

成熟、穩定的技術——

# 核分裂反應器的發展歷程

長久以來核能發電廠安全議題備受關注，自美國三哩島核電廠事故與前蘇聯車諾比核電廠災變後，在核子工程師的努力下，核能發電廠的安全績效已大幅提升。

李 敏

**1938**年哈恩(Otto Hahn)與史特拉斯曼(Fritz Strassmann)發現利用中子撞擊鈾靶，可以產生質量數較輕的原子核，麥特納(Lise Meitner)稱此現象為「核分裂」(nuclear fission)。

## 世界第一座反應器

鈾核分裂過程中，物質消失，以能量的形態釋出，此現象為愛因斯坦之質能轉換公式( $\Delta E = \Delta MC^2$ )最直接之證明。而鈾原子核發生分裂時，釋放出大量的能量與2~3個中子，中子可以繼續造成鈾核的分裂，產生所謂的連鎖分裂反應。

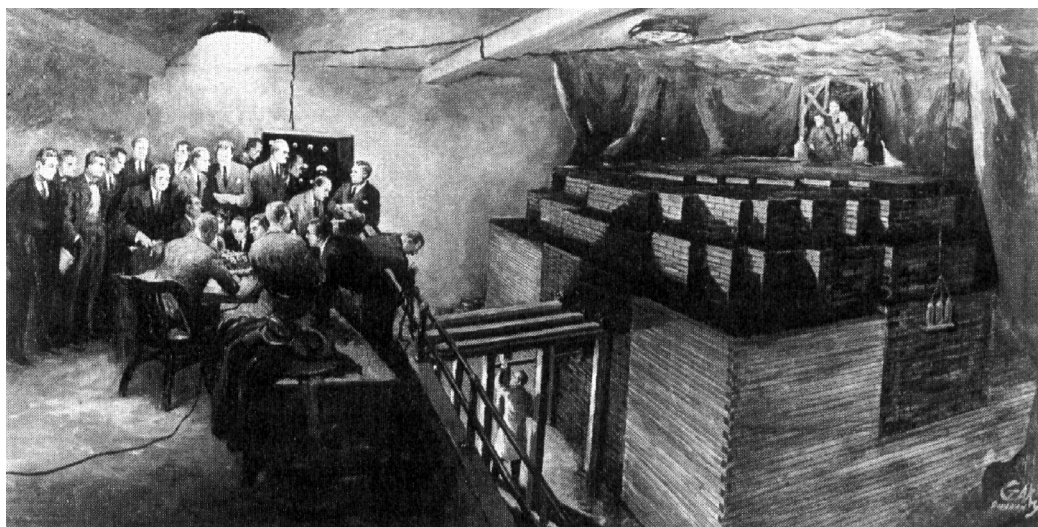
1942年12月，在原子能之父費米

(Enrico Fermi)的指導下，核分裂連鎖反應的概念在美國芝加哥大學的田徑場西側看台下的實驗裝置Chicago Pile-1(簡稱CP-1)中獲得證實，該實驗裝置的尺寸大小為9公尺×9.5公尺×6公尺，功率介於0.5~200瓦，是世界上第一座核子反應器(圖一)。

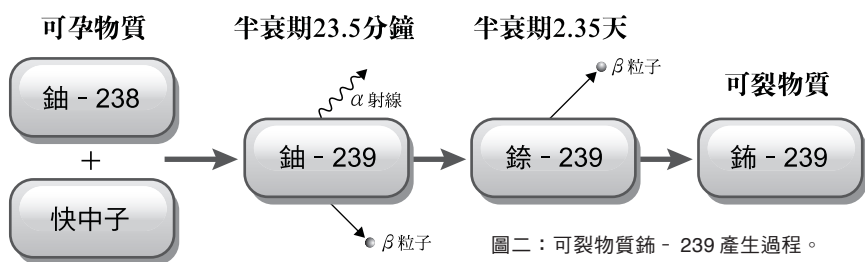
## 鈾 - 239 原子核的發現

1941年西博格(Seaborg)首度於柏克萊加州大學實驗室，以氘撞擊鈾-238而合成鈾元素(plutonium)；鈾有兩種同位素，即鈾-238(含量99.3%)與鈾-235(含量0.7%)，而僅有鈾-235可以維持核分裂連鎖反應(稱為可裂核種，fissile)，但

是鈾-238原子核吸收一個中子後，經過二次 $\gamma$ 衰變(即原子核釋出2個電子)成為鈾-239原子核，鈾-239亦可以維持核分裂連鎖反應，故可作為製造原子彈的材料或反應器的燃料，圖二所示為鈾-239產生的過程。世



圖一：世界第一座核反應器 CP-1 的現場。

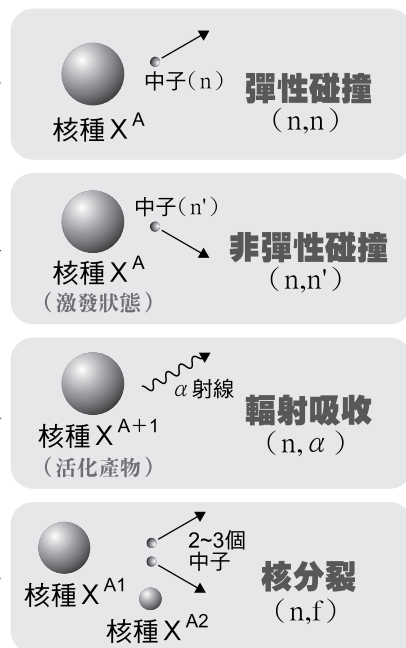
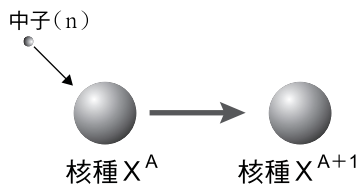


圖二：可裂物質鈾 - 239 產生過程。

世界上另一個可以透過吸收中子轉換為可裂核種的原子核為鈾 - 232，吸收中子經二次β衰變成為可裂核種鈾 - 233 原子核。這些吸收中子後可以成為可裂核種的原子核稱為可孕核種 (fertile)。

中子不帶電荷，可以無限制地接近原子核，中子與原子核間可能發生的反應如圖三所示，包括彈性散射、非彈性散射、中子吸收、帶電粒子反應、中子產生反應及核分裂等各種反應。中子與原子核發生何種反應的機會與核種及中子行進的速度(或中子的動能)有關。在核工的領域中，以「反應截面」(cross section)代表發生某種核反應的機會，圖四為鈾 - 238核的中子吸收截面；如圖所示，吸收截面與中子能量間的關係，可以分為三個區域；快中子區、共振中子區與熱(慢)中子區。

吸收截面於快中子區較低，慢中子區較



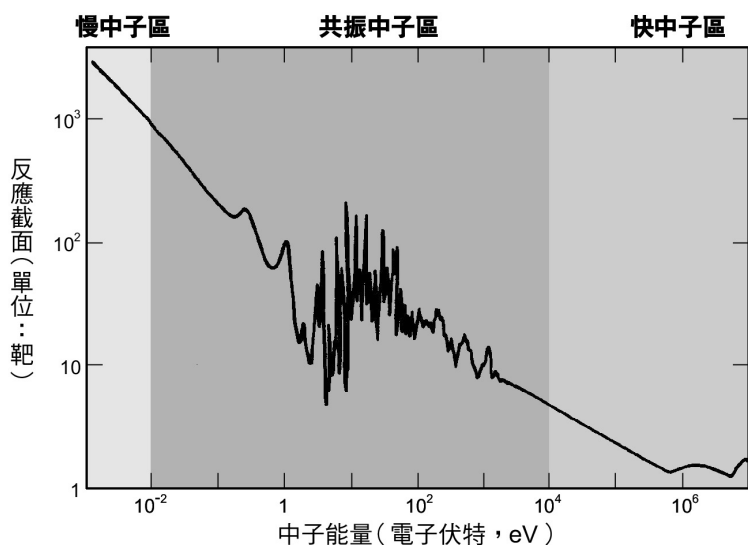
圖三：中子與原子核作用分類示意圖 (f代表核分裂 fission)。

高，其數值差異達數個數量級。當中子具有的能量與中子在原子核內軌道運動的能

階差相同時，特別容易被吸收，形成中子吸收共振區，而重核的共振區吸收在核反應器設計上扮演著重要的角色。

核分裂反應釋出之中子為快中子(即動能較高，移動速度較快)，能量介於  $10^5 \sim 10^7$  電子伏特 (eV) 間。快中子較不易誘發核分裂反應，故在設計核反應器時，需於反應器的爐心置入質量數較輕的核種做作為減速材料(緩和劑)，中子透過碰撞時之能量交換，減速成為慢中子(或稱為熱中子，能量小於  $10^{-2}$  電子伏特)，此類型反應器稱為熱中子反應器，可以使用鈾 - 235 含量(濃縮度)較低的鈾或天然鈾為燃料。

設計核反應器時，可以藉由材料的選擇，控制中子能量的分布(能譜)，進而決定中子被哪一



圖四：鈾 - 238核中子吸收截面與中子能量間的關係圖， $10^4$ eV以上為快中子區， $10^{-2}$ eV以下為慢中子區，中間為共振中子區。(反應截面單位：1靶 =  $10^{-24}$  平方公分)

種核種吸收；例如採用石墨為緩和劑的反應器，分裂產生的快中子在減速過程中，中子能動減緩較趨近連續，故較易成為所謂的共振區中子，為鈾-238核所吸收，產生鈾-239。若使用普通水（輕水）為緩和劑，中子有可能一次碰撞，即喪失全部動能，跳過共振區，成為熱中子；故利用普通水當緩和劑的反應器不適合生產鈾。

## 鈾生產反應器

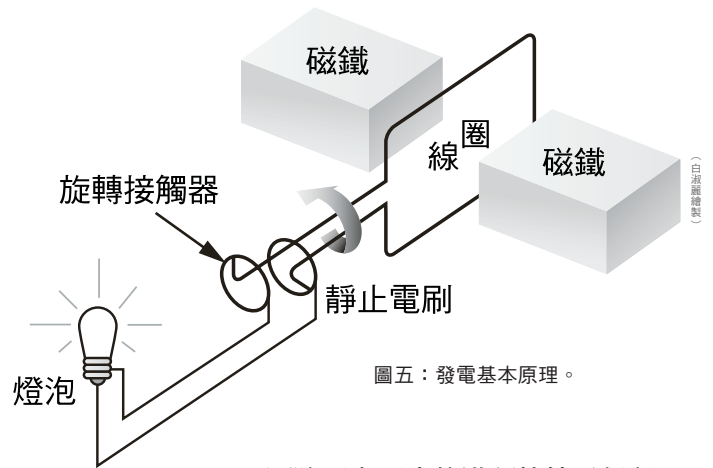
當核分裂連鎖反應的理論與現象獲得證實後，在當時以發展原子彈為目的曼哈頓計畫（Manhattan Project）主導下，美國於華盛頓州的漢福德（Hanford）興建了第一座生產鈾-239的石墨水冷反應器（B-Reactor），初始熱功率為25萬瓩（即千瓦），後來增加至221萬瓩。二次世界大戰結束前後，美國先後在漢福德核子保留區興建8座石墨水冷反應器，最後一座（N-Reactor）於1963年運轉。

石墨水冷反應器的設計概念，與發生車諾比災變的前蘇聯自行設計的RBMK-1000型反應器完全一樣。美國的N-Reactor於車諾比災變後7個月（1987年1月）停機。美

表一：一代核反應器

國家	反應器類型	特色
英國	石墨氣冷反應器	■使用石墨減速，利用二氧化碳冷卻。
加拿大	重水反應器	■使用重水減速，利用普通水或重水冷卻。 ■採用天然鈾為燃料，又稱為 CANDU 反應器*。
蘇聯	石墨水冷反應器	■採用石墨減速，普通水為冷卻劑，這種反應器又稱為 RBMK 反應器。
美國、蘇聯	輕水（普通水）反應器	■輕水同時是減速材料與冷卻劑。

（\*：CAN代表加拿大，D代表重水，U代表天然鈾）



圖五：發電基本原理。

國除了在西岸的漢福德核子保留區建有石墨水冷鈾生產反應器外，在東岸的薩凡納河（Savannah River）廠址建有重水鈾生產反應器。

前蘇聯之所以大規模興建石墨水冷之RBMK反應器，也是為了在發電的同時，亦可生產鈾-239。英國選擇發展石墨氣冷反應器也是為了生產鈾-239。印度則選擇重水鈾生產反應器。根據新聞報導，北韓的鈾生產反應器亦採石墨為緩合劑。鈾亦可作為核反應器的燃料，事實上生產鈾也不是什麼壞事，一切全看擁有者如何使用，唯鈾-239有可能被誤用來作為核武一直是核電發展的隱憂。

## 動力反應器與核能發電

透過冷卻劑將反應器內核分裂產生的熱能帶出，將工作流體（水）自液態轉為汽

態，推動汽渦輪機，帶動機械裝置，即可產生動力。若將汽渦輪機的另一端連接螺旋葉片，即成為船的推進器。若另一端接的是線圈，轉動的線圈切割磁場，造成通過線圈磁力線數目的改變，磁場強度改變時即可產生電力(圖五)，核能發電的過程與傳統燃煤電廠亦無差異，僅是能量的來源不同。

## 一代核反應器

二次世界大戰結束後，各種類型的反應器設計如雨後春筍般地出現。設計的種類主要分為快中子與熱(慢)中子反應器兩種，快中子反應器主要利用快中子誘發核分裂反應，熱中子反應器則是利用熱中子誘發核分裂反應。

### 熱中子反應器

熱中子反應器因反應器中使用的緩和劑(減速材料)及冷卻劑不同，而有各類型的設計(表一)。

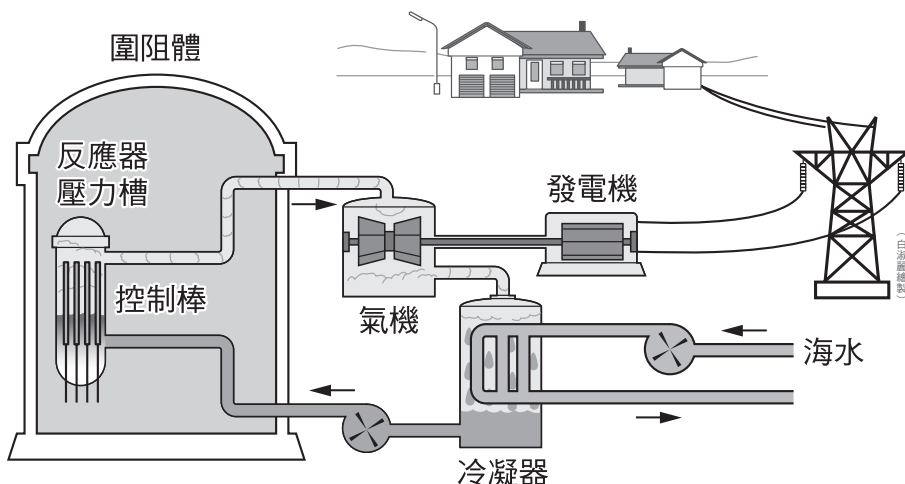
### 輕水式反應器

輕水式反應器又分為沸水式(圖六)與壓水式(圖七)兩種。兩者主要的差異在於沸水式反應器的冷卻水直接在壓力槽(reactor vessel)內達到沸騰推動汽機(turbine)。壓水式反應器採用較高的壓力，水不會在反應器內沸騰，加熱過的冷卻水流入蒸汽產生器，將能量交給工作流體，將工作流體蒸發以推動汽機。由於普通水中的氫原子核的熱中子吸收截面相當大，故必須使用鈾-235含量較天然鈾為高的濃縮鈾為燃料，輕水

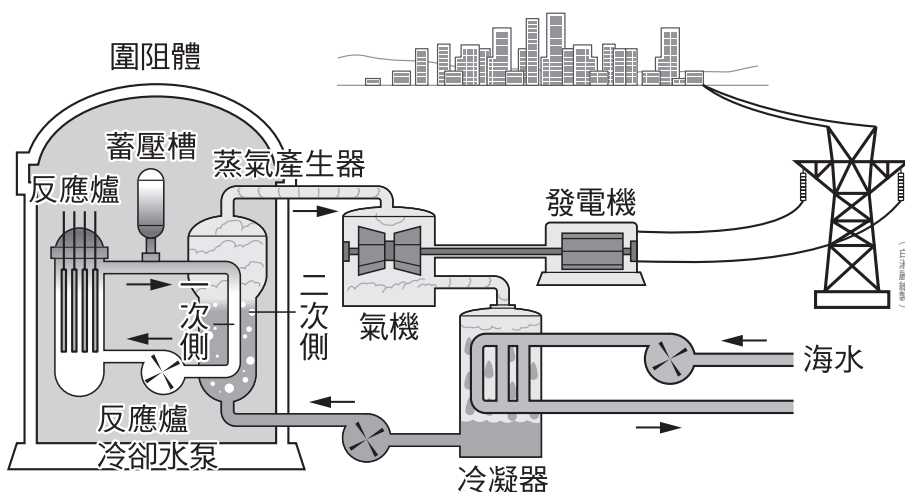
式反應器所使用的鈾燃料的濃縮大約介於3~6%間；使用石墨或重水為減速材料的反應器採用天然鈾即可達到臨界。

事實上，各國發展反應器時，是依據各自的需求與工業能力。採用石墨或重水為減速材料的反應器，通常亦可用於生產鈾-239核種；這兩種反應器均不需要大型之壓力槽，僅使用小尺寸的壓力管即可；此外，也不需要濃縮鈾，所以較適合重工製造技術尚待發展的國家。

美國選擇輕水式反應器的原因是看上了它的高功率密度，故小體積的反應器即可產生足以帶動船隻的動力。美國當初發展動力

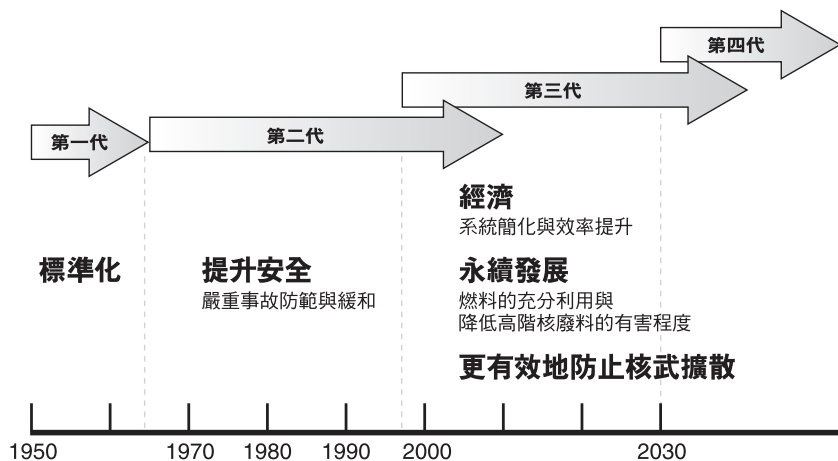


圖六：沸水式反應器系統。冷卻水進入反應器壓力槽，加熱成為水蒸汽，水蒸汽進入汽機，帶動轉動軸的轉動，轉動的另一端接有線圈，線圈切割發電機內之電磁場，產生電力。



圖七：壓水式反應器系統。壓水式反應器的冷卻水不會在反應器內汽化為水蒸汽，自反應爐流出之高溫的水，進入蒸汽產生器的一次側，將熱傳給二次側，造成流經二次側的工作流體沸騰為水蒸汽而推動汽機。

反應器的目的即是作為潛水艇的動力來源，美國第一艘核子動力潛艇鸚鵡螺號（USS Nautilus SSN-571）於1957年下水。若將潛艇的推進引擎放在陸地上，把推動螺旋槳換為汽機發電機即成為核能電廠。



圖八：動力核反應器發展與改進歷程。

## 快中子反應器

當核分裂反應是由快中子激發時，會比慢中子引發之核分裂反應釋出更多的中子，在維持核分裂反應的同時，有足夠的中子將鈾-238核轉換為鈾-239核，故在消耗可裂核種的同時，會產生更多的可裂核種（鈾-239），亦即有滋生（breeding）的效果，故快中子反應器又稱為滋生反應器。

由於快中子誘發核分裂反應的反應截面較低，故快中子反應器須採用鈾-235含量較高的鈾或鈾-239為燃料。快中子反應器為了維持中子的速度，需避免質量數較低的核種存在於系統內，故通常採用液態金屬（通常為鈉、鈉鉀合金或鉛）為冷卻劑。雖然世界上第一座產生電力的反應器是以液態鈉為冷卻劑的快中子反應器（美國實驗滋生反應器，Experimental Breeder Reactor-1），但由於無法克服液態金屬鈉與容器間的腐蝕作用，以及鈉與含氧物質起劇烈反應的技術問題，截至目前為止，並沒有大規模之商業化的使用。

有些一代核反應器的發展是作為交通工具的推進器，除了美國用於潛艇的壓水式反應器外，蘇聯核子動力船隻上使用之反應器為鉛冷之快中子反應器。美國亦曾嘗試發展適合用於推動飛機引擎的熔鹽式反應器

（molten salt reactor, MSR），熔鹽式反應器為熱中子反應器。

我們目前使用的商用核反應器均為熱中子反應器，僅0.5%鈾的能量被利用，若能夠大量使用滋生反應器，並發展可避免鈾元素擴散的燃料再處理技術，可大幅提高鈾的使用程度，達到理論值。換句話說，地球上的鈾足夠我們使用數千年，而且地球上鈾的含量較鈾更多。總而言之，在核融合反應器技術未完全成熟前，核分裂核反應器將扮演著不可取代的地位。

## 二代核反應器

經過初期的嘗試與發展，各國均將其反應器標準化，大量地興建，核工界稱當初示範型之反應器為一代核反應器，二代核反應器為標準化之核反應器，反應器的各世代如圖八所示。

根據國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）的數據，至2010年為止全世界有438座核能機組在30個國家運轉，總裝置容量為34億2047萬瓩。除了日本有5座（總裝置容量為643.5萬瓩）被視為三代核反應器的進步型沸水式反應器（advanced boiling water reactor）外，其他均可被歸類為二代核反應器。

## 安全議題

核反應器的安全問題一直是大眾關懷的重點。為了確保安全，必須防止放射性物質外釋到環境中，在設計上，各類型的核反應器均採用多層屏障以包覆放射性物質；事故中只要有一層屏障發揮功能，放射性物質便沒有機會外釋。

核反應器安全有兩個議題，首先是當設備故障時，能否適時地終止核分裂連鎖反應，或防止其中子數量驟升，造成反應器瞬間產生大量的熱而解體；另一個議題為核分裂反應終止後，不穩定的分裂產物產生的衰變熱要能適當移除，避免反應器內因累積過多的熱而熔毀。

反應器的第一類型事故——反應度（reactivity）事故，指的是從事故發生到反應器解體，可能僅有數秒鐘時間的事故，基

本上，可能發生反應度事故的反應器是完全不可接受的。第二類型的事故，是熱移除的事故，由於衰變熱的產生速率於停機後 10 分鐘內僅剩下停機前的 1.4%，故通常從事故發生到爐心熔毀會有一段時間，可以啟動各種緊急系統，只要能將衰變熱帶出，即不會導致爐心熔損，成為嚴重事故。

第一類型事故的預防不能依靠工程設計，必須要從反應器本身的物理特性來確認沒有發生的可能性，而二代反應器中除了石墨水冷式反應器（表一），均滿足此項要求。此外石墨水冷反應器有可能發生類似車諾比的災變，在 70 年代中期的教科書中即有明確的介紹，對核工專業人士來說更是一項基本常識。

除石墨水冷反應器外，二代核反應器最大的單門為喪失熱移除能力的事故，為確保

## 二代核反應器類型與使用情形

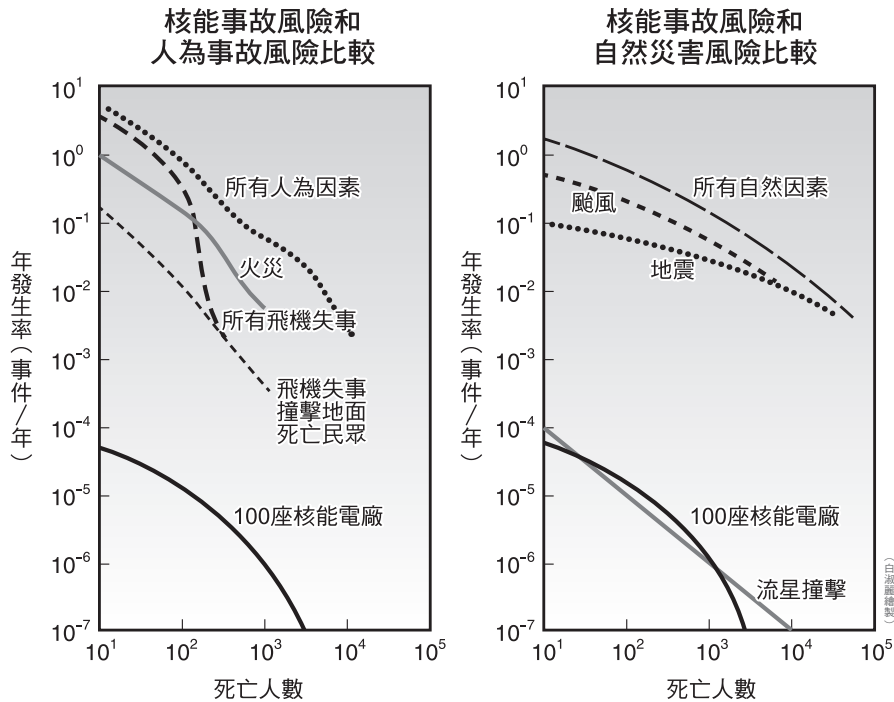
表二：二代核反應器

類型	緩合劑	冷卻劑	燃料	數目	總裝置容量(萬瓩)
壓水式反應器 (PWR)	普通水	普通水	濃縮鈾	66	24552.8
沸水式反應器 (BWR)	普通水	普通水	濃縮鈾	87*	7751.6
重水式反應器 (PHWR)	重水	普通水	天然鈾	46	2284.0
石墨水冷反應器 (LWGR)	石墨	普通水	濃縮鈾	18	1021.9
氣冷式反應器 (AGR)	石墨	二氧化碳	濃縮鈾	15	894.9
總量				433	36561.2

(\*不包括日本 5 座進步型沸水式反應器(三代)，總裝置容量 643.5 萬瓩。)

目前運轉中之主要二代核反應器類型及數量與總裝置容量如表二所示，二代核反應器主要是壓水式反應器與沸水式反應器，重水式反應器亦占有一席之地。重水式反應器主要製造與使用國家為加拿大與印度；加拿大設計製造的 CANDU 反應器亦外銷至韓國、中國、阿根廷等其他國家。石墨氣冷反應器只有英國在使用，石墨水冷反應器也只有蘇俄在使用。英國後來放棄了石墨氣冷反應器，改採美國西屋公司設計之壓水式反應器，於 1995 年商轉。

輕水式反應器的製造國與廠商包括法國、日本、德國、中國、瑞典等；蘇聯亦發展出自有的壓水式反應器 (VVER)，並外銷至其他共產國家，中國亦向蘇聯採購兩座機組，分別於 2006 與 2007 年商轉。



圖九：1975年《反應器安全研究報告》評估之核電廠風險。縱座標為事故年發生率，橫座標為事故發生後造成之死亡人數；死亡人數較小的事故，其發生的頻率亦較高。

核反應器的安全，各類型反應器均備有多重、多樣之緊急安全系統，移除事故中的衰變熱；為防止放射性物質於事故中外釋到外界環境，輕水式與重水式反應器還設計有圍阻體（containment），於發生事故時將具有放射性物質的系統與外界環境隔離。

緊急安全系統與圍阻體的設計、製造、安裝、維護及運轉均須符合嚴格之法規要求，接受國家法規管制單位的監督。多層屏障、緊急安全系統、法規管制、緊急應變計畫構成了核能安全執行的「深度防禦」（defense in depth）哲學。

在法規術語上，核電廠動力反應器的安全設計是針對「設計基準事故」（design basis accidents），指核電廠發生此類型事故時，緊急安全系統可以將電廠帶至安全停機的狀態，而圍阻體也可以確保外界環境不會有放射性物質污染的疑慮。一般均相信，

電廠不會發生比設計基準事故還要嚴重的事故（即爐心熔損的嚴重事故）。由於緊急安全系統與圍阻體的存在，增加了核電廠的建造成本、電廠的複雜程度及運轉維護的繁瑣。

### 核電廠安全度評估

1970年代初期，美國國會詢問當時原子能委員會（Atomic Energy Commission）的主席，核電廠是否絕對安全？於是原子能委員會委託麻省理工學院拉思姆森

（N.C. Rasmussen）教授執行一個大型計畫，利用機率與統計的方法，量化美國具代表性核能電廠的風險，評估的對象包括壓水式與沸水式反應器電廠各一座。

計畫結果為1975年發表，代號為WASH-1400之《反應器安全研究報告》（Reactor Safety Study）。報告最重要的結論為：電廠緊急安全系統有許許多多的零組件，有可能在同一時間、有一個以上之零組件發生失效，在某些失效組合下，會造成多重、多樣的安全系統喪失功能，導致比設計基準事故更嚴重的爐心熔損事故。但爐心熔損事故的發生，並不代表毀滅性的災難，故核電廠雖然非絕對安全，但其風險遠低於自然與人為災害，所以是在可接受的範圍內。

圖九所示為1975年發表之《反應器安全研究報告》的結果，然結果發表後並未獲得各界的認同，核工業界認為該報告危言聳

聽，反核者認為是在粉飾太平。1979年3月的美國三哩島核電廠事故證明了WASH-1400報告結論的正確性，比設計基準事故更嚴重的爐心熔損事故真的發生了！但由於圍阻體發揮功能，事故並未造成民眾任何實質的傷害，僅有微量的放射性物質於事故中外釋，其外釋量甚至低於WASH-1400報告的預測值。

自此，《反應器安全研究報告》採用的安全度評估方法（probabilistic safety assessment, PSA）獲得全球核能界廣泛的認同，投入大量的人力物力進行相關研究與技術發展。目前該項技術已被積極地用於核電廠的設計與日常運轉，以提升核電廠安全。

### 功率提升與執照更新

根據國際能源總署（International

Energy Agency, IEA）數據，全球電力約有14~15%來自核能。如前所述，這438部機組（除了日本的5座進步型沸水式反應器外，其他均為二代反應器），已累積將近有1萬4000反應器-年（1反應器-年指1座反應器運轉1年）之運轉經驗，顯示其安全紀錄可能是大型工業設施最好的。最為大家所詬病的車諾比核電廠災變並不會發生在其他類型之二代核反應器，而二代核反應器發生之最嚴重事故為美國三哩島事件，事故中並沒有任何民眾或從業人員受到實質傷害。

438座二代反應器中，使用年限介於20~30年間的有215座，超過30年的有133座。二代反應器原先設定之運轉年限為40年；從理論面及實務面來看，一個核能機組在運轉的第一天到永久停機的前一天，都是同樣地安全；如果是一個安全的核電廠，為

## 二代反應器使用年限延長實例

德國

有17座核反應器，總裝置容量為2033.9萬瓩，占比為20.6%；2009年核能發電量占比為26%。1998年選舉後成立之聯合政府決定逐漸淘汰核能，2000~2001年間德國政府與電力業者達成協議，核能電廠的平均運轉年限定為32年；到了2009年，新政府已決定更改政策，不再關閉達運轉年限的電廠。估計將運轉年限自32年延長至60年，可為電力公司帶來1000億歐元的利潤，現在最大的爭議為政府將如何分一杯羹。

瑞典

目前有10部核能機組，總裝置容量為939.9萬瓩，供應約40%的電力。瑞典早在1980年即決定放棄核能，1988年決定於1995年開始關閉核能電廠，預計到了2010年時瑞典將沒有核能電廠。此項政策導致1999年與2005年關閉了離丹麥首都哥本哈根很近的兩座老舊小型沸水式反應器，然而瑞典國會於2010年正式推翻1980年的政策，且國會以些微差距，通過於現有場址增加核能機組的計畫，所以瑞典政府已同意業者繼續運轉核電廠超過2010年。

為了彌補關閉兩座核電機組所損失的裝置容量（120萬瓩），瑞典的電力公司積極地提升運轉中機組的裝置容量，目前已累積增加105萬瓩。瑞典在核發功率提升執照時，均是以運轉60年為考量。



什麼不能繼續使用，好讓地球的資源能夠充分地利用。唯電廠是否要運轉超過 40 年，必須事先決定，對電廠的全部設施做一個全面的體檢，詳細地整理各重要系統與組件的運轉經驗與維修數據，依照法規管制單位的要求，提出執照更新的申請。

美國已允許將電廠的運轉年限由 40 年延長為 60 年，美國 104 部機組已有 75 部提出申請，21 部審查通過。美國能源部每年編列數千萬美金的經費，委託愛達荷能源環境工程實驗室（Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL）進行相關研究，精進分析測量技術，提早探討二代反應器運轉至 80 年的可能性。

大多數的二代反應器於 40 年前設計，當時的設計工具不是很精確，為確保安全，通常採較保守的設計，亦即保留較大的安全餘裕，讓實際運轉狀況與安全限值有較大的距離。在計算模式、分析工具與量測技術有長足進步的狀況下，當初為確保安全而保留的安全餘裕已沒有必要。換句話說，電廠可以在不違反安全限值的前提下，提高運轉功率，這就是所謂的功率提升。美國已完成功率提升的總功率達 564 萬瓩，等於 4.2 座龍門電廠的機組，目前尚有 59.5 萬瓩審核中，預期會有 289.4 萬瓩提出申請。

雖然目前興建中的核電廠是以三代（III）或三代加（III+）為主，但絕不代表二代反應器已走入歷史。二代反應器順利而安全的運轉，可以提供穩定、廉價、低碳的電力，不但符合人類全體的利益，更是電力公司印鈔票的機器。

### 三代（III）與三代加（III+）核反應器

1970 年代初期的第一次能源危機、1979 年的三哩島事故、與 1986 年車諾比災變對核工業的發展帶來極大的衝擊，除了法國、日本、與韓國仍積極興建核電廠外，其他國家的核能機組幾乎陷於停滯的狀況。

在此空窗期間，美國與歐洲的核子工程師痛定思痛，經過業者（反應器製造商與電力公司）、核安管制者（政府機構）與專家（核子工程師）長時間詳細深入之密集討論後，將傳統式電廠的安全缺陷一一找出，並配合業者需求，最後在核安管制單位認可的情況下，彙整出美國電力公司需求文件（utility requirement documents），與歐洲電力公司需求文件（European utility requirement），針對二代核反應器興建、維修、運轉及安全上的議題進行細部的改善，發展所謂的三代核反應器。

### 三代核反應器的設計原則

三代核反應器設計的重點為確保在固定工期與固定投資下，完成核電廠的興建、增加維修的方便性、提高運轉上的彈性、降低電廠發生爐心熔損嚴重事故的可能性，除此之外亦設計有預防及緩解嚴重事故的設施。

三代核反應器的設計原則，是採用二代核反應器已積累之成熟的工程技術和運行經驗為基礎，針對其不足之處，進一步採用經過開發驗證可行的新技術，以求顯著地改善其安全性和經濟性。

在安全性的要求上，爐心熔損事故的年發生機率不大於  $1.0 \times 10^{-6}$  每反應器 - 年，而大量放射性釋放到環境的事故年發生機率不大於  $1.0 \times 10^{-7}$  每反應器 - 年，這些數字均比二代核反應器好一個數量級；在經濟性的要求上，要求能與複循環發電的天然氣電

廠相競爭、機組可利用率大於等於 87%、建設期間不超過 54 個月、運轉設計年限設定為 60 年。

事實上，早在美國與歐洲國家規畫討論三代核反應器的設計原則前，日本的日立與東芝兩家公司已與美國奇異公司於 1980 年代中期，合作發展進步型沸水式反應器（advanced boiling water reactor, ABWR），為最早問世之三代核反應器。頭兩座進步型沸水式反應器機組為日本東京電力公司柏崎刈羽核電廠的六號與七號機，柏崎刈羽六號機於 1996 年 1 月商轉。台電龍門電廠所採用的機組即為同型之進步型沸水式反應器。

## 非能動緊急安全系統

第三代核反應器也如前所述二代核反應器備有多重、多樣之緊急安全系統，以移除事故中的衰變熱，並確保多層屏障的功能，防止放射性物質外釋到環境。由於緊急安全系統的設計複雜，需要外加的動力來驅動，例如馬達或汽機帶動的泵。

緊急安全系統喪失外來動力時，即無法執行既定的功能，若發生多重故障時，反應器有可能發生嚴重事故。為改善此項缺陷，某些被稱為三代加的核反應器利用重力將緊急冷卻水注入發生事故的反應器，再藉由自然對流將衰變熱帶出系統。重力注水與自然

## 三代與三代加核反應器製造商

業者對所謂的三代與三代加核反應器間並沒有明確的區分。撇開尚在概念性設計階段的機組不談，在市場上可以採購到的機組有：

- 新型壓水式反應器 (AP-1000)：美商西屋公司設計、製造。
- 新型壓水式反應器 (APWR-1700)：日商三菱公司設計、製造。
- 歐洲壓水式反應器 (EPR-1600)：法商亞瑞華公司設計、製造。
- 新型壓水式反應器 (VVER-1200)：俄羅斯設計、製造。
- 新型壓水式反應器 (APR-1400)：韓國設計、製造。
- 新型沸水式反應器 (ABWR)：美商奇異公司設計，奇異公司與日商日立公司合作製造，或日商東芝公司與西屋公司合作製造。
- 經濟簡易沸水式反應器 (ESBWR)：美商奇異公司設計、製造。
- 新型重水式反應器 (Advanced CANDU Reactor, ACR-1000)：加拿大設計、製造。

如上所列，三代核反應器均為熱中子反應器，以普通水或重水為減速材料，以水為冷卻劑，而二代核反應器中以石墨為減速材料的設計已經暫時出局。三代或三代加反應器的汽機運轉壓力溫度與二代水冷式反應器一樣，故機組發電效率並沒有改變。

各種不同設計的新型輕重水式反應器在現今核電市場上待價而沽，各有優點，各有強項。透過機型的標準化，在建廠時納入模組化施工，建造方法的制式化可以大量縮短工期，各個電廠均是齊一型式，備品可交流互用，人員經驗可交換傳承，並易累積電廠運轉維修的技術。

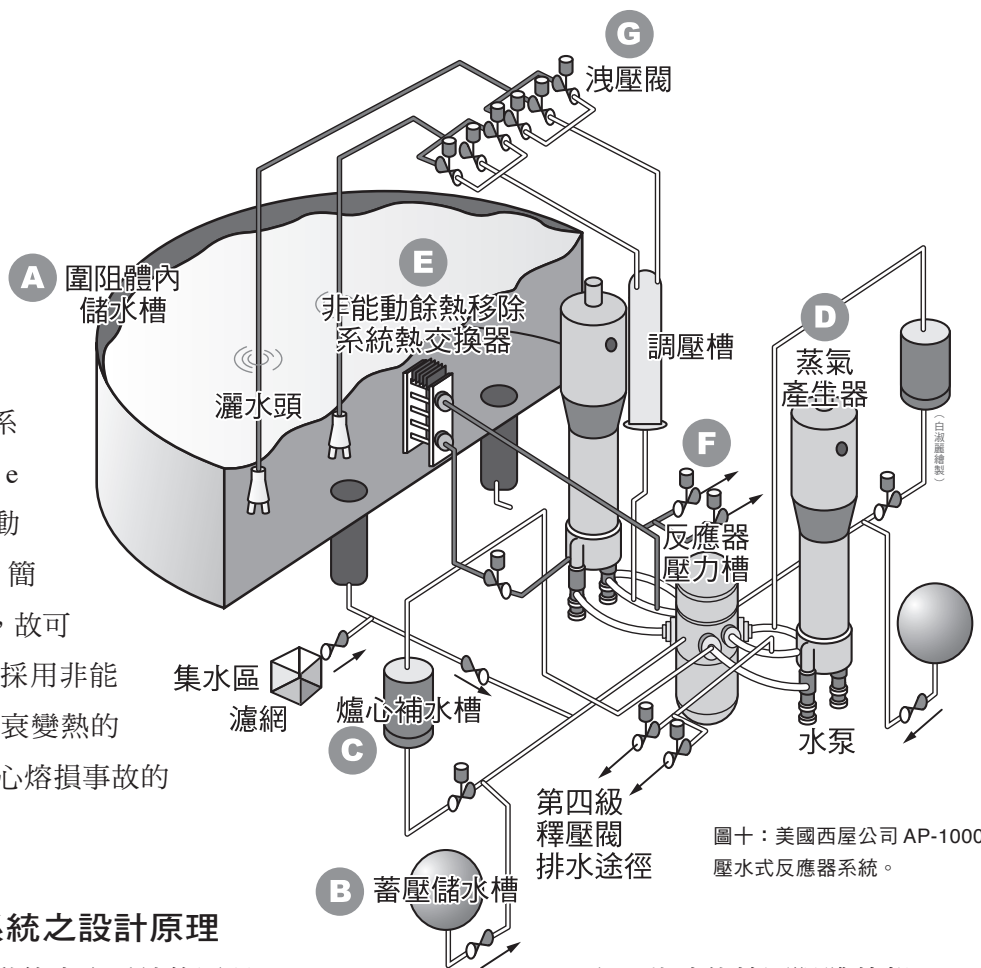
對流均為自然界的現象，不需要外來的動力驅動，故此類型之緊急系統被稱為非能動系統（passive system）；非能動系統的設計較簡單，零組件較少，故可靠度較高，所以採用非能動安全系統移除衰變熱的反應器，發生爐心熔損事故的機率會更低。

### 非能動安全系統之設計原理

為了解釋非能動安全系統的原理，在此利用美商西屋公司所設計的新型壓水式反應器（AP-1000）來介紹（圖十）。

AP-1000反應器系統將大量的緊急冷卻水置於較反應器為高的蓄水池（圖十A），部分緊急冷卻水置於以氮氣加壓的水槽（圖十B）與冷卻水系統相連通之爐心補水槽中（圖十C）。當系統發生故障，熱無法透過蒸汽產生器（圖十D）移除時，爐心中溫度較高的冷卻水，上升流入置於蓄水池之熱交換器（圖十E），將衰變熱交給蓄水池中的水，水冷卻後密度變大，向下流回壓力槽（圖十F）。蓄水池中的水將足以承受數天的衰變熱。如果冷卻水系統發生破管，冷卻水自系統流失，透過系統管路上的大型洩壓閥（圖十G）降壓，確保緊急冷卻水可以進入壓力槽（圖十F），進入壓力槽的水會再從系統流出，但流出時已將衰變熱帶出。

緊急冷卻水與衰變熱會累積在圍阻體



圖十：美國西屋公司 AP-1000 壓水式反應器系統。

內，此時位於圍阻體外部上方的另一個蓄水池，會將水沿著圍阻體外牆灑下，外冷內熱的圍阻體氣體空間內會形成自然對流，熱會自內部傳到外牆移除。圍阻體外部上方的蓄水池（圖十一A）可以非常方便地以水車補水，故不會有用罄的疑慮。若無法及時補水時，亦可以透過圍阻體外牆外側之氣體夾層通道（圖十一B）內空氣形成的自然對流將熱移除。

直至2010年全球共有61座興建中的核能機組，其中24座在中國，次多的為蘇俄，有11座；並非所有興建中的機組均為三代或三代加核反應器。以中國為例，雖然政策上決定以美國西屋公司的壓水式反應器AP-1000為日後發展的重點，亦採購了兩座法國亞瑞華公司的壓水式反應器EPR；但中國興建中的機組仍有一大部分為自行開發之仿法國早期設計的壓水式反應器，他們稱其為二代加（II+）核反應器。

## 四代核反應器

二代核反應器安全的運轉經驗，及提供之廉價而穩定的電力，使核能成為替代化石燃料的選項；核能發電在發電時不會排放二氧化碳，在二氧化碳排放減量的世界趨勢下，核能成為世界許多國家選擇大規模使用與發展的能源。在核能復甦浪潮中，全球將大規模興建三代及三代加核反應器。

如前所述，二代及三代核反應器均為熱中子反應器；熱中子反應器消耗的可裂核種（鈾 - 235）大於產生的可裂核種（鈾 - 239），然而天然鈾中的鈾 - 235 含量僅占 0.7%，待鈾 - 235 用罄後，剩下的鈾 - 238 將無法使用。僅靠熱中子反應器的核分裂來提供核能，估計只能使用數十年到近百年。

過去核能的使用局限於發電，若欲更廣泛地使用核能取代化石燃料，反應器的設計需要有劃時代的改變。針對此需求，四代核反應器國際論壇（Generation IV International Forum, GIF）於 2001 年 5 月成立，以求發展新世代的核反應器。目前參與的國家包括阿根廷、巴西、加拿大、中國、歐盟、法國、日本、韓國、蘇俄、南非、瑞士、英國與美國等 13 個成員。

新世代的核反應器的設計目標為安全、適當地防止核武器材料的擴散、減少放射性廢棄物的產量、有效地使用自然資源且具經濟競爭力。GIF 參與成員於 2002 年規畫出「四代核反應器技術路徑」（Generation IV Technology Roadmap），選定 6 種反應器概念做進一步的發展：

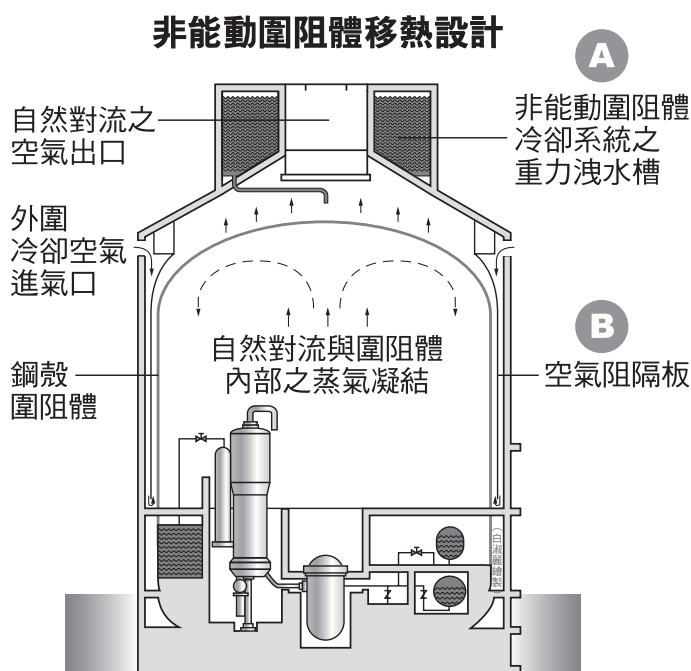
- 一、鈉金屬冷卻快滋生反應器（sodium cooled fast reactor）
- 二、鉛金屬冷卻快滋生反應器（lead cooled faster reactor）

- 三、氣冷式快滋生反應器（gas fast reactor）
- 四、熔鹽式反應器（molten salt reactor）
- 五、超臨界水反應器（supercritical water reactor）
- 六、超高溫氣冷反應器（very high temperature reactor）

前三種反應器均為快中子滋生反應器；熔鹽式反應器與超臨界水反應器可以為快中子反應器或熱中子；超高溫氣冷反應器為以石墨為減速材料，氬氣為冷卻劑的熱中子反應器。四代核反應器目前均屬於概念設計階段，依照規畫的技術路徑，將於 2030 年開始商轉機組的建造。其中比較特殊的是超高溫氣冷反應器，美國已選定其為下一代核反應器（next generation nuclear plant, NGNP），而第一部示範機組預定於 2021 年開始商轉。

### 超高溫氣冷反應器

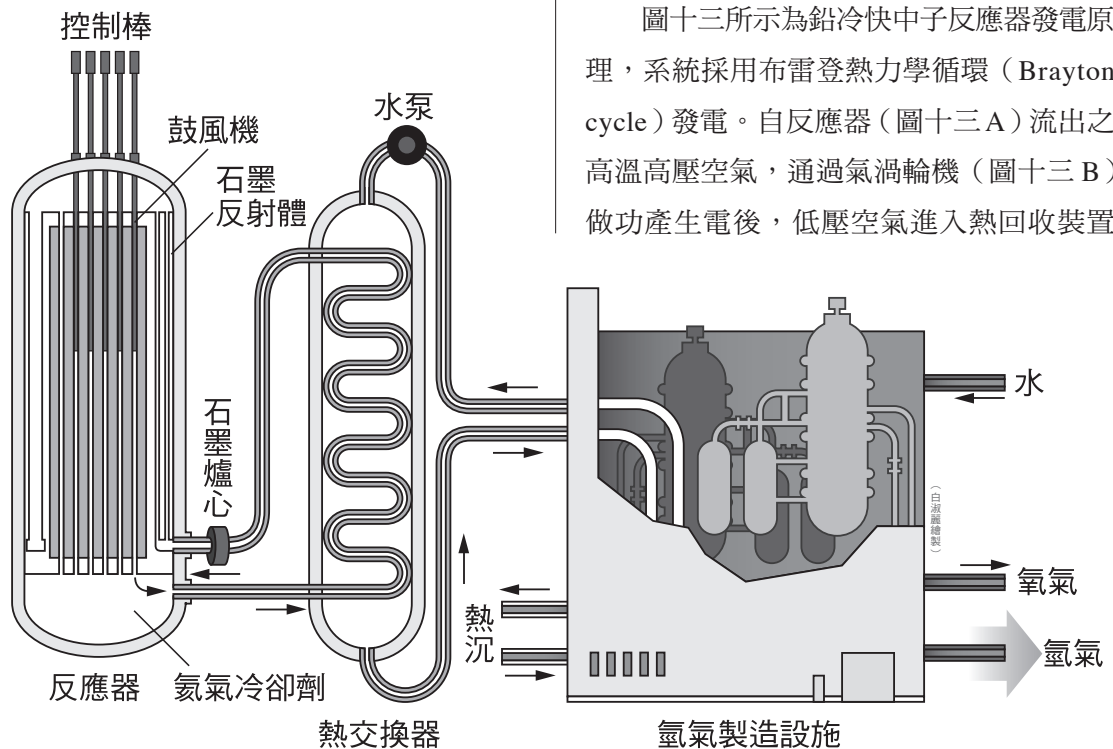
超高溫氣冷反應器（圖十二）最大的特點為可以產生溫度高達 950°C 的高溫。高溫



圖十一：美國西屋公司 AP-1000 壓水式反應器圍阻體。

能源轉換裝置的燃料，或肥料製作的原料。但美國目前積極發展此型反應器的原因不只是为了產生氫氣，而是希望將高溫氣體用於許多化工程序（process heat），例如從油頁岩與油砂提煉石油等，利用核能產生高溫氣體，可以大幅降低化石燃料的消耗與減少二氧化碳的排放。美國第一座超高溫氣冷反應器將會建於化工廠旁邊，將同時具有供電與供氣的功能。

超高溫氣冷反應器這種石墨緩和氦冷卻的反應器並非新的嘗試，美國早期亦曾興建兩座此類型的電廠，唯運轉於較低的溫度；中國亦有示範性的小型反應器，且目前正規畫興建此類型的商用動力反應器。這類的反應器不會發生類似車諾比的災變，主要是因為作為緩和劑的石墨可於事故中吸收大量的熱，故此型反應器的安全程度高於輕水反應器，唯其功率密度遠遠低於輕水反應器，限制了它的發展。



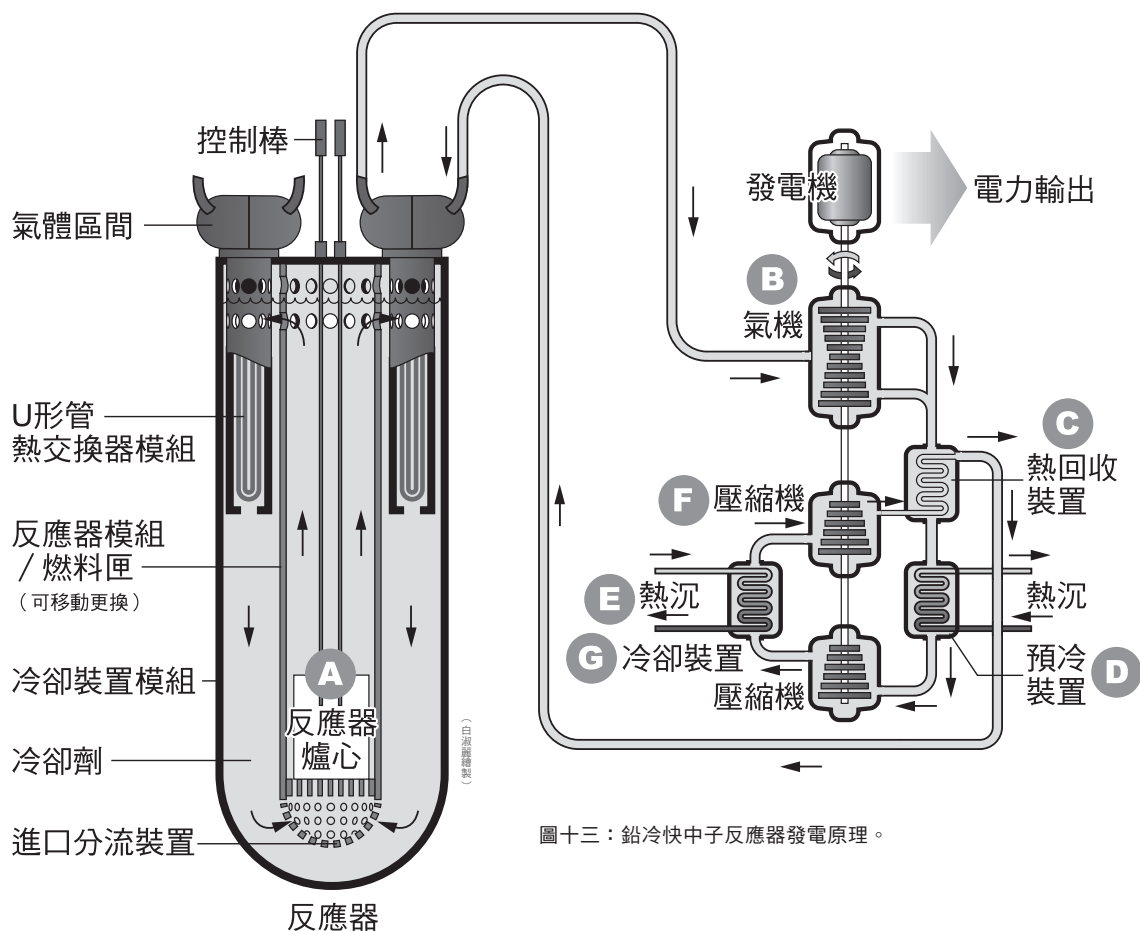
圖十二：超高溫反應器的概念示意圖。

## 鈉 / 鉛金屬冷卻快滋生反應器

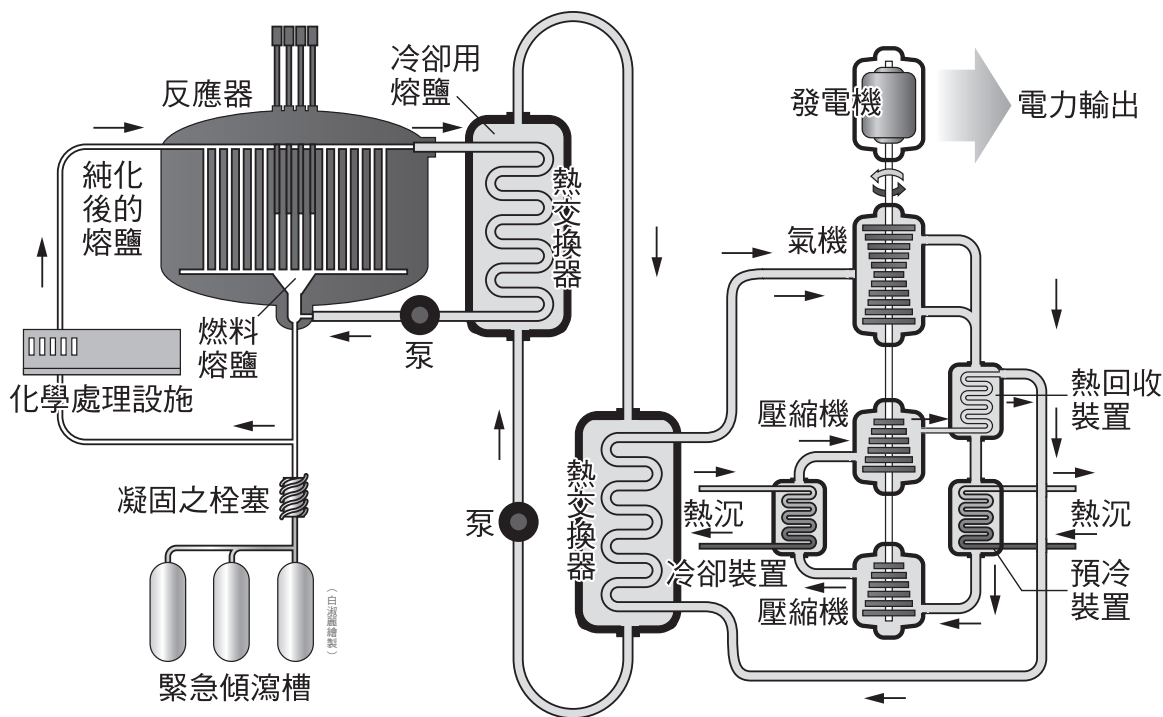
鈉金屬冷卻快滋生反應器與鉛金屬冷卻快滋生反應器並非新的設計，世界第一座產生電力的反應器即為鈉冷滋生反應器，目前日本、中國均有示範型之鈉冷反應器，蘇俄已有發電之鈉冷反應器機組，將此型機組列入四代核反應器的概念發展有宣示性的意味，而鉛冷卻快滋生反應器早已在蘇俄的潛艇上使用。

四代核反應器中的鉛冷反應器的設計，是將反應器相關組件封在一個「盒子」內，能連續使用數十年不用換燃料，在反應器內的可裂核種逐漸消耗的時，亦產生新的可裂核種，以維持臨界，待反應器已無法達臨界時，再將整個反應器運走，使用者將沒有機會接觸到核燃料，大幅降低核武器材料擴散的可能性。快滋生反應器除了可以滋生可裂核種外，亦可「燒掉」使用過核燃料中的半衰期極長的超鈾原素，縮短理論上高階核廢料需要照管的時間。

圖十三所示為鉛冷快中子反應器發電原理，系統採用布雷登熱力學循環（Brayton cycle）發電。自反應器（圖十三A）流出之高溫高壓空氣，通過氣渦輪機（圖十三B）做功產生電後，低壓空氣進入熱回收裝置



圖十三：鉛冷快中子反應器發電原理。



圖十四：熔鹽式反應器。熔鹽式反應器亦採用布雷登熱力學循環（Brayton cycle）發電。為避免空氣與燃料熔鹽有直接接觸的可能，故系統中多了一個熱交換器，此熱交換器的兩側流體都是熔鹽。

(圖十三 C)，將熱傳給即將流回反應器的高壓低溫空氣；在低壓空氣進入空氣壓縮機加壓前，先通過預冷裝置(圖十三 D)，將熱傳給熱沉(即環境)(圖十三 E)；空氣的加壓分為兩個階段，即有兩個空氣壓縮機(圖十三 F)，兩個壓縮機間置有冷卻裝置(圖十三 G)，將壓縮時進入空氣的能量移除，壓縮前移除熱的目的為減小氣體的體積，以減少壓縮時所需的功，最後再流回反應器中。

### 熔鹽式反應器

熔鹽式反應器(圖十四)的燃料為液態，鈾溶解於氟化物中，於管路中循環，當流體流入石墨構成的爐心時，滿足臨界的條件，發生核分裂反應，也會產生新的可裂物質。液態燃料可以流入再處理裝置，將分裂產物與可裂核種移除。熔鹽式反應器可以用來消耗使用過的核燃料中半衰期極長的超鈾元素。其實，熔鹽式反應器並非新的設計，美國早在核反應器發展的初期，即曾嘗試將此反應器用於航空器的推動，亦曾建構兩個示範機組。

### 超臨界水反應器

超臨界水反應器是指，將傳統的普通水反應器的運轉壓力提高至超過水的臨界壓力。超臨界水吸熱時沒有「相」轉換的問題，故系統會比傳統之壓水式或沸水式反應器都簡單，同時工作流體溫度壓力的提高亦可大幅提高熱效率。而目前最先進的燃煤電廠，亦操作於超臨界狀態。

### 結語

核分裂反應的發現距現在已有 70 年，

第一座核能電廠的商轉距今也有 50 餘年。二次世界大戰結束後，核分裂動力反應器的發展如雨後春筍般地嘗試了各類型的設計，形成了所謂的二代核反應器。二代核反應器歷經了三哩島事故與車諾比災變的洗禮，提醒核能業界需要加強核電廠的安全措施，在眾人的努力之下，使得核能電廠成為安全紀錄最好的工業設施之一。

二代核反應器為人類能源的使用做出了具體的貢獻，目前的發電量占全球總發電量的 15~16%。如果沒有這些核能電廠抑制了化石資源的消耗與二氧化碳的排放，很難想像地球現在會是什麼樣子。

在化石燃料的枯竭、供應與價格的不穩定及氣候變遷所導致之二氧化碳減量的壓力下，核能開始了復甦的浪潮，市場上出現了三代或三代加反應器，但其類型仍是輕水或重水緩和的水冷卻反應器。

三代核反應器有針對二代核反應器興建、維修、運轉及安全上的議題進行細部的改善。其設計之使用年限為 60 年，同時具有延長至 120 年的潛力。由於二代及三代核反應器均為熱中子反應器，熱中子反應器消耗的鈾-235 含量僅占天然鈾的 0.7%，僅能支撐人類數十年到近百年的能源需求，為此開啟了四代核反應器的研究與發展。四代核反應器目前均屬於概念設階段，而依照規畫的技術路徑，預計於 2030 年開始商轉機組的建造。

最後，核能發電強調安全的重要性，故通常僅使用已經通過驗證的科技，任何新的設計都需要反覆的求證才能付諸實施，故其改變是緩慢而漸進的。☺

李 敏：任教清華大學工程與系統科學系