

國立中山大學物理系尖端能源物理培訓計畫

核融合發電之研究與探討

指導教授：嚴祖強 副教授

作者：黃冠彰 黃程逸

2008/11/30

前言：

近年來地球溫室效應越來越嚴重，其中尤以火力發電廠為一個非常大的二氧化碳排放源，各國於節能減碳的同時，也重啓了對核能的省思。基於現今核分裂式的核能發電廠已經接近了使用年限，各國正在研發的「核融合發電」，以利於科技產業的向上發展，未來人類應追求的是「高效能、無污染」，在下面的內容將更深入的介紹有關「核融合」的利弊與新效能，更是我們未來的展望！相較於現在，傳統式的核分裂發電方式核廢料的污染，報廢機的處理，安置及最基本的是鈾礦的含量少，未來便可能使原料匱乏，屆時；現代的核能發電方法將不敷使用，核融合發電將成為目前最有潛力之新能源，無污染且大於傳統核能發電之數倍之強大能量，以及核融合所需的基本原料：重水（即氘 氚）在地球及月球上的含量豐富，能使未來數千年，甚至更久，都將沒有所謂的能源匱乏之情形。由於核融合之原理：輕原子融合，相較於核分裂的重核子分裂，在未來科技進步時，必有更新的核融合技術，將使人類永無能源匱乏的問題。

簡介：

其實，核融合這種能源，早在數十億年前就在宇宙中的各個發光的行星（恆星）內部不斷的發生，而這些行星就像太陽一樣，發光了數十億年了！由於地球資源因為人類的開發日漸枯竭，不由得尋找新的替代能源，而人類是到了最近的百年之內，才想到要發展這項新的能源！

太陽核心約高達攝氏 1500 萬度；太陽的主要成分為氫，由於在高溫、高壓下，原子核與電子的束縛能被打斷，形成『離子體』（plasma，或稱『電漿』）狀態。裸露、高速的氫原子核，互相撞擊、形成另外一種原子。這時產生的龐大能量，使得太陽發光、恆星閃閃發亮。愛因斯坦（Albert Einstein 1879~1955）在 1905 年發表的『特殊相對論』（狹義相對論）中預言，核聚變會產生龐大能量。核聚變反應前與反應後相比，反應後的質量變輕；他預言，反應後所減輕的質量是轉換成能量。愛因斯坦根據相對論，不但顛覆了以前的宇宙觀，也告訴我們，由非常小的質量可以轉換成非常大的能量。

其實核融合已經應用在戰場上了！1950 年 1 月美國便開始研發氫彈，後來結果證明其威力比原子彈要高出數倍，就是因為核融合產生的能量要比核分裂產生的能量要大上許多，如今，戰場上令人聞風色變的毀滅性武器，如今竟變成人類文明延續的關鍵。

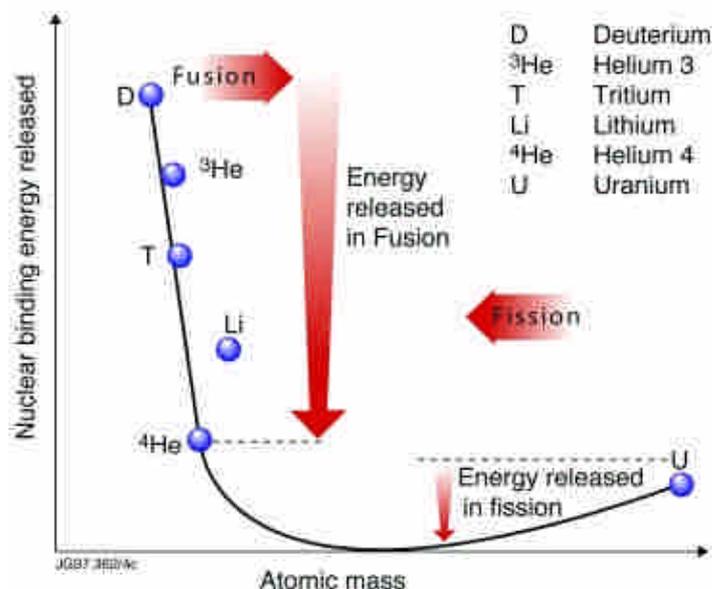
核分裂及核融合：

原子序於 40 至 80 之間為最穩定的原子，而當原子序超過 80 以後就都有一個天然放射性的趨勢。並且會分裂成二較輕而在穩定區域內的元素，此種趨勢即核分裂原理之基礎。而原子序小的原子則在高溫下可融合成原子序較大的原子。上述分裂與融合之反應均有質量欠缺（mass defect）現象，由愛因斯坦質能互換公式：

$$E = mc^2$$

E：能量、c：光速、m：質量

所欠缺的質量變依照上述的公式，變成能量！由於光速是一個非常大的常數，所以即使小小的質量也可以產生很大的能量。



由上圖可知核分裂與核融合產生的能量差別(縱向箭頭大小代表釋放的能量大小)，圖中的核融合反應與一般我們所認知的核融合反應(4個氫原子融合成一個氦原子)有所不同，是由氘與氦融合成氦原子，其實前者是太陽中產生的反應，由於後者反應的條件比前者要簡單許多，所以才採用氘與氦來產生核反應！

以下藉由上述的公式與原理，來估算一個融合反應產生的能量：

在太陽中發生的，是相當難起反應的氫原子核間的核融合反應，因為太陽夠大，熱能難以逸散，所以才能用氫當燃料燃燒。

融合的反應使 4 個氫原子核結合產生氦原子核。因 4 個氫原子核比

氦原子核重 0.7% 的質量，代表有質量在融合的過程中不見了。

4 個氫原子核質量 = 6.693×10^{-27} 公斤 (4 個質子)

1 個氦原子核質量 = 6.645×10^{-27} 公斤 (2 個質子，2 個中子)

質量差異 = 0.048×10^{-27} 公斤，約佔原質量的 0.7%。

$$E = m_0 c^2$$

$$= (0.048 \times 10^{-27} \text{ 公斤}) \times (3 \times 10^8 \text{ 公尺/秒})^2$$

$$= 0.43 \times 10^{-11} \text{ 焦耳}$$

這個數字看似非常小，但實際上發生反應的不是只有一個原子，而是非常多的原子，若我們將此數值乘上亞佛加爵數 $N = 6.02 \times 10^{23}$ 個原子，也就是一莫耳的核融合反應，可以產生約 26 億焦耳的能量！

污染方面：

核分裂產生的輻射線非常的強，不管反應前的鈾 235，或是反應後的物質，其放射性都非常強，所以在安置核廢料方面都必須要非常的謹慎小心，以免對環境造成污染，對生物造成傷害！

而核融合反應是由氫、氘與氚來反應，除了氚有些微的放射性外(放射出是電子，並不是 γ 射線)，反應後產生的氦是惰性氣體，幾乎不會產生輻射線，所以說核融合是非常乾淨的能源！

安全方面

核融合的反應需要極高的溫度，當反應失控的時候，只需降低其溫度就可以中止核融合反應，不像核分裂，因為中子的連鎖反應失控，造成過多的反應發生，導致反應無法控制，而可以使核心融化，輻射外洩。事實上，很多人擔心核電廠會爆炸，造成像廣島、長崎那樣的核爆，其實這是不可能發生的，因為核電廠使用的鈾濃度約在 5% 而已，而製作原子彈所需要的是 80% 以上的高濃度鈾。所以兩相比較之下，如果核融合發電技術能夠商業化，也是非核家園的到來也說不定！

發生核融合反應所需的條件

如果和控制核融合反應來比較，利用核分裂反應產生能量可以算是一件十分容易的工作。大部分的核分裂反應，不論是原子彈的爆炸，或是核能發電廠中的反應，都是中子使像鈾之類得重元素的原子核分裂開來，成爲一種或幾種較輕元素的原子核，同時並放出更多的中子。但是反應後原子核與中子的質量，比起反應前的質量總是會少一點點，這些消失的質量，就依著愛因斯坦 $E=mc^2$ 的質能互換公式轉換爲能量。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鈾或鈾而已！

至於核融合反應，也就是維持著太陽始終以一個大火球形式存在，以即使氫彈放

出無比威力的原子核反應，則是使像氫之類較輕元素的原子核再相撞時融合，成爲另一個較重元素的原子核。新原子的質量也是略小於原有原子核的質量和。消失的質量也是依據上述的質能互換公式轉換爲能量。但是要使原子核分裂容易，融合可就是困難重重的。因爲原子核本身帶有正電荷，核與核之間會互相排斥，就好像它們之間有一條看不見的彈簧防止它們過分開的靠近。一定要有足夠互相靠近而融合在一起。因此若想要引起大量的原子核相撞並融合產生相當的能量的話，就必須達到下面三項條件：

- (1)非常高的溫度(使原子核有較高的速度)。
- (2)非超高的密度(使原子核之間正面碰撞的機率提高)。
- (3)將高速度、高密度的原子核侷限在一起維持夠長的時間，使融合反應發生並能持續。

在太陽和一些其他的星球上，由於它們巨大星體所產生強大的重力，以及大量氫原子的存在，使得核融合反應能不斷地發生並延續下去。但是在地球上想要核融合反應，並將其有效地加以控制，卻是一件非常不容易的事情了。而要它達到實用與經濟的目的，更是人類科技的一項重大考驗。美國新墨西哥州山地亞(Sandia)實驗室的物理學家約那斯(Yonas)說：「核融合是今日科學中最令人興奮的領域，也是一座我們非爬不可的高山。」

在上坡的第一步，我們就發現已普通的氫原子核進行核融合反應，所需要的溫度和密度是今天的科學技術無法達成的。但由實驗顯示，若只是用氘或氚等氫的同位素做原料時，情況將會容易得多。理由是這些同位素原子核的截面積，比普通的氫原子核還要大得多。使得原子核之間正面相撞的機率較大，反應所需要的條件就不必像一般氫原子核那麼地苛刻。科學家們認爲比較容易進行的核融合反應，是氘與氚相撞融合爲氦原子核，並以高速中子的形式放出能量。氘與氚都是比較容易獲得的原料，每一加侖的海水中含有八分之一克的氘。氚在自然界中並不存在，但可由中子撞擊鋰的原子核來產生，而鋰本身則可以從岩石、海水之中大量地獲取。

在先前提到了，要達到核融合反應的溫度，必須要到達一億度左右，然而物體在高溫時便形成了電漿態

電漿的基本特性

電漿是由帶電的離子和電子組成。原子不產生電場，運動時也不會產生磁場可是在電漿中就不同了，組成電漿的粒子（電子和離子）有其電場且運動會產生磁場，也會受到電磁場的影響，這將導致相距很遠的兩個粒子不必碰撞就可發生相互作用，而且電磁場的運動和粒子的運動強烈耦合造就電漿具集體行爲。所以在電漿中集體行爲非常重要，這是電漿

的第一個基本特性。

第二個基本特性為電漿具有屏蔽外加電場而保持自身為電中性的能力。如果將兩塊連到電池兩端的平板放入電漿中，則連接正極和負極的平板將分別吸引電子和離子。結果，電場只存在平板周圍一個厚度為德拜屏蔽長度的薄層內，而在電漿的其他部分，平板所產生的電場趨近於零。這種屏蔽效應稱為德拜屏蔽 (Debye shielding)。瀕臨平板邊界數個德拜屏蔽長度厚的薄層，一般稱為鞘層。這種德拜屏蔽效應也發生於電漿中電子對於離子電場的屏蔽。存在德拜屏蔽效應而保持近似電中性是電漿的第二個基本特性。只有當電離氣體系統的尺度遠大於德拜屏蔽長度，而且德拜屏蔽層內的帶電粒子數足夠多時，該系統才會具有電漿的第二個特性。當上述條件產生時，電漿粒子的動能遠大於雙體碰撞的平均位能，集體作用的遠距電磁場對於電漿行為起主要作用，使得電漿具有第一個基本特性。

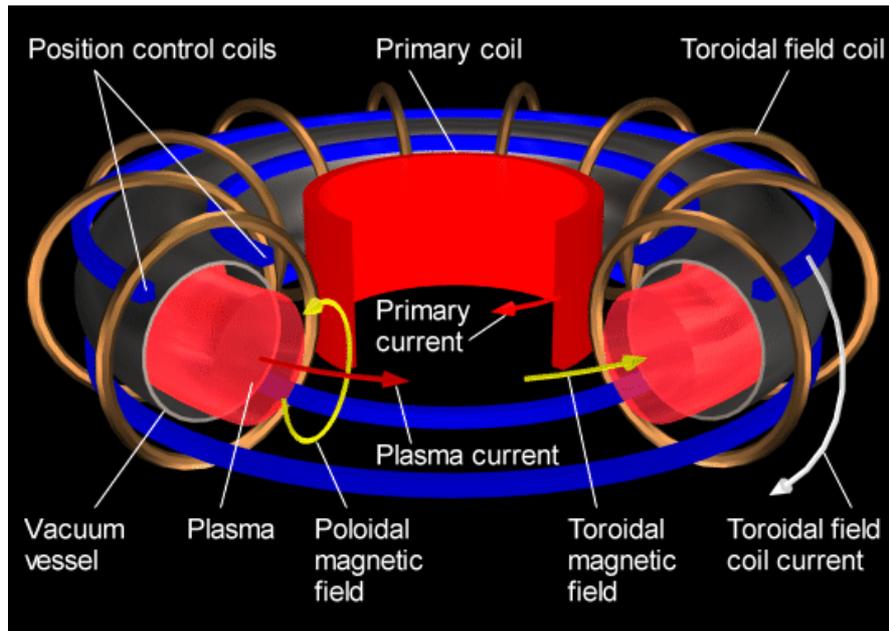
電漿的第三個特性是每一個電漿系統都有一個固有頻率，稱為電漿頻率。一束電磁波打到電漿的表面，如果電磁波的頻率小於電漿頻率，則該電磁波就會被屏蔽在外面而進不了電漿。其道理很簡單，如果，兩塊平板之間加的不是直流電壓，而是交流電壓，則當平板上的電壓改變時，電漿中的電子會被平板吸引或排斥。如果電磁波的頻率小於電漿的頻率，則電子的反應就跟得上電壓的改變，而將電壓屏蔽在外。

進行核融合反應的方法

但是要使足夠的氘與氚原子核進行融合反應並持續不斷，所需的條件仍舊是相當苛刻的。氘與氚的混合氣體必須要以每立方公分 10^{14} 質點的密度，再攝氏一億度的溫度下持續一秒鐘左右才行。目前科學家們有兩種方法來達成這樣的條件：一種是「磁瓶」(magnetic bottle)，也就是以封閉的磁場容納氘燃料進行反應。另一種是用雷射或電子束(electron beam)照射含有燃料的小球顆粒，使它像一個為小的氫彈一樣地進行融合反應放出能量。

(一)磁瓶法

「磁瓶」法所利用的就是氘與氚(或其他氣體)的混合氣體被提昇到極高溫度時，電子會被「剝離」原子核，這種氣體就變成了電漿(plasma)，也就是帶著負電的電子及帶著正電的原子核(離子)的混合物。因為這些帶電得粒子多半越過磁



力線的範圍，所以只要有一個強而有力的磁場，就可以能使核融合反應維持相當時間的容器，如果電將與反應器壁接觸，則雜質立刻被帶入電漿中，能量也立即損失，溫度隨之據降，反應也就停頓了！

目前最常用於核融合實驗的「磁瓶」式裝置叫做「托克馬克」(tokamaks)，是俄國科學家在 1960 年初期所發明的。它是一個圓環狀(像汽車車胎一樣)的密室，周圍為巨大的電磁鐵所環繞。氣體進入室內後開始加熱使其變成電漿，由電磁鐵所產生的強有力的磁場，可以使裏面的電漿保持不和密室壁接觸，由以上技術的運用與配合，在促進核融合反應上，「吐克馬」可以說是具備相當令人滿意的三項條件之組合了！再普林斯頓大學的電漿物理實驗室中，科學家們已可以用他們的「普林斯頓大環」(Princeton Large Torus)把電漿加熱到攝氏三千五百萬度，電漿密度是每立方公分 10^{14} 個粒子，但所能持續的時間只有 0.1 秒。

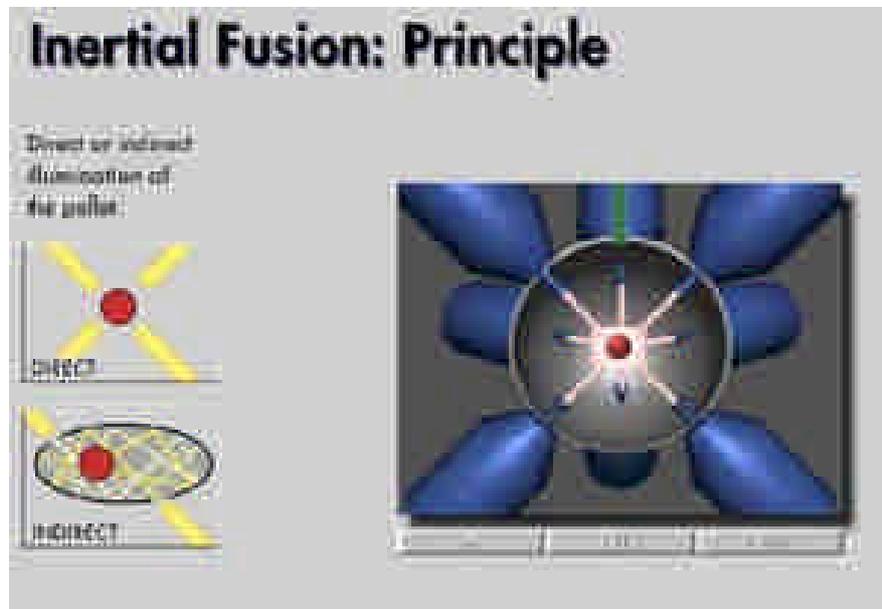
加州的勞倫斯試驗室(Lawrence Livermore Lab)，曾經創下電漿溫度攝氏一億三千萬度的紀錄。他們所用的 2XII-B 磁力封鎖裝置，是一具無底的管子，周圍環繞已磁鐵。管底另外有一個強而有力的磁場，它具有像鏡子般的反射作用能把粒子向試管中央反射回去以避免其漏失。不過到目前為止，卻還沒有一部磁力封鎖式的反應，可做到三項條件都能適於進行控制融合反應的地步！

目前被大部分的科學家們一致看好的「磁瓶」裝置，是正在普林斯頓建造的「吐克馬融合試驗反應器」(Tokamak Fusion Test Reactor，縮寫為 TFTR)。按原計畫，它將可以在 1981 開始啓用，屆時核融合反應的可行性就可以的到證實了！

(二)慣性封閉法

另外一種方法，也可以稱為「慣性封閉」(inertial confinement)法。利用雷射或是高能的電子束，強烈地照射在塞滿氘和氚的小球上。高能量的照射使小球的表面立刻氣化。當入射的光束能量高於某一程度之上以後，這些表面物質迅速地

「飛離」小球所產生的反作用力，就足以壓縮內部的氘及氚的原子核，使他們達到進行融合反所需要的溫度和密度，於是這粒小球就像一個小型氫彈爆炸一樣地方出能量。在新墨西哥州的哥洛斯阿拉摩斯科學實驗室(Los Alamos Scientific Lab)，以及前面提到的勞倫斯實驗室，都曾經利用雷射照射燃料小球達成融合的實驗。



最近勞倫斯實驗室正在建造一價值兩千五百萬美元的「須瓦」(Shiva)雷射，完工後將是世界上最強力的雷射，到時候將可以將進行更多有價值的實驗。此外，山地亞實驗的科學家們也寄望於改進它們目前所用的電子束產器，期能以功率高達八兆瓦的電子束來照射燃料小粒，以達成引發核融合所需要的條件。

(三)比較兩者的差異

磁瓶：使離子與電子受感應圈影響而來回反射於磁場內，這種維持電漿的方式稱為「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中部，就沒有這種電漿不穩定的問題了。

雷射融合：每秒二毫米直徑的小燃料球低落下進入八米直徑的爆炸密室。許多雷射光線從各方向會集在密室的中心構成焦點。小球一到中心，雷射光便打它，雷射的能量大約 10^6 焦耳。而脈衝支長短約為 10^{-9} 秒。雷射光壓縮小球至極高的密度而加熱，最後核融合反應發生。小球爆炸而產生了 10^8 焦耳的能量（相當於十四公斤的 TNT 爆炸之能量）。在反應容器孔性壁裡的鋰流質經薄膜蒸發並攝取大量的爆炸能量。圍包裡的鋰流質冷卻劑則把爆炸的熱量帶走，轉交給水蒸氣，水蒸氣之熱量就能產生電力，每次爆炸後，抽氣系統需要一秒的時間來清除因爆炸而產生的氣體。因雷射昂貴，需設法使一次雷射就能點燃幾個爆炸容器，這樣比較經濟！

現今無法解決的問題

1. 離子體中的雜質問題

離子體捲住磁力線，可保持懸浮於容器中的狀態。離子體的密度愈高，愈難保持懸浮於容器中的狀態，加熱所需的能量也愈大；因此容器內的離子體必須非常稀薄，其密度只能是大氣的 30 萬分之 1 左右。由於密度小，離子體即使接觸容器壁，容器壁也不會熔解。離子體若含雜質，再怎麼加熱，離子體的溫度也不會上升。雜質會自離子體奪走熱，並將熱能以光的形式向外釋出。混入離子體的雜質，主要是附著在容器壁的空氣分子、容器壁本身所含的鐵等原子。爲了避免雜質混入離子體，研究人員費盡辛苦。他們所採取的策略包括：導入『以脈衝放電除去容器壁附著物』的方法、『用較不受離子體混入雜質影響的材料製作容器壁』等。目前隨著排氣技術進步，離子體中是否混入雜質等，已幾乎不成問題。

2. 離子體非常不穩定

另外一個難題是，離子體非常『不穩定』。所謂不穩定，指的是『只要一紊亂，該紊亂會朝惡化方向擴大』的性質。山本名譽教授說：『早期裝置中的離子體非常不穩定，離子體一膨脹、收縮、搖晃，立刻碰撞容器壁；這是離子體的巨觀不穩定，離子體還有肉眼看不到的微觀不穩定；這是因爲離子體粒子在離子體內部振動的緣故。由於微觀不穩定，離子體粒子會朝容器壁鑽出。不穩定問題困擾了研究人員數十年。』離子體必須高溫並具備某種密度的密度，才能引發核聚變反應。離子體在這種條件下，壓力會上升；壓力上升，離子體將不穩定。換句話說，愈接近核聚變反應器的條件—高溫、高密度，離子體愈不穩定。鎌田主任研究員說：『克服不穩定的歷史，幾乎等同於離子體研究的歷史。目前透過磁力線分布的控制，穩定化技術已有長足進步。如何在更高的離子體壓力下使離子體穩定，成了我們今後重要的研究課題。』

總結：

我們仍十分看好核融合的前景

核融合被視爲未來主要的能源，其主要優點如下：

- 01.原料取得容易
- 02.少量原料產生巨大的能量
- 03.其廢料幅射性低

04.潔淨的發電過程

05.發生故障，立刻停機，不會爆炸

由於這些安全，環保且原料豐富的特性，幾乎成爲人類未來能源之希望所在。

核融合的能量非常大，氫彈就是利用核融合的原理製造的。核融合也是在太陽和許多恆星中經常進行著的反應。它的優點是沒有放射性污染的顧慮。

由於地球人口增加，個人耗費的能源用量也不斷升高，但自然界的能源蘊藏並非無窮，於傳統能源逐漸枯竭之際，對各種形式再生能源的開發研究正被各國重視。

近年來，無論核分裂、核融合和太陽能的研究發展，均呈現出一片蓬勃景象，但目前依賴最重，使用最多的還是化石性燃料，如煤、石油和天然氣等，佔有90%以上的今日能源供應市場由於這類燃料其蘊藏量有限且日益枯竭、分配不均，使用時又污染嚴重，鑒於目前已經投置的生產設備和應用技術，預計化石燃料尚可以維持在能源主流的地位直至本世紀之末，因此人類當務之急便是尋求更便利的潔淨能源，並加緊改良現有能源的利用技術。

目前核融合發電尚未成功。科學界預估，還要三十年時間技術才臻成熟，人類方能享受核融合發電的成果，儘管如此，核融合已被視爲二十一世紀最具潛力的發電技術，如果成功的話，人類就可以建立高效率、低污染、用之不竭的能源。

科技帶來的許多正面影響，但也必須注意其負面衝擊。其中包括

- 一、科技的發展，帶來了物質文明，是否會損及精神文明？
- 二、科技帶來了大量的工業污染，礦物燃料的燃燒引起溫室效應及氣候之常，如此是否會引起人類生存之危機？
- 三、以核分裂方式提供能源有環保之顧慮，但石油等礦物燃料儲存有限，當其耗盡之時，是否即爲人類文明終結之日？

這些人文、科技、環保議題，近經常被提出來討論，但通常都忽略了幾個事實：

即農業對生態環境的破壞，是相當嚴重的。無數的森林遭到濫伐，爲灌溉所建築之渠道、水庫、堤防等，通常也都帶來生態上嚴重的破壞，田園與高爾夫球場一樣，並非自然的本貌，而是破壞自然的人造綠地。

現今社會人類終於體悟到能源不容我們的任意揮霍，因此除了積極開發新能源、改善能源利用的效率外，也應研究如何在不降低生活水準、不減緩工業發展及經濟成長的前題下，努力節約能源。

面對未來，我們可以悲觀的認為，生態的破壞終將帶來人類的毀滅；我們也可以樂觀的認定，未來科技的進展，配合環保意識的加強，會使生態停止惡化，並且逐漸改善。因為科技在過去四百年的發展速度，遠超過任何人之想像，未來的科技發展及成果也一樣會帶給我們不斷的驚喜。

參考資料：

1. 陳秋榮, 物理雙月刊 (卅卷四期) 2008 年 8 月, 434 - 445
2. 陳秋榮, 物理雙月刊 (廿八卷二期) 2006 年 4 月, 419 - 425
3. <http://www.iter.org/index.htm>
4. <http://www.nfri.re.kr/english/research/kstar.html>
5. 維基百科

附錄：

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)。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 $m^{-3}\cdot s$ ，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。

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：

美國的 TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)

日本的 JT-60

歐洲的 JET (Joint European Torus)

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。

其他

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

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

目前處於計劃階段的國際熱核聚變實驗反應爐 (ITER)

未來展望—核融合發電

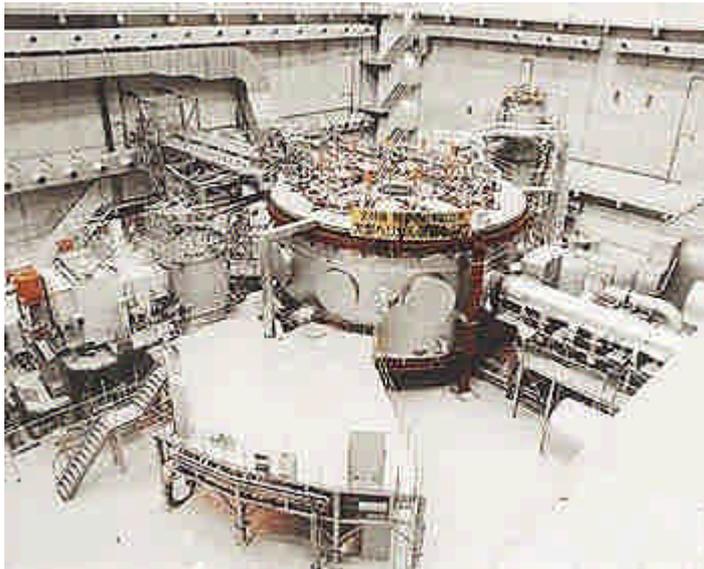
前言

基於現今核分裂式的核能發電廠已經接近了使用年限，加上各種發電，如：火力核能的高污染性，各界正在研發新一代的「核融合發電」，以利於科技產業的向上發展，未來人類應追求的是「高效能、無污染」，因此，「核融合發電」將是各界議論的話題。在下面的內容將更深入的介紹有關「核融合」的利弊與新效能，新型的核能發電將與我們人類成為密不可分的個體，更是我們未來的展望！相較於現在，傳統式的核分裂發電方式核廢料的污染，報廢機的處理，安置及最基本的是鈾礦的含量少，未來便可能使原料匱乏，屆時；現代的核能發電方法將不敷使用，核融合發電將成為目前最有潛力之新能源，無污染且大於傳統核能發電之數倍之強大能量，以及核融合所需的基本原料：重水（即氘 氚）在地球及月球上的含量豐富，能使未來數千年，甚至更久，都將沒有所謂的能源匱乏之情形。由於核融合之原理：輕原子融合，相較於核分裂的重核子分裂，在未來科技進步時，必有更新的核融合技術，將使人類永無能源匱乏的問題。

實驗用核融合發電機

為目前世界最大的反應爐 外部直徑 13 m 高度約 10 m 重量約 1600 噸

以保持 1 億度高溫電漿為目標的裝置（平成 9 年相當西元 1997 的情報）



核融合的序曲

其實，核融合這種能源，早在數十億年前就在宇宙中的各個發光的行星〈恆星〉內部不斷的發生，而這些行星就像太陽一樣，發光了數十億年了！而人類是到了最近的百年之內，才想到要發展這項新的能源！

愛因斯坦帶給我們的夢

太陽中央部位約高達攝氏 1500 萬度；太陽的主成分為氫，由於高溫，原子核與電子七零八落，成『離子體』（plasma，或稱『電漿』）狀態。裸露、高速亂飛的氫原子核，互相撞擊、合成一體。這時產生的龐大能量，使得太陽、恆星閃閃發亮。愛因斯坦（Albert Einstein 1879~1955）在 1905 年發表的『特殊相對論』（即狹義相對論）中預言，核聚變會產生龐大能量。核聚變反應前與反應後相比，反應後的質量變輕；他預言，反應後所減輕的質量是轉換成能量。愛因斯坦根據相對論，不但顛覆了以前的宇宙觀，也告訴我們，能源的確可能取之不盡、用之不竭。

試管中得核融合

人類開始對核融合燃起希望，是來自 30 年代美國一位天文物理學家貝特，他最早提出理論，認為包括太陽在內許多宇宙星辰，都是以核融合的方式產生能源。50 年代是核融合初試啼聲的階段，當然也經過了幾番「陣痛」。南太平洋一個小島上爆炸的氫彈，讓人們見識了核融合的威力，但如何使這無可駕馭的『威力』轉化為可控制的「能源」，是物理和化程科學首先要迎接的挑戰。

理論上來說，原子核帶有正電，會互相排斥。要發生核融合反應，必須將溫度提高到某一點，供給兩個原子核足夠的能量，使之具備相當大的速度，以克服排斥力而彼此撞擊融合。像太陽等的宇宙星辰，都是在相當高的溫度（約攝氏一億度）和壓力等條件下，引發持續不斷的核融合反應。換句話說，要進行人為的核融合首先要克服的便是，使裝置燃料的容器不被上億度的高溫溶化。

第一座反應器誕生

當用來進行融合的燃料加熱至相當的溫度時，其中原子結構已經破壞，成為混核自由電子和原子核的「電漿」，這種電漿具有兩種特性：一是其導熱性比室溫下的金屬大一百萬倍以上；一是具有很強的反磁性。1950年代的蘇聯科學家阿茲幕維契乃根據「電漿」這兩種特性，設計形狀如甜甜圈的托克馬克反應器，利用極強的磁場來拘束高溫電漿，避免高溫損壞反應器裝置。後人也一直針對這種「磁力封閉」的反應器進行改良實驗。其中較有成就的二個組織：一是美國普林斯頓大學的流磁機融合試驗反應器(TFTR)；另一則是歐洲十四個國家的科學家所籌設的歐洲核融合反應爐聯合計畫(JET)。

一場智慧的馬拉松

即使克制了超高溫仍不能完全實現核融合造福人群的夢想，因為在促進核融合反應時，已投下大量能量，如果反應產生後，製造的能量無法超過投入的能量，就毫無實用價值。根據50年代一位研究人工核融合的科學家勞生(Lawson)計算，在溫度、單位體積內反應的原子核數目，以及這些原子核聚在一起的時間，都必須達成一定的標準，才能使能量供需平衡。四十年來，世界上許多科學家即進行一場漫長的腦力馬拉松，努力以工程技術的改進，來達到包括攝氏一億度，以及使原子核反應聚在一起達一秒鐘的「勞生條件」。在這期間，又發明了一種「雷射核融合」→利用強力的雷射光，從四週照射燃料丸，以引起核融合反應。和磁力封閉法不同的是，它可將燃料的密度提高，所以僅需 10^{-8} 秒就足夠發生核融合反應。不過它和磁力封閉法一樣遭遇進出能量收支平衡的問題。為了達到收支平衡，需要有一能產生十萬交爾能量的雷射光；而如何開發這種雷射光？又足讓研究者傷透腦筋。

核融合的另一條岔路

就在一群科學家正循序漸進，慢慢累積核融合的技術經驗以尋求突破的同時，美國猶他大學化學系教授彭斯和英國南安普敦大學化學教授來西曼召開記者會宣稱；他們是在室溫下以電解的方法，引發了核融合。由於此反應溫度遠低於一般雷射或電漿核融合的反應溫度，因此又稱為低溫核融合。

記者會召開於1989年3月23日，根據彭斯和佛萊希曼的說法，他們是在電解重水(氘和氧結合的水)時觀測到額外的熱量，熱量之大已不能以化學反應來解釋，他們便懷疑是核反應，後來測得了微量的加馬射線和中子，證實了電解池中有核融合發生。

各國競相溫習謠言

消息傳出後，科學界頗為震驚，各國科學精英紛紛投入這個「用試管、燒杯」輕易引發核融合的實驗。理想狀況下，核融合反應發生，應可同時測得數種產物，包括中子、氦、氘、加馬射線和額外的熱量。可是眾多低溫核融合得實驗進行了一段時日後，尚無人在實驗中偵測到兩種以上的產物。更奇怪的是，兩位原發明者堅不透露實驗細節，也拒絕回答任何問題。佛萊希曼的密友→德州農工大學化學教授巴克瑞斯毫不客氣批評他們道：「我想他們現在正一遍又一遍地設法使結果重現，可能連他們自己都搞不清楚確實的實驗條件。」但是不久，巴克瑞斯在

一項重覆彭斯和佛萊曼希的實驗發現核融合的重要產物→氦。這項發現使他獲得許多研究金費，也使猶他大學生請籌建國家低溫核融合研究所的經費得以通過。

低溫核融合的封棺釘

科學界始終沒有停止對低溫核融合的質疑，由他大學授權該校物理系副教授沙拉蒙對彭斯的實驗室中進行了 5 周，沙拉蒙便發現，無論是中子的釋放量或額外的熱量，都與殫斯和佛萊希曼宣稱的相差了數百萬倍，因此沙拉蒙的結論是：彭斯和佛萊希曼所測得的額外熱量，並非由核反應。當這份結果被寫成論文，投到英國著名的「自然」期刊上時，低溫核融合的真相也如骨牌效應般現身。一位專攻核子化學的沃爾夫，在巴克瑞斯發現氦的電解池中，發現造假的證據→大量的輕水。唯一可能得解釋是：有人偷偷將超重水滴入電解池中，使氦計數器反應。

一場遊戲一場夢

低溫核融合事件，似乎只是少數人的人謀不藏，抱著爭取經費的心態，輕易公佈未經證實的科學發現。然而事實上，科學界未能善盡監督之責以及盲從的心態也難辭其咎。在內幕爆發前，美國能源部的專家評議小姐，就曾提出一份足以使熱衷低溫核融合的科學人士引以為鑒的報告，其序文開宗明義指出：「科學新發現通常必須前後一致，而且有在現性，所以只要實驗不是太複雜，新發現大約在幾個月內，就會被證實或被推翻。然而低溫核融合却非如此，到目前為止即使是支持最力者，也認為該實驗無法前後一致，具有在現性……因此，我們現在不可能斬釘截鐵地說有關低溫核融合的聲明已被證實推翻。不過是是溫核融合違反了過去五十年來科學界在核反應上所累積的知識，它需要以一種全新的核反應來解釋。」此文正可以做此事件的註腳。

JET 奪得馬拉松錦標

低溫核融合暫告落幕，高溫核融合也適時地展露一線曙光！

1911 年 11 月 9 日，電視上出現一群科學家，在滿是電腦終端機的控制室中，雀躍鼓掌。這是 JET 實驗中心的科學家們，首次利用氘和氚為燃料，在二十倍於太陽中心的高溫下產生核融合反應，時間幾乎長達一秒鐘，釋放出一百七十萬瓦左右的電力，這是人類控制核融合數十年來，首次突破「進出能量收支平衡點」。位於英國牛津郡的「歐洲核融合反應聯合計畫」(JET)，始自 1960 年歐洲原子能共同組織，當時他們決定以核融合作為人類新能源，逐以科學可行性、技術工程可行性和示範核融合電廠，而歐洲聯合核融合反應器，正是驗證科學可行性的第一步。

這個由 1973 年開始設計，1978 年正式建造的反應器，是全球規模最大的核融合實驗反應爐。研究人員經由一連串的實驗，逐步弄清達成每一個反應所必須的科學條件，利用電流通過反應爐壁，形成強大的磁場，而使超高溫的燃料懸浮在反應爐中。如此，鋼製的反應爐壁便不致受高溫破壞。

再接再勵半世紀

核融合研究的下一個階段，就是試驗技術工程可行的反應器。目前由美國、蘇聯、日本和歐洲共同合作的國際熱核實驗反應器(IIER)，已經展開設計工作；而 JET

也預計在 1997 年開始建造下一代的歐洲核融合反應器(NET)，如果一切順利，接下來便是在 2005 年，艦造示範核融合電廠，如此這段，要達到核融合發電的時代，得再奮鬥半世紀。

這一連串的研究，不但需要龐大的人力和物力，更需要具有相當科學水準的組織，來協調進展環環相扣的計畫。即使到了示範電的階段，也將面臨熱轉換的技術問題，然而在現有的困境中，尋求未來無限的可能，正式人之不同於其他動物的地方。核融合已踏出成功的第一不，剩下的是科學家的用心、耐心，以及人們所給予的信心。

透視核融合實驗計畫

1991 年是核融合實驗計畫的重要年代，設在倫敦郊區的歐洲聯合核融合反應器成功地引起核融合反應，產生將近一百七十萬瓦的電力。對於這近乎零缺點的發電方式，科學家經過數十年的探索鑽研，它的過去與未來，值得您的關懷與期待。核融合釋放能量的原理，與「核分裂」一樣是來自「質能互變」，不同的是它由兩個較輕的原子核，通常是氫的同位素氘和氚，結合成一個較大的原子，反應中減少的質量經由「質能互變」產生大量的熱能。50 年代運用核分裂發電的研究才開始萌芽。比起核分裂的燃料→鈾的有限蘊藏量，核融合的燃料→氘和氚可輕易由海水取的，其運用於發電的潛力，可說是無可限量。

利用核融合發電的另一個優點是，核融合反應後的產物，其放射是，核融合反應後得產物，其放射性強度很低，時間也很短。核融合雖然是放巨大的能量，但要它中斷卻很容易，所以即使發生故障，只會造成反應爐當機。另外，由於輻射量微乎其微，也不致造成必須撤離附近居民的緊急狀況。

未來電廠新希望

由超高強度雷射脈衝所遞送的功率，等於是全球電廠的總和。未來，這等是可能會倒轉過來，因為此種雷射可能會成為核融合電廠基本組件，供應世界能源的部分需求。人們追求用「受控核融合」來發電已有數十載，但卻始終遙不可及，令人發洩。近年有個方法頗受青睞：

慣性約束融合(inertial-confinement fusion)。

此法是把一丸燃料(如氫的重同位素，氘與氚之混合物)置中，然後用數十甚或數百個強雷射脈衝同時自四面八方打它。這些雷射會壓縮並加熱燃料丸至及高密度與密度，使得氘與氚核可以融合成氦並釋出大量的能量。利佛摩那個巨大的「新星」雷射，原本就是用於此研究目標的領導實驗裝置。

桌上型超高強度雷射無法提出供足夠的總能量來驅動熱核融合，但搭配上新星級的表兄弟，也許可提高該過程在經濟與科技層面的可行性。欲達到壓縮燃料丸並引爆融合所需的條件，得要有非常非常對稱的內爆過程，任何一丁點兒的不完美，都會讓它像是打高空般無用。利佛摩研究人員提出的新技術中，把燃料壓縮成高密度的重活而還是由大型雷射來擔綱，但不需要同時完全達到起燃溫度。取而代之的是，再趨近於最大密度時，使用袖珍型超高功率的 CPU 雷射加速射出一個超短的離子脈衝，打在內爆引發融合所需的高難度技術需求，而且應可大幅

提昇產能。

快速引燃技術的若干基本內容，最近也由英國牛津郡的拉塞福阿普頓實驗室與日本大阪大學的研究人員所驗證。可是就如融合研究的一貫情形，要證明這種方法卻有作為經濟發電的實用性，還有許多路要走。但不管這個特定應用是否晉身傳奇的一頁，超高強度光的似錦前程與多才多藝，絕對是阿基米德與截克里斯作夢也想不到的。

本文摘自核能天地

核融合相關報導：

美科學家提出十四項改善人類生活科技挑戰

 更新日期:2008/02/16 20:50 林煥屏



（法新社麻州波士頓十六日電）美國國家工程學院宣布十四項二十一世紀工程的重大挑戰，這些挑戰如果克服，將可大幅改善人類生活。

由全球各領域頂尖專家組成的一個委員會，昨天揭櫫這些任務。這個委員會是應美國國家科學基金會的要求集會。

委員會成員、也是 Google 共同創辦者的裴基說：「生活品質的巨大進展來自諸如農業與製造業領域的科技進步。如果我們把努力焦點放在我們這個時代的重大挑戰上，我們就能使未來獲得長足進步。」

這個委員會是二零零六年成立，曾幾度集會討論上述挑戰，其成員有些是他們世代最卓越的工程師和科學家。

透過互動網站，這項工作在一年期間匯集來自全世界著名工程師、科學家與一般大眾的意見。

這個委員會的結論已被超過五十個主題事件專家審核過。

最後的選擇分成對人類繁榮不可或缺的四個主題：永續性、健康、減少遭到傷害風險以及生活愉快。

委員會成員表示，委員會未試圖涵蓋每個重大挑戰，也未為克服所選擇挑戰的個別方法背書。他們不把目標焦點放在預測或是精巧的小機械上，而是找出有益於人類與地球繁榮所需要完成的事項。

委員會主席、也是美國前國防部長裴利說：「我們選擇我們認為透過創新和承諾實際可完成的工程挑戰，其中多數在本世紀初期便可達成。」

他補充說：「有些可以或應該儘速的達成。」

委員會決定不要為這些挑戰排出等級，但他們列出的挑戰包括可負擔得起的太陽能、從核融合提供能量、管理氮循環、全世界都可用到乾淨的水、人腦的逆向工程、防止核子恐怖行動、確保網際空間安全等。

美國國家工程學院提供大眾投票機會，選出他們認為最重要的議題，也在這個計畫的網站 www.engineeringchallenges.org 上提供評論。

該學院院長魏斯特說：「克服這些挑戰將是『創新』，任何一項的成功將會大幅改善每個人的生活。」

新聞報導

研究核融合 成大設電漿與太空中心



更新日期:2008/11/06 09:34 【中國時報 洪榮志／台南報導】

全國唯一的電漿與太空科學中心，五日在成功大學成立，除預定明年初建立首座小型磁化電漿實驗裝置（磁鏡），展開核融合的研究外，也將朝太空科學研究、衛星儀器建造、衛星與探測太空火箭任務等方向發展，並為台灣建立第一個世界級的磁約束電漿科學基地。

成大指出，開發取之不盡並兼顧環保且無污染的核融合新能源，及了解地球之外的太空電漿環境，都是當今的重要科技研發課題。成立國內最先進的電漿與太

空科學中心，主要任務就是為從事高溫電漿物理，及其應用於太空與核融合能源科學上的研究，並培育電漿科學與太空科學研究人才。

成大表示，太空儀器實驗室是台灣第一個具有太空規格的衛星儀器建造、測試與校正及具備衛星儀器設計、研發能力的實驗室；電漿科學實驗室將建造台灣一個磁約束電漿裝置，發展電漿診斷系統，以研究基礎核融合與太空電漿科學；微波實驗室則建置微波診斷裝置，以測量高溫電漿的物理性質。

成大還說，電漿與太空科學中心由前國家太空中心首席科學家陳秋榮主持，成員包括十三位全職科學家、及工程師、專員、研究生及學生。

該中心已與日本合作完成極光電子能譜儀太空儀器的設計，目前正在製作工程體和飛行體，這也將是第一個在台灣製造的太空電漿粒子儀器。

至於核融合能源開發的實驗裝置「磁鏡」，預定明年初完成。成大認為，核融合可以提供人類乾淨及取之不盡的新能源，當今世界有許多國家都已投資研究，但因政府幾乎沒有投入，導致國內迄今還沒有磁鏡裝置。

ITER 的誕生：

核融合反應爐計劃獲突破 歐盟等七國簽約

AFP

更新日期:2006/11/22 02:20 F57 陳昶佑

（法新社巴黎二十一日電）歐洲聯盟與六個國家今天簽訂合約，將斥資數十億美元，推動一項實驗性的核融合研究計劃，其目的在於仿效太陽能，提供無限的潔淨能源。

各國結束歷經數十年的艱難談判，今天在巴黎舉行簽約儀式，由法國總統希拉克主持，他在簽約儀式完成後說：「在這項卓越的創舉中，這是新的一步。」

歐盟、中國、印度、日本、俄羅斯、南韓與美國的代表，針對斥資一百億歐元（一百二十八億美元）建造反應爐的計劃簽訂合約。

「國際熱核實驗反應爐」（ITER）將從二零零八年起於法國南部卡德拉什開始興建，將耗時十年。

此一計劃的目的在於透過測試核融合科技，研究潔淨且無限的替代能源，以因應礦石燃料貯存量的銳減。