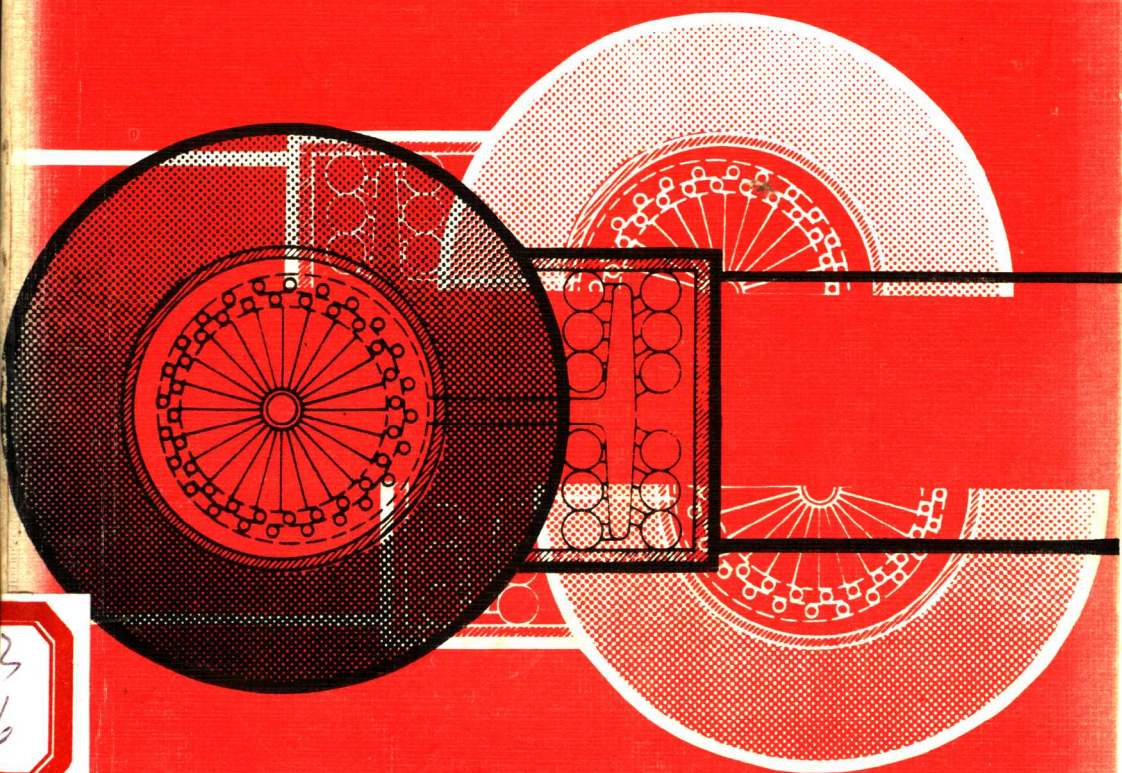


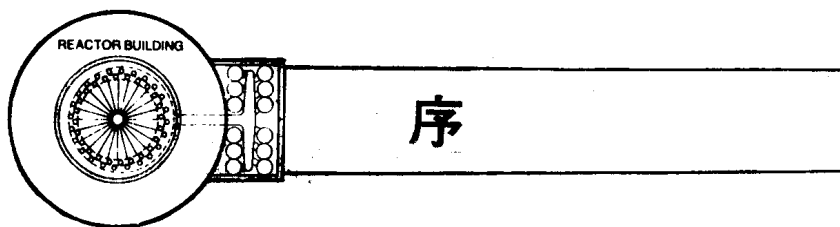
核能發電

(核融合能發電)

鄧光新 編著



全華科技圖書公司印行



能源已經成爲國家開發，提高人民生活水準之必須條件；過去的能源危機，早已震驚世界，而令人們感到談虎色變。能源問題以及尋求解決方法的存在，已成爲千真萬確的事實。我們絕對不可能逃避現實，而必須正視現實。然則，欲求解決能源問題，又有何途徑可循呢？誠然，核能是目前唯一可循與實用的途徑。利用核能於發電方面的成就是在第二次大戰之後的最近一二十年的新興科技。

所謂“核能發電”可分二部份：一爲“核分裂能”發電，係由重元素的原子核（如鈾-233，鈾-235，鈾-239等）分裂時，而放出來的能量用於發電，一爲“核融合能”發電，係由幾個輕元素的原子核（諸如氫及其同位素氘、氚等）融合在一起，成爲較重元素之原子核，而放出來的能量用於發電。可是，利用“核分裂能”的元素如鈾-235（天然鈾中含鈾-235之量爲0.7%），鈾-233及鈾-239爲人造元素等，目前所知道的其在世界上之蘊藏量並不豐富，故利用“核分裂能”爲能源，仍是有限的能源。惟獨“核融合能”的元素係來自水與空氣中，其來源不分時、空之限制，可取之不盡，用之不竭的能源。由於“核融合”所供應的能量強大無比，故科學家又稱它爲“超級”能源。因它具有這種先天性的優異條件，加之後天性的研究與發展，更使它加速進展。況今日世界能源需求之殷，與日俱增。有些強國或超級強國，甚至於五年或十年或二十年內企望對其能源自給自足，均將一切希望寄託在這一方面研究發展的成果上。但是，“核融合能”的利用，非一朝一夕的一蹴即成的，它已使我們深深地體驗到，它的工技藝術是有史以來，爲人類整個科技界面臨的最大的挑戰。讓

我們即早努力來克服它。在未來的世界裡，有足夠的能源的國家，才能算是世界上富強的國家。

關於以“核分裂能”來發電，曾於民國五十九年以“原子能發電”一書問世，現正修訂中，不日將再版。至於利用“核融合能”來發電，國內科技界對它的中文資料尚不多見，發表者亦太少。有見及此，故收集核融合能之嶄新資料，挑選刪除編成中文，除響應政府倡導科技中文化之英明遠見外，藉此引進“核融合能”新興技術，使其在國內生根發芽，茁壯成長，進而拋磚引玉，使自由中國海內外學人，共襄安邦定國之盛舉，導引以“核融核能”的發電早日在國內紮根實現，是所企盼。

對於本書取材方面，因係引進新興的科技，不得不顧及以科技知識體裁介紹，從頭談起，俾易於吸收；但又顧到大專理工醫農同學的需要，而深入淺出。惟因係新興的科技，對名詞之翻譯無例可循，不得不新創，拙見誤譯，再所難免，務望識者指正；則為“核融合能”發電的發展前途慶幸。

本書除部份由作者學生林秀華先生（現在美T T T專攻“核融合”博士學位）搜集資料與撰寫外，並蒙台電原子動力通訊編輯段維先生，行政院原子能委員會核能研究所孟憲鈺博士及旅居美國融合能專家朱國瑞博士等閱讀與修改，以證其清晰而易於了解。此外又蒙全華科技圖書公司經理陳繩籌教授及徐茂林先生等，對本書出版之各項鼓勵與協助殊多，均於此一併致最高的謝意。

鄧光新

民國六十七年五月

圖書之可貴 在其量也在其質

量指圖書內容充實、質指資料新穎够水準，我們就是本著這個原則，竭心盡力地為國家科學中文化努力，貢獻給您這一本全是精華的全華圖書。

目 錄

第一篇 基本原理與觀念

| | |
|------------------------------|----|
| 第一章 概 說 | 1 |
| 第二章 核融合反應的基本原理 | 7 |
| 第三章 核融合研究發展沿革 | 18 |
| 第四章 早期融合侷限包容系統原理 | 23 |
| 4-1 捏縮型侷限包容系統 | 26 |
| 4-1.1 磁啣方式 | 33 |
| 4-1.2 離子迴旋加熱 | 34 |
| 4-2 磁鏡型侷限包容系統 | 34 |
| 4-3 θ -方向捏縮包容系統 | 44 |
| 第五章 近期侷限系統的簡介 | 47 |
| 5-1 磁力侷限包容 | 48 |
| 5-1.1 托卡馬 | 48 |
| 5-1.2 θ -捏縮 | 50 |
| 5-1.3 磁 鏡 | 50 |

| | |
|------------------------------------------|-----------|
| 5-1.4 托卡馬的未來研究發展 | 51 |
| 5-2 雷射融合 | 55 |
| 5-2.1 雷射融合原理 | 56 |
| 5-2.2 雷射融合的進展 | 60 |
| 第二篇 核融合發電的基本觀念 | 63 |
| 第六章 核融合發電的基本觀念 | 63 |
| 6-1 融合發電與一般火力的比較 | 65 |
| 6-2 基本考慮 | 67 |
| 6-2.1 典型的融合反應器結構及電漿參數 | 68 |
| 6-2.2 核融合反應 | 70 |
| 6-2.3 影響電漿功率平衡的諸量 | 73 |
| 6-2.4 低 β 值與高 β 值電漿的加熱 | 77 |
| 6-3 功率平衡、反應器穩定性與燃料的燃耗 | 79 |
| 6-3.1 電漿功率平衡 | 79 |
| 6-3.2 熱穩定性 | 82 |
| 6-3.3 反應器功率(能量)平衡 | 83 |
| 6-3.4 勞生準則—能量均衡準則 | 85 |
| 6-3.5 電漿燃耗率及反應時間 | 86 |
| 第七章 托卡馬反應器系統 | 89 |
| 7-1 運轉原理 | 90 |
| 7-2 環形磁場對加熱及質點流的影響 | 94 |
| 7-3 磁轉軸器 | 97 |
| 7-4 托卡馬反應器的構想設計 | 98 |
| 7-5 理想的燃燒、注射及燃料循環 | 104 |

第八章 日捏縮反應器系統109

- 8-1 θ -捏縮系統的基本觀念109
- 8-2 運轉的原理.....110
- 8-3 反應器設計及元件的考慮115
- 8-4 氘氚的燃燒動態118
 - 8-4.1 燃燒循環118
 - 8-4.2 直接轉換循環123
- 8-5 中性氣體層對電漿的冷卻效應124
- 8-6 融合反應器發電廠的特性及能量平衡126

第九章 磁鏡反應器系統129

- 9-1 基本觀念.....129
- 9-2 運轉原理.....130
- 9-3 磁鏡反應器功率平衡及直接轉換.....132
- 9-4 高能量中性束的注入.....135
- 9-5 電漿能量的直接轉換.....137
- 9-6 200 MWe D-T磁鏡反應器設計的構想.....138
- 9-7 反應器電廠功率平衡.....142

第十章 雷射驅動融合反應器系統144

- 10-1 電漿燃燒的條件145
- 10-2 反應器能量平衡151
- 10-3 雷射光與燃料電漿間的交互作用153
- 10-4 燃料粒壓縮設計的計算157
- 10-5 雷射驅動融合反應器的構想161
- 10-6 RLDP 反應器電廠的特性164

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第十一章 核融合能電廠的設計 | 166 |
| 11-1 主要系統設計簡介 | 168 |
| 11-1.1 電 漿..... | 168 |
| 11-1.2 真空壁..... | 169 |
| 11-1.3 氫包層..... | 170 |
| 11-1.4 屏 蔽..... | 170 |
| 11-1.5 線 圈..... | 171 |
| 11-1.6 燃料循環..... | 171 |
| 11-2 核融合發電廠對環境的影響 | 172 |
| 11-2.1 「氫」的滲漏..... | 174 |
| 11-2.2 放射性產物..... | 178 |
| 11-2.3 磁場影響..... | 186 |
| 11-3 融合發電經濟 | 188 |
| 第十二章 目前的成就與未來的發展 | 190 |
| 12-1 目前的成就 | 190 |
| 12-1.1 磁力侷限系統的成就..... | 190 |
| 12-1.2 磁力系統電漿加熱的成就..... | |
| 12-1.3 精力侷限系統的成就..... | 196 |
| 12-1.3.1 以「雷射」為能源發展的成就..... | 197 |
| 12-1.3.2 以「相對論電子束」為能源的成就..... | 198 |
| 12-1.3.3 以磁場為能源發展的成就..... | 199 |
| 12-2 融合工藝與設計的發展 | 199 |
| 12-2.1 「電漿加熱」問題..... | 200 |
| 12-2.2 發展大型強磁場超導體問題..... | 200 |
| 12-2.3 真空壁材料問題..... | 202 |
| 12-2.4 燃料注入問題..... | 203 |

| | | |
|----------|---------------------------------|-----|
| 12-2.5 | 轉轍器性能問題 | 203 |
| 12-2.6 | 惰力系統融合微爆技術問題 | 204 |
| 12-2.7 | 設備的改進 | 207 |
| 12-3 | 未來的發展 | 207 |
| 12-3.1 | 目前正在進行的工程——短程計劃 | 207 |
| 12-3.1.1 | 磁力偏限系統 | 208 |
| 12-3.1.2 | 惰力偏限系統 | 213 |
| 12-3.2 | 下一代的工程——近程計劃 | 214 |
| 12-3.2.1 | 磁力偏限系統 | 214 |
| 12-3.2.2 | 惰力偏限系統 | 222 |
| 12-3.3 | 設計中的動力反應器——中程計劃 | 224 |
| 12-3.3.1 | 磁力偏限系統 | 224 |
| 12-3.3.2 | 惰力偏限系統 | 226 |
| 12-3.4 | 示範型融合動力反應器 (DPR) ——遠程計劃 | 227 |

第十三章 尾 語 230

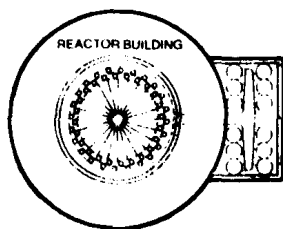
參考文獻

附 錄 換算因數表

索 引

第一篇 基本原理與觀念

1



概 說

人類文明的發展史與其所利用的能源之間有極密切的關係。簡言之，文明發展的歷程可以說就是在不斷的尋找新能源中次第展開；由於文明的進步發展連帶的對能源的消耗也就更形加速。

科學家曾經預測以現在使用能源的速度（實際上這種速度是一直上升的）。在公元2000年附近，全世界傳統的化石燃料將為之消耗殆盡。實際上今天這種能源上的缺乏已經衝擊到整個科技界，各國都在不斷地尋求新的能源，尤其當政治上的因素滲雜於其中時，使問題就更形複雜。

於是各種獲取能源之方法出現：如太陽能（Solar Energy）、地熱能（Geothermal Energy）、風力能、潮汐能等，但是這些都是小規模，而且不能滿足工業上、大規模（Large Scale）的需求。當然近些年來核分裂能源逐漸商用化，廣泛地應用到各個地區的電力系統中。是能源開發中的一支生力軍，但是這種能源有其本身先天的缺陷。

2 核能發電

首先面臨到的問題就是燃料——鈾 (Uranium) 的精鍊濃縮問題，如何從鈾的同位素中分離出可裂性元素 U-235 ？以往都是使用擴散法或最近應用離心法，這些方法所費既大，更不足應付目前所需，近年雖有用雷射濃縮之議但仍止於實驗階段。

其他方面的問題諸如：廢物及廢燃料的處理，環境污染等問題，這些都是極令人頭痛費思的。而且有一天鈾原料缺乏而必須由含鈾量較低的礦床裏開採時，其成本將更高，最近先進國家如英法、蘇聯者積極進行快滋生式反應器 (Fast Breeder Reactor) 的實用商業化，這種方法雖然可以節省一些燃料，但是仍然是一個問題，由於美國總統卡特於 1977 年 4 月 7 日發表“用過燃料不可再處理”，以及 (Pu-239) 之再循環也不能發展使用；因之，導致我們只能期望她成爲一個過渡時期的交替產物，最終我們仍然必須去尋找一勞永逸，取之不盡用之不竭的能源才是正途；現在美國、蘇聯、歐洲原子能聯營國 (Euratom Countries) 及日本等國，正方興未艾，夜以繼日，在努力研究發展中，同時已超過實驗階段，正向實用發電方面邁進。

自 1952 年氫彈試爆成功後，翌年 (即 1953 年) 12 月 8 日美國前總統艾森豪在聯合國會員國大會上，做了一項呼籲，要求各國集中精力於原子能的和平用途上，我們雖不去談他說這句話的政治背景，但是不管怎樣這句話確實引起了許多科學家在這一方面的努力，也就在不久引發了國際上各科技先進國家的科學競賽，其規模之大，持續之久，是前所未有的。

這項大競賽的目的就在於尋找一勞永逸的能源——核融合能 (Nuclear Fusion Energy)，或稱「熱核融合」 (Thermal Nuclear Fusion) (因其必須在高溫 (一億度) 以上始起作用之意也)；這種能源係以水與空氣中的氘 (Deuterium) 以符號 D 代表 (氫的同位素由一質子及一中子構成的) 爲燃料，而氘可以從海水中提取，其存量據科學家

的估計有 10^{17} 磅，如果讓這些重氫（氘亦稱為重氫）原子核全部做融合反應所釋放出的能量有 2.5×10^{28} BTU，以今日世界消耗能量的速率來看

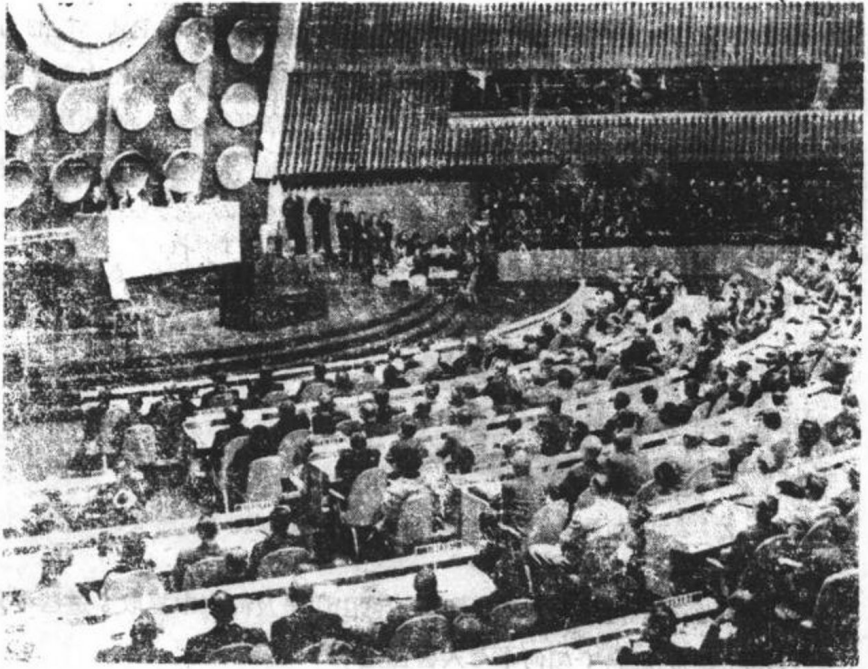


圖 1 - 1 1953 年艾森豪在聯合國全體會員國大會上演講

，足可以使用達 10^{11} 年，相當於 100 個宇宙的生命（宇宙的生命據天文學家估計總在一百億年左右）。這是何等驚人之數，待有一天這種能源研究成功，則為世界能源問題，最終的答案。中東的石油，將不再是奇貨可居了。

這是衆所週知的，核能分二種；一種是「核分裂能」，一種是「核融合能」，前者係重元素（如鈾、鈾等）的分裂所放出的能量，也就是現在我國六座核能商業發電廠所採用的能源；後者為輕元素（如氫及其同位素

4 核能發電

氘、氚等)的結合而成較重的元素(如氦等)所放出的能量,也就是現在所談的融合能。在發電應用上「融合能」遠比「分裂能」為優,諸如:

- (一) 燃料易獲得既取之不盡,又價廉,因融合能所用的燃料主要為氘的同位素,與鋰等;重氘(氘)存在自然界的空氣及水中,在水中其含量為0.017(160ppm或1:6000),由計算所得,一加侖水中含的氘核約為 $\frac{1}{8}$ 克,融合後所放出的能量,相當或超過300加侖汽油的燃燒能如圖1-2所示。

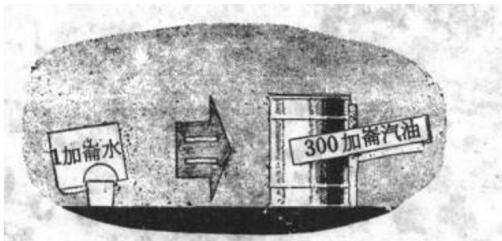


圖1-2 表示一加侖的水,其融合能相當於300加侖汽油的燃燒能

又鋰元素在自然界中存量也豐富,可由泥土及海水中提取。這些不分國界地域的燃料,如何不令人嚮往呢。

- (二) 安全及廠址易選擇,由融合能每一單位發電量所產生的放射廢料遠比分裂能為少,而融合所放的氦,是一種無毒無放射性的惰性氣體,也是工業上有價值的原料,對空氣污染也小,在安全顧慮方面比核分裂電廠要少,從安全措施比較上,不必像分裂電廠那樣精心考究,既無衰變熱(Decay Heat)的產生,也無“失去冷卻事故”,(LOCA)的問題,更無需緊急核心冷卻系統(ECCS)等設施。因為融合發電廠在運轉時不會有熔化危險,更不必擔心地震的災害,如果融合過程失常或失去控制,則核子反應自動停止,不會發生公害,所以對融合能的電廠廠址的選擇,可不受地域及人口密度的限制,而更靠近負載中心,甚至於可建在城市中心。

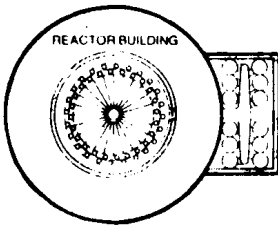
- (三) 核融合反應器內無化學體可燃性與產物，不像液金快滋生式反應器（LMFBR）內之金屬鈉，有機體冷卻反應器（OCR）內之有機化合物如HB-40等，易引燃燒，對電廠與周圍環境構成威脅。
- (四) 核融合反應器不需要也不產生核武器級之核子物料（Weapons-grade Nuclear Materials），故不怕盜竊、劫奪與敲詐，更不怕核武器之繁衍。
- (五) 若與分裂能反應器聯合運用，則一座核融合能反應器所產生之中子撞擊輕水式（LWR）反應器所用過之燃料或天然鈾或釷（Thorium）等燃料，則所滋生新的可裂物質（Fissile Materials）足夠10座輕水式或一個高溫氣體反應器（HTGR）之用。
- (六) 對經濟方面而言，除去減少緊急核心冷卻等安全設備系統，以及降低建造成本外，更由於分裂能所用過燃料再處理工程之困難，與美國卡特總統嚴加限制燃料再處理與鈾循環的關係；混合（Hybrid）融合動力反應器（Fusion Power Reactor）可將現在LWR所用過之燃料或天然鈾燃料再燃燒利用，可使其燃燒率高達150,000Mwd/MT（百萬瓩/公噸），比現在所用的LWR動力反應器的燃燒率增高一個級數（或稱10倍）。
- (七) 熱利用率高：如果利用電漿直接發電，由熱能轉變為電能的效率可高達60%至90%，因而排出的廢熱小，可減少凝結如冷卻塔之設備，故對環境之熱污染程度也低。

由以上所述，融合能當為今日最經濟，最安全的能源，但發展迄今，已有二十餘年歷史。為何仍未被人類加以利用呢？這一點說來話長了，誠然，控制融合能為人類有史以來從未遭遇到如此科技上最棘手的問題，實

爲對今日科學家最大的挑釁。例如我們已知道「分裂能」係由於中子不帶電荷容易打進帶正電荷的原子核的核心內，使其分裂而放出能量；但融合能就不然，因二個帶正電的粒子由於靜電斥力關係，不易相合，除非加外力（高能或高溫）才能使粒子超越電荷障壁而結合；這種外力也就是高溫或高能（約一億度或10KeV以上）方可引燃融合初步的要求。

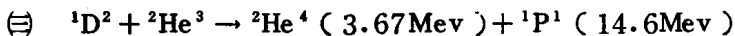
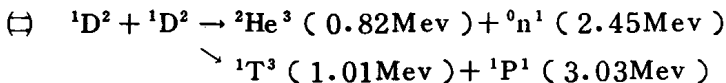
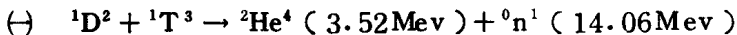
在此高溫下包容器的材料與侷限的辦法，電漿的溫度、密度與磁場強度、形狀，以及系統的尺寸，容積等一連串的關係問題，此外並需持續反應一相當的時間等，這些複雜錯綜的困擾使科學家愈深入研究發現問題愈多，經十餘年的努力，毫無成果，一切理想盡成畫餅。致使保守的科學家退避三舍，改行他去，極進者也裹足不前，幸在這時（1968年）蘇俄托卡馬（Tokamak）裝置研究成功，使前途渺茫的融合控制，豁然開朗，又掀起研究熱潮。至1970年又有異軍突起的雷射——融合構想問世，使融合研究的前途變爲多采多姿，大放異彩。假若欲以蘇俄大型的托卡馬-10（T-10）（已於1975年6月29日運轉）與美國普林斯頓的PLT（Princeton Large Torus）（業已於1975年秋季完成）用來完成一項突破性的重大試驗，達到理想後，則爲人類奠定走向新能源的里程碑，更將在本世紀終了之前，使人類可享受清潔、安全、經濟的能源了。

2



核融合反應的基本原理

什麼叫做核融合反應呢？我們先寫下最可能為我們所使用的核融合反應式：



${}^1\text{T}^3$ 氚是氫的同位素由一質子及二中子構成，氚可以從海水中提取，而氚則不存在於天然界中。以上四個反應式中，每一個反應都有能量釋出，為什麼會有這種能量釋出呢？

原來當我們檢查核力時，發現當原子序在 40 至 80 之間是最為穩定的原子，而當原子序超過 80 以後就都有一個天然放射性 (Natural Ra-

8 核能發電

dioactivity) 的趨勢，並且會分裂成二片較輕而在穩定區域內的元素，這種趨勢就是核分裂原理的基礎。在另一方面當原子序小於 40 時，就有一種要合成起來變成較重的元素的趨勢，這兩種分裂與融合的反應均有質量欠缺 (Mass Defect) 現象，由愛因斯坦質能互換的原理： $E = mc^2$ ，我們可以知道會有巨大的能量發生，而後者又較前者所放出的能量多出三、四倍。圖 2-1 及 2-2 正是兩張說明這兩種不同趨勢的圖片。

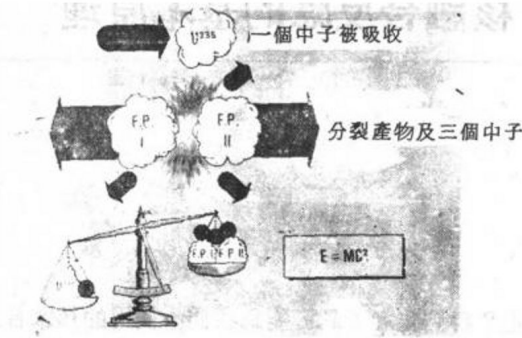


圖 2-1 核分裂反應的基本概念：圖中最上一部份表示中子被 U-235 吸收。當中部份表示 U-235 吸收中子後發生核分裂產生二個碎片及 3 個中子。最下一部份表示用天平測量參與作用的 U-235 + 中子 (左邊) 比反應後所生成的二個碎片及三個中子之和 (右邊) 為重。則其所失的質量由 $E = MC^2$ 即可計算其所釋放的能量。

當然分裂與融合之間仍然有極基本的不同，核分裂是自然的現象，只要可裂燃料質量夠多達到臨界狀況 (Critical Condition) 即能發生連鎖反應 (Chain Reaction)；但是在核融合方面，由於首先要讓核子與核子之間能夠很「靠近」才可能有反應發生，所以就必須加相當的能量破除庫倫電位障壁 (Coulomb Electrical Potential Barrier)。這是因為核子 (氘核子及氚核子) 是帶正電性的，他們會互相排斥如圖 2-3 及圖 2-4 所示。

不但是如此，我們還要考慮到核融合反應的反應截面積的大小 (Reaction Cross Section)，這是一種對核反應的或然率的量度，當我