

蘇俄車諾比爾核子事故 總結報告

行政院原子能委員會
中華民國七十六年元月

蘇俄車諾比爾核子事故總結報告

1. 前言

到 1985 年底全世界已裝置了 375 部核能發電機組，總裝置容量達 250000MW，供應世界用電之 14%，不論在其他能源豐沛或貧乏的國家，都頗受重視。蘇俄很幸運，在他們的國土上蘊有豐富的能源，煤、石油、天然氣及水利足夠其長期發電使用。惟這些豐富的資源並沒有平均分布在其遼闊的疆界中，90% 的燃料與 80% 的水利都集中在蘇俄的亞洲部分，但其 70% 的人口則聚居在其歐洲部分。蘇俄爲了彌補此點缺陷，決定在其歐洲部分發展核能發電。自從蘇俄在奧輔寧司克（Obninsk）運轉了世界第一個核能發電廠以來，迄 1986 年 6 月其核能發電已有 32 年歷史。目前蘇俄核能發電居世界第三位，裝置容量 28400MWe，在 1985 年發電 170G kw-hr，佔其總發電量的 10%。計畫在 1986 至 1990 年，五年內將核能發電提升到 360Gkw-hr 爲其 1985 年的二倍。蘇俄發展的熱中子式反應器（Thermal Neutron Reactor）有 WWER 型輕水式及 RBMK 型鈾石墨之沸水壓力管式兩種，計畫在西元 2000 年左右其核能發電將逐漸以快滋生式取代。已經在運轉的快滋生式反應器核能電廠有三座，計有 BOR-600、12MWe 位於烏拉諾斯克（Ulyanovsk）地區，BN-350、1000MWth（發電及蒸餾水生產兩用）、位於克薩克斯坦（Kazakhstan），以及 BN-600、600MWe、位於烏拉斯（Urals）。正在建造者有 BN-800，爲正式商業用型，並計畫採用爲標準型式，此外在國際原子能總署支持下，發起與美國、日本、及一

些西方國家共同進行用 Tokamak 之融合（Fusion）研究。蘇俄在核能發電上投入了大量的人力與財力，並已獲得相當的成就。

舉世核能電廠之設計、建廠、運轉，莫不以可靠度（Reliability）及安全度（Safety）爲最重要目標，不幸仍不免發生許多意外事故，但蘇俄車諾比爾核能電廠事故之嚴重性堪稱空前。

該電廠第四號機事故發生於 1986 年 4 月 26 日，造成了 31 人死亡，輻射塵飄散到世界各地，廠址周圍半徑 30 公里內數萬居民疏散。鄰國皆蒙其害，並爲之震驚。蘇俄在事故引發之際並未立即發布消息，俟鄰國發現輻射落塵之後才予承認，但仍未發表經過及原因。行政院原子能委員會於獲悉事故發生後即協同外交部及我駐歐各國代表以最迅速方式蒐集事故資料，透過新聞媒體向國人報告，並展開因應措施。但是當時缺乏完整的資料，只能和其他國家一樣，等待蘇俄進一步透露實情。在此期間有很多推測性的報導，其中多數摻入了政治或商業的因素，不能全盤採信。由於事故的嚴重，國際原子能總署（IAEA）署長於 5 月 5 日親赴蘇俄瞭解情形，並徵得蘇俄同意，俟事故全案調查完成後，將完整資料提交 IAEA 組成的專家會議研討，事後轉發各會員國家參考。迄至 8 月中旬蘇俄能源部（Russian Department of Energy）才提送 NE-40 號報告給 IAEA，旋於 8 月 25 日在維也納舉行之專家會議中提出報告。我國雖非 IAEA 會員國，亦經 IAEA 轉來完整的資料。本會遂即邀請國內清華大學、台灣電力公司、核能

研究所集中資料共同研究，並分工撰寫報告（本總結報告係摘要），以求國內各界對蘇俄車諾比爾核子事故有正確的瞭解，同時亦藉此機會報告我國核能電廠在此期間所汲取之經驗與對應措施。

2. 事故導因

蘇俄車諾比爾（Chernobyl）核能發電廠，位於蘇俄烏克蘭（Ukraine）省 Prip-yat 河旁，離 Chernobyl 鎮 10 英哩，離基輔（Kiev）市 60 英哩。人口分布基輔市有 250 萬人，Prip-yat 及附近共約 4 萬 9 千人，在 18 英哩半徑內有人口 15 萬至 18 萬。此廠已裝妥 RBMK-1000 型機組四座，正在施工中者兩座，此次發生事故的是第四部機組。該機組自 1983 年 12 月開始運轉發電，所裝之 1661 根燃料棒中約 75% 尚屬第一批裝填燃料，平均燃料耗率為 10.3MWd/kg。1986 年 4 月 25 日事故發生之前，正值該機組定期保養停機，電廠當局擬乘其停機之便，進行一項實驗。該實驗為利用該機組兩部汽輪發電機中之第 8 號汽輪機，測試當其驅動之蒸汽被切斷後，僅賴其本身旋轉慣性發電，能否供給該機組安全停機所必需電力。此實驗曾在 1982 及 1984 年實施，惟因其發電輸出電壓迅速下降未能成功，這次是為了改善電壓下降問題，在勵磁機上加裝了一個新的設計再度進行實驗。由於該機組設計上的缺陷，本次試驗上不當的措施，再加上人為運轉錯誤，而釀成本次大禍。

3. 車諾比爾核能電廠的 RBMK 型反應器

車諾比爾第四號機反應器爐心由 250 × 250 × 600 mm 石墨方塊疊成 7 m 高一組的

方柱，再由 2488 組這種方柱排成直徑 12.2 m 高 7 m 的圓柱形爐心。穿過這些方柱中心有 1661 支直徑 88 mm、管壁厚度 4 mm 的鋁合金壓力管（Pressure Tube）。每支壓力管內裝 2% 濃縮鈾、鋁製外殼燃料棒 18 支組成的燃料束一組，以 270℃ 沸輕水（boiling light water）為冷却劑自壓力管下端進入，經燃料四周吸收熱量後溫度上升至 300℃，由壓力管上端流至汽水分離器，轉換成 284℃、壓力 70 kg/cm² 之飽和蒸汽，再匯集到蒸汽集管（Steam Header）驅動兩具 500MWe 汽輪發電機。每支壓力管所構成的環路相當一個單獨的沸水式反應器，設計最高熱功率為 3250 KW，全部爐心熱功率為 3200MW。通過壓力管的主冷却水由兩個平行環路供應，每個環路有 4 台冷却水泵，正常運轉 3 台，1 台為備用，經過複雜的分配管綫分送冷却水到 1661 支壓力管。其緊急爐心冷却水係由主冷却水之 44 個分配集管引入爐心，短時間緊急冷却水（Short time emergency cooling water）可由蓄壓器（accumulators）與飼水泵分流供給，長期緊急冷却水由 3 台具有緊急電源之緊急冷却水泵供水。在 4 月 25 日所實施之勵磁機特殊實驗，是在緊急冷却狀況下，測驗汽輪機慣性所發的電，究竟是否能維持緊急柴油發電機起動前驅動飼水泵所需電力。

蘇俄報告中證實 RBMK 型反應器特性上有一項缺點，當核反應器冷却水流失或汽化之際，其爐心核燃料分裂之鏈鎖反應（chain reaction）會加快（即核能術語所稱之 Positive Void-Coefficient）。鏈鎖反應加快就是反應器發出熱量提高，產生之蒸汽增多。由於這項缺點，核反應器在運轉時

需由一複雜的系統不斷地調節，保持鏈鎖反應穩定。此複雜的控制系統包括了半自動與手動兩部分設計，其反應器的體積愈大控制愈困難。

反應器控制是靠 211 根可吸收中子的控制棒，可分組插入爐心，其最高插入速度僅有每秒 0.4 米。為防止其某部分核能燃料過熱另設有局部控制系統 (Local Control Systems)。如果任何一個壓力管環路破裂，其漏出蒸汽可經溢流管導至水池予以凝結，此項保護系統僅能對 1661 組壓力管中之 1 組破裂時有效，當許多壓力管同時破裂時，反應槽底室的壓力將會過荷。其複雜的偵查系統或許可找到洩漏的位置，但已無能力防止外洩了，因為所有放射性物質都在反應器爐心裡，但卻沒有以耐壓的容器加以包封。

4. 事故發生經過

車諾比爾核能電廠第四號機是 1983 年 12 月開始運轉，在 1986 年 4 月 25 日是例行停機保養，電廠藉此機會做前述之實驗。其實驗準備既不健全又未經任何正式批准程序，逕行由一位不懂核反應器的電機工程師主持實驗，更遑論應有之安全措施。有關事故演變之詳細時程請參閱附錄，以下為事故發生之過程：

汽輪發電機原訂在反應器功率下降至 700 ~ 1000MWt 時進行汽機之慣性能量試驗，但由於電力調度之要求，車諾比爾四號機在降至半載時，繼續運轉 9 小時。在此時運轉員已依試驗程序書之要求，將緊急爐心冷卻系統關閉，使機組在無安全防護情況下運轉達十餘小時；由於低功率長時間之運轉，在爐心聚集大量的氙毒，造成反應器功率

嚴重的不穩定，功率由 1600MWt 降至 30 MWt；4 月 26 日凌晨 1:00，所有控制棒及安全棒均被抽出爐心之外，以便克服氙毒而能使反應器功率提昇至試驗之最低容許值 700MWt (另一次違反安全規定之特性)；但由於氙毒之繼續形成，升載失敗，運轉員僅能將反應器功率穩定於 200MWt (7%)，此功率在正常安全運轉程序是被禁止的，但運轉員仍繼續進行此項試驗計畫，這是最主要的違背試驗程序。運轉員依據試驗計畫，開啓每一冷卻迴路之第四台循環泵，使得冷卻劑通過爐心的流量超過正常流量甚多，汽水分離器之蒸汽及水位，在冷卻劑達飽和狀態時開始下降。由於一連串的錯誤操作，造成大量空泡在核心產生，使反應器功率迅速上升。當功率迅速增加時，運轉員試圖手動停止核子鏈鎖反應，却因早先為測試而已將自動跳機切斷，竟至無法達成；而另一方面，本來可能迅速使反應器停機，也因幾乎大部份的控制棒已抽出爐心而被限制住。

由於空泡的產生，造成反應度不斷的増加，導致迅速超臨界衝脫，據蘇聯專家估計，大約在四秒內功率急劇上昇為全功率之數百倍。由於超臨界功率衝脫，遂突然爆發大量能量，導致燃料破碎。部份小而熱的燃料碎片進入冷卻水中，瞬間產生大量蒸汽而造成蒸汽爆炸。

由於能量的釋出，移動了 1000 噸的反應器蓋板，導致所有兩側進入反應器的冷卻水通道被切斷。且使大量空氣進入反應器，引起石墨自燃，經過 2 到 3 秒鐘，第二次爆炸聽到時，反應器熱破片已衝出損壞的反應器機房外。雖然目前仍不知氫氣在此次爆炸中究竟動態如何，但由於反應器已損壞，容許空氣進入，而導致其後石墨之燃燒。

5. 輻射物外洩情形

在此事故中部分燃料碎片，全部惰性氣體，大部分氣態輻射分裂產物外洩，並受烈焰之上升氣流推送至約 1200 米高空。其洩漏量自事故後逐日降低，但由於核反應器溫度在 5 月 2 日至 6 日間再度上升，洩漏量亦一度隨着增加。此後因救難人員將液態氮氣自核反應器下部灌入，輻射物外洩量才因溫度降低大幅減少，石墨之燃燒亦隨之熄滅。全部外洩量不包括惰性氣體，據蘇俄報告為 5000 萬居里，約為爐心輻射含量之 3.5 %。所洩漏之輻射物含有大量不易氣化之核種，其中燃料粒子是因反應器失控 (Nuclear Excursion) 及石墨燃燒而放出。根據蘇俄報告，居民之曝露劑量為：撤離之 135000 人，體外劑量平均為每人 12000 毫侖目。蘇俄之歐洲部分 7400 萬居民在 1986 年內平均劑量為每人 100 毫侖目，以後 50 年平均每人累積劑量為 400 毫侖目。自食物進入人體內平均每人 70 年累積劑量為 3000 毫侖目。在該蘇聯報告中估計，其歐洲部分人口中癌症死亡要較事故發生前增加 0.4 %。但在 1986 年 8 月 25 日至 29 日國際原子能總署在維也納舉行討論該份蘇俄報告時，專家們認為蘇俄將癌症死亡增加數高估了 10 倍，應該為 0.04 % 較為合理。

本省因距事故地點甚遠 (約為 12000 公里)，自獲悉事故發生後，即刻加強輻射落塵監測，迄至 5 月 7 日才因降雨而偵測發現放射性同位素碘 131，表示落塵已經大氣平流層傳送飄落本省。在連續監測結果中，以 5 月 12 日至 18 日間落塵量較多，但均未超過警戒值，6 月 10 日以後才不再測得任何核種，前後共測得鈮 95、鈾 103，鈾 106，

碘 131，鉍 134，鉍 136，鉍 137，鉍 140，釷 140，鈾 141 等 10 種來自核反應器爐心的核種。本省在此期間之連續實施蔬菜、草樣、奶品檢驗，將所得結果合併計算，此次事故造成本省民衆之最大個人全身輻射劑量為 0.19 毫侖目，甲狀腺 6.48 毫侖目，遠低於民衆輻射安全防護標準，每年 500 毫侖目之限值，經評估確定對本省民衆安全無影響。在監視進口食品方面僅發現來自愛爾蘭之奶粉 5 批所含核種活性強度超過限值，即刻會同經濟部商檢局、國貿局、衛生署予以退貨。

6. 車諾比爾電廠與其四周情況

車諾比爾核能電廠目前有 4 部機組，每兩部機組之建築物連為一體，另有第五及第六部機尚在興建中。在此事故後，第四部機之核反應器爐心部分及主冷却水系統全部損毀，其鄰近所儲存近 100 根的用過燃料未受損。反應器爐心內燃料餘熱繼續散出，石墨緩衝劑火焰熄滅，但溫度仍高，由大氣對流冷却散熱的結果，輻射物仍有部分洩入大氣，經熱氣流推送至高空。核燃料鏈鎖分裂已停止。難以氣化之輻射性顆粒仍然外洩，惟大部分落在廠房結構物之內。在事故第一天為了抑制輻射物外洩，蘇俄以直升機在核反應器上面投了約 5000 噸白雲石、鉛、硼、砂、土等物料壓蓋。為了冷却熔毀的爐心，將低溫液態氮自核反應器底間壓入。另外裝設了一個排熱管道在爐底間，企圖停止爐心繼續熔化，但後來證實無效。在 1986 年 5 月底該機組屋頂尚存相當輻射強度，核反應器溫度仍有攝氏數百度。在第四號機以大量水泥遮蔽完成，廠區除污後，該廠之第一第

二號機相繼恢復運轉。地下水防止污染措施已完成，其效果如何正嚴密監視中。30 公里半徑內之區域，開始廣泛除污工作，並從事降低區域內農作物對輻射物吸收之工作。

7. 預計蘇俄對 RBMK 反應器採行之改善措施

前述 RBMK 反應器之缺陷，蘇俄有的立即改善，有的交付研究對策。所宣布之中期改善措施有：

- 限制控制棒同時抽出數量。
- 將固定插入爐心控制棒之最低數量由 30 支增至 80 支。
- 改善人員訓練及操作規範。
- 將燃料濃縮 U235 含量自 2 % 提高到 2.4 %，以改善正空泡係數 (Positive Void Coefficient)。
- 改善快速停爐系統。

由於 RBMK 反應器與我國核能電廠所採用反應器，在設計本質上不同，其所從事之改善措施，我國無直接可借鏡之處，僅以蘇俄在此事故上所獲教訓，提醒我國在核能安全上更高的警覺。

8. 世界各國反應

蘇俄車諾比爾核子事故，使世人對核能發電的疑慮加深，實屬自然反應。這也鞭策了核能發電業者盡全力改善安全措施，以期挽回大眾對核能發電的信心。各國政界，尤其是民主國家的在野黨，紛紛以反核為政見爭取恐懼核能發電的民衆，期以獲得選票。各國核能發電政策在此衝擊之下，尚未因車諾比爾核子事故而影響的國家有日本、法國、美、加拿大、土耳其、瑞士、匈牙利、埃及、韓國、中共、印度、阿根廷、巴西、西

班牙、比利時、蘇俄等；其核能發電所受阻力增加，惟尚未改變核能政策者有德國、英國、意大利；因此而聲稱將停用核能發電者有瑞典及奧地利，此事故後決定繼續興建核能發電廠國家有印度、法國、埃及、中共、日本、匈牙利、土耳其、韓國、巴西等。截至 1986 年底的統計，世界核能發電佔總發電量之比率還在持續增加中。

9. 我國應因措施

9.1 我國核能電廠安全性檢討及對策

檢討我國核能電廠現有措施，並未發現類似車諾比爾事故原因之重大潛在核能安全問題，亦無須立即採取任何改善行動，然而為提昇國內核能運轉安全，仍應加強下列措施。

9.1.1 電廠設計

- (1) 台電公司須加速進行增設核能一廠圍阻體充氮系統工程，並儘速規劃核能二廠圍阻體氫控改善工程，以提昇沸水式核能電廠的圍阻體保護功能。
- (2) 台電公司須繼續改進各燃料週期的核心特性，使緩和劑溫度係數恆保持負值。
- (3) 台電公司須儘速研議增設各核能電廠的「預期暫態未急停 (ATWS)」的防護設計及因應操作程序，以便萬一發生 ATWS 時，可及時控制爐心反應度，或防止 ATWS 的發生。
- (4) 核能一廠屬較早期設計，台電公司應儘速規劃進行核能一廠的安全度評估工作，通盤檢討該電廠設計之潛在弱點，並針對弱點進行設計改善。

9.1.2 運轉維護

- (1)核能電廠運轉人員應嚴格遵守運轉規範之要求運轉，絕不可自行取消或調整保護系統及安全系統之自動訊號及設定點。
- (2)核能電廠不可因趕進度或追求運轉績效而違反安全規定或疏忽各項安全措施。
- (3)避免進行可能危及核能安全之特殊測試，儘量以分析方式或模擬器演練取代。對於必須進行之特殊測試，均應於事前申報原子能委員會核准。
- (4)應嚴格遵守測試程序書規定，進行各種測試，不可自行改變測試方法及步驟。進行測試期間，品質人員應在現場見證測試步驟。
- (5)加強運轉人員①核心特性訓練②緊急操作程序③各類異常狀況的模擬器操作。
- (6)規劃實施運轉人員 6 班制，並增加運轉人員待遇及福利，改進升遷制度，以吸收最優秀人才，提昇運轉人員素質，並鼓勵士氣。
- (7)核子反應器之運轉由當值值工師全權指揮並負完全責任，任何來自外界可能影響電廠運轉的措施，包括電力系統的調度或安全設定值的變更，皆須先會知值工師。
- (8)針對核能電廠具有大量輻射外洩的火災類型，重新檢討改進防火程序書、消防設備，及防護衣物之適當性。
- (9)全盤檢討各核能電廠的操作程序書，包括異常操作程序書及緊急操作程序書，以儘量減低人為錯誤發生。
- (10)加強核能電廠設備預防性維護保養作業，落實年度歲修檢查工作，以提高組件設備

之可靠性。

- (11)同一廠址，一部機組發生火災而波及機組共用設施，並有影響運轉安全或造成輻射外洩之虞時，其它機組應即手動停機。
- (12)同一廠址，一部機組發生第四類緊急事故時，其它機組應即手動停機。

9.1.3 安全管制

- (1)原子能委員會應繼續加強執行核能電廠視察工作，嚴格監督運轉狀況是否符合規定。發現不符合安全規定情事時，應即嚴格督促改進或採取必要限制措施。
- (2)台電公司應加強核能安全委員會核能電廠運轉安全之檢查工作及核能品質處之品質保證稽查工作。
- (3)建立核能電廠緊急事故發生後，國內外技術迅速支援之具體方案。

9.2 緊急應變計劃之檢討

蘇俄在此次核子事故所採取的有效緊急應變措施却為世界各國注視之焦點，皆欲藉取蘇俄之經驗修定自己的核能電廠緊急應變計畫。車諾比爾核子事故結束，正逢我國全國核子事故處理委員會修訂工作計畫之際，參與單位彼此交換心得歸納有下述意見：

9.2.1 指揮系統

一旦核子事故發生，需要迅速動員全國人力物力支應，動員越迅速，遭受的損失越小。其動員範圍較廣，非一兩個政府機構能力所及，因此核能電廠緊急應變計畫實為全國性動員之編組。運用既定編組，以行政系統指揮疏散、救災、及安全管制，各核能機

構之專業人員應以擔任該編組之資詢幕僚及執行參謀，如此即可更有效的完成任務。

9.2.2 緊急計劃區域狀況之掌握

由地方行政單位主動管制核能電廠緊急計畫區內的建築與人口之增加（目前台電公司對是項資料調查相當齊全），以民防編組增加輻射防護及疏散訓練。當事故發生時可藉民防編組傳達應變方法，並動員民防編組協助執行必要措施。如此更容易掌握有效措施，譬如事故區內有多少水井需防護，掩蔽人口需要多少民生必需品；疏散處置之方向，需要多少運輸工具，如何設立管制輻射偵檢點及除污站等。

9.2.3 疏散車輛

蘇俄在此次核子事故中以 2 小時 45 分鐘，動用 1100 餘輛巴士完成疏散 Pripyat 鎮的 49000 居民。由此點更加強我們將以前緊急計畫原擬以軍用卡車疏散民衆，改爲由車輛動員委員會徵用巴士疏散的觀念，俾使在疏散過程中亦有掩蔽之效。又我國核能發電廠附近濱海公路彎曲狹窄，其疏散時可允許之交通流量，以及可就近動員到之車輛除了正委託學術專業機構予以評估外，另道路拓寬工作已付諸實施。

9.2.4 消防訓練

蘇俄此次核子事故，因廠房屋頂多數柏油，爆出之可燃物瞬間引發火警 30 餘處。如此多起火災對相隣機組安全構成嚴重威脅。該事故中輻射曝露受傷者大部分是因救火而

造成。國內核能三廠第一號機發電機失火之際，恆春附近消防車皆趕到現場，但並無作爲，事後多方責備該廠只有消防車一部，消防設備太簡陋。實際核能電廠內部有完善之消防系統，廠內通路複雜，要靠專業知識消防，無人指引即便廠外支援亦難執行，所以在消防上要加強指揮引導人員訓練及當地廠外消防人員聯絡演習；廠外之消防人員亦應具有核能電廠之特殊滅火常識，如是才能有效支援，也可避免不必要傷亡。

9.2.5 災情發布及互助聯繫

自車諾比爾核能電廠事故發生後，國際原子能總署因其職責所在遂採取了一連串行動，惟一成就就是達成了 57 個國家共同簽署了核子事故早期警報及互助支援協定。我國雖因非聯合國會員未簽署該項協定，但隨時可經由現存之管道，在事故發生時提出報告。對外互助支援方面，行政院原子能委員會與美國核能管制委員會簽有互助支援協定，並正與近鄰日本進行安排同樣協定，台電公司亦與國外多個核能組織簽有類似協定。如此一旦事故發生，即可循既訂之作業程序連絡國外之相關機構，以期獲得最迅速及切合需要的支援。

9.2.6 醫護

台灣電力公司在本省南北部分別與高雄醫學院及榮民總醫院簽有輻射傷害救治合約，平日救治對象係以廠內受傷人員爲主，但對事故發生後之民衆而言，該二醫院有此治療技術但是容量有限，所以應加強附近之醫療機構間相互支援方式，以能及時急救處理

除污再予後送。民衆保護甲狀腺可食用碘片亦應由就近衛生所儲存，並納入緊急計畫管制，因為碘片屬於藥物，行政院原子能委員會已協調衛生署完成對該藥物之使用評估，在意外事故發生時即可按照實際狀況需要分發，絕不能由民衆自行食用，以免引起不良之副作用。

9.3 環境監測及進口管制

9.3.1 台灣地區落塵之監測

原子能委員會台灣輻射偵測工作站自民國63年設立起即專責台灣地區放射性落塵及環境輻射之偵測。為偵測大氣中落塵所含放射核種的強度，在台灣各地利用抽氣、水盤、膠紙及雨水等方法，收集放射性落塵；為了評估人體可能遭受的輻射劑量，也分析各地的蔬菜、牛奶、土壤、草樣、飲水及各類生物試樣。在4月29日獲知意外事件發生後，除即責由該站及本會核能研究所加強各項作業，每日取樣進行放射性含量的分析外，另協調國立清華大學、台灣電力公司及交通部氣象局共同進行落塵監測工作。

分析方法，主要包括總貝他活性計測及加馬能譜分析2種。總貝他活性計測在能迅速判別試樣中放射性的含量有無異常。加馬能譜法則可進一步分析其中所含放射性核種的種類及濃度，此外對於雨水試樣亦進行氡含量的分析。

9.3.2 輻射劑量評估

放射性落塵可能經由體外暴露或經由呼吸、飲食等途徑進入體內。茲就體外及體內

兩部份，分別評估此次意外事故對於台灣地區民衆可能造成的輻射劑量。

計算結果，在5月5日至25日間所受的體外暴露共計 $114\mu\text{R}$ 。大約是同一時間內自然背景輻射所造成體外暴露的 $1/40$ 。這段期間內經由呼吸所造成的體內全身劑量為 $1.0\mu\text{rem}$ ，甲狀腺劑量為經由飲食所造成的最大個人體內全身劑量為 $15.6\mu\text{rem}$ ，甲狀腺劑量為 3.3mrem 。此次意外事故擴散至台灣地區的放射性落塵，偵測結果發現最主要的核種是 ^{131}I ，經由呼吸及飲食可能造成的最大個人體內全身劑量為 3.5mrem ，相當於有效等效劑量（effective dose equivalent） 0.1mrem ，此約為自然放射核種所造成體內劑量的 $1/200$ ，至於其餘核種的影響則幾可忽略不計。

此次意外事件所造成體外及體內的總有效等劑量約為 0.2mrem 。根據國際放射防護委員會的研究結論，輻射的致癌危險度為 $125\text{ fatal cancer}/10^6\text{ person} - \text{rem}$ ，則此次意外事故可能造成的輻射傷害，在每百萬人中，因引發癌症而致死者可能只有0.025人。

9.3.3 進口食品之管制

蘇俄車諾比爾電廠意外事故發生後，雖依據偵測結果，台灣地區所受輻射污染情況輕微，本地所生產的食物飲用並無輻射安全顧慮，但我國亦同時自世界各國輸入農產品或農產加工品，而該等輸出國則已包括污染情況遠較我國嚴重之歐洲地區及日、美等國。為防止該等地區或國家之污染食品輸銷我國，以確保國民之健康，本會乃協調經濟部、財政部、衛生署及農委會等各政府有關部門，共同研商對進口食品之管制措施。

經決議首先實施之措施為對進口食品之抽驗，此項工作係由經濟部商品檢驗局設於各地之分局對由各關口輸入之進口食物實施批次抽樣，再送本會台灣輻射偵測工作站偵測其放射性含量，第一批樣品的偵測報告於75年5月18日完成，此時各國可能受污染之食品因運輸作業等因素尚未進入我國，抽驗工作之重點在建立完整之背景資料，同時並積極搜集世界各地受污染的詳情及其所採行之措施資料，以做為我國之因應參考。

6月30日，本會邀集有關學者專家，依據輻射劑量法定限值，並參考美、歐各國標準及衡量我國國情後，對進口食品之放射性核種含量訂定限值

本會首次測得進口食品污染是在75年8月12日。該次污染食品係愛爾蘭5、6月份生產，供食品加工用之散裝奶粉，共計2萬餘公斤，其放射性核種銻134及銻137含量之和最高達2萬餘微居里／每公斤，已超過食品進口限值，乃由本會函請經濟部及衛生署等單位處理，責成進口廠商辦理退運，使其不得在本國販售。

為因應上述情況的發生，經濟部商品檢驗局的抽樣作業，對於自歐洲進口之乳製品乃由批次抽驗改為逐批抽驗，先放後驗改為先驗後放，更加嚴密保障進口食品之輻射安全。

為使食品之放射性核種含量限值具有法律地位，以便於管理作業。衛生署乃依據食品衛生管理法中，參照本會所訂進口食品放射性含量限值，於75年9月1日公告食品原產子含量標準，使對食品之放射性含量管制更具強制性。

隨後，本會相繼查獲愛爾蘭進口之奶粉

放射性含量超過限值，經濟部國貿局乃於10月10日採納本會建議發布公告，對自歐洲進口之乳製品應檢附官方證明，其合於我國進口限值者方得進口，已進口之問題奶品即行退運，至此我國對進口食品之污染管制工作更為周密完善。

至75年10月底止，本會對進口食品之偵測已累增至781批次，涵蓋的範圍包括穀物、雜糧、肉類、奶品、蔬果及嬰兒食品等六大類，輸出的國家則包括歐、美、亞、非、澳五大地區，共計27國。此項偵測管制工作將持續至其影響消失為止，以確保國民健康。

9.4 事故傳播報導

事故後，本會除與國外有關機構保持密切連繫外，並協調新聞局、國科會、農委會、衛生署、經濟部商品檢驗局、交通部觀光局等有關單位共同配合。藉新聞記者招待會、行政院院會等各種不同場合加以說明。經由新聞稿的發布並透過電視台、廣播電台、報章雜誌等媒介，傳播下列訊息：

- (1)增加台灣地區輻射偵測之次數，每日發布偵測結果。
- (2)加強進口食品貨物（如奶粉、肉類、穀物、雜糧、嬰兒食品及蔬菜之輻射偵檢。對有問題之食品（如愛爾蘭奶粉）即行退運，使其不流入消費市場。
- (3)提醒前往國外旅客應注意之措施。
- (4)使民衆在部分民生必需品（如水果、蔬菜等），採取正確的清洗方法。
- (5)傳播一般輻射防護常識，普及全民對輻射與日常生活關係之認識。

10. 結論

核能發電受兩次石油危機之刺激在 70 年代盛極一時。後因美國三哩島核能事故，及電力成長未達預期目標，造成各國發電裝置容量過多，使得 80 年代的核能工業陷於不景氣狀態。自 1982 年起世界經濟漸行復甦，核能工業狀況也應隨着逐漸好轉，不料又受到車諾比爾嚴重核子事故影響。由本報告各段中可洞悉到這次核子事故影響，其結果已不是單純的核能安全技術問題，同時亦屬有政治及經濟因素。所以我們除了瞭解此次核子事故的發生的經過及原因外，尚希望能有一些多方面共同的體認。

10.1 能源

世上目前可供人類運用，不能再生的主要能源 (Non-renewable energy) 共有石油、天然氣、煤、鈾四種，如都以相當之石油 (tons of oil equivalent, toe) 來計算，目前估計還蘊藏 11000 億 toe，最多也只能再加上可能探勘到的石油及鈾 3000 億 toe，這是地球上全部不再生能源，其中有 80 % 為煤。以目前各種能源配合使用情形來看，石油尚可平穩供應一段時間，以後對煤及天然氣之依賴將逐漸增加。如果真如時下有些議論停用一部分核能發電廠，相應的必將加速其他能源消耗，以目前製作核燃料之方式，而且改良型反應器一時不實用，即使有了滋生式反應器，也只能延長年限，有鑒於此，我們不能不節約使用能源。

10.2 環境保護

現在新聞不時報導燃煤燃油造成酸雨為害，如德國加拿大的一些森林因酸雨為害而枯萎，一些湖泊變成死湖。如繼續增加使用煤礦、石油等燃料，其產生多少二氧化碳是可以估算的，屆時地球因溫室效應而產生的生態變化是可預期的。今天要求不再使用核能發電，明日却受到酸雨的災害，人類到底應如何調和理想與現實呢？

10.3 政治

各國民衆多為此次車諾比爾核子事故增加了許多疑慮，同時助長了反核潮流。民主國家的政治運作為了爭取選民，在野黨皆順應當時熱門的話題，執政黨因負有國家經濟責任，不能在深思熟慮前隨意改變政策，於是在各國選舉活動中，核能發電成為政見衝突重點，至於替代方案之有無及可行性如何往往被忽略了。

10.4 商業與經濟

許多核能先進國家皆在核能工業上投下巨資，銷售是唯一能回收的方式。因此西方各大核能業者一致指責蘇俄事故反應器設計不良，並儘力說明西方設計不同或較優越之處。同時也加強對現有核能電廠技術服務及安全改善措施，俾挽回民衆對核能發電的信心。也有幾個核能技術先進國家極端缺乏其他能源，為了維持能源的自主性，在別無選擇的情形下，只有繼續發展核能發電，並沒

有被車諾比爾核能事故所動搖；換言之，各國莫不是以自身之利益，為決定動向之最高原則。

10.5 民意溝通

在認定車諾比爾核能事故對未來會發生什麼影響之前，第一要務應該是使每一位民衆都瞭解到底發生了什麼事。我國目前在台灣地區自產能源非常匱乏，因此使用何種能源的權衡，對每一位同胞本身的利益非常重要，這直接牽涉到我們生活的品質，若無法知道事情全貌是不可能做有利於自身的決定的。以瑞典這個進步的國家亦不免在決策的過程中走崎嶇的道路。瑞典目前電力約有 50 % 來自水力，48 % 來自核能。1980 年瑞典國會投票決定西元 2010 年後廢止使用核能，水力大約已開發殆盡，外來的酸雨使瑞典人民不考慮燃油、燃煤發電，由於地處寒帶其能源有 50 % 是消耗在暖氣上，最近又決定禁止任何燃油取暖設施，均改用電力。其電力每年以 10 % 成長，這種狀況演變下去不是無足夠的電可用，就是電費高漲。由於片面而誤導的訊息使矛盾的決議一再發生，吾人還能不重視民意溝通嗎？

10.6 核能安全

如何安全的使用核能是世界各國共同目標，也是無止境的努力方向，車諾比爾事故之後各國更是不敢掉以輕心。一般國家是從三方向努力來達到安全境界。

10.6.1 硬體(Hardware)

是從電廠的設計與設備上改進。運用新的科技來提升系統及設備之可靠度及降低人為因素之事故率。如改進控制室的安排，可

減少人為操作錯誤；加強核反應器以外設施 (balance-of-plant), 提高整廠性安全；其他如減少流阻 (flow restriction)，管路應力 (pipe stress) 改善，閥之性能及一些附屬設備改善，使跳機率減少等。我國已進行多時的安全度評估 (PRA)、整體可靠度計畫 (IRI) 及管綫路整體研究計畫即是很具體的方案。

10.6.2 電廠運轉程序 (Plant Procedure)

包括運轉規範，預防保養作業，人員之選用，人員之編組，甚至士氣的提昇。這些方面政府行政單位負監督之責，而執行係由電力公司進行。如運轉規範、品保計畫、預防保養計畫陸續改進；選定適當燃料更換週期，各環路水質控制，維修包商管理；人是否稱職，編組是否符合工作需要；另外亦應誘導參加工作者都更有責任心及榮譽感，也是增加可靠性及安全度之有效途徑之一。

10.6.3 訓練(Training)

有些核能先進國家，對訂出之書面規範過份自信，因此選用運轉人員時，其基本素質就要求不高。以美國為例，多進用曾服務於海軍之核子動力船艦有關之士官階級之操作員，殊不知這其間有相當大的不同，一艘核子動力船在運轉時，自最資深及學識充分的核子工程師到基層的操作員都在場，而陸上的核能電廠是上下班制，為什麼美國核能電廠的意外事故多發生在下班或週末？因為這些運轉人員完全根據規範行事還可以，並沒有足夠的知識處理突發狀況，三哩島事故發生前如果當時運轉員什麼都不動，還不至於發生爐心熔化的結果，不幸他做了能力範

圍之外的判斷。蘇俄這次意外又何嘗不是人為錯誤在先！

我國這方面的要求始終高於世界一般水準，每一班值班人員一定配置高級運轉員，候選人一定以大專以上相關科系畢業為先決條件。所有的運轉人員均需先經過電力公司體檢甄試、訓練、實習的儲備程序，最後經過行政院原子能委員會嚴格之專業考試合格後才能取得運轉人員執照，全部過程順利的需數個月的時間，每兩年重新鑑定換發執照，平日未值班的人員均在每座核能電廠內之「模擬訓練中心」接受再訓練，務求每一位運轉人員熟悉核能電廠內可能發生之狀況及應採之應變處理程序。

10.7 國際合作

這件意外事故產生了一個直接正面效果，那就是促成國際一致的核能事務合作心態。蘇俄政府在事發之後曾緘默了一段時間，然後開始加強了報導。到七十五年九月國際原子能總署（IAEA）召開車諾比爾核能事故討論會時，蘇俄的合作態度達到了高潮，除了派出專家作一天半的說明外，接着又回答了近千個問題，席間沒有一個國家為政治理由而爭吵，一反過去的態度。最後各國並達成了協議，以早期警報通知及相互援助為重點。不久之後蘇俄即正式通知IAEA一艘核子潛艇沉沒在大西洋海中，與其以往遮掩的態度完全相反。就整個情形來看就是非常大的進步，這代表各國還能意識到既然生存在同一個地球上，利益與患難是相共的，雖然仍然許多地區性的紛爭不已，但總算有個開始了。

附錄一 事故發生時程

4月25日

- 01:00 核反應器開始降載（降低功率）。
- 13:05 一組汽輪發電機（第七號機）停機，以便測驗是否能由另一組（第八號機）汽輪發電機如實驗情況下供電。
- 14:00 為避免干擾實驗，將緊急爐心冷卻系統隔離，並經配電調度中心指示，第四部機組仍維持50%容量發電。
- 23:10 現場核反應器自動控制系統關閉，繼續降載使核反應器輸出工加率在700至1000MWt之間（為實驗所需）。在局部連鎖反應變動之際不宜手動操作降載，又將總輸出功率控制點設定錯誤，非預期的功率在4月26日00:28時降至30MWt。

4月26日

- 01:00 為將功率升高，將全部控制棒抽出，功率仍僅在200MWt，略成穩定，但無法升到指定的最低要求700MWt。
- 01:03 為了實驗需要，在正常運轉的6台主冷卻水泵之外又起動了兩台備用主冷卻水泵。因此爐心冷卻水流量增加，產生蒸汽量減少導至熱流不穩（thermohydraulic instability）引發反應器控制發生問題。由於蒸汽壓力不足及汽水分離槽水位降低，又因此時核反應器保護系統被關閉，使得

反應器無法自動跳脫停機。其運轉 8 台主冷却水泵及關閉反應器保護系統，實在已很明顯地違反安全運轉規範。

01:22:30 控制室記錄器印出功率分布及控制棒位置，顯示當時最少應有 30 支控制棒插入，實際只有 6~8 支。照規範規定核反應器該即刻停爐，但操作人員仍繼續進行實驗。

〔註〕RMBK 型核反應器運轉規範規定，最少應有 30 支控制棒在插入位置，否則在緊急情況下停爐速度太慢。西方核反應器有獨立的快速停機系統，多方防止人為操作錯誤。

01:23:04 關閉第八號汽輪機供汽閥，開始進行試驗。爲了如一次實驗不成功尚可連續做第二次，使核反應器不致因第七號及第八號汽輪機供汽閥被關閉時而引起停機，進而將反應器停機有關信號關閉。此點違反實驗計畫及正常運轉程序。此時汽水分離槽內壓力增加，但並非核反應器產生蒸汽量增多，而是進入的爐心主冷却水之溫度上升了。

01:23:21 由於冷却管路循環遲緩，進入爐心冷却水溫度增加，加速了冷却水中汽化量，主冷却水泵輸出更減弱。

01:23:31 通過爐心主冷却水中所含蒸汽泡

量繼續增加，由於該型核反應器之特性（Positive Void Coeff）導致反應器功率上升，控制系統已無能力抑制。

〔註〕西方輕水核反應器之空泡因數可使鏈鎖反應停止，功率自然下降，核反應器能自我抑制。值班工程師發覺狀況有異，下令插入全部停爐棒及控制棒意圖儘速停爐，原來所插入之停爐棒未全部插到底，而且已抽出控制棒過多，此項停爐作用大受影響，此時關閉伺服電源意圖使控制棒以重力落至爐心底部。

約 01:23:44 4 秒之間功率上升數百倍，約有 30 % 核燃料過熱，已達約 3000

℃，因此導至蒸汽爆炸（Thermal-Mechanical Explosion）核反應器上蓋炸開，主冷却管路破裂，反應器建築頂部破損，核反應器暴露至外界。

約 01:24 自廠外觀察到的兩次爆炸中間相隔 2~3 秒，一個含熾熱金屬碎片的火球噴入空中，引起核反應器間內外火災多起，並將輻射物質直接投射到大氣中。

〔註一〕其第一次爆炸是由核子反應失控（Nuclear Excursion）。第二次爆炸西方專家推斷爲第二次核子反應失控所造成，但蘇俄認爲是因在高溫下鋳金屬與水及石墨與水產生化學反應所產生氫氣與外界侵入的氧氣混合造成第二次爆炸。爆出碎片包含鋳、鈾、鐵落在澆有柏油之屋頂上，

引發火災。

〔註二〕鋁金屬與水在高溫下產生化學反應，可能發生在西方輕水式核反應器，但石墨與水之反應不會發生。同時在西方輕水式核反應器內鋁與水產生之氫氣體積也較小，包封容器內沒有大量氧氣侵入不會發生爆炸，可承受壓力之包封容器可阻止輻射物外洩。

05:00 外界火災撲滅，但爐心石墨繼續燃燒。