

第六章第五節 密封評估

目錄

五、密封評估	6.5.1-1
(一) 密封系統與作業說明	6.5.1-1
1. 密封系統	6.5.1-1
(1) 密封特性	6.5.1-1
(2) 密封鋼筒	6.5.1-1
(3) 密封體穿孔	6.5.1-2
(4) 設計文件、法規與標準	6.5.1-2
2. 作業說明	6.5.1-2
(1) 概述	6.5.1-3
(2) 密封作業	6.5.1-3
(3) 試驗、檢驗與測試	6.5.1-4
(二) 密封分析	6.5.2-1
1. 密封要求	6.5.2-1
2. 洩漏率	6.5.2-1
3. 正常分析	6.5.2-2
(1) 放射性物質的洩漏	6.5.2-3
(2) 密封容器的壓力	6.5.2-3
4. 異常及意外分析	6.5.2-3
5. 分析結果	6.5.2-4
(三) 密封監測	6.5.3-1
(四) 避免用過核子燃料劣化之評估	6.5.4-1
(五) 參考文獻	6.5.5-1

附圖目錄

圖 6.5.1-1 密封鋼筒密封邊界.....	6.5.1-6
-------------------------	---------

附表目錄

表 6.5.1-1 密封鋼筒密封邊界的銲接.....	6.5.1-7
----------------------------	---------

五、密封評估

(一) 密封系統與作業說明

1. 密封系統

(1) 密封特性

本系統所採用之密封鋼筒可用以貯存用過核子燃料，並確保內部物質在正常、異常與意外情況下不致外洩。密封鋼筒之密封邊界是由鋼筒外殼、底板、密封上蓋及兩個穿孔蓋所構成。於密封鋼筒裝載燃料後，在裝載作業現場將密封上蓋及兩個穿孔蓋用銲接結合，密封上蓋及兩個穿孔蓋以雙層銲接作密封。第一層密封銲接是指密封鋼筒外殼上緣內側與密封上蓋、密封上蓋與兩個穿孔(排水孔/排氣孔)之內層孔蓋的銲道所構成；第二層密封銲接是指密封環與密封鋼筒外殼上緣內側、密封環與密封上蓋、密封上蓋與兩個穿孔(排水孔/排氣孔)之外層孔蓋的銲道所構成。密封邊界如圖 6.5.1 所示。密封邊界不使用螺栓或其他機械式方法封閉。密封邊界處的銲接分類，如表 6.5.1-1 所描述。

(2) 密封鋼筒

密封鋼筒包含之主要組件，分別為鋼筒外殼、底板、密封上蓋。密封鋼筒外殼呈直立之圓筒狀，由厚度約 12.7 mm (0.5 in) 的不銹鋼(304/304L)板滾製並以全滲透銲接結合，底部則以厚度約 69.9 mm (2.75 in) 的不銹鋼(304/304L)板銲接結合，以達成密封功能。密封鋼筒的內外徑約分別為 1803.4 mm (71 in) 與 1828.8 mm (72.0 in)，高度約為 4871.7 mm (191.8 in)。現場裝載燃料後執行密封上蓋及兩個穿孔蓋的封銲。密封鋼筒外殼無對外穿孔，密封上蓋及其穿孔蓋採用雙層銲接作密封、無機械式封閉裝置(例如 O-Ring)，故依 ISG-5 [9]之規範，封銲的密封邊界不需再進行密封監測。

密封鋼筒設計標準(基準與準則)如本報告第三章表 3.1.1-4 本系統主要設計基準與接受準則之內容。設計特徵如本報告第三章表 3.1.1-5 密封鋼筒及提籃設計參數之內容。密封邊界部分的製造依據 ASME Section III, Subsection NB [10]，法規不適用部分 (Code Exception) 如本報告第三章表 3.1.1-8(密封鋼筒採用 ASME 替代方案一覽表)所示。

密封鋼筒之外殼與底板銲接而成的筒狀容器為密封邊界的一部份，其設計、成形、銲接、檢驗與測試皆依照 ASME Section III, Subsection NB [10]，屬於品質分級 A 等級組件。

(3) 密封體穿孔

密封體在密封上蓋上有兩個穿孔 (裝配快速連接頭) 供排水與排氣作業使用，其中一孔(排水孔)有連接水管延伸至筒底，用以排出筒內的積水，另一孔(排氣孔)則用以灌入空氣或惰性氣體至密封鋼筒內以協助排水，當排水完成後，此孔將用以真空乾操作業及回填氬氣。回填氬氣完成後，兩個穿孔均用雙層孔蓋予以封銲，封銲後穿孔即不再使用。

(4) 設計文件、法規與標準

密封鋼筒詳細構造如本報告第三章附錄 A 工程設計圖所示，密封鋼筒之設計、製造與結構分析所依據的設計基準、法規與標準於本報告第三章表 3.1.1-4~5 與表 3.1.2-1 分別有說明。在相關工程設計圖上亦有標示。

氬氣洩漏測試 (Helium leak test) 標準須滿足 ANSIN14.5-1997 [7]的漏密(leaktight)的要求(洩漏標準為洩漏量小於或等於 1×10^{-7} ref cm^3/s 空氣，此洩漏標準約等同於小於或等於 2×10^{-7} cm^3/s 氬氣)。

2. 作業說明

以下密封作業相關之敘述，多數為燃料裝載後在現場實施的密封作業，受到現場輻射與屏蔽(傳送護箱)內環境之限制，需要採用 ASME 的替代方案來執行作業，而這些替代方案皆經 US NRC 核准的標準作業。

(1) 概述

密封鋼筒裝載燃料後，將密封上蓋置於鋼筒上端，密封上蓋環形階梯下緣與鋼筒外殼內側進行第一層第一部分的密封銲接。密封上蓋厚度約為 228.6 mm(9 in)的不銹鋼(304/304L)板，在現場以開槽銲接與密封鋼筒外殼結合。密封上蓋上有排水孔與排氣孔；密封上蓋具屏蔽功能，保護作業人員在銲接、排水、抽真空、乾燥與氬氣回填作業時之輻射安全。在第一層第一部分的密封銲接完成後，密封鋼筒將進行水壓測試 (hydrostatically pressure tested)，以確認其密封性。在通過該水壓測試及完成排水、抽真空、乾燥與氬氣回填作業後，將排水孔與排氣孔用內層孔蓋予以封銲，成為第一層密封銲接的第二部分。水壓測試程序如本報告第五章一、(一)節所述。

密封邊界第二層密封銲接係由密封環分別與密封上蓋／密封鋼筒外殼上緣加上排水孔與排氣孔之外層孔蓋封銲所構成。密封上蓋有螺紋孔可連結吊升機構，以吊運裝載後的密封鋼筒。密封邊界如圖 6.5.1-1 所示。

(2) 密封作業

在第一層密封銲接中，密封上蓋環形階梯下緣與密封鋼筒外殼內側之間施以多層之開槽銲接，銲道檢測則採用漸進式液滲檢測 (progressive PT)，依據 ASME Code Section V, Article 1, 6, and 24 [11]規範及 ASME Code Section III, NB-5350 [10]為接受標準。在密封上蓋封銲完成後，密封鋼筒將執行水壓測試。在水壓測試及排水、抽真空、乾燥與氬氣回填等作業完成後，排水孔與排氣孔之內層孔蓋施以銲接密封。銲道表面執行液滲檢測(PT)，PT 依據 ASME Code Section V, Article 1, 6, and 24 [11]規範及 ASME Code Section III, NB-5350 [10]為接受標準，詳細操作如本報告第五章一、(一)節所述。

第二層密封銲接包含密封上蓋與外層孔蓋、密封環與密封上蓋、密封環與密封鋼筒外殼上緣等銲道所構成。外層孔蓋對密封上蓋施以銲接密封；密封環對密封上蓋與密封環對鋼筒外殼銲道在現場施以開槽銲接密封，並對銲道表面實施液滲檢測 (PT)，該液滲檢測需依據 ASME Code

Section V, Article 1, 6, and 24 [11]，並根據 ASME Code Section III, NB-5350 [10]為接受標準。

所有銲接程序之建立與驗證需依據 ASME Code Section IX [6]，所有銲接人員與設備之驗證亦需依據 ASME Code Section IX [6]。

銲道如有缺陷，該缺陷需依據 ASME Code Section III, NB-4450 [10]之規定修復，修復後依原檢測方法與接受標準執行再檢測。

(3) 試驗、檢驗與測試

密封鋼筒需經過以下測試以確保滿足規範的要求：

所有的元件均以目視檢查其合於工程設計圖面。

所有可看見的鋼筒外殼銲接結合部分需做目視檢查，依據 ASME Code Section V, Article 1 and 9 [11]，ASME Code Section III, NF-5360 [10]為接受標準。銲道如有缺陷(以 PT 為例，相關缺陷定義於 ASME Code Section III, NB-5350 中)，該缺陷需依據 ASME Code Section III, NB-4450 [10]之規定修復，修復後依原檢測方法與接受標準執行再檢測。

密封鋼筒外殼軸向及周向銲道需執行射線照相檢查(RT)與液滲檢測(PT)。RT 依據 ASME Code Section V, Article 1 and 2 [11]規範及 ASME Code Section III, NB-5320 [10]為接受標準。PT 依據 ASME Code Section V, Article 1, 6, and 24 [11]規範及 ASME Code Section III, NB-5350 [10]為接收標準。

密封鋼筒外殼與底板銲接結合部分執行液滲檢測(PT)及超音波檢測(UT)，UT 依據 ASME Code Section V, Article 1 and 5 [11]規範及 ASME Code Section III, NB-5330 [10]為接收標準。

製造工廠內，密封鋼筒外殼軸向及周向銲道與底板銲道除了上述各項檢查與檢測之外，需再施以水壓測試與氬氣洩漏測試。水壓測試須符合 ASME Section III NB-6000 的要求，而氬氣洩漏測試須滿足 ANSI N14.5 [7] 的漏密要求。若有偵測到氬氣洩漏，根據 ASME Section III NB-4450 [10]，對洩漏位置進行修理。修理完成後需再檢測，其合格標準與原標準同。所有的洩漏測試與檢驗皆須依據核可的程序書執行，並留下書面記錄。

製造廠須於交貨前將密封鋼筒組合完畢，其目的在確認所有部件皆至定位，且能測試相關組件組合的吻合度（包括提籃組件、密封上蓋、排水管、孔蓋與密封環等）。

以上所述為密封鋼筒於工廠製造時所須進行之試驗、檢驗與測試。以下則將略述密封鋼筒於核電廠內裝載燃料後所須執行之密封相關測試工作。

依據 ISG-15 [5]與 ISG-18 [4]的規定，在現場組裝的第一層密封銲接的第一部分密封銲道須使用漸進式液滲檢測，該檢測需檢測該銲道之根部銲層、最終表面銲層及中間銲層。對於排水孔/排氣孔之內、外孔蓋及密封環相關之銲道，須檢測其最終表面銲層。本液滲檢測（PT）依據規範與接受標準同前，必要時檢測結果並需以錄影、照相或其他方式記錄。

密封鋼筒在裝載燃料及完成第一層密封銲接第一部分的封銲後，排水孔及排氣孔之內層孔蓋封銲前執行 130 psig 的水壓測試，接受標準為維持 10 min 後，無目視可見的洩漏，目的在檢測密封上蓋的封銲是否洩漏。

於內層孔蓋與密封上蓋之封銲完成後，用氬氣洩漏測試來驗證內層孔蓋銲接的密封性。洩漏測試須符合 ASME Section V Article 1 and 10 [11] 及滿足 ANSI N 14.5-1997 [7]的漏密要求。若有偵測到氬氣洩漏，根據 ASME Section III NB-4450 [10]，對洩漏位置進行修理。修理完成後需再檢測，其合格標準與原標準同。所有的洩漏測試與檢驗皆須依據核可的程序書執行，並留下書面記錄。

不論於製造工廠或核電廠現場執行相關檢驗時，非破壞檢測人員資格須依據 SNT-TC-1A [8]予以評定。每一銲道檢測需準備書面報告，報告內容最少應包含組件名稱、代碼、材料、檢測人員的等級、非破壞性檢測程序及所發現的缺陷（如果有的話）。

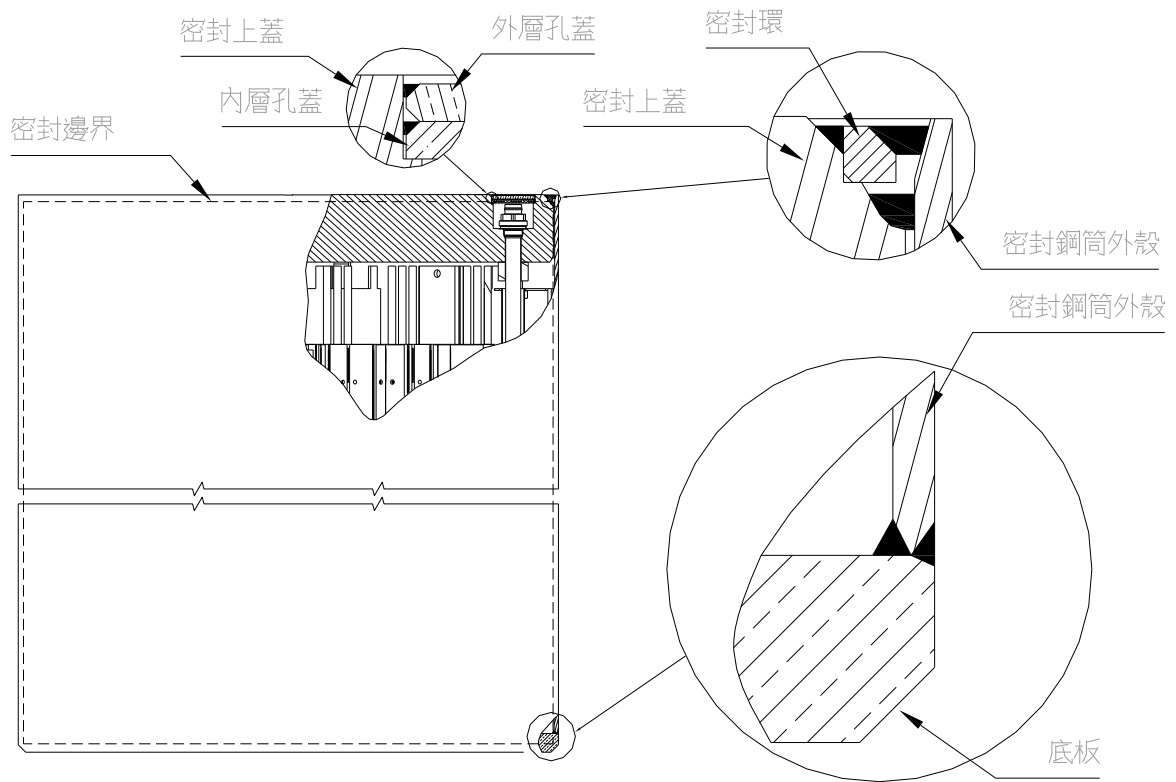


圖 6.5.1-1 密封鋼筒密封邊界

表 6.5.1-1 密封鋼筒密封邊界的銲接

密封邊界銲接		
銲接位置	銲接型態	銲接分類 ASME Section III, NB
外殼軸向	全滲透槽銲（工廠施行）	A
外殼周向（如果有使用）	全滲透槽銲（工廠施行）	B
底板對外殼	全滲透槽銲（工廠施行）	C
密封上蓋對外殼	斜角槽銲（現場施行）	C
孔蓋（排水孔與排氣孔）對密封上蓋	斜角槽銲（現場施行）	C
密封環對外殼/密封環對密封上蓋	斜角槽銲（現場施行）	C

註：銲接分類之定義請參閱參考文獻之[10] ASME NB-3351 Weld Joint Category.

(二) 密封分析

1. 密封要求

密封鋼筒可容納 87 組 BWR 燃料束，在 50 年的設計使用壽命期，密封鋼筒可以有效防止放射性內容物的洩漏，並防止外部氣體的滲入，以避免所貯存的用過核子燃料的護套損壞。密封鋼筒密封邊界的設計是據 ASME Code Section III, Subsection NB [10]以確保在正常、異常與意外的條件下，均能保持其密封性。

密封鋼筒沒有外露通往內部的孔道，沒有機械式的密封來維持其密封性。所以，依 ISG-5 [9]不須連續監測銲接所形成的密封體。同時密封鋼筒的設計允許在必要的情況下，其所貯存的燃料束可再取出。

密封鋼筒設計基準如本報告第三章表 3.1.1-4 所示，核二廠之用過核子燃料特性如本報告第三章表 3.1.1-2 所示。

2. 洩漏率

密封邊界是由密封鋼筒外殼之不銹鋼組件銲接結合而成，密封鋼筒外殼軸向與圓周向的銲道是用目視檢查、液滲檢測(PT)、射線照相檢測(RT)與超音波檢測(UT，僅用於外殼對底板之銲道)來確認其完整性，並使用氦氣洩漏測試(LT)來確定其密封性。密封上蓋與鋼筒外殼的多層銲道檢測，是利用漸進式液滲檢測(至少檢測根部、中間銲層與表面)來確認該銲道的完整性與密封性。密封上蓋與鋼筒外殼的銲道銲接完成後，須依 ASME Code Section III NB-6000 [10]的規定進行現場水壓測漏測試。

為了確認鋼筒外殼及排水/排氣孔內層孔蓋與密封上蓋的密封邊界銲道密封性，該銲道須經氦氣洩漏測試，該洩漏測試須滿足 ANSIN 14.5-1997 [7]的漏密要求。有了此一嚴格的洩漏標準規範，ISG-5 [9]也說明，如密封邊界連接係由銲接所構成(非使用金屬 O-ring)，且滿足 ANSIN 14.5-1997 之洩漏要求下，可不計算放射性物質洩漏。ISG-5 原文相關說明如下：

如有密封蓋的貯存容器其設計與測試能符合 ANSI N14.5-1997 中的漏密定義則不須進行下述 a 至 d 的分析。

a. 洩漏分析需符合 ANSIN14.5-1997 的說明。

b. 在正常的運轉（貯存）條件下，劑量的計算是依據允許的洩漏量對貯存場或管制區邊界（在本案中指廠界）之人員所造成的影響，其值不超過 10 CFR 72.104(a)的規定。適用我國原能會頒布的「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第 14 條的規定，其值與 10CFR 72.104(a)一致為 0.25mSv/年。

c. 在假設意外的條件下，劑量的計算是依據允許的洩漏量對貯存場或管制區邊界（在本案中指廠界）之人員所造成的影響，其值不超過 10 CFR 72.106(b)的規定。我國未明確意外事件的管制規範，直接引用 10CFR 72.106(b)之規定，其值為 50mSv。

d. 洩漏分析需說明密封鋼筒內的惰性環境在貯存期間內可以被維持。

洩漏測試程序如本報告第五章一、(一)節所述之步驟，其可合理保證密封邊界的氣密性，並確認不致有任何放射性物質、分裂氣體、揮發物、腐蝕物與填充氣體之洩漏。

第一層密封銲接的第一部分密封銲道中，密封上蓋與密封鋼筒外殼的銲道沒有作氬氣洩漏測試，ISG-18 [4]有提供一個等效的作法，其適用於貯存用過核子燃料的不鏽鋼製密封邊界封銲，該內容為：依循 ISG-15 [5]規定，密封邊界銲道分析須考量材料容許強度的 80%，銲接須符合 ASME Code Section IX [6]規範需求。

3. 正常分析

密封鋼筒藉由傳送護箱傳送至混凝土護箱中，在此傳送過程，密封鋼筒將承受吊重負載。

當密封鋼筒置於混凝土護箱中，混凝土護箱可有效地保護密封鋼筒免於直接的自然天候負載，如風、雨、雪等。在正常操作條件下，主要的直接負載，來自衰變熱、太陽光與大氣溫度所導致的內壓增加。正常操作內壓的影響評估如本報告第六章三、(五)節所示。

(1) 放射性物質的洩漏

密封鋼筒於正常情況下的結構分析如本報告第六章二、(一)節所示，分析結果顯示在正常操作情況下，密封鋼筒不會洩漏。同樣地，在正常貯存情況下不會有放射性物質外釋。

(2) 密封容器的壓力

密封鋼筒、提籃及內部組件的材料皆不會與燃料池水起反應而產生氣體。碳鋼製的提籃及內部組件有作表面鍍膜（鎳）處理，避免與池水產生化學反應。

密封鋼筒在封閉以前施行排水、真空乾燥，及氬氣回填等作業，氬氣回填作業與其回填量，如本報告第五章一節所述。故密封鋼筒在封閉後，不會有明顯的其他氣體（如水氣、空氣）存在於筒中。在正常情況下，內壓的增加起因於內部氬氣的溫度升高，以及假設 1 % 燃料護套的損壞，所產生壓力約為 79.6 psig。根據這些條件所計算的筒內壓力增加量，會小於正常使用的設計壓力 100 psig，本報告第六章二、(一)節在正常情況下使用 110 psig 作結構相關的計算，可以涵蓋設計壓力，故不會因正常貯存環境所產生的內壓，而導致不良的影響。

由於密封邊界是藉由封銲所構成，在正常操作與貯存情況下，不會有任何密封邊界的損壞，所以，筒內放射性物質無洩漏之虞。

4. 異常及意外分析

密封鋼筒在異常情況時，假設 10 % 的燃料護套損壞，密封鋼筒內最大壓力不超過 90 psig，已被異常情況下結構計算壓力限值 130 psig 所涵蓋。假想意外事故時，如 100 % 燃料護套損壞或混凝土護箱進氣口全阻塞，密封鋼筒內最大壓力不超過 140 psig (此時溫度約為 299 °C)，也被意外情況下結構計算限值 250 psig 所涵蓋。

密封鋼筒是放在混凝土護箱內，混凝土護箱可有效地保護密封鋼筒免於直接的自然天候負載，如地震、洪水與颱風所產生的強力撞擊。為了評估的目的，異常情況的事項如本報告第三章一、(一)節所示，然而異常的條件不會在此考慮，是因為其不會較意外情況更為嚴苛。

密封鋼筒在異常與意外狀況的結構分析(採用異常 130 psig，意外 250 psig 作計算參數)，如本報告第六章二節及六節所示，在此種狀況下仍能維持結構完整性。由於密封結構完整，因此不會有放射性物質洩漏的問題。

貯存場地邊界的輻射劑量，在意外的條件下，根據法規 10 CFR 72.106b [1]對意外條件的曝露，在 100 m 最近廠界處，全身劑量需小於 50 mSv。

5. 分析結果

密封鋼筒可提供長時間貯存放射性物質。密封邊界是藉由封鐸所構成，以製造出堅固的障壁，使所有設計基準中的正常、異常與意外的條件下，均能避免放射性物質外釋。

密封鋼筒內經抽真空、乾燥再充滿氬氣，密封邊界能在長時間的貯存中，防止氬氣洩漏及阻隔外界空氣進入密封鋼筒內。避免空氣進入主要是為了防止燃料護套材料劣化。

本密封鋼筒密封系統符合法規 10 CFR 72.24 [1]，保護民眾免受洩漏出之放射性物質的影響。同時也符合法規 10 CFR 72.122 [1]用過核子燃料長期貯存之防護，使得未來對於其內容物進行再處理，也不會有作業安全上的顧慮。

(三) 密封監測

裝載核燃料後的密封邊界是由鋼筒外殼、密封上蓋與兩個穿孔蓋以雙層封銲方式所構成，在正常貯存的情況下，不會有任何密封邊界的損壞。而銲接的作業方式亦經過美國 NRC 審查通過的標準作業方法，且依 ISG-5 [9]之規範，銲接的密封邊界無放射性物質外釋之虞，因此，不須密封監測。

(四) 避免用過核子燃料劣化之評估

在本報告第六章三、(七)節與第六章三、(五)節之熱傳分析中，已對密封鋼筒內分裂氣體進行評估。在本報告第五章一、(一)節作業程序中說明，為確保貯存燃料及相關組件不會腐蝕劣化，密封鋼筒內填充的氦氣最低純度要求應不低於 99.995 % (依體積估算)。綜合上述各節之說明，無任何可能造成燃料劣化之環境或條件。

(五) 参考文献

- [1] 10 CFR 72, Code of Federal Regulations, "Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater Than Class C Waste," US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- [2] NUREG- 1536, "Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems," Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, January 1997.
- [3] PNL-6365, "Evaluation of Cover Gas Impurities and Their Effects on the Dry Storage of LWR Spent Fuel," Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, November, 1987.
- [4] ISG-18, "The Design / Qualification of Final Closure Welds on Austenitic Stainless Steel Canisters as Confinement Boundary for Spent Fuel Storage and Containment Boundary for Spent Fuel Transportation," US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, May 2003.
- [5] ISG-15, "Materials Evaluation," US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Revision 0, January 10, 2001.
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, "Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2001 Edition with 2003 Addenda.
- [7] ANSI N 14.5- 1997. "American National Standard for Radioactive Materials - Leakage Tests on Packages for Shipment," American National Standards Institute, Washington, DC, 1997.
- [8] Recommended Practice No. SNT-TC-1A, "Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing," The American Society for Nondestructive Testing, Inc., Columbus, OH, edition as invoked by the applicable ASME Code.
- [9] ISG-5 "Confinement Evaluation," US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Revision 1.
- [10] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NB, "Class 1 Components", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2001 Edition with 2003 Addenda.
- [11] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, "Nondestructive examination" American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2001 Edition with 2003 Addenda.