

螺絲緊固失效以及其預防方式

~第四集：環境因素的螺栓失效~ (下半部)

文/西田新一，佐賀大學名譽教授

1. 前言

我在前一集(上半部)中描述了腐蝕環境中的兩種螺栓疲勞失效現象。此外，我透過講解延遲失效的機制，介紹了延遲失效所引起的失效案例。雖然在重複施加某種應力的情況下，不論螺栓是何種鋼材等級或形狀，螺栓的疲勞失效會發生，但環境因素的失效只會發生在高張力螺栓上，這種螺栓在延遲失效的案例中對腐蝕性環境非常敏感。本文會介紹另一個環境因素的螺栓失效案例，或稱為應力腐蝕龜裂(SCC)，這種案例又與上一集的螺栓失效案例有些不同⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

2. 氫氣保存器的水平儀專用螺栓失效⁽¹⁾⁻⁽³⁾

2.1 失效概要

氫氣保存器的水平儀後側偵測到了過量的氣體洩漏。透過檢查發現，水平儀上的螺栓斷裂了。由於使用了許多同種類的水平儀，所以對斷裂的螺栓進行細部調查，以防止同樣的麻煩再發生。該水平儀已使用了6年又10個月，其規格材質為：SUS630 (H900)、1/4-20UNC、統一標準螺紋、外徑 $\phi 6.35\text{mm}$ 、牙底直徑 $\phi 4.976\text{mm}$ 、牙距 1.27mm 、螺紋長度 25.4mm 、頭部下方的整體長度 63.5mm 、緊固扭力 $2\text{kgf}\cdot\text{m}$ 。在大氣壓力 $70\text{kgf}/\text{cm}^2$ 的情況下會產生 317kgf 的軸向張力(見圖4.1)。

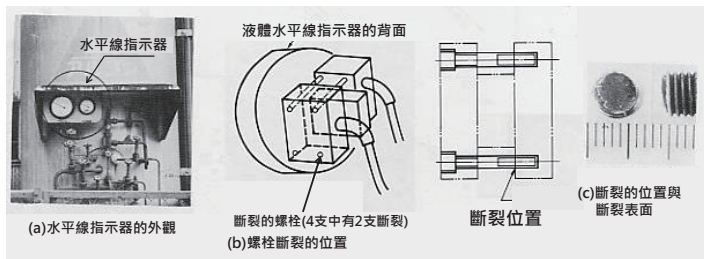


圖4.1 設備外觀和斷裂位置

2.2 調查的物件

- (1) 分析化學成分並透過光學顯微鏡觀察結構
- (2) 外觀檢查
- (3) 力學屬性(硬度分布)
- (4) 觀察斷裂的表面並分析斷裂表面的元素

2.3 調查與討論後的結果

(1) 螺栓材料

圖4.1列出螺栓的化學成分和力學屬性。該螺栓的Cu和Nb成分偏離了SUS630的JIS標準。

表4.1斷裂螺栓的化學成分和力學屬性

	化學成分 [質量, %]									力學屬性	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	P, S [kgf/mm ²]	T, S [kgf/mm ²]
斷裂的螺栓	0.07	0.38	0.35	0.021	0.015	4.58	15.46	2.24	0.07	-	(150~160)*
SUS630 規格	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	3.00/ 5.00	15.50/ 17.50	3.00/ 5.00	0.15/ 0.45	≥120	≥134

* 數值轉換自維氏硬度數：P, S代表試驗應力[proof stress]；T, S代表拉伸應力[tensile stress]

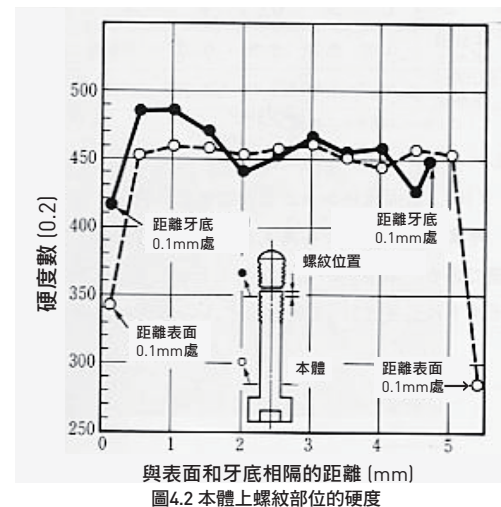


圖4.2 本體上螺紋部位的硬度

圖4.2是硬度分布。雖然可在斷裂點和螺栓本體這兩者之間觀察到明顯的硬度分布差異，但整支螺栓的硬度還是很高。

圖4.3是光學顯微鏡的照圖。顯微結構顯示出一個經過回火的麻田散鐵結構，因此可知回火的溫度相當低。

(2) 觀察斷裂表面與分析其元素

圖4.4與4.5顯示粒間破斷的表面在斷裂表面上佔了很大的比例，最終導致延性斷裂(ductile fracture)。在分析一部份的斷裂表面時偵測到了氯與硫的成分(見圖4.6)。在牙底和螺栓本體上觀測到腐蝕凹坑(圖4.7)。

(3) 螺栓的緊固力

假設螺栓的緊固力為 $2\text{kgf}\cdot\text{m}$ ，螺栓在使用中的軸向張力為 317kgf ，扭力係數為 0.15 。在前述條件之下，將在牙底橫斷面形成的應力為 $123\text{kgf}/\text{mm}^2$ 。一般來說，緊固高張力螺栓所需的軸向張力是 $105\text{kgf}/\text{mm}^2$ ，這種張力可說是相當大。如前所述，當螺栓的張力強度很高($150\sim 160\text{kgf}/\text{mm}^2$ 左右)且緊固所需的軸向張力很大的時候，螺栓就會很容易受到環境的影響，可能會脆裂(見圖4.5)。

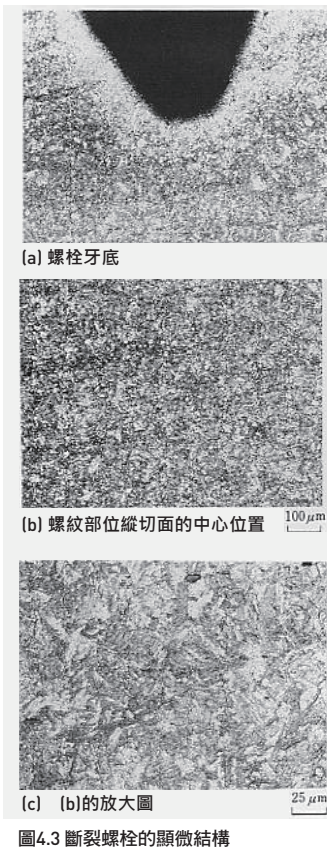


圖4.3 斷裂螺栓的顯微結構

(4) 總結

總結以上描述的調查結果，可判斷是承受大量軸向緊固力的高張力螺栓內形成的點蝕造成了應力腐蝕。預防這種龜裂的有效方法是將熱處理條件從H900改成H1075以降低螺栓強度，並把螺栓緊固扭力從2 kgf-m減少到1 kgf-m。此外，圖4.8是降伏強度對硫化氫的應力腐蝕開裂門檻值造成的影響，需要採用更足量的材料來對抗應力腐蝕龜裂。

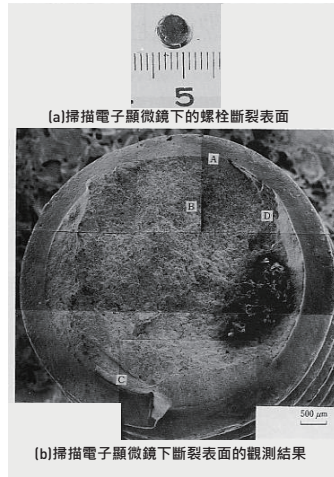


圖4.4 斷裂表面的觀測結果

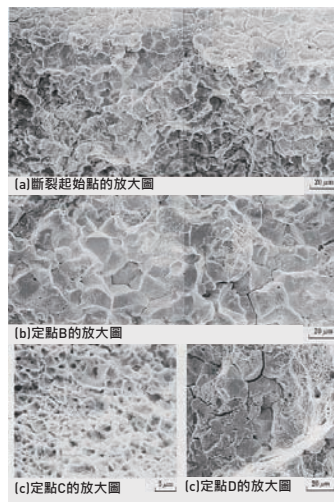


圖4.5 掃描電子顯微鏡下斷裂表面的觀測結果

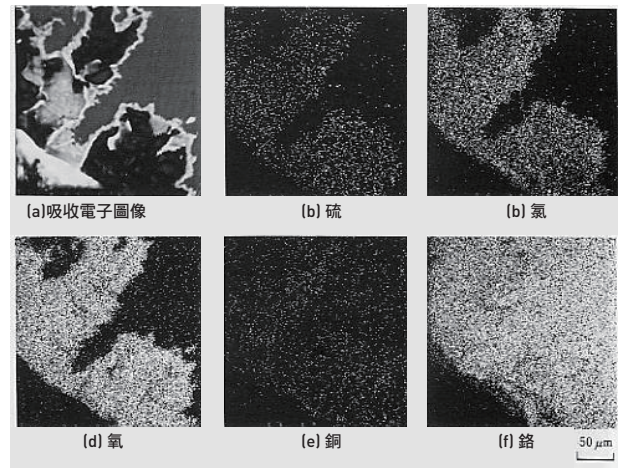


圖4.6 斷裂表面的化學分析

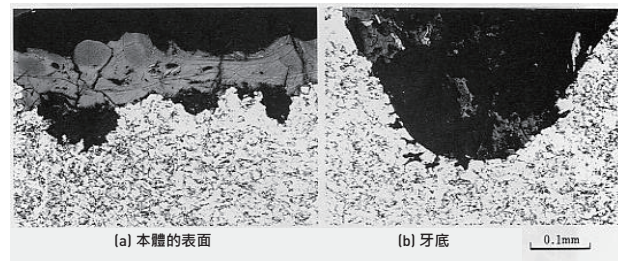


圖4.7 螺栓縱切面的顯微結構

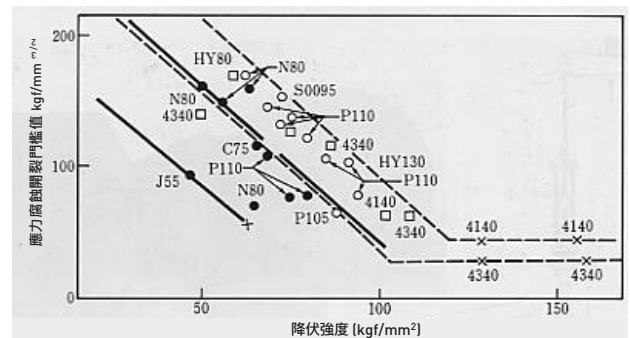


圖4.8 降伏強度對硫化氫的應力腐蝕開裂門檻值造成的影響

3. 加熱爐的雙頭螺栓失效^[4]

為了省能源、降低重量、縮短工程時間以及降低成本，加熱爐近期使用了絕緣材料而非耐火磚。由於爐內溫度非常高，用來緊固絕緣材料的雙頭螺栓材質採用沃斯田鐵不鏽鋼(通常是SUS304)。鋼胚熱爐的SUS304雙頭螺栓發生了失效的狀況，為了防止類似的失效在未來又發生並對採用絕緣材料的作法提出解釋，已對斷裂的雙頭螺栓進行調查。

3.1 失效的概要

鋼胚熱爐是由預熱區、加熱區和裝料端的均熱區所組成，大氣溫度在攝氏600至800度之間，也就是相對較低的溫度。圖4.9是被緊固的雙頭螺栓的示意圖。如圖所示，雙頭螺栓透過電阻熔接到厚度4.5mm的SS400鋼板上，其位置就在離滑管爐底2公尺高的爐頂內。鋼板側的絕緣材料採用二氧化矽板、高嶺土耐火纖維(a)與高嶺土耐火纖維(b)的三層結構。火爐運作三年後，有幾百支的雙頭螺栓斷裂了，而且面積達20平方公尺的絕緣材料掉落。此外，鋼板的溫度超過攝氏60度，且燃氣的結露溫度在理論上是58度。當火爐的溫度降低，鋼板、螺栓和絕緣材料之間就可能會結露。

上述的加熱爐使用六個月後，冷卻海水從滑管滲漏了出來。海水的滲漏發生在預熱區和加熱區之間滑管的兩個部位上。由於熱爐動力的減量幅度小，該爐在海水滲漏的狀況下已連續運作五天。滲漏的海水在爐內的高溫中汽化並從火爐的煙囪排放出去，一部分的高溫蒸氣會被爐頂的絕緣材料吸收掉。此外，在停機並冷卻三天後維修了滑管的補償功能，爐頂的絕熱材料也持續使用。

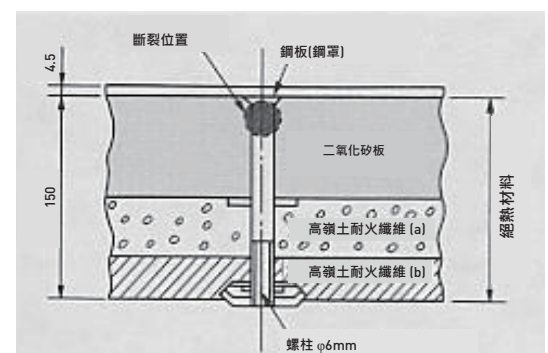


圖4.9 緊固的螺栓示意圖

3.2 斷裂螺栓的外觀

圖4.10是斷裂螺栓的外觀，這些螺栓是從鋼板的接合部位開始斷裂，螺栓的表面覆蓋了咖啡色的銹屑。此外，銹屑的顏色印到了一部份的內絕緣材料(二氧化矽板的黑色區塊)上，此絕緣材料與鋼板接觸。基於上述，濕氣會存留在鋼板、二氧化矽板與螺栓之間。

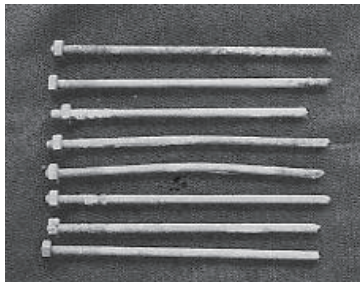


圖4.10 斷裂螺栓的外觀 (φ6mm)

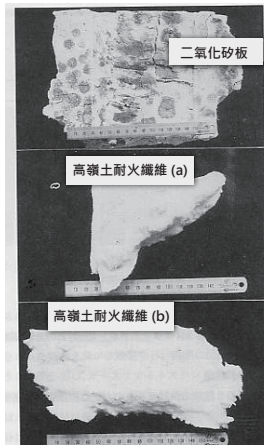


圖4.11 斷裂螺栓附近的絕熱材料外觀

力的可能性很高：加熱爐運作中的振動→絕緣材料和螺栓的橫向搖動→螺栓接合部位的彎折應力。此外，由於硬度增加了 $\Delta Hv=10\sim 40$ ⁽⁴⁾⁽⁶⁾(參考圖4.17)，估計冷加工的比例會在1~4%。

(4) 腐蝕性化合物的化學分析

把雙頭螺栓和鋼板浸泡溶解在混合過純水(35°C, 200ml)的溶液(經攪拌與過濾)中，分析其銹屑和三種絕緣材料。表4.3列出上述銹屑與絕緣材料的化學成分。如表所示，鋼板

3.3 調查結果與討論

(1) 螺栓的生產歷程

螺栓是透過以下程序生產的：冷拉線→固溶處理→滾牙。除了斷裂的螺栓之外，火爐採用的同一批未使用過的螺栓產品也被調查了其電阻焊接的部位，顯示出正常的沃斯田鐵顯微結構。表4.2列出化學成分，其分析結果顯示

表4.2 SUS304螺柱的化學成分 [質量, %]

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
螺柱	0.064	0.48	1.28	0.038	0.002	8.70	18.40	0.02
SUS304 規格	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00~10.50	18.00~20.00	—

符合SUS304的規格。因此該螺栓並不是因為產製過程的瑕疵而斷裂。

(2) 螺栓的顯微結構

圖4.12和4.13顯示雙頭螺栓的縱切面的顯微結構。多處的細微龜裂從外表(腐蝕凹坑的底部)產生，並往垂直於螺栓軸線的方向，沿著晶界呈鋸齒狀擴散。整支螺栓都有晶界碳化物的沉澱。因此該螺栓是經過400~800度高溫的晶界碳化物沉積。由於上述的狀況會在絕緣材料掉落後才發生，因此螺栓開始斷裂的溫度會低於400度。

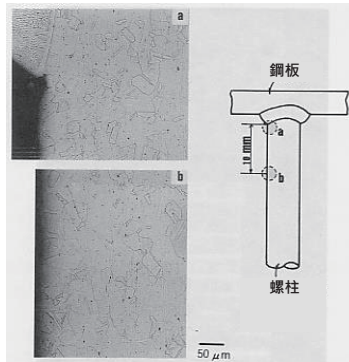


圖4.12 未使用的螺柱縱切面的光學顯微結構

圖4.14顯示雙頭螺栓縱切面的光學顯微鏡照圖以及應力腐蝕龜裂的發生。圖4.15是雙頭螺栓的縱切面和裂痕的放大圖。如圖所示，應力腐蝕龜裂發生時，裂痕會四處產生，並隨著穿晶斷裂沿著晶界擴散。此外，裂痕就像閃電一樣往各方向擴散，呈現明顯的樹枝狀。

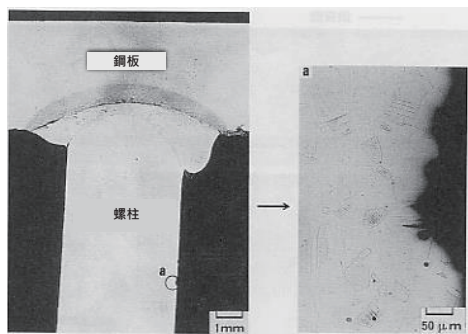


圖4.13 SUS304螺柱縱切面與其腐蝕凹坑的放大圖

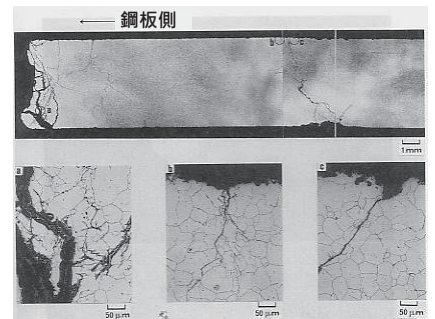


圖4.14 螺柱縱切面與其應力腐蝕龜裂的顯微結構

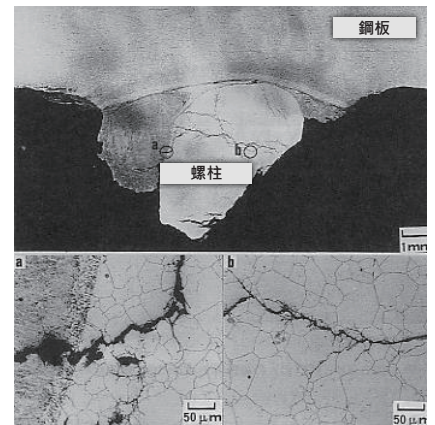


圖4.15 斷裂螺柱的縱切面與其裂痕的放大圖

(3) 透過硬度分布評估施加到雙頭螺栓上的應力

圖4.16是雙頭螺栓縱切面的硬度分布。斷裂的螺柱A與螺柱B，以及未使用之螺柱的硬度各介於 $Hv=170\sim 23$ 與 $Hv=160\sim 190$ 之間。前者的硬度又比後者高出了 $\Delta Hv=10\sim 40$ ，且此數值會因為加工硬化而產生。原先支撐絕緣材料的軸向拉伸應力是0.69MPa，其應力無法影響雙頭螺栓的加工硬化。以下的應

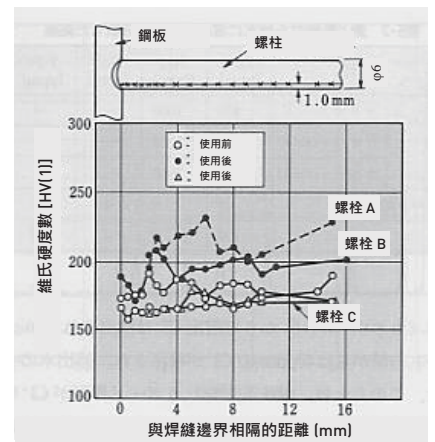


圖4.16 螺柱縱切面的硬度分析

被偵測出150ppm的氯-1，與鋼板接觸的與絕緣材料被測出400ppm。由於未使用的二氧化矽板中的氯含量為35ppm，所以氯在鋼板和二氧化矽板之間的凝結程度會有4~10倍之多。另一方面，居中的絕緣材料(高嶺土耐火纖維a)與外部絕緣材料(高嶺土耐火纖維b)並未被檢測出溶解的氯-1。此外，斷裂螺栓的銹屑被偵測出40ppm的氯-1，且溶解過銹屑的水大約呈現中性的酸鹼值。這代表螺栓和二氧化矽板之間的邊界呈現含氯-1的潮濕狀態，邊界會容易發生縫隙腐蝕(腐蝕凹坑)和應力腐蝕龜裂(見表4.4)。

圖4.18和4.19分別是X光照射下雙頭螺栓表面之銹屑的繞射圖，以及鋼板和化學分析。圖4.20是不鏽鋼的相對SCC(應力腐蝕龜裂)抗性，此相對抗性顯示較高的數值出現在往上以及往右的方向。

3.4 總結與應對措施

依據鋼胚熱爐之SUS304雙頭螺栓失效的調查，筆者做出總結並提出應對措施。海水從熱爐的滑管滲漏，侵入到鋼板、螺栓和二氧化矽板，導致發生應力腐蝕龜裂，會使SUS304雙頭螺栓失效。此現象會被視為等同於絕緣材料中沃斯田鐵不鏽鋼的外部應力腐蝕龜裂(ESCC)。此外，從二氧化矽板侵入到失效部位的氯-1會被視為上述失效的起因之一。

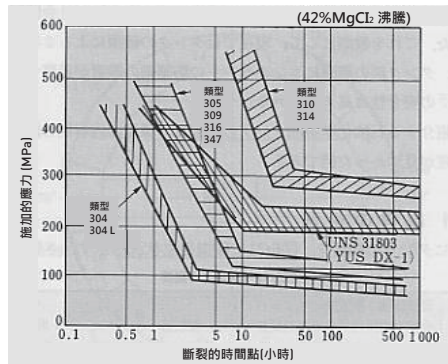


圖4.20 不鏽鋼的相對應力腐蝕龜裂抗性

上述失效的應對措施是去預防氯-1侵入到上述的環境中。換句話說，會要求做仔細的維修和管理以預防海水從滑管滲漏，並使用無氯-1的絕緣材料以及抗應力腐蝕龜裂的鋼材。防止間晶龜裂的抗SCC不鏽鋼顯示以下的順序SUS304 < SUS316 < SUS310S < SUS430，15/18Cr-12/15Ni-3/5Si沃斯田鐵不鏽鋼。火爐的壽命約十年，考量到SUS310S的可焊性，SUS310S在此案例中已經很夠用(見圖4.20)。

補充上述，先前的案例是起因於應力腐蝕龜裂。以一般的應力腐蝕龜裂來說，龜裂會四處產生，斷裂的表面在沒有顯微塑性變形的狀況下呈現鋸齒邊緣。應力腐蝕龜裂不只會晶間擴散也會穿晶擴散，呈現明顯的樹枝狀，這與其它的斷裂紋路不同。在為失效的狀況做正確的判斷時，破裂表面以及縱切面的觀測都很重要。換句話說，多數的研究者卻往往只會觀測斷裂表面而已；反之，他們不只應調查斷裂表面，也該調查其縱切面，並透過比較上述的斷裂紋路來判定失效的原因。

4. 結語

雖然螺栓和螺帽栓合的元件是機械設備中最具代表性的接合零件，但它們失效時就會被當作耗材，然後被新的零件替換掉。本文已介紹了兩例典型的環境因素導致的螺栓失效(應力腐蝕龜裂)。總結以上的調查結果，歸納出以下事項：

- (1) 氬氣保存器的水平儀專用螺栓失效：高張力螺栓是以高軸向張力緊固住，螺栓內有點蝕的孔洞，引起了應力腐蝕龜裂。為預防這種斷裂，有效的做法是將熱處理條件從H900改成H1075以降降低螺栓強度，並把螺栓緊固扭力從2 kgf-m減少到1 kgf-m。
- (2) 加熱爐的雙頭螺栓失效：海水從熱爐的滑管滲漏、侵入到鋼板、螺栓和二氧化矽板，導致發生應力腐蝕龜裂，會使SUS304雙頭螺栓失效。上述失效的應對措施是去預防氯-1侵入到上述的環境中。換句話說，會要求做仔細的維修和管理以預防海水從滑管滲漏，並使用無氯-1的絕緣材料以及抗應力腐蝕龜裂的鋼材。此外，考量到SUS310S的可焊性，SUS310S在此案例中已經很夠用。

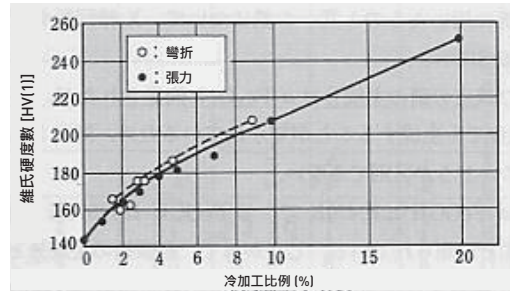


圖4.17 冷加工比例與SUS304維氏硬度數之間的關係

表4.3 銹屑與純水中溶解之絕緣材料的化學成分

材料	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	T, Fe (ppm)	酸鹼值
絕緣材料					
二氧化矽板	400	1,000	-	-	-
高嶺土耐火纖維(a)	0	1,000	-	-	-
高嶺土耐火纖維(b)	0	2,800	-	-	-
螺柱的銹屑	40	0	0	0	6.5
鋼板的銹屑	150	0	0	110	6.8

表4.4 螺柱的使用狀態

應變 (%)	氯 (ppm)	溫度 (°C)	酸鹼值
1 ~ 4	40 ~ 400	60 ~ 400	6.5 ~ 6.8

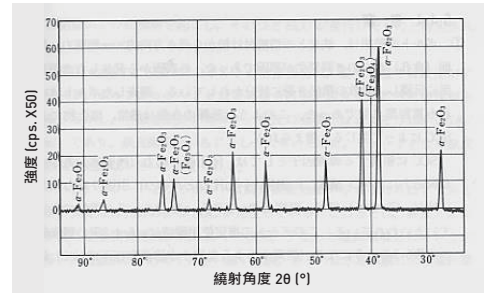


圖4.18 螺柱表面銹屑的X光繞射圖與化學分析

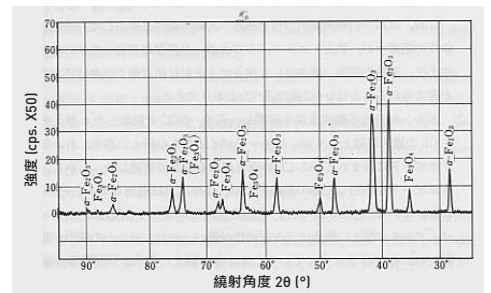


圖4.19 鋼板表面銹屑的X光繞射圖與化學分析

參考文獻:

- (1) S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, (1993), pp.85 and 122, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (日文)
- (2) S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1993), pp.71 and 103, Butterworth Heinemann Co. Ltd. UK
- (3) S. Nishida, Failure Analysis of Machines & Components, (1995), pp.85 and 122, Kinkado Co. Ltd, (日文)
- (4) S. Nishida, Failure Physics, (1991), pp.164, Japanese Plant Maintenance Association, (日文)