

永續、終極的希望——

核融合能全球發展計畫

為了發展理想中的核融合反應器，各國皆投入大量資金與人才，展開多項計畫，開發各式核融合反應器，到底人類還要等待多少年，才能脫離能源危機的威脅？

開執中、陳建宏

能源問題是世界各國急需面對的課題。目前，80%已開發國家的能源來自於化石燃料。而環境問題(如溫室效應和酸雨污染)及化石燃料的存量有限，意味著我們對煤、天然氣及石油的依賴將受到嚴重限制。

2050年，全球人口預計從60億成長到90億，要維持更先進的生活水準，預估需要增加2~3倍的能源消耗。因此面對能源安全、永續發展及環境保護等挑戰，多元化的能源絕對是必要的。

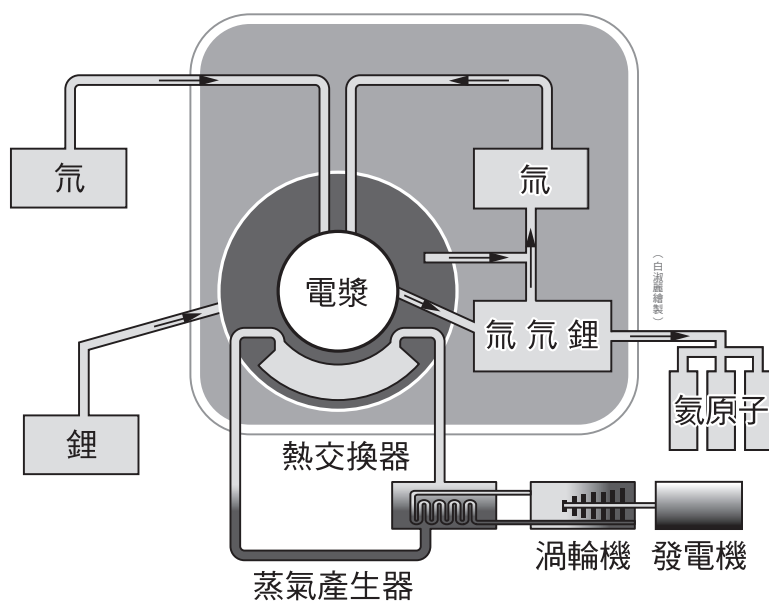
安全穩定的核融合能

未來的能源供應來源選項可能包括化石燃料、核分裂能、核融合能以及再生能源。以現狀評估，化石燃料與核分裂仍將持續作為發電的主要來源，但其成長率將因為社會接受度及環境因素而受限。再生能源取決於環境條件，因此不易維持穩定的電力供應，此外也受到能源儲存技術的挑戰。為了供應穩定的基本負載供電，必須有能長時間提供穩定電力的來源。這表示短期內仍需依賴化石燃料和核分裂，但尚存資源(不論化石燃料或是鈾礦)很快就會用盡，且核分裂的放射性廢棄物又是各界所頭痛的問題，若指望永續安全的能

源來源，長期而言仍必須仰賴核融合能。

核融合提供了一個安全、穩定的能源供應來源，因為其屬於高能源效率。1公斤核融合燃料所提供能量相當於1000萬公斤化石燃料，且燃料取得方便，可從海水提煉的氘(2D)預估有 10^{14} 公噸，由鋰礦(鋰-6)提煉製備的氚(3T)，預估也有 10^9 公噸。又因為同質量下核燃料可提供的能量為化石燃料的千萬倍，以地球含量評估， 10^{14} 公噸的氘以及 10^9 公噸氚，可供應數百萬年的能源需求。換句話說，核融合一旦成功，人類將永遠不必憂心能源匱乏的問題。

再者，融合反應為兩個輕原子結合成重



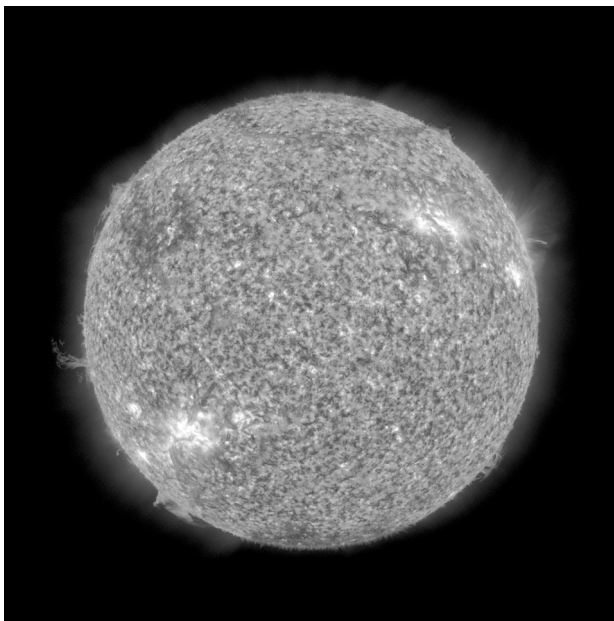
圖一：核融合電廠簡圖，結合氘氚原子產生能量後，由熱交換器輸出能量。

原子，而非燃燒，無二氧化碳等溫室氣體的產生，所產生的核廢料也都屬短半衰期的放射性廢料，若經過精心設計、挑選耐輻照材料後，所有放射性廢料皆可在 100 年內降至一般廢棄物等級，以往被環保人士詬病的放射性廢料問題將迎刃而解。

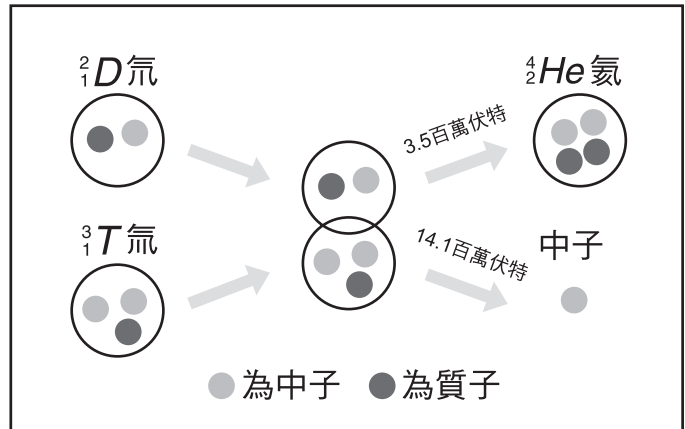
此外，核融合反應安全性較高，僅有少量的燃料會被使用在反應器中，代表大規模核子事故如「三哩島事件」及「車諾比事件」將不會發生。據目前估計，未來核融合發電的成本將大致與核分裂、再生能源和化石燃料相近。因此，核融合可能會在人類未來的能源需求中扮演關鍵角色（圖一為核融合電廠示意圖）。

核融合原理

太陽燃燒即為最常見的核融合反應（圖二），核融合是聚合多個小原子，生成一個重原子並伴隨著巨大的能量釋放反應，此乃科學界冀望許久卻又尚待突破的終極目標。

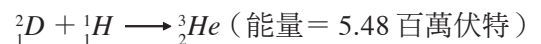


圖二：宇宙中核融合無時不刻在發生。圖為太陽以核融合反應燃燒。



圖三：氘 - 氚的融合反應式。

太陽及其他恆星中的核融合反應主要是依著以下反應方程式：



每一秒，太陽內部有 6 億 5700 萬公噸的氘，融合為 6 億 5250 萬公噸的氦。其過程中約有 426 萬公噸的質量轉換為能量釋出 3.83×10^{26} 焦耳，或相當於 9.15×10^8 億公噸黃色炸藥爆炸的能量。然而傳達到地球的能量只剩下 1.74578×10^{17} 焦耳，也就是說，這些遠不及太陽釋放能量千萬分之一的部分，就供給了地球生物生存的大多數能量。科學界很早就開始研究，如果人類在地球上能仿照太陽產出核融合能，且用來發電，則人類社會能源短缺問題將永遠解決。

現今國際上研究發展的核融合反應多為氘 (${}^2_1\text{D}$) - 氚 (${}^3_1\text{H}$) 式融合，該反應如圖三所示，氚可由鋰的同位素鋰 - 6 製備 (${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$)，地球存量約 10^9 公噸，而氘在大自然的含量約為一般氫的七千分之一，也有 10^{14} 公噸，簡單計算這兩種元素的地球存量，光是進行氘 - 氚式融合就可以提供 10^{27} 焦耳的能量，而現今人類所需能源不過每年 10^{20} 焦耳，因此單是運用氘 - 氚式融合就可供給人類使用 1000 萬年的能源需求。更遑論若是人類成功開發相同於太陽

（圖四來源：維基百科）

燃燒，進行氘 (${}^2\text{H}$) - 氚 (${}^3\text{H}$) 融合的反應 (由於 ${}^2\text{H}$ 在地球存量更是氘或氚的數千倍，原料更充裕)。由此可知，控制核融合的反應速度和規模，實現持續、平穩的能量輸出，用來發電以造福人類社會，已是國際上一致的共識。

核融合發展歷程與研究方向

目前世界上致力研究的核融合實驗分為兩大主流。其一為磁控核融合，以磁控電漿方式使之懸浮並反應。其二為慣性約束融合，以雷射誘發升溫而反應。

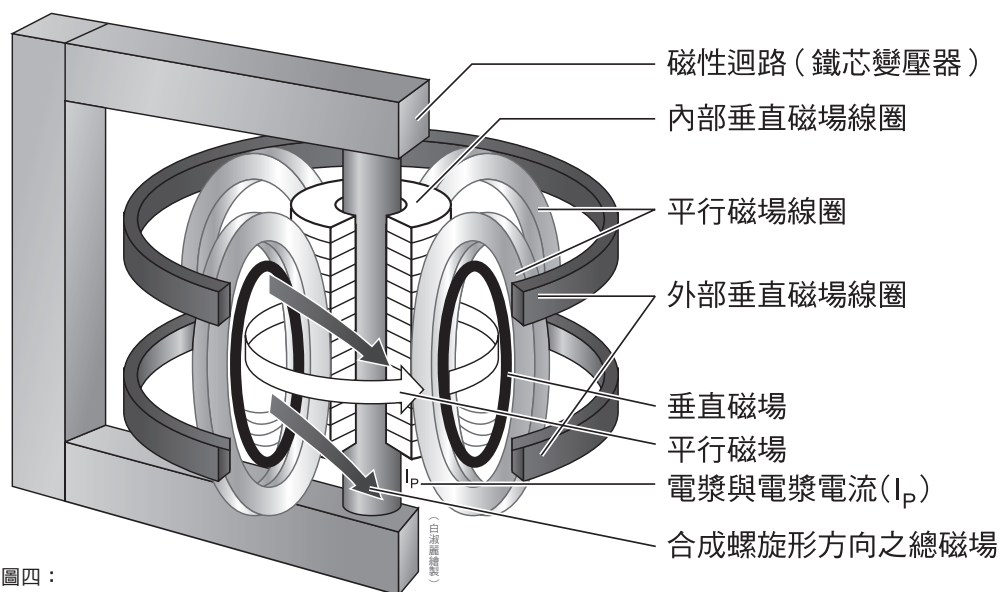
50年代初，蘇聯成功地建立了首座以磁控方式聚合之托卡馬克 (Tokamak) 結構。70年代開始，世界掀起了托卡馬克研究熱潮，包含美國的托卡馬克融合試驗反應器 (Tokamak fusion test reactor, TFTR) 以及歐盟的歐洲聯合環形加速器 (Joint European Torus, JET)、日本的 JT-60 (Japan Torus-60) 更是大型托卡馬克結構。

而雷射誘發升溫的慣性約束融合雖於1960年代就有人提出，然而功率太低無法有助於融合反應。甚至因為磁控聚合的領先而不受重視。其發展從60年代美國的勞倫斯利弗莫爾國家實驗室 (LLNL) 以簡陋的雷射光源 (4 pi laser system)，僅用12束雷射聚焦升溫，以及1978年開始運作的24束雷射，到近期美國國家點燃實驗設施 (National Ignition Facility, NIF) 的192束雷射實驗，期望在2011年能有突破性進展。

磁控聚合

提及磁控聚合，托卡馬克裝置為該分支的代表。為了將氘 - 氚電漿維持在數億度的高溫，需用電場將其約束，但是高能量的電漿粒子在高速運動下容易與四周的反應爐壁接觸，使爐壁材料因高溫而被游離並進入電漿中，導致電漿溫度急遽下降而停止反應進行，故1950年代初期由前蘇聯科學家亞思莫 (Artsimovitch) 等人發展出托卡馬克結構核融合反應器。托卡馬克 (Tokamak) 是「磁線圈圓環室」的俄文縮寫，由許多個不同方向的封閉磁場組成「容器」，利用強磁場將電漿懸空限制在磁場中 (圖四)。

而自1961年蘇聯的第一個核融合反應器 T3 起建，這40多年來核融合研究持續地進行著，自70年代末，美、歐、日、蘇開始建造4個大型托卡馬克反應器，即美國的核融合實驗反應器 TFTR、建在英國的歐洲聯合環 JET 及日本的 JT-60 和前蘇聯的 T-20 (後來因經費及技術原因改為較小的 T-15，採用超導磁體)，其中日本原子力研究所建立之 JT-60U 反應器與歐盟的 JET 反應器，



圖四：
托卡馬克反應器簡圖，
以磁線圈架構讓高溫電漿磁控懸浮於環狀真空中，使之在半空中進行融合反應。

兩者的實驗結果皆達到了輸出能量大於等於輸入能量 ($Q \geq 1$, $Q = \text{產生的功率} \div \text{輸入的功率}$)。

自蘇聯贈送給中國超導 HT-7 (Hefei Tokamak) 實驗裝置後，中國更成為繼俄、日、法後，第四個擁有托卡馬克的國家。當前全球有 30 多個國家及地區開展了核融合研究，運行的托卡馬克裝置至少有幾十個，以下介紹磁控聚合的各國現況。

歐盟 JET 計畫

由歐盟 12 個會員國出資的 JET 計畫，吸引超過 2000 多名技術專家投入研究。JET 的電漿密度設計為 4.8 兆安培 (MA)，稍遜於日本 JT-60 計畫，線圈尺寸也較小。1991 年，JET 托卡馬克裝置成功地實現了核融合史上第一次氘-氦運行實驗，預告了氘氦的磁約束熱核融合的可行性；後來，JET 更創造了核融合輸出功率 16.1 兆瓦特 (MW) 的新紀錄。

JET 的物理參數最接近於托卡馬克核融合實驗堆，因此

電漿的實驗狀況以及發展可以作為國際熱核實驗反應器計畫 (ITER) 實際運轉的參考，藉以了解 ITER 的物理相關問題，而且其規模較小，更適合做侷限快速 α 粒子之研究，JET 目前嘗試的各類電漿控制技術將是 ITER 運轉條件的重要依據。

此外，JET 也同時觀察以鈹 (Be) 作為核融合反應器第一面牆結構材料的承受能力。由於碳複合材易導致氦沉積在第一面牆上，JET 的研究正在嘗試兼用鈹及耐高溫鎢 (W) 作為第一面牆與偏濾器材料。作為 ITER 的參考裝置，JET 如何提高材料使用壽命，無疑是邁向實用之前最重要的議題。

日本 JT-60 研究計畫

作為亞洲最先進的核融合研究中心，日本的 JT-60 研究計畫為 JET-2M 的後續計畫，由日本原子力研究所主持。在上個世紀末，JT-60U 計畫於氘-氦聚合反應已達到輸出能量為輸入能量的 1.3 倍，證明了未來商用可能性。

近期 JT-60 正在嘗試「高效率運作模式」，利用很高比例的自舉電流來供給維持電漿，使其有自我供給的能力。藉由 JT-60 中子入射系統的多方向入射裝置來控制壓力，

電磁鐵 (Magnets)

由 48 組系統組成的電磁鐵，磁場相當於地磁的 20 萬倍。

診斷系統 (Diagnostics)

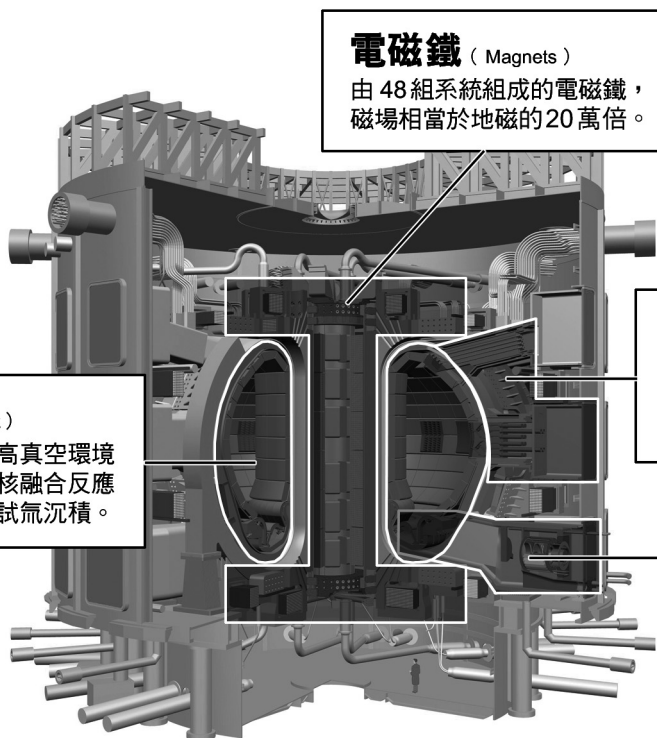
約 50 個測量系統，將有助於控制、評估和優化核融合電漿性能，並進一步了解物理性質。

偏濾器 (Divertor)

位於底部的真空容器，其功能是吸取熱量和氦灰（融合反應的產物）以及其他電漿雜質。

屏蔽層 (Blanket)

屏障層承受高熱且高真空環境下之中子所產生的核融合反應，並用於觀察、測試氦沉積。



圖五：ITER 所設計的托卡馬克反應爐簡圖。
(詳細彩圖，請見封底內側)

(圖來源：ITER Organization)

系統可成功避免電漿不穩定性。因此，目前藉由高溫電漿的自舉電流約75%，可維持平穩性條件約7.4秒，顯示了高效率的運作模式——高效能的融合發電廠的可行性。

ITER 計畫

自1988年起，美國、歐盟、日本與俄羅斯共同合作成立了國際熱核實驗反應器計畫(international thermonuclear experimental reactor, ITER)，立基於TFTR(美國)、JET(歐盟)、JT-60(日本)和T-15(俄羅斯)等裝置引導的研究之上，建造總預算超過100億歐元的實驗反應爐(圖五)，並作為商業運用前身。參與國分別有：中國、俄羅斯、美國、歐盟、韓國、日本、印度。

在拉丁文中，「iter」的意思是「道路」，此「ITER」計畫也意指邁向下一代新能源的道路。設置於法國南方的ITER，其環直徑達12公尺，比JET大一倍，在2008年開始運轉，初步規畫為至少運轉20年的實驗設施。預估於2050年，全球第一個商業運轉的核融合發電廠將會啟動，並預期在2100年供應全球20%用電。

有鑑於ITER的主要目標是產生一個Q值超過5的穩定電漿體，且運作維持至少8分鐘，目前ITER仍有一些重要的物理和工程問題尚未解決，如偏濾器的排熱、大破裂的防禦、密度極限、長脈衝H-模(long pulse H-mode)的維持、中心區雜質累積等；而另一些專家認為，ITER牽扯的物理及工程項目實在太廣，包括先進約束模式的實驗研究、防14 MeV(百萬電子伏特)中子輻

照材料研製，以及核融合供電最佳化設計等一系列課題，所以要看見核融合的商用階段還需要時間，圖六為未來發展核融合電廠的階段示意圖。

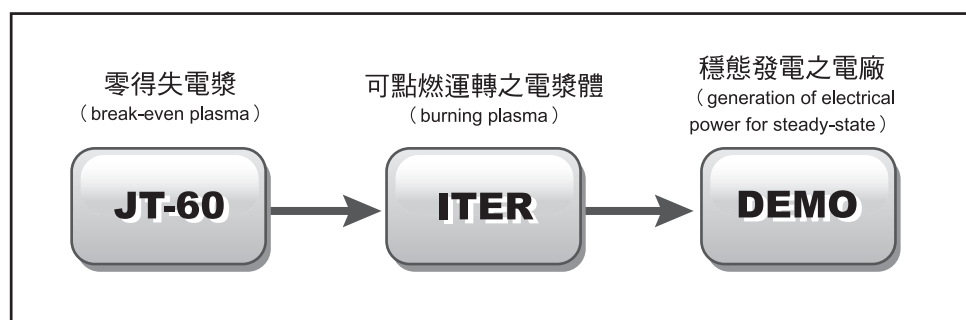
慣性約束融合

受控核融合的另一分支——慣性約束融合(inertial confinement fusion, ICF)則是在高壓下進行的。目前學界較通用的方法是用多束強雷射光來壓縮固態氫小球，使其在很短的時間內昇華成氣體，電離後產生核融合(圖七)。

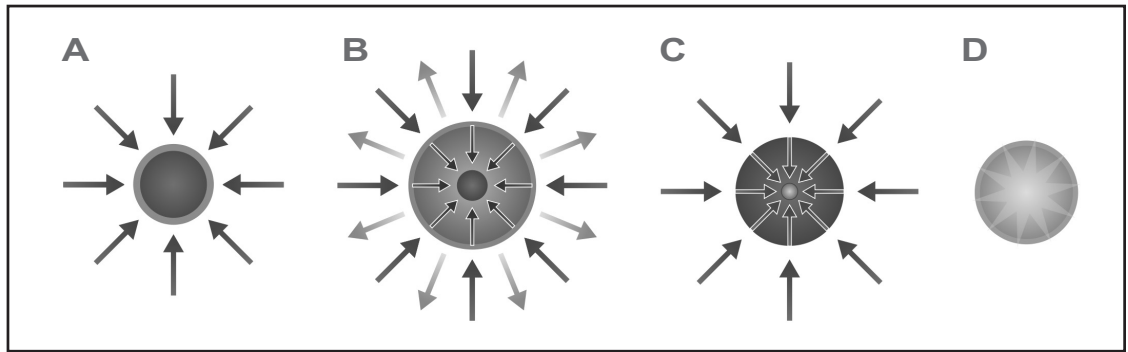
如圖七所示，為了引發慣性約束融合，通常會將含氘或氚的燃料做成針頭般大小、少於3公分的小彈丸狀，並從四面八方發射雷射到這個燃料上(圖七A)，當雷射接觸燃料丸表面時，高溫會瞬間引爆燃料丸的外殼(圖七B)，爆炸產生的震波若能均勻且同時由彈丸的表面傳到彈丸內部(圖七C)，就能壓縮最核心的燃料，此高壓將能達到引發核融合反應的程度(圖七D)。

核融合反應一旦發生，連鎖反應就能將燃料丸剩餘的部分燃燒一空，產生大量能量。此方式雖立意明確，卻始終未能成功引燃，其中最大困難主要是在於突破雷射光束的準確性。

近年美國的國家點燃實驗設施在此領域的突破，使得雷射誘發慣性約束融合再度吸



圖六：實現核融合發電之階段圖，由JT-60及ITER的實驗裝置為前身，期許最終搭建出一座商用核融合電廠 DEMO (Demonstration Power Plants)。



圖七：雷射誘發慣性約束融合的基本原理。（詳細彩圖，請見封底內側）

引全球目光，該機構在占地約3個足球場的建築內進行核融合實驗，12年來建立了192個巨型雷射器。實驗開始時利用單一雷射，透過透鏡與玻片反射而達到放大效果以及功率調節，能量上升後再分枝至192束雷射光。若雷射都發射至同一點並控制得宜，短短時間內輸出的巨大能量（500兆瓦）將大幅超過全美的峰值發電量。

另外，歐洲的雷射誘發慣性約束融合裝置HiPER（high power laser energy research facility），不同於一般ICF系統，因其有第二組雷射束直接加熱，使用低能量的雷射即可在短時間內升溫，有可能為商用運轉的ICF鋪路。

結語

核融合一直是自然界最原始也是宇宙間最常見的能量釋放，而核融合的迷人之處，在於研發成功後將可一勞永逸地解決能源危機。自古以來，人類師法自然的精神不變，為克服能源問題，科學界結合多方領域嘗試突破現狀，然而不論磁控侷限或是慣性約束，要穩定控制聚合反應，的確不如科幻電影中那樣容易。所以在商用核融合成功之前，許多替代方案或新能源需不斷被開發，試圖延緩能源短缺的危機，而科學的進步、微尺度的突破、新材料的開發、理論的創新

都有可能於若干年內徹底改變現狀。

雖然核融合產物的半衰期不到15年，為避免材料在爐心受到中子照射而影響機械性質，各國仍積極研發耐高溫、高輻照的新材料，近年美國橡樹嶺實驗室（Oak Ridge National Laboratory）研發的碳化矽複合材料（SiCf/SiC composite）就是一例。相較於亞洲鄰近的日、韓，甚至中國，台灣現今尚未有核融合相關的研究計畫，核融合反應器工程雖複雜浩大，卻也需各領域人才針對細節研究，建議我國應積極投入電漿或是材料科學的研究，以提供部分貢獻與發展。

據美國能源部估計1998~2020年間的年耗能增長率為2.1%，以這種使用速率，石油、天然氣、煤礦、鈾礦的存量將所剩無幾，產生的二氧化碳又造成暖化問題，因此，開發「乾淨新能源」實在迫在眉睫，商用化的核融合將是人類最終解決能源問題的希望。☪

參考資料：

1. 國際熱核實驗反應器計畫組織：<http://www.iter.org/>
2. 日本原子力研究開發機構：<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/index-e.html>

陳建宏、開執中：任職清大能環中心

諾貝爾的榮耀

完整收錄歷年科學桂冠的獲獎事蹟

讓您更貼近大師敏銳的心靈

掌握最新的科技脈動

一年一度的諾貝爾獎，不僅是全球科學界每年最大的盛事，更代表了科學成就的頂峰。科學家沒有一天不在挖掘你意想不到的事實，《物理桂冠》為你介紹大至宇宙結構、小至夸克作用的近代物理學精華。《化學桂冠》告訴你科學家如何利用「雷射飛秒光譜學」偵測化學反應；電影中複製恐龍的PCR技術竟是出自諾貝爾化學獎得主！《生理醫學桂冠》讓你掌握生物科技的最新動向，看看科學家如何突破器官移植的重重關卡；如何揪出狂牛症的罪魁禍首。此外，你可以從這套書中，了解楊振寧、李政道、丁肇中、李遠哲、朱棣文、崔琦等華人科學家的耀眼成就。（WS073、WS074、WS075）

- ★ 歷年諾貝爾科學桂冠的獲獎事蹟與珍貴照片，一次完整呈現
- ★ 收錄數十幅黑白解說插圖，圖文對照，更貼近大師的科學風采
- ★ 由《科學月刊》邀請各領域的學者專家執筆
- ★ 台大物理系教授高涌泉、台大化學系教授周必泰、長庚大學生命科學系教授周成功、國立自然科學博物館前館長周延鑫 專序推薦

諾貝爾的榮耀——物理桂冠 定價350元

諾貝爾的榮耀——化學桂冠 定價330元

諾貝爾的榮耀——生理醫學桂冠 定價320元

科學月刊 著

