

世界各先進國家核子反應爐簡介

作者 陸軍化學兵學校少校教官劉衛蒼

提要 >>>

- 一、核電廠的設計因時空條件有所不同，建造之核電廠均結合當時最新科技建造，憑藉多層屏障安全設計，來確保核電廠運作安全。
- 二、緊急應變計畫區是因應萬一發生核子事故，須採取先期防護行動，甚或疏散民眾而設計。我國以發生反應爐爐心熔燬事件為基本假設，經由專家利用程式分析與評估，3座核能電廠緊急應變計畫區劃定均以核電廠為中心周圍半徑5公里之區域；但因應此次日本福島核電廠狀況，原能會預計重新調整緊急應變計畫區範圍。
- 三、「他山之石，可以攻錯」，日本福島核災事故使得世人對核電廠產生恐懼與害怕，但在尚未出現更有效的替代能源之際，如何創造「核安家園」及教育民眾認識核能，瞭解核電，可以減少因無知所帶來的恐懼。
- 四、核災處置是國軍化學兵部隊執行的任務之一，平時應致力於核災戰備整備，當面臨核災時才能立即投入應援任務，不負國人對國軍的期望。

關鍵詞：核能、核電、核電廠、核電安全、圍阻體

前言

日本於2011年3月11日14時46分發生

芮氏地震儀9級強震，造成福島核一廠反應爐一連串災情，令人難以置信的核災浩劫更引起周邊國家及全世界人民的恐慌。



鑑於我國與日本同處於地震頻繁的板塊上，隨時可能面臨同樣威脅，希望藉由本文提供讀者瞭解核能發電的特色、核能電廠的安全設計、各式核反應爐的型式、世界各先進國家的核能發展，以及我國核災緊急應變計畫，使國人認識核能，減少因無知所帶來的恐懼。

核能發電特色

核能就是核分裂時所放出的能量。核分裂時可產生極大的能量，核能發電運作主要是利用中子來撞擊鈾的原子核，以控制棒調節鈾燃料分裂的連鎖反應，當鈾原子核分裂時會釋放出大量的能量，這些能量可以使液態水轉換成水蒸氣，再由水蒸氣推動發電機，即可發電。核分裂的過程，新產生的分裂原子核的總質量會較分裂前的原子核總質量輕一些。這減少的部分質量就是核能的來源。

核分裂時能釋放出多少能量是依據1905年愛因斯坦所提出的理論 $E=mc^2$ 計算，公式中的E為能量，m為質量，而c則為光速，質量與能量為一體兩面，兩者之間是可以互換的。質量轉換產生的能量非常巨大，若以1公克的質量轉化所釋放的能量，相當於16萬公噸黃色炸藥的爆炸威力，或約可讓100瓦特的燈泡點亮3萬年¹。

核電廠安全設計

核能電廠安全設計是採取

「多重屏障」觀念，確保運轉安全。所謂多重屏障²，是將放射性物質置於層層安全屏障之中，以阻止放射性物質與外界環境接觸。多重屏障的邏輯如下：縱使第一層屏障因故而失效，還有第二層屏障可提供安全保護；如第二層屏障也失效，還有第三層屏障、第四層屏障及第五層屏障提供多重屏障安全保障（如圖一）。多層屏障的目的，是要把核能電廠發生核子事故的機會及其產生的影響降到最低的程度。各層屏障的設計重點概述如下：

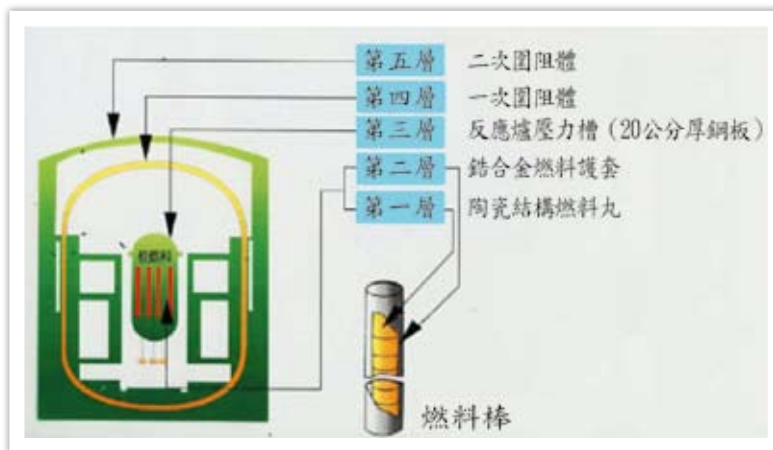
一、燃料丸

燃料丸外形如半吋長粉筆般大小的圓柱體，是由高密度陶瓷結構的二氧化鈾製成，可將大部分的核分裂產生的輻射物包封其內，只有小部分的氣態分裂產物，會逸出燃料丸外。

二、燃料護套

燃料丸串疊在特製的鋁合金燃料護套裡，兩端封閉，稱為燃料棒，逸出燃料丸

圖一 核能電廠多重屏障安全設計



資料來源：<http://wapp4.taipower.com.tw>

1 資料來源：台電公司。

2 資料來源：<http://wapp4.taipower.com.tw>

的氣態放射性物質，會被包封在燃料護套內。

三、反應爐壓力槽

反應爐壓力槽是以20公分厚特殊鋼料製成，能耐高溫高壓的大容器。燃料就在這壓力槽中，若放射性產物因燃料護套損壞而逸出，仍被包容在壓力槽內。

四、鋼筋水泥圍阻體（又稱一次圍阻體）

若反應爐壓力槽破漏時，內襯鋼板的水泥圍阻體可以封閉從反應爐壓力槽散逸出來的放射性物質，不致洩漏出去。

五、反應器廠房（又稱二次圍阻體）

為鋼筋水泥作成的建物，將鋼筋水泥圍阻體包封在裡面，壓力比外面大氣壓力低，萬一有放射性產物洩漏至反應器廠房內，排放外界的氣體須經特殊的處理設備，過濾其中的輻射物質，不致直接逸散到空氣中。

核反應爐型式³

核能發電雖源自相同的物理現象，卻有不同的工程設計。以下約略介紹目前商業運轉以及未來有可能加入商轉的核能發電機組。

一、輕水式反應器

輕水式反應器是利用鈾-235 分裂反應所產生的能量，將水加熱使其變成蒸氣，再推動汽輪機與發電機來發電，而核分裂產生的能量則來自分裂後損失的質量，利用這種原理來發電，還須透過很精緻而複雜的工程技術。目前世界上數量最多的核能發電機組便是輕水式核電廠。

（一）沸水式反應器BWR

沸水式反應器係利用水作為反應器的冷卻劑與緩和劑，使水直接在反應器爐心內沸騰，發生蒸氣，以供發電或產生動力的核能電廠之用；沸水式反應器因冷卻劑直接在反應器內沸騰產生蒸氣，並直接利用產生的蒸氣推動汽輪機（如圖二）。所需的熱交換器，冷卻劑泵及輔助設備的數目較少，建造較簡單，價格也相對便宜。沸水式反應器唯一的缺點為反應器內的放射性，容易被蒸氣帶入蒸氣機等產生動力的設備，因此，在屏障設計上較複雜。而福島第一核電廠1號反應爐至6號反應爐及我國的核一廠與核二廠皆屬此型反應器設計。以下就福島第一核電廠及國內核一廠機組概述之。

1.福島第一核電廠，座落在福島縣雙葉郡大熊町及雙葉町，擁有6部沸水式反應器（如表一）。1號機為沸水式反應器第3型（BWR 3）、2～5號機為沸水式反應器第4型（BWR 4）、6號機為沸水式反應器第5型（BWR 5）。基本上，這三型沸水式反應器的設計非常類似，而第4型與第5型可以視為標準化的機組。

2.我國核能一廠所採用的機型亦為沸水式反應器第4型，商轉時間亦與福島一廠的3～5號機非常接近（我國核電廠基本資料詳如表二）。其中圍阻體設計是確保核電廠安全的重要屏障，也是最後一道保護裝置。

3.福島第一核電廠1～5號機的圍阻體設計為所謂的馬克1型（Mark I）（如圖三），與臺電的核一廠類似。馬克1型圍阻體曾招致批評⁴：其設計，若反應爐過

3 資料來源：<http://wapp4.taipower.com.tw>

4 李威翰譯，〈電廠反應爐 GE設計有問題〉，法新社，華盛頓2011/03/18。



熱，蓄積氫氣，引發的爆炸可能會讓圍阻體損燬，原本的設計並未考慮冷卻劑喪失時可能發生的動態負載，機體是否有能力讓圍阻體通風，避免氫氣蓄積。另馬克1型用來存放廢燃料棒儲存池設置位置，並非在一次圍阻體的保護範圍外，即減少一層安全屏障。

(二)壓水式反應器PWR

目前世界上數量最多的便是壓水式核電廠，壓水式反應器是美國與蘇聯用於核子潛艇而發展。其分裂反應原理、燃料棒設計、緩和劑功能、壓力槽與圍阻體之作用等都與沸水式核反應器類似。兩者間最大的差別是壓水式反應器在水加熱成蒸氣的過程中採用了兩套迴路，在壓水式反應器中的「主迴路」冷水經過爐心加熱後

維持較高的壓力，使通過爐心的水只增加溫度但不變成蒸氣，熱水送至「蒸氣產生器」中把熱量傳給「次迴路」的水後變成冷水再送回爐心；而次迴路的水則會被加熱成蒸氣去推動汽輪機，用過的蒸氣再經海水冷卻後重複使用，這種設計可以確保汽輪機使用的蒸氣絕無核分裂反應所產生的放射性物質，但因系統較為複雜，故運轉與維護也較沸水式反應器麻煩（如圖四）。

另壓水式反應器的控制棒設在壓力槽上端，由上向下抽插，比起沸水式反應器由下往上的設計在運作與保養上較為方便。國內核三廠即為此型反應器。

(三)進步型沸水式反應器

由美國奇異公司與日本東京電力、

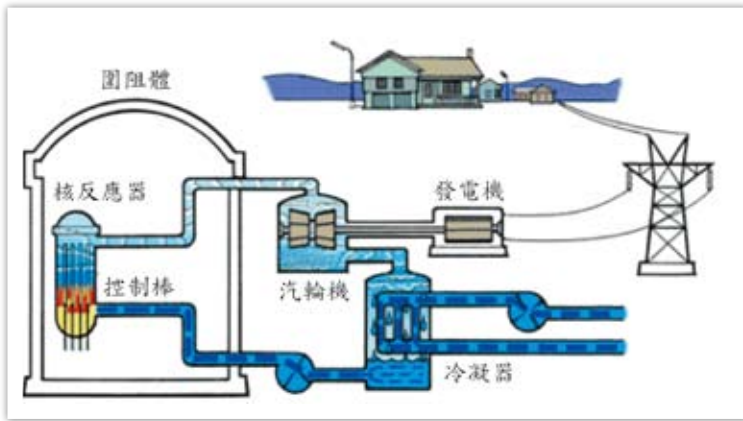
表一 日本福島第一核電廠基本資料⁵

單 位	反 應 器 型 式	圍 阻 體 型 式	商 業 運 轉	電 力
1號機	奇異公司 沸水式第3型	馬克1型	1971/3/26	460百萬瓦
2號機	奇異公司 沸水式第4型	馬克1型	1974/7/18	784百萬瓦
3號機	東芝公司 沸水式第4型	馬克1型	1976/3/27	784百萬瓦
4號機	日立公司 沸水式第4型	馬克1型	1978/10/12	784百萬瓦
5號機	東芝公司 沸水式第4型	馬克1型	1978/4/18	784百萬瓦
6號機	奇異公司 沸水式第4型	馬克2型	1979/10/24	1,100百萬瓦
7號機（計畫階段）	進步型 沸水式反應爐		2016年10月 （現已取消）	1,380百萬瓦
8號機（計畫階段）	進步型 沸水式反應爐		2017年10月 （現已取消）	1,380百萬瓦

資料來源：<http://zh.wikipedia.org>

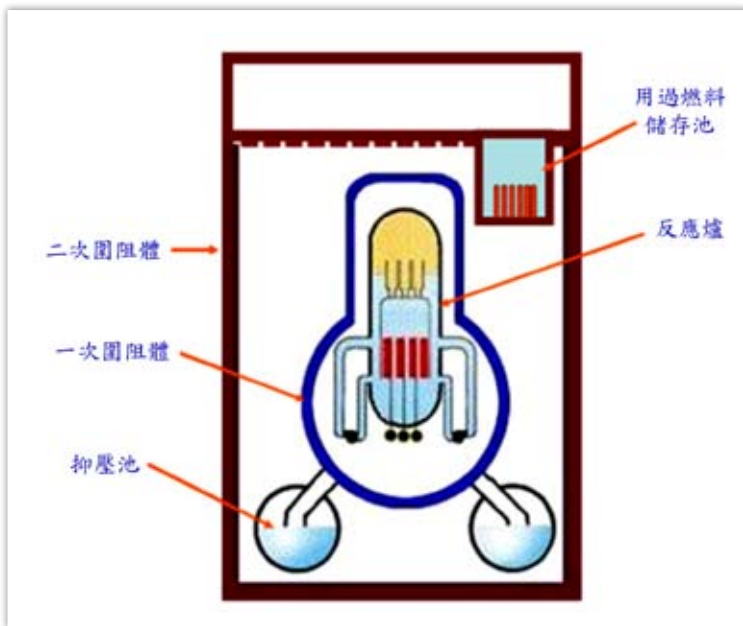
⁵ 資料來源：<http://zh.wikipedia.org>

圖二 沸水式反應爐示意圖



資料來源：<http://wapp4.taipower.com.tw>

圖三 馬克1型圍阻體型式示意圖



資料來源：http://www.aec.gov.tw/www/fukushima/index_07_2.php

日立、東芝等公司在1990年代共同發展的最新設計。改良沸水式反應爐，在反應器設計、安全系統、儀控系統、工作人員輻射防護及廢料減量等各方面提升性能。

二、重水式反應器

由加拿大設計出來的一種反應爐（叫做CANDU），這種反應爐使用高壓重水（即氧化氘 D_2O ）作為冷卻劑及中子緩和

劑，採用天然鈾為燃料。這種反應爐的核燃料不是裝在單一壓力管道中，而是裝在幾百個壓力管道中。該反應爐使用天然鈾作為核燃料，是一種熱中子式核反應爐，它可以在輸出功率開到最大時添加核燃料，因此，能高效利用核燃料（因為可作精確控制）。大部分高壓重水式反應爐都位於加拿大，部分出售到阿根廷、中國大陸、印度、巴基斯坦、羅馬尼亞和南韓等國。

三、氣冷式反應器

以中純度濃縮鈾-235做為燃料，氦氣或二氧化碳做為冷卻劑，石墨做為中子緩和劑，這種反應器成本低、效率高，英國大部分的核能電廠都採用這種型式。

四、石墨緩輕水式反應器（RBMK）

為前蘇聯共產國家獨特發展使用，和美國所發展的輕水式反應器最大的不同，在於使用輕水通過爐心作為冷卻劑，但是卻沒有中子緩和劑的功能，而是使用石墨作為中子減速的材料，這種反應器可以在運轉時更換核燃料，可以比較經濟的利用核燃料，但是由於石墨會引起燃燒，再加上沒有圍阻體的設計，容易發生類似俄羅斯車諾比爾電廠的核子事故。

五、快滋生式反應器（FBR）

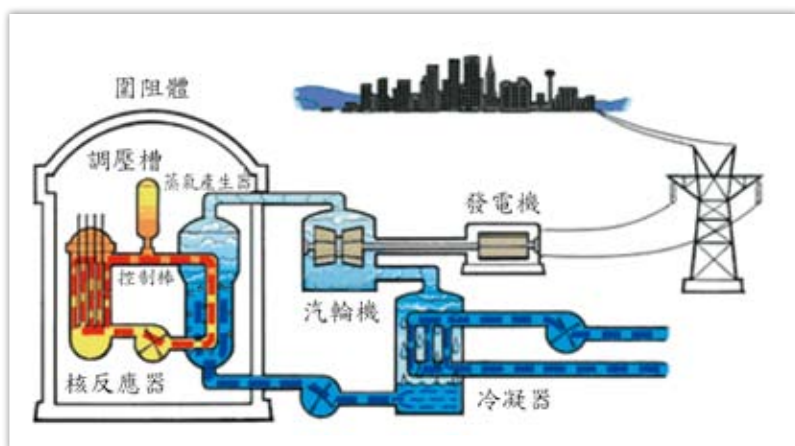
滋生式反應器即是在此反應器中不但消耗可分裂燃料，同時也產生新的可分裂燃料，而且產生的新燃料比其所消耗的為多；滋生式反應器因不需使用緩和劑將其所分裂時釋放之快中子減速至熱中子，僅藉冷卻劑和其他反應器材將中子減能至

表二 我國核電廠基本資料⁶

位 置	新北市石門區		新北市萬里區		屏東縣恆春鎮		新北市貢寮區	
額 定 熱 功 率 (百萬瓦MW)	1,775		2,894		2,785		2,700	
額 定 發 電 量 (百萬瓦)	635		985		951		未定	
反 應 器 型 式	奇異公司 沸水式第4型		奇異公司 沸水式第6型		西屋公司 壓水式3迴路		奇異公司進步型 沸水式反應爐	
發 電 機 廠 商	西屋公司		西屋公司		奇異公司		日立公司	
圍 阻 體 型 式	馬克1型		馬克3型		鋼筋強化 混凝土型		鋼筋強化 混凝土型	
機 組	1號	2號	1號	2號	1號	2號	1號	2號
商 轉 日 期	1979 01 05	1979 09 06	1981 12 28	1972 03 15	1984 07 27	1985 05 18	未定	未定

資料來源：<http://www.cv.nctu.edu.tw>

圖四 壓水式反應爐示意圖

資料來源：<http://wapp4.taipower.com.tw>

0.05~0.1 百萬電子伏特範圍之內。故滋生式反應器通常被稱為快滋生式反應器，但目前並未正式加入商業運轉的行列。日本的文殊反應器及法國的超級鳳凰反應器，由於一次側流體採用液態鈉，因此，

又被稱為液態金屬快滋生式反應器，此型反應器是未來最有可能加入商業運轉之滋生式反應器。

各國核能發展

根據世界核能協會統計，目前全球有588個核子反應爐，負責供應全球約15%電力，運轉中有441個，建造中有30個（如表三）。現分別就我國、美國、法國、中國大陸、日本等國家介紹其核能發展狀況。

一、我國

我國目前有6部核能機組運轉中，2部機組興建中，核能電廠的裝置容量為5.1百萬瓩瓦（GW），核能發電比例約占全國總電力的20%。在2008年的發電量結構

6 資料來源：<http://www.cv.nctu.edu.tw>

當中，火力發電占發電量70%，自主發電能源（含核能及再生能源）僅約占22.6%，其中核能占20.8%。我國的人口約占世界人口0.3%，但溫室氣體排放量在2006年卻占全球排放約1%，故二氧化碳人均排放量高居世界前幾名，因此，我國

將核能作為無碳能源的選項之一。

二、美國

美國為全世界最大核能發電國，共有104部機組100.6百萬瓩瓦，產生近20%的全國總電力。美國自從1977年以後，就沒有新的機組興建安。在2002年美國能源部

表三 各國機組狀況統計表⁷

國 家 名 稱	運 轉 中	建 造 中	核能發電量 (GWh)	核能發電比例 (%)
中 華 民 國	6	2	74,718	19.5
美 國	104	0	787,219.8	19.42
法 國	58	0	428,700	78.07
中 國 大 陸	13	4	51,845	1.94
日 本	55	1	291,541.8	29
南 韓	20	2	141,178.7	38.6
印 度	19	6	15,593.87	2.62
巴 基 斯 坦	2	1	2,547.9	2.74
加 拿 大	18	0	92,398.45	15.8
墨 西 哥	2	0	10,399.94	4.86
阿 根 廷	2	1	7,153.3	6.93
巴 西	2	0	13,769.41	3.31
比 利 時	7	0	44,314.32	54.44
英 國	19	0	69,237	18.4
德 國	17	0	158,709.5	31.82
芬 蘭	4	1	21,999	27.99
荷 蘭	1	0	3,269.622	3.47
西 班 牙	8	0	57,431	19.82
瑞 典	10	0	65,053.93	47.98
瑞 士	5	0	26,372.93	37.41
保 加 利 亞	2	2	16.04	44
捷 克	6	0	24,498.7	31.48
匈 牙 利	4	0	12,508.17	37.69
羅 馬 尼 亞	2	0	5,177.957	9

7 資料來源：行政院原子能委員會核能管制處編，《世界核能發電機組手冊（第三版）》，2011年3月。



立陶宛	0	1	7,944.6	72.29
烏克蘭	15	2	84,814	47.53
斯洛伐克	4	0	16,599.27	57
斯洛維尼亞	1	0	5,289.475	40
亞美尼亞	1	0	2,421.617	41.95
俄羅斯	32	6	144,300	15.91
南非	2	0	10,074.15	4.4
伊朗	0	1	0	0
總計	441	30	2011年發電概況	

資料來源：行政院原子能委員會核能管制處編，《世界核能發電機組手冊（第三版）》，2011年3月。

啟動「核電2010計畫」興建設計新電廠，提出全球核能夥伴計畫，其目標為與具有先進核能和平利用計畫的法、日、俄等國合作，開發新反應器及核子燃料循環的技術。

三、法國

法國有58部機組共63.3百萬瓩瓦容量，為全世界第二大核能發電國，僅次於美國；惟其核能發電占比（2007年為77%）為世界第一。迄今法國已成為世界最大的淨電力輸出國。因此，電力為法國第四大輸出項目，法國電力公司（EDF）將其總發電量的15%出口至鄰近各國，成為世界第一的電力出口國。法國2005年通過的能源法，除明確宣示積極持續支持再生能源發展外，亦指出為提供穩定的生產電力及減少溫室氣體排放量，法國能源政策法仍維持核能的選擇架構。

四、日本

日本為全世界第三大核能發電國，僅次於美、法。目前有55部機組共47.6百萬瓩瓦容量，提供全國30%的電力，若扣除核能發電，電力自主率僅約4%。日本2006年公布國家能源新戰略及核能立國計畫大綱，明述主要目標在於實現全球能源

永續發展及確保日本能源供應安全，相關核能具體內容包括(一)提高現有輕水式反應器的運轉效率，建議提高核能發電占全國總發電量比例至30%，甚至40%以上；(二)投資新建、擴建和改建核能電廠；(三)2006年起建造第2座放射性廢棄物處置廠；(四)將快中子滋生反應器示範建造、試運轉日期提前至2025年。

五、中國大陸

中國大陸核能發電技術發展雖僅約20年，但近幾年強力表現其企圖心。舉凡核電技術研發、設備製造、工程設計、工程建設、專案管理及營運管理等方面，皆已具備相當的基礎與實力。自從1994年，第1座電廠運轉後，就積極推動其核能計畫；中國大陸電力需求每年以大於8%成長，2007年核能發電共626億度，其占比為1.9%，共有13部機組運轉中，裝置容量為8.6百萬瓩瓦。截至2007年8月，有4部機組正建造中。

我國緊急應變計畫區劃定

「緊急應變計畫區」是萬一發生核子事故且須採取先期防護行動，甚或疏散民眾時，我國參照世界核能先進國家作法，

以發生反應爐爐心熔毀事件為基本假設，採用準則如下：

一、設計基準事故在緊急應變計畫區外，所造成之預期輻射劑量，不超過核子事故民眾防護行動規範之疏散干預基準。

二、爐心熔損事故在緊急應變計畫區外，所造成之預期輻射劑量，超過核子事故民眾防護行動規範疏散干預基準之年機率應小於十萬分之三。

三、爐心熔損事故在緊急應變計畫區外，所造成之預期輻射劑量，超過2西弗之年機率應小於百萬分之三。

另考慮核能電廠可能發生事故及其可能導致之輻射外釋狀況，配合電廠的氣象資料、電廠周圍人口分布狀況、地形及其他必須的一些參數⁸。我國以發生反應爐爐心熔毀事件為基本假設，利用CRAC2或MACCS2程式評估事故後的劑量與風險度分布狀況，以及「核子事故防護行動指引」之劑量標準，經過專家群詳細的分析與評估，我國核能一、二、三廠「緊急應變計畫區」之範圍分別為0.5公里、1.5公

里及3.0公里。經整體考量後，3座核能電廠緊急應變計畫區均訂為「以核能電廠為中心周圍半徑5公里的區域」；另世界各國目前所採取之緊急應變計畫區範圍如表四。因應此次日本福島核電廠狀況，原能會預計調整緊急應變計畫區範圍。

結 論

核能發電所需燃料體積小、不會造成空氣污染、也不會因排放二氧化碳造成溫室效應，但其核電廠安全是民眾最擔心的事。核電廠的設計因時空條件有所不同，建造之核電廠都是結合當時最新科技建造而成，憑藉多層屏障安全設計來確保核電廠運作時安全。訂定核電廠緊急應變計畫區，在平時即須做好各項準備工作，規劃適當應變措施，並透過核安演習定期演練來訓練其核子事故緊急應變。核災處置是國軍化學兵部隊執行的主要任務之一，平時應致力於核災戰備整備，當面臨核災時才能立即投入應援任務，不負國人對國軍的期望。

表四 各國緊急應變計畫區半徑比較⁹

國 家			疏 散 區（公 里）	國 家			疏 散 區（公 里）
比	利	時	5		芬 蘭		20
法		國	5		瑞 典		12~15
義	大	利	3		瑞 士		20
西	班	牙	3		美 國		16
日		本	8~10		韓 國		3~5
荷		蘭	5		英 國		1~3.5
德		國	10		加 拿 大		10

資料來源：An International Nuclear Emergency Exercise, OECD, 1995.

8 原能會，民國95年7月17日會技字第0950020117號公告。

9 資料來源：OECD, An International Nuclear Emergency Exercise, 1995.