

目錄

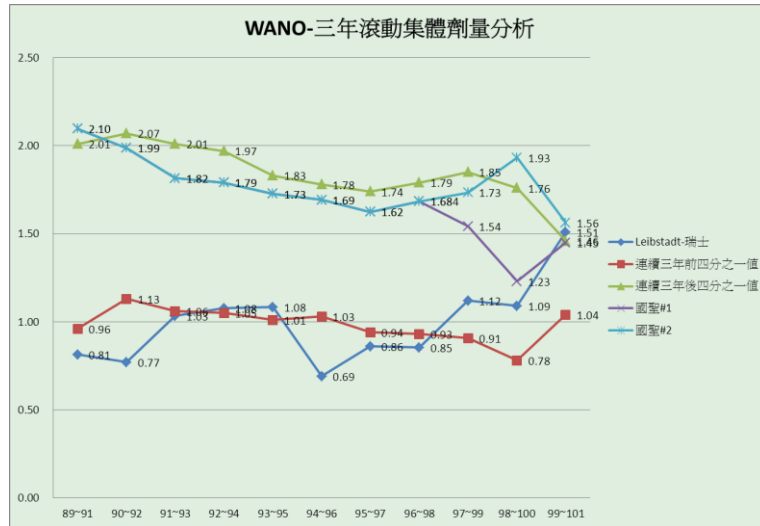
壹、前言.....	2
貳、出國行程.....	3
參、研討實習項目	4
一、精緻化水化學反應：	5
二、輻射屏蔽的應用.....	8
三、高輻射/高污染機件維修作業流程規劃完整	9
四、善用遙測儀器執行即時監控	11
五、前瞻性之主管制站工作環境規劃	11
六、管制區之輻射工作區域分類	12
肆、心得與建議	13
伍、參考文獻.....	16

壹、前言

世界核能發電協會 (World Association of Nuclear Operators, WANO) 所訂定之績效指標 (Performance Indicators, PI) 代表各商用核電廠之「安全度」及「可靠度」。第二核能發電廠(本廠)之集體有效劑量 (Collective Radiation Exposure, CRE)表現與其它沸水式反應爐第六型 (BWR-6)姊妹廠相比,排名列於中間值;然而與世界各國沸水式反應爐(BWR)型核能電廠比較,績效指標則略顯不足(圖一)。

近幾年來雖然本廠針對集體有效劑量抑低已採取多項改善措施,例如更換少數高輻射劑量管路及移除輻射源、增設永久性或暫時性鉛屏蔽、要求工作人員穿著鉛衣、建置遙控輻安監視系統、廣設候工區(工作區域中之最低輻射工作區域)及特殊高輻射工作要求工作前必須先進行模擬訓練 (Mock-up)等等措施;但因工作現場之背景輻射偏高,加上隨著機組運轉時間增長,相對應之維修工作量亦增加之影響下,整體而言體集有效劑量趨勢雖有向下現象,但下降幅度相對緩慢(圖一)。

BWR-6 姊妹廠中瑞士 KKL(Kernkraftwerk Leibstadt)核電廠(友廠)在集體有效劑量指標中一直名列前茅,值得參訪學習並藉此機會建立互相交流管道,研習項目包括「精緻化水化學反應」、「輻射屏蔽的應用」、「高輻射/高污染機件維修作業流程規劃完整」、「善用遙測儀器執行即時監控」、「前瞻性之主管制站工作環境規劃」及「管制區之輻射工作區域分類」等等,期望學習業界的強項並深切檢討本身可能的弱點,當作持續精進本廠抑低集體有效劑量之基石。



圖一 WANO-三年滾動集體劑量之指標比較。

貳、出國行程

一、行程:

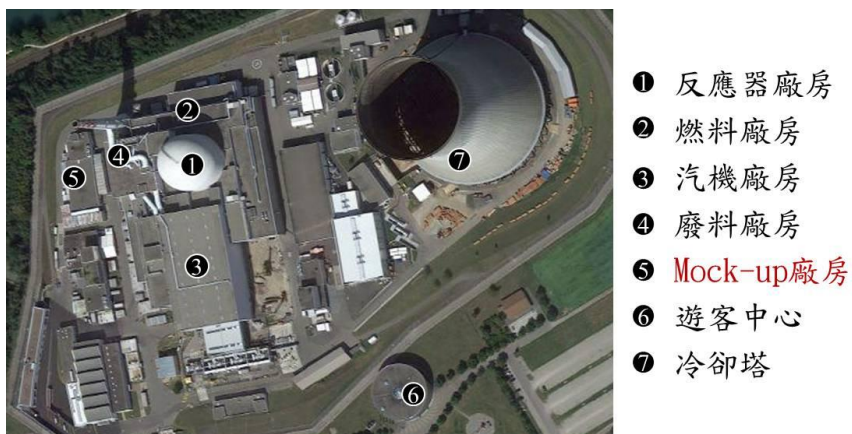
102年6月09日至10日 往程(台北 => 瑞士)

102年6月11日至20日 KKL (實習)

KKB 和 KKG (參訪實習)

102年6月21日至22日 返程(瑞士 => 台北)

二、Leibstadt 核電廠(KKL)位於瑞士和德國的邊界，引進萊茵河(Rhein river)之淡水至冷卻塔(Cooling Tower)當作機組的熱沉(圖二)。於1984年5月正式商業運轉，該機組出力為1220MWe，反應器型式為第六代沸水式核反應器，燃料週期為12個月(本廠為18個月)。



圖二 Leibstadt 核電廠的廠房配置。

三、Beznau 核電廠(KKB)於 1969 年 12 月正式商業運轉，裝置兩部機組，單一機組出力為 365MWe。因機組已運轉超過四十年，所以廠房內正在進行大規模的線路重整及更新。整個廠房建構在阿勒河(Aare river)中之小島上面，外部循環冷卻系統取河水進行冷卻，冷卻後排放回河水中。

四、Gösgen 核電廠(KKG)於 1979 年 11 月正式商業運轉，單部機出力為 970MWe。參訪時，正逢該廠大修後期，這次大修除更換燃料和固定的維護保養工作，汽機轉子更新及發電機更換屬額外大工程。該廠也深受福島事件影響，新增應變防護措施，但因瑞士是內陸國家，不可能會有海嘯侵襲，不過還是有考量受地震之影響:

(一)、廠房旁靠近河邊周圍增設防水牆約 1.5 公尺高。

(二)、用過燃料池存放廠房，並加強針對防震及補水系統進行設計新建置，目前已完成施工。

參、研討實習項目

影響體外輻射防護項目之因素有:時間、距離、屏蔽及射源移除等四項(圖三)。

一、時間：

接受曝露的時間要儘可能縮短，所以事先要瞭解狀況並做好準備，熟練操作程序。例如：Mock-up 訓練以減少工作人員在高劑量率工作的時間，藉此來減少劑量。

二、距離：

要遠離射源，輻射的強度與距離的平方成反比關係，距離加倍，輻射強度減弱四倍。例如：善用候工區進行檢修，候工區指在工作區域最低的空間劑量率，遠離高劑量率機件或管路。

三、屏蔽：

利用鉛板、鋼板或水泥牆可擋住輻射或降低輻射強度，保護人員的安全。

四、射源移除：

利用系統設備進行管路沖洗或水化學控制管路中的水質，使其管路劑量率降低。



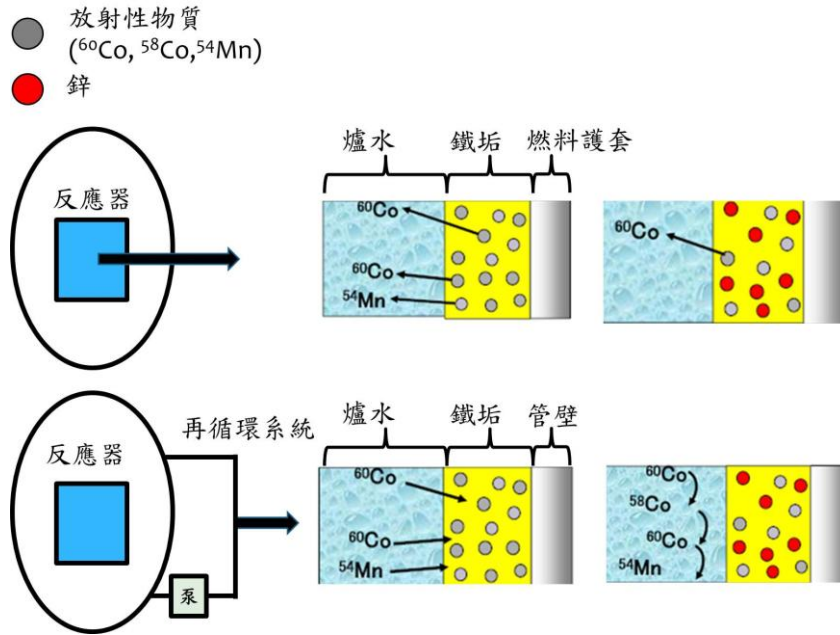
圖三、體外輻射防護項目。

由此輻射防護項目為出發點，與友廠保健務理人員研討實習項目，可從下列六項來詳盡說明：

一、精緻化水化學反應：

Leibstadt 核電廠利用精緻化水化學反應，以減少反應器再循環系統(Reactor Recirculation System, RRS)中放射性物質之沉積，相當早開始利用耗乏鋅(Depleted Zinc Oxide, DZO)注入飼水，水化學之耗乏鋅功能主要為(圖四)：

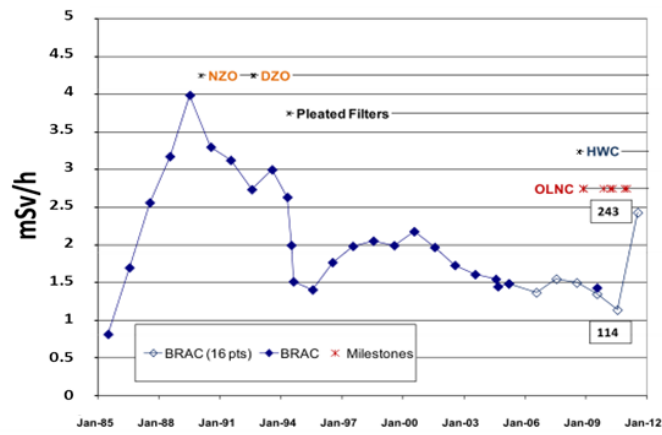
- (一)、減少燃料護套表面放射性物質(^{60}Co 、 ^{58}Co 及 ^{54}Mn)釋出。
- (二)、減少放射性物質與再循環管路結合產生鐵垢。



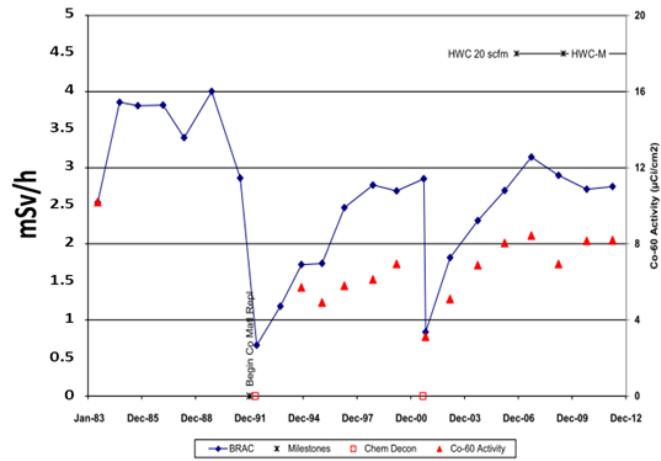
圖四、注耗乏鋅對燃料棒和再循環管路之作用

友廠藉此機制降低 RRS 的背景輻射，並且得到明顯的效果(圖五)。冷凝水淨化系統除本身具備預敷型的過濾淨化系統，用來執行過濾和除礦外，另外加裝皺褶式過濾器(前置過濾器)可以強化過濾冷凝水中之雜質，使冷凝水中之雜質減少，以利預敷型除礦器更加有效率進行除礦，藉此使再循環管路之背景輻射更加降低，再循環管路約達到 1.5mSv/h(圖五)。

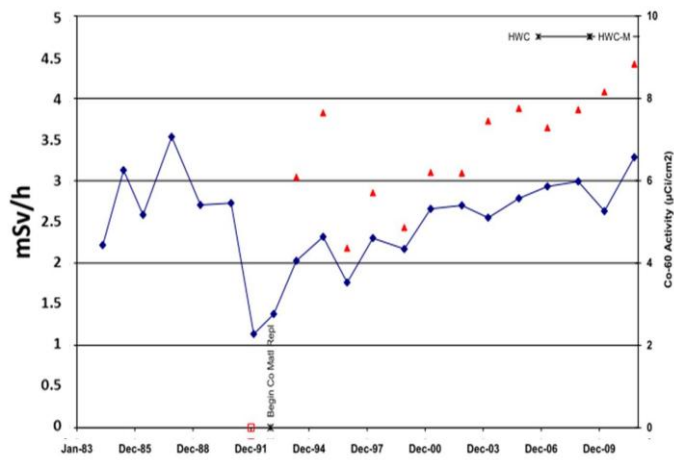
相較於本廠在這方面的做法，使用六床的深床式除礦器，因除礦器本身兼具過濾和除礦之功能，所以很容易受冷凝水中之雜質影響而降低其效率，此外除礦器前沒有加裝過濾器，使得除礦器受冷凝水中之雜質影響更加明顯。惟 102 年年初，本廠已完成加裝 ARCS(Advanced Resin Cleaning System)用來改善線上清洗除礦器之樹脂，使樹脂可以重複使用，可恢復除礦器之除礦效率。目前本廠的再循環管路劑量率約為 3mSv/h(圖六及圖七)。



圖五、Leibstadt 核電廠再循環管路之劑量率。



圖六、國聖一號機再循環管路之劑量率。



圖七、國聖二號機再循環管路之劑量率。

二、輻射屏蔽的應用

大修集體有效劑量來源大部分來至乾井區域維護工作之劑量貢獻，所以在乾井區域加裝適當的輻射屏蔽，降低乾井區域之背景輻射劑量率，對集體有效劑量抑低策略更是重要措施之一，尤其對於長時間在此區域工作的人員更為重要。

Leibstadt 電廠自行設計於乾井區域之高輻射劑量率管路加裝設臨時及固定式的輻射屏蔽(圖八)，例如裝設於再循環系統中之管路、爐水淨化系統(RWCU)或其他高輻射劑量率點等等，以降低乾井區域之空間輻射劑量率。



圖八、瑞士核電廠乾井一樓 Under vessel 門口之臨時式與固定式屏蔽

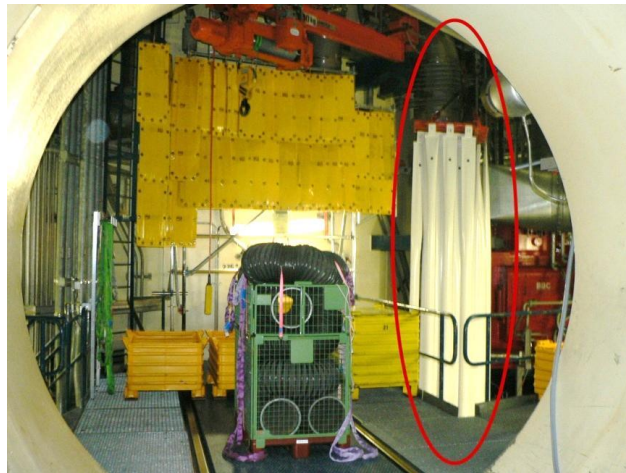
固定式屏蔽除可減少安裝和移除臨時屏蔽所接受之劑量外，再者固定式屏蔽可透過設計及完整施工，更能發揮其屏蔽功能，例如控制棒驅動機構(Control Rod Drive, CRD)更換、局部能階功率階監測器(Local Power Range Monitor, LPRM)之切割及回裝等等作業。

與本廠較為不同的地方，除加裝臨時鉛屏蔽外，並且在不影響機組安全的情形下，增設固定式屏蔽(圖九)，以減少工作人員裝設屏蔽之劑量。

在屏蔽的選材中，水也是很好的屏蔽材質之一，現場實際操作

厚度 30cm 約可達到兩個半值層的效果(舉例：管路原輻射劑量率為 4 mSv/h 可降至 1 mSv/h)，所以友廠善用水袋當作臨時式屏蔽，利用光滑表面之塑膠水袋內裝水，而水袋下端裝置簡易接頭，使得水屏蔽可以簡易吊掛及移除。現場實際臨時式屏蔽的設計如下(圖九)。

水屏蔽在不使用的時候，只需把水屏蔽中的水藉由水管引流掉，就可以簡易移除和搬運，並且容易除污和摺疊整理，整理後只需利用極少的空間就可以儲存大量臨時式屏蔽。



圖九、瑞士核電廠乾井口裝設屏蔽概況，白色為水袋屏蔽，黃色為鉛屏蔽。

三、高輻射/高污染機件維修作業流程規劃完整

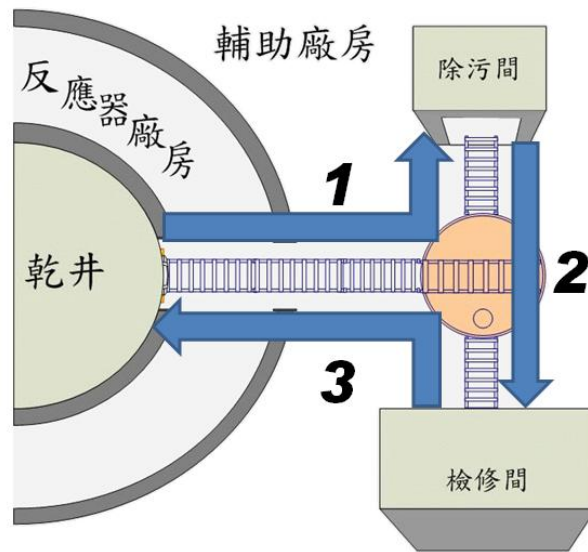
友廠在規劃設計建造廠房時，就考量高輻射/高污染機械設備之維護路線，發展出利用鐵軌設計運送之完整規劃，例如(圖十):

- (一)、利用載具從乾井內運送機件至機件除污間。
- (二)、除污完畢後再藉由此載具運送至維修間進行維修。
- (三)、最後完成檢修後，送回乾井內回裝。

運送過程中只需少數工作人員參與高輻射/高污染區域工作，不僅減少輻射的曝露也可降低工安的風險。傳送載具外觀如圖十一。

利用傳送載具，可以將高輻射及高污染機件直接送至除污間，進行降低污染作業，也可減少高污染機件造成的污染擴散可能。

此外獨立房間進行維護，可降低現場工作之亂度，另一方面也可以減少其他工作人員因輻射機件而受到不必要的輻射曝露。



圖十、瑞士核電廠重機械機件運送示意圖



圖十一、瑞士核電廠現場載具的外觀

四、善用遙測儀器執行即時監控

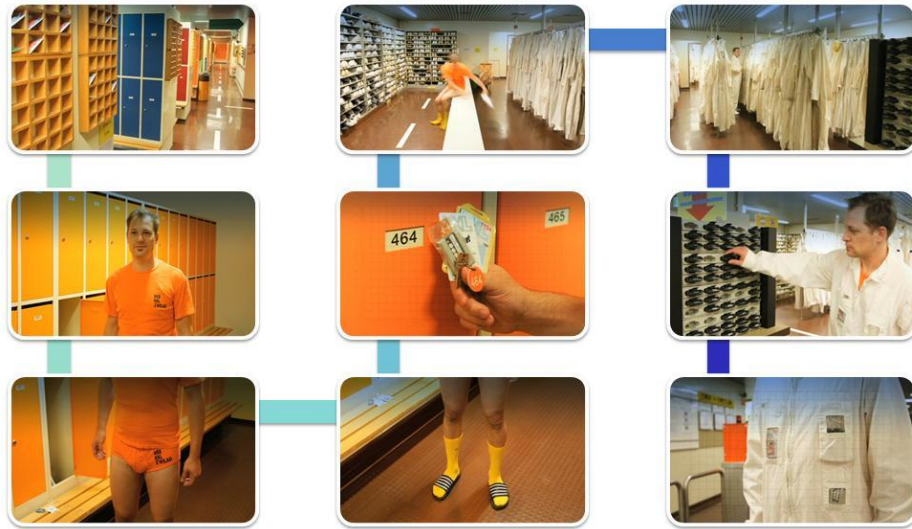
因水下作業之輻射情形可能發生隨時劇烈的輻射狀況改變或輻射狀況不明，此會造成潛水工作人員受到超曝露之風險，因此潛水作業時有必要即時監控潛水仗的輻射曝露劑量。

友廠執行水下作業時，透過有線的連接電子式個人劑量計 (Electronic Personal Dosimeter, EPD)進行即時的監控，一方面讓潛水仗更加安心工作，另一方面監視人員如發現工作輻射劑量偏高區域，即通知潛水人員遠離高輻射源，確保工作人員輻射安全。工作環境惡劣情形，也可利用此設備加上紅外線通訊設備，進行即時監控。

五、前瞻性之主管制站工作環境規劃

進現場需更換所有衣物(包括內褲、內衣及襪子)，並將換下的個人衣物放置於個人置物箱，進入前須確認是否攜帶劑量計、置物箱鑰匙、識別證及工作卡；進入管制區內需加穿白色防護衣及安全帽，將劑量計、識別證及工作卡放置在白色防護衣的固定位置，再取得 EPD 並開機後，才可進入管制區；更換衣服及進入管制區情形如附圖十二。

因為更換和置放空間需要極大空間，所以在建廠時期，即已考慮現場需求之空間，而本廠原始設計並無如此考量，以提供如此大的空間規劃。



圖十二、瑞士核電廠進入管制區更換衣物流程。

六、管制區之輻射工作區域分類

管制區內依污染程度劃分為四種區域，分別穿著不同的輻防裝備，由圖十三顯示。

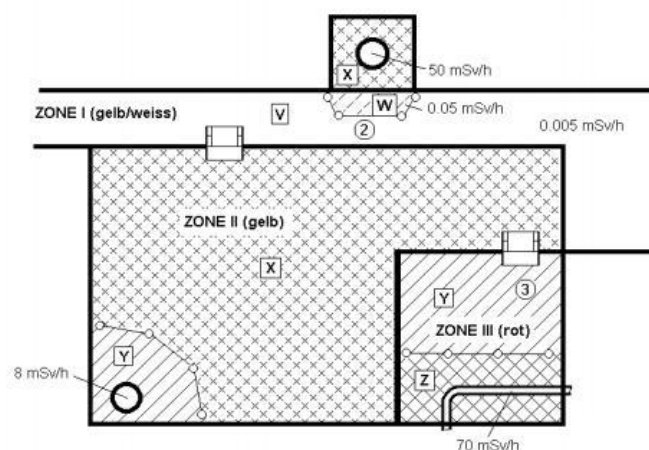
並依輻射強度的不同區分為不同的區域(表一)，並在工作入口處設置輻射狀況及污染程度告示板(圖十四)，告知工作人員前往工作區域的輻安狀況，及正確的輻安裝備需求。



圖十三、瑞士核電廠現場管制依污染程度區分為不同區域。

V	$\dot{D} < 0.01 \text{ mSv/h}^{10}$
W	$0.01 < \dot{D} < 0.1 \text{ mSv/h}$
X	$0.1 < \dot{D} < 1 \text{ mSv/h}$
Y	$1 < \dot{D} < 10 \text{ mSv/h}$
Z	$\dot{D} > 10 \text{ mSv/h}$

表一、瑞士核電廠現場管制依輻射強度區分為不同區域。



圖十四、瑞士核電廠現場設置告示牌包含輻射強度及污染程度。

肆、心得與建議

非常感謝台電公司及各位長官，給予本人這次機會到國外核電廠實習，對我這位資歷尚淺的員工，更是相當難能可貴。出國實習前的準備和實習過程，常需要與國外電廠聯繫以及辦理出國相關手續等等，每次的歷練和突破都代表我更加地進步，因此使我個人的經驗豐富不少。此外最重要的是可以與友廠從事核能發電之輻射工作人員互相交流學習的機會，讓我在輻射防護工作方面之策略學習或方式增廣見聞、拓展視野。最後期望

能在未來的日子裡，可以將此經驗善加運用，為公司盡微薄之力。

參考友廠的現場策略，在此提出以下幾點建議:

- 一、建議本廠反應爐評估添加 DZO 的可能性：GE-OEM BWR 電廠有 45 部機組(不含日本機組)，其中有 41 部機組已成功應用 DZO 多年，其中有多部機組之反應器再循環系統(RRS)管路輻射劑量率(統稱 BRAC)抑低至 1mSv/hr 以下，但由於集體有效劑量並不一定與 BRAC 量測值(劑量率)成比例關係。且應用 DZO 的投資費用包括必要的化學除污及設備安裝費等約為**新台幣兩億元**(根據 2003 年 G.E 公司報價，化學除污費約新台幣一億三千萬及設備安裝費約新台幣七千萬)，此外本廠劑量抑低評估，每次大修約可節省約 400 人-毫西弗之集體有效劑量，根據 1997- 經濟合作暨發展組織(OECD)/Nuclear Energy Agency(NEA)報告之全球核能設施人員集體劑量幣值分析，非 OECD 國家核能設施約 600 美元 /人-毫西弗，我國適用於非 OECD 國家，1 人毫西弗平均值約折合 2013 年新台幣約 18,000 元(1 美元匯率 30 元台幣估算) 而節省集體有效劑量所換算之費用約為**新台幣七百二十萬元**。此外過去 DZO 曾被懷疑與燃料破損有關，但目前核燃料廠家均已同意只要 DZO 穩定控制在適當範圍內(飼水 $Fe \leq 1ppb$, 爐水 $SiO_2 \leq 300ppb$)，並不認為對燃料有危害。然而目前由於核二廠兩部機的爐水水質中矽土(SiO_2)的濃度尚未進入安全範圍，二號機的飼水不溶鐵濃度亦未符合 1ppb 以下的安全區間，仍應積極努力，讓水質能滿足限制條件，以利添加 DZO 從源頭抑低輻射源，達成抑減本廠集體有效劑量之目標。雖然立即性效益不大，若**考慮機組延役和 WANO 績效指標的表現**，頗值得使用此作法，從源頭抑低輻射源。
- 二、重新評估乾井區域增設固定式及水屏蔽之可行性：由於大修期間乾井管制區域的劑量貢獻占整體集體有效劑量相當大的比例，抑低乾井管制區域的空間劑量率是絕對必要，積極推動裝設固定式屏蔽，並審慎評估水屏蔽裝設之可行性，在符合核安法規下，增設乾井區域之屏

蔽，提供工作人員良好之工作環境。

三、建議善用遙測儀器，確保水下作業之輻射安全：為防止工作人員在輻射變化急遽之空間下作業而接受非預期的輻射曝露，應善用無線或有線之 EPD 系統相關科技產品，並以通訊系統提醒工作人員遠離高輻射劑量點，以確保工作人員的輻射安全。

四、持續培養全廠從上至下之輻安當責態度，落實更加積極、主動輻安文化：近幾年來，在本廠各組的全力推動下工作人員漸漸養成輻安的觀念，爾後還需倚賴各組的配合及交流，以現場安全為前提下，盡可能把現場狀況簡單化，避免在滿載狀況下作業等等。此外輻射安全是以人為出發點，平日或教育訓練中提升所有工作人員輻安素質，達到深植於每一位工作人員內心，使得工作人員自動自發，發揮輻安、工安及核安概念運用在工作上，確保工作人員可以安全無慮的在核電廠工作，達成全員輻安理想。

每一項工作都必須有詳盡的工作計畫，不僅考量工作的品質，並且具備考量到輻安、工安及核安，應有詳盡的工作計畫，才能達到高品質及高效率的作業。友廠廠房佈置設計深具前瞻性，不但考量後續的維護機件的動線，而且也考量杜絕低微污染的擴散，設計更換衣物的空間及維修動線均值得學習。

雖我國的大修策略不見得與國外電廠相同，但各電廠大修工期縮短之目標是一致的，且通常大修的工期受到燃料循環週期(18 個月或 24 個月)、運轉模式、組件維修週期、安全授權程度及電力市場之影響，加上近年一些機組老化、背景輻射狀況不同(再循管路輻射劑量率)或執照更新等因素的影響，很難客觀的僅以集體有效劑量之 CRE 值來評比考量。

鑒於此，安全是核能運轉唯一的道路，我們應始終秉持「安全第一，品質至上」的理念，將持續努力精進，此外本廠仍期能自我督促，實踐追求卓越的目標期望，在世界各國初始比較條件一致化下，經由自身的持續努力精進，而躍昇達 WANO CRE 值績效指標之前 1/4 排名。

伍、參考文獻

- 一、實習劑量抑低管理與執行技術(張繼聖,2004)
- 二、核能電廠大修工期縮短探討(何偉, 台電核能月刊 第 305 期, 2008)
- 三、GEBWR 家族水化學營運策略見聞(朱方, 台電核能月刊, 2008)
- 四、核二廠 WANO-TC TSM 回顧 HWC 之劑量抑低策略(黃榮富, 台電核能月刊 第 312 期, 2008)
- 五、核二廠輻射安全之創新與精進(鄭琨琮, 台電核能月刊, 2012)
- 六、核能電廠除役費用評估探討(鄭琨琮,台電核能月刊 第 246 期 P77, 2003 年 6 月)
- 七、Information System on Occupational Exposure(OECD/NEA, 1997)
- 八、Guidelines for External Personnel for the safety in the Nuclear Power(Kernkraftwerk Leibstadt, 2012)
- 九、Guide Information for Staff at Gosgen Nuclear Power Plant,(Kernkraftwerk Gosgen, 2012)