

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

(裝訂線)

用過核燃料乾式儲存技術設計原理與安全度評估

服務機關：台灣電力公司
出國人職稱：核能工程師
姓名：李榮達
出國地區：美國
出國日期：91.10.19~91.10.28
報告日期：91.12.20

G3/c09105154

行政院及所屬各機關出國報告提要 C09105154

出國報告名稱：用過核燃料乾式儲存技術設計原理與安全度評估

頁數 16 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

李榮達/台灣電力公司/第二核能發電廠/核能工程師/(02)24985990 分機：2614

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：91年10月19日至91年10月28日 出國地區：美國

報告日期：91年12月20日

分類號/目

關鍵詞：「用過核燃料」、「乾式貯存」、「HI-STORM」、「MPC」

內容摘要：(二百至三百字)

美國 Holtec 公司為目前美國主要用過核燃料濕式及乾式貯存設施的供應者，於溼式貯存方面約占有 95% 的市場，乾式貯存則約占有 60% 的市場，迄今已順利完成安置 28 個 MPCs (Multi-Purpose Canister)。

Holtec 公司所設計之用過核燃料乾式貯存設施有兩種系統：HI-STORM 及 HI-STAR。HI-STORM 是採混凝土與碳鋼為其屏壁；HI-STAR 則是以金屬為屏壁。故 HI-STAR 系統所需的費用約為 HI-STORM 系統的四倍。HI-STORM 及 HI-STAR 內部是使用外徑規格相同之 MPC 來貯放用過核燃料。MPC 最多可貯放 68 支 BWR 燃料束。MPC 之設計可提供 thermosiphon 功能，故可將較 hot 之燃料束集中放置於 MPC 中央區域，Holtec 亦提出分區貯放之方式，即將較 Hot 之燃料放置於 MPC 中央區域，外圍則放置較 Cold 之燃料，如此可大幅降低 HI-STORM 外的輻射劑量，此方式已獲得 NRC 之執照。HI-STORM 之設計是以碳鋼為包覆結構，內部再灌入混凝土。其耐震強度比單純混凝土結構要高出許多，USNRC 曾測試 HI-STORM 之耐震強度可超過 1.0g。在遭受飛機或飛彈攻擊時，CASK 也不會被完全穿破而造成輻射物質外洩。

HI-STORM 系統是使用空氣自然對流方式來進行冷卻，於安置完成使用期間，不需使用任何溫度或其它的監視儀器。故 HI-STORM 是一安全亦廣泛被使用之乾式貯存設施。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

目 錄

	頁次
出國行程與任務.....	1
一、引言	1
實習內容	
二、HI-STORM 100 及 HI-STAR 100 設計原理與安全度要求.....	3
格架 (Basket) 設計.....	5
MPC(Multi-Purpose Canister)設計	8
HI-STAR 100 SYSTEM 設計	10
HI-STORM (STORage Module) 100 SYSTEM 設計.....	10
三、使用實績	13
四、現場安裝流程.....	13
五、結語與建議事項.....	16

出國行程與任務

本次出國任務時間為期十天，主要為實習美國 HOLTEC 公司所設計製造之用過核燃料乾式儲存設施設計原理及安全度評估。實習地點為位於美國紐澤西州 Marlton 市之 HOLTEC 公司總部及其協力製造工廠（位於賓州匹茲堡）。

一、引言

本（台電）公司對於「用過核燃料」之營運策略，最初之規劃乃先存放在各電廠的內建「用過燃料池」裡數年，俟其衰變熱與放射性強度顯著減弱後，運往英國進行「再處理」，然後運往美國執行鈾回收作業。然而，由於美國在七〇年代末政策決定不發展商業「用過核燃料」「再處理」與「再循環」，使得我國不得不中止原先「再處理」之規劃，轉而參照國際間一些核電先進國家的作法，在國際「再處理」設施尚未有充裕之處理容量之前，將原有「用過燃料池」予改裝成「高密度儲存架」，以增加電廠內用過燃料池的儲存容量，俟未來國際「再處理」市場增大時，再重新考慮「再處理」與「再循環」方式。換言之，本公司現行「用過核燃料」之營運策略，係採取下列三階段規劃：

第一階段為「溼式貯存」：將各電廠原有「用過燃料池」存放格架更換為高密度儲存架，以擴充廠內「用過燃料池」的存放容量 --- 必要時進行兩次更換格架作業。

第二階段為「乾式貯存」：於廠內另興建貯存設施以進行「乾式貯存」，在乾式貯存期間可以隨時取出用過核燃料，進行再處理以回收鈾與鈾等可利用的物質，或直接送至最終處置場。

第三階段為最終處置。建造最終處置場，永久處置用過核燃料，或其經再處理所產生的高放射性廢料。

核能一廠一/二號機之「用過燃料池」之池滿年限原為民國 78 年/79 年，經更換存放格架為「高密度儲存架」，及實施十八個月燃料週期後，其池滿年限

可延長約十二年；核能二廠一/二號機之「用過燃料池」之池滿年限原為民國 83 年/84 年，經更換存放格架為「高密度儲存架」、實施十八個月燃料週期、及使用高燃耗燃料後，其池滿年限可延長約十三年；核三廠一/二號機之「用過燃料池」之池滿年限原為民國 85 年/86 年，經更換存放格架為「高密度儲存架」後，其儲存容量可充分滿足核三廠運轉四十年之需要。

至於「乾式貯存」，本公司於民國 74 年即進行規劃，並自 78 年開始進行「核一、二廠用過核燃料中期貯存可行性研究」，並邀請專家學者參與「乾式貯存」方法評選，確認有四種「乾式貯存」方法可符合安全需求。民國 84 年，核一廠「乾式貯存」設施開發計劃「環境影響說明書」由行政院環保署審查通過。隨後即展開核一廠「乾式貯存」工程招標手續，共有八家具有「乾式貯存」技術實績符合資格之公司參與投標，於民國 88 年 7 月由美國 Sierra Nuclear Corporation（已為英國核燃料公司 British Nuclear Fuel Limited 所購併）得標，原預訂民國 94 年底竣工，唯該公司毫無把握如期完成，而於最近聲請廢標，故核一廠「乾式貯存」工程勢必須要重新辦理招標手續。另一方面，由於核一廠的「乾式貯存」設施開發計劃進度遲緩，無法及時紓解其「用過燃料池」將要池滿之急，以是核一廠必須進行第二次更換存放格架作業，該項作業於民國 88 年完成，可為核一廠再掙得將近十年的緩衝期。

核二廠「乾式貯存」設施之「環境影響說明書」，於民國 84 年底經行政院環保署審查通過（85 年 9 月經環保署同意核備），原規劃之設施基地面積約為一公頃。然而，由於時空之變遷，依民國 89 年元月施行之最新建築技術規則建築設計施工編第二六二條規定：「山坡地平均坡度超過 30%者，不得開發為建築用地。」原核二廠「乾式貯存」開發計劃勢必要做大幅度之檢討與變更，蓋原計劃「乾式貯存」場址平均坡度超過法規限制者達全開發面積之 67% --- 換言之，原場址只剩三分之一面積可開發做為「乾式貯存」之用。為此，公司高層決定平行推動下列兩案：（一）減少「乾式貯存」設施之貯存容量、與（二）對於「用過燃料池」進行第二次更換存放格架作業。後者預期可先於前者完工使用，使核二廠每部機約可增加 750 束用過燃料之貯存空間，為核二廠再掙得大約六年的緩衝期。

無論如何，自現今之「溼式貯存」技術觀之，核一廠與核二廠的「用過燃料池」恐已無第三次擴充存放容量之機會，「乾式貯存」設施乃此兩電廠貯存其每部機組運轉四十年之全部「用過燃料」所必需，就核一廠而言，其「乾式貯存」設施必須於民國 97 年完成啓用，核二廠的部分則須於民國 100 年前後完成啓用，以免影響其正常運轉發電。

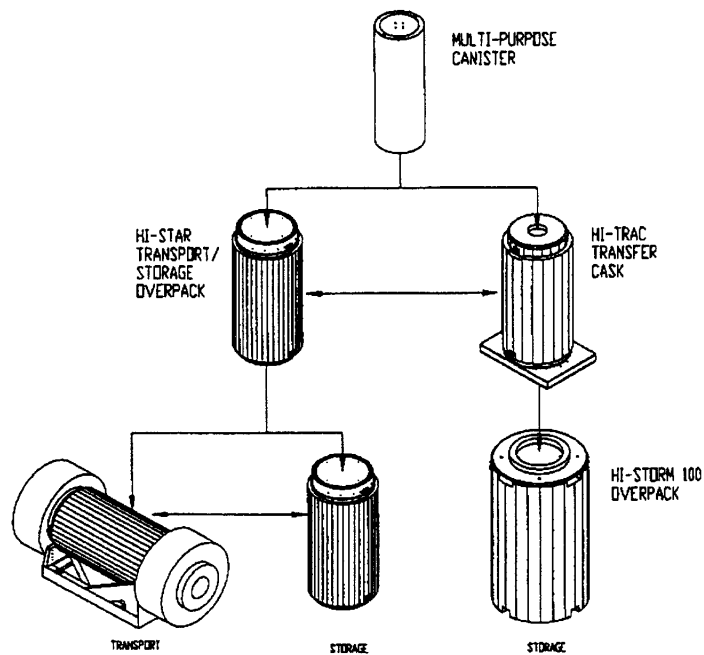
藉此次前往美國 HOLTEC 公司及其製造工廠，針對乾式貯存技術之設計原理與安全度評估，進行實習。可為核二廠未來考量乾式貯存設置計劃時，引進更進步而安全之乾式貯存技術，以增加每一乾式貯存護箱裝載燃料束之數量，如此可在乾式貯存場址大幅縮減的情形下，增加乾式貯存之容量，期在核二廠第二次用過燃料池貯存容量擴充工程配合下，解決核二廠運轉年限內，用過燃料貯放問題。

本報告接下來將就 HOLTEC 公司所設計之乾式儲存設施系統之設計原理與安全度要求、使用實蹟及現場安裝流程進行說明。

二、HI-STORM 100 及 HI-STAR 100 設計原理與安全度要求

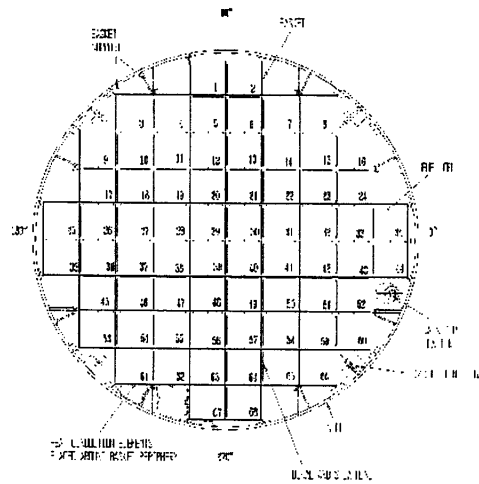
HOLTEC 公司已開發兩款乾式儲存護箱，分別為使用「混凝土模組」之 HI-STORM 100 系統及「金屬護箱」型式之 HI-STAR 100 系統，此兩種型式皆採內外護箱設計，其內箱 MPC(Multi-Purpose Canister)則是採多功能及相同外圍尺寸設計。其組件之相關性如圖一所示，HOLTEC 所設計兩款乾式儲存護箱皆已獲得美國聯邦核管會核發之執照。

HI-STAR (Holtec International Storage, Transport, and Repository) 系統是 HOLTEC 公司所開發第一款用來儲存及運送用過核燃料之護箱，「100」是表示所需的負載重量超過 100 噸。HI-STAR 100 是工業界首先採用 MPC 技術之護箱系統。MPC 技術原由美國能源部出資贊助開發，目前則廣泛被使用於用過核燃料護箱設計上。



(圖一) HI-STAR 100 & HI-STORM 100 FAMILY

MPC (Multi-Purpose Canister)是一圓柱形的壓力包封容器，內安裝有放置用過核燃料用之格架(圖二)，此包封容器設計需有絕對的完整性，能與外界環境完全隔絕，故 HI-STAR 100 之 MPC 是採用 ASME SECTION III CLASS 1 壓力容器之焊接規定，正常抗壓力為 100 psig，且沒有使用任何凸緣 (FLANGE) 及螺栓。



(圖二) MPC-68 之上視圖

格架設計

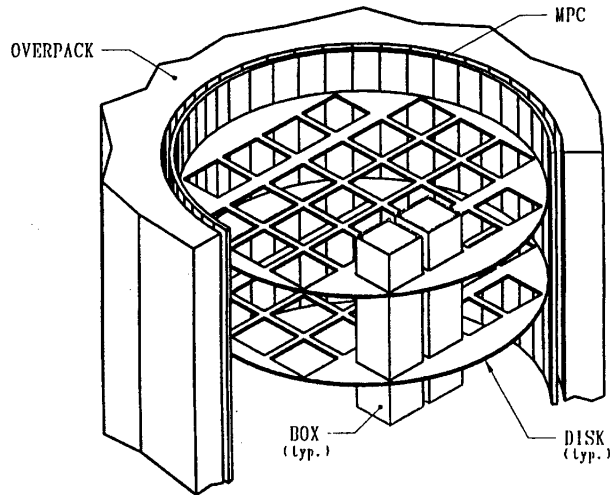
MPC 內格架 (BASKET) 之功能與傳統用過核燃料儲存格架設計相同，燃料是採垂直存放，每一格放置一束燃料，且格架內皆加入適當之中子吸收物質，可使整個燃料存放陣列即使在發生最不利的情形下，反應度仍可維持在次臨界狀態 ($K_{eff} < 0.95$)，雖然 MPC 之設計製造是不允許龜裂及洩漏情形發生，但核燃料之臨界分析仍以最嚴重之情形，即整個 MPC 充滿水的情形下進行分析。

另燃料格架之設計強度，需考量在運送過程中發生意外掉落撞擊事件時，仍能維持其完整性，保有原有之設計功能。因此在 MPC 內部有防撞護墊之設計，此方面是依 ASME CODE SECTION III SUBSECTION NG 結構設計要求進行設計。

因為用過核燃料有衰變熱 (DECAY HEAT)，會導致燃料格架於使用期間產生徑向和軸向熱膨脹，而熱膨脹會使格架產生熱應力，為避免產生之熱應力過高，故燃料格架與 MPC 內壁不能採直接接觸焊接，需保留足夠的延伸空間。

此外，關於格架與燃料間的熱傳導效應；設計時需考量如何有效移除燃料長期存放所產生之衰變熱，以避免燃料護套因熱量累積溫度升高發生劣化龜裂之情形。因為空氣的熱導效率約僅金屬的二千分之一，所以設計時需儘可能減少燃料與格架間の間隙，但如此卻會增加格架其它部分之間隙(如格架與 MPC 間)，故最初設計者提出「BOX-AND-DISC」之設計觀念 (圖三)，將每一儲存格做成一長條盒 (box)，再放置於橫向的支撐架上，支撐架為一橫向平板，在平板上依所欲放置的燃料儲存格數量挖出方形的洞，此橫向支撐板列可減低儲存格縱向的熱膨脹並將熱量有效傳遞至 MPC，一般設計會同時採用兩種不同的支撐板材質，一為高強度但熱傳效率差 (如合金鋼)；一為熱傳效率好但強度低 (如鋁)，將其間隔排列以兼顧支撐強度及高熱傳之要求。

因為儲存格是採用不銹鋼材質內包覆有硼片，在焊接過程發現，大量的焊接會導致儲存格變形 (因硼與不銹鋼熱膨脹程度不同)；而支撐格板若使用高強度但熱傳效率差之材料 (如不銹鋼)，製造上發現在鑽孔及與儲存格間焊接時亦會發生上述之情形。為避免此情形故必需將不銹鋼支撐架上的孔加大以提供焊接時所產生變形的空間。

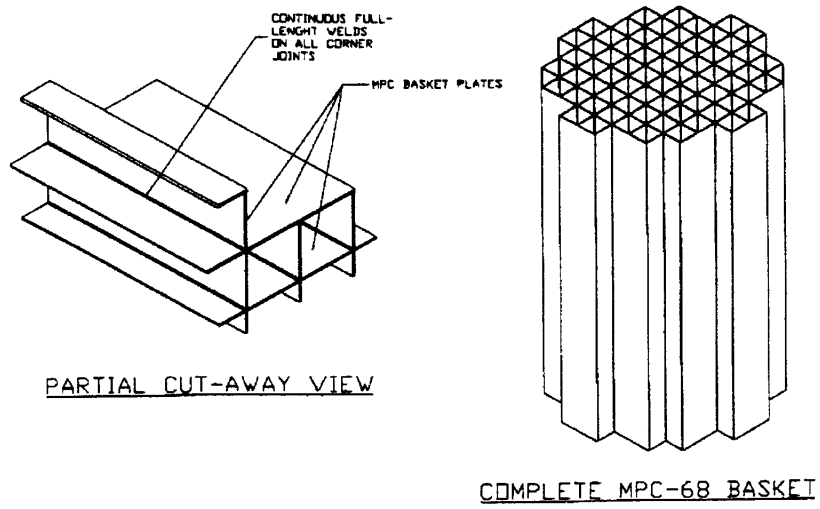


(圖三) BOX- AND- DISC 格架設計

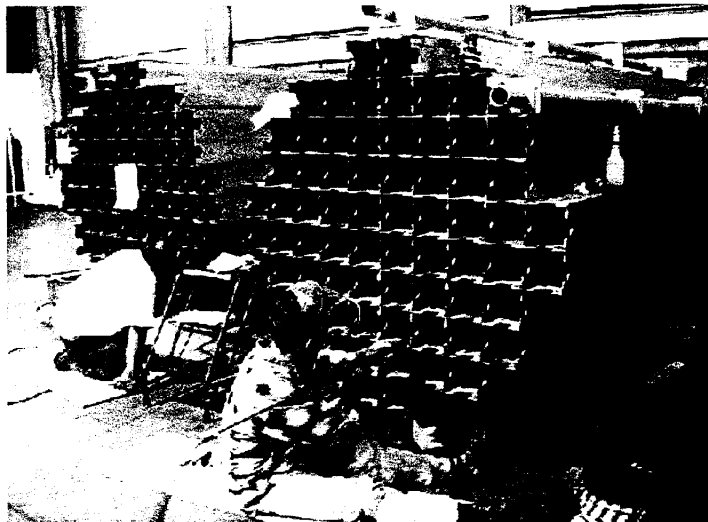
但對於「BOX-AND-DISC」設計在結構上卻面臨嚴重且無法解決的問題。即此種設計對於每儲存格盒 (box) 而言，當支撐平板於使用產生熱膨脹時，會對儲存格盒壁形成剪力，在護箱水平掉落事件分析時，將會導致儲存格變形，無法維持原設計時所應有之功能。

HOLTEC 公司花了將進四年的研發改良上述問題，完成 MPC 格架之設計。完全摒棄原「BOX-AND-DSIC」之設計方式，改採蜂巢狀 (honeycomb) 之結構設計 (圖四)，此亦為 HOLTEC 公司專利發明，所有儲存格是由片狀平板組合而成，連接處則採完全焊接連結 (圖五)，可使燃料所產生之衰變熱量完全傳遞到格架之外圍。蜂巢狀之格架可提供最大的結構強度、熱傳導及輻射屏壁。目前 HOLTEC 公司已有三種型式之格架獲得美 USNRC 之執照，分別為 MPC-68、MPC-32 及 MPC-24。其中 MPC-68 為 BWR 燃料所使用，MPC-24 及 MPC-32 為 PWR 燃料使用，主要設計參數詳參表一。

TABLE 3 MPC DATASHEET				
MPC	MPC-68	MPC-68F	MPC-24	MPC-32*
Capacity	68	68	24	32
Max. Wt. (lbs)	88,000	89,000	80,000	90,000
Fuel Type	BWR	BWR†	PWR	PWR
Enrichment Limit (max.) % of ²³⁵ U	4.2	4.2	4.6	5.0
O.D. (in.)	68.375	68.375	68.375	68.375
Overall Height (in.)	190.5	190.5	190.5	190.5
Basket Shell Material	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel
Basket Structural Material	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel
Criticality Control	Boral, Fixed Neutron Absorber	Boral, Fixed Neutron Absorber	Boral, Fixed Neutron Absorber	Boral, Fixed Neutron Absorber



(圖四) 蜂巢狀 (honeycomb) 格架



(圖五) Honeycomb 格架(Fully welded)焊接工作

MPC(Multi-Purpose Canister)設計

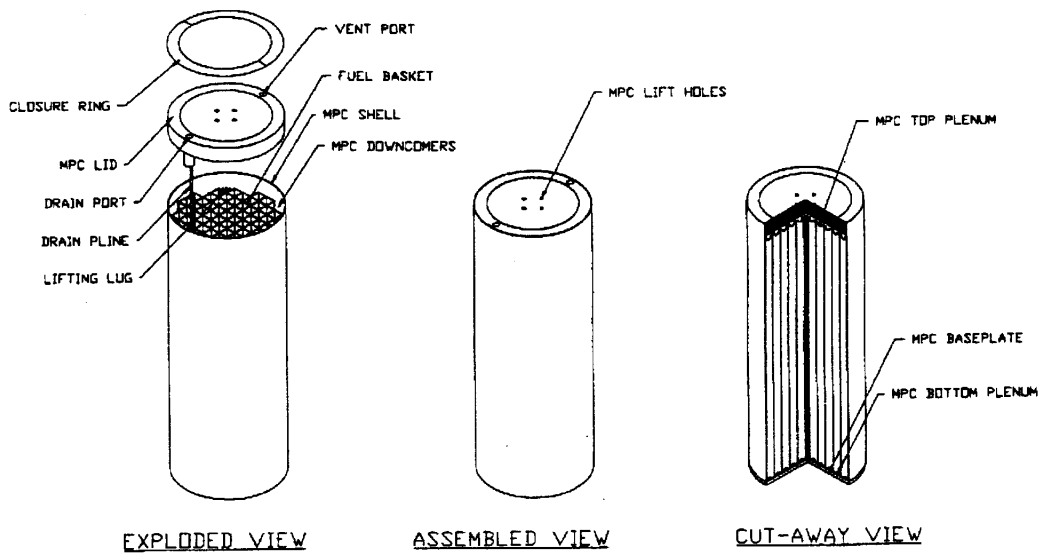
MPC (Multi-Purpose Canister)是一圓柱形的壓力包封容器，其主要組件如圖六，是採用雙重 (Redundant) 包封設計，未使用螺絲或其它機械裝置來密封。頂端蓋為一圓盤直接焊接至 MPC 殼側，蓋上有水及空氣之排放裝置用來移除 MPC 內之空氣和水氣及回充惰性氣體 (如氬氣) 用。於蓋上再安裝一包封環 (closure ring)，將包封環邊緣與 MPC 殼側和圓盤蓋邊緣以焊接方式連接在一起。在包封環安裝前必需先將圓盤蓋上之排氣、排水孔覆蓋封焊。MPC 之洩漏機率為： 1×10^{-11} /NRC。另外，MPC 之設計可提供 thermosiphon 功能 (如圖七所示)，可填充之氬氣於格架之 Top & Bottom Plenum 及降流區 (Downcomer) 間產生良好對流，此設計可容許將 Hot fuels 集中放置於 MPC 中央區域也不會發生超過溫度限值的情形。

因 thermosiphon 功能設計，HOLTEL 公司提出區域儲存 (Regionalized Storage) 之觀念，即把較 Hot(young)之用過燃料集中放置於 MPC 中央，再將較 Cold(Old)之舊燃料放於 MPC 外圍 (參圖八)，如此可大幅降低護箱表面之輻射劑量，此法已獲得 NRC 執照。以 MPC-68 為例，以區域存放原則，中央區域可放置之用過核燃料其燃耗最高可達 59900MWD/MTU (15yrs cooling time) or 45100 MWD/MTU (5 yrs cooling time)，詳參表二。

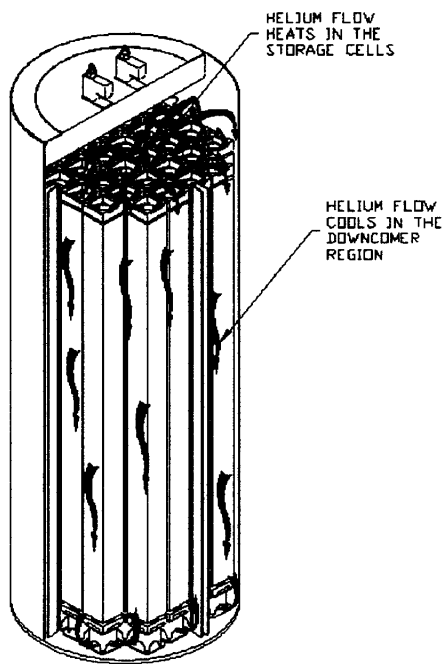
Cooling Time & Burnup Uniform Loading ([Years]/[MWD/MTU])	Current CoC		LAR 1014-2	
		5 / 38,300		5/58,000
	15 / 53,900		10/70,000	
Cooling Time & Burnup Regionalized Loading ([Years]/[MWD/MTU])	Region 1	Region 2	Region 1	Region 2
	5 / 45,100	5 / 26,200	3 / 49,200	5 / 28,800
	15/59,900	20/48,500	5/70,000	20/52,900

MPC 是完全以不銹鋼合金製成，目前美國能源部 (DOE) 接受可使用做為高階核廢料儲存設施之包封材料有 SS316、SS316LN、SS304、SS304LN。

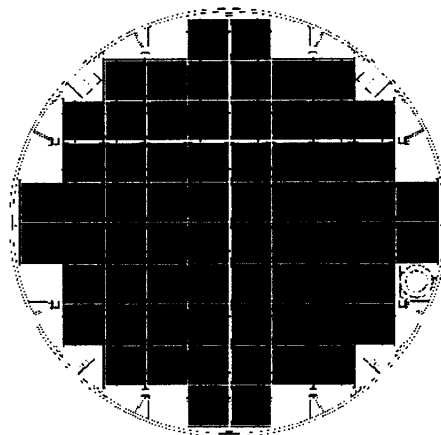
目前 HOLTEC 公司所設計之 MPC 除了可儲存用過核燃料 (有 channel/無 channel 皆可) 外，還可存放受損燃料、非燃料之硬體 (如 class C 之廢料) 及 GTCC (Greater Than Class C waste) 等。



(圖六) MPC 主要組件



(圖七) Thermosiphon 設計



(圖八) 區分儲存 (Regionalized Storage)

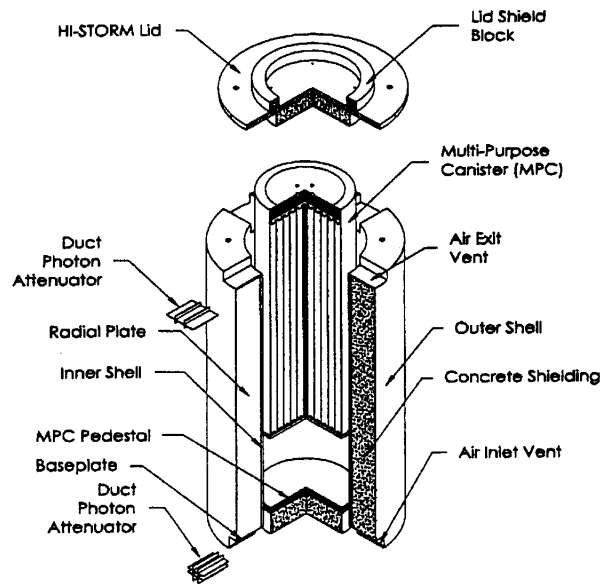
HI-STAR 100 SYSTEM 設計

- ◎HI-STAR (Storage, Transport and Repository) 護箱之主體結構，包括 MPC 及 HI-STAR 包覆 (overpack) 結構兩部分。
- ◎依 ASME code Section III Subsection NB 及 NF 設計規範。
- ◎通過獲得美國 10CFR72 及 10CFR71 CoCs (Certificate of Compliance)。
- ◎兼具運輸及包封儲存用過核燃料兩種功能。
- ◎故在運輸時不需使用額外的運輸護箱。
- ◎運輸時可裝防撞限制器 (Impact limiters)。
- ◎可搭配於所有的 MPC 型式 (MPC-68、MPC-32、MPC-24)。
- ◎外層包覆 (overpack) 結構為碳鋼材料，故其為全金屬護箱。
- ◎採多層低溫冷渣鋼製程，使其強度可在遭受飛彈攻擊時，仍不會產生龜裂。
- ◎有裝載燃料的護箱在遭遇火災、洪水及可能高度之掉落事件時，亦不會發生塑性變形。
- ◎NRC 曾模擬發生隧道火災時，HI-STAR 護箱可在持續燃燒七小時的火勢下，仍維持其完整性。

HI-STORM (STORAge Module) 100 SYSTEM 設計

HI-STORM (Holtec International Storage and Transfer Operation Reinforced Module) 護箱之主體結構 (圖九)，包括 MPC、HI-TRAC (TRANSFER Cask) 及 HI-STORM 外層包覆 (overpack) 結構三個部分。它是一非常堅固的用過核燃料儲存設施，採垂直存放方式，垂直方向設計有空氣對流孔可促進空氣之對流冷卻 MPC。HI-STORM 已於 2000 年 5 月獲美國 NRC 之 CoC(編號：72-1014)。

HI-STORM 是一直立、可通風的圓柱體包封結構，可將局部的輻射劑量降至最低並維持內部 MPC 於適當位置。其設計上特別考量，使其易於抵抗強風、颶風或閃電等自然界現象的襲擊，一般而言，將 HI-STORM 護箱部署於中期儲存場內。



(圖九) HI-STORM 主要結構及組件

HI-STORM 外層包覆 (overpack) 為一金屬-混凝土、厚壁圓柱體容器，其內外側是由碳鋼板構成，內層鋼板厚 2 inch 外層鋼板厚為 0.75 inch，內外鋼板間於安裝組合完成後灌入混凝土屏壁，厚度為 26.75 inch。頂部則以混凝土和金屬蓋用螺絲鎖緊。整體結構除了提供輻射線之生物屏壁，亦可保護內部儲存物不受天災及飛彈攻擊而破壞。

護箱於底部及頂端分別設計有四個進氣和排氣孔及氣流導通管，可藉空氣自然對流方式將內部 MPC 之熱量移除。在氣流導通管上裝有 HOLTEC 創新發明之光子衰減器 (photon attenuator)，可有效阻止 γ 射線，約可降低至 $1/10^6$ 倍。在所有的通氣孔處都裝有網狀濾網，以防止昆蟲進入護箱內。

HI-STORM 包覆 (overpack) 結構主要設計參數如下表所示：

高度(height, inches)	231
外徑(Shell O.D. , inches)	132.5
內徑(Shell I.D. inches)	73.5
重量(Weight ,lbs)	269000
裝載後重量(Weight Loaded with heaviest MPC, lbs)	358000
底部進氣孔數量	4
底部進氣孔大小 (inches)	15 x 10
頂部排氣孔數量	4
頂部排氣孔大小 (inches)	25 x 6

HI-TRAC 是設計做為 HI-STORM 系統的 Shuttle 護箱，因為 HI-STORM 體積太大無法直接於燃料池側來進行安裝。HI-TRAC 也是為一圓柱體容器，其上下蓋為可移動式，HI-TRAC 可與 HI-STORM 或 HI-STAR 頂部相接合，將 MPC 傳遞至 HI-STORM。HI-TRAC 容器壁是由碳鋼為主要材料，再加入鉛屏蔽層，操作過程是以水及鉛做為輻射屏蔽，上端蓋中央開有一洞做為吊升降 MPC 用，下端蓋可於接合後開啓使 MPC 能直接傳送至 HI-STORM 本體內。

HI-STORM 設計上之安全度考量：

「乾式貯存」設施之興建，除了事前須做好周全之規劃、準備工夫，如可行性研究、地質鑽探、環境影響評估、投資可行性評估等，相關法規對其工程設計之要求仍極為嚴謹，與核電廠幾無二致。以美國為例，聯辦法規 10CFR72 明白要求：「乾式貯存」護箱系統承受地震、洪水、飛體撞擊等意外事件之能力，須比照核電廠反應器系統；在完成「乾式貯存」護箱細部設計與安全分析後，尚須進行 Performance Test，以實體模擬驗證其實測數據（如溫度、屏蔽）與模式數據之差異，經分析評估可接受以後，美國聯邦核管會才會核發執照。以下為 HI-STORM 系統一些有關安全方面之考量：

- ◎強度可抵抗地震及恐怖份子飛彈攻擊。依 USNRC 於鹽湖城所做之測試，在 1.0g 的地震下仍可維持完整。
- ◎護箱在飛彈及飛機攻擊時仍不會被穿破。依 Sandia 國家實驗室研究所得，護箱在波音 767 以 530MPH 速度撞擊後，導致輻射外洩的機率為零。
- ◎頂蓋可承受最大外力為 3.7×10^6 lbs。
- ◎無發生輻設外洩的風險。（MPC 從 25 呎高掉落至硬水泥地也不會造成輻射外洩）。
- ◎對外界造成之輻射劑量很低。

HI-STORM 之優/劣點：

- ◎結構堅固，安全度高。
- ◎採購彈性大，價格相對低廉，約為 HI-STAR 的 1/4 價格。
- ◎運轉使用期間不需安裝任何監視儀器。

◎安裝過程較複雜。

三、使用實績

HOLTEC 公司於美國乾式儲存市場之佔有率約為 60% ，迄今已完成 50 個護箱製造及交運，且成功完成 31 個 MPCs 之裝填。主要實績經驗條列如後：

◎ Plant Hatch：裝置完成 3 個 HI-STAR 及 6 個 HI-STORM。

◎ Dresden：裝置完成 4 個 HI-STAR 及 13 個 HI-STORM。

◎ JAF：裝置完成 3 個 HI-STORM。

◎ CGS：裝置完成 2 個 HI-STORM。

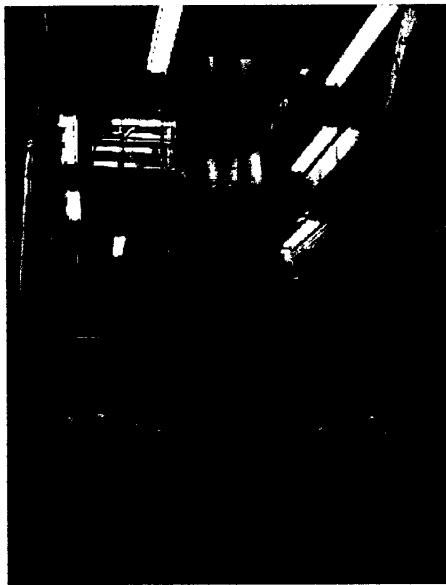
◎ Trojan：2002 年 9 月開始進行安裝 34 HI-STORM。

四、現場安裝流程

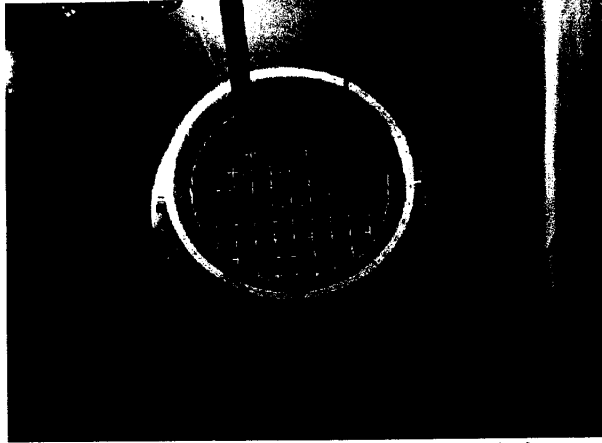
本報告僅就 HI-STORM 系統現場安裝流程進行說明。

1. 運送 HI-STORM SHELL、HI-TRAC 及 MPC 至電廠。
2. 先將 HI-STORM SHELL 安置於廠房外，並於殼部加入混凝土。
3. 將 HI-TRAC 及 MPC 移入燃料廠房內。
4. 將 MPC 裝入 HI-TRAC 內。(圖十)
5. 將護箱置入燃料池中。
6. 裝填用過燃料至護箱中。(圖十一)
7. 完成燃料裝填後，安裝護箱蓋。
8. 從燃料池吊出 HI-TRAC 至廠房地面。
9. 進行 MPC 密封操作程序(圖十二)
 - MPC 蓋焊接工作，完成後執行三次液滲檢測。
 - MPC 加壓至 130psig，進行水壓測試。後再執行一次液滲測試。
 - MPC 內部排水。
 - MPC 內部乾燥。
 - 填充氮氣。
 - 將排氣、排水孔覆蓋及密封焊接，完成後執行二次液滲檢測。

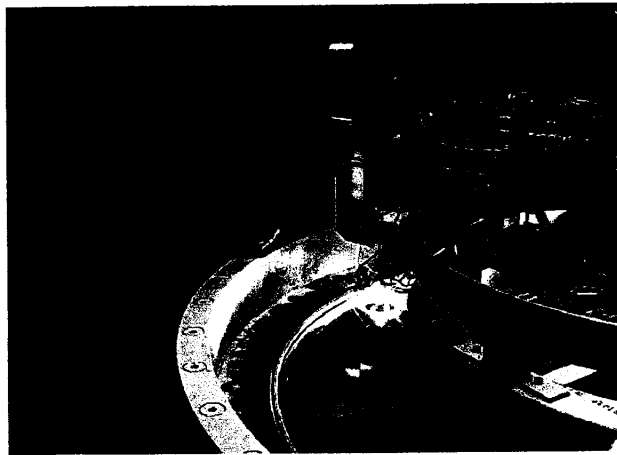
- 密封環 (Closure Ring) 安裝焊接，完成後執行二次液滲檢測。
 - 氮氣洩漏檢測 (5×10^{-6} atm-cc/sec)
10. HI-TRAC 蓋及 MPC 吊掛鋼纜安裝。
 11. 將 MPC 傳送至 HI-STORM。
 12. 移出 HI-STORM 護箱。
 13. 安裝 HI-STORM 護箱蓋及吊架。
 14. 移至中期貯存場放置。(圖十三)



(圖十) 將 MPC 裝入 HI-TRAC 內



(圖十一) 裝填用過燃料至護箱中



(圖十二) 進行 MPC 密封操作程序



(圖十三) 安置於中期貯存場之 HI-STORM(灰) 及 HI-STAR(白)

五、結語與建議

用過核燃料乾式貯存技術，於美國從 1984 年開始開發使用迄今已有十餘年經驗，所使用之聯辦法規為 10CFR72，1989 年版共分十項子題，1991 年另增加 Subpart K 及 L 兩大部分。美國 HOLTEC 公司成立於 1986 年，總部設於美國紐澤西州 Marlton，主要從是用過核燃料乾式及濕式貯存設計、整體規劃及施工。由此次於 HOLTEC 公司實習所得，知目前乾式貯存設施是一十分成熟之技術，亦有十餘年使用經驗，在美國聯辦法規的要求下，對貯存設施安全方面的設計之要求仍極為嚴謹，與核電廠幾無二致。如「乾式貯存」護箱系統承受地震、洪水、飛體撞擊等意外事件之能力，須比照核電廠反應器系統。

HOLTEC 公司所設計用於 BWR 燃料貯存之設施為 HI-STORM & MPC-68 及 HI-STAR & MPC-68 系統，每一護箱最多可放置 68 束 BWR 燃料，裝置完成後，於運轉使用期間，以空氣自然對流方式將核燃料所產生之衰變熱移除，加上其特有「區域存放」之設計，可大幅降低貯存設施表面之輻射劑量，故系統不需使用溫度或輻射等監視設備。是一安全且易於運轉維護之先進核燃料貯存設施。HI-STORM 系統在安置過程雖較 HI-STAR 略為複雜，但在費用上遠比 HI-STAR 低（約為四分之一），而兩種設施所需之場地大小相同，故選用 HI-STORM 將是較有利之考量。

本次出國為期十日，扣除搭機交通行程，實際用於從事實習 HOLTEC 公司「乾式貯存」設施的設計原理及相關安全度評估工作之時間僅有五日。所需實習的相關課題內容極多，時程上更顯倉促，所幸 HOLTEC 公司聯絡人 Sales Manager Ms Joy Russell 大力協助，不吝提供所需之資料，並協助安排相關設計人員參與討論解答相關疑問，使這次實習工作能達事半功倍之果效，亦使職能順利完成此次任務。惟藉此建議日後相關之實習工作，公司能增加實習之時程至十四日，不至有時程過於倉促而有遺漏之憾。