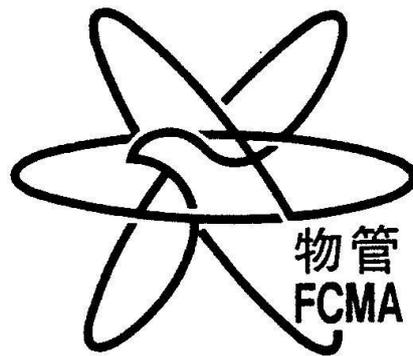


報告編號：FCMA-103201

台灣電力公司  
低放射性廢棄物混凝土盛裝容器  
使用申請案審查報告



行政院原子能委員會放射性物料管理局

中華民國 103 年 1 月

## 目 錄

一、 緣起	2
二、 法規依據	2
三、 申請核發使用許可與審查過程	6
四、 申請書內容概要與審查意見	7
五、 審查總結	16

## 一、緣起

台灣電力公司為增加低放射性廢棄物之貯存安全，設計一混凝土材質之盛裝容器，預期以耐 100 年結構完整容器（High Performance Container, HPC）為設計目標；為收集實際盛裝低放射性廢棄物後核種擴散之相關數據，先行申請為低放射性廢棄物之一般盛裝容器，待核種擴散數據齊備後，再申請更長期之使用年限。台電公司於 101 年 12 月 24 日，依據「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第九條之要求：盛裝容器經核准後始可使用，檢具「低放射性廢棄物混凝土盛裝容器使用申請書」提出使用申請，說明該盛裝容器之設計、製造及測試皆符合相關法規之要求。

本容器之設計年限為 50 年，容器呈圓柱狀，桶身及桶蓋以混凝土為基材，為強化結構之強度，混凝土內再摻入鋼纖維；淨容量 300 公升，且設計為可使國內核電廠現今使用之 55 加侖桶直接置入。為求操作及搬運便利性，本容器於桶身設計有桶箍，另於桶身頂端預埋 4 支吊掛螺絲。

為確認本容器於使用年限內能維持其結構完整，放射性物料管理局（以下簡稱物管局）與外聘專家學者組成審查團隊進行審查，審查內容包括：容器設計、容器製造及容器試驗等，以確保本容器於盛裝低放射性廢棄物後，貯存階段與運送過程其包封能維持完整，不致有放射性物質外洩之虞。

## 二、法規依據

### （一）「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」

第八條 盛裝容器應符合下列規定：

- 一、材質、設計及製造，能防止腐蝕與劣化，並可確保設計年限內結構之完整。
- 二、考量操作及搬運之便利。

- 三、機械強度足以承受吊卸、搬運、貯存或最終處置等作業之負載。
- 四、容器封蓋及緊固設備，具操作之便利性，在吊卸及搬運過程中不致動搖或脫落。
- 五、容器外表應平整、易於除污並避免頂部積水。

第九條 盛裝容器經核准後始可使用，申請者應提出載明下列事項之報告，報請主管機關審核：

- 一、適用範圍。
- 二、設計基準、詳細工程設計及圖說。
- 三、容器材質、組成、尺寸、製造及防蝕方式。
- 四、試驗方法、標準及結果。
- 五、品質保證。
- 六、其他經主管機關指定之事項。

第十二條 裝有放射性廢棄物之盛裝容器表面，應有輻射示警標誌及編號。輻射示警標誌之中心圓半徑不得小於二公分。

## (二) 「放射性物質安全運送規則」

第十六條 放射性物質各包件之設計、製造、試驗、文件建檔、使用、維護與檢查，以及運送與運送中之貯存等作業，均應建立品質保證計畫，以保證各項作業均能符合本規則之規定。

第十九條第三款 放射性物質、包裝及包件應符合附件三及附件四之相關規定。

附件三 放射性物質、包裝及包件之規定

### 壹、包裝及包件之一般規定

- 一、包裝之設計及製作，應儘可能使其外表無突出物、且易於除污。
- 二、包裝外層之設計，應儘可能防止積水。

- 三、 包件之設計應考慮其質量、容積及形狀，使便於安全搬運及運送，並使其在運送時能固定於運送工具。
- 四、 包件上任何吊升配件之設計，在正常使用時應使其不致失效，且於配件失效時，包件仍能符合本規則其他規定。對抓取式吊升設備應特別考慮其安全因素。
- 五、 包件外表面可作吊升用配件或其他任何裝置，設計時應符合前款要求並能承受包件之質量，或在運送時能夠移去或避免被誤用。
- 六、 運送時任何加於包件之附件，不應減低包件之安全性。
- 七、 包件應能承受在例行運送中可能遭遇之任何衝擊、震動或共振效應，且不損及包件中各容器封閉裝置之效用，或包件整體之完整性。螺帽、螺栓或其他鎖定裝置之設計，應使在重複使用下，能防止其無意間之鬆動或脫落。
- 八、 包裝、組件或結構體之材料與放射性包容物之間，其物理或化學性質應能相互適應。並應考慮其在輻射照射下之性能改變。
- 九、 包件中可能洩漏放射性包容物之各閥門應加保護裝置，使未經許可不能任意操作。
- 十、 包件及包裝之性能標準，就保持容器及屏蔽之完整性而言，視所運送放射性物質之數量、性質以及可能遭遇之運送狀況嚴重程度而定。

#### 伍、 工業包件之規定

- 二、 第一型工業包件 (IP-1) 其設計應能符合本附件中第壹項各款之規定，且包件外表每一邊均應在十公分以上，空運時並應符合本規則第二十四至二十六條之要求。

三、第二型工業包件（IP-2），其設計應符合前款規定，並於承受附件四中三、（二）、1、（2）及（3）款所規定之自由墜落試驗及堆積試驗後，應能防止放射性包容物之失落或逸散，且在其屏蔽完整性受損的情況下，仍能使包件外表面上任何一點之輻射強度增加量，在原數值百分之二十以下。

#### 附件四 主管機關規定之試驗

##### 三、包件之試驗

##### （二）包封容器、屏蔽完整性及評估臨界安

全性之試驗：

##### 1. 證明具有承受一般運送狀況能力之試驗：

本試驗包括噴灑試驗、自由墜落試驗、堆積試驗及貫穿試驗。所有試驗程序應由噴灑試驗開始，自噴灑試驗終了至後續之各試驗所需間隔時間，樣品之外部無可查及之乾燥現象。「在缺少有相反情形之證明時」，如噴灑係四面同時進行，此間隔之時間應為二小時；但如噴灑係一面一面連續不斷進行，則毋需時間間隔。

（1）噴灑試驗：樣品應承受之水噴灑試驗，係模擬每小時約五公分之雨量，且至少需一小時。

（2）自由墜落試驗：樣品應墜落至目標物使受試驗樣品之安全性能受到最大之損壞。

（甲）墜落之高度自樣品最低點至目標物之最上層表面間應不少於附表五中依據包件質量所訂定之距離。

前項所稱之目標物，應為本

附件中二、(二)、1款中所規定者。

(3) 堆積試驗：除非包裝之形狀能有效防止堆積，樣品應能承受一歷經二十四小時，相當於下列兩者中較大者之重壓試驗：

(甲) 相當於包件實際質量之五倍。

(乙) 相當於一萬三千帕斯卡(0.一三公斤力每平方公分)壓力乘以包件之垂直投影面積。

前項負載應均勻加至樣品之兩對面，其中之一應為包件正常放置時之底部。

### 三、申請核發使用許可與審查過程

(一) 台灣電力公司依據「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第九條之規定，於101年12月24日檢具「低放射性廢棄物混凝土盛裝容器使用申請書」及審查費用，向物管局申請核准使用許可。

(二) 本案由物管局與外聘專家學者共九位組成審查團隊，審查台電公司提送之使用申請書，於102年3月1日將第一次審查意見以物二字第1020000484號函送台電公司，請台電公司依審查意見提出說明。

(三) 就審查過程所發現之重要議題，於102年3月29日邀集審查委員舉行第一次審查會議，並請台電公司列席補充說明。

(四) 台電公司於102年4月1日函復物管局，就第一次審查意見進行答覆說明。物管局請審查委員對台電公司之答覆說明進行第二次審查。

(五) 物管局於102年5月6日將第二次審查意見彙整後，以物二字

第1020001138號函請台電公司進行說明。台電公司於102年6月13日提出第二次審查意見之答覆說明。物管局請審查委員對台電公司之答覆說明進行第三次審查。

- (六) 於第三次審查過程中，仍有部分議題尚未釐清，因此於102年7月12日召集審查委員召開第二次審查會議，同時亦請台電公司列席說明。
- (七) 後續再經過第四次審查、台電公司之第四次答覆說明及第五次審查後，所有議題皆已釐清，同意台電公司之說明，物管局於102年11月12日以物二字第1020002923號函同意核備「低放射性廢棄物混凝土盛裝容器使用申請書」。

#### 四、申請書內容概要與審查意見

本容器使用申請書審查內容包含容器之設計、製造與試驗，過程中共提出 95 項審查意見(包含 20 項文辭與單位修正意見)，並召開兩次審查會議，最後經審查確認台電公司之答覆符合審查意見之要求。以下針對容器設計、製造與試驗之內容概要及重要之審查發現分述如下：

##### (一) 低放射性廢棄物混凝土盛裝容器之設計

###### 1. 容器設計概要：

- (1) 本容器呈圓柱狀，桶高 107 公分，桶身外徑 85.4 公分，壁厚 7.5 公分；桶身及桶蓋皆以混凝土混以鋼纖維所組成，淨容量 300 公升，空重 620 公斤，設計之使用年限為 50 年。
- (2) 在 50 年之設計年限內確保其結構完整方面，本容器以下列三種方式進行驗證：
  - A. 容器之混凝土材料設計為利用富勒緻密堆積理論，透過各材料的粒徑分布情況為基礎，進行乾搗單位重試驗，組合各材料而形成最緻密狀態，使混凝土盛裝容器能具備高強度及高耐久性等重要品質指標。

B. 以環境有害因子-氯離子之擴散行為，確保本容器使用年限內結構完整：觀察 3%氯化鈉溶液在混凝土試體內之擴散行為，及利用離子擴散之理論計算，並配合氯離子濃度門檻值 0.05%，得氯離子擴散 50 年只需保護層 10 公厘之厚度，而本容器設計厚度為 75 公厘，足以確保設計年限（50 年）內不受氯離子影響而破壞容器之完整性。

C. 以環境有害因子-硫酸根離子之擴散行為，確保本容器使用年限內結構完整：依據 ASTM C1012 (CNS14794) 之規範，使用  $352\text{mol/m}^3$  (50g/L) 濃度之硫酸鈉溶液浸泡混凝土試體，觀察硫酸根離子在混凝土試體內之擴散行為，推算出硫酸鹽於混凝土試體中之擴散係數介於  $2.2 \times 10^{-13}\text{m}^2/\text{s}$  與  $7.1 \times 10^{-13}\text{m}^2/\text{s}$  之間，並藉由 Harrison 等人於 1981 年研究結果之裂化深度經驗公式，計算出硫酸根離子容器材質中擴散 50 年只需保護層 1 公厘之厚度，而本容器設計厚度為 75 公厘，足以確保設計年限（50 年）內不受硫酸根離子影響而破壞容器之完整性。

- (3) 本容器封蓋之設計為以桶蓋嵌入桶身後，桶蓋頂部與桶身頂部齊高，桶身與桶蓋縫隙處再以與桶身相同之材料（惟不含鋼纖維）填補。
- (4) 本容器外表均設計為平整光滑面，另為使其外表面易於除污，在其外表面再施以塗裝作業。
- (5) 於桶身設計有桶箍，俾利移動式起重機以環抱式夾具搬運，以及設計於桶身頂端預埋 4 支吊掛螺絲(分佈在 0、90、180 及 270 度角)，俾利容器以吊掛方式，利用固定式起重機搬運。

(6) 本容器主要供台電公司各核能設施盛裝低放射性廢棄物之用。

2. 容器設計之審查意見：

- (1) 審查發現本案以普通一型水泥作為耐久性混凝土物件之主要膠結原料，但既已知桶身將受硫酸鹽侵蝕，要求台電公司說明是否應採用二型或五型水泥。台電公司說明依目前混凝土品質及耐久性試驗評估，使用一型水泥之混凝土試體已可抵抗硫酸鹽侵蝕，未來如欲研發更長耐用年限之容器，如 300 年之高完整性容器 (High Integrity Container, HIC) 時，將會以二型水泥為優先考慮。
- (2) 若此容器不在處置場製造，將涉及廠外道路運送，須符合「放射性物質安全運送規則」之規定，且所盛裝的固化處理或安定化低放射性廢棄物的核種活度濃度，將受到限制，因此要求台電公司說明設計之包件類型及盛裝的最高活度濃度。台電公司表示本設計之包件類型為專用第二型工業包件(IP-2)，可盛裝低比活度物質第一類(LSA-I)及第二類(LSA-II)，盛裝的最高活度濃度依據「放射性物質安全運送規則」附件一與附表二及附表 7 之規定，另亦可盛裝低比活度物質第三類(LSA-III)，其估算之平均比活度在每公克千分之二 A2 值以下者。
- (3) 要求台電公司說明單一只盛裝容器的輻射防護或屏蔽功能要求為何。台電公司說明依據「低放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第八條規定，盛裝容器並無輻射防護或屏蔽之功能要求，故未予以撰述。惟本容器因已有 75 公厘之混凝土製桶壁，已具相當程度之輻射屏蔽功能。

- (4) 耐久性評估方程式之計算結果中說明，氯離子於該設計之混凝土中擴散 50 年，濃度達到門檻值 0.05% 之深度為 10 公厘 (mm)，但由申請書之試驗結果中，在歷時 90 天與 180 天後，10mm 處之氯離子即達 0.05%，同深度評估需 50 年而實驗卻只需 90 天即達氯離子濃度門檻值；另同深度歷時 360 天之氯離子濃度小於歷時 180 天之氯離子濃度，有違常理，請台電公司說明原因。台電公司重新提出實驗數據，並說明申請書只需保護層 10 mm 厚度即可達到設計功能目標之敘述，乃由於實驗誤差造成；經重新驗證並計算後，設計年限 50 年後氯離子濃度達腐蝕最低門檻值 0.05% 之深度位於 20 mm 處，故 75mm 的容器厚度足以抵抗氯離子之侵蝕。
- (5) 由於混凝土盛裝容器之密封方式是將桶蓋置於桶身上，並以活性粉混凝土澆注密封，請台電公司說明此活性粉混凝土密封施工的接受標準為何。台電公司說明除對活性粉混凝土試體作抗壓強度檢驗外，亦對拌合、施工至密封完成後之盛裝容器進行耐透氣性試驗，以驗證上述之作業程序能符合要求。
- (6) 由於吊掛螺絲之設計與材質影響其吊掛強度，因此請台電公司列表說明吊掛螺絲之材質、螺紋型式、螺紋深度與寬度、及公螺絲應旋入母螺絲人的圈數或深度等設計。台電公司已依審查意見進行說明，並加註於申請書中。
- (7) 請台電公司說明吊掛螺絲之鎖孔與混凝土交界面上是否需採行合宜的防護措施，以避免侵蝕物入侵。台電公司說明鎖孔與混凝土交界面是一體成型，其界面不會有侵蝕物入侵。

- (8) 請台電公司說明本案研究開發階段，研究單位及台電公司的品質查證作為與查證結果。台電公司說明核研所於研究期間，有制定「低放射性廢棄物混凝土盛裝容器品質查證計畫」，所內化學工程組對於制定之品質保證計畫都有確實執行與查核；台電公司於研究進行期間，曾對核研所實施了三次的期中報告審查，以及二次的期中查訪查證工作，每次的查證工作皆會存留紀錄。

本項審查發現有關之審查意見，經台電公司答覆說明澄清後，審查委員認為本容器之設計與結果可以接受。

## (二) 低放射性廢棄物混凝土盛裝容器之製造程序

### 1. 容器製造程序概要：

- (1) 本容器製造所使用之材料包含水泥、細粒料、粗粒料及拌合水，皆定有檢驗項目及合格標準，以管控材料之品質。
- (2) 製造過程所使用之度量儀器，定期執行檢測校驗作業，以確保摻混比例正確，容器品質一致。
- (3) 明定各材料之混合順序，且各材料加入後之混合攪拌時間亦為恆定，以確保均勻混合。
- (4) 容器於模具脫膜後需養生 28 天，以確保容器達到其應有之強度。

### 2. 容器製造程序審查意見：

- (1) 申請書中對鋼纖維僅有外型上之要求，因此要求台電公司說明其拉力強度需求是否無關結構應用。台電公司說明鋼纖維拉力強度需符合規範 CNS12892，要求需大於  $3,520 \text{ kgf/cm}^2$ 。
- (2) 製程控制內容中強調利用電腦自動控制全部作業，但未說明此自動化系統如何校正、驗證及其

頻率為何，要求台電公司加以描述說明。台電公司說明自動化系統之荷重單元及儀控單元，每年須委託中央標準局或具 TAF 認證機構進行校正。

- (3) 混凝土拌和完成至灌入容器模具過程中，欠缺對新拌混凝土的量化檢測，以確保拌和完成之混凝土確為適合灌注的混凝土，請台電公司說明是否已有此方面之考量。台電公司說明為確保混凝土適合澆注，本申請案對製程前之材料品質及製程中的計量與拌合時間均有標準的作業流程，並於每批次澆注後進行混凝土品質檢驗，以確保容器品質。
- (4) 針對品質保證計畫中混凝土之工作性，要求台電公司說明對於混凝土工作性之要求為何。台電公司表示本容器使用之混凝土配比水膠比相當低，水泥漿體相當黏稠且使用鋼纖維，無法如一般混凝土進行坍度、坍流度等新拌試驗；但本案於研發過程經有系統的試拌與矯正，並已進行 20 只容器之墜落試驗，皆證明容器具結構完整性，因此只要按本申請書附件三之標準作業程序操作，並依照第五章品質保證計畫內容，對混凝土盛裝容器製造前與製程中之品質檢驗管制嚴謹把關，其產品皆能符合原設計的目標。
- (5) 於審查過程中發現，鋼纖維混凝土內部之鋼纖維若變異過大易生問題，申請書中所列的各項試驗均不足以驗證容器混凝土中鋼纖維的分佈情形，要求台電公司說明該如何確保。台電公司說明本容器之製造有一套標準作業流程，且於澆注過程係採 360 度旋轉澆注，以定速緩慢的下料，並於底部與桶側皆有加裝振動器進行振動，以使其內含之鋼纖維能均勻的分佈。研發期間所製造的成品經剖開 4 只容器後觀察，鋼纖維於桶身皆為均

勻分佈；另鋼纖維的均勻性屬探討該容器盛裝廢棄物後，核種傳輸重要考量因素，與本階段盛裝容器測試項目並無關聯。未來將考慮於後續耐 100 年結構完整性研究進行過程中，繼續尋找適合的方法驗證。

- (6) 若混凝土桶脫膜後表面有瑕疵，要求台電公司說明可接受的瑕疵，並加述瑕疵的修補方法及再檢驗機制。台電公司說明已依審查意見，將各種瑕疵之可接受標準增列申請書中。
- (7) 要求台電公司說明第五章之品質保證計畫是否適用於將來不特定的製造商。台電公司表示品質保證計畫係適用於所有不特定的製造商，以確保達成研發與量產品質齊一之目的。

本項審查發現有關之審查意見，經台電公司答覆說明澄清後，審查委員認為本容器之製造程序與方法可以接受。

### (三) 低放射性廢棄物混凝土盛裝容器之測試方法與結果

#### 1. 容器之測試方法與結果概要：

- (1) 混凝土抗壓試驗：攪拌均勻之混凝土於澆注時取樣並養生 28 天後，立即進行抗壓試驗；測試結果強度為 103.7MPa，約為國外試驗標準要求之 2 倍（法國要求需大於 50MPa）。
- (2) 滲水試驗：將脫模後外觀質量和尺寸檢查合格的容器，在第 1 天於容器內部充滿水，在第 28 天後檢查容器，結果無滲漏之情形。
- (3) 噴灑試驗為容器封蓋後對其以模擬每小時 50 公厘之雨量連續噴灑 1.5 至 2.5 小時，試驗結果為盛裝容器頂部及容器表面無滯留水。

- (4) 墜落試驗為容器內置入 600 公斤之溼砂(含 1% 水)，封蓋灌漿密封後養護 28 天。測試時將容器吊起，使容器最低處離地達法規要求之 1.2 公尺，以桶身傾斜 45 度自由墜落於堅硬、水平、0.5 公尺厚的混凝土厚板。試驗結果僅桶箍出現些微受力磨擦痕跡，容器皆無出現破壞損傷；墜落試驗後並將容器傾倒靜置 10 分鐘，結果裝填物(含水分)沒有外洩的情形。
- (5) 堆疊試驗中，依規定容器需承受裝滿廢棄物五倍之重量(6 公噸)進行堆疊試驗。本案施加比法規更嚴之荷重(20 公噸)，作用力持壓 24 小時後，容器仍能保持結構完整，沒有任何龜裂或破損之情形。
- (6) 吊掛試驗中，將已封蓋之盛裝容器四邊以吊卸作業使用之鋼索吊起，於桶蓋上方以千斤頂朝盛裝容器頂蓋上方施加壓力，加壓至 4 噸(大於 3 倍舉起負載)後停止施壓並持續兩小時後，觀察吊卸孔及鋼索之破壞情形。試驗結果顯示吊卸作業採用之鋼索能承受至少 3 倍之舉起負載(3.6 噸)，且吊卸孔沒有因吊卸作業負荷而產生裂縫。

## 2. 容器之測試方法與結果之審查意見：

- (1) 混凝土試體取樣及抗壓試驗中，要求台電公司說明混凝土的取樣點、養生方法及試體內是否含鋼纖。台電公司表示試體與容器同時同批次澆鑄，分三層取樣及澆鑄試體，故試體內含鋼纖維；而試體之養護方式為 24 小時拆模後，立刻置於  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  之飽和石灰水水槽中養護。
- (2) 要求台電公司說明未來低放射性廢棄物混凝土盛裝容器，成品之氯離子與硫酸鹽侵蝕試驗的抽驗比例為何。台電公司說明氯離子與硫酸鹽侵蝕試

驗是為了推估本容器使用年限所進行之耐久性實驗，未來產製過程無須針對前述試驗項目進行抽驗作業。

- (3) 墜桶試驗為在 0.5 公尺厚、強度比儲存桶低的混凝土上進行，數次之後混凝土表面會有坑洞甚至破裂，而影響儲存桶墜落時的受力行為，且桶身強度  $680 \text{ kgf/cm}^2$ 、地面強度  $210 \text{ kgf/cm}^2$ ，相差約 3 倍，墜落試驗無法反應破壞情形，因此要求台電公司說明是否已考量此部分。台電公司說明如表面有坑洞或破裂時，需修補混凝土表面使其平整，且本項墜落測試係依據 10CFR Part 71.71(c) 之試驗條件，於堅硬平整的地面進行試驗，其目的為考量運送時意外事故對容器的損壞，試驗的結果亦符合法規要求，所述測試地面強度等問題，應與實際作業安全無關聯。
- (4) 墜桶試驗取樣頻率為每 300 桶取 1 桶進行，該取樣頻率是否合理？要求台電公司說明。台電公司說明本申請案於研發過程經有系統的試拌與矯正，並已進行 20 只容器之墜落試驗，皆證明容器具結構完整性。未來進入量產的階段，只要廠商按申請書附件三之標準作業程序操作，並依照第五章品質保證計畫內容，對製造前與製程中之品質檢驗管制嚴謹把關，其製造之產品皆能符合原設計的目標，故墜桶試驗之取樣頻率仍維持為每 300 桶取 1 桶進行。

本項審查發現有關之審查意見，經台電公司答覆說明澄清後，審查委員認為本容器之試驗方法與結果可以接受。

## 五、 審查總結

台電公司所申請之低放射性廢棄物混凝土盛裝容器使用申請，經過 5 次書面審查，共提出 95 項審查意見，經台電公司答覆說明後，審查委員認為可以接受，該容器於設計、製造及試驗均符合相關法規之要求，並具有 50 年使用年限內防阻內部放射性物質外洩之功能，因此同意台電公司對低放射性廢棄物混凝土盛裝容器之使用申請。