

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

機率破壞力學在核能電廠維護作業上之應用

服務機關：台灣電力公司 核能發電處

出國人：職 稱：十等核工師
姓 名：陳培中

出國地區：日本

出國日期：自 91 年 12 月 08 日
至 91 年 12 月 20 日

報告日期：92 年 01 月 15 日

G3/
109200241

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：機率破壞力學在核能電廠維護作業上之應用

頁數 18 含附件：有否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(02) 23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

陳培中/台灣電力公司/核能發電處/核工師/(02)23667674

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：自91年12月08日至12月20日

出國地區：日本

報告日期：92年01月15日

分類號/目

關鍵詞：核能電廠維護

內容摘要：(二百至三百字)

- 1、近年來降低核能發電的成本已成為核能發電界的共識，在確保核能發電安全及可靠性的前提下，核能界已引進機率破壞力學應用在核能電廠維護作業上，以達到減少設備檢測次數、縮短大修工期及降低維護成本之目的。
- 2、機率破壞力學(Probabilistic Fracture Mechanics, PFM)理論，可用來評估反應器內部組件、蒸汽產生器管束之劣化情形。其特殊之處，在於以機率分析強化已龜裂爐心組件及蒸汽產生器管束之結構完整性評估，並與傳統命定式(Deterministic)結構完整性之評估結果相互比較印證，已確定評估程序中，因各種非破壞檢測(如：In-Vessel Visual Inspection, IVVI)、材料試驗數據、不當加工程序、變動負荷……等，所造成之影響。並利用統計方法，建立各種隨機機率破壞力學模式，以為評估基礎，供相關作業參考。

目 錄

	<u>頁數</u>
一、出國事由.....	3
二、出國行程.....	3
三、實習內容.....	3
(一)、機率破壞力學的發展.....	3
(二)、可靠度與機率函數.....	5
(三)、破壞力學.....	7
1、破壞力學簡介.....	8
2、破壞準則.....	9
3、疲勞裂縫成長模式.....	10
4、非破壞檢測.....	10
(四)、蒸汽產生器軸向裂縫管束之破壞力學分析.....	13
(五)、蒸汽產生器應力腐蝕起始行為.....	15
(六)、蒸汽產生器管束裂縫之彈塑性破壞力學分析.....	16
四、心得與建議.....	17

一、出國事由

- 1、近年來降低核能發電的成本已成為核能發電界的共識，在確保核能發電安全及可靠性的前提下，核能界已引進機率破壞力學應用在核能電廠維護作業上，以達到減少設備檢測次數、縮短大修工期及降低維護成本之目的。
- 2、蒸汽產生器為壓水式核電廠極為重要之設備，蒸汽產生器運轉後之維護適當與否，將影響蒸汽產生器壽命極鉅進而影響電廠營運。本公司核三廠蒸汽產生器內之熱交換管，目前檢查結果尚稱良好，而國外電廠蒸汽產生器曾發生應力腐蝕（SCC）的問題，若能及早利用機率破壞力學的技術，預估蒸汽產生器發生應力腐蝕的機率及時間，將可大幅減少蒸汽產生器檢測次數及範圍，以期達到縮短大修工期之目的。有關機率破壞力學應用在蒸汽產生器方面資料，本公司亟為欠缺，而日本三菱公司為日本壓水式核電廠的主要製造廠商，此方面經驗豐富，故亟須派員赴該公司了解此技術之發展及應用。

二、出國行程

91年 12 月 08 日 往程（台北→東京）

91年 12月 08日～12月 19日 實習機率破壞力學在核能電廠維護作業上之應用

91年 12 月 20 日 返程（東京→台北）

三、實習內容

（一）、機率破壞力學的發展

由於科技的進步、法規上的考量，以及有關結構設計與經濟的因素，元件可靠度預測的重要性以及它對決策

的影響變得越來越顯著，對於核能電廠設備的許多問題，如果使用傳統的分析方法，如決定論分析，往往不能反應實際狀況，因而真正解決問題。因為如果為了安全理由而悲觀地假設所有最壞的可能會同時發生，結果反而造成過於保守導致材料的浪費。為了改善上述缺失，美國在 1950 年代採用機率模式來取代決定論分析，進而演變成機率破壞力學之發展。

機率破壞力學最早是應用於航太工業上，美國空軍及飛機工業協會都曾投入大量人力和財力在這方面的研究上，無論在設計、製造及結構分析上都有顯著的成果，至於應用在核能電廠之結構分析則是開始於 1980 年代左右，尤其在管線與壓力容器之應用較為常見。

目前機率破壞力學之研究大多依循過去決定論破壞力學 (Deterministic Fracture MECHANICS, DFM) 之分析程序，只是在考慮輸入變數時，取其中一個或多個隨機變數。以下則是一些習慣上我們常考慮為隨機之輸入變數：

- 1、 初始裂縫尺寸 (Initial Crack Size) 之深度、長度或位置。
- 2、 裂縫檢測機率 (Crack Detection Probability)。
也就是受到裂縫尺寸影響之檢測機率和裂縫大小可能發生之機率。
- 3、 材料性質 (Material Properties)。
如次臨界裂縫成長特性、破壞韌性和拉伸性質。
- 4、 運轉條件 (Service Conditions)。
如應力程度、週期速率、溫度和環境等。

但需注意的是，並不是所有的參數在每個應用下都必須考慮成隨機，只有那些具有不確定性或對壽命和可靠度之計算有很大影響的變數才須假設為隨機。因此在

任何給定時間之破壞機率，便可結合傳統的破壞力學以及適當的統計方法加以求出，如此就可以改進決定論分析法過於保守之缺點。

(二)、可靠度與機率函數

在今日高科技及精密工業時代，我們不但要求系統的性能與日俱增，同時也希望生產的成本能大幅降低，跟著就會有一個希望故障率最小化的要求，因此可靠度 (Reliability) 的觀念便因此而受到重視。尤其再加上產品的競爭、故障的損失、安全的考量、新材料的開發、系統的複雜化等等問題，使得產品的開發充滿了風險，所以簡單的說，可靠度工程的發展也就是為了控制這些風險的事項。

那麼究竟甚麼是「可靠度」呢？就廣義來說，可靠度與可信賴性、操作的成功、沒有停機或故障等，有密切的關係。因此，可靠度的定義是指組件、裝置、設備或系統在一特定時間範圍及規定條例情況下，能順利完成所要求任務的機率。一般而言，可靠度愈高，代表系統正常運作的機率愈高；而可靠度愈低，則象徵著系統發生故障或破壞的機率愈大。

所以，在評估系統可靠度之前，一定要先確定系統的破壞模式，也就是在何種情況下，系統將產生破壞而無法發揮正常功能。一旦系統破壞模式確定了，我們就可以經由可靠度理論的分析來得知某系統在給定條件下的可靠度。

既然可靠度的定義，可以表示為系統經過一段特定時間仍然能倖存的機率，那麼若以隨機變數 T 來表示系統故障的時間，則其破壞的機率密度函數 (Probability Density Function, P.D.F.) $f(t)$ 便可以表示為故障發生在 $t + \Delta t$ 之間的機率：

$$f(t) \Delta t = P \{ t \leq T \leq t + \Delta t \}$$

因此，系統在時間小於或等於 t 之前發生破壞的機率 $F(t)$ 可表示為：

$$\begin{aligned} F(t) &= P(T \leq t) && t \geq 0 \\ &= \int_0^t f(\tau) d\tau \end{aligned}$$

其中， $F(t)$ 又稱為累積分佈函數
(Cumulative Distribution Function, C.D.F.)

因為可靠度代表系統在操作時間 t 內發生故障而仍能正常運轉的機率，所以我們可以將可靠度函數 (Reliability Function) $R(t)$ 定義為：

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = 1 - F(t) \\ &= 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau \\ &= \int_0^\infty f(\tau) d\tau \end{aligned}$$

由於可見，只要知道隨機變數 T 的機率密度函數或累積分佈函數，就可以求出可靠度函數之值。同理，如果知道可靠度函數，也可以反求機率密度函數或累積分佈函數之值。

如此，便可輕易算出在時間 t_1 至 t_2 之間可能發生破壞的機率：

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt &= \int_{t_1}^\infty f(t) dt - \int_{t_2}^\infty f(t) dt \\ &= R(t_1) - R(t_2) \end{aligned}$$

除了上述之可靠度與破壞機率之外，破壞率 (Failure Rate) 與風險函數 (Hazard Function) 也是令一種可靠度量測指標。其中，破壞率為系統在 t_1 時間內尚未破壞，但可能會在 $[t_1, t_2]$ 之間單位時間內發生破壞的機率，定義為：

$$\text{Failure Rate} = [R(t_1) - R(t_2)] / (t_1 - t_2) R(t_1)$$

然而當區間 $[t_1, t_2]$ 趨近於零時，上述之破壞率即稱之為風險函數 (Hazard Function) $h(t)$ ，故風險函數事實上即是系統在瞬間可能發生之破壞率，也就是系統在當時的情況下，下一瞬間可能會發生破壞的機率。定義為：

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [R(t) - R(t + \Delta t)] / \Delta t R(t) \\ &= 1/R(t) \cdot [R(t) / dt] \\ &= f(t) / R(t) \end{aligned}$$

(三)、破壞力學

千百年來，工程設計中材料應用一直困擾著人類，然而隨著金屬加工技術的改進，金屬在結構件上的應用也日益增加，但經驗顯示這些材料所構成之結構件並非件件令人滿意，還常常發生一些意想不到的損壞，如焊接的油管無端的破裂，造成原油大量外洩及許多生命和財產的損失等等。這些都是因為在早期的機械設計上，總是假設機械元件之材料為完美且毫無缺陷存在，然後以降伏應力 (Yield Stress)、最大負荷 (Ultimate Load)、疲勞壽命 (Fatigue Life)、潛變 (Creep) 及斷裂時間等做為破壞現象之考慮參數，再計算出該組件所能承受之應力與使用壽命，最後在加上安全係數。後來人們漸漸地發現，原來已存在在材料中的一些瑕

疵可能會導致裂縫產生及斷裂。因此在設計一結構件時，除了安全係數考量外，其實尚有許多問題須要解決。尤其是近代核能工業與航太工業的發展，除了高度安全的考量之外，還必須兼顧材料的輕量化，而傳統以安全係數為考量之設計理念，已無法全然顧慮到某些特殊結構功能上的各項要求，於是造成了「破壞力學」的發展。

1、 破壞力學簡介

所謂「破壞力學」，其主要精神在於捨棄傳統安全係數之呆板考量，取而代之的是：假設結構件在初始使用時即存在有微小瑕疵或裂縫，同時並考慮結構件在使用壽命之內可能遭遇到各種的環境影響，另外再以傳統力學、疲勞學等學理來分析結構件的損壞情形、殘餘強度、剩餘壽命、安全性與可靠度等。因為任何材料之中，多多少少都存在著一些缺陷，如雜質、氣泡、空洞、外加原子等等，這些缺陷常會嚴重阻礙材料中差排 (Dislocation) 的移動，進而影響材料的機械性質甚鉅，這往往不單是加上一安全係數就能彌補的。

於是工業界在考慮結構件時，往往假設結構件在最初既存在有裂縫，並在荷重與環境侵蝕之雙重作用下，此裂縫將隨時間而成長，裂縫愈長，其延伸的應力集中也愈高，這表示裂縫延伸速率會隨時間而增加。由於裂縫的存在，結構件強度將低於原設計強度，殘留的強度也將隨裂縫的增大而漸漸降低。因此經過一段時間後，殘留的強度將低到使結構件，在使用時不足以承受突然的高荷重，此時的結構件即可能發生破壞。假如沒有突然而至的高荷重，裂縫也將繼續成長，直到殘留的強度低到連正常工作負荷都無法支撐的地步。因此設計者必須預期這種破壞發生的可能性，也必須接受結構件可能毀壞的風險，這也意味著此一結構件將只能有有限的使用壽命。當然，在所有的使用壽命內，破壞發生之可能機率，必須是人們可以接受的限度內。為了達到如此的安全性，且需能預測裂縫的成長與殘留強度降低的速度有多快，而做這些預測及發展出預測

的方法即是破壞力學之主要內容。

2、 破壞準則 (Failure Criterion)

應用破壞力學來探討含有裂縫缺陷之構件，在外力作用下的破壞情形時，首先須假設所分析之材料具有均質性 (Homogeneous) 與等方向性 (Isotropic)，由 Irwin 導出裂縫尖端附近的應力場為：

$$\sigma_{ij} = (K / \sqrt{2\pi r}) f_{ij}(\theta) + \dots$$

其中 K 為應力強度因子 (Stress Intensity Factor)，是幾何形狀及所受負荷之函數。

一般考慮的裂縫體受力模式有三種：

Mode I：張開形 (Opening Mode)

Mode II：滑移形 (Sliding Mode)

Mode III：撕開型 (Tearing Mode)

由理論及實驗指出，三種模式之中以張開形裂縫最易產生且較其他二種型式危險，故通常一般都僅考慮張開形裂縫，此型式的應力強度因子 K_I 可寫為：

$$K_I = \beta(g) \sigma \sqrt{\pi a}$$

其中， $\beta(g)$ ：為幾何形狀因子 (Geometry Factor)。

σ ：為應力 (Stress)。

a ：為裂縫尺寸。

接著考慮在小範圍降服強度 (Small Scale Yielding) 的條件下，應力強度因子會有一個臨界值 (Critical Value) K_{Ic} ，當裂縫成長使得應力強度因子達到此一臨界值時，材料即認定為破壞 (Failure)，且可由實驗證明它與環境、溫度和板厚等相關因素有關。故 Mode I 之破壞準則可寫成

$$K_I \geq K_{Ic}$$

3、疲勞裂縫成長模式

由於傳統金屬疲勞之觀點而言，假設欲分析之結構件有初始裂縫存在，因此當反覆應力（Reversed Stress）施加於結構件時，會導致裂縫成長（Crack Growth），由 Paris Law 得知，裂縫成長率（Crack Growth Rate, CGR）為：

$$d a / d N = C_0 (\Delta K)^m$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

$$= \beta (g) \sigma \sqrt{\pi a}$$

C_0 、 m ：為材料常數，可由實驗得知。

ΔK ：為應力強度範圍（Stress Intensity Range）。

N ：為應力反覆施加次數（Cycle）。

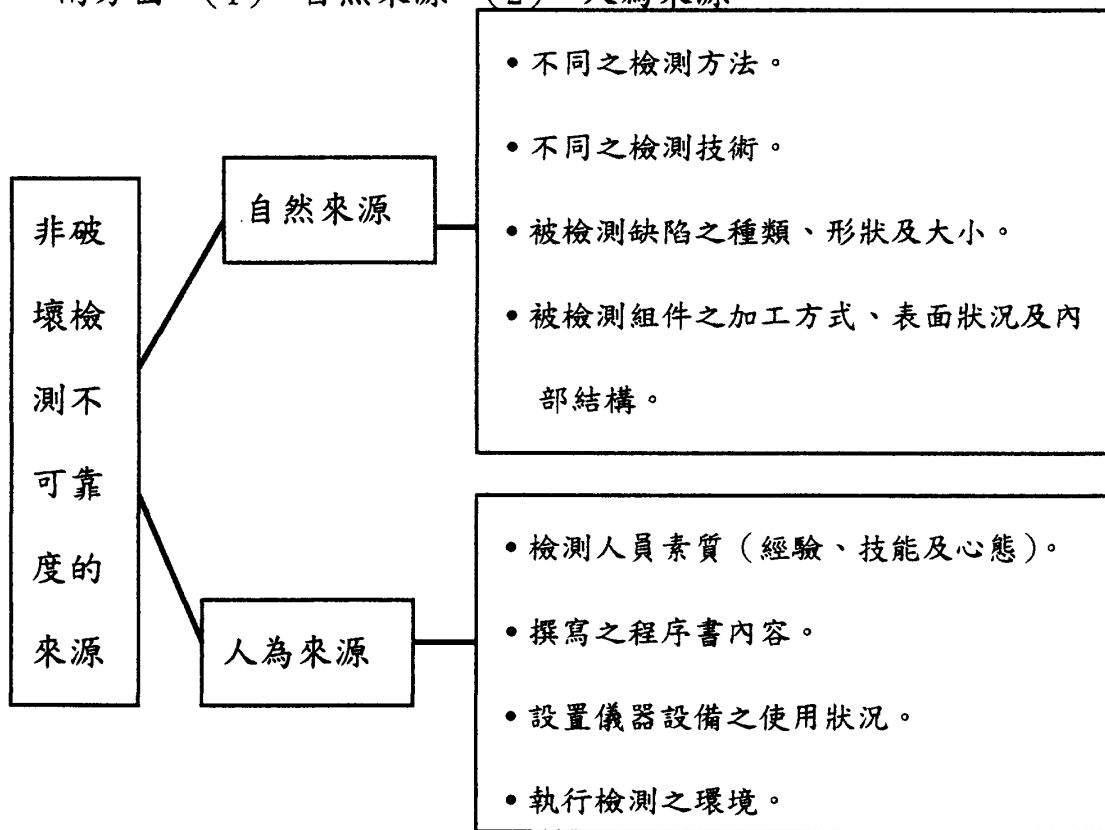
由於一般只考慮 Mode I 之情形，故於此僅考慮 ΔK 所造成裂縫延伸的部分，且由前公式可知，裂縫會隨著運轉時間增加而愈長愈大，再由破壞準則之觀念，即可判斷各時期之結構件是否會因裂縫成長而破壞。

4、非破壞檢測（NON -Destructive Testing，NDT）

核能發電運轉安全性的考量，是超越其他一切事務，是核能電廠最重要的考量，而判斷核能電廠內攸關安全運轉之各世組件結構是否具完整性，則有賴於檢測，其中非破壞檢測更在這方面扮演著極重要的角色。在上述「破壞力學」的理念

之下，一般可以接受一瑕疵或裂縫的存在於結構件的事實，但是也必須時時監視此瑕疵或裂縫的成長情形，並對其做適當之控制、修補或零組件之更換。此外，還須注意到結構件其他地方是否也有新的裂縫形成、成長，而影響結構件的安全。

一般而言，結構件內裂縫的大小，總被希望控制在某一臨界大小之內，並要避免因裂縫過大，導致結構件之脆性破裂（Brittle Fracture）而造成重大災害。為了達到以上的要求，定時或不定時對使用中的結構件進行非破壞檢測，便有其實際上的需要。非破壞檢測之目的，在於應用各種檢測方法與技術去尋找結構件內所可能存在的最小瑕疵或裂縫，然而非破壞檢測本身，卻存在許多不確定性（Uncertainty）與模糊性（Fuzziness）。這些不確定性與模糊性的來源可分為兩方面：(1)、自然來源。(2)、人為來源。



就自然來源而言，所包括的方法、技術、缺陷、組件皆具有

其固有之不可靠度 (Inherent Unreliability)，如：

檢測較厚之組件：超音波方法之可靠度，將高於放射線照像 (RT) 的方法。

檢測較薄之組件：放射線照像方法之可靠度，將高於超音波方法。

檢測重金屬組件 (或纖維玻璃)：中子照像方法之可靠度，則高於放射線照像 (RT) 的方法。

檢測一般電子零件：放射線照像 (RT) 方法之可靠度，則高於中子照像方法。

組件所含同樣大小之缺陷，無方向性者 (如氣孔、夾雜物等) 之可靠度較高於有方向性者 (如裂縫、融合不良等)。

就人為來源而言，所包括的人員、程序書、設備、環境皆有其變動之不可靠度，如：

檢測人員素質：是否具有優良技能、敬業態度、研判經驗豐富者，其所產生之可靠度高。

儀器設備：功能正常，定期校準之儀器設備，其所產生之可靠度高。

工作環境：舒適環境下進行檢測工作，其所產生之可靠度也較高。

由以上所提之各項因素都可更加深了非破壞檢測之「檢測不確定性」(Inspection Uncertainty)。因此，應用機率與統計的方法來評估檢測系統之檢測能力，似乎是一項合理且可行的方式之一，於是有人提出了「檢測機率(曲線)」(Probability of Detection, POD)，以及錯誤警訊機率 (Probability of False Alarm, POFA) 等觀念，嘗試以機率與統計的方法來評估非破壞檢測系統之檢測能力。

為了使分析不致於太複雜，一般通常假設由非破壞檢測所得到的裂縫大小，就是真實裂縫的大小。若 E1 事件表示真實裂縫的大小 A，落於 a 與 a + da 之間，E2 事件表示裂縫被非破壞檢測偵測到，則藉由貝氏定理 (Bayes Theorem)：

$$P(E1/E2) = P(E2/E1) \cdot P(E1) / P(E2)$$

可得到

$$\begin{aligned} & P(a < A < a + da / \text{creak detected}) \\ &= \frac{P(\text{creak detected} / a < A < a + da) \cdot P(a < A < a + da)}{P(\text{creak detected})} \end{aligned}$$

進一步的簡化，可得到：

$$f(a / \text{No Repair on Crack}) = k \cdot P(\text{No Repair on Crack} / A=a) \cdot f_0(a)$$

亦即：

$$f_2(a) = k \cdot L'(a) \cdot f_0(a)$$

其中， $f_2(a)$ 為經過修補後裂縫大小之機率密度函數。

$L'(a)$ 表示大小為 a ，但沒有被修補之機率。

因此於完全修補 (Complete Repair) 之情形下，

$$L'(a) = 1 - L(a)$$

(四)、蒸汽產生器軸向裂縫管束之破壞力學分析

當非破壞檢測發現蒸汽產生器管束已有應力腐蝕龜裂存在時，此根管子是否仍可繼續運轉，還是必須作塞管或是執行焊接套管修護的工作？在 ASME 規範中已有明確規定：當裂縫深度小於 40% 的管壁厚度時，管件可允許繼續運轉。這個規定的訂定，是根據早期類似 wastage 大體積式的缺陷且管壁均勻薄化現象作為依據，並考慮適量安全餘裕下以 plastic load limit 分析法計算所得。然而根據目前我們所關注的二次側應力腐蝕龜裂現象，是屬於局部的缺陷，因此，此規範被認為是太保守且沒有彈性，故

使人常有發展另一個替代的規範的想法。然而在 ASME 規範中也曾提及替代的臨時標準是被允許的，只要管制單位接受其分析的方法、應用模式以及數據即可。

NRC Regulatory Guide 1.121 即提供建立替代的臨時標準的導則：

- (1) 分析和實驗確認的臨界裂縫穩定尺寸。
- (2) 缺陷對此檢測到下次檢測時的成長率。
- (3) 能檢測出臨界尺寸缺陷的非破壞檢測能力。
- (4) 能精確量測出臨界尺寸缺陷的方法。

依據此導則和 ASME Section III 的邏輯概念，EPRI 也分別於 1993 & 1995 年 issue 通告：有關替代的臨時標準的導則的說明。並且在實際的案例上，也曾應用在美國 Oregon 州 Portland 市附近的 Trojan 核能電廠，其藉著 Bobbin Coil 渦電流檢測法量測出，二次側應力腐蝕龜裂在支撐板 (Tube Support Plate) 的電壓值，作為新的導則，以減少面臨可能被大量要求塞管和修護的動作。其原理即根據裂縫尺寸現況的精確值，並考慮運轉時間、裂縫成長率、非破壞檢測的不確定值 (Uncertainty)，最後並比較臨界的裂縫尺寸，以執行管束結構完整性評估。

以往關於此劣化缺陷之安全評估，大都是建立於線彈性力學之分析基礎上，而此分析基礎是，對於管束裂縫不太深且電廠正常運轉狀況下是可接受的。然而，電廠並非都是正常運轉，當有意外狀況產生時，則可能導致管束結構承受之壓力負載升高，此時，蒸汽產生器管束裂縫結構可能承受較高之負載應力，而在局部甚至整體結構上，發生降伏或塑性變形之情形，此時，線彈性破壞力學之分析假設將不在成立。然而，對此裂縫結構之安全分析，則需要利用彈塑性力學做進一步的分析。除此之外，以往核能法規對於核能結構安全之規範，大都是基於線彈性分析，或極限分析的基礎上，對於電腦計算分析能力還不成熟的時期，此線彈性分析或極限分析之假設，可說是相對保守及安全的，隨著電腦計算分析能力之快速發展，以往採用線彈性分析或極限分析的假設，現今看來似乎過於保守。

在彈塑性分析假設下，材料性質為非線性，故在結構彈

塑性分析時，需要有完整的應力應變曲線，如此才可以正確模擬結構受力後之變形，及應力分布狀況。一般可藉著材料之拉伸試驗及其他相關試驗，求得材料應力應變曲線，再利用有限元素法建立分析模型，此模型之邊界條件皆為對稱條件，而負載方面，則是以施加於管束內表面內壓力為負載。由分析結果可知：裂縫尖端 J 積分之值，隨著裂縫之增長量增加而增加，其中又以在裂縫形狀比最大之情況下，增加最快。其增加之形式，類似呈指數形式增加，當其裂縫增加到一程度時，裂縫成長之機率增大許多。

(五)、蒸汽產生器應力腐蝕起始行為

西屋 Mode F 型之蒸汽產生器，其 U 型管束之材質為英高鎳 600TT (Thermal Treatment) 或英高鎳 690 合金，由實驗是測試的結果及以往世界各國之運轉經驗顯示，英高鎳 600TT，此種材質雖富延展性並耐高壓，但在高溫的工作環境中，仍有可能會造應力腐蝕龜裂 (SCC)，等各種劣化問題。一般蒸汽產生器管束和防震棒 (Anti-vibration Bar, AVB) 之間的震磨 (Fretting) 現象，會隨著蒸汽產生器使用年限的增加，管束劣化現象之情況會趨於飽和。據統計數據顯示：蒸汽產生器管束和防震棒之間的震磨 (Fretting) 現象，所造成之塞管，會在電廠運轉的第七、第八運轉週期達到飽和或最高點，然後即有減少之現象]。因此此問題之嚴重性，比較可以預測，但應力腐蝕龜裂的劣化問題，一旦發生，則會大量的應力腐蝕龜裂產生，其所造成之殺傷力之大，難以想像，故不可不事先加以防範。

Mode F 型之蒸汽產生器最可能發生應力腐蝕龜裂之部位，為管束外表面和管板、支撐板相交接處，以及表面堆積污泥形成縫隙 (Crevice) 的地方。主要是因為：此縫隙中之化學物質的濃縮環境和管束的材質特性，加上殘留應力及負荷應力的相互作用，所以形成二次側應力腐蝕龜裂。

經實驗結果顯示：蒸汽產生器 U 型管束之材質為英高鎳

600TT，其在越嚴苛的腐蝕環境之中，沿晶侵蝕之現象愈明顯，發生之時間愈短。

(六)、蒸汽產生器管束裂縫之彈塑性破壞力學分析

以破壞力學觀點而言，對於管束在表面含軸向裂縫分析上，造成裂縫尖端 K 或 J 值增大的主要因素，在於管束內壓力的大小。若以蒸汽產生器內部管束在一次側及二次側壓力負載條件分析結果，當可能產生之最大內壓負載，作用在不同的裂縫深度及長度分析模型時，破壞分析之結果，則介於彈性及彈塑性分析模式之間。

在線彈性分析假設下，有限元素分析模式僅需楊氏係數及松柏比兩種材料機械性質。然而，在彈塑性分析假設下，因為材料性質的非線性，故在做結構彈塑性分析時，就需要有完整之應力應變曲線，如此方可正確模擬結構件受力後之變形，即應力分布狀況。

針對蒸汽產生器內部管束之外表面半穿透性裂縫，以線彈簧元素及三維實體元素，進行彈塑性破壞力學分析，另外再考慮裂縫本身之幾何形狀，所得以下幾點結論：

- 1、針對裂縫本身之幾何形狀分析，裂縫面積之大小與 J 積分值有直接的關係，且裂縫面積愈大，相對 J 積分值也愈大。
- 2、線彈簧元素分析結果，其 J 積分值略大於三維實體元素之 J 積分值。
- 3、考慮裂縫之幾何形狀，在不同裂縫長度及深度時，其 J 積分值皆保持一定的差異性，且其差異的大小與裂縫幾何形狀有直接的關係。
- 4、在不同裂縫長度及深度，其長度/深度比愈小，其對線彈簧元素及三維實體元素分析結果 J 積分值，差值愈大。

由分析結果可知，不管是線彈簧元素或三維實體元素所作之模型分析，其在裂縫尖端固定點之 J 積分值，會隨

裂縫面積變大而增加。

另外經由實驗分析結果比較得出，在不同之裂縫形狀參數比，其比值越小，所得之 J 積分誤差值會有偏大之趨勢。最後，不論採何種方式之模型，蒸汽產生器其內部發生應力腐蝕龜裂之可能性，如果蒸汽產生器的基礎資料完備，是可藉著機率破壞力學之方式，預估其發生應力腐蝕龜裂之機率。

四、心得與建議

- 1、目前機率破壞力學的理论基礎可稱完備，而實際應用於工業界，最早是應用於航太工業上，在核能電廠之結構分析應用則是開始於 1980 年代，因應用在核能電廠設備上之時間及案例並不太多，故其在核能工業上的發展，仍有廣大的空間。
- 2、機率破壞力學若要成功地應用於核能電廠設備上，則需有廣大及完備的資料庫 (Data Base)，然資料庫的建立，除靠電廠本身所建立之資料庫外，亦需國外同型機組的資料庫來相互應證比對，則所得的結果方能準確無誤。
- 3、應用機率破壞力學於核能電廠設備上時，會利用到許多有關設備所用之材料性質及應力計算書等資料，此資料皆須建立於設備資料庫中，然這些資料一般皆為設計製造廠家之商業機密，取得不易，若無法取得這些資料，則所得出之結果會大打折扣。
- 4、本公司核三廠蒸汽產生器為西屋製造 Mode F 型，依日本三菱公司之實際運轉經驗，Mode F 型之蒸汽產生器發生應力腐蝕龜裂之機率，並不很大。以機率破壞力學的分析觀點看來，只要有足夠蒸汽產生器的材料性質、應力資料及相關的維護資料，其發生應力腐蝕龜裂之機

率，是可以計算預估的。但三菱公司認為：只要確實做好蒸汽產生器應做的維護工作，Mode F 型之蒸汽產生器發生應力腐蝕龜裂的機率，應該不大。