



核能科技

探討永續核能之新科技

史堯年 汪仁虎

提

要

做任何事都要消耗能量，能量充分可做更多更大的事，短缺則必須省略許多耗能的活動，短缺太多會致使生活水平倒退，甚至大多數人都無法生存，而過分充裕的能源不但助長野心，也可能因為濫用於戰爭，最後將文明一夕摧毀，因此能源的發展與供求一定要拿捏恰當，才能維持一個繁榮與和諧的世界，本文探討一種核能反應爐，利用核裂變與融合原料相輔相成的作用以提供持續的能源。

壹、前言

能源分再生與非再生，再生能源是最古老的動力來源，包括樹木、風力、水力、陽光、浪潮等，都是來自於太陽，經自然轉換而生，不論利用與否，最後都會成為常溫熱輻射由地表散失出去，這類能源總量很大，但分佈不均、稀薄、除水力外利用成本很高，目前佔能源產率不高，因為較無污染，故頗受鼓勵開發。非再生能源包括煤、石油、天然氣等化石燃料，及核能等，化石燃料或稱有機燃料，由數億年生物遺體累積而成，是目前使用最主要的能源，缺點是儲量有限並會放出二氧化碳等污染，造成溫室效應。核能分融合式與分裂式兩種，融合式能量巨大，但控制處理技術先進，會是未來的動力主流，分裂式的缺點有輻射廢料問題。

貳、主要能源

Q為能源大單位， $1Q = 293.1 \times 10^{12} \text{kWh}$ 。太陽在地表面受地理環境及季節影響差異很大，大約每日、每 m^2 可提供5000 kcal輻射能量，大氣層外較不影響為28750 kcal，因此利用太陽能最好是在太空中用太陽電池發電。全球水力若充分開發，約



每年提供0.1Q，其他地熱、潮汐、風力、生質能等供給量都有限。化石能源主要有煤、石油、天然氣等，煤所含的熱值約7200 kcal/kg，可開採的儲量估計約有80 Q，石油10600 kcal/kg，天然氣5000 kcal/m³，兩者合計儲量約10 Q，今天世界每年能源消耗量超過0.6 Q，如果全部使用再生及化石能源，約可再維持180年，但約40~60年內，石油與天然氣將陸續耗盡。

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百萬倍以上，而氫融合能又是鈾分裂能的約四倍，地球上可開採的資源量，可用於目前一般熱中子裂變反應爐的主要原料²³⁵U，只能提供約2.5 Q，如果使用快中子滋生反應爐，以²³⁸U、²³²Th、²³⁹Pu及²³³U為燃料則可提供能量達1400 Q，足供人類使用兩千年，再若受控核融合發電能實用化，更將供應長達數億年，是根本解決能源的方法。

受控核融合發電不排放二氧化碳，不產生溫室效應，也沒有高輻射性的廢料處理問題，是很好的獲取能源方法，早在50餘年前受控核融合的競賽就開始了，至今已有不錯的展現，每次融合獲得的輸出能量也已經與輸入相當，但離實用階段仍然遙遠，主要因為兩個氫原子核都帶正電彼此排斥，融合要有很大的互撞動能，不論以磁場捏縮或雷射驅動方法都在幫助其克服此庫倫位障，但因一摩爾氫同位素原子核一旦融合，會產生很大能量將周圍物質全部爆散出去，致無法連續供料維持自行燃燒，而必須不斷重複供料、點火與爆散的過程，輸出的動能用於發電，必須先提供此點火所需龐大之電能，剩餘的才能供給他用，也就是說輸出能量要比輸入大約四倍以上才有實用價值，看來恐怕再50甚至100年也未必成功。

相形之下控制裂變核反應就容易多了，因為裂變燃料主要靠吸收中子引發分裂，而中子不受庫倫位障影響。天然鈾含三種同位素：²³⁸U（99.28%）、²³⁵U（0.715%）、²³⁴U（0.0058%），其中可以直接用於裂變提供能源的只有²³⁵U，故天然鈾必須濃縮，在原子彈中須濃度達90%以上，在重水式反應爐中可不必要濃縮，一般熱中子輕水式反應爐中濃度約2%~5%，有些核艦使用濃度甚至高達40%以上，因此很快²³⁵U就會被耗盡，剩下仍具有百倍量能的²³⁸U與極少量由²³⁸U吸收部份中子後衰變而成的²³⁹Pu，及儲量比鈾大三倍的²³²Th，這些巨大能量的提供，只能依賴於核廢料再處理並取得²³⁹Pu的快中子滋生反應爐了。

參、能源危機

民生與工業所用的能源，用在戰場上就成為軍火，巨大核能搖身一變就是極端恐怖的核武，核武燃料同樣包括鈾、鈷、銻及氫的同位素，點燃核武也是依賴²³⁵U與²³⁹Pu吸收中子後的裂變動能，今天只要4 kg的²³⁹Pu就能點燃一枚巨大核彈最令人擔憂，一些核大國早已熟練各種方式的提煉、濃縮、再處理、滋生反應爐發電等技巧



，並取得各種元素同位素在不同輻射刺激狀態下的反應性質等數據，但為求核技術的壟斷及避免核武擴散危險，因此處處防範，關鍵資料不會輕易公佈，且對其它地區可能的濃縮及再處理行為嚴密監控及嚴格處罰。這種方式短期有效，長期十分危險，一些處心積慮者仍有辦法一朝加入核武大國之列，尤其當石油天然氣逐漸枯竭，若核融合仍未能實用化，一般輕水式核反應爐也已耗光了 ^{235}U ，再生能源代價高昂且遠不能滿足需求，許多資源匱乏、人口稠密地區被逼往絕境，垂死掙扎者還有什麼好顧慮的？只要有燃料都會利用，尤其難以抗拒隱藏巨大能源的核廢料，因此各種同位素提煉、濃縮、再處理、滋生反應……會如雨後春筍到處蔓延，核武器也就同時無所不在，末日可能隨時如寒冬般籠罩而來，且更嚴酷千萬倍，結果定不堪想像。

肆、設法脫困

任何節能、提高效率與開發新能源的方法都值得鼓勵，由於根本解決之道仍在利用那巨大又無窮的核能，故從核能利用逐漸改善會是最好的發展方向，若能綜合各種反應爐材料成分與運作，詳加計算、設計與驗證，以提供更多的核能，或可與其他方法一起幫助延長國際上以合理價格供應能源的年限，並避免核武之快速擴散，增加核融合發電實用化及找尋其他能源所需更充裕的時機。

目前的快中子滋生反應爐核心燃料為鈾，用鈉為冷卻劑，可以很快的從核心移出熱能，對中子的減速效果很小，大量的 ^{238}U 與鈾燃料棒相間隔插入核心及置於爐壁，吸收及反射分裂產生的快中子及中速中子，能量在1.1 MeV以上的中子可使 ^{238}U 分裂，放出200 MeV以上的能量及2.5到3個中子，吸收其它能量的中子則使其逐漸轉變成鈾，並加入成為新的燃料，若在一次循環期間，每燃燒一個鈾可以再產生一個以上新的鈾，如此一代代循環滋生及再處理利用，是很不錯的供應方法。

中子按照其能量分：慢中子 $E < 1 \text{ keV}$ 、中速中子 $1 \text{ keV} < E < 500 \text{ keV}$ 、快中子 $0.5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$ ，慢中子中能量為0.025 eV的稱為熱中子，此為與環境達熱平衡下的中子能量，中子一般能量愈小愈容易被核吸收，因為能量小速度慢，與核的引力作用時間長，約大於 $1/10^{22}$ 秒，且動能小再脫離的力量也小。原子核一旦吸收中子後將形成激態的複核，失去原有的穩定度，通常發射微小粒子以趨向新的穩定態，也可能在瞬間（ $1/10^{15}$ 秒）分裂成兩三個不同的原子核，同時放出一些 α 、 β 、 γ 或中子等射線。核反應的機率通常以截面 σ 來表示，其單位 $b = 1/10^{24} \text{ cm}^2$ 。各種元素同位素對不同能量中子的吸收截面及吸收後的各種變化皆不相同，滋生反應爐主要能區為快中子，核心燃料若換成 ^{238}U ，主要欠缺為 ^{238}U 每次分裂放出2.5個中子，較 ^{239}Pu 的2.9個為少，且吸收快中子後產生裂變的比率很低，這些欠缺難以彌補，



故 ^{235}U 不適合這種快中子滋生反應。

一般熱中子核反應爐包括一個由金屬材料製成的大保護罩，套住核反應器與蒸發器，並以厚重水泥牆多重保護方式使射線不致外洩，反應器為鋼製耐壓容器，核心部分為濃縮 ^{235}U 或 ^{239}Pu 固態合金，或液態溶液，以鋁外殼包裝成核燃料棒元件，視發電規模共有數十至數萬支，整齊排列於冷卻劑中，元件周圍被石墨製成的中子反射體包圍，可彈回中子以減少損失，許多控制棒間隔的插在燃料棒中，以插入的長度來調節臨界點，控制棒以吸收中子能力最強的 ^{113}Cd 或 ^{10}B 等原料做成。核燃料不會自行裂變，須有少許中子源供給第一群中子，核分裂在 $1/10^{14}$ 秒內產生高能量的迅發中子佔98% 很難控制，而由部分碎片同位素逐漸釋放不穩定能量，從不及一秒到數分鐘內也會釋放約佔2% 的延遲中子，利用此延遲中子才能有效控制核燃料的連鎖反應在臨界點區間。管線幫浦送冷卻劑通過反應器核心，吸收分裂產生的熱能，成為高溫、高壓液態進入蒸發器做熱交換，使管外的水沸騰為蒸汽，而自身冷卻後由幫浦推送再進入反應器循環，蒸汽則由蒸汽管引出屏蔽輻射的鋼罩，推動蒸汽渦輪機與發電機發電後進入冷凝器，冷凝器內有冷水管，抽深海或河川裡的冷水送入，使蒸汽凝結再循環使用，而冷水則成為溫水，排放至河川下游或外海，或經散熱池散熱後重複使用。

核分裂產生的快中子能量約2 MeV、須與氫核碰撞約16次、氖核29次、碳核92次，可使能量降成熟中子，與越重的粒子碰撞能量損失越小，故熱中子反應爐常使用水或重水為冷卻劑，而快中子滋生反應爐則常使用鈉或鉀為冷卻劑，作為冷卻劑的條件還包括小的中子吸收截面、大的熱容量及穩定的化學性質等。

每裂變一個 ^{235}U 燃料產生2.5個中子，所有產生的中子，扣除從反應器逃脫的部分，其他由反應器內所有材料依吸收截面按比例分配，平均每次裂變產生的中子，其中至少要有一個用於維持連鎖反應，另外有的被 ^{238}U 或 ^{232}Th 吸收並衰變產生 ^{239}Pu 與 ^{233}U ，可作為新增加的燃料用於彌補部份燃料的耗損，反應爐不斷運作，裂變不斷產生許多新的元素同位素，使得燃料性質跟著變化，當無法維持供能運作時，則須停爐更換新的燃料棒，用過的燃料棒按規定不得再處理，能做的只有在此一般反應爐運作時設法獲得最多的能量，即找出一種最佳化的方案。

尋找此方案包含收集資料、電腦模擬與運算、實驗證明三個階段：收集包括各種核燃料、減速與冷卻劑、反射體、外套殼、衰變與裂變產物等元素同位素的物理化學性質及其對不同能量中子的各種吸收、反射與裂變的截面值。模擬包括先有幾個大致可行的方案，然後建立一套電腦程式，用於計算在不同劑量、不同組合方式下可以獲得的功率變化、總能量、剩餘材料的成分與數量之數值變化與圖解等，當然也要估算發電的價格成本，以找出最好的組合方案。構想與事實會有許多誤差，驗證可以找出造成誤差的問題所在，甚至發現一些意想不到的新事件，須不斷修正



與再實驗至完善為止。

伍、非再處理核裂、聚變滋生反應爐

核裂、聚變滋生反應爐使用重水為減速與冷卻劑可以減少對中子的吸收，且核心所放出的 γ 射線與氘核反應也會生成中子： $\gamma + D \rightarrow n + H$ 。反應器內添加 ^{232}Th 核燃料棒，當其吸收一中子會衰變產生 ^{233}U ： $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} (\beta 23\text{m}) \rightarrow ^{233}\text{Pa} (\beta 27.4\text{d}) \rightarrow ^{233}\text{U}$ 。對熱中子而言 ^{233}U 作為新增燃料並不比 ^{235}U 或 ^{239}Pu 差，雖然每次裂變放出 200MeV 能量及平均中子數 2.3 小於 2.5 或 2.9，但其裂變截面對總吸收截面之比為 529.1/574.7=0.92， ^{235}U 為 582.6/680.9=0.856， ^{239}Pu 為 748.1/1017.4=0.735，此表示 ^{233}U 所浪費的中子量較少， ^{232}Th 的熱中子吸收截面 7.35b 優於 ^{238}U 的 2.68b，且鈾的儲量比鈾大三倍，價格比鈾便宜很多。提高 ^{233}U 濃縮燃料棒的濃度（最佳濃度須經電腦模擬運算），如此可以容許添加較多比例的鈾，以利衰變成新燃料增加提供能量。燃料棒被石墨製成的中子反射體包圍，但仍有部分中子穿透出去，增加再利用率，又不致耗損有用的裂變中子，可在反射體內再加一稍薄的石墨層（厚度須經估算），且在兩層石墨中間密夾 ^9Be 與 ^6LiD 之合金，其中 ^6Li 吸收中子的截面很大，會產生 T 和 α 粒子： $^6\text{Li} + n \rightarrow T (2.73\text{MeV}) + \alpha (2.05\text{MeV})$ ，T 與 D 相融合的庫倫位障為 0.1MeV，故部分 T 撞擊 D 可相融合（截面小），再產生 α 粒子與中子： $T + D \rightarrow \alpha (3.52\text{MeV}) + n (14.06\text{MeV})$ ， α 粒子被 ^9Be 吸收（截面小），會再放出中子：



T、D、 α 粒子與 ^9Be 原子核都帶正電，彼此庫倫位障很高，當高溫達 10^9C 時粒子間的熱震盪可以全面克服此位障，而常溫下想利用輻射動能達成碰撞融合或吸收的截面都很低，可能只有不超過千分之一的機率，若要真正提高機率以提供更多的核融合能必須另行設法：設計一種核反應器，在其中騰出一個可供融合的作用區域，將 ^9Be 與 ^6LiD 合金製成的許多小珠粒，間隔的由外部向反應器內逐一探進此區域，在器壁周邊開許多小窗口，裝置耐高溫之透光材料，許多高功率脈衝雷射間斷而穩定的射來，分別穿過這些窗口與透光的冷卻劑（輕水或重水）共同聚焦在小珠粒上，其中 ^6Li 因吸收裂變中子而輻射出 T 與 α 粒子，此輻射動能結合聚焦雷射的壓縮與升溫造成的熱震盪能共同作用，較容易使得第一群 T、D 融合及 α 粒子與 ^9Be 融合，因熱震盪能增高則融合機率也會跟著增加，若雷射功率夠高，持續時間夠長，融合後放出的粒子會引發二度融合使能量再增加，如此連鎖反應若能達到使整個珠粒核融合的條件，就會湧出大量的輻射，其中包含可以回饋給鈾、鈾、鈾裂變燃料所需的大量中子，此狀況類似微小規模的中子彈爆發，當此回饋中子大量出現時，可在能控制的臨界範圍內，將 ^{232}Th 以調整控制棒的類似方法適量的逐步添加入反應器內，與 ^{238}U 吸收中子後會漸漸轉變成 ^{233}U 或 ^{239}Pu 裂變燃料以彌補 ^{233}U 的耗損，此稱熱中子滋



生，如此裂變核能與核融合能可以相輔相成，並循環作用以持續提供能源。若要實際驗證此反應器的運作，必有許多困難需要克服，例如在不斷流動的冷卻劑內，如何將比重較輕的 ${}^9\text{Be}$ 與 ${}^7\text{Li}$ 合金小珠粒，依準確的路徑與時間單獨送達雷射聚焦點處或許可在此區域內順冷卻劑流動方向，利用細管深入至焦點旁立即釋放小珠粒，並在雷射發出之前細管須快速退出此區域，且在焦點處應有持續的觀測與控制聯結等系統設施。這種裂、聚變聯合核反應器是否可行與值得嘗試，如何細部設計安排，安全與防護又如何，都須仔細評估，能否達成實用效果，更要經過不斷改進與測試才能確定。

陸、結論

我們要為後代子孫化解他們可能即將遭遇的許多危險因子，就好像前人為我們解決了諸多問題一般，至於更久遠連今日都無法解決的，再留給兒孫輩去設法吧！此法有無效果尚待驗證，然而縱使模擬結果認為可行，也證實從此裂、聚變燃料中確可取出更多的有效能源，可供數百年的需求，仍不免會出現許多核廢料問題，一樣也包含大量的潛在能源並威脅全人類，生命的存續與安全最為重要，為防災變應該及時規範：對所有用過的裂變燃料，即具有高放射性的核廢料，最好能規劃幾處共同的安置區，收集儲存以利監控，待將來外太空科技發展成熟時，若有需要才准許各自運往外星再處理及運用。

參考資料

1. Hans Thirring 著，潘家寅譯"能源"科技圖書有限公司，1979. 8.
2. 鄧光新"核融合能發電"全華出版社，1978. 3.
3. James Howard Kunstler著，郭恆祺譯"沒有石油的明天"商周出版2008. 1.
4. 魏明通"核化學"五南文化廣場，2000. 4.
5. 林清涼"近代物理—原子核物理學簡介"五南文化廣場，2003. 3
6. 蘇英源、郭金國「冶金學」全華科技圖書，2000. 9.
7. 陳冠榮等著，「冶金和金屬材料」化工出版社，2001. 1.
8. 史堯年、汪仁虎「淺論影響國家發展之能源危機與轉機」空軍官校雙月刊第126期，2005.

作者簡介

副教授 史堯年

學歷：空軍官校55期、中正理工學院航空工程碩士，經歷：空軍官校航機系系主任，現職：空軍官校航機系副教授。

兼任副教授 汪仁虎

學歷：空軍官校55期、中正理工學院物理碩士，經歷：空軍官校數理組副教授，現職：空軍官校數理組兼任副教授。