

科技文化

人造太陽——

聚變：未來文明的希望

• 曾鏡濤

太陽能 and 風能太不經濟了，水力發電有地區限制，而且缺乏彈性，所以都無從大量開發。因此，對能源的追求就只好從太陽能本身轉向太陽能的原理，從地表深層轉向原子核心——也就是說，轉向核能了。

一 碳素燃料文明的危機

從倚賴食物產生體內能源，到應用火來建立體外能源，是人類進化的重要里程碑，也是人從高等動物過渡到萬物之靈的標誌。中國古代有燧人氏鑽木取火的傳說，西方神話中也有普羅米修斯(Prometheus)因為憐憫人類在黑夜和寒冷中掙扎，毅然把天上火種偷偷地帶到人間的故事，這些都是火的出現在人類意識深處遺留下來的痕迹。

到了歷史時期，社會進步和能源開拓仍然密切相關。早期工業革命所產生的一個大變化就是以煤代替木材作為主要能源；二十世紀在交通、運輸、家庭生活上的大革命則倚賴石油和天然氣提供動力。從木材而煤而石油，顯示人類能源的探索從地上轉到地下，從地表轉到深層，但這些碳素燃料(fossil fuel)的應用都脫離不了兩個基本限制。第一，它們都是儲藏了太陽能的生物遺骸，整體數量雖然相當龐大，但在世界人口急劇膨脹以及人均能量消耗迅速上升的影響下，估計大約一百年後，即公元2100年左右，石油和天然氣就會消耗殆盡；煤的藏量較豐富，但恐怕也只能支持到公元2500年左右。這估計可能由於各種不確定因素而須調整，但「碳素燃料文明不可能維持超過數百年」恐怕是改變不了的事實。

更嚴重的是，碳素燃料的應用不可避免地將大量二氧化碳排入大氣層，從而造成溫室效應，令地球整體溫度上升。據估計，自十九世紀中葉迄今，大氣

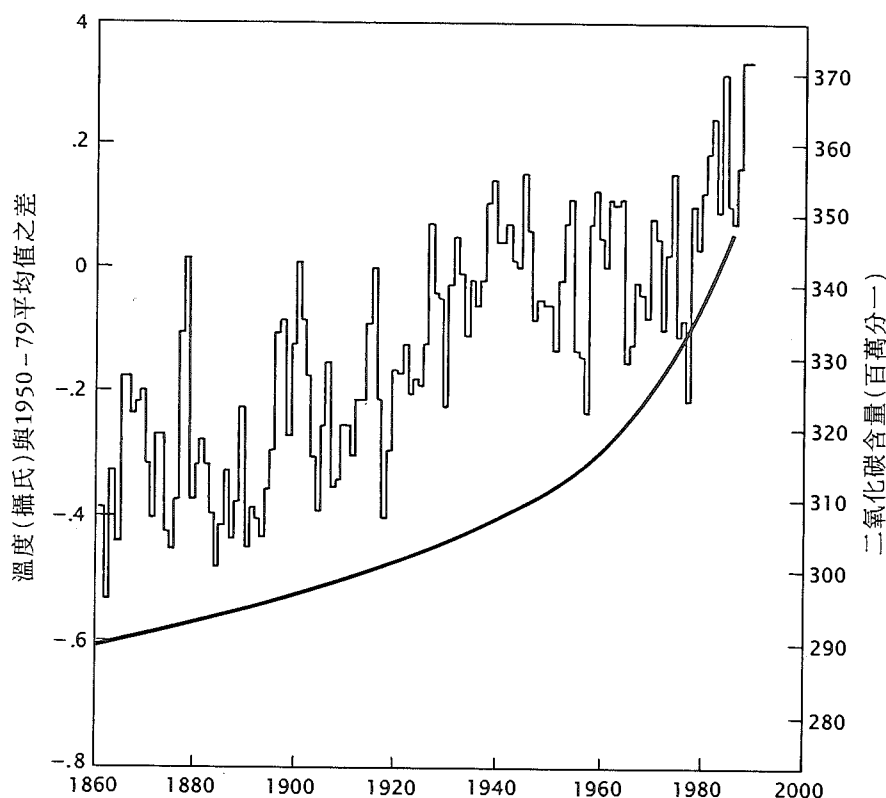


圖1 過去百餘年間氣溫(折線)和大氣中二氧化碳含量(平滑曲線)的變化：兩者都在上升。

Hank Iken, US Defense Council, from *Scientific American* Sept 1989, p. 42.

溫室效應

太陽輻射以可見光為主，可以輕易穿透大氣中的某些微量氣體，如二氧化碳、氧化氮、沼氣等，但為地球吸收後變為波長較長的紅外線，則不能穿透上述所謂「溫室氣體」，會為其吸收而再輻射回地面，成為「被困」，因而導致地球整體溫度上升。由於這和種植用的玻璃或透明塑膠溫室原理相同，所以稱為溫室效應。

中的二氧化碳成分已增加了20%以上；而精密測試顯示，1958–88短短三十年間，已經有將近13%的增加(圖1)。這趨勢假如繼續下去，今後五十年間地球平均溫度可能上升1.5至4.5攝氏度，由是可能引致冰川和南極冰原融解，海洋氾濫和其他氣候上大變化。在目前，這些變化的徵兆已經出現了，它們至終對農業、經濟、政治、社會等等會帶來甚麼影響，是難以逆料的。

誠然，對個人來說，幾百年後的事情大可不必操心。但從有萬年歷史的人類文明整體看，當前的危機卻非常嚴重，因為它猶如處身於一架飛行了十個小時的噴射機上，而再過一、兩刻鐘，飛機的汽油就將用盡，機器也可能發生故障。對這情況，稍有頭腦的乘客不可能不感到震驚。因此，以其他能源代替碳素燃料就成為當前急務了。

要找尋新能源，最顯而易見的目標無疑就是太陽本身。事實上，地球就經常浸沐在陽光所帶來的巨大能量流之中，只要捕捉、儲藏和轉化這能量流，能源問題就可以完全解決。因此，太陽能電池、風力發電、水力發電這些直接或間接控制太陽能的方法近數十年來受到極大注意。可惜，它們對解決能源問題

的貢獻卻十分有限。基本原因在於目前還沒有經濟與實際的方法儲存能量(即「製造」高能量密度燃料)，同時也缺乏把太陽輻射或大氣流這些低密度能量流轉變為電流的高效率轉換器。換句話說，太陽能和風能太不經濟了，水力發電有地區限制，而且缺乏彈性，所以都無從大量開發。因此，對能源的追求就只好從太陽能本身轉向太陽能的原理，從地表深層轉向原子核心——也就是說，轉向核能了。

二 原子時代的新能源

甲 從戰爭到和平

核輻射(radioactivity)是上世紀末發現的，原子核的發現以及它性質的澄清則是本世紀初至30年代之間的事。1938–39年間，即第二次世界大戰爆發前夕，核物理學出現了改變人類命運的突破：德國化學學家哈恩(Otto Hahn)和史特拉斯曼(Fritz Strassmann)等發現了原子核的裂變(fission)現象。在大戰刺激下，短短六年後美國就根據核裂變原理製造出了第一顆原子彈(1945)，由是將人類帶入所謂「原子時代」。較少人注意的是，與哈恩的發現同一年代，貝特(Hans Bethe)與韋錫克(Carl von Weizsäcker)各自提出了氫核的聚變(fusion)是太陽和其他恆星能量來源的詳細論證。二次大戰結束後短短七年，在東西兩大陣營冷戰刺激下，美國又試爆了第一顆根據聚變原理製造的氫氣彈(1952)。所以，核能(nuclear energy)在最初十五年是用於戰爭和破壞的。

核能的和平應用，則從1956年第一座氣冷式裂變核能發電廠啟用開始。當時大家對這代表科技成就高峰的嶄新能量來源充滿憧憬，以為它可以成為人類未來文明的動力。可是，到如今，經過將近四十年發展，地球上雖然已經建成

目前世界能源的消耗

以石油和天然氣為主，佔53%；煤其次，佔25%；餘下是水力發電(5.4%)、核電(3.6%)及其他能源，包括柴火。石油主要消耗於運輸，而且在這方面還不能由其他能源方式(例如電力)替代。

了四百多座裂變核能發電廠，它所能供應的，卻只不過是全球能量消耗的4%，亦即全球發電能量的16%(但在法國、比利時、南韓等國家則佔發電量50%以上)，還比不上水力發電。這一方面是由於核電廠精密複雜，造價昂貴；更重要的，則是一般民衆對輻射廢料和輻射意外所隱藏的危險反應愈來愈激烈。1979年美國三里島核電廠意外和1986年蘇聯切諾貝爾核電廠的悲劇爆炸事件自然更成為這些反應的焦點。

但裂變核能還有一個基本限制，那就是它必須以重元素鈾(uranium)作為燃料，而鈾和碳素燃料一樣，也是有限的。僅僅以目前全球已在運轉和在建造中的520餘座裂變核電廠的消耗所需計算，一百年後全球已知的鈾礦(估計含鈾七至八百萬噸)就會被消耗淨盡——而這些核電廠所提供的能量還只不過是目

前全球能源總消耗量的5%而已。

這令人失望的前景是由於目前核能工業中標準的裂變反應器效率太低造成。進一步的辦法是全面採用目前法國和日本已在試用的快速增殖反應器，因為以同樣耗鈾量計，它的能量輸出可達目前標準反應器百倍以上(詳見下文)。也就是說，倘若全面採用增殖反應器，並且完全以核能作為能源，那麼地球上的鈾大約可以支持目前的能量消耗 $100 \times 100 \text{年} \times 5\%$ ，即500年左右。所以，即使在理想情況下，裂變核能最多只不過能夠為人類爭取較長解決能源問題的過渡時間——用坐噴射機的比喻來說，再飛一小時而不是半小時——而並不是至終解決辦法。要完全解決能源問題，得應用太陽產生能量的核聚變原理，也就是說，在地球上建造一個小型太陽。

乙 從裂變到聚變

大家知道，物質是由原子組成，原子基本上有一個極重而小的核，外面圍繞着許多電子。所有化學作用，包括燃燒過程，所牽涉的都只是原子外層的電子，每個原子由是釋出的能量，大致屬於eV(電子伏，相當於 1.6×10^{-19} 焦耳)數量級；至於核作用則牽涉到原子核的變化，它所釋出的能量大致屬於MeV(百萬電子伏)數量級。所以，就相同質量的反應物質而言，核作用的能量要比化學作用大上百萬倍，這基本上是由於前者涉及的核作用力(nuclear force)遠較後者涉及的電磁力強大之故。

上文提到，產生核能有兩種不同反應：一是裂變，即重核分裂為二；一是

圖2 核子(nucleon)合成原子核時每一核子所釋出的平均能量，亦即核的質均位能。位能越低，核越穩定。

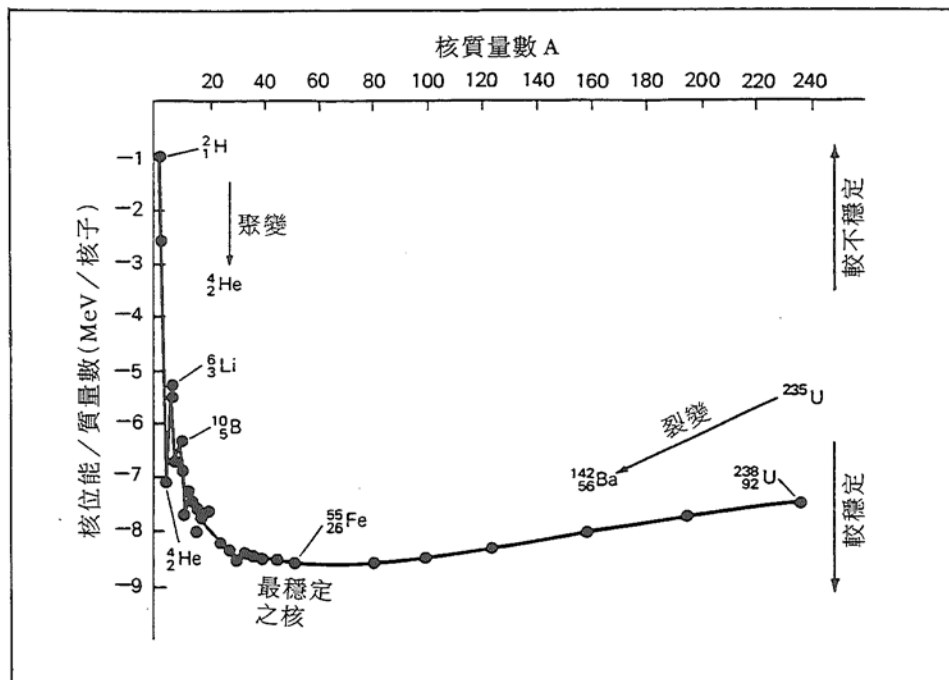


Figure from *Fundamentals of Chemistry*, Fourth Edition by Frank Brescia, John Arents, Herbert Meislich, and Amos Turk, copyright © 1980 by Saunders College Press, reproduced by permission of the publisher.

聚變，即兩個輕核互相撞擊後融合成較重的核。裂變和聚變都可以釋放核能，則是由於原子核結構的一個特點：質量中等的鐵核是質均位能最低的核，而重核分裂或輕核融合在核的質譜上都代表向中央鐵核位置移動的變化，因此兩者都是釋放能量的(圖2)。

裂變是十分罕見的現象，可以自然發生裂變的元素只有鈾的稀有同位素鈾235，而在天然鈾中它只佔0.7%。倘若把鈾235提煉出來，使它集中成大塊質量，那麼少數核在自然裂變產生的中子會加速所有其他鈾核的裂變，使它們幾乎同時釋出能量，發生巨大爆炸，這是原子彈的原理。但我們亦可以將鈾235作有限度集中，並且用種種方法控制它的裂變速率，使它穩定地釋出能量供發電用途，這就是裂變反應器的原理。

至於上文提到的增殖反應器則是利用裂變產生的中子去撞擊不可裂變的同位素鈾238(它佔天然鈾99%以上)，使它蛻變成可裂變的人造重元素鈾239(plutonium 239)，然後用後者作為另一裂變反應器的燃料。這是目前剛剛開始應用的嶄新技術，由於它牽涉到的溫度、熱量、燃料輻射強度、機器系統複雜性都遠高於目前所用的水冷反應器，所以是否能為各國政府和民衆普遍接受，還未可逆料。但即使裂變核能工程發展一切順利，它仍不能超越有限的鈾藏量這個基本限制，不可能為人類文明長久提供動力。

至於聚變，即兩原子核的融合，則必須兩個核非常之接近，在短程核作用力生效的時候才會發生。由於核帶正電，它們彼此間的靜電斥力(亦稱為庫侖位障)會阻止核互相接近，所以只有在極高溫度和密度之下，當原子核獲得巨大動能的時候，它們才可能克服庫侖位障而發生聚變。在太陽和恆星之中，這巨大動能基本上是由於星體巨大質量的萬有引力所造成的內向壓力產生的：在氫氣彈中，相類的壓力是用裂變式原子彈的爆炸所造成——因此原子彈可說是氫氣彈的引爆信管。

要以聚變原理開發能源，燃料不是基本問題，因為適合發生聚變的重氫，即氘核以重水形式大量存在海水之中，佔後者質量的六千分之一。原則上，海水中所含的重氫聚變能量都釋放出來的話，它大約相當於 $10^6 \times 1/6000$ ，即160倍海水那麼多汽油的燃燒能量，以目前的消耗率計，這足夠人類用上數十億年，實際上可算是無限的了。所以，聚變的問題，只是在於怎樣造成長期類

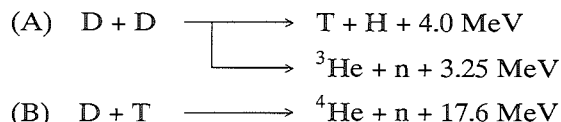
似太陽中心那樣的高溫和高密度環境，使核聚變可以在受控情況下穩定進行。這問題在過去四十年間已令主要工業國家花費了巨額研究經費，至今進展雖然不少，但離開建立受控核聚變工廠的至終目標卻還相當遙遠。本文所要在下面討論的，主要就是這一項重大科技研究的進展。

原子核

由帶正電的質子和中性的中子組成。質子數 Z 決定元素種類，例如氫核 $Z = 1$ ，氦核 $Z = 2$ ，鈾核 $Z = 92$ ；質量數 A 則等於質子與中子數目之和，它用以分辨同一元素但不同質量的核。文中涉及的主要原子核有氫($Z = 1$)的同位素氘(deuterium, $A = 2$)和氚(tritium, $A = 3$)；鈾(uranium, $Z = 92$)的同位素鈾 238 ($A = 238$)及鈾235 ($A = 235$)；以及人造元素鈾(plutonium, $Z = 94, A = 239$)。

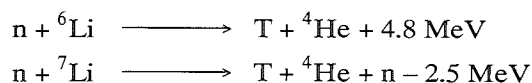
三 聚變的物理條件

為了儘量減低聚變所需溫度，聚變燃料一般採用帶電荷最少的氫核。在太陽內部，聚變主要是普通氫核(即質子)的融合，但這反應太慢，並不實際，所以人工聚變主要以氫的同位素氘(符號D)和氚(符號T)為燃料。它們可以有兩種核反應：



其中氦核(${}^3\text{He}$ 及 ${}^4\text{He}$)和中子(n)等都是反應生成核，反應釋出的能量分別記在反應式後。

顯然，反應(B)釋出能量較多；而且，由於D-D與D-T兩個系統的反應性質不一樣，反應(B)所需的「始燃溫度」大約是 $6 \times 10^7 \text{C}$ (攝氏度)，反應(A)則更要高數十倍(太陽中心溫度是 $2 \times 10^7 \text{C}$ 左右)。因此，D-T融合已成為所有核聚變研究應用的標準過程，其中氘核由海水提煉，氚核則是以中子撞擊鋰(lithium, 符號Li)產生：



聚變反應的進行既然需要數千萬度高溫，在這環境中，我們熟悉的物質三態，根本不能存在，因為那時候分子都分解為原子，而原子也會受衝擊而致外層電子剝落，成為帶電的離子。在十萬度以上，氫、氘和氚的電子已全部和原子核分離，因此電子和帶正電的核分別自由行動，它們之間的關係只透過靜電吸引力來維持。但整體來看這種物質仍然呈電的中性，這稱為等離子態(plasma state)。等離子態的性質跟我們熟悉的固、液、氣體頗不一樣，但事實上，宇宙間的物質，大部分處於等離子態：恆星和恆星間的游離物質，都是等離子體；至於我們日常應用的各種光管，裏面也有等離子體的存在。受控聚變的研究，是和等離子體物理和化學分不開的。

輻射能耗

等離子體內的帶正電離子與帶負電電子在受磁場影響或碰撞而加速時都會發出電磁波，分別稱為同步輻射(synchrotron radiation)與軔至輻射(bremsstrahlung)，又分別與溫度的一次方與平方根成比例，它們都會帶走上述粒子的能量，這就是文中所謂輻射能耗，它與一般物質的黑體輻射(與溫度的4次方成比例)相類而不相同。

要在等離子體內維持聚變反應，先決條件是聚變產生的能量，能夠補充等離子體的能量耗失。能耗主要有兩種：輻射能耗和粒子游失能耗。

要在等離子體內維持聚變反應，先決條件是聚變產生的能量，能夠補充等離子體的能量耗失。能耗主要有兩種：輻射能耗和粒子游失能耗。

等離子體和普通物質一樣，在一定溫度下會放出輻射能，能耗功率約和溫度的平方根成正比；至於聚變產生能量的功率，則和反應機率成正比，在低溫時約與溫度的2.5次方成比例。因此溫度過低時，聚變功率補充不上輻射耗散功率，聚變不能維持；反之，溫度高於一定點後，聚變功率高於輻射耗散功率，聚變過程便可維持等離子體的溫度，使聚變可以繼續進行，這正如化學燃燒必須溫度達到燃點以上才可以維持一樣。如上文所說，D-T反應的燃點 T_1 是 6×10^7 C左右。

除了輻射能耗之外，等離子體還會因為它的成分粒子游離出等離子體以外而損失能量。這消耗的功率 P_d 與等離子體的密度 ρ （以單位體積中的粒子數目計）成正比而與它的壽命 τ 成反比，這壽命即正離子或電子被困或約束在等離子體內的時間，又稱約束時間(confinement time)： $P_d = a\rho/\tau$ ， a 為常數。另一方面，聚變功率 P_f 則明顯的與等離子體的密度平方成正比： $P_f = b\rho^2$ ， b 為常數。因此維持聚變的另一個條件是 $P_f > P_d$ ，即 $b\rho^2 > a\rho/\tau$ ，也就是 $\rho\tau > a/b$ ，或等離子體約束時間與密度的乘積要大於一個下限，這個條件稱為羅遜條件(Lawson condition)。對D-D聚變來說，這下限是 10^{16} s/cm³，而對D-T聚變來說則是 10^{14} s/cm³。因此不論從燃點或羅遜條件考慮，D-T反應都要比純粹氘間的反應容易達到。

四 磁約束聚變

從上文的討論，可以知道要產生受控聚變，必須把氘與氚的等離子體加熱到燃點以上，並且在充分長時間內維持高溫和等離子體的約束。以目前科技水平而言，單單把等離子加熱到燃點以上並不成問題，困難的是維持這溫度和等離子體的約束。這是因為高溫等離子體是最佳的導熱體，導熱系數比室溫中的金屬高出一百萬倍以上；而且，它的溫度亦比任何固體物質的熔點高出千倍。因此在聚變反應器中，必須用有效的方法使等離子體（它有類於擴散能力極強的氣體）與由固體造成的反應器壁絕緣，否則注入等離子體的熱會立即散失到器壁上，使它受到嚴重損壞。要控制等離子體的運動，最有效的方法是使用強力磁場，因為等離子體中的帶電粒子在垂直於磁場的方向只能作迴旋運動。所以，假如在與反應器壁平行的方向加上強力磁場，則等離子體中的正離子與電子便受到磁力線約束，不能自由地碰向反應器壁。

甲 磁鏡約束

但是沿磁力線的方向，帶電粒子仍然可以自由行動。如何可以使等離子體在磁力線方向也受到約束呢？

一種磁力約束的途徑是利用「磁鏡」觀念。磁鏡(magnetic mirror)的原理

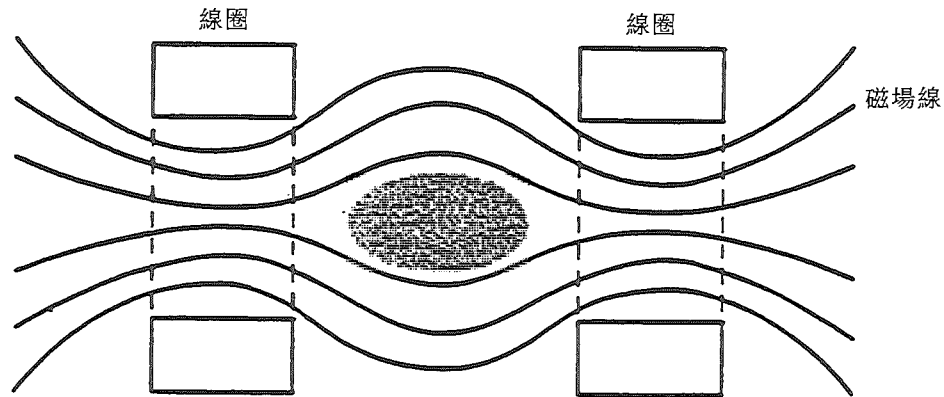


圖3 最簡單的磁鏡約束系統由兩組同軸線圈組成，線圈間磁場較弱處(陰影部分)就是等離子體範圍。

Encyclopedia Britannica, Vol 13, p. 312 (1979).

是：當帶電粒子沿磁力線迴旋前進時，若磁場大幅增加，它的前進速度便會減低，繼而停止前進，然後往反方向迴旋進行，這情形與光線被鏡面反射相似。最簡單的磁鏡約束系統如圖3所示：由兩組磁場線圈裝置在同一中心軸上，等離子體約束在線圈中間磁場較弱之處。由於磁力線兩端磁場都較高，帶電粒子在兩個線圈之間沿磁力線往反迴旋，因而受到約束。這樣的磁鏡約束系統，在自然界最重要的例子莫如地球外層的磁力層(magnetosphere)：從太陽吹來的「太陽風」(solar wind)中有很多高能帶電粒子受到地球磁場所造成的磁鏡約束，歷久不散，成為有名的范阿崙(Van Allen)輻射帶。但磁鏡約束系統的磁力線不自相封閉，因此總有些帶電粒子不受約束，成為漏網之魚，所以整個等離子體的約束時間難以持久。80年代中期以後，磁鏡約束的聚變途徑，已慢慢被放棄了。

乙 環流器

另一種方法是令磁力線自相連接，成為封閉幾何形狀，這樣帶電粒子雖然是沿磁力線自由運動，但是它們卻逃不出一特定的空間，達到受約束的目的。這種磁力線的結構，通常都成圓環(toroid)狀。

目前最有希望的磁力約束方法，即60年代蘇聯物理工作者發展的「環流器」(Tokamak，或者譯為「托克馬克」)，就是採用圓環式磁力線結構。60年代末期西方聚變工作者帶着他們的實驗診斷儀器進入蘇聯，測量過環流器等離子體的溫度與約束時間之後，不得不信服環流器的優越性。此後以美國為主的西方聚變研究，便也都改為以環流器為主。中國在80年代中期建成了環流器，至今已運轉多年，並在實驗指標上達到先進水平了。環流器的裝置大體如圖4所示，主要部分是一個圓環狀的真空室，室內有兩組線圈，一組產生主圓環方向(toroidal)磁場，另一組產生副圓環方向(poloidal，即垂直於圓環主平面)磁場。真空室內的等離子體受這兩個磁場約束，成為圓環狀的流體，並且在一個外圍感應圈的感應下產生一環向電流。這等離子體內的電流，有加熱和穩定等

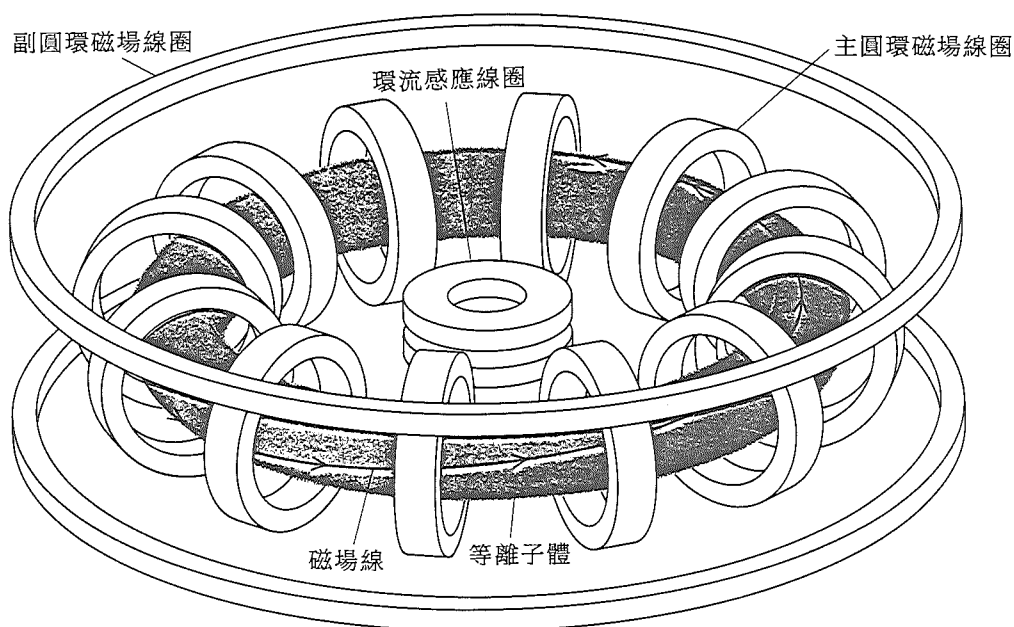


圖4 環流器示意圖。圖中一共有三組磁鐵，分別產生沿圓環方向磁場，副圓環方向磁場以及感應環向電流。磁場的作用是約束等離子體；感應環向電流則將之加熱。

Gabor Kiss, from *Scientific American* October 1983, p. 47.

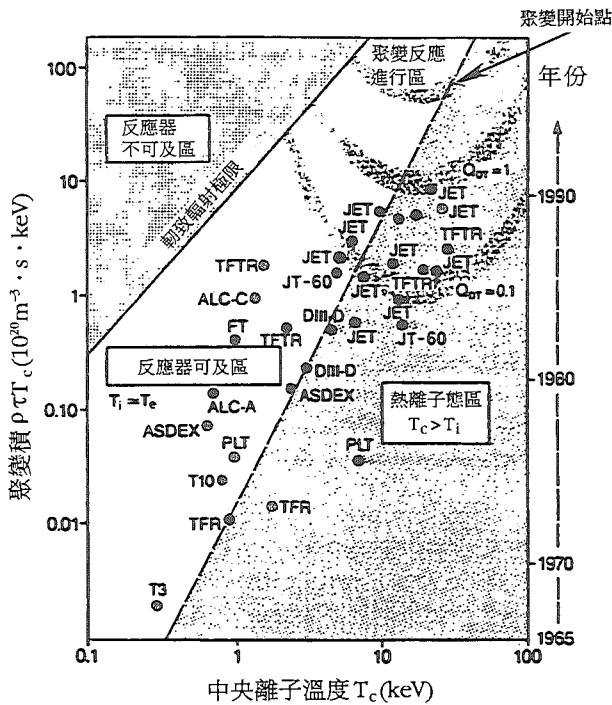
離子體兩重作用。由於等離子體的電流是靠感應產生，所以環流器採取脈沖式操作，每一脈沖時間大約是一秒鐘，而等離子體密度則在 10^{14} s/cm³以上，所以能滿足羅遜條件的要求。

到70年代中期，發展了注入中性粒子束加熱法，使環流器內的等離子體溫度大增，超越點火溫度條件的要求。現在餘下的，主要是有效地延長約束時間的問題。近二十多年來，環流器聚變研究的成績，可以用環流器中央正離子溫度 T_c ，密度 ρ 和約束時間 τ 的積 $\rho \tau T_c$ 來顯示。在圖5中，縱軸是「聚變積」 $\rho \tau T_c$ ，橫軸是 T_c ，能滿足聚變反應條件的區域在圖右上角。從1965年到現在，主要環流器實驗裝置（特別是歐州共同環流器(JET)和美國普林斯頓大學環流器(TFTR，見圖6)這兩個重要裝置)所取得的進步都可以從這圖看出來。經過二十多年努力，可供應能源的受控聚變雖然仍未實現，但是衡量成功的指標 $\rho \tau T_c$ 卻已增長了差不多一萬倍，餘下的問題似乎是不太多了。

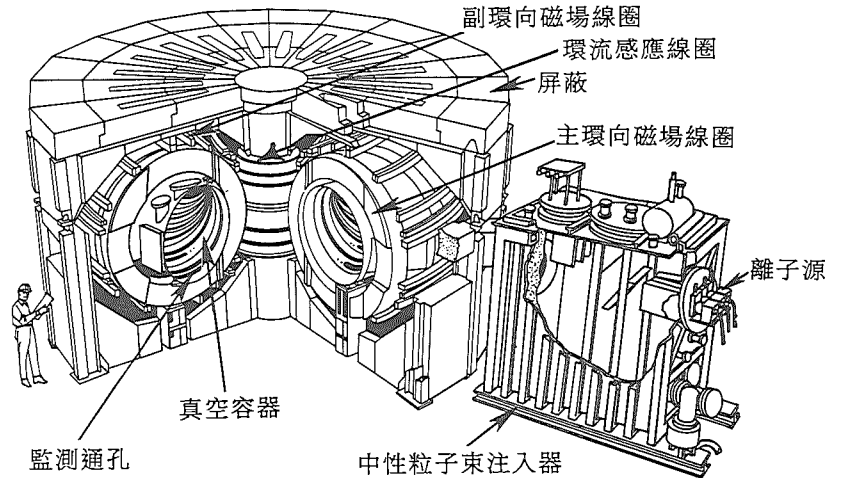
等離子體加熱

環流器內的等離子體加熱主要是藉中央線圈（見圖4及圖6）產生脈沖磁場，從而在等離子體的環流室內引起感應電場，驅動帶電粒子加速運動（也就是造成感應電流），藉碰撞把電子的動能轉化為熱能。

這些餘下問題最主要的有兩種：第一，環流器內的高溫等離子體常常因為電流和壓力的特殊分佈而發生電磁流體的不穩定，嚴重時會令等離子體出現大幅度振盪以致碰撞並損壞真空容器壁，同時等離子體也會迅速失溫。第二，等離子體內又會出現湍流(turbulence)，從而導致異常運輸現象，大大提高等離子體的導熱系數。這兩類問題的後果，主要都是令約束時間不能延長。



From Nuclear Fusion, Vol 30, p. 1667 (1990).



From Information Bulletin, Princeton University Plasma Physics Laboratory, NT-7 December 1983.

圖5(左) 各主要環流器實驗裝置的表現可以在「聚變積」(縱軸)和中央離子溫度(橫軸)這兩個指標作為座標的平面上顯示。從圖中可見JET近年指標已接近反應進行區。

圖6(右) 美國普林斯頓大學等離子物理實驗室環流器聚變實驗裝置(TFTR)模型剖面圖。這部環流器耗資二億美元以上，與歐洲的JET同為世界最主要的環流器。

對這些複雜的物理現象，科學家目前還不能根本了解，所以短期內也談不上解決辦法。然而，不少聚變研究工作者都抱着樂觀態度，認為我們既然不需要等待流體力學徹底解決湍流問題，便可以造出飛機飛上天去，那麼環流器受控聚變的成功，也不一定需要等待電磁流體的湍流現象大白於世。他們主要的論據是基於比率定律(scaling laws)的應用。二十年來，世界各國環流器實驗累積的數據顯示：約束時間實際上與磁場強度以及環流器半徑成正比。所以要滿足羅遜條件，便要建造更大更強力的環流器。因此在JET和TFTR環流器實驗結束之後，下一代受控聚變實驗裝置規模之大，已決不是一兩個國家可以獨力負擔的。現在美國、西歐、蘇聯和日本等工業先進國已經有在科技和財政上合作建造下一代環流器裝置的計劃了。

當然，從工程觀點看來，建造環流聚變發電裝置還要面對如何「屏蔽」(shield)複雜的磁鐵系統(特別是極可能被採用的超導磁鐵)，以免受到聚變產生的高能中子流所造成的材料損害。而目前我們對高能中子對一般材料(更不必說超導材料)的影響知道得還很有限。諸如此類許多工程問題，都有待進一步研究解答。

然而，不容諱言，規模過大還是環流器發展的最大隱憂。試想即使環流器能按現時定下的軌道順利發展，但建造一個環流器聚變發電廠假如要花上百十億美元經費，那麼不要說私營電力公司難以投資，即使以國家財政力量支持，那也只有最先進、最發達的國家可以應付。所以，看來我們還得對高溫等離子體物理求得進一步了解，以縮小環流器聚變裝置的規模，它才可以成為普遍的能源設施。

五 慣性約束聚變

磁力約束的目標不外是維持等離子體的密度和溫度以滿足羅遜條件。但是仔細研究羅遜條件，便會發現有截然不同的途徑可以達到同樣目標：假使我們能在很短時間內——短得等離子體的成分粒子還未擴散——把等離子體加熱到聚變的燃點，並且壓縮到很高密度，那麼約束時間與密度的乘積仍可以滿足羅遜條件。用這方法達成聚變，便不必擔憂等離子體的約束問題，也就是說等離子體本身的慣性提供了約束，所以這種途徑稱為慣性約束(inertial confinement)聚變。

事實上，氫彈爆炸便是慣性約束聚變的一個好例。在氫彈中，先由裂變彈(原子彈)的引爆把氘和氚在 10^{-8} 秒內加熱到聚變燃點。在這約束時間內，只要聚變燃料密度大約等於一般固體密度便可以滿足羅遜條件。自然，以原子彈「點火」而產生聚變只能用於破壞性武器，所以慣性約束的聚變研究，一直要等到60年代激光科技發展起來才露出曙光。激光技術提供了一個在極短時間(約 10^{-11} 秒)內把極高能量(約 10^4 焦耳)聚集在一極小空間的方法。一個直徑在毫米(mm)以下的聚變燃料小球，在這樣強烈的激光照耀下，可以迅速加熱至燃

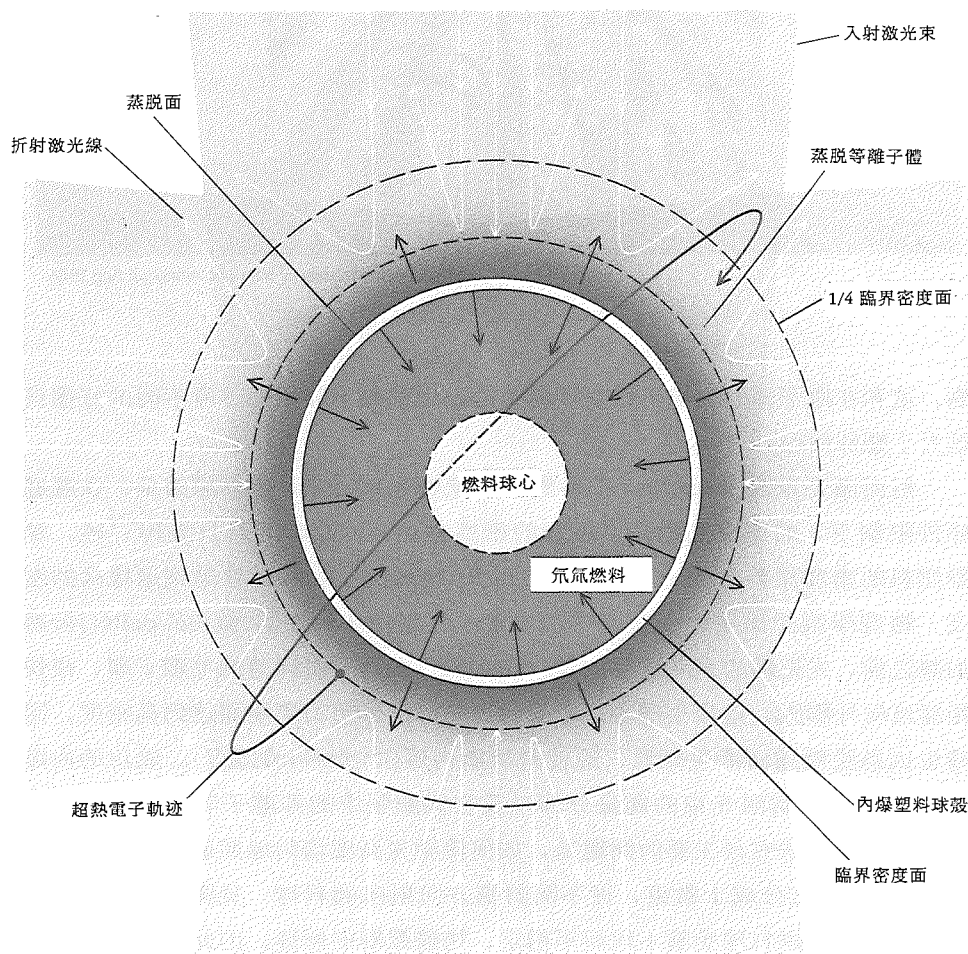
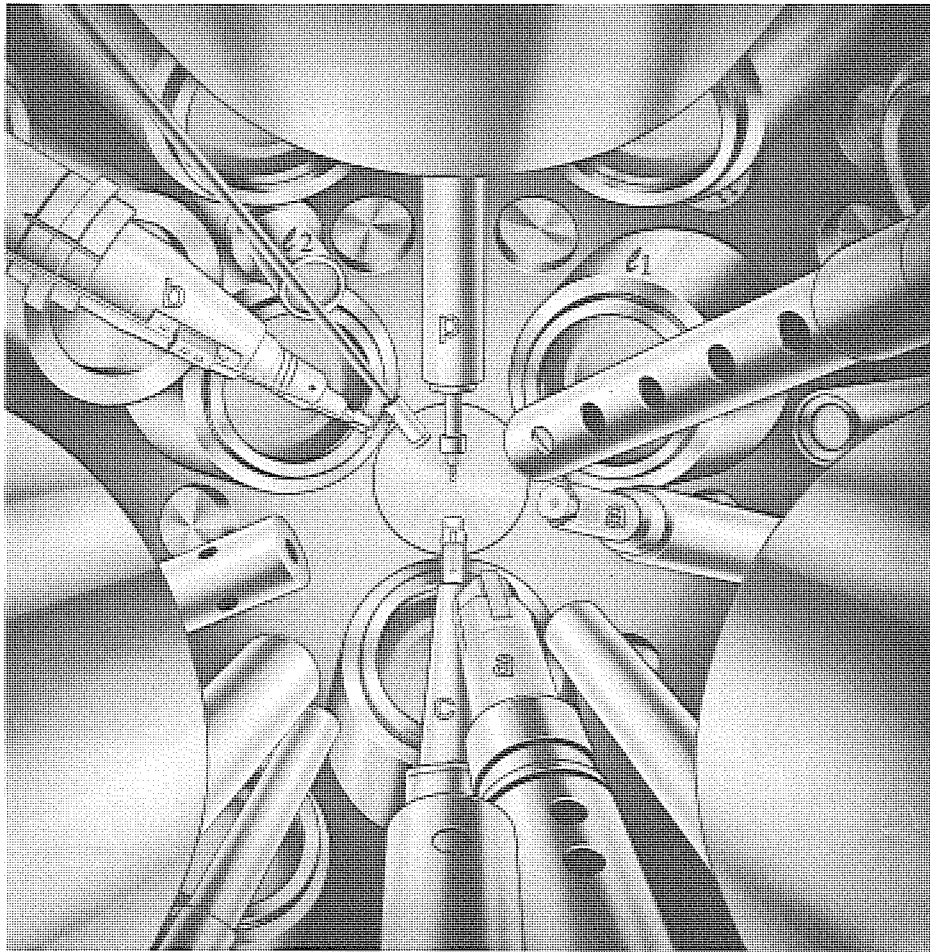


圖7 激光聚變實驗示意圖：激光束可以有24條之多。從不同方向入射，以求能量分佈均勻。激光一般用極短波長，以衝擊和蒸發燃料球表面薄層，造成內爆。

圖8 美國洛徹斯特大學OMEGA激光聚變系統反應室核心印象圖：圖中央白點是懸掛在定位裝置(p)上的氘氚燃料球(直徑1mm)，24條激光束從不同方向通過不同大小的許多透鏡(包括 ℓ_1 及 ℓ_2 兩類)入射，實驗結果則由X-光顯微鏡(a)，高速照相機(b)，X-光針孔照相機(c)等儀器監測。



Hank Iken, from cover of *Scientific American* Aug 1986.

點，這和在原子彈的引爆下聚變燃料受熱達到燃點十分相似，所不同的好像只是大小懸殊而已。

然而激光聚變(laser fusion)事實上比氫彈還要困難，主要原因是，在羅遜條件限制下，約束時間愈短，所需的密度愈高。約束時間若只有 10^{-11} 秒，聚變燃料的密度便要高達一般固體密度的 10^3 倍或以上。為了要達到這樣高的密度，物理學者想出了一個很巧妙的方法：在把微小的燃料球(fuel pellet)內部加熱之前，先把球的表面迅速加熱，令它氣化成為一層稀薄的等離子層，很快很猛地向外膨脹，這樣小球內部會受到內向的反作用力壓縮而達到高密度，同時也因為受壓縮而產生高溫，這就是所謂內爆(implosion)(圖7)。成功的內爆有賴於嚴格控制激光束的能量分佈以及它與膨脹中的等離子層之間的相互作用。激光聚變研究最主要的問題是，如何使激光高度均勻地照射在燃料球表面(一般是把激光分成十數束，從不同對稱方向射向燃料球，見圖8)，因為受熱不平均，會使燃料球受壓不均而不穩定，妨礙聚變的燃燒。因此，有些學者提

出間接加熱的建議：即激光照射在一球形的空容器內壁，燃料球則放在容器中心，受球形內壁反射光線的加熱。這樣的加熱方法比直接照射平均多了，缺點是反射的效率問題。甚麼才是最佳的選擇？現在仍有待探討。

除了激光之外，高能粒子束也可以用來加熱聚變燃料球，以求達到受控聚變的目的。激光的優點是容易聚焦，缺點是產生激光的能量轉換效率很低，不合經濟考慮；反之，粒子束可以用現有的加速器技術以高效率產生，經濟上不成問題，缺點則是粒子束帶電荷，所以聚焦在微小的燃料球上有困難。總體來說，目前慣性約束聚變的研究重點仍在於建造更強力的激光源和加速器上。

和磁力約束聚變相比，慣性約束在環境安全和維修方面的優點大多了。因為激光或粒子束的來源可以遠離聚變反應器，所以屏障要求大大降低，同時，反應器內也不須要高度真空。更重要的是，由於燃料球體積微小，每次產生的能量可以控制；而且，燃燒後的殘餘物抽出反應器後，再進入反應器的燃料球一定要用激光或粒子束重新點燃，所以不像裂變反應器，不會有失控的可能，安全性相當高。氫彈的成功已證明慣性約束聚變是可行的，倘若受控的慣性約束聚變研究成功，那麼就像原子彈變成裂變發電廠一樣，可以達到把破壞性極大的武器轉變成為人類福利服務的工具這一目的了。

六 結 語

經過四十多年努力研究，人類利用聚變作和平用途的美夢仍然未能達到。工業發達的國家如美、日、西歐每年都投下大量人力和經濟資源支持聚變的科技研究，這自然是因為聚變是解決關乎人類文明前途的能源和環境問題的關鍵。在工業革命之前，社會處於穩衡狀態：人口增長率低，經濟生產及能量消費也低。工業革命以後，這穩衡態已經打破，現代人類文明只有在高能量消耗的條件下才能維持下去。碳素燃料既已產生嚴重污染，太陽能、風能、地熱能等等，則受到天時或地理條件局限，只能作為輔助性能源，而可供裂變能源之用的鈾藏量和碳素燃料一樣，也有限制。因此，從長遠來說，人類只能寄望於在地球上建造自己的「小太陽」，以求令文明長期延續了。

最後，我們用兩個進展報告結束本文。1988年在美國奈華達州核彈地下試驗場進行了一個當時並不公開的實驗，實驗中一個裂變核彈爆炸產生的強力X射線被引導照射到一個混有氘和氚的燃料球上，點燃了聚變反應。這和氫彈爆炸不同的地方是，燃料球和核彈分別在不同位置，裂變核彈所提供的只是強力輻射源。實驗結果顯示，達到聚變燃料球點火目的所需輻射能量不超過 10^7 焦耳。雖然這比目前世界上最強力的激光源還超出一百多倍，但實驗的成功把人們心中對核聚變發電的原則可行性的疑慮完全消除了。

到1991年11月13日，歐洲共同環流器(JET)終於實現了穩定維持氘氚受控

熱核聚變兩秒鐘，並且令反應持續1分鐘。這是經過長達四十年研究所獲得的決定性結果，它令全球科學界矚目，被視為1991年科技領域的主要大事。雖然JET所做到的，距離建造可供實用的能源工廠還十分遙遠，但畢竟我們可以相信，「人造太陽」不再是夢想了。

作者對陳方正博士的熱心鼓勵和寶貴建議，對中山大學李華鍾教授的編輯工作，以及對楊綱凱教授閱讀校稿表示衷心感謝。

參考資料

有關能源及溫室效應問題

Scientific American Sept 1989 Special Issue: "Managing Planet Earth" 特別其中有關於大氣以及氣候的專文

Scientific American Sept 1990 Special Issue: "Energy for Planet Earth" 特別其中有關於碳素燃料、核能和太陽能的專文

有關聚變

Nuclear Fusion: 30th Anniversary Issue, Vol. 30, September 1990

Eugene F. Mallove: *Fire From Ice* (John Wiley & Sons, 1991)

Nicholas A. Krall & Alvin W. Trivelpiece: *Principles of Plasma Physics* (San Francisco Press, 1986)

Kenro Miyamoto: *Plasma Physics for Nuclear Fusion* (MIT Press, 1980)

Wilmot N. Hess: *The Radiation Belt and Magnetosphere* (Blaisdell Publishing Co., 1968)

Friedwardt Winterberg: *The Physical Principles of Thermonuclear Explosive Devices* (New York: Fusion Energy Foundation, 1981)

R.S. Craxton, R.L. McCrory & J.M. Soures: "Progress in Laser Fusion", *Scientific American* Aug 1986, p. 60.

R.W. Conn: "The Engineering of Magnetic Fusion Reactors", *Scientific American* Oct 1983, p. 44.

曾鏡濤 生長於香港，1970年香港中文大學物理系畢業，隨即赴美深造，專攻太空及等離子物理學。1974年於普林斯頓大學取得博士學位，隨即進入美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory)專門從事聚變研究工作，現任美國科技應用國際公司(Science Applications International Corp.)資深研究員，從事聚變、加速器等多項應用物理研究。目前的主要興趣在於將大規模電子計算機的運算應用於科技發展上。