

第十六冊

核能電廠

譯者：程育甫

目 錄

爲什麼要利用核能?.....	1
原子與電力.....	3
反應器的類型.....	5
沸水反應器	
壓水反應器	
氣冷反應器	
重水反應器	
滋生反應器	
典型的核能電廠設計.....	13
核心容器	
核心	
主冷卻系統	
發電廠總論	
核能發電的成本.....	23
美國境內的核能電廠簡介.....	25
世界各國發展核能的近況.....	43

加拿大

英國

法國

蘇聯

其他各國

卷末語 49

核能電廠

原著：Ray L. Lyerly

Walter Mitchell, III

譯述：程育甫

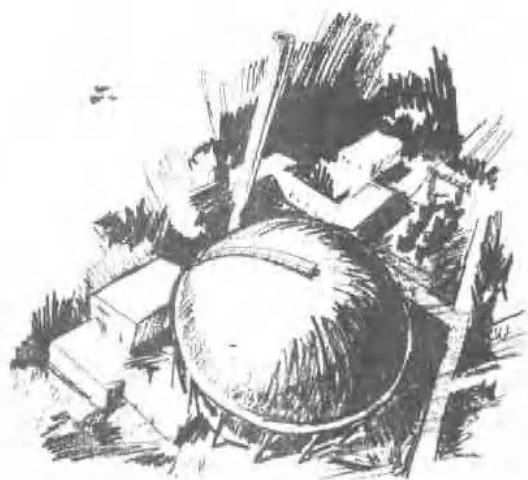
爲什麼要利用核能

您可能要覺得意外，今日美國居然有數百萬人用的電力是由核能電廠所供給的，正在建造規劃中的核能電廠尚可供應另外幾百萬人之需，將來毫無疑問的核能發電將佔世界總發電量的大部分。

爲什麼會有如此巨大的轉變？爲什麼幾年以前被認爲是毫無前途的核能發電今日竟足以在商業上與傳統發電相抗衡？要回答這些問題不但得考慮目前情況，還得兼具遠大的眼光。

整個世界在快速的成長中，我們對於能量的需求也一天高於一天，上升之速遠超過人口的增殖，傳統的能源如煤、石油、瓦斯等在短期內或可應付如此迅速的成長，終久是要用完的，唯有利用核能才足以供應激增的用電量，維繫人類底文明。

當世界步入核子時代，核能發電逐漸普及時，大家可能希望知道一些這方面的基本常識，核能發電是怎麼回事？發電成本多少？應該建造在什麼地方？用什麼型式的反應器等，本書將一一回答這些問題，答案的根據主要以目前美國中央發電廠的概況爲準。



原子與電力

核能電廠與傳統的火力電廠是相似的，二者都是利用高溫高壓的蒸汽來推動氣輪機轉動發電機產生電力，熱能經氣輪機轉變成機械能，機械能再轉化成電能，蒸汽的來源是二者的主要不同之處。

傳統的火力電廠燒煤，石油或瓦斯，利用燃燒時的熱能加熱水以產生高溫高壓的水蒸汽，核能電廠並非燃燒什麼原料，而是利用核分裂（Nuclear fission）後副產的熱能來製造水蒸汽，因此對核能電廠來說核分裂就相當於傳統發電廠的燭燭燃燒一樣，後面我們會談到核反應器的詳細情形，目前我們還是先說明一下什麼是核分裂反應。

所謂核分裂反應主要是指像鈾，鈾等幾種特殊的重金屬元素，在特定狀況下會分裂成較輕的元素的現象。現在就以鈾為例子，自然界存在的鈾是由三種同位素混合而成，鈾 235 佔 0.71%，鈾 238 佔 99.28% 其餘不到 0.01% 是鈾 234 這三種原子化學性質相同而質量不同，其中鈾 235 的原子核被自由中子撞擊之後會立刻分裂成兩片以高速飛離，同時附帶生出兩個或三個不等數量的中子（參閱附圖一）

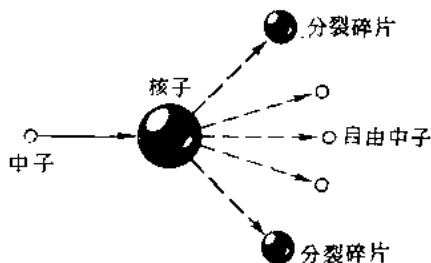


圖 1 典型核分裂反應圖。

以高速飛散的分裂破片和周圍的原子碰撞摩擦其動能轉變成熱能，而附帶而生的中子可以引起另外一次核分裂，如此衍生不息形成鏈反應。

如何維持這種鏈反應是一項重要的問題，因為每秒鐘得分裂 3×10^{10} 個核子才相當於 1watt 的功率，要想利用核能就得把鏈反應維持在一個頗高的速度，並想辦法把生出的熱能移出來，為了引發，維持並有效控制鏈反應於是有核反應器的產生。（註一）

一座反應器主要包括三個部分：

- (1) 燃料：能够分裂，放出中子，產生熱能。
- (2) 控制設備：控制鏈反應速率，間接控制放出的能量及發電量。
- (3) 冷却劑：傳送熱能。

下一章將詳述反應器與高溫水蒸汽間的關係，並討論水蒸汽供應系統的一般特點。

註 1：有關核分裂與反應器運轉進一步的資料請參閱本文庫中的另外兩書。

(1) 我們的原子世界 Our Atomic World。(2) 核反應器 Nuclear Reactors.

反應器的類型

如果您到百貨公司裡告訴店員說您想買一副咖啡壺，他可能要問您想買那一種，是要含濾嘴的呢，還是附帶有篩子的呢？或是別種類型的咖啡壺，每一種都能燒出熱騰騰的咖啡來，只不過步驟稍異而已，當然反應器不是咖啡壺，但情形是差不多的，反應器也有好幾種類型，都能產生熱能，只是步驟上小有出入。

在說明反應器的類型之前，我們要先談一下在發展核能發電工程上一件重要的東西——反應器的燃料——自然界裡可供作反應器燃料的物質是有限的，如果反應器在短期內要消耗大量燃料的話，那麼核能發電就沒什麼前途可言了。

反應器以燃料消耗率來分類，大約可分成三種類型，第一類為目前美國境內大部分的商用核能電廠所用的反應器，其燃料消耗頗快，第二類的反應器其燃料淨消耗量降低很多（註1）正在發展階段，不久將大量問世，第三類最了不起的反應器要到10年或20年後才能完全發展成功，其燃料消耗率是「負」的，意思是說這類反應器能生產燃料比消耗掉的還多（註1）一般通稱這種反應器叫滋生反應器（Breeder Reactor），其原理已被證明是可行的，只是技術上還存在著一些問題有待解決，稍假時日，這種深具商業潛力的反應器即可問世（註2）。

註1：所謂生產燃料就是說在原燃料裡加一些可孕物質，這種物質經中子照射會逐漸衰變成可裂性的材料經加工淨製可作反應器燃料。

註2：關於燃料方面進一步的資料請參閱本套文庫裡的另外一冊 Atomic Fuel “(原子燃料)”。

以上我們是以燃料的消耗作大致的分類，下邊我們將以反應器的特徵，冷卻系統等為分類的依據，說明的重點放在各型反應器蒸汽供應系統，要注意各型反應器的燃料消耗量，至於發電系統則大同小異，我們就先解釋一下，請參閱第二圖，高溫高壓的水蒸汽由左上角送入氣輪機推動一根粗大的轉軸，熱能變成動能，轉軸帶動發電機把動能變成電能生產電力。

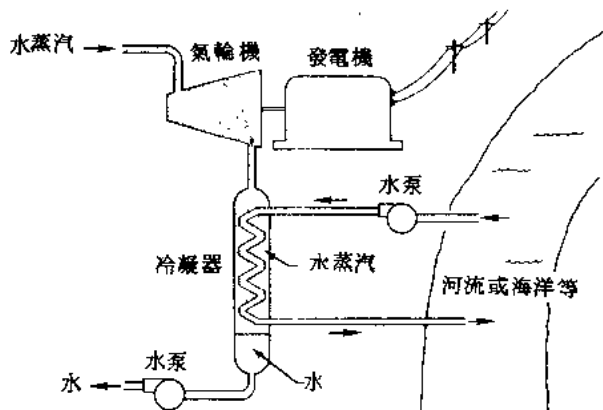


圖 2 核能電廠的發電部門。

用過的蒸汽送入冷凝器，凝結成水以水泵打回到反應器冷卻系統去以備再用，圖裡所示的凝結方式是用冷水打入冷凝器的外層來凝結用過的蒸汽，冷水的來源通常為河流湖水或海洋等。

下面我們開始逐一介紹反應器的類型：

沸水反應器

沸水反應器英文原名是 (Boiling Water Reactor) 簡稱BWR 請參閱第三圖所示，經特殊手續處理過的水由反應器的底部注入容器，被核心裡正在進行鏈反應放出高熱的核燃料加熱而沸騰，水蒸汽收進一根大管子送到發電系統去。

BWR 所生產的水蒸汽，其壓力大約保持在每平方英尺 1000 磅左右，這個壓力相當於海平面下半哩深的水壓，在如此巨大壓力之下

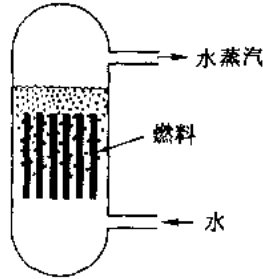


圖 3 沸水反應器的蒸汽供應系統簡圖。

水的沸點提高很多，所以產生的蒸汽不但壓力高溫度也很高，足夠用來推動氣輪機，進行發電。

讀者一定很清楚，一般家庭裡燒開水時，水壺裡冒出來的蒸汽只有華氏 212°，這種溫度的水蒸汽內含能量不多，無法推動氣輪機，所以在發電的立場實在沒有什麼利用的價值，如果加熱並同時加高壓，則水的沸點提高，蒸汽溫度也跟著增高，單位體積水蒸汽內含能量就增加很多，這才有利用的價值，其原理就和為高山上煮飯而設計的加壓鍋的道理相同，在 BWR 裡每平方英吋 1000 磅高壓下，水蒸汽的溫度可以高達華氏 545°。

反應器的蒸汽供應系統以 BWR 最為簡單，用的零件也最少，但體積異常龐大，一座發電容量 500,000 瓩的核能電廠如採用 BWR 需要的核心容器有 60 英尺高，直徑達 19 英尺而如採用下一節就要提到的壓水反應器則只需 40 英尺高，直徑 14 英尺的核心容器，不過壓水反應器還需外加一些裝備是 BWR 所不需要的，因此二者比較之下各有優劣，成本相去無多。

BWR 已經有相當成功的發展，許多成品已打入商業市場，至於 BWR 的燃料淨消耗量和下一節就要討論的壓水反應器差不多，都稍嫌高了些尚待改進。

壓水反應器

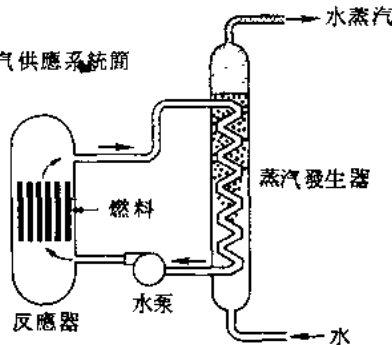
壓水反應器原文是 Presurized Water Reactor 簡寫作 PWR

，此型反應器運轉時加於冷却水的壓力比 BWR 還高，以致於通過核心的水無法沸騰，實際數字每平方英寸將近 2000 磅，是 BWR 的兩倍，如此巨大壓力之下水可以加熱到 600°F 還不致於沸騰，把這高溫的水引入一座蒸汽發生器裡，產生蒸汽轉動氣輪機。

在蒸汽產生器裡中間的管子通過反應器送來的熱水，加熱周圍壓力較低的次級冷却系統的水，使之沸騰生出 500°F 左右的水蒸汽，主冷却系統的水不和次級的混合而以水泵送回到反應器裡去，多這麼一道手續有好幾個好處，第一可以減少輻射發散，核心裡放射線很強會破壞物質（包括水）的各種性質並使之帶有害人類的放射性，通過核心的水如果獨立自成一個系統，要控制放射線的危害就方便多了，第二這種加高壓的水沸點很高，可使整個發電系統以高溫運轉，依熱力學的基本原理這可以提高氣輪機的效率而提高了發電效率減低成本。

在下一章裡我們將進一步說明 PWR，這裡只是先作個簡單的介

圖 4 壓水反應器蒸汽供應系統簡圖。



紹藉以明瞭反應器的分類。

氣冷反應器

第五圖所示是氣冷反應器簡圖，看來和壓水反應器非常相似，二者運轉原理的確是相同，都是利用一種流體傳遞核心裡的熱能到蒸汽發生器裡去。

氣冷反應器所用的流體是氣體，通常用氦氣 He_2 ，或用二氧化碳 CO_2 ，施以每平方英尺幾百磅的高壓，用風扇推動使之循環，這種巨型風扇所需馬力強勁，消耗的電力也多，供應一座發電量500,000瓩的發電廠的風扇所用的電力，足以轉供一般家庭用20吋電扇25萬台之需。

第五圖用到一個新名詞緩和劑，在反應器裡緩和劑佔很重要的地位，所以我們要解釋一下它的作用。

緩和劑是用來緩和中子的速度（也就是減低其速度），核子剛剛分裂之後放出的中子叫作快中子，其速度很高不易擊中別核子生分裂反應，經減速後的中子（稱作慢中子）擊中原子核的機會較大，所以減低中子速度就是增加分裂反應的效果。

前面提到的反應器不論BWR，PWR都以水作冷却劑，實際上水不但有冷却作用，兼可作緩和劑緩和中子速度，所以不必加緩和劑，氣冷反應器情形稍異，因為氣體的減速性能很差，無法有效達成減低中子速度的使命，所以須另外選一種物質協助才行，通常就採用石墨作氣冷式反應器的緩和劑，石墨具有完美的緩和性能，加上可耐高溫，非常適合氣冷反應器的要求。

氣冷反應器核心運轉時溫度高達 $1400^{\circ}F$ 而生出的蒸汽溫度在 $1000^{\circ}F$ 左右，因此發電效率甚佳，這是其優點之一，另外還有一個值得重視的優點就是能夠以很低的燃料淨消耗量維持運轉，最新型的

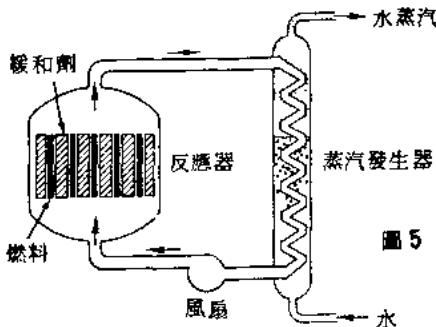


圖5 氣冷反應器蒸汽供應系統簡圖。

氣冷反應器甚至於能夠生產燃料，當然缺點還是有的，最嚴重的要算體積龐大這一項，因為氣體的熱容量很小，冷卻效能差，所以折算下來整個反應器單位體積所能生產的能量就顯得很低了，因此同樣發那麼多的電，氣冷式反應器的體積比別種型式的反應器要大得多。

重水反應器

重水反應器英文原名是 Heavy Water Reactor 簡寫作 HWR，利用重水作緩和劑而得名，重水（ D_2O ）有很多性質和普通的水（ H_2O ）相似，而如果您一手拿一杯重水另一隻手拿一杯普通的水並不會真覺得重水重多少，只是因為二者的核子性質不同便於分辨起見，所以叫 D_2O 為重水，有一點值得一提，重水一磅要賣美金 20 元比普通水貴多了。

重水反應器的核心作管狀，外邊是一座容重水的水箱，燃料裝置在管子裡，排列方式跟氣冷式反應器差不多，燃料並非整個堵塞住管子，而是留一部分空間好讓冷劑能通過以移去分裂反應生出的熱能，第六圖是 HWR 的蒸汽供應部門排列簡圖。

重水反應器裡作為緩和劑的重水和冷劑是隔開的，所以有很多種流體可資選擇為重水反應器的冷劑，比較常用的有水，各種氣體，有機化合物冷劑等，或者就用重水也行，在美國一般設計廠商多喜用液態有機化合物作冷劑，此種化合物類似熔化的蠟，沸點很高

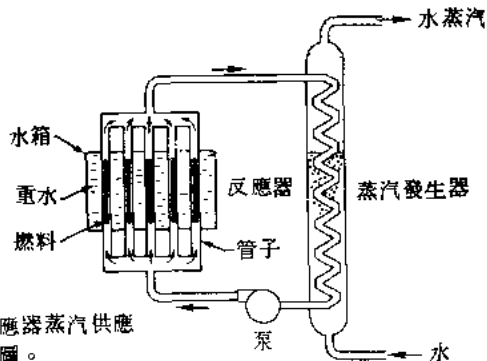


圖 6 重水反應器蒸汽供應系統簡圖。

有一座典型的重水反應器採用的有機化合物冷卻劑可不必加高壓而加熱到 750°F ，保持良好運轉，產生 725°F 的蒸汽。有機化合物可作冷卻劑的很多，其中以一種聯三苯混合物，商業上取名“聖多蠟”（Santowax）最通用。

重水反應器燃料淨消耗量很低（有可能作到使生產的燃料比消耗掉的稍微多出一點），因此在滋生式反應器尚未正式發展成功之前，重水反應器在商業市場上頗具競爭潛力。

滋生反應器

前面提到的幾種反應器裡有好幾種具有滋生燃料的能力，也就是說能一面消耗燃料一面製造燃料，而生產量比消耗量還多，這是工業技術水準提高，製造反應器的材料不斷革新的成果。

滋生反應器工作原理與非滋生式的有些不同，讀者或還記得鈾 235 原子在吸收中子之後能生分裂反應然後放出幾個自由中子（參閱第一圖），自由中子經緩和劑減速後能引發新的分裂反應這就是鏈反應，但自由中子並非全部被能分裂的物質所吸收，有些是被反應器的結構材料所吸收而浪費掉了，還有冷卻劑，各項控制元件也會消耗一部分的自由中子，滋生反應器的設計就是考慮儘可能利用這些中子，使它激發一些可孕材料（fertile material）成為可裂性的核燃料。可孕材料被中子擊中時會轉變成可裂材料，譬如鈾 238 就是一種可孕材料，被中子擊中後， U^{238} 會逐漸衰變成 Pu^{239} ，這是分裂元素可作反應器燃料，但須仔細設計核心燃料的排列與採用新的製造材料（包括利用可孕材料，可裂材料等）使鏈反應剩餘的中子利用到製造燃料方面去，只要能作到每分裂一個核子就能製造多於一個新的可裂性核子，那麼滋生燃料的效果就完全達到了，目前可孕材料存在最豐富的就是鈾 238。

前面所提過幾座可能滋生燃料的反應器只是理論上的推測，實際操作之下可能無法真正達到滋生的效果，但至少燃料淨消耗量很低是不成問題，而真正已經試驗成功的滋生式反應器，目前只有一種用液態金屬作冷卻劑的反應器，請參閱第 7 圖。

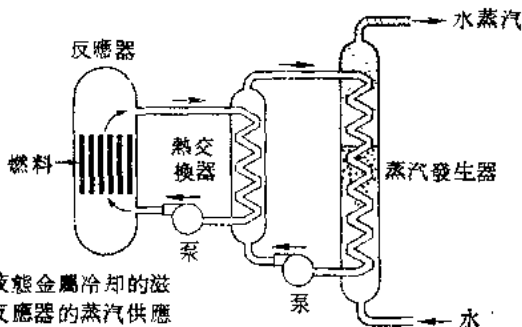


圖 7 以液態金屬冷卻的滋生反應器的蒸汽供應系統。

很明顯看得出，此型反應器用的零件比別型的都多，至少在反應器冷卻系統與氣輪機蒸汽系統之間多了一座中間熱交換器，這座熱交換器裡用的冷卻劑還是用液態金屬（液態金屬是鈉鉀的混合物），其傳熱效能很好，讀者不必吃驚於用液態金屬作冷卻劑，大家所熟知的汞就是一種液態金屬，鈉鉀的熔點很低一加熱就化成液體了。

主冷卻系統裡液態金屬的溫度是 900°F ，傳到次級，到第三級裡產生的蒸汽溫度在 800°F 左右。

就像其他幾種冷卻劑一樣，液態金屬的性能並非十全十美，還是有優點也有缺點，它的好處是具備完美的傳熱性能且不必加高壓以維持高溫運轉，同時核心單位體積能以很高的速率放出能量，而不必擔心熱能來不及運送出去而發生危險，也就是說同樣的發電量用液態金屬為冷卻劑的滋生反應器體積最小。

液態金屬冷卻劑的缺點是化學性質不穩定，無論水或蒸汽一碰到液態金屬會生很強的化學反應，所以一旦蒸汽發生器有了缺漏，後果很悲慘的，為了隔離主冷卻系統與第三級的蒸汽系統起見中間多加了一級冷卻系統，以避免萬一有了變故輻射外洩造成更嚴重的危害，當然這得增加不少預算經費。

以上我們很簡要的解釋了各種反應器的類型及蒸汽供應系統的一般特性，下一章我們將選定一種反應器說明得仔細些。

典型的核能電廠設計

如果您想多了解一下核能電廠的體積、外形、特徵與各部門間的關係，本章給您一個概略的介紹。

介紹的重點，以一座典型的核能電廠為對象，我們隨意選擇這座「典型」的電廠，假設它用的是壓水反應器，發電量大約 50 萬瓩，花了三年才建造完成。

第八圖就是我們任意選的這座核能電廠簡單示意圖，原則上是把第二圖與第四圖合併起來而成，簡單起見，在圖裡我們只畫了單環路冷卻系統而以數字標明另外二環路相似冷卻系統的起點與終點，需要多環路的原因主要是受了水泵容量的限制。

從三座蒸汽發生器裡引出來的蒸汽輸送管先合成一根大管，再和高壓蒸汽氣輪機連結，蒸汽輸入氣輪機放出一部分能量以轉動一根粗大的滾軸，出來的蒸汽溫度壓力都降低了不少，並且還帶有細水滴，因為細水滴對氣輪機的效率有不良的影響，故先使通過一個水汽分離器除去水滴以後再送到低壓氣輪機去進一層利用蒸汽裡含有的能量轉動那根大滾軸，而大滾軸可帶動發電機生產電力。

此時蒸汽帶來的能量幾乎已消耗殆盡，沒有再利用的價值，送入冷凝器一排排的冷凝管子把汽凝結成水以減小體積，壓力也同時降到低於大氣壓力的程度，凝結水送入預熱器裡開始加熱，從預熱器出來的水有一個專有名詞叫它飼水；因為它是用來飼給蒸汽發生器的，飼水預熱可以增加發電效率，通常在通入蒸氣發生器之前需好幾道預熱手續，此地也是為了簡便起見只標明了兩級。

水從冷凝器到蒸汽發生器之間一面逐級加熱一面還得逐級提高壓力，從低於每平方英寸 14.7 磅（此為標準大氣壓力值）加高到大約

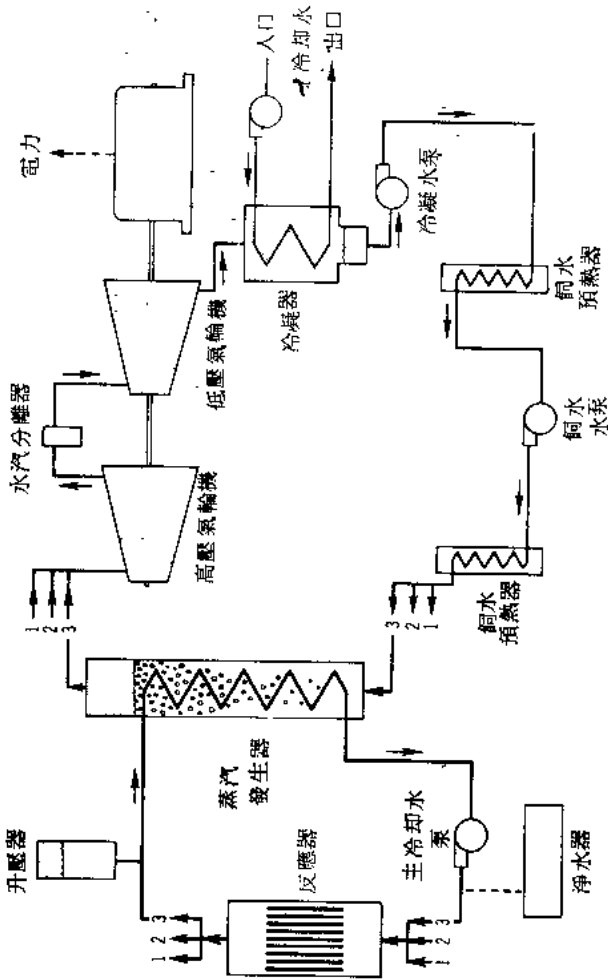


圖 8 採用壓水反應器的整體核能發電廠示意圖。

每平方英尺700磅，圖裡只畫了兩座水泵實際不止此數。到最後一級預熱之後分三條管子送到三座蒸汽發生器去。

一般核能電廠多具有多環路平行的蒸汽供應系統，而發電系統却