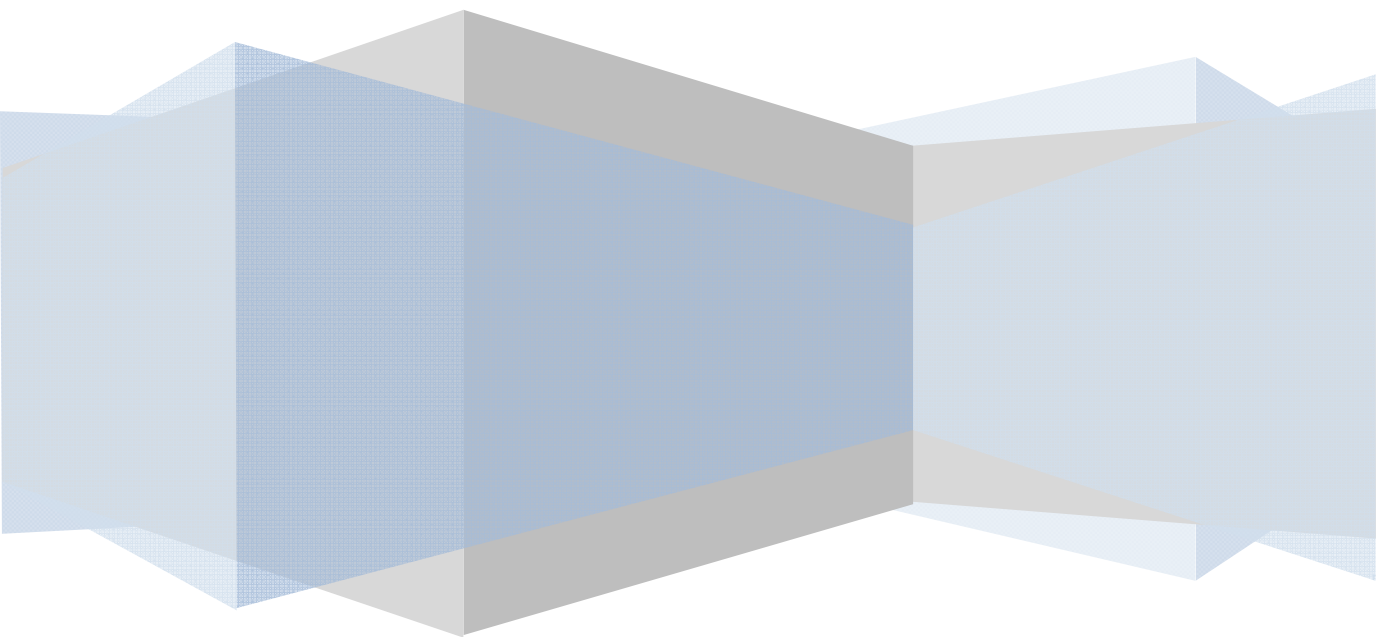


核能研究所

核一廠爐心側板穩定器 上部支撐件應力及收斂 性評估

吳思穎、康龍全



核一廠爐心側板穩定器上部支撐件應力及收斂性評估

吳思穎、康龍全
核能研究所

摘要

爐心側板穩定器為沸水式反應器(BWR)爐心側板焊道龜裂時之修復組件，其主要功能為確保爐心側板的結構完整性。2006年2月美國 Hatch 核能電廠一號機大修期間發現爐心側板穩定器上部支撐件(Upper Support)共有三處裂紋。依美國電力研究所(EPRI)之初步檢驗結果研判，裂縫產生之肇因為晶間應力腐蝕龜裂(IGSCC)。

雖然核一廠的爐心側板穩定器尚未發現任何龜裂，台電公司與核研所都曾針對該組件進行應力分析，以研判其發生晶間應力腐蝕龜裂之潛在可能。由於該組件結構複雜，又須考慮高度非線性的接觸力學效應，簡易的分析可能有收斂性的疑慮，因此本研究將針對裂縫可能發生之位置進行應力收斂性評估，仔細測試有限元素模型的網格切割，以探討數值分析之收斂性，並計算該組件之正確應力場。

關鍵字：穩定器上部支撐件、接觸力學分析、收斂性

ABSTRACT

Core-Shroud Stabilizer has been installed to strengthen the structure integrity of the aging core shrouds on which cracks were found on the horizontal welds. On an enhanced visual inspection of the stabilizer in Feb. 2006, three cracks were found on the stabilizer's upper support component in HATCH-1 Nuclear Power Plant in the United States. The root cause was identified to be inter-granular stress corrosion cracking (IGSCC) of alloy X-750.

Though no crack has been found on the shroud stabilizer in ChinShan Nuclear Power Plant, studies have been conducted to identify the possibility of cracking of this important component. Because this structure is complicated, and it must consider the non-linear contact effect, there may be doubt of convergence property. In this study, we calculate the stress field of the upper support component of the stabilizer and discuss the convergence property further. Detailed 3D finite element analyses with the consideration of contact condition between metals are simulated using ABAQUS program.

Keywords: stabilizer upper support, contact analysis, convergence

一、緒論

「爐心側板焊道龜裂」是沸水式反應器(BWR)共通的問題，核一廠一、二號機及核二廠二號機在過去的大修檢測中皆在周向水平焊道位置發現裂紋。核一廠一、二號機已在1996年大修時以繫桿式之爐心側板穩定器(stabilizer)在垂直方向鎖緊，以防止水平方向裂紋繼續惡化；核二廠二號機經製造廠家 GE 公司與台電依 ASME 法規要求進行嚴謹之安全評估，判定此細微裂紋尚不需修理，可以繼續安全運轉。

美國 Hatch 核能電廠一號機爐心側板穩定器於1994年安裝，為 BWR 爐心側板焊道裂紋首件修復案例。2006年2月 Hatch 核能電廠一號機於大修期間，以加強目視檢測方法(Enhanced Visual Inspection, EVT-1)進行爐心側板穩定器完整性檢測時，發現部分上部支撐件(Upper Support)有裂紋產生，該裂紋均起始於內彎角，並往外彎角延伸，如圖1所示。依美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)之初步檢驗結果研判[1]，此一事件發生的肇因是因為爐心側板穩定器上部支撐件合金材質之晶間應力腐蝕所致。

爐心側板穩定器之裂紋可能造成在事故情況下，該穩定器無法維持爐心側板結構之完整，進而影響反應爐維持爐心冷卻之能力，造成更大的安全危害。雖然核一廠在例行檢測中

並未在爐心側板穩定器與繫棒發現裂紋，但由於核一廠一、二號機採用與美國 Hatch 電廠同型的爐心側板穩定器(僅在穩定器彎角處有降低應力集中的改善設計，如圖 2 所示，在內彎角處設置一直徑 0.5"之內圓孔，以降低應力集中現象)，為確保核一廠爐心側板穩定器之設計功能，本研究針對此結構進行安全分析，計算穩定器上部支撐件受力後之最大主應力(principal stress)值，並判斷該結構之安全性。研究過程中發現裂紋發生處之最大主應力值收斂性不佳，在嚴謹的數值分析觀點下，此分析尚有精進的空間，尤其是在組件破壞力學分析中，局部應力是判斷裂紋起始的關鍵。故將更深入探討收斂性不佳的原因，針對是否因為網格分割仍然不夠細緻、或是接觸模擬方式不夠正確、亦或其他不可知的原因做更深入之研究。

本報告將針對核一廠一、二號機之爐心側板穩定器上部支撐件進行詳細應力分析及收斂性討論，利用 ABAQUS 有限元素軟體建立完整之穩定器上部支撐件的有限元素模型，分析支撐件受拉情況下之應力分佈，並尋找收斂性不佳之原因，特別針對美國 Hatch 核能電廠中穩定器裂紋發生的位置，探討核一廠一、二號機之穩定器相同位置之應力分佈並且加以判斷其安全性。

二、核一廠爐心側板之永久性修補說明

2.1 爐心側板功能概述與修補方式

爐心側板為圓筒型結構，共有 H1~H7 等七個水平焊道，參見圖 3。爐心側板原設計功能為提供爐心頂部導架 (top guide)、爐心底板 (core support plate)、側板蓋 (shroud head) 垂直及水平方向支撐，區隔爐心及降流區 (downcomer) 之水流，並於冷卻水流失事故發生時維持 2/3 爐心水位，以確保燃料冷卻功能。

爐心側板水平焊道發現龜裂現象時，其永久性修補方法為在壓力槽與爐心側板之間加裝四組「穩定器」(stabilizer)，取代爐心側板 H1~H7 焊道在結構上所扮演的角色，如此，即使焊道 H1~H7 因 360 度裂穿而失去功能時，爐心側板依然能有效支撐爐心頂部導架、爐心底板、側板蓋，以維持其原有之安全功能，並能滿足核一廠最終安全分析報告 (FSAR) 中對爐心側板之原有設計需求，其設計壽命能包括核一廠一、二號機之剩餘壽命 (包括可能之壽命延長)。「穩定器」設計採用無焊接且為可拆式組件，必要時可全部自安裝位置拆除或更新。「穩定器」是由多個組件組合而成，如圖 4 所示，本研究將針對穩定器上部支撐件進行分析，如圖 5 所示。

2.2 爐心側板穩定器上部支撐件材質說明

爐心側板穩定器上部支撐件之材質為 X-750 英高鎳合金，此合金硬化材料機械性質優越，因其高溫強度與延展性俱佳，故應用於壓水式 (PWR)，沸水式 (BWR) 反應器之高應力、高溫度的水環境中。主要作為爐心組件及結構材料，如螺栓 (Bolt)、螺柱 (Pin)、壓簧 (Spring)、橫樑 (Beam) 及其他需要高強度，不易變形和抗腐蝕等組件。然而經過電廠多年的實際運轉經驗顯示，該合金會產生沿晶應力腐蝕 (IGSCC)、疲勞 (Fatigue)，腐蝕疲勞 (Corrosion Fatigue) 等問題。本研究即為該材料晶間應力腐蝕之案例。

三、核一廠爐心側板穩定器上部支撐件應力分析模型

爐心側板修補工程係以穩定器取代焊道 H1~H7 之功能。修補方法是在側板蓋法蘭板上開槽，將穩定器上部支撐件鉤於此槽，另外在側板支撐板上開孔，以穩定器下部夾頭扣住，接著以拉桿連接支撐件及夾頭，參考圖 4。施工時不在壓力槽上進行任何形式之焊接工作，而以螺栓方式取代，當穩定器鎖緊時，由於穩定器下部夾頭已扣住無法移動，因此上部支撐件將緊鉤爐心側板蓋，且力量將藉由拉桿傳遞至穩定器上部支撐件下端。

本研究已於 96 年 10 月進行穩定器上部支撐件之結構應力分析研究[2]，唯在研究過程中發現最大主應力值收斂性不佳，因此更進一步針對收斂性進行討論。本研究是利用 ABAQUS CAE[3]建立核一廠一、二號機爐心側板穩定器上部支撐件分析模型並簡化分析之假設條件。利用 ABAQUS 軟體較強的非線性分析功能，進行金屬組件接觸問題等高度非線性應力分析並

研究其收斂性。

3.1 分析模型

本研究使用 ABAQUS CAE 建立穩定器上部支撐件之模型，各組件 3D 幾何外觀如圖 6 所示，組合所有組件使成圖 7 之結構，其中組件 1 及 2 為主要欲分析之部分；組件 3、6、7 為連接組件 1、2 之元件；組件 4 及 5 為模擬爐心側板局部區域之元件。

一般材料晶間應力腐蝕龜裂之門檻應力值均由實驗得知，基本假設為材料是線彈性材質，因此，雖然穩定器上部支撐件材料在局部區域可能產生塑性變形，但為晶間應力腐蝕龜裂研判之需要，本報告分析採用線彈性材料模式。分析中，X-750 英高鎳合金材料之材料特性如下：

楊氏係數 E : 29.2×10^6 psi (550°F 下)

柏松比 ν : 0.3

3.2 束制、邊界條件及負載

圖 7 中組件 4 及 5 分別為模擬爐心側板蓋法蘭板與 H1 及 H3 焊道附近之結構，以藉此模擬支撐件與爐心側板蓋法蘭板之接觸狀況。由於此二構件並非主要欲分析之組件，為節省計算所花費的時間，將此二構件設定為剛體。穩定器上部支撐件與兩長條型剛體接觸之特性亦假設為自由滑動之接觸狀況，可能之接觸面積如圖 8 所示。組件 1、2 與組件 3 則以 ABAQUS 所提供之 Tie 方式聯結，使其連接面上的變形保持相依關係，如圖 9 所示。

爐心側板穩定器上部支撐件是鉤扣於爐心側板蓋法蘭板上，鎖緊後則固定於爐心側板上，因此本研究之邊界條件施加於組件 4 及 5 上，其分析模式之邊界條件如圖 10 所示，由於組件 4 及組件 5 為剛體，控制兩組件上任一點不可移動及轉動時即為控制整個構件完全束制。

穩定器上部支撐件之受力狀態為穩定器鎖緊時軸向拉桿將力量傳遞至圖 7 中之組件 6，再藉由組件 7 (插銷) 將力量傳遞至組件 1、2 上，由完整結構圖(圖 7)可知在下拉過程中由於組件 6、7 之束制將使組件 1 及 2 之距離不致有太大的改變，力量主要作用於組件 1、2 之 4 個插銷孔上，為節省計算時間，本分析將不分析組件 6 及組件 7，而以參考點方式模擬上述行為。在組件 1、2 上之 4 個插銷孔中點建立一參考點，並使該參考點與組件 1、2 之 4 個插銷孔以 Tie(node) 方式相關聯，如圖 11 所示，作用於爐心側板穩定器上之持續拉力在正常運轉情況下為 66.513 kips，施加於前述參考點上。此方式可控制組件 1、2 在受力過程中之距離保持不變，且施加於參考點之外力可以等效力方式轉換到相關聯面積上，故可完整模擬組件 6、7 在穩定器上部支撐件之行為。在機組運轉狀態下，穩定器上部支撐件承受軸向拉力後，預期轉向爐心側板之力矩將促使其與 H1 及 H3 焊道緊密接觸，接觸面積如圖 8 所示。

3.3 網格分佈

圖 12 為前期分析所採用之有限元素分析網格。由於在內彎角處易有應力集中效應，預期有較大的應力梯度，為能獲致準確的應力值，因此該部位採用極細之網格分佈，如圖 13 所示。所採用之元素為三維八節點固體元素(8 node Brick Element, C3D8)。前期研究已針對圖 13 中紅色虛線內之區域進行不同網格分割方式對內彎角處應力之影響作深入之探討，發現隨著網格分割越細緻所計算之最大主應力值也越大，因此本研究將針對最大主應力值無法達到收斂進一步進行分析，由於本研究為非線性接觸問題，且網格分割已極為細緻，因此除了針對網格分割方式探討收斂性問題外，亦不排除接觸設定方式是否錯誤以影響應力收斂性。

四、爐心側板穩定器上部支撐件應力及收斂性分析

結構承受負載後，在三維空間中任一點之應力有 9 個分量。由於本結構受力後之破壞型式屬裂縫正向開裂破壞，組件之劣化程度取決於最大主應力值。本研究主要探討爐心側板修補組件之晶間應力腐蝕龜裂行為，因此，分析後之應力均以最大主應力值呈現。本章節將針對最大主應力值收斂性不佳進行分析及討論。

4.1 爐心側板穩定器上部支撐件應力分析

在機組運轉狀態下，穩定器上部支撐件承受軸向拉力後，預期轉向爐心側板之力矩將促使其與 H1 及 H3 焊道緊密接觸，當網格分割方式如圖 12 時，上部支撐件之最大主應力分佈情形如圖 14 所示，由局部放大圖(圖 15)可知最大主應力發生於內彎角之圓孔中。由幾何外型判斷，穩定器上部支撐件受力後應力將集中於內彎角處，此處也是此組件最易發生晶間應力腐蝕龜裂的位置。另外，由於 Hatch 核能電廠一號機於大修期間，以加強目視檢測方法(EVT-1)進行爐心側板穩定器完整性檢測時，發現部分上部支撐件(Upper Support)靠近內彎角的圓孔處有裂紋產生，與本分析結果吻合。

4.2 收斂性分析

由於本研究為高度非線性接觸分析，因此最大主應力值收斂性將針對接觸行為及網格細緻化進行探討。首先針對接觸行為進行簡易偵測，判斷是否為無法收斂之主要原因，偵測方式為將組件 4 及 5(圖 7)從模型中移除，將邊界條件施加於穩定器上部支撐件上，以相同的方式施加外力，利用此方式將接觸行為從問題中移除，粗略判斷接觸行為對於最大主應力值收斂性是否有影響，進一步決定從哪一個影響因子進行更深入之收斂性探討。

首先將組件 4 及 5 移除，將邊界條件施加於最大主應力發生之內彎角處，如圖 16 所示，邊界條件以不可移動只可轉動之方式施加，另外在穩定器上部支撐件與 H3 焊道接觸位置上端給予 X 方向不可移動之限制，如圖 17 所示，以前期之網格劃分方式進行數次不同網格結構之分析，分析結果發現最大主應力值仍然會因為網格劃分方式不同而有所不同，且趨勢與前期研究(未移除接觸行為)[2]之趨勢雷同，如圖 18 所示，最大主應力值皆與網格細緻程度相關，由此可知即使移除接觸因素，最大主應力值仍然與網格細緻化程度有關，因此吾人研判接觸行為並非最大主應力值收斂性之主要影響因子。移除接觸行為為將邊界條件施加於穩定器上部支撐件上並無法正確模擬穩定器實際受力後之行為，故此種分析僅為求其趨勢以判斷應先分析何種影響因子，以免花費過多時間於非主要影響因子之分析上。由前述分析結果，吾人決定首先進行網格細緻化對收斂性影響之討論。

由於實際經驗及前期有限元素分析皆顯示裂紋將發生於上部支撐件之內彎角處，因此本節針對該處之網格進行更細緻之分析以探討網格與收斂性之關係。首先將上部支撐件分為兩個區域，如圖 13 所示，以紅色虛線作為兩區域之分界，以便利建模工作。前期研究中發現圖 13 中方向 1 之網格分割方式對應力分析結果有影響，因此本研究將針對此部份之網格分割進一步進行研究。前期研究將方向 1 之網格細分至 16 格即不再做更細緻分割主要因為 ABAQUS 軟體之網格採自動化分割，使用者雖然可以給予部份網格限制條件，但實際分割網格之工作仍然由軟體計算，軟體會以使用者之設定進行符合該條件之網格分割。由於網格是由軟體計算而得，因此當網格過小時可能因為節點精度而使網格體積為零而造成無法繼續計算之情況，在前期研究過程中即遇到類似問題，且當網格分割至 16 格時以人為方式判斷網格已足夠細緻因此未再進行更細緻之分割，應力值與網格數之關係圖如圖 19 所示，當方向 1 切割 16 層網格時，網格分佈如圖 20 所示，數值分析結果最大主應力值為 77.76ksi，雖然最大主應力值未達收斂，但結構斷面應力已達收斂[2]。此次研究將繼續細分網格以進行研究，由於節點精度可能造成網格體積為零無法計算，因此必須使用試誤法的方式進行分析，分析結果顯示當方向 1 之網格切割至 56 層時已趨於穩定，當方向 1 之網格數達 80 層網格時最大主應力值將趨於收斂，如圖 21 所示，雖然隨著不同的網格細緻程度，分析得到的應力值會有震盪的情況，但若將應力值以回歸方式展示(如圖 22)，可知其最大主應力值已達收斂。當方向 1 之網格切割層數達 80 層時，網格分佈如圖 23 所示，由圖可知網格已極為細緻，此時可能由於厚度方向之層數過少而導致元素過於狹長，因此吾人亦針對厚度方向作不同層數之分析，以探討元素過於狹長時對計算結果是否有影響，分析結果發現當層數越多時，最大主應力值會略為降低，當層數達 12 層時，最大主應力值降低幅度相較於 4 層之狀況皆小於 1%，分析結果顯示厚度方向之網格數對於應力分析影響甚小。

由於已確認前期研究最大主應力值無法達到收斂之原因為網格不夠細緻的關係，因此便不再針對接觸行為進行收斂性探討。

五、結論

本研究之目的是以 ABAQUS 建立三維有限元素模型，分析核一廠一、二號機之爐心側板穩定器上部支撐件的應力場，尤其把重點集中在穩定器上部支撐件內彎角處的應力集中情形，以協助判定該位置發生晶間應力腐蝕的可能性。在前期研究中已針對應力可能集中處之網格進行較細緻之網格分割及測試，但所分析得的最大主應力值收斂性仍然不佳，當時主要的疑慮集中在此組件的高度非線性接觸特性是否影響數值分析結果的收斂性？本研究為確定接觸行為是否為影響應力收斂性的主要因子，以移除接觸因子之方式進行分析，發現計算所得應力值之收斂性仍然不佳，且最大主應力值仍然與網格大小有極為密切的關係，確定在本案例中材料的接觸行為並非影響收斂的主要因子，因此促使本研究在網格已經非常細密的基礎上繼續作更細緻的分割，最後才得到收斂的主應力值。

六、參考文獻

- [1] EPRI BWRVIP EOC/NRC Management Meeting, "Update on Hatch 1 Tie Rod Issue", March 15, 2006.
- [2] 吳思穎、康龍全, “核一廠爐心側板穩定器上部支撐件應力評估”, INER-A1479R, October, 2007.
- [3] ABAQUS finite element program, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. , version 6.5

七、圖片

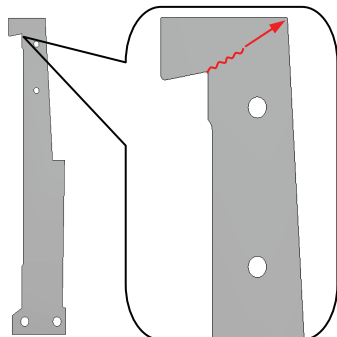
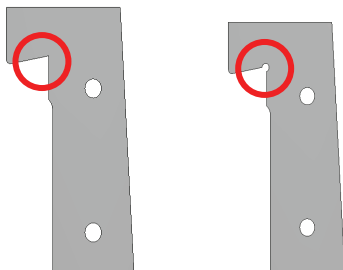


圖 1 裂紋發生位置及成長方向



(a)美國 Hatch 電廠 (b)核一廠

圖 2 美國 Hatch 電廠與核一廠爐心側板穩定器上部支撐件之差異

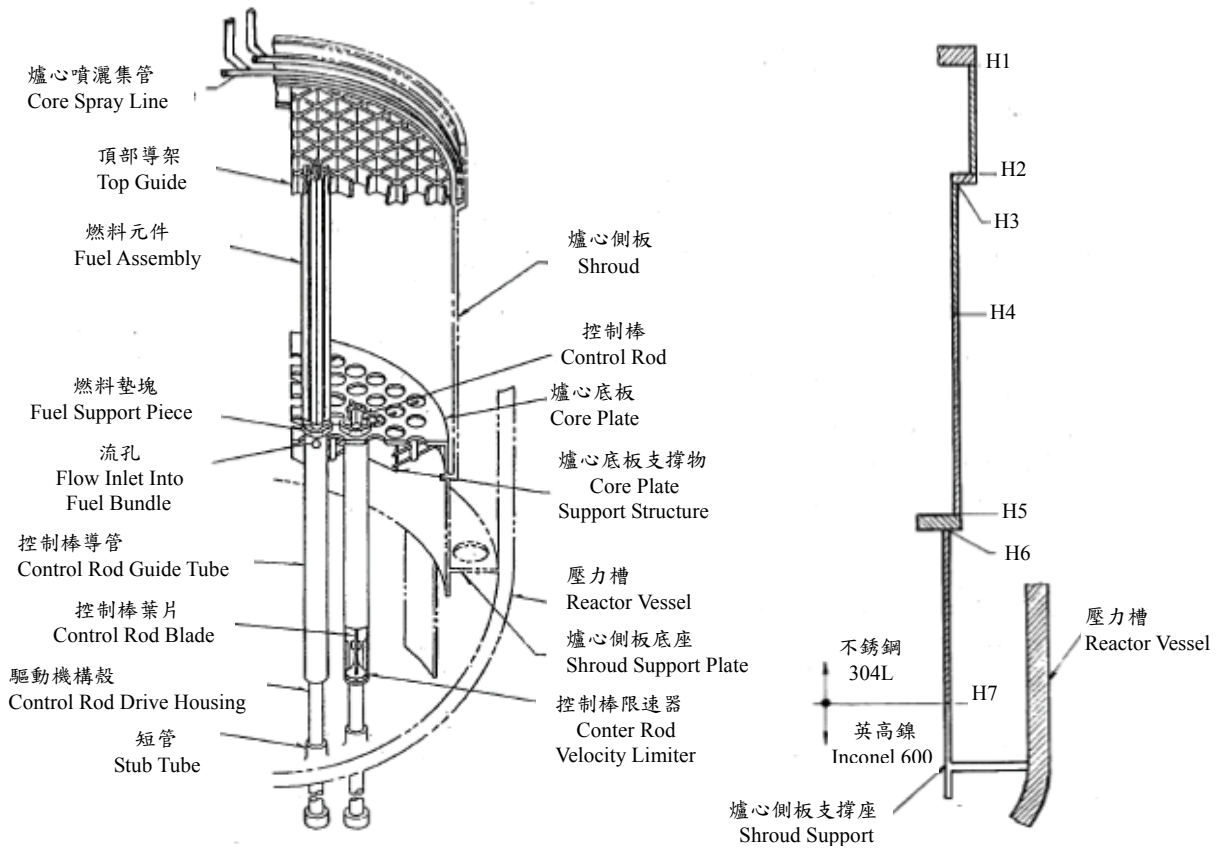


圖 3 核一廠二號機相關爐內組件示意圖及爐心側板焊道位置圖。

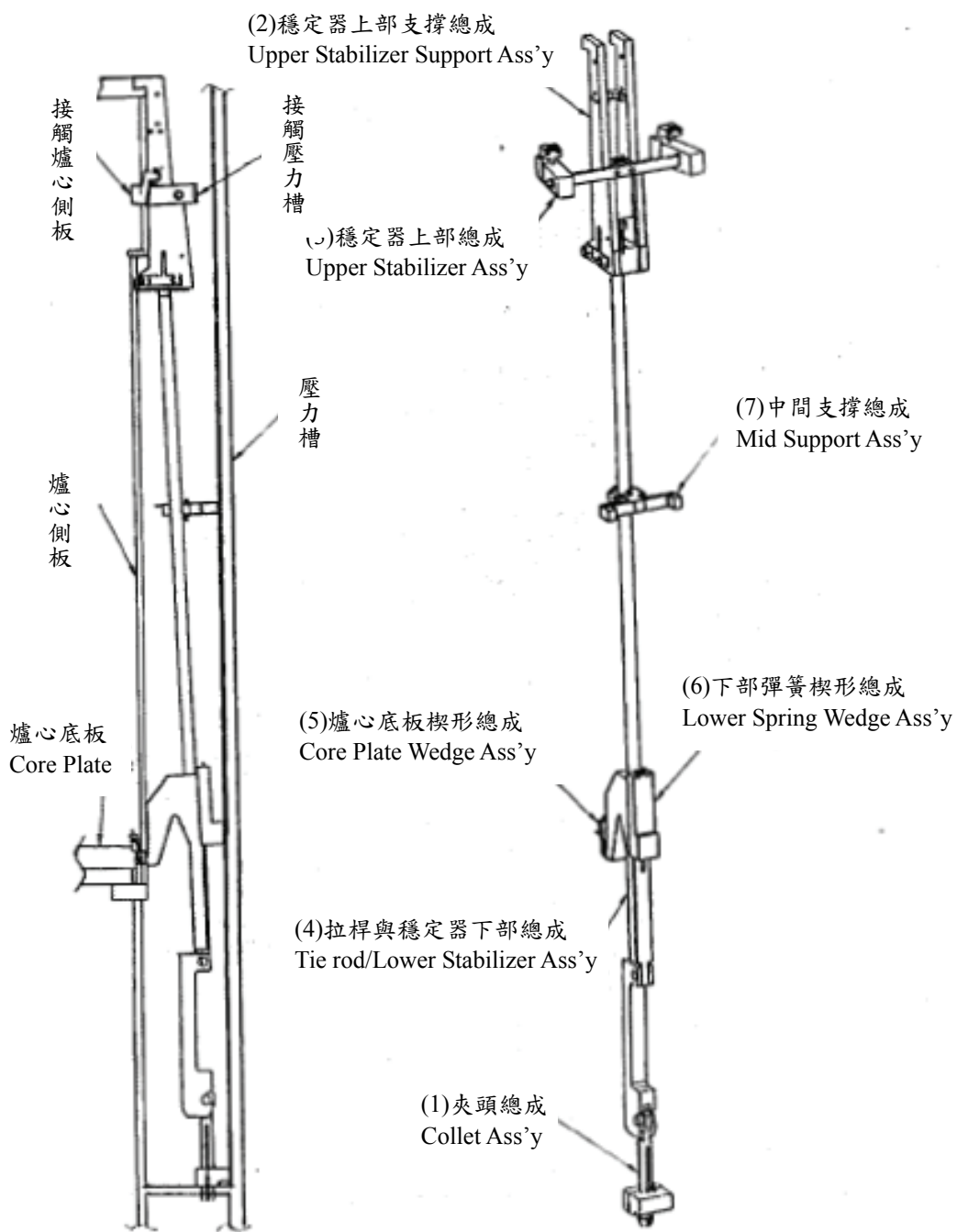


圖 4 核一廠二號機爐心側板穩定器組件總成

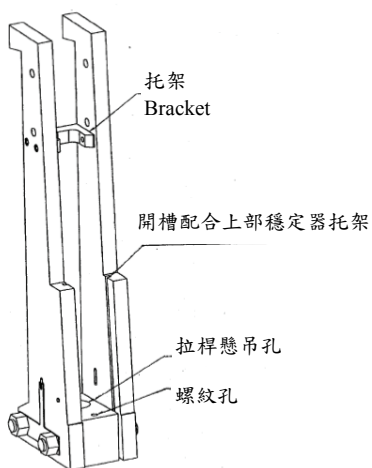


圖 5 穩定器上部支撐總成

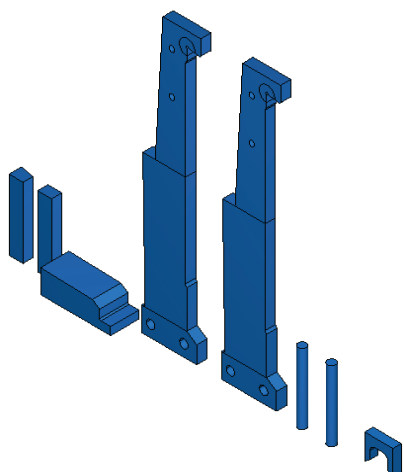


圖 6 核一廠爐心側板穩定器上部支撐件組件

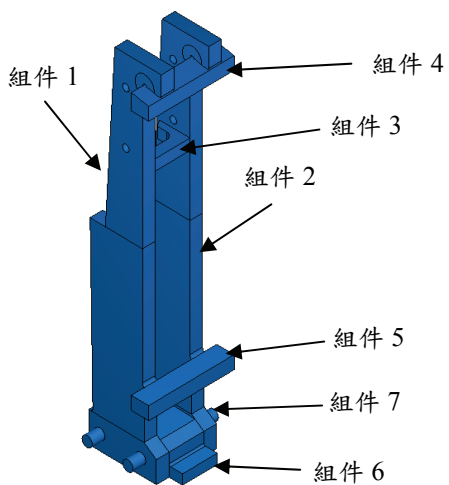


圖 7 核一廠爐心側板穩定器上部支撐件 3D 模型

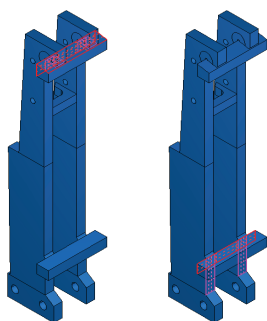


圖 8 爐心側板穩定器上部支撐件與爐心側板之接觸

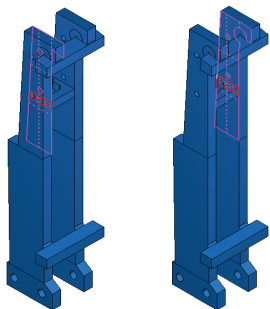


圖 9 爐心側板穩定器上部支撐件之束制

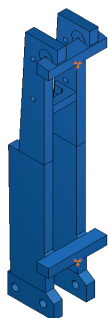


圖 10 核一廠爐心測版穩定器上部支撐件之邊界條件

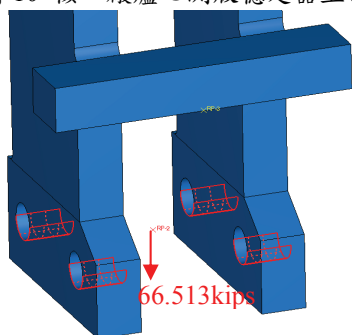


圖 11 參考點及 4 個插銷孔

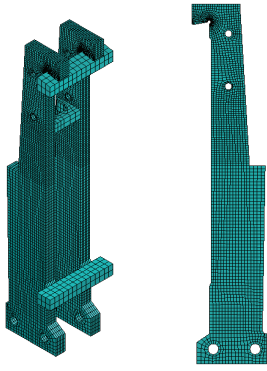


圖 12 核一廠爐心測版穩定器上部支撐件之網格分割

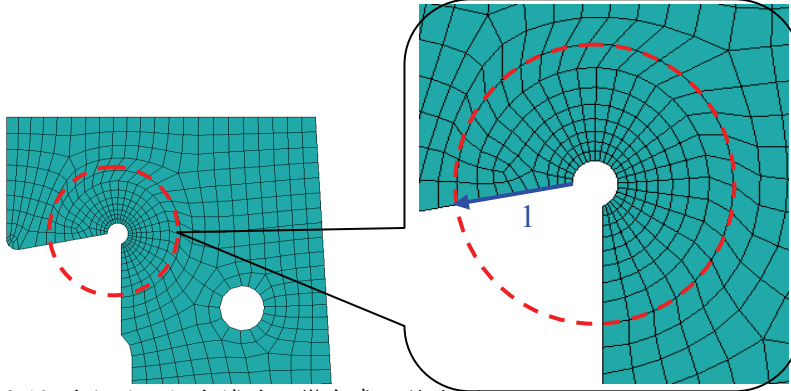


圖 13 穩定器上部支撐件內彎角處網格分割

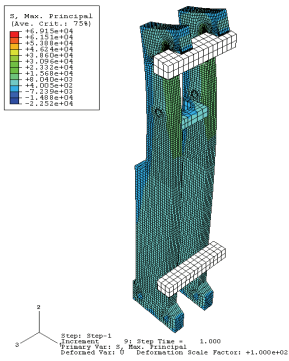


圖 14 核一廠爐心側板穩定器上部支撐件之最大主應力分析圖

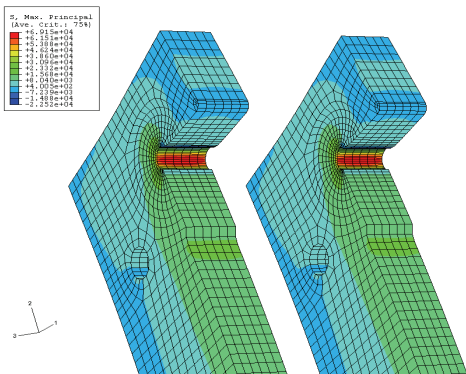


圖 15 核一廠穩定器上部支撐件之內彎角處最大主應力分析圖

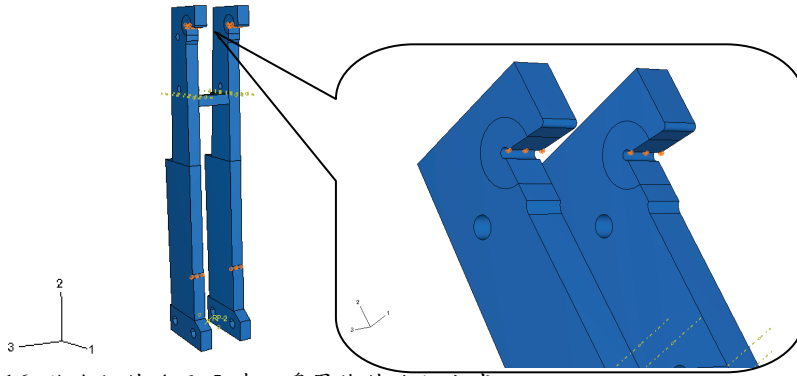


圖 16 移除組件 4 及 5 時 邊界條件施加方式

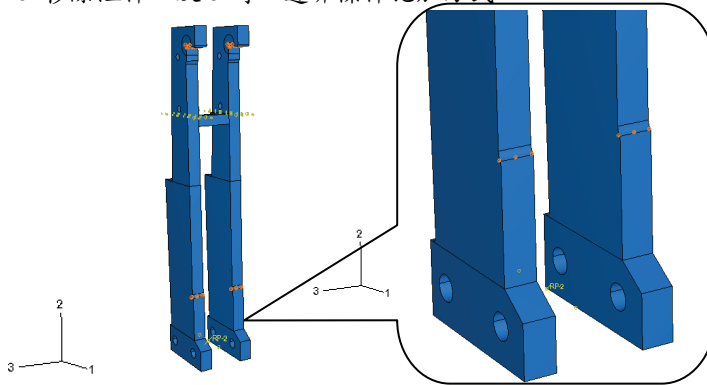


圖 17 移除組件 4 及 5 時 邊界條件施加方式

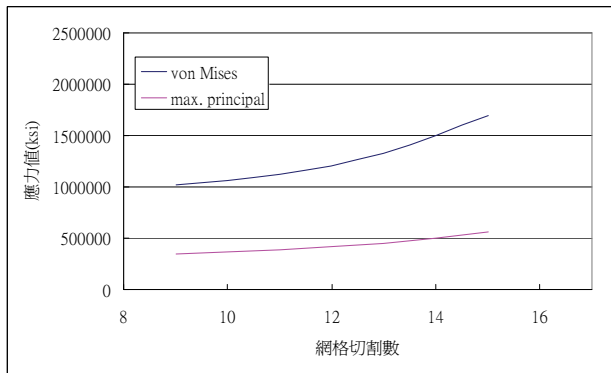


圖 18 無接觸行為時 最大主應力值與網格之關係圖

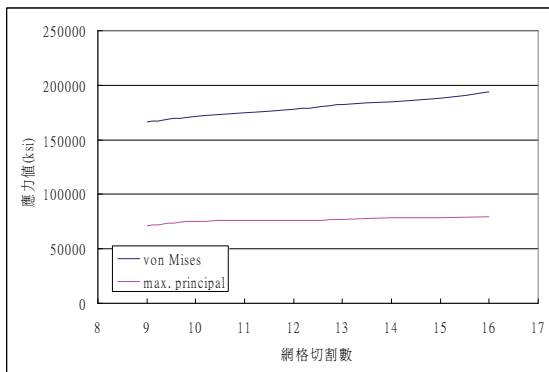


圖 19 方向 1 分割粗細不同時對應之 von Mises 及最大主應力值

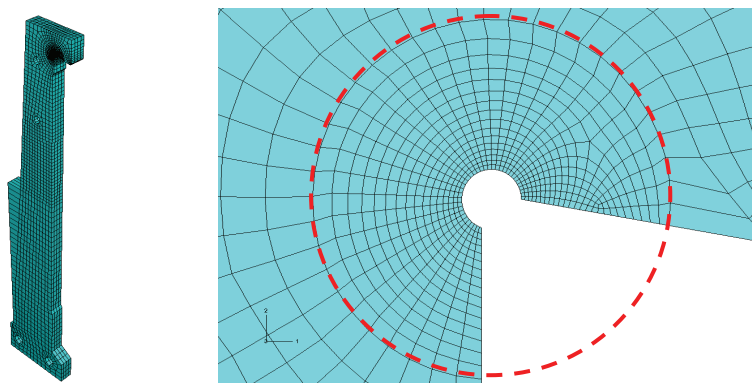


圖 20 方向 1 之網隔層數達 16 層之網格分佈圖

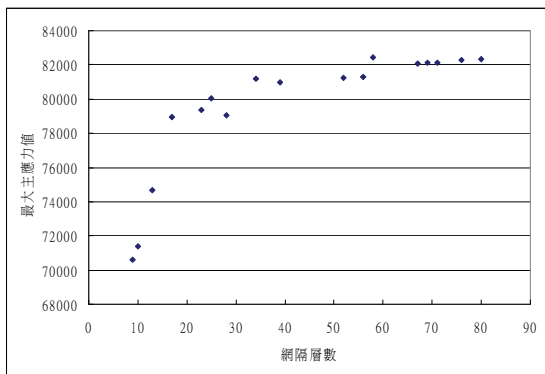


圖 21 方向 1 不同網格數與對應之最大主應力之關係圖

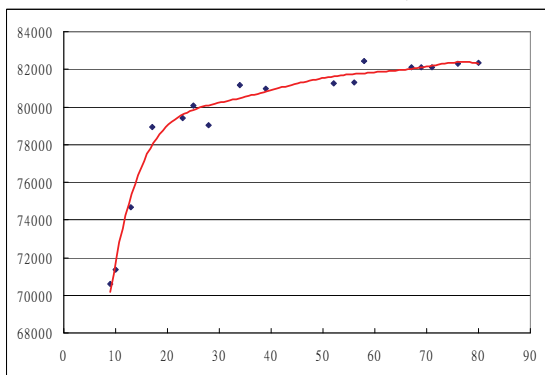


圖 22 回歸曲線

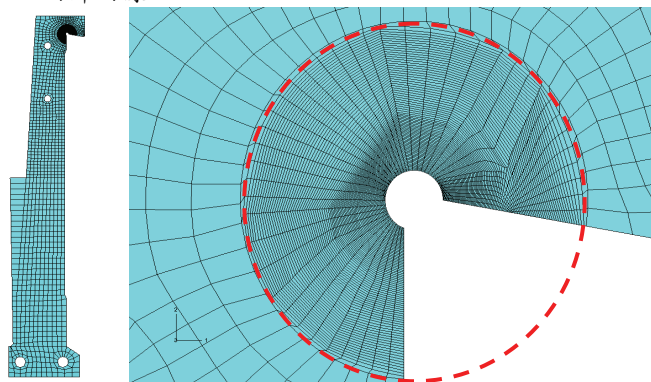


圖 23 方向 1 之網隔層數達 80 層之網格分佈圖