

指向核能復興之羅盤

— 奪回「世界最低輻射曝露國」 —

以奪取核能金牌為目標

作者：原子力安全基盤機構(JNES)安全情報部長 水町涉

譯者：行政院原子能委員會(AEC)技正 石門環

*日文原文刊載於 2004 年 8 月 ENERGY 雜誌

奧林匹克運動會

1896 年 4 月 6 日，第一屆近代奧林匹克運動會在雅典的 Panathenaic 競技場舉行開幕典禮，觀眾有 5 萬人，共 14 個國家參加。筆者曾在此競技場跑過，觀眾席是大理石作成的，非常豪華。大家都知道奧林匹克運動會是 Coubertin 男爵到處奔走、努力促成的，他曾說過：「競技者鍛鍊肉體，努力使祖國國旗能夠飄揚，這需要互助的友情、肌肉與高貴的精神相互合作」。雖然我們可以理解參加就具有意義，但是一些世界紀錄保持者仍然希望能奪取金牌。

4 年前（譯者著：原文發表於 2004 年 8 月）的雪黎奧運，日本是第一次女性比男性獲得較多的獎牌，女性 13 面，男性 5 面。特別是馬拉松的高橋尚子選手、柔道的田村亮子（婚後已改姓谷）選手的金牌更是贏得滿堂彩，希望雅典奧運時也能加油。

曾以世界最低輻射曝露（金牌）為傲的日本核電

改變話題看看核能的世界，日本在 1960 年代引進美國的技術，興建核能電廠。進入 1970 年代後，以應力腐蝕龜裂（SCC）及蒸汽產生器傳熱管龜裂等為主，遭遇到各式各樣的問題，設備利用率相當低，輻射曝露劑量

也很高。1980 年代以後，日本開發獨自的技術，把問題解決。此次以降低輻射曝露劑量問題為重點。

核能電廠中輻射曝露最多的當然是接近爐心的圍阻體的作業，圍阻體內沒有階梯，作業員在狹隘的空間內匍匐前進，宛如爬猴梯似的，當然曝露劑量就高。筆者為改善此狀況，把以前美國式的圍阻體形狀（圖 1）改變，將其擴大，營造良好的作業環境，並提議較佳的階梯形狀，此提案獲得採用，日本標準的核能電廠也因此誕生，現在的東通核電廠等也加以採用（圖 2）。

當初，筆者也曾加入電梯，但人員搭乘的電梯必須每半年檢查一次才能使用，所以不得不放棄。筆者擔任東京電力公司柏崎 1 號機的設計負責人時，日夜煩惱應該作成什麼樣的電廠，其實答案很簡單，核電廠相當乾淨，不會對環境釋放出 NO_x 和 SO_x，問題只有輻射線。輻射線的屏蔽也很簡單，只要以混凝土遮蔽即可。筆者將輻射源較高的系統，例如餘熱移除系統(RHR)、爐水淨化系統（CUW）等管路及機械設備室以混凝土徹底遮蔽，結果在開始運轉後的第一次大修定期檢查時，總曝露劑量為世界最低，當時所有人都認為 BWR 比 PWR 曝露劑量多，因為達成這樣的成果，在世界上成為話題。當然這不只是設計上的改良，電力公司也與廠家通力合作，尋求作業的效率化，努力降低曝露劑量，終於奪得金牌。

每部機組曝露劑量世界最差

但是日本也因此掉以輕心，首先參照圖 3，此圖將世界主要國家每部核能機組總曝露劑量作一比較，清楚顯示日本在 1980 年代初期的曝露劑量成績非常不好，但在此之後，每年改善的結果，終於在 1992 年達到世界最低

曝露劑量。問題是因此變得自大，此後在維持現況的狀態下又過了 10 年，在此期間，世界各國學習日本的成果，終於凌駕日本，此事實如圖 3、圖 4 所示。圖 5 顯示 2002 年度各國曝露劑量，日本也是世界最差。圖 6 為 PWR 的情況，在世界中成績一樣不好。綜合而言，日本的每部機組總曝露劑量變成世界最差。當然每一位作業員的曝露劑量比容許劑量仍然低很多，對健康也完全沒有問題。但是，國際原子能總署（IAEA）有 ALARA 的目標，這是取 As Low As Reasonably Achievable 的第一個字母，意思是「在合理範圍內盡可能降低」，這是世界公認的準則，必須加以尊重。此處重點在於「合理範圍」，當然不符合經濟效益的降低是沒有意義的。

Browns Ferry 的降低曝露對策 （烤肉大會時密切協調）

由圖 3 與圖 4 可知，美國每部機組的曝露劑量在 1980 年代比日本差很多，1990 年代以後，美國徹底調查世界第一名的日本之降低曝露方法，1997 年終於超過日本，而且仍然持續改善，此差距也愈來愈大。

2002 年 Browns Ferry 3 號機以 14 天 16 小時完成燃料更換，創造了當時的世界最快紀錄，同時也全力進行降低曝露劑量。

我們到現場實地調查，並分析其方案。Browns Ferry 3 號機為 TVA 所有，容量 115 萬瓩、BWR-4 型機組，1977 年開始運轉。

調查結果得知不但燃料更換在 14 天內完成，同時也在此期間進行 243 個項目的營運期間檢測（ISI）、更換控制棒葉片 16 個、更換低壓汽機轉子、檢查並保養 45 個熱交換器、檢查並測試相當多數量的閥門。更換燃料時委託 Stone & Webster 公司，並雇用當地的作業員，作業員約 1000 人，保全人

員 (Security) 約 150 人，全部約 2000 人，比日本略多。為了降低曝露並確保安全，在更換燃料之前，在室外舉行烤肉大會，由上級管理階層親自下廚調理，請作業員享受烤肉大餐，這種為了能更密切協調所舉辦的活動已成為慣例，就像是早期的日本式風格。

日本致力於降低曝露而成為世界第一時，最大的貢獻來自於前述的設計理念與事前進行細緻的計畫。在進入高輻射的房間內作業前，先作成機器模型(Mockup)，訓練如何有效率地在該場所作業，另外也事先考慮前往該處之人員通道必須使曝露劑量最低。

在 Browns Ferry 詢問相關人員，結果也完全一樣，其答案為：「降低曝露別無秘訣，第一是計畫，第二是計畫，第三也是計畫」。高輻射劑量的作業事先作成模型，徹底訓練，這簡直是日本作法的愚忠翻版。另外上級管理階層每 3 個月和職員一起吃披薩午餐，其作用是在加強溝通，這也是以往的日本風格。

但是他們也有獨自開發的降低曝露方法，對於高輻射劑量房間內的作業，準備電視與麥克風，監督者從外部漂亮的房間內發號施令，採用詳實的方案，避免不必要的曝露。對高輻射劑量的作業如 ISI，特別是 BWR 的控制棒驅動機構 (CRD)、PWR 的蒸汽產生器 (SG) 等，設置鷹架也是高劑量作業，這與日本一樣，因此在 1996 年以前已經把所有舊的 CRD 全部換新。

反應爐壓力容器的連結管嘴 (Nozzle) 因沈積輻射物質，亦是高劑量作業，因此以噴水 (Water Jet) 清洗管嘴，致力於降低曝露。另外爐心側板 (Shroud) 之補修也屬高劑量作業，所以在更換燃料的樓層以遙控操作的方式進行補修。另一方面，為降低人員通道的曝露，設置永久性的階梯與鷹

架，努力將曝露劑量由 30 侖目降至 10 侖目。

2001 年美國全國可量測之輻射作業中，曝露人數合計約 10 萬人，平均劑量為 1.2 mSv，一年中超過 20 mSv 的人數約 70 人，美國核能協會 (NEI) 正思考將此人數大幅減少。

法國的降低曝露對策 (納入津貼評核)

圖 3 顯示法國在 1980 年代每部機組曝露劑量與日本、美國比較，成績相當良好，但在 1990 年時，由於日本的努力而被超越。1991 年，法國接受國際輻射防護協會 (ICRP) 新的建議，並在 1996 年接受 EU 指令，體認到「輻射防護與核能安全同等重要」。法國電力公司 (EDF) 董事長提出「除了核能安全以外，再加上降低集體與個人曝露劑量」的口號，要求該公司年報上除了安全以外，也必須納入降低劑量的報告。1991 年之曝露劑量為高峰，隨後即顯現出降低劑量的效果，1997 年又再度趕上日本，此後仍持續降低。

2003 年將每部機組集體劑量之目標值設定為 0.95 人-西弗，實際上則達到 0.89 人-西弗。法國把降低劑量與發電、安全、保全 (Security) 一起評估，納入評核津貼的項目中。

就具體的降低曝露方法而言，蒸汽產生器傳熱管的 ISI 是劑量最多的作業，大約 120 mSv，佔停機時總劑量約 300 mSv 的三分之一以上。另外，像閥類檢查、蒸汽產生器周邊一次側管路隔離等也是高劑量作業，故著重在這些作業的降低劑量方法。

瑞典的降低曝露對策 (管制者與事業者的協調)

詢問瑞典的有關人員，得知在 1990 年的集體劑量在世界各國中屬中等成績，過去也未受到重視。1990 年代中期，各國的曝露劑量都有減少的趨勢，瑞典反而有增加傾向，由 ISOE 數據可知瑞典的集體劑量比外國高。

所謂 ISOE 是指 Information System on Occupational Exposure，也就是職業曝露資訊系統，屬 IAEA 及 OECD 之組織，從事降低曝露劑量活動，蒐集世界上從事核能工作者之曝露數據。世界上共有 4 個技術中心，歐洲技術中心、北美技術中心、亞洲技術中心以及 IAEA 技術中心，不屬於前 3 個中心之國家則歸屬於 IAEA 技術中心、亞洲技術中心由我們負責，擁有世界上所有曝露數據，圖 3~6 為實際數據的圖形。

瑞典的輻射防護委員會 (Swedish Radiation Protection Authority, SSI) 因該國的集體劑量比國外高，故特別致力於降低劑量較高的 BWR 電廠，提出 DORIS (DOse Reduction In Swedish BWRs) 計畫，對事業者賦與 ALARA 義務，促其努力降低曝露劑量。此 DORIS 計畫於 1994 年 12 月成立，對曝露劑量偏高的原因進行調查，並以採取具有成效的對策為目的，致力於降低劑量，其方針為每部 BWR 機組總劑量從 1998 年的 1.2 人-西弗降至 1.0 人-西弗，此目標已經達成。

具體的降低曝露劑量對策為減少鈷、燃料完整性、提升蒸汽乾燥度、除污設備更新及現代化等，而且不只是這些硬體的改善，同時也呼籲事業者高層徹底執行教育訓練。

瑞典最大的特徵在管制者與事業者之間的信賴，以充份的協商對話來實現圓滑的管制，因此 2004 年 6 月 13 日開始的 Forsmark 1 號機 (BWR，

100 萬瓩) 更換燃料以 7 天 20 小時達成瑞典國內最短時間的新紀錄。我國管制者與事業者以前也是爽朗談笑，氣氛非常輕鬆，互相信賴，這也是以往日本的良好習慣。

芬蘭的降低曝露對策

降低曝露劑量的最優等生芬蘭又是如何呢？芬蘭 TVO 公司主辦人員列舉以下 5 個項目為降低曝露之重要因素，這些全部是理所當然。

- (1)對全體從業人員貫徹降低曝露的意識。
- (2)降低射源項 (Source Term)，特別是減少鈷 60。
- (3)作業內容與降低曝露對策之詳細計畫。
- (4)燃料之完整性。
- (5)貫徹訓練與周知。

2004 年 4 月份「Energy 月刊」本系列文章中曾提及芬蘭維持 90%設備可用率之秘訣主要有以下兩點，其一是重點式的狀態監視保全，另一點則為備品的充實，此兩點對降低曝露具有相當大的貢獻。

首先是狀態監視保全，將設備區分為 4 種不同優先等級的類別，分別為①對機組的安全性和容量因素具有較大的影響，②對安全性和容量因素影響較小者，③對安全性與容量因素沒有影響，但其保全具有經濟效果，④對安全性與容量因素沒影響，且其保全不具經濟效果。分類的結果，①為全部設備的 5%，②為 10%，③為 18%，④為 67%。

由此檢討結果，對①，②，③類設備（全部的 33%）進行經常性的狀態監視保全，但對屬於第④類者，亦即全部設備的 67%僅止於一般性的監視。總而言之，就是專注心力於狀態監視保全，設置振動計、溫度計、流量計

等，進行經常性監視，將資金投入此領域，致力於提升容量因素，曝露劑量自然就會降低。

ICRP 新的建議

國際性輻射曝露的容許劑量以位於斯德哥爾摩的國際輻射防護協會（ICRP）1990 年的建議為基準，規定從事輻射作業人員之曝露劑量在 5 年間須小於 100mSv，每年須小於 50mSv。

預定 2005 年將大幅修訂，相關會議於 2004 年 7 月底在東京召開，其中最大的修訂是將曝露限度從劑量限度變更為劑量約束值，這是最基本的問題，今後亦將持續議論。此次規定容許曝露劑量之一年間約束值為 20 mSv，預定今後世界各國亦將繼續討論。

奪回世界第一的寶座（金牌）

很抱歉本月份文章對一般人而言有些專門性的敘述，核能電廠唯一的問題點就是輻射線，這是本質論，降低曝露是非常重要的課題。2004 年夏、秋期間，日本原子力學會等亦提出此問題，本人應邀前往演講或擔任會議主持人，故在此時期彙整此一重要議案。

日本在 1992 年每一機組之曝露劑量為世界最低。

日本是世界唯一的核爆受災國，國民對輻射線相當敏感，為因應此狀況，採行極為細緻的對策，獲得世界最低曝露的結果。美國、法國、瑞典、芬蘭等國由 ISOE 數據得知此事實，因而學習日本，進行改善，這些國家終於在 1997 年超越日本，現在世界主要國家之中，日本反而變成最差，這是因為日本達成世界第一後就此安於現狀，當然每一位輻射工作人員的劑量當量仍然達成國際的容許基準，完全沒有問題。

但是，不必要的輻射曝露是沒有意義的，管制單位、電力公司、以及核電廠廠家都必須努力改善。何況此領域可說是日本人最擅長者，亦即動腦進行改善，詳細計畫後執行。若再度認真思考，由過去的實績可證明奪回世界第一的寶座是可能的。雖然最近核能技術人員喪失自信，但核能相關人員若能團結在一起，一定可以再奪取金牌，此次也用在此羅盤系列文章中持續言及的結語。

「日本核能重拾自信－以 2004 年為核能復興元年」。



圖 1 Mark-I 型反應爐圍阻體

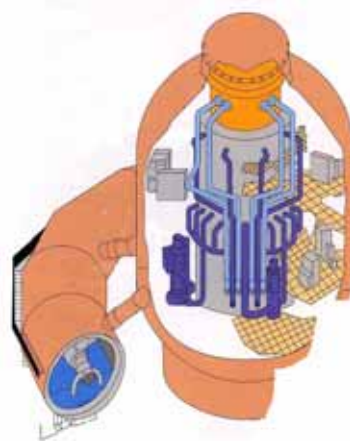


圖 2 日本改良型反應爐圍阻體

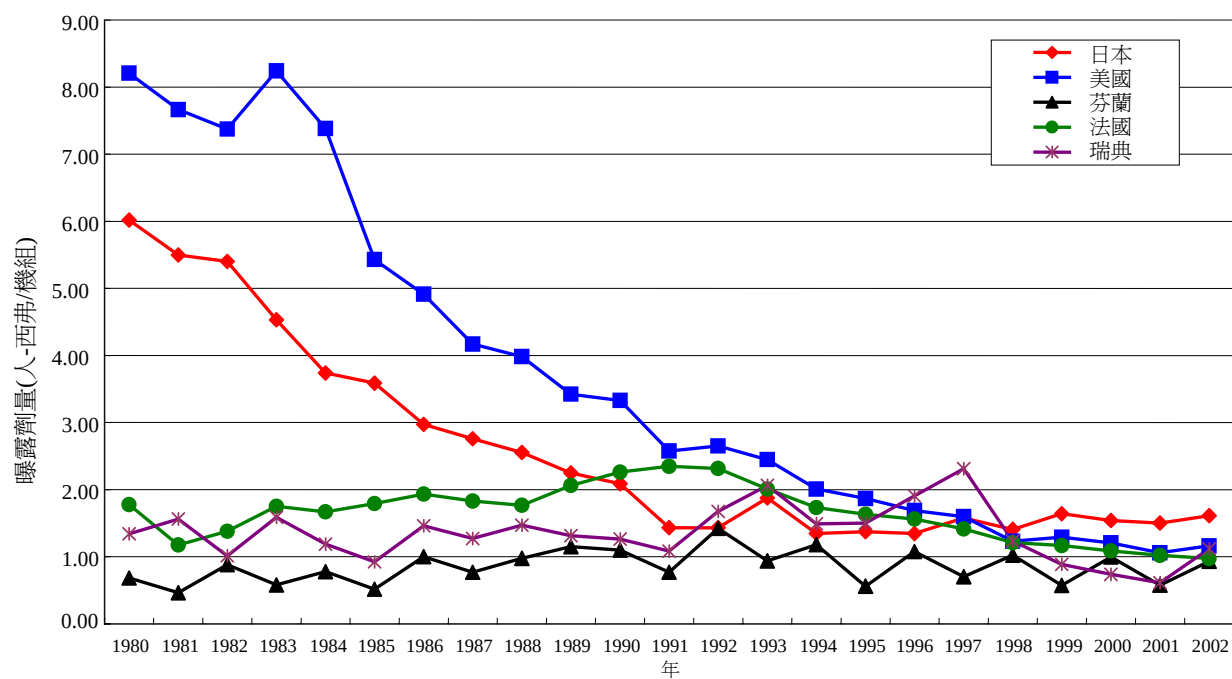


圖 3 各國每部核能機組年平均曝露劑量

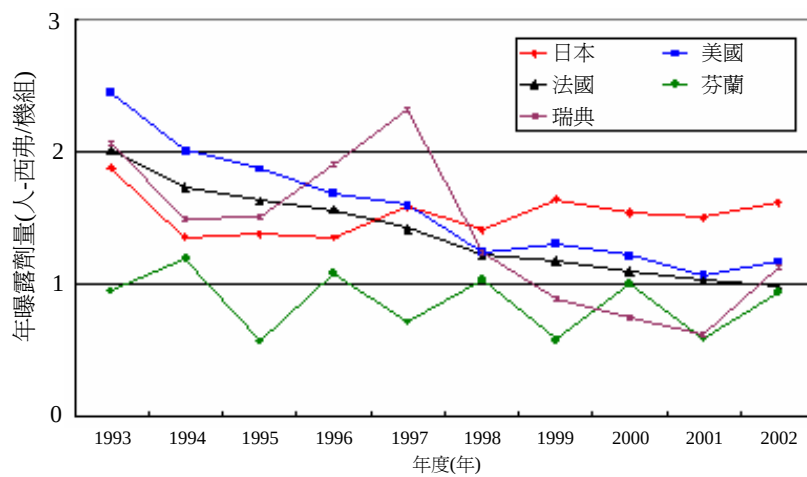


圖 4 各國最近 10 年年平均曝露劑量

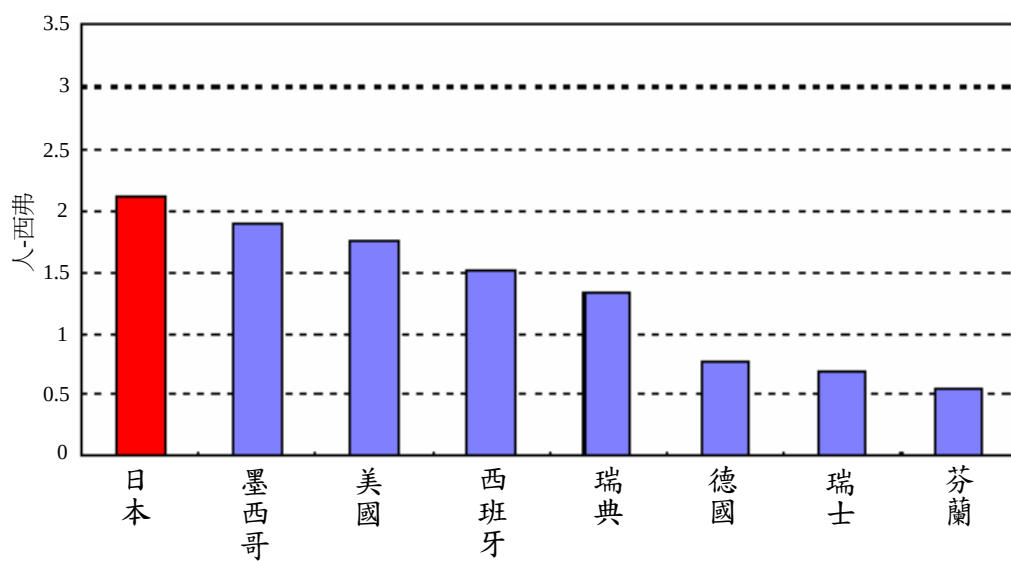


圖 5 2002 年各國 BWR 機組年曝露劑量

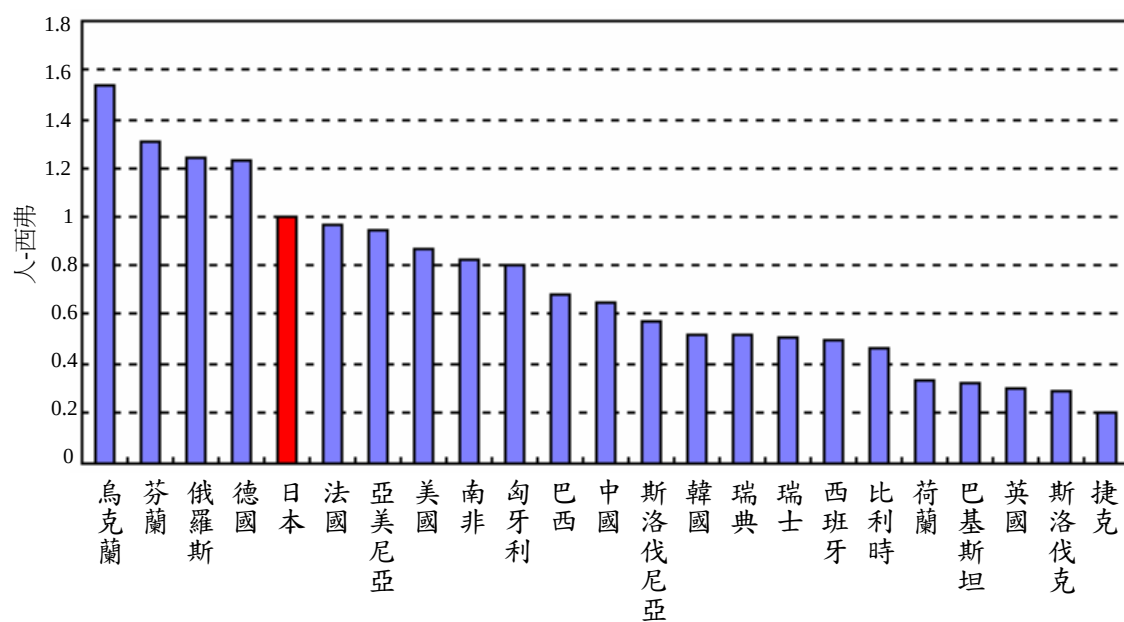


圖 6 2002 年各國 PWR 機組年曝露劑量