

簡介終極綠能：核融合

電漿所\向克強

最近利用核融合反應來發電的研究有重大的進展。ITER，一座由美國、歐盟、俄羅斯、日本、韓國、中國和印度合資在法國南部所建造的托克馬克，已經開始組裝，預計在2025年開始電漿實驗。除了ITER的發展，它的投資國都有各自的國家級核融合計劃。就連泰國和哥斯大黎加也不落人後開始投入核融合的研究。此外，民間也積極投資，比較讓人期待有Tokamak Energy(英國)、Commonwealth Fusion Systems(美國)、TAE Technologies(美國)和新奧能源(中國)。在臺灣只有成大電漿所有小規模的核融合研究能量，有三位老師從事這方面的理論和實驗的研究，目前成大的核融合研究是全台唯一也是第一。當世界各地核融合研究在蓬勃發展之計，成大更應該自信滿滿的積極投入核融合的研發，成為臺灣在這個領域的先鋒。

核融合是終極綠能，因為它滿足了所有綠色能源的要求。它和核分裂完全不同，它不是利用核分裂的連鎖反應來發電，所以沒有爐心熔解的危險。也不會產生半衰期超過千年的核廢料，在建造和運轉的過程中它的二氧化碳的排放量也低於太陽能的系統。即使是標榜非核家園的德國都大力投入核融合的研發。德國除了參與ITER之外，還有兩座大型的核融合研究裝置，一個是托克馬克，另一個是仿星器。因此，非核家園的政策與核融合發電並不衝突。

核融合發電是利用兩個輕原子核的融合反應所釋放出來的能量來發電，因為融合反應的機率和它的燃料溫度有關，第一代的核融合電廠的燃料應該是氘的同位素氘和氚。氘和氚的核融合會產生一個能量 14MeV 的中子跟一個能量 3.5MeV 的氦原子核。²這個反應最有可能發生是當氘和氚的溫度是 25keV 左右的時候。在那個溫度下，氘和氚都完全游離成為帶負電的電子和帶正電的原子核，這種組合稱為電漿。用磁場來控制是最有可能產生符合發電所須要的電漿。目前能夠達成輸出能量和輸入能量差不多的都是由磁場所侷限的托克馬克電漿，因此，托克馬克最有可能成為第一代的核融合電廠。核融合發電，簡單的說，就是在電廠內創造出一個小型太陽並利用它來發電，也因為如此，核融合發電比一般的太陽能發電更有效率，因此不需大面積的土地，但它和太陽有一個重大的不同點，在太陽裏，電漿是由重力所侷限，在電廠裏，電漿是被磁場所控制。ITER的主要目標之一是達成輸出能量是輸入的10倍($Q=10$)，並驗證自我加熱的機制。這裏 Q 的定義是輸出能量和輸入能量的比。它是核融合研究的進步指標之一，大約在25年前， Q 就已經接近1了。但是因為ITER的進展較慢，沒有更大體積的托克馬克來推進 Q 值，隨著日本JT-60SA的運轉， Q 值可望再向上提升。發電所需的氘和氚可由海水中提煉，有足夠儲量可以用來維持幾百萬年全世界的核融合電廠的需求。當然隨著對電漿物理了解的進步，核融合電廠的燃料也可能被質子和硼-11所取代(硼-11是硼的同位素)，它們的融合反應產生三個氦原子核，而且沒有中子，核廢料的放射性可因此更為減少，世上對非氘和氚的核融合電廠研發較少，但並非沒有，燃燒非氘和氚的電廠可能是核融合的終極目標。

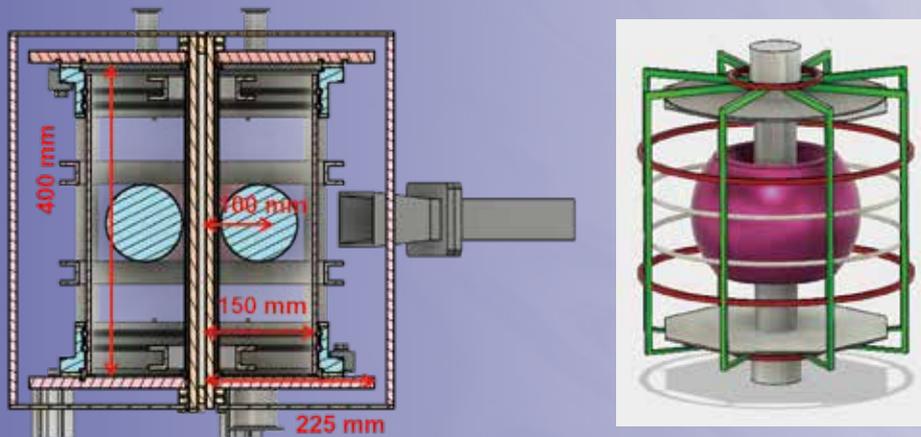


圖 1. 托克馬克示意圖。紫色代表被捆束的電漿，其它顏色的線圈是產生磁場用的。
圖 2. 托克馬克的縱切截面示意圖。淺藍色代表電漿的截面，尺寸是依據電漿所初步設計的托克馬克。

托克馬克是一個環形的磁控電漿裝置(如圖1和圖2)³，它的磁力線是螺旋形的纏繞在環形的磁面上，磁場是由在線圈和電漿裡的電流所產生，這個裝置最大的特徵是它具有軸對稱性，這對磁控有很大的助益。帶電的氘和氚的原子核受到磁力的控制在這個裝置裡運動並彼此碰撞產生核融合反應而釋出中子和形成氦原子核。帶電的氦原子核受到磁力的

控制停留在裝置內加熱氘和氚以維持核融合反應所需要的溫度，如此在適合的電漿條件下，核融合反應可以持續不斷且不需要外加的能量，這就是自燃($Q \rightarrow \infty$ ，也就是 Q 趨近無限大)。但對一座電廠來說 Q 能達到20-30也足夠了。中子和覆蓋在外的物質作用完成發電的功能並滋生所需的氘，當然也副產出放射性物質，但是處理這些放射性物質的方式

和醫院、工廠所產生的放射性物質一樣，只需要淺層掩埋或重覆使用即可，不會對環境產生太大的影響。托克馬克之所以受到核融合研究的重視，因為它的電漿捆束能力優於其他的裝置，隨著對電漿物理解的進步，它的電漿捆束時間不斷的進步，因此才有ITER的建造來檢視在接近自燃的物理條件下電漿捆束性質，以完成核融合發電的最後一哩路。

日本是亞洲國家在核融合研發的領頭羊，它參與了 $Q=1$ 的角逐。近年來韓國、中國和印度也積極參與，這四個國家都有各自的超導托克馬克研究計劃來參與和協助ITER的研發。臺灣最喜歡和韓國比較，在核融合研發方面，韓國已有專屬的核融合國家實驗室從事這方面的研究，臺灣是遠遠的落後，若再不起步，未來沒有「核融合台積電」可和三星競逐，三星是參與建造韓國托克馬克KSTAR的公司之一，其目的不言而喻。

除了托克馬克之外，另外一種環形磁控裝置是仿星器，它和托克馬克最大的不同點是螺旋形磁場完全由線圈裡的電流所產生。電漿裡的電流是不需要的，它的

最大的優點是電漿較托克馬克穩定，缺點是它完全沒有對稱性，這對高能的氦核子的控制是不利的，因為仿星器的裝置一直是屬於托克馬克備胎的角色，它的電漿參數比托克馬克大約落後了一代，因此成為第一代的核融合電廠的可能性較低。

另外值得一提的是球形環形裝置，它是把一般托克馬克的大小半徑的比降低到參以下，整個環形裝置看起來「像」一個圓球，這種裝置仍具有軸對稱，所以仍然保有磁控的優點。它的另一個特點是它可以容忍較一般托克馬克更大的電漿壓力，因此核融合電廠的體積和造價可以降低，這是第一代核融合電廠可能的選項之一。也因為體積和造價較低，

是臺灣切入核融合研發很好的起手式。

參與核融合研究的國家的總人口數已經超過世界人口的半數以上，成功之後核融合發電的知識是世界的文化財，臺灣是國際的一分子，在這人類追求最終的乾淨能源的盛宴上缺席是會讓驕傲的臺灣人汗顏的。臺灣要參與核融合研發可從成大電漿所現有的基礎上開始，並與在桃園的核研所合作設計並建造托克馬克和世界接軌，一方面培養人才、一方面從事先端的研究，如此當核融合發電成功之日，臺灣也可自己建造核融合電廠，而無需向國外購買，這也可以提升臺灣的綜合科技實力，一舉數得，何不為之？

參考註釋：

1. www.iter.org
2. MeV 是百萬電子伏特。KeV 是壹千電子伏特。一個電子伏特 (eV) 是一個電子通過壹伏特的電位差所獲得的能量。室溫 (25°C) 相當於 0.025eV。
3. 托克馬克的示意圖。圖片是由電漿所張博宇老師所提供。