



# 逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：未來的新能源—核融合

作者：陳玠瑜

系級：材料系

學號：D9585454

開課老師：田春林

課程名稱：近代物理

開課系所：電機系

開課學年：97 學年度 第 1 學期



## 中文摘要

能源與人類之生活是密不可分的，也是人類賴以生存和文明發展的重要根基，沒有能源就沒有人類的物質文明，更沒有社會的進步和發展。長期以來，科學家們窮其畢生精力於核融合的研究，即是在人工可控制的情況下，將不同質量之氫原子元素（即氘和氚）於高溫電漿中，將之約束於特定空間內，並停留足夠長的時間，使彼此間產生有效的反應碰撞（非僅止彈性碰撞），並發生核融合反應而生成較重的原子核，其原子核團所需的溫度能量、密度和純度都需經過精確的控制，之後，當輸入的能量遠大於反應產生的能量，方得效益。惟要將核融合所涉及的理論實地操作實現，其所面臨之是否有可有效發生核融合的機械設備，並是否可達到商業上的利益等問題都還需要一一的去克服。過去發展過程中所嘗試的各種激發電子漿之方法和約束電子漿的設備都被逐一的試驗成功，惟是否能成功的將其商業化，並如何有效獲得此新能源，仍是科學家們目前正在努力的目標。我們相信有朝一日，一個成功的核融合裝置和設備將有助於人類取得乾淨而有效力的能源。

**關鍵字：**能源、核融合、氘、氚

## 目錄

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 中文摘要.....                | 2  |
| 目錄.....                  | 3  |
| 一、核融合的簡介.....            | 5  |
| 1.1 動機.....              | 5  |
| 1.2 前言.....              | 6  |
| 1.3 研究主題.....            | 7  |
| 二、一個又老又新的能源—核融合.....     | 8  |
| 2.1 核融合發電.....           | 8  |
| 2.2 可控的核融合方式.....        | 9  |
| 2.2.1 超聲波核融合.....        | 10 |
| 2.2.2 雷射約束（慣性約束）核融合..... | 12 |
| 2.2.3 磁約束核融合（托卡馬克）.....  | 13 |
| 2.2.3.1 托卡馬克裝置.....      | 14 |
| 2.2.3.2 其他.....          | 15 |
| 2.3 核融合的基礎和目前的研究.....    | 15 |
| 2.4 電漿如何加熱及約束.....       | 17 |
| 2.5 維持電漿的嘗試.....         | 19 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 2.6 流磁機的發展.....      | 19 |
| 2.6.1 流磁機之優劣點.....   | 21 |
| 2.7 星機.....          | 21 |
| 2.8 崎嶇環.....         | 22 |
| 2.9 磁鏡.....          | 22 |
| 2.10 雷射核融.....       | 23 |
| 三、核分裂與核融合的比較.....    | 25 |
| 3.1 核分裂.....         | 25 |
| 3.2 核融合.....         | 26 |
| 3.3 比較.....          | 27 |
| 四、核融合的研究現況.....      | 29 |
| 4.1 低溫核融合的實現.....    | 29 |
| 4.2 室溫的桌上型核融合實驗..... | 30 |
| 4.3 熱核融合的新方法.....    | 31 |
| 5 結語.....            | 32 |
| 參考文獻.....            | 34 |

## 一、核融合的簡介

### 1.1 動機

能源的取得大部份來自巨觀上的化學變化能—燃燒，少量來自自然界的太陽能、風能、潮汐能等等，其中核分裂所產生的輻射能（ $\alpha$ 射線、 $\beta$ 射線、 $\gamma$ 射線）對人體傷害嚴重，且「核廢料」的問題，一直找不到適當的方法解決，所以未來的替代能源「核融合」即是目前科學家們極希望能夠發展成功的。

據文獻資料顯示核融合有許多相當優異的好處：

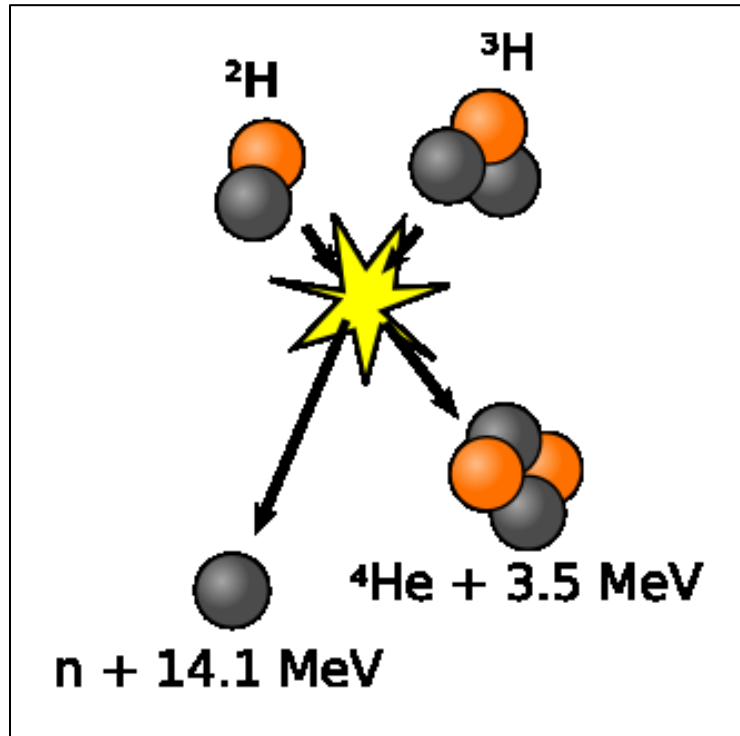
- (1) 只需極少之原料即可有大量能量產生，故較不會快速大量的消耗地球資源。
- (2) 其所使用之原料是一種含量豐富，且來源容易取得的。
- (3) 在反應發生過程中，其所產生之輻射能極小，只需一張紙就可以擋住，故可以忽略其對人體的傷害。
- (4) 能量產生過程中，當然也不會引起環境污染或產生危險的副產品，故其運作是安全可靠的。

既有如此優異之特質，那麼核融合到底是什麼，它的理論基礎是什麼，與核分裂又有何不同，運作所需要的條件是什麼，實際上又是如何運作的，目前研究進展到什麼地步等等都是值得了解的問題。

依目前知識上所了解的核分裂反應，像是核子彈，或是核能發電廠中的核反應等，都是利用中子使像鈾之類的重元素的原子核分裂開來，反應後，會成為一種或幾種質量較輕的元素，同時並放出更多的中子。其反應後原子核與中子的質量總合，比起反應前總是會少一點點，這些消失的質量，就依著愛因斯坦 $E = mc^2$ 的質能互換公式轉化為能量。原子核分裂反應的條件，一般說來最重要的就只是要有足量的反應原料鈾或鈾而已！但是核融合依文字看起來與核分裂相似但它到底是什麼呢？

## 1.2 前言

核融合，又稱核聚變，是指由質量小的原子（主要是指氘或氚），在一定條件下（如超高溫和高壓），發生原子核互相聚合作用，生成新的質量更重的原子核，並伴隨著巨大的能量釋放的一種核反應。反應後的原子核或中子蘊藏巨大的能量，原子核的反應變化（從一種原子核變化為另外一種原子核）往往伴隨著能量的釋放。如果是由重的原子核變化為輕的原子核，叫核分裂，如原子彈爆炸；如果是由輕的原子核聚合變化為重的原子核，叫核融合，此有如太陽發光發熱的能量來源，核融合反應也是恆星（包括太陽）發光發熱的能量來源[1]。



圖一、氘-氚（D-T）的核融合反應釋放出的核能，是被考慮的未來主要能源[1]。

### 1.3 研究主題

本文首先針對核融合的理論是否可行先做初步的了解，其中大部份的重點將放在如何產生核融合。從本文將可以了解到，先要有核融合反應之發生，而在核融合反應過程中所跑出的高能量中子，會將水加熱變成水蒸氣，並帶動蒸氣機的運作，其蒸氣機運作之原理與火力發電和核能發電相似，所以本報告的重點主題，將放在如何產生核融合的原理和如何使核融合有效率的發生運作。最後再對核融合與核分裂在原理上之不同做比較。

## 二、一個又老又新的能源—核融合

假若從海水中提煉出來的氘能成功地作為反應器燃料，那麼核融合將是可供人類取之不盡的能源。

產生核融合的關鍵是如何將燃料（重氫又稱氘：以1個質子和中子所構成的原子核，超重氫又稱氚：1個質子和2個中子所構成的原子核）加熱至1080K的高溫並維持數秒鐘的電漿，再利用之來進行核融合反應。很強的磁場確能使電漿與外界絕緣而約束之，諸如「流磁機」、「星機」及「崎嶇環」皆用環狀磁場達成較長的電漿約束時間。

「流磁機」試驗成果證實已離成功的反應器不遠了，不過其構造較複雜，成本較高且修護困難。「星機」及「崎嶇環」則較簡單，可是發展慢，規模小。磁場兩端不封閉的開端式磁場（簡稱「磁鏡」）雖能達到所需高溫，但約束電漿的時間不夠長。針對上述困難，最近發展的觀念是利用「反轉場鏡子」及「前後鏡」來達到理想的電漿約束時間。另外雷射光雖能壓縮小燃料球，使小球爆炸產生小規模的核融合能量，但目前雷射之效率太低，於使用上並不經濟[2]。

### 2.1 核融合發電

因為核融合反應需要極高的溫度所以目前無法做到既有效發電又能達到經濟效益，在實際的應用上，其能量產生的方式，是將最輕



的原子(氫原子)加熱成為電漿狀態，並進行核融合反應以釋放能量。在這核融合反應過程中一部分的氫核子質量轉換為能量。利用氫核子的同位素氘(deuterium)與氚(tritium)的核融合是最容易實現的核融合反應。氘和氚核子發生核融合後，兩個2萬電子伏特能量的原子核結合成一個350萬電子伏特能量的氦原子核( $\alpha$ 粒子)，並放出一個14.1百萬電子伏特(MeV)能量的中子，產生的能量約為原來能量的450倍。一個氘核和一個氚核融合成一個較重的氦核，而釋放出能量的反應速率是溫度的函數，而且在溫度為數億度(比太陽核心溫度還高數倍)時反應速率達到最大值。然而在這樣的高溫下，氘和氚的混合氣體成了電漿狀態。如何控制電漿溫度以實現最佳的核融合反應速率，是相當關鍵的技術。現在的托克馬克(Tokamak)實驗已可控制核融合反應以緩慢的方式釋放能量，只是仍向達到經濟效益努力邁進。

電漿為會導電的氣體，而且會受到磁力影響，利用非常強的磁場，可以限制極高溫度電漿的活動範圍，以進行核融合反應。若能開發以磁場控制核融合反應的電廠，則可以滿足人類的能源需求，可以說是最終解決了人類對潔淨新能源需求的問題[3]。

## 2.2 可控的核融合方式

目前主要的可控核融合方式有下列幾種[1]：

(一) 超聲波核融合

(二) 雷射約束（慣性約束）核融合

(三) 磁約束核融合（托卡馬克）

### 2.2.1 超聲波核融合

一群美國科學家在沒有外在中子源的情況下，利用聲波轟擊苯及丙酮的混合溶液，成功的引發了核融合反應。

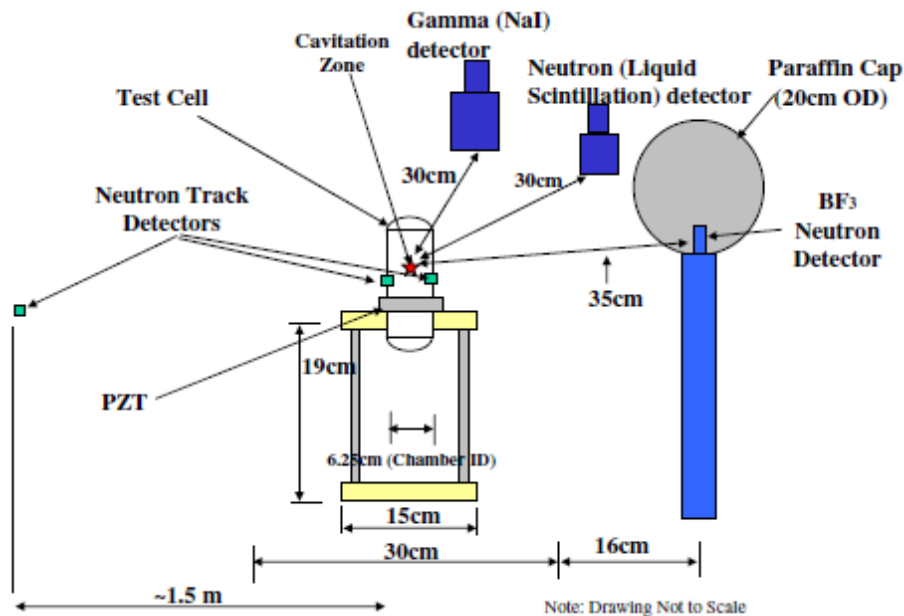
這個實驗的主要原理是利用高頻率的聲波轟擊加了重氫（deuterium）的苯及丙酮的混合溶劑，使溶液中的微小氣泡快速的膨脹並崩潰，進而產生相當大的能量來使苯中的重氫做融合。最重要的檢驗方式是探測實驗完成後所放出的熱中子[4]。

聲波核融合在2002年的時候曾經造成了不小的爭論，主要是因為當時的實驗利用了一個外來的中子源在溶液內產生微小的氣泡。所以就有人挑戰他們所診測到的中子究竟是從實驗所發出或者是外在中子源所放出的中子。不過後來他們不願重蹈覆轍。他們將天然的鈾溶解在溶劑裡面，利用鈾的自然衰變來在溶液內產生微小的氣泡，徹底避開了這個問題[5]。

為了尋求實驗精確，他們利用了三種偵測中子的方法，分別是用塑膠中子軌道探測儀（neutron track plastic detector）來偵測快中子，

氟化硼偵測器 (BF<sub>3</sub> detector) 及液態火花探測器 (NE-113-type liquid scintillation detector) 還有一個測量實驗所放出的gamma射線能量的儀器 (碘化鈉晶體探測器, NaI gamma ray detector) 來檢驗實驗結果。四個不同的測量方法同時支持溶液中發生了重氫跟重氫之間的核融合反應。實驗所放出的中子能量約小於等於2.45 MeV，每秒大約放出五千到一萬個中子。

這個實驗結果相當令人振奮，不過這樣就要利用它來製造核融合發電還有很長的距離，因為現在實驗所可以放出的能量還遠小於外加的能量。不過這個結果對基礎科學研究，還有一些需要中子源的應用研究來說，還是具有很大的吸引力[6]。



圖二、實驗儀器的架構圖[4]

## 2.2.2 雷射約束（慣性約束）核融合

解決電漿約束的另一條途徑是利用慣性，也就是在一個真空容器中心的小範圍內，以某種方式產生高溫高密度電漿，並讓其在極短（十億分之一秒）的時間內發生核融合反應。由於慣性的作用，在這短的時間內，電漿中的帶電粒子還達不到容器的內表面。因此，這種途徑被稱為慣性約束。在實驗中，目前比較通用的辦法是用多束強雷射來壓縮固態氫小球，使其在很短的時間內昇華成氣體、電離並發生核融合。因此，這一途徑有時也稱為雷射核融合。慣性約束核融合也有一些科學上和技術上的問題，有待進一步探索和解決[7]。

在「慣性」融合程序中，雷射光束或粒子光束將壓縮氘與鋰之混合物成為莢囊，藉此產生密度高之熱電漿。這種電漿的熱核燃燒發生時間小於兆分之一秒。CNRS已持續支持這項基礎程序研究超過20年，包括理論、數位模組與實驗。法國強雷射使用實驗室（LULI）擁有一項強力的雷射設施，同時也是一項歐洲大型儀器。在LULI儀器所作的實驗與高強度、非線性或相對之雷射-電漿互動有關，旨於分析與恆星電漿中類似的情境，包括雷射的熱度、熱傳輸、流體動力學、高密度與熱物質狀態之對等、熱電漿之原子物理與高離子化狀態等[8]。

歐洲科學家的另外計畫主要是利用「慣性約束核融合」(ICF)技術，以雷射光快速而均勻地加熱含有氘與氚的塑膠球標靶，如果能讓標靶在塌陷過程中達到極高的密度與溫度，就有可能引發可控制的核融合反應。與傳統的鈾元素核分裂發電方式相較，核融合發電的原料可自海水取得，而且過程中只會產生少量的低輻射性廢料[9]。

### 2.2.3 磁約束核融合（托卡馬克）

托卡馬克 (Tokamak) 是一種利用磁約束來實現受控核聚變的環性容器。它的名字 Tokamak 來源於環形 (toroidal)、真空室 (kamera)、磁 (magnit)、線圈 (kotushka) 前面文字字母所構成。其最初是由位於蘇聯莫斯科的庫爾恰托夫研究所的阿齊莫維齊等人在20世紀50年代發明的。

托卡馬克的中央是一個環形的真空室（有點像輪胎），外面纏繞著多組一定形態的線圈。真空室內充入一定氣體，在燈絲的熱電子或者微波等預電離手段的作用下，產生少量離子，然後通過感應或者微波、中性束注入等方式，激發並維持一個強大的環形電漿體電流。這個電漿體電流與外面的線圈電流一起，產生一定的螺旋型磁場，將其中的電漿體約束住，並使其與外界盡可能地絕熱。這樣，電漿體才能被感應、中性束、離子迴旋共振、電子迴旋共振、低雜波等方式加熱

到上億度的高溫，以達到核聚變的目的。

相比其他的磁約束受控核聚變方式，托卡馬克的優勢地位的建立來源於前蘇聯的T-3托卡馬克的實驗結果。1968年8月在蘇聯新西伯利亞召開的第三屆電漿體物理和受控核聚變研究國際會議上，阿齊莫維齊宣布在蘇聯的T-3托卡馬克上實現了電子溫度 1 keV，質子溫度 0.5 keV， $n\tau=10$ 的18次方m-3.s，這是受控核聚變研究的重大突破，在國際上掀起了一股托卡馬克的熱潮，各國相繼建造或改建了一批大型托卡馬克裝置。其中比較著名的有：美國普林斯頓大學由仿星器-C改建成的 ST Tokamak，美國橡樹嶺國家實驗室的奧爾馬克 (Ormark)，法國馮克奈-奧-羅茲研究所的 TFR Tokamak，英國卡拉姆實驗室的克利奧 (Cleo)，西德馬克斯-普朗克研究所的 Pulsator Tokamak[1]。

### 2.2.3.1 托卡馬克裝置

20世紀70年代後期到80年代中期，世界各國陸續建成了四個大型的托卡馬克，他們分別是[1]：

- (一) 美國的 TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)
- (二) 日本的 JT-60
- (三) 歐洲的 JET (Joint European Torus)
- (四) 蘇聯的 T-15 (超導線圈一直工作不正常，基本上未獲得太多

結果)

除這上面的四個以外，通用原子能公司的DIII-D應該也佔有重要的地位。在DIII-D上，獲得了目前傳統大環徑比托卡馬克（區別于低環徑比的球形托卡馬克）上最高水平的電漿體比壓值。其創新性的D型截面，也展示了非常良好的約束效果[1]。

### 2.2.3.2 其他

(一) 中國的超導托卡馬克 HT-7U（後更名為EAST，Experimental Advanced Superconducting Tokamak）

(二) 中國的球形托卡馬克SUNIST，（Sino-UNited Spherical Tokamak）

(三) 目前處於計劃階段的國際熱核聚變實驗反應爐（ITER）[1]

## 2.3 核融合的基礎和目前的研究

我們日常所用能量的來源，包括化石燃料（煤與石油）、水力與風力等等，推到最後，都來自太陽。太陽的內部的溫度非常高，裡面的氫原子核在融合反應之下釋放出大量的能量，這就是太陽能。其他星球放出的光也是一樣，所以說，核融合本就是億萬年前相當古老的能源。

氫彈就是利用核融合的原理製成的，它所釋放的能量不能控制，

只有破壞力。近年來，因為人類需要的能量急遽增加，而化石燃料的儲量又有限，使得人們開始努力開拓新的能源。核分裂反應已經在使用了，可以控制的核融合反應研究也正在進行中。三十年來許多科學家們竭盡努力，期使小規模的核融合反應產生的熱量，能緩慢地放出，而供應人類長期的便宜動力。

如果我們發展成功核融合反應器，便會有比化石燃料更經濟的燃料，而沒有空氣污染的問題；它會遠比核分裂的發電廠安全，且少放射性的問題；又會比直接利用太陽能的發電廠優良，因為能不斷發電而不受天候的影響。

但是要發展這樣的新能源，也有許多困難。第一個困難是必須把燃料加熱至比太陽更熱的溫度，才能有足夠多的核融合反應來配合其經濟利用的條件。而在較低的溫度下帶正電荷的燃料離子，因離子間的庫倫斥力較不易達成核融合反應，只有彈性碰撞。在這樣的高溫下，燃料氣體（通常研究的是氘氚）將會完全離子化，形成負電子與正原子核的「雲海」，是為「電漿」。

第二個困難是要使熱核電漿維持一段長的時間，避免使它冷卻或融化反應器的容器壁。這段時間的長短是以達到反應至燃料百分之五至十之耗燃率為準[2]。

初期的核融合反應器要用氘氚反應（D-T），因為它能在較低的



溫度及較短的維持時間下發生足夠的融合反應。D-T融合產生的中子穿過容器壁進入，其即所謂含有鋰的「圍包」(blanket)，就反應癸生了原料所需的氘。發出的熱量可經由流體(例如氦)運輸，使水蒸汽供應渦輪機發電。據估計，在地層內有一千萬噸鋰，如果全部利用，可產生 $5 \times 10^{23}$ 焦耳的能量，比化石燃料的能量多兩倍(也可以從海水提煉鋰，可是也許不經濟)。所以，D-T燃料循環至少可供人類需用達幾百年之久。到了地球上的鋰用罄時，採用氘氘反應(D-D)的反應器可能已發展成功，這種反應器需要比較高的溫度及比較長的維持時間。

水裡的氘有六千五百分之一是氘，而從水中提煉氘已發展出很經濟的方法。從一公升水抽出的氘可產生的能量等於 $1.2 \times 10^{10}$ 焦耳，比燃燒三百公升石油的能量還多。全部海水含有的氘共能夠產生 $7.6 \times 10^{30}$ 焦耳的能量，可供給人類需用達千萬年有餘[2]。

## 2.4 電漿如何加熱及約束

發展核融合反應器的兩個主要問題是如何加熱及如何約束電漿。其中，核融合產生的功率密度與溫度是有一定的關係。例如，當我們用D-T反應，D與T的密度各為每立方米 $10^{20}$ 個，溫度達到10 keV(相當於絕對溫標 $10^8$ °K)，則產生之功率密度 $P_f$ 約為每立方米3百萬

瓦（3MW），這是一個D-T核融合反應器典型的數據。如果 $P_f$ （功率密度） $< 1\text{MW}/\text{m}^3$ ，則產生的電力就不經濟；如果 $P_f > 10\text{MW}/\text{m}^3$ ，則可能毀壞反應器的容器壁。要產生同樣高的功率密度，用D-D反應則需要達到的溫度為100keV（ $10^9\text{K}$ ），燃料的密度低於 $\sim 10^{20}/\text{米}^3$ 才不會有爆炸的危險（空氣的密度等於 $2.5 \times 10^{25}$ 分子/ $\text{米}^3$ ）。

關於維持電漿所需要的時間，我們考慮的準則是，電漿產生的熱量轉換為電，又回過來輸入電漿的能量必須能維持電漿的溫度，及補充其所損失之輻射能。亦即：

$$(\text{可用之輸入能}) \geq (\text{需要的輸入能})$$

從這個條件，我們可以估算出D-T反應，當溫度為20 keV，在「無得失」（break-even）的情況下，若發電的全部用來回授，離子（或電子）的密度 $n$ 與約束時間 $\tau$ 之乘積 $n\tau$ 必須大於 $0.8 \times 10^{20} \text{m}^{-3}\text{sec}$ 。又假設只用百分之二十的電回授入反應器，則 $n\tau > 5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}\text{sec}$ 。所以，若取 $n \sim 10^{20} \text{m}^{-3}$ ，則必須能約束電漿幾秒鐘的時間。如果用D-D燃料的話，則需要約束電漿的時間要幾十倍；因為技術上的困難增多，所以我們並不急於建造一座D-D反應器。

就觀星球的核融合，其星球的質量非常大，其引力場當即能約束其電漿而使之不致擴散。可是在實驗室裡的電漿質量太小而幾乎沒有自引力，如果用金屬或陶磁作容器壁來約束電漿，會使電漿很快地冷

卻下來，容器壁也有融化之虞。最好的解決方法是利用磁場來約束電漿。這樣離子及電子會沿著磁力線軸向作螺旋狀運動，而僅能緩慢地向與磁力線垂直之方向擴散[2]。

## 2.5 維持電漿的嘗試

維持電漿需用感應線圈通上電流來達成。在環狀約束的情況下，感應圈在環的外側因相隔較遠，所以磁場也比較弱。磁場的梯度可使電漿往磁壓力較小之方向（往環外）漂流。若想抵消這個漂流必須扭轉磁力線。有兩個方法可扭轉磁力線：（1）所謂「流磁機」即托卡馬克（Tokamaks）是利用感應電漿電流來產生附加的磁場，或（2）所謂「星機」（Stellarators）是利用附加的螺旋形感應圈[2]。

為測量電漿的密度、溫度、電位、電流密度、空間、時間的關係等，已發展了許多「診斷」的方法。比方說可以將脈動的雷射光束會聚於電漿之一個極小部分，該處的游離電子將使雷射光散射到一多頻道分光器，而能將光譜記錄下來。散射後的光強度正比於電子密度，而光譜曲線之寬窄亦正比於電子溫度之平方根（都卜勒效應）[2]。

## 2.6 流磁機的發展

Alcator（流磁機的一種）有特別強的磁場，所以能達到較高的電

漿密度而 $n\tau > 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ sec}$ 。「普林斯頓大環」(Princeton Large Torus, PLT)及「T-10」(在莫斯科)等，都是今日最大的約束電漿裝備，且已具有很好的成績。可是圓橫截面的流磁機並不經濟。美國通用原子能公司(GA，聖地牙哥)的「雙環」(Doublet)實驗採用非圓的橫截面而能達到較大之 $\beta > 0.1$ 。

用環磁場約束電漿的法子永遠會混有雜質。比方從容器壁因離子或電子轟擊而放出的(sputtered)原子便是。這些雜質會增加電漿的輻射損失而使電漿冷卻。一個避免雜質的方法是把電漿外層分離，使其冷卻，再用抽氣幫浦除淨。這樣的方法叫作「轉離法」(divertor)。

「角向場轉離實驗」(Poloidal Divertor Experiment, PDX)乃是利用這個方法保存電漿純性之實驗設備。”流磁機型融合試驗反應器”

(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)已於1981年完成，可用D-T燃料而可達到「無得失」條件之 $n\tau > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ sec}$ 。(今日試驗時不用氙，因為D-T反應產生的中子可使容器壁有放射性，而且氙也是有放射性的)。按計畫流磁機型的「試驗發電反應器」(Experimental Power Reactor, EPR)將已示範小規模發電。為簡單起見，此機不用「轉離法」，所以所含雜質使「燃燒」時間限於在十秒左右。一個「雙環機」型的試驗發電反應器，比「雙環三號」又要大一號[2]。

## 2.6.1 流磁機之優劣點

雖然到了1990年已發展出試驗型的發電反應器，可是還有許多困難尚待解決。按照預算，流磁機型的大發電廠的資本價格約為每瓩二千塊美金，還不如今日核能電廠的一千塊那麼經濟。

雖然本文所敘述的流磁機試驗都在美國，事實上最早的流磁機發展於蘇俄，而目前相似的試驗也在歐洲、日本進行中[2]。

## 2.7 星機

星機兼有環磁場感應圈及螺旋形的感應圈。但所謂「螺旋機」(torsatron)只有螺旋形的感應圈，可以省去織合感應圈的麻煩，可是不容易控制所謂「磁剪現象」(magnetic shear)，即磁力線在不同之層次具有不同的方向分布。「磁剪」雖不易控制，其存在卻有助於電漿的穩定性，所以很重要。

「可利歐」星機有感應圈，星機電漿的密度及溫度類似於小流磁機。如果小半徑 $a$ 和環磁場 $B$ 的乘積相同，則流磁機及星機維持電漿的時間略同。今日的星機都不如流磁機那麼大。星機有大的縱橫比(aspect ratio)，可是流磁機只有 $R/a \sim 3$ ，所以如果小半徑一樣，星機比流磁機大幾倍也貴幾倍。因為實驗室中，流磁機首先在長時間的約束電漿( $>0.01$ 秒)技術上，宣告成功，故其研究得到了許多經費

支持，可是星機的研究卻相形見絀[2]。

## 2.8 崎嶇環

所謂「愛爾摩崎嶇環」(Elmo Bumpy Torus, EBT)有24個間隔較遠的環磁場圈。在電子和磁場之共振頻率(electron cyclotron resonance frequency)可以發生及維持電漿。

崎嶇環的好處是電漿穩定所以約束的時間長，而 $\beta$ 值也好。如果要提高電漿的密度及溫度，必得增加磁場強度及微波頻率。目前正在發展中的200瓩及二百八十億赫(28 GHz)的微波發射機，可以增加中心之磁場強度至0.85tesla，於是電漿的密度及溫度將加倍。最後的目標是增加磁場強度及微波頻率至3 tesla及130 GHz，可是那種微波發射機還沒發展！這種機型的主要問題是：「維持反應器需要多少微波功率？」及「可能發展出所需要的微波發射機麼？」。

如果需要的微波功率不太大，而微波發射機也發展成功的話，現在的約束電漿的方法中，崎嶇環是最有前途的，因為它容易造也容易修理，而且也經濟(每瓩在一千塊美金之內)[2]。

## 2.9 磁鏡

使離子及電子受感應圈影響而來回反射於磁場內，用這方式維持

電漿的方法叫作「磁鏡」。普通磁鏡裡，電漿並不穩定，因為離開鈾的電漿越走磁場越小，磁壓也就越弱，不會回來。但如果磁壓的最低點在電漿之中部，就沒有這種電漿不穩定的問題了。有一種試驗採用兩個「陰陽」感應圈，產生了上述的「最低磁壓」(minimum-B)的磁場稱為2X II B實驗。用二萬電子伏(數百安培)中性原子束加熱而發生熱離子的電漿[2]。

## 2.10 雷射核融

雷射核融合所生的能量可等於在小球攝取得雷射光量之一百倍。如果小球所受照射不均，外層可能破碎而不引起爆炸。另外，還須避免高能電子預先加熱小球之內部，因為預先加熱會增加內在的壓力而抵消有效壓縮。

為了模擬電漿的現象，已發展了非常複雜的計算機程式，也發展了「診斷方法」來量電漿密度及溫度。目前空間的解析精度已可達 $10^{-6}$ 米，對時間的精度約為 $10^{-11}$ 秒。

「阿古斯」(Argus)雷射實驗在1977年完成的資料。勞倫斯試驗室採用鈹及玻璃之雷射產生核融合能量的計劃。所謂「Shiva」 $3 \times 10^{13}$ 瓦的雷射實驗將於今年開始實行，而Shiva二號則計畫於1981年達成「無得失」情況。(「無得失」代表核融合產生之能量等於雷射光線

之能量)。美國新墨西哥州的洛斯阿拉摩斯科學實驗室 (Los Alamos Scientific Laboratory, LASL) 用二氧化碳的雷射，也預定於1982年達成「無得失」情況。世界上尚有許多其他試驗室正加緊研究雷射融合。

最大的問題是如何來發展合適的雷射，就目前的雷射效率而言，實離理想甚遠。鈹和玻璃雷射 ( $\lambda=1.06\mu\text{m}$ ) 的效率只是千分之二，碘雷射的效率等於千分之五。用二氧化碳雷射的波長 ( $10.6\ \mu\text{m}$ ) 壓縮小球則不如較短的波長那麼有效。但是二氧化碳雷射的效率比較好，大約為百分之五。最後的核融合雷射大概將用高壓力的氣體，來達到短的脈衝時間，高的重複速度，以及大的平均功率。單原子的氣體比分子的氣體好，因為分子的能階相隔太近，不容易聚成單色波長。很多試驗室也研究，用高能電子或離子束壓縮小燃料球。

雖然一般咸認在幾年內可達成「無得失」情況，但要雷射核融合反應器大眾化地產生經濟的電力，還要突破多重的困難。

流磁機及雷射最近的研究發展，確實給核融合反應器的將來帶來了很大的鼓勵，而主要研究國家的核融合研究經費的增加也表示了各國當局推動較大實驗的決心。可是，何種方法才能早日實現經濟的核融合反應器，卻還沒有明確的答案。除了以上介紹的方法以外，還有許多有希望的方法等待我們來創造。請拭目以待1981年核融合反應器達到「無得失」之盛舉。核融合能源是國際上最受歡迎的一種研究，

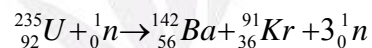


各界的熱望與需要亦十分殷切。目前，工業先進國家採取緊急計畫，動員大批科學家和工程師發展核融合反應器，正像當年發展核武器及太空飛行一樣的熱烈[2]。

### 三、核分裂與核融合的比較

#### 3.1 核分裂

鈾-235等重原子核在吸收一個中子後發生裂變，分裂成兩個質量大致相同的新原子核，同時放出2到4個中子，並伴有巨大的能量釋放：



而新產生的中子又會引起其他 ${}^{235}\text{U}$ 原子核的裂變，最終形成了鏈式裂變反應。 ${}^{235}\text{U}$ 原子每次裂變放出約200 Mev的能量，約為一個碳原子燃燒所放出能量（4.1ev）的4.9萬倍。如果控制鏈式反應的速度，就可根據需要來利用核能。而核裂變反應爐就是實行可控裂變反應的裝置，其關鍵是控制中子的數目和保持中子的平衡。

核電站是利用核裂變反應釋放的大量熱能來進行發電，即是實現核能—熱能—電能轉換的地方。用於發電的鏈式裂變反應的條件：

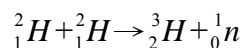
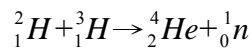
- (一) 鈾要達到一定的質量（臨界質量）。
- (二) 中子的能量要適當。
- (三) 核裂變反應要做到有序和可控。

核反應爐是核電站的心臟，他是使原子核裂變鏈式反應能夠有控制的持續進行的裝置，是利用核能最重要的設備。核反應爐的種類很多，若依引起裂變的中子能量來區分，可分為熱中子反應爐（thermal neutron reactor）和快中子反應爐（faster neutron tractor）[17]。

### 3.2 核融合

核融合過程與核裂變過程正好相反。核融合是利用兩個或兩個以上較輕原子核，如氫的同位素氘、氚，在超高溫（幾千萬或上億攝氏度）等特定條件下猛烈碰撞，聚合成一個較重原子核，由於發生質量虧損，而釋放出一個中子和巨大的能量。輕核聚變時結合能的變化比重核裂變大的多，因而輕核聚變過程將放出更大的能量。實現聚變反應的條件就是要把電漿加熱到點火溫度，並控制反應物的密度和維持此密度的時間，這使的實現核融合能的應用遠比核分裂能的應用要困難的多。

目前人們關心的融合反應有：



利用這些核融合反應可以為人類提供能量，其主要原因有三點：

(一)核反應釋放的能量巨大。

(二)核融合的原材料 ${}^2_1\text{H}$ 可以從海水中擷取。

(三)核融合反應的產物對環境的影響很小。

但是人類要將核融合的能量加以利用還有很長的路要走，這是因為目前還不能實現可控的熱核融合反應。主要的問題有兩點：

(一)如何達到核融合所需的高溫。

(二)如何使核融合反應以受控方式進行。

(三)人工的核融合反應目前只能在氫彈爆炸或由加速器產生的高能粒子碰撞實驗中得以實現。

比起核分裂以及其他能源產生方式環保相當多是有技術但是資金等問題還需要時間來解決的。但在2005年，部份科學家相信已經成功做出小型的核融合，並且得到初步驗證[17]。

### 3.3 比較

如前所述，如果是由重的原子核變化為輕的原子核，叫核分裂，其有如原子彈爆炸；如果是由輕的原子核變化為重的原子核，叫核融合，如太陽發光發熱的能量來源。

和核分裂相比，核融合的放射性污染等環境問題少很多，而且其原料可直接取自海水中的氘，來源幾乎取之不盡，是理想的能源方式。目前人類已經可以實現不受控制的核融合，主要如氫彈的爆炸。但是要想能量可被人類有效利用，必須能夠合理的控制核融合的速度和規

模，實現持續、平穩的能量輸出；而觸發核融合反應必須消耗能量，因此人造核融合製造的能量與觸發核融合的能量要到達一定的比例才能有經濟效應。科學家正努力研究如何控制核融合，但是現在看來還有很長的路要走[1]。今將核融合和核分裂做一比較：

表一、核融合和核分裂的比較

|        | 核分裂   | 核融合  |
|--------|---|--|
| 原料     | 鈾-235   | 氘、氚（可由海水取得，月球亦有相當大量的資源可利用）   |
| 能源產生方式 | 鈾-235受中子重擊，而產生連鎖，反應所產生的熱能，再將水加熱成高溫高壓推動汽輪機，帶動發電機，產生電能。   | 將最輕的原子（氫原子）加熱成為電漿狀態，並進行核融合反應以釋放能量。在這核融合反應過程中一部分的氫核子質量轉換為能量。  |
| 反應方程式  | ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{56}^{142}\text{Ba} + {}_{36}^{91}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n}$ | ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$<br>${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ |
| 核廢料    | γ射線   | 氦、微中子  |

## 四、核融合的研究現況

### 4.1 低溫核融合的實現

一群美國及俄國的科學家宣稱他們進行的實驗得到了室溫核融合的證據。儘管結果仍有爭議，但若他們的發現為真，將是自然科學的一大進步。

核融合之所以困難在於要將兩個質子抵抗其相斥力而壓縮到極小的距離，這個步驟需要極大的溫度及壓力。所以在使用核融合所放出的能量為武器的氫彈中，必須先以核分裂的原子彈來提供所需要的能量才能進行核融合。當兩個質子融合之後會形成重氫。不過在反應爐中要做到所需要的條件實在是太過困難，所以研究人員會選擇氘跟氚來進行核融合的研究。一樣可以產生極大的能量不過所需要的條件則略為寬鬆。

美國 Oak Ridge National Laboratory 的 Rusi Taleyarkhan 表示 [10]，他們的實驗從另一個完全不同的觀點著手。桌上就可以完成而且所需要的材料相對於傳統核融合反應是便宜又方便。他們主要提供核融合所需的臨界能量的方法稱為 cavitation，是利用釐米級的氣泡受到高頻震盪而爆破所產生的能量。他們表示當泡泡爆破的時候將可以產生一千萬度的高溫及壓力來將兩個原子核進行核融合。

他們的實驗是利用氘將丙酮中所有的氫都換掉。他們對丙酮同時照射中子並加上高頻震盪。當泡泡在丙酮中爆破的時候，他們利用聲光效應來觀察所發出的光。因為泡泡爆破的能量很大又集中於一個小區域，所以可以有足夠的能量使分子發光。另一個可能的證據自來自中子的檢測。當兩個氘融合的時候會放出一個中子，所以檢查是否有中子發射出來便成為核融合是否成功的最好證據。他們表示他們檢查出了少量的氘，也就是融合後的產物，也觀察到中子從丙酮中發射出來。

這個研究結果仍有爭論，不過就算是成功了，距離商業化的大規模發電仍然有一大段距離[11]。

## 4.2 室溫的桌上型核融合實驗

UCLA的科學家[12]利用焦電晶體，成功的在室溫下製造出核融合。不過這雖然是室溫之下的核融合反應，卻對目前的能源危機並沒有直接的幫助，因為最重要的關鍵是它沒有辦法在源源不斷的維持住這個核融合反應。不過這個實驗可以產生相當大數量的中子，可以作為很簡單的一個中子源（neutron source）。

UCLA實驗的關鍵是利用所謂的焦電材料（pyroelectric material）晶體，加溫之後會在表面聚集足夠多的電子而產生強電場，使電子可

以被加速到幾千電子伏的能量。

所以他們的實驗基本上是將重氫 (deuterium) 和焦電材料鉍酸鋰 (LiTaO<sub>3</sub>) 放在真空腔中。利用鉍酸鋰降溫之後再升溫，可以在表面產生大約十二萬伏特的電壓。而在鉍酸鋰上則接到一組鎢製的探針，這時鎢尖端的電壓可以高達每奈米25伏。在這麼強的電場下，重氫的電子會被游離掉，同時重氫離子會被加速撞上以重氫化鉕 (ErD<sub>2</sub>) 所構成的靶，使得重氫離子和靶內的重氫產生核融合反應。重氫-重氫的核融合反應會產生一個氦三和一個能量為2.45MeV的中子，而這個中子也就是核融合的證據。在實驗中，每秒大概可以產生九百個中子，遠大於自然界中的背景值。

這個實驗大概可以產生 $1e-8$ 焦耳的能量，對能源危機的幫助其實不大，不過這個實驗如果改變升溫的溫度範圍，並利用較大的鎢探針，可以產生高達每秒十萬個中子，這對目前許多醫院而言，是一個很好的中子源，可以利用作為治療癌症之用，而不需要位此製造一座加速器，而且還可以在不要用的時候「關上」，基本上也減低了輻射的困擾[13,14]。

### 4.3 熱核融合的新方法

美國Sandia實驗室的科學家[15]利用一種新方法，表示可以完成

熱核融合反應。傳統的熱核融合構想主要有把熱電漿用強磁場拘束在極小的體積內以達到夠高的溫度來產生核融合反應的Tokomak法，另外是用雷射的強聚焦性對氣體加熱以產生核融合。這兩種方法經過多年的研究都沒有得到有效的結果。

美國Sandia國家實驗室的研究人員利用他們一部叫做Z machine的儀器似乎提供了一個解答。他們把重氫放在機器裡面的一個容器中。在把重氫變成電漿態時，不同於前面兩種方法，他們利用通入兩千萬安培的電流讓鎢絲變成蒸氣並用磁場使蒸氣撞向重氫容器外由塑膠薄膜所構成的圓柱而產生X光。藉由X光在容器內的震盪把容器內的重氫壓縮至超過兩千萬度而生核融合的現象。他們實驗測得的中子數與理論估計應放出的中子數相當，從而間接證實了核融合反應。這個發現如果能被反覆確認為真，將是核融合最重要的成就之一，向核融合發電的理想再進一步[16]。

## 5 結語

遠至浩瀚無窮的宇宙盡頭，近至我們的身體內的生理機能，舉凡會運動的、會發亮的、會產生變化的、會傳遞東西的都與能量有關。大地萬物之母—太陽，其所產生之能量蘊育著大地萬物，使大地萬物充滿生機。植物靠太陽進行光合作用，動物靠吃植物而存活，故其根



本來源都要追溯於太陽的能量，因此能量是生命中不可或缺的重要來源及基本要素。我們的先人因取得了能源的利用技術，大量的能源因此被加以生產和利用，例如：石油、天然氣、煤、風、水等，故有了現今的科技發展。而我們目前正在使用的能源，大致上來自燃燒石油、煤、天然氣或是少量的自然能源、核分裂等，但是大量的使用正使地球上有限的自然資源如石油、煤、天然氣，正日益減少中，且是有用盡的一天，不能長期無窮無盡的滿足人類的需求，石油的短缺更造成前一陣子石油價格的高漲，又化學變化的燃燒使得空氣污染日益嚴重，導使地球的溫室效應更加劇惡化嚴重。現今我們的整個生活基礎建立於使用大量能源的科技上，凡舉食、衣、住、行、育樂無不與之息息相關，是故，一個乾淨的、無殘害的能源使用，為科學家們正努力研究與開發的方向。

## 參考文獻

- [1] 維基百科 <http://zh.wikipedia.org/wiki/維基百科>.
- [2] 杜蘭, “核融合,” 科學月刊雜誌, 第 102 期, Jun, 1978.
- [3] 陳秋榮, “核融合研究簡介 (托克馬克),” 物理雙月刊, 28 卷 2 期, pp.419-425, 2006 年 4 月.
- [4] R. P. Taleyarkhan, C. D. West, R. T. Lahey, Jr., R. I. Nigmatulin, R. C. Block, and Y. Xu, “Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, pp.034301-1-034301-2, 2006.
- [5] Science Daily, “Using Sound Waves To Induce Nuclear Fusion With No External,” *Science News*, Mar 06, 2002.
- [6] John C. H. Chen, “物理：聲波核融合的重大突破,” *Sciscape 新聞報導*, Feb. 02, 2006.
- [7] 董家齊, 陳寬任, “奇妙的物質第四態——電漿,” 《科學發展》, 354 期, pp.52-59, 2002 年 6 月.
- [8] 駐法科技組, “法國家科學研中心能源研究概況,” 法國國家科學研究中心能源專刊, 2008 年 11 月 17 日.
- [9] 閻紀宇, “歐洲共同研發核融合發電,” 中國時報, 2007 年 4 月 2 日.

- [10] Taleyarkhan, R. P. et. al., “Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation,” *Science*, 295, 1868-1873, 2002.
- [11] John C. H. Chen, “物理：低溫核融合的實現？,” *Sciscape 新聞報導*, Mar. 06, 2002.
- [12] B. Naranjo, J. K. Gimzewski, and S. Putterman, “Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal,” *Nature*, 434, 1115, 2005.
- [13] Phil Schewe, Ben Stein, “Pyrofusion: A Room-Temperature, Palm-Sized Nuclear Fusion Device,” *Physics News Update*, 729, April 27, 2005.
- [14] John C. H. Chen, “物理：室溫的桌上型核融合實驗,” *Sciscape 新聞報導*, May 02, 2005.
- [15] Kenneth Chang, “New Fusion Method Offers Hope of New Energy Source” *The New York Times*, April 8, 2003.
- [16] John C. H. Chen, “物理：熱核融合的新方法” *Sciscape 新聞報導*, April 09, 2003.
- [17] 陳軍, 袁華堂, 陳憲偉, “新能源材料,” 五南圖書出版公司, 2004.