

核反應器停機冷卻過程法蘭部位結構安全性評估

翁炯立、張漢洲、劉家銓

臺灣電力公司 核能安全處

摘要

核反應爐在停機降溫過程中，往往起動反應爐頂蓋噴灑以加速冷卻，造成法蘭與鄰近爐壁承受較大之溫差，本文以有限元素法探討該部位承受各種不同之冷卻條件下之應力狀態。分析結果顯示，於停機冷卻過程中，雖無法得知反應爐頂蓋噴灑造成Dome內壁實際之冷卻速率，但只要管控PT13與PT3間之溫差維持在280.39°F以下，且配合監控PT3之溫降率，使其不高於455.43°F/hr，則可確保Dome在停機冷卻過程中之結構安全無虞。

關鍵字：熱應力、有限元素分析

ABSTRACT

It is not uncommon to start head spray to increase the cooling rate in the course of shutdown cooling for a nuclear reactor pressure vessel, and it causes higher thermal gradient around the vessel flange and its vicinity. This study investigates the induced stresses by FEA, and the result stress intensity is justified against the designed stress criteria. This study can help establish an operation strategy to ensure the structure integrity and safety for the nuclear reactor pressure vessel. From the results, this operation strategy can be determined that the temperature difference between temperature monitor points PT13 and PT3 should be controlled under 280.39°F, while the cooldown rate of PT3 should be kept no more than 455.43°F/hr as well.

Keywords: Thermal stress, Finite Element Analysis.

一、前言

本項分析主要在探討核反應爐在停機降溫過程中，由於起動反應爐頂蓋噴灑(Head Spray)，加速 Dome 內壁之冷卻，造成法蘭與鄰近爐壁承受較大之溫差，並引發該部位較大之熱應力，對反應爐槽法蘭與接近法蘭之槽壁結構安全之影響，藉以擬訂一套溫度監測方法，確保該部位結構之安全。分析中主要模擬反應爐 Dome 結構部位，包括反應爐蓋、反應爐槽法蘭及接近法蘭之槽壁等，以有限元素法探討該部位承受各種不同之冷卻條件下之應力狀態，並且以 ASME 設計規範之要求檢視反應爐結構之安全性，找出足以確保該部位結構安全的監測參數及其管制條件。

二、有限元素分析模式及假設

2.1 反應爐頂蓋噴灑之冷卻模擬

冷停機過程中，較厚的法蘭比薄的爐壁散熱慢，使得兩者產生明顯的溫差。本項分析模擬反應爐頂蓋噴灑過程加速 Dome 部位之冷

卻。本分析所指的 Dome 係包括反應爐頂蓋、反應爐槽法蘭及接近法蘭之槽壁等部位。冷卻率與反應爐頂蓋噴灑噴灑之流量、時間以及噴流與內壁之接觸狀況等均有關係，其變數多且複雜，不易準確模擬，因此本分析直接模擬 Dome 內壁因反應爐頂蓋噴灑起動而承受各種不同程度之冷卻率，促使法蘭及鄰近爐壁產生各種不同程度之溫差，進而探討法蘭及其鄰近部位之應力變化狀況。

2.2 負荷及邊界條件

本分析採用有限元素法進行熱彈性應力分析，分析中假設 Dome 內壁承受之爐壓及熱負載等均為軸對稱。圖 1 為本分析所採用之有限元素軸對稱分析模式，分析中假設遠離法蘭部位之爐壁在軸向位移受到拘束，以避免結構自由運動，造成運算無法收斂之問題。分析過程中，Dome 內壁承受固定之冷卻率，當溫度降至常溫 80°F 時，內壁即維持此一溫度，但分析仍繼續進行，因此時整個結構仍繼續冷卻中，應力仍繼續變化中。另在冷卻停機過程中，內壁除承受上述之溫降熱負荷外，亦同時保守假

設爐壓一直維持於正常運轉壓力 1010 psi。整個結構外表面假設為絕熱狀態。由於離法蘭部位較遠的結構對法蘭附近之結構溫度及應力之影響漸小，本分析模式模擬至離法蘭面 100" 處。圖 1 所示為 Dome 之有限元素分析模式與負荷及邊界條件。

2.3 分析假設

分析過程採耦合熱應力分析 (coupled thermal stress analysis)，所用分析工具為 ABAQUS 6.8 版【1】。整個分析模式總共採用 2007 個元素，2313 個節點，元素型式為四節點軸對稱熱耦合元素 CAX4T，分析模式之網格劃分如圖 2 所示。分析開始前之初始熱穩態溫度假設法蘭與鄰近爐壁均為 285°C(546°F)。

目前溫度監測有兩處，一處用於監測反應爐槽法蘭溫度，監測點為 PT-13，另一處用於監測接近法蘭之槽壁溫度，測取點為 PT-3，其中 PT-13 位於下法蘭外緣中間部位，而 PT3 則位於下法蘭與反應爐槽焊道下方 5" 位置。PT-13 監測點相當於本分析模式之 #233 節點，而 PT3 監測點則相當於本分析模式之 #151 節點，如圖 2 所示。

2.4 材料特性

反應爐槽法蘭之材質為 SA508-2，反應爐槽壁之材質為 SA533B-1，兩者之熱特性相近，本項熱彈性應力分析所用之材料特性如下【2】：

楊氏係數 $E = 28.5 \times 10^6$ psi

熱膨脹係數 $\alpha = 8.7 \times 10^{-6}$ in/in

卜松比 $\nu = 0.3$

熱傳導係數 $\kappa = 23.4$ Btu/(in-hr-°F)

材料之密度 $\rho = 0.282$ lbm/in³

比熱 $C = 0.123$ Btu/lb-°F

上列兩種材料之機械特性相同，在 -20°F ~ 700°F 之設計應力強度 $S_m = 26.7$ ksi。

三、法規接受標準

本項分析主要探討反應爐槽法蘭與接近法蘭之槽壁溫度差引發之熱應力，進而研判對結構安全之影響。溫度差引發之熱應力在應力類別上歸類為二次應力 (secondary stress)，ASME Section III 法規要求，一次應力 (primary stress)

與二次應力和應小於 $3S_m$ 。本分析中，反應爐結構所承受之一次應力為內壓所引發，而二次應力則為結構冷卻過程中之各部位溫度梯度所產生，依法規 ASME Section III NB-3222.2 節要求及原設計廠家之應力報告書【3】：

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m \text{ -----(3.1)}$$

(3.1) 式中，

P_L : Primary local membrane stress

P_b : Primary bending stress

Q : Secondary stress (membrane + bending)

S_m : 材料容許應力強度 (allowable stress intensity)

依此項設計規範，Dome 在停機冷卻過程中，各部位所受之應力 ($P_L + P_b + Q$) 應小於 $3S_m = 80.1$ ksi。

四、分析結果與討論

4.1 Dome 內壁冷卻率造成之溫差

圖 3 所示為假設 Dome 內壁因反應爐頂蓋噴灑而以 200°F/hr 冷卻率之情況下，法蘭溫度監測點 (PT13，即節點 #233) 及鄰近爐壁溫度監測點 (PT3，即節點 #151) 之溫度變化歷程。由圖 3 顯示，隨著冷卻時間，節點 #233 及節點 #151 之溫度均隨之下降，顯然節點 #151 之溫度下降比節點 #233 快得多。圖 4 為兩節點溫降率之比較，當冷卻至 8036 秒時，節點 #151 之溫降率達到最高值 199.8°F/hr，接近內壁之冷卻速率 200°F/hr，而節點 #233 則在 8730 秒時，溫降率才達到最高值 172.2°F/hr。圖 5 為兩節點之溫差隨時間之變化歷程，圖中顯示，頂蓋噴灑進行冷卻初期，兩者之溫差隨時間漸增，當歷時約 8530 秒時，溫差達到最高值 188.7°F，隨後，兩者溫差即逐漸縮小。圖 6 所示為節點 #233 與節點 #151 之間溫差達到最高值時 (8530 秒)，整個法蘭附近部位之溫度分佈情形。圖中顯示，反應爐法蘭厚度比爐壁厚度大得多，因此，法蘭之散熱比爐壁慢得多。

4.2 Dome 內壁冷卻率造成之應力

圖 7 為上述假設 Dome 內壁以 200°F/hr 冷卻率之冷卻過程中節點 #233 與節點 #151 之間溫差達到最高值時 (8530 秒) 之 von Mises 等效應力分佈情形。圖 7 顯示，應力較高部位發生在法蘭之內表面及焊道附近之內表面。圖 8 分

別為法蘭部位內表面(節點#21)及焊道部位內表面(節點#2)之 von Mises 等效應力之變化歷程。圖 8 顯示,節點#21 最高之 von Mises 等效應力則發生在 7630 秒,而節點#2 最高之 von Mises 等效應力則發生在 6530 秒,兩處之最高 von Mises 等效應力均未發生在節點#233 與節點#151 最高溫差之時間(8530 秒)。換言之,當反應爐法蘭及其附近結構承受最高應力後,各部位之溫度仍繼續變化,節點#233 (PT13)與節點#151 (PT3)之溫差仍持續增加中,但結構之最高應力卻逐漸下降。

4.3 ASME 設計規範之符合性

本分析採用有限元素法針對結構同時承受壓力及熱負荷所引發之合成應力,因此,所求得之合成應力含蓋一次應力及二次應力。為符合 ASME 之應力分類,需選取適當截面,一般而言指最薄截面,進行應力線性化處理(linearization),以求得截面上各節點之薄膜應力及彎曲應力,並針對最高應力點研判是否符合法規之接受標準。如前所述,本分析中,應力較高部位發生在法蘭之內表面(節點#21)及焊道附近之內表面(節點#2)。圖 9 為節點#21 所處截面之最高應力(7630 秒)線性化結果,最高值之 $P_L + P_b + Q = 52.18$ ksi (在節點#21);圖 10 為節點#2 所處截面之最高應力(6530 秒)線性化結果,最高值之 $P_L + P_b + Q = 33.74$ ksi (在節點#2)。節點#21 所處截面應力線性化後之各主應力及應力強度如表一所示。

由以上之分析結果顯示,假設 Dome 內壁因反應爐頂蓋噴灑而以 200°F/hr 冷卻率之情況下,應力最高點發生在下法蘭面內壁處,最高應力值為 52.18 ksi,遠低於 ASME 設計規範接受標準 80.1 ksi。在此一冷卻條件下,節點#233 (PT13)與節點#151 (PT3)之最高溫差為 188.7°F。

比照上述之分析方法,可以求出 Dome 內壁因反應爐頂蓋噴灑而分別以 100°F/hr、300°F/hr、400°F/hr、460°F/hr 及 500°F/hr 冷卻率下,Dome 結構所承受之最高應力,以及法蘭溫度監測點(PT13,即節點#233)及鄰近爐壁溫度監測點(PT3,即節點#151)之最高溫差值,進而研判在符合 ASME 設計規範之接受應力標準下,容許之冷卻條件以及容許之節點#233 與節點#151 之間的溫差。圖 11 為假設 Dome 內壁分別承受 100°F/hr、200°F/hr、300°F/hr、400°F/hr、460°F/hr 及 500°F/hr 等 6 種不同之

冷卻率下,最高應力隨時間變化之情形。圖 11 顯示,Dome 內壁承受 100°F/hr、200°F/hr、300°F/hr、400°F/hr、460°F/hr 之冷卻率下,其最高應力值均在 ASME Section III 設計規範之接受標準內(80.10 ksi),即在圖中之紅色曲線以下,且冷卻率愈大,最高應力值也愈高,當冷卻率在 460°F/hr 時,其最高應力(80.00 ksi)接近 80.10 ksi,亦即整個停機冷卻過程中,其最高應力均不會超過上述之設計規範接受標準,但當冷卻率超過 460°F/hr,如圖中之 500°F/hr 時,其最高應力值在 3051 秒至 3451 秒之間將超過 80.1 ksi,超出 ASME Section III 設計規範之接受標準。圖 12 為上述 6 種不同之冷卻率下,法蘭溫度監測點(PT13,即節點#233)及鄰近爐壁溫度監測點(PT3,即節點#151)溫差值之變化情形。圖 12 顯示,對應於每一個冷卻率,PT13 與 PT3 之溫差在冷卻初期均隨時間而漸增,當達到最高值後,此一溫差即漸減。上列 6 種不同之冷卻率下,引發之最高應力、最高溫差及其相對應之時間點整理如表二。由表二顯示,Dome 內壁冷卻率維持在 460°F/hr 以下,以及法蘭溫度監測點(PT13,即節點#233)及鄰近爐壁溫度監測點(PT3,即節點#151)溫差值維持在 280.39°F 以下,Dome 結構之最高應力均可符合 ASME Section III 設計規範之應力接受標準(80.10 ksi)。

4.4 停機冷卻過程確保 Dome 結構安全應力管控之參數

由表二或圖 12 可以看出,Dome 內壁冷卻率超過 460°F/hr 時,Dome 結構承受之最高應力將超過 ASME 設計規範之應力接受標準(80.10 ksi),同時,到達最高應力之時間點比到達 PT13 與 PT3 間最高溫差之時間點早得多,以 Dome 內壁冷卻率 500°F/hr 為例,由表二顯示,Dome 結構承受最高應力 82.33 ksi(>80.10 ksi)之時間在 3351 秒,但 PT13 與 PT3 間之溫差,需要等到 3951 秒才會達到最高值,因此,如果單純僅針對 PT13 與 PT3 間之溫差進行規範,勢必無法及時監測到結構最高應力之發生,因而難以確保反應爐結構之安全停機。因此,為避免發生 Dome 結構承受之最高應力超過 ASME 設計規範之接受標準,有必要監測另一個可以確保 Dome 內壁冷卻率不致超過 460°F/hr,或者即使超過 460°F/hr,Dome 結構之最高應力亦不致於超出 ASME 設計規範應力接受標準(80.10 ksi)之另一個參數。由本分析探討結果,監測 PT3(節點#151)之降溫率即可防止 Dome 結構之最高應力超出 ASME 設計規

範之應力接受標準(80.10 ksi)，而得以確保於停機冷卻過程中，Dome 之結構安全，以下進一步說明。

由表二或圖 12 可以看出，停機冷卻過程中，Dome 結構到達最高應力之時間點雖比到達 PT13 與 PT3 間最高溫差之時間點早得多，但 Dome 結構承受最高應力之時間點卻與 PT3(節點#151) 之降溫率達到最高值之時間點吻合，如圖 13、圖 14、圖 15 及圖 16 所示。以圖 14 為例，假設 Dome 內壁承受 500°F/hr 之情況下，監測點 PT3(節點#151) 之降溫率、PT13/PT3 溫差及 Dome 結構承受最高應力隨時間之變化情形如圖所示，其中垂直之綠色虛線為 PT3(節點#151) 之降溫率達到最高值與 Dome 結構承受最高應力之時間點，兩者吻合，均為 3351 秒。圖中亦可看出，如前所述，此時間點顯然比 PT13/PT3 溫差(黑色曲線)達到最高值之時間點(3951 秒)提早許多。

由圖 13 可以看出，當 Dome 內壁冷卻率為 460°F/hr 時，Dome 結構承受之最高應力接近超過 ASME 設計規範之應力接受標準(80.10 ksi)，當達到最高應力時，PT3(節點#151) 之降溫率亦達到最高值，此一溫降率為 455.43°F/hr，特別以粗黃線標示於圖中，此一溫降率將進一步用來檢視，當 Dome 內壁冷卻率超過 460°F/hr 時，用來監測以防止 Dome 結構承受之最高應力不致於超出 80.10 ksi 之可行性。

圖 14 中標示為粗紫色之垂直線係假設 Dome 內壁冷卻率為 500°F/hr 時，Dome 結構承受之最高應力達到 ASME 設計規範之應力接受標準(80.10 ksi)之時間，此一時間為 3031 秒，而此時 PT3(節點#151) 之降溫率為 488.52 °F/hr，比標示為水平粗黃線的 455.43°F/hr 為高，由此可清楚看出，如果管控 PT3(節點#151) 之降溫率不可高於 488.52 °F/hr，則可確保 Dome 結構之最高應力不會超過 ASME 設計規範可接受之應力標準(80.10 ksi)，而不致有結構安全上之疑慮。

假設 Dome 內壁冷卻率更高時，當 Dome 結構承受之最高應力達到 ASME 設計規範之應力接受標準(80.10 ksi)時，PT3(節點#151) 之降溫率離 455.43°F/hr 愈遠，亦即其安全餘裕愈大，詳如圖 15(假設 Dome 內壁冷卻率為 600°F/hr)及圖 16(假設 Dome 內壁冷卻率為 700°F/hr)所示。表三進一步整理出各種不同之 Dome 內壁冷卻率之情況下，應力達到 ASME

設計規範接受標準(80.10 ksi)之時間及此時 PT3(節點#151)之降溫率與 PT13 與 PT3 間之最大溫差。由表三可見，假設 Dome 內壁冷卻率低於 460°F/hr，則任何時間最高應力均不可能超過設計規範可接受之應力標準，此時，監測 PT13 與 PT3 間之溫差，使其不超過 280.39°F 足可確保 Dome 之結構安全。當 Dome 內壁冷卻率一旦高於 460°F/hr 時，俟 Dome 結構之最高應力達到 80.10 ksi 時，PT13 與 PT3 間之溫差均仍小於 280.39°F，因此，僅管控此項溫差顯然無法確保 Dome 之結構安全，然而，此時 PT3(節點#151) 之降溫率均大於 455.43°F/hr，且如前所述，Dome 內壁冷卻率愈高，PT3(節點#151) 之降溫率離 455.43°F/hr 愈遠，其安全餘裕愈大。

反應爐在停機冷卻過程中，起動反應爐頂蓋噴灑，加速 Dome 內壁之冷卻，雖然無法確知 Dome 內壁之冷卻率，但由以上分析結果顯示，此期間除了管控 PT13 與 PT3 間之溫差維持在 280.39°F 以下外，如果能夠再監測 PT3(節點#151)之溫降率，使其不高於 455.43°F/hr，則可不必得知 Dome 內壁之冷卻率，亦即不必顧慮反應爐頂蓋噴灑之實際狀況，均仍可確保停機冷卻過程中，Dome 之結構安全無虞。

五、結論

機組在冷停機過程中，當起動反應爐頂蓋噴灑加速 Dome 之冷卻時，引發法蘭及其鄰近爐壁之間的溫差，造成結構額外的熱應力。由以上之分析結果顯示，Dome 內壁承受之冷卻率越大，引發法蘭溫度監測點(PT13，即節點#233)及鄰近爐壁溫度監測點(PT3，即節點#151)間之溫差越高，結構因而承受之應力亦越高。分析結果亦顯示，停機冷卻過程中，造成 Dome 結構之最大截面應力發生在反應爐槽下法蘭面之內壁上(節點#21)。

由本分析結果顯示，假設 Dome 內壁冷卻率維持在 460°F/hr 以下，Dome 結構承受之最高應力在任何時間均可符合 ASME Section III 設計規範之應力接受標準(80.10 ksi)，而在此條件之冷卻過程中，PT13 與 PT3 之溫差最高可達到 280.39°F。但 Dome 內壁冷卻率如果超過 460°F/hr 時，Dome 結構之最高應力在某些時段將可能超出 ASME Section III 設計規範之應力接受標準。然而，由本分析結果亦顯示，當其最高應力即將超過 ASME Section III 設計規範之應力接受標準時，PT3(節點#151)之溫降率均會高於 455°F/hr，因此，如果於停機冷卻

過程中能同時監測 PT3(節點#151)之溫降率，管控使其不超出 455°F/hr，則可不必顧慮 Dome 內壁之冷卻速率，而仍可確保 Dome 之結構安全，且有相當之安全餘裕。

綜合本分析結果顯示，於停機冷卻過程中，當起動反應爐頂蓋噴灑加速 Dome(包括反應爐蓋、反應爐槽法蘭及接近法蘭之槽壁部位)之冷卻時，雖無法得知 Dome 內壁實際之冷卻速率，但只要管控 PT13 與 PT3 間之溫差維持在 280.39°F 以下，且配合監控 PT3 之溫降率，使其不高於 455.43°F/hr，則可確保 Dome 在停機冷卻過程中之結構安全無虞。

六、參考資料

- 1.ABAQUS/Standard User's Manual, version 6.8, Hibbit,Karsson & Sorensen, Inc.
- 2.American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II Part D - Properties. 2005 Edition, New York, American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- 3.Manufacturer's Stress Report for Chinshan No.1 Reactor Pressure Vessel, NCL-69100, the Japan Steel Works, LTD.

七、表格

表一 Dome 內壁承受 200°F/hr 之冷卻率下，節點#21 所處截面應力線性化後之各主應力及應力強度

應力種類	節點	主應力 1 (ksi)	主應力 2 (ksi)	主應力 3 (ksi)	應力強度 (Stress Intensity) (ksi)
Membrane + Bending (最高點)	#21 (內表面)	51.90	25.65	-0.28	52.18
Membrane + Bending (最低點)	#6 (外表面)	15.92	5.91	-0.06	15.98

表二 Dome 內壁承受 100°F/hr、200°F/hr、300°F/hr、400°F/hr 及 500°F/hr 等 5 種不同之冷卻率下，造成節點#233 (PT13) 與節點#151(PT3)間之最大溫差及結構承受之最高應力

冷卻率 (°F/hr)	最高溫差		最高應力		ASME 設計規範接受之應力標準 (ksi)
	溫差值 (°F)	時間 (秒)	應力值 (ksi)	時間 (秒)	
100	107.70	16518	34.34	10318	80.10
200	188.69	8530	52.18	7630	80.10
300	238.50	5947	65.67	5587	80.10
400	267.37	4667	75.21	4187	80.10
460	280.39	4195	80.00	3645	80.10
500	285.80	3951	82.33	3351	80.10

表三 Dome 內壁承受不同冷卻率之情況下，應力達到 ASME 設計規範接受標準(80.10 ksi)之時間及此時節點#151(PT3)之降溫率與 PT13 與 PT3 間之最大溫差

冷卻率 (°F/hr)	應力達到 ASME 設計規範接受標準 (80.10 ksi)之時間 (sec)	應力達到 ASME 設計規範接受標準時，節點 #151(PT3)之降溫率 (°F/hr)	應力達到 ASME 設計規範接受標準時，PT13與PT3間之最大溫差 (°F)
< 460	任何時間應力 < 80.10 ksi	N/A	<280.39
460	3645	455.43	280.39
500	3031	488.52	237.26
600	2182	562.68	196.40
700	1732	622.79	168.30

八、圖片

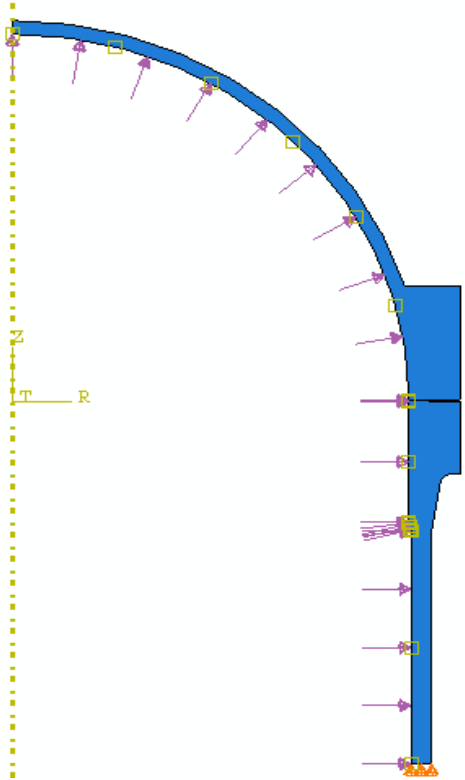


圖 1 Dome 之有限元素分析模式與負荷及邊界條件

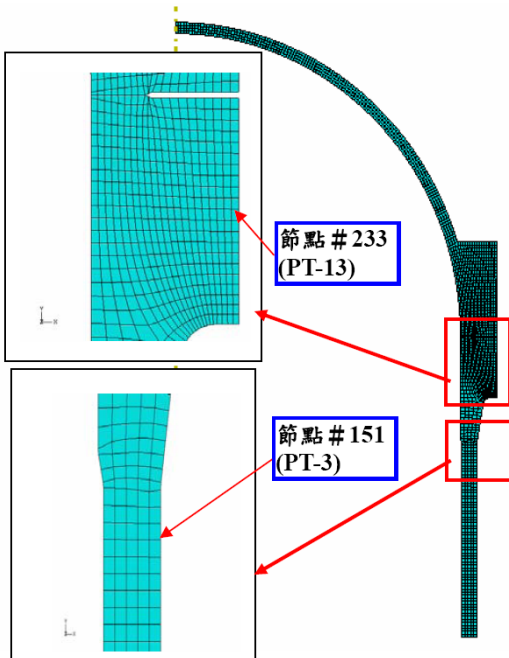


圖 2 Dome 之有限元素分析模式之網格劃分

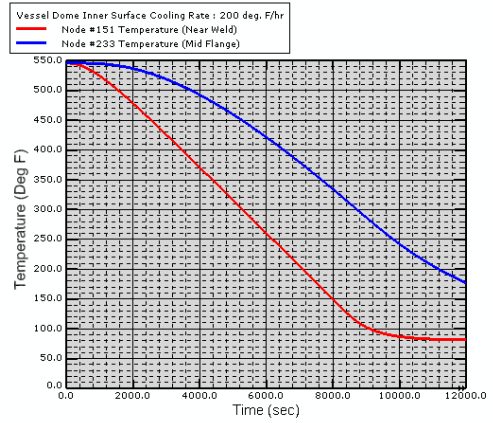


圖 3 Dome 內壁以 200°F/hr 冷卻率下，節點 #233 及節點#151 之溫度變化歷程

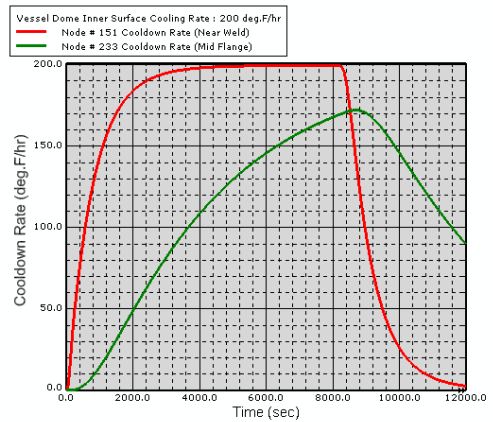


圖 4 Dome 內壁以 200°F/hr 冷卻率下，節點 #233 及節點#151 之溫降率變化歷程

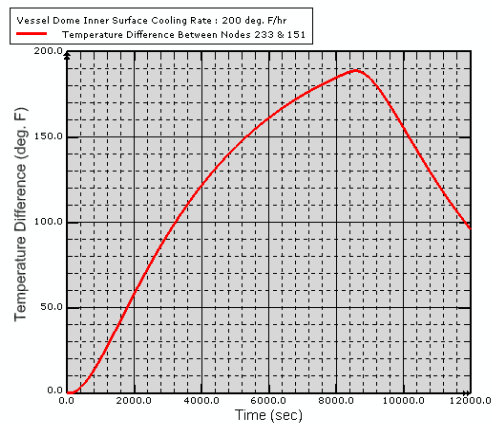


圖 5 Dome 內壁以 200°F/hr 冷卻率下，節點 #233 及節點#151 之溫差變化歷程

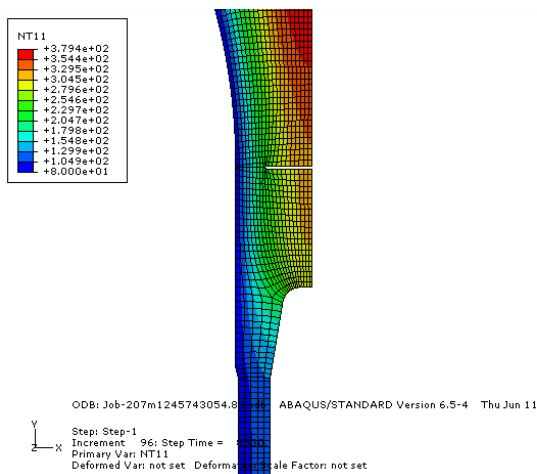


圖 6 節點#233 與節點#151 之間溫差達到最高時(8530 秒), 法蘭附近部位之溫度分佈情形

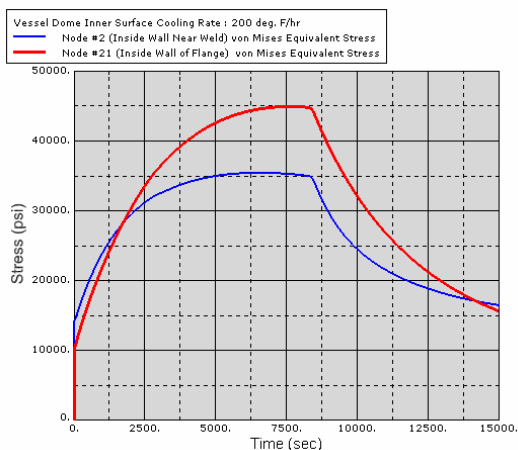


圖 8 焊道部位內表面(節點#2)及法蘭部位內表面(節點#21)之 von Mises 等效應力之變化歷程

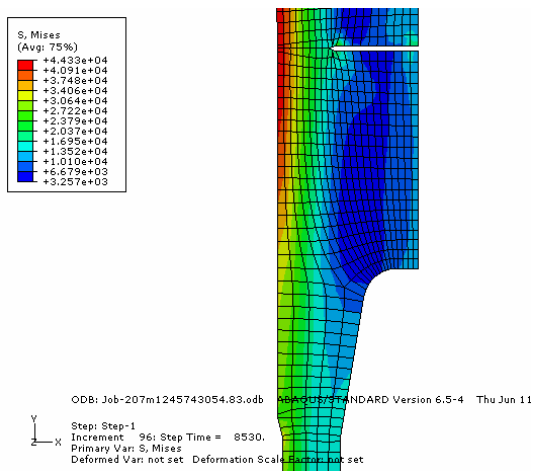


圖 7 節點#233 與節點#151 之間溫差達到最高時(8530 秒), 法蘭附近部位之 von Mises 等效應力之分佈情形

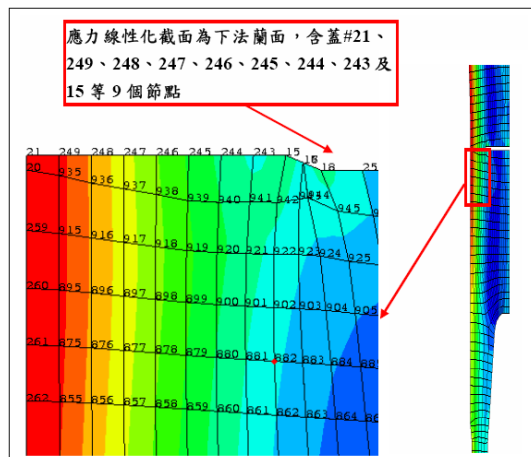


圖 9 (a) 節點#21 應力線性化截面(下法蘭面)

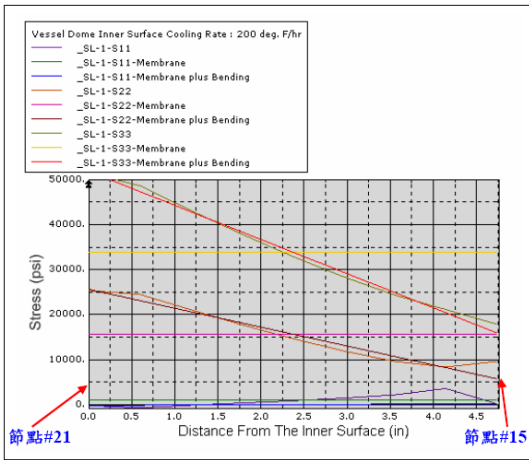


圖 9 (b) 節點#21 所處截面之最高應力(7630 秒)
線性化結果

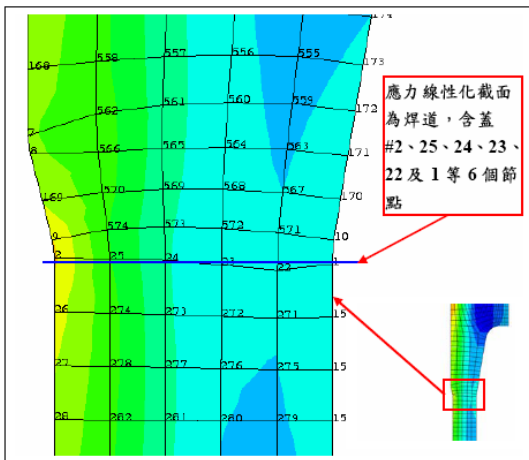


圖 10(a) 節點#2 應力線性化截面(焊道)

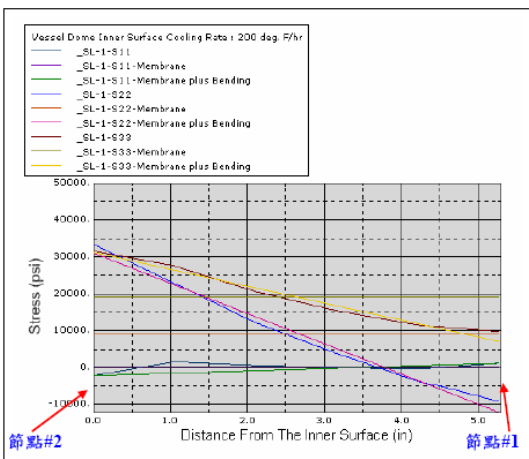


圖 10(b) 節點#2 所處截面之最高應力(6530 秒)

線性化結果

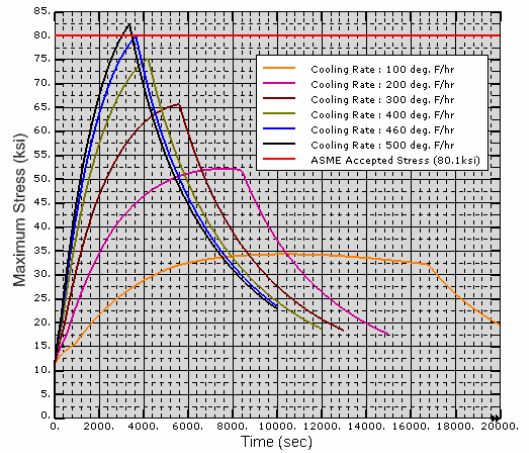


圖 11 Dome 內壁承受 100°F/hr、200°F/hr、300°F/hr、400°F/hr 及 500°F/hr 等 5 種不同之冷卻率下，最高應力隨時間變化之情形

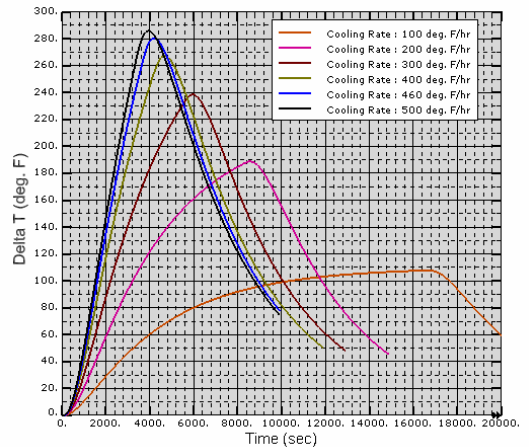


圖 12 Dome 內壁承受 100°F/hr、200°F/hr、300°F/hr、400°F/hr、460°F/hr 及 500°F/hr 等 6 種不同之冷卻率下，造成節點#233(PT13)與節點#151(PT3)間之溫差隨時間變化之情形

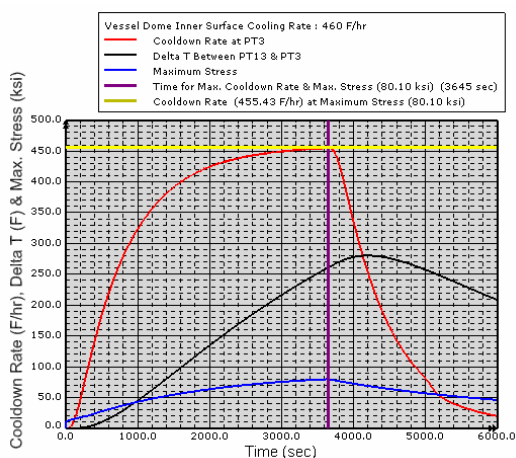


圖 13 Dome 內壁冷卻率在 460°F/hr 之情況下，PT3 之降溫率、PT13 與 PT3 之溫差及最高應力隨時間之變化情形

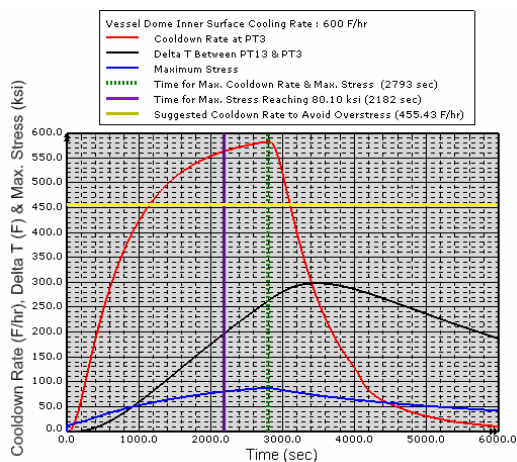


圖 15 Dome 內壁冷卻率在 600°F/hr 之情況下，PT3 之降溫率、PT13 與 PT3 之溫差及最高應力隨時間之變化情形

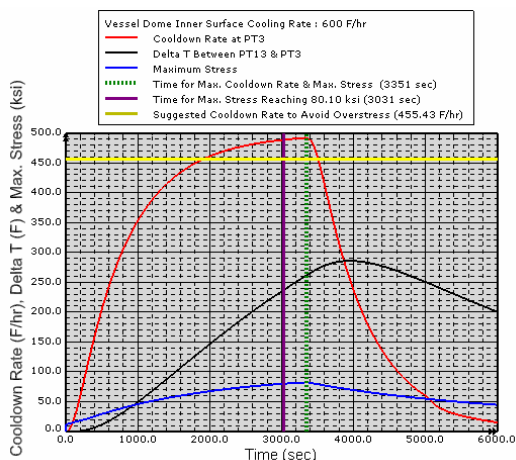


圖 14 Dome 內壁冷卻率在 500°F/hr 之情況下，PT3 之降溫率、PT13 與 PT3 之溫差及最高應力隨時間之變化情形

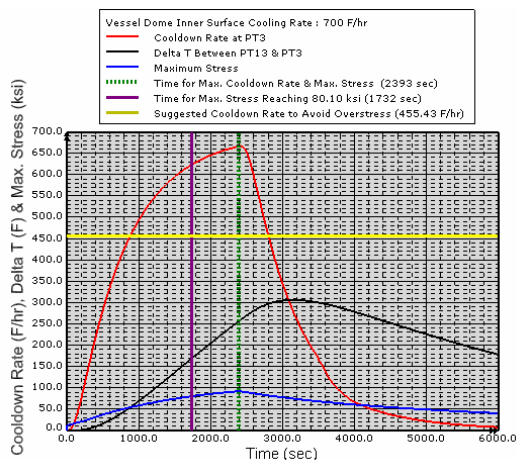


圖 16 Dome 內壁冷卻率在 700°F/hr 之情況下，PT3 之降溫率、PT13 與 PT3 之溫差及最高應力隨時間之變化情形