

GE1712 能源核電與輻射

# 車諾比爾核能電廠災變

李 敏

國立清華大學  
工程與系統科學系

# 內 容

- 前 言
- 事故流程說明
  - 背景資料
  - 事故時序
- 事故緊急應變措施
- 事故人員傷害與環境劑量評估
- 事故發生原因
- 後續措施
- 結 語

# 前言

1986年4月26日凌晨，蘇聯車諾比爾核能電廠的4號反應器發生水蒸氣及氫氣爆炸。爆炸後引起反應器內石墨的燃燒，造成大量的放射性物質外釋。蘇聯政府迅速的疏散了車諾比爾區域的5萬居民，但是並未將電廠發生災變的新聞對外發佈。

4月28日清晨，瑞典福斯馬克核能電廠偵測到電廠工作人員受到輻射污染，該電廠立即進行廠區疏散，並清查輻射污染的來源。結果發現污染來自於廠外而非廠內，同時國境內其它輻射偵測站亦發現，所偵測到的輻射強度較背景強度高了近一百倍。

28日晚上9時，莫斯科電視新聞報導中，簡短提到位於車諾比爾電廠的反應器在意外中受損。

29日早晨，蘇聯的駐外人員向瑞典及西德政府詢問撲滅石墨火災的方法，但瑞典及西德均表示沒有這一方面的經驗，建議蘇聯去找較有經驗的英國人。

29日凌晨，美國將軍事用情報衛星調整軌道，航經車諾比爾上空以觀察電廠狀況。衛星照片顯示反應器屋頂已經不見，且反應器內石墨殘餘物仍在冒煙，但廠區其它三部機組仍完好未受損。

## 前言(續)

4月30日，蘇聯重申只有兩人在意外中死亡，可是有197人住院，但其中49人已經出院，並表示電廠的輻射外釋狀況在持續改善中，水源並未遭到污染，同時以照片顯示廠區的石墨燃燒已經撲滅。

5月1日，美國衛星照片證實石墨燃燒已經停止，至此車諾比爾核能電廠災變已經獲得控制。

整個事故過程中，因蘇聯政府不主動提供消息，故西方國家對車諾比爾災變的嚴重程度頗多臆測。

1986年8月，蘇聯政府派了一個28人的代表團赴維也納的國際原子能總署，在五天會議中對車諾比爾災變的前因後果作了毫不保留的交代。

# 事故流程說明

## 背景資料

車諾比爾核電廠採用石墨水冷式反應器 (RBMK) 型。

車諾比爾核能電廠的廠房採雙機組式設計。

反應器以輕水當作冷卻劑，石墨為中子緩和劑；並利用氦氣和氮氣冷卻石墨減速中子時所吸收的能量。

反應器熱功率輸出為3200百萬瓦，發電量為1000百萬瓦。

反應器的石墨堆直徑為12公尺(包含1公尺厚石墨反射體)，高為8公尺(包含上下50公分的石墨反射體)。

1681根壓力管垂直分佈於石墨堆中。

鋁合金壓力管直徑為8.8公分。每根壓力管內有18根的鈾燃料棒，冷卻水自壓力管通道，用以移除核分裂所產生的熱量。

反應器有兩套獨立不能互通的冷卻水循環迴路。

通往各個壓力管的管路上裝有調節閥，能夠配合熱功率輸出的變化，  
調控冷卻水的流量。

# 事故流程說明

## 背景資料(續)

車諾比爾核能電廠四號機組(配備第七、八號發電量，各500百萬瓦的渦輪發電機)於1983年12月正式運轉。

1986年4月25日的計畫停機是例行性的中級保養，研究人員打算利用這一機會進行第八號渦輪發電機的慣性減速試驗。

試驗的目的是要釐清渦輪發電機在蒸汽停止供應之後，渦輪發電機的轉動慣量，是否可以在備用柴油發電機啟動之前，提供廠內的緊急電源。

車諾比爾電廠曾經做過這類型的試驗，結果發現電壓下降的速率，比研究人員所預期的來的快。

這次的試驗，要測試一個特殊的發電機磁場調整器，來克服電壓急遽下降的問題。

# 事故流程說明

## 事故時序

**4/25/1986, 01:00 am**

四號機組準備進行中級保養，機組從滿載3200百萬瓦熱功率開始降載。

**4/25/1986, 13:00 pm**

第七號渦輪發電機解聯，廠內電源轉由第八號渦輪發電機供應，此時反應器輸出熱功率為1600百萬瓦。

**4/25/1986, 14:00 pm**

依試驗程序操作，關掉緊急爐心冷卻系統。但接獲負載管理中心的通知，電力需求增加，機組必須維持運轉。反應器輸出熱功率維持在1600百萬瓦九個小時。運轉人員在控制室枯坐，等候進一步的通知。

**4/25/1986, 23:10 pm**

負載管理中心通知，可以停機。運轉人員準備降功率至700~1000百萬瓦。

# 事故流程說明

## 事故時序(續)

**4/26/1986, 0:28:00 am**

運轉人員操作失誤，功率驟降到30百萬瓦。功率短時間內的大幅降低，使得反應器內累積大量的氙原子核，大量吸收中子，反應器無法維持臨界運轉員將控制棒大量抽出，以提升功率。

**4/26/1986, 1:00:00 am**

反應器功率穩定於200百萬瓦，低於法規的要求。反應器爐心內尚有約等於6-8根全長之控制棒，遠低於法規低限要求之15根。

**4/26/1986, 1:19:00 am**

運轉人員完成實驗準備工作。

**4/26/1986, 1:23:00 am**

反應器功率穩定於200百萬瓦，準備開始實驗。運轉員切斷汽機跳脫而導致反應器急停的訊號，準備在實驗失敗時，可以再重做一次。運轉員手動跳脫8號汽機。

# 事故流程說明

## 事故時序(續)

**4/26/1986, 1:23:31 am**

因反應度的正空泡回饋，總反應度及功率始爬升，功率在5秒內，驟升500倍。

**4/26/1986, 1:23:40 am**

運轉人員按下急停按鈕。

**4/26/1986, 1:23:44 am**

因控制棒設計不當，及特殊之功率分佈，控制棒剛插入時，反應度不降反升，造成功率持續快速上升。

**4/26/1986, 1:23:48 am**

水蒸汽爆炸<sup>☛</sup>，不久傳來第二次爆炸聲，反應器解體。爆炸後引起反應器內石墨的燃燒，大量放射性物質外釋。

# 事故緊急應變措施

事故發生後，早期的處置目標主要是抑制石墨燃燒，以防止更多的放射性核種自破損的爐心外釋。

採行空投大量滅火材料到爐心的方式救災。

首先，投入40噸的碳化硼，防止反應器再度達到臨界狀態。

接著再投入800噸的石灰石以吸收爐心石墨燃燒所釋放的能量，並利用其遇熱會產生大量二氧化碳的特性，隔絕石墨燃燒所需的氧氣供輸。

緊接著又投入2400噸的鉛，鉛吸熱融化形成液態鉛層，以阻絕輻射線穿透，達到屏蔽的輻射效果。

最後，投入砂和泥土滅火，同時作為過濾介質，以吸附放射性物質懸浮物。這些覆蓋反應器的滅火材料，在短時間內效果還不錯，但隨著時間的拉長，由於滅火材料的阻擋，和大氣自然對流的減少，熱量無法有效排出，爐心溫度於是逐漸升高。

為解決爐心持續高溫的難題，專家於是安裝液態氮氣冷卻系統，把加壓的液態氮打入反應器底部，吸收爐心累積熱量，再由爐心上方流到大氣中以降低爐心溫度。

## 事故緊急應變措施(續)

為加強熱移除，於是在反應器廠房基座底部建造一套暫時性平臥式熱交換器，作為額外的熱移除機械裝置。整個工作在六月底完成，熱移除效果良好。

為防止放射性物質自解體的廠房外釋，蘇聯政府再損壞的反應器外建構一允久性的覆蓋結構。

蘇聯政府迅速的疏散了車諾比爾區域的5萬居民。

自1986年4月27日至8月中旬，大約有116,000位居住在核電廠週圍的民眾，疏散撤離家園以減少輻射曝露，總面積2800 km<sup>2</sup>的高劑量區被劃定為「禁制區」；事故發生後數年，再撤離220,000人置汙染較低的區域，「禁制區」擴大為4300km<sup>2</sup>。

## 事故人員傷害與環境劑量評估

車諾比爾災變中，放射性物質外釋的量非常的龐大。包括3~4%的燃料碎片，100%的惰性氣體，與20~60%的揮發性核種。燃料碎片的外釋，是由事故初始時的爆炸所造成的。RBMK反應器，石墨於事故中火燃燒，溫度高達5000度。在長達數天的燃燒中，造成大量的揮發性核種外釋。

事件發生後，為數237位職業工作者，因輻射曝露引發臨床上之併發症而住院，經診斷有134例屬於急性輻射之確定效應。134位病患中，有28人在最初三個月內死於輻射傷害，另有三位死於與輻射非相關的疾病。11位病患由於接受大於10戈雷之劑量，而引發消化道之傷害。1987~2004，另有19位死亡，但其死因與輻射傷害的確定效應無關。

在1986~1987年參與清除與善後工作的二十萬人平均劑量100毫西弗，其中約有10%超過250毫西弗，幾個百分比的人超過500毫西弗。

自禁制區撤離的116,000民眾中，低於10%的人接受超過50毫西弗（為台灣背景劑量的25倍）的劑量，低於5%的人接受超過100毫西弗劑量<sup>12</sup>

## 事故人員傷害與環境劑量評估(續)

受輻射響地區小孩甲狀腺癌的明顯增加，是車諾比爾災變中，唯一可以清楚確定的輻射健康效應，至1995年底，共發現約800例的15歲以下兒童甲狀腺癌病例。事故發生時已出生及事故後六個月內出生的小孩，其甲狀腺癌上升極明顯，但事故後六個月才出生的小孩，其甲狀腺癌罹患率與未受曝露民眾相同。

由於劑量預估的不準確，車諾比爾災變所造成之甲狀腺癌的病例是否會持續增加，尚很難預料。

血癌是與輻射曝露主要相關的疾病。由日本原子彈爆炸倖存者和其他研究顯示，輻射引致血癌致死的機率不大。據估計居住在污染區與禁制區內的710萬居民中，會有470個因輻射而引發血癌的病例。但710萬的人口中，因其他原因引發血癌的病例為25,000個，故從統計學上來說無法確切估計輻射的影響。

據估計，居住在污染區與禁制區內的710萬居民中，會受車諾比爾災變中所釋出之放射性物質的影響，將在事故發生後的85年內多出6600個致死癌症，但710萬居民中，因其他原因發生死亡癌症的病例為87萬個。

# 事故發生原因

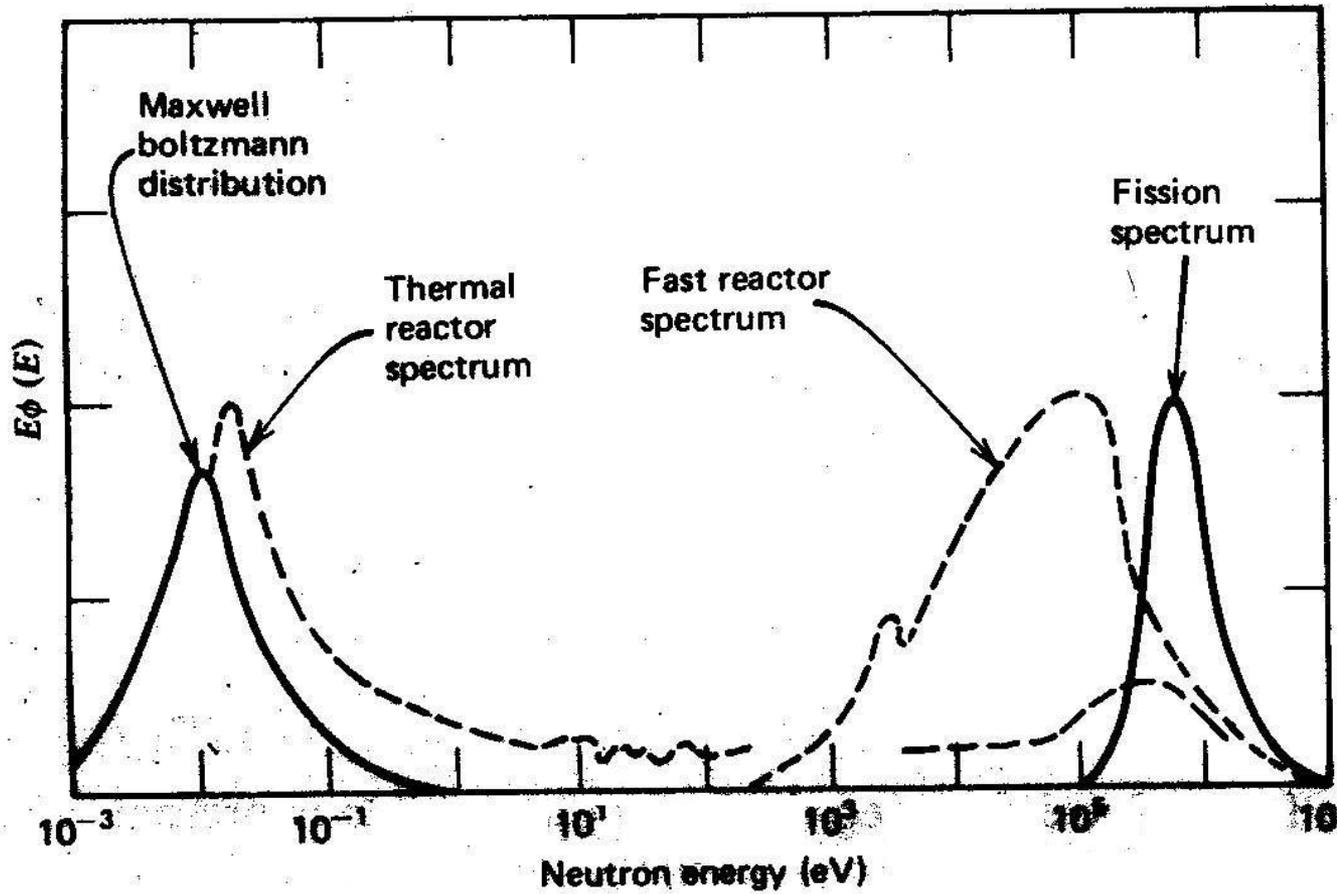
- 設計不當，包括反應度空泡回饋為正值，及控制棒的設計缺陷。
- 運轉人員不了解反應器的核工特質。
- 嚴重違反運轉規範，將反應器至於低功率狀態，並將控制棒抽出超越下限值。
- 反應器處於非常態之運轉，實驗程序未經核能專業核可。
- 蘇聯當初為何會選擇發展這一類型反應器的理由：
  - ❶ 這一類型的核反應器使用石墨當作緩和劑，因此有較多的中子在鈾-238的中子共振吸收區被吸收，產生較多的鈾-239，可用以製造核武器；
  - ❷ 這一類型反應器可以在運轉中抽換燃料，無須停機，如此可以使得鈾-238的生產更有效率；
  - ❸ 二次大戰後的蘇聯尚沒有能力與技術建造輕水式反應器所需要的大型壓力槽，而石墨水冷型反應器只需小口徑的壓力管既可，因此較適合蘇聯的技術水準。

# 事故發生原因

- 車諾比爾核能電廠使用的為 “熱中子反應器”，其功率的高低與熱中子的數目成正比。
- 核分裂反應產生的中子為快中子，快中子與緩和劑碰撞減速成為熱中子。
- 快中子在減速過程中須經過 “共振吸收區”。
- 當反應爐心受到干擾，核分裂速率加快，功率上升，燃料溫度上升；都普勒效應會造成共振尖峰中子吸收能力的上升，即熱中子數目會減少；使核分裂速率減緩。  
-- 此燃料回饋效應為負值
- 當緩和劑(或爐心內質量數較低之核種)的數目增加時，快中子有較大的機會減速成為慢中子(減速效應)；但慢中子亦有較大的機會被緩和劑吸收(吸收效應)，無法造成核分裂反應，持續產生更多的中子。兩個效應何者為強，與反應器的組成有關。

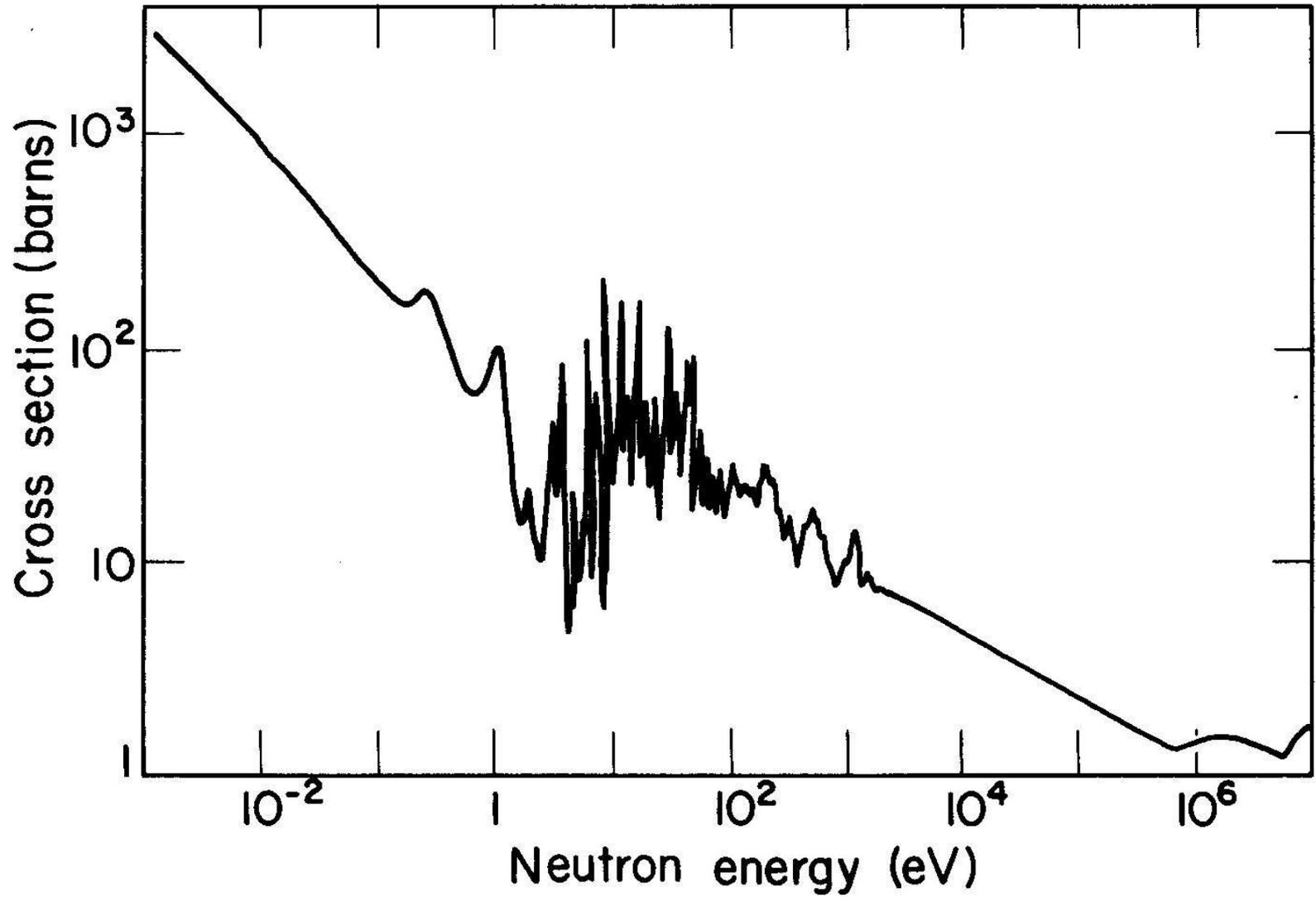
# 事故發生原因

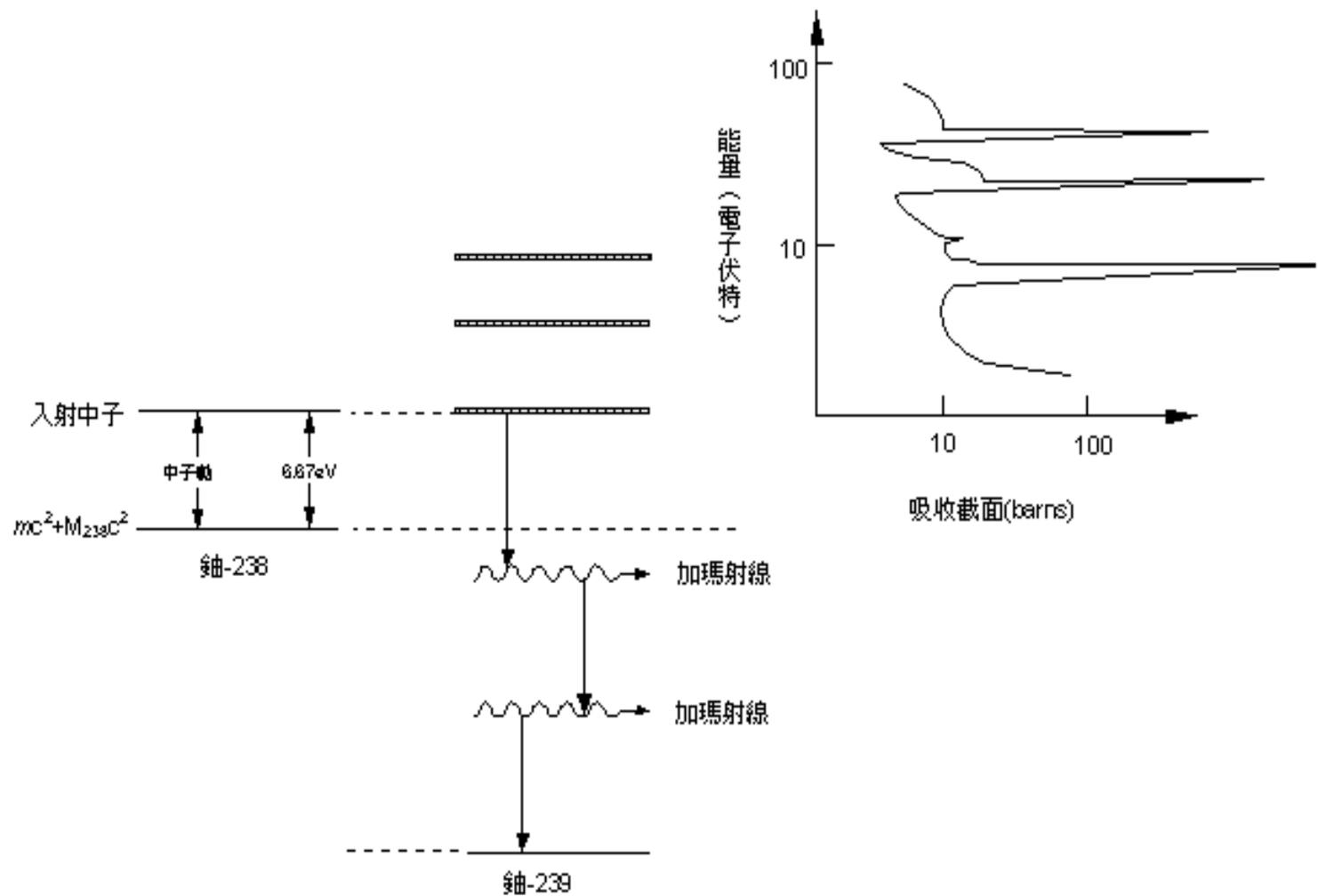
- 當反應爐心受到干擾，核分裂速率加快，功率上升，緩和劑(或冷卻劑)溫度(或水蒸汽比例)上升；緩和劑(或冷卻劑)的密度降低，存在於爐心之緩和劑(或冷卻劑)的數目減少；此數目的減少會造成核分裂速率的加速或減緩與反應器的類別有關。
- 輕水式反應器使用普通水作為緩和劑及冷卻劑，普通水密度降低時其減速效應大於吸收效應，故會造成核分裂速率的減緩。  
--- 此緩和劑回饋效應亦為負值
- 石墨水冷反應器以石墨為緩和劑，普通水為冷卻劑；當反應爐心功率上升，石墨的密度不會有大幅度的改變，但水的密度會因吸收較多的熱而有大幅度的改變；故整體來說吸收效應大於減速效應，會造成核分裂速率的加速。  
---此緩和劑回饋效應為正值
- 在低功率運轉時，石墨水冷反應器燃料與緩和劑回饋效應的總和為正值。



**FIGURE 1-5** Typical neutron flux spectra.

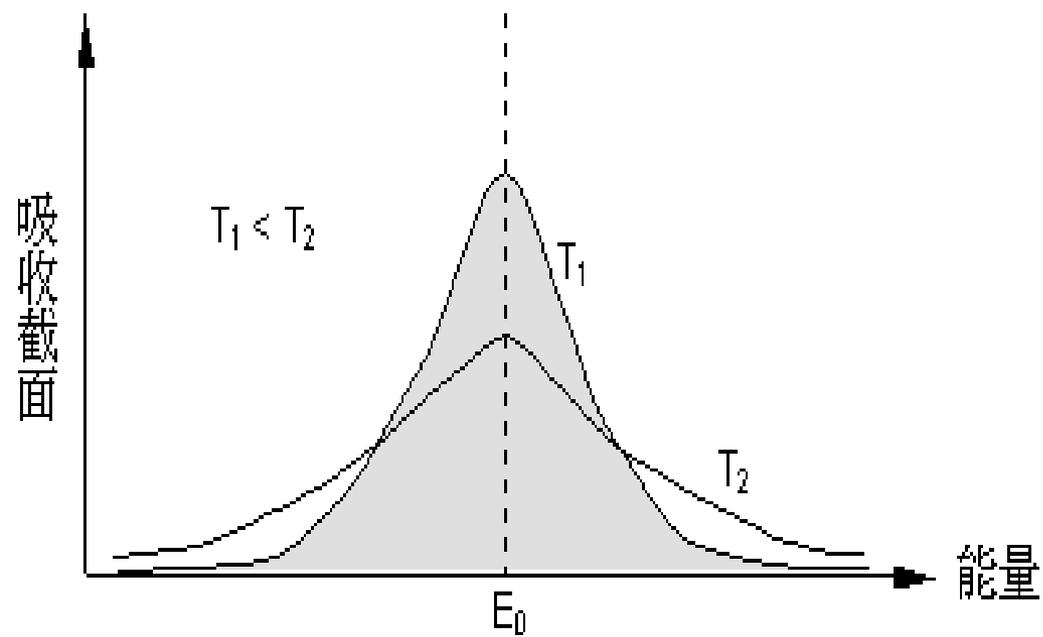






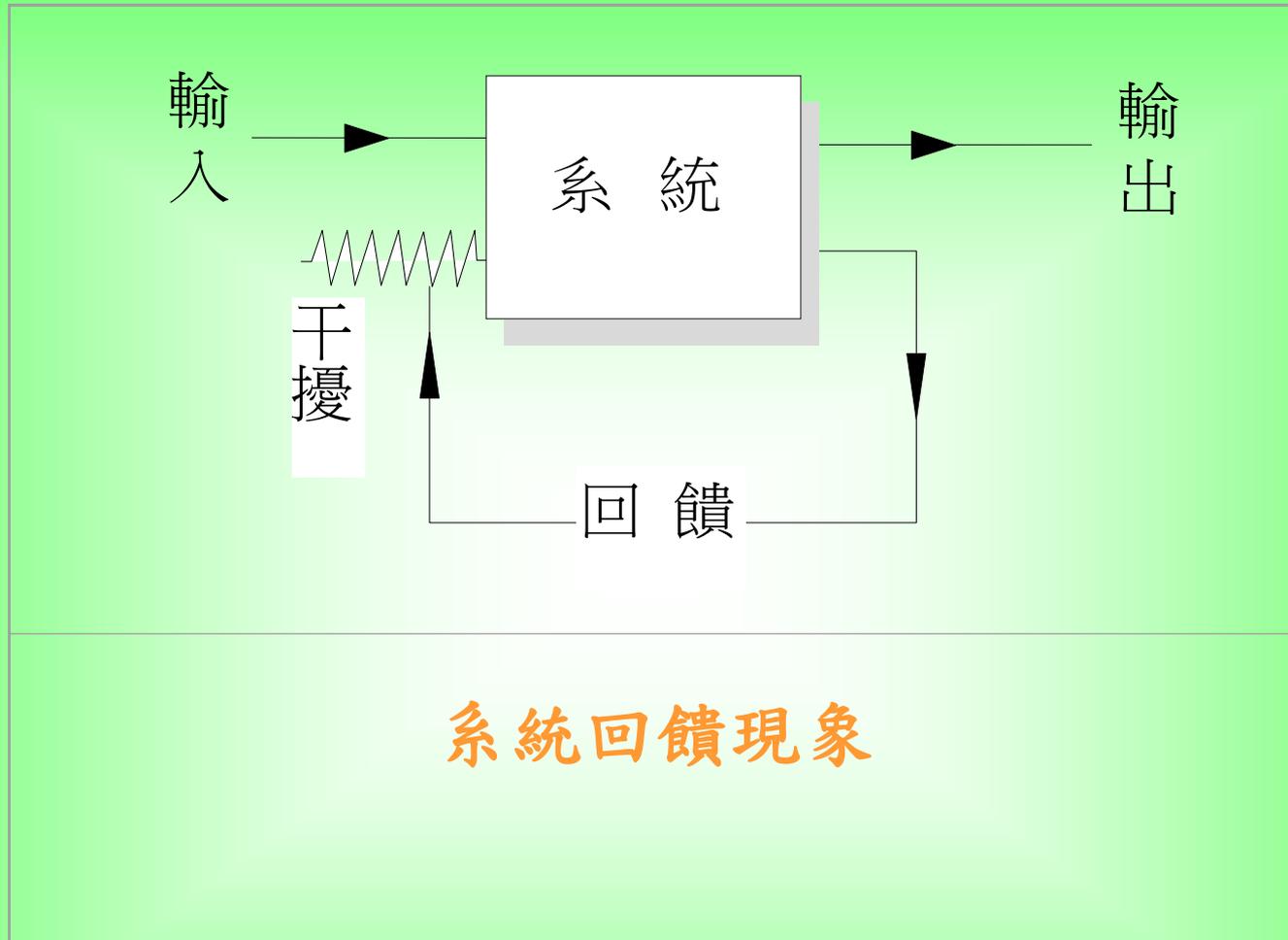
圖附 1.8：鈾 238 物質其 6.67 電子伏特能量區之共振吸收能階示意圖。





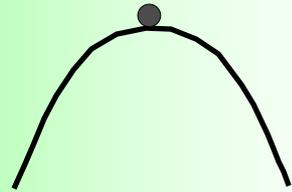
圖附 1.9：溫度上升共振吸收都卜勒擴增效應。



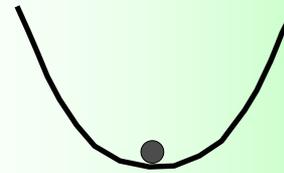


## 系統回饋現象





正回饋特性



負回饋特性



## 後續措施

- 降低正空泡反應度回饋：
  - 將濃縮度由2.0% 提升為2.4% ，可增加燃耗，以提升中子被分裂產物吸收的比例。
  - 於爐心中加入額外之中子吸收物質，以防止反應器運轉於低功率。
  - 為改善反應度運轉餘裕，將手動控制棒由等效45根提高為等效60根。
- 控制棒重新設計
- 急停時間由18秒減為12秒。
- 建立防止誤觸緊急救援系統的機制。

## 結語

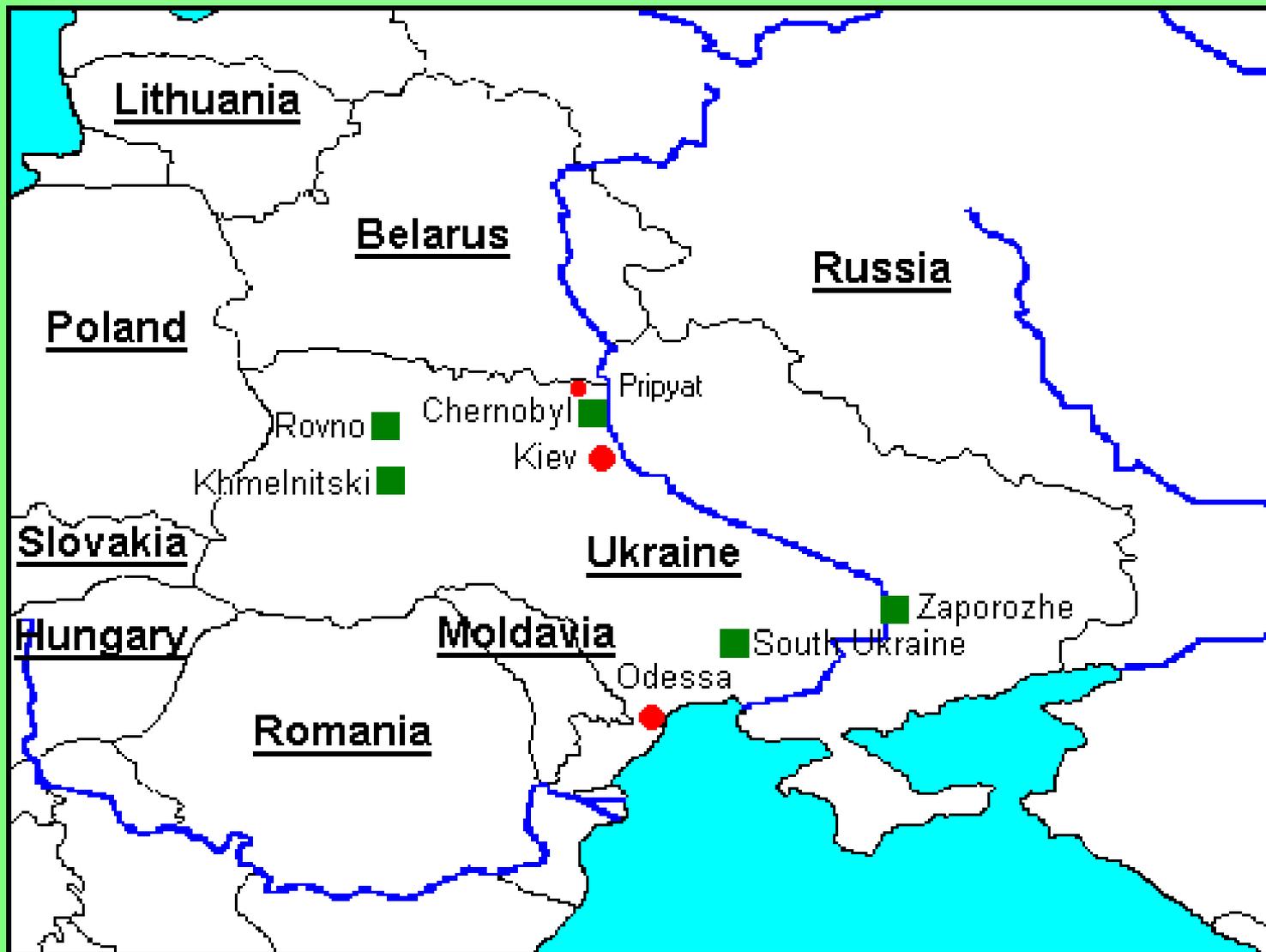
蘇聯車諾比爾核能電廠的災變中，大量的放射性物質自毀損的反應器外釋污染了廣大的土地，也使眾多的民眾曝露於遠較背景輻射為高的環境中。雖然說到目前為止，因車諾比爾災變的輻射傷害而死亡的人數，抵不過一次飛機失事所造成的傷亡，也抵不過南韓大邱市瓦斯爆炸的傷亡人數。但蘇聯政府必須疏散與安置眾多的難民，為困頓的經濟與財政帶來了更沈重的負擔。居住在污染區與禁制區的民眾，更長期生活在輻射的陰影中，這種心理上的傷害，可能更強過生理的實質傷害。從任何角度來說，類似車諾比爾災變的核能廠事故都是絕對無法接受的。

類似車諾比爾災變的核能電廠是不可能發生於輕水式反應器的。輕水式反應器的安全顧慮，是反應器內的衰變熱無法持續的移除，造成反應器爐心的熔損。這種因熱移除發生問題所導致的事務，需要一段時間的惡化，才會造成爐心的熔損，即使爐心已經熔損，只要核能電廠的圍阻體保持整性放射性物質還是不會釋放到外界環境。

# 石墨水冷反應器使用狀況

WNA 網站資料, 2011/11/19

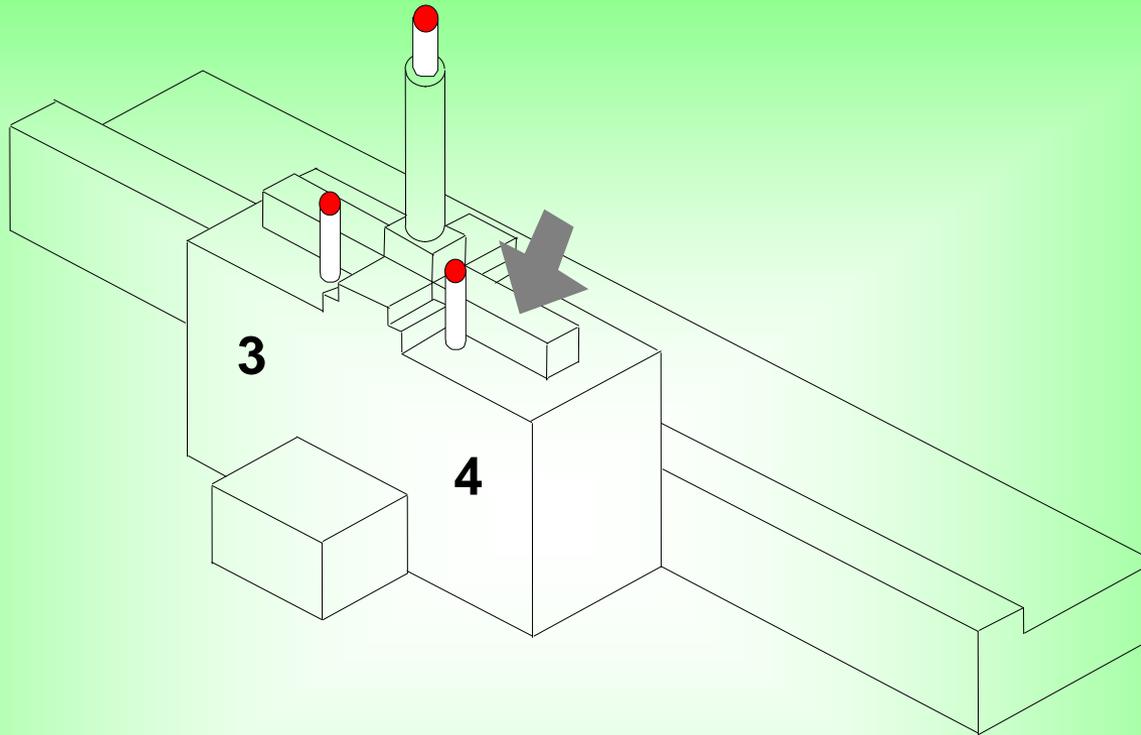
位置	機組	商轉年	功率 (MWe)	目前狀況
立陶宛				
Ignalina	1	1983	1185	2004/12 停機
	2	1987	1185	2009/12 停機
烏克蘭				
Chernobyl	1	1977	925	1996 停機
	2	1978	925	1991 停機
	3	1981	925	2000 停機
	4	1983	925	1986 損毀
	5	--	925	未完工
	6	--	925	未完工
蘇俄				
Kursk	1	1976	925	持續運轉至2021
	2	1979	925	持續運轉至2024
	3	1984	925	持續運轉至2014
	4	1986	925	持續運轉至2016
	5	-	925	未完工
Leningrad	1	1973	925	持續運轉至2019
	2	1975	925	持續運轉至2021
	3	1979	925	持續運轉至2025
	4	1981	925	持續運轉至2026
Smolensk	1	1983	925	持續運轉至2013
	2	1985	925	持續運轉至2015
	3	1990	925	持續運轉至2023





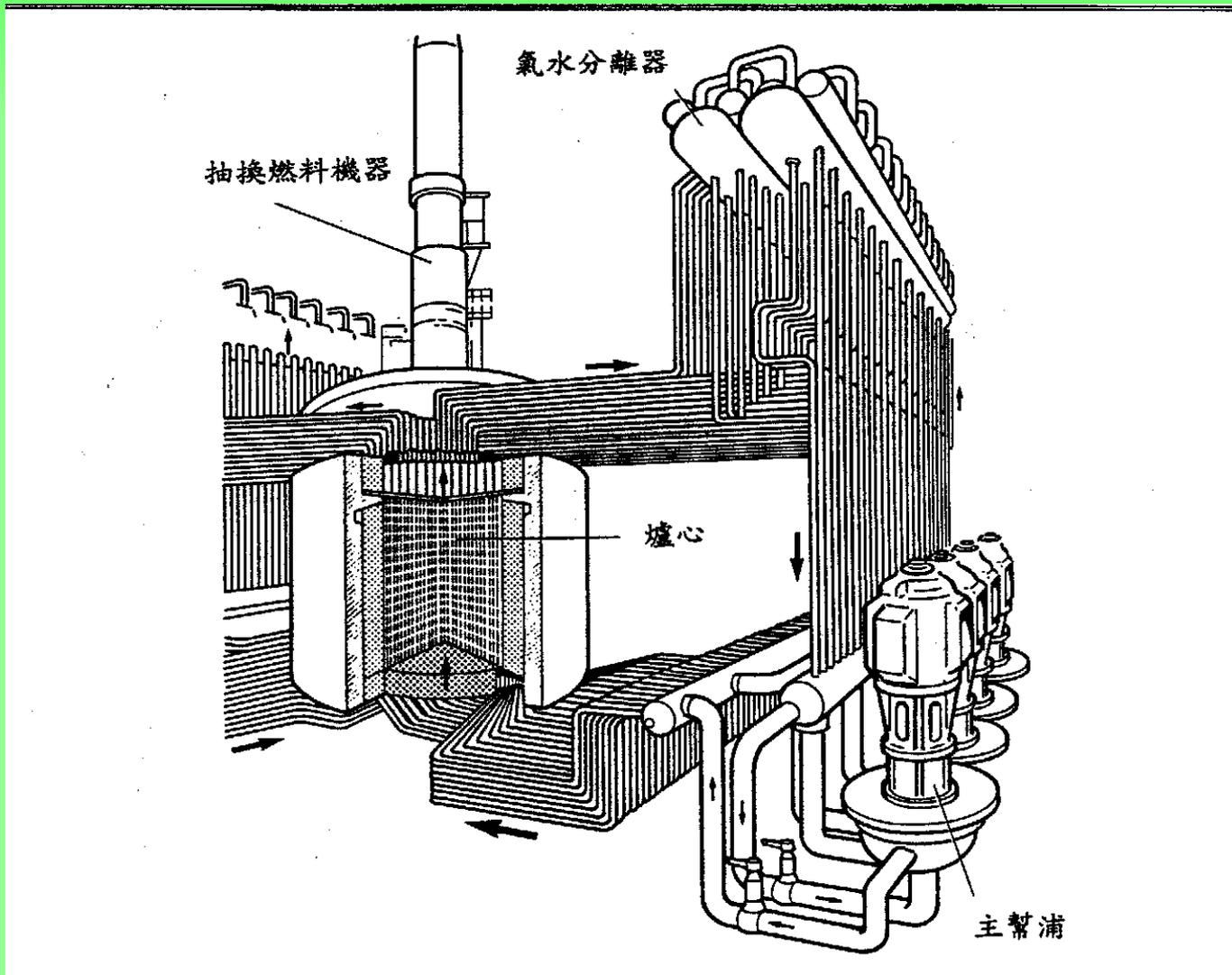
Chernobyl nuclear power station, Ukraine.  
0.96.07.02.15 DEC 1995  
CHERNOBYL UKRAINE D  
© Greenpeace/Shirley



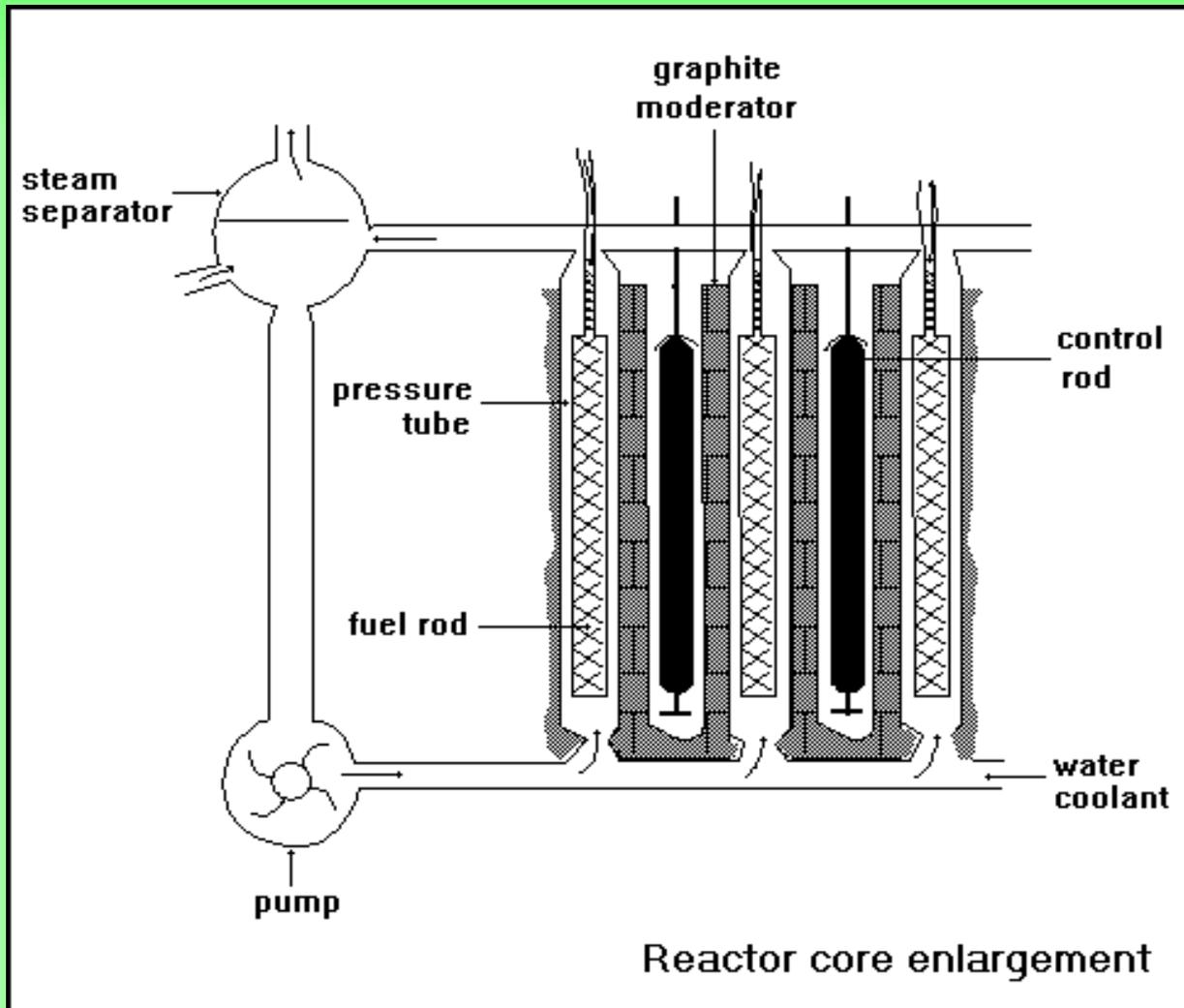


車諾比爾 RBMK 型鈾石墨沸水壓力管反應器，雙機組式設計之核能電廠  
示意圖，箭頭處所指的就是發生核災變的第四號機組。





車諾比爾四號機組爐心水循環系統示意圖。箭頭所指是水流方向，水由主泵由下往上打入爐心吸收熱量，沸騰產生蒸氣；濕蒸氣被導入氣水分離器以去除水分，乾蒸氣送到渦輪發電機發電，從氣水分離器出來的水分，借重力作用流回主泵，形成循環。<sup>29</sup>





GREENPEACE

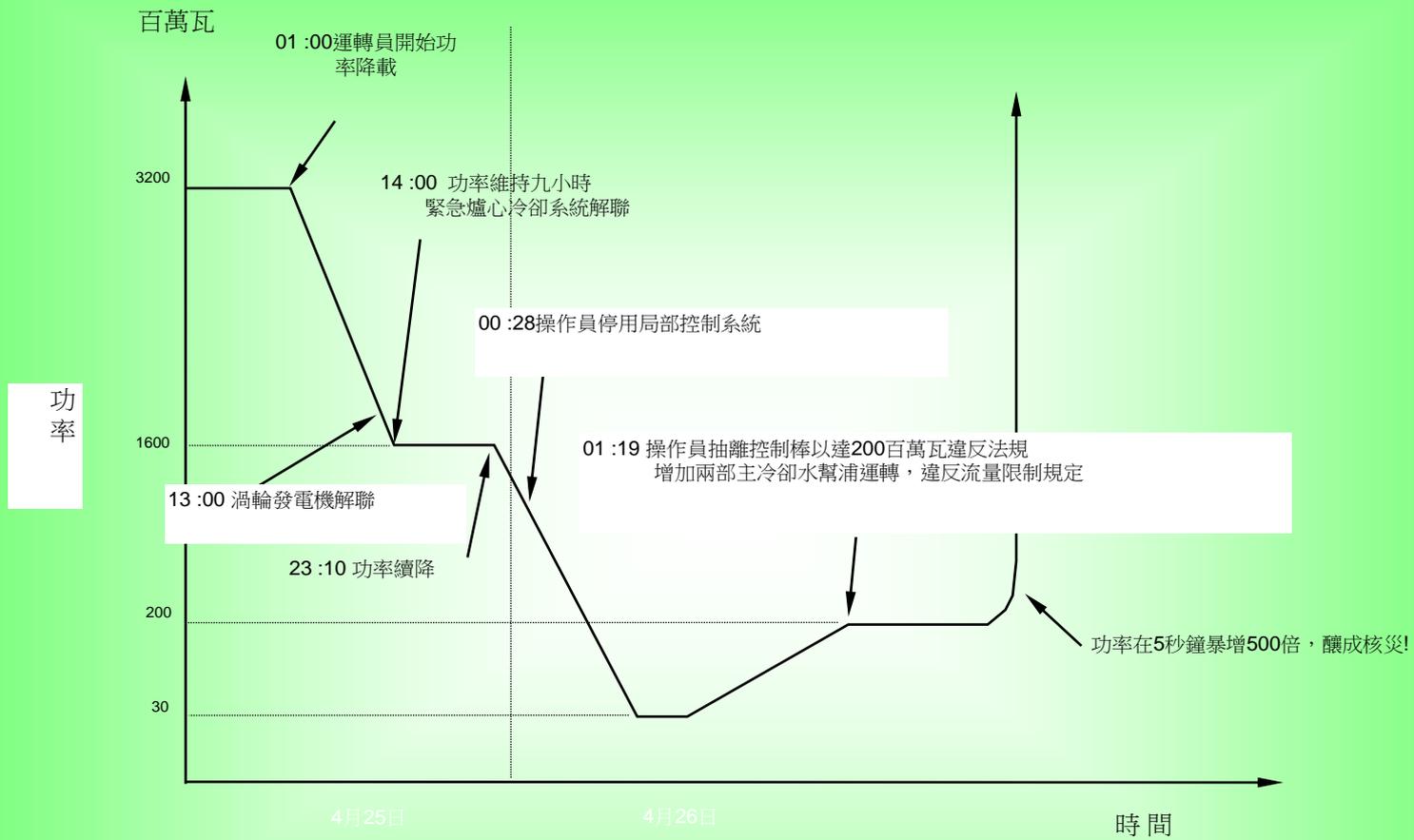
Inside 2nd reactor, checking graphite channels for cracks,  
Chernobyl, Ukraine.  
0.96.07.02.10 DEC 1995  
CHERNOBYL UKRAINE D  
© Greenpeace/Shirley



GREENPEACE

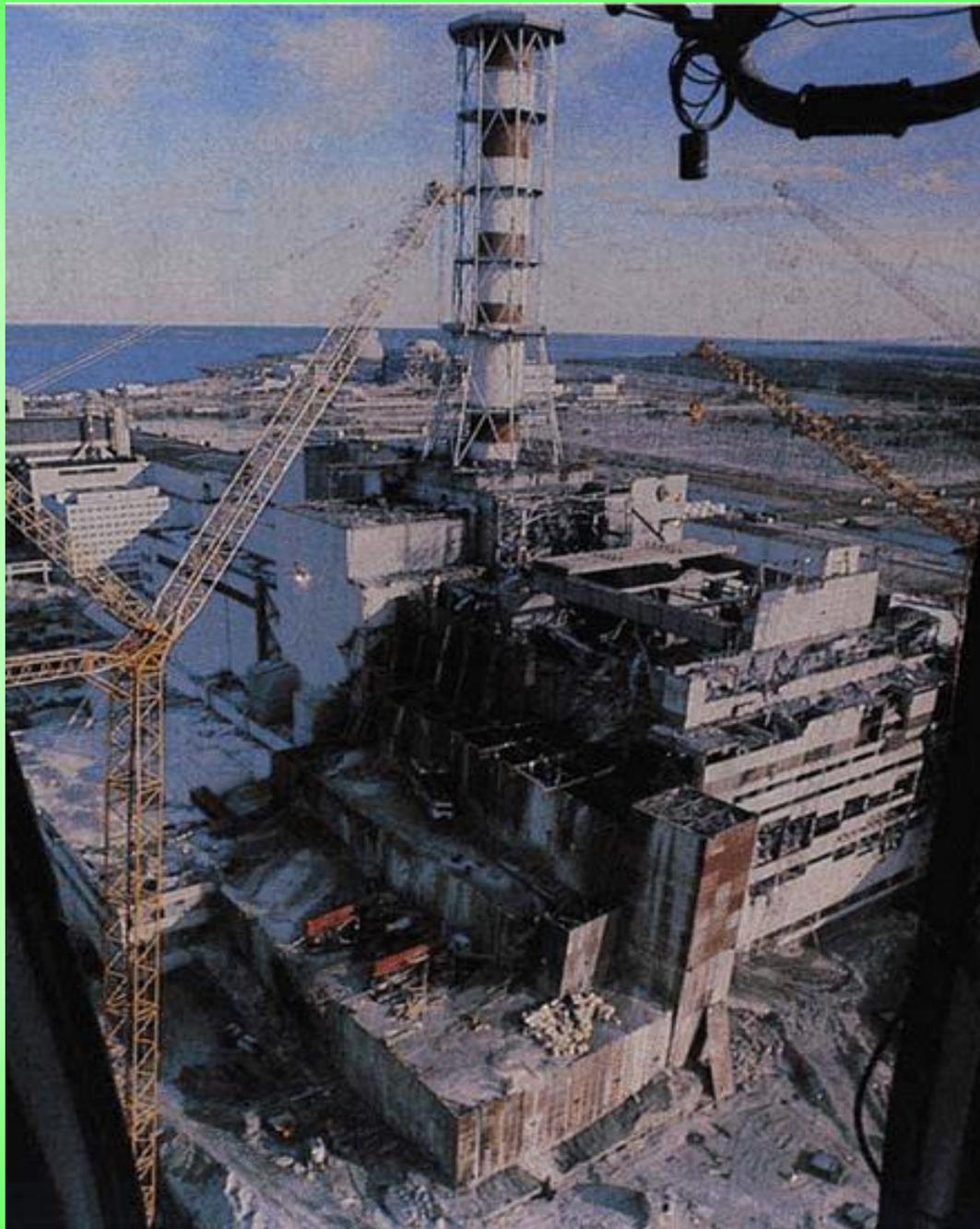
Inside the control room of 1st block. Chernobyl nuclear power station. Ukraine.  
0.96.07.02.08 DEC 1995  
CHERNOBYL UKRAINE D  
© Greenpeace/Shirley

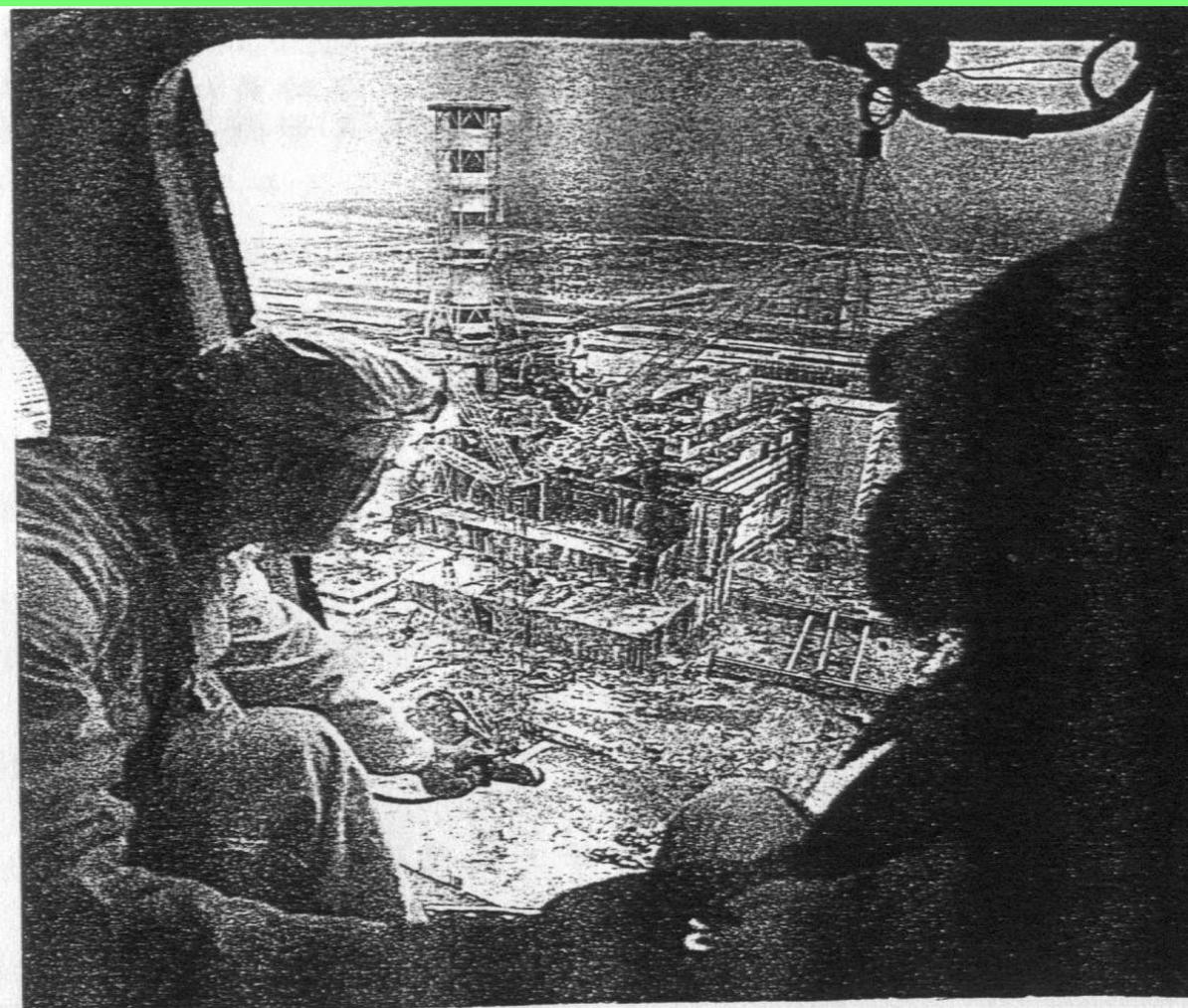




車諾比爾核災時反應器功率時序特徵示意







技術人員搭乘直昇機執行車諾比爾核能電廠空中輻射量偵測。  
從照片可以看出核災的巨大破壞能力。





[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chernobyl\\_Disaster.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chernobyl_Disaster.jpg)



I-131 : 爐心總量的55% ; 約  $1760 \times 10^{15}$  貝克 ( 400 kg)

Cs-137 : 約  $85 \times 10^{15}$  貝克

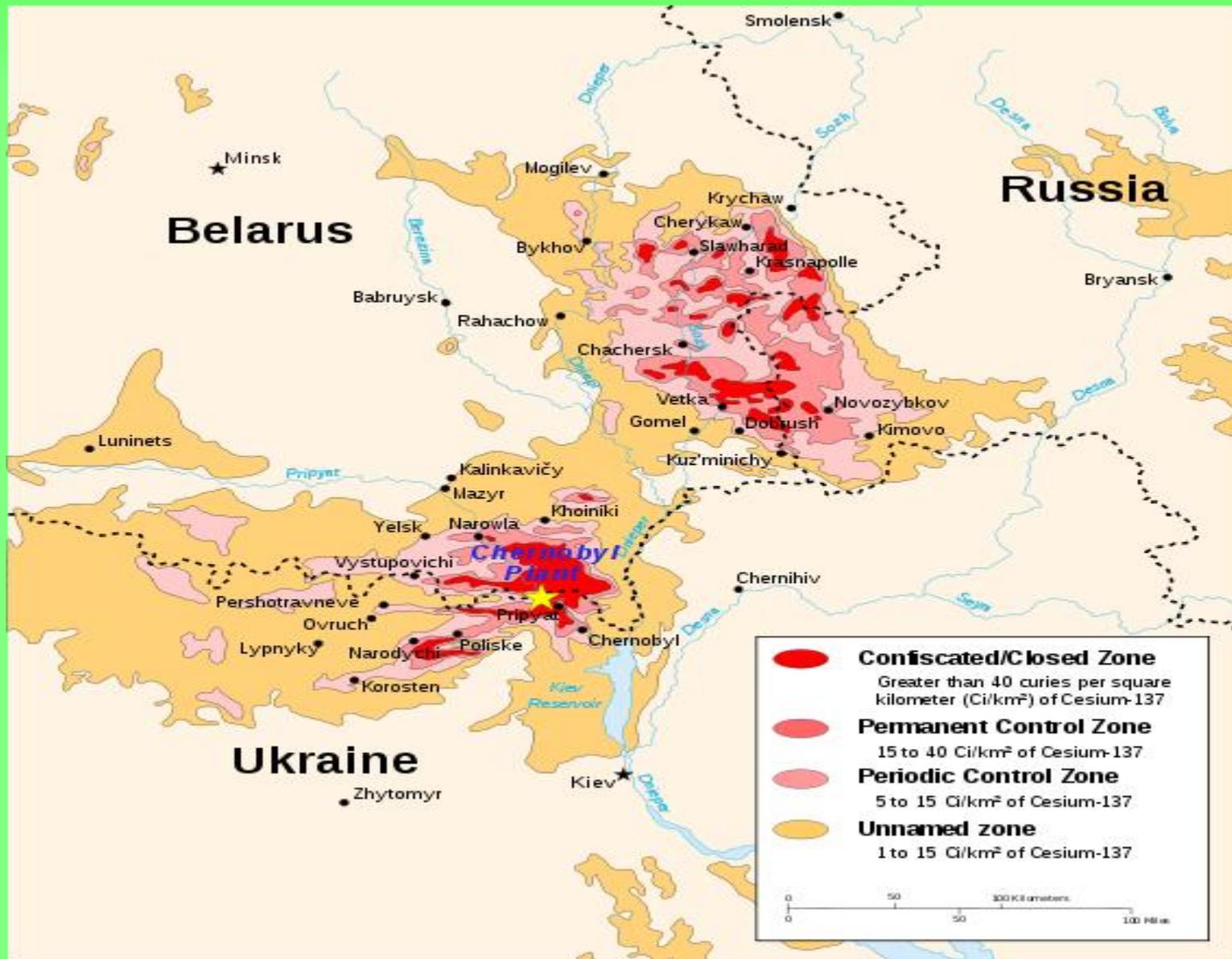
燃料 : 總量的  $3.5 \pm 0.5\%$  ; 約為 6 噸的燃料碎片

估計之外釋總量為  $5200 \times 10^{15}$  貝克

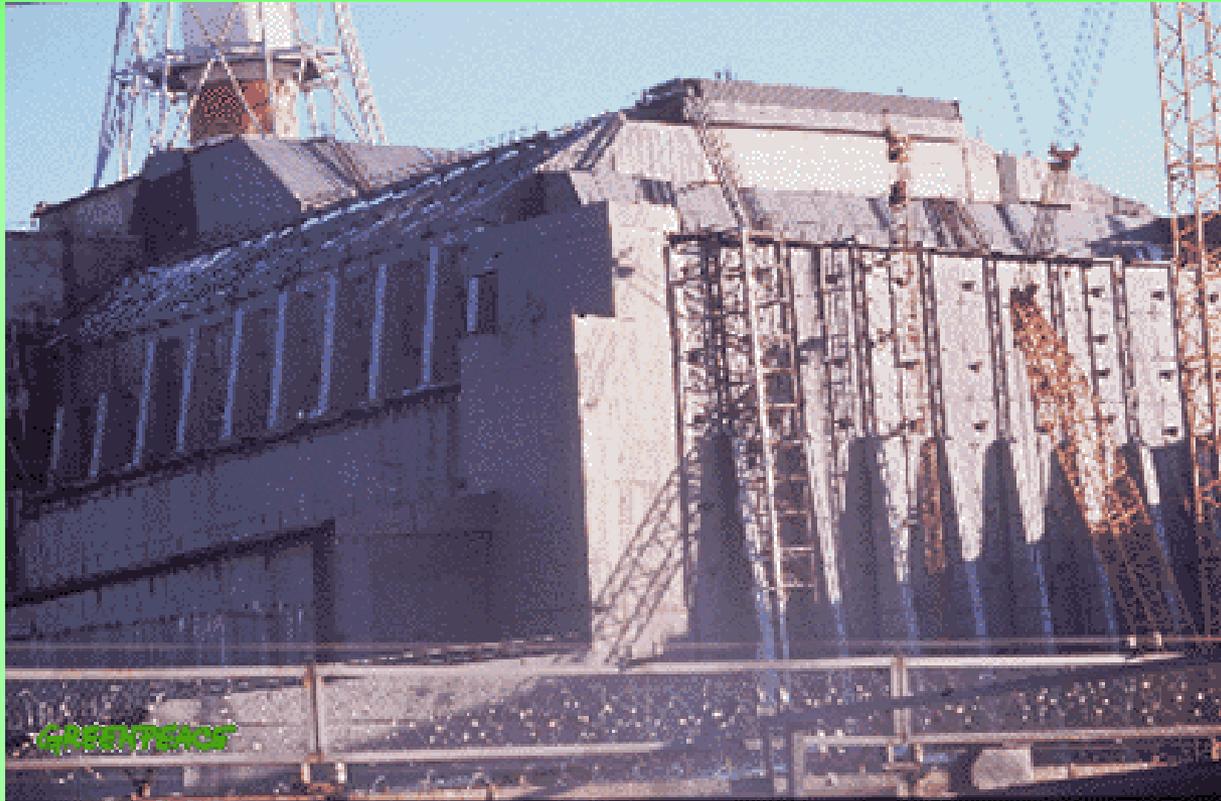
外釋總量超過廣島與長崎原子彈爆炸的 400倍

約為1950與1960年代核彈試爆外釋總量的1/1000至 1/100

落塵的汙染面積達 100,000 平方公里



[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chernobyl\\_radiation\\_map\\_1996.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chernobyl_radiation_map_1996.svg)



Reactor 4 Chernobyl NPS. Covered with Sarcophagus since accident in 1986.  
0.96.07.02.17 DEC 1995  
CHERNOBYL UKRAINE D  
© Greenpeace/Shirley

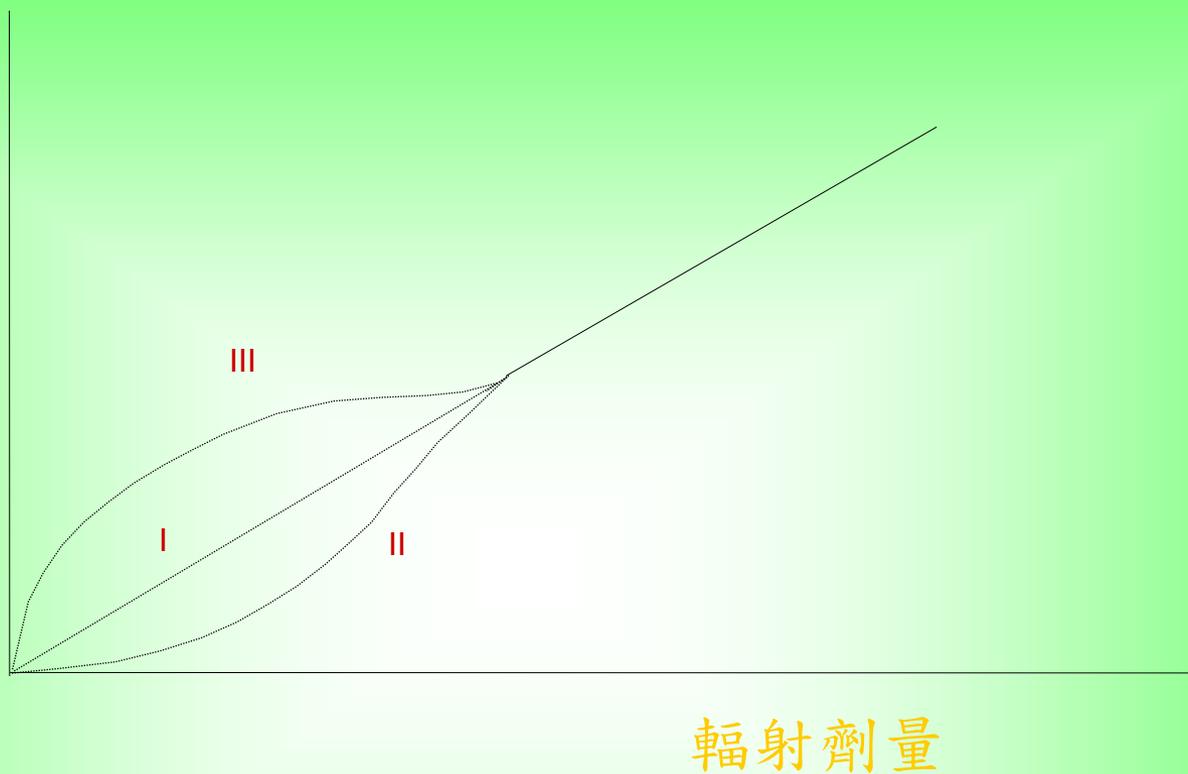




Chernobyl nuclear power station, Ukraine.  
096.07.02.19 DEC 1995  
CHERNOBYL UKRAINE D  
© Greenpeace/Shirley



額外癌症病例



癌症劑量曲線低輻射劑量區線性假設



61,000 位來自蘇俄的緊急救援工作人員，有4995 人於1991~1998年間死亡。聯合國特別成立的專家團估算，其中216人的死因與輻射劑量有關，另估計這個群體中約有30人會因輻射劑量而罹患血癌。換句話說，這群工作人員的因輻射劑量(平均體外劑量為107毫西弗)而死亡的人，佔死亡人數的4.6%。

1992~2000 年間，白俄羅斯、俄羅斯、與烏克蘭共有4000名小孩與青少年(0~18歲)罹患甲狀腺癌。1986 ~2002間，白俄羅斯罹患甲狀腺癌的1152 人中，治癒比率為 98.8%。依據現有知輻射建康風險模式估算，200,000 清理工作人員中，會有2,200 個額外癌症死亡案例；135,000 撤離的居民中會有160 個額外癌症死亡案例；270,000 居住在(嚴格控制區)的民眾中會有1,600額外癌症死亡案例。受影響最大的600,000人中，會約有4,000個額外癌症死亡案例，遠低於其他因素所造成之癌症。

居住在其他低汙染區的6,000,000人口中，若以平均劑量7毫西弗估算，會有 5,000 個額外癌症死亡案例。