

適用性評估技術發展概況與應用

劉綾津，王振華

國立高雄第一科技大學 環境與安全衛生學系

一、前言

不論在美國、歐盟、或日本等國，各都有其設備適用性評估技術(Fitness for Service)的開發。在美國，最早出現的標準是由美國石油協會(API)於 2000 年發表的 API RP 579；而歐盟也陸續出現 BS7910、SINTAP、R6 等分析指引。日本則由高壓氣體保安協會以 API RP 579 為藍本，著手建立其自有的適用性評估標準。

但這個發展趨勢並未因上述文件的發佈而停止，或直接進入工廠使用。各國還是在持續發展這個技術。除了從其原先以石化為應用對象，擴展至其它老舊結構的分析，以美國為例，其機械工程師協會 ASME 也認知這項技術的重要性，並參與 API 579 的修訂，而於 2007 年 6 月發表了由二個協會合作制訂的第一個版本。

「適用性評估技術」通常用於分析老舊、存有缺陷的設備，了解其是否有足夠強度以繼續於製程中使用。理應在國內得到很大迴響，但事實不然。技術本身的複雜固然有之，我們對其使用時機的了解、與工廠作業的結合方式，以及對技術的信任度等都會影響其被接受度。「受損結構的強度分析」一向屬破壞力學領域，多需用到有限元素法等專業工具。

本研究以 API 所發展的適用性評估技術為基礎，探討缺陷對結構強度的影響與評估方式。另以燃氣分液罐為例，分別以傳統方式、適用性評估與有限元素法對局部減薄進行評估，並藉由此案例，逐項探討分析中應注意掌握的各项細節，並了解適用性評估技術的可用性。

二、缺陷評估方法

目前，壓力容器的設計、建造規範，在國外以 ASME Boiler & Pressure Vessels Code 為主，我國則有 CNS 9788。其中針對結構強度計算所使用的計算法則，均是以結構沒有缺陷做為基本的假設。反

之，當結構表面發生減薄、內部發生損傷、甚或因高溫產生材料質變的情況時，就變得非常難以評估了。

API 579 可提供脆裂、均勻減薄、局部減薄、孔蝕、裂痕等九種缺陷類型進行評估。API 579 結合設備失效分析、檢查規劃，並能依多種缺陷型態進行適用性評估，如均勻減薄、局部減薄、孔蝕等。

比較各國適用性評估規範後發現，API 579 與其它標準不同之處是不僅包括運轉中設備缺陷安全評估，還提出設備強度計算式子及對判定不適用設備提供調降計算等建議。API 579 在缺陷安全評估部份和 BS 7910、R6 都相差不大，但有很多內容是其它標準未討論到的，卻是在分析上十分重要的。

設備缺陷的類別很多，有的因腐蝕、沖蝕而生、有的因材質變化，但考量傳統 $t_{mm} > t_{min}$ 的觀念是假設均勻減薄缺陷，因此，本研究僅針對壓力容器上金屬損失(metal loss)類型的損傷，發展相關的適用性評估技術。

三、壓力容器設計概念

適用性評估中，需針對設計進行驗證，在金屬損失部份便是透過計算最小所需厚度。API 579 是基於 ASME PBVC 而建立，國內壓力容器建造主要是基於 CNS 國家標準建立因此透過壓力容器的設計瞭解壓力設備之胴體與端板設計原則，設計厚度需透過壓力、負載與容許應力而得，故厚度所代表意義為設備強度，因此評估設備堪用性時，不僅以單純厚度比較而是由強度觀點進行。

壓力容器設計上用的元件，由各種不同幾何形狀的胴體與端板構成，設計公式如表 2(僅以圓柱殼體為例)，旨在呈現 CNS 與 ASME 設計公式的異同。依 CNS 第三種容器規定，內存致死性物質、液化氣體、壓縮乙炔氣與使用氣體實施耐壓試驗之壓力容器不得當作第三種容器，故第三種容器非為勞委會所規定之高壓氣體特定設備，不在本研究探討範圍。

基本上，CNS 9789 第一種容器的設計理念與 ASME 頗不相同。CNS 9789 第二種容器的設計理念，包含厚度設計公式幾與 ASME BPVC 相同，因此，可以簡略的推論，依據 CNS 9789 第二種容器故

設計建造的壓力容器，將可使用本研究所開發的適用性評估技術，評估設備的堪用性。

表 2 圓柱型胴體

ASME	CNS9789 第 2、3 種容器	CNS9789 第 1 種容器
僅受內壓之圓周方向應力(縱向接頭)之計算厚度		
$t_{min}^c = \frac{PR_c}{SE - 0.6P}$	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$t = \frac{PR}{S - 0.5P}$
軸方向應力(圓周接頭)之計算厚度		
$t_{min}^L = \frac{PR_c}{2SE + 0.4P}$	$t = \frac{PR_c}{SE + 0.4P}$	N/A
P ：內部設計壓力(MPa：psi) R ：胴體之內半徑，內半徑= $D/2$ $LOSS$ ：均勻金屬損失 (cm：in)		$R_c = R + LOSS + FCA$ D ：胴體的內直徑(cm：in) FCA ：未來腐蝕裕度(cm：in)
S ：材料之設計溫度下之基本容許應力(MPa：psi) E ：熔接接合品質係數(銲接效率)或管孔群效率，取二者中較小之值 註：N/A 表示無相關資料		

四、設備堪用性判定標準

一般事業單位在了解設備堪用性程度時，傳統上多以最小量測厚度 t_{mm} 與設計上的最小所需厚度 t_{min} 相比。 t_{min} 是設計值，代表可以承受容器工作壓力的最小的、安全的厚度值。

厚度量測是許多壓力容器定期檢查不可或缺的項目，當結構的殼受到腐蝕的影響時，會產生如圖 1 所示的剖面結構，凹陷區域為金屬損失區域，最深處厚度為 t_{mm} 。雖然各部位厚度不同，一般在檢查時，是視同殼厚只剩下 t_{mm} 的厚度，明顯簡化問題的複雜度。所以，當 $t_{mm} \geq t_{min}$ 時，表示容器為可接受情況，故可繼續運轉使用。當 $t_{mm} < t_{min}$ 時，即表示設備無法工作壓力下，無法安全運轉。

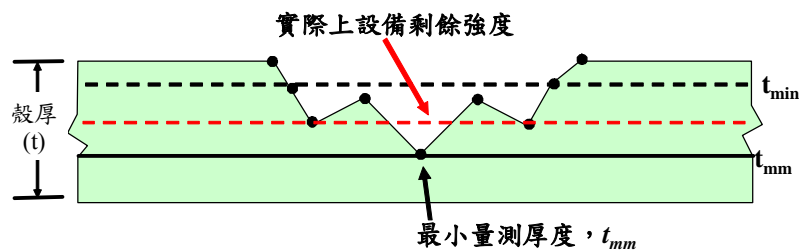


圖 1 受腐蝕作用的殼壁剖面圖

一般的認知是，當容器厚度的量測數值出現低於設計上的最小所需厚度時，即表示設備有故障的危險，必須立即維修或汰換該座設備。但，熟悉設計法則的人大概都知道，其實在進行設計時，實際上是有很大的安全係數內的。以往，由於結構分析不易，且在安全考量的原則是「保守為上」，因此，都接受當 $t_{mm} < t_{min}$ 時，即表示設備壽命終止的陳述。

反之，若說當 $t_{mm} < t_{min}$ 時即應進行維修是過於保守的作法，那還有多少安全的空間？除了維修或將設備淘汰以外，還有其它選擇嗎？「調降負載」(de-rating) 如何進行？也就是在傳統理解的危險狀況($t_{mm} < t_{min}$)到設備真正的危險(強度不足)之間，其實還是有不小的空間。這個多出來的安全空間，對工廠的價值是，表示多出來的生產時間和維修的準備時間。此外，一個應相對改變的觀念是，任何量測或分析的目的是在了解設備是否具有足夠強度，而非單純比較設備厚度值。

五、適用性評估

適用性評估中，各缺陷評估可依缺陷所在設備部位、是否有外加負載及相關規定等選用評定等級(Level)，評定等級可分為 3 個等級：Level 1、2、3。在這 3 個評估等級中，計算程序複雜度及精確度由低到高依序為 Level 1 < Level 2 < Level 3。

Level 1 是以簡化評估程序及強度計算式，配合檢查數據及相關量測結果，提供適用性判定，Level 1 僅能針對圓柱殼、圓錐殼或管線直管部份等，且主要受力為來自壓力容器的內壓。其簡單性其實來自分析的結構對像為形狀對稱、邊界及受力條件的單純。

比較起來，Level 2 需要更詳細的檢查與維修保養數據的配合，如使用應力計算數據。Level 2 分析對像除了 Level 1 涵蓋項目外，還包括壓力容器上的噴嘴與管線歧管的銜接處、管板接合處、強化環等，也就是元件設計的所需厚度並非建立在與壓力、負載的元件上。

Level 3 評估在缺陷相關的強度計算上使用破壞力學或有限元素法，以得到更精細的數據，雖有最高精確度，但所需數據及資料相對於現場是不易取得，且計算費時費力。

當評估設備為不堪用時，可以選擇深入評估或是調整設備運轉壓力或維修等。而當評估結果為設備堪用時，則可利用評估程序對應各缺陷的剩餘壽命計算式推估。這三種評估等級主要差異在結構的強度計算精確度和支援的作業項目不同。三種評估等級比較總結列於表 1。

表 1 評估等級差異

評估等級	適用缺陷所在部位	關於外加負載的限制	所需數據
Level 1	1. 壓力容器之圓柱殼或圓錐殼等部位 2. 球形壓力容器和儲槽 3. 球形、橢圓形及端板 4. 管線系統的直管部分 5. 不含結構配件的彎頭	外加負載不可使用於 Level 1 評估中	1. 設備基本資料 2. 缺陷資料，缺陷尺寸、厚度等。 3. 容許應力值資料 4. 其它，依照各缺陷要求資料
Level 2	1. 壓力容器或儲槽的噴嘴與管線歧管的銜接處 2. 錐型連接段的補強區 3. 管板接合處 4. 法蘭、管線系統	外加負載可使用於 Level 2 評估中	1. Level 1 所需資料 2. 應力分析結果 3. 缺陷詳細特徵及數據
Level 3	以上部位皆可使用，此外可用於金屬損失位於橢圓端板、碟型端板或圓錐轉換區的肘部。	外加負載可使用於 Level 3 評估中	1. Level 1、2 所需資料 2. 有限元素或破壞力學所需資料 3. 材質實驗結果等

六、局部減薄評估技術

局部減薄評估用於元件因腐蝕/沖蝕、機械損害所在局部區域形成的金屬損失。局部減薄 Level 1 評估流程如圖 2 所示，Level 2 評估流程如圖 5。

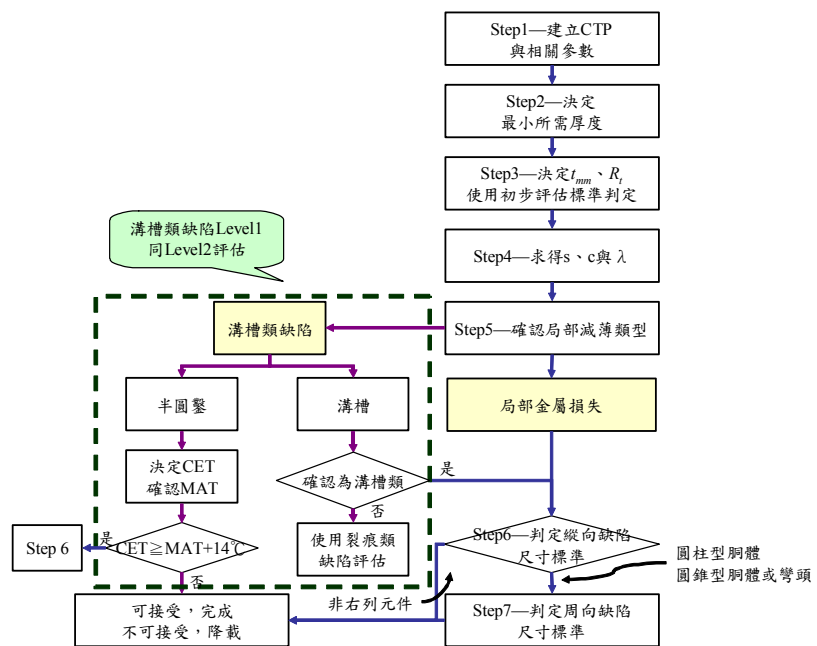


圖2 局部減薄Level 1評估流程

Level 1 評估步驟為：

1. Step1—建立關鍵厚度剖面圖(CTP)，並決定 D 、 FCA 、 g_r 、 L_{msd} 、 $MAWP$ 、 MFH 、 RSF_a 等參數。

D 為缺陷所在元件的直徑

FCA 為未來腐蝕裕度

g_r 為溝槽類缺陷的半徑

L_{msd} 為局部減薄區域邊緣至結構上主要不連續處的最近距離

$MAWP$ 為最大允許工作壓力

RSF_a 為容許的剩餘強度係數

2. Step2—計算最小所需厚度。由於各個國家所採用的設計規範都不同，這個數據主要來自設計規範，且與形狀有關。
3. Step3—決定最小測量厚度(t_{mm})、剩餘厚度比(R_t)、缺陷尺寸(s)及殼參數(λ)。

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_{\min}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{Dt_{\min}}} \quad (2)$$

4. Step4—使用以下條件判定缺陷大小，若同時符合下列需求，則進行 Step 5；否則，依 Level 1 評估結果，此缺陷為不可接受。

$$R_t \geq 0.2 \quad (3)$$

$$t_{mm} - FCA \geq 0.25(\text{cm}) \quad (4)$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{Dt_{\min}} \quad (5)$$

5. Step5—為局部減薄區域(LTA)(減薄區域不含溝槽或半圓鑿)，則進行 Step 6；否則，需確認下列溝槽類缺陷標準。

- (1). Step5.1—使用下列方程式計算關鍵溝槽半徑(g_r^c)

$$g_r^c = \max[0.25t_{\min}, 0.64(\text{cm})] \quad (6)$$

- (2). Step5.2—若缺陷的相關參數，符合下列兩個判斷式，則進行 Step 6。若不符合則不為溝槽類缺陷，建議使用局部金屬損失或裂痕類方法進行評估。

$$g_r \geq g_r^c \quad (7)$$

$$\frac{g_r}{(1 - R_t)t_{\min}} \geq 1.0 \quad (8)$$

(3). Step 5.3—若缺陷是屬於溝槽，則進行 Step 5.6；否則，缺陷若為半圓鑿，則需以操作及設計之狀態，判斷元件之關鍵暴露溫度(*CET*)。

(4). Step 5.4—判定最小允許溫度 (Minimum Allowable Temperature, *MAT*)。

MAT 可由機械設計資料、材料規格、和材料數值等提供，如衝擊實驗。對於使用未經衝擊測試的材料所製造的壓力容器，可依照材質特性篩選曲線並使用脆性破壞發生溫度與金屬厚度關聯得到 *MAT*。

(5). Step 5.5—當 *CET* 與 *MAT* 符合下式，則進行 Step 5.6；否則，進行 Step 5.7。

$$CET \leq MAT + 14 \quad (\text{或 } MAT + 25^\circ F) \quad (9)$$

關鍵暴露溫度(Critical Exposure Temperature, *CET*)定義為操作條件、大氣條件下推算出的最低金屬溫度，為設備最低的操作溫度。

(6). Step 5.6—進行 Step 6 後即完成評估。

(7). Step 5.7—依 Level 1 結果，此溝槽類缺陷為不可接受。

6. Step6—將計算而得的 λ 與 R_t ，於圖 3 中找出所在區域為可接受與否。若 λ 與 R_t 的對應位置位於曲線的上方(可接受區域)，缺陷的縱向為可接受。反之，則為不可接受。除此之外需判斷剩餘強度係數(*RSF*)，可利用下式計算，且計算得到的 *RSF* 必須大於 RSF_a 才符合標準。

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)} \quad (10)$$

$$M_t = (1 + 0.48\lambda^2)^{0.5} \quad (11)$$

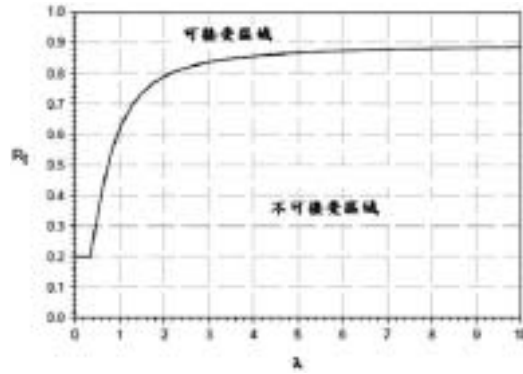


圖 3 胴體上之局部金屬損失的判定標準

7. Step7—對於圓柱型胴體與圓錐型胴體，使用圖 4 估算缺陷的周向範圍。將計算而得的 c/D 與 R_t 值，輸入圖 4。若 c/D 與 R_t 值的對應位置位於曲線的上方，則缺陷的周向大小是可接受的；否則，缺陷的周向大小是不可接受的。

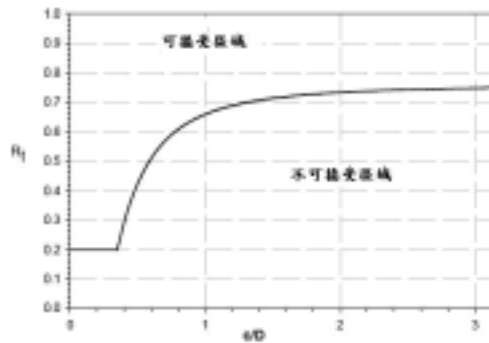


圖 4 圓柱胴體上最大容許周向大小的判定標準

跟 Level 1 比起來，Level 2 對剩餘強度係數(RSF)的計算較為嚴謹。在 Level 2 中判斷縱向 CTP 的剩餘強度係數。若縱向 CTP 的厚度剖面圖產生顯著的變動，則依下列之程序所計算而得的 RSF 會較 Level 1 的為嚴謹。

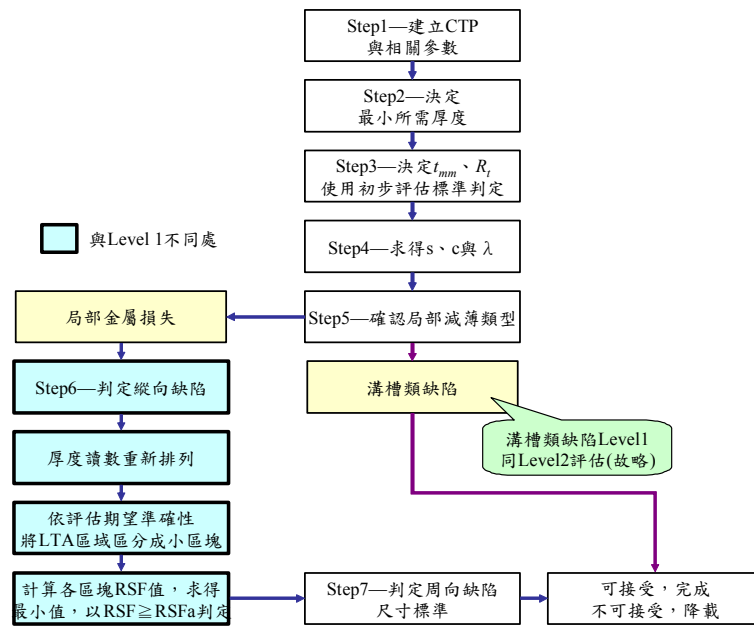


圖 5 局部減薄 Level 2 評估流程

Step 1 至 Step 5 大略與 Level 1 評估流程相似，故此由 Step 6 敘述。

1. Step 6.1—將金屬損失區域的厚度讀數由小而大排列。
2. Step6.2—設起始評估的點位於最大金屬損失的位置，即位於厚度輪廓數據中的最小量測厚度(t_{mm})。其次的開始點，則依據 Step6.1 的順序。
3. Step6.3—於目前的評估起點，將厚度剖面圖細分成一系列的小區塊。小區塊的分割數量與寬度則依所期望的準確性而定。
4. Step6.4—對所有的小區塊，利用下列的方程式，計算其剩餘強度係數。 A^i 為 s^i 處的金屬損失面積。 A_0^i 為 s^i 處之原始的金屬面積。

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i} \left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)} \quad (12)$$

$$\text{其中， } A_0^i = s^i t_{\min} \quad (13)$$

M_t^i 稱為 Folias factor 與結構類型有關，如為圓柱型胴體，

$$M_t^i = \left[\frac{1.02 + 0.4411(\lambda^i) + 0.32409(\lambda^i)^4}{1.0 + 0.02642(\lambda^i)^2 + 1.533(10^{-6})(\lambda^i)^4} \right] \quad (14)$$

如為球型胴體與端板，

$$M_t^i = \frac{1.0005 + 0.49001(\lambda^i) + 0.32409(\lambda^i)^2}{1.0 + 0.50144(\lambda^i) - 0.011067(\lambda^i)^2} \quad (15)$$

5. Step6.5—針對每一小缺陷區塊，計算 RSF^i 。其中，最小的 RSF^i 即代表整個缺陷區域的剩餘強度係數值。
6. Step6.6—對下一個評估區重複 Step6.3~Step6.5。
7. Step6.7—Level 2 分析所使用的剩餘強度係數(RSF)，為取所有評估區的最小值。

若 $RSF \geq RSF_a$ ，則局部減薄區域是符合 Level 2 的標準。若 $RSF < RSF_a$ ，則元件上的缺陷是不符合 Level2 的標準，此元件可執行元件降載或維修。當元件評估的結果無法接受時，評估程序提供元件降載的估算方法。以下為承壓元件(壓力容器與管線)的降載計算方法。

適用性評估依缺陷類型不同提供不同的剩餘強度係數(RSF)計算，在 Level 1 評估中，縱向、周向缺陷及 Level 2 評估的周向缺陷皆使用(10)中式子計算。而 Level 2 評估中縱向缺陷則使用式(12)計算。

在適用性評估中，提供計算 RSF 的方法。若計算所得 RSF 大於 RSF 的容許值，則受損元件可持續使用。若計算所得 RSF 小於 RSF 的容許值，則元件必須考慮維修、降載或採取補救措施減低運轉環境的影響。使用 RSF 計算調降後容許工作壓力的公式如下：

$$MAWP_r = MAWP \left(\frac{RSF}{RSF_a} \right) \quad \text{for } RSF < RSF_a \quad (16)$$

其中， $MAWP_r$ = 受損元件調降後的最大容許工作壓力

$MAWP$ = 正常元件的最大容許工作壓力

RSF = 依照元件缺陷及劣化機制計算的剩餘強度係數

RSF_a = 容許剩餘強度係數

除上述方法外，尚可利用適用性評估所給予最大容許工作壓力

(MAWP)與薄膜應力(σ)式子得知相關資訊，並利用其式計算應調降壓力值。以圓柱型胴體之受內壓之圓周方向應力的計算厚度式為例，最小所需厚度為式(17)、最大容許工作壓力為式(18)及薄膜應力為式(19)。

$$t_{\min}^c = \frac{PR_c}{SE - 0.6P} \quad (17)$$

$$MAWP^c = \frac{SEt_c}{R_c + 0.6t_c} \quad (18)$$

$$\sigma_m^c = \frac{P}{E} \left(\frac{R_c}{t_c} + 0.6 \right) \quad (19)$$

七、評估案例

1. 案例說明

有一壓力容器於檢查期間，發現有腐蝕現象。此容器的設計與建造依據為 ASME BPVC, Section VIII, Division 1。表 2 所列為壓力容器基本資料。表 3 為缺陷厚度量測數據，其中縱向、周向量測間距同為 0.254cm。

表 2 基本資料表

操作壓力(P)	21.093kg / cm ²
操作溫度(T)	125° C
內部直徑(D)	189cm
標稱厚度(t_{nom})	2.40cm
均勻金屬損失	0cm
未來腐蝕裕度	0cm
建造材質	SA 516-70
焊接效率	0.95
距離結構不連續處	38.1cm
容許剩餘強度係數	$RSF_a=0.9$

表 3 量測數據

縱向檢 測 數據	周向檢測數據							周向 CTP
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
M1	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
M2	2.40	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	2.40	1.32
M3	2.40	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	2.40	1.32
M4	2.40	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	2.40	1.32
M5	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
縱向 CTP	2.40	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	2.40	單位 <i>cm</i>

2. 傳統作法

最小量測厚度 t_{mm} 為 1.32cm；最小所需厚度 t_{min} 為 1.43cm，故 $t_{mm} < t_{min}$ 是不可以接受的，必需立即進行降載或相關措施。

3. 適用性評估技術作法

首先，判斷缺陷所在位置以計算出 $t_{min}^C = 1.43cm$ 與 $t_{min}^L = 0.85cm$ 則 $t_{min} = \max[t_{min}^C, t_{min}^L]$ 最小所需厚度 (t_{min}) 為 1.43cm。剩餘厚度比 (R_t) 為 0.77；縱向缺陷尺寸 (s) 為 12.116cm，周向缺陷尺寸 (c) 為 9.576cm；殼參數 (λ) 為 0.86。

利用初步判定標準，如下：

$$R_t = 0.77 \geq 0.2 \quad (\text{符合})$$

$$t_{mm} - FCA = 1.321cm \geq 0.25cm \quad (\text{符合})$$

$$L_{msd} = 38.1cm \geq 1.8\sqrt{Dt_{min}} = 27.076cm \quad (\text{符合})$$

由於上述三項接為符合，故將 $R_t=0.77$ 、 $\lambda=0.86$ 、 $c/D=0.05$ ，置入圖 3 與圖 4 進行判定。

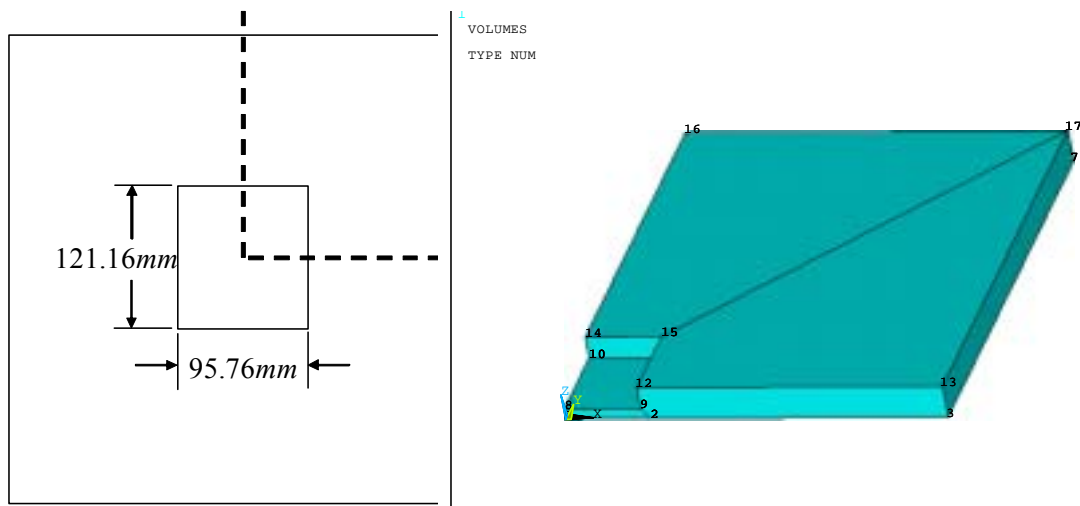
λ 與 R_t 落於圖 3 的對應位置位於曲線上方(可接受區域)，且 RSF 為 0.96 是大於容許剩餘強度 0.9，故缺陷的縱向為可接受。 R_t 與 c/D 落於圖 4 的對應位置位於曲線上方(可接受區域)，依 Level 1 的評估，缺陷的周向為可接受。由於同時符合上述條件，故局部減薄是可接受，可持續運轉毋需進行降載。

假設當厚度減薄至 0.762cm 時，則 R_t 為 0.44、 λ 為 0.94、 c/D 為

0.06，置入圖 3 與圖 4 中，發現缺陷的縱向標準是不可接受的，周向為可接受的，另外 $RSF = 0.83 \leq RSF_a = 0.9$ 。基於上述依 Level 1 評估，局部減薄是不可接受的，需進行降載或進一步分析，才可持續運轉。

4. 有限元素法

為了驗證前列分析結果，我們建構了一個簡單的有限元素殼板模型，進行計算。進行的案例有二，範圍如圖 6(a)所示。案例中一個減薄中心區域厚度為 1.32cm ；另一案例減薄中心區域厚度為 0.762cm 。由於壓力容器的操作狀態屬靜力學問題，而且為對稱結構，如圖 6(b)。因此，有限元素實體模型如圖 6(b)。



(a) 模擬部位，中間的矩形為一局部減薄區域 (b) 1/4 對稱的有限元素模型

圖 6 局部減薄缺陷模型

一般常用的失效評估準則，使用等效 von Mises 應力 σ_{eqv} 。如果 σ_{eqv} 大於材料的降伏應力 σ_y 時，即有失效危險。 σ_{eqv} 定義如下式

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \sigma_{eqv} \quad (20)$$

本處所使用材料之降伏應力為 2671.78 kg/cm^2 。第一個減薄中心區域厚度為 1.32cm 的案例中，計算所得之 $\sigma_{eqv} = 1852.39 \text{ kg/cm}^2$ ，該值遠小於材料之降伏應力為 2671.78 kg/cm^2 ，也就是當殼體上存在這樣

一個缺陷長×寬為 $121.16\text{cm} \times 95.76\text{cm}$ ，而殼厚只剩 1.32cm 的情況，在強度上仍是足夠的。其結果與前述適用性評估結果一致。注意，這座壓力容器的設計最小所需厚度為 1.425cm ，以傳統觀念，這座設備將被視為不堪用。

至於，當減薄中心區域厚度降為更嚴重的 0.762cm 時，適用性評估結果恰好由堪用轉為不堪用。而由有限元素計算的結果，減薄區域內的 $\sigma_{eqv} = 2516.25 \text{ kg/cm}^2$ ，雖然其值尚略小於降伏應力 2671.78 kg/cm^2 。雖然評估結果還勉強堪用，但一般使用者碰到這種狀況時，大既都會選擇進行維修了。

因此從安全的角度，使用前述適用性評估的作法，在沒有使用有限元素工具的情況下，推估這個厚度為不可接受是合理的。這個案例的目的在了解適用性評估技術的可用性。結果可謂滿意。

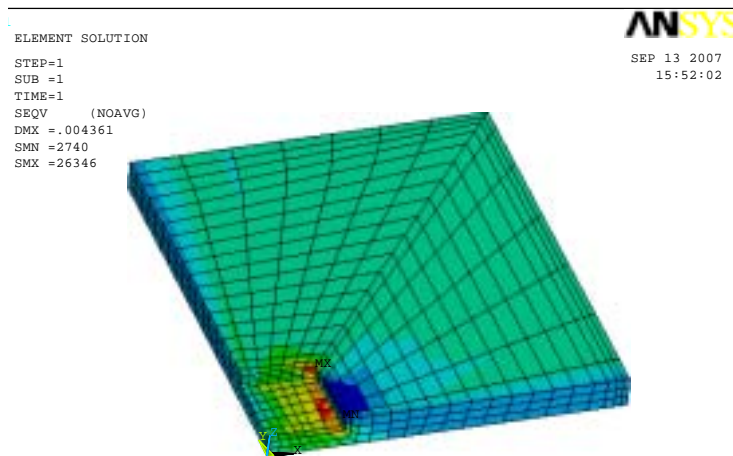


圖 7 應力分析結果

八、結果與討論

工廠裡對設備堪用性判定的標準是厚度必須大於設計上的最小所需厚度；如果非破壞檢查結果顯示量測的最小厚度小於最小所需厚度，即表示須立即進行維修。但多數人不了解，壓力容器的設計上有很大的安全係數。而且，強度才是重點，厚度只是一項與強度幾成正比、容易作為強度指標的參數。因此，從性能觀點，工廠實仍應回歸

到結構強度上。當然，前提是強度計算是容易執行的。這也就是適用性評估技術發展的基礎。

在前述的容器案例中，殼壁上最深處的厚度為 1.32cm ，遠小於設計所容許的最小厚度 1.43cm 。如以傳統的判定標準，這個設備會被列為極度危險，需立即維修；適用性評估技術則將缺陷長度與容器直徑的相對大小做為變數，建立各比值下，結構所能維持安全運轉的厚度比例關係(R_t)，由複雜的計算代替以簡單的查圖即可。

另外，為了驗證適用性評估結果，我們建立了一個簡單的有限元素模型，在這個模式中，結構的 Von Mises 應力小於材料的降伏應力。

受腐蝕區域為局部減薄類型，使用 Level 1 分析時，判別為堪用。另一個案例為不堪用，在此可對減薄區域詳細估算後，瞭解更詳盡缺陷狀況。雖然，這座設備所屬工廠基於「安全考量」，最後選擇維修這座設備。適用性評估的設計道理是，由簡略到深入分析，對應力與強度的估算愈準確。因此，使用適用性評估技術加上恰當的監管，即使設備的厚度已低於設計容許值時，也是能安全運轉的。

另外，適用性評估分析的時機，並非針對所有已發現有腐蝕的設備，而是針對，腐蝕部位的厚度已低於設計值時；而工廠希望了解還有多少使用空間，或工廠礙於生產特性，無法立即停工時，才有必要考量適用性評估。對於，製程可以隨時中止的工廠，還是以保守為宜。

適用性評估標準方法的價值之一是，它提供了共同的分析基準與平台。以往，不同的方法或不同解析度、或對負載條件的處置，會使得分析結果呈現出不一致的結論，在繼續使用或立即停工之間爭議不休。使用這個方法後，大家可以在安全的前提下，進行討論。

設備安全性判定應擺脫傳統迷失，不將設備厚度作為判斷標準，而是使用結構強度進行判斷，除此之外也應考慮設備整體是否可持續運轉，也就是性能是取向，以結果論來考量。

八、參考文獻

- (1) American Petroleum Institute, API 510: Pressure vessel inspection code: Maintenance inspection, Rating, Repair, and Alteration,

2001。

- (2) American Petroleum Institute, API 579: Fitness-for-Service, 2000。
- (3) Hideo Kobayashi, Shinsuke Saka, Masyuki Asano, development of a flaw evaluation handbook of the high pressure institute of Japan, pressure vessels and piping, 2000.
- (4) R.A. Ainsworth, An overview of the European flaw assessment procedure SINTAP and its validation, pressure vessels and piping, 2000.
- (5) C.S. Wiesner, Engineering critical analyses to BS7910-the UK guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, pressure vessels and piping, 2000.
- (6) 勞委會，危險性設備內部檢查延長開放期限或替代檢查審查注意事項，2003。
- (7) 曾月華，壓力容器劣化機制與殘餘強度評估系統之建立，碩士論文，高雄第一科技大學，高雄市，2005。