

【從能量看宇宙】

宇宙間物質的本質與運動、聲音、熱、電、磁、輻射、內部結構等特性，和其間的關聯與規律是物理學研究的課題。愛因斯坦狹義相對論的著名公式 $E=mc^2$ 不僅開啟了原子能應用的大門，也昭示著質量與能量之間密不可分的關係。從能量的觀點來看宇宙星辰的誕生與演化和天文物理中各個尺度的研究對象都有關聯，不同數量級大小的能量總是對應著特定的天文物理過程。

能量可以用不同的形式存在，在滿足一定的條件下可以互相轉換，不能無中生有。天體移動與旋轉的動能、重力位能、組成分子散亂隨機振動或熱運動的熱能、電磁場的能量、原子分子的結合能等等都是能量的可能形式。天文物理關心能量的轉換，也關心它們傳輸的過程。太陽一類的恆星如何形成？不透明的太陽核心融合反應所產生的光和熱如何在漫長的歲月裡逐漸的傳遞到星球表面再提供萬物生存所需？太陽表面約 5,800 K 的和煦陽光如何能產生百萬度高溫（但是非常稀薄）的日冕和強烈粒子噴發的太陽風？大質量星球生命末期核心瞬間重力塌縮如何產生比整個銀河系更高能量的爆發？能量的本質又是什麼？真空也有能量嗎？廣義相對論的核心是愛因斯坦方程式。方程式左邊描述的是時空的幾何，右邊則是物質（包含能量、動量等）的分布。知名的相對論學者惠勒（John Wheeler）用一句話來闡釋：時空決定物質如何運動，物質決定時空如何彎曲。物理宇宙學的真空中量子力學的真空對宇宙時空的膨脹有什麼樣的影響？有沒有其他的可能？我們是否真的了解宇宙的組成和它們所遵循的物理定律？

本期我們特地挑選概念上相關的文章，雖然未必能完全解答上述疑問，卻也可以從能量的角度一瞥我們的宇宙。

（作者/金升光）

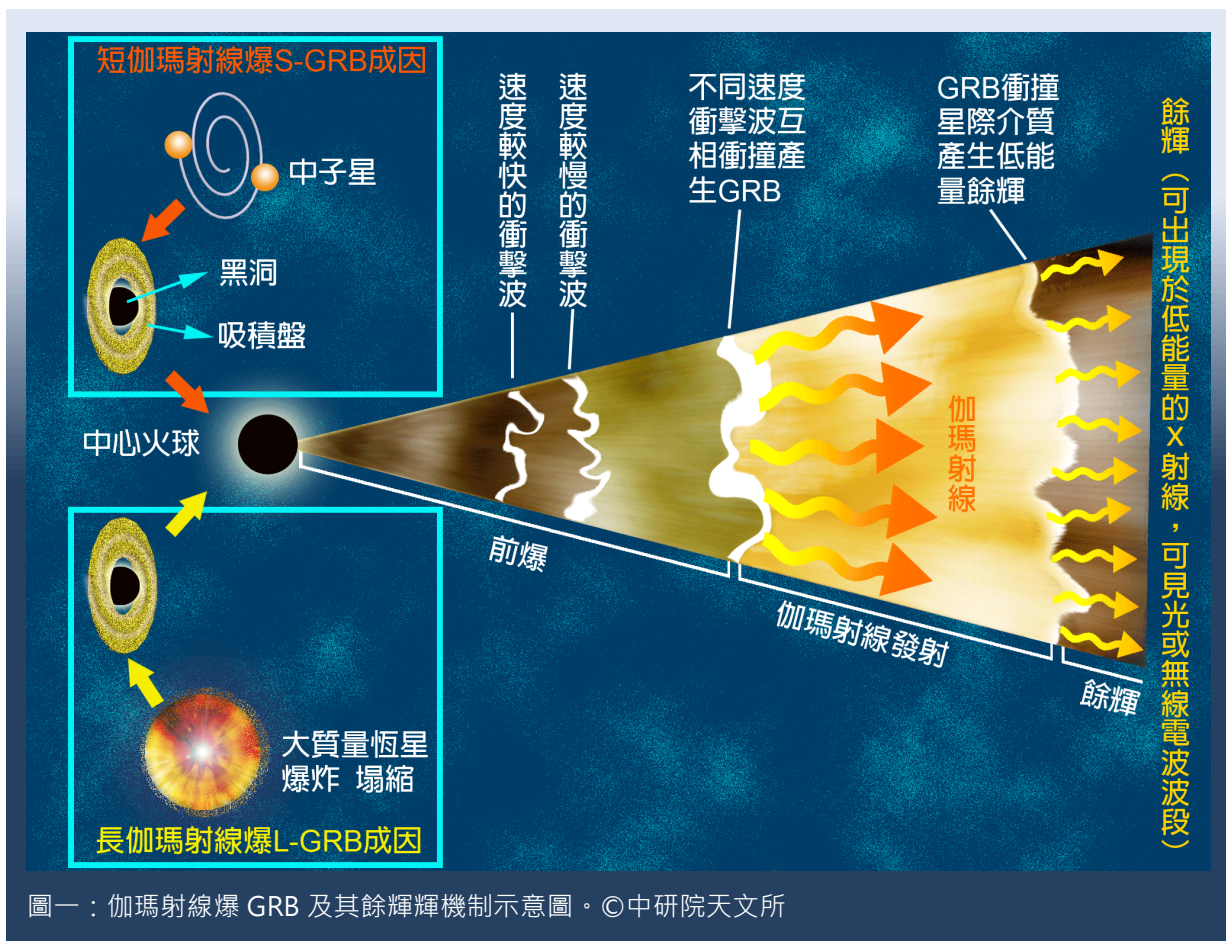


天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【曇花一現的宇宙高能大爆發—伽瑪射線爆】

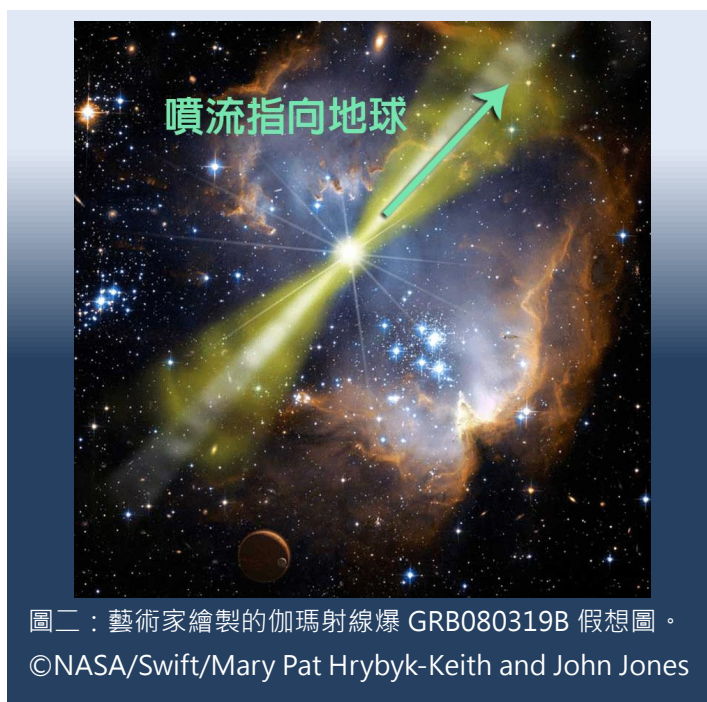
伽瑪射線爆 (γ -ray burst; 簡稱 GRB), 是自宇宙大霹靂以來最高能爆發現象之一, 常短暫出現於高能量 γ 射線波段, 且從未在相同位置重複出現。由於 γ 射線波段的訊號會被地球大氣層吸收, 因此地面上無法直接觀測這些高能爆發, 必須仰賴大氣層外的高能偵測衛星來偵測 GRB。自從 1960 年代末期美國用來監測核爆的船帆座衛星 (Vela) 發現 GRB 之後, 歷經幾十年的衛星觀測, 資料統計顯示每天都有大約 1 至 2 次的 GRB 被偵測到, 而且這些高能爆發可出現在宇宙的任何一個距離尺度中。根據 GRB 在 γ 射線波段持續的時間, 可將其分成兩類: 一是持續時間長於 2 秒的「長伽瑪射線爆」(簡稱 L-GRB), 另一類持續時間短於 2 秒的為「短伽瑪射線爆」(簡稱 S-GRB)。天文學家以偵測到爆發的日期來命名 GRB, 例如: 2013 年 4 月 5 日發生的 GRB, 名為 GRB 130405A, 同一天若有數個發生, 則以加上英文字母 B、C 等, 依此類推。

從 GRB 的亮度和所在的距離, 天文學者估計其所釋放出的總能量比銀河系鄰近的超新星爆炸多出 100 倍。為了解釋這巨大的能量釋放, 理論學者們認為 GRB 應源自體積很小且擁有巨大能量的火球爆發所產生, 爆發所產生的巨大能量集中從火球的兩端釋放, 透過噴流的形式噴出不同速度的衝擊波。噴流中速度快的衝擊波衝撞前方速度較慢的衝擊波後, 即產生高能的 GRB。當噴流的方向正好對準著觀測者時, GRB 即可被偵測到。從兩類 GRB 的觀測, 天文學家推論: 兩類巨大爆發應來自不同物理機制所產生的火球。L-GRB 可能源自大質量恆星在演化末期, 因核心不穩、重力失衡, 塌縮, 進而產生的劇烈大爆炸。而 S-GRB 則是兩顆緻密的中子星、或是中子星和黑洞互相吞食而產生的大爆炸。(圖一)



圖一：伽瑪射線爆 GRB 及其餘輝機制示意圖。©中研院天文所

不論是 L-GRB 還是 S-GRB，其能量皆透過噴流的形式釋放。而這些能量衝撞散佈在宇宙中的星際介質，然後被星際介質吸收並釋放出較低能量的輻射（例如：X 射線，可見光或是無線電波），這些低能輻射被稱之為 GRB 的「餘輝」(afterglow)。餘輝通常可持續較久的時間（約 1-2 天），因此當衛星測得 GRB 位置時，地面上的望遠鏡便得以指向 GRB 位置蒐集詳細的餘輝觀測資料。天文學家也發現大部分的餘輝黯淡消失後，GRB 位置附近皆伴隨出現位在相同距離的某個星系。意味著 GRB 的爆發來自恆星等級的星體，並可能在某些特定的星系中產生。隨著衛星定位技術的進步，加上地面望遠鏡的快速觀測，GRB 研究有了重大的突破。GRB 030329 的地面光譜及光學觀測提供 L-GRB 與超新星的直接證據。GRB080319B 刷新了人類肉眼可見的天體記錄，其視星等最亮可達 5.8(圖二)。GRB090429B 發生在 131.4 億光年外，是迄今地球上所觀測到最遙遠的大爆發。



GRB 的研究歷史雖然僅有數十年，但卻開啟了高能天文物理的新視野。目前，幾乎所有相關研究成果都集中在「L-GRB」。天文學者在研究 GRB 高能訊息及餘輝的演化過程時，藉由理論模型結合觀測結果來探討產生這些高能爆發的極端物理機制、以及 GRB 與周圍星際物質的作用情況。透過 L-GRB 的研究，我們可以瞭解宇宙中極大質量恆星的死亡及新生的黑洞，並進一步找尋宇宙中第一個死亡的星球和最早的黑洞。

(作者/黃麗錦)



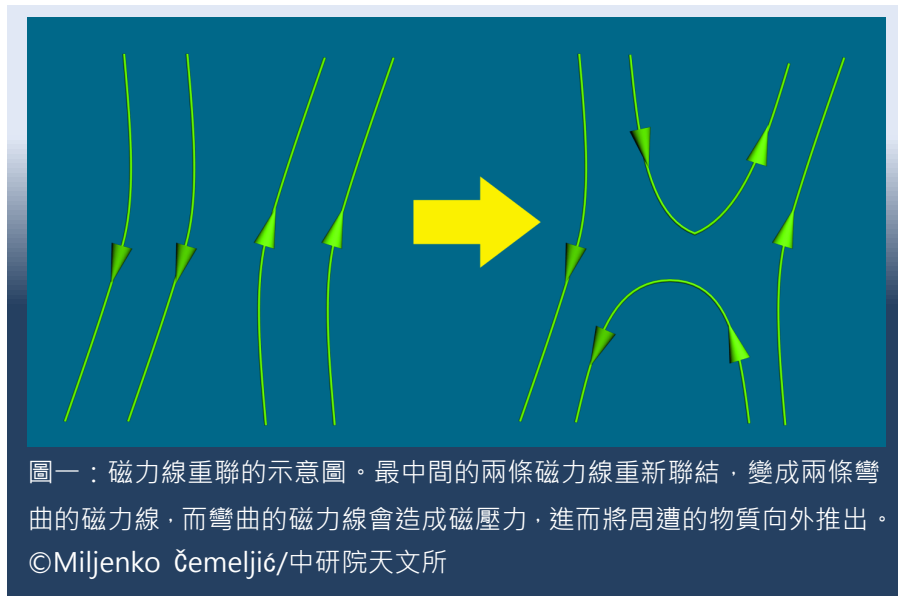
天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【宇宙的能量—磁力線重聯】

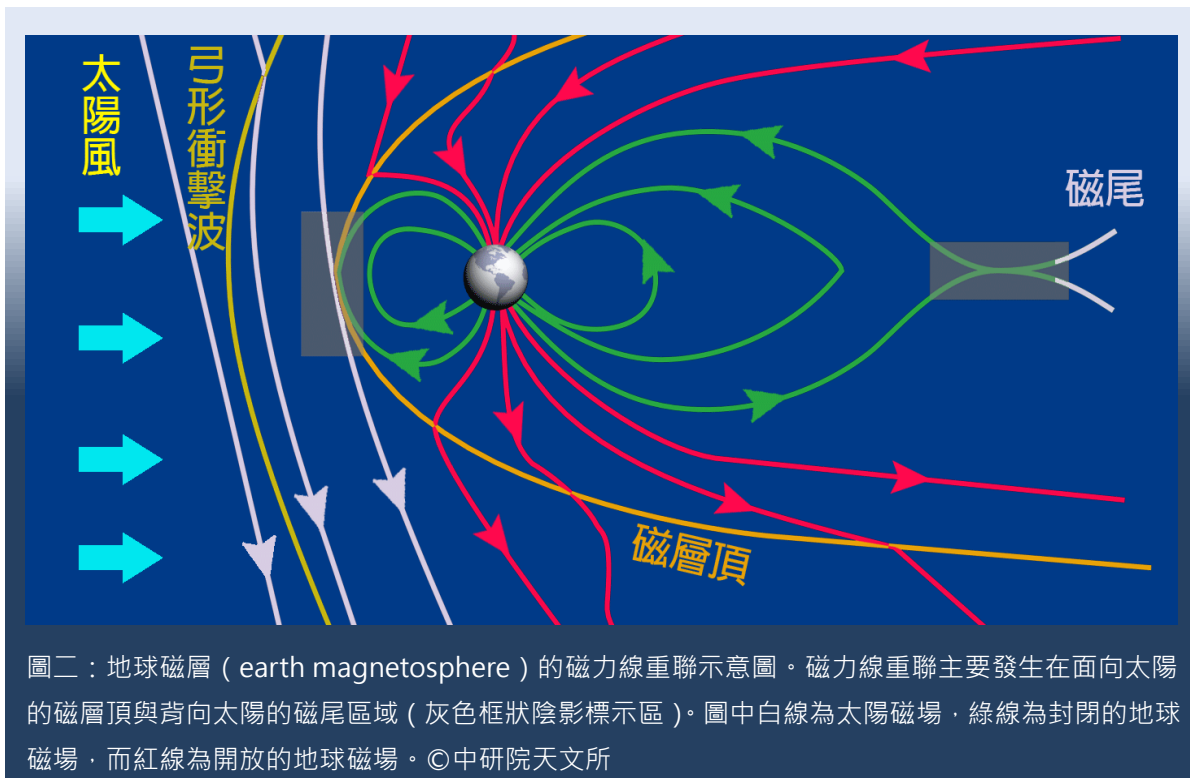
磁力線重聯 (magnetic reconnection) 是磁力線改變聯結方式的過程，其間磁場的能量會被轉換成動能或熱能，進而加熱或加速周圍的電漿。磁力線重聯被認為會發生在不同尺度的各種天體上，如今這個推測已經被觀測證實，而其作用所及範圍之廣，從太陽物理到宇宙學都得將之列入研究

範疇。磁力線重聯最早是在太陽閃焰中被觀測到，及至今日，其相關研究已擴及各領域：例如：恆星形成理論、原恆星的磁場產生及其與吸積盤交互作用的機制理論、中子星和黑洞、天體的熱能-物質-角動量傳輸、恆星形成理論中的紊流磁力線重聯、以及宇宙射線的加速等等。當磁場產生重聯現象時 (圖一)，被彎曲的磁力線就像

是拉長的橡皮筋一樣會產生(磁)張力，受磁力線影響的電漿物質因此被加速推開，其間，磁場的能量就被釋放出來了。



圖一：磁力線重聯的示意圖。最中間的兩條磁力線重新聯結，變成兩條彎曲的磁力線，而彎曲的磁力線會造成磁壓力，進而將周遭的物質向外推出。
©Miljenko Čemljić/中研院天文所

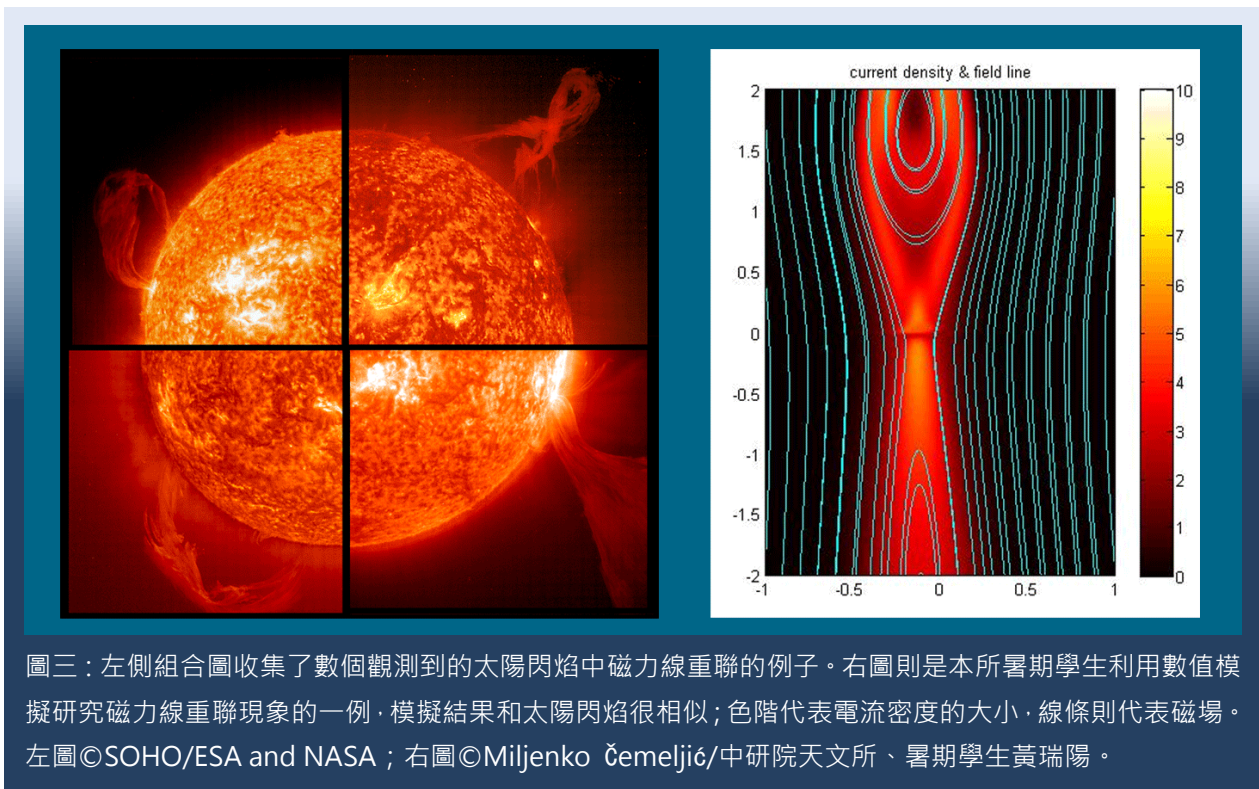


圖二：地球磁層 (earth magnetosphere) 的磁力線重聯示意圖。磁力線重聯主要發生在面向太陽的磁層頂與背向太陽的磁尾區域 (灰色框狀陰影標示區)。圖中白線為太陽磁場，綠線為封閉的地球磁場，而紅線為開放的地球磁場。©中研院天文所

磁力線重聯現象可以在距離我們最近的地球大氣和太陽表面觀測到。和磁力線重聯有關的現象之一就是著名的「極光」：由太陽發出的帶電粒子，通過地球磁場與太陽磁場發生重

聯的區域，然後被地球磁場捕捉，朝地球南北兩磁極加速，撞擊高層大氣原子，產生極光（圖二）。此外，科學家也借助衛星希望精確測量磁力線重聯發生的時機及範圍。例如 2000 年由歐洲太空總署發射、直到 2014 年前仍會執行的 The Cluster 任務，其搭載了測量儀器的四組太空船可以測量電漿在地球周圍的立體空間分布，此任務負責測量向陽側的磁層頂（magnetopause）與背陽側的磁尾處（magnetotail）的磁場尺度。另一個在 2008 年 2 月所執行的 THEMIS 任務，則是由五顆組成衛星負責觀測地球磁氣層於高緯度短暫發生的磁層亞暴（magnetospheric substorms），其收集到的紀錄，證實了磁力線重聯是觸發地球電離層中極光強化的原因。

太陽表面最顯眼的磁力線重聯現象當屬閃焰。在磁迴路中，方向相反的磁場通量（magnetic flux）先是累積，然後再以巨大閃焰的形式釋放出來（圖三），此過程藉由磁力線重聯讓磁場能量直接轉換成動能與熱能。太陽閃焰的觀測結果間接證實了磁力線重聯的發生，卻為最早的磁力線重聯模型（1957 年由 P. Sweet 和 E. Parker 提出）帶來待解的難題。當時這個簡單模型所提到的重聯，是發生在兩組均勻分佈而方向不同磁場之間的一層薄電流層內；此雖然可以成功解釋磁力線重聯的發生，但後來實際觀測到的重聯速度，卻比這個模型所預測的要快得多。



在典型天文物理條件之下，此模型所預測的磁力線重聯速度過慢，而其中磁力線重聯的速度主要是取決於大尺度幾何構造。為此，科學家正在努力研究其他物理模型，想要解釋觀察到的快速磁力線重聯現象。主要修改途徑有兩類。第一類是修改微觀電阻率（microscopic resistivity）並引起較厚的電流層；第二類則是改變幾何構造，進而縮小特徵尺度，這類中最早的例子是 H. Petschek 於 1964 年所提出的快速磁力線重聯模型。

像磁力線重聯這種複雜的問題，無法用早期簡化的解析模型（analytical models）解釋。想要有所突破，必須藉由數值模擬，而且是三維數值模擬，才可能完整呈現整個問題的樣貌。經由三維數值模擬的計算，較能逼近觀測上預期的快速磁力線重聯。類似這樣的快速重聯

機制就可能解釋磁場擴散並從原恆星雲氣帶走磁場通量的現象，並解釋宇宙射線中所有或部分高速粒子的來源，因此備受矚目。

此外，我們也需要發展新的數值方法。目前的模擬程式碼有數值擴散性過強的問題，以致無法準確描述磁力線重聯的物理過程。本所的理论研究部門—高等理论天文物理研究中心（TIARA）正在致力發展最新的數值方法，希望突破現有程式碼的極限，以便能正確估計磁力線重聯的時間。

（作者/Miljenko Čemeljić；翻譯/王亮堯、劉君帆；審校/尚賢）



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【低質量恆星形成與能量】

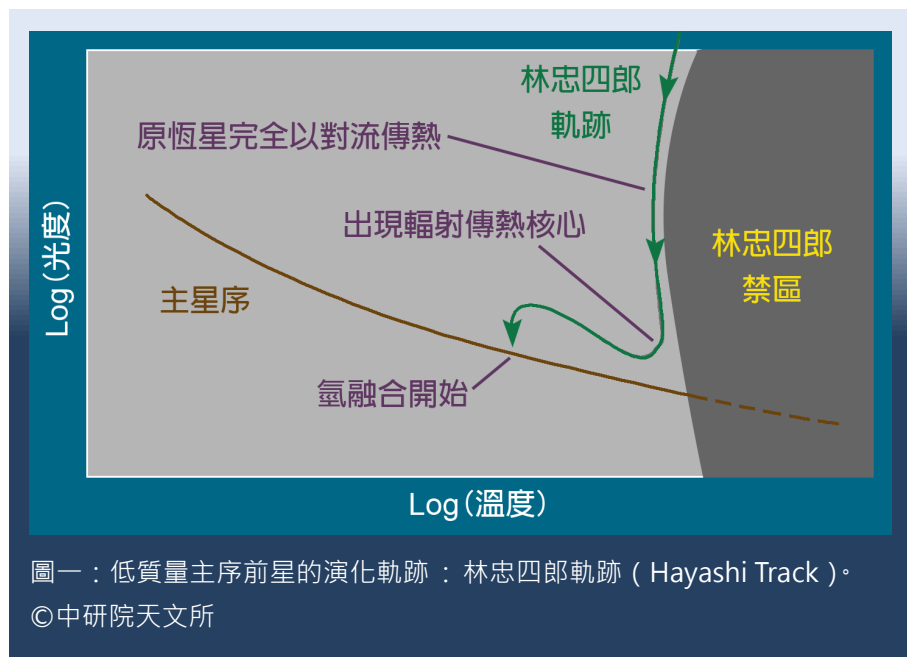
著名的天文學家馬丁·芮斯（Martin Rees）曾說：「我們都是恆星融合的核廢料」。恆星其實並不是恆久存在的，它有自己的生命週期。無論恆星的生命是平靜或激烈地結束，最後釋放出去的物質都將再次進入新的循環。但恆星又是怎麼誕生的呢？

早在十八世紀，拉普拉斯（Pierre-Simon Laplace）的星雲假說就提出：氣體因為重力而聚集和塌縮，於是形成恆星與太陽系。而「支撐恆星發光發熱的能源是什麼」，則是令十九世紀科學家們傷腦筋的問題。亥姆霍茲（Hermann von Helmholtz）認為解答是重力位能，不過經過計算後發現太陽的生命變成僅有數百萬年，正確解答直到二十世紀核物理的誕生才見分曉。恆星形成理論至今已趨完備，而所有理論都離不開重力與核反應。

恆星透過重力塌縮在充滿氣體與塵埃的星際介質中誕生。這些散布於星際空間的氣體分子和塵埃，經過漫長時間後便聚集成不同種類的星雲。其中，可見光無法穿透的暗星雲溫度相當低（10 K~100 K），裡面的氫原子可以分子形態存在；加上塵埃分布較其他星雲密，暗星雲（分子雲）成為恆星誕生的搖籃。

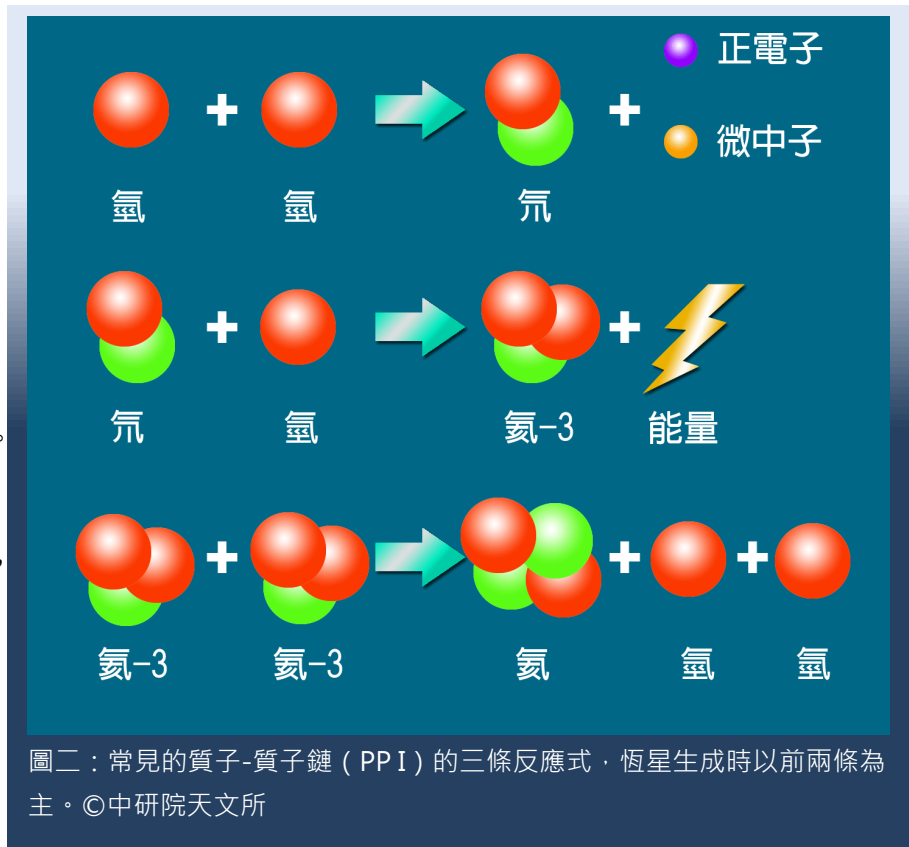
分子雲因為許多因素影響而重力塌縮。不過巨大的分子雲（絕對溫度約數十度， 10^5 太陽質量，大小約 50 秒差距）並不會直接塌縮成一個超巨大恆星。事實上，塌縮過程中只要一部份密度不均便會造成局部塌縮，所以從一個巨大分子雲中常會孕育出多個恆星甚至是星團。舉個質量與太陽相當的雲氣為例，剛開始是以自由落體的形式塌縮，此時雲氣的密度還不高，重力位能轉變成的熱能可順利輻射逸出不被塵埃吸收，雲氣溫度便可維持定值。當核心密度達到 10^{-13} g/cm^3 （註）時，雲氣變得越來越不透明，能量無法輻射出去，於是便開始絕熱塌縮；同時，核心壓力也開始增加，以減緩塌縮的速度，最後中心處於近乎流體靜力平衡（hydrostatic equilibrium）的狀態，然後形成一個半徑大約 5 au 的原恆星（protostar）。

原恆星形成後，雲氣仍是以自由落體的形式墜落到核心上形成衝擊波（shock wave），損失大量的動能轉變為熱能。加熱到大約 2,000 K 時，氫分子開始分離成氫原子；這個反應吸收了大量熱能，無法再提供足夠的壓力來維持平衡，於是不穩定的核心再次塌縮。下一次流體靜力平衡再建立時，還是一樣會有衝擊波，但能掉落的物質已經不再那麼多，最終，原恆星幾乎吸收累積了所有的質量，成為主序前星（pre-main sequence star）。直到這時，天體發出的光都以塌縮時釋放的重力位能為主。隨著溫度繼續升高，主序前星



直到這時，天體發出的光都以塌縮時釋放的重力位能為主。隨著溫度繼續升高，主序前星

表面的氫負離子增加，顯得愈加不透明，內部大量的熱在短時間因此無法輻射到表面，於是主序前星遂改採更有效率的對流方式來傳熱：表面溫度改變不多，但光度 (luminosity) 隨塌縮減低。這時候中心也首次出現氦的核反應，但此時影響不大。然而，隨著溫度越來越高，中心透明度也越來越高，光度也跟著提高，形成一個以輻射傳遞能量的核心。(圖一)



當中心溫度繼續升高，有兩組核反應在這時出現：氫轉變成氦-3的質子-質子鏈反應

(proton-proton chain) 反應 (圖二)，以及碳-12 與氫轉變成氦-14 的一系列碳氮氧循環反應 (CNO cycle)。這兩項核反應所提供的能量，自此開始遠超過重力位能。當核心逐漸調整完畢，碳-12 也耗盡，恆星的能量來源便以質子-質子鏈為主，最終登上主星序的行列，展開低質量恆星漫長的一生。下一個波瀾壯闊，就是恆星準備踏上死亡旅程的時刻了。

(作者/吳文正)

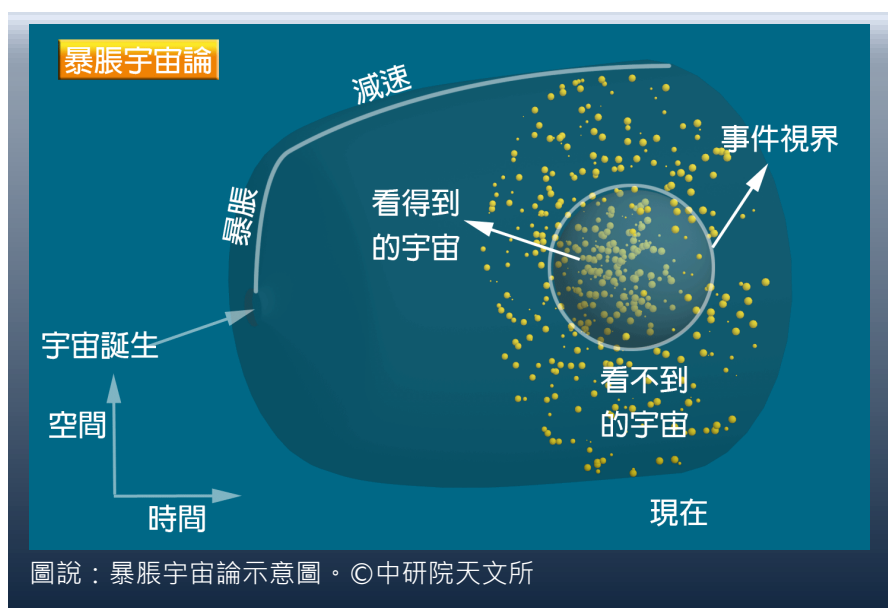
註：標準狀況下地球大氣密度約是此時核心密度的一百億倍



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，以創用CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。創用CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【暴脹及暗能量】

根據現今宇宙學的標準模型，宇宙在非常早期藉著真空能量經歷了一個暴脹 (inflation) 的時期。暴脹從宇宙大霹靂後的 10^{-36} 秒發生到大約 10^{-32} 秒結束，將宇宙從本來極小的體積以指數形式加速膨脹了 10^{78} 倍 (相當於把質子大小膨脹到太陽的 20 倍)。大霹靂時的量子擾動被放大為古典擾動，使得早期宇宙的能量密度產生些許不均勻，並成為現今觀測到的宇宙大尺度結構生成的種子。除此之外，宇宙瞬間的暴脹將任何微小曲率都抹平，造成現今宇宙空間的高度平坦性，而現在看來宇宙中因光速有限之下無法達到因果連結 (causally connected) 的部份區域，也早在暴脹之前就達成了均勻性，這些特點經由宇宙微波背景輻射的量測得以證實。在暴脹結束後，宇宙就以減速的方式膨脹。



除了真空能量促成宇宙暴脹之外，天文學家還引入另一種看不到的、提供反重力的能量來源—所謂的暗能量來解釋我們所觀測到的宇宙加速膨脹。宇宙加速膨脹的直接證據來自對遙遠超新星觀測的資料推論；如：1998 年，美國勞倫斯柏克萊國家實驗室進行的「超新星宇宙學計劃」(Supernova Cosmology Project)與澳洲 Mount Stromlo 天文台的 Brian Schmidt 所領導的「高紅移超新星搜尋 團隊」(High-Z Supernova Search Team)。

分別觀測不同的紅移超新星樣本，發現它們似乎比預期來得黯淡。解決這個矛盾最合理的解釋就是：那些在數十億年前由超新星發出的光所走的路徑比預期的還長，進而得到宇宙正在加速膨脹的結論。由歐洲太空總署 普朗克衛星觀測宇宙微波背景輻射間接得知宇宙暗能量佔了宇宙總質能成份有 68% 之多！

目前天文學家對造成宇宙加速膨脹的暗能量特性並不十分了解，理論學家借用愛因斯坦為了平衡重力所引進的宇宙常數、或類似能產生負壓的時變能量來源如第五元素 (quintessence) 來解釋反重力的現象。雖然宇宙早期的暴脹及現今所觀測到的加速膨脹同屬負壓所造成的加速膨脹，但其間是否有關連並不清楚。唯一可以確定的是，如果宇宙持續的加速膨脹，在非常遙遠的未來，即使是鄰近星系也將漸漸從我們的天空消失，宇宙將呈現一片死寂。
(作者/蔣龍毅、蘇游瑄)

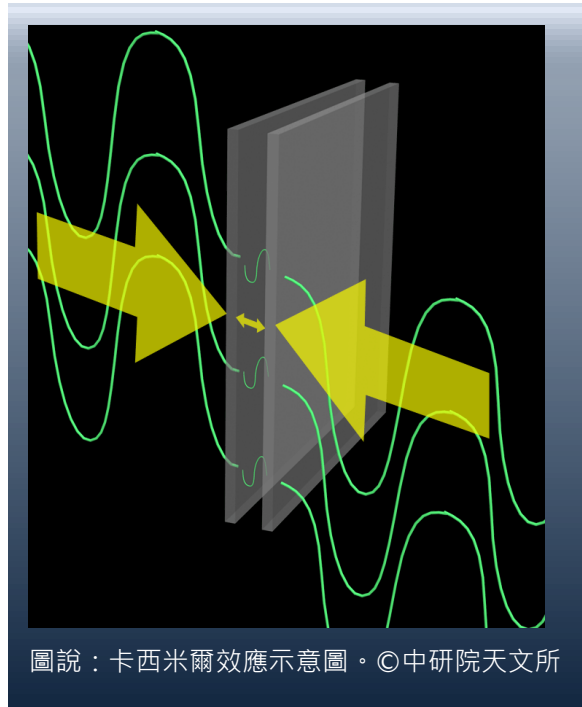


天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【天文小辭典】

真空能量

真空能量是一種存在於空間中的背景能量。根據量子力學的觀點，真空中到處充滿著「零點能」。零點能係指量子在絕對零度下仍保有震動時的能量。零點能的存在可以從量子力學中的海森堡測不準原理了解。該原理指出，我們無法以高精確度同時得知一個粒子的位置和動量。因此，當溫度降到絕對零度時粒子必定仍然在振動；否則，如果粒子完全停下來，那它的動量和位置就可以同時精確測知，而這違背了測不準原理。要證明真空能量的存在，量子場論中最簡單的實驗證據是卡西米爾效應 (Casimir effect)，於1948年由荷蘭物理學家卡西米爾所提出。此效應造成真空中兩片間距極小（約奈米尺度）的平行金屬板內外的能量落差，進而產生吸引力。



(作者/蔣龍毅)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【宇宙能量小方塊】

常見的能量相關單位：

國際單位制 (SI units) 中的能量以「焦耳」(J) 為單位， $1 \text{ J} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2}$ 。

功率則以「瓦特」(W) 表示， $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$ 。

家用電錶的 1 度電 = 1 kWh (千瓦 × 小時) 也是能量的單位。

常見的食物熱量單位「卡」(calorie) 的定義和溫度壓力等環境條件有關。1 卡約 4.2 J，1 大卡 = 1 千卡。

絕對溫度 (K) 與對應能量 kT 之間以波茲曼常數 $k = 1.380 \text{ 6488} \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ 轉換。

一顆熱量 600 大卡的粽子或便當如果能全部轉換成機械能，相當於把地表體重 60 kg 的人由重力加速度 9.8 m s^{-2} 的平地抬到比玉山還高所增加的位能。不過，食物熱量在人體內轉換成機械能的效率不高，大約五分之一左右。這熱量可能只夠爬台北 101 大樓兩趟。

基本粒子的能量通常以電子伏特 (eV) 來表示。 $1 \text{ eV} = 1.602 \text{ 176 565} \times 10^{-19} \text{ J}$ ，相當於用普通 1.5 伏乾電池把一顆電子從負極加速到正極所需能量的三分之二。

光子能量 = 普朗克常數 × 頻率，其中普朗克常數 $h = 6.626 \text{ 069 57} \times 10^{-34} \text{ J s}$ ，頻率 × 波長 = 光速。

波長 500 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) 的可見光光子能量將近 2.5 eV。

氫原子的游離能約 13.6 eV，波長更短的紫外光可以使它游離。

電子質量 $m_e = 9.109 \text{ 382 91} \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，換算成能量相當於 $m_e c^2 = 0.510 \text{ 998 928 MeV}$ ，其中 $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ， c 是光速。

質子 (氫原子核) 質量 $m_p = 1.672 \text{ 621 777} \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，相當於 938.272 046 MeV，大約是電子的 1836 倍。

有些稀有的超高能宇宙射線粒子能量超過 10^{20} eV 。

黃色炸藥當量 (TNT equivalent) 是 1 噸黃色炸藥 = $4.184 \times 10^9 \text{ J}$ 。

廣島原子彈約相當於 15,000 噸黃色炸藥或 $6.3 \times 10^{13} \text{ J}$ 。

假設「水立方」小行星是邊長 1 km 的正立方體，密度和水相同。如果小行星撞擊的相對速度和地球公轉速度約 30 km s^{-1} 差不多，撞擊的總動能 $4.5 \times 10^{20} \text{ J}$ 約相當於 10^{11} 噸黃色炸藥或幾百萬顆廣島原子彈。

太陽常數是在地球大氣層外，距太陽 1 天文單位遠處，每單位時間內垂直通過單位面積的太陽光所有波段總能量，大約是 1.367 kW m^{-2} 。換句話說，如果地面的太陽能板可以轉換太陽從無線電波到 X 光等等的能量，忽略大氣層吸收，每一平方公尺可以提供約相當於家用 1 kW 微波爐所需的能量。

太陽光度 ($L_{\odot} = 3.845 \times 10^{26} \text{ W}$) 是太陽每秒鐘輻射出來的總能量，相當於地球大氣層外測量到的太陽常數乘上球面積 $4\pi r^2$ ，球半徑 r 是地球到太陽的平均距離，即 1 au。如果換算成質量，約相當於每秒鐘損失超過四百萬噸，還不包括太陽風所帶走的部份。和太陽質量 $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ 相比，仍是九牛一毛。

氫原子核融合成氦原子核的反應損失的質量只佔原有質量的 0.7%。一般星球表層的溫度和壓力不會使氫原子核融合。太陽以現在光度持續 100 億年所放出的總能量約 10^{44} J 。如果相當於太陽質量的氫原子全部融合成氦，所產生的能量可以讓太陽維持 1000 億年。

典型中子星質量和太陽差不多，半徑只有台北市的大小，自轉週期在 1 ms 到 10 s 左右。質量 $1.4 M_{\odot}$ ，半徑 15 km，自轉週期 1 s 的均勻球體轉動動能約 10^{40} J 。許多波霎的電磁輻射能量來自中子星自轉的動能，可以維持幾千萬年或是更久。

一般實驗室或醫院裡的強力磁場約幾個特士拉 (T)，是地表地磁強度的 10 萬倍。典型中子星磁場約 10^8 T 。有些磁星 (magnetar) 的磁場可達 10^{10} T 以上，這磁場的能量密度超過 10^{25} J m^{-3} ，和磁場強度平方成正比，相當於鉛磚質量密度的一萬倍以上。

一般超新星爆炸時的光度可以和整個星系 1000 億顆星球的總光度相匹敵。核心塌縮的超新星可能釋放出 10^{46} J 的能量，主要來自重力位能。其中超過 99% 被微中子帶走，約 1% 提供星球爆炸的動能，僅有一小部分變成光，照亮星際空間。

(作者/金升光)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【所長的話】

人是萬物之靈，藉五感器官知覺，生而具有美感，既能欣賞山川自然，也可感知季節變換、日出日落、週而復始的規律。在生命科學和自然科學領域持續研究下，人類開始瞭解到，生命奇蹟似地出現極為寶貴，非比尋常，是在環環相扣的複雜過程逐一取得平衡後，生命才成為可能。回想首度登月的太空人在飛行中拍下的照片：我們這顆色彩鮮艷的星球竟是孤伶伶地懸掛在一片深邃玄黑的太空之中，美得令人讚嘆。迄今這幅影像仍在對我們說，為了子孫及人類後繼世世代代，環境保護和能源節約就是大家共同的使命。

近二十年，為了追求更好的生活，人類對周遭環境帶來極大的改變，不僅自然資源迅速消耗發出了警訊，對空氣、水、土壤造成的污染恐怕也將對地球留下永恆的傷疤。本期「天聞」邀請到李遠哲院士來呼籲氣候變遷、永續發展的重要，及在此議題中，社會群體應當扮演的角色。並且也邀請徐遐生院士詳細地為我們解說一種對人類和環境皆更為安全的核能，以及該怎麼做能將二氧化碳從大氣中去除並重返土壤，反轉原本已對環境造成的破壞。

身為天文人，特別易感於宇宙浩瀚，星球渺小，時間互長，生命短促。更當善用這歷史上獨一無二的時機來好好盡自己的本分，不僅節制自己的行為，承擔起責任，也必須追溯和認知前人已造成的損害、善加修復，期許一個更好的未來。讓我們從對話出發，追求知識，勤勉力行。

（作者/賀曾樸；譯者/黃珞文）

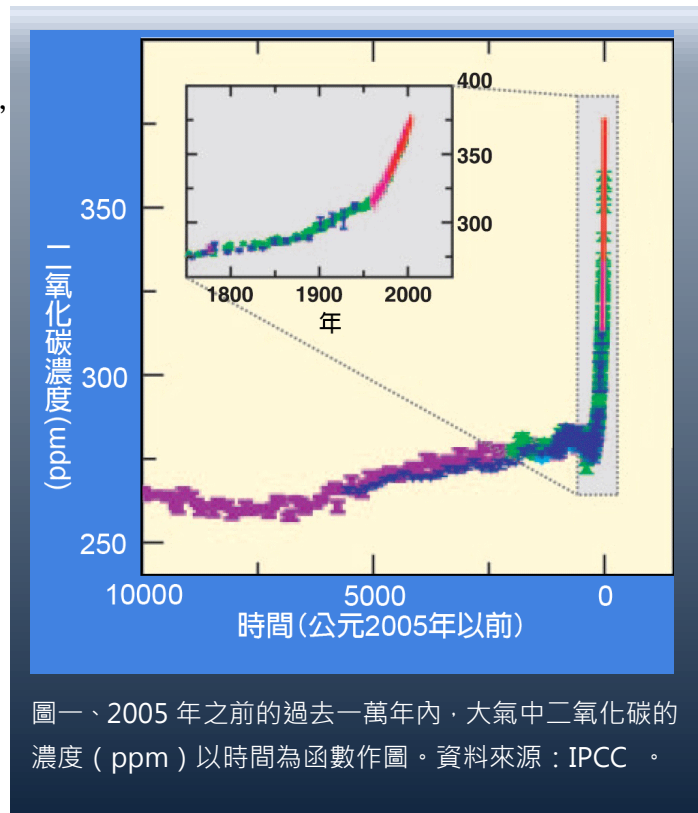


天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

人類燃燒化石燃料導致大氣中二氧化碳的濃度持續增加，到完成這篇文章為止，濃度已經從工業革命前的 280 ppm，增加到 395 ppm 了（圖一），科學家壓倒性的認為，二氧化碳濃度的增加是造成今日氣候變遷的主因，為避免氣候變遷帶來災難，人類使用能源不能再依賴燃燒化石燃料。在這篇文章裡，我們將介紹能替代化石燃料的方法，而這兩種方法正在中央研究院天文所研發中。

[核增殖反應爐]

傳統使用核能的方式是在輕水式反應爐（light water reactor；簡稱 LWR）裡分裂鈾-235（濃度需比天然鈾裡的鈾-235 高）來發電，此發電方法不能永遠取代化石燃料。若以 2050 年預計全世界能源需求量來估算，且所有能源都來自高純度鈾礦的話，其存量只夠使用六年。此外，人類也意識到 LWR 有產生核廢料、大量輻射物質外洩及核武擴散的問題。



圖一、2005 年之前的過去一萬年內，大氣中二氧化碳的濃度 (ppm) 以時間為函數作圖。資料來源：IPCC。

— 鈾-238 增殖反應爐

鈾-238 的豐存度是鈾-235 的 100 倍，鈾-238 獲得一個額外的中子後會變成鈾-239，接著鈾-239 透過兩個貝他 (beta) 衰變將兩個中子轉變成兩個質子後會變成可裂變的 (fissile) 鈾-239，這種將可孕的 (fertile) 鈾-238 轉變成可裂變鈾-239 的增殖 (breeding) 程序，能延長高純度鈾礦的使用年限到 600 年（如果人類所需的能量都由分裂反應爐提供）。含有鈾的礦物可以溶解在海水裡，因此日本建議在海水裡利用聚合物網來捕捉鈾，海洋能提供的鈾足夠驅動鈾經濟數百至數千年。

— 鈷增殖反應爐

鈷增殖反應爐具有更好的潛力，鈷元素只有一種穩定的同位素鈷-232，所以不需花大錢分離同位素，而且鈷-232 的原子核有 90 個質子與 142 個中子，屬於偶-偶核素 (even-even nuclide) 是一種可孕材料，可藉由吸收一個中子來製造可裂變材料。鈷-232 吸收一個中子後會變成鈷-233，接著透過兩次貝他衰變把兩個中子轉換成兩個質子後就變成鈾-233，鈾-233 的原子核屬於偶-奇核素，內含 92 個質子與 141 個中子，是一種可裂變材料。鈾-233 吸收一個慢中子以後，其巨大的原子核增加的能量足以讓它產生劇烈的振動，並分裂成兩塊不穩定的裂變產物，從富含中子的原子核分裂而來的裂變產物也富含中子，如果它們不丟出 2 到 3 個中子會很難維持穩定的狀態。一個鈾-233 原子核吸收一個慢中子並分裂了以後，平均會產生 2.49 個裂變 (快) 中子。

上述一個完整的分裂反應完成後產生的中子平均數量大於 2，其中一個中子可以用來維持鏈鎖反應，另一個中子則可用來將鄰近的鈾-232 轉變成鈾-233，鈾-233 又可再衰變成新的可裂變鈾-233。若想有效使用這些中子，可以將反應爐核心建造在一個不會吸收分裂反應產生的快中子、只將其減速的材料以內，那麼額外的 0.49 個中子可以讓更多的鈾-232 轉變成鈾-233。原則上鈾增殖反應爐的數量可以以指數的方式增加，直到其產生的能量能滿足這個世界的需求。

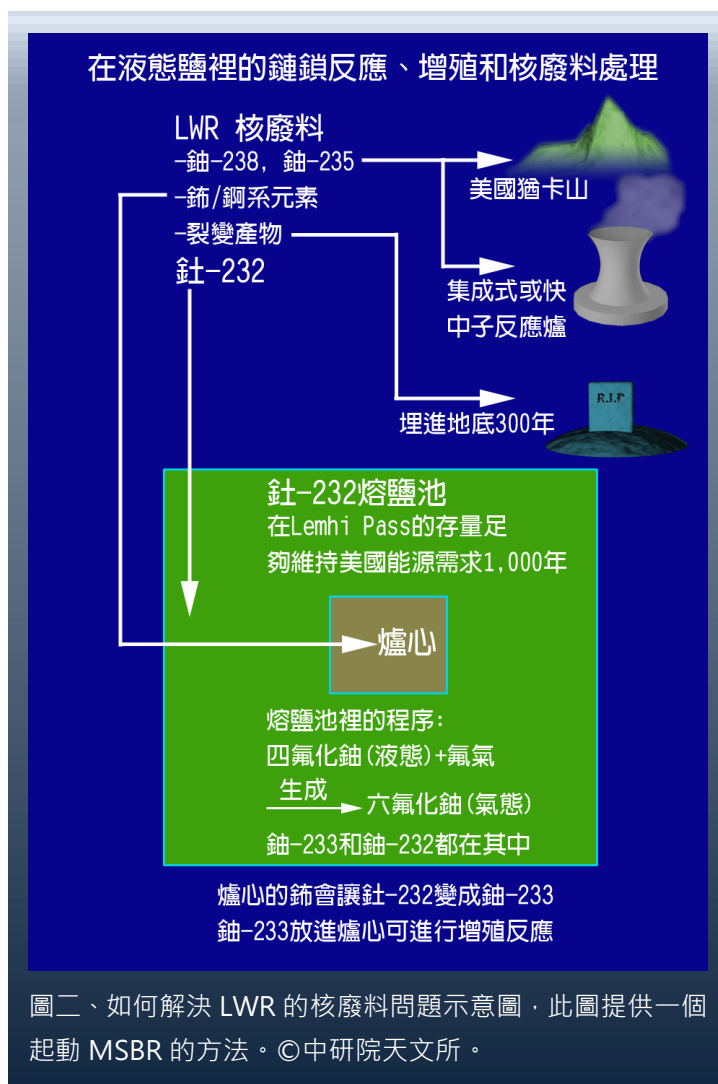
鈾元素在地殼的含量大約是鈾元素的 3 到 4 倍，也就是說，若高純度鈾礦的存量可以讓人類使用 600 年，那麼高純度鈾礦的存量還可以使用 2000 年之久。身為一個化學元素鈾有一個重要的性質跟鈾相反，就是鈾不溶於海水，因此在海洋中找不到鈾，不過鈾在一種稱為獨居石 (monazite) 的黑色海沙中含量很豐富。台灣的海灘有很多獨居石，如果不夠多還可以去海裡找，海底還有很多。由於鈾沒有其他商業用途，所以沒人調查過地球上能用作核燃料的鈾究竟有多少，如果我們願意退而求其次使用低純度鈾礦的話，那現有存量還可以使用幾百萬甚至上億年。因此，鈾增殖反應爐是可以永續發展的能源。

[熔鹽式增殖反應爐]

LWR 運轉了半個世紀以來，其產生的核廢料一直是個問題，在這裡關於熔鹽式增殖反應爐 (molten salt breeder reactor; 簡稱 MSBR) 的討論將從它能解決核廢料產生的問題開始，圖二簡單的解釋了 MSBR 如何解決核廢料問題。LWR 廢燃料棒裡的高階核廢料主要是由以下三個成份組成：

- 鈾-238 及未反應的鈾-235 混合物質
- 銻-239 及從鈾-238 附屬中子放射線產生的錒系元素
- 由可裂變原子核分裂而來的裂變產物

未參與分裂反應的鈾，可以與銻-239 及微量錒系元素安全地分離開來，方法是利用標準的氟化作用程序讓鈾與氟結合，產生六氟化鈾 (UF₆) 氣體，氣體會上升並離開熔鹽系統。一旦分離反應完成，大量的鈾-238 會與鈾-235 混合在一起 (由六氟化鈾的狀態轉化成更穩定的氧化態)，這樣的物質無法用來製作核彈，可以將它們儲存在地質儲存槽裡 (如美國猶卡山或是其替代地質儲存槽)，或提供給反應爐技術 (註一) 開發單位當成燃料使用。另外有一種稱為「高溫冶金加工」(pyroprocessing) 的技術在美國愛達荷國家實驗室研發，這個技術可以將銻-239 和微量錒系元素從裂變產物裡分離出來。



裂變產物還包含半衰期是 30 年左右的放射性元素，我們可以把這些物質裝進乾式儲存桶，存放在地底下 300 年以後，它們的放射性就會降至低於背景值，這時就可以打開儲存桶，把具有經濟與藥用價值的稀有物質回收。

鈾-239 和微量鈾系元素可利用化學反應將其製成氟的化合物（例如氟化鈾； PuF_3 ），若將氟化鈾溶進共熔的氟化鈉/氟化鉍（ NaF/BeF_2 ）熔鹽（一般傾向選擇載體溶劑鹽）裡，便可製成燃料鹽氟化鈾/氟化鈉/氟化鉍。接著將此燃料鹽灌進熔鹽轉化反應爐裡（molten salt converter reactor；簡稱 MSCR）直到達臨界質量後就可維持鏈鎖核分裂反應。此反應產生的中子數量會超過維持爐心鏈鎖反應的需求量，這些多出來的中子會隨機跑出反應爐心並照射在包圍住爐心的熔鹽池裡，熔鹽池內含氟化鈾（ ThF_4 ）溶進共熔的氟化鈉/氟化鉍熔鹽，這裡的鈾全是鈾-232，它們捕獲中子再經兩個貝他衰變後，會變成可裂變材料鈾-233。鈾-239 和微量鈾系元素經上述過程完全反應完後，LWR 的核廢料問題便可解決了。

LWR 核廢料的解決方式有兩個優勢：

- 它消除現有 LWR 產生鈾造成的放射性武器危機
- 它提供一個方法讓 MSBR 起動，因為它可以製造自然界不存在的鈾-233。

人造鈾-233 在熔鹽池裡以四氟化鈾的分子狀態存在，為了把它從熔鹽混合物裡萃取出來，我們可以持續將熔鹽池裡的熔鹽慢慢灌入另一含有氟氣泡泡的腔室裡，氟氣穿過熔鹽會與四氟化鈾結合形成六氟化鈾氣體，並飄進另一內有金屬鉍的腔室，六氟化鈾遇到鉍會產生化學反應形成四氟化鈾及氟化鉍，若把四氟化鈾-233 溶進共熔的氟化鈉/氟化鉍熔鹽裡，新的燃料鹽四氟化鈾/氟化鈉/氟化鉍即形成。接下來將此燃料鹽灌進反應爐心，以可裂變鈾-233 取代 MSCR 的鈾-239，此反應爐便成為 MSBR。利用電解可將氟化鉍分解成鉍和氟氣，再分別導入上述兩個腔室，便可重複利用把熔鹽池裡的鈾-233 繼續分離出來。上述的化學過程很簡單，而且可以遠端遙控，如此一來就可避免讓操作員暴露在輻射的危險當中。另外，維持這些化學反應的能量與反應爐產生的能量相比（ 10^{-5} ）根本微不足道。

燃料鹽在 MSBR 裡不斷地循環直到耗盡所有可裂變材料，其裂變產物只有短半衰期的物質，只需掩埋到地底 300 年，因此，MSBR 本身並沒有解決不了的核廢料問題。

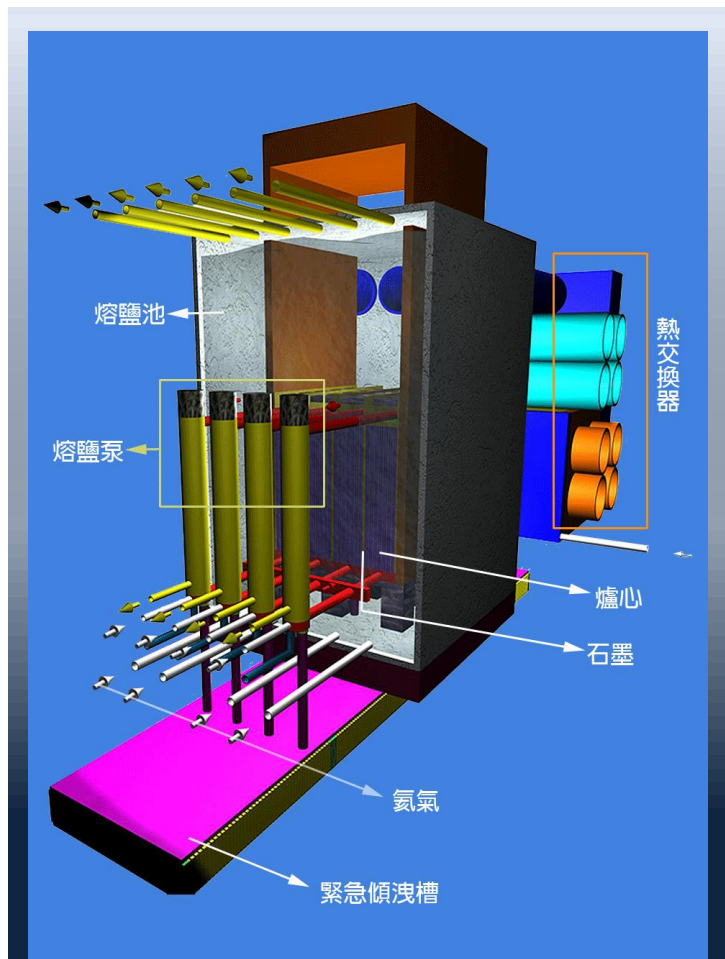
那麼國安問題呢？難道不能用鈾-233 製作炸彈嗎？答案是不行，因為若鈾-233 周圍有高速中子飛來飛去，那它就無法避免高速中子入射，接著自身丟出兩個中子並產生鈾-232 的反應發生，這樣的過程會讓鈾-232 與鈾-233 一起存在在炸彈裡而且幾乎不可能分離開來。鈾-232 衰變的過程會釋出高能伽瑪射線（gamma ray），即使有殉道者願意用未分離的鈾-233/鈾-232 混合物製作炸彈，並試著利用港口貨櫃走私到某個城市，那鈾-232 的存在會讓這個炸彈很容易被蓋格計數器偵測到。伽瑪射線也會干擾精密的電子控制裝置，必需遠離任何武器裝置。若有簡單得多的替代方案存在，不會有國家或恐怖組織想嘗試用鈾-233 製作炸彈，因此 MSBR 對國安來說是安全的。

圖三是二流體 MSBR (如圖二的概念示意圖)一個可行的機械設計圖。核分裂反應產生的中子會高速離開反應系統，為了降低中子的速度但不將其吸收，反應爐心的建材除了金屬螺栓與螺帽之外，其他部分完全是由碳基(石墨)材料製成，只要高溫的氟化鈉/氟化鉍熔鹽裡不含水，石墨便不受其化學影響。熔鹽池的外牆則是用金屬(赫史特合金 N，可抵抗熔鹽侵蝕)建造，在熔鹽池裡隨機遊走的中子在撞對外牆，把金屬活化成麻煩的低階核廢料之前，大部份會被鈷-232(以氟化鈷的形式溶在氟化鈉/氟化鉍熔鹽裡)吸收掉。

[核能事故]

所有的核能反應爐都為因應緊急事故做了自動關閉的設計，MSBR 也不例外，只是它有較大的安全幅度。沒有反應爐會因為鏈鎖反應失控而發生核能事故(車諾比反應爐除外，此核電廠的設計有很可怕的瑕疵，從來沒有通過前蘇聯以外的核能管理檢測)，大部分的核能事故是發生在反應爐安全地關閉之後，事故會發生是因為分裂產物產生的衰變熱無法有效消散。

有固定固態燃料元素的核電廠有可能會出什麼問題呢？福島核電廠提供了一個例子。地震發生時，雖然該核電廠的反應爐安全地關閉了，但是燃料棒持續地釋出衰變熱(其能量只有反應爐火力全開時的百分之幾)，地震與大規模海嘯讓該核電廠失去了全部的電力網，等於破壞了用來冷卻燃料棒的冷卻系統，這時電廠裡的輔助緊急設備必須儘快冷卻燃料棒，不幸的是輔助電力也失效，因為柴油引擎的燃料被海嘯沖走了，加上電池耗盡，而且冷卻劑水也因沸騰而蒸發掉了，福島核電廠面臨了大麻煩，燃料棒缺乏有效的冷卻開始熔毀，水蒸氣碰到極高溫的燃料棒便產生氫氣，氫氣離開爐心進入圍阻體後氫爆一觸即發，圍阻體並沒有建造的很堅固因而被炸開，大量的放射性物質便從圍阻體的裂縫逸散到環境當中。



圖三、二流體 MSBR 一個可行的爐心設計(專利審核中)。前方有四個熔鹽泵，用來將燃料鹽循環進黑色的爐心裡，爐心裡燃料鹽被減速劑石墨包圍著，所以達到臨界密度後便開始穩定的鏈鎖反應。包圍著爐心的熔鹽池和燃料鹽是以石墨牆隔開，爐心產生的熱可藉由石墨牆傳導至熔鹽池(此為第一次熱交換)，接著池裡的高溫熔鹽會流進池外的第二熱交換器，第二熱交換器的功能是把熱能從具放射性的熔鹽傳遞到不具放射性的工作鹽裡(例如用在生質超級烘焙法的醋酸鈉(NaAc)/醋酸鉀(KAc)熔鹽)。熱能交換完畢後，冷卻的熔鹽便流回熔鹽池的頂端，這時熔鹽池裡的熔鹽上冷下熱因而引起熱對流，讓熔鹽能均勻的混合。另外，冷卻的燃料鹽會離開爐心流進熔鹽泵，在此所有裂變氣體會被氣態氫經由白色的管道帶走，接著燃料鹽會經由紅色的管道再流回爐心，並開始另一個新的循環。
©中研院天文所。

以上的核能災害都不會發生在依照圖三設計的二流體 MSBR 身上，因為 MSBR 有以下幾個安全特色：

- MSBR 不使用水，所以不需要建造在靠近大量水的地方，例如海邊或是河川旁，這些通常是人類喜歡居住的地方。另外，MSBR 可以在地震過後存活，而且不會被海嘯毀掉。
- 熔鹽反應爐可以全自動運作，不需操作員介入。
- 中子減速材料是浮在熔鹽池（冷卻劑）裡，當事故發生失去冷卻劑後，這些減速劑會掉到爐心底下，中子便無法被有效率地減速，進而停止核分裂反應。
- 若燃料鹽因任何原因而過熱的話，位於其下方的排液栓塞會融化接著燃料鹽便會流進一個沒有減速劑且體積較大的氣冷槽裡，在這裡達到意外的臨界是不可能的。

若 MSBR 的核分裂反應太快，熔融的燃料鹽會升溫並膨脹，接著部份燃料鹽會流出爐心，進而降低反應速率。反之，我們如果需要多一點電力時，可以讓熔鹽池裡的熔鹽（冷卻劑）循環快一點，如此便可以加速降低燃料鹽的溫度，讓燃料鹽收縮進爐心裡加速核分裂反應。這跟太陽控制其核心熱核融合反應速率的原理一樣，太陽有個氣態的核心，降溫會收縮，升溫會膨脹，如此便可平衡從表面被輻射帶走的能量。我們不再需要擔心 MSBR 過熱或過冷，而是要擔心明天看到的太陽與今日所見不再相同。

排液栓塞的構想最初是由美國橡樹嶺國家實驗室（Oak Ridge National Laboratory）提出，他們發明了讓反應爐使用液態燃料元素這個概念。如上所述福島核電廠的例子，一個使用固態燃料元素的核電廠，如果其主要冷卻系統出問題，就必須要使用位於相同位置的裝置來維修。如果是液態燃料，我們只需將燃料移到另一個地方，也就是已經預備好的分離式緊急冷卻系統（緊急傾洩槽）。我們選擇了空氣來當冷卻劑，因為我們可能會失去水、失去熔鹽池冷卻劑，但幾乎不可能失去空氣。

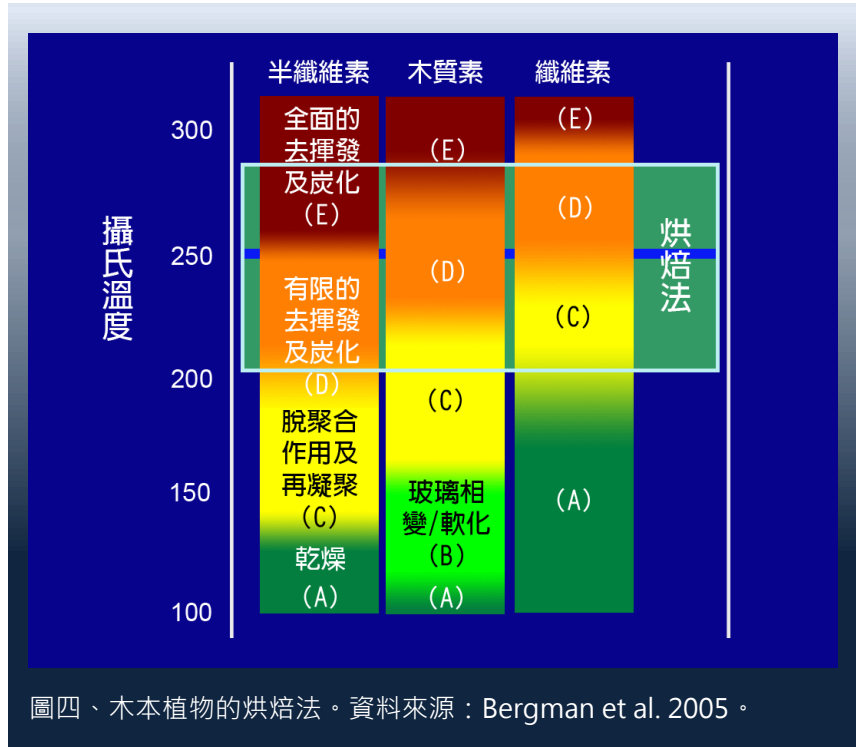
若想使用空氣來冷卻核能裝置，那麼分裂產物的衰變熱不能太多，也就是說清除高階核廢料若能在核電廠運轉的狀態下進行，那麼對核能安全是一個很大的貢獻。一個穩定運作的 MSBR，在火力全開的操作條件下遇到緊急情況而關閉時，相對於傳統核電廠會有較小的衰變熱，因此讓反應爐更安全。為了讓反應爐達到超級安全，反應爐應該避免建造的太大，因為其火力全開的產能與衰變熱的多寡成一定的比例。

不過，當核電廠完全停電時（例如福島核電廠）其實連開電扇散熱的電力都沒有，所以流進氣冷傾洩槽的燃料鹽還是沒辦法有效的散熱，對於這樣的意外事故，我們以鋼來製作熔鹽會散佈進去的另一層寬大超薄空間，熔鹽流動的過程會將熱量傳導進鋼裡，這樣的設計讓熔鹽可以在十秒內凝固，因此燃料鹽裡可能存在的任何分裂產物都會停止流動，加上固態鹽的蒸氣壓非常低，所以沒有具輻射性的氣體能夠逃逸至大氣。

還有一個額外的預防考量：圍阻體的圓頂要能夠抵擋嘗試衝撞反應爐的噴射機。圓頂得要好好設計以預防意想不到的事情發生，操作員必要時也得要棄守反應爐，就算沒人看守，反應爐也要是安全的，這意味著我們不能把衰變熱禁錮在圓頂內，而是需要把能量傳遞出來。Westinghouse AP 1000 的設計就是一個很好的例子，它的水泥製圓頂不是密合而是部份對外開放，圓頂下方有層薄薄的鋼製蓋子，可將氣體阻擋在反應爐內部，同時將熱量傳導到蓋子的外部表面，再藉由圍阻體的對外空隙讓空氣循環以對流的方式冷卻反應爐。最後，MSBR 可以遠端遙控，如此便可將意外事故對人類造成的衝擊減至最低。綜上所述，MSBR 是很安全的核能發電設備。

[生質變成生質燃料的超級烘焙法 — 碳中和與負碳]

烘焙法通常被認為是利用生質能最有效的途徑（圖四），傳統的方法包括燃燒一種燃料，在不完全隔絕空氣的環境下讓煙道氣加熱生質，此環境具很有限的通風口讓空氣中的氧氣進入，過程中會祛除易揮發的有機化合物（volatile organic compounds; 簡稱 VOCs）及水蒸氣，最後留下焦黑的固態殘餘物—木炭。燃料可以是天然氣、生質的一部分或者烘焙生質的產物，VOCs 通常也會被當作補充燃料。



超級烘焙法的專利申請尚未通過，此法是專利的...

第一作者在中央研究院構想出來，並使其成熟的一個改進程序，是利用熔鹽來產生替代能源的一般程序的一部份。超級烘焙法使用熔鹽當作傳熱媒介，熔鹽直接接觸並將熱傳給生質，生質完全浸在熔鹽裡以隔絕空氣裡的氧氣。傳統烘焙法需要很多小時才能完成炭化過程，超級烘焙法只需要十分鐘，因為在相同溫度和壓力的條件下，熔鹽每單位體積的熱容比煙道氣大 2000 倍。

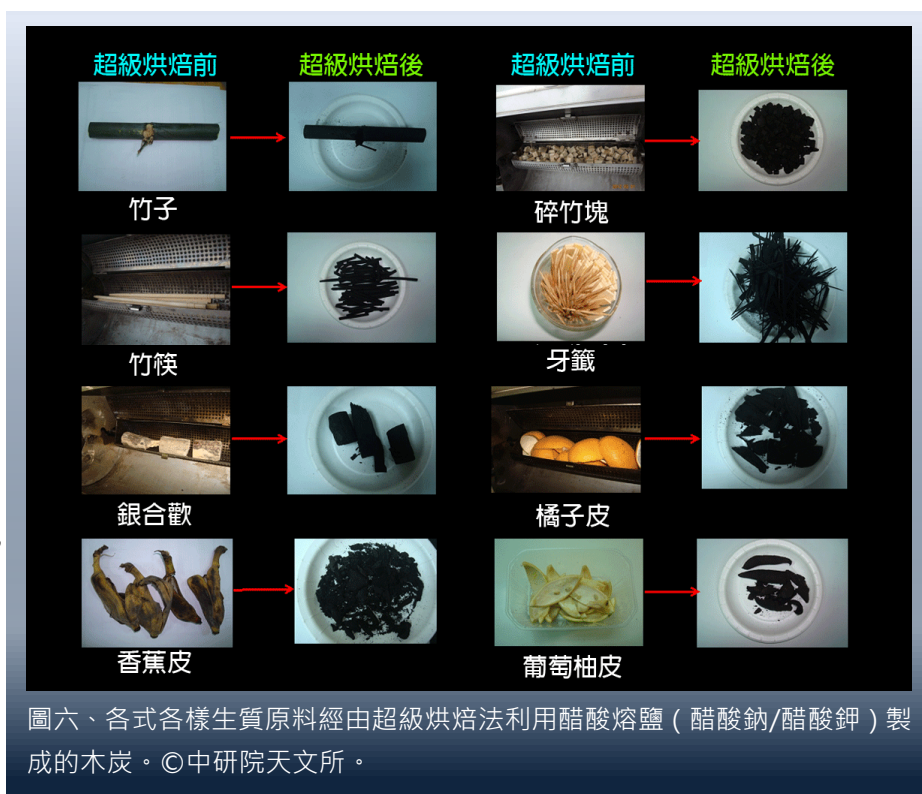
專利的第二作者設計了一個桌上型的機器「crankberry」(圖五)，可以在實驗室的尺度下讓超級烘焙法自動化進行。使用 crankberry，第三作者和其團隊已經超級烘焙了各式各樣的生質原料，並且一致得到好的結果(圖六)。



當熔鹽的溫度達到 300 °C，會產生能完全燃燒且維持環境碳中和的環保煤 (ecocoal)，可當作自然界中煤的替代燃料；而當溫度達到 500 °C，則會產生生質炭 (biochar)，是一種精細的負碳 (carbon-negative；譯者註) 土壤改良物質。

我們注意到掩埋生質炭是一種負碳活動，不只對掩埋生質炭的國家有益處，對整個世界都有正面的影響。

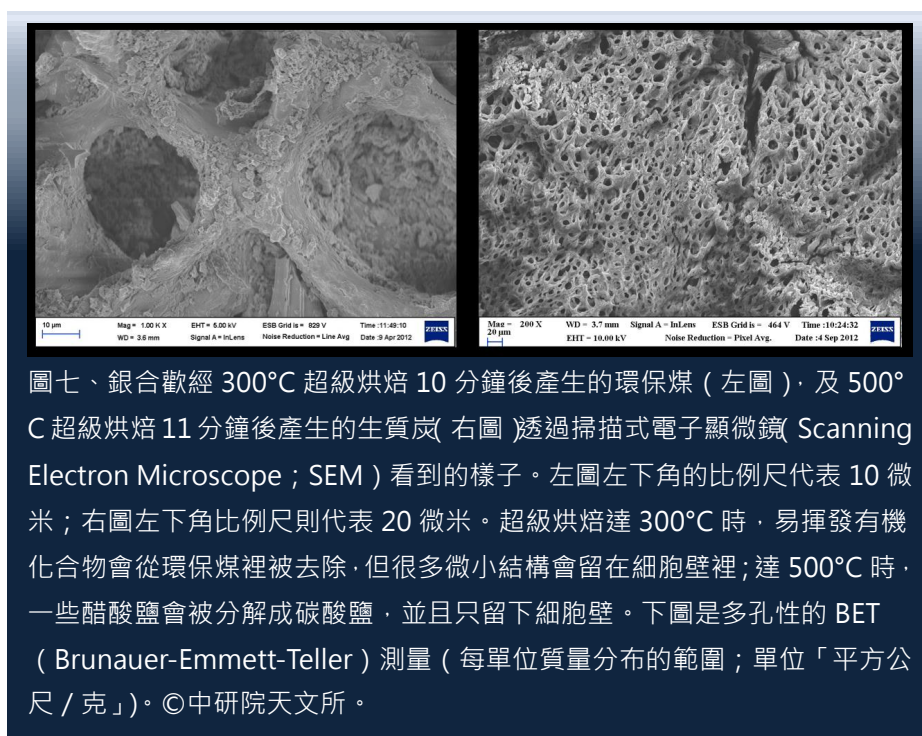
從生質分離出來的易揮發有機化合物不是用來燃燒，而是具有還原的功能，所以生質每單位重的經濟報酬比傳統烘焙法高，特別是除了水（註二）以外，醋酸是易揮發有機化合物裡含量最多的成分，如果我們讓醋酸鈉/醋酸鉀熔鹽溫度高於 460°C ，丙酮和碳酸鈉/碳酸鉀熔鹽就會產生，藉由醋酸與碳酸鈉/碳酸鉀熔鹽進行以酸為基底的快速反應，我們便能還原出醋酸鈉/醋酸鉀熔鹽（以及二氧化碳和水）。



圖六、各式各樣生質原料經由超級烘焙法利用醋酸熔鹽（醋酸鈉/醋酸鉀）製成的木炭。©中研院天文所。

丙酮是高價值化學物質，可做為工業用溶劑，也可做為一般飛機燃料的原料，所以超級烘焙法不只能創造高生產率的固態生質燃料，用來與自然界中的煤競爭；還能製造液態原料，用來減少運輸工業部份對石油的依賴，我們也得到可以取代天然氣的未壓縮可燃氣體。

超級烘焙法可將用來每天生產一噸生質燃料的設備體積大幅縮小，好處是能顯著降低重要設備的初期投資。藉由使用足夠小巧的批量處理設備，便可將其用卡車運至偏遠的超級烘焙位址（採收生質的地方）。另外，即使在烘焙過程中會有少部分熔鹽因流進木炭氣孔裡而流失，也不會造成太大經濟損失，因此超級烘焙法的生產率是有可能達到吸引人的經濟報酬。傳統烘焙法對小規模公司



圖七、銀合歡經 300°C 超級烘焙10分鐘後產生的環保煤（左圖），及 500°C 超級烘焙11分鐘後產生的生質炭（右圖）透過掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope；SEM）看到的樣子。左圖左下角的比例尺代表10微米；右圖左下角比例尺則代表20微米。超級烘焙達 300°C 時，易揮發有機化合物會從環保煤裡被去除，但很多微小結構會留在細胞壁裡；達 500°C 時，一些醋酸鹽會被分解成碳酸鹽，並且只留下細胞壁。下圖是多孔性的BET（Brunauer-Emmett-Teller）測量（每單位質量分布的範圍；單位「平方公尺/克」）。©中研院天文所。

來說是不可能有利潤的，但上述超級烘焙法的優點有可能讓這些小公司賺到錢。

生質炭對環保還有其他好處，例如西北美的冬季太暖和，再加上夏季偏乾旱，這樣的氣候被認為是山區森林爆發松樹樹皮甲蟲病害的主因，此病蟲害從南加州蔓延到英屬哥倫比亞，每天有數百千計的松樹倒下。我們提議在這些倒樹造成森林野火、腐爛釋出溫室氣體、或電線被倒下的大樹枝擊中造成昂貴且危險的斷電之前，將其超級烘焙掉，我們會將產生的生質炭埋入同一片森林的地底，目的不只要將生質炭的碳封存數千年，也要促進新的樹木生長，如此便可鎖住更多環境裡的碳。

森林危機影響的不僅僅只有北美，2012 年出版在自然期刊的一個調查報告顯示，全球 81 個森林裡，226 個森林物種中有 70% 因根部系統缺水而處於垂死的邊緣(土壤含水量太少)。這個現存的威脅應該要有一個適當的解決方法。

[重要的挑戰]

氣候變遷是 21 世紀一個重要的挑戰，人類文明的命運或許取決於人類是否能提出一個合理且科學的方法來迎接這個挑戰。我們的最終目的是要結合熔鹽反應爐和超級烘焙法這兩個技術，將具放射性的熔鹽池（氟化鈦/氟化鈉/氟化鉍）所攜帶的熱量經由熱交換器（如圖三背景所繪，這是一個簡易的耦合）轉換到不具放射性的工作鹽（醋酸鈉/醋酸鉀）裡，接著我們可以使用核熱量將生質製造成生質炭、丙酮和合成氣（具非常高的生產率），這比利用露天開採法及削平山頂開採法得到的煤、利用海底鑽井得到的石油、以及利用水力壓裂頁岩得到的頁岩氣還便宜且乾淨，而且以上開採程序都具高度侵略性。合成氣可以產生電力的基本負載；丙酮可以用來製作用於運輸的液態燃料；利用生質炭則可以達成負碳封存。

煤、石油及天然氣是地球上很珍貴的資源，如果我們使用這些資源來製作耐用品，而不是燃燒它們，其實它們對氣候變遷並沒有影響。我們並不是要化石燃料公司關門大吉，而是需要這些公司將這些原料拿去做別的事情。其他研究學者或許有更好的辦法能夠落實化石燃料經濟體的轉型，如果真有這種辦法，那他/她們應該要開始行動了。物質宇宙經過將近 140 億年的演化，原則上大自然已經給人類很多能夠取代化石燃料的能源了，接下來就靠我們自己著手利用這些能源，讓地球變得更美好。

（作者/徐遐生、蔡駿、本院化學所羅芬臺；譯者/楊淳惠；審校/蔡駿、黃珞文）

註一：例如集成式快中子反應爐（integral fast reactor；IFR）及旅波式反應爐（traveling wave reactor；TWR）

註二：生物炭製成後，我們將水還原並回收用以清洗及還原鹽類物質。

譯者註：生物或商品在成長或製作過程中排放的二氧化碳比吸收的少，我們稱這種現象為負碳。最常見的例子就是植物的光合作用。另一個例子是以鎂矽酸鹽為基礎原料的水泥在硬化過程亦能有效吸收空氣中的大量二氧化碳，使得在整個製程中呈現負碳的現象。另外，若任何組織、營利單位或個人將其釋放到大氣中的二氧化碳藉由某些方式（如植樹）吸收掉，因此其碳排放量的淨值為零，則稱之為碳中和。

參考資料: http://www.greenmaster.org.tw/web/web_2a_1.php?kk=110

(網路全文版及原文版，請參閱 <https://sites.google.com/a/asiasa.sinica.edu.tw/iaaq-on-web/>)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【從地球和人類發展看臺灣的永續能源選擇】

—李遠哲前院長專訪（季報節錄版）

[2°C 的衝擊]

地球形成 46 億年來陽光從未停止照射，物質得以循環，生命因此生生不息。直到工業革命，人們才開始利用化石燃料大規模生產，以為人定勝天，卻破壞了很多自然環境。不過短短 250 年左右，我們便發現路的盡頭近在眼前。一開始大家擔心化石燃料終會用盡，但其實在用盡之前，人類可能就會面臨無法生存的困境：人太多、消耗太多、污染太多、環境改變太多！太陽已經無法透過光合作用把人類活動產生的廢棄物回收消化，於是我們開始承受全球氣候變遷帶來的各種衝擊。半世紀前大家最擔心的核戰危機仍在，現在又多出兩個危機——溫室效應和生物多樣性的消失。再過半世紀，溫室效應帶來的極端氣候說不定就會突破臨界點，進入所謂「失控的斷層期」，這時海水中的二氧化碳和甲烷就會像咳嗽一樣，不停地被咳出。西伯利亞凍土中的甲烷一旦釋出，溫度就會突然上升，人類和很多生物都無法存活；這是本世紀內就可能發生的事。那麼，目前這個「臨界點」的界碑上寫的是什麼呢？「2°C」！

2007 年聯合國氣候變遷跨國小組 (IPCC) 的評估報告指出：和工業革命前相比，溫室效應已經讓全球均溫上升 0.7°C。一旦上升超過 2°C，地球生命就會遭到很大的衝擊；所以將升溫控制在 2°C 內是全球努力的目標（註一）。然而現在這個夢想已經達不到了，再不努力點，本世紀結束前溫度甚至可能會增加 4~5°C。

2°C，很多人不瞭解這個數字的意義，僅僅「2 度」有什麼大不了，早上到下午，溫度變化就不只這個，春夏秋冬溫差更大。住在北方的人甚至以為溫度升高 2 度氣候更舒適。可惜不是這樣，這



裡的「2度」是「全球年平均溫度上升2°C」。若以人體作比喻，平均體溫36.5°C，上升2度就發燒了。上升4度不趕緊降溫，生命就有危險。地球是有生命的體系，從某個觀點來看和人類很像。溫度升高2°C，各大洋的海水會大量蒸發，蒸發後儲存在雲氣中的能量非常大，一旦釋放出來，表現出來的就是颱風或者很多氣候變化，結果造成嚴重的極端氣候，例如乾旱好一陣子，然後突然下起大豪雨氾濫成災。

「人類的活動，地球承受的了嗎？」李前院長強調，這是今日當全球在討論永續發展時，首先要有的認知。

[永續發展與永續能源]

1987年聯合國世界環境與發展委員會(WCED)主席布蘭特(Brundtland)在「我們共同的未來」(Our Common Future)報告書中提出永續發展的概念：「滿足當代需求，同時不損及後代子孫滿足其本身需要的發展」。對此李院長提出兩個問題：滿足當代「誰」的需求？何謂「發展」？

歐美的需求就是需求嗎？洛杉磯沒有汽車就很多地方去不了、不能買日常生活用品、很多事都辦不成，所以汽車是他們生活的基本需求。非洲很多地方連吃的東西都沒有，所以他們的需求是「食物」。世界各角落人們差異那麼多，到底要滿足「哪個地方」的需求？這是很大的問題，但是全球並沒有共識。

至於「發展」，歐美發展的方式就是發展嗎？以歐美經濟發展模式來看，發展是「製造更多的東西、以便人們有更多的東西可消耗」，但是這個「永無止盡地增加物質消耗」的發展模式可行嗎？人口不斷增加，物質消耗也一直增加，因而產生的污染，不但陽光已經無法消化回收循環，而且開始影響生態環境。從地球的觀點來看，人類已經「過度開發」到地球承載不了的地步了。

所以李前院長希望大家在討論永續發展時好好思考：人類應用科技來發展經濟究竟是為了什麼？在達到目的的同時，也不要讓生態環境受到破壞，這樣我們才能繼續在這個地球生存下去。要如何才能永續發展呢？現在大家都說要走入「低碳社會」，也就是不要使用會產生二氧化碳的化石燃料(fossil fuel)。我們一直在講的再生能源、新能源也都是「回歸太陽」的意思。地球既然位處太陽系，人類就該善加利用直接或間接來自太陽的資源。太陽給我們的能量很大很多，一個小時內送到地球表面的能量就可以供應人類社會一年所需。太陽能、風力、地熱、洋流這些能量都是太陽給的。有些海洋能量—像潮汐是和地球及月亮的引力有關，那也是太陽系形成時留下來的能量。動植物的光合作用、森林土壤和微生物都是從太陽孕育出來的資源。如能善加利用這些就非常足夠我們生活了，當然這是在「人口數量能夠控制」的前提下。總的說來，人類要



圖說：太陽能、風力、地熱、洋流這些能量都是太陽給的。動植物的光合作用、森林土壤和微生物也都是太陽孕育出來的資源。背景圖片©RPeter Hannam/brisbanetimes.com.au。

永續發展，資源的利用上就要回歸到能與大自然共存的发展方式。

[50年後臺灣的能源要從哪裡來？]

整體而言，臺灣是個得仰賴「能源輸入」的國家，目前我們有98%的能源靠進口。臺灣地狹人稠，人口密度是美國的20倍、加拿大或澳洲的200倍左右，所以我們可以享受陽光的「人均享受量」很少。即便如此，我們還是得盡可能利用太陽能源，只不過以臺灣的地理情況，仍是無法單靠當地的太陽能發展。事實上若依照今天國人高消耗的生活方式繼續下去，即使再加上風力、水力、地熱、生質燃料等再生能源，能夠滿足能源需求的10%~20%就很了不起了；就算能滿足20%，還有80%得靠進口。隨著全球能源資源的快速減少，從國外買進能源的花費也會越來越貴，所以這80%的能源該如何取得？

目前臺灣幾乎所有能源都是依賴進口的化石燃料。化石燃料無法重複利用，但化石燃料的能量很密集，所以全球石油、煤炭的市場很大；每個國家根據自己的能源需求決定要買進多少煤炭，臺灣就是這樣。如果有一天人類不再使用化石燃料，對臺灣來說影響其實不大，因為我們大多數的能源還是得靠進口，差別只在輸入能源種類換成別的罷了。所以政府該好好想的是：未來臺灣要從哪裡輸入何種能源？科學家們也要同時努力研發適合臺灣的能源，不要全部依賴外國，自己掌握自己國家社會的未來，這樣才可靠。

[例舉發展中臺灣的永續能源]

李前院長例舉目前臺灣永續能源發展中的幾項，提供大方向的想法和建議：

- (1) 太陽光電能：目前太陽能板造價很貴，但相信隨著科技的進展，綠建築、節能綠生活會以不同的方式呈現，節省能源的材料研究也會持續發展，一旦技術成熟及量產，成本就可降低。如果政府在過渡時期能提供積極的配套及鼓勵措施，就可以支持研究發展繼續下去，民眾也就可以負擔得起這個能源的利用。所以不要拿一開始的高價格低估其未來的經濟價值；若純粹從技術觀點來看，數十年內臺灣要降低利用太陽能源的成本是有機會的，不可行端看政府的態度與配套政策。另外，國際間合作發展太陽能的儲存和輸送也是一個方法。李前院長今年會邀請亞太地區科學家和重要人物一起討論亞洲的未來，包括能源問題。他預期屆時澳洲一定會表示自己的廣大土地和充足陽光可以進行太陽能發電，多餘用不到的太陽能可以轉成高壓直流電，然後輸出給需要能源的很多亞洲國家。
- (2) 氫經濟 (hydrogen economy)：氫分子在地球上不是以天然氣體的形式存在；大部分的氫與氧結合後存在水中，所以氫並不是初級能源。我們利用風力、太陽能這些初級能源來供電、或微生物分解等其他方式將氫從水裡分解出來儲存；這個氫可以當作燃料，再透過化學反應產生電力。因此能量的儲存並不是「電」，而是儲存經過化學分解後的「氫」。換句話說，將來臺灣利用氫電，要進口的不是電而是氫嗎？氣體的運送很不方便，如果想轉成液態氫來運送，溫度要很低，這方面仍有很多技術問題和成本需要大家一起想辦法解決。
- (3) 生質燃料：美國地廣人稀，所以他們要發展再生能源還說得過去。巴西人口密度也不高，所以他們種甘蔗生產酒精燃料，提供很多汽車使用。但是要大量依賴生質能源就不適合在亞洲人口密度高的國家。想在臺灣利用生質產生酒精當作燃料，就會影響本土的農業生產，因為我們的土地有限，陽光接收也很有限，因此這類能源的

發展可能就要針對農業廢棄物的利用的方向去探討。

- (4) 核能：目前全世界所採用的核能發電方式是不理想的。純就核能發展來看，現今核電廠反應爐的運作為了避免核子武器的擴散，反應爐中真正能用來發電的核燃料鈾-235所含有的能量，用到的不到5%，剩下的95%都變成核廢料。核廢料產出那麼多，至今卻沒有辦法處理，結果這些問題全被推給了下一代。

核電廠除了本身不理想，安全也是個問題。在提高核安和解決核廢料處理問題上，有不少新一代的核電研究方案正在進行，在此無法一一介紹，構想很多，熔鹽式反應爐也是其中一種。這個研究多年前在美國橡樹嶺國家實驗室就曾試過，當時礙於一些無法克服的技術問題所以沒有繼續發展。徐遐生院士團隊對熔鹽式反應爐重新評估後認為可以設計得更好。他們計畫要開發的熔鹽式反應爐有幾項特色：使用熔鹽型態的冷卻劑及核燃料，不需用水所以不會氫爆，安全性比目前的輕水式反應爐高；不必蓋在海邊所以不影響海洋生態；混在氟化物熔鹽中的鈾-232經過核反應轉換成的鈾-233，作為核燃料幾乎可完全利用，產生的核廢料半衰期只有30年左右，裝入乾式儲存桶存放地下300年後還可能成為經濟礦物再利用；可回收現存輕水式反應爐的高階核廢料銻-239當作燃料再利用（詳見本期徐院士專欄文章內容）。如果這些理想能實現，或可解決核電目前的一些問題。李前院長也同意這個看法，但他認為臺灣目前的工業技術無法獨立完成這項研究，一定要想辦法找歐美有核能技術及經驗的先進國家合作，將格局放大才不會侷限完成理想的機會。

不過李前院長強調：核電廠的監視偵測系統在穩定的土地上應該是可以做得相當安全的；然而對臺灣來說，「地震」是一個重要變數，一旦「地震」因素加進來，事情就變得很複雜了。即便不在地震帶，光憑臺灣現今核電廠的運作管理，就已經問題叢生，更何況處在地震帶。所以臺灣能做好核安嗎？李前院長說：「其實我不太相信」。他認為對臺灣而言，核能不是永續能源，核電在臺灣發展是不合宜的。但若想進一步研究如何讓核燃料完全燃燒，不要造成更多的核廢料污染問題，這方面的研究倒是值得推動。此外，如果全球各國願意坐下來討論合作開發新一代核能反應爐，而且大家說好反應爐不要蓋在海邊和地震帶等不適合的地區，只蓋在穩定的土地上，生產出來的核電可以出口賣給不適合發展核電的國家，如此一來核能發電對全球還是可以很有貢獻的。

- (5) 碳中和、碳回收-碳收集及封存（carbon capture and sequestration；簡稱CCS）：除了開發低碳能源，想辦法將人類活動排放出來的碳回收或中和掉，也是走入「低碳」的選擇之一。除了植樹或使用不排碳的再生能源，碳化反應（torrefaction）也是一種方法。陽光提供能量給植物生長，我們再利用碳化反應將植物加熱燃燒變成木炭。整個碳化是「吸熱反應」，過程中吸收的能量一部份被燃燒釋出，一部份拿來進行碳中和。釋出的熱能透過熱交換器可再利用，但這些熱能其實相對不多。重點在碳化後，能量和碳可被保留下來。李前院長特別提出他小時候村民們進行碳中和的例子，人們在山上種相思樹，砍下來燒成木炭，用來煮飯洗澡。大家燒的是木炭不是木柴，所以排放的煙很少。

澳洲和南美洲的固碳回收農場、徐遐生院士的「超級烘焙法」，都是專門種植生長很快的植物然後進行碳化，主要目的其實不是為了當作再生能源，而是為了回收封存二氧化碳，這個機制還可以惠及全球。因此森林不要燒掉，應該把它作為光合作用

的碳回收基地。碳回收後將來還可以磨成粉灑回土壤，改善土壤性質。

臺灣如果在半世紀內仍無法脫離化石燃料，至少得想辦法處理掉煤炭發電所產生的二氧化碳。目前的方法是進行 CCS，把二氧化碳埋到地底下。李前院長表示：「我們應努力朝這方面研究，可是政府目前進行的非常緩慢。二氧化碳的封存需要做地層研究，每個洞打下去就是一百萬美金，這絕不是一個學術單位的教授可以做到的；必須靠政府大規模規劃、與國際合作才有辦法進行。」去年十一月召開的『2012 台灣二氧化碳捕獲封存與再利用』國際研討會，林立夫博士廣邀澳洲、日本、馬來西亞、中國的科學家，希望一起動腦想想應該怎麼解決未來亞洲的能源問題。「亞洲應該學學歐盟，他們很有組織。」李前院長強調，如果大家無法跨越主權國家利益的藩籬進入「全球」合作、互相支援，一切就無解。

[全球合作解決永續發展的問題]

二次大戰前英國以「日不落地」來描述自己，因為陽光隨時照耀著大英帝國各處的殖民地。反觀單一國家各地晝夜雲雨條件不一，陽光或風力供給可能不穩定。如果全球國家作為「共同體」一起合作，利用大自然提供能源的問題就可迎刃而解。臺灣未來的永續能源也是一樣，要想辦法和其他國家合作，建立起能源網絡。目前各國之間仍有國際藩籬、利益考量，所以藉由更多全球化的組織聯繫，希望把國界淡化、走向全球化，這是本世紀一定要走完的路。

隨著人類活動與交流的增加，今日大家面對的問題常常是「全球性」的問題；臭氧層破壞、溫室效應、流行病擴散、貧窮飢餓、森林保育、生物多樣性消失等問題，都是跨越國界持續進行的。「國際合作」和「國際間的競爭」存在著矛盾；如果不能全球一起解決，而是繼續以「主權國家」為單位考量自身利益，這些問題將永遠無解。或許不必 50 年，我們就會發現地球環境已經被破壞到人類無法生存的境地。屆時大家便會知道，我們的敵人其實就是自己，自己要把自己消滅掉了卻仍不知去正視這點。



圖說：科學界不要自己做自己的，應破除國家發展的界線，將「整個地球」當成一個整體目標來考量人類的未來及發展。淡化國界、走向全球化，這是本世紀一定要走完的路。

背景圖片©Henry Mühlpfordt。

所以李前院長近年來一直努力宣導「打破國界，走向全球」這個觀念。科學界不要自己做自己的，應破除國家發展的界線，將「整個地球」當成一個整體目標來考量人類的未來及發展。他強調科學家應該要結合關心環境的人文社會學者，一起跨領域合作來評估科學對人類社會帶來的衝擊和影響，並找出處理及解決問題的辦法。科學應從「國際化」(international)邁向「全球化」(global)，人類社會才能永續發展下去；然而，對此很多國家都還沒有共識。2012 年聯合國的 RIO+20 永續發展大會中，很多學界及民間人士都贊成訂定二氧化碳減量標準的國際協議。學術界想從全球觀點著眼卻只能從旁建議，真正決

定政策的政界人士卻未必有共識，這是現存的大矛盾。所以今天科學界的人在說，做研究的人還是得要想辦法影響政策，才有辦法施力。

李前院長語重心長地說：這個國家、國際利益和全球利益的矛盾，我們老一輩的人沒有解決，年輕一代要想辦法。長一輩的人沒能做到全球的聯繫，但是年輕世代不一樣。人類有史以來第一次可以透過網路聯繫全球，以往做不到的事，現在都有可能做到。所以說，現在的世代已經具備打破國家界線、進行全球連結的潛力。李前院長再三強調：不打破國界走向全球，人類的未來是沒有希望的；主權國家做不了事，必須全球一起來方能成事。

[減碳+再生能源≠永續發展]

透過科學研發及全球性的政策合作或許可為減碳及永續能源的問題找到出路，但這仍只是人類及地球永續發展的環節之一而已。大自然提供人類的產值比人類自己生產的 GDP 還高。比如說，蜜蜂蝴蝶的花粉授粉，我們所吃的食物有三分之一都靠他們。的確，如果能源都從太陽來，溫室氣體就可被控制住；但若我們繼續無限制消耗資源，把森林、綠地都變成水泥地，將來生態破壞、生物多樣性消失的一天，也就是人類消失的一天。人類是無法單獨在這地球生存的；所以，有些舊思維必須改變！



首先，世界發展至今，人口這麼多、消耗如此龐大，人類社會今後的永續發展，勢必得朝向「以最少的資源過最好的生活」的方向來走。這並不是要大家回歸原始，而是在應用科學的同時，別讓科學破壞了大自然。科技、經濟發展和回歸大自然並不相互矛盾；反之，科學應該要成為人類和大自然之間的溝通橋樑。降低能源消耗和提高能源使用效率，這是人類社會未來該走的方向。如何用很少的資源過最好的生活，這在產業上其實有很廣的路可以發展。比如說 20 年前的電冰箱每小時耗電量 1,000 瓦，現在約 130 瓦，能源消耗減少 8 倍；汽車工業現正朝著電動汽車發展；建築業在蓋房子時，則要以日常能源消耗最少又能讓人們生活過得最舒適的原則來設計。

其次，「高品質的生活=高消費、高消耗的生活」，這個觀念是錯誤的。高品質生活可以是和大自然完美結合的人文生活。閱讀、彈奏樂器、社區聚落的音樂、文化或體育活動、登山健行、在家聚會、看藝術展覽等等，這些活動消耗的能源都不高，同時生活品質也提升了。

此外，社會組織結構、生產製造和消費習慣也必須改變，這對地狹人稠的臺灣尤其重要。產業必須轉型，生產製造的東西要經久耐用，不該為了商業利益縮短產品壽命，或是不斷推陳出新、鼓勵消費，應該想辦法利用更少的資源創造更高的價值。對消費者而言也不要追逐流行、喜新厭舊，要以更少的物質消費來過更好的生活。社會組織結構要改變，讓走路、腳踏車車程、大眾捷運系統可達範圍內就能辦妥日常生活的大小事。這點，像多功能便利商店的普遍設立就是社會結構組織改變的一個成功例子。假如生活結構、經濟發展還是持續原來大量生產、大量消費的方式，這樣的未來是走不通的。

[現在改變還來得及嗎？]

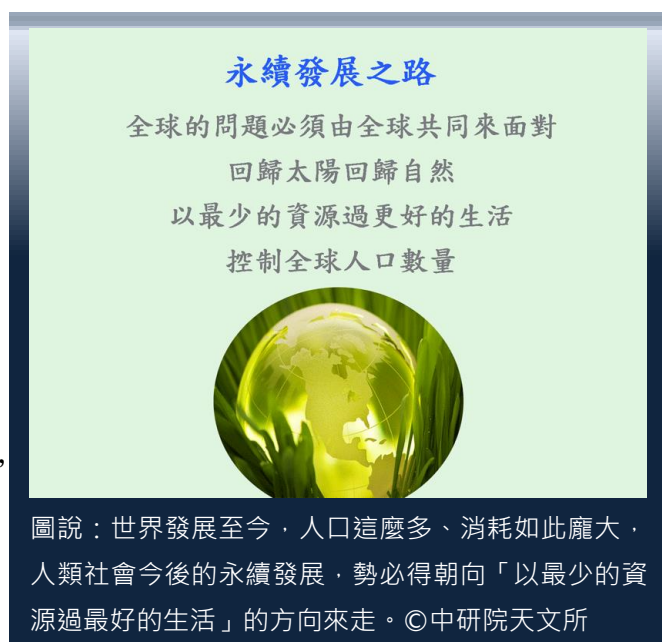
人類所要面臨的極端氣候危機，可能是30~50年內就會發生的事；在此之前，除了要扭轉被「長期教化」出的既有價值觀，還要有實質的改變作為才行。李前院長表示：10年之內若不能轉型，大概就沒希望了。然而，目前臺灣因應環境變遷的能源發展、社會發展、永續發展這些政策，執政者並沒有真正努力去規劃落實。原本行政院負責這些工作的永續發展委員會，單位階層甚至被降級到某個署的室組架構下面去。老百姓似乎也還沒有感受到「必須改變」的切身需要，大家應該是沒有深切瞭解到近年這些天災和溫室效應的關係。這是因為臺灣民眾對公共領域事務的參與一向被動，很多人的想法是「修身齊家治國平天下」，以自己的小圈圈為優先再往上拓展；從自己開始然後齊家，家裡弄好了才考慮治國，最後才想到平天下的問題。近年來民間方面已有不少進步，有越來越多人思考極端氣候和永續發展這方面的事，但是還沒有凝聚成足以讓執政者覺得非處理不可的壓力。核四到底該停建或是續建？這個「公共議題」大家能夠提出來討論，李前院長認為對臺灣是好事，希望藉此能讓臺灣的人民開始關心公共議題。

「債留子孫」是臺灣目前最嚴重的問題。李前院長說：「我都告訴年輕人，不要相信這些50年後就不在地球上的人所說的話，自己的未來要自己去掌握。」不要只是「沿襲」長輩過去的經驗和想法或是受到媒體宣傳的左右，年輕人要主動反省思考，縮短「現實與理想」的差距，為自己的未來好好想辦法。

[以最少的資源過最好的生活]

臺灣要永續發展，有兩個方向一定得落實。一是節能、減碳，發展可再生的永續能源。社會發展要同時跟上腳步，宣導民眾「以最少的資源過最好的生活」，從臺灣開始努力，然後影響亞洲和全世界。再者我們要往前看，想想以後的能源要怎麼來？這不僅是能源政策，且是涉及整個國家發展的政策，甚至需要全球大家一起合作。李前院長在受訪的最後表示：「我的影響很小無法幫大家督促政府行動，但是希望年輕人能夠覺醒，好好想想自己要的是怎樣的未來。」

（整理撰文/陳筱琪；採訪/陳筱琪、楊淳惠；審校/李遠哲）



註一：目前全球努力不要讓溫室氣體的濃度超過 450 ppm (ppm 百萬分濃度=溶質毫克數/溶液公升數)，但即便這樣，成功控制均溫上升不超過 2°C 的機會也只有二分之一。

(網路專訪全文版，請參閱 <https://sites.google.com/a/asiala.sinica.edu.tw/iaaq-on-web/>)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。