

爐心組件

- 壹、概述
- 貳、燃料
- 參、控制棒
- 肆、可燃毒物棒
- 伍、中子源
- 陸、套管塞阻件

壹、概述

本章旨在介紹爐心組件，包括燃料元件（Fuel Assembly）之燃料丸（Fuel Pellets）和燃料棒（Fuel Rod）、控制棒、可燃毒物棒、中子源及套管塞（Thimble Plug）等。燃料元件的功用係將燃料丸緊密安裝於17x17方形排列的燃料棒內，此種設計可降低因冷卻水引起的震動且確保燃料能獲得充分的冷卻作用。為提高燃料效率起見，燃料元件的排列必須儘可能地提高爐心之核子特性，以及選擇具有低中子吸收特性之各種材料，此可提高中子利用因數。

貳、燃料

一、概說

燃料是反應爐中最重要的一部份，由燃料的核分裂釋放出大的能量，這些能量大部份轉換成熱能。燃料的主要目的即在產生熱能，並將熱能傳遞給反應爐冷卻水，以再循環方式藉冷卻水將熱量帶走，因此燃料元件在結構上必須堅固、耐高溫、抗腐蝕、長壽命，易於安放在固定位置，且當燃料燃耗時，必須容易更換，爐心中燃料元件係由燃料棒組成，而燃料棒又由燃料丸堆積而成。核三廠目前使用西屋公司新型Vantage+燃料。

二、燃料丸

1. 構造：燃料丸呈圓柱形，在上、下兩端留有凹弧，以承受燃料丸受熱後產生的軸向膨脹。
2. 材質：燃料丸係由二氧化鈾（ UO_2 ）粉末燒結而成，天然鈾中大部份是U-238，僅含少量U-235，因此燃料丸所使用的鈾需經濃縮提取。
3. 二氧化鈾（ UO_2 ）是陶質（Ceramic）材料，意指它有高熔點，約2804.4（5080）。既然 UO_2 為陶質，所以是熱的不良導體。因此燃料丸中心溫度的控制更形重要。
4. 陶質燃料丸卻有一優點，它能吸收核分裂產物（主要是氣體），而本身體積並無顯著改變。當核分裂產物愈多時，燃料丸的體積會有少許改變，這種現象稱為膨脹（Swelling），既然燃料丸可吸收很多核分裂產物，可視為防止分裂產物外洩的輻射屏障。

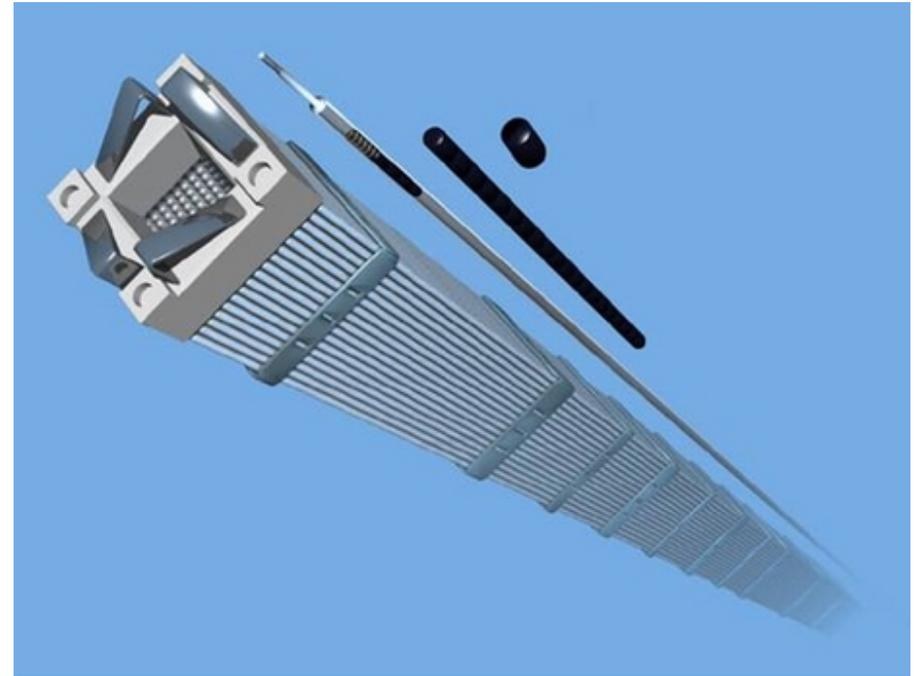
三、燃料棒及護套

1. 護套的特性

護套係分裂產物的主要包容邊界，必須堅固，不可破損，以鋳合金為材料，簡寫成Zirc-4，鋳合金具有下列優點：材料堅固，不腐蝕，為熱的良導體，高熔點，對中子的吸收與散射截面小，不與燃料起化學反應且不易氫化。護套必須防止燃料中分裂產物擴散到冷卻水中，但使用鋳合金作為護套將發生下列問題，就是在高溫下可與水反應產生氫：



當溫度達1260（2300）時，此反應會自行持續，為防止這種反應的發生，運轉中護套的溫度必須限制在1204.4（2200）以下。基於延長燃耗與提高運轉溫度等之考量，必須採用進步型鋳合金材料護套，目前使用ZIRLO材料護套。ZIRLO仍是鋳合金，機械特性及核特性與



Zr-4大致相同，但可改善抗腐蝕性，降低照射增長，降低潛變程度等等。

四、燃料元件 (Fuel Assembly)

1. 概說

本廠每部機爐心裝填157束燃料元件，每一元件呈17x17方形矩陣排列，亦即每邊有十七根燃料棒，每一燃料元件共有二八九個位置可安裝燃料棒，但實際上每一燃料元件僅裝置二六四根燃料棒，其餘的二十五根為導套管，其中座落在中心位置的一根作為爐內儀器用，稱為儀器套管，其餘二十四根可作為容納和引導控制棒、安裝可燃毒物棒、中子源棒或藉套管塞從燃料元件頂部塞住。

五、燃料產生的熱量

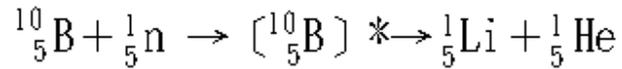
1. **燃料徑向溫度分佈曲線**，因為陶質二氧化鈾是熱的不良導體，由燃料分裂產生的熱量不易傳導到護套進而傳遞給緩和劑，故燃料棒徑向中央的溫度較外圍的溫度高出很多。但當燃料開始燃耗時，燃料丸因熱膨脹，致使燃料丸與護套間之間隙越來越小，間隙減少，則熱傳遞效果提高，熱較易於傳遞至緩和劑，所以燃料棒徑向中央的溫度就隨之減低。
2. **熱產生來源**
由鈾分裂產生的熱量，其中97.4%來自燃料的分裂，其餘的來自 射線與冷卻水或爐心結構物的反應作用。
3. **軸向功率**
以上討論的是徑向功率分佈情形，另有一很重要的功率分佈是軸向功率分佈，運轉人員關心的是運轉中爐心上半部與下半部功率(百分比全功率)之差值(AFD)，但核子工程師則關心每單位長度燃料棒產生的熱功率 (kw/ft)，後者對決定某些運轉限制值是很重要的，這限制值稱為熱通道因素 (Hot Channel Factor)，簡寫為H.C.F。

參、控制棒

- A. **控制棒是控制反應爐功率的基本工具**，不僅用於控制正常運轉時反應度的改變，亦控制異常狀態時急劇改變的反應度，使反應爐安全停機。
控制棒的工作原理係藉棒中含有吸收中子的毒素，當棒插入爐心時會吸收中子而降低分裂反應，爐心功率因而下降，因熱中子才易引發鈾分裂，而控制棒之中子毒素對熱中子有較大的吸收截面。
- B. **本廠採用的控制棒係以銀、鈾、鎳之合金製成。**
- C. **控制棒元件為類似爪形蜘蛛體 (Spider Body) 的機械裝置**，由二十四根吸收棒組成，可以控制整個長度的燃料元件，稱為爪形控制棒元件 (Rod Cluster Control Assembly)，簡稱RCCA。
- D. **控制棒元件**
 1. 本廠控制棒元件共有五十二個爪形控制棒，分成兩種：控制棒組 (Control Bank) 和停機棒組 (Shutdown Bank)，兩組各分成若干組。
 - a. **控制棒組**
 - A組 (Control Bank A) -八個RCCA
 - B組 (Control Bank B) -八個RCCA
 - C組 (Control Bank C) -八個RCCA
 - D組 (Control Bank D) -四個RCCA
 - b. **停機棒組**
 - A組 (Shutdown Bank A) -八個RCCA
 - B組 (Shutdown Bank B) -八個RCCA
 - C組 (Shutdown Bank C) -四個RCCA
 - D組 (Shutdown Bank D) -四個RCCA
 2. 在反應器起動開始時，停機棒組即已全部抽出，只有在緊急狀況才使停機棒組全部插入，以確保反應器安全停機，否則停機棒組是不做為正常控制的抽插用，停機棒組和控制棒組交錯分佈於整個爐心，不論何者，控制棒的移動是以組為原則 (即整組移動)，而控制棒組與組間又有一一三節的重疊 (Overlap) 裝置，同時各組又分為兩群。

肆、可燃毒物棒

一、可燃毒素當吸收中子後衰變成其他元素，譬如



${}^{10}_5\text{B}$ 對熱中子吸收截面為3840邦，是一種良好的中子毒素，利用此種可燃毒素 ${}^{10}_5\text{B}$ 製成毒物棒，裝填在爐心內。

二、在爐心內裝入可燃毒物棒的目的：

1. 壓制初始爐心的過剩反應度。
2. 保持緩和劑溫度係數為負值。
3. 保持較平均的徑向中子通量分佈曲線。

三、

每一根可燃毒物棒以螺栓鎖住在承板（Retainer Plate）上形成組件，然後插入燃料元件的導引套管，承板最多可容納二十四根毒素棒，而毒物棒數在各組件中的多寡，則依毒物棒元件在爐心內的位置而變，如果毒物棒數少於二十四根，則留下的空位以套管塞堵住，或裝入中子源棒。

四、

本廠較常使用的可燃毒物棒元件共有四種，在區域 和 因為該兩區域燃料濃縮度較高，安裝可燃毒物棒將可獲得均勻的徑向中子通量分佈曲線。核三廠從第一週期即使用硼矽玻璃棒的可燃毒物棒又稱Pyrex型式，而自第八週期開始改用WABA(Wet Annular Burnable Assembly)型式毒物棒。

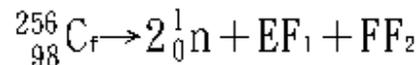
伍、中子源

一、概說

中子源對於反應器的安全運轉非常重要，有了中子源，源階偵檢器（Source Range Detector）才能量到每秒三個計數（Counts Per Second）的最低中子量，以確保偵檢器可使用且能反應中子的增殖效應，一般壓水式反應器使用兩種形式的中子源，第一種稱為一次中子源（Primary Source Assembly），用於首次爐心燃料裝填和初期反應器起動。功率運轉後，由於一次中子源因衰變和中子吸收燃耗很快，往後的反應器運轉須要額外的中子源，稱為二次中子源（Secondary Source Assembly），它必須受中子活化後才能使用。

二、一次中子源的構造

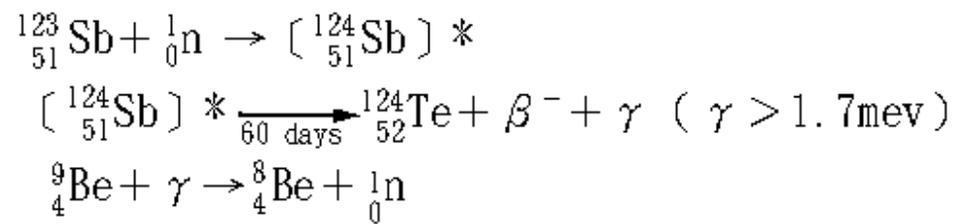
本廠使用放射性物質 ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ 作為一次中子源棒，在最初爐心燃料裝填和反應器起動時能自發分裂放出中子，中子源安裝於不銹鋼管內，然後懸裝於毒物棒承板上。 Cf 的自發反應式為



其中FF1和FF2分別代表不同的元素，而F代表某數字，此類中子源每 10^{-6}g 可產生 $2 \times 10^6\text{nv}$ 的中子。

三、二次中子源的構造

本廠使用的二次中子源棒係將銻（Antimony, Sb）與鈹（Beryllium, Be）混合的小丸疊集密裝在不銹鋼管內，此類中子源每居里的銻可產生 $3 \times 10^5\text{nv}$ 的中子，其反應式如下：



陸、套管塞組件 (Thimble Plug)

在所有不帶控制棒的燃料元件中，或者燃料元件中其可燃毒物棒少於二十四者，在不裝填可燃毒物棒或中子源棒的預留燃料棒束位置，均以不銹鋼短管塞住，謂之套管塞。