離劑量下導致失效，1~3 *krads* 的範圍卻又是商用設備使用之 MOS 元件的安全上限。

另一種因游離輻射造成的現象稱之單一事件不安定(Single Event Upset, SEU)，主要是發生在高密度 IC 元件之設備中，當其中一個元件測試時遭受干擾產生不穩定，這個元件的任何物理特性通常都不會有劣化的跡象，這樣的短暫錯誤被稱為單一事件不安定(單顆離子穿越晶片的現象)；核電站環境中產生 SEU 的主要來源是元件中  $\alpha$  粒子的離子化，為天然放射性之錒系元素(如鈾，鈾及其衍生物)衰變後的產物，而用於製造晶片及其構裝的材料中可發現這些微量的元素；因此，不能只因抗輻射能力通過驗證測試(高於該輻射門檻值規定)即可消除 SEU，SEU 問題的一個部分補救措施是使用錯誤檢測、校正或覆置等方法，特別是要維持或加強晶片構裝密度，這也就是現今 EPRI 對數位儀控系統發展 PLCs 的原因之一。

其次，在溫度和濕度方面，對 IC 元件而言是構裝材料和技術因素，目前是用於構裝類型主要為兩種：通孔安裝和表面黏結技術(Surface Mount Devices, SMD)，矽晶片和構裝通常藉由打線接合、捲帶自動接合以及覆晶(本研究主要評估對象)，取決於輸入/



輸出焊點的數量和間距、晶片、載板以及成本。主要構裝製造技術目前主要是以模塑塑料為主，基本上，塑料構裝的微電路架構是由一個 IC 晶片實體連接到導線框架，由金屬引線連接到輸入/輸出端，並以塑料模製直接包覆晶片及導線框。

溫度對 IC 元件的壽命有很高的關聯性，一般來說，電腦系統的冷卻效果是提高可靠度的基礎，主要目的是使在操作中晶片溫度不超過約  $50^{\circ}\text{C}$  ( $122^{\circ}\text{F}$ )，半導體製造商的品保要求，一般是確認工業等級之半導體元件，其最高額定溫度可超過  $80^{\circ}\text{C}$  ( $176^{\circ}\text{F}$ )，半導體製造商常使用可靠度的壓力測試來確保元件品質，通常使用等於或超過 ORNL 在研究中所使用的最大溫度和濕度水準。這些測試通常包括以下內容：熱壓膨脹試驗 (Autoclave Test, 測量設備耐濕氣滲透性和電鍍腐蝕的影響)、高溫高濕偏壓試驗 (High-temperature high-humidity Bias Test, 測量塑性構裝元件的耐濕性)、高溫極偏壓測試 (High-temperature Gate Bias Test, 設計為在高溫下對氧化物進行電偏壓的測試，也就是使電流通過特定點) 和高溫儲存壽命測試 (執行以極端溫度加速應用熱應力引發的失效機制)。在異常情況下，控制室環境溫度會提高 (例如喪失通風和空調)，但不超過  $49^{\circ}\text{C}$  ( $120^{\circ}\text{F}$ )，而常溫控制室的範圍為  $16$  至  $27^{\circ}\text{C}$  ( $60$  至  $80^{\circ}\text{F}$ )，故在 NUREG/CR-6479 報告中的觀點認為：位於控制室的保護系統，通常要在異常情況下運行至少 12 小時，而其半導體元件不太可能由於溫度而出現明顯的失效機制，高濕度 (~85%) 也是不太可能發生，除非伴隨著高溫的情況，而如此高的濕度很可能只有發生在事故條件之下。而經過多次測試證明，即使在這種情況下，先進之數位設備元件仍具有足夠長的時間維持其可靠性，以期使實現安全停機的目標。故該研究報告建議在溫和環境下的數位儀控設備，在樣式測試 (不含老化) 中應該仍是要充分證明該安全設備適用於電廠環境。

由於 NUREG/CR-6479 報告是在 1998 年出版，在當時或許已有許多 IC 電子構裝發展中的技術在現今量化及商業化，但該報告仍是以當時商業化的產品為探討對象，故當時的觀點不適宜應用於現今的商用產品，特別是使用於核能等級的條件下。故本研究的出發點則是先以現今最廣泛使用之數值模擬來進行 IC 電子構裝驗證參考，主要提供樣式測試下的研判依據，數值模擬的特點在於低成本、大量運算可能的狀況，亦可涵蓋電子構裝製程中不確定的因素，畢竟即使採用實體樣式測試可能僅抽樣數片元件來代表全數狀況。

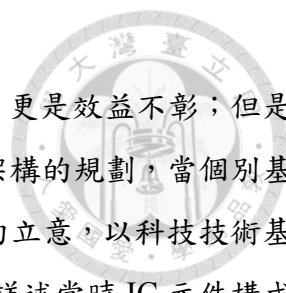


#### 4-3-2 NUREG/CR-6479(具微處理器設備之環境驗證技術基礎)

NUREG/CR-6479 這本研究報告主要由三個國家實驗室等級之研究單位共同撰寫，依次為橡樹國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)、桑迪亞國家實驗室(Sandia National Laboratories, SNL)以及布魯克黑文國家實驗室(Brookhaven National Laboratory, BNL)。在整個主題中，其分為 6 組子項，而橡樹國家實驗室則主導了其中 5 項；以下所列為各研究項目：

- A. 技術文獻回顧：以確定微電子電路重要之長期失效機制和製造商使用的零組件驗證方法。
- B. 審查當前核電廠環境驗證標準，以了解與安全相關之數位儀控伺服器的新議題和認可接受方式，以提升數位儀控系統的驗證程序品質。
- C. 參考美國軍方的整體驗證資格認定方式，以研究與核能環境有關之新的驗證認定方法。
- D. 研究核電廠環境之壓力源對數位設備的風險因子，且確認這些壓力源有包含在核電廠環境驗證的項目中。
- E. 關於環境壓力相關缺失及系統層級的失效模式研究，可對數位系統安全功能進行確認，或建議現有驗證測試的修正，將有助於系統功能性保持足夠的安全餘裕。
- F. 研究積體電路(IC)暴露於煙霧中的影響，以期識別對煙霧敏感性相關的驗證執行問題。

此報告開始就針對 1983 年 NRC 所發布的 Regulatory Guide 1.89 提出適用範圍不充分之質疑，因該導則允許的驗證方式是採用之 IEEE 323-1974 工業標準，其較適合應用於電廠環境的類比/電氣設備，但是，該報告認為由於類比元件造成失效問題的機制缺乏基礎架構，加上數位系統確實存在潛在優勢，使得當時在核能工業的發展趨向由數位系統取代類比儀控系統，故建議可藉由在 1994 發布的 NUREG/CR-5904 報告和當時美國軍方經驗可加強對數位儀控系統在環境驗證議題上的導則。圖 4-4 為環境驗證在防止具有微處理器之數位儀控系統遭遇一般失效的角色，也就是對執行環境驗證提出一個完整的架構，但以現今的數值運算的技術而言，分析確實可以做為環境驗證輔助的參考。以管制立場而言，單憑分析數值的結果，確實在證明系統或相關零組件、元件上的失效機



制顯得薄弱，且由數值分析整體系統在物理失效機制上的驗證，更是效益不彰；但是對數位儀控系統之環境驗證而言，其本質上就是一個整體性架構的規劃，當個別基礎的機制確認後再逐步向上沿伸，如同此報告(NUREG/CR-6479)的立意，以科技技術基礎為主題，而出發點的對象則是微處理器為主，故於該報告第 2 章詳述當時 IC 元件構成、型式、可能遭遇之環境壓力源(如電遷移、介電質失效、金屬層介面上電位腐蝕以及其他失效因素)之探討，如本章表 4-3 所列，該表彙整了通常被認為是降低 IC 元件可靠性之失效機制，這還不包括早夭型的失效，而這些早夭型失效通常是由製程缺陷導致的；例如蝕刻缺陷、引腳製程缺陷(早期結合為引線接觸不良，覆晶技術後為空孔缺陷等)，另外還有兩個失敗的機制未列在其中者，就是靜電放電和  $\alpha$  粒子引起的隨機故障與物理缺陷。

#### 4-3-3 加速測試彙整與 IC 電子構裝疲勞壽命評估

而核電廠環境驗證計畫中，老化驗證的目的是：將設備置於與預期執行安全相關功能的事故中，其最容易發生事故的狀態。也就是說，假設事故發生在設備的驗證壽命末端時，能證實出其功能仍能正常發揮。在事故之環境條件下對設備進行測試之前，通常使用加速老化來使設備顯示出等同於在正常使用條件下運行了相當長時間的狀態，並檢視其預期功能是否仍能發揮，而在半導體製造商則是在 IC 元件之電子構裝使用加速測試法[24]，其目標是確認主導在電子構裝中的失效率，以便在設計或製造過程中進行改良並提高可靠性，故兩者(加速老化與加速測試)的目的不同，但方式是一致的，通常應用於加速 IC 元件之電子構裝體失效機制之五種壓力源為：溫度，電壓，電流，濕度和溫度循環。

引用溫度加速的方式，主要源自於化學與物理過程而導致失效的機制，故可藉由溫度來加速機制的形成；假設 IC 元件的某些物理性質是隨時間變化參數，當該參數超過某個任意值時，IC 元件將失效，進一步假設當設備的溫度為  $T_1$  時，這些參數的變化導致發生失效，而失效的時間為  $t_1$ ；在另一個過程下，當溫度為  $T_2$  時，這些參數以不同的速率變化，出現失效的時間為  $t_2$ 。通常， $T_2 > T_1$  和  $t_2 < t_1$ 。藉由 Arrhenius model 來描述這些反應的過程； $t_1$ 、 $t_2$ 、 $T_1$  和  $T_2$  之間的關係如下式所列：

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\left(\frac{0}{k}\right)\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (4-1)$$



其中；

$\phi$  為活化能 (eV/molecule)；

$k$  為 Boltzmann's constant ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K-molecule)；

$t_1/t_2$  為加速因子。

該方程式是假設失效是由單一參數(化學反應)所引起，而相同的單一參數發生在實際狀況和加速條件下，一般而言，是指使化學濃度的改變而導致活化能之變化的機制(此機制也就稱之失效機制)，表 4-3 也列出了一些更重要的故障(失效)機制與其相關的活化能。

表 4-3 半導體元件在時間相關之失效機制

Device association	Failure mechanism	Relevant factors	Accelerating factors	$E_a$ = apparent activation energy for temperature (eV)
Silicon oxide and silicon-silicon oxide interface	Surface charge accumulation	Mobile ions, voltage, temperature	Temperature	1.0 to 1.05 (depends upon ion density)
	Dielectric breakdown	Electric field, temperature	Electric field, temperature	0.2 to 1.0
	Charge injection	Electric field, temperature	Electric field, temperature	1.3
Metallization	Electromigration	Temperature, current density, area, gradients of temperature and current density, grain size	Temperature, current density	0.5 to 1.2
	Corrosion (chemical, galvanic, electrolytic)	Contamination, humidity, voltage, temperature	Humidity, voltage, temperature	~ 0.3 to 1.1 (for electrolysis)
	Contact degradation	Temperature, metals, impurities	Varied	
Bonds and other mechanical interfaces	Intermetallic growth	Temperature, impurities, bond strength	Temperature	Al-Au: 1.0 to 1.05
	Fatigue	Bond strength, temperature cycling	Temperature extremes in cycling	
Hermeticity	Seal leaks	Pressure differential, atmosphere	Pressure	

Eyring model 可用於考慮溫度以外的環境應力。對於如果考慮到腐蝕，並且將壽命中值 ( $t_{50}$ ) 視為測量值腐蝕速率，那麼該過程可以用 Eyring model 如下式所列：

$$t_{50} = A e^{\frac{\phi}{kT}} F_H F_V \quad (4-2)$$



其中；

$A$  為特定常數；

$\emptyset$  活化能 (eV/molecule)；

$T$  為絕對溫度(K)；

$F_H$  為濕度應力因子(Humidity Stress Factor)；

$F_V$  為電壓應力因子(Voltage Stress Factor).

而 Eyring Model 另一個表示反應速率的式子，此為一般式， $R$ 是代表失效機制下的反應速率；

$$R = C \sinh \left[ \frac{\alpha(T)S}{kT} \right] e^{\left( \frac{-Q}{kT} \right)} \quad (4-3)$$

其中；

$\alpha(T) = kT\gamma(T)$ ，參數 $\gamma(T)$ 介於 1 to 4.5；

$k$  為 Boltzmann's constant ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K-molecule)；

$Q = \emptyset_0 + \alpha(T)S_B$ ； $S_B$ 為瞬間失效時之應力值， $\emptyset_0$ 為材料活化能相關參數。

上式在現今的 IC 電子構裝可靠度評估中已被廣泛的使用，主要因 IC 黏接至 PC 板已不再是當時所使用的金屬引腳，取而代之的是無鉛錫焊，稱之為覆晶錫球[25]；無鉛錫球常見的成分為銀-錫-銅，而金屬錫在常溫下即會產生塑性潛變，於熱循環的環境中，也因為上下銜接的電子元件之熱膨脹係數差異形成熱疲勞效應；故現今電子構裝壽命評估也已藉由實驗將上式稍作修正為計算錫球之潛變等效應變率，即 Generalized Garofalo 潛變等效應變率公式(Generalized Garofalo Creep Equation) [26]，並配合以應變為基底之 Coffin-Manson 疲勞壽命預估公式來評估此類 IC 元件之電子構裝體之疲勞壽命；下式則為潛變等效應變率公式：

$$\frac{d\epsilon_{cr}}{dt} = C_1 \sinh[C_2 \sigma]^{C_3} e^{\left( \frac{-C_4}{T} \right)} \quad (4-4)$$

其中；

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  及  $C_4$  為材料參數；

$\sigma$  為等效應力 (Equivalent Stress)；

$\frac{d\epsilon_{cr}}{dt}$  為等效潛變應變率 (Equivalent Creep Strain Rate)；

$T$  為絕對溫度 (K)。



由 Engelmaier 所提出考慮溫度與頻率效應之修正後 Coffin-Manson 預估公式[27] 為：

$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (4-5)$$

$$C = -0.442 - 6 \times 10^{-4} T_m + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1 + f) \quad (4-6)$$

其中， $N_f$ 為疲勞壽命， $\Delta\gamma = \sqrt{3}\Delta\varepsilon$ 為總體剪應變範圍， $\Delta\varepsilon$ 為等效應變範圍；而 $\varepsilon_f$ 為疲勞延展係數 (Fatigue Ductility Coefficient)， $C$ 為疲勞延展指數 (Fatigue Ductility Exponent)； $T_m$ 為熱循環中最大溫度與最小溫度之平均 ( $^{\circ}\text{C}$ )；而 $f$ 為一天內之熱循環總次數 (cycles/day)。

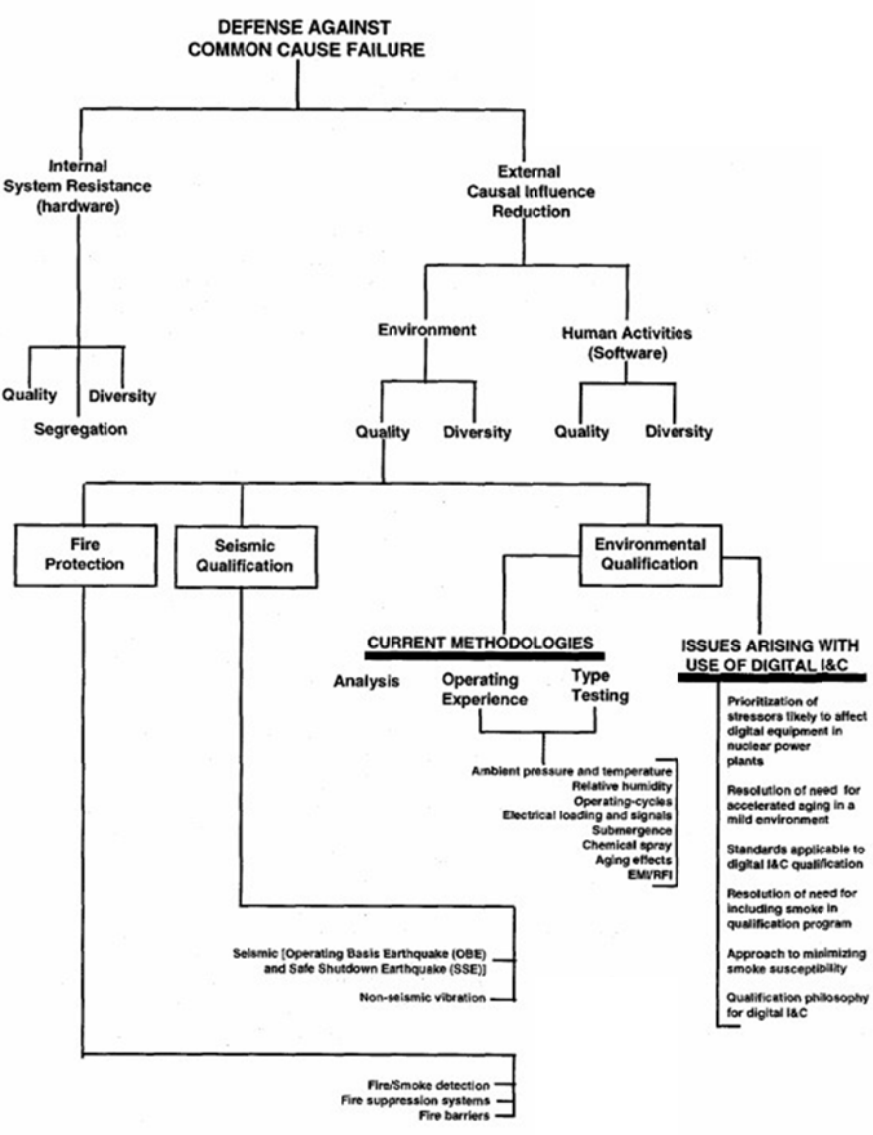


圖 4-4 微處理器在一般失效的驗證架構



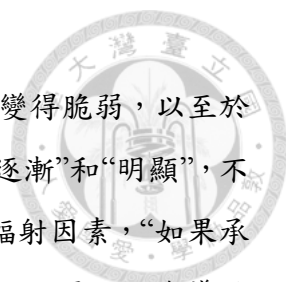
#### 4-3-4 基於位置類別的數位儀控系統設備驗證方法

NUREG/CR-6479 報告的第 3 章中，其主要的內容在於兩版本的工業標準 (IEEE323-1974 年版與 1983 年版)進行比較；在該章節開始，即對兩版本建議的驗證方法做出說明，兩版本規定了樣式測試、操作經驗和分析為主要驗證方法，此外，這兩個版本也允許三種基本方法的組合在某些情況下使用(例如，尺寸、應用、時間或其他限制因素妨礙了整個設備組件進行之樣式測試)，IEEE 323-1974 明確地描述了使用的樣式測試模擬操作(運轉)條件為首選驗證之認定方式，1983 版則無此明確(限制要求)。而在此報告對上述有提出方法上的建議：通常難以構建微處理器系統設備的有效數學模型，應直到建模改進的時候，才有資格以驗證為目的，因此，分析應限於非基於微處理器的設備。此段建議在當時確實適用，但現今應可當作參考，因越來越多半導體產業相關廠商之研發部門、研究單位等皆是採用本章下一節的做法[28]，當然也搭配環境測驗儀器進行樣式測試。

其次，對於老化效應在數位儀控系統、電子元件的驗證確實不易解決，在這本報告中也同樣闡述相關的問題；在 IEEE 323-1974 出版後次年，隨即出了一個補充說明：老化效應並不一定要應用於所有的 1E 類設備，而是老化必須以與環境參數相同的形式考慮(設備因溫度造成老化，而環境參數確實有溫度這樣的變數可能導致老化)。特定的設備若需要考量老化效應的影響，應根據具體設計和應用的評估，如果老化效應需要進一步評估，加速老化技術是否可以應用於該設備並產生有效的結果，應儘量與實際且正在監測之老化效應(Condition Monitoring)有相當的關連性。該標準還允許在 6.3.2(4)節中，在老化期間可排除輻射造成的效應—“如果承受輻射劑量程度(模擬設備預期的驗證壽命條件所必需的)是顯示產生的效果低於會導致設備的 Class 1E 功能喪失的效果”。

在這本 NUREG 報告則提出了相關的建議：Regulatory Guide 1.89 所允許的老化評估方法：Arrhenius 模型是假設失效是由單一參數(化學反應)所引起，對電纜這類的電氣設備零組件是保守的，但對先進數位系統則可能不適用，該報告建議採用 Eyring 模型，誠如本章後章節所評估的方式(反應速率的參數是由應力、時間及溫度所造成的)，另外也提出在當時的半導體設備商也是運用 Eyring 公式。

再來，對明顯的老化機制看法；於 IEEE 323-1983 第 6.2.1 節的第 3 段“考慮老化效應”中，將明顯的老化機制定義如下：如果在正常和異常的服務環境中，一個明顯的老



化機制將會導致設備劣化，重要設備的安裝壽命逐漸和明顯地使設備變得脆弱，以至於在 DBE 條件下無法執行其安全功能；這個定義的問題在於如何量化“逐漸”和“明顯”，不過要注意的是；1974 年的版本在第 6.3.2(4)節中允許在老化期間排除輻射因素，“如果承受輻射劑量程度(模擬設備預期的驗證壽命條件所必需的)是顯示產生的效果低於會導致設備的 Class 1E 功能喪失的效果”；因此，與 1983 年版本一樣，1974 版本允許在環境壓力源可排除老化效應，如果其效應是不重要的。此外，在 IEEE 323-1983 將溫和環境定義為“正常操作環境條件和服役階段中之異常條件，而地震是唯一的設計基礎事件”，根據這些定義，控制室表面上是溫和的環境，因為不受到高輻射或其他不利環境影響，如圍阻體內部或外部蒸汽斷管，在這樣的環境中，唯一的後果(設計基準事件)是地震事件；故數位儀控設備在此溫和環境下是不需考慮老化效應。

然而，在該研究報告中介紹之巨型積體電路失效機制，顯示升溫、溫度循環、電壓、電流密度和濕度都導致加速半導體元件的失效，製造商通常使用任何引發潛在故障的應力源進行測試，以便元件進入市場之前採取改良措施；例如，在正常操作條件下預測失效率常用測試的方法，即是在最高電壓下或接近最高時，施加數週的高溫熱應力於半導體電子構裝體。

圖 4-5(a)顯示了典型電廠的配置，蒸氣系統是位於圍阻體內，一般是最嚴苛的環境，特別是在事故條件下；然而，這樣的系統也有架設於圍阻體外(例如，蒸汽管穿越區和在輔助系統、汽機位置之非通風區)，其環境在正常和/或事故條件下也可能屬於嚴苛條件。最後，有些區域也具有相對較低的輻射、溫度和濕度，甚至在事故條件下；依據這些環境條件，該研究報告提出核電廠環境分類的概念；共區分為三個位置類別，如圖 4-5(b)；而在位置類別中定義了溫度，濕度和輻射邊界，其中的設備很可能經歷正常與意外事件之條件下。

A 類環境位置，這代表具有核電廠環境最嚴苛的條件，也就是說，A 類位置最具有環境條件促進老化；在這種環境中的設備驗證計畫中則必須考慮加速老化。在另一個極端是 C 類環境位置；該位置通常是由環境主控，所以正常和異常條件下的情況使得老化效應不可能發生，故如前所述 C 類環境位置下的設備是不需要進行加速老化。B 類環境位置具有跨越兩個位置類別的環境條件，根據這個建議，A 類環境位置是圍阻體區域內的任何一個區域，B 類是圍阻體區域之外的區域，C 類是圍阻體區域外的區域，其在



預期的服役條件下被描述為良性。

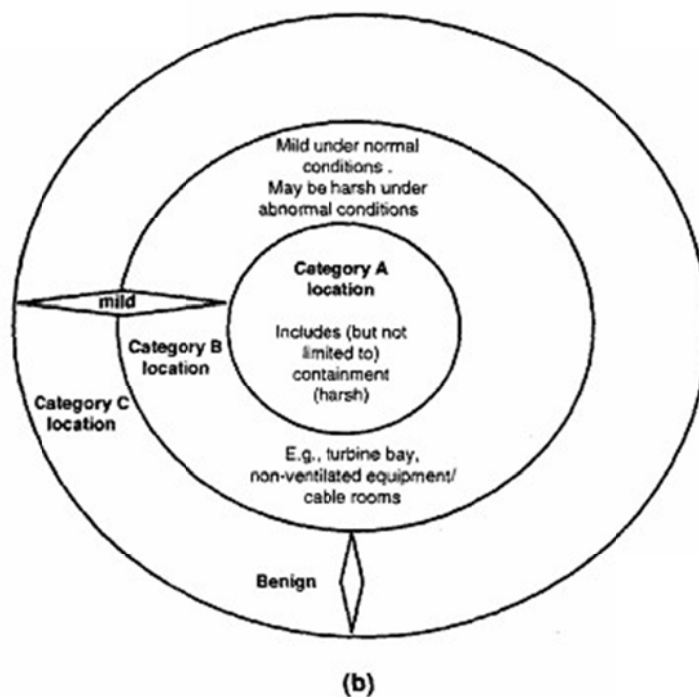
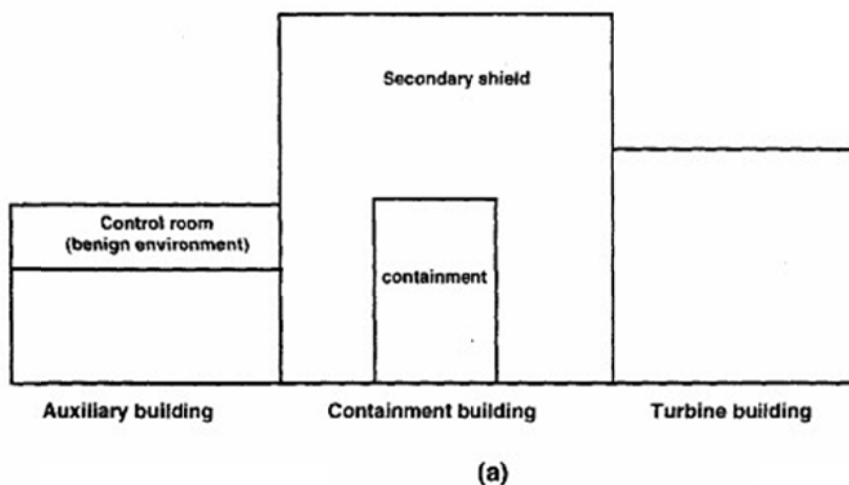


圖 4-5 (a) 一般電廠配置示意圖 (b)環境分類

綜合前面的論述，NUREG/CR-6479 研究報告提出了基於位置類別的數位儀控系統設備驗證方法，本章亦將相關內容與表 4-1 結合彙整為表 4-4。此外，是否需考慮老化



的驗證主要還是根據設備實際的位置和操作條件決定，該報告也建議對於位於 C 類環境的數位系統設備進行樣式測試（不含老化效應評估），以證明該類型之安全系統設備適用於核電廠環境中。而對於各環境位置類別的設備，其操作壽命期間預期之正常和異常的環境條件，以及對應之輻射，溫度和濕度值亦可在該研究報告之附錄 A 中找到相關之參考值。

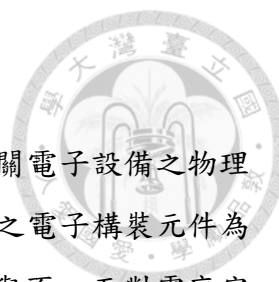
根據該研究報告內，半導體電子構裝元件在各種環境壓力源下，確實易受到長期影響失效機制的，且提出如何確保數位儀控設備安全的建議，其認為應用於電廠環境下的電子設備元件可來自半導體製造商採用適當的測試、改良製程或回饋更新設計，藉以減少潛在故障；現今之半導體廠商大多數確實已有相當的品保程序，可能符合核電廠嚴苛環境的要求。

本章則是建議在使用電子設備前，應可取得製造商對於該設備進行之環境驗證相關的佐證文件，或委請具資格之驗證單位進行測試及分析，確保其在安裝年限、環境條件之功能可發揮正常，並建構相關資料於已有的驗證資料庫中做為維護控管，未來於設備操作運行時再藉由軟體-硬體之搭配進行線上偵錯維護，如此雙重保障可確保數位儀控系統在電廠環境下之安全功能維持。

表 4-4 參考 NUREG/CR-6479 環境分類表之驗證要求



分類	設備零組件	架設位置	環境驗證條件		輻射	老化效應	引用導則及標準
電氣設備的環境驗證	如本章附錄	圍阻體內	嚴苛環境 屬 A 類環境 溫度範圍:17°C, 濕度範圍:70%		需驗證	需考慮	R. G. 1.89 IEEE 323-1974
		圍阻體外	溫和環境, 意外狀況下可能為嚴苛環境(具 B 類環境)		需驗證	B 類須考慮 C 類不需考慮	不須驗證、定期維護
電子設備的環境驗證	伺服器層級 (數位儀控系統)	圍阻體外 (控制室環境)	溫和環境 屬 C 類環境		建議驗證	不需考慮	R. G. 1.209 IEEE 323-2003
	含微處理器層級 (記憶體、介面卡、監測設備及無線訊號傳輸卡等)	圍阻體內	嚴苛環境 屬 A 類環境 溫度範圍:17°C, 濕度範圍:70%		需驗證	需考慮	R. G. 1.89 R. G. 1.97(監測設備) IEEE 323-1974
		圍阻體外 (控制室環境、但有可能在控制室外之環境)	B 類環境	C 類環境	建議驗證	B 類須考慮 C 類不需考慮	R. G. 1.209 R. G. 1.97(監測設備) IEEE 323-2003
			溫度範圍: 14°C 濕度範圍:50%	溫度範圍: 11°C 濕度範圍: 20%			
	半導體層級 (晶片電子構裝體)	圍阻體內	嚴苛環境 屬 A 類環境 溫度範圍:17°C, 濕度範圍:70%		需驗證	需考慮	R. G. 1.89 R. G. 1.97(監測設備) IEEE 323-1974
		圍阻體外 (控制室環境、但有可能在控制室外之環境)	B 類環境	C 類環境	建議驗證	B 類須考慮 C 類不需考慮	R. G. 1.209 R. G. 1.97(監測設備) IEEE 323-2003
溫度範圍: 14°C 濕度範圍:50%			溫度範圍: 11°C 濕度範圍: 20%				



#### 4-4 半導體微處理器電子構裝元件數值分析評估

由前小節所描述在 NUREG/CR-6479 報告中，其對於安全相關電子設備之物理失效機制(老化、劣化)的探討，主要對象是針對半導體微處理器之電子構裝元件為主，也就是說；該關鍵元件的失效機制主導著整體設備的運作與否。而對電廠安全相關設備而言，如何面對各種電廠環境且在高可靠度下運行才是主要關注的議題，故本章選取一最新且廣泛應用之晶圓層級晶片電子構裝作為疲勞壽命評估分析對象，主要藉由數值分析的過程，瞭解目前此類微處理器在平常運作電流通的狀況下，因電阻耗能隨之產生的熱，而在某種程序運作下使得該半導體元件承受週期性之往復熱循環；現藉由加速熱循環測試，配合前章節所述之疲勞壽命評估式，以求得在數值分析上，該半導體元件可能之使用壽命。

##### 4-4-1 假設性驗證案例

假設某一電子設備為數位儀控系統或監測系統，其主機板或介面卡上具有單晶圓級電子構裝技術之晶片，如圖 4-6 所示；依據 NUREG/CR-6479 所採用之熱循環加速測試，列於該報告表 4.2 (Assembly process qualification testing for plastic packages)所列之 JESD 22-A104 TM (Test Method, 測試方法)藉此獲得其分析之壽命。



圖 4-6 單晶圓級電子構裝技術之 IC 晶片

採用分析之晶片尺寸為  $4.8 \times 4.0 \times 0.4 \text{ mm}^3$ ，晶片四周下方佈植  $13 \times 13$  陣列之  $95.5\text{Sn}3.9\text{Ag}0.6\text{Cu}$  無鉛錫球(構裝體尺寸約  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ )，製程完成後之錫球上下黏接之直徑為  $0.25 \text{ mm}$ 、高度為  $0.16 \text{ mm}$ ，錫球間距為  $0.4 \text{ mm}$ ，最後下接  $0.66 \times 0.66 \times 1.0 \text{ mm}^3$  之印刷電路板 (Print Circuit Board, PCB)。在印刷電路板之上方有厚度  $0.015 \text{ mm}$  銅材質之導電層，另外，在晶片接點與錫球連接之間有由鈦 (Ti)、銅 (Cu)、鎳 (Ni)三種金屬所組成的多層金屬薄膜 (Under Bump Metallurgy, UBM)，同樣銜接晶片下方與金屬薄膜間則是介電層(Dielectrics)，主要材質為聚醯亞胺(Polyimide) [31]，而在晶片最外層的部分則是環氧樹脂(Epoxy)所包覆，整體構裝體斷面之二維及三維對稱結構模型可參考如圖 4-7 和圖 4-8，模型分析幾何尺寸如表 4-5，採用的材料機械性質如表 4-6 所示；無鉛錫球以外的材料性質均假設為線性。

表 4-5 幾何尺寸

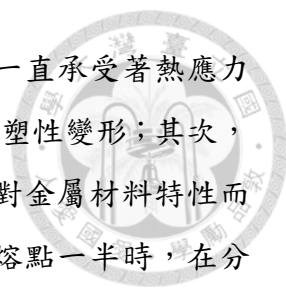
半導體 電子構裝元件	長度 (mm)	寬度/半徑 (mm)	厚度 (mm)	間距 (mm)
Chip	4.80	4.00	0.40	—
Cu Pad	—	0.096	0.015	0.40
Polyimide	6.00	6.00	0.02	—
UBM	—	0.096	0.02	0.40
Solder Ball (95.5Sn3.9Ag0.6Cu)	—	0.125	0.16	0.40
Epoxy	6.00	6.00	0.43	—
PCB	0.66	0.66	1.00	—

表 4-6 材料機械性質[32]

半導體 電子構裝元件	楊氏模數 (MPa)	Poisson's Ratio	熱膨脹係數 (ppm/K)	密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	熱傳導係數 (W/m K)	比熱 (J/kg K)
Chip	131,000	0.3	2.8	2,330	110	703
Cu Pad	68,900	0.34	16.7	8,300	401	385
Polyimide	2,500	0.34	20	1,420	0.12	1,090
UBM	118,000	0.34	18	8,300	401	385
Solder Ball (95.5Sn3.9Ag0.6Cu)	49,000-70T	0.35	21.3+0.017T	8,460	50.9	150
Epoxy X-direction	20,400	XY:0.11	125	1,840	0.38	1,150
Epoxy Y-direction	18,400	XZ:0.09	114	1,840	0.38	1,150
Epoxy Z-direction	15,000	YZ:0.14	82	1,840	0.30	1,150
PCB	27,000	0.39	18	1,938	13	879

T 為攝氏溫度(°C)

此外，新式之半導體晶片電子構裝在設計上目前仍存在著元件與元件間的熱



膨脹係數差異大的問題，在持續受熱的狀況下，構裝元件內部一直承受著熱應力的作用，在長時間的作用下，部分金屬材質之元件將會逐漸呈現塑性變形；其次，在模擬的熱循環試驗中，因測試環境設定之高低溫差非常大，對金屬材料特性而言，在高溫下潛變的效應即會明顯顯現，而當操作溫度高於其熔點一半時，在分析中就必須考量潛變影響；而在實際環境中，即使在室溫環境(約 298.15 K)下，潛變效應就會出現在電子構裝材料之錫球上。而 IC 晶片電子構裝的失效，往往是與系統連接之訊號或電源通路中斷，而其間扮演溝通的關鍵角色者即是無鉛錫球，故一般所進行之壽命評估即是針對此焊接元件的探討，不論在數值分析或測試上。

回到分析評估，潛變主要為材料在彈性範圍內，應力、應變與時間之重組 (Redistribution) 行為，錫球的潛變效應亦是各界(工程、學術或業界)研究的焦點之一，而在本分析中進行的潛變評估則是引用 Generalized Garofalo 潛變應變率公式，如上節之公式 (15)；由於所分析之無鉛錫球其材料成分為 95.5Sn3.9Ag0.6Cu，其屬共晶之錫銀銅合金，熔點約為 498 K，在熱循環最高溫範圍已高於材料熔點之一半，有顯著高溫穩態潛變行為。對於共晶 95.5Sn3.9Ag0.6Cu 無鉛錫球材料，其 Generalized Garofalo 潛變方程式材料參數分別如表 4-7 所示[32]。

根據美國材料試驗協會 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 對疲勞的定義為「當材料受連續之變動承載中發生局部性永久結構變形之過程，該過程主要使材料中之某點或多點產生不可逆之永久損傷，及使裂紋加大或經過多次之振動後而完全破壞。」而錫球在高低溫循環之下，其疲勞壽命預測方法，有以應變基底方法 (Strain-Based Approach)、能量基底方法 (Energy-Based Approach)、破壞模式方法 (Fracture Mode) 及分散式狀態概念模擬法 (Distributed State Concept Modeling) 等幾類。其中，以應變基底方法及與能量基底方法兩者最常被普遍使用；應變基底方法即一般常見的 Coffin-Manson 疲勞壽命預估公式，如上節之公式(4-5)；藉由應用修正後 Coffin-Manson 疲勞壽命預估公式，依據可能發生疲勞破壞處於熱循環間所累積之等效應變範圍預測錫球接點疲勞壽命，有關構裝體之熱循環疲勞壽命預估，即擬以前述疲勞壽命預估公式，配合有限元素計算所得之最大等效應變範圍，即可求得。

表 4-7 95.5Sn3.9Ag0.6Cu 無鉛錫球潛變方程式之材料參數[32]

Parameter	$C_1$ (1/sec)	$C_2$ (1/MPa)	$C_3$	$C_4$ (K)
Value	500000	0.01	5	5802

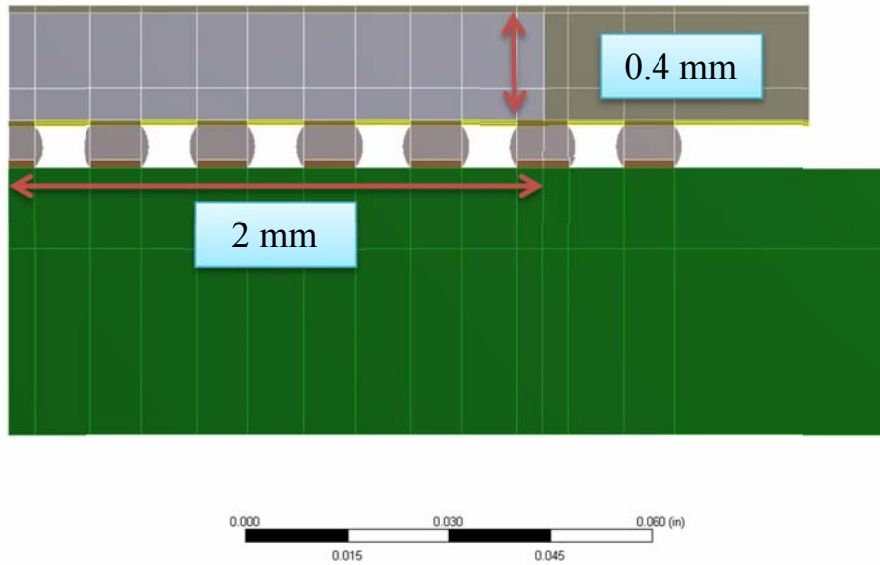


圖 4-7 二維剖面尺寸示意圖

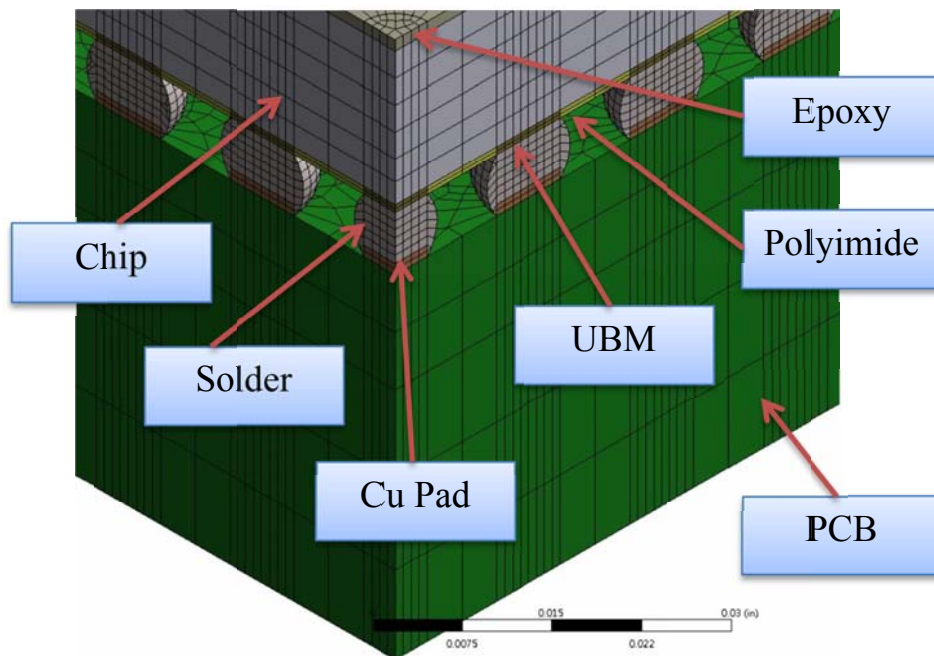


圖 4-8 晶元電子構裝之元件組態



#### 4-4-2 模型建立

為預測錫球之疲勞壽命，本分析採用商用有限元素軟體 ANSYS 進行建模與計算，整體應用三維實體元素，編號 SOLID 186 所建構，在 1/4 對稱模型中，如圖 4-9 所示，元素數量為 109453 個，節點數目亦高達 474983 個。邊界條件的設定是為了避免分析模型因承受熱應力的作用造成剛體運動，故在兩對稱面底部的位置設定固定端點，除對稱面外，其餘面皆未設定束制或耦合，主要為了符合實際受熱後晶片構裝體外側能自由產生上下翹曲。

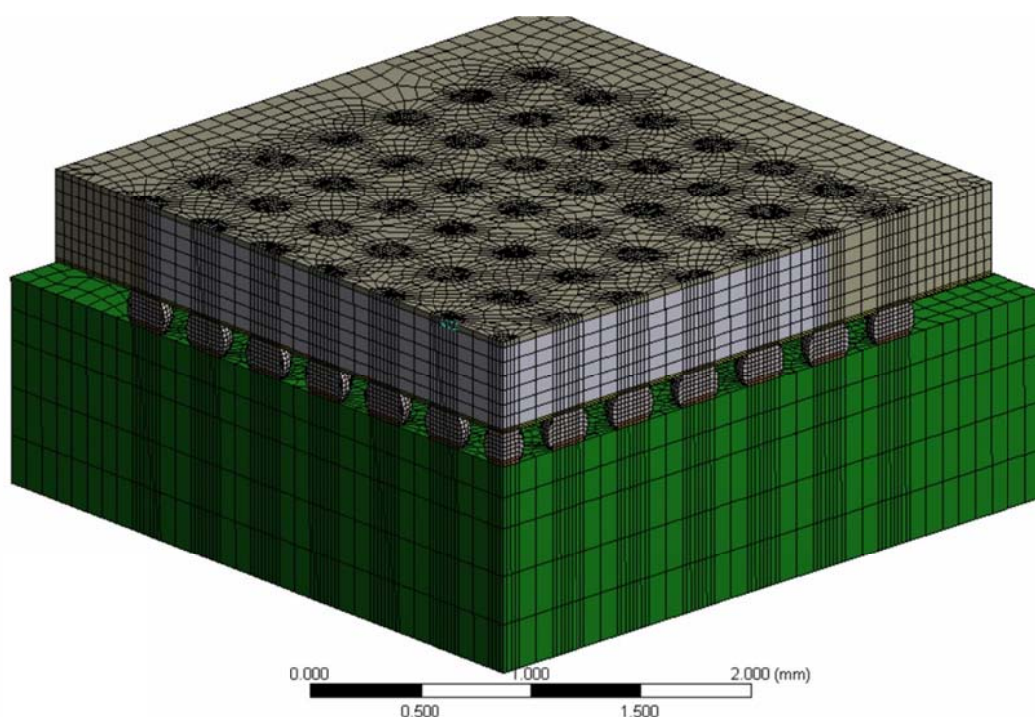


圖 4-9 1/4 對稱單晶圓級晶片分析模型

在分析負載設定方面，採用上節所述之 JEDEC 規定測試標準中的 JESD22-A104C 規則，同時假設外界環境溫度為 298.15 K；於晶片上方則是施加之溫度循環變化進行分析，如圖 4-10，亦即對分析模型施予 -40~125 °C 之熱循環負載，由初始溫度 25°C 開始升溫，每一循環為 50 分鐘，從低溫升至高溫及由高溫降至低溫均需 15 分鐘，而在高溫區與低溫區維持時間亦均為 10 分鐘之恆溫，如圖 4-11 所示，並執行四次熱循環 (Cycle)。由零應變溫度 (25°C) 開始，一次熱循環由下述四個 Load Steps 所組成：



1. Ramp Low : 於 15 分鐘內，由 125°C 降至 -40°C ；
2. Dwell Low : 保持 -40°C 10 分鐘 ；
3. Ramp High : 於 15 分鐘內，由 -40°C 升至 125°C ；
4. Dwell High : 保持 125°C 10 分鐘 。

根據已設定好材料機械性質、邊界條件及負載後，便可以進行此半導體電子構裝的力學分析，觀察四個熱循環全部歷時過程中，其構裝體變形、應力應變分佈情況及最大等效應變範圍。

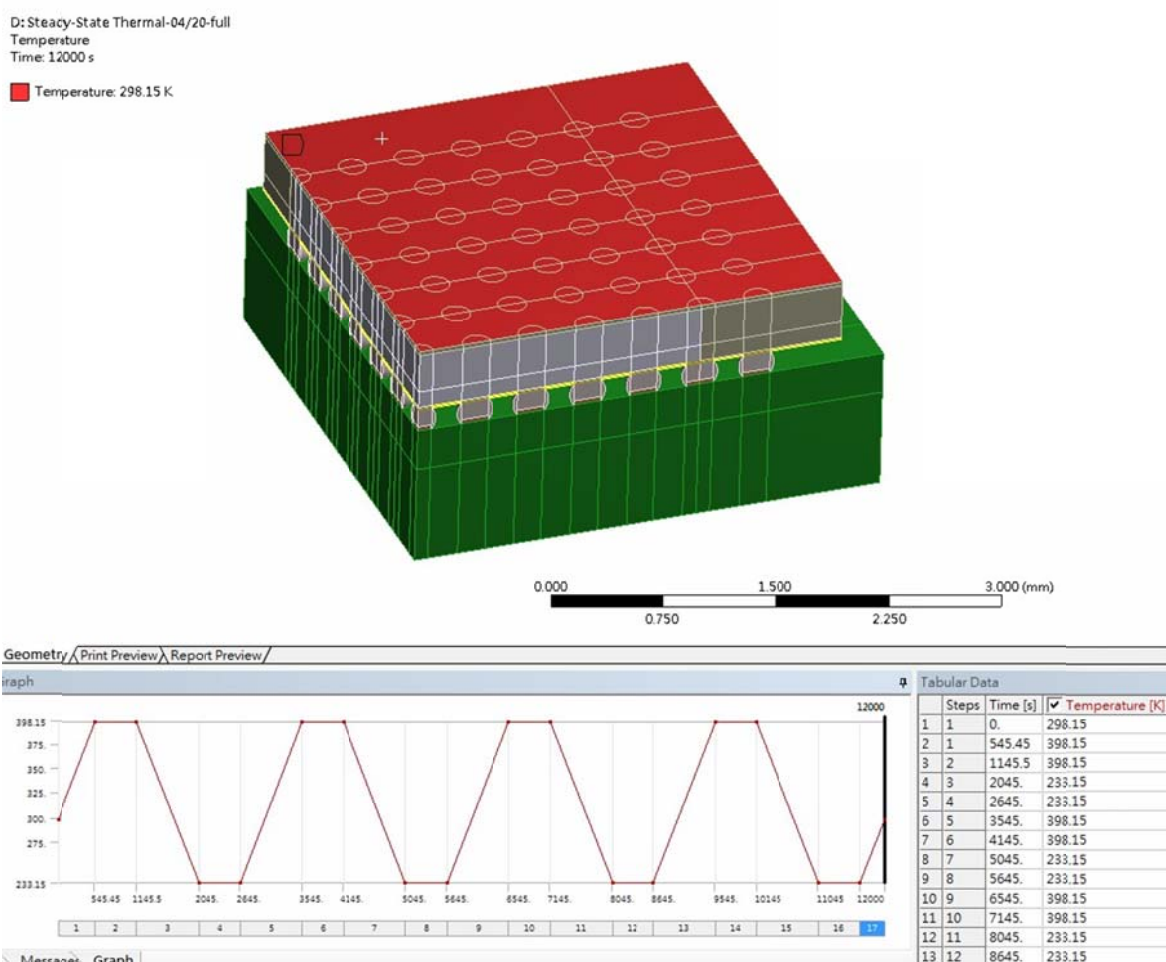


圖 4-10 溫度循環負載示意圖

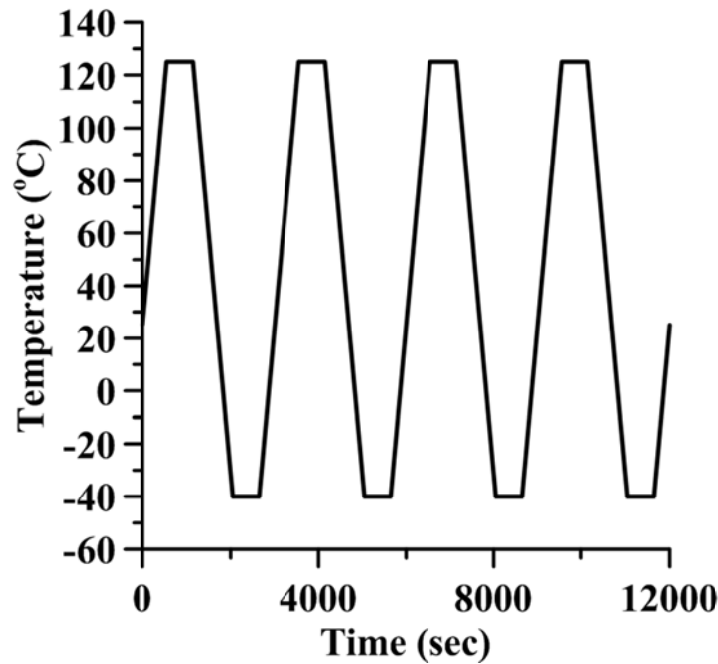


圖 4-11 熱循環負載(4 Cycles)

#### 4-4-3 分析結果及壽命評估

依據上節的設定程序執行數值分析計算，在模型分析時間設定為 12,000 秒，計算完成之結果如圖 4-12，該圖是以變形放大 60 倍之效果顯示，主要看出模型在四周因各元件熱膨脹係數之不同，所造成平面構裝體產生翹曲的變形，代表此分析符合物理現象；而最大潛變等效應變則是出現在晶片(Chip)下方最外圍的錫球上，此亦符合許多相關研究[33]之現象。

在壽命評估方面，主要採用最後一個熱循環下之高溫最大潛變等效應變及低溫最小潛變等效應變之差值，如圖 4-13；將此差值視為錫球接點疲勞壽命評估之計算值，藉由引用 3-1 節所敘述之 Modified Coffin-Manson 疲勞壽命公式，即可獲得在此熱循環狀況下錫球可承受之循環負載次數。表 4-3 列出了引用公式(4-5)、(4-6)的計算參數，表中最後一行則是循環次數結果。

表 4-3 Modified Coffin-Manson 疲勞壽命公式參數

Parameter	$\Delta\gamma$ (mm)	$c$	$T_m$ (°C)	$f$ (cycles/days)	$\epsilon_f$	$N$ (times)
Value	0.0207*	-0.417	42.5	28.8	0.325**	<b>603.18</b>

\*圖 4-13 最後一組循環之潛變等效應變差值；  
 \*\* $\epsilon_f$  為疲勞延展係數(Fatigue Ductility Exponent)，為經驗近似值。

表 4-3 呈現的結果是指溫差為 165 °C 下的環境中可負荷的循環次數 (N=603.18 次)，一般而言，這是指熱循環加速測試的結果，若參考 NUREG/CR-6479 所歸類的環境位置中，C 類屬於溫和環境，其正常條件下的溫度範圍為 16~27 °C，假設此微處理器之晶片在 C 類環境下運作時最高溫度為 68 °C；可藉由此數值並採用公式(4-1)轉換在此 C 類環境下的壽命；而對於錫球之加速因子的計算公式，形式上類似公式(4-1)，但其多考慮了循環次數以及溫差的效應；稱之為 Norris-Landzberg 加速因子公式[13]，如下式所列：

$$AF = \frac{N_{field}}{N_{test}} = \left[ \frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{field}} \right]^{1.9} \left[ \frac{f_{field}}{f_{test}} \right]^{\frac{1}{3}} \exp \left[ \frac{1414}{T_{field}^{Max}} - \frac{1414}{T_{test}^{Max}} \right] \quad (4-7)$$

其中，

$AF$  為加速因子， $\Delta T_{field}$  與  $\Delta T_{test}$  分別為實際、測試環境下與元件最高溫溫差；

$N_{field}$  為實際環境下可承受循環次數；

$N_{test}$  為測試循環次數；

$f_{field}$  代表一天內承受熱循環次數；

$f_{test}$  則是一天內測試次數；

$T_{field}^{Max}$ 、 $T_{test}^{Max}$  分別代表在正常環境下及測試運作最高溫度。

在表 4-4 中，參考列出了保守假設的 C 類環境，當然同時假設分析之半導體構裝元件置於此環境中，並以此計算出正常條件下的熱疲勞壽命。亦由表 4-4 中可看出溫差的影響性，但並非在嚴苛高溫的環境溫度下就會顯得比較安全，若在高溫的外界環境影響下，當然元件運作時的最高溫度也會隨之提高；而頻率越高當然其評估壽命會顯得較低，但主要觀察的是此類半導體元件的壽命(以循環次數表示)，若以此假設評估案例來看，設備維護的時程應該藉由此類的評估方式推算保守更新時間點，如此確保整體數位設備之正常運作。

表 4-4 假設之 C 類環境條件及計算之加速因子與熱循環次數

狀況條件	最大溫差	頻率 (cycles/days)	最高溫度 (K)	$AF$	$N$ (times)
一般 (較低溫時刻)	52 (最低溫 16°C)	1*	341.15	5.33	3331.97
一般 (較高溫時刻)	41 (最低溫 27°C)	1*	341.15	14.88	9305.02
一般均溫	46.5 (均溫 21.5°C)	2*	341.15	8.18	5115.36

\*例如；每日執行備份次數導致微處理器產生高溫

E: Static Structural-04/20-full  
 Equivalent Creep Strain  
 Type: Equivalent Creep Strain  
 Unit: mm/mm  
 Time: 9965

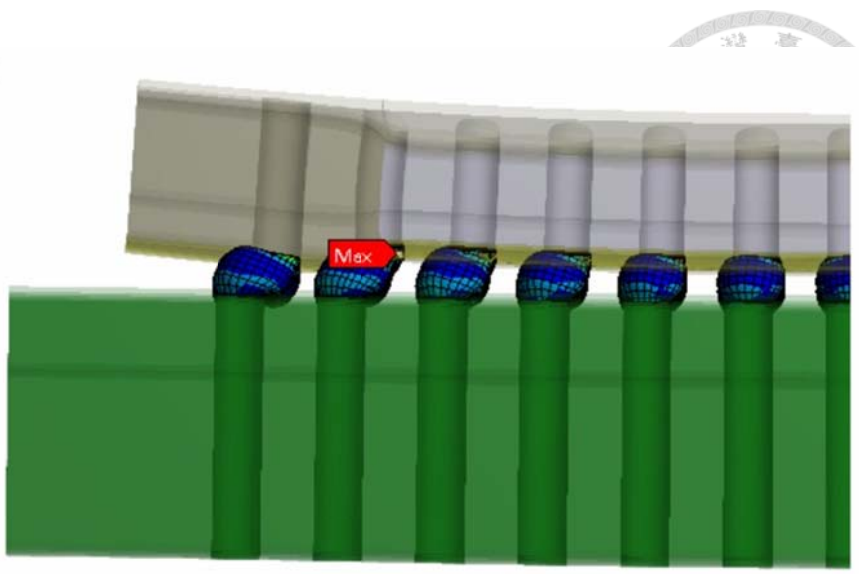
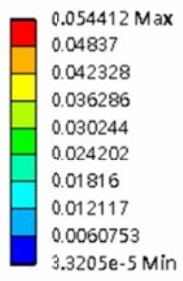


圖 4-12 放大 60 倍之變形及產生最大潛變等效應變的錫球位置

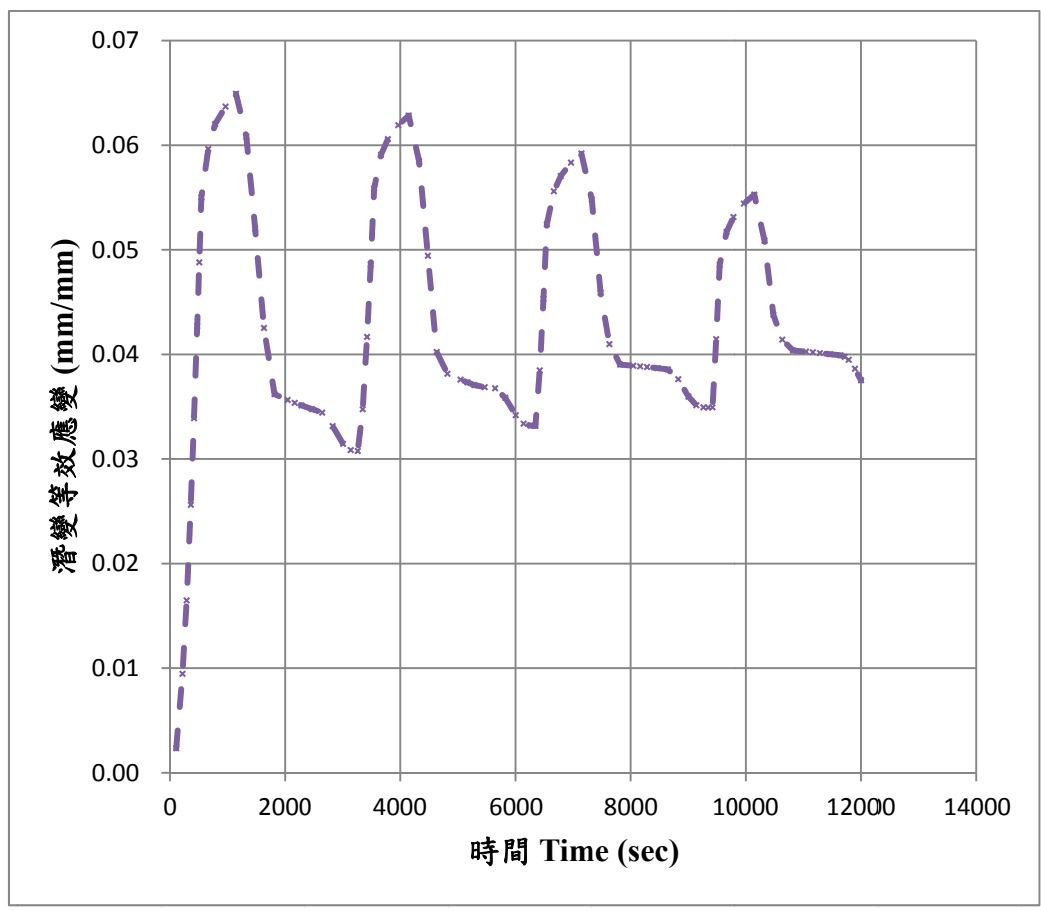
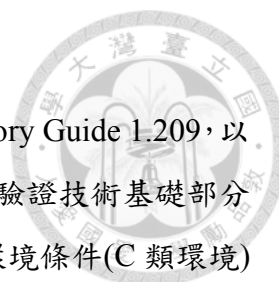


圖 4-13 潛變等效應變歷時變化




#### 4-5 小結

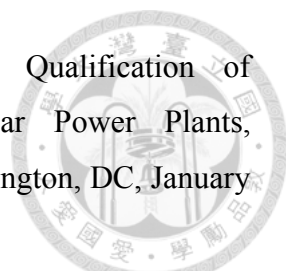
本章彙整了美國核管會(USNRC)所發布之導則 Regulatory Guide 1.209, 以及其所引用的 NUREG/CR-6479 中關於含半導體微處理器設備驗證技術基礎部分內容, 同時也依據 NUREG/CR-6479 所建議的加速測試及溫和環境條件(C 類環境)進行了假設半導體電子構裝元件之熱疲勞壽命評估案例。對計算出來的疲勞壽命(熱循環次數), 在數值分析的結果下, 其僅代表了一項指標, 並非實際元件壽命; 其次, 此類電子元件的壽命評估雖類似於電氣設備零組件(採用 Arrhenius model), 但具有本質上的不同; 如電纜與接頭等零組件是被動受到環境的影響, 環境溫差造成老化或劣化的效應; 而半導體電子構裝元件因操作電流與自身電阻發熱的關係, 造成與環境溫度的溫差形成熱應力, 因一般而言, 設備散熱系統之設計目的是帶走晶片自身產生的熱源, 使其降溫至接近環境溫度, 故分析以保守假設元件最高溫與環境可能最低溫視為循環壓力源; 另外加上構裝體組成元件之熱膨脹係數差異性(參考表 4-6), 整體在任何溫度下皆有熱應力的效應產生, 故對此疲勞壽命分析的目的, 是提供整體設備維護建議, 驗證的目的是代表在架設的環境下可正常發揮其效能, 而藉由驗證評估執行維護作為。

迄今國內電廠運轉多年, 因應政府 2025 年非核家園之政策, 迄今尚離核電廠之設計年限仍有些許運轉時間, 再加上除役過渡階段等時程; 電廠的每一階段之安全維護更是不可因此忽略, 其相關的安全規定也仍持續參考國外先進國家之經驗, 藉此一貫作為彰顯本國對核能安全的重視與要求。而國內電廠現今之儀控系統主要仍維持早期之設計, 設備元件之維護更換亦採用原設計為主, 安裝前同樣執行第三方檢證作業, 而本章研究的目的是在於提供未來在各階段設備應用的建議, 特別在於可能長期架設之監測設備上。

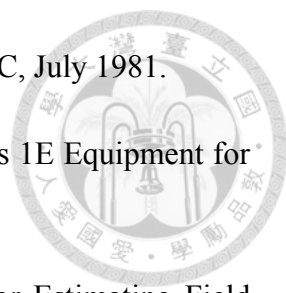
本章參考了國外對於安全重要與安全相關電子、電氣設備環境驗證相關的規範與導則, 同時銜接上目前最新之數位半導體晶片電子構裝之分析評估; 特別從數值分析的角度與方法, 提供在電廠環境下進行物理機制方面之樣式測試參考, 以加強對設備元件之環境驗證能有多重方面的確認依據, 期使設備在電廠運轉、除役停機過渡等各階段的安全功能可經由完善之驗證與維護以確保其正常運作。

## 本章參考文獻

- 
- [1] USNRC, Research Activities, NUREG-1925, Washington, DC, February 2016.
- [2] USNRC, Identification and Analysis of Failure Modes in Digital Instrumentation and Controls (DI&C) Safety Systems—Expert Clinic Findings, Part 2, Research Information Letter 1002, May 2014.
- [3] L. Betancourt, S. Birla, J. Gassino and P. Regnier, Suitability of Fault Modes and Effects Analysis for Regulatory Assurance of Complex Logic in Digital Instrumentation and Control Systems, NUREG/IA-0524, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, April 2011.
- [4] USNRC, Regulatory Guide 1.89, Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants, Revision 1, Washington, DC, June 1984.
- [5] IEEE, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std. 323-1974, Piscataway, NJ, 1974.
- [6] USNRC, U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 50.55a, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, , Washington, DC.
- [7] USNRC, Regulatory Guide 1.209, Guidelines for Environmental Qualification of Safety-Related Computer-Based Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants, Washington, DC, March 2007.
- [8] USNRC, U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 50.49, Environmental Qualification of Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants,” Washington, DC.
- [9] EPRI, Generic Requirements Specification for Qualifying a Commercially Available PLC for Safety-Related Applications in Nuclear Power Plants, Topical Report 107330, December 1996.
- [10] T. C. Ou, H. C. Lo, R. C. Wu and C. T. Lee, “A Study of I&C Systems Digital Upgrade in Nuclear Power Plant,” The 31st Power Engineering Conference, p.1725-1731, Tainan, Taiwan , December 2010.

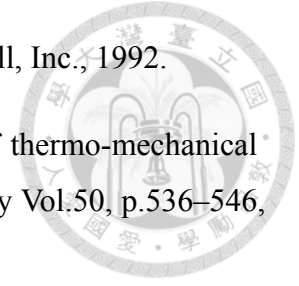
- 
- [11] Korsah, K. et al., Technical Basis for Environmental Qualification of Microprocessor-Based Safety-Related Equipment in Nuclear Power Plants, NUREG/CR-6479, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, January 1998.
- [12] 郭獻棠，赴美參加核電廠設備驗證技術相關訓練及參加第 28 屆設備驗證技術研討會，出國報告，行政院原子能委員會，106 年 3 月 27 日。
- [13] Y. F. Su, K. N. Chiang, “Design and Reliability Assessment of Novel 3d-IC,” Journal of Mechanics, Vol. 33, No. 2, p.193-203, April 2017.
- [14] C. Lu, “Overview of Fan-Out Wafer Level Package (FO-WLP),” 9th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2014.
- [15] JEDEC, JESD22 - A104-B, Temperature Cycling, Solid State Technology Association, July, 2000.
- [16] <[https://www.materialsnet.com.tw/material/DocView\\_MaterialFront.aspx?id=25225](https://www.materialsnet.com.tw/material/DocView_MaterialFront.aspx?id=25225)>, 電子構裝發展趨勢，材料世界網，2017/6/28 刊登。
- [17] <[http://www.mitsubishielectric.com/bu/powersystems/nuclear/lineup/i\\_c/index.html](http://www.mitsubishielectric.com/bu/powersystems/nuclear/lineup/i_c/index.html)>, 三菱電子，數位儀控系統架構圖。
- [18] 行政院原子能委員會，核能同級品零組件檢證作業及檢證機構認可管理辦法，會核字第 0950034131 號，95 年 12 月 12 日。
- [19] 李德善，“輻射偵測儀器”，中興工程科技研究發展基金會出版，2002。
- [20] EPRI, “Aging Assessment Field Guide,” Technical Results Report 1007933, December 2003.
- [21] USNRC, Regulatory Guide 1.97, Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants to Assess Plant and Environs Conditions During and Following an Accident, Revision 3, Washington, DC, May 1983.
- [22] USNRC, Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related

Electrical Equipment, NUREG-0588, Revision 1, Washington, DC, July 1981.

- 
- [23] IEEE, IEEE Std. 323-2003, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, Piscataway, NJ, 2003.
- [24] Y. Hsu, C. Y. Su and W. F. Wu, “An Analytical Procedure for Estimating Field Lifetime and Failure Rate of Electronic Packages,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 37, No. 1, p. 36-43, 2014.
- [25] Y. Hsu, C. Y. Su and W. F. Wu, “Thermal-Cyclic Fatigue Life Analysis and Reliability Estimation of a FCCSP based on Probabilistic Design Concept,” *Computers, Materials and Continua*, Vol. 36, No. 2, p. 155-176, 2013.
- [26] J. Weertman, “Creep Deformation of ICE,” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* Vol. 11, p.215-240, 1983.
- [27] J. H. L. Pang, T. Tan, S. K. Sitaraman. “Thermo-Mechanical Analysis of Solder Joint Fatigue and Creep in a Flip Chip on Board Package Subjected to Temperature Cycling Loading.” In: *Electronic Components and Technology Conference*, p. 878-83, 1998.
- [28] L. Zhang, J. H. Y. Guo, C. W. He, “Anand model and FEM analysis of SnAgCuZn lead-free solder joints in wafer level chip scale packaging devices,” *Microelectronics Reliability*, Volume 54, Issue 1, p 281-286, January 2014.
- [29] J. Dukovic et al., “Through-Silicon-Via Technology for 3D Integration,” *International Memory Workshop (IMW)*, p. 148-149, 2010, DOI: 10.1109/IMW.2010.5488399.
- [30] Y. H. Kwon, H. S. Bang, S. M. Joo, H. S. Bang, “Numerical Analysis of Thermo-Mechanical Characteristics of Solder Joint Depending on Change in Solder Junction Structure of MCP,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 55, p. 442-447, 2015.
- [31] <<http://www.dupont.com/products-and-services/membranes-films/polyimide-films/brands/kapton-polyimide-film.html/>>, KAPTON® Polyimide Film, Summary of Properties, DuPont Inc., 2017.

[32] N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, Inc., 1992.

[33] X. J. Fan, B. Varia and Q. Han, "Design and optimization of thermo-mechanical reliability in wafer level packaging," Microelectronics Reliability Vol.50, p.536-546, 2010.



本章附錄 安全相關電氣設備或系統(R. G. 1.89)



Typical safety-related electric <b>equipment</b> or <b>systems</b> 典型安全相關電氣設備或系統	
Engineered Safety Feature Actuation	特殊安全設施引動系統
Reactor Protection	反應器控制系統
Containment Isolation	圍阻體隔離系統
Steamline Isolation	蒸氣管線隔離系統
Main Feedwater Shut down and Isolation	主飼水停止與隔離系統
Emergency Power	緊急備用電源系統
Emergency Core Cooling	緊急爐心冷卻系統
Containment Heat Removal	圍阻體餘熱移除系統
Containment Fission Product Removal	圍阻體放射性分裂產物移除系統
Containment Combustible Gas Control	圍阻體可燃氣體控制系統
Auxiliary Feedwater	輔助飼水系統
Containment Ventilation	圍阻體通風系統
Containment Radiation Monitoring	圍阻體輻射偵測系統
Control Room Habitability System (eg., HVAC, Radiation Filters)	控制室空調系統
Ventilation for Areas Containing Safety Equipment	安全設備區域通風設備
Component Cooling	組件冷卻系統
Service Water	給水系統
Emergency Systems to Achieve Safe Shutdown	緊急安全停機系統

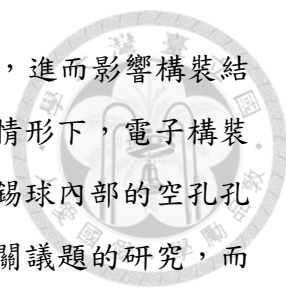
## 第 5 章 含製程引致隨機孔洞晶圓級電子構裝加速環境試驗之數值模擬



### 5-1 前言

本章為延續前章節有關電子構裝元件物理失效機制的探討，並引入了隨機缺陷的評估模式；而綜觀電子工業在現今高速發展下，電子晶片層級之構裝技術已不再視為積體電路製程的配角，演進至今，此項製程技術亦隨著 IC 零件型態及整合需求趨向多樣化與複雜化；例如，從單晶構裝 (Single-Chip Package, SCP) 延伸至多晶構裝 (Multi-Chip Package, MCP)，持續因應電子產品的創新需求 (輕、薄、可攜性以及尺寸短小等)，在整合需求上推出系統級構裝 (System-in-Package, SiP)、(System-on-Package, SoP) 或 (Package-on-Package, PoP) 等，甚至期望達成系統單晶片 (System-On-Chip, SOC)；型態上則產生有如晶圓級封裝 (Wafer-Level Chip-Scale Package, WLCSP)、2.5D/3D 構裝或立體構裝等，而相應的 IC 元件鍵結技術進展如近來受到越來越多關注的矽穿孔技術 (Through-Silicon Vias, TSV)[1]、微凸塊 (Micro bump)[2-3] 等；然而，目前無論各種先進之新型態構裝，在主流市場而言，是必須具備提高產線效率、低成本、高整合度以及可靠性等特點。例如，APPLE 最新推出之智慧手機：iPhone 7，其內 A10 晶片係採用扇外型晶圓級構裝 (Fan-Out Wafer Level Packaging, FO-WLP) 技術[4]，如圖 5-1 所示，晶片構裝後的高度縮減了 20%，可比較參考於圖 5-2 典型覆晶球柵陣列 (Flip-Chip Ball Grid Array, FCBGA) 構裝斷面結構示意圖，在設計上不僅設計難度低於 TSV 技術，接近 2.5D IC 構裝概念，加上了其省略載板 (Substrate) 架構，具有降低成本約 20~30% 之優點，故未來可望成為先進封裝技術的發展要點。自 2013 年起，全球各主要封裝測試廠皆積極擴充 FO-WLP 產能，主要是為了滿足中低價智慧型手機市場[5]。

對於此類的先進構裝技術，所有製造步驟都需在晶圓切片前完成，待構裝完成後才切割製成單顆構裝體產品，然而晶圓級構裝係由多種不同材料組合而成，由於各材料間之剛性、熱膨脹係數及受溫度影響後機械性質之變化均不相同，FO-WLP 的結構與 BGA 構裝相似，所以 FO-WLP 焊接點的熱機械行為預期會與 BGA 構裝相同，而 FO-WLP 中錫球焊點的關鍵位置在矽晶片面積的下方，其中矽晶片與印刷電路板 (Printed Circuit Board, PCB) 間熱膨脹係數不一致，所產生之局



部疲勞應變，更易造成晶片與 PCB 之間所連接的錫球發生破裂，進而影響構裝結構之可靠度，使電子元件或產品產生破壞或失效；但在通常的情形下，電子構裝體的破壞或失效常發生在錫球，而影響錫球壽命的因素中，以錫球內部的空孔孔隙所造成焊接可靠性之不確定性較高，國內、外已有針對此相關議題的研究，而部份的研究結果或業界經驗卻呈現相反的情形[8-9]。目前已有專家學者對於其主要的成因、類型及位置大致分為 6 類[10]，如圖 5-3 所示，其中第一種類型的空孔為微孔(Microvoids)，主要是由於焊接材料中助焊劑的各種化學成分，或是電路板/元件中的水蒸氣，在迴焊製程 (Reflow Process)中因高溫所導致的蒸發或揮發所引起的，而這些氣體困在熔融的焊點中，最後行成了空孔[11]。第二種類型的空洞叫平面微孔 (Planar Microvoids)，這種空孔常在焊點和 PCB 面之間出現，主要是由於 PCB 的表面粗糙度 (Surface Finishes)不平均所導致，故同樣在迴焊製程中成形。第三種類型稱之為收縮孔隙 (Shrinkage Voids)，主要是無鉛 SAC 合金 (Sn-Ag-Cu, Tin-Silver-Copper, SAC)焊點相較於錫-鉛焊點為脆弱，冷卻時造成小裂痕。第四種類型為微盲孔孔隙 (Micro-Via Voids)，當在微盲孔的位置沒有被焊接材料填充的地方，在迴焊製程後很容易形成空洞。第五種類型為介金屬化合物 (Intermetallic Compound, IMC)層之微孔 (IMC Microvoids)，在銅-錫的 IMC 層中，經過長時間的老化效應或是過多的熱循環，都有可能增加 IMC 層的空洞。第六種類型為針孔型微孔 (Pinhole Microvoids)，這類空孔亦常出現在 IMC 層上，成因可能在於 PCB 上銅片的製造缺陷。

上述錫球含空孔的現象對電子構裝產品壽命的影響，在 2003 年即有 Yunus 等人曾以 X-Ray 影像觀察，將構裝體置於扭轉測試 (Torsion Test)以及空氣熱循環 (Air-to-Air Thermal Cycling, AATC)環境試驗中進行可靠度評估，最後再應用對稱條件之有限元素模型進行錫球含空孔的模擬，同時進行疲勞壽命的計算[8]，但是其結果僅針對空孔出現於錫球上方進行討論。2008 年 Yu 等人應用疲勞剪力實驗進行含空孔錫球裂紋成長路徑的評估，其亦用有限元素分析模型模擬單顆錫球進行驗證分析[12]。2009 年 R. Jen 等人針對 FCBAG 構裝進行實驗，在電流通通的狀況下觀察在 IMC 層形成之空孔以及導致破壞失效機制[13]。不僅是焊接錫球會產生空孔，2014 年 Otiaba 等人則是以數值模擬的方式探討焊料介面散熱材料(Solder Thermal Interface Material, STIM)層的空孔大小、位置以及數量在熱循環效應下之

疲勞壽命[14]，其亦指出空孔相關之幾何參數確實會影響電子構裝產品的壽命。2016年 Busek 等人則闡述了助焊劑(Flux)種類對空孔形成的影響[15]，如同上述第一類型的空孔成因，此篇則是更加指出如何採用適當的助焊劑減少空孔的產生，由此更可驗證：空孔的存在，確實是業界對產品的良率是不可忽略的問題。另外，在錫球疲勞壽命評估方面的研究更是不勝枚舉，但均是假設錫球是完整的狀況下承受環境熱負荷；如 2002 年 Cergel 等人曾以實驗方式探討採錫-鉛-銀 (Sn-Pb-Ag) 與錫-銀 (Sn-Ag)錫球封裝體，在不同熱循環負載與迴焊溫度下之疲勞壽命[16]。2005 年 Cheng 等人曾利用子模型(Sub-modeling)有限元素分析方法，搭配不同錫球材料模式，針對一大型陣列之封裝體進行分析，求出等效應變，再利用疲勞壽命公式，預測封裝體之疲勞壽命值，並與實驗值比較，以求得最有效率及精準的分析模式[17]。

本章主要研究電子構裝產品焊點含有空孔之情況下，在承受熱循環負載環境中，其對構裝體的疲勞壽命所造成的影響；此外，藉由熱膨脹係數乘子通式、等效圓柱體之概念與隨機程序模擬具有空孔的錫球分佈於整個構裝體中，探討其可能之疲勞壽命分佈以及應用統計檢定說明分佈之適配性；而由各種假設隨機條件所計算出的結果，可歸納出何種類型之空孔影響構裝體之壽命較為顯著，最後則是評估此類含缺陷之主動元件在加速測試之概念下，其架設於假設性的環境中可能之驗證壽命。

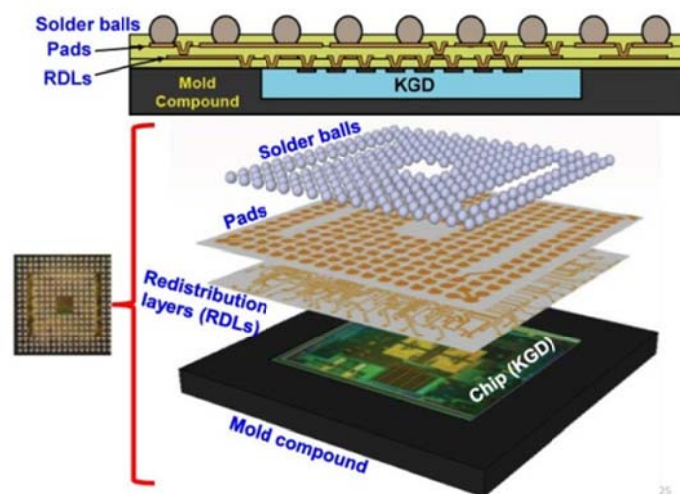


圖 5-1 扇外型晶圓級構裝 (FO-WLP: Fan-Out Wafer Level Packaging) [6]

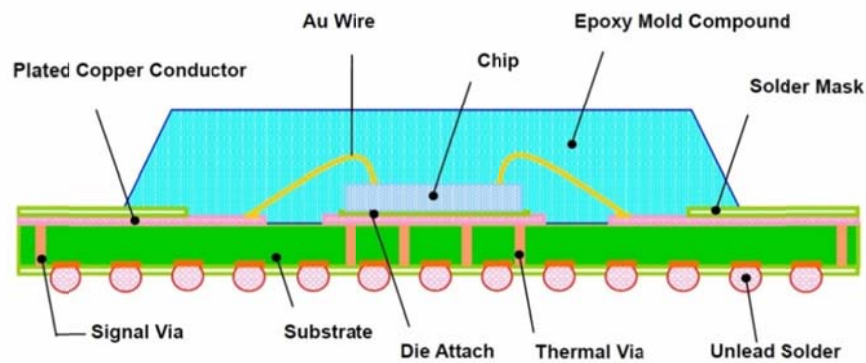


圖 5-2 典型覆晶球柵陣列 FCBGA 構裝斷面結構示意圖[7]

#### Location of Voids in BGA Solder Joint after Reflow Soldering

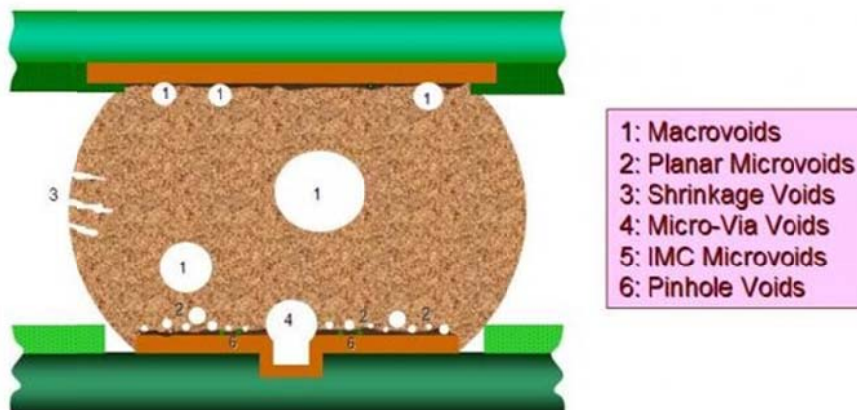


圖 5-3 空孔形成類型[10]

### 5-2 含缺陷錫球之數值實驗

為了解空孔在錫球內對錫球潛變之影響，直接藉由數值實驗的方式模擬單顆錫球含有空孔的狀況。此實驗的方法主要參考文獻[12]，該文獻是採用在等溫的環境下進行剪力實驗方式，其外力負荷是於水平方向往覆施加 2250N(每秒 0.2 次)，主要藉由機械式的剪力模擬熱疲勞，也將剪力的疲勞壽命視為等同熱疲勞壽命。其次，該實驗是以一個完整的含空孔之電子構裝體樣本進行，主要評估空孔對裂紋成長的影響，而裂紋成長路徑是由實驗所觀察而來，有限元素的數值模型則是使用元素生死(Element birth and death)來設定在已知的路徑上，當剪力往返次數造成塑性應變超過一個定值時，元素將自動刪除形成假設性的裂紋。而本章則直接

運用熱循環的方式，使單一錫球承受外在熱源時，藉由邊界條件的設定，使單一錫球趨近於全域分析時的變形情形，也就是模擬避免局部翹曲的行為發生以及如同全域分析下之錫球與錫球間對 PCB 板(Printed Circuit Board, PCB)的熱變形束制；另外，應用等效圓柱體模擬錫球，藉以提升全域分析效率；以下各小節將說明數值實驗的建立與應用。

### 5-2-1 數值實驗模型建立

在上一章中，已針對某一扇出型電子構裝體進行 1/4 對稱模型的分析，此構裝體的組態架構及幾何尺寸如圖 4-8 及表 4-6 所示，材料性質列於表 4-6 以及表 4-7，在分析負載設定方面，採用上一章所述之 JEDEC 規定測試標準中的 JESD22-A104C 規則[18]，同時假設外界環境溫度為 298.15 K；於晶片上方則是施加之溫度循環變化進行分析。

計算完成之結果如圖 4-12，該圖是以變形放大 60 倍之效果顯示，主要看出模型在四周因各元件熱膨脹係數之不同，所造成平面構裝體產生翹曲的變形，故以此現象做為單一含空孔錫球之數值實驗依據。

### 5-2-2 模擬含空孔之實體錫球

針對上小節所建構的 1/4 對稱模型分析結果，可觀察其單顆錫球局部的受力狀況及變形，圖 5-4 為顯示放大 20 倍總位移量之向量圖，在此可看出錫球承受不僅是單純剪力的作用；錫球在變形上可清楚看出承受剪力變形，而又因上下方其他元件(多層金屬薄膜 Under Bump Metallurgy, UBM、晶片、介電質層、銅墊以及 PCB)在垂直方向熱膨脹係數差異的影響，在總位移圖上，亦可看出錫球上下方具有垂直方向的位移分量差異，故錫球與其他元件的銜接處具有等同對錫球中心呈現扭轉力矩的效應，而文獻[8]所採用的實驗方法(其稱之 Torsion Testing)也代表了此效應可從本數值實驗模擬出來，故為了觀察各類型空孔對錫球的影響，本章設計了僅含單顆錫球的電子構裝體模型，如圖 5-5。在此模型中，設定之邊界條件主要讓單顆無鉛錫球在熱循環條件(實驗設定 2 個循環)下能呈現近似全域分析的反應，使各元件能在水平方向上自由膨脹，而在垂直方向上亦不會造成局部翹曲的行為。圖 5-6(a)為施加之邊界條件，其中在 PCB 部分，因為擷取的體積小且寬高比例大，其受熱變形無法呈現如全域分析的狀態(產生平面翹曲及軸向彎曲)，故在各面設定

樑束制條件(Beam Constrain：各元素節點至中心參考點由樑元素連接)[19]，如圖 5-6(b)。

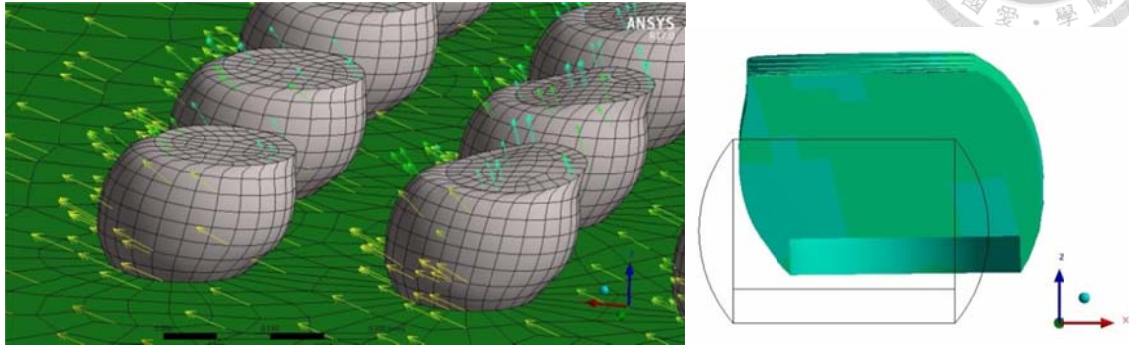


圖 5-4 放大 20 倍之總位移量向量圖

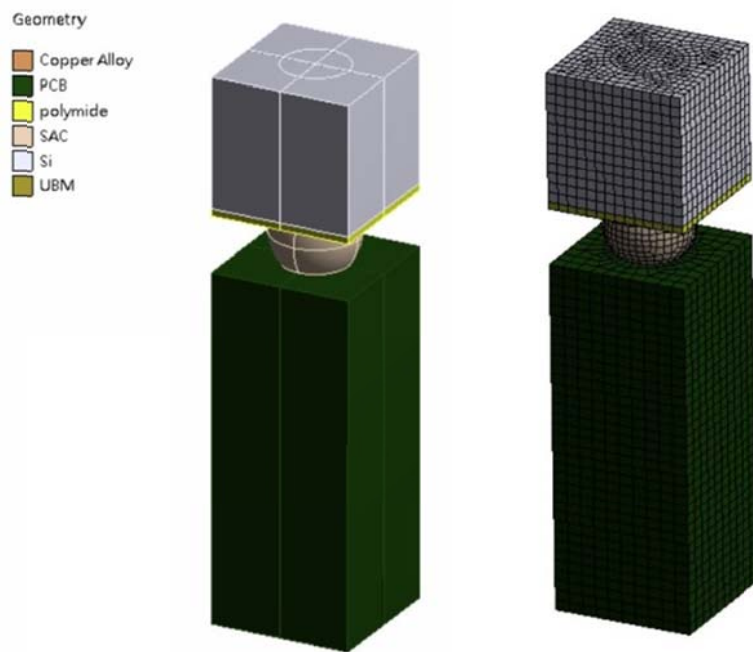


圖 5-5 僅含單顆錫球的電子構裝體模型

由於固定邊界條件設定的關係，錫球內的空孔位置若偏心是否因固定束制條件而造成不同的影響，本章亦有針對此進行數值實驗觀察；首先以一較極端的例子進行驗證，也就是空孔已在錫球最上方的面上且非常接近邊緣，圖 5-7 的俯視圖+X 及-Y 方向為固定束制面，空孔位置在遠離自由端(Free End)、接近束制處

(Close to Fixed End)與位在中間面，最大潛變位置雖隨著空孔位置的改變而改變，但數值大小並無過大的差異，特別是在最後一個循環的最大最小潛變等效應變差值上，約 0.0025 以內(如圖 5-8)，其他偏心之空孔在錫球內部相對於固定束制位置影響更小，故之後的全域分析及通式應用皆忽略此因素。

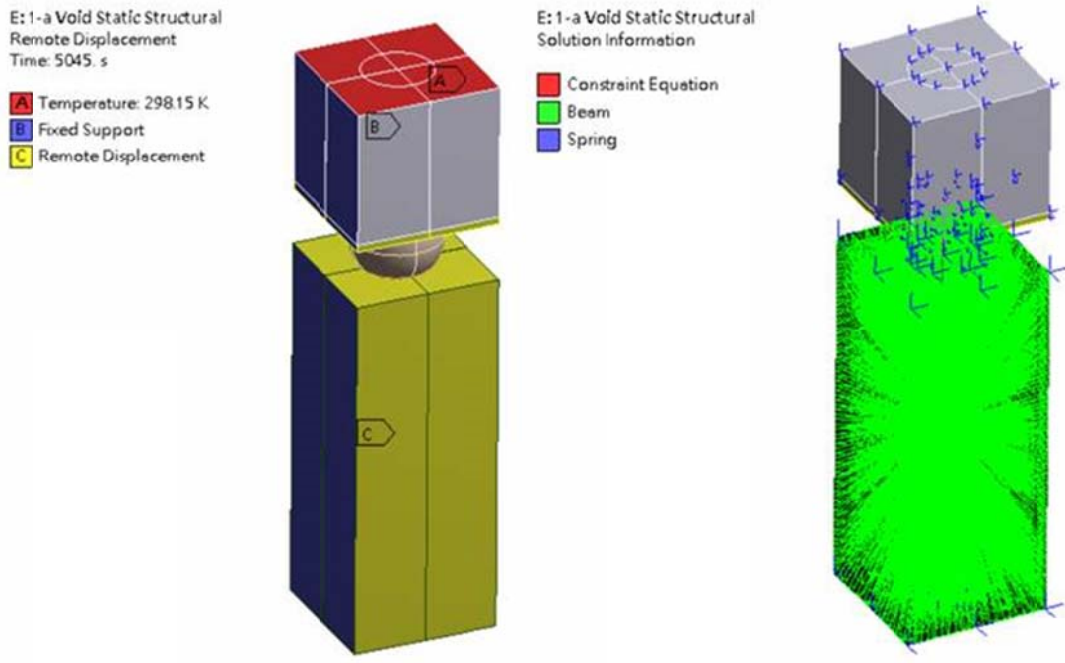
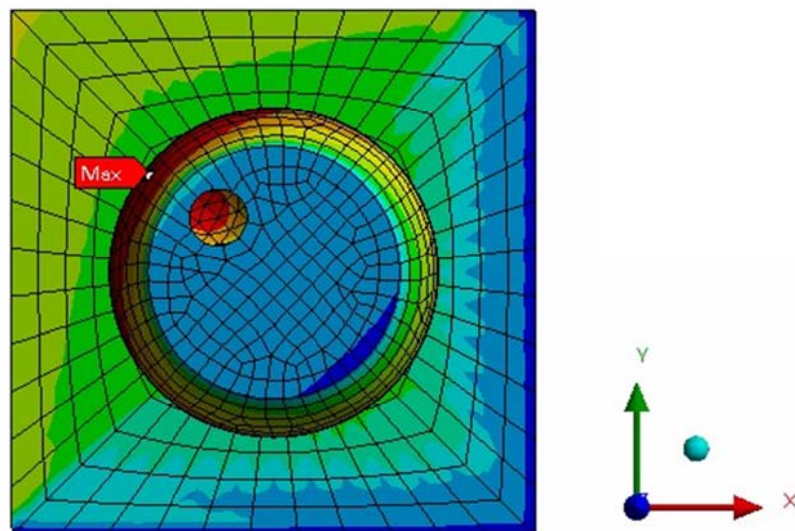
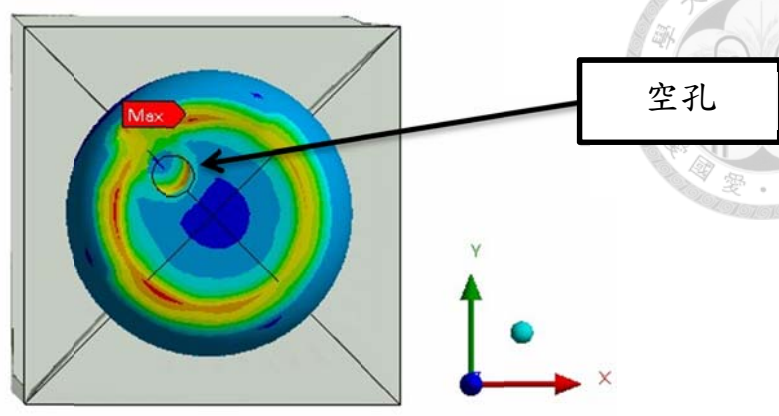


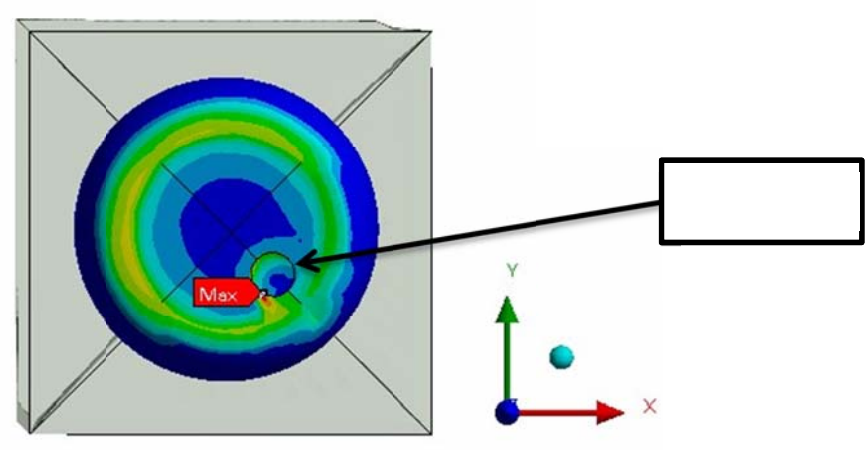
圖 5-6 (a) 左圖: 邊界條件 (b)右圖: PCB 上的樑束制條件



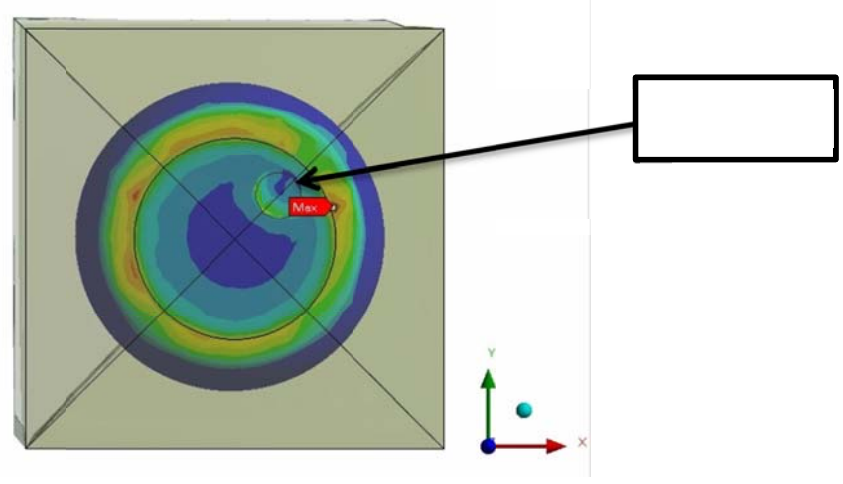
(a) 變位圖-顯示束制位置



(b) 遠離束制點之空孔



(c) 接近束制點的空孔



(d) 中間位置

圖 5-7 (a)變位圖-顯示束制位置(b)在遠離固定束制邊的空孔(c)接近束制端的空孔(d)中間位置

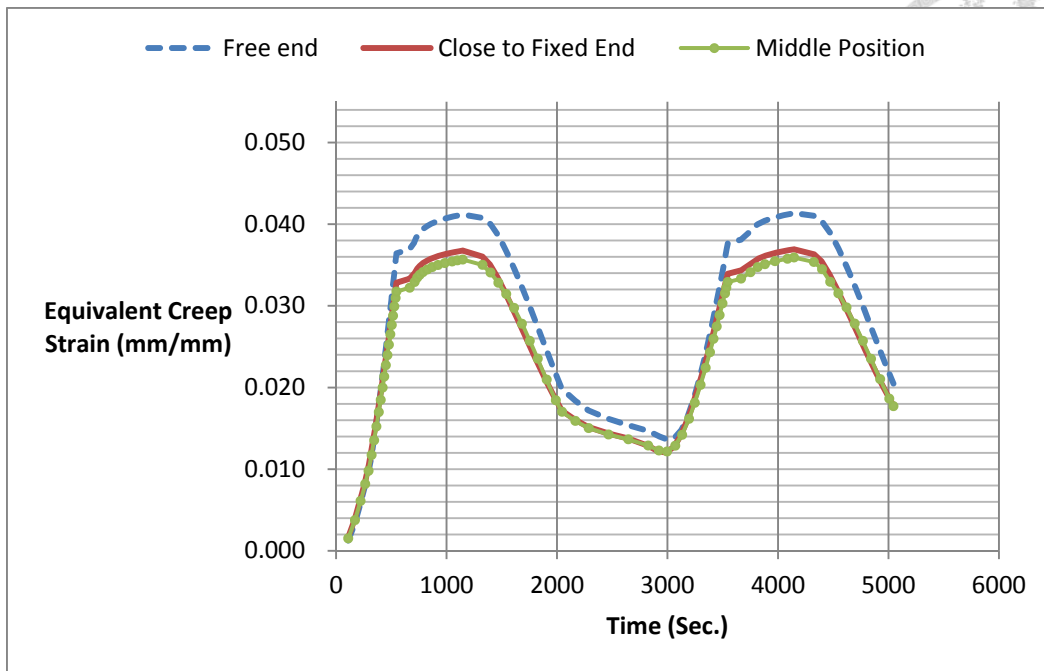


圖 5-8 空孔位置與束制位置之影響比較

### 5-2-3 等效圓柱體模擬

等效圓柱體的概念目的是為了提高進行全域分析的效率，此概念源自於第一章的電廠反應器壓力槽法蘭螺栓銜接的評估方式[20]，但在此電子構裝體錫球疲勞壽命的分析中，僅用樑元素是無法獲得較佳的潛變等效應變，因為樑元素即使給定斷面也無法獲得水平方向的熱應力，故以實體的圓柱體取代錫球模型是可行的方式之一。

同樣的，採用等效圓柱體建構之 1/4 對稱模型分析主要是先驗證比較其與實體錫球的數值結果，而建立此等效圓柱體則是先藉由數值上對實體無鉛錫球的拉伸、剪切以及扭轉測試；因為實體無鉛錫球在構裝體中包覆著金屬銅墊(Copper Pad)，故將其視為複合材料(正交異向性)，以上述的三種數值測試計算其 9 組材料機械性質： $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ 、剪切模數 $G_{xy}$ 三組以及 Poissons' ratio 等三組，所獲得的材料參數如表 5-1 所示。

再次回顧 Generalized Garofalo 潛變等效應變率公式(Generalized Garofalo Creep Equation) [21]：

$$\frac{d\epsilon_{cr}}{dt} = C_1 \sinh[C_2 \sigma]^{C_3} e^{\left(\frac{-C_4}{T}\right)} \quad (5-1)$$

其中， $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  及  $C_4$  為材料參數，如表 4-7 所列(實體無鉛錫球同樣引用此參數)，

$\sigma$  為等效應力 (Equivalent Stress),  $d\epsilon/dt$  為等效潛變應變率 (Equivalent Creep Strain Rate) 以及  $T$  為絕對溫度 (K)。

在該式中一項重要的參數 $\sigma$ ，影響了潛變等效應變的速率，當溫度變化時因熱膨脹係數所產生的熱應力隨之變化，故此項特性可應用於等效圓柱體模擬含空孔無鉛錫球受熱循環下的受力行為，也就是說，將等效圓柱體的熱膨脹係數乘上某倍數後，使其與含空孔無鉛錫球在相同溫度時形成應變(應力)相等，此時在熱循環歷時的過程中，潛變速率也會接近含空孔無鉛錫球的反應，故就可以一個等效圓柱體模擬各種含空孔無鉛錫球，而採用一通用公式(熱膨脹倍數)應用於等效圓柱體，目的是可模擬在無鉛錫球內各種隨機大小及位置空孔，但其限制在於單一空孔。

表 5-1 等效圓柱體材料機械性質

$E_x$	$-89.32T + 93545$	$G_{xy}$	$-18.06T + 29916$	$\nu_{xy}$	$2 \times 10^{-5}T + 0.313$
$E_y$	$-89.32T + 93545$	$G_{xz}$	$-25.92T + 25228$	$\nu_{xz}$	$-3 \times 10^{-5}T + 0.375$
$E_z$	$-65.21T + 65849$	$G_{yz}$	$-25.92T + 25228$	$\nu_{yz}$	$-3 \times 10^{-5}T + 0.375$

$T$  為絕對溫度(K)

### 5-3 等效通式建立

根據上節全域數值分析所觀察之模型反應(位移與變形)及單一無鉛錫球數值實驗測試結果(熱循環下潛變等效應變值)，我們提出了應用於等效圓柱體的熱膨脹係數乘子之通用公式，藉此來模擬無鉛錫球中各種可能位置的單一空孔對潛變等效應變的影響。此公式主要源自於桿件的扭轉應力公式： $\tau = \frac{T_{tor}r}{J}$ ，其中 $\tau \propto \frac{1}{J}$ ；而 $r$ 正是位在錫球與其他元件最外側的接觸邊，也是錫球半徑，故為定值， $\tau$ 為熱膨脹係數不同所引發的熱應力：含剪應力及垂直方向應力，斷面上之合應力視為固定值的扭矩( $T_{tor}$ )作用，此時溫度已達到均勻穩態，而 $J$ 則為及慣性矩，該通式如下所列；

$$\left[ \frac{\frac{d_1 + d_2}{2}}{\frac{d_1 + d_2}{2} - r_v} \right] \left( \frac{e_y}{r} + 2 \frac{e_x}{h} + 1 \right) \left( \frac{4r_v}{h} \right) + \left[ \frac{A_{solder} - A_{cylinder}}{A_{solder}} \right]$$

$$= CTE Multiplier \quad (5-2)$$

其中，

$d_1$ 與 $d_2$ 為空孔球心至上方邊角距離，如圖 5-8；



$r_v$  為空孔半徑；

$r$  與  $h$  為錫球半徑與高度， $e_y$  與  $e_x$  為空孔球心至中心水平與垂直軸距(視為偏距)；

左側最後一項為錫球截面與圓柱截面差值比例(此為經驗固定值 0.17)。

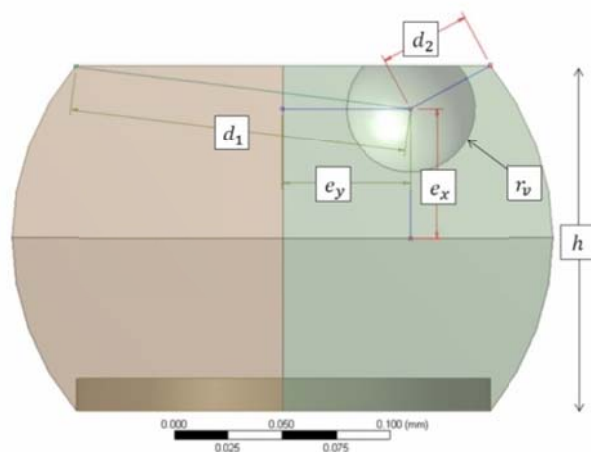


圖 5-9 等效圓柱體熱膨脹係數乘子通式之變數定義

由於應力影響潛變等效應變速率，如公式(5-1)，該通式在理論基礎方面，先以無鉛錫球具有正中央空孔作為通式推導的原型，如圖 5-9 所示；所有其他含空孔的錫球除了以此原形為基礎外，各別的幾何尺寸如空孔大小、偏心距及邊角距離皆有考量在通式中，故實體無空孔無鉛錫球的模擬並不適用於此通式，可直接採用等效圓柱體即可。

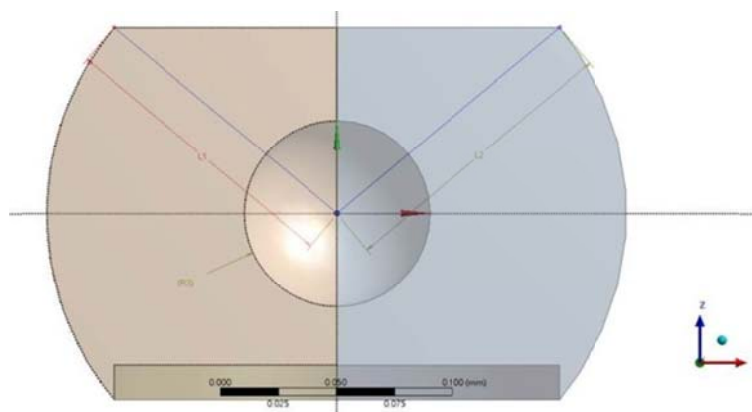


圖 5-10 含中央空孔之無鉛錫球



首先，含中心空孔圓(如圖 5-10)面積慣性矩為  $J_v = \frac{\pi}{2}(R_o^4 - R_i^4)$ ，不含空孔則為  $J_o = \frac{\pi}{2}R_o^4$ ；今以  $\frac{\tau_v}{\tau_o} \propto \frac{J_o}{J_v}$  之比值關係來看 CTE 乘子，此乘子另一個意義就是含與不含空孔在熱膨脹係數的比例關係，也就是如下式展開：

$$\frac{J_o}{J_v} = \frac{\frac{\pi}{2}R_o^4}{\frac{\pi}{2}(R_o^4 - R_i^4)} = \frac{R_o}{(R_o - R_i)} \cdot \frac{R_o^3}{(R_o + R_i)(R_o^2 + R_i^2)} \approx \frac{R_o}{(R_o - R_i)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_o}} \quad (5-3)$$

回到 CTE 乘子通式來看，第一項在正中央空孔中正是  $\frac{R_o}{(R_o - R_i)}$ ；

其次，第二項與第三項合併展開如下：

$$\left( \frac{\frac{e_y + 2e_x}{r} + 1}{2} + 1 \right) \left( \frac{4r_v}{h} \right) = \frac{2e_y r_v}{rh} + \frac{4e_x r_v}{hh} + \frac{4r_v}{h} \quad (5-4)$$

若將  $h \rightarrow r$ ，代表錫球截面視為全圓型來看，CTE 乘子在公式(5-4)的左側可化簡為  $\approx \frac{r_v}{r} \left( \frac{e_y}{2r} + \frac{e_x}{r} + 1 \right) 4$ 。

在面積極慣性矩中，公式(5-3)若將  $\frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_o}}$  展開如上式之型式，如：

$$\frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_o}} = \frac{R_i}{R_o} \left( \frac{R_o - R_i}{R_i} + 1 \right) \left( \frac{R_o}{R_o + R_i} \right)；其中，可將  $\frac{R_i}{R_o}$  視為  $\frac{r_v}{r}$ ，便可歸納出中空之圓形面積$$

極慣性矩呈現內外半徑間相互的比例，而 CTE 乘子通式則是考量偏心影響的比例關係。最後，公式(5-2)的最後一項則為數值實驗經驗值，約 0.17。故通式應用於等效圓柱體上，應可模擬含隨機單一空孔的無鉛錫球，並將此套用至全域的模型中，使全域的分析模型中具有隨機的含空孔錫球以及錫球內隨機位置、大小的單一空孔。

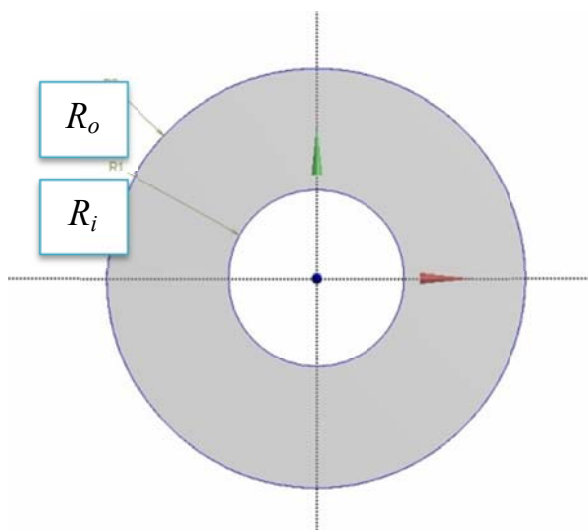


圖 5-11 含中心空孔圓



### 5-4 數值實驗結果

由上述各小節的說明，本節將等效圓柱體配合公式(5-2)模擬含空孔之無鉛錫球，並與實體含空孔無鉛錫球進行比較數值實驗的結果，如表 5-2 所列。

表 5-2 等效圓柱體配合通式(5-2)之模擬數值實驗

空孔類型	空孔幾何參數值(mm)					通式計算值	實體錫球應變差值(mm/mm)	等效圓柱體應變差值(mm/mm)	誤差(%)
	$d_1$	$d_2$	$e_y$	$e_x$	$r_v$				
A	0.125	0.125	0.000	0.000	0.040	1.64	0.0262	0.0252	3.71
B	0.140	0.140	0.000	0.020	0.040	1.74	0.0235	0.0233	0.62
C	0.157	0.042	0.059	0.060	0.028	1.90	0.0277	0.0291	+4.9*
D	0.177	0.086	0.063	0.000	0.040	1.96	0.0283	0.0269	4.6
E	0.181	0.043	0.080	0.040	0.030	1.78	0.0219	0.0237	+8.6*
F	0.091	0.189	0.080	0.010	0.030	1.47	0.0210	0.0195	7.0
不含空孔	Not Apply					Not Apply	0.0127	0.0132	4.2

\*等效圓柱體計算結果高於實體含空孔無鉛錫球之結果

圖 5-12~5-18 為各種空孔類型與不含空孔在實驗熱循環下的歷時結果，主要觀察潛變等效應變的大小與差值。

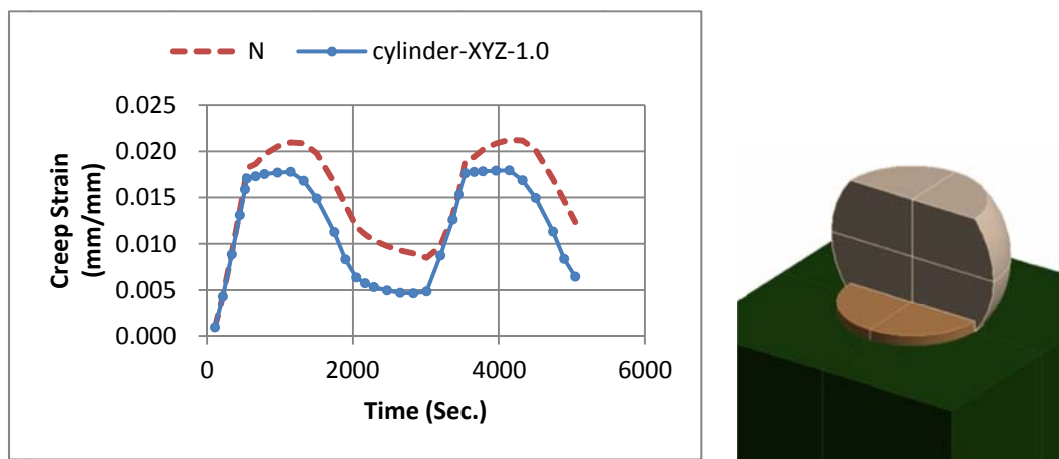


圖 5-12 (左側) 不含空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變;(右側)不含空孔實體模型(N)

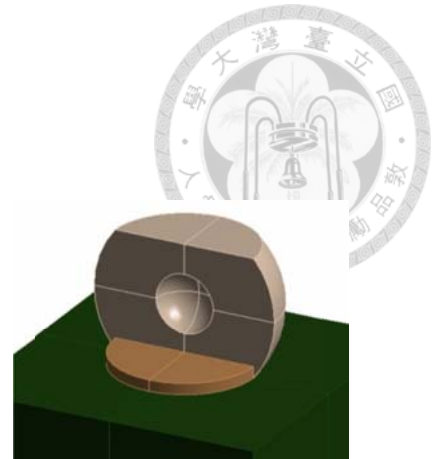
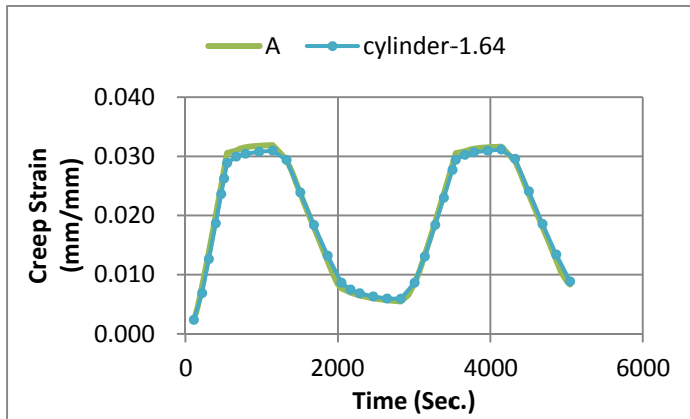


圖 5-13 (左側)含 A 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 A 類型空孔實體模型

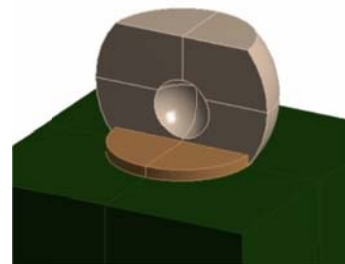
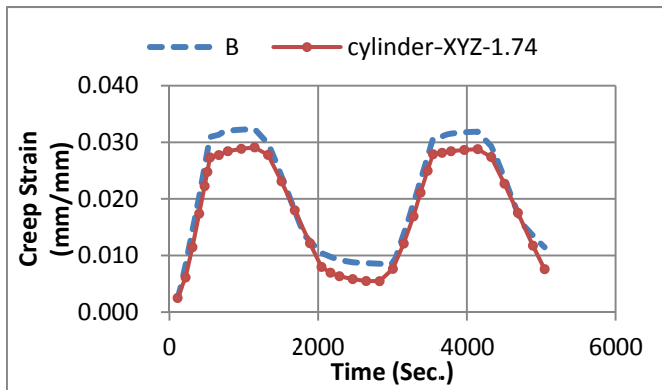


圖 5-14 (左側)含 B 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 B 類型空孔實體模型

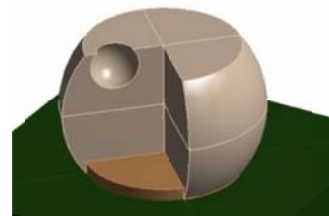
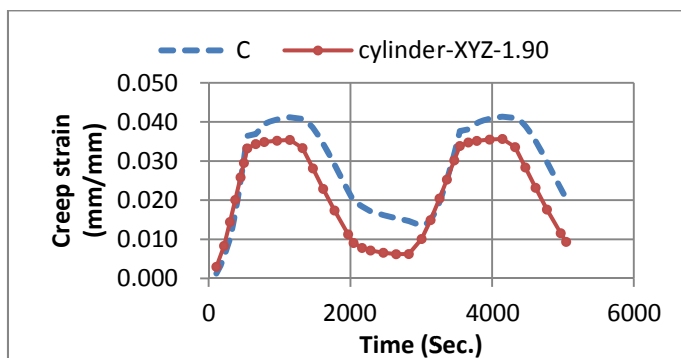


圖 5-15 (左側)含 C 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 C 類型空孔實體模型

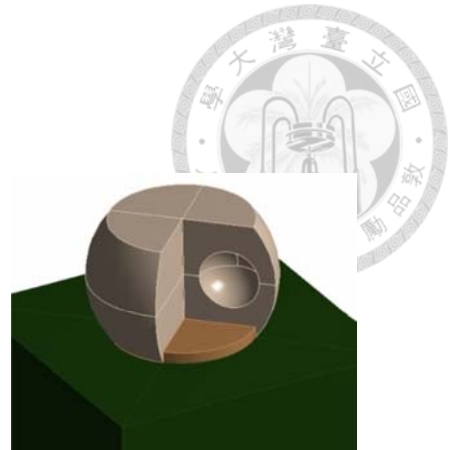
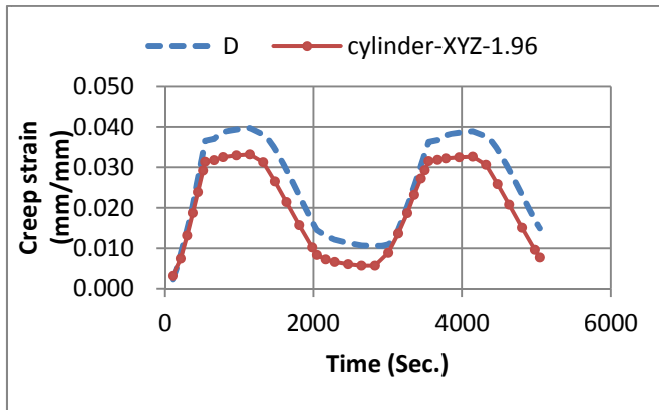


圖 5-16 (左側)含 D 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 D 類型空孔實體模型

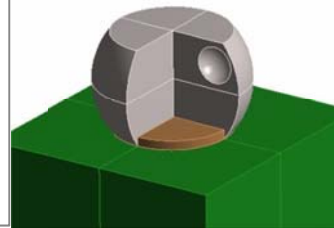
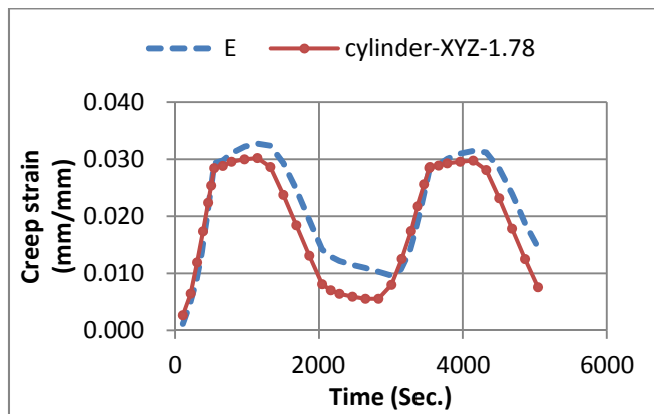


圖 5-17 (左側)含 E 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 E 類型空孔實體模型

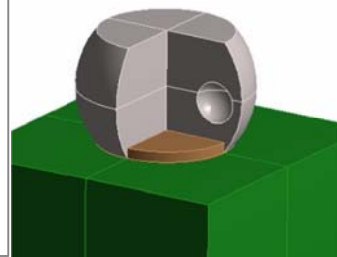
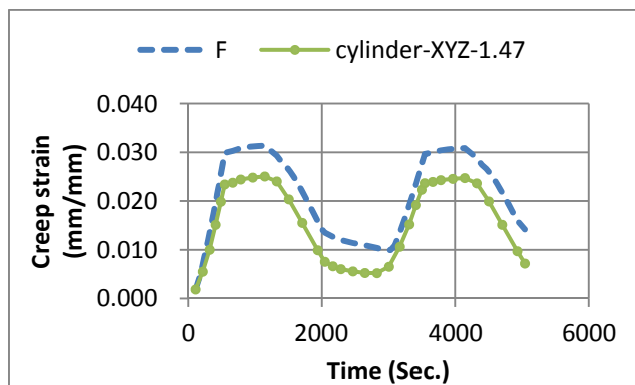


圖 5-18 (左側)含 F 類型空孔錫球及其等效圓柱體模型之潛變等效應變；(右側)含 F 類型空孔實體模型

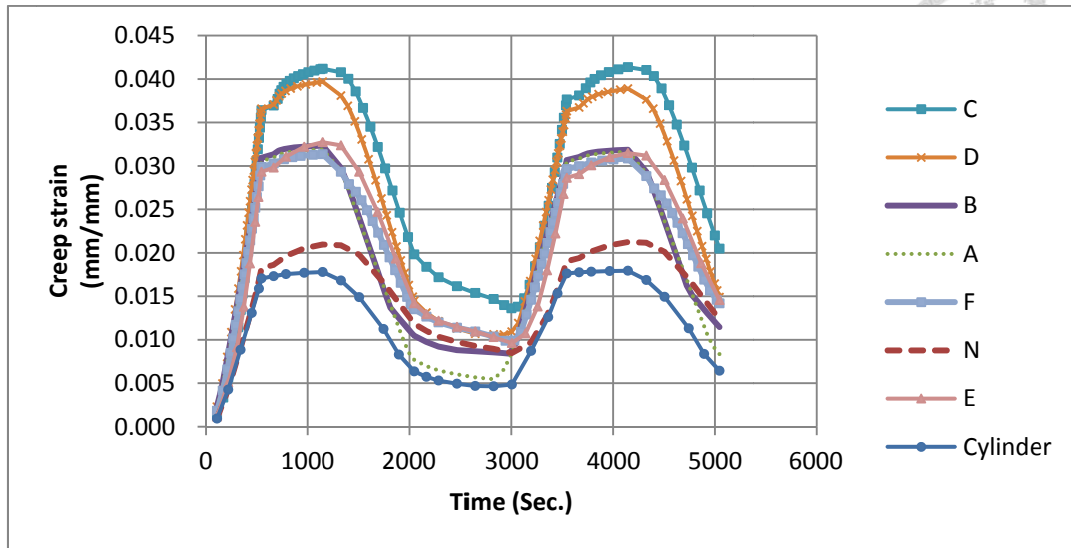


圖 5-19 所有含空孔類型實體及不含空孔等效圓柱體模型潛變等效應變

### 5-5 等效圓柱體全域分析模型建立

藉由以上數值實驗的驗證以及通式的應用，全域模型就可建構出模擬具有空孔之無鉛錫球的隨機位置、無鉛錫球內隨機的空孔大小及位置，如圖 5-20。圖 5-21 為 1/4 對稱實體電子構裝含無空孔之無鉛錫球模型、1/4 對稱與全域等效圓柱模擬錫球之模型，於潛變等效應變比較，在最後一組循環的最大潛變等效應變差值則相當接近，依次為 0.0207, 0.0200 以及 0.0019。

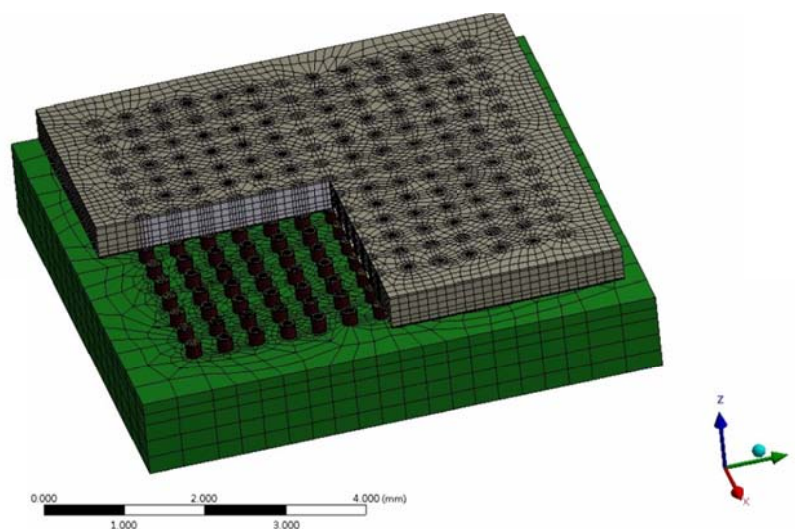


圖 5-20 等效圓柱體全域模型

上述之結果等同於驗證了等效圓柱體分析方法的可行性，加上上節所針對單顆錫球的數值實驗比對，隨機分佈的缺陷錫球對整體構裝體的影響便可模擬出來。

在數值模型設定方面，為避免模型受熱變形後產生剛體運動，僅在模型正中央下方 PCB 底部中心位置設定了各方向的束制，在受熱的狀況下四周則可自由變形，其他負荷設定如同實體無鉛錫球之 1/4 對稱模型。

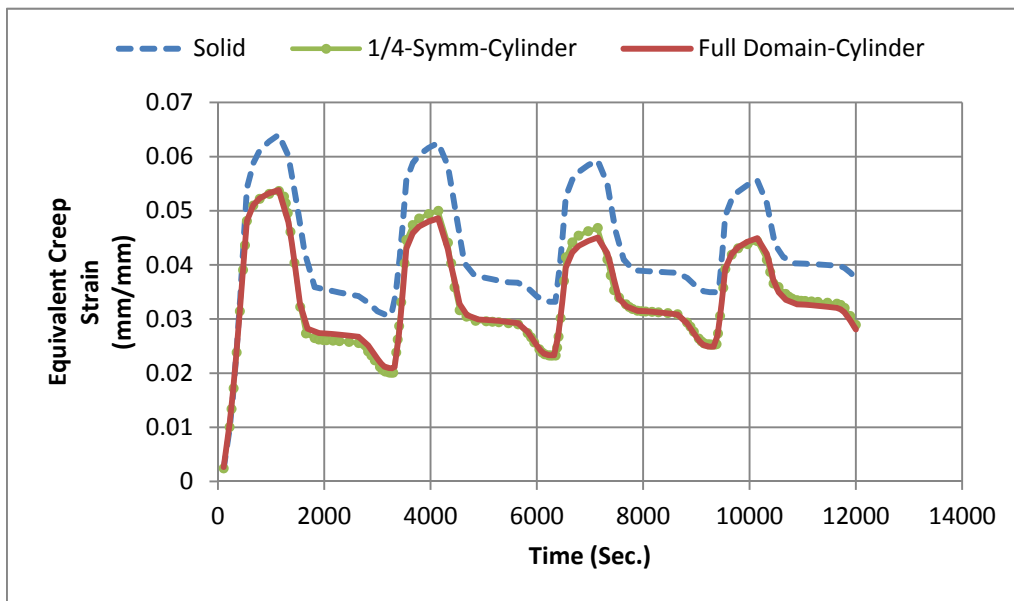


圖 5-21 實體無鉛錫球、1/4 等效圓柱與全域等效圓柱於潛變等效應變比較圖

### 5-6 疲勞壽命統計分析評估與加速因子

有關疲勞壽命評估方面的研究中，大多數都採用對稱完整結構的分析模型進行材料參數或是幾何尺寸變異條件下的可靠度評估，本章則是應用上述各節的方法，架構出可進行總體含空孔錫球分佈的全域分析，並同樣可搭配空孔在單一錫球任意位置的影響，藉此模擬更真實的製程缺陷問題。本節將針對此兩種隨機條件，進行數值模擬分析並藉由統計及可靠度評估的方法，研判空孔位置對整體構裝體的影響。另外，藉由應用 Engelmaier 所提出考慮溫度與頻率效應之修正後 Coffin-Manson 預估公式[22]，加上由前述之加速測試數值模擬，可推估在實際參考環境下所獲得之疲勞壽命分佈與平均疲勞壽命，如第 4 章的第(4-5)式。

在疲勞壽命評估方面，主要採用最後一個熱循環下之高溫最大潛變等效應變及低溫最小潛變等效應變之差值，將此差值視為錫球接點疲勞壽命評估之計算值，即可獲得在此熱循環狀況下錫球可承受之循環負載次數，表 5-2 列出了引用公式(4-5)、(4-6)的計算參數，表中則是列出三種無空孔錫球構裝模型(1/4 實體、1/4 等效圓柱以及全域等效圓柱)循環次數結果。此參考結果是指在溫差為 165 °C 下的環境中可負荷的循環次數，一般而言，這是指熱循環加速測試的結果。

表 5-2 Modified Coffin-Manson 疲勞壽命公式參數

Parameter	$\Delta\gamma$ (mm)	$c$	$T_m$ (°C)	$f$ (cycles/days)	$\epsilon_f$	$N$ (times)
1/4 Solid	0.0207*	-0.417	42.5	28.8	0.325**	603.18
1/4 Cylinder	0.0200*	-0.417	42.5	28.8	0.325**	653.03
Cylinder	0.0019*	-0.417	42.5	28.8	0.325**	733.93

\*圖 5-21 各實體無空孔構裝模型最後一組循環之潛變等效應變差值；  
\*\* $\epsilon_f$  為疲勞延展係數(Fatigue Ductility Exponent)，為經驗近似值。

#### 5-6-1 含隨機缺陷之無鉛錫球(等效圓柱體)統計評估

假設案例是由通式所計算出 6 種空孔類型(A~F)，與不含空孔之錫球進行隨機位置變化，首先分析單一類型空孔佔總體百分比的差異，隨機程序則是藉由如圖 5-22 的程式產生事件(Events)數，該程式可設定自定錫球陣列、完整錫球比例以及空孔類型，而空孔類型出現比例則是供使用者自行決定相等出現機率或隨機出現機率。圖 5-23 為藉由程式隨機建立僅有 A 類型空孔佔總體全域 50% 下的事件，圖 5-24 則是在此分析案例中，將程式所建立的隨機空孔配置設定於全域模型，表 5-3 列出所分析的 3 組隨機事件與 100% 全為 A 類的分析結果，圖 5-25 則是 100% 缺陷比例之 A 類空孔的最大潛變等效應變位置圖。在此分析中可發現數值雖相當接近，100% 缺陷比例全為 A 類型空孔的疲勞壽命評估結果(次數)相近於 50% 缺陷比例之 A 類型空孔的結果，在此可確認的是：出現在構裝體角落附近的含空孔錫球，主導著疲勞壽命的關鍵，與含空孔錫球的比例並無明顯的關係。另外，比較表 5-2 的結果(全域等效圓柱體)來看，A 類型的空孔造成疲勞壽命降低大約 44%。

其次，總體全域錫球皆含有空孔的狀況(100%)，在此案例中，6 種空孔類型各自佔總體數量的比例區分為三組案例：(1)相等出現機率(每種空孔類型出現機率 1/6)，而在隨機出現機率方面又區分為：(2)高 CTE 乘子之等效圓柱體(空孔對潛變等效應變的影響高)高出現機率，以及(3)低 CTE 乘子之等效圓柱體(空孔對潛變



等效應變的影響低)高出現機率；在等機率方面同樣藉由程式建立各類空孔配置之事件，如圖 5-26 所示，表 5-4 為各類型空孔出現機率相等(Case 1)之疲勞壽命評估結果，圖 5-27 為前三組事件之潛變等效應變歷時。

表 5-3 佔整體 50%A 類空孔 3 種隨機事件與 100%全為 A 類的分析結果

類型/事件 (出現百分比)	最大應變 (mm/mm)	最小應變 (mm/mm)	應變差值 (mm/mm)	疲勞壽命 N (times)
A/1.64(100%)	0.0475	0.0236	0.0240	421.16
A/1.64R1(50%)	0.0492	0.0248	0.0243	406.30
A/1.64R2(50%)	0.0485	0.0242	0.0243	405.64
A/1.64R3(50%)	0.0490	0.0247	0.0242	411.83

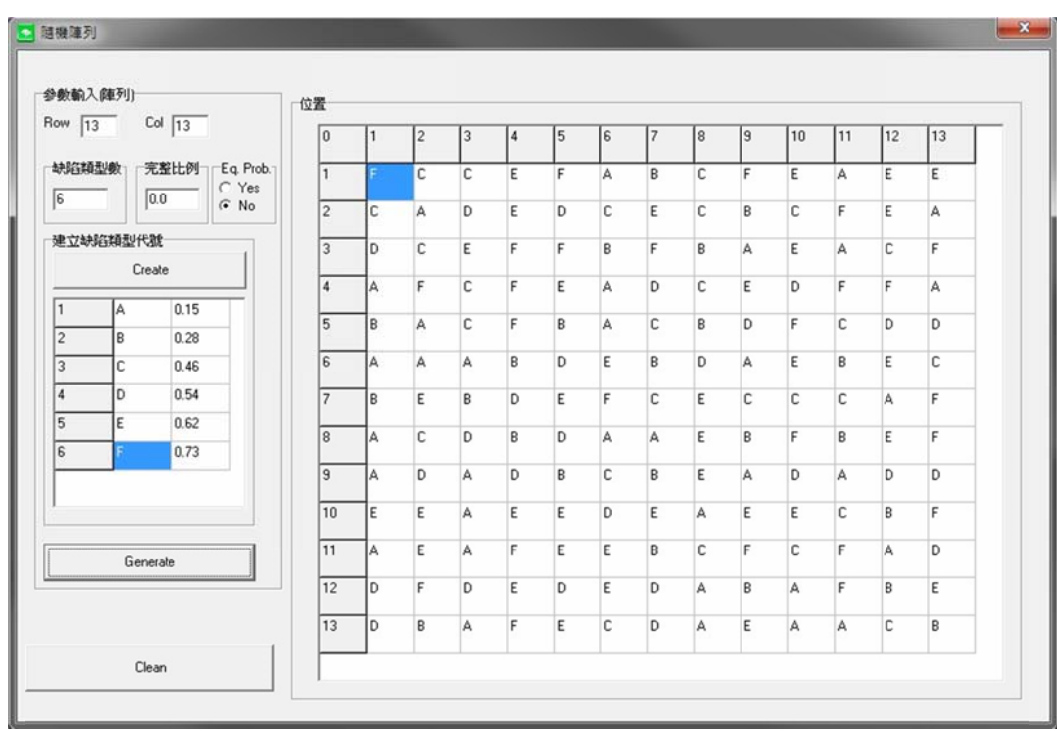


圖 5-22 100%含各類型空孔錫球隨機事件建立(空孔類型出現機率不等)

在隨機出現機率之高 CTE 乘子高出現機率(Case 2)方面，圖 5-28 左側列出了各種類型空孔出現的隨機機率，而高 CTE 乘子係指表 5-2 之 C、D 空孔類型，其出現機率為(C 類 33%及 D 類 24%，其餘 A 類 6%、B 類 2%、E 類 15%及 F 類 20%)，表 5-5 為此 Case 2 的壽命評估結果，圖 5-29 為前三組事件之潛變等效應變歷時。

表 5-4 Case 1-100%皆有空孔(各類型空孔出現機率相等, 1/6)

事件 (Events)	最大應變 (mm/mm)	最小應變 (mm/mm)	應變差值 (mm/mm)	疲勞壽命 N (times)	產生最大應變 空孔類型
R1	0.0499	0.0237	0.0262	338.771	D
R2	0.0497	0.0233	0.0263	335.166	C
R3	0.0495	0.0231	0.0264	331.699	C
R4	0.0497	0.0235	0.0262	339.030	D
R5	0.0495	0.0235	0.0260	344.775	D
R6	0.0494	0.0230	0.0264	333.309	C
R7	0.0492	0.0231	0.0261	340.847	C*
R8	0.0492	0.0233	0.0259	348.734	D*
R9	0.0497	0.0237	0.0260	345.230	D
R10	0.0494	0.0231	0.0263	336.135	C
R11	0.0492	0.0227	0.0264	331.388	C
R12	0.0497	0.0237	0.0261	342.964	D
R13	0.0493	0.0234	0.0259	347.320	D*
R14	0.0495	0.0230	0.0265	330.644	C
R15	0.0489	0.0230	0.0259	349.838	D*
R16	0.0494	0.0232	0.0262	340.432	C*
R17	0.0494	0.0230	0.0263	334.344	C
R18	0.0496	0.0235	0.0261	342.542	D
R19	0.0496	0.0236	0.0260	344.451	D
R20	0.0497	0.0235	0.0262	337.360	D
R21	0.0495	0.0231	0.0264	332.928	C
R22	0.0495	0.0230	0.0265	330.919	C
R23	0.0494	0.0233	0.0261	342.610	D
R24	0.0496	0.0232	0.0264	333.724	C
R25	0.0497	0.0237	0.0260	345.932	D
平均值				339.244	*最大值位置 並非在角落

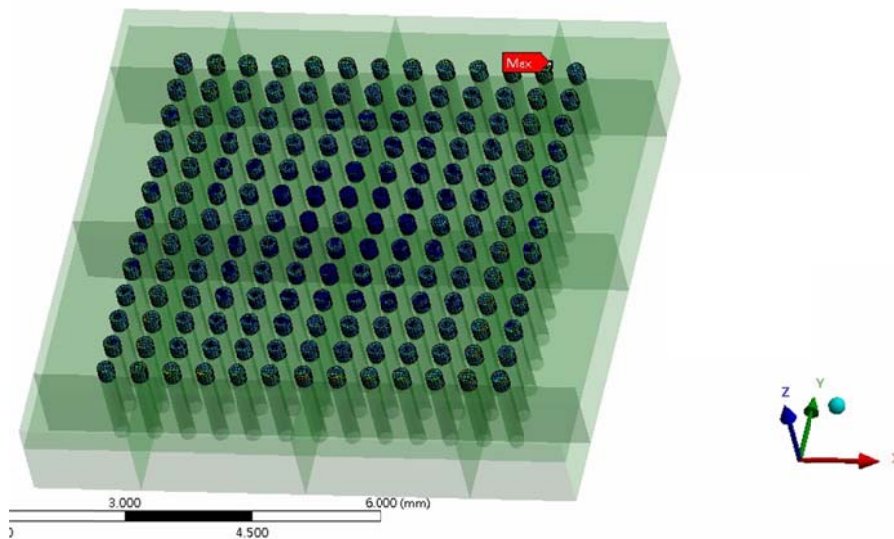


圖 5-25 50% A 類型空孔錫球計算結果(圖 4-3 隨機配置)

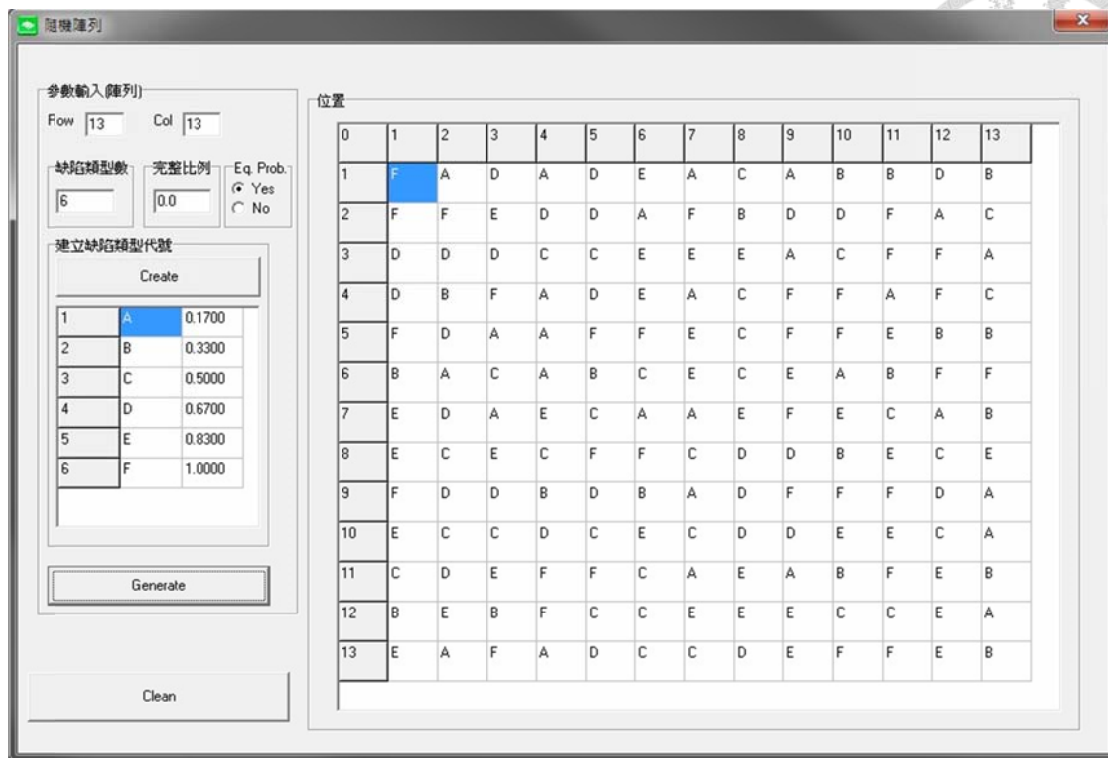


圖 5-26 100%含各類型空孔錫球隨機事件建立(空孔類型出現機率相等，Case 1)

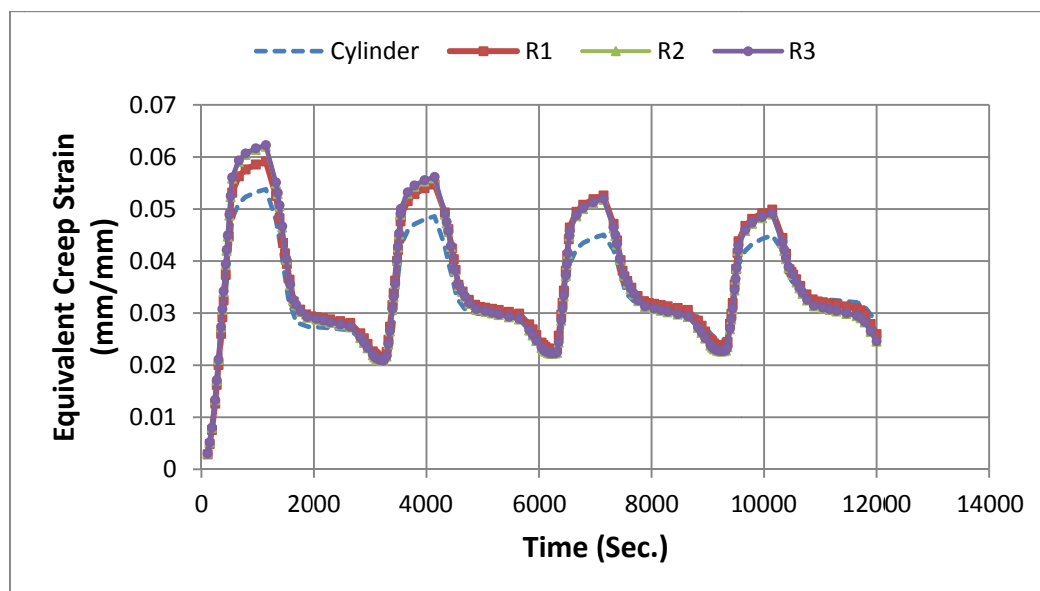


圖 5-27 Case 1 最大潛變等效應變歷時(前三組事件之結果)

另一種狀況為在隨機出現機率之低 CTE 乘子高出現機率(Case 3)方面，圖 5-30 左側列出了各種類型空孔出現的隨機機率，而低 CTE 乘子係指表 5-2 之 A, F 空孔類型，其出現機率為(A 類 21%及 F 類 16%，其餘 B 類 30%、C 類 0%、D 類 10%

及 E 類 15%)，表 5-6 為此 Case 3 的壽命評估結果，圖 5-31 為前三組事件之潛變等效應變歷時。



表 5-5 Case 2-100%皆有空孔(各類型空孔隨機出現機率，高 CTE 乘子高出現機率)

事件 (Events)	最大應變 (mm/mm)	最小應變 (mm/mm)	應變差值 (mm/mm)	疲勞壽命 N (times)	產生最大應 變空孔類型
R1	0.0493	0.0234	0.0259	348.813	D
R2	0.0496	0.0230	0.0266	327.302	C
R3	0.0489	0.0226	0.0263	335.379	C
R4	0.0499	0.0236	0.0263	337.202	C
R5	0.0493	0.0233	0.0260	346.195	D
R6	0.0496	0.0231	0.0265	329.539	C
R7	0.0499	0.0236	0.0262	338.281	C
R8	0.0490	0.0228	0.0263	336.106	C
R9	0.0499	0.0237	0.0262	338.771	D
R10	0.0496	0.0236	0.0261	343.155	D
R11	0.0498	0.0236	0.0261	341.640	D
R12	0.0497	0.0232	0.0265	329.677	C
平均值				337.672	

表 5-6 Case 3-100%皆有空孔(各類型空孔隨機出現機率，低 CTE 乘子高出現機率)

事件 (Events)	最大應變 (mm/mm)	最小應變 (mm/mm)	應變差值 (mm/mm)	疲勞壽命 N (times)	產生最大應 變空孔類型
R1	0.0490	0.0233	0.0258	352.169	E
R2	0.0476	0.0224	0.0252	371.813	D*
R3	0.0485	0.0230	0.0255	361.556	E
R4	0.0496	0.0235	0.0260	344.170	D
R5	0.0498	0.0236	0.0261	340.581	D
R6	0.0495	0.0235	0.0260	344.999	D
R7	0.0486	0.0232	0.0255	362.725	E
R8	0.0476	0.0224	0.0252	373.668	D*
R9	0.0486	0.0231	0.0256	359.440	E
R10	0.0490	0.0233	0.0257	356.408	E
R11	0.0492	0.0233	0.0259	349.121	D
R12	0.0492	0.0234	0.0258	352.026	E
平均值				355.723	*最大值位置 並非在角落

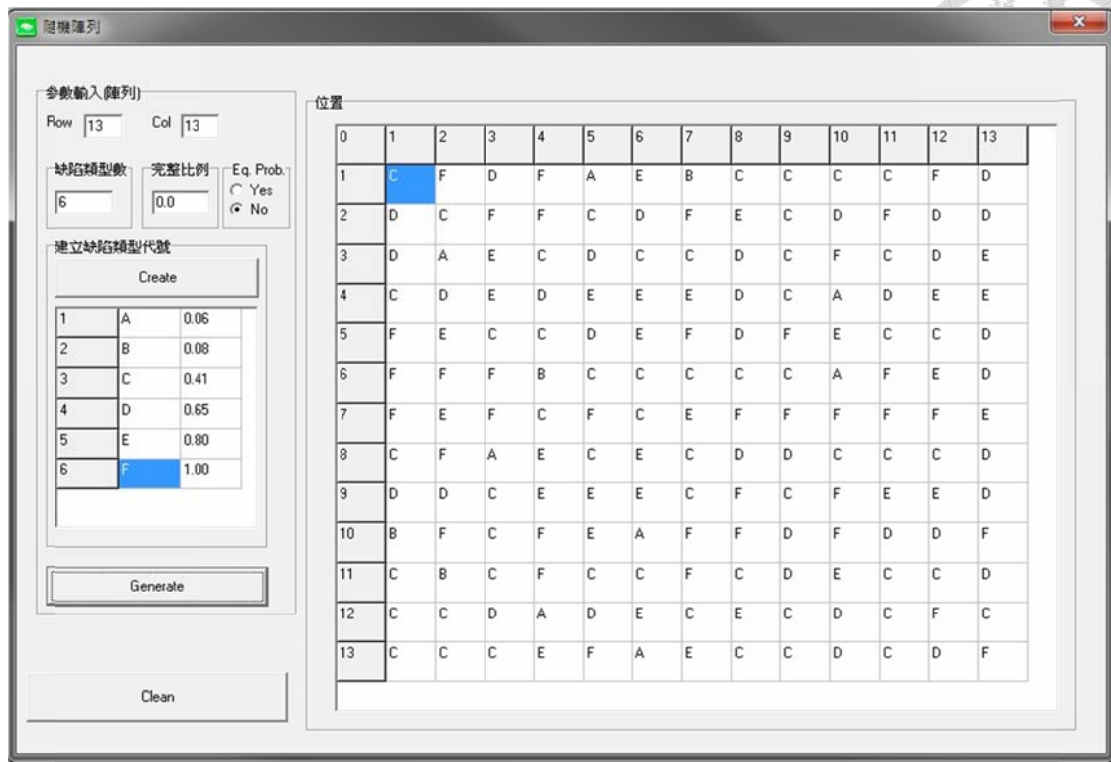


圖 5-28 100%各類型空孔隨機事件建立(高 CTE 乘子高出現機率，Case 2)

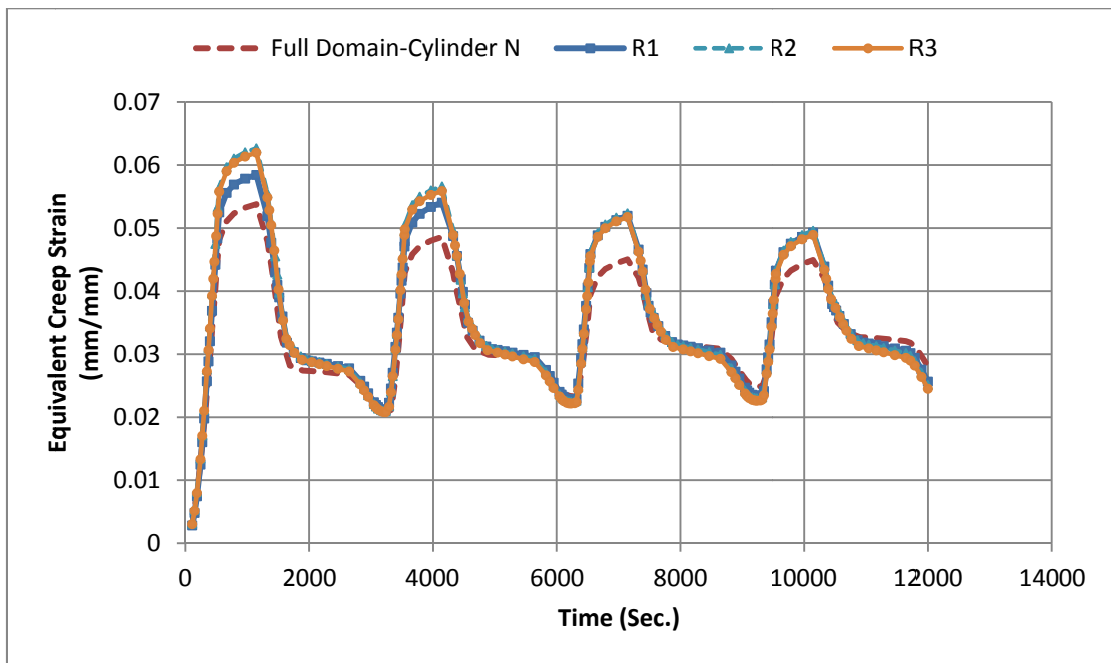


圖 5-29 Case 2 最大潛變等效應變歷時(前三組事件之結果)

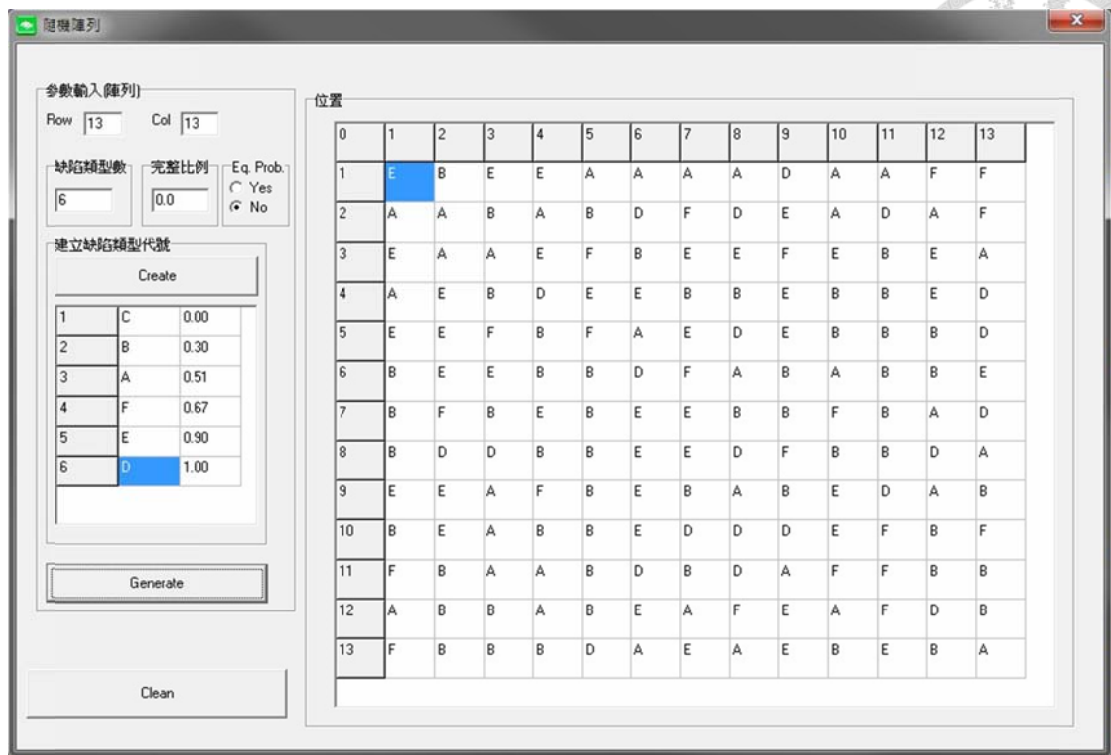


圖 5-30 100%各類型空孔隨機事件建立(低 CTE 乘子高出現機率，Case 3)

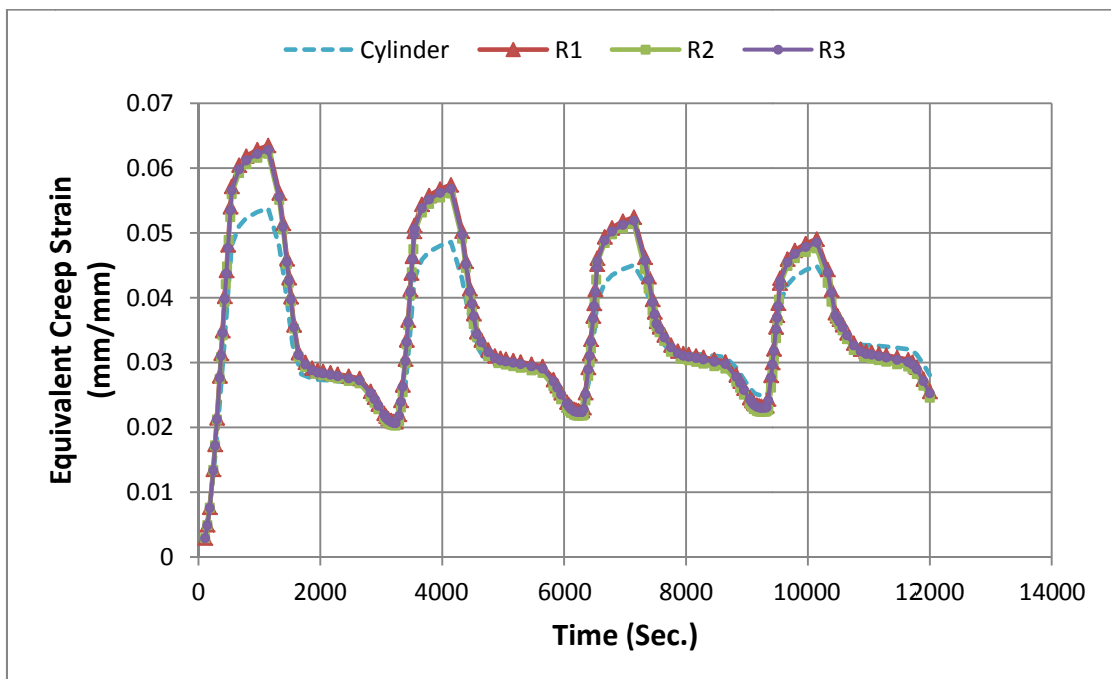


圖 5-31 Case 3 最大潛變等效應變歷時(前三組事件之結果)

接下來則是假設 50%的錫球具有空孔，同樣經由程式建立事件，如圖 5-32 所示，該圖中的 N 代表完整錫球。在此案例中，6 種空孔類型各自佔總體數量的比

例區分為兩組案例：(1) 高 CTE 乘子高出現機率，以及(2)低 CTE 乘子高出現機率；在隨機出現機率之高 CTE 乘子高出現機率(Case 4)方面，圖 5-33 左側列出了各種類型空孔出現的隨機機率，而高 CTE 乘子係指表 5-2 之 C, D, B 及 E 類型空孔，其出現機率為(C 類 17%及 D 類 32%，其餘 A 類 12%、B 類 5%，E 類 34%及 F 類 0%)，表 5-7 為此 Case4 的壽命評估結果。

表 5-7 Case 4-50%皆有空孔(各類型空孔隨機出現機率，高 CTE 乘子高出現機率)

事件 (Events)	最大應變 (mm/mm)	最小應變 (mm/mm)	應變差值 (mm/mm)	疲勞壽命 N (times)	產生最大應變 空孔類型
RR1	0.0527	0.0256	0.0271	310.888	D
RR2	0.0498	0.0231	0.0267	323.734	C
RR3	0.0522	0.0257	0.0265	329.679	D
RR4	0.0517	0.0250	0.0268	321.697	D
RR5	0.0524	0.0259	0.0265	329.886	D
RR6	0.0498	0.0231	0.0267	324.794	C
RR7	0.0501	0.0235	0.0266	326.730	C
RR8	0.0502	0.0236	0.0266	327.495	C
RR9	0.0499	0.0236	0.0263	337.042	D
RR10	0.0517	0.0256	0.0261	342.674	D
RR11	0.0524	0.0258	0.0266	325.901	D
RR12	0.0499	0.0232	0.0267	324.020	C
平均值				327.045	

最後 50%的錫球具有空孔隨機出現機率之低 CTE 乘子高出現機率(Case 5)方面，圖 5-34 左側列出了各種類型空孔出現的隨機機率，而低 CTE 乘子係指表 5-2 之 A, F 空孔類型，其出現機率為(A 類 13%及 F 類 66%，其餘 B 類 12%、C 類 6%、D 類 0%及 E 類 3%)，表 5-8 為此 Case5 的壽命評估結果。

從上述 Case 1~Case 5 總體含空孔錫球在全域所佔的百分比來看，其實對構裝體壽命的影響較大的因素；在於關鍵位置(邊角位置)是否具有高 CTE 乘子之等效圓柱體(含空孔錫球)，可從圖 5-35、5-36 的全域位移量來看，在構裝體四周具有較高的變形量，當然勢必造成錫球較大的潛變等效應變，但若在四週的缺陷錫球其空孔對潛變的影響不大，或是皆為完整錫球，可能的情況將會變成最靠近周邊對潛變影響較大的含空孔錫球，主導著構裝體的疲勞壽命，如圖 5-37，Case 5 的事件(編號 RR2)的最大潛變等效應變錫球出現位置。

從 5 個 Cases 各自的平均值來看，各類型空孔若出現機率相等，具有高 CTE 乘子之等效圓柱體幾乎不可能集中在中間區域，故呈現整體的疲勞壽命結果也都是該類型空孔的影響，形成壽命分佈離散性較低；等同於 Case2 及 Case4(高 CTE 乘子高出現機率)的結果(Case 1 平均值：339 次、Case 2 平均值：337 次以及 Case 4 平均值：327 次)。

但若各類型空孔若出現機率不等，且高 CTE 乘子之等效圓柱體低出現機率的條件下，可看出疲勞壽命的平均值提高(如 Case 3 平均值：355 次以及 Case 5 平均值：378 次)，這是理所當然的現象，但這樣的條件其實也是所有樣本空間的一部分，只是在較小的事件數下可能不易呈現。

表 5-8 Case5-50%皆有空孔(各類型空孔隨機出現機率，低 CTE 乘子高出現機率)

事件 (Events)	最大應變 (mm/mm)	最小應變 (mm/mm)	應變差值 (mm/mm)	疲勞壽命 $N$ (times)	產生最大應 變空孔類型
RR1	0.0490	0.0233	0.0257	356.408	E
RR2	0.0474	0.0223	0.0251	376.401	C*
RR3	0.0484	0.0242	0.0243	407.820	A
RR4	0.0481	0.0226	0.0255	363.567	C*
RR5	0.0504	0.0250	0.0253	367.559	E
RR6	0.0478	0.0226	0.0252	372.877	C*
RR7	0.0486	0.0242	0.0243	405.662	A
RR8	0.0480	0.0232	0.0249	383.840	B
RR9	0.0481	0.0227	0.0254	365.362	C*
RR10	0.0488	0.0243	0.0245	399.385	A
RR11	0.0480	0.0231	0.0250	380.650	B
RR12	0.0502	0.0245	0.0256	358.212	E
平均值				378.145	*最大值位 置並非在角 落

以下針對各組 Case 利用機率圖法及卡方檢定進行統計分析，藉此研判各種條件下之適配疲勞壽命分佈。表 5-9 彙整了各組 Case 之常態機率圖、對數常態機率圖以及韋伯(Weibull)機率圖所對應之圖表編號與平均值、標準差等相關參數，而卡方檢定統計量 $\chi^2$ 亦列於該表中。經由卡方檢定可看出，各種 Case 的數值結果均滿足以各分佈描述其疲勞壽命分佈，雖然樣本空間的事件數可能略少，但仍可推測含缺陷錫球在電子構裝體位置分佈下，可能的疲勞壽命下降了約 48%~55%。若假



設含缺陷錫球佔整體全域百分比僅 10%，隨著高 CTE 乘子之等效圓柱體高出現機率的情況下，可能的疲勞壽命亦不會提高太多，如圖 5-53，只要高 CTE 乘子的等效圓柱體出現在外圍或近角落位置，整體構裝體疲勞壽命仍會由該圓柱體所代表之錫球呈現主導位置。

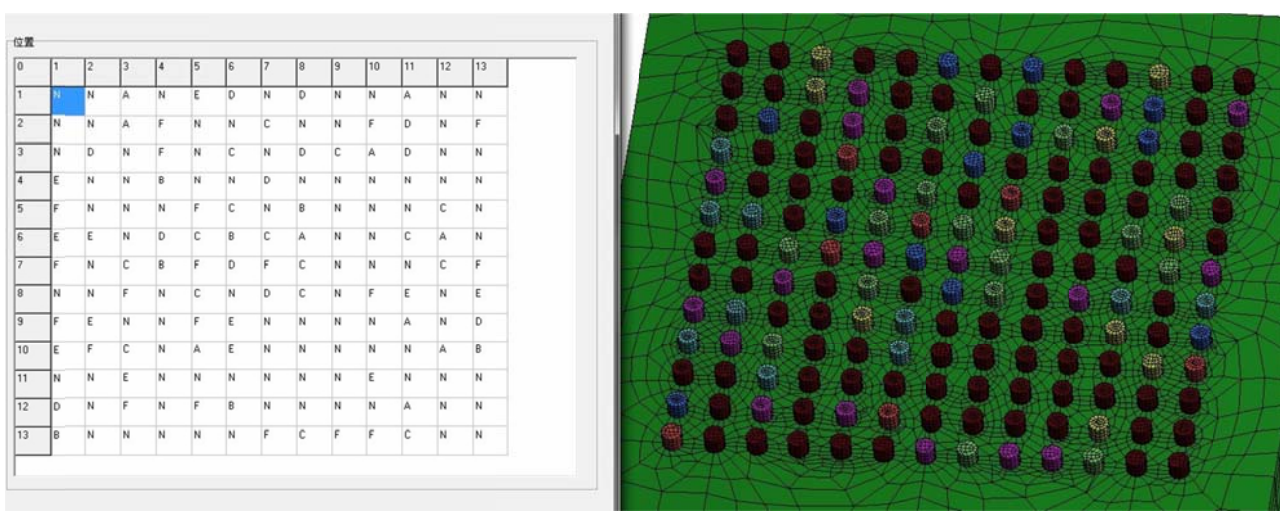


圖 5-32 50%各類型空孔隨機事件建立(左側的 N 代表完整錫球)

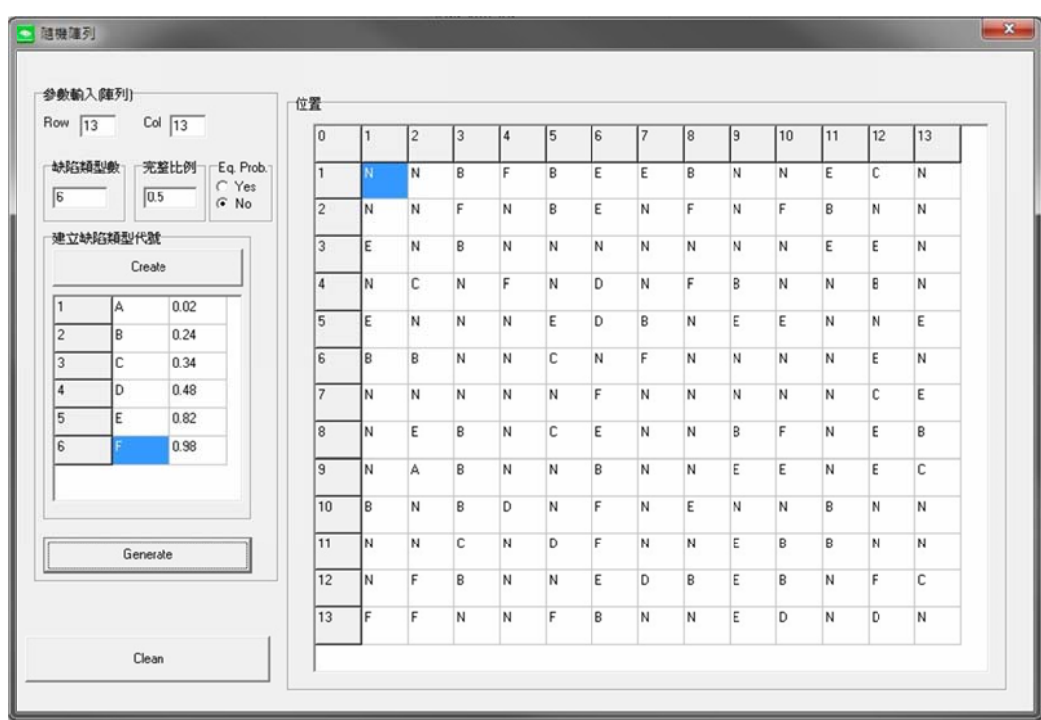


圖 5-33 50%各類型空孔隨機事件建立(高 CTE 乘子高出現機率，Case 4)

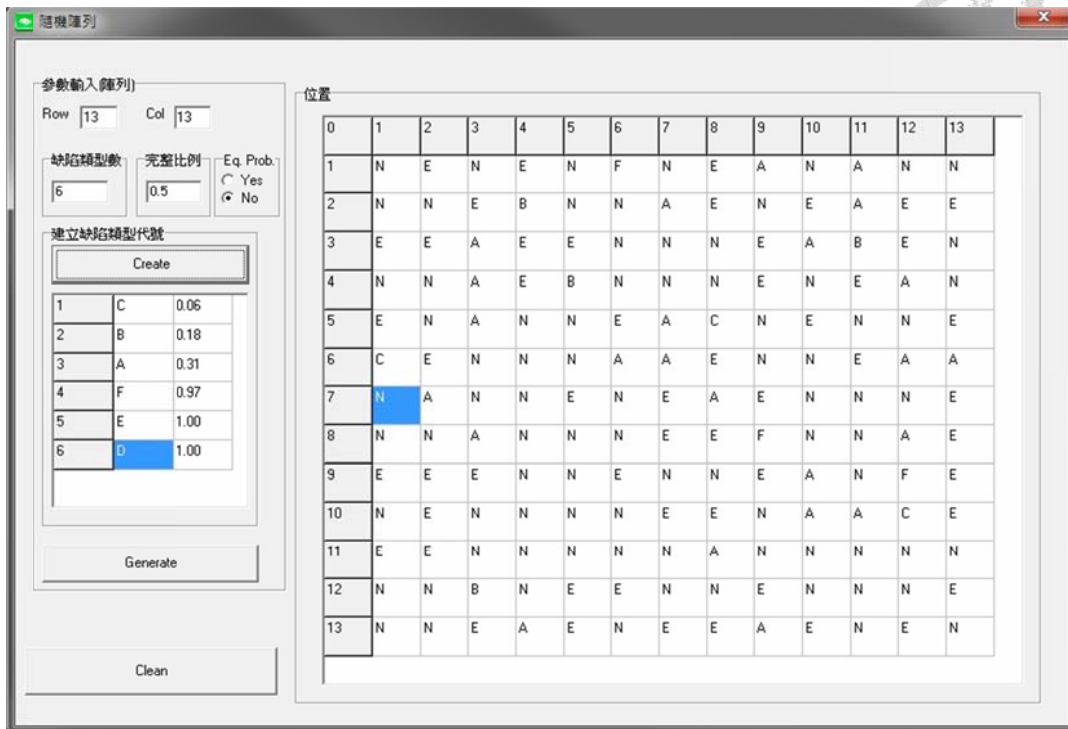


圖 5-34 50%各類型空孔隨機事件建立(低 CTE 乘子高出現機率，Case 5)

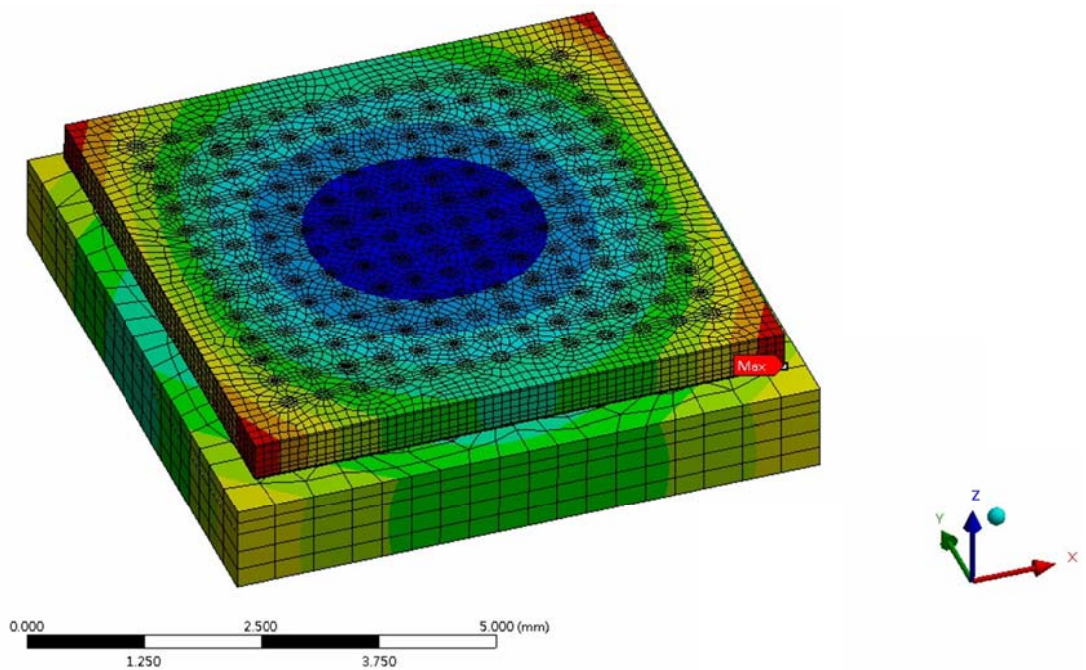


圖 5-35 最後一次熱循環下具有最大潛變等效應變之全域變形

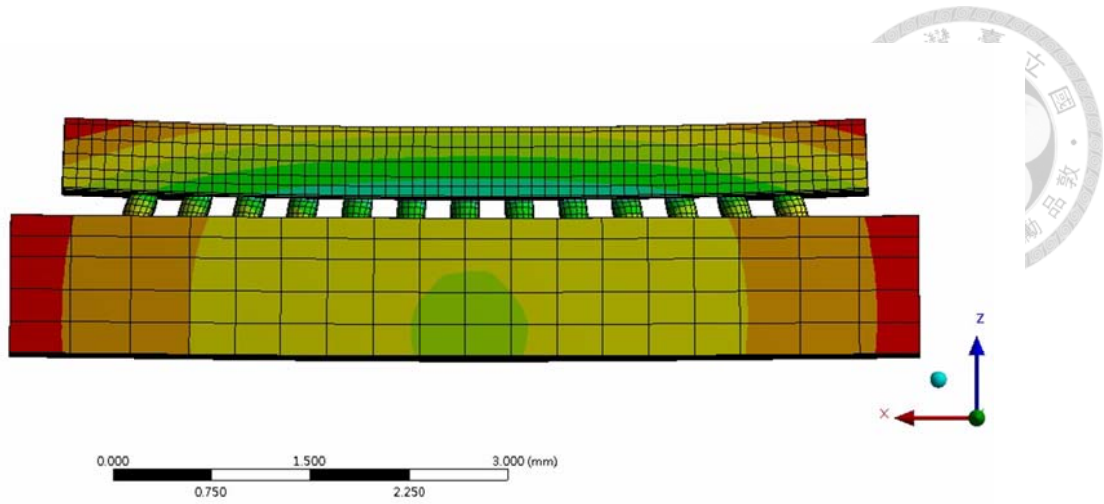


圖 5-36 最後一次熱循環下具有最大潛變等效應變之全域變形側視圖

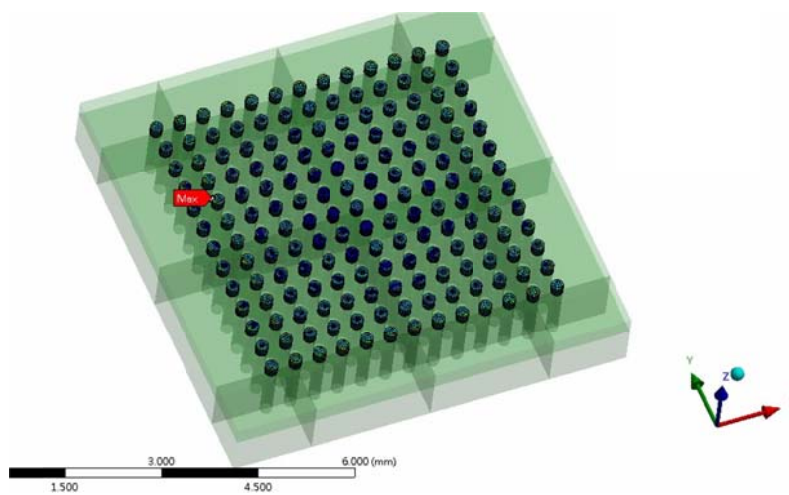
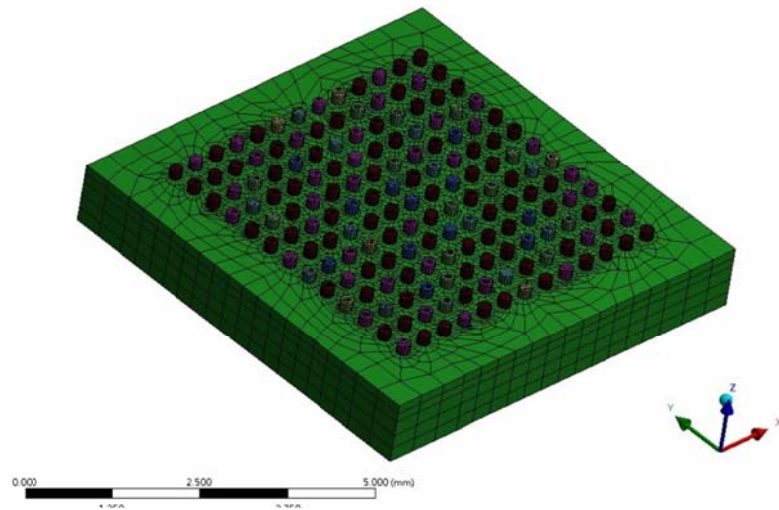


圖 5-37 Case 5 具有最大潛變等效應變之含空孔錫球位置



表 5-9 統計彙整表

分析	常態分佈	對數常態分佈	韋伯分佈	常態分佈	對數常態分佈	韋伯分佈	卡方檢定
Case	$\mu/\sigma$	$\mu_n/\sigma_n$	$\beta/\theta$	對應圖/表	對應圖/表	對應圖/表	常態/對數/韋伯 ( $\chi^2$ )
Case 1	339.20/6.42	5.82/0.02	63.50/342.12	圖 5-38/表 5-10	圖 5-39/表 5-11	圖 5-40/表 5-12	1.189/1.220/1.403
Case 2	337.57/7.30	5.82/0.02	55.63/340.82	圖 5-41/表 5-13	圖 5-42/表 5-14	圖 5-43/表 5-15	1.551/1.529/1.826
Case 3	355.72/11.59	5.87/0.03	36.65/360.70	圖 5-44/表 5-16	圖 5-45/表 5-17	圖 5-46/表 5-18	0.579/0.607/0.500
Case 4	327.04/8.09	5.79/0.03	44.36/330.86	圖 5-47/表 5-19	圖 5-48/表 5-20	圖 5-49/表 5-21	3.427/3.396/3.766
Case 5	378.20/20.04	5.93/0.05	22.40/386.82	圖 5-50/表 5-22	圖 5-51/表 5-23	圖 5-52/表 5-24	0.751/0.756/1.181

$\mu$ 為常態分佈之平均值， $\sigma$ 為變異數； $\mu_n$ 為對數常態分佈之平均值， $\sigma_n$ 為變異數； $\beta$ 為韋伯分配之形狀參數， $\theta$ 為尺度參數

表 5-10 Case 1 常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu) / \sigma$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
335	8	-0.6550	0.2562	0.2562	6.4058	0.3967
340	5	0.1240	0.5493	0.2931	7.3277	0.7394
345	7	0.9030	0.8167	0.2674	6.6849	0.0149
370	5	4.7980	1.0000	0.1833	4.5816	0.0382
$\chi^2 =$						1.189

表 5-11 Case 1 對數常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu_n) / \sigma_n$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
335	8	-0.6565	0.2558	0.2558	6.3942	0.4033
340	5	0.1271	0.5506	0.2948	7.3701	0.7622
345	7	0.8992	0.8157	0.2652	6.6290	0.0208
370	5	4.5993	1.0000	0.1843	4.6066	0.0336
$\chi^2 =$						1.220

表 5-12 Case 1 韋伯分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
335	8	0.2312	0.2312	5.7796	0.8530
340	5	0.4901	0.2589	6.4724	0.3349
345	7	0.8176	0.3276	8.1892	0.1727
370	5	1.0000	0.1824	4.5588	0.0427
$\chi^2 =$					1.403

表 5-13 Case 2 常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu) / \sigma$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
335	3	-0.3520	0.3624	0.3624	4.3490	0.4185
340	5	0.3330	0.6304	0.2680	3.2162	0.9894
345	2	1.0180	0.8457	0.2152	2.5827	0.1315
375	2	5.1280	1.0000	0.1543	1.8521	0.0118
$\chi^2 =$						1.551

表 5-14 Case 2 對數常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu_n) / \sigma_n$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
335	3	-0.3553	0.3612	0.3612	4.3342	0.4107
340	5	0.3296	0.6292	0.2680	3.2158	0.9899
345	2	1.0046	0.8425	0.2133	2.5595	0.1223
375	2	4.8596	1.0000	0.1575	1.8906	0.0063
$x^2 =$						1.529

表 5-15 Case 2 韋伯分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
335	3	0.3188	0.3188	3.8256	0.1782
340	5	0.5832	0.2644	3.1733	1.0516
345	2	0.8608	0.2775	3.3303	0.5314
375	2	1.0000	0.1392	1.6708	0.0649
$x^2 =$					1.826

表 5-16 Case 3 常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu) / \sigma$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
345	3	-0.9255	0.1774	0.1774	2.1282	0.3571
355	3	-0.0625	0.4751	0.2977	3.5728	0.0918
365	4	0.8005	0.7883	0.3132	3.7585	0.0155
405	2	4.2525	1.0000	0.2117	2.5404	0.1150
$x^2 =$						0.579

表 5-17 Case 3 對數常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu_n) / \sigma_n$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
345	3	-0.9282	0.1766	0.1766	2.1198	0.3655
355	3	-0.0464	0.4815	0.3048	3.6580	0.1184
365	4	0.8108	0.7913	0.3098	3.7175	0.0215
405	2	4.0200	1.0000	0.2087	2.5044	0.1016
$x^2 =$						0.607

表 5-18 Case 3 韋伯分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
345	3	0.1777	0.1777	2.1320	0.3534
355	3	0.4273	0.2496	2.9955	0.0000
365	4	0.7862	0.3589	4.3068	0.0219
405	2	1.0000	0.2138	2.5656	0.1247
$x^2 =$					0.500

表 5-19 Case 4 常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu) / \sigma$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
325	5	-0.2295	0.4092	0.4092	4.9109	0.0016
330	5	0.3320	0.6301	0.2208	2.6498	2.0845
375	2	5.3855	1.0000	0.3699	4.4393	1.3404
$x^2 =$					3.427	

表 5-20 Case 4 對數常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu_n) / \sigma_n$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
325	5	-0.2164	0.4143	0.4143	4.9722	0.0002
330	5	0.3443	0.6347	0.2203	2.6440	2.0994
375	2	5.0386	1.0000	0.3653	4.3838	1.2963
$x^2 =$					3.396	

表 5-21 Case 4 韋伯分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $x^2$
325	5	0.3641	0.3641	4.3687	0.0912
330	5	0.5897	0.2257	2.7082	1.9393
375	2	1.0000	0.4103	4.9231	1.7356
$x^2 =$					3.766

表 5-22 Case 5 常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu) / \sigma$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
370	5	-0.4090	0.3413	0.3413	4.0952	0.1999
395	4	0.8385	0.7991	0.4579	5.4943	0.4064
460	3	4.0820	1.0000	0.2009	2.4102	0.1443
$\chi^2 =$						0.751

表 5-23 Case 5 對數常態分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	$z_i = (y_i - \mu_n) / \sigma_n$	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
370	5	-0.3956	0.3462	0.3462	4.1546	0.1720
395	4	0.8559	0.8040	0.4577	5.4930	0.4058
465	3	3.9786	1.0000	0.1960	2.3520	0.1785
$\chi^2 =$						0.756

表 5-24 Case 5 韋伯分布統計檢定量

各區間上界	各區間觀察個數	預期個數之累積機率	預期個數之機率	預期個數	檢定統計量 $\chi^2$
370	5	0.3089	0.3089	3.7067	0.4512
395	4	0.7978	0.4889	5.8666	0.5939
465	3	1.0000	0.2022	2.4267	0.1355
$\chi^2 =$					1.181

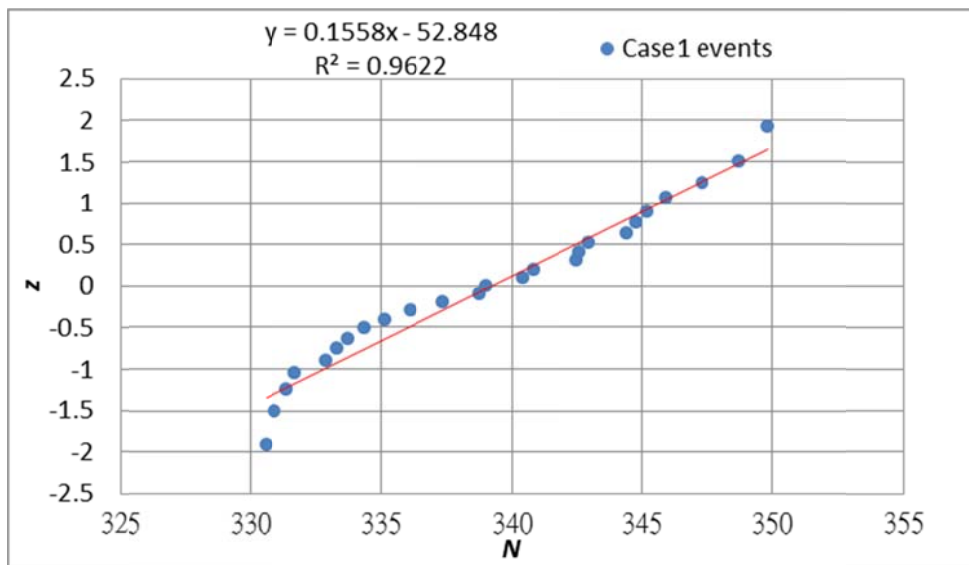


圖 5-38 Case 1 疲勞壽命之常態機率圖法

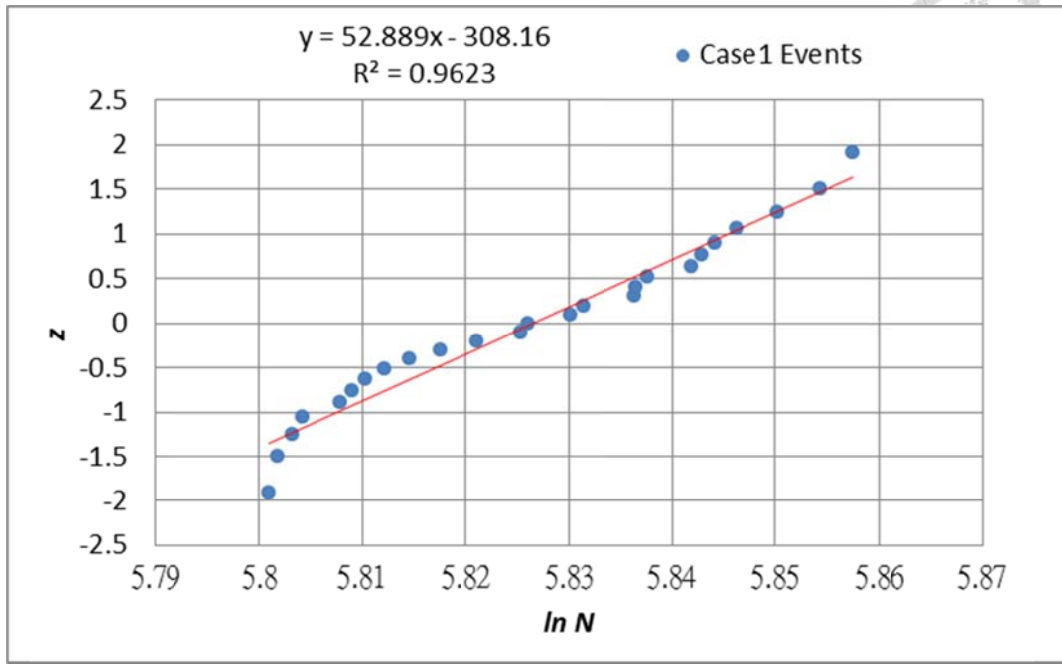


圖 5-39 Case 1 疲勞壽命之對數常態機率圖法

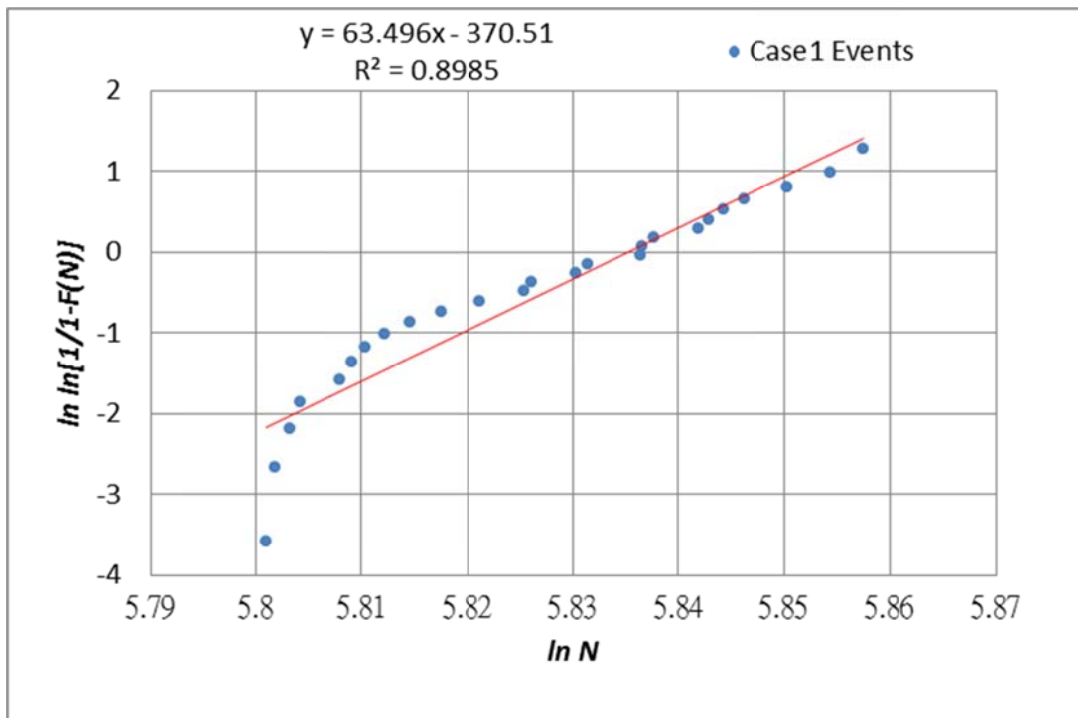


圖 5-40 Case 1 疲勞壽命之韋伯機率圖法

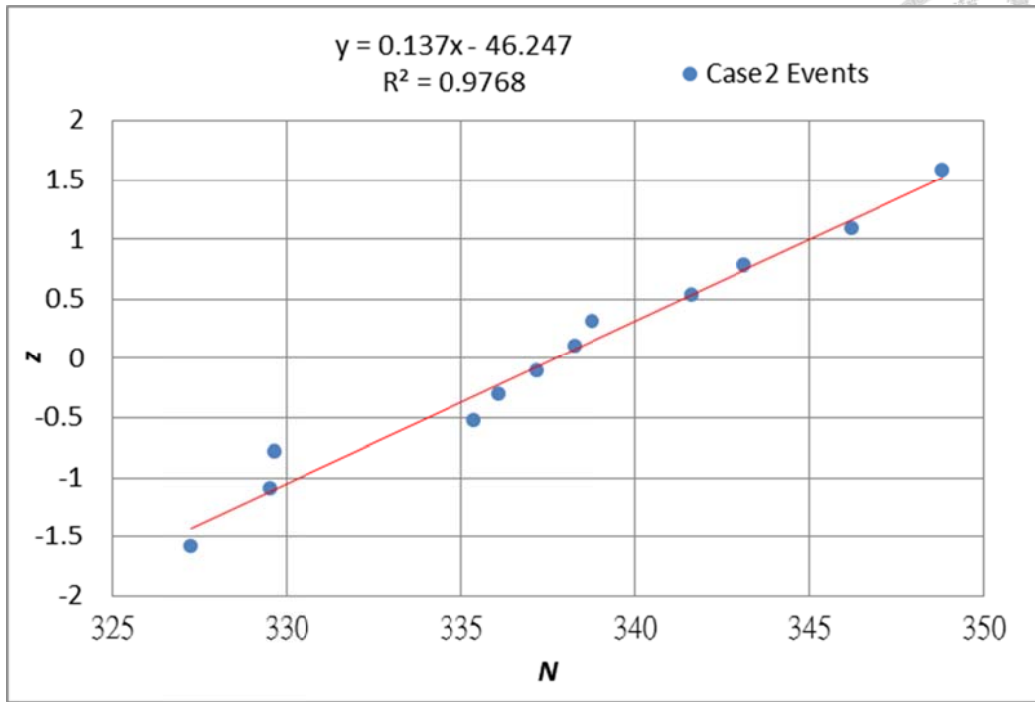


圖 5-41 Case 2 疲勞壽命之常態機率圖法

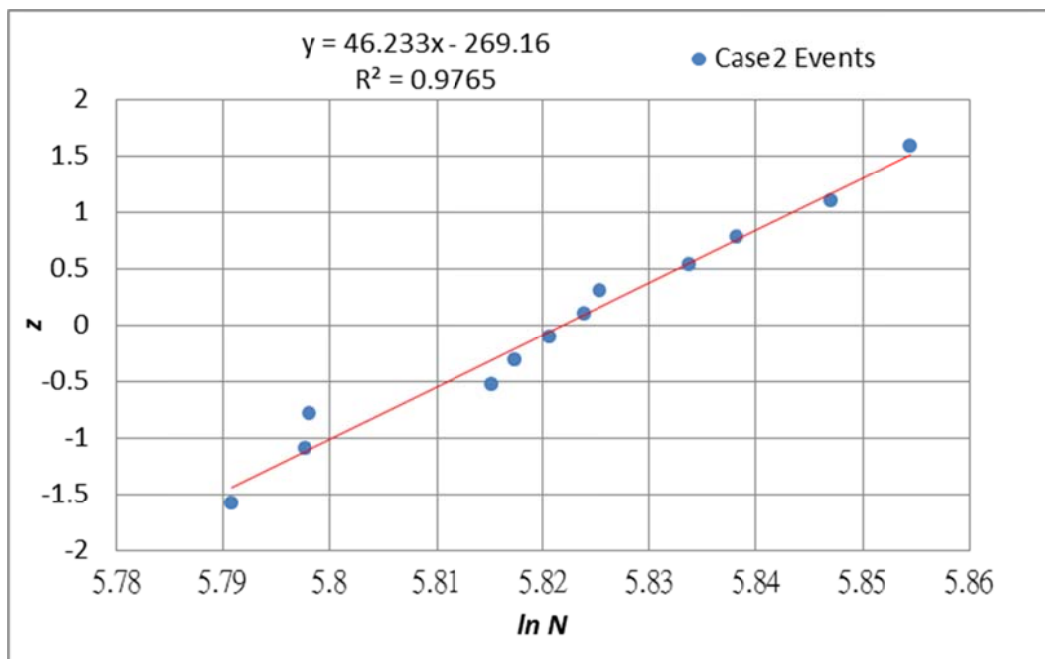


圖 5-42 Case 2 疲勞壽命之對數常態機率圖法

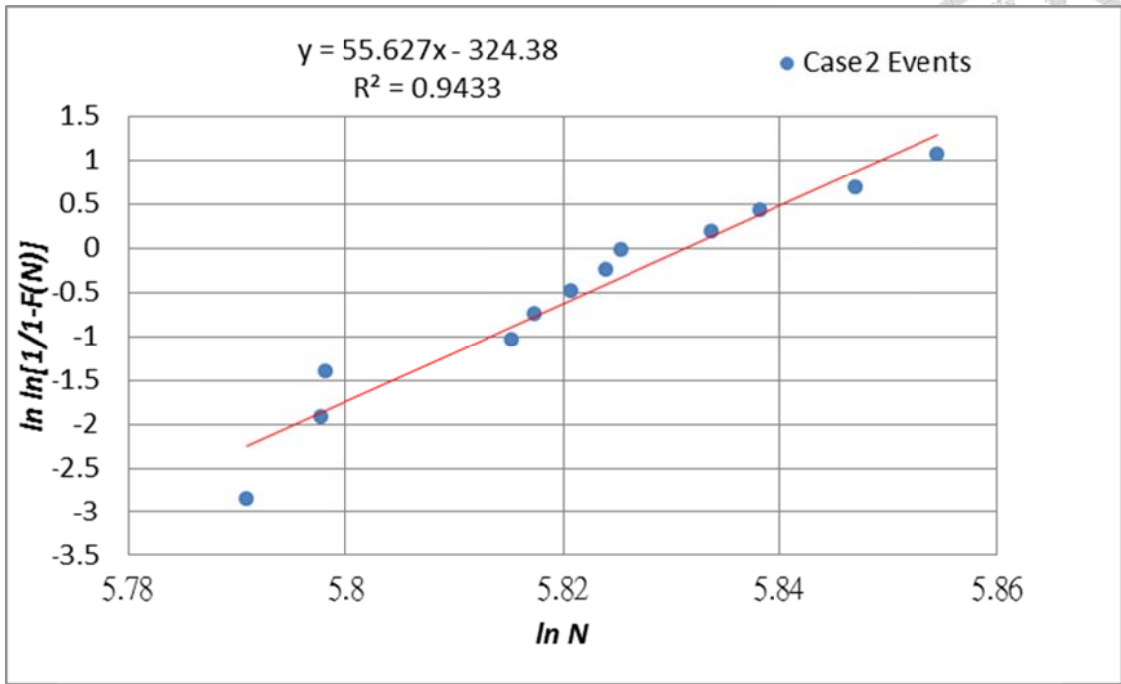


圖 5-43 Case 2 疲勞壽命之韋伯機率圖法

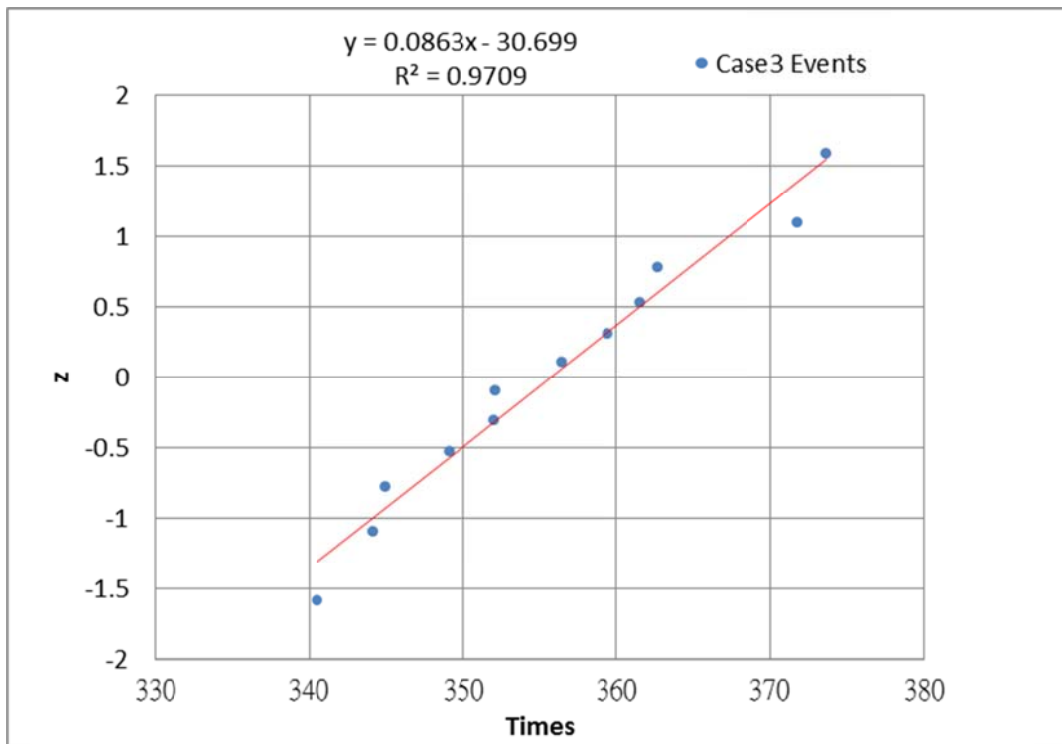


圖 5-44 Case 3 疲勞壽命之常態機率圖法

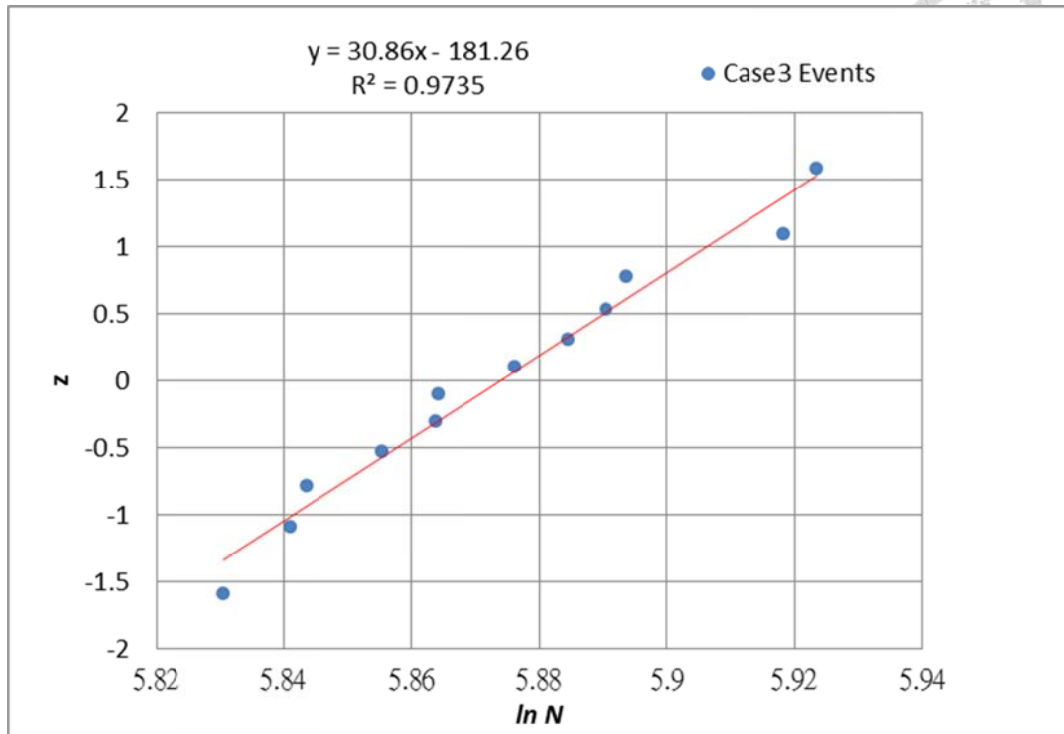


圖 5-45 Case 3 疲勞壽命之對數常態機率圖法

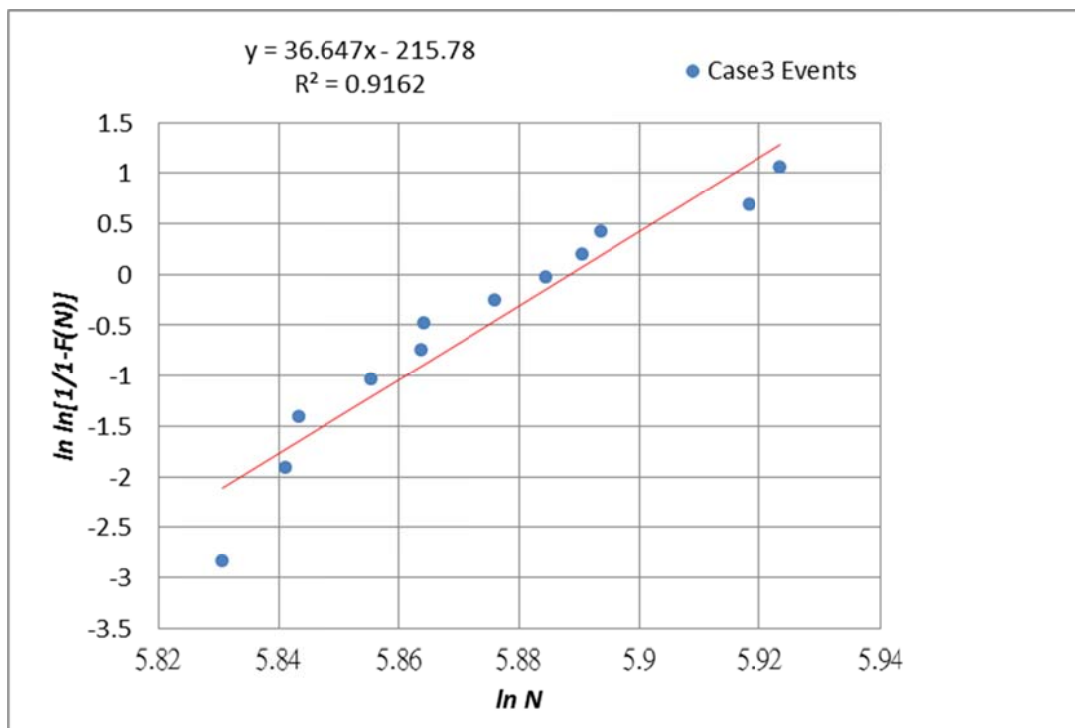


圖 5-46 Case 3 疲勞壽命之韋伯機率圖法

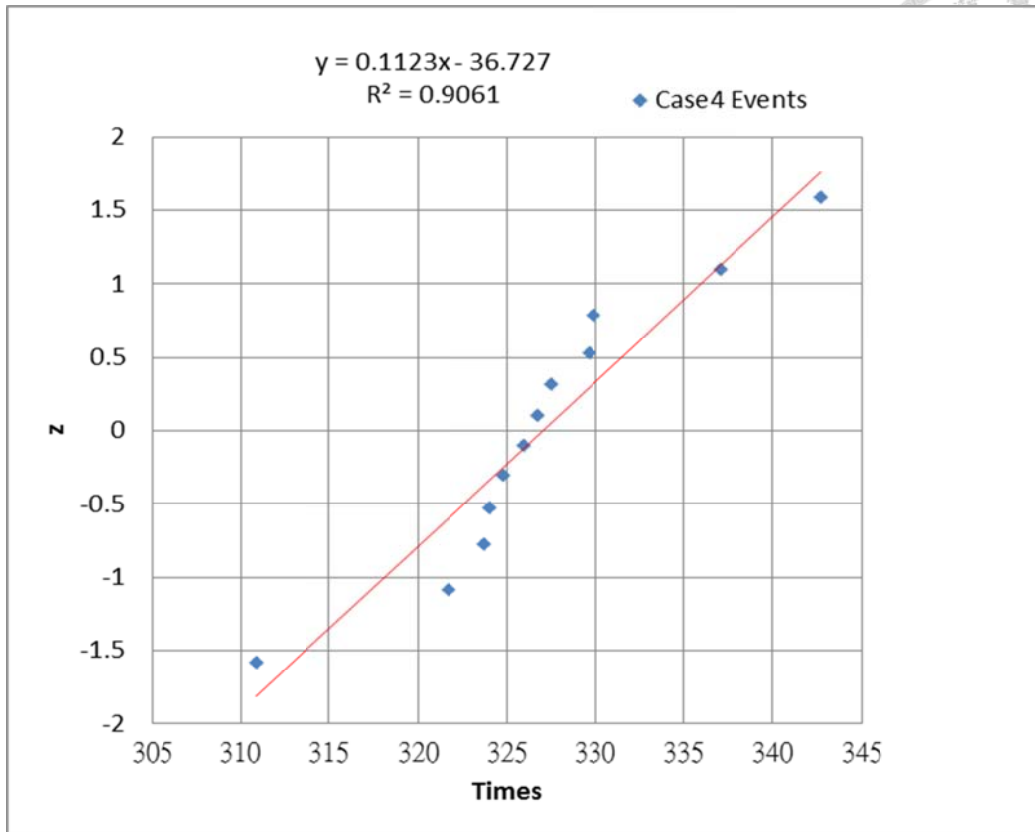


圖 5-47 Case 4 疲勞壽命之常態機率圖法

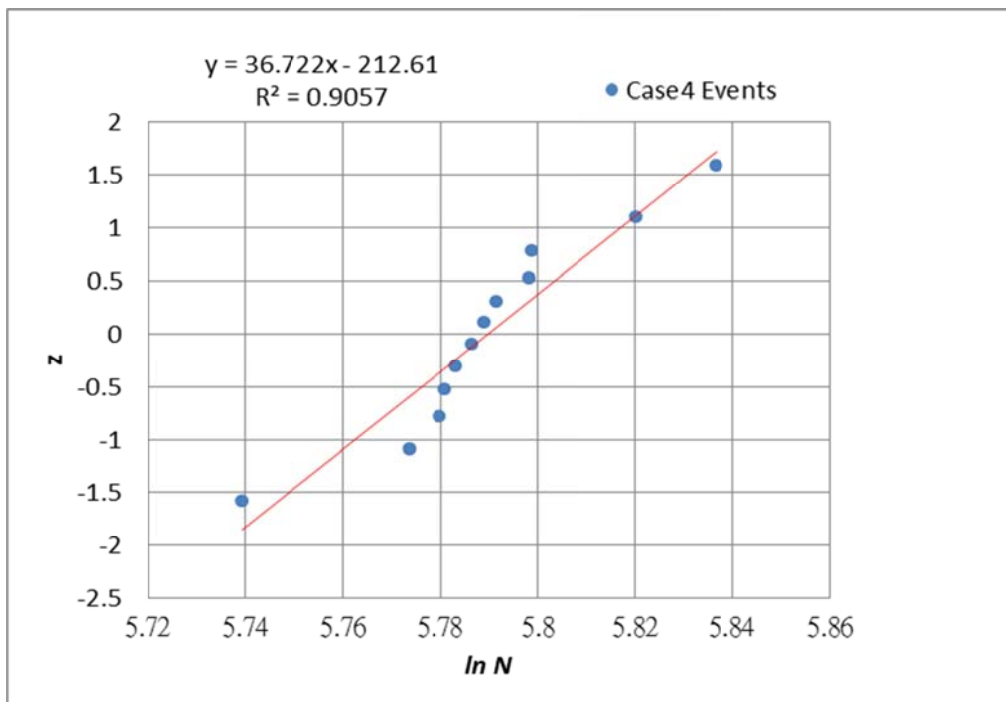


圖 5-48 Case 4 疲勞壽命之對數常態機率圖法

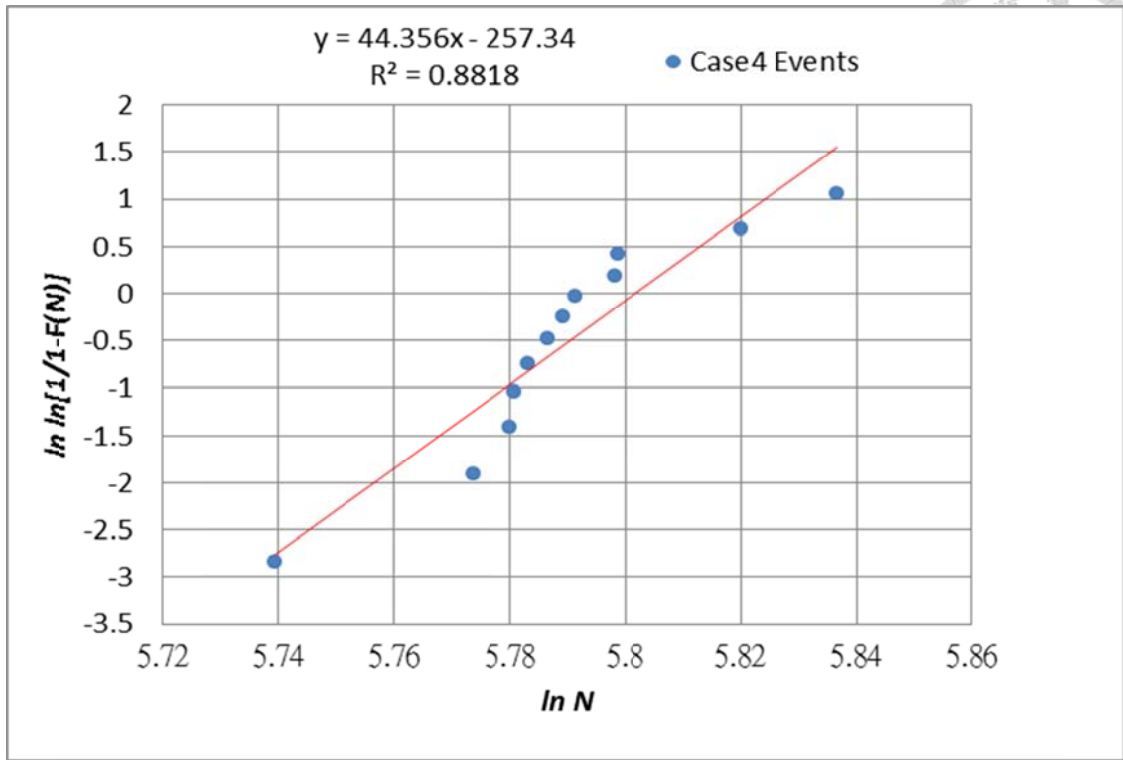


圖 5-49 Case 4 疲勞壽命之韋伯機率圖法

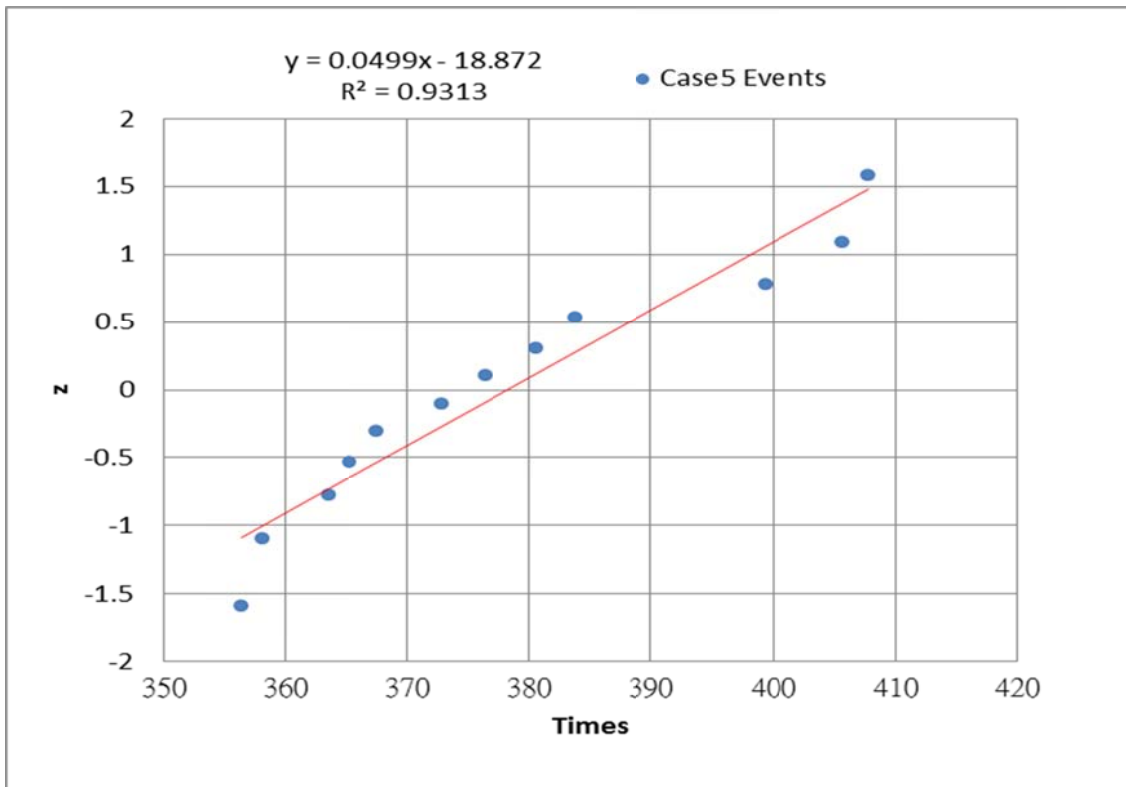


圖 5-50 Case 5 疲勞壽命之常態機率圖法

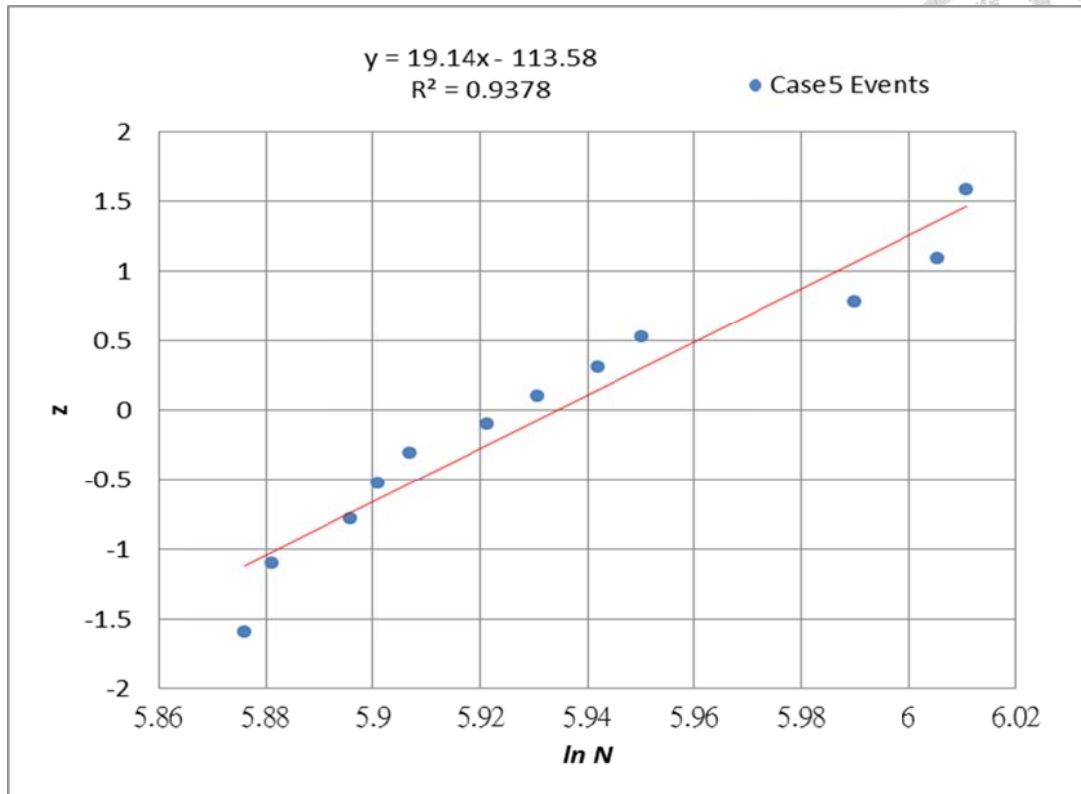


圖 5-51 Case 5 疲勞壽命之對數常態機率圖法

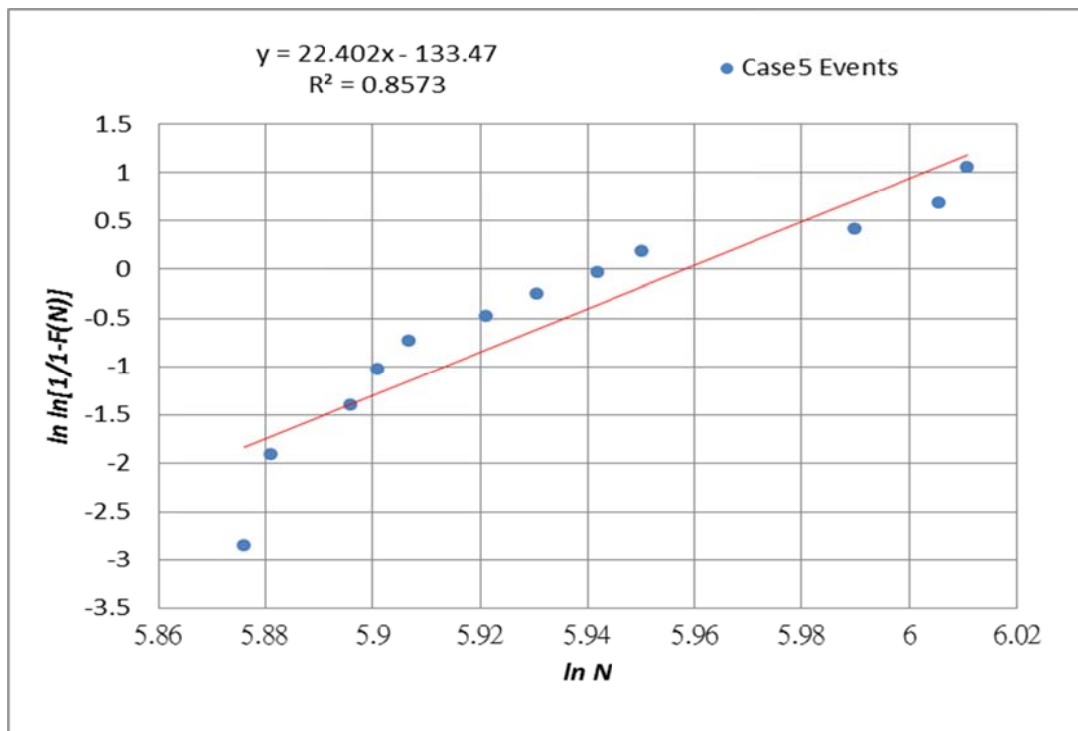


圖 5-52 Case 5 疲勞壽命之韋伯機率圖法

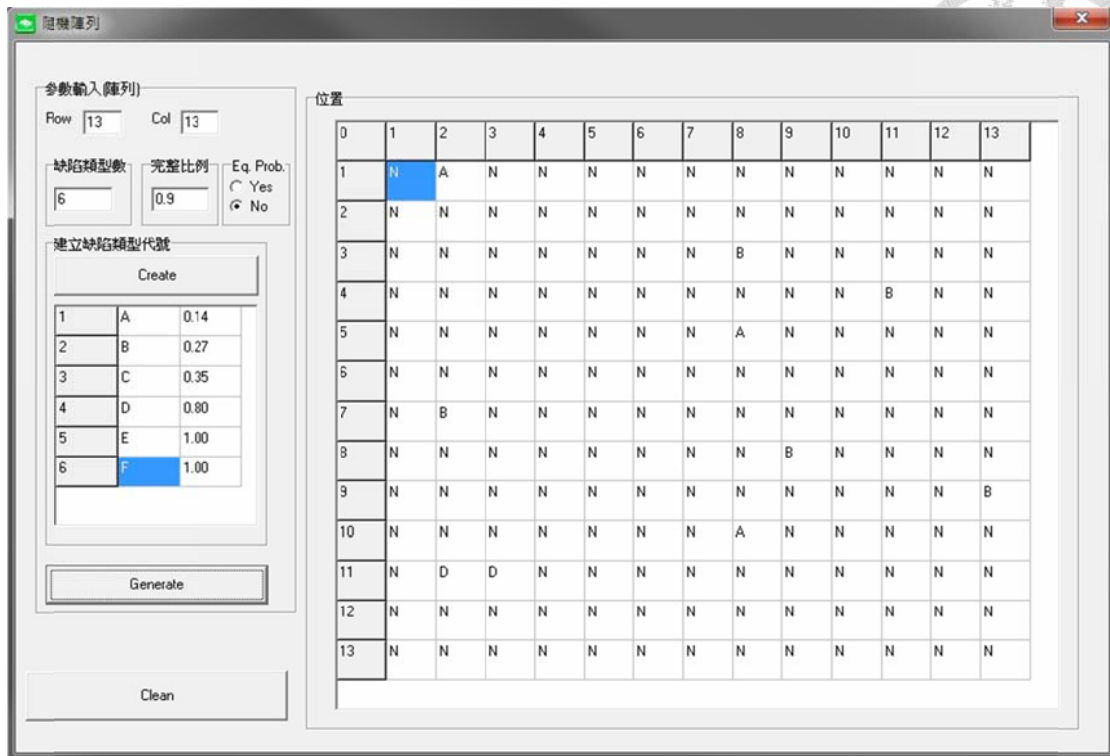


圖 5-53 10%各類型空孔隨機事件建立(高 CTE 乘子高出現機率, 45%)

### 5-6-2 加速因子

對於含鉛錫球(Sn-Pb)之加速因子的模型，在早期常使用 Norris-Landzberg 加速因子公式[23]，如下式所列：

$$AF = \frac{N_{field}}{N_{test}} = \left[ \frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{field}} \right]^{1.9} \left[ \frac{f_{field}}{f_{test}} \right]^{\frac{1}{3}} \exp \left[ \frac{1414}{T_{field}^{Max}} - \frac{1414}{T_{test}^{Max}} \right] \quad (5-5)$$

其中，

$AF$  為加速因子；

$\Delta T_{field}$  為實際環境下與元件最高溫溫差；

$\Delta T_{test}$  為測試環境下與元件最高溫溫差；

$N_{field}$  為實際環境下可承受循環次數；

$N_{test}$  為測試循環次數；

$f_{field}$  代表一天內承受熱循環次數；

$f_{test}$  則是一天內測試次數；

$T_{field}^{Max}$ 、 $T_{test}^{Max}$  分別代表在正常環境下及測試運作最高溫度。

對於現今採用之無鉛錫球的加速因子模型則可參考 Salmela 提出的加速因子

模型[24]，但是該模型適用於傳統覆晶球陣列(Flip Chip Ball Grid Array, FCBGA)類型的電子構裝元件，主要原因在於其加速因子考量基板(如圖 1-2)材質與錫球材質等相關的修正項目，然而，本分析所探討的對象並無基板元件，故選用適當的模型亦是相當重要的評估程序。

在文獻[25]中，Vasudevan 等藉由實驗重新修正適用於無鉛錫球之加速因子模型參數，其並無特別強調基板材質的影響，而重點在於以 Norris-Landzberg 加速因子模型作為基礎，在不同的無鉛錫球成分組成下共歸納了 17 對實驗數據結果，其最後提出之模型如下式所述：

$$AF = \frac{N_{field}}{N_{test}} = \left[ \frac{\Delta T_{field}}{\Delta T_{test}} \right]^{-n} \left[ \frac{f_{field}}{f_{test}} \right]^{-m} \exp \left[ \frac{1414}{T_{field}^{Max}} - \frac{1414}{T_{test}^{Max}} \right] \quad (5-6)$$

其中， $m=0.33$ ,  $n=1.9$ 。上式在參數項上與 Norris-Landzberg 模型並無太大的差異，僅在  $f_{field}/f_{test}$  項的指數成為負值，為了解在一般環境下含缺陷的構裝體疲勞壽命(可承受熱循環的次數)的評估指標，故仍引用該加速因子模型於晶圓層級的電子構裝體。

其次，參考美國核管會(U. S. Nuclear Regulatory Commission, USNRC)所發行之 NUREG/CR-6479[26]報告中，其歸類電廠的環境位置之 C 類(溫和)環境，此類環境主要描述電子設備所架設的控制室內，其正常條件下的溫度範圍為 16~27 °C，而此構裝體在此類環境下運作時假設最高溫度為 68 °C。另由 JESD22-A104C 之加速測試規則換算成每日之頻率(測試時間為 12000 秒，每日約為 28.8 次)，並假設該構裝體在控制室的環境中每日達到最高溫的次數，故可由式(5-6)推算出評估壽命，表 5-25 則為各 Cases 在加速測試下平均疲勞壽命所對應之加速因子與評估壽命，表 5-26 為 Norris-Landzberg 加速因子模型所計算出的評估壽命，主要目的是比較表 5-25 之結果。

由表 5-25 可明顯看出在正常環境下所推估一含與不含空孔缺陷錫球的疲勞壽命之差異，一般在數值或實驗之加速測試分析中，皆是將構裝體之無鉛錫球視為完整無缺陷，並藉此推算該類產品的保固期限或良率，而實際上含缺陷之錫球或許存在於所謂的良品中，而本章由一系列的評估流程，說明了含空孔缺陷錫球所導致潛在失效的不確定因素。

表 5-25 假設之 C 類環境條件及計算之加速因子與熱循環次數

Case/平均加速測試壽命 $N_{test}$ (times)	最大溫差 $\Delta T_{field}$	頻率 (cycles/days) $f_{field}$	最高溫度 (K) $T_{field}^{Max}/T_{test}^{Max}$	AF	$N_{field}$ (times)
無空孔 (733.93)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	22.00	16149.28
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	34.56	25367.06
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	21.65	15887.62
1 (339.24)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	22.00	7464.67
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	34.56	11725.40
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	21.65	7343.73
2 (334.67)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	22.00	7430.08
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	34.56	11671.07
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	21.65	7309.70
3 (355.73)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	22.00	7827.47
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	34.56	12295.28
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	21.65	7700.65
4 (327.05)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	22.00	7196.245
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	34.56	11303.76
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	21.65	7079.65
5 (378.15)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	22.00	8320.641
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	34.56	13069.95
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	21.65	8185.828

表 5-26 採用 Norris-Landzberg 加速因子模型計算之加速因子與熱循環次數

Case/平均加速測試壽命 $N_{test}$ (times)	最大溫差 $\Delta T_{field}$	頻率 (cycles/days) $f_{field}$	最高溫度 (K) $T_{field}^{Max}/T_{test}^{Max}$	AF	$N_{field}$ (times)
無空孔 (733.93)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	10.95	8034.41
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	17.20	12620.34
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	17.02	12489.34
1 (339.24)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	10.95	3713.74
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	17.20	5833.49
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	17.02	5772.94
2 (334.67)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	10.95	3696.53
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	17.20	5806.46
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	17.02	5746.19
3 (355.73)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	10.95	3894.24
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	17.20	6117.01
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	17.02	6053.52
4 (327.05)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	10.95	3580.197
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	17.20	5623.723
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	17.02	5565.351
5 (378.15)	52 (最低溫 16°C)	10*	341.15/393.15	10.95	4139.594
	41 (最低溫 27°C)	10*	341.15/393.15	17.20	6502.416
	46.5 (均溫 21.5°C)	20*	341.15/393.15	17.02	6434.923

## 5-7 小結

本章主要探討了最新的扇外型晶圓級電子構裝(Fan-Out Wafer Level Packaging, FO-WLP)元件，並假設該構裝元件中含空孔缺陷之無鉛錫球對整體元件疲勞壽命的影响，藉由一系列的數值模擬流程：如錫球之等效圓柱體、熱膨脹係數通式應用於模擬含空孔錫球，以及等效圓柱體全域模型模擬空孔缺陷或完整錫球隨機位置分佈等概念，將空孔缺陷造成對電子構裝元件的疲勞壽命不確定性呈現出來。

而經由整體疲勞壽命評估流程，亦可歸納其間在細節上的特點，茲分述如下：

- (1). 此類構裝體與一般覆晶球柵陣列(Flip-chip Ball Grid Array, FBGA)構裝體仍有不同之處在於：錫球引腳密度增加許多，從潛變等效應變對循環時間的歷時圖來看，其呈現的趨勢是微小上揚。一般而言，在第三個循環後的潛變等效應變的趨勢會逐漸收斂，但上揚的趨勢卻比 FBGA 少，原因就在於錫球間距的差異所造成。在本章的數值實驗曾對改變錫球間距進行測試，距離越大，其潛變等效應變對循環時間的歷時圖上揚的趨勢就越明顯。
- (2). 相當多文獻都有將無鉛錫球的材料性質設定塑性應變，但本研究發現對潛變等效應變對循環時間的歷時圖的結果差異不大，甚至幾乎無影響，可能如(1)的影響所致。
- (3). 呈上，在表 4-7 的  $C_1$  係數，其單位為(1/sec.)，本研究是參考其他文獻的設定值，當然同樣經過變更減少 10 倍、100 倍等的狀況下，潛變等效應變對循環時間的歷時圖將呈現階梯狀的變化，並非如本研究上下震盪的趨勢。
- (4). 對單顆無鉛錫球的數值模擬也曾構思將 1/4 對稱的全域模型進行子模型(Sub-model)的計算，藉以代表本章採用單顆無鉛錫球的數值模擬實驗，但結果發現，子模型僅能運用在結構幾何差異不大的問題上，細分網格當然沒有問題，也可以獲得較佳的收斂解，但是從無缺陷的錫球子模型更改為具有空孔的錫球子模型(幾何形狀明顯改變)，將導致不合理的計算結果出現。故以 BEAM CONSTRAIN 約束 PCB 的變形是最合理的結果，此處最合理指的是趨近於全域模型的結果。

對於整體研究結果，除了隨機空孔造成的影响外，藉由隨機事件的產生程式

也可以直接進行樣本空間的探討，本研究在本章採用了 5 種研究案例進行統計，而實質上這 5 種案例都是存在於同一樣本空間內，故綜觀來看，具有空孔的錫球造成構裝體在加速測試下的疲勞壽命確實變異很大，我們可以從全 A 類型的空孔當成其中一組事件，在比較具有高 CTE 乘子(影響潛變應變較大的空孔)位在角落位置的疲勞壽命，其值的範圍為約 310 次至 420 次(其他文獻對晶圓層級構裝體的壽命約為 300 次[2])。當然，也存在這些含空孔錫球集中在構裝體中央位置，周邊皆為完整錫球，其可能的壽命就會比較趨近於完整的結果。

在隨機事件的產生程式關於高低 CTE 乘子出現機率的設定方面，採用類似拉丁超立方體取樣(Latin Hypercube Sampling, LHS)的概念[27]，如圖 5-54，藉由空孔類型的分類數量視為分層取樣，這也代表每一種類型都有均勻的範圍取得一組出現機率，在各層(類型)的取樣中過程中則是以均勻分布方式進行。但不同的是，所有類型的出現機率最後的總合為 1.0。而在整體錫球陣列的位置上，每個位置出現的種類則是根據含空孔錫球的比例及空孔類型出現機率為主，如同樹狀圖向下延伸的方式決定，相關隨機單一事件呈現的結果可參考如圖 5-22(程式介面)。在圖 2-9 亦是相同的概念，但更為簡單，每根螺栓位置依據指定的整體斷裂比例，進行位置上的隨機均勻分布取樣。

一些現象亦可從數值分析數據中看出，同類型含空孔錫球同樣出現在構裝體角落位置，假使疲勞壽命由該類型含空孔錫球主導，整體構裝體完整錫球的比例高者，卻出現較低的疲勞壽命次數(如表 5-3，皆為 A 類空孔)。可能原因：相同的外在能量進入到兩種構裝體中，從能量分配的角度來看，高 CTE 總數多者可能相對分配到較少能量所致。

由於本分析主要討論兩種隨機的因素，可想見此類含缺陷的評估具有的樣本空間是相當的龐大，加上數值模型是採用完整的全域分析，我們仍是藉由 5 組的分析案例進行統計上的評估，而藉由數值上的結果可歸納出幾點現象，首先，含缺陷錫球占全域錫球的百分比，對構裝體的壽命並無直接的影響(屬於間接)，而由單一含缺陷錫球在熱循環的數值實驗可確認，空孔在錫球內的位置才是影響潛變等效應變最大的關鍵，這已有相當多的文獻證明此點，但本章藉由含空孔錫球在全域的隨機位置模擬中可發現，只要影響潛變等效應變最大的含空孔錫球出現在角落或靠近外圍周邊位置，整體構裝體的疲勞壽命皆是以此類錫球為主導，即使全域完整錫球的比例再高，亦是如此的狀況產生，而造成疲勞壽命的變異性增加

的原因，則是在於此類含缺陷錫球(高 CTE 乘子的等效圓柱體)出現在角落及周邊位置的機率高低的影響。

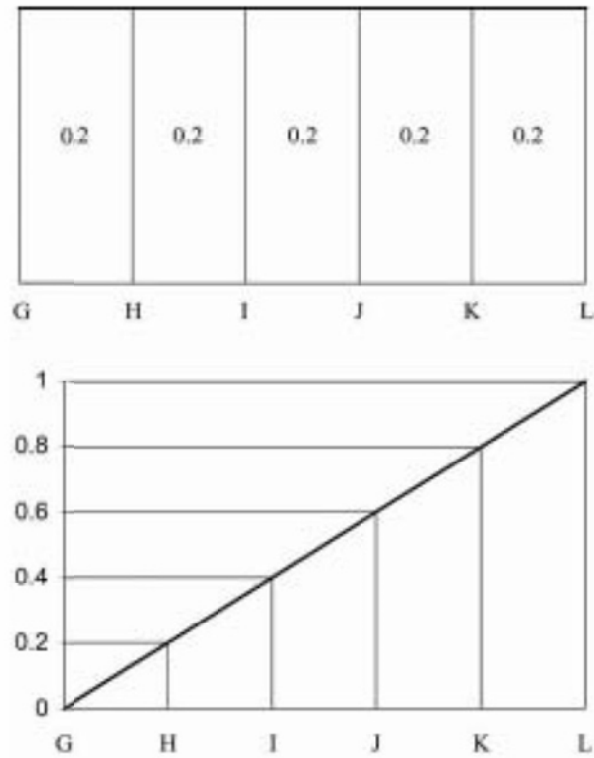

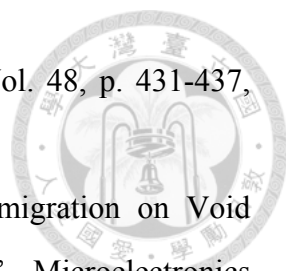


圖 5-54 均勻亂數取樣—拉丁超立方體取樣(Latin Hypercube Sampling, LHS)[27]

## 本章參考文獻

- 
- [1] J. Dukovic et al., “Through-Silicon-Via Technology for 3D Integration,” Internatioanl Memory Workshop (IMW), pp. 148-149, 2010, DOI: 10.1109/IMW.2010.5488399.
- [2] 蕭獻賦，實用 IC 封裝，臺北市：五南圖書出版股份有限公司，2015/6/1。
- [3] Y. H. Kwon, H. S. Bang, S. M. Joo, H. S. Bang, “Numerical Analysis of Thermo-Mechanical Characteristics of Solder Joint Depending on Change in Solder Junction Structure of MCP,” Microelectronics Reliability, Vol. 55, p. 442-447, 2015.
- [4] C. Lu, “Overview of Fan-Out Wafer Level Package (FO-WLP),” 9th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2014.
- [5] <<https://read01.com/LmmAoP.html>> 網站資料，扇外型電子構裝元件簡介。
- [6] <<http://appleapple.top/>> 網站資料，扇外型電子構裝元件示意圖。
- [7] 徐祥禎，電子構裝結構分析，網站電子檔資料，2009。
- [8] M. Yunus, K. Srihari, J. M. Pitarresi and A. Primavera, “Effect of Voids on the Reliability of BGA/CSP Solder Joints,” Microelectronics Reliability, Vol. 43, p. 2077-2086, 2003.
- [9] <<http://www.indium.com/blog/voids-in-solder-joints-i.php>> 網站資料，空孔類型說明。
- [10] R. F. Aspandiar, “Voids in Solder Joints,” Proceedings of the SMTAI 2006, 406-415, Chicago, IL, September 2006.
- [11] 邱建勳、何宗漢、劉旭唐、林書羽、林益生，“系統級封裝 (SiP)在 SMT 迴焊製程孔洞缺陷之研究”，工程科技與教育學刊第九卷第三期，第 312-321 頁，2012/09。
- [12] Q. Yu, T. Shibutani, D. S. Kim, Y. Kobayashi, J. Yang and M. Shiratori, “Effect of Process-Induced Voids on Isothermal Fatigue Resistance of CSP

- 
- Lead-Free Solder Joints,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, p. 431-437, 2008.
- [13] Ming-Hwa R. Jen, L. C. Liu and Y. S. Lai, “Electromigration on Void Formation of Sn3Ag1.5Cu FCBGA Solder Joints,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, p. 734-745, 2009.
- [14] K. C. Otiaba, M. I. Okereke and R.S. Bhatti, “Numerical Assessment of the Effect of Void Morphology on Thermomechanical Performance of Solder Thermal Interface Material,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 64, p. 51-63, 2014.
- [15] D. Bušek a, K. Dušek, D. Růžička, M. Plaček, P.Macha, J. Urbánek and J. Starý, “Flux Effect on Void Quantity and Size in Soldered Joints,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 60, p. 135-140, 2016.
- [16] L. Cergel, L. Wetz, B. Keser and J. White, “Chip Size Packages with Wafer-Level Ball Attach and Their Reliability,” *Proceedings of the Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM)*, p. 27-30, 2002.
- [17] H. C. Cheng, C. Y. Yu and W. H. Chen, “An Effective Thermal-Mechanical Modeling Methodology for Large-Scale Area Array Typed Packages,” *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 7, No. 1, p. 1-17, 2005.
- [18] JEDEC Solid State Technology Association, JESD22-A104C: Temperature Cycling, JESD22-A104C, 2005.
- [19] ANSYS Workbench User’s Guide 17.0, ANSYS, Inc., 2016.
- [20] S. R. Lin, W. F. Wu, Estimation of maximum axial force of anchor bolts in consideration of random bolt failures, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 131, No. 7, p.52–59, 2015.
- [21] J. Weertman, “Creep Deformation of ICE”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* Vol. 11, p.215-240, 1983.
- [22] J. H. L. Pang, T. Tan, S. K. Sitaraman. “Thermo-Mechanical Analysis of Solder Joint Fatigue and Creep in a Flip Chip on Board Package Subjected to Temperature Cycling Loading,” *Electronic Components and Technology*



- Conference, p. 878-83, 1998.
- [23] K. C. Norris and A. H. Landzberg, “Reliability of controlled collapse interconnections” , IBM Journal of Research and Development, Vol. 13, p. 266-271, 1969.
- [24] O. Salmela, “Acceleration factors for lead-free solder materials”, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 30, p. 700-707, 2007.
- [25] V. Vasudevan, X. Fanan. “Acceleration Model for Lead-Free (SAC) Solder Joint Reliability under Thermal Cycling,” Electronic Components and Technology Conference, USA, p.139-145, 2008.
- [26] Korsah, K. et al., Technical Basis for Environmental Qualification of Microprocessor-Based Safety-Related Equipment in Nuclear Power Plants, NUREG/CR-6479, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, January 1998.
- [27] 吳琮傑，重點取樣法在結構可靠度分析之應用，台灣科技大學營建系碩士論文，93年7月。

## 第六章 結論與建議



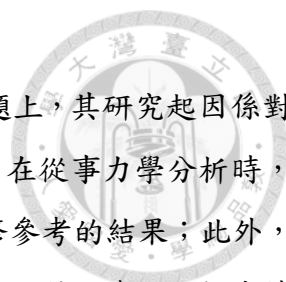
本研究探討重點在於隨機缺陷對電廠系統設備、機械結構組件與電子構裝元件所造成完整性的影響，以及如何建構出合理且有效之結構、力學分析評估模式。對於此類設備組件或元件含有隨機缺陷的問題，如何以統計方法處理具有大量且複雜樣本空間的隨機事件，我們也提出一系列解決方案。該些分析評估模式與解決方案在不確定問題的量化研究上，具有參考價值，對於後續的可靠度分析及風險評估亦奠定了基礎。此外，應用隨機缺陷概念進行結構力學評估，亦可排除保守或不保守的疑慮，等同於將此類安全問題回歸到真實面。

電廠的運轉維護到停機除役的安全問題，從傳統機械結構組件到先進的電子構裝元件必須面面俱到，但也絕非本研究可以涵蓋，而在窺探導則、規範與法源依據並非那麼周全時，我們思考以一個較新的角度試圖解決未知、不確定的問題。另外再以可靠度工程學理作為後盾，此即本研究的目的；而本研究相當程度達到一個階段性的目標。

就前瞻性而言，研究電子構裝元件的議題可不斷延伸下去，如在美國核管會數位控制儀控系統訓練教材所呈現的圖片說明中，傳統電廠主要的儀控元件，其大小如 A4 紙張之尺寸，而現今半導體技術的進展，使得單一顆晶圓層級的電子構裝元件性能可以等效於 1 萬組傳統元件，若同性能的設備維修或更換，是否有下游設備商願意重製如傳統電廠的元件，答案則顯而易見。因此，電子構裝在設計及製程在持續更新，應用層面不斷擴大，而傳統力學、可靠度學理在此間的角色，正是達成此情景的主要幕後推手之一。

### 6-1 結論

在第二章反應器壓力槽支撐裙板螺栓隨機斷裂的問題中，本研究已達成對於該不確定性的結構力學問題予以定量化評估。我們除考慮安裝階段螺栓被施加的預力條件外，也將分析模型進行合理簡化，同時運用基本力學概念，搭配數值技巧，快速且有效率的研判支撐裙板外加彎矩負荷最保守的施力方向，進而獲得含隨機斷裂環形螺栓陣列中之最大螺栓軸向力，也藉由大量樣本隨機事件進行模擬與統計，解決此不確定性問題之結構完整性評估，並完成找尋具有特定信心水準區間的分析結果。



第三章對於反應器爐心側板支撐焊道結構完整性評估的問題上，其研究起因係對美國電力研究院(EPRI)所發行 BWRVIP-38 導則不夠充足的地方，在從事力學分析時，引入隨機穿壁裂紋的概念，以便獲得更詳實、合理且可供檢測維修參考的結果；此外，採用第二章的模式，加入反應器爐心側板支撐的力學評估與探討。而對於爐心側板支撐內外兩側焊道這類環型連續體，我們證實該連續體可透過數值分析離散化方式提升分析效率。該章分析結果增強我們處理隨機缺陷結構完整性評估的經驗，亦可作為後續可靠度分析或風險評估的依據。

本論文第四章回顧電廠設備環境驗證相關規範，同時也引入半導體微處理器電子構裝元件物理失效機制的議題。在我們針對規範導則的瞭解與探討後，發現要訂定相關規範確實不易，特別是電子構裝技術不斷演進，元件材料的選用以及製程技術亦不斷改進，而電廠監控、儀控及量測設備既龐大且具有高度的複雜性，加上含半導體電子構裝元件主要在於其應用的廣泛性已遠大於電廠設備的可管理評估範圍，不光只是探討物理失效問題而已，軟體層面上的故障也是需探討的課題。在第四章最後，我們針對一個晶圓層級的電子構裝元件，討論其在加速環境數值實驗下之熱循環疲勞壽命，並且採用美國核管會出版報告所歸納的電廠環境，引用加速因子概念，評估該電子構裝元件在電廠環境下之疲勞壽命。所計算的結果可作為電廠對電子儀器設備壽命評估的參考，而本研究是假設該設備元件架設在電廠溫和環境中，亦假設了每日達到最高溫的頻率。

但回到此類元件的力學或疲勞壽命與可靠度評估等問題，卻發現相當多的文獻僅探討完好無缺的構裝體之可靠度，如文獻[1]；其他提及含缺陷構裝體的問題概以「可能造成影響」、「改善製程及焊錫料的更換」等文字帶過，而對製程缺陷所導致壽命的不確定性也僅靠經驗來描述，雖有研究以數值分析來量化佐證，卻侷限於較少引腳(錫球)的構裝元件或同一模型下單一類型的缺陷。本研究基於上述理由，結合第二、三及四章的分析經驗，進行第五章的研究。

在第五章中，缺陷代表各種不同類型空孔的總稱，而針對無鉛錫球內部不同類型空孔對電子構裝元件疲勞壽命所造成的影響，本研究運用數值實驗方式，以一個等效圓柱體配合熱膨脹係數乘子通式，可個別的評估出空孔對電子構裝元件疲勞壽命所造成的影響。如此一來，便可使各種類型隨機空孔在整體電子構裝元件的全域分析模型上呈現，該不同類型空孔的隨機出現，為本研究所引入之第一層隨機事件；而含空孔錫球佔整體



無鉛錫球之數量百分比為本研究所引入之第二層隨機事件；含缺陷錫球出現在整體構裝錫球陣列的位置則為第三層隨機事件。當然，若討論錫球內部空孔位置、大小等事件，則為第四層隨機。以上研究討論突破以往的侷限，使隨機空孔(缺陷)不確定性事件的結構完整性評估能有量化的結果。

雖有前述四層隨機事件，但第五章的分析主要聚焦於兩種隨機事件。我們先設定 5 種不同類型的空孔，如包含完整無空孔的錫球，等同於在該章中探討 6 種錫球的可能出現，此為第一隨機事件。其次，這 6 種錫球在電子構裝元件的全域分析模型各別出現的位置，又是另一種隨機事件。可想見樣本空間是相當的龐大，最後則藉由 5 組的分析案例進行統計評估，而該 5 組的分析案例屬於整體樣本空間之一群，案例之間亦可進行相互在趨勢上的比較(空孔類型差異、出現機率差異、完整百分比的差異等)。本研究亦針對該 5 組分析案例所獲得的疲勞壽命分佈進行卡方檢定，主要檢定各組案例之疲勞壽命符合常態、對數常態以及韋伯等分佈的適切性，該作法的另一層涵義代表分析模型在某種程度上的可信賴性。而加速因子的引用，同樣是期望將加速環境下的疲勞壽命次數轉換為電廠溫和環境下的疲勞壽命(使用年限)，當然我們也同樣假設了電子構裝元件每日達到最高溫的次數，故所換算出來的使用年限亦是可提供參考。

前述數值分析結果亦可從物理特性的角度進行驗證，首先，我們證實了空孔在錫球內的位置才是影響等效潛變最大的關鍵，符合許多文獻的說法，而本研究藉由含空孔錫球在全域的隨機位置模擬中發現，只要影響等效潛變最大的含空孔錫球出現在角落或靠近外圍周邊位置，整體構裝體的疲勞壽命概以該類錫球主導，即使全域完整錫球的比例再高，亦是如此狀況。而造成疲勞壽命變異性增加的原因，則受該類含缺陷錫球(高 CTE 乘子的等效圓柱體)出現在角落及周邊位置機率高低的影響；這也再次說明本論文所建構電子構裝元件的全域分析模型在某種程度上符合物理現象。

最後值得一提的是，在第五章參考文獻[8]提到，對具有含空孔錫球的可靠度研究中，空孔會導致 44% 的可靠度下降，針對此點，本研究以加速因子所評估的構裝體壽命下降約為 48%~55%，與既有文獻相符。



## 6-2 未來展望

本研究建議，對於如本研究般樣本空間龐大的工程力學問題，以能找出其可能潛在趨勢為主，同樣依據可能變化的參數進行分類取樣，藉由各類中之樣本事件來推估其整體可靠度，而也唯有提升分析模型的合理簡化及計算效率，方有可能達成期望的目標。以本研究為例，經由等效圓柱體的合理簡化並搭配熱膨脹係數乘子通式的應用於全域分析模型，採用高速 XEON 等級的 CPU 16 核計算此類問題，單一事件所花費的時間約為 22~24 小時不等，而所佔的儲存空間約為 30G 左右。故唯有再精進分析模型的效率增加隨機事件數量，便可更精確掌握含空孔缺陷電子構裝元件的疲勞壽命，或以條件機率的概念探討材料參數變異的疲勞壽命分布。

另外則是強調本研究無實體測試實驗的原因；雖然在 IEEE-323(1974 年版)有提及：不接受分析代替測試數據，除非(a)測試的組件是由於尺寸大小的限制，(b)部分提供類型測試數據支持分析假設並得出結論；本研究則是符合了(a)項的敘述條件。除此之外，即使實體測試實驗可以突破這樣的限制，但試想完成一組全域電子構裝元件含有隨機空孔的錫球，這必須花費多少的時間及金錢才能達成，故數值模擬的價值由此便可顯現出。因此，持續再往研究立體構裝的評估方面著手，先避免複雜的結構，尋找相關的實驗案例進行分析驗證，最後結合本研究的構想，探討含缺陷之立體構裝可能的失效機制及其可靠度評估。

## 本章參考文獻

- [1] C. H. Lee, K. C. Wu, K. N. Chiang, "A Novel Acceleration-factor Equation for Packaging-solder Joint Reliability Assessment at Different Thermal Cyclic Loading Rates," *Journal of Mechanics*, Vol. 33, No. 1, p.35-40, February 2017.