

第六章第五節 密封評估

目錄

(一) 密封系統與作業說明	6.5.1-1
1. 密封系統	6.5.1-1
2. 作業說明	6.5.1-3
(二) 密封分析	6.5.1-1
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
4. 意外分析	6.5.2-3
5. 分析結果	6.5.2-3
(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 密封鋼筒第一層與第二層密封邊界.....	6.5.1-7
圖 6.5.1-2 屏蔽上蓋穿孔及二層密封邊界詳圖.....	6.5.1-8

附表目錄

表 6.5.1-1 密封鋼筒密封邊界的銲接	6.5.1-9
-----------------------------	---------

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

INER-HPS 系統所採密封鋼筒可用以長期貯存 BWR 用過核子燃料，並確保內部放射性物質不致外洩。密封鋼筒第一層^(註)密封邊界是由密封鋼筒外殼、底板、屏蔽上蓋及兩個穿孔蓋所構成，用銲接來結合；密封鋼筒第二層^(註)密封邊界是由密封鋼筒外殼上緣與結構上蓋所構成，也是銲接結合。密封邊界如圖 6.5.1-1 及圖 6.5.1-2 所示。第一層與第二層密封邊界均不使用螺栓或其他機械式做封閉。密封邊界處的銲接分類，如表 6.5.1-1 所描述。

註：第一層與第二層密封邊界僅指密封作業之順序；與重要結構安全相關者為第二層密封邊界之結構上蓋及第一層密封邊界之密封鋼筒外殼。

(2) 密封鋼筒

密封鋼筒包含之主要組件，分別為密封鋼筒外殼、底板、屏蔽上蓋與結構上蓋。密封鋼筒外殼呈直立之圓筒狀，由厚度 16.0 mm(0.625 in)的不銹鋼(304L)板滾製並以全滲透銲接結合，底部則以厚度 44.5 mm(1.75 in)的不銹鋼(304L)板銲接結合，以達成密封功能。密封鋼筒的內外徑分別為 1,671 mm 與 1,703 mm，高度為 4,835 mm。現場裝載燃料後執行屏蔽上蓋與結構上蓋的封銲。密封鋼筒外殼無對外穿孔，無機械式封閉裝置，無密封環，依 ISG-5 之要求，封銲的密封邊界無須作密封監測。

密封鋼筒設計標準(基準與準則)如第三章 3.1.1-4 INER-HPS 系統主要設計基準與接受準則之內容。設計特徵如第三章表 3.1.1-5 密封鋼筒及提籃設計參數之內容。密封鋼筒的製造依據 ASME Code Section III, Subsection NB [3]，法規不適用部分(Code Exception)如第三章表 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第一層密封邊界的一部份，其設計、成形、銲接、檢驗與測試皆依照 ASME Code Section III, Subsection NB 相關規範在製造工廠完成，屬於品質分級 A 等級組件，其密封性能非常可靠。

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，須要許多 ASME 的替代方案才能執行作業，而這些替代方案皆經 NRC 核准的標準作業。

(3) 密封體穿孔

第一層的密封體在屏蔽上蓋上有兩個穿孔（裝配快速接頭）供抽水與排氣作業使用，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(通氣孔)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，此孔將用以真空乾燥及回填氦氣。回填氦氣完成後，兩個孔均用蓋板予以封銲，封銲後孔道將不再使用。最後將結構上蓋蓋上，並與密封鋼筒外殼上緣封銲接合形成第二層密封邊界。結構上蓋與密封鋼筒外殼沒有任何穿孔存在。

(4) 設計文件、法規與標準

密封鋼筒詳細構造如第三章一、(十)節工程設計圖所示，密封鋼筒之設計、製造與結構分析所依據的主要法規與標準於第三章表 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。

2. 作業說明

(1) 概述

在裝載燃料後，密封鋼筒分別有屏蔽上蓋與結構上蓋加以封銲。屏蔽上蓋為厚度 178 mm (7 in)的不銹鋼板，在現場以開槽銲接與密封鋼筒外殼結合。屏蔽上蓋上有排水孔與通氣孔，為提供輻射屏障，保護作業人員在銲接、排水、抽真空、乾燥與回填氦氣作業時之輻射安全。在屏蔽上蓋封銲完成後，密封鋼筒將進行氣壓測漏，以確認其密封性。在完成排水、抽真空、乾燥與回填氦氣作業後，將排水孔與通氣孔用孔蓋予以封銲，氣壓測漏程序於第五章描述。

第二層密封邊界係由結構上蓋與密封鋼筒外殼上緣所構成。結構上蓋為厚度 76 mm(3 in)的不銹鋼板，在現場以開槽銲接與密封鋼筒結合。結構上蓋可連結吊升機構，以吊運裝載後的密封鋼筒。

密封邊界如圖 6.5.1-2 所示，第二層密封邊界包含了結構上蓋、密封鋼筒外殼距離上緣 81 mm(3.2 in)處與緣口的銲道。

(2) 密封作業

密封鋼筒裝載燃料後，在現場安裝屏蔽上蓋與結構上蓋，並分別予以銲接密封。

屏蔽上蓋與密封鋼筒外殼之間施以多層之開槽銲接，銲道根部與最終表面均執行液滲檢測(PT)，依據 ASME Code Section V, Article 6 規範[5]及 ASME Code Section III, NB-5350 為接受標準[3]。在屏蔽上蓋封銲完成後，密封鋼筒將執行氣壓（水面上充以空氣、氦氣或氮氣）測漏測試。在排水、抽真空、乾燥與回填氦氣的作業完成後，排水孔與通氣孔蓋上孔蓋，並以單層銲接封閉。銲道表面執行液滲檢測(PT)，PT 依據 ASME Code Section V, Article 6 規範及 ASME Code Section III, NB-5350 為接受標準。詳細操作程序如第五章一、(一).7 與 9 節所述，壓力與洩漏測試的程序則於第五章一、(一).8 與 9 節所述。

第二層密封邊界是由結構上蓋與密封鋼筒外殼上緣所構成，亦在現場施以多層開槽銲接密封。銲道檢測採用漸進式液滲檢測（progressive PT），依據 ASME Code Section V, Article 6 規範及 ASME Code Section III, NB-5350 (PT) 為接受標準。

所有銲接程序之建立與驗證需依據 ASME Code Section IX 規範，所有銲接人員與設備之驗證亦需依據 ASME Code Section IX 規範[4]。

銲接缺陷修護符合 ASME Code Section III, NB-4450 規範，修護後的再檢驗方法與接收標準，依照第三章表 3.1.1-8 之第二項替代方案內容。

(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。

所有可看見的銲接結合部分需做目視檢查，依據 ASME Code Section V, Article 9，ASME Code Section III, NB-4424 與 NB-4427 為接受標準。銲道的缺陷需依據 ASME Code Section III, NB-4450 之規定修復，修復後依第三章表 3.1.1-8 ASME 替代方案執行相關檢測，並依據原接受標準再檢測。

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 2 規範及 ASME Code Section III, NB-5320 為接受標準。PT 依據 ASME Code Section V, Article 6 規範及 ASME Code Section III, NB-5350 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 5 規範及 ASME Code Section III, NB-5330 為接收標準。

屏蔽上蓋與外殼及穿孔蓋板之銲接結合部分，其銲道根部及最終表面需執行液滲檢測(PT)。結構上蓋與外殼之銲接結合部分，其銲道根部、每 9.5 mm (3/8 in) 厚度及最終表面需執行液滲檢測(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。

非破壞檢測人員資格須依據 SNT-TC-1A[7]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）。

現場組裝的密封銲接須使用液滲檢測(PT)。對於屏蔽上蓋與密封鋼筒外殼銲接之液滲檢測(PT)，檢測根部銲層與最終表面銲層。對於結構上蓋與密封鋼筒外殼銲接之液滲檢測(PT)，則檢測根部銲層、最終表面銲層及中間銲層(每層厚約 9.5 mm (3/8 in))。對於單層完成之銲道（屏蔽上蓋上排水孔/通氣孔之孔蓋），僅須檢測其最終表面銲層。

結構上蓋液滲檢測(PT)之結果，依照 ASME Code Section V, Article 6 之規定說明，其中包含所有相關的數據，必要時使用可重新審視其銲接完整性的紀錄，如錄影或照相等。

密封鋼筒外殼製造完成後，實施液壓測試，測試依照 ASME Code Section III, NB-6000 規範，合格標準為維持測試壓力(19 psig) 10 分鐘不降。之後能維持 15.3 psig 直到測試完成。

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，且能測試屏蔽上蓋組合的吻合度（包括了屏蔽上蓋、排水管與結構上蓋）。

密封鋼筒在裝載燃料及屏蔽上蓋封銲後，排水孔及通氣孔之孔蓋封銲前執行 35 psia 的氣壓測漏(leak testing)，接受標準為維持 10 min 的壓力不降，目的在檢測屏蔽上蓋的封銲是否洩漏。

屏蔽上蓋封銲完成(含孔蓋封銲)後，用氦氣洩漏測試來驗證屏蔽上蓋銲接的密封性。洩漏測試時將置一蓋板於屏蔽上蓋上方，以提供一洩漏測試所需之密閉空間，此空間將連結質譜儀洩漏偵測器，此偵測器的靈敏度須在 $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ 以上，以判別屏蔽上蓋的銲道是否以達到密封的標準(氦氣)。洩漏測試須符合 ANSI N14.5 的淨空包覆法(evacuated envelope method)的要求(洩漏標準為 $2 \times 10^{-7} \text{ std cm}^3/\text{s}$)。在氦氣洩漏測試完成後，若無法符合洩漏標準為 $(2 \times 10^{-7} \text{ std cm}^3/\text{s})$ 時，將採用嗅覺式(sniffer)洩漏測試，以確定屏蔽上蓋銲接的洩漏點，再加以修復；洩漏測試之合格標準為 $5 \times 10^{-5} \text{ std cm}^3/\text{s}$ ，測試儀器靈敏度為 $1 \times 10^{-5} \text{ std cm}^3/\text{s}$ ，符合 ASME Code Section V,

APPENDIX IV [5]法規要求(洩漏標準 1×10^{-4} std cm³/s)且採更嚴格之作業標準。

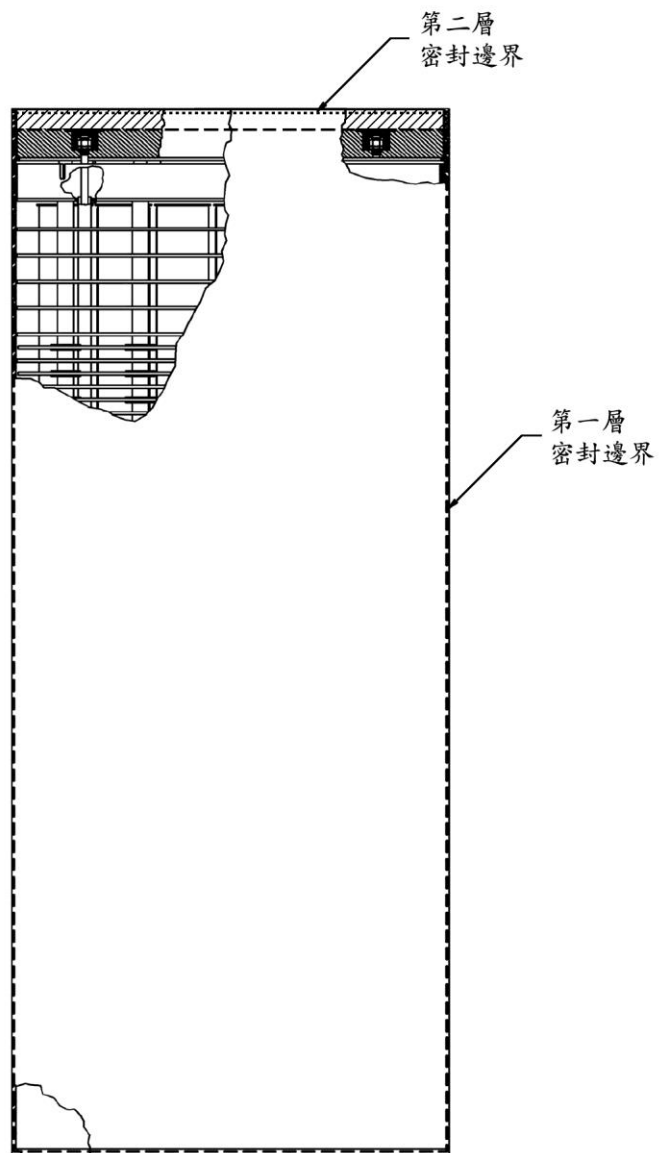


圖 6.5.1-1 密封鋼筒第一層與第二層密封邊界

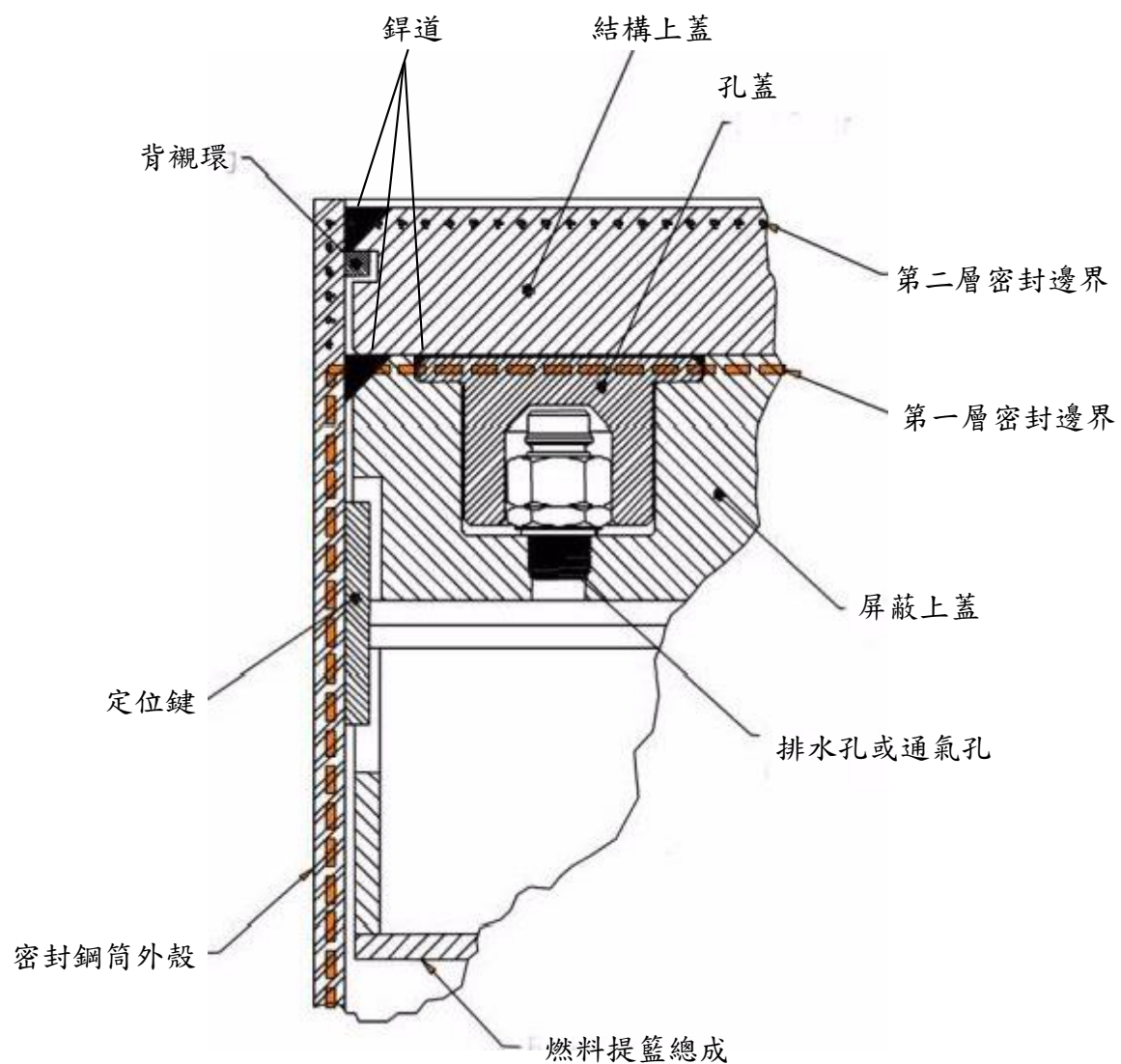


圖 6.5.1-2 屏蔽上蓋穿孔及二層密封邊界詳圖

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
屏蔽上蓋對外殼	斜角槽銲（現場施行）	C
結構上蓋對外殼	斜角槽銲（現場施行）	C
排水孔與通氣孔蓋板對屏蔽上蓋	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[6] ASME NB-3351 Weld Joint Category.

(二) 密封分析

1. 密封要求

密封鋼筒可容納 56 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。密封鋼筒的設計將依據 ASME Code Section III, Subsection NB 以確保在評估的正常、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，也沒有採用密封墊（環），來維持其密封性。所以，依 ISG-5 R1 規定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送回至燃料池中再取出。

密封鋼筒設計基準如第三章表 3.1.1-4 所示，核一廠之用過核子燃料特性如第三章表 3.1.1-1 所示。

2. 洩漏率

第一層的密封邊界是由密封鋼筒密封邊界上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)、超音波檢測(UT，僅用於外殼對底板之銲道)與壓力測試(製造工廠內作水壓測試)來確定其完整性。屏蔽上蓋在根部與最後一層銲接完成後，利用液滲檢測。屏蔽上蓋與密封鋼筒外殼的銲道進行現場氣壓測漏測試。結構上蓋與密封鋼筒外殼的多層銲道檢測，是利用漸進式(中間層，每層厚 3/8 in 作一次)液滲檢測加上根部及最終表面銲道之液滲檢測。

為了確認屏蔽上蓋與密封鋼筒封銲的密封性，ANSI N14.5-1997 定義，在標準條件下洩漏率標準為 $2 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}(\text{He})$ [1]，所謂標準條件係指在 25 °C，一個大氣壓差下的測試條件。氦氣是在室溫（25 °C）情況下注入密封鋼筒，在進行洩漏測試過程中，由於燃料衰變熱的影響，氦氣溫度將等於或高於 25 °C，導致開始時筒內壓力將會高於初始回填的壓力 14.7

psia（氦氣）。本案使用洩漏測試的儀器靈敏度為 $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}(\text{He})$ 以上，優於 ANSI 標準。有了此一嚴格的洩漏標準規範，所以不做放射性物質洩漏之計算。洩漏測試如第五章一、(一)節所述之步驟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。

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。正常設計內壓(設計壓力 15 psig)的影響評估如第六章三、(五).1.(5)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。鋁製的導熱圓盤在製造時，其表面即為氧化膜所保護，可阻止鋁件進一步氧化，避免與筒內的池水產生化學反應。碳鋼製的承載圓盤有作表面鍍膜（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真空乾燥，再回填氦氣至一大氣壓力，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氦氣的溫度升高，以及假設 1 % 燃料護套的損壞，產生壓力為 9.7 psig。

根據這些條件所計算的筒內壓力增加量，會小於在第六章二、(一)節正常的設計壓力 15 psig(參見本計畫結構評估報告之 2.6 節)。也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釐所構成，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. 意外分析

密封鋼筒在異常時假設 10 %的燃料護套損壞，產生壓力為 14.99 psig，已被正常的設計壓力 15 psig 所涵蓋。假想意外事故時，100 %燃料護套損壞，產生壓力為 47.3 psig，在結構分析時採用壓力 65 psig 來涵蓋意外時的壓力。密封鋼筒的內壓估算與裝載說明，分別在第三章一、(一)節與第五章一、(一)節所述。

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 15 psig，意外 65 psig 作計算參數)，如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 CFR72.106b [2]對意外條件的曝露，在 100 m 最近廠界處，對全身劑量需小於 50 mSv。

5. 分析結果

密封鋼筒可提供長時間貯存放射性物質。密封邊界是藉由封釐所構成，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、乾燥再充滿氮氣，密封邊界能在長時間的貯存中，防止氮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 CFR72.24 [2]，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 CFR72.122 [2]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

密封邊界是藉由雙層封銲所構成，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 NRC 審查通過的標準作業方法，且依 ISG-5 之要求，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。在第五章一、(一).8 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，密封鋼筒內填充的氬氣最低純度要求應高於 99.9 %(依體積估算)。

(五) 参考文献

- [1] ANSI N14.5-1997, "American National Standard for Radioactive Materials-Leakage Tests on Packages for Shipment, "American National Standards Institute, 1997.
- [2] Title 10 of the Code of Federal Regulations, Part 72 (10 CFR 72), "Licensing Requirements for the Storage of Spent Fuel in an Independent Spent Fuel Storage Installation, "April 1996 Edition.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division I "Rules for Construction of Nuclear Plant Components, "1995 Edition with 1995 Addenda.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, "Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators, "1995 Edition with 1995 Addenda.
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, "Nondestructive Examination", 1995 Edition with 1995 Appendix.
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, NB-3351 "Weld Joint Category".
- [7] SNT-TC-1A, "The American Society for Nondestructive Testing" 2001.
- [8] ANSI/AWS A5.1, "Specification for Carbon Steel Covered Arc Welding Electrodes", 2004/09
- [9] ANSI/AWS A5.5, "Specification for Low Alloy Steel Covered Arc Welding Electrodes", 1996
- [10] ANSI/AWS A5.18, "Specification for Carbon Steel Filler Metal for Gas Shielded Arc Welding", 2005
- [11] ANSI/AWS A5.20, "Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux- Cored Arc Welding", 2005
- [12] ANSI/AWS A5.23, "Specification for Low Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding", 1997
- [13] ANSI/AWS A5.28, "Specification for Low Alloy Steel Filter Metals for Gas Shield Arc Welding", 2005
- [14] ANSI/AWS A5.29, "Specification for Low Alloy Steel Electrodes for Flux

Cored Arc Welding", 1998

- [15] ANSI/AWS D14.1, "Specification for Welding of Industrial and Mill Cranes and other Material Handling Equipment", 2005
- [16] ANSI/AWS A5.30, "Consumable Inserts", 1997