

核二廠乾貯護箱系統廠外運送作業 專案評估報告

【核二廠乾貯場與最終處置銜接之運輸作業概念與評估】

台灣電力公司

中華民國 102 年 1 月

目錄

頁次

目錄	i
圖目錄.....	ii
表目錄.....	ii
1、 核二廠乾貯場與最終處置銜接之運輸作業概念與評估	1-1
2、 裝載容器及運送設備	2-1
3、 陸運路線.....	3-1
4、 道路承載.....	4-1
5、 海運船舶.....	5-1
5.1. 裝載前的準備.....	5-1
5.2. 裝貨過程中.....	5-3
5.3. 運輸途中之維護.....	5-4
6、 預定港口應具備條件	6-1
7、 結論	7-1
8、 參考文獻.....	8-2

圖目錄

	頁次
圖 1-1 近岸運輸(駁)船	1-1
圖 1-2 用過核子燃料運送護箱海運裝卸作業	1-2
圖 1-3 核二廠用過核子燃料長途海運運輸規劃	1-3
圖 1-4 核二廠用過核子燃料貯存系統主要組件示意圖	1-5
圖 1-5 用過核子燃料束從密封鋼桶轉換至處置用之燃料最終處置罐示意圖	1-5
圖 1-6 KBS-3型燃料最終處置罐剖面圖(單位：mm)	1-6
圖 1-7 KBS-3型燃料最終處置罐運送圖	1-6
圖 2-1 MAGNASTOR 密封鋼筒之運輸護箱MGNATRAN 示意圖	2-2
圖 2-2 瑞士Leibstadt電廠進行用過核子燃料護箱之運送	2-4
圖 2-3 特製之用過燃料陸運多軸油壓卡車可承載120噸之用過核子燃料護箱	2-4
圖 2-4 防撞緩衝器示意圖	2-5
圖 2-5 核二廠用過核子燃料傳送護箱門型吊車示意圖	2-5
圖 2-6 多軸油壓板車示意圖	2-6
圖 2-7 多軸油壓板車廠內運輸示意圖	2-6
圖 2-8 核二廠用過核子燃料多軸油壓板車廠內運輸示意圖	2-6
圖 2-9 用過核子燃料專用運輸船	2-7
圖 6-1 用過核子燃料運輸護箱海運裝卸作業示意圖	6-2
圖 6-2 用過核子燃料運輸護箱碼頭作業示意圖	6-2

表目錄

	頁次
表 1-1 台北港營運碼頭長度及設計水深一覽表	1-7
表 2-1 MAGNASTOR 密封鋼筒之運輸護箱 設計參考參數(僅供參考)	2-3
表 2-2 用過核子燃料專用運輸船M/S Sigyn 運載能力相關資料	2-7

前言

用過核子燃料和再處理過程所產生廢棄物之運送經驗，參考美國核能管制委員會統計資料，過去25年來，英國與法國平均每年有650運次(含日本用過核子燃料運往英國與法國再處理之國際長程海域運輸)，總計已運送超過7萬公噸用過核子燃料；而過去30年來，美國境內之用過核子燃料運輸超過2,700運次，總運送距離超過160萬英哩，均未曾發生運送容器破裂或輻射洩漏之意外事件，用過核子燃料及再處理過程所產生廢棄物之運輸作業安全無虞。

目前國際上用過核子燃料和再處理過程所產生廢棄物之運送經驗，以日本Nuclear Fuel Transport Company Ltd. 和英國World Nuclear Transportation Institution兩家公司最具經驗，經參考這兩家公司及世界核能先進國家之用過核子燃料及高放射性廢棄物運輸經驗，彙整寫成本核二廠乾貯護箱系統廠外運送作業專案評估報告，其內容分為6項如下。

1. 核二廠乾貯場與最終處置銜接之運輸作業概念與評估
2. 裝載容器及運送設備
3. 陸運路線
4. 道路承載
5. 海運船舶
6. 預定港口應具備條件

1、核二廠乾貯場與最終處置銜接之運輸作業概念與評估

將來進行核二廠乾貯場用過核子燃料運出廠外時，擬採最短陸路運輸途徑並配合海運方式處理，以降低陸路運輸沿途之民眾疑慮，其廠外之運輸規劃如下：

核一、二廠間道路為省道2號，台電公司曾於1971年委請省公路局進行基隆至金山間道路改良，1982年又加以改善，全線橋樑皆採用HS 20 標準，可通行150公噸全拖車或300公噸均佈載重(荷重分佈寬4公尺，長8公尺)。運送用過核子燃料之拖車係採特殊設計(加寬、加長、多軸)，其全重亦在150公噸左右，故通行應無問題。但台2線沿線為海岸景觀區，居民與遊客日益增多，陸路運輸應儘量縮短。依國外操作經驗，盡可能由核能電廠碼頭直接以海運運送，故執行本計畫時，規畫使用明光碼頭，以近岸運輸船（如圖 1-1）接駁運送護箱，由明光碼頭再轉運到主運港口（例如台北港），再轉交專用船舶運往最終處置場進行最終處置。運送護箱海運裝卸作業如圖 1-2。



圖 1-1 近岸運輸(駁)船



日本 Nuclear Fuel Transport Co., Ltd. 用過燃料海運吊卸資料圖片

圖 1-2 用過核子燃料運送護箱海運裝卸作業

從核二廠乾貯場移出用過核子燃料，應考量之事項說明如下：

1. 核二廠乾貯場門型吊車之最大吊載能力：237 公噸以上。
2. 運送護箱裝載限制：MAGNASTOR 運送護箱總重可能達到 120 公噸(含前、後端加套 Shock Absorber，可裝填 87 束 BWR 用過核子燃料)。
3. 目前國際核燃料運輸公司可提供負載達 150 公噸特製用過核子燃料全拖車，全長小於 8 公尺。
4. 目前國際核燃料運輸公司可提供之專用船舶裝載能力：每航次可以裝載 6 只 MAGNASTOR 運送護箱。

就運送經濟效益而言，不論是運送護箱或是專用船舶，皆應以滿載為原則。因此，若核二廠乾貯場用過核子燃料（計2349束）運送至最終處置場，則5個專用船舶航次即可完成。

長程海上運輸規劃（如圖 1-3）：核二廠直接使用明光碼頭，先以近岸運輸船接駁運送護箱，再由此轉運到主運港口（例如台北港），再轉交專用船舶運往最終處置場進行最終處置前之分裝再封罐處理(Encapsulation Process)，初步運輸規劃如圖 1-3。主運港口必須能停靠遠洋長程INF 2級運輸船舶(含近岸運輸船)及燃料運送護箱，因此，140~150公噸吊重能力以上之吊車亦屬必要設備。



圖 1-3 核二廠用過核子燃料長途海運運輸規劃

關於碼頭相關設施之需求，建議碼頭面積至少120m 長，80m 寬；港域水深8m，港口寬度大於48m，港口水深8.9m，迴船池直徑200m。而碼頭必須能承受總重150公噸的多軸拖車及重型大吊車之壓載，以及遠洋型船舶對碼頭之影響。而為執行本計畫，核二廠明光碼頭皆需進行必要之疏濬、抽砂與改善工程。

至於主運港口，以台北港為例，現有東1、2、3、4、5、6、7、13、14、15、16及北2、3、4等14座營運碼頭，台北港航道及迴船池水深約14.5~16公尺，表 1-1 為台北港營運碼頭長度及設計水深，每年實際測量碼頭及港域水深2次，符合本計畫運送需求。

核二廠乾式貯存採用不鏽鋼製容器(如圖 1-4)，未來用過核子燃料乾式貯存期滿後，可將盛裝用過核子燃料束之密封鋼筒（TSC）自混凝土護箱（VCC）中取出裝入傳輸護箱（TFR）中，再裝載至運輸護箱後利用運載機具運送至最終處置場。

處置場中，放射性廢棄物管理系統是最重要的運作系統，包括用過核子燃料接收、包裝、暫貯等系統。用過核子燃料抵達處置場後，將先送至放射性廢棄物管理系統中，由接收系統先行進行安全檢測並

登錄編號，然後送至包裝系統，此系統又屬放射性廢棄物管理系統中最重要之地表設施，在包裝系統中將用過核子燃料束從密封鋼桶轉換至處置用之最終處置罐內並將之焊接密封(Encapsulation Process) (如圖 1-5)，最後再經由豎井將最終處置罐從地表傳送至地下處置隧道進行最終處置，而後必須將運輸護箱及密封鋼桶送至汙染處理系統進行除污工作，便完成了用過核子燃料自乾式貯存轉換至最終處置的作業。

處置場設計與功能、規格需求與乾貯不同，目前我國處置概念規劃採用瑞典KBS-3銅質外殼鑄鐵為內襯的用過核子燃料最終處置罐(SKB, 2011)為參考設計，燃料最終處置罐剖面型態如圖 1-6所示。每個燃料最終處置罐可放入12個BWR燃料組件或4個PWR燃料組件。

整個包裝系統因需容納大型機具，且須要人力操作，所以其需用建築物面積較廣，未來可將廢棄物運送豎井設置於包裝系統內，用過核燃料束裝入燃料最終處置罐後，經由輸送帶運往運輸豎井，運到地下處置場如圖 1-7所示。包裝系統之建築物須為鋼筋混凝土建築，須防止輻射外洩，並達到耐震設計的要求，以避免建築物因地震造成龜裂損害。而內部相關設施操作可由全自動電腦機械操作，避免操作人員直接受到輻射威脅。在包裝系統外設有機具及人員運輸豎井，也設有維修豎井的設施；而暫貯系統則供地下作業之材料暫貯之用，包括處置容器貯存庫、及緩衝/回填材料貯存庫等，亦須嚴密管控。

本章節乾式貯存與最終處置之銜接性，是依據目前現況來做評估，未來銜接的過程中，將視國內外之處置概念與技術精進適時調整。

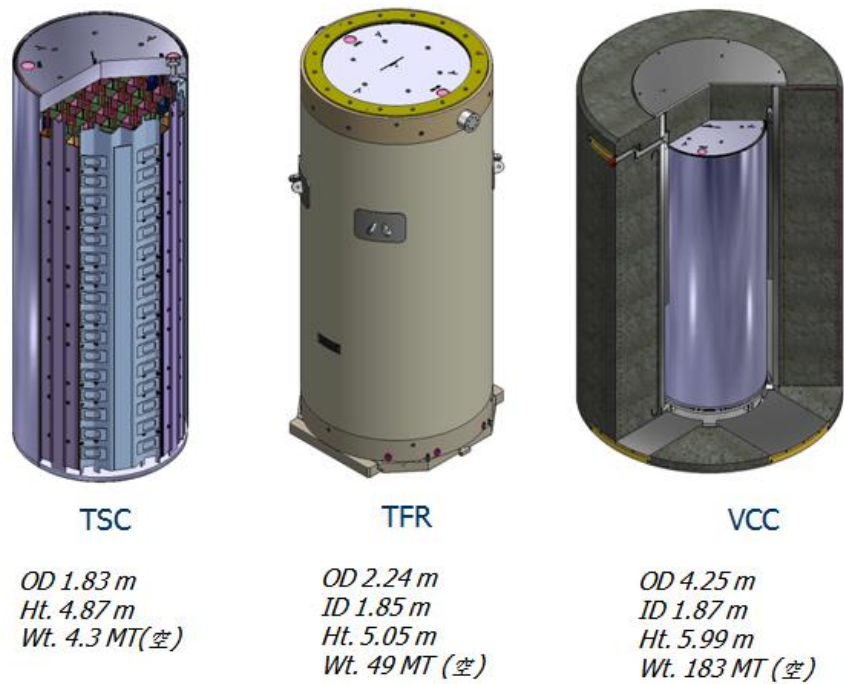


圖 1-4 核二廠用過核子燃料貯存系統主要組件示意圖



圖 1-5 用過核子燃料束從密封鋼桶轉換至處置用之燃料最終處置罐示意圖

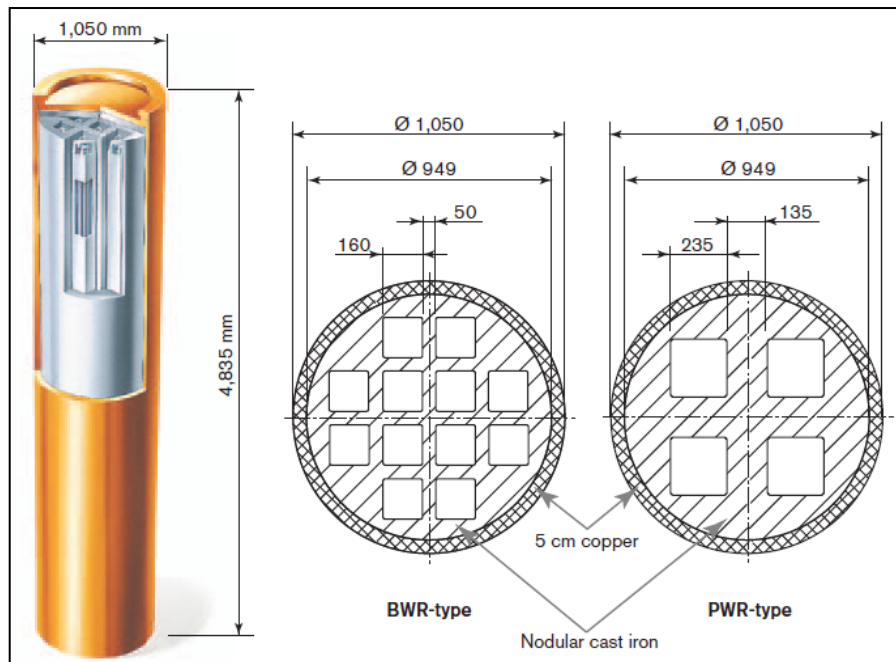


圖 1-6 KBS-3型燃料最終處置罐剖面圖(單位：mm)



圖 1-7 KBS-3型燃料最終處置罐運送圖

表 1-1 台北港營運碼頭長度及設計水深一覽表

碼頭	碼頭長度(m)	設計水深(m)	用途說明
東1	170	-9	散雜貨碼頭 (國內航線砂石船優先靠泊)
東2	170	-9	散雜貨碼頭
東3	227	-11	油品及散雜貨碼頭，開放油品船簽訂第一優先靠泊契約，及快速船(散貨船除外)申請第二優先靠泊
東4	150	-13	油品及散雜貨碼頭，載運淳品實業股份有限公司油品船第一優先靠泊，開放快速船(散貨船除外)申請第二優先靠泊
東5	150	-9~-13	油品及散雜貨碼頭
東6	157	-6.5~-9	散雜貨碼頭(非逸散污染性)
東7	250	-6.5	散雜貨(非逸散污染性)及港勤工作碼頭
東13	200	-12~-14	散雜貨碼頭
東14	300	-14	散雜貨碼頭
東15	250	-14	油品及散雜貨碼頭，載運台塑石化股份有限公司油品船第一優先靠泊，載運淳品實業股份有限公司油品船第二優先靠泊
東16	480	-14	散雜貨碼頭
北2	200	-9	散雜貨碼頭(非逸散污染性)
北3	410	-16	貨櫃碼頭
北4	330	-16	貨櫃碼頭
北5	330	-16	貨櫃碼頭

2、裝載容器及運送設備

為確保用過核子燃料於陸運及海運過程的安全順利，運送過程中必須選擇符合法規規定之裝載容器及運送設備，如運輸護箱(如圖 2-1)、運輸車輛(如圖 2-2、圖 2-3)、運輸船舶、防撞緩衝器(如圖 2-4)、門型吊車以及吊具(如圖 2-5)等，所需裝載容器及運送設備須獲得相關主管機關核發的使用執照。

運輸包件其包裝要求極為嚴格，且每一包件上均有一辨識條碼，此條碼可提供該包件之詳細資料，包括包件之型式(如金屬桶、金屬箱、或混凝土容器等)、廢棄物之來源以及其特性(放射性廢棄物之種類、活度、及劑量率)等。運輸護箱必須符合IAEA之運輸容器規定，必須能承受在最嚴重之事故下仍不會有放射性物質外逸。運輸護箱必須進行下列存活試驗(survive tests)以證明其在最嚴重事故下仍可確保用過核子燃料之安全：

- (1) 兩種墜落測試：一種是由9公尺高墜落在平坦表面，另一種是由1公尺高墜落在鋼棒上；測試時必須考量各種角度及最壞之情節。
- (2) 耐火測試：運輸護箱完全沈浸在液態碳化氫中燃燒30分鐘。
- (3) 沉浸測試：沈浸在水下200公尺深處1小時。

而運輸護箱之保養可參考法國經驗採取三級制，第一級是每次運送前後之檢查，第二級是每隔3年或15次運輸後進行中級保養，第三級是每隔6年或60次運輸後進行大保養，運輸護箱在生命週期之保養費用與護箱之成本相當。

目前核二廠所使用之MAGNASTOR乾式貯存系統之密封鋼筒兼具貯存及運輸功能，因此未來可直接裝入符合IAEA(或10CFR71)規定之運輸護箱。核二廠所使用MAGNASTOR系統混凝土護箱之廠商NAC公司目前正向美國核管會申請可運輸其密封鋼筒之運輸護箱

MGNATRAN，因此未來可使用此種運輸護箱或其它適合之運輸容器進行運輸。

運送用過核子燃料之車輛為專用車輛，依照我國「放射性物質安全運送規則」，包件表面的輻射強度應符合所列規定，即每一包件或外包裝外表面任一點以及距包件表面一公尺外，不得超過其規範之輻射強度與運送指數，若有需要，可加裝額外的鉛屏蔽。且運送過程需在貨櫃車駕駛處、貨櫃車表面、距貨櫃車外側垂直平面1公尺處以及2公尺處進行輻射劑量偵測。

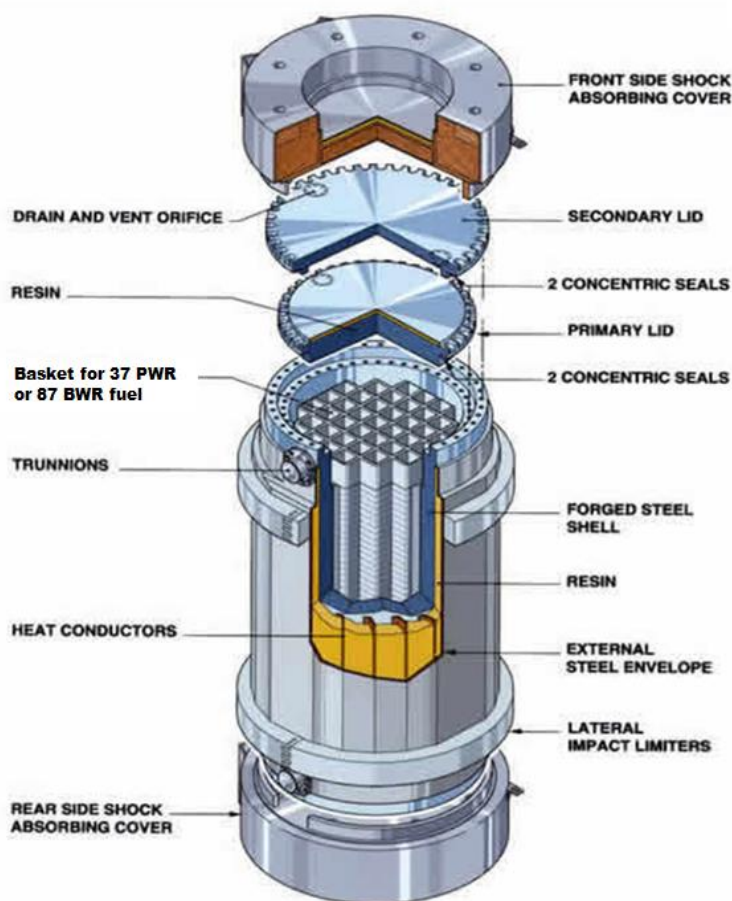


圖 2-1 MAGNASTOR 密封鋼筒之運輸護箱MGNATRAN 示意圖

表 2-1 MAGNASTOR 密封鋼筒之運輸護箱 設計參考參數(僅供參考)

系統主要組件	項目	細項	尺寸 (mm)	重量 (MT)
MAGNASTOR 運輸護箱	運輸護箱 (不含Shock Absorber Cover)	全長 空重 (不含水)、 全負載(含燃料與 Canister)	~5050	~50 ~100
	運輸護箱 (含Shock Absorber Cover)	外徑 厚度 全長	~2235 ~50--~60 (依各國法規要求) ~6200--~6400	~120
	頂環	外徑 高	~2235.2 ~361.9	
	Shock Absorber Cover (卡車用)	外徑 高	~2600 ~400	

運送車輛方面則綜合考量運送路徑環境條件、有效減少操作界面、提升運送安全性、設備取得及後續維護等因素，如採用多軸油壓板車，對於道路沿線構造物衝擊較小（如圖 2-6、圖 2-7、圖 2-8）。

運輸船舶方面，如瑞典是利用特殊設計之運輸船 M/S Sigyn 運送用過核子燃料（如圖 2-9）。M/S Sigyn 之載重為 1,400 噸，其載重及吃水水深相關資料如表 2-2，護箱利用碼頭卡車送到船上，當到達預定之接收港口時，再利用碼頭卡車將護箱運出，至 2009 年底止，已有 5050 噸用過核子燃料利用此種方式運抵瑞典之用過核子燃料中期貯存場（CLAB）。未來用過核子燃料在 CLAB 之封裝廠完成封裝後，亦將利用此種方式運抵瑞典的用過核子燃料最終處置場進行最終處置。



圖 2-2 瑞士Leibstadt電廠進行用過核子燃料護箱之運送



日本 Nuclear Fuel Transport Co., Ltd. 用過燃料陸運資料圖片

圖 2-3 特製之用過燃料陸運多軸油壓卡車可承載120噸之用過核子燃料護箱

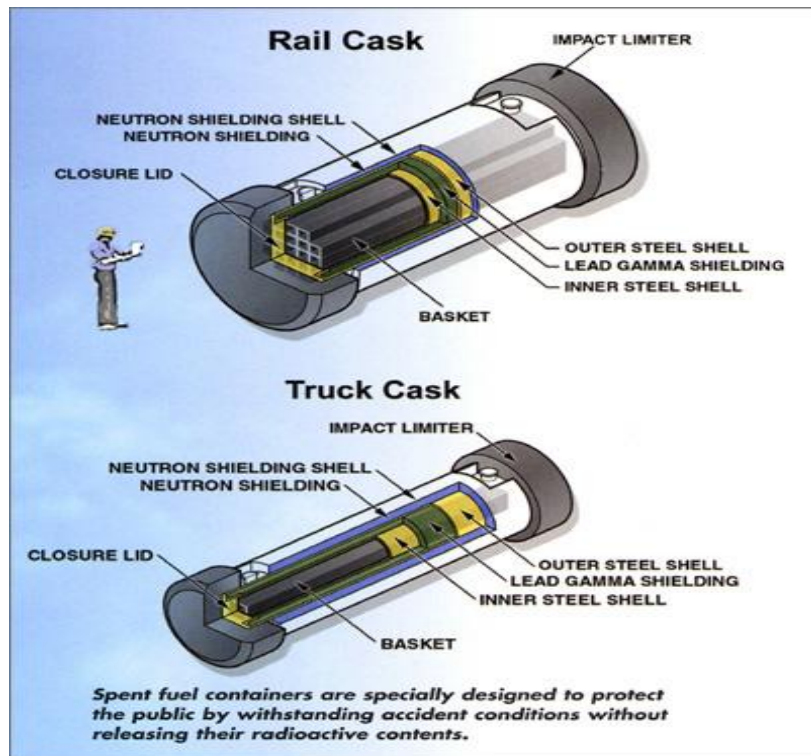


圖 2-4 防撞緩衝器示意圖

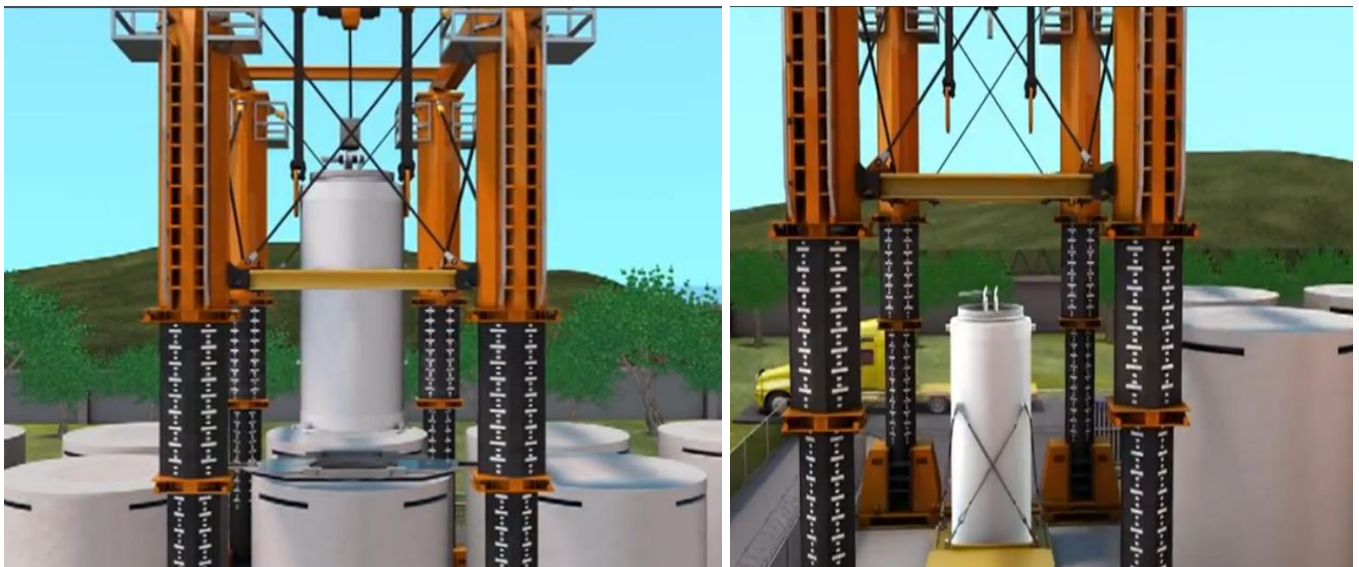


圖 2-5 核二廠用過核子燃料傳送護箱門型吊車示意圖

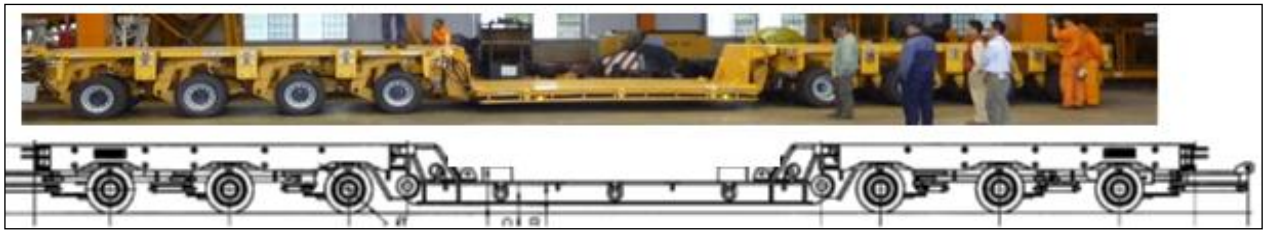


圖 2-6 多軸油壓板車示意圖



圖 2-7 多軸油壓板車廠內運輸示意圖

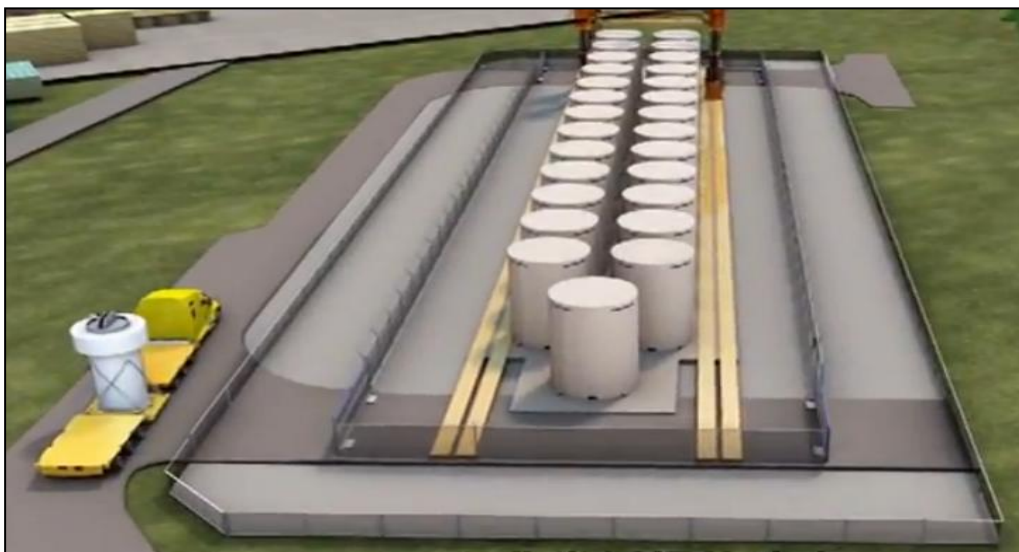


圖 2-8 核二廠用過核子燃料多軸油壓板車廠內運輸示意圖

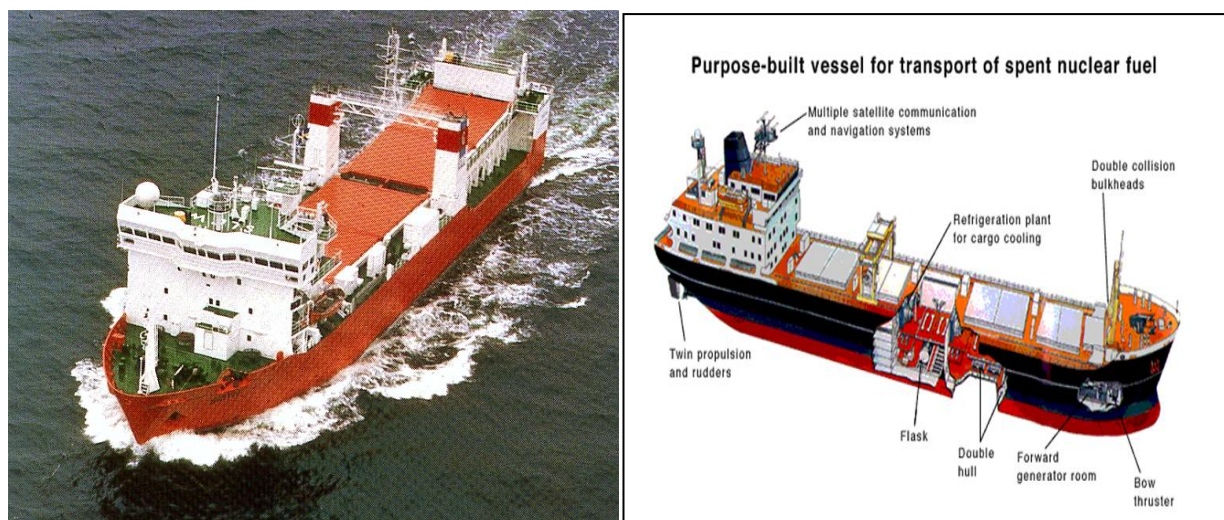


圖 2-9 用過核子燃料專用運輸船

表 2-2 用過核子燃料專用運輸船M/S Sigyn 運載能力相關資料

下水年份:	1982 年
船身全長:	90 公尺
船身全寬:	18 公尺
淨重:	2,044 公噸
總重:	4,166 公噸
裝載能力:	1,400 公噸
滿載吃水深度	4 公尺
巡航速度:	12 節

3、陸運路線

為達到陸運運輸安全，須對於輻射防護計畫、運輸人員之訓練、運送路線、車輛安全及維護等因素制訂運送計畫，並且須先對各相關路線進行評估，並避免白天人車頻繁時段與人口稠密處，減少途經路口之交通管制，避免擾民，以利於掌握狀況及增加運送的安全性，而運送小組成員則由核子燃料專業人員擔任。運輸車隊駕駛除需為技術優良的專業駕駛，並經事前的輻防訓練，車隊由經驗豐富的車長指揮，以應付各種緊急突發狀況的發生。

用過核子燃料運送在國內的陸地運輸部分，需考慮路線里程數與車程所需花費的時間。由於運送用過核子燃料係採特殊容器，運送車輛亦有特別考量，預計運送車輛重量因會超過半聯結車35噸總重量的限制，故必須另向公路監理機關申請核發通行證，並依核定的運輸路線、時間及其規定運輸條件進行運送作業。

用過核子燃料運送過程中，除了運搬機具本身的承載能力必須足夠外，載運重車對運輸路線既有構造物，如道路鋪面、道路邊坡、地下箱涵、溝渠管線、兩旁邊坡擋土牆以及橋梁的影響，都必須詳加考量。在進行運送路徑現況調查，並配合運送路徑沿線的環境條件綜合考量後，才能審慎擇定最合適之載具型式及運送路徑。

陸路運輸之運送計畫須訂定適當之執行及管制作業程序據以施行，相關原則如下所述：

- (1) 參與運送人員應依規定接受相關訓練，並由訓練合格人員押運，而運輸時，除包件外表黏貼警示標誌、駕駛（或操作人員）要接受危險物品運送專業訓練，於啟運前作酒精測試，並作成紀錄備查。
- (2) 運輸全程需嚴格限制行車速度，並進行交通管制。同時要落實各項實體保護措施，按照事前擬定之緊急應變方案，作好運輸的各項緊急應變措施，並且必須將運輸行程安排書面通知相關單

位與途經縣市行政區。運送車隊前後應有前導車及護送車押運，每一運送車輛均應由攜帶槍械及通訊設備之警察護送，並預先協調當地及沿途警察機關，實施交通管制及排除道路障礙。

- (3) 裝載容器、工具及載具必須符合安全標準且經過認證，才能進行運輸。運輸前定期進行相關維護保養工作，運輸後應依規定偵測及除污，以防止污染擴散。
- (4) 運輸作業過程中，應注意輻射安全，進行運輸時需沿途作輻射偵測，以保障工作人員及民眾之接受之輻射劑量符合法令規定。
- (5) 運抵目的地搬至存放場所後，應即依規定劃定適當管制區域，並採取輻射示警措施。

另外，參考美國的經驗，自從發生911恐怖事件後，核能管制委員會（NRC）對用過核子燃料之運輸安全特別注重，其所採取的安全措施包括：

- (1) 所有運輸均需有前導車。
- (2) 交通控制中心24小時有人員監控。
- (3) 對用過核子燃料運輸之時程保密。
- (4) 與地方執法單位保持聯繫。

以NRC規定為例，為了確保用過核子燃料之運輸安全，要求參與運輸作業相關人員不可對外洩漏運輸之確切時程。但為了使相關的州政府及其地方政府有時間來提供運輸安全準備，因此NRC要求運貨人應先通知州長或其授權人關於用過核子燃料進入該州之時間及路線。負責用過核子燃料及高放射性廢棄物運輸之公路運輸公司至少須投保5百萬美元之責任險。

4、道路承載

規劃運送路徑前，需先進行詳細勘查與評估作業，如地形測量、現地調查、非破壞性探測與破壞性探測等，相關作業說明如下所述：

- (1) 測量作業：進行評估作業前，需先對現況地形辦理重測，運送路徑全線可採用光波經緯儀進行測量，運送道路路線測量範圍須涵蓋周遭構造物，並包含道路沿線已知的地下管溝管線，經現地測量結束後再依據現地調查結果製作測量成果圖，以茲作為後續施工作業之參考基圖。
- (2) 現地調查：現地測量可瞭解地表地物之相對位置，而地上構造物損壞及地下管線分佈等，則須進行現地調查。由於載運使用之重車對於路面及地表加載數倍於普通車輛，運送路徑沿線路面狀況、地下管線分佈深淺及構造物強度等，都將對重車運送安全造成影響，因此，詳實的現地調查與評估為必要之工作。現地調查主要項目包含：
 - (a) 道路鋪面狀況調查(包含裂縫及平整度)。
 - (b) 道路下方管線調查(包含管線位置、深度及管材尺寸等)。
 - (c) 擋土牆構造物狀況調查(包含裂縫、損壞及垂直度等)。
- (3) 非破壞性探測：隨著科技發展，非破壞性探測已成為研判地層、地下構造物或混凝土狀況的重要方式之一，其準確性也越來越高。非破壞性探測除了不需破壞構造物之優點外，尚有快速省時及經濟環保等優點。為瞭解路面及地層狀況，除了採用局部區域鑽探及鑽心點取樣外，整條運送路徑可採用透地雷達及折射震波探測來研判地下構造狀況。
 - (a) 路面透地雷達探測：依照所規劃之測線，以拖曳式天線盒實際掃瞄，掃瞄完成後，將其資料存檔，並在紀錄簿上記錄掃瞄的路徑、道路表面狀況、測線線段、量測距離，重複上述步驟反覆進行，直至全部的測線均完成檢測為止。完成現場

探測工作後進行影像資料判讀，判讀時並與地形測量成果圖相互對應檢核。

- (b) 路面折射震波探測：折射震波探測設備包括震測儀、受波器、激發器及蓄電池等部分。現場量測前，將受波器安置於測線上測點測樁處，利用受波電纜連接各受波器與震測儀之受波頻道相通，檢視雜訊狀況並調整受波器之放大倍率，設定濾波頻率、取樣速度、疊加信號等功能後，再利用鐵槌敲擊地表，獲得此敲擊點之震波記錄。完成現場之探測工作後再進行影像資料判讀。
 - (c) 擋土牆構造物鋼筋檢測：使用小型之透地雷達儀器探測，採用此種方式可檢測混凝土內之上層鋼筋間距、鋼筋直徑以及保護層厚度等。
- (4) 破壞性探測：破壞性試驗是獲取較為準確的地層分佈狀況、地質強度參數或構造物強度參數的不二法門。為明確瞭解地層與路面的實際狀況，採用路面鑽心、混凝土鑽心及地質鑽探等試驗，並鑽取試體進行物理性質及強度試驗以供分析及評估，分述如下：
- (a) 路面鑽心試驗：試驗孔位乃依據現況道路縱坡變化情況配置。整段道路鑽心配置仍以平均分佈為原則，鑽心完後再作孔洞回補。
 - (b) 混凝土鑽心試驗：為求取結構體之混凝土強度，以作為構造物安全分析之用。鑽心試驗採用小型鑽石鑽孔機施作，鑽孔前使用透地雷達探測鋼筋位置以及配合避開管線密集區域，取樣後將試體依序編號後，再送至試驗室進行混凝土抗壓強度試驗，鑽心完後孔洞再作回補。
 - (c) 地質鑽探試驗：鑽孔佈設於高低差較大之邊坡處，繪製地質剖面圖後以瞭解實際地層分佈與地下水位高程，並確認承載

層深度與各地層之工程性質，供後續之邊坡穩定分析使用，鑽探結束後進行孔洞回補。

經由上述之勘查與評估作業後，於實際現場路徑探勘作業時，需配合並參考上述評估結果，規劃運輸道路是否足以承載運輸車輛通行，以及注意運送路徑之鋪面狀況是否出現破損或凹陷，若道路遭受損害則需施行修補工程以改善。另外，由於運送時程與評估時間較長，必須隨時掌握地質及構造物狀況，可於運送路徑沿線必要處佈設自動化監控系統，以隨時分析判讀，在結構物出現狀況時立即進行檢修改善，以連續監控方式確認運送路徑之狀態，使用之監測儀器以及監測目的如下：

- (1) 設置電子式地表伸縮計，以監測地表承載力不足而下陷或邊坡滑動造成之下陷。
- (2) 設置電子式傾斜管，以觀測邊坡滑動之土壤相對位移。
- (3) 設置電子式傾斜儀，以監測擋土牆是否傾斜，若擋土牆傾斜為擋土牆傾倒或滑動破壞之前兆。
- (4) 擋土牆出現裂縫可能為擋土牆斷面或配筋設計不足，為預防裂縫擴大造成之破壞，故設置電子式裂縫計觀測。

規劃實際運送作業實施前，有必要時，先進行全負重測試以確證運送路徑與橋梁之安全性。若發現路徑中有部分區域含有鬆散地層則於路徑改善工程中補強，就先前調查結果擇定顯示含有鬆散地層之區位進行平鈹載重試驗，確認路面及橋面承載力足夠後，再辦理負重測試。待鬆散地層區域完成平鈹載重試驗，確認路面承載力符合需求後，即針對運送路徑展開全面實體負重測試，使用運輸車輛利用配重塊模擬日後運貯時所產生之荷重條件，藉以驗證道路之承載能力，並觀察現場監測儀器之即時監測狀況。建議在正式運送之前進行1~2次加載運送模擬，以便瞭解運送途中是否出現先前無預期之突發狀況，在正式運送前進行修正改善。

除持續對道路施以監測與確認道路承載能力外，還需針對運送路徑進行安全評估與分析工作：

(1) 道路坡度評估：

(a) 目的：評估道路坡度及轉彎超高，是否可符合運送時之安全要求。

(b) 方法：依據道路高程、轉彎半徑、超高測量結果，進行電腦模擬。

(2) 路面載重能力評估：

(a) 目的：避免重車通行時，造成路面破壞。

(b) 方法：據路面檢測及地質鑽探成果，進行重車通過時道路鋪面(AC+級配)之安全評估。

(3) 地下箱涵安全評估：

(a) 目的：避免重車通行時，造成電力管線、過路涵洞、排水箱涵等地下管線之破壞。

(b) 方法：依據地下管線檢測成果，進行重車通過地下管線之安全評估。

(4) 邊坡穩定分析：

(a) 目的：評估重車超載是否會造成道路下側土牆破壞。

(b) 方法：藉由地質鑽探求得土壤參數，並藉由地形測量求得道路及邊坡之坡度及構造物之整體配置，進行邊坡穩定分析。

(5) 擋土牆安全評估：

(a) 目的：評估重車超載是否會造成道路下側土牆破壞。

(b) 方法：藉由地質鑽探求得土壤參數，並藉由地形測量求得坡度、擋土牆之配置，進行擋土牆安定分析。

(6) 橋梁載重能力評估：

(a) 目的：不同類型重車(車長、車寬、輪距、輪軸重)對橋梁有不同之荷重，需探討橋梁是否可承受載運重車之荷重。

(b) 方法：依據目前設計圖說進行應力分析，進行載運重車通過
橋梁之安全評估。

透過以上詳細評估基地條件以及探討改善工法的可行性後，以進一步擇定較佳之運輸行駛路線。

5、海運船舶

使用船舶運送應嚴格遵守有關法規，章程條例等各項規定，妥善謹慎處理運輸過程中的每一個步驟，才能確保運送途中的安全。海運船舶及相關載具需針對用過核子燃料尺寸運輸護箱的運送而製作，如英國太平洋核運輸有限公司所屬船舶，其長約104公尺，重達5100噸，是專門設計的雙殼船隻，僅用於國際運輸核原料，並符合所有相關國際安全標準，特別是國際海事組織所制訂之INF-3（輻照核燃料等級3），可運載高放射性物質如高放射性廢棄物及用過核子燃料等，用過核子燃料之海洋運送，應依核准之運送計畫、安全管制計畫及下列規定執行：

- (1) 包件應置於可隔離並加封條上鎖之船艙或貨櫃內。
- (2) 國內航線應指派攜帶通訊設備之人員護送。
- (3) 預先通知啟卸港之港務局，並協調警察機關派員戒護。
- (4) 船舶抵達目的港埠時，提貨前應由攜帶槍械之警察戒護。

另外載運流程也需經詳細的前置準備工作與擬定運輸及船舶相關維護工作。以下為國際放射性物質海運分別以「裝載前的準備」、「裝貨過程中」與「運輸途中之維護」3個階段說明，亦可為國內高放射性物質海運船舶運輸參考。

5.1. 裝載前的準備

- (1) 熟悉並配備相關文件如有關國際海事組織（International Maritime Organization，IMO）、靠港國家、主管部門、靠泊港區、船公司等有關危險貨物運送等，並保持最新資料。
 - (a) 適用於國際海上運送的「國際海運危險貨物規則（International Maritime Dangerous Goods Code，IMDG Code）」。
 - (b) 靠泊港國家或當地危險貨物的運送法規。
 - (c) 國家、主管機關、船公司等頒發的條例、標準、規章和法規。

- (2) 謹慎審查裝貨清單，取得完備的危險貨物單據，掌管運送貨物的特性。運送危險貨物主要之單據如下：
- (a) 危險貨物技術說明書 (Material Safety Data Sheet , MSDS) 。
 - (b) 包裝檢驗證明書和包裝適用證明書。
 - (c) 放射性物質劑量檢查證明書。
 - (d) 限量危險貨物證明書。
- (3) 危險貨物應向港務局提出裝運申請，以獲得危險貨物核准貨單。
- (4) 檢查承運船舶的技術條件，各種危險貨物對船舶技術條件有不同的要求。除承運船舶持有有效的危險貨物適裝證書外，在承運危險貨物時，必須事前向船舶檢驗部門申請對船舶證書後，方可接受承運。承運危險貨物船舶的檢驗內容如下：裝運貨艙的結構、貨艙的防火、防水設備、通風設備及其他狀況、船舶滅火和救生設備、船舶電氣與通信設備、船舶裝卸設備等。
- (5) 按「IMDG Code」要求進行積載與隔離。避免積載烈性危險貨物的貨艙中途再加裝其他貨物。
- (6) 裝船前應依安裝貨物規定期限內，向港口監督部門申請監督裝載並附送危險貨物積載圖和有效的危險貨物適裝證書的影本。若運送人未申請監督裝載，則港口法定監督部門有權對危險貨物的裝載過程實施法定監督。
- (7) 裝載前的其他準備。依據待裝危險貨物的緊急應變部署表和意外事故應變指南，備妥適宜的滅火器材和相應的急救藥品。貨物墊材和貨櫃繫栓器具 (Lashing gears equipment) ，保持煙霧警報和救生消防設備處於良好適用狀況。保持貨艙清潔、乾燥、管路系統及污水槽暢通、水密性良好等。

5.2. 裝貨過程中

船舶在裝卸過程中，因裝卸工人有接觸載櫃的機會，如果貨物因撞擊或摩擦造成包裝破損，工人將處於危險的工作環境中，從事故分析中發現，貨物運輸中，造成危險貨物之事故主因在於人為因素。因此，貨物裝卸必須按照危險貨物章程之規定操作，確實做好裝卸貨前的準備及防護工作，並正確操作。

- (1) 在船舶到港之前，須將危險貨物清單送交港口主管機關，告知貨物的名稱、數量、危險特性等，以便主管機關事先做好適當的安全措施。
- (2) 裝船的危險貨物清單，其內容應詳細載明，包括：船舶名稱、裝船港口及日期、卸貨港、貨物名稱、聯合國編號(United Nations Number, UN No.)、危險貨物類別、貨物數量、重量及體積、其他注意事項等，並於裝船前，此清單必須經船長簽名確認。
- (3) 船舶在抵達卸貨港之前，也應將船上所有的危險貨物清單、積載圖及卸貨清單轉交給港口主管機關。
- (4) 進行裝卸作業之前，必須將船上所有危險貨物清單及位置圖張貼在船上重要的場所，例如：駕駛台、機艙、餐廳、舷梯口等處。
- (5) 已申請裝運之危險貨物必須經由主管部門之認可，才可變更裝載位置。
- (6) 裝載容器外表必須依規定貼上正確的標誌，使所有操作人員均能辨識危險類別，研判其特性，注意安全。
- (7) 裝載之貨艙必須保持清潔、乾燥、艙蓋水密性、污水槽暢通。
- (8) 裝卸機具事先應做詳細檢查，吊桿滑車及鋼索必須保持良好之安全狀態，必要時應將吊桿及鋼索之安全工作負荷(SWL)做適度之降低，以防止斷裂。

- (9) 裝卸作業應儘可能在白天進行，裝卸時，船上應派專人值班。
如在夜間作業，必須有足夠的照明設備，且照明設備必需為防爆式或密閉式，嚴禁使用不安全的燈具。
- (10) 應在卸貨前將貨艙充分通風，必要時應經有關單位檢測合格才能卸貨。
- (11) 進行裝卸作業時，白天應掛紅旗，夜間應在桅頂懸掛紅燈，甲板上應設立醒目之「嚴禁煙火」警示牌。
- (12) 船上所有消防設備均處於立即可用的良好狀態並應嚴禁煙火。
- (13) 危險貨物之裝卸順序及安放位置必須依照積載圖(Stowage plan)及裝卸計畫進行裝卸，應防止碰撞、擦撞、摔落或翻滾等不安全之作業，並確保包裝的完整。
- (14) 裝卸過程中必須指派當值船副監督作業，對於操作安全必須嚴格執行。
- (15) 裝載完畢後必須確實繫牢、固定，並施以適當的墊材防護，避免與船體鋼材摩擦。
- (16) 裝載過程若發現包裝有破損現象發生，應立即請隨船員專業人員協助檢查處理，必要時應禁止裝船。
- (17) 裝卸載物時，如發生閃電、下大雨(雪)、或附近發生火警，即應立即關艙停止作業。
- (18) 海上航行期間應經常派人檢查，注意載物是否有移動、破裂、輻射洩漏等情形，並每日定時檢查溫度及通風。

5.3. 運輸途中之維護

- (1) 載有危險貨物的船舶不論航行、錨泊、繫泊等候，卸載期間均需對船舶所裝之危險貨物實施有效之監控與維護。檢查載物是否有移動、輻射洩洩及其他危險變化，按時測定貨艙溫度、濕度

及輻射值，合理進行通風防止潮濕，貨艙溫度過高及艙內危險氣體集聚。

- (2) 如需進入密閉艙間，甲板上必須專人看守，且進入時需佩戴自助式呼吸器，人員進入前需進行通風並經檢測以確保安全。船舶煙囪應設防焰網，進入貨艙人員，嚴禁攜帶足以引發火種之器具，包含手機、閃光相機，不可穿著帶有鐵釘的工作鞋或化學纖維或尼龍做成的工作服，艙內所使用的照明、通風和機械設備必須具有防爆特性。船上所有易燃、易爆氣體可能散佈區域，必須劃定「危險警界區」，區域範圍內，不得進行船體保養或檢修工作，更不可作剷除鐵銹工作。

6、預定港口應具備條件

將來用過核子燃料運出廠區外前，須先進行專用碼頭興建或港口與碼頭擴建之調查與評估，並完成施工作業。依國外操作經驗，儘可能可以由核能電廠碼頭直接以海運運送為宜，運輸護箱海運裝卸作業如圖 6-1所示。

用過核子燃料運至核能二廠專屬碼頭的過程，首先需規劃經由廠區內運輸道路運出，並且承載道路須符合載運重車之能力，中途並藉由事先規劃之路徑，於沿路加設保全措施及輻射防護措施與警告標示，以防止廢棄物運輸時遭受人為破壞而導致輻射外洩之危害。

海上運輸規劃則由核能二廠碼頭直接運往最終處置場，或轉運到預定主運港口，再轉交專用船舶運往最終處置場。主運港口必須能停靠如遠洋長程INF 2級運輸船舶(含近岸運輸船)，預計需建構140~150公噸吊重能力之門型吊車。而關於碼頭建造相關設施之需求，如碼頭面積、港域水深、港口寬度、港口水深、迴船池直徑等皆需符合專用遠洋級船舶停泊水深與裝卸作業範圍。另外，港口之南北防波堤延伸長度、防波堤沿設施所在水深、預留航道寬度與入口處的水深皆須納入計算與考量範圍。而碼頭必須也能承受總重150公噸的多軸油壓板車及總重達500公噸以上的門型大吊車之壓載，另外，還需考量遠洋型船舶停靠對碼頭之影響（如圖 6-2）。



圖 6-1 用過核子燃料運輸護箱海運裝卸作業示意圖



圖 6-2 用過核子燃料運輸護箱碼頭作業示意圖

7、結論

有關用過核子燃料乾式貯存後，送往最終處置場之運送作業，應符合「放射性物料管理法」、「放射性物質安全運送規則」及「核子燃料運作安全管理規則」等法規及標準，並經過資訊分析、運送路線規劃並研提運送計畫及安全管制計畫，經主管機關審查核准後，始得為之。由於乾式貯存可以存放用過核子燃料達40年之保存期限，預估於2055年為乾式貯存與最終處置之銜接時間，本報告所述銜接運輸作業概念是依據目前國際現況來做評估，未來實際規劃，將視國內、外之處置概念與技術精進適時調整。

8、參考文獻

台灣電力公司(2010)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD2009報告)，台灣電力公司。

台灣電力公司(2012)，核二廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告，台灣電力公司。

行政院原子能委員會核能研究所(2005/03)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段－發展初步功能/安全評估模式(93年計畫)－處置場設施配置與規劃評估&處置場安全需求與處置概念研擬。

行政院原子能委員會核能研究所，核一廠用過核子燃料乾式貯存設施【運送路徑勘查紀錄與結果】，台灣電力公司委辦計畫。

放射性物料管理法，中華民國91年12月25日華總一義字第09100248760號令公布。

放射性物質安全運送規則，中華民國96年12月31日行政院原子能委員會會輻字第0960033280號令。

洪銘蔚(2009)，海上危險貨物載運之研究－以放射性物質為例，國立海洋大學運輸與航海科學系。

泰興工程顧問股份有限公司(2011)，核能後端營運資訊蒐集與分析【總結報告】，台灣電力公司委辦計畫。

核子燃料運作安全管理規則，中華民國98年10月30日會物字第0980017791號令。

核子原料運作安全管理規則，中華民國98年10月30日會物字第0980017792號令。

翁寶山(2006)，台灣放射性廢棄物史話，行政院原子能委員會放射性物料管理局。

NAC(NUCLEAR ASSURANCE COMPANY)公司、行政院原子能委員會核能研究所(2011)，核二廠乾式貯存設施安全分析報告(簡報資料)。

SKB(2011),Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark , SKB,TR-11-01.