

車諾比爾核能電廠災變

清華大學工程與系統科學系李敏

1997 年 10 月

車諾比爾核能電廠災變始末^{*}

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。但確實的污染來源卻令人費解？瑞典根據測到的核種做進一步的分析，結果顯示放射性物質係來自於核能電廠反應器的爐心，再根據放射性物質在北歐諸國分佈的情形，以及過去數天的氣象資料，研判可能是蘇聯的車諾比爾核能電廠發生了意外。瑞典駐蘇聯外交人員因此向蘇聯政府查詢，但不得要領。

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。此時，美國雷根政府主動表示可以提供任何必要的援助，協助控制事故的惡化，但是蘇聯拒絕接受，僅僅要求加州大學一位骨髓移植專家及兩位助手前往協助救治傷患。同一天，蘇聯政府在新聞報導中透露，事故中已有兩個人死亡，並表示狀況已獲得控制，但電廠周圍的四個村落的居民已經疏

^{*} 節譯自美國時代雜誌 (time) 與新聞雜誌 (News Week) 於災變發生後之相關報導。

散。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。衛星照片亦顯示離電廠一段距離外的居民作息如常。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。根據到蘇聯協助醫療傷患的美國骨髓移植專家所提供的資料顯示，總共有 299 人住院接受治療，這些人大部份為電廠工作人員及救火隊員，到 5 月 3 日為止，有 11 人死亡。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。

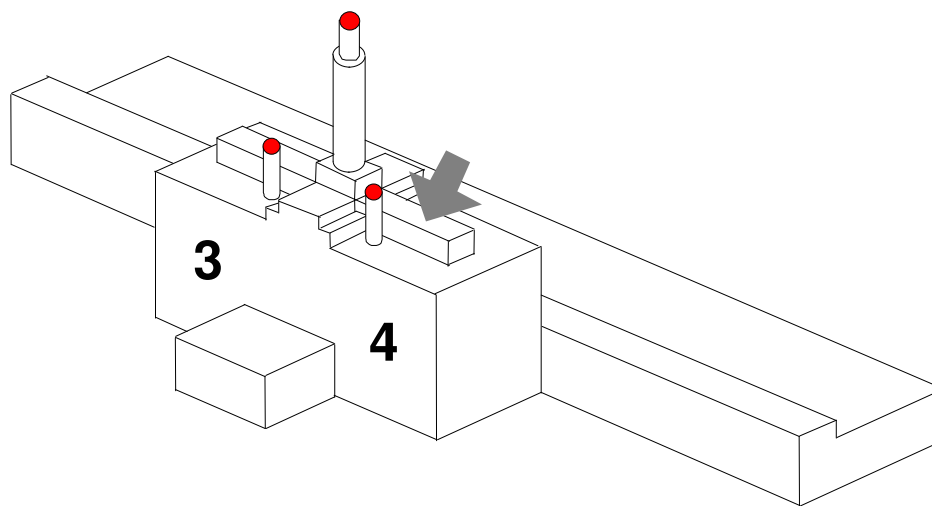
車諾比爾核能電廠介紹

前蘇聯幅員遼闊，地下資源非常豐富，蘊藏的煤炭、石油、天然氣、以及水力足夠發電之需求。然而這些豐富的資源分佈卻非常不均勻。據估計百分之九十的燃料和百分之八十的水力資源，集中於環境惡劣不適宜人類居住的亞洲部份，而蘇聯百分之七十的人口卻聚集在歐洲部份。因此，蘇聯決定在歐洲部份發展核能發電，以改善能源分佈不均的先天限制。

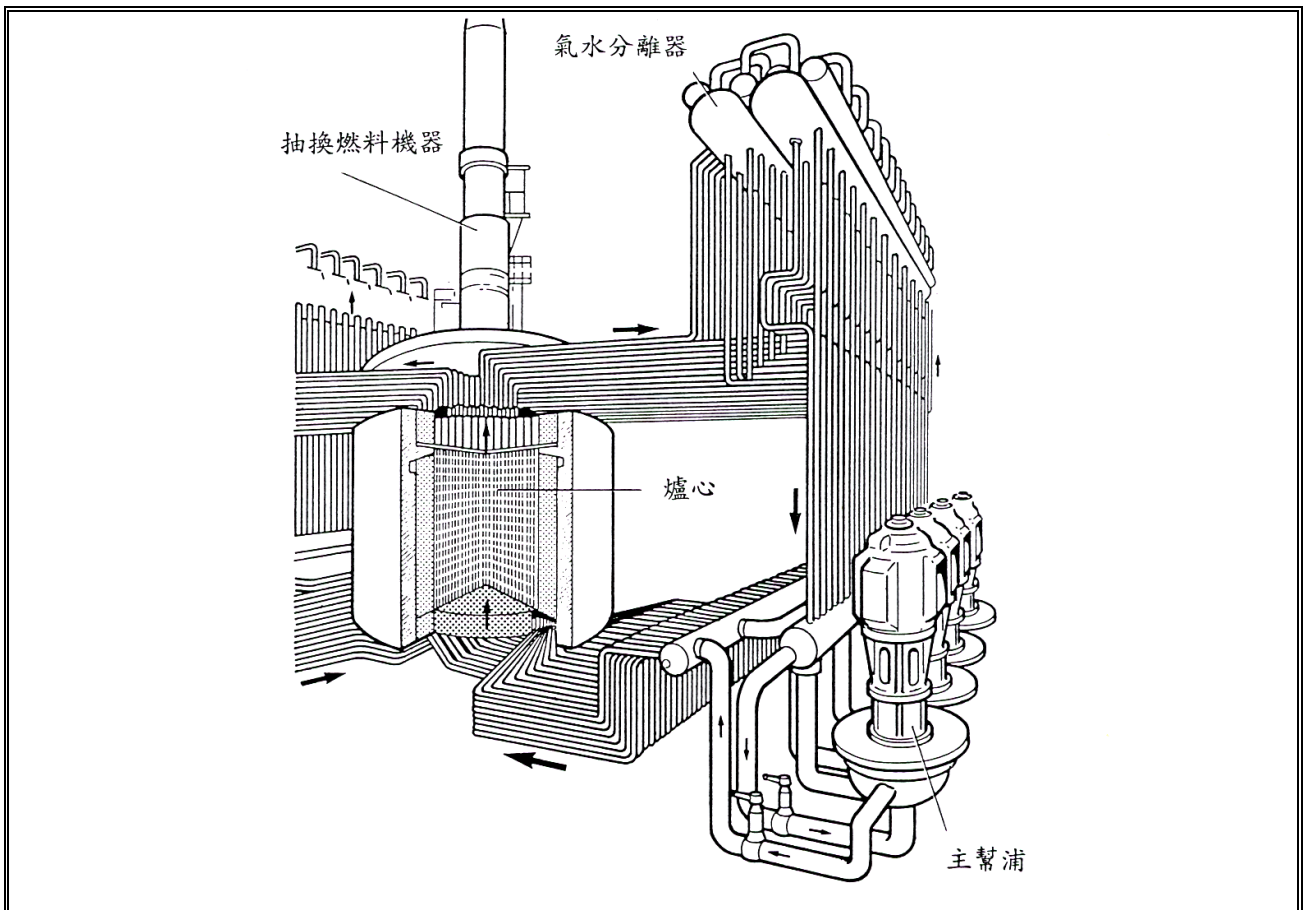
蘇聯自行設計發展的熱中子反應器有兩種類型，一是稱為 WWER 的輕水式反應器；二是稱為 RBMK 的石墨沸水管反應器。1986 年 4 月 26 日發生令世人震驚之車諾比爾核電廠災變的反應器是屬於 RBMK 型。車諾比爾核能電廠的廠房採雙機組式設計(參看圖附 1.1)，

反應器以輕水當作冷卻劑，石墨為中子緩和劑；並利用氦氣和氮氣來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。銳合金壓力管直徑為 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，各自提供八百多根壓力管所需的冷卻循環水，在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。循環水系統流程(見圖附 1.2)如下：由冷凝器回流的飼水，經飼水幫浦打入汽水分離器，再藉由重力作用引入主循環水幫浦，然後通過供水集管，分別送入壓力管吸收核反應熱量，產生水蒸汽。含水量為 14%的蒸汽由蒸汽管路導到汽水分離器上去除水分，產生乾度為 98% 到 99.8%，壓力為 68 個大氣壓的水蒸汽。



圖附 1.1：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。



圖附 1.2：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，水由主幫浦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，借重力作用流回主幫浦，形成循環。

資料來源：‘The Tchernobyl Accident’, rapport IPSN 2/1986 revision 3, Commissariat à l’Énergie Atomique, France.

事故時序敘述

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。這個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。因此這次的試驗，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。但是實驗過程不如預期的順利，而災變即在工作人員企圖完成實驗時發生了。

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。

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。

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，如圖附 1.3 所示，功率在 5 秒內，驟升 500 倍。

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

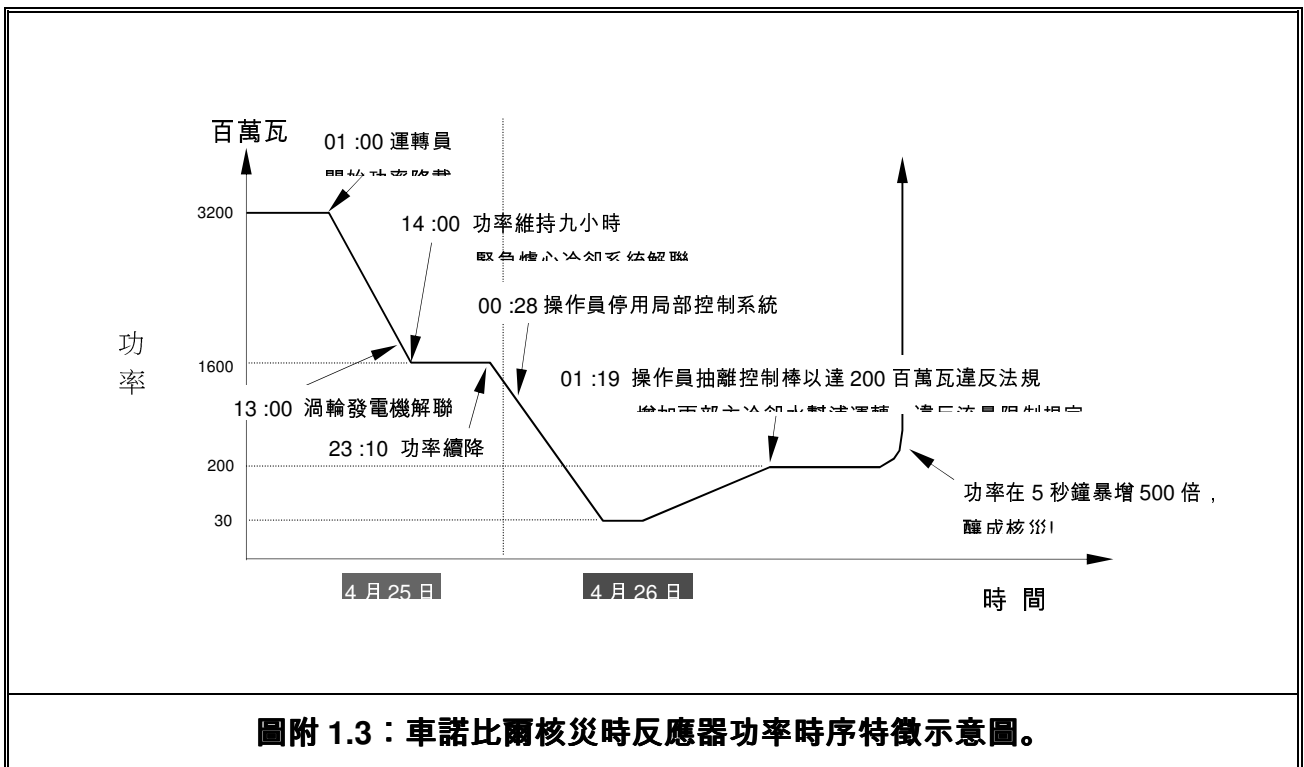
運轉人員按下急停按鈕。

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

功率持續快速上升。

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

水蒸汽爆炸⁶，不久傳來第二次爆炸聲，反應器解體(見圖附 1.4)。



圖附 1.3：車諾比爾核災時反應器功率時序特徵示意圖。

- ⁶ 水蒸氣爆炸是指高溫熔融的金屬與水接觸，造成水在極短的時間內汽化成水蒸氣，體積快速膨脹，形成爆炸。這類型的事務曾在煉鋁及煉銅工業中發生過。日常生活中，當我們把水滴入燒熱的油中，會造成熱油自鍋中飛濺出，也是水蒸氣爆炸造成的。



圖附 1.4：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。

資料來源：Richard Wolfson, 'Nuclear Choices: A Citizen's Guide to Nuclear Technology', The MIT Press, 1993.

車諾比爾災變發生原因探討

車諾比爾災變發生 4 個月後，蘇聯派了一個代表團赴維也納的國際原子能總署，將災變發生的原因做了完整的交代。追根究底，車諾比爾災變之所以會發生的最根本原因是反應器設計錯誤。這型反應器的功率反應度回饋系數在低功率時為正值。因而在低功率運轉時，反應器會極度的不穩定。只要一點小干擾，功率很可能如脫韁野馬般的無法控制，在短時間內

迅速竄升，造成反應器的解體。因而 RBMK 型反應器的運轉規範中，嚴禁於低功率區域運轉。車諾比爾災變的發生，是運轉人員為了在既定時程內完成實驗，完全不管運轉規範的安全限制，強行在低功率下運轉反應器，並且大量抽出控制棒，使得功率反應度的正回饋現象更為嚴重，終致闖下滔天大禍。車諾比爾災變之後，對反應器基本設計有所了解的核能專家，根據專業知識研判，一致認為類似車諾比爾的事故不可能發生在輕水式反應器上。以下將簡單說明其理由，在這之前先將幾個名詞意義做一說明。

反應度

為了維持反應器的穩態運轉，通常須將中子增殖因數調控為 1。所謂的中子增殖因數定義如下：

$$K = \frac{\text{下一代中子數目}}{\text{這一代中子數目}}$$

如果 K 值為 1，則每一世代的中子數目都將一樣。反應器輸出功率是正比於中子數目。因此 K 值為 1 時，功率為定值，不隨時間有所變化。K 值大於 1 時，中子數目會隨著世代遞增而持續增加，反應器功率會隨之增加。反之，K 值小於 1 時，中子數目會隨著世代遞增而逐漸遞減，反應器輸出功率隨之下降。一般說來，核分裂過程產生的中子，它的一代活動時間大約在 10^{-3} 秒到 10^{-5} 秒之間；因此 K 值些微的變化，會引起輸出功率快速的改變。在計算反應器動態反應特性，通常會使用到反應度 (ρ) 這個物理量，反應度和中子增殖因數的關係如下：

$$\rho = \frac{K - 1}{K}$$

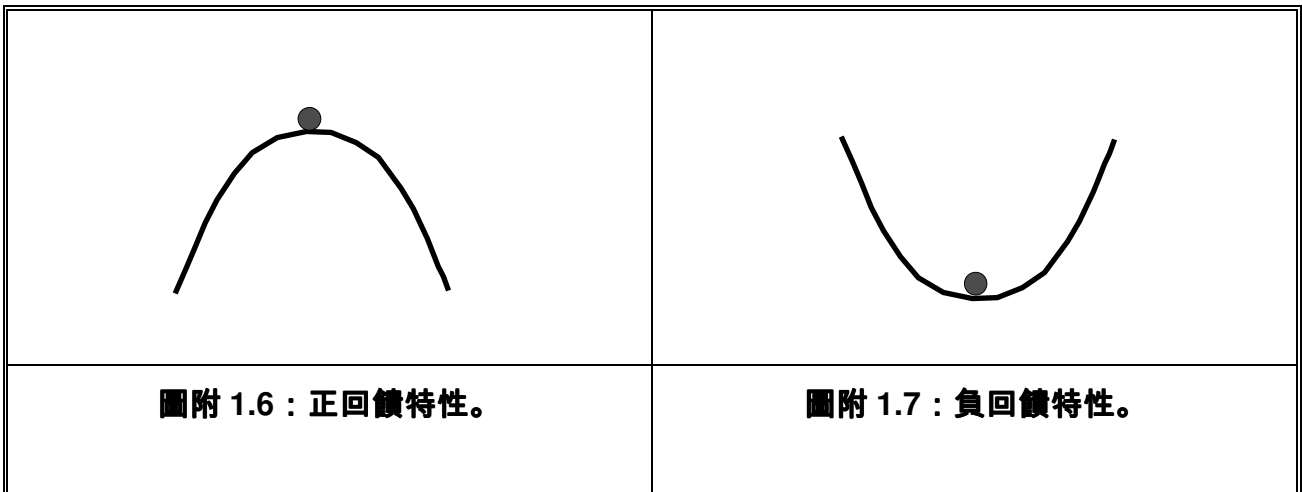
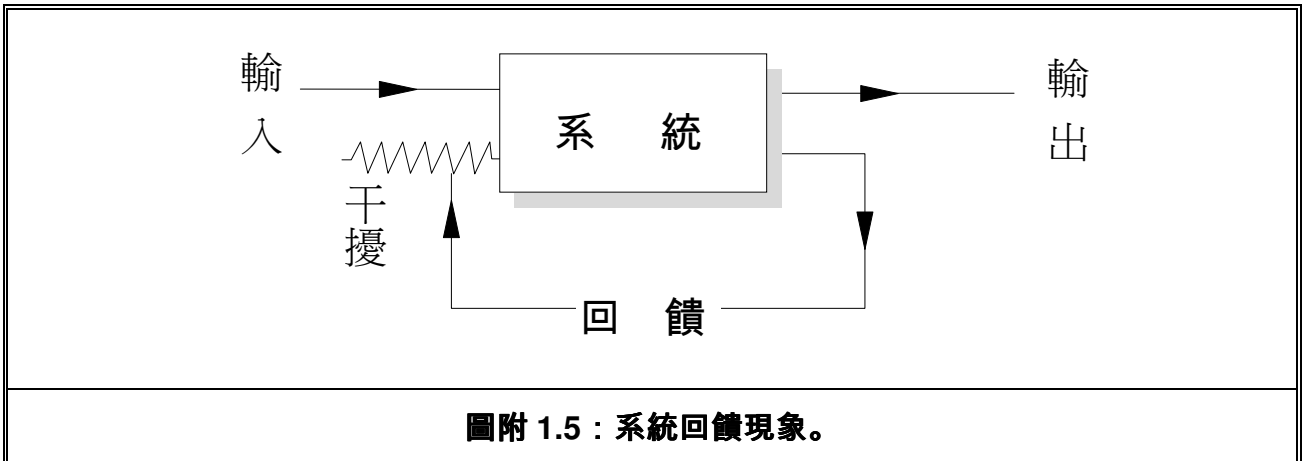
因此當反應度等於 0 時，功率維持穩定；當反應度大於 0 時，功率上升；反應度小於 0 時，功率下降。

回饋 (Feedback)

所謂的回饋是指系統和環境 (或其邊界條件) 間的互動。如圖附 1.5 所示，一個系統運轉時，將輸入轉為輸出，例如渦輪發電機的輸入為水蒸汽，輸出為電能。當系統的環境 (或其邊界條件，例如：水蒸汽流量，發電機之磁場強度，渦輪機軸承的振動等) 改變時，即是對系統產生一個干擾，這個干擾通過系統後，可能會再回過頭來影響原先的干擾狀態，這個過程就是所謂的回饋。如果這個影響是將干擾更形放大，那麼回饋即是正值；反之，如果這個改變是削弱干擾，那麼回饋即是負值。一個正回饋系統通常是無法穩定運轉的，這類型系統的穩定性，就好比置於開口向下之拋物線頂點的一粒珠子，珠子雖然處於平衡狀態，但任何外加的小小擾動都會讓珠子滾下來(見圖附 1.6)。負回饋系統則可以忍受外界施加的干擾，穩定運轉。就好比置於開口向上之拋物線底部的一粒珠子，珠子也是處於平衡狀態，但任何擾動都無法使彈珠永遠偏離(見圖附 1.7)。回饋是系統的特性，使用具正回饋特性的系統時，必須設法加入適當的控制機制，以抵銷正回饋效應，或是設法避免在該系統之正回饋的不穩定區域運轉。

正回饋現象對我們來說並不陌生，日常生活中即存在著許許多多正回饋的例子。例如到 KTV 歡唱時，不小心把打開的麥克風置於音箱前面，會產生一股令人受不了的高頻率刺耳雜音。為什麼會這樣呢？麥克風具有放大訊號的特性，一點點小的聲響進入之後，會被放大器加強，放大的聲響再自音箱播出；當麥克風正好放在音箱前面時，已加強過的播出聲響再次被收入麥克風裏放大，然後從音箱再輸出更響亮的聲音…… 如此週而復始惡性循環形成，自然產生令人受不了的刺耳雜音。要避免這個擾人的雜音，只需要把麥克風換個位置，遠離音箱就可以了。另外的例子是失戀症候群，當一個人和情人因某種原因分開而失戀時，心裏裡一時頓失依靠，情緒常常會陷入低潮，無法逃脫孤單寂寞的感覺。這種情況下有的人會以大吃大喝滿足口腹之慾，企圖轉移失戀鬱悶情緒。沒有節制大吃大喝的後遺症是體重失控直

線上升，體型顯得臃腫難看。於是情緒更形惡化下去，情緒影響行為，於是更加變本加利大吃大喝以逃避壓力，體重持續超重…… 惡性循環於焉形成，這種情緒和行為的身心互動關係構成了個典型正回饋現象。



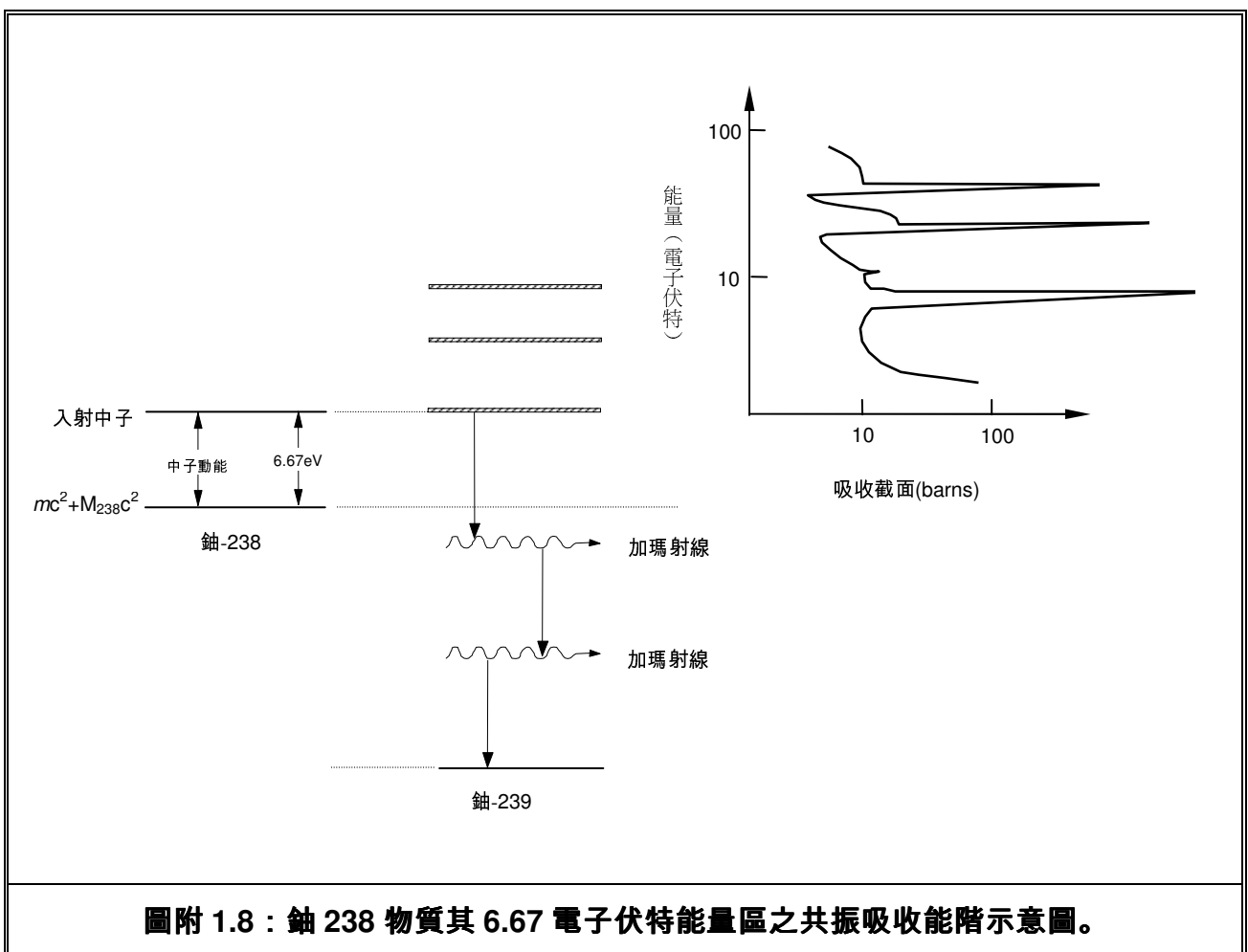
功率反應度回饋系數

當反應器功率上升時，會使得爐心內燃料溫度上升；緩和劑及/(或)冷卻劑的密度下降。

這些狀態的改變，會造成爐心內中子數目以及其能量分佈的改變，而中子性質的改變自然影響到反應度。所謂的功率反應度回饋系數即是功率改變時，反應度的變動情形。如果這個系數為正值即為正回饋；反之，系數為負值即為負回饋。回饋系數的反應器極不穩定，當輸出功率因外界微小干擾而小幅度上升時，透過正功率反應度回饋系數，反應度進一步增加，中子數目會更多，核分裂速率加速，功率更形上揚，功率上升再造成反應度增加……，最終反應器會因巨大能量的產生而解體。如果功率因外界干擾而小幅度下降，反應度增加也跟著變小(因功率反應度回饋系數為正)，形成功率下降，跟著反應度更小，惡性循環下，反應器終將處於次臨界狀態而停機。具有負回饋的反應器可穩定的運轉，當功率因外界微小干擾而上升(或下降)，負功率反應度回饋系數會使得反應度下降(或增加)，於是輸出功率下降(或增加)，回歸到原先功率狀態，反應器始終維持在穩定狀態。在了解這些技術性的名詞之後，下面要談的是為何車諾比爾的石墨水冷型反應器的功率反應度回饋系數為正值，而輕水式的卻為負值。

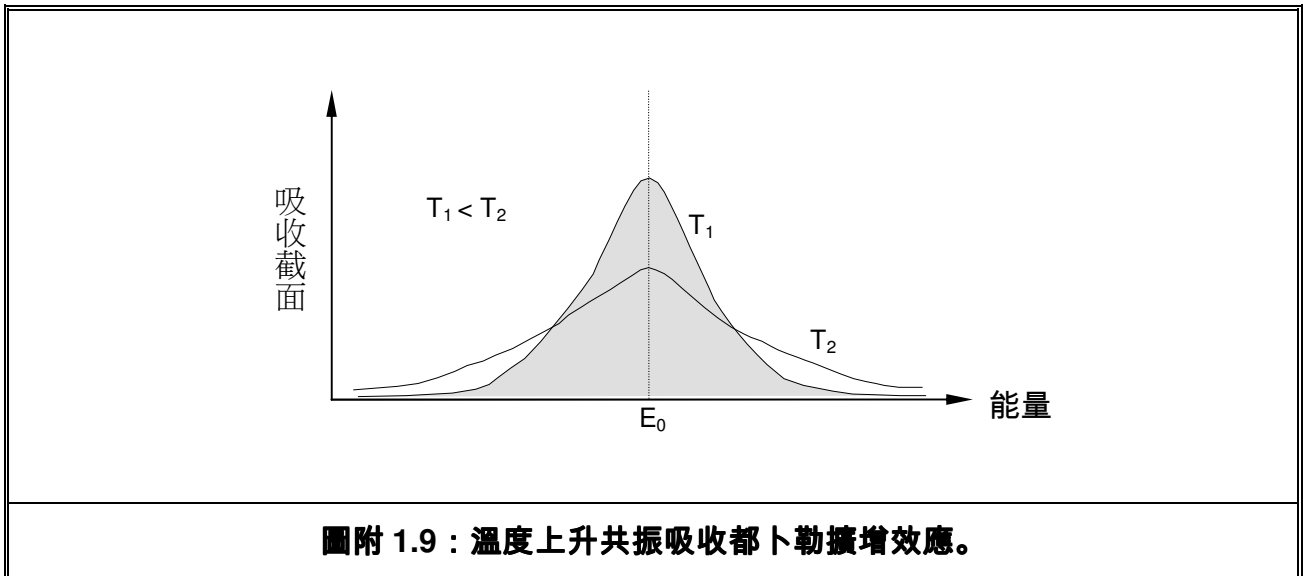
功率反應度回饋系數可以分為兩部份，一為燃料溫度改變造成的回饋；另一則為緩和劑及(或)冷卻劑密度的改變造成的回饋。石墨水冷型反應器和輕水式反應器都屬於熱中子反應器，即依靠慢中子誘發核分裂。核分裂反應產生的中子是快中子，分裂連鎖因此必須透過與緩和劑的碰撞，減速成慢中子，纔能再引發下一次的分裂反應。所以慢中子數目的多寡是影響爐心功率的主要關鍵。快中子的減速過程中，須通過所謂的中子共振吸收區域，較輕核種的中子共振吸收區位於較高的能量區(通常約在十萬電子伏特和百萬電子伏之間)；而較重核種的中子共振區位於比較低能量區(幾電子伏特到幾萬電子伏之間)。中子共振吸收區形成的原因如下：在質子與中子的原子核內狀態，和環繞原子核運動的電子一樣，分成許多不同能階軌道，如果入射的中子所攜帶的動能和原子核內某一能階相近時，那麼中子就特別容易被原

子核吸收。因此在特定的中子能量，原子核的中子吸收截面呈現如圖附 1.8 所示的高峰值。當燃料溫度因功率提高而上昇時，由於熱效應的影響，鈾-238 核在晶格裏的振盪速率加劇，從而改變了鈾-238 和入射中子間的相對速度分佈；造成吸收截面曲線，由原本窄而高變為寬而矮(如圖附 1.9 所示)，這一現象稱為都卜勒現象。都卜勒現象使得中子更容易在中子的共振吸收區被重核(鈾-238)吸收；也就是說，功率上升，燃料溫度上昇，會使得中子更不容易減速成熟中子。



因此這一部份的功率反應度回饋系數是負值。從以上的描述可以推論任何熱中子反應器中，燃料溫度改變所造成的反應度回饋均為負值。石墨水冷反應器的功率反應度回饋與輕水式反應器的不同，主要來自於所使用的緩和劑及(或)冷卻劑不同。熱中子反應器是利用緩和

劑的原子核與中子產生的碰撞，將快中子減速成慢中子，再以慢中子誘發鈾-235 核的分裂，冷卻劑的功能則是將核分裂產生的熱移走。石墨水冷型反應器使用石墨當作中子緩和劑，水為冷卻劑。輕水式反應器則是將緩和劑和冷卻劑合而為一，水即是緩和劑，也是冷卻劑。



輕水式反應器內的水，一方面透過彈性碰撞使中子減速；另一方面也會和燃料競爭吸收慢中子。因此當功率提昇時，水吸收更多熱量，水分子間的距離拉大，密度因而下降，造成爐心內的水分子數目減少，使得減速之後的慢中子較容易被燃料吸收，造成反應度升高。然而爐心內的水分子數目的減少，同時也會使得新生成的快中子無法有效減速成慢中子，較易在鈾-238 的中子共振吸收區被吸收，因此真正能誘發鈾-235 產生核分裂的慢中子數目反而減少，造成反應度下降。一般說來，水的減速功能勝於吸收作用，兩項影響相加之後，反應度呈現下降趨勢，功率反應度回饋系數為負值。

石墨水冷型反應器，功率上升時，冷卻劑的水吸收更多熱量，水分子間的距離拉大，水分子的密度與數目下降，慢中子較容易被燃料吸收，造成反應度升高。然而功率上升，卻不會對用作緩和劑的固體石墨造成明顯改變，因而不影響中子減速能力；所以整個功率反應度

回饋係數變為正值。石墨水冷型反應器在高功率運轉時，燃料的負反應度回饋大於緩和劑/冷卻劑的正反應度回饋，還可以安全運轉。但在低功率時，緩和劑/冷卻劑的正反應度回饋反大於燃料的負回饋，因此無法穩定操控反應器，此項設計上的缺陷是車諾比爾核能電廠之所以發生核災的最大原因。

蘇聯當初為何會選擇發展這一類型的反應器呢？原因有下列幾個：①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；②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；③二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。美國在華盛頓州的 Hanford 核能保留區內，也有一座同型的反應器，代號稱為 N-反應器，專門用以生產鈾元素。這座反應器於 1986 年車諾比爾災變後正式停止運轉。

災變處理措施

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。事故發生之後，燃料壓力管和位於反應器上方的管線嚴重損壞，無法利用緊急飼水幫浦補水到爐心，熄滅石墨的燃燒和抑制爐心繼續的惡化；因此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。再加上救災專家對反應器可否再繼續承受大量重物負荷產生懷疑，於是在 5 月 2 號停止空投作業，自此從爐心逸出的放射性物質開始增多，5 月 5 號外釋放射性物質的活度(activity)達到 8 百萬居里(1 居里= 3.7×10^{10} 貝克)。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。此外，高溫的爐心熔融物質和混凝土間，產生一連串複雜作用，影響反應器底部結構強度，使得救災工作更形困難，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。

放射性物質外釋狀況及造成的影響*

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，利用石墨做為緩和劑，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。再加上車諾比爾核能電廠沒有圍阻體的設計，故無法有效延遲放射性物質的外釋。

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 4300km² 的高劑量區被劃定為「禁制區」，以防人員擅

* 節錄自核能研究所蘇憲章先生所著之“車諾堡事件後十年之調查總報告”，該報告係節譯自歐盟、國際原子能總署、與世界衛生組織聯合於 1996 年 4 月 8 日 ~ 12 日在維也納召開名為「車諾堡十年後」大會之會議總

入。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。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。

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，另有二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。事故 10 年間，另有 4 位死亡，但其死因與輻射傷害的確定效應無關。

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。至今，治療病例群中只有三位小孩死於甲狀腺癌。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，劑量預估的不準確是主要原因。但依目前輻射致癌危險度之估算方法的預測，受高劑量的成人，在往後十年可能會出現甲狀腺癌發生率的上升。

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 1986~1987 年參與清除的 20 萬人中，會

有 200 個因輻射而引發血癌的病例。而因其他原因發血癌的病例為 800 個。依據目前的估算模式，200 個輻射引發血癌的病例中，會有 50 個病例在接受劑量後 10 年發生。但到 1995 年底，20 萬人中共有 40 人罹患血癌。因此，至今的結論為：除了甲狀腺癌以外，似無明顯證據顯示，血癌或其他癌症有升高的現象。

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。因此，除了甲狀腺癌以外，似無明顯證據顯示，血癌或其他癌症有升高的現象。

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，可能尚未超過 50 人，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。

車諾比爾核能電廠的石墨水冷反應器，利用石墨做為緩和劑，其特性與利用水為緩和劑的輕水式反應器，完全不同。事實上，當車諾比爾災變的訊息傳到美國後，任何對反應器物理稍有了解的人，都可以猜測到造成災變的主因，只是不清楚發生的過程而已。1970 年代

的核子工程教科書中，都已經明確的提到在設計反應器時，必須避免不穩定的材料選擇。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故，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。1979 年發生於美國三哩島的核廠事故，即因圍阻體發揮功能，並未對民眾造成輻射傷害。

另外值得一提的是，車諾比爾核能電廠災變中，石墨長時間的起火燃燒，導致放射性物質大量的外釋。輕水式反應器即使發生爐心熔損的事故，放射性物質外的情況，絕對要比車諾比爾災變的外釋來得少很多。