

輻射防護簡訊 80

中華民國95年8月1日

■ 出版單位：財團法人中華民國輻射防護協會
■ 地 址：新竹市光復路二段295號15樓之1 ■ 電話：(03)5722224 電傳：(03)5722521
■ 編輯委員：王昭平、尹學禮、何 偉、李四海、邱賜聰、施建樑
翁寶山、張寶樹、董傳中、趙君行、蘇獻章 (依筆劃順序)
■ 發行人：翁寶山 ■ 主 編：劉代欽 ■ 文 編：李孝華
■ 印刷所：大洋實業社 地址：新竹市建功一路95號
行政院新聞局出版事業登記證局版北市誌字第柒伍零號

□輻防消息報導

▲95年第2次「輻射防護專業測驗」及「操作人員輻射安全證書測驗」公告

(原能會訊)

行政院原子能委員會委託元培科學技術學院辦理 95 年第 2 次「輻射防護專業測驗」及「操作人員輻射安全證書測驗」，定於 95 年 10 月 21 日分別於台北、高雄舉行；報名日期為 95 年 8 月 28 日至 9 月 4 日，相關事項請詳閱簡章。相關訊息可連結行政院原子能委員會網站(<http://www.aec.gov.tw>)查詢。

▲ 原能會提昇為民服務效率，擴大辦理輻射防護臨櫃作業

(原能會訊)

原子能的民生用途非常廣泛，各種可發生游離輻射設備及放射性物質的應用日益增加。目前國內放射性物質或可發生游離輻射設備的數量將近 20,000 個，分佈在 8,000 餘個使用機構或單位，而此方面的輻射防護管理業務也隨之增加。

由於使用單位申辦各類輻射防護證照及許可的案件日漸增多，與民眾的權益息息相關，為兼顧民眾的權益與輻射安全，原能會除進行簡化人民申請案件程序外，並於 94 年 6 月起成立醫用類人民申請案件臨櫃試辦區，以隨到隨辦、立即取件方式，提供民眾最有效率的服務。

臨櫃試辦作業一年來，不斷改進相關作業流程，掌握案件處理的品質與時效，使每一件申請案的處理時間，由試辦初期約需 2 小時以上，逐漸減少為 1 小時以內完成。臨櫃申辦案件數量由 94 年 6 月的 176 件(佔所有人民申請案件的 19.9%)增加至 95 年 5 月的 376 件(佔所有人民申請案件的 41.4%)，顯示臨櫃作業方式，已獲相關醫療院所與輻射防護服務業的認同與支持。

鑒於醫用類輻射防護管理臨櫃作業的成效甚佳，原能會決定擴大辦理臨櫃作業，包括醫用及非醫用輻射防護證照及許可的申請案在內。自今年 7 月 1 日起，持有測量控制、照相檢驗、行李檢查、分析鑑定、獸醫、學校研究等 x 光機或放

射性物質的使用機構或單位，於申辦證照及許可等案件時，歡迎蒞臨原能會輻射防護處臨櫃作業區(台北縣永和市成功路一段 80 號 5 樓)辦理。

▲ 室外髒彈炸後 48 小時內應變導則研擬介紹

(輻協 翁寶山)

摘要

本文係就美國防恐的研究成果，從輻射防護的觀點，提出於髒彈在室外爆炸後 48 小時內緊急應變的導則(Guide)撰寫內容。所使用的實驗裝置及物料，常見的輻射源，災害邊界的劃分，緊急曝露的劑量限度及劑量率建議，為本文敘述的重點。

關鍵詞 放射瀰散裝置 氣膠化 災害邊界 緊急曝露

一、前言

放射瀰散裝置(radiological dispersal device, RDD)在新聞報導上俗稱為髒彈(dirty bomb)，是當前恐怖份子可能使用的武器。為反恐及防恐，尤其是在爆炸後 48 小時內的緊急應變，遂為各方所矚目。

早在韓戰時(1950 年 6 月 25 日至 1953 年 7 月 27 日)，美國麥克阿瑟元帥就建議在中韓交界處的鴨綠江，用鈷彈炸成一條防線，也就是原子彈加上鈷材料。鈷被原子彈釋出的中子活化後形成鈷 60 (^{60}Co)，半衰期長達 5.271 年，加馬射線的能量為 1.173 和 1.333 百萬電子伏，可防止雙方軍事人員超過鴨綠江，惟遭杜魯門總統反對而未實施。

2003 年 5 月 31 日，在孟加拉的批雅(Puiya)村，警察逮捕了 4 名伊斯蘭好戰份子，並沒收一個像足球那樣大的包件，內裝有在哈薩克(Kazakhstan)製造的鈾。經過孟加拉原子能委員會的查驗證實，這粗鈾為 225 克的氧化鈾。如果用一般的炸藥使其爆炸，足以構成很大面積放射性污染。這些鈾的黑市價錢可高達美幣 170,000 元。警察也沒收一份 23 頁的文件，描述如何製造髒彈。

本文將就髒彈在室外爆炸 48 小時之內的緊急應變，從輻射防護的觀點，作原則性的探討。¹

二、氣膠化實驗

髒彈爆炸後，彈體因高溫氣化，術語稱為氣膠化(aerosolization)或霧化。為瞭解髒彈所含物質的氣膠化情形，必須從實驗著手。美國所使用的實驗室體積龐大，一為 1000 立方公尺，供 0.23 kg 髒彈進行氣膠化實驗。另一為 50 立方米，供 0.06 kg 髒彈進行實驗。

大實驗室(半球形，1000 立方公尺)的需求係使髒彈在空氣中爆炸後全部的氣膠不會沉積於牆壁上。小實驗室(方形，50 立方公尺)的需求係使可偵檢到氣膠的數量能被收集。

表 1 列出試驗的彈體材料和物理形式。

表 1 氣膠化實驗的物質

物 質	物 理 形 式
銀(Ag)	金屬
鉍(Bi)	金屬
鉭(Ta)	金屬
鋁(Al)	金屬
不銹鋼	金屬
銅(Cu)	金屬
鈷(Co)	金屬
鈷(Co)	液體
鉬(Mo)	金屬
鉛(Pb)	金屬
鈾(U)	金屬
銱(Ir)	金屬
鈦酸鋇(SrTiO ₃)	陶瓷(3種密度)
二氧化鈾(CeO ₂)	陶瓷(2種密度)
二氧化鈾(CeO ₂)	陶瓷粉
二氧化鈾(CeO ₂)	壓實粉
鈾/鈮(Tb/Pd)	陶瓷金屬混合物(cermet)
氯化銫(CsCl)	液體(具不同相對濕度和溫度)
氯化銫(CsCl)	鹽粉
硫酸鋇(BaSO ₄)	泥漿(slurry)
硫酸鋇(BaSO ₄)	鹽粉
二氧化錳(MnO ₂)	陶瓷粉
二氧化鈾(UO ₂)	陶瓷粉

註：氣膠化(aerosolization)又稱為噴霧化

表 1 至表 5 係取自參考文獻 1。

曝露途徑為地面照耀(groundshine)、吸入、以及沉積於皮膚、毛髮和衣物。地面照耀指來自沉積於地面放射性物質的加馬輻射，簡稱地耀。鈷金屬主要造成局部地耀，鈦酸鋇則會造成吸入的問題，而氯化銫可造成地耀或吸入問題，視髒彈的設計而定。

表 2 列出恐怖份子可能獲得最大輻射源的例子。表 3 總結輻射效應及災害邊界的保守分析。

三、災害邊界的劃分

依災害邊界所劃分的區域(zone)可分為高(high)、中(medium)、低(low) 3 區，或用熱(hot)、溫(warm)、冷(cold)命名 3 區。¹其劃分如下：

1. 如對輻射源的活度一無所知，或由執法人員的情報得知為大於 370 TBq (10,000 Ci)的很大型輻射源，則應從爆心沿各方向建立 500 公尺的災害區，第一次疏散此高災害區的人口並管制進出。用儀器度量確認此高災害區的邊界劑量率為 10 mSv/h。
2. 如從執法人員的情報得知，輻射源的活度小於 370 TBq (10,000 Ci)，則在距爆心 250 公尺處建立災害邊界。
3. 高災害區建立後，於 0.01-0.1 mSv/h 處建立中災害區。
4. 低災害區的劑量率係小於 0.01-0.1 mSv/h。
5. 高、中、低 3 種災害區可為緊鄰。
6. 如劑量率高至 50 μ Sv/h 且第一年的等效劑量達 20 mSv (最先 4 天的曝露除外) 則應作第二次的疏散。
7. 出口處的劑量率應等於或小於兩倍的背景輻射。

表 2 髒彈的衝擊與災害邊界的決定

核種	主要輻射形式 (半衰期)	主要形式	計算用的輻射源 活度 GBq	輻射源的應用
銶 90(⁹⁰ Sr)	貝他 (28.6 年)	陶瓷(SrTiO ₃)	1.1×10 ⁷	大型放射性同位素熱產生器(RTG)(俄國 Ieh U-1)
銫 137(¹³⁷ Cs)	貝他、加馬 (30.17 年)	鹽(CsCl)	7.4×10 ⁶	照射器
鈷 60(⁶⁰ Co)	貝他、加馬 (5.27 年)	金屬	1.1×10 ⁷	照射器
鈾 238(²³⁸ Pu)	阿伐 (87.75 年)	陶瓷(PuO ₂)	4.9×10 ⁶	RTG 用於 Cassini 土星太空梭
鋂 241(²⁴¹ Am)	阿伐 (432.2 年)	壓實陶瓷粉 (AmO ₂)	7.4×10 ²	單一測井輻射源
鈾 252(²⁵² Cf)	阿伐 (2.64 年)	陶瓷(Cf ₂ O ₃)	7.4×10 ²	數種中子放射治療或測井輻射源
銥 198(¹⁹⁸ Ir)	貝他、加馬 (74.02 天)	金屬	3.7×10 ⁴	多種工業用放射照相
鐳 226(²²⁶ Ra)	阿伐 (1,600 年)	鹽(RaSO ₄)	3.7×10 ³	舊的醫用治療輻射源

表 3 從釋出點的特定災害邊界範圍

選擇劑量限度	所選劑量限度的意義	不同裝置設計的真实髒彈災害邊界		
		中等輻射源	很大型輻射源	很大型輻射源 (成熟工程)
假定 24 小時曝露，地耀劑量為 1 Gy	急性地耀低限值，可能看到確定效應的下限	0	~300 公尺	~300 公尺
肺吸入劑量 2.7 Gy (30 天約定劑量)	從吸入引起急性肺炎的低限劑量	0	0	~2 公里
終身吸入劑量 1 Sv (50 年約定劑量)	慢性輻射病的低限劑量。所謂慢性輻射病定義為臨床症候群，由於長期輻射曝露累積劑量達 0.7 至 1.5 Gy 以上所引起的。	0	0	~7 公里
地耀劑量 50 mSv (假定 5 小時曝露)	於此劑量下，緊急應變人員可不受限制地工作 5 小時	~100 公尺	~600 公尺	~600 公尺
10 倍於年攝入限度	體內吸取銫可用普魯士藍，對超鈾元素體內的劑量則可用 DTPA	0	0	<10 公里
500 mSv (50 年約定劑量)	建議疏散	<150 公尺	<1 公里	~15 公里
50 mSv (50 年約定劑量)	建議掩蔽	<600 公尺	<3.3 公里	<100 公里
10 mSv (50 年約定劑量)	美國環保署建議引發防護行動	2 公里	~10 公里	>100 公里
年劑量 20 mSv (推定沉積限度)	美國環保署指定遷徙	8 公里	~100 公里	>100 公里

註 1：災害邊界值為零時意謂在任何情節所選擇的劑量限度均未見到。

註 2：本表係依據真實的情節作分析的結果。

註 3：很大型輻射源指活度大於 370 TBq (10,000 Ci)。

註 4：成熟工程(sophisticated engineering)指很大型輻射源於某些情節(scenarios)災害會逾越災害邊界，但卻不太可能會發生。

四、緊急曝露的劑量

表 4 列出緊急曝露的劑量限度，而表 5 則列出劑量率的導則。這些限度與導則的選擇旨在使搶救生命更有效率。

表 4 緊急情況的劑量限度

劑 量 限 度 (mSv)	執 行 活 動	條 件
50	全部	無
100	防護關鍵基本設施	只基於志願性，於此的劑量下 限一般為不可採行
250	搶救生命、防護廣大人口或防 護關鍵基本設施，如情況未緩 和則會對公眾健康造成威脅。	只基於志願性，於此的劑量下 限一般為不可採行
500	搶救生命或防護廣大人口	只基於志願人員充份知道所涉 及的風險

表 5 緊急情況的劑量率建議

區	分 建 議	劑 量 率
啟動除污*	就貝他、加馬污染，為兩倍於背景值(假定背景值小於 0.5 μSv/h)。就阿伐污染，為任何可偵檢到的活度。	
中等災害區的外邊界	0.01 – 0.1 mSv/h	綠色區
高災害區的外邊界	10 mSv/h	黃色區
在高災害區工作	10 – 100 mSv/h	黃色區
往還劑量率(非搶救生命)	100 mSv/h	紅色區
往還劑量率(搶救生命及關鍵基本設施)	2 Sv/h	紅色區
只有完全被告知危險度的志願者	> 2 Sv/h	

*如果人口眾多可能受到污染，他們不可在爆心附近歸類或除污，且應迅速疏散以避免地耀劑量。

結語

我國「游離輻射防護法」與「核子事故緊急應變法」部分條文似可適用於
髒彈攻擊的情況，但尚須不斷地實際演練方可應付這種突發狀況。另對醫農工
商界所使用輻射源要加強管制，^{2,3}以杜絕歹徒製造髒彈的機會。

最近美國國家輻射防護與度量委員會出版第 19 號評註，⁴提出於緊急曝露
時對於輻射偵檢、人員防護設備、個人和設備的除污、以及人員和演習等的建
議，並提出下列的指引：

1. 描繪輻射管制區的利用。
2. 使用警報式的人員輻射劑量計。
3. 注意輻射強度與儀器的讀數對於時間、距離、以及屏蔽的影響。
4. 關切輻射強度相關的健康效應與危險度。
5. 重視搶救生命及其他危急活動的個人輻射劑量紀錄及輻射曝露管理。

參考文獻

1. S. V. Musolino and F. T. Harper, "Emergency Response Guidance for the First 48 Hours After the Outdoor Detonation of an Explosive Radiological Dispersal Device," **Health Physics** 90, 377-385 (2006).
2. International Atomic Energy Agency, Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources, **IAEA/CODEOC/2004**, Vienna, (2004)
3. National Council on Radiation Protection and Measurements, Management of Terrorist Events Involving Radioactive Material, **NCRP Report 138**, Bethesda, Maryland (2001)
4. National Council on Radiation Protection and Measurements, Key Elements of Preparing Emergency Responders for Nuclear and Radiological Terrorism, **NCRP Commentary No. 19**, Bethesda, Maryland (2006)

會議訓練報導

▲95&96 年度各項訓練班預定開課時間表

(輻協訊)

班 別	組 別	期 別 及 日 期	地 點
放射性物質或 可發生游離輻射 設備操作人員 研習班	(A 組) 36 小時 許可類 設備	A5-- 7 月 19 日~ 26 日	(高雄) 輻射偵測中心
		A8-- 7 月 13 日~ 20 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		A7-- 9 月 20 日~ 27 日	(高雄) 輻射偵測中心
		A9-- 9 月 25 日~10 月 2 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		A10--11 月 21 日~ 28 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		A11--12 月 6 日~ 13 日	(高雄) 輻射偵測中心
		A1-- 96 年 1 月 25 日~2 月 1 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		A2-- 96 年 3 月 7 日~ 3 月 14 日	(高雄) 輻射偵測中心
		A3-- 96 年 3 月 13 日~ 3 月 20 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		A4-- 96 年 5 月 22 日~ 5 月 29 日	(新竹) 帝國經貿大樓
	A5-- 96 年 6 月 6 日~ 6 月 13 日	(高雄) 輻射偵測中心	
	(B 組) 18 小時 登記備 查類 設備	B12--- 8 月 16 日~ 18 日	(高雄) 輻射偵測中心
		B13--- 8 月 23 日~ 25 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		B17--- 10 月 3 日~ 5 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		B18--- 10 月 25 日~ 27 日	(高雄) 輻射偵測中心
		B19--- 11 月 15 日~ 17 日	(台北)
		B20--- 11 月 29 日~ 12 月 1 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		B21--- 12 月 20 日~ 22 日	(高雄) 輻射偵測中心
		B 1— 96 年 1 月 22 日~ 24 日	(新竹) 帝國經貿大樓
B 2— 96 年 2 月 7 日~ 9 日		(高雄) 輻射偵測中心	

		B 3—96 年 3 月 28 日~30 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		B 4—96 年 4 月 25 日~27 日	(高雄) 輻射偵測中心
		B 5—96 年 5 月 16 日~18 日	(新竹) 帝國經貿大樓
		B 6—96 年 6 月 27 日~29 日	(新竹) 帝國經貿大樓
輻射防護專業 人員訓練班	輻射師(108 小時) 輻射師(12 小時)	師 7 期& 進階 7 (36hr) 第五階段--8 月 7 日~11 日 員 10 期 & 師 8 期 第一階段--12 月 12 日~15 日 第二階段--12 月 18 日~22 日 第三階段--96 年 1 月 8 日~12 日 第四階段--96 年 1 月 15 日~19 日 師 8 期& 進階 8 (36hr) 第五階段--96 年 2 月 6 日~13 日	(新竹) 帝國經貿大樓
鋼鐵建材輻射 偵檢人員訓練班		鋼 2--7 月 3 日~4 日 鋼 3--11 月 22 日~23 日 鋼 4--12 月 6 日~7 日	(新竹) 帝國經貿大樓 高雄 (新竹) 帝國經貿大樓
九十五年度 輻射防護教育訓練 II		9 月 15 日(五) 10 月 30 日(一) 11 月 9 日(四)	台北(月涵堂) 新竹(帝國經貿大樓) 高雄(偵測中心)

◎ 以上各項訓練班簡章備索詳細內容網址為 www.rpa.org.tw，電話：(03)5722224。◎

□ 專題報導

▲ 車諾比爾核災事實檔案

(核研所保物組 馬張明霞)

一、前言

很少科技項目會如核能引起如此廣大的爭議，更沒有核子意外事件如 1986 年 4 月在車諾比爾市發生的核電廠爆炸如此悲慘。”車諾比爾”這個字已和環境災難及嚴重長期人員健康影響劃上等號。因為關於車諾比爾的謠言和科學證據的複雜性，很難建立事實，並且其中加上有爭議的媒體報導，使得建立事實的全貌更難。某些問題並沒有絕對答案。早期預測這種輻射曝露將會影響上萬人的生命，但是直到 2005 年年中時直接受到影響死亡人數小於 50 位。在前蘇聯時期因為貧窮、精神健康問題和生活習慣，引發的疾病威脅大於區域的輻射曝露。

這份報告車諾比爾核災事實檔案的目的是幫助核能界專業人士之間的溝通和媒體記者在報導車諾比爾時及一般核能訊息時，能瞭解發生事件背後的原因

和引起的矛盾。專注於車諾比爾核災的事實上，其事實仍無法建立，例如科學證據來源是 2005 年關於健康效應的車諾比爾論壇報告和核能機構的 2002 年輻射和健康影響評估。因為車諾比爾意外事件扭曲了對核能贊成或反對的爭論。當爭論受到扭曲，對車諾比爾發生的普遍意見和意外後發生的事常常也都是錯的。目前對核能是關鍵時刻，自從車諾比爾核災發生後已過 20 年，核能科技也已大幅改變。

因車諾比爾事件使蘇聯核子發展減緩。新廠工程被迫停工，面對環境抗爭和地方政府阻撓使計畫停頓。即使大眾對核電需求故意降低，一個有野心國家也已提出對核電發展的新計畫。全世界因為對能源和全球暖化的憂慮，核能又成為政治題材的焦點並且再回到媒體版面。車諾比爾事實檔案敘述事件的重要性和後續動作，包含如何發生的，為什麼會發生和確定未來不會再發生，和解釋事件發生前後的所有事項，破除車諾比爾神話，澄清核災事件的影響等。這篇報告主要是給對車諾比爾災變有興趣的人員，也適合於研究人員、學生，核能專業人員和政治人物等。

車諾比爾核電廠有四個 RBMK 反應器。RBMK 是 reaktor bolshoy moshchnosti kanalniy 這四個字的縮寫表示高能槽反應器，這種反應器使用個別燃料槽，並用普通水當冷卻劑和石墨當緩速劑。這四個反應爐是輕水石墨型反應爐，1986 年 4 月 26 日的核災是發生在第四號反應爐。這種以石墨當緩速劑和普通水當冷卻劑的核子反應器很特殊，只有在前蘇聯時期使用。在別的國家發執照前，將會避免某些不當設計，最特別是容易造成能量快速上升，和沒有完全圍阻體構造。

車諾比爾事件發生導因於作業員要做測試而關掉安全系統。一個巨大爆炸掀掉反應器頂部 1000 噸的頂蓋。第二次爆炸爆裂出燃燒中核子燃料的碎片和爐心的石墨，並使空氣進入造成石墨緩速劑爆炸造成火焰燃燒。開始的爆炸造成兩人死亡，之後 28 位消防人員和緊急救援的清潔人員在三個月內因急性輻射曝露死亡和一位因心臟病死亡。

從 1986 年開始到未來有可能發生長期健康效應。一份 2005 年由國際原子能總署（IAEA）發表的報告敘述這核災的輻射曝露最後可能會有 4000 人死亡，同時認為實際的公眾健康效應不會如開始時想的那麼可怕。直到 2005 年年中，因核災輻射致死人數是少於 50 位，幾乎全是受到輻射曝露的救難人員，許多是核災後幾個月內死亡，但也有直到 2004 年死亡。

現在車諾比爾的所有 4 個反應器已經關閉和廠房不再營運。第 3 號反應器是最後一個在 2000 年 12 月 15 日關閉的反應器。總共有 16 個 RBMK 型反應器在運轉：15 個在俄國和一個在立陶宛。立陶宛的這個 RBMK 型反應器預計當 2009 年時立陶宛加入歐盟就會關閉。所有這些 RBMK 型反應器均已經過修改消除瑕疵。

在 1986 年建立一個庇護所包住已毀壞反應器和其殘餘物。這個庇護所是一個石棺圍阻體，是在發生事故後 7 個月內急忙建造的，現已毀壞。欲減少崩塌

的風險，一直在進行穩定和強化構造的工作。一個新拱門形狀構造的概念設計，叫做新安全圍阻體” New Safe Confinement (NSC)” 已被認可和看守人員正在評估中。這個以 100 年為設計概念的大型建物將建在離石棺圍阻體較遠的地方，使降低工作人員的輻射曝露劑量。當完工時在一天內迅速滑動石棺進入新安全圍阻體內，這將使石棺和外環境隔離，對未來拆除工作因均可在新安全圍阻體內進行提供安全狀況。

車諾比爾庇護所基金，是由歐洲建造發展銀行管理，在 1997 年設立目的是使石棺穩定和環境安全。這個計畫將花費 870 百萬美元，預期在 2008 年主建築計畫完工。

Pripyat 全城有 49,360 居民，離核能電廠 4 公里，事件發生後 36 小時內已撤離。因這事件最後約 350,000 人被重新安置。

二、核子災變

1986 年 4 月 26 日星期天清晨，前蘇聯現在的烏克蘭，基輔北方 130 公里處的車諾比爾核電廠發生世界上最大的核子事故。

這事故主要是因蘇聯反應器設計上有瑕疵，加上核電廠作業人員的訓練不良造成的錯誤。追就原因也是因為冷戰隔離和缺乏嚴格安全文化的後果。

第四號 925 MW 的 RBMK 反應器，因例行維護被關閉，並且決定利用這空檔執行測試。很諷刺地這測試目的是要改善安全性。反應器的冷卻泵依靠電力，所以作業員要決定是否在失去廠房電力時，這渦輪發電機(turbo-generator)的動能是否能提供足夠電力進行緊急設備操作和爐心冷卻水泵循環成為可行。這實驗目的是要決定當失去廠房電力時是否爐心能夠冷卻繼續保證安全。欲降低冷卻需求，反應器需以低能量運轉，儘管 RBMK 型反應器在低能量狀況下是不穩定的，測試嘗試於前兩種狀況但沒有完成。反應器電力減少到一半電力和兩個渦輪發電機的其中一個由反應器提供電力已經斷電。反應器緊急冷卻系統立刻不能運轉，因為主要泵慢下來時，作業員不要它停下來。因為系統需求此時 grid controllers 要求測試延後。反應器運轉在這種狀況超過 9 小時直到發出許可繼續降低電力進行測試。電力應維持在 700 到 1000MW 測試水準，但是自動控制的設定是不正確的和電力降到 39MW，使吸收中子的分裂產物氬濃度升高。這時 6 個主要冷卻泵在運轉和過度的水流，使核子反應明顯降低，因此作業員很難恢復電力。最後作業員設法穩定電力於 200MW，但是因為失去反應無法再增加。在這遠低於需要電力之下，仍決定從事測試。兩個遠處備用冷卻水泵啟動，使水流增加到超過負荷，同時引起冷卻系統的蒸氣減少，使核子反應更降低。為了要增加反應控制棒收起（超過作業程序指明的限度）。此時只使用 6 個到 8 個控制棒。依照作業程序至少需要 30 個才能保持穩定。如果小於 30 個就應該關掉反應爐。作業員繼續從事測試，儘管知道需約 20 秒的時間才能使所有燃料棒放下，並關掉反應爐避免能量快速上升。測試繼續進行，因反應爐超過限度安全系統發生錯誤而成為連結中斷。測試實驗開始關掉蒸氣供給到渦

輪發電機。安全系統的錯誤使反應器關閉。當渦輪運轉停止，冷卻水減少到反應爐和蒸汽快速生成。反應器正空泡係數（positive void coefficient）表示反應爐產生更多功率和蒸汽。

於 4 月 26 日清晨當地時間 01:23 時，突然功率急速上昇。反應器能量以指數型增加，估計有 100 倍，控制棒不能及時全部插入，更進一步他們的設計是水開始不正常進入到管路加劇危險狀況，燃料過度加熱和一些燃料管路崩壞，結果爆炸。追究原因主要是因蒸汽壓力和燃料反應造成吹掉在反應爐上端的 1000 噸封閉蓋。第二次爆炸由爐心燃料和石墨開始燃燒，使空氣進入造成石墨緩速劑開始燃燒。第二次爆炸的真正原因仍不清楚，但相信和氫氣有關。

要確定這次核災的原因並不容易，因為沒有可以比較的參考事件。目睹證人報告說，核災發生後開始經過偵測和實驗性質再重建是必需要做的，事故原因被認為是人為操作錯誤加上核能電廠設計不良。

事故已發生，在時間壓迫下進行偵測，偵測開始後不久又被打斷了 9 小時，電力需依靠基輔傳輸供應，所以偵測試驗須在晚上進行。RBMK 型反應器技術設計上有許多缺點認為是主要關鍵，包括控制棒的處理。在一個反應器功率多寡是由控制棒上昇下降來控制，控制棒上昇就會增加能量，控制棒下降可吸收更多中子使能量下降。無論如何這種型式的反應器，其控制棒設計有一個致命缺點，當燃料棒降到爐心底部時，石墨附件置於控制棒中可以增加核反應，附件是 RBMK 型反應器特殊設計，它們取代水和改善反應器中子的平衡。

在車諾比爾測試作業時，太多控制棒給退出，然後又同時插進爐心，尤其是正空泡係數已造成功率上昇時，故使能量快速上升導致反應器燃燒爆炸催毀。類似錯誤也發生在 1983 年的立陶宛是類似型式的反應器，好在沒有很嚴重的後果，但是這次經驗沒有傳遞到車諾比爾核電廠。

三、核災傷亡情況

31 人在事故發生後即刻死亡。一位在爆炸時死亡，一位因冠狀動脈栓塞死亡，一位因燒傷死亡和 28 位因急性輻射曝露死亡。事故發生第一天有 1000 位反應器駐廠作業員和緊急救援人員受到很高輻射劑量。從 1986 到 1987 年期間超過 200,000 位緊急救援和復原作業的工作人員，當時預估 2,200 位會因輻射長期健康效應而受傷甚至提早死亡。人員個別曝露的劑量很難確定，在 1986 年認為約是 170 毫西弗到了 1989 年認為是 15 毫西弗。對一般人的輻防標準限制每位每年是 1 毫西弗高於背景值，而在烏克蘭對這 200,000 位緊急救援和復原作業的工作人員平均背景劑量每位每年是 2.2 毫西弗。並且無人於出事地區外因急性曝露傷害而受傷。

四、核災後

反應器爐心現在全部受到輻射曝露污染，隨著煙霧核分裂物和碎片進入空氣中約 1 公里。藉著西北風吹到白俄羅斯，當然其它區域也受影響包括烏克

蘭。火燄燃燒到整個核能電廠，叫來 250 位消防員，他們並沒有佩帶人員劑量計，作業員和救難人員是接受命令的，並且許多在工作後仍留下來，幫忙救助其它人員要把場面控制下來。在早上 5 時火已撲滅，但石墨火繼續燃燒了 9 天。進到環境中的輻射主要是因燃燒石墨而引起。

4 月 27 日 Pripjat 城（約有 45000 居民）全部撤離。這些居民沒有再回來，這城就一直是當時撤離時的樣子。事故後幾年，更有 210,000 人被安置到污染較低的地方，和開始時半徑 30 公里的管制區 2800 km² 擴及到 4300 km²。

事故後頭 10 小時消防員取冷卻水灌進反應器爐心，要撲滅反應器的火災和停止放射性核物質排放，但這項任務是失敗了。從 4 月 27 日到 5 月 5 日，超過 30 架軍事直升機飛過燃燒中的反應器，他們丟下 2,400 噸鉛和 1,800 噸砂，企圖滅火和吸收核物料的放射性，這些努力也沒有成功。事實上他們使狀況更糟，因丟下物質使熱埋到底部聚集，反應器溫度又再上升，和放射性物質變得更更多。救火末期，爐心是用氫氣來冷卻，一直到 5 月 6 日火和放射性物質才受到控制。於 5 月 9 日，開始挖一個通道到爐心底下，裝置一個大的水泥厚板和冷卻系統。這個厚板是要當成一個阻擋物避免放射性物質滲透到地下水。最後爐心是包埋在一個 300,000 噸水泥和鋼的圍阻體或石棺內，周圍土地和建物需要去污。估計約有 6 噸二氧化鈾(UO₂)燃料和分裂產物釋出，核種中主要是氙、氫、碘、碲、鉍等。依據世界衛生組織，全部約 12 EBq(10¹⁸ Bq)放射性物質排放。污染最高的是 30 公里半徑內，鉍-137 量超過 1,500 kBq/m²。鉍-137 因容易量測被用來當指示劑，另一個健康風險最大的放射性核種碘-131（其半衰期為 8 天）已衰減，烏克蘭北邊和白俄羅斯南邊大部分區域有 40 kBq/m² 的放射活度，當雲飄過下雨時出現一些熱點(hot-spots)地區。

一位瑞典核能電廠工作者，在他檢查另一個瑞典設備時，第一次偵測到來自蘇聯的放射性污染。因西北風飄過斯堪的那維亞半島、荷蘭、比利時和英國，然後當風向改變往南又吹向歐洲其它地區，在北半球的每個國家甚至達到美國，日本均偵測到放射性污染。

事故地點周圍 30 公里是過渡區、車諾比爾區、管制區或第 4 區。行政上包括烏克蘭的 Kyivska Oblast 和 Zhytomyrska Oblast 最北處，以及連到白俄羅斯邊境。事故後很快劃出區域以利撤離居民和避免人民進入到高污染地區。出事地區附近區域分成 4 個集中點，其中第 4 個（實際上最近的在 30 公里半徑內）是最危險。在劃出的區域內任何居民禁止任何關於民事或經濟活動。

【下期待續】

- 1.歡迎賜稿，稿件請寄新竹市光復路二段 295 號 15 樓之 1 或電傳(03)5722521 輻防協會編輯組收。來稿一經刊登，略致薄酬(政令宣導文章，恕不給稿酬)。
- 2.本刊因篇幅限制，新聞類每則請控制在 500 字以內，專題類每篇以 2000 字內為佳。
- 3.歡迎訂閱(每年六期 180 元)。請洽：李孝華小姐 TEL：(03)5722224 轉 314。

五、健康效應

車諾比爾核災確實的長期健康影響是不可能界定或預判。因車諾比爾事件經過調查在白俄羅斯污染最嚴重區域至少 1,800 位兒童和成人已得到甲狀腺癌。甲狀腺癌一般來說，是可以治療痊癒的。依據聯合國在 2002 年發表的報告：甲狀腺癌數目在未來 10 年會達到 8,000 位。IAEA 說：意外發生當時因放射性污染約 4,000 位罹患甲狀腺癌，和至少 9 位兒童死於甲狀腺癌。但是癌病患者的存活率依白俄羅斯的經驗幾乎可達 99%。在 2005 年 9 月，車諾比爾論壇發表報告（The Chernobyl Forum Report 2005），是由超過 100 位專家從 7 個聯合國組織包括世界衛生組織；國際原子能總署；世界銀行；白俄羅斯；蘇俄和烏克蘭等完成。這份報告總結說：此次事件到最後會有約 4,000 人會因輻射曝露而死亡。公眾健康效應並不如開始時那麼嚴重。大致來說在附近地區科學家並沒有發現什麼很嚴重的惡性健康效應，也沒有發現因廣泛污染對健康的繼續威脅，除了一些在管制區域的特殊案例。直到 2005 年年中時，因核災輻射的死亡數是小於 50 位，所有幾乎都是救難人員。許多人在幾個月內就死亡了，但也有到 2004 年才死亡。車諾比爾論壇報告說：許多救難人員和人們住在污染區，均接受到低的全身輻射劑量，並沒有發現有影響到生育問題，也沒有因輻射造成天生畸形。報告也說：前蘇聯普遍因貧窮、精神壓力和生活習慣方面的影響對當地造成的健康威脅大於輻射曝露。在車諾比爾論壇報告中評估最後死亡人數比最早預期因輻射曝露會有成千上萬人死亡要少很多。在 1986 年一位國際衛生組織(WHO)代表在會議上說：依烏克蘭官方認為死亡會超過 100,000 人，此事件會造成輻射曝露而死亡是杜撰的。他又說已證明的死亡數是 40 位；一些當時是因直接受到照射，和 10 位死亡案例是因輻射引起的甲狀腺癌。在 2000 年由聯合國原子輻射效應科學委員會對輻射效應議題的報告所做的結論是，多數人因車諾比爾事故受到輻射曝露，但沒有受到嚴重的長期健康效應傷害的證據。2002 年聯合國報告關於車諾比爾事故的後果說：對長期健康效應仍保有很大的不確定性。又說：受影響區域的病況繼續反映前蘇聯其它部份的狀況，特別是男性壽命，明顯低於西歐和南歐，死亡原因是心臟病和外傷。報告也敘述本來認為白血病會增加但並沒有發生。但也敘述在 1986 年 4-5 月許多年輕人受到放射性碘-131 曝露而導致約有 2,000 位得到甲狀腺癌。曾有報告報導事故發生後死了好幾千位洗潔工，但報告很難說明原因：第一因為很難追蹤這些洗潔工，他們已回到前蘇聯各個地方；第二任何正常的人口在 20 年都發生許多死亡（例如已開發國家的正常死亡率是每年約 0.3% 或 20 年中 600,000 人口中有 36,000 位死亡）；第三洗潔工得到各種各樣的病，例如心臟病好像就不是因輻射而造成。

六、今天的車諾比爾

鑑於安全考量和操作問題，國際社會要求車諾比爾核電廠永遠完全關閉。在車諾比爾四個機組最後一個反應爐在 2000 年 12 月 15 日完成永遠關閉不再運

轉。在 1995 年 12 月烏克蘭簽署由 G7（現為 G8）國家和歐盟同意車諾比爾電廠關閉的備忘錄，蘇聯解體後國際合作加速進行，主要工作是評估已毀壞反應器的風險和當地長期復育的策略。G7 各國和歐盟聯合協助烏克蘭，對第 4 號機已受毀壞的反應器找到解決辦法。在 1996 年於 Slavutich 建立車諾比爾中心以處理核能安全，放射性廢棄物和輻射生態的事情。該中心提供工程；科技服務包括核子和輻射安全領域、除役、緊急處理和輻射生態。中心的國際輻射生態實驗室執行 30 公里內車諾比爾管制區的研究工作，並研究對動物細胞和組織的輻射影響。

同時對在 1986 年匆忙包圍第 4 號反應爐所建造的石棺進行補強。這個石棺圍阻覆蓋包住已毀壞的第 4 號反應爐和事故後建立的新建築。腐蝕和其它因素已增加石棺崩解的風險。於 1997 年 6 月烏克蘭、G7 和歐盟認可新圍阻所履行計畫，可覆蓋包住石棺和建構所謂新安全圍阻設施，這將是更安全和包圍石棺建立的永久性構造，其壽命以 100 年設計。G7 國家將撥 300 百萬美元作車諾比爾圍阻體基金，這基金在 1997 年設立對石棺穩定工作和新安全圍阻設施建造。這基金由歐洲銀行管理，為重建與發展。在 1997 年 11 月超過 40 個國家的代表參加在紐約的會議和宣佈，再增加 37 百萬美金到預估 870 百萬美金的計畫工程款。烏克蘭和 G8 經濟體的國家，蘇俄和歐盟合作穩住石棺，建立新的圍阻體，去除舊石棺毀壞部份確定其長期穩定性。在 2006 年 1 月歐洲銀行說圍阻體實行計畫已到重要時間，預期新安全圍阻設施在未來幾個月內可建立，完工日期排在 2008 或 2009。石棺的穩定工作已開始，8 個穩定工作中的 2 個已完成：一個柱子可支持石棺屋頂構造，以及再強化含大量分裂碎片的煙囪除氣架構支柱的支撐。這除氣設施是一個槽，吸收濃縮後再回到反應爐，目的是當建新圍阻體時穩定住石棺。石棺仍含有放射性物質，包含超過 2,000 噸鈾和約 1 噸放射性核種，其中 80% 是銻。

七、未來的車諾比爾

車諾比爾初期的清潔作業是令人印象深刻的，7 個月就完成石棺的建造，現在當地的輻射量也是低的。其它三座反應器的除役建構包括：(1) 一個新加熱工廠於 2001 年完工。這包含三個熱水鍋爐每個 50MWt 和三個蒸氣鍋爐每個 40MWt。電廠能夠供應一座城市的電力，也能夠符合未來需求包括除役工程。(2) 一個新的中期用過燃料貯存設施，因已有的已不夠使用。(3) 一個新的液體放射性廢棄物貯存槽於反應器作業時，可以收集低和中強輻射液體廢棄物，目前當地貯存槽已有約 25,000 m³ 廢棄物。新的設備將經過減容處理，之後輸送到一個貯存槽內。(4) 一個固體放射廢棄物處理廠已至建造之中。

需要一個新的中期用過燃料貯存，或叫 ISF-2，使反應器內的燃料可以移出。已有的設施已不夠使用。ISF-2 的設計在 2003 年因還要找解決辦法而停頓下來。同時 1-3 號反應器部分燃料於 2005 年 12 月已開始移出到既有的貯存設施內。G8 全球合作計畫 2006 年優先項目是使殘留電廠，不僅在車諾比爾和全部前蘇聯要談妥契約，使新圍阻設施可以開始施工，於 2006 年中完成新圍阻設

施的建造合約。對新圍阻設施的概念設計已被認可，是一個方形構造，內部 92 公尺高，全長 245 公尺，構造將是 150 公尺高且有牆圍住，但不由石棺支持。在一份 2005 年 12 月報告英國計畫，在 2006 年車諾比爾的新圍阻設施，將集中細部設計和它的執照事務。英國貿易工業部說 2006 年車諾比爾其它里程碑，將包括完成石棺穩定工作，一個整合型偵測系統，身體健康保護，以及進出管制。其目的是在 2009 年要完成新的圍阻設施。這整合型偵測系統是對石棺和各種儀器所偵測聚集燃料地區中的中子和加馬射線。這系統包括核能安全的、放射性的、地震的和構造的偵測。這系統的安置工作已進行中。身體健康保護和進出管制系統包括一個衛生間、1,500 名工作人員的更衣設施、醫療和輻射防護間、以及救難設施。

4 月 27 日，事故後 36 小時，Pripyat 城 45000 位居民，離核能電廠 4 公里，用巴士撤離。直到今天這城仍保持無人居住。直到 5 月 5 日，居住於反應器 30 公里半徑內的人們必需離開他們的家。10 天內有 130,000 位從這個區域撤離。

事故發生前，車諾比爾工人和他們的家庭是住在 Pripyat，48 小時內他們撤離，現在住到一個新城叫 Slavutich（也是 Slavutych），離電廠東邊 50 公里處。這個城由 8 個蘇俄聯盟共和國建造（俄羅斯、烏克蘭、白俄羅斯、亞塞拜然、亞美尼亞、愛沙尼亞、拉脫維亞、立陶宛）。每個共和國擁有自己的勞動力和物質，以及建造自己型式的房子和公寓。因此這城有 8 個不同區域，每個在建築形式上均不同。Slavutich 今天人口是 25,000 人。約 1/3 人口是 16 歲以下，許多居民在車諾比爾電廠工作或多少和其有關連。這城是烏克蘭境內最年青的城市，生育率高和死亡率低。Slavutich 的家庭生活水準高，有烏克蘭內一些最好的商店，也有好的學校、運動設施和國家最好的醫院之一。

2000 年封閉車諾比爾市，這城已成為社會經濟問題，並需適應減少對電廠的依賴。這城的行政機構由國際機構支持，已建立商業發展單位、經濟養成單位、社區發展中心、信用聯盟、鼓勵企業和吸引新經濟等，已有好的發展。

國際勞工組織在 Slavutich 設立訓練中心，前車諾比爾電廠員工接受再訓練後轉業。在 2002 年聯合國發展計畫特別指定 597,000 美元做為訓練之用。

八、環境問題

因反應爐燃燒毀壞排出放射分裂產物煙羽飄到大半歐洲。這次事故造成放射性污染 18,000 km² 的農地，其中 2,640 km² 不能再種植。在烏克蘭特別受影響的是森林。35,000 km² 的森林區域，全部的 40% 受到污染。在森林，針葉樹和闊葉樹吸收放射性如一個過濾器，落塵開始濃聚，死掉的落葉傳輸污染到泥土，10 年後又再回到樹木。銫-137 核種是一個主要問題，它有 30 年半衰期，意思是直到 2016 年環境中仍含有一半的放射性。銫於化學性質上和鉀相似，所以很容易被動植物吸收進入食物鏈。當在食物鏈內增加，那它的濃度就增高。進入食物鏈的主要途徑是從污染的莓果、磨菇、獵物和魚，還有經過乳牛吃污染的草和禾糧。估計魚中放射性濃度，將會比另一個 40 年消耗量的最高限度還要高。在蘇俄污染的牛奶被認為是造成甲狀腺癌的原因。在波蘭、匈牙利、奧

地利和瑞典牛奶品質也被破壞。歐洲許多國家燒毀污染的草木，和禁止許多農產品通過東歐，最受影響的是瑞典的馴鹿和羊。在 1986 和 1987 在基輔、Chemigov、Minsk 和其它小城的市場是禁止牛乳、肉類和許多水果和青菜的交易。在英國農業部事故後幾個月是限制羊隻的買賣和屠宰。

在白俄羅斯、俄羅斯和烏克蘭土壤污染程度受一些因素影響，如放射性同位素自然衰變現象；地殼變動和土壤型式。例如 1986 年事故後，在白俄羅斯接受到 70% 落塵。約 22% 國家被鈾-137 污染，直到今天 21% 還是被污染。這白俄羅斯政府的車諾比爾委員會，估計到 2016 年仍有 16% 領土是被污染。核能單位經濟合作與發展組織核能署(OECD/NEA)稱自從發生災變以來，外部輻射的劑量率在某些區域已降低 40 倍，以及某些區域已小於原來值的 1%。總之，農地土壤的鈾-137 活度有繼續減少現象但是很慢，這種狀況預料還會有相當漫長時間。

至於農產品主要問題是小的農戶，他們常依靠他們自己生產的農產品維生。白俄羅斯官方的車諾比爾委員會，和烏克蘭政府組織要求於車諾比爾救助計畫包括特別補助，加強對這些低收入農戶多方面協助。已有三個國家對國家農場生產的食物和在市場出售的食物特別設限。例如在白俄羅斯就有比德國規定嚴格 3 倍的限制。烏克蘭的例子還一直需要對食物偵測，單在 2000 年就超過一百萬食物樣本做分析。自從 1993 年依據車諾比爾的調查顯示，依官方規定保證在公有市場出售的國家農場產品是安全的。

事故後馬上關心的問題之一是 Dnieper 河和在 Pripjat 支流的水。雖然河流分佈是污染全部烏克蘭，但移動緩和以減輕效果是成功的，和大部分喝的水是不受影響。但是污染已聚集在其它河床，以及地下水受鋨和鋂(Am)的污染風險。例外的是在管制區內的地區，污染區域的空氣已不再受影響。

九、輻射和動物

從 1994 年，Robert Baker 博士、Ron Chesser 教授以及烏克蘭與英國的同業一起檢視在車諾比爾周邊的輻射對動物的效應。他們的結論是：因人們在耕種、畜牧、狩獵、和伐木活動的減少，反而野生動物得到益處。所以 Baker 博士說：世界上最糟糕的核能電廠事故對野生動物的摧毀比對正常人來的輕。美國能源部官員問：Baker 博士評估這核災對動物群的生態影響，雖然做定量評估很難，但淨生態影響應是正面的。Baker 博士說還需要做詳細長期研究，以利瞭解控制組未受曝露動物群以及受慢性輻射曝露的動物群有沒有不同？關於長期潛伏性曝露效應需要解決，才能瞭解此事件對人和對野生動物的全部影響。更多訊息可上網查關鍵字“Chernobyl”或www.nsrl.ttu.edu搜尋。

十、核能安全

歷史上有兩個國家級核能電廠災變：美國的三哩島和車諾比爾，一個有圍阻體，另一個沒有圍阻體。從 32 個國家商業運轉累積約 12,000 反應器年發生了這兩個主要核災。從西方核能電廠風險，在發生意外事故或恐怖份子攻擊的可能性狀況下來看，和其它一般接受風險的狀況比較算是小的。核能電廠是堅

固的。安全設備的目的是要保證就算所有可預料的狀況發生意外，公眾健康和
安全決不會受到輻射曝露傷害。

1979 年三哩島災變反應器嚴重受毀，但是放射性受到控制，沒有發生健康
傷害效應和對環境後序影響。在 1957 年聯合國組織下設立 IAEA，其中一個功
能是世界上核能安全的稽查員角色，它指定安全程序和甚至報告小事故。過去
10 年它的角色已增強，每個國家運轉核能電廠有一個核能安全檢查委員會，這
些委員會和 IAEA 保持密切聯繫。人員安全是核電廠工作上最主要關心事務。
許多方法管制輻射劑量，包含屏蔽阻擋，工作防護衣和其它相關設備，限制工
作人員在高輻射劑量區工作時間，和使用遠距遙控技術，不斷地監測個人劑量
和工作環境劑量，並和其它工業比較確定是在很安全範圍。一個欲減少核災的
安全指標，是需要計算爐心毀壞或爐心熔解事件的頻率。美國核能管制委員會
(NRC)對反應器設計必需符合壹萬年一次爐心毀壞的機率，新的設計甚至更嚴
格。目前最好的運轉電廠約是百萬分之一機率，未來十年建造的電廠約是千萬
分之一機率。三哩島災變是唯一的一個反應器事故（在 NRC 安全標準下），和
設計上理應是安全的，也因此無人員受到輻射傷害。今天法規要求如果發生熔
爐事件，必需控制在廠內，無需撤離附近居民。主要安全考量是放射性物質在
無法控制下排出的可能性，導致當地污染和遠地也受污染。在車諾比爾就發生
了並後果嚴重，最後在所有設計上費用增加以達到高安全標準。

核能發電可以認為是很安全。單在中國大陸 2004 年依官方消息約 6000 人
死於煤礦。使用石油也造成顯著健康和環境效應。

1.深度防禦

欲達到最適合的安全，核電廠今天使用”深度防禦”概念，應用在各種安全
系統。主要概念是：（1）高品質設計和建造；（2）設備需防止因操作不順造
成問題；（3）各種系統可充分偵測問題，控制燃料傷害和避免明顯放射性釋
放；（4）嚴重的燃料傷害效應可控制在本身廠內。

安全系統包含一連串在反應爐心和環境之間做阻隔，準備多個安全系統，
每個也都有備份和設計上遇人為錯誤可包容。安全系統花費是反應器全部預算
約四分之一。安全系統包含控制棒，插入可吸收中子，和第二道關閉防線是加
進吸收中子的物料。支援性冷卻系統去除剩熱。另外許多世界上運轉的反應器
（那些在車諾比爾的應是例外）均應有負空泡係數（**negative void
coefficients**）。反應器水流可當緩速劑和冷卻劑，過多蒸汽會減緩中子，需要
中子維持的核反應也就降低功率。其它加強安全的特點是最普通反應器，燃料
是固體陶瓷小丸形和當燃料燃燒在小丸內充滿放射性分裂產物。小丸排在鉛管
內成為燃料棒，這些在一個大的不鏽鋼壓力槽壁約有 20 公分厚，再加上一個至
少一公尺厚的水泥圍阻體內。新式核能電廠對抗地震有高標準設計，當地震發
生可以安全快速地關閉反應器。三哩島災變證明這系統的重要性，圍阻體體避
免放射性外釋，儘管約半個爐心已熔掉的事實，此事故因機械故障和作業員糊
塗，本來爐心冷卻系統可避免發生核災但作業員把它關掉了。事故後調查認為

核能安全上的人為因素是新重點。西方的反應器沒有主要設計的改變，但在控制和儀器是做了改進，和操作訓練是被徹底檢查。

2.國際核災嚴重性分級標準

國際核災嚴重性分級：7 級是最主要核災（車諾比爾核災）；6 級是嚴重核災；5 級是遠距有核災的風險；4 級是不嚴重的核災；3 級是嚴重意外事件；2 級是發生事件；1 級是反常事件；0 級是安全上沒問題。由國際原子能總署和經濟合作與發展組織(OECD)在 1990 年發展出來，國際核災嚴重性分級（INES）使核子核災和事件標準化。分級由 0 級的無安全問題到 7 級的車諾比爾核災。三哩島災變是 5 級雖無人受傷但遠距有核災風險。在 1980 年法國發生 4 級是建造時有災變，另一個 4 級是在 1999 年 9 月日本核燃料製造廠的災變。

3.國際上努力改進核能安全

車諾比爾核災不久，IAEA 馬上就升高核能電廠安全的重要性，特別是對仍然缺乏核能電廠安全的一些東歐區域。國際援助計畫加強對早期俄製反應器的安全性。用西方安全標準，或完成對核能電廠和它們的操作做顯著性改善。要克服在俄羅斯和立陶宛仍在運轉 RBMK 型反應器的缺陷，也已做修正。關於其它事項，是降低對正向無效系數反應的危險性。

4.恐怖主義

自從 2001 年紐約世界貿易中心攻擊事件，大家開始關注於一架飛機被用來攻擊一個核子反應器，目的是釋出放射性物質。各方面從事研究關於這種對核電廠攻擊的可能性。這些研究顯示核子反應器對這攻擊比國家的其它設施具相當抗性。美國能源部顧問專家透過美國電力研究中心做了詳細研究，結論是當大型商用飛機撞擊，美國反應器的構造夠堅固和燃料將可以受到保護。相同地，這些大型構造意思是就算在一個廠內（它們會保護好）受到任何恐怖攻擊，也不會造成任何嚴重的放射性外釋。

【附註資料來源從”Chernobyl Fact File” produced by NucNet in cooperation with the UK Dept. of Trade and Industry, Ed. By J. Shepherd, D. Dalton, L. Green, Peter Bucher. 24 April 2006。】