



軍事科技

探討(能)之科學

兼任副教授 史堯年、兼任副教授 汪仁虎

提 要

能就是能量、能源，推進一切活動的因子；能也是能力、技能，取得任何成就的本領。因為缺少能量所以我們的本領不能充分發揮，因為本領不夠所以我們無法取得更多能量；若有較大的能力就能取得較多能源，有了較多能源就能增加更強的能力。

能源有很多種形式各有不同功效及優缺點，目前尚無一種能滿足人類未來長久的需求，除非受控核融合，工商業運轉實現，才是解決能源問題最根本的方法，因所涉技術過於尖端又複雜，故耗資鉅大仍難成功，擔心若再50年還不成功，世界會變成甚麼樣子？故擬先回起點，由一些原始作用開始重新探索，盼能找出一種較簡捷、有效的解決途徑。從早期粒子碰撞實驗及磁與電的作用方法中，發現或有辦法克服極其微小的融合機率。若以兩部加速器分別連續加速氦核群，並聚縮成為細束在管道迴路中持續對撞、加速、再對撞循環，不斷產生一些融合能量來發電或許可以試試，這算是冷核聚變反應的構想，看似容易，若真要實行，其技術、精度與花費可能不低，有無實用價值？並沒把握，若有，代價也絕不低，因此節能減碳與探索其他方法的努力皆不可鬆懈。

壹、前言

能量不能被製造也不受減損，但可以產生強勁的活動力，它本身沒有價值，除非我們懂得從天然資源中取得它、使用它、改變它的形式、依流程作功、創造出貨品，提高我們的生活水平與建設成果，如此它的價值才得以彰顯，也就是能量必須



配合控制它運作的能力，才能發揮出功效。今天世界上有許多地方能源、資源頗豐富，卻貧窮落後，另有一些地方看來都貧乏，但民生富裕、社會先進，這主要是由於能力因素所導致。不論要發展政治、經濟、國防等目標，能源與能力都不可或缺，世界上任何地方，能源儲藏量雖有不同，基本上並不缺乏，缺乏的是利用能源的能力，天然條件我們無法改變，能做的是增強自己的能力，有了本領不愁得不到充分的能源、資源。

一、能源

能源分初級能源與終端能源，初級能源直接存在於自然界，包括：化石能源(煤、石油、天然氣)、生質燃料(木材、乾草、糞便)、再生能源(太陽能、風能、水力、地熱)、核能(裂變核能、聚變核能)等，其中生質燃料也常被歸入再生能源。終端能源則是為了方便使用，由初級能源經過轉換而來，包括：汽油、電力、電池、氫、酒精、炸藥等。目前世界上初級能源的大致消耗量，其中生質燃料約佔8%、再生能源5%、石油34%、天然氣21%、煤26%、核能6%。使用能源須考慮與估算各種能源的蘊藏量、產量、生產成本、穩定度、安全性、對環境的影響等，其中生產成本須考慮四個面相：資本投入、燃料成本、運轉與維護成本、除役成本。

二、能量的形式與轉換

能量本身是抽象的，通常依附在物質上，與其它資源不同，不能回收，不能重複利用，其總量不會增減，稱為能量守恆，或稱質能守恆，但它的形式可以改變，要想它幫我們作功，必須先將它從原有的形式轉換成方便作功的形式，才能發揮出有效的作用。用過的能量，再作功的本領就會下降，在一個封閉系統裡，能量用於作功的本領只會降低不會增加，也就是用過的能量雖然總量沒有減少，卻已經沒用了，因為它流失到周圍環境的分子上，成為環境分子的熱震盪，並逐漸擴散消失，無法再自行聚集，也就是本來排列有序的力量，發揮作用以後變得散亂無序，除非有更大的外力將它們整合起來，不然！我們只好不斷的開採新能源以供繼續使用。

我們得到能源後，可以直接取它的光、熱使用，但通常會先將它轉換成化學能的形式儲存，例如將石油提煉成汽油供發動機使用、或植物果實發酵成酒精、天然氣高壓在液化儲存槽內等。或者用它發電，並以高壓電纜線輸送到遠處工廠配合其他資源製造出各種產品、或製成蓄電池、乾電池、軍火等。儲存的能量與最終使用的目的形式之間，需要一些設備或器材供轉換，能量轉換器材種類很多，最重要的例如：發電機、電動機、發動機等。



三、能量轉換的效率

輸入的能量不可能完全有效做功，總會有些損耗在摩擦等阻礙上，其用於有效做功的能量與全部輸入能量之比，稱為能量轉換效率，在多級能量轉換過程中，總效率，等於各級效率的相乘積。以蒸汽渦輪機為例，能源燃料燃燒鍋爐的水成高溫 T_H （溫度單位須使用凱氏溫標）、高壓蒸汽，驅動渦輪機做功 W ，做功結束後，排出低溫 T_C 、低壓的蒸汽，此低溫與低壓仍會略高於環境的溫度與壓力，並散於四周環境，或經冷卻後成為液態水，循環利用。若高溫時蒸汽熱能為 Q_H ，排出之低溫蒸汽熱能成為 Q_C 。一部理想的熱機稱為Carnot熱機，此蒸汽對此熱機所作的功為 $W=Q_H-Q_C$ ，此熱機的熱效率 $\eta=(Q_H-Q_C)/Q_H \times 100\%=(1-Q_C/Q_H) \times 100\%$ 。因為蒸汽所含的熱能與其溫度成正比，故 $Q_C/Q_H=T_C/T_H$ ，則Carnot熱機的熱效率 $\eta=(1-T_C/T_H) \times 100\%$ 。由此可見高溫熱庫與低溫熱庫的溫差愈大，可以作愈多的功，效率也愈高。一般熱機的熱效率只有Carnot熱機熱效率的一半至三分之二。

一些常見的能量轉換系統之效率，例如：化石燃料電廠由化學能經熱能轉成機械能最後再轉換為電能，系統效率約30~40%。裂變核能電廠由核能經熱能轉成機械能再轉成電能，效率30~35%。發電機由機械能轉為電能，效率可達70~99%。電動機由電能轉為機械能，效率50~90%。風車由機械能至電能，效率35~50%。太陽電池由日光能至電能，效率5~30%。燃料電池由化學能（氫能）至電能，效率40~60%。鎢絲燈泡由電能轉變成光能，效率僅5%；日光燈20%；LED燈可達約30%。

四、開發新能源

化石能源及失控或處理不當的裂變核能汙染較嚴重，儲量亦有限，不能太過依賴。靠節約能源效益也是有限的，總不能節儉過頭，放棄發展！國際能源及原物料的價格常因經濟景氣循環，政治、戰亂及幕後強大力量推波助瀾的炒作等因素而大幅波動，許多人從中獲取暴利，更多人則承受重大損傷。

什麼是新能源？提高再生能源效率及使用率，算開發新能源嗎？雖然很值得鼓勵，但那些再生能源如太陽電池、水力、風車等，早已在使用，應該不算新能源，且當化石能源枯竭時，他們也遠無法彌補龐大的需求。目前所知有希望提供巨大貢獻的新能源，只有一種即核融合能，仍在實驗階段，離實用化仍遠。

核融合能的燃料不論在地球或任何外星都非常充分，能量的提供非常巨大，沒有高放射性廢料處理問題，較少擔心被有心人用做大規毀滅性的武器，萬



一發生意外甚至被炸毀，也不會有爐心熔解導致千年無法接近的危險，非常安全。何時受控核融合能發電，工業、商業運轉實現，人類文明將可步上一個新階段，能源問題獲得根本解決之後，所帶來的巨大財富與能力，會使得其它問題也容易隨之迎刃而解。

貳、再生能源

今日鼓勵使用再生能源，好處是不怕消耗殆盡、較少產生污染排放、分散供給來源、很少增加社會成本等，但其障礙有來源不穩定、利用成本高、技術、效益仍不成熟等。目前水力約佔全世界能源總產量2%，風力、太陽能、地熱等約合佔2%，可燃性再生能源與廢棄物等約佔8~9%。

一、水力：

水力通常是利用江河築壩，裝設水輪機擷取位能發電，目前約供應全世界電量的五分之一，在某些時間若有過剩的發電量，可用來將水泵送到較高位置的水庫中蓄存，等電力需求較高時再通過渦輪機發電，如此效率可以達到80%，建水壩，上游形成水庫，具有休閒、觀光、養殖、灌溉、防洪、運輸等功能，但也會改變水質，對當地生態造成干擾與傷害，若遇地震、海嘯或戰爭破壞水壩，對下游地區的生命財產會造成重大災難。

二、風力

地球表面各處接收太陽輻射的量很不均勻，各地氣溫變異頗大，也因此造成大氣密度也就是氣壓隨時隨地在變化，氣壓差異造成氣流，氣流就是具有動力的風。估計太陽照到地球上的能量當中，有1%至3%用於移動空氣成為風，風在通過裝在一根迴轉軸上，設計如飛機螺旋槳的葉片時，若連結發電機，其機軸也跟著轉動而發出電來，發電量取決於三項因素：葉片的長度和設計、空氣的密度、風速。

風車在設計上有許多種類，最常見的基本型式，為具有螺旋槳的水平軸型，其次為形如打蛋器的垂直軸型。葉輪直徑從50公尺到90公尺都有，從塔架基座到葉尖，高大的有135公尺，功率容量通常在100 kW以上，大型者最高功率可達150MW以上。建風車的地點必須先做風場評估，包括風速大小與穩定性、風剪、擾動、狂風的密集度、對視覺與噪音的影響、對鳥類等動物的影響，還有投資、維修與成本回收等問題，適合的地方不多，離岸風場通常風速高，不穩定氣流少，發展離岸風電，近年頗受重視。能量儲存可利用電瓶、製氫或併入電網等方法，雖然風力的資源量很大，近年發展也很快，但當考慮適當性



與經濟效益時，仍然有待努力。

三、生質能

太陽供應光輻射，植物行光合作用而成長，同時固碳與淨化空氣，組成這些植物的便是生物質量，可供給人類與動物糧食、建材、作為運輸燃料或發電，或其他化學品，稱為生質能，自古就是最重要的能源，但一般我們談生質能，並不包括糧食等功能，使得今日生質能反而不受重視。糧食的重要不只在於它的能量，還有它所含各種必須的營養素，若只就所含能量來看，當我們飲食，吸收了1卡由光合作用產生的能量，實際上化石能源已補貼了它10卡以上，包含肥料、農藥、灌溉、除草、整地、採收、包裝、運輸、冷藏、販售、烹調等，古代這些全由植物或再生能源供給，甚至農業還要支撐軍力、文化、建設、工商原料、、、，今天卻幾乎所有再生能源，直接間接全都得靠化石能源來補貼，多麼可怕！可見能源的發展是一條不歸路。

今天木材、生物糞便與其他形式的生質燃料，仍然是部分未開發與開發中地區的主要能源，含糖與澱粉的作物可以釀製乙醇，代替部分汽油供車輛運輸，副產品可做牲畜飼料或肥料；藻類，及許多植物含油的種子可以萃取成為生質柴油；一些生物廢棄物，例如污水或垃圾，在缺氧環境下會被分解出甲烷或沼氣等可燃氣體與液體，作為燃料或生產塑膠、黏著劑等化學原料；木材或作物殘渣等可燃物，除作為烹飪、取暖外，也能用於蒸氣渦輪機發電。

四、地熱能

地球形成之初，約有近2000°C的高溫，使重元素往地心沉降，外層逐漸冷卻下來，但內層受到鈾、鈾、鉀等許多放射性同位素輻射影響，維持更高的溫度，地殼就像保溫層，能量流出緩慢，使得過多能量會突破地殼，形成許多火山爆發，經過數十億年，半衰期較短的同位素漸趨穩定，火山與地震的頻率也隨之下降，剩下長半衰期元素繼續提供輻射能，推測今日地核溫度達6000°C，外核約4500°C，外地涵約500°C至4500°C之間，最外層厚度約30~90公里的地殼，約隨每公里30°C的地溫梯度向地表下降，有人將地熱也視為一種「核能」。地球內部所蘊涵的巨大高溫熱能稱為地熱，若經由接近地表斷層及裂縫噴出則成為火山爆發、溫泉或冒泡的沸泥。蘊藏地熱的區域大致分佈在地震和火山活動頻繁帶，通常位於地殼板塊交界處的地震帶或火環帶。

在蘊藏地熱處，如溫泉區打井，高壓熱水噴出立即閃沸為水蒸氣，可以推動蒸汽渦輪機發電(因高低熱庫溫差通常不大，故熱機效率亦不高)、直接利用熱水暖房、養殖、寒帶農業灌溉、冷房等。其中冷房係使用吸收式冷氣機，高



於 0°C 的冷房常採用溴化鋰為吸收劑，水為冷媒；低於 0°C 的冷凍室，則以氨為冷媒，水為吸收劑，地熱流體提供熱能以驅動這些機件，由熱泵抽取上來的地熱流溫度需高於 135°C ，才能將發生器內之氨－水混合液蒸發，其中水蒸汽由精餾柱分餾出來，散熱凝結，落回吸收器內，而純氨在凝結器內液化，流入冷凍室裡的蒸發器中，在蒸發器中，氨氣佔去較高分壓，氨液則在低分壓下，吸熱蒸發，帶走房裡的熱，達到冷凍效應，蒸發後的氨氣與水氣，因比重不同，氨氣往上循環於蒸發器與吸收器管路間，水氣則流出冷凍室外部，散熱後回到吸收器，被水吸收，成為氨－水混合液，重新流進發生器內循環。雖然地熱資源量巨大，但一般離地表太深，可以利用之處不多。

五、太陽能

廣義的太陽能，不但包含再生能源，也包含全部的化石能源，可以說除了核能以外全都是太陽能，而這裡所指的太陽能則是直接太陽能，也就是日光，可直接對住家和建物加熱、照明、發電、熱水等用途。其中發電方式有塔式發電與太陽電池發電，塔式發電由許多反射鏡追蹤太陽，將陽光反射到高塔上聚焦，達 1000°C 以上的高溫，可以推動蒸汽渦輪機發電。所有太陽能的用途中，最重要的則是太陽電池，尤其在太空中，人造衛星一定得靠太陽電池板發電運作，地面上行動中的隨身物件，如手錶、計算機、手機等，也常利用太陽電池供電。

太陽電池分為單晶矽、多晶矽、非晶矽和單晶化合物等種類，單晶類的轉換效率可達25%以上，成本昂貴，主要用於太空上，效率或許還能提高，但有其極限，可能無法越過40%；多晶矽的效率約15%，成本較低，至今使用率最高，適用於住宅屋頂發電系統；非晶矽成本也較低，效率約10%，但它可在燈光下發揮作用，也可任易彎曲，主要用於手錶、計算機等方面。

參、化石能源

一、石油

石油是由古代各種動、植物沉積並層層覆蓋與壓迫在特殊的隔離環境下所形成的，至今保存在地面下多孔岩石的許多凹穴當中，鑽探成功的時候，往往會自行湧出，施加巨大壓力，約可抽出兩三成，若將水、氮氣或二氧化碳泵入岩層，可以多取出三到六成，最新的方法，為泵入溶劑及灌注聚合物等方法，降低石油的黏度，將其趕出微小的石縫，如此可將油田中絕大部分的石油取出，甚至一些頁岩油與油沙也能順利取出，近代海洋油礦陸續發現，開採技術逐



漸提高，使得可開採的蘊藏量增加了許多。估計石油可開採蘊藏量大約有兩千多億噸，全世界每年生產量約40億噸，約佔全部初級能源消耗量的三分之一，依此趨勢大約可以再供使用50年。石油之所以特別受重視，因為它所煉製的液態油料使用及運輸均十分簡便，能量密度大，穩定度高，安全性不差，機械功的轉換過程順暢，而且它有許多珍貴的副產品，為生活所必需。

化石能源的最大缺點是汙染，包括空氣汙染與水汙染，對環境、人體健康及動、植物都造成許多不利影響，這些影響肇始於化石燃料的開採，接著是透過運輸、提煉、燃燒，至最終處置。在爐膛、爐灶、鍋爐、外燃機、內燃機當中，燃燒化石燃料，以驅動汽車、機車、火車、船舶、飛機等各類型機具，排出各種微粒與氣體，如硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、揮發性毒性金屬等汙染物，有些在大氣層中會轉換成臭氧、有機化合物及酸等毒性汙染物。

二、天然氣

天然氣總伴隨著石油礦，所以又稱為附屬氣，但也有與石油不相干的，一般相信這些非附屬氣，很可能源自於淡水動、植物，而非源自於海洋動、植物。天然氣的成分主要是甲烷 CH_4 ，比起汽油能燒得更乾淨，所排放的有害物質也少得多，通常以壓縮或冷凍液化的形態，使體積縮小為1/600，裝在密閉鋼製容器當中，方便儲存、運送，或以天然氣管線輸送，供應家庭炊事使用，也常供作運輸、化工原料及發電。天然氣可供開採的蘊藏量約1500億噸，全球每年生產約25億噸，佔總能源耗量約21%，還可供應60年，其燃料熱值約39 MJ/kg。

生物死亡經自然腐敗，厭氧菌分解有機質，會產生甲烷（約55%），與其他副產物。垃圾掩埋場當中即可導出這些近似的天然氣，只是就能源來看，這種供給量太小。另外有一種天然氣水合物，是甲烷類天然氣與水相互作用形成的結晶物，大多存在於海洋的大陸棚海底，少數存在於陸地上凍土層中，1 m^3

天然氣水合物可釋放出200 m^3 甲烷氣體，使用方便、清潔衛生，其蘊藏量比煤、天然氣與石油的總合蘊藏量還大得多，只是開採成本太高，目前看來沒有甚麼價值，倒是要小心，溫室效應或暖化的結果，不但造成海洋能夠容納 CO_2 的能力會下降，部分被凍結在海底的天然氣水合物有可能會氣化，釋放到大氣層中，汙染環境，造成溫室效應惡性循環。

三、煤炭

煤炭可供開採的資源量很大約有 8×10^{12} 噸，目前世界每年生產量約50億



噸，佔總能源耗量約26%，其燃料熱值約28MJ/kg。當石油與天然氣用盡時，可利用煤氣化與液化代替，估計可以再維持使用約兩、三百年。煤層為沼澤地區原始森林埋藏地下幾百萬年後轉化形成，主要成分為碳，其次為碳氫化合物及一系列其他成分，如硫、氮、氧、矽等，依含碳量多寡分為四級：褐煤含碳30%、次煙煤含碳40%、煙煤含碳50~70%、無菸煤含碳90%品質最好。直接燃燒會產生嚴重的空氣汙染、溫室效應及酸雨威脅農、漁、林業，故需要做一系列的淨化工作，以降低汙染度，同時也難免耗損許多能量，並增加很多投資成本，使得廉價的煤礦，最後變得並不便宜。

煤為固體，無法像液態石油或氣態天然氣可以直接打井抽取，必須以大型機具露天開採，或以人力進礦坑挖掘，挖掘出的煤礦首先要進行洗煤，以除去礦物當中不可燃部分及硫化物等雜質，過程中藉水沖洗軋碎的煤礦，初步將沉澱的較重且含酸性、毒性與放射性的礦物分離，另外進行分析與後續處理。洗煤的酸性、毒性排水，PH質可低到2.7，濃度較高的毒性物質，包括砷、鋇、鉍、硼、鉻、氟、鉛、汞等，放射線同位素有 C^{14} 、 K^{40} 、鈾、釷等。煤炭最主要的用途是發電，燃煤發電約佔全球發電量的四成(天然氣與核能約各佔兩成)。燃煤電廠和工業鍋爐必須配置燃氣脫硫裝置，需用到石灰洗滌器，洗滌器收集的汙泥當中，除石灰與硫化物以外，還包括各種毒性物質，其最終處置，需用到特別設計的安全儲池。煤礦中的灰份約佔全重的1%至15%，燃煤鍋爐底灰佔全部灰分的10%，飛灰佔90%，其中粒徑 $<1\mu m$ 的飛灰仍會逸散到空氣中，其他絕大部分可藉靜電集塵器收集，灰分所含酸性、毒性、放射性物質皆與原始煤礦相當，需慎重分析與妥善處置。

肆、核能

以相同的質量來比較，鈾分裂可以提供的能量是化石燃料的一百多萬倍，而氫的同位素融合成氦則比鈾分裂提供多約數倍的能量。宇宙中氫與其同位素的資源量遠大於其他元素，融合能也最大，是最理想、最主要的能源，地球上的資源量也足夠使用百萬年以上，那時人類也早有能力移民外星，可以獲得取用不盡的能源，但前提是有能力利用這種融合能，否則一切都是幻想，若真能控制這種能源，用於工、商業及民生、經濟，如同人工太陽，不論居住地球，移民外星，都能建設出美麗的梦想世界。

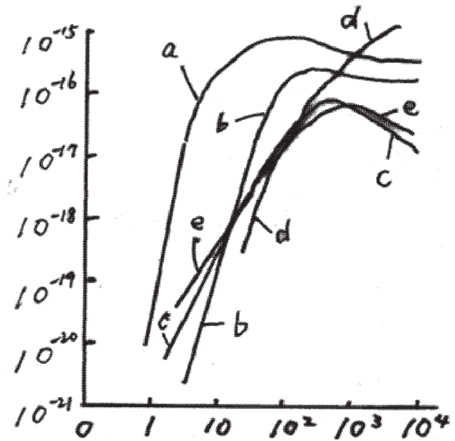
一、核融合能

原子核都帶正電，彼此要融合在一起，必須克服稱為庫倫位障的靜電斥力



，此力與相互作用兩同性原子核的電荷相乘積成正比，縱軸為融合作用的反應率，與兩者間的距離平方成反比乘積，單位為 cm^3/s 。

。核融合反應有很多種，例橫軸為正向撞擊時之動能，單位為 keV 。如在恆星上H與H可以融合、氦



與氦、碳與氧等等都可以融合。融合須撞開庫倫位障，其中較容易達成的組合，依次有以下數種：a. $\text{D}-\text{T}$ 、b. $\text{D}-^3\text{He}$ 、c. $\text{D}-\text{D}$ 、d. $\text{T}-^3\text{He}$ 、e. $\text{T}-\text{T}$ 。下圖為各組合核融合反應率與所需動能的關係曲線圖。

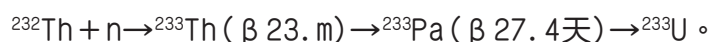
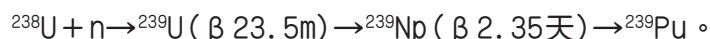
要讓核融合爐運轉，需要輸入電能 P ，融合反應會產生輻射熱能 F ，此熱能用於發電，發電量先要提供輸入的各項電力需求，其他的才能輸出，供民生與工商用途。輻射熱能與輸入電能之比 F/P 稱為能源倍增率 Q ，通常蒸汽發電機的效率約30%，因此 Q 值至少要有4倍以上，扣除自身運轉以外才有輸出，融合爐的結構極為複雜與精細，所耗成本非常高(以數十億美金計)，如果計算投資報酬與經濟效益， Q 值至少要有10~15倍，才有利用價值，最好有近50倍以上，就有較便宜的能源可用，算是真正解決了人類生活的苦難，每個人只要稍許努力，都能心想事成。但是今天已經過50餘年的奮鬥，核融合 Q 值僅達到1上下，離成功尚遙遠，再50年或更久，是否就一定能成？仍不敢保證，想想五十多年前，我們從收音機進步到電視、電腦、手機、iPhone、雲端技術、智慧型機器人、發展何其快速！奈何最重要的能源，卻舉步維艱！

二、裂變核能

自然界中可用於裂變核能的礦藏，只有鈾和鈾，不算太稀有的元素，主要靠吸收中子引發分裂，放出大量的輻射能，因為中子不帶電，不受庫倫位障影響，不需先有超高的震盪溫度，因此裂變是容易達到的。自然界各種同位素存在的量主要由它的半衰期決定，半衰期愈長存在量愈多，愈短愈少甚至早已衰變消失了，天然鈾含三種同位素： ^{238}U (99.28%)半衰期 4.468×10^9 年、 ^{235}U (0.715%)半衰期 7.038×10^8 年、 ^{234}U (0.0058%)半衰期 2.455×10^5 年，其中可以直接用於裂變，提供能源的只有 ^{235}U ，故天然鈾需要濃縮，在壓水式反



應爐中，只需 ^{235}U 濃度約2%到4%。天然釷只有一種同位素 ^{232}Th ，半衰期 1.405×10^{10} ，其與 ^{238}U 皆不能直接用於反應爐中提供能源，但可以經吸收中子後轉變成 ^{233}U ，其與 ^{239}Pu 皆為可用核燃料：



^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 都是裂變核燃料，具有很高的分裂截面，當吸收中子後若分裂，則每一燃料核能放出約200 MeV的能量，也包含2到3個中子，在反應爐中，中子被減速，及被包圍爐內原件周圍的石墨體所反射，若平均再有一個中子可以造成分裂，則達到連鎖反應的臨界點，控制在此臨界點，就能源源不斷獲得能量供給。

裂變反應爐種類很多，有輕水式、重水式、氣冷式及滋生反應爐等，最常見也是發展較成熟的是壓水式反應爐，其為輕水反應爐的一種（另一種為沸水式）。其反應爐的基本組成包括燃料棒、減速劑、控制棒及冷卻劑等。壓水式反應爐特點是以水為冷卻劑及中子減速劑，發電過程採用兩套迴路，可避免核分裂所產生的放射線物質損壞發電設備。主迴路當中，冷水經過爐心加熱加溫約 315°C ，但受到高壓（約15 MPa=150 atm）而不會成為蒸汽，此高壓熱水送至蒸汽產生器，把熱量傳給次級迴路的水後，降溫成較冷的水再送回爐心循環運作，而次迴路的水則被加熱成蒸汽，以推動蒸汽渦輪發電機，用過的蒸汽經海水或河水冷卻為液態後重複使用，燃料效率約可達30%。

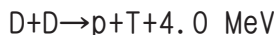
比起聚變（核融合），裂變（核分裂）是容易多了，至今裂變反應爐早已在各處運作，只是人們一直對它懷有戒心，一是控制問題，因為裂變反應爐，必須控制在恰好的連鎖反應臨界點附近運作，若有重大疏忽可能造成爐心融解成龐大的一團沉於爐底，陷於數千度高溫與強烈的輻射籠罩之下，任何機件靠近即被摧毀，數千年也沒法化解，只有使用巨大厚重的混凝土籠罩住它，至少在其方圓20餘公里範圍，劃歸野生動、植物區，人不得居住；第二是核廢料處理問題，廢料分強放射性的乏燃料，及受到輻射汙染與被中子活化的低放射性物件，其中乏燃料不准一般國家任意碰觸，成為令人聞之色變的核廢料；第三是乏燃料再處理問題，一般反應爐用掉的能量只有很小一部分，絕大部分仍藏在高放射性乏燃料裡，不斷的再處理可以不斷的繼續再使用，只是再處理後的燃料，也是原子彈的彈藥，一旦開放核廢料再處理，必定造成核武全面擴散，恐怖的世界末日很快就會降臨，才是真正令人擔心的事。

五、對撞循環核融合



核融合能是個好辦法，根本解決能源問題、容易控制輻射汙染、雖有核廢料需隔離、但無棘手的乏燃料問題、直接用於大規模毀滅性戰爭的難度高、可以讓世界維持更長久的和平、可以讓人類有較多的時間研究浩劫重生或尋找機會往外星拓展，當新世界一一出現，奇蹟景象嘆為觀止。先看看有哪些曾經做過的嘗試還值得再試，磁捏縮與雷射核融合太過複雜、精密，光是要達到熱核融合的條件就令人卻步，其它幾種融合方法也很難著手。所幸從最早期的碰撞實驗中，也許加以改進可以一試，經反覆構思後在此提出，名之為「對撞循環核融合」，其運作流程概述如下：

已知最容易達成的融合反應依次有：

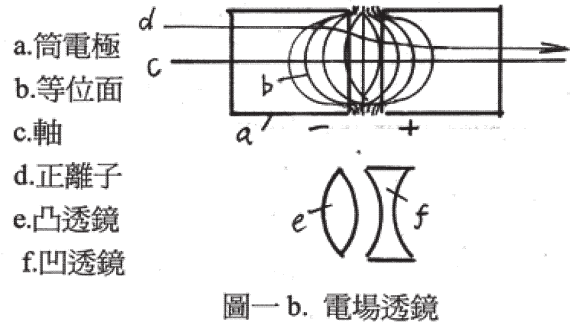
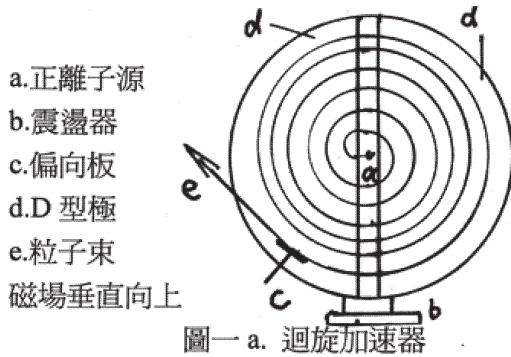


其原料包含氘(D)、氚(T)、氦3(${}^3\text{He}$)。其中T與 ${}^3\text{He}$ 很難取得，並極為昂貴，因此先以D-D反應為主。一D核直徑約 $1/10^{13}$ cm，若具有100 MeV的能量，射入直徑1 cm的區域而與另一D核碰撞融合的機率大約為 $(1/10^{13})^2=1/10^{26}$ ，如此微乎其微的機率要能增加到有意義，一種方法是精確射擊，以縮小碰撞區域，但這即使增加了10倍的精度也無濟於事；另一種方法是增加被撞擊的數量，若供給一莫爾的D核，質量2克，數量 6.02×10^{23} 個，碰撞融合機率成為0.6%，這是個有意義的數字，若同時如上述，增加數量與縮小區域則機率約可增加到6%，這給人很大的鼓舞，或許碰撞核融合並不像許多專家學者所認為的那麼渺茫。但仔細看又沒那麼樂觀，因為不可能大量的D核都排在一個小面積上當靶。若分成前後許多層，那麼通過前一兩層，就可能因受附近正電荷相斥而偏離出撞擊軌道，失去融合機會。另外當一束束D核射出時，D核之間也會因同為正電而排斥，很難聚成細束。想想問題還真多，因此必須巧妙布局，並設法解決各項問題，經不斷試驗與改進後，或許才有最終成功的希望。

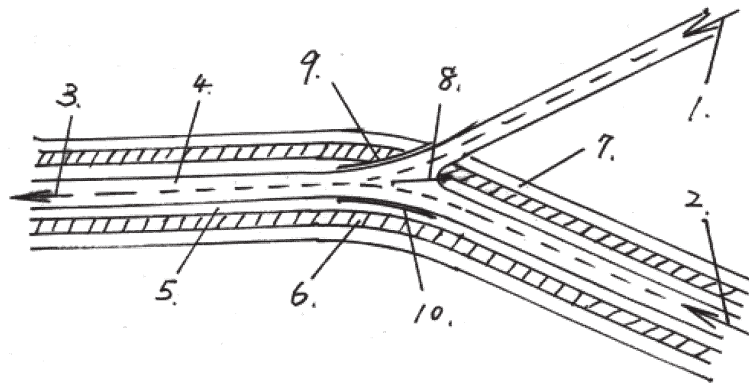
一、對撞循環

其結構如圖一所示：包含加速器、電場透鏡、電流線圈、電極導片等。

- (一)迴旋加速器：如圖一a. 為其俯視圖，由兩個中空的半圓形對稱導體做成電極，開口在直線裂縫邊緣，裂縫處由絕緣體封閉，並連結兩半圓成一個大圓餅狀，內部抽真空，外部連接電子振盪器，兩極間電位差造成電場，此電場呈現於裂縫處，不會進入半圓電極中空的內部，此裝置置放於電磁場中，磁



- 1.入射離子束
- 2.循環離子束
- 3.合併離子束
- 4.真空管道
- 5.內層水道
- 6.電流線圈
- 7.外層水道
- 8.陽極導片
- 9.陰極導片一
- 10.陰極導片二

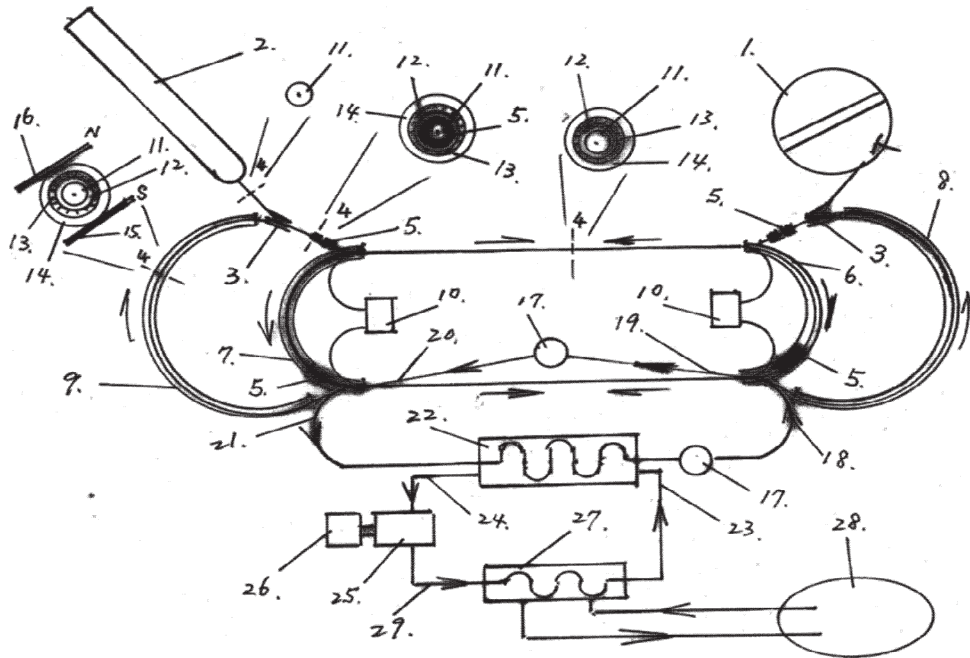


力線方向垂直向上，貫穿半圓電極內部，中央S為離子源，射出陽離子後受電場加速奔向負極，同時受磁場作用而偏轉成圓周運動，配合電極震盪，不停的供應離子源，就能一束束不斷的供給出離子射束。

(二)直線加速器：為在一線型抽真空的管內，排列一些電極環組合，用來提供加速電場。

(三)電場透鏡：電場透鏡與磁場透鏡通常用於電子顯微鏡中，可將電子束聚焦，如同光學顯微鏡中將光束聚焦的透鏡一般。

(四)電極導片：參與對撞後，除少數正離子進行核融合外，其餘須再循環，並與由加速器補充而來的新正離子合併，在同一個真空管道中行進，並準備再對撞。來自不同方向的新舊正離子束，無法靠磁場或其他方法合併，只能設計一種電磁導片，由電場的作用導引至同一個方向合併在一起，如圖一c. 所示，如同在一個三叉路口置放三片電極導片，其中陽極鑲在正中央，一邊為陰極一導片，用以推導加速器所釋出的正離子束，其電位大小須視正離子質量速度與彎道角度進行調控。另一邊為陰極二導片，用以推導循環而來的正離



1.迴旋加速器。2.直線加速器。3.電極導片。4.各斷面圖。5.電場透鏡。6.磁場 B_1 方向向上。7.磁場 B_2 方向向下。8.磁場 B_3 方向向下。9.磁場 B_4 方向向上。10.真空與雜質抽機。11.真空離子通道。12.內層水道。13.電流線圈。14.外層水道。15.S磁極。16.N磁極。17.幫浦。18.低溫水入外層。19.中溫水出外層。20.中溫水入內層。21.高溫水出內層。22.蒸汽產生器。23.二迴路循環水。24.高溫蒸汽。25.蒸汽渦輪機。26.發電機。27.冷凝器。28.冷卻池。29.低溫蒸汽。

圖二. 對撞循環核融圖

子束，其電位大小視循環而來的正離子平均動量及其所須變動的方向度進行調整。

如圖二. 所示，迴旋加速器、直線加速器分別加速D核，兩台加速器加速的能量可以不同，但須使每一D核具約100 keV以上能量，由兩端同時射出後，經電極導片導引方向，電場透鏡加速及收縮，再經磁場偏轉進入一直管內對撞，電場及磁場須配合D核方位與速度精確微調，經歷的所有管道須抽氣成真空，兩束D核才能準確對撞，為防D核受斥力散開或撞擊器壁損失能量，所經管道皆纏繞線圈，通大電流以造成順管道軸心的磁場，此磁場使D核在管線內呈螺旋前進，以增加碰撞融合機率並減少損失。每次對撞只有部分能夠融合，大部份錯過對撞機會的D核到達直管另一端，再受到磁場而偏轉，會先遇到真空與雜質抽氣機，將碰撞後的產物及速度太慢的粒子抽出，其它高速粒子經電場透鏡加速及收縮及受到磁場偏轉至另一段直管，兩直管結構相同且相互平行，D

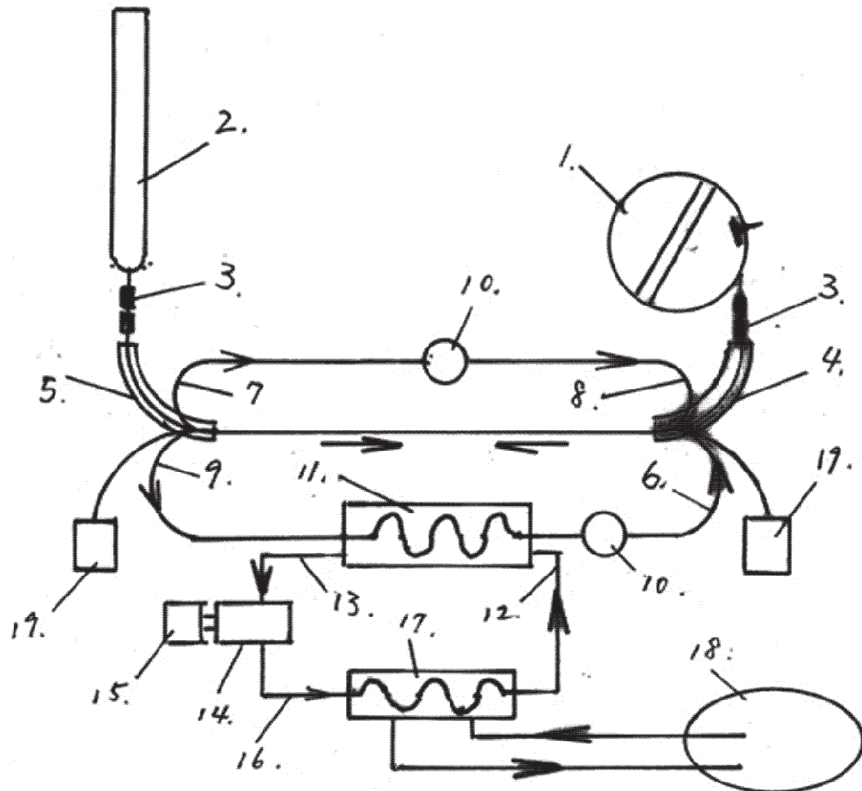


核再度相互對撞，仍然會再有部分對撞融合，其它錯失對撞機會的D核，會再到達直管的另一端，因受到邊緣磁力作用稍有歪斜，此時也會遇到真空雜質抽氣機，將碰撞產物及慢速粒子抽出，高速粒子再受到另一極性相反的磁場作用，而向原來的位置偏轉，在進入原直管之前，須經電極導片與加速器視對撞融合消耗量，持續補充而來的D核合併前進，並由電場透鏡加速與收縮後再進入直管對撞，此外還需安置各種感測器，以利控制調整，如此循環運作，不斷提供出融合能量。

此融合能造成的高溫，由循環水流冷卻，並將熱能取出，水道分為兩層，冷水先流過所有環路的最外層，再由高壓幫浦送進內層，此內層位於D核經歷的抽真空管與纏繞之線圈之間，水流流速的控制視溫度與壓力而定，此水流吸收核融合所釋

出的熱能成為一次迴路的高溫、高壓水，經熱交換器將熱能傳給二次迴路的水，降溫、降壓後循環利用。此二次迴路水會成為水蒸汽，送入蒸汽渦輪機與發電機組發電後，成低溫、低壓蒸汽，經冷卻後，亦再循環利用。

為節省能源，所有用於電與磁的導線，若有可能最好成為超導狀態，



1.迴旋加速器。2.直線加速器。3.電場透鏡。4.磁場B₁方向向上。5.磁場B₂方向向下。6.低溫水入外層。7.中溫水出外層。8.中溫水入內層。9.高溫水出內層。10.幫浦。11.蒸汽產生器。12.二迴路循環水。13.高溫蒸汽。14.蒸汽渦輪機。15.發電機。16.低溫蒸汽。17.冷凝器。18.冷卻池。19.真空與雜質抽機。

圖三. 對撞核融合簡化機構圖



以減少電阻耗能。

二、簡化機構與探測

若要實作並測試此對撞融合的設計，花費很大，又無成功把握，通常應先利用數學與電腦精算模擬，以提供較佳之組合形式，並判斷結果值不值。在此設想一種較簡單的驗證與偵測方法，或許能快點確定這種構想的優劣及是否最終能夠邁向成功。此簡化的機構如圖三. 所示。

此簡化機構大致上只是將原機構減半，並小型化，不再循環碰撞，以方便分析與測試並利於改進。同樣有迴旋加速器、直線加速器分別加速D核，由對稱的兩端同時射出後，經一電場透鏡加速及收縮，再經磁場偏轉進入一抽真空的直管內對撞，管道亦纏繞線圈，通大電流以造成順管道軸心的磁場，使兩束D核在管道內呈螺旋前進相互對撞，部分將造成核融合，其它則分別奔向直管的另一端，兩端各有一台真空與雜質抽機，收集管端全部氣體導入回收機構，檢測、分析與分離後，D核供繼續利用。冷卻水亦分為兩層，這以下部分至蒸汽渦輪發電流程與圖一所示相同。所有各處皆需安置各種探測器以記錄各項參數。

此簡化機構最大的功能，是容易調變各項作用因素，或更換部件。由探測器測到的各種曲線，找出最佳數據值及其所對應之參數，以探討改進辦法，及最終可行性評估，若確認具某種實用價值，再行細部設計與完整構建，並再做整體測試與改進，以確定是否如願。各種調變包括：

- (一) 兩台粒子加速器分別加速D核，使每核能量由50至500keV逐漸變化，若其它元件參數固定，僅偏轉磁場相應變動，由對撞融合率及所加速的能量變化曲線，加以記錄，並觀察受加速的D核供應量若改變，對曲線變化的影響，以方便找出最佳能量數值組合。
- (二) 電場透鏡的圓筒直徑、間隙與兩極電位差，同樣在其它因素不變下，做調變或更換，以找出最佳收縮比、對D核的增速量及對撞融合的效益量。
- (三) 調變真空直管繞線圈的電流，造成管內磁場強度變化，使D核呈螺旋前進對撞，繪出此種作用變化的能源效益提升曲線，並找出最佳值。
- (四) 調整並更換真空直管斷面的形狀、大小與長度，觀察對對撞融合及對抽取雜質的影響。
- (五) 其它，如真空抽氣機的力度、冷卻水的安置與流動、蒸汽渦輪發電採沸水或壓水、一次循環或二次循環、管路的材質、各種探測器的安裝、輻射(主要為中子)洩漏與對各管路元件的破壞、對撞後其它未參與融合的D核，離開真



空直管的平均能量與離散狀態、雜質的成分、發電的情況等，都需要一再試驗、記錄與改進。

三、預測與展望

如果兩D核碰撞融合，平均可以釋出3.65 MeV的熱能，而此機構所付出的電能，包括加速、收縮、電場、磁場、抽真空、超導冷凍、水流幫浦等，平均算在每一D核上為365 keV，兩核則為730 keV或0.73 MeV，佔釋出能量的20%，那麼此對撞融合機構，D核的融合機率至少要有20%，輻射熱能與輸入電能之比也就是能源倍增率Q才能達到1。通常蒸汽渦輪發電機效率約30%，則幾乎要達到100%的碰撞融合機率(實際上不可能)，至Q=5，才有一些剩餘的能量輸出，且代價非常昂貴，且這種方式永遠無法靠點火後注入燃料，就能自動融合，並提供源源不斷的能量。由此看來這項嘗試就算成了也沒有實用價值。

但也不盡然，此項裝置如果改為氘與氚的融合反應： $D+T \rightarrow n+{}^4\text{He}+17.6 \text{ MeV}$ 。則比氘與氘融合反應更容易達成，且釋出的能量也將高達近10倍量，若D-D融合之Q值能到達1，D-T融合Q值便能達到10，除供給自身運作外會有一點能量輸出，T的價格很高，就算再經過更多改進，Q值真能達到10，此項工程提供的能量代價仍然太高，不如乾脆利用太陽電磁算了。也就是說，若熱核融合不成，這項方案也不會有多少替代價值。

此對撞循環核融合若經測試改進，在D-D反應下Q值達到1上下，這是較有可能期待實現的推測，也就是約20%的核燃料獲得融合反應，80%核燃料因一再擦撞，偏離軌道並損失能量，最後連同雜質被一併回收處理，若無重大突破性辦法，換成甚麼燃料，看來都沒用，此法也終將被判淘汰。但也不用灰心，總有它適合利用之處，那就是在月球上，就地開採氦3以供此機構D- ${}^3\text{He}$ 對撞循環核融合反應。月球特點為離地球最近，赤道傾角6.68度，自轉週期27.32天，表面重力是地球的0.17倍，幾乎沒有大氣，核心已凝固，缺磁場保護，日光與輻射強烈，沒有火山，隕石及隕石坑多，塵埃顆粒尖銳，表面日夜溫差懸殊，白天高溫200℃以上，夜晚或陰影區低溫零下100℃或更低，極區附近地層下可能有少量水資源，各種天然無機礦藏與地球類似，有豐富的氦3能資源，必須優先提取，有能源才有可能推動其它的發展，但由於從來沒有過形成過大量的水循環，各種礦藏無法搬運會聚，開採與提煉成本都很高，若移居月球，各種資源絕大多數需要回收再利用，尤其重要的水資源，並且也需要從水中提取氘，或尋找含氫與含氧的化合物加以提煉與合成，若有不足的部分，需由地球運補。



雖然以上述碰撞循環核融合發電，大部分消耗於維持自身之循環，只有少部分提供他用，代價頗高，但比地球上值得，一方面月球上氦3資源豐富，另一方面月球無大氣調節，無太陽照射或陰暗處溫度異常冷，需要大量熱能暖房、維持機件運作及維持人與植物等生命體生存，因此在地球上認為是造成氣候暖化的廢熱，在月球上都是珍貴的能源，如此看來幾乎所有核融合能都是有用的，月球上正是它施展身手的好地方！

陸、結論

一般認為核融合的燃料－氫的同位素等，到處都是，宇宙外星更多的不計其數，只要受控試驗或商業運轉成功，便會有取用不盡的廉價能源。雖然受控核融合已研究了五十餘年，至今未能實用化，但每個人都認為距離成功已不遠，一旦點火成功，就像微型原子彈點燃微型氫彈一般，只要一點一點供給燃料，靠前一份融合的高溫就能持續受控融合下去，跟我們使用瓦斯爐一樣多麼方便，其能源倍增率不止30倍、50倍，而是300倍、500倍或無限多，能源問題徹底解決後的世界，就像小時候聽的神話故事，真是太美了。

受控熱核融合若實用化成功，只要在啟動時點火，之後就能靠核融合自身放出的高熱、高溫點燃後續提供的燃料。這也許是科學家為了安撫納稅人所勾劃的願景，實際上在核融合區域內會有高溫、高壓，將周圍所有物質爆散開去，地球上沒有像太陽那般強大的重立場，可將散開的燃料或新燃料再聚集，因此必須一次次依賴很多外加能量，將新燃料從新點燃。除非周遭充滿核燃料，利用慣性作用在爆散前瞬間點燃，全面核融合如氫彈爆炸，但慣性作用時間與空間也是有極限的，否則整個太陽中心點燃核融合，傳遍整個太陽一次炸開，哪還有太陽存在。它的極限是多呢？曾經有過最大氫彈試爆，威力達七、八千萬噸TNT當量，應該已接近一般狀態下的慣性極限了，作用範圍百餘公里方圓，若用於戰爭，最大的都市也瞬間灰飛煙滅。最小的核融合，只包含兩個氫同位素，作用範圍只有原子或分子大小，放出數個MeV微小的能量。在受控狀態下，只能容許很少量的核燃料融合，溫和釋出能量，仍必須先將融合後的產物連同能量快速取走一大部分，降溫、降壓後，才能在預定範圍內注入新燃料，再供應外加能量升溫、升壓造成新一輪的核融合。或者在前一輪造成的高壓下，以高能粒子強行撞入，進行持續再融合。不論如何總需要不斷供應很多的外加能量，才能進行受控核融合反應的持續運作，能源倍增率有30~50倍已非常理想，再多的恐怕只有聽故事了，所付代價非常昂貴，因此提供的方便能源不可能很便宜。



對撞循環核融合最後有無可能發揮實用價值？並無把握，只能說它是一種花費不算很大、技術不算很尖端、安全度很高、測試時間不長、體積也可以不大的一種構想，運氣好的話，也許能幫助很少數人將來往月球建立一個基地，或飛往其他外星去延續一絲人類文明，它本身並阻止不了紛爭，只能轉移眾人的部分注意力，仍要配合推行節能減碳，以延遲人類可能自相毀滅的時間機率，再盼望受控熱核融合實用化研究或其它更好的核融合方法，及時獲得突破性成就，並提供能被眾人普遍接受的能源價格，或能扭轉這老是懸在心中的末日夢魘。

參考資料

1. Roger A. Hinrichs、Merlin Kleinbach著，黃文良譯，「能源運用及環境」，新加坡商亞州聖智學習國際出版有限公司，2013. 1.
2. Richard A. Muller著，蔡承志譯，「給未來總統的物理課」，漫遊者文化事業，2011. 12.
3. 華健、吳怡萱編著，「能源與永續」，五南圖書出版，2009. 12.
4. 楊永盛、陽慶宗著，「電子顯微鏡原理與應用」，文京圖書有限公司，1975. 9.
5. 賴耿陽編著，「能源轉換學」，復漢出版社，2000. 4.
6. 井上信幸、芳野隆治著，鄭宇淳譯，「圖解核融合能源」，世茂出版，2006. 9.
7. 劉慶成、賈寶山、萬駿編著，「核科學概論」，哈爾濱工程大學出版，2006. 7.
8. Frank Shu著，國立編譯館主譯，「物理學宇宙-天文學導論」，明文書局，2001. 9.

作者簡介

兼任副教授 史堯年

學歷：空軍官校63年班、國防理工學院航空工程碩士，經歷：空軍官校航空機械學系講師、副教授、系主任。現職：空軍官校教學部航空機械學系兼任副教授。

兼任副教授 汪仁虎

學歷：空軍官校63年班、國防理工學院物研所碩士，經歷：空軍官校通識中心數理組講師、副教授。現職：空軍官校教學部通識中心數理組兼任副教授。